



## 稀土含量对 HRB400 钢组织与耐蚀性能的影响

陈浩<sup>1</sup>, 孙益斌<sup>2</sup>, 谢庆敏<sup>1</sup>, 刘小龙<sup>1</sup>, 张存帅<sup>2</sup>, 彭志贤<sup>2</sup>, 程朝阳<sup>2</sup>, 刘静<sup>2,3</sup>  
(1 广东金晟兰冶金科技有限公司, 云浮 527329; 2 武汉科技大学材料学部, 武汉 430081; 3 深圳大学材料学院, 深圳 518071)

**摘要:**通过添加微量镧(La)和铈(Ce)稀土元素,制备了成本低、耐蚀性优异的钢筋。利用电化学工作站、X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)等手段,研究了稀土添加量对耐蚀钢的组织与耐蚀性能的影响。结果表明,稀土元素细化了晶粒尺寸,促使长条状、形状不规则的MnS和 $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 复合型夹杂物转变为尺寸更小、形态更规则的球形夹杂物 $(Ce, La)_2O_3S$ 。添加稀土元素后,耐蚀钢的腐蚀电位发生正向移动,降低了腐蚀电流。此外,稀土元素可以使腐蚀产物中不稳定的 $\gamma-FeOOH$ 含量减少,形成更多稳定的 $\alpha-FeOOH$ ,增强了锈层的稳定性、致密性和附着能力。随着稀土含量的增加,耐蚀钢的耐蚀性能呈现出逐渐提高的趋势,其中,0.01%稀土添加量的耐蚀钢表现出最佳的耐蚀性能。

**关键词:**稀土合金化; 耐蚀钢; 夹杂物改性; 腐蚀性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00280 中图分类号: TG174.2+2

## Effect of Rare Earth Content on Microstructure and Corrosion Resistance of HRB400 Steel

Chen Hao<sup>1</sup>, Sun Yibin<sup>2</sup>, Xie Qingmin<sup>1</sup>, Liu Xiaolong<sup>1</sup>, Zhang Cunshuai<sup>2</sup>,  
Peng Zhixian<sup>2</sup>, Cheng Zhaoyang<sup>2</sup>, Liu Jing<sup>2,3</sup>

(1 Guangdong Jinshenglan Metallurgical Technology Co., Ltd., Yunfu 527329, China; 2 Faculty of Materials Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3 School of Materials Science, Shenzhen University, Shenzhen 518071, China)

**Abstract:** The steel rebar with low cost and excellent corrosion resistance were prepared by adding trace lanthanum (La) and cerium (Ce) rare earth elements. The effect of rare earth addition on the microstructure and corrosion resistance of corrosion resistant steel was studied by means of electrochemical workstation, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The results show that rare earth elements refine the grain size and promote the transformation of MnS and  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  composite inclusions with long and irregular shape into spherical inclusions  $(Ce, La)_2O_3S$  with smaller size and more regular shape. Following the addition of rare earth elements, the corrosion potential of the steel shifts positively, while the corrosion current is reduced. Furthermore, rare earth elements contribute to the reduction of unstable  $\gamma-FeOOH$  in the corrosion products, promoting the formation of more stable  $\alpha-FeOOH$ , which enhances the stability, compactness, and adhesion of the rust layer. As the rare earth content increases, the corrosion resistance of the steel gradually improves, with the optimal performance observed in the steel containing 0.01% rare earth elements.

**Key Words:** Rare Earth Alloying; Corrosion Resistant Steel; Inclusion Modification; Corrosive Properties

钢铁材料应用广泛,但普遍面临严重的腐蚀问题<sup>[1-4]</sup>。我国每年因材料腐蚀造成的经济损失约占总GDP的3.4%~4.0%<sup>[5]</sup>,特别是在基础设施领域,长期暴露于大气中的钢材腐蚀尤为严重<sup>[6-9]</sup>。目前,通过涂覆防腐涂层是防止腐蚀的一种常见方法<sup>[10]</sup>。然而,这种方法存在环境污染、成本较高等问题。另一方面,是钢材本身微观组织的优化,通过添加合金元素来提高钢筋的耐腐蚀性能<sup>[11-13]</sup>。这种方法

可以显著提高钢材的使用寿命,同时,减少对环境的污染。而稀土元素在众多合金中被称为“工业维生素”和“新材料之母”<sup>[14]</sup>。在钢中加入稀土可以起到改善凝固组织、细化组织、改变夹杂物形态和分布等作用<sup>[15-16]</sup>,从而显著提高钢的韧性、耐腐蚀性能、抗疲劳性能、耐热性能等<sup>[17-19]</sup>。

研究表明<sup>[20-23]</sup>,稀土元素如镧(La)、铈(Ce)等能够通过改变钢中夹杂物的性质、细化晶粒尺寸以及

基金项目: 国家自然科学基金(52231003, 52201084)、湖北省重大项目(JD)(2023BAA019)

作者简介: 陈浩(1986—),男,本科,高级工程师; E-mail: 3679495008@qq.com; 收稿日期: 2024-12-23

通信作者: 刘小龙(1972—),男,本科,高级工程师; E-mail: 3866983430@qq.com

影响锈层的稳定性等方式提升钢材的耐腐蚀性能。Huang<sup>[24]</sup>等研究发现,未添加稀土元素的HRB400E钢夹杂物主要为MnS和MnO-SiO<sub>2</sub>,长度3~4 μm,为块状或长条状且分布不均;而添加稀土元素后,夹杂物变为(Ce,La)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnS和(Ce,La)<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S+MnS复合夹杂物,尺寸减至1~2 μm,形状主要为球形或椭圆形。刘锦文<sup>[25]</sup>等研究发现在稀土含量为0.08%时,稀土能够充分发挥其细化组织、变质夹杂物和增强锈层保护能力的作用,而过量的稀土则可能导致夹杂物的聚集和粗化,反而对材料的耐腐蚀性能产生不利影响。由此可见,对于稀土元素在钢材中的最佳添加量尚未达成共识。不同研究者的实验结果存在差异,有些研究认为微量稀土即可显著提升耐蚀性,而有的研究认为需要添加一定量的稀土才能达到理想效果<sup>[26]</sup>。

本研究旨在添加不同含量稀土元素优化钢的耐腐蚀性,研究了稀土对组织、夹杂物形态及耐蚀性能的影响规律及机理,明确了较佳的稀土元素添加量,制备了成本低、耐蚀性优异的钢筋。

### 1 实验材料与方法

通过50 kg真空感应炉,在实验室冶炼了稀土含量(质量分数,下同)为0%、0.003%、0.010%的耐蚀钢筋,其轧制工艺参数见表1,化学成分见表2,3个成分试样分别标记为0RE,0.003RE,0.01RE。RE中La和Ce的比例为3:1。

表1 HRB400钢轧制过程工艺参数

Table 1 Process parameters of HRB400 steel rolling process

工艺	参数
保温温度/°C	1 050
保温时间/min	40
开轧温度/°C	1 050
终轧温度/°C	950 ~ 990
冷床入口温度/°C	950
冷却方式	空冷

金相试样经过机械研磨、抛光后,用4%的硝酸酒精溶液腐蚀,用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和能量色散X射线光谱(EDS)分析组织和夹杂物结构与形态变化。在HV-1000B型维氏硬度机上测试不同稀土含量实验钢的维氏硬度,测试时载荷为0.3 Kgf,保压10 s。室温下使用拉伸试验机测量试样的力学性能,拉伸试样尺寸如图1所示,拉伸方向与轧制方向垂直。

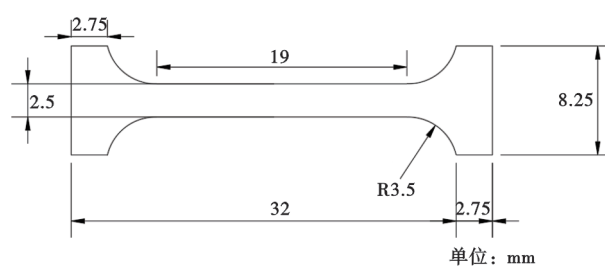


图1 拉伸试样尺寸图

Fig. 1 Size diagram of tensile specimen

为了研究不同稀土含量实验钢的耐腐蚀性能,在3.5%(质量分数)NaCl溶液,室温25 °C,将实验钢浸泡了168 h,采用失重法计算了实验钢的腐蚀速率,并且对腐蚀产物形貌和物相分别用扫描电镜(SEM)和能谱仪(XRD)进行分析、表征。电化学试样的尺寸为10 mm×10 mm,将导线焊在试样表面,样品冷镶并使其能够导电,试样在砂纸上研磨抛光后,用科斯特电化学工作站测定了实验钢的交流阻抗和极化曲线,测试采用传统的三电极测试体系,饱和甘汞电极作参比电极,铂片为辅助电极,不同稀土含量的实验钢作为工作电极。扫描区间为:-0.25 V~0.25 V(相对开路),扫描速度为1 mV/s。阻抗测试的赫兹范围为10<sup>5</sup>~10<sup>-2</sup> Hz,交流振幅为10 mv。

表2 实验钢的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of experimental steel %

实验钢	C	Si	Mn	Cu	Cr	V	RE
0RE	0.11	0.38	1.29	0.28	0.92	0.022	-
0.003RE	0.10	0.39	1.30	0.28	0.89	0.023	0.003
0.010RE	0.11	0.42	1.29	0.29	0.90	0.027	0.010

## 2 结果与讨论

### 2.1 稀土含量对耐蚀钢显微组织的影响

图2为不同稀土含量下三种实验钢的金相组织图。由图2可知,随着稀土含量增加,组织结构没有明显的变化,主要为铁素体和珠光体,其中珠光体沿着轧制方向呈现一定的带状分布<sup>[27]</sup>。利用ImageJ和截线法统计了15张200倍的实验钢的晶粒大小,发现在0RE的实验钢中,平均晶粒尺寸为19.9 μm,在添加0.003%的稀土后,平均晶粒尺寸为17.5 μm,添加0.010%后,尺寸进一步下降,为15.5 μm。

### 2.2 稀土含量对耐蚀钢夹杂物形态的影响

为了解释不同稀土含量对实验钢腐蚀性能的

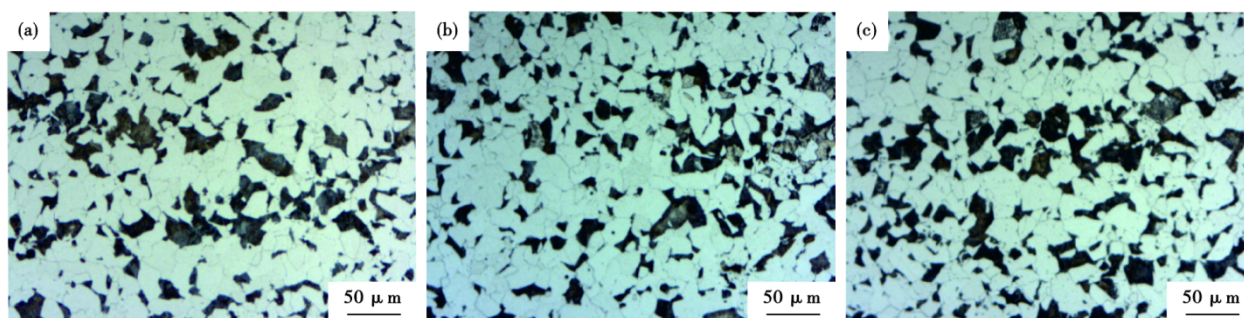


图2 不同稀土含量下实验钢的组织: (a)0RE, (b)0.003RE, (c)0.010RE

Fig. 2 Microstructure of experimental steel with different rare earth contents: (a) 0RE, (b) 0.003RE, (c) 0.010RE

作用机制,对三种实验钢进行了夹杂物分析,结果如图3所示。EDS结果显示,在没有添加稀土元素时,耐蚀钢中主要为MnS和 $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 复合型的夹杂物,形状多为棒状,而在添加0.003%的稀土元素后,钢中的夹杂物主要是由 $(Ce, La)_2O_3 + MnS$ 型和 $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 组成的复合夹杂物,形状大多不规则;当加入0.010%稀土后,部分Ce和La会将原有的 $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 和MnS夹杂物改性为高熔点的 $(Ce, La)_2O_3$ 型夹杂物,其形状多为球型。进一步的对夹杂物进行统计,其结果如图4所示。由图4可见,三种不同稀土含量的夹杂物尺寸主要集中在 $1 \sim 3 \mu m$ ,但是在不添加稀土元素时,数量较为稀少,而在添加稀土元素后,夹杂物尺寸在 $1 \sim 3 \mu m$ 时,夹杂物的数量有一个显著的上升。夹杂物尺寸 $>5 \mu m$ 的范围内,稀土元素的添加大大减少了大尺寸夹杂物的出现。

### 2.3 稀土含量对耐蚀钢力学性能的影响

对耐蚀钢在室温下进行了力学性能测试,其测试结果如图5示。未添加稀土的耐蚀钢其抗拉强度为652 MPa,而屈服强度为482 MPa。当添加0.003%的稀土后,钢的抗拉强度提升了35 MPa,屈服强度提升了12 MPa,表现出明显的增强效果。然而,当稀土含量增加到0.010%时,抗拉强度为693 Pa,而屈服强度为524 MPa。添加稀土后,晶粒有一定程度的细化,从而引起了强度的上升。

在伸长率方面,随着稀土含量的增加,三种钢的伸长率都呈现出下降的趋势。这表明稀土的添加虽然可以提升钢的强度,但可能会牺牲一部分材料的塑性<sup>[28]</sup>。一方面,稀土元素的加入改变了钢中的夹杂物形态和分布,使得夹杂物对位错滑移的阻碍作用增强,从而降低了钢的塑性变形能力<sup>[29-30]</sup>。另一方面,稀土元素的加入还可能促进了某些脆性相的形成,如稀土氧化物等,这些相在拉伸过程中

容易开裂或断裂,导致钢的塑性下降<sup>[21]</sup>。对于硬度的贡献,数据表明在一定范围内稀土含量的变化对耐蚀钢筋的硬度有一定的上升。

### 2.4 稀土含量对耐蚀钢电化学性能的影响

比较不同稀土含量耐蚀钢的电化学腐蚀试验结果及电极表面的等效电路示意图,如图6所示,可以明显看出,三种实验钢表现出相似的阻抗谱,阻抗特性均展现为容抗。相较于不添加稀土时,0.003RE的圆弧半径有一定的增大,而在0.010RE时,圆弧半径进一步增大,说明耐蚀钢表面阻碍电子交换能力随稀土含量增加逐渐增大,耐蚀性逐渐增强。等效电路图中, $R_s$ 为腐蚀溶液电阻,CPE为常相角元件(CPE-T反映了电极表面的电荷传输能力等特性,而CPE-P主要用于衡量CPE元件与理想电容或其他元件的相似程度,体现了电极表面的非理想特性或弥散效应), $R_p$ 为极化电阻,各参数的拟合结果见表3所示<sup>[14]</sup>。由于腐蚀介质相同,所以溶液的电阻变化不大,但极化电阻 $R_p$ 随着稀土元素含量的提高而增大。当稀土含量达到0.010%时,极化电阻达到最大值,为 $1.102R_p/(\Omega \cdot cm^2)$ 。与未添加稀土的耐蚀钢相比,极化电阻 $R_p$ 增加了12.4%。这意味着金属表面的反应动力学减慢,即腐蚀速率降低<sup>[14]</sup>。

在分析图7所示的极化曲线时,随稀土元素添加量增加,极化曲线逐渐向左上方移动。这表明,随稀土含量增加,耐蚀钢的自腐蚀电位呈现出增大的趋势,而自腐蚀电流则相应减小。导致这一现象出现的原因是由于不同相存在显著的电位差,并在腐蚀介质中构成微电偶腐蚀电池<sup>[14, 18, 31-32]</sup>。同时,氯离子( $Cl^-$ )的强渗透性及其在金属表面的吸附能力,能够形成强大的电场,加速阳极反应过程,从而导致夹杂物从基体上剥离。然而,当添加了质量分数为0.003%的稀土元素后,由于稀土元素与氧、硫的

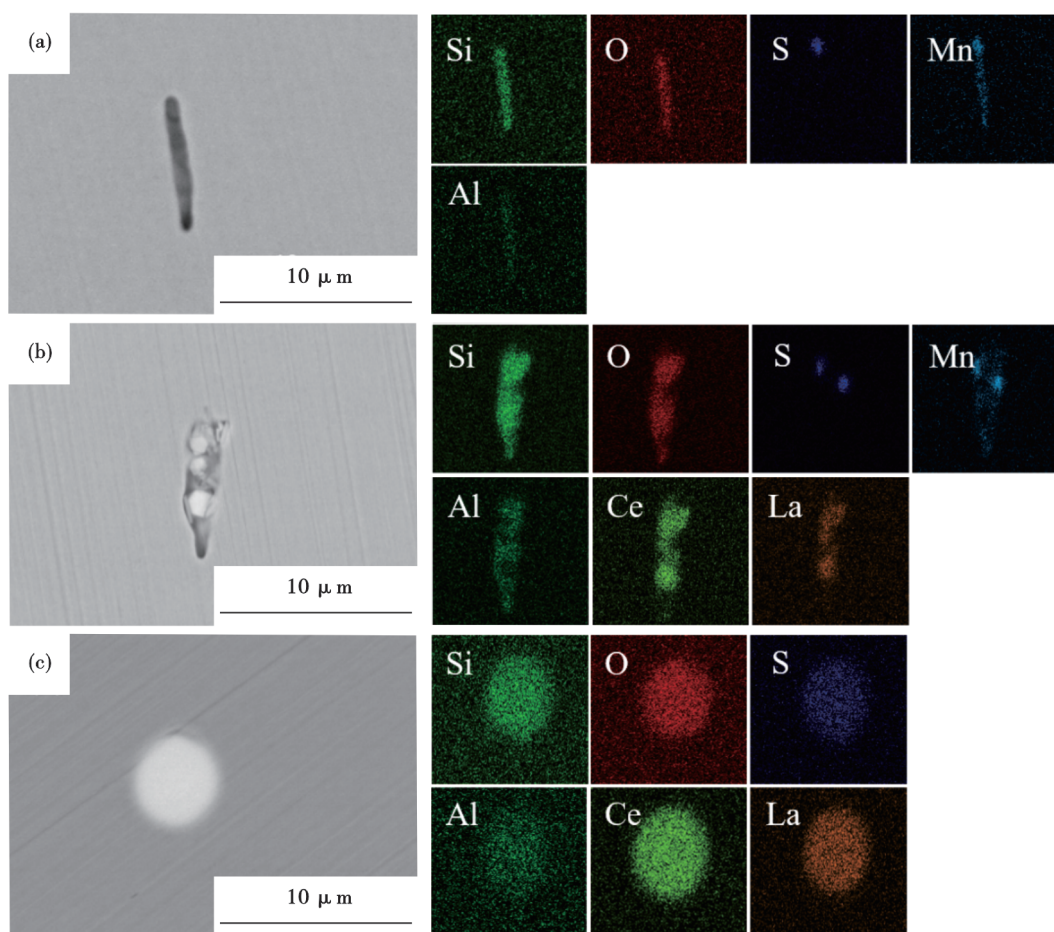


图 3 不同稀土含量下实验钢夹杂物的结构及EDS: (a)0RE, (b)0.003RE, (c)0.010RE

Fig. 3 Structure and EDS of inclusions in experimental steel with different rare earth contents : (a) 0RE, (b) 0.003RE, (c) 0.01RE

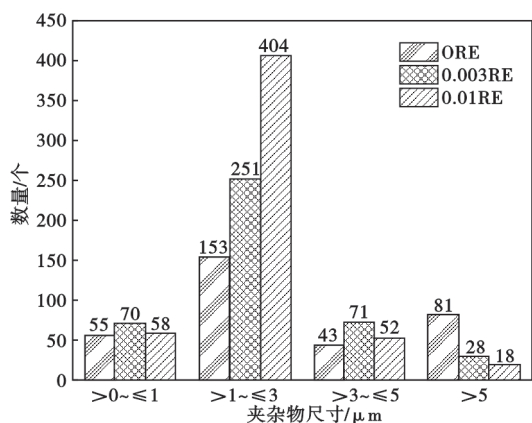


图 4 不同稀土含量下实验钢夹杂物统计

Fig. 4 Inclusion statistics of experimental steel with different rare earth content

亲和力较大,促使钢中的夹杂物转化为稀土氧化物,其形态变为不规则状,大尺寸夹杂物数量略有下降,从而减小了与基体的接触面积,进而缩小了腐蚀反应的活性区域<sup>[14]</sup>,减少了点蚀发生的概率,

有效地抑制了腐蚀过程<sup>[33-34]</sup>。当稀土含量继续增加到0.01%时,夹杂物的形态从不规则状转变为球状,大尺寸夹杂物数量进一步减少,从而进一步提升了材料的耐蚀性。这一现象充分说明了稀土元素在改善耐蚀钢的耐腐蚀性能方面发挥了积极作用,能够有效提高钢材的抗腐蚀能力。

所以在钢中添加稀土元素,可以有效地变质MnS等夹杂物,进而减弱微区电化学腐蚀活动<sup>[35]</sup>。在相同的环境条件下,MnS夹杂物的自然腐蚀电位相对较低,因此,更容易受到腐蚀,从而成为点蚀的源头。相比之下,稀土夹杂物展现出较高的自腐蚀电位,这一特性有助于缩小其与钢基体之间的电极电位差<sup>[36]</sup>。这种电位差的减小对于抑制夹杂物诱导点蚀的能力是有益的。进一步地,考虑到稀土氧化物和硫化物具备阳极性,它们能够作为电偶腐蚀微电池中的阳极<sup>[37]</sup>,并优先发生溶解,从而在一定程度上保护钢基体免受腐蚀侵害<sup>[38-39]</sup>。

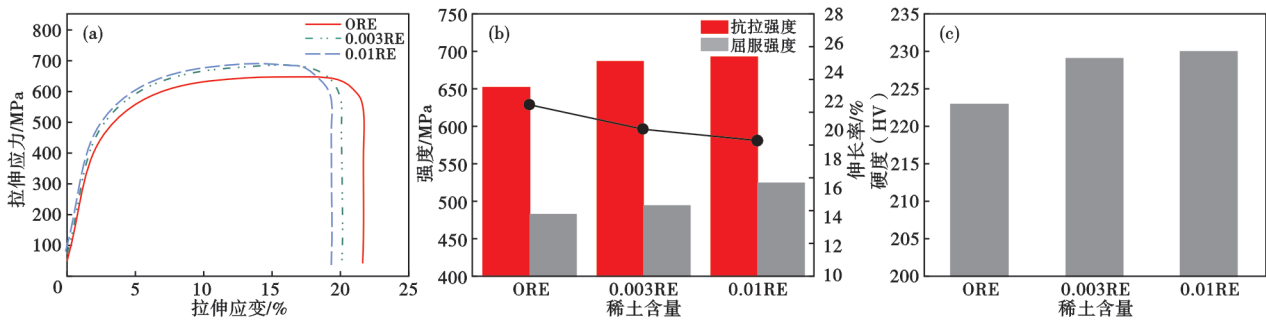


图5 不同稀土含量下实验钢的力学性能:(a)应力-应变曲线,(b)强度与伸长率,(c)硬度

Fig. 5 Mechanical properties of experimental steel with different rare earth contents: (a) stress-strain curve, (b) strength and elongation, (c) hardness

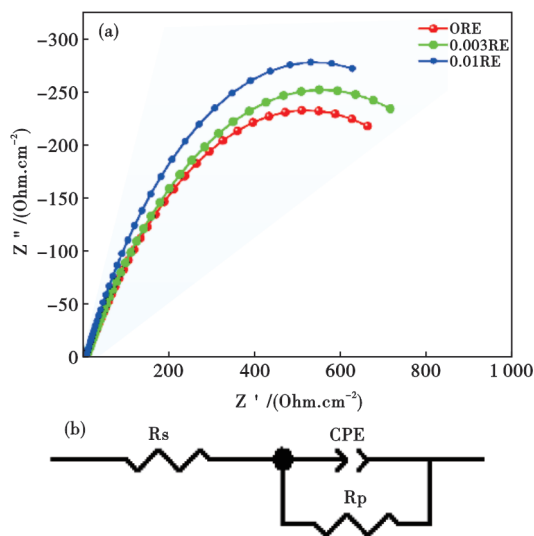


图6 三种实验钢在3.5%(质量分数)NaCl溶液下的Nyquist图及等效电路:(a) Nyquist图,(b) 等效电路

Fig. 6 Nyquist diagram and equivalent circuit of three experimental steels in 3.5% (wt) NaCl solution: (a) Nyquist diagram, (b) equivalent circuit

表3 等效电路中各参数的拟合结果

Table 3 Fitting results of the parameters in the equivalent circuit

实验钢	Rs/ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE-T/ ( $\text{F} \cdot \text{cm}^2$ )	CPE-P/ ( $\text{F} \cdot \text{cm}^2$ )	Rp/ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
ORE	6.00	0.0018	0.542	980
0.003RE	5.87	0.0027	0.548	1030
0.010RE	5.59	0.0025	0.585	1102

通过对极化曲线进行拟合分析,获得了腐蚀电位和腐蚀电流密度的数值,见表4。从这些数据中可以观察到一个明显的趋势:在3.5%NaCl溶液中,无论是未添加稀土的耐蚀钢还是添加了稀土元素的试验钢,均未表现出明显的钝化区。然而,与未添加稀土的耐蚀钢相比,添加了稀土元素的试验钢在腐蚀电位上呈现出正向移动的趋势,并且腐蚀电

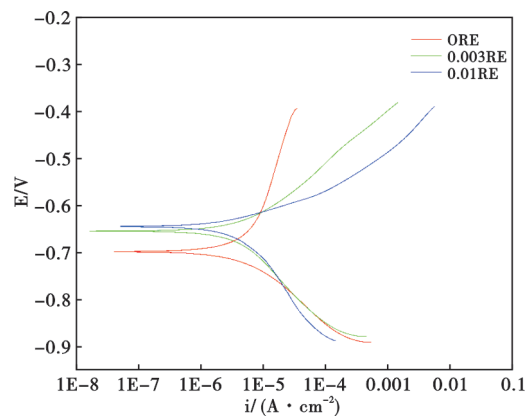


图7 不同稀土含量实验钢的极化曲线

Fig. 7 Polarization curves of experimental steels with different rare earth content

流也有所减小。研究结果显示,添加稀土元素显著增强了钢的耐腐蚀性,进而有效减缓了腐蚀进程。当稀土质量分数达到0.01%时,腐蚀电位最为正向,为-0.644 V,同时腐蚀电流密度也达到最小值,仅为 $4.727 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。此时,钢的耐蚀性能达到最佳状态。

表4 耐蚀钢筋的极化曲线拟合结果

Table 4 Polarization curve fitting results of corrosion-resistant steel rebar

实验钢	E <sub>corr</sub> /V	I <sub>corr</sub> /( $10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
ORE	-0.698	7.612
0.003RE	-0.654	4.937
0.010RE	-0.644	4.727

## 2.5 稀土含量对耐蚀钢腐蚀产物的影响

为了分析不同稀土含量的实验钢腐蚀产物膜的相组成,进行了XRD测试以确定其相成分,如图8所示。在不同稀土含量的实验钢中,腐蚀产物的成分构成基本相似,其主要包含 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、

$\gamma$ -FeOOH、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>等相。研究表明<sup>[40]</sup>,随着腐蚀周期的延长,钢表面会形成保护性的锈层,使电位分布变得相对均匀,进而降低腐蚀速率。而随着稀土元素的加入,能在一定条件下使 $\gamma$ -FeOOH转变为 $\alpha$ -FeOOH<sup>[14,41-42]</sup>。

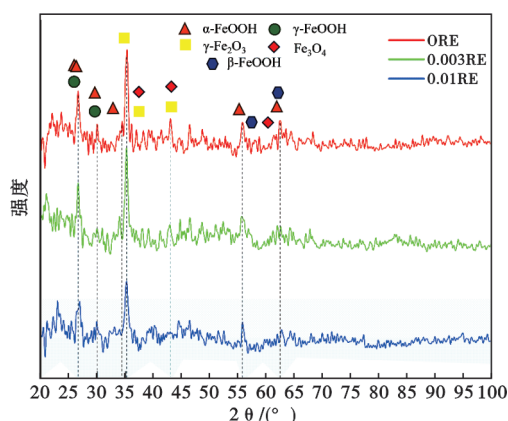


图8 不同稀土含量的耐蚀钢电化学腐蚀产物XRD

Fig. 8 Electrochemical corrosion product XRD of corrosion resistant steel with different rare earth contents

图9展示了不同稀土含量的耐蚀钢浸泡后的腐蚀产物形貌变化。未添加稀土时,腐蚀产物主要为多孔疏松的 $\gamma$ -FeOOH,其稳定性较差,当稀土含量增加至0.003%时,腐蚀产物的形态变为颗粒状,主要为 $\alpha$ -FeOOH,周围仍有部分 $\gamma$ -FeOOH存在。与未添加稀土的情况相比,加入0.003%稀土后的腐蚀产物更加致密,表面裂纹减少。进一步观察发现,当稀土质量分数达到0.010%时,表面裂纹最为细小,腐蚀产物呈细小颗粒状,周围未见明显的褶皱状 $\gamma$ -FeOOH。可见稀土元素添加能够优化腐蚀产物的结构,减少电化学活性物质 $\gamma$ -FeOOH的生成,促进锈层中的颗粒聚集和融合形成致密的 $\alpha$ -FeOOH<sup>[14]</sup>,这一转变显著提升了钢材料的耐腐蚀

性能。 $\alpha$ -FeOOH展现出较高的稳定性和较低的活性<sup>[14]</sup>,其结构致密性能够有效阻碍电荷的传递,表现出绝缘体的特性,从而抑制了电化学反应的发生,对试验钢的保护效果显著。

图10展示了不同稀土含量下耐蚀钢浸泡后锈层截面的形貌。在不含有稀土的实验钢中,“锈层-基体”界面呈现出较大的不平整性,这表明基体表面不同区域的腐蚀程度存在显著差异。此外,这些锈层中还存在较多的裂纹遍布在基体与锈层界面。虽然在图10(b)中添加0.003%的实验钢锈层平均厚度下降,但锈层与基体的附着情况更为良好,且“锈层-基体”界面相对平整。在图11(c)中,“锈层-基体”界面更为平整,且锈层平均厚度达到69  $\mu\text{m}$ 。这些现象说明稀土元素的加入有助于提高锈层的致密性和均匀性,减少缺陷的产生,有利于提高钢的耐腐蚀性能。

此外,通过对三种耐蚀钢进行浸泡实验进一步验证其耐蚀性情况,其实验结果如图11。当稀土添加量达到0.003%时,尽管腐蚀速率有所下降,但与未添加稀土的情况相比,变化并不显著。然而,当稀土含量增加到0.010%后,腐蚀速率相较于未添加稀土的情况有了显著的下降。这进一步证实了在一定范围内,增加稀土含量能够有效提升耐蚀钢的腐蚀性能。

### 3 结论

通过添加微量稀土元素,制备了成本低、耐蚀性优异的钢筋合金化的耐蚀钢,探讨了稀土元素对耐蚀钢筋的组织、夹杂物及耐蚀性能的影响规律及机理。

1) 稀土元素的加入能够细化晶粒,对于改善钢中夹杂物的形态具有显著效果。具体而言,稀土能够将MnS和 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 这些通常呈长条状且形状不

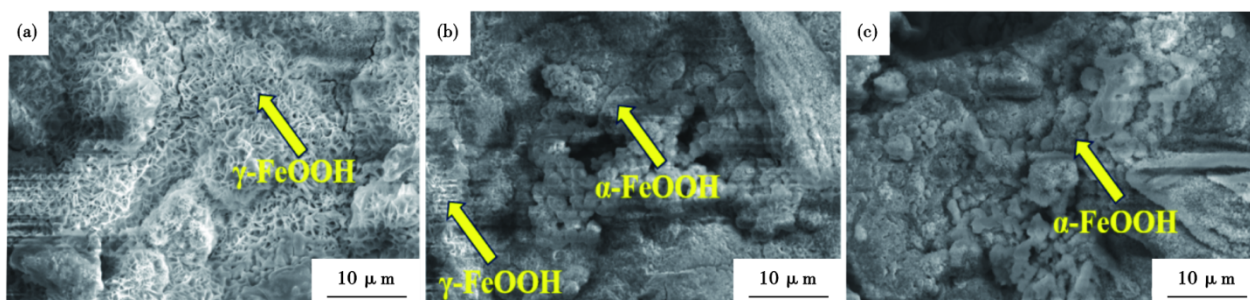


图9 不同稀土含量的耐蚀钢经电化学腐蚀后的腐蚀产物形貌:(a)ORE,(b)0.003RE,(c)0.01RE

Fig. 9 Morphology of corrosion products of corrosion resistant steels with different rare earth contents after electrochemical corrosion : (a) ORE, (b) 0.003RE, (c) 0.01RE

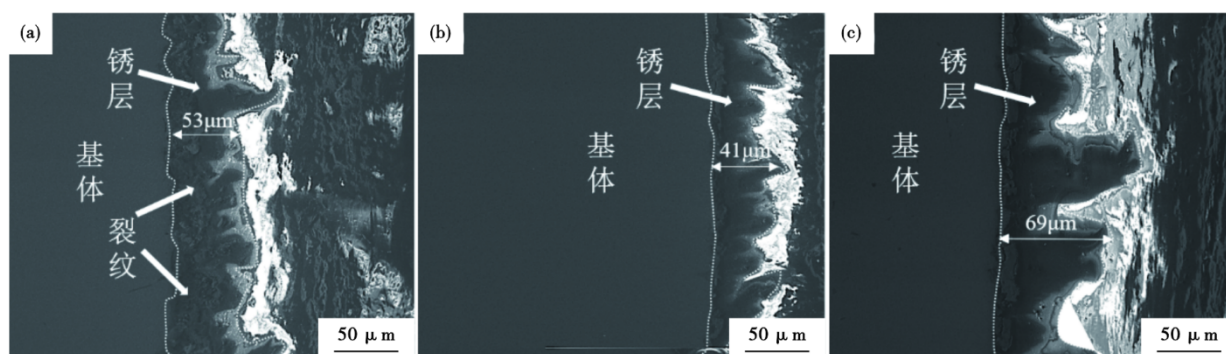


图 10 不同稀土含量的耐蚀钢经电化学腐蚀后的腐蚀产物形貌:(a)0RE, (b)0.003RE, (c)0.01RE

Fig. 10 Morphology of corrosion products of corrosion resistant steels with different rare earth contents after electrochemical corrosion : (a) 0RE, (b) 0.003RE, (c) 0.01RE

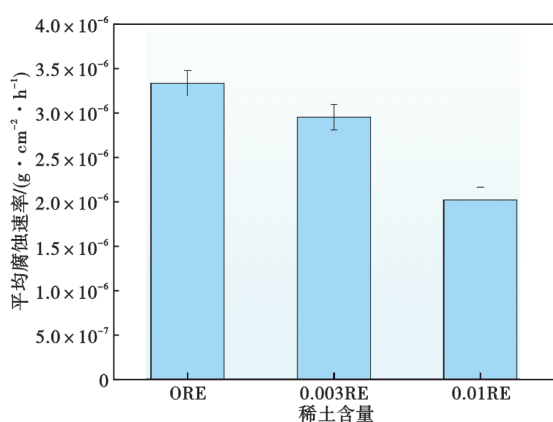


图 11 实验钢在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液下的浸泡腐蚀速率

Fig. 11 Immersion corrosion rate of experimental steel in 3.5% (wt) NaCl solution

### 参考文献

- [1] 吕涛涛. 2020 年重点钢铁企业粗钢产量变化对钢材品种产量影响分析[J]. 冶金管理, 2021(6): 17-22.
- [2] 徐 萌. 嵌入环境绩效的 N 钢铁公司综合绩效评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [3] 杨绍鹏, 张月峰. 加强全链条统筹 持续做好钢铁行业节能降碳[J]. 中国经贸导刊, 2023(12): 43-45.
- [4] 李宇信. 破局铁矿石高价困境的废钢政策探讨[J]. 冶金管理, 2020(16): 4-7.
- [5] 江 蒙. 微/纳米多孔微球制备及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [6] 张朝生. 新型耐大气腐蚀性能钢板处理技术的开发[J]. 宽厚板, 1999, 5(5): 21-24.
- [7] 刘 冰. 建筑钢材的腐蚀问题与防护对策[J]. 中华建设, 2014(4): 126-127.
- [8] 魏欢欢, 陈 晨, 郑东东, 等. 海洋腐蚀环境下高强度钢材研究现状及发展趋势[J]. 人民珠江, 2023, 44(8): 82-92.
- [9] 马秀敏, 郑 萌, 徐玮辰, 等. 腐蚀成本及控制策略研究[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 161-168.
- [10] 郭大伟. 热镀锌合金化镀层腐蚀行为及机理研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2014.
- [11] Krivý V, Kubzová M, Konečný P, et al. Corrosion processes on weathering steel bridges influenced by deposition of de-icing salts [J]. Materials, 2019, 12(7): 1089.
- [12] 李志彬, 黄毓祥, 陈鹏飞, 等. 隔水导管腐蚀分析及维护补救措施探讨[J]. 海洋石油, 2022, 42(1): 100-107.
- [13] 刘志勇, 汪 兵, 陈吉清. 一种超低碳耐候钢的组织 and 性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 56-58.
- [14] 戴 玥, 张金玲, 于彦冲, 等. 稀土对 A572 Gr. 65 钢电化学腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 217-223.
- [15] 鞍钢股份有限公司. 一种耐海洋潮差区腐蚀用高性能钢板及其生产方法. CN202110726. 5[P]. 2022-06-10.
- [16] 江 鹏. Ce 变质 Sn-Ag-Zn 共晶合金组织及其连接界面形成规律[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [17] 胥继华, 路 岩. 稀土元素对耐热钢热强性能影响的研究[J]. 金属热处理, 1999, 24(8): 1-2+9.
- [18] 张风林, 任鸿儒, 原春阳, 等. Ce 对 0.2C-0.5Si-1.5Mn 钢液洁净度与夹杂物变性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(5): 595-602.

规则的夹杂物转变为规则的球形,并减小其尺寸与数量。

2)随着稀土含量的增加,耐蚀钢的腐蚀电位发生正移,电流密度减小。当稀土质量分数达到 0.010% 时,耐蚀钢呈现出优异的耐腐蚀性能,腐蚀电位较正,腐蚀电流密度较低。

3)腐蚀产物的主要成分包括  $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。在加入稀土元素后,腐蚀产物中具有较高电化学活性的  $\gamma$ -FeOOH 颗粒聚集、融合,形成更加紧密的颗粒状  $\alpha$ -FeOOH 结构,锈层的稳定性和致密性得到提升,从而更有效地阻碍电荷转移,减少了活性区的面积,进而抑制了腐蚀的发生。

- [19] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 558-582.
- [20] Wang L M, Lin Q, Yue L J, et al. Study of application of rare earth elements in advanced low alloy steels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 451(1-2): 534-537.
- [21] 雷元素, 董瑞峰, 母志鹏, 等. 稀土元素对耐蚀钢腐蚀性能影响的研究综述[J]. 山东冶金, 2024, 46(1): 28-33+38.
- [22] Wei J, Dong J H, Zhou Y T, et al. Influence of the secondary phase on micro galvanic corrosion of low carbon bainitic steel in NaCl solution[J]. Materials Characterization, 2018, 139: 401-410.
- [23] Geng R M, Li J, Shi C B. Influence of cerium treatment on inclusion modification and as-cast microstructure of high-strength low-alloy steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(10): 1659-1668.
- [24] Huang F, Li J, Geng R, et al. Effect of rare earth on inclusion evolution and corrosion resistance of HRB400E steel[J]. Materials and Corrosion, 2022, 74(1): 53-67.
- [25] 刘锦文, 唐海燕, 李根, 等. 稀土对高强耐蚀钢中夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2023, 58(5): 70-82+9.
- [26] Li Y, Yuan X, Wang P, et al. Rare earth alloy nanomaterials in electrocatalysis[J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 83: 574-594.
- [27] 李德成, 李志宏, 韩利明. 碎煤加压气化炉爆炸事故分析[J]. 煤, 2012, 21(8): 63-65.
- [28] 沈利群. 稀土元素对金属材料性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 1994, 17(2): 19-22.
- [29] 白国君, 杨吉春, 梁文京. 稀土加入时机对重轨钢成分及夹杂物影响[J]. 炼钢, 2023, 39(2): 82-88.
- [30] 李杰, 向锋. 高温处理对高Co-Ni超高强度钢拉伸性能的影响[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2022, 32(3): 26-31.
- [31] 陈孟, 刘承军, 姜茂发. 稀土对含铜铁素体不锈钢中非金属夹杂物的影响. 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 2013: 5.
- [32] 张芳, 杨吉春. 稀土元素镧对20钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2009, 30(1): 63-65.
- [33] Park I J, Lee S M, Kang M, et al. Pitting corrosion behavior in advanced high strength steels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 205-210.
- [34] Zheng S, Li C, Qi Y, et al. Mechanism of (Mg, Al, Ca)-oxide inclusion-induced pitting corrosion in 316 L stainless steel exposed to sulphur environments containing chloride ion[J]. Corrosion Science, 2013, 67: 20-31.
- [35] 赵晓栋, 姜江, 李国宝, 等. 钢中大尺寸稀土夹杂物的形成动力学研究[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(1): 142-144.
- [36] 陈基权, 董瑞峰, 于宛鹭, 等. 稀土元素对低合金钢耐蚀性能影响的研究现状[J]. 江西冶金, 2023, 43(2): 106-113.
- [37] 李伟, 吴健鹏, 徐静波, 等. 非金属夹杂物对耐候钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. 稀土, 2016, 37(1): 91-97.
- [38] 高学中, 杨吉春, 刘晓. 稀土对2Cr13不锈钢夹杂物形态和耐蚀性能的影响[J]. 科技情报开发与经济, 2007(18): 150-152.
- [39] 唐有根, 韩红涛, 谢正和. 稀土Ce掺杂铝合金阳极的结构和电化学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006(4): 737-741.
- [40] 雷元素, 董瑞峰, 母志鹏, 等. 稀土元素对低合金钢腐蚀性能作用机理[J]. 包钢科技, 2023, 49(5): 33-36.
- [41] 张大征. 海洋平台用690 MPa级中锰钢组织性能及海水腐蚀行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [42] 吴群, 刘玉, 杜荣归, 等. 氯离子对模拟混凝土孔溶液中钢筋钝性影响的电化学研究[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 346-350.