

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.08

超音频脉冲方波电弧对镍基合金焊缝金属 高温低塑性裂纹(DDC)的影响

陈忠兵¹, 梁振新¹, 齐铂金², 从保强², 祁泽武², 鲁立¹, 韩潮宇¹

1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191

摘要: 通过高温拉伸试验和显微组织观察, 研究超音频脉冲方波电弧(UFP)对镍基合金690焊缝金属高温低塑性裂纹(DDC)的影响, 并与恒流(DC)钨极氩弧焊进行比较。结果表明, 在750~1 050 °C范围内, UFP焊缝较DC焊缝抗拉强度轻微降低, 但在900~1 050 °C区间, 两者强度差异极小。在试验温度范围内, UFP焊缝金属断面收缩率更高, 说明UFP焊缝金属具有更高抗DDC能力。UFP使焊缝金属柱状奥氏体晶明显变短, 枝晶占比增加, 且出现较为细小的等轴枝晶, 同时使析出相尺寸变小, 分布更弥散。细小的晶粒能降低晶界应力集中, 弯曲的晶界能机械地“锁住”晶界, 有效地阻碍晶界的滑移, 凝固过程中晶界上的析出相可以阻碍晶界的迁移, 助于弯曲晶界的形成, 这些均能有效减缓镍基合金焊缝金属DDC的萌生与扩展。

关键词: 超音频脉冲方波电弧; 镍基合金; 高温低塑性裂纹; 断面收缩率; 晶界; 碳化物

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0058-07

Influence of Ultra-high Frequency Pulsed Square Wave Arc on DDC of Nickel-based Alloy Weld Metal

CHEN Zhongbing¹, LIANG Zhenxin¹, QI Bojin², CONG Baoqiang², QI Zewu², LU Li¹, HAN Chaoyu¹

1. Suzhou Nuclear Power Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The effect of ultrasonic frequency pulsed square wave arc (UFP) on ductility dip cracking (DDC) of nickel based alloy 690 weld metal was studied and comparison was made with constant direct current(DC) TIG through high-temperature tensile testing and microstructure observation. The results showed that the tensile strength of UFP welds slightly decreased compared to that of DC welds within 750 °C to 1050 °C. However, the difference in strength between the two was negligible from 900 °C to 1050 °C. During the experimental temperature, the UFP weld metal exhibits a higher reduction of area, indicating that the UFP weld metal possesses enhanced resistance to DDC. UFP significantly shortens the columnar austenite crystals, increases the proportion of dendrites, and induces the formation of relatively small equiaxed dendrites. Simultaneously, it reduces the size of precipitated phases and enhances their dispersion. Fine grains can reduce stress concentration at grain boundaries. Curved grain boundaries can mechanically lock grain boundaries, effectively hindering their slip. The precipitation phase on the grain boundary during solidification can hinder the migration of grain boundaries and facilitate the formation of bent grain boundaries. All these factors can slow down the initiation and propagation of DDC.

Keywords: ultra-high frequency pulsed arc; nickel base alloy; ductility dip cracking; reduction of area; grain boundary; precipitate

引用格式: 陈忠兵, 梁振新, 齐铂金, 等. 超音频脉冲方波电弧对镍基合金焊缝金属高温低塑性裂纹(DDC)的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(6): 58-64.

收稿日期: 2025-02-18

修回日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20B2031)

作者简介: 陈忠兵(1966—), 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事电站构件及其焊接接头冶金、力学完整性研究。E-mail: czbing2000@163.com。

Citation:CHEN Zhongbing, LIANG Zhenxin, QI Bojin, et al. Influence of Ultra-high Frequency Pulsed Square Wave Arc on DDC of Nickel-based Alloy Weld Metal[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 58–64.

0 引言

固溶强化镍基合金以其优异的高温性能和良好的耐蚀特性,在核电、火电、化工等领域的关键部件中得到广泛应用。然而,这类材料焊接接头易产生高温低塑性裂纹(Ductility Dip Cracking, DDC),严重威胁设备的安全运行。DDC的产生机理主要包括晶界剪切和晶界滑移^[1-3]、硫偏析和脆化^[4-5]、沉淀诱发^[6-7]等观点。影响DDC形成的因素复杂而众多,如晶界形貌、析出相、杂质元素偏析等^[8-10]。针对镍基合金电弧焊接过程中出现的DDC及其他冶金缺陷,国内外科研工作者在镍基合金焊接性、焊接材料、工艺装备等方面开展了大量基础和工程应用研究,如通过晶粒细化改善焊缝高温低塑性、通过增强熔池流动和扰动加速热量传递、降低热输入控制焊接接头裂纹敏感性、改变电弧行为或热处理调控焊缝元素偏析等^[11-14]。尽管这些研究在一定程度上改善了DDC,然迄今为止,仍无法完全避免镍基合金接头中DDC的产生。

DDC的产生与晶界、析出相等密切相关,而电弧对焊接熔池结晶行为有着重要影响。因此,通过电弧作用改变凝固过程中晶界形貌与尺寸、析出相大小与分布,可能是改善镍基合金焊缝金属DDC的一条途径。1999年清华大学吴敏生教授首次提出电弧超声焊接技术^[15],使电弧既是焊接热源又同时将产生的超声直接作用于熔池中,搅拌熔池,击碎晶粒,从而减少气孔、细化晶粒、降低残余应力^[16],并且超声与电弧的复合作用,可有效改变电弧行为,影响熔池的流动及凝固过程,有助于调控焊缝组织,提高接头性能。北京航空航天大学齐铂金教授在2005年首次提出了一种大功率超音频脉冲方波电流钨极氩弧焊(Ultra-high frequency pulsed gas tungsten arc welding, UFP-TIG)新方法^[17-18],并开发出了大功率超音频电弧焊接成套工艺装备。该技术利用耐高压的绝缘栅双极型晶体管(IGBT),通过桥式变换和脉冲切换电路可以实现10~100 kHz高频脉冲电流直接输出,传统TIG焊枪即可使用。该

技术及配套设备在航空航天焊接生产中得到了应用,并且证明了该技术在铝合金、钛合金、高强合金焊接与增材制造中能起到细化焊缝组织晶粒、大幅度消除气孔缺陷及提高接头性能等作用^[19-21]。因此,将此焊接方法引入到镍基合金焊接中,可能为解决镍基合金DDC难题提供一种新途径。

本文在前期对UFP-TIG电弧物理行为研究的基础上,根据建立的UFP-TIG“焊接工艺参数—晶粒尺寸”的定量关系和镍基合金UFP-TIG焊接接头微观组织的调控策略,采用优化的UFP-TIG焊接工艺参数,制备高温拉伸试样和显微组织试样,通过性能测量与晶界观察、析出相等的分析,并与恒流(constant direct current, DC)TIG焊缝金属进行对比,研究UFP对镍基合金DDC的影响,掌握UFP影响镍基合金DDC的机制,为UFP-TIG电弧焊接技术在镍基合金的工程化应用提供依据。

1 试验设备与方法

1.1 试验材料

试验基板为20 mm厚的Q345B低合金钢板。焊材为 $\varnothing 1.2$ mm的Inconel-52M镍基合金焊丝,该焊丝与Inconel 690相匹配材,其化学成分如表1所示。

表1 Inconel-52M焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Inconel-52M welding wire (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	Mo
≤0.04	≤0.50	≤1.0	≤0.020	≤0.015	28.0~31.5	余量	7.0~11.0	≤0.5
Nb	Cu	Al	Ti	Co	B	Zr	其他	
0.5~1.0	≤0.3	≤1.1	≤1.0	≤0.12	≤0.005	≤0.02	≤0.5	

1.2 试验平台与试验工艺参数

UFP-TIG焊接试验平台如图1所示,包括三坐标运动机构、一自由度平动导轨工作台、焊接电源、送丝机和氩气供给系统。焊接电源的脉冲电流沿变化速率 ≥ 50 A/ μ s,脉冲电流频率0~100 kHz范围内独立调节,脉冲电流幅值0~100 A可独立调节。焊枪固定在三坐标运动机构上, x 、 y 、 z 方向的行程分别为1 000 mm、200 mm、200 mm。工件放置在一维平



动导轨工作台上,行程为1 000 mm,运动方向与 x 方向平行,运动速度50~1 000 mm/min。

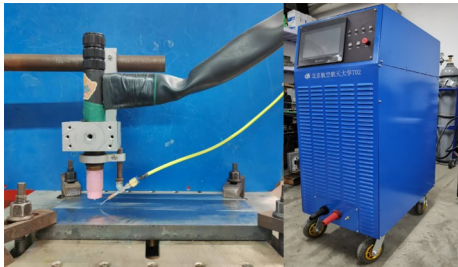
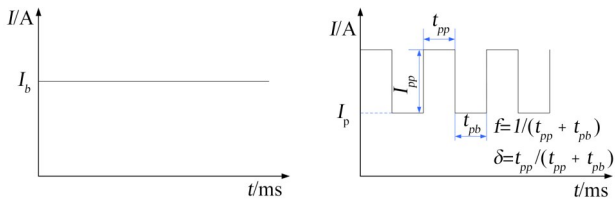


图1 UFP-TIG焊接平台及运动机构配置

Fig. 1 configuration diagram of UFP-TIG welding platform and motion mechanism

1.3 试样与试验过程

试验分别采用DC氩弧焊和UFP-TIG两种工艺制备试件。DC与UFP电流波形如图2所示。其中: I_b —恒流电流; I_p —脉冲基值电流; I_{pp} —超音频脉冲电流幅值; t_{pp} —超音频脉冲电流峰值作用时间; t_{pb} —超音频脉冲电流基值作用时间; f —超音频脉冲电流频率; δ —超音频脉冲电流峰值占空比。



(a)恒流(DC) (b)超音频脉冲(UFP)电流

图2 DC与UFP模式下电流波形示意

Fig. 2 Schematic diagram of current waveform in DC and UFP modes

根据前期研究获得的优化工艺参数(如表2所示)焊制试件:在285 mm(长)×135 mm(宽)×20 mm(厚)的Q345B试板上,堆焊5层,每层12~14道,堆焊路径为单向熔敷(见图3)。每道焊缝长230~240 mm,保护气体为99.9%氩气,氩气流量15 L/min,焊接速度100 mm/min,送丝速度2 000 mm/min。完成后堆焊层厚度约12.0 mm,如图4所示。

按图5制取高温拉伸试样。试样长度方向与焊接方向平行,且从焊制试件表层取样。高温拉伸试验在Gleeble 3180模拟试验机上进行,利用示波器记录拉伸过程中的载荷-位移。

垂直于焊接方向切取堆试块,分别经打磨、抛光和腐蚀后制成堆焊层全截面金相试样。试样腐蚀液为16 g FeCl₃+80 mL HCl+2 mL HNO₃+11 mL

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

恒流(DC)		超音频脉冲方波(UFP)		
电流	基值电流	幅值电流	频率	占空比
I_b/A	I_p/A	I_{pp}/A	f/kHz	$\delta/\%$
250	230	60	50	50

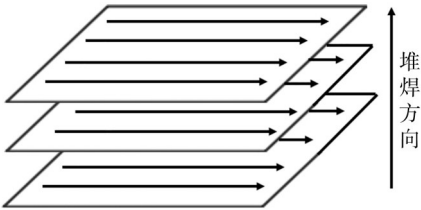


图3 多层多道堆焊路径示意

Fig. 3 Schematic diagram of multi-layer and multi pass welding path



(a)DC试件



(b)UFP试件

图4 DC和UFP焊接试件形貌

Fig. 4 Morphology of DC and UFP welded parts

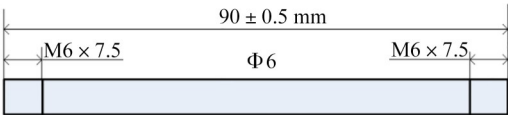


图5 高温拉伸试样

Fig. 5 High temperature tensile test sample diagram

H₂O,浸蚀时间5 s。选用堆焊层横截面中部组织的光镜图像对柱状晶和树枝晶尺寸进行统计分析。通过合成多张显微组织光镜图,将堆焊层中部的微观组织全貌展示出来,然后根据GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定法》的截距法,在Image-Pro Plus图像处理分析软件中对选择测量统计区域的平

均晶粒度进行测量和计算。采用扫描电镜(SEM)对堆焊层的组织进行观察,采用能谱分析(EDS)对相组成进行测试,结合X射线衍射(XRD)的分析数据确定物相的组成。

2 试验结果

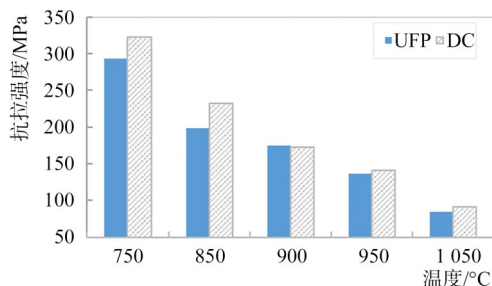
2.1 高温拉伸试验

以 100 °C/s 速率加热至试验温度,保温 5 s,加热和冷却过程中试样保持自由膨胀。在实验温度下,以 0.1 mm/s 应变速率施加拉伸载荷将试样拉断,并测量试样冷却后的断面收缩率。每个温度 2 个平行试样,试验结果如表 3、图 6 所示,拉伸过程中试样均未出现明显屈服点。

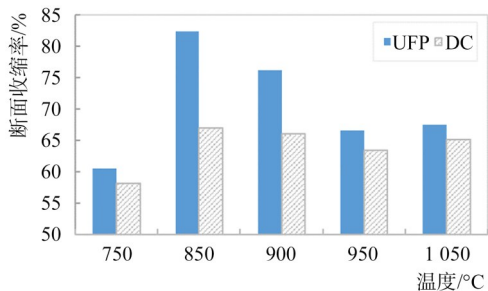
表 3 高温拉伸试验结果

Table 3 High temperature tensile test results

试验温度 /°C	抗拉强度/MPa		断面收缩率/%	
	UFP	DC	UFP	DC
750	293	323	60.5	58.1
850	198	232	82.3	67.0
900	175	173	76.1	66.0
950	136	141	66.6	63.4
1 050	85	91	67.4	65.1



(a) 抗拉强度



(b) 断面收缩率

图 6 UFP 与 DC 焊缝金属高温拉伸结果对比

Fig. 6 Comparison of high temperature tensile results between UFP and DC weld metal

2.2 显微组织观测

对 DC 和 UFP 焊缝金属显微组织进行拍摄并合成全貌图像,如图 7 所示。在图 7a 中,可见 DC 模式下粗大的柱状奥氏体连续生长,且穿越多层。相比之下,在图 7b 的 UFP 模式下,柱状奥氏体晶明显变短,焊缝金属表现出更为细化的组织。DC 和 UFP 试样中部的组织如图 8 所示,两类焊缝金属的共同点是:柱状奥氏体晶内分布着不同形态的枝晶亚结构,有的沿奥氏体晶长度方向整齐排列生长,有的则无规则的杂乱生长。两者不同点是:UFP 焊缝枝晶占比增加,且出现了较为细小的等轴枝晶。

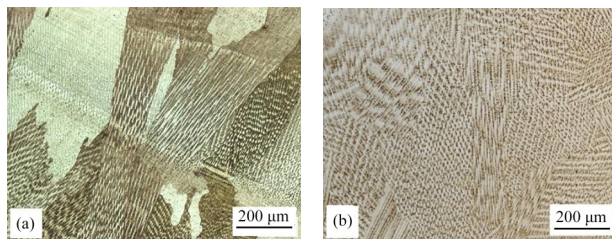


(a) DC 模式

(b) UFP 模式

图 7 不同电弧模式下堆焊层组织形貌

Fig. 7 Microstructure of weld overlay under different arc modes



(a) DC 模式

(b) UFP 模式

图 8 不同电弧模式下堆焊层中部显微组织

Fig. 8 Microstructure of the middle weld overlay part under different arc modes

对 DC 和 UFP 焊缝中的奥氏体晶和枝晶尺寸进行测量和统计,结果表明,DC 模式下粗大奥氏体晶占比较多,最大晶粒长度可达 6.76 mm,宽度最大可达 1.39 mm,平均长度和宽度分别为 3.39 mm 和 0.66 mm。UFP 模式下,粗大柱状晶占比减小,平均长度和宽度大幅度降低,分别为 1.99 mm 和 0.35 mm。



DC模式下亚晶的一次枝晶臂长可达 $81.7\text{ }\mu\text{m}$,二次枝晶臂长可达 $27.2\text{ }\mu\text{m}$,UFP模式下亚晶的一次枝晶臂长和二次枝晶臂长分别减至 $57.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $22.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

DC和UFP焊缝的析出相形貌如图9所示。在图9b中,分别用黄色虚线框和白色虚线框将亮色NbC和暗色(Ti,Nb)C的析出相标出。分析表明,析出相主要以NbC为主,(Ti,Nb)C的析出相较少。与UFP模式相比,DC模式的析出相尺寸更大,尺寸范围在 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 。由于UFP中部分析出相尺寸较小,数量上二者难以比较,但可以确定的是,UFP模式焊缝中的析出相的尺寸显著较小。

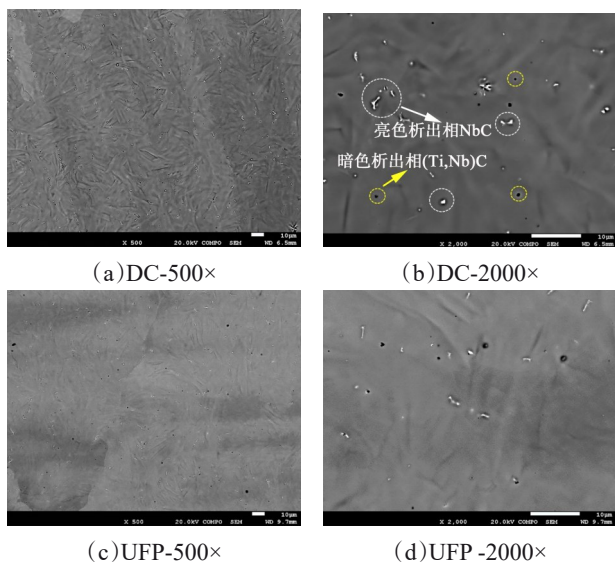


图9 不同电弧模式焊缝金属析出相

Fig. 9 Metal precipitation phases in welds with different arc modes

3 结果分析与讨论

3.1 UFP对镍基合金高温抗拉强度的影响

根据表3、图6的数据可知,在 $750\sim 1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,UFP焊缝与DC焊缝的抗拉强度都有

轻微降低,特别是在 $900\sim 1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,两种焊缝的抗拉强度差异极小。UFP对试样纵向拉伸强度的影响主要在于:UFP能够破碎焊缝中的粗大奥氏体晶粒,形成等轴晶粒,从而减小晶粒尺寸,降低焊缝金属的组织强度。

3.2 UFP影响DDC敏感性机理分析

从断面收缩率的比较中,可以明显看出UFP能明显改善Inconel 690合金焊缝金属抗DDC能力。综合分析本试验结果与DDC产生机理,认为其原因在于UFP能够细化晶粒,改善晶界形貌,使晶界更细小、更弯曲,同时使析出相尺寸变小,分布更弥散。

DDC是一种独特的开裂形式,通过发生在HAZ或焊缝金属中,是由于晶粒边界的滑移或分离以及高温下延性耗尽所引起的^[10]。任何影响晶界滑移和分离的因素都会能影响DDC的敏感性。图10^[10]展示了随晶界几何形状和析出相沉淀行为而变化的晶界应变积聚的示意图,镍基合金的晶粒越大,晶界越平直,每个三叉晶界需要承受的应力集中和应变就越大,晶界更容易产生滑移和变形,即材料抗DDC能力降低。文献[7]通过有限元计算发现,与平直晶界相比,弯曲晶界Mises应力最大值减小,应力分布更加均匀。文献[22]对于FM-52M镍基合金熔敷金属,分别采用无脉冲TIG焊和脉冲TIG焊接重熔,以改变焊缝金属晶粒尺寸和弯曲度,也发现细小、弯曲的晶界结构对裂纹扩展有一定阻碍作用,从而提高FM-52M抗DDC能力。从上述对奥氏体晶和枝晶尺寸测量和统计可以看出,相对于DC试样,UFP使柱状奥氏体晶明显变短,枝晶占比增加,且出现较为细小的等轴枝晶,这些现象与文献[7,10,22]等获得的改善镍基合金DDC的因素相一致,即:晶粒细化、弯曲晶界,从而提高焊缝金属抗DDC能力。

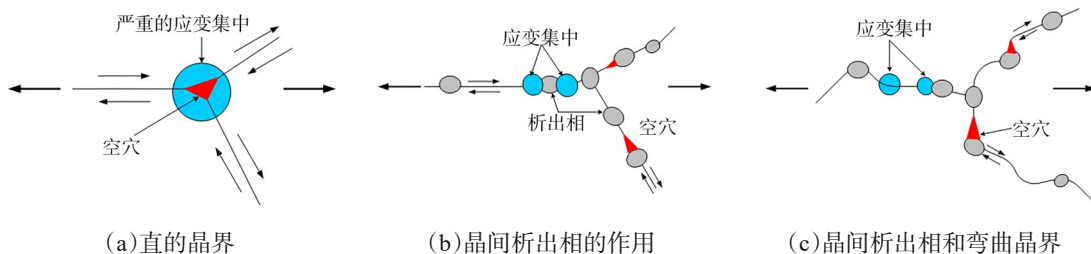


图10 晶界几何形状与析出相沉淀行为对晶界应变影响示意^[10]

Fig. 10 Influence of grain boundary geometry and precipitation behavior on grain boundary strain^[10]



镍基合金中碳化物的形貌与分布对 DDC 有着重要影响。图 10 展示了沉淀相的行为。当没有晶界碳化物时,结晶形成的晶界将是十分平直的,这时晶界滑移的应变将积聚于三叉晶界(见图 10a),当应变到达开裂临界应变以上时,裂纹首先萌生于该三叉晶界处。而当晶界存在碳化物时,应变积聚在三叉晶界、碳化物/基体的界面(见图 10b、图 10c)。此外,晶界碳化物 MC 作为高温相在凝固前期析出,能够有效地钉扎晶界,阻碍晶界迁移,促进弯曲晶界的产生^[23-24]。而 UFP 对析出相的形貌有着显著的影响。前期对单焊道 DC 和 UFP 显微组织观察时发现,DC 模式下焊缝金属的高角度晶界(即取向差大于 15°的晶界,High angle grain boundaries, HAGBs)占比为 87.0%,复合 20 kHz、40 kHz、60 kHz 的超音频脉冲电流后,焊缝中 HAGBs 含量分别为 90.6%、96.6% 和 87.1%。有研究表明,大角度晶界的产生与析出相相关^[10]:细小的碳化物阻碍晶界迁移,使得在晶界处产生一定的塑性变形,从而在其周边形成位错墙和位错胞,小角度晶界上的位错会转移到亚晶界上使其与亚晶发生合并,合并的新晶界会继续吸收位错而成为大角度晶界,因此 UFP 模式的焊缝具有更高比例的大角度晶界。这也与观察到的 UFP 模式下析出相尺寸更小、分布更弥散相吻合。根据析出相对镍基合金 DDC 影响的研究结论^[7,10,23-24],UFP 焊缝中更弥散、细小的析出相能起到阻碍凝固过程中晶界的迁移、助于弯曲晶界的形成和减轻晶界的应变集中的作用,从而减缓 DDC 的萌生与扩展。

4 结论

本研究深入探究了超音频脉冲方波电弧(UFP)对 Inconel 690 焊缝金属高温低塑性裂纹(DDC)的影响,并与传统恒流(DC)TIG 焊接进行了对比。主要结论如下:

(1)在 750~1 050 °C 高温拉伸试验中,UFP 焊缝的抗拉强度相较 DC 焊缝轻微降低,其原因为 UFP 破碎焊缝中粗大奥氏体晶,形成等轴晶粒,减小晶粒尺寸,降低焊缝金属的组织强度。但是在 900~1 050 °C 区间,两者强度差异极小。

(2)在 750~1 050 °C 高温拉伸试验中,UFP 较 DC 焊缝金属的断面收缩率更高,表明 UFP 焊接显著提高了 Inconel 690 抵抗 DDC 的能力。

(3)UFP 使柱状奥氏体晶明显变短,枝晶占比增加,且出现较为细小的等轴枝晶,同时使析出相尺寸变小,分布更弥散。弯曲的晶界能机械地锁住晶界,有效地阻碍晶界的滑移,弥散、细小的析出相能阻碍凝固过程中晶界的迁移,助于弯曲晶界的形成,同时减轻晶界的应变集中,这些均可减缓 DDC 的萌生与扩展,从而提高焊缝金属抗 DDC 的能力。

(4)UFP-TIG 焊接技术可有效改善 Inconel 690 焊缝金属的 DDC 敏感性,为解决镍基合金焊接过程中 DDC 的问题提供了一种新的技术途径。

参考文献:

- [1] Ramirez A J, Lippold J C. High temperature cracking in nickel-base weld metal, Part 2—Insight into the mechanism [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 380:245–258.
- [2] Noecker F F, DuPont J N. Metallurgical investigation into ductility dip cracking in Ni-based alloys, Part I [J]. Welding Journal, 2009, 88(1):7–20.
- [3] Noecker F F, DuPont J N. Metallurgical investigation into ductility dip cracking in Ni-based alloys, Part II [J]. Welding Journal, 2009, 88(3):62–77.
- [4] Yamaguchi S, Kobayashi H, Matsumiya T, et al. Effect of Minor Element on Hot Workability of Nickel-Base Superalloy [J]. Metals Technology, 1979, 6(5):170–175.
- [5] Nishimoto K, Saida K, Fujiya Y. Amelioration of microcracking in multipass weld metal of alloy 690 by adding rare earth metals [C]//Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [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, 2(2):31–43.
- [7] 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 [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(11):801–808.
- [8] Ramirez A J, Lippold J C. High temperature behavior

of Ni base weld metal: Part I[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1-2): 245-258.

- [9] Collins M G, Lippold J C. An investigation of ductility dip cracking in nickel-based filler materials-Part I[J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 288-295.
- [10] Dupont J N, Lippold J C, Kiser S D. 镍基合金焊接冶金和焊接性[M]. 吴祖乾, 张晨, 虞茂林, 等, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2014: 320-369.
- [11] 曹睿, 刘刚, 陈剑虹, 等. 镍基材料焊接中高温失塑裂纹DDC的生成机理及研究进展[J]. 焊接, 2018(7): 7-13. CAO R, LIU G, CHEN J H, et al. Formation mechanism and research progress of ductility dip cracking in welding of nickel-based materials[J]. Welding & Joining, 2018(7): 7-13.
- [12] 张晓鸿, 马朋召, 张康, 等. 脉冲TIG焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 93-101. ZHANG X H, MA P Z, ZHANG K, et al. Study on Controlling of Welding Seam Microstructure about Nickel-based High-temperature Alloy by Pulse TIG Welding Process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 93-101.
- [13] Srikanth A, Manikandan M. Development of welding technique to avoid the sensitization in the alloy 600 by conventional gas tungsten arc welding method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017(30): 452-466.
- [14] 杨鲲, 王泽龙, 赵立冰, 等. 机械振动方式对Inconel 601H镍基高温合金焊缝微观组织的影响[J]. 焊接技术, 2018, 47(8): 52-55. YANG K, WANG Z L, ZHAO L B, et al. Effect of mechanical vibration mode on weld microstructure of Inconel 601H nickel-base alloy[J]. Welding Technology, 2018, 47(8): 52-55.
- [15] 吴敏生, 段向阳, 李路明, 等. 电弧超声的激发及其特性研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 110-112. WU M S, DUAN X Y, LI L M, et al. Study of arc-ultrasonic excitation and its characteristics[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(6): 110-112.
- [16] He L, Wu M, Li L, et al. Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(13): 131504.
- [17] 齐铂金, 从保强. 新型超快变换复合脉冲变极性弧焊电源拓扑[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 57-60. QI B J, CONG B Q. A novel ultrafast convert complex pulse variable polarity arcwelding power topology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(11): 57-60.
- [18] 从保强, 齐铂金, 周兴国. 超快变换高频变极性方波TIG电弧行为[J]. 焊接学报, 2009, 30(6): 87-90. CONG B Q, QI B J, ZHOU X G. TIG arc behavior of ultrafast convert high frequency variable polarity square wave[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 87-90.
- [19] Yang M X, Qi B J, Cong B Q, et al. Effect of pulse frequency on microstructure and properties of Ti-6Al-4V by ultrahigh-frequency pulse gas tungsten arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1-4): 19-31.
- [20] 从保强, 齐铂金, 李伟, 等. 2219铝合金复合超音脉冲VPTIG焊接工艺[J]. 航空制造技术, 2010, 20: 91-93+97. CONG B Q, QI B J, LI W, et al. Hybrid Ultrasonic Pulse VPTIG Welding Process for 2219 Aluminum Alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 20: 91-93+97.
- [21] 马立, 范霖康, 张建, 等. 超音脉冲电流叠加对高氮钢GMA增材制造组织性能的影响[J]. 兵工学报, 2025, 46(1): 1-10. MA L, FAN J K, ZHANG J, et al. Effect of Ultrasonic Frequency Pulse Current Superposition on the Microstructure and Properties of GMA Additive Manufactured High Nitrogen Steel[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(1): 1-10.
- [22] 陈静青, 陆皓, 陈辉, 等. 晶粒尺度对镍基高温合金的高温失塑裂纹敏感性的影响[J]. 电焊机, 2015, 45(6): 21-25. CHEN J Q, LU H, CHEN H, et al. Influence of grain size on susceptibility of ductility-dip crack on Ni-based high-temperature alloy[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(6): 21-25.
- [23] Kadoi K, Jegaki T, Shinozaki K, et al. New measurement technique of ductility curve for ductility-dip cracking susceptibility in alloy 690 welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 672: 59-64.
- [24] Ramirez A J, Sowards J W, Lippold J C. Improving the ductility-dip cracking resistance of Ni-base alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 179(1-3): 212-218.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

