

端面粗糙度对锆合金包壳管脉冲TIG焊接接头组织及性能的影响

韩晓瑞^{1, 2}, 米文俊^{1, 2}, 王云波^{1, 2}, 于宏生^{1, 2}, 刘博^{1, 2}, 张雪伟^{1, 2}, 潘胜强^{1, 2}

1. 中核北方核燃料元件有限公司 内蒙古包头 014035
2. 中核包头核燃料元件股份有限公司 内蒙古包头 014035

摘要: 主要研究了端面粗糙度对锆合金包壳管脉冲TIG焊接接头组织和力学性能的影响。研究表明: 端面粗糙度值的减小显著改善了焊缝表面质量, 减少了水波纹缺陷, 焊缝成形效果更佳。显微组织分析表明: 焊缝区组织主要由 $\alpha + \alpha' + \beta$ 相组成, 热影响区主要为 $\alpha + \beta$ 相组织。端面粗糙度值的减小有助于熔池内部液态金属的均匀流动, 能够抑制局部晶粒异常长大, 提高了焊接接头组织的均匀一致性。力学性能试验结果表明: 端面粗糙度值的减小可优化焊接热过程, 进一步提高了焊接接头的抗拉强度和断后伸长率, 且焊缝区硬度更为均匀。本研究阐明了端面粗糙度对焊接接头质量的影响, 为锆合金包壳管的高质量焊接提供了科学依据和实践指导。

关键词: 锆合金包壳管; 脉冲TIG焊接; 钨极间距; 端面粗糙度; 组织性能

Effect of end face roughness on microstructure and properties of pulse TIG welded joint of zirconium alloy cladding tube

HAN Xiaorui^{1, 2}, MI Wenjun^{1, 2}, WANG Yunbo^{1, 2}, YU Hongsheng^{1, 2}, LIU Bo^{1, 2},
ZHANG Xuewei^{1, 2}, PAN Shengqiang^{1, 2}

1. China North Nuclear Fuel Element Co., Ltd., Baotou 014035, Inner Mongolia, China
2. China Nuclear Baotou Nuclear Fuel Elements Co., Ltd., Baotou 014035, Inner Mongolia, China

Abstract: This paper focuses on the effect of end face roughness on the organization and mechanical properties of pulsed TIG welded joints of zirconium alloy clad tubes. It has been shown that the reduction in end face roughness value significantly improves the weld surface quality and reduces water ripple defects, resulting in better weld shaping. Microstructure analysis shows that the weld zone organization is mainly composed of $\alpha + \alpha' + \beta$ phases, and the heat affected zone is mainly $\alpha + \beta$ phase organization. The reduction of end face roughness value helps to the uniform flow of liquid metal inside the molten pool, and can suppresses the abnormal growth of local grains. It improves the uniform consistency of the welded joint organization. The mechanical properties test results show that the reduction of end face roughness value can optimize the welding thermal process, further improve the tensile strength and elongation after break of the welded joint, and the hardness of the weld zone is more uniform. This study elucidates the influence of end face roughness on the quality of welded joints, and provides a scientific basis and practical guidance for the high-quality welding of zirconium alloy cladding tubes.

Keywords: zirconium alloy cladding tubes; pulsed TIG welding; tungsten spacing; end face roughness; organizational properties

1 序言

锆合金因其优异的耐腐蚀性能和低中子吸收截面,在核反应堆燃料包壳中得到了广泛应用^[1]。锆合金焊缝接头质量直接影响包壳管的结构完整性和服役寿命^[2]。脉冲TIG焊能够有效控制热输入,减少焊接变形和裂纹倾向,是锆合金包壳管焊接的首选工艺之一^[3]。

目前,国内外学者对锆合金焊接的研究主要集中在焊接参数优化对焊缝质量的影响方面^[4, 5]。除工艺参数外,端面粗糙度由于影响焊接界面,影响焊接过程中熔池的形成及凝固过程,也可能导致焊接缺陷。因此,本文以锆合金包壳管为研究对象,探讨端面粗糙度对脉冲TIG焊接接头的影响机制,旨在揭示端面粗糙度与焊缝质量之间的内在联系,为实现锆合金包壳管的高质量焊接提供科学依据和实践指导。

2 试验方法

试验选用的锆合金包壳管材料为工业锆合金,端塞为国产Zr-4合金。采用脉冲TIG焊接方法进行试验,平均焊接电流为32A,电弧电压为18V,脉冲频率为1800Hz,钨极间距为0.46mm,采用3种端面处理方式获得不同的端面粗糙度,分别为端面喷砂处理、无处理和端面砂纸打磨处理,对其依次编号为1~3号样品。

将锆合金包壳管焊接接头沿纵向切开后,观察面为焊接接头的纵截面,采用800#~4000#砂纸打磨至端面平整光滑后,采用HF:HNO₃:H₂SO₄:H₂O=1:3:3:3配制的抛光液进行化学抛光至表面光亮、无划痕,之后进行显微组织观察。每种处理方式下针对焊缝区选用3张显微组织照片,按照GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》通过Image J软件进行标定。

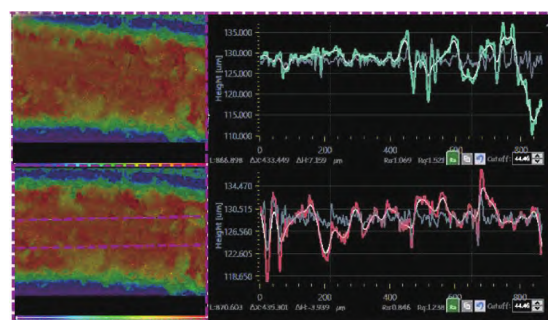
拉伸性能测试采用美特斯E45-305万能拉伸机,在恒定速度0.5mm/min条件下对试样进行轴向拉伸,为确保测试数据的可靠性,每种合金均进行3次平行测试并取平均值作为最终结果。显微硬度测试

采用HVS-1000A显微硬度计,在200gf(1.96N)加载力下保持15s,为避免材料局部性能波动对测试结果的影响,每种合金随机选取12个点进行测试,剔除最大值和最小值后取10个有效数据的平均值作为最终硬度值。

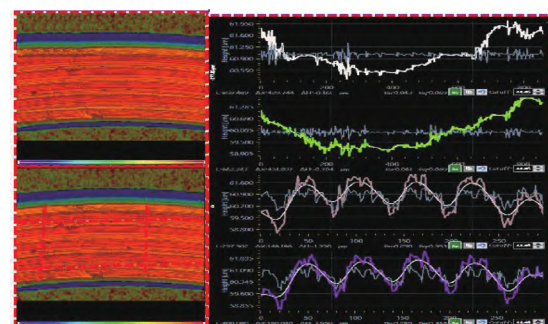
采用Bruker公司光学三维轮廓仪Contour GT-K对3种处理方式下的锆合金包壳管端面进行测试,测试前使用无水乙醇对样品端面进行仔细清洁,去除表面污染物后,对每种处理方式进行3次测试,获取材料端面清晰的三维形貌及表面粗糙度数据。

3 结果分析与讨论

(1) 不同处理端面粗糙度的对比分析 图1所示为不同处理方式下端面粗糙度值。从图1a可看出,喷砂处理后的锆合金包壳管材料整体端面粗糙度值较大,但由于喷砂不够均匀,边缘位置会出现倒角,端面粗糙度差异较大,导致 $S_a=1922.5\text{nm}$ 。从图1b可看出,在原管口的基础上经砂纸打磨处理后,管口端面出现明显的具有纵向周期性的打磨痕



a) 1号样品



b) 3号样品

图1 不同处理方式下端面粗糙度

迹,但此时端面粗糙度值与原管口和喷砂处理后相比较低, $S_a = 329.3715\text{nm}$ 。

(2) 端面粗糙度对锆合金包壳管脉冲TIG焊接焊缝成形的影响 图2所示为不同端面粗糙度下焊缝成形的宏观形貌。经喷砂处理后的锆合金包壳管焊接接头表面出现严重的水波纹缺陷,这主要是由于喷砂处理后管口端面的粗糙度值较大,导致在

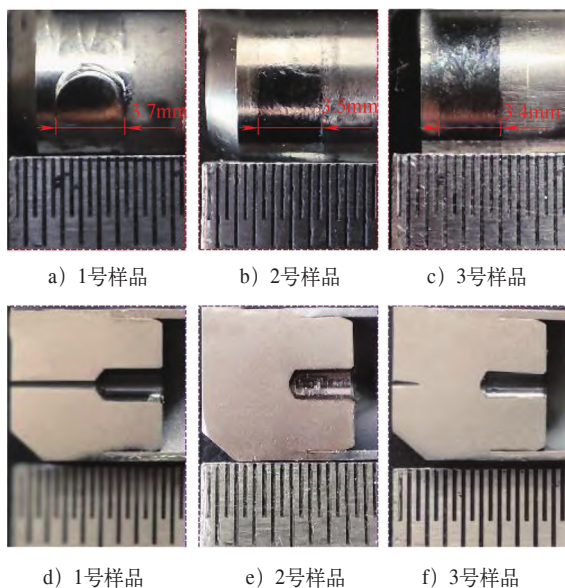


图2 不同端面粗糙度下焊缝成形的宏观形貌

焊接过程中熔融金属流动受到阻碍,形成水波纹缺陷。在原端口基础上经过砂纸打磨处理后,焊缝表面平整度略有提升,实际焊接过程中未出现水波纹缺陷,焊缝宽度与原管口和喷砂处理相比略低,为3.4mm。

(3) 端面粗糙度对锆合金包壳管脉冲TIG显微组织的影响 图3~图5所示分别为喷砂处理、无处理和砂纸打磨处理时的焊接接头显微组织。由图3~图5可知,无论是喷砂处理还是砂纸打磨处理,在焊接过程中焊缝区域均经历熔化后再凝固过程,内部组织首先由 α 相转变为 β 相,在随后的冷却过程中焊缝区组织由 β 相转变为 α 相,但仍存在部分未来得及转变的 β 相组织和 α' 相组织。热影响区内部虽然未完全熔化,但经历了高温热循环,导致晶粒粗大,内部主要为 α 相组织及少量的 β 相组织。不同处理方式下锆合金包壳管晶粒度见表1。结合表1可知,喷砂处理后,由于管口端面粗糙度数值较大,使得在焊接过程中液态金属流动受阻,导致焊缝区晶粒尺寸差异较大,局部区域强度分布不均。粗大晶粒区强度较低,影响焊接接头使用性能。经砂纸打磨处理后的管口端面粗糙度值较小,焊缝区晶粒尺寸差异较小。

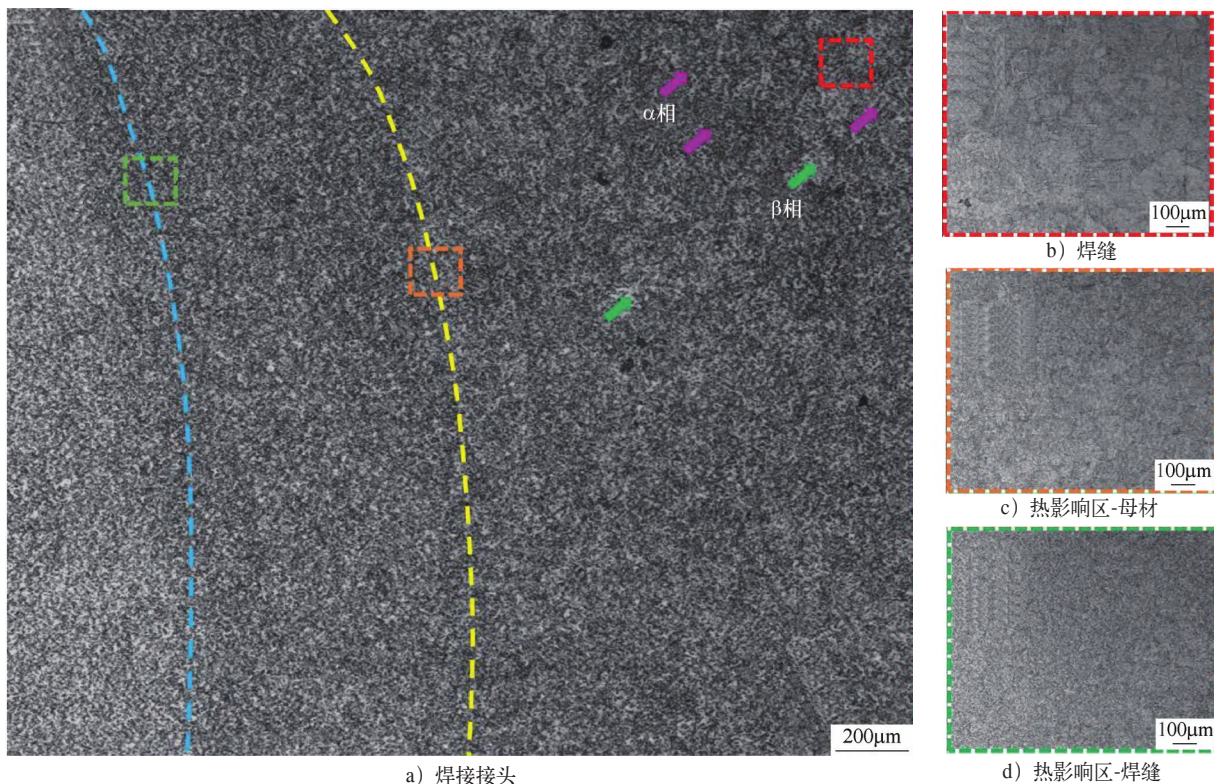


图3 1号样品的显微组织

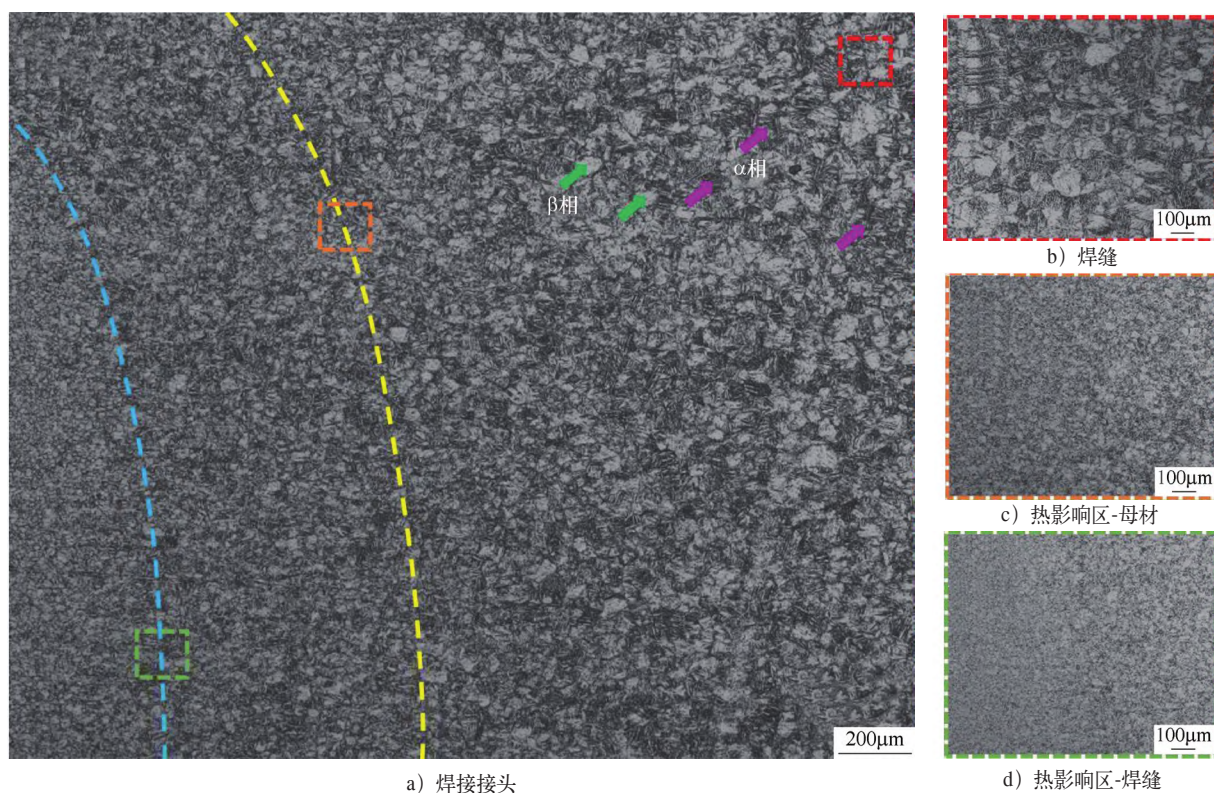


图4 2号样品的显微组织

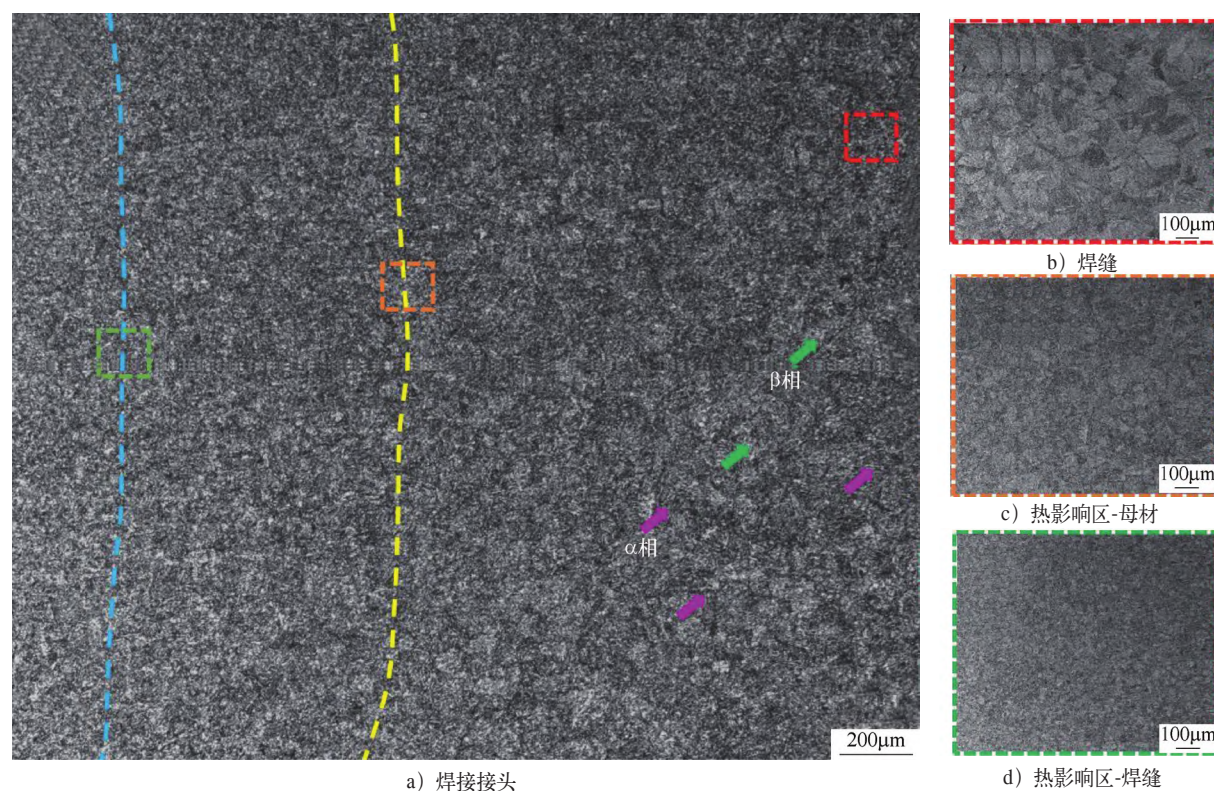


图5 3号样品的显微组织

(4) 端面粗糙度对锆合金包壳管脉冲TIG焊接力学性能的影响 图6所示为不同端面粗糙度下的显微硬度。由左至右三种颜色分别表示焊缝区、热影响

区和母材区。由图6可知,经砂纸打磨处理后,焊缝区的硬度与无处理时接近,均为215~220HV0.2,远高于喷砂处理时焊缝区的显微硬度。随着距焊缝

表1 不同端面粗糙度下钎合金包壳管晶粒度统计

样品	线段长度总和/ μm	晶界结点数/个	平均晶粒尺寸/ μm
1号	10435.96	100	104.36
2号	6152.684	100	61.53
3号	6214.288	100	62.14

中心的距离逐渐增大,硬度逐渐降低,喷砂处理后位于热影响区内的硬度均低于190HV0.2。

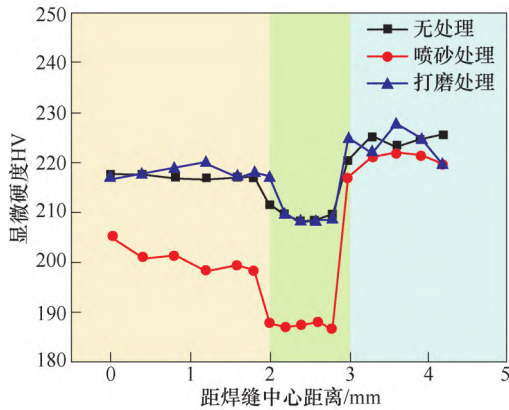


图6 不同端面粗糙度下显微硬度

图7所示为不同端面粗糙度下的抗拉强度和断后伸长率,图8所示为钨极间距为0.46mm、无处理时焊接接头的应力-应变曲线。由图7可知,经砂纸打磨处理后的焊接接头的抗拉强度最高,达到 (159.14 ± 3.46) MPa,无处理时焊接接头的抗拉强度居中,为 (152.13 ± 1.1) MPa,喷砂处理后的焊接接头的抗拉强度最低,为 (149.73 ± 2.23) MPa。除此之外,无处理时的断后伸长率略高,为 $(16.34 \pm 1.06)\%$,砂纸打磨处理后的断后伸长率居中,为 $(15.65 \pm 0.88)\%$,喷砂处理后的断后伸长率略低,为 $(15.37 \pm 1.19)\%$ 。

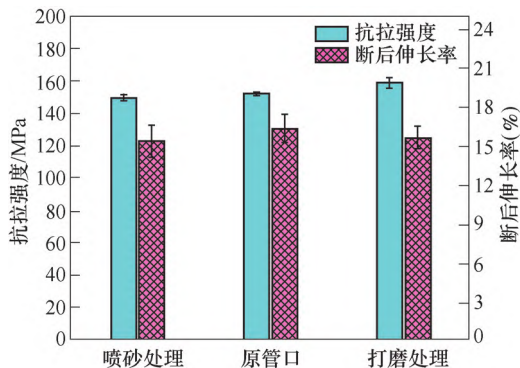


图7 不同端面粗糙度下抗拉强度和断后伸长率

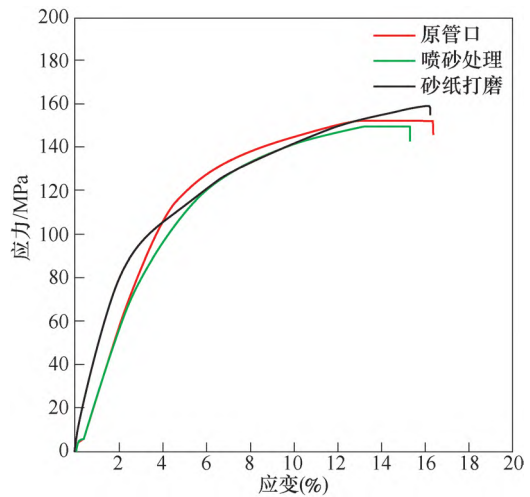


图8 钨极间距为0.46mm、端面无处理时焊接接头应力-应变曲线

4 结束语

1) 端面粗糙度值的减小能够显著提升焊缝表面质量,消除水波纹缺陷,优化焊接过程中熔池内部金属的流动性,使焊缝表面更加平整光滑,成形质量更佳。

2) 焊接接头内部组织主要由 α 相+ β 相组成。随着端面粗糙度值的减小,焊缝区晶粒尺寸差异减小,由 $104.35\mu\text{m}$ 降低至 $61.53\mu\text{m}$,组织均匀性提高,焊接接头的性能较优。

3) 随着端面粗糙度值减小,接头的抗拉强度从 (149.73 ± 2.23) MPa提高到 (159.14 ± 3.46) MPa,断后伸长率从 $(15.37 \pm 1.19)\%$ 提高到 $(15.65 \pm 0.88)\%$,焊缝区硬度也更为均匀,位于215~220HV0.2。

参考文献:

- [1] 蔡创. 钎合金交叉结构脉冲激光点焊特性及焊点氧化膜生长机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] 王苹, 汪建红, 温珂. 燃料棒加长端塞与包壳管TIG环焊工艺研究[J]. 中国核电, 2024, 17 (2): 171-175.
- [3] 蒋帆. 新型钎合金管棒材焊接性能研究[J]. 焊接技术, 2019, 48 (11): 40-43.
- [4] 崔振波, 纪思倩, 赵婷. 一种钎合金管与端塞TIG焊接工艺研究[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17 (17): 73-75.
- [5] 王正品, 刘瑶, 薛飞, 等. 焊接对Zr-Nb包壳管显微硬度和组织的影响[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32 (10): 830-834. (收稿日期: 20250506)