

第七篇

铁水预处理技术

第一章 铁水预脱磷

铁水预脱磷是铁水进入炼钢炉前预处理的新工艺,是炼钢分步精炼工艺的新发展,是适应对低磷钢种的需求、改进炼钢工艺技术和利用含磷较高的铁矿资源而得到发展的。

铁水中磷的去除是随着炼钢工艺和设备的发展变化而变化的。在 1847 年,英国 Thiel 等用一座平炉进行过铁水预脱硅脱磷工业试验,再用此铁水炼钢提高了炼钢生产效率。鞍钢在建国初期也采用过此种工艺。1879 年,欧洲用托马斯转炉去磷,冶炼高磷(1.8%~2.2%)铁水,磷是炼钢过程的主要发热元素之一,炼钢渣可用作磷肥。后来的碱性平炉和氧气转炉都有较强的去磷能力,对于一般含磷(0.04%~0.1%)铁水冶炼普通钢种都能满足去磷要求。到了 20 世纪 80 年代,由于石油危机冲击的影响,需要发展节能、省原材料、减少废弃物的新工艺。炼钢在实现铁水预脱硫后,进一步研究了预脱磷问题,同时也是适应低磷钢和纯净钢种的需求。1982 年 3 月,住友鹿岛厂实现了碱精炼工艺(SARP),同年 9 月新日铁君津厂最佳精炼工艺(ORP)运行,11 月神户厂专用炉脱磷投入使用。1984~1985 年,川崎的千叶厂和水岛厂铁水预处理站先后投产,并于 1988 年末扩建为铁水全处理。1986 年 11 月,日本钢管京滨厂脱磷站投产。1990 年,住友各厂实现了双炉串联简单精炼工艺(SRP)。1993 年 4 月,韩国浦项公司建成脱磷站。1998 年,日本钢管福山厂也采用双炉串联工艺处理 100% 铁水。欧洲只见意大利塔兰托厂和荷兰霍戈文厂有脱磷试验的报道。

我国太钢二炼钢于 1988 年建成铁水三脱预处理站,但脱硅脱磷处理较少。宝钢 1990 年末在一炼钢预脱硫站部分改为三脱预处理,由于工艺不完善没有正常运行,二炼钢在 1998 年 3 月三脱预处理站投入运行。1994 年 5 月,中国台湾中钢铁水三脱预处理

站投产。这种发展变化是适应提高钢的质量降低冶炼工艺成本和减少废弃物的环保需要的。

第一节 铁水预脱磷的处理方法

铁水预脱磷的处理方法按处理设备可分为炉外法和炉内法。炉外法设备有铁水包和鱼雷罐 ,炉内法设备有专用炉和底吹转炉。按加料方式和搅拌方式可分为喷吹法、顶加熔剂机械搅拌法(KB)以及顶加熔剂吹氮搅拌法等。现将其主要特点和发展变化分述如下。

一、铁水包喷吹法

20 世纪 80 年代初 ,采用原有脱硫设备进行铁水脱磷工业试验。1985 年 7 月 ,日本钢管福山制铁所投入生产。它包括高炉出铁厂顶喷脱硅和铁水包喷吹脱磷 ,脱磷装置规格如表 7-1-1 和图 7-1-1 所示。

表 7-1-1 铁水脱磷装置的规格

生产能力		135t/罐 × 2 罐	150000t/月
喷吹熔剂的设备	贮存罐	138m³ × 1	
	提升罐	2.6m³ × 1	
	喷吹罐	3.7m³ × 2 (给料速度 100kg/min)	
顶加熔剂的设备	贮料仓	25m³ × 2	
		30m³ × 1	
	称量仓	1.25m³ × 4	
		1.5m³ × 2	
顶吹氧枪的装置		2500m³/h (标态)	

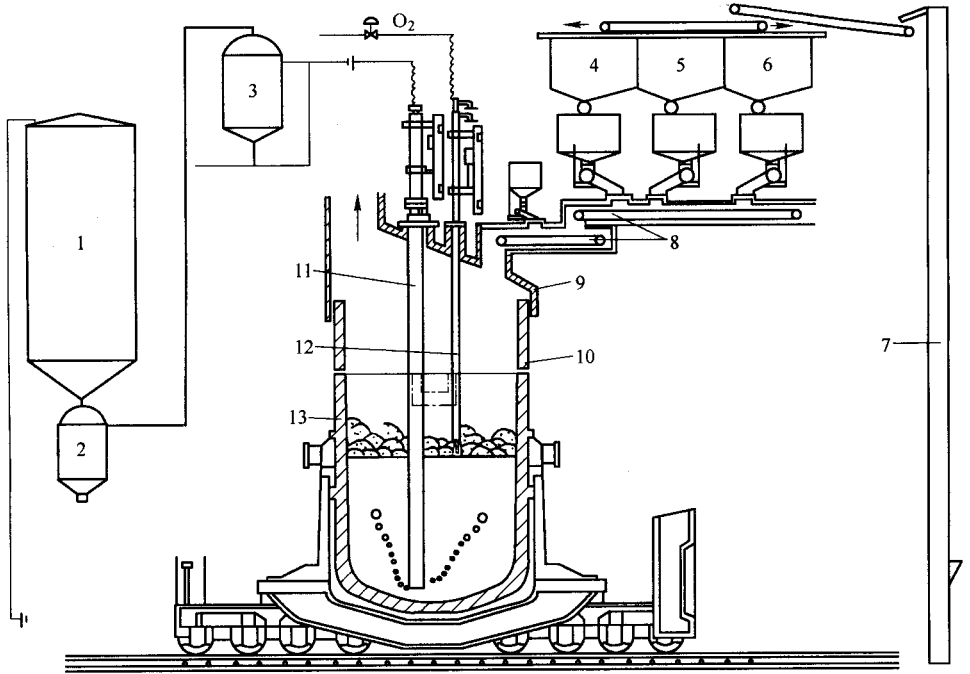


图 7-1-1 脱磷装置系统图

1—贮料仓 2—提升罐 3—喷吹罐 4—CaO 5—CaF₂ 6—轧钢皮 7—斗式提升机；
8—运输机 9—集尘罩 10—衬 11—N₂ 枪 12—O₂ 枪 13—铁水罐

根据上述流程,高炉铁水含硅量为 0.25%,采用投射法(TIM)可确保处理后小于 0.15%含硅量的比例大于 90%。脱磷处理有如下优点:铁水罐混合容易,排渣性好;氧源供给可上部加轧钢皮,并配以生石灰、萤石等熔剂,在强搅拌下加速脱磷反应;气体氧可以调节控制铁水温度;处理量与转炉匹配,使转炉可冶炼低磷($< 0.010\%$)钢种,减少造渣熔剂并用锰矿石取代锰铁冶炼高锰钢取得经济效益。

二、鱼雷罐喷吹法

在日本的大钢铁厂,鱼雷罐普遍作为运输工具,因而各大公司大部分实现了工业规模的鱼雷罐铁水预脱磷处理。住友鹿岛厂和新日铁君津厂)的处理流程如图 7-1-2 和图 7-1-3 所示。

上述两种流程的主要区别是脱磷剂不同,住友采用苏打,君津采用轧钢皮和生石灰等。经过几年的生产实践发现,以鱼雷罐作为铁水预脱磷设备存在如下问题:鱼雷罐中存在死区,反应动力学条件不好,在相同粉剂消耗下,需要载气量大,且效果不如铁水罐;喷吹过程中罐体振动比较严重,改用倾斜喷枪或 T 形、十字形出口喷枪后有好转;用做脱

磷设备后,由于渣量过大,罐口结渣铁严重,其盛铁容积明显降低;每次倒渣都需倒出相当多的残留铁水,否则倒不净罐内熔渣,影响盛铁量和下次处理效果;用苏打做脱磷剂罐衬侵蚀严重,尚无经济适用的方案予以解决。因此,使用这种脱磷容器的厂逐渐减少。

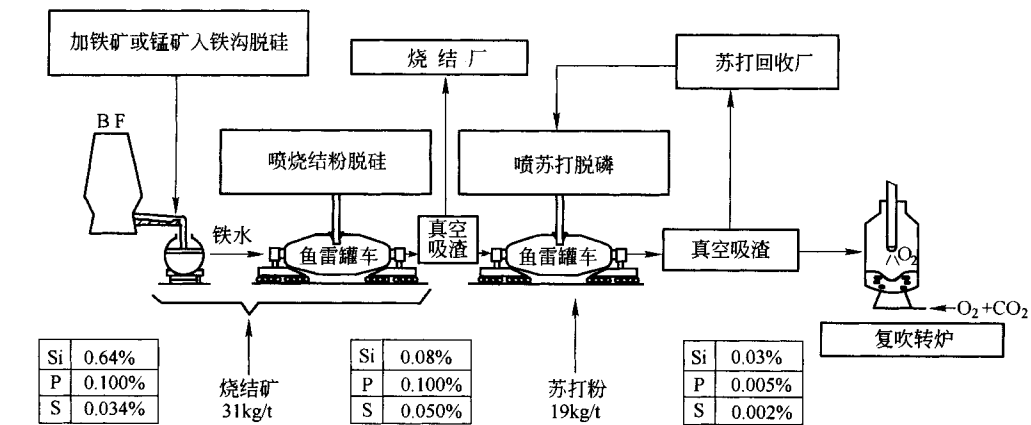


图 7-1-2 鹿岛厂新精炼(NRP)工艺流程

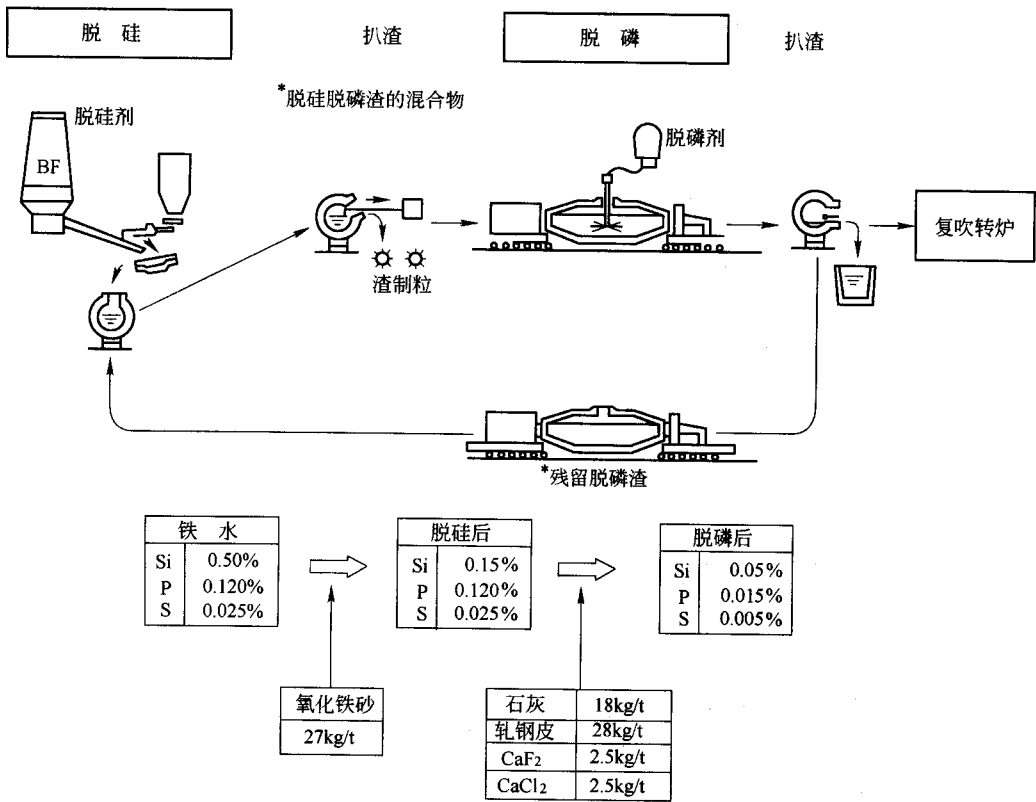


图 7-1-3 君津厂最佳精炼(ORP)工艺流程

三、专用炉处理

专用炉处理是在炼钢车间专门用一座预处理炉进行铁水脱磷。它有两种形式：一种是专门建造的一座可倾翻扒渣、容量较大并配有防溅密封罩、喷粉处理的铁水包,如日本钢管福山厂、宝钢二炼钢和太钢二炼钢就是如此。另一种是将炼钢车间的转炉稍加改造后专用于铁水脱磷,目前不少厂已经采用此法,较早采用此法进行工业生产的是神户制铁所,1983年10月专用炉投入使用,其规格和流程如表7-1-2和图7-1-4所示。

表 7-1-2 专用炉主要规格

设 备		规 格
炉型	能力	80t/炉
	高度	8000mm
	直径	5300mm
	内部容积	54m ³
	炉口直径	2424mm
	耐火材料	MgO-C
喷吹	载气	N ₂
	速度	最大 400kg/min
	插入喷枪	高 Al ₂ O ₃
		φ300mm

该工艺称为专-用炉(即H炉)氧—石灰喷吹脱磷脱硫工艺,即OLIPS法。用氮气做载气顶喷脱磷剂、顶吹氧气脱磷,并用少量苏打分期脱硫。同年,川崎千叶厂进行了底吹转炉Q-BoP脱磷的工业试验。以后,住友开发了预炼炉工艺,称为两级转炉串联操作SRP工艺,如图7-1-5所示。1988年,分别在和歌山厂160t转炉和鹿岛厂250t专用复吹转炉进行铁水预脱磷试验并投产。其中,第一级转炉称为脱磷炉,或称为预炼炉,完成脱磷任务,第二级称为脱碳炉,完成炼钢任务。脱碳炉的转炉渣可配入铁矿石、萤石或加少量石灰作为预炼炉的脱磷剂,充分利用转炉渣的脱磷能力,可节约脱磷剂降低成本。该工艺取得如下结果:预炼炉可在10min内将铁水含磷降至0.011%以下,同时可加7%

的废钢 ;用脱磷铁水可很容易生产小于 0.010% 的极低磷钢 ;总的 CaO 消耗量比冶炼普通含磷钢减少 10 ~ 18kg/t ;由于加锰矿石熔融还原 ,终点锰含量可提高到 1.5% ,因此可减少锰铁合金的费用 ;顶加脱磷剂(如块状石灰、转炉渣等)代替喷吹脱磷剂 ,价格便宜。这些结果的取得是因为炉型优于鱼雷罐 ,对脱磷反应速度和反应效率有利 ,处理时间短 ,散热损失小 ,铁水温度高有利于炼钢过程。

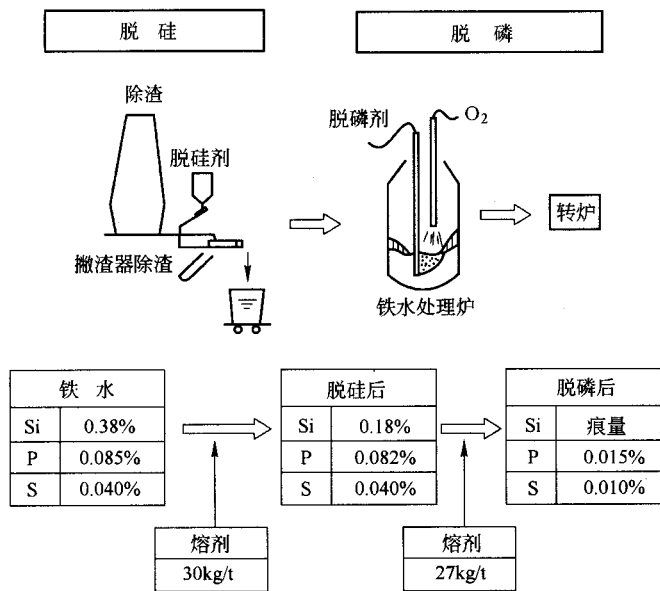


图 7-1-4 神户厂专用炉预处理工艺流程

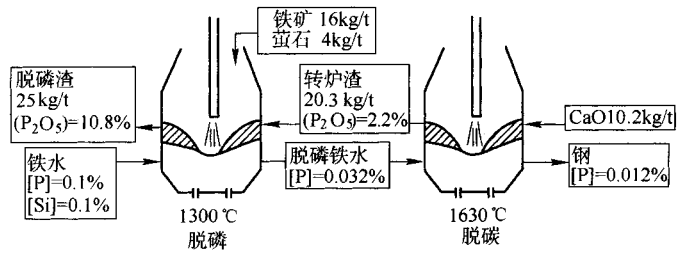


图 7-1-5 住友 SRP 操作工艺

其他方法也进行过试验。如新日铁广畑制铁所进行过 100t 铁水包 KR 搅拌脱磷脱硫试验 ;住友研究部进行过 45tKR 搅拌脱磷脱硫试验 ;值得提出的是神户千叶厂进行的底吹转炉铁水脱磷试验 ,其结果如图 7-1-6 所示 ,由于这种工艺的优点 ,已用来处理不锈钢和高碳钢的铁水 ,以减少转炉冶炼时磷的负担。

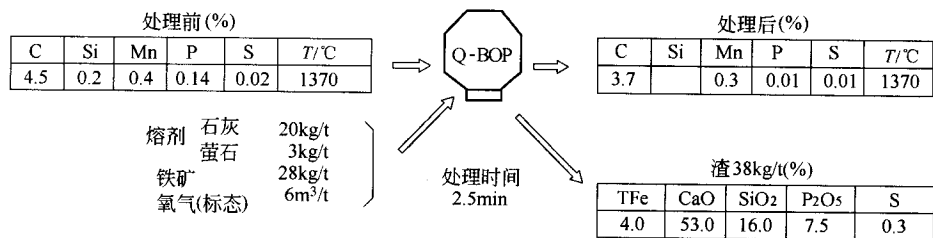


图 7-1-6 川崎千叶厂底吹转炉(Q-BOP)铁水脱磷

总的看来,铁水预处理脱磷的方法,除了已有的专用脱磷站外,由于转炉炼钢能力过剩,采用住友双转炉串联工艺是一种新的发展趋势。

1988 年末,川崎的千叶厂和水岛厂完成了铁水预处理设备的扩建工程,形成了全量铁水预处理体制。扩建包括高炉出铁场脱硅,采用两段投射法和脱硅反应槽喷吹法,保证处理后铁水含硅小于 0.10%~0.15%。水岛厂铁水预处理系统平面布置如图 7-1-7 所示。铁水预处理站系统有以下特点:预处理站前后均有扒渣中心,扒除高炉出铁场脱硅后的脱硅渣和预处理站的脱磷脱硫渣;水岛厂预处理站能双线四鱼雷罐车同时处理,系统的处理能力为 60 万 t/月,主要设备规格如表 7-1-3 所示。

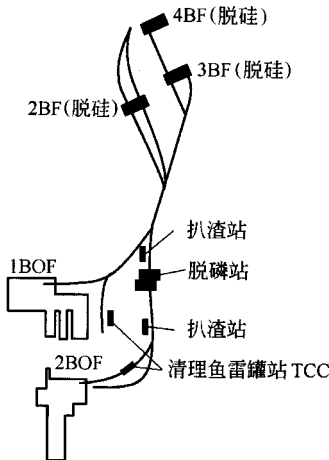


图 7-1-7 水岛厂铁水预处理平面布置

整个系统由直接数字控制系统操作,4 个鱼雷罐车由 1 个操作员同时进行全部喷粉过程;为了达到脱磷脱硫要求,开发了 4 种粉剂在线配料混合方法,使喷吹时可连续控制熔剂成分到最佳值,改善最终成分命中率;内径 $\phi 32\text{mm}$ 轻型倾斜喷枪可自动高速喷吹处理剂,在罐内使铁水很好流动无死区,在每一工位有两支枪,可高速自动更换;铁水预处

理的计算机操作控制系统根据每炉次铁水成分、数量和罐内铁水面高度及渣层厚度等信息 ,按目标磷和硫决定每种熔剂用量和喷吹类型 ,熔剂喷吹系统及喷吹类型如图 7-1-8 和图 7-1-9 所示 ,这样使处理结果的偏差为 $P \pm 0.003\%$ 、 $S \pm 0.002\%$,鱼雷罐车清洁装置有清渣机清除罐口冷渣铁 ,然后移出铁轨 ,将罐翻转 360° 倒完残渣 ,这样减少残渣回磷 ,保持罐的盛铁量 ,清理罐数量达到 70% 时 ,每个罐车受铁量增加 25 ~ 30t ,鱼雷罐车运行管理系统用罐号读取装置跟踪车位及行车路线。根据这些信息和预处理计划来调度鱼雷罐车 ,并将信息传送有关部门使转炉出钢和高炉出铁场脱硅与之同步 ,使用鱼雷罐车自动止轮装置 ,加快了配车 ,使车周转次数仍维持在 3.0 次/日以上。

表 7-1-3 铁水预处理设备规格

熔剂	脱磷剂	烧结矿 ,石灰 ,萤石
	脱硫剂	苏打
喷吹设备	分配罐	4 喷吹罐 $\times$ 4 线
	熔剂混合方法	在线混合
	喷吹速度	最大 600kg/min
	喷枪车	双枪 $\times$ 4 线
除尘器	废气冷却器	开路空气冷却器
	能力	$50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h} \times 2$ 线(120℃)
扒渣机		机械扒渣机 $\times 2$ 线 $\times 2$ 站
烧结矿磨机	类型	立式辊磨机
	能力	30t/h

铁水全处理的优点除了用脱磷脱硫铁水炼钢的优点外 ,避免了预处理铁水和普通铁水的转换 ,由于普通铁水冶炼时的高磷渣粘在转炉炉墙 ,转换成预处理铁水时受粘渣的影响 ,这种影响需连续冶炼 10 炉后方可消除 ,如图 7-1-10 所示 ,因而大大减少辅助材料消耗 ,与全部普通铁水炼钢相比减少至五分之一 ,预处理铁水的比例由 25% 增至 100% ,大大提高生产优质钢的质量和效率 ,显著降低生产成本。

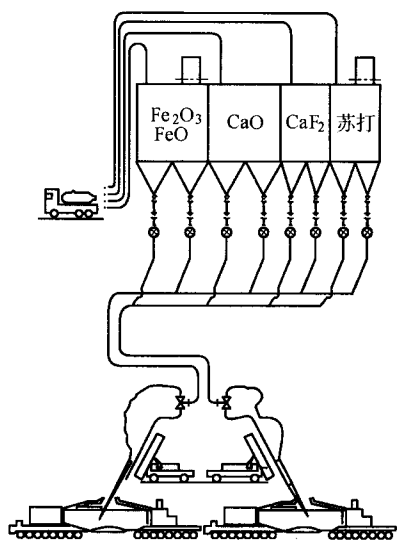


图 7-1-8 熔剂喷吹系统示意图

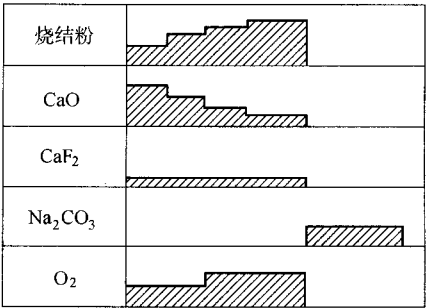


图 7-1-9 计算机计算的喷吹类型示例

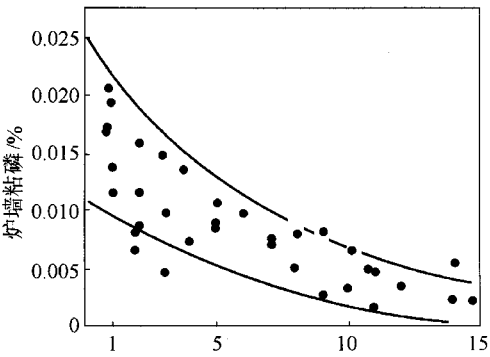


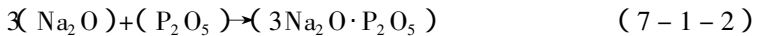
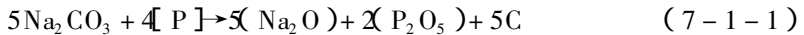
图 7-1-10 预处理铁水炼钢的炉次与炉墙粘渣含磷

第二节 脱磷剂

铁水脱磷剂主要由氧化剂、造渣剂和助熔剂组成。其作用在于供氧将铁水中磷氧化成 P_2O_5 ,使之与造渣剂结合成磷酸盐留在脱磷渣中。目前工业上应用的造渣剂有两类 :一类为苏打(即碳酸钠) ,它既能氧化磷又能生成磷酸钠留在渣中 ;另一类为石灰系脱磷剂 ,它由氧化铁或氧气将磷氧化成 P_2O_5 ,再与石灰结合生成磷酸钙留在渣中。工业上使用的氧化铁有轧钢皮、铁矿石、烧结返矿、锰矿石等 ,此类脱磷剂往往需添加助熔剂以改善脱磷渣性能 ,多采用萤石和氯化钙等助熔剂。下面分别介绍这两类脱磷剂的工业应用和开发情况。

一、苏打(Na_2CO_3)脱磷剂

在不另加氧化剂时 ,苏打可直接供氧和造渣。其反应如下 :



住友的碱精炼工艺(SARP)是苏打预处理铁水的工业应用 ,如图 7-1-2 所示。1982 年时 ,鹿岛厂的生产能力为每月 3 万 t ,脱磷后的铁水主要用于复吹转炉冶炼含磷小于 0.010% 的低磷钢(如不锈钢) ,低磷钢的月产量在 2 万 t 以上。

该厂脱磷操作的主要条件如下 :喷枪为两个水平喷嘴 ,内径 25mm ;用氮气作载气 ,流量为(标态) $7 \sim 10 m^3/min$;喷吹深度为铁水面下 1.2 ~ 1.5m ;苏打的喷吹速度为 100 ~ 300kg/min ,吹氧量为(标态) $10 \sim 50 m^3/min$,吹在铁水面上 500mm ,经过预脱硅后的铁水含硅量为 0.03% ~ 0.14% ,温度为 1300 ~ 1400℃。

苏打脱磷有如下特点 :脱磷初期 ,硅、钛先于磷被氧化 ,不吹氧时 ,铁水磷降至 0.02% 以下时 ,钒才被脱除 ,脱磷时锰不氧化 ,因此 ,脱磷初期大约只有 10% 的苏打用于脱磷和氧化 ,根据苏打在渣中的收得率计算 ,当铁水含磷小于 0.04% 时 ,收得率显著降低 ,铁水含磷为 0.01% ~ 0.02% 时 ,喷吹的苏打大约有 1/3 气化逸出 ,可能是钠气化 ,喷入铁水中的苏打只有 20% ~ 40% 与磷反应 ,其余则与硅、钛、硫及钒相结合 ;铁水温度低有利于脱磷 ,温度为 1250℃ 左右时 ,磷的反应率上升至 50% ~ 60% ,吹氧使渣中氧化铁上升 ,与不吹氧相比 ,渣中总碳量由 0.3% ~ 1.1% 下降至 0.1% ~ 0.7% ,使脱磷反应率提高 ,减少

铁水温降,且不易回磷,如图 7-1-11 所示;脱磷渣对反应器内衬侵蚀严重,虽采用 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiC} - \text{C}$ 砖用于渣,线也不理想,问题尚未得到解决。虽然苏打能有较高的脱磷脱硫能力,从脱磷渣和炉尘中能回收大约 70% 的苏打,由于铁水温降大、包衬侵蚀严重、苏打价格贵、利用率低、处理成本高,所以目前已不用苏打脱磷,如鹿岛厂已改用专用炉预脱磷。

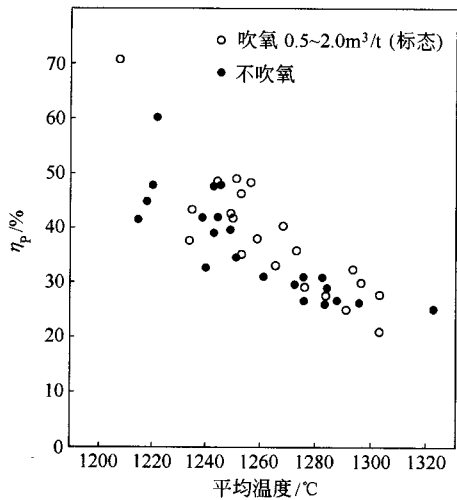


图 7-1-11 温度和吹氧对脱磷过程苏打收得率的作用

二、石灰系(CaO)脱磷剂

研究表明,用单一的石灰对铁水不能脱磷,脱硫率也不高。若配以氧化剂或吹氧气和助熔剂,则可达到很高的脱磷率,同时也有一定的脱硫率。对于石灰系脱磷剂,目前已获得工业应用的氧化剂有铁矿石、轧钢皮、烧结返矿、锰矿石等固体氧化剂和氧气,助熔剂有萤石、氯化钙、苏打等。表 7-1-4 为获得工业应用的脱磷剂及处理效果。

从表 7-1-4 可以看出,初期石灰基脱磷剂的开发是在铁水预处理脱硫设备的基础上进行的,主要由氧化铁、石灰、萤石等组成,磨成细粉用载气喷入。为了节约脱磷剂磨制费用和成本,有部分原料以块状从顶部加入,同时使用了多种氧化铁,如烧结除尘粉等,这种粉料比磨制轧钢皮大大节省了磨制费用。后来采用了专用转炉做预处理炉,利用了原来的加料系统,脱磷剂可利用顶部料仓加入,由于反应空间大,搅拌力强,加入的块状料也能迅速熔化,使脱磷反应迅速完成,复吹转炉约 10min 左右,底吹转炉只需 2min。加萤石等助熔剂是为了保证脱磷渣的流动性和反应能力,这将在脱磷渣中进一步讨论。

表 7-1-4 工业用脱磷剂及处理效果

厂 名	各脱磷剂单耗 /kg·t ⁻¹	脱磷剂单耗 /kg·t ⁻¹	处理方法与设备	处 理 效 果				投产时间
				$\frac{[P]_i}{[P]_f}$	$\eta_P/\%$	$\frac{[S]_i}{[S]_f}$	$\eta_S/\%$	
新日铁君津“ORP”	石灰 18, 轧钢皮 28, CaF ₂ 2.5, CaCl ₂ 2.5	51.0	290t 鱼雷罐, 喷吹氮气	$\frac{0.120}{0.015}$	87.5	$\frac{0.025}{0.005}$	80.0	1982 年
	千叶 水岛	石灰 10.3, 轧钢皮 14.4, CaF ₂ 0.8, 烧结尘 15.6 石灰 10, 轧钢皮 30, CaF ₂ 0.4, 苏打 0.5~9	41.1 250t 鱼雷罐, 顶吹氧, 熔剂在线, 混合喷吹	$\frac{0.12}{0.02}$	83.3	$\frac{0.035}{0.020}$	42.9	1982 年 1988 年全处理
神户 加古川	石灰 13.8, 轧钢皮 13.8, CaF ₂ 4.4 (苏打 5.8) 石灰 12.8, 轧钢皮 16, CaF ₂ 3.2 分期脱硫 (CaO+CaC ₂ 5.8)	32.0 32.0	240~300t 鱼雷罐, 吹氧 4~6m ³ /t (标态) 脱磷, 脱硫用氮气	$\frac{0.082}{0.015}$	81.7	$\frac{0.040}{0.010}$	75.0	1984 年末~ 1985 年初
住友和歌山	转炉渣 25~33, 铁矿石 20~24, 萤石 5~8, O ₂ 5~15m ³ /t	50~65	160t 专用转炉 10~15min, 底吹氮气 0.6~0.9m ³ /t (标态)	$\frac{0.100}{0.015 \sim 0.025}$	75~85			1986 年
中国太钢	石灰 14.4, 轧钢皮 22.6, CaF ₂ 4.1, O ₂ 2.84m ³ /t	41.0	55t 专用包, 50t 铁水, 用氮作载气	$\frac{0.082}{0.013}$	84.1	$\frac{0.030}{0.023}$	23.3	1988 年
韩国浦项	石灰 10.8, 轧钢皮 4.0, 烧结尘 21.2, 苏打 4.0	40.0	100t 专用包	$\frac{0.10}{0.01}$	90.0	$\frac{0.022}{0.009}$	60.0	1993 年

第三节 石灰系脱磷剂处理时的工艺因素

一、脱磷剂用量与熔渣碱度

脱磷剂用量比脱硫剂用量大 5 ~ 10 倍 ,达到 30 ~ 60kg/t ,如表 7 - 1 - 4 所示。其原因是 (1)脱除量大。按铁水含磷 0.1 %脱至 0.01 %计算 ,每吨铁脱除磷 0.9kg ,按铁水含硫 0.04 %脱至 0.005 %计算 ,每吨铁脱除 0.35kg (2)脱磷需要供氧和造渣。磷氧化为 P_2O_5 1kg 磷需供氧 80/62kg 氧(即 1.29kg) ,按 Fe_2O_3 供氧计算 ,1kg 氧需带入 112/48kg 铁(即 2.33kg) ,所以脱 1kg 磷需加入氧化铁为 $1.29 \times 2.33 = 3.0kg$, P_2O_5 又需与氧化钙结合为 $3CaO \cdot P_2O_5$,按 1kg 磷结合成磷酸钙则需加氧化钙为 $3 \times 56/62 = 2.71kg$,供氧和造渣需氧化铁和氧化钙为 5.71kg (3)硅的完全氧化生成的二氧化硅需与氧化钙结合 ,因此 ,需多加氧化钙 ,以保证有足够的熔渣碱度 ,保证磷酸钙的生成。而脱 0.35kg 硫仅需氧化钙为 $56/32 = 1.75kg$ 。

日本神户加古川厂得出不同温度水平下渣碱度与磷分配比的关系 ,如图 7 - 1 - 12 所示。在 1300 ~ 1360℃范围 ,温度低时磷分配比高 ,碱度则在 2 ~ 6 时磷分配比逐渐增加 ,而大于 6.0 时则迅速下降。对不同处理容器进行比较 ,如图 7 - 1 - 13 所示。说明转炉型容器低碱度时磷分配比较高。

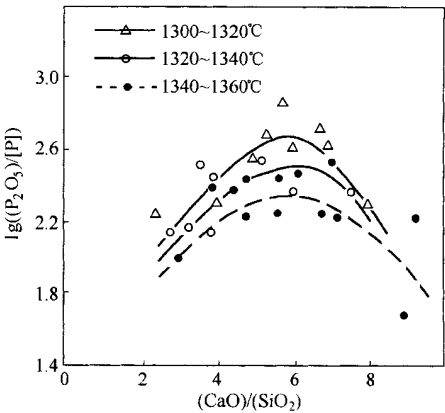


图 7 - 1 - 12 (CaO) (SiO₂) 与 (P₂O₅) [P] 的关系 (不同温度)

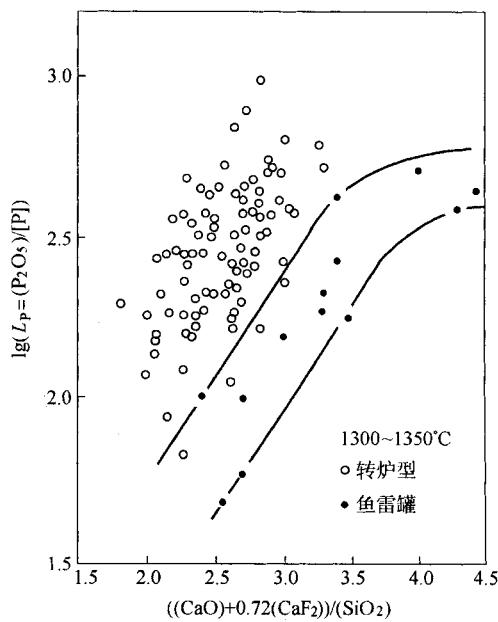


图 7-1-13 渣碱度和磷分配比的关系(不同处理容器)

加古川厂还进行过加锰矿 4.5 ~ 6.7kg/t 和加顶渣石灰块 2.2 ~ 4.5kg/t 试验 ,都能降低脱磷剂消耗量 ,如图 7-1-14 所示。日本钢管京滨厂采用脱磷铁水炼钢的转炉渣 ,其成分如表 7-1-5 所示。由于使用预熔过的循环渣 ,加快了初期成渣速度和脱磷 ,同时也减少石灰 加 1kg 循环渣可少加 0.5kg 石灰。

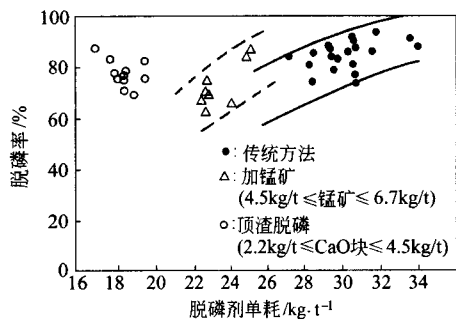


图 7-1-14 脱磷剂单耗和脱磷率的关系
(处理后温度为 1295 ~ 1315℃ ,硅含量为 0.20% ~ 0.25%)

宝钢研究 CaO - Fe₂O₃ - CaF₂ 基粉剂铁水预处理脱磷工艺 ,试验了 CaO/Fe₂O₃ ,为 0.95 ~ 1.05 ,CaF₂ 为 5% ~ 8% 的脱磷剂 ,粉剂单耗为 36 ~ 38kg/t ,氧气耗量为 1.30 ~

1.40m³/t ,铁水温度为 1350 ~ 1420℃ ,铁水为高炉炉前脱硅后的铁水 ,其硅含量为 0.04% ~ 0.20% ,其脱磷率为 70% 左右。发现 ,铁水温度对脱磷率影响明显 ,温度从 1360℃ 上升到 1420℃ 脱磷率从 95% 下降到 65% 左右。

表 7-1-5 转炉循环渣化学成分

TFe	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	P	S	碱度
13.2	34.73	10.44	15.1	7.57	0.61	0.039	3.33

二、铁水温度的控制

由于加入的脱磷剂量大和氧化铁熔融还原的吸热 ,处理后的铁水温降很大。从住友和歌山厂的图 7-1-15 可以看出 ,当不吹氧气时 ,处理后的铁水温降达到 130℃ 左右(喷粉用氮气做载气) ,当用氧气占全部供氧的 50% 时 ,铁水温降减少至 30℃ 左右。而神户加古川厂的温降则较小 ,如图 7-1-16 所示。可达到的控温水平为 1318±10℃。

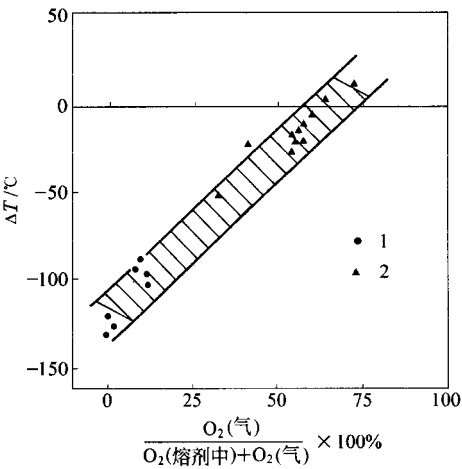


图 7-1-15 气氧比对温降的影响

图例	N ₂	O ₂
1	载气	载气
2	载气	载气 + 顶吹

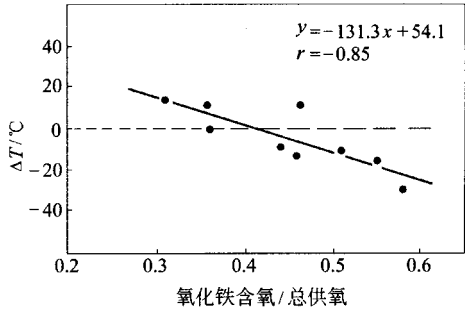


图 7-1-16 氧化铁中氧占总氧比对温降的影响

应该指出 ,总供氧量是保证脱磷的关键因素 ,图 7-1-17 为日本钢管京滨厂 260t 铁水包处理时 ,脱磷量与总氧量的关系。供氧(标态) $7 \sim 8\text{m}^3/\text{t}$ 可脱磷 0.1% ,低氧量时波动较大。从神户厂的经验可以看出 ,温度对磷分配比也有明显影响 ,如图 7-1-18 所示。

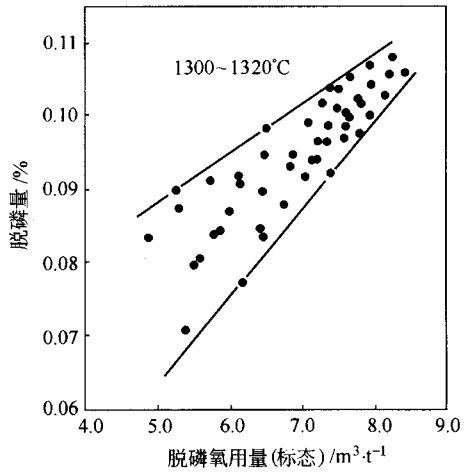


图 7-1-17 脱磷量与总氧用量的关系

三、助熔剂的选择

选择助熔剂的原因在于改善和稳定脱磷渣的性能。前面提到的加锰矿、加循环转炉渣都有利于加速成渣 ,改善初期脱磷能力 ,脱磷渣的稳定性可从脱磷剂和脱磷渣成分比较可以看出 ,如表 7-1-6 和表 7-1-7 所示。

比较表 7-1-6 和表 7-1-7 可以看出 ,加入的脱磷剂氧化铁含量与脱磷渣的氧化铁有很大降低 ,这是供氧的结果 ,但也使脱磷渣返干 ,因此 ,对石灰系脱磷剂加入助熔剂

是必要的。工业上使用的助熔剂有萤石、锰矿石、循环转炉渣、苏打等。实践证明 ,脱磷剂中配入 5% ~ 15% 萤石或 CaCl_2 是有利的。加转炉渣和苏打如前所述。加锰矿除了供氧改善成渣性外 ,还可利用锰矿熔融还原减少锰合金消耗 ,生产含锰 1.5% 左右的低合金钢。鹿岛厂在 250t 转炉炼钢中加入 17 ~ 20kg/t 锰矿石 ,底吹 CO_2 由(标态) $0.1\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t})$ 增至 $0.2\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t})$,熔化后碳降至 0.6% ,吹氧速度由(标态) $2.7\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t})$ 降至 $1.1\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t})$,使终点锰含量增至 0.8% ,锰还原率达 65% ~ 75% ,加入更多的锰矿受到热量限制 ,加焦炭又带入硫。在 2t 脱磷试验炉中加入焦炭 5 ~ 10kg/t 和锰矿 10 ~ 15kg/t ,结果如图 7-1-19 所示。铁水经预处理脱磷炉后锰含量增加到 0.8% ,不影响脱磷 ,虽然加入含硫 0.6% 的焦炭 ,对铁水含硫量无影响。再用此铁水在炼钢炉加入锰矿 30kg/t ,钢水含碳 0.1% 时锰含量增至 1.6%。

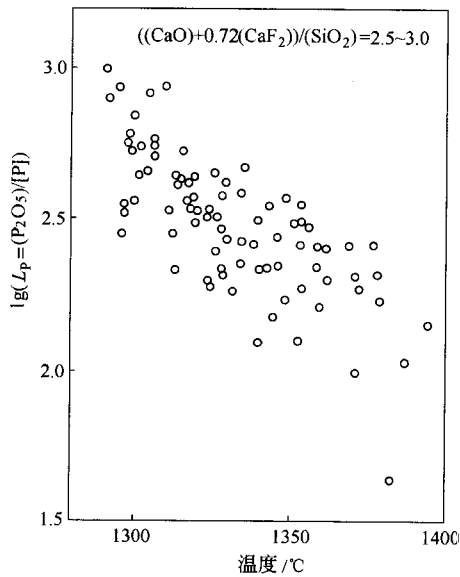


图 7-1-18 温度和磷分配比的关系

表 7-1-6 脱磷剂成分(%)

厂 名	Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2
太钢二钢	20.06	30.78	30.40	3.68
神户加古川	19.4	28.0	42.5	1.5

厂名	CaF_2	S	P
太钢二钢	4.98	0.135	0.011
神户加古川	6.7		

表 7-1-7 脱磷渣成分(%)

厂名	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	CaF ₂
太钢二钢	5.13	19.62	3.80	53.71	10.86
宝钢	5.12	14.8	7.9	70.1	
住友鹿岛	2.9	20		51.6	计入 CaO
住友和歌山	18	15		32	

厂名	MgO	MnO	P	S	C/S
太钢二钢	1.61	0.96	2.73	0.42	2.74
宝钢	0.5	3.35	4.095	0.21	4.74
住友鹿岛		3.4	7.2 ^①		
住友和歌山			5.8 ^①		

①鹿岛与和歌山的磷含量均按 P₂O₅ 计算。

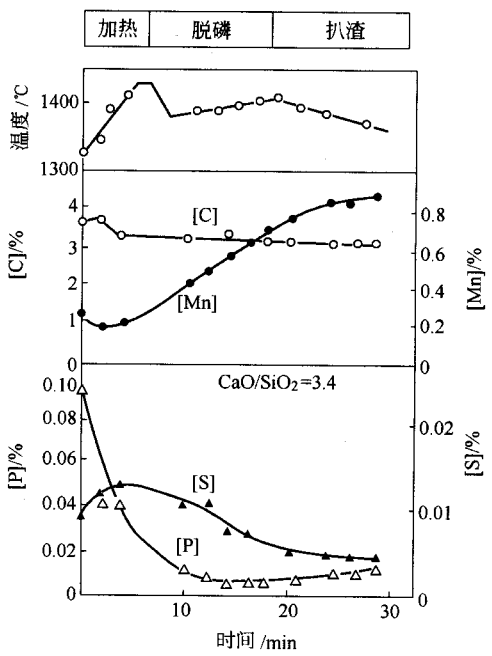


图 7-1-19 锰矿在预处理脱磷炉熔融还原的效果

四、铁水初始含硅量的要求

因为铁水脱磷时铁水中的硅优先全部氧化为二氧化硅,所以硅含量的高低影响到脱磷渣的碱度和脱磷剂单耗。图 7-1-20 为新日铁君津厂不同初始含硅量脱磷剂单耗的统计结果。由图表明,初始硅含量大于 0.15% 时脱磷剂单耗急剧增加,原因是硅的氧化需多供氧,生成的二氧化硅使渣碱度降低。但是,二氧化硅是重要的成渣组元,要保持脱磷渣低熔点和流动性,需要一定量的二氧化硅,所以对于石灰系脱磷剂来说,合适的初始硅含量为 0.10% ~ 0.15%。

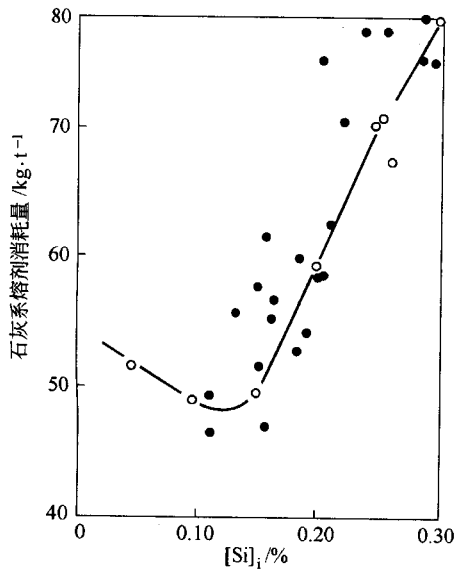


图 7-1-20 石灰系脱磷剂单耗与铁水初始含硅量的关系

第四节 中磷铁水脱磷

20 世纪 80 年代初,瑞典开始研究中磷铁水(0.2% ~ 0.7%)预脱磷这一问题,主要是其铁矿床含磷,需要分别采选,生产成本较高,若统一混采,铁水将达到中磷水平。而其矿业公司供应量占欧洲铁矿市场 15%,为了满足市场需求,研究了中磷铁水脱磷问题。我国也有含磷铁矿资源利用和铁水含磷高的问题,如包头矿、湘西矿、长阳矿等,由于磷

高限制了矿山开发利用,影响了钢铁冶炼技术经济指标和生产成本,对开发和生产优质钢品种受到限制。因此,国内也进行了试验室和工业试验。目前,国内外均未进入工业生产。

中磷铁水脱磷与已有的工业铁水脱磷的主要区别在于脱磷量。因而在工艺上主要解决以下问题:

(1)脱磷剂成分和单耗。瑞典进行了 6t 铁水包的喷吹试验。脱磷剂使用了苏打和石灰系脱磷剂两种,其结果如图 7-1-21 和图 7-1-22 所示。与表 7-1-4 比较,脱磷剂采用石灰系的脱磷剂量并没有大的变化,但配比中铁矿减少,石灰增加,萤石配比较高。从试验条件看,铁水原始含硅量小于 0.05%,磷含量为 0.2%~0.8%。从处理结果看,脱磷效果好,终磷含量小于 0.1%,但脱碳较多,终碳量为 3.5%左右。而苏打用量比住友碱精炼工艺多 13kg/t。

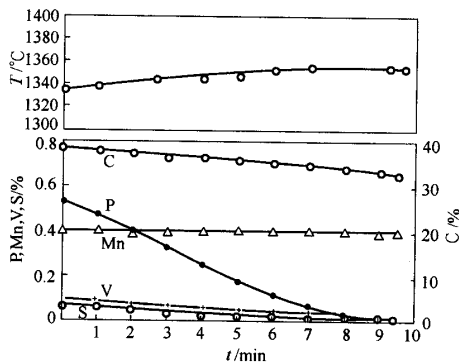


图 7-1-21 用苏打和氧气同时脱磷脱硫

熔剂	消耗量	喷吹速度
矿石 25% CaO52% CaF ₂ 23%	熔剂 41kg/t 氧气 5.1m ³ /t	熔剂 17.1kg/min 载气 空气 0.8m ³ /min

试验室研究中,董元簾等研究了中磷铁水处理时热平衡,牛求彬等研究了顶喷法处理中磷铁水问题,杨世山等研究了中磷铁水处理时的快速成渣问题。这些研究对进入工业生产都有一定参考价值。

(2)成渣性能及动力学条件。由于中磷铁水脱磷量大,从理论上分析,总供氧量应成倍增加,有的试验室试验的脱磷剂量也增加了 1 倍左右,但瑞典试验却未增加,其原因与

其气氧比较大有关 ,如图 7 - 1 - 23 所示。气氧比占 50% 时 ,改善了动力学条件 ,脱磷效果最好。过高则脱磷变差 ,脱碳急剧增加。成渣性能好与 CaF_2 配比高有关 ,不过侵蚀问题还要生产规模试验进一步研究解决。

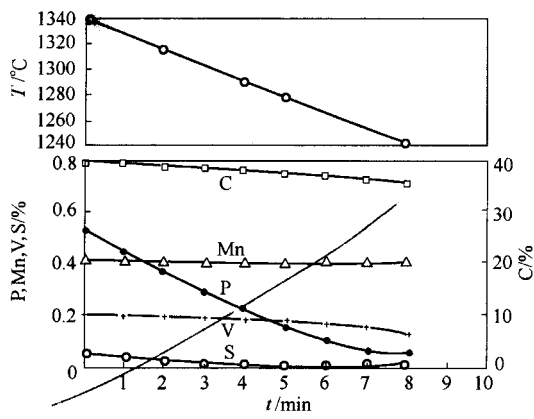


图 7 - 1 - 22 用石灰系脱磷剂同时脱磷脱硫

熔剂	消耗量	喷吹速度
Na_2CO_3 100%	熔剂 30kg/t 氧气 3.9m ³ /t	熔剂 15.8kg/min 载气 空气 0.8m ³ /min

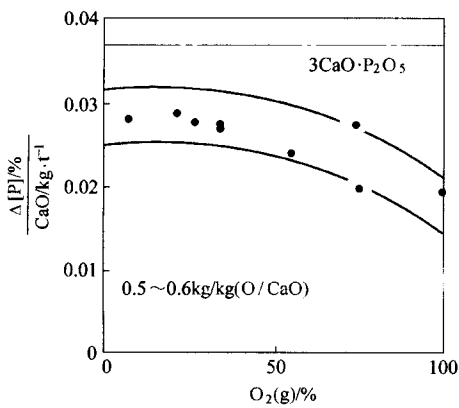


图 7 - 1 - 23 石灰系脱磷剂处理初期气氧比的作用

第二章 铁水预脱硫

铁水预脱硫是指铁水进入炼钢炉前的脱硫处理,它是铁水预处理中最先发展成熟的工艺。铁水预脱硫对于优化钢铁冶金工艺、提高钢的质量、发展优质钢种、提高钢铁冶金的综合效益起着重要作用。它已发展成为钢铁冶金中不可缺少的工序。

根据历史发展的特点,铁水预脱硫大致可分为三个时期:

(1)初始试验期(19世纪末~20世纪60年代)。1877年,英伊顿和贝克用苏打在高温铁水沟铺撒脱硫。1927年,美拜尔斯公司在化铁炉铁水罐中加苏打脱硫。1947年,瑞典人卡林用石灰粉在卧式回转炉中脱硫。1959年,瑞典人 Eketop 和 Kaling 在 3t 摇包上用 CaE_2 脱硫。1962年,日本神户试验了 40t 双向摇包。1965年,日本钢管公司和住友公司用机械搅拌法(KR法)脱硫。1968年,德国蒂森公司用 95t 吹气搅拌法(DO法)脱硫。1974年,日本神户加古川厂用 200 大气泡泵法(GMB法)脱硫。上述种种试验,除机械搅拌法(KR法)外,因效率差、温降大、炉衬寿命低等原因多被淘汰,但对脱硫剂的选择和使用积累了初步经验。

(2)大发展时期(20世纪70年代~80年代)。20世纪70年代以来,氧气转炉迅速取代平炉,因平炉炉气中硫对钢水的影响被消除,进入转炉的铁水含硫量直接影响着钢的含硫量。同时喷射冶金技术迅速发展,使铁水喷吹法(TDS法)投入使用。这期间世界各大钢铁公司纷纷建成了专用的铁水脱硫站,建站位置多选在高炉和转炉之间的运输线上,使用原有的铁水罐和鱼雷罐车进行脱硫。这期间,美国各厂盛行镁焦法,即将定量的含镁焦炭压入铁水进行脱硫。但因加入量无调节余地后来都改为喷吹法。

(3)成熟期(20世纪90年代至今)。80年代后期,由于炼钢工艺技术的发展,要求从铁水带入的化学热减少,允许铁水含硅量降低至 0.3%左右,从而减少炼钢渣量。新钢种

的开发和纯净钢的需求增加,使在原有脱硫工艺的基础上进一步开发了深脱硫工艺,同时也发展了脱硅和脱磷同时脱硫。

我国武钢 1976 年引进 KR 法一直生产至今。1985 年,宝钢引进 TDS 法,同期天钢、宣钢、攀钢、酒钢、鞍钢、冷水江等厂先后由我国自行设计建成脱硫站。1988 年,太钢引进铁水脱硅脱硫脱磷三脱技术,建成铁水预处理站。1998 年,宝钢一炼钢从美国引进 $\text{CaO} + \text{Mg}$ 粉复合喷吹脱硫技术,宝钢二炼钢从日本川崎引进铁水三脱技术,建成铁水预处理站。同年,本钢引进加拿大霍戈文厂工艺和美国罗斯波格喷粉设备建成石灰镁粉复合喷吹脱硫站。1999 年,鞍钢二炼钢也从美国引进石灰镁粉复合喷吹技术,建成脱硫站。随后,包钢从美国引进石灰镁粉复合喷吹技术建成脱硫站。

根据 2000 年 74 座转炉厂统计,铁水预处理站脱硫能力达 3691 万 t,但实际脱硫量为 1575 万 t,只占 42.7%。虽然我国钢产量从 1996 年起年产量超亿吨,已成为钢铁生产第一大国,但在生产工艺、装备、钢材品种、质量、成本、高附加值产品等方面与发达国家相比还有很大差距。中国加入 WTO 后,钢铁工业成为第一个全面对外开放的行业,正面临着世界范围的激烈竞争。全球钢铁产量过剩,国际市场价格低于国内,而且国内市场急需的板材等高附加值产品还需大量进口,因此充分发挥铁水脱硫站的能力,根据各厂资源和产品的特点,研究开发脱硫剂、喷吹工艺和自动控制技术是十分必要的。

第一节 发展的原因

一、提高钢的质量和品种的需要

钢的很多性能都受含硫量及其在钢中形成的硫化物夹杂的物理和化学性质的影响。硫化铁—硫化锰夹杂在热轧温度下很容易变形,成为延伸形夹杂,引起钢的性能各向异性。图 7-2-1 说明结构钢中含硫量对横向韧性和延伸性影响。由图可以看出,当含硫量小于 0.02% 时,板材和带材的横向冲击功迅速增加,含硫量小于 0.01% 时断口延伸率也急剧增加。另一个例子是高硅电工钢中含硫量的增加使磁性恶化。

除了易切钢的特殊情况外,硫一般被认为是有害元素,尤其是在结构钢中,除了对力学性能的影响外,含硫量的增加还对浇铸件和轧制件表面质量极为有害。对连铸钢坯来说尤其是这样,它使表面缺陷增加,因而影响收得率,增加精整工作量。

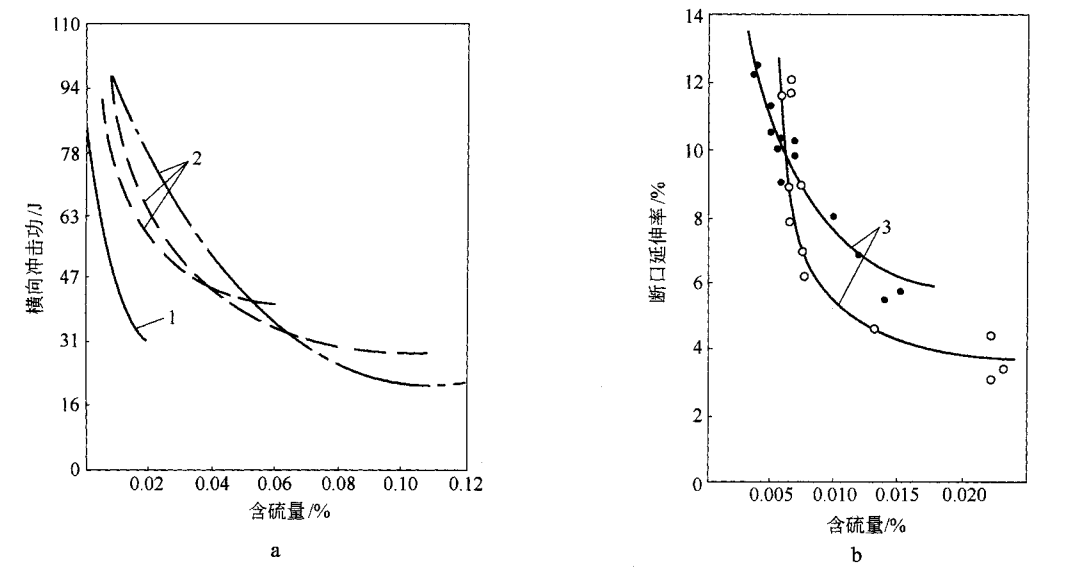


图 7-2-1 含硫量对板材和带材横向冲击功(a)和对铌合金钢试样断口延伸率(b)的影响
1—带钢 2—钢板(不同资料来源) 3—不同资料来源

德国蒂森公司发现钢中含硫量高于 0.02% 时的板坯表面缺陷为含硫量低于 0.019% 时的两倍。因此,必须把含硫量限制在 0.02% 以内。又如在北极使用的管道钢,它必须符合低温切口韧性的要求。为此,钢需要有较高的横向延伸性和横向冲击功,含硫量低于 0.01% 就能满足这些要求。很多优质钢种(如硅钢)规定钢中含硫量不高于 0.005%。对于这些优质钢种由脱硫站将铁水脱硫后炼钢才有可能达到要求。

另据美国钢铁工业考察资料整理出降低钢中硫含量的效益,如表 7-2-1 所示。

表 7-2-1 降低钢中硫含量的效益

项 目	硫含量/%		效 果
	原始含量	降低含量	
1. 连铸板坯裂纹	正常	低	有裂纹板坯减少 83%(2 万 t 板坯统计) 报废率由 10% 降至 1% 报废率减少 90%
2. 输油管表面缺陷	正常	低	
3. 冷成型材缺陷	0.018	0.009	
4. 力学性能和抗腐蚀性			
钢板厚度上延展性	0.02	0.003	断面收缩率增加 2-8 倍
调质钢锻造阀门韧性	0.04	0.003	增加 3 倍
X-65 管道钢韧性	0.019	0.003	增加 1 倍

项 目	硫含量/%		效 果
	原始含量	降低含量	
船板钢激光焊接吸收能	正常	低	增加 1 倍
2.25Cr – Mo 阀门焊接吸收能	0.008	0.003	约增加 1 倍
焊接成形带钢针孔腐蚀和层状开裂	0.02	0.01	大大减少
5. 低硫钢种应用			
965MPa 高强度层状开裂	0.008	0.002	减少
石油 C – 90 套筒抗氧化物应力裂纹(即 SSC 性能)		0001 ~ 0.005	保证抗 SSC 性能
大口径高强度管道		0.002 ~ 0.003	保证韧性和抗 SSC 性能
汽车薄板成形毛边的切边裂纹		低	保证消除缺陷
汽车轮箍火花焊接成形缺陷	正常	0.003	降低 50% ~ 90%

注 :原始硫含量正常值为 0025% ~ 0.04% ,降低硫含量值小于 0015%。

从表中可以看出 ,降低钢中硫含量可提高成材率 ,直接影响着连铸的表面质量和内部质量。因此 ,世界各国钢铁厂 经脱硫处理的铁水含硫量均小于 0.015% ~ 0.01%。随着生产的不断发展 ,优质钢材的需要量日益增加 ,这是铁水预脱硫得到发展的重要原因。

二、优化钢铁冶炼工艺的需要

现代高炉的单炉容积巨大 ,产量很高 ,降低焦比有很大的经济价值。世界冶金焦的价格在 20 世纪 80 年代就增加了两倍多 ,我国前几年的煤价调整 ,冶金焦价格也上涨了很多 ,这也要求降低焦比。有的地区原料人高炉的强碱 (Na₂O ,K₂O)负荷大 ,采用降低高炉渣碱度 ,以利于从渣中排出强碱使高炉顺行。宣钢实践证实 ,能有效排出强碱 ,同时带来降低焦比提高产量的效益 ,但铁水含硫高 ,必须进行炉外脱硫处理。宣钢高炉渣碱度 CaO/SiO₂ < 1.0 ,MSO10% ~ 12% ,高炉铁水含硫大于 0.07% ,加石灰系脱硫剂 10kg/t ,脱硫率为 60% ,处理后铁水含硫小于 0.03% ,高炉焦比下降 8 ~ 13kg/t ,日产量增加 2% ~ 4%。

H. P. 哈斯特等人总结了德国蒂森各厂高炉渣碱度对铁水含硫量、焦比和产量的影响 ,如图 7 – 2 – 2 所示。

在原料输入总硫量为 6kg/t、生铁含硅量 0.6%、渣量 300kg/t ,渣中 MgO8%、Al₂O₃12%的条件下 ,若碱度降低 0.2 ,生铁含硫升高 0.025% ,产量增加 6% ,焦比降低 20kg/t。在氧气炼钢生产中 ,钢中含硫量(其他条件不变)由硫的总输入量、渣量、渣成分

所决定。输入硫高时,需要渣碱度高才能得到低硫钢水,相应渣中含铁量也较高。所以使用脱硫后的低硫铁水减少了输入硫量,可降低炉渣碱度(少加石灰、减少渣量),提高钢水收得率,改善热平衡。图 7-2-3 为铁水含硫量与钢渣碱度、渣量、铁水收得率的关系。

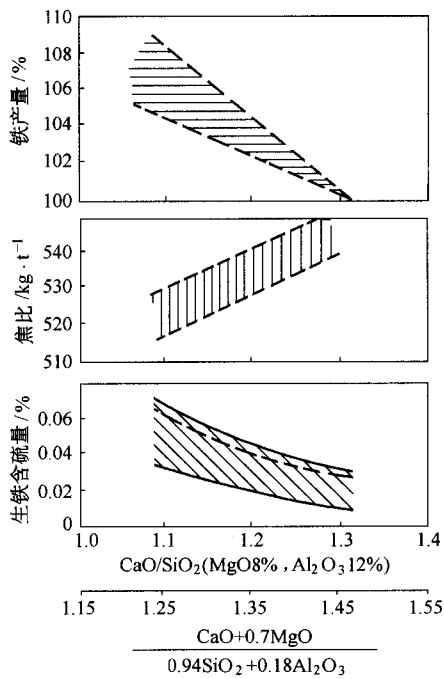


图 7-2-2 高炉渣碱度对铁水含硫量、焦比、产量的影响

(铁水成分 [Si] 0.60% [Mn] 0.60% [P] 0.15% ,包括油 80kg/t ,硫输入量 6kg/t)

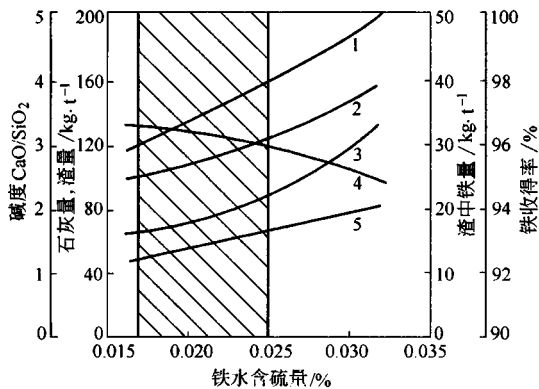


图 7-2-3 铁水含硫量对渣和铁收得率的影响

(铁水中 [Si] 0.6% ,钢中 [S] 0.018%)

1—碱度 CaO/SiO_2 2—渣量 3—渣中铁量 4—铁收得率 5—石灰量

在用含硅 0.6% 的铁水炼含硫 0.018% 的钢时 ,铁水含硫由 0.025% 降至 0.017% ,可使炼钢炉渣碱度由 4.0 降至 3.0 ,钢水收得率提高 0.6%。图 7-2-3 假定减少铁水输入要对铁平衡进行必要的修正 ,通过增加废钢来吸收因石灰减少而多余的热量 ,矿石、石灰的冷却系数分别为重废钢的 4.3 和 1.8 倍。

由上可以看出 ,令现在的炼铁和炼钢工艺和设备承担过分的脱硫任务是不合理的。这也是铁水预脱硫得到发展的重要原因。

第二节 铁水脱硫方法

铁水预脱硫的方法很多 ,从已列出的各种方法经工业实际应用 ,有的因处理能力较小、主要部件耐火材料寿命短、处理效果及可控性较差和环境污染问题较严重等而逐渐被淘汰。下面就几种工业上应用较成熟的方法和有应用前景的方法做进一步介绍。

一、KR 搅拌法

KR 搅拌法是日本新日铁广畑制铁所于 1965 年用于工业生产的铁水炉外脱硫技术。这种脱硫方法是以一种外衬耐火材料的搅拌器浸入铁水罐内旋转搅动铁水 ,使铁水产生旋涡 ,同时加入脱硫剂使其卷入铁水内部进行充分反应 ,从而达到铁水脱硫的目的。它具有脱硫效率高、脱硫剂耗量少、金属损耗低等特点。

1976 年武钢在引进硅钢生产专利技术时 ,根据硅钢质量的要求 ,从日本引进了 KR 铁水脱硫装置。1979 年在武钢二炼钢厂建成投产。从投产到 1989 年的 10 年间 ,已处理铁水 11413 罐次 943547t。经脱硫处理后 ,铁水含硫量小于 0.005% 的罐次比例在 98% 以上 ,满足了冶炼无取向硅钢的要求 ,并为开发和生产低硫新钢种提供了重要条件。KR 铁水脱硫装置投产以来的生产简况如表 7-2-2 所示。

表 7-2-2 1980~1989 年 KR 铁水脱硫装置生产简况

项 目 年 份	脱硫处理铁水		脱硫合格率 ([S]<0005%)	脱硫剂种类	脱硫剂单耗 /kg·t ⁻¹	备 注
	罐次	t				
1980	20	1652		CaC ₂		引进专利
1981	12	992		CaC ₂		引进专利

项 目 年 份		脱硫处理铁水		脱硫合格率 ([S]<0005%)	脱硫剂种类	脱硫剂单耗 /kg·t ⁻¹	备 注
		罐次	t				
1982		88	7277		CaC ₂		引进专利
1983		246	20295		CaC ₂		引进专利
1984		357	27061	85.50%	CaC ₂	5.32	引进专利
1985		571	52724	95.97%	CaC ₂	5.30	引进专利
1986		1105	91647	96.00%	含碳 CaO 基	8.40	采用含碳 CaO 基脱硫剂(KC-1)
1987		2191	181807	96.00%	含碳 CaO 基	8.94	采用含碳 CaO 基脱硫剂(KC-1)
1988	1~7月	1470	119991	97.27%	含碳 CaO 基	8.52	采用含碳 CaO 基脱硫剂(KC-1)
	8~12月	1294	106389	97.90%	无碳 CaO 基	8.50	无碳 CaO 基脱硫剂
1989		4059	333712	98.62%	无碳 CaO 基	8.39	无碳 CaO 基脱硫剂
合计		11413	943547				

注 :1998 年尚有 24900t 铁水为轻脱硫处理未计算在表内 ,如包括则累计脱硫铁水为 968447t。

(一) 脱硫操作工艺过程

脱硫操作各工序作业时间和工艺流程如图 7-2-4 所示。

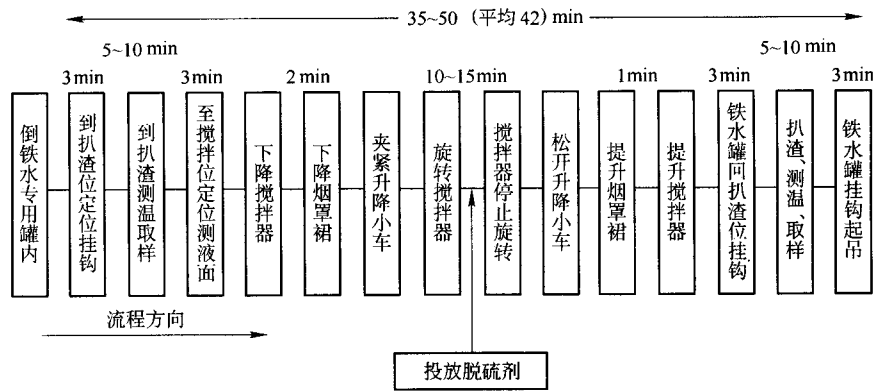


图 7-2-4 KB 工艺流程图和各工序作业时间

(二) 铁水条件和脱硫工艺参数

铁水条件和脱硫工艺参数如表 7-2-3 所示。

表 7-2-3 铁水条件及脱硫工艺参数

项 目	条件参数
铁水条件：	
铁水温度	1300℃
[S]	≤0.060%
渣层厚度	< 50mm
每次处理重量	75 ~ 85t/罐
脱硫工艺参数：	
处理时间	10 ~ 15min
搅拌器旋转速度	90 ~ 120r/min
搅拌器浸入铁水深度	1300mm
处理后[S]	≤0.005%
总工序时间	35 ~ 50(平均 42)min
过程温降	约 45℃

(三)影响脱硫合格率的因素

脱硫合格率是指经 KR 脱硫处理后[S]小于 0.005%的罐次比例。投产以来 ,先后采用的 CaC₂、KC-1 含碳 CaO 基和无碳 CaO 基脱硫剂进行铁水脱硫 ,合格率大约在 97% ~ 98%左右。生产统计表明 ,在约 2% ~ 3%未达到[S]≤0.005%的罐次中主要是由于铁水温度低、铁水含硫量高以及脱硫剂加入量少所致 ,与脱硫剂的种类无关。

(四)脱硫剂的开发

原引进 KR 脱硫设备和技术专利规定脱硫剂采用 CaC₂ ,故从投产后至 1985 年一直采用 CaC₂ 脱硫。CaC₂ 脱硫剂虽有脱硫能力强、脱硫速度快等优点 ,但存在以下问题 :由于小颗粒 CaC₂(0.1 ~ 1.0mm)极易与水 and 空气中的水分发生反应 ,其生成物乙炔气体易燃易爆 ,危及安全。因此 ,在加工、运输、贮存和使用过程中必须有严密的安全措施和保护系统 ;CaC₂ 加工困难、价格昂贵。

从 1981 年开始研究以 CaO 为主要成分的复合脱硫剂 ,经 398 罐的工业试验确定最佳配方为 KC-1 ,其成分为活性石灰 85%、萤石 10%、活性炭 5% ,经 375 罐次 30739t 试生产 ,脱硫效果良好 ,在单耗为 8.816kg/t ,平均脱硫效率达到 92.08% ,脱硫合格率(S≤0.005%所占比例)达到 100% ,但脱硫能力不如 CaC₂ ,对比试验时的消耗量分别为 :

CaC_2 5.66kg/t ,KC-1 脱硫剂 8.816kg/t ,1988 年已降至 8.52kg/t。

此后 ,武钢委托钢铁研究总院研究 CaO 基脱硫剂中活性碳的作用 ,实验室的研究结果表明 ,配碳量 5% 的脱硫剂与不配碳的相比 ,脱硫曲线十分接近 ,不配碳的脱硫速度还略高于配碳的 ,配碳量越多 ,脱硫速度越慢。从 1988 年 8 月开始采用 90% 活性石灰、10% 萤石的无碳脱硫剂 ,脱硫效率达 92% 以上 ,脱硫处理后 $[S] \leq 0.005\%$ 的罐次比例在 98% 以上 ,实际 $[S] \leq 0.002\%$ 时的脱硫剂耗量为 8.5kg/t。

从脱硫剂的开发看 ,都取得了很好的经济效益 ,从 CaCa 到 KC-1 石灰基脱硫剂 ,处理的吨铁成本降低 7.94 元 ,再从使用的 KC-1 石灰基脱硫剂到无碳石灰基脱硫剂 ,处理的吨铁成本又降低 1.95 元。

二、喷吹法

喷吹法是将脱硫剂用载气经喷枪吹入铁水深部 ,使粉剂与铁水充分接触 ,在上浮过程中将硫去除。为了完成这一过程 ,要求从喷粉罐送出的气粉流均匀稳定、喷枪出口不发生堵塞、脱硫剂粉粒有足够的速度进入铁水、在反应过程中不发生喷溅 ,最终取得高的脱硫率 ,使处理后的铁水含硫量能满足低硫钢生产的需要。这些具体的技术环节将在工艺技术中进一步讨论。下面主要介绍两种不同特点的喷吹装置和生产状况 ,即宝钢鱼雷罐车顶喷法(TDS)铁水脱硫和太钢二炼钢铁水罐喷吹脱硫 ,还介绍喷吹法的新发展和其他脱硫新方法。

宝钢是在 320t 鱼雷罐车中采用顶部插入喷枪进行脱硫的。脱硫车间位于高炉和转炉车间之间 ,共有两条脱硫线可同时脱硫 ,互不干扰。脱硫车间日处理能力为 2 万 t。鱼雷罐车装铁水量为 290t 左右。宝钢 TDS 法铁水脱硫处理工艺如图 7-2-5 所示。氮气流量(标态)为 $430 \sim 480\text{m}^3/\text{h}$,其中配入 CaC_2 比例越大流量越小 ,加压压力为 $0.28 \sim 0.32\text{MPa}$,喷吹压力为 $0.20 \sim 0.23\text{MPa}$ 。喷吹速度 CaO 为 $50 \sim 60\text{kg}/\text{min}$, CaC_2 为 $40 \sim 45\text{kg}/\text{min}$ 。喷枪插入深度为 $1.2 \sim 1.4\text{m}$,喷吹时间因处理后的含硫量要求不同、喷粉量不同而不同 ,时间变化在 $5 \sim 30\text{min}$,平均 21.63min 。脱硫剂单耗不大于 $5\text{kg}/\text{t}$ (其中 CaC_2 控制在 $2.0\text{kg}/\text{t}$ 以下) ,根据统计的平均脱硫率 $\eta_s = 73.1\%$,处理后硫含量可达 $0.001\% \sim 0.002\%$ 。喷吹温降为 20°C 左右。

该喷吹系统的特点是 :喷粉罐下部采用旋转给料器 ,驱动采用啮合式变速电动机 ,叶轮用聚胺酯类弹性材料制成 ,给料器的速度可在 10:1 范围内调节。因此 , CaO 和 CaC_2 的配料可根据各自的给料器的不同转速进行在线配料和调节 ,也可调节供粉速度。为了使送粉管内气粉流均匀 ,采用了大的氮气流量($420 \sim 480\text{m}^3/\text{h}$) ,因而属于粉气比低的稀

相输送,送石灰粉时粉气比为 $9.17 \sim 10.94$ (相应送粉速度为 $55 \sim 70\text{kg/min}$),送电石粉时粉气比为 $6.40 \sim 7.21$ 。送粉管径 $\phi 65\text{mm}$,喷枪出口 $2 \times \phi 32\text{mm}$ 。

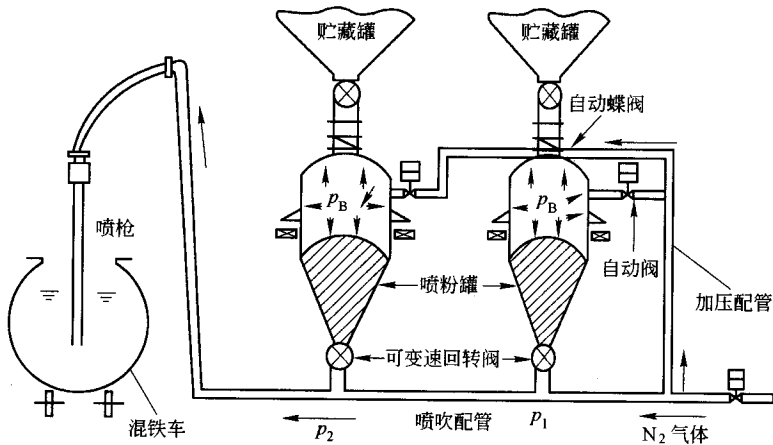


图 7-2-5 TDS 法铁水脱硫处理工艺

概括说来,其特点是可变速给料的稀相输送在线配料喷吹系统。由于其载气耗量大,容易造成喷溅,近来多发展为较浓相的喷吹系统(粉气比 $40 \sim 60$),宝钢一炼钢新增加的镁、电石在线共喷系统就是如此。

太钢二炼钢的铁水预处理站设在炼钢铸锭跨的延长部位,其喷粉系统示意图如图 7-2-6 所示。铁水处理在 55t 专用包内进行,有运罐车将专用包在处理工位和扒渣工位往复运行。延长部有 3 层钢结构粉罐系统,根据铁水三脱(脱硅、脱磷、脱硫)的需要,顶部有 3 个贮粉罐,分别装脱硅、脱磷、脱硫 3 种粉剂。下部共用 1 个喷吹罐。工艺流程是:高炉铁水罐→兑入 55t 专用包→扒渣、测温、取样→喷入脱硫剂→扒渣、测温、取样→兑入转炉。粉剂由粉罐车运来,由气力输送至相应的贮粉罐,再根据处理的需要加入喷粉罐。喷吹前加压等待喷吹。喷吹完后,如果粉料已吹完或不足一次喷吹用料或需吹不同粉料,则需放气卸压再装料或将残料返回上部贮粉罐再装新料。其脱硫能力为 2万 t/月 。氮气流量(标态)为 $1 \sim 1.2\text{m}^3/\text{min}$,预加压 0.29MPa ,差压 $0.015 \sim 0.020\text{MPa}$ (指罐压与助吹管路间压差)。喷吹速度为 $60 \sim 65\text{kg/min}$ 。喷枪插入深度为 1.34m 。脱硫剂配比为石灰 95% ,萤石 5% ,平均单耗为 8.65kg/t 。平均脱硫率 $\eta_s = 78.75\%$,处理后的铁水硫含量为 0.007% 。喷吹温降 20°C 左右。

该喷吹系统的特点是:喷粉罐下部有加松动气的锥体部分,该处有大量微孔,气流从微孔以高速吹入,使该处气粉呈松动混匀状态。为防止微孔堵塞,松动气呈常通状态。通过调节喉口直径和压差,调节下粉速度。粉气比为 $30 \sim 35\text{kg/kg}$ 。送粉管径 $\phi 50\text{mm}$,

喷枪出口 $2 \times \phi 15\text{mm}$ 。

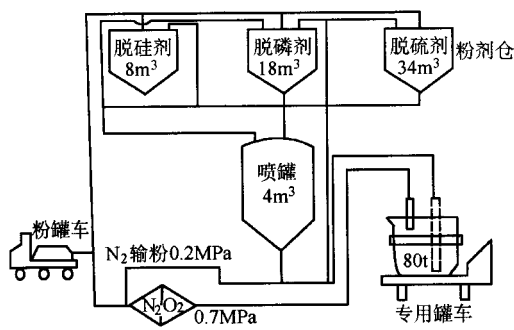


图 7-2-6 太钢铁水预处理站喷粉系统示意图

根据资料报道 ,由于鱼雷罐车的反应动力学条件差 ,北美大部分鱼雷罐车被取消 ,用铁水包取代 ,仅有的多法斯科公司和加拿大钢铁公司的两套鱼雷车脱硫设备也计划于 1998 年关闭。在炼钢车间建立新的脱硫装置 ,于 1998 年 9 月投入使用。经过生产使用在两方面有所改进 :一是喷吹系统——双路 $\text{CaO} \cdot \text{Mg}$ 喷吹罐和双枪喷吹系统。从实际使用看 ,其双路系统的设计是多余的。开始时喷吹罐上出现烟气和喷溅 ,调整喷吹参数(同时将 $\text{CaC}_2 : \text{Mg}$ 变为 $\text{CaO} : \text{Mg}$)后正常。开始出现渣中带铁严重 ,占渣重量的 50% ~ 60% ,后配入 6% CaF_2 ,渣的流动性过好 ,扒渣困难 ,后降至 2% 才正常。二是扒渣工艺。改进了扒渣机悬臂角度(115° 变为 135°) ,悬臂行程(16ft 变为 19ft) ,训练扒渣工操作 ,使达到熟练、统一。在罐边装置氮气吹渣器 ,大大提高了扒渣效率。还对高炉带渣、脱硫带渣、废钢和熔剂含硫对钢中含硫量的影响进行分析 ,得出高炉带渣和不扒脱硫渣对钢中含硫量影响最大 ,其次是废钢。通过这些工作 ,新脱硫装置从开始的脱硫含硫量 0.0063% 降到两年后的 0.0033%。日本和西欧采用铁水包脱硫也呈上升趋势。由于深脱硫的需求 ,镁在脱硫剂中的使用有所增加。在线配料的复合喷吹系统的生产运行 ,表现出灵活可靠、能降低材料单耗、铁水温度损失和铁水损失等优点。日新制钢报道了喂镁包芯线铁水脱硫工艺。其优点是 :设备简单 ,能控制镁的加入深度和加入量 ,避免喷吹法的载气对镁气的稀释作用。包芯线直径 13.0mm ,包芯线中熔剂是($\text{CaO} + \text{MgO}$)粉 ,熔剂量 1.54 ~ 1.67kg/m ,包芯线中镁含量分别为 30%、50% 和 70% ,喂线速度为 40 ~ 60m/min ,处理时间为 3 ~ 14min ,铁水量 90t ,原始含硫量为 0.01% ~ 0.02% ,处理后含硫量 $[\text{S}] \leq 0.003\%$ 时的镁用量为 1.1 ~ 1.4kg/t ,喂线的同时用氮气对铁水搅拌 ,能使脱硫率达到 90%。

第三节 脱硫工艺技术

铁水预处理脱硫工艺之所以在经济上和技术上是合理和可行的是由于以下原因：

(1) 铁水中含有大量的硅、碳和锰等还原性好的元素,使用强脱硫剂(如钙、镁、稀土等金属及其合金)不会发生大量烧损,以致影响脱硫剂的效率。铁水中的碳和硅能大大提高硫在铁水中的活度系数。铁水中氧含量较低,硫的分配系数相应有所提高。

(2) 脱硫剂直接加入铁水,比高炉和转炉冶炼中更易提高脱硫剂的反应物浓度。脱硫剂的选择范围宽,可适应各种不同的脱硫要求,使脱硫更经济有效。

(3) 铁水处理温度较低,可利用现有铁水罐和鱼雷罐车等运输设备,对减少处理装置的投资和使用寿命有利。

下面就脱硫剂、喷吹技术、原始含硫量与目标含硫量、铁水温度与过程温降、脱硫渣及去除和深脱硫处理等专题加以论述。

一、脱硫剂

工业上采用的铁水脱硫剂种类很多,有石灰系、金属镁系、电石系和苏打(即碳酸钠)系等,由于苏打渣侵蚀耐火材料问题严重、挥发损失大效率低和环境污染、价格贵等问题而很少使用。为了满足脱硫过程的各种要求,多使用复合型脱硫剂。

(一) 石灰系脱硫剂

石灰系脱硫剂中主要成分石灰是冶金中常用的熔剂,其价格便宜且来源广泛。以其组成的脱硫剂能满足铁水脱硫的要求,是脱硫剂中使用最广泛且用量最大的一种。

石灰系脱硫剂的发展主要解决提高石灰的反应动力学特性,使之能得到终点硫小于0.005%甚至更低的处理能力。宝钢曾用单一的石灰除尘粉,处理铁水2万t,平均脱硫率为48.18%。另一资料说明,喷吹石灰脱硫时, CaO 的利用率仅为8%。

研究表明,石灰颗粒与铁水的接触条件和颗粒表面的反应产品层对进一步反应的阻碍是利用率低的主要限制环节。Irons等人研究5种颗粒接触情况的模型结果与实验结果比较,得出实验中仅30%的颗粒进入铁水中,如图7-2-7所示。对于单颗粒石灰,在铁水中与 $[\text{S}]$ 、 $[\text{Si}]$ 反应,能形成硅酸钙层($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$),该层阻碍硫通过此层向深部扩散。对于前一限制环节,主要通过石灰颗粒特性(粒径、表面状况等)气力输送技术等方

面加以解决 ,即采用合适的粒径 ,在气力输送条件下使颗粒有足够的动能能进入铁水。对于产品层障碍 ,研究得出 ,加萤石可取得成效。配方中加入 5% ~ 10% 萤石 ,在 1350℃ 左右的铁水中 ,CaO 与 CaF₂ 能在石灰颗粒的晶粒界处生成液相 ,改善了硫在石灰颗粒中沿晶粒界的传输过程 ,脱硫速度增加 2 ~ 3 倍。当 CaO100% 时 ,边部出现不连续的集中渣相区 ,与渣相邻处有 CaS 分散在 CaO 晶粒界处 ,CaS 分布层较薄。当加 10% CaF₂ 后 ,边部无集中渣相区 ,边部和中心均发现有不规则网状 CaS 分布。加萤石后的配方 ,其工业生产数据如表 7-2-4 所示。

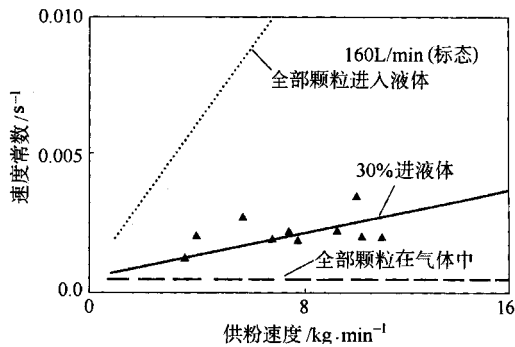


图 7-2-7 各种颗粒接触与卷流动力学模型速度常数比较

表 7-2-4 石灰基配方(脱硫,工业规模)

厂名	配方 / %				铁水脱硫			铁量 /t	单耗 /kg·t ⁻¹	喷吹时间 /min	送粉速度 /kg·min ⁻¹	降温 /℃
	CaO	CaF ₂	CaCO ₃	其他	S ₀	S _f	η _s					
太钢二钢	95	5			0.034	0.007	78.75	52.2	8.65	11	41.0	34
酒钢	90	5		C5	0.048	0.024	50.00	91.2	7.2	5 ~ 12	60 ~ 100	
宣钢	97	3			0.058	0.023	60.00	55.0	10.0	9.11	50 ~ 60	20 ~ 25
芬兰 Koverhar	75	10	15		0.053	0.017	67.90	50.3	6.76	12	28.3	36.8
					0.050	0.014	72.00	50.8	7.56	12	32.0	39.6
					0.054	0.011	79.60	50.8	9.15	12	38.7	39.8
美国 Aliquippa	100				0.060	0.015	75.00	155	8.2	30	42.4	27.8
	100	+ A10.68kg/t			0.060	0.015	75.00	155	5.4	20	41.9	18.9
	100	+ Mg0.63kg/t			0.060	0.015	75.00	155	6.3	22	44.4	16.1

厂名	配方/%				铁水脱硫			铁量 /t	单耗 /kg·t ⁻¹	喷吹时间 /min	送粉速度 /kg·min ⁻¹	温降 /℃
	CaO	CaF ₂	CaCO ₃	其他	S ₀	S _f	η _s					
意大利 Taranto					<0.01%	<0.006%						
	75	5	20		80.4%	36.4%	240	4.7				
	65	5	30		87.0%	48.8%	240	4.9				
	65	5	27	+ NaCO ₃ 3	87.5%	62.5%	240	5.3				

注 S₀—原始含硫量 S_f—处理后含硫量 脱硫率 η_s=(S₀ - S_f)/S₀。

从表中可以看出 ,除配 CaF₂ 外 ,有的配入 15% ~ 30% CaCO₃ ,其作用在于石灰石分解 增加新的 CaO 表面活性高 ,放出的 CO₂ 有强烈的搅拌作用 ,这种作用发生在石灰石颗粒处 ,大大改善传质条件 ,有利于脱硫。日千叶制铁所使用的配方为 :CaO22% , CaCO₃70% ,C5% ,CaF₂ 3%。其中 ,CaCO₃ 达 70%。结果表明 ,反应速度快 ,对温降没有明显影响 ,而且能做极低硫处理。该配方能使处理后的硫含量稳定地小于 0.002%。应该指出 ,释放出的大量气体会产生喷溅 ,需加以妥善解决。还有一种措施是加少量铝和镁 ,效果是降低单耗、缩短喷吹时间。有实验测定过 ,加铝 1.7kg/t 后 ,铁中氧的活度 a₀ 从 2.5 × 10⁻⁶ 降至 2.3 × 10⁻⁶。在 250t 鱼雷罐车中 a₀ 从 3.4 × 10⁻⁶ 降至 2.2 × 10⁻⁶。

(二) 镁和电石系脱硫剂

将镁浸入焦炭内部的镁焦作脱硫剂 ,20 世纪 70 年代在美国使用了相当长时间 ,后来发展成石灰—镁、电石—镁、包盐镁粒等喷吹法。这些方法的变化主要在于抑制镁的激烈反应 ,即加入钝化剂 ,降低镁的消耗量 ,保证处理后的铁水达到极低硫水平(≤ 0.003%)。由于其耗量低、渣量小、温降小、脱硫效果稳定 ,在北美欧洲的脱硫处理中广泛使用。表 7-2-5 为其使用情况。

表 7-2-5 铁水罐处理的过程参数比较

项目	电石	Mg—石龙			Mg 钝化		
		J & L 预混合		J & L 共喷 Mg 变速	J & L 镁团粒	USIR MAG	USSR
		30% Mg	20% Mg				
目标硫 S]<0.005%	难	易	易	中	易	易	
留净空高度/cm	30	0	0	15	50		(25) ^①

项目	电石	Mg—石龙			Mg 钝化		
		J & L 预混合		J & L 共喷 Mg 变速	J & L 镁团粒	USIR MAG	USSR
		30% Mg	20% Mg				
试剂单耗/kg·t ⁻¹	6.11	1.63	1.95	5.09	0.6		0.55
喷吹时间/min	13	6.5	3	4.5	12	6	5
温降/℃	17	15	< 10	11	14	(15)①	15
渣量/kg·t ⁻¹	7.0	2.0	1.9	5.0	1.0	0.5	0.5
渣特性	干稠	干	干	干稠	流体	流体	流体
载气量(标态)L·(min·t) ⁻¹	3.6	2.2			2.1		14
粉气比(kg/kg)	104.4	90.8			19.0		6.28

①()为根据资料估计数 ;②按含硫量从 0.035%降至 0.01%。

美国 LTV 克里夫兰二炼钢厂用 CaC₂ - Mg 作脱硫剂的变化过程如下 :1982 年采用石灰和镁混合喷吹 ,1983 年采用石灰—镁不预混在线共喷 ,1985 年采用电石—镁共喷 , 1988 ~ 1989 年采用程序共喷。这种程序喷吹是往 202t 铁水罐中先喷 90.6kgCaC₂ 再按 CaC₂ : Mg = 3.5 : 1 共喷 ,最后单喷 135.9kgCaC₂。这种程序喷吹 ,处理的目标硫可比原来方法要求低 ,即原为 0.005%改为 0.008% ,0.003%改为 0.005% ,0.001%改为 0.002%。这样处理还完全能满足原来炼钢目标硫 0.015%、0.010%、0.005%的要求。其原因是处理后铁水中过饱和的镁进一步脱硫 ,随后期喷入的 CaCa 表面沉淀出 MgS 上浮。后来 ,又进一步研究了镁和电石的脱硫特点 ,发现当硫含量低时 ,镁在铁水中的溶解损失急剧增加 ,铁水含硫为 0.05% 时 ,溶于铁水中的镁耗量只占脱硫耗镁量的 5% ;含硫为 0.012% 时 ,溶损耗镁与脱硫耗镁基本相等 ,含硫为 0.005% 时 ,溶损耗镁则为后者的 5 ~ 10 倍。现在 ,在极低硫需求的实践中发现 ,镁的溶解度比预计的更大 ,原因是镁与铁水中硫的活度强烈的负相关 ,按照 Speer 等人的估计 ,用镁作脱硫剂时硫含量的下限为 0.001%。温度对镁的溶损有明显影响 ,温度升高 ,镁的溶损增加。电石差不多不存在溶损 ,初期的脱硫反应完全受扩散动力学控制 ,即与碳化钙在铁水中的平均停留时间和混合效率有关 ,其反应效率在高硫水平时也很少超过 50% ~ 60% 随着硫的水平降低 ,铁水中硫的扩散成为控制环节 ,在低硫水平 0.005% 以下时 ,碳化钙的反应效率为理论值的百

分之几。温度则与镁相反,提高铁水温度,碳化钙的脱硫效率增加。结合镁和电石价格从成本考虑,设计了两个中间硫水平,即脱去单位硫镁和电石成本曲线的两个交叉点,如图 7-2-8 所示。商品碳化钙(75% CaC_2)与商品镁粒(99% Mg)的单位价格比为 1:5.5,铁水温度为 1370℃。上交叉点为 0.04% S,下交叉点为 0.007% S。另外,考虑温度对镁的溶损影响(图 7-2-9),在 1315~1425℃ 范围,预计模型的下交叉点为 0.005%~0.010% S 范围。预计新的程序可节约脱硫剂费用 7%~10%。

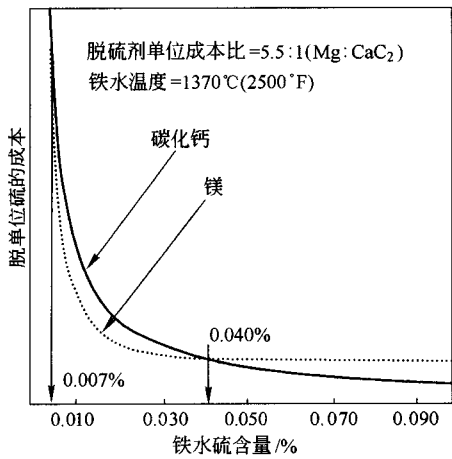


图 7-2-8 脱硫剂脱单位硫的成本与铁水含硫量的关系

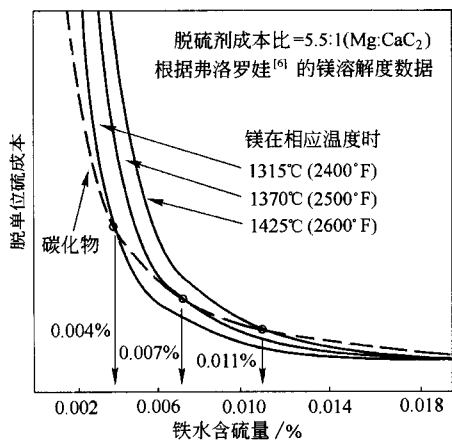


图 7-2-9 铁水温度对低硫的成本交叉点的影响

本钢 1998 年 10 月建成了喷吹镁基粉剂铁水脱硫站,经过工艺参数的优化,解决了喷溅问题。镁粉钝化后 $\text{Mg} \geq 96\%$, $\text{S} \leq 0.002\%$, 粒度 $0.85 \sim 0.212\text{mm} > 90\%$, 石灰 CaO

$\geq 98\%$, $S \geq 0.025\%$, 粒度 $\leq 0.075\text{mm} > 92.5\%$ 。使用国产镁粉后 , 出现喷溅较大的问题。经过改变了喷吹压力和喷粉速度 , 镁粉罐压由 580kPa 降至 380kPa , 喷吹速度由 $15 \sim 20\text{kg/min}$ 降到 $9 \sim 13\text{kg/min}$ 。石灰粉罐压由 670kPa 降至 500kPa , 喷吹速度由 $50 \sim 60\text{kg/min}$ 降至 $28 \sim 34\text{kg/min}$, 喷吹时间 CaO 粉由 5.82min 增加到 7.55min , 镁粉由 3.90min 增加到 6.18min 。粉剂单耗镁粉由 0.451kg/t 减少到 0.447kg/t , 石灰粉由 1.82kg/t 减少到 1.48kg/t 。在此工艺条件下 , 高炉铁水含硫量小于 0.05% 时 , 处理后的铁水含硫量小于 0.01% , 若高炉铁水含硫量小于 0.03% 时 , 处理后的铁水含硫量不高于 0.005% 。

鞍钢二钢 1999 年引进石灰镁粉复合喷吹脱硫站。其镁粉纯化后 $M_g > 90\%$ 、粒度小于 1.2mm 。石灰粉 $\text{CaO} > 90\%$ 并经流化处理 , 粒度小于 1mm 。粉剂单耗石灰粉为 1.8kg/t , 镁粉为 0.45kg/t 。喷吹速度石灰为 $36 \sim 48\text{kg/min}$, 镁粉为 $9 \sim 12\text{kg/min}$ 。处理前高炉铁水平均含硫量 0.028% , 处理后的铁水平均含硫量为 0.008% 。由于脱硫站的正常运行 , 减少了转炉造渣料 8.1kg/t (铁水) , 减少了铁损 8kg/t (钢) , 提高连铸机产量 5% 。通过计算经济效益 , 铁水脱硫费用为 16.66元/t , 使用脱硫铁水后转炉和连铸的效益为 22.687元/t , 铁水脱硫的净效益为 6元/t 。

电石用于脱硫已有较长的时间 , 前面已提及其用于脱硫的特性 , 它比石灰脱硫能力强 , 因而耗量约为石灰的一半左右 , 对减少脱硫渣量和铁损有利 , 仍较广泛应用于铁水脱硫。生产实践中发现有少量回硫现象 , 回硫量约为 $0.001\% \sim 0.002\%$ 。因此 , 电石系脱硫剂的发展有两种趋向 : 一种是配入更强的镁作深脱硫 , 这种变化已在镁系脱硫剂中介绍过 ; 另一种是配入石灰防止回硫。美国 Stelco. LEW 厂在鱼雷罐车中喷电石系脱硫剂 ($\text{CaC}_2 46\% \sim 48\%$, $\text{CaCO}_3 26\% \sim 36\%$, $\text{CaO} 17\% \sim 23\%$) , 在处理中间喷入 35kg 镁粒。在保证目标硫不高于 0.004% 时 , 节约脱硫剂 $2.7 \sim 3.0\text{kg/t}$ 。

二、喷吹技术

喷吹技术源于运输行业的气力输送。冶金上将这种气力输送技术用于铁水预处理后 , 由于工艺的需要 , 喷吹技术有了进一步的发展。

铁水预处理的工艺特点要求将粉剂均匀稳定地喷入铁水 , 使粉剂颗粒与铁水充分接触 , 迅速进行反应。从喷粉罐出粉到喷枪出口距离较短 , 根据现场条件从十几米到几十米 , 这不同于气力输送从几百米到几千米 , 因而可较少考虑输送过程的阻损问题。粉剂单耗比钢包喷粉大 , 如脱磷粉剂单耗高达 40kg/t 以上 , 若采用稀相输送 , 则载气量过大 , 容易造成喷溅 , 若采用较浓相输送 , 虽然单位距离管路阻损大 , 由于距离较短 , 也不用计

较较大的输送阻损和能耗。

实验研究过粉体砂从固定床到全部吹走之间各种粉气比时气体流速、管道阻损与输送状态的关系,如图 7-2-10 所示。图中为在直径 10mm 玻璃管中水平输送砂子的状态图。0-1 线表示砂子处于静止状态。随着气流速度的增加,管道中阻损呈线性逐渐增加。到 1 点后,气流速度增加,阻损不再增加,散料体积膨胀,孔隙度增加,管道状态由 a ($\epsilon = 0.45$, 无气孔) 转变为 b , 管中上部有少量气孔,呈高粉气比运动,不稳定。气流速度继续增加,管上部孔隙继续增多。目前已能实现在允许的压力波动情况下输送,粉气比达到 100 以上。到 3 点则部分颗粒在管上部悬浮运动,下部沉积粉粒减少,粉气比减小。3-2 曲线右侧为以悬浮为主的稀相输送,曲线左侧为从悬浮输送状态降低气流速度时出现部分沉积时的状态。随气流速度下降阻损增大。

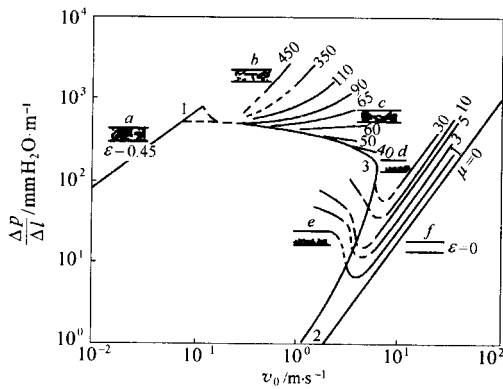


图 7-2-10 水平输送状态图

(砂子 $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, $d_s = 350 \mu\text{m}$, 玻璃管 $d = 10 \text{ mm}$; $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$)

宝钢的 TDS 顶喷法脱硫装置属于稀相输送范围。由于旋转给料器是定时定容积将整体粉料加入送粉管,此时的粉料与气体未充分混匀,不是处于良好的流化状态。因此,必须以大气量和高流速将粉料分散混匀。若气量小则不易混匀,容易产生脉动甚至堵塞。

现在较广泛使用的流化输送装置要求有良好的松动(流化)装置、合适稳定的管道输送、较有力的喷枪出口气粉流。流化装置的评价在于喷粉罐出口口处气粉流的均匀性,可用该处压力的波动程度来衡量。图 7-2-11 和图 7-2-12 为太钢二炼钢铁水预处理站送粉管路的测点布置及压力波动状态的实测结果。在管路上共有 5 个测压点。其曲线的特点是:开始 1min 左右压力较高,原因在于助吹管路有附加氮气。当停止加入附

加氮气时,压力下降至稳定输送水平,距喷粉罐最近的测点 5 压力最高波动最小(波动约 0.024~0.04MPa)。距喷枪最近的测点 1 压力较低波动较大(波动约 0.04~0.066MPa)。波动频率为 0.1~1 次/s。测定说明,自喷粉罐喉口流出的气粉流,随着压力降,低粉粒速度增加,气粉流的不均匀性也增加,使压力波动增大。

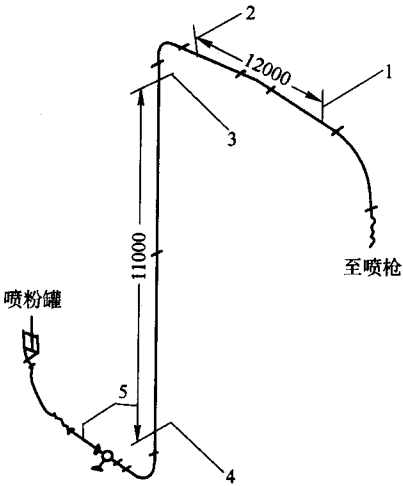


图 7-2-11 送粉管路测压点布置

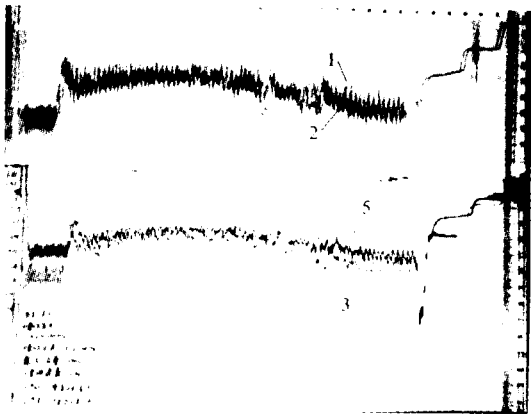


图 7-2-12 各测压点曲线

($p_5 > p_3$ 因为压力传感器常数 $k_5 > k_3$)

工业上影响稳定喷吹的因素主要有:设备结构因素、操作参数和粉料性质等。设备结构因素包括喷粉罐及其流化器设计、喉口直径调节范围、管路直径及长度和弯头数、喷枪出口直径和数量等。喷粉罐结构大致相同,只是在流化区有差异。粉料流化松动装置

有 ①罐内设松动棒,棒上有气孔;②罐内设螺旋管通气松动;③罐的锥体下部安有透气膜,如金属网或微孔透气流化,也有安装微孔透气钉流化的;④罐底部水平安装透气网流化。从松动效果看,以后两种效果较好。管道是喷吹系统的重要组成部分,管道直径要适合送粉速度范围和粉剂性质,长度要尽量短,少弯头,连接处不出现变径。SL 系统管长一般为 $15 \sim 20\text{m}$, ρN 系统管长小于 15m ,根据现场实际条件以不超过 30m 为宜。从喷枪出口的研究可知,在一定颗粒大小和气流速度条件下,气粉流进入液中的各种状况,如图 7-2-13 所示。图中,气流速度从马赫数小于 0.05 直至超音速,颗粒分为粗颗粒和细颗粒,颗粒又分为湿润性和非湿润性两类。从图 7-2-13 可以看出,一般设计喷枪出口速度为(标态) $70 \sim 100\text{m/s}$,属于中等速度, $80\mu\text{m}$ 以下的石灰,气体的负荷从 $20 \sim 200\text{kg/m}^3$ (标态)都处于射流范围。

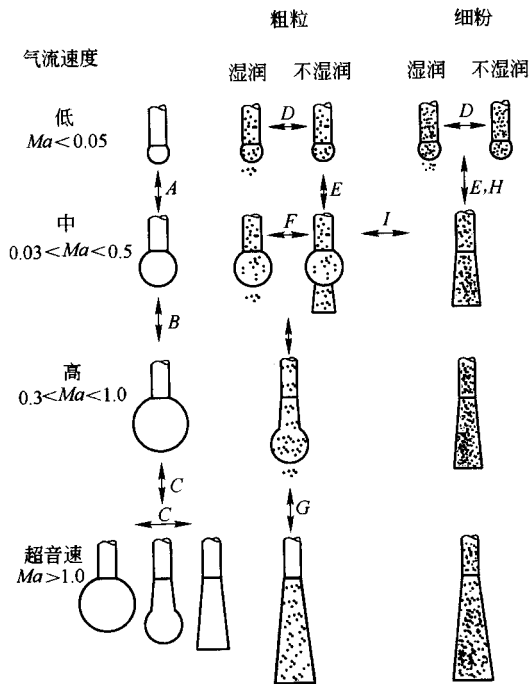


图 7-2-13 气粉流喷入液中的不同状态
(Ma —马赫数)

包盐镁粒粒度大于 $150\mu\text{m}$,负荷在 10kg/m^3 (标态)以下,如图 7-2-14 所示。因处于鼓泡状态,而容易出现堵塞,需要大大提高气流速度以防止堵塞。

生产实际操作中往往出现喷溅过大或堵塞、输送过程不稳定等现象。喷溅主要是由于设计的参数不合适或喷粉系统设计不当,这些问题一般在试运转中就会出现,往往采

取减小载气量等措施 ,却又出现堵枪 ,需进一步从各气路参数的匹配、管路结构和尺寸等方面找原因。另一类原因是元器件不可靠 ,包括电磁阀、喷枪等。还有就是操作人员对新工艺、新设备不熟悉、不理解 ,出现操作不当造成的。为了避免这些情况的出现 ,首先是设计合理 ,设备和元器件加工和安装可靠 ,还要提高计量和控制水平 ,避免误操作 ,如采取计算机智能控制与操作 ,宝钢一炼钢第二套脱硫装置就是如此。

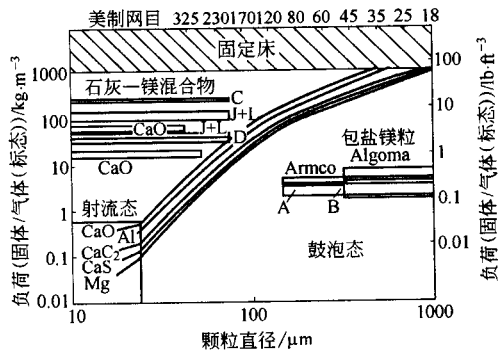


图 7-2-14 不同粒径的固体负荷从鼓泡到射流的转变

三、原始含硫量和目标含硫量

原始含硫量以日本最低 ,在 0.020% ~ 0.025% 范围 ,欧洲为 0.020% ~ 0.040% ,美国的范围较宽 ,为 0.025% ~ 0.065%。这与各厂的原料条件和钢铁冶炼工艺有关 ,也与冶炼的钢种对硫含量的要求有关。我国的生铁含硫量随各厂的原料条件和冶炼工艺在较宽的范围变化。条件较好的宝钢、首钢硫含量小于 0.03% ,焦炭硫高焦比高的中小厂和需排碱的 ,硫含量可达到 0.06% ,一般含硫量在 0.04%。

从铁水脱硫角度看 ,含硫量高时脱硫速度快 ,脱硫率高。随着铁水含硫量降低 ,脱硫速度变慢 ,脱硫率也下降。根据实验研究和理论分析认为 ,用石灰基脱硫剂时 ,出现脱硫速度变慢 ,效率下降的原因在于 :铁水含硫量大于 0.08% 时 ,石灰颗粒表面覆盖 CaS 层 ,此层中硫的扩散成为限制性环节。此时的脱硫速度与料流密度成正比 ,与石灰颗粒直径成反比。当铁水含硫量小于 0.04% 时 ,悬浮于铁水内的石灰颗粒上浮 ,与周围的铁水产生相对运动 ,在颗粒周围形成流动边界层 ,硫需经此边界层向石灰表面扩散。此时加速边界层扩散的措施都有利于脱硫 ,如加石灰石放出 CO_2 、加强搅拌等。

由于对优质钢种需求增加 ,要求铁水预处理的目标含硫量不断降低。用来冶炼一般钢种的铁水 ,经脱硫处理已达 0.02% 以下 ;用于冶炼连铸钢种的铁水全部经过脱硫处理 ,硫含量小于 0.015%。美国 LEW 厂的目标硫变化如图 7-2-15 所示。从 1985 年到

1989 年,目标硫含量 0.015% 已经被取消,目标硫含量 0.007% 的处理量也已经减少,目标硫含量 0.004% 的处理量已从总处理量的 20% 增加至 40%。目标硫含量 0.002% 已于 1989 年 5 月开始使用。同年 6 月,RH—OB/PB 脱气装置投产,用于生产高质量钢板、大口径钢管和深冲优质钢板。

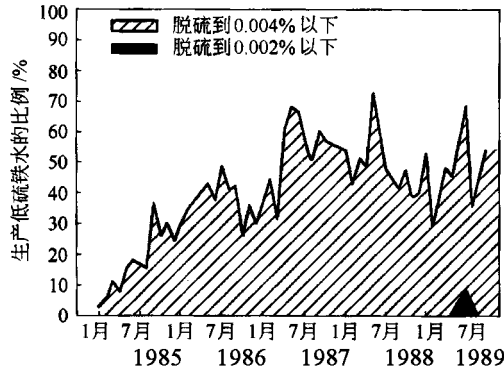


图 7-2-15 美国 LEW 厂低硫铁比例的变化

四、铁水温度与处理过程的温降

铁水预处理是炼铁和炼钢的中间工序,减少全过程的温降不仅会减少能耗,而且对工艺过程会产生一定影响。例如太钢的测定结果:从出铁厂撇渣器至各出铁溜嘴,温降分别为 5~17℃,溜嘴距撇渣器越远温降越大。流入铁水罐时温降最大,为 37~79℃,平均 60℃。空罐时间越长,铁水流速越小温降越大。扒渣温降 6~15℃,平均 12℃。倒包铁水温降 18~23℃,平均 21℃。装满铁水的铁罐在等待、运输过程的温降与时间有关,每小时约 8~39℃,平均 23℃,这与铁水面的覆盖程度有关。根据太钢铁水脱硫的实践,处理前铁水温度在 1280~1350℃ 范围,平均 1315℃。在粉剂单耗 8~9kg/t 的条件下,铁水温度提高,脱硫率稍有增加但不显著。应该指出,高炉容积大小对铁水温度有很大影响,如宝钢高炉的出铁温度达 1500℃,到脱硫站时的铁水温度达 1420℃ 以上,对提高脱硫率有利的。不仅如此,对扒渣和扒渣铁损减少也是有利的。如 Weirton 钢铁公司统计了铁水温度与扒渣铁损的关系,温度从 1399℃ 降至 1232℃,扒渣铁损由 2% 增加到 3.1%。

单从脱硫处理过程的温降看,其大小主要与脱硫方法、脱硫剂用量和扒渣测温取样等有关。如武钢 KR 法的过程温降为 45℃ 左右,太钢喷吹法为 33℃,其中喷吹温降为 20℃,前后测温扒渣取样的温降为 13℃。从太钢的生产统计得出,喷粉过程温降与喷粉

量密切相关,一般单耗每提高 1kg/t 温降相应增加 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。不同脱硫剂喷吹时,由于单耗不同,喷吹温降也有明显区别,参看表 7-2-2 和表 7-2-3,用石灰基脱硫剂为 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$,用电石和镁基脱硫剂为 15°C 左右。

五、脱硫渣的扒除

脱硫渣的扒除是脱硫处理过程的重要环节。完成这一操作与 3 方面的因素有关:一是扒渣机性能。这将在设备部分予以介绍,不过目前的产品性能尚不能很好满足要求,应进一步改进,使扒渣动作智能化。二是脱硫渣的性能和状态。石灰基脱硫渣在正常情况下是干渣,呈松散状,机械型扒渣机是能很好扒除的。美国 LTV 公司采用加 4% 的硼砂入电石系脱硫剂,其配方为 CaC_2 78%, CaO 18%, 硼砂 4%, 结果与 100% 的 CaC_2 比较,渣量减少了 25%。三是带高炉渣过多,使脱硫渣性能变差,或者是铁水罐带有残渣、铁水温度过低等。Weirton 钢铁公司采用如下方法精确测量带渣量:用 2in (50.8mm) 钢管内穿铝线,铝线向外延伸 14in (355.6mm),由螺母将铝线与钢管端部固定。用铁水先于渣溶化铝线的时间差精确确定渣层厚度。用这种方法测出带入转炉的高炉渣量平均每罐 2.5t ,并比较了 No.1 和 No.3 高炉一年的数据,发现由于 No.1 高炉清理铁水罐次数少,扒渣损失比 No.3 高炉多 770kg ,还研究了减少带入高炉渣的措施。

六、深脱硫工艺特点

由于对低硫钢的需求日益增加,对铁水脱硫的要求越来越高。如 Steleo 公司生产钢水含硫小于 0.0015% 的管线钢和小于 0.005% 的 HSLA 级别钢,这两种产品占总产量的 23%。极低硫钢生产时,要求 24 小时前通知高炉,若铁水含硫大于 0.045% 时,则需提高高炉渣碱度,使含硫量降至 $0.030\%\sim 0.035\%$ 。这样,钢水含硫可小于 0.003% 。鱼雷罐车在接受 230t 铁水前要求完全清除渣壳。实际高炉铁水平均含硫量为 0.025% 。脱硫站喷吹 1710kg 脱硫剂,其成分为: CaC_2 64%, CaO 20%, C 12%, MgO 6%。喷粉速度为 70kg/min ,脱硫后的平均含硫量为 0.002% 。

为了防止脱硫渣带入转炉,鱼雷罐车装有挡渣板,并通知操作人员不倒空鱼雷罐,留下 $5\sim 10\text{t}$ 铁水,防止涡流卷渣带出。从炼钢车间铁水包取样测出的铁水平均含硫量为 0.0022% 。铁水包不用扒渣。

低硫钢生产时,对高炉铁水没有限制,对加入高炉的炉料也没有低硫级的要求。铁水脱硫的目标硫为 0.004% ,铁水罐车倒罐时也不需剩余铁水。

总的说来,铁水脱硫工艺的发展主要围绕两方面进行:一方面是努力降低脱硫成本,

从降低脱硫剂单耗、采用廉价复合脱硫剂、减少扒渣铁损、提高脱硫工艺和自动化水平等 ;另一方面是保证深脱硫的目标硫水平 ,采用脱硫率高的脱硫剂 ,如镁、电石等 ,并采用各种措施防止脱硫渣进入转炉。

第三章 预脱磷过程中同时脱硫

为了更大程度减轻转炉负担,要求在铁水脱磷过程中尽可能同时脱硫。用石灰系脱磷剂处理时,若要求 $[P] \leq 0.01\%$,则氧位 $P_{O_2} \geq 10^{-13} \text{ atm}(10^{-8} \text{ h})$;若要求 $[S] \leq 0.005\%$,则 $p_{O_2} \leq 10^{-16} \text{ atm}(10^{-11} \text{ Pa})$ 。因此,在 $p_{O_2} = 10^{-13} \sim 10^{-16} \text{ atm}(10^{-8} \sim 10_{-11} \text{ pa})$ 范围内,在同一氧位下石灰系脱磷剂不同时具有脱磷脱硫能力。竹内等在100t铁水包脱磷时测定了不同部位的氧位,如图7-3-1所示。由图说明,不同部位的氧位不同,可分别具有较强的脱磷和脱硫能力,但总体过程无法控制。实际上,处理含磷0.1%左右的铁水,工业上已达到90%以上的脱磷率,而脱硫率则为50%左右。

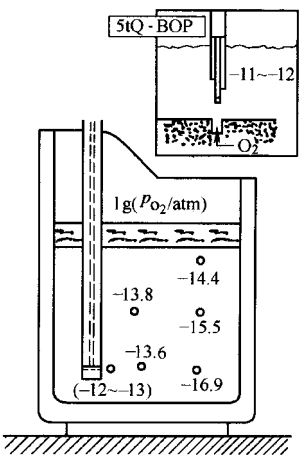


图 7-3-1 铁水包喷吹脱磷时不同部位的氧位

第一节 影响同时脱硫率的工艺因素

一、防止渣中含铁量过高

渣中含铁量对脱硫率的影响如图 7-3-2 所示。由图可以看出,反应动力学条件影响很大,喷吹方式比机械搅拌动力学条件更好,渣中含铁量降至 10% 以下,多数情况小于 5%,由于使渣的氧化性大大下降,有利于脱硫反应的进行。其他如加入氧化铁过多、铁水温度过低、成渣不好等因素,都会使渣中含铁量过高而影响脱硫。

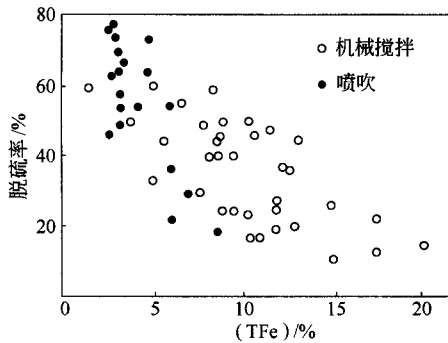


图 7-3-2 脱硫率与渣中含铁量的关系

改善成渣性能可加入助熔剂。从图 7-3-3 可以看出,加入 CaF_2 为 5kg/t 时(即渣中氟含量约为 6%),可使渣中含铁量小于 5%。加入 CaCl_2 也可使脱硫率提高。从图 7-3-4 可以看出,加入 3kg/t 的 CaCl_2 可使脱硫率由 10% ~ 30% 提高至 60% 以上,相应脱磷率也可达到 90%。

二、供氧制度

供氧制度包括总供氧量、气/固氧比、供氧苏打等。如前所述,要达到深度的脱磷,总氧用量必须大于(标态) $8.0\text{m}^3/\text{t}$,根据铁水温度 $\text{O}_{\text{气}}/(\text{O}_{\text{气}} + \text{O}_{\text{固}})$ 可在 20% ~ 60% 之间调节,一般控制在 1300 ~ 1350℃ 范围。供氧速度由熔剂喷吹速度和吹氧速度来决定,供氧过快,铁水氧位增长过快不利于脱硫,过慢则不利于脱磷。

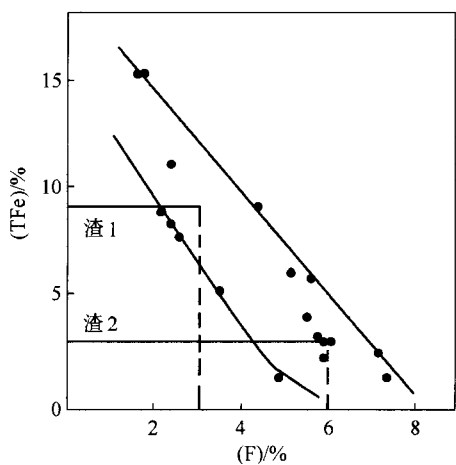


图 7-3-3 渣中氟含量与含铁量的关系

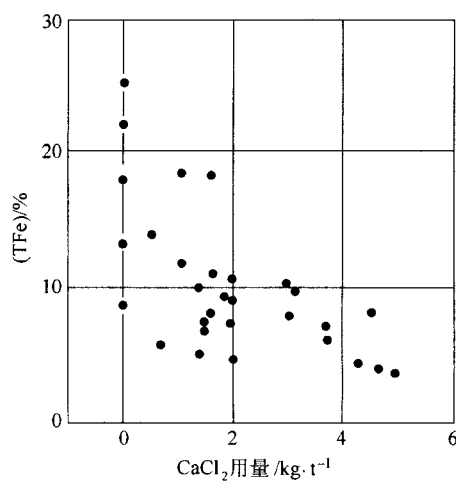


图 7-3-4 渣中含铁量与 CaCl₂ 用量的关系

第二节 分期脱磷脱硫

要保证 90% 以上的脱磷率 ,脱硫率很难提高 ,一般为 40% ~ 60% ,而且因操作因素等的变化 ,脱硫率很不稳定。分期处理是在脱磷的同时提高脱硫率的最有效办法。

分期脱磷脱硫有两种工艺 :一种是先脱硫后脱磷 ;另一种是先脱磷后脱硫。如图 7 -

3-5 和图 7-3-6 所示,分别为神戸厂专用炉和加古川厂鱼雷罐的分期处理结果,都是先脱磷后脱硫的。神戸在 90t 专用炉中处理,脱磷期喷吹 32kg/t 脱磷剂、顶吹氧气(标态)3 ~ 10m³/t,脱磷剂配比为 43% CaO + 43% 轧钢皮 + 14% CaF₂,喷吹 9min;脱硫期则停吹氧气,喷吹 6.5min Na₂CO₃ 5.6kg/t。结果表明,能除去大部分硫,还能继续脱磷。加古川厂在 300t 鱼雷罐中处理,脱磷期喷吹 32kg/t,顶吹氧气(标态)4 ~ 6m³/t,脱磷剂配比为 30% ~ 50% CaO + 40% ~ 60% 轧钢皮 + 5% ~ 15% CaF₂,喷吹 28.5min;脱硫期停吹氧气,喷吹 10.5min CaC₂ ~ CaO 1.8kg/t。结果表明,能去一部分硫,但有轻度回磷。两种情况下,渣中铁含量均保持在 5% 以下,所以在脱磷期以后就开始进行同时脱硫反应。图 7-3-7 为川崎水岛厂进行的先脱硫后脱磷和先脱磷后脱硫两种类型的试验结果。

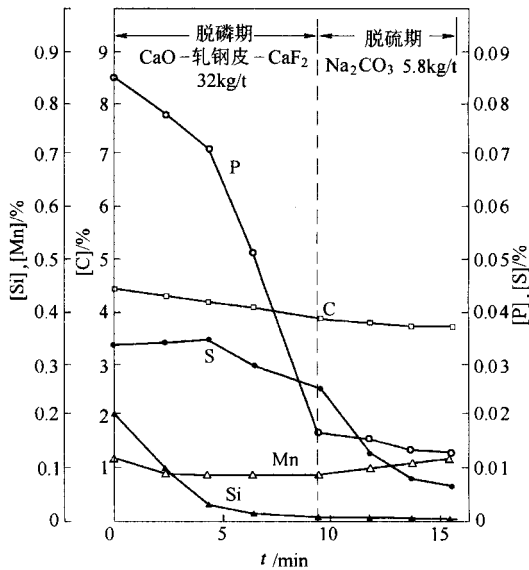


图 7-3-5 转炉脱磷时成功脱硫铁水成分的变化

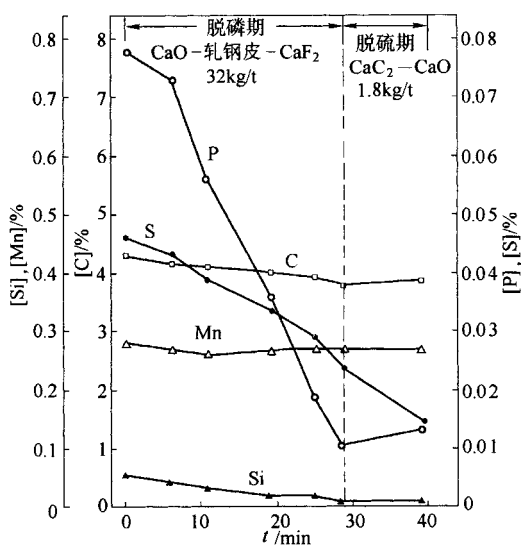


图 7-3-6 鱼雷车脱磷时成功脱硫铁水成分的变化

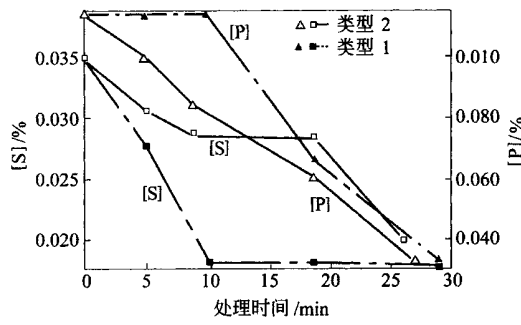


图 7-3-7 两种类型脱磷脱硫成分的变化

第四章 铁水预脱硅

铁水预脱硅指铁水进入炼钢炉前的降硅处理,它是分步精炼工艺发展的结果。它能改善炼钢炉的技术经济指标,降低炼钢费用,也可作为预处理脱磷脱硫的前处理,可降低脱磷处理剂的消耗,进一步生产纯净钢等各种优质钢。

铁水预脱硅开始较早,1897年 Thiel 等人“用平炉进行了脱硅脱磷的预备精炼工业试验,20世纪初进行了混铁炉脱硅试验,到20世纪40年代试验了高炉出铁时的脱硅,我国曾在20世纪50年代在鞍钢实行过预备精炼炉脱硅和高炉铁水沟脱硅,这些都对改善当时的平炉炼钢的冶炼技术经济指标和提高生产率起了良好的作用。到了20世纪90年代,基于对优质钢的需求,同时由于需要节省资源和能量、减少渣量等,日本发展了以脱硅脱磷为目的的铁水预处理。此后发展成两类预脱硅工艺:一类是作为铁水同时脱磷脱硫的前工序,以提高脱磷脱硫的效率。处理后的铁水进入转炉,只需完成脱碳和提高温度,渣量减少到100kg/t以下,只起保护渣层的作用,主要用于生产高纯钢种。另一类是作为降低转炉渣量的措施。1985年前后日本各大厂曾广泛采用预脱硅技术,主要在高炉炉前进行。后来,由于高炉冶炼低硅铁水技术的发展,这类预脱硅已较少,不过仍作为脱磷脱硫的前工序在高炉炉前脱硅。总的说来,作为分步精炼的第一步,铁水预脱硅已成为冶炼优质钢种、改善预处理脱磷脱硫和转炉冶炼技术的重要工序。

第一节 铁水预脱硅的方法

按处理场所不同,铁水预脱硅分为在高炉出铁过程中连续脱硅和在铁水罐(或鱼雷

车)中处理两种。按加入方法不同,有自然落下的上置法、喷枪在铁水面上的顶喷法和喷枪插入铁水的喷吹法等。按搅拌方法不同,有吹气搅拌、铁水落下流搅拌、喷吹的气粉流搅拌和叶轮搅拌。从改善处理剂与铁水的反应动力学条件看,以后两种较好,但需有相应的设备,铁水落下流搅拌最简单,吹气搅拌次之。各种脱硅方式的选择主要根据铁水含硅量、要求处理后的含硅量和已有的设备场地限制等条件来确定。若铁水含硅量大于 $0.45\% \sim 0.50\%$,应设置高炉炉前脱硅。若铁水需预处理脱磷脱硫,需先在铁水罐中脱硅,将含硅量降至 $0.10\% \sim 0.15\%$ 以下。

一、出铁场脱硅

有的脱硅剂以皮带机或溜槽自然落下加入铁水沟,随铁水流入铁水罐进行反应。如图 7-4-1 所示。有的铁水沟有落差,脱硅剂高点加入,过落差点后一段反应距离设置撇渣器,将脱硅渣分离,如图 7-4-2 所示。

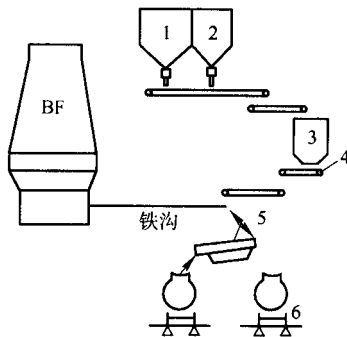


图 7-4-1 脱硅剂自然落入摆动溜嘴

1—主料仓 2—辅料仓 3—混料仓 4—定量给料机;
5—摆动溜嘴 6—320t 鱼雷罐车

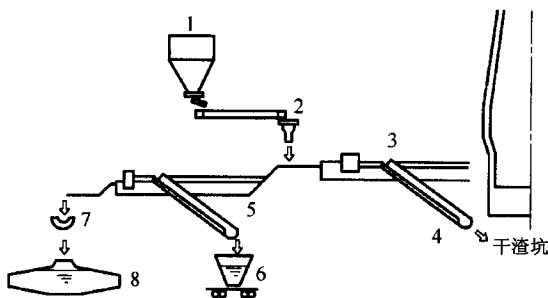


图 7-4-2 脱硅剂自然落入铁沟

1—料仓 2—脱硅剂 3—主铁沟 4—高炉渣 5—脱硅渣 6—渣罐 7—铁水 8—鱼雷罐车

落差脱硅的反应效果如图 7-4-3 所示, 锰含量、量有相应下降。有的脱硅剂以喷出方式进行: 一种为插入铁水的喷枪, 枪附近的铁水沟改为圆形反应坑, 枪有横吹 4 孔, 位于反应坑的中心, 如图 7-4-4 所示。另一种喷枪在铁水面上以高速气粉流向铁水投射。有的投射点在铁水沟, 该处改造为较宽较深的反应室, 如图 7-4-5 所示; 有的投射点在摆动溜嘴处, 如图 7-4-6 所示。粉料粒度小于 1.0mm , 贮仓为 30m^3 一个, 40m^3 两个, 最大给料速度为 $365\text{kg}/\text{min}$ 。这些加速添加方式都改善了反应的动力学条件, 但同时需克服喷溅过大和耐火材料侵蚀等问题。日本千叶厂 6 高炉因减产铁水含硅量从 0.23% 增加到 $0.35\% \sim 0.40\%$, 需要的脱硅量增大, 采用了在上部投加式外增加在摆动溜嘴处投射式脱硅, 如图 7-4-7 所示。其特点为: 使用矩形的广角投射喷枪, 以降低脱硅剂的投加密度, 通过回转阀将脱硅剂定量送出后, 用压缩气体加速, 通过分配器, 可对上部投加法与投射法用的脱硅剂的投加比例进行任意调整。这种方法的效果是: 处理前铁水含硅为 0.30% , 脱硅剂单耗为 $13\text{kg}/\text{t}$, 处理后含硅由 0.15% 降至 0.09% , 造渣抑制剂由 $0.23\text{kg}/\text{t}$ 降至 $0.10\text{kg}/\text{t}$ 。

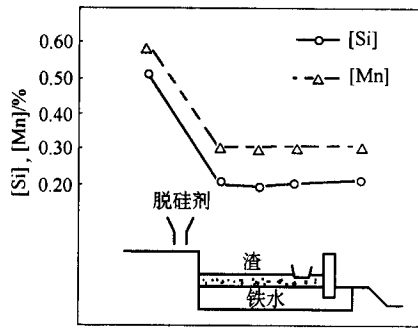


图 7-4-3 落差脱硅时 Si 和 Mn 的变化

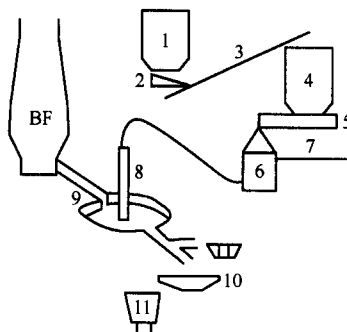


图 7-4-4 铁沟中喷吹脱硅

- 1—料仓 2—给料机 3—皮带机 4—料仓 5—定量给料器;
6—输送装置 7—载气 8—喷枪 9—主沟 10—摆动溜嘴 11—铁水罐

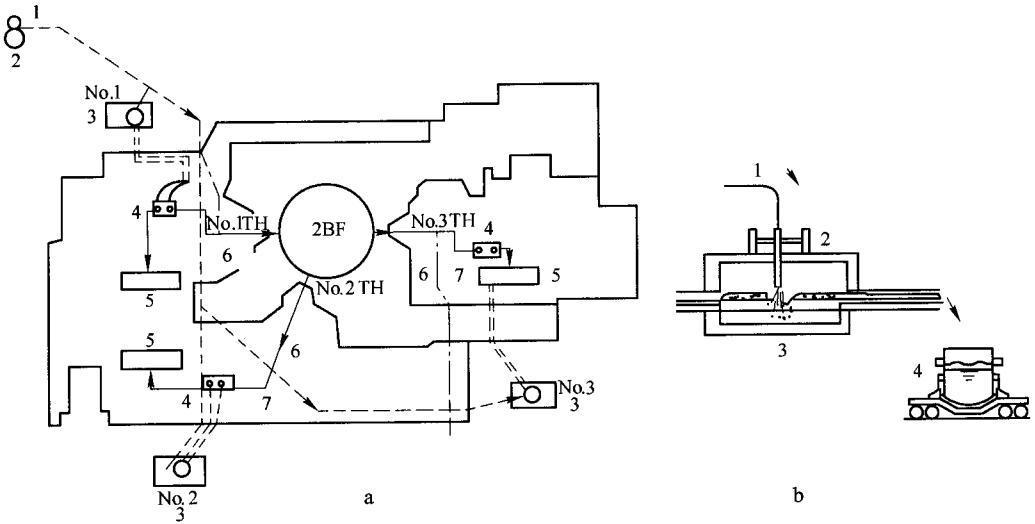


图 7-4-5 投射法布置在铁沟脱硅及反应室结构

a—铁厂平面 :1—辅助贮罐 2—主脱硅剂贮罐 3—喷吹罐 4—铁沟 5—摆动溜嘴 6—主沟 7—渣沟
b—反应室构造 :1—轧钢皮 空气 2—喷枪 3—高炉铁沟 4—铁水罐

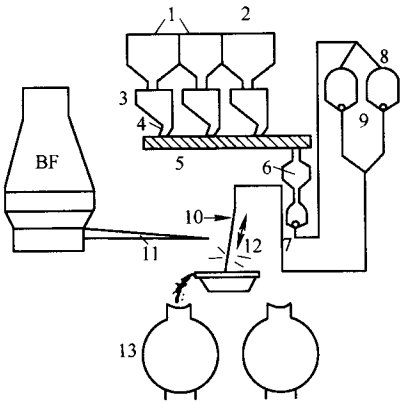


图 7-4-6 投射法布置在摆动溜嘴处脱硅

1—主料仓(烧结尘) 2—辅料仓(CaCO_3) 3—称量罐 4—螺旋给料器;
5—螺旋混料器 6—混料仓 7—输送罐 8—喷粉罐 9—旋转给料器;
10—喷枪 ;11—主沟 ;12—摆动溜嘴 ;13—250t 鱼雷罐车

二、铁水罐脱硅

这种脱硅在专门的预处理站进行 ,采用插入铁水的喷枪脱硅。太钢脱硅剂粒度为

0.370~0.147mm(40~100 目),处理时铁水温度为 1320℃ 左右 ,另加氧枪面吹(距铁水面 200mm 左右),防止温度下降。当气氧/固氧在 0.3~0.5 范围时 ,平均脱硅量达 0.59% ,处理后铁水温度基本不变 ,其气体氧用量(标态)相当于 1.4~2.0m³/t。

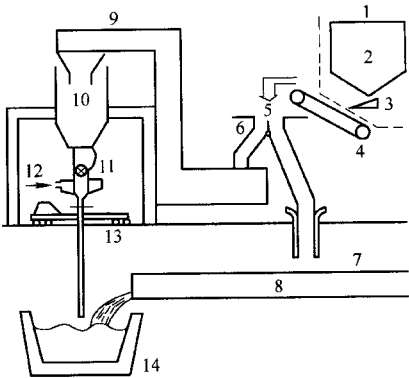


图 7-4-7 上部投加并用投射装置脱硅

- 1—原有设备 2—漏斗 3—进料 4—移动式输送机 5—分配器 6—缓冲器；
7—上部加料管 8—出铁沟 9—斗式输送机 10—漏斗 11—旋转阀 12—风机；
13—狭缝枪 14—倾翻槽

对比高炉炉前脱硅和铁水罐脱硅 ,其利弊是 :前者不需要增加脱硅工序时间 ,热损失少 ,处理后温度较后者高 100℃ 左右 ,但铁水罐装入量减少 10%~30% ,图 7-4-8 为脱硅后 200t 铁水罐的受铁量的变化。

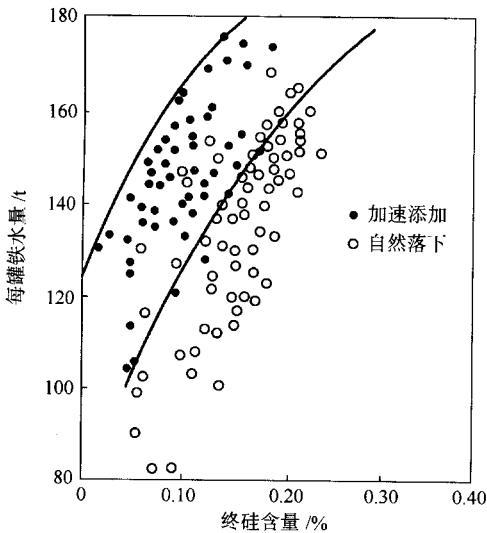


图 7-4-8 脱硅后 200t 铁水罐的受铁量变化

(0.25% < [Si] < 0.35%)

出铁中的硅含量、铁流大小和温度较难控制 ,影响了脱硅效率的稳定性。从设备上 看 ,炉前脱硅随出铁口多少需多点处理 ,设备费用高 ,但不需新建厂房 ,脱硅过程温降不 大。

第二节 脱硅工艺

一、合适的铁水含硅量

硅一直作为转炉炼钢的发热元素 ,但随着转炉容量增加和冶炼技术的进步 ,需要由 硅提供的热量逐渐减少。又因为减少渣量对改善炼钢技术经济指标十分有利 ,所以要求 铁水含硅量逐渐降低 ,尤其是需要预处理脱磷脱硫的铁水。根据不同的冶炼工艺和技术 经济条件 ,大致可分为需要脱磷脱硫预处理的铁水和直接供给转炉炼钢的铁水两种情 况。对需要脱磷脱硫预处理的铁水 ,其硅含量按使用预处理剂的不同分为两种 :如果使 用苏打系处理剂 ,则硅含量要求小于 0.10% ,如果使用石灰系处理剂 ,则硅含量要求小于 0.15%。因为高于此值时 ,处理剂首先用于脱硅而不能脱磷 ,不利于提高脱磷渣碱度(脱 磷渣碱度 $CaO/SiO_2 = 3.5 \sim 6.0$)和脱磷剂利用率。对直接供给转炉炼钢的铁水 ,按不同 钢种(指高温或低温出钢) ,以硅含量 0.50% 为基准 ,改变硅含量对炼钢时铁矿石加入量、 炉渣碱度、渣中 TFe 含量和铁收得率、锰铁合金消耗、渣量和喷溅损失等有影响 ,如图 7-4-9 和图 7-4-10 所示。低温($1610 \pm 10^{\circ}C$)出钢要求的铁水含硅量以 0.20% 时成本 最低 ,大于或小于 0.20% 时都引起成本升高 ;高温($1700 \pm 10^{\circ}C$)出钢要求的铁水含硅量 小于 0.40% ,高于 0.40% 时则引起成本上升。

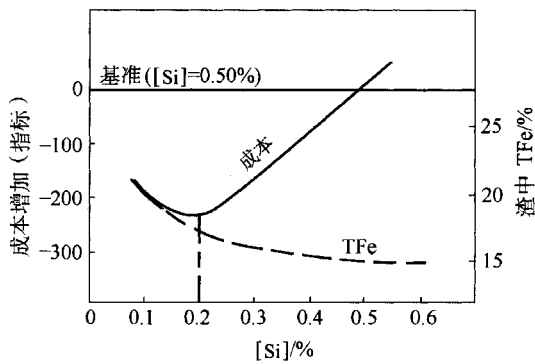


图 7-4-9 低温出钢的最佳含硅量

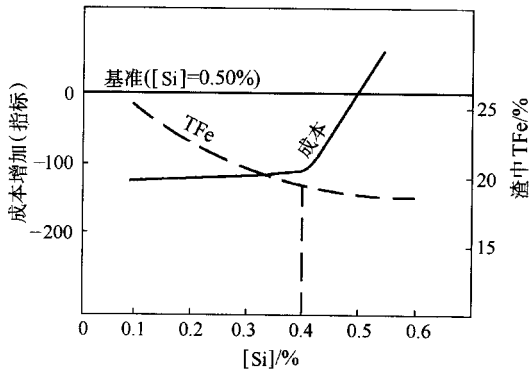


图 7-4-10 高温出钢的最佳含硅量

二、影响脱硅的因素

影响脱硅的因素主要有脱硅剂单耗、原始含硅量、反应界面面积(即铁水与脱硅剂混合状况)、脱硅剂的种类和粒度等。根据炉前脱硅和铁水罐脱硅的生产数据,温度在 1250 ~ 1450℃ 范围内时,温度变化对脱硅没有明显影响。

(一) 脱硅剂单耗和原始含硅量

铁水含硅量大于 0.5% 时,一般加入脱硅剂 10 ~ 30 kg/t,脱硅量约 0.1% ~ 0.4%。脱硅剂单耗增加,脱硅量增加,但增加幅度减小。这与铁水含硅量逐渐降低后脱硅氧效率降低有关,也与硅以外的其他元素(碳、锰等)的氧化有关。脱硅反应与脱硅剂单耗的关系可用下式表示:

$$+ \ln([Si]_0/[Si]) = KW \quad (7-4-1)$$

式中 $[Si]$ ——处理后铁水含硅量;

$[Si]_0$ ——处理前铁水含硅量;

K ——比例常数;

W ——脱硅剂单耗, kg/t。

脱硅氧效率 η_{Si} 可按下式表示:

$$\eta_{Si} = \frac{\text{与硅反应的氧}}{\text{脱硅剂中的全氧}} \times 100\% \quad (7-4-2)$$

实践证实,铁水原始含硅量对脱硅氧效率影响较大。当原始硅含量大于 0.5% 时, η_{Si} 在 70% 以上;当原始含硅量降低时,效率急剧变差。当 $[Si]_0 = 0.2\%$ 时, η_{Si} 约为 40%。

(二) 反应界面面积

反应界面面积反映铁水和脱硅剂的混合情况。出铁速度影响着铁水和脱硅剂的混合。

在 $[Si] = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时,向摆动溜嘴处加入 $25 \sim 30\text{kg/t}$ 的脱硅剂,当铁流速度由 6t/min 提高到 9t/min 脱硅率由 40% 提高到 60% ,如图 7-4-11 所示。铁沟上顶部投射法 (TIM) 的喷枪不插入铁水,能改善脱硅的氧效率,尤其是要求终硅量达到 $0.1\% \sim 0.2\%$ 时,投射法比自然落下法 (SFM) η_{Si} 提高约 10% ,如图 7-4-12 所示。例如,当 $[Si] = 0.55\%$ 时,在投射点后硅立即降至 0.33% ,而自然落下需经 15m 才逐渐降至 0.36% (轧钢皮单耗分别为 20kg/t 和 23kg/t) ,如图 7-4-13 所示。按铁水与脱硅剂并流反应模型解析,投射法使脱硅剂颗粒悬浮于铁水中,比自然落下法的反应面积增加 76 倍,避免了脱硅剂粒子的凝聚现象。降低单枪孔粉流密度能提高反应效率。若用两支相距 3m 的喷枪投射,每支枪单孔粉流密度为 3kg/t 时, 50% 以上的氧可用于脱硅,未反应的氧化铁只占 20% 。若单孔粉流密度达 30kg/t 时,用于脱硅的氧降至 10% ,未反应的氧化铁高达 50% ,并有 30% 的氧用于脱碳。上述两支枪与单枪比较,脱硅氧效率可提高 20% 。还有的将摆动溜嘴处的喷枪装为摆动式的,枪口能沿溜嘴方向在 0.5m 范围摆动,效率还可提高。其装置如图 7-4-14 所示。

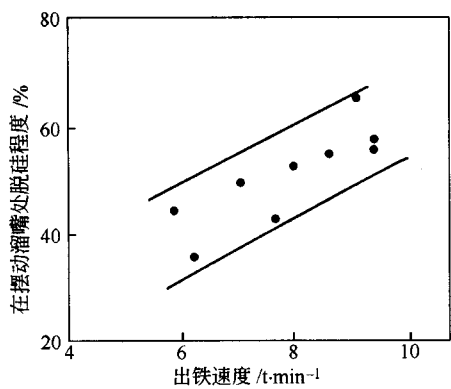


图 7-4-11 摆动溜嘴处脱硅率与出铁速度的关系
(脱硅剂用量 $25 \sim 30\text{kg/t}$ $[Si] 0.4\% \sim 0.6\%$)

(三) 脱硅剂和熔剂

脱硅剂主要是冶金厂各种氧化铁,有轧钢皮、烧结返矿、烧结尘,也可考虑转炉尘和铁精矿粉,其成分如表 7-4-1 所示。有的要加入一定量的熔剂(石灰、萤石),用于改进脱硅渣性能,提高流动性,减少泡沫渣。其配比如表 7-4-2 所示。

脱硅剂粒度用于铁水罐脱硅时较小($0.0542 \sim 0.147\text{mm}$),用于出铁厂脱硅时小于 5mm 。比较表 7-4-2 中所列各种脱硅剂的脱硅能力,在相同单耗($20 \sim 25\text{kg}$)和 $[Si] = 0.58\% \sim 0.90\%$,用于出铁场脱硅时,以轧钢皮最强,其脱硅率 $([Si] - [Si'])/[Si]$ 比烧

结返矿高 6.4% ,扣除轧钢皮含氧量高 2% 以外 ,还高 2% 左右。当相同单耗为 5 ~ 25kg/t 和 $[\text{Si}] = 0.2\% \sim 0.3\%$ 时 ,用轧钢皮处理后的含硅量比烧结尘约低 0.05% ,如图 7-4-15 所示。使用不同粒度的烧结矿粉(< 1mm , < 5mm) ,小粒度的脱硅量约高 0.03% ~ 0.05% (单耗为 5 ~ 20kg/t) ,如图 7-4-16 所示。顶喷法试验不同粒度时(平均粒径 0.08 ~ 1.5mm) ,粒度小于 0.8mm 时脱硅的氧效率相同。脱硅剂中添加熔剂(石灰、石灰石、萤石等) 有利于提高氧效率 ,降低渣中氧化铁和氧化锰的含量。当渣碱度 CaO/SiO_2 为 0.8 ~ 1.0 时 ,氧效率可提高到 60% ~ 70% ,如图 7-4-17、图 7-4-18 和图 7-4-19 所示 ,渣中氧化铁小于 7% ~ 10% ,氧化锰 15% 左右。其原因是碱度提高 ,渣中氧化铁、氧化锰的活度系数增加 ,二氧化硅的活度系数降低。因此 ,作为 CaO 来源的生石灰、转炉尘、预处理脱磷渣等 ,都可作为脱硅剂中熔剂的添加剂。实验室试验了 90% 轧钢皮 + 10% CaO、85% 烧结矿粉 + 15% CaO、100% 转炉尘 3 种脱硅剂 ,如图 7-4-20 所示。脱硅剂单耗为 21kg/t ,同时吹氧(标态) $2.0\text{m}^3/\text{t}$ 或 $3.0\text{m}^3/\text{t}$,脱硅效果以转炉尘最好 ,轧钢皮次之 ,烧结矿粉第三。脱硅量达 0.31% ~ 0.48% ,其中转炉尘高于其他两种 0.05% ~ 0.09%。吹氧能显著提高脱硅速度 ,10min 以内十分明显 ,15min 左右脱硅反应基本结束(即渣铁分离 ,表面平静) ,停止吹氧 5min 后 ,渣中铁含量迅速下降至 10% ~ 14%。

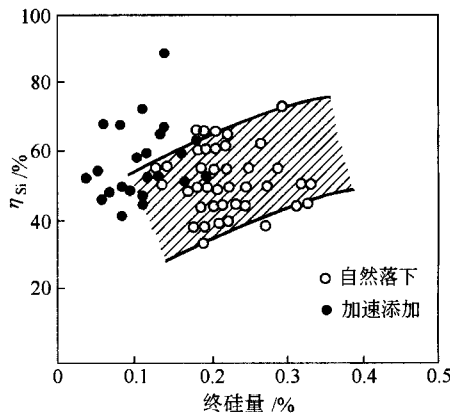


图 7-4-12 不同加入法时脱硅氧效率与终硅量的关系

三、脱硅渣起泡

炉前脱硅和铁水罐脱硅均出现较严重的起泡问题。1kg 铁水的实验室脱硅试验发现 ,起泡高度约为铁水高度的一倍 ,工业试验达到 0.3 ~ 1.2m(平均 0.77m)。

脱硅渣起泡有两方面的原因 :一是脱硅过程中的碳氧化 ,形成 CO 气体 ;二是气体在

脱硅渣中释放不及时。渣中氧化铁和生铁中的碳反应是产生气体的来源 ,由计算可以得到下列反应：

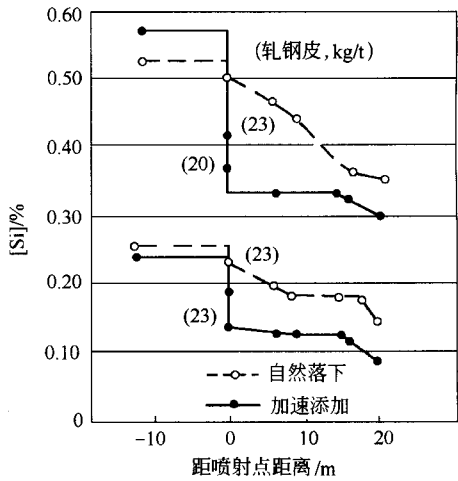


图 7-4-13 不同加入法距投射点铁水成分的变化

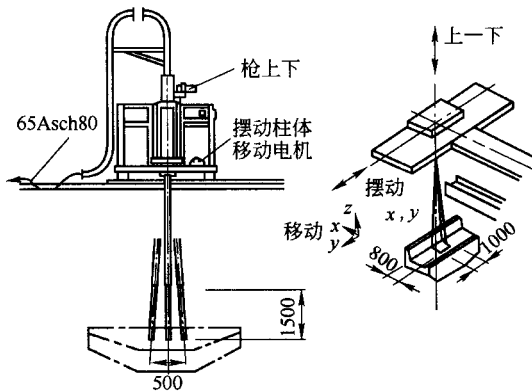


图 7-4-14 摆动枪驱动装置

表 7-4-1 脱硅剂成分(%)

成分	TFe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	O
轧钢皮	69.2	0.03	1.75	0.18		23.18
烧结返矿	52.3	12.0	7.60	1.88	1.71	20.98
烧结尘	47.5	13.25	6.80	3.20	1.34	20.00

成分	TFe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	O
转炉尘	53.6	12.80	2.20			22.83
铁精矿粉	66.4	0.54	9.58			25.71

表 7-4-2 脱硅剂与熔剂配比(%)

配比	轧钢皮	烧结矿粉	石灰	萤石
太钢二钢	90(<0.147mm 100 目)		10(<0.542mm 30 目)	
日本钢管福山	70 ~ 100		0 ~ 20	
日本川崎水岛			75	

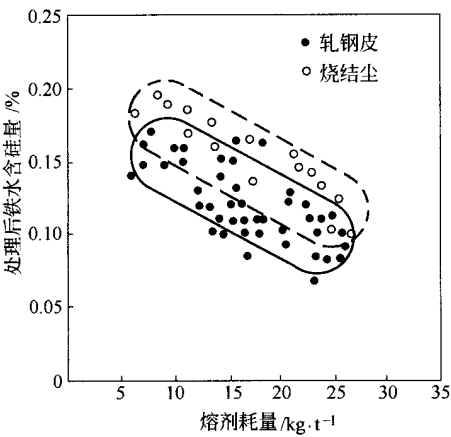


图 7-4-15 轧钢皮与烧结尘脱硅能力比较
(0.20% <[Si] < 0.30%)

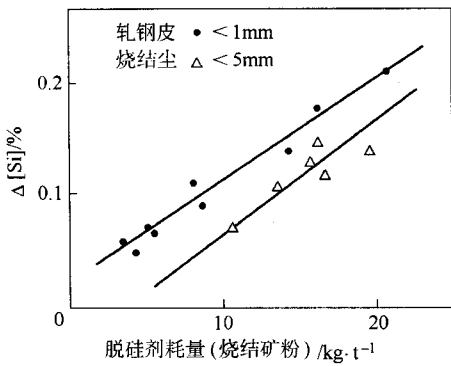


图 7-4-16 脱硅剂粒度与脱硅量的关系

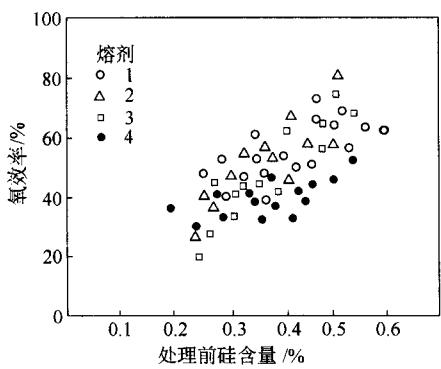


图 7-4-17 脱硅剂、粒度与氧效率的关系

图例	熔剂	粒度(平均)/mm
1	轧钢皮 + CaCO_3	0.8
2	除尘粉	0.08
3	铁矿粉	0.7
4	烧结矿粉	1.5

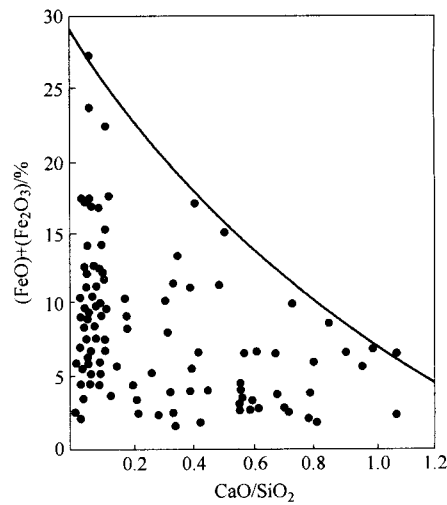


图 7-4-18 脱硅渣碱度与渣中氧化铁的关系

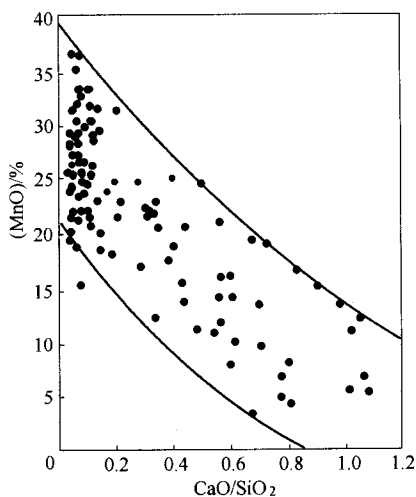


图 7-4-19 脱硅渣碱度与渣中氧化锰的关系

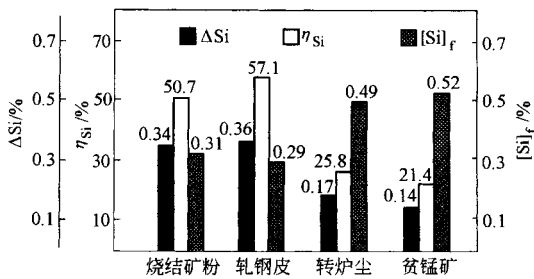
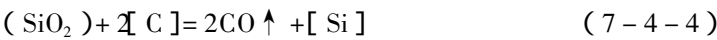


图 7-4-20 不同脱硅剂的脱硅效果
(铁水温度 :1400℃ ,脱硅剂用量 20~35kg/t)



$$\Delta G \text{ (J/mol)} = 103664 - 94.67 T$$

在脱硅条件下碳氧化反应式 7-4-3 能够同时进行。式 7-4-3 与硅氧化反应组合得硅—碳耦合反应为：



$$\Delta G \text{ (J/mol)} = 547998 - 30878 T$$

在非标准状态下：

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln p_{\text{CO}} a_{[\text{Si}]} / (a_{[\text{C}]} a_{(\text{SiO}_2)}) \tag{7-4-5}$$

按铁水成分 C4.2% Si0.78% Mn0.21% P0.073% S0.025% ,碳的活度系数和温度的关系为：

$$\begin{aligned}\lg f_c &= 1873 / T (e_c [\% \text{C}] + e_{\text{Si}} [\% \text{Si}] \\ &\quad + e_{\text{Mn}} [\% \text{Mn}] + e_{\text{P}} [\% \text{P}] + e_{\text{S}} [\% \text{S}]) \\ &= 1873 / T (0.14 \times 4.2 + 0.08 \times 0.78 - 0.012 \\ &\quad \times 0.21 + 0.051 \times 0.073 + 0.046 \times 0.025) \\ &= 1222.6 / T\end{aligned}$$

根据铁水脱硅条件,取 $p_{\text{CO}} = 20 \text{ kPa}$, a_{SiO_2} 按脱硅渣成分计算得 $a_{\text{SiO}_2} = 0.6922$,代入式 7-4-5 得出:

$$\Delta G = 531742 - 358.35 T \quad (7-4-6)$$

为防止碳氧化(即 $\Delta G > 0$),铁水温度至少要低于 1210°C ,目前铁水脱硅均高于这一温度,因此,脱硅过程中碳氧化是不可避免的。用工业纯铁配制相当的含硅量后进行脱硅试验证实,脱硅过程未发现起泡现象,即无碳含硅铁脱硅不起泡。

由此可见,渣起泡在于脱硅过程中碳的氧化。这种碳氧化现象虽不严重(脱碳小于 0.3%),不致影响炼钢过程,但其发气体积很大(约为铁水体积近百倍),因此,脱硅过程中保碳是很重要的。采取办法就是控制较低温度、适当提高渣碱度、加强搅拌和吹氮气促进气体溢出和破泡等。

渣起泡现象曾在转炉溢渣问题上研究过,得出气泡的崩毁时间常数 τ 和起泡高度 ΔH 与气泡生成速度 Q 之间有以下关系:

$$\tau = \Delta H / Q \quad (7-4-7)$$

若气体生成速度 Q 一定,起泡高度与 τ 成正比,这意味着渣的起泡性与气泡寿命有关。渣的表面张力越小,气泡寿命就越长。因此,含 P_2O_5 、 CaF_2 、 Na_2O 的渣,表面张力小,易于起泡。渣成分中 O/Si 比小即碱度低,容易起泡。可采取中间排渣减少渣量、造较高 FeO 含量的渣增加表面张力、吹入氮气破泡、投入无水炮泥压渣和控制脱硅剂加入速度等办法加以控制。

四、炉前脱硅的过程控制

为了供给炼钢成分稳定的低硅铁水,必须根据出铁时的硅含量和出铁速度确定和控制脱硅剂的输送速度和添加量。典型的控制系统如图 7-4-21 所示。它包括高炉热控制模型预报铁水含硅量以及出铁期间硅含量在线快速分析,再根据炼钢要求的含硅量控制脱硅剂的加入量。硅含量的快速分析已开发有多种,生产已采用的有两种:一种为取圆片状($\phi 20 \text{ mm}$)试样夹在两电极间,其间温差 200°C ,电极间热电势随硅含量增加而上升。测量范围是 $0 \sim 1.5\% \text{ Si}$,精度 $\sigma = 0.02\%$ 。插入试样至显示结果需 50 s ,为日本住友

鹿岛厂采用。另一种为固体电解质定硅探头,其结构为 $\text{Cr} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 // \text{ZrO}_2 \cdot \text{MoO} // \text{SiO}_2 / \text{Si}$ (铁中),用钼丝作高温导线,如图 7-4-22 和 7-4-23 所示。

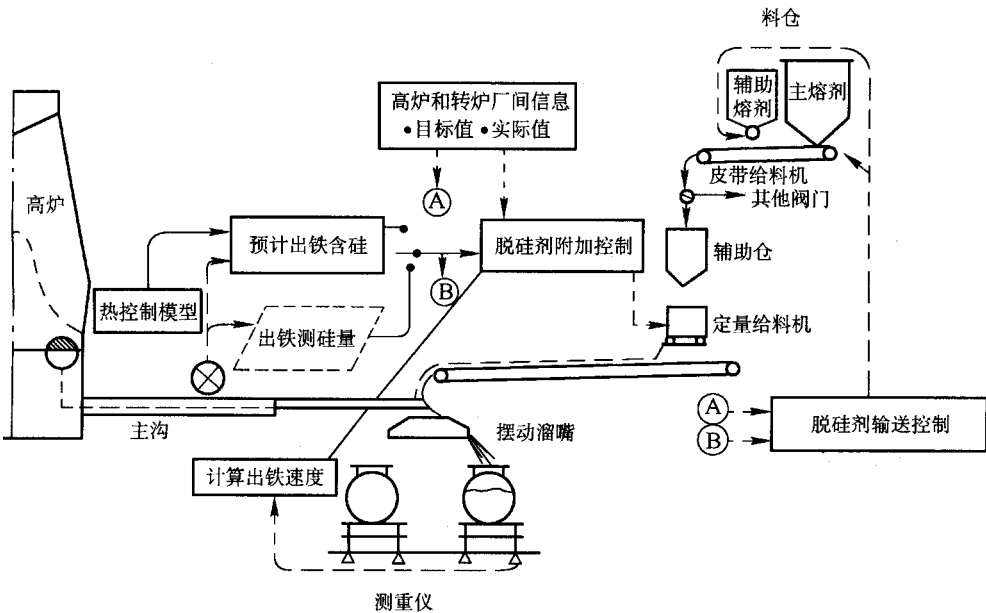


图 7-4-21 脱硅控制系统图

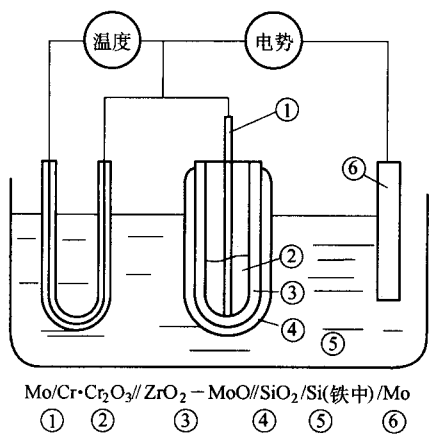


图 7-4-22 硅分析器结构

由固体电解质外套石英管 SiO_2 与铁水中硅平衡时,有如下关系:

$$[\text{Si}] + 2[\text{O}] = (\text{SiO}_2) \tag{7-4-8}$$

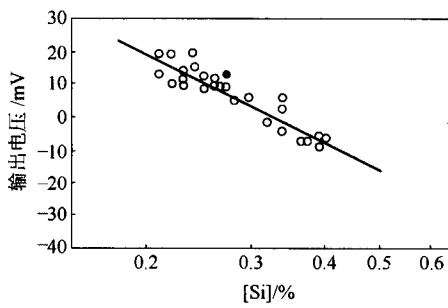


图 7-4-23 硅分析器输出电势与硅含量的关系

从测定固体电解质/铁水/石英套管间氧的活度得出相应的含硅量,即硅含量与输出电势(毫伏值)的关系。用此方法控制调节脱硅剂加入量的效果是:目标硅含量为 0.05%~0.12%时,命中率由 46%提高至 77%,脱硅剂消耗减少 30%,如图 7-4-24 所示。

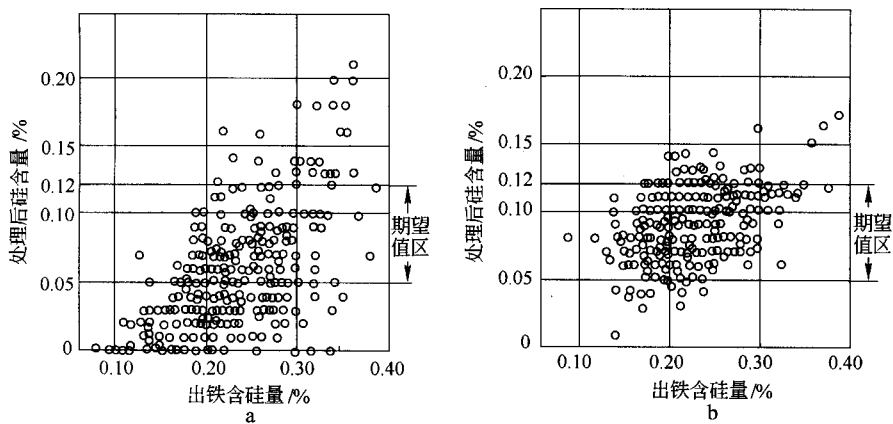


图 7-4-24 有无硅分析器时目标硅含量控制精度比较

- a—无硅探头(1987 年 4 月 11 日~4 月 20 日):处理后硅含量 $\bar{x} = 0.06\%$,
 $\sigma = 0.04\%$,命中率(0.05%~0.12% Si)=46%
- b—有硅探头(1987 年 9 月 11 日~9 月 20 日):处理后硅含量 $\bar{x} = 0.10\%$,
 $\sigma = 0.03\%$,命中率(0.05%~0.12% Si)=77%

五、脱硅用耐火材料

脱硅渣与高炉渣比较,前者氧化铁含量高,原来用 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiC} - \text{C}$ 系的铁沟耐火材料在渣线部分侵蚀严重。因此,在渣线部分改变材质,在脱硅剂加入部分扩大铁水沟尺寸,铁沟侧壁埋设强制风冷管等”。对高氧化铁的脱硅渣,由于 SiC、C 被氧化而受到侵蚀,可

用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 系耐火材料代替 ,耐侵蚀性主要取决于成渣反应生成液相量的大小。试验证实 ,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1.0$ 时 ,液相的生成受到抑制 ,原因在于脱硅渣中 FeO 与 $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成高熔点矿物。

第五章 铁水预处理设备

第一节 铁水脱硅设备

铁水中含硅量降低可以减少渣量 ,从而减少渣料及热能消耗 ,不过铁水预处理过程中的脱硅主要是为了脱除铁水中的磷。一般脱硅都设在高炉出铁时进行 ,不另建单独的脱硅站。高炉炉前脱硅主要有两种形式 :第一种是向出铁沟或摆动溜槽内投撒脱硅剂 ,由于此种方法脱硅效率低、效果不理想 ,一般很少采用 ;第二种是向出铁沟中喷射脱硅剂 ,脱硅效果比较好。这里以宝钢为例 ,介绍第二种脱硅方法的主要设备及其参数。

宝钢出铁厂脱硅布置如图 7-5-1 所示 ,脱硅流程如图 7-5-2 所示。

一、贮粉仓

炉前脱硅贮粉仓主要用于炉前脱硅用粉剂的储存 ,南北出铁场各设 1 组 ,每组设有 2 个贮粉仓 ,共计 4 个贮粉仓。

贮粉仓的参数为 :

数量	1 套(共 4 个 ,2、2 对称)
有效容积	30m ³ /罐
形式	下部为圆锥形的筒 ,带法兰
外形尺寸	φ360mm×(3000 + 2425)mm
设计压力	0.02MPa

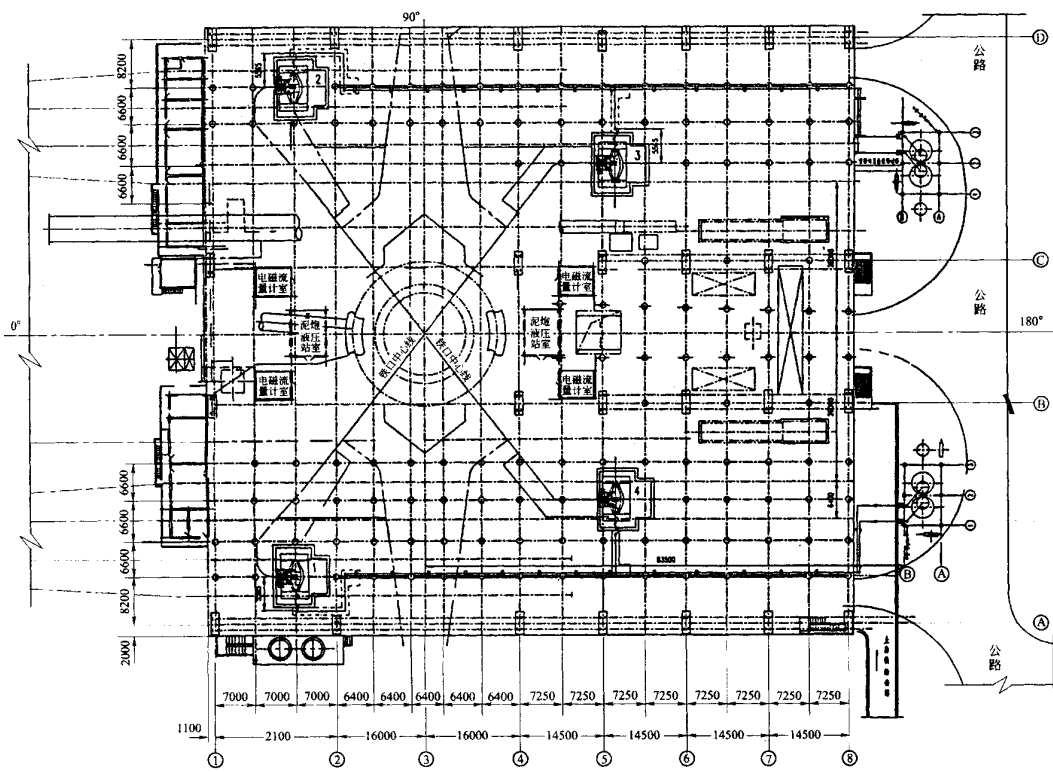


图 7-5-1 宝钢出铁厂脱硅布置图

卸料速度 1t/min
设计温度 $-20^{\circ}\text{C} < t < 150^{\circ}\text{C}$

贮粉仓结构说明：

(底部安装流态化设备) 流化工作条件：
仓内气体压力最大 0.02MPa 流化气吹入流量最大 $1.5\text{m}^3/\text{min}$ (标态)
流化气吹入压力最大 0.2MPa

- 装料口 N-1/DN100 ,1 个
- 布袋除尘孔 N-2/DN1200 ,1 个
- 放散孔 N-3/DN65 3 个
- 安全阀孔 N-4/DN80 ,1 个
- 连通管留孔 N-5/DN250 ,1 个

预留孔	N - 6/DN100 ,1 个
你孔	M - 1/DN600 ,1 个(加盖)
罐体使用材料	Q235 钢板

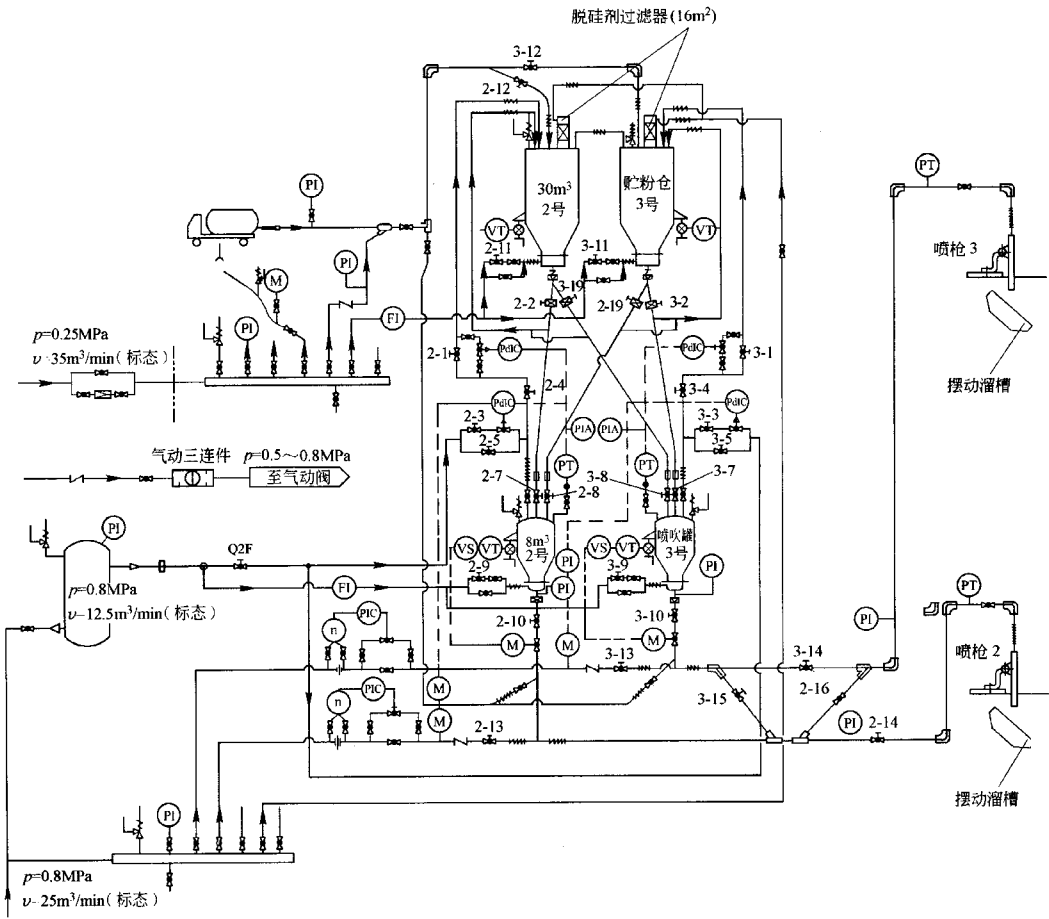


图 7-5-2 宝钢出铁厂脱硅流程图

二、喷吹罐

喷吹罐主要用于脱硅剂烧结粉矿的储存喷吹,通过其下部的喷吹罐流化阀 (DN400),使脱硅剂均匀地输送到下面管道内。南北出铁场各设 1 组,每组系统有 2 个喷吹罐。

喷吹罐的参数为：

数量	4 个
有效容积	10m ³
形式	下部为圆锥形的筒 ,带法兰
外形尺寸	φ2200mm×(2000 + 1403)mm
设计压力	1.0MPa
最大工作压力	0.8MPa
装料速度	1.0t/min
使用温度	- 20℃ < t < 150℃
底部卸料段直径	φ400mm

喷吹罐结构说明：

(底部卸料段法兰通径 DN400)	流化工作条件： 仓内气体压力最大 0.8MPa 流化气吹入 流量最大 1.5m ³ /min(标态) 流化气吹入压力最大 0.75MPa
装料口	a/DN150 ,2 个
吹扫口	b/DN100 ,1 个
充压口	c/DN80 ,1 个
放散孔	d/DN65 ,1 个
安全阀孔	g/DN50 ,1 个
仪表测量孔	f/DN50 ,1 个
预留孔	e/DN50 ,1 个
人孔	h/DN500 ,1 个(配人孔盖) N - 8/DN50 ,1 个
本体使用材料	Q235 及 16MnR

三、贮粉仓卸料溜管

贮粉仓卸料溜管主要用于铁水脱硅用脱硅剂(烧结尘)从贮粉仓卸入喷吹罐。

贮粉仓卸料溜管的参数为：

数量	2 套(1 座高炉用量)
溜管外形尺寸	φ165mm×5.5mm ,高 6447mm
设计压力	0.02MPa

四、喷枪传动设备

喷枪传动设备结构如图 7-5-3 所示。喷枪传动设备用于固定喷枪并操纵喷枪实现升降、摆动及回转动作。

喷枪动作参数为：

升降 行程 3400mm 4060mm 各两台 ,速度均约为 5m/min

摆动 行程 8° ,速度约为 0.3°/s (做调整用)

回转 行程 $\pm 250\text{mm}$,速度约为 3.0m/min

设备实现以上 3 个动作时 ,须能随时停在其行程范围内的任一位置。在上述各行程的起始点及终止点各设一个限位开关。

升降、摆动和回转动作均设行程指示器 ,应使摆动溜嘴操作处和脱硅操作箱处人员均看见行程指示器面板。在设备上设吊耳 ,并附带吊具。本设备包括喷枪杆及喷枪头。

每台设备有 3 台电机(升降、摆动和回转机构各有 1 台) ,总功率约为 10kW , 380VAC。

五、摆动溜嘴除尘罩

摆动溜嘴除尘罩的用途有：

(1) 做防尘罩及隔热用 ,保证摆动溜嘴处能有良好的除尘效果 ,阻止摆动溜嘴中铁水的辐射热向出铁场上扩散 ,改善操作人员及喷枪传动设备的工作条件。

(2) 除尘罩中块作为喷枪传动设备的基础 ,承受喷枪传动设备的负荷。在进行脱硅操作时 ,3 块除尘罩上均有人在上面操作。

(3) 除尘罩上开有窥视孔 ,操作人员借此观察铁水流入鱼雷罐的情况 ;中块还开有喷枪伸入孔。

摆动溜嘴除尘罩结构说明：

(1) 该设备主要是钢板焊接件 ,下表面要焊上固定耐火隔热浇注料的锚固钉。此耐火隔热浇注料不包括在除尘罩设备内。

(2) 4 组除尘罩的外形尺寸基本相同 ,其差别在于用来支承喷枪传动设备(重量为 60kN)支腿的基础支墩略有不同 ,支墩与除尘罩本体间用可拆连接。

(3) 除尘罩上开孔处均需设可方便取走的盖 ,要求盖的顶面与除尘罩顶面平齐。

(4) 除尘罩隔热层包括下侧 100mm 厚耐火隔热材料和上面设厚约 100mm 的耐火纤维毯隔热夹层。此耐火纤维隔热毯包括在除尘罩设备内。

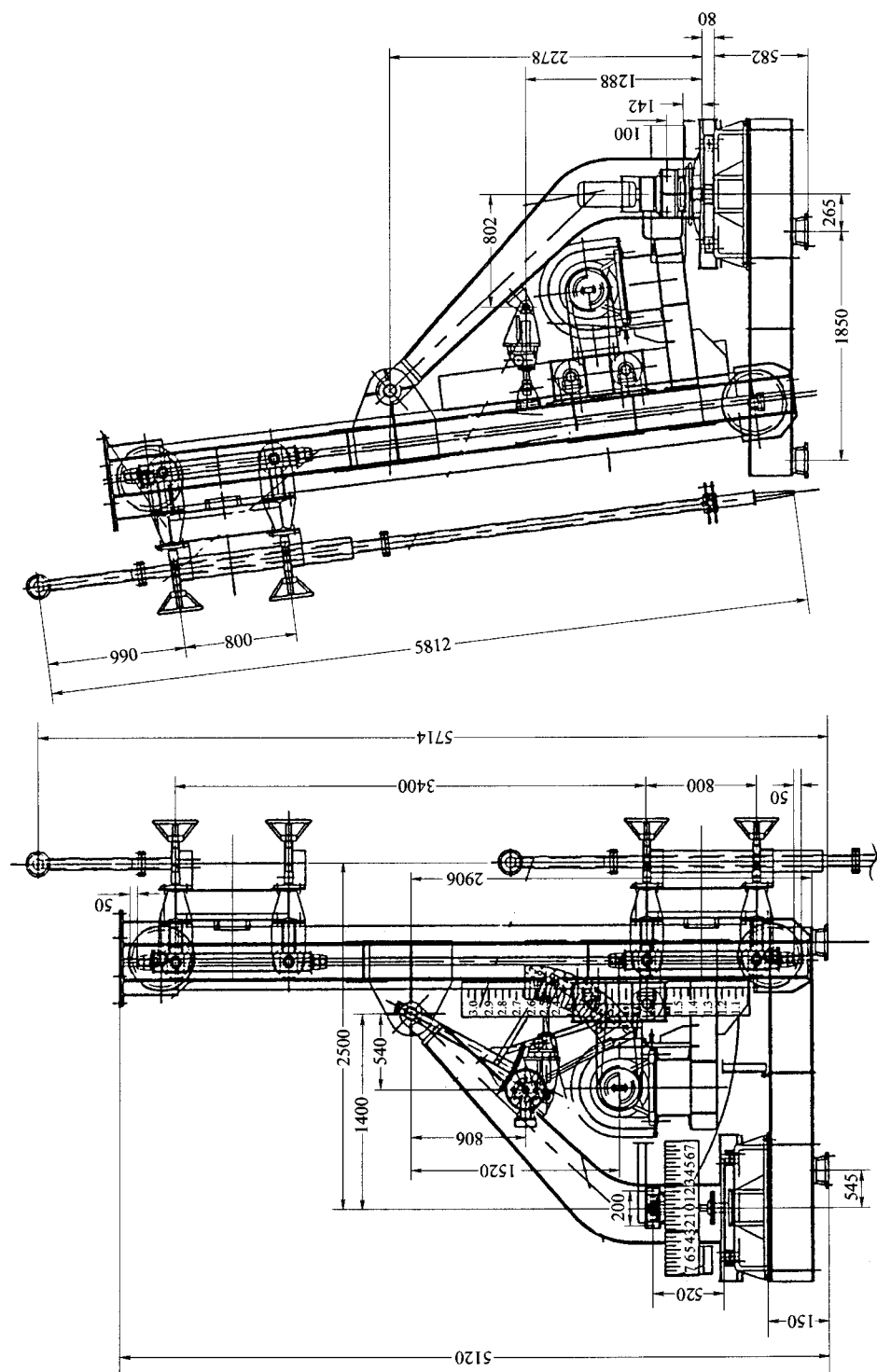


图 7-5-3 喷枪传动设备结构

除尘罩本体设沉头式吊环,吊环按除尘罩与喷枪传动设备一起吊运考虑。

第二节 铁水脱硫设备

在低氧势的铁水中进行脱硫能得到事半功倍的效果,所以现代化的大型钢铁企业普遍设有铁水脱硫设施。目前钢铁生产中采用的铁水脱硫设备主要有:

(1)KR(搅拌法)铁水脱硫设备;

(2)钙基、镁基喷吹脱硫设备等。

由于喷吹脱硫设备简单、建设和运行费用低,所以新建的铁水脱硫设备多以喷吹的形式为主。

一、KR(搅拌法)脱硫的主要设备性能和参数

武钢二炼钢的KR脱硫设备于1979年正式投产。年处理能力53.5万t/a。铁水由炼铁厂高炉用敞口式铁水罐运至KR脱硫间,铁水脱硫前的硫含量为0.036%~0.060%,脱硫后可降至0.005%以下,铁水温度不低于1300℃。脱硫剂使用粉状碳化钙(CaC_2),载气为氮气,处理周期平均为42min。

KR脱硫装置主要由搅拌器、搅拌器旋转和提升装置、搅拌器更换装置及干燥炉、烟罩及升降装置、碳化钙输送給料装置、扒渣机、铁水罐倾翻装置、除尘装置等组成。KR脱硫装置如图7-5-4所示,碳化钙输运系统如图7-5-5所示。

(一)搅拌器

搅拌器浸入铁水内用于搅拌铁水,其结构如图7-5-6所示。它衬有浇注耐火材料。1套装置共设有6个搅拌器,其中1个作为正常使用。而其余5个备用和干燥。其结构特点是有1个带十字形叶片的轴,外部浇注1层耐火材料。包括轴在内全高为2800mm,中间轴 $\phi 220\text{mm}$,内孔 $\phi 90\text{mm}$,套有内装 $\phi 60\text{mm}$ 压缩空气冷却用钢管。叶片钢板厚100mm。为了将浇注耐火材料与叶片和轴粘牢。在轴上和叶片上焊有 $\phi 5\text{mm}$ 长为50、70和100mm的“Y”形销钉共计300个。包括耐火材料在内重约为3000kg。搅拌器与主轴用法兰盘连接和承受并传递搅拌力矩。

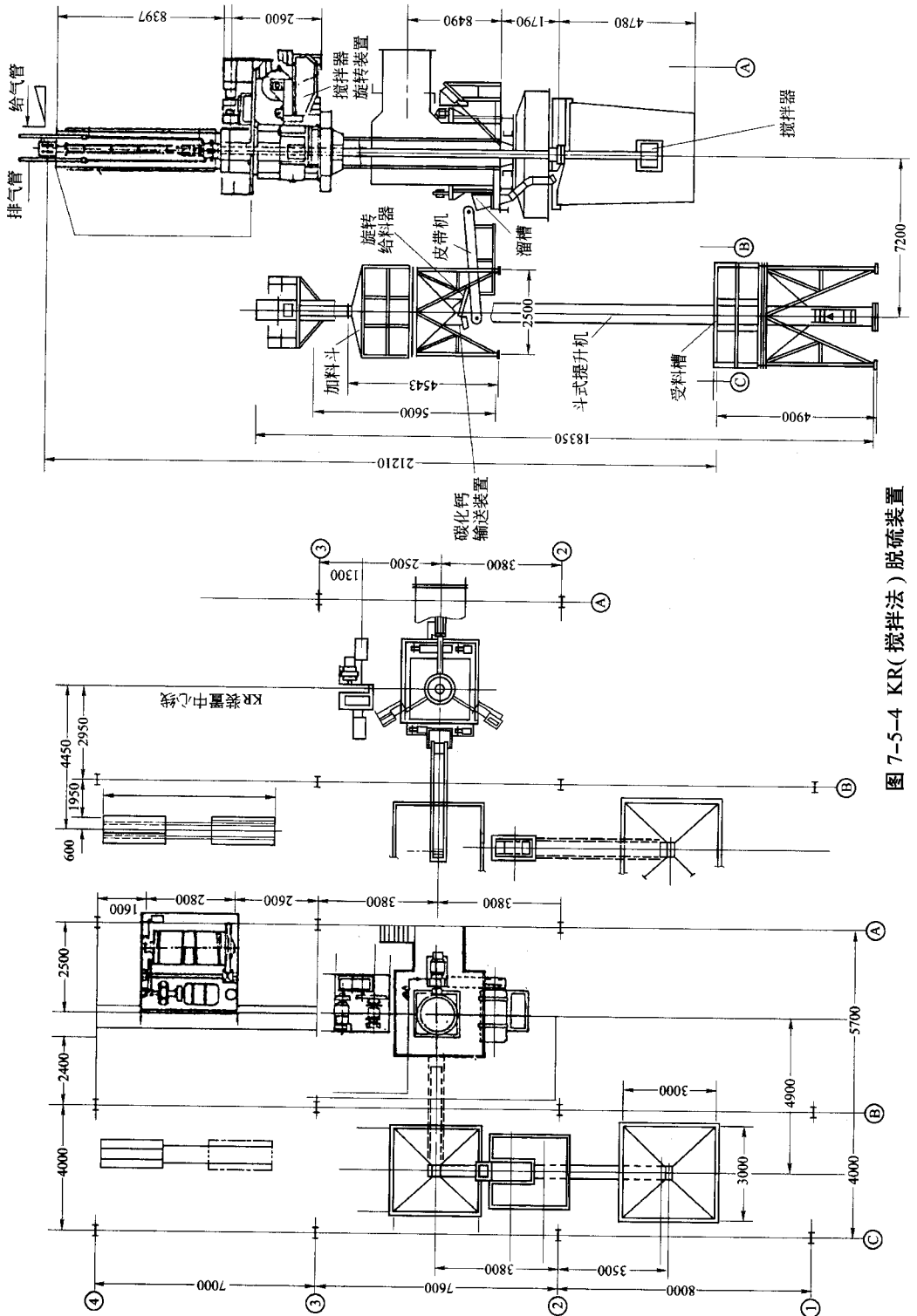


图 7-5-4 KR(搅拌法) 脱硫装置

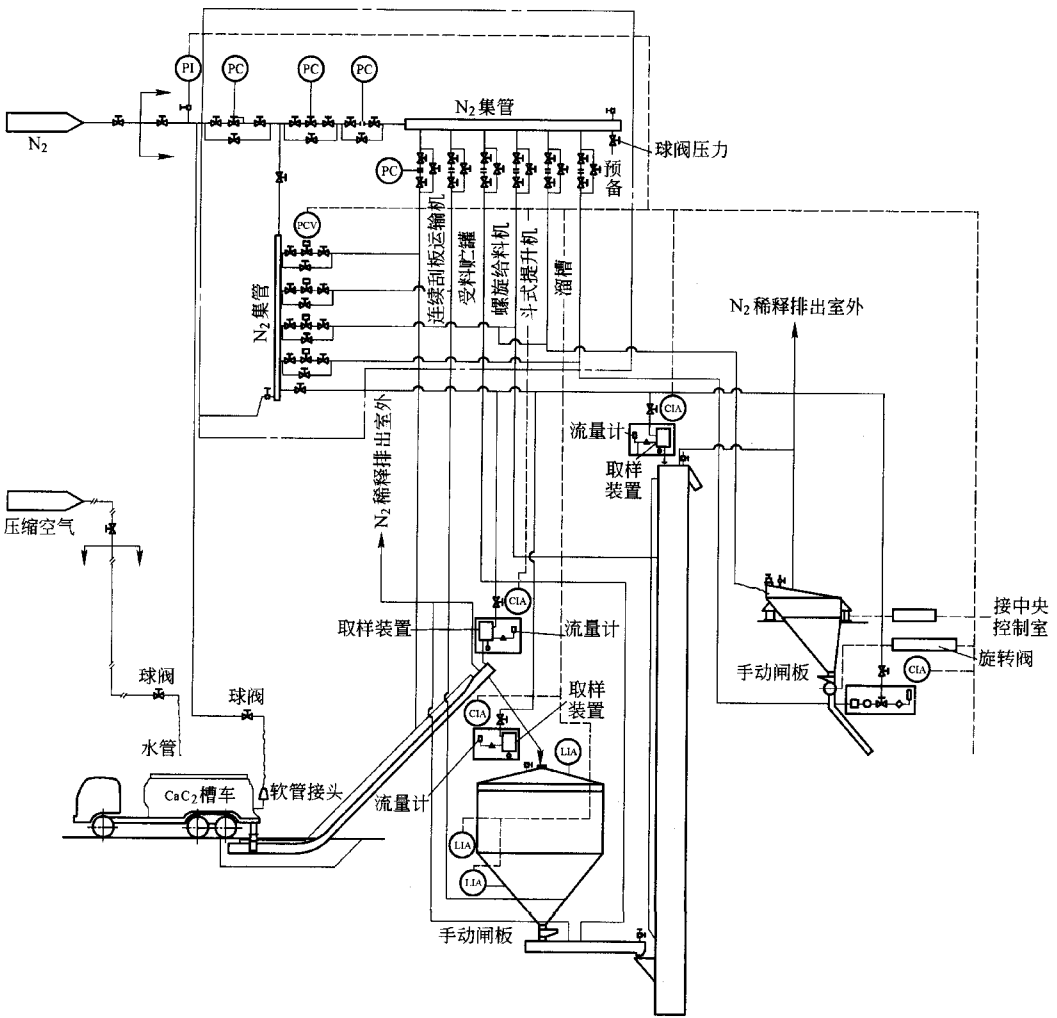


图 7-5-5 碳化钙运输系统图

(二) 搅拌器旋转和液压缸用液压动力装置

搅拌器旋转和液压缸用液压动力装置主要包括液压电机、液压缸和油泵装置。液压电机用于搅拌器的旋转。并安装在搅拌器小车上。液压电机传动适于低转速大扭矩的要求。并可无级调速。液压缸用于提升罩裙、夹紧搅拌器小车和提升搅拌器小车滑轨。

(1) 液压马达的参数为：

形式	径向柱塞油电机
电机数量	1 台
最大液压力	21MPa(表压)

转速	90 ~ 120r/min
最大扭矩	8200N·m
排油量	3087mL/r

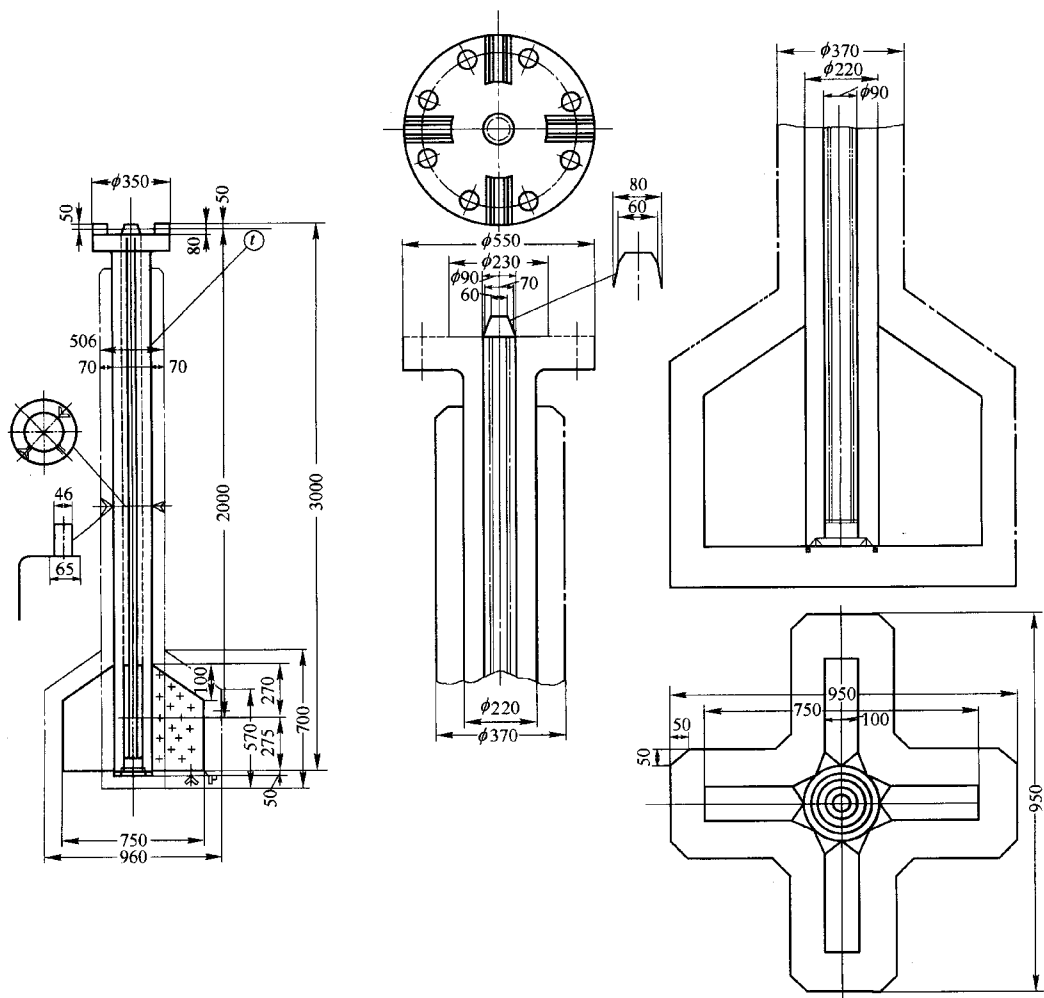


图 7-5-6 搅拌器结构

附属设备 转速传感器和挠性软管

(2) 液压电机主泵装置的参数为：

形式 变量轴向柱塞泵

泵的数量 2(1 台备用)

最大液压力 21MPa

转速	970r/min
电机容量	132kW
最大输出量	481mL/r
附属设备	马达转速控制装置

(3) 烟罩裙升降液压缸的参数为：

液压缸数量	4 个
烟罩裙(升降)	4 套
液压缸直径	$\phi 100\text{mm}$
行程	1350mm
最大液压力	14MPa(表压)

(4) 搅拌器小车夹紧用液压缸的参数为：

液压缸数量	2 套
液压缸直径	$\phi 100\text{mm}$
行程	70mm
最大液压力	14MPa(表压)

(5) 轨道板提升用液压缸的参数为：

液压缸数量	1 套
液压缸直径	$\phi 125\text{mm}$
行程	650mm
最大液压力	14MPa(表压)

(6) 液压缸副泵装置的参数为：

形式	叶片泵
泵的数量	1 台
最大液压力	14MPa(表压)
电机容量	22kW 60P 330V 50Hz

附属设备 液压油贮罐(容量 800L)、蓄势器(事故用,它可以借液压缸的行程使罩裙提升机夹紧搅拌器小车至任意行程)

(7) 液压油为防火磷酸脂。

(三) 搅拌器小车

1. 带轴承和联轴节的主轴

主轴和搅拌器借联轴节连接,并将搅动力传递至搅拌器。

用于冷却的压缩空气自气源经软管和管道并通过旋转活接头送至主轴的空气冷却孔。

搅拌器结构返回的压缩空气同样经过旋转活接头排至外面。冷却空气连续供应直到脱硫作业结束。

搅拌器旋转驱动装置如图 7-5-7 所示。

2. 带导辊的搅拌器小车

搅拌器小车是用型钢和钢板制作,是带有导辊的全焊接结构。

主轴通过轴承和搅拌器小车相连接,而搅拌器通过联轴节连接在主轴的端部。

在操作时,小车的位置根据搅拌器和铁水罐内铁水液面之间的关系而定。

3. 搅拌器小车夹紧装置

搅拌器小车夹紧装置用于防止在搅动过程中搅拌器和小车产生不规则的震动。它借 4 个液压缸操作。

4. 人工润滑系统

人工加油泵安装在搅拌器小车上,以润滑支承主轴的轴承、夹紧装置、旋转活接头、导辊、小车上的钢绳滑轮等。

(四) 搅拌器提升装置

搅拌器提升装置用于当铁水罐运入或运出 KR 操作位置时以及当更换搅拌器时提升搅拌器和小车。搅拌器提升装置如图 7-5-8 所示。

搅拌器提升装置用电动提升卷扬机传动,提升装置参数为:

提升速度 高速 6m/min, 低速 3m/min

升降行程 最大 8000mm(常用 7900mm)

电机容量 22kW/11kW, AC380V, 50Hz

主减速机速比 1:87.645

事故用升降速度 0.62m/min

事故用电机 2.2kW, DC220V, 1150r/min

事故用减速机速比 1:11

人工加油泵安装在框架上,以润滑卷扬机滚筒和钢绳滑轮的轴承。

(五) 搅拌器更换装置

搅拌器更换装置设计为上修方式,可以做到快速更换搅拌器装置。它包括 2 台搅拌器小车、小车轨道和轨道提升装置、搅拌器运送吊车和搅拌器吊杆和更换搅拌器专用工具、2 台手推搅拌器小车(新的和磨损的搅拌器小车)。

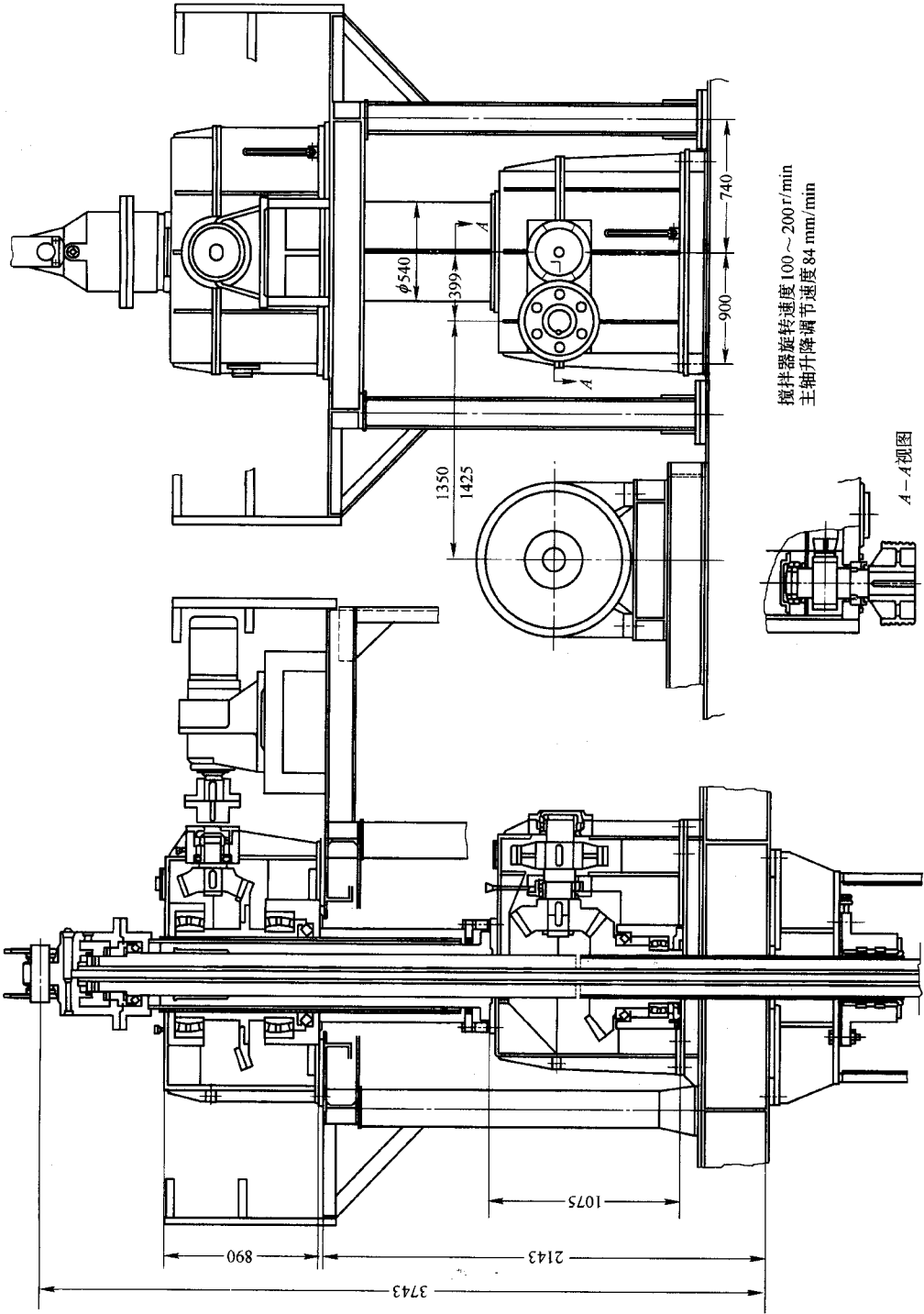


图 7-5-7 搅拌器旋转驱动装置

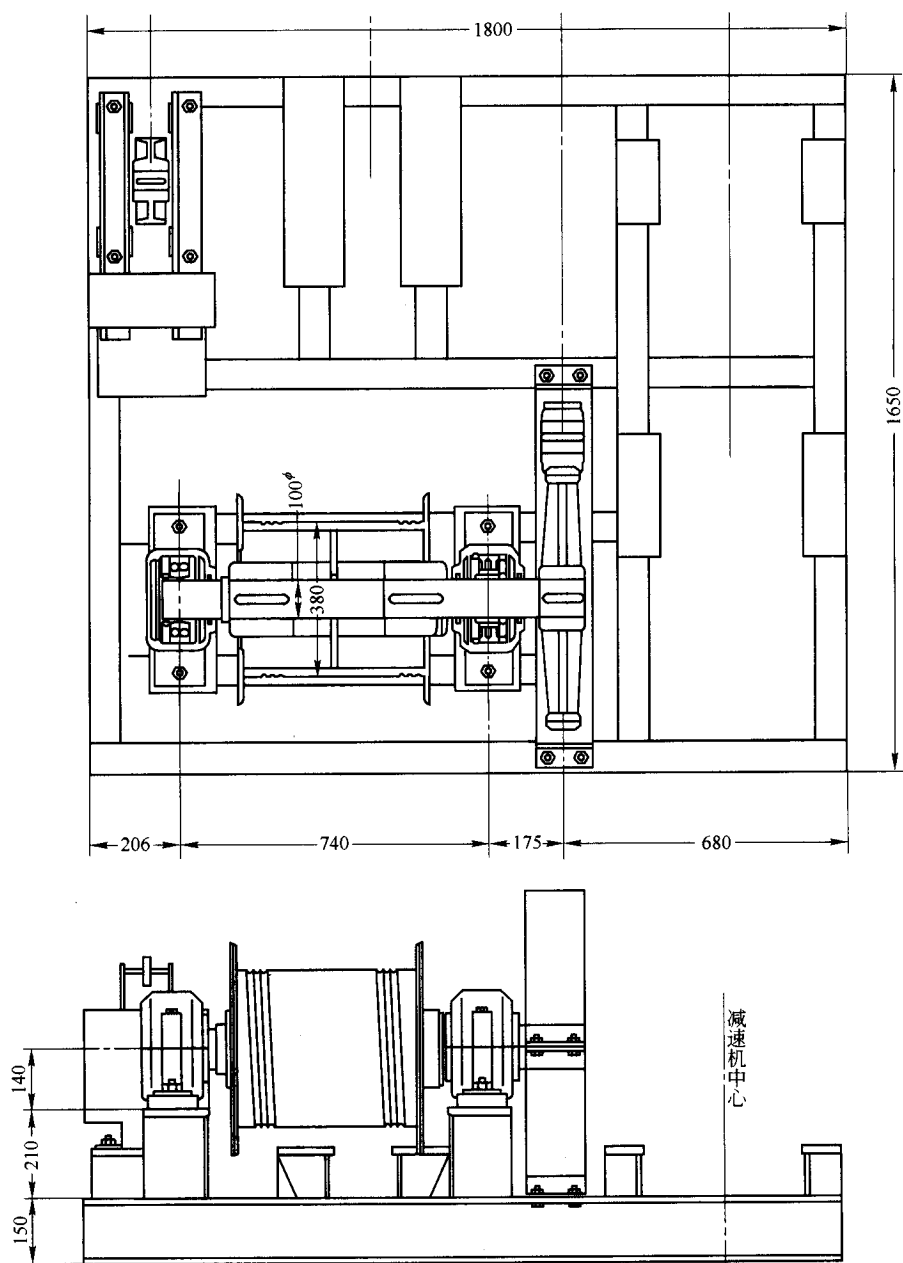


图 7-5-8 搅拌器提升装置

(六) 烟罩和烟气管道

烟罩包括固定上罩、中部密封罩和罩裙。烟罩升降行程为 1350mm，动作时间约 25s，升降速度为 55mm/s。当铁水罐通过时，罩裙借 4 个液压缸向上提升开启，而当铁水罐运入操作位置时，罩裙借液压缸下降，并封住四周的缝隙以使废气的漏损达到最小。烟罩

与铁水罐口间隙为 477mm ,排烟道直径 $\phi 1000\text{mm}$,并设有电动闸板 1.0m ,电机容量为 0.2kW。

(七)碳化钙输送给料装置

碳化钙加料系统设计为气动输送。该系统包括碳化钙接受管道、贮料罐、旋转给料器、带电子秤的给料泵和输送管道。

碳化钙借助 4t 槽车运送 ,通过用氮气压力输送管输入贮料罐。贮料罐内的碳化钙根据一炉需要量借旋转给料器送入带电子秤的给料泵。然后 ,碳化钙在需要的时候通过输送管道加入 KR 操作的铁水罐内。

(1)接受管道的参数为：

管道规格	STPG38 ,100A ,Sch80
运输能力	30t/h
氮气压力	0.2MPa(表压)
氮气流量	480m ³ /h(标态)

(2)贮料罐的参数为：

容量	35t
尺寸	$\phi 3300\text{mm} \times \text{H}5650\text{mm}$
附属设备	料位指示器及乙炔报警器及滤袋装置等

(3)旋转给料器的参数为：

能力	10t/h
电机功率	1.5kW

(4)给料泵的参数为：

能力	1000L
氮气压力	0.6MPa(表压)
氮气流量	600m ³ /h(标态)
运输能力	220kg/min
附属设备	载荷元件(1t $\times$ 3)

(5)输送管道规格为 STPG38 ,125A ,Sch80；

(6)电动溜槽所用电机容量为 0.75kW。

(八)框架构筑物

框架构筑物 ,包括允许搅拌器小车提升和下降的导轨框架、支承框架的梁和柱、搅拌器提升卷扬台架、搅拌器更换小车轨道、盖板、楼梯、栏杆等。框架共设有 4 层平台 ,分别

为 7.5m 主操作平台、10m 更换搅拌器平台、13.8m 提升卷扬平台、18.3m 提升滑轮组平台。设备最高点标高 19.3m。

(九) 搅拌器修理设备

搅拌器修理间所用设备的技术规格如下：

(1) 用作搅拌器砌筑耐火材料用 5t 起重吊车：

数量	1 台
能力	5t
提升高度	18m
跨度	8.5m

(2) 搅拌器干燥炉 2 台。

(3) 干燥炉耐火材料 2 台干燥炉用耐火黏土砖和耐火黏土浇注耐火材料。

(4) 搅拌器浇注耐火材料的钢箱 2 个。

(5) 链式滑轮 3 个 ,能力为 3t。

(6) 风镐 2 把。

(7) 双头螺栓修理电焊机 1 台。

(8) 双头螺栓修理气割枪 1 台。

(9) 泥浆搅拌器 1 台 ,能力为 0.25m^3 。

(10) 振动器 ,包括：

高频振动器	4 套
高频振动器的频率和电压变换器	1 套
可移动棒式电动振动器	2 套

(11) 搅拌器修衬用模板 2 套。

(12) 修衬工用各种工具 1 套 ,包括：

水桶	1 个
手提水桶	1 个
混合浇注耐火材料容器	1 个
拌料用手铲	1 把
拌料用手推车	1 辆
投料溜槽	1 个
风镐用软管	1 套

浇注耐火材料风干时搅拌器钢箱

冷却水软管	1 套
搅拌器表面磨平刀	1 套
搅拌器芯找中用铅锤	1 个
搅拌器芯找中用水平仪	1 个
搅拌器钢筋装配用扳手	1 套
搅拌器钢筋拆卸用钢钎	1 套

(十)扒渣机

扒渣机如图 7-5-9 所示。扒渣操作在铁水罐倾翻卷扬机倾翻铁水罐后用扒渣机进行。渣自铁水罐内扒除并流入渣罐内。扒渣操作是以一个钢板制作的扒渣板通过气缸装置连续地在铁水罐上向前、在浮于铁水面上的渣上向下和向后运动,自铁水罐内扒除渣子。

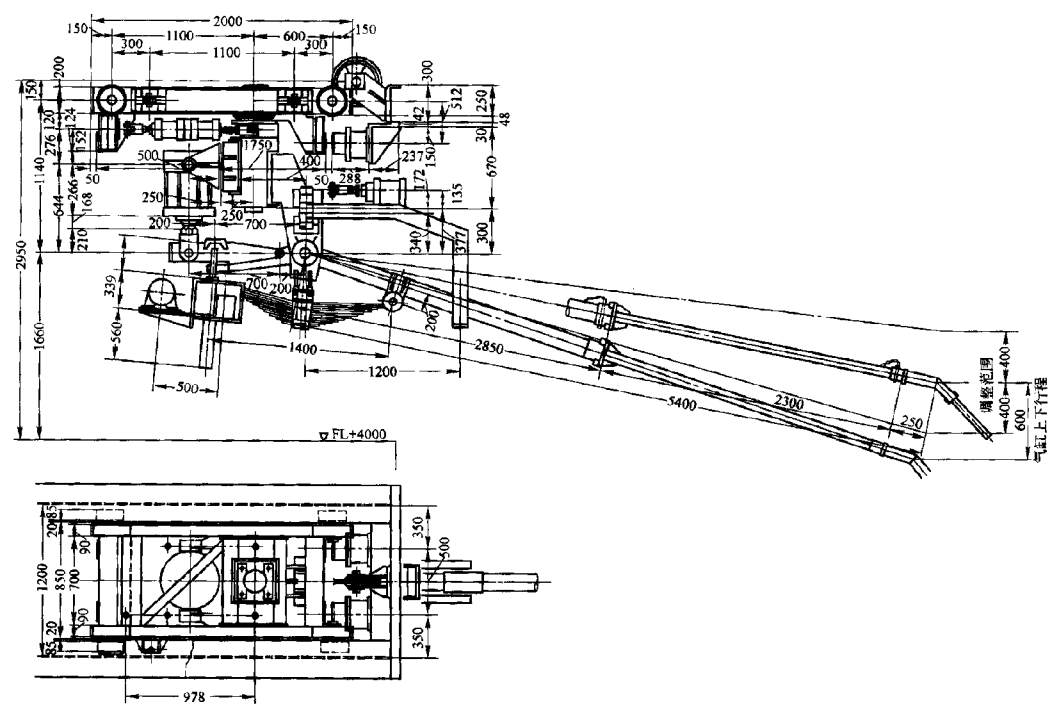


图 7-5-9 扒渣机

扒渣杆在扒渣操作时为了不发生卡死现象,可在渣面上旋转,扒渣板的位置可根据铁水罐的高度和铁水量的不同由电机传动的千斤顶调整至最佳高度。

当进行了约 30 罐扒渣作业发生扒渣板损坏后,可视渣量和熔渣条件换新扒渣板。

扒渣机可手动操作和自动操作 ,可有效地降低繁重体力劳动。

扒渣机系统包括扒渣机、铁水罐倾翻卷扬及烟罩 3 部分。

扒渣机的参数为：

正常工作范围	3 ~ 4m(最 5.5m)
速度	1.0 ~ 1.5m/s(可调)
扒渣板的宽度和高度	450mm × 400mm
扒渣板向下行程	500mm
扒渣板驱动	电动蜗轮千斤顶
上升的调整高度范围	1000mm
旋转角度	最大 12.5°(向左和向右)
气源和用量	压缩空气 1.4m ³ /min(最大操作耗量 ,压力为 0.45 ~ 0.7MPa)

铁水罐倾翻卷扬的参数为：

能力	45t
提升速度	3m/min
电机容量	45kW
附属装置	吊钩、钢丝绳滑轮、减速箱等

烟罩和闸板的参数为：

烟罩	钢结构件
管道直径	φ1500mm
电动闸板电机容量	1.5kW

空压机的参数为：

形式	螺杆式
能力	27.5m ³ /min
压力	0.7MPa(表压)
电机容量	160kW
附属装置	后冷却器及贮气罐等

(十一)布袋除尘装置

铁水脱硫过程中 ,由于搅拌和扒渣产生大量含尘烟气 ,必须及时进行捕集并分离净化烟气中的烟尘。KR 铁水脱硫采用布袋除尘器 ,排烟机安装在除尘器之后 ,捕集的烟尘连续地自布袋集灰斗 ,通过埋刮板卸料输送机运送至烟尘贮灰仓内 ,并定期卸灰清除。

武钢二炼钢 KR 铁水脱硫布袋除尘采用 1152m² 脉冲式布袋除尘器 ,具有以下优点 :

- (1)清灰方式较先进 ,过滤风速可达 2 ~ 3.5m/min ;
- (2)机械运动部件少 ,便于维修 ;
- (3)主机构造较简单 ;
- (4)可实现自动操作。

主管道的参数为 :

结构	钢结构
管道直径	φ1800mm

排烟风机的参数为 :

风量	3288m ³ /min(19700m ³ /h)
静压力	3.58kPa
烟气温度	100℃
转速	960r/min
电机	N = 310kW(6000V)

布袋除尘器的参数为 :

形式	1152m ² 脉冲式布袋除尘器
能力	2800m ³ /min
烟气温度	100℃
过滤面积	1152m ²
过滤风速	2.43m/min
室的数量	6
布袋尺寸	φ120mm × 2600mm
布袋材质	208 工业涤纶
布袋清扫装置	压缩空气脉冲型

空压机的参数为 :

能力	10m ³ /min × 2
压力	0.8MPa
电机	N = 75kW

烟尘卸料运输机的参数为 :

形式	埋刮板型输送机
能力	7 ~ 10m ³ /h

电机	$N = 3\text{kW}$, $n = 1430\text{r/min}$
贮灰斗的参数为：	
结构形式	钢结构
容积	20m^3
排灰装置	星形排灰阀(能力 1.176t/h)
电机	$N = 0.4\text{kW}$ 4 极

二、钙基、镁基脱硫的主要设备性能和参数

钙基、镁基喷吹设备类似 ,只是脱硫粉剂不同。宝钢、本钢、包钢已建成一定规模的镁基脱硫预处理项目 ,在这里以本钢为代表 ,简介镁基脱硫的设备参数及其特点。本钢镁基脱硫设备年处理铁水量 250 万 t ,原始硫平均含量 0.044% ,处理后可达 0.01% ~ 0.001%。其工艺流程如图 7-5-10 所示。

(一)槽车

槽车的参数为：

数量	2 辆(应视供粉点与铁水预处理站的距离确定)
料槽容量	10t
卸粉气体	氮气
卸粉垂直距离	约 15m
卸粉水平距离	30 ~ 40m
安全保护	应设气体过压保护

(二)石灰粉贮仓

石灰粉贮仓的参数为：

数量	1 个
容量	100m^3
直径	4000mm
总高	15m
保护压力	2.2kPa(22mmH ₂ O)
结构	由钢板焊接而成

石灰粉剂料仓装配有下列组成部分：

- (1)粉料输入管道；
- (2)料仓锥体部分的流态化系统；

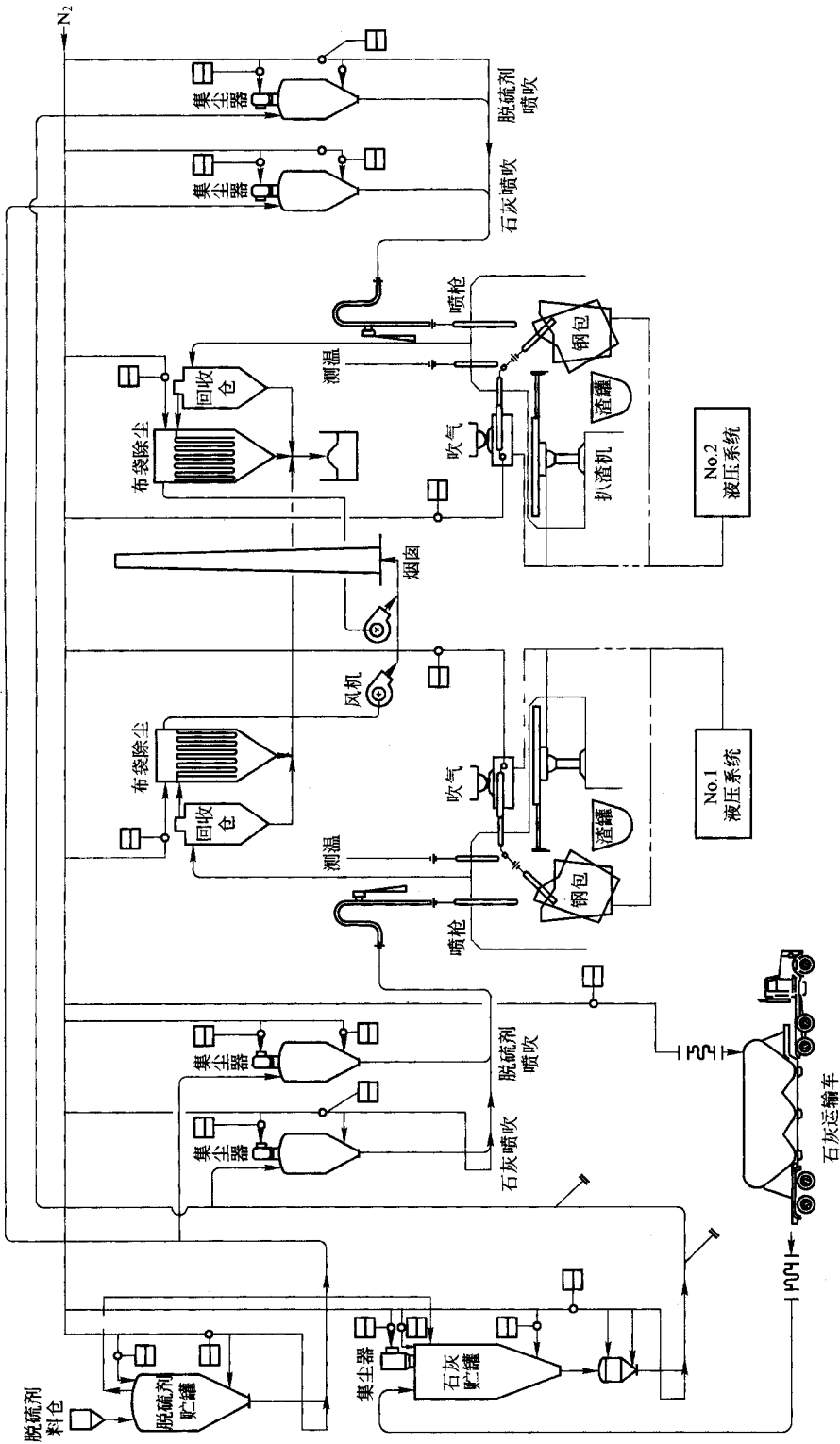


图 7-5-10 本钢镁基脱硫工艺流程图

(3) 料位指示系统 :共设 5 挡 ,可以提供料仓内不同的料位 ;

(4) 安全泄压阀 ;

(5) 集尘器 :并配有自动脉冲供氮设备 ,通风装置及电磁控制盘。

(三) 石灰粉输送罐

石灰粉输送罐的参数为 :

容积	1.7m^3
直径	1219.24mm
总高	2914mm
工作压力	420kPa
空载质量	1136kg
输送能力	150kg/min

粉剂靠自重由石灰输粉仓下落到输送罐中 ,并通过气力输送到发送罐中。输送罐是一个压力容器 ,它由下列部分组成 :

(1) 1 个由钢板焊接而成的耐压罐体 ;

(2) 1 套粉料流态化系统 ;

(3) 1 套进料系统 ,设手动和气动操作阀 ;

(4) 1 个减压阀 ;

(5) 1 套高、低压开关 ;

(6) 1 个安全泄压阀。

(四) 镁粉贮粉仓

镁粉贮粉仓的参数为 :

容积	10m^3
直径	约 2000mm
总高	6175mm
工作压力	550kPa
空载质量	3402kg
输送能力	100kg/min

镁粉贮料仓是一个压力容器 ,它由下列部分组成 :

(1) 1 个由钢板焊接而成的压力容器 ;

(2) 1 套氮气流态化系统 ;

(3) 1 套镁粉进、出口阀 ;

- (4) 一套高、低压开关；
- (5) 一套称量系统；
- (6) 一套高低压显示和安全放散阀。

袋装镁粉由汽车送到预处理站,并借助 5t 单梁悬挂吊车吊运到镁粉贮仓上部,人工卸到镁粉料仓中,而后根据镁粉用量要求,气力输送到镁粉发送罐中。该镁粉贮仓为两个喷吹位共用。

(五) 发送罐(喷粉罐)

发送罐(喷粉罐)的参数为：

容积	2.2m ³
直径	1219mm
总高度	约 4900mm
工作压力	1200kPa
空载质量	2000kg
供粉速度 ^①	
石灰粉	60kg/min(镁粉—石灰粉联合喷吹)
镁粉	25kg/min(镁粉—石灰粉联合喷吹)
石灰粉	90kg/min(石灰粉单独喷吹)
粉气比	150kg/8.4m ³

每个喷吹位备有石灰和镁粉发送罐各 1 个,发送罐由下列部分组成：

(1) 发送罐锥体:由钢板焊接而成的压力容器,每个喷吹位各设有石灰发送罐和镁粉发送罐各 1 个,全站共 4 个；

- (2) 一套粉料流态化系统；
- (3) 一套氮气输送系统；
- (4) 一套高压、低压开关；
- (5) 一套压力传感器的称量系统；
- (6) 一套进粉和排粉系统；
- (7) 一套安全泄压阀；
- (8) 一组除尘设备。

(六) 喷枪传动机构

喷枪传动机构的参数为：

^① 外商提供的供粉速度与外商提供的喷吹时间和所需耗粉量进行计算比较,上述供粉速度均偏小,有待修正。

起升质量	5000kg
最小提升能力	2500kg
喷枪质量	1500kg
喷枪升降速度	1.0m/s
喷枪行程	6650mm
驱动电机功率	约 22kW

喷枪传动机构由固定框架、导向架、升降、小车以及传动电机和齿轮箱组成，如图 7-5-11 所示。喷枪升降位置的确定，通过编码器来控制、喷枪架底座固定在标高 + 9.5m 的工作平台上，每个喷吹位置各设置 1 套。

(七)测温、取样装置

测温、取样装置的参数为：

起升质量	1270kg
喷枪行程	6800mm
枪升降速度	60m/min
测温试管长	1480mm
取样器长	1000mm
取样时间	约 6s

测温、取样装置由固定架、导向架、滑动小车以及传动机构等部件组成。枪位的确定采用编码器控制，该装置固定在标高 + 9.5m 的平台上，在平台上完成测温、取样探头的更换操作，每个喷吹位各设置 1 套。

(八)铁水罐运输与倾翻车

铁水罐运输与倾翻车如图 7-5-12 所示。

其参数为：

外形尺寸($L \times B$)	7309mm × 5810mm
最大承载量	300t
自重(估计)	70t
轨道中心线	3705mm
轴距	5129mm
轮压	
前轮轮压	353kN(铁水罐处于 0°倾斜时)
后轮轮压	372kN(铁水罐处于 0°倾斜时)

前轮轮压

396kN(铁水罐处于 45°倾斜时)

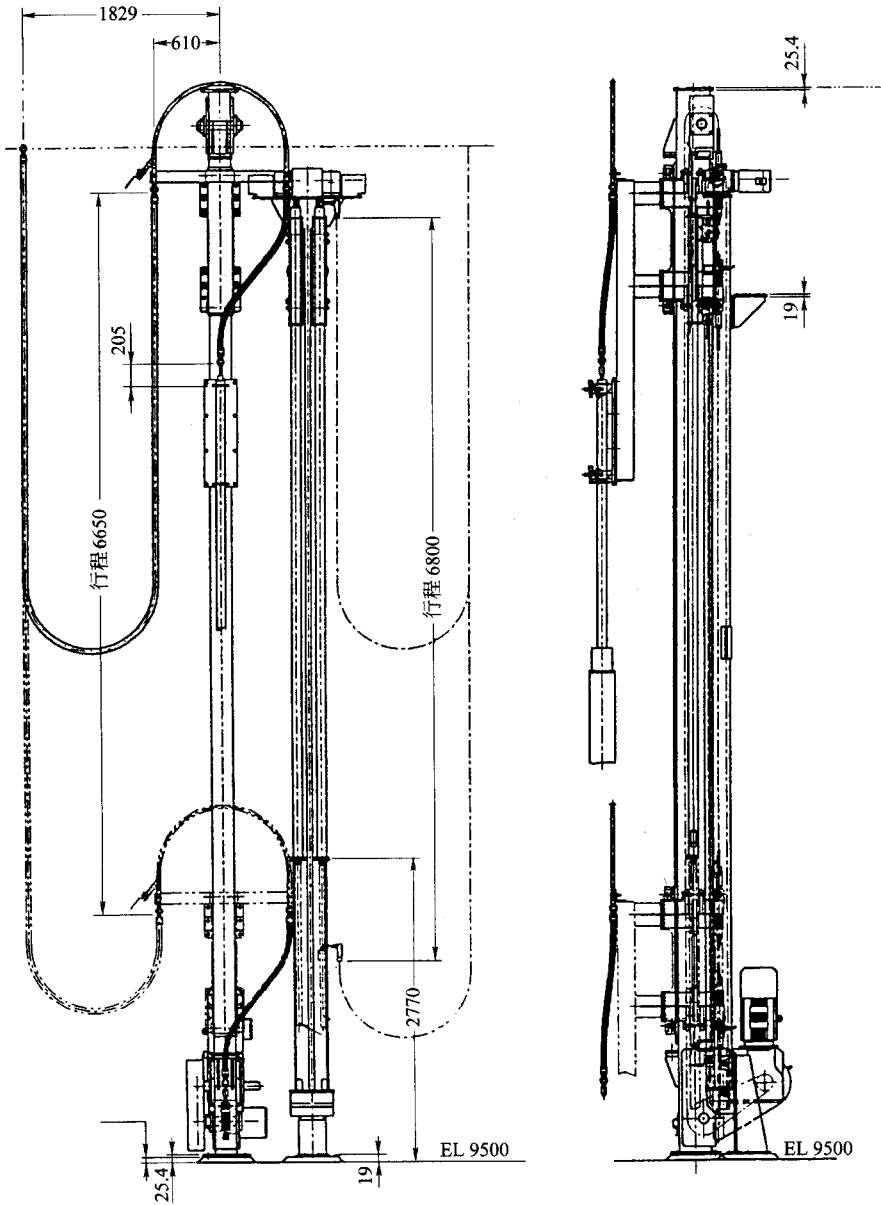


图 7-5-11 喷枪传动机构

后轮轮压

186kN(铁水罐处于 45°倾斜时)

走行速度(最大)

13.5m/min

铁水罐最大倾斜角度

45°21'

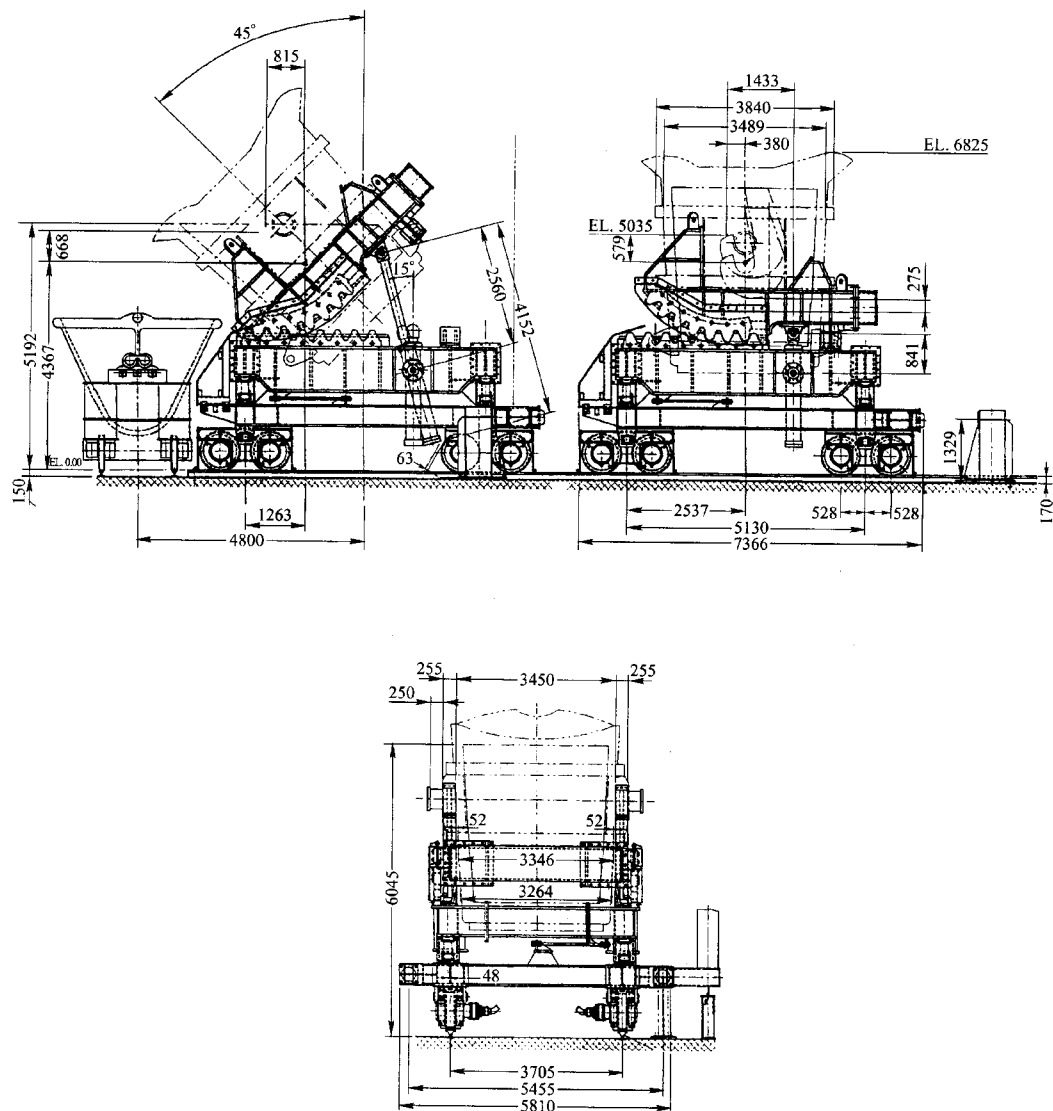


图 7-5-12 铁水罐运输及倾翻车

铁水罐倾翻速度	0.3r/min
铁水罐铁水最大装入量	160t
铁水罐铁水处理装入量	155t
铁水罐放在倾动架上的	2.0
动载系数	

铁水倾翻车轨道型号	Qu100
-----------	-------

铁水罐运输与倾翻车采用全液压驱动和倾翻,液压能源由独立的液压系统供应。液压系统的参数为:

液压介质	水乙二醇
最大操作压力	20MPa
正常操作压力	15MPa
流量	460L/min
倾翻缸个数	2个
倾翻系统内径	φ250mm
倾翻系统行程	2200mm
倾翻系统推动速度	100mm/s
运行系统用液压电机	2个
运行系统行走速度	13.5m/min

铁水罐运输与倾翻车为一焊接结构,由车架和倾翻架两部分组成。铁水罐放置在 1 个带有弧形滚动面的支架上,该支架通过 2 个液压缸使铁水罐得到一定角度的倾斜,以满足扒渣操作要求。

支架底座上安放有 4 个荷重传感器,每个荷重传感器承受能力为 250t,可以对铁水罐的铁水进行准确称量。

倾翻车为液压驱动,在行程两终点均设有限位开关,车子通过变更行走速度,可以准确停靠在吊包与处理的工作位置。

每个喷吹位的液压系统是独立的, 液压源由泵房经阀门站、管道送到铁水罐倾翻车上。通过阀门站对铁水倾翻车的操作进行控制。

(九)扒渣机

扒渣机主要由支撑柱、旋转支柱、扒渣机臂以及液压缸、液压传动件等部分组成,如图 7-5-13 所示。扒渣机的参数为:

扒渣机设备总重	5000kg
扒渣机臂总长	7940mm
扒渣机臂行程	5000mm
提升高度	1000mm
旋转速度	0.27r/min
旋转线速度	1.5m/min

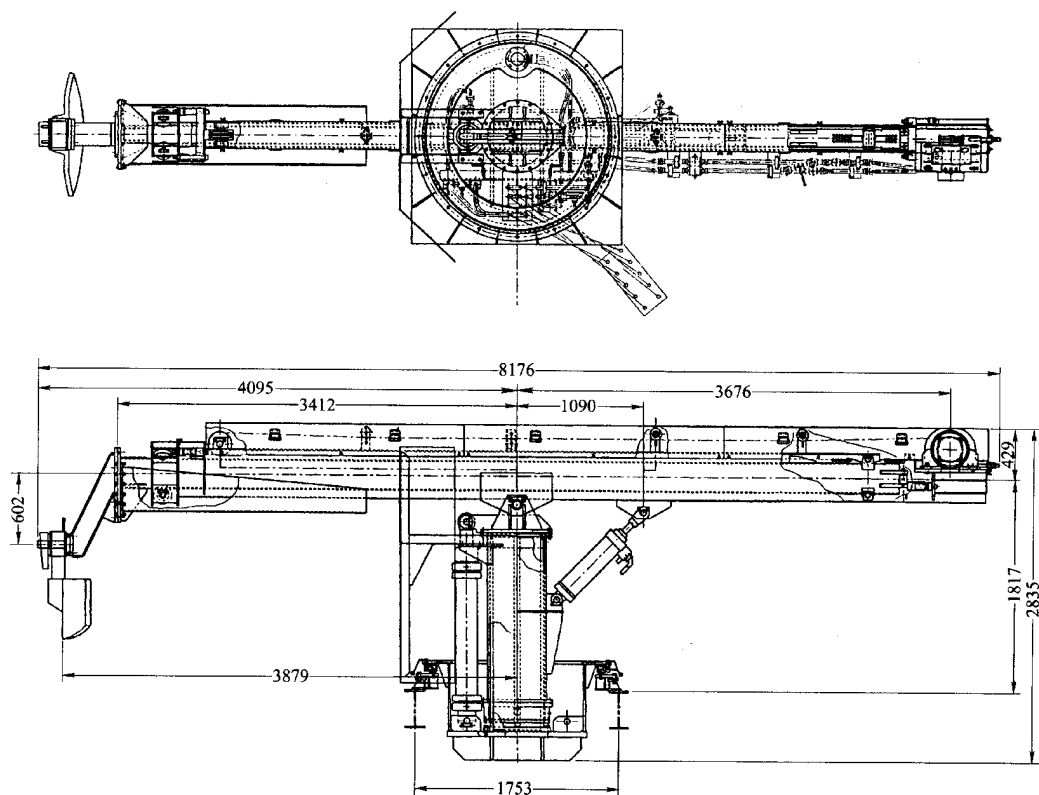


图 7-5-13 扒渣机

提升速度 75mm/min

向上允许倾角 5°

向下允许倾角 10°

水平旋转角度 $\pm 105^{\circ}$

水平旋转速度 $1.6^{\circ}/s$

扒渣机为液压传动 液压系统的主要技术

参数如下：

液压介质 水乙二醇

最大工作压力 20MPa

流量 100L/min

扒渣臂的提升缸行程 600mm

扒渣臂的倾动缸行程 600mm

扒渣机的液压介质由铁水预处理站统一的液压泵站提供 ,每个喷吹位设有独立的液压系统——泵站及阀门站 ,分别对本喷吹位内的铁水倾翻车、扒渣机、吹渣机三者进行传动和操作。

扒渣机借助操作台上的操作按钮进行人工操作。扒头伴随铁水罐不同的倾动角度 ,可以在变动的铁水面上按需要的位置和路线移动 ,将铁水罐的渣子扒到渣罐内。

(十)吹渣机

吹渣机的结构与扒渣机基本相同 ,如图 7 - 5 - 14 所示。吹渣机的参数为：

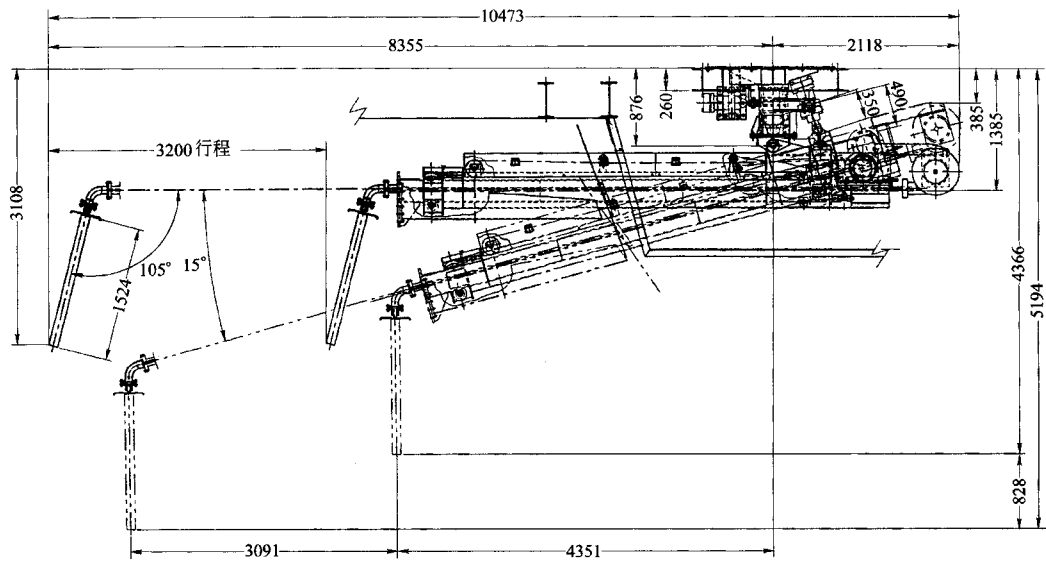


图 7 - 5 - 14 吹渣机

设备质量	2050kg
吹渣机臂长	4403mm
吹渣机臂行	3200mm
线速度	500mm/s
旋转速度	1r/min
倾斜角度	0 ~ 15(下降)
旋转角度	0 ~ 15°
氮气流量	72L/min

吹渣机是扒渣机的一种辅助工具,在扒渣机扒渣过程中,借助于吹渣机喷吹的氮气,可以将铁水罐液面上的脱硫渣向铁水罐流渣口吹赶,以提高扒渣机扒渣的工作效率,缩短扒渣时间。

吹渣机的吹渣机臂能完成前进、后退、上下旋转等动作,由液压驱动。吹渣机悬挂在标高 9.5m 的平台下,通过扒渣机操作台的相关按钮,人工操作,完成吹赶炉渣的作业。

(十一) 硫分析仪

为配合铁水预处理站的工艺操作,保证脱硫粉剂量的合理加入,并获得满意的预定的脱硫效果,铁水预处理站配备有硫分析仪 1 台,分析速度每次试样不大于 4min。

硫分析仪由分析装置、感应电炉、打印机、控制键盘、显示屏、氧气调节器、空气调节器等组成。

(十二) 渣罐车

渣罐车是本钢二炼钢现有 11m^3 渣罐的配套设备。根据铁水预处理的工艺要求,该车是在原有渣罐车结构的基础上重新设计而成。

渣罐车的参数为：

自重	约 25t
最大承载能力	约 50t
驱动方式	电动
行走速度	15 ~ 20m/min

渣罐车车体为焊接结构,行走于 ± 0.00 的地面轨道上。

(十三) 铁水罐

铁水罐的参数为：

最大容量	160t
有效容积	约 23.4m^3
罐体高	约 4700mm
罐自重	约 45t
装满铁水时罐体总重	约 225t
耳轴中心线距离	4250mm

160t 铁水预处理铁水罐是将二炼钢原转炉兑铁水的铁水罐上口加高 250mm 而重新设计和制造的,兑铁水嘴的对侧另增设一流渣嘴。该罐盛满 155t 铁水后,液面到罐口上缘的净空超过 500mm,满足外商喷吹操作工艺要求。

(十四) 50/10t 桥式起重机

新增 50/10t 桥式起重机,行走于 19 号 ~ 23 号柱之间,主要作业是用于吊运 11m^3 的

渣罐。

50/10t 桥式起重机的参数为：

起重量	50t
跨度	18m
起升高度	14m
工作制度	重级
起重机总重量	52t
大车行走速度	87.3m/min
小车行走速度	38.5m/min
轨道型号	Qu80

(十五) 5t 单梁悬挂起重机

5t 单梁悬挂起重机悬挂在厂房的房梁上 ,行走于 16 号 ~ 23 号柱之间。该起重机主要是用于吊运、更换喷枪 ,向镁粉仓吊装镁粉 ,吊运扒渣机扒头 ,检修 50/10t 桥式起重机。

5t 单梁悬挂起重机的参数为：

起重量	5t
跨度	17.25m
起升高度	25m
安装方式	悬挂式
操作方式	地面操作(配置遥控装置)

第三节 铁水三脱设备(全处理设备)

“ 三脱 ”指的是设备能够脱硅、脱硫、脱磷 ,也就是理论上能够根据原料情况及成品的要求 ,对铁水进行全面处理。实际上 ,从操作顺行与经济合理的角度考虑 ,脱硅一般都是在高炉炉前进行 ,在炼钢主要是进行脱磷和脱硫处理。

脱磷和脱硫需要多种不同的粉剂 ,所以其喷吹系统较单脱硫要复杂 ,其粉剂喷吹量也远比单脱硫要大 ,产生的渣量也大 ,这就决定了构成其设备的特点。

由于使用的处理容器不同 ,相应的有在铁水罐内处理的三脱设备和在混铁车内处理的三脱设备。

一、铁水罐内三脱设备

本节以太钢二炼钢铁水预处理三脱为例介绍铁水罐内三脱设备。

太钢二炼钢铁水预处理于 1988 年正式投产。年处理三脱铁水 95 万 t ,脱硫铁水 120 万 t ,脱硫周期为 44min ,脱磷周期为 80min。处理前铁水硅含量为 0.45% ,磷含量为 0.073% ,硫含量为 0.025% ,脱磷处理后铁水硅含量小于 0.10% ,磷含量为 0.02% ,硫含量为 0.012% ,脱硫处理后铁水硫含量为 0.005% ~ 0.015%。

太钢铁水预处理三脱工艺流程如图 7 - 5 - 15 所示。太钢铁水预处理三脱设备组成包括 :上粉系统、喷吹系统、扒渣系统、铁水系统、除尘系统、换枪系统、配管等。

(一)上粉系统

槽车的参数为：

型号	WH - QD7D ,上、下吸式气动散装水泥运输车
载重量	7000kg
满载质量	14470kg
外形尺寸	7500mm × 2400mm × 2938mm

水平运输距离 5m 时 ,垂直输送高度为 20m。水平运输距离 10m 时 ,垂直输送高度为 15m。

脱硅剂贮粉仓的参数为：

数量	1 个
有效容积	8m ³
外形尺寸	φ1859mm × 4503mm
最大装入量	16t
最大操作压力	5kPa

脱磷剂贮粉仓的参数为：

数量	1 个
有效容积	18m ³
外形尺寸	φ2609mm × 5263mm
最大装入量	27t
最大操作压力	5kPa

脱硫剂贮粉仓的参数为：

数量	1 个
----	-----

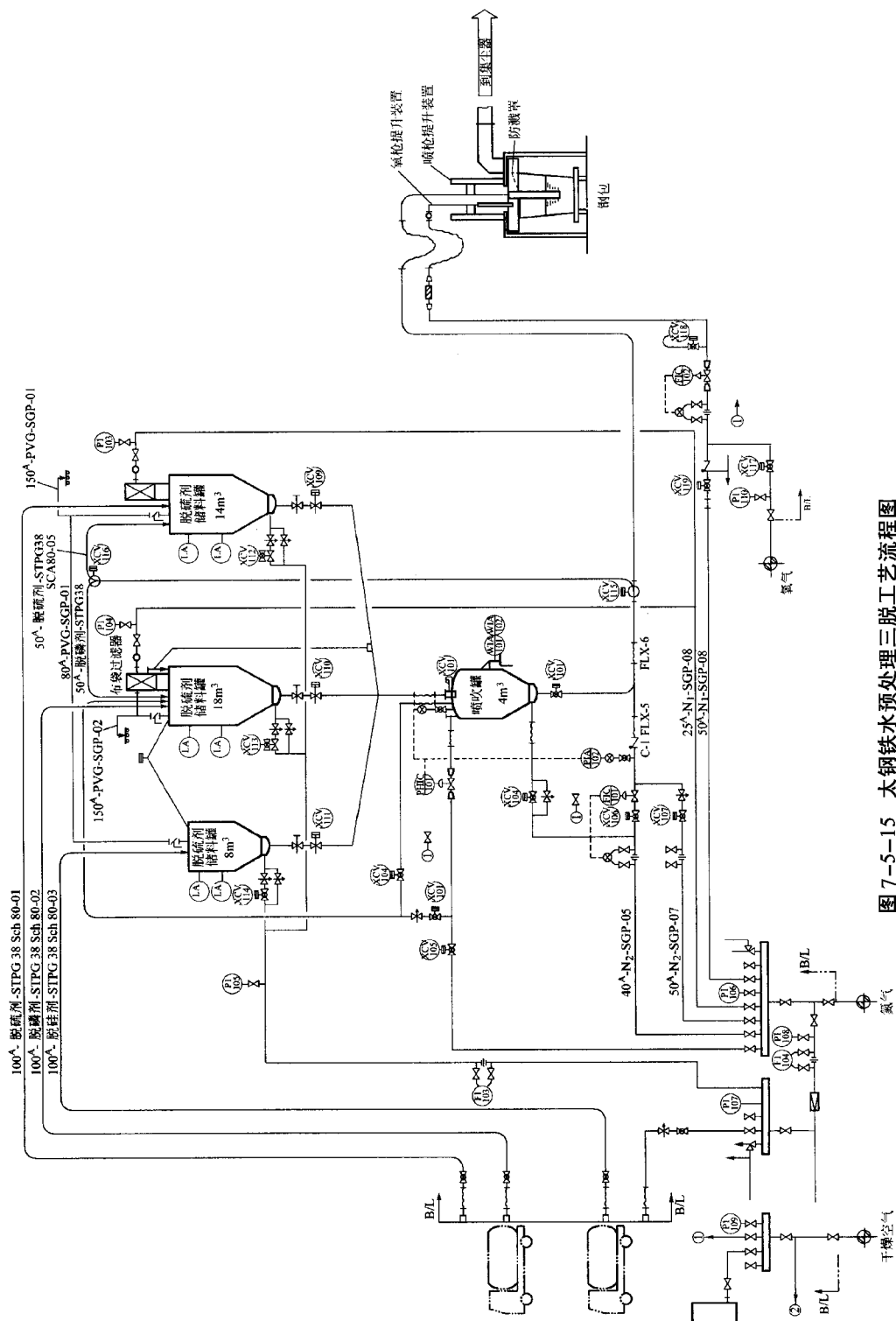


图 7-5-15 太钢铁水预处理三脱工艺流程图

有效容积	14m ³
外形尺寸	φ2350mm×4983mm
最大操作压力	5kPa
最大装入量	14t

下部流动排出器的参数为：

数量	3 个
形式	氮气松动流动式
排出能力	约 1.5t/min
外形尺寸	φ800mm
使用温度范围	约 600℃
出口尺寸	φ150mm
使用压力	(1.5 ~ 1.9)× 10 ⁵ Pa

贮粉仓上集尘机的参数为：

数量	2 台
形式	UDC - 44pE(19)
处理气量	16m ³ /min
过滤面积	16m ²
过滤速度	1m/min
压力损失(入口 ~ 出口)	2kPa
设计耐压	+ 5kPa

(二) 喷吹系统

给料阀的参数为：

型号	310 插板阀
驱动形式	气动
尺寸	φ150mm
数量	3 个

检修阀的参数为：

型号	手动插板阀
尺寸	φ150mm
数量	3 个

贮粉仓下料溜槽的参数为：

形式	三叉进料
数量	1 个
进料口尺寸 × 个数	$\phi 165\text{mm} \times 3$
出料口尺寸 × 个数	$\phi 266\text{mm} \times 1$

上阀的参数为：

形式	气动式锥形阀
进料口尺寸	$\phi 250\text{mm}$
工作压力	$(4 \sim 6) \times 10^5 \text{Pa}$
数量	1 个

发送罐的参数为：

数量	1 个
形式	压差控制吹入速度可调式
有效容积	4m^3
吹入速度	$50 \sim 120\text{kg}/\text{min}$
输送气体	氮气
载气流量	$2.5\text{m}^3/\text{min}$ (标态)
最大使用压力	$7 \times 10^5 \text{Pa}$
最大装入量	8t

发送罐附有以下冲洗部(喉口直径 $\phi 50\text{mm}$)、电子秤。

电子秤调校装置的参数为：

数量	1 套
外形尺寸	$\phi 2172\text{mm} \times 2324.2\text{mm}$

下阀的参数为：

数量	1 个
形式	气动球阀
使用压力	$4 \times 10^5 \text{Pa}$
最高使用压力	$7 \times 10^5 \text{Pa}$
容许周围温度	$-15 \sim +80^\circ\text{C}$
回转角度	90°

喷枪升降装置如图 7-5-16 所示, 附有升降指示。喷枪升降装置的参数为：

形式	固定立柱喷枪升降式
----	-----------

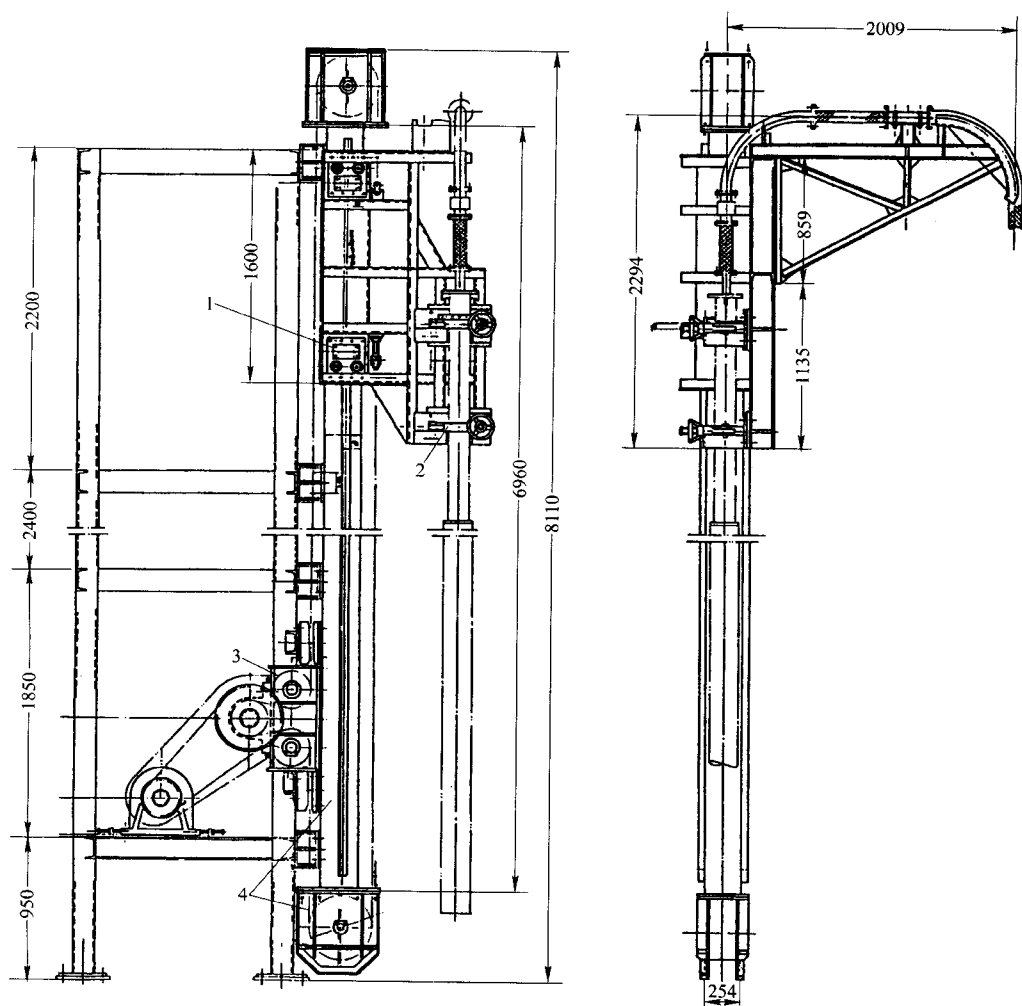


图 7-5-16 喷枪升降装置

数量	1 套
减速机形式	摆线针齿行星减速机
减速机型号	BWD515-6-87
电机功率	5.5kW ,1500r/min
总速比	$i = 1/158.6$
速度	6.92m/min
行程	5m

喷枪夹紧装置如图 7-5-17 所示。其参数为：

数量	1 套
----	-----

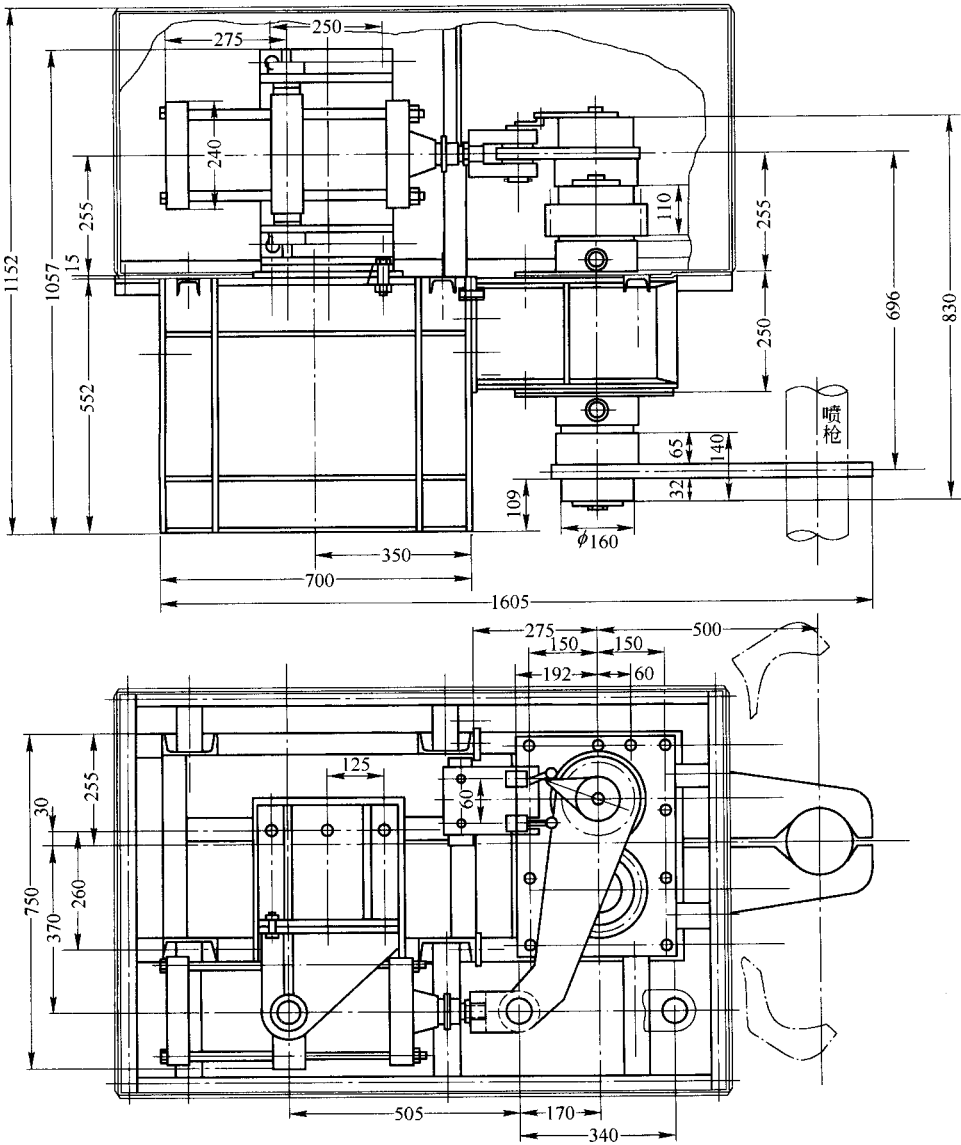


图 7-5-17 喷枪夹紧装置

驱动形式	气动
气缸行程	360mm
工作压力	$5 \times 10^5 \text{ Pa}$
氧枪升降装置如图 7-5-18 所示。其参数为：	
数量	1 套

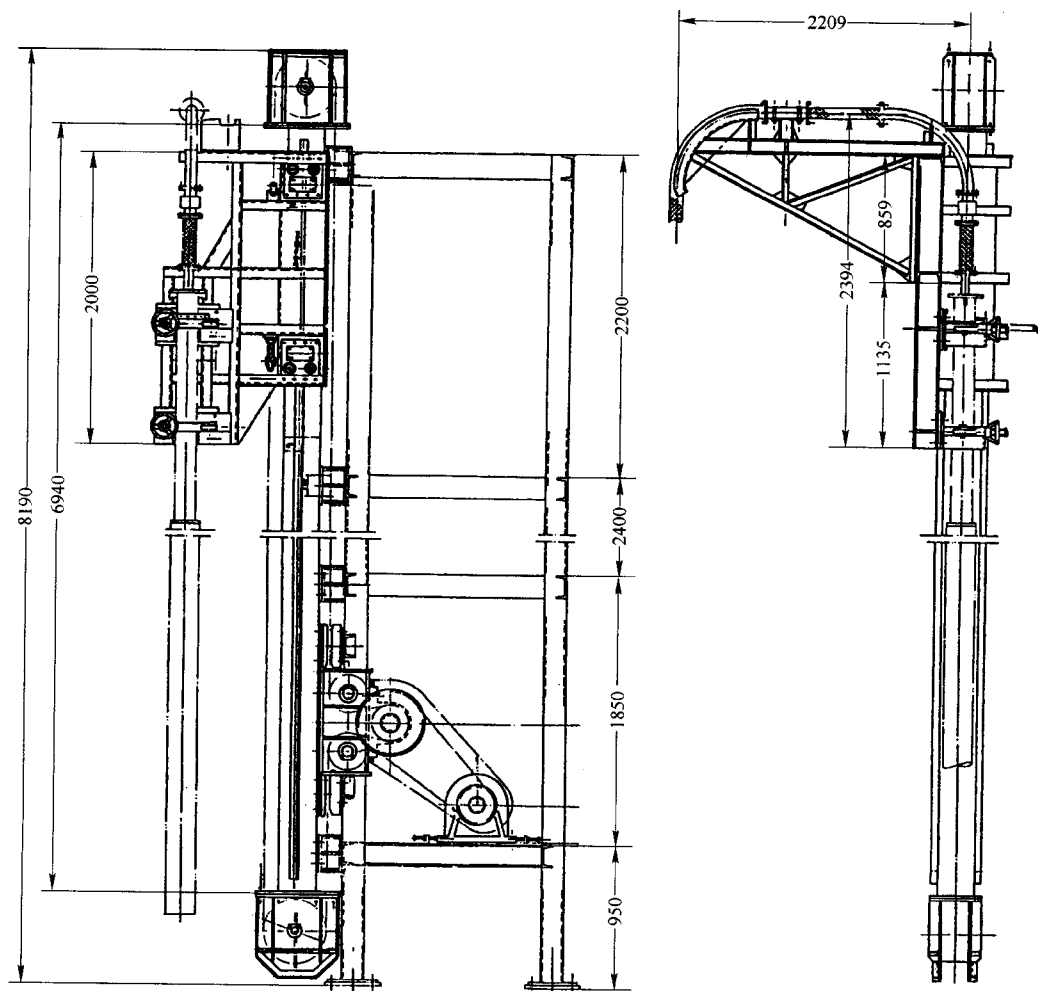


图 7-5-18 氧枪升降装置

升降速度	6.92m/min
升降行程	5m
减速机	摆线针齿行星减速机
减速机型号	BWD5.5-6-87
额定功率	5.5kW
总速比	1/158.6
喷枪的参数为：	
全长	6159mm

耐火材料段长	3500mm
喷枪孔数	2 孔
孔径	$\phi 15\text{mm}$
耐火材料外径	头部 $\phi 240\text{mm}$ 杆部 $\phi 200\text{mm}$
芯管	$\phi 60\text{mm} \times 8.5\text{mm}$

氧枪的参数为：

全长	6150mm
耐火材料长	3500mm
吹氧孔数	1 个
孔径	$\phi 25\text{mm}$
芯管	$\phi 34\text{mm} \times 4.5\text{mm}$
耐火材料外径	$\phi 205\text{mm}$

(三)扒渣系统

扒渣机如图 7-5-19 所示。其参数为：

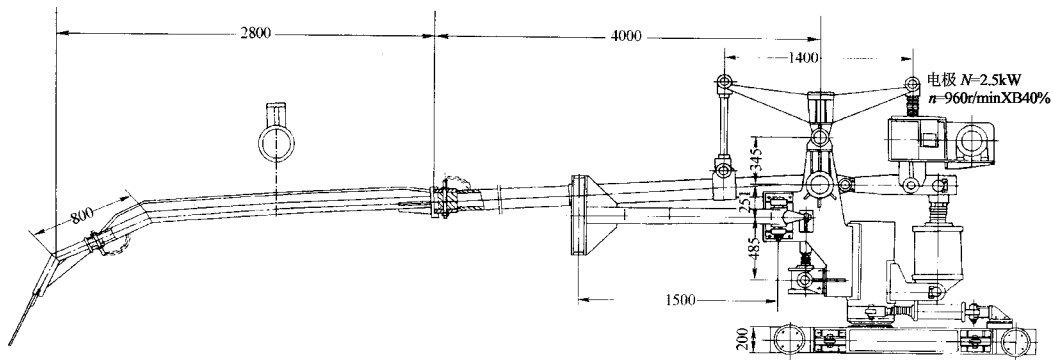


图 7-5-19 扒渣机

台数	1 台
形式	YS-1000 型汇压伸缩杆式
扒渣杆行程	5500mm
扒渣力	1000kg
扒头穿渣力	> 600kg

扒渣杆水平回转角度	105°
扒渣杆水平回转速度	2° ~ 5°/s
扒渣杆水平工作角度	30°
扒渣杆上下倾角	
(以水平线为中心)	± 15°
渣盘的参数为：	
有效容积	4m ³
外形尺寸	3370mm × 2000mm × 1350mm
耳轴中心距	3620mm

(四)铁水系统

铁水包的参数为：

公称容量	55t
最大容积	约 11.671m ³
耐火材料衬材质	黏土砖、高铝砖(渣线)
耐火材料衬质量	11.256t
耳轴中心距	3620mm
铁水包口直径	φ2437.4mm(内) , φ2848mm(外)
铁水包总高	3950mm
铁水包本体质量	约 30t

铁水包车如图 7 – 5 – 20 所示。其参数为：

形式	带有铁水包倾翻装置铁水包车
外形尺寸	约 8000mm × 4424mm × 3130mm
轨距	3200mm
行走速度	30.6m/min
行走电机功率	22kW
倾翻最大倾角	41°
倾翻速度	0.71r/min

电缆拖链的参数为：

半径	400mm
行程	约 32m

E 除尘系统

扒渣烟罩的参数为：

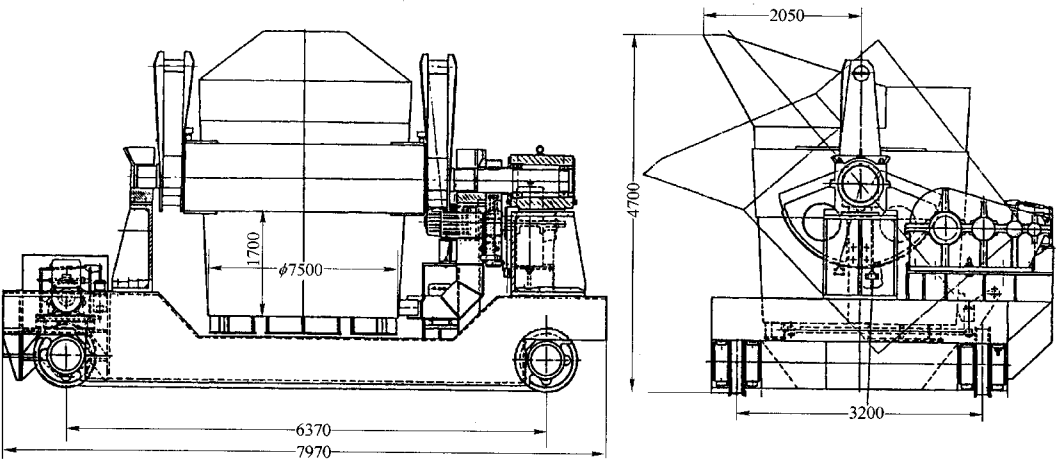


图 7-5-20 带有铁水包倾翻装置的铁水包车

外形尺寸	4500mm × 3900mm × 4586mm
烟道口直径	$\phi 1620$ mm
电动门及升降装置的参数为：	
电动门尺寸	5640mm × 1750mm
行程	700mm
升降速度	1.8m/min
电机型号	YEJ804-4
功率	0.75kW

(五) 换枪系统

1t 电葫芦的参数为：

数量	2 台
型号	CD 型
提升高度	16m
电机功率	提升 1.5kW
	运行 0.2kW

行走最小曲率半径 1.8m

喷粉枪、吹氧枪更换吊具数量为 2 个。

二、混铁车内三脱设备

本节以宝钢二炼钢铁水预处理三脱为例介绍混铁车内三脱设备。

宝钢二炼钢铁水预处理三脱设备于 1998 年 2 月正式投产 ,年处理能力为 291 万 t。其中 ,100%铁水脱硫 ,35%铁水脱磷 ,5%铁水进行补充脱硅处理。处理前铁水硅含量为 0.15%~0.20%(高炉出铁时脱硅) ,磷含量为 0.08%~0.12% ,硫含量为 0.04% ;三脱处理后铁水磷含量为 0.01%~0.04% ,硫含量为 0.002%~0.005%。其总图布置如图 7-5-21 所示。

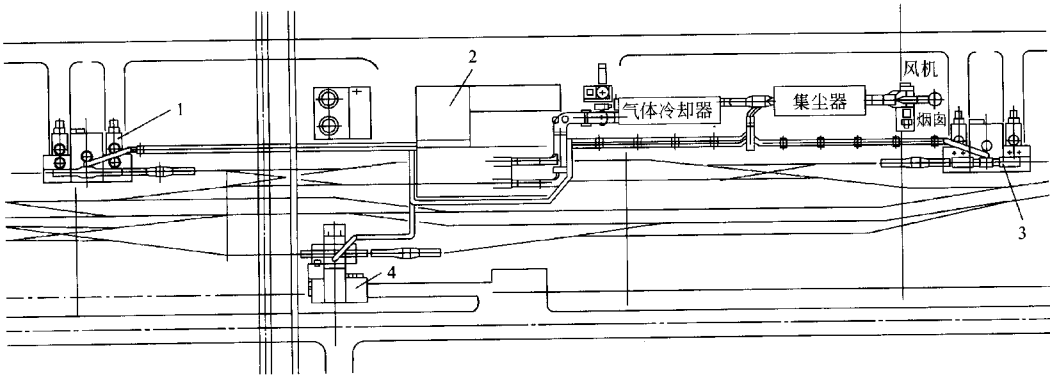


图 7-5-21 宝钢二炼钢铁水预处理总图布置

1—前扒渣中心 2—铁水预处理中心 3—后扒渣中心 4—混铁车排渣清罐中心

铁水处理车间包括前扒渣中心、后扒渣中心、铁水预处理中心、混铁车排渣清罐口中心等部分以及除尘及水处理设施。由四通八达的铁路线把各部分有机连接起来。

(一) 前扒渣中心

1. 扒渣机

扒渣机如图 7-5-22 所示。该设备用于混铁车扒渣 ,所有动作均为自动式液压驱动。扒渣机的参数为：

外形尺寸	4315mm×4135mm×4700mm
扒渣能力	最大 1000kg(水平 ,速度 800mm/s)
	最大 1280kg(垂直 ,速度 800mm/s)
驱动电机	液压电机
电机功率	37kW
动作分类	小臂升降、大臂升降、旋转、行走

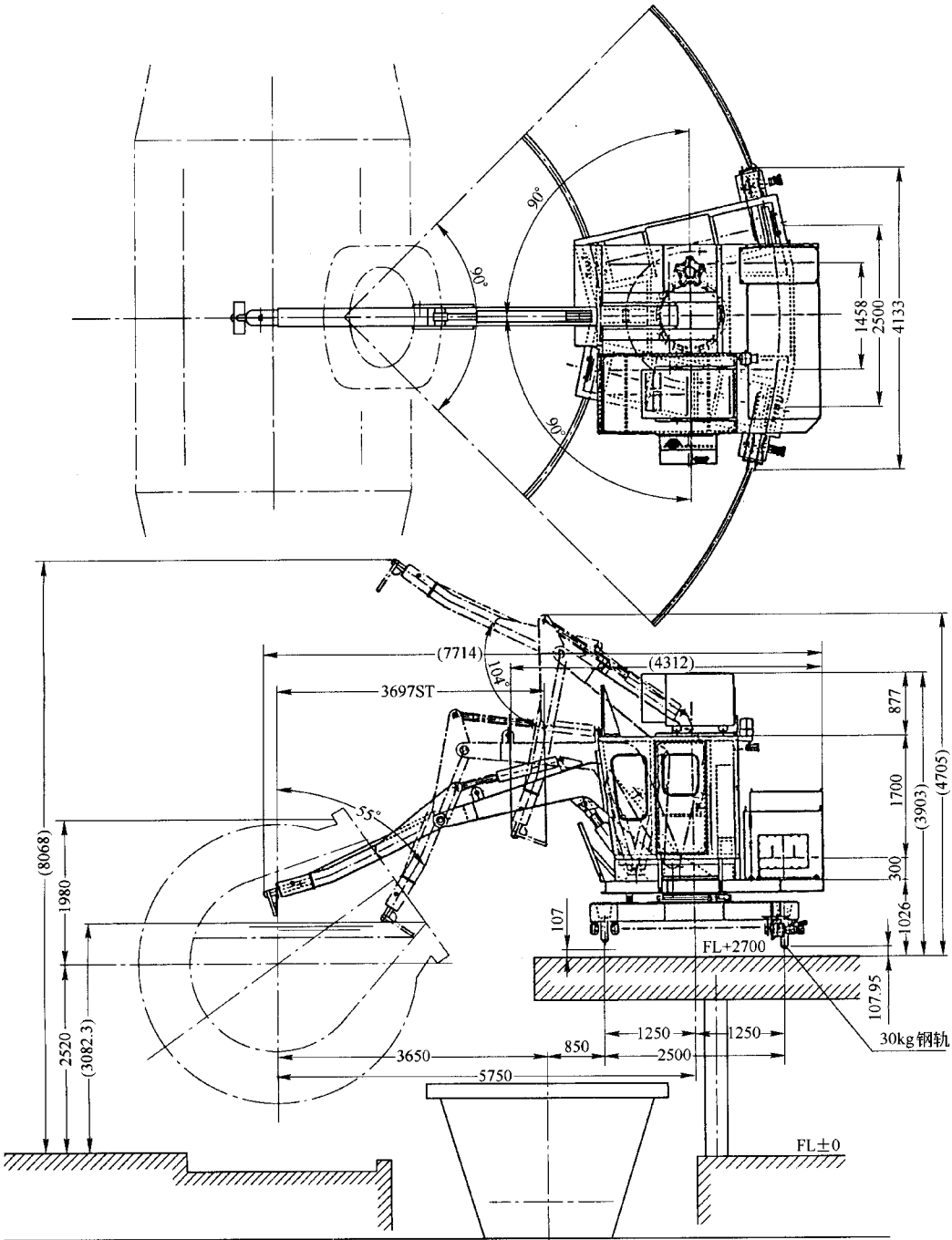


图 7-5-22 扒渣机

小臂升降液压缸	$\phi 100\text{mm} \times \phi 56\text{mm} \times 755\text{mm}$
小臂升降速度	约 $100 \sim 150\text{mm/s}$
小臂升降范围	约 50°
大臂升降液压缸	$\phi 125\text{mm} \times \phi 71\text{mm} \times 465\text{mm}$
大臂升降速度	约 $100 \sim 150\text{mm/s}$
大臂升降范围	约 90°
旋转驱动形式	液压电机
旋转速度	最大 1r/min
旋转范围	$140^\circ (-90^\circ \sim +90^\circ)$
运行驱动形式	液压电机
运行速度	250mm/s
运行操作范围	约 2400mm
设备总重	约 9t

2. 渣罐运行台车

渣罐运行台车如图 7-5-23 所示。渣罐运行台车可以承载一个空渣罐和一个满渣罐,并可 将渣罐从扒渣位移至等待位,在等待位上抱罐车再将满渣罐运走,然后放上一个空渣罐。渣罐运行台车的参数为:

形式	链条传动
尺寸	$3300\text{mm} \times 13500\text{mm} \times 1650\text{mm}$
载重量	最大 74.5t
运行速度	20.6m/min
电机功率	22kW
行程	10m
设备总重	约 25t

3. 测温取样装置

测温取样装置如图 7-5-24 所示。该装置用于测温取样探头的降下和上升。测温取样装置的参数为:

形式	链条传动
升降速度	20m/min
升降行程	4000mm
电机功率	3.7kW

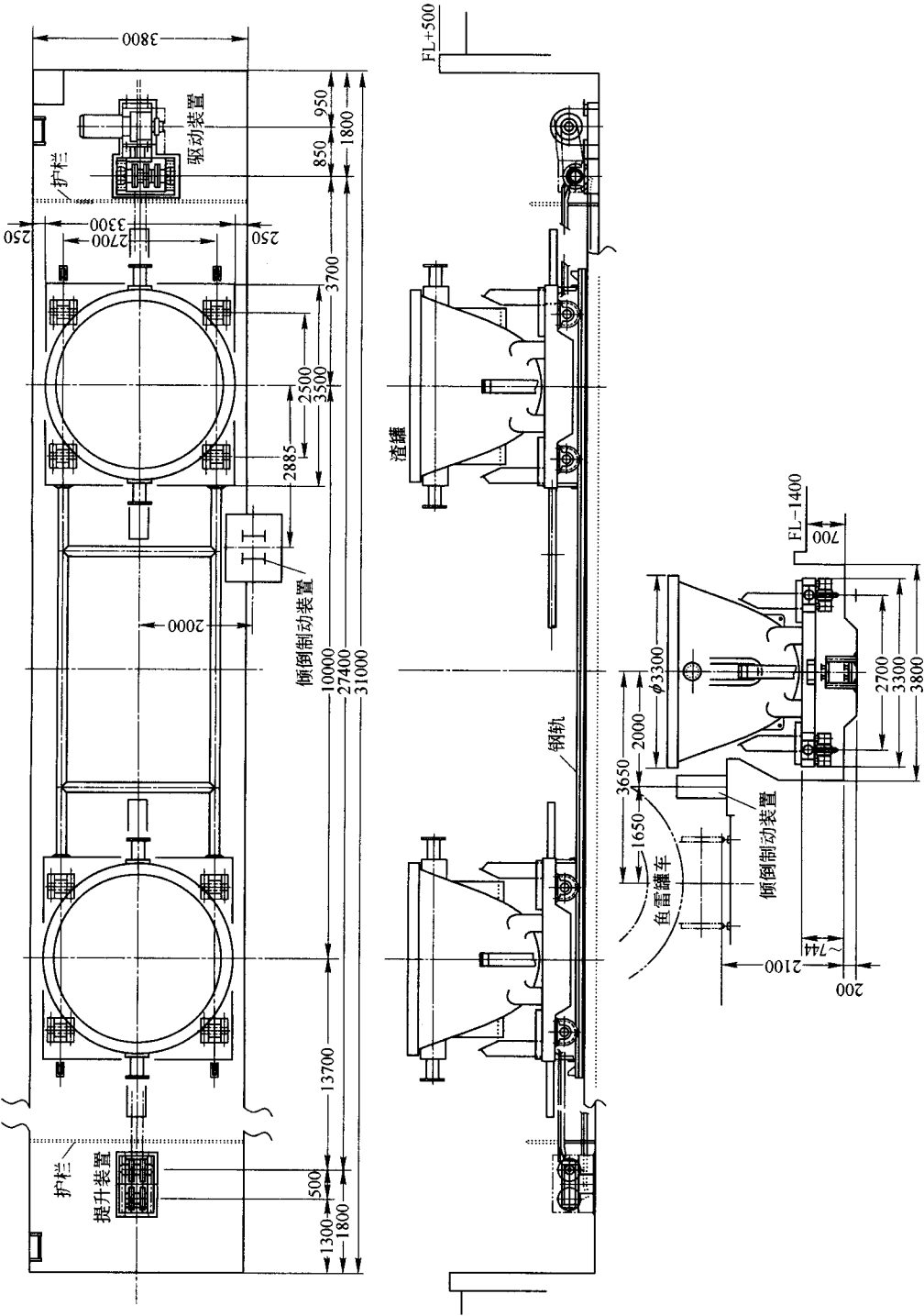


图 7-5-23 渣罐运行台车

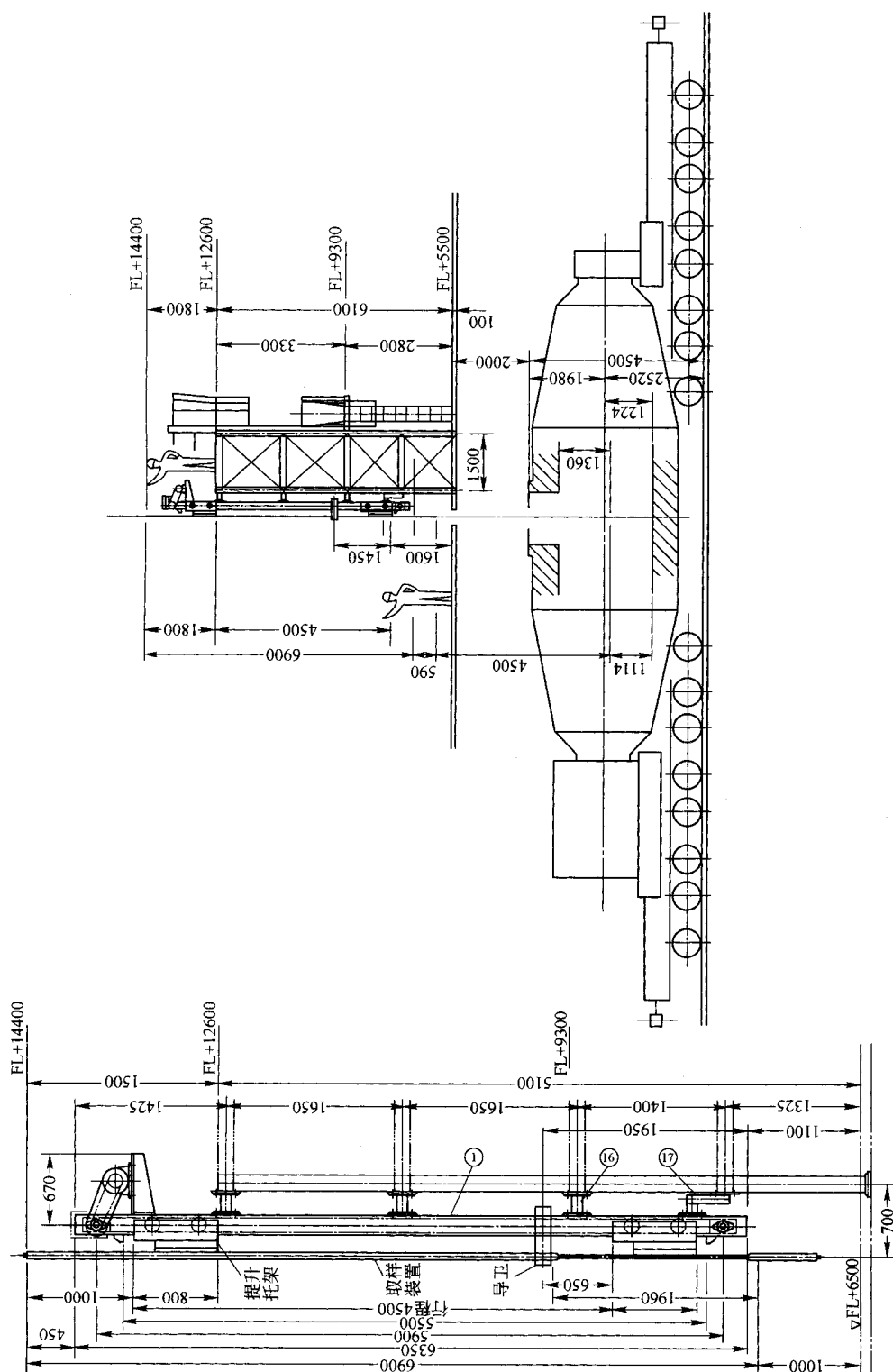


图 7-5-24 测温取样装置

设备总重 2.2t

4. 排烟罩

设置排烟罩的目的主要是收集扒渣过程中产生的烟尘。排烟罩的参数为：

形式 钢板和筋板焊接而成

尺寸 4700mm×5400mm×8300mm

设备总重 3t

5.6m³ 渣罐

渣罐的参数为：

形式 铸钢

外形尺寸 $\phi 4230\text{mm} \times \phi 3100\text{mm} \times 2300\text{mm}$

总重 25t

6.3.2t 电葫芦

3.2t 电葫芦主要用于扒渣机的检修及扒渣头的更换。其参数为：

形式 AS 型防爆电葫芦

起重量 3.2t

升降行程 12m

升降速度 6m/min

行走距离 约 18m

行走速度 15m/min

升降电机 3.7kW

行走电机 0.75kW

(二)铁水预处理中心

铁水预处理中心工艺流程如图 7-5-25 和图 7-5-26 所示。

1. 粉剂贮存设备

CaC₂ 贮粉仓

CaC₂ 贮粉仓用于贮存铁水脱硫用的 CaC₂ 粉,并供 2 个喷粉罐用。其参数为：

容量 100m³(2 天的使用量)

外形尺寸 $\phi 4800\text{mm} \times (5650 + 3600)\text{mm}$

设计压力 0.02MPa

卸料速度 1t/min

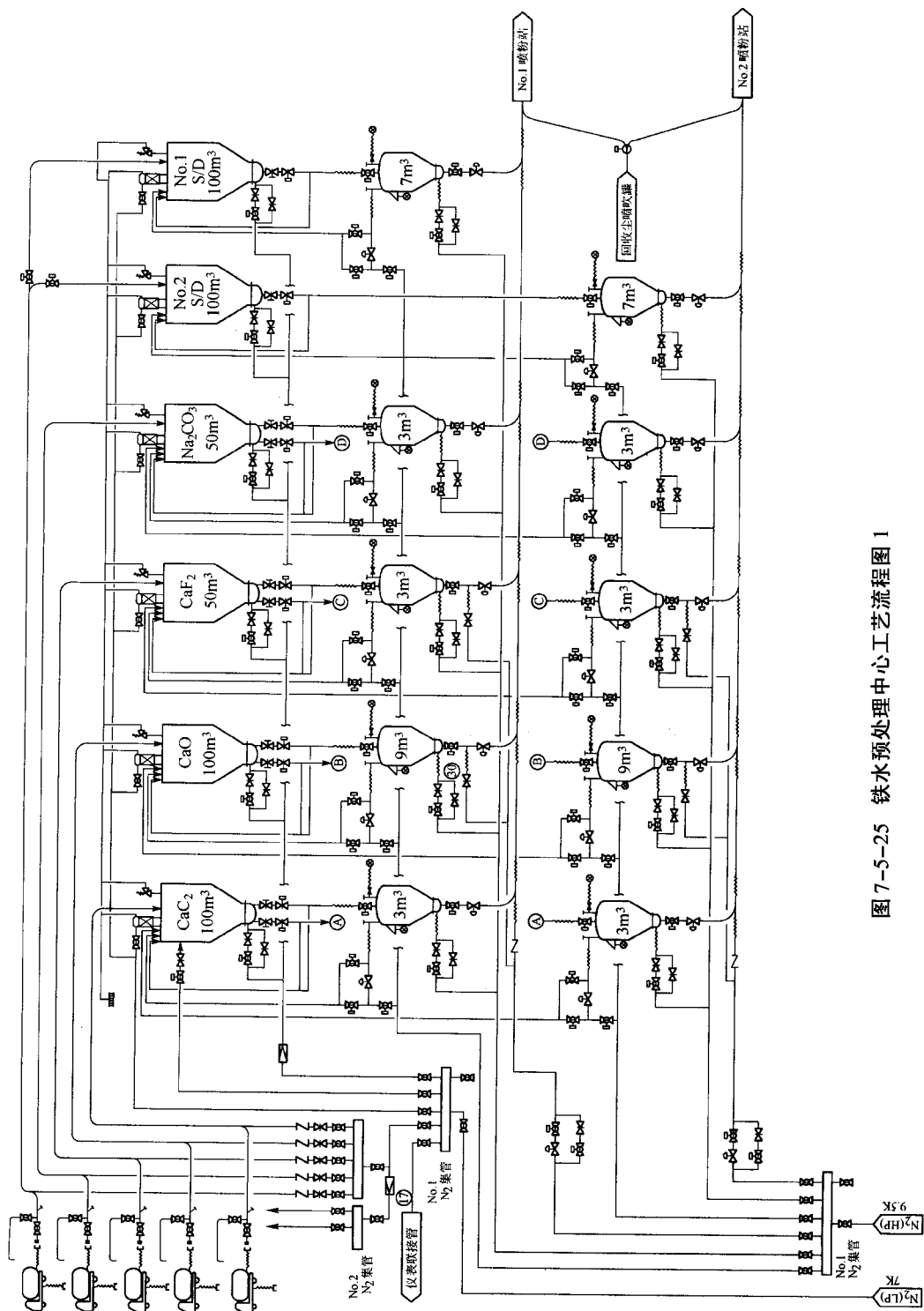


图 7-5-25 铁水预处理中心工艺流程图 1

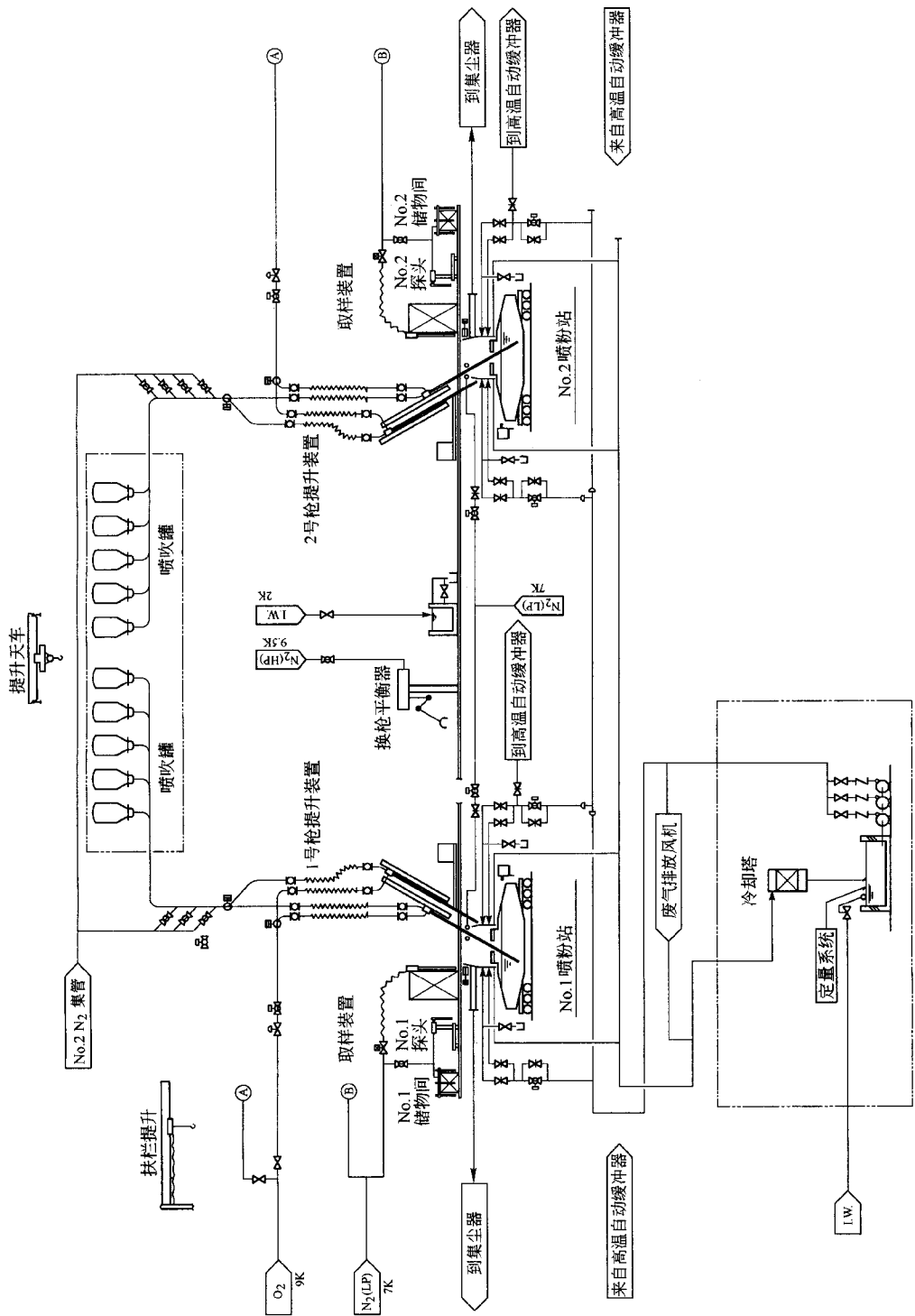


图 7-5-26 铁水预处理中心工艺流程图 II

底部流态化	800mm(直径)
设备总重	10t

CaO 贮粉仓

CaO 贮粉仓用于贮存铁水脱硫或脱磷用的 CaO 粉 ,并供 2 个喷粉罐用。其参数为：

容量	100m ³
外形尺寸	φ4800mm ×(5650 + 3600)mm
设计压力	0.02MPa
卸料速度	1t/min
底部流态化	800mm(直径)
设备总重	约 10t

CaF₂ 贮粉仓

CaF₂ 贮粉仓用于贮存铁水脱硫或脱磷用的 CaF₂ 粉 ,并供 2 个喷粉罐用。其参数为：

容量	50m ³ (2 天的使用量)
外形尺寸	φ3600mm ×(5550 + 2570)mm
设计压力	0.02MPa
卸料速度	1t/min
流态化段	800mm(直径)
设备总重	约 7t

Na₂CO₃ 贮粉仓

Na₂CO₃ 贮粉仓用于铁水脱磷后的再脱硫用的 Na₂CO₃ 粉 ,并供 2 个喷粉罐用 ,其参数为：

容量	50m ³
外形尺寸	φ3600mm ×(5550 + 2570)mm
设计压力	0.02MPa
卸料速度	1t/min
流态化段	800mm(直径)
设备总重	约 7t

烧结尘贮粉仓

烧结尘贮粉仓用于贮存铁水脱磷用的烧结尘 ,1 个贮粉仓供 1 个喷粉罐 ,共 2 套。其参数为：

容量	100m ³
----	-------------------

外形尺寸	$\phi 4800\text{mm} \times (5650 + 3600)\text{mm}$
设计压力	0.02MPa
卸料速度	2t/min
流态化段	800mm(直径)
设备总重	约 10t

2. 喷吹设备

CaC₂ 喷粉罐

CaC₂ 喷吹罐用于称量和喷吹铁水脱硫用的 CaC₂ 粉。其参数为：

容量	3m ³
外形尺寸	$\phi 1600\text{mm} \times (1500 + 1180)\text{mm}$
设计压力	0.99MPa
操作压力	0.4MPa
卸料速度	50 ~ 300kg/min
称量范围	0 ~ 4t
流态化段	400mm(直径)
设备总重	2.3t

CaO 喷粉罐

CaO 喷粉罐用于称量和喷吹铁水脱硫或脱磷用的 CaO 粉。其参数为：

容量	9m ³
外形尺寸	$\phi 2200\text{mm} \times (2670 + 1700)\text{mm}$
设计压力	0.99MPa
操作压力	0.4 或 0.6MPa
卸料速度	50 ~ 400kg/min
称量范围	0 ~ 11t
流态化段	400mm(直径)
设备总重	约 6t

CaF₂ 喷粉罐

CaF₂ 喷粉罐用于称量和喷吹铁水脱硫或脱磷用的 CaF₂ 粉。其参数为：

容量	3m ³
外形尺寸	$\phi 1600\text{mm} \times (1500 + 1180)\text{mm}$
设计压力	0.99MPa

操作压力	0.6 MPa
卸料速度	30 ~ 150 kg/min
称量范围	0 ~ 4t
流态化段	400mm(直径)
设备总重	2.3t

Na₂CO₃ 喷粉罐

Na₂CO₃ 喷粉罐用于称量和喷吹铁水脱磷后脱硫用的 Na₂CO₃ 粉。其参数为：

容量	3m ³
外形尺寸	φ1600mm × (1500 + 1180)mm
设计压力	0.99 MPa
操作压力	0.4 MPa
卸料速度	50 ~ 300 kg/min
称量范围	0 ~ 4t
流态化段	400mm(直径)
设备总重	2.3t

烧结尘喷粉罐

烧结尘喷粉罐用于称量和喷吹铁水脱磷的烧结尘。其参数为：

容量	7m ³
外形尺寸	φ2000mm × (2230 + 1550)mm
设计压力	0.99 MPa
操作压力	0.6 MPa
卸料速度	100 ~ 600 kg/min
称量范围	0 ~ 15t
流态化段	400mm(直径)
设备总重	约 4.4t

喷枪升降装置

喷枪升降装置如图 7-5-27 所示,它安装在铁水预处理中心 + 8.000m 主操作平台上。

它的主要作用是通过本身设置的限位开关将喷枪插入混铁车内的铁水中。其参数为：

形式	双枪、斜插、车式
外形尺寸	约 10140mm × 3535mm × 2435mm

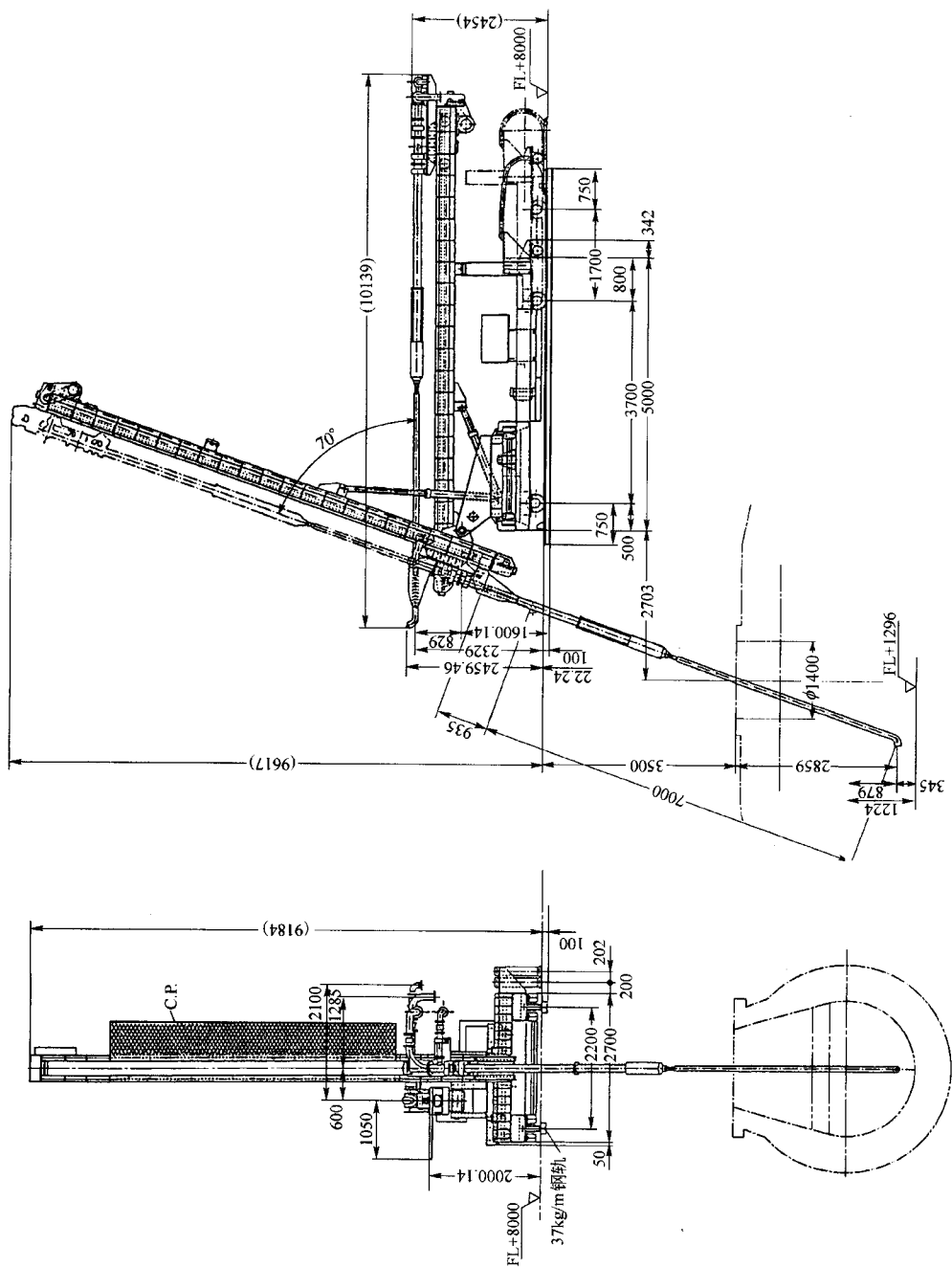


图 7-5-27 喷枪升降装置

行走动作	马达驱动 ,1.5kW
行走速度	5m/min
行走行程	约 1700mm
升降动作	电机驱动 ,2.2kW
升降速度	10m/min
升降行程	7000mm
倾斜及横移动作	液压驱动 ,倾斜 : $\phi 90\text{mm} \times 850\text{mmST}$ 横移 : $\phi 63\text{mm} \times 750\text{mmST}$
倾斜速度	2°/s
倾斜范围	0 ~ 70°
横移速度	100mm/s
横移行程	600mm
设备总重	约 12t

喷枪更换机械手

喷枪更换机械手如图 7-5-28 所示。其参数为：

提升负荷	100kg
夹紧负荷	100kg
操作行程	最大 4600mm(半径) 最大 2200mm(高)

喷枪更换机械手

夹紧装置	气缸驱动
气缸尺寸	$\phi 100\text{mm} \times 150\text{mmST} \times 2$ 件
气源	0.95MPa ,N ₂ 气
设备总重	0.6t

5t 单梁起重机

5t 单梁起重机主要用于维修安装在 + 8.000m 主操作平台上的设备 ,并负责吊运喷枪贮存架。其参数为：

起升质量	5t
运行速度	20m/min
运行距离	约 40m
横移速度	16m/min

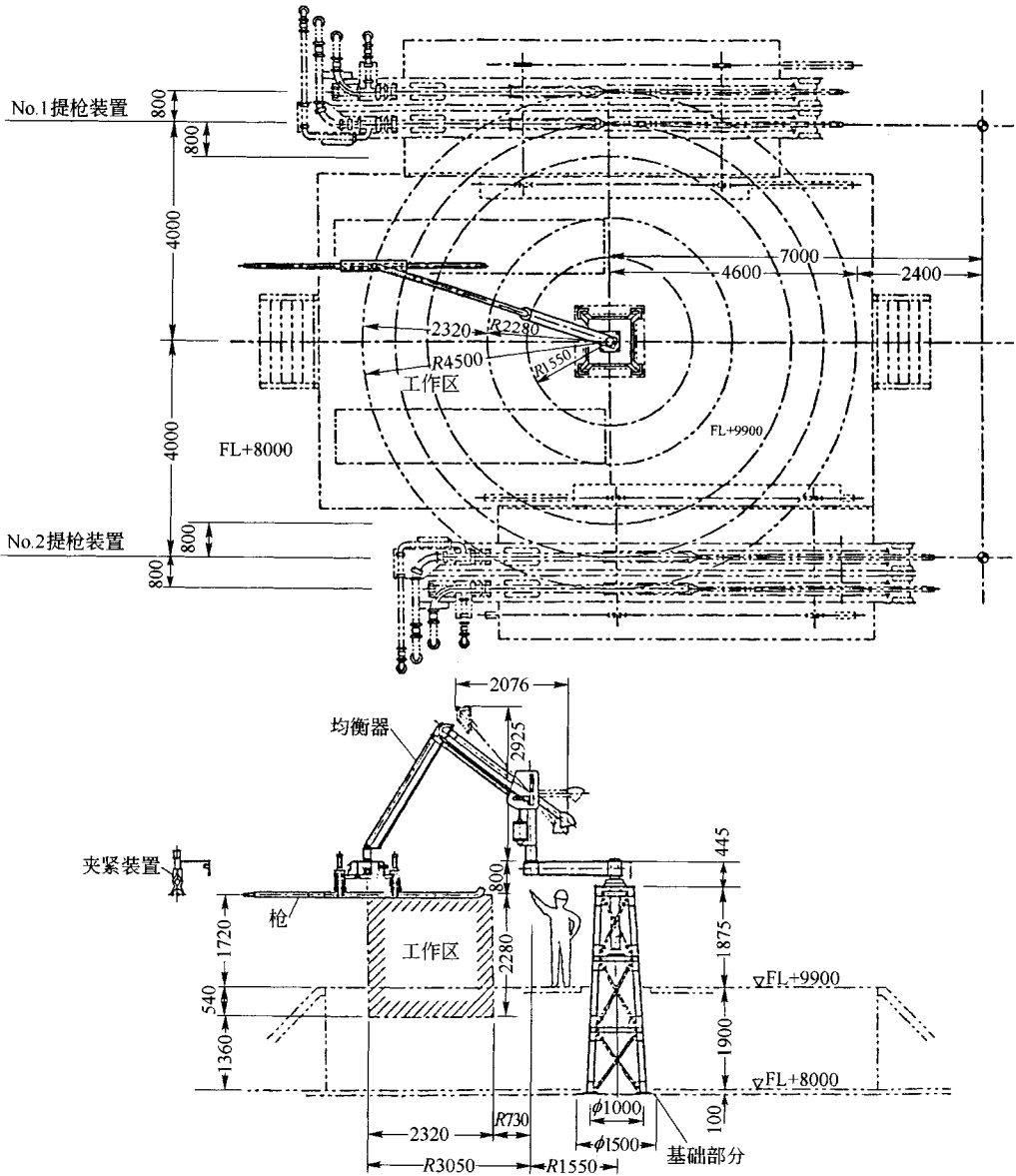


图 7 - 5 - 28 喷枪更换机械手

横移距离	17m
升降速度	5m/min
提升高度	22m
5t 电葫芦	
5t 电葫芦主要用于吊运喷枪贮存架。其参数为：	

起升质量	5t
行走速度	15m/min
行走距离	约 23m
起升速度	5m/min
起升高度	12m

3. 测温取样

测温取样装置

测温取样装置包括探头的把持机构 ,如图 7 - 4 - 29 所示 ,它用于测温取样探头的升起和降落。其参数为：

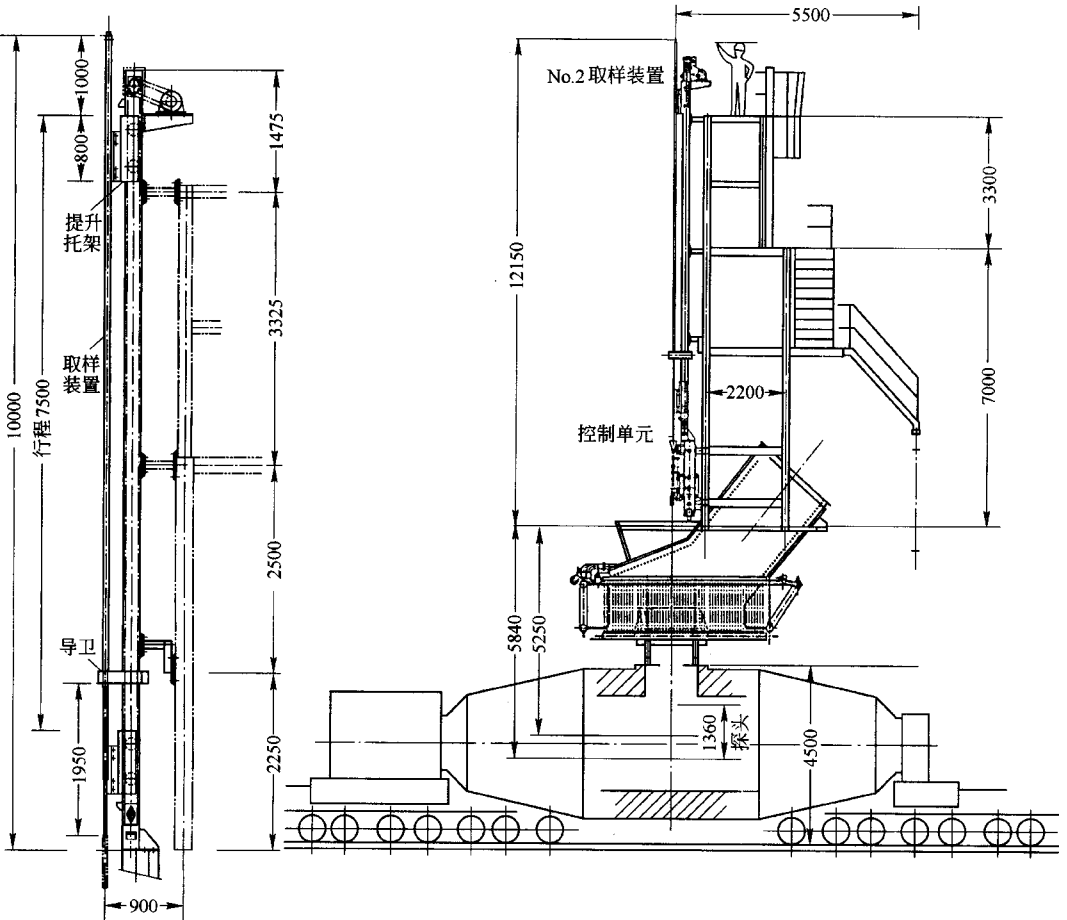


图 7 - 5 - 29 测温取样装置

形式 链条驱动

升降机构	电机驱动 3.7kW(V V V F)
升降速度	20m/min
升降行程	约 7500mm
把持机构	气缸驱动
气源	0.6MPa(空气)
夹紧	φ50mm × 150mmST
定位	φ80mm × 350mmST
设备总重	约 3.6t
探头自动更换装置	

探头自动更换装置由探头贮存架和探头装卸车组成 ,如图 7 – 5 – 30 所示。它主要用于测温取样装置探头的自动更换。其参数为：

探头贮存架	气缸驱动
气源	0.6MPa
贮存个数	16 个探头/贮存架
旋转气缸	φ63mm × 75mmST
停止气缸	φ40mm × 50mmST φ50mm × 75mmST
探头装卸车	马达和气缸驱动
行走速度	5m/min
行走距离	约 1400mm
驱动电机	0.4kW(齿轮传动)
气源	0.6MPa
夹持气缸	φ50mm × 50mmST
拔取气缸	φ50mm × 200mmST
旋转气缸	φ60mm × 200mmST
设备总重	0.5t

4. 排烟设备

防溅罩及其升降装置

防溅罩及其升降装置如图 7 – 5 – 31 所示。防溅罩主要是用于防止喷吹过程中混铁车中铁水喷溅。防溅罩升降装置是使防溅罩在喷吹时罩在混铁车上 ,处理完毕后 ,防溅罩升起 ,混铁车进出。防溅罩及其升降装置的参数为：

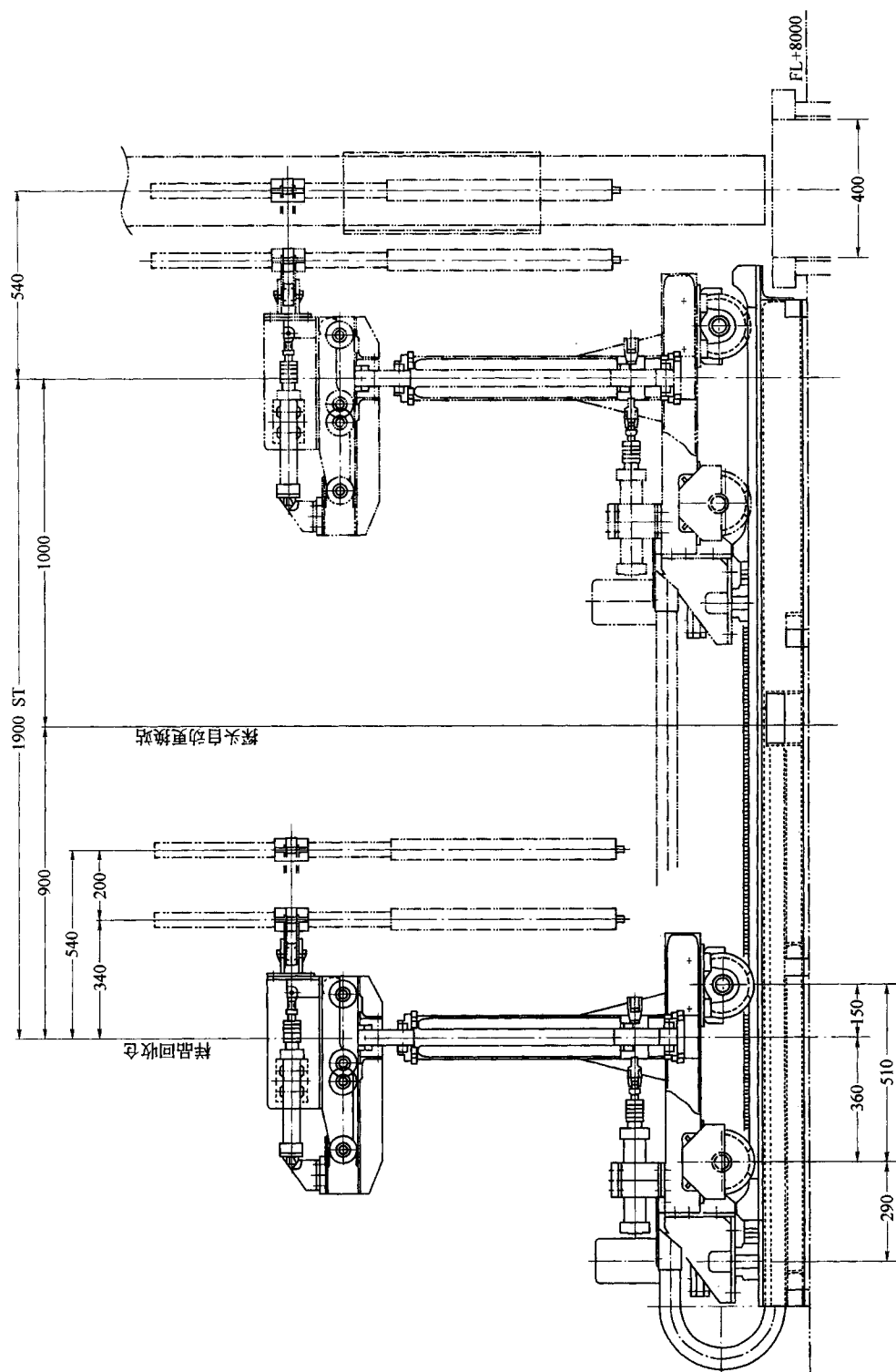


图 7-5-30 探头自动更换装置

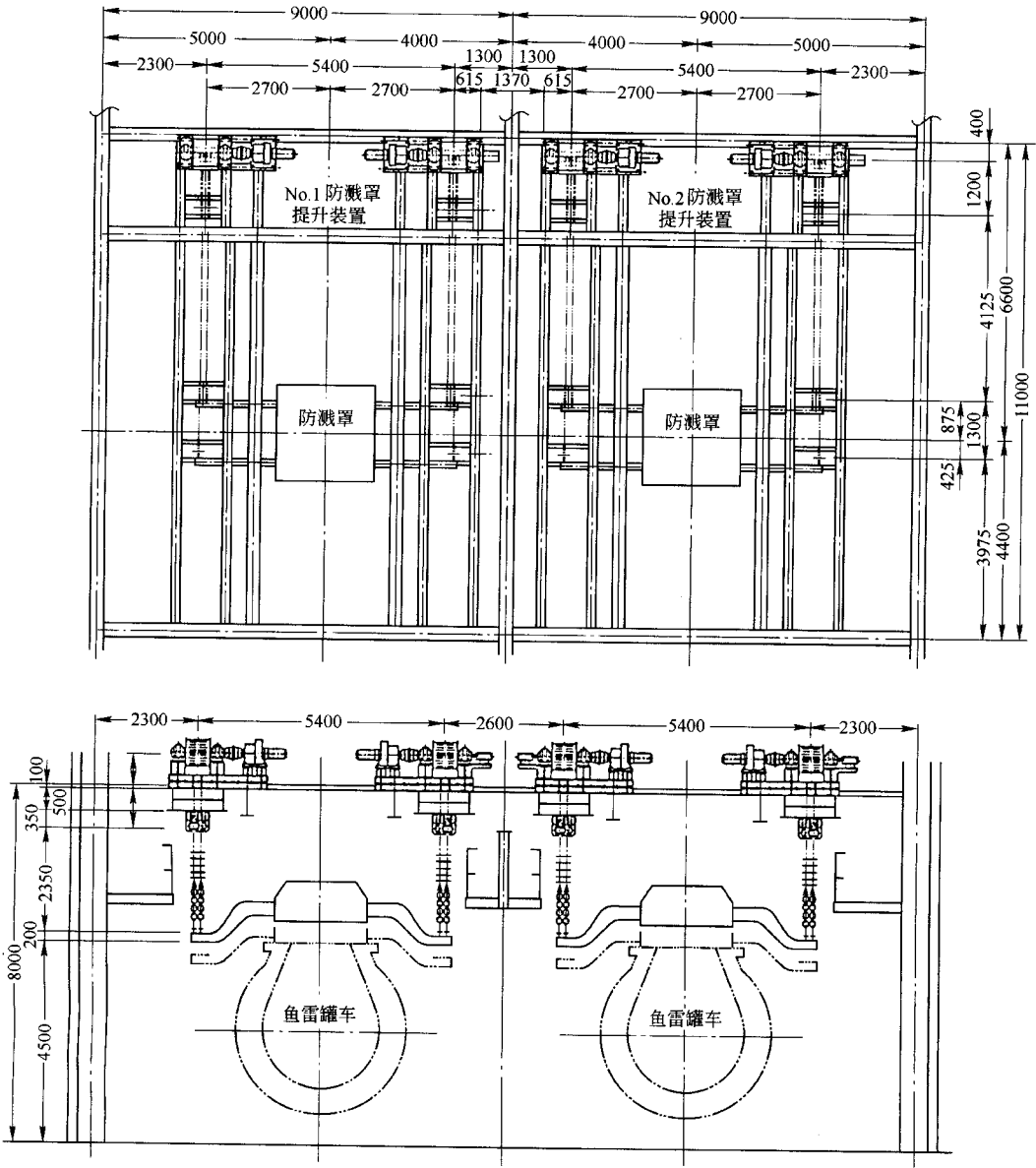


图 7-5-31 防溅罩及其升降装置

防溅罩形式	内衬耐火材料
防溅罩质量	约 9t (外壳加耐火材料)
升降形式	钢丝绳升降
提升能力	10t

提升机构	电机驱动 5.5kW
提升速度	5m/min
提升机构行程	5000mm
设备总重	5t
水冷集尘烟罩	

水冷集尘烟罩如图 7-5-32 所示。水冷集尘烟罩分两部分：一部分是集尘烟罩，坐在 +8.000m 主操作平台下；另一部分是水冷烟罩，吊在 +8.000m 主操作平台上。

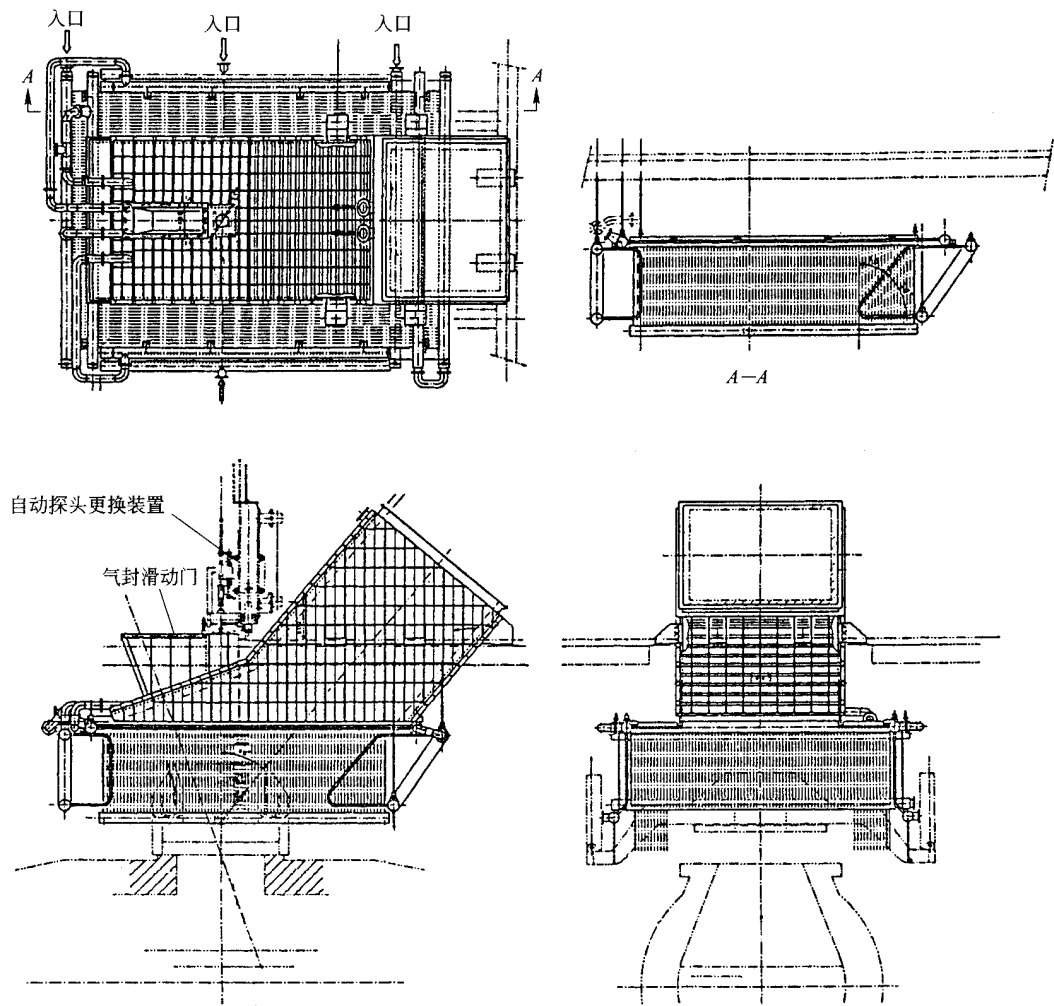


图 7-5-32 水冷集尘烟罩

集尘烟罩的参数为：

形式	内衬耐火材料的水冷罩
外形尺寸	进口 4475mm×2600mm 出口 2535mm×2535mm 高 约 3400mm
冷却水压力	最大 0.5MPa
冷却水流速	一般 3.5m ³ /min
进口温度	33℃
出口温度	41℃
水冷烟罩的参数为：	
形式	密集管水冷罩
外形尺寸	4500mm×4640mm×1400mm
冷却水压力	最大 0.5MPa
冷却水流速	一般 3.5m ³ /min
进口温度	33℃
出口温度	41℃

5. Na₂CO₃ 回收设备

Na₂CO₃ 灰仓

Na₂CO₃ 灰仓用于贮存除尘设备收集的灰尘。其参数为：

容量	40m ³
外形尺寸	φ4000mm×(3100 + 2900)mm
设计压力	0.02MPa
卸料速度	1t/min
流态化段	800mm(直径)
质量	约 7t

Na₂CO₃ 喷粉罐

Na₂CO₃ 喷粉罐用于称量和喷吹铁水脱磷

后再脱硫的回收 Na₂CO₃ 灰。其参数为：

容量	5m ³
外形尺寸	φ1800mm×(1500 + 1660)mm
设计压力	0.99MPa
工作压力	一般 0.5MPa

卸料速度	50 ~ 300kg/min
卸料喷嘴	$\phi 1250 \sim 120\text{kg/min}$; $\phi 18 \quad 100 \sim 200\text{kg/min}$; $\phi 25 \quad 180 \sim 300\text{kg/min}$
称重范围	0 ~ 6t
流态化段	1000mm(直径)
设备总重	3.4t

(三) 后扒渣中心

后扒渣中心同前扒渣中心 ,只是没有测温取样装置。

(四) 排渣清罐口中心

1. 清罐口机

清罐口机如图 7-5-33 所示。它主要用于混铁车罐口及罐口周边残渣和残铁的清理工,而清理是靠清罐口机上的气锤完成的 ,为了避免气锤头的损坏 ,它在工作时可以喷射水雾。清罐口机的参数为 :

外形尺寸	约 4600mm × 4100mm × 4750mm
冲击功	930J
气源压力	0.6MPa
气源流量	5m ³ /min
驱动形式	液压驱动
动作分类	轨道把持、运行、旋转、小臂升降、大臂升降、锤头翻转、锤头旋转
液压电机	30kW
轨道把持驱动方式	液压缸($\phi 80\text{mm} \times \phi 45\text{mm} \times 20\text{mmST}$) × 2
运行驱动方式	带制动器的液压电机
运行速度	20m/min
运行行程	约 2m
旋转驱动方式	带制动器的液压电机
旋转速度	最大 1r/min
旋转范围	270°

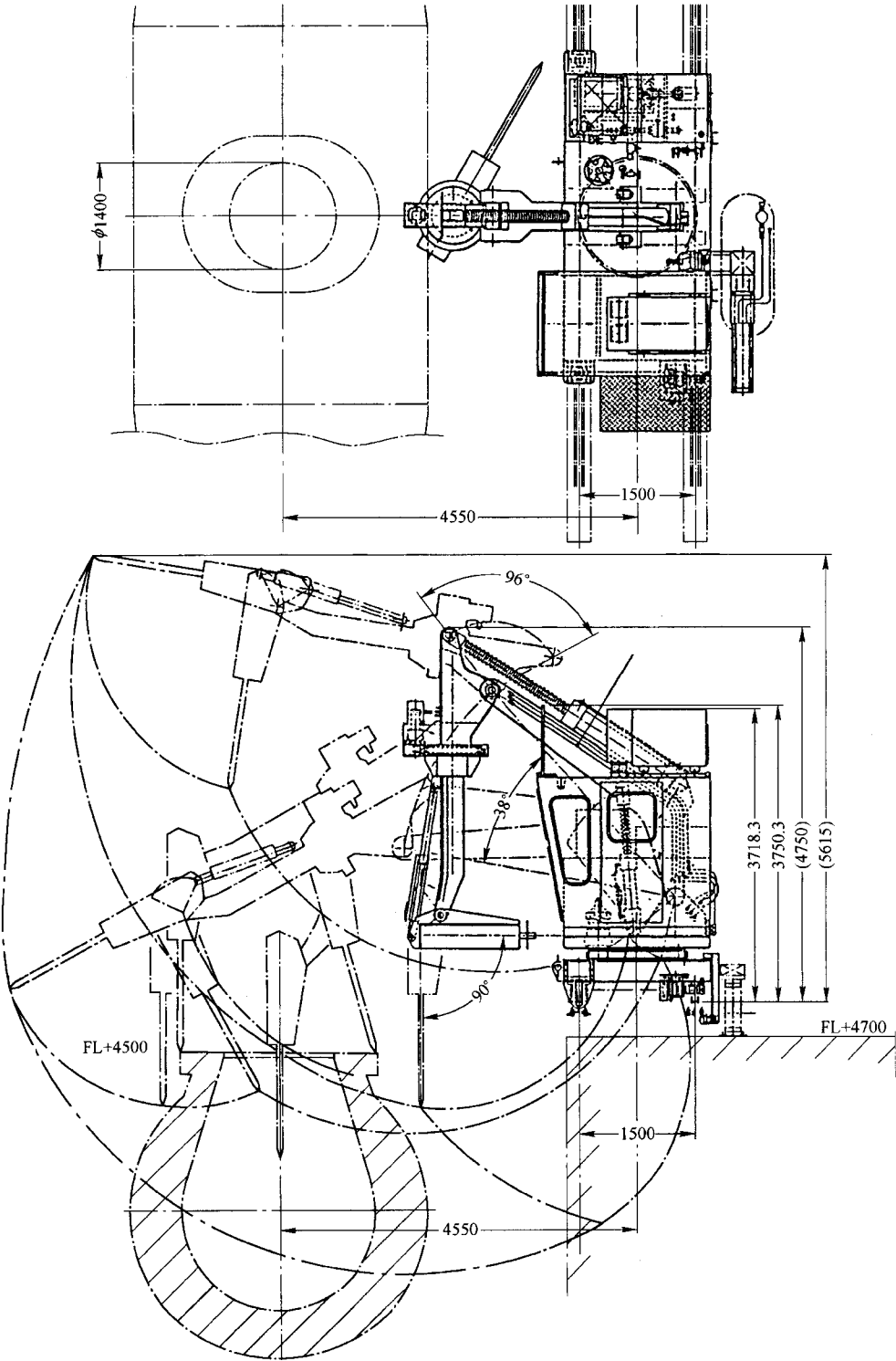


图 7-5-33 清罐口机

小臂升降驱动方式	液压缸($\phi 125\text{mm} \times \phi 71\text{mm} \times 42\text{mmST}$) $\times 2$
小臂升降速度	10m/min
小臂升降范围	约 96°
大臂升降驱动方式	液压缸($\phi 125\text{mm} \times \phi 71\text{mm} \times 42\text{mmST}$) $\times 2$
大臂升降速度	10m/min
大臂升降范围	约 38°
锤头翻转驱动方式	液压缸($\phi 80\text{mm} \times \phi 56\text{mm} \times 49\text{mmST}$) $\times 2$
锤头翻转速度	最大 10m/min
锤头翻转范围	约 90°
锤头旋转驱动方式	带制动器的液压电机
锤头旋转速度	最大 2r/min
锤头旋转范围	约 360°
设备总重	约 10t

2. 轨道开出装置

当清罐口机清罐口或混铁车进行倒渣作业时 ,为了避免残渣或残铁倒在轨道上 ,设置了轨道开出装置 ,如图 7-5-34 所示。当混铁车进出时 ,轨道开出装置复位。轨道开出装置的参数为 :

承载质量	最大 160t
外形尺寸	4900mm $\times$ 7275mm $\times$ 1700mm
动作分类	开出或锁紧
开出行程	7300mm
开出速度	10m/min
开出电机	3.7kW(VVVF)
锁紧行程	145mm
锁紧速度	0.9m/min
锁紧驱动	电动缸(0.4kW $\times 2$)

c 5t 电葫芦

5t 电葫芦主要用于清罐口机的检修和锤头的更换。其参数为 :

起重量	5t
提升高度	9m

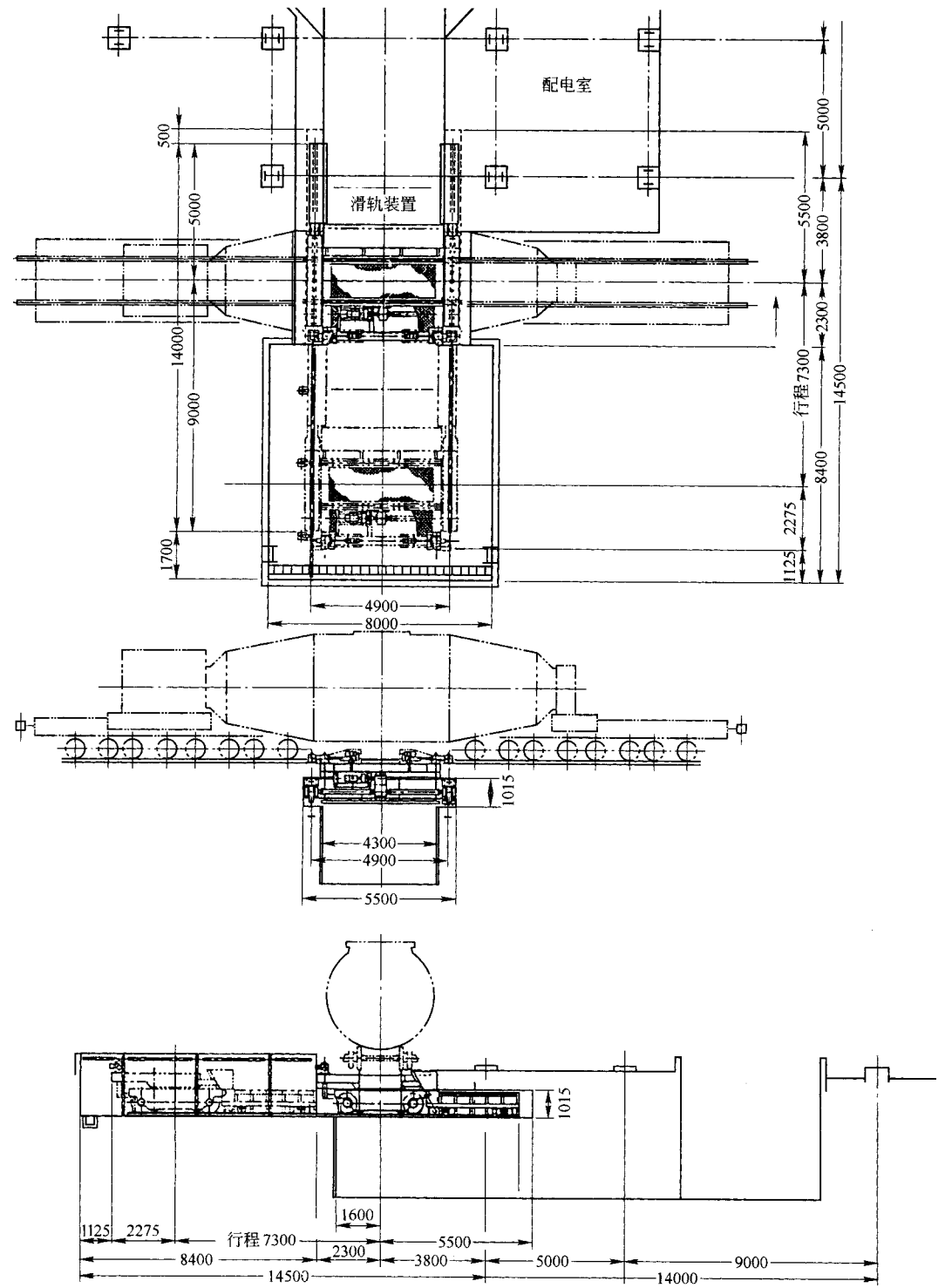


图 7-5-34 轨道开出装置

提升速度	6m/min
提升电机	5.5kW
行走距离	约 12m
行走速度	15m/min
行走电机	0.75kW

第六章 铁水预处理用耐火材料

铁水预处理通常在高炉出铁沟、鱼雷混铁罐车和铁水包中进行,铁水预处理用耐火材料一般指用于下列几方面的耐火材料:

- (1)出铁沟用耐火材料;
- (2)鱼雷混铁罐车和铁水包用耐火材料;
- (3)喷枪用耐火材料;
- (4)铁水搅拌器用耐火材料。

第一节 铁水预处理对耐火材料的作用与要求

以鱼雷混铁罐车铁水预处理为例,图 7-6-1 示出铁水预处理用的耐火材料。在进行铁水预处理时,预处理剂用载气(氮气或空气)通过喷枪喷入铁水中。为了提高预处理效率,通过喷嘴向铁水中喷入搅拌气体,或用搅拌器搅拌铁水,使预处理剂与铁水充分混合,加速反应进程并使反应充分完全。

在进行脱硅处理时,使用氧化铁系(FeO)预处理剂,一般用轧钢铁鳞或铁矿石作为预处理过程中的氧源,并使用石灰(CaO)调节炉渣碱度。在进行脱磷处理时,一般用石灰系($\text{CaO}-\text{CaF}_2-\text{FeO}$)或苏打灰系(Na_2CO_3)预处理剂。在进行脱硫处理时,使用石灰系($\text{CaO}-\text{CaF}_2$ 和 CaC_2)。各种预处理剂对耐火材料都有很强的侵蚀作用。尤其是苏打灰系预处理剂中, Na_2O 具有很好的脱磷、脱硫效果,但它的熔点很低(852°C),对耐火材料

的侵蚀作用很激烈。 Na_2O 还是一种强氧化剂,可使石墨和碳化硅氧化。在用石灰系预处理剂时,石灰(CaO)、萤石(CaF_2)和氧化铁(Fe_2O_3)混合使用,氧化铁和萤石对耐火材料有强烈的侵蚀作用,不过它们的侵蚀作用要比 Na_2O 轻。此外,由于处理过程中添加石灰,炉渣的碱度变化大,从酸性渣变为碱性渣,耐火材料遭受了酸性渣和碱性渣的侵蚀。

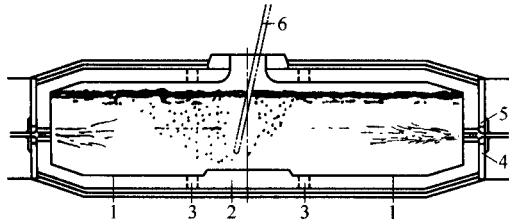


图 7-6-1 鱼雷混铁罐内的耐火材料

1—白云石质耐火材料 2—高铝耐火材料 3—镁质耐火材料;
4—密封砖 5—透气砖 6— CaC_2 喷枪

在铁水预处理过程中,耐火材料遭受的侵蚀破坏作用主要为:

- (1) 高温铁水和炉渣的强烈冲刷磨损作用;
- (2) 各种预处理剂的化学侵蚀作用;
- (3) 炉渣的渗透和侵蚀作用;
- (4) 间歇操作带来的温度骤变作用。

因此,对铁水预处理用耐火材料的要求是:

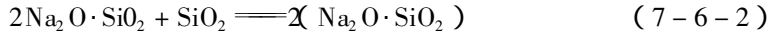
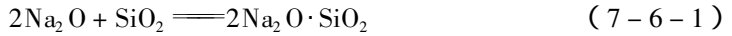
- (1) 高温强度大,耐磨损;
- (2) 耐各种预处理剂的侵蚀作用;
- (3) 抗炉渣的侵蚀性能好;
- (4) 耐热震性能好,不发生开裂、剥落掉片;
- (5) 便于现场应用和施工,对环境污染少。

第二节 铁水预处理用耐火材料基础

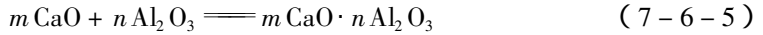
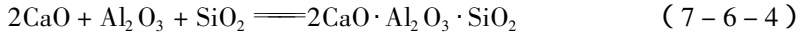
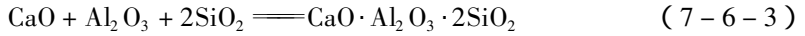
一、预处理剂对耐火材料的侵蚀作用

铁水预处理剂多采用苏打灰、石灰、氧化铁、 CaC_2 等,其对耐火材料的侵蚀分别表现为:

(1) 苏打灰 (Na_2CO_3) :其熔点(852°C)比铁水温度($1250 \sim 1450^\circ\text{C}$)低得多 ,加入到铁水中就立即熔融分解 ,生成的 Na_2O 是很强的熔剂 ,它与耐火材料中的 SiO_2 反应形成低熔点化合物偏硅酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$,熔点 1088°C) ,导致耐火材料熔损 :



(2) 石灰 (CaO) : CaO 可与耐火材料中 SiO_2 和 Al_2O_3 反应 ,生成 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、铝酸钙和玻璃相低熔物质 ,引起耐火材料的蚀损 :



(3) 氧化铁 (Fe_2O_3) :它是两性氧化物 ,对酸性耐火材料来说 ,它作为强碱性的 FeO 起作用 ,生成 $\text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系低熔点物相和 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 等化合物 ,侵蚀耐火材料。含有高浓度 FeO 的低黏度 $\text{FeO} - \text{SiO}_2$ 系炉渣 ,不仅对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系耐火材料有很强的侵蚀性 ,而且对碱性耐火材料的侵蚀也很严重。

(4) CaC_2 :它的侵蚀作用是氧化后的生成物 CaO 与耐火材料的侵蚀反应。

(5) CaF_2 :它是强熔剂 ,可降低炉渣的熔点和黏度 ,加速对耐火材料的侵蚀作用 ,分解产物 CaO 也与耐火材料发生侵蚀反应。

二、相平衡关系

在铁水预处理剂中 ,对耐火材料侵蚀作用大的主要成分为 Na_2O 、 FeO 和 CaF_2 ,图 7-6-2 为它们与常见耐火氧化物在 1400°C 下反应生成液相量的平衡状态图。铁水预处理的温度在 $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ 之间 ,于是可用图 7-6-2 来预测各种耐火材料抵抗铁水预处理剂侵蚀能力的优劣。

对于 Na_2O 和 CaF_2 预处理剂 , Al_2O_3 是最不容易生成液相的耐火氧化物 ,而对于 FeO 处理剂 , MgO 是最稳定的耐火氧化物。按图 7-6-2 的平衡状态图 ,耐火氧化物抵抗预处理剂侵蚀能力强弱的顺序为 : $\text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{SiO}_2$ 。

三、耐火材料抵抗铁水预处理剂侵蚀的性能

图 7-6-3 为苏打灰系预处理剂对各种耐火材料的侵蚀试验结果比较。与上述平衡状态图的判定相似 , Al_2O_3 质和 MgO 质耐火材料具有高的抗侵蚀性能。应当特别提出

的是,添加碳(石墨)和碳化硅可显著提高耐火材料的抗浸透性和抗侵蚀性。

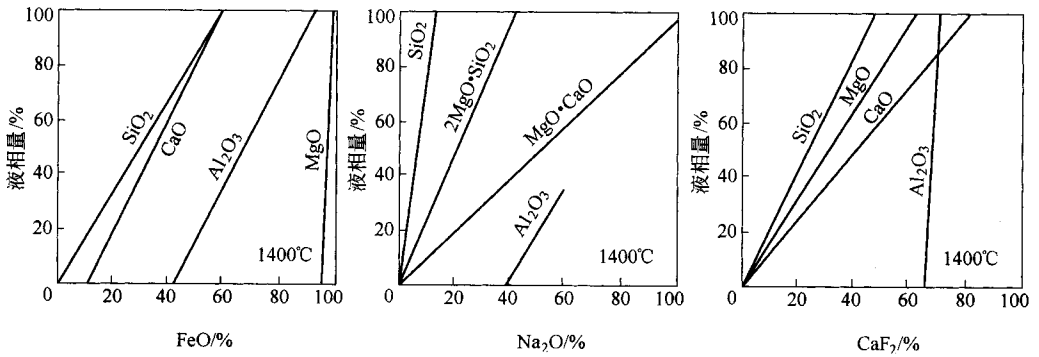


图 7-6-2 铁水预处理剂与耐火氧化物在 1400℃ 下反应生成的液相量

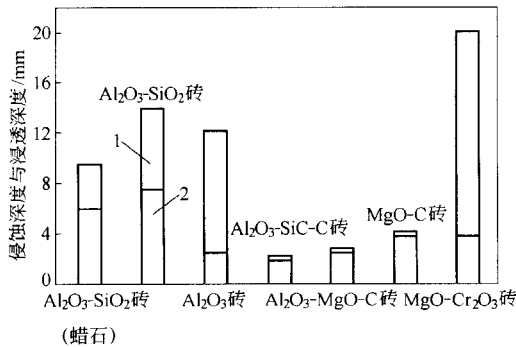


图 7-6-3 苏打灰处理剂对各种耐火材料的侵蚀试验结果比较
(试验条件: 高频感应炉 渣 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 3$;
加热周期: $1500^\circ\text{C} \times 30\text{min} \times 6$ 次)
1—炉渣浸透深度 2—蚀损深度

现在获得国内外普遍认可和广为流行的铁水预处理用的主体耐火材料为 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 质耐火材料,包括定形耐火砖和不定形耐火材料两大类。

第三节 高炉出铁沟用耐火材料

一、出铁沟耐火材料内衬

高炉出铁沟由主铁水沟(主铁沟)、铁沟(支沟)和渣沟构成。铁水从高炉出铁口流出

后通过铁水沟系统 ,经过渣、铁分离和预处理后流入鱼雷混铁罐车。高炉出铁时 ,铁水温度高达 $1450 \sim 1570^{\circ}\text{C}$,流经铁水沟的铁水量依高炉大小不同 ,每分钟达 $4 \sim 7\text{t}$ 。铁水中含有大量炉渣 ,每吨铁水约有 $180 \sim 340\text{kg}$ 炉渣。高炉每昼夜出铁多达 15 次 ,每次持续 $70 \sim 120\text{min}$ 。这样 ,出铁沟耐火材料工作层内衬反复频繁地受到高温铁水和熔渣的冲刷、磨损和腐蚀作用 ,工作条件相当恶劣 ,尤其是主铁沟段的耐火材料内衬受到的侵蚀作用更甚 ,成为高炉炼铁系统内消耗耐火材料最多的部分。

图 7-6-4 示出典型的出铁沟耐火材料内衬的剖面结构图。铁水沟修筑在钢板沟槽内或混凝土基础上 ,永久层一般用黏土砖或不定形耐火材料修筑 ,工作层采用含碳捣打料或含碳耐火浇注料 ,其中以含碳耐火浇注料为当今常用的出铁沟用耐火材料。

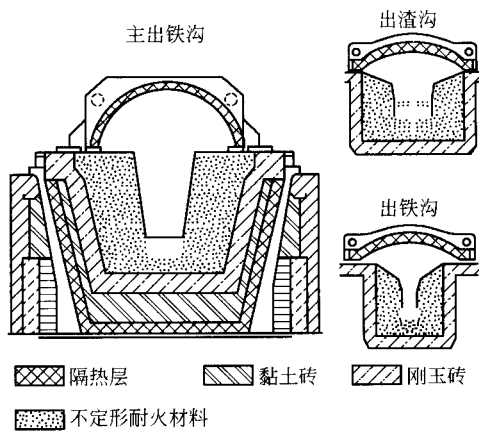


图 7-6-4 出铁沟耐火材料内衬的剖面结构

铁水沟工作衬用耐火材料 ,特别是用在主铁沟渣线部位的含碳不定形耐火材料 ,为能承受严酷的使用条件 ,应具备如下性能 :

- (1)耐化学侵蚀 :即耐熔渣和高温铁水的化学侵蚀和渗透 ,特别要求在温度高于 1500°C 时耐侵蚀性要好 ,同时还要求抗熔渣、铁水的渗透性要好 ;
- (2)高温力学性能好 :具有优良的高温耐磨性 ,即要耐熔渣和铁水的冲击与冲刷 ;
- (3)具有致密的结构 :在高温下的体积稳定性要好(或稍有膨胀) ;
- (4)抗氧化性好 :对于含碳耐火材料 ,要求具有良好的抗氧化性能。

二、耐火材料的应用与性能

20 世纪 60 年代以前 ,世界高炉大多是中小高炉 ,出铁沟工作衬多以廉价的焦炭粉、黏土熟料与焦油混合 ,经捣打制成。60 年代以后 ,高炉大型化 ,冶炼技术改进 ,采取了提

高温($> 1320^{\circ}\text{C}$),提高顶压($> 0.3\text{MPa}$),提高鼓风的富氧量,以及喷吹碳氢化合物和煤粉等措施,大大地提高了高炉的生产能力。这些改进均提高了出铁沟系统的负荷,增大了对出铁沟耐火材料的侵蚀破坏程度,使筑衬与修补费用大大提高,导致各国对出铁沟耐火材料的种类和施工性能进行了一系列的科学研究,从而开发出了品种各异、适应于不同场合的不定形耐火材料。图 7-6-5 示出了这个开发过程。从出铁沟耐火材料的发展进程可见,尽管对其进行了不少的改进,但基本材质都是含碳不定形耐火材料。近期所用的主要是 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 系列不定形耐火材料, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 系列浇注料是可以满足高炉出铁沟的操作要求的。

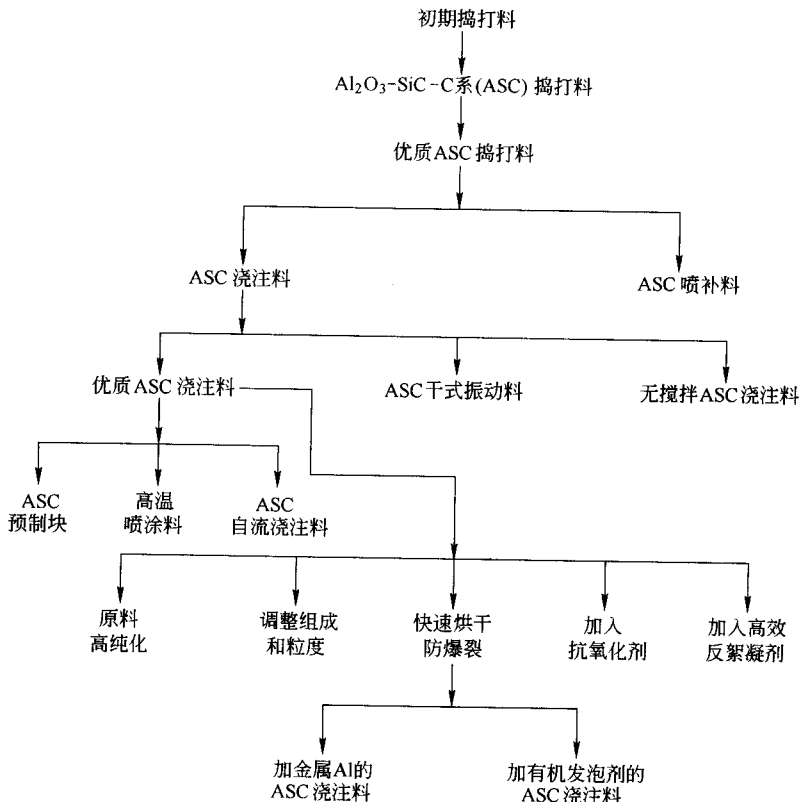


图 7-6-5 出铁沟用不定形耐火材料的开发进程

(一) 中国高炉出铁沟耐火材料

在 20 世纪 70 年代以前,中国的高炉出铁沟内衬主要是采用沥青结合的捣打料捣固而成。近些年来,由于炼铁工业的发展,出铁沟耐火材料的发展也很快,研制成功了多品种、多系列的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 捣打料和 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料,其生产和使用效果均已

接近或达到世界先进水平。

图 7-6-6 为宝钢 4063m³ 高炉出铁沟的布局。该高炉日产最大出铁量 1 万 t,出渣量 3200t,出铁速度为 5.8~7.5t/min。早期宝钢铁沟料使用炭质捣打料,每条出铁沟的通铁量为 6 万 t 左右,出铁沟耐火材料单耗约 2.2kg/t,其中主出铁沟耐火材料单耗约 1.1kg/t。1987 年开始改用耐火浇注料,宝钢的出铁沟料现已全部使用 Al₂O₃-SiC-C 质浇注料,一次通铁量为 5.5~6 万 t。表 7-6-1 列出宝钢铁水沟用的主要耐火材料品种和性能。

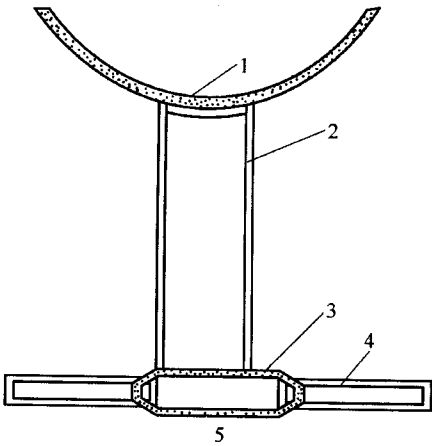


图 7-6-6 宝钢高炉出铁沟布局

1—铁口 2—主出铁沟 3—摆动流嘴 4—出铁沟 5—渣沟

表 7-6-1 宝钢 4063m³ 高炉出铁沟用耐火材料

使用部位		安全衬	摆动流嘴	主沟	铁沟	渣沟	沟盖
耐火材料		隔热砖	浇注料	浇注料	浇注料	浇注料	浇注料
化学组成/%	Al ₂ O ₃	38.43	≥65	≥50	≥45	≥50	≥60
	SiC		≥8	≥30	≥7		≥15
	SiO ₂	51					
物理性能	体积密度/g·cm ⁻³						
	110℃×24h	≤0.90	≥2.6	≥2.50	≥2.10	1500℃×3h	≥2.50
	1450℃×2h		≥2.5	≥2.50	≥2.0	≥2.05	

使用部位		安全衬	摆动流嘴	主沟	铁沟	渣沟	沟盖
物理性能	常温耐压强度/MPa	≥2.0	≥5.0	> 6.0	≥2.0	> 15.0	
	110℃×24h		≥15	≥10.0	≥3.5	> 30.0	
	1450℃×3h						
	抗折强度/MPa						1.97
	110℃×24h						4.93
	1450℃×3h						
	耐火度/℃					≥1730	
	线变化率/%	1300℃ ≤2	1450℃×2h ±0.5	1450℃×3h ±1.0	1450℃×3h ±1.0	1500℃×3h ±1.0	1400℃×3h ±1.0
	导热系数/W·(m·K) ⁻¹	350℃ ≤0.24					

在中国有许多中小高炉的出铁沟还采用 Al₂O₃ – SiC – C 质捣打料修筑 ,材质上有以矾土熟料为骨料的捣打料和以电熔刚玉为骨料的捣打料。表 7 – 6 – 2 为鞍钢炼铁厂以电熔棕刚玉为骨料的 Al₂O₃ – SiC – C 质捣打料的配料组成和性能 ,使用寿命比矾土质捣打料高 2 倍。

表 7 – 6 – 2 刚玉质铁水沟捣打料的配料组成和性能

配料组成/%		
电熔棕刚玉	1 ~ 8mm	56 ~ 65
	< 0.088mm	5 ~ 15
碳化硅(< 0.088mm + 0.5mm)		12 ~ 20
硬质沥青 0.5mm		5 ~ 10
蓝晶石(0.074 ~ 0.149mm)		5 ~ 10
黏土粉(< 0.088mm)		5 ~ 10
水		8 ~ 10
性能		
化学组成/%	Al ₂ O ₃	66.72
	SiC	10.25
	C	7.46
	灼减	9.3
物理性能 (1300℃×3h)	体积密度/g·cm ⁻³	2.48
	线变化率/%	+ 0.55
	耐压强度/MPa	26.5

(二)日本高炉出铁沟耐火材料

日本对出铁沟耐火材料的材质与施工方法的研究比较广泛深入,效果较为显著。20 世纪 60 年代以前,采用廉价原材料,使用焦油做结合剂人工捣打成形,通铁量在 1 万 t 以下。60 年代以后,开发了 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 质捣打料,通铁量可达 5 万 t。70 年代以后,出铁沟内衬的施工方法由人工捣打发展为机械捣打,并开始进行喷补维修。70 年代后期,开发了 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 系振动浇注料,相继研制成功振动成形法(VF 法),干式振动成形法(SVP 法),以及浇注成形法(N - Cast 法)等施工方法和施工机械,大大减轻了劳动强度。80 年代以后,又陆续研制开发了多种出铁沟耐火材料,如抗侵蚀性良好的致密 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料。为缩短 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的烘烤时间,研制了一种添加金属铝粉的抗爆裂的出铁沟耐火材料。为排除加铝粉浇注料因氢气爆炸产生的孔洞现象,研制了有机气体发生剂代替金属铝粉的抗爆裂出铁沟耐火材料。近年来,日本又研制出了一种热硬性的无搅拌 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 质浇注料,这是一种在生产厂预混合的浇注料。它以泥料态直接送到高炉炉前施工现场浇注,减轻了筑衬的作业量,改善了劳动环境。现在,日本又研制了自流浇注料,可以提高浇注体的均匀度,又可减轻工人的劳动强度。当前,日本除在部分小型高炉出铁沟上仍使用矾土 - $\text{SiC} - \text{C}$ 质捣打料外,在几乎所有的高炉出铁沟上均使用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 质浇注料。这种浇注料的不修补通铁量已超过 10 万 t。日本还开发了喷补料,用以喷补维修出铁沟内衬。出铁沟内衬经过修补和喷补维修后,通铁量已达到 50 万 t 以上。表 7 - 6 - 3 列出日本出铁沟耐火材料的性能。

表 7 - 6 - 3 日本出铁沟耐火材料的性能

材料种类		无搅拌浇注料		浇注料			自流 浇注料	喷补料	浇注料
		ML - Z	ML - F	LC - Z	LC - F	AC - Z	FC - F	CA	AM
化学组成 /%	Al_2O_3	53	68	46	73.5	75(73)	73	79	94
	SiO_2				2.5	4(3)	5	6	1
	SiC	43	26	47	16.5	15(19)	15	8	
	C	2.5	2.5	2.0	3.0	1	3		
	MgO					3		1 ~ 4	3

材料种类			无搅拌浇注料		浇注料			自流 浇注料	喷补料	浇注料
			ML-Z	ML-F	LC-Z	LC-F	AC-Z	FC-F	CA	AM
物理性能	体积密度 /g·cm ⁻³	110℃干燥后						2.87		
		1000℃×3h					2.75	2.85	3.25	
		1450℃×3h					2.84	2.84	2.31	(1500℃×3h)3.26
	耐压强度 /MPa	1000℃×3h	95	90	68	40	20	35		
		1450℃×3h	105	100	53	53	40	45	24	(1500℃×3h)78.5
	抗折强度 /MPa	110℃干燥后					4	6		
		1000℃×3h	14	13	10.7	4.5	4	8		
		1450℃×3h	12	15.0	9.0	7.5	10	12	4.5	(1500℃×3h)40.2
	高温抗折强度/MPa	110℃干燥后					1.0	1.2		
		1450℃×3h					2.3	0.6		
	线变化率 /%	1000℃×3h	+0.06±0.01	+0.01±0.01	+0.01±0.04	+0.01±0.0	+0.0	+0.0		
		1450℃×3h	+0.09±0.06	+0.06±0.10	+0.10±0.02	+0.02±0.2	+0.2	+0.02		(1500℃×3h)-0.12
	显气孔率 /%	110℃干燥后					15	16		
		1000℃×3h	16.6	16.2	16.5	14.5	20	17		
		1450℃×3h	15.0	16.1	16.8	17.0	18	18		(1500℃×3h)13.9
施工用水量/%							5.0	5.6	5.6	
使用部位			主出铁 沟渣线	主出铁 沟铁线	主出铁 沟渣线	主出铁 沟铁线	主出 铁沟	主出 铁沟	主出铁 沟喷补	出铁沟 脱硅沟

(三)德国高炉出铁沟耐火材料

德国高炉出铁沟内衬一般采用 Al₂O₃ - SiC - C 质捣打料 ,为了提高出铁沟的抗氧化性和耐侵蚀性。在捣打料中加入 Si₃N₄。近年来 ,德国还引进和开发了出铁沟用 Al₂O₃ - SiC - C 质浇注料和干式振动料。德国出铁沟用耐火材料的理化性能指标如表 7 - 6 - 4 所示。

表 7－6－4 德国高炉出铁沟用耐火材料的理化性能

材料种类			捣打料		浇注料		振动成形料		喷补料	不含 SiC 的浇注料
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		74	60	76.5	67.5	66.5	76	61	67 ~ 84
	SiO ₂		3	11	2.5	3.5	2.5	2	3	30 ~ 14
	SiC		12	15	12.5	17.5	27			
	C		4	3	2.5	5.5	(3)	15	30	
	Si ₃ N ₄			10				4		
	Si						(3)			
物理性能	体积密度 /g·cm ⁻³	干燥后	2.74	2.48	2.89	2.63	2.84	2.72		2.63 ~ 2.80
		1100℃ × 3h		2.45			2.81	2.67		2.60 ~ 2.75
		1450℃ × 3h	2.63	2.44	2.86		2.88	2.71		2.57 ~ 2.73
	显气孔率 /%	干燥后	17.5		17.1	21.8	16.7	22.6		14.9 ~ 15.5
		1100℃ × 3h					18.0	26.1		
		1450℃ × 3h	25.2	22	20.5		19.5	25.0	26.4	19.2 ~ 21.5
	耐压强度 /MPa	干燥后	16.5	8	5.9		12.6	18.6		30 ~ 35
		1100℃ × 3h		17			9.6	7.0	22.7	45
		1450℃ × 3h	35.7	25	29.6		22.9	18.6		55 ~ 90
	抗折强度 /MPa	干燥后	3.6	2.0	1.0	1.3	1.8	5.5		4.5 ~ 5.0
		1100℃ × 3h		3.5				1.0		6.5
		1450℃ × 3h	6.2	3.0	4.7		2.0	3.5	7.0	1.8 ~ 3.0
	线变化率 /%	1100℃ × 3h	+ 0.06							
		1450℃ × 3h		+ 0.2	+ 0.01		+ 0.10	- 0.29	1.1	+ 0.2
加水量/%			3.5		6		5	0.5	7 ~ 10	5.5 ~ 6

(四)韩国高炉出铁沟耐火材料

韩国在耐火材料的生产方面重视引进外国的先进技术 ,出铁沟耐火材料方面引进了日本、英国等国的先进技术 ,能够生产各种类别 ,性能不同的适应于出铁沟不同部位的系列耐火材料。各种出铁沟耐火材料的性能如表 7－6－5 所示。

表 7－6－5 韩国高炉出铁沟用耐火材料的性质

材料种类			Al ₂ O ₃ －SiC－C 浇注料			Al ₂ O ₃ －SiC－C 捣打料			出铁沟用 预制块	喷补料
			AU1	AU3	HK8H	AN210	RP210	CI－210	82	RGM－20
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		74	56	64.4	55	18	22	65	62
	SiO ₂		3	4		10	41	50	10	12
	SiC		14	36	14.5	SiC＋C	SiC＋C	SiC＋C	SiC＋C	19
	F.C		3	2	2.8	19	24	12	10	
物理性能	线变化率 /%	1450℃×24h	+0.05	+0.07	+0.01	+0.25	+3.0	+0.55		－0.07
	体积密度 /g·cm ^{－3}	110℃×24h	2.75	2.72	2.57	2.60	2.10	1.92	2.65	2.31
		1450℃×24h	2.73	2.67	2.51	2.45	1.75	1.83		2.26
	显气孔率 /%	110℃×24h	17.3	16.3	17.6					24.3
		1450℃×24h	27.5	21.2	22.6					27.2
	抗折强度 /MPa	110℃×24h	5.52	1.36	5.06					2.13
		1450℃×24h	2.95	4.62	7.05					7.56
	常温耐压 强度/MPa	110℃×24h	27.8	6.9	30.2	15.0	17.5	11.0	25.0	15.9
		1450℃×24h	17.6	31.7	62.5	13.0	9.0	6.0		32.1
浇注时加水量/%			6.5	6.5	7.0					
施工方法			浇注成形 振动成形	同左	同左	捣打成形	捣打成形	同左	装配	喷射
使用部位			主出铁 沟,铁线	主出铁 沟,渣线	出铁沟	主出铁沟	出铁沟	渣沟		主出铁沟
成形原料需用量/t·m ^{－3}			2.750	2.740	2.570	2.600	2.100	1.920	2.600	2.320

中、小型高炉的出铁沟内衬,由于受到施工空间小和出铁间歇时间短等条件的限制,一般使用捣打耐火材料或预制件。

大型高炉的主出铁沟的渣线部位采用 SiC 含量较高(SiC > 34%)的 Al₂O₃－SiC－C 系列浇注料,铁线部位采用 Al₂O₃ 含量较高(Al₂O₃ > 65%),而 SiC 含量较低(SiC ≈ 15%) 的系列浇注料。在渣沟、铁沟上使用 Al₂O₃－SiC－C 质捣打料以降低成本。主出铁沟还

采用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 质喷补料进行修补,以便延长出铁沟使用寿命,降低耐火材料消耗。

韩国生产的出铁沟耐火材料具有下列特性 (1)施工用水量少 (2)体积稳定 (3)可以直接与出铁沟残衬相结合 (4)可以在极短时间内干燥、烘烤 (5)安装迅速(预制件的砖型设计合理) (6)节省劳动力 (7)施工需要空间小 (8)耐火材料的性能与价格比较高。

三、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料

出铁沟用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料一般为低水泥和超低水泥浇注料,主要由 Al_2O_3 质骨料、 SiC 、碳、水泥及各种添加剂等多种物料配合而成,它们在浇注料中的作用如图 7-6-7 所示。

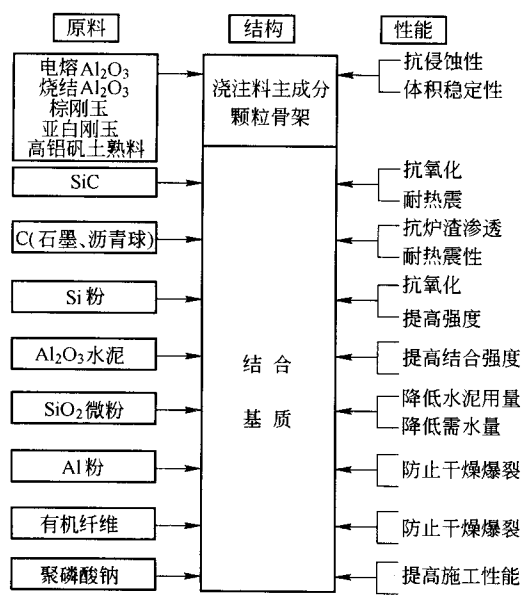


图 7-6-7 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料中各组分的作用

(一) Al_2O_3 骨料

可用于配制 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的 Al_2O_3 骨料有电熔刚玉、棕刚玉、亚白刚玉、烧结氧化铝和高铝矾土熟料。骨料的性能对浇注料的性能有很大的影响,应根据使用条件选定,高档浇注料的主体材料为电熔致密刚玉,中档用电熔棕刚玉,低档用烧结矾土熟料。

(二) SiC

SiC 原料的添加主要出于以下几种考虑 ①可以防止碳的氧化,提高出铁沟耐火材料的抗氧化性 ② SiC 的膨胀系数较低,仅仅是 Al_2O_3 的一半,可以防止耐火材料在使用过程中因反复加热、冷却所引起的脆化 ③ SiC 原料的导热率高,可以提高耐火材料的耐热

震性,这对提高出铁沟耐火材料的抗剥落性大有好处。图 7-6-8 为 SiC 加入量与 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的抗热震性能的关系。

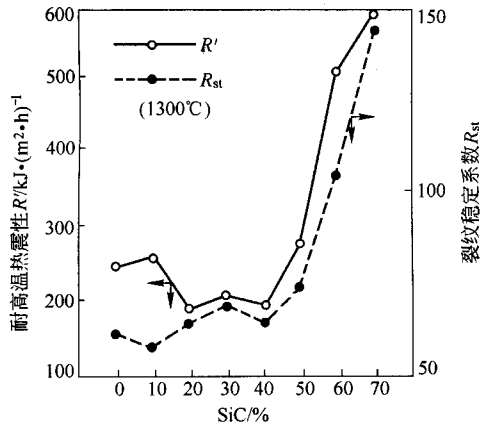


图 7-6-8 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料中 SiC 含量与 R' 、 R_{st} 的关系

图 7-6-9 为 SiC 含量与 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的抗侵蚀性能的关系。加入 SiC 可使浇注料的性能大大改善,其作用原理为使用中发生如下反应:

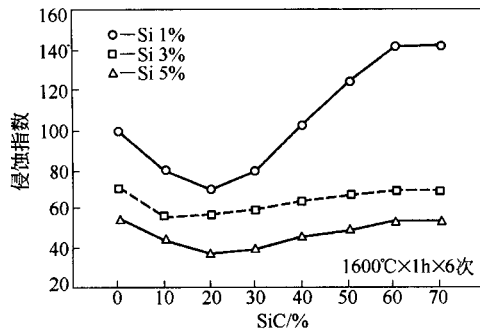


图 7-6-9 SiC 含量对抗渣性影响

氧化后产物为二氧化硅(SiO_2)和 CO 、 CO_2 , SiO_2 可以形成一层保护膜,防止耐火材料进一步氧化。当 O_2 向耐火材料内部扩散和 CO 向外扩散时,均需穿透这层保护膜, CO 逸出过程中可抑制 O_2 向内扩散,逸出后,在耐火材料表面形成气泡又限制了氧气的流入,最终抑制了氧化。

但是, SiC 加入量超过 20% 以后,浇注料的抗侵蚀性能变坏,这是因为 SiC 加入量过

多时 ,高温强度下降(图 7 - 6 - 10)。

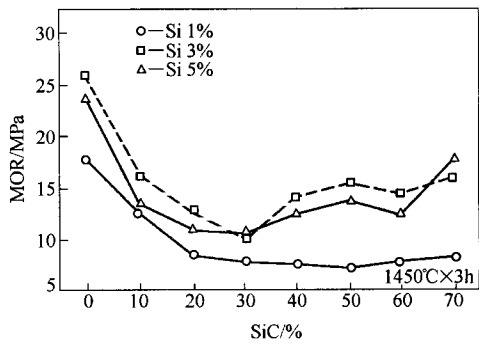
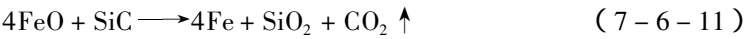


图 7 - 6 - 10 SiC 含量对断裂模量的影响

当脱硅剂的主要成分为氧化铁时 ,SiC 被氧化铁氧化 ,发生如下反应 :



实际使用中主要发生式 7 - 6 - 10 所示的反应。该过程在 1400℃ 以上会急剧进行 ,因此此温度下 ,FeO 为液相 ,反应产生大量气体 ,使 SiC(耐火材料)很快侵蚀。

尽管如此 ,SiC 仍能有效地防止富 FeO 炉渣的渗透和提高浇注料的抗侵蚀性 ,如图 7 - 6 - 11 所示。Al₂O₃ - SiC - C 浇注料在脱硅铁水沟中使用 ,SiC 的含量需控制在 10% 以下。

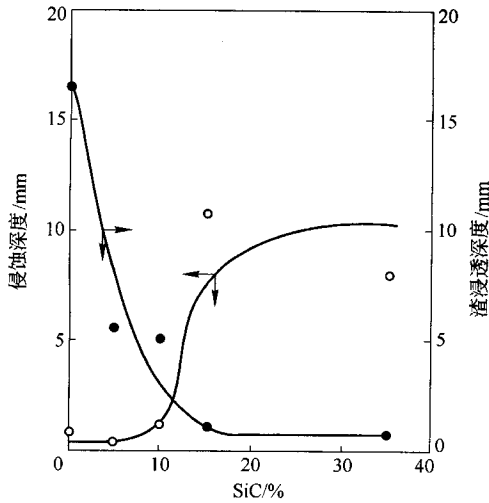


图 7 - 6 - 11 浇注料的 SiC 含量与对铁鳞渣的耐侵蚀性的关系
(试验条件 :旋转炉 ,温度 :1500℃ ,渣 :轧钢皮)

(三) 碳

在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料中,碳主要起阻止炉渣渗透的作用,将炉渣限定在耐火材料内衬的表层。同时,碳还使浇注料的热传导率提高,降低弹性模量,提高浇注料的耐热震性,减轻铁水沟内衬的结构剥落和开裂。碳可选用石墨、炭黑、沥青球作碳系原料加入。碳在浇注料中的作用效果与其加入量和碳原料的种类有关(图 7-6-12)。碳的加入量约为 4% 时,浇注料的抗蚀性最高。选用挥发分适中的碳原料,浇注料的抗侵蚀性能好。这是由于:

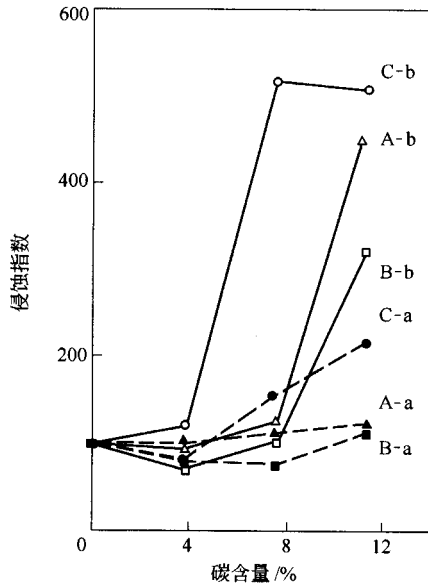


图 7-6-12 碳的含量和种类与 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的抗侵蚀性的关系

试验方法 a—高频感应炉法 b—旋转炉法

(1) 碳原料中挥发分气化,在该气化性气体的压力作用下,碳进入到耐火材料的气孔内壁,形成涂层,可防止熔渣向气孔内渗透;

(2) 分散于出铁沟耐火材料中的碳可以降低熔渣对耐火材料内衬的润湿性,从而防止了渣的渗透。

因此, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料中通常使用沥青球作为碳原料。

(四) 水泥

铁水沟用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料通常用高铝水泥和纯铝酸钙水泥作结合剂。水泥使浇注料获得强度,但加入水泥的同时,向浇注料中引入了 CaO , CaO 不利于浇注料的抗侵蚀性。另外,水泥用量增加,浇注料的需水量增加,导致浇注料的气孔率提高,体积密

度降低 ,抗侵蚀性降低。因此 ,铁水沟用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料一般为低水泥浇注料和超低水泥浇注料 ,浇注料中 CaO 含量控制在 $1.0\% \sim 2.5\%$ 以下。

碳的种类	固定碳/%	挥发分/%	灰分/%
A	64.0	35.8	0.2
B	85.8	13.8	0.4
C	98.8	0.8	0.4

(五) 硅粉

在高炉出铁沟浇注料中加入硅细粉 ,在一定温度下 ,它与浇注料中的碳发生反应 : $\text{Si} + \text{C} \longrightarrow \text{SiC}$ 。生成的这种 SiC 呈两种形态存在于基质中 :一种是非常细小的 ,直径约 $0.1 \sim 0.5\mu\text{m}$ 的纤维状 SiC ,它分布于基质的颗粒与颗粒之间 ,起到一种架桥衔接作用 ,具有 SiC 纤维的补强效应 ,因而可明显提高浇注料的烧后强度 ;另一种是呈蠕虫状或絮状 SiC ,它改善了浇注料的显微结构 ,使浇注料形成 SiC 结合的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 材料 ,提高了出铁沟料的抗氧化性和抗渣性。图 7-6-13 和图 7-6-14 为硅粉的加入量对浇注料性能的影响。

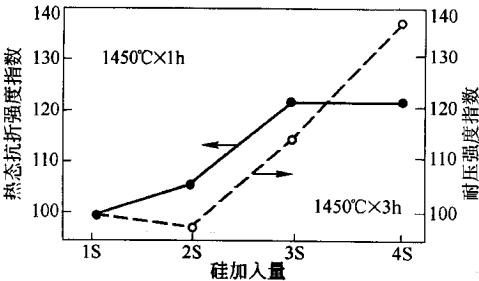


图 7-6-13 硅加入量对浇注料的高温强度的影响

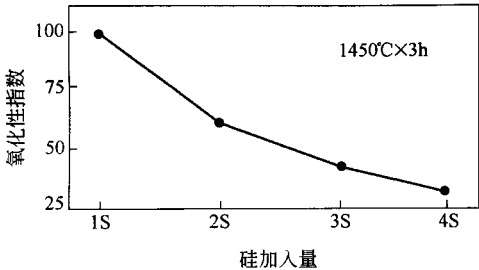


图 7-6-14 硅加入量对浇注料的抗氧性的影响

实际使用后观察,在渣—空气界面,添加的硅细粉,可提高出铁沟耐火浇注料的耐侵蚀性。当硅粉的加入量在 5% 左右时,抗侵蚀性最好。当硅细粉加入量达到 5% 以上时,由于碳含量不足,未参与反应的硅增多,抗侵蚀性会变差。

在渣—铁水界面,添加的硅细粉并不能提高耐火材料的耐侵蚀性。由于渣—铁水界面处,氧分压低,即使 Si 与 C 反应生成了 SiC,也会因发生 $\text{SiC} + 2\text{CO} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 3\text{C}$ 反应而生成 SiO_2 ,由于 SiO_2 的增加而使出铁沟耐火材料的耐侵蚀性下降。

(六) 金属铝粉

出铁沟浇注料中加入金属铝粉之后,铝粉遇水会发生如下反应:



反应后,生成的 H_2 在浇注料内部形成连通的均匀细小排气孔,有利于内部水分的排出,脱掉部分游离水,防止在烘烤过程中产生爆裂。反应过程中放出的热量也可加快脱水速度,加速浇注料的凝结硬化过程,提高出铁沟浇注料的强度。另外,反应后生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 凝胶可形成新的结合相,也可能提高浇注料的强度。

图 7-6-15 和图 7-6-16 为金属铝粉的加入量与浇注料的强度和抗氧化性的关系。

尽管添加金属铝粉对提高出铁沟浇注料的中温和高温强度有一定的好处,但加入量不宜过多,否则,会因铝粉与水反应放出大量的氢气,在浇注料体内形成大量连通气孔,使其结构疏松而导致强度下降,抗渣侵蚀性变差。

(七) 有机纤维

出铁沟浇注料中加入一些有机纤维也可防止烘干过程中发生爆裂,这是由于有机纤维在浇注料烘干过程中被烧失,留下排气通道。

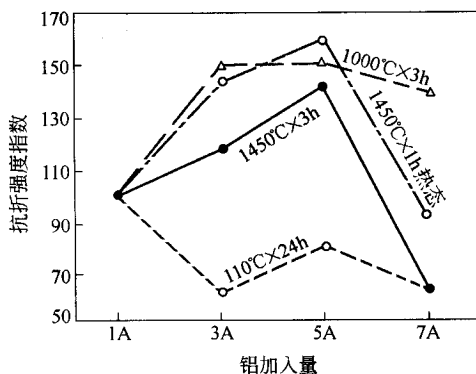


图 7-6-15 铝粉加入量对浇注料的抗折强度的影响

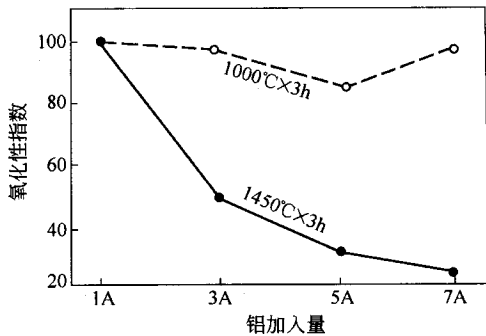


图 7-6-16 铝粉加入量对浇注料的抗氧化性的影响

除了金属铝粉和有机纤维外,增强出铁沟浇注料的抗爆裂性还可采用添加有机气体发生剂法、添加无机化合物发泡剂法等。

(八)聚磷酸钠

聚磷酸钠、聚氰铵类缩合物和萘磺酸盐缩合物等用作浇注料的减水剂,具有分散减水效果,可提高浇注料的体积密度,降低气孔率,提高强度。

四、 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 浇注料

在主铁沟内以铁鳞为预处理剂进行铁水脱硅时,富 FeO 炉渣对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料中的 SiC 和 C 发生下列反应:



反应导致 SiC 和 C 被氧化,浇注料受到严重侵蚀。

对以氧化铁为主要预处理剂的出铁沟,日本钢管公司与品川耐火材料公司使用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 浇注料,取得满意效果。表 7-6-6 列出脱硅出铁沟试用的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 浇注料的性能。 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 浇注料使用过程中发生如下反应:

表 7-6-6 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 浇注料的理化性质

材料种类		AM-1	AM-2	AM-3
化学组成 /%	Al_2O_3	94	87	76
	SiO_2	1	1	2
	MgO	3	10	20

材料种类		AM - 1	AM - 2	AM - 3
物理性质 (1600℃ × 3h)	体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.26	3.07	3.00
	显气孔率/%	13.9	17.4	16.5
	常温耐压强度/MPa	78.5	55.9	58.8
	抗折强度/MPa	40.2	7.8	16.7
	线变化率/%	- 0.12	+ 1.47	+ 1.18

- (1)氧化铝与氧化镁反应 ,在氧化铝颗粒周边生成镁铝尖晶石 ;
- (2)生成的镁铝尖晶石与渣中的氧化铁发生反应 ,氧化铁被尖晶石吸收形成高熔点的固溶体 ;
- (3)氧化铝与渣中的 CaO 发生反应 ,生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ 系反应物 ;
- (4) $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ 系反应物与渣中 SiO_2 发生反应 ,生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} - \text{SiO}_2$ 系反应物。
- 以上反应的生成物的熔点高 ,可使炉渣的熔点和黏度提高 ,抑制炉渣的浸润 ,提高浇注料的耐侵蚀性。

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 浇注料的抗侵蚀性与 MgO 含量、炉渣碱度及 FeO/SiO_2 比有关(图 7 - 6 - 17 和图 7 - 6 - 18) ,有如下规律。

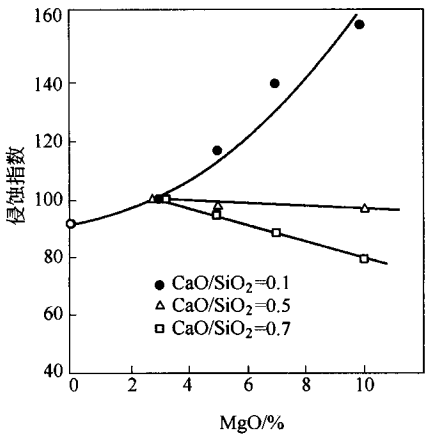


图 7 - 6 - 17 炉渣的碱度对 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 浇注料的抗侵蚀性的影响

炉渣的组成 : $\text{FeO}15\%$; $\text{SiO}_2\text{x}\%$;
 $\text{CaO}(70 - \text{x})\%$; $\text{MgO}10\%$; $\text{CaF}_25\%$

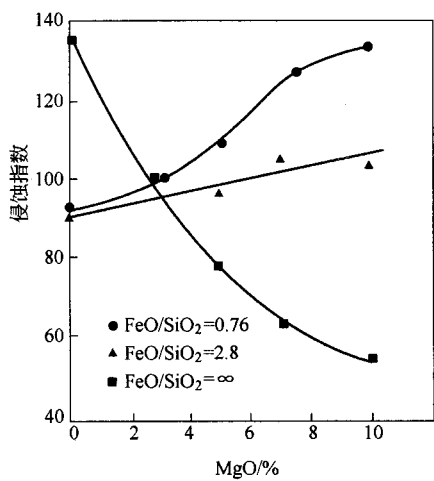


图 7-6-18 炉渣的 FeO/SiO₂ 比对 Al₂O₃ - MgO 浇注料的抗侵蚀性的影响
炉渣组成 :FeO39% ~ 95% ;
SiO₂51% ~ 0% ;MnO5% ~ 10%

(1)当炉渣碱度高于 0.7 时 ,浇注料的抗侵蚀性随 MgO 含量增多而提高 ;但炉渣碱度小于 0.5 时 ,耐侵蚀性随 MgO 含量增多而降低 ;

(2)在仅用铁鳞作脱硅剂时 ,FeO/SiO₂ 比很高 ,添加 MgO 可提高浇注料的抗侵蚀性能 ,但炉渣的 FeO/SiO₂ < 2.8 时 ,加入 MgO 反而使浇注料的抗侵蚀性能变坏。在实际的应用时 ,MgO 的适宜加入量为 3%。

五、出铁沟耐火材料内衬的损毁

(一)铁水和炉渣的机械冲刷磨损

出铁沟内衬使用时受到高速含渣铁水流的严重冲刷磨损作用。出铁沟内衬的使用寿命与 Al₂O₃ - SiC - C 浇注料的高温抗折强度有密切关系 ,高温抗折强度增加 ,侵蚀速度降低 ,如图 7-6-19 所示。因此 ,浇注料的高温抗折强度被用作衡量浇注料的耐用性或质量的一项基本性能指标。因此 ,设法提高浇注料的高温抗折强度 ,可以提高其使用寿命。

(二)化学侵蚀作用

出铁沟内衬使用过程中 ,在上渣线和下渣线部位 ,空气(氧) 、炉渣和铁水与耐火材料发生一系列的化学侵蚀作用(表 7-6-7) ,结果造成上、下渣线的局部严重损毁(图 7-6-20)。

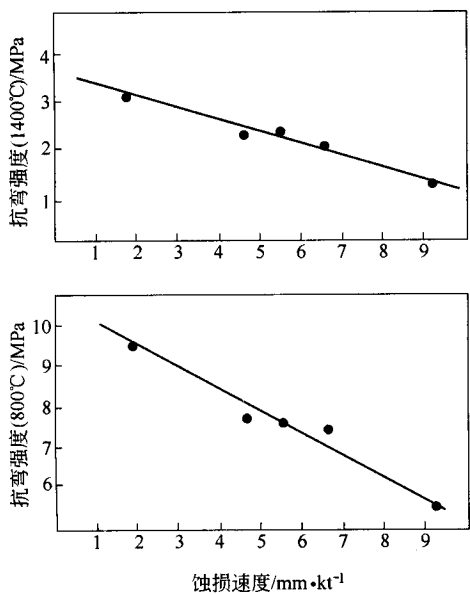


图 7-6-19 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料在铁水沟
铁水区渣线带的侵蚀速度与高温抗折强度的关系

表 7-6-7 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 出铁沟浇注料使用中发生的化学侵蚀作用

反应区	受损过程及结果
耐火材料—空气/氧气	C、SiC 的氧化
耐火材料—空气—熔渣	游离碳氧化 熔渣渗入耐火材料的开口气孔
耐火材料—熔渣	熔渣渗入耐火材料的开口气孔 基质与结合剂被侵蚀
耐火材料—熔渣—铁水	发生综合反应 基质、结合剂被侵蚀 SiC 被氧化、侵蚀，属高侵蚀区
耐火材料—铁水	铁水渗入耐火材料的开口气孔 SiC、C 可能被氧化、熔解

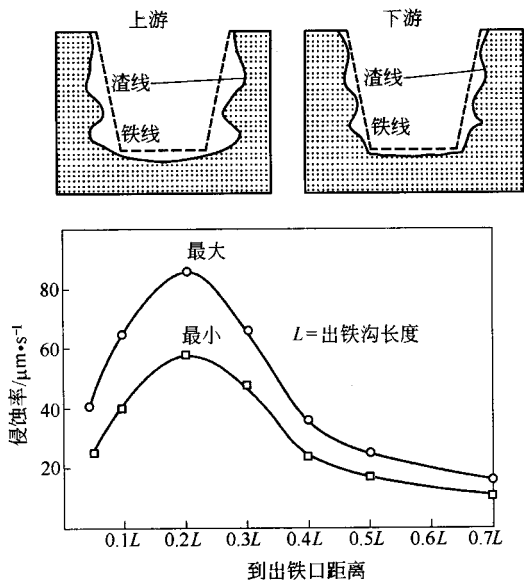


图 7-6-20 主出铁沟的典型侵蚀模型和侵蚀率

图 7-6-21 示出上渣线部位 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 浇注料的局部损毁。以 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 为主成分的出铁沟内衬被炉渣浸润,炉渣可沿内衬表面上升,形成很薄的一层渣膜(90 ~ 1200 μm)。空气通过这层渣膜进入内衬,使 SiC 氧化,氧化生成的 SiO_2 溶解于渣膜中。沿渣膜的高度方向, SiO_2 的浓度存在着浓度差,由于表面张力的变化,炉渣产生上下方向运动,结果造成局部损毁。

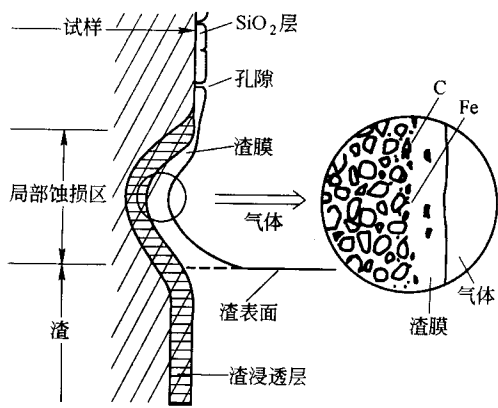


图 7-6-21 出铁沟内衬上渣线的局部损毁区和显微结构示意图

图 7-6-22 示出下渣线部位的耐火内衬的局部损毁。熔渣黏附在耐火材料内衬的表面或渗透到内衬耐火材料之内,在内衬与铁水之间形成渣膜,耐火材料与渣膜发生反

应。如渣膜中的 FeO 与出铁沟耐火材料中的 SiC 反应 $2\text{FeO} + \text{SiC} \longrightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe} + \text{C}$,使 SiC 颗粒氧化 ,促进了耐火材料的结构蚀损。渣膜不断运动 ,促进了新鲜渣补充渣层 ,同时除去了被蚀损的成分。又由于熔渣中的 SiO_2 与铁水反应 $\text{SiO}_2 + 2\text{Fe} \longrightarrow 2\text{FeO} + \text{Si}$,生成新的 FeO ,可以不间断地供给 FeO ,更加速了耐火材料的局部损坏。

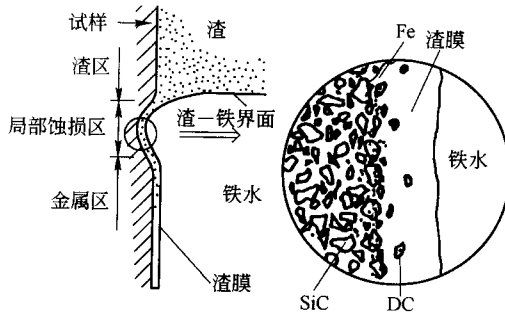


图 7-6-22 出铁沟内衬下渣线的局部损毁区和显微结构示意图

Fe—细颗粒铁 ;DC—从 SiC 中分解的碳

(三) 热震损毁

热震损毁是出铁沟内衬的主要损毁机理之一。出铁沟内衬施工后在干燥和烘烤时可能会出现裂纹 ,使用过程中 ,反复受到 $500^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ 温度循环变化作用 ,产生横向和纵向裂纹 ,加剧内衬的浸透和侵蚀 ,如图 7-6-23 所示。

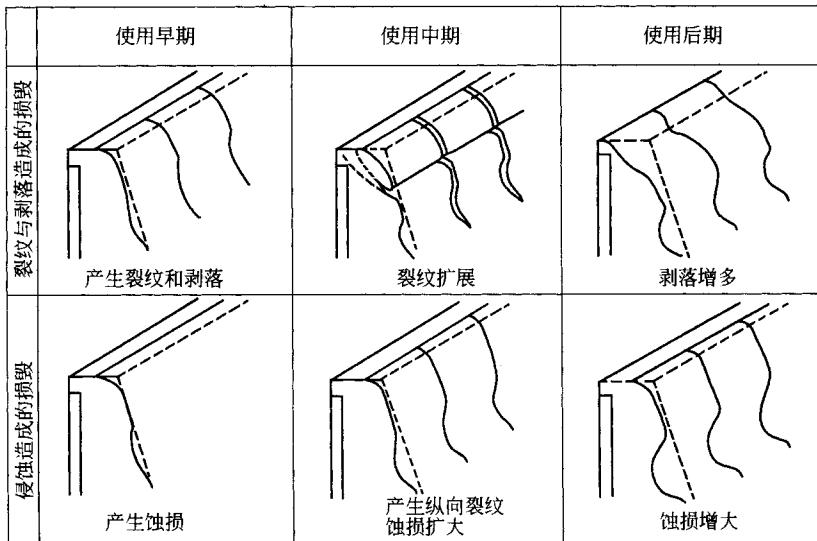


图 7-6-23 出铁沟内衬的损毁模型

六、出铁沟内衬的施工

出铁沟内衬施工方法有多种(表 7-6-8),分述如下：

表 7-6-8 高炉出铁沟内衬筑衬方法

筑衬方法	捣打成形法	振动成形法		利用固定模型		大砖及预制件	喷补方法 (迄今仅用于修补)
		重力作用下 振动模型下沉	使用内部带 振动器的模型	浇注和振动	自流浇注		
筑衬机械	压缩空气或 电动捣锤 (60 次冲击/min)	专用成形机 (VF),振动频率 3600 ~ 12000 次/min , 振幅 0.2~0.5mm , 功率 1.2kW	专用成形机 (SVP)频率 260 次/min 振幅 0.3 ~ 0.8mm , 功率 1.2kW	固定模型 插入式 振动棒	固定模型 不必振动加压	适当的 运输、安 装工具	喷补机的 喷补压力 0.5MPa , 不 用模板
优点	致密性好	组织致密, 均匀,砌筑时间 短,修补方便	筑衬简单, 不需干燥, 可迅速升温, 350 ~ 400℃/h , 修补方便	组织非常 均匀,修补 方便	组织均匀, 无噪声, 省力, 易修补	砌筑迅 速	快速进行 冷修和热修 补
缺点	捣固不均匀 , 容易分层	噪声大 , 干燥时间长	出铁沟上部 的致密性差	含水较多 干燥时间长	含水较多 干燥时间长	存在接 缝问题	喷补料回 弹损失大 ,气 孔率高 ,易分 层

(1)捣打成形法。早期,高炉出铁沟内衬的施工为人工捣打成形,后发展到用气动或电动捣锤对捣打料进行捣固施工。此法劳动强度大,内衬结构易分层,不均匀。现已开发出自动捣打机械,可对出铁沟的不同部位进行自动捣打成形。

(2)振动成形法(图 7-6-24)。将混合好的泥料注入出铁沟模型内,装上带有振动器的模芯,从上面对模芯一边加压,一边通电给予每分钟数千周波的频率进行振动,泥料因振动而流动、充填,模芯则边振动边逐渐下沉,使泥料致密成形。此法成形的出铁沟内衬致密均匀。

(3)干法振动成形法(图 7-6-25)。此法是用含水分极少的干式料,经过振动而成形的。成形后的内衬几乎不需干燥就可以快速升温(350 ~ 400℃/h)使用。此法节省能源,但出铁沟内衬的上部致密性稍差。

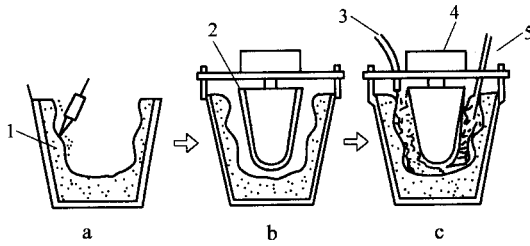


图 7-6-24 出铁沟振动成形示意图

a—投入振动成形料 b—放入模型 c—加荷重振动 模型下沉
1—残余衬 2—模型 3—浇注料 4—荷重 5—振动器

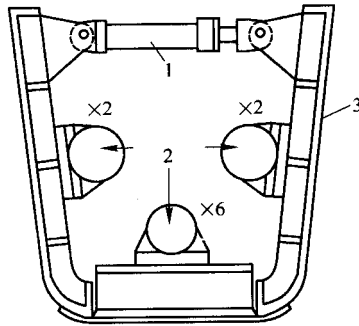


图 7-6-25 干式振动成形法示意图

1—液压缸 2—振动器 3—模型

(4) 浇注成形法(图 7-6-26)。此法使用含水量较多的(5%左右)浇注料,直接浇灌到已安放好的出铁沟模型内,利用插入式振动棒振动成形。这种成形方法的施工效率高,省力,内衬的组织均匀,密度较大。

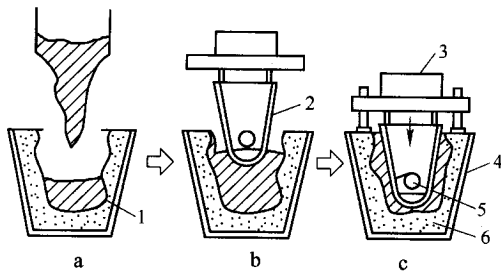


图 7-6-26 出铁沟浇注成形法示意图

a—除去残渣 b—放入模型 c—浇注与振动
1—耐火材料 2—模型 3—荷重 4—铁板;
5—插入式振动器 6—残余衬

(5) 自流浇注料成形法。将自流浇注料混合之后 ,投入出铁沟内衬模型内 ,靠泥料自身的良好的流动性 ,自行充填到模型内的每一个角落。此法可将狭小的孔隙填满 ,成形体质量均匀。

七、出铁沟内衬喷补维护

现在大型高炉出铁沟的作业条件十分恶劣 ,为了减少出铁沟内衬的损耗 ,人们常采用高级耐火原料 ,这就导致了出铁沟内衬耐火材料生产成本上升 ,因而 ,又不得不采取某些措施来降低成本。

出铁沟内衬在使用过程中不是全部均匀地受到侵蚀 ,到使用后期 ,会产生局部的损坏、剥落、龟裂等。特别是在贮铁式主出铁沟中 ,受到从出铁口倾注出的铁水的直接撞击 ,使该部位的内衬侵蚀深度可达到 200mm 以上 ,使铁水滞留 ,导致出铁沟底部内衬损坏殆尽。这时的出铁沟内衬因局部损坏不能继续使用 ,若丢弃的话 ,使很多耐火材料白白浪费掉 ,提高了内衬的使用成本。为了平衡耐火材料内衬的损耗 ,就要在有效地利用的同时 ,提高其使用寿命 ,较好的手段就是采用热喷补法。

(一) 热喷补方法

出铁沟内衬的热喷补维修使得出铁沟可在短时间的喷补作业后 ,就可能进行下一轮的出铁操作。出铁沟的形式各种各样 ,具有代表性喷补作业的程序如图 7-6-27 所示。约 16m 长的出铁沟内衬维修 ,使用 1.5~2t 喷补料 ,喷补层厚约 150mm ,用 2~3h 即可完成。

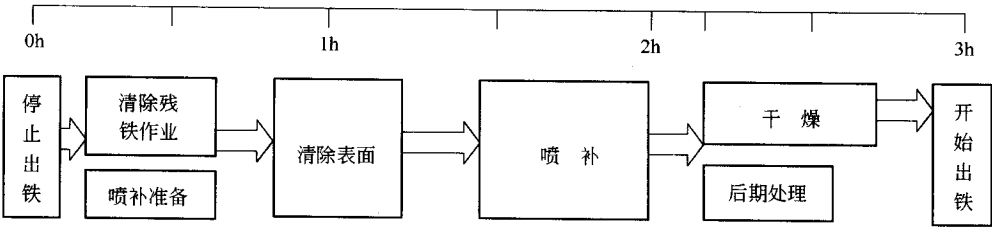


图 7-6-27 出铁沟喷补作业的程序

对于贮铁式出铁沟来说 ,在进行喷补作业之前 ,必须将贮存于出铁沟底的残余铁清理出去。在高炉作业中 ,由于增加了这项处理过程需要频繁地清除残铁 ,另外加上出铁沟自身的冷却循环等都会诱使出铁沟内衬结构的恶化。因此 ,必须注意选择适当时机进行喷补 ,以达到较好的效果。最适宜喷补时机应选择在铁线处、渣线处损坏出现凹状并达到某种程度时。清除残铁以及喷补如图 7-6-28 所示。喷补时间应选在出铁沟内衬

工作的表面温度从 800℃(呈赤红色)到开始变黑(约 500 ~ 600℃)时。

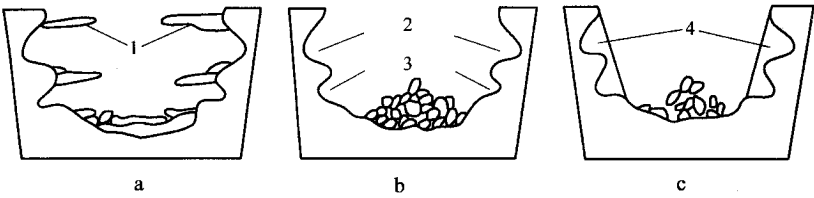


图 7 - 6 - 28 出铁沟喷补方法示意图

a—工作表面粘着板状、块状渣的出铁沟 ,b—用棒将渣清落到出铁沟底部 ,
使铁线凹处显露出来 ,用气吹净表面尘埃 ;c—可以保留工作表面上
粘着的薄的渣及飞溅物 ,在其表面直接喷补
1—渣 2—渣线 3—铁线 4—喷补层

(二)热喷补料的性质

热喷补料依据用途的不同有多种类型 ,但通常都采用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 系(表 7 - 6 - 9)。这些喷补料在喷枪嘴处与水混合后 ,成为均质的湿的无粉尘状喷补料 ,可以稳定喷出 ,黏结性良好 ,又能迅速硬化 ,成为非常致密的喷补层。

(三)喷补实施形式

目前对出铁沟内衬实施喷补有两种形式：

表 7 - 6 - 9 高炉出铁沟喷补料的种类和理化性质

材料种类			RGM - 20	GA - 80G	GC - 20G	GC - 8G	GC - 15G	GA - 65G	G - GP
化学组成 /%	Al_2O_3		62	77	65	72	62	68	≥ 55
	SiO_2		12	6	8	10	13	14	
	SiC		19	8	21	8	15	8	≥ 16
喷补层物 理性质	显气孔率 /%	110℃ × 24h	24.3						
		1450℃ × 2h	27.3	31	29	31	28	30	
	体积密度 /g · cm ⁻³	110℃ × 2h	2.31						2.4
		1450℃ × 2h	2.26	2.31	2.23	2.28	2.18	2.20	
	常温耐压 强度/MPa	110℃ × 24h	15.9						17.7
		1450℃ × 2h	7.56	24	28	21	23	20	16.1
	抗折强度 /MPa	110℃ × 2h	2.13						
		1450℃ × 2h	7.56	4.5	5.5	4.0	4.2	3.8	

材料种类	RGM - 20	GA - 80G	GC - 20G	GC - 8G	GC - 15G	GA - 65G	G - GP
喷补水分 / %		9 ~ 11	9 ~ 11	10 ~ 12	10 ~ 12	10 ~ 12	
喷补需料量 / t · m ⁻³	2.32	2.35	2.28	2.31	2.23	2.25	
应用部位	大型高炉 主出铁沟	大型高炉 主出铁沟 铁线	大型高炉 主出铁沟 渣线	大型高炉 主出铁沟 铁线、渣线	中小型高炉 主出铁沟 渣线	中小型高炉 主出铁沟 渣线、铁线	主出铁沟

(1)全面喷补法。对主要的易损坏部位 采取有计划的预防性全面喷补 ,以取得均衡的损坏。在这种情况下 ,应注意调整出铁沟的使用周期。全面喷补法的喷补料使用量大 ,出铁沟内衬的使用寿命可以得到大幅度提高 ,又可大大缩短喷补时间 ,减轻作业强度。

(2)局部喷补法。当出铁沟内衬的渣线、铁线等处因龟裂、剥落、侵蚀等原因形成局部损坏后 ,对这些部位实施喷补维修 ,采用局部喷补法。这种方法可以用较少量的喷补料进行维修 ,使得出铁沟内衬的整体损耗达到均衡 ,它还能够调整出铁沟的使用周期 ,可大幅度地提高其使用寿命 ,又能降低耐火材料单位消耗及减少单位成本。

另外 ,热喷补还可对出铁沟内衬出现的龟裂、剥落等进行应急性喷补维修 ,以防止因这些损坏而引起泄铁事故。

总之 ,可以依据出铁沟内衬的损坏情况以及所具备的施工条件 ,选择不同形式的喷补措施。其宗旨就是最大限度地发挥出铁沟内衬的潜力 ,降低耐火材料消耗 ,降低单位成本。

(四)注意事项

对出铁沟内衬实施热喷补易出现两个问题 :①喷补层密度低 ,容易损耗 ;②喷补料与出铁沟内衬表面粘接不牢固时 ,因喷补料自身产生的热、化学应力 ,以及流态的熔渣、铁水的冲刷磨损作用等都会使喷补层容易剥离。因此 ,今后应开发黏结性好、又耐侵蚀的性能优良的热喷补材料 ,提高对出铁沟内衬喷补的实效性、可信赖性。

第四节 鱼雷混铁罐车用耐火材料

一、耐火材料内衬的工作环境

在现代化钢铁厂 ,鱼雷混铁罐车不仅是铁水运输和贮存容器 ,同时还用作铁水预

处理的设备。表 7-6-10 列出铁水预处理鱼雷混铁罐车耐火材料的工作环境 ,混铁罐车内衬耐火材料使用时受到的作用为：

表 7-6-10 铁水预处理鱼雷混铁罐车耐火材料的使用环境

工厂	宝钢	日本神户制钢所
公称容量/t	320	350
铁水温度/℃	1450 ~ 1500	
空罐温度/℃	700 ~ 800	
预处理剂 种类	CaO ,CaF ₂ ,Na ₂ CO ₃	氧化铁 ,CaO ,CaF ₂
用量	10kg/t	600kg/min(最大)
喷吹方式	喷粉	喷粉 + 吹氧
喷吹气体速度 /m ³ ·min ⁻¹		60(O ₂)
处理时间/min	20 ~ 30	
日使用次数	2.5	
预处理比例/%	71 ~ 91	20(脱磷)

- (1)在铁水流入流出时 ,装入侧内衬受到铁水直接的强烈冲击磨损作用；
- (2)渣线部位的耐火材料受到预处理剂的严重化学侵蚀作用；
- (3)混铁罐车空罐温度为 700 ~ 800℃ ,流入罐内的高炉铁水温度为 1450 ~ 1500℃ ,使耐火材料内衬遭受严重的热震作用；
- (4)由于喷吹处理时强烈的气流搅拌 ,耐火材料内衬受到铁水和炉渣的冲刷磨损作用。

二、耐火材料的应用与性能

鱼雷混铁罐车耐火材料内衬 ,按使用条件和耐火材料的应用 ,大致分为 :隔热安全衬、罐口、罐顶、渣线、渣线以下和铁水冲击垫衬等部位。通常 ,混铁罐车耐火材料内衬 ,在不同部位上采用不同材质的耐火材料综合砌筑。不进行铁水预处理的混铁罐车内衬一般用优质黏土砖和高铝砖砌筑 ,在渣线部位有采用 Al₂O₃ - SiC - C 砖代替硅酸铝系耐火砖的趋向。在进行铁水预处理的混铁罐车中 ,由于使用环境恶化 ,黏土砖和高铝砖已不能满足使用要求 ,已普遍改用耐侵蚀性能好的 Al₂O₃ - SiC - C 砖砌筑内衬。

(一)中国宝钢鱼雷混铁罐车耐火材料

宝钢的 320t 鱼雷混铁罐车 ,在未进行铁水预处理时 ,采用致密黏土砖砌筑内衬 ,渣线

部位使用莫来石砖 ,内衬寿命约 700 次。在采取铁水预处理脱硅、脱磷后 ,从 1990 年 ,混铁罐车内衬改用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖砌筑。图 7-6-29 为宝钢 320t 鱼雷混铁罐车耐火材料内衬结构。

表 7-6-11 列出了内衬各部位使用的主要耐火材料品种和性能 ,鱼雷混铁车内衬寿命达 1700 次。

(二)日本鱼雷混铁罐车耐火材料

日本鱼雷混铁罐车耐火材料内衬因混铁车采取铁水预处理工艺发生两次大的改变。1972 年在鱼雷混铁罐车内实施脱硫处理 ,耐火材料内衬从优质黏土砖内衬改为高铝砖、高铝 - SiC 砖、高铝 - $\text{SiC} - \text{C}$ 砖或镁白云石砖为主的耐火材料内衬。1979 年在鱼雷混铁罐车内开始进行脱硫、脱硅和脱磷 ,耐火材料内衬改为以 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖为主要耐火材料的内衬。

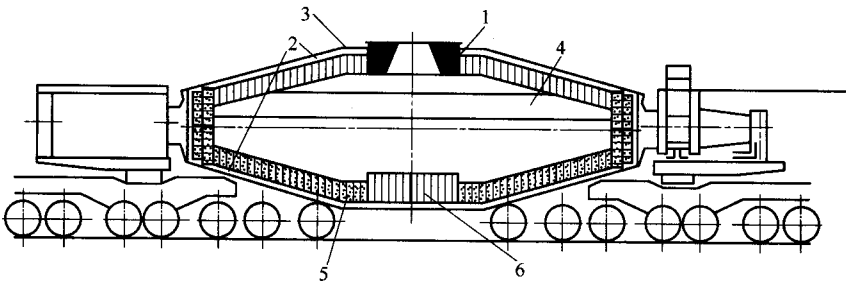


图 7-6-29 宝钢 320t 鱼雷混铁罐车的耐火材料内衬结构

- 1—罐口(浇注料) 2—安全衬(黏土砖) 3—罐顶(渣线以上,黏土砖);
4—渣线($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖) 5—渣线以下($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖);
6—铁水冲击垫($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖)

表 7-6-11 宝钢 320t 鱼雷混铁罐车用耐火材料的性能

使用部位		永久层	罐口	罐顶	渣线、渣线以下， 铁水冲击垫
耐火材料		黏土砖	高铝浇注料	致密黏土砖	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖
化学组成/%	Al_2O_3	44.03	≥ 50	48	≥ 59
	Fe_2O_3	1.97		1.56	
	SiC				≥ 18
	C				≥ 10

使用部位		永久层	罐口	罐顶	渣线、渣线以下， 铁水冲击垫
物理性能	显气孔率/%	20		14	≤10
	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.21	≥ 2.20 (1500℃×3h)	2.37	≥ 2.75
	常温耐压强度/MPa	57.8	≥ 25 (110℃×24h)	87.6	≥ 51.9
	抗折强度/MPa				22.5(25℃) 5.1(1400℃)
	耐火度/℃	≥ 1750	≥ 1770	1770	
	荷重软化点/℃	1427		1530	
	重烧线变化率/%	-0.1	0~1.5 (1500℃×3h)		

图 7-6-30 为日本神户制钢厂 350t 鱼雷混铁罐车耐火材料内衬结构 ,各部位使用的耐火材料性能如表 7-6-12 所示。混铁罐车耐火材料寿命为 1453 次。

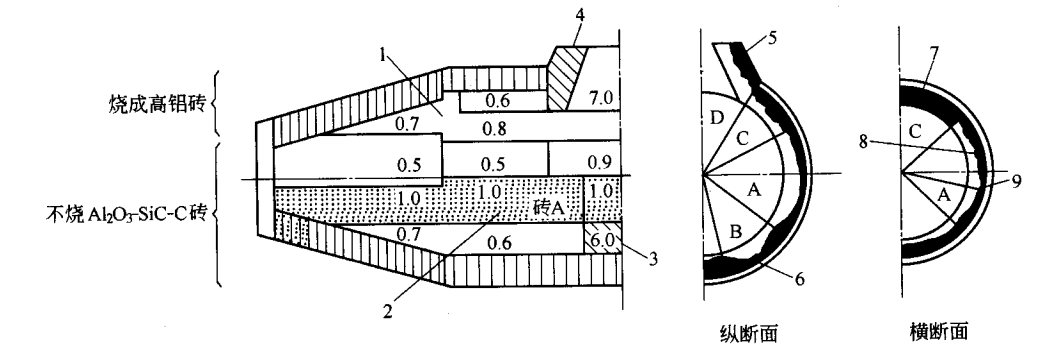


图 7-6-30 日本 350t 鱼雷混铁罐车耐火材料内衬
(图中数字表示相对侵蚀指数)

1—烧成高铝砖 2—不烧 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖 A 3—不烧 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖 B ;
4—高铝浇注料 5—罐口 6—铁水冲击垫 7—残余内衬 8—渣线 9—渣线下部

表 7-6-12 日本鱼雷混铁罐车用耐火材料的性能

使用部位	罐口	罐顶	渣线以下	铁水冲击垫
耐火材料	高铝浇注料(D)	高铝砖(C)	Al_2O_3 - SiC - C 砖(A)	Al_2O_3 - SiC - C 砖(B)

使用部位		罐口	罐顶	渣线以下	铁水冲击垫
化学组成/%	Al ₂ O ₃	85	85	65	68
	SiO ₂	11	13		8
	SiC			15	6
	C			13	10
	CaO	0.8			
	钢纤维	2			
物理性能	显气孔率/%	15.4	17.2	4.9	6.3
	体积密度/g·cm ⁻³	2.83	2.83	3.12	2.99
	常温耐压强度/MPa		115	64	78
	抗折强度/MPa 常温 1400℃	12.4	10.8	18.5	19.3
				22.1	12.9

鱼雷混铁罐车内衬的渣线和铁水流入流出侧部位 ,耐火材料局部蚀损严重 ,日本研究开发添加 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\sigma - \text{Si}_3\text{N}_4$ 的耐侵蚀 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖。

向 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖中添加 $\sigma - \text{Al}_2\text{O}_3$ 以增强抗炉渣侵蚀性能的原理是 ,一方面 , $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 作为 Al_2O_3 源 ,使侵入砖中的炉渣黏度提高 ,在热面上形成保护层 ;另一方面 ,由于 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3)$ 分子中含 Na_2O ,在还原气氛下与碳和 SiC 反应 ,使砖内气氛压力提高 ,可阻止炉渣侵入。表 7 - 6 - 13 列出添加和未添加 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的性能比较。在神户钢厂鱼雷混铁罐车上试用 ,含 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的抗侵蚀性能约提高 20% ,内衬寿命约提高 30%。

表 7 - 6 - 13 添加 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的性能

砖种		普通 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖	含 $\sigma - \text{Al}_2\text{O}_3$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖
化学组成 /%	Al ₂ O ₃	66	65
	SiC + C	28	28
	Na ₂ O		0.6
	$\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 添加量/%		10

砖种		普通 Al_2O_3 - SiC - C 砖	含 σ - Al_2O_3 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖
物理性能	显气孔率/%	7.5	9.5
	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.01	2.95
	常温耐压强度/MPa	46.1	46.1
	抗折强度/MPa	18.6	17.7

β - Si_3N_4 具有化学稳定性好、耐热冲击性好、高温强度大和耐磨损等优良性能。日本第一耐火材料公司用 β - Si_3N_4 ($\text{Si}58.9\%$, $\text{N}37.8\%$, $\text{Fe}0.5\%$)取代部分电熔氧化铝 ,试制生产含 β - Si_3N_4 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖。表 7 - 6 - 14 为添加与不添加 Si_3N_4 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖的性能。在神户钢厂的鱼雷混铁车铁水流入流出部位使用含 β - Si_3N_4 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖 ,抗侵蚀性能提高 10%。

表 7 - 6 - 14 添加 β - Si_3N_4 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖的性能

专种		普通 Al_2O_3 - SiC - C 砖	含 β - Si_3N_4 的 Al_2O_3 - SiC - C 砖
化学组成/%	Al_2O_3	65	57
	SiC	15	15
	C	13	13
	β - Si_3N_4	0	8
物理性能	显气孔率/%	5.4	7.5
	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.03	2.95
	常温耐压强度/MPa	85	76
	抗折强度 /MPa	常温	19
		1400℃	13

(三)德国鱼雷混铁罐车耐火材料

德国鱼雷混铁罐车内衬用耐火材料的使用和发展进程与日本类似。在 1970 年以前 ,鱼雷混铁罐车为单纯的铁水运输工具 ,内衬用优质黏土砖砌筑。在 20 世纪 70 年代采取脱硫预处理后 ,鱼雷混铁罐车内衬改用高铝砖 ,沥青和树脂结合红柱石砖 ,沥青结合白云石砖。大约在 1985 年以后 ,在鱼雷罐车内进行脱硫、脱硅和脱磷处理 ,内衬改用高铝矾土 - SiC - C 砖 ,红柱石 - SiC - C 砖和 Al_2O_3 - SiC - C 砖。

表 7 - 6 - 15 为德国鱼雷混铁罐车用耐火材料的性能。渣线部位用的 Al_2O_3 - SiC - C 砖是以刚玉为骨料制造 ,抗侵蚀性强 ,用于砌筑 300t 鱼雷混铁罐车内衬。以高铝矾土熟料和红柱石为骨料生产的 Al_2O_3 - SiC - C 砖适用于不接触炉渣的其余内衬。

表 7－6－15
 德国鱼雷混铁罐车用耐火材料的性能

使用部位		安全衬	罐顶	渣线	渣线以下	
		黏土砖	高铝砖	Al ₂ O ₃ －SiC－C 砖	红柱石－SiC－C 砖	高铝－SiC－C 砖
化学组成/%	Al ₂ O ₃	45.8	60～61	75	50	68
	SiO ₂	48.0	37～38		29	5
	Fe ₂ O ₃	1.8	<1.0	0.4	1	1.3
	TiO ₂				0.2	2.6
	SiC			8	8	8
	C			10	10	10
物理性能	显气孔率/%	14～18	10～15	5.0	4.0	4.5
	体积密度/g·cm ⁻³	2.1～2.2	2.5～2.6	3.00	2.80	2.93
	常温耐压强度/MPa	40～60	60～100	60	50	50
	高温抗折强度/MPa1500℃		5～12			

(四) 韩国鱼雷混铁罐车耐火材料

韩国鱼雷混铁罐车各部位用的耐火材料和性能如表 7－6－16 所示。耐火材料系由韩国春山(Chosun)耐火材料公司生产。

表 7－6－16
 韩国鱼雷混铁罐车用耐火材料的性能

使用部位		安全衬	罐口	罐顶	渣线及下部		
耐火材料		黏土砖	浇注料	高铝砖	Al ₂ O ₃ －SiC－C 砖		
					A	B	C
化学组成/%	Al ₂ O ₃	35	75	84	68	60	50
	SiO ₂		15				
	SiC				9	7	2
	C		(需水量)		15	12	5
物理性能	显气孔率/%	20		17	5	12	15
	体积密度/g·cm ⁻³	2.15		2.87	3.07	2.75	2.68
	常温耐压强度/MPa	40.0	135.0 (110℃×24h) 50.00 (1350℃×3h)				
	荷重软化点 T ₂ /℃	1380		1630	1700	1650	1620
	线变化率/% 1000℃	0.54	+ 0.5 % (1350℃×3h) + 1.5 % (1500℃×3h)	0.64	0.6	0.52	0.50

三、鱼雷混铁罐车用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖

(一) $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的组成与性能

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖是由氧化铝、碳化硅和碳组成的树脂结合不烧砖。氧化铝为砖的颗粒骨料,对苏打灰和氧化铁型炉渣具有很强的抗侵蚀性能的成分,但氧化铝因热膨胀率较高,耐热震崩裂性能较差。碳(石墨)可有效地防止炉渣的浸透和改善耐火材料的耐崩裂性能,这正好弥补氧化铝的弱点。碳化硅是防止碳被氧化的一种有效的抗氧化剂,还可提高耐火材料的热稳定性。此外, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖还添加抗氧化剂等添加剂。图 7-6-31 示出 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖中各种成分在耐火材料中所起的作用。 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的性能和使用效果与其原料质量、组成及颗粒配比等因素有关。

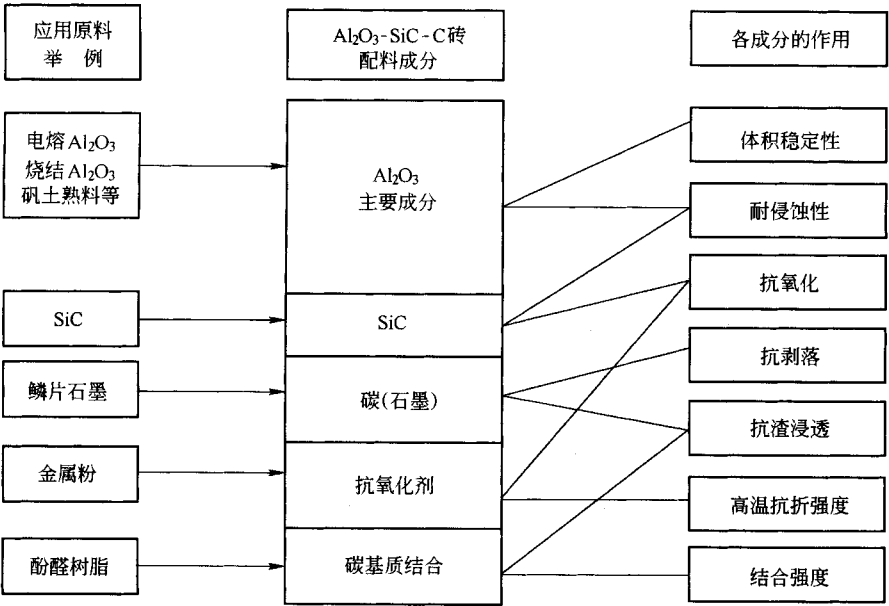


图 7-6-31 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的原材料组成和作用

用作氧化铝骨料的原料有人造原料电熔氧化铝和烧结氧化铝,以及天然原料高铝矾土熟料和红柱石。天然原料的 Al_2O_3 含量低,杂质含量高,抗侵蚀性能差。电熔氧化铝和烧结氧化铝的纯度基本相同,但由于电熔氧化铝的结晶粒度大,它的耐侵蚀性能明显优于烧结氧化铝。

图 7-6-32 示出碳(石墨)的添加量与 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的侵蚀率的关系,表明 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的最佳含碳量约为 10%。

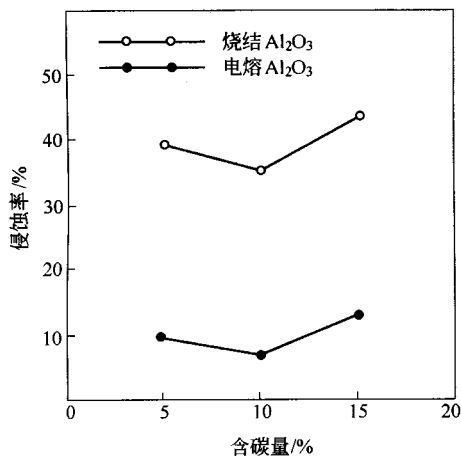


图 7-6-32 Al₂O₃-SiC-C 砖的碳含量与耐侵蚀性之间的关系

Al₂O₃-SiC-C 砖中加入 SiC 的主要目的是控制砖中碳被氧化,其抗氧化原理如图 7-6-33 所示。在还原气氛条件下,Al₂O₃-SiC-C 砖中的 SiC 颗粒表面发生下列反应,生成 SiO₂ 同时析出 C:

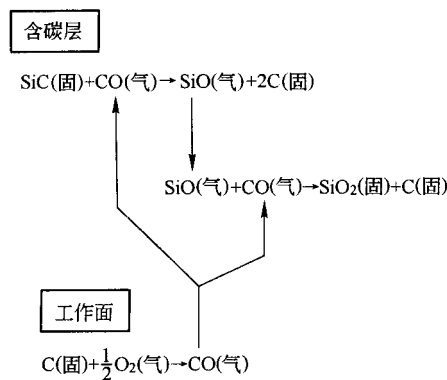
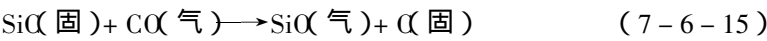
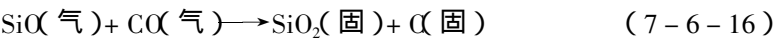


图 7-6-33 SiC 在 Al₂O₃-SiC-C 砖中的行为



并继续发生下列反应:



于是, SiC 的抗氧化机理归结如下:

- (1) SiC 和砖中的 Cα(气) 反应产生 Siα(气),同时析出 α(固),使基质致密;
- (2) 部分 Siα(气) 在 Al₂O₃ 颗粒表面和气孔中转化成 SiO₂(固) 填满于砖中的空隙使砖致密;
- (3) 固体 C 的析出使热面上被氧化的 C 又返回砖中,使砖结构又变得致密。

除了上述主成分外,在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖中添加 MgO 、 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 和氮化硅等可改善耐火材料的性能(图 7-6-34 和表 7-6-17)。

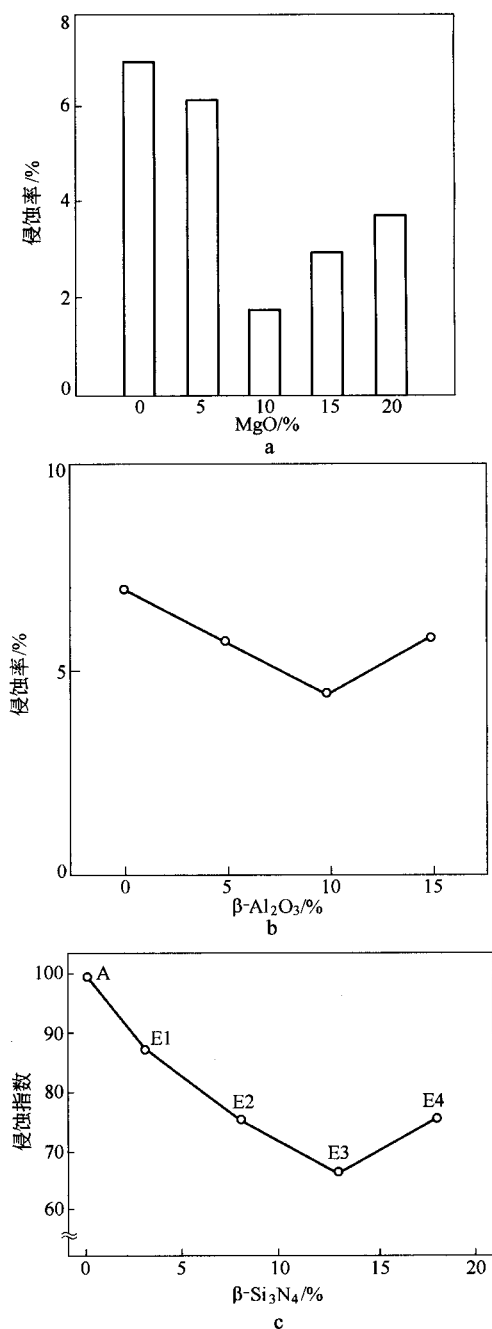


图 7-6-34 添加 MgO 、 $\beta - \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\beta - \text{Si}_3\text{N}_4$ 对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的抗渣性能的影响

表 7-6-17 图 7-6-34c 中所用耐火砖的种类与理化性能

材料种类			A	E1	E2	E3	E4
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		65	62	57	52	47
	SiC		15	15	15	15	15
	FC		13	13	13	13	13
	β -Si ₃ N ₄		0	3	8	13	18
物理性能	显气孔率/%		5.4	4.6	7.5	9.8	10.7
	体积密度/g·cm ⁻³		3.03	3.03	2.97	2.88	2.83
	常温耐压强度/MPa		85	86	76	59	59
	断裂模量 /MPa	常温	23	22	19	17	18
		1400℃	16	15	13	11	12

(二) Al₂O₃-SiC-C 砖的蚀损

图 7-6-35 为 Al₂O₃-SiC-C 砖的蚀损机理。在一般情况下, Al₂O₃-SiC-C 砖在鱼雷混铁罐车内衬上使用时, 工作面上的碳首先被氧化, 其过程为 苏打灰(Na₂CO₃)加入铁水中时立即熔融分解:

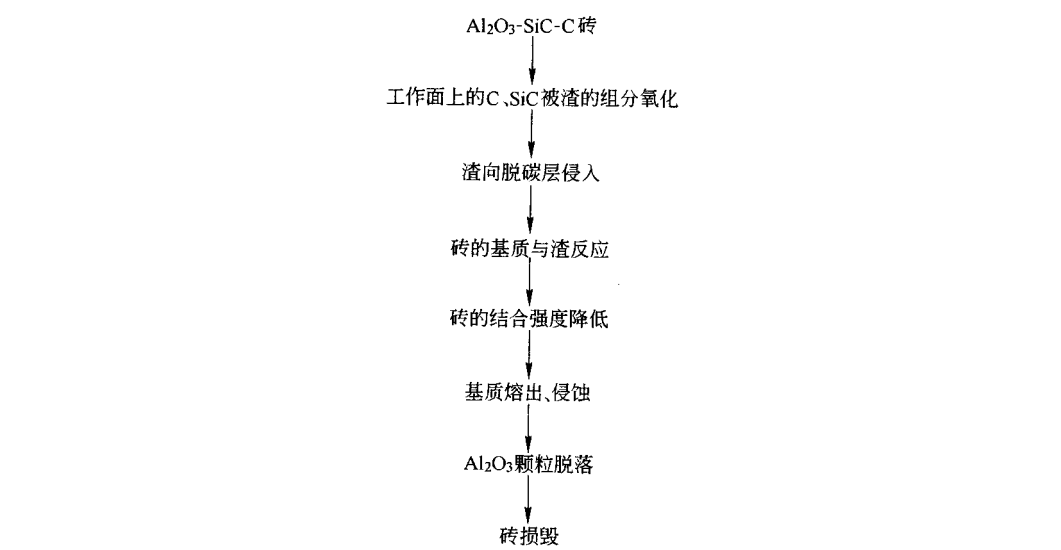


图 7-6-35 Al₂O₃-SiC-C 砖的蚀损机理



Na_2O 是碳的强氧化剂,可使耐火材料发生脱碳作用:



并使砖中的 SiC 分解:



耐火砖工作层脱碳后,炉渣随之侵入砖内脱碳层,与基质反应生成低熔物,结合基质受到破坏, Al_2O_3 颗粒脱落,耐火材料遭受损毁。 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖损毁是脱碳—渣渗透—渣渗透层腐蚀—熔损的循环侵蚀过程。因此,改进 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖的性能和使用效果的方向是提高砖的抗氧化性,其措施有:提高砖的致密度,降低砖的透气性,添加抗氧化剂。

四、鱼雷混铁罐车耐火材料内衬的喷补

鱼雷混铁罐车耐火材料内衬使用过程中,铁水冲击垫、渣线等部位易磨损,出现局部损坏,需进行小修、中修维护。

图 7-6-36 为日本的鱼雷混铁罐车内衬喷补装置。该装置由计算机控制并配备电视监视系统。表 7-6-18 为日本喷补料的性能。

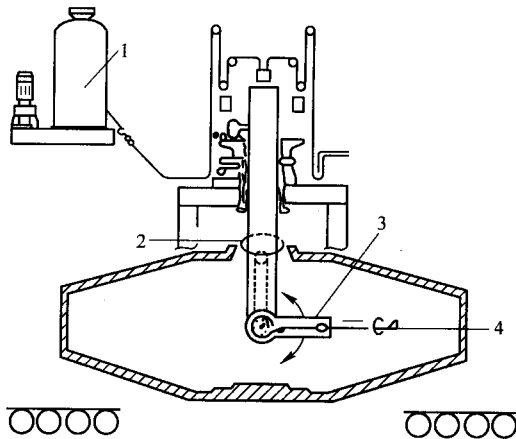


图 7-6-36 日本鱼雷混铁罐车内衬喷补装置

1—料罐 2—喷枪 3—喷嘴转臂 4—喷嘴

表 7-6-19 为宝钢混铁罐车 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ 砖内衬的修补料的性能。STP-100 修补料用于填补侵蚀的凹坑, SGL-1 修补料用于喷补整个内衬。

表 7－6－18 日本鱼雷混铁罐车喷补料的性能

喷补料材质			高铝－SiC 质
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		51.9
	SiO ₂		32.9
	SiC		10.0
粒度/%	> 2380μm		5.0
	< 74μm		34.0
物理性能	线变化率 /%	干燥后	0
		1000℃×3h	+ 0.03
		1500℃×3h	+ 2.50
	常温耐压 强度/MPa	干燥后	9.8
		1000℃×3h	8.0
		1500℃×3h	15.3
	常温抗折 强度/MPa	干燥后	3.1
		1000℃×3h	2.0
		1500℃×3h	6.7
	体积密度 /g·cm ⁻³	干燥后	2.15
		1000℃×3h	2.06
		1500℃×3h	1.96

表 7－6－19 宝钢鱼雷混铁罐车 Al₂O₃－SiC－C 砖内衬用修补料的性能

修补料编号		STPC－100	SGL－1
化学组成/%	Al ₂ O ₃	82.4	76.0
	SiO ₂	4.5	7.8
	SiC	9.0	8.1
	C	4.4	4.8

修补料编号			STPC - 100	SGL - 1
物理性能	体积密度 /g·cm ⁻³	110℃ × 24h	2.75	2.54
		1450℃ × 3h	2.70	2.55
	常温耐压强度 /MPa	110℃ × 24h	37.0	2.00
		1450℃ × 3h	55.0	4.20
	常温抗折强度 /MPa	110℃ × 24h	5.0	0.50
		1450℃ × 3h	9.0	0.80
	线变化率/% 1450℃ × 3h		- 0.2	- 0.4
	流动度/mm		> 150	
加水量/%			约 5.5	约 10

第五节 铁水预处理喷枪用耐火材料

一、喷枪耐火材料的工作环境

喷枪为铁水预处理的重要装置。在鱼雷混铁罐车、铁水包内对铁水进行脱硅、脱硫、脱磷预处理时 , 喷枪浸入到铁水中 , 预处理剂通过喷枪以氧气、氮气为载气吹入铁水中 , 与铁水充分混合和反应(参见图 7 - 6 - 1)。表 7 - 6 - 20 为铁水预处理喷枪耐火材料的工作环境。喷枪工作时 , 不同位置上的耐火材料受到不同的损伤作用 , 图 7 - 6 - 37 示出喷枪各部位耐火材料所遭受的作用和对耐火材料的要求。

表 7 - 6 - 20 铁水预处理喷枪的工作环境

工厂	宝钢	鞍钢第三炼钢厂	新日铁大分制铁所
铁水包容量/t	320	80	300
铁水温度/℃	1400 ~ 1425	1209 ~ 1385	

工厂	宝钢	鞍钢第三炼钢厂	新日铁大分制铁所
处理剂 种类	CaO ,CaC ₂	90 % CaO5 % CaF ₂ 5 % C	氧化铁 氧化铁 - CaO CaF ₂
用量		8 ~ 10kg/t	600kg/min
喷吹载气流量/m ³ · min ⁻¹		3 ~ 3.5	4
处理时间/min	20	6 ~ 17	
炉渣碱度	0.87 ~ 1.14		
喷枪 长度/mm	6650	7377	
直径/mm	250	205	
耐火材料用量/kg · 支 ⁻¹	455		

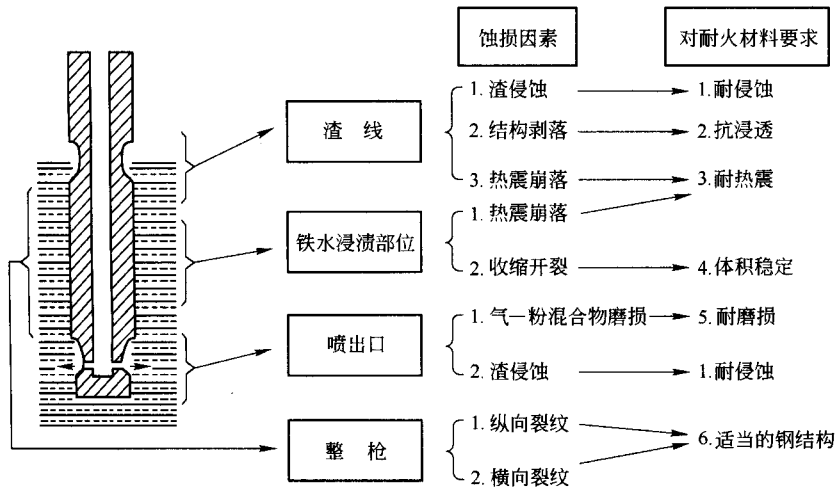
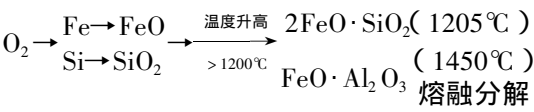


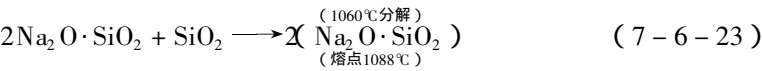
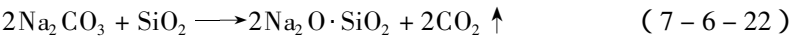
图 7 - 6 - 37 铁水预处理喷枪的损毁因素及对耐火材料的要求

在喷枪头部的喷出口周围 ,耐火材料在高温下受到气体和粉料的激烈磨损作用 ,并受到下列侵蚀作用 :



在铁水浸渍的中间部位 ,熔损作用较小 ,主要是龟裂和剥落造成的损伤。

在渣线部位 ,主要受到下列侵蚀反应的作用 :



由于喷枪使用时受到预处理剂强烈侵蚀作用 ,温度骤变作用 ,喷粉过程中产生震动作用 ,因此 ,铁水预处理喷枪耐火材料必须具有优良的耐侵蚀性能 ,耐热震性能 ,足够的高温强度和安全可靠的结构。

二、喷枪耐火材料的应用与性能

铁水预处理喷枪的外形尺寸大 ,长 4 ~ 7m ,直径 200 ~ 300mm ,重 0.5 ~ 1t。考虑到使用的安全性和便于制造 ,喷枪由金属管芯和耐火浇注料构成 ,管芯为普通厚壁无缝碳素钢管 ,外层为高铝耐火浇注料 ,以振动成形法制成整体喷枪。研究和实际使用表明 ,用耐热钢纤维增强的高铝质浇注料能适应喷枪耐火材料的使用要求 ,耐热钢纤维的含量约为 4%。据图 7 - 6 - 38 所示试验结果 ,浇注料的氧化铝含量的适宜范围为 60% ~ 80% ,这时具有较好的抗侵蚀性能和耐热震性能。

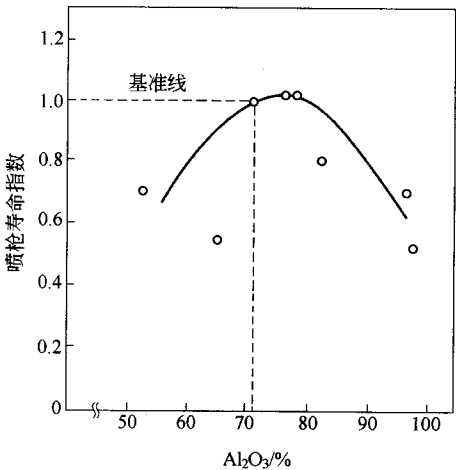


图 7 - 6 - 38 浇注料的 Al₂O₃ 含量与喷枪使用寿命的关系

宝钢于 1985 年从日本引进 TDS 铁水预脱硫装置 ,1989 年后使用国产耐火浇注料制作喷枪 ,平均使用寿命为 22 次。表 7 - 6 - 21 为中国铁水预处理喷枪的性能。日本铁水

预处理喷枪的使用寿命为 25 ~ 35 次 , 喷枪用浇注料的性能如表 7 – 6 – 22 所示。

表 7 – 6 – 21 中国铁水预处理整体喷枪用耐火浇注料的理化性能

材料种类			1	2	3
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		60	66.44	54.74
	SiO ₂				37.31
	CaO				3.67
物理性能	体积密度 /g·cm ⁻³	100℃ × 16h	2.5	2.64	2.22
		1450℃ × 2h		2.61	
	常温耐压 强度/MPa	100℃ × 24h	25	64.0	
		1500℃ × 3h	40	116.0(1450℃ × 2h)	
	常温抗折 强度/MPa	100℃ × 16h	4.0		11.62
		1350℃ 烧后			7.49
	耐火度/℃		1790		
	线变化率/%		+ 0.5(1500℃ × 3h)	- 0.2(1450℃ × 2h)	1.9(1400℃)

表 7 – 6 – 22 日本铁水预处理整体喷枪耐火浇注料的理化性能

使用条件			CaO 型预处理剂	FeO + Na ₂ CO ₃ 预处理剂
耐火材料			高铝浇注料	高铝浇注料
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		55	74
	SiO ₂		42	23
物理性能	显气孔率 /%	105℃ × 24h	14.0	13.5
		1000℃ × 3h	16.3	16.0
		1500℃ × 3h	15.8	18.0
	常温抗折 强度/MPa	105℃ × 24h	7.7	8.0
		1000℃ × 3h	8.0	9.0
		1500℃ × 3h	17.4	16.0

使用条件		CaO 型预处理剂	FeO + Na ₂ CO ₃ 预处理剂
物理性能	高温抗折强度/MPa1200℃	7.6	10.5
	线变化率 /%	105℃ × 24h	- 0.05
		1000℃ × 3h	- 0.06
		1500℃ × 3h	+ 0.68
	热膨胀率/%	0.50(1000℃)	0.60(1000℃)

三、喷枪耐火材料的蚀损

铁水预处理喷枪的损毁形态如图 7 - 6 - 39 所示。影响喷枪使用寿命的最主要原因为：

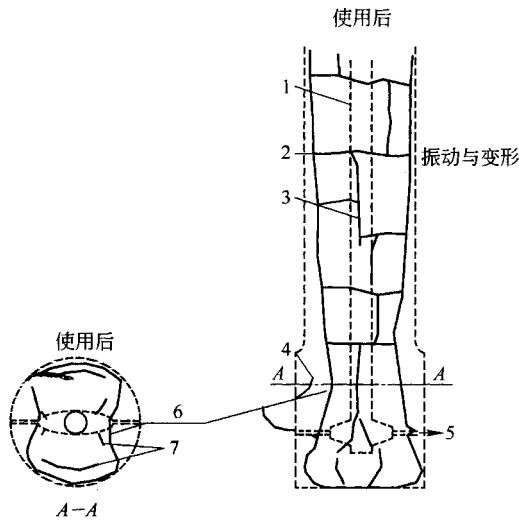


图 7 - 6 - 39 铁水脱硅喷枪浇注料的损毁(虚线为使用前)

- 1—钢管 2—横向裂纹 3—纵向裂纹 4—铁水的反冲击；
5—喷粉与气体 6—喷吹孔上部蚀损 7—剥离

- (1) 喷口孔上部的损毁；
- (2) 纵向开裂、层状龟裂引起的粉体泄露和剥落。

在喷口孔上部附近 , 由于预处理剂和铁水的搅拌作用 , 加速了耐火材料的磨损和熔损。另外 , 由于反复加热、冷却引起热剥落 , 以及喷枪的振动、摇动等机械作用 , 使耐火浇

注料产生龟裂和剥落。

喷枪在浸入铁水中受热—空气冷却的循环变化过程中,耐火材料内外的温度变化情况如图 7-6-40 所示。由于内外温差的作用,在耐火材料内外不同部位产生不同的热应力。如图 7-6-41 所示,在圆柱形的耐火浇注料中,出现沿圆周方向的周向热应力和沿直径方向的径向热应力。当喷枪受到急热作用时,表面受到压缩热应力的作用,而内部则相反为受到拉应力的作用。在约经过 10min 后,耐火材料内部受到的拉应力作用达到最大(图 7-6-42),为耐火浇注料的抗拉强度的 50~60 倍,致使耐火材料浇注料产生圆周方向和直径方向的裂纹。而在浇注料和钢管之间,由于两种材料的热膨胀系数不同,导致产生纵向裂纹。

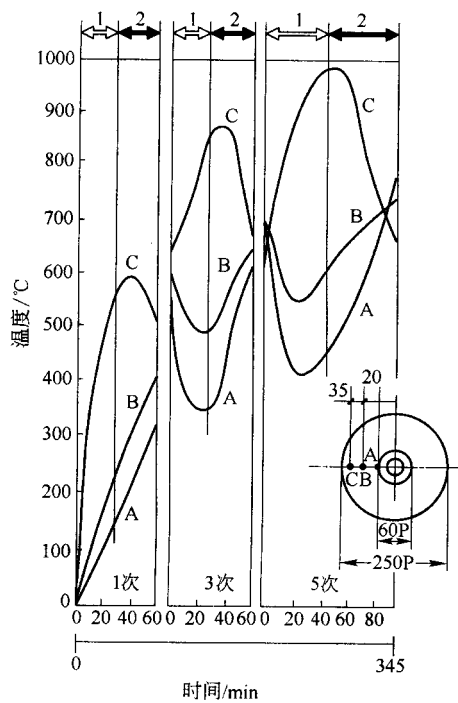


图 7-6-40 铁水预处理喷枪使用时耐火浇注材料内的温度变化情况
1—浸入铁水 2—空气中冷却

改进喷枪使用寿命的主要措施是:在材质上选择使用耐热震抗侵蚀性能好的耐火浇注料,添加耐热钢丝纤维;在钢管与浇注料之间留出膨胀缝隙等。

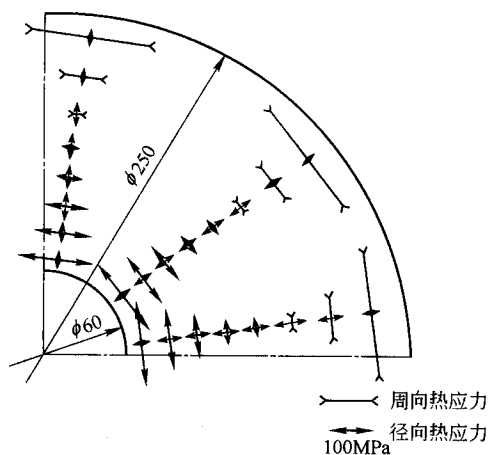


图 7-6-41 铁水预处理喷枪浸入铁水(1400℃)
10min 后耐火浇注料中的热应力分布

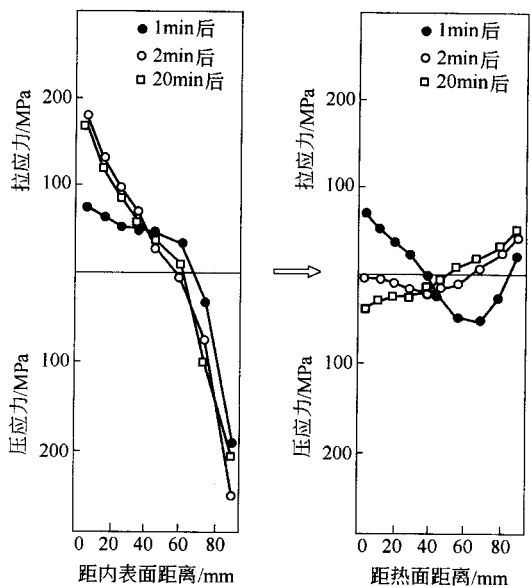


图 7-6-42 铁水预处理喷枪在受到急热(1400℃)
和冷却时耐火浇注料的热应力分布

第六节 KR 铁水脱硫搅拌器耐火材料

一、KR 搅拌器耐火材料的工作环境

图 7-6-43 和表 7-6-23 示出 KR 铁水脱硫装置及其搅拌器耐火材料的工作环境。在铁水脱硫处理时 ,十字形桨式搅拌器浸入到铁水包中 ,以 100 ~ 140r/min 的转速旋转搅拌 ,铁水呈漩涡运动 ,使铁水与脱硫剂充分混合反应。KR 搅拌器耐火材料受到激烈的铁水和炉渣的冲刷磨损 ,脱硫剂的化学侵蚀作用 ,以及由于间歇式作用遭受温度急变作用 ,使用条件比较恶劣。

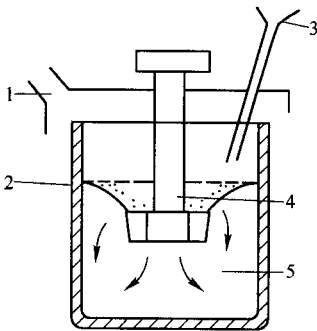


图 7-6-43 KR 铁水脱硫装置示意图

1—除尘器 2—铁水包 3—脱硫剂 ;
4—搅拌器 5—铁水

表 7-6-23 KR 铁水脱硫搅拌器耐火材料的使用条件

工厂	武钢	日本鹿岛制铁所
铁水处理量/t·次 ⁻¹	75 ~ 85	250
铁水温度/t	> 1300	
搅拌时间/min	10 ~ 15	11 ~ 14

工厂		武钢	日本鹿岛制铁所
搅拌器	高/mm	2685	2620
	转轴直径/mm	400	600
	旋转直径/mm	1200	1310
	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	90 ~ 120	140
	转矩/ $kg \cdot m$	825	
	种类	CaC_2, GaO	GaO, Na_2CO_3
脱硫剂	用量/ $kg \cdot t^{-1}$	3 ~ 4	
日处理次数		17	

二、耐火材料的应用与性能

由于 KR 搅拌器的形状复杂和外形尺寸大 ,用一般的耐火材料生产工艺难以制作 ,因而采用耐火浇注材料制造 ,比较简单容易。

图 7 - 6 - 44 为武钢的 KR 搅拌器的形状和尺寸 ,搅拌器用耐火材料的性能如表 7 - 6 - 24 所示 ,耐火浇注料的配料比如表 7 - 6 - 25 所示。

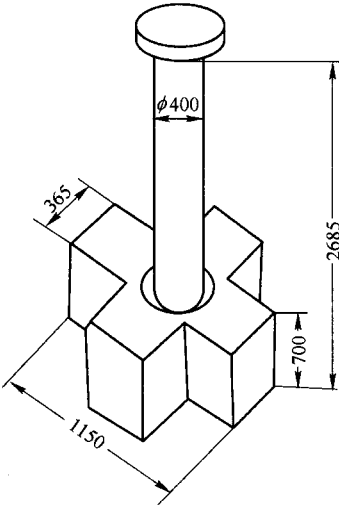


图 7 - 6 - 44 武钢使用的 KR 搅拌器

表 7－6－24 武钢 KR 搅拌器用耐火浇注料的性能

材料种类			1	2
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		50.81	52.38
	SiO ₂		35.2	35.86
物理性能	线变化率 /%	105℃烘干	－0.16	－0.02
		1000℃×3h	－0.14	
		1300℃×3h	－0.67	0.06
	导热系数/W·(m·K) ^{－1} 350℃		0.55	0.62
	抗折强度 /MPa	105℃烘干	10.3	4.9
		1000℃×3h	3.9	6.1
		1300℃×3h	8.9	10.4
	耐压强度 /MPa	105℃烘干	58.6	25.3
		1000℃×3h	31.7	39.3
		1300℃×3h	68.1	40.8

表 7－6－25 武钢 KR 搅拌器用耐火浇注料的配比/%

材料种类	1	2
焦宝石熟料 ,<7mm	60	60
高铝熟料 ,<0.088mm	25	37
生黏土粉 ,<0.088mm	3	3
纯铝酸钙水泥	12	
矾土水泥		2
50% 磷酸		13
减水剂(NNO)	0.12	
水	10	

图 7-6-45 为日本住友鹿岛制铁所的 KR 铁水脱硫搅拌器的形状与尺寸 ,搅拌器用耐火浇注料的性能如表 7-6-26 所示。

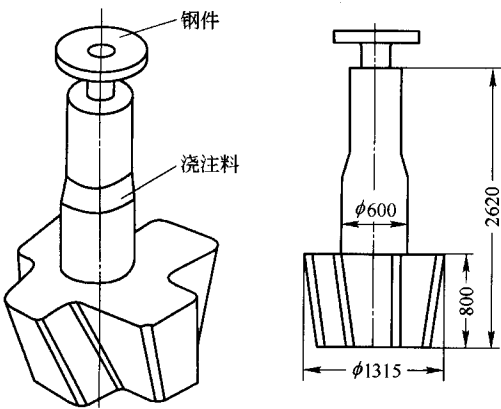


图 7-6-45 日本 KR 搅拌器的形状和尺寸

表 7-6-26 日本 KR 搅拌器用耐火浇注料的性能

材料种类			1	2
化学组成 /%	Al ₂ O ₃		58	56
	SiO ₂		29	29
	SiC		10	13.5
	线变化率/% 1500℃×3h		+0.13	+0.30
物理性能	体积密度 /g·cm ⁻³	105℃×24h	2.63	2.56(110℃)
		1000℃×3h	2.58	
		1500℃×3h	2.59	2.56
	抗折强度 /MPa	105℃×24h	6.1	13.2
		1000℃×3h	5.9	5.13
		1500℃×3h	10.0	(HMOR1400℃)
				14.5
	耐压强度 /MPa	105℃×24h	38.2	
		1000℃×3h	56.8	
		1500℃×3h	76.4	

日本使用的 KR 搅拌器的使用寿命一般在 220~300 次 ,最高达 500 次。使用损毁的主要原因因为热震造成龟裂和开裂、炉渣浸透、侵蚀和磨损。改进耐火材料性能和延长搅拌器使用寿命的主要措施有：

(1)配料中添加 5%高膨胀性硅石颗粒骨料 ,如图 7-6-46 所示。在受到热的作用时 ,于硅石颗粒周围形成微裂纹 ,在受到热震作用时 ,起缓冲热应力的作用 ,从而提高抗

热震性能。

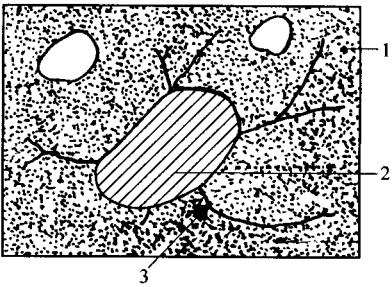


图 7-6-46 耐火浇注料添加硅石颗粒
1—基质 2—高膨胀氧化硅颗粒 3—微裂纹

(2)添加 2% 氧化铝微粉 ,水泥用量减少至 2% ,以提高耐火浇注料的抗侵蚀性和耐磨性。

(3)添加 SiC 以改善耐火材料的耐侵蚀性和抗热震性。当碳化硅加入量达到 5% ~ 10% 以上时 ,耐侵蚀性和耐热震性明显提高(图 7-6-47)。

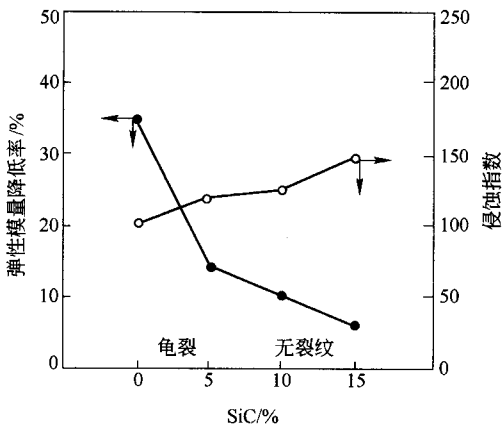


图 7-6-47 SiC 含量对 KR 搅拌器用耐火浇注料的抗侵蚀性和耐热稳定性的影响
(渣 :铁水预处理后的渣)

弹性模量降低率	1400℃ × 1h↔空气冷却(10 次循环)
侵蚀指数	140℃ × 1h↔空气冷却(4 次循环)
无裂纹	1400℃ × 1h↔水冷(15min) + 空气冷却(15min) 10 次循环)