

· 工艺技术 ·

70 t EAF-LF-RH 冶炼 18CrNiMo7-6 齿轮钢过程的夹杂物变化

胡梦頔^{1,2}

(大冶特殊钢有限公司 1 棒材研究所; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘要 采用全流程取样, 利用 ASPEX 全自动扫描分析法进行检验, 对 70 t EAF + LF + RH 工艺生产的齿轮钢 18CrNiMo7-6 钢中夹杂物特性的演变规律进行系统的分析和研究, 试验结果表明, LF 精炼调整成分后, 夹杂物数量去除率粒径 1 ~ 10 μm 为 89%, >10 μm 为 97%, 从 LF 精炼调整成分后至软吹结束, 夹杂物数量去除率粒径 1 ~ 10 μm 为 54%, >10 μm 为 66%, >20 μm 的夹杂物基本清除。夹杂物完成了 Al₂O₃ → Al₂O₃ · MgO → Al₂O₃ · CaO 的转变。

关键词 70 t EAF + LF + RH 18CrNiMo7-6 齿轮钢 夹杂物 ASPEX 分析

Evolution of Inclusions in Gear Steel 18CrNiMo7-6 during 70 t EAF-LF-RH Smelting Process

HU Mengdi^{1,2}

(1 Bar research Institute, 2 Hubei Province Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The evolution of inclusions in gear steel 18CrNiMo7-6 produced by 70 t EAF + LF + RH process is systematically analyzed and studied by means of whole process sampling and ASPEX test. The test results show that sampling after adjusting the composition during LF refining the removal rate of inclusions with size 1 ~ 10 μm is 89%, with >10 μm is 97%, from adjusting the composition during LF refining to the end of soft blowing, and the removal rate of size 1 ~ 10 μm inclusions reaches 54% removal rate of inclusions >10 μm is 66%, and the inclusions >20 μm are basically removed. The inclusion completes the transformation from Al₂O₃ → Al₂O₃ · MgO → Al₂O₃ · CaO.

Material Index 70 t EAF + LF + RH, 18CrNiMo7-6 Gear Steel, Inclusions, ASPEX Analysis

渗碳齿轮钢 18CrNiMo7-6 广泛应用于高铁、风电行业的变速箱中的重型齿轮, 目前也用于我国新的电机传动齿轮^[1-3], 其承载能力大, 工作条件恶劣, 承受冲击扭转、接触疲劳等复杂载荷作用, 因此, 要求严格控制齿轮钢的纯净度, 尤其控制氧化类夹杂^[4]。因此, 研究冶炼过程中的夹杂物变化十分重要, 本文就冶炼过程中各个夹杂物的组成、结构和变化规律进行了研究, 为进一步提高产品质量打下基础。

1 生产工艺

采用 70 t 电弧炉冶炼 + LF + RH + IC 的工艺生产 18CrNiMo7-6 齿轮钢, 试验钢的化学成分见表 1。

70 t 电弧炉铁水配比 ≥ 60%, 炉后加入 100 kg 铝锭预脱氧, LF 采用碳粉和碳化硅脱氧, 并适当加入铝粒, 精炼时间 ≥ 60 min, 成分合格后进入 RH 工序, 精炼过程渣的成分见表 2。RH 工序真空度 ≤

表 1 18CrNiMo7-6 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 steel / %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	O
0.166	0.26	0.51	0.008	0.005 2	1.72	1.50	0.29	0.001 0

表 2 LF 初渣和终渣成分/%

Table 2 Ingredient of initial and end LF slag/ %						
精炼渣	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	FeO	MnO
LF 初渣	58.2	21.0	10.0	9.2	0.8	0.8
LF 终渣	57.5	18.0	12.7	10.4	0.8	0.6

67 Pa, 保持时间 ≥ 20 min, 软吹时间 ≥ 20 min, 然后浇铸。LF 加足 Al 粒, RH 后不再喂。

2 检测结果与分析

2.1 夹杂物数量统计与分析

在炼钢各工序取样, 利用 ASPEX 分析试样的夹杂物的尺寸、数量、类型, 统计结果见表 3。总体看, 夹杂尺寸主要为 1 ~ 20 μm 的中小型, 大于 20 μm 的大型夹杂 LF 后基本去除。由表 3 可知, 在 LF 精炼过程中, 夹杂总去除率是 92.27%; 但是最大夹杂物尺寸有所增加, 见表 4, 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 RH 完成到软吹结束后, 夹杂物增加 17.4%, 1 ~ 5 μm 的小型夹杂物增加较多, 主要为钢包耐火材料侵蚀或添加 MnN 带入的外来夹杂。

LF 精炼调整成分后取夹杂物试样,对比钢包样的夹杂物,1 ~ 10 μm 夹杂总去除率 89%,大于 10 μm 夹杂数量总去除率 97%,LF 精炼调整成分后检测至软吹结束检测,1 ~ 10 μm 夹杂总去除率 54%;大于 10 μm 夹杂数量总去除率 66%, > 20 μm 的夹杂物基本清除,没有超过 50 μm 的夹杂物。

2.2 夹杂物定性分析

利用 ASPEX 扫描统计,对在各个工序金相试样中非金属夹杂物进行能谱分析,发现试样中夹杂物主要成分是 Ca、Mg 和 Al 元素的氧化物。因此将能谱分析得到的 Ca、Mg 和 Al 元素的原子质量分数换算成其对应氧化物质量分数,由表 5 可以看出,LF 前期,夹杂物中主要成分是 Al₂O₃,这是钢液铝脱氧的结果,此时的夹杂物形状不规则,有较大尺寸的夹杂物存在。LF 精炼结束时夹杂物中 CaO 含量升高,这是由于钢液中发生了如式(1)~(3)所示的反应,使夹杂物向 Al₂O₃→Al₂O₃·MgO→Al₂O₃·CaO 夹杂物转变。

溶解 Al 与渣中和耐火材料中的 MgO 发生反应

表 3 各工序不同尺寸夹杂物数量

Table 3 Number of inclusions with different sizes in each process, number

夹杂物尺寸/μm	各工序夹杂物数量/[个·(50 mm) ⁻²]				
	钢包样	LF 调整成分后	RH 真空前	RH 结束	RH 后软吹结束
≥1 ~ 3	205	84	74	36	47
>3 ~ 5	536	54	22	14	13
>5 ~ 10	694	19	14	5	12
>10 ~ 20	106	3	7	7	2
>20 ~ 50	3	3	1	1	0
总数	1 544	163	118	63	74

表 4 各工序最大夹杂物尺寸/μm

Table 4 Size of maximum inclusions in each process/μm

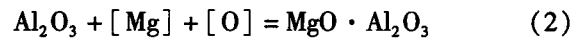
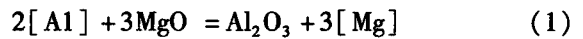
钢包样	LF 调整成分后	RH 真空前	RH 结束	RH 后软吹结束
24.3	26.4	34.4	37.9	19.0

表 5 各工序夹杂物的元素占比/%

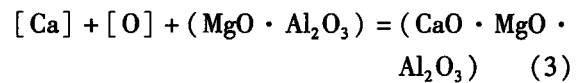
Table 5 Element proportion of inclusion in each process/%

元素	钢包样	LF 调整成分后	RH 真空前	RH 结束	RH 后软吹结束
Mg	0.50	18.20	8.00	0.60	1.60
Al	83.80	58.30	47.90	40.70	58.00
Ca	0.80	15.00	25.40	44.80	29.20
S	6.10	2.80	4.30	3.20	2.80
Mn	7.50	3.00	10.20	4.90	4.00
Si	0.50	1.20	2.80	3.20	2.40
Ti	0.60	1.00	0.60	2.00	1.90

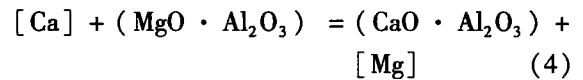
如下^[46]。



钢液中 Ca 含量达到一定程度时,会发生如下反应



RH 真空结束夹杂物中 MgO 含量平均值降低至 0.60%,CaO 含量平均值升高至 44.80%,这是由于钢液中连续发生了如式(4)所示的反应。



有研究发现,[Ca]与 Al₂O₃·MgO 反应,置换出部分[Mg]^[7],本实验钢液中夹杂物成分变化规律也证实该观点。

2.3 三元相图变化

对每个工序 MgO·CaO·Al₂O₃ 的夹杂物分布进行三元相图分析,三元相图每个格子代表 1/10,每一粒夹杂物中三种氧化物占比相加为 1,通过三元相图可以看出,复合夹杂物的成分组成。

电弧炉加入铝粒和 CaSi 线进行脱氧,因此,电弧炉钢包样夹杂物主要以 Al₂O₃ 为主,少量 CaO,如

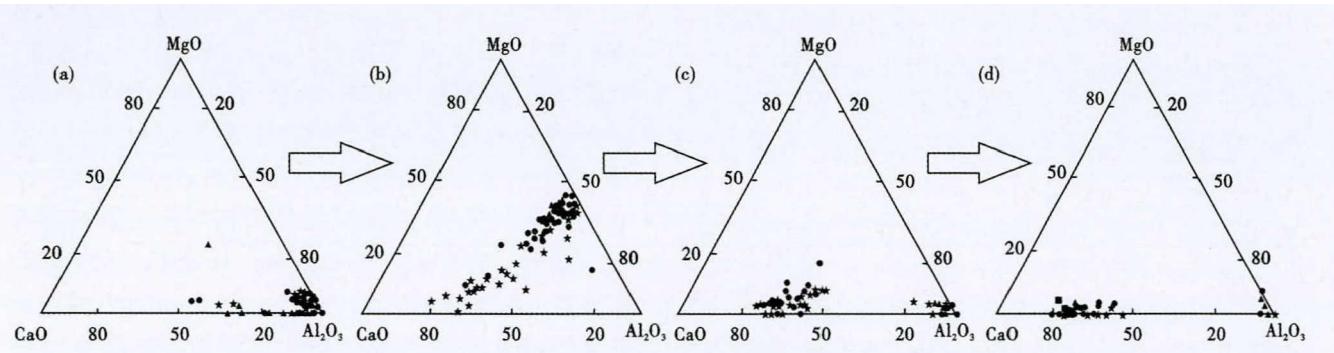


图 1 钢包(a),LF(b),RH 结束(c)和软吹结束(d)钢中夹杂物三元相图

Fig. 1 Ternary phase diagram of inclusions in steel at ladle (a), LF (b), RH end (c) and soft end (d)

图1(a)三元相图所示。LF精炼时间40 min后,耐材中的Mg被置换出来,向MgO转变,在LF精炼过程中夹杂物不断上浮但无法上浮完全,剩下少量残余,LF精炼结束后,Mg类夹杂物含量从18.2%降低至8%,但由于LF精炼过程中添加了脱氧剂,Ca含量提高,如图1(b)三元相图所示。RH过程抽真空时间30 min,深真空时间20 min,破真空后夹杂物向CaO和Al₂O₃转变,如图1(c)三元相图所示。破真空后软吹20 min,期间炉中MgO的Mg被Ca置换出来,剩CaO和Al₂O₃^[8],如图1(d)三元相图所示。该规律变化也符合公式(1)-(4)的变化。

3 结论

(1)大冶特钢生产的18CrNiMo7-6钢,LF精炼

过程中夹杂总量呈下降趋势,LF精炼调整成分后取样时,对比钢包样的夹杂物,1~10 μm夹杂总去除率89%,大于10 μm夹杂数量总去除率97%,LF精炼调整成分后检测至软吹结束检测,1~10 μm夹杂总去除率54%;大于10 μm夹杂数量总去除率66%,>20 μm的夹杂物基本清除。

(2)齿轮钢冶炼过程中,夹杂物完成了Al₂O₃→Al₂O₃·MgO→Al₂O₃·CaO的转变,RH真空结束夹杂物中MgO含量降低,CaO含量升高。整个过程符合预期,后期改善方向应集中在小型夹杂物数量的去除上。

参考文献

- [1] Zhao Yaping, Wang Maoqiu, Yuan Jiguo. 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] 高建伟, 刘军. 转炉生产齿轮钢氧化物夹杂控制的工艺优化[J]. 连铸, 2015, 40(3): 49-53.
- [5] 陈秀娟, 郑少波, 洪新, 等. VD 炉内轴承钢中碳还原渣中 CaO 的热力学及影响因素分析[J]. 上海金属, 2005, 27(2): 26-33.
- [6] Guo J, Cheng S S and Cheng Z J. Mechanism of Non-Metallic Inclusion Formation and Modification and Their Deformation during Com-

- pact strip Production (CSP) Process for Aluminum-Killed steel[J]. ISU International, 2013, 53(12): 21-42.
- [7] 刘佳伟, 岳峰, 王子健. 100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂的演变[J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 61-65.
- [8] 张立峰. 钢中非金属夹杂物几个需要深入研究的课题[J]. 炼钢, 2016, 32(4): 1-16.

胡梦頔(1988-),男,工程师,2009年武汉科技大学(本科)毕业,齿轮钢新产品工艺研究。
E-mail: humengdi@citicsteel.com

收稿日期:2022-02-10

下期要目

- | | |
|---|------|
| F45MnVS 非调质钢中硫化锰夹杂物特性控制的研究 | 白瑞娟等 |
| 薄带铸轧流程制备含钕 3% Si 取向硅钢的组织与织构研究 | 朱立光等 |
| 夹杂物特性对 10CrNi3MoV 钢冲击韧性的影响 | 杨治争等 |
| 10B21 含硼冷镦钢轧后结疤成因分析及工艺改进 | 肖步庆等 |
| 50CrMo 钢 Φ600 mm 连铸圆坯中心裂纹分析及工艺改进 | 张洪才等 |
| 铸坯喷丸工艺对 430 铁素体不锈钢卷板表面质量影响的研究 | 李鹏飞等 |
| 汽车零部件用 45Mn2R 硫系易切削钢的开发 | 梁娜等 |
| H13 钢 Φ130 ~ 150 mm 热轧材探伤不合格原因分析及改进措施 | 张新文等 |
| 1Cr11Ni2W2MoV 钢持久性能机理分析及工艺改进 | 董晓亮等 |
| 17-7PH 沉淀硬化不锈钢电渣重熔过程洁净度的变化 | 徐涛等 |
| 调质处理工艺对微合金化 Q960E 钢 70 mm 板组织性能的影响 | 成慧梅等 |