

## 先进连接技术

基于正交试验的钛合金窄间隙 TIG  
焊接工艺参数优化

李立\*, 缪露露, 颜永成

(山东科技大学 智能装备学院, 山东 泰安 270019)

**摘要:** **目的** 针对 20 mm 厚 TC4 钛合金中厚板窄间隙 TIG 焊接过程中坡口狭窄导致的侧壁熔合不良、气孔敏感性强以及多层焊热循环差异显著等问题, 采用分层优化策略, 系统探究焊接电流、焊接速度、送丝速度及钨极摆动速度对打底层与填充层焊缝成形及力学性能的影响规律, 厘清各层工艺调控机制与主次关系。**方法** 采用窄间隙摆动电弧 TIG 焊接系统进行多层焊试验, 针对打底层与填充层分别设计四因素三水平正交试验, 以焊缝横截面积、熔深、拉伸强度为评价指标, 通过极差与方差分析明确各因素的影响主次及显著性, 并结合金相组织观察, 揭示热输入对焊缝区与热影响区组织演变的影响机制。**结果** 打底层试验结果表明, 送丝速度是影响横截面积的主导因素 ( $R=89.82$ ); 焊接速度对拉伸强度的影响最显著 ( $R=25.9, P=0.031$ ), 钨极摆动速度亦有显著影响 ( $P=0.028$ ); 焊接电流是影响熔深的主要因素 ( $R=1.4$ )。优化工艺参数为焊接电流 180 A、焊接速度 120 mm/min、送丝速度 0.8 m/min、摆速 60 mm/s, 对应热输入 1 080 J/mm, 拉伸强度达 910 MPa。在填充层试验中, 钨极摆动速度对拉伸强度的影响极显著 ( $R=38.97, P<0.001$ ), 送丝速度影响显著 ( $P=0.015$ ); 优化参数为焊接电流 200 A、焊接速度 120 mm/min、送丝速度 1.5 m/min、摆速 55 mm/s, 对应热输入 1 300 J/mm, 拉伸强度达 908 MPa。金相分析结果表明, 当热输入由 775 J/mm 增至 1 178 J/mm 时, 打底层焊缝组织由细针状马氏体向  $\alpha+\beta$  混合组织再向粗化魏氏组织演变, 热影响区晶粒逐渐粗化; 填充层组织演变趋势相似, 但是因散热条件差异, 晶粒粗化程度更为明显。**结论** 采用分层优化策略可有效解决侧壁熔合不良与气孔缺陷问题, 并明确了打底层的工艺调控重点在于平衡熔透与强度, 而对于填充层, 则需侧重熔池搅拌与填充匹配的工艺调控。热输入是组织演变的关键因素, 拉伸强度随热输入增加呈先升后降的趋势, 打底层在 890 J/mm、填充层在 1 040 J/mm 附近获得峰值强度。在适宜热输入范围内可获得组织细密、力学性能优良的焊接接头, 为厚板多层焊工艺设计提供了系统的试验依据与理论支撑。

**关键词:** 钛合金; 窄间隙焊接; 正交试验; 工艺参数; 热输入

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.08.016

**中图分类号:** TG457.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)08-0176-13

收稿日期: 2025-11-06

Received: 2025-11-06

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2022QE184); 湖南省自然科学基金 (2024JJ6174)

Fund: Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2022QE184); Hunan Provincial Natural Science Foundation (2024JJ6174)

引文格式: 李立, 缪露露, 颜永成. 基于正交试验的钛合金窄间隙 TIG 焊接工艺参数优化[J]. 精密成形工程, 2026, 18(8): 176-188.

LI Li, MIAO Lulu, YAN Yongcheng. Optimization of Titanium Alloy Narrow-gap TIG Welding Process Parameters Based on Orthogonal Experiment[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(8): 176-188.

\*通信作者 (Corresponding author)

## Optimization of Titanium Alloy Narrow-gap TIG Welding Process Parameters Based on Orthogonal Experiment

LI Li\*, MIAO Lulu, YAN Yongcheng

(School of Intelligent Equipment, Shandong University of Science and Technology, Shandong Tai'an 270019, China)

**ABSTRACT:** The work aims to address the issues of poor sidewall fusion, high porosity sensitivity, and significant differences in thermal cycles during multi-pass welding in narrow-gap TIG welding of 20 mm thick TC4 titanium alloy medium-thick sheets caused by the narrow groove, by systematically investigating the effects of welding current, welding speed, wire feed speed, and tungsten electrode oscillation speed on the weld formation and mechanical properties of the root and filler layers through a layer-specific optimization strategy, and clarifying the regulation mechanisms and priorities of process parameters for each layer. Multi-pass welding experiments were conducted using a narrow-gap oscillating arc TIG welding system. Orthogonal experiments with four factors and three levels were designed for the root layer and filler layer, respectively. The cross-sectional area, penetration depth, and tensile strength were taken as evaluation indicators. Range analysis and variance analysis were employed to determine the primary and secondary effects and significance of each factor. Combined with metallographic observation, the influence mechanism of heat input on the microstructure evolution in the fusion zone and heat-affected zone was revealed. For the root layer, wire feed speed was the dominant factor affecting the cross-sectional area ( $R=89.82$ ); welding speed had the most significant effect on tensile strength ( $R=25.9$ ,  $P=0.031$ ), and tungsten electrode oscillation speed also showed a significant effect ( $P=0.028$ ); welding current was the main factor influencing penetration depth ( $R=1.4$ ). The optimized parameters were welding current of 180 A, welding speed of 120 mm/min, wire feed speed of 0.8 m/min, and oscillation speed of 60 mm/s, corresponding to a heat input of 1 080 J/mm, achieving a tensile strength of 910 MPa. For the filler layer, tungsten electrode oscillation speed had an extremely significant effect on tensile strength ( $R=38.97$ ,  $P<0.001$ ), and wire feed speed had a significant effect ( $P=0.015$ ). The optimized parameters were welding current of 200 A, welding speed of 120 mm/min, wire feed speed of 1.5 m/min, and oscillation speed of 55 mm/s, corresponding to a heat input of 1 300 J/mm, achieving a tensile strength of 908 MPa. Metallographic analysis showed that as the heat input increased from 775 J/mm to 1 178 J/mm, the microstructure of the root layer weld evolved from fine acicular martensite to a mixed  $\alpha+\beta$  structure and then to coarsened Widmanstätten structure, while grains in the heat-affected zone gradually coarsened. The filler layer exhibited a similar evolution trend, but grain coarsening was more pronounced due to different heat dissipation conditions. In conclusion, the layer-specific optimization strategy effectively resolves the problems of poor sidewall fusion and porosity defects, clarifying that the root layer requires a balance between penetration and strength, while for the filler layer, the focus should be put on molten pool stirring and filler metal matching. Heat input is a key factor in microstructure evolution; tensile strength first increases and then decreases with increasing heat input, reaching peak values at approximately 890 J/mm for the root layer and 1 040 J/mm for the filler layer. Within an appropriate heat input range, welded joints with fine microstructure and excellent mechanical properties can be obtained, providing a systematic experimental basis and theoretical support for the process design of multi-pass welding of thick sheets.

**KEY WORDS:** titanium alloy; narrow gap welding; orthogonal experiment; process parameters; heat input

钛合金具有良好的机械加工性能、耐腐蚀性能等,在航空航天、船舶等大型结构件及生物医疗领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。TC4 钛合金是  $\alpha$ - $\beta$  双相钛合金,兼具  $\alpha$  型钛合金的热稳定性和  $\beta$  型钛合金的热处理强化优点,综合性能优异,是目前应用较为广泛的钛合金之一<sup>[4]</sup>。

随着中厚板构件在结构轻量化与整体化制造中的需求逐渐增加,如何实现高质量、低变形且高效率的 TC4 中厚板焊接成为诸多学者关注的关键问题<sup>[5-7]</sup>。在众多焊接方法中,TIG 焊稳定的焊接工艺和简单的操作在中厚板钛合金焊接中占有很大优势<sup>[8]</sup>。传统 TIG

焊接坡口宽、填充金属量大、热输入高,往往导致残余应力和变形累积<sup>[9]</sup>;而窄间隙焊接通过减小坡口角度与填充体积,可有效降低热输入并提升生产效率。然而,在钛合金的窄间隙 TIG 焊中,电弧受狭窄空间约束易发生偏转,导致侧壁熔合不足与气孔敏感性增加,显著影响焊缝质量<sup>[10-12]</sup>。因此,针对 TC4 钛合金中厚板窄间隙 TIG 焊接工艺参数进行系统优化具有重要的研究意义。

近年来,国内外学者在钛合金窄间隙 TIG 及复合热源焊接方面开展了大量研究。杨清福等<sup>[13]</sup>对比了 MCNG-TIG 和 EBW 两种焊接工艺制备的接头,结果

显示, 由于磁场对熔池的搅拌作用, MCNG-TIG 接头的焊缝区与热影响区晶粒尺寸细小, 而 EBW 的力学性能更好。Song 等<sup>[14]</sup>通过调整激光和电弧的相对位置, 以及焊丝与电弧的位置, 改善了焊接层间熔合和并抑制了气孔缺陷, 成功焊接了 24 mm 厚的 TC4 钛合金板。Jian 等<sup>[15]</sup>发现了光束摆动幅度、焊缝能量和送丝量比例是影响 V 形坡口焊接是否能够熔合的关键因素, 并解决了厚板填充丝窄间隙激光焊接中侧壁和层间不完全熔合的问题。任泽良等<sup>[16]</sup>对 36 mm 厚 TA5 钛合金进行了窄间隙 TIG 焊焊接试验, 研究表明, 接头表面形貌良好, 探伤 (RT) 合格, 焊缝组织为柱状晶锯齿状  $\alpha$  相, 强度达到母材的 95.7%。Chen 等<sup>[17]</sup>对 Ti-4Al-2V 钛合金 TIG 焊接接头的微观结构和力学性能进行了研究, 发现热影响区 (HAZ) 和熔合区 (FZ) 有不同的相组成和微观结构, 且不同微观区域的纳米硬度等力学性能存在差异。陈立佳等<sup>[18]</sup>对 TC4 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头进行了研究, 通过对不同层位样品进行试验, 发现各层位在高周疲劳性能的多项特性上存在差异。Feng 等<sup>[19]</sup>采用窄间隙热丝 TIG 焊接方法成功焊接了单边 U 型坡口 20 mm 厚 TC4 钛合金板, 并分析了焊接接头不同位置的组织和力学性能。

此外, 部分学者采用正交试验的方法探究了多个焊接工艺参数的协同作用对焊接质量的影响, 贡一峰等<sup>[20]</sup>探究了激光功率、焊接速度、离焦量等参数对 TC4 钛合金激光焊接质量的影响, 得到了最优焊接热输入。玄明昊等<sup>[21]</sup>通过正交试验优化了激光成形连接的线能量密度、坡口角度和扫描路径等参数。熊然等<sup>[22]</sup>通过正交试验方差分析的方法, 优化了 2219 铝合金电子束焊接的工艺参数。李星帅等<sup>[23]</sup>探究了各种焊接参数对焊缝形貌以及气孔率的影响, 得到了水下激光焊接的最优焊接参数。然而不同焊接层的热循环行为显著不同, 导致组织特征与残余应力分布存在差异<sup>[24-25]</sup>。已有研究表明, 在厚板多道焊接中, 首道焊层的熔合行为对整体接头的组织连续性及性能稳定性起决定性作用<sup>[26-27]</sup>。因此, 采用分层策略分别优化打底层与填充层的焊接参数, 更容易达到焊接质量最优状态<sup>[28]</sup>。现有研究表明, 已有学者采用正交试验的方法研究多个焊接工艺参数的协同作用对 TC4 钛合金焊接质量的影响, 但是对于 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接还没有相关研究, 而且 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接的工艺参数更多, 增加了钨极的摆动, 焊接坡口角度也相对狭窄, 所以有必要研究增加钨极摆动之后多个焊接工艺参数对 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接的协同影响。基于多层多道焊接前一层对后一层热处理作用的影响, 以及打底层 (焊接的第一层) 和填充层 (中间焊接层) U 型坡口的过渡、填充量的改变, 针对打底层和填充层, 分别设计正交试验, 考虑到盖面层 (焊接最后一层) 需要根据填充层最后填充高度, 适时调整工艺参数, 没有对盖面层进行设计正交试验。打底层和填充层焊接完成后采用统一的焊接参数, 完成盖面层的焊接。

本文对 20 mm 钛合金中厚板窄间隙 TIG 焊接过

程开展研究, 选取了焊接电流、焊接速度、送丝速度、钨极摆动速度 4 个重要影响因素, 设计了四因素三水平正交试验, 探究其对打底层和填充层焊缝宏观形貌以及拉伸强度的影响。建立不同焊接层工艺控制要点与各影响因素之间的对应关系, 进而得出各因素对不同焊接层质量指标的具体影响规律。

## 1 试验

### 1.1 材料

本文选用尺寸为 300 mm×50 mm×20 mm 的退火态 TC4 钛合金试板作为焊接母材, 选用直径为 1.2 mm 的 TC4 焊丝, 母材与焊丝的化学成分分别如表 1 和表 2 所示。母材采用双 U 型坡口, 钝边 2 mm, 圆弧半径为 4.5 mm。焊接前去除氧化皮和杂质, 并用无水乙醇清洗, 焊接保护气选用氩气, 焊枪保护气体流量为 15 L/min, 焊枪尾部二次保护气体流量为 35~40 L/min, 背面气罩保护气体流量为 35~40 L/min。

表 1 板材的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of sheets |      |      |       |       |         |       | wt. % |
|--------------------------------------|------|------|-------|-------|---------|-------|-------|
| Al                                   | V    | Fe   | C     | N     | H       | O     | Ti    |
| 6.49                                 | 3.91 | 0.19 | 0.021 | 0.005 | 0.001 2 | 0.169 | Bal.  |

表 2 焊材的化学成分

| Tab.2 Chemical composition of welding materials |      |       |       |       |         |       | wt. % |
|-------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| Al                                              | V    | Fe    | C     | N     | H       | O     | Ti    |
| 6.09                                            | 3.96 | 0.038 | 0.009 | 0.007 | 0.003 0 | 0.138 | Bal.  |

### 1.2 方法

采用窄间隙 TIG 摆动电弧焊接系统进行焊接, 焊接系统如图 1 所示, 主要由十字操作机及机头、窄间隙焊枪、福尼斯 TIG 电源、TIG 送丝机、控制柜及遥控器、水冷系统等组成。首先通过平板试验确定了焊接工艺参数的大致范围, 然后针对打底层和填充层, 选取了不同的焊接工艺参数水平, 设计了 2 组正交试验, 并计算出相应的焊接热输入。对于所有的焊接试样, 盖面层统一选用焊接热输入 890 J/mm, 通过调节送丝速度、钨极摆速和摆宽, 获得了良好的表面成形。

焊接试样层道数如图 2 所示, 试样焊接完成后, 沿垂直于焊缝方向, 采用线切割的方式加工金相试样, 其尺寸为 50 mm×20 mm×10 mm, 进行研磨、抛光后, 用 Kroll 试剂进行腐蚀, 腐蚀时间为 10 s。采用型号为 VHX-6000 的超景深三维显微镜, 进行试样宏观形貌的观察和测量。在 TM28-HD202C 型金相显微镜下进行金相组织观察。采用型号为 WDW-100 的电子万能试验机分别对不同焊接工艺参数下的打底层和填充层的拉伸试样进行拉伸性能测试。拉伸试样尺寸如图 3 所示, 在打底层和填充层对称焊缝的双面分别取样, 测试后, 取 2 个试样的拉伸强度平均值作

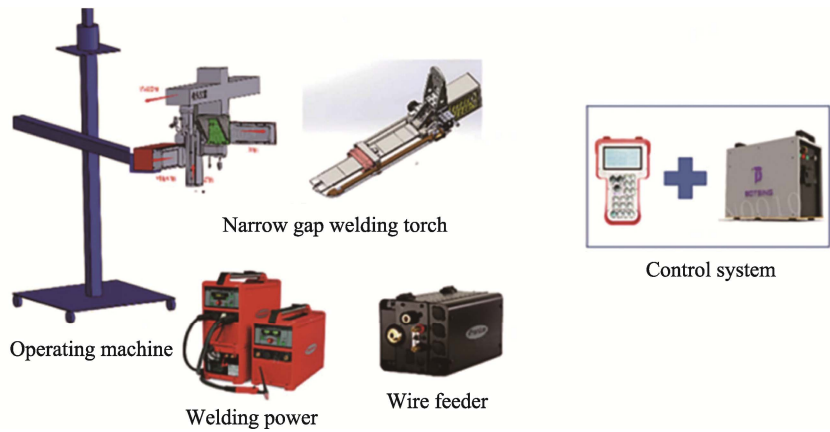


图 1 焊接系统  
Fig.1 Welding system

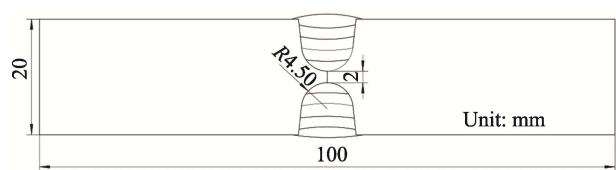


图 2 焊接层道图  
Fig.2 Welding layer diagram

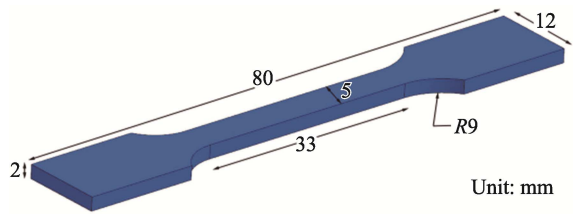


图 3 拉伸试样尺寸  
Fig.3 Tensile specimen dimensions

为拉伸强度值。

2 结果与讨论

2.1 打底层试验

2.1.1 打底层正交试验

打底层焊接时,焊接电源上显示焊接电压在 12 V

左右波动,结合正交试验设计对应的焊接工艺参数,按照式(1)计算出相应的焊接热输入(如表 3 所示)。打底层焊接试验后的分析结果有外观形貌、熔深、焊缝的横截面积、拉伸强度值,以及断裂位置(如表 4 所示)。在所有的正交试验组合参数中,打底层 8 号试验组的试验参数并不能保证打底层焊缝成形,由于焊接电流较大,送丝速度比较慢,熔融金属填充量不够,因此无法焊接成形。填充层 3 号试验组焊缝成形不良,存在气孔及未熔合缺陷,原因是焊接速度以及钨极摆动速度比较快,送丝量又比较大,电弧热一部分用来熔化焊丝,一部分用来熔化母材,填充金属较多,左右两侧的电弧热量不够,出现未熔合和气孔现象(如图 4 所示)。因此没有对打底层 8 号焊接试样以及填充层 3 号焊接试样进行后续结果测试,在进行极差结果计算时,用同一焊接工艺参数水平下的其他 2 个焊接试样的结果平均值代替其测试结果。

$$Q = \frac{IU}{v_s \times 1\,000} \tag{1}$$

式中:  $Q$  为热输入, kJ/mm;  $I$  为电流, A;  $U$  为电压, V;  $v_s$  为焊接速度, mm/s。

焊缝横截面积以及拉伸强度的极差结果如表 5、表 6 所示,不同水平试验参数下  $k$  值变化如图 5 所示。其中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  是每一个因素在不同水平下结果的

表 3 打底层焊接正交试验因素水平及热输入  
Tab.3 Orthogonal test factors and levels for root layer welding and heat input

| No. | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Heat input/(J·mm <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1   | 140               | 110                                   | 0.6                                    | 40                                                         | 916.36                           |
| 2   | 140               | 120                                   | 0.8                                    | 50                                                         | 840                              |
| 3   | 140               | 130                                   | 1.0                                    | 60                                                         | 775.38                           |
| 4   | 160               | 110                                   | 0.8                                    | 50                                                         | 1 047.27                         |
| 5   | 160               | 120                                   | 1.0                                    | 60                                                         | 960                              |
| 6   | 160               | 130                                   | 0.6                                    | 40                                                         | 886.15                           |
| 7   | 180               | 110                                   | 1.0                                    | 60                                                         | 1 178.18                         |
| 8   | 180               | 120                                   | 0.6                                    | 40                                                         | 1 080                            |
| 9   | 180               | 130                                   | 0.8                                    | 50                                                         | 996.92                           |

表 4 打底层正交试验结果  
Tab.4 Orthogonal test results of root layer

| NO. | Appearance | Cross-sectional area of the weld/mm <sup>2</sup> | Tensile strength test1/MPa | Tensile strength test2/MPa | Penetration depth/mm | Fracture location |
|-----|------------|--------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------|
| 1   | Good       | 145.76                                           | 856.6                      | 861.2                      | 5.5                  | Weld seam         |
| 2   | Good       | 95.34                                            | 861.8                      | 925.4                      | 5.3                  | Weld seam         |
| 3   | Good       | 87.38                                            | 875                        | 872.4                      | 5.6                  | Weld seam         |
| 4   | Good       | 94.78                                            | 902.4                      | 883.6                      | 6.6                  | Weld seam         |
| 5   | Good       | 106.74                                           | 782.6                      | 961.2                      | 6                    | Base material     |
| 6   | Good       | 79.84                                            | 806.8                      | 876                        | 5.9                  | Base material     |
| 7   | Good       | 175.74                                           | 909.4                      | 876.8                      | 7.4                  | Base material     |
| 8   | Unformed   |                                                  |                            |                            |                      |                   |
| 9   | Good       | 133.76                                           | 855.6                      | 876                        | 6.4                  | Base material     |



a 焊缝不连续 b 焊缝两侧出现气孔

图 4 焊缝缺陷图-3 号试验组

Fig.4 Weld defect map of test group 3: a) weld discontinuity; b) porosity appears on both sides of weld

表 5 打底层焊缝横截面积极差结果  
Tab.5 Cross-sectional area range of root layer weld

| Factor | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $K_1$  | 328.48            | 416.84                                | 338.4                                  | 428.24                                                     |
| $K_2$  | 281.36            | 303.12                                | 285.32                                 | 262.77                                                     |
| $K_3$  | 464.25            | 369.86                                | 369.86                                 | 315.92                                                     |
| $k_1$  | 109.49            | 138.95                                | 112.8                                  | 142.75                                                     |
| $k_2$  | 93.79             | 151.56                                | 95.11                                  | 87.59                                                      |
| $k_3$  | 154.75            | 123.29                                | 184.93                                 | 105.31                                                     |
| $R$    | 60.96             | 28.27                                 | 89.82                                  | 55.16                                                      |

表 6 打底层焊缝拉伸强度均值和标准差  
Tab.6 Mean & SD of tensile strength of root layer weld

| No. | Tensile strength Test1/MPa | Tensile strength Test2/MPa | Mean   | Standard deviation |
|-----|----------------------------|----------------------------|--------|--------------------|
| 1   | 856.6                      | 861.2                      | 858.9  | 3.25               |
| 2   | 861.8                      | 925.4                      | 893.6  | 44.97              |
| 3   | 875                        | 872.4                      | 873.7  | 1.84               |
| 4   | 902.4                      | 883.6                      | 893    | 13.29              |
| 5   | 782.6                      | 961.2                      | 871.9  | 126.29             |
| 6   | 806.8                      | 876                        | 841.4  | 48.93              |
| 7   | 909.4                      | 876.8                      | 873.93 | 34.51              |
| 8   |                            |                            | 876.8  | 23.05              |
| 9   | 855.6                      | 876                        | 876    | 14.42              |

总和,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  是它们的均值, 用来表征焊接参数对正交试验焊接结果的影响能力。 $R$  是极差, 极差  $R$  用于判断各焊接参数对正交试验结果影响的主次顺序, 方差分析中的  $P$  值则用于检验各参数影响的显著性程度。

如表 5 所示, 送丝速度的  $R$  值最大, 说明送丝速度是影响打底层焊缝横截面积的主要因素。如图 5a 所示, 当送丝速度由 0.8 m/min 到 1.0 m/min 时,  $k$  值快速上升, 当送丝速度增加时, 熔敷金属量快速上升, 导致焊缝横截面积显著增大。当焊接电流从 160 A 增

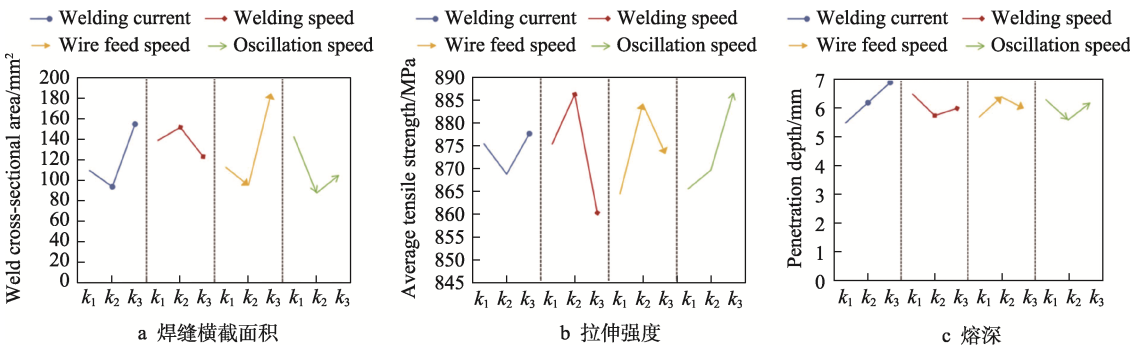


图 5 打底层不同水平试验参数下  $k$  变化曲线

Fig.5 Variation curves of  $k$  under different horizontal test parameters for root layer: a) weld cross-sectional area; b) tensile strength; c) penetration depth

加到 180 A 时,  $k$  值快速上升, 说明焊接电流通过影响电弧热输入和熔深, 间接调控了焊缝横截面积。当焊接速度为 130 mm/min 时,  $k$  值最小, 没有明显的变化趋势, 说明焊接速度通过影响单位长度焊缝的热输入和熔敷时间, 对横截面积产生了反向作用。当钨极摆动速度为 50 mm/s 时,  $k$  值最小, 没有明显的变化趋势, 说明钨极摆动速度通过改变熔池范围和热量分布影响了焊缝成形。

打底层焊缝拉伸强度的均值和方差如表 6 所示, 极差分析如表 7 所示。可知, 焊接速度的  $R$  值最大, 说明焊接速度是影响打底层焊缝拉伸强度的主要因素。如图 5b 所示, 当钨极摆动速度为 60 mm/s 时,  $k$  值最大, 随着钨极摆动速度的增加,  $k$  值逐渐增加, 钨极摆动通过扩大电弧作用范围, 促进母材与填充金属的均匀混合, 减少未熔合、夹渣等缺陷, 显著提升了熔合区的力学性能。送丝速度和钨极摆动速度的  $R$  值接近, 说明它们对拉伸强度的影响程度相差不大。焊接电流的  $R$  值最小, 当焊接电流为 180 A 时,  $k$  值最大, 当焊接电流从 140 A 增加到 180 A 时,  $k$  值先减小后增大, 当焊接速度为 120 mm/min 时,  $k$  值最大, 当焊接速度从 120 mm/min 增大到 130 mm/min

时,  $k$  值快速减小, 当送丝速度为 0.8 m/min 时,  $k$  值最大, 当送丝速度高于和低于 0.8 m/min 时,  $k$  值降低。以获取最大焊缝拉伸强度为目标, 优化后的打底层焊接工艺参数如下: 焊接电流为 180 A、焊接速度为 120 mm/min、送丝速度为 0.8 m/min、钨极摆动速度为 60 mm/s, 此时焊接热输入为 1 080 J/mm。打底层焊缝拉伸强度的方差计算值如表 8 所示, 焊接电流和送丝速度的  $P$  值大于 0.05, 说明焊接电流和送丝速度对打底层焊缝拉伸强度的影响不显著。焊接速度和钨极摆动速度的  $P$  值小于 0.05, 说明对打底层焊缝拉伸强度的影响显著。

如表 9 所示, 焊接电流的  $R$  值最大, 说明焊接电流是影响打底层焊缝熔深的主要因素。如图 5c 所示, 随着焊接电流的增加,  $k$  值逐渐增大, 随着焊接速度的增加,  $k$  值呈现减小的趋势, 当送丝速度和钨极摆动速度变化时,  $k$  值没有出现明显变化。打底层焊缝熔深越大, 焊缝根部熔透效果越好, 保证一定的焊缝熔透深度值, 能避免出现根部未熔合缺陷, 但是熔深过大会出现过烧现象, 因此  $k$  值的大小不能用来优化打底层焊接熔深。如图 6 所示, 打底层焊道存在不同的熔合状态, 2 条焊道未熔合 (如图 6a 所示)

表 7 打底层焊缝拉伸强度极差结果  
Tab.7 Tensile strength range of root layer weld

| Factor | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Factor | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $K_1$  | 2 626.2           | 2 625.84                              | 2 593.41                               | 2 596.59                                                   | $k_2$  | 868.77            | 886.2                                 | 884.13                                 | 869.64                                                     |
| $K_2$  | 2 606.31          | 2 658.6                               | 2 652.39                               | 2 608.92                                                   | $k_3$  | 877.61            | 860.3                                 | 873.18                                 | 886.6                                                      |
| $K_3$  | 2 632.83          | 2 580.9                               | 2 619.54                               | 2 659.8                                                    | $R$    | 8.84              | 25.9                                  | 19.66                                  | 21.07                                                      |
| $k_1$  | 875.4             | 875.28                                | 864.47                                 | 865.53                                                     |        |                   |                                       |                                        |                                                            |

表 8 打底层焊缝拉伸强度方差结果  
Tab.8 Tensile strength variance of root layer weld

| Factor                               | Sum of squares | Degrees of freedom | Mean square | $F$ value | $P$ value | Significance   |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|-----------|-----------|----------------|
| Welding current                      | 144.6          | 2                  | 72.3        | 0.41      | 0.676     | No significant |
| Welding speed                        | 1 860.7        | 2                  | 930.35      | 5.27      | 0.031     | Significant    |
| Wire feed speed                      | 988.5          | 2                  | 494.25      | 2.8       | 0.114     | No significant |
| Tungsten electrode oscillation speed | 1 915.2        | 2                  | 957.6       | 5.43      | 0.028     | Significant    |

表 9 打底层焊缝熔深极差结果  
Tab.9 Penetration depth range of root layer weld

| Factor | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Factor | Welding current/A | Welding speed/(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $K_1$  | 16.4              | 19.5                                  | 17.1                                   | 18.9                                                       | $k_2$  | 6.2               | 5.75                                  | 6.4                                    | 5.6                                                        |
| $K_2$  | 18.5              | 17.25                                 | 19.3                                   | 16.8                                                       | $k_3$  | 6.9               | 6                                     | 6                                      | 6.2                                                        |
| $K_3$  | 20.7              | 17.9                                  | 17.9                                   | 18.6                                                       | $R$    | 1.4               | 0.75                                  | 0.7                                    | 0.7                                                        |
| $k_1$  | 5.5               | 6.5                                   | 5.7                                    | 6.3                                                        |        |                   |                                       |                                        |                                                            |

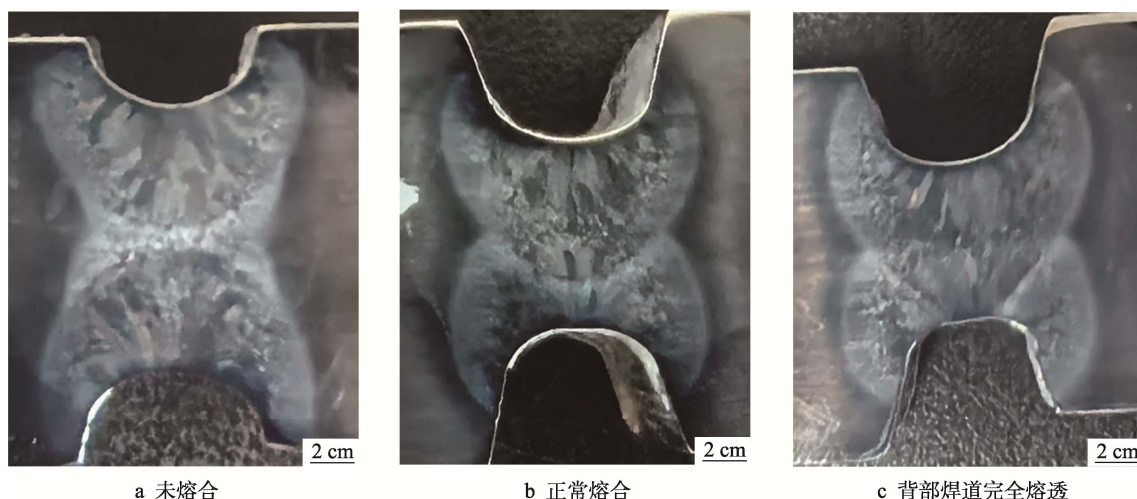


图6 打底焊道熔合形态对比

Fig.6 Comparison of fusion shapes of root layer weld: a) faulty fusion; b) normal fusion; c) back weld is fully penetrated

会形成潜在的缺陷,在承受载荷时,此处容易产生应力集中,降低焊接接头的强度和韧性,影响结构的整体力学性能。焊道与焊道之间实现了良好的熔化结合(如图6b所示),形成对称的熔合区,是工艺稳定、质量合格的理想状态。当热输入达到并略高于临界熔透阈值时,能够形成背部焊道完全熔透的对称熔合区(如图6c所示),此时打底焊缝成形质量高、可靠性好。但是工艺可调节范围比较窄,需要严格控制工艺参数防止过度熔合,出现过烧或下塌缺陷。

### 2.1.2 打底层焊接热输入对金相组织的影响

取打底层焊接热输入最小值 775.38 J/mm 的 3 号焊接试样、焊接输入居于中间值 960 J/mm 的 5 号焊接试样和热输入最大值 1 178.18 J/mm 的 7 号焊接试样,探究打底层热输入对金相组织的影响,取焊接试样的焊缝区和热影响区试样为研究对象,观察它们的金相组织。

选取填充层热输入较小值 960 J/mm 的 2 号焊接试样、热输入居于中间值 1 080 J/mm 的 5 号焊接试样和最大值 1 300 J/mm 的 7 号焊接试样,探究填充层焊接热输入对金相组织的影响,取焊接试样的焊缝区和热影响区的金相试样为研究对象,观察它们的金相组织。

熔合区的金相组织变化如图7所示,由于热输入

较小,所以熔池冷却速度快,在焊缝中心熔合区形成了细小的马氏体组织(如图7a所示)。β相在快速冷却时会发生无扩散型相变,转变为α'马氏体。这些细小的马氏体针状组织相互交织,形成较为致密的结构。随着热输入的增加,熔池冷却速度相对减慢。β相在冷却过程中部分转变为α相,形成一定比例的α和β相组织(如图7b所示)。高热输入导致熔池冷却速度缓慢,焊缝中心熔区的晶粒有充足的时间生长,β相在缓慢冷却过程中充分转变,出现一些魏氏组织特征(如图7c所示)。

热影响区的金相组织变化如图8所示,热影响区受到的热量较少,温度升高幅度相对较小,组织变化主要是在母材原有组织的基础上发生部分相变。靠近焊缝的热影响区形成了少量细小的α相变体,而远离焊缝的区域组织变化较小,基本保持母材的原始两相(α+β)组织特征。由于热输入小,热影响区的宽度较窄,晶粒长大现象不明显(如图8a所示),随着热输入的增加,在靠近焊缝的区域,晶粒有一定程度的长大,并且α相的含量和形态发生了变化。形成一些粗化的α相变体,但整体组织仍然保持一定的均匀性(如图8b所示)。随着大量的热量输入,温度升高幅度大且持续时间长,靠近焊缝的热影响区完全转变为粗大的α相组织(如图8c所示)。

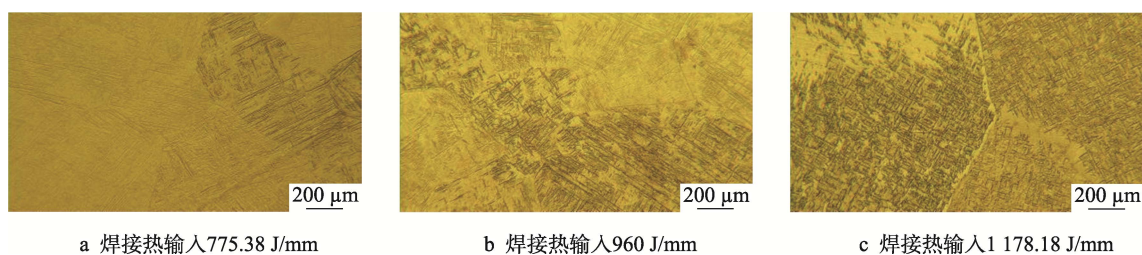


图7 打底层焊缝熔合区金相组织

Fig.7 Metallographic structure of fusion zone of root layer weld: a) welding heat input of 775.38 J/mm; b) welding heat input of 960 J/mm; c) welding heat input of 1 178.18 J/mm

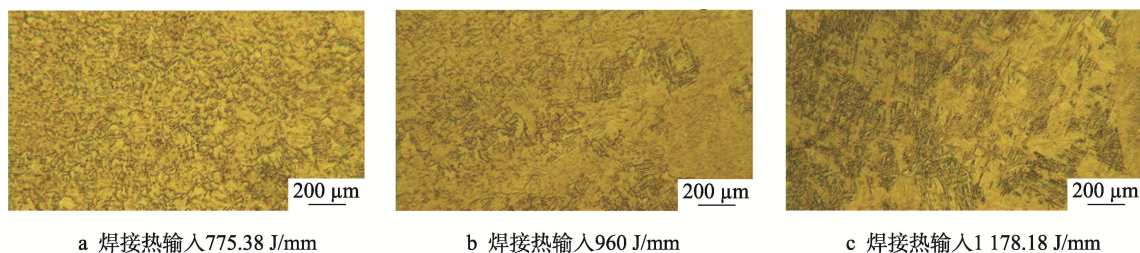


图 8 打底层焊缝热影响区金相组织

Fig.8 Metallographic structure of heat-affected zone of root layer weld: a) welding heat input of 775.38 J/mm; b) welding heat input of 960 J/mm; c) welding heat input of 1 178.18 J/mm

### 2.1.3 打底层焊接热输入对拉伸强度和熔深的影响

如图 9a 所示,随着热输入从 775.38 J/mm 开始增加,拉伸强度呈现上升趋势,原因可能是适度增多的热量输入改善了熔池的流动性,有助于减少一些微小的焊接缺陷,如微气孔等。当拉伸强度达到峰值 910 MPa 左右时,焊接热输入为 886 J/mm,此时打底层的金相组织达到相对理想状态。熔池的冷却速度和合金元素的扩散达到一种平衡。然而,随着热输入继续增加,拉伸强度开始下降,原因是,打底层受到的热量过多,过高的热输入会使打底层的晶粒显著粗化(如图 8c 所示)。晶粒在高温下长时间停留而不断生长。粗大的晶粒降低了晶界的面积,减少了晶界对位错运动的阻碍作用。当热输入超过 997 J/mm 进一步增加时,拉伸强度出现小幅回升和再次下降的现象,与打底层内部发生的复杂物理化学过程有关。在高热输入下,可能促使一些亚稳相的转变或新相的生成。某些新形成的相可能在短期内对强度有一定的提升作用。拉伸强度再次降低的原因可能是打底层的整体结构受到更严重的破坏,如出现更多的裂纹源或缺陷聚集。从控制热输入大小和获得较高的拉伸强度 2 个方面综合来看,热输入应控制在 890 J/mm 左右。如图 9b 所示,随着热输入的增加,打底层焊缝熔深呈现上升趋势,掌握好焊接热输入的值,对打底层焊缝成形质量很重要。

## 2.2 填充层试验

### 2.2.1 填充层正交试验

填充层焊接电压在 13 V 左右,结合正交试验表中的焊接工艺参数按照式(1)计算了每个试验号的热输入如表 10 所示,填充层正交试验后分析的结果有外观形貌、焊缝的横截面积、拉伸强度值以及断裂位置,如表 11 所示。

如表 12 所示,钨极摆动速度的  $R$  值最小,说明钨极摆动速度对填充层焊缝横截面积的影响程度最小,钨极摆动速度并非填充层截面积的主控变量,其核心工艺功效在于调控熔池横向铺展行为,以保证单道焊缝熔宽在全长度范围内的均匀性,避免因坡口宽度变化或装配误差导致的侧壁未熔合或咬边。焊接电流、焊接速度、送丝速度 3 个焊接工艺参数对填充层焊缝横截面积的影响程度相差不大。如图 10a 所示, $k$  值随着焊接电流和送丝速度以及钨极摆动速度的增大而增大,随着焊接速度的增加而减小。焊接电流、焊接速度、送丝速度通过热输入与填充量的协同作用,等效影响横截面积。

填充层焊缝拉伸强度的均值和方差如表 13 所示,极差分析如表 14 所示,钨极摆动速度  $R$  值最大,说明钨极摆动速度对填充层焊缝拉伸强度的影响程度最大,其次是送丝速度、焊接速度,最小的是焊接电流。如图 10b 所示, $k$  值随着焊接电流和送丝速度的增

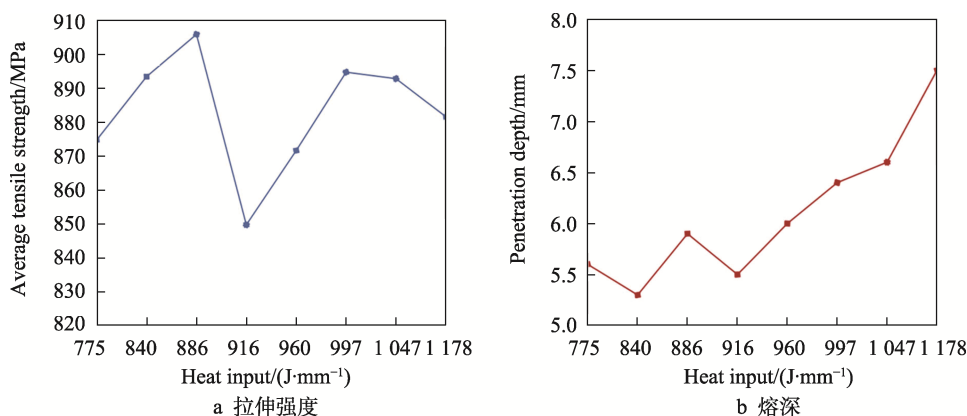


图 9 打底层焊接质量因素与热输入关系曲线

Fig.9 Curve of relationship between root layer welding quality factors and heat input: a) tensile strength; b) penetration depth

表 10 填充层焊接正交试验因素水平及热输入  
Tab.10 Orthogonal test factors and levels for filler layer welding and heat input

| NO. | Welding current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode oscillation<br>speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Heat input/<br>(J·mm <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1   | 160               | 120                                       | 1                                          | 50                                                            | 1 040                                |
| 2   | 160               | 130                                       | 1.3                                        | 55                                                            | 960                                  |
| 3   | 160               | 140                                       | 1.5                                        | 60                                                            | 891.43                               |
| 4   | 180               | 120                                       | 1.3                                        | 60                                                            | 1 170                                |
| 5   | 180               | 130                                       | 1.5                                        | 50                                                            | 1 080                                |
| 6   | 180               | 140                                       | 1                                          | 55                                                            | 1 002.86                             |
| 7   | 200               | 120                                       | 1.5                                        | 55                                                            | 1 300                                |
| 8   | 200               | 130                                       | 1                                          | 60                                                            | 1 200                                |
| 9   | 200               | 140                                       | 1.3                                        | 50                                                            | 1 114.29                             |

表 11 填充层正交试验结果  
Tab.11 Orthogonal test results of filler layer

| NO. | Appearance | Cross-sectional area<br>of the weld/mm <sup>2</sup> | Tensile strength<br>Test1/MPa | Tensile strength<br>Test2/MPa | Fracture location |
|-----|------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1   | Good       | 195.62                                              | 903.4                         | 880.6                         | Weld seam         |
| 2   | Good       | 193.86                                              | 869.8                         | 840.2                         | Weld seam         |
| 3   | Stoma      |                                                     |                               |                               |                   |
| 4   | Good       | 234.54                                              | 872.4                         | 885                           | Weld seam         |
| 5   | Good       | 223.82                                              | 900                           | 917                           | Base material     |
| 6   | Good       | 184.98                                              | 806.8                         | 876                           | Weld seam         |
| 7   | Good       | 253.52                                              | 867.8                         | 891                           | Weld seam         |
| 8   | Good       | 230.14                                              | 872.6                         | 872.8                         | weld seam         |
| 9   | Good       | 203.54                                              | 886.2                         | 898.2                         | Weld seam         |

表 12 填充层焊缝横截面积极差结果  
Tab.12 Cross-sectional area range of filler layer weld

| Factor         | Welding<br>current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten elec-<br>trode oscillation<br>speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Factor         | Welding<br>current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten elec-<br>trode oscillation<br>speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|----------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| K <sub>1</sub> | 588.42               | 683.68                                    | 610.74                                        | 662.98                                                             | k <sub>2</sub> | 214.45               | 215.94                                    | 210.65                                        | 210.79                                                             |
| K <sub>2</sub> | 643.34               | 647.82                                    | 631.94                                        | 632.36                                                             | k <sub>3</sub> | 229.07               | 194.26                                    | 238.67                                        | 232.34                                                             |
| K <sub>3</sub> | 687.2                | 582.78                                    | 716.01                                        | 697.02                                                             | R              | 34.33                | 33.63                                     | 34.89                                         | 24.68                                                              |
| k <sub>1</sub> | 194.74               | 227.89                                    | 203.78                                        | 207.66                                                             |                |                      |                                           |                                               |                                                                    |

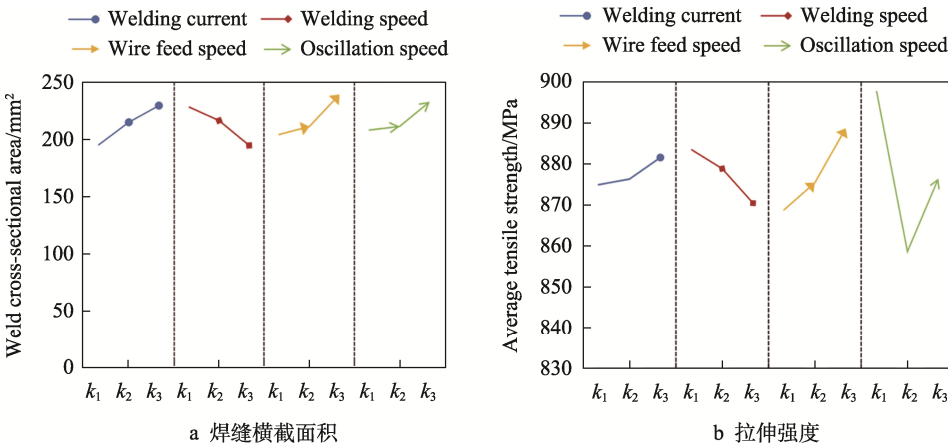


图 10 填充层不同水平试验参数下  $k$  变化曲线  
Fig.10 Variation curve of  $k$  under different horizontal test parameters for filler layer:  
a) weld cross-sectional area; b) tensile strength

表 13 填充层焊缝拉伸强度均值和标准差  
Tab.13 Mean & SD of tensile strength of fill layer weld

| No. | Tensile strength<br>test1/MPa | Tensile strength<br>test2/MPa | Mean   | Standard<br>deviation | No. | Tensile strength<br>test1/MPa | Tensile strength<br>test2/MPa | Mean  | Standard<br>deviation |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|--------|-----------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------|
| 1   | 903.4                         | 880.6                         | 892    | 16.12                 | 6   | 806.8                         | 876                           | 841.4 | 48.93                 |
| 2   | 869.8                         | 840.2                         | 855    | 20.93                 | 7   | 867.8                         | 891                           | 879.4 | 16.4                  |
| 3   |                               |                               | 877.49 | 16.49                 | 8   | 872.6                         | 872.8                         | 872.7 | 0.14                  |
| 4   | 872.4                         | 885                           | 878.7  | 8.91                  | 9   | 886.2                         | 898.2                         | 892.2 | 8.49                  |
| 5   | 900                           | 917                           | 908.5  | 12.02                 |     |                               |                               |       |                       |

表 14 填充层焊缝拉伸强度极差结果  
Tab.14 Tensile strength range of filler layer weld

| Factor                | Welding<br>current/A | Welding<br>speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode<br>oscillation speed/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | Factor                | Welding<br>current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten elec-<br>trode oscillation<br>speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <i>K</i> <sub>1</sub> | 2 624.49             | 2 650.11                                     | 2 606.1                                       | 2 692.71                                                          | <i>k</i> <sub>2</sub> | 876.2                | 878.73                                    | 875.3                                         | 858.6                                                              |
| <i>K</i> <sub>2</sub> | 2 628.9              | 2 636.19                                     | 2 625.9                                       | 2 575.8                                                           | <i>k</i> <sub>3</sub> | 881.43               | 870.36                                    | 888.46                                        | 876.3                                                              |
| <i>K</i> <sub>3</sub> | 2 644.29             | 2 611.08                                     | 2 665.38                                      | 2 628.9                                                           | <i>R</i>              | 6.6                  | 13.01                                     | 19.76                                         | 38.97                                                              |
| <i>k</i> <sub>1</sub> | 874.83               | 883.37                                       | 868.7                                         | 897.57                                                            |                       |                      |                                           |                                               |                                                                    |

大而增大,随着焊接速度的增大而减小,当钨极摆动速度增大时, *k* 值先增大后减小。当焊接电流为 200 A、焊接速度为 120 mm/min、送丝速度为 1.5 m/min、钨极摆动速度为 55 mm/s 时, *k* 最大。以获取最大焊缝拉伸强度为目标,优化后的填充层焊接工艺参数为,电流 200 A、焊接速度 120 mm/min、送丝速度 1.5 m/min、钨极摆动速度 55 mm/s,为 7 号实验组的参数,此时焊接热输入为 1 300 J/mm。填充层焊缝拉伸强度的方差计算值如表 14 所示,焊接电流和焊接速度的 *P* 值大于 0.05,表示焊接电流和焊接速度对填充层焊缝拉伸强度的影响不显著。送丝速度的 *P* 值小于 0.05,表示送丝速度对填充层焊缝拉伸强度的影响显著。钨极摆动速度的 *P* 值小于 0.01,表示钨极摆动速度能够显

著影响填充层拉伸强度值。

2.2.2 填充层焊接热输入对金相组织的影响

选取填充层热输入较小值 960 J/mm 的 2 号焊接试样、热输入居于中间值 1 080 J/mm 的 5 号焊接试样和最大值 1 300 J/mm 的 7 号焊接试样,探究填充层焊接热输入对金相组织的影响,取焊接试样的熔合区和热影响区为研究对象观察它们的金相组织。

熔合区的金相组织变化如图 11 所示,与打底层相比,打底层受母材激冷作用更强,组织更细小致密,填充层针状马氏体的尺寸相对打底层略大一些(如图 11a 所示)。这是因为填充层受到母材的激冷作用相对较弱,冷却速度稍慢。随着热输入增加,与打底层在

表 15 填充层焊缝拉伸强度方差结果  
Tab.15 Tensile strength variance of filler layer weld

| Factor                               | Sum of squares | Degrees of freedom | Mean square | <i>F</i> value | <i>P</i> value | Significance       |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|----------------|----------------|--------------------|
| Welding current                      | 146.7          | 2                  | 73.35       | 0.81           | 0.474          | No significant     |
| Welding speed                        | 514.7          | 2                  | 257.35      | 2.85           | 0.110          | No significant     |
| Wire feed speed                      | 1 255.5        | 2                  | 627.75      | 6.95           | 0.015          | Significant        |
| Tungsten electrode oscillation speed | 1 915.2        | 2                  | 2346.15     | 25.98          | <0.001         | Highly significant |

表 16 填充层焊缝拉伸强度极差结果  
Tab.16 Tensile strength range of filler layer weld

| Factor                | Welding<br>current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten electrode<br>oscillation speed/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | Factor                | Welding<br>current/A | Welding speed/<br>(mm·min <sup>-1</sup> ) | Wire feed<br>speed/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) | Tungsten elec-<br>trode oscillation<br>speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <i>K</i> <sub>1</sub> | 2 620.5              | 2 658.5                                   | 2 645                                         | 2 667.6                                                           | <i>k</i> <sub>2</sub> | 883.2                | 872.7                                     | 872.9                                         | 874.4                                                              |
| <i>K</i> <sub>2</sub> | 2 649.7              | 2 618.2                                   | 2 618.7                                       | 2 623.2                                                           | <i>k</i> <sub>3</sub> | 881.8                | 882.7                                     | 889.2                                         | 875.7                                                              |
| <i>K</i> <sub>3</sub> | 2 645.4              | 2 648.1                                   | 2 667.6                                       | 2 627                                                             | <i>R</i>              | 9.7                  | 13.5                                      | 16.3                                          | 14.8                                                               |
| <i>k</i> <sub>1</sub> | 873.5                | 886.2                                     | 881.7                                         | 889.2                                                             |                       |                      |                                           |                                               |                                                                    |

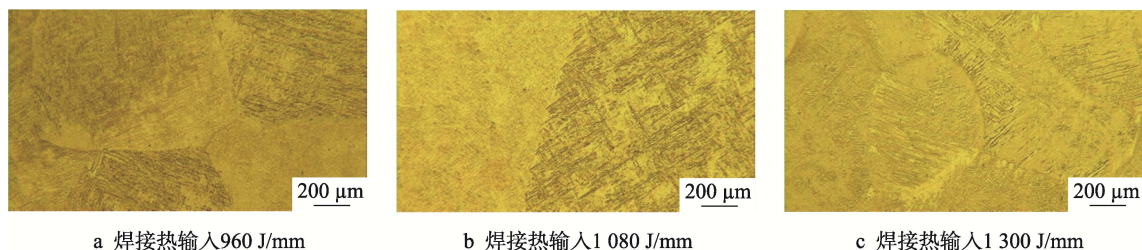


图 11 填充层焊缝熔合区金相组织

Fig.11 Metallographic structure of fusion zone of filler layer weld: a) welding heat input of 960 J/mm; b) welding heat input of 1 080 J/mm; c) welding heat input of 1 300 J/mm

该热输入下的组织相比,打底层组织因快速冷却保留更多马氏体特征,而填充层组织更倾向于形成平衡的两相混合组织。填充层的 $\alpha$ 相尺寸相对打底层在类似热输入下稍大,因为填充层散热条件与打底层不同,冷却速度相对较慢(如图11b所示)。高热输入使组织中出现粗大的魏氏体组织特征, $\alpha$ 相呈粗大的片状或羽毛状(如图11c所示)。与打底层在该热输入下相比,体积相对较大,散热相对较慢,组织粗化更严重。

热影响区的金相组织变化如图12所示,随着热输入的增加,打底层热影响区受母材约束,组织粗化和性能恶化程度相对较小,而填充层热影响区由于受

前方焊接层和当前热输入共同影响且无母材的强约束,组织粗化更为明显。

### 2.2.3 填充层焊接热输入对拉伸强度的影响

如图13所示,与打底层类似,当热输入从996 J/mm开始增加时,拉伸强度呈现上升趋势,此时,填充层焊接区域获得的热量有限,熔池冷却速度较快,焊缝金属在凝固过程中形成细小的金相组织(如图11a所示)。同时,较低的热输入有助于减少合金元素的烧损和偏析。TC4钛合金中的铝(Al)和钒(V)等合金元素在相对较低的温度和较短时间内扩散不充分,能够在焊缝中保持较为均匀的分布,有利于提高焊缝的强度性能。随着热输入增加到1040 J/mm,拉伸强度达到峰值,填充层焊缝的微观结构达到相对最优状态(如图11a所示)。此时,熔池的冷却速度和合金元素的扩散达到一种平衡。焊缝中形成了合适的 $\alpha+\beta$ 两相组织比例和形态, $\alpha$ 相和 $\beta$ 相的协同作用使材料能够承受更大的拉应力,在这个热输入范围内,焊接热循环对填充层周围组织的热影响也处于相对合理的程度,没有导致明显的组织恶化和性能下降(如图12b所示)。当热输入继续增加,拉伸强度开始下降。这是因为过高的热输入使焊缝晶粒有充足的时间生长,形成粗大的晶粒结构,从而降低了材料的拉伸强度(如图11c所示)。此外,高热输入还可能导致填充层焊缝中的合金元素烧损或偏析加剧。例如,钛合

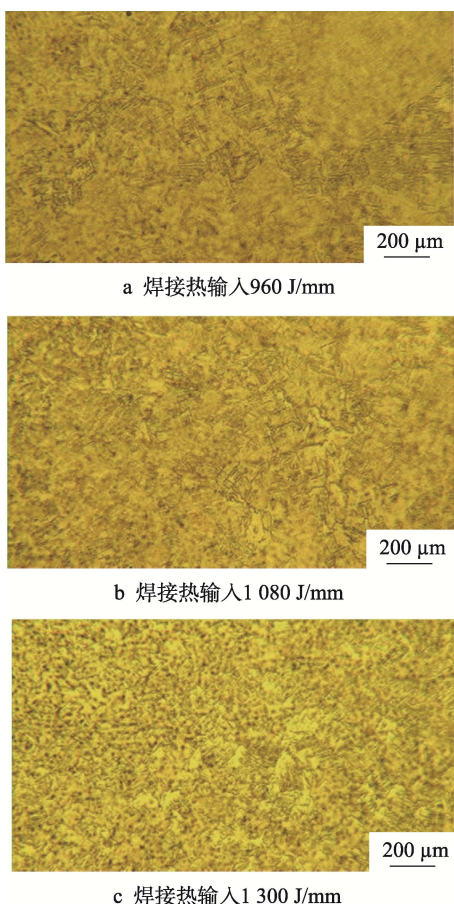


图 12 填充层焊缝热影响区金相组织

Fig.12 Metallographic structure of heat-affected zone of filler layer weld: a) welding heat input of 960 J/mm; b) welding heat input of 1 080 J/mm; c) welding heat input of 1 300 J/mm

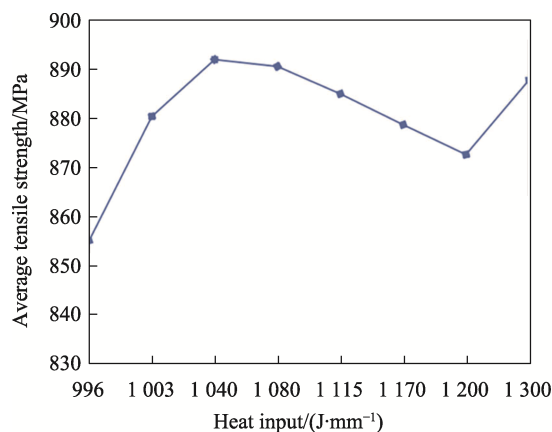


图 13 填充层焊缝拉伸强度与热输入关系曲线  
Fig.13 Curve of relationship between average tensile strength of filler layer weld and heat input

金中的一些易挥发元素可能在高温下损失, 或者合金元素在凝固过程中由于缓慢冷却而发生严重的偏析, 破坏了材料的组织均匀性, 进一步降低了拉伸强度。为了获得具有较高拉伸强度的焊缝, 热输入应控制在 1 040 J/mm 左右。

### 3 结论

1) 采用分层正交试验方法优化 20 mm 厚 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接工艺, 明确了各焊接层的主导影响因素及其调控机制。打底层焊缝横截面积主要受送丝速度控制 ( $R=89.82$ ), 拉伸强度显著受焊接速度 ( $R=25.9$ ,  $P=0.031$ ) 与钨极摆动速度 ( $P=0.028$ ) 影响; 填充层拉伸强度则主要取决于钨极摆动速度 ( $R=38.97$ ,  $P<0.001$ ) 和送丝速度 ( $P=0.015$ ), 焊接电流与速度影响不显著。

2) 获得打底层与填充层的最优工艺参数组合如下: 打底层为焊接电流 180 A、焊接速度 120 mm/min、送丝速度 0.8 m/min、摆速 60 mm/s (热输入 1 080 J/mm); 填充层为焊接电流 200 A、焊接速度 120 mm/min、送丝速度 1.5 m/min、摆速 55 mm/s (热输入 1 300 J/mm)。为保证试验变量的一致性, 避免盖面层工艺差异对打底层与填充层正交试验结果造成干扰, 所有焊接试样的盖面层均采用统一焊接参数 (热输入 890 J/mm) 完成焊接。

3) 热输入对组织演变起决定性作用。随热输入增加 (775 J/mm $\rightarrow$ 1 178 J/mm), 打底层焊缝组织由细针状马氏体向  $\alpha+\beta$  混合组织再向粗化魏氏组织演变, 热影响区晶粒逐渐粗化; 填充层组织演变规律相似, 但因散热条件差异, 晶粒粗化程度更为明显。

4) 拉伸强度与热输入呈先升后降的非线性关系。打底层在 890 J/mm 附近达峰值强度 910 MPa, 填充层在 1 040 J/mm 附近达峰值强度 908 MPa, 分别较非优化参数试样 (断裂位置位于焊缝) 的平均值提高 4.6% 和 3.4%。热输入过低易导致熔合不良, 过高则引起组织粗化与性能劣化, 将热输入控制在适宜范围 (打底层 890 J/mm 左右、填充层 1 040 J/mm 左右) 是获得优质接头的关键。

分层优化策略有效解决了打底层成形不稳定及填充层未熔合、气孔等缺陷问题, 获得的焊接接头组织均匀、力学性能优良, 验证了分层正交试验方法在厚板多层焊工艺优化中的可行性与有效性。

### 参考文献:

[1] 徐全斌, 刘诗园. 国外航空航天领域钛及钛合金牌号及应用[J]. 世界有色金属, 2022(16): 96-99.  
XU Q B, LIU S Y. Grades of Titanium and Titanium Alloys Developed in Western Countries and Their Applications in the Aerospace Industry[J]. World Nonfer-

rous Metals, 2022(16): 96-99.  
[2] 矫显明, 谷洪新. 船舶焊接技术及焊接材料的选择[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(1): 53-54.  
JIAO X M, GU H X. Ship Welding Technology and Selection of Welding Materials[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2021, 29(1): 53-54.  
[3] MARIN E, LANZUTTI A. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review[J]. Materials, 2023, 17(1): 114.  
[4] LIU C C, LI Y H Z, GU J, et al. Phase Transformation in Titanium Alloys: A Review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(10): 3093-3117.  
[5] ZHANG H J, SHEN M Y, TIAN X Q, et al. Investigating the Influence Mechanism of Different Shielding Gas Types on Arc Characteristics and Weld Quality in TA2 Laser-Arc Hybrid Welding[J]. Metals, 2024, 14(8): 946.  
[6] LI D C, ZHU H H, QU S G, et al. Effect of Heating on Hot Deformation and Microstructural Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Materials, 2023, 16(2): 810.  
[7] OU P, CAO Z Q, HAI M N, et al. Microstructure and Mechanical Properties of K-TIG Welded Dissimilar Joints between TC4 and TA17 Titanium Alloys[J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112644.  
[8] 杨旭光, 廖志谦, 刘希林, 等. 大厚度钛合金焊接技术的现状与发展[J]. 焊接技术, 2024, 53(2): 5-11.  
YANG X G, LIAO Z Q, LIU X L, et al. Current Status and Development of Welding Technology of Large Thickness Titanium Alloy[J]. Welding Technology, 2024, 53(2): 5-11.  
[9] 滕彬, 范成磊, 徐锴, 等. 厚板窄间隙焊接技术研究现状与应用进展[J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 116-128.  
TENG B, FAN C L, XU K, et al. Research Status and Application Progress of Narrow Gap Welding Technology for Thick Plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 116-128.  
[10] LI F X, SUN Q J, JIN P, et al. Wetting Behavior of Melt and Its Effect on Lack of Fusion in Arc Oscillating NG-GTAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117176.  
[11] XIAO N, KONG H Y, SUN Q J, et al. Study of Process, Microstructure, and Properties of Double-Wire Narrow-Gap Gas Metal Arc Welding Low-Alloy Steel[J]. Materials, 2024, 17(24): 6183.  
[12] ALI B, HEIDER Y, MARKERT B. Residual Stresses in Gas Tungsten Arc Welding: A Novel Phase-Field Thermo-Elastoplasticity Modeling and Parameter Treatment Framework[J]. Computational Mechanics, 2022, 69(2): 565-587.  
[13] 杨清福, 曾才有, 张宇鹏, 等. 大厚度 TC4 钛合金窄间隙焊接接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 8-15.  
YANG Q F, ZENG C Y, ZHANG Y P, et al. Effect of Large-Thickness TC4 Titanium Alloy Narrow Gap Weld Structure on Mechanical Properties of Joints[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 8-15.  
[14] SONG G, XU Z J, LANG Q, et al. A Laser-Induced TIG Arc Narrow-Gap Welding Technique for TC4 Titanium

- Alloy Thick Plates Based on the Spatial Position Control of Laser, Arc and Filler Wire[J]. *Metals*, 2024, 14(5): 510.
- [15] LONG J, ZHANG L J, ZHUANG M X, et al. Narrow-Gap Laser Welding with Beam Wobbling and Filler Wire and Microstructural Performance of Joints of Thick TC4 Titanium Alloy Plates[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108089.
- [16] 任泽良, 王刚, 李娟, 等. TA5 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头组织和性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(21): 158-161.
- REN Z L, WANG G, LI J, et al. Study on Microstructure and Properties of Narrow Gap TIG Welded Joints in TA5 Titanium Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(21): 158-161.
- [17] CHEN Y, LIU X, ZHANG Z D, et al. An Investigation into the Microstructures and Mechanical Properties of a TIG Welding Joint in Ti-4Al-2V Titanium Alloy[J]. *Metals*, 2024, 14(5): 596.
- [18] 陈立佳, 宁浩楠, 张志鹏, 等. TC4 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头的高周疲劳性能[J]. *沈阳工业大学学报*, 2023, 45(4): 397-402.
- CHEN L J, NING H N, ZHANG Z P, et al. High Cycle Fatigue Properties of Narrow Gap TIG Welded Joint of Thick TC4 Titanium Alloy Plate[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2023, 45(4): 397-402.
- [19] FENG X D, XU Y W, SHI Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Thickness TC4 Titanium Alloy Narrow Gap Welded Joint[J]. *Materials Letters*, 2024, 374: 137150.
- [20] 贡一峰, 李敬勇, 林靖宇, 等. 基于正交试验的 TC4 钛合金激光焊工艺优化研究[J]. *精密成形工程*, 2024, 16(5): 11-20.
- GONG Y F, LI J Y, LIN J Y, et al. Optimization of TC4 Titanium Alloy Laser Welding Process Based on Orthogonal Experiment[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2024, 16(5): 11-20.
- [21] 玄明昊, 邢本东, 苏亚东, 等. 基于正交试验的 TC4 钛合金激光成形连接工艺参数优化[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(8): 64-69.
- XUAN M H, XING B D, SU Y D, et al. Optimization of Process Parameters for Ti-6Al-4V Titanium Alloy Laser Beam Welding Based on Orthogonal Experiment[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(8): 64-69.
- [22] 熊然, 韩冬, 胡春海, 等. 基于正交试验的 2219 铝合金电子束焊接工艺参数优化[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(9): 217-219.
- XIONG R, HAN D, HU C H, et al. Optimization of Process Parameters for 2219 Alloy Electron Beam Welding Based on Orthogonal Experiment[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(9): 217-219.
- [23] 李星帅, 张清华, 赵永庆, 等. 基于正交试验的不锈钢局部干法水下激光焊接工艺优化[J]. *焊接学报*, 2025, 46(5): 42-49.
- LI X S, ZHANG Q H, ZHAO Y Q, et al. Optimization of Local Dry Underwater Laser Welding Process for Stainless Steel Based on Orthogonal Experiment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2025, 46(5): 42-49.
- [24] QI H, PANG Q H, LI W J, et al. Effect of High Welding Heat Input on the Microstructure and Low-Temperature Toughness of Heat Affected Zone in Magnesium-Treated EH36 Steel[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 19459.
- [25] LI C M, HUANG L, ZHAO M J, et al. Influence of Hot Deformation on Dynamic Recrystallization Behavior of 300M Steel: Rules and Modeling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 797: 139925.
- [26] HU Y N, WU S C, GUO Y, et al. Inhibiting Weld Cracking in High-Strength Aluminium Alloys[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5816.
- [27] 李昌范, 郝永魁, 古典, 等. 单、双道焊缝熔合区的一次补焊对 Q345E 钢的焊接接头性能的影响[J]. *电焊机*, 2020, 50(10): 50-56.
- LI C F, HAO Y K, GU D, et al. Influence of One-Time Repair Welding of Single-Pass and Double-Pass Weld Fusion Zone on Properties of Welded Joints of Q345E Steel[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(10): 50-56.
- [28] 魏晓鹏, 李芳, 杨旭, 等. 厚板多层多道机器人焊接分层规划方法[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(5): 31-35.
- WEI X P, LI F, YANG X, et al. Layered Planning Method for Robotic Multi-Pass Welding of Thick Plates[J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(5): 31-35.