DOI: 10.3901/JME.2020.21.158

汽车摩擦材料缩比Krauss摩擦试验机的研制及比较性评价*

王振玉^{1,2} 王杰¹ 王利宁^{3,4} PETER K⁵ 马云海^{3,4} 王铁山^{3,4}

- (1. 四川大学机械工程学院 成都 610065;
2. 成都理工大学工程技术学院 乐山 614000;
3. 吉林大学机电设备研究所 长春 130117;
4. 吉林大学生物与农业工程学院 长春 130022;
5. Krauss GmbH-Link Engineering Company Murr 71711 德国)

摘要: 为了提高小样试验工况的可模拟性,降低试验成本,提高试验效率,以Krauss试验机为原型,根据相似原理,应用量纲分析法推导缩比Krauss试验机的基本参数,研制了一种缩小比例的Krauss试验机。选用PVW-3212试验规程,选取同一批次汽车制动衬片进行试验研究,通过对摩擦因数、试验温度和试验周期等指标进行比较。结果表明,全程平均摩擦因数较接近,摩擦因数最大值和最小值出现的阶段和制动次序均相同,全程平均温度具有很好的线性相关性。执行相同PVW-3212试验规程的情况下,在制动初始和制动解除阶段,缩比Krauss试验机压力响应较快,全尺寸Krauss试验机压力响应较慢,缩比试验制动结束时间提前约100 ms,每次试验成本约为全尺寸Krauss试验机的29.67%。缩比Krauss试验机与全尺寸Krauss试验机具有较好的一致性和可比性,证明了该缩比Krauss试验机的可靠性,为摩擦材料的测试提供了一种新的试验装置。

关键词: 摩擦材料; 相似理论; Krauss试验机; 对比试验; 摩擦磨损

中图分类号: TH117

Development and Comparative Evaluation of Reduced-scale Krauss Friction Tester for Automobile Friction Materials

WANG Zhenyu^{1,2} WANG Jie¹ WANG Lining^{3,4} PETER K⁵
MA Yunhai^{3,4} WANG Tieshan^{3,4}

- (1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065;
2. School of Engineering and Technology, Chengdu University of Technology, Leshan 614000;
3. Jilin University Mechanical and Electrical Equipment Research Institute, Changchun 130117;
4. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022;
5. Krauss GmbH-Link Engineering Company, Murr 71711 GER)

Abstract: In order to improve the simulation of the sample test conditions, reduce the test cost, and improve the test efficiency. Taking the Krauss tester as a prototype, the basic parameters of the reduced-scale Krauss tester were obtained according to the similarity principle and the dimensional analysis method. The reduced-scale Krauss tester had been developed. The same batch of automobile brake linings have been rigorously evaluated on two Krauss testers following PVW-3212 procedure and have been discussed these parameters such as friction coefficient, experimental temperature and test cycle. The results show that the average friction coefficient is relatively close, the maximum and minimum values of the friction coefficient appear at the same stage and the same braking sequence, and the average temperature of the whole process has good linear correlation during the entire test. When the same PVW-3212 test procedure is carried out, the pressure response of the reduced-scale Krauss tester is faster than that of the

* 国家自然科学基金(51075177)资助项目。20191107 收到初稿, 20200715 收到修改稿

full-scale Krauss tester in the initial braking and braking release stages, so the reduced-scale Krauss tester brake completion time is about 100 ms earlier, and the test cost is approximately 29.67% of the full-scale Krauss tester. The reduced-scale Krauss tester has good consistency and comparability with the full-scale Krauss tester, which proves the reliability of the reduced-scale Krauss tester and also tries to provide a new test device for the friction material test.

Key words: friction material; similarity theory; Krauss tester; comparative test; friction and wear

0 前言

汽车制动摩擦材料广泛应用于制动器和离合器中^[1-2], 保证各种车辆能够安全快速地减速或停止^[3], 其摩擦磨损性能的评价主要通过摩擦试验机来完成^[4-8], 目前测试用的摩擦试验机主要有惯性摩擦试验机^[9]、Krauss 摩擦试验机^[10]、FAST 试验机^[11]、Chase 试验机^[12]和定速摩擦试验机^[13]等, 其中 Krauss 试验机诞生于 1965 年, 是由德国 ATE-TEVES 与 ERICH.KRAUSS 研制开发的, 并由 Krauss 公司制造推广, 故称之为 Krauss 试验机(或 ATE 试验机)。该摩擦试验机以原尺寸刹车片试样和原配制动钳、制动盘为试验对象, 模拟性强, 测试简捷快速、经济可靠, 成为欧洲及全世界公认的盘式制动衬片摩擦性能权威性测试设备, 被世界摩擦材料和汽车制造厂商所认可, 国内外诸多学者^[14-17]利用 Krauss 摩擦试验机评价汽车制动摩擦复合材料的摩擦磨损性能。

用于评价汽车制动摩擦材料用的惯性摩擦试验机和 Krauss 摩擦试验机为全尺寸试验机。FAST 试验机、Chase 试验机和定速摩擦试验机为小试样试验机, 由于试验程序, 模拟条件和评价方法等因素的影响, 小尺寸试验机与全尺寸试验机的试验数据很难具有可比性。近年来相似设计理论广泛应用于工程领域^[18], 王永岩等^[19]通过相似理论推导振动筛各物理量的相似比, 通过试验证实了利用缩小比例的相似试验模型筛进行试验模态分析的有效性。王春华等^[20]基于相似理论的量纲分析法, 按照 3:1 的相似比建立各物理量的关系, 通过有限元分析与试验结果对比研究, 表明缩小的相似模型能有效模拟泡沫铝元件轴向冲击过程的吸能特性, 有效解决试验成本较高, 数值模拟计算量大的问题。王颖等^[21]基于相似理论设计 1/2 比例月球模型样车;以速度和坡度为试验因素, 开展月球车坡面通过性试验。国外学者 SANDERS 等^[22]以相似理论为基础, 建立原型和模型的参数关系, 研制了一种缩小尺寸的单面双试样摩擦试验机, 对比试验结果表明被测试样的摩擦磨损性能指标具有相同的变化趋势, 证实了缩

比试验的有效性。赵小楼等^[23]以相似理论为基础, 确定缩比例和相关参数, 研制了单面单试样 1:5 缩比台架, 对比试验测试结果表明两者试验数据具有良好的一致性和可比性, 验证了 1:5 缩比台架试验数据的有效性。马继杰等^[24]通过相似理论确定惯性缩比试验装置的参变量缩比系数, 研制惯性缩比试验装置, 通过对比试验得知, 缩比试验装置测得的结果与台架试验可比性较好, 证明惯性缩比试验装置能较可靠预测原型试验。基于以上研究, 德国 Krauss GMBH 公司与吉林大学机电设备研究所共同提出“缩比 Krauss”试验机概念, 并已经申报给 ISO 组织, 依据相似理论确定缩比 Krauss 试验机参数, 由吉林大学机电设备研究所完成试验机的试制和测试。

1 基于相似理论推导缩比模型摩擦过程相关参数

1.1 量纲分析法建立摩擦过程制动元件相似准则

选取 Krauss 试验机制动系统中制动元件为研究对象, 将制动摩擦过程进行简化, 建立相似准则。对摩擦过程中各物理量的量纲进行考察, 根据相似第二定理^[25]。建立各物理量间的关系。则

$$f(\mu, E, A, P, F, L, T, M, R, D) = 0 \quad (1)$$

式中, μ 为摩擦因数; E 为摩擦盘弹性模量; A 为试件摩擦面积; P 为单位面积上的压力; F 为制动力; L 为长度; T 为制动时间; M 为摩擦力矩; R 为有效摩擦半径; D 为摩擦盘直径。

其 π 项式为

$$\pi = \mu^a E^b A^c P^d F^e L^f T^g M^h R^j D^k \quad (2)$$

式中, $a, b, c, d, e, f, g, h, j, k$ 分别代表 $\mu, E, A, P, F, L, T, M, R, D$ 的指数。

为方便量纲分析, 取制动力 F 、长度 L 、制动时间 T 为 3 个基本量纲^[26], 采用量纲矩阵分析法, 与该模型有关的物理量在力系统中建立各物理量的量纲表达式, 依据 π 项式, 则该系统的量纲矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f & g & h & j & k \\ \mu & E & A & P & F & L & T & M & R & D \\ F & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ L & 0 & -2 & 2 & -2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据各指数间关系联立方程得

$$\begin{cases} b + d + e + h = 0 \\ -2b + 2c - 2d + f + h + j + k = 0 \\ g = 0 \end{cases} \quad (4)$$

制动过程共有 7 个相似准则, 根据相似三定理, 得到制动过程各参数的 π 矩阵

$$\begin{bmatrix} a & b & c & d & h & j & k & e & f & g \\ \mu & E & A & P & M & R & D & F & L & T \\ \pi_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 \\ \pi_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ \pi_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 2 & 0 \\ \pi_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ \pi_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ \pi_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

上述 π 矩阵中每个因次代表每个参数幂次, 矩阵中每一行幂次组成一个 π 因子, 则依次求得 7 个相似准则 $\pi_1 \sim \pi_7$ 分别为

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \mu & \pi_2 &= \frac{EL^2}{F} & \pi_3 &= \frac{A}{L^2} & \pi_4 &= \frac{PL}{F} \\ \pi_5 &= \frac{M}{FL} & \pi_6 &= \frac{R}{L} & \pi_7 &= \frac{D}{L} \end{aligned}$$

1.2 各参数相似比推导

设制动过程原型与相似模型各参数间的相似比表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\mu_p}{\mu_m} &= C_\mu & \frac{E_p}{E_m} &= C_E & \frac{A_p}{A_m} &= C_A & \frac{P_p}{P_m} &= C_P \\ \frac{M_p}{M_m} &= C_M & \frac{R_p}{R_m} &= C_R & \frac{D_p}{D_m} &= C_D \\ \frac{F_p}{F_m} &= C_F & \frac{L_p}{L_m} &= C_L & \frac{T_p}{T_m} &= C_T \end{aligned}$$

式中, p 代表原型, m 代表模型, C_μ 、 C_E 、 C_A 、 C_P 、 C_M 、 C_R 、 C_D 、 C_F 、 C_L 、 C_T 分别为摩擦因数、弹性模量、摩擦面积、单位压力、摩擦力矩、有效摩擦半径、摩擦盘直径、制动力、长度和制动时间各参数原型与模型的相似比。

制动组件的相似模型与原型的几何形状和边界条件相似, 其相似模型是根据制动器元件实物依照相似比按几何尺寸放大或缩小而成, 即

$$\frac{L_p}{L_m} = C_L = \lambda, \quad \lambda \text{ 为模型的几何相似比。}$$

由边界条件相似知, 摩擦盘材质相同, 则 $C_E=1$, 制动时间 T 相同, 则 $C_T=1$, 试件单位摩擦面积上的比压相同, 则 $C_P=1$, 根据相似条件, 可求得模型与原型的其它各相似比如表 1 所示。

表 1 模型与原型的相似比

相似比	C_μ	C_A	C_F	C_M	C_R	C_D
比值	1	λ^2	λ^2	λ^3	λ	λ

2 缩比 Krauss 试验机设计

2.1 缩比参数确定

现有的小样试验机, 如定速摩擦试验机试样摩擦表面尺寸为 25 mm×25 mm 正方形, Chase 试验机试样摩擦表面尺寸为 25 mm×25 mm 圆弧形。适用于 Krauss 摩擦试验机的现行试验标准 ECE-R90 采用取样法的试样摩擦表面尺寸为 4 400 mm², 行业建议试样表面尺寸为 80 mm×55 mm, 依据模型尺寸相似比, 则缩比 Krauss 摩擦试验机的试样表面尺寸取值为 40 mm×25 mm 矩形。由此, 可确定缩比 Krauss 模型与 1:1 Krauss 原型摩擦面积比为 1:4.4, 即 $C_A = \lambda^2 = 4.4$, 则模型的几何相似比 $\lambda = \sqrt{C_A} \approx 2$, 根据 Krauss 试验机中采用的奔驰制动器参数、几何相似比和制动程序, 确定缩比 Krauss 试验机缩比基本参数如表 2 所示。

表 2 缩比 Krauss 试验机基本参数

参数	数值	相似比
试件摩擦面积 A/cm^2	10	1:4.4
单位面积上的压力 $P/(\text{N}/\text{cm}^2)$	74.5	1:1
制动力 F/N	745	4.4:1
制动时间 T/s	5	1:1
有效摩擦半径 R/mm	52.5	1:2
摩擦盘直径 D/mm	139	1:2

2.2 试验机主要结构

用于制动摩擦材料摩擦学评估的缩比 Krauss 试验机应能够模拟与实际系统中滑动速度, 接触压力和温度相当的操作条件。缩比 Krauss 试验机结构如图 1 所示。

图 1 为缩比 Krauss 试验机结构示意图。该试验机主要由动力系统、测温系统、测速系统、制动系统、伺服加载系统、力矩测量系统及冷却除尘系统组成。动力系统主要由主电动机、带传动机构、主轴组件构成。主轴组件通过轴承座支撑, 主轴端部连接摩擦盘; 测温系统主要通过热电偶测温, 由集流环输出; 测速系统通过光电编码器测量主轴转速。力矩测量系统通过压力传感器测

量摩擦力矩, 进而换算成摩擦因数; 制动系统通过制动活塞施加正压力对连接主轴的制动盘进行制动; 伺服加载系统通过伺服电动机的旋转带动制动主缸的活塞进行直线运动产生制动压力; 冷

却除尘系统由吹风机通过送风管道对制动盘制冷, 再由排风机通过排风管道将热量和粉尘排除室外, 既能很好地控制试验温度, 又能保持制动系统及试验区域的清洁。

图 1 缩比 Krauss 试验机结构示意图

制动系统结构如图 2 所示, 制动钳体主要由左、右两部分构成, 左钳体和右钳体中间通过销轴定位, 螺栓锁紧, 左钳体上部的凸缘用来与制动力臂相连接。左、右钳体的前上端设有排气孔, 下端设有进油孔, 排气口上安装有空气排气阀, 进油孔通过快换接头连接压力发生器的制动总泵。试件夹位于钳体中间, 通过上部的环形把手方便操作, 试件安装在试件夹的试件腔内, 试件腔的背部设计卸载螺钉孔。钳体内加工成液压缸体, 活塞安装在缸体内, 通过密封圈实现密封。摩擦盘位于中部, 通过法兰与回转主轴相连。试验前通过空气排气阀将制动液体内的空气排出。试验时在有压液体的作用下推动左、右钳体内活塞分别向内侧移动, 进而带动试件夹, 使试件压紧摩擦盘, 在正压力的作用下, 产生摩擦力矩实现制动, 一次制动完成后, 压力卸载, 活塞向外侧移动, 试件与摩擦盘分开。试验结束后, 试件温度仍然较高, 在试件腔内膨胀卡紧, 通过卸载螺钉孔将试样顶出, 方便取样。

图 2 制动系统结构图

伺服加载系统结构如图 3 所示, 选用日本安川公司生产的交流伺服电动机(型号: SGMGV-09DDA6,

额定转速 1 500 r/min, 最大输出转矩 5.39 N·m, 功率 850 W, 电压 AC400 V, 配有 20 位增量编码器), 其固定到电动机安装板上, 电动机端和主轴端分别安装同步带轮, 采用同步带传动, 将电动机的动力传递给主轴。为提高定位精度, 主轴上采用两个深沟球轴承进行轴向和径向定位, 双向推力轴承承担轴向推力, 主轴左端连接滚珠丝杠, 将主轴的旋转动力转化为直线位移驱动滑座向左移动, 滑座前面的锥形体通过钢球推动制动总泵的活塞向左移动, 在制动主缸内的制动液将产生高压制动油液经阀块的接口输出到制动系统, 阀块连接压力变送器测量压力信号。当电动机反向旋转时, 制动主缸内的制动活塞将向右移动, 制动系统泄压。

图 3 伺服加载系统结构图

该伺服加载系统采用智能模糊 PID 控制技术, 在软件上通过程序给定输入信号, 通过数据采集系统, 经过 D/A 转换, 输出电压信号, 该电压信号由电动机伺服控制器转换为电流信号供给电动机, 驱动电动机转动, 通过压力传感器获得压力反馈信号, 由数据采集系统经过 A/D 转换处理, 得到计算机控制系统能够识别的数据, 实现闭环控制。

力矩测量系统结构如图 4 所示, 选用 S 型拉压传感器, 传感器的上端通过连接件与力臂相连, 下端通过连接件固定于轴承座的支架上。力臂通过螺钉固定到制动钳体上, 制动钳体与旋转的主轴间安装有轴承, 主轴带动摩擦盘旋转, 当实现制动时, 制动钳体就会产生旋转力矩, 在力臂的作用下将转矩传递给 S 型拉压传感器, 传感器两边的电阻应变片发生变形, 进而其阻值发生变化, 转换成电信号测量其拉、压力。

图 4 力矩测量系统结构图

摩擦盘是重要的试验零部件, 采用珠光体铸铁盘, 其主要成分如表 3 所示。按轿车刹车盘要求, 不加合金, 材料组织为珠光体 >98%, 铁素体 <2%, 渗碳体 <0%, 铸造过程中不许有气孔, 夹杂, 缩松, 裂纹等缺陷, 布氏硬度 HB170~190, 其实物如图 5 所示。

图 5 摩擦盘结构及实物图

表 3 摩擦盘成分及质量分数(%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
3.5~4.0	2.0~2.4	0.6~1.0	<0.1	<0.1	0.15~0.25	0.6~0.7

图 6 缩比 Krauss 试验机实物图

加工制作完成的缩比 Krauss 试验机实物如图 6 所示, 全尺寸 Krauss 试验机实物如图 7 所示。

图 7 全尺寸 Krauss 试验机实物图

3 试验部分

3.1 试验条件

为评价缩比 Krauss 试验机的性能，与全尺寸 Krauss 试验机进行对比试验，在相同时间段同一室温下进行，摩擦盘为同一炉铁水浇筑的珠光体铸铁盘，摩擦试样为同一批次，同一模压制备的有机复合摩擦材料试件。其对比试验条件如表 4 所示。

表 4 对比试验条件

项目	缩比 Krauss 试验	全尺寸 Krauss 试验
试验标准	PVW-3212	
摩擦盘尺寸/mm	φ139×6	φ278×12
试样尺寸/mm	40×25	80×55
有效摩擦半径/mm	52.5	105

3.2 试验规程

PVW-3212 标准的主要试验规程如表 5 所示，全尺寸试验参数记作全尺寸，缩比试验参数记作缩比。该试验规程主要分成三个阶段，磨合阶段、衰退阶段和恢复阶段，三个阶段共进行 100 次制动，其中磨合阶段 30 次，衰退阶段 60 次，恢复阶段 10 次，每次制动时间约 5 s，在 5 s 的制动时间内，大约每 2 ms 采集一次数据，每次制动采集近 2 500 组数据。在进行主程序前，先对试样进行磨合，以保证试样与摩擦盘的接触面积达到 95% 以上，保证具有较好的贴合效果。

表 5 PVW-3212 标准试验规程

序 号	试验 项目	制动 循环	制动 次数	制动 时间/s	制动释 放 时间/s	转速/(r/min)		制动管路压 力/10 ⁵ Pa		初始 温度 /℃	冷 却
						全尺 寸	缩比	全尺 寸	缩比		
1	磨合	1-6	5	5	10	660	1 229	15.6	19.8	100	开
2	衰退	7	10	5	10	660	1 229	15.6	19.8	50	关
3	衰退	8-12	10	5	10	660	1 229	15.6	19.8	100	关
4	恢复	13	10	5	10	660	1 229	15.6	19.8	100	开

3.3 摩擦因数计算

Krauss 试验机采用 PVW-3212 试验规程，其摩擦因数计算公式如下

$$\mu = Km\mu \frac{M}{P} \tag{6}$$

式中， M 为制动力矩； P 为制动压力； $Km\mu$ 为计算系数；而 $Km\mu$ 按下式计算

$$Km\mu = \frac{1}{2Ar_zRm\eta} \times 10^3 \tag{7}$$

式中， Ar_z 为制动缸活塞面积； Rm 为制动力臂长度； η 为效率(取 0.98)。

3.4 摩擦因数结果比较与分析

根据 PVW-3212 标准，将全过程的三个阶段摩擦因数数据进行对比，图 8 为全程平均摩擦因数对比图，可知全程摩擦因数变化总体趋势相同，缩比试验摩擦因数波动幅度略小于全尺寸试验摩擦因数。缩比 Krauss 试验全过程的平均摩擦因数为 0.325，全尺寸 Krauss 试验全过程的平均摩擦因数为 0.341，全程平均摩擦因数较接近，相对误差为 4.7%，但全过程中缩比 Krauss 试验全程摩擦因数的方差为 0.000 811，全尺寸 Krauss 试验全程摩擦因数的方差为 0.002 203，说明缩比 Krauss 试验全程摩擦因数波动较小。从图 8 可以看出，摩擦因数的最大值均出现在衰退阶段的第一个循环的第 5 次制动，全尺寸 Krauss 试验机测试摩擦因数为 0.42，缩比 Krauss 试验机测试摩擦因数为 0.379；其摩擦因数的最小值均出现在衰退阶段的第二个循环的最后一次制动，全尺寸 Krauss 试验机测试摩擦因数为 0.182，缩比 Krauss 试验机测试摩擦因数为 0.252，随后摩擦因数的低点逐渐抬升。

图 8 全程平均摩擦因数对比图

3.5 试验温度结果比较分析

摩擦过程主要是能量转换的过程，制动盘及其

旋转部件的转动动能转变成热能, 试验过程中试验温度的比较主要体现两个试验装置的温度模拟性。图9为试验温度对比图, 可以看出试验温度具有非常好的一致性, 每次制动摩擦盘的温升相差较小, 这主要是每个循环的第一次制动初始温度除了第1次和第31次外都是100℃, 这样能够很好地实现温度比较, 从整体上看, 缩比试验的温度整体高于全尺寸试验, 主要是由于缩比制动活塞直径相对较小, 启动快, 摩擦升温较快。将缩比试验和全尺寸试验的试验温度进行相关性分析, 结果如图10所示, 得到试验温度的线性拟合曲线方程为

$$y = 0.874x - 4.3939 \quad R^2 = 0.9899$$

表明二者的试验温度相关性很好。

图9 试验温度对比图

图10 试验温度的相互关系

3.6 试样外观比较分析

对比试验选用试样为同一批次, 同一模压加工出的摩擦材料, 以芳纶纤维为主要增强纤维、酚醛树脂为粘结剂的某品牌汽车配套制动衬片, 对比试样外观如图11所示, 二者形貌区别较小, 两种试样

执行 PVW-3212 标准后表面出现一定量的黑色粉末, 去除粉末测量二者的质量损失分别为 1.47% 和 1.41%, 缩比 Krauss 试样的质量损失略大。造成这种结果的主要原因一方面是由于缩比 Krauss 试验的升降温速度均较快, 整体上温度略高于全尺寸 Krauss 试验; 另一方面是由于缩比试样体积相对较小, 热容量小, 在相同制动初始温度条件下, 衰退及恢复试验中的制动最高温度略高于全尺寸 Krauss 试验。因此, 相对较高的温度促使试样中酚醛树脂和有机组分热分解加剧, 形成的碳化粉末较多。

图11 试样外观

3.7 试验周期及成本比较与分析

PVW-3212 标准程序分为三个阶段共进行 100 次制动, 总的试验周期由制动时间、制动释放时间和连续制动后的制动盘降温等待时间组成。

3.7.1 单次制动过程制动时间比较与分析

在 100 次制动过程中, 选取衰退阶段初始制动温度 250℃ 时的单次制动过程进行制定时间的比较分析。

每次制动过程主要分成 3 个阶段, 即初始制动阶段、稳定制动阶段和制动解除阶段。从图 12 可以看出, 缩比 Krauss 试验机在初始制动阶段, 制动压力和力矩曲线经历突变-整理-回归的过程, 小活塞启动较快, 活塞运动阻尼较小, 压力迅速升高, 通过压力变送器反馈信号, 由控制算法进行自整定计算, 振幅逐渐减小, 最后回归到给定的伺服压力。同样在制动解除阶段, 缩比试验制动压力结束时间

提前 300 ms, 摩擦力矩的制动结束时间提前约 100 ms, 全尺寸试验摩擦力矩的制动结束时间滞后约 150 ms。产生这种现象的主要原因可根据液压制动数学响应模型分析。液压制动过程中通过制动主缸驱动制动轮缸完成微位移动作实现制动。彭雄斌等^[27]完成微位移控制液压系统建模, 得到位移放大液压缸与执行液压缸两者的位移关系式, 由此得出此 Krauss 试验机液压制动系统中制动主缸-制动轮缸的位移关系式

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{A_v / A_p}{V_0 \rho_p A_p^2 L_p s^2 / A_p^2 E_p + V_0 B_p s / A_p + A_p E_p + 1} \quad (8)$$

整理得

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{A_v E_p}{V_0 \rho_p A_p L_p s^2 + V_0 B_p s / A_p + A_p E_p} \quad (9)$$

式中, $x_p(s)$ 为制动轮缸的位移响应; $x_v(s)$ 为制动主缸的位移响应; A_v 为制动主缸活塞有效作用面积; A_p 为制动轮缸活塞有效作用面积; E_p 为油液弹性模量; V_0 为制动主缸和制动轮缸油液初始体积之和; ρ_p 为制动轮缸活塞材料密度; L_p 为制动轮缸活塞长度; B_p 为制动轮缸等效黏性阻尼系数。

图 12 250 °C 衰退过程单次制动过程对比图

两种 Krauss 试验机采用相同的压力发生器, 试验程序 and 控制系统均相同, 则制动主缸输出位移

$x_v(s)$ 相等, 但缩比试验机与全尺寸试验机的制动活塞面积约为 1:4.4, 由式(9)可知, 活塞面积越大, 产生微位移动作响应越慢, 活塞面积越小, 产生微位移动作响应越快, 致使 Krauss 试验机单次制动所需时间缩短 100 ms, 单次制动时间减少将会使整个试验完成时间缩短, 节约试验成本。

3.7.2 累计试验时间及成本比较与分析

图 13 为两种 Krauss 试验机累计试验时间对比图, 随着制动次数的增加, 累计试验时间纵坐标差值逐渐增大, 试验程序越复杂, 制动次数越多, 累计制动时间差就会越大。试验结束后, 缩比 Krauss 试验机累计试验时间为 3 946.9 s, 全尺寸 Krauss 试验机为 5 842.2 s。

图 13 累计试验时间对比图

可知, 执行 PVW-3212 试验标准, 缩比 Krauss 试验机的试验周期是全尺寸 Krauss 试验机的 68%, 试验周期大大降低; 缩比 Krauss 试验机的主电动机功率为 15 kW, 全尺寸 Krauss 试验机主电动机功率为 75 kW, 采用 PVW-3212 试验标准, 缩比 Krauss 试验机每次试验的耗电量约为全尺寸 Krauss 试验机的 29.67%, 试验成本可以大幅降低。可见, 通过相似理论研制的缩比 Krauss 试验机不但能够有效减少试验时间, 缩短产品开发周期, 而且还能大幅减低成本。

4 结论

(1) 全程平均摩擦因数较接近, 分别为 0.325 和 0.341, 相对误差为 4.7%。摩擦因数的最大值均出现在衰退阶段的第一个循环的第 5 次制动, 摩擦因数的最小值均出现在衰退阶段的第二个循环的最后一次制动, 最大值和最小值出现的阶段和制动次序均相同。

(2) 试验温度具有非常好的一致性, 每次制动摩擦盘的温升相差较小, 二者试验温度的线性拟合

曲线方程为 $y = 0.874x - 4.3939$ ，且 $R^2 = 0.9895$ ，表明二者的试验温度相关性很好。

(3) 单次制动过程中，缩比试验制动压力结束时间提前 300 ms，摩擦力矩的制动结束时间提前约 100 ms。

(4) 缩比 Krauss 试验机的试验周期是全尺寸 Krauss 试验机的 68%，每次试验成本约为全尺寸 Krauss 试验机的 29.67%，大大缩短产品开发周期，大幅减低试验费用。

参 考 文 献

- [1] LIU Y C, WANG L N, LIU D X, et al. Evaluation of wear resistance of corn stalk fiber reinforced brake friction materials prepared by wet granulation [J]. *Wear*, 2019, 432-433: 1-9.
- [2] BALACHANDRAN S R, BALAJI M A S, Noorani A B M A, et al. Tribological performance evaluation of newly synthesized silane treated shell powders in friction composites[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(6): 065317.
- [3] JI Z, LUO W, ZHOU K, et al. Effects of the shapes and dimensions of mullite whisker on the friction and wear behaviors of resin-based friction materials[J]. *Wear*, 2018, 406: 118-125.
- [4] SHINDE D, MISTRY K N, JHAVAR S, et al. A Review on Non-Asbestos Friction Materials: Material Composition and Manufacturing [J]. *Advanced Materials Research*, 2018, 1150: 22-42.
- [5] SUN W, ZHOU W, LIU J, et al. The size effect of SiO_2 particles on friction mechanisms of a composite friction material [J]. *Tribology Letters*, 2018, 66(1): 1-10.
- [6] FEDERICI M, PERRICONE G, GIALANELLA S, et al. Sliding behaviour of friction material against cermet coatings: Pin-on-disc study of the running-in stage [J]. *Tribology Letters*, 2018, 66(2): 53.
- [7] 张森, 章健. 汽车通风盘式制动器的流固热多物理场耦合建模与分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(8): 154-164. ZHANG Sen, ZHANG Jian. Modeling and analysis on fluid-solid-thermal physical field coupling of ventilated disc brake [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(8): 154-164.
- [8] SUN W, ZHOU W, LIU J, et al. Development of a composite friction material with excellent fade resistance by employing oversized ceramic particles[J]. *Tribology Letters*, 2018, 66(1): 22-31.
- [9] FEDERICI M, ALEMANI M, MENAPACE C, et al. A critical comparison of dynamometer data with pin-on-disc data for the same two friction material pairs – A case study[J]. *Wear*, 2019, 424-425: 40-47.
- [10] HA C Y, SOO J B, MOK L S, et al. Size effect of tire rubber particles on tribological properties of brake friction materials[J]. *Wear*, 2018, 406-407: 80-86.
- [11] JEGANMOHAN S R, CHRISTY T V, SOLOMON D G, et al. Influence of calcium sulfate whiskers on the tribological characteristics of automotive brake friction materials[J]. *Engineering and Technology, International Journal*, 2020, 23(2): 445-451.
- [12] KCHAOU M, SELLAMI A, FAJOUI J, et al. Tribological performance characterization of brake friction materials: What test? What coefficient of friction?[J]. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 2018 (208-210): 1-13.
- [13] MA Y, WU S, TONG J, et al. Tribological and mechanical behaviours of rattan-fibre-reinforced friction materials under dry sliding conditions[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(3): 035101.
- [14] KACHHAP R K, SATAPATHY B K. Synergistic effect of tungsten disulfide and cenosphere combination on braking performance of composite friction materials[J]. *Materials & Design*, 2014, 56(4): 368-378.
- [15] DADKAR N, TOMAR B S, SATAPATHY B K, et al. Performance assessment of hybrid composite friction materials based on flyash-rock fibre combination[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(2): 723-731.
- [16] TIWARI A, JAGGI H S, KACHHAP R K et al. Comparative performance assessment of cenosphere and barium sulphate based friction composites[J]. *Wear*, 2014, 309(1-2): 259-268.
- [17] GWEON J H, JOO B S, JANG H. The effect of short glass fiber dispersion on the friction and vibration of brake friction materials[J]. *Wear*, 2016, 362-363(9): 61-67.
- [18] YANG R G, DUAN Z B, LU Y, et al. Load reduction test method of similarity theory and BP neural networks of large cranes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(01): 145-151.
- [19] 王永岩, 张则荣. 振动筛试验模型和原型相似试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(5): 101-105. WANG Yongyan, ZHANG Zerong. Similar experimental

- study of test model and prototype of vibrating screen[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 101-105.
- [20] 王春华, 刘影. 相似理论在泡沫铝冲击吸能过程的应用分析[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(10): 1542-1549.
- WANG Chunhua, LIU Ying. Analysis of impact energy absorption for foam aluminum components based on similarity theory [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(10): 1542-1549.
- [21] 王颖, 黄晗, 李建桥, 等. 基于相似理论的月球车坡面通过性能试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 406-412.
- WANG Ying, HUANG Han, LI Jianqiao, et al. Experiment on Lunar rover's trafficability on slope terrain based on similarity theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 406-412.
- [22] SANDERS P G, DALKA T M, BASCH R H. A reduced-scale brake dynamometer for friction characterization[J]. Tribology International, 2001, 34(9): 609-615.
- [23] 赵小楼, 王铁山, 程光明, 等. 基于相似原理的摩擦材料 1:5 缩比台架及其可比性分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(5): 153-156.
- ZHAO Xiaolou, WANG Tieshan, CHENG Guangming, et al. The scaling 1:5 dynamometer based on similar principle for friction material and its comparability analysis[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(5): 153-156.
- [24] 马继杰, 赵金祥, 刘笑羽, 等. 汽车摩擦材料惯性缩比试验装置与试验流程研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(7): 102-106.
- MA Jijie, ZHAO Jinxiang, LIU Xiaoyu, et al. Research on subscale inertia test equipment and test procedure of vehicle friction materials [J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(7): 102-106.
- [25] 赵丽娟, 赵名扬. 相似理论在采煤机螺旋滚筒结构设计中的应用[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 63-69.
- ZHAO Lijuan, ZHAO Mingyang. Similarity Theory application in structure design of shearer drum[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(1): 63-69.
- [26] 张晨, 蔡正银, 徐光明, 等. 冻土离心模型试验相似准则分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 89-97.
- ZHANG Chen, CAI Zhengyin, XU Guangming, et al. Dimensional analysis of centrifugal modeling of frozen soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 89-97.
- [27] 彭雄斌, 龚国芳, 廖湘平, 等. 微位移控制液压系统建模与模型辨识[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 206-211.
- PENG Xiongbin, GONG Guofang, LIAO Xiangping, et al. Modeling and model identification of micro-position-control hydraulic system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 206-211.

作者简介: 王振玉, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 教授。主要从事摩擦材料技术与装备研究。

E-mail: wangzhenyu2009@163.com

王杰(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事计算机集成制造技术研究。

E-mail: wangjie@scu.edu.cn