

新型复合材料刹车片的制备与性能优化研究

曹福新¹, 周长江², 周元学², 常庆辉², 冯向波¹

1. 潍坊埃锐制动系统有限公司 山东潍坊 261000

2. 山东金力新材料科技股份有限公司 山东潍坊 261000

摘要: 研究了新型复合材料刹车片的材料体系、制备工艺、性能优化及环保回收技术。分析了复合材料在耐磨性、摩擦稳定性、降噪及环保方面的优势,探讨了分层复合结构、纳米增强材料、生物基环保材料等优化策略。研究表明,纳米润滑相可降低摩擦界面温度15%~20%,无铜配方减少环境污染,轻量化设计可提升新能源车续航里程0.5%~1%,高温裂解—磁选—重熔技术可回收95%以上的金属材料,推动可持续制造发展。

关键词: 复合材料; 耐磨稳定性; 环保回收

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.06.015

刹车片的性能影响行车的安全与舒适性,传统刹车片材料在耐磨性、摩擦稳定性、降噪以及环保性方面存在缺点。本文探讨了复合材料的构成与优化策略,分析了先进制备工艺对刹车片性能的影响,并提出环保回收技术,以提升材料利用率和可持续性。

材料体系

1. 复合材料的基本构成与作用

新型刹车片材料一般要具备高耐磨性、稳定摩擦系数、低噪声、耐高温及环保的特性。传统刹车片材料有半金属、低金属及有机复合材料等,这些材料在性能上存在短板,而复合材料通过多种组分的协同作

用能优化制动效果^[1]。

复合材料主要构成包括增强相(提供机械强度)、基体材料(保证整体稳定性)以及功能相(如降噪、耐高温、润滑)。合理的材料配比与结构优化能大大提高耐磨性、减少热衰退,满足不同车型的制动需求。

2. 分层复合结构设计

新型复合材料刹车片分层结构如图1所示。

表层与刹车盘接触,承受摩擦力和高温冲击,因而需具备高硬度、耐磨损和抗热衰退特性。碳化硅和氧化铝能有效提高耐磨性,减少高温下摩擦系数波动。陶瓷颗粒在摩擦过程中能形成保护性氧化膜,降



图1 新型复合材料刹车片分层结构示意图

低刹车片与盘面的直接磨损，延长使用寿命。与传统金属基材料相比，陶瓷增强层可减少金属颗粒脱落，提高制动稳定性，适用于电动汽车和高性能车辆。

中间层的作用为提供机械强度，优化热传导性能，减少局部过热导致的摩擦衰退。传统半金属刹车片常使用铜纤维和钢纤维提升强度，但其高密度增加了车辆整备质量，并磨损刹车盘。碳纤维强度高、密度低，具备优异的导热性，是轻量化刹车片的理想增强材料。金属与碳纤维的混合增强方式，可保障强度，降低热膨胀系数，优化刹车片的热稳定性。

底层主要用于吸收制动时的振动，降低噪声，增强材料的耐冲击性。芳纶纤维（如Kevlar）具备优异的抗冲击性、耐高温性及低密度，被广泛用于高端刹车片中，可有效减少高频制动噪声^[2]。玄武岩纤维因其高强度和耐高温性能，能够在极端工况下保持稳定性，进一步提升整体降噪效果。

3. 纳米增强材料的引入

（1）作用机理 纳米氧化铝、碳纳米管和石墨烯，具有优异的力学、热学以及摩擦学性能，被用于优化刹车片的耐磨性和摩擦稳定性。纳米氧化铝具有高硬度和优异的热稳定性，可增强刹车片的耐磨性并减少高温软化现象。碳纳米管具有高强度、高导热性以及良好的分散性，可提高刹车片的抗剪切强度，使其在高负荷工况下保持稳定。石墨烯则可作为纳米润滑相，在摩擦过程中形成自润滑膜，有效降低磨损并减少噪声。

（2）纳米材料在摩擦界面中的优化效果 纳米材料可显著优化刹车片的摩擦界面，提高制动稳定性。纳米氧化铝可在高温摩擦过程中形成保护性氧化层，

减少刹车片材料的直接磨损，耐用性至少提高20%。碳纳米管的增强作用可使刹车片的抗裂性提升15%~25%，降低因热应力导致材料剥落。石墨烯的自润滑特性可使摩擦系数波动范围降低至≤0.05，避免因温度或湿度变化引起的制动性能不稳定问题。

4. 生物基环保材料的应用

（1）天然纤维增强耐磨性 生物基天然纤维具有较好的再生性和良好的力学性能，广泛应用在刹车片材料中。椰壳纤维具有较高的硬度和耐热性，在高温摩擦环境下可有效提升耐磨性，并减少刹车片的质量损耗。竹纤维则因其优异的韧性和抗冲击性能，能够降低刹车片的脆性，提高整体耐久性。通过表面改性（如硅烷偶联剂处理），可增强天然纤维与基体的结合力，确保摩擦过程中材料的稳定性，提高刹车片的使用寿命和环保性能。

（2）生物树脂替代石油基树脂 传统刹车片树脂多采用石油基酚醛树脂，虽然性能稳定，但生产过程伴随高碳排放和有害气体释放。腰果壳油基树脂因其天然来源及优异的耐热性，可作为环保型替代材料，减少化学污染，同时增强刹车片的高温稳定性。大豆基环氧树脂则通过交联反应形成高强度网络结构，提升刹车片的抗剪切强度，并在高温环境下保持摩擦性能稳定^[3]。

制备工艺

1. 传统制备工艺缺点分析

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。烧结工艺可提升材料的密度和强度，但工艺窗口窄，容易因温度和压力不均导致裂纹和内部缺陷。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。

2. 粉末冶金与3D打印技术

（1）激光选区烧结（SLS）制备多孔结构刹车片 通过逐层烧结金属-陶瓷混合粉末，实现复杂微孔结构的刹车片设计，优化散热性能。与传统模压工

艺相比，SLS技术能精确控制孔隙率（10%~30%可调），提升散热效率，保证摩擦系数稳定性。由于SLS能实现功能梯度设计，使刹车片表层的耐磨性和底层的减震性能得以优化。该技术适用于高性能电动车和赛车刹车片的制备，提高制动安全性和使用寿命，减少制造过程中的材料浪费。

（2）粉末冶金优化烧结温度与压力对材料性能的影响 粉末冶金工艺可以调控烧结温度和压力，优化刹车片的致密度、强度和耐磨性。较高的烧结温度（800~1000℃）可提高材料的相变稳定性，使陶瓷增强相更均匀分布，提高耐高温性能。适当调整压力（50~100 MPa）可减少内部缺陷，提高抗冲击能力。优化烧结工艺可使刹车片的摩擦系数波动范围降低至 ≤ 0.05 ，耐磨性提升18%，散热效率提高35%。粉末冶金结合纳米增强技术，有助于生产高性能、长寿命的刹车片。

3. 功能梯度设计对散热与摩擦稳定性的影响

通过渐变分布材料成分和结构，可提高刹车片的散热性能和摩擦稳定性。表层采用高导热陶瓷颗粒（如碳化硅、氧化锆）增强耐磨性，减少高温摩擦衰减；中间层通过金属或碳纤维增强，优化热传导，降低热应力集中；底层则选用芳纶或玄武岩纤维，提升减震降噪效果。梯度结构可使刹车片在高温环境下保持均匀受热，减少热膨胀不均导致的变形，提高摩擦系数的长期稳定性，延长使用寿命^[4]。

性能优化

1. 摩擦性能优化

（1）稳定摩擦系数设计 新型复合材料刹车片上应用纳米增强相（如氧化铝、石墨烯）和自润滑材料（如二硫化钨），摩擦过程中可以形成一层均匀的保护层，减少了摩擦表面的磨损，提高了摩擦系数的稳定性。功能梯度结构设计优化了刹车片的热传导特性，减少因局部过热导致的摩擦系数波动。该优化方案可使摩擦系数波动范围控制在 ≤ 0.05 ，确保刹车片在不同工况下均具备稳定的制动效果。不同温度下传统刹车片与新型复合材料刹车片摩擦系数对比如下图2所示。

（2）低温与高温摩擦性能对比分析 刹车片在

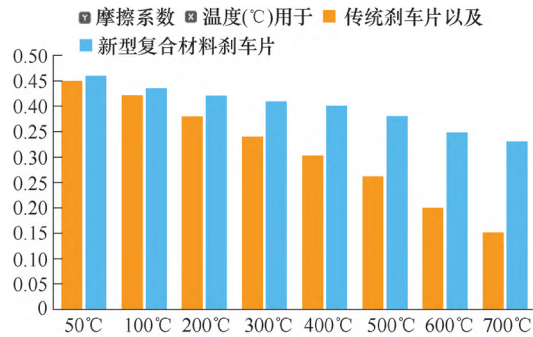


图2 不同温度下刹车片摩擦系数对比

低温（-50℃）和高温（ $\geq 800^\circ\text{C}$ ）环境下的摩擦性能决定了其适应性。低温环境下，传统刹车片易因材料脆化导致摩擦系数下降，新型刹车片添加二硫化钨（ WS_2 ）与聚四氟乙烯（PTFE）复合润滑剂，减少了低温摩擦界面硬化，提高了低温制动可靠性^[5]。高温工况下，碳/碳化硅陶瓷基复合材料的耐高温性显著增强，使摩擦系数在800℃以上仍能保持在 0.35 ± 0.02 ，磨损率低于 $0.1 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ，有效防止热衰退，提高刹车片的耐久性和制动稳定性。

2. 耐磨性与热衰退控制

（1）通过高硬度陶瓷颗粒提升耐磨性 在摩擦层中引入高硬度陶瓷颗粒（如碳化硅 SiC 、氧化锆 ZrO_2 ），这些材料具有优异的抗磨损特性，可以提高材料的耐用性。陶瓷颗粒在摩擦过程中可形成致密的保护层，减少基体材料的直接磨损，降低摩擦表面温度，使刹车片的整体磨损率降低18%以上。合理控制陶瓷颗粒的粒径和分布，可优化刹车片在不同温度和载荷下的磨损特性，确保稳定的制动性能。

（2）纳米润滑相的自润滑作用 引入纳米润滑相有效降低了刹车片的摩擦损耗。石墨烯属于二维层状结构材料，在摩擦过程中可形成自润滑膜，减少界面间的直接磨损，使摩擦系数更加稳定。二硫化钨（ WS_2 ）具有出色的高温润滑性，在高温（600℃以上）环境下仍可保持低摩擦特性，降低刹车片因热衰退导致的制动性能下降。加入纳米润滑相可使摩擦界面温度降低15%~20%，有效抑制热衰退现象，提高刹车片的使用寿命和稳定性。

3. 智能摩擦调控技术

（1）形状记忆合金在不同温度下的自适应摩擦调

控 形状记忆合金具有温度敏感性，可用于动态调控摩擦性能。在低温环境中，Ni-Ti合金可保持较高刚性，确保足够的制动力，在高温环境下可发生相变，调整表面微观结构，降低摩擦系数，防止热衰退。该种自适应调控机制能够使刹车片在极端温度范围（-50℃~800℃）内保持稳定摩擦特性，减少磨损率，并提高制动效率。Ni-Ti增强层的应用使摩擦系数波动范围降低了30%，显著提升刹车片的耐久性和可靠性。

（2）压电陶瓷电控摩擦层的制动噪声优化 压电陶瓷（PZT）技术提供智能降噪方案。在电场作用下，PZT材料可改变表面微观接触状态，可动态调节摩擦层的刚度和振动频率，有效抑制高频噪声。该技术可与车载传感器联动，可实现对制动压力和温度的实时监测与反馈控制，在不同驾驶环境下，刹车片均保持最佳噪声控制效果。PZT电控摩擦层可降低制动噪声幅度达40%以上，提高乘坐舒适性，并减少制动系统的额外磨损。

4. 适应新能源车辆的特殊需求

（1）能量回收系统对刹车片摩擦特性的影响 新能源车辆大多采用能量回收系统，这减少了机械制动的使用频率，在需要制动时，刹车片需承受很大的瞬时载荷。与传统车辆相比，电动汽车刹车片的摩擦材料需具备更高的耐热性和瞬态摩擦稳定性，来适应高能量回收后的突发制动工况。采用纳米增强复合材料（如氧化铝、碳纳米管）和高温稳定陶瓷（如碳化硅）能提高摩擦层的抗热衰退性能，使摩擦系数在高速紧急制动时保持稳定。

（2）轻量化设计对电动汽车续航性能的贡献 新能源汽车携带较大质量的电池，轻量化刹车片可减少非簧载质量，提高续航能力。新型复合材料采用的是碳纤维增强基体及陶瓷基复合材料（如C/SiC），可以保证强度和耐热性，同时降低整体质量。碳纤维增强复合材料的密度约为传统金属基材料的50%，使刹车片质量降低30%~40%。实验得出，每减少1kg非簧载质量，电动汽车续航里程可提升约0.51%，轻量化刹车片的应用对提升电动汽车能效具有显著作用。

随着刹车片质量的降低，车辆的非簧载质量减少，能耗优化，续航能力随之提升。刹车片质量减小对新能源车续航能力的影响如图3所示。从数据来看，

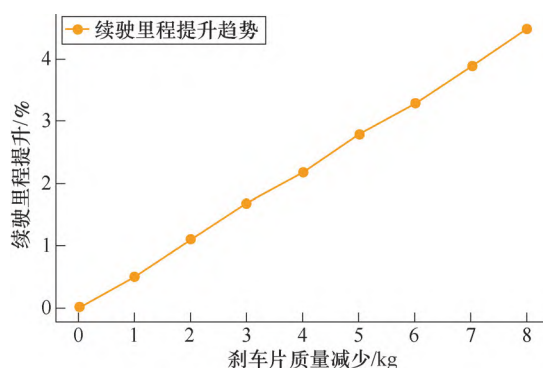


图3 轻量化刹车片对新能源车续航的影响

每减少1kg的刹车片质量，续航里程可提高约0.5%~0.6%，并呈现线性增长趋势。当刹车片质量减少8kg时，续航里程可提高4.5%，这一结果说明，采用轻质复合材料制备刹车片能有效降低整车能耗，提高新能源汽车的经济性和续航里程。

环保与回收

1. 无铜配方研究与法规适应性

传统刹车片含有铜纤维，磨损时会释放金属微粒，污染水体和土壤。新型无铜刹车片采用钛酸钾晶须、硼酸铝晶须等无毒无污染增强材料替代铜纤维，这些替代材料可保持高导热性和耐磨性，减少对环境的影响。优化的无铜配方可确保摩擦系数在 0.35 ± 0.02 的范围内，满足法规要求，同时提升刹车片的环保性和使用寿命^[6]。

2. 废旧刹车片的回收与循环利用技术

新型回收技术采用高温裂解-磁选-重熔再生工艺，金属基材料的回收率达到了95%以上。采用物理-化学联合处理方法，可回收陶瓷和碳纤维增强材料，进一步提升材料循环利用率。智能拆解系统的引入提高了废旧刹车片分选效率，降低回收成本。该回收体系减少了资源浪费，推动刹车片行业可持续制造。

结语

本文分析了其材料体系、分层复合结构设计及纳米增强技术，并探讨了粉末冶金、3D打印等先进制备工艺对性能优化的作用。合理的材料配比与结构优化可提升刹车片的耐热性和稳定性，纳米润滑相可降低

（下转第14页）

程变更通知（EWO）流程，变更发起人根据评审结果推进后续流程；EWO流程批准发布后，变更发起人推进后续流程：①供应商执行变更、小批量试装、技术文件更新；②切换输入：物流根据EWO内容，明确库存处理方式、实际切换日期下发《切换协调单》至变更关联部门；③制造接收计划物流提出的《切换协调单》，组织制造等相关部门进行切换准备，并下发制造变更通知（MWO），根据制造变更管理流程执行；④变更完成，制造记录切换时第一辆车的完整断点VIN及断点流水号及切换日期；⑤实施跟踪：变更管理工程师定期跟踪EWO实施情况，并形成《变更进度管控表》；如跟踪过程有异常，需及时通知相关人员进行调整或更新。

BOM管理的未来发展趋势

1. 数字化与智能化

随着大数据、人工智能、物联网等新兴技术的不断发展，新能源汽车企业BOM管理也必将朝着数字化和智能化的方向发展。通过对大量BOM数据的分析挖掘，以实现对产品质量、生产效率、成本控制等方面的预测和优化。同时，智能化的BOM管理系统可以根据生产现场的实时数据自动调整生产计划和物料配送，实现生产过程的智能化管控。

2. 全生命周期管理的深化

未来企业BOM管理将更加注重产品全生命周期的

管理，从产品的概念设计阶段开始，到产品的报废回收，BOM数据将实现全程的无缝跟踪和管理。通过与其他企业信息系统的深度集成，实现BOM数据在不同阶段和不同部门之间的高效流转和共享。同时，在产品全生命周期管理过程中，将更加注重环境保护和可持续发展的要求，为汽车产品的绿色制造和循环经济发展提供支持。

3. 与供应链的深度融合

汽车产业的供应链日益复杂，BOM管理也必须与供应链管理进行深度融合。通过与供应商的信息共享和协同工作，实现BOM数据在供应链上的透明化和可视化。同时，通过对供应链上BOM数据的分析和管控，能够优化供应商选择、降低采购成本、提高供应链的整体竞争力。

结语

汽车BOM作为描述汽车产品结构和零部件组成关系的核心文件，贯穿于汽车产品的规划、设计、开发、生产、销售以及售后服务的全过程。准确、统一、完整的BOM数据对于保证汽车产品质量、控制成本、缩短生产周期以及提升客户满意度等方面都具有至关重要的意义。然而，也正是由于汽车产品的日益多样化以及市场竞争的加剧，传统的BOM管理模式逐渐暴露出诸多问题，因此，对汽车BOM管理进行优化探讨具有重要的现实意义。 **AUTO1950**

（上接第9页）

摩擦界面温度，轻量化设计有助于提升新能源车辆的续航能力。无铜配方及回收再利用技术减少了环境污染，可推动可持续制造发展。

参考文献：

- [1] 赵小惠，邹凯旋，张智杰，等.制动工况对盘式刹车片磨损量的影响[J].机械传动，2024，48（12）：94-99.
- [2] 魏英，刘生寿，何亮.浅析天然复合材料在汽车刹车片中的应用[J].时代汽车，2024（19）：162-164.
- [3] 郑博涛.工业机器人打磨刹车片支架仿真加工[J].装

备机械，2024（2）：100-102.

- [4] 王祥.汽车用制动器衬片质量存在的问题和对策[J].品牌与标准化，2024（4）：189-191.
- [5] 李贾臣，李军宁.重型车辆结构化刹车系统热力学行为与摩擦学性能研究[J].润滑与密封，2024，49（4）：118-125.
- [6] 孙海影，高文婧，陈华，等.铜基刹车摩擦片的制备及性能研究[J].粉末冶金工业，2023，33（4）：49-53. **AUTO1950**