

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.007

含氮节镍型 QN2109Mo 奥氏体不锈钢组织和性能

花能斌,王劲扬,徐杨,王乾廷

(福建工程学院 材料科学与工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 选择含氮节镍型 QN2109Mo 奥氏体不锈钢作为研究对象,采用 XRD、TEM、SEM、EDS、摩擦磨损试验机和电化学工作站等检测手段,研究 QN2109Mo 不锈钢的组织结构、摩擦磨损性能以及耐腐蚀性能,并与 316L 不锈钢进行对比。实验结果表明:N 原子主要以间隙固溶形式存在于 QN2109Mo 不锈钢中,对 QN2109Mo 不锈钢组织起到了细化作用,提高了 QN2109Mo 不锈钢的硬度。在干摩擦状态下,QN2109Mo 不锈钢的耐磨损性能优于 316L 不锈钢,其磨损机理为氧化磨损和磨粒磨损共同作用。在 $w(\text{NaCl})$ 为 3.5% 的溶液中,QN2109Mo 不锈钢表现出比 316L 不锈钢更低的自腐蚀电流密度和更高的点蚀电位,具有更优异的耐 NaCl 溶液腐蚀性能。

关键词: 含氮不锈钢;奥氏体组织;间隙固溶;耐磨损性能;耐腐蚀性能

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)06-0549-07

Microstructure and properties of nitrogen-containing nickel-saving QN2109Mo austenitic stainless steel

HUA Nengbin, WANG Jingyang, XU Yang, WANG Qianting

(School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: QN2109Mo nickel-saving austenitic stainless steel containing nitrogen was selected as the research object. Its microstructure, frictional wear properties and corrosion resistance were studied with XRD, TEM, SEM, EDS, frictional wear tester and electrochemical workstation, and then compared with those of 316L stainless steel. Results show that nitrogen atoms mainly exist in the form of interstitial solid solution in QN2109Mo stainless steel. Nitrogen atoms play a role in refining the structure of the steel and thus improving its hardness. Under the dry friction condition, the wear resistance of QN2109Mo stainless steel is better than that of 316L stainless steel, and its wear mechanism is the combined action of oxidation wear and abrasive wear. In the 3.5% (wt) NaCl solution, QN2109Mo stainless steel exhibits a lower self-corrosion current density and a higher pitting corrosion potential than those of 316L stainless steel, which corresponds to the better corrosion resistance to NaCl solution.

Keywords: nitrogen-containing stainless steel; austenitic structure; interstitial solid solution; wear resistance; corrosion resistance

316L 奥氏体不锈钢因其具有无磁、耐腐蚀、耐高温、易成形、易焊接等特性,被广泛应用于各类领域^[1]。但在海洋工程应用中,316L 不锈钢的耐腐蚀性能仍有不足,Zhu 等^[2]通过 316L 不锈钢模拟海水溶液浸泡试验研究其耐蚀性能,结果显示,316L 不锈钢表面出现大尺寸腐蚀坑。因此迫切需要开发出低成本且性能优于 316L 不锈钢的新材料。

收稿日期: 2022-10-03
基金项目: 海洋经济发展专项资金项目(FJHJF-L-2021-10);福建省科技厅引导性项目(2021H0023)
第一作者简介: 花能斌(1982—),男,福建南安人,教授,博士,研究方向: 非晶纳米晶合金、高熵合金、生物医用金属材料。

李兵兵等^[3]总结超级奥氏体不锈钢的发展中提到氮合金化能使不锈钢具有优异的耐蚀性能、强度和塑韧性。Salahinejad 等^[4]研究在氮气作用下不锈钢的机械合金化,表明 N 是强烈的奥氏体形成和稳定元素,具有间隙固溶强化作用。Lee 等^[5]通过研究 Fe-18Cr-10Mn-N 合金的拉伸性能,表明 N 含量增加能有效提高屈服强度。Ha 等^[6]通过研究 N 对酸性溶液中 Fe-Cr 二元合金电化学试验时的影响,表明 N 合金化能够提高不锈钢钝化膜中 Cr 含量,提高其耐蚀性能。向红亮等^[7]通过改变不锈钢中 N 含量成分,研究 N 含量对材料组织与性能的影响规律,可在降低合金成本的基础上保持甚至提高不锈钢的耐腐蚀和力学性能。因此以 N 代替镍降低成本,保持和提高不锈钢性能,是开发应用于海洋环境不锈钢的重点研究方向。本文选择 QN2109Mo 不锈钢作为研究对象,并与 316L 不锈钢进行对比,为其在海洋工程领域中的应用提供理论和实验依据。

1 试验材料及方法

1.1 试样选取和组织结构表征

选用 QN2109Mo 和 316L 冷轧钢板,其化学成分如表 1 所示,经冶炼、连铸、热轧、冷轧和固溶等工序,获得厚度为 3 mm 的试验材料。采用电火花线切割工艺将钢板加工成 15 mm×15 mm×3 mm 的试样。经机械研磨、抛光后,采用 Bruker-AXS-D8 型 X 射线衍射仪(XRD)对样品进行物相分析,工作电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA,采用单色 Cu 靶 Kα 射线,设置扫描范围在 20°~80°,扫描速度和步长分别为 2°/min 和 0.02°。按 GB/T 4334-2020《金属和合金的腐蚀奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法》中方法对不锈钢进行侵蚀^[8],利用 Imager A2M 光学显微镜(OM)进行金相组织观察,采用 S-3400N 扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织形貌观察,采用附带能谱仪(EDS)分析样品表面化学组成。采用 FEI Talos F200X 透射电子显微镜(TEM)观察样品的微观结构。

表 1 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of QN2109Mo and 316L stainless steels

合金	w / %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
QN2109Mo	0.033	0.433	1.85	20.60	9.62	1.55	1.03	0.238	余量
316L	0.016	0.410	1.34	16.62	10.05	2.02	0.15	0.031	余量

1.2 显微硬度测试

采用 THV-10D 型显微维氏硬度计测试试样的显微维氏硬度,载荷为 49.032 N,停留时间 15 s。

1.3 摩擦磨损行为表征

采用 HSR-2M 型测试机测试样品在室温下的干摩擦摩擦磨损行为。摩擦对偶件选用直径为 6 mm 的 Si₃N₄陶瓷,摩擦实验设置的固定参数为:法向载荷 10 N,摩擦频率 60 r/min、摩擦时间 30 min,往复运动振幅 5 mm。采用 MT-500 型探针式材料表面磨痕仪测量不锈钢样品的磨损体积 ΔW,通过公式(1)计算出样品的磨损速率 W_s:

$$W_s = \frac{\Delta W}{S \cdot N}$$

(1)

式中, S 为摩擦行程,mm; N 为法向载荷,N。用 SEM 观察磨痕形貌,采用 EDS 测定磨痕表面的化

学成分。

1.4 电化学腐蚀行为表征

采用瑞士 AutoLab 电化学工作站进行电化学动电位极化曲线测试,采用三电极工作体系,以 QN2109Mo 或 316L 不锈钢试样为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂片为对电极,采用 w(NaCl) 为 3.5% 的溶液。试验参数为:样品在溶液中接触面积 15mm×15mm,扫描速度 1 mV/s,外加电压 -1~1.5 V。测试前,将试样浸泡于 NaCl 溶液中,待开路电位稳定后,测试试样的动电位极化曲线。对电化学腐蚀后的样品采用 SEM 观察腐蚀形貌,用 EDS 测定腐蚀区域的化学成分。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织分析

图 1 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的金相显微镜照片。由图可知,QN2109Mo 和 316L 不锈钢都为单一奥氏体组织,经过冷轧固溶处理后不锈钢晶粒呈无规则的多边形,晶粒尺寸大多集中在 20~50 μm 之间。从图 2 可见,QN2109Mo 不锈钢的晶粒尺寸比 316L 不锈钢的更细小,这可能是由于 QN2109Mo 不锈钢中固溶了更多的 N 原子,N 原子以间隙原子的形式存在于奥氏体晶体结构中,间隙原子与位错或晶界相互作用抑制再结晶形核和晶粒长大^[9],使得 QN2109Mo 不锈钢的晶粒更加细小。

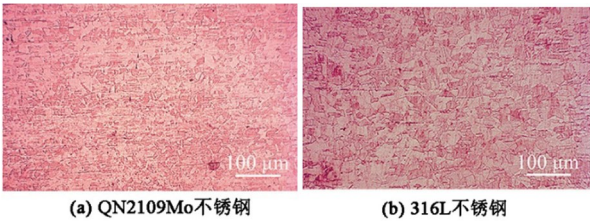


图 1 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的金相显微镜照片
Fig.1 Metallographic microscope images of QN2109Mo and 316L stainless steels

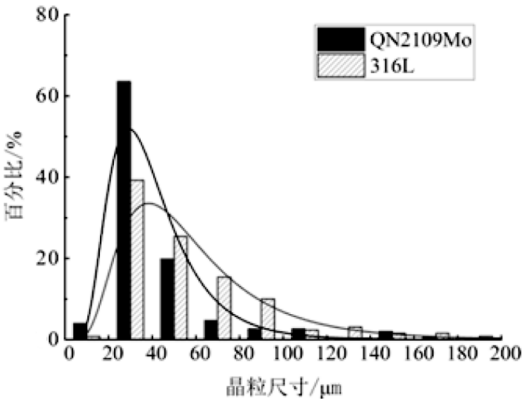


图 2 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的晶粒尺寸分布
Fig.2 Grain size distribution of QN2109Mo and 316L stainless steels

图 3 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢表面形貌 SEM 照片。从图中可以看出,QN2109Mo 和 316L 不锈钢呈现单一的奥氏体相组织形貌。表 2 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢表面区域 EDS 分析结果。QN2109Mo 和 316L 不锈钢表面的主要成分为 Fe、Cr、Ni,其中 QN2109Mo 不锈钢中 Ni 元素含量小于 316L 不锈钢。N 作为间隙原子可以起到稳定奥氏体作用,QN2109Mo 不锈钢采用 N 代替 Ni,起到降低 Ni 含量,节约原料成本的作用。

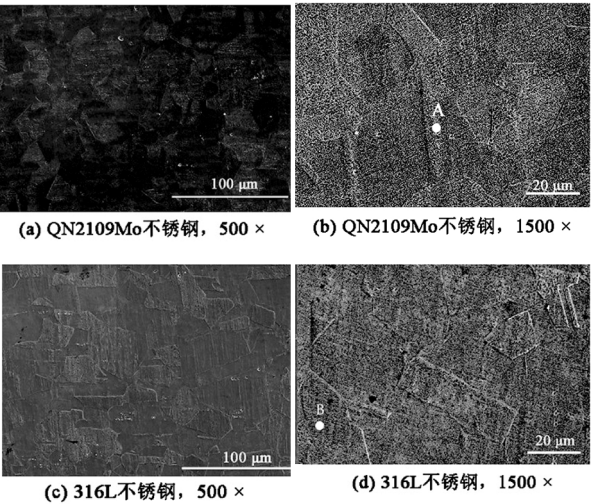


图 3 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的表面形貌 SEM 照片
Fig.3 SEM images of surface morphologies of QN2109Mo and 316L stainless steels

2.2 物相表征

图 4 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的 XRD 图谱。由图可知,QN2109Mo 和 316L 不锈钢都具有尖锐的衍射峰,经 PDF 标准卡片对比,两种不锈钢都是单一奥氏体相面心立方结构。两种不锈钢在 2θ 角约 43° 位置都有尖锐的衍射峰(111) γ,在 2θ 角约 50° 位置出现一个较小衍射峰位(200)γ, QN2109Mo 不锈钢在 2θ 角约 74°位置比 316L 不锈钢多一个衍射峰(220)γ。此外,与 316L 不锈钢的衍射峰对比,QN2109Mo 的衍射峰向低角度方向发生小幅度偏移,这可能是由于掺杂了 N 原子形成间隙固溶体,引发晶格畸变,导致晶胞参数增大。

表 2 QN2109Mo 和 316L 不锈钢表面 EDS 分析结果
Tab.2 EDS analysis results of surfaces of QN2109Mo and 316L stainless steels

测试区域	w / %									
	C	N	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	
A	5.28	1.09	0.37	19.44	2.67	60.76	7.99	1.12	1.28	
B	6.06	1.16	0.42	15.56	1.73	63.88	9.29	0.03	1.86	

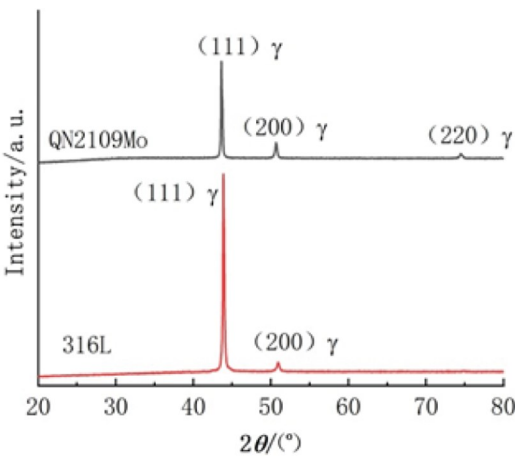


图 4 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of QN2109Mo and 316L stainless steels

从而表现出更高的显微硬度。

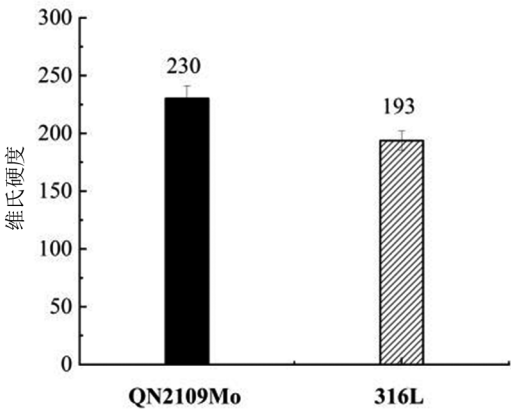


图 6 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的显微维氏硬度值
Fig.6 Vickers microhardness of QN2109Mo and 316L stainless steels

图 5 为 QN2109Mo 的 TEM 明场像。从图 5 (a) 和 (b) 中可以看到, QN2109Mo 不锈钢中为单一的奥氏体相, 没有明显的第二相析出。通过能谱分析, QN2109Mo 不锈钢中 A 区域的主要成分为 Fe、Cr、Ni, 并未发现含 N 化合物的析出, 这进一步印证了 N 元素在 QN2109Mo 不锈钢中主要以固溶形式存在于基体内部。

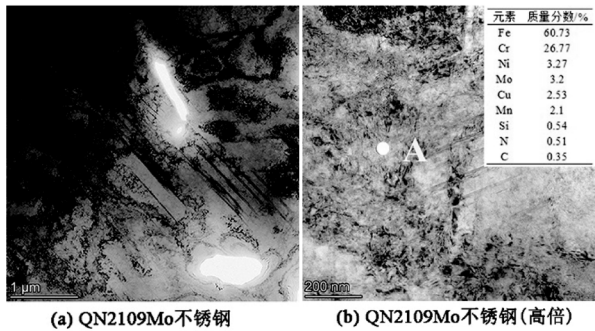


图 5 QN2109Mo 不锈钢的 TEM 明场像
(插表为 A 区域的 EDS 分析结果)

Fig.5 TEM bright field images of the QN2109Mo stainless steels (Inset is the EDS analysis results of Region A)

2.3 显微硬度

图 6 是 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的显微维氏硬度值。由图可知, QN2109Mo 不锈钢的显微硬度值 (230 HV) 高于 316L 不锈钢 (193 HV)。这是由于 QN2109Mo 不锈钢比 316L 不锈钢固溶了更多的 N 元素, 大量间隙 N 原子倾向于在位错及晶界处偏聚, 引起晶格畸变达到组织细化效果,

2.4 摩擦磨损分析

图 7 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢在空气中进行的摩擦磨损实验的摩擦系数和磨损速率。由图 7 (a) 可知, 在干摩擦条件下, QN2109Mo 和 316L 的摩擦系数分别为 0.8 和 0.81。由图 7 (b) 可知, QN2109Mo 和 316L 不锈钢的磨损速率分别为 2.81×10^{-8} 和 $2.97 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。QN2109Mo 不锈钢的摩擦系数和磨损速率都比 316L 不锈钢小, 这是由于 QN2109Mo 不锈钢具有较高的硬度所致。

图 8 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢在干摩擦条件下的磨痕表面形貌 SEM 照片, 表 3 为图 8 中 QN2109Mo 不锈钢磨痕 A、B 区域和 316L 不锈钢磨痕 C、D 区域的 EDS 成分分析结果。从图 8 (a) 和 (c) 中可以观察到, 两种不锈钢的磨痕表面都存在不连续的岛状黑色衬度区域, 经表 3 中 EDS 分析结果, 确定黑色衬度区域的 O 元素含量明显大于周边区域, 这说明在摩擦磨损过程中发生了氧化磨损现象。同时, 两种不锈钢试样的磨痕表面都存在明显的平行于摩擦方向的犁沟, 这是磨粒磨损的典型特征。在摩擦过程中磨痕表面材料发生氧化生成氧化层, 使得接触表面硬度升高韧性下降。同时在摩擦过程中 Si_3N_4 摩擦对偶件不断犁削磨痕表面, 裂纹在磨痕表面开始形成和扩展, 最后发生脆性断裂从磨痕表面剥落^[10]。综上, QN2109Mo 和 316L 不锈钢在干摩擦条件下的磨损机理主要为氧化磨损和磨粒磨损。

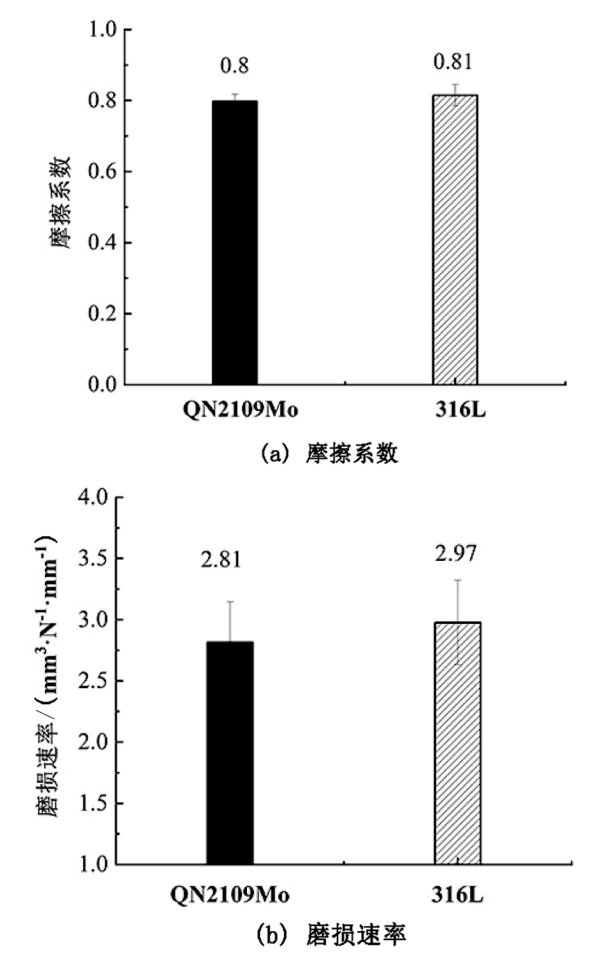


图 7 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的摩擦系数和磨损速率
Fig.7 Frictional coefficients and wear rates of QN2109Mo and 316L stainless steels

图 9 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢的磨屑形貌,从图中可以看到,磨屑形态主要表现为絮状粉末,同时也有部分呈现尺寸较大的块状。QN2109Mo 不锈钢的磨屑中块状磨屑的尺寸比 316L 不锈钢小,磨屑颗粒的大小对摩擦磨损存在一定的影响,在一定范围内,细小的氧化物磨屑在载荷的作用下更容易形成致密的氧化物附着在磨损表面,起到润滑的作用,从而降低摩擦磨损^[11]。

2.5 电化学行为

图 10 是 QN2109Mo 和 316L 不锈钢样品在 $w(\text{NaCl})$ 为 3.5% 的溶液中的动电位极化曲线。由图可知, QN2109Mo 和 316L 不锈钢在 NaCl 溶液中具有典型的电化学极化特征,在阳极极化区都存在活化区、钝化区和稳态点蚀生长区过程。在活化区不锈钢发生水解,其水解形成的金属氧化物吸附于电极表面形成钝化膜,随电位增加,腐

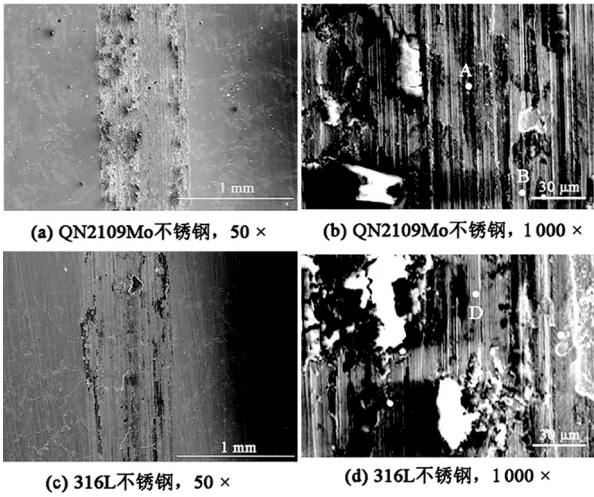


图 8 不锈钢磨痕表面形貌 SEM 照片
Fig.8 SEM surface morphologies of wear scars for the stainless steels

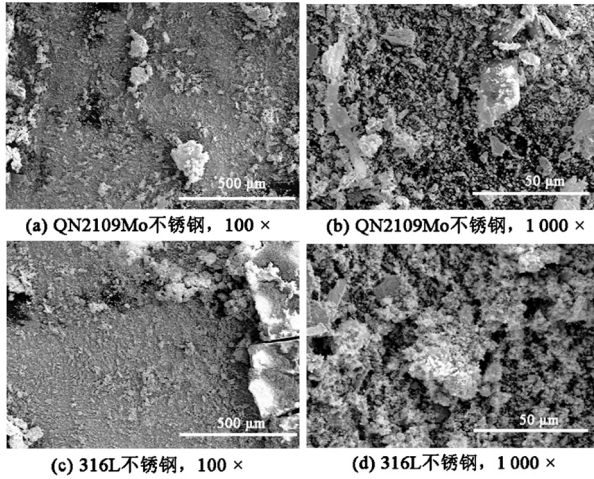


图 9 QN2109Mo 和 316L 不锈钢磨屑表面形貌 SEM 照片
Fig.9 SEM images of surface morphologies of wear debris of QN2109Mo and 316L stainless steels

蚀电流密度逐步平缓进入钝化区, Cr_2O_3 钝化膜覆盖于表面阻碍腐蚀性离子和不锈钢基体反应,随着电位的进一步升高,由于钝化层的保护作用,其腐蚀电流基本不变,当在试验过程中某些点发生局部破坏而难以自修复时,阳极电流将急剧增大,这时进入稳态点蚀生长区^[12]。从图中可见, QN2109Mo 不锈钢的钝化区明显宽于 316L 不锈钢。两种不锈钢的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度、点蚀电位等电化学参数列于表 4。QN2109Mo 和 316L 不锈钢的自腐蚀电位都为 -0.3V , 自腐蚀电流密度分别为 5.49×10^{-7} 和 $8.26 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 点

蚀电位分别为 1.118 和 0.196 V。QN2109Mo 不锈钢的自腐蚀电位低于 316L 不锈钢,经典电化学理论指出,自腐蚀电位反映了工作电极在腐蚀过程中的热力学趋势,自腐蚀电流密度是由工作电极溶解在电解液中引起的,是评价样品相应工作环境中耐腐蚀性的重要指标,QN2109Mo 不锈钢的自腐蚀电流密度小于 316L 不锈钢,这表明 QN2109Mo 不锈钢的耐蚀性能更高。此外,对于固溶态或退火态的不锈钢,PREN 是衡量不锈钢耐点蚀性能的重要参数^[15],可通过公式(2)计算得到:

PREN =

$w(\text{Cr}) + 3.3w(\text{Mo}) + 30w(\text{N}) - w(\text{Mn})$ (2)

其中, $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Mo})$ 、 $w(\text{N})$ 、 $w(\text{Mn})$ 表示对应元素含量的质量百分数。QN2109Mo 和 316L 不锈钢的耐点蚀当量计算结果分别为 31 和 22.8, QN2109Mo 不锈钢的耐点蚀当量大于 316L 不锈钢,从表 4 中也可得到 QN2109Mo 不锈钢的点蚀电位远高于 316L 不锈钢,说明 QN2109Mo 具有更高的耐点蚀性能。

表 3 QN2109Mo 和 316L 不锈钢磨痕表面的 EDS 分析结果
Tab.3 EDS analysis results of wear scar surfaces of QN2109Mo and 316L stainless steels

测试区域	w / %									
	C	N	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
A	2.24	0.63	29.32	2.09	13.89	1.71	42.77	5.92	0.70	0.74
B	2.79	0.47	0.87	0.41	19.61	2.71	61.42	9.14	1.42	1.17
C	1.65	0.55	31.63	1.75	11.10	1.04	44.86	6.13	0.10	1.19
D	2.47	0.23	1.50	0.42	15.88	1.39	66.61	9.59	0.00	1.92

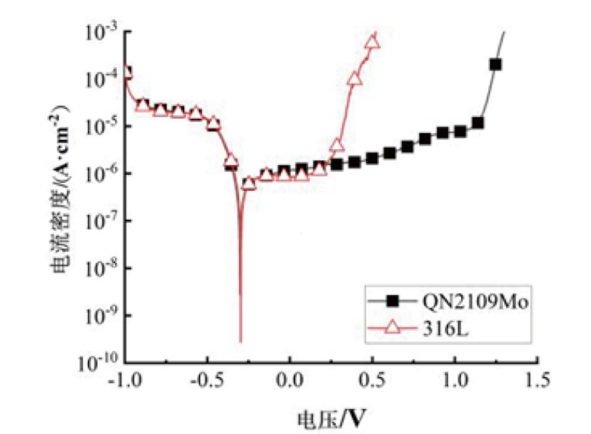


图 10 QN2109Mo 和 316L 不锈钢在 $w(\text{NaCl})$ 为 3.5% 的溶液中动电位极化曲线

Fig.10 Potentiodynamic polarization curves of QN2109Mo and 316L stainless steels in the 3.5% (wt) NaCl solution

表 4 QN2109Mo 和 316L 不锈钢在 3.5% (wt) NaCl 溶液中的电化学参数

Tab.4 Electrochemical parameters of QN2109Mo and 316L stainless steels in the 3.5% (wt) NaCl solution

合金	自腐蚀 电位/V	自腐蚀电流 密度/($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	点蚀 电位/V
QN2109Mo	-0.302	5.49×10^{-7}	1.118
316L	-0.298	8.26×10^{-7}	0.196

图 11 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢在电化学极化实验后的表面形貌 SEM 照片。从图中可以看到,316L 不锈钢极化实验后存在明显的点蚀坑,尺寸在 50 μm 左右。而 QN2109Mo 不锈钢极化实验后表面没有观察到明显的点蚀坑,这进一步说明 QN2109Mo 不锈钢的耐点蚀性能优于 316L 不锈钢。表 5 为 QN2109Mo 和 316L 不锈钢腐蚀表面 EDS 分析结果,腐蚀形貌表面与点蚀坑中各组分元素差异很小,这主要是 Cl^- 吸附到钝化膜表面上,并不断侵蚀钝化膜,与钝化膜中的形成元素结合生成可溶性的化合物,从而在钝化膜缺陷处萌生腐蚀坑,腐蚀坑中的腐蚀产物溶解于腐蚀溶液中,导致腐蚀坑内外表面成分相差不大。

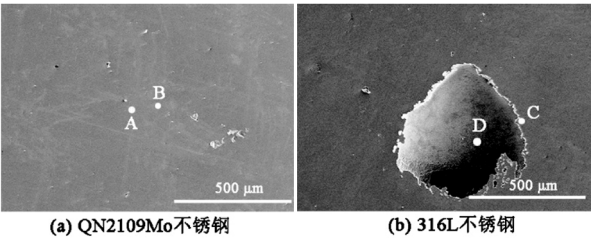


图 11 不锈钢电化学极化实验后的表面形貌 SEM 照片
Fig.11 SEM images of surface morphologies of stainless steel after electrochemical polarization experiment

表 5 QN2109Mo 和 316L 不锈钢极化实验后表面 EDS 分析

Tab.5 EDS analysis of QN2109Mo and 316L stainless steels after polarization experiment

测试区域	w / %									
	C	N	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
A	9.18	1.17	0.74	0.40	18.28	2.30	57.32	8.03	1.15	1.43
B	6.18	1.01	1.04	0.37	18.59	2.34	59.42	8.37	1.43	1.24
C	5.37	0.70	0.81	0.43	15.10	1.81	64.89	9.04	0.14	1.72
D	5.15	1.30	1.76	0.43	15.60	1.58	63.11	9.10	0.07	1.90

3 结论

1) QN2109Mo 和 316L 不锈钢为单一奥氏体组织,N 元素在 QN2109Mo 不锈钢中主要以间隙固溶形式存在,间隙 N 原子对 QN2109Mo 不锈钢组织起到了细化作用,QN2109Mo 不锈钢的硬度高于 316L 不锈钢。

2) 在干摩擦条件下,QN2109Mo 和 316L 不锈

钢的摩擦磨损过程中主要受到氧化磨损和磨粒磨损的共同作用,由于 QN2109Mo 不锈钢具有更高的硬度,其抵抗磨削能力更强,具有更高的耐磨损性能。

3) 在 $w(\text{NaCl})$ 为 3.5% 的溶液中,QN2109Mo 和 316L 不锈钢自腐蚀电位都在 -0.3 V 左右,但 QN2109Mo 具有更低的自腐蚀电流密度和更高的点蚀电位,表现出更优异的抗点蚀性能。

参考文献:

[1] ASRI R I M, HARUN W S W, SAMYKANO M, et al. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: a review [J]. Materials Science and Engineering: C,2017,77:1261-1274.

[2] ZHU M, HE F, YUAN Y F, et al. A comparative study on the corrosion behavior of CoCrNi medium-entropy alloy and 316L stainless steel in simulated marine environment [J]. Intermetallics,2021,139:107370.

[3] 李兵兵, 郎宇平, 陈海涛, 等. 超级奥氏体不锈钢的发展[J]. 中国冶金, 2022, 32(6): 54-60,70.

[4] SALAHINEJAD E, AMINI R, HADIANFARD M J, et al. Structural evolution during mechanical alloying of stainless steels under nitrogen[J]. Powder Technology,2012, 215-216:247-253.

[5] LEE T H, OH C S, KIM S J. Effects of nitrogen on deformation-induced martensitic transformation in metastable austenitic Fe-18Cr-10Mn-N steels[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 110-113.

[6] HA H Y, LEE T H, Kim S J. Role of nitrogen in the active - passive transition behavior of binary Fe - Cr alloy system [J]. Electrochim Acta, 2012, 80: 432-439.

[7] 向红亮, 黄伟林, 刘东, 等. N 含量对 29Cr 铸造超级双相不锈钢组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(3): 304-310.

[8] 中华人民共和国国家标准. 金属和合金的腐蚀奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀方法: GB/T 4334-2020 [S].北京: 中国标准出版社, 2020.

[9] 邓亚辉, 杨银辉, 曹建春, 等. 23Cr-2.2Ni-6.3Mn-0.26N 节 Ni 型双相不锈钢动态再结晶行为研究[J]. 金属学报, 2019, 55(4): 445-456.

[10] DALMAU A, RICHARD C, MUNOZ A I. Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: wear, corrosion and tribo-corrosion appraisal[J]. Tribology International, 2018, 121:167-179.

[11] RABINOWICZ E, MUTIS A. Effect of abrasive particle size on wear[J]. Wear, 1965, 8(5): 381-390.

[12] 蒋一, 程满浪, 姜海洪, 等. 高强度含 N 节 Ni 奥氏体不锈钢 08Cr19Mn6Ni3Cu2N (QN1803) 的显微组织及性能[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 642-652.