

## 表面失效及防护

# 不同热处理态的 304 和 321 奥氏体不锈钢在氯化铵环境中的应力腐蚀行为对比研究

马宏驰, 吴伟, 周霄骋, 王亮

(北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 对比研究原始、固溶和敏化态的 304 和 321 奥氏体不锈钢在模拟加氢催化氯化铵环境中的应力腐蚀 (SCC) 行为及机理。**方法** 将 304 和 321 奥氏体不锈钢经过热处理制备成固溶和敏化态试样, 采用 U 形弯试样在模拟加氢催化氯化铵环境中浸泡的应力腐蚀试验方法对其进行研究, 通过观察 U 形弯弧顶的腐蚀形貌和开裂时间, 并结合腐蚀及裂纹的 SEM 照片和电化学测试结果进行分析。**结果** 原始和固溶状态 304 不锈钢 U 形弯试样在氯化铵溶液环境中开裂时间为 25 d 左右, 断口形貌分别为穿晶断口和沿晶断口; 敏化态试样 18 d 后发生开裂, 断口形貌为穿晶和沿晶的混合断口。原始和固溶态 321 不锈钢 U 形弯试样在该环境中经过 39 d 均无应力腐蚀裂纹; 敏化试样经 30 d 后产生宏观开裂。电化学测试结果显示, 不同热处理态的 304 不锈钢在氯化铵溶液中均具有明显的点蚀敏感性, 321 不锈钢在该环境中耐点蚀和应力腐蚀的能力优于 304 不锈钢。**结论** 不同状态的 304 不锈钢在高温氯化铵环境中具有较强的应力腐蚀倾向, 特别是敏化态试样; 321 不锈钢在该环境中的应力腐蚀敏感性相对较小, 但敏化处理显著增加了其沿晶应力腐蚀倾向, 而固溶态试样具有明显的沿晶腐蚀特征。

**关键词:** 奥氏体不锈钢; 氯化铵; 应力腐蚀; 固溶处理; 敏化

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0126-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.019

## Comparative Study on Stress Corrosion Cracking Behaviors of 304 and 321 Austenitic Stainless Steels by Different Heat Treatment in $\text{NH}_4\text{Cl}$ Solution

MA Hong-chi, WU Wei, ZHOU Xiao-cheng, WANG Liang

(Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare and study the stress corrosion cracking (SCC) behaviors and mechanism of 304 and 321 austenitic stainless steels in original state, solution treatment, sensitization in simulated catalytic hydrogenation  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -containing environment. 304 and 321 austenitic stainless steels were prepared to solid solution and sensitization specimens by heat treatment and investigated by the stress corrosion test of U-bend specimens immersed in simulated catalytic hydrogenation  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -containing solution. Based on corrosion morphology on U-bend and cracking time, SEM microscopic analysis and electrochemical measurements of corrosion or crack morphology were employed to conduct analysis. The cracking time

收稿日期: 2018-06-24; 修订日期: 2018-07-29

Received: 2018-06-24; Revised: 2018-07-29

基金项目: 国家材料环境腐蚀平台项目 (NECP) 和国家自然科学基金 (51801011, 51671028)

Fund: Supported by National Environmental Corrosion Platform (NECP) and the National Natural Science Foundation of China (51801011, 51671028)

作者简介: 马宏驰 (1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。邮箱: mahongchi128@163.com

Biography: MA Hong-chi (1985—), Male, Ph. D., Assistant professor, Research focus: metal corrosion and protection. E-mail: mahongchi128@163.com

for 304 stainless steel U-bend in original and solid solution states was approximately 25 days and the fracture morphology was transgranular and intergranular fracture respectively. The cracking time for sensitized specimen was 18 days and the fracture morphology was the combination of transgranular and intergranular fracture. 321 stainless steel U-bend did not appear stress corrosion crack after 39 days at original and solid solution states, but the sensitized specimen generated macro cracks after 30 days. From the electrochemical test results, 304 stainless steel at different heat treatment states had obvious pitting sensitivity in  $\text{NH}_4\text{Cl}$  and the pitting and stress corrosion resistance of 321 stainless steel in such environment was better than that of 304 stainless steel. 304 stainless steel at different states has higher SCC susceptibility in high temperature  $\text{NH}_4\text{Cl}$  environment for different heat treatment, especially for sensitized one. In comparison, the SCC susceptibility of 321 stainless steel in such environment is relatively low. However, sensitization treatment greatly enhances its susceptibility to intergranular stress corrosion cracking (IGSCC), while the solid solution specimen has obvious characteristic of intergranular corrosion.

**KEY WORDS:** austenitic stainless steel;  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; stress corrosion cracking; solution treatment; sensitization

石油是一种不可再生的能源资源和战略资源, 随着人类的不断开采, 优质原油已日渐稀缺。随着对石油需求量的不断增加, 人们对稠油、高凝油、低渗透油的开采愈来愈多, 全球已经全面进入了劣质原油时代, 我国情况尤甚。为了提升炼化劣质原油的能力, 石油炼化企业普遍采用不锈钢作为关键装置或结构材料。但原油中含有大量的氯, 不仅会导致设备的全面腐蚀加剧、铵盐堵塞以及催化剂中毒等问题, 硫化物或氯化物的存在还会对各种不锈钢构件造成严重的局部腐蚀, 尤其是应力腐蚀<sup>[1-6]</sup>, 使炼油厂的装置和设备发生严重的腐蚀事故, 进而导致非正常停工、停产甚至人员伤亡。

304、321 等 300 系奥氏体不锈钢由于较高的性价比而广泛用于石油炼化行业中<sup>[7-8]</sup>, 然而石油炼化装置中的环境苛刻而复杂, 常出在高温、高硫、低 pH、高  $\text{Cl}^-$  浓度等严酷环境, 导致不锈钢在该环境中的局部腐蚀行为和机理较为复杂, 腐蚀介质临界值难以判断和预防, 因而随着近年加工劣质原油比例的增加, 腐蚀问题也越来越严重<sup>[8-12]</sup>。Nishikata<sup>[13]</sup>研究表明, 304 不锈钢只有在氯离子浓度超过 6 M 时才会发生点蚀; Cheng<sup>[14]</sup>研究显示, 敏化处理降低了 304 不锈钢的点蚀电位, 增大了点蚀发生的临界湿度, 同时降低了临界氯离子浓度, 且使得点蚀形貌从圆形向不规则形状转变。张诚<sup>[15]</sup>在研究 316L 不锈钢在普光气田胺液中的应力腐蚀

行为时发现, 316L 不锈钢在高含硫含氯胺液环境中具有很好的韧性, 未发生应力腐蚀开裂, 胺液的碱性环境使得氯化物应力腐蚀开裂的门槛值显著上升。然而, 针对典型的不锈钢材料在高氯原油炼化环境中的腐蚀, 尤其应力腐蚀问题研究得还不够细致, 对应力腐蚀的预防、监控及工艺防腐等方面的指导性不强<sup>[3,16]</sup>。本文所研究的加氢催化氯化铵环境属于酸性环境, 且温度较高。

文中采用 U 形弯应力腐蚀试验方法, 结合腐蚀/裂纹形貌观察和电化学测试, 研究了原始、固溶和敏化态的 304 和 321 奥氏体不锈钢在模拟加氢催化氯化铵环境中的应力腐蚀行为及机理, 对于炼化设备的合理选材和服役寿命预测具有重要意义。

## 1 实验方法

实验材料为 304 和 321 不锈钢, 其化学成分如表 1 所示。将两种不锈钢进行两种方式处理: 在 1050 °C 保温 30 min, 然后水淬进行固溶处理; 在 600 °C 保温 2 h, 然后空冷至室温以实现敏化处理。将原始试样和固溶、敏化处理后的试样依次用水磨砂纸逐级打磨至 2000#, 经 0.5  $\mu\text{m}$  金刚石抛光膏抛光后, 采用王水侵蚀, 并在 QUANTA 250 扫描电子显微镜 (SEM) 下观察微观组织结构。

表 1 304 和 321 奥氏体不锈钢化学成分  
Tab.1 Chemical compositions of 304 and 321 austenitic stainless steels

| Component | C     | Cr    | Ni    | Mn   | Si   | P    | S    | Fe   |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 304       | 0.065 | 17.55 | 10.39 | 2.48 | 0.63 | 0.32 | 1.01 | Bal. |
| 321       | 0.022 | 18.05 | 10.03 | 2.23 | 0.86 | 0.29 | 1.15 | Bal. |

应力腐蚀实验采用恒应变 U 形弯试样, 试样制备参照 ASTM G30-97(2009)<sup>[17]</sup> 执行, 通过线切割切取 95 mm×14 mm×2 mm 的平板试样, 采用水砂纸

将试样逐级打磨至 2000#, 经除油、脱水后, 吹干备用。采用 U 形压头将其压弯至张角为 30° 左右, 并采用螺栓加载至两肩平行, 试样与螺栓之间采用

聚四氟乙烯垫圈隔开。根据某炼油厂催化加氢装置中的腐蚀环境,换热器、冷凝管常有铵盐沉积,且氯离子浓度较高,装置所处环境温度较高,因而根据现场腐蚀介质中的氯离子浓度,在实验室中采用接近沸腾状态的1%  $\text{NH}_4\text{Cl}$  水溶液作为模拟溶液。实验在水浴锅中的烧杯中进行,温度控制为  $98 \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ ,为保持溶液环境的稳定,将烧杯口用塑料膜密封。将U形弯试样放入烧杯中进行浸泡试验,每天观察裂纹萌生和开裂情况,直至出现宏观开裂,39 d后如还未开裂即终止试验。实验结束后,用酒精脱水吹干后进行宏观拍照,并切取弧顶区域,采用除锈液(10%  $\text{HNO}_3$  + 2%  $\text{HF}$ )进行除锈、超声清洗、吹干后,用SEM观察断口微观形貌和弧顶表面的腐蚀形貌。

为分析两种不锈钢经不同热处理后的应力腐蚀敏感性,采用阳极回扫极化曲线法研究两种不锈钢钝化膜的稳定性和点蚀敏感性。将10 mm×10 mm的试样背面焊上导线,用环氧树脂镶样,表面经机械抛光至2000#水砂纸,再用丙酮脱脂、酒精脱水、离子水冲洗后,立刻放入98  $^{\circ}\text{C}$ 的1%  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液中,采用PARSTAT2273型电化学测试系统测量开路电位。采用三电极体系,以Pt片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,扫描速率为20 mV/min,直到阳极电流密度超过1000  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 后反向扫描,回到与初始极化曲线相交后停止。根据国标GB/T 17899—1999,在阳极极化曲线上与

电流密度  $J_a=100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  所对应的电位最高值为击穿电位( $E_b$ ),回扫极化曲线与初始极化曲线相交点对应的电位为保护电位( $E_p$ )。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 微观组织分析

两种钢的原始组织和经过不同热处理后的微观组织如图1所示。可见,经过固溶处理后,晶粒均有不同程度的长大。304不锈钢经固溶处理后,其晶界粗化,原因是由于在高温保温过程中,随着晶粒的长大,碳等杂质原子在晶界发生偏析,导致晶界贫铬,在浸蚀剂的浸蚀下优先发生腐蚀,显示出粗大的晶界。有研究显示,不锈钢固溶处理不仅使晶粒显著增大,还增加了其晶间腐蚀敏感性<sup>[16]</sup>。敏化后也呈现粗化的晶界,原因是在敏化温度区间长时间保温时,碳有足够的时间扩散至晶界,与晶界附近的Cr形成 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ <sup>[18-19]</sup>,导致晶界贫铬,表现为浸蚀后的晶界粗化。321不锈钢经固溶处理后没有显示出粗化的晶界,而敏化处理后显示出粗化的晶界,但比304不锈钢稍轻微。原因可能是由于321不锈钢的碳含量远低于304不锈钢,因而碳在晶界的偏析和碳化物的析出相对较少。有研究表明,较低的碳含量可减轻晶间腐蚀倾向,有效改善抗晶间腐蚀性能<sup>[4,20]</sup>。

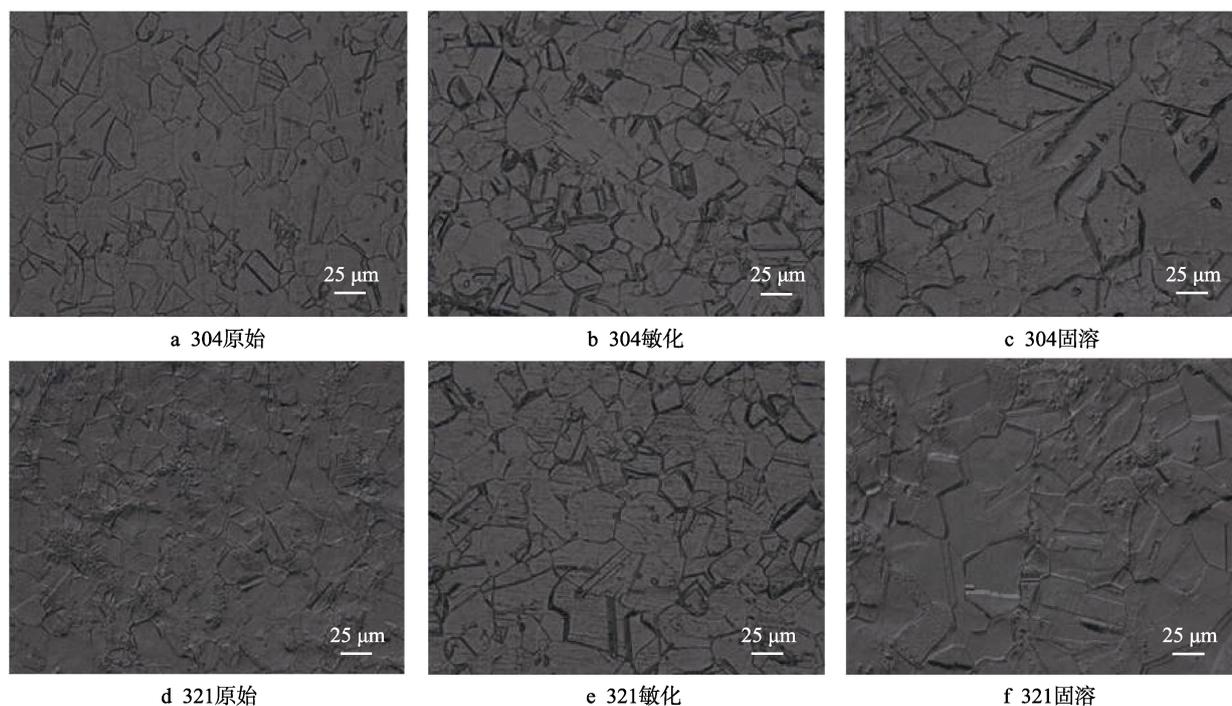


图1 304和321奥氏体不锈钢原始组织和不同热处理态的微观组织

Fig.1 Microstructures Original structures of and microstructures of 304 and 321 austenitic stainless steels with at different heat treatment original states: a) 304 at original state; b) 304 at sensitization state; c) 304 at solid solution state; d) 321 at original state; e) 321 at sensitization state; f) 321 at solid solution state

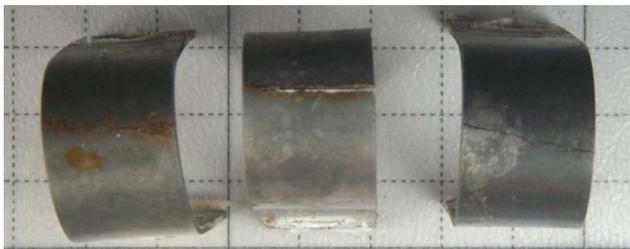
## 2.2 U 形弯应力腐蚀行为

表 2 为不同状态的 304 和 321 不锈钢 U 形弯试样发生应力腐蚀的开裂时间。结果显示，不同状态的 304 不锈钢 U 形弯试样在试验条件下均在很短的时间内发生应力腐蚀开裂，原始和固溶状态开裂时间为 25 d 左右，敏化状态试样 18 d 后即发生开裂，试样宏观形貌如图 2 所示。这表明 304 不锈钢

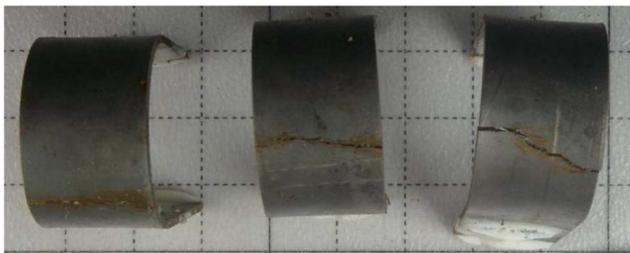
在含  $\text{Cl}^-$  环境中具有较强的应力腐蚀倾向，而敏化处理又进一步增加了其 SCC 敏感性。321 不锈钢 U 形弯试样在试验条件下，仅有敏化状态的试样产生应力腐蚀裂纹，而原始试样和固溶态试样经过 39 d 的浸泡试验后均没有应力腐蚀裂纹的萌生，如图 3 所示。这表明 321 不锈钢在氯化铵环境中具有一定的应力腐蚀抗性，而敏化处理增加了其应力腐蚀敏感性。

表 2 304 和 321 不锈钢 U 形弯试样开裂时间  
Tab.2 Cracking time of U-bend specimen of 304 and 321 stainless steels

| Materials | Specimens | As-received/d  | Sensitized/d | Solution treated/d |
|-----------|-----------|----------------|--------------|--------------------|
| 304SS     | 01        | 18             | 18           | 22                 |
|           | 02        | 18             | 18           | 22                 |
|           | 03        | 39             | 18           | 30                 |
|           | Average   | 25±9.9         | 18           | 24.6±3.7           |
| 321SS     | 01        | No cracks (39) | 22           | No cracks (39)     |
|           | 02        | No cracks (39) | 30           | No cracks (39)     |
|           | 03        | No cracks (39) | 36           | No cracks (39)     |
|           | Average   | No cracks (39) | 29.3±5.7     | No cracks (39)     |



a 原始状态

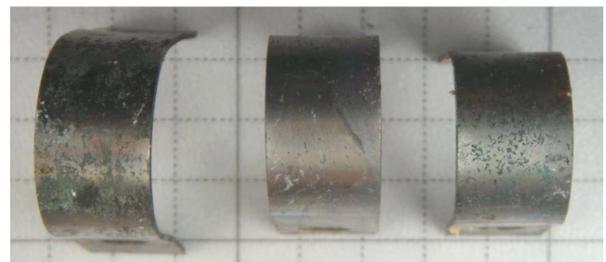


b 敏化状态

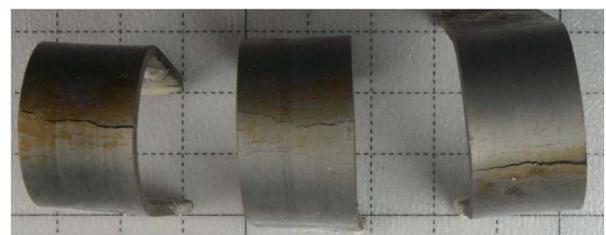


c 固溶状态

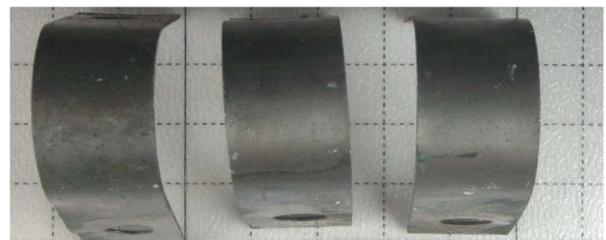
图 2 304 不锈钢 U 形弯试样浸泡试验后的宏观形貌  
Fig.2 Macro-morphologies of 304 stainless steel U-bend specimen after SCC tests: a) original state; b) sensitization; c) solution treatment



a 原始状态



b 敏化状态



c 固溶状态

图 3 321 不锈钢 U 形弯试样浸泡试验后的宏观形貌  
Fig.3 Macro-morphologies of 321 stainless steel U-bend specimen after SCC tests: a) original state; b) sensitization; c) solution treatment

图 4 为 304 不锈钢原始、敏化、固溶处理的 U 形弯试样裂纹断口的 SEM 形貌。由宏观形貌可看出，三种状态下的应力腐蚀裂纹均基本贯穿整个试样的厚度，表明不同状态的 304 不锈钢经过 18~39 d 的应力腐蚀试验后，已发生完全的宏观开裂。而由微观形貌可见，原始试样断口（图 4b）为典型的穿晶应力腐蚀（TG-SCC）断口，表明原始态 304 不锈钢虽然具有较高的应力腐蚀敏感性，但无明显的沿晶应力腐蚀特征。敏化后的 304 不锈钢 U 形弯试样呈现出沿晶和穿晶（TG-SCC+IG-SCC）的混合断口（图 4b），表明 304 不锈钢经敏化处理后具有一定的晶间腐蚀倾向，表现出晶界敏化影响晶间腐蚀和沿晶应力腐蚀的特征。原因是由于敏化温度区间长时间保温有利于碳的扩散和碳化铬在晶界的析出<sup>[21-22]</sup>，进而使晶界贫铬，因而在氯离子环境中，晶界区钝化膜不稳定，更易受到氯离子的侵蚀和破坏，在晶界处形成点蚀或发生沿晶阳极溶解，从而在应力作用下发生沿晶应力腐蚀开裂。固溶处理后的 304 不锈钢 U 形弯试样裂纹断口表现为典型的沿晶应力腐蚀（IG-SCC）断口（图 4f），原因可能是在固溶保温过程中碳和杂质原子在晶界发生偏析<sup>[23]</sup>，且由于  $Cr_{23}C_6$  的析出温度为 648~1147 °C<sup>[24]</sup>，因而在 1050 °C 固溶时仍然会发生

碳化铬在晶界的析出和晶界贫铬，晶界在腐蚀介质中作为阳极而发生选择性的沿晶腐蚀，从而导致明显的沿晶应力腐蚀开裂。

图 5 为 321 不锈钢原始、敏化、固溶处理的 U 形弯试样表面腐蚀形貌或断口形貌。原始和固溶处理试样经过 39 d 的浸泡试验后，弧顶区没有应力腐蚀裂纹的产生（图 3 所示），由弧顶表面的微观腐蚀形貌（如图 5a、c 所示）。可知，原始试样弧顶表面形成了密集细小的点蚀坑，但没有诱发裂纹的萌生，表明 321 不锈钢在氯化铵环境中具有一定的点蚀倾向，经过足够长时间的腐蚀可能会发展成大的点蚀坑或诱发应力腐蚀裂纹的萌生。321SS 原始和固溶处理试样在氯化铵溶液中经过 39 d 仍没有裂纹的萌生，应力腐蚀裂纹萌生时间远高于 304SS，表明其应力腐蚀敏感性明显低于 304 不锈钢，这可能与其相对较高的铬含量和较低的碳含量有关。固溶处理的试样经过 39 d 的浸泡试验后，在弧顶区形成溃疡状腐蚀（图 5c），微观形貌显示为明显的沿晶腐蚀，如果实验时间足够长，这种晶间腐蚀可能导致沿晶应力腐蚀的发生，表明固溶处理的 321 不锈钢在氯化铵环境中具有较高的晶间腐蚀倾向和潜在的应力腐蚀风险，原因可能与杂质原子在晶界的偏析有关，但其应力腐蚀倾向低于固

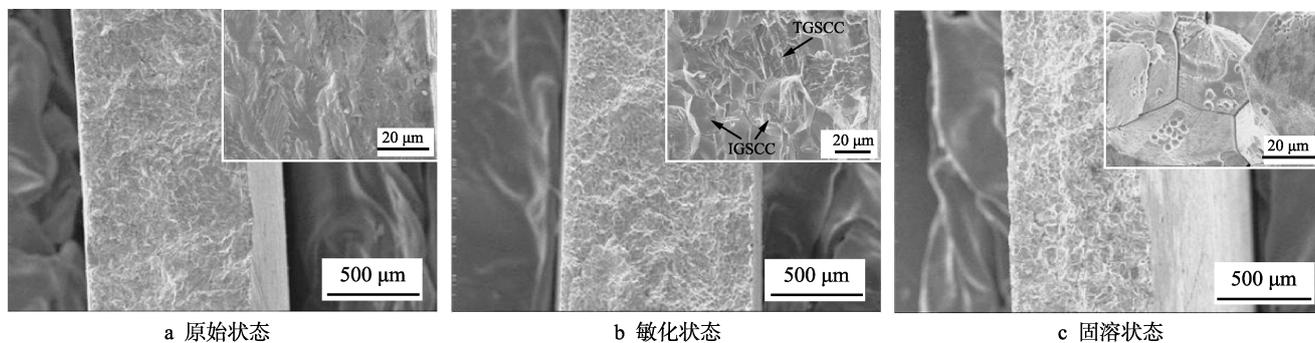


图 4 304 不锈钢 U 形弯试样裂纹断口的 SEM 微观形貌  
Fig.4 SEM micro-morphologies of 304 stainless steel U-bend specimen fracture:  
a) original state; b) sensitization; c) solution treatment

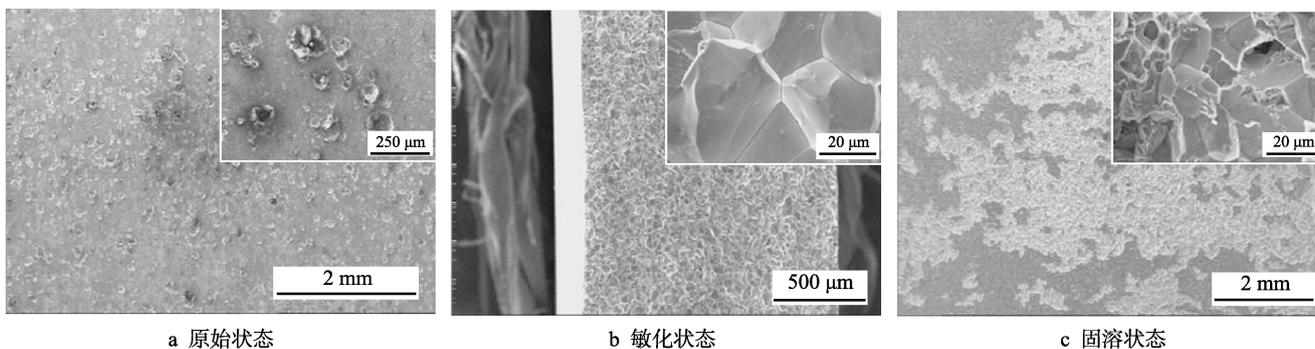


图 5 321 不锈钢 U 形弯试样弧顶微观腐蚀形貌或裂纹断口形貌  
Fig.5 Micro corrosion morphologies or fracture morphologies of 321 stainless steel U-bend specimen:  
a) original state; b) sensitization; c) solution treatment

溶处理的 304 不锈钢。敏化处理的 321 不锈钢 U 形弯试样经 22~36 d 的浸泡试验后均出现宏观开裂 (图 3b), 断口微观形貌如图 5b 所示, 结果显示应力腐蚀裂纹基本贯穿整个试样的厚度, 且断口形貌为典型的沿晶开裂, 表明敏化后的 321 不锈钢具有明显的沿晶应力腐蚀倾向, 这与图 1 的金相侵蚀形貌是一致的。原因是由于在 600 °C 敏化处理时, C 原子向晶界扩散, 与晶界附近的 Cr 结合形成  $Cr_{23}C_6$ , 导致晶界贫铬。

### 2.3 动电位极化曲线

为分析两种不锈钢经不同热处理状态后在氯化铵环境中的点蚀和应力腐蚀敏感性, 采用阳极回扫极化曲线法研究两种不锈钢的电化学行为。根据阳极回扫极化曲线可以得到两个参数, 一个是击穿电位 (即点蚀电位)  $E_b$ , 一个是保护电位  $E_p$ 。当阳极电位高于  $E_b$  时, 会发生点蚀 (或应力腐蚀); 电位低于  $E_b$  但高于  $E_p$  时, 不会产生新的点蚀, 但原有点蚀 (裂纹) 会生长; 当电位低于  $E_p$  时, 不会发生点蚀, 原有的蚀坑也不会长大。该实验可用于进一步评价不锈钢钝化膜稳定性以及点蚀或应力腐蚀敏感性。

图 6 为 304 不锈钢原始、固溶和敏化处理试样的阳极回扫极化曲线。由图可知, 不同试样回扫曲线与初始极化曲线差别明显, 表明不同试样在该环境中均具有明显的点蚀敏感性。此外, 原始试样的点蚀电位最高, 经过固溶和敏化处理后, 点蚀电位出现一定程度下降, 如表 3 所示, 表明经过热处理后 304 不锈钢的钝化膜稳定性和点蚀抗力降低。原因是晶界碳化铬的形成使得基体中的铬含量降低, 而铬在钝化膜的形成和稳定中具有至关重要的作用<sup>[25-26]</sup>, 因而晶界的贫铬区在氯化铵溶液中易受到氯离子的侵蚀而发生点蚀, 进而导致沿晶应力腐蚀的发生, 这与 U 形弯应力腐蚀试验结果是一致的。

图 7 为 321 不锈钢原始、固溶和敏化处理试样的阳极回扫极化曲线, 不同热处理态的点蚀电位如表 3 所示。与 304 不锈钢的结果相比, 321 不锈钢的回扫曲线与初始极化曲线更为接近, 表明 321 不锈钢

在氯化铵溶液中耐点蚀和应力腐蚀的能力优于 304 不锈钢, 这与 U 形弯浸泡实验结果一致。固溶试样的点蚀电位比原始和敏化试样稍高, 但其维钝电流密度较高; 敏化试样的极化曲线与原始试样相差不大, 表明其耐点蚀能力与原始试样相当。其应力腐蚀敏感性的升高是由晶界敏化造成的, 钝化膜的破裂和点蚀的萌生优先沿着晶界贫铬区形成, 导致沿晶应力腐蚀的发生。

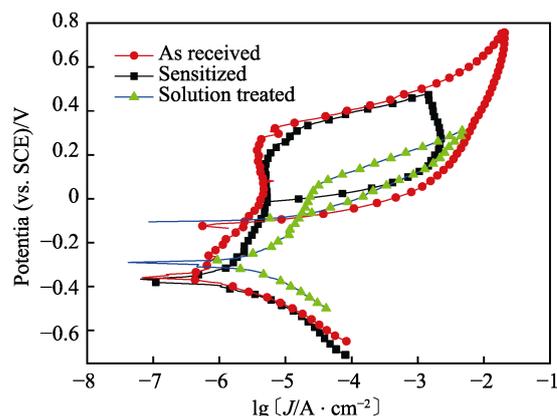


图 6 304 不锈钢原始、固溶和敏化处理试样的阳极回扫极化曲线

Fig.6 Anodic back-scanning polarization curves for 304 stainless steel specimen treated at original state, solid solution and sensitization

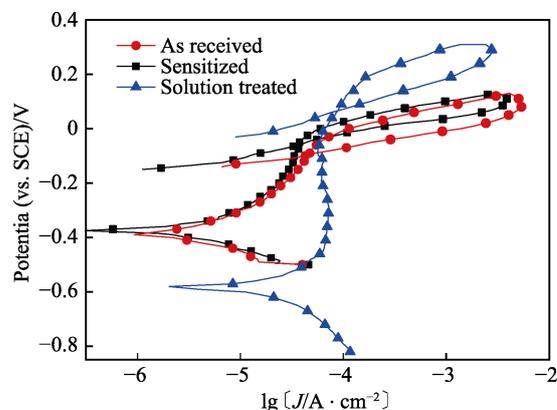


图 7 321 不锈钢原始、固溶和敏化处理试样的阳极回扫极化曲线

Fig.7 Anodic back-scanning polarization curves for 321 stainless steel specimen treated at original state, solid solution and sensitization

表 3 不同热处理态的 304SS 和 321SS 在热氯化铵溶液中的点蚀电位  
Tab.3 Pitting potentials of 304SS and 321SS in hot  $NH_4Cl$  solution at heat treatment states

| Materials state | 304SS       |            |                  | 321SS       |            |                  |
|-----------------|-------------|------------|------------------|-------------|------------|------------------|
|                 | As-received | Sensitized | Solution-treated | As-received | Sensitized | Solution-treated |
| $E_b/V$         | 0.279       | 0.194      | 0.052            | -0.053      | -0.044     | 0.189            |

## 3 结论

1) 原始、固溶、敏化态的 304 不锈钢在高温

氯化铵环境中均具有较强的应力腐蚀倾向, 特别是敏化态试样。原始和固溶态试样断口分别为典型的穿晶和沿晶断口, 敏化态试样为穿晶和沿晶的混合

断口。

2) 321 不锈钢由于较低的碳含量而具有相对较轻的应力腐蚀倾向,但是敏化处理增加了其沿晶应力腐蚀敏感性,而固溶态试样具有明显的沿晶腐蚀特征。

#### 参考文献:

- [1] HOU B R, LI X G, MA X M, et al. The cost of corrosion in China[J]. *npj Materials degradation*, 2017, 1(1): 1-10.
- [2] 周敏. 中国石油炼化企业腐蚀与控制现状[J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(2): 62-68.  
ZHOU M. Current condition of corrosion and control for Chinese oil process company[J]. *Corrosion & protection*, 2012, 33(2): 62-68.
- [3] 刘建洲. 奥氏体不锈钢的应力腐蚀及其防护[J]. *石油化工设备技术*, 2010, 31(4): 49-53.  
LIU J Z. Stress corrosion and control for austenitic stainless steel[J]. *Petro-chemical equipment technology*, 2010, 31(4): 49-53.
- [4] 孙京丽, 邹丹, 金晶, 等. 三种常用不锈钢的耐局部腐蚀性能[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(9): 665-671.  
SUN J L, ZOU D, JIN J, et al. Localized corrosion resistance of three commonly-used stainless steels[J]. *Chinese journal of materials research*, 2017, 31(9): 665-671.
- [5] 李斌, 邢希金, 张鑫, 等. 酸性环境下溶解氧对低合金管材点蚀的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(3): 246-252.  
LI Bin, XING Xi-jin, ZHANG Xin, et al. Effects of dissolved oxygen on pitting of low alloy tubes in acidic environment[J]. *Surface technology*, 2017, 46(3): 246-252.
- [6] LIU Z Y, DONG C F, LI X G. Stress corrosion cracking behaviour of two stainless steels in hydrogen sulfide environment[J]. *Materials science and technology*, 2009, 31(3): 318-323.
- [7] 崔思贤. 不锈钢的发展及其在石油化工工业中的应用(1)[J]. *石油化工腐蚀与防护*, 1994, 11(4): 1-5.  
CUI S X. Development and application of austenitic stainless steel in oil and chemistry industry (1)[J]. *Petro-chemical corrosion and control*, 1994, 11(4): 1-5.
- [8] 孙亮, 侯艳宏, 杨席, 等. 炼油加工过程中氯离子与硫离子对 316L 不锈钢和 Monel 合金腐蚀的影响[J]. *表面技术*, 2015, 44(12): 41-48.  
SUN L, HOU Y H, YANG X, et al. Effect of chlorine ion and sulfur ion on corrosion of 316L stainless steel and Monel alloy in oil refining process[J]. *Surface technology*, 2015, 44(12): 41-48.
- [9] 姚鹏程, 谢俊峰, 杨春玉, 等. 高温高压环境 Cl<sup>-</sup>浓度和 CO<sub>2</sub> 分压对不锈钢油管的影响[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, 31(10): 67-70.  
YAO P C, XIE J F, YANG C Y, et al. Effect of chloride concentration and CO<sub>2</sub> partial pressure on stainless steel tubing under high temperature and high pressure[J]. *Total corrosion control*, 2017, 31(10): 67-70.
- [10] 赵国仙, 王雅倩, 计玲, 等. 油田苛刻环境中 2205 双相不锈钢的腐蚀行为[J]. *机械工程材料*, 2018, 42(2): 82-87.  
ZHAO G X, WANG Y Q, JI L, et al. Corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in severe environment of oil field[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2018, 42(2): 82-87.
- [11] 林海, 许杰, 范白涛, 等. L80 钢在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀环境中的力学特性[J]. *表面技术*, 2016, 45(5): 91-96.  
LIN Hai, XU Jie, FAN Bai-tao, et al. Mechanical properties of L80 steel in CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S environment[J]. *Surface technology*, 2016, 45(5): 91-96.
- [12] 马大永. 两种不锈钢填料在高酸含氯原油中的腐蚀行为[J]. *技术与教育*, 2017, 31(1): 8-12.  
MA D Y. Corrosion behaviors of two austenitic stainless steel padding in chloride-containing acidic oil [J]. *Technique & education*, 2017, 31(1): 8-12.
- [13] TSUTSUMI Y, NISHIKATA A, TSURU T. Pitting corrosion mechanism of type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions[J]. *Corrosion science*, 2007, 49(3): 1394-1407.
- [14] CHENG C Q, KLINKENBERG L I, ISE Y, et al. Pitting corrosion of sensitised type 304 stainless steel under wet-dry cycling condition[J]. *Corrosion science*, 2017, 118: 217-226.
- [15] 张诚. 316L 不锈钢在普光净化厂含氯胺液中的应力腐蚀开裂[J]. *腐蚀与防护*, 2016, 37(11): 900-903.  
ZHANG C. Stress corrosion cracking of 316L steel in chloride containing MDEA solution[J]. *Corrosion & protection*, 2016, 37(11): 900-903.
- [16] 杨宏泉, 段永锋. 奥氏体不锈钢的氯化物应力腐蚀开裂研究进展[J]. *全面腐蚀控制*, 2017, 31(1): 13-19.  
YANG H Q, DUAN Y F. Review on chloride stress corrosion cracking of austenitic stainless steels[J]. *Total corrosion control*, 2017, 31(1): 13-19.
- [17] ASTM G30-97. Standard practice for making and using U-bend stress corrosion test specimens[S].
- [18] 强少明, 江来珠, 李劲, 等. 双环电化学动电位再活化法评价 11Cr 铁素体不锈钢晶间腐蚀敏感性[J]. *金属学报*, 2015, 51(11): 1349-1355.  
QIANG S M, JIANG L Z, LI J, et al. Evaluation of intergranular corrosion susceptibility of 11Cr ferritic stainless steel by DL-EPR method[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2015, 51(11): 1349-1355.
- [19] 黄峻, 刘小光, 张晓云, 等. 电化学动电位再活化法评定不锈钢晶间腐蚀敏感[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1992, 4(4): 242-249.  
HUANG J, LIU X G, ZHANG X Y, et al. Evaluation of intergranular corrosion susceptibility of stainless steel by EPR method[J]. *Corrosion science and protection technique*, 1992, 4(4): 242-249.

- [20] HUANG X Z, WANG D, YANG Y T. Effect of precipitation on intergranular corrosion resistance of 430 ferritic stainless steel[J]. *Journal of iron and steel research, international*, 2015, 22(11): 1062-1068.
- [21] 毕宗岳, 严培林, 余晗, 等. 16Cr 奥氏体不锈钢晶间腐蚀的敏感性[J]. *材料保护*, 2017, 50(3): 26-28.  
BI Z Y, YAN P L, YU H, et al. Susceptibility of intergranular corrosion of 16Cr austenitic stainless steels[J]. *Materials protection*, 2017, 50(3): 26-28.
- [22] QIAN J, CHEN C F, YU H B, et al. The influence and the mechanism of the precipitate/austenite interfacial C-enrichment on the intergranular corrosion sensitivity in 310 S stainless steel[J]. *Corrosion science*, 2016, 111: 352-361.
- [23] TAKAHASHI J, ISHIKAWA K, KAWAKAMI K, et al. Atomic-scale study on segregation behavior at austenite grain boundaries in boron-and molybdenum-added steels[J]. *Acta materialia*, 2017, 133: 41-54.
- [24] DONG R F, LI J S, ZHANG T B, et al. Elements segregation and phase precipitation behavior at grain boundary in a Ni-Cr-W based superalloy[J]. *Materials characterization*, 2016, 122: 189-196.
- [25] CHENG X Q, WANG Y, LI X G, et al. Interaction between austenite-ferrite phases on passive performance of 2205 duplex stainless steel[J]. *Journal of materials science & technology*, 2018, 34(11): 2140-2148.
- [26] HOU Q, LIU Z Y, LI C T, et al. The mechanism of stress corrosion cracking of Alloy 690TT in a caustic solution containing lead[J]. *Corrosion science*, 2017, 128: 154-163.