

基于固有应变法的客车骨架焊接变形预测方法

程 健, 殷张浩, 朱 广, 杨世森, 梁玉东

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要:针对客车复杂结构件焊接变形预测方法缺失的问题,本文提出一种基于固有应变法的焊接变形高效预测方法。通过计算焊接变形等效载荷构建预测模型,实现对客车大型分片焊接变形的预测,相对误差小于5%,为客车骨架焊接变形抑制提供了方法指导。

关键词:客车骨架; 焊接; 变形预测; 固有应变法; 仿真分析

中图分类号:U463. 82

文献标志码:A

DOI:10. 15917/j. cnki. 1006-3331. 2025. 06. 012

Welding Deformation Prediction Method of Bus Frame Welding Based on Inherent Strain Method

CHENG Jian, YIN Zhanghao, ZHU Guang, YANG Shisen, LIANG Yudong

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: The paper proposes an efficient welding deformation prediction method based on the intrinsic strain method to address the lack of prediction methods for complex structural components of passenger buses. By calculating the equivalent load of welding deformation to construct the prediction model, it achieves the prediction of large segmented welding deformation of passenger buses, with a relative error less than 5%, providing methodological guidance for suppressing passenger bus frame welding deformation.

Key words: bus frame; welding; deformation prediction; intrinsic strain method; simulation analysis

客车骨架需承受内外饰及整车载荷,其结构状态直接影响客车的运行品质和安全性能。目前客车普遍采用全承载式骨架结构,车架和车身的分片结构由多种型材组焊而成。分片焊接及整车骨架总成焊接中的变形,是制约客车制造精度和效率的重要因素^[1]。准确预测客车骨架焊接变形是控制变形的基础。国内外大型交通运输装备制造公司普遍将公式法、经验法和仿真法相结合,用于预测大型复杂设备的焊接变形,且误差可控制在5%以内^[2-3]。基于固有应变法的有限元仿真方法侧重于变形预测结果,具有方法简单、效率高及算力需求小等显著优点,在轮船船体、轨道车辆及客车车身等大型复杂结构焊接变形预测方面得到广泛应用。

本文针对客车大型分片结构缺乏焊接变形预测方法的问题,基于固有应变法开展客车骨架焊接变形预测方法研究,以提升客车制造质量、生产效率与工艺水平。

1 固有应变法概述

固有应变法是基于固有应变理论的弹性有限元方法,其主要原理是将焊缝区域的固有应变作为弹性有限元结构的输入,然后通过弹性有限元分析,获得结构的应力场分布和变形情况^[4]。固有应变理论认为,焊接应力和应变产生的根本原因包括塑性应变、热应变和相变应变^[5]。焊接结构的弹性应变在焊缝完全冷却后将复原,因此焊接结构的固有应变可以表示为塑性应变、热应变和相变应变引起的蠕变应变之和。而焊接结构的塑性应变引起的蠕变应变远大于热应变和相变应变引起的蠕变应变之和,因此焊接结构的固有应变可近似表示为式(1)^[5]。

$$S_0 = S_p + S_T + S_x = cS_x \quad (1)$$

式中: S_0 、 S_p 、 S_T 及 S_x 分别为焊接结构的固有应变、塑性应变、热应变及相变应变; c 为固有应变计算修正系数。

收稿日期:2025-04-21。

第一作者:程 健(1997—),男,硕士,工程师,主要从事汽车焊接工艺及焊接变形研究工作。E-mail: 15084775194@163.com。

相较于传统热弹塑性法需模拟焊接过程中温度、应力及变形的瞬态变化,固有应变法则不考虑这些瞬态变化,而注重于结构冷却后的最终变形。因此,该方法的分析过程更简单、所需数据量更少且计算效率更高,为客车整车骨架等大型焊接结构的高效焊接变形预测奠定了方法基础。本文以典型的日字型接头(尺寸约 500 mm×200 mm×40 mm,网格单元数约 10 万)为例,对比了热弹塑性仿真与固有应变仿真的特征(见表 1)^[6]。对比结果表明,固有应变仿真更适用于客车骨架的焊接变形预测。

表 1 热弹塑性仿真与固有应变仿真特征对比

类型	热弹塑性仿真	固有应变仿真
计算时间	≥24 h	≤1 min
数据大小	58 G	168 M
算力需求	单核网格≤1.5 W	无限制
建模时间	≥1 h	≤10 min
仿真结果	多物理场瞬态变化过程	应力分布、变形结果
适用范围	简单接头焊接过程仿真	大型复杂结构应力分布及变形预测

2 客车骨架焊接变形有限元仿真模型构建

2.1 固有应变值提取

目前,提取固有应变值的方法根据数据来源主要分为两种:基于实测变形数据总结的理论公式法、基于焊接过程热弹塑性仿真法。其中,理论公式法通过建立固有应变与焊接能量输入之间的量化线性关系来计算固有应变值。这种线性简化模型导致其计算精度较低且灵活性较差,在生产制造过程中应用有限^[5]。

随着计算机处理能力的增强和仿真精度的提高,采用热弹塑性仿真来获取固有应变值的方法得到广泛应用。该方法能够高效、高精度且低成本地提取不同焊接结构与工艺下的固有应变值。鉴于热弹塑性仿真在提取应变值方面的显著优势,本文采用该方法获取接头的固有应变值。

2.2 固有应变加载方法

现有主流弹性有限元模型无法直接将固有应变作为输入加载到模型上,需先对固有应变进行计算转化,再以特定载荷形式加载于模型进行有限元计算。根据提取和加载形式,主要分为温度载荷法和等效载

荷法,其加载方式如图 1 所示。

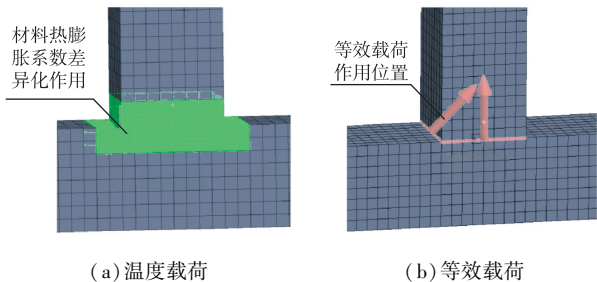


图 1 固有应变加载方式示意图

温度载荷法是通过改变焊缝区域材料的热膨胀系数并配合定量化的温度变化,实现焊接结构焊缝区域固有应变值的加载。等效载荷法是将焊缝及其附近热影响区域的固有应变值积分,转化为等效力后作为输入加载到静力学模型中,然后通过弹性有限元计算求解获得结构变形。由于该方法在加载效率、可调节灵活性及预测精度方面更具优势,因此本文选取等效载荷法加载变形载荷。前期研究还发现^[7],相较于焊缝的横向和纵向应变,沿着板厚方向的应变可以忽略不计,因此在进行焊缝等效载荷计算时,仅考虑焊缝横向和纵向应变的等效及后续加载,具体公式如下^[8]:

$$F_L = E \int_{A_L} S_L dmdn \tag{2}$$

$$F_T = E \int_{A_L} S_T dmdn \tag{3}$$

式中: F_L 、 F_T 分别为焊接变形横向、纵向等效力; S_L 、 S_T 分别为焊缝横向应变、纵向应变; E 为弹性模量; A_L 为焊缝截面面积; m 和 n 为面积积分的二维变量。

基于前面对多种固有应变值提取和加载方法的分析,本文选用热弹塑性有限元仿真方法来提取固有应变值,选用等效载荷法加载固有应变数据,完成典型接头焊接变形预测模型的建立,同时结合实验验证该模型的准确性。选取客车骨架基础单元日字接头为研究对象,该接头的材料为 QSTE700TM 低合金高强度钢。综合考虑仿真精度、计算效率及实际工况,对接头焊缝附近区域进行网格加密处理,将网格尺寸设定为 1 mm,其他区域则采用 10 mm 的粗网格进行划分。此外,还去除了型材上影响网格质量的电泳孔、圆角及倒角等工艺特征,并设置了必要的约束以模拟夹具的夹紧作用。最终完成了日字接头网格模型的建立,如图 2 所示。

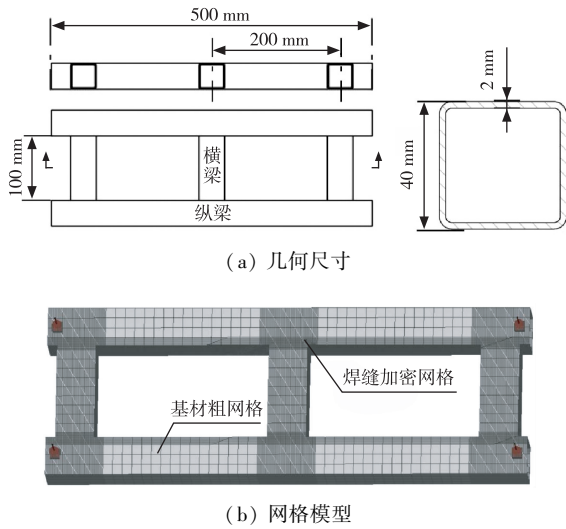


图2 日字接头几何尺寸和网格模型示意图

不同尺寸、形状及材料的日字接头,统一采用双椭球热源表征焊接过程中基材对热量的吸收机制,具体可表示为^[9]:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}(f_f U I \eta)}{a_1 b c \sqrt{\pi^3}} \exp\left(-\frac{3(x-vt)^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (4)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}(f_r U I \eta)}{a_2 b c \sqrt{\pi^3}} \exp\left(-\frac{3(x-vt)^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (5)$$

$$f_f = \frac{2a_1}{a_1 + a_2}, f_r = \frac{2a_2}{a_1 + a_2} \quad (6)$$

式中: q_f 、 q_r 分别为双椭球热源模型的前、后半椭球所在空间内任意位置的热流密度; a_1 、 a_2 分别为热源模型的前、后长轴半径; b 、 c 分别为热源模型的宽度、深度; f_f 、 f_r 分别为前、后半椭球的能量分配系数; U 为焊接电压; I 为焊接电流; η 为基材对热源能量的吸收率; v 为焊接速度; t 为热源移动时间; x 、 y 、 z 为热源模型的三维坐标。

基于焊接仿真软件导入网格模型,设置装夹固定参数表征夹紧特征,确定热源模型参数(电流 180 A, 电压 19.8 V),设置边界条件参数(对流换热系数 36.7 W/(m²·K)、热辐射系数 0.65),并选择 Pardiso 直接稀疏求解算法完成焊接过程仿真求解,其流程如图3所示。



图3 焊接热力学仿真模型建立求解流程图

2.3 变形等效载荷计算

由于不同尺寸接头焊接变形等效载荷的提取流程完全相同,因此,本文以横梁长度 $l=100$ mm、方通型材宽度 $a=40$ mm 且型材厚度 $h=2$ mm 的钢结构日字接头为例,详细阐述整个等效载荷提取流程。首先获取整个焊接过程中日字接头的最高温度分布,如图4所示。由图可知,塑性应变主要产生于焊缝及其附近温度超过 1 100 °C 的过热影响区,该区域主要分布在焊缝两侧约 2 mm 的范围内。

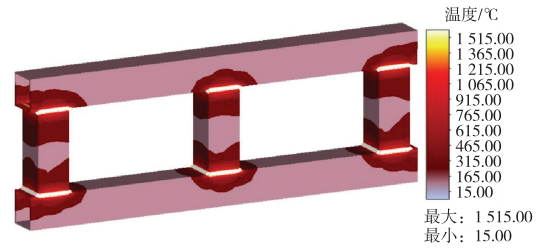
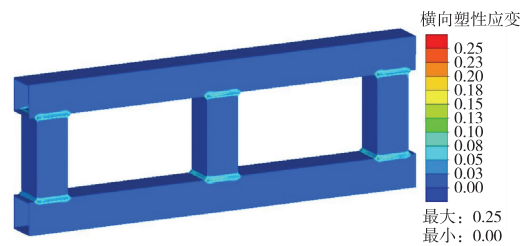
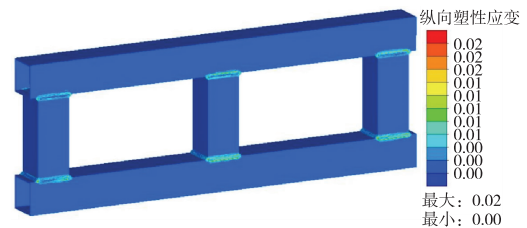


图4 日字接头最高温度云图

日字接头沿型材厚度方向的变形一般不超过 0.1 mm,通常忽略不计。提取日字接头垂直焊缝方向的横向塑性应变和沿焊缝方向的纵向塑性应变分布情况,如图5所示。可以发现,日字接头的主要横向塑性应变和纵向塑性应变区域基本分布在距焊缝 2 mm 的范围内,这一结论与最高温度分布分析结果一致。此外,对比发现,焊缝横向塑性应变显著大于纵向应变,这与实际焊接过程中横向变形大于纵向变形的规律一致。



(a) 横向



(b) 纵向

图5 日字接头塑性应变云图

综合考虑等效载荷的计算精度及计算效率,结合

塑性应变主要分布在焊缝附近 2 mm 区域的特征,分别提取平焊缝和角焊缝的焊缝中心线及其上下 1 mm 和 2 mm 处 5 条直线上的 41 个数据点,以 205 个离散点的塑性应变数据来表征整个焊缝和过热区域的塑性应变数据特征。塑性应变数据采集点示意图如图 6 所示,相邻数据点间隔 1 mm。日字接头横向和纵向塑性应变数据如图 7 所示。

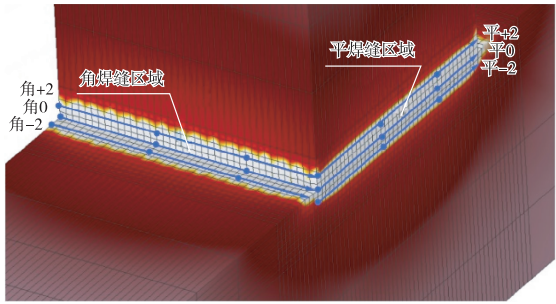
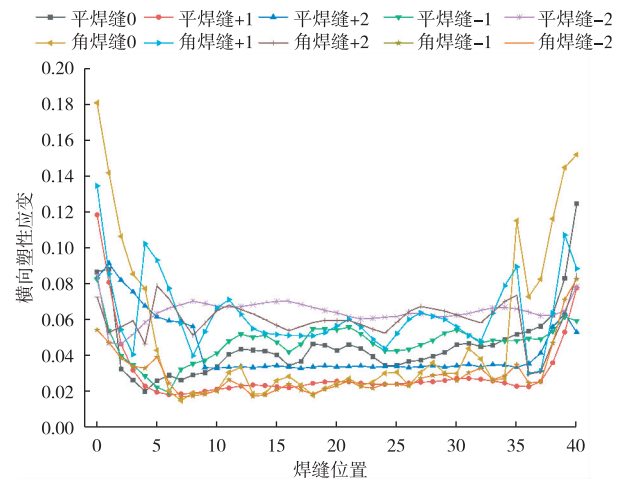
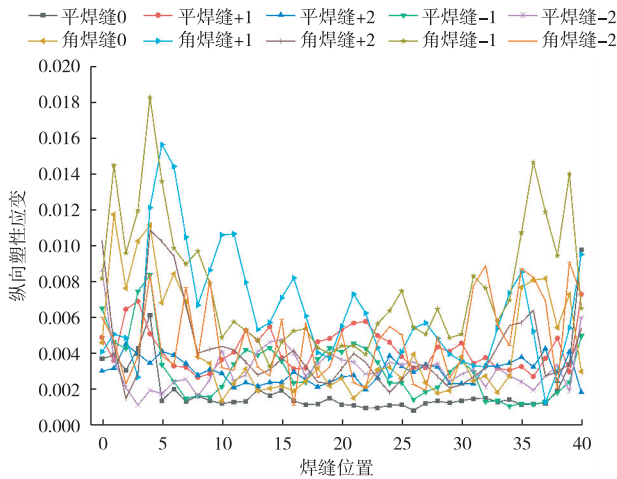


图 6 日字接头塑性应变数据采集点示意图



(a) 横向塑性应变



(b) 纵向塑性应变

图 7 日字接头塑性应变离散数据

由图 7 可知,接头横向应变和纵向应变均呈现出两端较大、中间小,以及两端波动剧烈、中间稳定的趋势。分析认为,一方面是焊缝两端区域的角焊缝和平焊缝的温度和变形相互影响较大,导致两端塑性应变数值相对较大;另一方面是焊缝两端分别为起焊和离焊位置,而焊缝中部区域焊接过程的稳定性显著高于两端,因此焊缝两端的应变波动更大。

接头横向塑性应变在 0.02~0.2 范围内波动,纵向塑性应变在 0.001~0.02 范围内波动。焊缝横向与纵向应变差异主要源于热力学与约束条件的综合作用。横向因温度梯度陡峭且受周围冷金属强烈约束,导致压缩塑性变形集中,冷却后残余应力显著;而纵向因热源移动使温度梯度平缓,应变可部分释放。横向收缩受母材刚性约束和厚度方向收缩叠加影响,泊松效应被抑制;纵向则能自由收缩。此外,横向相变膨胀受非相变区约束,加剧应变梯度,而纵向相变较均匀。工艺因素(如接头形式)进一步放大横向收缩效应,使焊缝横向应变显著大于纵向应变。

此外,角焊缝横向和纵向塑性应变大部分大于平焊缝,与前面发现的规律相吻合。对比焊缝不同位置的横向塑性应变(如图 7(a)所示),发现稳定状态下,角焊缝和平焊缝两侧边缘位置的横向塑性应变大于靠近焊缝中心线区域的应变。分析认为,焊缝边缘区域的温度梯度大、冷却速率快导致塑性应变增大。

根据图 7 所提取的日字接头塑性应变数据,结合等效载荷理论计算公式(式(2)和式(3)),计算典型日字接头的角焊缝和平焊缝的横向及纵向变形等效载荷数据,结果见表 2。

表 2 典型日字接头焊接变形等效载荷数据

类别	横向平均应变	横向等效载荷/N	纵向平均应变	纵向等效载荷/N
平焊缝	0.045	55 374	0.003	2 542
角焊缝	0.048	76 268	0.004	2 788

由表 2 可知,角焊缝的横向和纵向变形等效载荷均大于平焊缝,其主要原因为角焊缝横向和纵向平均应变及焊缝面积较大。本研究中日字接头角焊缝为空间结构焊缝,角焊缝的高度约为平焊缝的 1.1~1.2 倍,角焊缝宽度约为平焊缝的 1.2~1.4 倍,而角焊缝和平焊缝长度相同,使其截面积显著大于平焊缝。此外,角焊缝和平焊缝的横向变形等效载荷超过纵向等效载荷 20 余倍,表明焊接结构变形的主导载荷为横

向变形。

3 客车骨架焊接变形预测模型构建及应用

3.1 焊接变形预测模型构建

前面基于热力学仿真模型,提取了日字接头的固有应变数据并计算得出了等效载荷的具体数值。但该等效载荷为无明确方向和作用位置的标量。通过提取日字接头等效应力矢量图可以发现,日字接头焊接变形的等效应力主要集中在焊缝区域,且主等效应力斜向内作用,如图8所示。

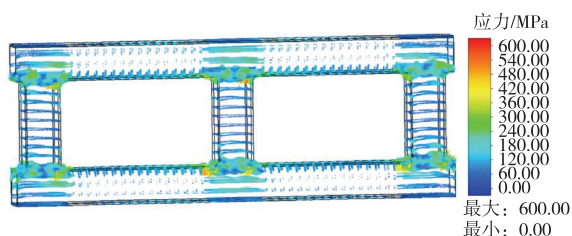


图8 日字接头等效应力矢量图

将等效应力矢量分解为沿焊接方向的纵向力和引起焊缝收缩的横向力,将等效载荷的作用位置集中于焊缝中心线。基于ANSYS的静力学弹性有限元仿真模块,结合表2中提取的等效载荷数据,建立典型日字接头的变形预测仿真模型,如图9所示。

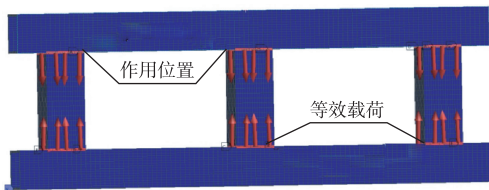
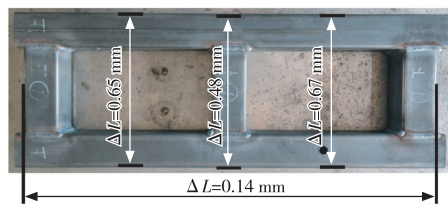


图9 日字接头等效载荷作用示意图

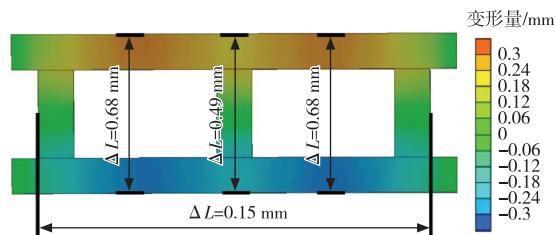
3.2 焊接变形预测模型验证

基于ANSYS对所建立的日字接头焊接变形预测模型进行数值求解,考虑到客车骨架中较为严重的焊接变形主要包括接头处的收缩和梁中部的弯曲变形。因此,本文将实验和仿真获得的日字接头多处的收缩和弯曲焊接变形数据进行对比分析,全面验证所建立的焊接变形预测模型的有效性。焊接变形预测模型的验证结果如图10所示(图中 ΔL 表示焊接变形量)。可以发现,日字接头焊接变形绝对误差均不超过0.1 mm,其中,日字接头的横向收缩变形误差约为2%,纵梁弯曲变形误差小于5%,横梁弯曲变形误差约为7%。这证明了所建立的日字接头焊接变形预测模型的有效性,也验证了基于固有应变法的焊接变形

预测仿真的可行性。



(a) 实验测量结果



(b) 仿真预测结果

图10 日字接头焊接变形预测模型验证

3.3 焊接变形预测模型应用

如图11所示,骨架分片结构包含48个型材接头、84条平焊缝和84条角焊缝,分片尺寸为1500 mm×580 mm×40 mm。若采用传统的焊接实验方式对其进行变形评估,通常需要进行至少3组重复实验,以避免实验和测量误差。单组分片的焊前准备、焊接实验及焊后变形数据测量的时间约2 h。整个分片焊接变形实验的材料和工时成本合计约2000元。若采用常规热力学仿真软件进行焊接变形预测,当网格数量超过100万时,对电脑算力需求至少为64核,建模和仿真计算时间则会超过2周,仿真需求和仿真效率均难以满足实际要求。

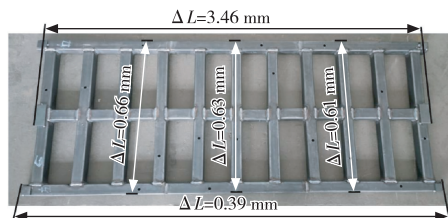


图11 分片结构焊接实验变形数据

本文选取上述骨架分片进行变形预测的应用演示。整个骨架分片的建模和仿真计算时间小于1 h,材料和工时成本可忽略不计。分片结构中,型材的壁厚为2 mm,宽度为40 mm,接头横梁长度有两种,分别为100 mm和500 mm。根据横梁长度与接头焊接变形等效载荷之间的关系式,确定该分片结构的等效载荷,具体数据见表3。

表 3 分片结构焊接变形等效载荷数据

横梁长度/ mm	平焊缝纵向 载荷/N	角焊缝纵向 载荷/N	平焊缝横向 载荷/N	角焊缝横向 载荷/N
100	2 542	2 788	55 374	76 268
500	2 542	2 788	11 628	18 352

采用相同的方法,基于表 3 的等效载荷数据,建立分片结构的焊接变形预测模型,如图 12 所示。提取仿真计算得到的焊接变形结果,如图 13 所示。将仿真结果与图 11 中分片结构的焊接数据进行对比,可以发现分片结构的纵向变形和横向变形的相对误差均不超过 5%,证明本文提出的焊接变形预测方法在大型分片结构焊接变形预测方面具有良好的适用性。

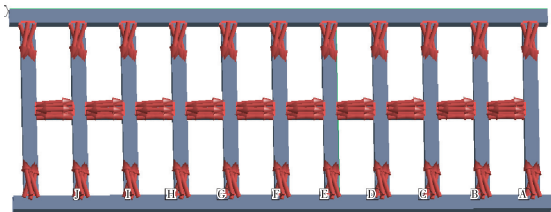
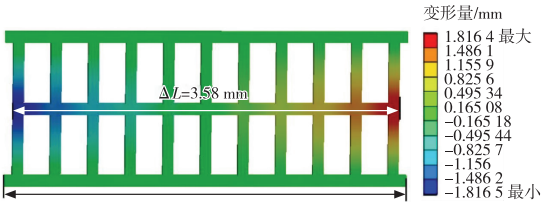
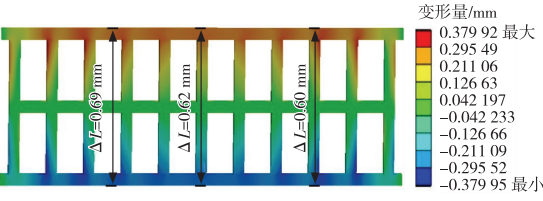


图 12 分片结构焊接变形载荷作用示意图



(a) 纵向焊接变形



(b) 横向焊接变形

图 13 分片结构焊接变形

4 结束语

本文基于固有应变法,提出了一种高效预测客车骨架焊接变形的方 法。采用热弹塑性仿真实现高效率和低成本的应变提取,通过等效载荷加载策略实现高精度的应变加载,构建典型接头和分片结构的静态结构仿真模型预测焊接变形,实验验证预测误差小于 5%。上述预测方法有效解决了传统大型结构件预测方法难以同时兼顾精度和效率的难题,为优化客车骨架结构设计和焊接工艺提供了有效手段,对提升焊接质量和效率具有重要的工程价值。

参考文献:

[1] 刁国虎,费有霞. 12 m 燃料电池客车全承载车身的有限元分析[J]. 客车技术与研究,2024,46(1): 8-10.

[2] 宋元元. 车架钢结构组装和焊接变形控制[J]. 科技创新与应用,2021(3): 107-109.

[3] LI L F, LOU C, SHEN J, et al. Numerical prediction of welding deformation in ship block subassemblies via the inhomogeneous inherent strain method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022(80): 860-873.

[4] 李树栋,祝航,戴忠晨,等. 基于固有应变法的不锈钢车体车顶焊接变形仿真[J]. 电焊机,2018,48(8): 9-12.

[5] 梁勇,陈鹏,徐紫薇,等. 基于固有应变法的转向架横梁焊接变形模拟[J]. 电焊机,2015,45(10): 120-123.

[6] 韩春花,徐娜,张兴芳,等. 基于固有应变理论的高铁车顶 MIG 焊接变形仿真研究[J]. 热加工工艺,2022,51(5): 123-127.

[7] 程健,殷张浩,朱广. 基于数值仿真的客车骨架焊接收缩变形机理研究[J]. 客车技术与研究,2025,47(5): 31-39.

[8] 陈小建,朱海燕,徐腾养,等. 固有应变值施加方式的焊接变形仿真研究[J]. 工具技术,2017,56(11): 12-16.

[9] 李陈峰,金腾龙,刘德怀,等. 铝合金加筋板焊接温度场和残余应力数值模拟[J]. 舰船科学技术,2021,43(23): 71-75.