

· 组织和性能 ·

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00069

445J2 超纯铁素体不锈钢和 316L 超低碳奥氏体 不锈钢在溴化锂溶液的点蚀分析

武卓杰^{1,3}, 侯利锋^{1,3}, 杜华云^{1,3}, 邹勇², 武敏², 范光伟², 卫英慧^{1,3}

(1 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 2 山西不锈钢股份有限公司, 太原 030003;

3 山西省金属材料腐蚀与防护工程技术研究中心, 太原 030024)

摘要: 445J2 铁素体不锈钢由于高的导热率、低的热膨胀系数以及良好的耐蚀性能使得其作为溴冷机中一些部件的良好候选材料, 本文采用电化学测试方法对比研究了 445J2 超纯铁素体不锈钢(%) : 0.01C, 22.5Cr, 1.9Mo, 0.27Nb, 0.20Ti, 0.09Al, 0.36Cu, 0.015P, 0.001S, 0.015N) 和 316L 奥氏体不锈钢(%) : 0.002C, 16.8Cr, 10.19Ni, 2.02Mo, 0.025P, 0.0008S) 在 20~60 °C 0.1~1M 的溴化锂溶液中的点蚀行为, 并采用扫描电镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)对电化学结果进行表征。结果表明, 随着 LiBr 温度和浓度的升高, 两种钢腐蚀电流密度增大, 点蚀电位降低, 耐点蚀性变差; 氧化物和硫化物夹杂会引起两种钢的点蚀; 高含量的 Cr 以及 Mo、Ti、Nb、Al 等合金元素使 445J2 钢具有优异的耐点蚀性能。

关键词: 445J2 超纯铁素体不锈钢; 316L 超低碳奥氏体不锈钢; 点蚀; 溴化锂

Pitting Erosion Analysis of Ultra-Pure Ferritic Stainless Steel 445J2 and 316L Ultra-Low-Carbon Austenitic Stainless Steel in Lithium Bromide Solution

Wu Zhuojie^{1,3}, Hou Lifeng^{1,3}, Du Huayun^{1,3}, Zou Yong², Wu Min², Fan Guangwei², Wei Yinghui^{1,3}

(1 College Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2 Shanxi Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003; 3 Shanxi Province Metal Material

Corrosion and Protection Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030024)

Abstract: The high thermal conductivity, low coefficient of thermal expansion and good corrosion resistance of 445J2 ferritic stainless steel make it being a good candidate for some parts in the bromine cooler. The pitting corrosion behaviors of 445J2 ultrapure ferritic stainless steel (%) : 0.01C, 22.5Cr, 1.9Mo, 0.27Nb, 0.20Ti, 0.09Al, 0.36Cu, 0.015P, 0.001S, 0.015N) and 316L austenitic stainless steel (%) : 0.002C, 16.8Cr, 10.19Ni, 2.02Mo, 0.025P, 0.0008S) in 0.1-1M lithium bromide solutions at 20-60 °C are studied by electrochemical test method. The electrochemical results are characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive analyzer (EDS). The results show that with the increase of LiBr temperature and concentration, the corrosion current density of the two steels increases, the pitting corrosion potential decreases, and the pitting corrosion resistance deteriorates; oxide and sulfide inclusions can cause pitting corrosion of the two steels; High content of Cr and alloying elements such as Mo, Ti, Nb, Al make 445J2 steel have excellent pitting resistance.

Key Words: 445J2 Ultra-Pure Ferritic Stainless Steel; 316L Ultra-Low-Carbon Austenitic Stainless Steel; Fitting Corrosion; Lithium Bromide

溴化锂制冷机由于其环保及良好的热物理性能等得到广泛的应用, 特别是在氟利昂被禁用的前提下, 无污染的溴化锂制冷机有望成为主流制冷设备之一^[1]。尽管溴冷机拥有能耗低、热效率高等优势, 但溴化锂溶液作为强腐蚀介质, 会对制冷系统中

的金属零件和吸收装置中的热交换器造成严重的腐蚀问题^[2-4]。为了减轻腐蚀造成的危害, 溴冷机加热部件常采用耐蚀材料如 316L 不锈钢, 或者是往溶液中添加一些缓蚀剂如 Li₂MoO₄、Li₂CrO₄、BTA^[5-7]等。

Sarmiento^[8]等人研究了缓蚀剂 LiNO₃、Li₂CrO₄

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX20191400002094), 山西省科技重大专项(20191102006)资助

作者简介: 武卓杰(1997-), 男, 硕士研究生(太原理工大学); **E-mail:** :2418380563@qq.com; **收稿日期:** 2022-07-12

通讯作者: 侯利锋(1978-), 女, 教授; **E-mail:** :houlifeng78@126.com

和 Li_2MoO_4 的添加对 316L 不锈钢在 25、50、80 °C 的溴化锂溶液中的影响,结果表明,随着温度升高 316L 钢的耐腐蚀性降低,缓蚀效率升高。随着添加量的增多,缓蚀剂效果先减小后增大。Arteaga^[9] 等人通过失重法和电化学测试方法研究了 316L 钢在不同温度的溴化锂溶液中的腐蚀行为,同样发现随着温度的升高 316L 钢腐蚀速率增大,耐蚀性变差。相较于奥氏体不锈钢,铁素体不锈钢有更良好的耐蚀性以及高的导热系数和低的膨胀率^[10-12]。特别是近年来受到镍价格上涨的影响,少镍、无镍的铁素体不锈钢受到人们关注。由太钢生产的 445J2 超纯铁素体不锈钢通过 VOD 精炼技术将 C、N 含量控制在极低水平,并添加微量 Ti、Nb、Mo 等元素,进一步提高了耐蚀性。关于 445J2 钢的耐蚀性,已有学者进行了研究。邹勇^[13] 通过将 445J2 钢在三氯化铁溶液中浸泡后发现其点腐蚀速率远小于 316L 钢和 304 钢,另外缝隙腐蚀以及循环腐蚀试验也都表明 445J2 钢耐蚀性能优于 316L 钢和 304 钢。童丽华^[14] 的研究表明,445J2 钢在模拟罗家寨腐蚀环境下未发生应力腐蚀,可安全服役。目前 445J2 钢主要被用于体育馆等大型建筑的屋顶、办公楼的幕墙以及换热器和供暖设备上。

点蚀作为不锈钢局部腐蚀中的一种常见类型,常被认为是其他腐蚀类型的萌生起源,危害性大,严重时穿透金属,导致设备失效^[15]。通常不锈钢容易在含卤素离子(Cl^- 、 Br^-)的溶液中发生点蚀。目

前关于铁素体不锈钢在溴化锂溶液中的研究少有报道。因此本文研究了 445J2 钢在溴化锂溶液中的点蚀行为,为其在溴冷机上的应用提供试验数据支持。

1 试验材料及方法

试验材料为山西太钢不锈钢股份有限公司提供的 445J2(00Cr22Mo2NbTi)超纯铁素体不锈钢以及 316L(022Cr17Ni12Mo2)奥氏体不锈钢,其中 445J2 钢的冶炼工艺流程为 VOD→连铸→热连轧→热卷退火酸洗→冷轧→冷卷退火酸洗;316L 钢的冶炼工艺流程为: AOD→LF→钙处理→连铸→热轧→冷轧。445J2 退火温度为 870 °C,随后淬火冷却;316L 加热温度为 1 050 °C,随后进行水冷。两种钢的化学成分见表 1,金相组织及夹杂物如图 1。可以看出,445J2 钢基体为单一均匀的铁素体组织,夹杂物主要为含 Al、Mg 和 Ti 的氧化物复合夹杂,316L 钢基体组织主要为单相的奥氏体组织,夹杂物主要为 MnS 和含 Al、Si、Ca 的氧化物复合夹杂。O 作为钢中的有害元素,需要尽可能除尽。445J2 钢和 316L 钢的氧含量都控制在 0.002% ~ 0.003%。将 200 mm × 150 mm × 1 mm 的钢板用线切割机切成若干 15 mm × 15 mm × 1 mm 的方形试样用作电化学测试。进行电化学测试之前,用环氧树脂封样,使其暴露面积为 1 cm²,再将样品在 SiC 上进行打磨,每次打磨后保证划痕方向一致方可换下一目继续打磨,从 180 逐级打磨到 2000,然后超声清洗 5 min,用无

表 1 试验 316L 和 445J2 不锈钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of tested 316L and 445J2 stainless steel/%

钢种	Cr	C	N	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Cu	Fe
316L	16.8	0.002	0.046	0.46	0.98	0.025	0.0008	10.19	2.02	-	-	-	-	余量
445J2	22.5	0.01	0.015	0.26	0.08	0.015	0.001	-	1.90	0.27	0.20	0.09	0.36	余量

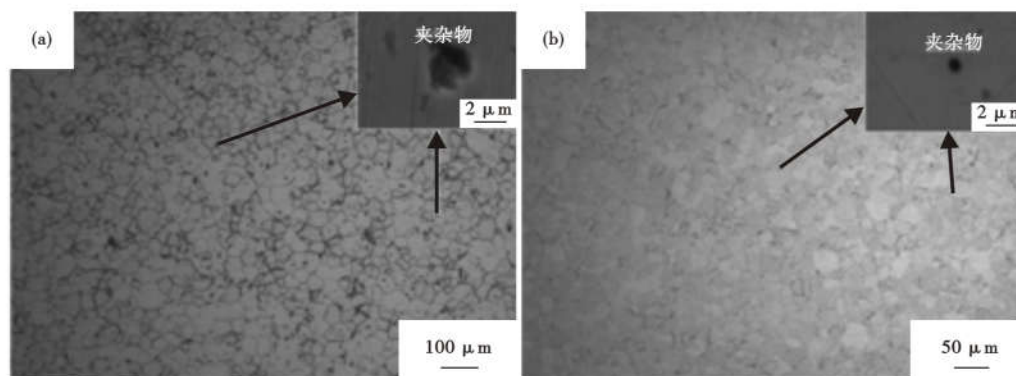


图 1 试验 445J2 钢 1 mm 板 870 °C 淬火(a)和 316L 钢 1 mm 板 1 050 °C 水冷(b)金相组织及夹杂物形貌

Fig.1 Morphology of metallographic structure and inclusions in tested 445J2 steel 1 mm plate annealing at 870 °C, quenching (a) and 316L steel 1 mm plate solid-solution at 1 050 °C, water-cooling (b)

水乙醇冲洗,冷风吹干备用。

电化学测试采用动电位扫描法,仪器为法国 Bio-logic 公司生产的 SP-150 型电化学工作站。采用三电极系统进行测试,其中 Pt 电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,试样为工作电极。极化扫描速率为 0.333 mV/s ,电解质为 0.1 M 、 0.5 M 和 1 M LiBr 溶液,溶液温度分别为 20 、 40 、 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,通过双层电解池外接循环水来进行控制。每次极化之前先进行 70 min 的开路,确保样品电位达到稳定。每组极化曲线至少进行 3 次测试,以确保试验的可重复性。

将电化学测试后的样品超声清洗 5 min ,然后无水乙醇清洗,吹干后使用 TESCAN-VEGA3 扫描电镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 进行表征分析。

2 试验结果与讨论

2.1 动电位极化曲线

图 2 和图 3 为 316L 钢在不同温度和浓度的溴化锂溶液中的极化曲线图,从图 2,图 3 中可以看出,316L 钢在所测试的介质中曲线形状基本相同,阳极分支电流密度在某个极化电位下突然地显著增大,

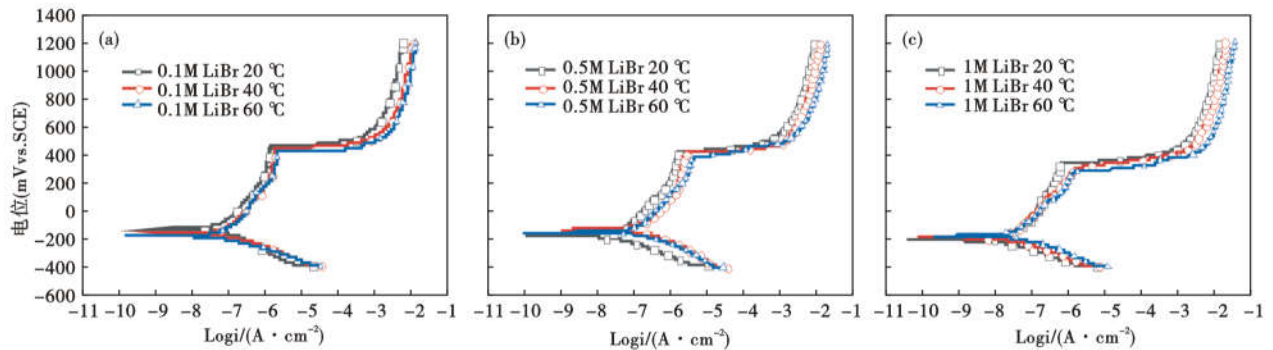


图 2 316L 钢在 $20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 0.1 M (a), 0.5 M (b) 和 1 M (c) LiBr 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 2 Potentiodynamic polarization curves of 316L steel in 0.1 M (a), 0.5 M (b) and 1 M (c) concentrations of LiBr solutions at $20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$

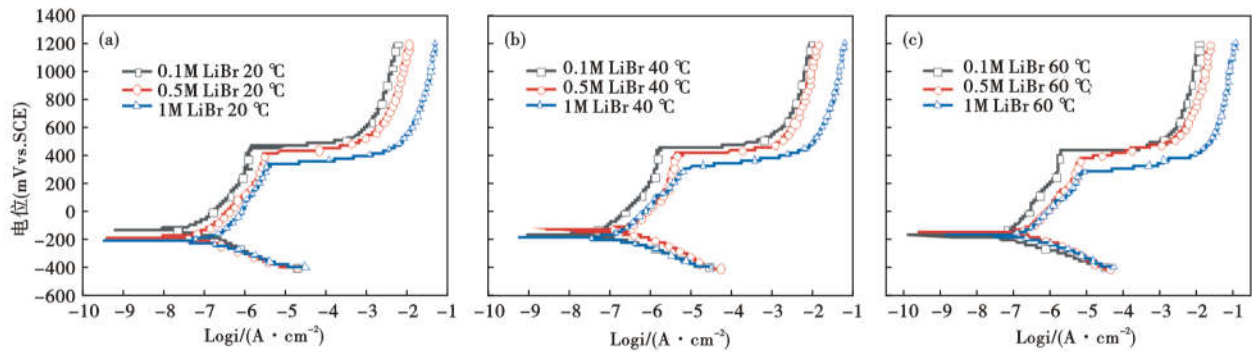


图 3 316L 钢在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (a), $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (b) 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (c) $0.1 \sim 1 \text{ M}$ LiBr 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 3 Potentiodynamic polarization curves of 316L steel in $0.1 \sim 1 \text{ M}$ LiBr solutions at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (a), $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (b) and $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (c)

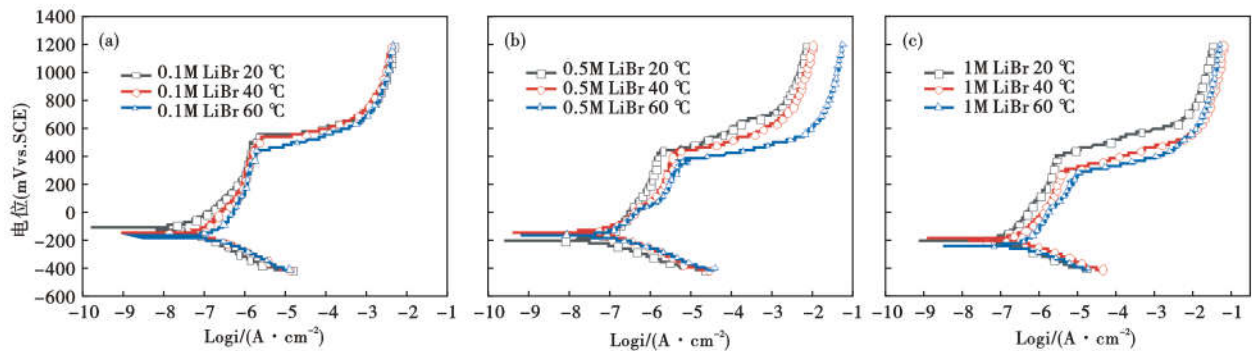


图 4 445J2 钢在 $20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 0.1 M (a), 0.5 M (b) 和 1 M (c) LiBr 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of 445J2 steel in 0.1 M (a), 0.5 M (b) and 1 M (c) concentrations of LiBr solutions at $20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$

表明此时钝化膜发生击穿,发生了点蚀^[16]。在相同浓度的 LiBr 溶液中,随温度升高,316L 钢阳极电流密度增大,点蚀电位降低。说明温度升高使得 316L 钢腐蚀加剧,钝化膜更容易被击穿,点蚀更易发生。相同温度下, LiBr 溶液浓度越高,316L 钢耐点蚀性

越差。

图 4 和图 5 为 445J2 钢在不同温度和浓度的 LiBr 溶液中的极化曲线图,从图中可以看出,随着温度和浓度的升高,曲线向右下方移动,点蚀电位变负,耐点蚀性变差。

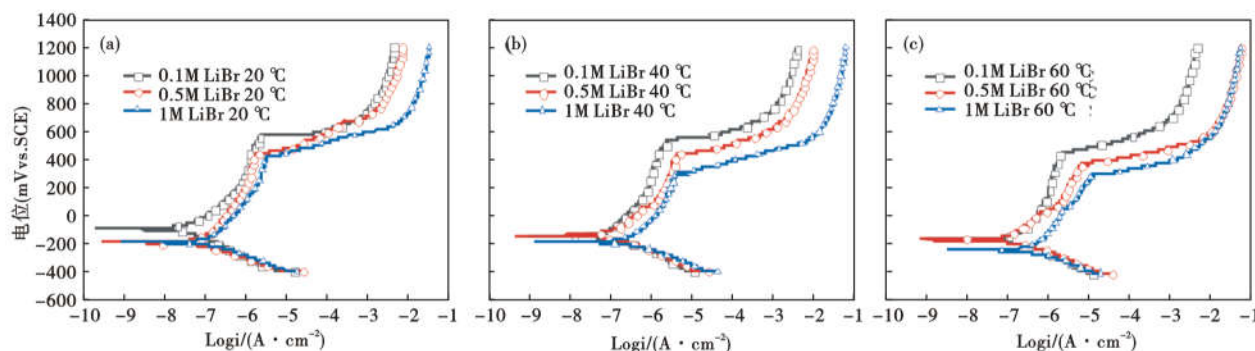


图 5 445J2 钢在 20 °C (a), 40 °C (b) 和 60 °C (c) 的 0.1 ~ 1M LiBr 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 5 Potentiodynamic polarization curves of 445J2 steel in 0.1 ~ 1M LiBr solutions at 20 °C (a), 40 °C (b) and 60 °C (c)

表 2 为 316L 钢和 445J2 钢在 LiBr 溶液中进行动电位极化后的拟合结果。随着溴化锂溶液浓度和温度的升高,316L 钢和 445J2 钢点蚀电位降低,腐蚀电流增大,表明溶液温度和浓度的升高使得两种钢腐蚀速度加快,腐蚀倾向增大,点蚀敏感性增加。在同样的条件下,445J2 不锈钢腐蚀电流密度小于 316L 钢,点蚀电位比 316L 钢高,表明 445J2 钢在所测试的

溴化锂介质中拥有比 316L 更好的抗点蚀性能。

2.2 点蚀形貌

图 6 为 316L 不锈钢在不同浓度和温度的溴化锂溶液中进行电化学测试后的 SEM 图。通过 Image-pro6.0 软件对比统计分析了 50 张图片后,得出在 0.1 M 的低浓度下,316L 钢在 20 °C 下表面仅有少量微小的点蚀坑,平均尺寸约为 96 μm,点蚀坑密度为 0.36 个/mm²。当温度为 40 °C 时点蚀坑尺寸增大到大约 190 μm,数量也增大为 0.45 个/mm²。当温度达到 60 °C 时,可以看到表面点蚀坑密度变为 0.63 个/mm²,平均尺寸增大到了大约 265 μm,说明 316L 钢表面点蚀坑尺寸随着温度的升高逐渐增大,数量增多,点蚀程度加重。在其它溶液浓度下,随着温度的增加,蚀坑尺寸增大,表面蚀坑密度增加,腐蚀程度进一步加重。且在浓度为 0.5 M 和 1 M 时,如图 6(d-i),可以看到点蚀坑出现台阶状的腐蚀形貌,表面腐蚀产物完全脱落,点蚀坑内部被暴露,部分点蚀坑相互连接。

图 7 是 445J2 不锈钢在不同温度和浓度的溴化锂溶液中进行电化学测试后的 SEM 图。从扫描图中可以看到,随着溶液温度的升高,445J2 钢表面点蚀坑数量增多,尺寸增大,耐点蚀性变差。当 LiBr 溶液浓度为 0.1 M 时,随着温度升高点蚀坑的尺寸几乎没有变化,约 40 μm,但数量略有增加。在 60 °C、1 M 的溶液中,点蚀坑尺寸达到最大约 283 μm。对比 316L 钢和 445J2 钢点蚀形貌图可以看出,相同测试条件下 445J2 钢点蚀坑尺寸更小,耐

表 2 316L 钢和 445J2 钢在 20 ~ 60 °C 0.1 ~ 1M LiBr 溶液中的极化曲线拟合结果

Table 2 Characteristic values of polarization curves of 316L steel and 445J2 steel in 0.1 ~ 1M LiBr solutions at 20 ~ 60 °C

钢种	溶液温度/°C	溶液浓度/M	E_{corr}/mV	$I_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	E_p/mV
316L	20	0.1	-131	6.231×10^{-8}	463
		0.5	-186	1.139×10^{-7}	405
		1	-212	1.730×10^{-7}	336
	40	0.1	-168	6.469×10^{-8}	442
		0.5	-140	1.267×10^{-7}	387
		1	-193	2.172×10^{-7}	304
	60	0.1	-180	9.959×10^{-8}	406
		0.5	-167	1.382×10^{-7}	366
		1	-177	2.843×10^{-7}	273
445J2	20	0.1	-98	4.431×10^{-8}	577
		0.5	-195	8.694×10^{-8}	468
		1	-195	1.297×10^{-7}	416
	40	0.1	-142	6.318×10^{-8}	546
		0.5	-137	1.198×10^{-7}	448
		1	-187	2.081×10^{-7}	327
	60	0.1	-162	9.911×10^{-8}	482
		0.5	-163	1.242×10^{-7}	383
		1	-234	2.766×10^{-7}	294

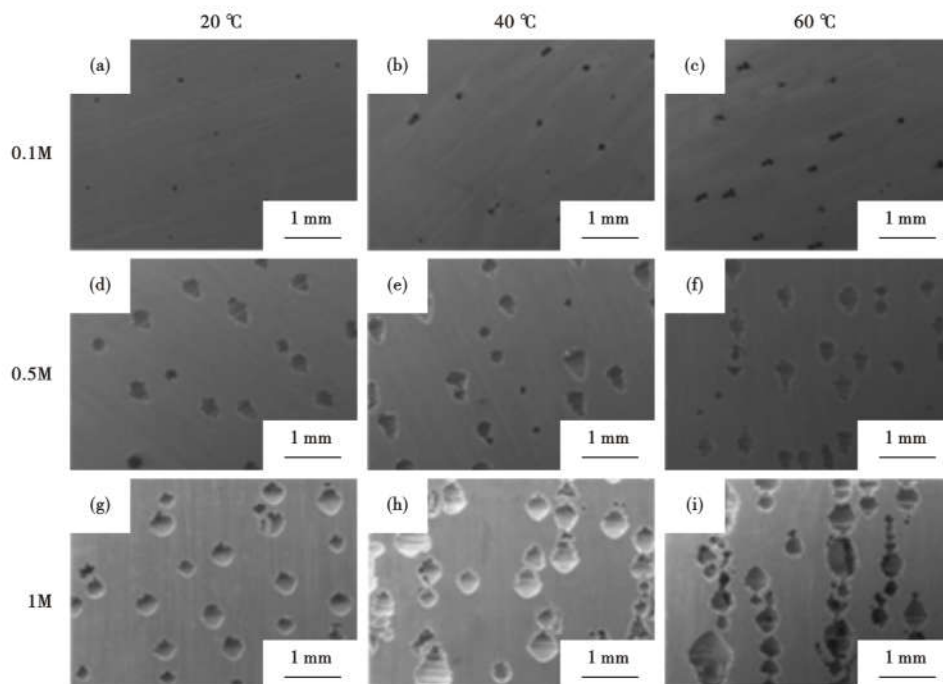


图 6 316L 钢在 20 ~ 60 °C 0.1 ~ 1M 的 LiBr 溶液中进行电化学测试后的 SEM 图
Fig. 6 SEM images of 316L steel after electrochemical tests in 0.1 ~ 1M LiBr solutions at 20 ~ 60 °C

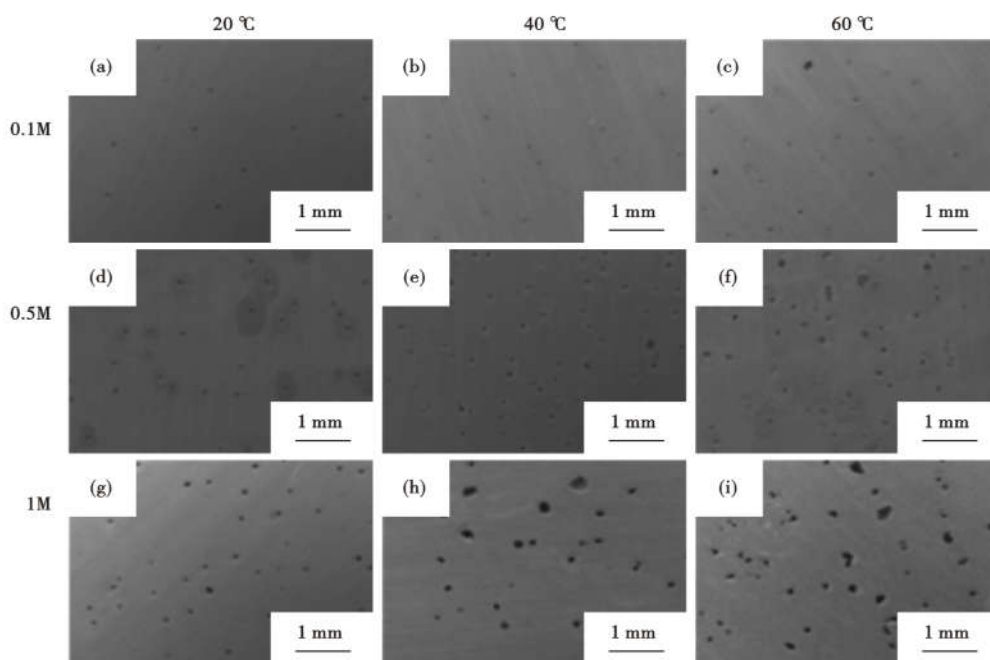


图 7 445J2 钢在 20 ~ 60 °C 0.1 ~ 1M 的 LiBr 溶液中进行电化学测试后的 SEM 图
Fig. 7 SEM images of 445J2 steel after electrochemical tests in 0.1 ~ 1M LiBr solutions at 20 ~ 60 °C

点蚀性更强,这与动电位极化测试结果一致。

3 分析与讨论

3.1 点蚀成因

图 8(a)为 316L 钢在 60°C/0.5 M 溴化锂溶液中进行电化学测试后的扫描图。发现腐蚀后未脱落的第二相,对其进行 EDS 分析发现主要含 O、Si、

Mn、S 等元素,说明主要是 MnS 和含 Si 氧化物的复合夹杂。也有学者^[17-18]对 316L 不锈钢的点蚀进行研究,认为引发点蚀的主要夹杂物为氧化物以及硫化物夹杂,和本研究结果类似。因此,在本研究中,这些夹杂物引起 316L 钢点蚀。图 8(b)为 445J2 钢在 20 °C/0.5 M 的 LiBr 溶液中进行电化学测试后的

SEM 图,可以看到有花边状的腐蚀形貌出现,这是点蚀发展初期的重要特征^[19]。在位置 2 发现了未脱落的第二相,对其进行 EDS 扫描发现主要是含 Ti、O、Cu 等元素,说明 445J2 钢点蚀容易在含 Cu、Ti 氧化物夹杂处发生。Ha^[20] 等人在研究 11% Cr 铁素体不锈钢时也发现了非金属夹杂物 (Ti、Ca)-O 对其

点蚀的产生具有重要作用。综上所述,316L 钢和 445J2 钢在溴化锂溶液中的点蚀均是在夹杂物处萌生,夹杂物的存在会使得不锈钢表面钝化膜完整性受到破坏,侵蚀性离子如 Cl^- 、 Br^- 会在此处吸附聚集,与夹杂物反应,形成微电池。随着腐蚀时间的延长,夹杂物脱落,形成凹坑,成为点蚀起点。

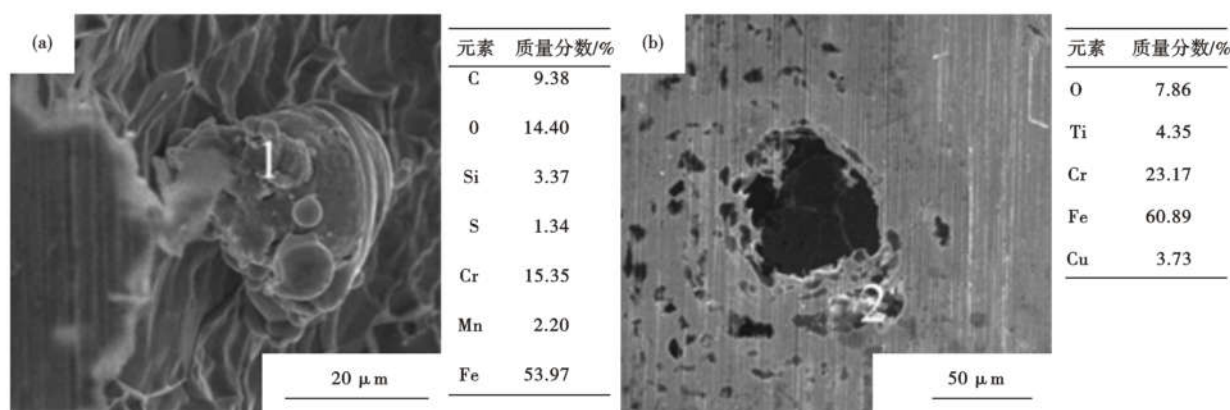


图 8 (a)316L 钢(60 °C,0.5M LiBr)和(b)445J2 钢(20 °C,0.5M LiBr)电化学测试后的 SEM 形貌和 EDS 分析

Fig. 8 SEM morphology and EDS analysis of (a) 316L steel (0.5M LiBr at 60 °C) and (b) 445J2 steel (0.5M LiBr at 20 °C) after electrochemical testing

3.2 温度和浓度对两种钢点蚀行为的影响

电化学测试结果表明温度升高会使 316L 钢和 445J2 钢腐蚀电流密度增大,点蚀电位降低,耐点蚀性变差。这主要是由于温度升高会对钝化膜和离子产生影响。根据文献^[2, 21]报道,在较低温度下形成的钝化膜缺陷明显更少,也就是说随着温度升高,钝化膜致密性变差,保护性能降低。另外不锈钢表面的钝化膜是处于不断溶解和生成的动态平衡中。随着温度升高,钝化膜溶解和生成速率都会加快,但溶解速率大于自修复速率,导致钝化膜变薄,容易破裂,使金属基体暴露。暴露的金属基体处于活化态,与处于钝化态的钝化膜组成活性-钝性腐蚀电池,成为点蚀源。

温度升高不仅会对钝化膜造成影响,同时还会增加 Br^- 活性, Br^- 半径很小能够轻易穿过钝化膜扩散进入基体内部而造成腐蚀危害。此外 Br^- 容易吸附在不锈钢表面缺陷处,当温度升高时, Br^- 在这些缺陷处的吸附点会增多,加大了对此处钝化膜的破坏,导致点蚀的萌生与发展。

相同温度下,随着溶液浓度升高,316L 钢和 445J2 钢点蚀电位下降,腐蚀电流密度的密度升高,点蚀敏感性增加。这主要是因为 Br^- 会选择性吸附在钝化膜的一些缺陷处对其进行破坏,随着 Br^- 浓度的增大,越来越多的溴离子会聚集在缺陷处,破坏

钝化膜自身动态平衡,诱发点蚀。另外 Br^- 半径很小,随着溴化锂浓度的增加,更多的溴离子会穿过钝化膜进入内部对基体进行破坏。

3.3 两种钢耐点蚀能力不同的原因

耐点蚀当量(PRE)是衡量不锈钢耐点蚀能力的重要指标,PRE 的值越大,耐点蚀性能越好^[22]。奥氏体(ASS)和铁素体不锈钢(FSS)耐点蚀当量公式如下:

$$\text{PRE}(\text{FSS}) = W\% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} \quad (1)$$

$$\text{PRE}(\text{ASS}) = W\% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 16\% \text{N} \quad (2)$$

通过上述公式可以得出,445J2 钢的 PRE 值为 28.77,而 316L 钢的 PRE 值为 24.20。所以从理论上来说 445J2 钢耐点蚀性能是优于 316L 钢的。Cr 是不锈钢获得不锈性和耐蚀性最主要的元素,也是导致其不断发展的主要元素^[23]。提高 Cr 含量能够明显提升不锈钢的耐蚀性,特别是耐点蚀性能。相比于 316L 钢,445J2 钢加入了更多的 Cr 使其耐蚀性得到了提高。Mo 的添加不仅能促进 Cr 在钝化膜上的富集,稳定钝化膜,而且适量添加 Mo 还会明显提升不锈钢的耐点蚀性能^[24]。有关研究^[25]表明,Nb、Ti、Al 等合金元素的添加也会提升钝化膜的保护性能。445J2 钢中添加了少量的 Nb、Ti、Al、Cu 等元素,在稳定 C、N,提升高温氧化性能的同时也提升了

耐腐蚀性能,这就使得445J2钢的耐点蚀性优于316L钢。

4 结论

(1) LiBr溶液浓度和温度对316L钢和445J2钢耐点蚀性有明显影响。随着LiBr溶液浓度和温度的升高,两种钢的腐蚀电流密度增大,点蚀电位下降,点蚀坑尺寸增大,耐点蚀能力降低。

(2) 氧化物和硫化物夹杂是445J2钢和316L钢

中引发点蚀的主要原因,但相较于316L钢,445J2钢更适合应用于LiBr溶液,高含量的Cr以及Mo、Nb、Ti、Al等合金元素使得445J2钢更加耐点蚀。

(3) 在同一温度和浓度条件下,445J2钢腐蚀电流密度小于316L钢,点蚀电位高于316L钢,耐点蚀能力更强。此外445J2钢良好的导热性以及低的热膨胀系数使得其有望替代316L钢用于溴冷机中一些加热部件。

参考文献

- [1] 郭建伟,梁成浩. 碳钢在高温高浓度溴化锂溶液中腐蚀行为[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(5): 554-556.
- [2] LEIVA-GARCÍA R, MUÑOZ-PORTERO M J, GARCÍA-ANTÓN J. Corrosion Behaviour of Sensitized and Unsensitized Alloy 900 (UNS 1.4462) in Concentrated Aqueous Lithium Bromide Solutions at Different Temperatures [J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 950-959.
- [3] 罗序禄,李文武,曹志锡. 制冷机中溴化锂溶液腐蚀性研究[J]. 轻工机械, 2011, 29(1): 104-107.
- [4] LEIVA-GARCÍA R, M-P. M. J, GARCÍA-ANTÓN. J. Influence of Sensitisation on the Corrosion Behaviour of Alloy 926 (UNS N08926) in Concentrated Aqueous Lithium Bromide Solutions at Different Temperatures [J]. International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2011, 52(3): 950-959.
- [5] 梁成浩,郭建伟. 不锈钢在溴化锂吸收式制冷机中的腐蚀研究进展[J]. REFRIGERATION, 2000, 19(3): 28-32.
- [6] 蒋伏广,陆柱. 钼酸锂与苯骈三氮唑复配对碳钢在溴化锂溶液中的缓蚀作用及其在溴化锂制冷机组中的应用[J]. 化学世界, 2006(1): 1-4.
- [7] BLASCO-TAMARIT E, IGUAL-MUÑOZ A, ANTÓN J G, et al. Effect of Temperature on the Corrosion Resistance and Pitting Behaviour of Alloy 31 in LiBr Solutions [J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1848-1857.
- [8] E. SARMIENTO J G G-R, A. M. RAMIREZ-ARTEAGA, J. URUCHURTU. Corrosion Inhibition of 316L Stainless Steel in LiBr + Etileneglycol + H₂O By Using Inorganic Inhibitors [J]. International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2013, 8: 12417-12433.
- [9] CUEVAS-ARTEAGA C, CONCHA-GUZMÁN M O. Corrosion Study of SS-316L Exposed to LiBr-H₂O Solution Applying Electrochemical Techniques and Weight Loss Method [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2013, 44(1): 57-68.
- [10] SARKARI KHORRAMI M, MOSTAFAEI M A, POURALIAKBAR H, et al. Study on Microstructure and Mechanical Characteristics of Low-Carbon Steel and Ferritic Stainless Steel Joints [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 608: 35-45.
- [11] ZHANG X, FAN L, XU Y, et al. Effect of Aluminum on Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion Resistance of Ultra-Pure 429 Ferritic Stainless Steels [J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 682-689.
- [12] 王耀龙. 超纯铁素体在不锈钢产业中的应用 [J]. 内蒙古科技与经济, 2012, 12: 84-85.
- [13] 邹勇. 高耐候性铁素体不锈钢 TTS445J2 [Z]. 中国钢结构协会房屋建筑钢结构分会 2011 年学术年会. 广州. 2011.
- [14] 童丽华. 国产超纯铁素体不锈钢在 Cl-环境下的点蚀行为研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [15] 戴起勋. 金属材料学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [16] 才箏. 太阳能热水器用不锈钢耐点蚀性能的研究 [J]. 中国钢铁业, 2017(3): 34-36.
- [17] 闵梁. 316L 不锈钢中氧化物夹杂诱发点蚀行为的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- [18] 鲍明昱,任呈强. 基于点蚀的 316L 不锈钢在酸性气田环境中的适应性评价 [J]. 材料导报, 2016, 30(9): 10-15.
- [19] LI T, SCULLY J R, FRANKEL G S. Localized Corrosion; Passive Film Breakdown vs. Pit Growth Stability; Part III. A Unifying Set of Principal Parameters and Criteria for Pit Stabilization and Salt Film Formation [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(11): C762-C770.
- [20] HA H Y, PARK C J, KWON H S. Effects of Non-Metallic Inclusions on the Initiation of Pitting Corrosion in 11% Cr Ferritic Stainless Steel Examined by Micro-Droplet Cell [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1266-1275.
- [21] HUR. D. H, PARK. Y. S. Effect of Temperature on the Pitting Behavior and Passive Film Characteristics of Alloy 600 in Chloride Solution [J]. 2006, 62: 745-750.
- [22] 顾玥,詹肇麟,荣凡. 445M 铁素体不锈钢缝隙腐蚀性能的研究 [J]. 特殊钢, 2011, 32(3): 65-67.
- [23] 游香米,姜周华,李花兵. 超纯铁素体不锈钢的开发与应用现状 [J]. 中国冶金, 2006, 16(11): 16-19.
- [24] SHU J, BI H, LI X, et al. The Effect of Copper and Molybdenum on Pitting Corrosion and Stress Corrosion Cracking Behavior of Ultra-Pure Ferritic Stainless Steels [J]. Corrosion Science, 2012, 57: 89-98.
- [25] WANG Y, CHENG G, WU W, et al. Effect of pH and Chloride on the Micro-Mechanism of Pitting Corrosion for High Strength Pipeline Steel in Aerated NaCl Solutions [J]. Applied Surface Science, 2015, 349: 746-756.