

1995 特殊鋼學術年會 論文集

中国金属学会特殊钢专业学会

中国 本溪

1995 年 8 月

2. -53

6

目 次

特殊钢冶炼技术的近期进展	傅 杰 马廷温 王 平 兰德年	(1)
抚钢 50t 超高功率电炉运行效果	段富宪	(9)
LF 炉埋弧渣技术的开发及其应用	牛四通 杨德华 黎绪炳等	(13)
AOD 炉水力学模拟研究	张茂槐 林企增 朱本立 李士琦	(18)
我国合金钢连铸的实践与思考	卞桂斌 黄自谋	(22)
软接触结晶器连续铸钢技术	任忠鸣 邓 康 魏季和 蒋国昌	(26)
GFM 锻轧机及其生产工艺技术	王纯亮 梁永吉	(28)
合金结构钢的发展述评	杨其革 杨培义 丁仁根	(33)
35MnVS 在发动机连杆上的应用研究	邱玉贵 张义和 俞振隆	(38)
齿轮钢的动态断裂破坏力(F_{dyn})影响因素初探	杨其革 杨培义 丁仁根	(42)
32CrNi3MoV 钢的试验研究	郭庆丰 王 琪 朱保成	(47)
$Z_{12}CNDV_{12}$ 和 $Z_{15}CN_{1703}$ 钢中不同碳化物的析出对其力学性能的影响	王红涛	(52)
非调质钢研究与应用的新进展	董成瑞 金同哲	(56)
渗碳钢钢锭中氧的分布	杨培义 杨其革 林文泉 何永年 方军	(61)
970MPa 级非调质抽油杆钢的试验研究	齐长发 吴石麟 杜 野 王云阁	(63)
45V 钢轧制工艺的研究	张本生	(68)
785MPa 级非调质钢 YE45MnV 力学性能研究	刘乐凯	(72)
我国轴承钢生产的发展	王昌生 谢亚庆 周德光	(76)
轴承钢的连铸生产	李凤翔 孙东东 吴利生	(84)
接触应力水平对轴承钢(GCr15)中硫的行为的影响	王宪武 金文海 杨子宁 吴利生	(89)
10Cr4Ni4Mo4V 钢高温性能的研究	袁新生 王杰君 谷臣清 吴利生	(92)
高 Mo 奥氏体不锈钢组织及其稳定性对耐蚀性的影响	杨长强 李慧玲	(96)
稀土铈在双相不锈钢中的作用	孙文山 丁桂荣 宋爱英 罗铭蔚 王智慧	(101)
爆炸焊接不锈钢复合钢板界面“复合区”的组织特征和成分分布的研究	李文达 王素英 崔雅卿 杜 炜	(105)
一种新型低镍高性能的奥氏体耐热钢的组织与性能研究	彭心平	(109)

1995 特殊钢学术年会论文集

化肥装置 CO 变换预热器腐蚀破裂的研究	刘 斌(113)
氮对亚稳奥氏体不锈钢的性能和组织影响的研究	胡伟量(116)
一种 Fe-Ni-Co 基合金低温力学性能的研究	李依依 范存淦 王安川 李冬法(120)
新一代高强韧性低温钢 07MnNiCrMoVDR 钢(WDL 钢)的研制开发及应用	陈 晓(125)
一种 Fe-Cr-Ni-Mn-N 合金的低温力学性能及组织稳定性研究	范存淦 李冬法 赵学军 李依依(129)
溶质原子的不平衡偏聚对高锰奥氏体超低温钢性能的影响	薛侃时 张静江 李 晋 王 滨(133)
内部氢对一种沉淀强化奥氏体钢室温及低温力学性能的影响	马禄铭 梁国军 范存淦 李依依(138)
国内外模具钢生产技术概况及其展望	徐 进(143)
提高 5CrNiMo 锻模钢性能的研究	陈再枝 姜桂兰(154)
5CrMnMo 钢调幅分解	惠树人(159)
高速工具钢近年来的发展概况	罗 迪 李忠之 刘惠文 唐律今(163)
锡对高速钢性能的影响	雷利军 田 旭 刘路军 姬玉萍(171)
硅在高速钢中的使用原则及含硅高速钢的发展	潘复生 周守则 丁培道(174)
高速钢中的大颗粒碳化物	罗 迪 邢国华 齐生祥 杨 扬(178)
国内外金属耐磨材料的现状及展望	王洪发(182)
新型高强韧性奥氏体-贝氏体组织低合金钢的研究	曲敬信 栾道成 杨东方 邵荷生(188)
钻井楔齿滚刀用低合金耐磨铸钢的研究	杨瑞林 李力军(192)
高强韧性 35Cr2MnSiMoR 耐磨铸钢的研究	王洪发 夏 放 许 达 王晓东(196)
SR 复合强化高锰钢	朱瑞富 王世清(199)
激光熔覆粗 WC 颗粒金属陶瓷层的耐磨性	朱蓓蒂 曾晓雁 陶曾毅 杨树国(203)
4Cr13 钢激光淬火及回火的组织与磨损特性	潘 肃 欧阳家虎 高彩桥(207)
我国钎钢钎具的进步与创新	徐曙光 董鑫业 李秀清(211)
发展我国的重型钎具	董鑫业(216)
钢的计算机设计	余柏海(220)
从美国小钢厂的发展得到的启示	张有礼(224)

特殊钢冶炼技术的近期进展

傅 杰 马廷温 王 平

(北京科技大学)

兰德年

(冶金部科技司)

本文对用电炉流程、转炉流程和特种冶金方法生产特殊钢的冶炼技术的近期进展作了综述,并结合我国现状,指出必须加强合金钢短流程生产工艺研究和技术开发,重视转炉流程生产合金钢技术的应用。

1 前言

特殊钢包括合金钢及合金,例如结构钢、弹簧钢、轴承钢、工模具钢、不锈钢、高温合金、精密合金等。低合金钢习惯上列入普钢。

目前,先进的特殊钢生产流程有三个:

电炉流程:电炉-二次精炼-连铸-热送热装-轧制。这就是所谓的短流程;

转炉流程:高炉-铁水预处理-转炉-二次精炼-连铸-热送热装-轧制;

特种冶金:真空感应熔炼、冷坩埚熔炼、电渣重熔、真空电弧重熔、电子束熔炼、等离子熔炼等——锻造或轧制。

本文对上述三个流程中冶炼技术的近期进展进行综述,并分析国内外特殊钢冶炼技术水平的差距,结合我国现状,指出必须加强合金钢短流程生产工艺研究和技术开发,重视转炉流程生产合金钢技术的应用。

2 电炉流程冶炼技术的近期进展

世界主要产钢国家 1870~1992 年钢产量的变化可以看出,这一段时期内世界年产钢量为 7 亿 t 左右^[1]。我国自 80 年代以来,钢产量迅速增长,1993 年,钢产量为 8954 万 t,1994 年,继续上升到 9135 万 t,到 2000 年预计会超过 1.2 亿 t 大关。

按照国际钢铁学会的估计^[2],1995 年,我国钢消耗量将为 1.113 亿 t,到 2000 年为 1.543 亿 t,年平均增长率为 6.7%,我国将成为世界上年钢消耗量最多的国家。表 1 列出了 1994~2000 年世界各地区和国家钢消耗量的变化情况。

表 1 世界各地区和国家钢消耗量的变化,100 万 t

地区和国家	1994	1995	2000	年增长率, %
美国	108.7	108.6	102.0	-1.0
加拿大	13.6	13.8	14.3	0.6
拉丁美洲	31.6	33.2	41.8	4.7
欧共体	109.6	114.5	121.2	1.1
其它西欧国家	22.4	23.9	25.3	1.2
东欧	15.2	16.9	20.9	4.3
前苏联	59.5	58.4	66.1	2.5
中国	104.7	111.3	154.3	6.7
日本	80.6	82.2	99.2	1.4
其它亚洲国家和地区	114.8	121.5	154.3	4.9
澳大利亚和新西兰	6.6	6.6	6.6	0.0
非洲	15.1	15.4	16.5	1.4
中东	10.6	11.1	12.1	1.7
世界总量	693.6	717.3	824.5	2.8

在炼钢方法方面,目前主要是转炉冶炼与电炉冶炼,电炉钢比例不断上升。日本 70 年代初电炉钢产量约占总产量的 20%,目前电炉钢比例为 33%左右。美国情况与日本类似,电炉钢约占总钢量的 40%。我国电炉钢产量的发展也很快,至 1993 年,平炉钢比已降到 16.13%,电炉钢比上升到 23.17%。

电炉钢产量的迅速增加是与电炉钢冶炼技术的发展或者说与电炉钢短流程生产工艺技术的发展分不开的。电炉钢短流程发展很快,近年来美国、日本等国家新建了许多直流电弧炉和超高功率电弧炉^[3],就是作为电炉钢短流程生产线中的初炼设备。

我国不少特钢厂及地方钢厂已配置电炉、二次精炼和连铸设备,特别是一些重点特钢厂

和地方钢厂以及一些重点的钢铁联合企业,在“八五”期间已造成或正拟引进设备技术,建设现代化的短流程生产线,其中包括生产长材(汽车用轴承钢、齿轮钢等)、板材(不锈钢板、造船板等)和管材(石化用管线钢等)的短流程生产线,共10余条。

电炉流程冶炼技术的进步主要表现在以下两个方面:

2.1 快速熔炼技术

在短流程生产中,电炉基本上起熔化的作用,快速熔化是关键,现代电炉冶炼的特征是生产节奏转炉化。电炉冶炼周期(出钢—出钢时间)已可达40min,即一天生产36炉钢。可以说,现代电炉冶炼技术都是围绕着缩短冶炼周期这一总目标而发展起来的。

$$\tau = \tau' + \tau'' = \frac{C \times W \times 60}{P \times \cos\phi \times \eta} + \tau''^{[4]}$$

其中: τ —冶炼周期, min;

τ' —通电时间, min;

τ'' —非通电时间, min;

C —电耗, kWh/t;

W —钢液重量, t;

P —表观输入功率, kVA;

$\cos\phi$ —功率因数;

η —电效率。

从上式可知,为缩短冶炼周期,必须减小 W/P 及 C 值,提高 $\cos\phi$ 和 η 。在这一思想指导下,发展了一系列电炉冶炼新技术,除众所知的超高功率电弧炉和直流电弧炉及其相关技术、强化吹氧及氧—燃烧咀技术和导电横臂技术外,近年来的电炉技术热点包括电炉二次燃烧技术、废钢预热及废钢加铁水冶炼技术。

电炉二次燃烧技术在我国尚属空白,图1、图2是 Nucor 60t 电炉采用二次燃烧技术所获效果^[5]。由图1、图2可见,采用电炉二次燃烧技术以后,炉气中 CO 比例显著降低,CO₂ 比例显著增加,冶炼周期缩短7%,电耗降低15%。德国巴登钢厂也得到类似效果^[6],采用电炉二次燃烧技术以后,产量提高7~10%,电耗降低6%,电极消耗和铁耗维持原有水平。

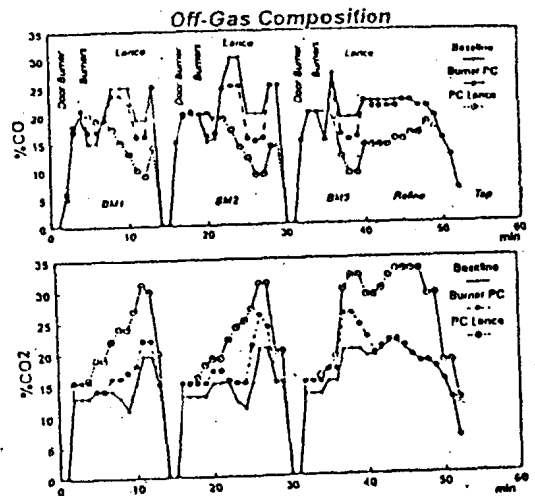


图1 二次燃烧对炉气成分的影响

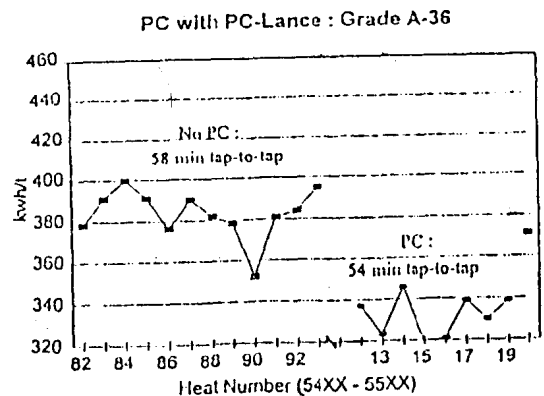


图2 二次燃烧对冶炼周期及电耗的影响

关于废钢预热,目前比较成功的技术有双壳电炉法、烟道竖式电炉法和 consteel 法(连续预热法)^[4,7]。值得注意的是,最近 Nucor 正考虑建一台容量为70t、年产90万t,具有四根 $\varnothing 250\text{mm}$ 顶阴极的中心烟道式直流电弧炉—COMELT,新一代的电弧炉^[8]。图3、图4分别是 COMELT 炉子的侧视图及俯视图。据报道,COMELT 炉子具有如下特点:(1)采用多根较小尺寸石墨阴极,可建容量大于150t的直流电弧炉;(2)采用中央烟道废钢预热,电耗较普通直流电弧炉或交流电弧炉减少100kWh/t;(3)冶炼周期为30~50min;(4)电极侧面温度低,氧化损失小,电极消耗比普通直流电弧炉低

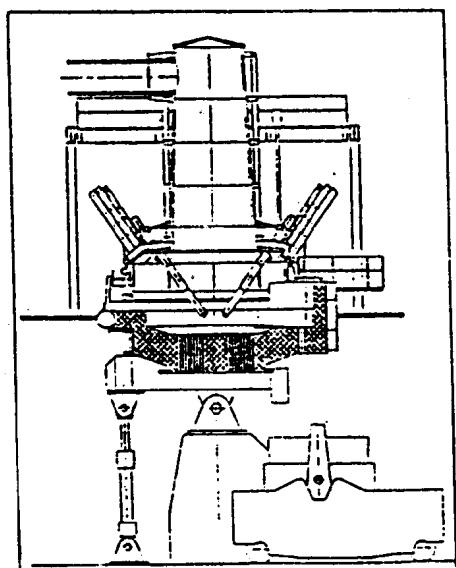


图3 COMELT 炉子的斜视图

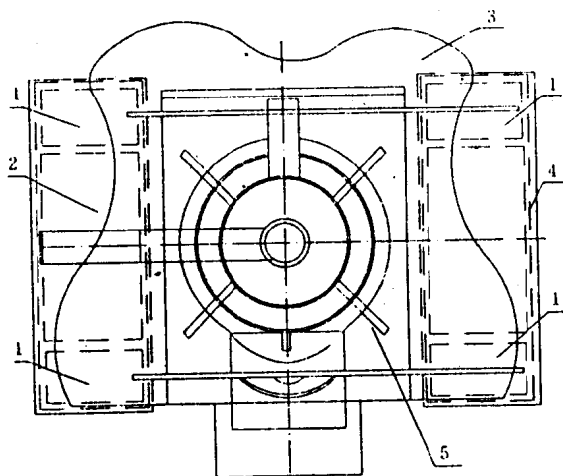


图4 COMELT 炉子的俯视图

1-整流器;2-变压器;3-炉子平台;4-变压器房;5-电极

30%; (5) 采用全封闭系统, 噪音比普通直流电弧炉低 10~15dB; (6) 由于挥发物逸出少及废钢对烟尘的拘捕, 所需除尘设备的尺寸只有普通直流电弧炉的 60%; (7) 钢成本可降低 8~20 美元。

关于废钢加铁水冶炼, 由于铁水是载能体, 可以显著降低电耗, 此外, 铁水中有害金属杂质含量低, 可以提高钢的纯净度。图 5 说明电炉料中铁的比例与电耗的关系, 由图可见, 加入 30% 铁水, 可使电耗从 450kWh/t 降至 300~350kWh/t。

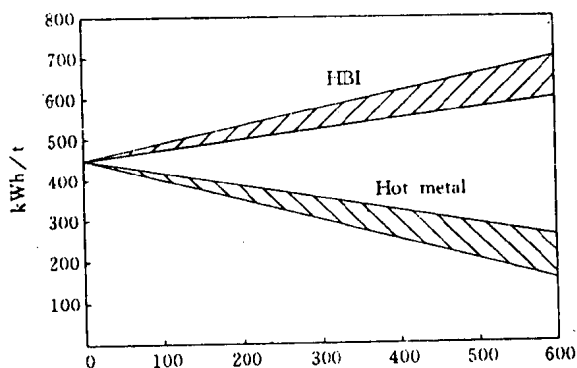


图5 加铁水量对电耗的影响

通过采用一系列快速熔炼技术, 使得电炉冶炼周期缩短, 生产率提高, 电耗、电极消耗及成本下降。表 2 是 1992 年报道中的主要数据^[9]。

2.2 二次精炼技术

二次精炼是实现电炉快速熔炼的前提条件, 也是提高电炉钢质量、增加品种、协调电炉—连铸生产, 实现多炉连浇的重要手段。与电炉流程有关的二次精炼方法主要有 LF, VD, RH, AOD, VOD, WF 以及 DCLF。

近年来, 二次精炼技术进步主要包括以下几个方面:

2.2.1 提高产品纯洁度

围绕着生产低氧轴承钢, 国内外冶金工作者作了大量的工作, 内容包括采用合理的二次渣及 Ar 搅拌制度和脱氧工艺, 防止二次氧化等。我国各特殊钢厂在科研院所和高等学校的配合下, 进行了大量的工作, 使轴承钢总氧量不断下降, 有的厂家已接近国际水平(日本生产的连铸高碳轴承钢平均总氧量为 5.6ppm, 模铸轴承钢约 9ppm)。表 3 列出了我国各主要特殊钢厂生产的轴承钢总氧量^[10]。

2.2.2 实现钢液温度及成分的目标控制

近年来, 国内外冶金工作者均很重视对二次精炼过程进行计算机控制。伯利恒钢公司斯蒂尔顿厂利用钢包处理站对钢液的温度进行目标控制, 连浇炉数最高达 109 炉。太原钢铁公司对 18t AOD 炉精炼不锈钢实行微机动态控制,

实现了终点碳和钢液温度的目标控制,缩短了吹炼时间,提高了炉龄和铬回收率^[11]。北京科

技大学正在进行 LF+VD 过程钢液成分、纯洁度和钢液温度同步目标控制的试验研究。

表 2 1992 年报道中的一些主要数据

项 目	普通交流电炉	普通直流电炉	DANARC 交流电炉	DANARC 直流电炉	双壳炉	Consteel	烟道竖式电炉
冶炼周期, min	55	66	47	47	50	49	53
生产率, t/MVA · h	2.75	2.44	3.39	3.04	2.75	2.46	3.03
电耗, kWh/t	363	410	295	329	363	407	330
电极消耗, kg/t	1.6	1.4	1.4	1.1	2.1	1.9	1.1
成本, US\$ /t	162.91	162.45	159.65	160.97	—	—	—

表 3 我国各特殊钢厂生产的高碳轴承钢总氧量

项目	大冶	上五	长特	齐钢	抚顺	大连	西宁	无锡
炉数	1067	3628	770	881	296	510	205	28
平均总氧量, ppm	10.40	12.17	12.90	13.44	13.81	17.73	20.06	14.25
≤10ppm	64.10	19.96	22.99	15.66	16.22	0.16	0.49	0
≤13ppm	85.85	77.21	63.10	51.99	49.66	9.01	7.41	39.29
≤15ppm	93.63	94.03	82.70	75.94	73.65	33.92	24.39	75.00
≤20ppm	99.34	100	96.75	98.30	100	86.37	80.78	100

2.2.3 建立合理的电炉二次精炼设备配置

对于不同要求的特殊钢电炉流程,应有不同的二次精炼设备配置。

EAF-LF-VD-WF-CC 是最常用的电炉流程,可以满足低氧钢、低硫钢、低气体含量钢的要求,对连铸的顺行和产品质量能起充分的保证作用。

EAF-LF-RH-WF-CC 也是一个先进的电炉流程。日本大同钢公司于 1982 年投资 5 亿日元,在 EAF-RH-WF-CC 流程中增建 LF,使月产量由 3.9 万 t 增加到 5.4 万 t^[12]。与上述 LF-VD-WF 配置相比较,脱硫效果差一些,但脱气效果较好。

EAF-LF-WF-CC,可以满足不要求脱气钢种的需要,可以达到很高的脱氧和脱硫率,满足连铸对钢液温度及夹杂物属性的要求。

对于钢包内径较小的小容量炉子(例如容量为 20~25t 的炉子),宜采用 DCLF。

3 转炉流程生产特殊钢^[13]

由于铁水预处理及二次精炼的发展,使得

转炉流程在特殊钢生产方面发挥了重要作用。使用转炉流程生产特殊钢技术首先由日本开发。日本于 1957 年引进转炉技术,1961 年使用转炉生产特殊钢 28 万 t,占当时特殊钢产量的 10%,1967 年 156 万 t,占 23%,1971 年 528 万 t,占 51%,超过特殊钢产量的一半,1985 年达 1200 万 t,近年来一直保持在 1000 万 t 以上的水平,占特殊钢总产量的 70%左右。

转炉与铁水预处理及二次精炼设备相结合,特别是基于转炉冶炼采用金属杂质含量低的铁水作原料以及冶炼过程中没有电炉冶炼过程中电弧区钢液吸氮问题,转炉流程不仅可以容易地生产出过去只能靠电弧炉生产的轴承钢、不锈钢等钢种,而且可生产出一些电炉流程难以生产的品种,例如含碳、氮总量低于 50ppm,含铜、镍、铬、钼、锡总量低于 0.14% 的深冲钢板。

表 4 即日本 1986~1990 年二次精炼与带真空处理的二次精炼技术应用情况以及特殊钢产量在总钢产量中所占比例。由表可见:转炉流

程的炉外精比与真空处理比都高于电弧炉流程。而特殊钢在总钢量中所占比例约为 15%。

我国目前合金钢比例为 5.4%，钢液二次精炼比约为 12%。

表 4 日本转炉与电弧炉二次精炼、真空处理比及特殊钢比的变化

年份		1986	1987	1988	1989	1990
转炉钢	二次精炼比, %	70.4	71.7	71.7	73.2	78.8
	真空处理比, %	53.5	52.9	53.4	54.6	56.2
电炉钢	二次精炼比, %	51.4	53.4	53.5	56.0	65.0
特殊钢占总钢量比, %		14.6	14.7	15.2	14.5	14.6

值得注意的是,转炉流程生产轴承钢取得了很好的效果。轴承钢的主要性能是疲劳寿命,钢中氧含量对疲劳寿命具有决定性能影响,总氧量从 20 年前的 30ppm 降到今天的 6ppm 左右,轴承钢的疲劳寿命提高了近 30 倍^[14]。日本神户制钢采用高炉-铁水预处理-转炉-二次精炼-连铸流程生产轴承钢,钢中总氧量全部小于 6.3ppm^[15]。转炉与 RH 配合生产的轴承钢氧含量为 20ppm 时,可以达到电炉与 RH 配合生产的总氧量为 10ppm 的轴承钢的疲劳寿命水平(见图 6)。后者可以用转炉流程生产的轴承钢金属杂质和氮含量低来解释。

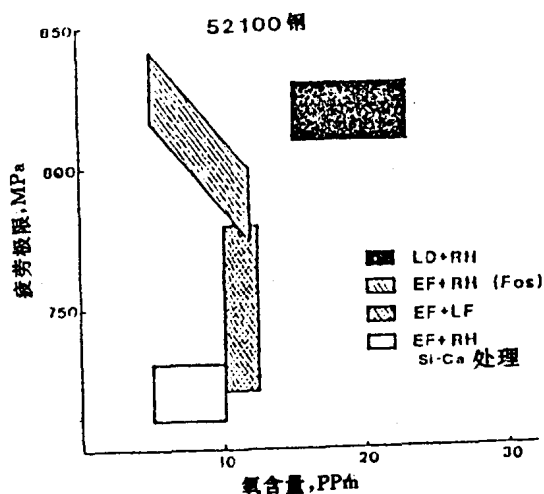


图 6 不同流程生产的轴承钢总氧量与旋转弯曲疲劳极限的关系

4 特种冶金的发展动态

特种冶金包括真空感应熔炼、电渣重熔、真

空电弧重熔、电子束熔炼、等离子熔炼等。难熔金属(钨、钼、铌、钽)及活泼金属(钛及钛合金包括钛、铝金属间化合物等)用真空电弧重熔、电子束熔炼以及冷坩埚感应熔炼等方法来制备;高温合金、精密合金以及某些对质量要求很高的合金钢用真空感应熔炼、电渣重熔或真空电弧重熔等方法来生产^[16]。

近年来,随着二次精炼技术的发展,用二次精炼方法生产的特殊钢,在纯洁度方面已达到甚至超过特种熔炼的产品,使得过去要靠特种熔炼方法才能生产的品种现在改用二次精炼方法来生产,例如,过去要用真空电弧重熔或电渣重熔的轴承钢,现在可用 LF+RH 或 LF+VD 来生产,试验结果表明,用二次精炼方法获得的超纯轴承钢的氧含量与真空电弧重熔的相同,二者具有相同的 B_{10} 寿命^[17]。

二次精炼技术的发展,使得特种熔炼产品失去一部分市场。在这一形势下,特种冶金除了保持其在难熔金属、活泼金属、高温合金、精密合金、特殊钢锻件生产等方面的主导地位外,近年来也开辟了一些新的应用领域,用于特殊钢生产,这些领域包括:

(1) 高压电渣重熔高氮不锈钢^[18]

德国用高压电渣炉,在 42Pa 压力下,生产直径 1000mm、重 20t 的高氮不锈钢, PESR 的自耗电极用电弧炉生产,氮以 Si_3N_4 形式加入,重熔前后钢中合金成分及氮含量的变化列于表 5。

表 5 不锈钢 PESR 前后合金成分及氮含量的变化, Wt%

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
奥氏体不锈钢 A							
1.3816(P900)	<0.12	<1.0	17.0~19.0	17.0~19.0	—	—	0.40~0.60
自耗电极	0.05	0.15	18.5	18.5	—	—	0.65
PESR 锭	0.05	0.68	18.5	18.5	—	—	1.00
奥氏体不锈钢 B							
1.3965	<0.10	<1.0	7.5~9.5	17.0~19.0	4.5~6.5	—	0.10~0.20
自耗电极	0.05	0.15	8.5	18.0	5.50	—	0.30
PESR 锭	0.05	0.75	8.5	18.0	5.50	—	0.70
铁素体不锈钢 C							
1.4922	0.17~0.23	<0.5	<1.0	10.0~12.5	0.30~0.80	0.80~1.20	—
自耗电极	0.10	0.15	0.5	12.0	0.50	1.00	0.08
PESR 锭	0.10	0.33	0.5	12.5	0.50	1.00	0.20
马氏体不锈钢 D							
1.4116	0.42~9.48	<1.0	<1.0	13.8~15.0	—	0.45~0.60	—
自耗电极	0.15	0.15	0.5	15.0	—	0.60	0.15
PESR 锭	0.15	0.45	0.5	15.0	—	0.60	0.35

高氮不锈钢除了节约大量昂贵的镍资源外,还具有特别优异的性能,例如,高氮奥氏体不锈钢能够通过冷轧获得 2000MPa 甚至 3000MPa(小断面材)的超高强度,而不产生应力腐蚀裂纹。众所周知,对于其它超高强钢,当屈服强度超过 1500MPa 时,即使在室温纯水条件下也会引起破坏;高氮铁素体或马氏体—铁素体不锈钢,由于允许较低的碳含量,消除了作为腐蚀疲劳源的碳化物坑,从而具有高的强度和腐蚀疲劳抗力。

(2) 零夹杂超纯不锈钢及高温合金

A. Mitchell 提出了生产零夹杂不锈钢及高温合金的概念^[19],不但从理论上论证了获得零夹杂不锈钢及高温合金的可能性,而且通过实验(三次电子束冷床熔炼—EBCHM),获得了接近零夹杂的不锈钢,并认为,如果能避免原始金属中带入 CaO 或含 CaO 的夹杂物,使能生产出零夹杂的超纯不锈钢及高温合金。表 6 是三次 EBCHM 锭的化学成分及夹杂物数量。

表 6 三次 EBCHM 锭的化学成分及夹杂物数量

试验锭	化学成分, %							夹杂物数量, N/cm ²				
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	O	1~2	2~3	3~4	4~5	>5μm
1	0.05	0.64	0.29	20.4	11.4	0.0030	0.0002	0	0.08	0	0	0
2	0.06	0.41	0.41	22.3	11.8	0.0030	0.0003	0	0	0.08	0.08	0

(3) 冷坩埚感应熔炼金属间化合物等^[20]

冷坩埚感应熔炼又称感应壳熔炼(ISM),由于没有耐火材料坩埚与熔炼金属间的反应,特别适应生产钛及钛合金锭子铸件以及活泼金属组成比重差较大的金属间化合物(例如钛、铝金属间化合物)。目前冷坩埚熔炼设备可具有抽锭或离心浇注功能,容量可超过 1000L。图 7

是带抽锭装置的冷坩埚感应炉的示意图。

(4) 电渣离心浇注与感应电渣离心浇注

利用电渣离心浇注或感应电渣离心浇注可以生产接近使用尺寸的特殊钢铸件,例如轧辊、轮子、齿轮毛坯、不锈钢法兰等,其性能可以达到锻件技术条件,使用寿命与锻件相当甚至超过锻件,利用动态效应可以获得细晶粒的 37×

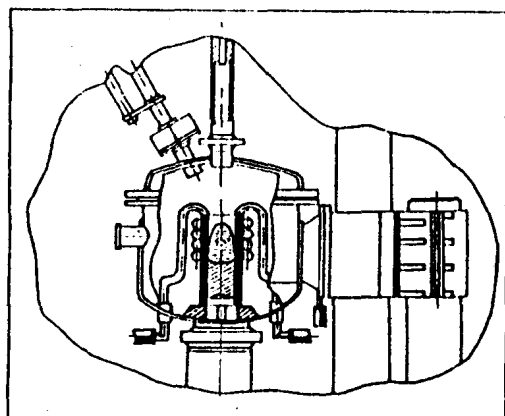


图7 带抽锭装置的冷坩埚感应熔炼示意图

12H8R8M 奥氏体不锈钢细晶铸件^[21,22]。

(5) 中间包等离子加热与电渣加热

中间包等离子加热已为人们所熟知,国内

已引进技术,而电渣加热尚未引起人们重视。中间包电渣加热与等离子加热比较,具有如下优点:设备简单,投资省,操作费用低,而热源,加热均匀;没有等离子弧的高温辐射作用,包衬寿命高;熔渣有较好的冶金反应能力,能有效地脱硫及去除夹杂物。目前,中间包电渣加热技术在国内外已成功应用于生产^[23]。

5 加强合金钢短流程生产工艺研究与技术开发,促进我国特殊钢生产发展

近年来特殊钢冶炼技术的进步结果体现在两个方面,一是冶炼周期的缩短,生产率的提高,能耗、材料消耗及成本的降低;二是产品冶金质量的提高,集中表现在纯洁度提高上。表7列出了不同年代钢中主要杂质元素含量的变化情况。由表7可见:目前作为钢中杂质元素的C、S、P、O、N、H的总量已可达40ppm以下^[24]。

表7 1992年确定的钢中杂质元素含量与年代的关系

元素	回归公式		相关系数	1993年水平*	2000年水平
	X, 公元年	Y, ppm		ppm	ppm
C	$\lg Y = -0.0416x + 83.702$		0.75	6.2/8~10	4
S	$\lg Y = -0.0521x + 103.903$		0.82	1.2/2~3	0.6
P	$\lg Y = -0.0551x + 110.716$		0.72	8.0/10	3
O	$\lg Y = -0.0342x + 68.742$		0.94	3.8/4	2
N	$\lg Y = -0.0250x + 50.732$		0.76	8.0/10	6
H	$\lg Y = -0.0213x + 42.271$		0.85	0.66/0.5~1	0.5

* 计算值/实际值。

我国近年来在特殊钢生产设备改造和采用新技术方面也进行了大量的工作,取得了一定的成绩,但是,应当指出,我国的特殊钢生产与国际水平比较,在特殊钢占总钢量比例、设备及工艺水平、产品结构与质量以及技术经济指标诸方面均存在较大差距。

目前,我国的特殊钢主要用电炉流程生产。为了发展我国的特殊钢生产,不少厂家拟新建短流程生产线,可以预期,这些短流程生产线的建成,将使我们的装备水平上一个新台阶,缩短与国际水平的差距。但是,这些生产线能否达到预期的产量和质量期望值,还必须有合理的工

艺制度配合。由于引进外国短流程生产技术时,限于资金,通常软件引进较少,即使是引进了,由于保护知识产权等原因,也难于推广和提高全行业的整体水平,为此,必须在消化引进的基础上,加强合金钢短流程生产工艺研究与技术开发,特别是发展我们自己独创的技术。

消化引进和研究开发需要必要的经费,表8列出了日本6个主要钢公司近年来用于生产设备改进和研究开发的费用^[1]。由表8可见,他们用于研究开发的投资强度是很大的,约占生产设备改造投资费用的20%~25%,绝对值超过每厂1亿美元/年。在这方面我们的差距实在

是太大了。为此,有必要呼吁国家能给予较多的研究开发经费拨款,建议生产厂家在制定短流程生产线投资预算时要考虑一定数量的研究开发经费。

表 8 日本六个主要钢公司用于生产设备改进及研究开发的总投资总额,亿美元

项目	1986 年	1987 年	1988 年	1989 年	1990 年
生产设备费用	39.85	31.36	30.17	41.72	52.83
研究开发费用	9.30	8.46	9.04	9.57	13.13

6 结论

(1) 电炉流程是我国特殊钢生产的主要流程,国外在电炉快速熔炼及二次精炼方面的技术进步,值得我们借鉴。我国应迅速增加电炉钢的二次精炼比,以适应连铸要求。在引进短流程生产装备的同时,要加强工艺研究与技术开发,

特别是要发展我们自己独创的技术。为此,应增加研究开发投资强度;

(2) 国外转炉流程承担了很大一部分特殊钢生产任务。由于二次精炼技术的发展,使得转炉流程在特殊钢生产方面发挥了重要作用。基于转炉原料中金属杂质含量,冶炼过程没有电弧区钢液增氮过程,加上脱碳效果好,利于生产低碳-低氮、低金属杂质钢种。我国用转炉流程生产合金钢尚属空白。应重视转炉流程生产合金钢技术的应用,以提高特殊钢产量在总钢产量中所占比重。

(3) 特种冶金由于二次精炼技术的发展,丧失了部分特殊钢市场,但在保持其在难熔金属、活泼金属、高温合金、精密合金、特殊钢锻件生产等方面的主导地位外,近年来也开辟了一些新的应用领域,用于特殊钢生产。

参考文献

- 1 Isao Kozasu, 在美国卡内奇、梅隆大学钢铁研究中心讲学资料,1994
- 2 T. P. McAloon, Steel Demand Haen't Peaked Yet, Iron & Steelmaker, Dec. 1994, P31
- 3 杨金岱,国内外直流电弧炉发展现状与动态,钢铁工艺,当代电炉流程和电炉工程问题研讨会专辑,1993, P38
- 4 殷瑞钰,当代电炉流程的工程进展评价,同 3, P1
- 5 Pravin Mathur and Giffin Daughteidge, Oxygen Injection for Iffectine Post-combustion in the EAF, Proc. of the 51st Electric Furnace Conference, Wachington D. C., 1993
- 6 姜钧普,杨天钧,强化电炉冶炼的几点措施—德国巴登钢厂(BSW)短流程技术分析,全国电炉炼钢及短流程学术研讨会资料,苏州,1994, 12
- 7 徐匡迪,现代电炉炼钢的发展趋势,同 3, P30
- 8 T. P. Mcaloon, COMELT A New Generation of Electric Arc Furnace, Iron & Steelmaken, Oct. 1994, P63
- 9 DANARC,新一代电弧炉,达涅利公司总部资料,1994
- 10 特殊钢信息,特殊钢,1994, 15(4):59
- 11 李学峰,缪汉金,郭家祺,邵志刚,王京明,AOD 炉精炼不锈钢的微机动态控制,特殊钢,1995, 16(1):52
- 12 Toshio Kishida, Steel Times, 1983, 12(5): 10
- 13 王平,傅杰,转炉二次精炼对电弧炉特殊钢冶炼地位的冲击,同 6
- 14 上杉年一,铁と钢,1992 年,第 1 号, P4
- 15 大西捺泰,铁と钢,1987,第 3 号, P513
- 16 傅杰,真空冶金的近期进展,真空,1991, No. 3, P1
- 17 佐藤纪男,特殊钢,43 卷 1 号,1994, P36
- 18 G. Mengel, J. Stain and A. Choudgury, Proc. of the 1991 Vacuum Metallurgy Conference, Warroudale PA, VSA, 1992, P9
- 19 S. Fukomoto and A. Mitchell, 同 18, P3
- 20 A. Gubchenko, Y. Novikov, A. Choudhary and F. Hugo, 同 18, P15
- 21 Fu Jie et al, Proc. of The ICVM, Paris, 1992
- 22 B. E. Patm, B. I. Medovar, G. A. Boiko, A. V. Chernets and A. P. Ignatov, 同 18, P115
- 23 W. Holggrecubec and H. Holggrecuben, Pooc. q the ICVM, Paris, 1992
- 24 石井帮息,在北京科技大学讲学资料,1992

抚钢 50t 超高功率电炉运行效果

段富宪

(抚顺钢厂四炼钢)

抚钢自筹资金 2.4 亿元新建四炼钢。从德国 KRUPP 公司引进一台 50t 超高功率电弧炉,国内配套 60tLF 炉及 VD 炉、三条模铸线,组成 UHP-LF-VD 炉特钢冶炼生产线。为这台超高功率电炉还配备了布袋除尘、废钢预热、炉前喷粉,自动加料,风送试样、重油烤包等辅助设备。超高功率电炉的导电支臂 PCA,管式水冷炉壁和水冷炉盖,偏心底出钢,计算机控制等都采用了当今世界先进技术。国内配套的 LF 炉及 VD 炉和其它辅助设备,也都采用了国内先进的液压技术和计算机控制。试车后,进行了上千项设备改造和工艺技术开发,使这条冶炼生产线的技术装备和生产工艺均达到国内先进水平和国际八十年代末水平。

超高功率电炉-二次精炼的生产工艺,是将老式电炉的“熔化-氧化-还原”老三期传统生产工艺一分为二,即超高功率电炉的功能只完成熔化和氧化期的任务,二次精炼的功能只完成还原期的任务。而 LF-VD 二次精炼生产工艺,则是将真空电弧炉 VHD 工艺一分为二,即 LF 炉是在非真空条件下加热精炼,而 VD 炉则是在真空下非加热精炼。因而 UHP-LF-VD 生产工艺路线,为更有效的实现生产高效率、产品高质量、低消耗、低成本奠定基础,为适应特钢不同档次技术标准要求的品种质量创造了条件。是一条科学的合理的高效益的特钢生产工艺路线。这条冶炼生产线自一九九二年十月二十三日热负荷试车一次成功以来,在不到半年时间,完成了职工技术培训、工艺技术开发、设备消化吸收,按国外先进管理模式组织生产,攻克了设备关、工艺关、操作关、管理关,迅速实现了投产、达产、达标、达效的目标。两年来,已生产八十多个品种,36 万 t 优质特殊钢,设备运行正

常、产品质量稳定提高,技术经济指标先进。

生产效率。50t 超高功率电炉设计年产量 20 万 t、冶炼时间每炉 104min、实际冶炼时间 81min,创造了日产超千吨、月产超 2 万 t 钢的最高纪录,年产可达 24 万 t 钢,超过设计能力的 20%。

产品质量。到目前为止,碳结、合结、碳工、合工、弹簧、模具、轴承、轿车齿轮钢等共八十多个品种均一次生产成功,质量全部达到标准要求,轴承钢质量达到国内一流水平,齿轮钢质量达到国际标准,很多产品打入国际市场。

经济效益。电炉冶炼电耗平均 423kwh/t,电炉电极消耗 1.9kg/t,耐火材料全部国产化,炉壁寿命平均 370 次以上,最高寿命达到 573 次,赶上国际先进水平。原材料、铁合金消耗少,成本大幅度下降,经济效益显著提高。这条冶炼生产线运行效果证明:它具有生产效率高、品种质量高、经济效益高的特点,在市场经济条件下,有很强的竞争能力。取得令人满意的成绩。

1 生产效率高

超高功率电炉追求生产高效率是炼钢工作者的首要目标。只有高效率才有高效益。超高功率电炉所以能实现生产高效率。原因如下:

(1) 将电炉还原精炼任务移到二次精炼炉完成,充分利用电炉变压器功率,缩短了冶炼时间、提高生效率。这是一项重大的工艺突破。

(2) 超高功率电炉使用高额定容量的电炉变压器,使吨钢视在功率 $\geq 700\text{kVA}$,大幅度提高了输入视在功率,缩短了冶炼时间,提高了生产效率,这是一项硬件措施。这两项技术为超高功率电炉实现生产高效率奠定了基础、创造了客观有利条件。

(3) 供电软件技术措施。所谓供电软件措

施就是“在全炉冶炼过程中,尽可能最大限度的使用最大视在功率,加速熔化、加速升温、缩短冶炼时间”,50t 超高功率电炉变压器视在功率为 35kVA。第一级电压 269.9V、电流 48110A,允许使用的最大视在功率 $S = \sqrt{3} \times 269.9 \times 48110 = 22.49\text{kVA}$ 。仅达到最大功率的 64%,已经不是超高功率了。而第十八级(最高级)电压 519.8V,电流 38870A,这一级允许使用的最大视在功率 $S = \sqrt{3} \times 519.8 \times 38870 = 35\text{kVA}$ 。100%达到最大视在功率,才能提高生产效率。这个软件措施就是选择合理的供电制度。

供电制度就是冶炼全程使用“最高电压、最小电流、最长电弧、最大功率”的工作方式。这种供电制度功率因素高(0.86),有效功率高,线路损失少,弧光辐射作用强、加速废钢熔化、缩短冶炼时间。但是,这种供电制度,在废钢基本全熔后,弧光暴露在钢液面上,对炉壁炉盖造成强烈的辐射,加剧了炉壁、炉盖的损耗。如果改为“低电压、大电流、短电弧”的工作方式,则功率因素下降、输入有效功率下降、线路损失增加,钢水升温速度缓慢、冶炼时间延长、生产效率下降,问题很突出。

(4) 泡沫渣工艺软件措施。应用泡沫渣技术,强化泡沫渣操作,泡沫渣屏蔽电弧是解决这个问题的重要而有效的技术软件措施。由于泡沫渣的埋弧作用,产生了如下效果:1、减少了弧光对炉体炉盖辐射的危害、保护了炉壁炉盖、延长了使用寿命。2、改变了电弧的导电方式,电弧以电离空气导电变为渣阻导电为主,通过电弧加热炉渣对流向钢水传递热量,提高了热利用率。3、由于渣阻导电,电弧负载趋于线性、电流稳定、改善功率因素、噪音下降。4、泡沫渣体积变大、渣层变厚、渣比重变小,减少了对炉壁渣线的腐蚀和冲刷。因而,废钢全熔后,同样可以采用“最高电压、最小电流、最长电弧、最大功率”的工作方式,加速钢液升温,缩短冶炼时间。实现全程最大限度的使用最大视在功率,提高了生产效率。

(5) 生产条件对生产效率的影响也是非常

重要的。废钢的成分,加工的尺寸,堆比重大小,对装铁次数、压铁次数以及熔化速度影响很大。大块废钢的重量大,由于熔化快、升温快、直到出钢还化不完,也是常见现象。炉体寿命、修炉次数及修炉时间,炉体损坏程度及补炉时间,对生产效率影响更大。氧气压力、氧气流量对加速熔化、升温,加快脱碳速度关系很大。提高设备检修维护质量、减少设备热停工、保证设备正常运行,对提高生产效率具有重要意义。提高生产操作技术水平、减少事故、加强生产组织指挥与协调,保证生产连续地均衡地快节奏地进行,对提高生产效率是不可忽视的。

总之,超高功率电炉实现生产高效率,要把设备、工艺、生产条件、生产管理、综合考查分析,提出具体措施才能达到目的。

2 产品质量高

超高功率电炉-二次精炼工艺比老式电炉冶炼工艺先进,保证产品高质量,这是公认的事实,是毫无异议的。因为老式电炉冶炼工艺存在很多难以克服的缺点,在一些关键性工艺环节上严重影响产品质量。而超高功率电炉-二次精炼工艺则全部一一克服了。

(1) 从氧化看,老式电炉氧化期吹氧去碳脱磷和去气、去夹杂效果都是很好的,氧化末期钢液[H]含量可降低到 3ppm,磷也可降低到 $\leq 0.010\%$ 。但是,经过扒渣还原精炼,氧化渣扒不净,磷又部分还原,出钢前[H]含量增加到 5~7ppm,结果前功尽弃。

(2) 从还原看,老式电炉还原期脱氧脱硫效果也很好,但在出钢时,有时先钢后渣,脱硫效果变坏了。出钢时间长,钢渣混冲,二次氧化吸气严重,污染了钢液,恶化了质量。老式电炉出钢温度是可以准确控制的,但因出钢口大小、出钢时间长短、出钢渣钢是否混出,钢包烘烤温度高低等都难以达到控制标准,因此出钢到包中的温度高低都只能听天由命了,对质量影响极大,有时甚至直接造成浇注事故。老式电炉出钢前的化学成分也可以做到准确控制,但出钢后到包中有些元素如 C, S, Al, Ti 等出钢前后变化极大,有的甚至出格,造成化学成分不合。

总之,老式电炉在温度控制、化学成分、脱氧脱硫、去气去夹杂、纯净钢液等一系列关键问题上影响产品质量的稳定和提高,有些技术标准要求高的品种,质量时好时坏,很不稳定,多年过不了关,成为老大难。

超高功率电炉-二次精炼工艺,则有效的克服了以上缺点。产品质量高而稳定。超高功率电炉废钢全熔后,吹氧、脱碳、脱磷、去气、去夹杂效果都很好。氧化末出钢 $C \leq 0.10\%$,高氧化性、高碱性、大渣量,可以把磷降到很低水平。偏心底出钢,留钢留渣操作,避免了氧化渣进入钢包中与合金发生不利反应,出钢口大小有标准,出钢流短、出钢速度快、减少温降、减少吸收气体。包中造渣脱氧脱硫、合金及 Ar 气搅拌,化学成分、温度均匀、渣变白、脱氧良好,一般普钢即可浇注,质量可以满足标准要求。而对特殊钢一般技术条件要求的品种,如 40Cr, 60Si2Mn, 20CrMnTi 等,则到 LF 炉继续精炼,造渣脱氧脱硫,Ar 气搅拌加热去气去夹杂,精确控制温度和化学成分,并使之均匀化,进一步纯净钢液,保证模铸或连铸质量要求,杜绝了化学成分不合、温度不合造成的废品,提高钢的内部质量。对特殊技术条件要求,用途重要的高级优质钢,如轴承钢、轿车齿轮钢等在 LF 炉精炼后,还要到 VD 炉进行真空精炼,进一步脱氧脱气和成分微调,净化钢液,提高质量。

按照技术标准要求,品种质量档次不同,抚钢的超高功率电炉-二次精炼工艺也不同,分为两条工艺路线,一条是 UHP-LF 炉工艺路线,约有 30%~40%的高档次的关键品种都经过这一条工艺路线,确保产品的高质量要求。如轴承钢,在老式电炉生产,要求精料,好炉体,精细操作,也一直过不了质量关,成为老大难。另一条 UHP-LF-VD 炉工艺路线,全部采用废钢冶炼,高倍氧化物、硫化物 100%合格,钢中 $[O]$ 含量 $\leq 10PPm$ 。轿车齿轮钢 16~25MnCr5,碳规格窄(0.03%),硅要求低($\leq 0.08\%$),S、Al 规格窄有上下限控制,生产难度大,均一次冶炼成功, $[O]$ 含量 $\leq 15PPm$,高低倍组织,机械性能,淬透性等质量指标,均达到国际标准。总之,同

老式电炉炼钢工艺相比,UHP-LF-VD 炉冶炼工艺可以准确控制出钢浇注时的温度、化学成分、保证脱氧脱硫脱气,去夹杂,提高钢液纯度的效果。克服了老式电炉工艺缺点,保证产品高质量。

3 经济效益高

抚钢 50t 超高功率电炉-二次精炼运行两年来的效果证明:产品成本大幅度下降,经济效益显著提高。现在,每年在消化固定折旧费用 1000 万元的基础上,吨钢成本比老车间降低 200 元左右。产品成本是生产运行效果的综合反映,降低产品成本的因素也是多方面的。

(1) 生产高效率、低消耗、低成本。1、降低电炉冶炼电耗和电极消耗。由于超高功率电炉输入最大的有功功率,强制缩短冶炼时间,留钢渣操作,装铁后可同时吹氧送电,加速废钢的熔化,废钢全熔后,快速升温($10^{\circ}C/分$),十几分钟即可达到出钢温度,大大降低了水冷炉壁,水冷炉盖,烟气除尘所带走的热能。由于冶炼时间短,严格控制高温出钢和高温钢液在炉中的停留时间,强化泡沫渣操作等,大大提高了炉壁寿命,缩短了补炉时间(200 次前基本不补炉),减少了炉体热辐射损失。由于优化选择冶炼时间短,电耗最低的最佳出钢量等措施,UHP 冶炼电耗比老式电炉降低 15%~18%,同时由于冶炼时间短,造泡沫渣减少电极氧化,电极消耗降低 50%~60%。2、降低耐火材料消耗。由于 UHP 电炉冶炼时间短,大面积采用水冷炉壁水冷炉盖(90%)实行泡沫渣操作,严格控制温度,加强炉体砌筑和维护,炉壁寿命高,耐火材料消耗少。由于 LF 炉采用非真空埋弧加热,钢包渣成均匀腐蚀,热点不明显,钢包寿命高(平均 50 次以上),耐火材料消耗少。由于采用 3t 以上大锭型模铸,帽口、汤道砖等耐火材料消耗少。同老式电炉比,耐火材料总消耗降低 40%~50%,其它如氧气,吹氧管等都明显下降。

(2) 原材料、铁合金消耗少,降低成本。钢铁料铁合金等原材料消耗占钢锭成本的 75%~80%,降低钢铁料、铁合金消耗对降低成本具有重大意义。由于超高功率电炉熔化快,钢液升

温快、脱碳快、造泡沫渣等减少了废钢的熔损,电炉不扒渣,减少钢液的流失。因而,废钢回收率高,消耗降低。包中合金化, Si, Mn, Cr 等合金元素回收率高, (比老电炉高 3%~5%), 易氧化元素 Al, Ti, B 等, 浇钢前在包中加入, 收得率比电炉高 20%~40%, 同时, 高合金返回钢可直接加入 LF 炉中, 贵重合金元素 Ni, Cr, W, Mo 等可 100% 回收, 而在电炉装返回钢冶炼, 经吹氧熔化后, 铬损达 30%~40%。浇钢完毕剩余钢水可全部返回 LF 炉, 减少注余量, 降低电耗, 合金元素 100% 回收, 并节省了脱氧剂和造渣材料, 大大降低成本。

(3) 产品质量高、废品少、成本低。UHP-LF-VD 炉生产线运行两年来, 基本上消灭了化学成分不合废品, 消灭了跑钢、漏钢、短尺乱尺事故废品, 消灭了高低倍理化检验不合的成炉废品, 消灭了用户复验的退货废品, 消灭了计划外产品。废品量比老炼钢车间降低 40%~50%, 减少了废品损失, 降低成本。同时, 由于产品质量好, 使用可靠, 信誉高, 国内外市场占有率高, 增加了经济效益。

(4) 设备检修维护质量高, 备件消耗少, 成本低。提高引进设备的消化吸收能力, 强化设备改进和检修维护质量, 消除设备隐患, 减少设备

事故和设备热停工, 保证设备功能和运行正常, 降低备件消耗、降低成本取得很好效果。如 1994 年电机损耗比老车间下降 90%, 提高引进设备国产化水平, 研究开发国产配件代替进口配件, 降低消耗, 如水冷炉壁和水冷炉盖国产代用, 节约上百万元。

起初看来, UHP 电炉初炼后, 又经 LF 炉二次精炼, 有的还要经过 VD 炉三次精炼, 产品成本应该是高的。但是, 由于设备工艺先进, 生产效率和产品质量大幅度提高, 消耗大幅度下降, 实际成本是低的。

抚钢四炼钢的 UHP-LF-VD 炉冶炼生产线, 两年来运行效果是显著的, 成绩是突出的。在厂党委和厂长张宝琛的正确决策和具体指导下, 经过四炼钢全体干部职工的顽强拼搏、刻苦攻关、在热负荷试车一次成功后, 以最快的速度达产、达效, 并在生产效率、品种质量、产品成本、安全生产等, 创造了国内一流的成果。有些技术经济指标达到了国际先进水平, 快速走上了市场经济轨道, 受到冶金部、省市领导的充分肯定, 受到国内外专家的高度赞赏。四炼钢二期工程-大方坯连铸机投产后, 形成超高功率电炉-二次精炼-连铸短流程生产线, 经济效益必将再上新台阶。

LF 炉埋弧渣技术的开发及其应用

牛四通 张 鉴 成国光 王 平 佟福生

(北京科技大学, 北京 100083)

杨德华 王剑志 梅洪生 杨建川

(长城特殊钢公司, 江油 621701)

黎绪炳

(江油市宏达冶金辅助材料厂, 江油 621700)

通过对多种精炼渣系发泡性能的实验室研究, 确定了 LF 炉埋弧精炼的基础渣组成; 根据炉渣结构的共存理论所建立的数学模型, 计算出了具有良好发泡性能的精炼渣粘度、界面张力和密度范围; 研制出了发泡剂专利产品; 在 LF 炉上进行了几百炉次埋弧精炼工业试验, 取得了良好的技术经济指标。

1 前言

埋弧渣属于 LF 炉的配套技术^[1,2], 可以显著改善 LF 炉精炼的技术经济指标^[3~9], 给企业带来较大的经济效益。埋弧精炼可以有两种方法: 其一, 靠增大渣量提高渣厚达到埋弧精炼的目的; 其二, 通过加入发泡剂, 使基础渣体积膨胀、厚度增加, 达到埋弧精炼的目的。后者是本文研究的主要内容^[10]。

国外有关埋弧渣的报道很少, 文献[3]简单介绍了在电炉还原期用乙酰胺石灰造埋弧渣, 但详细资料作为专利未予透露。国内关于埋弧渣的深入系统的研究也很少, 文献[11]以碳酸盐作发泡剂的主要原料, 进行了 LF 炉埋弧精炼的工业试验, 但其基础渣成分与我国大多数 LF 的成分有一定距离, 而且, 发泡效果不理想; 据悉, 齐齐哈尔钢厂和西宁钢厂的 LF 炉应用埋弧精炼技术, 但未见这方面的资料公布。

本文通过对多种精炼渣系发泡性能进行深入系统的实验室研究, 确定了具有良好化学性质和发泡性能的精炼渣组成; 根据炉渣结构的共存理论^[12], 计算出了精炼渣的主要物理性质的合适量值范围; 通过对多种发泡材料发泡能力的研究, 开发研制出了发泡剂产品(该产品已申请国家专利); 结合实际生产, 在 LF 炉上进行了几百炉次埋弧精炼工业试验, 取得了良好

的技术经济指标。目前, 埋弧精炼技术正逐步推广应用于国内多个钢铁企业。

2 基础渣发泡性能的实验室研究

K. Ito 和 R. J. Fruehan 经过对渣系发泡性能长期研究和反复推导论证后得出^[13~15]炉渣的发泡性能和炉渣的其它物理性质一样, 是炉渣组成和温度的函数; 该函数值可以通过实验测得。当高温渣液底吹气体时, 液渣的高度(h)随气体流速(V_g)增加而呈线性升高; 单位高度的增加量(Δh)与气体流速的增加量(ΔV_g)之比($\Delta h/\Delta V_g$)始终保持固定不变值; 当渣系组成或温度改变时, 该比值也随之相应改变。K. Ito 和 R. J. Fruehan 将该比值定义为炉渣的发泡指数(Σ), 并以此作为检验炉渣发泡性能优劣的标准。其计算公式为:

$$\Sigma = \Delta h / \Delta V_g \quad (1)$$

式中: Σ —炉渣的发泡指数(s);

Δh —炉渣单位高度的增加量(m);

ΔV_g —气体流速的增加量(m/s)。

从公式 1 可见, 当气体流速增加量(ΔV_g)一定时, 炉渣单位高度增加量(Δh)越大, 炉渣的发泡指数(Σ)越高; 反之, 则相反。这为研究炉渣的发泡性能奠定了理论基础。

2.1 实验方案

国外 LF 炉精炼渣的特点是碱度高(有时渣中 CaO 含量高达 65%),并获得了较好的精炼效果^[16];而国内 LF 炉精炼渣的碱度大多处于中($B=2.2\sim 3.0$),低($B=1.6\sim 2.2$)碱度水平^[17]。在这种碱度范围内,同样,显著提高了钢液精炼的质量。根据以上情况,本文的实验室研究将渣系的碱度研究范围确定在 $1.6\sim 4.2$ 之间,组成渣系的其它组元及其含量是参阅文献[3,18~24]确定的。

实验方案采用正交试验法^[25~28],并依碱度高低分三组依次分别进行研究。实验中全部使用分析纯化学试剂;试样总重量为 60 克,试验温度为 1500℃;底吹气体为氮气。为方便起见,实验考察的发泡指标(Σ')定义为精炼渣单位高度的增加量(Δh)与底吹氮气流量的增加量(ΔQ_g)之比($\Delta h/\Delta Q_g$)。发泡指标(Σ')和发泡指数(Σ)均表示精炼渣的发泡性能,二者在量值上存在下列关系:

$$\Sigma' = \Sigma / S \quad (2)$$

式中: Σ' —精炼渣的发泡指标(s/m^2);

Σ —精炼渣的发泡指数(s);

S —常数,吹气管截面积(m^2)。

实验的主体设备是钼丝炉。

2.2 实验结果

通过正交试验的离差分析法和计算工程平均值法,可得三种碱度范围内具有最佳发泡指数的精炼渣组成,如表 1 所示。表中所列精炼渣最佳配方将作为开发 LF 炉埋弧精炼技术的基础渣成分的重要依据。

表 1 精炼渣的最佳配方

组元	碱度	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂
低碱度	1.6	41.23	25.77	8	15	10
中碱度	2.6	47.67	18.33	9	10	15
高碱度	3.4	55.64	16.36	8	7	9

3 精炼渣物理性质的计算模型

决定炉渣发泡性能的主要物理性质是粘度、表面张力和密度。炉渣的物理性质与其本身

的微观结构质点的类型和浓度密切相关。本文根据炉渣结构的共存理论^[12]及有关的热力学数据^[29],建立模型并求解,得出了精炼渣系的粘度、界面张力和密度的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \eta_{1500^\circ\text{C}} = & -1.048618 + 0.018259N_{\text{CaO}} + 6.796705N_{\text{MgO}} - 2.772547N_{\text{CaF}_2} - 201958.5N_{\text{Al}_2\text{O}_3} \\ & - 0.054274N_{\text{SiO}_2} - 0.684333N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} - 1.878258N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} + 42.4268N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} - 177.2346N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} - 20.7971N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} + 49.78201N_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} - 31.34261N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} + 427.4113N_{\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3} - 116.1922N_{\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3} + 418.6056N_{\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2} + 3493.292N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} + 129.7196N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} + 27.83963N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} \\ & + 6.797258N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1500^\circ\text{C}} = & 535.4634 - 1.890364N_{\text{CaO}} + 4.694643N_{\text{MgO}} - 7.98073N_{\text{CaF}_2} - 31.79329N_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0.237474N_{\text{SiO}_2} - 0.042794N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} + 3.979796N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} + 0.592821N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} + 23.96422N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} - 0.005877N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} - 8.010872N_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} + 123.156N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} + 5810.066N_{\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3} + 50.22144N_{\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3} - 1.212806N_{\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2} - 17.64822N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} - 1970.71N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} - 4.474455N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} \\ & + 32.43553N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{1500^\circ\text{C}} = & 2.574634 - 0.000412N_{\text{CaO}} - 5.020573N_{\text{MgO}} - 12.39232N_{\text{CaF}_2} + 0.073244N_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 0.070214N_{\text{SiO}_2} - 0.202146N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} - 0.11459N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} - 6.631026N_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} + 0.92292N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} - 0.296046N_{\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} + 0.22959N_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} - 0.376742N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} + 0.246679N_{\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3} + 1029.66N_{\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3} - 11.23537N_{\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2} - 83.33798N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} - 283.6688N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2} + 50.70166N_{\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2} - 263.5821N_{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2} \quad (5) \end{aligned}$$