

铈和钙处理对 NM450 钢中夹杂物的影响

郭树豪¹, 刘金瑞¹, 高 军², 樊立峰³, 崔 衡^{1*}

(1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要:通过配置有 AZtecFeature 自动夹杂物分析模块的扫描电镜-能谱仪 (SEM-EDS) 和 Factsage 热力学计算, 研究了国内某厂稀土 NM450 钢生产过程中的 Ca 处理和 Ce 处理对钢中夹杂物的演化过程的影响。结果表明: 经过 0.001 5% Ce 处理, 钢液中主要夹杂物 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 被改性为低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 和低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 夹杂物。Ce 处理 20 min 后, 钢中约 53% 夹杂物被去除。钢液中 [Ce] 扩散进入 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 形成低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物。钢液中的 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 [Ce] 反应产生 CeAlO_3 , 进而生成 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。二次 Ca 处理后, 含 Ce 夹杂物种类没有发生改变, 尽管部分夹杂物转化为液态夹杂物, 但同时导致了夹杂物总体数量上升, 且 CaS 成为了主要夹杂物。这表明现行 Ce 处理协同双 Ca 处理的精炼工艺存在钙处理过量的问题。

关键词: 非金属夹杂物; Ce 处理; Ca 处理; NM450 钢; 夹杂物改性

中图分类号: TF76, TG115

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0158-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.022

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effects of cerium and calcium treatment on the inclusions in NM450 steel

GUO Shuhao¹, LIU Jinrui¹, GAO Jun², FAN Lifeng³, CUI Heng^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China; 2. Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Monolia, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Monolia, China)

Abstract: The effects of Ca treatment and Ce treatment on the steel inclusions during the steelmaking process of Ce-contented NM450 steel were studied. The evolution process of inclusions in steel was analyzed by Scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS) equipped with AZtecFeature automatic inclusion analysis module and Factsage thermodynamic calculation. After 0.001 5% Ce treatment, the main inclusions in the molten steel are modified from $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ into complex inclusions such as low melting point $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$, $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ and low melting point $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$. About 53% of the inclusions in the steel were removed after Ce treatment for 20 minutes. [Ce] diffuses into $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ to form low melting point $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ inclusions in the molten steel. $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ in the molten steel reacts with [Ce] to produce CeAlO_3 , which in turn generates $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions. After the secondary Ca treatment, the Ce inclusion species did not change. Although some of the inclusions were con-

收稿日期: 2024-01-09

基金项目: 中央引导地方科技发展资金 (2022ZY0001)。

作者简介: 郭树豪, 1996 年出生, 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事钢铁冶金夹杂物研究, E-mail: 13366568362@163.com;

* 通讯作者: 崔 衡, 1978 年生, 男, 内蒙古包头市人, 博士生导师, 研究员, 从事钢铁冶金研究, E-mail: cuiheng@ustb.edu.cn。

verted into liquid inclusions, the overall number of inclusions increased, and CaS became the dominant inclusion. It indicates that there is a problem of excessive calcium treatment in the current Ce treatment combined with double Ca refining treatment processes.

Key words: non-metallic inclusions, Ce treatment, Ca treatment, NM450 steel, inclusion modification

0 引言

NM450 钢是一种应用广泛的低合金耐磨钢, 其具有合金含量低、韧性佳、耐磨性高等优势^[1]。耐磨钢中夹杂物的控制是提升耐磨钢的质量和性能的重要方式。目前工业生产过程中, 多采用 Ca 处理的方式控制 NM450 钢中 Al₂O₃ 等夹杂物, 使之具有较低的熔点和良好的塑性^[2-3]。然而, 随着冶金工艺要求的提升, Ca 处理存在的增加大型夹杂物出现频率, 降低夹杂物去除效率, 加剧耐火材料侵蚀等问题得到了更多关注^[4], 通过如稀土处理, Mg 处理等其他工艺替代或协同钙处理, 成为近年来控制夹杂物, 提高钢质量的研究热点^[5]。

稀土元素因其对钢液洁净度和钢质量的改善效果而得到了大量研究^[6-10]。试验条件下, 稀土对多种成分的钢中 Al 系夹杂物的改性效果和作用机制已得到了较为充分的研究^[11-16]。然而, 实际生产应用中, 稀土处理会与其他处理工艺协同进行, 作用效果受到相互影响, 并受到冶炼工艺的影响, 存在收得率低、水口结瘤、作用效果不稳定等问题^[17-18], 而目前工业生产中稀土处理与 Ca 处理工艺的相互影

响及作用机制尚未得到充分研究。为此, 笔者基于某钢厂稀土 NM450 钢生产工艺, 通过扫描电镜、能谱分析、夹杂物自动统计, 结合热力学计算, 研究了 Ca 处理和稀土 Ce 处理后钢中夹杂物演化过程, 并分析了 Ce 处理与 Ca 处理在改性夹杂物过程中的相互作用, 旨在对 NM450 钢实际生产过程中的稀土处理工艺提供理论指导。

1 取样及试验分析

某钢厂稀土 NM450 钢生产工艺为: BOF 冶炼→LF 精炼→RH 精炼→连铸, 期间进行两次 Ca 处理和一次 Ce 处理(Ce 加入量约为 0.001 5%), 处理和钢液取样时机如图 1 所示。通过直读光谱仪(CCD7000)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)、氧氮分析仪(TCH600)和碳硫分析仪(CS-2 800)分析钢液样本成分, 试验钢成分如表 1 所示。通过 SEM 扫描电镜、EDS 能谱分析仪和 AztecFeature 夹杂物自动分析模块, 对钢样本中夹杂物进行分析和统计, 分析 Ce 处理和 Ca 处理对夹杂物的影响, 并对典型夹杂物演化过程的热力学条件进行计算, 分析在 Ce 处理和 Ca 处理对钢中夹杂物的影响情况。

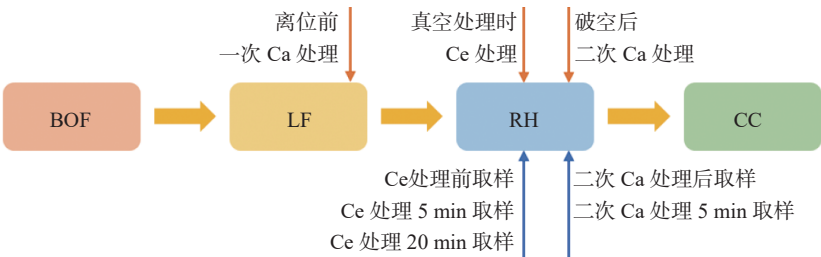


图 1 Ce 处理、Ca 处理和钢液取样时机示意
Fig. 1 Schematic diagram of Ce-Ca treatment and steel liquid sampling timing

表 1 试验钢样化学成分
Table 1 Chemical composition of wear-resistant steel %

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Nb	Al	Ti
0.194	0.255	1.242	0.009 8	0.782 8	0.282 5	0.018 9	0.050 7	0.014 2

2 结果与分析

2.1 Ce 处理和 Ca 处理对钢中夹杂物成分、数量和平均尺寸的影响

图 2 为利用 AztecFeature 夹杂物自动分析模块对钢液样本中各夹杂物种类所占比例、数密度和平均直径统计的结果。Ce 处理前, 钢中主要夹杂物为 xCaO·yAl₂O₃, 同时存在少量的 Al₂O₃、CaS、MnS,

表明一次 Ca 处理对钢中脱氧产物的改性效果较好。随着 Ce 的加入, 钢中夹杂物数量略微上升, 其中主要夹杂物由 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 转化为 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Ce-Al-Ca-O 和 Ce-Al-Ca-O-S 三种夹杂物。由于三种夹杂物的总占比与 Ce 处理前钢液中 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 比例接近, 且样本中并未发现独立的 Ce 化合物夹杂, 这一阶段的夹杂物数量上升应归因于 Ce 对 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 的改性作用。随着真空处理的进行, 相比于 Ce 处理前, Ce 处理 20 min 后, 钢中约 53% 的夹杂物被去除。二次 Ca 处理后, 夹杂物数密度再次上升, 其中 CaS 夹杂物占比由 6% 大幅增加至 62%, 成为钢中主要夹杂物, 而原有的三种主要夹杂物总比例由 83% 降至 31%, 表明二次 Ca 处理对钢液洁净度产生了不利影响。

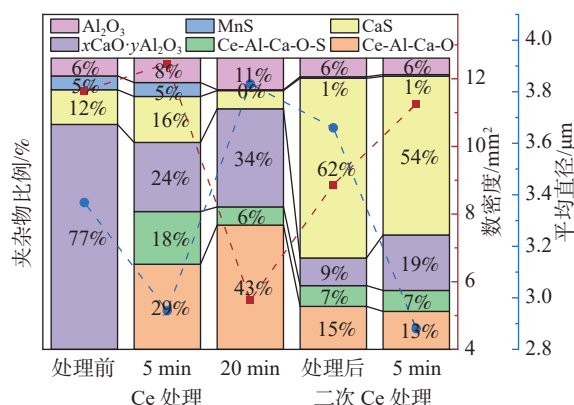


图 2 钢中夹杂物占比、数密度和平均尺寸统计

Fig. 2 Statistical diagram of the proportion, number density and average size of inclusions in steels

2.2 Ce 处理和 Ca 处理对钢中夹杂物类型及形貌的影响

图 3 为 Ce 处理前钢中典型夹杂物 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 的形貌和 EDS 面扫结果, 其呈现较高的球形化形貌和均质特征。Ce 处理后钢中的主要夹杂物中出现了 Ce-Al-Ca-O 和 Ce-Al-Ca-O-S 夹杂物, 其典型形貌

和 EDS 面扫结果如图 4 所示。其 4(a) 中夹杂物质地均匀, 形貌上相比 4(b)(c) 无法区分成分差异, 面扫结果中尽管 Ce 与 Ca、Al、O 元素没有完全重合, 但 Ca、Al、O 的富集区域范围远高于夹杂物颗粒对应的范围, 考虑到夹杂物尺寸较小, 其与 Ce 分布的差异应该是 EDS 测试误差造成的, 因此认为 4(a) 所示的夹杂物在钢液中以液态的形式存在。QIU 等^[19]研究表明存在低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物。故认为, Ce-Al-Ca-O 夹杂物为低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物。同时, 4(b)(c) 中的复合夹杂物的形貌接近球形, 有一定的多边形轮廓, 且在背散射模式下有明暗区域。根据 EDS 扫描结果, Ce 含量富集区域与明亮区域有重合性。因此认为, 光亮区域为高熔点 CeAlO₃ 夹杂物。这符合半固态夹杂物的形貌特征^[20]。因此认为, 4(b) 中的复合夹杂物为高熔点 CeAlO₃ 夹杂物被液态 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 包覆的半固态夹杂物。而 4(c) 中的 Ce-Al-Ca-O-S 夹杂物是由浅色部分的 CeAlO₃ 和深色部分的 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 组成的复合夹杂物。Ce-Al-Ca-O 夹杂物存在低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物和 CeAlO₃ + $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物两种形式。类似地, 图 5 所示的二次 Ca 处理后钢中典型 Ce-Al-Ca-O-S 夹杂物的 EDS 面扫结果显示, 其由低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物和 CaS 组成, 即钢中 Ce-Al-Ca-O-S 夹杂物同样有 CeAlO₃ + $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 和 CaS + 低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 两种存在形式。造成两种存在形式的原因是 Ce-Al-Ca-O 夹杂物体系中 Ce 和 Ca 含量的变化, 使其在 CaO-Al₂O₃-Ce₂O₃ 体系中所处的平衡区域发生改变, 下文将对其进行详细论述。二次 Ca 处理后钢中 CaS 夹杂物主要为直径不足 1 μm 的细小夹杂物, 即图 2 中二次 Ca 处理夹杂物数量不断增加且夹杂物平均尺寸不断降低的结果是由大量 CaS 的生成造成的。

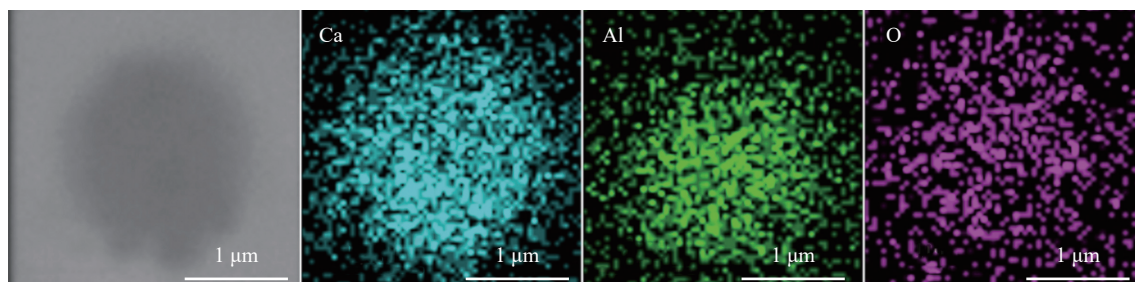


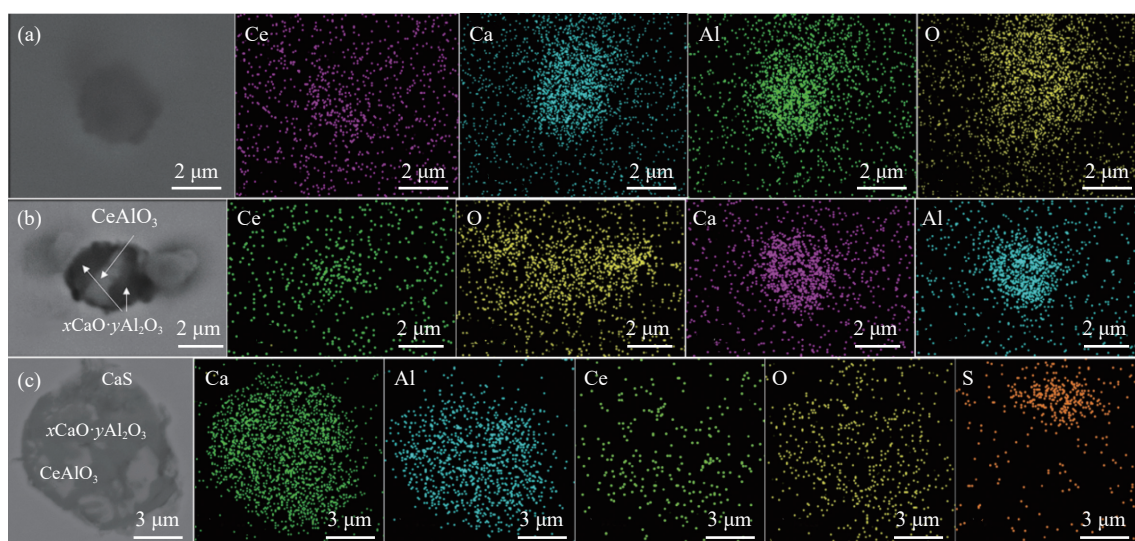
图 3 加 Ce 前钢中典型夹杂物的形貌和 EDS 面扫描结果

Fig. 3 Morphology and EDS elemental maps of typical inclusions in steels before Ce treatment

3 Ce 处理和 Ca 处理对 Ce-Al-Ca-O 夹杂物的作用机制

为研究钢中 Ce、Ca 含量对其中夹杂物组分的影响, 使用 Factsage 热力学软件计算 NM450 钢中成分在 1 600 °C 下的相图, 计算结果如图 6 所示。在 Ce 含量小于 0.004% 时, 随着 Ca 含量的增加, 钢中的含 Ca 夹杂物演化过程为: $\text{CaAl}_4\text{O}_7 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_9 \rightarrow \text{Liq}$ (液态夹杂物) $\rightarrow \text{Liq} + \text{CaS}$ 。随着 Ce 含量的增加, 钢中的 Ce 化合物演化过程为: $\text{Al}_{11}\text{O}_{18}\text{Ce} + \text{CeAlO}_3 \rightarrow$

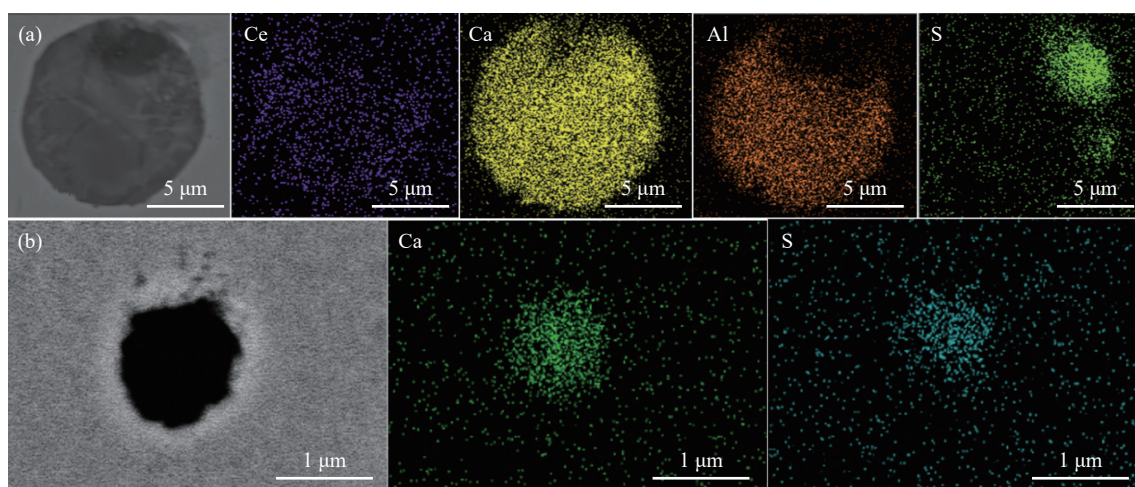
$\text{CeAlO}_3 \rightarrow \text{CeAlO}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$, 并降低 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物演化所需 Ca 含量。在 Ce 含量大于 0.004% 时, 钢中只可能产生 CaS, 而无法形成 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。本试验 Ce 处理过程添加 Ce 含量约为 0.001 5%, Ca 处理能够影响 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的种类和 CaS 的生成。需要指出的是, 由于缺少 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ce}_2\text{O}_3$ 三元体系中各组分含量变化对其存在形式的影响, 无法仅通过图 6 的计算结果全面说明 Ce 处理和 Ca 处理对 Ce-Al-Ca-O 夹杂物的作用机制。



(a) 低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物; (b) $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物; (c) $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 复合夹杂物

图 4 Ce 处理后钢中典型夹杂物的形貌和 EDS 面扫描结果

Fig. 4 Morphologies and EDS elemental maps of typical inclusions in steels after Ce treatment



(a) $\text{CaS} + \text{低熔点 } x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物; (b) CaS 夹杂物

图 5 Ca 处理后钢中典型夹杂物的形貌和 EDS 面扫描结果

Fig. 5 Morphologies and EDS elemental maps of typical inclusions in steels after secondary Ca treatment

根据夹杂物统计结果, Ce 处理后, 钢中并未产生独立的 Ce 化合物夹杂物, 含 Ce 夹杂物为低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 及其与 CaS 组成的复合夹杂物。其中, 低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 是通过 [Ce] 扩散进入液态 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物中形成, 而复合夹杂物中 CeAlO_3 则可能通过以下方式产生: 钢中的 [Ce] 与液态 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成 CeAlO_3 ; 随着溶于液态夹杂物中的 [Ce] 含量不断提高, 在液态夹杂物内部析出 CeAlO_3 。此处, 考虑到固态 CeAlO_3 夹杂物与钢液的不润湿性, 以及 CeAlO_3 可溶入三元 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ce}_2\text{O}_3$ 渣系内。因而, 生成的固态 CeAlO_3 更易在表面张力的影响下被液态夹杂物包裹^[19,21-22]。

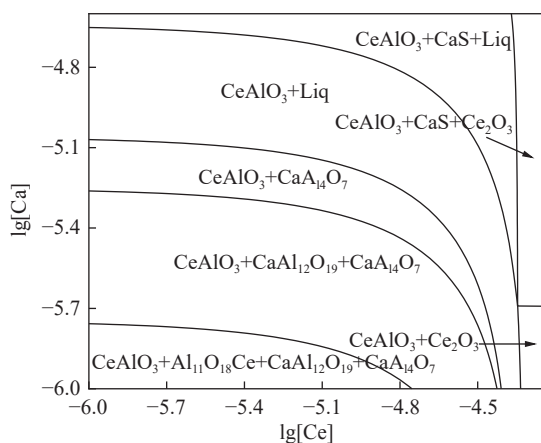
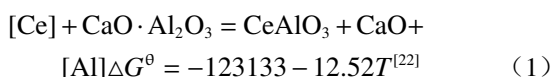


图 6 NM450 钢体系中 1 600 °C 下 Ca-Ce 平衡图

Fig. 6 Stability diagram of NM450 steel system at 1 600 °C

将各样本中 Ce-Al-Ca-O 夹杂物成分投射在 $\text{CaO}-\text{AlO}_{1.5}-\text{CeO}_{1.5}$ 相图中, 并根据 Factsage 热力学软件计算和相关试验研究^[23], 在相图中标明 $\text{CaO}-\text{AlO}_{1.5}-\text{CeO}_{1.5}$ 三元系的纯液相区和液相+ CeAlO_3 区域得到图 7。由图 7 可知, Ce 处理 5 min 后, 夹杂物成分从纯液相区移动至液相+ CeAlO_3 区域, Ce-Al-Ca-O 夹杂物中三种组分的平均摩尔分数由 40.0CaO-60.0 $\text{AlO}_{1.5}$ 转变为 29CaO-31.5 $\text{AlO}_{1.5}$ -39.5 $\text{CeO}_{1.5}$, 其反应方程表示为式(1)所示。



1 600 °C 下, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 可能形成液态夹杂物。根据图 7 中三元体系的液相区域范围, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 液相夹杂物中只需极少量 $\text{CeO}_{1.5}$ 即可析出 CeAlO_3 , 而 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$

和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 均需要 $\text{CeO}_{1.5}$ 摩尔分数达到 21% 以上才可产生 CeAlO_3 。考虑到钢液中 Ce 含量极低, 只有 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 可能通过溶解钢中 [Ce] 析出 CeAlO_3 。

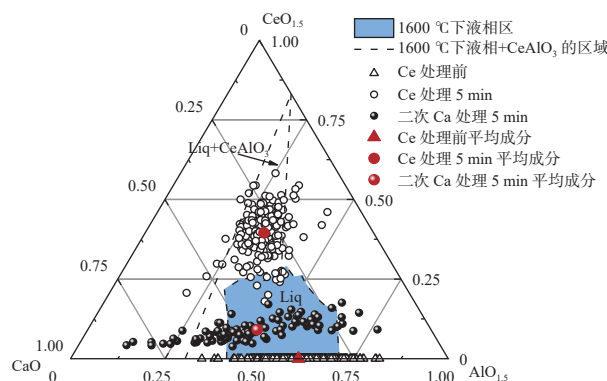


图 7 Ce-Al-Ca-O 夹杂物在 $\text{CaO}-\text{AlO}_{1.5}-\text{CeO}_{1.5}$ 相图中的组成分布

Fig. 7 Composition distribution of Ce-Al-Ca-O inclusions in the $\text{CaO}-\text{AlO}_{1.5}-\text{CeO}_{1.5}$ phase diagram

尽管图 7 中二次 Ca 处理后钢中 Ce-Al-Ca-O 夹杂物平均成分位于纯液相区, 表明二次 Ca 处理有助于降低 Ce-Al-Ca-O 夹杂物的熔点, 提高钢液的可浇性。然而, 二次 Ca 处理后 Ce-Al-Ca-O 夹杂物成分分布范围较大, 且产生了大量 CaS, 导致钢中夹杂物数量增加, 恶化了钢液洁净度。因此, 目前稀土 NM450 钢生产过程中存在 Ca 处理过量的问题。二次 Ca 处理前钢中约 53% 的夹杂物已被去除, 同时, 夹杂物数密度降低至 5.45 个/ mm^2 。钢液中余下夹杂物中 83% 为低熔点液态夹杂物或半固态夹杂物, 其中半固态夹杂物在与钢液润湿性差异和表面张力的作用下, 呈现出低熔点夹杂物包裹高熔点夹杂物的球化特征。这说明 Ce 处理后对钢中夹杂物的控制效果较好。与此同时, 后续的 Ca 处理对夹杂物的控制效果起到了一定反作用, 且产生的大量 CaS 也会影响钢液的可浇性。因而需要考虑后续进行二次 Ca 处理中 Ca 的加入量问题。

4 结论

1) 稀土 NM450 钢生产试验中, 0.001 5% Ce 处理前钢中主要夹杂物为 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物; Ce 处理后 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物被改性为低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 和低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{CaS}$ 等

夹杂物, Ce 处理 20 min 后, 相比于 Ce 处理前, 钢中约 53% 的夹杂物被去除; 二次 Ca 处理后 CaS 成为钢中主要夹杂物, 同时夹杂物数量显著升高, 而含 Ce 夹杂物种类没有发生改变。

2) Ce 处理后, 钢中生成低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 两种 Ce-Al-Ca-O 夹杂物。钢液中 [Ce] 扩散进入 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 形成低熔点 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{Ce}_2\text{O}_3$ 夹杂物。钢液中的

$x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 [Ce] 反应产生 CeAlO_3 , 进而生成 $\text{CeAlO}_3 + x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。

3) 二次 Ca 处理使 Ce-Al-Ca-O 夹杂物转化为液态夹杂物, 但二次 Ca 处理后 Ce-Al-Ca-O 夹杂物成分差异大, 且导致了大量 CaS 夹杂物产生和钢中夹杂物总体数密度的上升, 恶化了钢液洁净度。因此, 通过 Ce 处理协同双 Ca 处理的精炼方式生产 NM450 钢的工艺中存在 Ca 处理过量的问题。

参考文献

- [1] LI H Y, ZHANG Y, XIE Z. Wear behaviors of vanadium and titanium modified NM450 steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(3): 60-64.
(李会英, 张瑶, 谢尊. 钒钛改性机械 NM450 钢的磨损性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(3): 60-64.)
- [2] WANG Z Y, JIANG M, WANG X H. Formation and evolution behavior of inclusions in Q345D steel refining process[J]. Steel, 2022, 57(2): 63-72.
(王章印, 姜敏, 王新华. Q345D 钢精炼过程夹杂物生成及演变行为[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 63-72.)
- [3] ZHANG L Q, YUAN Z. Effect of Ca treatment on the microstructure and properties of Ti high energy welded non quenched and tempered low alloy high-strength steel[J]. Materials Introduction, 2008, 22(S3): 166-168.
(张莉芹, 袁泽. Ca 处理对 Ti 大线能量焊接非调质低合金高强钢组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(S3): 166-168.)
- [4] DENG Z Y, ZHU M Y. Analysis of clean steel refining calcium treatment technology [J/OL]. Iron and Steel, 2023, 9, 26: 1-14.
(邓志银, 朱苗勇. 洁净钢精炼钙处理技术探析[J/OL]. 钢铁, 2023, 9, 26: 1-14.)
- [5] CHENG L, YANG W, LI S S, *et al.* Inclusion evolution during the production of pipeline steel by the “BOF → LF → RH → calcium treatment → CC” process[J]. Steelmaking, 2019, 35(6): 60-66.
(程林, 杨文, 李树森, 等. “BOF→LF→RH→钙处理→CC” 工艺生产管线钢过程夹杂物演变[J]. 炼钢, 2019, 35(6): 60-66.)
- [6] YU J S, CHEN J Z, CHEN X Y, *et al.* Exploration of the development future of rare earth treatment steel[J]. Rare Earth, 1983(2): 53-59.
(余景生, 陈继志, 陈希颖, 等. 稀土处理钢发展前途的探讨[J]. 稀土, 1983(2): 53-59.)
- [7] XU D F, CHEN K H, HU G Y, *et al.* The effect of trace rare earth Ce on the microstructure and corrosion properties of Al-Zn-Mg aluminum alloy[J]. Materials Introduction, 2020, 34(8): 8100-8105.
(徐道芬, 陈康华, 胡桂云, 等. 微量稀土 Ce 对 Al-Zn-Mg 铝合金组织和腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(8): 8100-8105.)
- [8] WANG H, BAO Y P, ZHI J G, *et al.* Effect of rare earth Ce on the morphology and distribution of Al_2O_3 inclusions in high strength IF steel containing phosphorus during continuous casting and rolling process[J]. ISIJ International, 2021, 61(3): 657-666.
- [9] WANG Y, LIU C. Evolution and deformability of inclusions in Al-killed steel with rare Earth-Alkali metals (Ca or Mg) combined treatment[J]. Journal of Rare Earths, 2023, 41(9): 1459-1466.
- [10] WANG L, SONG B, YANG Z B, *et al.* Effects of Mg and La on the evolution of inclusions and microstructure in Ca-Ti treated steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 28 (2021): 1940-1948.

- [11] WANG L C, TIAN J L, REN J, *et al.* The effect of Ce/Mg treatment on the cleanliness of M50 bearing steel[J]. Journal of Engineering Science, 2022, 44(9): 1507-1515.
(王礼超, 田家龙, 任吉, 等. Ce/Mg 处理对 M50 轴承钢洁净度的影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1507-1515.)
- [12] YANG C, LUAN Y, LI D, *et al.* Effects of rare earth elements on inclusions and impact toughness of high-carbon chromium bearing steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1298-1308.
- [13] WANG X, WU Z, LI B, *et al.* Inclusions modification by rare earth in steel and the resulting properties: a review[J]. Journal of Rare Earths, 2023.
- [14] LI Y, LIU C, ZHANG T, *et al.* Inclusions modification in heat resistant steel containing rare earth elements[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(1): 76-82.
- [15] GAO S, WANG M, GUO J L, *et al.* Characterization transformation of inclusions using rare earth Ce treatment on Al - killed titanium alloyed interstitial free steel[J]. Steel Research International, 2019, 90(10): 1900194.
- [16] LIU H Z, ZHANG J, ZHANG J, *et al.* First-principles study on the effect of rare earth element cerium on the modification and corrosion of non-metallic inclusions in steel[J]. Journal of Engineering Science, 2022, 44(9): 1516-1528.
(刘瀚泽, 张静, 张继, 等. 稀土元素铈对钢中非金属夹杂物改性和腐蚀影响的第一性原理研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1516-1528.)
- [17] YANG J, LI T T. Research progress on inclusion control in rare earth treated non oriented silicon steel[J]. Steel, 2022, 57(7): 1-15.
(杨健, 李婷婷. 稀土处理的无取向硅钢夹杂物控制研究进展[J]. 钢铁, 2022, 57(7): 1-15.)
- [18] WANG Y G, LIU C J, QIU J Y, *et al.* The effect of aluminum on non-metallic inclusions in rare earth heat-resistant steel[J]. Steel, 2022, 57(4): 52-57.
(王野光, 刘承军, 邱吉雨, 等. 铝对稀土耐热钢中非金属夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(4): 52-57.)
- [19] QIU J, WANG H, HUO G, *et al.* Phase diagram of CaO-Al₂O₃-CeO_x slag system at 1600 °C in reducing atmosphere and air atmosphere[J]. Ceramics International, 2023, 49(12): 20447-20455.
- [20] MIAO Z Q. Formation mechanism and key metallurgical process of large size inclusions in high-end bearing steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
(苗志奇. 高端轴承钢中大尺寸夹杂物形成机理与关键冶金工艺[D]. 北京: 北京科技大学, 2023)
- [21] YUE Q, CHEN Z, ZOU Z S. Mechanism analysis of agglomeration of non-metallic inclusions in molten steel[J]. Steel, 2008(11): 37-40.
(岳强, 陈舟, 邹宗树. 钢液中非金属夹杂物团聚的机理分析[J]. 钢铁, 2008(11): 37-40.)
- [22] GENG R M, LI J, SHI C B, *et al.* Evolution of inclusions with Ce addition and Ca treatment in Al-killed steel during RH refining process[J]. ISIJ International, 2021, 61(5): 1506-1513.
- [23] KITANO R, ISHII M, UO M, *et al.* Thermodynamic properties of the CaO-AlO_{1.5}-CeO_{1.5} system[J]. ISIJ International, 2016, 56(11): 1893-1901.

编辑 邓淑惠