

NM450 耐磨钢稀土处理工业实践

周剑波¹, 张波^{2*}, 靳建锋³, 闫强军³, 王新华¹

1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 110083;

2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819

3. 南京钢铁股份有限公司 板材事业部, 南京 210035

Industrial practice of RE-treatment for NM450 wear-resisting steel

Zhou Jianbo¹, Zhang Bo^{2*}, Jin Jianfeng³, Yan Qiangjun³, Wang Xinhua¹

1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Plate BU, Nanjing Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, China

1. 前言

低合金耐磨钢由于合金含量低、综合力学性能好、生产成本相对较低等优点, 被广泛应用于冶金、建材、煤炭、化工等领域的机械设备制造^[1-2]。随着机械设备服役的环境越来越恶劣、极寒地区资源的勘探和开发对设备要求越来越苛刻, 以及装备制造业向规模大型化、运转高效化、轻量化等方向的发展^[3], 对低合金耐磨钢在不同服役条件下的综合性能提出了更高的要求。

稀土作为冶金工业中重要的添加剂, 是高品质钢铁材料的重要微合金元素。研究表明, 稀土在钢中可以起到净化钢液、变质夹杂和微合金化的作用^[4-7]。在钢中添加稀土, 有望通过稀土变质夹杂物, 细化组织, 改善晶界等作用, 提高低合金耐磨钢的低温冲击韧性和耐磨性能。为此, 本文在国内某钢厂进行了低合金耐磨钢 NM450 的稀土处理工业试验研究, 系统研究了稀土处理对于钢中夹杂物赋存特征和耐磨钢力学性能的影响。研究结果可为高品质钢稀土处理工艺技术研发提供借鉴。

2. 实验方法

NM450 耐磨钢稀土处理的炼钢工艺流程为: 铁水预处理→转炉→LF→RH→连铸。稀土合金在 RH 真空冶炼过程中通过高位料仓加入, 分别在 LF 进站、LF 出站、RH 出站、中间包等位置取钢液提桶样进行夹杂物统计分析。在提桶样上切取夹杂物分析试样, 经磨抛后采用 Phenom Desktop SEM 扫描电镜观察分析夹杂物的形貌及成分, 并采用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行统计分析。铸坯经轧制和热处理后得到产品钢板, 依据国标 GB-T2975-1998, 采用 ZBC2502-D 美特斯摆锤式冲击试验机测试冲击性能, 测试温度为-20℃。依据 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》, 使用 CMT5105 美特斯电子万能试验机测试实验钢拉伸性能。

3. 结果与分析

3.1. 钢中夹杂物的统计分析

在 LF 进站出站试样中, 主要存在的夹杂物类型为 Al_2O_3 、 MgAl_2O_4 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 等夹杂物。在进行 Ce 处理后的 RH 出站试样中, 典型夹杂物为如图 1(a)所示的 $\text{CaO-Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物和图 1(b)所示的 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系夹杂物为近似球状, 表面较为粗糙, 尺寸多 $>5\mu\text{m}$; $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物均为高熔点物相 (CeAlO_3 熔点: 2030°C), 其在钢液中呈现出明显的长方体形貌, 表面较光滑, 尺寸多分布在 $2\sim 5\mu\text{m}$ 之间。

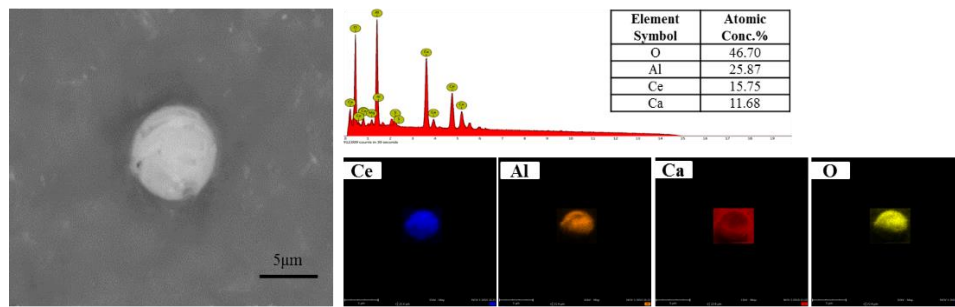
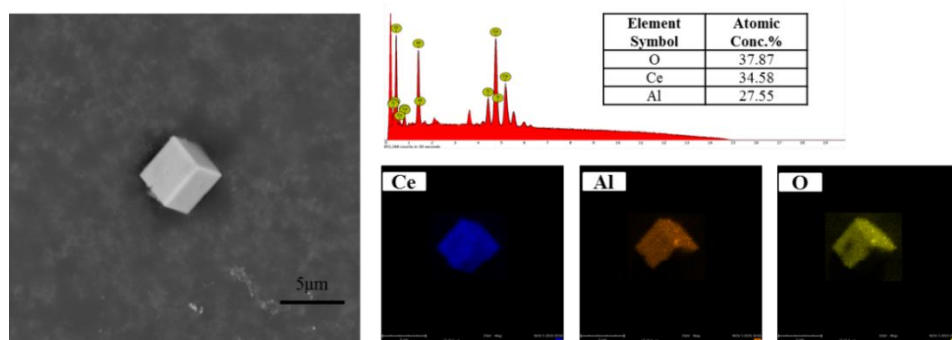
(a) $\text{CaO-Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物(b) $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物

图 1 RH 出站试样中典型夹杂物的三维形貌及能谱分析结果

为了直观显示炼钢工艺流程中夹杂物的成分变化,将夹杂物的能谱分析结果转化为相应的氧化物摩尔分数,并将其标记在 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 三元相图中,其结果如图 2 所示,其中黑色实线代表该三元体系中的液相区(分别为 1550°C 、 1600°C),不同颜色圆点分别代表不同工序中典型夹杂物成分的检测值。可知在 LF 进站试样中,主要为高熔点、不规则形状的 Al_2O_3 及 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物;随着 LF 精炼的进行,夹杂物中 Al_2O_3 、 MgO 含量不断降低,转变为近似球状 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系夹杂物,并且部分夹杂物成分已经进入液相区;经过 Ce 处理后, RH 出站试样中出现了熔点较低、近似球状的 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系夹杂物,夹杂物中未检测到 MgO , CaO 含量逐渐降低; RH 出站与中间包夹杂物中存在大量高熔点、规则块状的 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物。

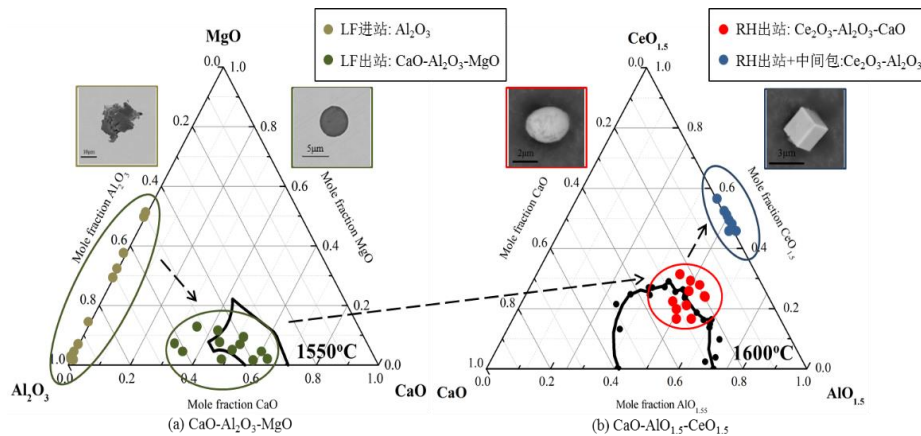
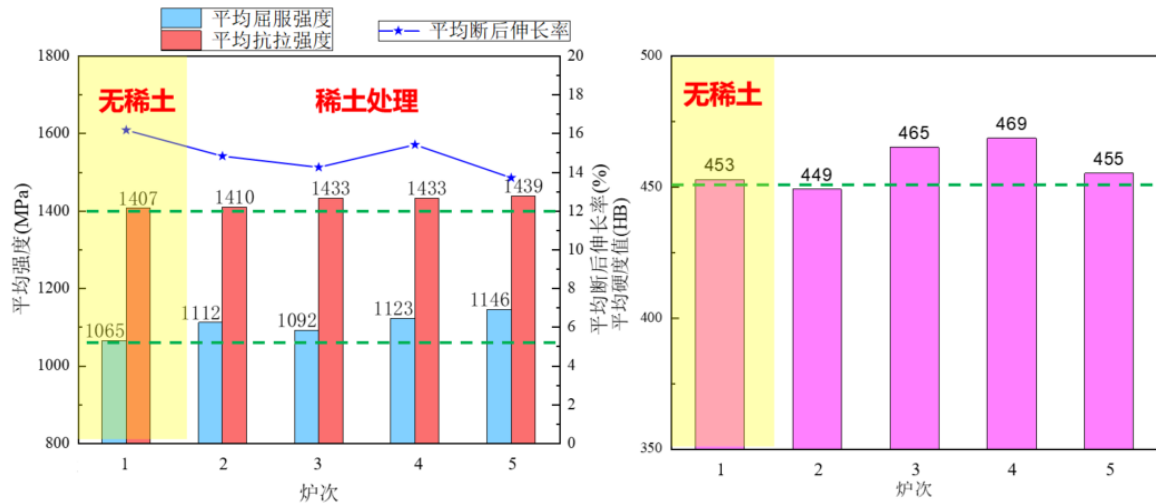


图 2 NM450 钢稀土处理过程中夹杂物的成分变化

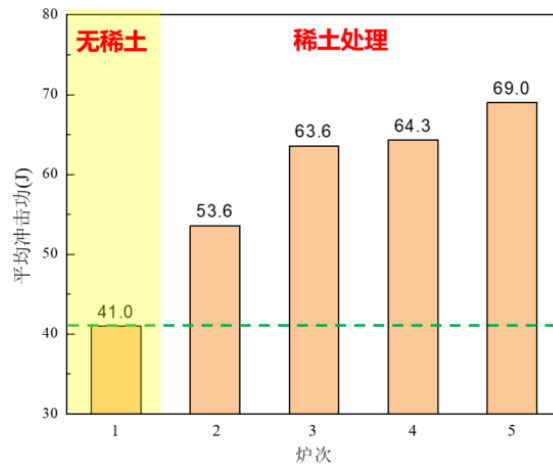
3.2. 稀土处理对钢板力学性能的影响

图 3 所示为 NM450 钢板的力学性能测试结果。由图 3（a）可以看出，稀土处理 NM450 钢的强度、塑性指标和未添加稀土炉次基本相当。由图 3（b）可以看出，较未添加稀土炉次的硬度，添加稀土的炉次的硬度值得到提高，由 453HB 提升至 460HB（平均值）。由图 3（c）可以看出，随着稀土含量的增加，NM450 钢的冲击功提高，当 $w(\text{Ce})$ 为 0.0023% 时，NM450 钢的低温冲击功最大，较未加稀土炉次的冲击功，由 41J 提高至 63J，升幅达 54%。可见，稀土处理 NM450 可在不降低耐磨钢的强度和塑性的条件下，有效改善其低温冲击韧性和硬度。



(a) 不同炉次钢的屈服强度、抗拉强度及断后延伸率

(b) 不同炉次钢的硬度值



(c) 不同炉次钢的冲击功

图 3 NM450 钢力学性能测试结果

4. 结论

(1) 在 RH 真空冶炼过程中通过高位料仓加入稀土合金的方式进行了 NM450 耐磨钢的稀土处理，将高硬度、易团簇且形状不规则的 Al_2O_3 及 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物变质为 $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。

(2) 对 NM450 钢进行稀土处理，可在保证其强度和塑性基础上提高硬度，并明显改善低温冲击韧性。 -20°C 冲击功由 41J 提高至 63J，硬度由 453HB 提升至 460HB。

致谢

感谢辽宁省自然科学基金（2022-YQ-09）的支持。

参考文献

- [1] DENG X, WANG Z, HAN Y, *et al.* Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Medium Carbon Low Alloy Martensitic Abrasion Resistant Steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2014 21(1), 98-103.
- [2] SONG H, LI C, LAN L, *et al.* Impact Toughness of an NM400 Wear-Resistant Steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(8), 72-77.
- [3] Yao Z S, Liu M, Hu H J, *et al.* Microstructure and Wear Properties of a Bainite/Martensite Multi-phase Wear Resistant Steel [J]. *ISIJ International*, 2021, 61(1): 434-441.
- [4] Xiangjun Liu, Jichun Yang, Fang Zhang, Xiaoyang Fu, Hongwei Li, Changqiao Yang, Experimental and DFT study on cerium inclusions in clean steels [J], *Journal of Rare Earths*, 2021, 39(4): 477-486.
- [5] Chao Liu, Reynier I. Revilla, Zhiyong Liu, Dawei Zhang, Xiaogang Li, Herman Terryn, Effect of inclusions modified by rare earth elements (Ce, La) on localized marine corrosion in Q460NH weathering steel [J], *Corrosion Science*, 2017, 129: 82-90.
- [6] YUE, L., WANG, L., & HAN, J. Effects of rare earth on inclusions and corrosion resistance of 10PCuRE weathering steel [J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(6), 952-956.
- [7] LIU, Y., WANG, L., CHOU, K. Effect of cerium on the cleanliness of spring steel used in fastener of high-speed railway [J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, 32(8), 759-766.