

动力电池箱底板搅拌摩擦焊数值模拟 及焊接顺序优化

胥军, 孟新委, 贺国清, 李刚炎
(武汉理工大学机电工程学院, 430070, 武汉)

摘要: 为使动力电池箱底板达到焊接工艺规范要求,通过数值模拟的方法优化其焊接顺序。以某型动力电池箱底板为例,在现有焊接顺序方案下,采用顺序热力耦合法建立其搅拌摩擦焊数值模拟模型,仿真结果表明动力电池箱底板焊接残余应力应变与实际变形结果吻合度高,变形挠度超过工艺规范要求。为此,综合考虑调整焊接顺序以控制残余变形的的方法具有简单可行、成本较低等优点,提出5种焊接顺序候选方案,以最大残余变形挠度最小为原则筛选得到优选方案。现场试验结果表明,数值模拟结果与实际结果误差较小,所建立的模型满足要求,且采用优选的焊接顺序方案后,动力电池箱底板焊后最大残余变形挠度较原焊接顺序方案降低了约33%,由4.92 mm减小为3.31 mm,符合底板的焊接工艺规范要求。

关键词: 动力电池箱;搅拌摩擦焊;数值模拟;焊接顺序优化

中图分类号: TG453 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107010 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0088-09



OSID 码

Numerical Simulation and Welding Sequence Optimization of Friction Stir Welding for Power Battery Enclosure's Bottom Plate

XU Jun, MENG Xinwei, HE Guoqing, LI Gangyan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to make the bottom plate of power battery enclosure meet the welding process specification requirements, the welding sequence is optimized through numerical simulation. A certain type of power battery enclosure's bottom plate was taken as the research object. According to the existing welding sequence scheme, its numerical simulation model of friction stir welding was established by adopting the sequential thermal-mechanical coupling method. The simulation results showed that the values of welding residual stress and strain were consistent with the actual ones, and the value of deformation deflection exceeded the specification requirements. As the method of adjusting welding sequence to control residual deformation is simple, feasible and low-cost, it was adopted to propose five candidate schemes for welding sequence. The optimal scheme was selected based on the principle of achieving minimum residual deformation and deflection. Field test results showed that the error between numerical simulation results and actual ones was small, which shows that the established model is satisfactory. By adopting the proposed optimal welding sequence scheme, the maximum residual deflection of the bottom plate was reduced by 33%, decreasing from 4.92 mm to 3.31 mm, which meets the

requirements in the welding process specification.

Keywords: power battery enclosure; friction stir welding; numerical simulation; welding sequence optimization

据统计,我国纯电动汽车产销量、保有量已连续5年居世界首位^[1],在世界汽车产业发展转型中扮演着重要角色。动力电池系统的封装与承载依赖尺寸精准的动力电池箱体,动力电池箱底板是整个系统的关键承力部件^[2],直接关系着动力电池系统乃至整车的安全。动力电池箱底板多由若干块铝合金型材经搅拌摩擦焊接加工而成,在焊接过程中,温度沿厚度方向存在明显梯度,极易导致纵向翘曲变形^[3],进而导致后序装配焊接无法进行。为此,亟需建立一种置信度较高的动力电池箱底板搅拌摩擦焊数值模拟模型。

国内外学者针对搅拌摩擦焊数值模型的构建开展了一系列研究:谢吉祥通过仿真分析了轴向振动对7075铝合金平板搅拌摩擦焊接残余变形的影响,数值模拟结果表明在搅拌头上施加轴向的高频振动对焊件残余变形的影响较小^[4];张亚等基于分段温度函数法,应用数值模拟技术分析了不同焊接顺序和方向的优化方案对铝合金车体侧墙FSW焊接残余变形的影响^[5];Wen等利用有限元法开发了随焊焊缝滚压、随焊焊缝双侧滚压及焊后滚压3种搅拌摩擦焊数值模拟模型,仿真表明焊后滚压对控制焊接残余变形的效果最佳^[6]。但是,以上研究所建立的数值模型多集中于中小型简单构件,且仅涉及单条焊缝的焊接处理。

为此,本文以918型动力电池箱为例,针对其底板焊接加工后经常出现的底板端部一侧向上翘曲和变形挠度超过工艺规范要求(≤ 4 mm)的问题,采用数值模拟方法对电池箱底板搅拌摩擦焊接顺序方案进行仿真分析,获取多种候选方案,并以最大残余变形挠度为指标确定其中的优选方案,通过现场试验对优选方案进行验证。

1 动力电池箱底板搅拌摩擦焊温度场数值模拟

918型动力电池箱由6005A铝合金型材拼焊而成,主要包括底板、边框、横梁、吊耳和其他附件,其结构如图1所示。

1.1 焊接温度场传热理论

动力电池箱底板搅拌摩擦焊接过程属于典型的非线性瞬态热传导过程,在笛卡尔三维直角坐标系

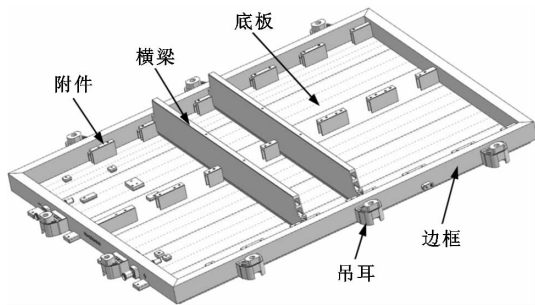


图1 918型动力电池箱结构

Fig. 1 Structure of 918 power battery enclosure

(X, Y, Z)中,其温度场满足导热微分方程^[7]

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

式中: c 为材料比热容; ρ 为材料密度; T 为温度; t 为时间; λ 为材料热导率; $\bar{Q}$ 为内热源强度。

搅拌摩擦焊的产热主要来自搅拌头摩擦与材料塑性变形^[8],基于能量守恒定律,搅拌摩擦焊的输入热源与搅拌头所做的机械功近似相等,由此可得搅拌摩擦焊的生热方程为

$$Q = W = M_z \omega = \int_s f \omega r ds \quad (2)$$

式中: Q 为焊接过程生热功率; W 为搅拌头所做机械功; M_z 为搅拌头扭矩; ω 为搅拌头角速度; f 为搅拌头与被焊工件接触面上的作用力。搅拌摩擦焊的生热功率与搅拌头的扭矩紧密联系,因而在搅拌摩擦焊数值模拟中选取合适的扭矩是关键,根据实测结果, M_z 取值 1×10^4 N·mm。

1.2 搅拌摩擦焊热源模型建立

根据搅拌摩擦焊特有的产热方式^[9],在建立热源模型时作如下假设:①总生热功率分布于轴肩与焊件的接触面和插入焊件内部的搅拌针所作用区域;②焊接过程的生热功率利用率为95%,且总输入热功率中的75%产生于轴肩与被焊工件的接触面,其余25%则产生于搅拌针的体积范围内;③将搅拌头轴肩处的产热定义为热流密度跟随搅拌头轴肩半径的增大而线性增加,且热源模型是关于焊件对接处轴对称的面热源。将搅拌针处的产热定义为均匀分布的体热源,可得搅拌摩擦焊等效热源模型^[10]

$$Q_{in} = \eta Q = \frac{2\pi n \eta M_z}{60}$$

(3)

$$Q_s = 0.75 Q_{in}$$

(4)

$$Q_p = 0.25 Q_{in}$$

(5)

$$q_s(r) = \frac{3Q_sr}{2\pi(R_1^3 - R_0^3)}$$

(6)

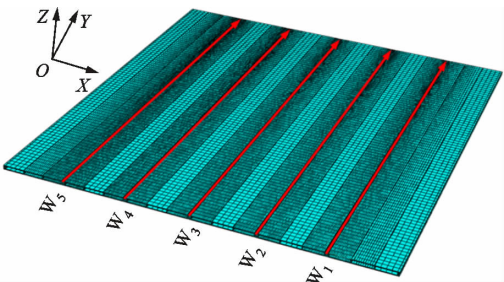
$$q_p = \frac{Q_p}{\pi R_0^2 h}$$

(7)

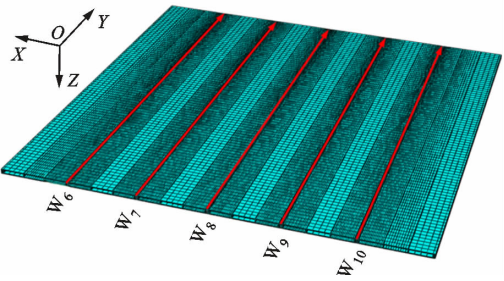
式中: Q_{in} 为焊接过程总输入热功率; η 为热量利用率; n 为搅拌头转速; Q_s 为轴肩处产热; Q_p 为搅拌针处产热; $q_s(r)$ 为轴肩处的热流密度; $q_p(r)$ 为搅拌针处的热流密度; r 为热源到接触面上积分点的距离; R_0 为搅拌针半径; R_1 为搅拌头轴肩半径。

1.3 焊接温度场数值模拟模型建立

动力电池箱底板(1 140 mm×1 260 mm×12 mm)由 6 块 6005A 铝合金型材拼接而成,正反面共有 10 条焊缝(如图 2 所示的 $W_1 \sim W_{10}$),原焊接顺序方案为 $W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow W_4 \rightarrow W_5 \rightarrow W_6 \rightarrow W_7 \rightarrow W_8 \rightarrow W_9 \rightarrow W_{10}$ 。建立底板有限元模型,分别对各铝合金型材进行六面体网格划分(单元类型选取 DC3D8)。为提高计算效率且保证数值模拟的准确性,将焊缝及附近隔板区域的网格细化,对距焊缝较远的区域网格逐步粗化,仿真模型的网格数量为 99 540,节点数量为 174 752。



(a)底板正面有限元模型



(b)底板反面有限元模型

图 2 动力电池箱底板正反面有限元模型
Fig. 2 Finite element models of power battery enclosure's bottom plate

6005A 铝合金主要成分组成参照 GB/T 3190—2008^[11],由于仿真软件中没有自带的材料库,故将 6005A 铝合金的成分组成输入到 JMatPro(材料性能模拟软件)中,计算得到 6005A 铝合金的热物理性能参数如图 3 所示。

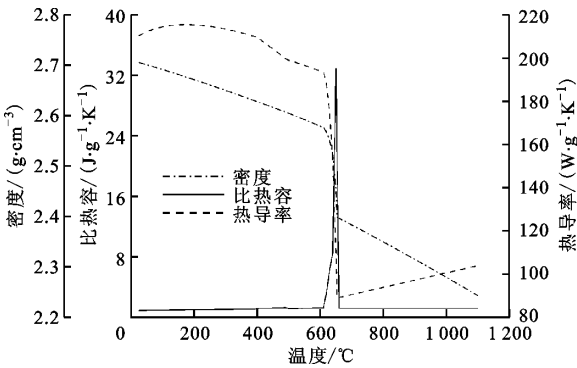


图 3 6005A 铝合金热物理性能参数
Fig. 3 Thermophysical performance parameters of 6005A aluminum alloy

焊接过程中工件与周围环境存在着辐射换热和对流换热过程^[12],在温度场的模拟中忽略热辐射,仅考虑热传导与热对流。将工件的对接面处理为绝热面,将搅拌头轴肩与工件上表面接触的圆环面处理为面热源,将搅拌针与工件内部的接触面处理为体热源,动力电池箱底板搅拌摩擦焊接数值模拟参数如表 1 所示。

表 1 搅拌摩擦焊接数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters of friction stir welding

参数	数值
初始温度/℃	20
底面与支撑对流换热系数/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	100
上表面与空气对流换热系数/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	30
搅拌头的转速/(r·min ⁻¹)	800
焊接速度/(mm·min ⁻¹)	600
搅拌头轴肩半径/mm	8
圆柱形搅拌针半径/mm	3
搅拌针高度/mm	6

基于式(3)~(7)的搅拌摩擦焊等效热源数学模型,采用 Fortran 语言编写 ABAQUS 移动热源的 DFLUX 子程序,在 ABAQUS 软件的 Load 模块中根据所确定的初始条件、边界条件和载荷条件进行相应的设置。

2 动力电池箱底板搅拌摩擦焊应力应变场数值模拟

2.1 焊接应力应变场有限元分析理论

采用顺序热力耦合法对动力电池箱底板搅拌摩擦焊加工过程进行热弹塑性有限元分析。由于焊接应力应变场为非线性问题,其焊接热力耦合过程复杂,将焊接应力应变场视为材料非线性瞬态问题以提高计算的准确性。焊接应力应变场分析时采用弹塑性力学模型,并利用增量理论进行模拟计算。在弹性或塑性变形阶段,材料应力应变关系为^[13]

$$\{d\sigma\}^e = \{D\}\{d\epsilon\} - \{C\}dT \tag{8}$$

$$\{d\epsilon\}^e = [B]\{d\delta\}^e \tag{9}$$

式中: dT 为温度增量; $\{C\}$ 为与温度相关的向量; $[D]$ 为弹性或弹塑性矩阵,与泊松比 μ 、弹性模量 E 相关。各单元节点应变增量 $\{d\epsilon\}^e$ 可通过式(9)计算得到,基于应力应变关系式(8)可得各单元体应力增量 $\{d\sigma\}^e$ 。

2.2 焊接应力应变场数值模拟模型建立

搅拌头机械载荷作用主要分为搅拌头的下压力与工作扭矩^[14]。将下压力简化为均匀作用于搅拌头轴肩横截面上的面压力,其作用效果如图 4 所示,面压力可表示为

$$P = \frac{F_z}{\pi R_1^2} \tag{10}$$

式中 F_z 为搅拌头下压力。

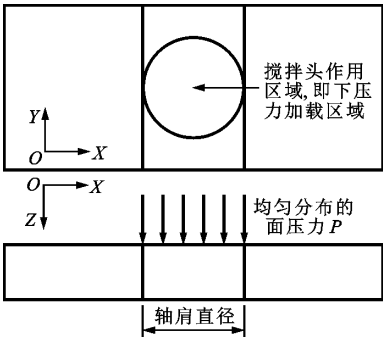


图 4 下压力加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of lower pressure loading

搅拌头工作扭矩为搅拌头表面各受力点作用于旋转中心的累积力矩,故可用搅拌头表面各受力点的切向力来表达搅拌头的旋转作用。在建立搅拌头的机械载荷数学模型时,采用如图 5 所示的沿轴肩圆周分布的切向力来表达对扭矩的作用,其中 f_x 与 f_y 分别为切向力在 X 方向与 Y 方向的分量,可表示为

$$f_x = \frac{3M_z}{2\pi l R_s^3} \frac{y}{r} \tag{11}$$

$$f_y = \frac{3M_z}{2\pi l R_s^3} \frac{(-x)}{r} \tag{12}$$

式中: l 为加载体力区域的厚度; x 与 y 为该积分点的坐标值。

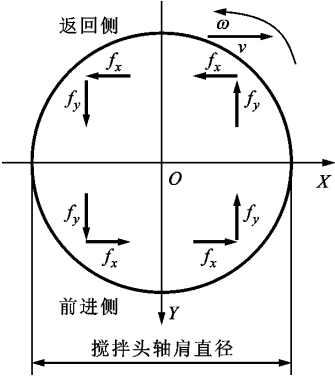


图 5 工作扭矩加载示意图

Fig. 5 Schematic diagram of working torque

搅拌摩擦焊应力应变场分析模型所需的载荷条件分别由温度场、搅拌头及底面支撑与夹具共同提供,其中温度场直接采用已得到的数值模拟结果;搅拌头的作用以搅拌头机械载荷的方式进行表达,其中扭矩和下压力的取值分别为 $1 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 和 $1.2 \times 10^4 \text{ N}$;为提高计算效率,采用等效力学边界条件替代夹具模型。参考实际焊接过程中动力电池箱底板被夹具压紧在底面支撑上,将动力电池箱底板与夹具夹紧位置视为固定约束,对底板的每块拼接板中部区域节点的所有自由度进行约束。当动力电池箱底板焊后冷却至环境温度时,移除底面支撑与夹具的约束,在动力电池箱底板的焊接开始侧边缘添加一个全自由度辅助约束与一个 Y 方向的辅助约束,防止动力电池箱底板出现刚性移动,保证其在近似自由的状态下呈现出焊后残余应力和残余变形。

2.3 焊接应力应变数值模拟结果分析

采用顺序热力耦合法进行力学分析时,需将温度场模拟计算结果以预定义场的边界条件形式加载至模型,因此网格划分方式不变,为节省求解时间选取缩减积分单元,将其网格单元类型改为 C3D8R。将 6005A 铝合金化学成分输入 JMatPro 软件中,得到其力学性能参数,并将其添加到 ABAQUS 软件中,焊接应力应变场求解计算过程中所需的关键材料力学参数随温度的变化如图 6 所示,可在 ABAQUS 软件的 Visualization 模块里查看焊接过程中应力与应变的变化状态及焊接残余应力与残余变形的分布

情况。

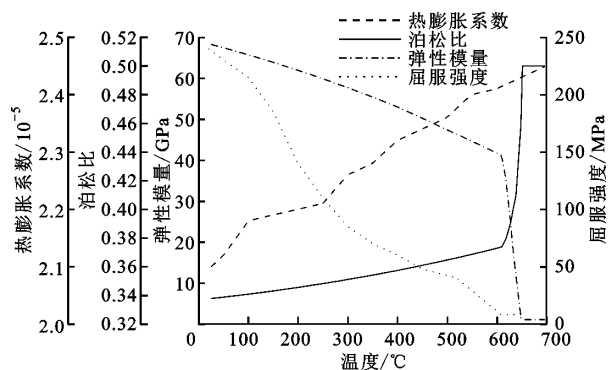


图6 6005A 铝合金力学性能参数

Fig. 6 Mechanical properties of 6005A aluminum alloy

动力电池箱底板搅拌摩擦焊应力场数值模拟结果如图7所示,焊接残余应力主要分布于焊缝的焊接稳态阶段位置,最大值约为239.5 MPa。焊接残余应力过大时不仅会引发残余变形,而且对焊件稳定承载力、疲劳寿命等均有影响。

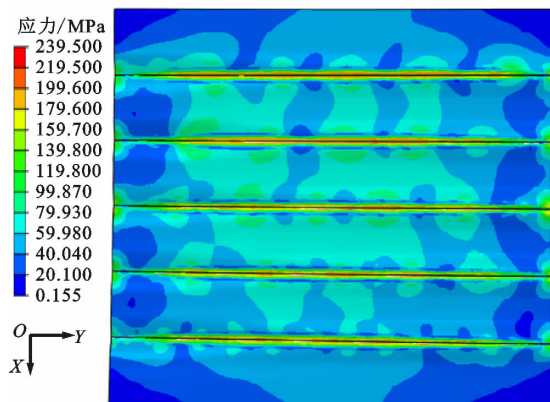


图7 底板焊接残余应力

Fig. 7 Welding residual stress of bottom plate

铝合金型材搅拌摩擦焊接残余变形的表现形式分为挠曲变形、失稳变形与错边变形^[15]。在焊接过程中,挠曲变形和失稳变形常同时出现且不易分辨,均可归为失稳挠曲变形。

动力电池箱底板在原焊接方案下的残余变形数值模拟结果如图8所示,其焊后整体残余变形表现为失稳挠曲变形,最大残余变形出现在动力电池箱底板焊缝1外侧铝合金结构板角部,沿X方向的变形挠度 U_x 为1.05 mm,沿Y方向的变形挠度 U_y 为0.36 mm,沿Z方向的变形挠度 U_z 为4.65 mm,最大残余变形挠度 U_{max} 为4.73 mm。为量化电池箱底板的焊接残余变形量,将焊后最大残余变形挠度作为动力电池箱底板失稳挠曲变形的评价指标。

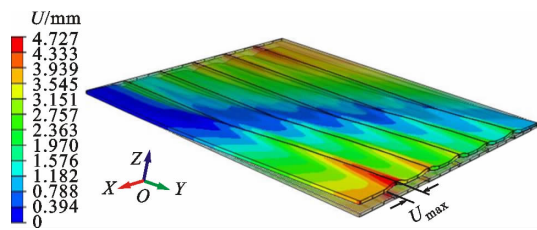


图8 动力电池箱底板焊接残余变形($\times 10$)

Fig. 8 Welding residual deflection of power battery enclosure's bottom plate

为更加清晰地探究动力电池箱底板焊后失稳挠曲变形的情况,在动力电池箱底板的上面提取3条参考线(如图9所示),其中路径1、路径2与路径3分别与焊缝起始位置、焊缝中间位置及焊缝终点位置相对应。

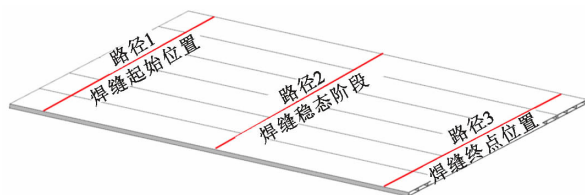


图9 焊接残余变形提取路径

Fig. 9 Extracted path of welding residual deformation

对该焊接顺序方案进行实际焊接并测量3条路径上的实际变形结果,动力电池箱底板在3条参考线上的残余变形挠度数值模拟结果与实际结果如图10所示,实际焊接结果与数值模拟结果相对误差小于8%,所建立的模型可满足仿真要求,动力电池箱底板焊接原方案最大残余变形挠度为4.92 mm,超出工艺规范所规定的范围,为此需要对其进行优化。

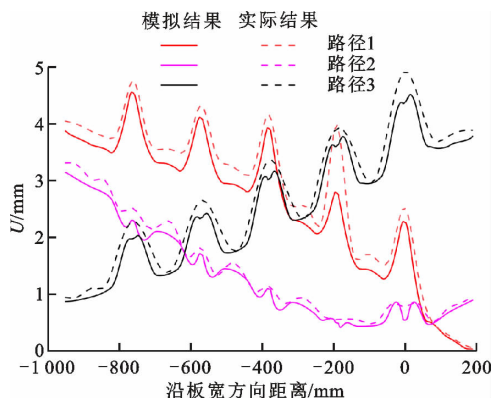


图10 残余变形挠度数值模拟结果与实际结果

Fig. 10 Numerical simulation and experimental results of residual deflection

3 动力电池箱底板搅拌摩擦焊接顺序优化

3.1 动力电池箱底板焊接顺序方案设计

在控制动力电池箱底板焊后残余变形的诸多方法中,通过调整焊接顺序以控制残余变形的方法具有简单可行、成本较低等优点^[16-18]。通过比较几种不同焊接顺序对动力电池箱底板焊后变形的影响,进而筛选出优选焊接顺序方案。由于批量生产加工的动力电池箱底板正反面结构一致,且具有先焊正面再焊反面的工序特点,提出 5 种不同焊接顺序候选方案如表 2 所示。

表 2 焊接顺序候选方案

Table 2 Welding sequence candidate schemes

方案	焊接顺序
1	W ₃ →W ₁ →W ₅ →W ₂ →W ₄ →W ₈ →W ₆ →W ₁₀ →W ₇ →W ₉
2	W ₁ →W ₅ →W ₂ →W ₄ →W ₃ →W ₆ →W ₁₀ →W ₇ →W ₉ →W ₈
3	W ₃ →W ₂ →W ₄ →W ₁ →W ₅ →W ₈ →W ₇ →W ₉ →W ₆ →W ₁₀
4	W ₁ →W ₂ →W ₅ →W ₄ →W ₃ →W ₆ →W ₇ →W ₁₀ →W ₉ →W ₈
5	W ₃ →W ₁ →W ₂ →W ₅ →W ₄ →W ₈ →W ₆ →W ₇ →W ₁₀ →W ₉

在保持其他边界条件和初始条件相同的情况下,上述焊接顺序候选方案仅考虑各条焊缝的焊接顺序改变,不考虑改变焊接方向,对这些方案进行数值模拟。

3.2 动力电池箱底板焊接顺序方案优选

动力电池箱底板在 5 种焊接顺序候选方案下的焊接残余变形结果如图 11 所示,皆发生了失稳挠曲变形,焊接残余变形分布不对称,但动力电池箱底板在残余变形分布和最大残余变形挠度上存在着较为明显的差异。方案 4 在焊后残余变形分布上呈现出首尾两端翘曲、中间下凹的特征,且焊接最大等效残余变形位于动力电池箱底板焊缝 1 和焊缝 6 的终点拼接处,最大残余变形挠度为 3.11 mm;方案 1、方案 2、方案 3 和方案 5 在焊后残余变形分布上呈现出沿动力电池箱底板宽度负方向翘曲,且焊接最大残余变形位于动力电池箱底板焊缝 5 和焊缝 10 的终点拼接处,最大残余变形挠度分别为 3.72、3.96、5.73 和 4.97 mm。由此可知,焊接顺序的改变对焊件残余变形的影响较为显著。

为更好地观察动力电池箱底板在 5 种候选方案下的焊后残余变形挠度,分别提取图 9 中所示的 3 条路径上的残余变形挠度,结果如图 12 所示。在 5 种焊接顺序候选方案下,动力电池箱底板的焊后残

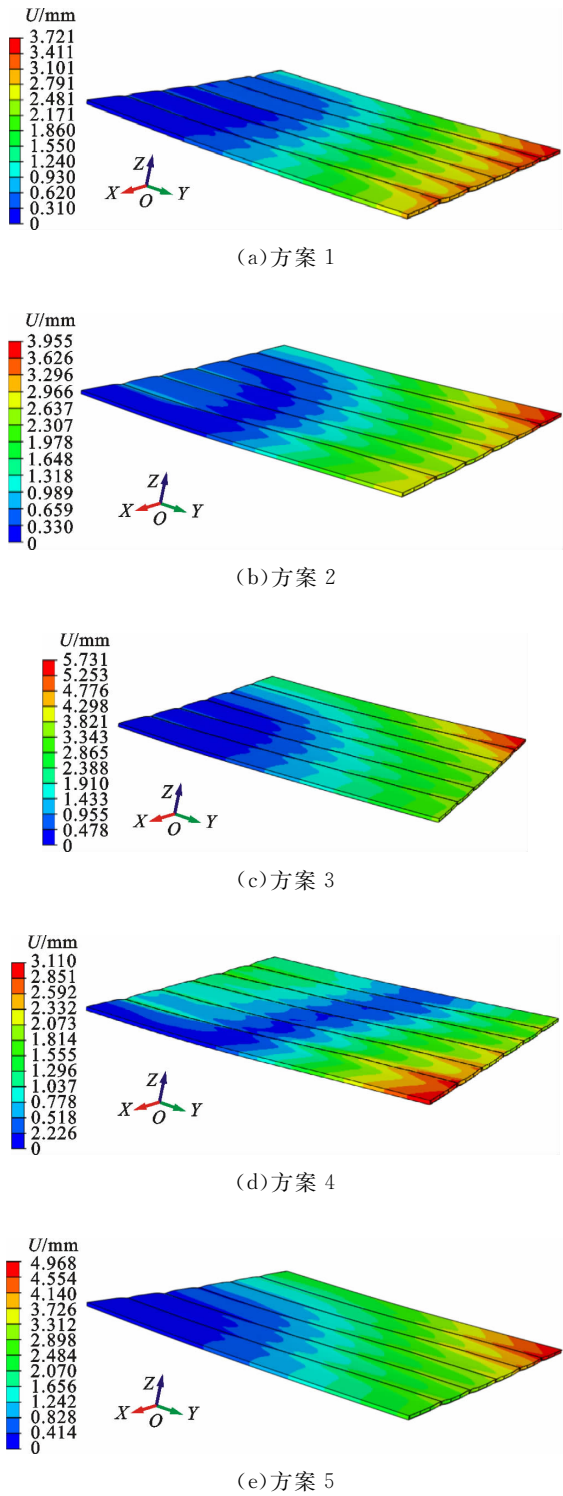


图 11 不同焊接顺序候选方案焊接残余变形

Fig. 11 Welding residual deflection of different welding sequence candidate schemes

余变形挠度呈现出两种趋势:焊接顺序候选方案 4 的整体残余变形挠度表现得较为平缓,在动力电池箱底板焊缝起始端位置的残余变形挠度沿着动力电池箱底板宽度正方向逐渐减小,在焊缝焊接稳态阶段的残余变形挠度较小且变化微弱,在焊缝终点位

置的残余变形挠度沿动力电池箱底板宽度正方向缓慢变大,最终在焊缝1和焊缝6的终点拼接处产生最大残余变形挠度;其余4种方案的整体残余变形挠度变化较为剧烈,在总体上表现为沿动力电池箱底板宽度正方向不断减小,最大残余变形挠度出现于焊缝6和焊缝10的终点拼接处。

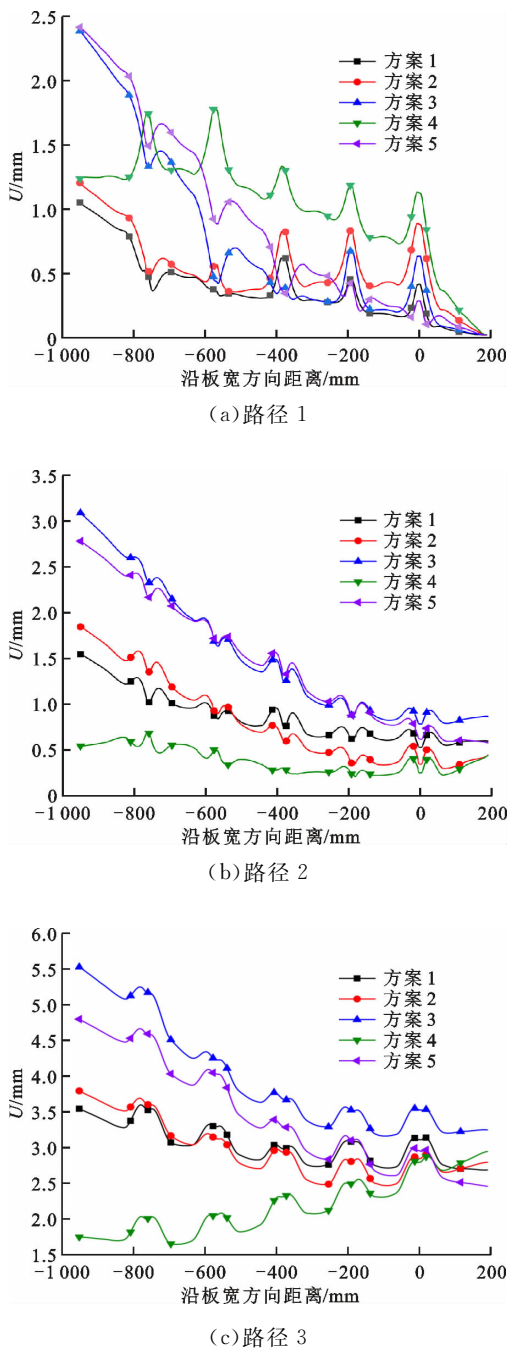


图12 不同焊接顺序候选方案在3条路径下的残余变形
Fig.12 Residual deflection of different welding sequence candidate schemes along three paths

此外,5种焊接顺序候选方案数值模拟的焊后最大残余应力、最大残余变形挠度与底板沿各方向

最大残余变形挠度的结果如表3所示。
由表3可知,动力电池箱底板在不同焊接顺序候选方案下的主要变形为沿Z方向变形,然后依次为沿X方向与Y方向变形。综合比较5种焊接顺序方案的数值模拟结果发现,方案4的最大残余变形挠度和沿各方向的最大残余变形挠度均优于另外4种方案。由于本文主要面向控制动力电池箱底板的焊后变形,故在实际生产中应优选焊接顺序候选方案4。

表3 焊接顺序候选方案焊接变形结果
Table 3 Welding deflection of five welding sequence candidate schemes

方案	σ/MPa	U_x/mm	U_y/mm	U_z/mm	U/mm
1	194.5	0.515 4	0.168 1	3.696	3.721
2	191.3	0.519 3	0.188 3	3.929	3.955
3	193.7	0.530 9	0.179 5	5.711	5.731
4	192.1	0.486 9	0.181 1	3.095	3.110
5	197.1	0.514 3	0.187 4	4.948	4.968

4 动力电池箱底板焊接优选方案试验验证

依据动力电池箱底板搅拌摩擦焊数值模拟结果,在HT-JM16×23/2型搅拌摩擦焊机上,采用优选的焊接顺序方案进行焊接试验,试验现场如图13所示。

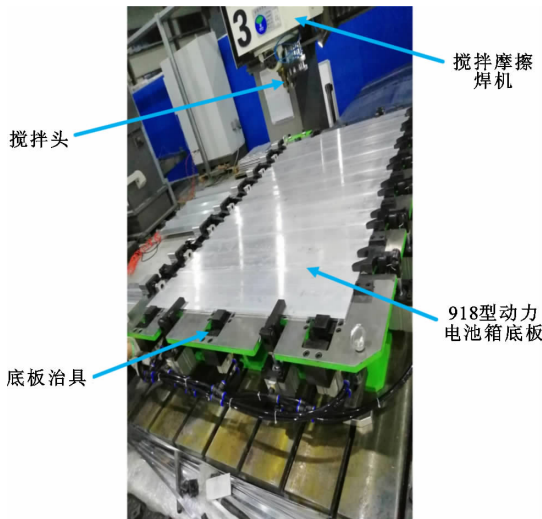


图13 搅拌摩擦焊接优选方案试验现场
Fig.13 Test site of friction stir welding

为更准确地对比动力电池箱底板在优选的方案4与原方案焊接试验下的焊后残余变形挠度差异,将动力电池箱底板固定在平面上,沿图9所示的3

条测量路径均匀间隔 38 mm 选取测量点,测量底板焊后残余变形挠度。首先测量平台的高度,然后依次测量各测量点的高度,最后将各点的高度减去平台的高度,进而得出各测量点的残余变形挠度。在优选的方案 4 与原方案焊接试验下,动力电池箱底板的残余变形挠度对比如图 14 所示。

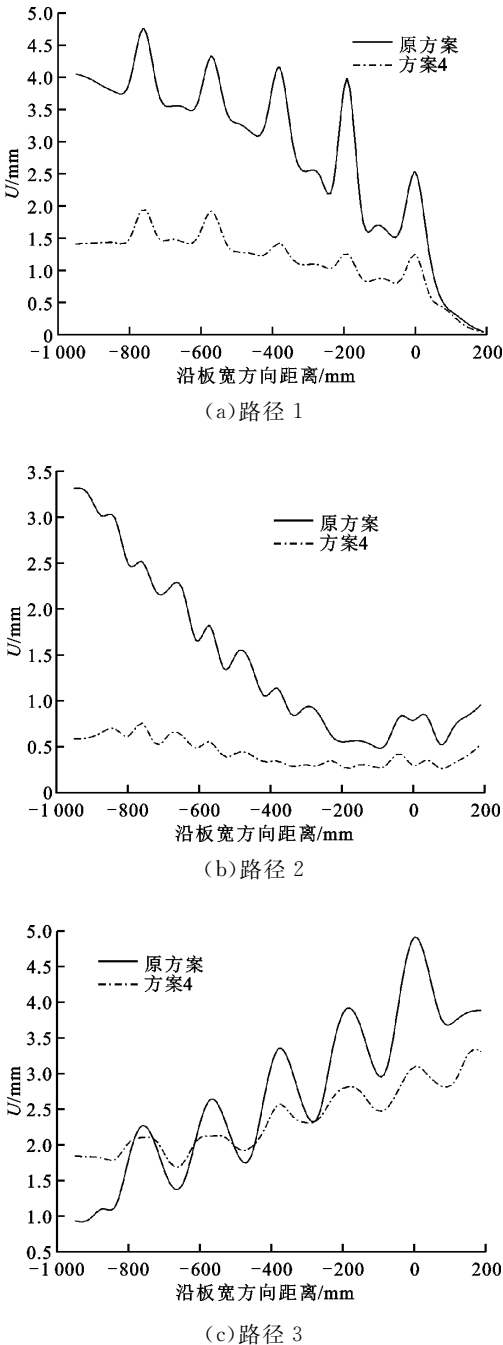


图 14 方案 4 与原方案的焊接残余变形对比

Fig. 14 Comparison of welding residual deflection between scheme 4 and original scheme

对比图 14 和图 12 可知,优选出的焊接顺序候选方案 4 的实际结果和数值模拟结果吻合度高,且

由图 14 可知,动力电池箱底板在焊接优选的方案 4 与原方案下的焊后最大残余变形挠度分别为 3.31 和 4.92 mm,焊件最大残余变形挠度减小约 33%。同时,动力电池箱底板在焊接优选的方案 4 下最大残余变形挠度满足焊接加工质量标准中的要求(≤ 4 mm)。通过试验结果可知,动力电池箱底板在优化焊接顺序后,最大残余变形挠度减小较为明显,焊接加工质量得到较大改善。

5 结 论

本文针对 918 型动力电池箱底板,采用理论分析、数值模拟和试验验证的方法对底板搅拌摩擦焊接顺序方案进行了优选,结论如下:

(1) 基于动力电池箱底板搅拌摩擦焊接热传导分析理论和顺序热力耦合法,采用 ABAQUS 有限元软件建立了动力电池箱底板搅拌摩擦焊应力应变场数值模拟模型,且数值模拟结果与实际焊接试验结果相比误差小于 8%,可满足仿真要求;

(2) 基于搅拌摩擦焊接应力应变场数值模拟法对焊接顺序进行优化,得到动力电池箱底板焊接顺序优选方案,相较于顺序式焊接方案最大残余变形挠度减小约 33%。

参考文献:

[1] 赵丹, 马建. 中国电动汽车产业发展现状、问题与未来 [J]. 长安大学学报(社会科学版), 2020, 22(4): 51-61.
ZHAO Dan, MA Jian. Development status, problems and future of electric vehicles in China [J]. Journal of Chang'an University (Social Science Edition), 2020, 22(4): 51-61.

[2] 陈涛, 李宁宁, 李卓, 等. 侧面柱碰撞条件下电动汽车电池系统结构优化 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1021-1030.
CHEN Tao, LI Ningning, LI Zhuo, et al. Structural optimization of electric vehicle battery systems under pole side impacts [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1021-1030.

[3] 汤一博, 孙宏波, 余海东, 等. 夹具拘束下大型薄壁铝合金结构搅拌摩擦焊接变形特性 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1881-1889.
TANG Yibo, SUN Hongbo, YU Haidong, et al. Friction stir welding deformation behaviors of large thin-walled aluminium alloy structure with different clamping restraints [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(15): 1881-1889.

- [4] 谢吉祥. 轴向振动复合旋转搅拌摩擦焊的温度场及残余应力的数值分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [5] 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 Zhimin, SHI Qingyu, et al. Simulation and process optimization of friction welding for aluminum alloy train side wall [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 78-82.
- [6] WEN S W, COLEGROVE P A, WILLIAMS S W, et al. Rolling to control residual stress and distortion in friction stir welds [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(6): 440-447.
- [7] 王卫兵, 董春林, 李光, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接热耦合数值模拟 [J]. 航空制造技术, 2009(16): 66-69.
- WANG Weibing, DONG Chunlin, LI Guang, et al. Thermal-mechanical coupled numerical simulation for friction stir welding of aluminum alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(16): 66-69.
- [8] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 11-21.
- CHEN Gaoqiang, SHI Qingyu. Recent advances in numerical simulation of material flow behavior during frictions stir welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 11-21.
- [9] 李红克, 史清宇, 赵海燕, 等. 热量自适应搅拌摩擦焊热源模型 [J]. 焊接学报, 2006(11): 81-85.
- LI Hongke, SHI Qingyu, ZHAO Haiyan, et al. Auto-adapting heat source model for numerical analysis of friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(11): 81-85.
- [10] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 铝合金薄板搅拌摩擦焊接残余变形的数值分析 [J]. 金属学报, 2009, 45(2): 183-188.
- YAN Dongyang, SHI Qingyu, WU Aiping, et al. Numerical analysis on the residual distortion of Al alloy sheet after friction stir welding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(2): 183-188.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 变形铝及铝合金化学成分: GB/T 3190—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 刘琪, 董仕节, 官旭, 等. 搅拌摩擦焊温度场数值模型的研究进展 [J]. 材料导报, 2015, 29(21): 118-125.
- LIU Qi, DONG Shijie, GUAN Xu, et al. A review numerical model for temperature field in friction stir welding process [J]. Materials Reports, 2015, 29(21): 118-125.
- [13] 胥军, 邓峰, 苏田, 等. 动力电池箱 MIG 焊数值模拟及变形控制研究 [J/OL]. 中山大学学报(自然科学版), 2021 [2021-01-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1241.N.20210106.2054.007.html>.
- XU Jun, DENG Feng, SU Tian, et al. Research on numerical simulation and deformation control of melt inert-gas welding in power battery enclosure [J/OL]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021 [2021-01-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1241.N.20210106.2054.007.html>.
- [14] 钮旭晶, 侯振国, 鲁二敬, 等. 标动铝合金底板双轴肩搅拌摩擦焊的数值仿真 [J]. 轨道交通装备与技术, 2019(6): 26-30.
- NIU Xujing, HOU Zhenguo, LU Erjing, et al. Numerical simulation of FSW with double probes for base board of standard EMU [J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2019(6): 26-30.
- [15] 朱树红, 夏罗生. 铝合金搅拌摩擦焊残余应力及变形的研究进展 [J]. 焊接技术, 2017, 46(3): 1-5.
- ZHU Shuhong, XIA Luosheng. Research progress on residual stress and residual deformation aluminum alloy FSW [J]. Welding Technology, 2017, 46(3): 1-5.
- [16] 周欢. 低边敞车侧墙组装焊接顺序优化研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2008: 49-50.
- [17] 郭敏. 加筋薄板单边焊接屈曲变形及其影响因素研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 81-91.
- [18] 吕涛. 钛合金舱体结构件激光点焊变形预测与焊接顺序优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 34-35.

(编辑 荆树蓉)