

制动器异响故障成因及整改措施研究

曹滨滨

湖北航特科技有限责任公司 湖北 荆门 448124

摘要：制动器异响是车辆使用中最常见的故障之一，严重影响驾驶舒适性和产品口碑。本文系统阐述了制动异响的分类与评价方法，从摩擦学角度分析了粘滑振动、负阻尼效应、模态耦合及转移膜等核心机理，深入剖析了摩擦材料、制动盘、卡钳及系统匹配等因素对异响的影响。在此基础上，从材料优化、制动盘改进、硬件升级、系统匹配及工艺控制五个维度提出针对性整改措施，以期对制动器异响问题的诊断与治理提供系统性的技术参考。

关键词：制动器；异响故障；整改措施

引言：制动器异响是车辆最常见的故障之一，虽通常不影响制动安全性，但高频尖叫声或低频颤动严重影响驾乘舒适性，也是用户投诉的重灾区。异响成因复杂，涉及摩擦材料、制动盘、卡钳结构、装配工艺及使用工况等多重因素，不同频率范围的异响对应不同激发机理，给诊断整改带来极大困难。近年来，随着用户对NVH性能要求的提升，制动异响问题日益受到主机厂和供应商的高度重视。本文系统梳理制动异响的分类与机理，深入分析故障成因，并提出可操作的整改措施。

1 制动异响的分类与特征

1.1 按发生条件分类

制动异响可按制动工况、车速范围和温度区间分类。按工况，分为低速轻制动异响（车辆即将停止时的尖叫声）、中速制动异响、倒车制动异响及冷热态异响。按车速，低频异响（10-300Hz）表现为制动抖动，与制动盘厚度不均或端面跳动相关；中频异响（300-5000Hz）是最常见的制动尖叫，由自激振动引发；高频异响（5000-15000Hz）刺耳尖锐，与摩擦材料表面高频模态有关。按温度，低温异响多见于冷态初段，高温异响则与热衰退或转移膜破坏相关。准确识别异响的发生条件，是故障诊断的第一步，也是制定针对性整改方案的前提。

1.2 按产生机理分类

按产生机理，制动异响分为摩擦诱发振动、结构共振和瞬态冲击噪声三类。摩擦诱发振动是主要类型，因摩擦系数随速度变化呈负斜率特性，引发系统自激振动，表现为尖叫声。结构共振是部件固有频率与外部激励耦合，导致振动放大，表现为特定工况下的强烈异响。瞬态冲击噪声包括制动片接触瞬间的“咔嚓”声、片在卡钳内窜动的金属撞击声等，与配合间隙过大或弹性元件失效相关。三类机理可能单独作用或相互叠加，使异响问题更加复杂。从机理入手分析，有助于精准定

位故障根源，避免盲目更换零件^[1]。

1.3 异响评价方法

制动异响评价分为主观评价和客观测量两类，主观评价由专业人员在不同工况下试车，根据响度、频率、持续性等打分，常用标准包括SAE J2521、AK-Master等。主观评价接近真实用户体验，但结果因人而异。客观测量采用麦克风和加速度传感器，在试验台或实车上采集信号，通过频谱分析、模态分析等手段提取异响特征。常用评价指标包括异响发生概率、最大声压级及主要频率成分。客观测量可精确定位异响频段和模态，为整改提供数据支撑。将主观评价与客观测量相结合，是当前行业通行的高效诊断模式。

2 制动异响的摩擦学机理

2.1 粘滑振动理论

粘滑振动是解释制动低频噪声的经典理论，其核心在于摩擦副表面交替经历“粘附”与“滑动”两个阶段。当静摩擦系数高于动摩擦系数时，制动片与制动盘在微观接触点先粘附，弹性变形积累能量；当剪切力超过临界值后突然滑动释放能量，随后再次粘附，形成周期性振动。该振动频率较低，表现为颤振或嘎嘎声。粘滑振动受摩擦材料表面粗糙度、润滑状态、正压力及系统刚度等因素影响。提高系统刚度、降低静动摩擦系数差异是抑制粘滑振动的有效手段。在摩擦材料中添加固体润滑剂可稳定摩擦系数，减少粘滑倾向。理解粘滑机理对解决低速制动抖动问题具有重要指导意义。

2.2 负阻尼效应

负阻尼效应是解释制动尖叫的核心理论之一，当摩擦系数随滑动速度增大而减小时，系统进入负阻尼状态，振动不仅不会被消耗，反而会从摩擦界面持续吸收能量，使振幅不断放大直至形成自激振动。负阻尼效应与摩擦材料配方密切相关，半金属材料在高速度、高温

度下容易出现摩擦系数负斜率,陶瓷材料则相对稳定。负阻尼振动频率通常落在1-8kHz中高频范围,人耳最为敏感。通过惯量试验台进行拖曳试验,可提取摩擦系数-速度曲线。选用摩擦系数随速度变化平缓的材料配方,是抑制负阻尼尖叫的根本措施之一。

2.3 模态耦合机理

模态耦合是指制动器两个或多个结构模态在摩擦力作用下发生耦合,形成不稳定振动。制动器总成包含制动盘、卡钳、支架、摩擦材料等多个弹性体,各有其固有频率和振型。当摩擦力将两个独立模态耦合时,振动能量可在不同模态间转移,其中一模态从摩擦力中吸收能量,另一模态向外辐射声能,形成自激振动,表现为尖锐的制动尖叫。有限元模态分析是识别模态耦合风险的有效工具,通过计算复特征值判断系统不稳定倾向^[2]。解决思路包括:改变部件刚度以错开模态频率、增加阻尼材料、优化摩擦材料接触压力分布。模态耦合机理揭示了制动异响不仅是摩擦问题,更是结构动力学问题。

2.4 摩擦材料转移膜

摩擦材料转移膜是制动摩擦界面上由磨屑沉积形成的动态薄层,其厚度、均匀性、附着力直接影响摩擦系数稳定性和噪声表现。理想的转移膜应薄而均匀,能稳定摩擦系数、抑制振动;过厚或不连续的转移膜则会导致摩擦系数波动,诱发粘滑和尖叫。转移膜形成受制动温度、压力、滑动速度及材料配方影响。新制动片初期噪音较高,正是因转移膜尚未建立均匀。制动盘表面粗糙度和清洁度也显著影响转移膜附着能力。通过磨合工艺促进均匀转移膜形成、使用表面处理技术的制动盘、或在材料中添加成膜助剂,均可改善异响。理解转移膜机理有助于从界面动力学角度优化制动副匹配性。

3 异响故障的成因分析

3.1 摩擦材料因素

摩擦材料是影响制动异响的首要因素,配方中增强纤维的种类与含量、粘结剂热稳定性、填料粒径分布及润滑剂比例,直接影响摩擦系数的稳定性和速度敏感性。半金属材料导热性好但摩擦系数随速度变化明显,易在高速轻制动时产生尖叫;少金属和NAO材料较柔和,但高温下摩擦系数衰减较快。材料硬度过高会增加振动传递刚性,过低则导致压力分布不均。孔隙率不均会造成局部热点,诱发热弹性不稳定。生产工艺中的压制压力、温度曲线、热处理也会影响材料内应力和密度均匀性。优化材料配方和严格控制生产工艺,是从源头解决异响问题的根本性措施。

3.2 制动盘因素

制动盘的几何精度和表面状态对异响有显著影响,端面跳动超差会激发低频振动;厚度不均会产生制动力矩波动,表现为制动抖动。摩擦面粗糙度决定转移膜的初始附着能力,过光滑不利于转移膜形成,过粗糙则加速磨损。热变形是高温制动后产生异响的主因,会导致局部接触压力集中,诱发模态耦合。灰铸铁因其良好的导热性和阻尼性能仍是主流选择,但石墨形态对阻尼有直接影响。若制动盘固有频率与摩擦材料模态频率耦合,会在特定车速下出现强烈尖叫。提高加工精度、优化散热结构、采用划线打孔或涂层等表面处理技术,是减少制动盘诱发异响的有效措施^[3]。

3.3 制动卡钳与支架因素

卡钳和支架的结构刚度及运动灵活性是影响异响的重要因素,卡钳刚度不足会导致弹性变形,改变摩擦材料压力分布,诱发模态耦合。导向销卡滞使卡钳无法对中,摩擦材料偏磨产生不规则振动。活塞回位不畅会导致拖滞,产生低频鸣叫。消音片失效会降低高频振动吸收能力。制动片弹簧片松动或缺失,会在制动接合瞬间产生金属撞击声。卡钳与支架配合间隙超标同样会产生异响。定期检查导向销润滑、更换老化消音片、确保卡钳安装扭矩达标,是消除结构类异响的关键。

3.4 制动系统匹配因素

制动系统匹配性是易被忽视的异响成因。摩擦材料与制动盘的配对是核心,不同厂家、牌号之间存在“配伍性”差异,更换非原厂配件后的异响往往源于匹配不当。接触面积覆盖率不足会导致局部压力过高,诱发高频振动。制动系统与悬架、转向系统的耦合也不容忽视,悬架刚度、衬套特性影响振动传递路径。整车声学灵敏度也是因素,防火墙隔音不足使噪声更易传入驾驶舱。开发阶段通过系统级NVH仿真和整车道路试验验证匹配效果,可大幅降低量产后的异响投诉率。售后市场应优先选用原厂配套或经过匹配验证的替换件,避免不同品牌零件混用。

4 整改措施

4.1 摩擦材料优化

摩擦材料优化是解决制动异响的根本性措施,调整增强纤维的种类与比例,减少钢纤维、增加芳纶浆粕或陶瓷纤维,以降低刚性模量、减少振动传递。添加云母、蛭石等减振填料可增加材料内耗,吸收高频振动能量。优化润滑剂粒径和含量,使摩擦系数-速度曲线趋于平缓,降低负阻尼效应。改进粘结剂热稳定性,避免高温分解导致性能突变。工艺层面,优化压制压力和温度曲线,确保密度均匀、消除内应力。增加热处理工序

使粘结剂充分固化,控制孔隙率在合理范围内避免局部热点。产品定型前需进行全面的NVH台架测试,涵盖不同温度、压力、速度工况,确保异响发生概率低于目标值。对于已量产的异响问题,可采用更低硬度、更高阻尼的“软配方”替代方案。

4.2 制动盘优化

制动盘优化应从几何精度、表面处理和结构设计三方面入手。几何精度方面,端面跳动应不超过0.05mm,厚度差控制在0.01mm以内,这是消除低频抖动的先决条件,采用双端面磨削工艺可提高平行度。表面处理方面,划线或打孔设计可排出摩擦粉尘、保持界面清洁、降低摩擦系数波动,划线方向应与旋转方向匹配。表面涂层技术可促进均匀转移膜形成、缩短磨合期。结构设计方面,优化散热筋提高散热效率、减少热变形;采用高碳灰铸铁提升阻尼性能;在制动盘外缘增加阻尼环或粘贴减振贴片,吸收特定频率振动能量。后市场维修中,若制动盘跳动超差或表面严重磨损,应直接更换新盘而非车削修复,以免破坏平衡^[4]。

4.3 卡钳与硬件优化

卡钳与硬件优化重点在于提高刚度、保证运动灵活性和增强阻尼。卡钳刚度方面,采用有限元分析优化结构,增加加强筋或改用整体式设计,提高弯曲刚度、减少弹性变形;可选用高强度铸铁或铝合金替代普通铸铁。导向销方面,选用表面涂层处理的高精度导向销,配合耐高温润滑脂,每2万公里或每次更换制动片时进行清洁润滑,确保橡胶护套完好。消音片采用多层复合结构增加阻尼层厚度,必要时涂覆阻尼胶。制动片弹簧片选用高弹性不锈钢材料。活塞需确保密封圈弹性良好、回位顺畅。卡钳与支架配合间隙应控制在设计范围内,必要时加装弹性垫片。售后维修建议整套更换卡钳维修包,包括导向销、润滑脂、防尘套和消音片。

4.4 系统匹配优化

系统匹配优化是从整车层面解决异响的系统性方法,新车型开发阶段应开展摩擦材料与制动盘的组合测试,筛选最优匹配组合,而非分别采购单独合格的零件。建立制动器总成NVH性能数据库,积累不同材料配对的异响数据。整车层面,优化悬架衬套刚度、调整振动传递路径,降低制动振动向驾驶舱的传递效率;增加

防火墙隔音材料,提高驾驶舱隔声量。后市场改装应优先选用经过整车匹配验证的套装产品,避免不同品牌、材质的零件混用。建立售后异响快速诊断流程,通过更换已知优良状态的参考件对比测试,快速定位异响源。对于特定工况下的异响,可通过调整制动助力比或优化ABS参数,改变制动压力建立速率,避开不稳定工况。系统匹配需要主机厂、供应商和售后商的协同配合。

4.5 工艺控制措施

工艺控制是确保整改措施有效落地的保障。制造环节应严格控制制动片压制的温度、压力和时间参数,确保批次一致性;定期校验热处理炉温均匀性;制动盘加工在线检测端面跳动和厚度差,不合格品自动剔除。装配环节使用自动定量注脂设备,检查消音片粘贴牢固度和钢背毛刺,螺栓按规范顺序拧紧并标记扭矩线。维修环节制定标准化作业指导书,对导向销清洁润滑、更换消音片、清洁安装面,维修后进行磨合试车。建立维修质量追溯机制,持续改进工艺。工艺控制的精细化程度,直接决定整改措施能否长效可靠。

结束语

制动器异响是摩擦学、结构动力学与材料科学交叉作用的复杂问题。本文从异响分类与评价入手,阐述了粘滑振动、负阻尼、模态耦合及转移膜等核心机理,分析了摩擦材料、制动盘、卡钳及系统匹配对异响的影响。整改须从材料优化、制动盘改进、硬件升级、系统匹配及工艺控制五个维度协同推进,单一措施难以根除问题。随着电动汽车普及和用户NVH要求提升,制动异响将面临更高标准。未来,基于数字孪生的虚拟开发与人工智能辅助故障诊断,有望为异响治理提供更高效的技术路径。

参考文献

- [1]朱开勇.地铁车门制动器故障分析及LS锁改造[J].今日制造与升级,2025(1):188-190,205.
- [2]马建国,薛晨.风电机组偏航制动器工作原理及解决措施[J].设备管理与维修,2022(11):84-86.
- [3]程诗瀚,杨远渊,黄峻.盘式制动器振动异响问题研究[J].汽车制造业,2022(2):26-27,30.
- [4]朱伯承,周宗成,辛庆锋,等.纯电乘用车倒车制动异响工况复现测试分析[J].设备管理与维修,2024(20):23-27.