

湿热老化对碳纤维增强复合材料设备舱强度影响*

何子坤¹ 肖守讷¹ 江兰馨² 陈东东¹ 王明猛¹

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 2. 四川大学机械工程学院, 610065, 成都)

摘要 [目的] 轨道交通列车的运行环境较为复杂, 列车上的复合材料在运行期间会受到恶劣的外界因素影响而出现老化现象, 因此有必要研究湿热老化对碳纤维复合材料设备舱强度的影响。[方法] 对碳纤维复合材料进行湿热老化试验及静态力学(拉伸、压缩、剪切)试验, 获得湿热老化前、后复合材料的力学性能参数; 建立某型号碳纤维复合材料的设备舱有限元模型, 采用试验的方法获得湿热老化前、后的材料参数, 计算设备舱在气动载荷下的静强度。[结果及结论] 湿热老化后的编织碳纤维复合材料力学性能有不同程度的衰减, 压缩强度下降最大, 下降了 39.3%; 与初始状态相比, 各碳纤维部件的 Tsai-Wu 失效因子均出现了不同程度的增大, 湿热老化导致的碳纤维强度和碳纤维模量的退化会引起设备舱刚度和承载极限的退化。

关键词 列车; 碳纤维复合材料; 设备舱强度; 湿热老化
中图分类号 U270.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.046

Influence of Hygrothermal Aging on the Strength of Carbon Fiber Reinforced Composite Material Equipment Cabin

HE Zikun¹, XIAO Shoune¹, Jiang Lanxin², CHEN Dongdong¹, WANG Mingmeng¹

(1. State Key laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, 610065, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The operating environment of rail transit trains is relatively complex, and composite materials on the trains are subject to deterioration during operation due to the aging phenomenon caused by harsh external factors. Therefore, it is necessary to study the effect of hygrothermal aging on the strength of carbon fiber composite equipment cabins. [Method] Hygrothermal aging tests and static mechanics (tensile, compression, shear) tests on carbon fiber composite are conducted to obtain their mechanical performance parameters before and after hygrothermal aging. An equipment cabin finite element model for a certain type of carbon fiber composite is

established. The material parameters before and after hygrothermal aging are obtained by experimental methods, and the static strength of the equipment cabin under aerodynamic loads is calculated. [Result & Conclusion] The mechanical properties of woven carbon fiber composites after hygrothermal aging show different degrees of attenuation, with the compressive strength decreasing the most by 39.3%; compared with the initial state, the Tsai-Wu failure factors of each carbon fiber component show different degrees of increase. The degradation of carbon fiber strength and carbon fiber modulus due to the hygrothermal aging may cause the degradation of equipment cabin stiffness and bearing limit.

Key words train; carbon fiber composite; equipment cabin strength; hygrothermal aging

CFRP(碳纤维增强复合材料)是一种由树脂基体和碳纤维组成的新型材料,具有质量轻、强度高、耐腐蚀性等特点^[1-2]。随着工艺技术的发展,制造成本的逐步降低,CFRP 如今已越来越适合用于轨道交通行业中的轻量化应用,如司机室头罩、中间车车体、转向架、设备舱等^[3-4]。

轨道交通列车的运行环境较为复杂,列车上的复合材料在运行期间会受到恶劣的外界因素影响而出现老化现象。影响 CFRP 湿热老化的外界因素有很多,如温度、湿度、紫外线、空气酸碱度等。这些因素长期共同作用于复合材料,将会导致材料内部基体发生破坏,纤维与树脂间的界面力有所下降,湿热环境对碳纤维复合材料的影响较为显著^[5-6]。目前,已有文献针对湿热老化对轨道交通列车复合材料结构件的影响研究较少。

鉴于此,本文对 CFRP 进行湿热老化试验,对不同温度下老化前、后的 CFRP 进行拉伸、剪切、压缩试验,得到 CFRP 的基本材料参数,分析导致其力学性能下降的原因。同时,利用不同温度下老化后复合材料的剩余强度参数对某复合材料设备舱进行仿真试

* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2020J024);牵引动力国家重点实验室自主课题(2020TPL_T07)

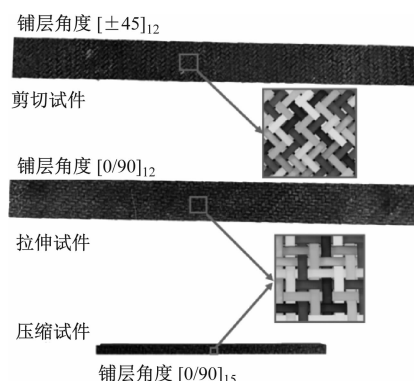
验,分析其静强度变化情况。本文研究可为湿热环境下 CFRP 设备舱的强度退化研究提供借鉴与依据。

1 湿热老化对碳纤维影响

1.1 试验材料与制备

本文采用碳纤维编织预浸料、T300/3k 碳纤维和 EM199 型阻燃环氧树脂,满足轨道交通行业中的 EN45545-2:2013 + A1:2015《Railway applications-Fire protection of railway vehicles-Part 2: Requirement for fire behavior of materials and components》的要求。采用模压成型工艺制备试件,模压设备为 XLB-D 型平板硫化机,层合板制备工艺示意图如图 1 所示。为了贴合模具尺寸,将编织预浸料尺寸裁为 300 mm×300 mm,根据试验所设计的铺层顺序,堆叠得到 CFRP 层合板。CFRP 成型工艺为:将预浸料以 1~3 °C/min 的速度加热至 160 °C,并在 16 MPa 压力下压缩 1 h,然后置于室温下冷却至 60 °C 以下,最后去除设备压力得到层合板^[7]。

根据标准 GB/T 3354—2014《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》、GB/T 3355—2014《聚合物基复合材料纵横剪切试验方法》和 GB/T 1448—2005《纤维增强塑料压缩性能试验方法》,将制备好的 CFRP 层合板切割成标准试件(见图 1)。试件铺层角度及尺寸如表 1 所示。为了保证力学性能试验的准确性,避免 CFRP 试件水分蒸发而导致试件性能恢复,在泡水前提前在试件上贴好加强片。



注:[0/90]₁₂表示以 0°与 90°交替的顺序铺层 12 次所得到的试件;余类同。

图 1 层合板制备工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laminate preparation process

1.2 湿热老化与静态力学性能试验

湿热老化试验参考标准为 HB 7401—2021《航

表 1 试件铺层角度及尺寸

Tab. 1 Paving angle and size of specimens

铺层角度/(°)	试件长度/mm	试件宽度/mm	试件厚度/mm
[0/90] ₁₂	250	25	2.4
[±45] ₁₂	250	25	2.4
[0/90] ₁₅	140	6	3.0

空用聚合物基复合材料吸湿试验方法》。湿热老化过程采用的设备为 JOANLAB-BHS-2 型水浴箱,温度变量设置为 30 °C 和 50 °C,水温控制精度为 0.1 °C。所有试件均浸泡在 HN2L-25 型工业蒸馏水中。吸湿开始前,使用精度为 0.1 mg 的天平测量试件的基准质量,每次测量使用 3 个样品。试验开始后,按照规定的时间间隔对试件进行称重,测量前用纸巾擦去样品表面的水迹,测量并记录每次称重结果,同时计算吸湿率。当相距 6.5~7.5 d,且材料相继两次吸湿量的变化小于 0.02% 时,认为材料达到了吸湿饱和。

静态力学性能试验包括拉伸试验、剪切试验和压缩试验,通过试验能够获得 CFRP 最基本的性能参数。在老化前进行一次静态力学性能试验,每组试验取 4 根试件,得到 CFRP 的初始性能。待样品达到吸湿饱和时,再进行一次静态力学性能试验。使用的仪器为 MTS809 型拉扭试验系统和 DIC(数字图像相关)设备。

在 MTS809 型拉扭试验系统上,采用单边加载方式,拉伸加载速率为 2 mm/min,剪切加载速度为 5 mm/min,压缩加载速度为 -1 mm/min。直接通过 MTS809 型拉扭试验系统获取试件的载荷、位移,试件的拉伸、剪切、压缩应力可通过载荷计算获得,试件的应变通过 DIC 设备处理后获得。试验设备照片如图 2 所示。



图 2 试验设备照片

Fig. 2 Photos of test equipment

不同静态力学性能试验下,初始状态和老化后,试件的应力-应变曲线如图 3 所示。在拉伸试验中,试件吸湿饱和后的曲线斜率有轻微下降,吸湿温度越高,斜率下降越大。在剪切试验中,吸湿后

试件的剪切应变有明显增大,且进入塑性变形的最大剪切应力有所降低。在压缩试验中,试件压缩的屈服应力和最大应变因吸湿而降低,且温度越高,二者下降越大。

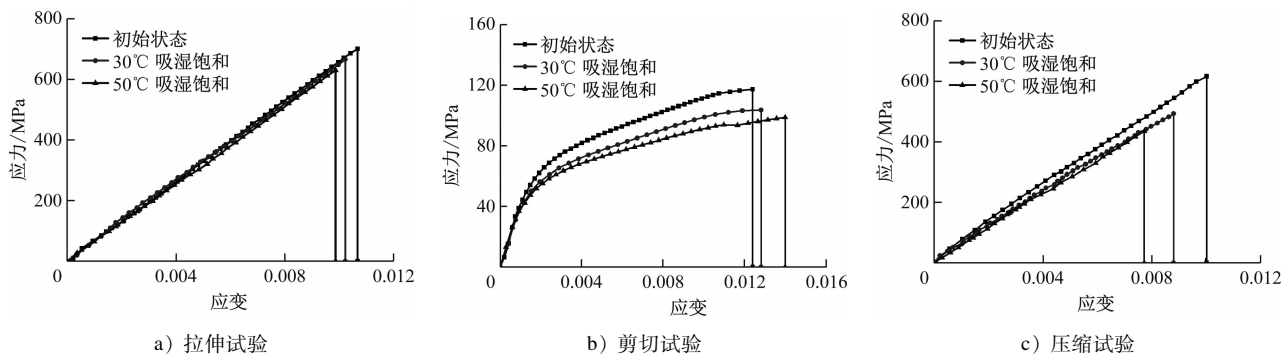


图 3 不同静态力学性能试验下初始状态和老化后试件的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens in initial state and after aging under different static mechanical properties tests

初始状态、30 ℃及 50 ℃吸湿饱和后的材料参数如表 2 所示,表中数值均为每组 4 根试件的平均值。相较于 CFRP 试件在 30 ℃吸湿饱和后的力学性能,50 ℃吸湿饱和后的 CFRP 试件性能下降更明显。相比于初始状态,50 ℃吸湿饱和的 CFRP 试件拉伸强度下降了 8.11%,拉伸模量减小了 7.81%,剪切强度下降了 14.94%,剪切模量减小了 18.43%,压缩强度下降了 39.30%,压缩模量减小了 10.77%。CFRP 试件的拉伸强度下降不大,这是因为在拉伸过程中,主要承受载荷的是拉伸方向的碳纤维,而吸湿过程主要发生在树脂基体上,碳纤

维基本不吸湿。剪切性能的降低是由于树脂基体吸湿导致基体发生溶胀,产生内部缺陷,在温度影响下,基体和纤维的热膨胀系数不匹配,形成内应力,导致树脂基体和纤维之间的界面发生损伤。压缩性能下降显著是由于在压缩过程中,树脂基体主要承受压缩载荷,温度越高,树脂基体吸湿越快,其内部产生的裂纹会破坏基体本身的力学性质,导致试件压缩强度大幅降低。CFRP 试件的面内泊松比平均值呈增大的趋势,50 ℃吸湿饱和后,试件的面内泊松比平均值从 0.071 增加至 0.087。

表 2 初始状态、30 ℃及 50 ℃吸湿饱和后的材料参数

Tab. 2 Material parameters in initial state and after moisture absorption saturation at 30 ℃ and 50 ℃

试件状态	纤维方向拉伸 弹性模量/ GPa		纤维方向压缩 弹性模量/ GPa		面内剪切 模量/GPa		纤维方向 拉伸强度 极限/MPa		纤维方向 压缩强度 极限/MPa		面内剪切 强度极限/ MPa		面内泊松比	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
初始状态	71.11	2.54	68.34	9.32	5.64	0.05	673.09	29.31	723.37	69.96	91.54	0.42	0.071	0.003
30 ℃吸湿 饱和	69.18	3.14	62.50	4.01	4.84	0.14	660.47	14.53	503.44	16.50	82.74	0.94	0.081	0.006
50 ℃吸湿 饱和	65.56	1.29	60.98	3.83	4.85	0.21	618.53	2.86	439.08	7.46	74.67	1.25	0.087	0.005

2 CFRP 设备舱有限元模型

2.1 设备舱有限元模型

针对某型号 CFRP 设备舱进行有限元建模,基于上述湿热老化试验获得的材料参数,分析湿热老化对 CFRP 设备舱结构静强度的影响。CFRP 设备

舱有限元模型如图 4 所示。

为了节约计算成本,从整个 CFRP 设备舱结构中截取一个结构完整的模块作为研究对象。该模块由 2 根上边梁、2 根下边梁、4 根弯梁、2 根横梁、2 个裙板、2 个通风格栅、2 块底板、若干连接支座及螺栓紧固件组成,各部件之间均通过连接支座和螺栓

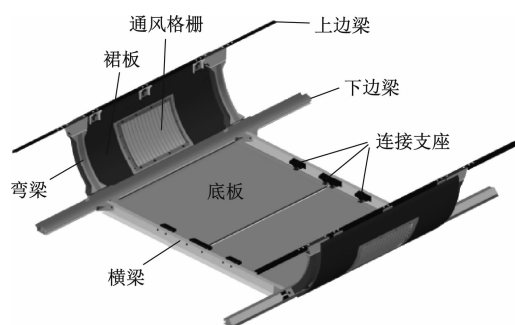


图 4 CFRP 设备舱有限元模型

Fig. 4 Finite element model of CFRP equipment cabin

紧固件进行连接。其中,整个模块的有限元模型包括 70 662 个 91 号壳单元、43 808 个 181 号壳单元、294 570 个 186 号实体单元、190 个 188 号梁单元和 456 个刚性单元。

设备舱的裙板和底板采用碳纤维与泡沫组成的三明治夹层结构,弯梁和横梁采用碳纤维层合板结构,上、下边梁及通风格栅采用铝合金挤压型材,连接支座选用合金钢,紧固件为不锈钢材质。由于本文试验为面内试验,无法获得碳纤维的层间参数,仿真中选取文献[8]的层间参数,如表 3 所示。部分金属材料参数如表 4 所示。

表 3 碳纤维层间参数^[8]Tab. 3 Interlayer parameters of carbon fiber^[8]

材料参数	取值
厚度方向弹性模量/GPa	11.10
yz 向层间剪切模量/GPa	3.95
xz 向层间剪切模量/GPa	5.27
厚度方向拉伸强度极限/MPa	50
厚度方向压缩强度极限/MPa	300
yz 向层间剪切极限/MPa	120
xz 向层间剪切极限/MPa	50

注:铺层角度 0°为 x 方向,铺层角度 90°为 y 方向,垂直于 x、y 平面为 z 方向

表 4 部分金属材料参数

Tab. 4 Parameters of some metal materials

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg/m ³)	泊松比
铝合金	69	2.82×10^3	0.3
合金钢	206	7.93×10^3	0.3
不锈钢	210	7.85×10^3	0.3

CFRP 设备舱中的碳纤维部件采用 Tsai-Wu 失效准则进行校核,若 Tsai-Wu 失效因子大于 1,则认为设备舱结构失效。

2.2 载荷与边界条件

CFRP 设备舱在上边梁处通过螺栓与车体底架边梁连接,正常情况下,底架边梁的挠度较小,所以对 CFRP 设备舱上边梁与车体连接处的螺栓上部进行全约束。由于加速度工况对于 CFRP 设备舱的影响不大,故本文只考虑气动载荷对 CFRP 设备舱的静强度影响。参考 EN 12663: 2010《Railway applications-Structural requirements for railway vehicle bodies》及文献[9],设定 CFRP 设备舱承受的气动载荷为 7 500 Pa。约束和载荷示意图如图 5 所示。

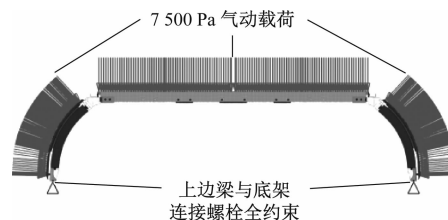


图 5 约束及载荷示意图

Fig. 5 Schematic diagram of constraints and loads

3 老化前后的设备舱静强度计算结果

3.1 设备舱应力分析

初始状态下,气动载荷为 7 500 Pa 时的 CFRP 设备舱应力云图如图 6 所示。CFRP 设备舱整体结构的最大应力约为 296.8 MPa,出现在横梁与底板的连接螺栓孔处,底板最大应力约为 283.3 MPa,弯梁最大应力为 148.7 MPa,底板与弯梁的最大应力均出现在螺栓连接处。设备舱中金属结构的最大应力为 209.67 MPa,满足材料的强度极限,因此下文仅分析 CFRP 的结构强度问题。

3.2 老化前后复合材料部件强度分析

3 种状态下,各 CFRP 部件的 Tsai-wu 最大失效因子对比如表 5 所示。CFRP 设备舱中各部件结构的 Tsai-Wu 最大失效因子大多出现在应力较大位置处。

3 种状态下,各 CFRP 部件的 Tsai-Wu 失效因子分布云图如图 7 所示。底板的最大失效因子约为 0.887,出现于底板与横梁连接处的螺栓孔,相较于初始状态,该处的失效因子增大了 21.51%。弯梁与边梁连接处的失效因子受湿热影响最大,30 ℃及 50 ℃吸湿饱和后分别增加了 55.56% 和 81.33%。虽然 3 种状态下的最大失效因子出现的部位相同,但由于老化进程的不一致,Tsai-Wu 失效因子的分布也有所差异。

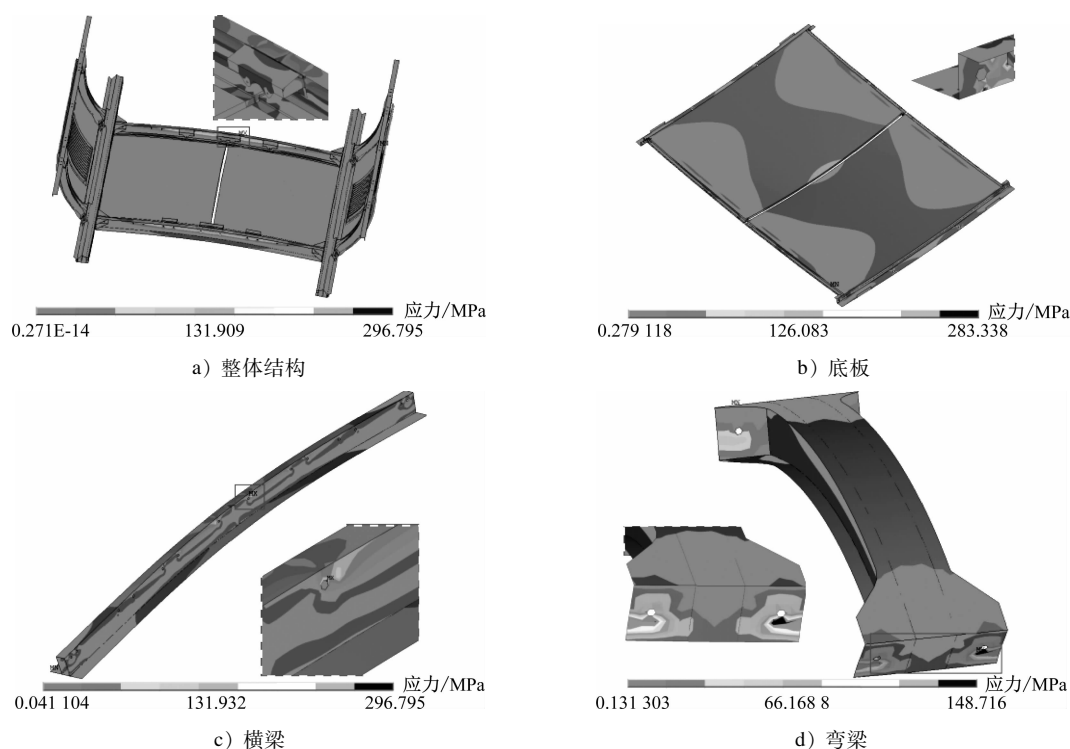


图6 初始状态下气动载荷为7 500 Pa时的CFRP设备舱应力云图

Fig. 6 CFRP equipment compartment stress nephogram under 7 500 Pa aerodynamic load in the initial state

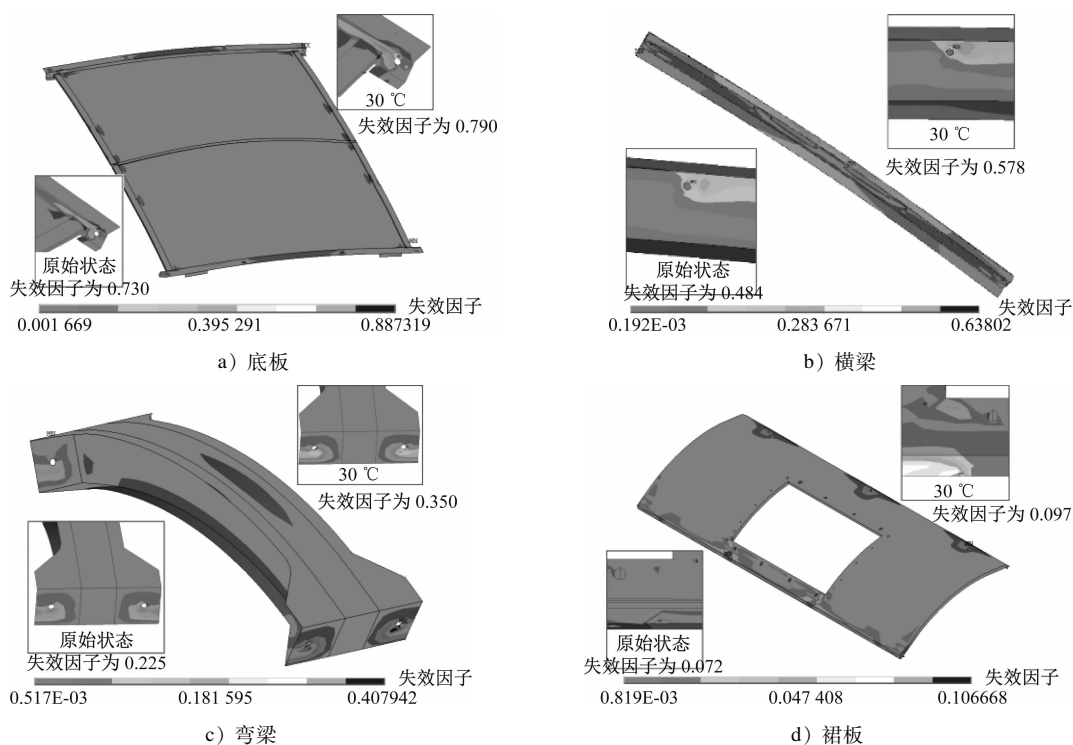


图7 3种状态下各CFRP部件的Tsai-Wu失效因子分布云图

Fig. 7 Tsai-Wu failure factor distribution nephogram of each CFRP component under three states

3种状态下,CFRP设备舱的失效因子均小于1,说明CFRP设备舱在7 500 Pa的气动载荷下满足

静强度要求。CFRP设备舱中,各CFRP部件失效因子的增大幅度远大于CFRP剩余强度的下降程度,

表 5 3 种状态下各 CFRP 部件的 Tsai-wu 最大失效因子对比
Tab.5 Comparison of Tsai-Wu maximum failure factors of each CFRP component under three states

部件名称	3 种状态下的 Tsai-Wu 失效因子最大值			具体位置
	初始状态	30 ℃吸湿饱和	50 ℃吸湿饱和	
底板	0.730	0.790	0.887	螺栓孔
横梁	0.484	0.578	0.638	螺栓孔
弯梁	0.225	0.350	0.408	螺栓孔
裙板	0.072	0.097	0.107	裙板下端

这是由于 CFRP 在湿热环境中的强度退化大于模量退化造成的。虽然 50 ℃吸湿饱和后,各 CFRP 部件并未出现失效情况,但相比于未老化状态,其最大失效因子增大了 81.33%,说明实际工程中,在评估与环境交互密切的 CFRP 结构时,应充分考虑湿热环境因素对材料的影响,保障结构部件的安全性。

4 结论

1) 湿热环境对 CFRP 的性能具有不同程度的影响。与初始状态相比,30 ℃及 50 ℃吸湿饱和后,试件材料的拉伸、剪切、压缩性能均有不同程度的衰减,且温度越高,性能衰减越严重。50 ℃吸湿饱和后,试件的拉伸强度下降了 8.11%,拉伸模量减小了 7.81%,剪切强度下降了 14.94%,剪切模量减小了 18.43%,压缩强度下降了 39.30%,压缩模量减小了 10.77%。该复合材料的模量衰减程度普遍低于屈服强度衰减程度。

2) 采用有限元建模,分析碳纤维复合材料设备舱在 7 500 Pa 气动载荷下的静强度,在初始状态、30 ℃及 50 ℃吸湿饱和后,各 CFRP 部件的 Tsai-Wu 失效因子均小于 1,结构薄弱部位均位于螺栓连接开孔处,该 CFRP 设备舱在 7 500 Pa 气动载荷下满足静强度要求。

3) 湿热老化后的 CFRP 部件 Tsai-Wu 失效因子存在不同程度的增大,最大可达 81.33%,出现在 50 ℃吸湿饱和后的弯梁与边梁连接处,这是由于湿热环境使 CFRP 的力学性能发生了退化。在实际工程应用中,在评估与环境交互密切的 CFRP 结构时,应当充分考虑湿热环境因素对材料的影响,以保障结构部件的安全性。

参考文献

[1] 王昕敏. 轨道交通车辆转向架零部件应用碳纤维复合材料替

代金属材料研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(4): 115.

WANG Xinmin. Application of CFRP materials to replace metal materials in bogie parts of rail transit vehicles[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(4): 115.

[2] 陈德强, 冯遵委, 胡定祥, 等. 碳纤维复合材料在城轨车辆转向架中的运用[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(8): 123. CHEN Deqiang, FENG Zunwei, HU Dingxiang, et al. Application of carbon fiber composite materials in bogies of urban rail vehicles[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(8): 123.

[3] 车士俊, 张明睿. 复合材料在轨道交通中的应用综述[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 100.

CHE Shijun, ZHANG Mingrui. Review of the application of composite materials in rail transit[J]. Fiber Composites, 2022, 39(2): 100.

[4] 肖守讷, 江兰馨, 蒋维, 等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 154.

XIAO Shoune, JIANG Lanxin, JIANG Wei, et al. Application and prospect of composite materials in rail transit vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 154.

[5] NIU Y F, WANG D D, YAO J W. Investigation of the performances for CFRP composites exposed to different aging environment at nano-scale[J]. Polymer Testing, 2022, 116: 107771.

[6] 刘雪蓉, 徐元铭, 张卫方, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料湿热老化研究进展[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(4): 20. LIU Xuerong, XU Yuanming, ZHANG Weifang, et al. Research progress of hydrothermal aging of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Fiber Composites, 2020, 37(4): 20.

[7] JIANG L, XIAO S, JIANG W, et al. Effect of stacking configuration on dynamic tensile properties of braided carbon fibre composites under medium-low strain rates[J]. Composites Science and Technology, 2021, 213(9): 108924.

[8] OLMEDO Á, SANTIUSTE C. On the prediction of bolted single-lap composite joints[J]. Composite Structures, 2012, 94(6): 2110.

[9] 董瑞雪, 刘志明. 高速动车组复合材料设备舱结构评价方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1392.

DONG Ruixue, LIU Zhiming. Evaluation method for the structure of composite equipment cabin of high-speed EMU[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1392.

· 收稿日期:2022-10-10 修回日期:2022-12-12 出版日期:2024-12-10

Received:2022-10-10 Revised:2022-12-12 Published:2024-12-10

· 第一作者:何子坤,硕士研究生,9843908@qq.com

通信作者:肖守讷,研究员,snxiao@swjtu.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license