

# 铜基粉末冶金摩擦材料调速制动摩擦系数试验

王延忠<sup>1</sup>, 魏 彬<sup>1</sup>, 宁克焱<sup>2</sup>, 韩 明<sup>2</sup>, 沈 蓉<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程学院, 100191 北京; 2. 中国北方车辆研究所 车辆传动重点实验室, 100072 北京)

**摘 要:** 为得到速度和压力边界条件在摩擦元件接合过程中对摩擦特性的影响机制,设计一种变速滑摩的方法,针对径向槽、双圆弧槽和螺旋槽3种沟槽形式,通过不同工况摩滑过程和闭锁过程的摩擦系数试验数据分析,获得了摩擦系数随滑摩速度及压力载荷变化的特性.试验结果表明,变速滑摩试验可以很好地体现摩擦元件制动过程中的流体动力效应、边界摩擦效应和粘附闭锁效应;沟槽形式一定程度上影响摩擦系数随速度的变化趋势,静摩擦系数随载荷的增大而减小最后趋于稳定;在不同载荷条件下,摩擦系数对速度边界的敏感程度存在差异;变速过程静动比分析结果表明,Cu基粉末冶金摩擦材料适合在重载条件下工作,而且双圆弧沟槽摩擦元件的接合平顺性更好.

**关键词:** 摩擦机理;沟槽;Cu基粉末冶金;边界条件;调速滑摩

**中图分类号:** TH117

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2014)01-0116-05

## Friction coefficient speed-control experiment of Cu-based wet sintered friction material

WANG Yanzhong<sup>1</sup>, WEI Bin<sup>1</sup>, NING Keyan<sup>2</sup>, HAN Ming<sup>2</sup>, SHEN Rong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China;

2. China National Key Lab of Vehicular Transmission, China North Vehicle Research Institute, 100072 Beijing, China)

**Abstract:** In order to obtain the friction mechanism of friction element in engagement with the changes of speed and pressure boundary condition, a newer speed control test method for friction characteristic of friction element with different grooves is proposed. The effect of mixed, boundary and adhesion friction can be well embodied in friction and lock-up experimental process of the friction element. The grooves can impact the trends of the friction coefficient curves with the increase of speed. The static friction coefficient declines with the increase of load and tends to be stable in the end. The friction coefficient sensitivity to speed is different. It is verified that Cu-based sintered friction material can work in heavy duty condition and the one with double arc grooves can engage more smoothly by the fiction static and dynamic ratio investigation.

**Keywords:** friction mechanism; grooves; Cu-based sintered materials; boundary condition; speed control friction

大功率 Cu 基粉末冶金摩擦材料在高能量密度传动系统中得到了广泛应用.现阶段广泛采用 SAE 台架试验和 Pin On Disc 销盘试验作为材料摩擦特性的验证手段.针对复杂边界情况的摩擦元件摩擦特性,大多数试验都在 SAE#2 或相似的试验台上完成.该试验台能够完成挤压、滑摩、闭锁等多工况的模拟. Haviland<sup>[1]</sup>、Evans<sup>[2]</sup> 和 Holgerson<sup>[3]</sup> 等通过 SAE 制动试验初步研究了湿

式离合器接合过程的摩擦特性,得出了制动过程中存在多种摩擦机理的结论. Tatiah<sup>[4]</sup> 和 Osanai<sup>[5]</sup> 等对湿式摩擦副多次接合过程的热失效机理进行了理论和试验研究,得到了以失效模式为基础的温度场热应力模型, Kim<sup>[6]</sup> 通过制动试验研究了铜基物质在摩擦磨损过程所起到的重要作用,并分析了其成分对摩擦磨损特性的影响.

Pin On Disc 销盘试验台因结构简单常用于摩擦磨损模型的验证<sup>[7]</sup>. YAN Wenyi<sup>[8]</sup> 等以应力分析为基础提出了磨合磨损模型,通过销盘试验对该模型进行了试验验证, Laraqia<sup>[9]</sup> 使用销盘试验机验证了三维温度场解析模型. Wahlströma<sup>[10]</sup>

收稿日期: 2013-02-26.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(ss2012aa040104).

作者简介: 王延忠(1963—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 魏彬, buaaweibin@126.com.

等采用销盘试验对多种航空制动材料进行了摩擦特性的试验分析.现阶段所采用的试验方法大多为模拟制动试验,该方法虽然有效模拟了制动的全过程,但不易于对制动过程各个阶段及其相应的摩擦机理进行深入研究,边界条件相互影响,试验数据的同一性和稳定性比较差,销盘试验影响因素单一,不能模拟复杂表面对摩擦特性的影响,试验所得到的结果与结论即使对同一型号的产品也没有普遍的适用性.

本文应用自行设计的调速摩擦磨损试验机,采用模拟制动边界及调速主动控制方法来更精确地分析边界条件对摩擦系数的影响.

1 制动过程阶段划分

行星变速机构中的某铜基粉末冶金湿式摩擦材料的典型制动过程及其参数变化曲线如图 1 所示.该试验在传统的 SAE 台架上完成,所采用的试样如图 2(a)所示,机械特性如表 1 所示.

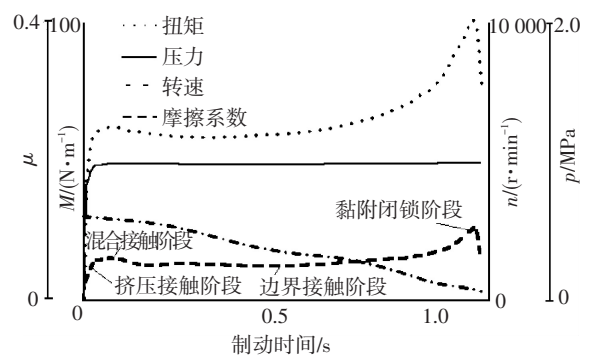
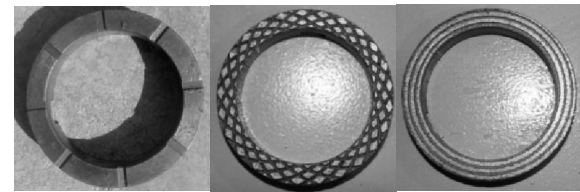


图 1 摩擦元件紧急制动过程示意图



(a) 径向槽 (b) 双圆弧槽 (c) 螺旋槽

图 2 用于摩擦机理验证的试验试环

表 1 某 Cu 基粉末冶金材料试验参数

| 试样尺寸/<br>(mm×mm) | 刚度/<br>GPa | 沟槽形式 | 冷却形式 | 冷却油量/<br>(mL·min <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------|------|------|----------------------------------|
| Φ85×Φ65          | 2.26       | 径向槽  | 轴心喷油 | 90                               |
| Φ85×Φ65          | 2.26       | 双圆弧槽 | 轴心喷油 | 90                               |
| Φ85×Φ65          | 2.26       | 螺旋槽  | 轴心喷油 | 90                               |

由图 1 可以看出,在整个制动试验过程中,所施加的载荷变化不大,多组试验过程中的环境温度变化也不明显,速度的变化基本呈线性下降趋势;由于载荷固定,扭矩和摩擦系数曲线呈相同的变化趋势;接合初期摩擦系数有小幅波动,之后趋

于平缓,在速度降低到某一特定值后摩擦系数出现峰值(闭锁效应).由长期实践经验可知,摩擦系数的变化往往对应着摩擦磨损形式的改变即摩擦机理的变化<sup>[11]</sup>.通过对大量模拟制动试验的观察以及相应的摩擦机理的分析,可以将整个制动过程分为 4 个阶段:A(摩擦副流体膜挤压阶段)<sup>[12-13]</sup>、B(固液混合摩擦阶段)、C(边界接触阶段)和 D(黏附闭锁阶段).影响材料摩擦特性的主要边界条件是面压、速度和温度,整个制动过程各阶段的主要边界条件影响因素如图 3 所示.闭锁摩擦系数是摩擦副相对转速趋于零时的摩擦系数,本质上该阶段摩擦机理接近低速拖摩、静摩擦系数情况.但闭锁摩擦并不是确定对应着某种摩擦机理的摩擦形式,所以闭锁摩擦系数可以是以上 B、C、D 中的任何一种摩擦类型,为任一种摩擦机理所主导.黏附闭锁效应的产生是针对于重载情况,在轻载小惯量的试验条件下,可能还没有完全完成 A、B、C、D 这 4 个阶段就已经完成了闭锁,结束了整个制动过程.

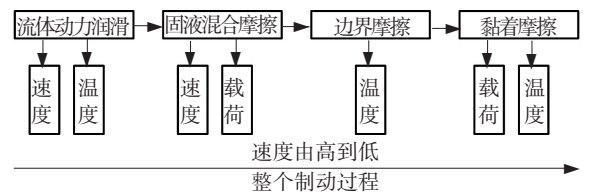


图 3 摩擦制动过程主要边界条件

2 摩擦机理变速试验验证

采用 SAE 台架制动工况研究摩擦机理有简单、直观的特点<sup>[14]</sup>.但由于制动过程时间较短,接触面压力变化范围大,并且在制动过程中涉及到元件振动、流体阻尼的影响,摩擦系数在短时间内波动较大.在这种情况下,材料摩擦机理与边界的关系往往会被许多试验因素所掩盖,试验的同一性很不理想.为了验证制动过程所提出的分阶段研究摩擦机理的设想,采用了模拟制动边界、调速主动控制的方法来更精确地分析边界条件对摩擦系数的影响.

2.1 试验设备

试验采用自行设计的调速摩擦磨损试验机,该设备包括调速系统、液压伺服加载系统、双量程扭矩测量系统、高低频信号采集系统、润滑冷却及控制显示系统,如图 4 所示.

试验机的转速由速度编程器控制,加载方式为液压闭环加载,稳定性好.有 1 500 N 和 500 N 两套扭矩测量系统以及高低频采样采集系统.采用不同夹具可完成多尺度盘盘对摩和销盘对摩的试验.轴心喷油的设计更贴近传动过程中的实际情况.采用球

头自调心机构可以保证摩擦表面良好贴合。

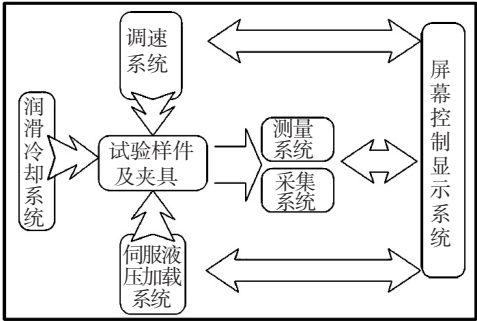


图 4 试验系统构成示意图

2.2 试验方法

为了确定摩擦副在不同边界工况的摩擦机理,设计了定载变速的滑摩试验.选取抗磨液压油,控制冷却油流量为 90 mL/min,冷却油温度 350 K,采用线性变速及阶梯压力多工况磨合,磨合时间为 150 min,磨合后摩擦系数及冷却油温度都较稳定.摩擦机理验证试验的压力边界条件为不同载荷区间的连续变速试验,速度边界为在 3.5 min 内转速完成从 0~700 r/min 匀速增加,再从 700 r/min 均匀降回 0.为了保证试验的同一性和数据的一致性,采用了多组试验连续进行的方法,在编程器内将速度曲线输入,对摩擦系数进行连续的采集.此过程重点分析速度边界及压力边界对流体特性、边界膜特性以及固固接触特性的影响。

3 试验结果与讨论

3 种沟槽在静闭锁区域的摩擦系数曲线如图 5~7.速度区间是从 600 r/min 到 0 再到 600 r/min,其中摩擦系数峰值处是速度小值. 总体来看,相同载荷下,螺旋槽的静摩擦系数最大,径向槽的静摩擦系数次之,双圆弧槽的静摩擦系数最小.在此试验工况下,速度极低,分子间的结合力大,易发生黏附,此时的摩擦系数较大;随着转速增高,分子间结合力下降,黏附现象消失,随着润滑剂的影响不断增加,混合润滑形成,对于径向槽摩擦副(如图 5),静闭锁摩擦系数随着载荷的增加而减小,随着转速的增加,摩擦系数逐渐减小,而且载荷越小,摩擦系数随速度增加减小得越快,不同载荷下摩擦系数随速度增加,先趋同一致,然后再相互分离.试验数据显示,Cu 基粉末冶金湿式摩擦元件自身特性的稳定性较好,没有出现明显摩擦特性的突变;加速减速过程特性基本对称;面压对静摩擦系数和滑动摩擦系数均存在较大影响,该材料的静摩擦系数远大于滑动摩擦系数,导致了粉末冶金材料多工况工作时的平稳性较差,闭锁

冲击很强;静摩擦系数值为摩擦系数极大值,这也阐明了在机理明确的条件下,静摩擦系数和闭锁摩擦系数特性相似的结论。

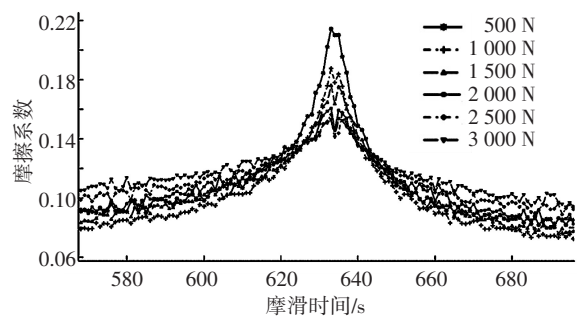


图 5 径向槽静闭锁区间摩擦系数曲线

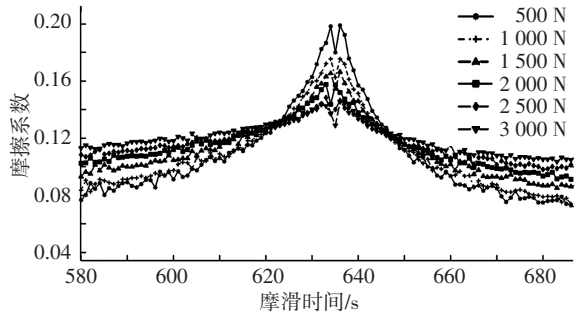


图 6 双圆弧槽静闭锁区间摩擦系数曲线

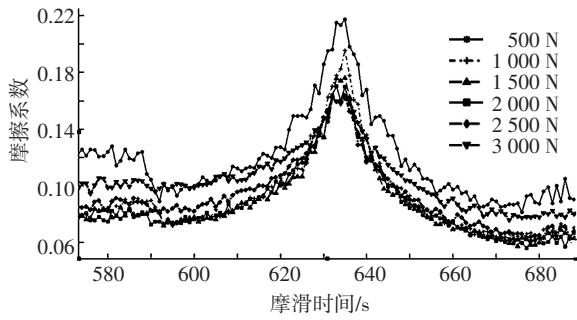


图 7 螺旋槽静闭锁区间摩擦系数曲线

双圆弧槽和螺旋槽的静摩擦系数总体趋势和径向槽相似,只是螺旋槽摩擦副的摩擦系数曲线随转速增加没有出现明显的汇聚与交叉,而是基本保持着各自原有的位置关系.这可能是因为双圆弧沟槽的摩擦试样在滑摩速度逐渐增加的过程中摩擦机理处于相对稳定的状态。

中高速区的局部摩擦系数曲线如图 8~10 所示.速度区间为 500 r/min 到 700 r/min. 可以看出,双圆弧槽和径向槽的摩擦特性相似,低速区摩擦系数随着面压的增大而减小,中高速区摩擦系数随着面压的增大而增大(径向槽 500 N 轻载情况除外).螺旋槽在 500 N 载荷情况出现摩擦系数突然增大的情况,总体速度区间内摩擦系数呈现随载荷的增大而减小趋势.在高速区(图 5~7),螺旋槽摩擦副的稳定性较差,高速区摩擦系数随速

度变化非常敏感,不利于在速度变化较大、较快的工况条件下工作.径向槽和双圆弧槽的特性相似,但径向槽在轻载条件下(500 N)摩擦系数比螺旋槽略大,重载条件下,双圆弧槽摩擦系数随速度变化比径向槽稳定,更适合在较大面压下工作.

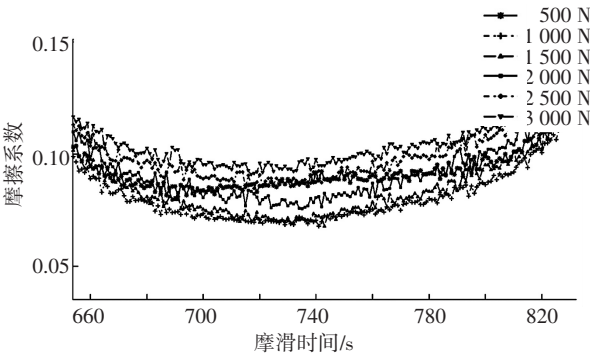


图 8 径向槽滑摩区间摩擦系数曲线

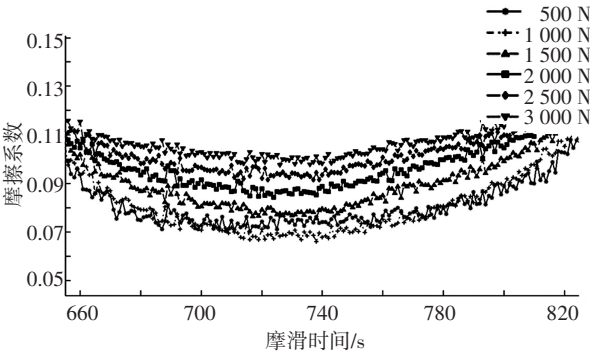


图 9 双圆弧槽滑摩区间摩擦系数曲线

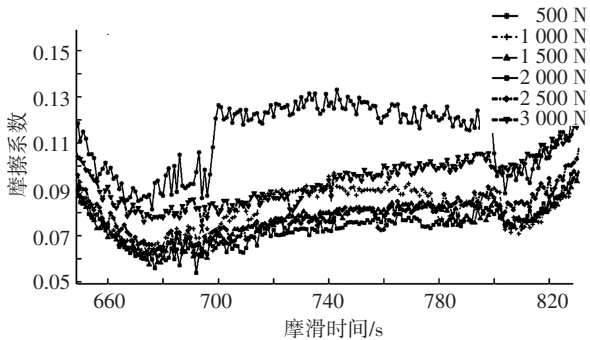


图 10 螺旋槽静滑摩区间摩擦系数曲线

实验数据表明:轻载条件下(500 N),摩擦特性存在较大的异性,首先,极轻载荷情况下的闭锁摩擦系数在所有载荷形式中是最高的,但轻载条件下的摩擦系数受沟槽形式和滑动速率变化的影响较为明显.这是因为在载荷较小而滑摩速度又较高的情况下,流体动特性对摩擦特性的影响不能忽略,径向槽、双圆弧槽以及螺旋槽以及不同沟槽的动力效应不同,导致轻载情况下的摩擦特性随速度变化较大,随着面压的增大,流体动力效应对整个系统的加成效应减小,摩擦系数趋于稳定,静动比下降,摩擦特性趋于稳定.

3 种沟槽形式摩擦副不同载荷下的静动比曲

线如图 11 所示,横坐标用名义面压表示,同时对对应的是 500~3 000 N 的载荷.除了螺旋槽 500 N (0.2 MPa) 情况,3 种摩擦副的静动摩擦系数比随载荷增加而减小,这也证实了 Cu 基粉末冶金湿式摩擦元件更适用于重载情况.除极轻载条件,双圆弧槽摩擦副的静动比曲线低于另外两条,这说明双圆弧槽在相同工况下接合更平顺,工作更平稳,在轻中载条件下,螺旋槽略好于径向槽,重载情况二者特性相近.

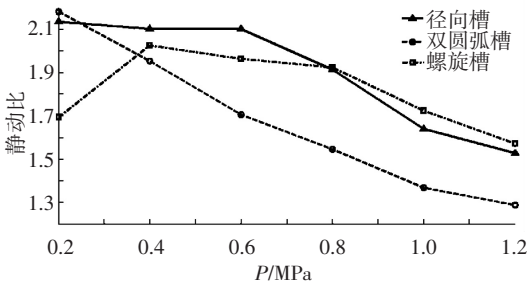


图 11 不同沟槽形式静动摩擦系数比例曲线

4 结 论

对不同沟槽摩擦特性的试验分析表明: Cu 基粉末冶金摩擦材料摩擦特性随边界条件变化的特点如下:

- 1) 当试验转速集中在 0~700 r/min, 载荷集中在 500~3 000 N 时,摩擦系数在加速与制动段呈现出较对称的特性.
- 2) 静闭锁摩擦系数远大于滑动摩擦系数,静动比基本上呈随面压的增大而减小的趋势,这表明 Cu 基粉末冶金摩擦副更适合于在中、重载条件下工作.
- 3) 径向槽和双圆弧槽具有静摩擦系数随载荷增大而减小,滑动摩擦系数随载荷增大而增大的特点(径向槽 500 N 除外);螺旋槽摩擦副在速度区间内随载荷增大摩擦系数基本呈降低的趋势.
- 4) 在某些特定工况下,双圆弧槽相比于其他两种槽形静动摩擦系数比较小,双圆弧摩擦元件的接合会较平顺,工作时也更加平稳.

参考文献

[1] HAVILAND M L, RODGERS J J, DAVISION E D. Surface temperatures and friction in lubricated clutches [C]//Automotive engineering congress and exposition. Detroit, Michigan, USA:SAE Int, 1963:28-36.

[2] EVANS E M, WHITTLE J. Friction in wet clutches[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1968, 182(14):132-138.

[3] HOLGERSON M. Apparatus for measurement of engagement characteristics of a wet clutch[J]. Wear,

- 1997,213(1/2): 140-147.
- [4] TATIAH K. An analysis of automatic transmission clutch-plate temperatures[C]//Automotive Engineering Congress. Detroit, Michigan, USA: SAE Int, 1972: 287-294.
- [5] OSANAI H, ILEDA K, KATO K. Relations between temperature in friction surface and degradation of friction materials during engaging of wet friction [C]//International Congress and Exposition. Detroit, Michigan, USA: SAE Int, 1990: 53-57.
- [6] KIM S J, LEE J Y, HAN J M. The role of copper on the friction and wear performance of automotive brake friction materials[J]. J Mater Manf, 2012,5(1): 9-18.
- [7] BORTOLETO E M, ROVANI A C, SERIACOPI V, et al. Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test[J]. Wear, 2013, 301(1): 19-26.
- [8] YAN Wenyi, O'DOWD N P, BUSSO E P. Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 50(3):449-470.
- [9] LARAQIA N, ALILATA N, GARCIA J M, et al. Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device-Exact analytical solution [J]. Wear, 2009,266(7):765-770.
- [10] WAHLSTRÖMA J, SÖDERBERG A. A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes [J]. Wear, 2010, 268(5): 763-769.
- [11] 王延忠,魏彬,吴项宇,等.大功率重载摩擦元件磨损率的分形预测方法 [J].润滑与密封,2012,37(10): 1-5.
- [12] WANG Yanzhong, WEI Bin. Mixed-modal disk gas squeeze film theoretical and experimental analysis[J]. International Journal of Modern Physics, 2013, 27(25): 1350168;1-21.
- [13] WANG Yanzhong, WEI Bin. A linear solution for gas squeeze film characteristics in ultrasonic excitation condition [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2013,34(5): 469-473.
- [14] WANG Yanzhong, WEI Bin, WU Xiangyu. Wet friction-elements boundary friction mechanism and friction coefficient prediction [J]. Tribology Industry, 2012,34(4): 198-205.

(编辑 杨 波)