

· 工艺技术 ·

## 惰性气体保护 5 t 电渣炉重熔铁路用 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢

周立新<sup>1</sup> 丁磊<sup>1</sup> 苏春阳<sup>2</sup> 潘明旭<sup>2</sup> 张洲<sup>2</sup> 柳学胜<sup>1</sup>

(湖北新冶钢有限公司 1 技术中心, 2 炼钢事业部, 黄石 435001)

**摘要** 试验和分析了全封闭气罩氩气保护电渣重熔与常规大气下电渣重熔铁路用 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢( /% : 0.19C, 0.49Cr, 1.75Ni, 0.23Mo, 0.071Al) 的冶金效果。结果表明, 氩气保护电渣重熔锭 Si 和 Mn 的烧损量( 3% ~ 12% 和 4% ~ 10% ) 低于常规电渣重熔锭 Si 和 Mn 的烧损量( 15% ~ 18% 和 7% ~ 10% ); 当 G20CrNi2MoA 钢电极的氧含量为  $10 \times 10^{-6}$  时, 氩气保护电渣锭的氧含量(  $15 \times 10^{-6}$  ) 低于常规电渣锭的氧含量(  $21.3 \times 10^{-6}$  ); 氩气保护电渣锭的冶金质量明显优于未经气体保护的常规电渣锭。

**关键词** 惰性气体保护电渣炉 渗碳轴承钢 G20CrNi2MoA 氧含量 非金属夹杂

## Carburized Bearing Steel G20CrNi2MoA for Railway Remelted by an Inert Gas Shielding Atmosphere 5 t Electroslag Remelting Furnace

Zhou Lixin<sup>1</sup>, Ding Lei<sup>1</sup>, Su Chunyang<sup>2</sup>, Pan Mingxu<sup>2</sup>, Zhang Zhou<sup>2</sup> and Liu Xuesheng<sup>1</sup>

(1 Technology Center, 2 Steel-making Business Department, Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** The metallurgy effect of carburized bearing steel G20CrNi2MoA for railway ( /% : 0.19C, 0.49Cr, 1.75Ni, 0.23Mo, 0.071Al) by argon shielding atmosphere electroslag remelting (ESR) in closed hood and by normal atmospheric ESR has been tested and analyzed. Results show that the loss of Si and Mn of argon shield atmosphere ESR ingot ( 3% ~ 12% and 4% ~ 10% ) is less than the loss of Si and Mn of normal atmospheric ESR ingot ( 15% ~ 18% and 7% ~ 10% ); as the oxygen content in electrode of steel G20CrNi2MoA is  $10 \times 10^{-6}$ , the oxygen content in argon shield atmosphere ESR ingot (  $15 \times 10^{-6}$  ) is lower than that in normal atmospheric ESR ingot (  $21.3 \times 10^{-6}$  ); and the metallurgical quality of argon shield atmosphere ESR ingot is obviously better than that of normal non gas shielding ESR ingot.

**Material Index** Inert Gas Shielding Atmosphere ESR Furnace, Carburized Bearing Steel G20CrNi2MoA, Oxygen Content, Nonmetallic Inclusions

传统的电渣重熔都是在大气环境下进行, 20 世纪 60 年代的研究结果表明, 重熔钢中的氧含量取决于脱氧元素的浓度和该脱氧元素的氧化物在渣中的活度, 此外, 渣池上方大气环境下的氧分压也会产生一定的影响。

过去的工作者为了降低钢中氧含量, 通常在重熔过程中向渣池界面加入诸如 J-Al、J-Mg、Ca-Si、Fe-Si 等脱氧剂对熔渣进行连续脱氧, 但这种方法将会改变熔渣的成分, 从而使重熔钢锭中的易氧化元素发生变化, 甚至达不到标准或工艺要求。近年来, 国内外对惰性气体保护电渣炉及重熔工艺的研究进展较快, 在防止电渣钢锭增氢的同时, 也可以有效地防止钢锭增氧<sup>[1]</sup>, 而降低氧含量有利于提高轴承钢的疲劳寿命<sup>[2]</sup>。

本文简要地介绍了 5 t 惰性气体保护电渣炉设备特点, 对比分析了气体保护与非气体保护冶炼的铁路用渗碳轴承钢 G20CrNi2MoA 的冶金质量, 研究了气体保护电渣炉使用不同渣量对钢材质量的影响。

### 1 惰性气体保护电渣炉设备特点及冶炼工艺要点

#### 1.1 设备特点及主要技术指标

惰性气体保护电渣炉采用了高速倒流冷却水结晶器、双工位熔炼站、X-Y 电极对中系统、精确的梁式称重仪、四支管状母排炉腿支撑的同轴电缆导电系统; 过程控制采用先进的计算机控制熔化速率; 电极(母材)的浸入采用特定的计算方法, 通过采集称重仪的称重信号、炉口电压(或电阻)的测量信号及电压(或电阻)摆动的信号来控制, 以得到稳定的熔速。

变压器功率 20 kVA; 5 t 惰性气体保护电渣炉结晶器平均直径 660 mm; 5 t 常规电渣炉结晶器平均直径 660 mm; 自耗电电极直径 460 mm。

#### 1.2 铁路用渗碳轴承钢 G20CrNi2MoA 的冶炼工艺要点

冶炼工艺: 自耗电电极 → 电极抛丸 → 电极烘烤 → 电渣重熔 → 钢锭缓冷 → 取样检验 → 钢锭判定入库。

母材直径 460 mm, 长约 3 540 mm; 电渣钢锭平均直径 660 mm, 单支锭重约 4.6 t; 重熔渣料均采用

二元预熔渣。在氩气保护下冶炼以固渣起弧,熔速设定为 10.5 kg/min,稳定期熔炼熔速波动 $\leq 0.3$  kg/min。在常规电渣下冶炼以液渣起弧。

## 2 试验方法及结果

### 2.1 试验方法

将同一炉号的 G20CrNi2MoA 母材分 5 批在不同电渣炉上冶炼,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 分别表示不同炉体及试样编号,1<sup>#</sup> 采用常规电渣炉冶炼,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 采用惰性气体保护电渣炉重熔。不同的电渣炉冶炼时渣料质量分别是:1<sup>#</sup> 炉 200 kg;2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 炉 150 kg;4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 炉 170 kg。

### 2.2 分析设备及方法

母材取块样采用美国热电集团瑞士 ARL4460 光电直读光谱仪分析;成品钢材加工为  $\Phi 5$  mm  $\times$  6 mm 的标准试样,在 RO-316 氧测定仪进行氧含量测定,采样点 3 个;合金钢钻头在距电渣钢锭底部 130 mm 和距顶部 120 mm 处,用直径为 16 mm 钻头钻取深度 15 mm 的粉末样,采用 ICP-MS 等离子体质谱仪分析;渣样研磨后 100% 通过 100 目,烘烤后采用化学法分析各渣样的化学组成。

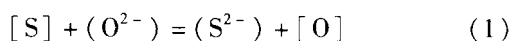
### 2.3 试验结果

1<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup> 电渣钢锭底部、顶部成品化学成分分析结果如表 1,二元预熔渣以及冶炼完成后的渣样分析结果如表 2,钢锭成材后取 5 批试样评定钢中非金属夹杂物级别及氧含量,结果如表 3。

## 3 分析讨论

### 3.1 惰性气体保护电渣重熔过程中的脱硫

由表 1 的数据可知,非气体保护电渣重熔脱硫率达 58%,而气体保护电渣炉冶炼的脱硫率为 26% 左右,经气体保护电渣重熔后渣中的硫含量稍高于非气体保护电渣炉,从钢-渣间的脱硫反应:



要提高电渣脱硫的反应能力,应使渣中有足够的  $(O^{2-})$  才能使钢中  $[S]$  变成  $(S^{2-})$ ,方能达到去硫的目的。为此提高渣相中碱性氧化物含量才能提高渣中  $(O^{2-})$  的浓度。因此,提高熔渣的碱度,降低金属熔池中的氧浓度,利于脱硫反应,研究表明<sup>[3]</sup>:在使用  $CaF_2$ - $Al_2O_3$  渣系时,钢中的硫被大量去除。

表 1 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢母材,常规重熔锭(1<sup>#</sup>)和氩气保护重熔锭(2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)的化学成分/%

Table 1 Analysis of electrode, normal ESR ingot (1<sup>#</sup>) and argon shielding atmospheric ESR ingot (2<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup>) of carburized bearing steel G20CrNi2MoA /%

炉号	部位	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
母材	熔炼	0.19	0.58	0.33	0.008	0.012	0.49	1.75	0.23	0.071
1 <sup>#</sup>	底部	0.21	0.52	0.27	0.008	0.005	0.50	1.74	0.24	0.032
	顶部	0.20	0.54	0.28	0.008	0.005	0.50	1.74	0.24	0.031
2 <sup>#</sup>	底部	0.20	0.54	0.30	0.008	0.009	0.51	1.75	0.24	0.026
	顶部	0.18	0.56	0.32	0.009	0.009	0.51	1.75	0.24	0.027
3 <sup>#</sup>	底部	0.20	0.54	0.31	0.009	0.009	0.52	1.75	0.24	0.029
	顶部	0.19	0.56	0.31	0.009	0.008	0.52	1.75	0.24	0.032
4 <sup>#</sup>	底部	0.21	0.52	0.31	0.009	0.009	0.51	1.75	0.25	0.025
	顶部	0.20	0.53	0.31	0.009	0.009	0.51	1.75	0.25	0.025
5 <sup>#</sup>	底部	0.18	0.53	0.29	0.009	0.009	0.51	1.75	0.24	0.025
	顶部	0.20	0.54	0.29	0.009	0.009	0.51	1.75	0.24	0.026

表 2 二元预熔渣及常规重熔锭(1<sup>#</sup>)和氩气保护重熔锭(3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>)的渣样分析结果/%

Table 2 Analyzing results of binary premelted slag, slag samples for normal ESR ingot (1<sup>#</sup>) and argon shielding atmospheric ESR ingot (3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>) /%

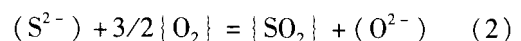
炉号	C	S	FeO	MnO	CaO	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
预熔渣	0.031	0.024	0.48	0.05	3.70	68.42	26.00	0.87
1 <sup>#</sup>	0.030	0.038	0.54	0.15	4.22	67.22	22.94	1.29
3 <sup>#</sup>	0.029	0.055	0.52	0.15	4.49	67.79	24.22	1.09
4 <sup>#</sup>	0.032	0.058	0.52	0.17	3.93	67.70	24.72	1.11

表 3 常规重熔锭(1<sup>#</sup>)和氩气保护重熔锭(2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)的非金属夹杂物级别和平均氧含量

Table 3 Rating of nonmetallic inclusions examination and average oxygen content in normal ESR ingot (1<sup>#</sup>) and argon shielding atmospheric ESR ingot (2<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup>)

炉号	A		B		C		D		[O]/ 10 <sup>-6</sup>
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
1 <sup>#</sup>	1	0	1.5	1	0	0	0.5	0.5	21.3
2 <sup>#</sup>	1	0	1.5	0	0	0	0.5	0.5	15.5
3 <sup>#</sup>	1	1	1	0	0	0	0.5	0.5	14.8
4 <sup>#</sup>	1	1	1	0	0	0	0.5	0	14.5
5 <sup>#</sup>	1	0	1	0	0	0	0.5	0.5	15.2

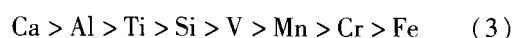
在熔渣-钢液的界面反应生成的脱硫产物  $(S^{2-})$ ,迁移至熔渣表面与气相中的氧反应为:



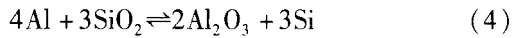
由于在氩气的保护下,没有氧气的供给,不能满足气化脱硫的条件,因此在氩气的保护作用下不利于脱硫。

### 3.2 电渣重熔过程元素的变化

由氧化物标准生成自由能数据知<sup>[4]</sup>,元素与氧的亲合力顺序:



排在前面的元素相对较活泼,生产的氧化物也愈稳定,如 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,而排在后面的氧化物通常被认为是渣中的不稳定氧化物,如 FeO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、SiO<sub>2</sub>,易被还原,但在实际电渣重熔过程中,并不是严格按照(3)式的氧化顺序进行,还取决于金属元素在钢中的活度以及其氧化物在渣中的活度。如反应:



由于 Al 的还原性大于 Si,通常的情况下 Al 会烧损,但是由于预熔渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量高(26%左右),渣中的 SiO<sub>2</sub> 含量低(1%以下),钢中铝的含量低(0.07%左右),使得该反应平衡向左移动。气体保

护和非气体保护(常规)电渣重熔过程对钢中 Si、Mn、Al 的变化如图 1 所示,从图 1 可以看出,常规电渣炉冶炼的电渣锭 Si、Mn 的烧损较气体保护电渣炉大,Si、Mn 的烧损量(氧化量):常规电渣炉冶炼在 15%~18%、7%~10%;惰性气体保护电渣炉冶炼在 3%~12%、4%~10%。氩气的保护作用在一定程度上可以减少易氧化元素的烧损,同时,渣中不稳定氧化物对易氧化的合金元素烧损也有一定的影响。成田贵一等研究了渣中不稳定氧化物在高温下的稳定性<sup>[5]</sup>,认为 FeO、MnO、SiO<sub>2</sub> 在高温下易供氧,将引起钢液中活泼合金元素的氧化。因此,控制电渣重熔过程渣料中不稳定氧化物的含量能有效防止

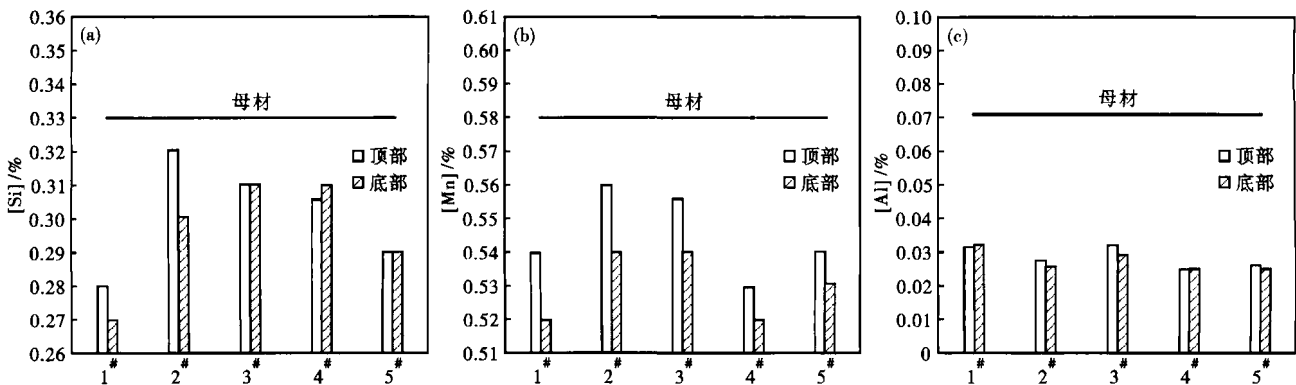


图 1 氩气保护对 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢电渣重熔锭中 Si(a)、Mn(b)、Al(c)含量的影响:1# 常规大气电渣重熔锭;2#~5# 氩气保护电渣重熔锭

Fig. 1 Effect of argon shielding atmosphere on Si (a), Mn (b) and Al (c) content in carburized bearing steel G20CrNi2MoA ESR ingot; normal atmospheric ESR ingot (1#); argon shielding atmospheric ESR ingot (2#~5#)

活泼合金元素的氧化。

### 3.3 电渣重熔过程氧含量的变化

经 LECO 氮氧仪分析,自耗电极的氧含量为  $10 \times 10^{-6}$ ,1# 常规电渣炉生产的钢材氧含量均值  $21.3 \times 10^{-6}$ ,而惰性气体保护电渣炉生产的钢锭氧含量均值为  $15 \times 10^{-6}$ ,如表 4 所示。

电渣过程中氧的来源途径主要有<sup>[6]</sup>:

表 4 氩气保护对电渣重熔锭氧含量的影响:电极-母材,1#-常规大气下电渣重熔;2#~5# 氩气保护电渣重熔

Table 4 Effect of argon shielding atmosphere on oxygen content in ESR ingot: oxygen content in electrode, normal atmospheric ESR ingot (1#) and argon shielding atmospheric ESR ingot (2#~5#)

炉号	[O]/10 <sup>-6</sup>
电极	10.0
1#	21.3
2#	15.5
3#	14.8
4#	14.5
5#	15.0

(1) 自耗电极中溶解的氧及不稳定的非金属氧化物夹杂;

(2) 在电极制造和重熔时渣池上方电极表面生产的氧化铁皮;

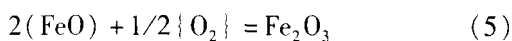
(3) 造渣材料中带入的不稳定氧化物;

(4) 氧直接从大气中通过熔渣转移到金属熔池。

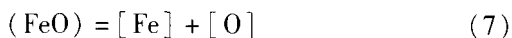
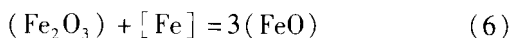
尽管自耗电极的初始氧含量很低 ( $10 \times 10^{-6}$ ),电渣重熔后仍是一个“增氧”的过程<sup>[7]</sup>。自耗电极在重熔前表面均做过抛丸处理,一定程度上减少了氧化铁皮在重熔过程中进入渣池,但这对钢锭内氧含量的影响并不大,即使电极表面经剥皮处理后,重熔后头部虽可获得较低的氧含量,但尾部的氧含量并无太大变化<sup>[8]</sup>。

表 2 列出的是重熔前后渣料中不稳定氧化物的含量,影响渣中氧含量的决定性因素是渣中的  $a_{[FeO]}$  值,当渣中 FeO 的质量分数在 0.4%~0.8% 波动

时, FeO 的活度  $a_{[FeO]}$  为 0.008 5 ~ 0.015 5, 与之平衡时钢液中的  $[O]$  为  $(16.4 \sim 35.5) \times 10^{-6}$  [9]。在惰性气体保护下冶炼, 控制罩内氧的分压有效地控制重熔过程气氛中氧的增加, 大气中的氧是通过渣池转移到钢中, 依靠渣中不稳定的变价氧化物, 渣池面上低价氧化物被空气中的氧氧化成高价氧化物, 其反应式:



当这些高价氧化物转移到渣-钢界面时, 又与该钢中合金元素作用转变成低价氧化物, 从而使氧转入钢中:



这个过程将空气中的氧不断输入到钢中, 其他元素的氧化物同样如此。

因此, 在电渣重熔前向罩内通入氩气, 在罩内形成“微正压”, 能阻止空气中氧的进入; 当罩内氧的分压达到一定值时, 便可以开始重熔冶炼, 在重熔至补缩过程中氩气的保护作用能有效减少钢锭的增氧。

#### 3.4 气体保护电渣炉渣量对电渣钢锭质量的影响

渣量的大小决定于重熔电阻的大小, 渣量太多导致电渣重熔热效率降低, 渣量太少导致钢液的渣洗作用不强, 合理的渣料用量对钢锭质量、冶炼成本大有好处, 从金相显微镜的夹杂物评级结果看来(表 3), 170 kg 和 150 kg 的渣量对电渣钢的质量影响几乎无差别, 从冶炼成本的角度考虑, 150 kg 的渣量更合理。

采用不同工艺冶炼的 G20CrNi2MoA, 常规电渣炉冶炼的硫化物类夹杂(A类)稍好于惰性气体保护电渣炉冶炼的; 氧化铝类(B类)夹杂不如惰性气体保护电渣炉冶炼的; 硅酸盐类(C类)和球状类(D

类)夹杂物的级别与惰性气体保护电渣炉冶炼的相差不多。

#### 3.5 经济效益比较

综合比较不同电渣炉的冶炼 4.6 t 铁路用渗碳轴承钢 G20CrNi2MoA 自耗电电极(见表 5)。由于使用同轴电缆导电设计, 使得电渣重熔电效率大幅提高; 由于采取在渣层表面浅处的摆动控制及特定的算法使得电渣重熔的热效率大幅提高, 因此惰性气体保护电渣炉的电耗比常规电渣炉节省得多。

表 5 常规大气电渣炉(1<sup>#</sup>)与氩气保护电渣炉(2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)冶炼参数对比

Table 5 Comparison of melting parameters between normal atmospheric ESR furnace (1<sup>#</sup>) and argon shielding atmospheric ESR furnace (2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)

炉号	渣料使用量/ kg	电耗/ kWh	惰性气体消耗量/ m <sup>3</sup>
1 <sup>#</sup>	200	7 000	0
2 <sup>#</sup>	150	5 957	28.8
3 <sup>#</sup>	150	5 950	29.2
4 <sup>#</sup>	170	6 003	29.6
5 <sup>#</sup>	170	5 980	29.6

## 4 结论

(1) 气体保护电渣炉在全程氩气保护作用下冶炼铁路用 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢, 相比常规电渣炉冶炼的钢锭具有组织均匀、合金元素烧损少的特点。

(2) 由于在氩气保护下冶炼, 使得钢中的氧含量增加较少, 原始电极氧含量为  $10 \times 10^{-6}$ , 经气体保护电渣炉冶炼后, 氧含量均值为  $15 \times 10^{-6}$ , 而常规电渣炉则为  $21.3 \times 10^{-6}$ 。说明惰性气体的保护作用能显著降低电渣钢锭的氧含量。

(3) 与惰性气体保护电渣炉冶炼相比, 常规电渣炉具有更好的脱 S 效果。

#### 参考文献

- 陈希春, 冯 涛. 电渣冶金最新进展[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 62-67.
- 王昌生, 刘胜国, 许明德, 等. 降低电渣重熔 GCr15 钢的氧含量[J]. 特殊钢, 1997, 18(3): 31-35.
- 李正邦. 电渣熔铸[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 25.
- 黄希祐. 钢铁冶金原理(第 3 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 436-439.
- 成田贵一. 溶鉄中におろバナヅウムと酸素との平衡[J]. 鉄と鋼, 1969, 55(12): 981-1006.
- 姜周华. 电渣冶金的物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1999: 149-150.
- 耿 鑫, 姜周华. 电渣重熔过程中氧含量的控制[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(1): 16-20.
- 刘胜国, 许明德, 刘凤霞, 等. 高碳铬轴承钢电渣重熔过程中的氧及其控制[J]. 特殊钢, 1993, 14(3): 45-48.
- 周德光, 许卫国, 王 平, 等. 轴承钢电渣重熔过程中氧的控制及作用研究[J]. 钢铁, 1998, 33(3): 13-17.

周立新(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 《特殊钢》编委, 北京科技大学毕业, 特殊钢产品研发及工艺研究。

收稿日期: 2012-05-02