

车辆薄板结构电磁感应加热调平工艺研究¹

谢绍兴¹, 滕东平¹, 鲁万彪¹, 赵云峰¹, 潘永刚¹, 王炎², 张雪彪³

(1 中车南京浦镇车辆有限公司技术工程部, 江苏 南京, 210031; 2 中国铁路上海局集团公司南京车辆监造项目部, 江苏 南京, 210031; 3 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对于轨道车辆薄板结构的焊接变形问题, 传统火焰加热调平工艺存在噪声大、板体松弛及调平效果不稳定等缺点。本文提出将高频感应热源应用于车辆薄板结构调平工艺, 设计了配套的感应加热电源设备及专用工装, 并对车顶与侧墙薄板结构的调平过程进行了数值模拟与试验研究。结果表明, 感应加热调平后的薄板平面度满足工艺误差要求。最后, 在车间进行了薄板结构的感应调平工艺试验, 感应热源的调平工艺具有加热点直径小, 板面紧实效果好, 无过热现象等优势, 适用于车辆薄板结构的焊接变形矫正。

关键词: 车辆薄板; 火焰调平; 感应热源; 平面度

中图分类号: U270.6 **文献标识码:** A

Study on straightening Technology of Thin-Plate Structure of Vehicles with Electromagnetic Induction Heating

Xie Shaoxing¹, Teng Dongping¹, Lu Wanbiao¹, Zhao Yunfeng¹, Pan Yonggang¹, Wang Yan², Zhang Xuebiao³

(1 Technical Engineering Department of CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Nanjing 210031, China; 2 Nanjing Vehicle Supervision and Manufacturing Project Department of China Railway Shanghai Group Co., Ltd, Nanjing 210031, China; 3 School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: For the welding deformation of rail vehicle thin-plate structures, the traditional flame heating straightening process suffers from issues such as high noise, loose plate body, and unstable straightening effects. This paper proposes the application of a high-frequency induction heat source to the straightening process of vehicle thin-plate structures. A corresponding induction heating power equipment and specialized tooling were designed, and numerical simulations and experimental studies were conducted on the straightening process of the roof and sidewall thin-plate structures. The results indicate that the flatness of the thin plates after induction heating straightening meets the process error requirements. Finally, workshop tests of the induction straightening process for thin-plate structures demonstrated that the induction heat source offers advantages such as a small heating spot diameter, effective plate surface tightening, and no overheating phenomena, which is suitable for correcting welding deformation in vehicle thin-plate structures.

Keywords: Vehicle thin-plate; Flame straightening; Induction heat source; Flatness

碳钢轨道车辆车体多采用板梁式耐候钢结构, 通过精密焊接工艺组装而成。侧墙及车顶通常使用2 mm厚薄板, 总装后易出现焊接变形问题^[1-2]。为保障车体外观平整度, 目前普遍采用火焰加热法进行薄板调平。具体工艺中, 工人使用电磁铁将烤火板吸附在车体内侧, 随后在侧墙内侧对烤火板上的孔位逐一加热并喷水冷却, 使薄板收缩以恢复平整。车顶薄板则采用直接火焰加热后立即水冷的方式进行调平。根据车辆工艺要求, 合适的调平温度为600~750℃, 侧墙平面度允许误差 ≤ 1.5 mm/m, 高度方向 $\leq 3\sim 4$ mm/m; 车顶平面度误差 ≤ 3 mm/m。该工艺需准确控制加热位置、温度, 并配合外力和冷却措施^[3]。因而其调平效果高度依赖操作人员的经验与技术熟练度。

电磁感应加热矫正技术凭借其高效、节能的特点, 已在船舶焊接结构变形矫正中得到应用^[4]。Mark

Wells等^[5]针对8 mm以下船体薄板的矫正研究表明,感应加热效果优于传统火焰矫正;McPherson等^[6-7]也指出感应加热对薄板结构具有更好的修复效果。由于电磁感应加热的集肤效应,涡流主要集中于钢板表层,可实现加热深度的精确控制,因此该技术在船舶薄板结构的矫正中得到了广泛应用,尤其适用于总段与搭载阶段中大面积甲板、围壁等结构的变形修复^[8,9]。

船舶焊接结构的矫正主要针对“瘦马”变形,通常在筋板结构的焊缝背面进行短线状加热,因此感应器设计为线状,以此替代火工矫正中的“背烧”工艺,具有较强的工艺适应性^[10]。相比之下,碳钢轨道车辆侧墙和车顶结构常采用“梅花状”多点加热方式,这与船舶薄板结构的线状加热矫正工艺存在显著区别。

在碳钢轨道车辆薄板结构矫正方面,孙海双^[11]针对侧墙薄板结构,分析了在电磁铁模板辅助下的火焰点状调平工艺,并通过车间试验验证了其在侧墙平面度控制中的适用性;贾昕等^[12]研究了侧墙火焰矫正中多点加热布置、加热温度对于板边残余应力的影响。范宏博^[13]采用电磁感应加热替代火焰加热,对高速列车铝合金部件开展了热矫正试验与数值模拟,并确定了最优工艺参数。孙宏宇^[14]则运用氩弧矫平技术处理不锈钢车体薄板变形。此外,张立君、匡赞新等^[15-16]对比了电磁铁辅助孔位加热与真空矫正工艺的优劣。姜明^[17]比较了蒙皮涨拉与真空吸附调平工艺,并结合不同结构变形特点开展了工程应用。

然而,上述方法大多仍以火焰作为热源,普遍存在噪音大、加热效率低、板体收紧效果不足等问题。总体来看,目前针对车辆薄板结构的点状调平仍以火焰加热为主,在电磁感应矫正方面的系统性工艺研究仍较为缺乏。

为此,本文研制了适用于车辆薄板调平的感应加热电源及双点式手持加热头,建立了热弹塑性有限元模型以分析调平过程中的温度与变形行为,并通过车间试验验证了该工艺的有效性,以其为提升车辆薄板调平质量与效率提供工艺依据。



图1 薄板感应加热调平设
Fig. 1 Thin plate induction heating

1 车辆薄板结构电磁感应加热调平工装

为实施薄板结构感应加热调平,本研究研制了一套专用工装,该系统以SPY3-40-PLC型感应加热电源为核心,配备手持式加热头(图1)、悬吊装置及软电缆,支持远距离调平作业。电源额定功率40KW,具备加热时间自动控制功能,可有效防止工件过烧。手持式加热头集成了双点式感应器与手持式手柄,可同时加热两个点位,显著提升作业效率。加热头外壳采用尼龙材料经3D打印工艺制成,具有质量轻、持握方便的特点。手柄下端设有加热控制按钮,前端装配有两点式铜管感应器。

薄板结构的感应加热采用多点加热方式,两个加热点均使用螺旋形感应线圈。线圈由直径3mm的细铜管绕制而成,外径约为16mm。螺旋形线圈间距固定为40mm,加热过程中感应器与薄板表面保持恒定间隙,以确保加热均匀性与工艺稳定性。

2 薄板结构感应加热过程的数值分析方法

在数值模拟中,若完全考虑电磁场与温度场的复杂耦合关系,将面临计算规模大、网格划分复杂及边界条件设置困难等问题。鉴于电磁场的邻近效应使热量高度集中于感应器下方局部区域,且薄板厚度方向温度梯度较小,本研究将感应热等效为作用于加热点区域的内热源,采用热-结构耦合的序列耦合计算方法^[18]。该方法避免了复杂的电磁场计算,在保证模拟精度的同时大幅降低了计算资源需求。

2.1 温度场有限元理论

薄板感应加热过程可以采用三维非线性瞬态热传导方程来描述加热过程中的温度场,其控制方程为^[19-20]:

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

此处将热源强度 q 作为感应加热生热率的内热源,引入拉普拉斯算子 ∇^2 上式可化为:

$$c\rho \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla \{T\}) = \{q\} \quad (2)$$

式中: $c(T)$ 为随温度变化的比热, $T(x,y,z)$ 为随时间变化的温度场, ρ 为密度, $\lambda(T)$ 为随温度变化的热传导系数, $\{q\}$ 为热源的能密度。

在热-弹-塑性有限元模拟中,薄钢板表面与周围环境之间的热量交换主要通过空气对流与热辐射两种方式进行。一般将环境温度设定为20℃,其对流与辐射换热的边界条件可表述为以下控制方程^[19]:

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

$$q_b = C\varepsilon (T_s^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中: q_c 为对流热量损失, q_b 为空气自然对流换热系数, T_s 为薄板表面温度, T_0 为环境温度, q_b 为热辐射损失热量, C 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$, ε 为辐射率,取值0.6~0.9。

此外,在实际加热过程中,辐射热损失所占比例较小,因此在后续薄板感应加热的数值模拟中予以忽略。

2.2 感应热的简化热源模型

试验采用尺寸为250 mm × 150 mm × 2 mm的耐候钢Q350EWL1薄板试样,经双点式感应器加热后的状态如图2所示。试验设定加热电流为65 A,加热时间为1.8 s,加热结束后立即进行喷水冷却。采用Raytek-MARATHON型自动红外测温仪(测温范围300℃~1500℃)对钢板温度进行测量,为了便于测量,选择图2中编号为“1”的加热点背面中心位置点为测温点A,然后对A点温度-时间曲线进行积分,得到加热区域的平均温度,据此建立钢板表面的感应热功率模型^[21]。A点的平均温度变化可表示为:

$$\Delta T = \frac{\int_0^9 y dt}{8} = 473.2^\circ C \quad (5)$$

感应加热过程的总热量可表示为: $Q = cm\Delta T = c\rho V\Delta T$,其中 m 为质量; c 为比热,450 J/kg·℃; ΔT 为温升; ρ 为密度,7880 kg/m³。由此得到薄板感应加热的生热率为:

$$q = \frac{Q}{V \cdot t} = 2.1 \times 10^8 \text{ W} / \text{m}^3 \quad (6)$$

依据理论推导, 感应热功率以生热率的形式施加于加热区域, 由于薄板厚度方向的温度梯度很小, 可将感应热功率简化为圆柱体形态, 其生热率为 $2.1 \times 10^8 \text{ W} / \text{m}^3$ 。将实际测量并计算得到的感应热作为内热源代入方程 (1) 进行求解, 从而获得薄板感应加热的数值结果。



图2 薄板感应加热后的照片

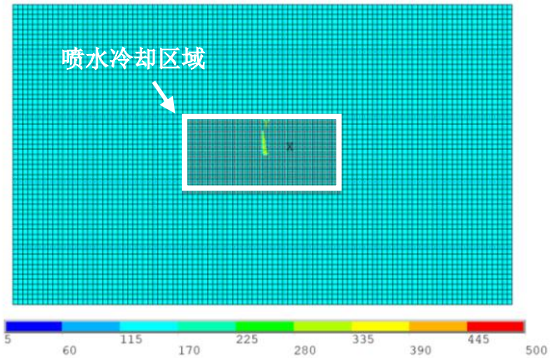


图3 薄板模型及喷水冷却区域

Fig. 2 Photo of the thin plate after induction heating

Fig. 3 Thin plate model and water cooling area

2.3 薄板感应加热有限元模型

基于上述感应热源简化方法, 采用ANSYS有限元软件建立了薄板试样有限元网格模型。薄板试样为耐候钢Q350EWL1, 温度场分析中忽略热辐射, 仅考虑对流换热。依据牛顿冷却定律, 在薄板各表面施加相应的自然对流系数, 并在加热点附近的局部喷水冷却区域 (图3) 施加水冷换热系数。该系数取值参照文献^[21]的膜态沸腾换热数据, 设为 $5 \times 10^8 / \text{W}(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。水冷区域尺寸为宽40 mm、长80 mm, 相应边界条件施加于图3所示范围。应力应变场计算时的材料强化模型为双线性等向强化模型, 屈服强度和切变模量等数据参考文献^[22]。

薄板模型采用映射网格进行划分, 厚度方向划分为三层网格, 在长度和宽度方向的网格为2.5 mm。图4是A点温度试验值与计算值的对比, 两者平均相对误差约为9.05%。图5为试验板的温度分布云图, 最高温度位于中心区域, 符合电磁感应加热的典型分布特征。

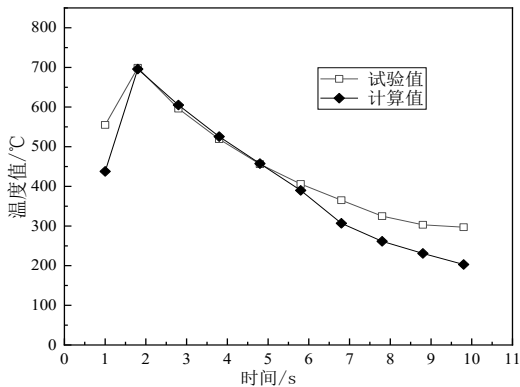


图4 A点温度变化曲线

Fig. 4 Curve of temperature change at point A

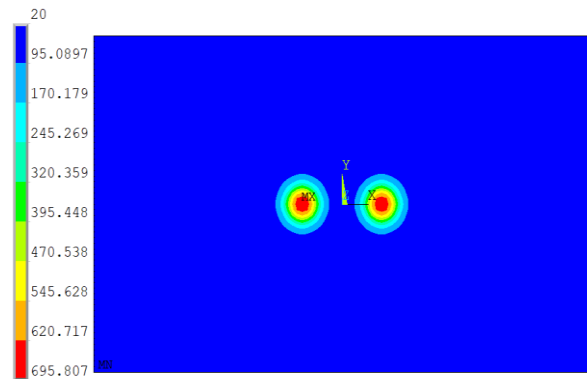


图5 小试板温度分布云图

Fig. 5 Temperature contour of the small test plate

3 车顶薄板结构的感应加热调平试验及数值分析

3.1 侧墙薄板结构的感应加热调平试验

试验用的车顶结构选自CR200J动车组列车, 材料为2 mm厚耐候钢Q350EWL1, 试验结构尺寸为1100 mm×450 mm×2 mm车顶薄板, 曲率半径8000 mm, 如图6所示, 根据薄板内侧板梁的网格结构划分为E、F两个板格区域。加热时的电流为50~60A, 加热时间1.5~1.8s, 温度650~750℃。

结合车辆生产车间的实际调平经验，加热方案采用梅花状多点逐行布置形式，每个板格布置104个加热点，总计208个加热点，净加热时间156 s。每个加热点加热后立即进行喷水冷却，且不实施锤击调平作业。加热作业现场如图7所示。为分析车顶弧度方向平面度的变化，在薄板表面布置平面度测量网格点，使用水平尺（靠尺）配合塞尺测量各个网格点在加热前后的平面度偏差，以塞尺所测间隙值作为平面度数据，据此评估感应加热调平效果是否满足工程技术要求。

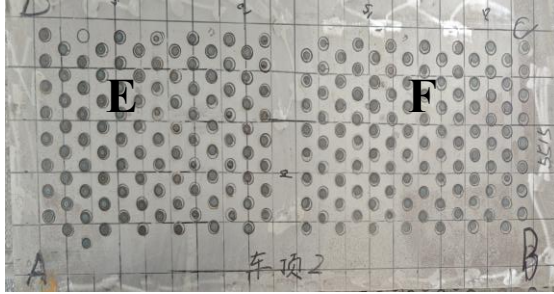


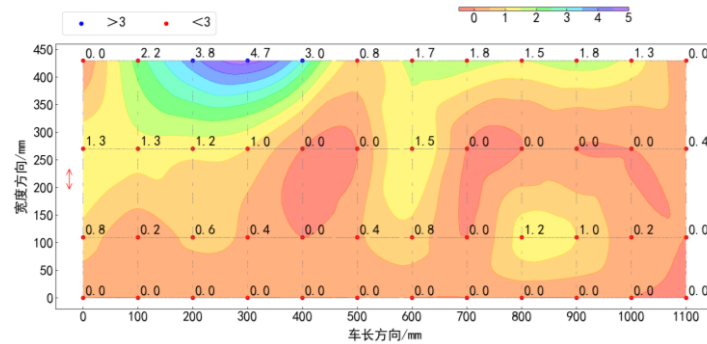
图 6 车顶试验结构

Fig. 6 Experimental structure of the vehicle roof

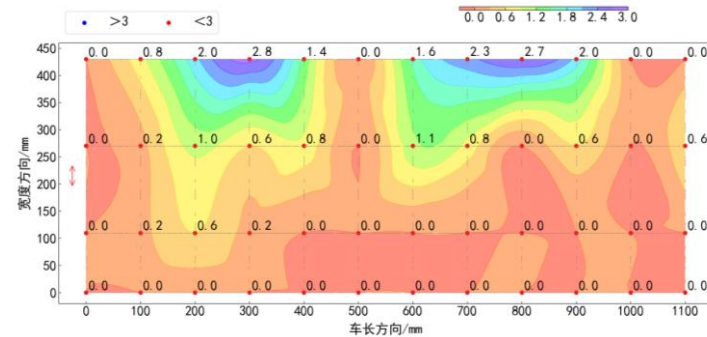


图 7 感应加热调平作业

Fig. 7 Induction heating straightening process



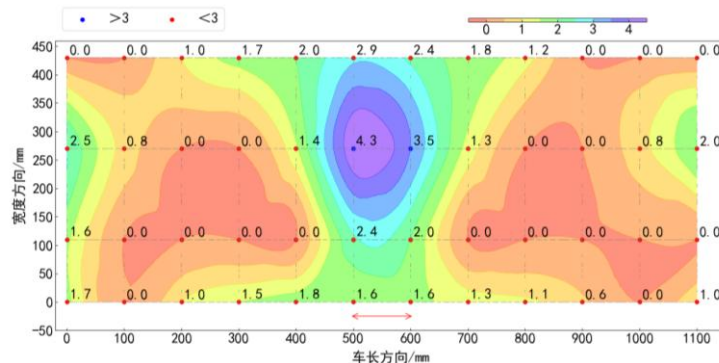
(a) 弧度方向的平面度（加热前）



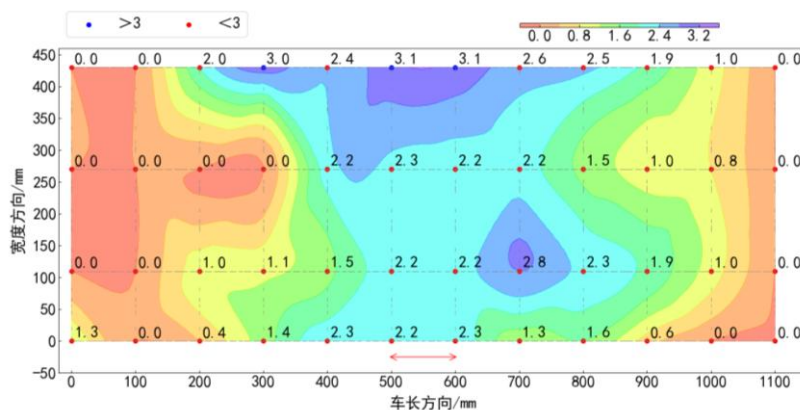
(b) 弧度方向的平面度（加热后）

图 8 车顶结构弧度方向的平面度变化

Fig. 8 Flatness in the direction of the arc of the vehicle roof structure



(a) 长度方向的平面度（加热前）



(b) 长度方向的平面度 (加热后)

图9 车顶结构长度方向的平面度

Fig. 9 Flatness in the length direction of the roof structure

图8展示了车顶薄板结构在弧度方向加热前后的平面度测量结果。图8(a)中,在感应加热前,仅在区域E的板边处存在明显凹陷,弧度方向平面度最大偏差值为4.7 mm;感应加热调平后,整体间隙值显著降低,所有测量点处的平面度均处于误差允许范围内,钢板自由边的不平度也得到有效矫平。

图9显示了车顶薄板结构在长度方向加热前后的平面度变化情况。加热前,区域E与区域F之间存在多处测量点超差,间隙误差范围为3.5~4.3 mm。该误差主要源于背面梁柱结构存在较大的弯曲变形(图9(a)),在车间作业时通常需优先对梁柱变形进行调平。这里仅进行薄板的调平加热,图9(b)显示区域E与区域F内部框架的平面度均达到技术要求,仅在板边处有个别点超差0.1mm。试验结果表明,感应加热调平后车顶薄板结构的整体平面度符合车间工艺规范。

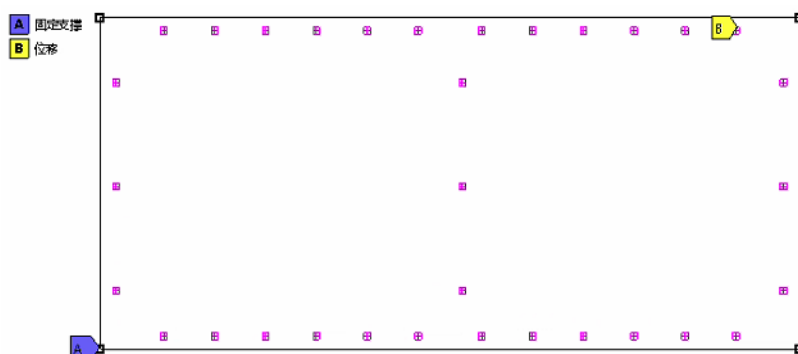


图10 模型约束条件

Fig. 10 Model constraints

3.2 车顶薄板结构的感应加热调平数值分析

针对上述试验结构,本文采用数值模拟方法分析其变形特征。车顶薄板结构尺寸较大,由乙型梁与柱通过焊接而成,蒙皮板和梁柱之间通过塞焊连接,塞焊点间距为100 mm,图10中薄板内部的方块点表示塞焊位置。根据车顶薄板的结构特点,在建立有限元模型时仅考虑薄板部分,通过在塞焊点处施加垂向位移约束来反映梁柱对蒙皮板的约束作用,从而简化数值计算。

在车顶薄板结构的有限元模型中,单元类型选用为SOLID 186,薄板划分为5 mm的均匀映射网格,厚度方向的网格尺寸为1 mm,模型节点数为426665,单元数为77000。温度场计算时的温度边界条件和上面的小板模型相同。结构计算时的约束条件如图10所示,在薄板下表面四个角点施加绞支约束,即约束X、Y、Z三个方向自由度;在塞焊点处约束Z方向自由度。

图11是温度分布的计算结果,薄板的最高温度710℃,采用圆点状加热模式。限于计算机资源的限制,数值模拟时没有考虑各点加热顺序对于变形的影响;文献^[22]中也提及薄板四周均有塞焊点及焊缝,且对称分布,加热顺序对于薄板变形及残余应力的影响不大。

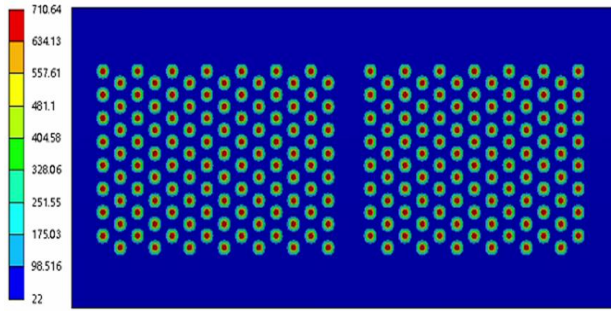


图 11 车顶薄板结构温度分布图

Fig. 11 Temperature contour of the thin plate structure
of the vehicle roof

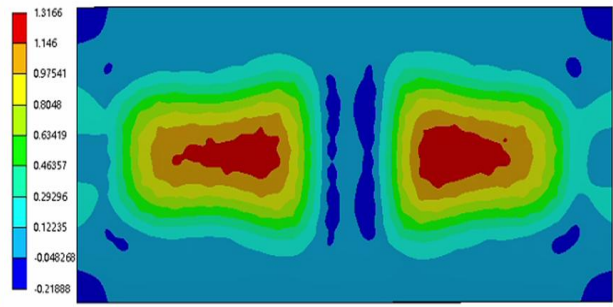


图 12 垂向位移云图

Fig. 12 Vertical displacement contour plot

图12为薄板的垂向位移云图，加热后呈现凹凸变形模式，变形模式和试验结果是一致的。数值计算得到的最大垂向变形约为1.52 mm，由于平面度的试验测量值是采用靠尺和塞尺测量的一维结果，因此，数值计算的位移结果与试验测量的间隙数据并不直接对应。图13是薄板加热后的等效力图，可见加热区域范围内存在较大的残余应力，薄板调平的目的不仅仅是矫正变形，同时可以使板收紧。

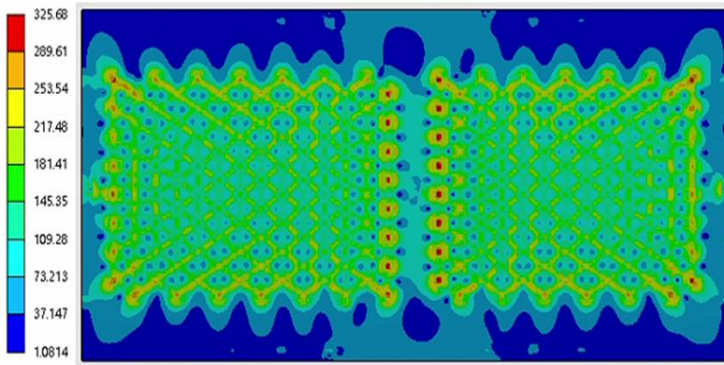


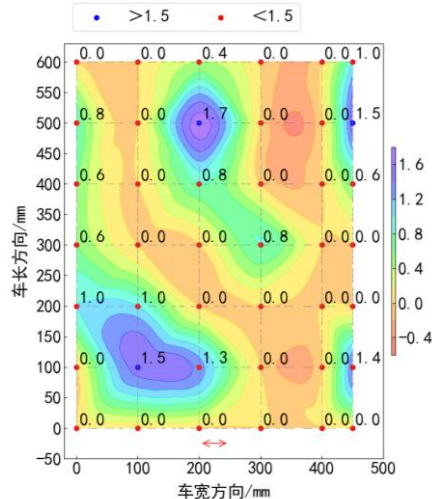
图 13 薄板米塞斯应力云图

Fig. 13 Thin plate Mises stress contour plot

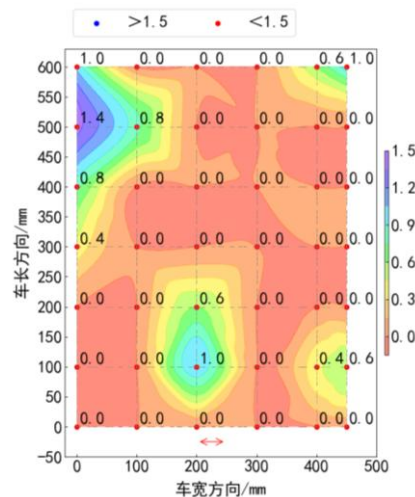


图 14 侧墙结构的感应加热矫正

Fig. 14 Induction heating process of side wall structure



(a) X 方向的平面度 (加热前)



(b) X 方向的平面度 (加热后)

图 15 侧墙结构 X 方向的平面度

Fig. 15 Flatness in the X direction of the side wall structure

4 侧墙薄板结构的感应加热调平试验及数值分析

4.1 侧墙薄板结构的感应加热调平试验

试验用侧墙结构尺寸为 750 mm×730 mm，采用两点式感应器进行多点加热，加热电流 65A，加热

时间 1.8 s。加热点共计 180 个，净加热时间 162 s。调平过程中未使用锤击工艺，而是在车体外侧采用电磁铁吸附薄板，并与内侧的烤火板配合，加热后立即进行喷水冷却。加热作业现场情况如图 14 所示。为了测量薄板平面度的变化，在薄板表面布置测量网格点，采用水平尺与塞尺组合测量各点在加热前后的平面度数值。

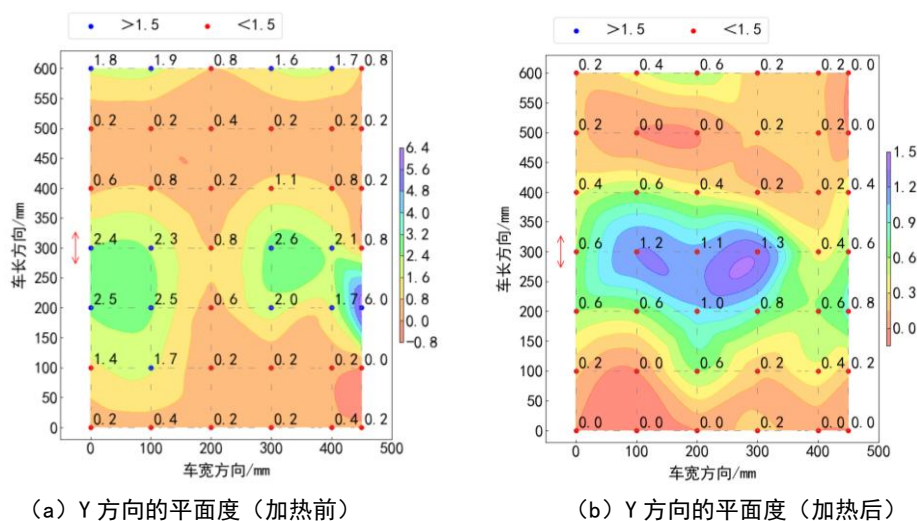


图 16 侧墙结构 Y 方向的平面度

Fig. 16 Flatness in the Y direction of the side wall structure

图 15 是侧墙板 X 方向加热前和加热后的平面度数值，加热前有个别点的间隙值为 1.5~1.7 mm，调平后间隙值最大为 1.4 mm，且位于板边附近。图 16 是薄板 Y 方向的平面度数值变化，在 Y 方向有多点超过 1.5 mm 的误差限。调平后各点都得到了矫平，最大的间隙值为 1.3 mm，均在误差范围内。表明感应加热调平的效果可以满足车间工艺要求。

4.2 侧墙薄板结构的感应加热调平数值分析

车辆侧墙结构尺寸较大，由乙型梁和柱焊接而成，如图 17 所示，蒙皮板和梁柱之间的焊接则通过塞焊连接，每隔 100 mm 设置一个塞焊点，在塞焊点处施加约束条件来反映梁柱对于蒙皮板的位移约束。侧墙薄板有限元模型的单元类型和网格划分与车顶结构相同，节点数为 243273，单元数为 43800。图 18 所示为模型的约束条件设置，在薄板下表面四个角点施加铰支约束，即限制 X、Y、Z 三个方向的平动自由度；在塞焊点位置仅约束 Z 方向自由度。

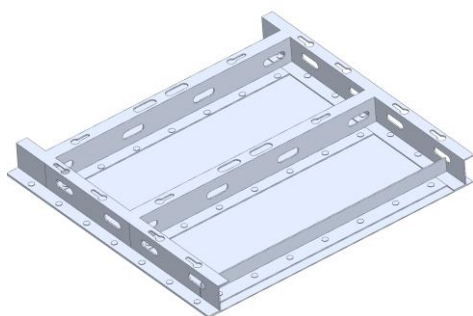


图 17 侧墙结构三维模型

Fig. 17 Three-dimensional model of side wall structure

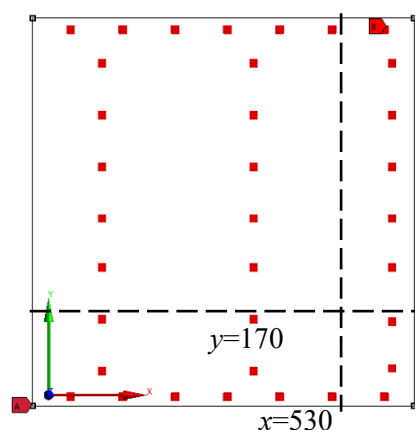


图 18 模型约束条件

Fig. 18 Model constraints

为了评估数值计算结果的准确性，这里采用 MetraSCAN 3D 三维光学扫描仪对侧墙板结构加热前后的表面数据进行了测量，如图 19 所示，测量精度 0.025 mm。其中位于 $y=170$ 和 $x=530$ 处截面的垂向变形量用于评估钢板的变形（如图 18 所示），对这两条测量线的数据与计算值进行对比。图 20 是温度分布的计算结果，薄板的最高温度 707℃。

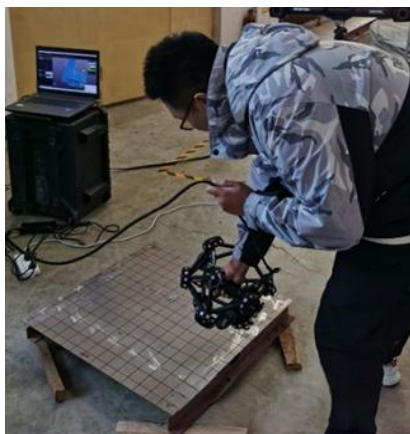
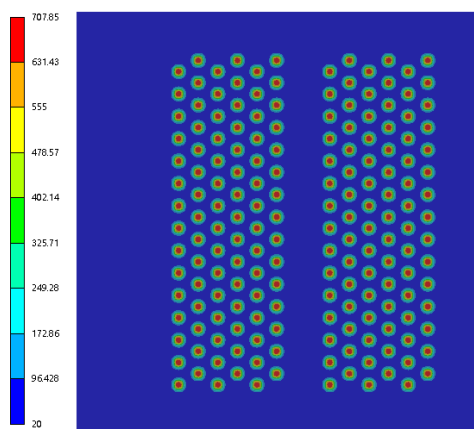


图 19 侧墙表面的三维扫描测量过程图

Fig. 19 Measurement process of side wall structure by 3D scanner



20 侧墙结构表面温度分布图

Fig. 20 Temperature distribution diagram of side wall structure surface

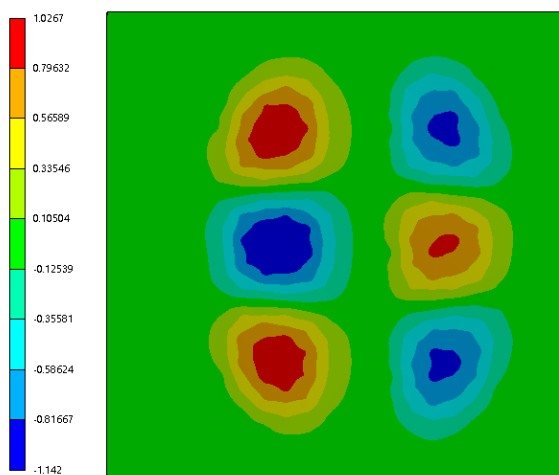


图 21 垂向位移云图

Fig. 21 Contour of the vertical displacement

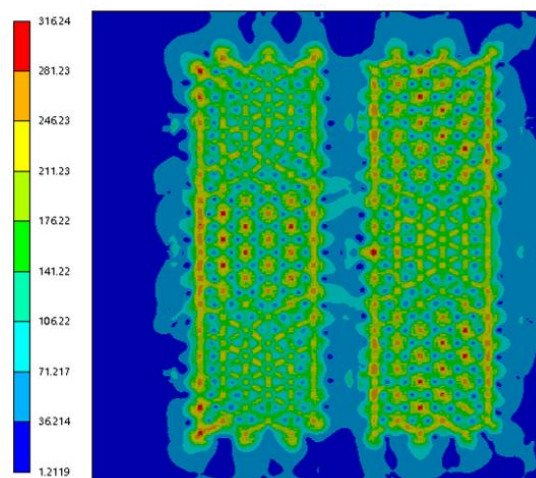


图 22 薄板等效应力云图

Fig. 22 Contour of equivalent stress of thin plate

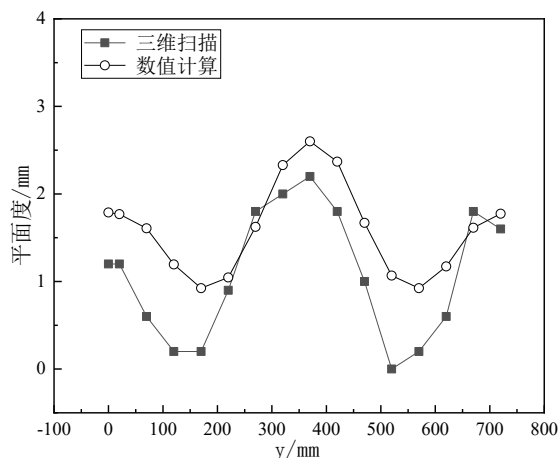


图 23 测量点平面度对比 (x=530)

Fig. 23 Comparison of flatness at the measuring point (x = 530)

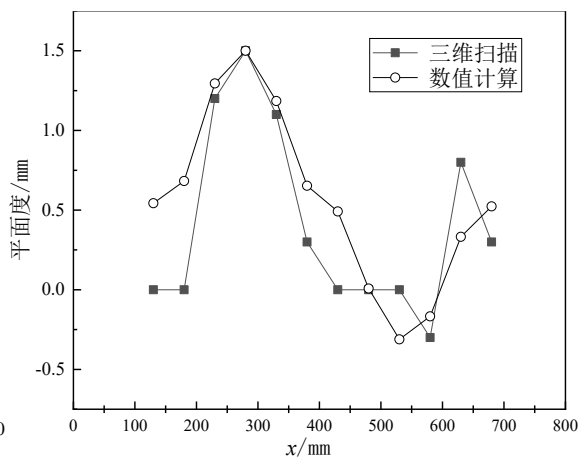


图 24 测量点平面度对比 (y=170)

Fig. 24 Comparison of flatness at the point (y = 170)

图 21 是薄板的垂向位移云图，可以看出加热后薄板呈现凹凸变形模式，该变形形态与试验结果相一致，最大垂向变形量约为 2.1 mm。图 22 为薄板加热后的等效应力分布图，可见在加热区域内存在较大的拉应力。薄板调平的目的不仅在于矫正几何变形，同时也旨在提升板体的整体紧实度。

为验证数值模拟结果与三维光学扫描实测数据的一致性，本研究将两者的变形结果统一转换为平面度数据进行对比。图 23 图 24 分别为两条测量线上各测点平面度的对比情况。在图 23 中三维扫描数据

最大平面度为 2.2 mm，数值计算结果为 2.6 mm，两者最大平面度的相对误差为 18%，且变形趋势均表现为凹凸形态；图 24 中三维扫描最大平面度为 1.2 mm，数值计算为 1.3 mm，最大相对误差为 8.3%，两条曲线的变化趋势吻合良好。

综上，本文所建立的有限元模型能够有效预测薄板结构的变形行为，具备较好的工程适用性。

5 车间现场感应加热调平试验

在公司车体总装车间对薄板结构开展了感应加热调平工艺试验。图 25 所示为车顶薄板结构感应加热调平的实际操作场景。为评估调平后薄板的紧实效果，在车间常采用踏压检测方式作为直观判断依据，即人员在薄板上脚踩施压后，结构未出现局部起伏或发出“哐哐”异响，即认为板体达到紧实状态。



图 25 车顶感应加热调平照片



图 26 侧墙感应加热调平照片

Fig. 25 Photo of the roof induction heating correction

Fig. 26 Photo of the Side wall induction heating correction

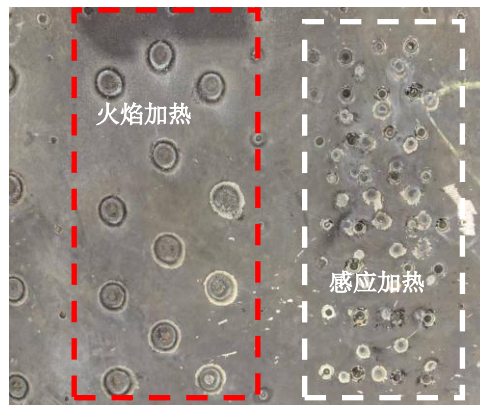


图 27 点状直径对比

Fig. 27 Spot diameter comparison

感应加热调平过程中配合水冷措施，具有热源集中、收缩力大等特点，其紧板效果优于火焰加热工艺。经过大量试验验证，感应加热调平后的薄板平面度均符合车间生产误差标准，板面整体紧实度良好，未出现有的结构火焰调平后仍然存在板体松弛的现象。踏压测试中无异常响声，表明感应加热在板面产生的拉应力已有效矫正原有变形区域。

图 26 为采用感应加热进行侧墙调平的现场照片。基于感应加热的邻近效应，热点直径主要由感应器的形状与尺寸决定。该工艺在薄板调平过程中可减少甚至完全省去烤火板的使用，从而简化工艺流程，提高调平效率。

图 27 展示了同一薄板结构分别采用火焰加热与感应加热后的热影响区形态。左侧为火焰加热形成的热点痕迹，直径约为 22~23 mm；右侧则为感应加热的热点痕迹，直径约为 12~15 mm。火焰加热所产生的热点直径明显大于感应加热。与火焰加热相比，感应加热所形成的热点面积显著减小，这一特性有助于减小热矫正过程中对板材材质的热影响^[23]。此外，在侧墙部位采用感应加热后的板形紧实效果亦优于火焰加工，说明感应加热调平工艺及专用工装能够满足车辆薄板矫正的要求。结合车间现场矫正实际

情况，表 1 总结了两种矫正方式的主要特点。

表 1 两种调平工艺对比
Tab. 1 Comparison of two straightening processes

序号	内容	火焰加热调平	电磁感应加热调平
1	工艺原理	采用氧-乙炔火焰对车辆薄板进行直接加热，依靠热传导诱导的塑性变形及收缩应力实现矫正。可根据变形结构灵活调整加热区域面积，适用于凹凸曲面的调平，但易导致局部过热。	通过感应器在薄板内部激发涡流，涡流在板材中转化为焦耳热，使加热区域迅速升温。热量分布集中，加热深度与面积可控，有效避免“过热”现象。
2	操作要求	高度依赖操作人员的技术熟练度。	通过预设电流、加热时间等工艺参数实现精确控温，避免过热现象，降低对操作人员经验的依赖。在侧墙板调平中无需使用烤火板，工艺更为简化。
3	矫正效果	加热区域直径较大，热源温度分布较分散，导致局部收缩力较小，板体紧实效果一般。	可实现精准控温，加热区域集中且面积小，热源集中程度高，收缩力大，板体紧实效果显著。
4	运行成本	能源消耗较高（氧-乙炔气体）。	电能消耗相对较低。
5	加热时间	单点加热时间约1秒。	每2个加热点耗时约1.5~1.8秒。
6	环境影响	伴随噪音，并释放大量二氧化碳等有害气体	无噪音，环境友好，属于绿色工艺。

6 结论

本文针对轨道车辆薄板结构焊接变形调平需求，提出高频电磁感应加热调平工艺，通过数值模拟、部件试验与车间现场验证，得出以下结论：

（1）针对车辆薄板结构的调平工艺，研制了一套专用薄板电磁感应加热工装及设备，以 SPY3-40-PLC 型感应加热电源为核心，配备手持式加热头、悬吊装置及软电缆，支持远距离调平作业，实现了加热参数的精准可控。车辆侧墙和车顶薄板结构的部件试验表明，该设备及工艺适用于车辆薄板结构的焊接变形调平，可有效替代传统火焰加热工艺，为提升车辆薄板调平质量、降低生产成本、推动轨道车辆制造工艺升级提供了切实可行的技术方案。

（2）与传统火焰加热调平工艺相比，感应加热技术展现出显著优势：加热点直径仅 12~15 mm（火焰加热为 22~23 mm），热源集中且无过热现象；板面收紧效果显著，踏压检测无松弛异响；加热时无噪音与有害气体排放，属于绿色环保工艺。未来可进一步拓展至不同材质（如铝合金）、不同厚度薄板的调平研究，优化感应器结构与多区域协同加热策略，实现更复杂变形场景的高效矫正。

参考文献

[1] 谢绍兴, 辛志斌, 范钦磊等. 时速 160 km“复兴号”动车组控制车车体总成工艺浅谈[J]. 轨道交通装备与技术, 2020, 4: 1-3.
XIE S X, XIN Z B, FAN Q L, et al. Discussion on the assembly techniques for the control car body of 160 km/h Fuxing EMU[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020, 4: 1-3.

[2] Seong W, Na S. Systematization of heat straightening process of stiffened plate by surface flattening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299:117333.

[3] 党锐玺, 杨瑞欣. 25 型客车钢结构侧墙板平整度矫正工艺研究[J]. 机车车辆工艺, 2021, 2: 33-35.
DANG R X, YANG R Q. Strengthening techniques for the flatness of sidewall panel on the steel structure of Type 25 passenger wagon[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021, 2: 33-35.

[4] 曹大庆. 基于高频电磁感应加热技术的薄板焊接变形矫正工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023: 1-7.
Cao D Q. Research on welding deformation correction process of thin plate based on high frequency electromagnetic induction heating technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.

[5] Mark Wells, 王正, 赵亚涛. 船甲板焊接变形矫正新方法[J]. 金属加工(热加工), 2009(20): 16-17.

- Mark Wells, Wang Z, Zhao Y T. A New Method for Correcting Welding Deformation on Ship Deck[J]. MW Metal Forming, 2009(20): 16-17.
- [6] Mcpherson N A. Correcting thin-plate distortion in shipbuilding[J]. Welding Journal, 2010, 89(1): 30-34.
- [7] Mcpherson N. Induction heat straightening - a distortion rework reduction tool for thin plate[J]. Welding and Cutting, 2008,7(1):162.
- [8] 张庆亚, 吴百公, 王秋平,等. 基于电磁感应加热的船用中厚板对接接头变形背烧矫正机理研究[J]. 船舶力学, 2025, 29 (08): 1288-1298.
- ZHANG Q Y, WU B G, WANG Q P, et al. Research on deformation mitigation mechanism of marine medium plate butt-welded joint based on heating induction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29 (08): 1288-1298.
- [9] 冯敏超, 孙建志, 蒋林勇. 电磁感应加热矫平工艺在船用薄板中的应用[J]. 船海工程, 2021, 50 (02): 94-97.
- Feng M C, Sun J Z, Jiang L Y. Application analysis of electromagnetic induction heating leveling technology in marine sheet[J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50 (02): 94-97.
- [10] 刘徐阳, 蔡昌儒, 赵亦希, 等. 电磁感应矫平工艺的多物理场耦合仿真研究[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(03): 253-263.
- Liu X Y, Cai C R, Zhao Y R, et al. Multi-physics field coupling simulation of induction leveling process[J]. Journal of Shanghai Jiao tong University, 2023, 57(3): 253-263.
- [11] 孙海双. 蒙皮结构侧墙校平工艺方法的研究与应用[J]. 铁道车辆, 2024, 62(02): 103-105+117.
- SUN H S. Research and Application of Leveling Process Methods for Sidewalls of Skinned Structures[J]. Rolling Stock, 2024,62(02):103-105+117.
- [12] 贾昕, 朱平, 杨鑫华. 基于热-机耦合方法的列车侧墙火焰矫形工艺分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51(09): 90-94.
- Jia X, Zhu P, Yang X H. Analysis of flame rectification technology of train sidewall based on thermo-mechanical coupling method[J]. Hot working technology, 2022, 51(09): 90-94.
- [13] 范宏博. 基于电磁感应加热的铝合金车体焊接变形矫正工艺研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2025: 22-30.
- Fan H B. Research on the welding deformation correction technology of aluminum alloy car body based on electromagnetic induction heating[D]. Dalian Jiao tong University, 2025.
- [14] 孙宏宇. 轨道车辆不锈钢焊接变形的氩弧矫平技术研究[J].当代工人(C 版), 2016, (04): 46-47.
- Sun H Y. Research on Argon arc leveling technology for stainless steel welding deformation of rail vehicles[J]. Contemporary Worker, 2016, (04): 46-47.
- [15] 张立君, 张泽, 朱成明. 碳钢车车体钢结构真空矫正和电磁矫正工艺对比[J]. 机车车辆工艺, 2016, (03): 12-13.
- Zhang L J, Zhang Z, Zhu C M. Comparison of vacuum correction and electromagnetic correction processes for carbon steel vehicle body steel structures[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016, (03): 12-13.
- [16] 匡赞新, 唐再章, 刘正文. 真空调平工艺在车辆薄板焊接箱体的运用[J].中国金属通报, 2018, (05): 227-228.
- Kuang Z X, Tang Z Z, Liu Z W. The application of the vacuum leveling process in the welded box body of vehicle thin plates[J]. China Metal Bulletin, 2018,(05):227-228.
- [17] 姜明. 车体蒙皮焊接变形控制及调平工艺应用[J]. 内燃机与配件, 2020, (06): 122-124.
- Jiang M. Control of welding deformation and application of leveling process of skin plate for vehicle body[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, (06): 122-124.
- [18] Zhang X B, Yang Y L, Liu Y J. Feasibility research on application of a high frequency induction heat to line heating technology. Journal of Marine Science and Application, 2011, 10(4): 456-464.
- [19] 王园武. 船体钢板感应加热感应器的设计与温度场数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016: 18-24.
- Wang Y W. Research of inductor design and numerical simulation of temperature field of steel plate[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016: : 18-24.
- [20] Zhang X. The Numerical Analysis of Temperature Field During Moveable Induction Heating of Steel Plate[J]. Journal of ship production and design, 2012,28(2):73-81.
- [21] 杨世铭. 传热学基础. 北京: 科学出版社, 1982.
- Yang S M. Fundamentals of Heat Transfer. Beijing: Science Press, 1982.
- [22] 唐勇. 面向铁路货车侧墙焊接变形控制的数值仿真与试验验证[D]. 大连: 大连交通大学, 2021: 56-63.
- Tang Y. Numerical simulation and experimental verification for welding deformation control of railway freight car side wall[D]. Dalian: Dalian Jiao tong University, 2021: 56-63.
- [23] 朱涛,齐红瑞,太万秋,等.基于断口分析的机车铸造牵引座焊后疲劳失效机制研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(04): 29-36.
- Zhu T, Qi H R, Tai W Q, et al. Research on fatigue failure mechanism of locomotive casting traction seat after welding based on fracture analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(04): 29-36.



第一作者: 谢绍兴(1986—), 男, 研究生, 高工, 主要研究方向为轨道车辆车体制造工艺。



通信作者: 张雪彪(1974—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为薄板焊接结构感应加热矫正技术研究。