



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.07

EQ NiCrFe-7A 带极堆焊熔敷金属 DDC 裂纹敏感性研究

孟长鑫¹, 曹睿^{1*}, 杨飞², 徐晓龙², 王若蒙², 蒋勇²

1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

2. 四川大西洋焊接材料股份有限公司, 四川 自贡 643000

摘要: 基于攻关华龙一号及在役核电机组关键核心技术装备, 将 EQ NiCrFe-7A 焊带熔敷金属作为研究对象, 以了解高温服役状态下镍基 690 合金的组织及裂纹敏感性变化。采用应变-裂纹试验 (Strain-To-Fracture)、扫描电子显微镜表征了不同温度下材料的裂纹敏感性及微观组织演变。结果表明, EQ NiCrFe-7A 焊带金属的高温失塑裂纹敏感性随温度升高而降低, 裂纹敏感温度区间为 950 °C~1050 °C, 最低临界应变量为 4.21%。高温失塑裂纹的开裂受晶界形态和析出相分布影响, 随温度升高, 大角度晶界比例升高, 残余应力增加, 析出相钉扎作用减弱, 高温失塑裂纹开裂倾向增加。裂纹附近富集的残余应力, 能促进再结晶晶粒和孪晶的产生, 一定程度上缓解了裂纹扩展。

关键词: EQ NiCrFe-7A 焊带金属; 应变-裂纹试验; 晶界特征; 高温失塑裂纹

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0068-06

Study on the DDC Sensitivity of the Deposited Metal of Nuclear Grade EQ NiCrFe-7A Solder Strip

MENG Changxin¹, CAO Rui^{1*}, YANG Fei², XU Xiaolong², WANG Ruomeng², JIANG Yong²

1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Atlantic China Welding Consumables, INC., Zigong 643000, China

Abstract: Based on the key core technology of Hualong-1 and in-service nuclear power units, the EQ NiCrFe-7A weld metal was taken as the research object to understand the change of the microstructure and crack sensitivity of Ni-based 690 alloy in high temperature service. The crack sensitivity and microstructure evolution of the material at different temperatures were characterized by strain-to-fracture test and scanning electron microscopy. The results show that the high temperature ductility-dip crack sensitivity of EQ NiCrFe-7A weld metal decreases with the increase of temperature, and the crack sensitivity temperature range is 950 °C~1050 °C, with the minimum critical strain of 4.21%. The high temperature ductility-dip crack is affected by the grain boundary morphology and the distribution of precipitated phases. With the increase of temperature, the proportion of large-angle grain boundaries increases, the residual stress increases, the pinning effect of precipitated phases weakens, and the high temperature ductility-dip crack tendency increases. The residual stress enriched near the crack

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008); 国家自然科学基金(52175325); 国家自然科学基金(51961024); 国家自然科学基金(52071170)

作者简介: 孟长鑫(1998—), 男, 硕士, 主要从事镍基 690 合金 DDC 裂纹的研究。

通讯作者: 曹睿(1977—), 女, 博士, 教授, 主要从事金属材料以及焊接接头强韧性、损伤以及断裂行为、新材料、异种材料的焊接性、复合板材的制造以及相关基础研究。E-mail: caorui@lut.edu.cn。

can promote the recrystallization grain and twin, and fasten the crack propagation to some extent.

Keywords: EQ NiCrFe-7A weld metal; strain-to-fracture test; grain boundary characteristics; high temperature plastic deformation crack

引用格式:孟长鑫,曹睿,杨飞,等. EQ NiCrFe-7A 带极堆焊熔敷金属 DDC 裂纹敏感性研究[J]. 电焊机,2025,55(8):68-73.

Citation:MENG Changxin, CAO Rui, YANG Fei, et al. Study on the DDC Sensitivity of the Deposited Metal of Nuclear Grade EQ NiCrFe-7A Solder Strip[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 68-73.

0 引言

镍基 690 合金属于 Inconel 系列高温合金,由美国 SMC 公司在镍基 600 合金基础上针对应力腐蚀裂纹等问题进行成分改良得到。镍基 690 合金因含有高比例的镍、铬等元素,不仅抗应力腐蚀开裂性能有所改进,还具备更优异的延展性、冶金稳定性及力学特性^[1]。因此在压水堆核电机组的核安全级关键设备(如稳定器、压力壳和蒸发器等)中应用前景广阔^[2]。

蒸汽发生器(SG)是压水堆核电站(PWR)中连接一回路与二回路的枢纽,其镍基材料部件长期服役于苛刻环境,易发生腐蚀、开裂等失效现象,严重威胁了核电站的安全运行^[3-4]。镍基 690 合金作为蒸汽发生器的主要镍基用材,在服役过程中易产生高温失塑裂纹(DDC, ductility dip crack),此类微米级裂纹多存在于焊接接头中,极易成为晶间腐蚀裂纹或疲劳裂纹的裂纹源,对核电机组的安全运行构成潜在风险。

目前,我国在镍基焊材研究领域与国外仍存在一定差距,且关于 DDC 开裂机制尚未形成统一认识。为突破技术瓶颈,推动镍基焊材的国产化和自主化,明确 DDC 开裂的关键影响因素,本文系统研究了国产镍基 690 合金在不同温度条件下的组织和裂纹敏感性的变化,旨在为镍基 690 合金焊材的自主研发和应用提供技术保障及理论支撑。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料为大西洋焊材公司提供的 Ni-Cr-Fe 系列焊材 EQ NiCrFe-7A 焊带,对带极堆焊工艺熔覆得到熔覆金属开展应变-断裂(STF)试验。熔覆金属

的化学成分如表 1 所示,焊接工艺如表 2 所示。

表 1 EQ NiCrFe-7A 熔覆金属化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of EQ NiCrFe-7A weld metal (wt. %)

Ni	Cr	Fe	Mn	Nb	Si	Al	Ti	Cu	C
Bal.	30.49	7.60	1.7	2.43	0.55	0.15	0.08	0.022	0.025

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊接电流	焊接速度	焊接电压	层间温度	试样
/A	/(cm·min ⁻¹)	/V	/°C	状态
720	15	28	180-225	焊态

1.2 试验方法

采用 Gleeble 热模拟试验机,将制取的 STF 试样以 100 °C/s 的加热速率分别加热至试验温度(设定 750 °C、850 °C、950 °C、1 050 °C、1 150 °C 五个测试温度,保温 10 s 以保证试样自由热膨胀。随后将位移量清零,以 0.6 mm/s 的速度拉至设定位移(每个温度区间设置 5 个加载位移进行测定,初始加载位移的选择根据该温度下材料的屈服值确定),保持 10 s 后让试样自然冷却,确保试样能够随温度下降而自由收缩,获得不同温度条件下的应变值,然后通过试样的失塑温度区间 DTR 和临界应变值 E_{min} 这两个敏感性指标来评价材料的高温失塑裂纹敏感性。STF 试验过程如图 1 所示。

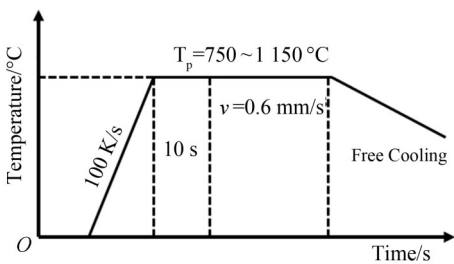


图 1 STF 试验过程

Fig. 1 STF test process

STF 试验后,将试样切割成 10 mm×10 mm×1 mm 的薄片,首先对测试表面进行机械研磨和抛光,然后进行 2 h 氩离子抛光以去除机械应变层。

采用扫描电子显微镜观察测试区域,结合 Channel5 软件分析晶粒取向、晶粒尺寸和形状、晶界特征分布和晶体微观结构的局部畸变等信息。

2 试验结果与分析

2.1 STF 试验结果分析

图2为EQ NiCrFe-7A焊带熔覆金属STF试验得到的裂纹敏感性曲线。整体来看,产生DDC的临界应变值随着试验温度的提升而逐渐减小,1 050 °C之后发生较明显的回升,即材料抵抗DDC开裂的能力随温度升高先降低再增加。观察到在750 °C~850 °C温度区间内存在DDC敏感性降低的现象,分析可能是700 °C~800 °C温度区间内 $M_{23}C_6$ 相的大量析出,使得750 °C时裂纹敏感性降低。

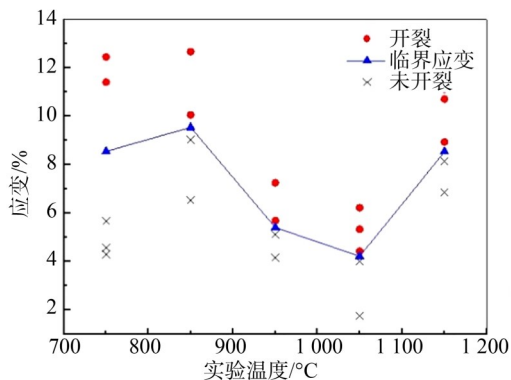


图2 EQ NiCrFe-7A 熔覆金属裂纹敏感性曲线

Fig. 2 EQ NiCrFe-7A cladding metal crack sensitivity curve

$M_{23}C_6$ 相为面心立方结构的晶间析出相,与 γ 基体呈不完全共格关系,晶格常数约为 γ 基体的3倍。根据晶界能理论,这种不完全共格关系导致 $M_{23}C_6$ 相与 γ 基体处具有较高的错配度,易引发应变集中,促使DDC沿晶界开裂^[5-6]。同时,随温度升高,MC相析出率增大。作为晶内析出相,MC相在750 °C~1 140 °C区间内稳定性较高(接近合金的熔点),因此具有较高的强度和稳定性,能钉扎晶界、阻碍晶界滑移,形成长直晶界,增加晶界的弯曲度,使得材料具有较高的DDC开裂抗性^[7-8]。因此在试验初期,受MC相和 $M_{23}C_6$ 相的双重作用,使得在750 °C~850 °C出现了DDC开裂敏感性降低的现象。

随温度继续升高,熔覆金属的DDC敏感性逐渐增强,塑性急剧下降,1050 °C时达到峰值;此后因动

态再结晶作用,敏感性有所回升。最终确定DDC裂纹敏感温度区间为950 °C~1 050 °C,最小临界应变值约为4.21%。

2.2 温度对EQ NiCrFe-7A 熔覆金属组织及性能的影响

图3、图4分别为不同温度下EQ NiCrFe-7A 熔覆金属的析出相尺寸统计和微观组织SEM形貌。结果显示,随温度升高,析出相数量减少且有粗化趋势,对应STF试验结果,熔覆金属的DDC敏感性增加,表明熔覆金属的DDC敏感性受析出相影响。

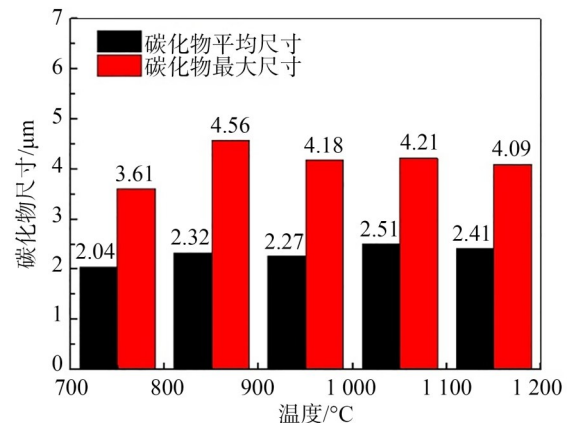
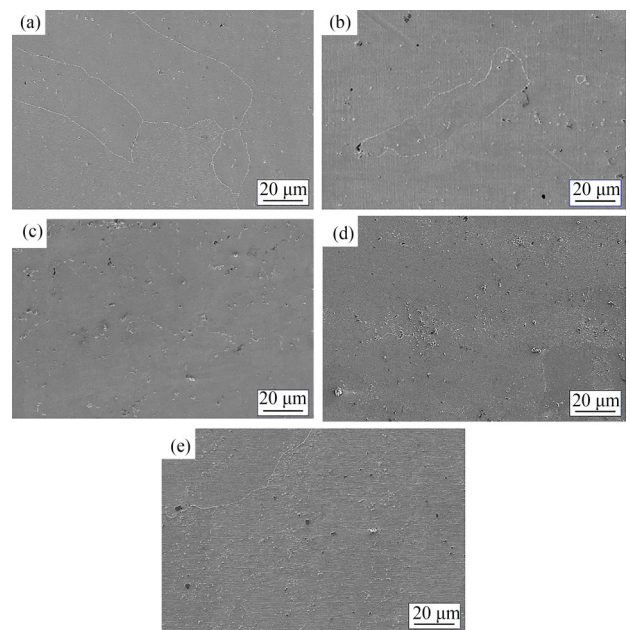


图3 EQ NiCrFe-7A 熔覆金属析出相尺寸

Fig. 3 Size of precipitated phase of EQ NiCrFe-7A cladding metal



(a) 750 °C; (b) 850 °C; (c) 950 °C; (d) 1 050 °C; (e) 1 150 °C

图4 EQ NiCrFe-7A 熔覆金属不同试验温度下的SEM形貌
Fig. 4 SEM morphology of EQ NiCrFe-7A cladding metal at different test temperatures

熔覆金属析出相的EDS和XRD表征结果分别如图5、图6所示。结果表明,析出相主要为富Nb、Mo元素的MC相、Laves相和富Cr的 $M_{23}C_6$ 相,以及少量富Al的黑色圆球状氧化物。

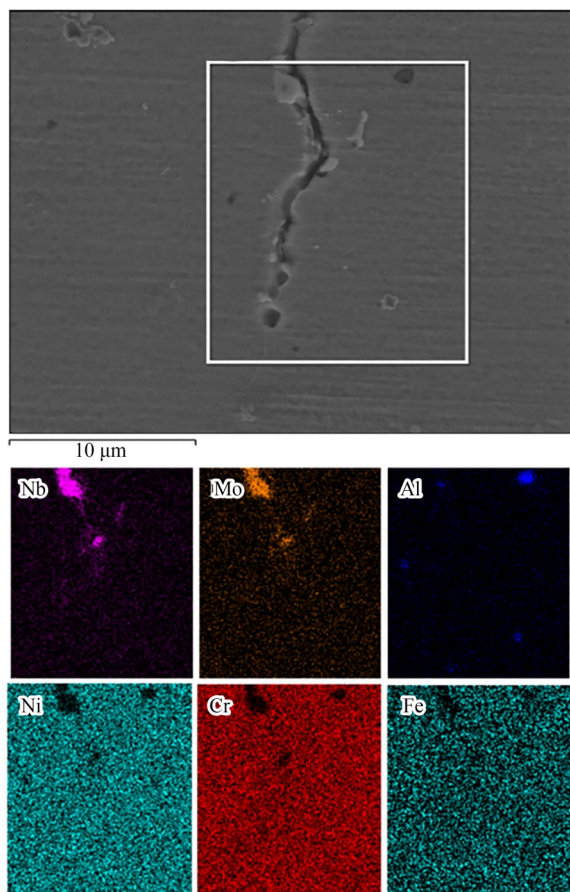


图5 析出相EDS结果

Fig. 5 EDS results of precipitated phase

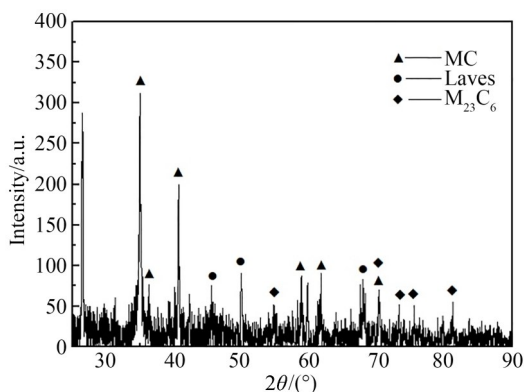


图6 析出相XRD分析结果

Fig. 6 XRD analysis results of precipitated phase

这些析出相弥散分布于枝晶间,一方面促进小晶粒的形成,另一方面通过钉扎作用使附近的奥氏

体晶界变得更为曲折。相较于平直晶界,弯曲晶界可分散应力集中,降低DDC开裂风险;并且当这些曲折的晶界相互交织,形成较为致密的迷宫状晶格结构时,还能增强晶粒的咬合,有效承担一部分应力集中,阻碍变形过程中晶界滑移效应,提高了材料对DDC的抵抗能力^[9-10]。反之,平直晶界在变形时,尤其沿垂直加载方向,易发生滑动,加剧裂纹的扩展,且随温度升高,晶界强度与晶内强度的比值增大,更易发生开裂和扩展。Lippold和JM Kikel等人^[11-12]也证实,大晶粒形成的平直晶界对DDC更敏感,裂纹沿着相对平直和低流变应力的晶界更容易发生扩展。

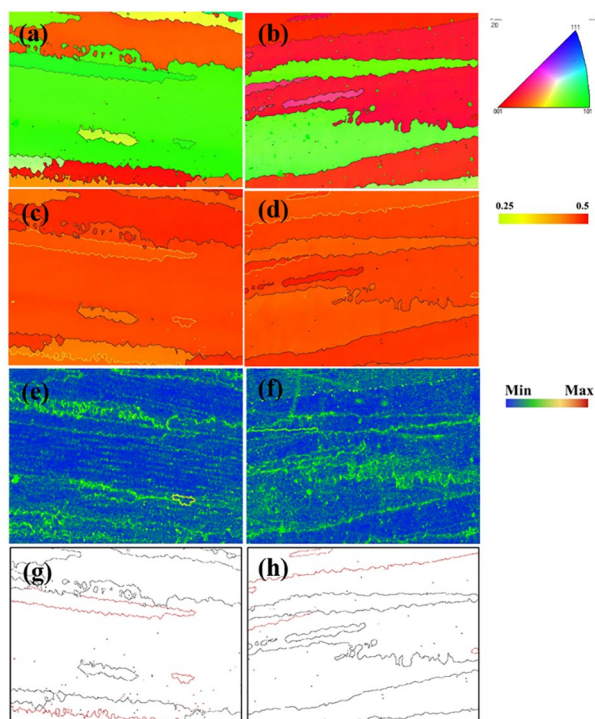
图7为750℃和1050℃试验温度STF试验后EQ NiCrFe-7A熔覆金属晶界角度的EBSD结果。图7g、7h中红色线条代表小角度晶界(2°~15°)、黑色线条代表大角度晶界(>15°)。图8为大小角度晶界占比统计图,1050℃时EQ NiCrFe-7A熔覆金属具有更多的大角度晶界,随温度升高,大角度晶界占比由53.72%增至66.29%,对应STF试验结果熔覆金属DDC敏感性阈值大幅降低。

图7e、7f为熔覆金属750℃和1050℃时的KAM图。在枝晶间和晶界上存在大量残余应力,且在1050℃时晶界残余应力明显高于750℃,其中大角度晶界附近的残余应力更集中。这是由于大角度晶界具有更高的界面能,焊缝凝固后期可能存在残余液相,根据应变局部化理论,凝固末期应变最终集中在液相区域,导致大角度晶界残余应力更高^[13]。

图7c、7d为熔覆金属750℃和1050℃时的施密特因子图。相邻晶粒存在不同的施密特因子,具有高施密特因子(0.4~0.5)的晶粒受外力作用容易发生塑性变形被称为易变形晶粒,施密特因子较低的晶粒为难变形晶粒,而变形不相容的晶粒更容易发生应力集中,从而导致开裂。结合图7g、7h可知,难变形晶粒多分布于大角度晶界附近,且大角度晶界往往存在不同施密特因子的晶粒。因此随试验温度升高,大角度晶界处严重的应力集中和相邻晶粒的变形不兼容更容易萌生高温失塑裂纹。

2.3 裂纹分析

图9为DDC在不同放大倍数下的形貌特征。可见DDC主要沿晶界扩展,裂纹附近分布有大量析



(a,b)晶界取向图;(c,d)施密特因子图;(e,f)KAM图;
(g,h)大小晶界图

图7 EQ NiCrFe-7A熔覆金属 750 °C和 1050 °C的EBSD

Fig. 7 EBSD results of EQ NiCrFe-7A cladding metal at 750 °C and 1050 °C

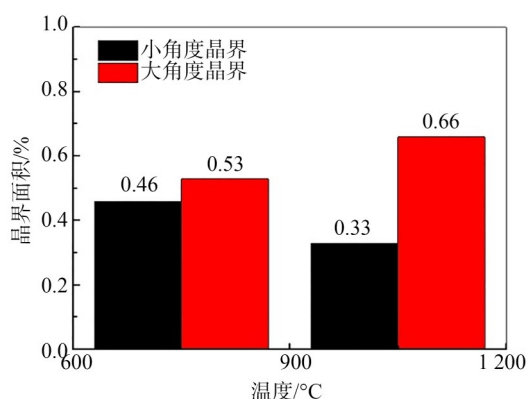


图8 EQ NiCrFe-7A熔覆金属 750 °C和 1050 °C-大小角度晶界占比

Fig. 8 EQ NiCrFe-7A cladding metal at 750 °C and 1050 °C - proportion of grain boundaries with different angles

出相,且析出相周围的裂纹及晶界存在较明显的曲折。这是由于MC型碳化物作为晶内析出相,具有较高的强度和稳定性,其弥散分布可钉扎晶界、改善晶界形貌并阻碍晶界滑移的作用。如图9b所示,晶界上的析出相分担晶界滑移和外力带来的应力集中,阻碍裂纹扩展;但当局部应变达到阈值时,析

出相自身会成为新的应力集中点,促使裂纹在其下端继续扩展。

随温度升高,析出相发生溶解和粗化,钉扎作用减弱,导致晶界在应力作用下更易滑移。根据晶界滑移机理,这种滑移引发的应力集中会促进DDC的萌生,从而增加熔覆金属的开裂敏感性。

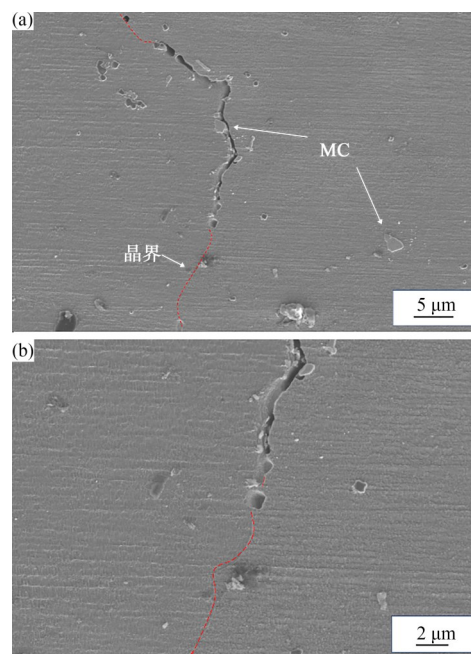


图9 高温失塑裂纹形貌

Fig. 9 Morphology of Ductility-dip crack

图10是DDC的EBSD表征结果。如图10a所示,当裂纹扩展受阻时,其两侧及附近的残余应变不断累积,直至裂纹获得足够能量继续扩展或在相邻晶界形成新的裂纹。如图10b所示,在裂纹尖端和附近分布有大量再结晶晶粒和变形孪晶,这是由于裂纹附近晶界积累的应变驱动了再结晶与孪晶的成核和生长。研究表明,熔敷金属在1000 °C~

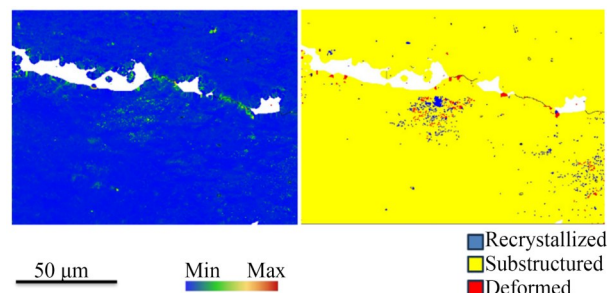


图10 高温失塑裂纹附近的EBSD结果:(a)KAM图;(b)局部再结晶和孪晶图

Fig. 10 EBSD results near the high-temperature plastic-loss crack

1 100 °C存在动态再结晶现象,可缓解晶界应力集中,降低晶体内部位错塞积程度,从而恢复材料的塑性变形能力与抗DDC开裂能力^[14]。其中,再结晶晶粒通过消耗晶界局部应力缓解残余应变与晶格畸变,孪晶则通过二次孪晶增强塑性变形能力,二者共同消耗储存能量并释放应变集中,有效阻碍DDC扩展^[15-16]。通常,将高温阶段的再结晶现象看作是塑性恢复的象征,也是高温失塑裂纹敏感性开始恢复的标志。

3 结论

(1)EQ NiCrFe-7A 焊带熔覆金属的 DDC 敏感性整体上随温度升高逐渐降低,在 1 050 °C时开始回升,裂纹敏感温度区间为 950 °C~1 050 °C,最低临界应变量为 4.21%。

(2)晶界形态和析出相分布影响 DDC 的开裂。大角度晶界相对于小角度晶界具有更多的残余应力,更容易引起高温失塑裂纹开裂,且随温度升高大角度晶界比例增加。析出相钉扎晶界形成弯曲晶界,缓解应力集中,降低 DDC 开裂倾向。

(3)裂纹附近存在大量残余应力,在裂纹尖端及附近分布有大量再结晶晶粒和变形孪晶,缓解了高温失塑裂纹开裂倾向。

参考文献:

- [1] Symons M D, Young A G, Scully R J. The Effect of Strain on the Trapping of Hydrogen at Grain-Boundary Carbides in Ni-Cr-Fe Alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, A. Physical Metallurgy and Materials Science, 2001, 32(2): 369-377.
- [2] 郑东宏,王仕航,吕俊娥,等. Ni-Cr-Fe 合金 690 在压水堆核级承压设备中的应用[J]. 压力容器, 2015, 32(09): 66-74.
ZHENG D H, WANG S H, LV J E, et al. Application of Ni-Cr-Fe Alloy 690 on Nuclear Safety Related Pressure-retaining Vessel in Pressurized Water Reactor [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(09): 66-74.
- [3] 宋志刚. 中国压水堆蒸汽发生器传热管的研究及国产化[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(08): 1-5.
SONG Z G. Localization About Steam Generator Tube of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Unit in China[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(08): 1-5.
- [4] 汪家梅,段振刚,张乐福,等. 核电蒸汽发生器 690 合金管在高温高压水中的腐蚀电化学行为[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(04): 514-520.
WANG J M, DUAN Z G, ZHANG L F, et al. Electrochemical Corrosion Behaviors of Alloy 690 in High-Temperature and High-pressure Water [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(04): 514-520.
- [5] Lee T, Suh H, Han S, et al. Effect of a heat treatment on the precipitation behavior and tensile properties of alloy 690 steam generator tubes[J]. Journal of Nuclear Materials, 2016, 47985-47992.
- [6] Young G A, Capobianco T E, Penik M A, et al. The mechanism of ductility dip cracking in nickel-chromium alloys[J]. Welding Journal, 2008, 87(2): 31-43.
- [7] 丰涵,宋志刚,郑文杰,等. Inconel 690 镍基合金平衡相的热力学计算和试验分析[J]. 特殊钢, 2008(04): 13-15.
FENG H, SONG Z G, ZHENG W J, et al. Thermodynamic Calculation and Experimental Analysis on Equilibrium Phases in Nickel Base Alloy Inconel 690 [J]. Special Steel, 2008(04): 13-15.
- [8] 张钱珍,程世长,刘正东,等. Inconel 690 合金 TT 处理后的析出相[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(06): 40-44.
ZHANG Q Z, CHENG S C, LIU Z D, et al. Precipitated Phase of Alloy Inconel 690 After Thermal Treatment [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(06): 40-44.
- [9] 周辉,王培,陆善平. NiCrFe 焊缝金属的晶界形貌和晶界 MC 碳化物对局部变形行为的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(11): 801-808.
ZHOU H, WANG P, LU S P. Effect of Grain Boundary Morphology and MC on Plastic Deformation Behavior of NiCrFe Weld Metal: Crystal Plasticity Finite Element Analysis [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(11): 801-808.
- [10] Wei X, Xu M, Chen J, et al. Fractal analysis of Mo and Nb effects on grain boundary character and hot cracking behavior for Ni-Cr-Fe alloys[J]. Materials Characterization, 2018(145): 65-76.
- [11] Collins G M, Lippold C J. An Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Filler Materials-Part I: the strain-to-fracture test has been used to develop temperature-strain relationships for ductility dip cracking[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 288-295.