

转炉-LF-VD-CC 流程轴承钢显微夹杂物的分析

杜 珊¹ 闫绍维² 王硕明² 刘宪民³

(1 河北理工大学计算机与自动控制学院,唐山 063009; 2 河北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009;

3 石家庄钢铁有限责任公司,石家庄 050031)

摘 要 系统分析了石钢 45 t 顶底复吹转炉-LF-VD-中间包冶金过程各工序轴承钢中显微夹杂物的行为、特征、数量及变化历程。钢中的夹杂物由 LF 处理前的块状 Al_2O_3 、铬硅酸盐和铬锰酸盐逐步转变为铸坯中的铬钙酸盐、球状铬硅酸盐和条状铬锰酸盐夹杂;显微夹杂数量平均值由 LF 处理前 8.74 个/ mm^2 减少为铸坯中 2.72 个/ mm^2 ,夹杂物尺寸亦减小。

关键词 转炉流程 轴承钢 显微夹杂

An Analysis on Micro-Inclusion in Bearing Steel at Each Procedure of BOF-LF-VD-CC Flow Sheet

Du Shan¹, Yan Shaowei², Wang Shuoming² and Liu Xianmin³

(1 College of Computer and Automation, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009;

2 College of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009;

3 Shijiazhuang Iron and Steel Corp Ltd, Shijiazhuang 050031)

Abstract The behavior, characteristics, amount and transformation of micro-inclusion in bearing steel at each procedure of 45 t BOF-LF-VD-CC flow sheet at Shijiazhuang Steel have been studied by added tracer elements. Results showed that inclusions in steel before LF refining were gradually transformed from blocky Al_2O_3 , chromic-silicate and chromic-manganate to calcium chromate, globular chromic-silicate and banding chromic-manganate inclusions in cast billet; and the average number of micro-inclusions in steel decreased from 8.74/ mm^2 before LF to 2.72/ mm^2 in billet while the size of inclusions also decreased.

Material Index BOF-LF-VD-CC Process, Bearing Steel, Micro Inclusion

转炉流程生产轴承钢具有生产效率高、铁水洁净的优点,对提高轴承钢的质量和产量有一定优势^[1,2]。石钢根据自身工艺特点,采用转炉-LF-VD-连铸工艺生产轴承钢,并形成了批量生产。轴承钢一般在较严峻的条件下使用,对钢中非金属夹杂物要求严格^[3-8]。经过计算,为了避免形成点状钙铝酸盐夹杂,石钢轴承钢以铝脱氧为主,从而形成的脱氧产物的特性及其上浮排除是提高轴承钢质量的重要影响因素。本文对石钢转炉流程生产轴承钢显微夹杂物的特征、数量及变化历程进行了系统分析。

1 工艺流程和实验方法

轴承钢生产工艺流程为:45 t 顶底复吹转炉-LF 精炼-VD 真空精炼-连铸。铸机半径(m) R12/16/32,铸坯断面尺寸 150 mm × 150 mm,铸机拉速

1.4 ~ 1.6 m/min,铸机具有结晶器电磁搅拌功能。

LF 电极直径 350 mm,电极 3 支,氩气流量 5 ~ 7 m^3/h ,氩气压力大于 0.3 MPa。VD 真空精炼钢水量 40 ~ 45 t,真空泵抽气能力 600 kg/h。

实验选取 3 个浇次,每个浇次取第 2 炉为实验炉,LF 处理前在钢包渣中加入示踪元素 Ba,在中间包覆盖剂中加入示踪元素 La,结晶器保护渣中加入示踪元素 Na 和 K,在中间包打结料中加入示踪元素 Ce,以便夹杂物分析。

实验 GCr15 轴承钢设定 $\leq 50 \mu m$ 的夹杂为显微夹杂,GCr15 轴承钢化学成分如表 1 所示。

2 各工序钢中显微夹杂物的变化

2.1 LF 处理前后显微夹杂物的特征

LF 处理前钢水中的夹杂物,主要为 Al_2O_3 、铬硅

表 1 GCr15 轴承钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of bearing steel GCr15 /%

C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	Al	Sn	Als
0.96	0.21	0.29	1.44	0.005	0.009	0.03	0.088	0.036	0.008 5	0.027

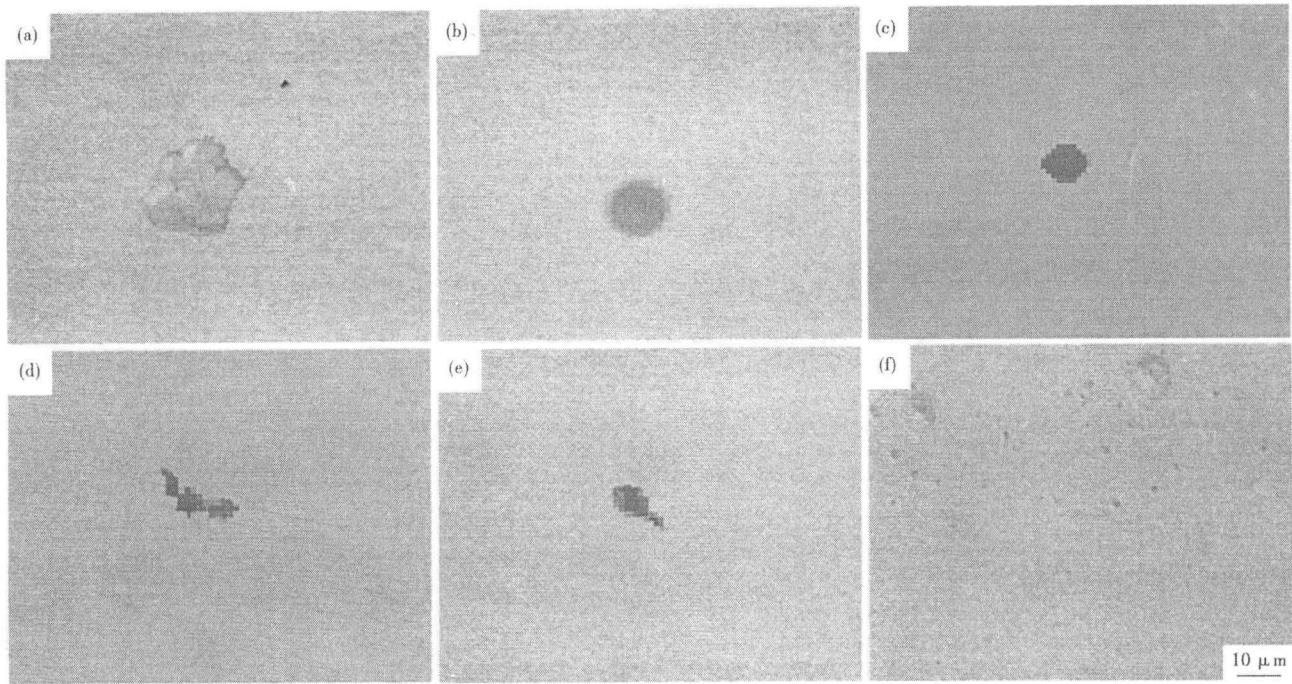


图1 各工序轴承钢中夹杂物形貌:(a) LF精炼前,Al₂O₃;(b) LF精炼后,铬硅酸盐;(c) VD后,铬硅酸盐;(d) VD后,铬锰酸盐;(e) VD后,Al₂O₃;(f) 铸坯中,铬硅酸盐

Fig. 1 Morphology inclusion in bearing steel at each procedure: (a) Al₂O₃, before LF refining; (b) chromic-silicate, after LF refining; (c) chromic-silicate, after VD; (d) bending chromic- manganese, after VD; (e) blocky Al₂O₃ after VD; (f) chromic-silicate in cast billet

酸盐和铬锰酸盐3类夹杂。其中 Al₂O₃ 夹杂以块状、条状和少量簇状形态存在。如图1(a)所示。

LF处理后钢水中的夹杂物,主要为球形铬钙酸盐、球形铬硅酸盐(数量有所增加)、条状的铬锰酸盐(数量减少)和少量的 Al₂O₃ 夹杂,其中簇状 Al₂O₃ 几乎完全消失,条状的 Al₂O₃ 夹杂绝大多数转变为块状 Al₂O₃ 夹杂。球形铬硅酸盐夹杂如图1(b)所示,主要的夹杂物组成如表2所示,LF炉渣成分和碱度如表3所示。

LF处理前显微夹杂数量平均值为8.74

表2 LF处理后主要夹杂物成分/%

Table 2 Ingredient of main inclusions in steel after LF /%

夹杂物类型	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaS	FeO	MnO
铬钙酸盐	31~39	16~20	17~22	18~23	>10	-
铬硅酸盐	23~28	21~28	23~29	12~15	>15	-
铬锰酸盐	22~29	23~28	11~15	-	>10	25~31
Al ₂ O ₃	1~2	75~80	5~9	2~4	>5	9~12

表3 LF炉渣成分和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of LF refining slag

成分/%							碱度 (R)
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	MnO	FeO	
16.10	53.68	5.22	11.34	10.12	0.22	0.90	3.33

个/mm²,处理后夹杂物平均值为6.28个/mm²,去除率达28.15%。

LF处理前后100个视场中夹杂物个数与粒径的关系:LF处理前,0~5 μm的显微夹杂占总数的76.52%,5~10 μm的显微夹杂占20.13%。LF处理后,0~5 μm的显微夹杂占总数的85.42%,5~10 μm的显微夹杂占12.34%,同时显微夹杂的数量亦减少。

2.2 VD处理后显微夹杂物的特征

VD真空处理后钢水中的显微氧化物夹杂主要为球状或椭球状的铬硅酸盐、铬钙酸盐、条状的铬锰酸盐和少量的块状 Al₂O₃ 夹杂,如图1(c)、(d)、(e)所示。

VD真空处理后钢水中的显微夹杂物数量的平均值为2.43个/mm²,去除率达61.31%。VD后显微夹杂物粒径的分布,100个视场夹杂物的个数与粒径的关系:0~5 μm的显微夹杂占总数的93.72%,5~10 μm的显微夹杂占5.17%。VD处理后显微夹杂的数量减少及平均粒径进一步减小。

2.3 中间包钢水中显微夹杂物的组成

中间包钢水中的夹杂物主要仍是球状铬钙酸盐、铬硅酸盐和条状铬锰酸盐,显微夹杂所占夹杂总量的比例分别约23%、34%和36%,另外有少量块

状 Al_2O_3 夹杂。

稳定浇铸时显微夹杂个数为 $3.12 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。中间包钢水中显微夹杂粒径较小, $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 的夹杂占总数 95% 以上, $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 约占总数 4%, 而大于 $10 \mu\text{m}$ 的夹杂则很少, 约占 1%。

2.4 铸坯中显微夹杂物的组成

铸坯中显微夹杂总体积率为 0.031% (由内弧至外弧平均计算值), 其中以铬钙酸盐、铬硅酸盐和铬锰复合夹杂为主, Al_2O_3 和硫化钙所占体积率较低。显微夹杂物数量的平均值为 $2.72 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。各类显微夹杂体积率分布如图 2 所示。

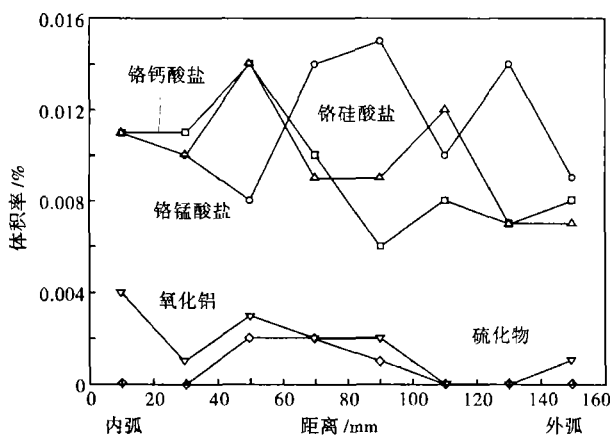


图 2 铸坯断面不同类型夹杂物含量统计

Fig.2 Distribution of different inclusions in billet section

不同类型夹杂占显微夹杂总量的比例为: 铬钙酸盐 24%、铬硅酸盐 36%、铬锰复合夹杂 34%、 Al_2O_3 5.17%, 而硫化钙小于 0.83%, 多为脱氧产物。典型的铬硅酸盐夹杂形貌如图 1(f) 所示。

在上述 5 类显微夹杂中, 铬钙和铬硅类夹杂占 60%, 其化学成分上比较接近, 为多元素铬的复合氧化物, 两者区别主要在于 Cr、Ca 含量的差异及示踪元素种类的区别。硅铝锰复合夹杂占 34%, 该类夹杂含 Mn 较高, 但未达到锰硅比的合理范围, 在脱氧过程中仍未完全形成低熔点液态复合脱氧产物上浮排除。其它显微夹杂含 Mn 更低, 这也从另一个侧面反映出钢中 Mn/Si 低。 Al_2O_3 占 5.17%, 以块状形式独立存在, 多为小于 $5 \mu\text{m}$ 的夹杂。尽管其含量较少, 但 Al_2O_3 属于脆性夹杂物, 对轴承钢的质量影响很大, 其含量越高轴承钢的疲劳寿命越低^[4]。硫化物夹杂含量极低、粒径小。

显微夹杂中含示踪元素 La 的夹杂物占总测试数的 99.17%; 含 Na 和 K 的总测试数的 30%; 含 Ba

的占总测试数的 5.17%。显微夹杂成分复杂且几乎全部含示踪元素, 说明其主要是脱氧产物与中间包液面二次氧化产物吸附聚集而形成的复合物; 其次是结晶器液面对钢液的污染; 钢包液面影响较小。

LF 处理去除率达 28.15%, 对显微夹杂物去除效果较明显; VD 真空处理去除率达 61.31%, VD 真空处理对夹杂物的去除效果显著; 中间包内夹杂物数量有所增加, 去除率为 -28.40%, 因此增强中间包的冶金效果, 优化流场显得尤为重要; 结晶器的去除率为 12.82%, 去除效率仍有开发潜力。

3 结论

(1) BOF-LF-VD-CC 流程产生的 GCr15 轴承钢的夹杂物为铬钙酸盐、铬硅酸盐、铬锰酸盐、 Al_2O_3 和硫化钙。

(2) LF 前-LF 后-VD 后-中间包-铸坯中单位面积显微夹杂数量 ($\text{个}/\text{mm}^2$) 依次为 8.74-6.28-2.43-3.12-2.27。

(3) LF 前-LF 后-VD 后-中间包钢水中 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 夹杂占夹杂总数的比例依次为 76.52%-85.42%-93.72%-95%; $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 夹杂占夹杂总数比例依次为 20.13%-12.34%-5.17%-4%。

本研究得到国家科技部重点推广项目基金资助(项目编号:2004EC000059); 河北省自然科学基金资助项目(编号:502263)

参考文献

- 1 濑户浩藏, 陈洪真. 轴承钢在 20 世纪诞生并飞速发展的轴承钢. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- 2 王硕明. 转炉流程轴承钢中非金属夹杂物行为的研究[博士论文]. 沈阳: 东北大学, 2006
- 3 张彩军. 管线钢非金属夹杂物行为研究[博士论文]. 北京: 北京科技大学, 2003
- 4 杨建虹. 轴承钢洁净度对轴承疲劳寿命的影响. 轴承, 2001(5): 28
- 5 Kato Yoshiyuki, Masuda Tsutomu, Kawakami Kiyoshi, et al. Recent Bearing Improvements in Steel Cleanliness in High Carbon Chromium. ISIJ International, 1996, 36(Supplement Page): 89
- 6 Uesugi T, Tsubota K. Effect of Steel Manufacturing Processes on the Quality of Bearing Steels. Philadelphia, PA: ASTM, 1988: 278
- 7 李正邦. 超洁净钢和零非金属夹杂钢. 特殊钢, 2004, 25(4): 24
- 8 杨广前. 120 t 转炉冶炼 GCr15 轴承钢的工艺实践. 特殊钢, 2004, 25(1): 41

杜 珊(1968-), 女, 讲师, 1997 年毕业于北京科技大学, 人工智能、计算机图形学的教学及计算机应用研究。

收稿日期: 2007-03-20