

引用格式: 嵇爽, 戚振南, 刘燕霞, 等. 耐蚀合金 NS334 及堆焊试样在氯离子环境中的腐蚀行为研究 [J]. 热加工工艺, 2025, 54 (24): 127-131+138.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232728

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

耐蚀合金 NS334 及堆焊试样在氯离子环境中的 腐蚀行为研究

嵇爽¹, 戚振南¹, 刘燕霞², 赵英利¹, 韩彦光¹, 张志旺¹, 李瑞杰¹

(1. 河钢材料技术研究院, 河北 石家庄 052165; 2. 河北工业职业技术大学, 河北 石家庄 050019)

摘要:对耐蚀合金 NS334 母材及堆焊试样在浓度 6wt%~24wt% FeCl₃ 溶液中进行电化学腐蚀试验、浸泡腐蚀试验, 通过 SEM、LSCM 等手段, 对腐蚀形貌、腐蚀失重率、腐蚀机理等进行研究。结果表明: NS334 合金母材及堆焊试样的电化学腐蚀速率与溶液浓度呈正相关。当 FeCl₃ 浓度大于 18wt% 后, 耐蚀性迅速降低, 母材腐蚀减重率从 0.02 g/(m²·h) 增加至 0.05 g/(m²·h), 堆焊试样腐蚀失重率从 0.025 g/(m²·h) 增加至 0.11 g/(m²·h)。母材的孪晶小角度晶界耐蚀性强化效果与细化晶粒的耐蚀性弱化效果共同作用, 导致母材耐蚀性优于堆焊试样。氯离子腐蚀主要沿晶界及二次枝晶发生并向内部延伸扩展。

关键词:耐蚀合金 NS334; 电化学腐蚀; 极化曲线; 腐蚀速率

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)24-0127-05

Corrosion Behavior of Corrosion-resistant Alloy NS334 and Its Overlay Welding Specimen in Chloride Ion Environment

Ji Shuang¹, Qi Zhennan¹, Liu Yanxia², Zhao Yingli¹, Han Yanguang¹,
Zhang Zhiwang¹, Li Ruijie¹

(1. HBIS Materials Technology Research Institute, Shijiazhuang 052165, China; 2. Hebei Vocational University of Industry and Technology, Shijiazhuang 050019, China)

Abstract: Electrochemical corrosion tests and immersion corrosion tests were conducted on the base metal and overlay welding specimen of corrosion-resistant alloy NS334 in concentration 6wt%~24wt% FeCl₃ solution. The corrosion morphology, corrosion weight loss rate and corrosion mechanism were studied using SEM, LSCM and other methods. The results indicate that the electrochemical corrosion rate of NS334 base material and overlay welding specimen is positively correlated with solution concentration. When the concentration of FeCl₃ exceeds 18wt%, the corrosion resistance rapidly decreases, and the corrosion weight loss rate of the base material increases from 0.02 g/(m²·h) to 0.05 g/(m²·h), the corrosion weight loss rate of the overlay welding specimen increases from 0.025 g/(m²·h) to 0.11 g/(m²·h). The strengthening effect of twinning small angle grain boundary on corrosion resistance of the base material and the weakening effect of refined grain on corrosion resistance jointly result in the base material having better corrosion resistance than the overlay welding specimen. Chloride ion corrosion mainly occurs along grain boundaries and secondary dendrites and extends inward.

Key words: corrosion resistant alloy NS334; electrochemical corrosion; polarization curve; corrosion rate

腐蚀对金属材料的影响巨大, 我国每年因金属材料腐蚀导致的经济损失高达 5000 亿元^[1-2]。镍基耐蚀合金因兼具良好的耐蚀性及综合力学性能而被广泛应用。其中, NS334 合金具有高铬、高钼、高钨

的合金含量, 同时控制 <0.01wt% C、<0.08wt% Si 含量, 在具备一定力学性能的同时, 具有良好的耐点蚀特性^[3-5]。目前关于 NS334 合金的研究包括飞机起落架用 300M 钢表层熔敷 NS334 合金材料, 在其整体强度增加的同时, 明显改善了它的耐蚀性能^[6]; 在 PCrNi3MoVP 炮钢表面激光熔敷一层 NS334 合金, 表面硬度达到 280HV, 与基体的 350HV 较为接近, 匹配性较好, 具有代替镀铬的应用前景^[7]。研究退火工艺对 NS334 合金热轧板材组织影响规律时发现,

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2025-07-08

作者简介: 嵇爽, 男, 硕士, 工程师, 主要从事特种材料研发及生产工作;

E-mail: jishuang@hbisco.com

通讯作者: 刘燕霞, 女, 副教授, 硕士, 主要从事特种钢冶炼研究工作;

E-mail: zhangzhiwangliu@163.com

1000℃低温退火5 min后,再进行1100℃高温退火15 min热处理,晶粒组织发生再结晶,产生了较多孪晶组织,改善了晶界分布,优化了耐蚀性能^[8];μ析出相是导致NS334合金锻造开裂的主要原因,经1170℃保温10 h空冷后,偏析几乎全部消失,锻造良好^[9]。目前,对于NS334合金堆焊试样在氯离子环境内腐蚀的研究相对较少。

为系统研究NS334合金母材及堆焊试样在氯离子环境内腐蚀行为,本文以其母材及堆焊试样为研究对象,通过FeCl₃溶液浸泡试验及电化学腐蚀试验,结合扫描电镜及激光共聚焦显微镜观测微观组织变化特性,检测不同浓度FeCl₃溶液中2种状态NS334合金的腐蚀速率,探究其腐蚀机理,为NS334合金材料的推广应用提供基础数据。

1 试验准备及方法

1.1 材料准备

试验准备NS334合金母材及同材焊丝,焊丝规格为φ1.2 mm,其具体成分如表1所示。在母材上进行堆焊试验,焊接前150℃烘烤30 min。具体焊接工艺如表2所示。堆焊17层,堆焊高度>40 mm,每道次焊接工艺一致,以保障堆焊试样组织及成分稳定,层间需不锈钢刷打磨氧化层,确保层间无氧化、无气孔、无夹渣。切割去除热影响区部分,在堆焊试样熔敷金属部分取样作为堆焊的评价试样,对堆焊试样进行固溶处理:1140℃保温30 min,出炉水冷。

表1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt%)

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe	W	S	P	Ni
母材	0.065	0.026	0.32	16.52	15.65	5.52	4.12	0.006	0.005	余量
焊丝	0.088	0.045	0.42	15.85	15.54	6.01	4.22	0.008	0.008	余量

表2 焊接工艺参数
Tab.2 Welding process parameters

焊接电流/A	焊接电压/V	保护气氛及流量/(L·min ⁻¹)	层间温度/℃
195	23	全氩气/18	<90

1.2 电化学腐蚀试验

对母材及堆焊试样取样,经磨床加工至相同粗糙度表面。利用AUTOLAB PGSTAT302电化学工作站,采用三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极、辅助电极为铂片电极、待检测试样作为工作电极,测试前30 min使开路电位达到稳定。电化学阻抗谱交

流幅值为10 mV、频率为0.01~10⁶ Hz、极化曲线扫描范围为-0.2~0.15 V、扫描速度为0.3 mV/s。试样裸露于溶液中的尺寸为5 mm×5 mm,腐蚀环境为6wt%、12wt%、18wt%、24wt% FeCl₃溶液,采用交流阻抗和动电位极化法评价耐蚀性。试验温度为常温。

1.3 FeCl₃溶液浸泡腐蚀试验

在母材及堆焊试样上制备3 mm×30 mm×30 mm试样,经磨光加工,将试样表面加工至相同粗糙度,超声清洗、干燥后称量试验前质量W_前。将配好的试验溶液(不同浓度的FeCl₃溶液)置于已充分洗涤过的烧杯中。在50℃恒温水浴锅中放入试样后开始计时。24 h后取出试样,立即用水清洗,用毛刷将表面氧化层清理干净,超声清洗烘干后称重W_后。由腐蚀率公式计算可得相应腐蚀率。

$$\text{腐蚀率} = (W_{\text{前}} - W_{\text{后}}) / (S \times t) \quad (1)$$

式中:W_前为试验前试样质量,g;W_后为试验后试样质量,g;S为试样总面积,m²;t为试验时间,h。

2 试验结果及分析

2.1 极化曲线分析

在涉氯环境中,金属表面因氯离子腐蚀发生点蚀缺陷。为探究NS334合金母材及堆焊试样腐蚀情况,选用不同浓度的FeCl₃溶液进行电化学腐蚀研究。图1为母材及堆焊试样在FeCl₃溶液中电化学腐蚀的极化曲线、腐蚀电流密度及腐蚀电位变化图。图1(a)、(b)为NS334合金母材及堆焊试样在不同浓度FeCl₃溶液中电化学腐蚀的极化曲线,该曲线表征在不同FeCl₃浓度溶液中电极电位和电流密度的关系。从图1(a)、(b)可知,2种状态的试验材料在不同浓度FeCl₃溶液中极化曲线形状相近,均无明显钝化。自腐蚀电位分布在0.44~0.52 V。将极化曲线外推拟合处理得到腐蚀电流密度,结果如图1(c)所示。当溶液浓度低于18wt%时,腐蚀电流密度从6%时的1.29 μA/cm²缓慢增长至2.20 μA/cm²;当溶液浓度提升至24wt%时,急速上升至30.51 μA/cm²。因此,在浓度<18wt%时,NS334合金的耐蚀性较好。根据拟合结果可知,随FeCl₃浓度增加,腐蚀电流密度呈现逐渐增长趋势,腐蚀速率增加。

分析原因,FeCl₃溶液中Cl⁻是点蚀主要诱导因素,Cl⁻吸附在材料钝化膜表面,阻碍元素移动进而抑制钝化膜的自我修复;同时Cl⁻尺寸较小,容易穿过钝化膜缝隙进入基体内形成微小空隙,此空隙内

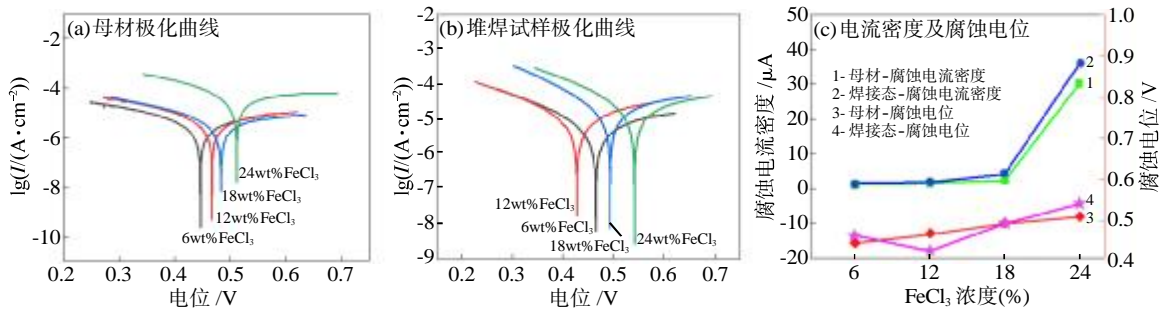


图1 试验材料在不同 FeCl₃ 浓度溶液中极化曲线及电流密度、腐蚀电位
Fig.1 Polarization curves, current density and corrosion potentials of experimental materials in the solutions with different FeCl₃ concentrations

部呈现活性溶解状态,与外表面的钝化层形成腐蚀电池,作为阳极,空隙内部金属快速溶解。由于自催化作用,内部腐蚀速率快速增加,空隙逐渐增加直至形成肉眼可见腐蚀孔洞。Cl⁻浓度偏低时,钝化膜的自我修复速度接近于 Cl⁻腐蚀速率,整体体现较弱的腐蚀电流密度;当浓度 > 18wt% 时,Cl⁻腐蚀速率显著快于钝化膜自我修复速率,导致钝化膜快速破坏,因此耐蚀性急剧下降^[10-11]。

堆焊试样在不同浓度 FeCl₃ 溶液中极化曲线、腐蚀电流密度及腐蚀电位分别如图 1(b)、(c) 所示,当浓度 < 18wt% 时,腐蚀电流密度较小,随着浓度继续增加,腐蚀电流密度迅速提高,从 18wt% 时的 4.04 μA/cm² 急速增加至 24wt% 的 35.07 μA/cm²。因此,NS334 合金堆焊试样在 18wt% 以上浓度的 FeCl₃ 溶液中耐蚀性较差,分析原因,高 Cl⁻ 浓度在试样表面的晶界处吸附并溶解,导致表面晶界处 Cr₂O₃ 氧化膜破裂,恶化材料表面耐蚀性。

从图 1(c) 可知,母材的耐蚀性均优于堆焊试样,尤其在浓度高的溶液中,堆焊试样的腐蚀电流密度增加明显,在 24wt% 溶液中,腐蚀电流密度相差 4.56 μA/cm²。对比材料微观组织,如图 2 所示,母材为细小奥氏体晶粒,平均晶粒尺寸为 24 μm,其中一些孪晶穿过整个晶粒,形成穿晶型孪晶,部分孪晶终止于晶粒内部,形成终止型孪晶^[12];堆焊试样为粗大

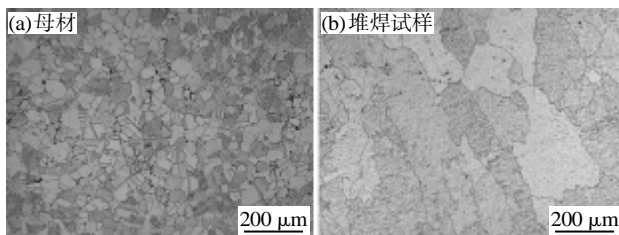


图2 母材及堆焊试样的微观组织
Fig.2 Microstructure of base metal and overlay welding specimen

奥氏体组织,平均晶粒尺寸为 87 μm。资料显示,晶界处元素为无序排列,能量更高,更容易发生腐蚀,因此晶界越多,耐蚀性越差,即小尺寸晶粒的组织降低材料的耐蚀性。母材组织中存在大量孪晶,这些孪晶属于小角度晶界,其晶界能量低于大角度晶界能量,具有更高的稳定性,同时孪晶具备切断大角度晶界的作用,弱化大角度晶界作为腐蚀主要渠道的作用,孪晶的存在可以改善材料耐蚀性^[13-14]。因此,孪晶的强化效果与细化晶粒的弱化效果共同作用,最终体现为母材耐蚀性的改善。

2.2 电化学阻抗谱(EIS)分析

研究材料在 FeCl₃ 中阻抗变化规律,结果如图 3 所示。母材及堆焊试样在 FeCl₃ 溶液中均表现为单

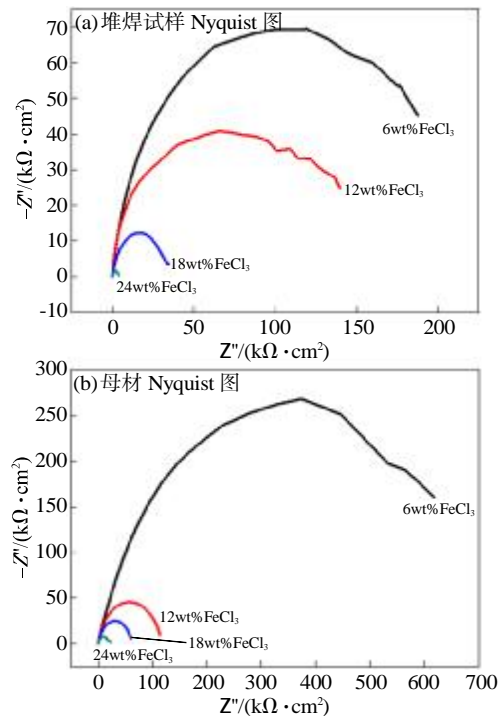


图3 NS334 合金母材及堆焊试样在 FeCl₃ 中的阻抗变化
Fig.3 Impedance variation of NS334 alloy base metal and overlay welding specimen in FeCl₃ solution

个容抗弧,形状为不规则半圆形。随浓度提高,容抗弧半径变小。容抗弧半径越大,材料表面电阻越大,阻碍腐蚀电化学进行的能力越强,材料表现出更高的耐蚀性。母材腐蚀容抗弧半径明显高于堆焊试样腐蚀容抗弧半径,因此耐蚀性更优。

2.3 FeCl₃ 浸泡腐蚀分析

图 4、5 分别为母材及堆焊试样在不同浓度 FeCl₃ 溶液中浸泡腐蚀后的宏观形貌。当 FeCl₃ 浓度 < 18wt% 时,母材及堆焊试样试样表面良好,无明显缺陷;当浓度增加至 24wt% 时,母材及堆焊试样试样表面均呈现不同程度腐蚀缺陷,母材表面出现少量点状缺陷,堆焊试样试样缺陷呈不规则长条状。对部分腐蚀坑进行激光共聚焦观察,最深处深度达到 2 mm。

统计腐蚀失重率,结果如图 6 所示。当 FeCl₃ 浓度大于 18wt% 后,耐蚀性迅速降低,母材腐蚀速率从 0.02 g/(m²·h) 增加至 0.05 g/(m²·h),堆焊试样腐蚀速率从 0.025 g/(m²·h) 增加 0.11 g/(m²·h)。母材耐蚀性优于堆焊试样。对缺陷附近残存的腐蚀产物进行能谱检测,其主要为含氯物质,其氯浓度达到 48.85wt%,表明此处出现了氯化物的聚集。

分析原因,随 Cl⁻ 浓度增加,钝化膜载流子质量浓度提高,溶解钝化膜能力更强,在失去钝化膜的部位形成氧空穴、金属空穴等显微缺陷。随着缺陷数量增加,逐步积累形成点蚀源。初始点蚀坑内离子水解形成的氢离子导致缺陷内部呈现强酸性,环境腐蚀性进一步加剧,加快速蚀坑内部金属元素的溶解。同时点蚀坑内部金属阳离子富集,诱导作为阴离子的

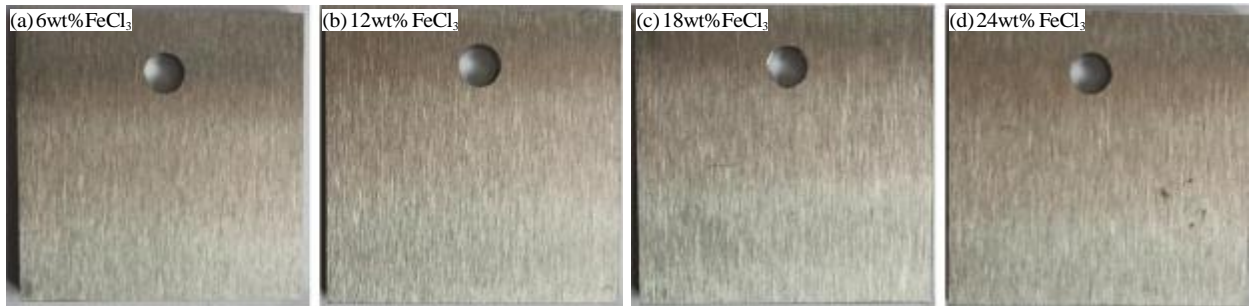


图 4 母材在不同浓度 FeCl₃ 中腐蚀形貌

Fig.4 Corrosion morphologies of base material NS334 alloy in different concentrations of FeCl₃

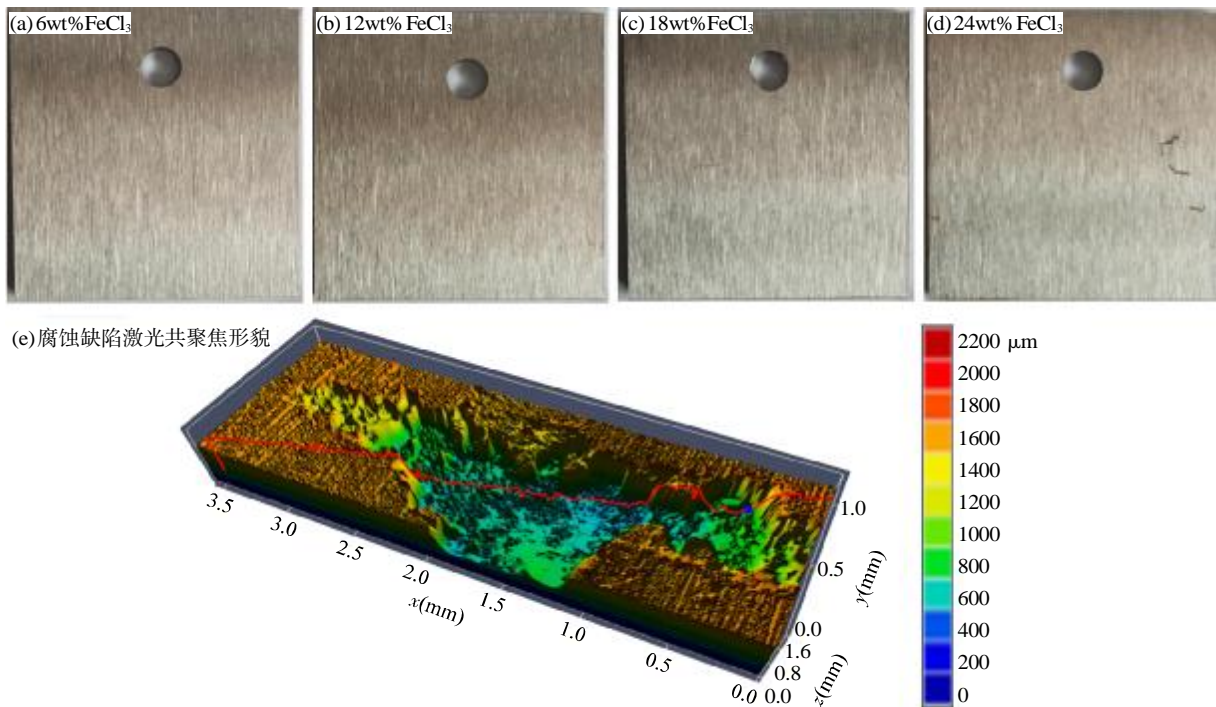


图 5 堆焊试样在不同浓度 FeCl₃ 中的腐蚀形貌

Fig.5 Corrosion morphologies of overlay welding specimen in different concentrations of FeCl₃

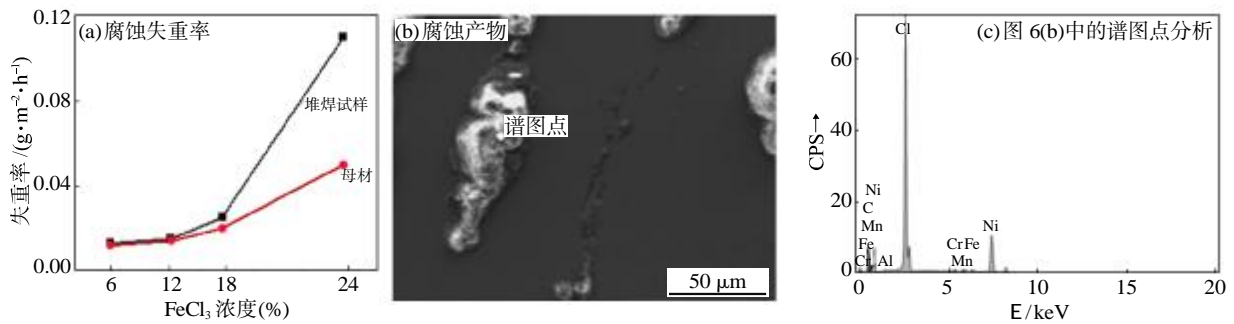


图6 腐蚀失重率及腐蚀产物
Fig.6 Corrosion weight loss rate and corrosion products

Cl在点蚀坑间隙通过扩散的方式进入点蚀坑内。随着坑内Cl富集,化学活化点蚀坑内壁,导致内部不断溶解。二者综合作用致使点蚀坑迅速延伸扩展^[15-16]。试验结果进一步验证了电化学腐蚀试验结论。

2.4 腐蚀机理研究

利用SEM观察缺陷微观组织,结果如图7所示,局部腐蚀主要从晶界开始,逐渐扩展延伸。分析原因,因NS334合金为高镍、高钼、高钨材料,凝固过程晶界处元素偏析严重,镍、钨等元素在晶界富集,导致晶界处铬元素含量降低,降低晶界处耐蚀性,因此腐蚀从晶界开始发生。通过对图7(a)、(b)的对比发现,FeCl₃浓度增加,晶界处腐蚀愈加严重,腐蚀缺陷呈现明显长大趋势,部分细小晶粒因晶界腐蚀,已经完全脱落。对腐蚀缺陷处纵向刨开,如图7(c)所示,腐蚀主要发生在表层以下,形成皮下腐蚀坑。对腐蚀缺陷进行高倍观察,如图7(d)所示,腐蚀缺陷呈鱼骨状分布,因此NS334合金的氯离子腐蚀主要沿枝晶及二次枝晶发生并发展,因此组织偏析是促进氯离子腐蚀的重要原因。

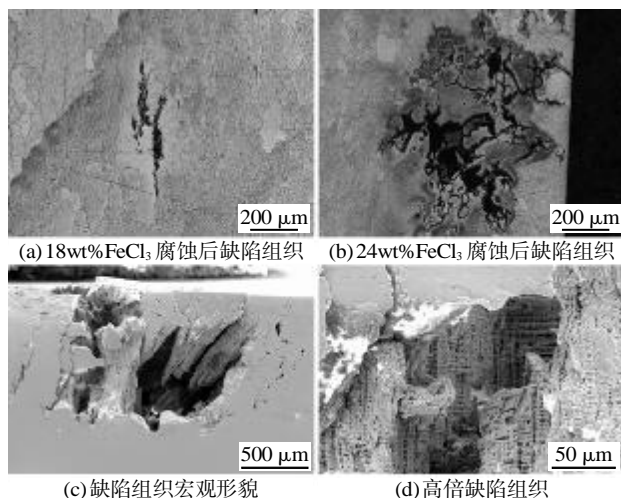


图7 缺陷组织的微观形貌
Fig.7 Micromorphologies of defective structure

3 结论

- (1) NS334合金母材及堆焊试样在FeCl₃溶液腐蚀过程中无明显钝化过程。
- (2) 孪晶的耐蚀性强化效果与细化晶粒的耐蚀性弱化效果共同作用,最终体现为母材耐蚀性优于堆焊试样。
- (3) NS334合金材料的氯离子腐蚀主要沿晶界及二次枝晶发生并向内部延伸扩展,组织偏析是NS334合金发生氯离子腐蚀的重要原因。

参考文献:

- [1] 杨文昊. 金属材料的腐蚀与防护分析[J]. 世界有色金属, 2021(12): 192-193.
- [2] 黄国亮, 薛蔓凌, 字映竹. 金属材料腐蚀与防护机理研究述评[J]. 世界有色金属, 2018(6): 2.
- [3] Huang C H, Wang J, Yan J, et al. Evaluation of corrosion and wear performance of Fe-based coating and hastelloy C276 in H₂S environment on 304 stainless steel substrate [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 674: 131871.
- [4] 孙绍恒, 杨宇军, 夏金民, 等. 热处理工艺对爆炸焊接后哈氏合金C276耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 158-161.
- [5] 王秀民, 张艳茹, 郝义磊, 等. 哈氏合金C276在溴胺混合液中的耐蚀性[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 223-228.
- [6] 崔静, 薛安源, 刘玲, 等. 300M钢激光熔覆C276涂层微观组织和电化学性能[J]. 航空材料学报, 2021, 41(5): 86-93.
- [7] 王晓明, 罗耕星, 胡浩, 等. 炮钢表面激光熔覆Hastelloy C-276涂层的组织及性能[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 321-327.
- [8] 张晓宇, 钟军, 赵军, 等. Hastelloy C-276合金多道次退火晶粒团簇组织的演变[J]. 稀有金属, 2021, 45(9): 1053-1061.
- [9] 嵇爽, 李会林, 赵秀娟, 等. 镍基耐蚀合金Hastelloy C-276锻造开裂原因分析[J]. 金属热处理, 2021, 46(6): 240-244.
- [10] 张伟, 曹文凯, 阳俊龙. 温度和Cl浓度对完井液中Cr13油管的电化学腐蚀的影响[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2023, 40(4): 1-5.
- [11] 程嘉瑞, 晏琦琪, 乔帆帆, 等. 流动NaCl溶液中P110钢的电化学腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(7): 87-91.

(下转第138页)

线性增长,但晶粒尺寸随之明显减小。

(3) 随着 C 含量的增加,GH4079 合金热处理态锻制棒材的室温抗拉强度和屈服强度升高,断后伸长率降低;650 °C/863 MPa 试验条件下持久寿命明显增长,持久塑性相当。这得益于合金中存在大量细小、相对均匀分布的碳化物,可显著阻碍位错运动、抑制晶界滑移。

参考文献:

- [1] 杜金辉,赵光普,邓群,等. 中国变形高温合金研制进展[J]. 航空材料学报,2016,36(3):27-39.
- [2] 杜金辉,吕旭东,董建新,等. 国内变形高温合金研制进展[J]. 金属学报,2019,55(9):1115-1132.
- [3] Huang F X. Development of turbine disk high superalloys in russia[J]. Journal of Aeronautical Materials,1993,13(4):49-56.
- [4] Zhou G, Ding H, Cao F R, et al. Flow instability criteria in processing map of superalloy GH79[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012,22:1575-1581.
- [5] Zhong L Q, Liang Y L, Hu H. Study on plastic deformation characteristics of shot peening of Ni-base superalloy GH4079 [J]. IOP Conf. Series:Materials Science and Engineering, 2017,230:012041.
- [6] Zhang W W, Liu X G, Lu T G, et al. Microstructural evolution of GH4079 superalloy during hot deformation and heat treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,33:298-317.
- [7] 钟丽琼,梁益龙,胡浩. GH4079 高温合金磨削表面特征的研究[J]. 工艺与检测,2016(12):79-82.
- [8] Zhang X J, Zhou G, Zhang H Y, et al. Study of processing map of GH4079 alloy based on different instability criteria[J]. JOM:The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society (TMS),2024,76:3872-3887.
- [9] Lu T G, Liu X G, Zhang W W, et al. Microstructure evolution and fracture characteristics of GH4079 superalloy during high-temperature tensile process [J]. Materials Science and Engineering A,2024,918:147450.
- [10] Ying W F, Hou J, Jiang S N, et al. A comparison of the hot deformation behavior and constitutive model of the GH4079 alloy[J]. Crystals,2025,15(148):1-20.
- [11] 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [12] 石照夏,胥国华,刘宁. C 含量对 GH4169 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2023,52(8):2926-2934.
- [13] 余竹焕,张洋,翟娅楠,等. C、B、Hf 在镍基高温合金中作用的研究进展[J]. 铸造,2017,66(10):1076-1081.
- [14] 刘世忠,史振学,李嘉荣. C 含量对第二代单晶高温合金组织的影响[J]. 航空材料学报,2017,37(3):9-15.
- [15] 史振学,刘世忠,赵金乾. C 含量对单晶高温合金再结晶的影响[J]. 失效分析与预防,2019,14(1):8-13.
- [16] 谷雨,杨树峰,赵朋,等. 镍基高温合金 GH4738 的凝固偏析和碳化物析出行为[J]. 中国冶金,2021,31(7):13-21.
- [17] 张献光,陈佳俊,杨文超,等. GH4141 难变形高温合金铸态组织析出相鉴别及均匀化过程中回溶行为[J]. 稀有金属材料与工程,2024,53(1):137-147.
- [18] Cooper D E, Blundell N, Maggs S, et al. Additive layer manufacture of Inconel 625 metal matrix composites, reinforcement material evaluation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013,213(12):2191-2200.
- [19] 尚丽娟,伦建伟,陈礼清,等. 碳化物对热连轧 403Nb 钢位错组态及蠕变性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2010,22(11):19-22.
- [20] 龚雪婷,李鑫,李昊泽. 碳含量对 XH35BT 高温合金组织演变和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2018,43(9):21-26.
- [21] 黄乾尧,李汉康,等. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [22] 宋艳丽,安军靖,王惠生,等. 退火工艺对 GH4169 合金带材组织和力学性能的影响[J]. 中国冶金,2022,32(12):66-71.
- [23] 田宁,田素贵,于慧臣,等. 块状碳化物的形态演化及对镍基合金蠕变性能的影响 [J]. 中国有色金属学报,2019,29(7):1427-1436.
- [24] 余乾. 微量元素 C 和 Mg 对一种镍基高温合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2006,26(4):11-13.
- [25] 余竹焕,刘林,赵新宝,等. 碳在镍基单晶高温合金中作用研究的进展[J]. 铸造,2009,58(9):918-924.
- [26] 史世风,胡博炜,范强,等. 合金成分和工艺参数对镍基铸造高温合金 GMR235 组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(11):2038-2042.
- [27] 赵新宝,党莹樱,尹宏飞. 超超临界电站用镍铁基高温合金 TCP 相和碳化物析出的热力学计算[J]. 材料工程,2015,43(5):38-43. 

(上接第 131 页)

- [12] 胡常青,刘翠秀,陈斌,等. Ti-25Nb-25Ta 合金拉伸变形过程中{332}<113>变形孪晶的 EBSD 研究[J]. 电子显微学报,2016,35(5):386-392.
- [13] 彭大朋,王珏,蔡旋坤,等. 晶界工程处理对 GH738 合金耐腐蚀性的影响[J]. 现代冶金,2018,46(1):1-5.

- [14] 谢君,王道红,刘金灿,等. 一种耐磨耐蚀双相合金的组织及性能[J]. 热加工工艺,2023,52(4):47-50.
- [15] 罗辉,项东,郭晓斐. 奥氏体不锈钢晶粒度对晶间腐蚀速度的影响[J]. 山东建筑大学学报,2008,23(5):406-409.
- [16] 方同辉,袁兴栋,李子哲,等. 模拟海洋环境下 N06625 合金耐蚀性能的研究[J]. 山东建筑大学学报,2023,38(4):47-51. 