

摩擦学学报

TRIBOLOGY



摩擦粒子填充材料对高速列车闸片制动性能的影响

范志勇, 项载毓, 莫继良, 钱泓桦, 陈伟, 周仲荣

Effect of Filling Materials into Friction Block on Brake Performance of High-Speed Train Brake Pad

FAN Zhiyong, XIANG Zaiyu, MO Jiliang, QIAN Honghua, CHEN Wei, ZHOU Zhongrong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021097>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高速列车制动闸片摩擦块形状对制动界面摩擦学行为的影响

Effect of Brake Pad Friction Block Shape on Tribological Behavior of Brake Interface of High-Speed Train

摩擦学学报. 2021, 41(1): 95 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020038>

CRH380A型高速动车组制动闸片摩擦损伤分析

Wear Analysis of Brake Pad for CRH380A High-speed Train

摩擦学学报. 2020, 40(2): 185 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019156>

沟槽表面填充材料对界面摩擦振动噪声的影响

Effect of Filling Material into Grooves on the Interfacial Friction-Induced Vibration and Noise

摩擦学学报. 2017, 37(5): 647 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.012>

研磨子抑制高速列车车轮多边形磨耗的机理研究

Mechanism of Suppression of Polygonal Wear of Wheel on High-Speed Trains by Abrasive Block

摩擦学学报. 2020, 40(2): 234 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019037>

制动工况对汽车半金属刹车片磨损性能的影响

Influence of Braking Conditions on Wear Performance of Automobile Semi-Metal Brake Pad

摩擦学学报. 2021, 41(2): 160 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020073>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2021097

摩擦粒子填充材料对高速列车闸片 制动性能的影响

范志勇^{1,2}, 项载毓^{1,2}, 莫继良^{1,2}, 钱泓桦^{1,2}, 陈伟^{1,2}, 周仲荣^{1,2*}

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031;

2. 轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 在自行研制的制动缩比试验台上, 对中心孔填充不同材料的高速列车制动闸片摩擦粒子进行拖曳制动试验, 并采用有限元分析方法进行制动系统复特征值和接触应力分析, 探讨填充不同材料对磨损特性、振动噪声和热分布的影响。结果表明: 原始摩擦粒子中心孔填充材料后, 对制动系统的摩擦系数和模态耦合特性未产生显著影响, 但对界面磨损行为和系统振动噪声特性产生明显影响。填充粉末冶金后排屑行为下降, 磨损行为更为复杂, 制动系统产生的噪声增大; 而填充紫铜、石墨和铸铁后的制动噪声均有所降低, 尤其填充铸铁后表面磨损相对均匀, 其摩擦学性能相较于其他粒子得到一定的改善。填充材料产生的磨屑及相应的界面磨损行为是影响制动摩擦振动噪声和表面热分布的关键因素, 填充合理的材料有助于降低制动噪声和改善制动界面磨损行为及表面热分布。

关键词: 高速列车制动系统; 闸片粒子; 填充材料; 磨损; 振动噪声

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2022)05-0900-13

Effect of Filling Materials into Friction Block on Brake Performance of High-Speed Train Brake Pad

FAN Zhiyong^{1,2}, XIANG Zaiyu^{1,2}, MO Jiliang^{1,2}, QIAN Honghua^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, ZHOU Zhongrong^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

2. Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: The brake pad, as one of the key components in the brake system of the high-speed train, is a vital link in the brake process, playing a significant part in determining the safe operation of the fast-running high-speed train. However, the brake pad will be excessively and eccentrically worn after a long time of service due to the uneven pressure acting on it, which may greatly reduce the brake torque and thereby make the train operation unreliable. In addition, friction-induced vibration and noise (FIVN) generated during the brake process generally relating to the poor wear situation at the brake interface can be extremely annoying. Therefore, for the sake of safe operations of the high-speed train, it's of great significance to comprehensively study the tribological behaviors at the brake interface, so as to find effective ways to improve wear and FIVN performance of the brake pad. In practical settings, the brake pad of a high-speed train consists of multiple friction blocks. For enhanced heat dissipation and pressure welding process, perforated structure is introduced in the friction block. However, the effective contact area is inevitably reduced because of the existence of the hole. If appropriate filling materials are filled into the hole, on the one hand, the contact area is compensated, on the

Received 19 May 2021, revised 21 July 2021, accepted 26 July 2021, available online 19 August 2021.

*Corresponding author. E-mail: zrzhou@swjtu.cn, Tel: +86-28-87600971.

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51822508) and the program of Science and Technology Agency of Sichuan Province (2020JDTD0012).

国家自然科学基金项目(51822508)和四川省青年科技创新研究团队项目(2020JDTD0012)资助。

other hand, the role of wear debris at the brake interface influencing the surface wear, thermal distribution and FIVN characteristics may be understood through comparing the tribological behaviors of the perforated block and those of the blocks filled with different additive materials. This can provide guidance to choose proper fillers that can make the friction block behave better in terms of interfacial tribology behavior. Given this, in this study, perforated friction blocks of high-speed train brake pad respectively filled with powder metallurgy, cooper, graphite and cast iron in the central hole were employed on a small-scaled braking dynamometer to conduct tribological tests. Complex eigenvalue analysis and contact stress analysis were performed on finite element software. The effect of different additive fillers on the brake tribological behavior was investigated, and the relationship between the wear situation, thermal distribution, and FIVN at the brake interface was discussed. The results showed that the additive materials had no visible effect on the interfacial friction coefficient and the unstable vibration frequency and mode. However, the tribological behaviors in terms of wear behavior, thermal distribution and FIVN characteristics at the brake interface were significantly affected by the fillers. The noise of the braking system increased after the filling of powder metallurgy material, which may be due to the reduced wear trapping performance of the powder metallurgy filled block, consequently the wear behavior was worsened and the FIVN of the brake system was intensified. The noise of the braking system was reduced after filling cooper, graphite and cast iron. However, the worn surface of the copper filled block showed obvious material accumulation phenomenon. In addition, significant thermal concentration was observed on the brake interface when the friction block was filled with graphite. For the cast iron filler case, the number of large contact plateaus were significantly reduced, which lowered the contact stiffness and improved the wear situation and thermal distribution of the brake interface, and the FIVN of brake system was greatly reduced. The wear behaviors caused by the additive fillers were the key factors affecting the FIVN and the interfacial thermal distribution. Filling proper additive materials into the friction block contributed to reduce the FIVN and improve the interfacial wear behavior and thermal distribution.

Key words: high-speed train brake system; friction blocks; filling material; wear; vibration and noise

制动闸片作为高速列车机械制动的重要组成部分,对车辆制动性能起着十分关键的作用^[1]。随着列车运行速度的提升,制动闸片不仅应具有良好的抗摩擦磨损性能以保证列车行车安全,同时制动过程也应避免制动振动噪声对乘坐舒适性的影响以及对周围环境的污染^[2]。

国内外学者针对高速列车制动闸片,从材料配方^[3-6]、制备工艺^[7-8]、结构特征^[9-10]、磨损及振动噪声行为^[11-17]等方面开展了大量的研究,也取得了一系列有意义的成果。但目前对于铜基粉末冶金制动闸片材料研究主要是通过直接改变材料的配方或加工工艺来达到调节材料性能的目的^[18-19]。尽管也有学者尝试在制动盘表面加工沟槽并添加粉末颗粒等方式进行界面调控^[20],但该方法无法保证粉末颗粒在盘表面沟槽中的稳定投放,难以实现界面摩擦膜的稳定形成。

闸片摩擦粒子材料需要结合摩擦系数、耐磨性、强度和振动噪声等因素及性能指标进行综合考虑,因此,针对为适应不同运营条件而进行闸片摩擦粒子配方的调整和优化存在周期长且成本高的问题,对现有摩擦粒子进行材料填充等局部优化调整则可在不改变摩擦粒子整体材料配方的前提下实现制动性能的有效调控,成为目前亟需开展的研究方向之一。制动闸片产品调研中发现,某国外知名制动企业推出了一

款低噪声制动闸片新产品,其主要方法是在摩擦粒子中心孔中填充与基体不同的材料,但截止目前,对摩擦粒子中心孔填充合适摩擦材料以优化制动性能的相关研究的报道仍比较少。

为此,本研究工作中采用不同于传统材料组分配方或制造工艺的调整方法,在不改变闸片摩擦粒子整体材料的前提下,尝试在摩擦粒子中心孔处分别填充粉末冶金、紫铜、石墨和铸铁四种不同材料,并基于自行研制的高速列车制动缩比试验台进行制动试验,进一步采用有限元分析方法进行制动系统复特征值和接触应力分析。最终,综合试验及有限元分析结果,阐明摩擦粒子中心孔填充不同成分材料对制动性能的影响,并探讨制动界面磨损、热分布及振动噪声之间的关联性。

1 试验方法

本试验中所用的制动盘和摩擦粒子试样材料分别源自实际高速列车制动系统中的锻钢制动盘和铜基粉末冶金制动闸片。其中,制动盘试样的材料元素组成及质量分数为Fe(主要成分)、Si(0.25%)、Mn(0.75%)、C(0.31%)、Ni(1.8%)、Cr(1.1%)和Mo(0.5%)。摩擦粒子试样的元素组成及质量分数主要为Fe(13%~15%)、Cu(45%~50%)、石墨(18%~20%)、FeCr(6%~8%)、

MoS₂ (4%~6%)、SiC (2%~4%)和其他(3%~5%). 制动盘和原始摩擦粒子的材料属性列于表1中, 试样的基本尺寸以及制动盘之间的接触关系如图1所示, 摩擦半径为120 mm. 其中, 制动盘的半径为180 mm, 厚度为16 mm. 摩擦粒子试样是高速列车闸片摩擦粒子的真实原型, 厚度为14 mm, 中心具有半径为8 mm的圆孔.

在本研究中, 分别用铜基粉末冶金、紫铜、石墨和灰铸铁对原始摩擦粒子中心孔进行压装填充, 其中铜基粉末冶金对应摩擦粒子本体材料, 紫铜和铸铁主要材料成分对应摩擦粒子基体组元的材料, 石墨则对应摩擦粒子润滑组元的材料. 通过对中心孔填充材料的摩擦粒子进行摩擦振动噪声测试试验, 探究摩擦粒子本体材料、基体组元和润滑组元对制动性能的影响.

所有试验在自行研制的高速列车制动缩比试验台(图1)上进行, 此外, 根据我国高速列车摩擦制动实际介入工况及《TJ/CL 307-2014: 动车组闸片暂行技术条件》, 在摩擦振动噪声测试前进行多组不同制动盘转速和制动压力下的预试验, 确定制动压力为600 N和制动盘转速为200 r/min时能够获得较为稳定的摩擦振动噪声信号. 因此, 本文中所有试验工作均在这一工况下开展, 且采用拖曳制动模式, 每次测试时长为120 s.

试验前对摩擦粒子样品进行充分跑合, 以确保制动界面的良好接触. 为确保试验结果的准确性, 每种摩擦粒子重复测试5次以上. 在试验台中配置了三维力传感器, 用以测量试验过程中摩擦粒子的法向力和摩擦力; 在摩擦粒子夹具侧方安装三向加速度传感器

以测量系统的振动加速度信号; 在距离制动盘面大约100 mm处固定1个记录声压信号的传声器; 采用热成像仪记录制动盘和摩擦粒子的表面温度.

2 结果与讨论

2.1 摩擦粒子中心孔填充粉末冶金对制动性能的影响

首先对原始具有中心孔结构的摩擦粒子与中心孔填充粉末冶金本体材料的摩擦粒子进行试验及有限元分析, 通过对比这两种摩擦粒子的界面摩擦学行为, 探究闸片摩擦粒子中心孔结构的存在及填充材料调控对制动性能的影响.

2.1.1 两种摩擦粒子制动系统振动和噪声特性分析

图2示出了试验全程的噪声时域信号和两个方向的振动加速度信号均方根(RMS)值的演变情况. 从图2(a)可以看出, 两种摩擦粒子都产生了连续的噪声信号, 其中原始摩擦粒子噪声声压振荡幅值相对稳定, 而填充粉末冶金的摩擦粒子声压振荡幅值随着制动过程的进行出现了明显的上升, 波动幅值也随之变大. 从图2(b)可以看出, 整个试验过程中, 原始和填充粉末冶金摩擦粒子在两个方向上的振动加速度均方根值均有增加的趋势, 即两种摩擦粒子的界面振动增强. 原始摩擦粒子的法向振动加速度均方根值明显高于切向振动加速度均方根值, 然而填充粉末冶金摩擦粒子在两个方向上的振动加速度较为接近, 总体来说两种摩擦粒子的振动强度相差不大.

表 1 制动盘和原始摩擦粒子试样的材料属性
Table 1 Mechanical properties of the frictional materials

Frictional materials	Density/(g/cm ³)	Young's modulus/GPa	Surface hardness	Poisson's ratio
Disc sample	7.8	206	310 HV	0.30
Block sample	4.7	6.5	15~25 HBW	0.28

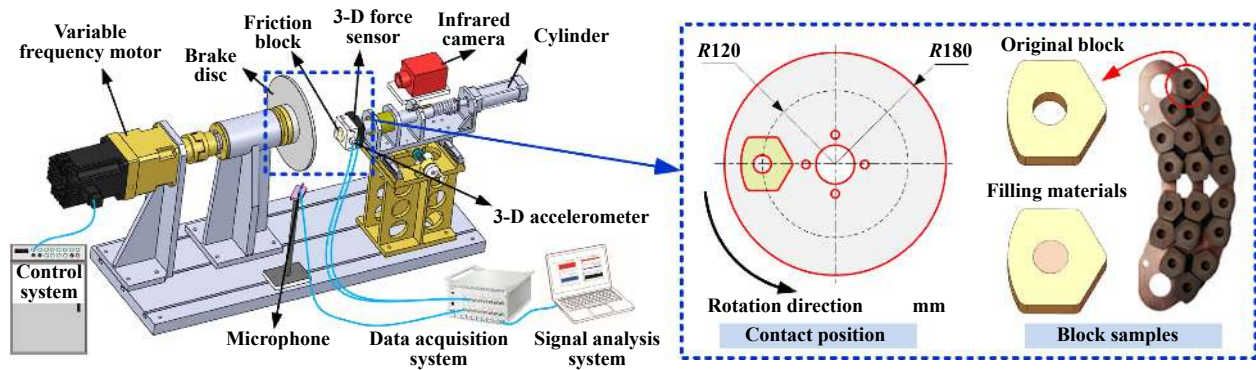


Fig. 1 Schematic diagrams of the brake dynamometer, contact position and the sample preparation
图 1 试验装置、接触位置及试样制备示意图

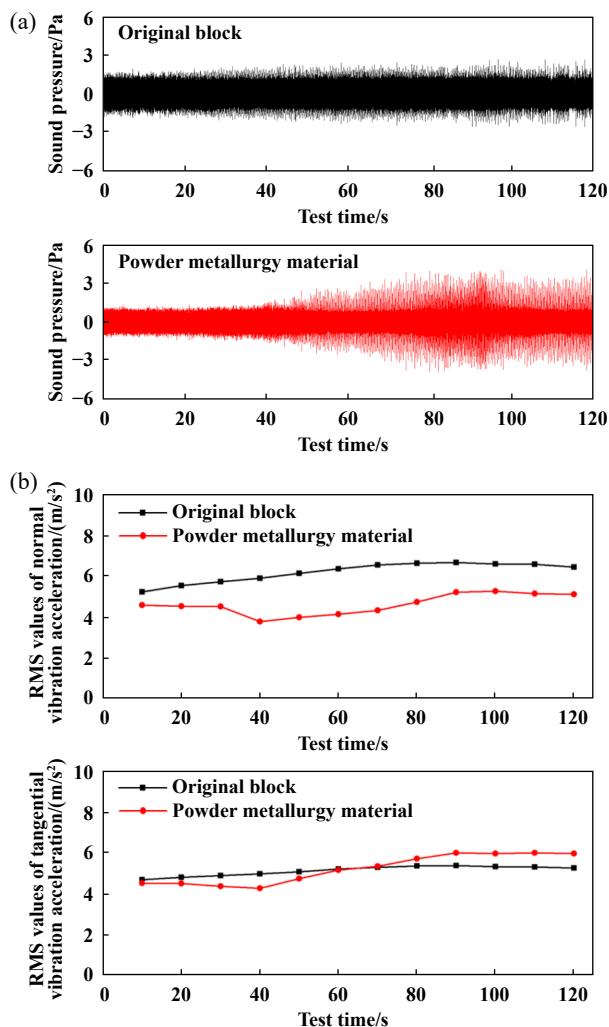


Fig. 2 The evolution of (a) time domain signals of sound pressure and (b) RMS values of normal & tangential vibration acceleration signals in the whole test process of two kinds of friction blocks

图2 两种摩擦粒子试验全程(a)声压时域信号和(b)两个方向振动加速度信号均方根值演变情况

图3所示为稳定阶段两种摩擦粒子的声压时域信号。结果表明原始和填充粉末冶金摩擦粒子在稳定阶段1 s时间内均出现了多个周期性噪声。其中,原始摩擦粒子噪声平均等效声压级(Equivalent sound pressure level, ESPL)达到91.6 dB,而填充粉末冶金的摩擦粒子噪声声压能量要高于原始摩擦粒子,其平均等效声压级达到了95.1 dB。

对稳定阶段摩擦噪声及振动加速度信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)分析,结果如图4所示。原始摩擦粒子出现了两个高频尖叫噪声频率,其中最大的主频为7 055 Hz,而填充粉末冶金的摩擦粒子只出现了1个能量较高的主频(4 858 Hz),这表明制动系统的噪声频率响应特性在摩擦粒子中心

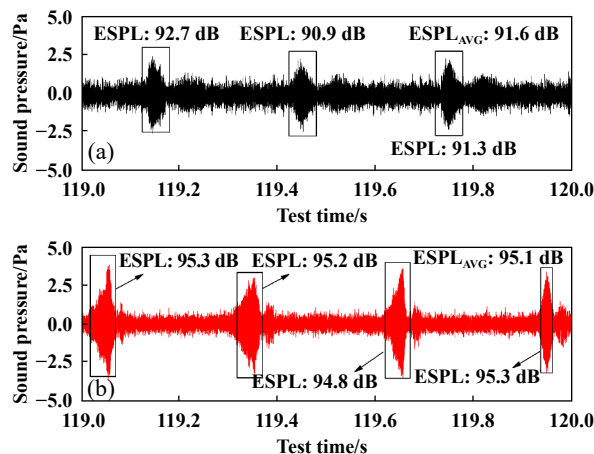


Fig. 3 Sound pressure signals at the steady stage for (a) original friction block and (b) friction block filled with powder metallurgy material

图3 (a)原始和(b)填充粉末冶金摩擦粒子稳定阶段声压的时域信号

孔填充材料后会发生改变。两种摩擦粒子法向和切向振动加速度频谱曲线上均出现了多个能量峰值,均出现两个近似倍频关系的主频7 996和16 003 Hz,而在声压频谱中对应频率处并没有表现出明显的峰值。考虑到在试验台空转工况下采集到的振动信号也出现了这两个主频,进一步说明了这两个振动加速度主频是由试验台本身的固有振动造成的。

2.1.2 两种摩擦粒子制动界面的摩擦磨损分析

图5所示为两种摩擦粒子在试验过程中摩擦系数的演变趋势,可以看出,原始和填充粉末冶金摩擦粒子在制动过程中平均摩擦系数总体波动范围不大,均呈现平稳演变趋势,原始摩擦粒子与制动盘摩擦过程中表现出更大的摩擦系数,但二者相差并不明显。

采用扫描电子显微镜(SEM)对原始和填充粉末冶金的摩擦粒子磨损表面形貌进行测试分析,结果如图6所示。可以看出,原始摩擦粒子内环和外环磨损相对严重,表面堆积有大量磨屑。中间环带表面磨屑堆积较少,大量金属基体暴露在表面,呈现较为光滑平顺的接触平台。这是由于原始摩擦粒子的中心孔结构可以收集摩擦界面的磨屑,尤其收集了中间环带内的磨屑,这减少了该区域的磨粒磨损现象并使得该区域表面相对平坦。中间环带表面的接触平台成为了该区域主要的承力平台,金属基体与制动盘表面直接接触,这成为导致摩擦系数较大的主要原因。

从图6(b)中可以发现,填充粉末冶金摩擦粒子磨损表面除切入端顶角处沿着摩擦方向有明显的犁沟以外,其余区域总体差异不明显。摩擦粒子表面中间

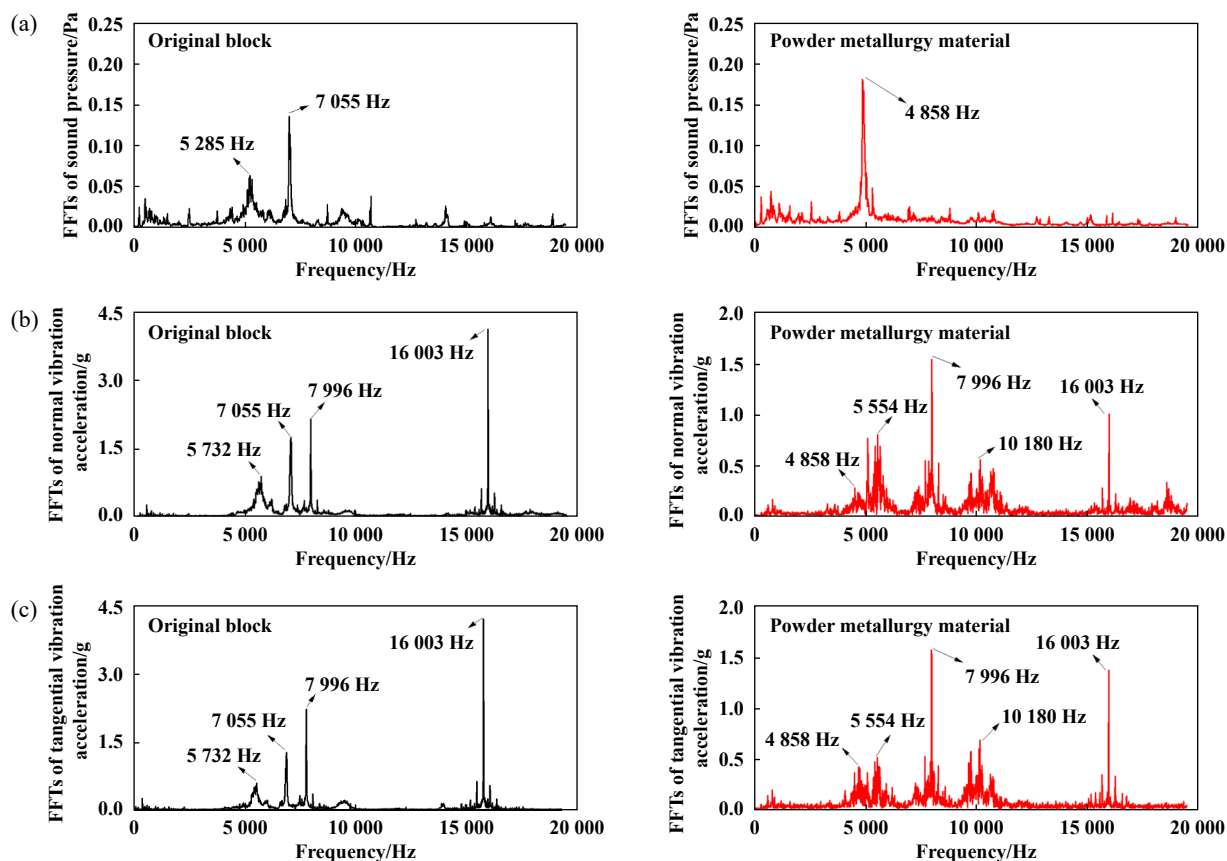


Fig. 4 FFTs of (a~b) the brake noise, (c~d) normal and (e~f) tangential vibration acceleration signals in the steady stage

图4 稳定阶段两种摩擦粒子振动噪声频谱特性: (a~b)摩擦噪声, (c~d)法向振动加速度和(e~f)切向振动加速度

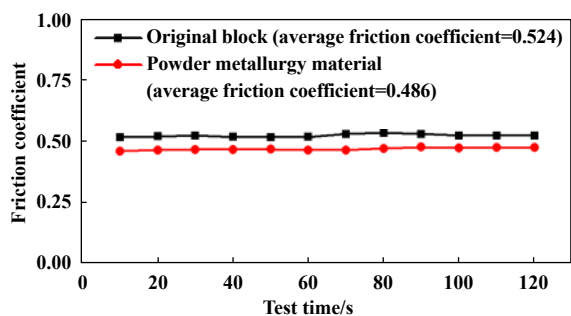


Fig. 5 Evolution of friction coefficients for the two friction blocks

图5 两种摩擦粒子试验过程中摩擦系数的演变趋势

环和外环的接触平台被严重破坏,存在明显的材料剥落现象.此外,表面磨屑堆积相对较多,大量的磨屑散落在接触平台表面及附近区域.在摩擦制动过程中,磨屑也充当了磨粒的角色,在界面的研磨作用下磨损表面将被进一步破坏,导致系统不稳定振动幅值增大,也激发了系统的噪声.

2.1.3 两种摩擦粒子制动界面的摩擦热分布

图7所示为制动试验结束时制动盘和摩擦粒子表面温度分布情况.可以看出,两种摩擦粒子均导致制

动盘产生明显的环形带状相对高温区,其中与原始摩擦粒子相对摩擦的制动盘均存在内、外两圈热环,而与填充粉末冶金摩擦粒子相对摩擦的制动盘的热环主要集中在摩擦区域的中间靠近内环附近位置.

原始摩擦粒子的表面高温区域主要集中于内环和外环区域,外环温度聚集更为明显,这也说明原始摩擦粒子内、外环磨损较为严重,产生了较多的磨屑,中间环切入端和切出端温度相对要低一些.填充粉末冶金的摩擦粒子表面温度分布总体相对较为均匀,只是在摩擦粒子切入端顶角周边沿着摩擦方向出现了热聚集现象,结合前面摩擦粒子磨损表面分析(图6),该区域也出现了明显的犁沟,说明该区域磨损较为严重,是表面热聚集现象的主要原因之一.

提取制动盘摩擦区域IO线段上不同位置随摩擦试验在30、60、90和120 s的温度变化情况,可以看到随着制动摩擦试验时间的持续增加,制动盘表面温度也在升高,与两种摩擦粒子相对摩擦的制动盘在制动过程中温度曲线存在明显的峰值,其中与原始摩擦粒子相对摩擦的制动盘温度曲线在摩擦环内外两侧对应位置出现了两个峰值,而与填充粉末冶金摩擦粒子

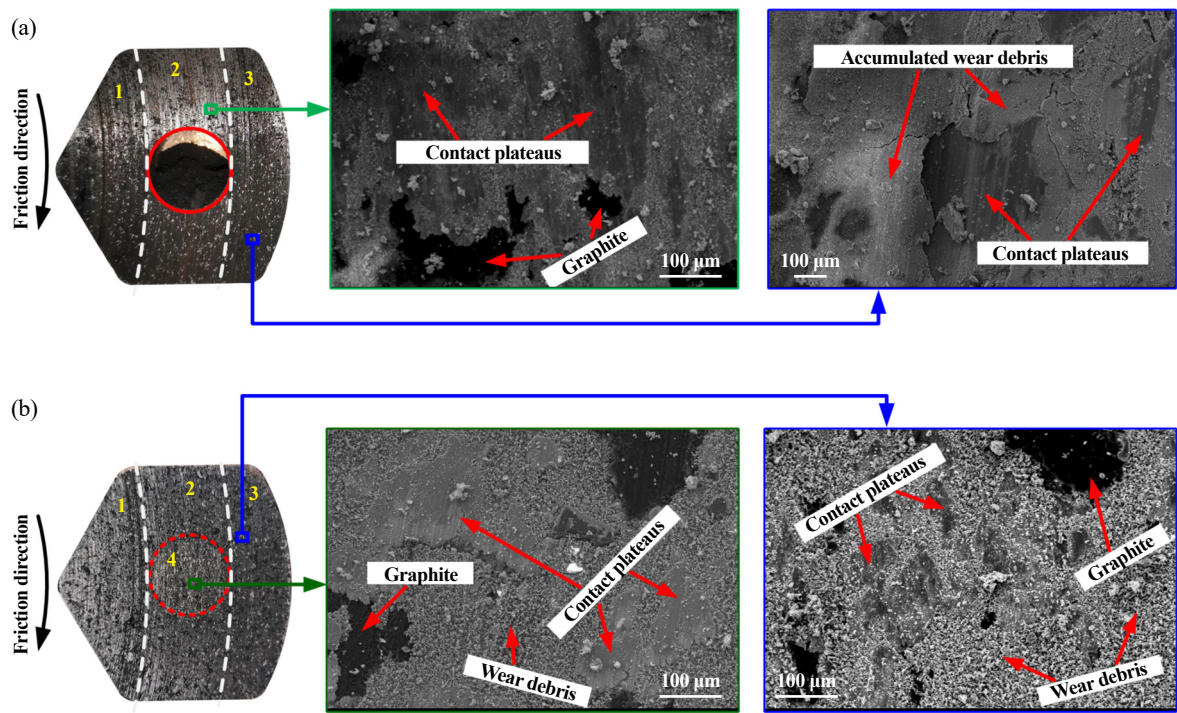


Fig. 6 SEM micrographs of worn surface of (a) original friction block and (b) friction block filled with powder metallurgy material
图 6 (a)原始和(b)填充粉末冶金摩擦粒子磨损表面形貌的SEM照片

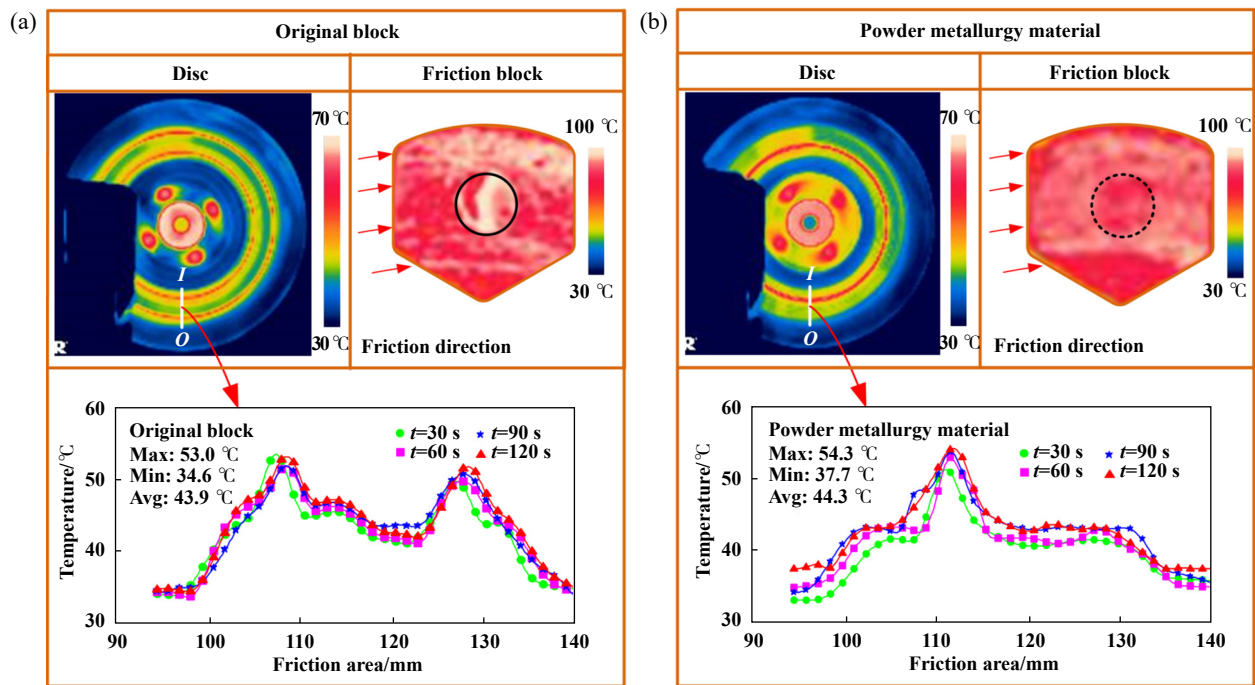


Fig. 7 Surface temperature distributions of the brake disc and friction blocks : (a) original friction block; (b) friction block filled with powder metallurgy material
图 7 (a)原始和(b)填充粉末冶金的摩擦粒子制动盘和摩擦粒子表面温度分布情况

相对摩擦的制动盘温度曲线只在摩擦环内侧对应位置出现了1个峰值,这与摩擦粒子的表面热分布一致。

2.1.4 两种摩擦粒子制动系统的有限元分析

采用Abaqus 6.14建立简化的试验装置有限元模

型,其主要由制动盘、摩擦粒子、夹具、三向力传感器和推杆组成,各个组成部分的结构尺寸及材料组均与实际试验台保持一致,并采用六面体网格进行单元划分,结果如图8(a)所示.结合有限元模型中各组成部

分的实际约束情况,将制动盘与摩擦粒子定义为面-面接触,其中,主面为制动盘摩擦面,从面为摩擦粒子摩擦面,其边界条件如图8(b)所示.将制动盘转速设置为200 r/min,复特征值分析的摩擦系数设置为0.2~0.6,

在推杆末端施加的压力为0.306 MPa,这与制动试验过程的施加载荷600 N相一致.摩擦粒子与夹具、夹具与三向力传感器及其三向力传感器与推杆之间均设置Tie约束.

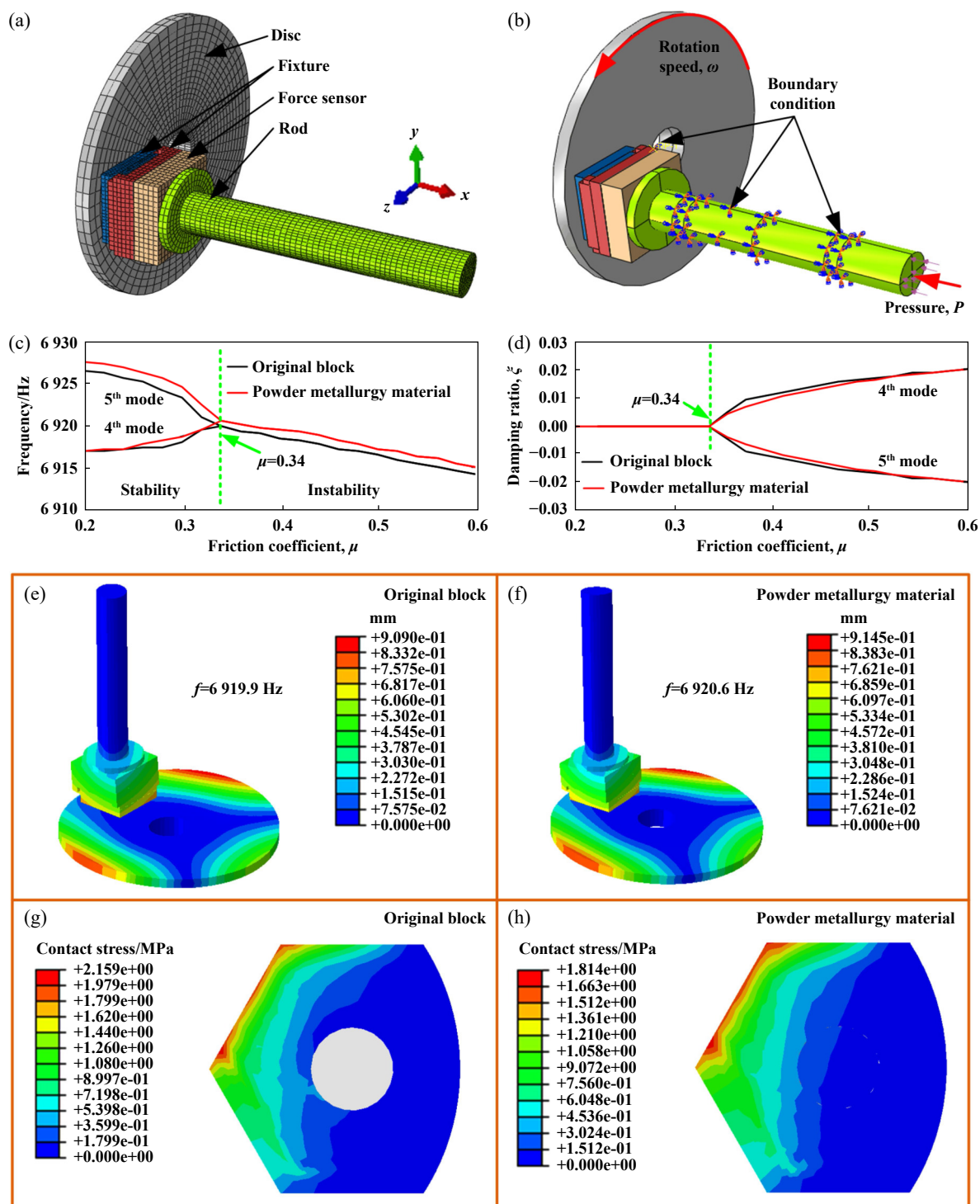


Fig. 8 Finite element model and analysis results: (a) finite element model; (b) boundary conditions; (c) mode coupling frequency and (d) damping ratios for the brake systems; (e~f) unstable modes for the brake systems; (g~h) contact stress distribution of two brake pads

图8 试验装置有限元模型与结果:(a)有限元模型;(b)边界条件;(c)频率和(d)阻尼比;
(e~f)不稳定模式振型;(g~h)接触应力分布

对原始和填充粉末冶金摩擦粒子组成的制动系统进行复特征值分析,其结果如图8(c)和图8(d)所示。可以看出两个系统均在摩擦系数达到0.34后,第4和第5阶模态开始产生耦合,制动系统进入不稳定振动状态,且随着摩擦系数的增大制动系统不稳定振动增强,而频率呈逐渐降低趋势。此外,两个制动系统的频率及阻尼比在模态耦合前、后均无显著差异。

图8(e)和图8(f)展示了原始和填充粉末冶金摩擦粒子组成的两种制动系统的不稳定模态振型。可以看出,两种制动系统的不稳定振动模态振型基本一致,只在变形大小上存在微小的差异。鉴于在两种制动系统复特征值分析时并未考虑界面磨损的因素,由此推测得出:填充粉末冶金材料不会直接影响制动系统的不稳定振动及其强度,制动摩擦过程中填充材料产生的磨屑及相应的界面磨损作用是影响制动系统振动响应的关键因素。

图8(g)和图8(h)展示了两种制动系统界面接触应力分布情况。可以看出,尽管填充粉末冶金材料后增大了界面的接触面积,在一定程度上降低了界面接触应力,然而并未显著影响摩擦粒子表面的接触应力分布情况,两种制动系统摩擦粒子表面接触应力具有很好的一致性,仅填充材料表面的接触应力存在一定差异。两种摩擦粒子的界面接触应力集中多分布于摩擦方向的切入端位置,这会导致摩擦粒子表面该区域磨损程度较为严重,这与前文磨损特征分析(图6)结果相符。

2.1.5 摩擦粒子中心孔填充粉末冶金对制动性能影响的结果分析

以上试验和有限元分析结果表明,未填充材料的原始摩擦粒子的中心孔收集了大量的磨屑,其内环和外环表面堆积大量磨屑,并在界面中反复碾压摩擦形成热环;填充粉末冶金摩擦粒子仅在切入端顶角沿摩擦方向周边出现了热聚集现象,但表面磨损相对更为严重,其制动系统不稳定振动幅度和激发的噪声强度要高于原始摩擦粒子。有限元分析结果表明,中心孔填充材料对制动系统的模态耦合特性不存在显著影响,填充材料产生的磨屑及相应的界面磨损行为是影响制动系统振动噪声和热分布的关键因素。

摩擦粒子中心孔填充粉末冶金本体材料对制动系统摩擦系数和模态耦合特性没有显著影响,但对界面磨损特性和热分布产生影响,进而影响系统的振动噪声特性。因此,有必要进一步开展摩擦粒子中心孔填充不同材料的制动性能测试试验,以寻找满足不同制动性能需求的填充材料,并系统阐明填充不同材料

对制动界面摩擦学行为的影响机制。

2.2 填充不同成分材料对摩擦粒子制动性能的影响

选取紫铜、石墨和铸铁材料对摩擦粒子进行填充并开展制动试验,分析讨论各种填充材料摩擦粒子的制动噪声特性和摩擦磨损特性,探究摩擦粒子中心孔填充不同成分材料对制动性能的影响。

2.2.1 填充不同成分材料制动系统的振动和噪声特性分析

图9示出了填充不同材料摩擦粒子的噪声平均等效声压级。可以看出,与原始摩擦粒子相对比,填充粉末冶金摩擦粒子产生的噪声平均等效声压级最大,而填充紫铜、石墨和铸铁材料后制动系统产生的噪声等效声压级均有所降低,尤其填充石墨和铸铁摩擦粒子产生的噪声等效声压级明显较小。

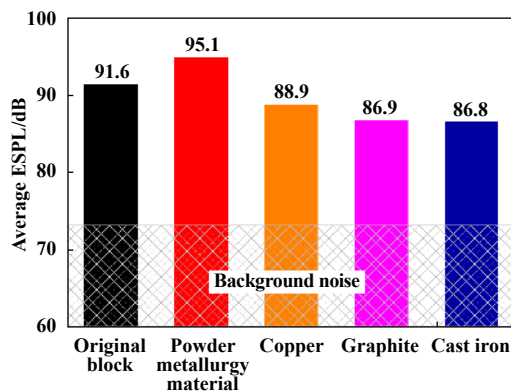


Fig. 9 Average ESPL of brake noise for the five friction blocks

图9 五种摩擦粒子制动噪声的平均等效声压级

图10所示为在原始摩擦粒子中心孔填充紫铜、石墨和铸铁材料后三种摩擦粒子试验稳定阶段的A计权等效声压级。可以看出,三种摩擦粒子噪声的平均等效声压级均小于原始摩擦粒子,更远远小于填充粉末冶金摩擦粒子。表明摩擦粒子中心孔填充不同成分材料对制动系统摩擦噪声存在较明显影响,中心孔中填充紫铜、石墨和铸铁材料均能一定程度上抑制制动系统摩擦噪声。

图11示出了三种摩擦粒子试验过程法向和切向振动加速度信号的均方根值以及稳定阶段两个方向振动加速度功率谱密度(PSD)分析结果。可以看出,填充石墨和铸铁摩擦粒子在法向上的振动明显强于其切向振动,而填充紫铜的摩擦粒子法向和切向振动强度在初始阶段较为相近,随着界面摩擦的进行,其法向振动强度总体高于切向。这些现象表明这三种摩擦粒子所在系统的不稳定振动由法向振动主导,即制动

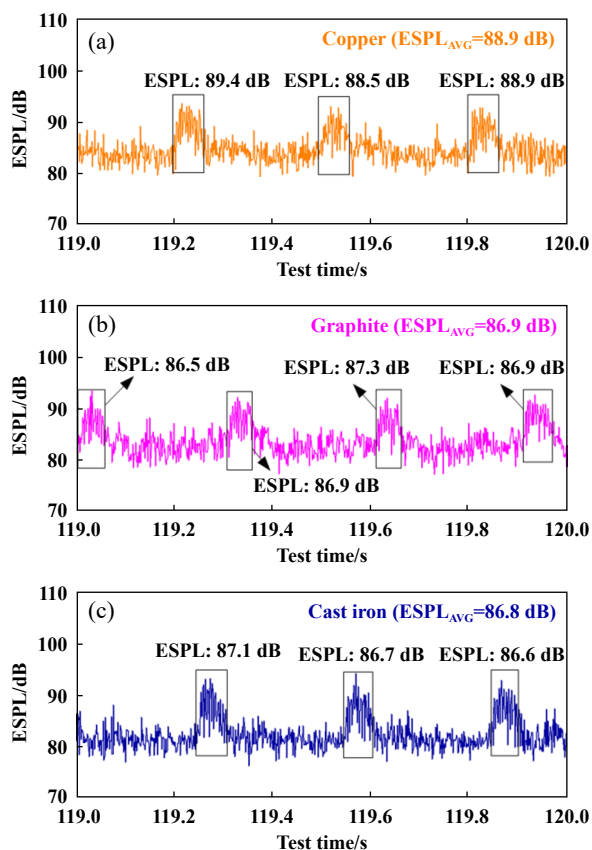


Fig. 10 ESPL of brake noise in a short time for the friction blocks filled with (a) copper, (b) graphite and (c) cast iron

图 10 填充(a)紫铜、(b)石墨和(c)铸铁摩擦粒子试验稳定阶段噪声的等效声压级

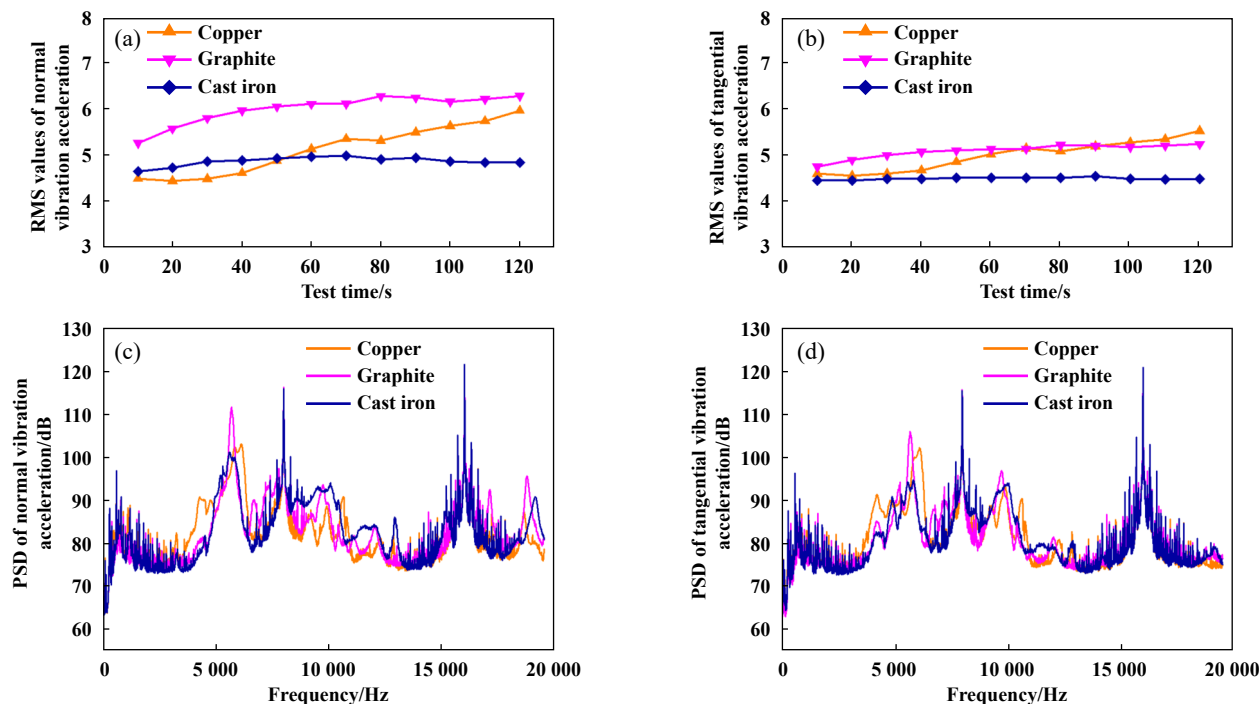


Fig. 11 RMS values and PSD of normal & tangential vibration acceleration signals with stable noise for the three friction blocks

图 11 三种摩擦粒子法向和切向振动加速度均方根值和稳定阶段两个方向振动加速度的功率谱密度

界面存在明显的法向冲击作用. 功率谱密度分析结果显示三种摩擦粒子的振动频率相近, 表明摩擦粒子中心孔填充紫铜、石墨和铸铁对制动系统的不稳定振动频率没有显著影响.

2.2.2 填充不同成分材料制动界面的摩擦磨损分析

图12示出了填充三种不同成分材料摩擦粒子试验过程中平均摩擦系数的演变情况. 可以看出, 摩擦粒子中心孔填充三种材料后, 摩擦系数均较为稳定. 填充石墨后, 制动界面生成的磨屑颗粒中有较多的石墨存在, 由于石墨具有较好的流动性和润滑性, 降低了金属材料之间的粘附性, 从而摩擦粒子的摩擦系数会降低. 摩擦粒子填充铸铁后, 由于铸铁材料属性和制动盘锻钢材料接近, 界面会存在一定的犁削和粘附作用, 故填充铸铁摩擦粒子的平均摩擦系数最高.

图13和图14分别展示了填充三种不同成分材料摩擦粒子磨损表面典型区域形貌的SEM照片及关键位置的EDS分析结果. 从图13(a)可以看出, 中心孔填充紫铜摩擦粒子靠切出端区域出现材料堆积现象, 中心孔区域表面有明显的剥层, 点A处表面材料主要成分中Fe元素占比较大[图14(a)和(b)], 这是因为填充的紫铜材料相对较软, 摩擦过程中磨屑会嵌入或覆盖在其表面, 导致Fe和Cu元素的氧化物较多. 磨损表面中间环区域和外环区域磨屑较多, 且存在明显的剥落坑, 说明填充紫铜摩擦粒子表面磨损较为严重, 这也

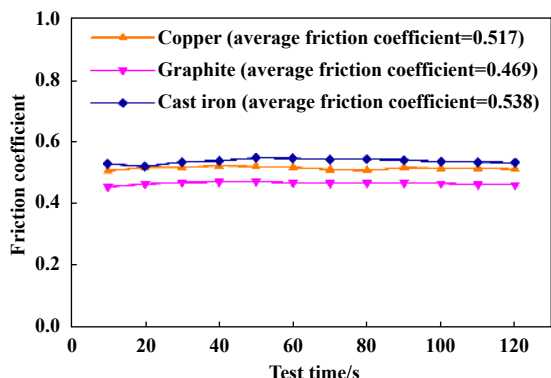


Fig. 12 Friction coefficients of the three friction blocks filled with copper, graphite and cast iron

图 12 填充紫铜、石墨和铸铁摩擦粒子的摩擦系数

使得该制动系统产生了较强的摩擦振动和噪声。

从图13(b)可以看出,中心孔填充石墨后摩擦粒子中心孔上方靠近切入端附近表面初始接触平台较多,表面散落的磨屑相对较少,仅局部有材料剥落现象。

然而,中心孔填充的石墨材料表面磨损严重,有非常明显的犁沟现象,这是由于石墨材料较软且容易被磨屑中的硬质颗粒犁削。结合表面点C和点D处EDS分析结果[图14(c)和(d)]可以看出,摩擦过程中产生的大量磨屑堆积在石墨材料的犁沟中。此外,在中心孔靠切入端侧的边缘附近产生了较为严重的材料剥落现象,说明填充石墨材料后并没有改善中心孔附近存在的应力集中问题,这也是填充石墨摩擦粒子的法向加速度均方根值相对较大的主要原因。

从图13(c)可以看出,中心孔填充铸铁材料表面有明显的犁沟现象,这可能是铸铁材料表面被磨屑中的一些硬质颗粒犁削造成的。铸铁材料表面出现明显剥层现象,主要是铸铁材料与相对摩擦的锻钢制动盘材料有一定粘附作用导致的。结合表面点E和点F处EDS分析结果[图14(e)和(f)]可知,摩擦过程中产生的磨屑中氧化物的成分明显增多,说明制动过程中摩擦界面

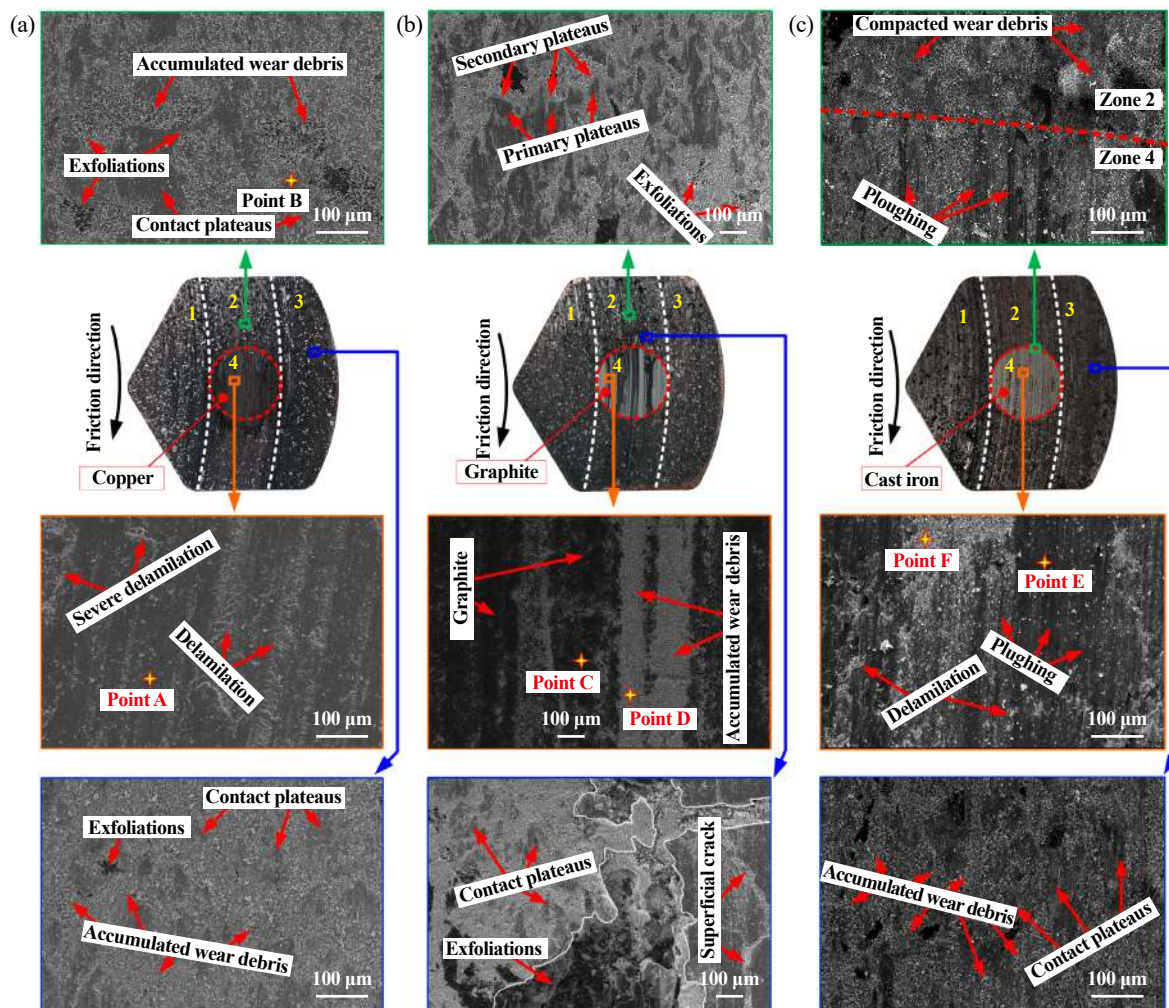


Fig. 13 SEM micrographs of worn surface of the three friction blocks the three friction blocks filled with (a) copper, (b) graphite and (c) cast iron

图 13 填充(a)紫铜, (b)石墨和(c)铸铁摩擦粒子磨损表面形貌的SEM照片

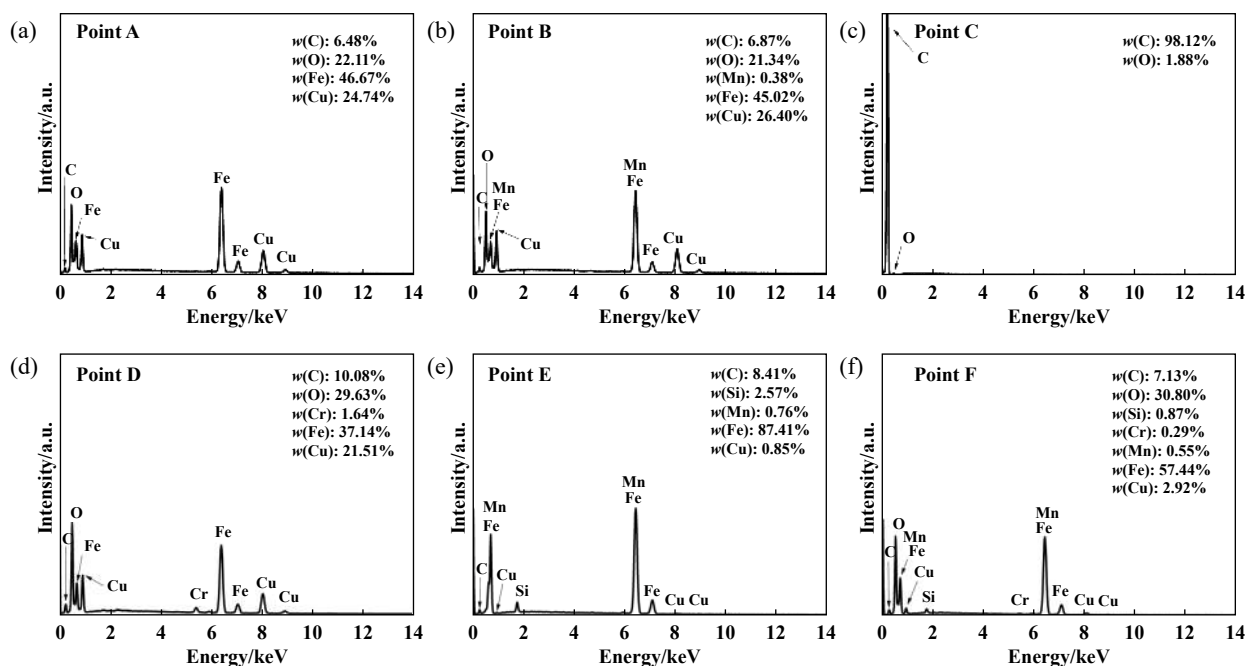


Fig. 14 EDS analysis (mass fraction) of corresponding point in the worn surface morphologies in Fig. 13

图14 图13中磨损表面形貌图中对应各处的EDS分析(质量分数)

发生了强烈的氧化磨损. 尽管填充铸铁材料摩擦粒子中间环靠切入端区域和外环区域表面有较多堆积的磨屑, 但并没有十分明显的剥落坑, 这是由于灰铸铁中含有一定量的片状石墨, 在石墨的润滑作用下改善制动界面摩擦学行为^[7].

2.2.3 填充不同成分材料制动界面的摩擦热分布

图15所示为制动试验结束时制动盘和填充三种不同材料摩擦粒子表面温度分布结果. 可以看出, 填充紫铜摩擦粒子与制动盘相对摩擦的环形带状区域的表面温度分布相对均匀, 没有出现明显的连续热环. 填充石墨和铸铁摩擦粒子均导致制动盘产生明显的环形带状相对高温区, 其中, 与填充石墨摩擦粒子相对摩擦的制动盘存在明显的中间热环, 而与填充铸铁摩擦粒子相对摩擦的制动盘的热环主要出现在摩擦区域的环内侧附近.

填充紫铜摩擦粒子的表面温度分布总体较为均匀, 然而该粒子在摩擦过程中产生较多磨屑, 使得表面温度相对较高. 对于填充石墨摩擦粒子, 试验过程摩擦系数最小(图12), 界面剪切等相互作用较弱, 故填充石墨的摩擦粒子表面温度总体相对较低. 此外, 由于填充石墨的表面出现较明显的犁沟, 其表面磨损相对较为严重, 同时石墨的密度较小, 导致其单位体积的比热容较小, 这可能是导致该粒子中心孔区域温度相对较高的原因之一. 填充铸铁材料摩擦粒子在摩擦粒子切入端顶角沿着摩擦方向周边出现了热聚集现

象, 这是由于该区域存在犁沟等磨损行为.

2.2.4 摩擦粒子中心孔填充不同材料对制动性能影响的结果分析

摩擦粒子中心孔填充紫铜、石墨和铸铁材料后制动系统的噪声等效声压级相对原始和填充粉末冶金材料摩擦粒子均降低, 其中摩擦粒子填充铸铁后噪声声压级最小. 填充紫铜摩擦粒子表面出现材料堆积现象, 由于紫铜质地比摩擦粒子本体材料粉末冶金要软, 因此从切入端产生的磨屑中的硬质颗粒容易将填充区域划伤, 形成犁沟和剥落现象, 摩擦粒子表面温度较高. 填充石墨摩擦粒子表面局部出现较严重的材料剥落现象, 且出现较明显的犁沟, 表面磨损相对较为严重, 同时石墨的密度较小, 导致其单位体积的比热容较小, 因此石墨填充区更容易出现摩擦热的集中现象. 由于石墨的润滑作用, 摩擦界面的平均摩擦系数减小, 这有助于减小界面振动噪声. 而填充铸铁摩擦粒子振动强度相对较小且稳定, 摩擦粒子的界面磨损相对均匀, 没有出现连片的大尺寸接触平台, 其表面摩擦学性能相较于其他粒子得到了改善.

3 结论

在不改变闸片摩擦粒子整体材料的前提下对摩擦粒子中心孔进行了不同材料的填充, 并开展了制动性能试验及有限元分析, 探讨了不同填充材料对摩擦粒子制动性能的影响, 结论如下:

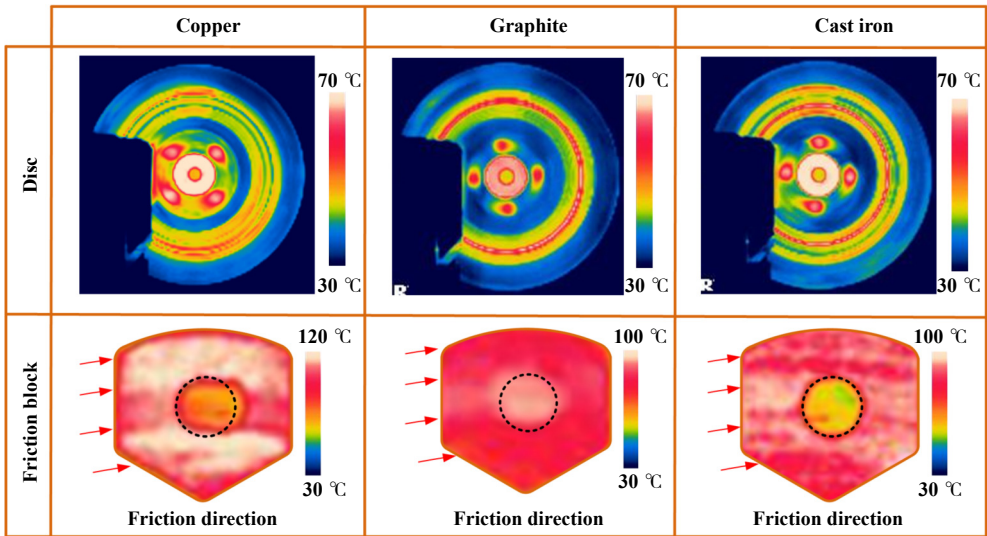


Fig. 15 Surface temperature distributions of the brake disc and the three friction blocks after testing

图 15 制动试验后制动盘和三种摩擦粒子表面温度分布情况

a. 试验及有限元分析结果表明,中心孔填充材料对制动系统的模态耦合特性未存在显著影响,填充材料产生的磨屑及相应的界面磨损行为是影响制动系统振动噪声和热分布的关键因素。

b. 制动闸片摩擦粒子中心孔填充不同材料对界面磨屑行为及磨损产生了明显影响,并最终导致制动系统噪声特性、制动界面磨损特性和表面热分布的差异。

c. 制动闸片摩擦粒子填充合理的材料有助于降低制动系统噪声,并改善制动界面磨损行为及表面热分布. 研究结果可为高速列车低噪声摩擦粒子设计提供理论支撑,但值得注意的是,仍需要进一步开展1:1台架试验和装车试验用以综合评价这些填充材料对闸片的制动性能的影响并获取最优的填料方案。

参考文献

[1] Wang Lei, Pan Qirui, Zhu Song, et al. Fabrication of copper-based powder metallurgy brake pad for high-speed train and its friction and wear property[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(6): 55–58 (in Chinese) [王磊, 潘祺睿, 朱松, 等. 高速列车铜基粉末冶金闸片的制备及摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2017, 41(6): 55–58]. doi: 10.11973/jxgccl201706013.

[2] Meehan P A, Leslie A C. On the mechanisms, growth, amplitude and mitigation of brake squeal noise[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107469. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107469.

[3] Österle W, Prietzel C, Kloss H, et al. On the role of copper in brake friction materials[J]. Tribology International, 2010, 43(12): 2317–2326. doi: 10.1016/j.triboint.2010.08.005.

[4] Su Linlin, Gao Fei, Han Xiaoming, et al. Tribological behavior of

copper –graphite powder third body on copper-based friction materials[J]. Tribology Letters, 2015, 60(2): 30. doi: 10.1007/s11249-015-0605-3.

[5] Li Zhuan, Liu Yizhong, Zhang Bengu, et al. Microstructure and tribological characteristics of needled C/C-SiC brake composites fabricated by simultaneous infiltration of molten Si and Cu[J]. Tribology International, 2016, 93: 220–228. doi: 10.1016/j.triboint.2015.08.047.

[6] Yao Pingping, Xiao Yelong, Zhang Zhongyi, et al. Progress in powder metallurgical brake materials for high-speed trains[J]. Materials China, 2019, 38(2): 116–125 (in Chinese) [姚萍萍, 肖叶龙, 张忠义, 等. 高速列车粉末冶金制动材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(2): 116–125]. doi: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.02.06.

[7] Qu Xuanhui, Zhang Lin, Wu Peifang, et al. Development and application of braking materials for modern rail transit vehicles[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(2): 1–9 (in Chinese) [曲选辉, 章林, 吴佩芳, 等. 现代轨道交通刹车材料的发展与应用[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(2): 1–9]. doi: 10.11951/j.issn.1005-0299.20160421.

[8] Gyimah G K, Huang P, Chen D. Dry sliding wear studies of copper-based powder metallurgy brake materials[J]. Journal of Tribology, 2014, 136(4): 041601. doi: 10.1115/1.4027477.

[9] Xiang Z Y, Chen W, Mo J L, et al. The effects of the friction block shape on the tribological and dynamical behaviours of high-speed train brakes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 194: 106184. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106184.

[10] Wang Dongwei, Mo Jiliang, Zhang Qi, et al. Effect of filling material into grooves on the interfacial friction-induced vibration and noise[J]. Tribology, 2017, 37(5): 647–655 (in Chinese) [王伟东, 莫继良, 张琦, 等. 沟槽表面填充材料对界面摩擦振动噪声的影

- 响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 647–655]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.012).
- [11] Xiao Jinkun, Xiao Shuxian, Chen Juan, et al. Wear mechanism of Cu-based brake pad for high-speed train braking at speed of 380 km/h[J]. Tribology International, 2020, 150: 106357. doi: [10.1016/j.triboint.2020.106357](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106357).
- [12] Massi F, Berthier Y, Baillet L. Contact surface topography and system dynamics of brake squeal[J]. Wear, 2008, 265(11-12): 1784–1792. doi: [10.1016/j.wear.2008.04.049](https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.049).
- [13] Zhang Lijun, Yu Jia, Diao Kun, et al. Investigation into the dynamical friction characteristics under squeal conditions based on a pin-on-disc system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 69–74 (in Chinese) [张立军, 余佳, 刁坤, 等. 基于盘-销系统的摩擦尖叫条件下的动态时滞摩擦特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 69–74]. doi: [10.3901/JME.2013.05.069](https://doi.org/10.3901/JME.2013.05.069).
- [14] Dong Huili, Bao Jiusheng, Yin Yan, et al. Experimental analysis on friction noise of disc brake[J]. Tribology, 2020, 40(2): 175–184 (in Chinese) [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]. 摩擦学学报, 2020, 40(2): 175–184]. doi: [10.16078/j.tribology.2019108](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019108).
- [15] Qian Kuncai, Wu Shezhang, Qiao Qingfeng, et al. Friction performance of brake disks and blocks for high-speed EMU trains in cold, rainy, and snowy weather[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1188–1192 (in Chinese) [钱坤才, 吴射章, 乔青峰, 等. 高寒雨雪气候下高速动车组盘片摩擦副摩擦性能[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1188–1192]. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.2017.06.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2017.06.020).
- [16] Noh H J, Jang H. Friction instability induced by iron and iron oxides on friction material surface[J]. Wear, 2018, 400–401: 93–99. doi: [10.1016/j.wear.2017.12.025](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.025).
- [17] Bakar A R A, Ouyang H J, Khai L C, et al. Thermal analysis of a disc brake model considering a real brake pad surface and wear[J]. International Journal of Vehicle Structures and Systems, 2010, 2(1): 20–27. doi: [10.4273/ijvss.2.1.04](https://doi.org/10.4273/ijvss.2.1.04).
- [18] Wang Ye, Yan Qingzhi, Zhang Xiaolu, et al. Effect of graphite on properties of copper-based brake pads material made by powder metallurgy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2012, 30(6): 432–439 (in Chinese) [王晔, 燕青芝, 张肖路, 等. 石墨对铜基粉末冶金闸片材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2012, 30(6): 432–439]. doi: [10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2012.06.006](https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2012.06.006).
- [19] Wang Pei, Chen Yue, Zhang Yongzhen, et al. Influence of sintering pressure on tribological property of Cu-based Powder metallurgy material for brake[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(6): 66–69 (in Chinese) [王培, 陈跃, 张永振, 等. 烧结压力对铜基粉末冶金闸片材料摩擦学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(6): 66–69].
- [20] Kato H. Effects of supply of fine oxide particles onto rubbing steel surfaces on severe-mild wear transition and oxide film formation[J]. Tribology International, 2008, 41(8): 735–742. doi: [10.1016/j.triboint.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.001).