

Mn对2205双相不锈钢耐点蚀性能的影响

郑建超¹⁾, 潘超¹⁾, 张建涛¹⁾, 付少鹏²⁾, 林平²⁾, 胡晓军¹⁾✉

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 瑞浦科技集团有限公司, 丽水 323903

✉通信作者, E-mail: huxiaojun@ustb.edu.cn

摘要 研究锰元素对2205双相不锈钢耐点蚀性能的影响,锰质量分数的变化范围为0.93%~1.26%。分别采用化学腐蚀法、动电位极化法研究双相不锈钢2205的耐腐蚀性能,采用夹杂物自动分析技术研究锰对钢中夹杂物种类及数量的影响,通过扫描电镜、能谱及夹杂物原位分析法观察化学腐蚀及电化学腐蚀前后钢中夹杂物及其周围钢基体的变化情况。采用电感耦合等离子体发光光谱测定腐蚀产物的成分。研究表明,不同类型的夹杂物对耐腐蚀性能的影响不同,(Mn、Si)氧化物以及(Mn、Si、Cr)氧硫化物在腐蚀液中更易溶解进而促进腐蚀,而(Cr、Mn、Al)氧化物却很稳定。锰的加入会促进钢中(Cr、Mn、Al)夹杂的析出,此类夹杂物不仅自身很容易被含Cl离子的溶液腐蚀,而且作为点蚀的起始点,促进了点蚀坑的形成,加快了基体腐蚀,最终导致不锈钢耐点蚀性能的下降。

关键词 双相不锈钢; 点蚀; 夹杂物; 化学腐蚀; 基体

分类号 TG142.72

Effect of manganese addition on resistance to pitting corrosion of duplex stainless steel S32205

ZHENG Jian-chao¹⁾, PAN Chao¹⁾, ZHANG Jian-tao¹⁾, FU Shao-peng²⁾, LIN Ping²⁾, HU Xiao-jun¹⁾✉

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Ruipu Technology Co. Ltd., Lishui 323903, China

✉Corresponding author, E-mail: huxiaojun@ustb.edu.cn

ABSTRACT Duplex stainless steel (DSS) has been applied to marine industries, chemical plants, and nuclear facilities because of its high mechanical strength, good weldability, good resistance to pitting corrosion in various aggressive environments, and relatively low cost than similar-performance materials. However, with the decline of iron and steel industries, the competition among stainless steel products is becoming fierce. To reduce the costs of stainless steel, enterprises have attempted to replace high-priced alloy elements with low-priced alloy elements. Thus, the project of substituting manganese for nickel has attracted considerable attention. In this study, effect of manganese addition in the range of 0.93%–1.26% on the resistance to pitting corrosion of duplex stainless steel in chloride medium was investigated. Chemical corrosion and potentiodynamic anodic polarization tests were conducted to assess the resistance to pitting corrosion. Categories and number of inclusions were analyzed using inclusion automatic analysis technology. Changes of inclusions before or after chemical and electrochemical corrosion were observed using *in situ* observation, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer analysis. Inductively coupled plasma test was conducted to analyze compositions of corrosion products. The results indicate that different inclusions have different effects on pitting corrosion. Types of (Mn, Si) oxides and complex inclusions of (Mn, Si, and Cr) oxysulfides are dissolved, which accelerates the corrosion process. However, the types of (Cr, Mn, and Al) oxides are stable in similar environment. The addition of manganese leads to the deterioration of the resistance of duplex stainless steel to pitting corrosion because manganese accelerates the formation of (Mn, Si) oxides that act as initial locations of pitting corrosion in chlorine ion corrosion environment. Dissolved inclusions help to expose fresh matrix to etchant solution, accelerating the corrosion of

the matrix. Thus, the corrosion of the duplex stainless steel matrix is more serious than that of the inclusions.

KEY WORDS duplex stainless steel; pitting corrosion; inclusion; chemical corrosion; matrix

2205 钢是一种由铁素体及奥氏体组成的双相不锈钢,其点蚀当量在 35 左右. 与奥氏体不锈钢相比,双相不锈钢有更高的强度,更好的韧性以及可焊接性能. 与铁素体不锈钢相比,双相不锈钢有更好的耐腐蚀性能以及更高的屈服强度^[1-3]. 因此 2205 钢在石油、化工、造纸、能源、船舶、军事等工业领域都有广泛的应用^[4-8]. 而 2205 钢之所以可以在不锈钢领域占据一席之地,除了优越的性能,还有更低的生产成本. 不锈钢生产中 Ni 的成本在所有合金中占比最大,而 Mn 和 Ni 同为奥氏体稳定元素,因此添加较高含量的 Mn 替代部分 Ni 的方案引起了企业的注意. 2002 年开发成功含 Mn 双相不锈钢并投入市场.

关于 Mn 在双相不锈钢中的作用及对各种性能的影响,Merello 等^[9]的研究表明,高锰高氮双相不锈钢中 Mn 的加入能提高钢中 N 的溶解度,起到固氮作用. Westin 等^[10]对节 Ni 高 Mn 型 2101 双相不锈钢焊接性能的研究发现,焊缝中的氧化物含 Mn、N 较高,这些氧化物降低了焊缝的耐蚀性能. 苏煜森等^[11]与方铁琉等^[12]对 2101 双相不锈钢高温热加工行为的研究发现,Mn 稳定奥氏体能力较 Ni 弱,样品动态再结晶效果也会随之变差. Mn 作为一种合金元素,能够提高不锈钢的拉伸性能,淬硬性以及延展性^[13-15]. An 等^[16]研究了 Mn 对双相不锈钢耐点蚀性能的影响,结果表明 Mn 的加入会促进点蚀

坑在奥氏体相及两相交界处形成,降低钢的耐点蚀性能. Toor 等^[17]的研究表明锰的加入促进高 Mn-N 双相不锈钢中 Mn、Cr 氧化物的形成,而此类夹杂物可以作为点蚀源,降低不锈钢的耐点蚀性能. Li 等^[18]在超级双相不锈钢 25Cr-2Ni-3Mo-xMn-N 的成分设计时,考虑了 Mn 加入对不锈钢耐点蚀性能的影响,当 Mn 质量分数超过 12% 时,会有 σ 相生成,进而造成不锈钢耐点蚀性能的下降. 此外 Mn 的加入势必会影响钢中夹杂物的形成,MnS 作为最常见的夹杂物之一,除了降低不锈钢的延性特性以外^[19-21],由于其在含 Cl 离子的溶液中易于溶解而作为点蚀的起始点,使金属表面直接暴露在溶液中,加快腐蚀^[22-26]. 2205 双相不锈钢中 S 含量很低,MnS 夹杂较少,基本是氧化物夹杂,文献中很少有人对这方面进行研究. 因此有必要研究 Mn 的加入对该钢种中夹杂物的影响,以及各类夹杂物对耐腐蚀性能影响及机理.

本文以 2205 双相不锈钢为研究对象,采用化学腐蚀法、电化学腐蚀法、夹杂物原位分析法、夹杂物自动分析技术、电感耦合等离子体发光光谱等方法系统研究 Mn 的加入对其耐点蚀性能的影响.

1 实验方法

实验原材料为 2205 双相不锈钢,来自于国内某不锈钢企业,其化学成分见表 1.

表 1 不同实验材料的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of experimental alloys

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe	点蚀当量
样品 1	0.018	0.34	0.93	0.025	0.0031	22.47	5.39	3.06	0.15	0.163	余量	35.31
样品 2	0.019	0.32	1.04	0.024	0.0027	22.81	5.30	2.94	0.15	0.168	余量	35.20
样品 3	0.014	0.32	1.16	0.025	0.0033	22.69	5.39	2.85	0.15	0.172	余量	34.85
样品 4	0.015	0.30	1.26	0.024	0.0029	22.72	5.35	2.90	0.15	0.165	余量	34.93

将 200 ± 1 g 的不锈钢置于 $\phi 30$ mm \times 80 mm 的氧化镁坩埚中,然后将其放入管式硅钼棒炉中,全程通入 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 高纯 Ar 保护,以 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $1650 \text{ }^\circ\text{C}$,恒温 2 h,待样品完全熔化后分别加入不同质量的电解金属锰(Mn 质量分数 $> 99\%$). 每组水淬后的钢锭经线切割,分别制成 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的样品两个, $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的样品 4 个. 试样在 $1075 \text{ }^\circ\text{C}$ 固溶处理 2 h 后水淬. 实验装置如图 1 所示.

将试样表面抛光至 $1.5 \text{ } \mu\text{m}$,用无水乙醇清洗干净,热风吹干,供夹杂物自动分析系统统计夹杂物的类型、尺寸和数量. 再采用电子显微镜对特定类型的夹杂物进行观察与分析.

化学腐蚀的样品尺寸为 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,样品表面用 SiC 砂纸打磨至 500 目,经无水乙醇清洗后,在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下放入 400 mL 的质量分数 6% $\text{FeCl}_3 + 0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 溶液中浸泡 24 h. 腐蚀后用去离子水清洗样品表面,再放入 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 $2.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

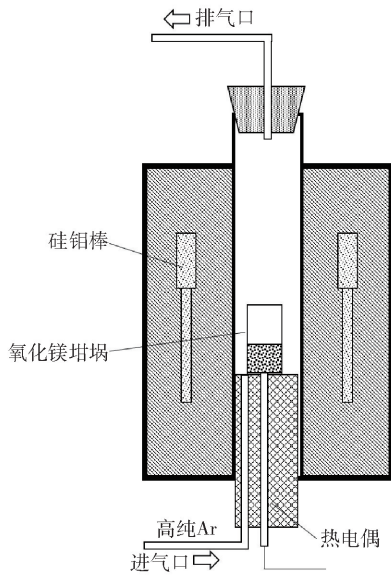


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

L^{-1} HNO_3 溶液中浸泡 20 min, 去除腐蚀产物. 称量腐蚀前后样品的质量, 计算腐蚀率 (GB/T 17897 — 1999). 腐蚀后的 6% $FeCl_3 + 0.05 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ HCl 溶液进行化学分析测试, 测定溶液中 Mn 、 Si 、 Ti 、 Cr 、 Al 和 Ni 元素的含量.

原位分析法中, 样品尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 表面抛光至 $1.5 \mu\text{m}$, 在样品表面做好标记以便确定夹杂物的位置. 在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下放入 6% $FeCl_3 + 0.05 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ HCl 溶液中浸泡 24 h, 对腐蚀前后的样品进行电子显微镜观察及能谱分析, 观察不同夹杂物对双相不锈钢点蚀的影响.

采用动电位极化曲线法测试样品的点蚀点位. 测试溶液为质量分数 3.5% 的 $NaCl$ 溶液, 温度为 $(50 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. 扫描从 -1.0 V 开始向阳极方向扫描, 扫描速度为 $10 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$, 扫描至 $+1.6 \text{ V}$ 结束 (ASTM G150-99 (2004)). 采用扫描电镜观察电化学测试前后夹杂物周围的点蚀情况.

2 实验结果与讨论

2.1 Mn 的添加对腐蚀率的影响

对于点蚀严重、均匀腐蚀不明显的材料, 其耐点蚀性可以用腐蚀率, 即单位面积、单位时间的质量损失表示, 单位是 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 腐蚀率 η 按式 (1) 计算:

$$\eta = \frac{W_0 - W}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中, W_0 为腐蚀前样品的质量, W 为腐蚀后样品的质量, S 为样品的表面积, t 为时间.

Mn 的添加对 2205 双相不锈钢腐蚀率的影响见图 2. 随着 Mn 加入量的增加, 样品腐蚀率也随之升高. 因此, Mn 的添加会降低双相不锈钢的耐蚀性能. 而样品的腐蚀失重主要来源于两个方面, 一是不锈钢表面夹杂物的腐蚀, 另一个是不锈钢基体自身的腐蚀.

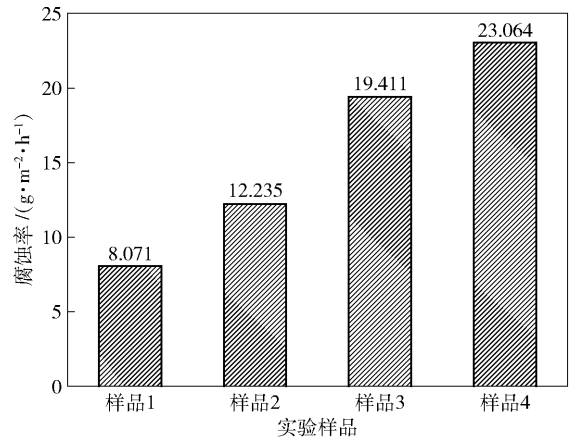


图 2 Mn 的添加对腐蚀率的影响

Fig. 2 Effect of manganese addition on the corrosion rate

为探究夹杂物腐蚀机理, 首先采用扫描电镜对 2205 双相不锈钢中的夹杂物进行观察分析. 钢中夹杂物主要有 3 类, 分别为 (Mn 、 Si) 氧化物, (Cr 、 Mn 、 Al) 氧化物以及 (Mn 、 Si 、 Cr) 氧硫化物. 各类夹杂物在腐蚀前后的形貌变化及夹杂物中成分质量分数见图 3. (Mn 、 Si) 氧化物和 (Mn 、 Si 、 Cr) 氧硫化物经化学腐蚀后, 基本完全被溶解, 并在样品表面留下点蚀坑. 而 (Cr 、 Mn 、 Al) 氧化物没有任何变化. 点蚀坑的形成必然会提高双相不锈钢的腐蚀率, 降低其耐点蚀性能. 采用夹杂物自动分析技术对这 3 类夹杂物的尺寸和分布密度进行统计分析, 结果如图 4.

随着锰含量的增加, 钢中夹杂物总量明显增加, 其中 (Mn 、 Si) 氧化物数量变化最为突出, 且 (Mn 、 Si) 氧化物的平均尺寸为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$, 大于其他两类夹杂物. 这表明了 Mn 的加入一定程度上促进了 (Mn 、 Si) 氧化物的形成. 为进一步解释这种现象, 对 (Mn 、 Si) 氧化物中 Mn/Si 的质量比进行统计, 结果如图 5. 可以发现 Mn 的加入对 Mn/Si 的质量比影响不大, 基本维持在 3 到 4 之间, 也就是说钢中 (Mn 、 Si) 氧化物主要以 $3MnO \cdot 2SiO_2$ 和 $2MnO \cdot SiO_2$ 两种形式存在, 其反应方程如式 (2) 和式 (3):



$$K_2 = \frac{a_{(3MnO \cdot 2SiO_2)}}{a_{[Mn]}^3 \cdot a_{[Si]}^2 \cdot a_{[O]}^7} \quad (2)$$



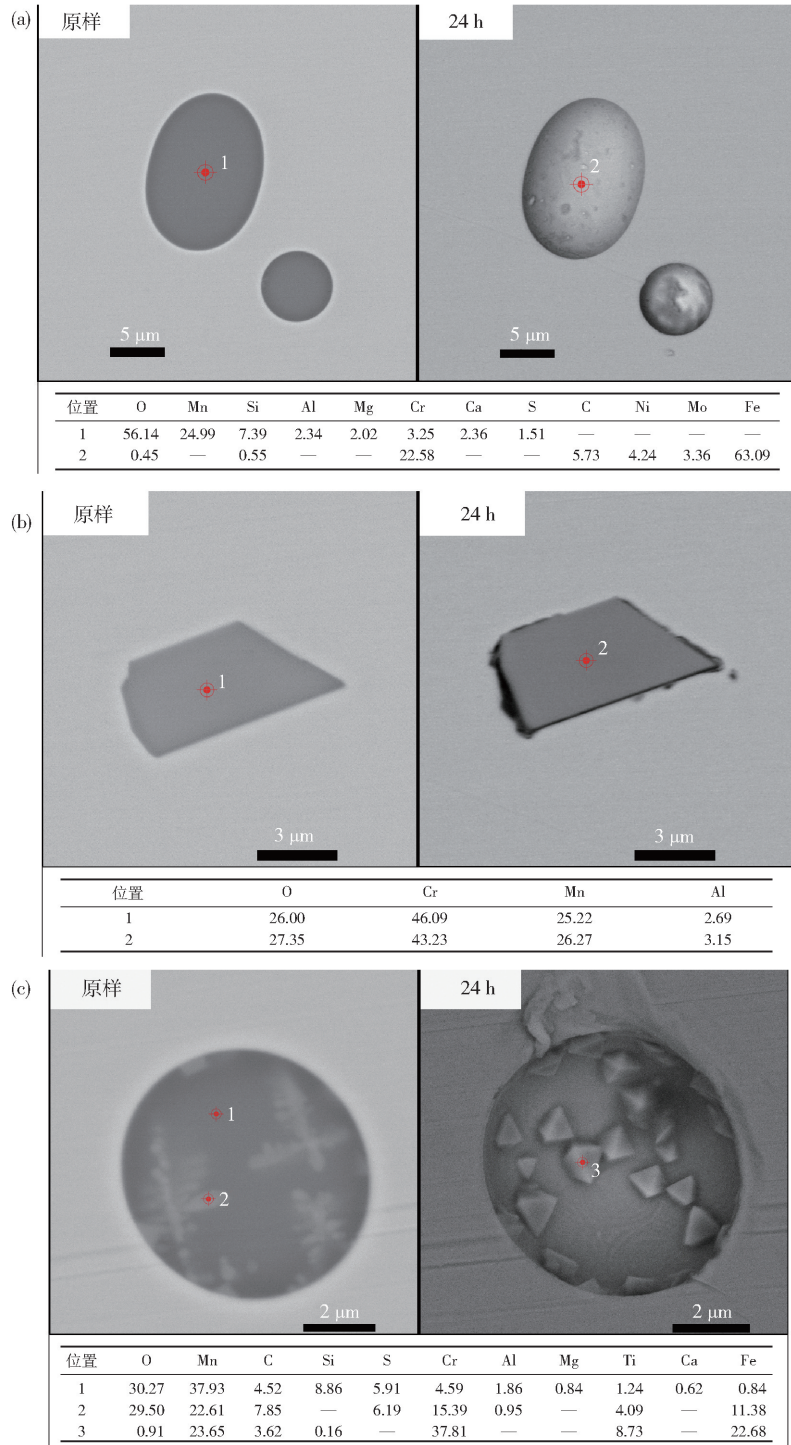


图3 不同类型夹杂物腐蚀前后形貌变化。(a) (Mn, Si) 氧化物; (2) (Cr, Mn, Al) 氧化物; (3) (Mn, Si, Cr) 氧硫化物

Fig. 3 Backscattered electron images of inclusions in experimental alloys before and after chemical corrosion; (a) (Mn, Si) oxides; (b) (Cr, Mn, Al) oxides; (c) (Mn, Si, Cr) oxysulfides

$$K_1 = \frac{a_{(2MnO \cdot SiO_2)}}{a_{[Mn]}^2 \cdot a_{[Si]} \cdot a_{[O]}^4} \quad (3)$$

式中, $a_{(3MnO \cdot 2SiO_2)}$ 和 $a_{(2MnO \cdot SiO_2)}$ 分别表示 $3MnO \cdot 2SiO_2$ 和 $2MnO \cdot SiO_2$ 的活度, 对 (Mn, Si) 氧化物夹杂, 在以纯物质为标准态的情况下, 其值为 1; $a_{[Mn]}$ 、 $a_{[Si]}$ 和 $a_{[O]}$ 分别表示 Mn、Si 和 O 在钢液中的活度。

随着 Mn 的加入, 式 (2)、(3) 必然使平衡向右

移动, 有利于 (Mn, Si) 氧化物的生成。此外, 随着 Mn 的加入, 钢液中 Si 的活度也会受 Mn 含量的影响, 而 Mn 对 Si 的活度系数的影响可以用式 (4) 表示:

$$\lg f_{[Si]} = e_{Si}^{Mn} \cdot [\% Mn] + e'_{Si} \cdot [\% j] \quad (4)$$

式中, $f_{[Si]}$ 表示钢液中 Si 的活度系数, e_{Si}^{Mn} 表示 Mn 对 Si 的相互作用系数, $[\% Mn]$ 表示钢液中 Mn 质量分数, e'_{Si} 表示钢液中除 Fe、Mn 外其他元素对 Si 的相互

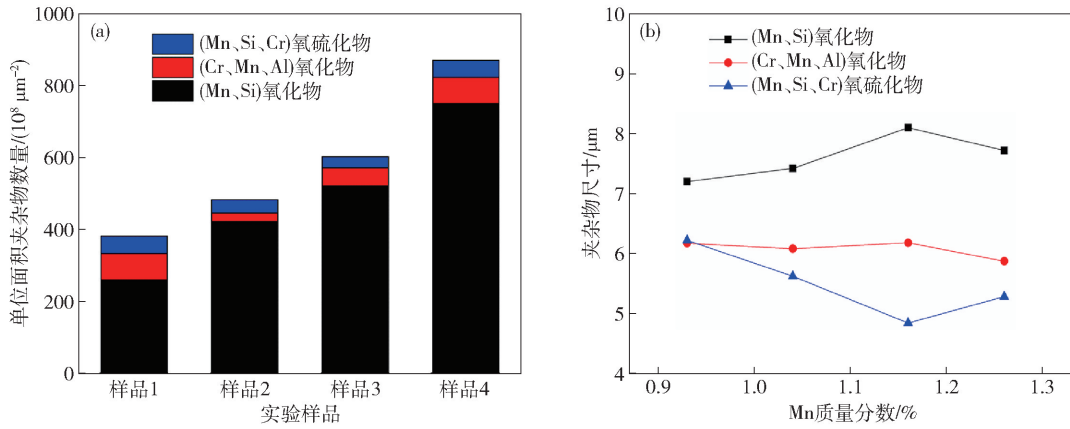


图 4 Mn 的添加对钢中各类夹杂物的影响。(a) 数量; (b) 尺寸

Fig. 4 Effect of manganese addition on the inclusions: (a) number; (b) size

作用系数, [%j] 表示钢液中除 Fe、Mn 外其他元素的质量分数. 文献[27] 给出 $e_{\text{Si}}^{\text{Mn}} = 0.002$, 说明 Mn 的加入提高钢液中 Si 的活度, 式(2)、(3) 进一步向右移动. 综上所述, 钢液中 (Mn、Si) 氧化物的生成与增加, 与 Mn 的加入有直接关系, 而大量 (Mn、Si) 氧化物的腐蚀溶解也是降低双相不锈钢耐点蚀性能的主要原因之一.

影响双相不锈钢耐点腐蚀率的另一个原因则是钢基体的腐蚀. 采用电感耦合等离子体发光光谱法测定腐蚀后溶液中 Mn、Si、Ti、Cr、Al 和 Ni 等元素的含量. 由于未发现钢中有含 Ni 夹杂物, 因此溶液中的 Ni 元素主要来源于钢基体, 根据双相不锈钢化学成分, 可折算出钢基体的质量损失. 而其他元素折

合成相应的氧化物, 计算得到夹杂物的总质量, 计算结果如图 6. 图中钢基体的质量损失占绝大部分, 说明对化学腐蚀而言, 主要腐蚀的还是钢基体, 夹杂物的溶解腐蚀占比较小. 钢基体的质量损失一部分来自于基体的均匀腐蚀, 另一部分为点蚀坑的加深造成的局部钢基体的腐蚀. 通过夹杂物数量的统计结果来看, 随着 Mn 的加入, 钢中夹杂物的数量明显增加, 尤其 (Mn、Si) 氧化物, 而此类夹杂物的溶解, 在样品表面留下大量的点蚀坑, 这些点蚀坑会恶化点蚀环境, 促进局部钢基体的腐蚀. 这说明导致钢基体腐蚀率上升的原因并非均匀腐蚀, 而是点蚀加剧的结果.

夹杂物的点蚀机理如图 7, 在含 Cl^- 腐蚀液中,

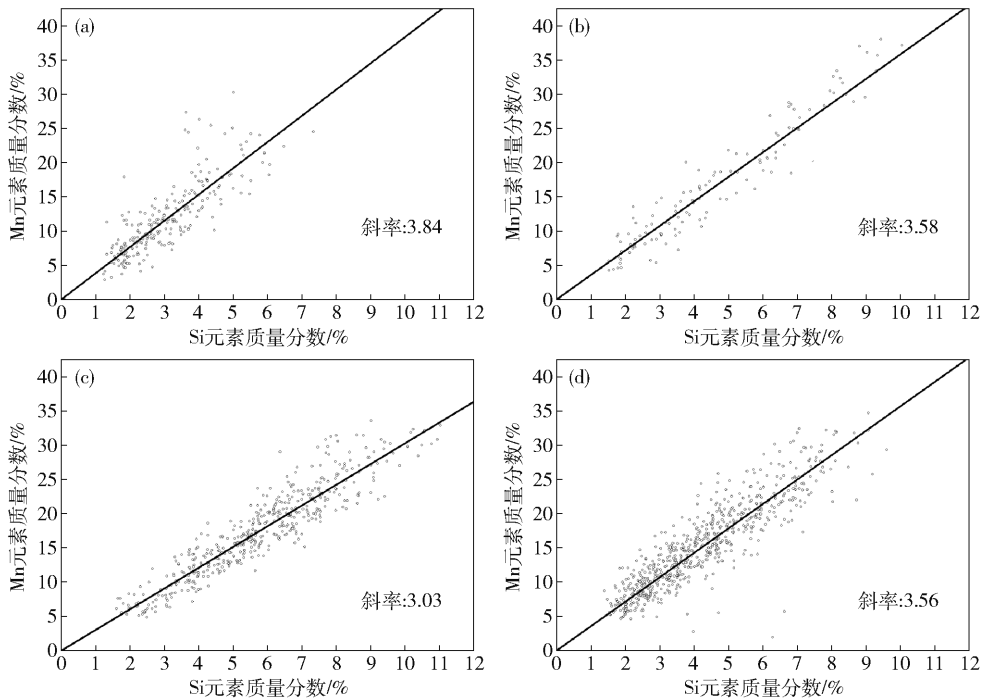


图 5 Mn 的添加对 (Mn、Si) 氧化物中 Mn/Si 比值的影响。(a) 样品 1; (2) 样品 2; (3) 样品 3; (4) 样品 4

Fig. 5 Effect of manganese addition on the Mn/Si ratio of (Mn, Si) oxides: (a) alloy 1; (2) alloy 2; (3) alloy 3; (4) alloy 4

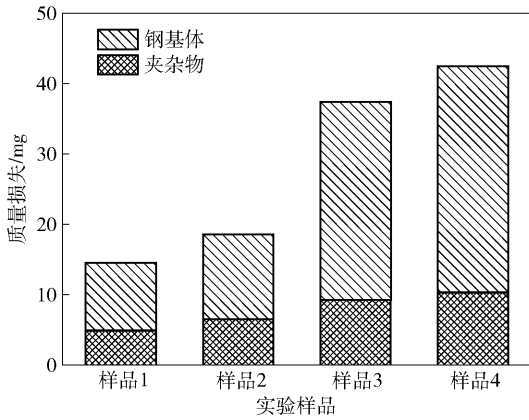


图 6 Mn 的添加对钢基体和夹杂物质量损失的影响

Fig. 6 Effect of manganese addition on the mass loss of inclusions and matrix

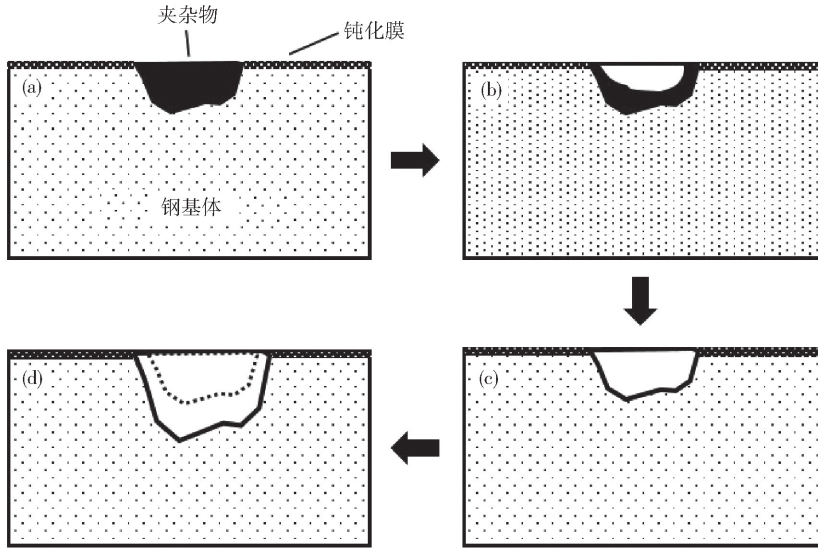


图 7 点蚀机理示意图。(a) 腐蚀前;(b) 夹杂物的腐蚀;(c) 夹杂物被完全腐蚀;(d) 基体的腐蚀

Fig. 7 Schematic diagram of the pitting corrosion mechanism: (a) initial; (b) corrosion process of inclusion; (c) etch off; (d) extension of pitting corrosion

钢的点蚀电位分别为 0.58、0.48、0.44 和 0.34 V。因此, Mn 的加入会降低不锈钢的点蚀电位。而点蚀往往在金属表面的伤痕、晶界以及夹杂物处优先发生。为进一步探究点蚀发生过程, 采用电子显微镜对测试后的样品进行观察, 发现不锈钢表面的击穿位置主要集中在晶界和夹杂物附近。这是由于双相不锈钢为双相组织, 两相腐蚀电化学行为差异较大, 晶界较多, 晶间腐蚀敏感度较高^[29-30]。另一方面, 对夹杂物附近的点蚀坑观察发现, 不同类型的夹杂物, 对点蚀的影响不同。如图 9 所示, 经电化学测试后, 在 (Mn、Si) 氧化物周围形成较大的点蚀坑, 而在 (Cr、Mn、Al) 氧化物周围却没有形成。这说明 (Mn、Si) 氧化物的存在会恶化周围的腐蚀环境, 促进点蚀的形成。

由于溶液酸性较强, 一些易溶解的氧化物夹杂会被腐蚀掉, 而由于钝化膜的存在, 腐蚀前期钢基体并不会严重腐蚀。随着腐蚀时间的延长, 样品表面的夹杂物逐渐溶解, 在样品表面出现大量的腐蚀坑, 而这些腐蚀坑的出现为点蚀提供了很好的起始点^[28]。在这些点蚀坑内, 由于 H⁺ 的富集, 溶液会进一步腐蚀钢基体, 点蚀会进一步向深处扩展。因此, 易溶解夹杂物的存在是引起点蚀的主要原因, 其促进基体腐蚀, 加快速度, 进而提高总的腐蚀率, 降低双相不锈钢的耐点蚀性能。

2.2 Mn 的添加对点蚀电位的影响

图 8 为不同 Mn 含量 2205 双相不锈钢的动电位极化曲线。随着 Mn 含量的增加, 2205 双相不锈

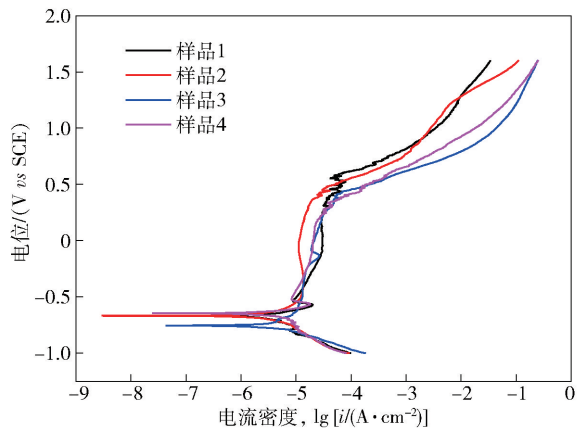


图 8 不同 Mn 含量双相不锈钢的动电位极化曲线

Fig. 8 Effect of manganese addition on the potentiodynamic polarization behavior of duplex stainless steel

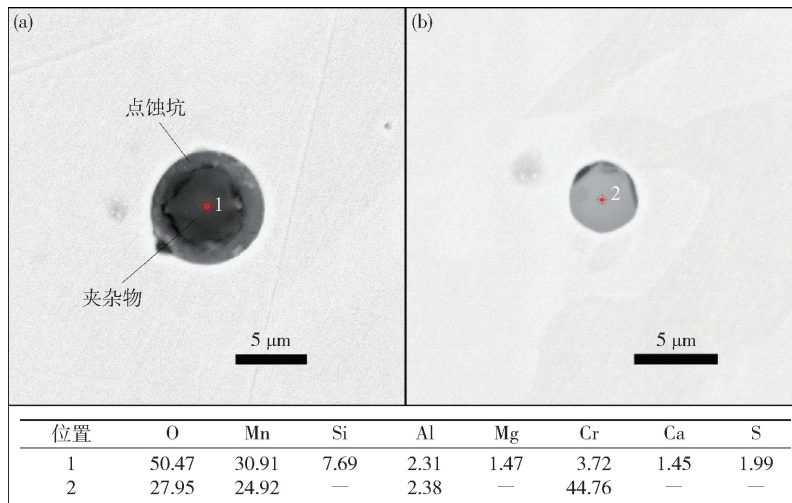


图 9 不同类型夹杂物对点蚀的影响. (a) (Mn,Si)氧化物; (b) (Cr,Mn,Al)氧化物

Fig. 9 Effect of inclusions on pitting corrosion; (a) (Mn, Si) oxides; (b) (Cr, Mn and Al) oxides

3 结论

(1) 随着 Mn 含量的增加, 2205 双相不锈钢的腐蚀率升高, 点蚀电位下降, 耐点蚀性能降低.

(2) 在化学腐蚀过程中, 不同夹杂物对腐蚀率的影响不同. (Mn、Si)氧化物容易被腐蚀液溶解, 并留下点蚀坑, 进一步促进钢基体的腐蚀. 而(Cr、Mn、Al)氧化物不溶解于腐蚀液, 对双相不锈钢的耐点蚀性能影响较小. 此外, 钢基体的腐蚀占整个腐蚀质量损失的大部分, 夹杂物的腐蚀占比较小.

(3) 在电化学腐蚀中, (Mn、Si)氧化物的存在会恶化其周围的腐蚀环境, 促进点蚀坑的形成, 降低双相不锈钢的耐点蚀性能.

参 考 文 献

[1] Garfias-Mesias L F, Sykes J M, Tuck C D S. The effect of phase compositions on the pitting corrosion of 25 Cr duplex stainless steel in chloride solutions. *Corros Sci*, 1996, 38(8): 1319

[2] Momeni A, Kazemi S, Bahrani A. Hot deformation behavior of microstructural constituents in a duplex stainless steel during high-temperature straining. *Int J Miner Metall Mater*, 2013, 20(10): 953

[3] Cheng X Q, Li C T, Dong C F, et al. Constituent phases of the passive film formed on 2205 stainless steel by dynamic electrochemical impedance spectroscopy. *Int J Miner Metall Mater*, 2011, 18(1): 42

[4] Deng B, Jiang Y M, Xu J L, et al. Application of the modified electrochemical potentiodynamic reactivation method to detect susceptibility to intergranular corrosion of a newly developed lean duplex stainless steel LDX2101. *Corros Sci*, 2010, 52(3): 969

[5] Olsson J, Snis M. Duplex-A new generation of stainless steels for desalination plants. *Desalination*, 2007, 205(1-3): 104

[6] Wu J. *Duplex Stainless Steel*. Beijing: Metallurgy Industry Press,

2000

(吴玖. 双相不锈钢. 北京: 冶金工业出版社, 2000)

[7] Yang S M, Chen Y C, Chen C H, et al. Microstructural characterization of $\delta/\gamma/\sigma/\gamma_2/\chi$ phases in silver-doped 2205 duplex stainless steel under 800 °C aging. *J Alloys Compd*, 2015, 633: 48

[8] Pohl M, Storz O, Glogowski T. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Mater Charact*, 2007, 58(1): 65.

[9] Merello R, Botana F J, Botalla J, et al. Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standard low-Ni high-Mn-N duplex stainless steels. *Corros Sci*, 2003, 45(5): 909

[10] Westin E M, Olsson C O A, Hertzman S. Weld oxide formation on lean duplex stainless steel. *Corros Sci*, 2008, 50(9): 2620

[11] Su Y S, Yang Y H, Cao J C, et al. Research on hot working behavior of low-nickel duplex stainless steel 2101. *Acta Metall Sin*, 2018, 54(4): 485

(苏煜森, 杨银辉, 曹建春, 等. 节 Ni 型 2101 双相不锈钢的高温热加工行为研究. *金属学报*, 2018, 54(4): 485)

[12] Fang Y L, Liu Z Y, Zhang W N, et al. Microstructure evolution of lean duplex stainless steel 2101 during hot deformation. *Acta Metall Sin*, 2010, 46(6): 641

(方轶瑜, 刘振宇, 张维娜, 等. 节约型双相不锈钢 2101 高温变形过程中微观组织演化. *金属学报*, 2010, 46(6): 641)

[13] Ueji R, Tsuchida N, Terada D, et al. Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure. *Scripta Mater*, 2008, 59(9): 963

[14] Calcagnotto M, Ponge D, Raabe D. On the effect of manganese on grain size stability and hardenability in ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels. *Metall Mater Trans A*, 2012, 43(1): 37

[15] Tsukutani I, Hashimoto S, Inoue T. Effects of silicon and manganese addition on mechanical properties of high-strength hot-rolled sheet steel containing retained austenite. *ISIJ Int*, 1991, 31(9): 992

- [16] An L C, Cao J, Wu L C, et al. Effects of Mo and Mn on pitting behavior of duplex stainless steel. *J Iron Steel Res Int*, 2016, 23(12): 1333
- [17] Toor I, Hyun P J, Kwon H S. Development of high Mn-N duplex stainless steel for automobile structural components. *Corros Sci*, 2008, 50(2): 404
- [18] Li J, Xu Y L, Xiao X S, et al. A new resource-saving, high manganese and nitrogen super duplex stainless steel 25Cr-2Ni-3Mo-xMn-N. *Mater Sci Eng A*, 2009, 527(1-2): 245
- [19] Diederichs R, Bleck W. Modelling of manganese sulphide formation during solidification, part I: description of MnS formation parameters. *Steel Res Int*, 2006, 77(3): 202
- [20] Oikawa K, Ishida K, Nishizawa T. Effect of titanium addition on the formation and distribution of MnS inclusions in steel during solidification. *ISIJ Int*, 1997, 37(4): 332
- [21] Shao X J, Wang X H, Wang W J, et al. *In-situ* observation of manganese sulfide inclusions in YF45MnV steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(5): 570
(邵肖静, 王新华, 王万军, 等. 硫化锰夹杂物在 YF45MnV 钢中行为的原位观察. 北京科技大学学报, 2010, 32(5): 570)
- [22] Webb E G, Suter T, Alkire R C. Microelectrochemical measurements of the dissolution of single MnS inclusions, and the prediction of the critical conditions for pit initiation on stainless steel. *J Electrochem Soc*, 2001, 148(5): B186
- [23] Lillard R S, Kashfipour M A, Niu W. Pit propagation at the boundary between manganese sulfide inclusions and austenitic stainless steel 303 and the role of copper. *J Electrochem Soc*, 2016, 163(8): C440
- [24] Ha H Y, Park C J, Kwon H S. Effects of misch metal on the formation of non-metallic inclusions and the associated resistance to pitting corrosion in 25% Cr duplex stainless steels. *Scripta Mater*, 2006, 55(11): 991
- [25] Williams D E, Zhu Y Y. Explanation for initiation of pitting corrosion of stainless steels at sulfide inclusions. *J Electrochem Soc*, 2000, 147(5): 1763
- [26] Williams D E, Mohiuddin T F, Zhu Y Y. Elucidation of a trigger mechanism for pitting corrosion of stainless steels using submicron resolution scanning electrochemical and photoelectrochemical microscopy. *J Electrochem Soc*, 1998, 145(8): 2664
- [27] Ohta H, Suito H. Activities in CaO-SiO₂-Al₂O₃ slags and deoxidation equilibria of Si and Al. *Metall Mater Trans B*, 1996, 27(6): 943
- [28] Zheng J C, Hu X J, Pan C, et al. Effects of inclusions on the resistance to pitting corrosion of S32205 duplex stainless steel. *Mater Corros*, 2018, 69(5): 572
- [29] Amadou T, Sidhom H, Braham C. Double loop electrochemical potentiokinetic reactivation test optimization in checking of duplex stainless steel intergranular corrosion susceptibility. *Metall Mater Trans A*, 2004, 35(11): 3499
- [30] Deng B, Jiang Y M, Xu J L, et al. Application of the modified electrochemical potentiodynamic reactivation method to detect susceptibility to intergranular corrosion of a newly developed lean duplex stainless steel LDX2101. *Corros Sci*, 2010, 52(3): 969