

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.05

动车侧墙焊接变形高效模拟与修正方法研究

沈 刚¹, 王亚男¹, 耿 明¹, 刘 松¹, 郭春城¹, 吴益霖², 陈静青²

1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130113

2. 西南交通大学, 四川 成都 610031

摘 要: 针对轨道交通行业动车组侧墙结构多工序焊接变形数值模拟存在的计算效率低、刚体位移干扰等问题, 提出一种融合局部热循环映射与变形修正的有限元分析方法。通过建立局部精细化焊缝模型进行温度场瞬态模拟, 提取典型接头的热循环曲线参数, 构建等效热源模型并将其映射至整体结构网格, 实现了基于顺序耦合的焊接应力变形快速计算。为解决多工序累积效应导致的刚体位移偏差, 提出空间变形修正算法, 通过建立基准坐标系对模拟结果进行刚体运动分解, 采用坐标变换消除平移和旋转分量, 提取纯变形分量进行统计对比。以某型动车组侧墙结构为对象, 对激光-MAG 复合焊接工艺进行全过程模拟, 结果表明: 局部-整体映射策略使计算效率显著提升, 变形误差 < 20%。该方法有效解决了大型复杂结构多工序焊接模拟的精度与效率矛盾, 为轨道交通装备制造工艺优化提供了可靠的分析工具。

关键词: 焊接变形; 有限元模拟; 温度场映射; 刚体位移; 高速列车

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0041-06

Research on Efficient Simulation and Correction Method for Welding Deformation of High-Speed Train Sidewalls

SHEN Gang¹, WANG Yanan¹, GENG Ming¹, LIU Song¹, GUO Chuncheng¹, WU Yilin², CHEN Jingqing²

1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130113, China

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: To address the issues of low computational efficiency and rigid body displacement interference in numerical simulations of multi-process welding deformation for high-speed train sidewall structures in the rail transit industry, this paper proposes a finite element analysis method integrating local thermal cycle mapping and deformation correction. By establishing a local refined weld seam model for transient temperature field simulation, the thermal cycle curve parameters of typical joints are extracted to construct an equivalent heat source model, which is then mapped to the global structural mesh. This achieves rapid calculation of welding stress and deformation based on sequentially coupled analysis. To resolve rigid body displacement deviations caused by cumulative multi-process effects, a spatial deformation correction algorithm is proposed. A reference coordinate system is established to decompose rigid body motion from simulation results, and coordinate transformation is applied to eliminate translational and rotational components, thereby extracting pure deformation components for statistical comparison. Taking a high-speed train sidewall structure as an example, the laser-MAG hybrid welding process is simulated comprehensively. Results indicate that the local-global mapping strategy significantly improves computational efficiency, with deformation errors < 20%. This method effectively resolves the conflict between accuracy and efficiency in multi-process welding simulations for large-scale complex structures, providing a reliable analytical tool for optimizing rail transit equipment manufacturing processes.

Keywords: welding deformation; finite element simulation; temperature field mapping; rigid body displacement; high-speed trains

收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3407800)

作者简介: 沈 刚(1978—), 副高级工程师, 主要从事铝合金车体焊接工艺研究。E-mail: saratian86@126.com。

引用格式: 沈刚, 王亚男, 耿明, 等. 动车侧墙焊接变形高效模拟与修正方法研究[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 41-46.

Citation: WANG Yanan, GENG Ming, LIU Song, et al. Research on Efficient Simulation and Correction Method for Welding Deformation of High-Speed Train Sidewalls[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 41-46.

0 引言

随着轨道交通装备向高速化、轻量化方向发展, 动车组侧墙作为承载气动载荷与支撑设备的关键部件, 其焊接制造精度直接影响车体服役安全性与装配工艺性^[1-2]。激光-MAG 复合焊^[3]、搅拌摩擦焊^[4]等先进工艺在轨道交通装备中的广泛应用, 虽提升了焊接效率, 但多道焊序产生的累积变形仍难以精确控制。传统依赖试错法的工艺优化模式成本高昂, 而有限元数值模拟技术为预测焊接变形提供了有效手段^[5]。然而, 面对侧墙结构的大尺寸、多焊缝特征, 现有的全局精细化建模方法常因计算资源消耗过大而难以满足工程时效性需求; 同时, 多工序模拟中由夹具约束变化引发的刚体位移叠加效应, 严重干扰了变形量的定量评估, 制约了仿真结果对实际生产的指导价值。

当前焊接变形模拟研究主要围绕热源模型优化与计算策略改进展开。经典瞬态热弹塑性法虽能准确反映温度-应力耦合机制, 但其全流程三维仿真效率难以适应多焊缝结构需求^[6-7]。基于等效热源的快速算法(如固有应变法)虽提升了计算速度, 但对复杂热循环过程的简化易导致局部变形预测偏差^[8-9]。近年来, 热源简化^[10]与 GPU 加速^[11]已被用于平衡焊接仿真的精度与效率, 但在多工序焊接场景中, 尚未系统解决工序间变形累积引起的刚体运动干扰问题。此外, 现有研究多聚焦于单一焊道变形分析, 缺乏针对轨道交通大型构件多工序协同变形的系统性校正方法。

本研究提出一种融合局部热循环映射与空间变形修正的焊接变形高效模拟方法。通过建立局部精细化模型获取典型接头的温度场特征参数, 构建可扩展至整体结构的等效热源映射模型, 显著降低多焊缝模拟的计算规模; 同时, 开发基于基准坐标系的空间变换算法, 有效剥离多工序累积的刚体位移分量, 实现纯变形量的精确提取。以某型动车组侧墙结构为应用对象, 验证所提方法在计算效率

与预测精度方面的综合优势, 为轨道交通大型复杂结构焊接工艺优化提供了新的解决方案。

1 有限元建模

本文针对侧墙焊接模型, 基于局部-整体映射的焊接模拟策略, 首先对焊缝局部进行温度场模拟, 之后依据焊接准稳态温度场的相似性原理, 将局部焊缝模型的热循环温度场映射至整体模型, 求解焊接应力及变形。

1.1 局部焊缝建模及温度场模拟边界条件

建立侧墙型材的焊缝局部模型, 如图 1 所示, 材料为 6005A 铝合金, 焊材采用 5 系铝合金焊丝。采用壳-固耦合形式模拟铝合金薄壳结构的温度场。焊缝区域网格尺寸 1.5 mm。实体网格数约 25 000 个, 壳体网格数约为 40 000 个。其中壳体网格类型为 DS4, 实体网格类型为 DC3D8。

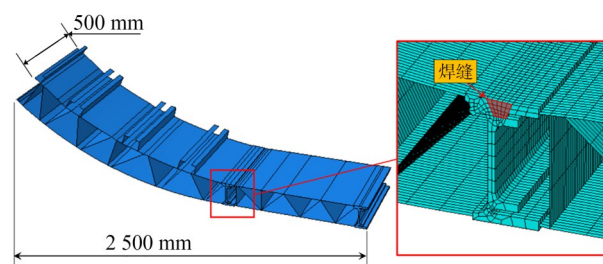


图 1 局部焊缝模型

Fig. 1 Local weld seam model

采用双椭球体积分布热源模拟焊接换热, 如式(1)所示:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{ab_f c \pi^{3/2}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_f^2}\right) (x \geq 0)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{ab_r c \pi^{3/2}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_r^2}\right) (x < 0) \quad (1)$$

式中 $Q = \eta UI$, η 为热效率, U 为电压, I 为电流, a 、 b_f 、 b_r 、 c 为热源参数, f_f 、 f_r 为热源分配系数。型材表面向周围存在对流换热及辐射对流换热, 其对流辐射换热系数如(2)所示:

$$h = 20 + 5.67^{-8} \times 0.8 \times (T + T_0)(T^2 + T_0^2) \quad (2)$$

1.2 整体结构建模及边界条件

基于壳-固耦合建模理论,构建了融合壳体-实体多尺度特征的动车组侧墙焊接过程数值模型,如图2所示。该模型采用分层建模策略:主体蒙皮结构选用S4R壳单元进行离散,单元尺寸经网格收敛性分析确定为12 mm,有效表征0.8~1.2 mm薄板结构的弯曲刚度特性;关键焊缝区域采用C3D8R实体单元进行精细化建模,通过局部网格加密技术将热影响区网格密度提升至1 mm,精确捕捉熔池动态演变过程。全模型共划分网格162.4万单元,其中壳单元占73.6%,实体单元占26.4%,在保证计算精度的同时实现了计算效率优化。

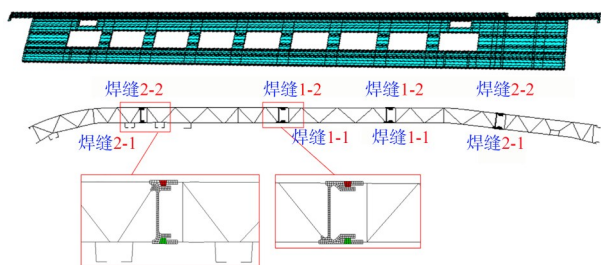


图2 整体结构模型及边界条件

Fig. 2 Global structural model with boundary conditions

侧墙焊接制造的工装边界条件如图3所示。工装约束为:机械固定、工装支撑。载荷边界条件为液压加载、重力加载(压铁)、结构自重等。按照以下顺序进行焊接制造:①液压/机械压紧(反装)→②重力加载(反装)→③反装自动焊→④工装释放+型材重力翻转→⑤液压/机械压紧(正装)→⑥正装自动焊→⑦工装释放→⑧机械加工。

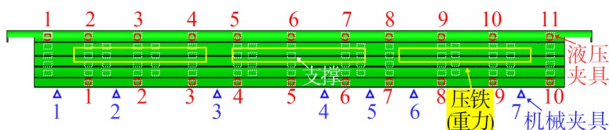


图3 边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

2 数值模拟结果分析

2.1 温度场模拟结果

局部焊缝结构的温度场模拟如图4所示。数值模拟结果表明,熔池前端因热源集中作用呈现显著的非稳态传热特征:在距熔合线0.5 mm范围内,温度梯度高达480 °C/mm,等温线呈现非对称椭圆形分布,其长轴方向与焊接速度矢量形成15°~20°夹角;熔池尾流区则以热传导为主导,温度梯度降至35 °C/mm以下,等温面沿焊缝轴向形成拖曳状分布。

分布,其长轴方向与焊接速度矢量形成15°~20°夹角;熔池尾流区则以热传导为主导,温度梯度降至35 °C/mm以下,等温面沿焊缝轴向形成拖曳状分布。

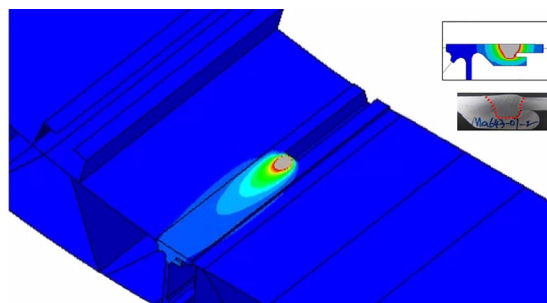


图4 焊接温度场分布

Fig. 4 Welding temperature distribution

对侧墙型材的角焊缝、对接焊缝的温度进行模拟,并提取焊接热循环曲线,并将该结果映射到型材结构中,替代大型结构的瞬间热源的温度场模拟,如图5所示。映射后的整体结构温度场既保留了局部精细化模型的梯度特征,又通过热源叠加算法准确反映了多道焊热积累效应。与传统全局精细化模型相比,该方法在保持预测精度的前提下,将单次焊接过程模拟耗时从72 h压缩至4.2 h,显著提升了多工况迭代优化的可行性。

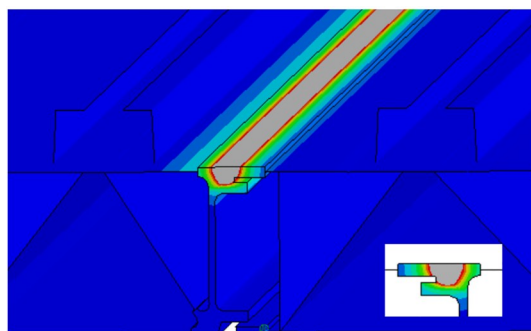


图5 焊接热循环(6005A熔点约650 °C)

Fig. 5 Welding thermal cycle of 6005A (melting point ~650 °C)

2.2 整体模型变形分析

如图6所示,经过正/反装自动焊接后,侧墙型材表面轮廓呈现显著曲率变化,最大拱曲偏移量达14.2 mm。这种非线性变形源于多约束耦合效应:机械工装(111组)、液压工装(1 200 kgf)与重力工装(6 t)的分布导致局部拘束度差,从而引发非对称焊接应力释放。经机械加工后,残余应力场重新分布,约释放23.6%的弹性变形分量。

为精准评估模拟精度,建立跟踪基准的变形分

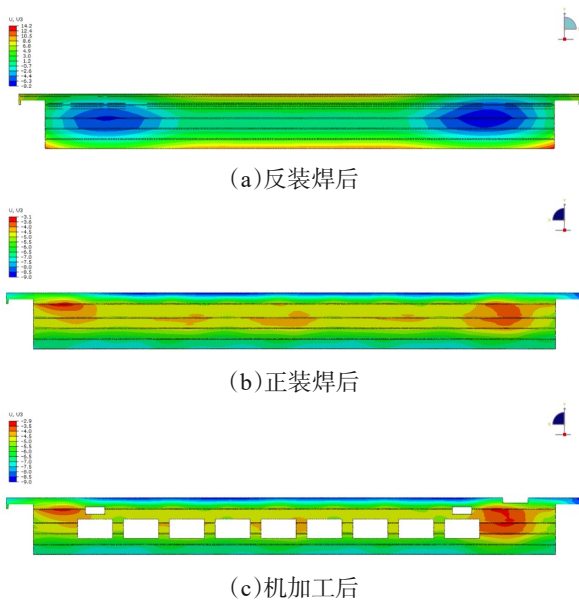


图6 动车组侧墙焊接后弧度变形分布
Fig. 6 Distribution of radial deformation on the side wall of EMU after welding

解方法(如图7所示):首先仿真模型与实测点云统一至全局坐标系;随后进行刚体运动解耦,提取包含平移($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)和旋转($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)分量的变换矩阵,最终获得纯变形场。经统计,刚体位移分量占总位移量的38.2%~45.7%,验证了变形分解的必要性。

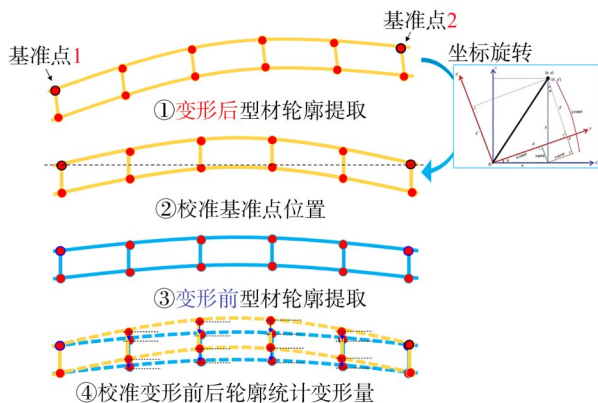


图7 空间变形修正
Fig. 7 Correction for deformation due to spatial stiffness

沿图8所示的7条特征路径的变形分布如图9所示。反装焊接后,路径Path2中部因夹紧工装跨距较大(较其他区域增大15%),导致最大拱曲变形达10.2 mm,超出相邻Path1、Path7区域(约束跨距1.6 m)变形量约20%。正装焊接阶段撤除重力工装后,通过机械-液压复合约束,使残余变形收敛至

4 mm内,但路径Path6因热输入累积仍存在3.8 mm超标变形(制造规范限值 ± 2 mm),需进行局部火焰矫形以恢复几何公差。

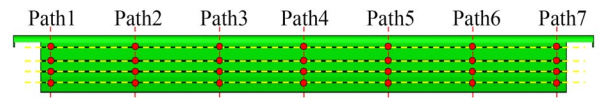


图8 侧墙焊接变形测量位置示意
Fig. 8 Schematic diagram of measurement locations for side wall welding deformation

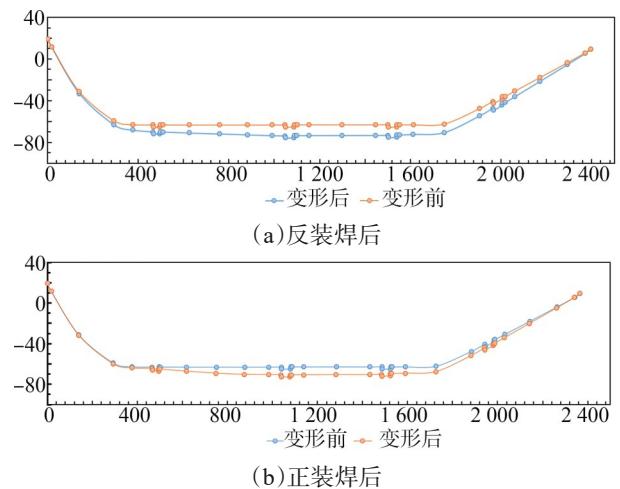


图9 侧墙自动焊后变形分布
Fig. 9 Deformation distribution after automatic welding of the side wall

基于10台现车侧墙的变形测量数据(如图10、图11所示),采用Kriging空间插值法建立实测变形场。统计分析显示:正装焊接夹具定位的随机偏移导致实测数据离散系数达0.37,监测点(Path2/Path6)

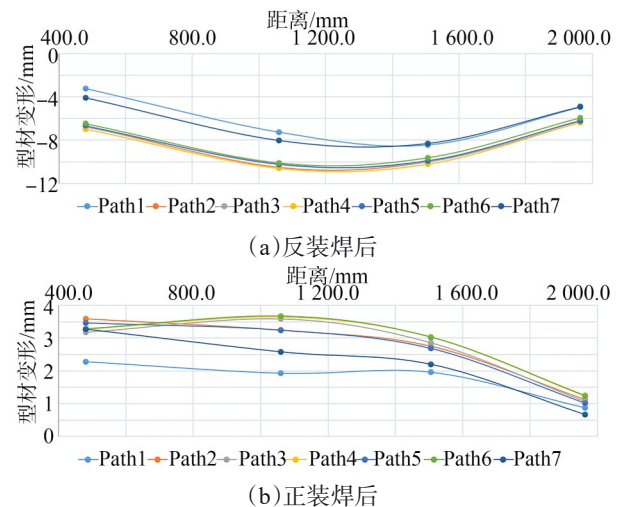


图10 动车组侧墙型材焊后弧度变形量统计(数值模拟)
Fig. 10 Statistical analysis of radial deformation amount in side wall profiles of EMU after welding (numerical simulation)

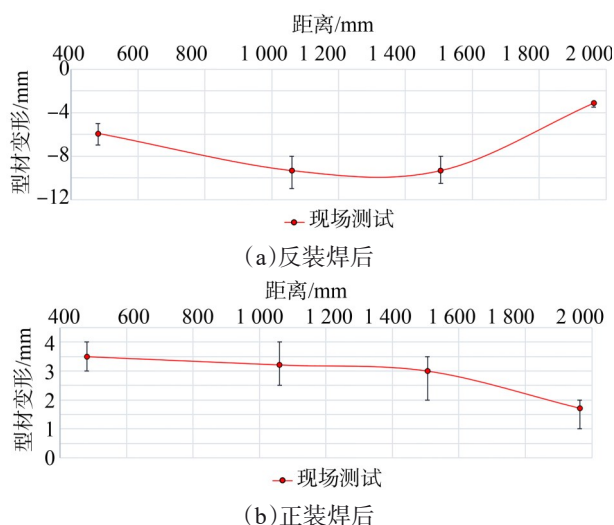


图11 动车组侧墙型材焊后弧度变形量统计(现场测量)

Fig. 11 Statistical analysis of radial deformation in side wall profiles of EMU post-welding (on-site measurement)

的平均值和仿真结果趋势吻合,特征变形误差<20%。验证了数值模型对复杂约束条件下变形演化规律的表征能力。

4 结论

基于多尺度建模理论与空间变形解耦方法,本研究构建了轨道交通装备大型复杂结构多工序焊接变形预测新体系,通过数值仿真与工程验证相结合,获得以下结论:

(1)通过局部-整体映射方法,对大型结构进行焊接变形模拟,其计算效率相比传统顺序耦合瞬态热弹塑性显著提高,以动车组侧墙焊接为例(长度<24 m,8条自动焊缝),计算时间<20 h。

(2)对焊后释放变形进行空间变形修正,通过建立基准坐标系对模拟结果进行刚体运动分解,采用坐标变换消除平移和旋转分量,可以实现数值模拟的焊接变形和原始构形的变形量对比。

(3)该数值模拟得到的焊接残余变形和现场测试相比,误差<20%。

(4)本文提出的局部-整体映射方法和空间变形修正技术,可进一步推广至航空航天、海洋平台等大型焊接工程结构焊接变形预测中。其高效计算特征可满足百米级复杂结构的焊接仿真需求,而刚体运动分解与变形量提取方法,为实际工程中多

约束、长流程焊接的累积变形控制提供了新的分析方法,为工程数字化仿真与智能建造提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张子傲,张知航,黄继华. 高速列车铝合金车体焊接工艺研究进展[J]. 轨道交通材料,2023(1):1-7.
ZHANG Z A, ZHANG Z H, HUANG J H. Advance in the Research of Welding Procedures for Aluminum Car Bodies of High Speed Train[J]. Materials for Rail Transportation System, 2023(1):1-7.
- [2] 姜艳,马国龙,马寅,等. 高速列车铝合金车体典型接头激光-MIG复合焊接特性研究[J]. 电焊机,2022,52(10):1-8.
JIANG Y, MA G L, MA Y, et al. Study on Laser-MIG Hybrid Welding Characteristics of Typical Joints of Aluminum Alloy Carbody for High Speed Train[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10):1-8.
- [3] Han X H, Yang Z B, Ma Y, et al. Comparative study of laser-arc hybrid welding for AA6082-T6 aluminum alloy with two different arc modes[J]. Metals, 2020, 10(3):407.
- [4] 马付建,李锡伟,陈绍,等. 6061铝合金超声辅助搅拌摩擦焊温度场分析[J]. 焊接学报,2024,45(8):41-51.
MA F J, LI X W, CHEN S, et al. Analysis of temperature field of ultrasonic assisted friction stir welding of 6061 aluminum alloy [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(8):41-51.
- [5] Liang W, Mao Z, Hu L, et al. Estimating welding deformation of ultra-thin mild steel bead-on-plate joints by means of inherent strain method[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199:111825.
- [6] 薛海峰,梁连杰,孙景楠,等. 高速列车侧墙大型材激光-MIG复合焊接[J]. 电焊机,2015,45(2):49-52.
XUE H F, LIANG L J, SUN J N, et al. Laser-MIG hybrid welding on the large-size profiles of high-speed train side walls[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(2):49-52.
- [7] Bai X. Time-Step Optimization in Transient Thermo-Mechanical Analysis of Welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021.
- [8] Li C, Zhai H, Zhu L W, et al. Numerical investigation of welding deformation diminution for double shell structure using the layered inherent strain [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2025, 57:103208.
- [9] Najafi Mohammad Jafari, Khosravifard Amir, Nayebi

- Ali. Optimizing the butt-weld process of pipes based on the inherent strain approach[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2025(214):105439.
- [10] 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+41.
- SUN J M, DENG D A, YE Y H, et al. Simulating Welding Residual Stress of Multi layer and Multi pass Welding T-joints in Q390 High strength Steel Thick Plate with Instantaneous Heat Source[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2016, 37(7):31-34+41.
- [11] 闻博,金成,黄诗铭,等. 转向架构架 T 形接头单丝、双丝焊接热源模型及应力场数值模拟[J]. 电焊机, 2021, 51(7):99-103.
- WEN B, JIN C, HUANG S M, et al. Heat source model and stress field numerical simulation of single-wire and double-wire welding for T-joint of bogie frame[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(7):99-103.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 40 页

- 7070-7651 based on BP algorithm of neural network[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(3):12-15.
- [7] Manvatkar V D, Arora A, De A, et al. Neural network models of peak temperature, torque, traverse force, bending stress and maximum shear stress during friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(6):460-466.
- [8] 池浩瀚,刘雪松,李世海. 基于遗传算法及神经网络的 6005A-T6 铝合金 FSW 工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2021, 50(07):118-120.
- CHI H H, LIU X S, LI S H. Optimization of FSW process parameters for 6005A-T6 aluminum alloy based on genetic algorithm and neural network[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7):118-120.
- [9] 李甲顺. 基于自组织增量学习神经网络的 FSW 质量评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- LI J S. Study on FSW quality evaluation based on self-organizing incremental learning neural network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [10] 叶镭. 基于密度聚类算法的搅拌摩擦焊过程异常检测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- YE L. Study on anomaly detection of friction stir welding process based on density clustering algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- Wang H, Bah M J, Hammad M. Progress in Outlier Detection Techniques: A Survey[J]. IEEE Access, 2019, 7:107964-108000.
- [12] Chandola V, Banerjee A, Kumar V. Anomaly detection[J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(3):1-58.
- [13] Tang J, Chen Z, Fu A W, et al. Enhancing effectiveness of outlier detections for low density patterns [C]//Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, 2002:535-548.
- [14] Jin W, Tung A K H, Han J, et al. Ranking outliers using symmetric neighborhood relationship [C]//the 10th Pacific-Asia Conference, 2006:577-593.
- [15] Papadimitriou S, Kitagawa H, Gibbons P B, et al. LOCI: fast outlier detection using the local correlation integral [C]//the 19th International Conference on Data Engineering, 2003:315-326.
- [16] 曹炳琪. 基于网格聚类优化算法的搅拌摩擦焊接质量评价系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
- CAO B Q. Study on friction stir welding quality evaluation system based on grid clustering optimization algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>