

介质温度对含铌 2120 双相不锈钢点蚀性能的影响

梁奕明¹ 何福善¹ 谢文煊¹ 向红亮^{1,2} 郑开魁²

(1.福州大学机械工程及自动化学院; 2.福州大学先进制造学院)

摘要 采用熔模铸造制备 2120 双相不锈钢和 Nb 含量为 0.1% 的 2120 双相不锈钢。用动电位极化曲线测试、电化学阻抗谱测试的电化学腐蚀方法,结合光学显微镜、扫描电镜、能谱分析等手段,分别研究了在不同温度下的 3.5% 的 NaCl 溶液中其耐点蚀行为及其影响规律。结果表明,Nb 含量为 0.1% 的 2120 与 2120 双相不锈钢表面钝化膜稳定性随温度的升高而降低。随着介质温度升高,含 Nb 的 2120 与 2120 双相不锈钢的点蚀电位均呈现降低趋势,而自腐蚀电流密度增大。添加了 Nb 后, α 相含量增加且基体上有富 Nb 相析出,不锈钢表面蚀孔尺寸也随温度的升高而增加。

关键词 2120 双相不锈钢;Nb 合金化;温度;点蚀

中图分类号 TG142.71;TG146.4⁺16

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Medium Temperature on Pitting Corrosion of 2120 Duplex Stainless Steel Containing Nb

Liang Yiming¹, He Fushan¹, Xie Wenxuan¹, Xiang Hongliang^{1,2}, Zheng Kaikui²

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University;

2.School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University)

Abstract: 2120 duplex stainless steel(DSS) with and without 0.1% niobium content were prepared by investment casting. The pitting resistance and its influence law of the steel in 3.5% NaCl solution at different temperatures were investigated by electrochemical corrosion methods including potentiodynamic polarization curve test and electrochemical impedance spectroscopy test, combined with optical microscope, scanning electron microscope, and energy spectrum analysis. The results indicate that the stability of surface passivation film of both steels is decreased with the increase of temperature. Meanwhile, the pitting potential is reduced, while the self-corrosion current density is increased. The content of α is increased with niobium-rich phase precipitated in the matrix after Nb addition, and dimension of corrosion hole on the stainless steel surface is expanded with temperature increase.

Key Words: 2120 Duplex Stainless Steel, Niobium Alloying, Temperature, Pit Corrosion

双相不锈钢(Duplex Stainless Steel,简称为 DSS)是一种固溶组织中同时含有铁素体(α)相和奥氏体(γ)相的合金^[1]。组织中 α 相具有较高的抗拉强度和疲劳强度, γ 相具有优良的成形性和较高的韧性,这两种相的结合使得双相不锈钢具有较好的综合性能。由于 Ni、Cr 等元素的价格昂贵且波动较大,以 2120 为代表的节约型双相不锈钢备受关注。节约型双相不锈钢以 Mn、N 等元素代替了 Ni、Mo 等元素,因此被广泛应用于石油化工、核能发电、工程建设、海洋船舶、纸浆造纸、食品生产、健康医疗等领域^[2~4]。2120 双相不锈钢主要应用于海洋船舶工业中,其工作环境十分恶劣,所以

对其耐蚀性能有一定的要求。与其他不锈钢类似,在含 Cl⁻ 溶液中,2120 不锈钢发生腐蚀的主要类型是点蚀,严重时可能造成穿孔,对安全危害大。对于此类问题,国内外学者在热处理工艺、合金化处理方面进行了研究^[5],但针对 Nb 的作用研究报道相对较少。

Nb 作为微合金化添加元素,对不锈钢耐蚀性能的影响主要是通过形成稳定的碳化物和氮化物,细化晶粒、提高晶粒粗化温度,抑制再结晶及产生显著的沉淀强化效果等作用^[6]。Nb 可以通过沉淀强化来控制 γ 晶粒的尺寸,以此达到细化晶粒的作用,进而提高钢的力学性能。在铁素体不锈钢中 Nb 常与 C、N 等元素形

收稿日期:2021-11-05;修改稿收到日期:2021-12-21

基金项目:福建省增材制造创新中心开放基金资助项目(ZCZZ202-09)

第一作者简介:梁奕明,男,1997 年出生,硕士研究生,福州(350108),E-mail:852954115@qq.com

通信作者:何福善,男,1977 年出生,副教授,福州(350108),E-mail:fushan-he@qq.com

引用格式:梁奕明,何福善,谢文煊,等. 介质温度对含铌 2120 双相不锈钢点蚀性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):762-767.

LIANG Y M, HE F S, XIE W X, et al. Effects of medium temperature on pitting corrosion of 2120 duplex stainless steel containing Nb[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):762-767.

成碳化铌、氮化铌起强化作用,Nb 可增强 2120 双相不锈钢的力学性能和耐蚀性能。国内外学者研究了腐蚀的碳氮化合物,通过抑制铬化物的析出,减少了晶界贫铬现象,从而提高了点蚀电位,改善了耐蚀性能^[7]。根据 Nb 对材料耐蚀性能的影响,发现温度是影响其耐蚀性能的重要因素之一^[8]。因此,本课题对不同温度下含 0.1% 的 Nb 的 2120 双相不锈钢与 2120 双相不锈钢(简称 0.1Nb2120 与 2120)进行了动电位极化曲线测试、电化学阻抗谱测试,以获得温度对不锈钢的耐点蚀性能的影响,为其应用提供借鉴。

1 试验方法

1.1 试验材料及热处理

原材料包括 316L 不锈钢、氮化合金、钼铁、电解铬、电解锰和工业纯铁等。将干燥的原料送入功率为 35 kW,熔化量为 18 kg 的中频感应炉中至熔化;经造渣、扒渣、脱氧处理后,将钢水浇入预热的熔模型壳中,冷却后获得所需的铸锭。制备的 2120 和 0.1% 的 Nb 的 2120 双相不锈钢,采用 ARL3460 直读光谱仪测定其成分,见表 1。

表 1 双相不锈钢的化学成分

材料	Tab.1 The chemical composition of duplex stainless steel %											
	w_B											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Nb	Fe
2120	0.006	0.33	2.31	0.01	0.001	1.86	20.72	0.32	0.18	1.13	—	余量
0.1Nb2120	0.005	0.31	2.41	0.01	0.001	1.95	20.83	0.35	0.18	1.16	0.1	余量

将 2120 与 0.1Nb2120 铸锭置于 SXL-1400C 型热处理箱中进行 1 100 °C×2 h 的固溶处理和 650 °C×2 h 的时效处理。

1.2 电化学测试

采用标准三电极体系的 CHI660e 电化学工作站进行电化学测试^[9]。测试前将试样制备成带有背面引出铜线的树脂胶封装试样,保证试样可导电且暴露预测面为 10 mm×10 mm,并将预测面打磨、抛光至镜面。配置质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,分别在 35、40、45、50、55、60 °C 的水浴中进行动电位极化曲线测试。试验中,先将工作电极在-0.9 V_{SCE} 电压下阴极极化 300 s,以去除试样表面的氧化物。然后开路电位检测 30 min,待电压稳定后进行动电位极化曲线测试。电压的扫描范围为-0.6~0.5 V,扫描速率为 5 mV/s。测试后试样测试面用去离子水超声清洗、无水乙醇冲洗后,温热风干,以备形貌观察。

1.3 组织形貌

将热处理后试样用线切割加工成尺寸为 10 mm×10 mm×4 mm 的试样,经打磨、抛光至镜面,用无水乙

醇清洗后吹干并干燥储存。采用 Murakami 试剂[10 g 的 KOH+30 g 的 K₃Fe(CN)₆+100 mL 的 H₂O]对试样在 90 °C 水浴腐蚀 60 s,然后在 MV5000 型光学显微镜(OM)下观察其金相组织。在室温下将试样用 Beha-ra 溶液(0.2 g 的 K₂S₂O₅+3 mL 的 HCl+20 mL 的 H₂O)侵蚀 10~20 s,并用 Phenomenon Desktop 型扫描电镜(SEM)进行析出相形貌观察。试样完成电化学测试后进行上述操作并观察组织形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 交流阻抗谱测试

不同温度下 2120 与 0.1Nb2120 试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中测得的交流阻抗谱见图 1。可以看出,试样的阻抗谱变化曲线形态一致,皆有容抗弧特性,说明不同试样皆有一定耐 Cl⁻ 腐蚀的能力且介质温度的改变并没有改变试样电极反应机理^[10,11]。2120 和 0.1Nb2120 电化学试样的容抗弧半径由水浴温度 35~60 °C 逐步减小,说明随着温度升高,钝化膜稳定性逐渐降低。两种试样的交流阻抗谱对比发现,2120 试样在 35~50 °C 的容抗弧半径变化较为平稳,在 50~55 °C 之间的变化较大,而在 55~60 °C 之间又变得平稳。在金属腐蚀防护与研究的过程中存在一个临界点蚀温度,可以作为不锈钢点蚀敏感性的依据之一^[12,13]。EBRA-HIMI N 等^[12]也提出了应用电化学阻抗技术测试金属的临界点蚀温度。故 2120 双相不锈钢的临界点蚀温度为 50~55 °C。0.1Nb2120 双相不锈钢的容抗弧半径变化趋势无显著差别,故 0.1Nb2120 双相不锈钢的临界点蚀温度大于 60 °C。在 50 °C 以上的介质温度中,0.1Nb2120 双相不锈钢的钝化膜稳定。

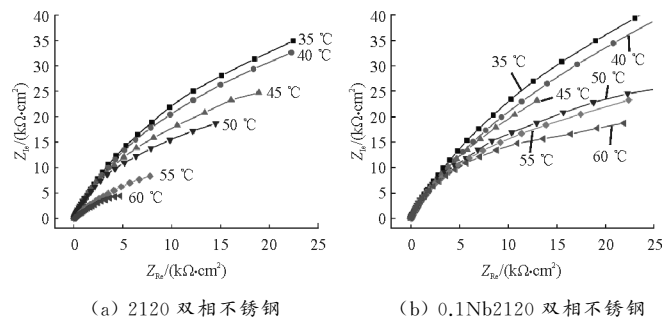


图 1 不同温度的 2120 双相不锈钢电化学阻抗谱

Fig.1 Electrochemical impedance spectroscopy of 2120 DSS under different temperatures

对各种交流电压阻抗电路图谱采用软件(Zsim-Demo)进行等效电路图分析拟合,软件拟合后所采用的等效电路图见图 2。

图 2 中 Q 包括弥散系数 n 及试验材料与介质溶液间的双电层电容 C,是与界面电容相关的常相位角元

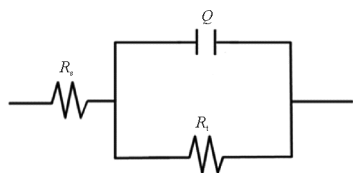


图 2 交流阻抗谱等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of AC impedance spectrum

 1. R_s 为溶液电阻 2. 双电层电容 C 3. 电荷转移电阻

件,即 CPE,表征试样表面的钝化膜特性^[14,15]。 R_t 是电位为 E_{corr} 时电极过程中电荷穿过电解质溶液和电极相界面转移过程的难易程度^[16]。2120 与 0.1Nb2120 试样的 R_t 都随介质温度的升高而降低,说明试样回路电流阻力减弱,膜的稳定性变差,易被氯离子腐蚀介质击穿而受损^[17]。图 3 为不同温度下 2120 与 0.1Nb2120 试样的电荷转移电阻。可以看出,随着水浴温度升高,2120 和 0.1Nb2120 试样的 R_t 值均出现不断下降的趋势。在温度低于 50 °C 时,0.1Nb2120 与 2120 试样的 R_t 相近,说明此时二者钝化膜稳定性相当;而温度大于 50 °C 时,0.1Nb2120 的 R_t 大于 2120 试样的,即 0.1Nb2120 试样的钝化膜稳定性大于 2120 试样。这与添加 Nb 元素后组织中二次相的析出和演变有联系。研究表明,Nb 对 $\epsilon\text{-Cr}_2\text{N}$ 相与 Cr_{23}C_6 相的析出有一定的抑制作用,从而使基体中的 Cr 增多,提高 Cr 元素在不锈钢钝化膜中的浓度。而 Cr 又是形成钝化膜的主要元素之一,所以可以提高钝化膜的稳定性^[7]。

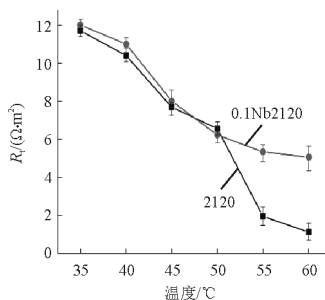


图 3 不同温度下 2120 与 0.1Nb2120 试样的电荷转移电阻

Fig.3 Charge transfer resistance of 2120 specimen with and without 0.1% Nb at different temperatures

2.2 动电位极化曲线测试

图 4 为在不同水浴温度下的 2120 和 0.1Nb2120 试样在 3.5% 的 NaCl 溶液腐蚀介质中所测得的动电位极化曲线。可以看出,动电位极化曲线包括活化区(ab)、活化-钝化过渡区(ac)、钝化区(cd)和过钝化区(de)。阳极极化曲线与阴极极化曲线的交点对应的电位为自腐蚀电位(E_{corr}),2120 和 0.1Nb2120 试样的自腐蚀电位均在一 0.3 V 左右波动,这表明材料具有相似的自腐蚀倾向^[18]。取 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时的电位为点蚀电位,用极化曲线外推法计算得到腐蚀电流密度 I_{corr} 。不同温

度下 2120 试样的点蚀电位 E_{pit} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 变化见图 5。2120 和 0.1Nb2120 试样的点蚀电位随着介质温度的提高呈降低的趋势,2120 试样的点蚀电位从 50 °C 开始剧烈变化,0.1Nb2120 试样的点蚀电位变化相对平缓。根据法拉第定律可知,金属的腐蚀速率与腐蚀电流密度 J_{corr} 成正比^[19],故 J_{corr} 可以很好地反映材料的腐蚀速率。随介质温度提升,材料的 J_{corr} 呈上升趋势,2120 试样在 50 °C 后腐蚀速率大幅上升。通过试样的 E_{pit} 和 J_{corr} 可以得出,随着温度上升,2120 和 0.1Nb2120 试样的耐蚀性能都有不同程度的降低,在高于 50 °C 时,0.1Nb2120 试样的耐蚀性能要高于 2120 试样的。Nb 提高了不锈钢的钝化膜稳定性,导致其耐点蚀性能也随之升高。极化曲线测得的耐蚀性能结果与先前的交流阻抗谱测试的结果一致。

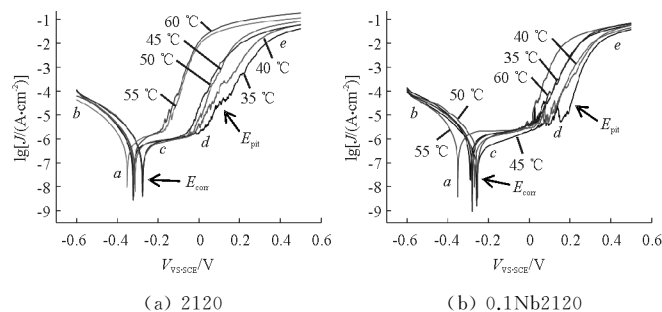


图 4 不同温度下试样在 3.5% 的 NaCl 溶液腐蚀介质中的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of specimens in corrosive media with 3.5% NaCl solution at different temperatures

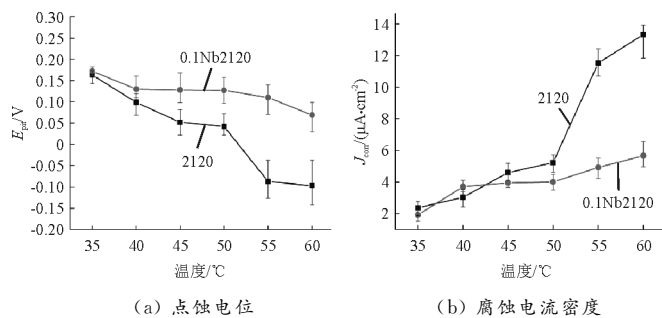


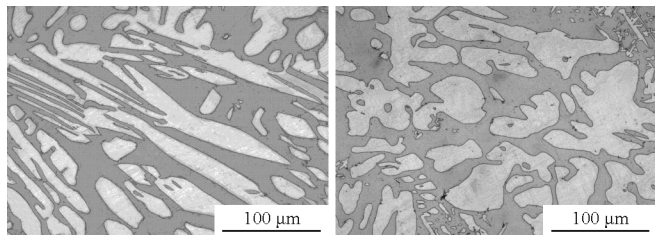
图 5 不同温度下 2120 试样的极化参数

Fig.5 Polarization parameters for 2120 specimens at the different temperatures

2.3 双相不锈钢点腐蚀机理研究

图 6 为 0.1Nb2120 和 2120 试样的金相组织(OM)。可以看出,金相组织中主要由灰白相和暗灰相组成。利用 Image Pro Plus 软件随机选取多张金相图片进行相比例分析,得到 2120 试样组织中灰白相含量为 55.16%,而 0.1Nb2120 试样灰白相含量为 46.61%,降低了 15.5%,可见添加 Nb 后灰白相比例降低。其中,2120 试样的灰白相有较多以长条、尖角状分布,而

0.1Nb2120试样中的灰白相相界更多地呈圆钝状,尤其是细小的灰白相较多。这是由于基体产生的析出相钉扎相界,导致相界迁移过程中发生曲折^[20,21]。晶粒尺寸较小时试样表面在溶液中钝化膜形成速率比点蚀形核速率更快,有利于改善试样耐点蚀性能^[22],而尖角状的晶粒更易造成点蚀源。同时,2120 试样组织方向性明显,而 0.1Nb2120 试样不仅没有明显方向性,而且因晶粒细化晶界增多。因此,0.1Nb2120 试样的腐蚀电流必然低于 2120 试样。从金相组织可以得出0.1Nb2120 试样耐点蚀性能会优于 2120 试样的。



(a) 2120

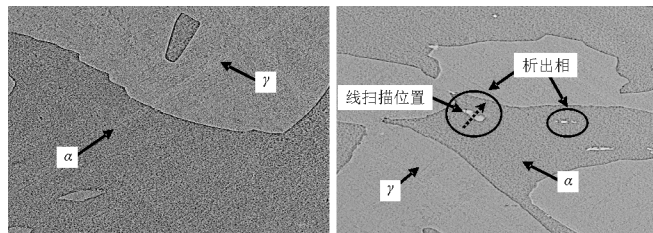
(b) 0.1Nb2120

图 6 0.1Nb2120 和 2120 试样的铸态显微组织

Fig.6 As-cast microstructure of 2120 DSS with or without 0.1% Nb

2120 和 0.1Nb2120 试样的 SEM 组织见图 7。采用 SEM/EDS 对暗灰相和灰白相分析,结果见表 2。对图 7b 中暗灰色基体上存在亮白色析出相进行线扫描,结果见图 8。由表 2 可知,灰白相的 Cr 含量少于暗灰相, Ni 和 N 多于暗灰相。根据两相基体元素对比与 Nb

为强铁素体元素,判断暗灰相为 α 组织,灰白相为 γ 组织^[1,23]。加入 Nb 后, γ 相中的 N 含量上升, α 相中的 N 含量下降,两相中的 Cr 含量增多。N 是强 γ 相元素,其在 γ 相中的固溶度大于 α 相^[24]。当添加 Nb 后, α 相扩大,而 N 无法在 α 相中快速扩散就聚集在 γ 相中。N 含量上升也会促使 Ni 元素向奥氏体转移,所以 0.1Nb2120 试样 γ 相中的 Ni 含量比 2120 试样略有提高^[25]。



(a) 2120

(b) 0.1Nb2120

图 7 2120 和 0.1Nb2120 试样 SEM-BSE 微观组织形貌

Fig.7 SEM-BSE microstructure morphologies of both specimens

表 2 2120 与 0.1Nb2120 双相不锈钢主要相的 SEM/EDS 分析

Tab.2 SEM/EDS analysis of the main phases in 2120

试样	相	DSS with or without 0.1Nb					%
		Cr	Nb	Mo	Ni	N	
2120	暗灰相	21.06	0.01	0.84	0.34	0.03	
	灰白相	19.38	0.01	0.81	1.85	0.31	
0.1Nb2120	暗灰相	22.02	1.21	0.83	0.37	0.01	
	灰白相	20.40	0.01	0.85	2.02	0.52	

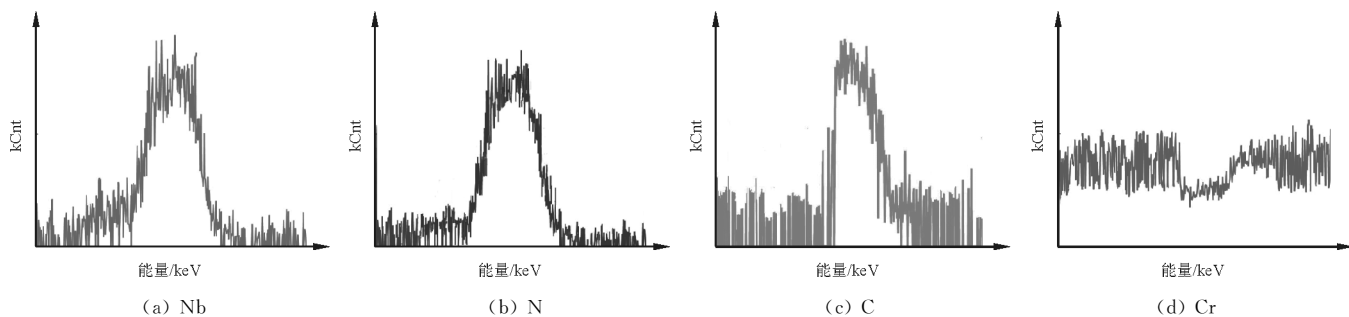


图 8 0.1Nb2120 合金中析出相的 EDS 线扫描

Fig.8 EDS linear scanning of the precipitated phases in 0.1Nb2120

从图 8 可知,亮白色析出相与 α 基体相比具有较高的 Nb、N、C 含量,较低的 Cr 含量。Nb 是促进 α 形成元素并且是强碳、氮化合物形成元素^[26], Nb 会与基体中的 C、N 结合形成铌碳化物或铌氮化合物,然后在 α 基体上析出而起到沉淀强化的作用。同时 Nb 与 C、N 的结合力大于 Cr 与 C、N 的结合力,所以 Nb 对 ϵ - Cr_2N 相与 Cr_{23}C_6 相的析出有一定的抑制作用,从而使基体中的 Cr 增多。Cr 具有强烈形成且固化 α 相的作用,而且能缩减 γ 相区,因此 α 相富 Cr 低 Ni、 γ 相低 Cr 富 Ni^[27]。基于双相组织中 α 属于 BCC 结构,其原子密

排度较低,富集在 α 相上的 Cr、Mo 等强化元素容易获得持续扩散能力,有利于减少贫 Cr 区,提高耐蚀性。

选取 35 °C 和 60 °C 水浴温度下做完极化曲线测试后的试样 SEM 点蚀形貌见图 9。可以看出,点蚀坑主要集中在 α 和 γ 之间的相界交接处与 α 基体内,少量存在于 γ 基体内。对比可以看出,在 60 °C 水浴中 2120 试样与 0.1Nb2120 试样的选择性腐蚀比 35 °C 时明显。低温时点蚀坑形貌比较封闭,数量多且尺寸小。高温时点蚀坑边缘呈花边状,数量小且尺寸大。在低于临界点蚀温度时点蚀坑较小,是由于在低温时活性点较小,参

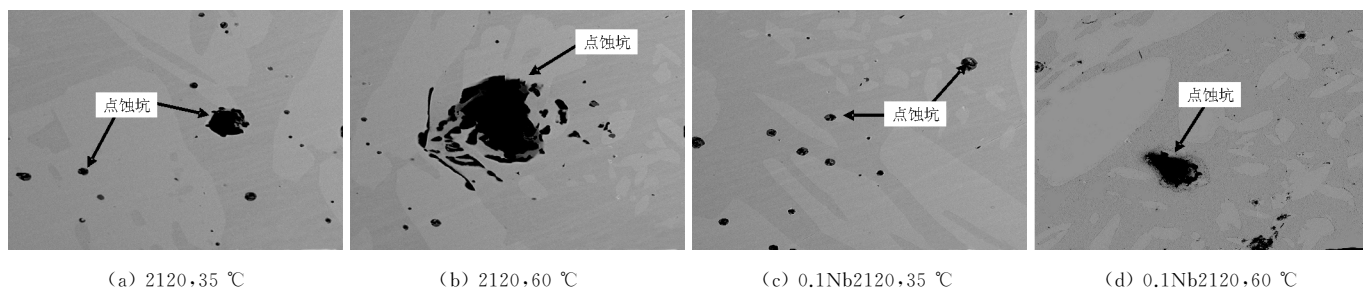


图9 不同水浴温度下试样 SEM-BSE 微观组织腐蚀形貌

Fig.9 SEM-BSE microstructure corrosion morphologies of 2120 and 0.1Nb2120 at different water bath temperatures

加反应的物质活动较少,击穿钝化膜的概率相对减少^[8,28]。即使有少量点蚀坑形成,由于局部反应物质少,导致腐蚀速率较低,点蚀发展也较为缓慢。在高温下活性点较多,反应的介质能以较快的速度进行,导致点蚀坑的继续发展,最终造成稳定的点蚀。对比发现,相同温度下0.1Nb2120试样的点蚀坑尺寸与数量皆小于2120试样。结合两相元素分析,认为是由于Nb的加入影响碳氮化合物的产生,导致试样耐蚀性能得到强化^[29]。

3 结 论

(1)在交流阻抗谱试验中,随着温度从35℃升到60℃,2120不锈钢与Nb含量为0.1%的2120不锈钢(0.1Nb2120)均表现为单一的容抗弧且容抗弧半径逐渐下降,即2120和0.1Nb2120不锈钢钝化膜稳定性随温度上升而逐渐下降。相同温度下2120不锈钢合金钝化膜稳定性要比0.1Nb2120不锈钢合金差,在高于50℃时2120不锈钢合金钝化膜稳定性大幅下降。

(2)极化曲线结果表明,随着温度从35℃升到60℃,2120不锈钢与Nb含量为0.1%的2120不锈钢的钝化区均减小,耐点蚀性能都逐渐减弱,但0.1Nb2120不锈钢合金耐点蚀性能更好。相同温度下2120不锈钢的腐蚀电流密度比0.1Nb2120不锈钢的高,且点蚀成核电位要比0.1Nb2120不锈钢的低。0.1%的Nb加入使得2120不锈钢更不易受到Cl⁻的侵蚀,高温耐蚀性能提高。

(3)2120不锈钢的晶粒呈长条状,0.1Nb2120不锈钢的晶粒呈岛状且晶粒细化。二者孔蚀优先在 α/γ 相界与 α 相内成核,35℃时点蚀坑小且多,60℃时点蚀坑从微孔转变成超大的点蚀坑。0.1Nb2120不锈钢点蚀坑尺寸在相同温度下小于2120不锈钢合金的。

参 考 文 献

[1] 吴玖. 双相不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 1999.
[2] 王兰喜. 国产超级双相不锈钢应用浅析[J]. 石油化工设备技术, 2017, 38(2): 7-8, 54-58.
[3] AL-MURSHDY J M, HAMMOOD S A, DAKHEF N. Improve-

ment corrosion behaviour of lean duplex stainless steel 2101 alloy in ringer solution by plasma nitriding for biomedical applications[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973(1): 12 070-12 077.
[4] 孙卿卿, 仲红刚, 曹欣, 等. 节约型双相不锈钢性能与研究状况[J]. 上海金属, 2012, 34(4): 38-42.
[5] 向红亮, 吕文潇, 郑开魁. 退火温度对NSSC 2120 双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1 010-1 016.
[6] ZHANG D Q, LIU G, ZHANG K, et al. Effect of Nb microalloying on microstructure evolution and mechanical properties in low carbon medium manganese steel[J]. Materials Science & Engineering, 2021, A824: 141 813.
[7] 夏佃秀. Nb在现代铁素体不锈钢中的应用研究进展[J]. 山东科学, 2019, 32(1): 57-67.
[8] 马明玉, 崔君军, 刘后龙, 等. 介质温度对耐高温铁素体不锈钢点蚀行为的影响[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(2): 130-135.
[9] 王维珍, 刘淑静, 王静, 等. 三电极海水腐蚀动态试验装置的研制[J]. 材料保护, 2013, 46(8): 58-62.
[10] 孙伟, 施锦杰. 等效电路拟合钢筋锈蚀行为的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 387-392.
[11] 安朋亮, 梁平, 张云霞. 高氮奥氏体不锈钢耐点蚀性能研究[J]. 材料保护, 2017, 50(7): 34-36.
[12] EBRAHIMI N, MOMENI M, KOSARI A, et al. A comparative study of critical pitting temperature(CPT) of stainless steels by electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic and potentiostatic techniques[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 96-102.
[13] 万章, 孔韦海, 张强. 耐蚀合金临界点蚀温度标准试验方法比较[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(2): 105-109.
[14] 颜晨曦, 于洋, 张天翼. 含氯环境下温度对2205双相不锈钢点蚀行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5): 115-122.
[15] XU L N, ZHU J Y, LU M X, et al. Electrochemical impedance spectroscopy study on the corrosion of the weld zone of 3Cr steel welded joints in CO₂ environments[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015, 22(5): 500-508.
[16] 曹楚南. 腐蚀电化学原理(第三版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
[17] HOSEINPOOR M, MOMENI M, MOAYED M, et al. EIS assessment of critical pitting temperature of 2205 duplex stainless steel in acidified ferric chloride solution[J]. Corrosion Science, 2014, 80: 197-204.
[18] 樊学华, 于勇, 张子如, 等. 316L奥氏体不锈钢在不同电位下的点蚀和再钝化行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 287-293, 318.

Mg-Zn-Sn 铸造合金的组织及力学性能

杨珏^{1,2} 胡剑² 张诗昌^{1,2}

(1.武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室; 2.武汉科技大学材料与冶金学院)

摘要 通过改变 Zn、Sn 含量,采用金属型铸造了 Mg-Zn-Sn 合金,研究了其铸态组织及力学性能。结果表明,在 Zn、Sn 总含量 $\leq 6\%$ 时,随着元素含量增加,Mg-Zn-Sn 合金的组织由柱状晶向等轴晶转变,且等轴晶晶粒尺寸和二次枝晶间距减小,原因是生长限制因子 G_{RF} 值随着元素含量增加而增大;而第二相 MgZn 及(或) Mg_2Sn 数量则随元素含量增加而增加;屈服强度及压缩强度随 Zn、Sn 含量增加而增大,压缩率在 Zn、Sn 含量均为 2% 时达到最高,这是由于 Mg_2Sn 及 MgZn 相变得细小且均匀分布在晶界,提高了合金的塑性。

关键词 Mg-Zn-Sn 合金;铸态组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Sn Casting Alloys

Yang Jue^{1,2}, Hu Jian², Zhang Shichang^{1,2}

(1.Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology; 2.School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology)

Abstract: Mg-Zn-Sn alloys with different contents of Zn and Sn were prepared by metal mold, and the as-cast structure and mechanical properties of the alloys were investigated. The results show that the morphology of the grains is changed from columnar to equiaxed and the equiaxed grain size as well as the secondary dendrite spacing is decreased as the element content increases when the total mass fraction of Zn and Sn is less than or equal to 6% due to the value of G_{RF} (Growth restriction factor) increases. However the amount of second-phase MgZn and/or Mg_2Sn is increased with Zn and Sn content increasing. The yield strength and compressive strength of the alloy are increased with the content of Zn and Sn increasing, however the compressive rate of the alloys reaches the highest values at 2% Zn and 2% Sn, which is attributed to the finer and uniform distribution of Mg_2Sn and MgZn phases at the grain boundaries, thus improving the plasticity.

Key Words: Mg-Zn-Sn Alloys, As-cast Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-08-10;**修改稿收到日期:**2021-09-26

第一作者简介:杨珏,男,1997 年出生,硕士研究生,武汉(430081),E-mail:1048621969@qq.com

通信作者:张诗昌,男,1962 年出生,教授,武汉(430081),E-mail:s.c.hust@163.com

引用格式:杨珏,胡剑,张诗昌. Mg-Zn-Sn 铸造合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):767-770.

YANG J, HU J, ZHANG S C. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Sn casting alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):767-770.

- [19] 何进,晏敏胜,杨丽景,等. S32750 超级双相不锈钢在 NaCl 溶液中的临界点蚀温度及电化学腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(2): 106-112.
- [20] REBECCA A, WHEELING, JOHN C. Characterization of weld metal microstructure in a Ni-30Cr alloy with additions of niobium and molybdenum[J]. Materials Characterization, 2016, 115: 97-103.
- [21] ANTONIO J, RAMIREZ, JEFFREY W, et al. Improving the ductility-dip cracking resistance of Ni-base alloys[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2006, 179(1): 212-218.
- [22] 石林,郑志军,高岩. 不锈钢的点蚀机理及研究方法[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 79-85.
- [23] 向红亮,吕文潇,郑开魁. 退火温度对 NSSC 2120 双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1 010-1 016.
- [24] 冯志慧. 经济型双相不锈钢 2101 热塑性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [25] 杨吉春,刘香军,周莉,等. 氮对 2205 双相不锈钢在 NaCl 溶液中耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 6-11.
- [26] 刘静,罗兴宏,胡小强,等. Ti 和 Nb 微合金化对超纯 11%Cr 铁素体不锈钢组织的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(6): 686-694.
- [27] BHATTACHARYA A, SINGH P M. Role of microstructure on the corrosion susceptibility of UNS S32101 duplex stainless steel[J]. Corrosion, 2008, 64(6): 532-540.
- [28] 郭一二,梁平,迟嘉鹏,等. 高氮奥氏体不锈钢的临界点蚀温度及 Cl⁻ 浓度对其的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(6): 625-629.
- [29] 黄恩泽,杜开平,王旭,等. Nb 对双相不锈钢激光熔覆组织及性能的影响研究[J]. 热喷涂技术, 2020, 12(1): 19-24.

(编辑:刘卫)