

# 复杂铝合金焊接结构的残余应力数值模拟分析

张月来<sup>1</sup>, 彭章祝<sup>1</sup>, 常茂椿<sup>2</sup>, 胡龙<sup>2</sup>, 潘国昌<sup>3</sup>, 徐博<sup>3</sup>

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 株洲, 412001; 2. 重庆大学, 重庆, 400045; 3. 北京伊萨科技发展有限公司, 北京, 100090)

**摘要:** 以 SYSWELD 有限元软件为平台, 开发了基于瞬间热源的高效计算方法来模拟复杂铝合金结构的焊接残余应力。首先以 6061 铝合金平板堆焊接头为研究对象, 分别采用移动热源和瞬间热源计算接头的焊接残余应力, 对比两者的计算结果验证瞬间热源法的有效性。随后, 将所开发的高效计算方法用于模拟 6 系铝合金复杂结构的焊接瞬态应力和残余应力, 并将计算结果用于分析实际产品制造中开裂问题的原因, 并提出了两种减缓和防止铝合金结构开裂的方案, 即减小焊接热输入和增大开裂位置型材的板厚。结果表明, 铝合金结构在焊接生产制造过程中发生开裂是由该位置产生了高瞬态拉伸应力所致。降低关键焊缝焊接热输入和增加型材板厚, 均对结构开裂位置的瞬态焊接应力有一定程度的改善, 且增加型材厚度的改善效果更好。

**创新点:** 基于 SYSWELD 有限元软件, 开发了铝合金焊接残余应力高效计算方法, 使用高效计算方法实现对铝合金结构设计和焊接工艺的改善。

**关键词:** 焊接残余应力; 数值模拟; 瞬间热源; 铝合金结构

中图分类号: TG 446<sup>+</sup>.1 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20201215001

## 0 序言

铝合金作为重要的轻量化材料, 近年来被广泛应用于航空、船舶、轨道交通和汽车等行业<sup>[1]</sup>。由于熔化焊设计上的灵活性, 且具有较高的生产效率和低成本等优势, 成为结构装配时最常用的连接方法之一, 但焊接过程中产生的瞬态应力有时会直接导致被焊工件开裂, 而残余应力对结构的疲劳强度、抗应力腐蚀能力甚至结构稳定性都有较大的影响。因此, 调控焊接结构在焊接过程中的应力以及焊后的残余应力成为了工程中高度重视的课题<sup>[2]</sup>。

随着计算焊接力学的不断发展, 数值模拟技术已被广泛应用于预测各类工程结构的焊接残余应力和变形<sup>[3]</sup>。以往的研究中多针对铝合金接头进行焊接数值模拟<sup>[4-6]</sup>, 所采用的热—弹—塑性有限元方法模拟焊接残余应力时需要较长的计算时间<sup>[7]</sup>。如果研究对象是尺寸较大或焊缝数量庞大的复杂焊接结构, 很难采用常规的热—弹—塑性有限元方法来获得结构的残余应力。为了克服这一困难, 开发了一种面向实际工程应用的数值模拟方法, 采用简

化的瞬间热源来代替传统的移动热源, 进而大幅提高计算效率。

关于采用简化热源模型及焊道合并技术来模拟厚板多层多道焊接头的残余应力, 文献 [8-9] 对低合金高强钢、奥氏体不锈钢和镍基合金厚板焊接接头的残余应力进行了研究。结果表明, 瞬间热源和焊道合并技术可以有效预测焊接接头的残余应力, 该方法在不过度损失计算精度的情况下可以大幅提高计算效率进而缩短计算时间。对于铝合金结构而言, 由于其热导率远大于低合金高强钢、镍基合金及奥氏体不锈钢<sup>[10]</sup>, 因此有必要研究瞬间热源是否可以用于预测铝合金焊接结构的残余应力。

基于 SYSWELD 软件平台开发了基于瞬间热源模型的高效计算方法来模拟焊接残余应力。首先, 以 300 mm × 200 mm × 10 mm 的 6061 铝合金平板堆焊接头为研究对象, 分别采用移动热源和瞬间热源来计算单道堆焊的温度场与残余应力, 通过比较两种数值模拟结果来验证瞬间热源的可行性。随后, 以高铁列车用的 6 系薄板铝合金产品为研究对象, 采用所开发的高效计算方法来计算复杂铝合金薄板结构的残余应力, 并研究关键部位的几何尺寸和焊接热输入对焊接残余应力的影响, 为优化产品结构设计和控制焊接结构的残余应力提供科学依据。

## 1 平板单道堆焊接头的残余应力

### 1.1 有限元模型的建立

图 1 为平板堆焊接头有限元网格模型. 使用 SYSWELD 软件建立  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 3D 模型, 均采用六面体单元, 总单元数为 33 800 个, 总节点数为 40 804 个. 为兼顾计算精度和计算时间, 距离焊缝较近位置网格较为细密, 而距离焊缝较远位置网格相对稀疏. 对模型施加如图黑色箭头所示的拘束条件用于防止模型的刚性位移.

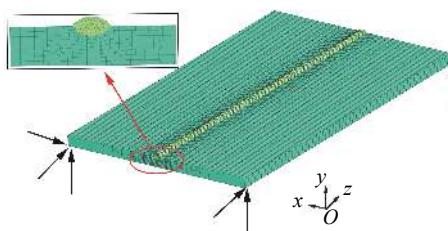


图 1 3D 有限元网格模型及边界条件

Fig. 1 3D element model and constraint condition

### 1.2 移动热源模型与瞬间热源模型

#### 1.2.1 移动热源模型

温度场计算时, 采用了由 Goldak 提出的移动热源模型<sup>[11]</sup>. 而在 SYSWELD 软件中, 为了使计算过程具有更好的收敛性, 将双椭球热源进行了归一化处理, 热流密度分布更均匀, 亦可较好的实现焊接温度场的数值模拟. 其前后  $1/4$  椭球的热流密度为

$$q_f(x, y, z) = Q_f \exp \left[ - \left( \frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right] \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = Q_r \exp \left[ - \left( \frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $Q_f$ ,  $Q_r$  分别为前后  $1/4$  椭球进行归一化处理后的电弧热输入;  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$ ,  $c$  分别为椭球的形状参数; 默认条件  $Q_f/Q_r=1.2$ ,  $a_f/a_r=0.6$ .

焊接过程除了考虑工件自身不同区域的热传导, 还采用 Newton 定律来考虑工件表面与环境的对流传热, 用 Stefan-Boltzmann 定律来考虑工件表面的辐射散热, 分别用公式 (3)~式 (4) 来表示.

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

式中:  $q_c$  为对流散热功率;  $h_c$  为材料表面散热系数,  $\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$ ;  $T$  为焊接过程中的瞬时温度;  $T_0$  为室温 ( $20 \text{ °C}$ ).

$$q_r = \varepsilon_r \sigma_r [(T + 273.15)^4 - (T_0 + 273.15)^4] \quad (4)$$

式中:  $q_r$  为辐射散热功率;  $\varepsilon_r$  为材料黑度系数,  $\varepsilon_r =$

0.8;  $\sigma_r$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\sigma_r = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$ .

研究考虑了 6061 铝合金的材料非线性特点, 具体性能参数如图 2 所示.

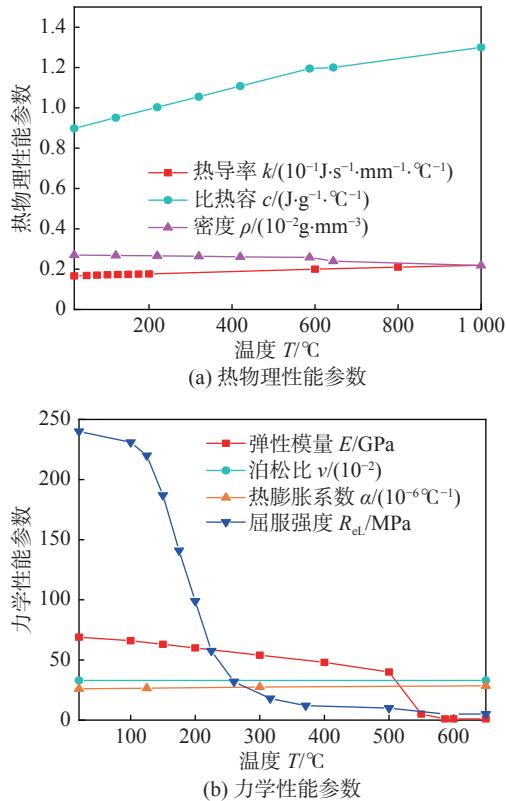


图 2 6061 铝合金材料参数

Fig. 2 Material properties parameters of 6061 aluminum alloy. (a) thermal physical properties parameters; (b) mechanical properties parameters

#### 1.2.2 瞬间热源模型

瞬间热源模型是在短时间内对整个焊道同时加热的热源模型. 该热源是一个等密度分布的体积热源, 在保持总热量不变的情况下, 通过调整瞬间热源的热流密度  $q$  和加热时间  $t_h$ , 使得熔池形状和峰值温度控制在合理范围内. 瞬间热源的热流密度  $q$  为

$$q = \frac{\eta U I L}{v t_h V} \quad (5)$$

式中:  $q$  为热流密度;  $U$  为电弧电压;  $I$  为焊接电流;  $\eta$  为焊接效率;  $L$  为整条焊道的长度;  $v$  为焊接速度;  $t_h$  为加热时间, 研究定义  $t_h=2.7 \text{ s}$ ;  $V$  为整条焊缝的体积.

### 1.3 结果分析

图 3 为使用移动热源和瞬间热源模型计算获得的平板对接接头中央截面处的峰值温度分布云图. 6061 铝合金固相线温度为  $592 \text{ °C}$ , 液相线为

654 °C,因此定义温度场计算中 650 °C 以上区域为熔池. 从图 3 可以看出,采用移动热源和瞬间热源计算得到的峰值温度大小、熔池大小及热影响区宽度等基本一致,说明可以采用瞬间热源来计算铝合金焊接过程的温度场. 图 4 为接头表面残余应力分布,横向、纵向应力分布总体上较为相似. 图 5 为对

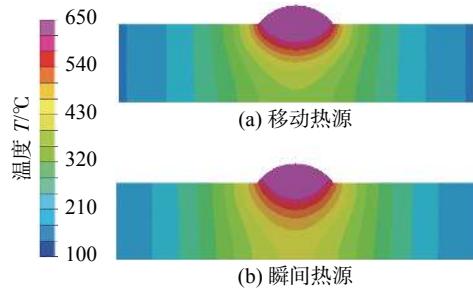


图 3 中央截面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of cross section. (a) moving heat source; (b) instantaneous heat source

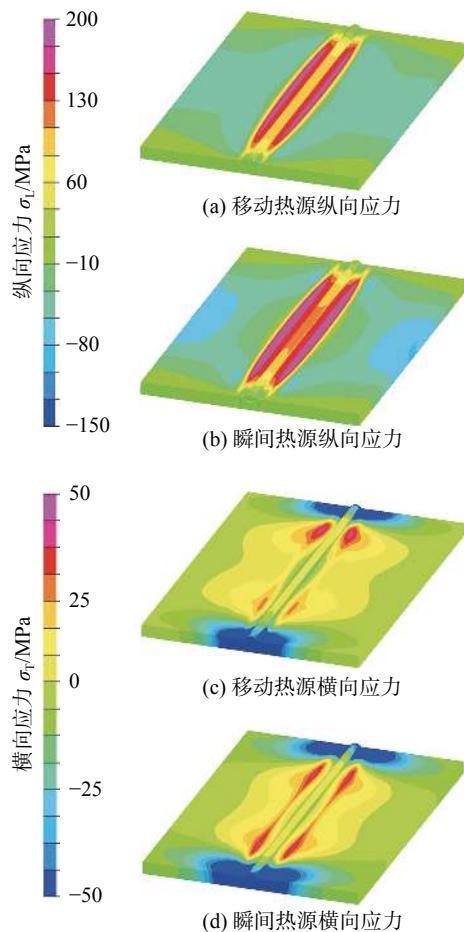


图 4 接头表面残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of joint surface. (a) longitudinal residual stress by moving heat source; (b) longitudinal residual stress by instantaneous heat source; (c) transverse residual stress by moving heat source; (d) transverse residual stress by instantaneous heat source

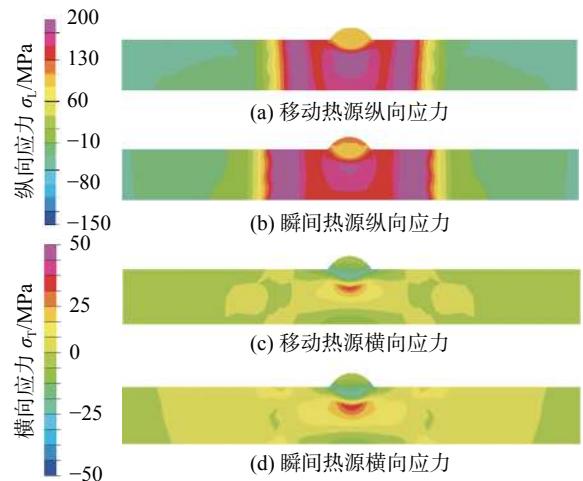


图 5 截面残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution of cross section. (a) longitudinal residual stress by moving heat source; (b) longitudinal residual stress by instantaneous heat source; (c) transverse residual stress by moving heat source; (d) transverse residual stress by instantaneous heat source

接头中央截面纵向和横向残余应力分布云图. 从图 4 和图 5 可以看出, 移动热源与瞬间热源计算得到了相似的纵向与横向残余应力分布. 两者计算得到的焊缝及热影响区均存在较高的拉应力, 且高应力区域穿透整个板材厚度, 热影响区外纵向残余应力很快降低为压应力. 采用移动热源和瞬间热源计算得到的纵向拉应力峰值分别达到 232, 254 MPa. 横向残余应力主要出现在焊道下部及焊缝边缘两侧的母材位置, 移动热源和瞬间热源计算得到的横向应力峰值分别为 35, 42 MPa. 在焊道中则主要为较低的横向压应力, 且在焊道底部压应力大于焊道上部区域.

通过上述温度场和应力场计算结果的对比, 发现采用瞬间热源计算得到的温度分布基本与移动热源一致, 但由于瞬间热源是对整个焊道同时加热, 因此在焊道中相对移动热源会有略高的热量累积, 造成温度场和应力场范围较移动热源略有增大. 由于瞬间热源对整个焊缝同时加热, 减小了焊接接头的局部刚度, 横向残余应力的计算精度会受到一定程度的影响. 但是, 当结构本身的刚度较大, 板厚较厚并且采用多层多道焊时, 这种影响的程度会更小一些. 两种热源模型的计算均在同一计算机设备 (CPU 6 核, RAM 16GB) 上完成, 从计算时间来看, 采用瞬间热源可以较大幅度节省计算时间. 先前的研究也已经证明与移动热源相比, 瞬间热源

能大幅提高计算效率<sup>[8-9]</sup>. 因此可以认为瞬间热源能用于铝合金焊接残余应力的计算, 并能有效提高计算效率.

## 2 复杂铝合金结构的残余应力

### 2.1 有限元模型

对某车辆边梁焊接结构进行残余应力数值模拟分析, 建立了与实际焊接结构尺寸及形状完全一致的三维实体模型, 如图 6 所示. 对实体模型进行了网格划分, 该结构的网格模型单元数为 268 893 个, 节点数为 315 433 个. 对模型施加拘束限制刚性位移, 并依据实际焊接拘束条件限制图 6 所示位置节点法向位移.

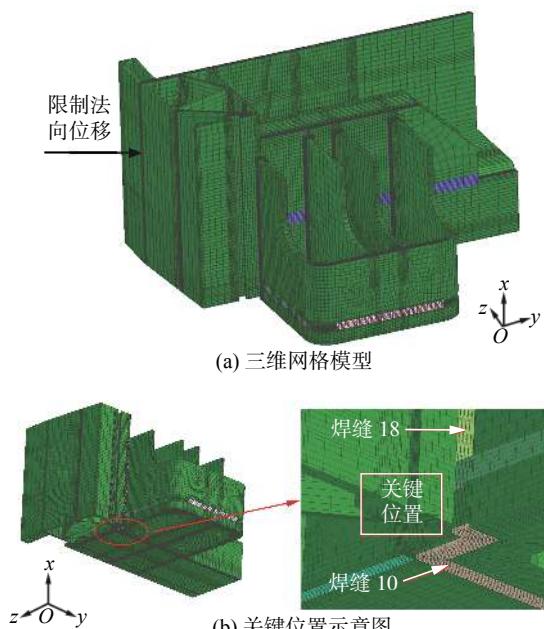


图 6 复杂铝合金焊接结构有限元网格模型

Fig. 6 Finite element mesh model of aluminum alloy welding structure. (a) 3D element model; (b) key position

该铝合金结构较为复杂, 包含两种接头形式: 对接和角接, 如图 7 所示, 且均为多层多道焊接接头. 该结构有 21 条焊缝, 共计 83 个焊道, 采用 MIG

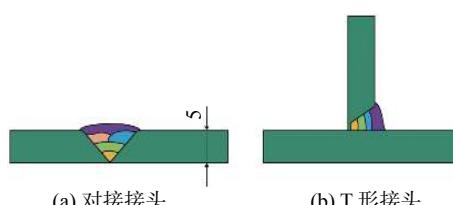


图 7 焊接接头形式 (mm)

Fig. 7 Type of weld joints. (a) butt joint; (b) T joint

焊方法, 单道热输入控制在 1.0 kJ/mm 左右. 在现有的计算能力条件下, 所有焊道均采用移动热源进行计算, 所花费时间预计将超过一个半月. 为尽量降低计算精度损失且节省计算时间, 文中采用焊缝内部焊道施加瞬间热源, 表层焊道施加移动热源的方式计算铝合金构件的焊接温度场及残余应力.

为了缓解关键位置在焊接过程中的瞬态焊接应力, 研究提出两种解决方案: 方案一是减少焊缝 18 的热输入; 方案二是增加关键位置处型材的板厚. 为了与原始计算案例 A 作对比, 研究追加了两个计算案例, 即计算案例 B 和计算案例 C. 在计算案例 B 中, 焊缝 18 的热输入降低 15%, 在计算案例 C 中, 关键位置处板厚从 5 mm 增加至 10 mm, 如图 8 所示.

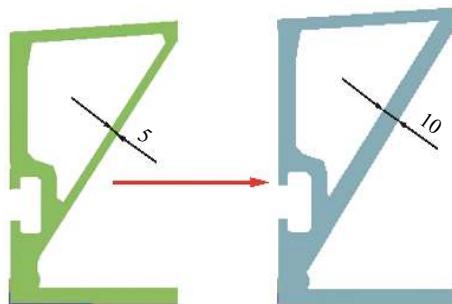


图 8 关键位置板材增厚 (mm)

Fig. 8 Thickening of the plate in key position

### 2.2 结果分析

图 9 显示了铝合金构件在焊接过程中峰值温度超过 650 °C 区域, 即焊接仿真形成的熔化区域. 计算过程中, 熔池的温度范围在 650 ~ 1000 °C 之间.

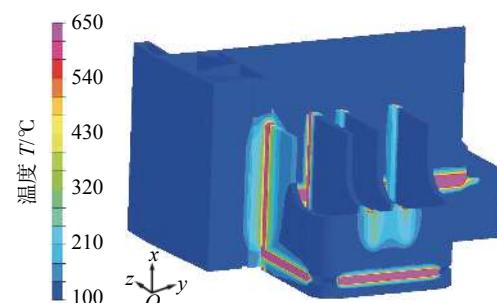


图 9 温度分布

Fig. 9 Temperature distribution

图 10 为铝合金构件焊缝 18 焊接完成时刻关键位置  $y$  向残余应力云图及断裂位置示意图. 从图 10 可以发现, 在焊缝位置及远离焊缝 18 的关键位置处 (图 6 所示中距离焊缝 18 约 58 mm) 出现了较高的瞬态焊接应力. 这一位置产生高瞬态焊接应

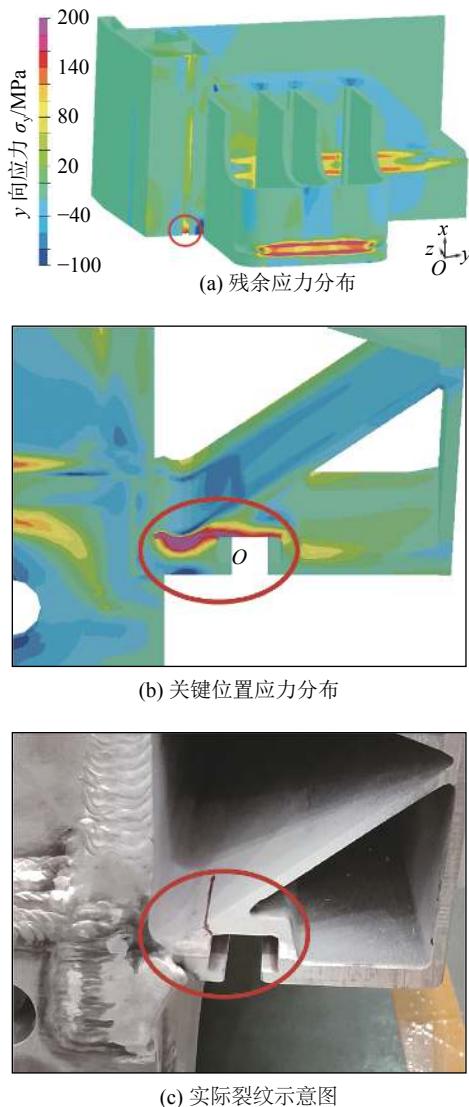


图 10 焊缝 18 完成时刻关键位置  $y$  向残余应力及裂纹示意图

Fig. 10 Diagram of  $y$ -direction residual stress and crack of key position after welding weld 18. (a) residual stress distribution; (b) residual stress of key position; (c) actual crack diagram

力的原因,一方面是源于焊接热输入,另一方面是由于此处的结构拘束比较大。此外,由于截面形状引起的应力集中也是原因之一。由于铝合金型材在制备过程中往往要经历较大的塑性变形,不可避免有初期残余应力产生。焊缝及其附近位置经历较高的峰值温度,制备过程中产生的初期残余应力会被消除。

图 11 为关键位置在整个焊接过程各方向应力的演变过程。从图中可以看出关键位置经历的峰值温度在 100 ℃左右,制备过程产生的初期残余应力不会被消除。还发现在整个焊接过程中,  $x$  和  $z$  两个方向的残余应力值变化范围不大;在焊缝 18 加热完成时,产生了高达 200 MPa 的  $y$  向拉伸残余应

力。因此在焊缝 18 加热完成时刻,在初期残余应力和较高的瞬态拉伸应力的叠加作用下,关键位置的实际应力可能将达到并超过此时材料对应的屈服强度,为开裂发生的高风险区域。在实际产品试制中发现,部分产品在关键位置处也产生了如图 10 所示的焊接裂纹。

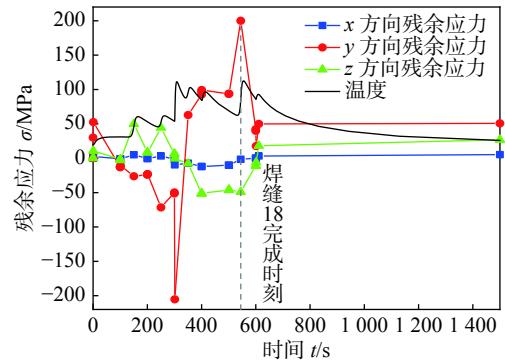


图 11 关键位置温度及残余应力演变

Fig. 11 Evolution of temperature and residual stress in key position

图 12 为计算案例 A、计算案例 B 和计算案例 C 在关键位置处焊接过程  $y$  向残余应力的演变过程。从图 12 可以看出,优化焊接工艺及结构前后关键位置处的  $y$  向应力演变过程基本一致。在焊缝 18 焊接完成时,  $y$  向应力峰值有所不同。计算案例 B 和计算案例 C 在焊缝 18 焊接完成时的  $y$  向瞬态焊接应力分别为 180.5 MPa 和 164.0 MPa, 均小于计算案例 A 在焊缝 18 焊接完成时的  $y$  向瞬态焊接应力 (200.0 MPa), 其中计算案例 C 的降幅最大, 达到了 18%。因此可以得到这样的结论, 即减小焊接热输入和增加关键位置板材厚度均可在一定程度降低该结构关键位置处的瞬态焊接应力, 且增加型材厚度的改善效果更加明显。在实际产品制造过程中, 采用适当增大板厚的方法, 该产品结构未出现焊接裂纹。

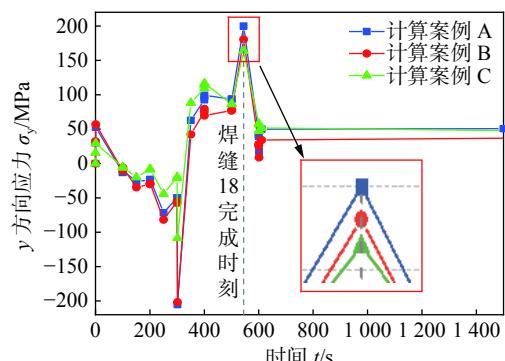


图 12 关键位置  $y$  方向残余应力演变

Fig. 12 Evolution of  $y$ -direction residual stress in key position

### 3 结论

(1) 利用移动热源和瞬间热源模拟 6061 铝合金平板堆焊温度场和应力场, 证明了瞬间热源模型应用于铝合金焊接温度场和应力场仿真并能提高计算效率的可行性.

(2) 设计优化前, 焊接过程中所有焊缝及远离焊缝 18 的关键位置均产生了较高的瞬态拉伸应力. 焊缝位置在前期制备过程产生的初期残余应力会被消除, 关键位置的初期残余应力不会被消除, 且与较高的瞬态拉伸应力叠加作用下, 为较高风险区域.

(3) 优化后的计算结果显示, 减小焊接热输入可以缓解关键位置的瞬态焊接应力, 但是与增加型材板厚相比效果并不显著. 增加型材板厚可以较大幅度地减缓关键位置的瞬态焊接应力.

### 参考文献

- [1] Wahid M A, Siddiquee A N, Khan Z A. Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint[J]. *Marine System & Ocean Technology*, 2020, 15: 70 – 80.
- [2] 孟金奎, 王萍, 马健潇, 等. 焊接残余应力对 7N01 铝合金疲劳裂纹扩展影响 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(9): 25 – 29.  
Meng Jinkui, Wang Ping, Ma Jianxiao, *et al.* The effect of welding residual stress to the fatigue crack growth of 7N01 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(9): 25 – 29.
- [3] Deng Dean, Liang Wei, Murakawa H. Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 183(2): 219 – 225.
- [4] 林相远, 张威, 王利, 等. 6XXX 系铝合金弧焊与高功率激光焊组织性能对比 [J]. *有色金属加工*, 2020, 49(2): 16 – 19.  
Lin Xiangyuan, Zhang Wei, Wang Li, *et al.* Comparison of microstructure and properties of 6XXX series aluminum alloy arc welding and large power laser welding[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2020, 49(2): 16 – 19.
- [5] 李桓, 徐光需, 张宇辉, 等. 2219/5A06 异种铝合金焊接接头组织与性能相关性 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(9): 8 – 15.  
Li Heng, Xu Guangpei, Zhang Yuhui, *et al.* Correlation of structure and properties of 2219/5A06 dissimilar aluminum alloy welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(9): 8 – 15.
- [6] 董晓晶, 李桓, 杨立军, 等. 铝合金多股复合焊丝脉冲 MIG 焊接接头组织与性能分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(11): 61 – 67.  
Dong Xiaojing, Li Huan, Yang Lijun, *et al.* Analysis of structure and properties of pulsed MIG welding joints of aluminum alloy multi-strand composite welding wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(11): 61 – 67.
- [7] Deng Dean, Hidekazu Murakawa, Liang Wei. Numerical simulation of welding distortion in large structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196: 45 – 48.
- [8] 胡兴, 戴培元, 张超华, 等. 合并焊道法对 SUS304 不锈钢平板对接接头焊接残余应力计算精度和效率的影响 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 72 – 82.  
Hu Xing, Dai Peiyuan, Zhang Chaohua, *et al.* The effect of combined weld bead method on the calculation accuracy and efficiency of welding residual stress of SUS304 stainless steel plate butt joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 72 – 82.
- [9] 孙加民, 邓德安, 叶延洪, 等. 用瞬间热源模拟 Q390 高强钢厚板多层多道焊 T 形接头的焊接残余应力 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(7): 31 – 34.  
Sun Jiamin, Deng Dean, Ye Yanhong, *et al.* Simulation of welding residual stress with transient heat source in Q390 high strength steel multi-pass T-joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(7): 31 – 34.
- [10] 颜祯, 谢伟伟, 尹志新. 连续碳纤维铝基复合材料横向等效热导率的模拟分析 [J]. *装备制造技术*, 2020(2): 21 – 23.  
Yan Zhen, Xie Weiwei, Yin Zhixin. Simulation analysis of transverse equivalent thermal conductivity of continuous carbon fiber aluminum matrix composite[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020(2): 21 – 23.
- [11] 牛志伟, 黄继华, 刘凯凯, 等. Al-Si-Ge-Zn 钎料钎焊 6061 铝合金接头组织与性能分析 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(9): 97 – 101.  
Niu Zhiwei, Huang Jihua, Liu Kaikai, *et al.* Microstructure and property of 6061 aluminum alloy brazed joint with Al-Si-Ge-Zn filler metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(9): 97 – 101.

第一作者: 张月来, 博士, 高级工程师; 主要从事轨道交通车辆制造材料及焊接技术研究工作; Email: zhangyuelai.zz@crccgc.cc.

(编辑: 戴红)