



高速磁浮碳纤维复合材料车体 结构及性能研究

王剑博, 邵 晴, 刘海萍, 任忠华, 李 刚, 于青松
(中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所, 吉林 长春 130062)

摘要: 磁浮交通是一种高速、安全、节能、环保、可持续发展的交通方式, 极具发展潜力。当磁浮列车运行速度超过600 km/h时, 产生的气动载荷对车体强度要求也更严苛, 亟需开展更高车体强度的相关研究。文章分析了复合材料高速磁浮列车车体结构, 研发了由碳纤维复合板和铝合金型材组成的新型车体结构。基于ANSYS仿真软件构建车体数值计算模型, 分析刚度、强度、模态等主要性能, 验证了满足600 km/h速度以上运行车体的承载要求。仿真结果表明, 垂向载荷工况下, 车体下弦梁挠度最大值为1 mm; 整备状态下车体一阶垂向弯曲振型自振频率为7.88 Hz, 满足全寿命周期内刚度和模态要求。基于修正的Brown-Miller应变寿命方程, 采用Fe-safe软件、Tsai-Wu失效准则分析车体结构疲劳寿命, 计算表明, 复合板芯材应力最大值位于工况3的底架复合板芯材处, 满足疲劳强度设计要求。文章研究的车体结构较上海示范线商业运营磁浮列车质量减小6.7%, 为后续磁浮列车提速及轻量化提供了理论基础和工程经验。

关键词: 高速磁浮; 车体结构; 车体性能; 轻量化; 碳纤维复合板; 磁浮列车

中图分类号: U237; U270.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X (2024) 06-0029-06

0 引言

磁浮列车采用无接触支撑、导向和驱动的方式运行, 是区别于汽车、轮船、轮轨列车、飞机的第5种交通运输工具。高速磁浮列车运行速度可达到600 km/h甚至更高, 并能够以较低的能源消耗和碳排放实现舒适、快速的中长途旅行, 适合我国国土辽阔、人口众多、能源短缺的国情^[1-3]。高速磁浮列车与高速轮轨列车和民用航空系统互为补充, 能够满足不同乘客的出行需求。发展高速磁浮交通有助于提高我国综合交通运输体系的配置效率和能力, 同时可缓解能源和环境等方面的矛盾。

车体是高速磁浮列车的主要承载结构, 需要满足整车高速运行工况下刚度、强度、疲劳、质量等指标要求。随着速度等级的提高, 车体结构轻量化与高强度的矛盾日益突出。针对车体的结构减重主要从材料

优化和结构优化两个方面入手。在材料优化方面, 现阶段主要采用镁合金、碳纤维增强材料、铝蜂窝夹层板、复合材料等新材料减轻结构重量^[4-5]。在结构优化方面, 文献[6]以中低速磁浮车车顶为研究对象, 分析了车顶结构特点及轻量化型材断面设计; 文献[7]基于参数化车体数值模型研究了车体关键设计参数对复合材料磁浮车体结构性能的影响规律。总体而言, 全铝合金材料的车体结构难以满足轻量化要求, 因此混合材料车体结构优化亟待研究^[8]。国际上, 日本新型新干线N700系高速列车和韩国铁道科学院研制的摆式列车上都部分应用了碳纤维复合材料^[9-10]。国内轨道客车领域对复合材料的应用研究起步较晚, 中车长春轨道客车股份有限公司研制的碳纤维复合材料轻轨“光谷量子号”较同类金属车体质量可减小35%^[11-12]。但上述针对复合材料的研究一般应用于低速轨道列车或非承载结构, 针对高速轨道、磁浮列车车体承载结构的复合材料应用技术尚待进一步研究。

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20240301009GX); 中国中车重点研发项目(2024CCB192)

通信作者: 于青松, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事磁浮总体技术研究; E-mail: 13943038869@163.com

引用格式: 王剑博, 邵晴, 刘海萍, 等. 高速磁浮碳纤维复合材料车体结构及性能研究[J]. 机车电传动, 2024(6): 29-34. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.06.004.

Citation: WANG Jianbo, SHAO Qing, LIU Haiping, et al. Research on the structure and performance of carbon fiber composite carbody for high-speed maglev transportation[J]. Electric drive for locomotives, 2024(6): 29-34. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.06.004.

为满足高速磁浮列车 600 km/h 的速度要求, 本文提出一种适用于高速磁浮列车的车体结构, 其特点为使用骨架承载式车身, 表面覆盖件使用碳纤维“三明治”复合板, 使用航空铆接技术和结构型密封胶保证整车的强度和密封。通过数值分析方法研究了车体结构刚度、强度、模态等性能。

1 高速磁浮车体结构

高速磁浮列车的车体与轨道无接触运行, 因此车体垂向和纵向载荷要求较轮轨列车更宽松。但随着速度等级提升, 磁浮列车气动承载能力和轻量化要求比轮轨列车更高。使用铝合金材料和复合材料进行车辆减重, 并采用铝合金框架连接碳纤维“三明治”复合板的整体承载结构以提升承载能力, 同时为保证载荷传递路径不受影响, 在车体的垂直方向保证材料的一致性; 借鉴航空飞行器设计理念, 采用铆接形式连接不同材料, 既保证了气动载荷承载性能, 又可以满足整车的气密性要求。

研发一种适用于高速磁浮列车的硬质泡沫碳纤维“三明治”复合板, 具有轻量化、隔音、隔热及气密性好等特点, 通过静态力学性能试验、冲击试验及剥离试验、三点弯曲及四点弯曲、疲劳试验、燃烧性能试验和烟毒试验、雷击等试验验证, 证明了碳纤维“三明治”复合板性能能够满足整车以 600 km/h 速度全天候安全行驶的要求。

采用混合式复合成型方法生产, 先在铝型材框架和外碳纤维板连接区域表面分别涂刷胶粘剂, 再将铝型材框架利用工装夹具固定在外碳纤维板连接区域, 真空固化后, 分别对硬质泡沫板、内外碳纤维板、铝型材框架分别涂刷粘接剂。再将涂好粘接剂的硬质泡沫芯体填充到铝型材框架内, 之后进行内碳纤维板的固定, 固定后覆盖辅助材料, 采用常温真空工艺将复合板内部的气体导出, 确保粘接剂能够覆盖全部内部表面。通过采用混合式复合成型方法互相弥补, 能够提高碳纤维“三明治”复合板产品结构和尺寸的稳定性的。

高速磁浮列车复合材料轻量化车体由底架、端墙、侧墙和车顶 4 部分组成, 各部分单独生产后再进行车体总组装, 能够有效缩短车体的生产周期。具体组成示意如图 1 所示。

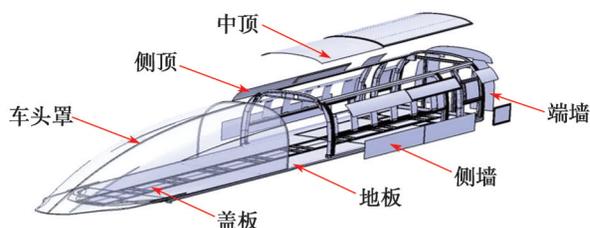


图 1 车体组成示意

Fig. 1 Diagram of carbody composition

车体主要技术参数如表 1 所示。

表 1 车体主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of carbody

参数项目	车体长 (含前端头罩)/mm	车体 宽/mm	车体 高/mm	设计质量/t
参数值	27 770	3 700	2 550	5.8

车体使用高强度铝合金薄壁挤压型材, 通过焊接、铆接工艺形成车体框架作为主承载结构。在框架之间通过结构型密封胶和铆钉安装碳纤维“三明治”复合板组成整车车体。

底架设置 2 根边梁、2 根中部纵梁、若干横梁, 中部设置有可拆卸的碳纤维“三明治”复合板检查门, 以满足悬浮架的安装、检修需求。其余区域使用碳纤维“三明治”复合板进行覆盖, 以实现底架的轻量化设计。

前端头罩为碳纤维“三明治”复合材料整体成型无骨架承载流线型车头, 蒙皮使用碳纤维材料, 芯体材料使用硬质泡沫材料, 抗冲击层使用以橡胶增韧芳纶纤维布为增强材料的柔性复合材料, 表面敷设铜网, 满足防雷击、防电磁辐射要求。

侧墙区域除门区立柱、窗间型材、端部立柱使用铝型材外, 其余均使用碳纤维“三明治”复合板进行覆盖; 端墙区域除立柱使用铝型材外, 其余均使用碳纤维“三明治”复合板进行覆盖; 车顶区域除两侧各设置 1 根纵梁、中部设置 1 根弯梁外, 其余均使用 2 块碳纤维“三明治”复合板进行覆盖。

车体材料分布如图 2 所示, 其中绿色部分为铝型材, 灰色部分为碳纤维复合材料。

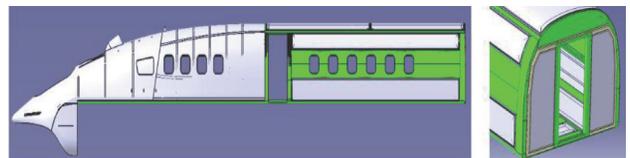


图 2 车体材料分布示意

Fig. 2 Distribution of carbody materials

2 车体有限元模型

为验证上述车体结构在 600 km/h 速度运行时的结构强度、疲劳强度能否满足设计要求, 依据高速磁浮走行机构载荷谱采用有限元分析校核车体的结构强度和疲劳强度。铝型材属于薄壁结构, 采用板壳单元模拟; 碳纤维“三明治”复合板采用壳单元模拟蒙皮, 实体单元模拟芯体; 车窗、车门和底架设备以集中质量点的形式施加在各自的质量中心位置; 内装、管线、乘客等以均布质量点的形式加在各自对应的承载结构上。车体所用材料的性能参数如表 2~表 4 所示。

碳纤维“三明治”复合板中的复合板蒙皮使用壳

单元进行模拟, 复合板中各单层板的厚度与铺设角度通过定义壳截面属性实现; 芯体使用六面体实体单元进行模拟, 与复合板的连接通过节点相连实现; 复合板与其他结构间相连的铆钉使用梁单元进行模拟。

表2 车体铝合金型材特性参数

Table 2 Material properties of aluminum alloy profiles in carbody

材料牌号	型材类型	厚度/mm	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
6005A-T6	空心	≤5	240	71	0.33
6082-T6	空心	≤5	240	71	0.33
5083-H111	板材	≤40	110	70	0.30

表3 碳纤维材料性能参数

Table 3 Performance parameter of carbon fiber material

参数项目	参数值	参数项目	参数值
E1t经向拉伸模量/GPa	63.7	X1t经向拉伸强度/MPa	579
E1c经向压缩模量/GPa	61.5	Yt纬向拉伸强度/MPa	510
E2t纬向拉伸模量/GPa	61.7	X1c经向压缩强度/MPa	672
E2c纬向压缩模量/GPa	61.0	Yc纬向压缩强度/MPa	622
v12主泊松比	0.050 7	S面内剪切强度/MPa	105
G12面内剪切模量/GPa	5.01	密度/(kg·m ⁻³)	1 650

表4 泡沫材料性能参数

Table 4 Performance parameter of foam material

参数项目	参数值
弹性模量/GPa	160E-3
泊松比	0.3
z向压缩强度/MPa	3.5
x向剪切强度/MPa	2.2
x向剪切模量/MPa	50
y向剪切强度/MPa	2.2
y向剪切模量/MPa	50
密度/(kg·m ⁻³)	110

使用ANSYS软件对车体强度开展有限元分析, 碳纤维“三明治”复合板结构的基本单元尺寸为40 mm, 铝结构的基本单元尺寸为20 mm, 共划分单元3 340 944个, 节点为2 913 282个, 具体如图3所示。

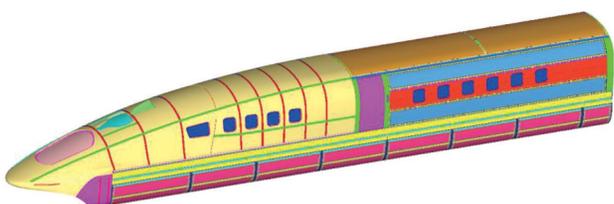


图3 车体结构有限元模型示意图

Fig. 3 Finite element model of carbody structure

3 车体刚度、模态与静强度分析

碳纤维“三明治”复合板使用Tsai-Wu失效准则开展强度评定, 同时兼顾碳纤维拉压强度不相等的工况。取二阶张量形式, 在平面应力状态下计算如下:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_6 为应力张量; F_1 、 F_{11} 、 F_{12} 、 F_{22} 为表征材料性能的强度张量。

在所有应力分量相互作用下, 若式(1)左端计算值(即Tsai-Wu失效因子)小于1, 则材料尚未失效; 若左端计算值等于1, 则材料已开始失效; 若左端计算值大于1, 则材料已经失效。

根据刚度分析计算, 车体在单独垂向载荷工况下, 车体下弦梁的最大挠度为1 mm。

无约束自由模态分析结果表明: 整備状态下车体第七阶阵型(前六阶为刚体模态)为一阶垂向弯曲振型, 振动频率为7.88 Hz, 可以满足车辆设计要求。

高速磁浮列车复合材料车体强度分析工况依据高速磁浮车体强度计算加载规范并参考EN 12663-2014标准^[13], 对复合材料有限元车体模型进行加载。应用ANSYS软件中的静强度分析模块进行了分析计算, 不同工况作用下车体静强度计算结果如图4所示, 车体承载结构中的板单元最大应力及发生部位如表5所示。

从表5可以看出, 高速磁悬浮车体承载结构在各设计载荷工况作用下, 其各部件的最大应力均未超过许用应力, 满足静强度设计要求, 且大部分部件的应力距许用应力限值较大, 即有较大的静强度裕量。

4 车体疲劳分析

本文采用FE-safe软件对有限元模型进行后续的疲劳寿命分析。FE-safe是进行疲劳耐久性分析的专用软件, 在软件开发过程中通过大量的试验验证, 包含了非常丰富的材料数据库, 因其具有较高的计算精度, 被广泛应用于各类金属、非金属结构的疲劳分析中。

FE-safe软件提供了丰富的疲劳寿命算法, 用户可以根据需要选择合适的计算方法, 其中包括: 利用应力-寿命曲线并采用Goodman、Gerber平均应力修正的单轴分析; 利用应变-寿命曲线并采用Morrow、Smith-Watson-Topper平均应力修正的单轴分析; 用名义应力法进行多轴疲劳分析, 以及利用局部应力-应变法进行多轴疲劳分析^[14]。

本文研究的高速磁浮车体结构中的材料均为韧性材料, 因此选用Brown-Miller准则并考虑到剪应变和正应变综合因素产生裂纹, 认为疲劳裂纹产生于剪应变最大的平面内^[15]。对于韧性材料的多轴疲劳算法, Brown-Mille算法是美国汽车工程学会(SAE)唯一推荐

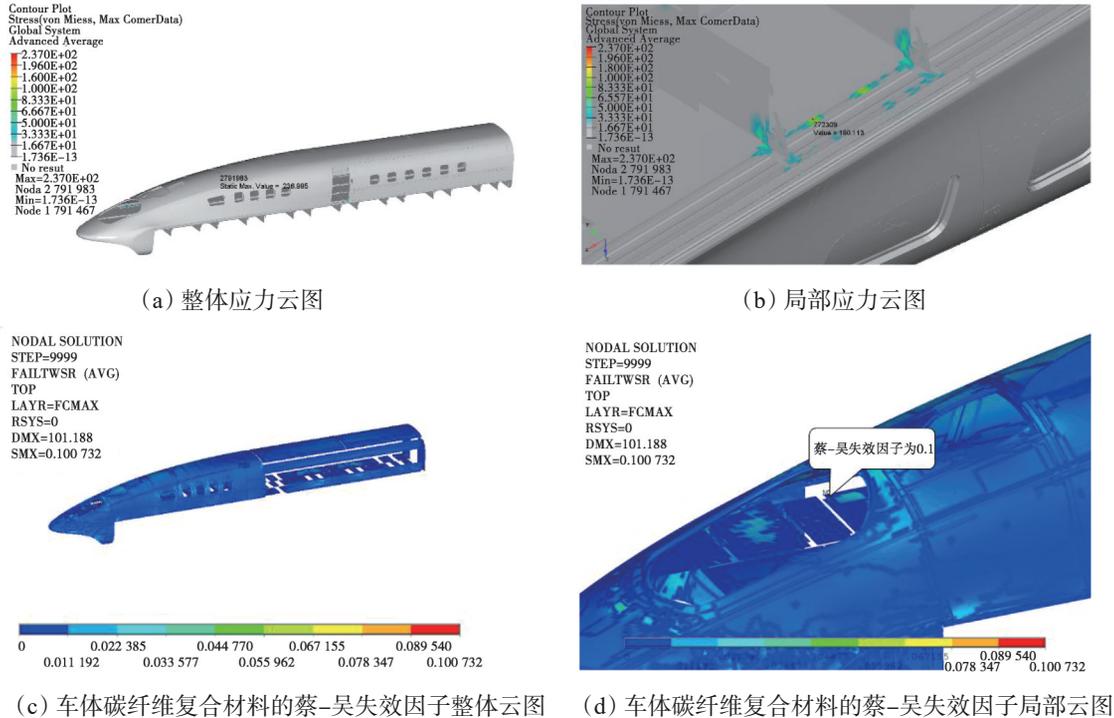


图4 不同工况作用下车体静强度计算结果

Fig. 4 Calculation results for carbody static strength under different conditions

表5 板单元的最大应力及其相应部位

Table 5 Maximum stress in plate elements and corresponding parts

序号	工况	最大应力/MPa	最大应力发生部位	许用应力/MPa
1	组合工况 1	80.3	牵引拉杆座	236
		74.1	车钩 V 形加强板	236
2	组合工况 2	75.5	牵引拉杆座	236
		57.4	车钩 V 形加强板	236
3	组合工况 3	80.3	牵引拉杆座	236
4	组合工况 4	115.0	车体侧上角复合板面板	150
5	垂向超常 载荷+车钩载荷	186.0	车钩 V 形加强板	236
		131.0	夹层端部横隔板, 横向小梁	195
6	垂向载荷	98.5	夹层端部横隔板, 横向小梁	195
7	扭转载荷	22.7	夹层端部横隔板靠近 T 形支架部位	195

的算法, 它使用标准单轴材料数据, 采用临界平面技术, 自动跟踪每个位置的主应力和剪应力方向、大小的改变, 确保获取非比例加载时精准的应力应变谱能够计算概率疲劳。Brown-Miller 应变寿命方程为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = C_1 \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + C_2 \epsilon'_f (2N)^c \quad (2)$$

式中: $\Delta\gamma_{\max}$ 为剪应变; $\Delta\epsilon_n$ 为正应变范围; C_1 、 C_2 为常数, $C_1=1.65$, $C_2=1.75$ 。

式(2)是指平均应变为零的情况, 考虑到平均应力和平均应变的影响, 需要对其进行修正。FE-safe 软件提供了多种修正方法, 工程实际中经常利用 Morrow 平均应力准则进行修正, 修正后的 Brown-Miller 应变-寿命公式为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = C_3 \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N)^b + C_4 \epsilon'_f (2N)^c \quad (3)$$

式中: σ_m 为平均正应力; C_3 、 C_4 为常数, $C_3=1.65$, $C_4=1.75$ 。

将车体结构主要焊接部位计算动应力幅值及与许用动应力幅值比较, 见表6所示。计算动应力幅值均小于许用动应力幅值, 并且非焊接部位计算应力幅值远小于许用应力幅值。碳纤维“三明治”复合板芯体的最大应力发生在工况3时的底架碳纤维“三明治”复合板芯体, 其最大动应力幅值为0.0504 MPa, 小于该材料通过试验测得的疲劳极限0.15 MPa^[6]。因此, 测试结果表明车体结构能满足疲劳强度设计要求。

根据上述结构设计制造高速磁浮列车头车车体后, 车体的实际称重质量为5720 kg。在车体加长690 mm的基础上与既有上海示范线运营的高速磁浮列车车体(等断面, 含前端车体长27080 mm)对比实现减重

6.7%, 同时满足车体结构强度、疲劳设计指标要求, 达到了预期的轻量化设计目标。

表6 焊接部位动应力幅值比较

Table 6 Comparison of dynamic stress amplitude across welding positions

序号	焊接部位	焊接形式	计算最大应力幅值 /MPa	许用最大应力幅值 ^[7] /MPa
1	窗角	角焊	6.1	18.8
2	门角	角焊	10.7	18.8
3	地板	缝焊	7.4	32.3
4	车顶/上边梁	缝焊	5.0	32.3

5 结束语

本文设计研发的高速磁浮列车车体由铝合金骨架与碳纤维“三明治”复合板组成, 部件之间采用胶铆连接, 轻量化效果明显, 比上海示范线商业运营磁浮列车质量减小6.7%。采用板壳单元模拟铝合金结构与碳纤维“三明治”复合板、实体单元模拟芯体、梁单元模拟铆钉, 建立高速磁浮复合材料车体有限元模型。在垂向载荷工况下, 车体下弦梁挠度最大值为1 mm; 整备车体一阶垂向弯曲振动频率为7.88 Hz; 静态载荷与疲劳载荷作用下, 车体各部件应力计算值均小于许用值。参考高速磁浮加载规范和EN 12663标准的载荷对磁浮车体结构进行了性能分析与验证, 可用于指导高速磁浮列车车体结构设计。考虑到车体大量应用铆接工艺, 后续还应对应部件连接铆钉进行强度分析, 进一步提高磁浮列车强度性能。

参考文献:

- [1] 严陆光. 关于我国高速磁悬浮列车发展战略的思考[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 40-46.
YAN Luguang. Consideration on the development strategy of high-speed maglev in China[J]. Strategic study of Chinese academy of engineering, 2002, 4(12): 40-46.
- [2] PALMER C. Engineered to go fast, maglev trains inch forward[J]. Engineering, 2021, 7(7): 891-893.
- [3] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.
- [4] 李戈辉. 碳纤维复合材料铺层优化研究及在磁悬浮车体中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LI Gehui. Research on the optimization of carbon fiber composite laminate and its application in maglev car body[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [5] 谭艳, 姚召定, 陈火天, 等. 中速磁浮列车轻量化车体夹层

复合材料研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(5): 79-82.

TAN Yan, YAO Zhaoding, CHEN Huotian, et al. Sandwich composite for lightweight car body of medium speed maglev train[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2022, 45(5): 79-82.

- [6] 王国静. 磁浮车车顶结构轻量化设计[J]. 机车车辆工艺, 2022(1): 8-10.
WANG Guojing. Lightweight design of the roof structure of maglev vehicles[J]. Locomotive & rolling stock technology, 2022(1): 8-10.
- [7] 王人鹏, 周勇, 程玉民. 复合材料磁悬浮列车车体结构数值模拟(III)——车体结构性能的参数化数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2020(1): 52-56.
WANG Renpeng, ZHOU Yong, CHENG Yumin, et al. Numerical simulation on composite vehicle structure of maglev train(III): parametric numerical simulation of vehicle body structure performance[J]. Computer aided engineering, 2020(1): 52-56.
- [8] KIM J, LEE S, SHIN K. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody[J]. Composite structures, 2007, 78(4): 468-476.
- [9] KIM J S, JEONG J C, LEE S J. Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train[J]. Composite structures, 2007, 81(2): 168-175.
- [10] 俞程亮. 三明治复合板结构高速磁浮列车承载结构优化研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
YU Chengliang. Study on optimization for the high speed maglev car body structure with sandwich panels[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [11] 魏阜伦, 衣海娇. 碳纤维复合材料在轨道车辆应用展望[J]. 现代城市轨道交通, 2021(2): 90-93.
WEI Fulun, YI Haijiao. Application prospective of carbon fiber composite materials in rail vehicles[J]. Modern urban transit, 2021(2): 90-93.
- [12] 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.
- [13] European Committee for Standardization. Railway applications - structural requirements of railway vehicle bodies - part 1: locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons): EN 12663-1: 2010+A1: 2014[S]. Brussels: CEN, 2014.
- [14] 杜征. 基于ABAQUS的4 300 mm宽厚板支承辊有限元研究及疲劳寿命计算[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
DU Zheng. Research on backup roll for 4 300 mm wide plate mill with ABAQUS software and calculation of the

- fatigue life[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [15] 李影. 大型直线振动筛结构损伤识别及疲劳寿命预测研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- LI Ying. Research on structural damage diagnosis and fatigue life prediction of large vibrating screen[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.
- [16] 沈臻弘, 赵洪伦. 轨道车辆三明治板结构的有限元建模方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(1): 42-45.
- SHEN Zhenhong, ZHAO Honglun. Study on FEA modeling methods of sandwich panel structure for railway vehicles[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2007, 30(1): 42-45.
- [17] European Committee for Standardization. Eurocode 9: design of aluminium structures part 1-3: structures susceptible to fatigue: EN-1999-1-3: 2007[S]. Brussels: CEN, 2007.

Research on the structure and performance of carbon fiber composite carbody for high-speed maglev transportation

WANG Jianbo, SHAO Qing, LIU Haiping, REN Zhonghua, LI Gang, YU Qingsong

(Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: Maglev transportation represents a high-speed, safe, energy-efficient, environmentally-friendly, and sustainable mode of travel, with great development potential. However, the aerodynamic loads generated by maglev trains operating at speeds exceeding 600 km/h impose stringent requirements on carbody strength, creating an urgent need for relevant studies. This paper analyzed the composite carbody structure of high-speed maglev trains, and researched a novel carbody structure composed of carbon fiber composite plates and aluminum alloy profiles. Based on ANSYS, a numerical calculation model was constructed to analyze the main performance characteristics of carbodies, such as stiffness, strength and modals. These analyses confirmed compliance with the load requirements for train operation faster than 600 km/h. The simulation results indicate a maximum deflection of 1 mm at the lower chord beam under vertical load conditions and a natural vibration frequency of 7.88 Hz in the first-order vertical bending mode for carbodies under the servicing state, in alignment with the stiffness and modal requirements throughout the whole lifecycle of carbodies. Furthermore, based on the modified Brown-Miller equation for strain life, the fatigue life of the carbody structure was analyzed by applying the Fe-safe software and Tsai-Wu failure criterion. The calculations reveal that the maximum stress in the composite sandwich plates occurs at the underframe composite sandwich board under condition 3, which meets the design requirements for fatigue strength. Compared with the maglev trains put into commercial operation on the Shanghai demonstration line, the proposed carbody structure achieves a mass reduction by 6.7%. The study findings provide a theoretical basis and engineering experience for future speed increase and lightweight design of maglev trains.

Keywords: high-speed maglev; carbody structure; carbody performance characteristics; lightweight; carbon fiber composite plate; maglev train