

· 试验研究 ·

精炼渣对轴承钢中氧含量和夹杂物的影响

阮小江^{1,2} 姜周华³ 龚伟³ 李阳³ 李京社¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 江阴兴澄特种钢铁有限公司,江阴 214400;
3 东北大学材料与冶金学院,沈阳 110004)

摘要 采用 MoSi₂ 电阻炉在 MgO 质坩埚内进行了精炼渣成分(% :47 ~ 64CaO、13 ~ 23SiO₂、15 ~ 25Al₂O₃、5 ~ 10MgO、0 ~ 8CaF₂; CaO/SiO₂ = 2.0 ~ 4.5)对 0.95% C-1.50% Cr GCr15 轴承钢中氧含量和夹杂物的影响的实验研究。实验中发现,随精炼渣碱度CaO/SiO₂由 2 增加至 4.5,钢液中的终点全氧含量由 20 × 10⁻⁶降至 11 × 10⁻⁶,夹杂物的总数量、总面积和平均半径减小。适当提高 Al₂O₃ 含量或添加 CaF₂,减少 MgO 含量,可以显著提高炉渣吸附夹杂物的速度和能力。低碱度渣精炼的钢液中夹杂物成分含有 ≥20% SiO₂,塑性较好,夹杂物的尺寸为 15 ~ 20 μm。高碱度渣精炼的钢液中典型的夹杂物是氧化铝和铝镁尖晶石等脆性夹杂物,尺寸 ≤5 μm。

关键词 轴承钢 精炼渣 碱度 氧含量 夹杂物

Influence of Refining Slag on Oxygen Content and Inclusions in Bearing Steel

Ruan Xiaojiang^{1,2}, Jiang Zhouhua³, Gong Wei³, Li Yang³ and Li Jingshe¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Jiangyin Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214400;
3 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The influence of ingredient of refining slag (47 ~ 64CaO, 13 ~ 23SiO₂, 15 ~ 25Al₂O₃, 5 ~ 10MgO, 0 ~ 8CaF₂; CaO/SiO₂ = 2.0 ~ 4.5) on oxygen content and inclusions in 0.95C-1.50Cr GCr15 bearing steel has been tested and studied by MoSi₂ electrical resistance furnace with MgO crucible. It was found in test that with increased refining slag basicity CaO/SiO₂ from 2 to 4.5, the end total oxygen content in liquid steel decreased from 20 × 10⁻⁶ to 11 × 10⁻⁶, and the total amount, total area and average size of inclusions in steel decreased; the speed and capability of refining slag to absorb inclusions could remarkably increase with increasing Al₂O₃ content or adding CaF₂, decreasing MgO content in slag; with low basicity refining slag, the size of inclusions in liquid steel, which contained ≥20% SiO₂, was 15 ~ 20 μm with quite good plasticity; and with high basicity slag the typical inclusions in liquid steel were brittle inclusions such as alumina and MgO-Al₂O₃ spinel, of which the size was ≤5 μm.

Material Index Bearing Steel, Refining Slag, Basicity, Oxygen Content, Inclusion

为了提高轴承钢质量,国内外普遍重视对 LF/VD精炼渣的研究^[1-7],但研究结果差异较大,有的主张用高碱度,有的主张用低碱度。为此,本实验就不同碱度的精炼渣对钢液全氧含量和夹杂物性质影响进行了研究,进一步探讨渣系对轴承钢质量的影响。

1 实验方案

实验设备采用 MoSi₂ 电阻炉, MgO 质坩埚,测温采用双铂铑热电偶,实验温度为1 560 °C,实验过程中通 Ar 气保护,流量为 4 L/min。实验用钢铁料是从现场 LF 冶炼过程中的轴承钢钢水中吊取的,成分(%)为 0.95C、0.33Mn、0.25Si、0.006S、0.010P、1.50Cr。实验用的渣料是用化学纯试剂配制的,经

表 1 精炼渣系成分和对应的终点钢中全氧含量
Table 1 Ingredient of refining slag and corresponding end total oxygen content in steel

精炼渣 No.	成分/%					R ₂	R ₁	CaO/Al ₂ O ₃	终点全氧/10 ⁻⁶
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂				
1	47	23	25	5	0	2.0	1.08	1.88	20
2	56	14	25	5	0	4.0	1.56	2.24	13
3	64	16	15	5	0	4.0	2.23	4.27	16
4	54	13	15	10	8	4.2	2.29	3.60	15
5	48	22	15	10	5	2.2	1.32	3.20	20
6	58	14	15	5	8	4.5	2.17	3.87	11

注: R₂ = CaO/SiO₂; R₁ = (CaO + MgO)/(SiO₂ + Al₂O₃)

过高温烘烤。渣系成分见表 1。

实验操作步骤如下:(1)向炉内加入约 1 kg 钢料,给电升温,同时吹氩保护;(2)金属料熔清后,温度达到1 560 °C时,取钢样①作为原始样;(3)加入

铝粒 2 g 对钢水进行脱氧;(4)一次性加入预先配制好的渣料 100 g;(5)在 1 560 ℃ 炉子恒温 60 min 后,取钢样②;(6)1 560 ℃ 下恒温 30 min 后取钢样③;(7)断电,待炉子冷却至室温后取出终点钢样;(8)将所取的钢样作全氧、定量金相和扫描电镜分析。

2 实验结果及讨论

2.1 影响钢中全氧含量的因素

各炉次实验全氧变化情况见表 2。尽管各组实验的初始全氧含量值变化较大,但 1[#]、2[#]、6[#] 三组渣系的初始全氧含量接近(约为 0.002 5%),3[#]、4[#]、5[#] 三组实验的初始全氧含量接近(约为 0.003 3%)。

表 2 实验精炼过程钢中全氧含量的变化/%

Table 2 Variation of total oxygen content in steel during refining test / %

精炼渣 No	初始钢样①	钢样②	终点钢样③
1	0.002 6	0.002 5	0.002 0
2	0.002 5	0.001 9	0.001 3
3	0.003 2	0.002 6	0.001 6
4	0.003 5	0.002 3	0.001 5
5	0.003 3	0.002 1	0.002 0
6	0.002 3	0.001 2	0.001 1

(1)二元碱度。比较 1[#]、2[#]、6[#] 三组以及 3[#]、4[#]、5[#] 三组实验的终点全氧含量可以清楚看出,碱度越高,终点全氧含量越低。其原因是炉渣中 SiO₂ 是不稳定的氧化物,在铝脱氧情况下,低碱度渣中 SiO₂ 将成为向钢液供氧的来源,导致钢中氧含量增加。

(2)CaF₂。比较 2[#] 和 6[#] 渣系可知,6[#] 渣系实验过程中氧含量的降低速度明显要快得多。除了 6[#] 渣系的二元碱度稍高外,最主要的原因是添加 CaF₂ 可以显著降低炉渣的熔化温度,降低粘度,提高炉渣的流动性,从而有利于提高夹杂物的吸附速度。比较 1[#] 和 5[#] 渣系的实验结果,也有同样的规律。在两者二元碱度基本相同的条件下,添加 CaF₂ 的 5[#] 渣系的脱氧速度明显要快。

(3)Al₂O₃。在两者二元碱度相同的条件下,含 25% Al₂O₃ 的 2[#] 渣系终点全氧含量明显低于含 15% Al₂O₃ 的 3[#] 渣系。其主要原因是 2[#] 渣系 CaO/Al₂O₃ 的比值明显低于 3[#] 渣系,因而其熔化温度低,流动性好,有利于吸收钢中的夹杂物。这一点也可以用四元碱度(R₄)说明。在两者二元碱度相同的条件下,四元碱度过高将导致熔渣熔化温度上升,流动性变差,夹杂物吸附能力降低。

(4)MgO。比较 4[#] 和 6[#] 渣系可知,除了 6[#] 渣系的二元碱度稍高外,MgO 对脱氧的效果也有一定的影响。

从以上分析可知,二元碱度对脱氧效果的影响最大。其次是炉渣的熔化温度和流动性(或粘度)。在保证二元碱度大于 4.0 的前提下,适当增加渣中 Al₂O₃ 含量,合理控制 MgO 的含量,必要时添加适量 CaF₂ 以保证炉渣具有较低的熔化温度和良好的流动性,以利于吸附钢中的夹杂物。

2.2 夹杂物分布情况

用 LEICA Q600S 图象仪、DMRME 显微镜放大 500 倍观察夹杂物,每个试样 30 个视场。表 3 列出了 4[#]、5[#] 和 6[#] 实验炉次钢样的夹杂物尺寸分布、数量和总面积的统计结果。

通过表 3 夹杂物的分布可以看出:采用高碱度的 6[#] 渣系终点钢样的夹杂物的平均直径最小,夹杂物的数量最少,没有发现大于 10 μm 的夹杂物,91.94% 的夹杂物尺寸小于 5 μm。相反,采用低碱度的 5[#] 渣系终点钢样的夹杂物的平均直径最大,夹杂物的数量最多,发现有大于 20 μm 的夹杂物,尺寸小于 5 μm 的夹杂物比例只有 84.86%。这一实验结果与前面的全氧含量结果完全对应。

2.3 夹杂物扫描电镜及能谱分析

图 1 给出的是 5[#] 低碱度渣精炼的终点③号钢样的典型夹杂物扫描电镜图象。可以看出,低碱度

表 3 实验精炼过程钢中夹杂物分布的变化

Table 3 Variation of inclusions distribution in steel during refining test

精炼渣样	不同直径夹杂物的分布/%					平均直径/ μm	总数/个	总面积/μm ²
	0~5 μm	5~10 μm	10~15 μm	15~20 μm	≥20 μm			
4-1(初始)	84.25	14.38	0.68	0.69	0	3.296	146	1 781.202
4-2	87.90	11.29	0.81	0	0	3.091	124	1 174.976
4-3(终点)	89.80	9.18	1.02	0	0	2.991	98	858.802
5-1(初始)	80.46	17.62	1.54	0.38	0	3.582	261	3 684.762
5-2	80.35	16.76	1.73	1.16	0	3.862	173	2 985.012
5-3(终点)	84.86	13.94	0.40	0.40	0.40	3.593	251	3 524.940
6-1(初始)	82.65	13.27	4.08	0	0	2.880	98	1 434.625
6-2	90.70	8.14	1.16	0	0	2.826	86	693.532
6-3(终点)	91.94	8.06	0	0	0	2.928	62	485.094

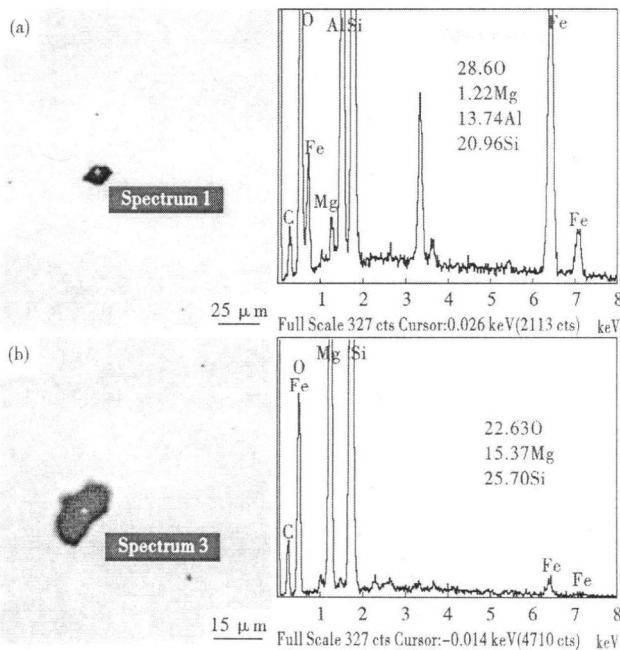


图1 5#低碱度渣精炼钢中夹杂物能谱分析

Fig.1 Energy spectrum analysis on inclusions in steel refined with low basicity refining slag No. 5

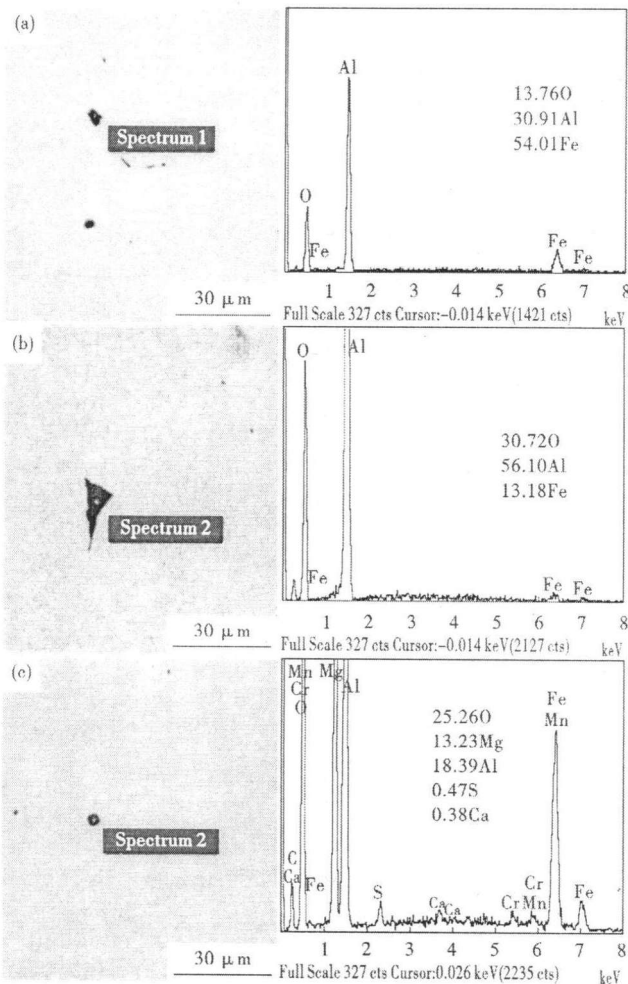


图2 6#高碱度渣精炼钢中夹杂物能谱分析

Fig.2 Energy spectrum analysis on inclusions in steel refined with high basicity refining slag No. 6

渣精炼的钢液中夹杂物成分含有 20% 以上的 SiO_2 、夹杂物熔点低,具有一定的塑性,但是夹杂物的尺寸相对较大,在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 。图 2 给出的是 6#高碱度渣精炼过程钢样的典型夹杂物扫描电镜图象。其中图2(a)为初始钢样①的扫描电镜分析,图2(b)为钢样②的扫描电镜分析,图2(c)为终点钢样③的扫描电镜分析,可以看出钢中夹杂物的成分是经历了 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ 向铝脱氧后的 Al_2O_3 转变,然后向复合夹杂物 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaS}$ 转变过程。虽然这些典型的夹杂物是以 Al_2O_3 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (铝镁尖晶石) 等脆性夹杂物为主,但是尺寸很小,一般在 $5 \mu\text{m}$ 以下,因此,对钢的性能危害很小。

3 结论

(1) 二元碱度 (CaO/SiO_2) 在 $2.0 \sim 4.5$ 的实验范围内,随着精炼渣碱度的提高,精炼终点钢中全氧含量显著降低,夹杂物的数量、尺寸也明显减小。

(2) 在二元碱度基本相同的条件下,适当提高 Al_2O_3 含量或添加 CaF_2 , 减少 MgO 含量,可以降低精炼渣的熔化温度,提高炉渣的流动性,从而显著提高炉渣吸附夹杂物的速度和能力。

(3) 低碱度渣精炼的钢中夹杂物含 $\geq 20\%$ SiO_2 , 具有一定的塑性,但是尺寸相对较大,在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间。高碱度渣精炼的钢液中典型的夹杂物是氧化铝和铝镁尖晶石等脆性夹杂物,但是尺寸很小,一般 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。对钢的性能危害很小。

参考文献

- 1 上杉年一. つか国の轴承钢の进步发展について. 鐵と鋼, 1988, 74(10):1889
- 2 Yoon B H, Heo K H, Kim J S. Improvement of Steel Cleanliness by Controlling Slag Composition. Ironmaking and Steelmaking, 2003, 30(2):51
- 3 王昌生, 李永恩, 万业恕, 等. 轴承钢炉外精炼工艺研究, 特殊钢, 1987, 8(2):24
- 4 何俊, 皇甫庆茹, 王昌生, 等. 一种提高轴承钢疲劳寿命的冶炼方法. 钢铁, 1988, 23(12):58
- 5 王昌生, 易继松. 轴承钢非真空精炼及其冶金效果. 特殊钢, 1992, 13(1):9
- 6 刘宇雁, 张存信. 炉渣碱度对车辆用轴承钢非金属夹杂物形貌的影响. 包头钢铁学院学报, 1998, 17(3):221
- 7 于平, 陈伟庆, 冯军, 等. 高碱度渣精炼的轴承钢中夹杂物研究. 钢铁, 2004, 39(7):20

阮小江(1968-), 男, 博士研究生, 厂长、高级工程师, 特殊钢品种、质量和工艺研究。

收稿日期:2008-03-13