

交变磁场对制动器摩擦噪声抑制的试验研究

鲍久圣, 董慧丽, 阴妍, 郭超勋, 赵少迪, 艾俊伟

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 基于摩-磁复合盘式制动器和模拟制动试验台, 分析了不同磁场参数与制动器摩擦噪声及摩擦磨损行为之间的非线性映射关系, 讨论了交变磁场对制动器摩擦噪声的抑制机理。结果表明: 磁场可明显抑制制动器摩擦噪声的产生, 其中磁感应强度的改变对降噪效果更为明显; 低频磁场对噪声有较好抑制作用, 但磁场频率过高反而可能会加剧噪声的产生。磁场具有稳摩降噪、润滑降噪和磁致伸缩的作用机制, 其根本原因是改善了界面摩擦磨损特性, 增加了氧化磨损的比例, 磨屑被细化后充当了固体润滑剂的作用, 使得摩擦界面趋于稳定从而达到降噪的效果。研究结果解释了磁场作用下制动器摩擦噪声的发生规律及抑制机理, 可为未来利用磁场治理制动器摩擦噪声污染奠定理论基础。

关键词: 降噪; 盘式制动器; 摩擦噪声; 磁感应强度; 磁场频率

中图分类号: TB535; U463.51; TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0838-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.021

引言

制动摩擦噪声是城市噪声污染的重要组成部分, 严重影响着人们的正常生活^[1]。随着汽车数量的迅速增长, 大中城市交通拥堵越发严重, 频繁的起步和刹车大大增加了制动噪声的产生。影响制动摩擦噪声的因素较复杂, 且噪声本身具有较大的瞬时性和随机性, 故制动噪声的抑制成为目前国际性难题^[2]。汽车制动引起的噪声通常被分为抖动、颤振和尖叫等。其中, 制动尖叫作为一种典型的技术难点, 具有频率高(1000-16000 Hz)、声压级高(60-120 dB)、瞬时性等特点。据统计, 制动尖叫在用户对汽车制动器的申诉中所占比例高达 60%, 各大车企每年有近 20% 的研发费用均消耗在解决振动及噪声问题上^[3]。因此, 研究如何抑制制动噪声是汽车行业发展中亟待解决的问题。

国内外学者在抑制制动噪声领域进行了深入研究, 例如, Xu 等^[4]利用仿真和试验相结合的方法, 提出从改变摩擦片的材料和制动系统设计两个角度抑制摩擦噪声。管迪华等^[5]得出材质较软、摩擦因数较小、长而窄的摩擦片能起到抑制摩擦噪声的作用。盖小红等^[6]、莫继良等^[7]证明沟槽的存在可打断摩擦界面连续接触, 抑制摩擦尖叫噪声效果。陈光雄等^[8]发现当金属-金属摩擦副出现高声强级的摩擦

噪声时, 其表面磨痕形貌出现麻坑状, 犁沟出现不均匀断裂, 则摩擦副表面粗糙度较大。对于噪声抑制的研究多集中于通过增加阻尼层、修改制动器结构参数、修饰制动盘表面、改变摩擦材料等方面, 但其仅对高频噪声有较好的抑制效果, 对低频噪声的效果较差。近年来, 陆续有学者发现磁场对摩擦磨损特性和噪声有一定的抑制作用, 如魏永辉等^[9]发现随着磁导率增大, 摩擦系数和磨损率有减小的趋势; Mansori 等^[10]研究了外加磁场垂直于滑动接触面时磁化材料的滑动磨损行为; 徐敬业^[11]提出磁场可以主动实现对摩擦界面的磨屑和高低频噪声的抑制; 在文献[12-15]中, 研究人员研制了新型摩-磁复合制动器, 可实现磁场的添加及其灵活调节, 探索了导磁制动副的摩-磁耦合行为及其机理。然而目前关于磁场影响摩擦振动噪声的研究较少, 尤其对其抑制机理的研究存在很大不足。因此, 探究交变磁场对制动摩擦噪声的抑制作用具有较强的创新性和前瞻性, 且对探寻减振降噪方法具有重要的理论指导及实践意义。

针对当前研究的不足, 本文利用摩-磁复合制动性能试验台, 开展大量的制动试验, 首先重点探究磁场参数、摩擦噪声和摩擦磨损等参数之间的动态联系; 其次, 观测磁场干预下导磁摩擦片的表面形貌及磨屑分布, 并分析导磁摩擦片表面元素成分和分布, 从而深入研究磁场干预下制动摩擦噪声的发生规律及机理。

收稿日期: 2020-05-01; 修订日期: 2020-09-08

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(51875562); 江苏省高校优势学科建设工程项目

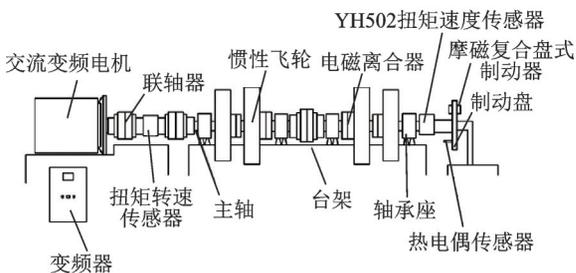
1 试验部分

1.1 试验设备

本文采用台架试验法模拟真实的制动工况,摩-磁复合制动性能试验台架如图1所示。其主要由惯量载荷系统、测控系统、动力驱动系统、液压系统、摩-磁复合制动器和台架六部分组成。通过变频器和电机控制转速的大小,采用飞轮模拟汽车后轮的转动惯量,测控系统主要用来监测信号,通过液压系统实现摩擦制动,同时向励磁线圈通电实现电磁制动。测控系统主要实现实时监测制动压力、摩擦转矩、主轴转速和声振信号,通过GB-DTS扭矩传感器测量摩擦转矩,并计算得出摩擦系数;采用AWA-14421型声学传感器和CT1010L ICP/IEPE加速度传感器实时监测声振信号,同时利用恒流适配器对声振信号分别进行放大、滤波,利用NI MCC1608G数据采集卡采集、显示和记录数据。



(a) 实物图
(a) Physical picture



(b) 结构图
(b) Structure diagram

图1 摩-磁复合盘式制动器声-振试验台架

Fig.1 Frictional-electromagnetic compound disc brake sound-vibration test bench

试验采用课题组设计的摩-磁复合盘式制动器^[16],其主要结构有:背板、励磁线圈、导磁摩擦片(特质材料)、制动钳支架、制动钳体和制动盘等,如图2所示。

背板被改造成两块,并由两个圆柱铁芯连接的结构,铁芯上缠绕线圈,每个制动器两侧分别布置2个励磁线圈,每个线圈匝数 $N=438$,铁芯直径 $d=24\text{ mm}$,长度 $l=30\text{ mm}$,通过万用表测量励磁线圈

电阻为 $7.1\ \Omega$, 24 V 交流电通过调压器、变频器、励磁线圈,产生的电流范围为 $0\text{--}5\text{ A}$;线圈通入电流后,产生的磁场可以穿过背板、铁芯和导磁摩擦片,可使磁场在制动副摩擦区域形成完整的回路,真实模拟制动器在磁场环境下工作的状态。

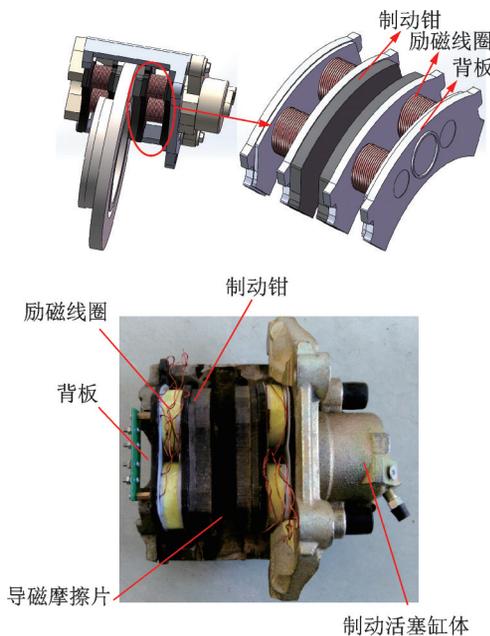


图2 摩-磁复合盘式制动器

Fig.2 Frictional-electromagnetic compound disc brake

1.2 试验方案

制动摩擦噪声本身具有不确定性、瞬时性、多变性,且制动工况的变化对其影响较大。研究表明,摩擦力、摩擦系数与摩擦噪声之间存在一定的映射关系,为全面反映噪声整体的强度和特征,采用等效连续A声级(L_{Aeq})和尖叫发生率(O_{cc})来表征噪声特性;采用摩擦系数 μ 和摩擦力波动系数 α 表征摩擦特性。通过结合制动噪声和摩擦特性,研究盘式制动器的制动摩擦噪声产生机理。

根据文献^[2,17-20]与实际工况相结合,做出以下定义: L_{Aeq} 为将噪声能量按时间进行平均,表示某段时间内非稳态噪声的声级^[17],其计算公式为

$$L_{Aeq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt \quad (1)$$

式中 L_{Aeq} 为某时刻 t 的瞬时A声级(dB(A)); T 为噪声的暴露时间(s)。

制动尖叫影响因素众多,发生机理复杂,尖叫的频率和声压级都存在固有的不可重复性、时变性、随机性和不确定性等特征,即便是制动压力、速度和温度都确定,其声压峰值也表现出很强的离散性,故尖叫发生率定义为制动试验次数中制动尖叫($L_{Aeq} > 70\text{ dB}$)发生的频次^[18-19],其计算公式如下

$$O_{cc} = \frac{m}{N} \quad (2)$$

式中 N 为制动噪声试验总次数; m 为制动尖叫出现的次数。

摩擦系数反映了制动力矩的大小,通过制动转矩的测量推算得出^[20]其计算公式为

$$\mu = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \frac{M_i}{FR_m} \quad (3)$$

式中 N' 为制动转矩采样点数; M_i 为第 i 个采样点的制动转矩(N·m); F 为制动压力(N); R_m 为有效摩擦半径(m)。

摩擦过程中,表面微凸体的非连续啮合以及形貌的起伏都会引起摩擦力的波动,其反映了制动摩擦性能的稳定性^[2],其计算公式如下

$$\begin{cases} f_i = \frac{M_i}{FR_m} \\ \alpha = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{i=n} (\bar{f} - f_i)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 f_i 为第 i 个采样点对应的摩擦力(N); \bar{f} 为摩擦力均值(N), α 为摩擦力波动系数。

(1) 不同工况下制动尖叫发生率试验方案设计

为了定量研究磁场对摩擦噪声的影响规律,选取合适的制动工况是试验方案的必要条件。通常低速阶段更易产生制动摩擦噪声,故制动初速度选取为 5, 10, 15, 20, 25 km/h。根据 GB 5763-2008《汽车用制动器衬片》,本方案选取 0.98 MPa 为制动压力参考值,考虑试验台液压泵站的能力,取制动压力分别为 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 MPa。采用正交试验法,将上述 2 因素(制动初速度和制动压力)5 水平进行排列组合、交叉分组为 25 种工况,且为确保试验数据的可靠性,在每个工况上进行了 3 次制动试验取其平均值。

为模拟真实的制动工况,排除单次制动的偶然性,本方案选取了多次连续制动,每次制动时间为 5 s,两次相邻制动时间间隔为 30 s,连续制动次数为 10 次。

(2) 不同磁场环境下制动摩擦噪声试验方案设计

在进行大量关于不同工况对制动尖叫发生率试验(具体为试验方案(1))之后,选取以下尖叫发生率较大的工况如表 1 所示。将交流电压调节至 36 V,

表 1 交变磁场下摩擦噪声的三种制动工况

Tab. 1 Three kinds of braking conditions of friction noise under alternating magnetic field

制动工况	制动压力/MPa	制动初速度/(km·h ⁻¹)
1	0.75	10
2	1.25	10
3	1.25	5

通过高斯计测量制动器摩擦接触区域的磁感应强度,其大小为 0.258 T,故选取磁感应强度分别为 0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24 T; 磁场频率为 0, 25, 50, 75, 100 Hz。

针对以上三种工况,分别研究磁感应强度和磁场频率对制动噪声的影响规律及其机理。磁感应强度过大或过小都会影响磁场频率的效果,因此依据经验选取磁感应强度为 0.18 T,研究不同磁场频率下制动噪声的变化规律;同理,选取磁场频率为 50 Hz,研究不同磁感应强度对制动噪声的变化规律。此方案采用交叉法开展试验,各 15 组试验,每组开展 20 次制动试验,每组重复 3 次。记录并整理制动噪声特征参数与摩擦特征参数等。

1.3 试验结果与分析

1.3.1 制动工况参数对制动器尖叫发生率的影响

制动压力与制动初速度是影响制动摩擦噪声的重要因素,二者共同决定了制动尖叫发生率^[21-22],其关系如图 3 所示。

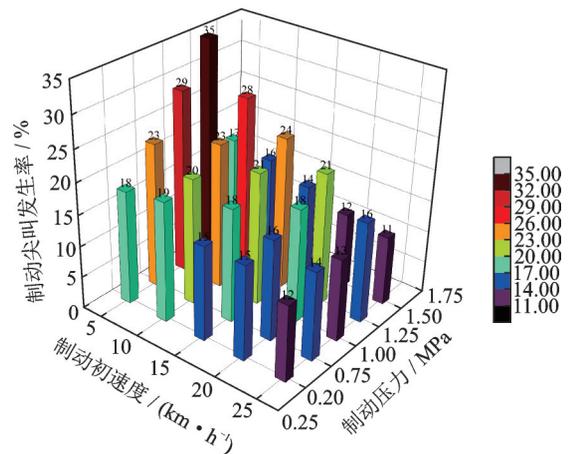


图 3 不同工况下制动尖叫发生率

Fig. 3 The incidence of braking friction noise under different working conditions

从图中可以看出,制动压力为 1.25 MPa,制动初速度为 5 km/h 时,制动尖叫发生率最大(约为 35%);制动压力为 0.5 MPa,制动初速度为 25 km/h 时,制动尖叫发生率最小(约为 12%)。不同制动工况下,制动尖叫发生率可能相近。例如,制动压力为 1 MPa,制动初速度为 10 km/h;制动压力为 0.75 MPa,制动初速度为 5 km/h;这两种工况的尖叫发生率均为 23%。

从压力维度来看,制动初速度一定时,随制动压力的增加,制动尖叫发生率表现为先增大后减小。在不同制动初速度下,制动尖叫发生率均在制动压力为 1.25 MPa 时达到最大。制动压力为 0.5-

1.25 MPa时,摩擦噪声呈较为平缓的增长趋势,这是由于随着载荷的增大,微凸体间相互啮合的程度加深,被切削和脱落的材料增加,磨损率上升,摩擦噪声随之增加;超过1.25 MPa时,制动尖叫发生率出现了急剧的下降,分析认为,随着磨粒磨屑的增多,其不断被碾压成层片状,在一定程度上减少了摩擦磨损,摩擦界面趋于稳定,由此产生的振动也会减少,摩擦噪声也随之减弱。

从速度的维度来看,制动压力恒定时,随制动初速度的增加,制动尖叫发生率基本呈现不断减小的趋势;但减小的变化率有明显的差异。制动压力为0.75,1和1.25 MPa时,变化趋势比较明显。除此之外,制动尖叫发生率在低速阶段(0-15 km/h)更为明显,当制动初速度较低时,由于制动过程时间短,摩擦片的温度突变较大,表面微凸体之间相互挤压碰撞产生强烈的局部过热形成冷焊点,发生剪切脱落,造成黏着磨损且摩擦界面不稳定,故低速制动时更容易产生噪声。同时,制动初速度较高时,磨屑的产生速度大于排出速度,磨屑产生堆积现象,摩擦表面产生三体磨粒磨损^[23],隔离了摩擦面的直接接触,摩擦界面相对稳定,摩擦尖叫发生率较小。

1.3.2 磁场参数对制动器摩擦噪声的影响

(1) 磁感应强度对制动摩擦噪声的影响研究

三种不同的制动工况下,开展磁感应强度对制动尖叫发生率、等效连续A声级、摩擦系数和摩擦力波动系数四个参数的影响规律,试验结果如图4所示。

对比图4(a)和(b),从摩擦学角度分析,摩擦系数和摩擦力波动系数在有无磁场时有很大的差异,且均随着磁感应强度的增大而减小。摩擦表征参数在不同磁感应强度下的减小速度不同。在0-0.06 T范围内,摩擦系数减小速度较慢;在0.06-0.24 T范围内,摩擦系数减小速度较快,该现象表明较小磁感应强度的磁场只能轻微的改善制动摩擦行为,对摩擦系数的影响较小。摩擦力波动系数整体趋势在减小,但趋势越来越平缓。从图4(c)和(d)中可以看出,磁感应强度越大,制动尖叫发生率越小;连续等效A声级随磁感应强度的增大明显降低。磁感应强度为0和0.24 T的试验工况,对比其制动尖叫发生率,工况1的尖叫发生率降低了25%,工况2降低了约18%,工况3降低了约8%;对比其连续等效A声级,工况1降低了12%;工况2与工况3均降低了8%。由此可见,磁场在抑制摩擦噪声产生、降低制动摩擦噪声强度方面有积极作用。

(2) 磁场频率对制动摩擦噪声的影响研究

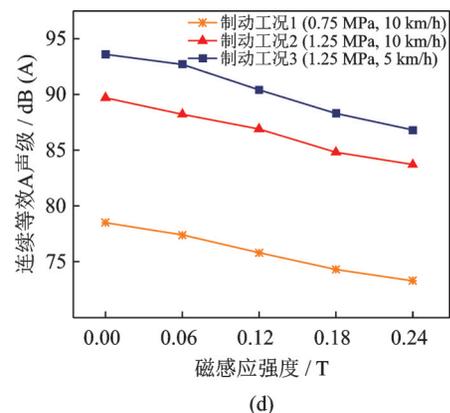
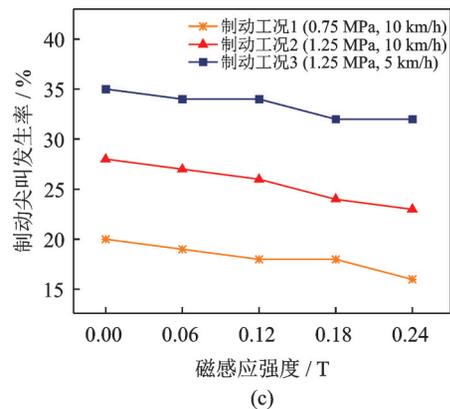
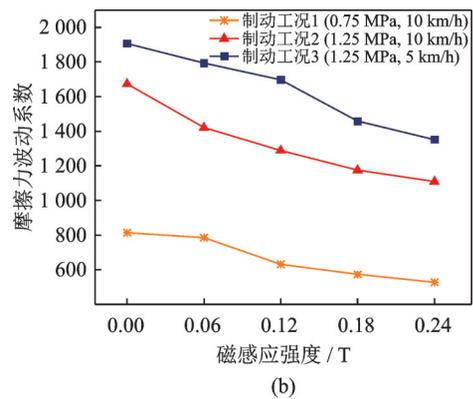
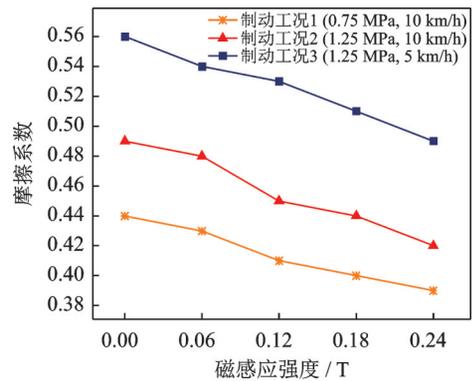


图4 不同参数随磁感应强度的变化曲线

Fig. 4 Curves of different parameters with magnetic induction

三种不同的制动工况下,开展磁场频率对制动尖叫发生率、等效连续A声级、摩擦系数和摩擦力波动系数四个参数的影响规律,试验结果如图5所示。

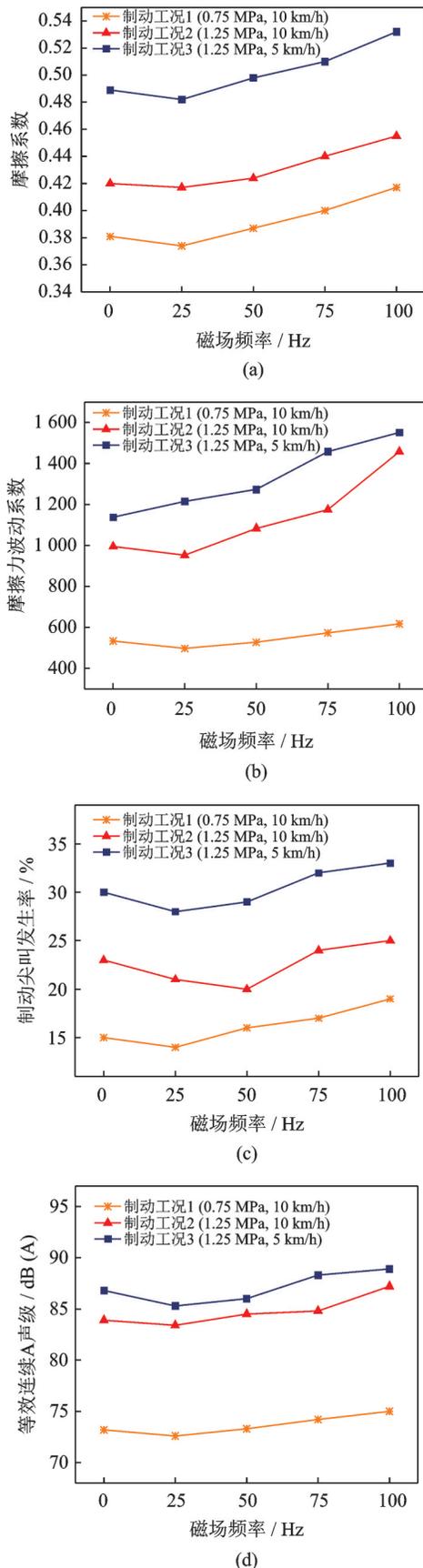


图5 不同参数随磁场频率的变化曲线

Fig. 5 Curve of different parameters with magnetic field frequency

从图5(a)可以看出,磁场频率为25 Hz时,各制动工况的摩擦系数均达到最低值;磁场频率位于25-

100 Hz时,制动摩擦系数随着频率的增加而逐渐增大。由图5(b)中可以看出,随着磁场频率的增大,摩擦力波动系数先降低后升高。工况1和工况2在磁场频率为25 Hz时,摩擦力波动系数值达到最小;在25 Hz之后摩擦力波动系数增加,摩擦系统稳定性降低。从图5(c)中可以看出,制动尖叫发生率随磁场频率的增大,其变化趋势基本呈现先减少后增加,但变化值均不明显。磁场频率在一定程度上对制动尖叫发生率有部分影响,但具有局限性。从图5(d)中可以看出,制动摩擦噪声在不同频率的交变磁场下表现出先减小后增大的趋势。三种制动工况下,25 Hz交变磁场时制动摩擦噪声强度最低,高于25 Hz以后制动摩擦噪声等效连续A声级逐渐上升。

综上所述,低频磁场噪声有抑制声压的作用,高频磁场反而增强了噪声声压的大小。磁场频率的变化对制动摩擦特征影响很小,因为磁场频率虽能改变摩擦特性,但对摩擦特征的改变幅度较小,不足以引起制动噪声强度的明显变化。

2 磁场对摩擦噪声的抑制规律及其机理研究

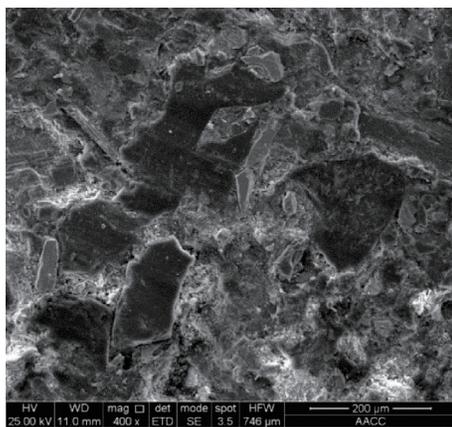
制动摩擦噪声的产生与制动副表面的磨损有关,分析摩擦副表面磨损特征及元素含量是揭示磁场对制动摩擦噪声影响机理的有效手段^[24]。虽然无法直接捕捉在磁场作用下制动过程中的摩擦学行为,但导磁摩擦片的形貌却能较好地反映以上信息。观测磨屑和摩擦面可以分析磨粒磨损的形态,摩擦片表面形态的变化是研究摩擦磨损规律和机理的关键。且摩擦片的化学成分与分布特点反映了摩擦副表面间的化学反应和元素迁移,其对摩擦机理的研究同样十分重要。本文利用SEM(扫描电子显微镜)观测导磁摩擦片的微观表面形貌特征,分析磁场下的摩擦磨损行为;利用EDS(能谱仪)和BSE(背散射电子成像技术)分析导磁摩擦片表面元素成分和分布^[25]。通过对不同磁场条件下导磁摩擦片的微观形貌、元素分布的分析,探究磁场对制动噪声的影响进而揭示其机理。

2.1 不同磁场环境下导磁摩擦片表面磨损分析

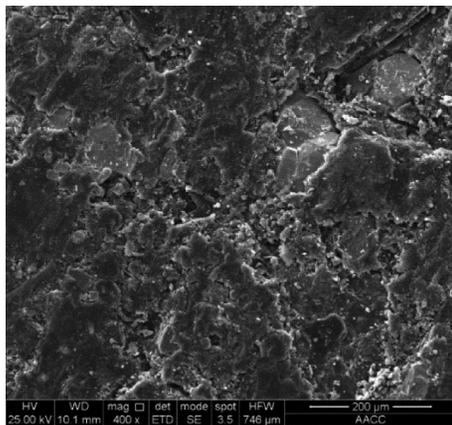
从图6(a),(b),(c),(d)可以得出,随着磁感应强度的增加,摩擦副界面的磨损状态逐渐得到明显改善。

未加入磁场环境时,图6(a)中可以清晰看到表面磨损严重,大块颗粒状摩擦材料脱落,凹坑的深度与尺寸较大,总体呈现出麻坑状,甚至部分磨屑发生聚集与黏结并被填充在凹坑中。摩擦界面的磨损过于剧烈,且此时的噪声声压最大。制动器出现噪声较大

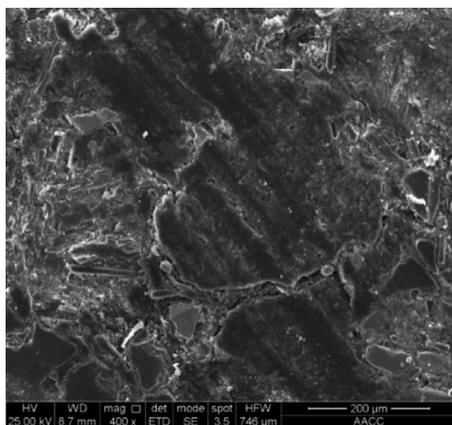
的原因在于摩擦副本身的磨损状态严重,产生制动性能衰退和颤抖现象。图6(b)中整个界面犁沟现象少量存在,但剥落区域和深度都明显减小,凹坑中存在细小的磨屑,部分颗粒被压入到摩擦界面中。除此之外,噪声降低2.8 dB。图6(c)中磨屑数量减少、尺寸较小,摩擦面由于摩擦压实作用整体较平整,犁沟排布较均匀,可明显观察到材料剥离与脱落痕迹。凹坑数量明显减少,存在部分细小颗粒,依附在表面或者被填充在沟壑中。图6(d)中没有明显大块物质脱落,只有零星凹坑分布在摩擦界面,颗粒状的磨屑均匀分布在摩擦界面,整个表面光滑致密。摩擦系统稳定性最高,有效抑制了自激振动与制动摩擦噪声的产生。



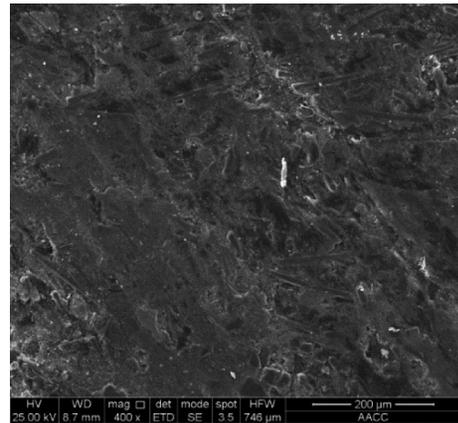
(a) $B = 0, f = 50 \text{ Hz}, L_{eq} = 89.7 \text{ dB}$



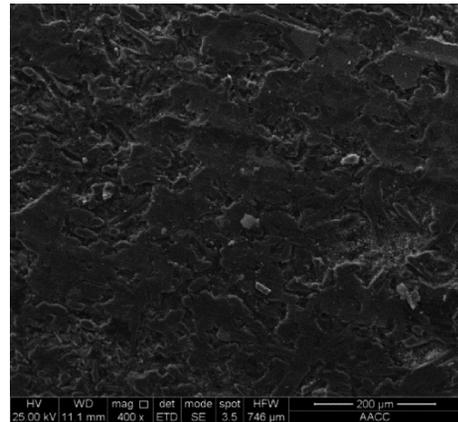
(b) $B = 0.12 \text{ T}, f = 50 \text{ Hz}, L_{eq} = 86.9 \text{ dB}$



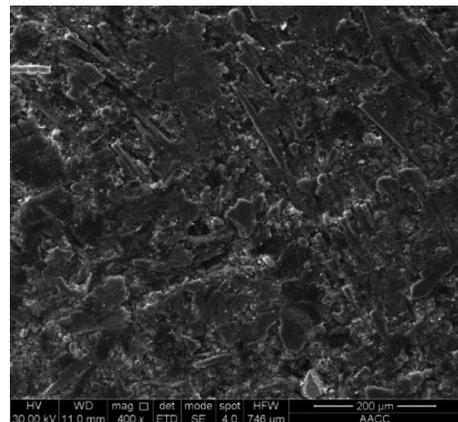
(c) $B = 0.18 \text{ T}, f = 50 \text{ Hz}, L_{eq} = 84.8 \text{ dB}$



(d) $B = 0.24 \text{ T}, f = 50 \text{ Hz}, L_{eq} = 83.7 \text{ dB}$



(e) $B = 0.18 \text{ T}, f = 25 \text{ Hz}, L_{eq} = 83.4 \text{ dB}$



(f) $B = 0.18 \text{ T}, f = 100 \text{ Hz}, L_{eq} = 84.8 \text{ dB}$

图6 不同磁场环境下的摩擦片表面形貌

Fig. 6 Worn surface morphology of magnetic conductive organic friction pads under different magnetic fields

由图6(e),(f)可以得出,磁感应强度不变时,低频磁场下,导磁摩擦片表面仅有少量凹坑,磨屑数量较少且多为细小的颗粒;高频磁场下,导磁摩擦片表面存在明显的凹坑加深,犁沟现象明显。

综上所述,磁场缓解了摩擦界面的磨损,且随着磁感应强度的增加,磁场减磨效果越明显,制动摩擦噪声也随之降低。磁场频率对摩擦片减磨效果有一定的改善效果。

2.2 不同磁场环境下导磁摩擦片表面元素分析

不同磁感应强度下导磁摩擦片磨损表面成分和磨损颗粒分析结果如图7所示,导磁摩擦片表面元素存在明显差异。随着磁感应强度的增加,氧元素所占比例增加,这说明摩擦表面的氧化磨损情况较多。磨屑作为第三体,在摩擦过程中不仅能吸收机械能,而且被反复研磨细化,导致表面积增加,较刚脱离母体时更易于氧化。同时,铁和镍的含量均随着磁感应强度的增加而增加,这说明磁场对脱落的

磨屑具有较强的吸附作用,使得磨屑被填充在凹坑中。

摩擦界面各元素的分布情况与存在形式也发生了改变。从图7中可以看出,随着磁感应强度的增加,磨屑变得更为细小,且分布更为均匀。以Fe元素为例,图7(a)中Fe元素以较大的颗粒形式存在于导磁摩擦片表面,形状不规则。图7(b)与(c)中Fe元素的颗粒明显细化,尺寸较小且均匀分布。这些现象均表明,磁场使得导磁摩擦片表面发生物理与化学变化,物质成分的比例发生变化。

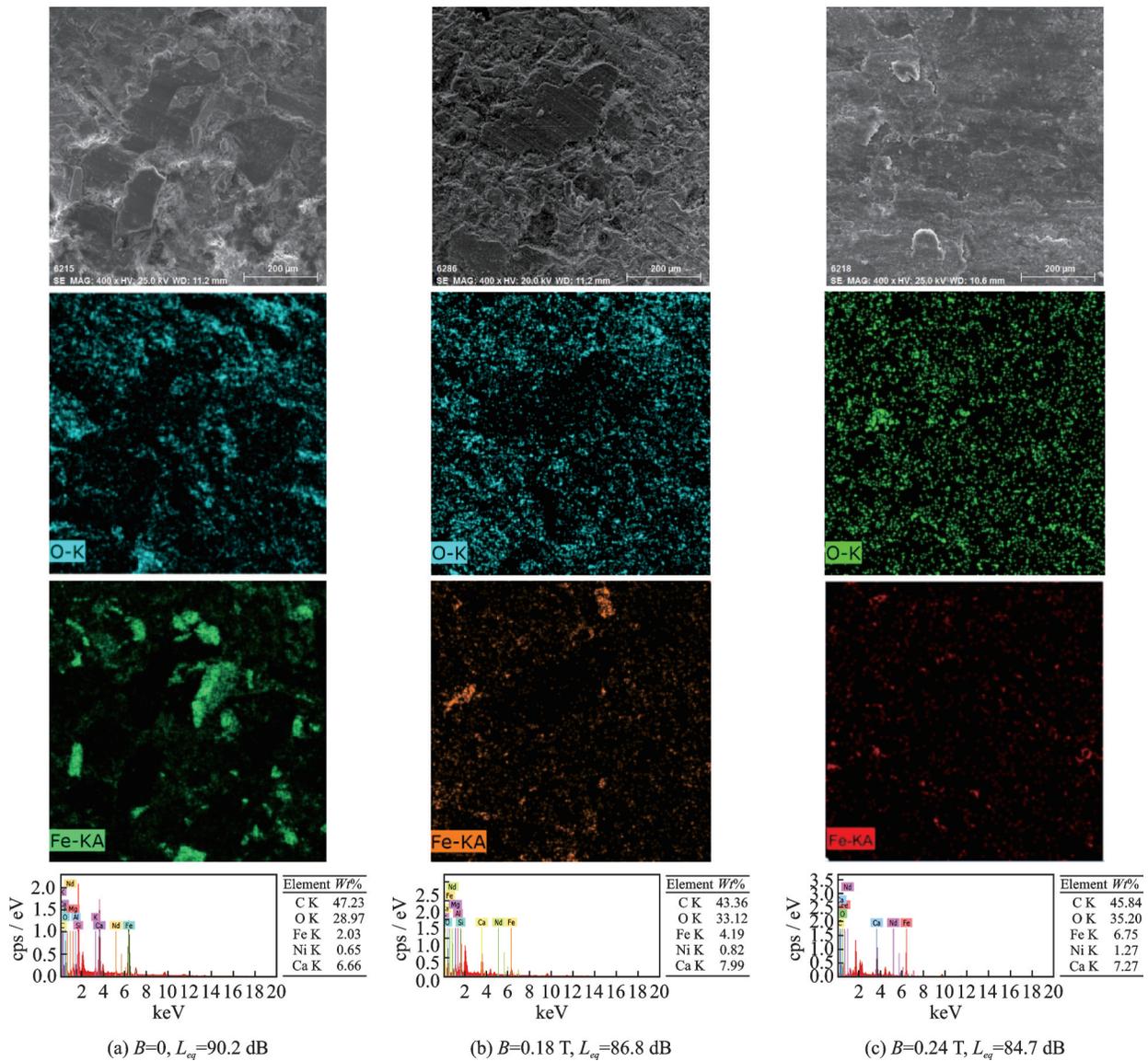


图7 不同磁场环境下摩擦片磨损表面能谱分析 $P=1.25$ MPa, $v=10$ km/h

Fig. 7 EDS analysis of the worn surface of magnetic conductive organic friction pads under different magnetic fields $P=1.25$ MPa, $v=10$ km/h

2.3 交变磁场影响制动噪声发生机理的讨论

综上所述,对比有无磁场的试验工况,很明显添加磁场使得摩擦系数、摩擦力波动系数以及等效连续A声级均减小,且摩擦界面的磨损状态明显得到缓解;这是由于磁场增强了顺磁性物质的化学吸附能力,促

进了摩擦界面的氧化膜的形成,磨损状态被缓和^[26]。且磁场对铁磁性材料的吸附作用,磨屑吸附在制动盘反复被研磨,改变了导磁摩擦片表面的微观状态^[27]。磁感应强度越高,摩擦系数与摩擦力波动系数越小,摩擦界面凹坑越少。但当磁感应强度超过摩擦材料

的饱和值,导磁摩擦片中的铁磁性材料在磁场作用下,因磁化现象发生了几何尺寸可逆变化,即磁致伸缩效应^[28]。磁致伸缩现象和摩擦应力的结合,使导磁摩擦片金属相或组织结构发生变化,最终导致其整体的强度和硬度均得到提高,从而耐磨性得到增强^[29]。根据摩擦导致的自激振动机理可知,磁场使得制动摩擦系统稳定,制动摩擦噪声以摩擦力为激励力,摩擦磨损得到缓解,摩擦力波动系数较小,对产生其噪声的能量输入就会减小,自激振动减弱,因此摩擦噪声不论从产生概率还是从强度均得到抑制。上述现象共同说明了磁场具有减磨降噪的作用。

在磁场作用下,磁化状态导致导磁摩擦片产生磁致伸缩效应,磁致伸缩效应降低了材料内应力,增加了材料塑性,位错迁移速度的增加相当于硬化材料表面的作用,因此变相增强了摩擦副耐磨性。但是磁场频率过高时,位错速度过快,材料迅速聚集在接触表面成为裂纹源,加速接触点断裂而成为磨屑,从而磨损现象加剧;同时,由洛伦兹力、线磁致伸缩和体磁致伸缩机理综合作用在铁磁材料中激发出超声波,最终超声波产生的能量转化为噪声,导致铁磁材料产生的声压和噪声发生率加剧^[30]。

此外,制动器摩擦磨损是包含黏着磨损、氧化磨损、犁削和剥层等现象的混合磨损机制,其中黏着磨损是磨损的主要方式。一方面,磁场的添加使磨损的程度减小,摩擦界面更加平整光滑,稳定了摩擦系数,摩擦振动与噪声的倾向降低,如下式所示

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S \quad (5)$$

式中 F 为磁场吸力; B 为磁场与导磁摩擦片表面的磁感应强度; S 为磁场与导磁摩擦片之间接触面积; μ_0 为磁导率。

F 与摩擦副之间的有效接触面积 S 成正比,与 B 的平方成正比,摩擦片与制动盘相互啮合接触,磁感应强度 B 与接触面积 S 越大,磁吸力 F 越大,啮合越严密,因而摩擦副振动越小,提高了工作的平稳性,降低了振动噪声^[31]。磁场的存在使得摩-磁制动副相互吸引啮合接触,接触面积的增加使得摩擦系统的波动减小。

另一方面,将磁场摩擦学与摩擦噪声发生机理相结合,可以通过磁荷模型解释振动噪声减弱,由于导磁摩擦片在制动过程中产生钕铁硼、 Fe_3O_4 等铁磁性磨屑,其主轴与外部磁场方向夹角为 θ ,两极分别会产生 $+m$ 与 $-m$ 的磁荷^[32];随着交变磁场对磨屑的磁化,磨屑受到力偶的作用发生旋转,最终磁性磨屑颗粒的磁轴方向与外磁场方向平行,磨屑颗粒受力如图8所示。

当磁场 H 在 x 方向上发生改变时,磁性磨屑颗

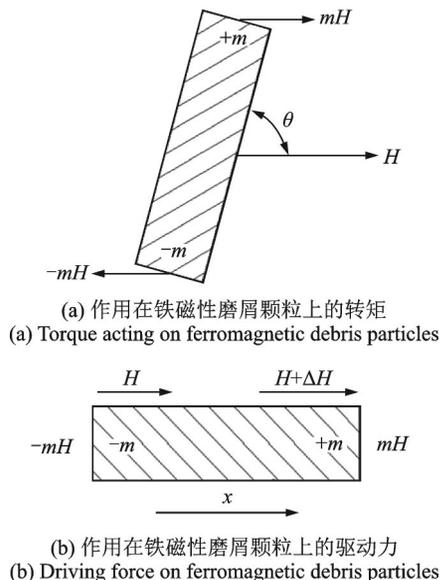


图8 交变磁场下磁性磨屑受力示意图

Fig. 8 Force analysis of magnetic abrasive particles under alternating magnetic field

粒受到的磁场力 F_x 可由下式可得

$$F_x = ml \frac{\partial H}{\partial x} = \lambda VH \frac{\partial H}{\partial x} \quad (6)$$

式中 V 为铁磁性磨屑颗粒的体积(m^3); λ 为铁磁性磨屑颗粒的磁化率; $\partial H/\partial x$ 为磁场在 x 方向上的方向导数(T/m)。

交变磁场决定了磁场力,磁场的存在不仅使得铁磁性磨屑被吸附在摩擦表面,而且也会夹杂其他颗粒状磨屑,铁磁性磨屑产生布朗运动。且由于磁场对磨屑的磁吸引作用,降低了摩擦界面间的直接接触,使磨损状态得到缓和。磨屑承担摩擦副间的“第三体”的角色,起到隔离作用,阻止了摩擦界面的直接接触,且第三体磨料对母体造成磨料磨损的作用微弱,黏着和犁削现象都得到缓和。在高频磁场下,在磁场力与分子力的作用下,磁性磨屑在交变磁场中的动态行为越显著,频繁的磁化导致铁磁性磨屑产生弹性振动及呈现出黏着与聚集的状态,相对低频磁场作用下,增加了摩擦界面的自激振动^[33];在低频磁场的制动过程中,磨屑一直做往复运动,被研磨时间越长,磨屑的颗粒体积越小,且不断被填充在凹坑中,使得摩擦界面更为光滑,同时细小的磨屑可起到类似滚珠或固体润滑剂的作用,减少了摩擦磨损,微凸体之间的切削与塑性变形减少,摩擦振动的激励源随之减弱,摩擦噪声相对降低^[34]。磨屑的研磨与细化作用也是降低制动噪声的原因之一。

3 结论与展望

本文通过开展不同磁感应强度和磁场频率下的

摩擦噪声及其摩擦磨损性能试验,研究磁场对不同制动工况下制动器摩擦噪声的影响规律及其机理,主要结论如下:

1) 低速高压更易于产生制动噪声;磁感应强度较大时,摩擦力波动系数与摩擦系数的变化趋势均得到缓解,摩擦系统自激振动也因此减弱,摩擦噪声声压降低。磁场频率的改变对降噪有一定的局限性,低频抑制摩擦噪声,高频反而具有促进作用。

2) 磁场可明显抑制摩擦噪声的产生,原因如下:

a. 磁场具有减磨降噪的作用。磁场通过促进氧化磨损,改善摩擦片摩擦磨损状态,使摩擦副相互吸引啮合接触,波动减小,摩擦振动减弱,起到了耐磨的作用,最终降低摩擦噪声产生的概率和声压大小。

b. 磁场具有磁致伸缩效应。当磁感应强度超过饱和值后,产生体积磁致伸缩效应。摩擦材料整体的强度、硬度和耐磨性增强;低频磁场时材料的位错迁移速度增加而迅速聚集在一起使表面硬化,耐磨性增强。但高频磁场下,位错迁移速度过快,接触表面形成裂纹源,加速接触点的断裂,磨损反而加剧。

c. 磁场具有润滑降噪的作用。磁场对磨屑有吸附作用,磨屑被细化为更小的颗粒且承担固体润滑剂的角色,促进氧化膜的形成,降低摩擦力的波动,从而导致摩擦噪声的降低。

本文通过试验研究和理论分析,掌握了磁场对盘式制动器摩擦噪声的影响机理。但是由于制动摩擦噪声受多种因素的影响,且时间和试验手段有限,本文的研究工作仍然存在不足之处,有待进一步研究:

1) 论文主要是交变磁场对制动器摩擦噪声的试验研究和抑制规律的总结,今后宜建立相关的数学模型或统计模型进一步阐述机理的研究,且希望在今后的工作中可找出完全抑制摩擦制动噪声的参数;

2) 本研究表明磁场可以抑制制动摩擦噪声,为减轻制动摩擦噪声提供了一种可行的方法,建立磁场力变化引起制动尖叫的动力学模型,阐明其机理及参数影响规律是今后亟待研究的问题。

参考文献:

[1] 陈光雄. 金属往复滑动摩擦噪声的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
Chen Guangxiong. Investigation into friction-induced noise under metal reciprocating sliding conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.

[2] 董慧丽, 鲍久圣, 阴妍, 等. 盘式制动器摩擦噪声特性的试验分析[J]. 摩擦学报, 2020, 40(2):175-184.
Dong Huili, Bao Jiusheng, Yin Yan, et al. Experimental analysis on friction noise of disc brake[J]. Tribology, 2020, 40(2):175-184.

[3] 胡伟坛, 张亮, 章文杰. 盘式制动器制动振动噪声问题解决方案[J]. 内燃机与配件, 2018, 273(21):140-141.

[4] Xu Wang, John Sabu, He Ren. A study of squeal noise in vehicle brake system[C]. ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2011:711-716.

[5] 管迪华, 黄锦春. 盘式制动器尖叫的馈入能量分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8):97-99.
Guan Dihua, Huang Jinchun. Feed-in energy analysis of disc brake squeal[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(8):97-99.

[6] 盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 等. 织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3):102-107.
GE Xiao-hong, MO Ji-liang, LIU Ming-qian, et al. Suppressing friction-induced squeal noise at interface by surface texturing[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3):102-107.

[7] 莫继良, 王东伟, 李建熹, 等. 摩擦热对界面磨损及制动系统稳定性的影响[J]. 上海交通大学学报(自然科学版), 2018, 52(5):624-630.
Mo Jiliang, Wang Dongwei, Li Jianxi, et al. Effect of friction heat on interfacial wear and brake system stability[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Natural Science Edition), 2018, 52(5):624-630.

[8] 陈光雄, 周仲荣. 摩擦系数影响摩擦噪声发生的机理研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9):766-769.
Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong. The mechanism of friction coefficient influencing friction noise[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(9):766-769.

[9] 魏永辉, 王秀丽, 刘元朋, 等. 金属材料直流磁场干摩擦的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(11):223-229.
Wei Yonghui, Wang Xiuli, Liu Yuanpeng, et al. Dry friction of metal materials under DC magnetic field[J]. Surface Technology, 2017, 46(11):223-229.

[10] Mansori M E, Zaidi H, Kadiri E K, et al. Surface modifications of a non-ferromagnetic copper/ferromagnetic steel XC48 couple in magnetized sliding contact[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 86-87 (part2):511-515.

[11] 徐敬业. 水平磁场对滑动摩擦界面磨屑行为及振动噪声特性的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

- Xu Jingye. The effects of horizontal magnetic field on wear debris behaviors and vibration and noise characteristics on sliding friction interface [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [12] Huang Shan, Bao Jiusheng, Ge Shirong, et al. Design of a frictional-electromagnetic compound disk brake for automobiles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(4): 1113-1122.
- [13] Yin Yan, Bao Jiusheng, Liu Jingge, et al. Braking performance of a novel frictional-magnetic compound disc brake for automobiles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(10): 2443-2454.
- [14] Bao Jiusheng, Huang Shan, Liu Yang, et al. Tribological behavior and mechanism of a magnetic conductive brake pair under action of alternating magnetic field [J]. Tribology International, 2019, 131:465-475.
- [15] 鲍久圣, 纪洋洋, 阴妍, 等. 摩-磁复合制动性能及恒力矩制动控制研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 156-165
- Bao Jiusheng, Ji Yangyang, Yin Yan, et al. Braking performance and constant torque controlling of frictional-magnetic compound brake [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 156-165.
- [16] 纪洋洋. 基于磁场干预的摩-磁复合制动性能智能调控方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Ji Yangyang. Intelligent controlling method of frictional-magnetic compound braking performance based on magnetic field [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [17] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- Zhou Xinxiang. Noise Control Technology and Its New Development [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [18] 张立军, 刁坤, 孟德建, 等. 制动器摩擦尖叫台架试验与不确定性统计分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):773-781.
- Zhang Lijun, Diao Kun, Meng Dejian, et al. Bench test and statistical analysis of uncertainty of disc brake squeal [J]. Journal of Tongji University (Natural Science) 2014, 42(5):773-781.
- [19] 张立军, 庞明, 孟德建, 等. 制动器摩擦尖叫的时变性与不确定性统计分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(2):288-294.
- Zhang Lijun, Pang Ming, Meng Dejian, et al. Statistical analysis of time variation and uncertainty of disc brake squeal [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(2):288-294.
- [20] 陆玉浩. 盘式制动器摩擦故障特征提取与模式识别研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- Lu Yuhao. Feature extraction and pattern recognition of friction faults for disc brake [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [21] 安超, 李国萌, 王荣鹏. 多工况下制动系统噪声实验与测试分析 [J]. 机械设计与制造, 2018, (9): 254-257.
- An Chao, Li Guomeng, Wang Rongpeng. Experimental research and test analysis of brake noise under multiple conditions [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, (9):254-257.
- [22] 郭超勋. 磁场对汽车盘式制动器摩擦噪声的影响规律及机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Guo Chaoxun, Research on the effect and mechanism of magnetic field on friction noise of automobile disc brake [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [23] 鲍久圣. 盘式制动器摩擦学性能测试与智能预测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Bao Jiusheng, Testing and Intelligent Forecasting Technology for Tribological Performance of Disc Brake [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [24] 陈光雄, 周仲荣, 黎红, 等. 金属往复滑动摩擦噪声与摩擦表面形貌特征关系的研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(8):85-88.
- Chen Guangxiong, Zhou Zhongrong, Li Hong, et al. The relationship between metal reciprocating sliding friction noise and friction surface topography [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 85-88.
- [25] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of Tribology [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [26] 王凤梅, 谢敬佩, 李炎, 等. 外加磁场对 W-20Cu/45 钢摩擦副干摩擦特性影响的实验研究 [J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3):288-294.
- Wang Fengmei, Xie Jingpei, Li Yan, et al. Effects of magnetic field on dry tribological characteristics of W-20Cu/45 steel friction pairs [J]. Tribology, 2015, 35(3):288-294.
- [27] 简小刚. 直流稳恒磁场对铁磁性材料干滑动摩擦磨损影响初探 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1999: 1-8.
- Jiang Xiaogang. Effect of DC steady magnetic field on dry sliding friction and wear of ferromagnetic materials [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese

- Academy of Sciences, 1999: 1-8.
- [28] 魏永辉, 张永振, 陈 跃, 等. 国内外磁场干摩擦学研究现状及展望[J]. 润滑与密封, 2010, 35(5): 94-98.
Wei Yonghui, Zhang Yongzhen, Chen Yue, et al. Research situation and prospect of magnetic field tribology in foreign and domestic [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(5): 94-98.
- [29] 商 剑, 张永振, 邱 明. 磁场干摩擦学的研究进展[J]. 材料保护, 2009, 42(4): 43-46.
Shang Jian, Zhang Yongzhen, Qiu Ming. Development of research on unlubricated tribology in the presence of magnetic field [J]. Materials Protection, 2009, 42(4): 43-46.
- [30] 谢日时. 基于超磁致伸缩的汽车制动噪声主动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Xie Rishi, Active control of automobile braking noise based on giant magnetostriction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [31] 王 瑜. 永磁装置中磁场力的计算[J]. 磁性材料及器件, 2007, 10(5): 49-53.
Wang Yu. Calculation of magnetic field force in permanent magnet device [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2007, 10(5): 49-53.
- [32] 唐 非, 鹿安理. 磁场处理对钢中内应力影响的研究[J]. 机械工程材料, 1998, 22(4): 4-5.
Tang Fei, Lu Anli. Study on effect of magnetic treatment on internal stress of steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1998, 22(4): 4-5.
- [33] 吴 甦, 赵海燕, 鹿安理, 等. 磁处理降低钢中残余应力的微观机理模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(2): 147-150.
Wu Su, Zhao Haiyan, Lu Anli, et al. Micro-mechanism model of residual stress relaxation in steels by magnetic treatment [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(2): 147-150.
- [34] 陈光雄, 石心余. 在有或无摩擦噪声状态下磨痕形貌的观察[J]. 中国表面工程, 2002, 15(2): 21-23.
Chen Guangxiong, Shi Xinyu. Observation of wear scar morphology with or without friction noise [J]. China Surface Engineering, 2002, 15(2): 21-23.

Experimental analysis on alternating magnetic field to suppress friction noise of brake

BAO Jiu-sheng, DONG Hui-li, YIN Yan, GUO Chao-xun, ZHAO Shao-di, AI Jun-wei
(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Brake friction noise is widespread, which affects the driving comfort of car and causes urban noise pollution. Magnetic field tribology research shows that the magnetic field has a positive effect on the stability of friction and reducing wear. Therefore, the magnetic field can be considered to suppress friction noise. Based on the friction-magnetic composite disc brake and simulated brake test bench, the nonlinear mapping relationships between different magnetic field parameters, brake friction noise, friction and wear behavior are analyzed, and the mechanism of restraining brake friction noise by alternating magnetic field is discussed. The results show that the magnetic field can obviously suppress the generation of brake friction noise and the change of magnetic induction intensity has a more obvious effect on noise reduction; the low frequency magnetic field has a better effect on suppressing noise, however too high the magnetic field frequency may increase the noise. The Magnetic field has the mechanism of stabilizing friction and noise reduction, lubrication and noise reduction, and magnetostriction. The fundamental reason is to improve the interface friction and wear characteristics, then increase the proportion of oxidation wear. The abrasive debris is refined and acts as a solid lubricant. The friction interface tends to be stable to achieve the effect of noise reduction. The research results explain the occurrence rule and suppression mechanism of brake friction noise under the action of magnetic field, which can lay a theoretical foundation for the future use of magnetic field to control brake friction noise pollution.

Key words: noise reduction; disk brake; friction noise; magnetic induction intensity; magnetic field frequency

作者简介: 鲍久圣(1979-),男,博士,教授。电话:13813451343;E-mail:cumtbjs@cumt.edu.cn

通讯作者: 阴 妍(1979-),女,博士,副教授。电话:13813451353;E-mail:cumtyinyan@126.com