

轨道车辆型材结构搅拌摩擦焊残余状态研究

刘其鹏^{1a, 1b, 2}, 王忠旭^{1c}, 高月华^{1c}, 杨鑫华^{1a, 2}

(1. 大连交通大学 a. 材料科学与工程学院; b. 土木与安全工程学院; c. 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连市轨道交通装备焊接结构与智能制造技术重点实验室, 辽宁 大连 116028)

摘要: 目的 研究轨道车辆中典型的箱型和 V 筋结构型材搅拌摩擦焊残余状态。方法 采用顺序热力耦合方法进行了搅拌摩擦焊残余应力及变形的仿真研究。结果 给出了上下壁板焊缝区域的残余应力大小及分布规律, 阐述了两种结构的横向和纵向残余变形特征。对 V 筋结构型材, 分析了不同筋板角度对焊接残余状态的影响。结论 残余应力方面, 主要表现为纵向残余应力, 上下壁板两条焊缝的残余应力峰值相近, 高应力分布区域宽度差别较大。残余变形方面, 箱型结构呈马鞍形, V 筋型材呈下凹形。V 筋型材筋板夹角的变化对残余应力没有显著影响。筋板角度增大, 纵向残余变形减小而横向残余变形增大。

关键词: 搅拌摩擦焊; 轨道车辆型材; 残余应力与变形; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.016

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)04-0101-07

Residual State of Friction Stir Welding of Rail Vehicle Profile Structures

LIU Qi-peng^{1a,1b,2}, WANG Zhong-xu^{1c}, GAO Yue-hua^{1c}, YANG Xin-hua^{1a,2}

(1. a. School of Materials Science and Engineering; b. School of Civil and Safety Engineering; c. School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Dalian Key Laboratory of Welded Structures and Its IMT of Rail Transportation Equipment, Dalian 116028, China)

ABSTRACT: The paper aims to study residual states of friction stir welding of rail vehicle box and V bar profile structures. Simulation study was carried out based on the sequential thermo-mechanical coupling method. The value and distribution of residual stress in weld areas located at the top and bottom panel were analyzed in details. The distribution characteristics of transverse and longitudinal residual deformation of two structures were expounded, and influence of V bar angle on the residual state was discussed. The residual stress is mainly shown as the longitudinal residual stress, the peak value of the residual stress of the two welds in the upper and lower panels is similar, and the width of the high stress distribution is different. In terms of residual deformation, the box structure is saddle shaped and the V bar profile is concave. The change of the angle between the V bar profiles has no significant effect on the residual stress. With the increase of bar angle, the longitudinal residual deformation decreases and the transverse residual deformation increases.

KEY WORDS: friction stir welding; profiles of railway vehicles; residual stress and deformation; numerical simulation

近年来, 随着我国高铁、地铁等建设事业的快速发展, 轨道车辆结构的综合性能要求在不断提升。铝合金型材因其密度低、比强度和比刚度高以及耐腐蚀

等优点成为高速列车以及城轨车辆车体的主要结构。采用传统熔化焊连接铝合金结构时易出现气孔、裂纹等缺陷。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20170540120, 2015020120); 大连市高层次人才创新支持计划(2015R075); 国家自然科学基金(11202041); 辽宁特聘教授项目

作者简介: 刘其鹏(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为轨道车辆焊接结构性能仿真与优化设计。

一种新型固相连接技术，焊接过程热输入较小，不会出现材料的熔化现象，焊缝区域不易出现气孔和裂纹等缺陷，并且具有噪声低、污染小等优势，在铝合金车体的生产和制造中得到了广泛应用^[1-2]。李红^[3]、王庆峰^[4]对不同厚度的6005A-T6铝合金型材接头进行了拉伸与弯曲试验研究，以确定合理的工艺参数。朱向东^[5]对6082-T6和6005A-T6两种铝合金母材及FSW接头疲劳性能进行了研究，并分析指出焊后残余应力对研究焊接接头疲劳强度是非常重要的。

FSW过程是一个复杂的热力耦合过程，通常伴随着温度以及应力应变的显著变化，导致焊后接头出现残余应力和变形，严重影响焊后构件疲劳性能及其装配和使用，因此，对搅拌摩擦焊接构件的残余应力和变形进行研究是十分必要和重要的。近年来，国内外学者对铝合金板材FSW残余应力和变形的分布规律^[6-8]以及工艺参数^[9-10]、几何尺寸^[11-12]等因素的影响进行了广泛而深入的研究。但上述研究集中于板材结构，对于轨道车辆型材结构的研究很少，主要有张亚等^[13]采用分段温度函数法，对6N01-T5铝合金列车侧墙FSW残余变形进行了仿真研究与焊序优化；朱卫等^[14]针对6005A-T6铝合金型材建立了一个热力耦合有限元模型，初步给出了焊接及冷却阶段的温度场与应力分布；迟哲等^[15]针对某地铁列车侧墙型材结构，发展了固有应变法，对残余变形进行了分析。

综上，对于铝合金板材FSW残余状态的研究已经比较充分，然而，由于型材的连接方式、横截面结构等都与板材不同，针对板材的研究结论不能直接应用于型材结构^[13-15]，因此，轨道车辆型材结构的FSW焊后残余应力及变形的研究工作仍有待进一步深入和开展。文中基于ABAQUS软件，采用顺序热力耦合方法，对轨道车辆中典型的箱型和V筋结构型材的FSW残余状态进行仿真研究。温度场以及部分残余状态模拟结果与文献中已有结果的一致性表明了文中模型的合理性与有效性。详细分析了接头处上下壁板焊缝区域的纵向和横向残余应力的大小及分布规律，阐述了两种结构的横向和纵向残余变形的分布特征，并分析和讨论了筋板角度对V筋型材残余状态的影响。

1 理论简介

文中采用顺序热力耦合途径对搅拌摩擦焊接过程进行仿真，首先进行瞬态传热分析，然后将所得温度场作为载荷施加到热应力计算中。瞬态传热控制方程见式(1)。

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

式中：T为温度；t为时间变量；ρ、c、k分别为密度、比热容和导热系数；Q为热源项。在空间域内进行离散^[16]，根据伽辽金加权余量法可得域内的有限元方程见式(2)。

$$[K]\{T\} + [C]\frac{\partial\{T\}}{\partial t} = \{P\} \quad (2)$$

式中：[K]为热传导刚度矩阵；{T}为节点温度向量；[C]为热容矩阵；{P}为热流向量。时间域内采用加权差分法进行离散，t到t+Δt时间段内计算公式为：

$$\{T\}^{(t+\Delta t)} = \theta\{T\}^{(t+\Delta t)} + (1-\theta)\{T\}^{(t)} \quad (3)$$

式中：θ为加权系数。

热应力计算中，与经典弹塑性理论不同之处在于本构关系需要同时考虑弹性、塑性和温度的影响。对于塑性区的材料，其总应变增量{dε}等于弹性应变增量{dε_e}、材料温度效应引起的应变增量{dε_{e,T}}、塑性应变增量{dε_p}以及温度应变增量{dε_T}之和^[11,17]，有：

$$\begin{aligned} \{d\epsilon\} &= \{d\epsilon_e\} + \{d\epsilon_{e,T}\} + \{d\epsilon_p\} + \{d\epsilon_T\} = \\ &[D_e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D_e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \lambda\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\} + \{\alpha\}dT \end{aligned} \quad (4)$$

式中：[D_e]为弹性矩阵；λ为塑性乘子；f为塑性势函数；{α}为热膨胀系数矩阵；{σ}和{dσ}分别为应力和应力增量向量。由最小势能原理或加权余量法建立增量形式的热弹塑性有限元方程，并在时间域内采用Newton-Raphson方法进行求解，则在t+Δt时刻，求解方程可表示为：

$$[K_s]^{(t+\Delta t, n)}\{\Delta u\}^{(n)} = \{\Delta F\}^{(n)} \quad (5)$$

式中：n为迭代次数；[K_s]为总刚度矩阵；{ΔF}为载荷增量向量；{Δu}为位移增量。且有：

$$[K_s]^{(t+\Delta t, n)} = \sum_e \int_{\Omega_e} [B]^T [D]_{ep}^{(t+\Delta t, n)} [B] d\Omega \quad (6)$$

$$\{\Delta F\}^{(n)} = \{F\}^{(t+\Delta t)} - \sum_e \int_{\Omega_e} [B]^T \{\sigma\}^{(t, n)} d\Omega \quad (7)$$

式中：Ω_e表示单元域；[B]为单元几何矩阵；{F}为外载荷向量。通过上述公式迭代求解得到位移增量{Δu}，通过几何关系和本构关系求得应变及应力增量，进而得到当前的应变和应力状态。

2 型材结构及FSW连接

轨道车辆中的型材结构，从横断面的不同可分为两种，一种是垂直筋板的箱型断面，见图1a；另一种是倾斜筋板的V型断面，见图1b。文中对这两种不同断面的型材结构进行研究。型材的FSW连接见图1。由于型材结构的特殊性，通常采用搭接焊^[1-2]，

并且接头一般有上下两条焊缝。从图 1 可以看出, 型材接头区域通常设有两条立柱筋板, 并对焊缝所在处的立柱进一步加粗。这是因为在搅拌摩擦焊接过程中, 搅拌头会对焊件施加机械载荷, 加粗立柱以更好地承受来自搅拌头的下压力。

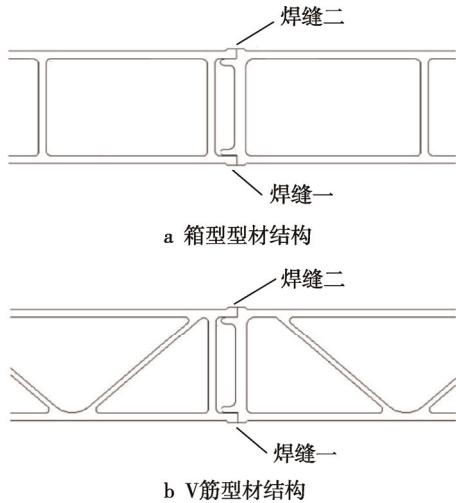


图 1 型材搅拌摩擦焊接头

Fig.1 Joint of friction stir welding of profiles

3 有限元模型

箱型和 V 筋型材的有限元模型见图 2, 仿真过程未建立大尺寸的侧墙或地板模型, 而是在焊缝接头两侧各建立一个型材胞元结构, 这样做既能反映型材结构的基本特征, 又能大大节省计算量。箱型和 V 筋型材的整体尺寸分别为 $340 \text{ mm} \times 177.5 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 和 $340 \text{ mm} \times 216.5 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 上下壁板厚度为 3 mm , 筋板厚度为 2.5 mm 。焊缝区单元尺寸较小, 网格较

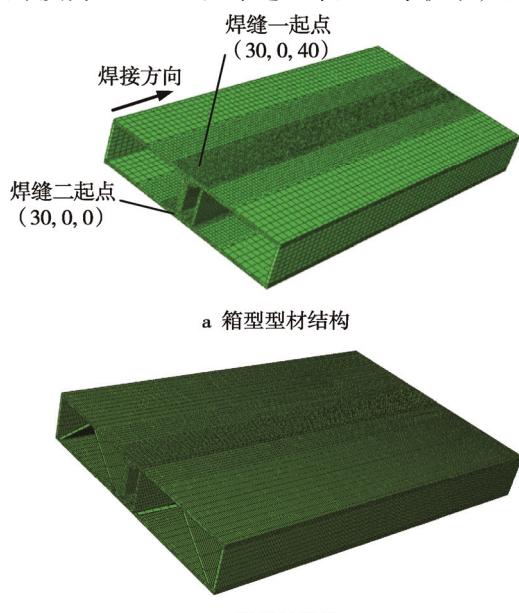


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

密; 远离焊缝区单元尺寸逐渐增大, 网格较稀疏, 单元类型为八节点六面体单元, 箱型型材单元数为 95 536, V 筋型材单元数为 139 776。坐标系 x 方向为焊接前进方向, 即为纵向; y 方向代表模型宽度方向, 即为横向; z 方向代表厚度方向, 即为竖向; 其中坐标原点位于第二道焊缝所在平面。

模型中未建立夹具和垫板实体模型, 而是采用等效热力学条件代替。模拟温度场时, 垫板和夹具位置处考虑为增大的对流换热边界条件, 其对流换热系数设为 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; 其余对流面和空气接触, 换热系数设为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, 环境温度设为 20°C 。应力计算时, 夹具和垫板位置固定相应节点的自由度。型材材料为 6005A-T6, 其热力学物性参数见文献[14]。

文中采用顺序热力耦合途径对型材结构进行搅拌摩擦焊仿真分析。热源模型采用面-体热源^[11], 计算公式为:

$$q_s(r) = \frac{3Q_s r}{2\pi(R_0^3 - R_1^3)} \quad (R_1 \leq r \leq R_0) \quad (8)$$

$$q_p(r) = \frac{Q_p}{\pi R_1^2 H} \quad (r \leq R_1) \quad (9)$$

式中: q_s 和 q_p 分别表示轴肩和搅拌针区域的热流密度; $Q_s = 0.75Q_{tot}$ 为轴肩产热功率; $Q_p = 0.25Q_{tot}$ 为搅拌针产热功率; Q_{tot} 为焊接的输入功率; R_0 为搅拌头轴肩半径; R_1 为搅拌针半径; H 为搅拌针高度。上述公式通过 DFLUX 子程序以移动热源的形式实现。搅拌头下压力计算公式为:

$$p = \frac{F_N}{\pi R_0^2} \quad (10)$$

式中: p 为施加到焊件表面的压力; F_N 为搅拌头顶锻压力, 取 5 kN ^[14]。压力公式通过 DLOAD 子程序以移动面荷载的方式实现。

针对图 2 的型材结构, 采用上下两道焊缝的焊接方式。先焊接上表面, 作为第一道焊缝, 焊接开始点处的坐标为 $(30, 0, 40)$; 然后模型翻转焊接底面, 作为第二道焊缝, 焊接开始点处的坐标为 $(30, 0, 0)$ 。焊接两条焊缝所用的参数相同, 搅拌头转速 750 r/min , 焊速 240 mm/min ; 轴肩半径为 6 mm , 搅拌针半径为 1.8 mm , 搅拌针高为 2.9 mm 。焊接结束, 待焊板冷却一段时间后, 选取少量节点进行约束, 使薄板能够自由伸展的同时又避免产生刚体位移, 以获得合理的焊后状态。V 筋型材有限元模型的坐标系、焊接顺序和方向、以及参数设置等均与箱型型材一致。

4 箱型型材残余状态仿真分析

4.1 温度场

箱型型材两道焊缝所在表面温度场的仿真结果

见图3。在稳态焊接阶段，上下两道焊缝温度场分布形式基本相同，但焊缝峰值温度不同。焊缝1峰值温度为509 °C，而焊缝2峰值温度为524.3 °C。焊缝2峰值温度较高是因为其焊接过程会受到焊缝1温度的影响。此外，两道焊缝最高温度均低于材料熔点温度，焊接过程属于固相连接。温度场分布呈椭圆形，搅拌头前方梯度较高，等温线密集，后方梯度较低等温线较稀疏。图3给出的温度场分布与已有的结论相符^[13-15]。

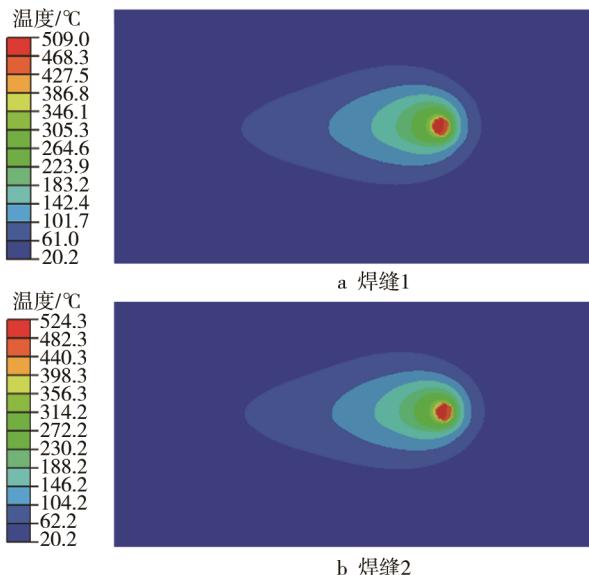


图3 焊接过程温度场
Fig.3 Temperature field in welding

4.2 残余应力及变形

构件中间位置处横截面上下两道焊缝所在壁板的残余应力变化见图4，其中S11和S22分别为纵向残余应力和横向残余应力。由图4可以看出，纵向和横向残余应力都呈不对称分布，这是因为在接头区域型腔内的两条筋板立柱粗细不一致，结构的不对称导致残余应力分布的不对称。上下壁板纵向残余应力在焊缝区域均表现为拉应力，向两侧逐渐变化为压应力。纵向残余拉应力集中分布在焊缝区域约两倍轴肩

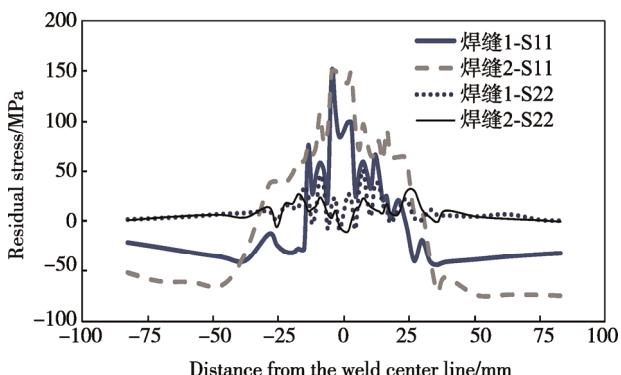


图4 箱型型材壁板横截面残余应力
Fig.4 Residual stress of panel section of box profiles

直径范围内，峰值则位于搅拌头轴肩边缘附近。焊缝2的纵向拉应力区域更宽，纵向拉应力和压应力的值均大于焊缝1。此外，横向残余应力远小于纵向残余应力，说明了焊后应力主要表现为纵向残余应力。

焊后的残余变形云图见图5（放大50倍）。图5中上表面为焊缝2所在面，可以看出，结构的不对称导致焊后残余变形也呈不对称分布。变形后结构整体呈横向向上凸、纵向下凹的马鞍形，与文献中对类似结构的描述相一致^[13]。

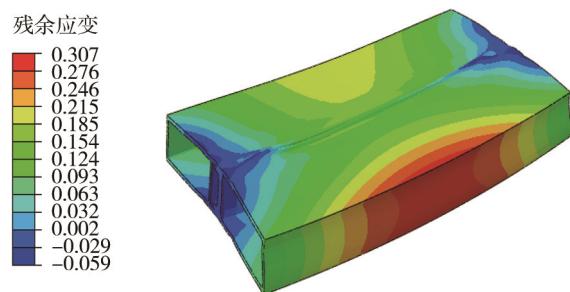


图5 箱型型材残余变形云图
Fig.5 Residual deformation contour of box profiles

焊板中间位置处横截面上下两道焊缝所在壁板横向变形值变化和焊缝处纵向变形值的变化见图6。图6a中左侧对应型材接头的细立柱侧，右侧对应型材接头的粗立柱侧。从图6a看出，上下壁板的横向残余变形趋势相同，呈上凸形状；两侧横向变形不对

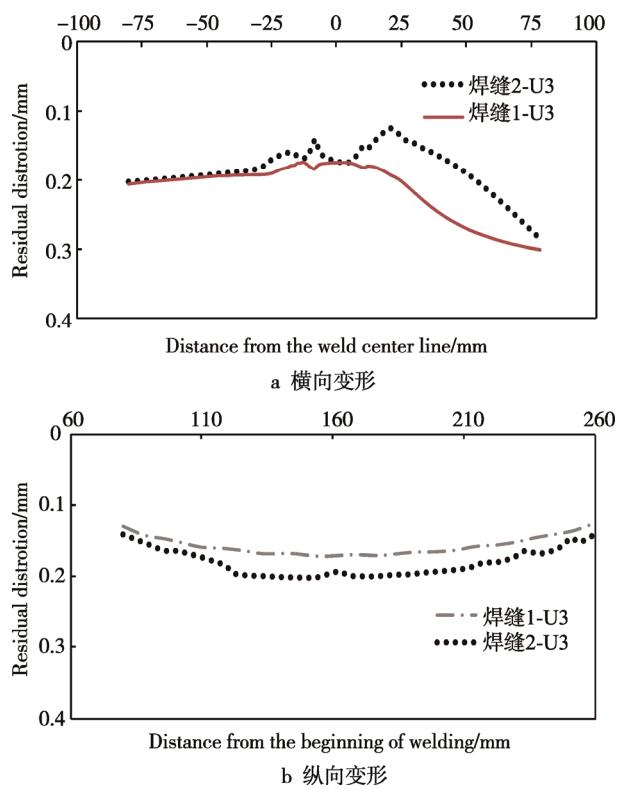


图6 箱型型材横向和纵向残余变形
Fig.6 Transverse and longitudinal residual deformation of box profiles

称, 粗立柱侧变形量更大。细立柱侧上下壁板的变形基本一致, 而粗立柱侧上下壁板的变形相差较大。从图 6b 发现, 上下壁板的纵向残余变形趋势一致, 呈下凹形状, 焊缝 2 所在壁板的变形程度更加剧烈。

5 V 筋型材残余状态仿真分析

本节对带斜筋结构的 V 筋型材进行 FSW 仿真分析。V 筋型材的 FSW 温度场与箱型型材结构的基本一致(见图 3), 而残余应力与变形规律不同。两道焊缝所在壁板横断面的残余应力值变化见图 7。纵向残余应力远大于横向残余应力, 残余应力相对于焊缝不对称分布, 且焊缝 2 的残余应力高于焊缝 1。纵向残余拉应力集中分布在焊缝区域约 2 倍轴肩尺寸范围内, 整体偏向于粗立柱侧。拉应力峰值出现在轴肩边缘处, 向外迅速减小, 到 2 倍轴肩尺寸以外变为压应力, 压应力值小于拉应力。与箱型型材不同之处在于 2 条焊缝残余应力区域和峰值方面, 箱型型材两条焊缝的残余应力峰值相近(均为 150 MPa 左右), 焊缝 2 的高应力区明显宽于焊缝 1; V 筋型材 2 条焊缝的残余应力峰值差别较大(焊缝 1 约为 150 MPa, 焊缝 2 约为 187 MPa), 二者的高应力分布区域却比较相近。

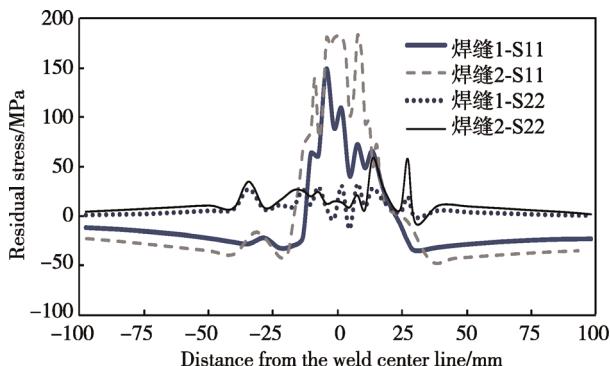


图 7 V 筋型材壁板横截面残余应力

Fig.7 Residual stress of panel section of V bar profiles

焊后结构的残余变形见图 8(放大 50 倍)。焊后构件整体变形很小, 并且没有出现箱型型材那样的马鞍形状。为更清楚地探究变形趋势, 取模型中间处横断面上下壁板变形值作图 9a, 沿焊接方向取模型左右两侧边缘壁板变形值作图 9b。图 9b 中 left 对应左侧细立柱侧, right 对应右侧粗立柱侧。由图 9 可以看出, 两道焊缝的变形基本一致, 横向和纵向残余变形均呈下凹形式, 横向变形程度大于纵向变形, 与实际情况相符^[15]。

与箱型型材结构相比, V 筋型材结构焊后残余变形形式发生了变化, 从马鞍形变成下凹形, 而且变形程度显著减小。原因在于后者筋板数量增多、筋板结构也发生了变化, 使得型材整体的抗弯曲变形能力增强。

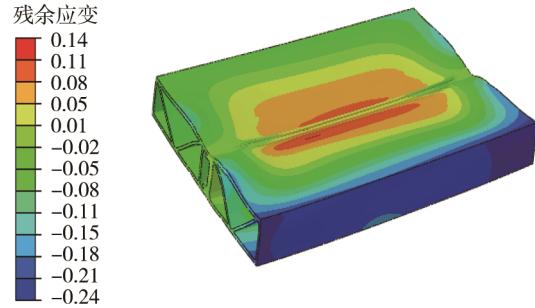
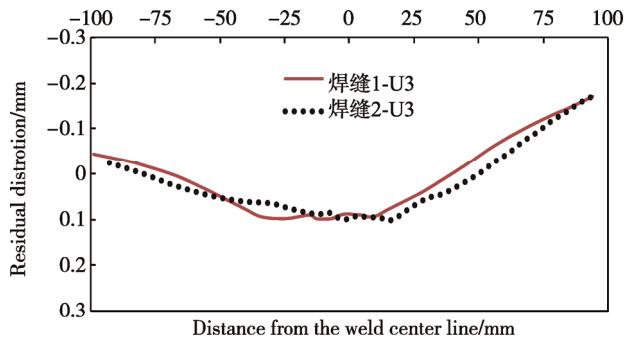
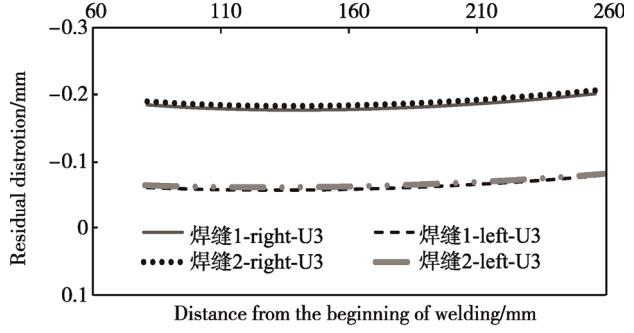


图 8 V 筋型材残余变形云图

Fig.8 Residual deformation contour of V bar profiles



a 横向变形



b 纵向变形

图 9 V 筋型材横向和纵向残余变形

Fig.9 Transverse and longitudinal residual deformation of V bar profiles

6 筋板角度对 V 筋型材残余状态的影响

在轨道车辆中, V 筋型材已经在底板、侧墙等结构中广泛使用。通常情况下, 车体不同部位筋板的夹角会有所不同。上节中筋板的夹角为 90°, 本节分别对夹角为 60° 和 120° 筋板的结构进行研究, 并对 3 种结构的残余应力和变形进行对比和分析。

由于结构的纵向残余应力远大于横向残余应力, 因此在进一步探讨筋板角度对残余应力的影响时, 仅对焊后的纵向残余应力进行研究。取构件中间位置横断面上下壁板的纵向残余应力值作图 10。由图 10 可以看出, 除残余应力峰值略有升高外, 筋板夹角的增加对残余应力的分布没有显著影响。

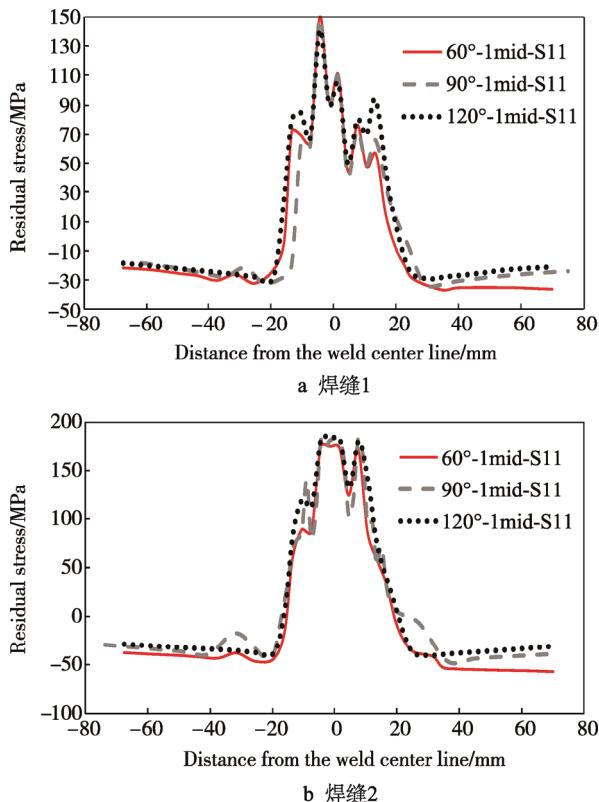


图 10 3 种筋板角度两道焊缝纵向残余应力

Fig.10 Longitudinal residual stress of the two weld joints with three ribbed plate angles

为进一步探究结构残余变形与筋板角度的关系，取模型焊板中间位置横截面上下壁板的横向残余变形值作图 11，沿焊接方向取模型左右两侧边缘处上

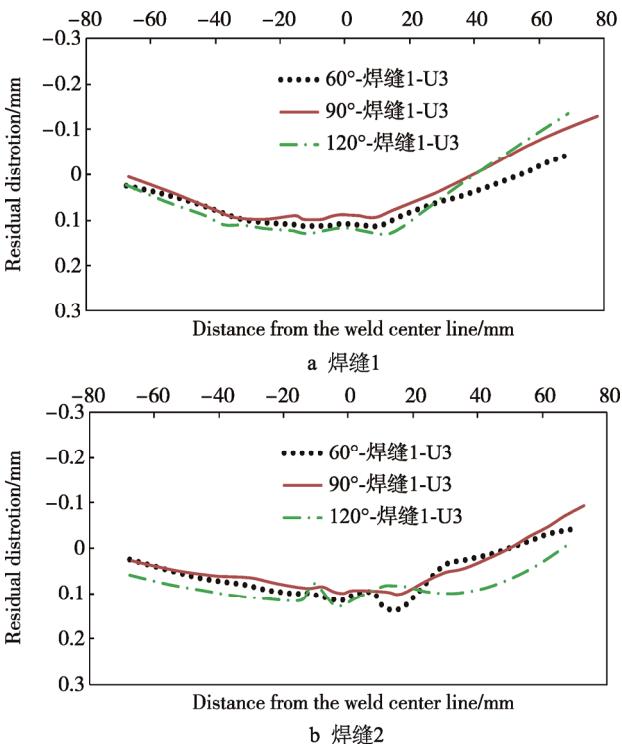


图 11 3 种筋板角度横向残余变形

Fig.11 Transverse residual deformation with three ribbed plate angles

下壁板的变形值作图 12。由图 11 可知，横向残余变形都呈下凹形，整体变形差别并不显著，其中 60° 和 120° 时沿横向都出现了明显的不平滑现象，且右侧上下壁板的变形程度不一致。筋板夹角为 90° 时，两条焊缝的变形均比较平缓，且上下壁板的相对变形情况较好。结合图 9b 与图 12 可以看出，随着筋板夹角的增大，构件焊后纵向残余变形基本趋势不变，均为下凹形，但变形程度不断减小，筋板夹角为 90° 时，已能够获得足够平直的纵向变形。

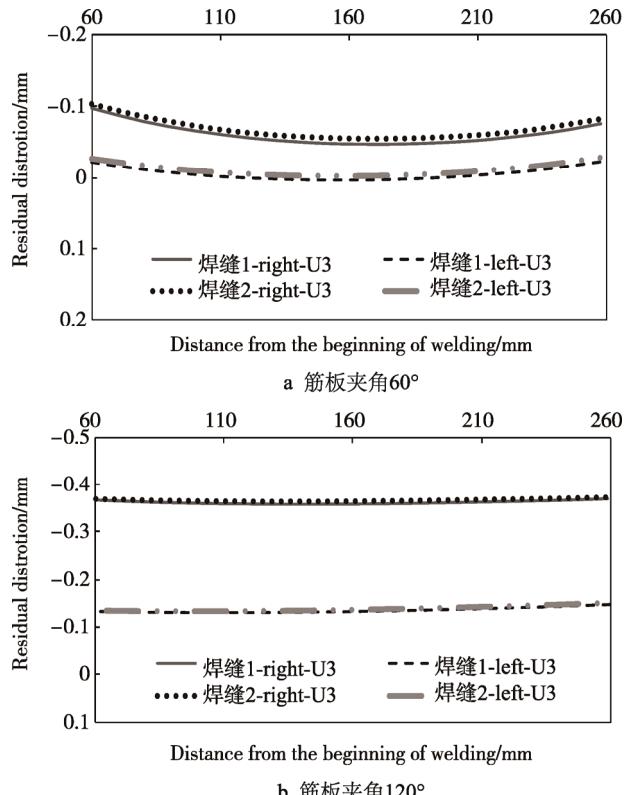


图 12 筋板夹角 60° 和 120° 时纵向残余变形

Fig.12 Longitudinal residual deformation with 60° and 120° of ribbed plate angle respectively

筋板角度过小，纵向残余变形较大，而且会使单位尺寸内筋板数量增大，从而型材整体质量增大，成本增加。筋板角度过大时会使型材横向残余变形（左右两侧相对位移）增大；且角度过小或者过大都会使上下壁板的变形出现不平滑不一致现象，因此，在满足强度等其他要求的前提下，筋板夹角约为 90° 的型材能得到较理想的焊后状态。

7 结论

针对轨道车辆中两种典型的 6005A-T6 型材结构，对其搅拌摩擦焊后残余状态进行仿真研究，得到的主要结论如下。

- 1) 箱型型材的焊后残余应力主要表现为纵向残余应力，上下壁板两条焊缝的残余应力峰值相近，而

二者的高应力分布区域宽度差别较大。焊后残余变形呈横向向上凸纵向下凹的马鞍形。型材接头区域焊缝处筋板做了加厚处理, 导致残余应力和残余变形呈不对称分布, 加厚筋板侧的应力和变形偏大。

2) 与箱型型材相比, V 筋型材焊后残余变形较小, 焊后残余应力较高。V 筋型材上下壁板两条焊缝的残余应力峰值差别较大, 残余变形呈下凹形。

3) 对于 V 筋型材, 筋板夹角的变化对残余应力的分布没有显著影响。随着筋板夹角增大, 纵向残余变形减小, 横向焊缝左右两侧相对变形增大, 并且夹角较大或较小均会导致上下壁板发生明显的不平滑变形。

4) 综上, 对于轨道车辆型材结构, 从焊后变形角度而言, 应将焊缝所在区域设计为 V 筋型材结构, 且筋板夹角约为 90°较为理想。

参考文献:

- [1] 栾国红. 搅拌摩擦焊技术在轨道列车制造中的应用[J]. 焊接, 2015(1): 7—12.
LUAN Guo-hong. Application of Friction Stir Welding Technology in the Manufacture of Rail Train[J]. Welding, 2015(1): 7—12.
- [2] 韩晓辉, 陶传琦, 张铁浩, 等. 搅拌摩擦焊技术在轨道车辆铝合金车体制造中的应用与展望[J]. 现代焊接, 2016(6): 16—20.
HAN Xiao-hui, TAO Chuan-qí, ZHANG Tie-hao, et al. Application and Prospect of Friction Stir Welding Technology in the Manufacturing of Aluminum Alloy Carbody of Rail Vehicles[J]. Modern Welding, 2016(6): 16—20.
- [3] 李红. 城轨铝合金车体侧墙搅拌摩擦焊技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Hong. FSW Technique Research on Aluminum Alloy Carbody Side Wall of Mass Transit Train[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [4] 王庆峰. 6005A-T6 铝合金地铁车体的搅拌摩擦焊[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
WANG Qing-feng. Friction Stir Welding of 6005A-T6 Aluminum Alloy for the Metro Vehicles Car Body[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [5] 朱向东. 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究及其在城轨车辆车体上的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
ZHU Xiang-dong. The Research of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Applying of Metro Vehicles Car Body[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [6] KHANDKAR M Z H, KHAN J A, REYNOLDS A P, et al. Predicting Residual Thermal Stresses in Friction Stir Welded Metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1/2/3): 195—203.
- [7] LI D, YANG X, CUI L, et al. Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of AA6061-T6 Butt Welded Joints by Stationary Shoulder Friction Stir Welding[J]. Materials & Design, 2014, 64: 251—260.
- [8] STEUWER A, HATTINGH D G, JAMES M N, et al. Residual Stresses, Microstructure and Tensile Properties in Ti-6Al-4V FSW[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(7): 525—533.
- [9] JAVADI Y, SADEGHI S, NAJAFABADI M A. Taguchi Optimization and Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in FSW[J]. Materials &Design, 2014, 55(55): 27—34.
- [10] HUANG X, REYNOLDS A P. Effects of the Friction Stir Welding Process Variants on Residual Stress[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2017(5): 1—8.
- [11] 张正伟. 搅拌摩擦焊接构件残余状态和疲劳寿命研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
ZHANG Zheng-wei. Investigations on Residual State and Fatigue Life of Friction Stir Welded Structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [12] 朱浩, 赵熠朋, 郭柱, 等. 搅拌头尺寸对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头温度场及残余应力场的影响[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 59—63.
ZHU Hao, ZHAO Yi-peng, GUO Zhu, et al. Influence of Tool Size on Temperature Field and Residual Stress Field of Friction Stir Welded Joint of 7075 Aluminum Alloy[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 59—63.
- [13] 张亚, 朱志民, 史清宇, 等. 铝合金列车侧墙搅拌摩擦焊变形模拟仿真与工艺优化[J]. 电焊机, 2014, 44(4): 78—82.
ZHANG Ya, ZHU Zhi-min, SHI Qing-yu, et al. Simulation and Process Optimization of Friction Welding for Aluminum Alloy Train Side Wall[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 78—82.
- [14] 朱卫, 钟磊, 岳译新. 基于铝合金型材搅拌摩擦焊热力耦合有限元分析研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(6): 25—29.
ZHU Wei, ZHONG Lei, YUE Yi-xin. Finite Element Analysis and Research for Thermal-mechanical Coupled of FSW Based on Aluminum Profile[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(6): 25—29.
- [15] 迟哲, 刘亚良, 王陆钊, 等. 基于固有应变法的地铁侧墙 FSW 焊接变形仿真[J]. 电焊机, 2017, 47(10): 1—7.
CHI Zhe, LIU Ya-liang, WANG Lu-zhao, et al. Simulation of FSW Deformation of Subway Sidewall Based on Inherent Strain Method[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(10): 1—7.
- [16] 李景涌. 有限元法[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
LI Jing-yong. Finite Element Methods[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1999.
- [17] 郭柱. 7075 铝合金搅拌摩擦焊温度场及残余应力场的数值模拟[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
GUO Zhu. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress Field in Friction Stir Welding of 7075 Aluminum Alloy[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2015.