

含 Ce 颗粒增强型耐磨钢中夹杂物 在 RH 过程中的演变

张可, 刘座宇, 吴华杰*, 张鹏程, 武会宾

(北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083)

摘要:通过对 RH 过程样进行氧氮含量检测、成分检测和夹杂物扫描检测, 分析了钢中夹杂物在 RH 精炼过程中的演变。结果表明, 钢中的夹杂物按类型可分为氧化物、硫化物、含 Ce 的氧化物和氧硫化物以及 $Ti(C_xN_y)$ 及其复合夹杂物四类。 $Ti(C_xN_y)$ 及其复合夹杂物可分为 $Ti(C_xN_y)$ 、 $Ti(C_xN_y)$ 与氧化物、硫化物或稀土 Ce 夹杂物组成的复合夹杂物。样品中夹杂物的尺寸主要分布在 $1 \sim 2 \mu m$ 。RH 精炼过程对 Ti 的各类夹杂物的数量密度和尺寸分布的影响不大, 对钢中氧化夹杂物有明显的去除作用, 氧化物数量密度从进入 RH 的 $73 \text{ 个}/mm^2$ 降低至软吹后的 $8 \text{ 个}/mm^2$, 硫化物析出量较少且数量密度基本不变。加 Ce 后出现了 Ce 的氧化物、氧硫化物以及 Ti-Ce 复合夹杂物。Ce 的夹杂物会为样品中的夹杂物提供弥散的形核质点, 形成尺寸较小的复合夹杂物。Ce 也会改性钢中的夹杂物, 降低样品中高熔点氧化夹杂物的含量。

关键词: 含 Ce 耐磨钢; $Ti(C_xN_y)$; RH 精炼; 尺寸分布

中图分类号: TF769.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0172-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Evolution of inclusions in Ce-containing particle-strengthened wear-resistant steel during the RH process

ZHANG Ke, LIU Zuoyu, WU Huajie*, ZHANG Pengcheng, WU Huibin

(Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Oxygen and nitrogen content analysis, chemical composition detection, and inclusion scanning were performed on sample taken during the RH refining process to investigate the evolution of inclusions in the steel. The results show that inclusions in steel can be categorized into four types: oxides, sulfides, Ce-containing oxides and oxysulfides, and $Ti(C_xN_y)$ along with its complex inclusions. $Ti(C_xN_y)$ and its complex inclusions can be further divided into $Ti(C_xN_y)$ and complex inclusions consisting of $Ti(C_xN_y)$ with oxides, sulfides, or rare earth Ce inclusions. The size of inclusions in the samples is primarily in the range of 1 to 2 μm . The RH refining process has little effect on the number density and size distribution of various Ti-containing inclusions. However, it significantly removes oxide inclusions, reducing their number density from 73 particles/ mm^2 before RH treatment to 8 particles/ mm^2 after soft blowing. The precipitation of sulfides is low, and their number density remains basically unchanged. After Ce addition, Ce oxides, Ce oxysulfides, and Ti-Ce complex inclusions appear. Ce-containing inclusions act as dispersed nucleation sites

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-01-27; 接受日期: 2026-02-09

基金项目: 新材料重大专项项目资助 (No.2024ZD0606600)。

作者简介: 张可, 2001 年出生, 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 从事连铸坯温度场数值模拟及钢中夹杂物的基础研究, E-mail: M202311318@xs.ustb.edu.cn; *通信作者: 吴华杰, 1978 年出生, 男, 安徽黄山人, 博士, 副研究员, 长期从事高品质特殊钢冶金质量控制理论和技术研究, E-mail: wuhuajie@ustb.edu.cn。

for inclusions tend to form smaller complex inclusions. Ce also modifies the inclusions in steel, lowering the content of high-melting-point oxide inclusions.

Key words: Ce-containing wear-resistant steel; $Ti(C_xN_y)$; RH refining; size distribution

0 引言

工业中最广泛应用的钢铁耐磨材料可分为高锰钢、高铬铸铁和低合金耐磨钢三大类^[1]。高锰钢中质量分数大于 10% 的 Mn 可以稳定奥氏体,使其在室温条件下稳定存在。高锰奥氏体钢在冲击变形条件下发生形变诱导马氏体相变及加工硬化,通过表层形成高硬度的马氏体组织,芯部保持良好韧性的奥氏体组织,二者共同作用使高锰钢兼具耐磨性和韧性。然而,高锰钢在小冲击和低应力等条件下,其奥氏体组织未发生明显的相变及加工硬化,故不能展现良好的耐磨性能^[2-4]。同时,高锰钢在实际应用中存在局限性,如较高的碳含量使焊接后容易开裂,再加热处理后容易析出碳化物降低韧性等。高铬铸铁具有较高的初始硬度,基体上镶嵌着维氏硬度(HV)约为 1 300~1 800 的独立 M_7C_3 杆状碳化物,保证了良好耐磨性能的同时,由于基体具有较好的连续性而表现出不错的冲击韧性^[5]。但是,高铬铸铁因其生产工艺复杂、含有大量铬镍等稀缺元素等特点,限制了其应用^[6]。低合金耐磨钢因其经济性、耐磨性和综合性能良好而被广泛应用于冶金、矿山、煤炭和机械等领域的设备^[7-9]。研究人员通过轧制和热处理结合的方式得到高硬度的耐磨相,如马氏体^[10],贝氏体等^[11],也有研究者为了兼顾硬度、耐磨性和韧塑性,开发了马氏体与铁素体相结合的耐磨相^[12]。然而,由于淬透性的限制,耐磨钢表层的硬相磨损后,其耐磨性能会急剧下降,为了延缓耐磨钢耐磨性能的下降,同时使钢内部的非硬相也具有一定的耐磨性能,研究者们尝试向低合金耐磨钢中引入硬质颗粒,开发颗粒增强型耐磨钢,有研究证明,通过向钢中加入 Ti 并控制生成特定形态的 TiC 和 TiN 有利于增强钢的耐磨性能^[9,13-14]。

关于稀土元素对钢中夹杂物的作用,学者们发

现其能改性 Al_2O_3 等氧化物、球化长宽比大的 MnS,为钢中的夹杂物提供细小弥散的形核核心等^[15-18]。在含 Ti 钢中, Ti 会在钢中生成多边形 TiN,尺寸过大或聚集的 TiN 会恶化钢的性能^[19]。王健等^[20]发现 Ce 可以与 Al_2O_3 反应生成 $CeAlO_3$,该夹杂物可作为 TiN 的异质形核核心形成 $CeAlO_3$ -TiN 复合夹杂物,使原本粗大、棱角分明的 TiN 更加细小圆整。XIE 等^[21]研究了 La-Ti-Mg 复合处理 AH36 高强钢中夹杂物的效果,并调整不同元素的添加顺序以确定最优的处理工艺,研究发现通过稀土与 Ti 的复合处理,可在钢中直接形成以 La-Ti-O 为核心,外围包裹着 TiN 和 MnS 的复合夹杂物,该类复合夹杂物的平均尺寸通常小于纯 TiN,在特定的 Ti-La-Mg 添加顺序下,上述复合夹杂物在钢基体中的分布更均匀。牛泽鹏等^[22]研究了稀土 Ce 微合金化对无 Ti 的低合金耐磨钢中夹杂物和凝固组织的影响。而在低合金耐磨钢中同时含有 Ti 的硬质颗粒和稀土 Ce 的情况下,对于钢中夹杂物的研究较少。

以国内某厂生产的 NM400 级含 Ce 和 Ti 低合金耐磨钢为研究对象,系统取样研究 RH 精炼过程钢中夹杂物包括 $Ti(C_xN_y)$ 的变化情况,为后续优化颗粒增强型耐磨钢中 $Ti(C_xN_y)$ 及其他夹杂物的控制提供数据支撑和参考依据。

1 试验钢取样及分析方法

1.1 试验钢的取样

国内某厂含 Ce 和 Ti 的颗粒增强型耐磨钢的冶炼环节和工艺路线为:转炉→LF 精炼→RH 精炼→连铸,在 LF 精炼过程中进行 Ti 合金化。为检测夹杂物在 RH 精炼过程的演变情况,分别在 RH 精炼环节的进 RH、加 Ce 前、加 Ce 后和软吹后四个工艺节点取样。图 1 为耐磨钢取样位置的示意,RH 出站时样品的化学成分见表 1。

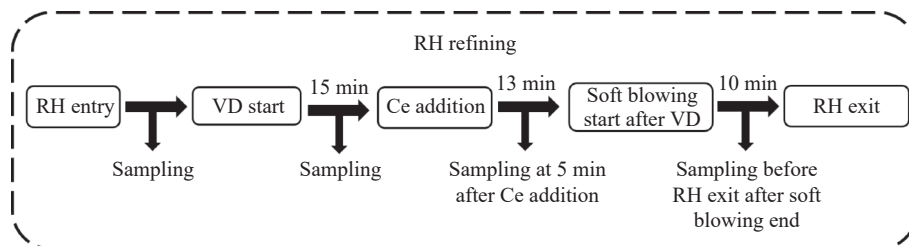


图 1 耐磨钢 RH 过程取样位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling locations during RH process for wear-resistant steel

表1 RH出站样品的化学成分
Table 1 Chemical composition of RH-tapped sample %

C	Si	Mn	P	S	Ca	Al _i	Ti	Ce	
0.15	0.39	1.39	0.005	0.001	0.001	1	0.036	0.041	0.000 8

1.2 检测方法

通过线切割将样品加工成若干个 10 mm×10 mm×10 mm 的金相试样用于夹杂物分析,和 Ø5 mm×10 mm 的圆柱样用于氧氮检测。通过 TCH 600 氧氮氢分析仪对试样的 O 和 N 元素含量进行测定。使用 Particle X 夹杂物自动扫描系统对钢中夹杂物进行分析检测,每个试样的检测面积不小于 30 mm²,检测尺寸在 1 μm 以上的夹杂物。

2 结果与讨论

2.1 对氧氮含量的影响

钢中的氧氮含量是评价钢液洁净度的重要指标,直接影响钢中夹杂物的形成与最终性能。如图 2 为各取样位置的样品中 O 元素和 N 元素的含量。图 2 中,随着 RH 精炼的进行,样品中 O 元素和 N 元素的含量逐渐降低。进 RH 时,样品中的 O 含量为 20.7×10⁻⁶,N 含量为 46.5×10⁻⁶。加 Ce 前,样品的 O 含量为 18.5×10⁻⁶,N 含量为 33.9×10⁻⁶。加 Ce 后,样品的 O 含量为 15.1×10⁻⁶,N 含量为 32.6×10⁻⁶。软吹后,样品的 O 含量为 14.5×10⁻⁶,N 含量为 25.9×10⁻⁶。对于 RH 过程中脱 O 和 N 的效果。软吹后样品的 N 含量相对于进 RH 时的 N 含量降低了 44.3%,O 含量相对于进 RH 时的 O 含量降低了 30.0%。

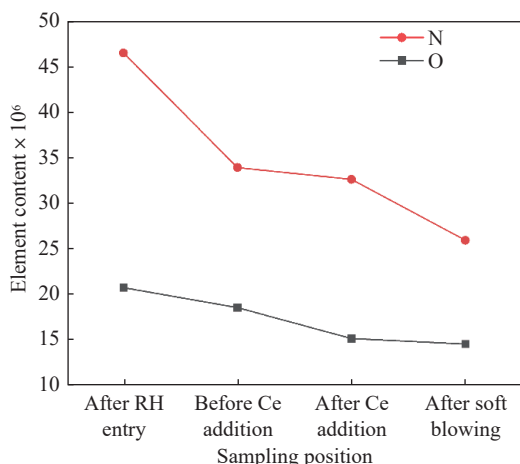


图2 样品中的氧氮含量

Fig. 2 Oxygen and nitrogen contents in the samples

2.2 对非金属夹杂物的影响

Ce 和 Ti 处理均会在钢中分别生成 Ce 或 Ti 的夹杂物,为了探究 Ce 和 Ti 的夹杂物对钢中夹杂物的作用,开展试验对钢种的夹杂物进行了分析。

2.2.1 夹杂物的种类和整体数量密度

经过研究,发现钢中的夹杂物分为氧化物、硫化物、含 Ce 的氧化物和氧硫化物与 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物四类。氧化物指 Ca、Mg、Al 等与 O 形成的氧化夹杂物,样品中未检测到纯 Al₂O₃。硫化物指 MnS 和 CaS。含 Ce 的氧化物或氧硫化物指 Ca-Ce-Al-O 复合夹杂物和 Ca-Ce-O-S 复合夹杂物。Ti 的夹杂物主要有氮化物、碳化物和碳氮化物,将其称为 Ti(C_xN_y),将 Ti(C_xN_y)、Ti(C_xN_y)-MnS、Ti(C_xN_y)-Ca-Ce-O-S 等均归类为 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物,图 3 为观察到的典型夹杂物的情况。

图 4 为样品中各类夹杂物的整体数量密度。RH 精炼过程中,夹杂物的数量密度逐步降低,从进 RH 时的 140 个/mm² 降低至软吹后的 85 个/mm²。主要原因是氧化夹杂物的减少,说明精炼过程中钢液中的氧化夹杂物通过与渣相或炉衬反应等方式被去除。真空脱气后,钢中数量密度最大的夹杂物类型为 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物。同时,加 Ce 后钢中出现一定数量含 Ce 的氧化物和氧硫化物,部分氧化夹杂物会参与 Ce 的反应。由图 4 可知,四个取样位置的样品中不含 Ce 的硫化物的数量密度较小,且基本不变。同时,Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物的数量密度变化较小。

2.2.2 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物

图 5 为样品中 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物的数量密度和平均尺寸。其中,图 5(a) 为 RH 精炼过程各样品中 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物的数量密度,图 5(b) 为样品中 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物的平均尺寸。由图 5(a) 可知,各样品的 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物中均为纯 Ti(C_xN_y) 占最大比例,Ti(C_xN_y) 也易与硫化物形成复合夹杂物。加 Ce 后,各样品中出现了少量 Ti-Ce 复合夹杂物。夹杂物的数量密度从进 RH 时 65 个/mm²,随 RH 进行增加至加 Ce 后的 76 个/mm²,而软吹后又降至 63 个/mm²。图 5(b) 中夹杂物平均尺寸从进 RH 时的 1.07 μm,在加 Ce 前增加为 1.13 μm,加 Ce 后平均尺寸到最大值,为 1.27 μm,软吹后降低至 1.16 μm,波动幅度 0.2 μm。

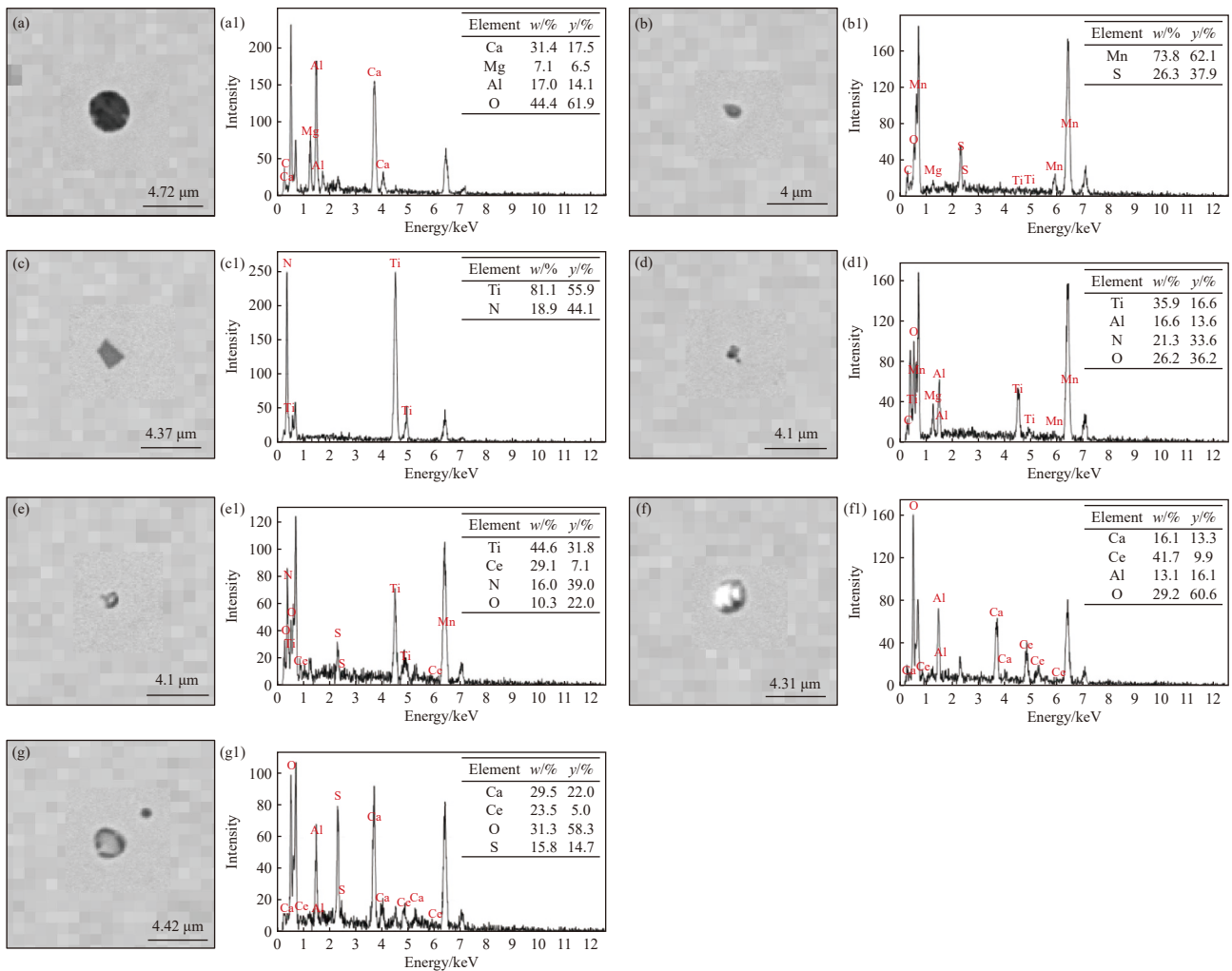


图 3 样品中各类典型的夹杂物形貌及元素含量

Fig. 3 The morphology and elemental content of various typical inclusions in the sample

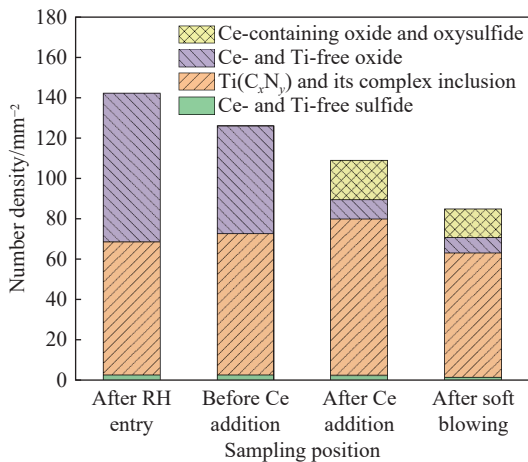


图 4 夹杂物整体数量密度

Fig. 4 Overall number density of inclusions

图 6 为样品中各种含 Ti 夹杂物的尺寸。由图 6 知, RH 精炼过程中样品中的各种含 Ti 夹杂物

的尺寸主要分布的情况相近, 加 Ce 后 Ce 的夹杂物会与 Ti 的夹杂物生成一定量的复合夹杂物。各样品中含 Ti 夹杂物的尺寸主要分布在 1.3 ~ 1.7 μm。

结合图 5 和图 6 中夹杂物的数量密度和尺寸来看, RH 精炼过程对 Ti(C_xN_y) 及其复合夹杂物的影响不大。

2.2.3 Ce 对 RH 过程中氧化物和硫化物演变的影响

图 7 为样品中氧化物、硫化物和含 Ce 夹杂物的数量密度。随着 RH 工艺的进行, 样品中氧化物的数量密度逐渐减少。各样品中硫化物的数量密度均约为 3 个/mm²。加 Ce 后部分氧化夹杂物转化为 Ce 的氧化物, 样品中也会生成少量 Ce 的氧硫化物。

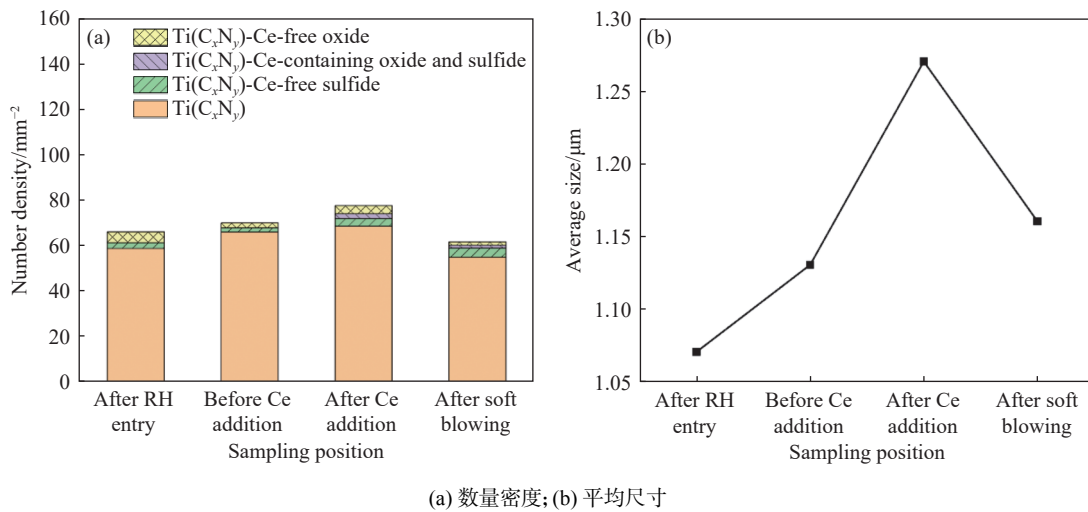


图 5 RH 过程样中 $Ti(C_xN_y)$ 及其夹杂物的数量密度和平均尺寸
 Fig. 5 Number density and average size of $Ti(C_xN_y)$ and its complex inclusions in RH process samples

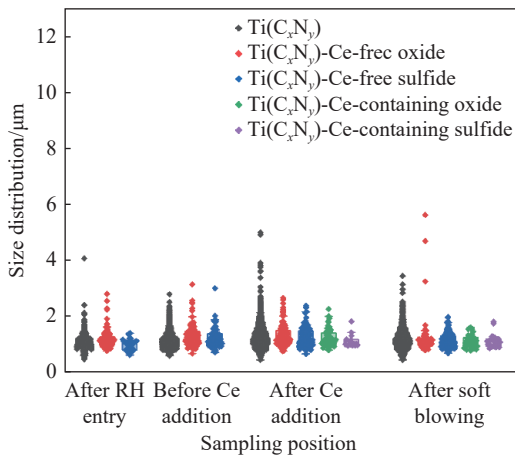


图 6 样品中含 Ti 夹杂物的尺寸分布
 Fig. 6 Size distribution of Ti-containing inclusions in the samples

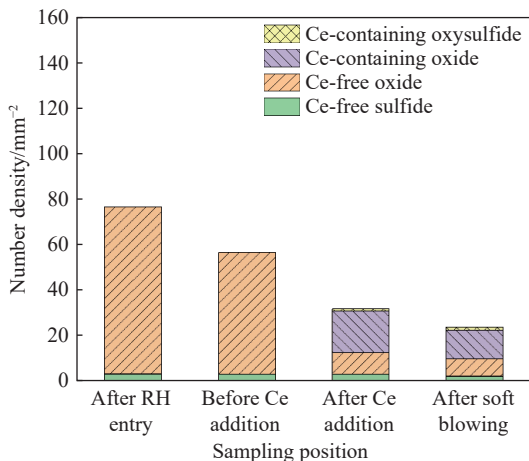


图 7 样品中氧化物、硫化物和含 Ce 夹杂物的数量密度
 Fig. 7 Number density of oxides, sulfides, and Ce-containing inclusions in the samples

为探究样品中氧化物成分的变化,将样品中氧化夹杂物的成分情况汇于图 8。其中,图 8(a)~(d)

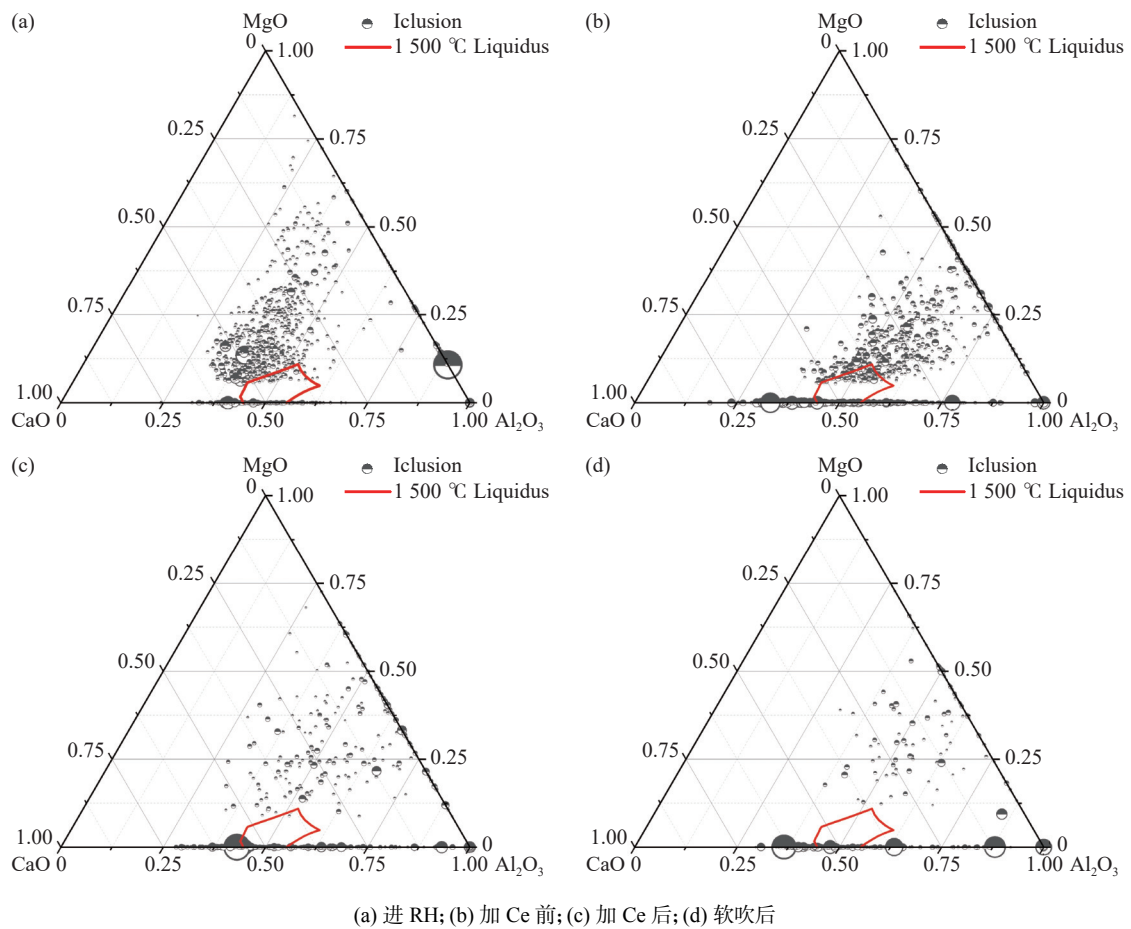
分别为进 RH 至软吹后样品中氧化物的 CaO-MgO- Al_2O_3 三元相图。随着 RH 工艺的进行,高熔点的氧化夹杂物减少。图 8(c) 加 Ce 后相对于图 8(b) 加 Ce 前氧化夹杂物有明显减少。

如图 9 为样品中含 Ce 夹杂物的成分分布。其中,图 9(a) 和图 9(b) 分别为加 Ce 后和软吹后样品中含 Ce 夹杂物的成分 Ce-O-S 和 Ce-O-Al 三元相图。软吹后,含 Ce 夹杂物中 Ce 的氧化物略减少。

图 10 为各取样位置中含 Ce 与不含 Ce 夹杂物的尺寸分布。图 10 中,各样品中的夹杂物主要分布在 1~2 μm 。未加 Ce 的情况下,样品中的最大尺寸为进 RH 的 23 μm 。向钢液中加入 Ce 后,样品中夹杂物的尺寸最大约为 16 μm ,夹杂物最大尺寸降低约 7 μm 。同时,加 Ce 后样品中生成的含 Ce 夹杂物的最大尺寸约为 7 μm 。

2.2.4 NM400TiCe 成分体系下的夹杂物生成热力学

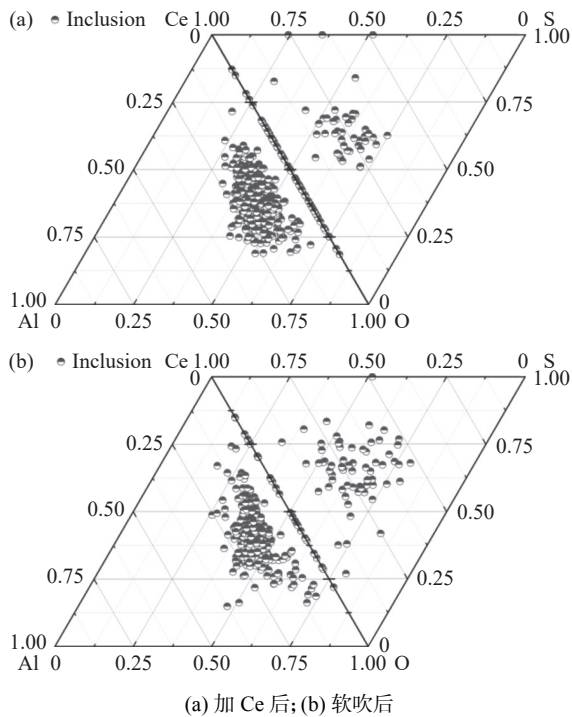
根据表 1 中钢液出站后测得的成分,以及图 2 中软吹后样品中的氧氮水平,利用 Factsage 8.2 进行 NM400TiCe 成分体系下的夹杂物生成热力学计算,选用数据库有 FactPS、FToxid、FTstel 和自建数据库 RECE,计算结果如图 11 所示。在图 11 中, $Ti(C_xN_y)$ 的生成量最大,在钢中的质量分数约为 0.043%,这与图 4 各样品中 $Ti(C_xN_y)$ 夹杂物数量密度最大的试验结果相符。热力学计算结果显示,在 NM400TiCe 的成分体系内, $Ti(C_xN_y)$ 在温度低于钢的液相线温度 1 474 $^{\circ}C$ 后开始析出,而 RH 处理过程中钢液的温度约为 1 600 $^{\circ}C$,高于 $Ti(C_xN_y)$ 的析出温度,所以 RH 精炼过程对 $Ti(C_xN_y)$ 无明显影响。



(a) 进 RH; (b) 加 Ce 前; (c) 加 Ce 后; (d) 软吹后

图 8 样品中氧化夹杂物的三元相图

Fig. 8 Ternary phase diagrams of oxide inclusions in the samples



(a) 加 Ce 后; (b) 软吹后

图 9 样品中含 Ce 夹杂物的成分分布

Fig. 9 Composition distribution of Ce-containing inclusions in the samples

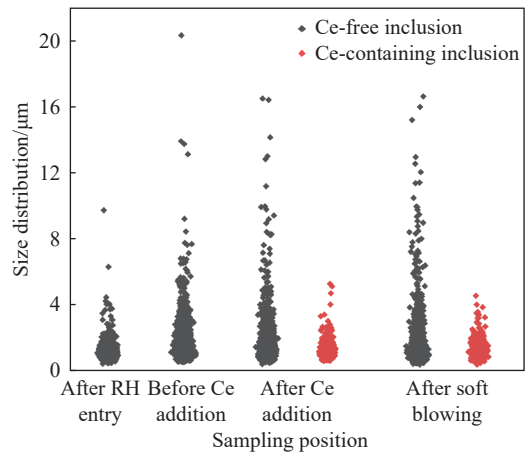


图 10 样品中含 Ce 与不含 Ce 夹杂物的尺寸分布对比
Fig. 10 Size distribution comparison between Ce-containing and Ce-free inclusions in the samples

MnS 的析出含量较低, 且析出温度约为 1 250 °C, 也低于 RH 精炼过程中钢液的温度, 对应了试验结果中硫化物的数量密度低且各样品中硫化物数量密度基本不变的结果。热力学计算结果中 Al_2O_3 、 $CeAlO_3$ 在 1 600 °C 下已经析出, 所以 RH 能够对钢中的氧化物产生明显的影响。同时发现虽然

Ce 含量仅为 8×10^{-6} , 理论上 Ce_2O_2S 在 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 以下就能够生成, 试验中也观察到了这类夹杂物, 为确认 Ce 对其生成情况的作用, 进一步计算了 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同 Ce 含量对夹杂物生成的影响, 由图 12 可见, 当 Ce 含量在 $2 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 范围内, 该钢种在低温时 Ce_2O_2S 都会存在。

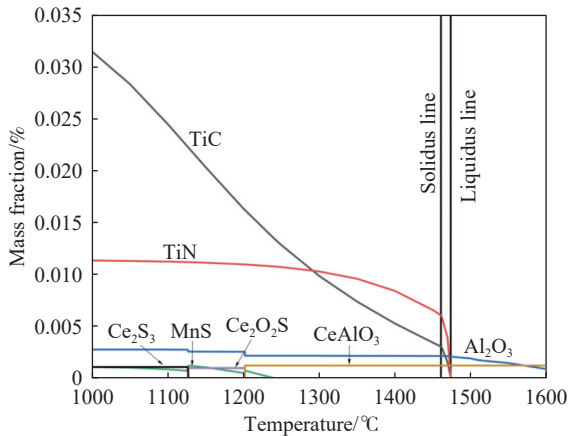


图 11 热力学计算夹杂物随温度的演变

Fig. 11 Thermodynamic calculation on the evolution of inclusions with temperature

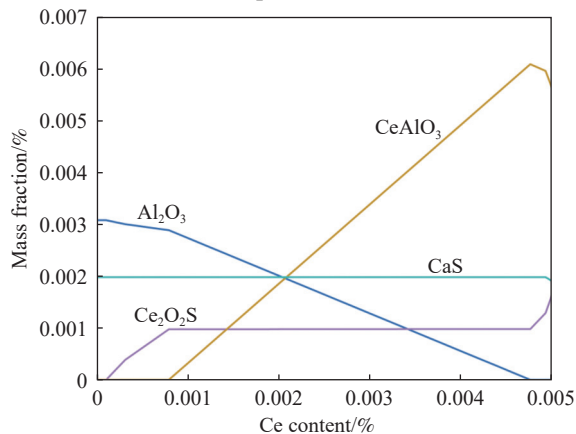


图 12 热力学计算 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 下不同 Ce 含量对夹杂物生成的影响
Fig. 12 Thermodynamic calculation on the effect of different Ce contents on inclusion formation at $1000\text{ }^\circ\text{C}$

3 结论

1) 在 NM400TiCe 的成分体系中, 夹杂物主要有 Ca-Mg-Al-O 系氧化物、硫化物 MnS 和 CaS、含 Ce 的氧化物和氧硫化物与 $Ti(C_xN_y)$ 及其复合夹杂物四大类。

2) RH 具有脱氧、脱氮和去除夹杂物的功能, 可以有效提高 NM400TiCe 的洁净度。使进 RH 时钢液中 O 含量 20.7×10^{-6} 、N 含量 46.5×10^{-6} 脱至出站前 O 含量 14.5×10^{-6} 、N 含量 25.9×10^{-6} ; RH 真空处理对夹杂物有显著的去除效果, 可将夹杂物的最大尺寸从 $23\text{ }\mu\text{m}$ 逐步降低至 $16\text{ }\mu\text{m}$, 将氧化物数量密度从 $73\text{ 个}/\text{mm}^2$ 降低至 $28\text{ 个}/\text{mm}^2$, 软吹虽然对夹杂物的尺寸和成分没有明显影响, 但仍可将氧化物的数量密度从 $28\text{ 个}/\text{mm}^2$ 继续降低至 $20\text{ 个}/\text{mm}^2$; RH 对 $Ti(C_xN_y)$ 及其复合夹杂物的数量密度和尺寸分布影响不大, 原因是 RH 精炼过程中钢液的温度约为 $1600\text{ }^\circ\text{C}$, 高于 $Ti(C_xN_y)$ 的析出温度 $1474\text{ }^\circ\text{C}$, RH 过程无法对这类夹杂物产生影响。

3) 微量 Ce 能够起到降低 NM400TiCe 钢中夹杂物尺寸和改性夹杂物成分的作用。微量 Ce 与钢液反应会生成自身细小的 Ce-Al-O 类和 Ce-O-S 类稀土夹杂物, 同时稀土夹杂物能够为后续生成的 $Ti(C_xN_y)$ 、氧化物和硫化物提供弥散的形核质点, 形成的含 Ce 复合夹杂物的尺寸依然很小, 加 Ce 后与软吹后样品中含 Ce 夹杂物的最大尺寸约为 $5\text{ }\mu\text{m}$, 而不含 Ce 的夹杂物最大尺寸约为 $16\text{ }\mu\text{m}$, 加 Ce 有利于降低夹杂物的整体尺寸; 微量 Ce 处理后含 Ce 夹杂物的数量密度约占整体夹杂物的 16%。

参考文献

- [1] WEI S Z, XU L J. Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 54(4): 523-538.
(魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展[J]. 金属学报, 2020, 54(4): 523-538.)
- [2] WANG Y F, QIU C M, LU C H, *et al.* Effect of conventional cold rolling on wear-resisting performance of high manganese steel[J]. Advanced Materials Research, 2011, 284-286: 1493-1497.
- [3] LI S S, CHEN X J. Work hardening and wearability of superhigh manganese steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(4): 38-41.
(李树索, 陈希杰. 超高锰钢加工硬化及耐磨性的研究[J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(4): 38-41.)
- [4] SHI D K, LIU J H. Deformation and work hardening mechanisms in high-manganese steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1989, 25(4): 282-285.

- (石德珂, 刘军海. 高锰钢的变形与加工硬化[J]. 金属学报, 1989, 25(4): 282-285.)
- [5] RICLIN V G. Critical review of constitution of carbon-chromium-iron and carbon-iron-manganese systems[J]. International Metals Reviews, 1984, 29: 299-327.
- [6] LI W. Production and market of wear resistant irons and steels parts[J]. Foundry, 2004, 53(12): 958-962.
(李卫. 耐磨钢铁件的市场与生产[J]. 铸造, 2004, 53(12): 958-962.)
- [7] DENG Y R, DENG X T, WU H, *et al.* Effect of Ti content on phase transformation behavior and strength-toughness of wear resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(3): 323-331.
(邓玉荣, 邓湘涛, 吴昊, 等. Ti 含量对耐磨钢相变行为及强韧性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(3): 323-331.)
- [8] HUANG X X, SHEN Y H, JIN S Y, *et al.* High-temperature wear performance and mechanism of NM400/NM500 mining machinery steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(6): 797-808.
(黄夏旭, 申炎华, 靳舜尧, 等. NM400/NM500 级矿山机械用钢的高温磨损性能及机理[J]. 工程科学学报, 2019, 41(6): 797-808.)
- [9] WANG S, HU F, LI D F, *et al.* Effect of TiN on toughness of high-strength wear-resistant steel and its mechanism analysis[J]. China Metallurgy, 2021, 31(7): 38-45.
(王帅, 胡锋, 李德发, 等. TiN 对高强度耐磨钢韧性的影响及其机制分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(7): 38-45.)
- [10] WANG M D, LIU D Q, WU H B. Influence of quenching on microstructure and mechanical properties of low alloy wear-resistant steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(8): 156-161.
(王明娣, 刘东权, 武会宾. 淬火工艺对低合金耐磨钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 156-161.)
- [11] QIN Y M, LI Y G, ZHANG M, *et al.* Effect of refined cementite on nanostructured bainitic bearing steel[J]. China Metallurgy, 2020, 30(9): 104-109.
(秦羽满, 李艳国, 张明, 等. 细化渗碳体对高碳纳米贝氏体轴承钢的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 104-109.)
- [12] DENG X T. Microstructure and mechanical property control and wear mechanism study for low-alloy abrasion resistant steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
(邓想涛. 低合金耐磨钢组织性能控制及磨损机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.)
- [13] WU H B, DING C, YUAN X M. Effects of finish cooling temperature on microstructure and properties of reinforced wear resistant steel with rare earth TiC particle[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2024, 50(4): 72-78.
(武会宾, 丁超, 袁晓鸣. 终冷温度对稀土 TiC 颗粒增强耐磨钢组织和性能的影响[J]. 包钢科技, 2024, 50(4): 72-78.)
- [14] HUANG L. Preparation and wear mechanism of micron-sized and nano-sized TiC particles reinforced low alloy abrasion resistant steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
(黄龙. 微米/纳米 TiC 粒子增强型低合金耐磨钢制备与磨损机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.)
- [15] LI B, WU Z W, CHEN W X, *et al.* Effect of deoxidizer on non-metallic inclusions in M50NiL steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 177-182.
(李兵, 吴志伟, 陈文雄, 等. 脱氧剂对 M50NiL 钢中非金属夹杂物的影响[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 177-182.)
- [16] MENG Y X, TIAN J Z, ZHANG Y L, *et al.* The effect of mixed rare earth additions on inclusions in 18MnCr petroleum casing steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(3): 140-148.
(孟宇翔, 田嘉治, 张玉玲, 等. 混合稀土对 18MnCr 石油套管钢中夹杂物的影响[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(3): 140-148.)
- [17] ZHUO C, LIU R, ZHAO Z R, *et al.* Effect of rare earth cerium content on manganese sulfide in U75V heavy rail steel[J]. Metals, 2022, 12: 1012.
- [18] WU H J, XIAO T L, XU Y T, *et al.* Effect of rare earth cerium on inclusions and contact fatigue properties in high-carbon chromium bearing steel[J]. Metall Mater Trans B, 2026, 57: 65-74.
- [19] FU J, ZHU J, DI L, *et al.* Study on the precipitation behavior of TiN in the microalloyed steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(8): 801-804.
(傅杰, 朱剑, 迪林, 等. 微合金钢中 TiN 的析出规律研究[J]. 金属学报, 2000, 36(8): 801-804.)
- [20] WANG J, PENG J, ZHANG F, *et al.* Thermodynamic calculation and experimental analysis on effects of rare earth Ce on TiN phase precipitation in 20CrMnTi steel[J]. Iron and Steel, 2024, 59(4): 66-73,84.
(王健, 彭军, 张芳, 等. 稀土铈对 20CrMnTi 钢中 TiN 相析出热力学计算及分析[J]. 钢铁, 2024, 59(4): 66-73,84.)
- [21] XIE Y M, SONG M M, ZHU H Y, *et al.* Effect of the addition orders of La, Ti and Mg on inclusions in steel AH36[J]. Metall Mater Trans B, 2025, 56: 738-752.
- [22] NIU Z P, YU Y C, ZHENG Z, *et al.* Effect of Ce microalloying on inclusion and solidification structure of low alloy wear-resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2025, 37(7): 919-928.
(牛泽鹏, 于彦冲, 郑仲, 等. Ce 微合金化对低合金耐磨钢夹杂物与凝固组织的影响[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(7): 919-928.)