

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.11

镍基合金与不锈钢异种焊接接头全位置 自动TIG焊接工艺研究

李 洋¹, 徐睦忠¹, 刘自刚¹, 代锋先^{1,2}, 李新华³, 邢 丽¹

1. 浙江巴顿焊接技术研究院, 浙江 杭州 311200
2. 浙江金旦智能科技有限公司, 浙江 杭州 311215
3. 一重集团大连核电石化有限公司, 辽宁 大连 116113

摘要: 针对核反应堆压力容器与主管道安全端异种金属(SA508 Gr.3 Cl.1/SA182 Gr.F316LN)对接焊缝的制造需求, 系统研究全位置自动TIG焊接工艺特性。通过对比多层单道焊(钨极摆动)与多层多道焊(钨极不摆动)的工艺效果发现: 多层多道焊制备的焊缝未检出失塑裂纹(DDC), 无损检测合格率达100%, 室温拉伸强度达665 MPa, 350 °C高温拉伸强度为547 MPa, 冲击功最高达245 J(V型缺口), 8件弯曲试样均无缺陷; 而多层单道焊试样焊缝中呈现多处100~200 μm级DDC裂纹。试验表明, 多层多道焊通过控制热输入(峰值电流180~230 A, 送丝速度70~130 cm/min)和焊道排布优化, 可显著降低镍基焊缝的裂纹敏感性, 接头硬度分布均匀(180~211 HV), 晶间腐蚀测试无开裂倾向, 综合性能优于核电标准要求, 为大厚度异种金属结构工程化焊接提供了技术支撑。

关键词: 异种钢焊接; 全位置自动TIG; 镍基合金; 多层多道焊; 失塑裂纹

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0082-06

Study on All-position Automatic TIG Welding Technology for Dissimilar Joints of Nickel-based Alloy and Stainless Steel

LI Yang¹, XU Muzhong¹, LIU Zigang¹, DAI Fengxian^{1,2}, LI Xinhua³, XING Li¹

1. Zhejiang EO. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 311200, China
2. Zhejiang Golden Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, China
3. China First Heavy Industries of Dalian Nuclear Power Petrochemical Co., Ltd., Liaoning 116113, China

Abstract: To address the manufacturing requirements of dissimilar steel (SA508 Gr.3 Cl.1/SA182 Gr.F316LN) butt welds between reactor pressure vessels and main pipeline safe-ends, this study systematically investigates the characteristics of all-position automatic TIG welding processes. Comparative analysis of multi-layer single-pass welding (with tungsten oscillation) and multi-layer multi-pass welding (without tungsten oscillation) reveals that: The multi-layer multi-pass welded joints exhibit no detectable ductility-dip cracking (DDC), achieve 100% nondestructive testing compliance, demonstrate room-temperature tensile strength of 665 MPa and high-temperature tensile strength of 547 MPa at 350 °C, with maximum impact energy reaching 245 J (V-notch). All eight bending specimens show defect-free performance. In contrast, multiple 100~200 μm-scale DDC cracks were observed in multi-layer single-pass welded specimens. Experimental results confirm that multi-layer multi-pass welding effectively reduces crack susceptibility in nickel-based welds through controlled heat input (peak current 180~230 A, wire feed speed 70~130 cm/min) and optimized bead arrangement, producing uniform hardness distribution (180~211 HV) and no intergranular corrosion cracking tendency. The comprehensive performance exceeds nuclear power standards, providing critical data support for engineering applications of thick-walled dissimilar steel structures.

Keywords: dissimilar steel welding; all-position automatic TIG; nickel-based alloy; multi-layer multi-pass welding; ductility-dip cracking

收稿日期: 2024-03-05 修回日期: 2024-04-11

作者简介: 李 洋(1985—), 男, 硕士, 主要从事新型焊接技术及工艺研究。E-mail: cfhiliyang@163.com。

引用格式:李洋,徐睦忠,刘自刚,等.镍基合金与不锈钢异种焊接接头全位置自动TIG焊接工艺研究[J].电焊机,2025,55(3):82-87.

Citation:LI Yang, XU Muzhong, LIU Zigang, et al. Study on All-position Automatic TIG Welding Technology for Dissimilar Joints of Nickel-based Alloy and Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 82-87.

0 引言

作为核电工程安全一级主设备及一回路压力边界组成部分,核反应堆压力容器接管与主管道安全端之间异种材料对接焊缝的性能和质量至关重要。该焊缝采用镍基合金作为焊接填充材料,基于镍基焊缝的抗高温蠕变、抗热疲劳、抗腐蚀等特点,使得其广泛被应用到核电产品高温、高压及腐蚀环境中的异种钢连接。由于镍基合金液态金属的流动性及导热性较差,焊接过程中易发生过热导致晶粒粗大进而使得焊缝塑、韧性下降;同时镍基材料合金元素含量较高,在焊缝金属凝固过程中偏析现象明显,从而存在一定的热裂倾向^[1-10]。因此,焊接方法及施焊过程控制决定着镍基焊缝的质量能否满足核电产品的制造要求。核电关键部件的焊接较多以多层焊接为主,随着在焊缝及热影响区中残余应变不断地累积,且存在析出物和基体之间的晶格错配带来的畸变应力,导致多晶变形时局部区域出现应变集中,特别是在一定的敏感温度区间内,当累积的应变达到限值突破临界进而形成裂纹^[11-19]。

全位置自动TIG基于其施焊过程稳定、自动化控制程度高(焊接工艺参数可实现分区独立设定)、坡口填充量少及焊接残余应力小等优点,在核电主设备上已实现应用。本文通过全位置自动TIG焊接设备,拟对核反应堆压力容器接管与主管道安全端对接焊缝,分别进行多层单道焊与多层多道焊工艺试验研究。通过试验结果确定合理的焊缝制备过程与工艺参数,保证焊接接头在无损检测、化学成分及力学性能上均满足核电相关技术要求,进而实现其在核电产品上的工程应用。

1 试验材料与方法

试验在接管侧采用低合金钢SA508 Gr.3 Cl.1基材上堆焊镍基隔离层,在主管道侧采用不锈钢

SA182 Gr.F316LN。其中,镍基隔离层堆焊及对接坡口填充金属所用材料均采用镍基合金INCONEL 52M,直径 $\varnothing 0.9$ mm的实芯焊丝。

模拟核反应堆压力容器接管与主管道安全端对接U型坡口形式,如图1所示。

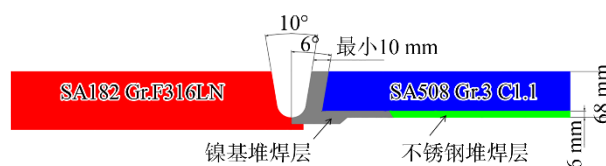


图1 对接坡口示意

Fig. 1 Diagram of butt groove

试验采用尺寸及材质均相同的两组试验件,工件的坡口深度均为68 mm,组装完成后坡口上端面的宽度为28 mm。第一组试验采用全位置自动TIG进行多层单道焊(钨极摆动)的坡口填充;第二组试验采用同一焊接设备进行多层多道焊(钨极不摆动)的坡口填充。

1.1 多层单道焊试验

采用多层单道焊(钨极摆动)的焊接形式,其在坡口填充阶段,钨极以带一定角度倾斜的形式固定在钨极夹上。通过钨极夹的周期性旋转实现钨极在坡口内的左右循环反复摆动,进而实现电弧在坡口内部及侧壁的交替施焊,如图2所示。因此所焊

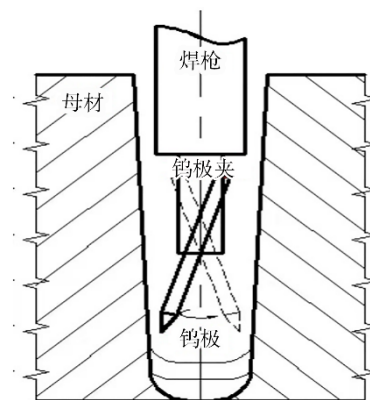


图2 多层单道焊(钨极摆动)示意

Fig. 2 Multilayer single-pass welding (tungsten swing) schematic diagram

工件的坡口宽度,需要与钨极摆动的覆盖范围相匹配。随着焊丝在钨极下方的持续输入,实现液态熔敷金属的铺展并保证与坡口侧壁的充分熔合。

对于坡口深度为 68 mm 的试验件,采用多层单道焊(钨极不摆动)的填充方式,待到坡口填充完毕(包括最后的盖面焊),综上累计共施焊 41 层,所用工艺参数如表 1 所示。

表 1 多层单道焊(钨极摆动)焊接工艺参数

Table 1 Multi-layer single pass welding (tungsten swing) welding process parameters

峰值电 流/A	极值电 流/A	焊接电 压/V	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	钨极摆动速 度/(r·min ⁻¹)
220~240	150~170	9.2~9.8	150~200	70~110	55~75

注:钨极摆动角度 15~35°,摆动过程侧壁停留时间为 0.6 s,脉冲频率为 2.5 Hz,占空比为 50%,热丝电流为 20~80 A。

1.2 多层多道焊试验

多层多道焊则采用钨极不摆动的焊接形式,如图 3 所示。随着坡口内熔敷金属逐道、逐层的焊接填充,根据上一道及上一层焊缝的分布状态,操作者通过移动焊枪的左右位置及高度,有序安排焊枪在坡口内的空间位置。

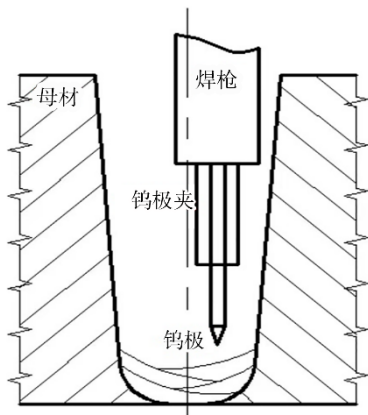


图 3 多层多道焊(钨极不摆动)示意

Fig. 3 Multi-layer and multi-pass welding (tungsten don't swing) schematic diagram

相较于多层单道焊,多层多道焊对于不同尺寸坡口的适用范围更广,相邻两道焊缝之间可根据坡口内部焊缝堆叠的实际分布状态,在下一道焊缝施焊前对焊枪所在位置进行合理排布。虽然相比于多层单道焊在效率上略有下降,但多层多道焊在施焊过程中焊道排布的灵活性、操控性上优势明显。

对于 68 mm 深度的坡口,多层多道焊填充结束

时共计施焊 48 层(包括最后的盖面焊)。由于坡口根部的宽度较窄,首层焊缝采用一层一道。从第 2 层开始采用一层两道的填充方式。随着填充金属的不断堆积,坡口内部的宽度由下向上逐渐外扩,在临近盖面阶段也由一层两道转变为一层三道多层多道焊(钨极不摆动)焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 多层多道焊(钨极不摆动)焊接工艺参数

Table 2 Multi-layer and multi-pass welding (tungsten don't swing) welding process parameters

峰值电 流/A	极值电 流/A	焊接电 压/V	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	钨极摆动速 度/(r·min ⁻¹)
180~230	120~160	8.6~11.3	70~130	80~150	55~75

注:钨极摆动角度 55°~75°;脉冲频率为 2.5 Hz;占空比为 50%;热丝电流为 20~80 A。

2 试验结果及分析

2.1 多层单道焊焊缝

多层单道焊(钨极摆动)所焊试样焊接接头的宏观截面形貌,如图 4 所示。通过观察可知,焊缝区晶粒的生长趋势为垂直于熔合线向着焊缝中心处生长。同时,焊缝结构分布图上的层与层之间排布较为规整,每一层焊缝的宽度横跨整个坡口的截面,同时与位于两侧的母材实现熔合。

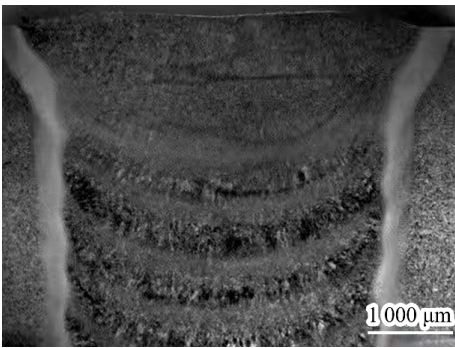


图 4 多层单道焊(钨极摆动)焊接接头横截面宏观形貌

Fig. 4 Metallographs of welding seam after twice bending before soaking

针对多层单道焊(钨极摆动)完成的试验件,解剖观察其焊缝组织微观形貌时发现焊缝中存在多处细小的微裂纹,如图 5 所示。经分析确认以上裂纹为失塑裂纹(Ductility-Dip Cracking, DDC),属于热裂纹。DDC 裂纹是镍基合金焊接结构中较为常见的微观缺陷,尤多出现于多层多道焊中。其尺寸较小(约 100~200 μm),多出现在热影响区或多层多

道焊的再热影响区。由于核电产品的一些重要结构多为壁厚大、拘束度较高,在多层多道环缝组对焊接过程中,镍基合金易出现DDC裂纹。该裂纹多为沿晶分布,采用常规无损方法难以检测,虽然短期内对结构的安全无明显影响,但从核电站40~60年的服役周期来看,DDC裂纹可能成为疲劳裂纹或应力腐蚀的裂纹源,潜在较大的安全隐患。

其中图5a、5b中的裂纹位于焊缝中路的两处不同位置,图5c中裂纹则位于靠近母材为不锈钢一侧的焊缝中(靠近熔合线附近),图5d中裂纹位于靠近母材为镍基隔离层一侧的焊缝中,同样也是靠近熔合线附近。

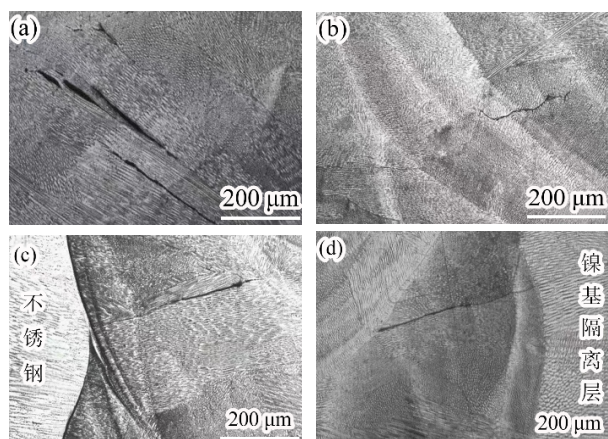


图5 多层单道焊(钨极摆动)焊缝中出现的DDC裂纹形貌

Fig. 5 DDC crack appearance in multi-layer single pass welding (tungsten swing) weld

为了对比研究DDC裂纹出现的原因,在焊接过程进行了多层单道焊控温试验(严格控制层间温度80℃以内),结果发现焊缝中同样出现了DDC裂纹。

2.2 多层多道焊焊缝

采用全位置自动TIG多层多道焊(钨极摆动)所焊焊接接头的宏观截面形貌,见图6所示。

为了进一步进行确认,通过对多个采用多层多道焊(钨极不摆动)制备的试验件,进行焊接接头宏观截面的观察,均未在其中发现DDC裂纹的存在。

综上所述,基于镍基合金液态金属导热性差、流动性差、合金元素易氧化等特点,其熔池金属不易润湿铺展,单道焊缝熔深较浅。且区别于其他焊接材料,镍基合金无法通过增大焊接电流来增加其熔覆金属的流动性,这反而会增加焊缝的裂纹敏感性。采用多层单道焊进行施焊,每一道焊缝均需实

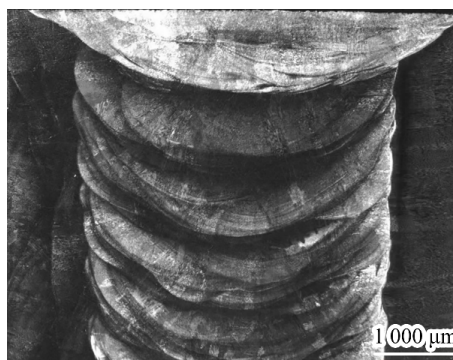


图6 多层多道焊(钨极不摆动)焊接接头横截面宏观形貌

Fig. 6 Metallographs of welding seam after twice bending before soaking

现在坡口整个宽度方向上的熔覆过渡且与侧壁实现熔合,焊缝的拘束度较大,焊缝所受内应力增大,诱使焊缝内部裂纹的萌生。同时多层单道焊采用的钨极摆动也会进一步增大热输入量,进一步增加了DDC裂纹出现的倾向;而采用多层多道焊的填充形式,相邻焊缝之间的排布及过渡则更加平缓,不存在多层单道焊中每道焊缝必须横跨整个坡口宽度的限制,使得每道焊缝的拘束度得以释放,有效降低焊缝内部内应力;且多层多道焊施焊过程中钨极无需摆动,一定程度上有效限制了焊缝所受热输入。同时在可操作性上,多层多道焊施焊过程中操作者根据坡口内实时状态,可较大自由度地规划后续焊缝的填充。

2.2.1 无损检测

对多层多道焊(钨极不摆动)焊接接头进行无损检测,在接头表面打磨后对其进行渗透检测(PT)和射线检测(RT),未发现焊缝表面及内部存在缺陷,无损检测结果符合产品技术要求。

2.2.2 化学成分测试

对多层多道焊对接焊缝的化学成分,按照GB/T 223和GB/T 8647—2006进行检测,检测结果如表3所示,其结果满足对应产品技术条件要求。

2.2.3 力学性能测试

多层多道焊接头的力学性能检测结果,其中室

表3 焊缝化学成分检测结果(质量分数,%)

Table 3 Test result of chemical composition of weld (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.029	0.50	0.82	0.008	0.003	29.16	>56
Mo	Cu	Co	Ti	Fe	Al	Nb+Ta
0.13	0.01	0.02	0.54	10.95	0.47	0.02

温拉伸强度检测按照 GB/T 2652—2008 执行,检测结果如表 4 所示。冲击性能检测按照 GB/T 2650—2008 执行,测试结果如表 5 所示。弯曲性能测试按照 GB/T 2653—2008 执行,检测结果如表 6 所示。按照技术条件上相关要求,以上力学性能检测数据均满足其要求值,说明采用多层多道焊(钨极不摆动)实现了不锈钢+镍基焊缝+镍基隔离层+低合金钢异种金属之间的优质连接。

表 4 拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results

取样位置	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%
纵向焊缝(T/2)	350	547	462	27.0	74.0
纵向焊缝(T/2)	20	665	545	36.0	57.0
横向接头(表层)	350	457	210	25.5	77.0
横向接头(T/2)	350	454	196	27.5	74.5
横向接头(根部)	350	458	210	27.0	74.0

注:T代表板厚,以上均采用棒拉。

表 5 冲击韧性试验结果

Table 5 Impact toughness test results

取样位置	缺口类型	试验温度/℃	冲击功/J	纤维面积/%	侧向膨胀/mm
焊缝(T/4)	V	23	208/245/240	100	2.04/1.97/1.86
焊缝(T/2)	V	23	210/206/201	100	2.23/1.84/1.83

注:T代表板厚。

表 6 弯曲试验结果

Table 6 Bending test results

类型	试样尺寸	弯曲角度	弯曲半径	试样状态	结论
横向侧弯	10×38×200	180°	40	焊态	无缺陷

注:弯曲试件数量 8 件。

硬度检测按照 GB/T 2654—2008 执行,检测结果如表 7 所示。

表 7 硬度试验结果

Table 7 Hardness test results

测量位置	测量结果	均值
焊缝表面	176/190/177/185/172	180
焊缝 T/2	227/210/205/206/211	211.8
焊缝根部	209/201/202/204/203	203.8

2.2.4 金相及晶间腐蚀测试

其中宏观金相检测按照 GB/T 226—2015 执行,微观金相检测按照 GB/T 13298—2015 执行,检测结果如表 8 所示。

晶间腐蚀所用焊缝试件共 4 件,其中 2 件为焊

表 8 金相检验

Table 8 Metallographic examinations

宏观金相	微观金相
经检查在焊缝全截面上未发现裂纹、气孔、未熔合等焊接缺陷	母材(SA508 Gr.3 Cl.1 侧):贝氏体回火组织
	热影响区(SA508 Gr.3 Cl.1 侧):贝氏体回火组织
	隔离层:奥氏体+少量碳化物
	焊缝:奥氏体+少量碳化物
	热影响区(不锈钢侧):奥氏体+铁素体+少量碳化物
	母材(不锈钢侧):奥氏体+铁素体+少量碳化物
200 倍观察未发现焊接缺陷	

态,2 件焊态敏化(敏化处理:675±5 ℃×1 h),按 ASTM A262 E 法检验,未发现晶间腐蚀引起的裂纹或开裂倾向。

3 结论

(1)全位置自动 TIG 两种不同填充方式制备的镍基合金对接焊缝,进行对比试验分析获得:运用多层多道焊(钨极不摆动)制备的焊缝,其内部无 DDC 裂纹出现;而多层单道焊所焊试件,则在焊缝的不同区域均发现多处 DDC 裂纹。

(2)多层多道焊(钨极不摆动)的填充方式在施焊过程中具备更好的操作性,操作者可依据坡口内焊缝的实时分布状态,适宜地调整焊枪的位置来部署后续焊缝的起焊位置。

(3)多层单道焊不仅每道焊缝需横跨坡口整个横截面,焊缝承受较大的拘束度,进而增加了焊缝内部产生较大的内应力。同时多层单道焊钨极摆动也会进一步增大焊缝所受热输入;而采用多层多道焊(钨极不摆动)的填充方式,相较于多层单道焊,上述问题均可得到有效控制及解决。对于大厚度钢结构对接坡口的焊接,其坡口结构大多为深且窄的形式。鉴于镍基合金熔池中液态金属的流动性较差,熔深浅的特点,采用多层多道焊可有效改善焊缝抗高温失塑裂纹的敏感性,避免了 DDC 裂纹的产生。

参考文献:

[1] 曹睿,刘刚,陈剑虹. 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(07):7-13+65.
CAO R, LIU G, CHEN J H. Formation mechanism and

- research progress of ductility dip cracking in welding of nickel-based materials [J]. *Welding & Joining*, 2018 (07): 7-13+65.
- [2] 孙鹏, 冯东旭, 谷文. 镍基合金全位置窄间隙 TIG 焊接工艺研究[J]. *一重技术*, 2017(03): 63-67.
SUN P, FENG D X, GU W. Research on All-Position Narrow-Gap TIG Welding on Nickel-Based Alloy Materials[J]. *First Heavy Technology*, 2017(03): 63-67.
- [3] 王鑫, 谷文, 冯东旭. 镍基合金单层单道窄间隙 TIG 焊接工艺研究[J]. *一重技术*, 2016(01): 39-42.
WANG X, GU W, FENG D X. Research on single-pass narrow gap TIG welding process of nickel base alloy [J]. *CFHI Technology*, 2016(01): 39-42.
- [4] 余春, 徐济进, 魏啸. 核级镍基合金焊接材料失塑裂纹研究现状[J]. *金属学报*, 2022, 58(4): 529-540.
YU C, XU J J, WEI X. Research Status of Ductility-Dip Crack Occurring in Nuclear Nickel-Based Welding Materials [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(4): 529-540.
- [5] 陈静青. FM-52M 熔敷金属高温失塑裂纹机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
CHEN J Q. Research on ductility-dip cracking of filler metal 52M [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [6] 陈佩寅, 郝乾宇, 徐锴. 基于微观组织的镍基合金焊接热裂纹判据[J]. *焊接*, 2023(10): 6-12.
CHEN P Y, HAO Q Y, XU K. Thermal crack criterion for welding Nickel-based alloys based on microstructure [J]. *Welding & Joining*, 2023(10): 6-12.
- [7] 余磊, 曹睿. 镍基合金焊接裂纹研究现状[J]. *金属学报*, 2021(01): 16-28.
YU L, CAO R. Welding Crack of Ni-Based Alloys: A Review [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021(01): 16-28.
- [8] 郭泉, 何鹏, 徐锴. 一种核电用镍基合金焊丝熔敷金属的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2020, 41(4): 26-30.
GUO X, HE P, XU K. Microstructure and mechanical properties of deposited metal for nuclear plant nickel alloy welding wire [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2019, 41(4): 26-30.
- [9] 周辉. 镍基焊缝中高温失塑裂纹产生机制的晶体塑性研究 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2019.
ZHOU H. Crystal plasticity study on the mechanism of high temperature deplasticizing crack in Nickel-based weld [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2019.
- [10] Li Y F, Wang J Q, Han E H, et al. Multi-scale study of ductility-dip cracking in nickel-based alloy dissimilar metal weld [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, 35: 545.
- [11] Collins M G, Lippold J C. An investigation of ductility dip cracking in nickel-based filler materials—Part I [J]. *Weld. J.*, 2003, 82: 288.
- [12] Ramirez A J, Lippold J C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II—Insight into the mechanism for ductility dip cracking [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2004, 380: 245.
- [13] Ramirez A J, Lippold J C. New insight into the mechanism of ductility-dip cracking in Ni-base weld metals [A]. *Hot Cracking Phenomena in Welds* [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [14] 李新华. 异种钢镍基焊缝全位置自动 TIG 焊接工艺研究[J]. *经济技术协作信息*, 2019, 22: 115.
LI X H. Research on Automatic TIG Welding Process for Nickel based Welds of Heterogeneous Steel at All Positions [J]. *Economic and Technological Cooperation Information*, 2019, 22: 115.
- [15] 张忠海. 全位置窄间隙 TIG 焊接技术研究[J]. *大型铸锻件*, 2021(03): 29-31.
ZHANG Z H. Research on All Position Narrow Gap TIG Welding Technology [J]. *Heavy Casting and Forging*, 2021(03): 29-31.
- [16] Mcracken S L, Tatman J K. Comparison of ductility-dip cracking to computer modeling with SysWeld™ in a narrow groove multi-pass weld [C]//ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 2016: 1-11.
- [17] Qin R Y, Duan Z L, He G. Microstructure and ductility-dip cracking susceptibility of circumferential multipass dissimilar weld between 20MND5 and Z2CND18-12NS with Ni-base filler metal 52 [J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2013, 44: 4661.
- [18] 霍树斌, 陈佩寅, 陈燕. 核用 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹产生机理研究[J]. *焊接*, 2012(9): 31-36.
HUO S B, CHEN P Y, CHEN Y. Mechanism of micro-crack in TIG welding with Inconel 690 wire for nuclear application [J]. *Welding & Joining*, 2012(9): 31-36.
- [19] 邢希学, 邸新杰. 一种镍基高温合金熔敷金属的组织及性能[J]. *焊接学报*, 2014, 35(9): 73-76.
XING X X, DI X J. Microstructure and properties of a nickel-base superalloy deposited metal [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2014, 35(9): 3-76.