稀土节镍不锈钢洁净化关键技术

任英[1]，张继[1]，张立峰[2*]

（1. 北京科技大学冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 北方工业大学机械与材料工程学院，北京 10144）

摘　要：在实验室条件下研究了铈对低镍不锈钢中夹杂物的影响规律。随铈含量增加，钢中 T.O 含量降低，钢中 T.S 含量降低，钢中氧化物夹杂的演变路径为：Si-Mn-(Al)-O→Ce-Si-Mn-O→Ce-O-S。通过实验室实验研究了铈对低镍不锈钢凝固组织及加热过程奥氏体晶粒长大过程的影响。通过腐蚀失重实验、电化学实验等方法研究了铈对低镍不锈钢抗腐蚀性能的影响。通过高温拉伸试验、室温冲击和拉伸试验研究了铈对低镍不锈钢力学性能的影响。

关键词： 低镍不锈钢　稀土　夹杂物

Key technology of Clean Production of Rare Earth-containing Low-nickel Stainless Steels

Ren Ying[1], Ji Zhang[1], Zhang Lifeng[2*]

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract: Laboratory experiments were performed to study the influence of cerium on the inclusion in the low-nickle stainless steel. When the total cerium content in the steel increased, the total oxygen content in the steel decreased, and the total sulfur content in the steel decreased f. The transformation path of inclusions was: Si-Mn-(Al)-O→Ce-Si-Mn-O-S→Ce-O-S. Effects of cerium on the solidification structure and the growth of austenite grains during heating was studied through laboratory experiments. The effect of cerium on the corrosion resistance of the low-nickel stainless steel was studied through corrosion weight loss experiments, electrochemical experiments. The effect of cerium on mechanical properties of the low-nickel stainless steel was studied through tensile test at high temperature, impact test and tensile test at room temperature.

Key words: Low-nickel stainless steels, Rare earth, Inclusions

1 前言

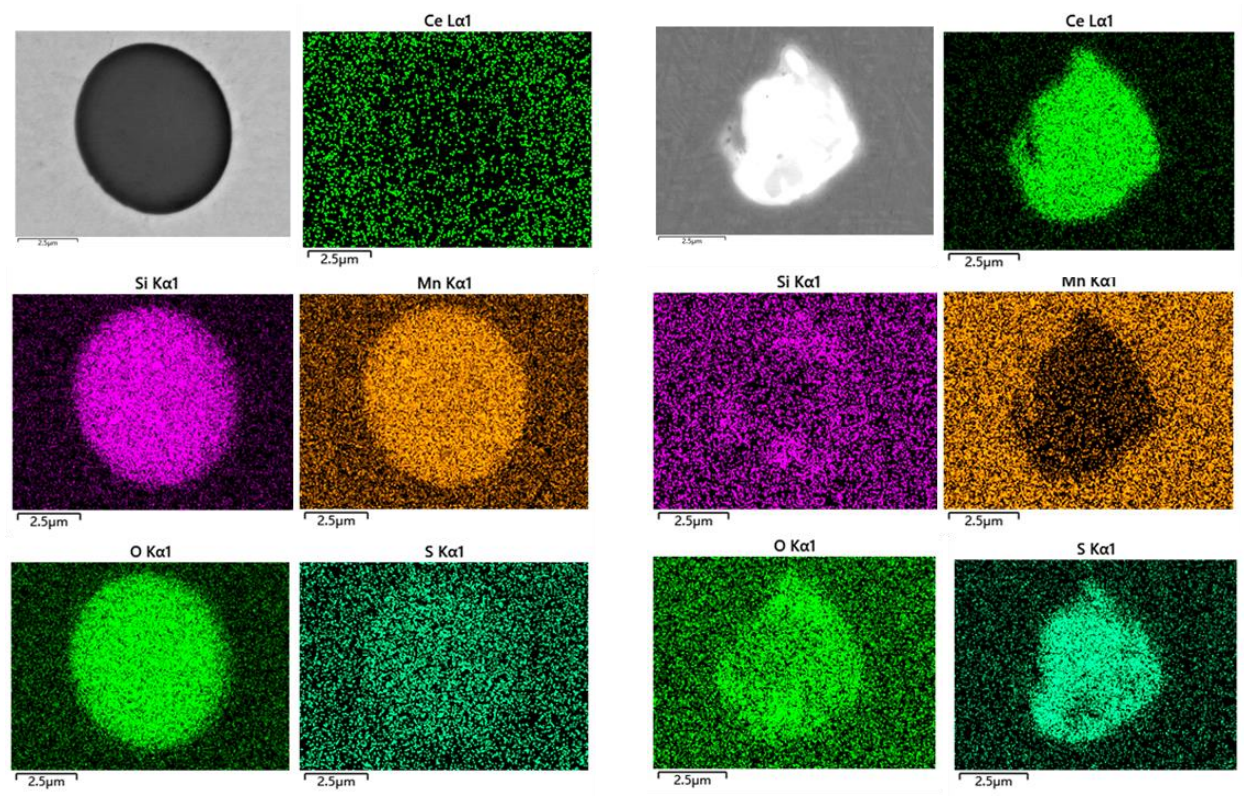
不锈钢是指在大气、水、酸等溶液或其他腐蚀介质中具有一定化学稳定性的钢，是一种最常见的耐腐蚀材料，并且兼具良好的力学性能和加工性能，在航空航天、海洋开发、医疗器械、建筑装修、家用电器等领域都有广泛的应用[1, 2]。作为 300 系不锈钢的替代品，200 系不锈钢在生产成本方面具有很大优势，在家用电器、餐饮厨具、卫生设备、交通运输及工业设备和部件方面有很广泛的应用。200 系不锈钢中铬、镍含量较低，需要添加足够的锰和氮元素来稳定钢的奥氏体组织。由于 200 系不锈钢中铬和镍含量较低，其抗腐蚀性能相对较差，且钢中较高含量的锰元素会导致 MnS 夹杂物生成，妨碍钝化膜的形成，进而降低钢的抗腐蚀性能[3]。此外，200 系不锈钢化学成分中较高含量的锰，也导致了钢材力学性能方面的强度高但

塑性不足的特点。因此，有必要针对 200 系低镍不锈钢开展进一步研究，在其价格优势的基础上提升其产品性能。

土元素在钢中应用的研究十分广泛，稀土元素对钢液脱氧、脱硫、钢中夹杂物改性、钢组织及性能方面均有重要影响[4-8]。国内外学者对稀土元素在不锈钢中的应用进行了大量研究[9-14]，但是，已有研究大多集中于 300 系和 400 系不锈钢，有关稀土元素在 200 系低镍不锈钢中的应用研究较少。因此，有必要全面、系统地研究稀土元素在 200 系低镍不锈钢中的作用效果及影响机理，充分发挥我国丰富的稀土资源优势，为进一步开发性能优良的 200 系低镍不锈钢提供理论依据。

2 稀土对节镍不锈钢中夹杂物的影响

低镍不锈钢中添加稀土铈可显著提升钢的洁净度，随铈含量增加，钢中 T.O 含量降低，钢中 T.S 含量降低，钢中氧化物夹杂的演变路径为：Si-Mn-(Al)-O→Ce-Si-Mn-O→Ce-O-S。在热处理过程中，不含铈不锈钢中 Si-Mn(-Al)-O 夹杂物转变为 Mn-Al(-Si)-O 夹杂物，加热过程中有 MnS 夹杂析出，导致夹杂物中 MnS 含量增加。



（a）无稀土处理　　（b）有稀土处理

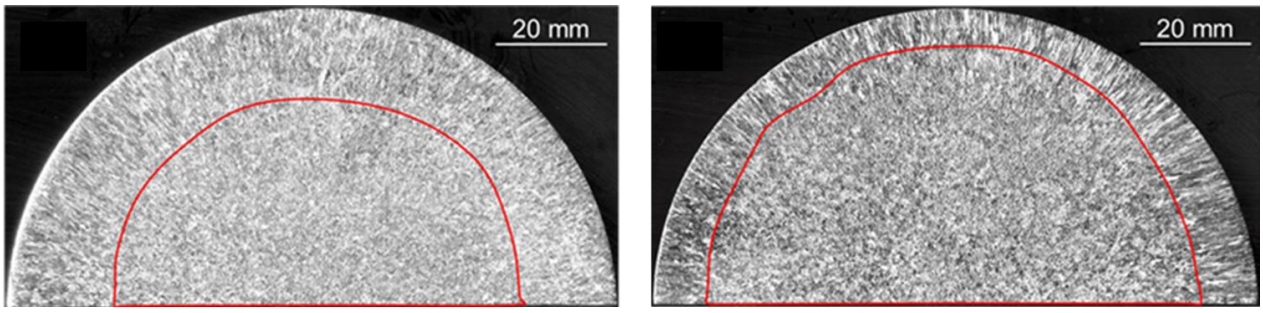
图 1 稀土处理对节镍不锈钢中夹杂物的改性

Figure 1 Modification of inclusions in low-nickel stainless steels by rare earth treatment

3 稀土对节镍不锈钢微观组织的影响

将无稀土处理和有稀土处理熔炼得到的节镍不锈钢铸锭，从铸锭底部切取厚度为 40 mm 的圆片，并沿直径将圆片切开，半圆片用于纵剖面凝固组织分析。对用于铸锭凝固组织分析的横剖面和纵剖面进行打磨和抛光，对不锈钢的凝固组织进行侵蚀，侵蚀溶液为体积比为 1:1:1 的盐酸、硝酸和水的溶液，侵蚀时间为 5 min，最后得到铸锭的凝固组织照片。图 2[15]为不同铈含量的不锈钢铸锭的凝固组织照片。对钢锭凝固组

织的柱状晶区和等轴晶区进行划分，无稀土处理时，横剖面的等轴晶率较低，柱状晶率较大。稀土处理后，铸锭横剖面和纵剖面的凝固组织柱状晶长度逐渐减小，等轴晶区逐渐扩大。由此可知，稀土处理可以显著增加节镍不锈钢钢锭凝固组织的等轴晶率。



（a）无稀土　　（b）含稀土

图 2 无稀土处理和有稀土处理节镍不锈钢凝固组织形貌[15]

Figure 2 Photographs of the solidification structure of ingots of low-nickel stainless steels without and with rare earth treatment

4 结论

（1）随铈含量增加，钢中 T.O 含量降低，钢中 T.S 含量降低，钢中氧化物夹杂的演变路径为：Si-Mn-(Al)-O→Ce-Si-Mn-O→Ce-O-S。

（2）稀土处理可以显著增加节镍不锈钢钢锭凝固组织的等轴晶率。无稀土处理时，横剖面的等轴晶率较低，柱状晶率较大。稀土处理后，铸锭横剖面和纵剖面的凝固组织柱状晶长度逐渐减小，等轴晶区逐渐扩大。

（3）通过高温拉伸试验、室温冲击和拉伸试验研究了铈对低镍不锈钢力学性能的影响。稀土处理可以实现节镍不锈钢冲击韧性和抗拉强度等力学性能的提升。

致谢

本文作者感谢国家自然科学基金（资助号：U22A20171）、北方工业大学、北京科技大学、燕山大学高钢中心（HSC）、先进制造用高品质钢铁材料开发与智能制造北京市和河北省国际科技合作基地（ICSM）的资助。

参考文献

[1] 张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京：冶金工业出版社, 2019.

[2] 张立峰. 钢中非金属夹杂物：工业实践[M]. 北京：冶金工业出版社, 2019.

[3] 任英，张立峰，杨文. 不锈钢中非金属夹杂物[M]. 北京：冶金工业出版社, 2020.

[4] A. Vahed, D. A. R. Kay. Thermodynamics of rare earths in steelmaking[J]. Metallurgical Transactions B, 1976, 7(3): 375-383.

[5] Qiang Ren, Lifeng Zhang. Effect of cerium content on inclusions in an ultra-low-carbon aluminum-killed steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(2): 589-600.

[6] Cheng Su, Guanghong Feng, Jianguo Zhi, Bo Zhao, Wei Wu. The effect of rare earth cerium on microstructure and properties of low alloy wear-resistant steel[J]. Metals, 2022, 12(8): 1358-1371.

[7] Lingqiang Zhong, Zhigang Wang, Rongchun Chen, Jianguo He. Effects of yttrium on the microstructure and properties of

20MnSi steel[J]. Steel Research International, 2021, 92(11): 2100198.

[8] Xiaojun Xi, Shaoying Li, Shufeng Yang, Jingshe Li, Mengjing Zhao. Effect of adding yttrium on precipitation behaviors of inclusions in E690 ultra high strength offshore platform steel[J]. High Temperature Materials and Processes, 2020, 39(1): 510-519.

[9] Changgang Wang, Rongyao Ma, Yangtao Zhou, Yang Liu, Enobong Felix Daniel, Xiaofang Li, Pei Wang, Junhua Dong, Wei Ke. Effects of rare earth modifying inclusions on the pitting corrosion of 13Cr4Ni martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 93(1): 232-243.

[10] Yi Wang, Changrong Li, Linzhu Wang, Xingqiang Xiong, Lu Chen. Effect of yttrium treatment on alumina inclusions in high carbon steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 29(4): 655-664.

[11] Wan Zheng, Xueqiang Yan, Shan Xiong, Guowei Wang, Guangqiang Li. Pitting corrosion behavior of cerium treated HSLA steel induced by sulfide inclusions in 3.5 wt% NaCl solution[J]. Journal of Rare Earths, 2021, 39(3): 348-356.

[12] Diqiang Luo, Min Liu, Xin Jiang, Yinhong Yu, Zhenming Zhang, Xiaoming Feng, Chaobin Lai. Effect of yttrium-based rare earth on inclusions and cryogenic temperature impact properties of offshore engineering steel[J]. Crystals, 2022, 12(3): 305-320.

[13] Shucai Zhang, Jiangtao Yu, Huabing Li, Zhouhua Jiang, Yifeng Geng, Hao Feng, Binbin Zhang, Hongchun Zhu. Refinement mechanism of cerium addition on solidification structure and sigma phase of super austenitic stainless steel S32654[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2022, 102(1): 105-114.

[14] Wenjian Zhou, Jian Zhu, Zhihao Zhang. Austenite grain growth behaviors of La-microalloyed H13 steel and its effect on mechanical properties[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(9): 4662-4673.

[15] Ji Zhang, Ying Ren, Riqing Huang, Zaijing Huang, Rong Huang, Lifeng Zhang. Effects of cerium addition on inclusions and solidification structure of a low-nickel Si-Mn-killed stainless steel[J]. Steel Research International, 2023: (Under consideration).