

铝基复合制动盘闸片开发及试验

袁泽旺¹, 田 春¹, 张定权², 李羲宸², 牛连杰²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 上海壬丰复合材料有限公司, 上海 200135)

摘要: 为开发与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘匹配使用的闸片, 设计了金属系和陶瓷系两种配方的闸片. 闸片经由传统工艺和微孔工艺两种工艺成型, 并进行了小样惯性缩比试验、定速摩擦试验, 1:1 台架试验及噪声测试. 结果表明, 陶瓷系微孔工艺成型的 J65-217c 闸片在紧急制动、常用制动、模拟线路制动工况下的平均摩擦系数及静摩擦系数, 满足城市轨道交通车辆要求, 磨耗量 $0.58 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$, 制动盘最高温度不超过 $400 \text{ }^\circ\text{C}$, 常用制动噪声为 $79.3 \sim 93.4 \text{ dB(A)}$. 此外, 通过减少金属填料增加陶瓷成分, 可有效降低闸片摩擦系数的波动和磨耗; 传统工艺闸片较微孔工艺闸片磨耗略低; 摩擦系数-速度曲线的负斜率特性和微孔成型技术有利于降低闸片制动噪声, 制动力越大噪声越大; 小尺寸试样比实物闸片的摩擦系数波动性小.

关键词: 闸片; 开发; 制动试验; 噪声; 微孔成型

中图分类号: U292

文献标志码: A

Development and Testing of Pad for Brake Disc of Aluminum Matrix Composites

YUAN Zewang¹, TIAN Chun¹, ZHANG Dingquan², LI Xichen², NIU Lianjie²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai ReinPhen Composite Materials Co. Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: To develop pad matching for brake disc of SiCp/Al composite, two formulas of metal series and ceramic series were designed. Pads were formed respectively by using the conventional and the microporous forming processes. Sample inertia subscale test, constant speed friction test, full-scale rig test and noise test were conducted. The results show that the average friction coefficient in emergency braking, service braking, and track simulation braking, and the static friction coefficient of J65-217c pad by using the microporous forming process can meet the requirements of urban rail vehicle. The wear of J65-217c pad is $0.58 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$, and its noise in

service braking is 79.3 to 93.4 dB(A) . The maximum temperature of disc in the whole braking process is much lower than $400 \text{ }^\circ\text{C}$. In addition, the fluctuation of friction coefficient and wear of pad can be decreased effectively by reducing metal filler while adding ceramic filler. The wear of pad forming by using the conventional process is slightly lower than that of the pad forming by using the microporous process. Negative slope of friction coefficient-speed curve and porosity guaranteed by the microporous process are beneficial for reducing braking noise. As the braking force increases, the noise increases. The fluctuation of friction coefficient of subscale sample is smaller than that of full-scale pad.

Key words: pad; development; braking test; noise; microporous forming

城轨车辆用铝合金制动盘质量轻、导热性能良好, 能够显著降低车辆簧下质量, 降低摩擦副制动时的温升^[1-2]. SiC 颗粒增强铝基复合制动盘是铝合金制动盘的一种, 由于采用了增强颗粒, 其力学性能大大高于铝合金基体^[3-5]. SiC 颗粒增强铝基复合制动盘在试验过程中, 基本上沿用适用于铁盘或钢盘的闸片^[6-10]. SiC 颗粒增强铝基复合制动盘在材料和成型上, 不同于传统的铁盘和钢盘^[11], 而且摩擦热量在盘与片之间的分配因摩擦副之间材料参数不同而不同^[12-13], 与铁盘或钢盘配合良好的闸片, 是否能与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘相匹配需要研究探讨和试验验证.

本文对新型材料 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘的对偶闸片进行了 MM-1000 缩比试验、定速摩擦试验, 反复改进材料配方和成型工艺, 开发了一种适用于 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘的微孔型合成闸片, 并通过 1:1 台架试验, 验证该闸片与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘匹配使用时的摩擦磨耗性能和制

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAG13B01-11); 国家自然科学基金(U1534205)

第一作者: 袁泽旺(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为列车制动与安全. E-mail: 0746yzw@tongji.edu.cn

通信作者: 田 春(1979—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为列车制动与安全. E-mail: chtian77@163.com

动噪声特性.

1 研制工艺

1.1 压制工艺

合成闸片成型过程中需要将准备好的原料进行干燥处理、称量分类后进行混料,而后进行压制和热处理.图 1 是合成闸片成型的工艺流程,其中压制方法分为传统工艺和微孔工艺两种.传统工艺是将混料在高温下加压黏结,再经过常温固化而成型,微孔工艺是直接将混料在常温或低温下加压固化而成型.压制温度的差异使闸片表现出不同的性能^[14],本文研究了传统工艺和微孔工艺两种成型闸片对 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘的适应性.



图 1 合成闸片成型工艺流程

Fig.1 Forming process of composite brake pad

1.2 微孔成型技术

为减少制动过程中产生的噪声,在闸片开发过程中采用微孔成型技术,孔径约为 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$,孔隙率高达 $15\% \sim 20\%$,且为通孔.运用改进的纤维增强技术、增加交互贯通网络技术的弹性体来增强基体强度和韧性,降低噪声和磨损.交互贯通的微孔结构增加了对流散热及散热面积^[15],有效降低摩擦温度,保护摩擦副.相关研究表明,闸片的磨粒质量最多的颗粒尺寸分布在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 之间^[16],连通的微孔结构不易被磨粒堵塞.由此可见,微孔型闸片不仅能够有效降低摩擦噪声,还能通过提高闸片的散热能力来保证闸片在高温条件下可靠工作.

在材料成分方面,开发了金属系和陶瓷系两个配方体系,其主要区别是一个含金属填料,另一个少含甚至不含金属填料,而相应地增加特种陶瓷成分.特种陶瓷粉末用于控制摩擦系数,实现与对偶制动盘的良好匹配,延缓或避免大颗粒陶瓷因疲劳磨损引起的失效.在成型工艺方面,分别采用传统工艺和微孔工艺两种方式来压制闸片,成型过程中控制各组闸片的孔隙率大小.在充分了解 SiC 颗粒增强铝基对偶材料性能试验的基础上,确定闸片研发的方向,筛选出 8 副闸片进行试验研究和分析对比.表 1 给出了 8 副闸片的型号及对应的技术特点,其中微孔工艺闸片 3 副,传统工艺闸片 5 副.图 2 所示的 7 副闸片以及当时正在台架上进行试验的闸片即为试验研究所用的 8 副闸片实物.

表 1 闸片型号及技术特点

闸片型号	材料成分	成型工艺	气孔率
J65-102c	金属系	微孔工艺	高
J65-102h	金属系	传统工艺	高
J65-104h	金属系	传统工艺	一般
J65-211h	陶瓷系	传统工艺	高
J65-217c	陶瓷系	微孔工艺	较高
J65-217h	陶瓷系	传统工艺	较高
J65-218c	陶瓷系	微孔工艺	一般
J65-218h	陶瓷系	传统工艺	一般

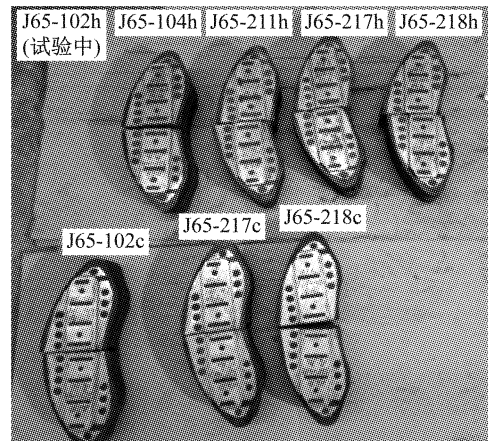


图 2 用于 1:1 台架试验的 8 副闸片

Fig.2 8 pairs of pads for rig test

2 试验及结果

2.1 MM-1000 试验

MM-1000 试验是一种缩比的小样惯性制动试验,能够模拟短时反复制动工况,主要用于摩擦材料的开发过程.MM-1000 试验是对 1:1 台架试验的模拟,依据摩擦面接触比压、摩擦面滑摩功以及摩擦半径处的线速度和减速度相等作为模拟的相似准则,其中缩比制动盘转速与实车运行速度的对应关系为

$$n_s = \frac{30rv}{\pi r_s R}$$

式中: n_s 为缩比制动盘转速, $r \cdot \text{min}^{-1}$; v 为实车运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; R 为车轮半径, m ; r 为车辆制动盘摩擦半径, m ; r_s 为缩比制动盘摩擦半径, m .

表 2 所列参数是以 1:1 台架试验参数为基础,按相似性原理确定的 MM-1000 试验参数.图 3 为闸片材料开发过程中采用的 MM-1000 摩擦磨损试验台,其工作原理是通过驱动主轴及惯性飞轮一同加速到规定的制动速度下,脱离驱动电机,施加一定的制动力使试样压向高速旋转的制动盘产生摩擦制动.根据试验台的特点,缩比试验采用的摩擦体试样为长方体状,外形尺寸为 $26 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ (长 \times

宽×高),摩擦面与实际闸片摩擦面一致,如图 4 所示。

表 2 MM-1000 缩比试验参数

Tab.2 Subscale test parameters of MM-1000

试验方式	参数	数值
1:1 台架试验	载重/t	14
	常用制动夹紧力/kN	38.5
	紧急制动夹紧力/kN	45
	闸片摩擦面积/cm ²	800
	摩擦半径/mm	247
	初始温度/°C	50
	制动盘规格/(mm×mm)	φ640×110
MM-1000 试验	惯量/(kg·m ⁻²)	0.46
	常用制动压力/MPa	0.38
	紧急制动压力/MPa	0.48
	闸片摩擦面积/cm ²	10.4
	摩擦半径/mm	50
	初始温度/°C	50
	制动盘规格/(mm×mm)	φ140×45

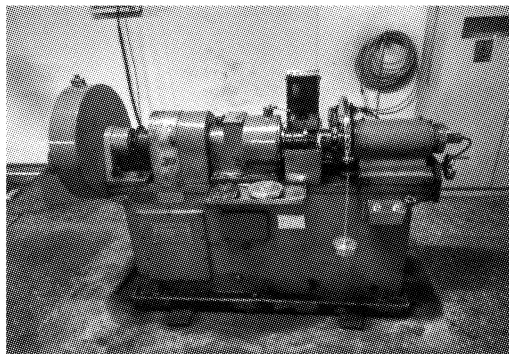


图 3 MM-1000 摩擦磨损试验台
Fig.3 MM-1000 friction test-bed

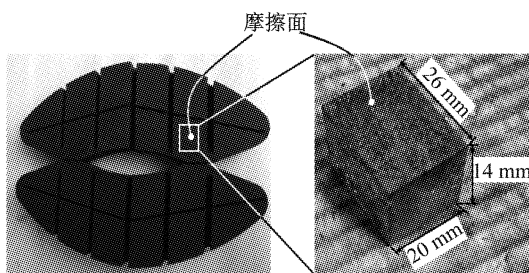


图 4 闸片试样及尺寸
Fig.4 Pad sample and dimensions

表 3 是 MM-1000 试验台上 8 副闸片的摩擦性能试验结果。

从表 3 中可以看出 J65-102h、J65-104h、J65-102c 及 J65-217c 闸片的摩擦系数均高于合成闸片的平均摩擦系数 0.350,金属系闸片表现出较高的平均摩擦系数。摩擦系数的平均稳定系数(不同速度下制动过程中平均摩擦系数与最大摩擦系数比值的平均值)基本上集中在 90%左右,其中 J65-217c 闸片

表 3 MM-1000 缩比试验结果

Tab.3 Results of MM-1000 subscale test

闸片型号	平均摩擦系数	平均稳定系数/%	厚度磨耗/mm	质量磨耗/g
J65-102c	0.369	88	0.075	0.24
J65-102h	0.394	88	0.058	0.11
J65-104h	0.386	88	0.063	0.16
J65-211h	0.281	88	0.048	0.08
J65-217c	0.365	91	0.055	0.12
J65-217h	0.301	89	0.030	0.06
J65-218c	0.288	83	0.073	0.25
J65-218h	0.254	90	0.248	0.07

摩擦系数的平均稳定系数最高,达到 91%,即 J65-217c 闸片在 MM-1000 试验台上具有高而稳定的摩擦系数。整个试验过程中,除 J65-218h 以外,其余闸片的厚度磨耗均在 0.1 mm 以内,J65-217h、J65-211h 和 J65-217c 闸片的厚度磨耗量不超过 0.05 mm。J65-217h、J65-218h 和 J65-211h 闸片的质量磨耗均低于 0.1 g。同样材料配方的闸片,传统工艺闸片的质量磨耗要低于微孔工艺闸片。

2.2 定速摩擦试验

合成闸片对温度比较敏感,为研究不同温度条件下闸片的摩擦磨耗性能,采用定速摩擦试验台对 8 副闸片试样进行试验。图 5 是闸片开发过程中使用的 D-MS 定速摩擦试验台。试验采取从 100 °C→150 °C→200 °C→150 °C→100 °C 的温度变化控制策略,每个阶段持续 10 min。试验过程的转速为 500 r·min⁻¹,制动压力为 1 MPa。定速摩擦试验台所用的制动盘尺寸为 φ170 mm×30 mm,相对 MM-1000 缩比试验所用制动盘要大,摩擦温度升降过程更接近实际制动盘,因而更能反映温度对摩擦磨耗性能的影响。

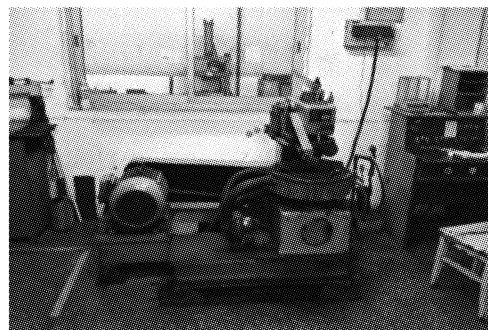


图 5 D-MS 定速摩擦试验台
Fig.5 D-MS constant speed friction test-bed

图 6 为定速试验台上 8 副闸片摩擦系数测试结果,可以看出,8 副闸片的平均摩擦系数均在 0.470 以上。按摩擦系数均值高低水平依次排序,金属系闸片 J65-102c、J65-102h 和 J65-104h 排在前三位,比

陶瓷系高,与 MM-1000 试验结果相仿. 同样材料配方的闸片,传统工艺闸片的摩擦系数总体上比微孔工艺闸片低. 除 J65-102c 闸片以外,其余闸片在 100~200 °C 之间的摩擦系数变化幅度小于 0.04,即当温度变化时,闸片的摩擦系数能够保持较好的稳定性.

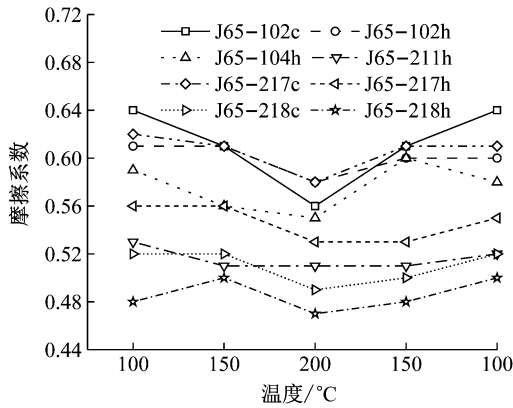


图 6 定速试验平均摩擦系数

Fig.6 Average friction coefficient of constant speed test

图 7 和图 8 分别为定速试验结束后测得 8 组闸片的质量磨耗值和体积磨耗率. 从图 7 可以看出,在 100~200 °C 范围内,陶瓷系闸片的磨耗值在 0.05 g

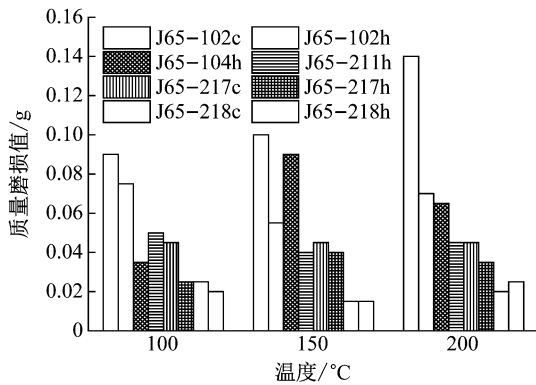


图 7 定速试验质量磨耗值

Fig.7 Weight wear of constant speed test

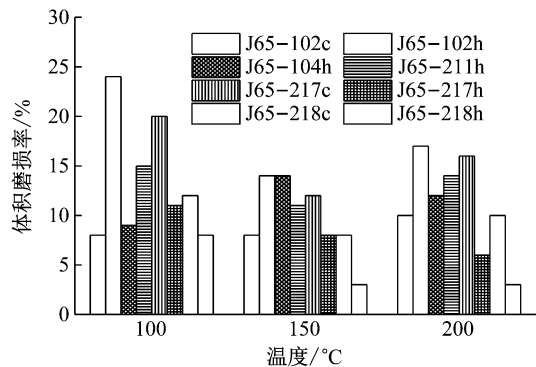


图 8 定速试验体积磨耗率

Fig.8 Volume wear rate of constant speed test

以下,而金属系闸片的磨耗值普遍高于陶瓷系,这与金属系高摩擦系数的特点是分不开的.

从图 8 可以看出,在 100~200 °C 范围内,大部分闸片的体积磨耗率低于 15%,J65-218h 和 J65-102c 闸片的体积磨耗率甚至低于 10%. 综合质量磨耗值和体积磨耗率结果来看,同样材料配方的闸片,传统工艺闸片的磨耗要比微孔工艺闸片低,与 MM-1000 试验结果一致.

2.3 噪声测试

为分辨出闸片在制动过程中产生的噪声水平,评价其噪声性能好坏,采用噪声测试仪对闸片在 1:1 台架上对其制动过程中的摩擦噪声进行测试. 噪声测试仪的型号为爱华 AWA6228 多功能声级计,测试仪在试验台上的布置如图 9 所示. 噪声探测头固定在试验仓内,通过延长线与外部的显示和控制装置相连. 根据试验现场的空间条件,探测头距离制动盘中心 0.55 m,距离地面高度 1.5 m,与人体听觉高度一致. 对于某一初速度下的单次停车制动试验,先由牵引电机将试验台牵引至设定的初速度,紧接着按照预定的减速度减速直至停车. 噪声测试仪从试验台减速开始进行启动,测试整个制动过程中的噪声 A 声压级平均值. 由于在制动减速的过程中,牵引电机不工作,背景噪声仅仅来自试验台通风系统的通风噪声,与牵引电机无关. 据此,针对相应速度下的通风过程,测试背景噪声. 测试过程中试验台只通风,不制动,整个测试过程为 30 s. 测量结果视为相应速度下的背景噪声值,去除该背景噪声值的制动噪声结果即为闸片实际产生的摩擦噪声.

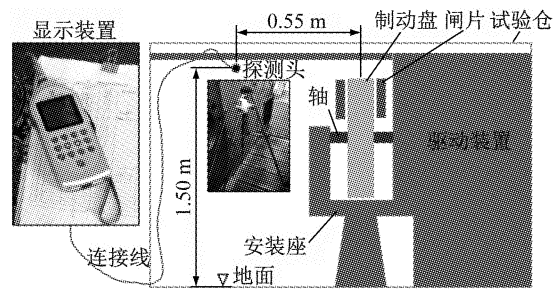


图 9 噪声测试装置及其布置

Fig.9 Test device for noise and its layout

2.4 1:1 台架试验

在某种意义上,MM-1000 试验和定速摩擦试验是一种近似试验,因此,1:1 台架试验在验证闸片产品性能合格与否时是不可或缺的. 1:1 制动试验台以完整的闸片和制动盘为试验对象,以能量相等的原则,设计试验条件与现车运行条件一致,试验台运转

速度与现车运行速度相等进行试验,因而试验结果能够真实、准确地反映试验对象的实际性能。

1:1台架试验中一个重要的评价指标就是制动过程中制动盘的最高温度.在制动盘摩擦半径所在圆环间隔 90°均匀布置 4 个 K 型热电偶,测量制动盘表面温度.热电偶安装孔为通孔,感温头距离摩擦表面 2 mm,信号通过滑环引出,热电偶在试验台制动盘上的布设见图 10.

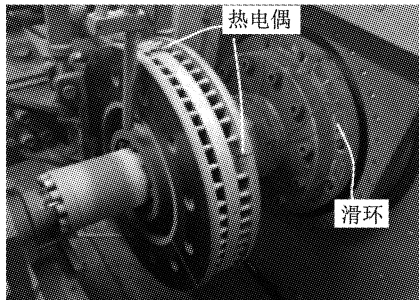


图 10 台架上制动盘的温度测试方法

Fig.10 Temperature measurement method for brake disc on test rig

考虑到 1:1 台架试验周期长,费用高,8 副闸片需按照一定的筛选流程进行试验,最终选定一组性能最优的闸片进行制动试验.筛选试验包含磨合试验、紧急制动试验和常用制动试验 3 个阶段,其中常用制动试验分为 60%常用制动试验和最大常用制动试验.表 4 是闸片在 1:1 台架上的典型试验工况及相应的试验条件,紧急制动和常用制动试验的初始速度最高为 110 km·h⁻¹,反映了闸片在实际运营过程中的使用情况.在筛选试验过程中,以平均摩擦系数、磨耗量和制动噪声对 8 副闸片的性能进行比较.表 5 给出了城轨车辆关于闸片摩擦性能相关技术参数的建议指标,包含了各制动工况下的摩擦系数、整个制动过程的磨耗量以及制动盘温度限值^[17].

磨合的目的在于使闸片与制动盘充分接触,当闸片与制动盘的接触面积达 80%以上时,认为磨合已经充分.由于在磨合试验过程中,闸片与制动盘表面尚未充分接触,出现磨耗和噪声大以及摩擦系数波动幅度大的现象是正常的.磨合试验在筛选过程中的作用是剔除摩擦系数过高或过低的闸片.磨合

表 4 1:1台架典型试验项目及试验工况

Tab.4 Typical items and its conditions for full-scale rig test

工况	夹紧力/kN	初始温度/℃	初速度/(km·h ⁻¹)
磨合试验(1~5 闸)	46.0	≤100	80
磨合试验(6~10 闸)	46.0	≤70	80
磨合试验(11~16 闸)	38.5	≤50	100
紧急制动	46.0	≤100	40、60、80、100、110、100、80、60、40
60%常用制动	23.0	≤50	40、60、80、100、110、100、80、60、40
最大常用制动	38.5	≤50	40、60、80、100、110、100、80、60、40
静摩擦测试	45.0	≤50	
模拟线路运营	38.5	≤50	100

表 5 城轨车辆合成闸片摩擦性能技术指标

Tab.5 Technical indexes of friction performance for composite brake pad of urban rail vehicle

参数	下限值	上限值
紧急制动平均摩擦系数	0.31	0.45~0.000 2v (v 为制动初速度,km·h ⁻¹)
最大常用制动平均摩擦系数	0.31	0.43~0.000 2v (v 为制动初速度,km·h ⁻¹)
静摩擦系数	0.32	
模拟运营工况	0.25	
磨耗量/(cm ³ ·MJ ⁻¹)		0.8
制动盘温度/℃		400

试验中各组闸片的平均摩擦系数如图 11 所示,其中 J65-102h 闸片的摩擦系数太低,11~16 闸次的磨合试验未完成。

从图 11 中可以看出,J65-102c 和 J65-218c 闸片摩擦系数过高,且稳定性不好.由于 8 副闸片的材料配方大体上接近,试验过程中摩擦系数值理应一致,过高或过低的摩擦系数都可以认为偏离了设计目标值.据此,将剩余 5 副闸片进行后续的紧急制动工况和常用制动工况模拟。

图 12~14 分别为剩余 5 副闸片在台架上紧急制动的平均摩擦系数、磨耗量和噪声结果.从图 12 中紧急制动工况的平均摩擦系数可以看出,作为 5 副闸片中唯一一副金属系闸片,J65-104h 的摩擦系数超过了规定的上限摩擦系数.J65-217c 闸片的摩擦系数随速度提高而下降,与设定的上限摩擦系数变化趋势一致,J65-217h 闸片的摩擦系数随速度波动不大,而 J65-211h 和 J65-218h 闸片的摩擦系数随速度提高而提高,与规定的上限摩擦系数变化趋势相

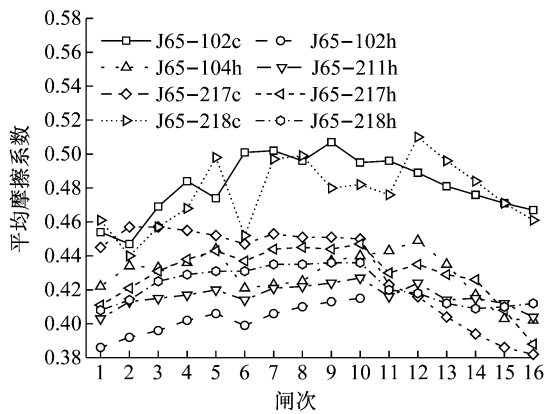


图 11 磨合试验平均摩擦系数

Fig.11 Average friction coefficient of running-in test

反.从图 13 中紧急制动工况的磨耗量可以看出, J65-217h、J65-218h 和 J65-217c 闸片的磨耗量均在 $0.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$ 以下, J65-104h 闸片的磨耗量最大, 达到 $0.67 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$, 与试验过程中表现出的高摩擦系数结果相一致. 从图 14 中紧急制动工况的噪声结果来看, J65-217c 闸片在不同速度下的噪声值比较平稳, 在 $84.5 \sim 89.8 \text{ dB(A)}$ 之间, 平均值在 5 副闸片中最低. J65-104h 闸片的噪声值最高, 达到

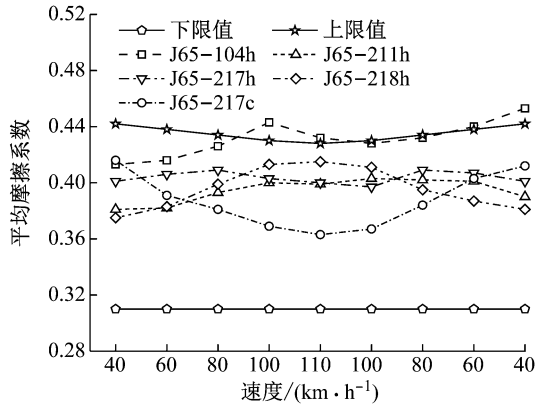


图 12 紧急制动平均摩擦系数

Fig.12 Average friction coefficient of emergency braking

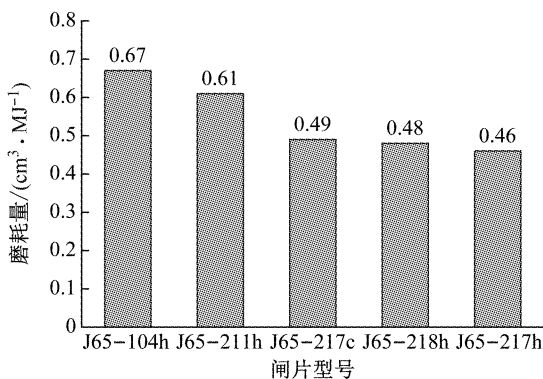


图 13 紧急制动磨耗量

Fig.13 Wear in emergency braking

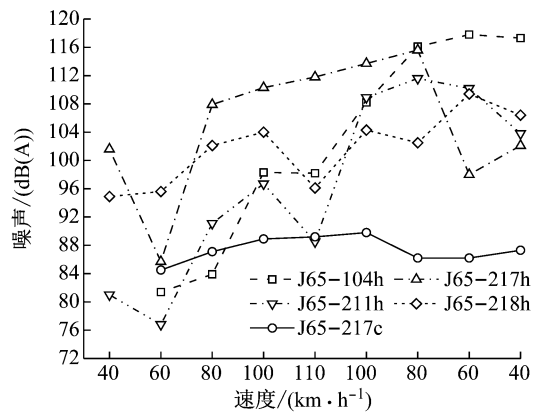


图 14 紧急制动噪声

Fig.14 Noise in emergency braking

117.8 dB(A), 且随着试验的进行噪声值越来越高.

综合摩擦系数、磨耗量和噪声结果来看, J65-104h 闸片在 5 副闸片中各项技术指标均处于劣势, 因此在后续的常用制动工况模拟试验中, J65-104h 闸片试验被取缔.

将剩余 4 副闸片在台架上进行常用制动工况模拟试验, 得到平均摩擦系数结果如图 15 所示, 磨耗量如图 16 所示, 噪声结果如图 17 所示. 剩余的 4 副闸片均为陶瓷系闸片, 闸片中不含甚至含金属, 与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘配合使用时常用制动摩擦磨耗性能均能满足表 5 中的相应规定.

图 15 展示了 4 副闸片在台架上的常用制动平均摩擦系数结果, 包括 60% 常用制动和最大常用制动及对应的上下限值. 从图 15 中可以看出, 4 副闸片的最大常用制动平均摩擦系数均在设定的范围之内, 其中 J65-217c 闸片在两种工况下摩擦系数均随速度提高而降低, 与设定的上限值变化趋势一致, 其余 3 副闸片与设定的摩擦系数上限值变化趋势相反.

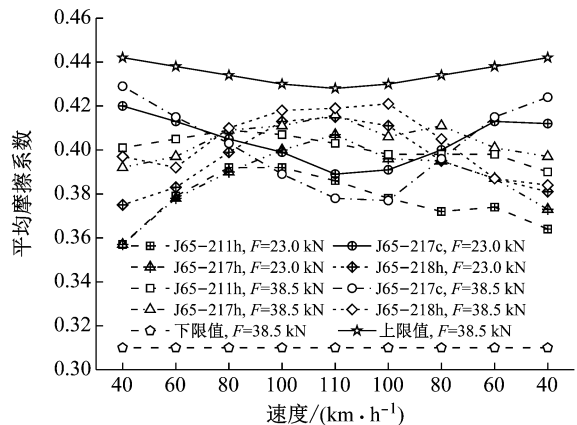


图 15 常用制动平均摩擦系数

Fig.15 Average friction coefficient of service braking

常用制动工况下,4副闸片的磨耗量在 $0.27 \sim 0.35 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$ 之间,如图 16 所示,可见闸片在常用制动工况下磨耗不大.4副闸片在两种不同压力常用制动工况下的噪声结果如图 17 所示,可以看出,制动力越大,制动产生的噪声越大.制动初速度在 $40 \sim 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内,J65-217c 闸片在 60% 常用制动工况下的噪声范围为 $79.3 \sim 89.2 \text{ dB(A)}$,最大常用制动工况下的噪声范围为 $85.2 \sim 93.4 \text{ dB(A)}$,且不同速度工况下的噪声值波动性较小.与 J65-217c 闸片相比,J65-211h 和 J65-218h 闸片噪声值明显偏高,且各速度工况下的噪声值波动也较大.J65-217h 闸片的噪声值虽然波动性较小,但不同制动压力下的噪声值分别在 $100.2 \sim 116.1 \text{ dB(A)}$ 和 $107.5 \sim 117.1 \text{ dB(A)}$ 之间,为 4 副闸片中最大的.

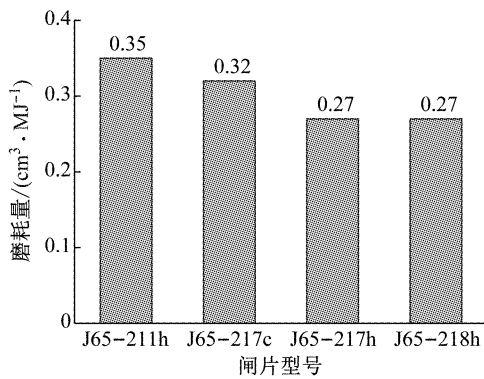


图 16 常用制动的磨耗量

Fig.16 Wear in service braking

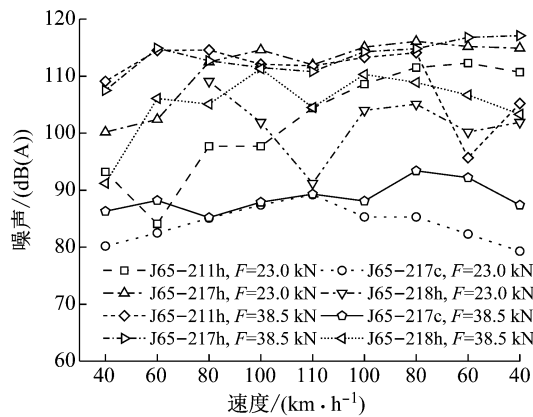


图 17 常用制动噪声

Fig.17 Noise in service braking

就摩擦磨耗而言,参与筛选试验的金属系闸片表现出来的性能均不如陶瓷系闸片,原因在于与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘配合使用时,闸片中的金属填料会与制动盘表面微观上凹凸不平的 SiC 颗粒产生较大阻力,表现出高而不稳定的摩擦系数和磨

耗.高摩擦系数和磨耗量与缩比试验和定速试验得到的结果一致,台架试验上采用真实尺寸的闸片,在制动过程中相对较小试样更不易变形,适应微观上凹凸不平的 SiC 颗粒表面相对困难,因而摩擦系数波动幅度较大.

就制动噪声而言,唯独 J65-217c 闸片的噪声低而平稳,其余闸片的噪声高且不稳定.充分磨合以后,在紧急制动和常用制动过程中,只有 J65-217c 闸片的摩擦系数随速度增加而降低,说明摩擦系数-速度曲线的负斜率特性有利于降低制动噪声.在常用制动工况中,J65-217c 闸片是 4 副片中唯一一种采用微孔工艺压制而成的闸片,保证了微孔型闸片中的孔隙率,这也是 J65-217c 闸片噪声低的重要原因.

综合各项试验指标来看,J65-217c 闸片噪声性能优异,磨耗量低,摩擦系数稳定且在设定范围之内,与设定上限值的变化趋势一致,随速度变化的适应性好.因此采用 J65-217c 闸片进行完整的制动试验程序,验证该闸片其他工况下的摩擦磨耗性能.

J65-217c 闸片的静摩擦系数测试结果如图 18 所示,5 次静摩擦系数均大于 0.32,满足城轨车辆对合成闸片的要求.模拟线路运营试验时,J65-217c 闸片的平均摩擦系数和制动过程中制动盘的最高温度如图 19 所示.经过 7 次制动的适应以后,摩擦系数开始稳定在 $0.35 \sim 0.36$ 之间,在 40 次停车制动试验过程中,平均摩擦系数在标准规定的范围之内.经过 7 次制动的适应以后,制动盘温度保持在 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,40 次停车制动试验过程中,制动盘的最高温度不超过 $400 \text{ }^\circ\text{C}$.从线路模拟试验的结果来看,J65-217c 闸片满足城轨车辆多站点频繁启停的运用环境.整个制动试验结束以后,称取闸片的质量并计算总的磨耗量为 $0.58 \text{ cm}^3 \cdot \text{MJ}^{-1}$,低于表 5 设定的磨耗上限.

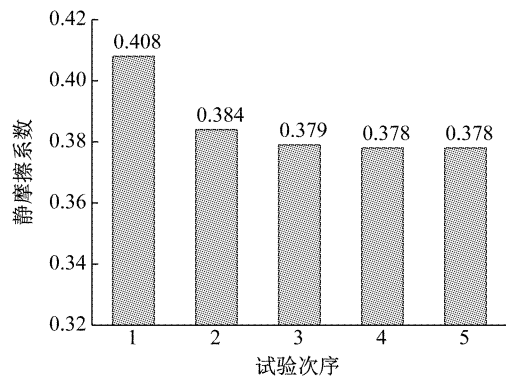


图 18 J65-217c 闸片的静摩擦系数

Fig.18 Static friction coefficient of J65-217c

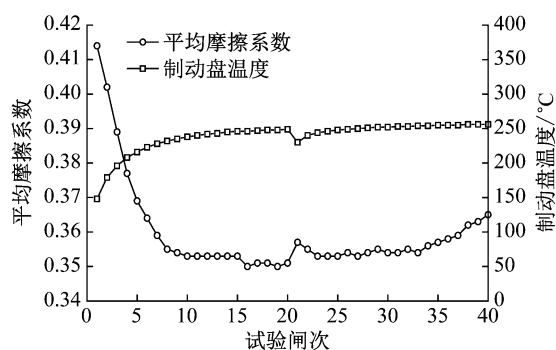


图 19 J65-217c 闸片模拟线路试验的摩擦系数及制动盘最高温度

Fig. 19 Friction coefficient of J65-217c and maximum temperature of disc in track simulation test

3 结论

(1) 研制的 J65-217c 闸片与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘摩擦性能匹配良好, 整个台架试验过程中制动盘温度远低于 400 °C, 满足城轨车辆的技术要求。

(2) 研制的 J65-217c 闸片摩擦系数随速度提高而降低, 与标准规定的变化趋势一致, 适应轮轨黏着系数的变化趋势。

(3) 研制的 J65-217c 闸片噪声低而平稳, 摩擦系数-速度曲线的负斜率特性和微孔成型技术有利于降低闸片制动噪声, 制动力越大制动噪声越大。

(4) 材料中减少金属成分, 增加陶瓷成分能够改善闸片与 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘的摩擦匹配性, 保证摩擦系数的稳定性, 降低磨损及噪声。

(5) 传统工艺闸片较微孔工艺闸片磨损略低。

(6) 缩比试样比真实闸片更容易适应 SiC 颗粒凹凸不平的表面, 因而台架试验摩擦系数较缩比试验和定速试验波动大。

参考文献:

[1] GOO B C. Al/SiCp brake discs produced by dissimilar cast-bonding[J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2015, 31(10): 1318.

[2] JIANG L, JIANG Y L, YU L, *et al.* Thermal analysis for brake disks of SiC/6061 Al alloy co-continuous composite for CRH3 during emergency braking considering airflow cooling[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(11): 2783.

[3] MALEQUE M A, KARIM M R. Tribological behavior of dual and triple particle size SiC reinforced Al - MMCs: a comparative study[J]. *Industrial Lubrication & Tribology*, 2008, 60(4): 189.

[4] MALEQUE M A, KARIM M R. Wear behavior of as-cast and

heat treated triple particle size SiC reinforced aluminum metal matrix composites[J]. *Industrial Lubrication & Tribology*, 2009, 61(2): 78.

- [5] WALCZAK M, PIENIAK D, ZWIERZCHOWSKI M. The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites[J]. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 2015, 15(1): 116.
- [6] NONG X D, JIANG Y L, FANG M, *et al.* Numerical analysis of novel SiC 3D /Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 108: 1374.
- [7] SHIVAMURTHY R C, SURAPPA M K. Tribological characteristics of A356 Al alloy-SiC_p composite discs[J]. *Wear*, 2011, 271(9/10): 1946.
- [8] DAOUD A, EI-KHAIR M T A. Wear and friction behavior of sand cast brake rotor made of A359-20vol% SiC particle composites sliding against automobile friction material[J]. *Tribology International*, 2010, 43(3): 544.
- [9] ANOOP S, NATARAJAN S, BABU S P K. Analysis of factors influencing dry sliding wear behaviour of Al/SiC-brake pad tribosystem[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3831.
- [10] NATARAJAN N, VIJAYARANGAN S, RAJENDRAN I. Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material[J]. *Wear*, 2006, 261(7): 812.
- [11] 宋国芳, 杜永平, 韩建民. SiC 颗粒增强铝基复合材料的摩擦磨损机制研究[J]. *润滑与密封*, 2006(5): 127.
- SONG Guofang, DU Yongping, HAN Jianmin. Research on mechanism of friction and wear of Al/SiCp composites[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(5): 127.
- [12] YEVTUSHENKO A, GRZES P. Finite element analysis of heat partition in a pad/disc brake system[J]. *Numerical Heat Transfer*, 2011, 59(7): 521.
- [13] ADAMOWICZ A, GRZES P. Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14): 2177.
- [14] 杨昆鹏, 高贤, 姚文俊, 等. 传统工艺对刹车片摩擦磨损性能的影响[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 13.
- YANG Kunpeng, GAO Xian, YAO Wenjun, *et al.* Effects of hot pressing on friction and wear properties for brake pads[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science)*, 2015, 37(6): 13.
- [15] 金健生, 杨洋, 牛连杰, 等. 一种有效降低闸片制动温度和制动噪声的新途径[J]. *机车电传动*, 2015(5): 36.
- JIN Jiansheng, YANG Yang, NIU Lianjie, *et al.* A new way for effective reducing brake temperature and noise of brake pad[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2015(5): 36.
- [16] IIJIMA A, SATO K, YANO K, *et al.* Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(23): 4908.
- [17] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通车辆合成闸片技术规范: CZJS/T 0012—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- China Association of Metros. Technical specification of brake pads for urban rail vehicle: CZJS/T 0012—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.