



碳纤维复合材料与铝合金连接热膨胀影响研究

高 阳, 周啸尘, 周伟旭, 王彦翔, 刘 晓, 秦 浩
(中车长春轨道客车股份有限公司 国家轨道客车系统集成工程研究中心
新技术研究部, 吉林 长春 130062)

摘 要: 碳纤维复合材料与铝合金的热膨胀系数存在一定差异, 服役温度变化会导致二者产生不同的变形量, 造成连接处产生较大应力。文章采用理论分析和仿真相结合方法, 针对车体典型工况, 研究环境温度分别为常温23℃、高温60℃及低温-40℃时不同热膨胀系数对碳纤维复合材料与铝合金连接性能的影响。结果表明, 在典型载荷工况作用下, 低温状态时复合材料的拉伸应变、压缩应变及铝合金的应力均为最大值; 常温状态时复合材料的拉伸应变、压缩应变及铝合金的应力均为最小值; 在高低温状态下, 铆钉的拉伸力和剪切力相比常温状态均有所增大, 其中高温状态下铆钉受剪切力作用明显, 而在低温状态下, 铆钉受拉伸力作用明显。

关键词: 动车组; 碳纤维复合材料; 铝合金; 热膨胀系数; 仿真分析

中图分类号: U270.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X (2024) 06-0050-06

0 引言

随着轨道交通技术的不断发展, 轨道交通车辆对轻量化的要求也越来越高, 传统铝合金材料已经不能满足日益提高的轻量化要求, 碳纤维复合材料具有高比强度、耐腐蚀性、耐疲劳等特点, 从而越来越广泛地应用于轨道交通车辆部件^[1], 然而碳纤维复合材料在轨道交通车辆承载结构中的应用尚处于研究阶段, 在承载结构中采用全碳纤维复合材料仍未成熟应用。考虑到充分利用不同材料的特点, 发挥不同材料的优势, 目前在承载结构中一般同时使用碳纤维复合材料与铝合金材料, 在碳纤维复合材料结构与铝合金结构之间形成连接, 但二者之间热膨胀系数的差异会引起应力集中与形变失配的问题, 从而影响结构连接的可靠性与耐久性。目前国内外学者针对碳纤维复合材料的热膨胀特性进行了相应研究: 文献[2-3]通过研究发

现在表征材料的热稳定性方面, 热膨胀系数是较为重要的参数, 调整原材料、控制纤维体积分数等方式, 可实现复合材料在特定方向上的零热膨胀。文献[4]采用下垂法原理测定玻璃纤维、碳纤维等纤维丝束的热膨胀系数。文献[5]利用衍射原理测试了300~2 500 K下碳纤维热膨胀系数。文献[6]对T800碳纤维复合材料层合板的热膨胀特性进行了试验研究, 并给出面内热膨胀系数的理论计算公式。文献[7]利用原位透射电子显微镜对两种聚丙烯腈(PAN)基和一种沥青基碳纤维在20~1 100℃温度范围内的热膨胀系数进行了评估。文献[8]对二维和三维碳纤维/环氧树脂复合材料的热膨胀特性进行试验研究, 分析了编织复合材料热膨胀机理及影响因素。文献[9]基于RVE模型预测了单向板及层合板的各向异性热膨胀系数。文献[10]研究了碳纤维及其复合材料在不同温度下的热膨胀系数特性。在以往研究中, 国内外学者主要针对碳纤维及其复合材料本身的热膨胀系数进行研究, 分析了不同因素对热膨胀

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4301202)

通信作者: 周啸尘, 男, 高级工程师, 主要从事碳纤维复合材料在轨道交通应用方面的研究; E-mail: zhouxiaochen.ck@crrecg.cc

引用格式: 高阳, 周啸尘, 周伟旭, 等. 碳纤维复合材料与铝合金连接热膨胀影响研究[J]. 机车电传动, 2024(6): 50-55. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.06.007.

Citation: GAO Yang, ZHOU Xiaochen, ZHOU Weixu, et al. Study on the impact of thermal expansion on carbon fiber composite-aluminum alloy connections[J]. Electric drive for locomotives, 2024(6): 50-55. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.06.007.

系数的影响规律以及热膨胀系数的预测方法,而针对碳纤维复合材料与铝合金连接结构受二者热膨胀系数差异所造成的影响研究和报道较少。

由于固化过程中的残余应变以及应用过程中的热膨胀行为对复合材料的结构设计至关重要^[11-12],为探究不同热膨胀系数对碳纤维复合材料与铝合金之间连接的影响规律,在-40~60℃温度内,研发团队对复合材料与铝合金的连接性能进行了仿真分析,为碳纤维复合材料与铝合金之间的结构连接设计提供依据。

1 碳纤维复合材料与铝合金的热膨胀特性

碳纤维复合材料以其极高的强度重量比、优异的抗腐蚀性能和耐高温能力,在航空航天、轨道交通、汽车、风电等领域得到了广泛应用^[13-15]。碳纤维热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)较低,自身的热膨胀几乎可以忽略,而基体材料(如环氧树脂)的热膨胀系数也相对较低,因此碳纤维复合材料在温度变化时具有极高的尺寸稳定性,在高精度和高可靠性要求的应用场景中表现出色。

与此相比,铝合金由于其密度低、强度高、加工性能良好、耐腐蚀和导热性能优异,在轨道交通领域早已成熟应用。铝合金的热膨胀系数较高,这意味着在温度变化时,铝合金会经历显著的尺寸变化,即铝合金在升温时会膨胀,在降温时会收缩,这种较高的热膨胀系数使得铝合金在变化的温度环境中容易产生较大的热应力和变形。

当连接使用碳纤维复合材料与铝合金时,两种材料之间的热膨胀系数差异显著,会导致连接处产生复杂的热应力和变形失配。具体而言,在温度变化过程中,碳纤维复合材料的尺寸变化较小,而铝合金的尺寸变化较大,这种不一致的变形会在连接界面处产生应力集中。应力集中可能引发界面脱粘、裂纹,甚至导致连接失效,特别是在高低温交替变化的环境中,这种应力和变形的不匹配更加明显,可能加速连接部位的损伤和退化。

基于上文分析,在设计碳纤维复合材料与铝合金的连接结构时,设计者必须充分考虑两种材料热膨胀系数差异对连接性能的影响,可以采取多种措施来缓解这种不利影响,例如优化连接设计、选择合适的胶粘剂、使用柔性中间层或采用混合连接技术等。同时,对连接结构进行仿真研究,输入不同材料的热膨胀系数以模拟材料性能,并分析在不同温度下连接区域的应力应变水平。本文通过研究两种材料热膨胀系数差异对连接性能的影响规律,可以有效减小在复合材料结构设计中因材料热膨胀系数差异带来的不利影响,确保连接结构的稳定性和耐久性,提高整体结构的可靠性和使用寿命。

2 仿真建模及典型工况

2.1 仿真建模

本文针对碳纤维复合材料侧墙与铝合金底架连接结构进行研究,其中侧墙为碳纤维复合材料夹层结构,由国产25K-T400级碳纤维内外蒙皮及内部泡沫芯材组成,铝合金底架整体由铝合金6005A-T6拉挤型材焊接组成,侧墙与底架通过铝合金角板连接,角板使用6005A-T6板材折弯件。采用Hypermesh软件对上述不同材质及结构进行有限元建模,碳纤维内外蒙皮、铝合金底架结构及连接角板创建壳单元SHELL,芯材创建体单元SOLID,连接铆钉创建BEAM单元等操作对混合材料结构模型进行离散化处理。主体结构网格尺寸为20~30 mm,连接区域的网格尺寸为10 mm。侧墙与底架边梁处的有限元模型如图1所示。

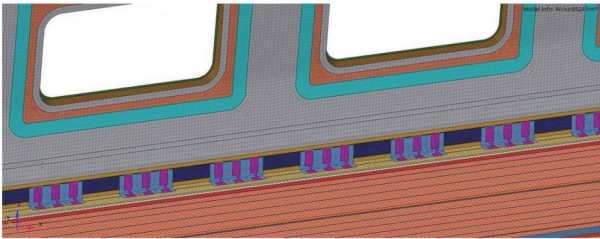


图1 侧墙与底架边梁连接结构有限元模型

Fig. 1 Finite element model of connection structure between side wall and underframe side beam

碳纤维复合材料和铝合金型材性能参数如表1所示,仿真计算时,在材料属性中输入不同材料的热膨胀系数以及高温、低温与常温之间的温度差值。

表1 碳纤维复合材料及铝型材材料性能参数
Table 1 Parameters of material properties of carbon fiber composite and aluminum profile

性能参数	碳纤维复合材料	铝合金
弹性模量 E_l /MPa	128 947	69 000
弹性模量 E_t /MPa	9 643	69 000
剪切模量 G /MPa	4 539	25 940
密度 ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 570	2 710
泊松比	0.316	0.330
热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.2×10^{-5}	2.3×10^{-5}

2.2 典型工况

作为轨道交通车辆结构,碳纤维复合材料和铝合金的连接结构需按照标准TB/T 3451—2016《动车组车体结构强度设计及试验》进行评价,根据标准选取5种典型载荷工况,分别在常温及高低温下(常温为23℃,高温为60℃,低温为-40℃)的情况进行分析,典型工况如表2所示。

表2 典型工况描述

Table 2 Typical operating conditions

工况	载荷工况	载荷施加方法
1	垂向整备载荷 (AW0)	整车均布的重量以重力加速度形式施加, 设备重量施加于设备悬挂处, 乘客重量均布于座椅处, 其余重量分布在地板上
2	垂向超员载荷 (AW3)	垂向载荷同工况 1
3	AW3+纵向压缩工况	垂向载荷同工况 1
4	AW0+二位端部压缩 400 kN (地板面上方 150 mm 处)	垂向载荷同工况 1 (无乘客质量), 纵向载荷作用于二位端端墙地板面上方 150 mm 处
5	气密载荷工况	垂向载荷同工况 1, 气密载荷作用在车体外表面

当车间开展不同材料部件装配作业时, 部件尺寸为初始状态, 此时将车间施工温度 23 ℃ 定为常温温度。在恶劣环境情况下, 选取车辆运行的最低环境温度 -40 ℃ 为低温温度。确定高温温度时, 考虑在极端环境下材料表面热量积聚, 由标准 EN 14750 《铁路应用城市和郊区铁路车辆用空调》可知等效太阳辐射功率 800 W 时可模拟列车运行最高环境温度 40 ℃ 环境, 通过观察太阳辐射功率 800 W 下的材料表面温度, 开展材料表面温升试验。结果表明, 在 800 W 太阳辐射功率下, 材料表面的温度趋近于 60 ℃, 高于标准的模拟温度 40 ℃, 因此高温温度定义为 60 ℃, 太阳辐射功率 800 W 下材料表面的温升情况如图 2 所示。

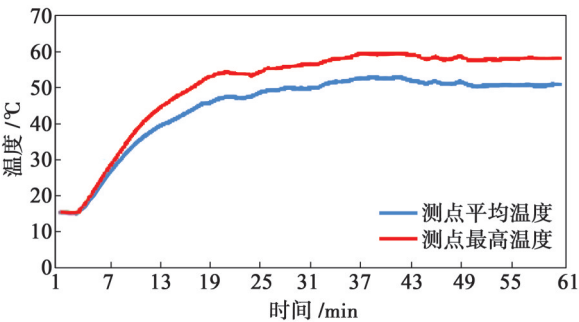


图2 太阳辐射功率 800 W 下材料表面温升图

Fig. 2 Temperature rise diagram of material surface under solar radiation power of 800 W

3 仿真结果分析

3.1 热膨胀对静强度的影响

由于各材料热膨胀系数不同, 在温度变化时容易导致材料发生微小形变, 连接位置应力及应变水平发生变化。为研究热膨胀对静强度的影响, 针对常温 23 ℃、高温 60 ℃ 及低温 -40 ℃ 这 3 种不同温度工况, 对碳纤维复合材料侧墙与铝合金底架边梁之间结构连接的静强度进行仿真分析。

选取不同温度状态下碳纤维复合材料结构和铝合金结构在 5 种典型工况下产生的最大应力应变云图进行分析。碳纤维复合材料侧墙在常温下的最大拉伸应变出现于 AW0+二位端部压缩 400 kN 工况, 低温、高温

下的最大拉伸应变均出现于 AW3+纵向压缩工况, 如图 3 所示。

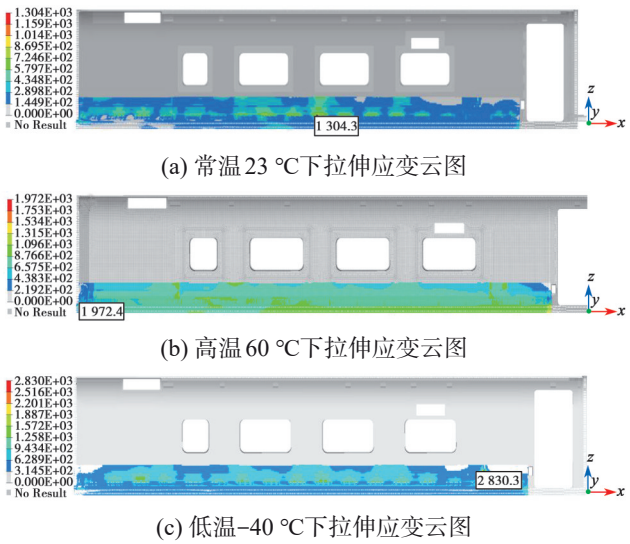
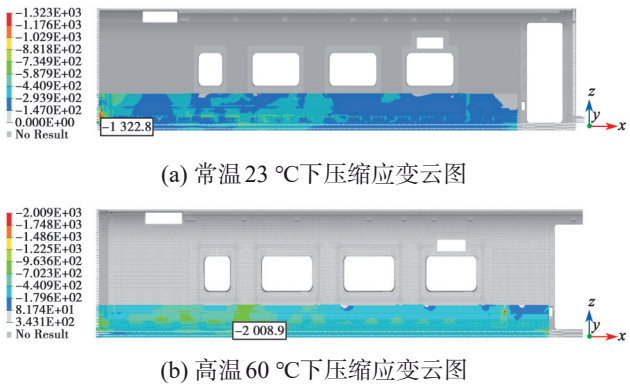


图3 碳纤维复合材料侧墙在不同温度下拉伸应变云图
Fig. 3 Nephogram of tensile strain of carbon fiber composite side walls at different temperatures

碳纤维复合材料侧墙在常温下的最大压缩应变出现于 AW0+二位端部压缩 400 kN 工况, 低温、高温下的最大压缩应变均出现于 AW3+纵向压缩工况, 如图 4 所示。

铝合金边梁在常温下的最大应力出现于气密载荷工况, 在高温、低温下的最大应力均出现于 AW3+纵向压缩工况, 如图 5 所示。

由图 3~图 5 可得到不同温度下碳纤维复合材料结构与铝合金结构的最大应力应变值, 如表 3 所示。

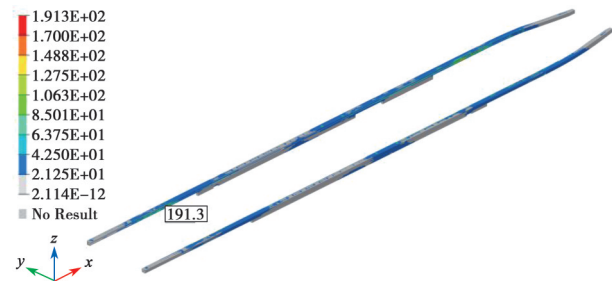




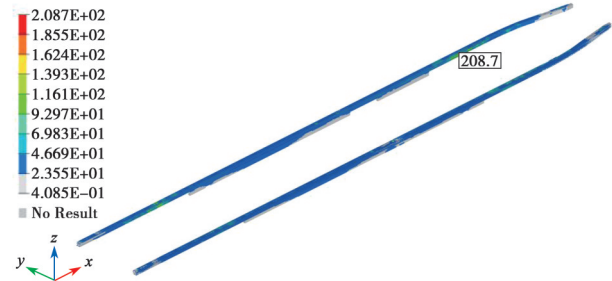
(c) 低温-40 °C下压缩应变云图

图4 碳纤维复合材料侧墙在不同温度下的压缩应变云图

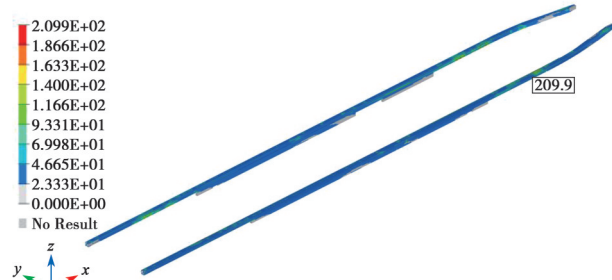
Fig. 4 Nephogram of compressive strain of carbon fiber composite side walls at different temperatures



(a) 常温 23 °C下铝合金应力云图



(b) 高温 60 °C下铝合金应力云图



(c) 低温-40 °C下铝合金应力云图

图5 铝合金边梁在不同温度下的应力云图

Fig. 5 Nephogram of stress of aluminum alloy side beams at different temperatures

表3 不同温度下碳纤维复合材料结构与铝合金结构应力应变值

Table 3 Stress and strain values of carbon fiber composite and aluminum alloy structures at different temperatures

温度工况	碳纤维复合材料 最大拉伸应变/ $\mu\epsilon$	碳纤维复合材料 最大压缩应变/ $\mu\epsilon$	铝合金最大 应力/MPa
常温 (23 °C)	1 304.4	1 322.8	191.3
高温 (60 °C)	1 972.4	2 008.9	208.7
低温 (-40 °C)	2 830.3	2 487.2	209.9

对比仿真分析结果可知, 低温状态下碳纤维复合材料的最大拉伸应变、最大压缩应变、铝合金的最大

应力均为最大值, 而常温下碳纤维复合材料的最大拉伸应变、最大压缩应变、铝合金的最大应力均为最小值。复合材料的拉伸应变和压缩应变、铝合金应力值越大意味着安全性越低, 故在低温-40 °C时, 温度差值较大, 结构的安全系数较低。

3.2 热膨胀对铆钉拉伸性能影响分析

连接铆钉的拉伸力与剪切力可以反映连接时的受力情况, 力值越大说明安全性越低, 针对常温 23 °C、高温 60 °C及低温-40 °C情况, 对5种典型工况下的碳纤维复合材料与铝合金结构连接的铆钉最大拉伸及剪切性能进行分析。

在不同温度状态下, 铆钉所受最大拉伸力和剪切力均出现在AW3+纵向压缩工况, 碳纤维复合材料侧墙与铝合金边梁之间结构连接的铆钉受力变化如表4所示。

表4 碳纤维复合材料与铝合金之间结构连接的铆钉受力
Table 4 Forces on the rivet in structural connection between carbon fiber composite and aluminum alloy

温度工况	铆钉最大拉伸力/N	铆钉最大剪切力/N
常温 (23 °C)	7 020.3	4 666.8
高温 (60 °C)	7 188.3	8 940.7
低温 (-40 °C)	13 672.1	8 952.8

由表4可知, 在低温状态下, 铆钉承受的拉伸力及剪切力最大, 这是由于从常温 23 °C到低温-40 °C的温度变化跨度最大, 而碳纤维复合材料与铝合金的热膨胀系数不同, 当温度发生变化时, 各自产生的变形量不一致, 这种变形的不协调受到铆钉连接的约束, 会在铆钉及连接处产生较大的应力, 变形量越大所受到的应力越大, 因此铆钉所承受的拉力随着温度跨度的增加而不断增大。

分别对不同温度下的铆钉拉伸力与剪切力进行对比发现, 高温下的铆钉拉伸力比常温下的铆钉拉伸力略高, 而低温下的铆钉拉伸力比常温下的铆钉拉伸力增大了约95%; 高温与低温状态下的铆钉剪切力相比常温状态下的铆钉剪切力增大约1倍, 而高温与低温状态下的铆钉剪切力相差不大。这是由于在高温状态下, 铝合金受热膨胀, 对碳纤维侧墙结构产生挤压作用, 此时连接区域的受力仍以面内剪切为主, 因此连接区域的铆钉剪切力明显增大, 而铆钉拉伸力变化不大; 在低温状态下, 铝合金遇冷收缩, 连接区域受面外力的作用, 此时拉伸力在铆钉受力中的作用增大, 因此铆钉拉伸力明显增大, 而铆钉剪切力相较于高温状态变化不大。

4 结论

为研究热膨胀系数对碳纤维复合材料与铝合金连

接的影响,建立了碳纤维复合材料侧墙与铝合金底架连接结构模型,采用Hypermesh软件分析了5种典型工况下碳纤维复合材料的拉伸应变及压缩应变、铝合金的应力和连接铆钉的拉伸及剪切性能,得出以下结论:

① 高低温对碳纤维复合材料结构与铝合金结构的静强度、连接铆钉的拉伸和剪切性能影响较大,尤其在低温环境下,碳纤维复合材料的拉伸应变、压缩应变、铝合金材料的应力以及连接铆钉的拉伸力和剪切力均为最大。

② 相较于常温和高温工况,低温环境下产生了更大的温度差,受不同材料热膨胀系数差异的影响,铝合金结构产生了更大的热变形,连接区域产生了较大的应力,即温差越大,热膨胀系数对连接强度的影响越大。

③ 该研究对指导异种材料的连接设计与验证有一定的借鉴作用。在后续设计中,应充分考虑热膨胀系数差异对连接区域产生的影响,确保异种材料连接结构的合理性与可靠性。

参考文献:

- [1] 贺冠强,刘永江,李华,等.轨道交通装备碳纤维复合材料的应用[J].机车电传动,2017(2): 5-8.
HE Guanqiang, LIU Yongjiang, LI Hua, et al. Application study of carbon fiber composite material in rail transit equipment[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 5-8.
- [2] 吕静,杨彩云.编织结构复合材料热膨胀性能的影响因素[J].产业用纺织品,2014(5): 26-30.
LYU Jing, YANG Caiyun. The influence factors of woven composite material thermal expansion performance[J]. Technical textiles, 2014(5): 26-30.
- [3] 翟军军,王露晨,孔祥霞.三维多向编织复合材料温度效应综述:热传导、热膨胀性质和力学响应[J].复合材料学报,2021,38(8): 2459-2478.
ZHAI Junjun, WANG Luchen, KONG Xiangxia. A review on temperature effect of 3D multi-directional braided composites: heat conduction, thermal expansion properties and mechanical response[J]. Acta materiae compositae sinica, 2021, 38(8): 2459-2478.
- [4] 欧阳国恩,许路,刘成民,等.几种纤维的热膨胀系数实验测定[J].宇航材料工艺,1988(4): 48-53.
OUYANG Guoen, XU Lu, LIU Chengmin, et al. Experimental determination of the coefficients of thermal expansion of several fibers[J]. Aerospace materials & technology, 1988 (4): 48-53.
- [5] PRADERE C, SAUDER C. Transverse and longitudinal coefficient of thermal expansion of carbon fibers at high temperatures (300-2 500 K) [J]. Carbon, 2008, 46(14): 1874-1884.
- [6] 邱雪琼,陈琳.碳纤维增强复合材料层压板的热膨胀系数测量及理论计算方法[J].复合材料科学与工程,2021(7): 28-32.
QIU Xueqiong, CHEN Lin. Test and theoretical method for coefficients of thermal expansion of carbon fiber reinforced composite laminate[J]. Composites science and engineering, 2021(7): 28-32.
- [7] KULKARNI R, OCHOA O. Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites[J]. Journal of composite materials, 2006, 40(8): 733-754.
- [8] 姚学锋,杨桂,姚振汉.编织结构复合材料热膨胀特性的实验研究[J].复合材料学报,2000,17(4): 20-25.
YAO Xuefeng, YANG Gui, YAO Zhenhan. Experimental study of thermal expansion behavior on braided structure composite[J]. Acta materiae compositae sinica, 2000, 17(4): 20-25.
- [9] 万佩,夏辉,刘晨,等.基于多尺度数值模型的复合材料各向异性热膨胀系数预测[J].复合材料学报,2023,40(2): 1208-1217.
WAN Pei, XIA Hui, LIU Chen, et al. Prediction of anisotropic coefficient of thermal expansion for laminated composite using multiscale numerical models[J]. Acta materiae compositae sinica, 2023, 40(2): 1208-1217.
- [10] 杨成,姜鹏飞,朱立平,等.碳纤维及其复合材料温度相关热膨胀特性研究[J/OL].复合材料科学与工程: 1-7. (2024-03-28) [2024-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20240327.1146.004.html>.
YANG Cheng, JIANG Pengfei, ZHU Liping, et al. Study on temperature-dependent thermal expansion properties of carbon fiber and CFPR[J/OL]. Composites science and engineering: 1-7. (2024-03-28) [2024-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20240327.1146.004.html>.
- [11] HUANG Shuwei, ZHANG Junjie, KE Yanan, et al. In-situ monitoring of carbon fiber/epoxy composite with FBG sensors under curing and thermal cycling conditions[J]. Composites communications, 2024, 47: 101875.
- [12] NISHIHARA K, OKUYAMA K I, RODRIGUEZ R, et al. The thermo-mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polymer composites exposed to a low earth orbit environment[J]. Aerospace, 2024, 11(3): 201.
- [13] 王明举,李博,周伟旭,等.碳纤维复合材料车体承载部件的设计[J].大连交通大学学报,2020,41(4): 106-108.
WANG Mingju, LI Bo, ZHOU Weixu, et al. Research and design of carbon fiber composites bearing structure[J]. Journal of Dalian jiaotong university, 2020, 41(4): 106-108.
- [14] 周伟旭.碳纤维增强树脂基复合材料在轨道交通车辆车体中的应用与思考[J].城市轨道交通研究,2018,21(12): 10-13.
ZHOU Weixu. On the application of carbon fiber reinforced polymer to rail transit composite carbody[J]. Urban mass

transit, 2018, 21(12): 10-13.
[15] GUAN Shouyan, WANG Fujii, WANG Hongquan, et al. Enhancing planar compression performance of 3D printed con-

tinuous carbon fiber reinforced honeycomb sandwich structures using interleaved core paths[J]. Journal of manufacturing processes, 2024, 120: 940-950.

Study on the impact of thermal expansion on carbon fiber composite-aluminum alloy connections

GAO Yang, ZHOU Xiaochen, ZHOU Weixu, WANG Yanxiang, LIU Xiao, QIN Hao

(Emerging Technology Research Department, National Engineering Technology and Research Center for System Integration of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: The coefficient of thermal expansion differs between carbon fiber composites and aluminum alloys to some extent, leading to varying degrees of deformation under changing service temperatures, which causes significant stress at their connections. Combining theoretical analysis and numerical simulation, this study examined the effect of varying thermal expansion coefficients on the connection performance between carbon fiber composites and aluminum alloys under typical vehicle operating conditions. The study considered the following environmental temperatures: atmospheric temperature at 23 °C, high temperature at 60 °C, and low temperature at -40 °C. The results show that under typical load conditions, both the tensile strain and compressive strain of the composites, as well as the stress in the aluminum alloys, reach their maximum values at the low temperature, while at the atmospheric temperature, these parameters reach their minimum values. At both high and low temperatures, the tensile and shear forces on the rivets increase compared to the states at the atmospheric temperature. Specifically, the rivets are more affected by shear forces at the high temperature and more affected by tensile forces at the low temperature.

Keywords: EMU; carbon fiber composite; aluminum alloy; thermal expansion coefficient; simulation analysis