

# 激光电弧复合焊接顺序对 304 不锈钢 T 形接头影响的模拟试验分析

桂晓燕, 张艳喜, 游德勇, 高向东

(广东工业大学, 广东省焊接工程技术研究中心, 广州 510006)

**摘要:** 建立 304 不锈钢 T 形接头三维有限元模型, 研究激光电弧复合焊接顺序对 304 不锈钢 T 形接头热变形及残余应力的影响. 采用高斯面热源加高斯锥形热源组合的热源模型, 模拟激光电弧复合热源, 并通过 304 不锈钢激光电弧复合堆焊工艺试验验证数值模拟激光电弧复合焊接过程的可靠性. 结果表明, 焊缝截面熔池形貌的数值仿真结果与焊接工艺试验结果吻合较好, 该热源模型能有效模拟激光电弧两种热源的复合作用. 确定多种焊接顺序方案, 分析不同焊接顺序下 T 形接头温度场、残余应力和热变形情况, 激光电弧复合焊接顺序对 T 形接头残余应力及热变形均有影响, 通过对比不同顺序下残余应力值及热变形量发现, 顺序焊接能有效减小焊接残余应力, 同时反向焊接产生的热变形量最小. 综合分析, 不锈钢 T 形接头顺序反向焊接的效果最佳.

**创新点:** (1) 建立组合热源模型, 采用激光电弧复合焊工艺验证模型有效性.

(2) 采用热弹塑性有限元法探索焊接顺序对 304 不锈钢 T 形接头复合焊接的影响规律.

**关键词:** 激光电弧复合焊接; 304 不锈钢 T 形接头; 焊接顺序; 数值模拟

**中图分类号:** TG 404

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20210324005

## 0 序言

焊件在焊接时处于不均匀温度场中, 焊接变形和残余应力难以避免<sup>[1]</sup>, 会严重影响接头的力学性能<sup>[2-3]</sup>. 针对多道焊缝的复杂结构, 焊接顺序对残余应力及热变形的影响较大<sup>[4-5]</sup>. 焊接顺序对加筋板结构变形影响的研究较多<sup>[6-8]</sup>. 文献 [9] 基于非线性弹塑性有限元法对 6061-T6 铝合金汽车保险杠 MIG 焊接工艺进行数值模拟, 制定 4 组不同焊接顺序方案, 对比残余应力值, 选出最优焊接顺序方案.

激光电弧复合焊接通过两种热源的耦合作用, 发挥各自优点, 可获得更好的焊接质量<sup>[10-11]</sup>. 目前复合焊接方面的研究多集中于复合热源模型的建立以及熔池内部流动、熔池和匙孔的形貌特征等<sup>[12-13]</sup>. 文献 [14] 对 Q235 钢多层激光 MIG 复合焊接进行数值模拟, 研究功率分布对熔池温度场及熔池的几何形状的影响. 文献 [15] 提取熔池顶部和底部的瞬

时物理现象, 用来监测激光-MAG 复合焊接过程的稳定性和焊缝成形. 关于激光电弧复合焊应力应变场的研究相对较少.

对 304 不锈钢激光电弧复合堆焊试验进行数值模拟, 通过工艺试验验证数值模拟激光电弧复合焊接过程的可靠性. 然后建立 T 形接头有限元模型, 确定 4 种焊接顺序方案, 考虑材料的高温性能以及相变影响, 分析计算焊接过程中温度场、应力应变场的变化情况. 研究焊接顺序在激光电弧复合焊接过程中对 T 形接头温度场与应力应变场的影响, 为优化焊接顺序以减小 T 形接头焊接变形及残余应力提供理论和试验依据.

## 1 试验方法

采用激光电弧复合焊接设备进行 304 不锈钢堆焊工艺试验, 激光功率为 1.4 kW, 焊接电压为 25 V, 焊接电流为 240 A, 焊接速度为 0.05 m/s, 离焦量为 +1 mm, 光丝间距为 2 mm, 焊丝直径为 1 mm, 保护气体为 2% 的二氧化碳和 98% 的氩气, 气体流量为 30 L/min, 施焊时激光在前, 电弧在后.

T 形接头激光电弧复合焊接数值模拟试验采用双道焊接方式,激光功率为 1.4 kW,电弧电压为 20 V,焊接电流为 150 A,焊接速度为 0.05 m/s,其它参数设置同堆焊工艺试验相同. 制定 4 种不同的焊接顺序方案,分析 304 不锈钢 T 形接头复合焊接过程的温度场、应力应变场情况,焊接顺序方案如图 1 所示. 图中数字 1 代表第一道焊接工序,数字 2 代表第二道焊接工序,箭头方向代表焊接方向. Case1 为同时同向焊接, Case2 为顺序同向焊接, Case3 为同时反向焊接, Case4 为顺序反向焊接.

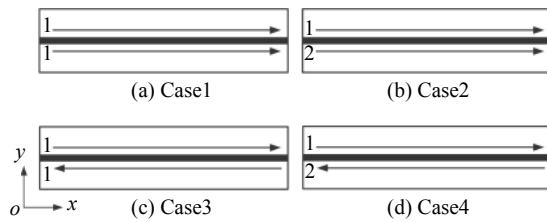


图 1 T 形接头双道焊焊接顺序方案

Fig. 1 Double pass welding sequence scheme of T joint. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型建立

304 不锈钢激光电弧复合堆焊试验采用尺寸为 150 mm × 110 mm × 3 mm 的平板,有限元模型及六面体网格划分如图 2 所示,为提高计算效率,采用过渡网格划分. 节点总数为 60 614,单元总数为 12 420.

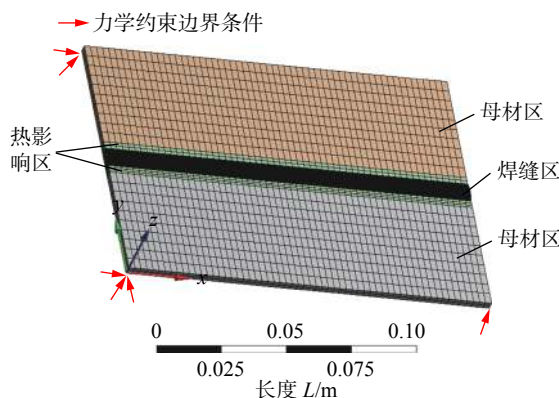


图 2 激光电弧复合堆焊有限元模型

Fig. 2 Finite element model of laser-arc hybrid overlaying welding

不锈钢 T 形接头选用底板 300 mm × 50 mm × 3 mm ( $L \times W \times D$ )、腹板 300 mm × 20 mm × 3 mm ( $L \times W \times D$ ),有限元模型如图 3 所示,网格划分完成后节点总数为 207 059,单元总数为 45 875.

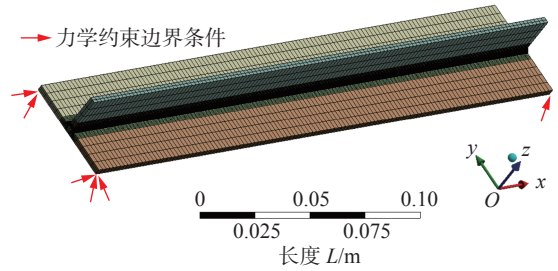


图 3 不锈钢 T 形接头有限元模型

Fig. 3 Finite element model of stainless steel T joint

### 2.2 材料参数设定

试验母材选用 304 不锈钢,考虑到材料的高温性能,采用材料性能模拟软件 JMatPro 计算 304 不锈钢随温度变化的性能参数,热物理性能参数及热力学性能参数分别如图 4 和图 5 所示.

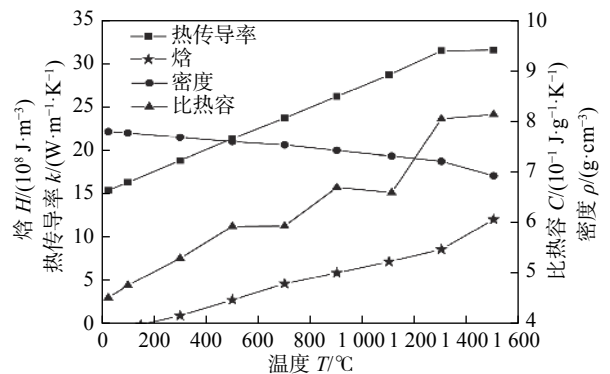


图 4 304 不锈钢热物理性能参数

Fig. 4 Thermophysical property parameters of 304 stainless steel

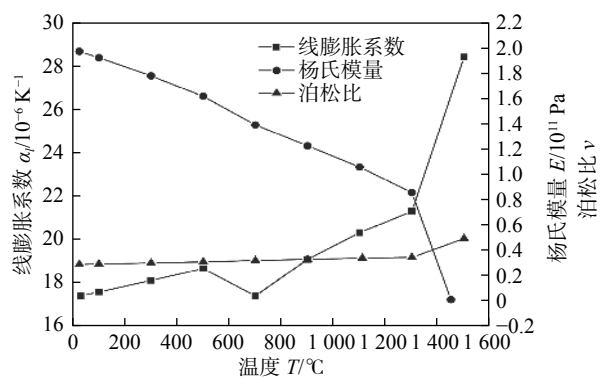


图 5 304 不锈钢热力学性能参数

Fig. 5 Thermodynamic performance parameters of 304 stainless steel

### 2.3 热源模型建立及验证

#### 2.3.1 热源模型的建立

热源模型的选取直接关系到温度场中热流分布情况及熔池形态,是焊接过程数值模拟的关键<sup>[16]</sup>. 针对激光电弧复合焊的热源机理复杂性,采用组合热源模型进行模拟,根据激光和电弧热源各自特

点, 选用高斯面热源模型模拟电弧热源, 选用高斯锥形热源模型模拟激光热源<sup>[17-19]</sup>. 面热源  $q_1$  和体热源  $q_2$  的热流密度数学表达式为

$$q_1 = \frac{3Q_1}{\pi R_0^2} \exp\left(-\frac{3((x-vt)^2 + y^2)}{R_0^2}\right) \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{9Q_2 e^3}{\pi H(e^3 - 1)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left(-\frac{3\left(\left(x - v\left(t - \frac{l}{v}\right)\right)^2 + y^2\right)}{\left(r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i}\right)^2}\right) \quad (2)$$

式中:  $Q_1$  为电弧功率;  $R_0$  为电弧热源的有效半径, 取  $R_0$  为 2 mm;  $v$  为焊接速度;  $Q_2$  为激光功率;  $H$  为高斯锥形热源的高度;  $l$  为光丝间距;  $r_e$  和  $r_i$  分别为上和下表面的有效热源半径, 当离焦量为 0 时, 激光光斑直径为 0.4 mm, 取  $r_e$  为 0.5 mm,  $r_i$  为 0.3 mm;  $z_e$  和  $z_i$  分别为作用在上、下表面热源的  $z$  坐标位置.

### 2.3.2 热源模型的验证

304 不锈钢板激光电弧复合堆焊试验焊接完成后, 对焊缝区进行磨削、抛光、腐蚀, 采用光学显微镜获取焊缝截面熔池形态, 将模拟得到的熔池形态与试验结果进行对比, 如图 6 所示. 图 6 中虚线代表试验熔池形貌轮廓, 可以看出数值模拟结果与工艺试验结果吻合较好, 证明了数值模拟激光电弧复合焊接的准确性.

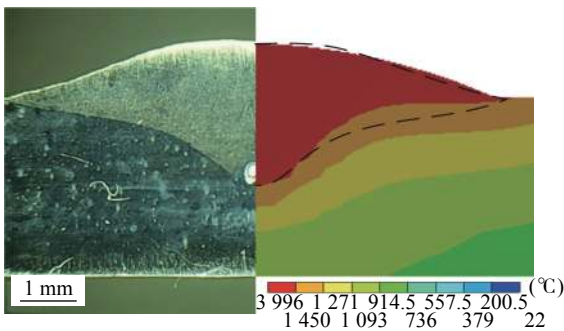


图 6 焊缝截面形貌对比

Fig. 6 Comparison diagram of weld section morphology

### 2.4 边界条件

在温度场分析过程中, 焊件散热方式为热辐射和热对流. 对流定律和辐射定律分别为

$$q_c = \alpha_c (T - T_0) \quad (3)$$

$$q_r = \varepsilon C_0 (T - T_0) \quad (4)$$

式中:  $\alpha_c$  为对流换热系数, 设为  $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T$  为焊件表面温度;  $T_0$  为环境温度, 设为  $22^\circ\text{C}$ ;  $C_0$  为辐

射常数;  $\varepsilon$  为黑度系数, 取值为 0.8.

在结构场分析过程中, 为防止模型在计算过程中发生刚性移动, 在模型的 3 个顶点分别施加  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的约束, 如图 2 和图 3 所示, 箭头集中的位置为顶点, 箭头方向为约束方向.

## 3 结果与讨论

### 3.1 温度场结果分析

图 7 为  $t = 6 \text{ s}$  和  $t = 12 \text{ s}$  两个时刻不同焊接顺序的 T 形接头温度分布云图, 可以看出, 随着焊接热源的移动, 焊件表面的温度分布在不断变化. 温度高的区域温度梯度较小, 温度低的区域温度梯度较大. Case1 和 Case3 是两道焊缝同时焊接, 在  $t = 6 \text{ s}$  时, 两侧均完成焊接; 在  $t = 12 \text{ s}$  时, 经过 6 s 的冷却时间, 焊件的温度冷却至  $250^\circ\text{C}$  左右. Case2 和 Case4 是两道焊缝顺序焊接, 在  $t = 6 \text{ s}$  时, 第一道焊缝完成焊接, 进入冷却阶段, 第二道焊缝开始焊接; 在  $t = 12 \text{ s}$  时, 第二道焊缝完成焊接, 第一道焊缝冷却至  $200^\circ\text{C}$  左右, 由于第一道焊缝产生的热积累, 第二道焊缝的最高温度均比第一道焊缝的高.

为进一步研究 T 形接头激光电弧复合焊接温度场的情况, 沿焊缝方向  $x=150 \text{ mm}$  处的截面位置取 6 个节点, 节点分布以及各节点在不同焊接顺序下的热循环曲线如图 8 所示. 点 A 和 B 为两道焊缝对称位置的节点, 点 C 和 D 为热影响区中底板对称位置节点, 点 E 和 F 为热影响区中腹板对称位置节点. Case1 中,  $t = 3 \text{ s}$  时热源移动到节点所在的截面处, 节点温度达到峰值, 焊缝处节点温度达到  $1818.4^\circ\text{C}$ , 随后进入冷却阶段. Case2 中, 靠近左侧焊缝的 3 个节点在  $t = 3 \text{ s}$  时到达最高温度, 靠近右侧焊缝的 3 个节点受到左侧焊缝的影响, 温度小幅度上升;  $t = 3 \text{ s}$  之后, 左侧焊缝进入冷却阶段, 温度快速下降;  $t = 9 \text{ s}$  时靠近右侧焊缝的 3 个节点到达最高温度, 受到热积累的作用, 最高温度为  $1929.2^\circ\text{C}$ , 比左侧焊缝节点温度高, 此时左侧焊缝的 3 个节点同样受到右侧焊缝影响, 温度出现小幅度回升. Case3 是同时反向焊接, 由于节点位于焊缝中心截面, 左右两侧热源同时到达截面位置, 因此在  $t = 3 \text{ s}$  时到达最高节点温度, 温度变化规律与 Case1 相同, Case3 的最高温度略高于 Case1 的最高温度. Case4 是反向顺序焊接, 与 Case2 的热循环曲

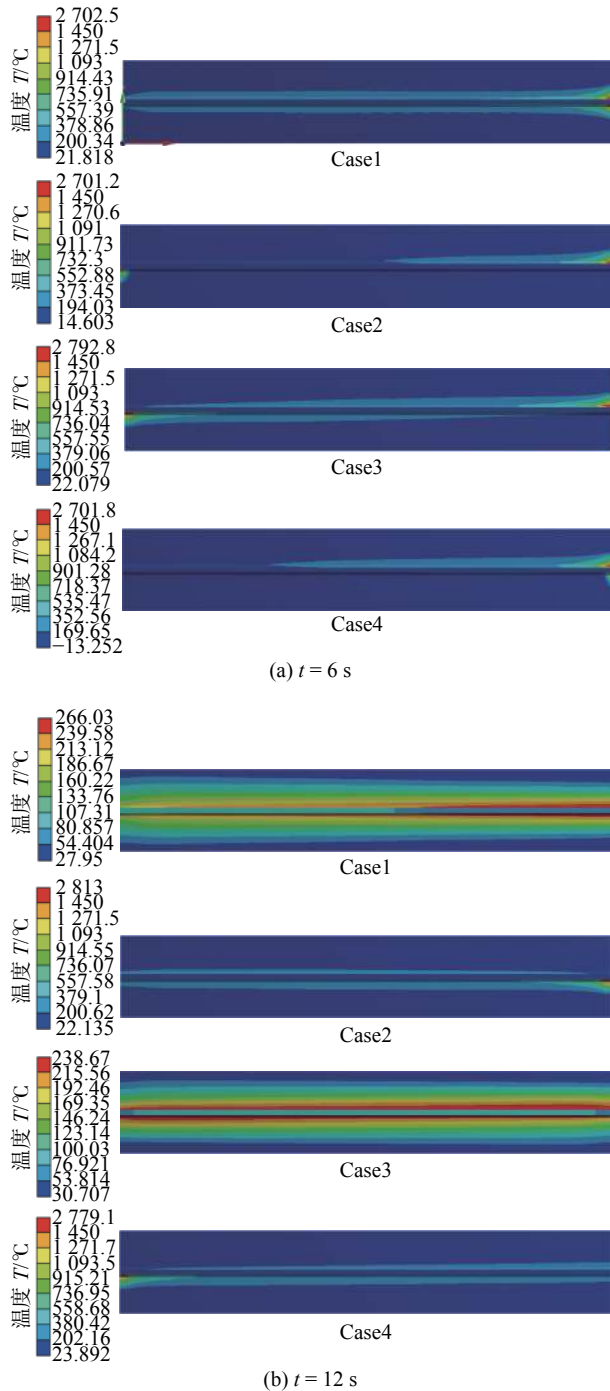


图 7 不同时刻焊件的温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution of welding parts at different times. (a)  $t = 6$  s; (b)  $t = 12$  s

线规律相同,最高温度略高于 Case2.

### 3.2 残余应力结果分析

为研究不同焊接顺序对 T 形接头激光电弧复合焊接残余应力的影响,测量垂直焊缝中心线上的残余应力,不同顺序下的残余应力如图 9 所示.从图 9 可以看出,焊缝处的纵向残余应力呈现拉应力,由于焊缝处的金属在冷却阶段凝固收缩时,焊缝处的金属与周围金属温差较大,受到周围金属的

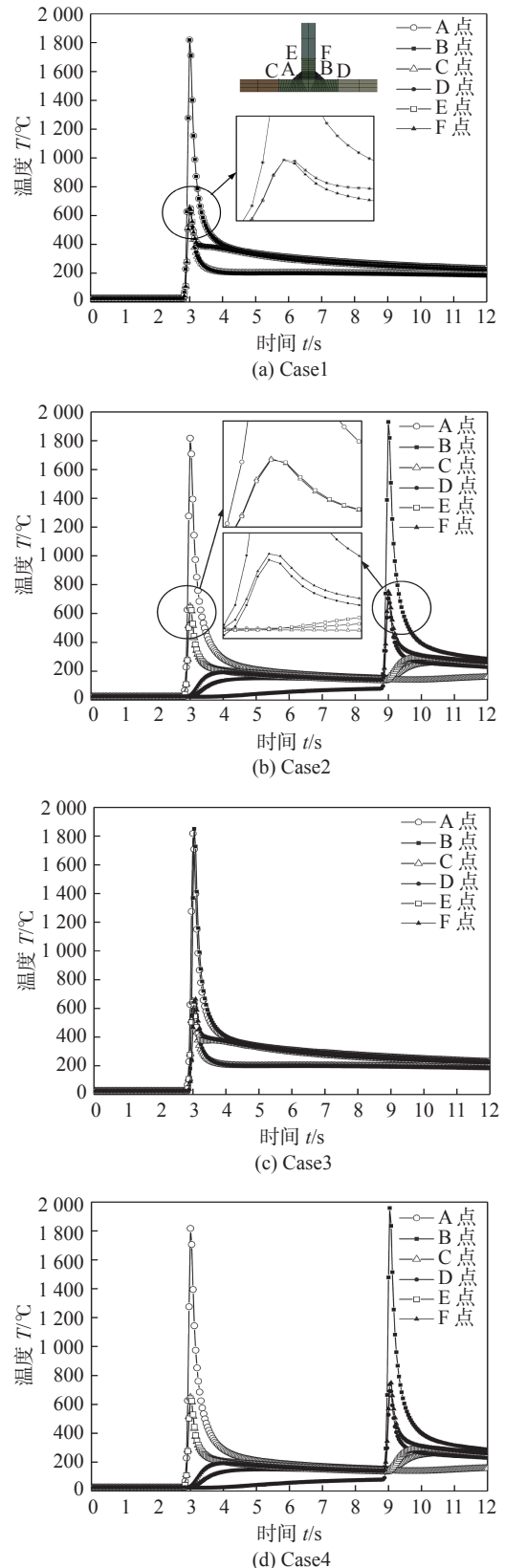


图 8 不同焊接顺序下节点热循环曲线

Fig. 8 Thermal cycle curves of nodes in different welding sequences. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4

约束而产生较高的残余拉应力. Case1 和 Case3 是同时焊接,最大残余拉应力较大. Case2 和 Case4 是

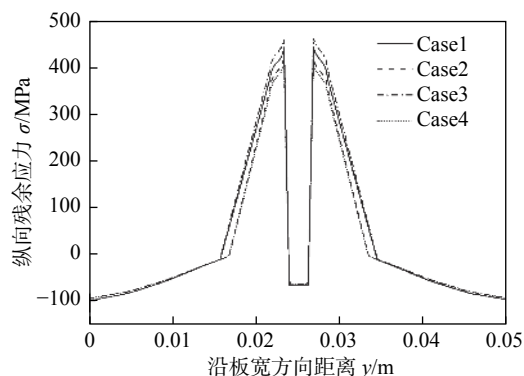


图 9 不同焊接顺序下纵向残余应力值

Fig. 9 Longitudinal residual stress values in different welding sequences

顺序焊接,在焊接第二道焊缝时,第一道焊缝开始冷却散热过程,因此第二道焊缝冷却时与周围金属的温差降低,产生的最大拉应力比同时焊接的拉应力小.

### 3.3 焊接变形结果分析

焊接变形对于结构件的装配、使用寿命等方面有很大的影响.图 10 为不同焊接顺序下的有限元变形云图,可以看出,最大变形量均发生在腹板末端处,焊接顺序对于变形分布的影响较大. Case1 的最大变形量为 0.868 mm; Case2 的最大变形量为 1.269 mm; Case3 的最大变形量为 0.824 mm; Case4 的最大变形量为 1.032 mm.

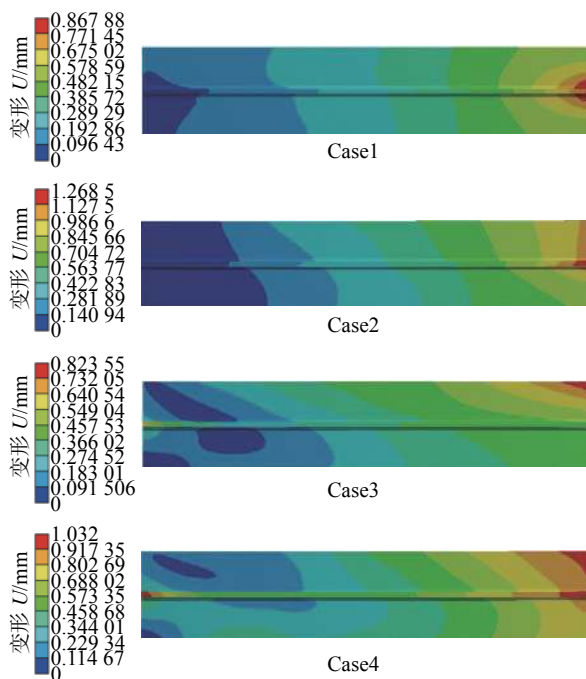


图 10 不同焊接顺序下热变形分布云图

Fig. 10 Cloud image of thermal deformation distribution in different welding sequences

为进一步分析不同焊接顺序对焊接变形量的具体影响,测量不同顺序下路径 1 的变形量,如图 11 所示.从图中可以看出, Case1 两侧变形量相等,变形量较大,沿腹板对称分布. Case2 与 Case4 为顺序焊接,第一道焊缝冷却时产生的拉应力一定程度上减小了第二道焊缝加热时产生的压应力,使第二道焊缝产生的变形比第一道焊缝产生的变形小. Case3 为同时反向进行焊接,相当于在加热时产生了方向相反的压应力,彼此有一定程度上的抵消,因此产生的焊接变形最小.

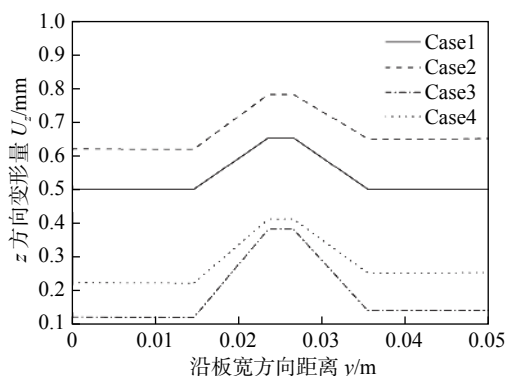


图 11 不同焊接顺序下路径 1 的 z 方向变形量

Fig. 11 Deformation in the z direction of path 1 in different welding sequences

## 4 结论

(1) 建立激光电弧复合焊接有限元数值模型,分别对 304 不锈钢平板堆焊及 T 形接头焊接进行数值模拟,并通过堆焊工艺试验验证,试验得到的熔池形貌与数值计算结果吻合较好,表明数值模拟激光电弧复合焊接过程的可靠性.

(2) 对不锈钢 T 形接头激光电弧复合焊接温度场的分析,表明焊件的温度分布是一个瞬态变化的过程,温度随着焊接热源的移动不断变化,温度越高的区域,温度梯度越小.双道焊接时,两道焊缝之间互相影响,温度越高,散热速度越快.

(3) 分析不锈钢 T 形接头激光电弧复合焊接的残余应力分布,可以看出纵向残余应力峰值集中在左右两侧焊缝处,呈现为拉应力,远离焊缝区域逐渐减小至压应力.不同焊接顺序下的残余应力值表明两道焊缝先后顺序焊接对于减小焊接残余应力有较好的效果.

(4) 不同焊接顺序下,不锈钢 T 形接头激光电弧复合焊接结构场的数值模拟结果显示,最大焊接

变形量主要发生在腹板末端, 受边界约束最小的一侧。焊接顺序对焊接变形分布影响较大, 且同时反向焊接变形量最小为 0.824 mm。

## 参考文献

- [1] Han T, Gu S W, Xu L, *et al.* Study on stress and deformation of keyhole gas tungsten arc-welded joints[J]. China Welding, 2020, 29(1): 21 – 29.
- [2] 许欣欣, 梁晓光, 杨瑞生, 等. 焊接残余应力对 2219 铝合金熔焊接头承载能力的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 17 – 22.  
Xu Xinxin, Liang Xiaoguang, Yang Ruisheng, *et al.* Effect of welding residual stress on bearing capacity of fusion welded joint of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(10): 17 – 22.
- [3] Liu F Y, Tan C W, Gong X T, *et al.* A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 128: 106247.
- [4] Mondal A K, Biswas P, Bag S. Prediction of welding sequence induced thermal history and residual stresses and their effect on welding distortion[J]. Welding in the World, 2017, 61(4): 711 – 721.
- [5] Shadkam S, Ranjbarbarnodeh E, Iranmanesh M. Effect of sequence and stiffener shape on welding distortion of stiffened panel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149: 41 – 52.
- [6] Chen Z, Chen Z C, Shenoi R A. Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure-science direct[J]. Ocean Engineering, 2015, 106: 271 – 280.
- [7] Han S, Ahn J, Na S. A study on ray tracing method for CFD simulations of laser keyhole welding: progressive search method[J]. Welding in the World, 2016, 60(2): 247 – 258.
- [8] Liang W, Deng D. Influences of heat input, welding sequence and external restraint on twisting distortion in an asymmetrical curved stiffened panel[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 439 – 451.
- [9] Yi J, Zhang J M, Cao S F, *et al.* Effect of welding sequence on residual stress and deformation of 6061-T6 aluminium alloy automobile component[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 287 – 295.
- [10] Gao X D, Wang L, You D Y, *et al.* Synchronized monitoring of droplet transition and keyhole bottom in high power laser-mag hybrid welding process[J]. Sensors Journal, IEEE, 2019, 19(9): 3553 – 3563.
- [11] 严春妍, 易思, 张浩, 等. S355 钢激光-MIG 复合焊接头显微组织和残余应力 [J]. 焊接学报, 2020, 41(6): 12 – 18.  
Yan Chunyan, Yi Si, Zhang Hao, *et al.* Investigation of microstructure and stress in laser-MIG hybrid welded S355 steel plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(6): 12 – 18.
- [12] Zhu Z W, Ma X Q, Wang C M, *et al.* Modification of droplet morphology and arc oscillation by magnetic field in laser-MIG hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 131: 106138.
- [13] 吴向阳, 徐剑侠, 高学松, 等. 激光-MIG 复合焊接热过程与熔池流场的数值分析 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 91 – 102.  
Wu Xiangyang, Xu Jianxia, Gao Xuesong, *et al.* Numerical simulation of thermal process and fluid flow field in Laser-MIG hybrid weld pools[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 91 – 102.
- [14] Zhou S J, Bu H C, Gao Q Y, *et al.* Effect of power distribution on the temperature evolution in laser-MIG hybrid welding for Q235 steel[J]. Modern Physics Letters B, 2019(4): 1950405.
- [15] Gao X D, Wang L, Chen Z Q, *et al.* Process stability analysis and weld formation evaluation during disk laser-mag hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124(1): 105835.1 – 105835.13.
- [16] 高向东, 冯燕柱, 桂晓燕, 等. 激光入射角影响焊接熔池匙孔瞬态行为数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 82 – 89.  
Gao Xiangdong, Feng Yanzhu, Gui Xiaoyan, *et al.* Numerical simulation of effects of laser incident angle on transient behaviors of molten pool and keyhole during laser welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 82 – 89.
- [17] Hou Z L, Liu L M, Lü X Z, *et al.* Numerical simulation for pulsed laser-gas tungsten arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25: 995 – 1002.
- [18] Zhan X H, Liu Y, Ou W M, *et al.* The numerical and experimental investigation of the multi-layer laser-MIG hybrid welding for Fe36Ni Invar alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(12): 4948 – 4957.
- [19] Fu G, Lourenco M I, Duan M L, *et al.* Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures[J]. Marine Structures, 2016, 46: 30 – 55.

第一作者: 桂晓燕, 硕士; 主要从事焊接数值模拟研究;  
Email: 1614714604@qq.com.

通信作者: 高向东, 博士, 教授, 博士研究生导师;  
Email: gaoxid@gdut.edu.cn.

(编辑: 郑红)