

复合材料刹车盘的热应力分布与抗热衰退性能研究

李 杨

莱州汇众汽配有限公司 山东烟台 261400

摘要: 高速列车、重型汽车向高速、大载荷发展背景下,制动圆盘需承受摩擦产生的热应力与热衰退,传统金属制动圆盘已难满足需求。以复合材料制动圆盘为研究对象,结合实验与有限元模拟,探究热应力时空分布特征,以及材料组分、结构对热应力集中的作用机制,通过循环制动测试厘清热循环、初始温度与制动性能衰减的内在关联,研究表明,C/C-SiC复合材料制动圆盘热应力分布更均匀,1500次循环制动后摩擦系数衰减幅度低于8%,可为高性能制动圆盘设计与应用提供技术支撑。

关键词: 复合材料刹车盘;热应力分布;抗热衰退性能;有限元模拟;制动安全性

引言

随着交通领域对制动系统可靠性、耐久性要求的不断提升,刹车盘在制动过程中面临的热载荷问题日益突出,传统刹车片制备工艺,包括热压模压成型和烧结工艺,具备一定局限性。热压模压成型成本较低,难以精确控制材料的微观结构,导致摩擦性能不稳定,并且孔隙率较大,影响耐磨性。传统制备工艺在环保方面材料浪费较大,能耗较高,不利于可持续制造的发展。当前关于复合材料刹车盘的研究多聚焦于单一性能优化,欠缺热应力分布与抗热衰退性能的协同分析,本文围绕该类部件的热应力演化规律与抗热衰退机制,结合系统的理论分析、实验测试与模拟验证填补现有研究空白,为其工程应用奠定基础。

一、复合材料刹车盘相关基础理论

(一) 复合材料刹车盘的材料特性

复合材料制动圆盘的性能依赖基体材料与增强相的协同作用,当前主流品类涵盖碳纤维增强陶瓷基复合材料,即C/C-SiC、玻璃纤维增强树脂基复合材料,即GFRP及金属基复合材料,即MMC。C/C-SiC复合材料融合碳纤维的高韧性与陶瓷的耐高温特质,处于800-1200℃高温环境中依旧维持稳定力学性能,导热系数达80-120W/(m·K),远超传统铸铁制动圆盘的40-50W/(m·K),GFRP复合材料密度仅1.8-2.2g/cm³,大致为铸铁的四分之一,不过耐高温能力偏弱,一般适配常温或中低温制动场景,金属基复合材料以铝合金作为基体,掺入碳化硅颗粒实现增强,热膨胀系数能控制在10-

15×10⁻⁶/℃,切实降低热应力集中隐患,只是密度相较陶瓷基复合材料更高,约2.6-2.8g/cm³,不同复合材料的特性区别,决定它们在不同制动场景中的应用范畴,同时构成热应力分布与抗热衰退性能研究的基础。

(二) 刹车盘热应力的产生机理

制动圆盘的热应力主要来自制动过程中的“摩擦生热-热量传递-温度梯度”循环,与刹车片接触滑动摩擦时,瞬时生成的摩擦热功率可达10⁵至10⁶W,70%至80%热量由其吸收,制动圆盘结构存在厚度差异,通风孔、轮毂连接部位均属此类,且材料导热性存在各向异性,碳纤维增强复合材料沿纤维方向与垂直方向导热系数差异即达3至5倍,导致热量在其内部传递不均,形成明显温度梯度^[1]。依据热弹性理论,温度梯度会促使材料不同部位产生不均热膨胀,而制动圆盘的结构约束如与轮毂的刚性连接限制自由膨胀,进而催生热应力,热应力超过材料屈服强度或断裂强度时,制动圆盘会出现塑性变形、热裂纹等失效现象,明确热应力产生机理因此成为优化制动圆盘设计的关键。

(三) 抗热衰退性能的核心评价指标

抗热衰退能力是表征制动圆盘在长期高温制动工况中性能稳定性的关键指标,主要依托摩擦系数平稳性、磨损率及制动效能衰减幅度评价,摩擦系数是体现制动性能的核心参数,理想制动圆盘的摩擦系数应维持在0.35至0.45区间,热衰退阶段衰减幅度需控制在15%以内;磨损率直接关联使用寿命,通常以单位制动次数的质量损耗或厚度缩减量计量,优良复合材料制动圆盘磨损率应限制在5×10⁻⁷g/(N·m)以下。热恢复能力同样

是重要评价维度,制动圆盘经高温制动后冷却至常温时,摩擦系数恢复至初始值85%以上,即表明抗热衰退能力具备良好可逆性,这些维度共同构成抗热衰退性能评估体系,为实验方案设计提供清晰依据。

二、复合材料刹车盘热应力分布研究方案

(一) 实验材料与样本制备

本研究以C/C-SiC复合材料为实验载体,基材包含T700碳纤维、碳化硅粉末及酚醛树脂粘剂,碳纤维体积分数35%,碳化硅粉末纯度99.5%。试样制备采用“先驱体浸渍裂解工艺+热压烧结”组合工艺,将碳纤维编织为三维立体预制体,于80℃环境中经酚醛树脂浸渍2小时,再置于氮气保护氛围内,按5℃/min升温速率加热至1000℃完成裂解,重复浸渍-裂解流程3次以获取低密度C/C坯体;后续掺入碳化硅粉末,于1800℃温度、30MPa压力参数下热压烧结2小时,最终制得直径350mm、厚度25mm的制动圆盘试样,试样表面粗糙度控制在Ra1.6μm以内,确保制动实验中的接触稳定性,另制备同规格铸铁制动圆盘试样作为对照,用于对比热应力分布差异。

(二) 热应力测试系统搭建

热应力测试系统由制动模拟实验台、温度采集模块及应力测试模块构成,制动模拟实验台采用惯性式设计,可模拟车速0至200km/h、制动压力0至1.5MPa的工况,调整飞轮惯性矩范围50至200kg·m²模拟不同载荷条件^[2]。温度采集选用K型热电偶,测量范围0至1300℃、精度±1℃,在制动圆盘径向内、中、外半径处设为50mm、125mm、175mm,轴向表面、中间层及背面共布置9个测点,数据采集频率设为10Hz,应力测试选用高温型电阻应变片,工作温度范围-50至800℃,分别粘贴制动圆盘内、中、外半径的圆周方向与径向,共6个测试点,借助动态应变仪采集应变数据,结合C/C-SiC复合材料常温下180GPa的弹性模量计算热应力值,整个测试系统实验前需校准,温度测试误差控制在±2℃以内,应力测试误差控制在±5MPa以内。

(三) 有限元模拟模型构建

基于ANSYS Workbench软件搭建复合材料制动圆盘热-结构耦合有限元模型,模型用实体单元Solid186划分网格,制动圆盘通风孔直径10毫米、数量36个,需考量其对热量传递的影响,对通风孔周边区域加密网格,尺寸设为2毫米,其余区域网格尺寸5毫米,总单元数约8.5万个。材料参数参照实验试样,C/C-SiC复合

材料导热系数、比热容、热膨胀系数按各向异性参数设定:沿纤维方向导热系数110W/(m·K)、垂直方向50W/(m·K),比热容1.2kJ/(kg·K),热膨胀系数5×10⁻⁶/℃,边界条件:制动阶段,接触面依制动压力及摩擦系数计算施加摩擦热载荷,热流密度范围1至5×10⁶W/m²,非接触面用对流换热边界,换热系数设为20W/(m²·K);结构约束上,中心轮毂处加固定约束模拟实际安装工况,通过瞬态热分析得温度场,将其作为载荷导入结构分析模块求解热应力分布云图,为实验结果验证提供理论参照。

三、复合材料刹车盘抗热衰退性能实验分析

(一) 循环制动实验设计

为评估复合材料制动圆盘抗热衰退能力,设置循环制动实验,工况参照GB/T5763-2019《汽车用制动器衬片》标准。实验分三个阶段:初始1-500次制动,车速100km/h、压力0.8MPa,每次间隔30秒模拟常规场景;中期501-1000次制动,车速150km/h、压力1.2MPa,每次间隔20秒模拟中高强度场景;后期1001-1500次制动,车速200km/h、压力1.5MPa,每次间隔15秒模拟极端高强度场景,实验中每100次制动暂停30分钟,使其自然冷却至常温再测试,避免累积热量干扰结果,对照组铸铁制动圆盘同工况测试,确保数据可比^[3]。

(二) 实验数据采集与处理

实验数据采集包含温度、摩擦系数、磨损量三类核心参数,温度数据靠制动圆盘表面热电偶实时采集,重点记录每次制动过程中圆盘最高温度及温度峰值出现时刻;摩擦系数通过制动实验台自带扭矩传感器测算,公式为摩擦系数=制动扭矩/(制动压力×制动半径),每5次制动记录一组平均数值;磨损量采用电子天平与千分尺协同测定,电子天平精度0.1mg、千分尺精度0.001mm,每200次制动后称量圆盘质量变化,测量厚度变化取3次平均值作最终结果。数据处理阶段,借助Origin软件对摩擦系数随制动次数的变化曲线拟合,计算摩擦系数衰减率;通过磨损量与制动次数的线性关系,推算单位制动次数的磨损率,保数据准确性与可靠性。

(三) 抗热衰退性能实验结果

实验结果表明,C/C-SiC复合材料刹车盘1500次循环制动后具备优异抗热衰退性能,温度方面,初始阶段最高温稳定在350-400℃,中期升至550-600℃,后期达750-800℃,均未超材料耐高温极限;铸铁刹车盘后期最高温达950-1000℃,远超其600℃安全使用温度,摩擦系数方面,C/C-SiC刹车盘初始0.42,1500次制动后降

至0.39, 衰减率仅7.1%; 铸铁刹车盘初始0.40, 后期降至0.31, 衰减率达22.5%^[4]。磨损量方面, C/C-SiC刹车盘1500次后质量损失8.2mg, 磨损率 $4.1 \times 10^{-7} \text{g}/(\text{N} \cdot \text{m})$; 铸铁刹车盘质量损失达35.6mg, 磨损率 $1.8 \times 10^{-6} \text{g}/(\text{N} \cdot \text{m})$, C/C-SiC刹车盘热恢复性能更优, 冷却后摩擦系数恢复至初始值92%, 铸铁刹车盘仅恢复至78%, 充分证明复合材料抗热衰退优势。

四、热应力分布与抗热衰退性能的关联机制及优化建议

(一) 热应力分布对耐衰退性能的影响机制

热应力分布均匀性直接影响刹车盘抗热衰退性能, C/C-SiC复合材料刹车盘凭借高导热系数且各向异性平缓, 热应力集中于通风孔边缘与轮毂连接部位, 最大热应力值120MPa, 低于材料180MPa屈服强度, 未出现热裂纹; 铸铁刹车盘则因导热性欠佳, 热应力集中在径向外侧区域, 最大热应力值达250MPa, 远超其200MPa屈服强度, 1000次制动后即显现明显热裂纹。热应力集中会破坏刹车盘表面摩擦层结构, 引发摩擦系数波动增大与材料磨损加速, 形成“热应力集中-摩擦层失效-性能衰退”的恶性循环, 优化热应力分布、降低应力集中程度, 成为提升刹车盘抗热衰退性能的核心途径。

(二) 复合材料成分与结构的调控作用

复合材料成分与结构的合理调控可有效优化热应力分布, 增加碳纤维体积分数能提升导热性, 其占比从30%增至40%时, C/C-SiC复合材料导热系数提升25%、热应力降低18%, 但体积分数过高会增加材料脆性, 最佳范围为35%至38%^[5]。通风孔由圆形改为椭圆形, 边缘应力集中系数从1.8降至1.3; 刹车盘表面设计0.5毫米厚碳化硅涂层, 能提升表面硬度与导热性, 进一步降低

热应力, 梯度结构设计可实现热应力由表及里的梯度释放, 避免局部应力过高, 为复合材料刹车盘的成分与结构设计提供方向。

结语

本文结合理论分析、实验测试与有限元模拟, 系统研究复合材料刹车盘的热应力分布与抗热衰退性能。研究明确C/C-SiC复合材料在热应力均匀性与抗热衰退性能上的优势, 揭示二者关联机制热应力集中越低, 摩擦系数越稳定、磨损率越低。实验显示, C/C-SiC刹车盘经1500次循环制动后, 摩擦系数衰减率、磨损率均低于8%与 $5 \times 10^{-7} \text{g}/(\text{N} \cdot \text{m})$, 性能优于传统铸铁刹车盘。文中提出的成分、结构与工艺优化建议, 为其工程化应用提供可行方案, 未来可进一步探索纳米涂层影响及极端低温性能, 为性能提升提供更全面支撑。

参考文献

- [1] 范丽君. 碳/碳复合材料在飞机刹车盘中的制备工艺与性能分析[J]. 中国战略新兴产业, 2024, (08): 118-120.
- [2] 曹福新, 周长江, 周元学, 等. 新型复合材料刹车片的制备与性能优化研究[J]. 汽车工艺师, 2025, (06): 6-9+14.
- [3] 黄亚芳, 张琛, 张利敏. 汽车高碳刹车盘的生产工艺研究[J]. 模具制造, 2025, 25(06): 132-134.
- [4] 迟波, 于博. 碳/碳复合材料的发展及应用研究[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(04): 76-80.
- [5] 施伟伟, 胡海洋, 周蕊, 等. 国产飞机炭刹车盘的制备及性能研究[J]. 炭素技术, 2023, 42(02): 61-63.