

轻合金成形

铝合金 T 型接头激光+GMAW 复合焊 残余应力数值分析

朱征宇, 刘辉, 王加友, 刘文, 胥国祥*, 钱红伟

(江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室, 江苏 镇江 212100)

摘要: **目的** 研究激光+GMAW 复合焊中不同激光功率参数对铝合金 T 型接头残余应力的影响, 从而提高焊接性能。**方法** 分别考虑了热弹塑性理论、传热学以及 T 型接头几何特性, 建立了铝合金 T 型接头激光+电弧复合焊残余应力的数值分析模型。采用双椭球体热源模型表征电弧热输入与熔滴熔, 采用锥体热源模型对激光深熔焊进行描述。基于所建立的 T 型接头模型, 使用 ANSYS 有限元软件对 12 mm 厚铝合金激光+GMAW 焊 T 型接头残余应力进行模拟计算, 并研究其分布特征; 使用 X 射线衍射法对 T 型接头处的残余应力进行测量从而对所建模型的准确性进行验证。同时, 对比了不同激光功率下铝合金 T 型接头对残余应力的影响规律。**结果** 当激光功率分别为 2、3、4、5 kW 时, 铝合金 T 型接头路径 L3 上的纵向残余应力最大值分别为 270、263、258、251 MPa, 米塞斯-等效应力最大值分别为 265、261、257、250 MPa。**结论** 后焊的焊缝 A 对焊缝 B 有明显的热处理作用, 使应力明显降低; 在 T 型接头焊缝及近缝区, 横向残余应力和厚度方向残余应力峰值均比纵向残余应力峰值小, 且随着激光功率的增大, 焊缝及近缝区拉应力峰值不断减小。

关键词: 数值模拟; T 型接头; 残余应力; 铝合金; 复合焊

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.04.013

中图分类号: TG404 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)04-0101-10

Numerical Analysis of Residual Stress in Laser+GMAW Hybrid Welding of Aluminum Alloy for T-joint

ZHU Zhengyu, LIU Hui, WANG Jiayou, LIU Wen, XU Guoxiang*, QIAN Hongwei

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science
and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of different laser power parameters in Laser+GMAW hybrid welding on the residual stress in aluminum alloy T-joint, so as to improve the welding performance. A numerical analysis model for evaluating residual stress in T-joint of aluminum alloy subjected to Laser+GMAW hybrid welding by considering thermal-elastoplastic theory,

收稿日期: 2023-12-28

Received: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51975263, 52375340)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975263, 52375340)

引文格式: 朱征宇, 刘辉, 王加友, 等. 铝合金 T 型接头激光+GMAW 复合焊残余应力数值分析[J]. 精密成形工程, 2024, 16(4): 101-110.

ZHU Zhengyu, LIU Hui, WANG Jiayou, et al. Numerical Analysis of Residual Stress in Laser+GMAW Hybrid Welding of Aluminum Alloy for T-joint[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(4): 101-110.

*通信作者 (Corresponding author)

heat transfer and geometric characteristics of T-joint. The arc heat input and droplet enthalpy were characterized by a double ellipsoid heat source model, and the cone heat source model was used to describe laser deep fusion welding. Based on the T-joint model, the residual stress of 12 mm thick aluminum alloy welded by laser+GMAW was simulated with ANSYS finite element software, and its distribution characteristics were studied. The residual stress in the T-joint was measured with X-ray diffraction techniques to verify the accuracy of the model. At the same time, the effect law of aluminum alloy T-joint on the residual stress under different laser power process parameters was compared. When the laser power was 2, 3, 4 and 5 kW, the maximum longitudinal residual stress along path L3 of the T-joint of aluminum alloy was 270, 263, 258 and 251 MPa, respectively, and the maximum value of Von-Mises equivalent stress was 265, 261, 257 and 250 MPa respectively. The results show that the post-welded weld A has obvious heat treatment effect on the weld, and the stress is obviously reduced. The peak value of transverse residual stress and thickness residual stress is smaller than that of longitudinal residual stress in T-joint weld and near seam area, and the peak tensile stress of weld and near weld area decreases with the increase of laser power.

KEY WORDS: numerical simulation; T-joint; residual stress; aluminum alloy; hybrid welding

铝合金因具备优异的抗氧化性、耐腐蚀性和易加工性而广泛应用于汽车、造船和化工等行业的焊接结构中^[1-3]。相较于简单接头, T 型接头受空间限制更易出现焊接缺陷^[4-6], 其焊接质量较难控制。激光+GMAW 复合热源焊以热输入小、焊接速度快、焊接变形小和焊接过程稳定等优势, 成为减少铝合金焊接缺陷的有效方法, 特别是在复杂接头的应用中展现出巨大潜力^[7-8]。相较于其他材料, 铝合金的热膨胀系数大, 它在焊接过程中所产生的残余应力问题更为突出^[9-11]。因此, 针对激光+GMAW 复合焊接 T 型接头, 深入分析不同激光功率条件下焊缝及近缝区的残余应力分布特征, 不仅有助于理解复合热源焊接 T 型接头的工艺特点, 而且对优化 T 型接头复合焊工艺参数、提高焊缝成形质量具有重要的实际意义。

目前关于 T 型接头复合热源焊接工艺方面的研究较多, 如激光前后置、光丝间距、光丝夹角、激光功率参数、焊接速度等, 研究对象基本为简单的平板对接接头, 而对铝合金激光+GMAW 复合焊 T 型接头残余应力的分析较少。Sun 等^[12]采用间接耦合法建立了 NV E690 对接三维有限元模型, 分别单独采用锥体热源和圆柱高斯热源对温度场、应力场以及变形进行了计算, 但接头为对接形式, 且焊接热源为单一热源, 该研究为计算激光+GMAW 复合焊应力提供了一定的理论基础。Mazar 等^[13]通过改变焊接电流和焊接速度等焊接参数, 观察了激光电弧复合焊 T 接头几何形状的变化。Zhang 等^[14]对 9 mm 厚钢板进行了 Laser+GMAW-P 复合焊, 并模拟计算了钢板焊缝处的残余应力。由于材料几何尺寸、焊接工艺参数、接头结构及材料物理性能有所差异, 上述研究结论对本文不同激光功率下 12 mm 厚铝合金 T 型接头残余应力分布特征以及焊接过程中残余应力变化情况无法适用。

本文综合考虑了 T 型接头的几何特征和激光+GMAW 复合焊工艺特点, 构建了适用于激光+GMAW 复合焊铝合金 T 型接头焊缝及近缝区残余应力计算的数值分析模型, 并对 T 型接头各向残余应力和等效

应力进行了分析, 探讨了不同焊接工艺参数下对其的影响, 以期优化工艺参数、减小焊接残余应力和提高焊接接头成形质量提供参考。

1 试验

搭建激光+GMAW 复合焊试验平台进行铝合金 T 型接头试验, 激光器型号为 IPG YLS-6000, 母材为 6061 铝合金, 厚度为 12 mm, 焊丝为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝, 离焦量为 0 mm, 焊接电流为 180 A, 焊接速度为 10 mm/s, 光丝间距为 3 mm, GMAW 焊枪与 T 型接头立板之间的夹角为 45°, 气体流量为 20 L/min, 焊丝伸出长度为 15 mm, 保护气体为纯 Ar。复合焊接系统和 XRD 衍射仪检测设备如图 1 所示, 复合焊热源模型及作用位置示意图如图 2 所示。在焊接过程中, 激光在前, 电弧在后, 按照先 B 焊缝再 A 焊缝的顺序焊接; 在保证其他参数不变的情况下, 依次改变激光功率参数, 如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数
Tab.1 Process parameters of welding

Case no.	Laser power/kW	Welding speed/(mm·s ⁻¹)	Welding current/A	Laser-arc distance/mm
D1	2	10	180	3
D2	3	10	180	3
D3	4	10	180	3
D4	5	10	180	3

2 有限元模型

2.1 温度场数值分析

2.1.1 复合热源模型

对于 T 型接头激光+GMAW 复合热源, 热量来源一般为电弧热输入、熔滴热哈和激光热输入。电弧热

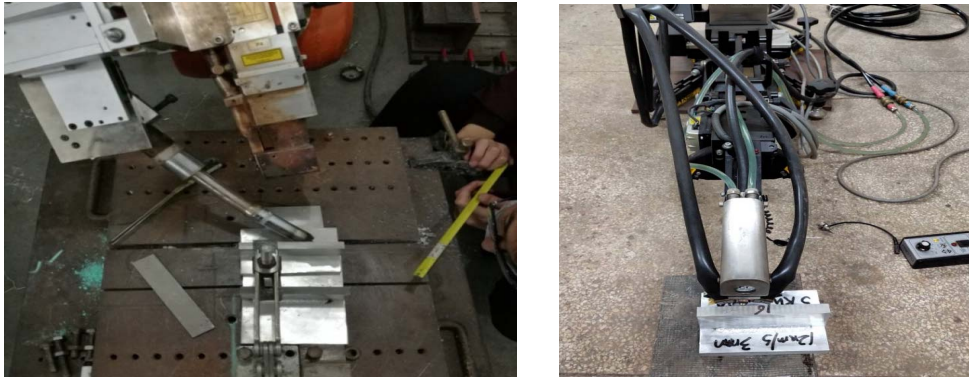


图 1 激光+GMAW 复合热源焊接平台与 XRD 衍射仪设备
Fig.1 Laser+GMAW hybrid welding platform and X-ray diffraction equipment

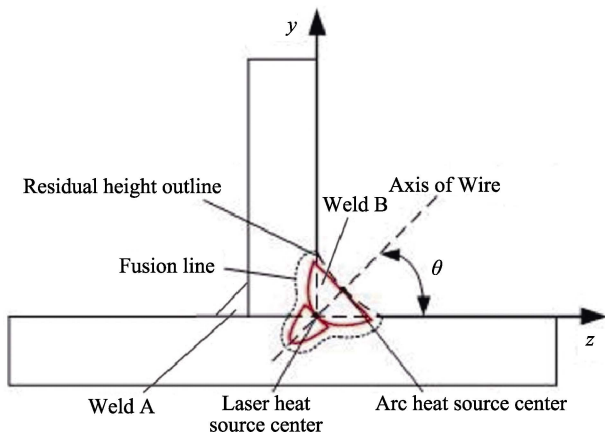


图 2 复合焊热源模型及作用位置示意图
Fig.2 Schematic for heat source model of hybrid welding and action zone

流分布模式具有体积热源特征, 为了提高计算效率, 将电弧热输入与熔滴热焓合并考虑^[15-17]。热源上半部分采用双椭球体热源, 如式 (1) 所示。

$$q_f(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}\eta IU}{(a_f + a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}\eta IU}{(a_f + a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad x \geq 0$$

式中: η 为热效率; I 为焊接电流; U 为电弧电压; q_f 、 q_r 分别为热源前、后半部分的热流密度分布函数; a_f 、 a_r 、 b_h 、 c_h 为双椭球体热源的分布参数。

在复合热源焊接 T 型接头过程中, 由于焊缝下半部分体积较小且散热快, 因此采用中心热流不变的双椭球热源作用模式很难计算得到理想的熔池轮廓。考虑到激光与电弧之间相互作用、小孔形貌、内部热量分布等因素, 采用峰值热流递增的热源, 有效地对深度方向上的热流功率进行补偿。因此, 根据激光+GMAW 复合热源焊接焊缝横截面几何形状特点, 建

立“双椭球体热源+热流峰值指数递增-锥体热源”的组合式体积热源模型。

热源下半部分采用热流峰值指数递增-锥体热源模型, 如式 (2) 所示。

$$q(r, z) = Q_0 \exp\left(\frac{\ln x}{z_i - z_e}(z - z_e)\right) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2(z)}\right)$$

$$Q_0 = \frac{3Q_1 \ln x}{\left\{r_e^2 - r_i^2 - 2\frac{r_i - r_e}{\ln x} \left[r_e - r_i x - \frac{r_i - r_e}{\ln x}(1 - x)\right]\right\}} \times (2)$$

$$\frac{1}{\pi(1 - e^{-3})(z_i - z_e)}$$

式中: $r_0(z)$ 为 z 坐标处热源半径; z_e 和 z_i 分别为热源上、下表面的 z 坐标; r_e 和 r_i 分别为热源上、下表面半径; Q_1 为激光有效热输入; x 为热源上下表面热流峰值比例系数; Q_0 为计算常数。

本文所建立的“双椭球体热源+热流峰值指数递增-锥体热源”组合式体积热源模型尺寸参数可以通过焊接工艺参数的经验公式确定, 然后将初步计算所得结果与实际焊接工艺参数下的焊缝形状和尺寸进行比较, 再对初始设定的参数进行调整, 使模拟的温度场与实际焊接过程热流分布一致, 最终确定模拟热源参数。其中激光热源上、下表面半径 r_e 和 r_i 以及双椭球体热源的分布参数 a_f 、 a_r 、 b_h 、 c_h 需要通过具体工艺确定, 本文激光热源深度设为 3 mm, 激光半径设为 1 mm。

2.1.2 三维热传导方程与表面边界条件

在计算激光+GMAW 复合热源焊温度场的过程中, 只考虑了固体热传导过程, 其三维热传导控制方程如式 (3) 所示。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q} \quad (3)$$

式中: T 为温度; ρ 为密度; c_p 为比热容; k_x 、 k_y 和 k_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的导热系数; $\bar{Q}$ 为内部热生成率。

对于 T 型接头表面换热方式, 考虑到对流换热、辐射散热和蒸发散热^[18-20], 设置边界条件如式 (4) 所示。

$$kT\nabla \cdot n_1 = \alpha_c(T - T_\infty) + L_b(T - T_\infty) \quad (4)$$

式中: k 为导热系数; T_∞ 为环境温度; ∇ 为拉普拉斯算子; n_1 为工件表面外法线单位向量; α_c 为对流和辐射综合散热系数; L_b 为蒸发潜热。

根据铝合金 T 型接头实际尺寸, 建立适用于 T 型接头的数值分析模型。相较于四面体网格划分, 非均匀化六面体网格划分具有网格数量少和求解效率高等优点, 更适用于本文模型网格。在温度梯度较大的熔池和热影响区采用较细密的网格, 而在温度梯度小的区域采用较稀疏的网格, 如图 3 所示。由于 ANSYS 软件自身的限制, 无法对实际的焊接过程进行描述, 因此填充金属对 T 型接头传热过程的影响是通过“生死”单元技术来反映的^[21-23]。

2.2 各向残余应力计算

为了提高计算效率, 本文采用间接耦合法^[24]实现残余应力的计算, 即先在热分析阶段根据材料的热物理性能和焊接工艺参数得到焊件在焊接过程中各部位的温度历史, 然后在结构分析阶段将之前获得的温度场数据作为热载荷数据来进行应力和变形模拟; 计算时忽略应力场对温度场的影响。为防止模型出现非物理刚体运动, 在其底部施加位移约束。在铝合金 T

型接头焊接过程中, T 型接头每处的应变应当考虑热应变、塑性应变、相变引起的应变以及弹性应变所引起的总应变, 在模拟计算过程中, 弹性应变和塑性应变的计算涉及材料的应力-应变曲线, 而热应变的计算则需要考虑热膨胀系数和温度场的分布^[25]。总应变增量的计算如式 (5) 所示。

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^E + \Delta \varepsilon^P + \Delta \varepsilon^T \quad (5)$$

式中: $\Delta \varepsilon^E$ 、 $\Delta \varepsilon^P$ 和 $\Delta \varepsilon^T$ 分别为弹性、塑性及热应变增量。

3 结果与讨论

基于所建网格模型, 利用 ANSYS 软件对 12 mm 厚铝合金激光+GMAW 复合焊 T 型接头残余应力进行计算。图 4 为铝合金的热物理及力学性能参数^[26]。

当激光功率为 5 kW 时, 12 mm 厚铝合金 T 型接头激光+GMAW 复合焊接下的焊缝横截面温度场计算结果与实验结果对比如图 5 所示。可以看出, 两者焊缝熔池形貌基本吻合, 证明了所建复合热源模型的准确性。

为了对 12 mm 厚铝合金激光+GMAW 复合焊 T 型接头在不同激光功率下的残余应力演变规律进行充分研究, 通过 X 射线衍射法测量工件表面纵向应力测量点位置、焊缝 A/B 所处焊件位置以及相关路径 (L1、L2、L3), 如图 6 所示, 不同激光功率下铝合

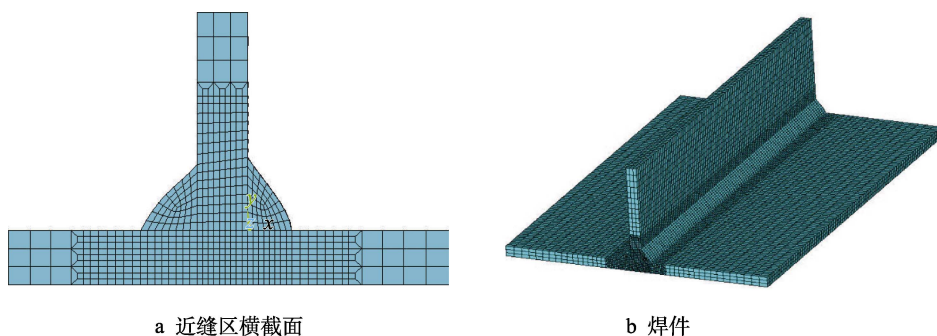


图 3 焊件网格布局示意图

Fig.3 Schematic of weldment meshing layout: a) cross section near the seam area; b) weldment

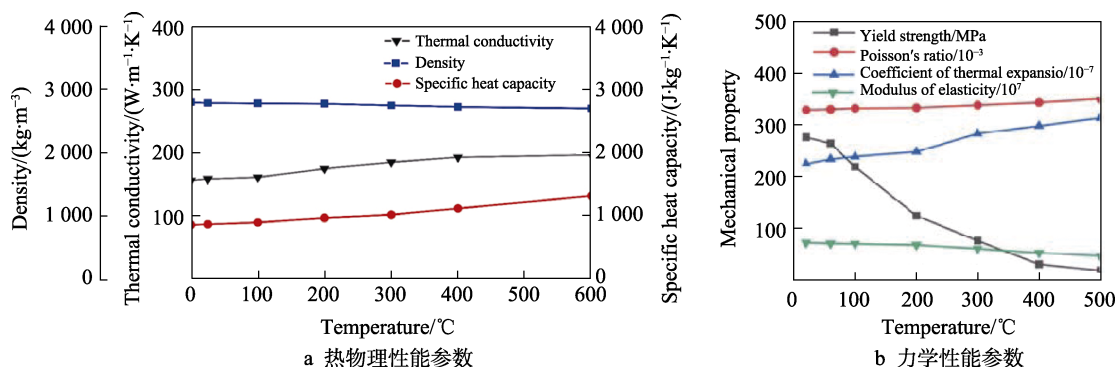


图 4 铝合金热物理及力学性能参数

Fig.4 Thermal physical and mechanical properties of aluminum alloys: a) thermal physical property parameters; b) mechanical property parameters

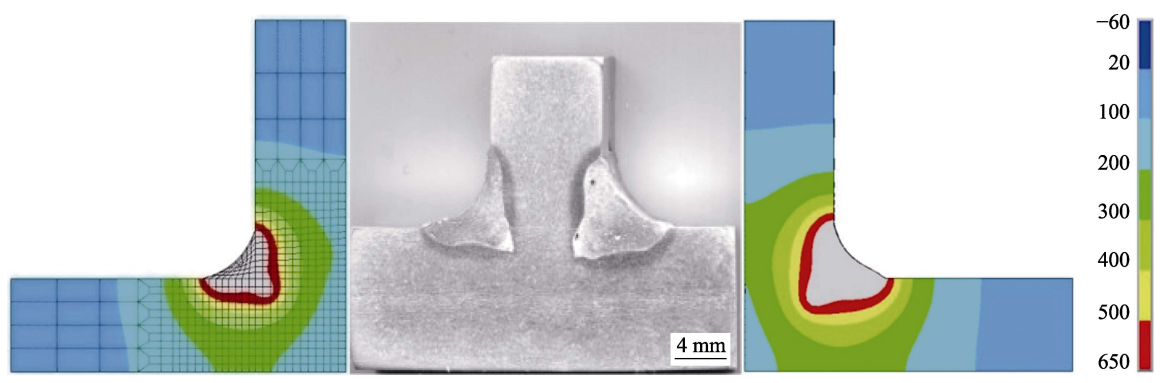


图 5 当激光功率为 5 kW 时 T 型接头剖面计算结果与实验结果对照图
Fig.5 Comparison of calculation and experimental results of T-joint section when the laser power is 5 kw

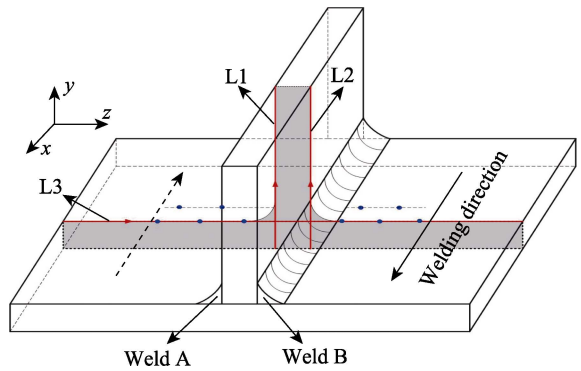


图 6 应变测定点及残余应力评估轨迹图
Fig.6 Schematic of strain measurement point and residual stress evaluation trace

金 T 型接头焊件在笛卡尔坐标系下各个方向上整体残余应力云图 and 不同路径下残余应力曲线对比图如

图 7~12 所示。
不同激光功率下铝合金 T 型接头横向残余应力的三维分布云图如图 7 所示。可知, 横向残余应力受激光功率的影响较小, 其分布趋势基本相似, 在焊缝及近缝区附近存在较小拉应力或者压应力, 在焊件其他位置存在较小的拉应力; 而在焊缝的起弧端和熄弧端压应力较大, 横向压应力峰值高达 293 MPa, 且距离焊缝越远, 横向残余应力越小; 随着激光功率的增大, 热影响区处的拉应力区域逐渐变窄, 但拉应力峰值逐渐增大。

不同激光功率下铝合金 T 型接头纵向残余应力的三维分布云图如图 8 所示。可知, 纵向残余应力在焊缝处的拉应力较大; T 型接头其他位置的纵向残余应力与横向残余应力分布相似, 应力相对较小。同时, 随着激光功率的增大即热输入增大, 焊缝及近缝区的

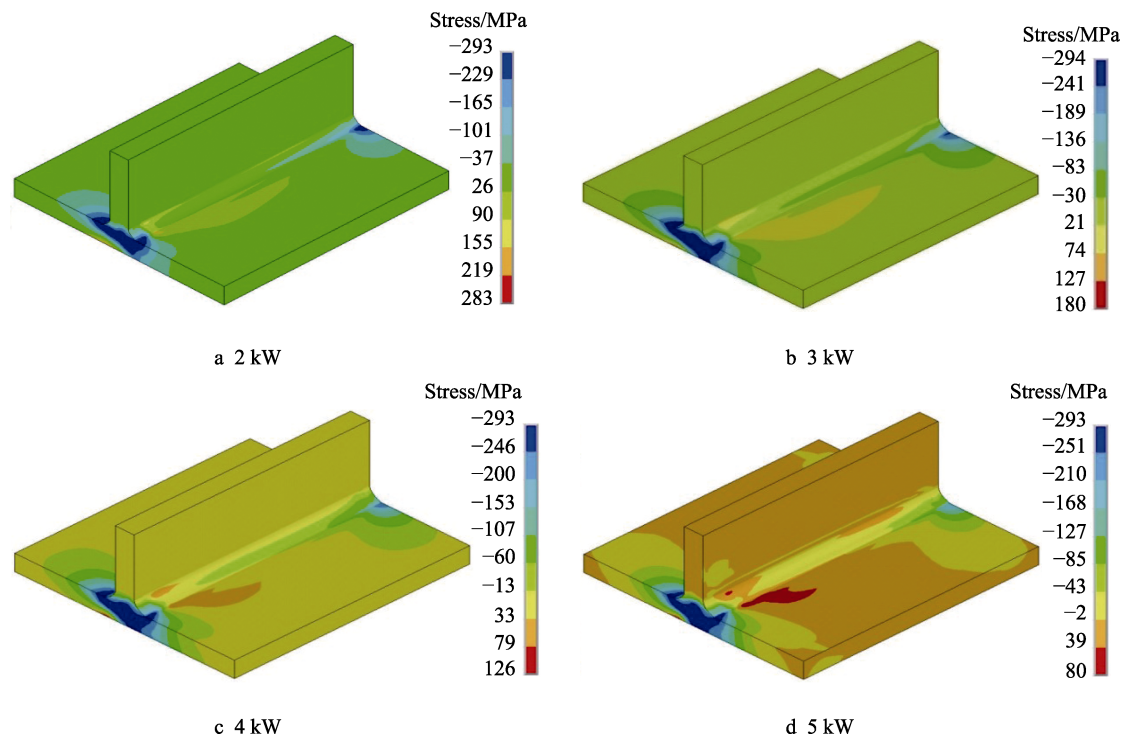


图 7 横向残余应力计算结果
Fig.7 Calculation results of transverse residual stress

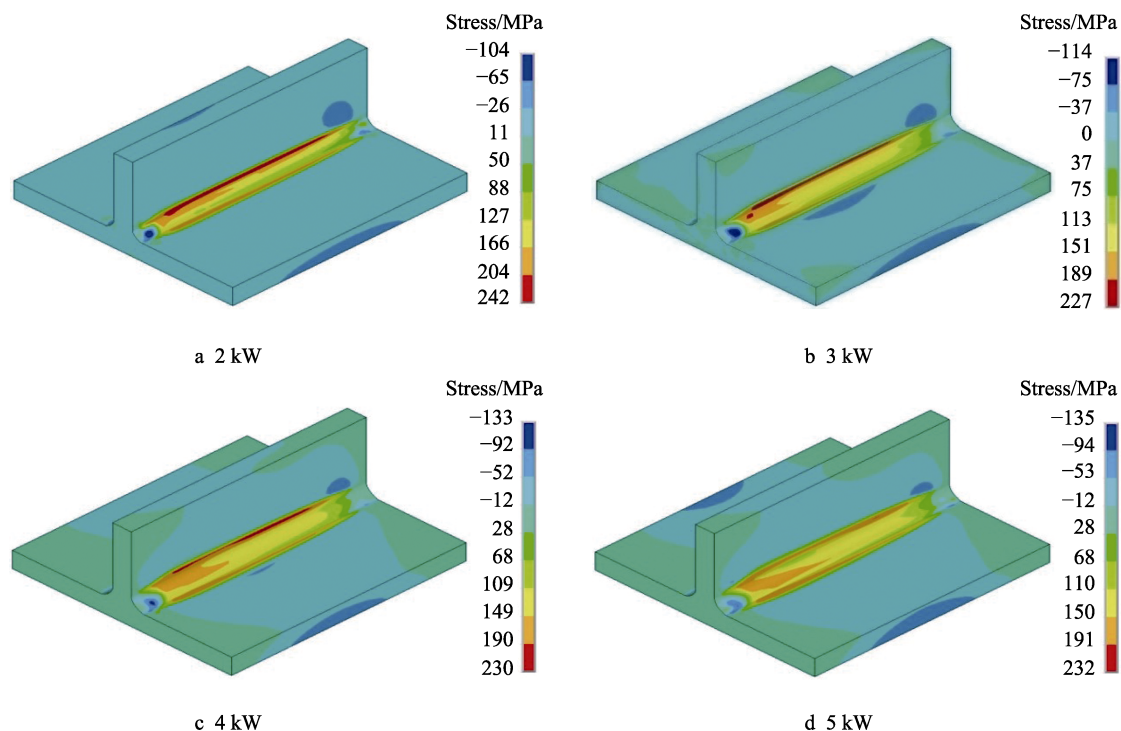


图 8 纵向残余应力计算结果
Fig.8 Calculation results of longitudinal residual stress

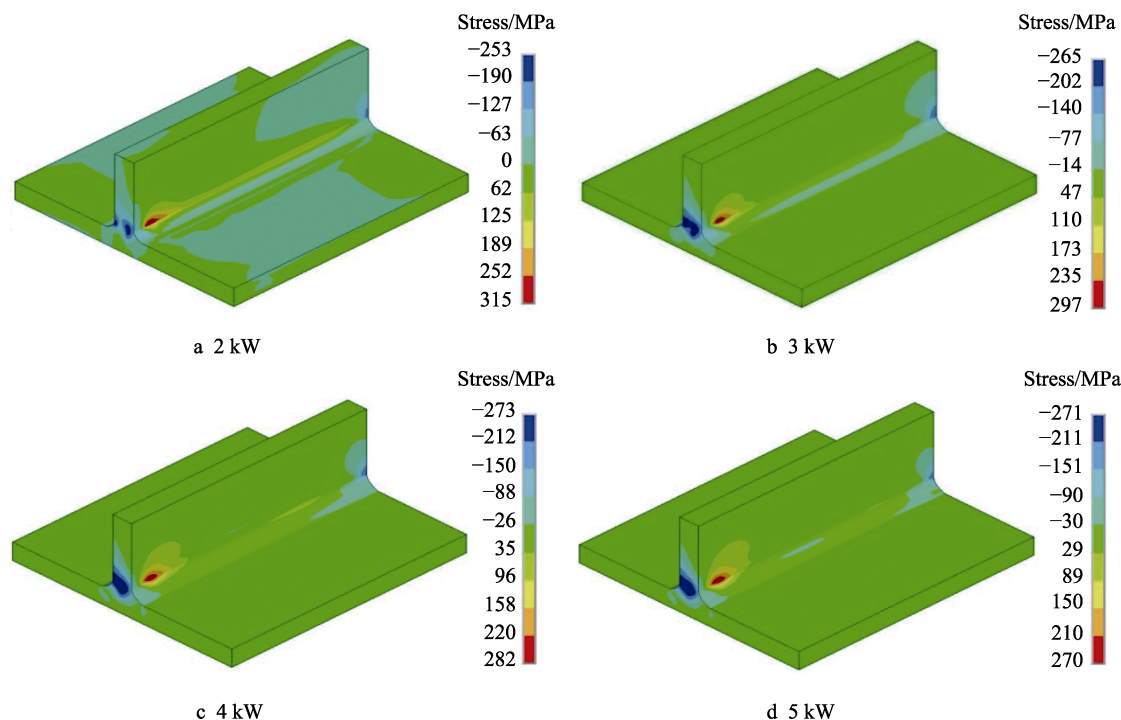


图 9 厚度方向残余应力计算结果
Fig.9 Calculation results of residual stress in thickness direction

拉应力峰值从最高的 240 MPa 逐渐减小到 189 MPa, 而 T 型接头焊缝起弧端和收弧端的压应力峰值从 104 MPa 逐渐增大到 135 MPa。

不同激光功率下铝合金 T 型接头厚度方向残余应力的三维分布云图如图 9 所示。可以看出, 在 T 型接头的起弧端和熄弧端立板上存在明显的压应力集中区域, 而在立板靠近焊趾的位置存在一个拉应力集

中区域, 其中随着激光功率从 2 kW 逐渐增大到 5 kW, 热输入不断增大, 拉应力峰值逐渐下降, 从 D1 的 315 MPa 减小到 D4 的 270 MPa; 而在压应力区域, 峰值基本无变化, 厚度方向最高残余应力为 273 MPa。除立板起弧端、收弧端和焊趾部位, 在整个 T 型接头的其他区域残余应力分布较为均匀, 且都以较小的压应力或拉应力状态分布。

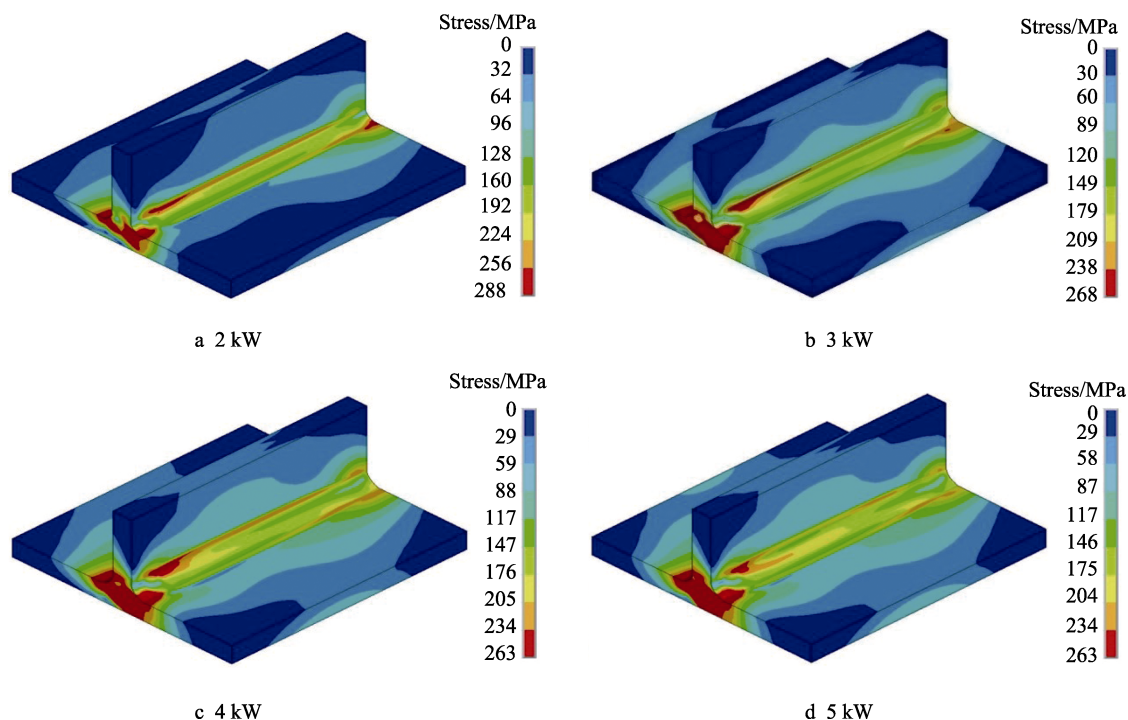


图 10 米塞斯-等效应力计算结果

Fig.10 Calculation results of Von-Mises equivalent stress

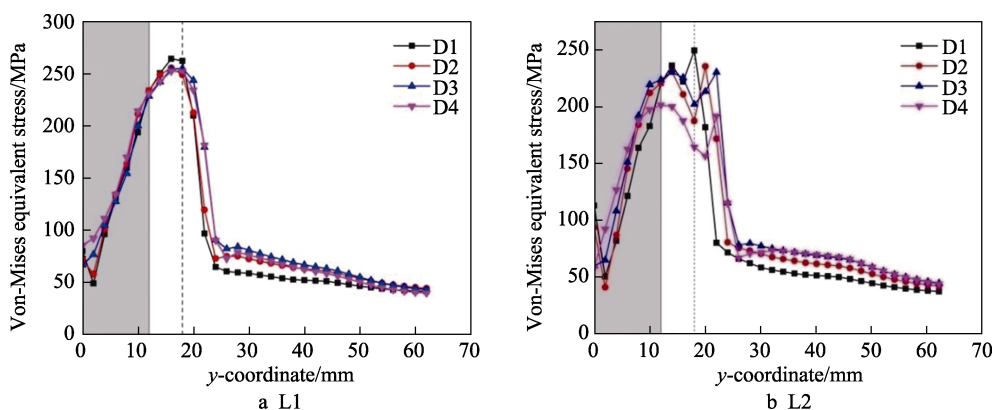


图 11 双路径下米塞斯-等效应力分布

Fig.11 Distribution of Von-Mises equivalent stress under dual paths

不同激光功率下铝合金 T 型接头米塞斯-等效残余应力的三维分布云图如图 10 所示。可知, 在 T 型接头立板与平板交接处即焊缝附近区域存在较大等效拉应力, 起弧端和收弧端尤为甚之, 应力峰值高达 288 MPa, 超过材料屈服强度, 有开裂风险; 除焊缝之外, 工件各个区域拉应力较小, 呈圆弧形均匀分布, 远小于材料屈服强度。随着复合焊中激光功率的不断增大及热能的增大, 等效拉应力的峰值逐渐减小, 高应力集中分布区域也随之变小。

立板路径 L1 和路径 L2 上的米塞斯-等效应力分布曲线对比如图 11 所示。可知, 路径轨迹对米塞斯-等效应力分布趋势及特征的影响不大, 当激光功率为 2 kW 时, 2 条路径上的等效应力达到峰值, 约为 265 MPa, 且随着激光功率的增大, 等效应力峰值逐渐减小, 但等效应力作用区域的宽度逐渐增大; 在

$y=20$ mm 位置, 等效应力出现骤降并逐渐减小到 30 MPa。

T 型接头上表面激光+GMAW 复合焊沿垂直焊缝方向上的残余应力及米塞斯-等效应力的分布曲线如图 12 所示。当激光功率为 2 kW 和 5 kW 时, 纵向残余应力与检测结果的对比如图 12c 所示, 可见计算结果与实际检测结果基本相同, 模型的准确性进一步得到了验证。由图 12a 可知, 路径 L3 横向残余应力的分布特征相同, 焊缝 A 和焊缝 B 两侧的应力分布变化特征也相似; 在焊缝及近缝区存在较大拉应力, 当激光功率为 2、3、4、5 kW 时, 在焊缝 A 处的拉应力峰值分别为 20、38、23、22 MPa, 焊缝 B 在焊趾处的拉应力峰值要小于焊缝 A 的, 远低于材料屈服强度, 而在立板中心附近则出现了拉应力的波谷; 图 12b 为厚度方向残余应力, 不同激光功率下厚度方向

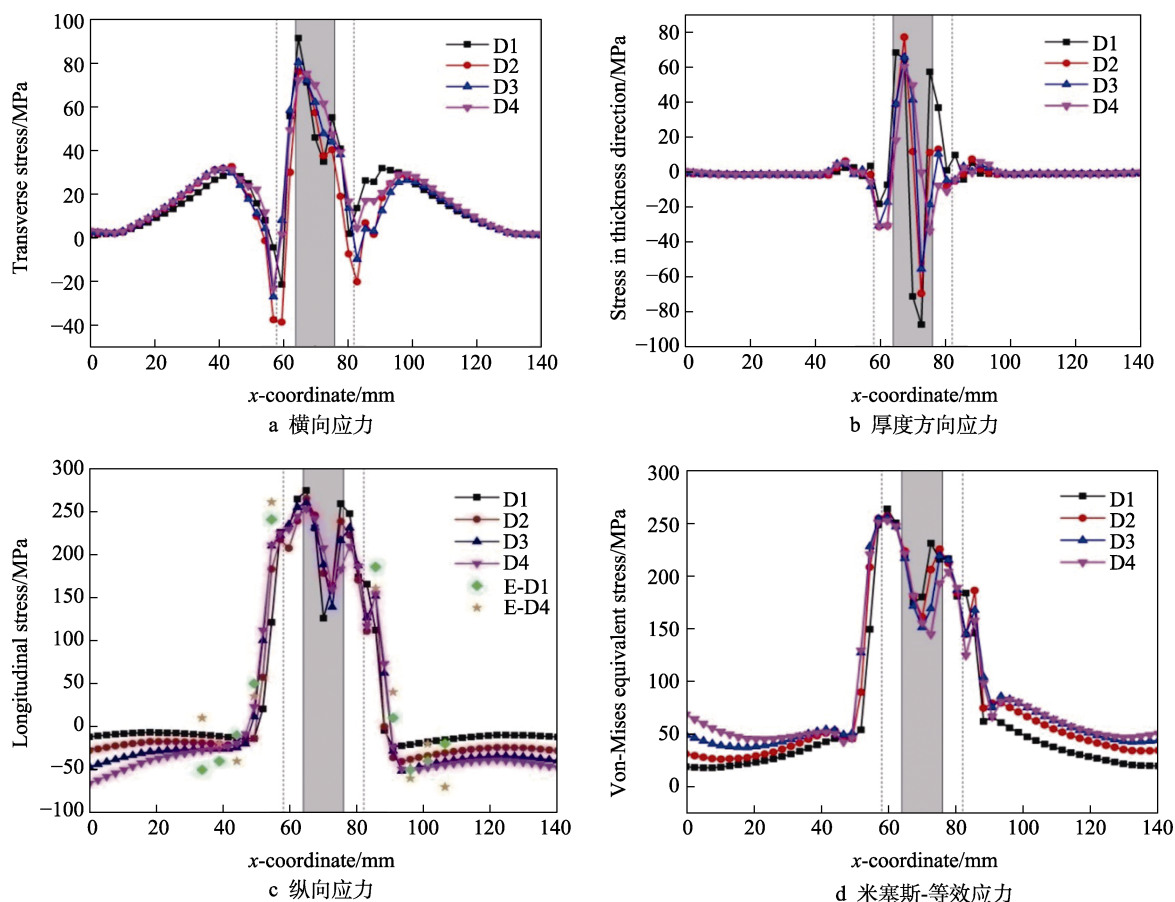


图 12 路径 L3 上 T 型接头剖面各向残余应力大小分布及检测结果对比

Fig.12 Distribution of residual stress in T-joint section on path L3 and comparison of test results: a) transverse stress; b) stress in thickness direction; c) longitudinal stress; d) Von-Mises equivalent stress

的残余应力都较小,其残余拉应力在立板中心处达到峰值,随着焊缝距离的增大,拉应力逐渐转变为压应力,在焊缝中心到达峰值,两者峰值均在 80 MPa 左右。图 12c 和图 12d 为沿着路径 L3 上的纵向应力和米塞斯-等效应力,两者分布特征基本一致,在焊缝及近缝区表现为较大的拉应力,其峰值随着激光功率的增大而减小,当激光功率为 2、3、4、5 kW 时,纵向残余应力峰值分别为 270、263、258、251 MPa,同时高应力区域的宽度增大;对比图 12c 和图 12d 左右两侧焊缝纵向和等效应力,发现由于焊缝 B 先于焊缝 A 焊接,故焊缝 A 对焊缝 B 有热处理作用,从而细化了焊缝 B 处的晶粒组织、提高了微观组织性能并消除了部分在焊接过程中产生的残余应力,使焊缝 A 附近的拉应力高于焊缝 B 附近的拉应力。在图 12d 中,当激光功率为 2、3、4、5 kW 时,铝合金 T 型接头的等效应力峰值分别为 265、261、257、250 MPa。

4 结论

1) 综合考虑了 6061 铝合金的热物理性能、激光+GMAW 复合焊制造工艺特点以及 ANSYS 软件的特

点,建立了铝合金 T 型接头激光+GMAW 复合热源残余应力的三维数值分析模型,计算了当激光功率为 2、3、4、5 kW 时铝合金 T 型接头的残余应力,并与实际检测结果进行对比。结果表明,计算结果与检测结果较为吻合,验证了所建模型的准确性。

2) 在铝合金 T 型接头焊缝及近缝区,横向残余应力和厚度方向残余应力峰值均比纵向残余应力峰值小。在 2 kW 激光功率下,纵向残余应力和米塞斯-等效应力峰值分别高达 270 MPa 和 265 MPa,而在 5 kW 激光功率下纵向残余应力和米塞斯-等效应力峰值分别约为 251 MPa 和 250 MPa。

3) 后焊的焊缝 A 对焊缝 B 具有明显的热处理作用,使铝合金 T 型接头工件冷却到室温时的纵向应力和等效应力降低。

4) 对于 12 mm 厚铝合金 T 型接头,当激光功率从 2 kW 增大到 5 kW 时,随着焊接热输入的增大,复合焊高应力区域宽度增大,而应力峰值逐渐减小,纵向残余应力由 270 MPa 减小至 251 MPa。

参考文献:

[1] HE C, WEI J, LI Y, et al. Improvement of Microstruc-

- ture and Fatigue Performance of Wire-Arc Additive Manufactured 4043 Aluminum Alloy Assisted by Inter-layer Friction Stir Processing[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 39(2): 183-194.
- [2] KOISTINEN D, MARBURGER R. A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels[J]. *Acta Metall*, 1959, 7: 59-60.
- [3] JIN X Z, BERGER P, GRAF T. Multiple Reflections and Fresnel Absorption in an Actual 3D Keyhole during Deep Penetration Laser Welding[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2006, 39(21): 4703-4712.
- [4] 周方明, 毕研华, 陈丽丽, 等. 激光功率对镀锌板复合焊接过程稳定性的影响[J]. *江苏科技大学学报*, 2023, 37(5): 27-31.
- ZHOU F M, BI Y H, CHEN L L, et al. Effect of Laser Power on the Stability of Induction Welding Process of Galvanized Sheets[J]. *Jiangsu University of Science and Technology*, 2023, 37(5): 27-31.
- [5] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-5.
- ZHOU W S, YAO J S. Welding of Aluminum and Aluminum Alloy[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-5.
- [6] 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 12-20.
- ZUO T C. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 12-20.
- [7] 张盛海, 陈铠, 肖荣诗, 等. 高强铝合金 T 型接头激光焊接的研究现状[J]. *激光杂志*, 2005(4): 77-78.
- ZHANG S H, CHEN K, XIAO R S, et al. Current Situation of Laser Welding of High Strength Aluminum Alloy in Tee Joint[J]. *Laser Journal*, 2005(4): 77-78.
- [8] STAUFER H. Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry[J]. *Welding Journal*, 2007, 86(10): 36-40.
- [9] BAGGER C, OLSEN F O. Review of Laser Hybrid Welding[J]. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [10] DEFALCO J. Practical Application for Hybrid Laser Welding[J]. *Welding Journal*, 2007, 86(10): 47-50.
- [11] UEDA Y, YUAN M G, MOCHIZUKI M, et al. A Prediction Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual(Report IV)-Experimental Verification for Prediction Method of Welding Residual Stresses in T-Joints Using Inherent Strains[J]. *Transactions of Japan Welding Research Institute*, 1993, 22(1): 169-176.
- [12] SUN G F, WANG Z D, LU Y, et al. Numerical and Experimental Investigation of Thermal Field and Residual Stress in Laser-MIG Hybrid Welded NV E690 Steel Plates[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 38: 106-120.
- [13] MAZAR A M, NIKODINOVSKI M, CHENIER P, et al. Experimental and Numerical Investigations of Hybrid Laser Arc Welding of Aluminum Alloys in the Thick T-Joint Configuration[J]. *Optics Laser Technology*, 2014, 59: 68-92.
- [14] ZHANG T, WU C S, QIN G L, et al. Thermomechanical Analysis for Laser+GMAW-P Hybrid Welding Process[J]. *Computational Materials Science*, 2010, 47(3): 848-856.
- [15] UEDA Y, MA N X. Measuring Method of Three-Dimensional Residual Stresser with the Aid of Distribution Functions of Inherent Strain(Report I)-a Function Method for Estimating Inherent Strain Distribution[J]. *Transactions of Japan Welding Research Institute*, 1994, 23(1): 71-78.
- [16] XU G X, WU C S, MA X Z, et al. Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Distortion in laser+GMAW Hybrid Welding of Aluminum Alloy T-Joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2013, 26(3): 352-360.
- [17] MURAKI T, BRYAN J, MASUBUCHI K. Analysis of Thermal Stresses and Metal Movement during Welding-Part I: Analytical Study[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1975, 97(1): 85.
- [18] ZHANG C, GAO M, WANG D. Relationship between Pool Characteristic and Weld Porosity in Laser Arc Hybrid Welding of AA6082 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 217-222.
- [19] CAMPANA G, ASCARI A, FORTUNATO A, et al. Hybrid Laser-MIG Welding of Aluminum Alloys: The Influence of Shielding Gases[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5588-5590.
- [20] QIAN X Y, YE X, HOU X Q, et al. Research on Residual Stress Distribution in Different Areas of Laser-MAG Arc Hybrid Welding by Numerical Simulation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2160(1): 82-88.
- [21] REN S D, HUANG W J, MA N S, et al. Numerical Modeling from Process to Residual Stress Induced in Resistance Spot Welding of DP980 Steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(7): 3563-3576.
- [22] GUI X Y, GAO X D, ZHANG Y X, et al. Investigation of Welding Parameters Effects on Temperature Field and Structure Field during Laser-Arc Hybrid Welding[J]. *Modern Physics Letters B*, 2022, 36(7): 2150467.
- [23] 刘川, 张建勋, 牛靖. 焊接动态拘束变形三维多体耦合数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 83-86.
- LIU C, ZHANG J X, NIU J. 3D Multi-Body Coupling Numerical Simulation of Welding Dynamic Distortion with Restraints[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(6): 83-86.
- [24] 胥国祥, 郭庆虎, 胡庆贤, 等. 中厚板铝合金光纤激光+MIG 复合热源焊残余应力的数值分析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(2): 77-83.
- XU G X, GUO Q H, HU Q X, et al. Numerical Analysis of Welding Residual Stress in Laser+MIG Hybrid Butt Welding of Medium-Thick Aluminum Alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2): 77-83.

-
- [25] 姬进红, 刘文, 胥国祥, 等. 铝合金 CMT 电弧增材制造残余应力分析[J]. 焊接技术, 2023, 52(5): 1-5.
JI J H, LIU W, XU G X, et al. Analysis of Residual Stress in CMT Arc Additive Manufacturing of Aluminum Alloys[J]. Welding Technology, 2023, 52(5): 1-5.
- [26] 段永刚. 基于 ANSYS 软件的焊接应力变形工程预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2003: 40-50.
DUAN Y G. Engineering Prediction of Welding Stress and Deformation Based on ANSYS Software[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003: 40-50.