

加热与热处理

## 高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的热处理与组织性能研究

苏 宁<sup>1</sup>, 刘凤军<sup>1</sup>, 李月超<sup>2</sup>

(1. 中国石油管道局工程有限公司, 河南 郑州 451450; 2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为了提升高强管道用不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能, 对高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢进行了固溶和时效处理, 研究了时效温度对不锈钢显微组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响, 并分析了其作用机理。结果表明, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在 350~625 °C 时效处理 4 h 后, 基体组织均为马氏体和奥氏体, 且随着时效温度升高, 马氏体向奥氏体转变; 不锈钢的屈服强度  $R_{eL}$  和抗拉强度  $R_m$  随着时效温度的升高先增大后减小, 在时效温度为 350 °C 时具有较高的强塑性。FeCl<sub>3</sub> 溶液中浸泡腐蚀试验结果与电化学试验结果一致, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的腐蚀速率随着时效温度的升高先增大后减小, 在时效温度为 350 °C 时具有最佳的耐腐蚀性能。因此, 高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢最佳的时效温度为 350 °C, 此时不锈钢具有良好的强塑性和耐腐蚀性能。

**关键词:** 时效温度; 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢; 显微组织; 力学性能; 耐腐蚀性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.027

中图分类号: TG142.1; TG161

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0215-07

## Study on heat treatment and microstructure and properties of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel for high-strength pipeline

Su Ning<sup>1</sup>, Liu Fengjun<sup>1</sup>, Li Yuechao<sup>2</sup>

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 451450, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to improve the mechanical properties and corrosion resistance properties of stainless steel for high-strength pipelines, the solution and aging treatment on 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel for high-strength pipeline was conducted, the influences of aging temperature on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance properties of stainless steel were studied, and its mechanism of action was analyzed. The results show that after aging treatment at 350~625 °C for 4 hours, the matrix structures of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel are martensite and austenite, and with the increasing of aging temperature, martensite transforms into austenite. The yield strength  $R_{eL}$  and tensile strength  $R_m$  of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel first increases and then decreases with the increasing of aging temperature, which has good strength plasticity at the aging temperature of 350 °C. The results of immersion corrosion test in FeCl<sub>3</sub> solution are consistent with those of electrochemical test. The corrosion rate of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel first increases and then decreases with the increasing of aging temperature, and it has the best corrosion resistance property at the aging temperature of 350 °C. Thus, the optimum aging temperature of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel for high-strength pipeline is 350 °C, at this time, the stainless steel has good strength and plasticity as well as corrosion resistance property.

**Key words:** aging temperature; 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel; microstructure; mechanical property; corrosion property

最经济合理的石油、天然气等长距离输送方式是通过管道来实现的, 尤其是随着近年来中哈、中俄输油管线、中俄输气管线以及国内西气东输等工程的布局, 给高强管道用钢带来了良好的发展机遇, 同时也对管道用钢的综合性能提出了更高的要求,

即除需要具有传统管道用钢的强度和塑性外, 还需要具有良好的耐腐蚀性能, 以满足长距离、复杂环境 (含有腐蚀性介质元素 Cl、S 等) 下管道用钢的使用需求, 避免或者减少由于局部腐蚀等造成的漏油、漏气等现象<sup>[1]</sup>。其中, 半奥氏体沉淀硬化型 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢由于具有较高的强韧性和良好的耐蚀性, 在高压管道用钢中具有较好的应用前景, 但是这类型的不锈钢在长时间复杂环境下使用时, 会出现局部点蚀进而演变成穿孔并造成整体管道泄露事故<sup>[2]</sup>, 因此, 有必要采取适宜的调控手段在保

收稿日期: 2024-01-07; 修订日期: 2024-04-08

基金项目: 河南省科技攻关项目 (2102210278); 教育部产学合作协同育人项目 (221176014)

作者简介: 苏 宁 (1976-), 男, 学士, 工程师

E-mail: suning7611@sina.com

障足够强塑性的前提下提升其耐点蚀性能。目前, 高强管道用不锈钢的耐腐蚀性能的研究多集中在合金成分设计、加工工艺优化等方面<sup>[3-4]</sup>, 对于通过时效处理来改善半奥氏体沉淀硬化型 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢力学性能和耐腐蚀性能方面的报道较少。为了提升高强管道用不锈钢的综合使用性能, 对高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢进行了固溶和时效处理, 研究了时效温度对 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢显微组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响, 结果可为半奥氏体沉淀硬化型不锈钢的耐腐蚀性能的改善提供技术支撑, 并有助于新型高强管道用钢的开发与工业化应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢为研究对象, 其主要元素化学成分(%, 质量分数)为 0.17C、0.20Si、0.49Mn、0.008P、0.002S、15.7Cr、4.12Ni、2.10Mo、0.08N, 余量为 Fe。

### 1.2 热处理工艺

采用德国 CarboliteGero LHT 高温热处理炉对高强管道用 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢进行 1025 ℃/1 h 的固溶处理, 空冷至室温后进行不同温度(350~625 ℃)的时效热处理, 时效保温时间为 4 h, 在管道用钢时效处理结束后, 采用空冷的方式冷却至室温。

### 1.3 测试仪器与方法

在 TESCAN S9000 场发射扫描电镜上观察不同时效温度下的 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的显微组织; 室温拉伸测试在 Instron5544 型拉伸试验机上进行, 设定拉伸速率为  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 参照 GB/T 228.1—2021<sup>[5]</sup>; 室温 U 型缺口冲击试验在英斯特朗 INSTRON 摆锤冲击试验机上进行, 参照 GB/T 229—2020<sup>[6]</sup>; 奥氏体含量采用荷兰帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪进行测试与分析; 电化学性能测试在普林斯顿 P4000A 电化学工作站中进行, 主要包括极化曲线和电化学阻抗谱, 测试过程中采用标准三电极体系, 溶液为质量分数为 3.5% 的 NaCl, 极化曲线测试时设定温度为 50 ℃、扫描速度为  $20 \text{ mV} \cdot \text{min}^{-1}$ , 阻抗谱测试温度为 30 ℃、频率为 1~10000 Hz; 将不锈钢试样加工为  $60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的片状, 采用 60#~800# 砂纸逐级进行打磨后清洗、吹干, 根据 GB/T 17897—2016<sup>[7]</sup>, 在质量分数为 6% 的  $\text{FeCl}_3$  溶液中进行 50 ℃ 浸泡腐蚀试验, 时间为 48 h。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织

图 1 为 1025 ℃/1 h 固溶+不同温度时效处理后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的扫描电镜显微形貌观察结果。对比分析可见, 350~625 ℃ 时效处理 4 h 后, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢均为马氏体 M+奥氏体 A 组织, 但是各自的相对含量存在明显差异。当时效温度为 350 和 450 ℃ 时, 基体组织为板条马氏体+少量奥氏体, 其中板条马氏体中含有高密度位错, 显微组织表现为成群的板条, 硬度高而塑性差; 当时效温度上升至 535 ℃ 时, 基体组织中板条状 M 组织特征趋于模糊化, 而 A 组织特征有所增强; 继续升高时效温度至 625 ℃ 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢中 M 组织转变为 A 组织的含量明显增多。

### 2.2 力学性能

图 2 为不同时效温度下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的室温拉伸性能和冲击性能测试结果。由图 2a 可知, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的屈服强度  $R_{\text{eL}}$  和抗拉强度  $R_m$  随着时效温度的增大先增大后减小, 最大值均在时效温度为 450 ℃ 时取得, 而奥氏体含量随着时效温度的升高先保持稳定, 在时效温度达到 535 ℃ 及以上时快速增加; 从断面收缩率  $Z$ 、断后伸长率  $A$  和冲击功  $A_{\text{kv}}$  测试结果(图 2b)来看, 断面收缩率和冲击功随着时效温度的增加先降低再升高而后再降低, 而断后伸长率在 350~450 ℃ 时有所上升, 继续增加时效温度, 断后伸长率的波动幅度不大。当时效温度从 350 ℃ 升高至 450 ℃ 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $R_{\text{eL}}$  和  $R_m$  不断增大, 这主要与此时不锈钢中会析出细小  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  相而产生沉淀强化作用有关<sup>[8]</sup>; 当时效温度在 450 ℃ 以上时, 高温作用下  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  相会发生粗化而降低第二相的强化效果, 且逆转变奥氏体含量会逐渐增加, 两方面共同作用下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的抗拉强度和屈服强度会明显降低, 而塑性变形能力增加<sup>[9]</sup>。综合而言, 时效温度为 350 ℃ 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢取得较好的强塑性。

### 2.3 耐腐蚀性能

#### 2.3.1 电化学腐蚀

图 3 为 350~625 ℃ 时效 4 h 后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的阳极极化曲线, 其中,  $J_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度。从钝化膜开始破裂时的电位(点蚀电位  $E_b$ )<sup>[10]</sup> 的测试结果可

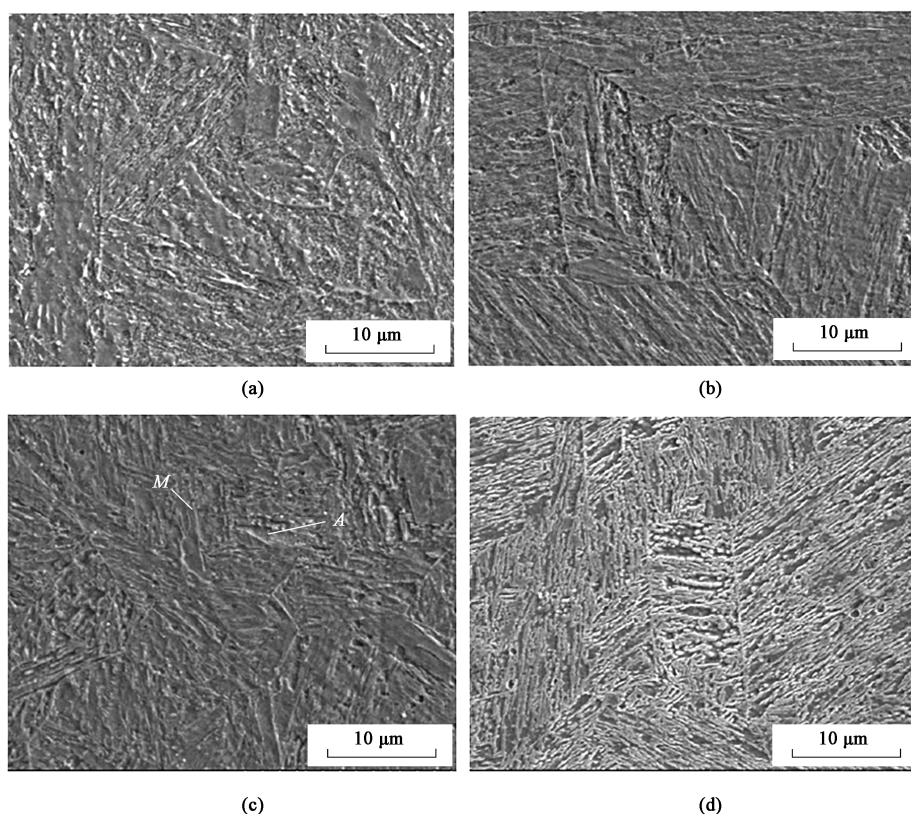


图1 不同时效温度下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的显微组织

(a) 350 °C (b) 450 °C (c) 535 °C (d) 625 °C

Fig. 1 Microstructures of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel under different aging temperatures

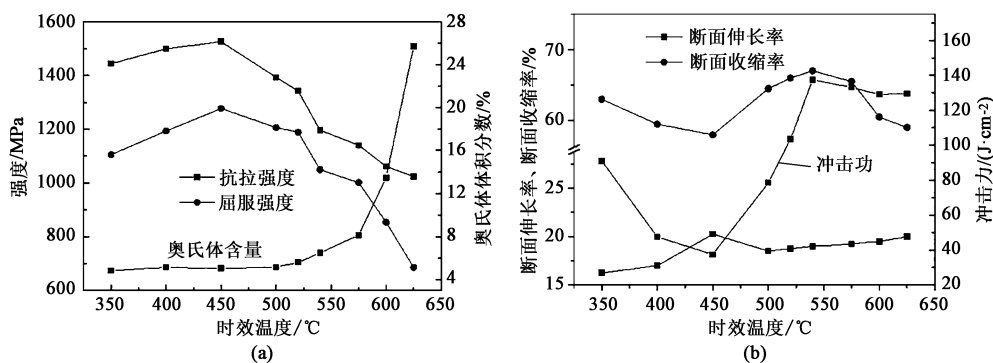


图2 不同时效温度下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的力学性能

(a) 强度与奥氏体含量 (b) 断后伸长率、断面收缩率和冲击功

Fig. 2 Mechanical properties of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel under different aging temperatures

(a) Strength and austenite content (b) Percentage elongation after fracture, percentage reduction of area and impact energy

知, 时效温度为 350、450、535 和 625 °C 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $E_b$  分别为 226、86、79 和 144 mV, 可见, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $E_b$  会随着时效温度的升高先减小后增大; 从阳极电流密度为  $100 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$  时的电位  $E_{b100}$  [11] 的测试结果可知, 时效温度为 350、450、535 和 625 °C 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $E_{b100}$  分别为 266、203、98 和 156 mV, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $E_{b100}$  也随着时

效温度的升高先减小后增大。整体而言, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在时效温度为 350 °C 时取得  $E_b$  和  $E_{b100}$  的最大值, 在时效温度为 535 °C 时取得  $E_b$  和  $E_{b100}$  的最小值, 而  $E_b$  和  $E_{b100}$  值越大则 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的耐腐蚀能力越强 [12]。由此可见, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的耐腐蚀能力会随着时效温度的升高先降低后升高, 时效温度为 350 °C 时具有最佳耐腐蚀性能。这主要是因为: 时效温度的



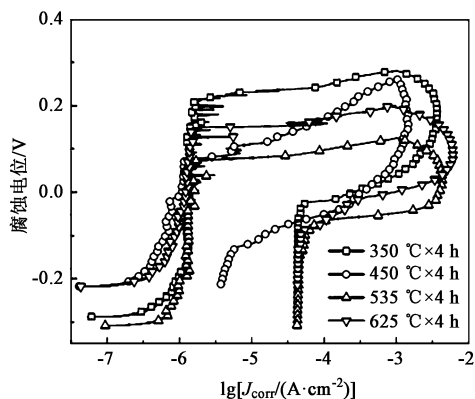


图3 时效处理后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel after aging treatment

升高会改变 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢中奥氏体含量和碳化物（富耐蚀性元素的析出相）析出，而奥氏体的存在有助于降低耐蚀性元素的富集程度并抑制点蚀萌生和扩展，碳化物析出会在周围产生耐蚀性元素贫乏区并降低耐腐蚀能力<sup>[13-14]</sup>，多方面共同作用下使得 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在时效温度为 350 °C 时具有良好的耐腐蚀性能。

图 4 为 350~625 °C 时效 4 h 后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱图 (Electrochemical Impedance Spectroscopy,

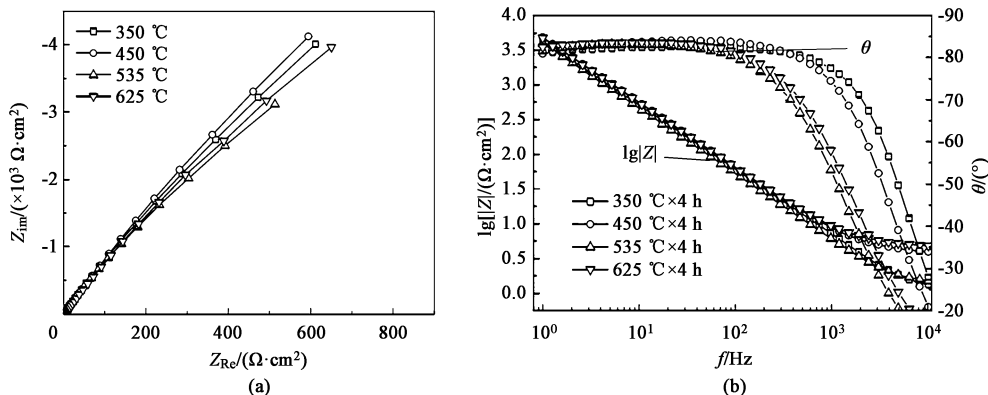


图4 不同时效温度下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的电化学阻抗谱图

(a) Nyquist 图 (b) Bode 图

Fig. 4 EIS diagrams of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel under different aging temperatures

(a) Nyquist diagram (b) Bode diagram

### 2.3.2 浸泡腐蚀

图 5 为 350~625 °C 时效处理 4 h 后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在 FeCl<sub>3</sub> 溶液中的浸泡腐蚀深度和腐蚀速率的测试结果。当时效温度为 350、450、535 和 625 °C 时，1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的平均腐蚀深度分别为 63.61、181.32、203.17 和 139.41 μm，相应的腐蚀速率分别为

EIS)，其中  $Z_{im}$  和  $Z_{re}$  分别为阻抗虚部和阻抗实部， $Z$ 、 $f$  和  $\theta$  分别为阻抗幅模、频率和相位角。表 1 中列出了电荷转移电阻  $R_{ct}$ 、钝化膜电阻  $R_f$  的拟合结果，其中，成膜电位  $E_{mp}$  分别对应于钝化膜形成、钝化膜较为完整和钝化膜破裂 3 个阶段<sup>[15]</sup>。从 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在 350~625 °C 时效处理 4 h 后的 Nyquist 图 (图 4a) 可知，4 种时效温度下 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的 Nyquist 图中均可见相似的低频容抗弧，说明在此时效温度范围 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的腐蚀机理相同<sup>[16-17]</sup>；如图 4b 所示，在 0.1 V 成膜电位下，350 °C/4 h 时效后不锈钢的阻抗幅模值  $|Z|$  在低频区相对 450 °C/4 h、535 °C/4 h 和 625 °C/4 h 时效处理发生上移，即表明此时的钝化膜电阻相对较高，在相同腐蚀条件下会具有更高的耐腐蚀性能，这与图 3 和表 1 的测试结果保持一致。此外，从图 3 的极化曲线拟合结果来看，不同时效温度下，电极表面弥散系数  $n$  的值均在 0.84 以上，这说明此时的表面扩散程度较小<sup>[18]</sup>；在成膜电位不变时，1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的电荷转移电阻  $R_{ct}$  会随着时效温度的升高先减小后增大，即不锈钢表面发生电化学反应的难易程度先减小后增大，而钝化膜电阻同样表现为先减小后增大的趋势则表明表面钝化膜的致密性和耐腐蚀性能会随着时效温度的升高先降低后升高<sup>[19-21]</sup>。

20.8、55.9、66.0 和 44.5 g·(m²·h)<sup>-1</sup>。从时效热处理后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的静态浸泡腐蚀性能测试结果可知，随着时效温度升高，平均腐蚀深度和腐蚀速率均表现为先增后降趋势，在时效温度为 350 °C 时，1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢具有最小的平均腐蚀深度和腐蚀速率，即具有最佳的静态耐浸泡腐蚀性能。



表 1 350~625 ℃时效处理 4 h 后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  
EIS 拟合结果

Table 1 Fitting results of EIS for 1Cr16Ni4Mo2N stainless  
steel after aging treatment at 350~625 ℃ for 4 h

时效 温度/ ℃	$E_{mp}/$ V	$R_{ct}/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_f/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	常相位角元件 CPE 电 容/( $\times 10^{-5} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$n$
350	-0.18	5.71	$6.32 \times 10^4$	8.04	0.9309
	0.00	5.80	$9.40 \times 10^4$	4.62	0.9467
	0.30	5.51	5.13	28.41	0.9316
450	-0.18	2.43	$2.10 \times 10^4$	8.83	0.9071
	0.00	2.46	$4.85 \times 10^4$	5.44	0.9329
	0.30	2.38	$2.51 \times 10^3$	3.35	0.9302
535	-0.18	2.21	$2.90 \times 10^4$	6.29	0.9190
	0.00	2.20	$3.74 \times 10^4$	4.12	0.9480
	0.30	2.12	$1.515 \times 10^3$	3.70	0.9445
625	-0.18	4.87	$6.26 \times 10^4$	6.97	0.8957
	0.00	4.95	$4.14 \times 10^4$	4.31	0.9278
	0.30	4.81	$2.527 \times 10^3$	4.77	0.8437

图 6 为 350~625 ℃时效处理 4 h 后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在 FeCl<sub>3</sub> 溶液中的点腐蚀坑显微形貌。在时效温度为 350 ℃时，点腐蚀坑呈类圆形，边缘较为圆钝，直径约为  $\Phi 158 \mu\text{m}$ ；时效温度增加至 450 ℃时，点腐蚀坑呈敞口状椭圆形，边缘可见微裂纹；时效温度为 535 ℃时，点腐蚀坑直径增加至  $\Phi 220 \mu\text{m}$  左右，点腐蚀坑呈半封闭类圆形，边

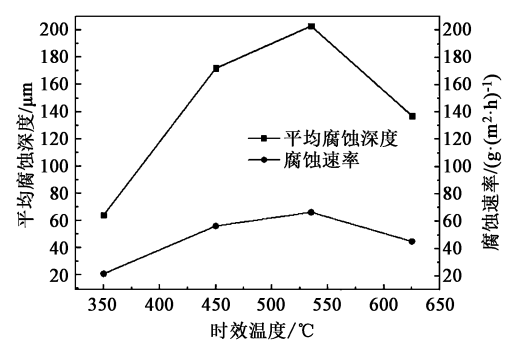


图 5 不同温度时效处理后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的浸泡腐蚀  
试验结果

Fig. 5 Immersion corrosion test results of 1Cr16Ni4Mo2N stainless  
steel after aging treatment at different temperatures

缘较为粗糙，在点蚀萌生后丝状腐蚀会继续横向扩展，点腐蚀坑内还可见腐蚀微孔；时效温度为 625 ℃时，点腐蚀坑直径减小至约  $\Phi 146 \mu\text{m}$ ，但是腐蚀坑深度相较时效温度为 350 ℃时更深。对比分析可知，当时效温度为 350 和 450 ℃时，点腐蚀坑呈敞口状，在 FeCl<sub>3</sub> 溶液浸泡过程中更容易与孔外介质发生交换<sup>[22-23]</sup>，点腐蚀坑的横向宽度和纵向深度较为接近，而当时效温度上升至 535 和 625 ℃时，点腐蚀坑呈半封闭状，点腐蚀坑形状的差异会影响腐蚀过程中腐蚀产物的剥落和聚集，从而在腐蚀坑横向宽度和纵向深度上造成差异。静态浸泡腐蚀形貌的观察结果与图 5 所示腐蚀速率的测试结果相吻合，且与电化学性能测试结果保持一致。

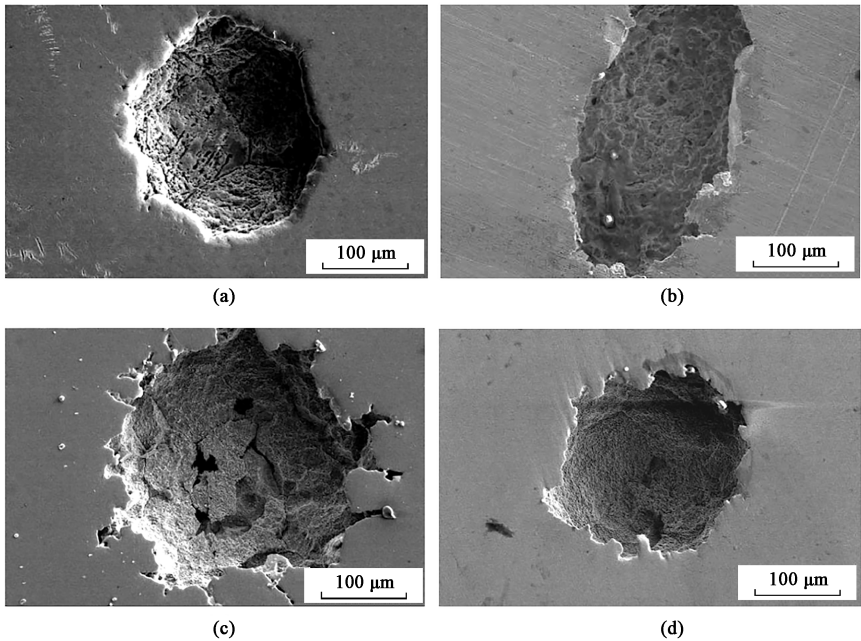


图 6 不同温度时效处理后 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的腐蚀形貌  
(a) 350 ℃ (b) 450 ℃ (c) 535 ℃ (d) 625 ℃

Fig. 6 Corrosion morphologies of 1Cr16Ni4Mo2N stainless steel after aging treatment at different temperatures

### 3 结论

(1) 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢在 350~625 ℃ 时效处理 4 h 后, 基体组织为 M+A, 且随着时效温度的升高, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢呈现由 M 组织转变为 A 组织的趋势; 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的屈服强度和抗拉强度随着时效温度的增大先增大后降低,  $R_{el}$  和  $R_m$  最大值在时效温度为 450 ℃ 时取得, 时效温度为 350 ℃ 时不锈钢具有较好的强塑性。

(2) 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的  $E_b$  和  $E_{b100}$  随着时效温度的升高先减小后增大, 在时效温度为 350 ℃ 时取得最大值, 在时效温度为 535 ℃ 时取得最小值, 时效温度为 350 ℃ 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢具有最佳耐腐蚀性能。

(3) 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢的平均腐蚀深度和腐蚀速率随着时效温度的变化趋势相同, 即随着时效温度升高, 平均腐蚀深度和腐蚀速率均表现为先增后降趋势, 在时效温度为 350 ℃ 时, 1Cr16Ni4Mo2N 不锈钢具有最小的平均腐蚀深度和腐蚀速率, 即具有最佳的静态耐浸泡腐蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] 傅菁. 某装置不锈钢管道泄漏原因分析与对策 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37 (4): 122-124.  
Fu Q. Analysis and countermeasures of stainless steel pipe leakage in a certain unit [J]. Total Corrosion Control, 2023, 37 (4): 122-124.
- [2] 张小丽, 寻懋年, 梁小红, 等. 含 Ce S31254 超级奥氏体不锈钢析出相析出行为及耐蚀性 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43 (2): 384-390.  
Zhang X L, Xun M N, Liang X H, et al. Precipitation of second phase and its effect on corrosion resistance of Ce-containing S31254 super austenitic stainless steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (2): 384-390.
- [3] 苗华军. 时效处理对超级双相不锈钢 00Cr29Ni6Mo2N 组织和耐点蚀性的影响 [J]. 特殊钢, 2021, 42 (5): 81-84.  
Miao H J. Effect of aging treatment on microstructure and pitting corrosion property of 00Cr29Ni6Mo2N super duplex stainless steel [J]. Special Steel, 2021, 42 (5): 81-84.
- [4] Han X L, Wei P, Zhao Y M, et al. Enhanced pitting corrosion resistance of nanostructured AISI 304 stainless steel via pipe inner surface grinding treatment [J]. Nanomaterials, 2023, 13 (2): 318-324.
- [5] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [6] GB/T 229—2020, 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法 [S].  
GB/T 229—2020, Metallic materials—Charpy pendulum impact test method [S].
- [7] GB/T 17897—2016, 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点蚀腐蚀试验方法 [S].  
GB/T 17897—2016, Corrosion of metals and alloys—Corrosion test for pitting corrosion resistance of stainless steels in the ferric chloride solution [S].
- [8] 赵博, 臧伟, 郇飞, 等. 时效热处理对新型节镍双相不锈钢组织及性能的影响 [J]. 钢管, 2023, 52 (1): 25-29.  
Zhao B, Zang W, Gao F, et al. Effect by aging heat treatment on structure and properties of new nickel-saving duplex stainless steel [J]. Steel Pipe, 2023, 52 (1): 25-29.
- [9] 范春华, 李国祥, 李雪莹, 等. AM355 不锈钢在酸性溶液中的腐蚀电化学行为 [J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36 (1): 121-124, 157.  
Fan C H, Li G X, Li X Y, et al. Electrochemical corrosion behavior of AM355 stainless steel in acid solution [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36 (1): 121-124, 157.
- [10] 唐炯, 张雷, 王竹, 等.  $SO_4^{2-}$  对含  $Cl^-$  溶液中 316L 奥氏体不锈钢钝化行为及点蚀行为的影响 [J]. 工程科学学报, 2018, 40 (3): 366-372.  
Tang X, Zhang L, Wang Z, et al. Effect of  $SO_4^{2-}$  on the passive and pitting behavior of 316L austenitic stainless steel in  $Cl^-$ -containing solution [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40 (3): 366-372.
- [11] 纪翔, 张汛涛, 宋先捷, 等. 不同热处理后航空紧固件用 17-4PH 钢耐腐蚀性及硬度的研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (20): 130-136.  
Ji X, Zhang X T, Song X J, et al. Study on corrosion resistance and hardness of 17-4PH steel for aviation fasteners after different heat treatment [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (20): 130-136.
- [12] 孙永伟, 范芳雄, 王灵水. 热处理制度对 UNS S32750 超级双相不锈钢微观组织及腐蚀行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (6): 111-120.  
Sun Y W, Fan F X, Wang L S. Effect of heat treatment process on microstructure and corrosion behavior of UNS S32750 super duplex stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (6): 111-120.
- [13] Zhao L, Qian H C, Chang W W, et al. Effect of aging heat treatment on microbiologically influenced corrosion of 17-4PH stainless steel by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Corrosion Science, 2024, 227: 111739-111743.
- [14] Ahmad S, Mehta M L, Saraf S K, et al. Electrochemical studies of stress corrosion cracking of sensitized AISI 304 stainless steel in polythionic acids [J]. Corrosion, 2012, 41 (6): 363-367.
- [15] 赵兰英, 陈家兴. 时效处理对 Cr20Mn18Ni0.5 高氮奥氏体不锈钢组织与力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (22): 132-134.

(下转第 254 页)