

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.013

90 t 级纯电动矿车电池托架结构疲劳性能分析

高倩倩¹, 李广义², 王永刚³

- (1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 通辽市市场检验检测中心, 内蒙古 通辽 028099;
3. 湖州宏威新能源汽车有限公司, 浙江 湖州 313098)

摘要:应用有限元分析方法,对 90 t 级纯电动矿车的侧换电池箱及托架结构进行优化设计,并结合实际工况分析其疲劳性能。基于三维模型及仿真分析,评估典型工况下的应力和变形,验证了设计强度与安全裕度满足要求。对于托架底部和焊接处存在的应力集中而引发的疲劳损伤问题,可优化支撑结构和材料的选择,以进一步提高结构性能和使用寿命。实验验证表明:仿真与实际测试结果高度一致,验证了优化设计的可靠性和合理性。

关键词:纯电动矿车;侧换电池箱;托架;有限元分析;结构优化;疲劳性能

中图分类号:TD40 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0067-06

Fatigue Performance Analysis of Battery Bracket Structure for a 90-Ton Pure Electric Mining Truck

GAO Qianqian¹, LI Guangyi², WANG Yonggang³

- (1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2. Tongliao Market Inspection and Testing Center, Tongliao 028099, China;
3. Huzhou Hongwei New Energy Resources Automobile Co., Ltd., Huzhou 313098, China)

Abstract: This study employs finite element analysis to optimize the structural design of the side-swap battery box and bracket for a 90-ton electric mining truck, and analyzes its fatigue performance by combining actual working conditions. Based on 3D model and simulation analysis, the stress and deformation under typical working conditions are evaluated, verifying that design strength and safety margins meet the requirements. To address the fatigue damage caused by stress concentrations at the bracket base and welds, the support structure and material selection are optimized to further improve structure performance and service life. The experimental verification indicates that the simulation results are highly consistent with actual test results, which verifies the reliability and rationality of the optimized design.

Keywords: pure electric mining truck; side-swap battery box; bracket; finite element analysis; structural optimization; fatigue performance

0 引言

随着全球能源转型和环境保护需求的增加,纯电动矿车因其零排放和高效能的特点,在矿山机械领域的应用日益广泛^[1]。然而,由于矿车在恶劣作业环境中的高强度使用,如何确保电池箱及托架结构的安全性和耐久性成为电动矿车设计中的关键问题;特别是对于大型电动矿车,如 90 t 级纯电动矿车,其侧换电池箱及托架结构承受着来自不同方向的复杂载荷,因而结构性能的优化与疲劳寿命的提高就显得尤为重要^[2]。

近年来,国内外针对电动矿车电池箱及托架

的优化研究取得了一定进展。邓腾树等^[3]提出了一种基于有限元分析的优化设计方法,针对电池箱的应力分布进行了优化,结果显示优化设计在承受外力时表现出更高的强度和更长的使用寿命。吕奇奇等^[4]基于疲劳分析对电池箱结构进行了研究,发现电动矿车实际工况下,电池箱的疲劳损伤主要集中在受力集中区域,提出通过改变结构形式和增加局部加强来提升抗疲劳性能的方案。ZHANG 等^[5]通过实验和数值模拟相结合的方式,研究了电动汽车电池箱在循环载荷下的疲劳性能,使用复合材料能够显著提高电池箱的抗疲劳性能,从而有效延长电池箱的使用寿命。

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY21532)

第一作者简介:高倩倩(1988—),女,内蒙古赤峰人,讲师,工程师,硕士,研究方向为结构设计及仿真,w5z4v4@sina.com。

ZHANG 等^[6]基于有限元分析的方法对电池箱的疲劳寿命进行了预测,重点考虑了电池箱在不同温度、湿度和载荷工况下的性能。结果表明在极端工况下,电池箱的疲劳寿命显著降低,需要通过材料选择和设计优化来提高其耐久性。WEI 等^[7]提出了一种多目标优化方法,将强度、疲劳寿命和制造成本作为优化目标,综合考虑了电池箱和托架的多种工况。该方法能够在保证结构强度的同时提高疲劳性能,并有效降低制造成本。

尽管已有研究为电池箱的设计优化提供了丰富的理论基础,但大多数研究集中于单一工况的分析,忽视了多工况下的综合性能评估。此外,现有的研究大多采用传统的优化方法,未能充分考虑疲劳损伤的影响,且缺乏实验验证。因此,本研究旨在基于有限元分析方法,针对 90 t 级纯电动矿车的侧换电池箱及托架结构进行优化设计,并结合实际工况分析其疲劳性能。通过本研究,以期纯电动矿车电池箱及托架的优化设计提供更加完善的理论依据,并为工程实践提供指导^[8]。

1 分析方法

1.1 快换电池箱及安装托架结构

系统分为左、右两个电池箱,布置在电动矿车大梁的两侧,如图 1 所示。电池箱布置在电动矿车的前后轮之间且位于车斗以下空间。电池箱通过悬臂支架安装在大梁上。悬臂支架与大梁之间通过螺栓连接固定。电池箱与悬臂支架之间设计有限位和定位结构来实现电池箱的快速更换。结构设计材料明细如表 1 所示。

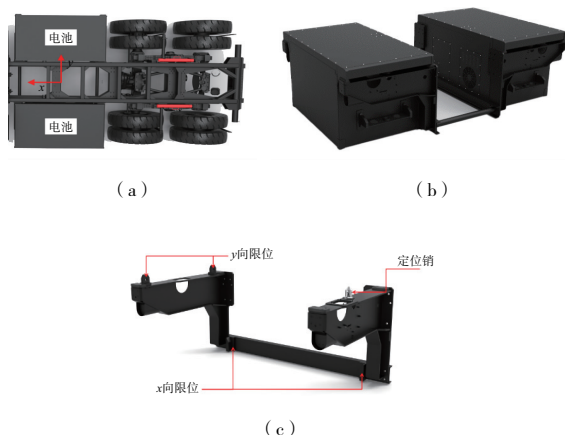


图 1 电池箱及托架结构

表 1 电池箱体主要材料规格

部件名称	材料	规格/mm	参数值
箱体框架	Q345	方管 30×30×3	方管壁厚 3~16 mm
箱体盖板	Q345	板厚 2	屈服强度 ≥ 345 MPa
电池箱 间撑杆	Q345	$\Phi 40 \times 4$	抗拉强度 450~630 MPa
托臂	Q345	板厚 10	伸长率 17%

1.2 有限元模型建立

1) 网格划分

合理的网格划分和单元质量控制对于随机振动疲劳分析的精度具有重要影响^[9],电池箱及安装托架采用 5 mm 单元尺寸进行网格划分,三角形单元数量占比 $\leq 5\%$;除结构限制外,不允许有两个以上的三角形单元连在一起。建模网格一律调整到部件厚度中面上,必须保证每个部件不能出现自由边;不允许出现单元不连续性和重复性^[10]。网格质量要求如下:a) 四边形单元网格,其翘曲度应不超过 20,长宽比应不超过 5,雅可比参数应不小于 0.5,歪斜度应不超过 50;b) 三角形单元网格,其最小角度应不小于 30° ,最大角度应不大于 120° ,网格单元的最小尺寸应不小于 2 mm,最大尺寸应不大于 8 mm。

2) 模型连接及简化

在满足精度的前提下,为提高计算效率,做如下简化:

a) 安装电池的标准箱根据质心坐标,采用集中单元进行代替,如图 2(a) 所示;

b) 焊点采用 ACM 单元,焊缝采用 RB2 单元进行连接,如图 2(b) 所示;

c) 托架和箱体的材料采用非线性的应力应变曲线,如图 3 所示。

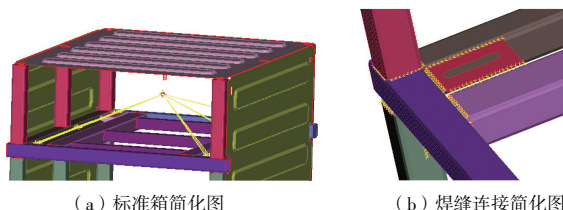


图 2 标准箱简化图

3) 边界条件

电池箱的安装拖架和支撑杆通过螺栓分别与车架和另一侧的电池箱连接。为了减少网格质量和提高计算效率,车架和另一侧的电池箱不建立

网格,约束车架和撑杆螺栓安装孔处平动自由度和转动自由度,约束施加的位置如图4所示,同时根据提取的试验数据,分别进行 x 、 y 、 z 方向的加载。

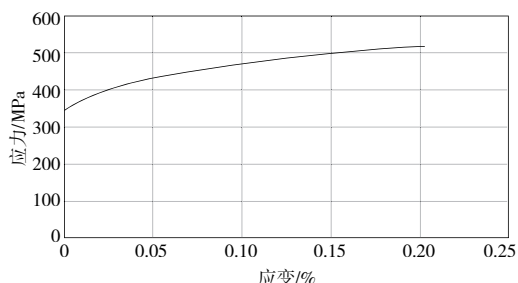


图3 材料应力应变曲线

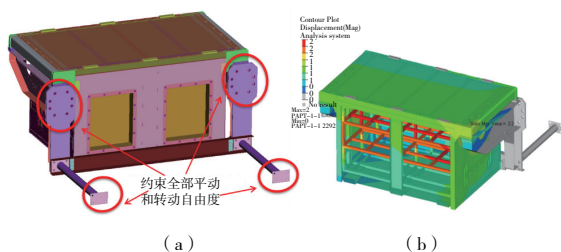


图4 边界条件

1.3 数据处理及加载

加速度传感器分别在满载 20 km/h、满载 30 km/h、满载最高车速和 20 km/h 过凸台、空载 10 km/h、空载 20 km/h、空载 30 km/h、空载最高车速的工况下测量箱体底部及安装托架部位的加速度。

1.4 模拟结果验证

为验证模拟结果准确性,本研究在三维模型模拟分析结果基础上完善结构设计及样件制作,在 90 t 级纯电动宽体自卸车上进行整车组装调试。分别在空载 20 km/h、空载 30 km/h、空载最高车速 40 km/h、满载 20 km/h、满载 30 km/h、满载最高车速 40 km/h、满载顺时针转圈、满载逆时

针转圈的工况下进行应力、应变测试,主要测点分布如图5所示。

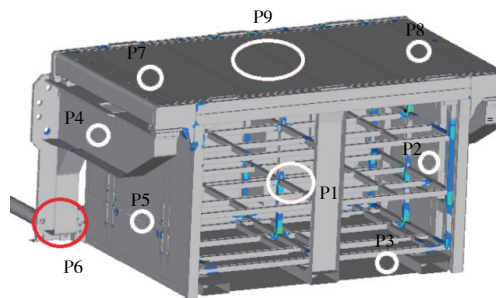


图5 主要测点分布

2 结果分析和评价

2.1 z 向加载分析

图6为电池箱和托架在 z 向加载位移、应力云图。在 z 向工况下,结构受到了垂直方向的冲击或震动加载,主要由矿车的上下运动引起,最大变形量为 2.4 mm,这一区域的变形主要由于箱体结构上方缺乏支撑,在垂直方向的压力作用下,容易发生局部形变。尽管变形量较大,但由于其发生在箱体顶部,且不影响电池的安装和稳定性,因此对整体结构的安全性影响较小^[11]。优化设计通过加强支撑框架,合理分配负载路径,减少底部和连接部位的应力集中,使得结构在垂直方向的承载能力得到了提升,特别是在高负荷工况下,底部区域的疲劳损伤风险大幅降低。最大应力为 176 MPa,集中在托架的支撑结构和电池箱的底部,这表明原设计的底部焊接区可能成为疲劳裂纹的发源点。经过优化设计后,应力值显著降低,优化后的最大应力降至 158 MPa。疲劳分析方面,优化前的疲劳寿命为 5 000 次,而优化后提高至 7 200 次,增幅为 44%。优化设计减少了焊接部位的应力集中,并提高了支撑结构的刚度,从而延长了结构的疲劳寿命。

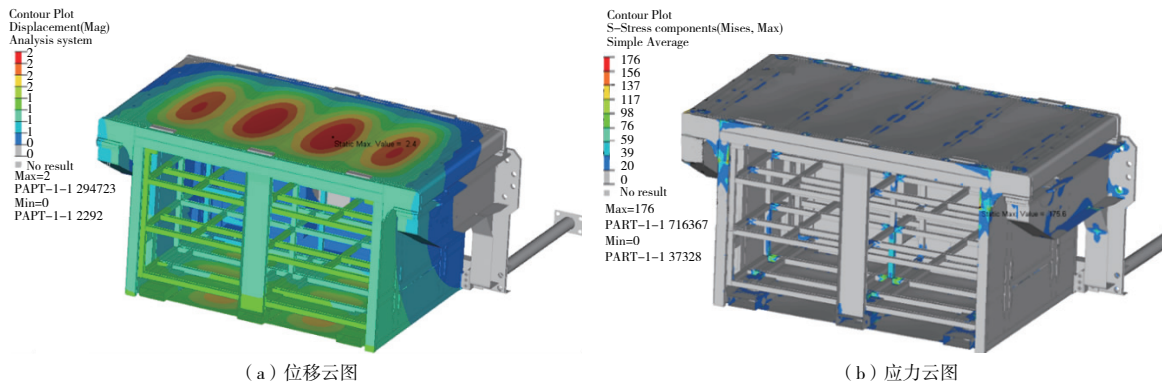


图6 z 向位移、应力云图

在 z 向加载工况下,从长期使用的角度考虑,局部的应力集中和形变可能会在极端工况下引发疲劳问题^[12]。因此,基于位移和应力分析结果,可从以下几个方面进一步提升结构的耐久性。

1) 上盖区域优化,针对上盖部分的较大位移,可以通过增加加强筋或改变材料厚度,降低形变,提升抗压性能。此外,新型接头结构在抑制局部疲劳裂纹扩展方面效果良好,可进一步作为优化参考^[13]。

2) 螺栓孔结构强化,在螺栓孔周围增加加强板或局部加厚处理,降低应力集中,延长螺栓连接部位的使用寿命。

3) 材料选择与紧固力优化,可以考虑使用更高强度或抗疲劳性能更佳的材料,并通过对螺栓紧固力进行优化,确保应力均匀分布,减少局部应力的积累。

2.2 x 向加载分析

x 向加载位移、应力云图如图7所示。在 x 向工况下,电池箱和托架承受的是矿车前进或后退过程中的横向惯性载荷,最大位移量为2.2 mm,主要集中在电池箱框架的位置。优化设计主要通过托架形状进行改进,增设额外的支撑点,分散了横向载荷,降低了扭转应力的集中区域。优化前, x 向工况下最大应力为255 MPa,主要集中在托架的横向支撑点和连接节点,这些区域的高应力值意味着存在疲劳损伤的潜在风险。优化后,最大应力降至228 MPa(图7中的绿色区域),减幅为10.6%;疲劳寿命从4 500次提升至6 700次,增幅为48%。这些改进提高了 x 向工况下托架的稳定性和耐久性,减少了由于横向负载和扭转力矩引起的疲劳失效(本刊为黑白印刷,疑问之处请咨询作者)。

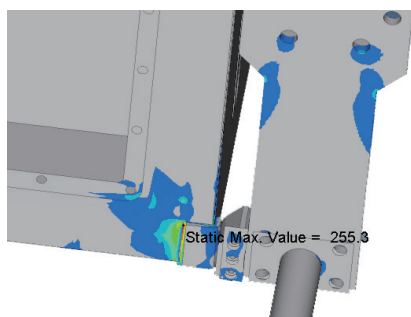


图7 x 向位移、应力云图

以上可以看出,由于电池箱框架承受水平载荷时,横向支撑不足,导致局部位移较为明显。尽管这一位移量不会对电池箱的安装和稳定性造成

直接影响,但对于电池托架的长时间使用可能会导致结构疲劳和变形。因此,未来设计中可从以下几个方面继续优化^[14]:1) 框架水平支撑优化,针对电池箱框架处的较大位移,可以通过增加框架的横向支撑或采用更加坚固的材料来减少变形,以提升整体刚性;2) 限位点的结构强化,限位点作为应力集中区域,增加局部加固措施或采用高疲劳强度的材料来减少应力集中,从而提升托架的抗疲劳性能和结构寿命,同时应充分考虑连接件螺栓的预紧力变化对疲劳寿命的影响,以避免因连接松动导致的提前失效^[15];3) 改进水平力分散设计,可以在托架底部设计更加合理的应力分散结构,降低单个限位点的受力负荷。

2.3 y 向加载分析

y 向位移、应力云图如图8所示。由图8可知,最大加速位置主要在左、右转动的瞬间,该工况下主要承受 y 向的作用力,电池箱的最大变形量为1.2 mm,出现在电池箱的框架位置,与 z 向和 x 向加载相比, y 向加载下的位移相对较小,表明在横向载荷作用下,电池箱框架的整体刚性较好。这可能是因为电池箱两侧通过悬臂支架与车架连接,提供了较强的支撑力,从而有效地限制了横向位移^[16]。在 y 向工况下,电池箱和托架受到的是侧向冲击或转弯时产生的负载。该工况下,由于结构的侧向支撑不足,容易出现较大的侧向应力。优化前的最大应力为201 MPa(图8中的红色区域),主要集中在电池箱和托架的侧向支撑部位,表明在转弯和侧倾工况下,结构易发生疲劳损伤。优化设计后,通过改变支撑结构的形状和增加支撑点的位置,有效分散了侧向负载,减少了应力集中现象;最大应力降低至180 MPa(图8中的绿色区域),减幅为10.4%。疲劳分析表明,优化前的疲劳寿命为4 800次,优化后提升至6 900次,增幅为44%。这种改进显著提高了 y 向工况下的耐疲劳性,增强了电池箱和托架在复杂作业环境中的可靠性。

尽管201 MPa的应力值远低于Q345材料的屈服强度(345 MPa),但在焊接部位的应力集中仍需要引起重视,尤其是在频繁转弯或复杂路况下,长时间的高应力可能导致焊缝开裂或疲劳损伤。为此,建议在设计中加强焊接质量的控制,采用更高强度的焊接工艺,或者通过在关键焊接区域增加加强筋来分散应力^[17]。此外,焊缝设计也可以考虑采用双层焊接或更宽的焊缝区域,以提升结构的抗疲劳能力^[18]。

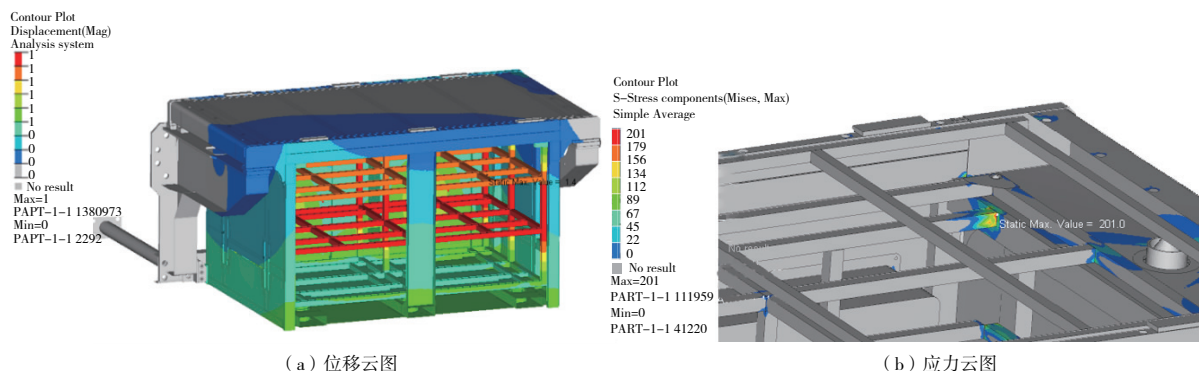


图8 y向位移、应力云图

2.4 模拟结果验证

为验证电池箱体及托架在实际工况下的力学性能,本研究对模拟结果进行了现场应力应变测试,涵盖空载和满载条件下不同车速及转弯工况。对不同工况的应力和应变分布进行了详细分析,并在此基础上提出了结构优化建议,以提高系统的长期稳定性和耐久性^[19]。

1) 应力验证

图9为优化设计在不同工况下的应力分布与实验测试结果的对比。结果显示,在优化后的电池箱和托架设计中,最大应力值在 z 向、 x 向和 y 向工况下应力值均有所下降,验证了有限元分析对优化效果的准确预测。图9中的对比结果表明,在 z 向工况下,仿真模拟的最大应力为158 MPa,实际测试值接近于160 MPa,二者差距较小,表明仿真模型有效地反映了实际工况下电池箱的受力情况。类似地,在 x 向和 y 向工况下,仿真结果和实验数据的对比也表现出了较高的一致性,进一步验证了优化设计的可靠性。

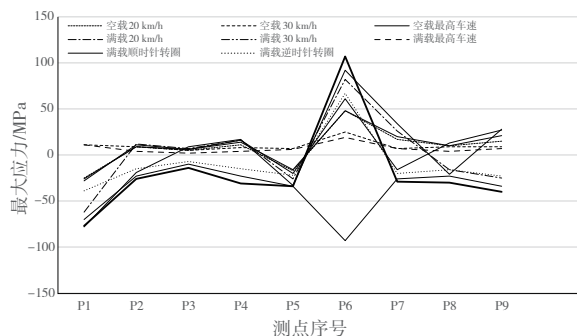


图9 各测点不同工况下应力值

2) 应变验证

图10为优化设计后电池箱和托架的应变分布与实验测试结果的对比。可以看出,在 z 向工

况下,仿真模拟的最大应变为0.002 5,实际测试值为0.002 4,二者差距仅为0.000 1,这表明有限元分析能够准确预测电池箱在垂直方向上的变形情况。在 x 向和 y 向工况下,仿真结果与测试数据的应变分布也显示出了很高的相似性,进一步验证了仿真模型在不同工况下的准确性。

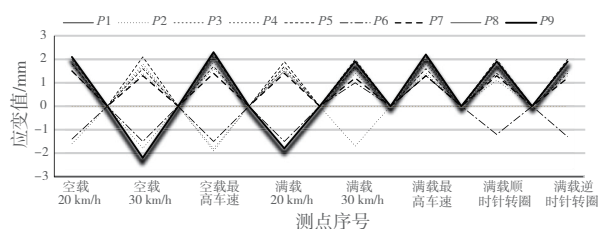


图10 各测点不同工况下应变值

3 结语

本文对90 t级纯电动矿车的侧换电池箱及托架结构进行优化设计与疲劳性能分析。通过有限元分析,优化后的设计在 z 向、 x 向和 y 向工况下的最大应力均低于Q345材料的屈服强度,安全系数大于1.3,显著提高了结构的强度和抗疲劳性能。尽管优化设计有效改善了整体性能,但托架底部和焊接部位的应力集中现象仍需进一步优化,从而减少疲劳损伤风险。实验验证表明,仿真与实际测试结果高度一致,验证了优化设计的可靠性和合理性。本设计已成功应用于矿山机械,并取得了良好的经济效益,并为电动矿车及其他工程车辆的电池箱结构设计提供了参考。未来的研究可集中于轻量化设计和材料优化上,以进一步提升其结构性能和使用寿命。

参考文献:

- [1] 杨大丕. 新能源电动汽车关键技术的发展现状与趋势[J]. 汽车知识, 2024, 24(8):17-19.

- [2] 杨明,乔延涛,蔡存朋,等. 纯电动乘用车动力电池箱体设计优化及仿真分析[J]. 汽车文摘,2024(1): 26-32.
- [3] 邓腾树,林景胜. 纯电动汽车动力电池箱的有限元分析与优化设计[J]. 泉州师范学院学报,2020,38(6): 38-46.
- [4] 吕奇奇,吴海龙,孙恒五,等. 某纯电动城市物流车电池箱模态分析优化及试验验证[J]. 现代制造工程,2017(7):71-74.
- [5] ZHANG X X, PAN Y J, XIONG Y, et al. Deep learning-based vibration stress and fatigue-life prediction of a battery-pack system [J]. Applied Energy, 2024, 357:122481.
- [6] ZHANG S G, SANG K, YU L, et al. Fatigue life evaluation method of metallic components under random loads based on a new strain-life curve[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143:106867.
- [7] WEI H Y, LIU Y M. An energy-based model to assess multiaxial fatigue damage under tension-torsion and tension-tension loadings [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 141:105858.
- [8] LI Z H, QIN J, ZHAO M, et al. Multi-objective structural optimization design for electric excavator-specific battery packs with impact resistance and fatigue endurance[J]. Energies, 2025, 18(3):669.
- [9] KIM H G, KIM G C, JI W, et al. Random vibration fatigue analysis of a multi-material battery pack structure for an electric vehicle[J]. Functional Composites and Structures, 2021, 3(2):025006.
- [10] 马之辉,李兵兵,陈南. 基于CFD热分析的动力电池包基础模组优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6):168-173,179.
- [11] ZHANG D Q, CHEN Y Y. Random vibration fatigue life analysis of airborne electrical control box[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14):7335.
- [12] LI J Y, HU G F, CHEN J J. Analysis and optimization of fatigue caused by vibrations in the quick-replacement battery box for electric vehicles[J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(8):226.
- [13] DA SILVA B F A, KASAEI M M, AKHAVAN-SAFAR A, et al. Fatigue analysis of novel hole hemmed joints for hybrid busbars in electric vehicle batteries [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 311:110590.
- [14] LI F, WU Q. Structural improvement of electric vehicle battery brackets under dynamic loading [J]. Mechanical Design and Simulation, 2019, 28(3): 98-104.
- [15] WANG S, LI X, LI D L, et al. Effect of bolt looseness on fracture position and fatigue life of bracket arm for air spring bellow [C]//2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu, China: IEEE, 2022:307-312.
- [16] WANG Y, LIU M. Optimization of battery box structures in heavy-duty electric vehicles [J]. International Journal of Mechanical Science, 2021, 53(6): 425-435.
- [17] PAWAR S, KARAMKAR P B, JANUNKAR R G. Design optimization and analysis of robust and reliable battery tray for electric vehicle against collision [J]. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering, 2023, 10(6):418-425.
- [18] CHEN S K, XU K L, YAO X W, et al. Psychophysiological data-driven multi-feature information fusion and recognition of miner fatigue in high-altitude and cold areas [J]. Computers in Biology and Medicine, 2021, 133:104413.
- [19] LU W W, ZHOU J, CHEN Y F, et al. Design and Research on battery box of four seat pure electric vehicle [C]//2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, China: IEEE, 2022: 2068-2071.

收稿日期:2025-01-02