

60 t LF-VD 精炼过程 18CrNiMo7-6 齿轮钢夹杂物的演变

刘金鑫¹ 冯桂萍¹ 张 龙¹ 顾文涛¹ 刘玉芬²

(抚顺特殊钢股份有限公司 1 技术中心; 2 中心实验室, 抚顺 113001)

摘要 18CrNiMo7-6 钢(/% : 0.17C, 0.57Mn, 0.24Si, 0.012P, 0.003S, 1.70Cr, 1.49Ni, 0.28Mo) 的冶金流程为 60 t EAF-LF-VD-2.1 t 铸锭。取样分析了 EAF 铝锭预脱氧, LF 铝粒和碳化硅混合脱氧剂扩散脱氧(LF 初渣成分 /% : 57 ~ 60CaO, 20.5 ~ 22.0Al₂O₃, 9.9 ~ 11.3SiO₂, 8.8 ~ 10.6MgO, 0.7 ~ 1.1FeO, 0.7 ~ 0.9MnO), VD 后和软吹后钢中夹杂物数量、尺寸和组成的变化。结果表明, 精炼过程 1 ~ 10 μm 夹杂物数量降低 16.67%, > 10 μm 夹杂物数量降低 50%, ≥ 30 μm 夹杂物基本去除; 精炼过程中生成的夹杂主要为镁铝钙的复合夹杂物和 CaS, MgS, MnS 等硫化物; 成品材中主要为 Mg-Al 的氧化物夹杂, 硫化物以 MgS 为主, 有少量 MnS、CaS。应进一步优化冶炼工艺, 控制中小型夹杂物的形成。

关键词 18CrNiMo7-6 齿轮钢 60 t LF-VD 精炼 非金属夹杂物演变 分析

Evolution of Inclusions in Gear Steel 18CrNiMo7-6 during 60 t LF-VD Refining Process

Liu Jinxin¹, Feng Guiping¹, Zhang Long¹, Gu Wentao¹ and Liu Yufen²
(1 R&D Center; 2 Center Lab, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The metallurgical flowsheet for steel 18CrNiMo7-6 (/% : 0.17C, 0.57Mn, 0.24Si, 0.012P, 0.003S, 1.70Cr, 1.49Ni, 0.28Mo) is 60 t EAF-LF-VD-2.1 t ingot. The variation of amount, size and ingredient of inclusions in steel after EAF aluminium pre-oxidation, LF aluminium shot and silicon-carbide mix deoxidant diffusion deoxidation (LF initial slag ingredient /% : 57 ~ 60CaO, 20.5 ~ 22.0Al₂O₃, 9.9 ~ 11.3SiO₂, 8.8 ~ 10.6MgO, 0.7 ~ 1.1FeO, 0.7 ~ 0.9MnO), VD and soft blowing has been analyzed by sampling. Results show that during refining process the amount of 1 ~ 10 μm inclusions decreases by 16.67%, the amount of > 10 μm inclusions decreases by 50% and the ≥ 30 μm inclusions basically are removed from liquid; during refining process the main formed-inclusions are magnesium-aluminium-calcium compound inclusions and CaS, MgS and MnS etc sulfide; the main inclusions in finished products are Mg-Al oxides and main sulfide is MgS with minor MnS and CaS etc sulfide. The further optimized steelmaking process is to control the formation of small and medium size inclusions.

Material Index Gear Steel 18CrNiMo7-6, 60 t LF-VD Refining, Evolution of Non-Metal Inclusions, Analysis

渗碳齿轮用 18CrNiMo7-6 钢, 广泛用于高铁、风电、减速机等行业的大型齿轮, 特别是重型卡车和沿海机械传动齿轮, 当前也用于中国新的电力机车传动系统齿轮^[1-3], 承载能力大, 因此工作条件恶劣, 对纯净度要求较高。非金属夹杂物的总量、级别是衡量其纯净度的重要指标, 严重影响产品的质量和性能。因此, 研究冶炼过程中非金属夹杂物的演变至关重要。本文对 18CrNiMo7-6 钢在精炼过程中夹杂物的行为进行研究, 通过精炼过程取样, 分析夹杂物的组成、结构和变化规律, 为进一步提高产品质量奠定基础^[4-6]。

1 试验方案

18CrNiMo7-6 钢生产工艺流程: 60 t EAF → 60 t LF → 60 t VD → 模注 (2.1 t 锭)。EAF 出钢采用 1 kg/t 的铝锭沉淀预脱氧。LF 工位采用 1 kg/t 铝粒和 1.5 kg/t 碳化硅混合脱氧剂扩散脱氧; 加热 1 600 ℃

温度后取样分析化学成分; 根据成分分析结果补加合金料调整化学成分, 整个 LF 工序冶炼时间 100 min; 取样分析成分合格后进入 VD 工序, LF 精炼渣成分见表 1。VD 工序在真空度小于 100 Pa 保持 20 min, 氩气流量 48 L/min 软吹 30 min, 软吹结束后浇注, 浇注温度 1 584 ℃。LF 精炼过程中钢中酸溶铝变化 0.036%、0.023%、0.016%; 到 VD 喂 Al 线 150 m, 酸溶铝 0.036%。分别在 LF 白渣形成 (LF1)、LF 出钢 (LF2)、VD 开盖 (VD1) 和软吹结束后 (VD2) 取样, 分析钢中夹杂物的数量、生成和变化情况。试验

表 1 LF 初渣和终渣的成分 /%

Table 1 Ingredient of initial and end LF slag /%

精炼渣	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	FeO	MnO
LF 初渣	57.0 ~ 60.0	20.5 ~ 22.0	9.9 ~ 11.3	8.8 ~ 10.6	0.7 ~ 1.1	0.7 ~ 0.9
LF 终渣	57.5 ~ 58.0	17.6 ~ 18.3	12.5 ~ 13.2	10.1 ~ 11.3	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.6

表 2 18CrNiMo7-6 试验钢的化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of tested steel 18CrNiMo7-6 / %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
0.17	0.57	0.24	0.003	0.012	1.70	1.49	0.28

钢成分见表 2。

2 结果分析与讨论

2.1 夹杂物定量统计与分析

利用金相显微镜对夹杂物的尺寸、数量进行统计,选取 100 倍视场,统计视场数为 20 个,统计结果见表 3。总体看,夹杂尺寸主要集中在 1~30 μm 的中小型,大于 30 μm 的大型夹杂精炼后基本去除。由表 3 可知,多数夹杂物在 1~30 μm ,在 LF 精炼过程中,夹杂总去除率是 16.67%;但是 1~5 μm 的小型夹杂有所增加,估计为钢包耐火材料侵蚀或添加合金料带入的外来夹杂。从 VD 开盖到软吹结束后,夹杂增加 30%,1~5 μm 的小型夹杂物增加较多,估计为钢包耐火材料侵蚀或添加 CrN 带入的外来夹杂。从 LF1 至 VD2,1~10 μm 夹杂总去除率 16.67%;大于 10 μm 夹杂总去除率 50%。

2.2 夹杂物的定性分析

用扫描电镜对 4 个精炼工位的夹杂物进行定性分析,见图 1~4。图 1 为 LF 精炼白渣刚形成, EAF 出钢沉淀脱氧产生的大颗粒夹杂物未完全被钢渣吸附;此时夹杂物的组成为:外层 MgAl 尖晶石,并附有 MgS;内层为钙铝酸盐。Al 为 EAF 沉淀脱氧加

表 3 各工序 18CrNiMo7-6 钢中非金属夹杂物数量

Table 3 Amount of non-metal inclusions in liquid at each procedure

工序	夹杂物/ μm					总数
	1~5	>5~10	>10~30	>30~50	>50	
LF1(白渣形成)	10	2	4	2	0	18
LF2(LF 结束)	12	1	2	0	0	15
VD1(VD 结束,软吹前)	2	4	2	2	0	10
VD2(软吹后)	8	2	3	0	0	13

入;Mg 是 EAF 和 LF 中耐火材料(镁碳砖)受侵蚀的外来夹杂;在精炼中,高碱度渣中的 CaO 容易在搅拌过程中被钢液中的 [Si]、[Al] 还原成钙进入钢液,随后钢液中溶解的 [Ca]、[Al] 和 [O] 会慢慢向 Al_2O_3 和 $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ 转移,生成钙铝酸盐^[5]。图 2 为 LF 精炼白渣保持 100 min,大颗粒夹杂物基本被钢渣吸收而去除,此时 Ca、Al、Mg 形成复合夹杂物,与精炼初期夹杂物成分、分布有明显区别,硫化物分布较为弥散。图 3 为 VD 抽真空精炼过程中,氩气流量在 200~250 L/min,细小夹杂物在氩气流带动下运动,经历碰撞、聚集、长大过程;以 Ca、Al、Mg 复合夹杂物为主,其中含有偏聚的不规则硫化物;外层聚集较多的 Mg 的氧化物,是 CaAl 酸盐夹杂物在抽真空过程中受钢包内衬侵蚀剥落的细小夹杂物包裹所致。图 4 为 VD 软吹结束后,外层为 CaAl 酸盐,心部到边缘有一长条形的 MgAl 酸盐和 Mg 的氧化物;硫化物分布较为弥散,无聚集。

对所生产的 $\Phi 130$ mm 和 $\Phi 180$ mm 的轧/锻棒

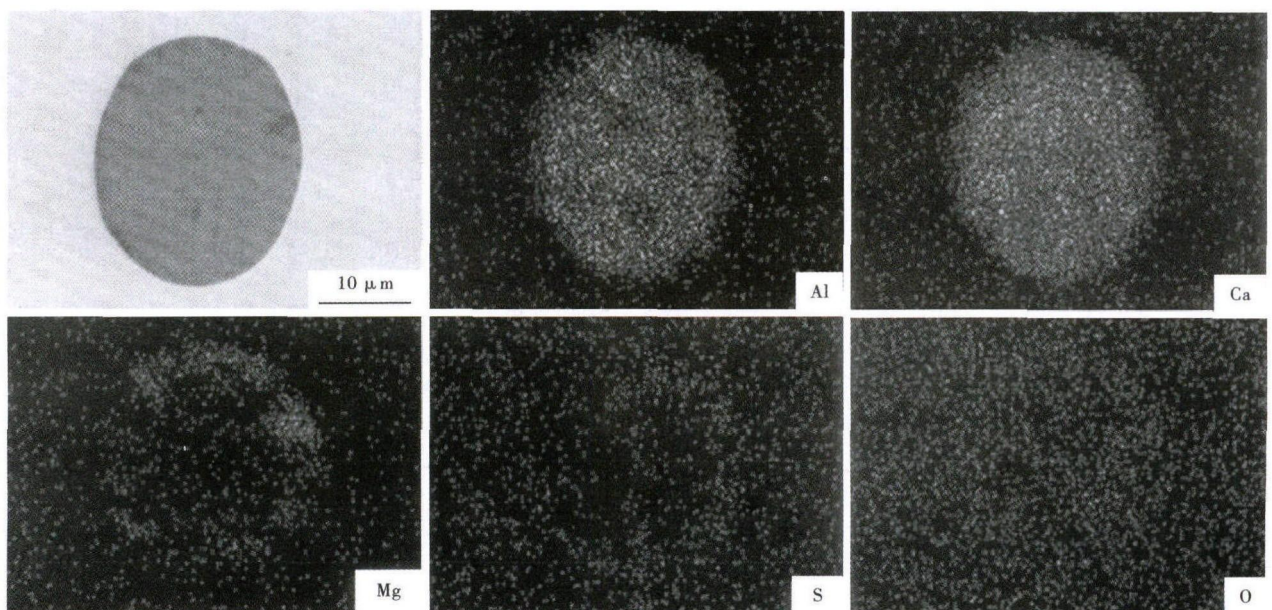


图 1 LF 精炼白渣形成时 18CrNiMo7-6 钢液中典型夹杂物形貌和分析,SEM

Fig. 1 Morphology and analysis of typical inclusion in liquid of steel 18CrNiMo7-6 with formation of LF refining white slag, SEM

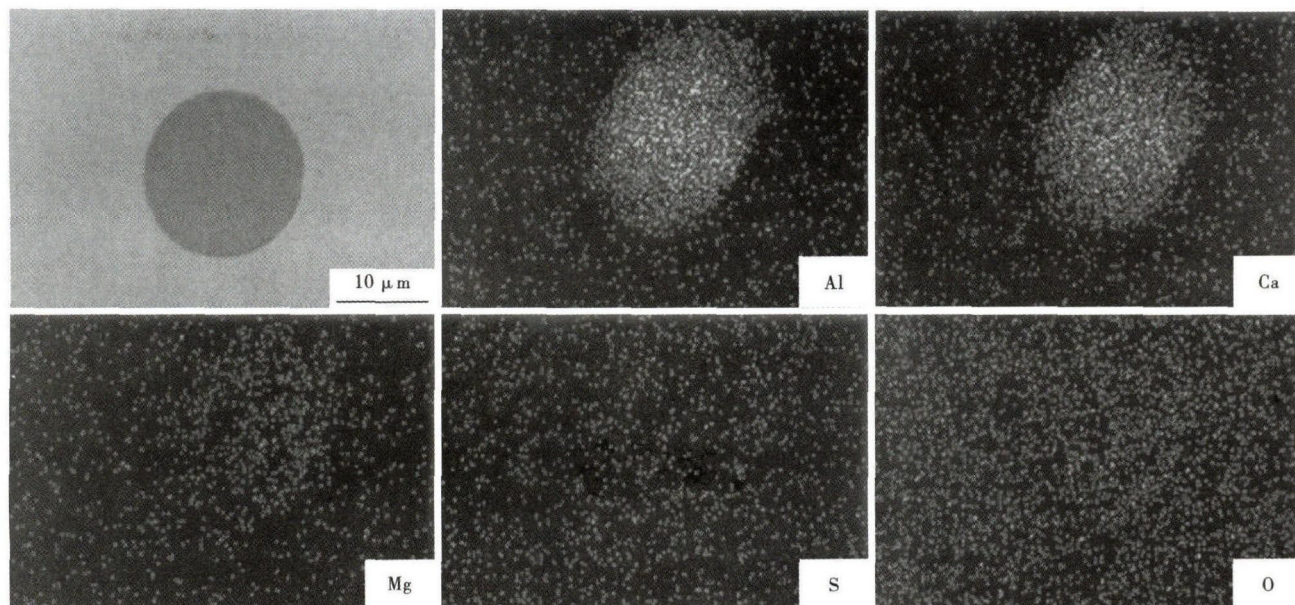


图2 LF 精炼结束时 18CrNiMo7-6 钢液中典型夹杂物形貌和分析, SEM

Fig. 2 Morphology and analysis of typical inclusion in liquid of steel 18CrNiMo7-6 at end LF refining, SEM

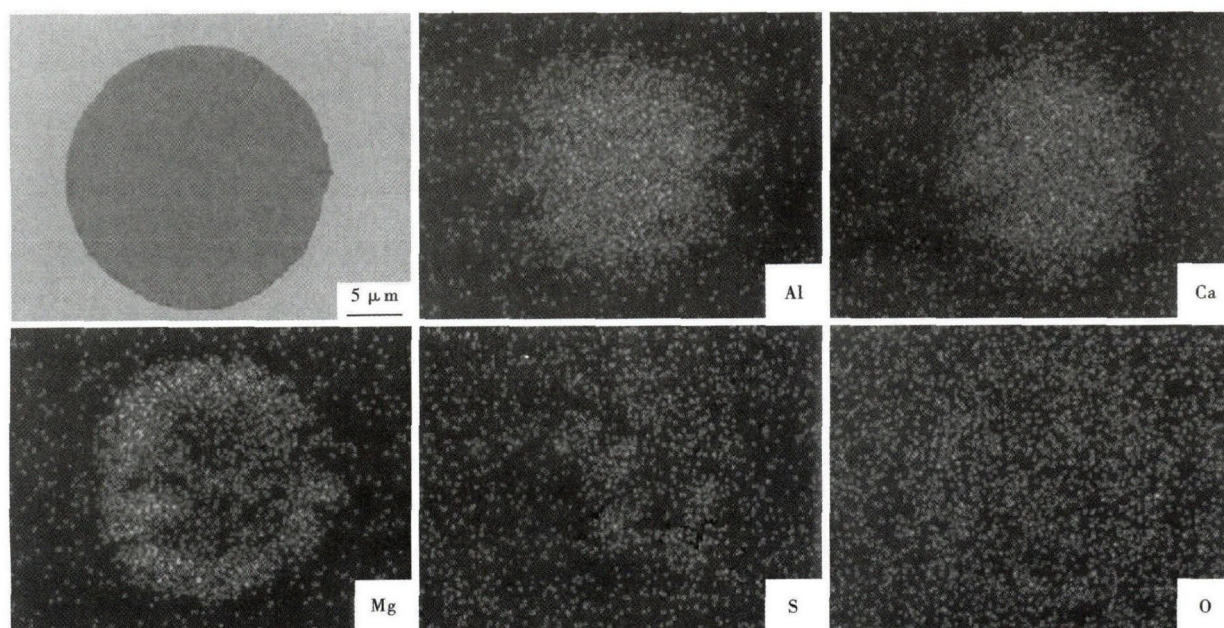


图3 VD 结束软吹前 18CrNiMo7-6 钢液中典型夹杂物形貌和分析, SEM

Fig. 3 Morphology and analysis of typical inclusion in liquid of steel 18CrNiMo7-6 at end VD before soft argon blowing, SEM

材取样检测, A类、B类夹杂物评级分别是 1.0、1.0 级。精炼过程中非金属夹杂物为球形;球形夹杂物经过轧/锻后,塑性夹杂物被拉长,脆性夹杂物断裂、破碎,不变形夹杂物保持圆形。在金相显微镜下,找出典型的氧化物和硫化物,对其进行扫描电镜分析,为链状的复合氧硫化物夹杂。由图 5、图 6,复合氧化物以 Mg、Al 的氧化物为主,含有少量 Ca、Mn;硫化物以 MgS 为主,有少量 MnS、CaS。A、B 类夹杂物全部为复合夹杂物,氧化物的组成相对较为简单,主

要为铝酸钙,含少量硫化物(硫化钙为主);硫化物结构较为复杂,主要为硫化锰、硫化镁、硫化钙,同时含有铝酸盐的氧化物。

3 结论

(1) 抚顺特钢生产的 18CrNiMo7-6 钢,精炼过程中夹杂总量呈下降趋势,1 ~ 10 μm 夹杂总去除率 16.67%;大于 10 μm 夹杂总去除率 50%。夹杂尺寸主要集中在 1 ~ 30 μm 的中小型,大于 30 μm 的大型夹杂在精炼后基本去除。

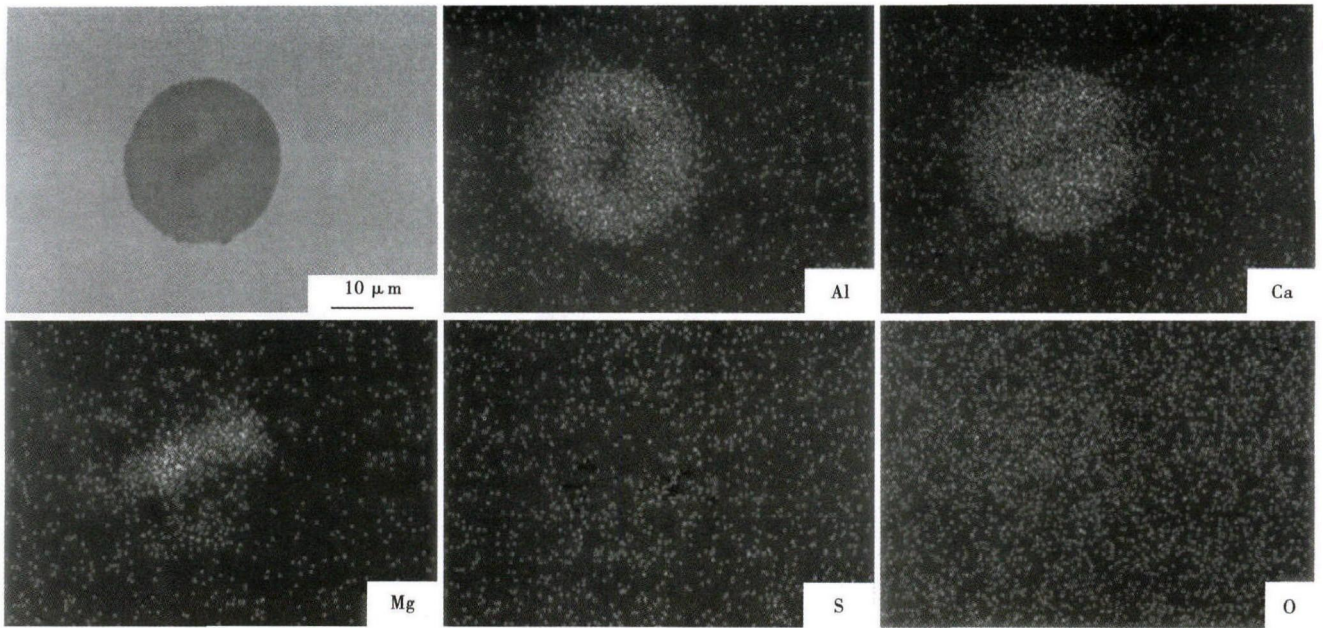


图 4 软吹后 18CrNiMo7-6 钢液中典型夹杂物形貌和分析,SEM

Fig. 4 Morphology and analysis of typical inclusion in liquid of steel 18CrNiMo7-6 after soft argon blowing, SEM

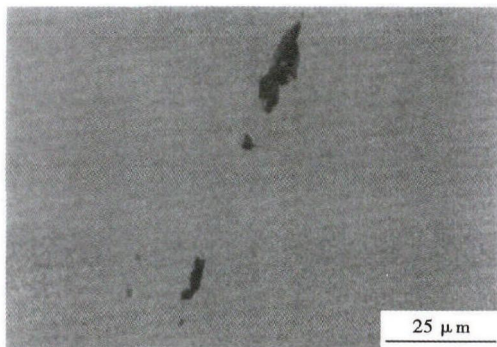


图 5 18CrNiMo7-6 钢 Φ130 ~ 180 mm 锻/轧材中 Mg-Al-Ca-Mn 复合氧化物形貌,SEM

Fig. 5 Morphology of Mg-Al-Ca-Mn compound inclusions in Φ130 ~ 180 mm forged/rolled products of steel 18CrNiMo7-6, SEM

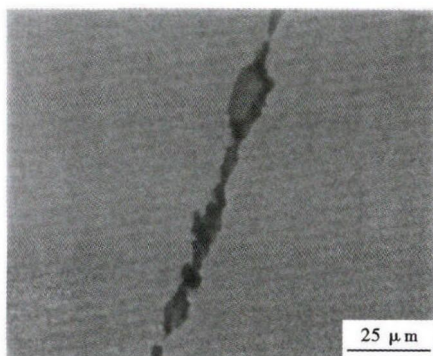


图 6 18CrNiMo7-6 钢 Φ130 ~ 180 mm 锻/轧材中 MgS-MnS-CaS 复合硫化物形貌,SEM

Fig. 6 Morphology of MgS-MnS-CaS compound inclusions in Φ130 ~ 180 mm forged/rolled products of steel 18CrNiMo7-6, SEM

(2)在精炼过程中生成的夹杂主要为镁铝钙的复合夹杂物和 CaS、MgS 等硫化物。成品材中主要为含 Mg、Al 的氧化物夹杂,硫化物以 MgS 为主,有少量 MnS、CaS。A、B 类夹杂物全部为复合夹杂物,氧化物的组成相对较为简单,主要为铝酸钙,含少量硫化物(硫化钙为主);硫化物结构较为复杂,主要为硫化锰、硫化镁、硫化钙,同时含有铝酸盐的氧化物。改善方向应集中在对中小型夹杂物的控制上。

参考文献

[1] Zhao Ya-ping, Wang Mao-qiu, Yuan Ji-guo. The Effect of V-Nb on the Growth of Austenite Grains in 17CrNiMo6 Gear Steel[J]. Baosteel Technical Research, 2008, 2(2):46-50.
 [2] 王爱香, 高金柱, 顾敏. 新型高合金齿轮渗碳钢 17CrNiMo6 的热处理[J]. 金属热处理, 2010, 35(10):82-86.
 [3] 肖国华, 董瀚, 王毛球, 等. 钙硫比对 18CrNiMo7-6 钢中硫化物热变形性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(11):14-17.
 [4] Zhan Dong-ping, Li Feng-gong, Zhang Hui-shu. Research on Refining Technology of Clean Steel in a Plasma Ladle Furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(Supplement1):694-694.
 [5] 王治钧, 袁守谦, 陈列, 等. LF-VD 精炼过程中 GCr15 钢中夹杂物的行为[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(2):11-15.
 [6] 胡庆华, 赵军, 朱世凤. 大锻件内非金属夹杂物的形成及防止措施[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3):69-71.

刘金鑫(1978-),男,硕士(辽宁科技大学),工程师,辽宁冶金职业大学(专科)毕业,合金结构钢研发。

E-mail:jinxinliu19780609@126.com

收稿日期:2016-06-24