

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.002

# 摩擦膜特征对陶瓷增强酚醛树脂基材料摩擦性能影响

孙胃涛<sup>1,2</sup>, 王彬<sup>1</sup>, 周文龙<sup>2</sup>

(1. 滨州学院, 机电工程学院, 山东滨州 256600; 2. 大连理工大学, 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁大连 116085)

**摘要:** 针对目前对于摩擦膜物理特征与材料摩擦性能之间关系的研究较少的情况, 选用大尺寸石英颗粒与酚醛树脂基体进行复合, 利用销-盘式摩擦试验机对其摩擦磨损性能进行测试。摩擦结束后, 采用纳米/微米压痕法表征颗粒表面摩擦膜的力学特性, 并通过扫描电子显微镜观察摩擦膜微观形貌。测试结果显示, 酚醛树脂粘结剂在21.9%~29.4%时, 摩擦系数随树脂基体粘结剂含量增加而减小, 这是由于摩擦膜强度逐渐降低, 导致粘着摩擦力减小。另外, 酚醛树脂基摩擦材料抗热衰退性与摩擦膜厚度成反比, 这是由于有机粘结剂在高温下热降解对摩擦膜稳定性不利。陶瓷颗粒具有较高硬度, 使得材料具有良好耐磨性。

**关键词:** 陶瓷增强酚醛树脂基摩擦材料; 摩擦膜; 力学性能; 厚度; 摩擦性能

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0007-06

## The Effects of Friction Film Characterization on Friction Performance of Ceramic Reinforced Phenolic Resin Based Materials

Sun Weitao<sup>1,2</sup>, Wang Bin<sup>1</sup>, Zhou Wenlong<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China; 2. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

**Abstract:** In response to the situation that studying the relationship between friction film physical properties and friction performance has been rarely reported, bigger quartz particles were designedly employed to reinforce phenolic resin matrix. A pad-on-disc friction machine was used to test the friction performance. After test, the nano/micro indentation method was used to characterize the mechanical features of friction film formed on particles surface, and scanning electron microscope was used to observe the micro-topography. Results show that friction coefficient decreases with the increasing binders in the range of 21.9%~29.4%. It was ascribed to the gradual decrease of friction film strength which reduced the resistance during adhesive friction. The fade resistance is inversely proportional to the friction film thickness. It was attributed to the degradation of organic binders at high temperatures which adversely affected the friction film stability. The materials wear is greatly improved due to the ceramic particles having excellent wear resistance.

**Keywords:** ceramic enhanced phenolic resin matrix friction material; friction film; mechanical property; thickness; friction performance

一直以来,树脂基摩擦材料由于制备工艺简单、成本低廉、性能可调控性强,在汽车制动领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。然而,由于含有大量有机粘结剂,在高温工况下容易发生热降解,导致制动效率降低,出现热衰退现象,严重制约其应用前景<sup>[2]</sup>。陶瓷具有良好的力学性能和较低的温度敏感性,作为增强组分,被认为是提高树脂基摩擦材料抗热衰退性的有

效措施之一<sup>[3-4]</sup>。研究发现,界面摩擦膜的形成在其中发挥了关键作用。

V. Mat ě jka 等<sup>[5]</sup>研究 SiC 颗粒尺寸对摩擦膜形成的影响,结果显示,摩擦膜稳定性随颗粒尺寸增加而提高。A. R. M. Lazim 和 M. Eriksson 等<sup>[6-7]</sup>探究了摩擦膜几何特征与制动噪音趋向之间的关系,得出结论,摩擦系统中尺寸小、连续性差的摩擦膜更

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(SS2015AA042502)

**通信作者:** 孙胃涛,博士研究生,主要从事材料加工研究

**收稿日期:** 2021-07-01

**引用格式:** 孙胃涛,王彬,周文龙. 摩擦膜特征对陶瓷增强酚醛树脂基材料摩擦性能影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):7-12.

Sun Weitao, Wang Bin, Zhou Wenlong. The effects of friction film characterization on the friction performance of ceramic reinforced phenolic resin based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):7-12.

易引起尖锐噪音。Sun Weitao 等<sup>[8]</sup>研究了摩擦膜在摩擦盘磨损中的作用,认为摩擦膜避免了摩擦材料与摩擦盘的直接接触,减少了硬质微凸体对摩擦盘的犁削作用。K. H. Cho 等<sup>[9]</sup>在研究摩擦膜特征与陶瓷颗粒尺寸关系时发现,瞬态摩擦膜容易引起严重的材料磨损和摩擦波动,相反,稳定的摩擦膜则有利于提高材料耐磨性和摩擦稳定性。此外,大量文献还从摩擦膜成分和微观组织结构的角度对摩擦磨损机制进行了详细研究<sup>[10]</sup>。但是,目前对于摩擦膜力学性能的关注较少,且主要集中在理论研究层次<sup>[11-12]</sup>。即树脂基摩擦材料表面摩擦膜的重要性已得到证实,但由于摩擦膜尺寸小、连续性差,表征困难等因素,相关实验研究进展缓慢,不够系统和深入。

针对目前对于摩擦膜物理特征与材料摩擦性能之间关系研究较少的情况,笔者采用酚醛树脂作为粘结剂,将重晶石、蛭石、碳纤维以及石墨粘结在一起形成树脂基体,石英颗粒的体积分数为16%。并以此陶瓷增强酚醛摩擦材料为研究对象,引入大尺寸陶瓷颗粒提高成膜趋向,通过改变树脂粘剂含量调节摩擦膜力学特征,通过改变颗粒表面粗糙度调整摩擦膜厚度。借助纳米压痕仪、扫描电子显微镜(SEM)等分析手段对界面摩擦膜物理特征进行表征,探究其与材料摩擦磨损性能之间的映射关系。

## 1 实验方法

### 1.1 主要原材料

腰果壳油改性酚醛树脂: PF-6291 型, 济南圣泉集团股份有限公司;

石英陶瓷颗粒:  $(3.0 \pm 0.5)$  mm, 广东东枫研磨有限公司;

碳纤维: T700, 盐城爱丽维纤维制品有限公司;  
重晶石:  $74 \mu\text{m}$  (325 目), 咸阳非金属矿研究所;  
鳞片石墨: 中碳 (80-90), 青岛富润达有限公司;  
蛭石: 2 mm (10 目), 咸阳非金属矿研究所。

### 1.2 主要设备及仪器

四柱液压机: YH32-100 型, 合肥锻压有限公司;

定速式摩擦试验机: JF151 型, 吉林旺达机械有限公司;

SEM: Zeiss SUPRA 55 型, 德国卡尔·蔡司有限公司;

纳米压痕仪: MTS Nano-Indentor XP 型, 美国 MTS 有限公司;

X 射线光电电子能谱分析仪: Spectrometer

ESCA-750 型, Mg-K $\alpha$ , 美国杜邦公司。

### 1.3 制备方法

首先, 利用热压成型工艺制备三组复合摩擦材料试样 S-1, S-2, S-3。将除石英以外的组分在高速搅拌机中预先混合均匀, 然后将石英颗粒加入上述预混料中缓慢搅拌, 最后置于模具中进行热压。热压温度控制在  $170^\circ\text{C}$ , 成型压力为 25 MPa, 压制时间 30 min。然后, 将预制品进行热处理, 处理温度  $175^\circ\text{C}$ , 时间 6 h。每一试样中石英颗粒的体积分数为 16%, 颗粒尺寸在  $(3.0 \pm 0.5)$  mm 左右。这些石英颗粒具有优良的力学性能, 在滑动摩擦过程中能够为磨屑聚集提供平台, 便于稳定均匀摩擦膜的形成<sup>[8]</sup>, 为后续对其进行分析表征提供有利条件。所得试样如图 1 所示。S-1, S-2 和 S-3 对应树脂粘剂含量分别为 21.9%, 24.4% 和 29.4% (见表 1), 重晶石作为空间填料用以平衡各样品的质量差。

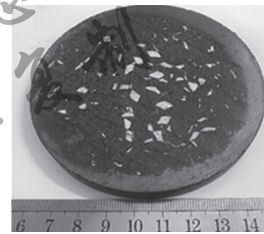


图1 陶瓷增强树脂基摩擦材料 (黑色为树脂基体, 白色为石英颗粒)

表1 不同试样中树脂基体成分 %

| 组分  | S-1  | S-2  | S-3  |
|-----|------|------|------|
| 粘结剂 | 21.9 | 24.4 | 29.4 |
| 重晶石 | 61.5 | 59.0 | 54.0 |
| 蛭石  | 7.4  | 7.4  | 7.4  |
| 碳纤维 | 6.4  | 6.4  | 6.4  |
| 石墨  | 2.8  | 2.8  | 2.8  |

### 1.4 摩擦测试

利用销-盘式摩擦试验机对材料摩擦磨损性能进行测试。图 2 为试验机结构示意图。

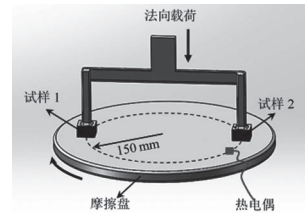


图2 销-盘式摩擦试验机结构示意图

摩擦盘材质为灰铸铁, 工作半径 150 mm, 通过电机予以驱动, 转速为 480 r/min。两个尺寸为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的相同摩擦材料试样以 1225 N 法向载荷压在摩擦盘表面。摩擦温度通过鼓风机和加热装置进行协同控制, 并通过接触式热

电偶进行测量。

本研究包括以下两项测试内容:

(1) S-1, S-2 和 S-3 的摩擦系数。

试验前, S-1, S-2 和 S-3 均用 600<sup>#</sup> SiC 纸打磨。随后, 进行简短磨合, 确保摩擦副之间形成良好接触。试验持续 5 000 r, 对整个过程中的平均摩擦系数进行采集。为保证数据的准确性, 每个样本测试三次。材料磨损量用厚度损失予以评价。

(2) S-1 抗热衰退性与颗粒表面粗糙度关系。

依据文献 [13], 颗粒表面粗糙度通过利用不同型号碳化硅砂纸进行打磨予以调控。试样 S-1-200 颗粒表面粗糙度最大, 其次是 S-1-600 和 S-1-1000, 分别经 200<sup>#</sup>, 600<sup>#</sup> 和 1 000<sup>#</sup> 碳化硅纸打磨所得。然后, 进行磨合。正式试验分为五个阶段: 100, 150, 200, 250, 300, 350℃。每个阶段持续 5 000 r, 并采集各阶段的平均摩擦系数。

### 1.5 其它性能测试

SEM 测试: 试样磨损表面及摩擦膜截面形貌利用 SEM 进行观察。

摩擦膜力学特征测试: 采用纳米压痕仪进行表征, 压力载荷为 0.49 N, 保压时间为 15 s。

试样表面摩擦膜化学成分分析: 采用 X 射线光电子能谱分析仪进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦膜特征

图 3 为试验 (1) 前后 S-1 表面微观形貌。从图 3 中可看出, 试验前, 颗粒表面非常粗糙, 分布着大量微凸体 (图 3a)。摩擦结束后, 这些颗粒由于具有良好的耐磨性而发展成为初始型接触平台, 表面上观察到大面积连续均匀的摩擦膜, 但在树脂基体区域几乎没有发现膜层生成 (图 3b)。

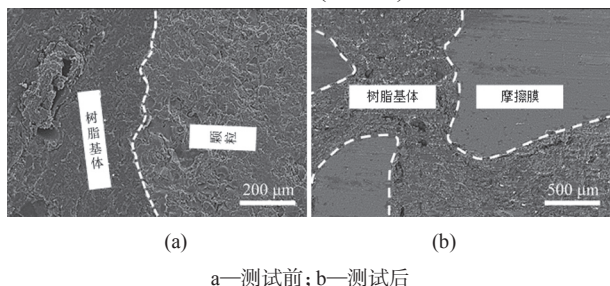


图 3 试样 S-1 表面测试前、后微观形貌

分析认为, 当摩擦副之间发生相对滑动时, 硬质微凸体与摩擦盘发生剧烈交互作用, 微凸体对摩擦盘造成机械犁削, 本身会因碰撞发生微断裂 [14]。与此同时, 摩擦盘也会与树脂基体产生滑动摩擦。

在法向载荷和剪应力共同作用下, 上述过程中产生的大量磨屑在颗粒周围聚集、压实, 形成摩擦膜 [15]。为验证这一推论, 采用 SEM 对摩擦过程中颗粒表面微观形貌演变进行分析。图 4a 为试验中 2 400 r 时对应的颗粒表面微观形貌, 其中颗粒表面的部分区域已被摩擦膜覆盖。图 4b 所示为图 4a 中黑色框标记区域的放大形貌, 清晰显示出磨屑被压实的形态, 证实了摩擦膜的形成机理。随摩擦过程不断进行, 磨屑不断生成并压实, 使摩擦膜不断生长, 最后渐渐趋于均匀、连续和稳定, 如图 4b 所示。

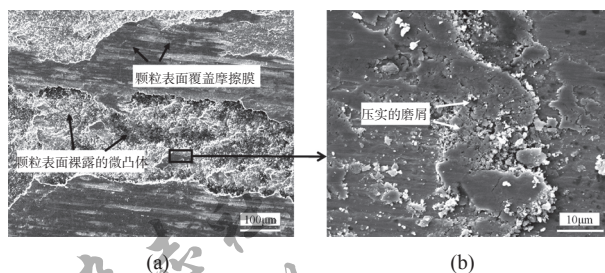


图 4 测试 (1) 中 2 000 r 对应试样颗粒表面磨损形貌

### 2.2 粘结剂含量对摩擦系数的影响

图 5 给出了试验 (1) 中 S-1, S-2 和 S-3 的摩擦表现。从图 5 中得出, 摩擦系数随树脂基体中粘结剂含量增加逐渐减小。

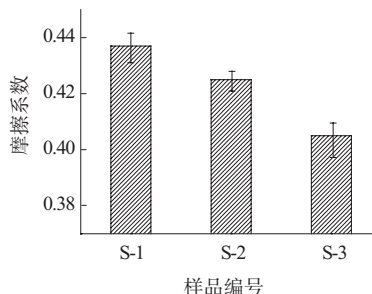


图 5 摩擦系数随粘结剂含量变化图

对于粘结剂含量与摩擦系数间的关系, 已有大量业内人士进行细致研究, 详细情况见表 2。从表 2 可以看出, 由于配方和实验条件的差异, 树脂粘结剂的作用机理尚存在争议。例如, Jie Fei 等和 Ho Shuching 等 [16-17] 认为较高树脂含量有利于摩擦界面润滑膜的形成, 导致摩擦系数下降。而 M. H. Cho 等 [18] 认为树脂的高硬度导致摩擦阻力增大。就本研究而言, 石英颗粒的加入无疑对摩擦机理起决定作用。众所周知, 滑动摩擦过程中摩擦机理与材料磨损表面特征密切相关 [3-4]。由图 3b 中 S-1 的磨损表面可以看出, 颗粒表面覆盖摩擦膜, 且略高于周围树脂基体区域。据此, 可以确定两种摩擦机制对

表2 不同研究中摩擦系数与摩擦膜力学性能之间关系

| 序号      | 材料             | 树脂含量 / %    | 测试条件                                          | 摩擦系数                       | 原因                |
|---------|----------------|-------------|-----------------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| 文献 [16] | 纸基摩擦材料         | 35 ~ 50     | 0.5 MPa,<br>70 ~ 75℃,<br>9.2 m/s              | 摩擦系数<br>随树脂含<br>量增加而<br>减小 | 促进润滑<br>膜形成       |
| 文献 [17] | 碳化铜改性酚醛树脂基摩擦材料 | 5 ~ 25      | 1 MPa,<br>室温,<br>$1.57 \times 10^{-2}$<br>m/s | 摩擦系数<br>随树脂含<br>量增加而<br>增大 | 树脂硬度<br>高         |
| 文献 [18] | 不含石棉有机摩擦材料     | 15 ~ 30     | 0.3 MPa,<br>25℃,<br>1 m/s                     | 摩擦系数<br>随树脂含<br>量增加而<br>减小 | 摩擦膜剪<br>切强度降<br>低 |
| 本研究     | 陶瓷增强树脂基摩擦材料    | 21.9 ~ 29.4 | 0.98 MPa,<br>80℃,<br>7.9 m/s                  | 摩擦系数<br>随树脂含<br>量增加而<br>减小 |                   |

摩擦系数产生影响:机械犁削和粘着摩擦<sup>[19]</sup>。前者通常由摩擦界面硬质微凸体嵌入较软的材料引起。当摩擦副之间发生相对滑动时,摩擦盘的塑性变形抗力阻碍机械犁削。后者是通过分子力或其它形式键合力在摩擦膜和摩擦盘之间建立粘着联结点<sup>[19]</sup>。当发生相对滑动时,粘着连接处的抗破裂阻力贡献部分摩擦力。前者摩擦等级由较软材料的力学性能决定,后者则受实际接触面积和联结点剪切强度影响较大。事实上,在之前的工作<sup>[20]</sup>中,针对陶瓷增强树脂基摩擦材料提出一个定量描述其摩擦行为的物理模型,如公式(1)所示。式中, $\mu$ 为摩擦系数, $\lambda$ 为颗粒表面微凸体的几何因子, $S_0$ 为试样总接触面积, $\omega$ 为陶瓷颗粒含量, $\tau$ 为摩擦膜的剪切强度, $N$ 为施加的法向载荷, $\sigma_\alpha$ 为摩擦盘屈服强度。

$$\mu = \lambda / 2 + (S_0 \omega \tau) / N - \tau / \sigma_\alpha \quad (1)$$

聚合物-金属摩擦副的 $\tau$ 值通常在0.2~0.5 MPa之间,远小于摩擦盘的屈服强度 $\sigma_\alpha$ ,因此 $\tau / \sigma_\alpha$ 可忽略不计。此外,在本研究中, $\lambda$ , $S_0$ , $\omega$ 和 $N$ 均为常数。因此,S-1、S-2和S-3摩擦系数的差异主要由摩擦膜的剪切强度引起。图6在一定程度上证明了这一点,展示了摩擦膜的剪切变形特征。



图6 摩擦膜塑性变形

图7为不同试样对应摩擦膜上压痕的微观形貌。由图7a可知,S-1对应压痕极不规则,呈现块状剥落,裂纹沿对角线扩展。这表明该摩擦膜具有

明显脆性<sup>[21]</sup>。相比之下,S-2对应压痕损伤较轻,如图7b所示,这意味着摩擦膜延展性或韧性有所改善。就S-3而言,压痕相对完整,裂纹与边线平行(图7c)。不难推断,S-3对应摩擦膜具有最高的塑性和韧性,其次是S-2,再者是S-1。

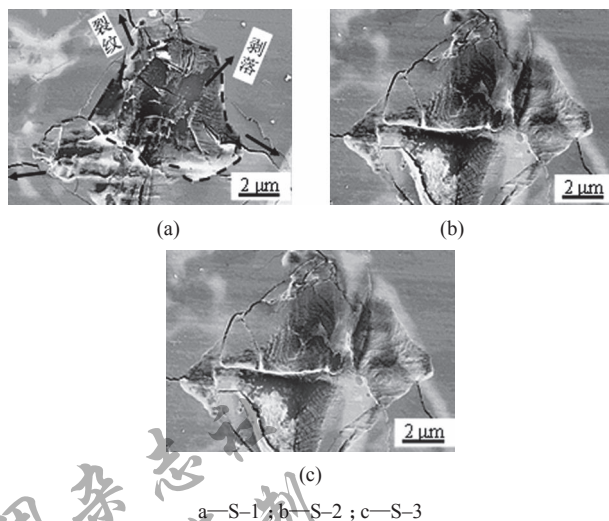


图7 摩擦膜上压痕微观形貌

文献[22-23]认为高含量树脂粘结剂具有许多极性或柔性基团有助于改善摩擦膜的完整性和柔韧性。利用X射线光电子能谱分析仪分析了S-1、S-2和S-3的摩擦膜化学组成。观察到C 1s谱有明显差异,如表3所示,随着粘结剂含量的增加,极性或柔性基团中—C—OH和—C=O官能团的相对强度逐渐增加。这在一定程度上符合上述论断。但是,塑性的增加对摩擦膜的强度有一定的负面影响,降低了变形抗力。因此,摩擦系数随着粘结剂含量的增加而降低(见图5)。

表3 不同试样摩擦膜C 1s的XPS分析结果

| 试样  | —C—OH    |          | —C=O     |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     | 结合能 / eV | 相对强度 / % | 结合能 / eV | 相对强度 / % |
| S-1 | 285.6    | 5.7      | 287.2    | 2.4      |
| S-2 | 285.6    | 6.1      | 287.2    | 2.7      |
| S-3 | 285.6    | 6.8      | 287.2    | 3.2      |

### 2.3 颗粒表面粗糙度对热衰退性的影响

图8提供了测试(2)中S-1颗粒表面粗糙度对材料抗热衰退性能的影响规律。较低温度下,材料摩擦等级与颗粒表面粗糙度成正相关,这与多数相关研究结论相吻合<sup>[24-25]</sup>,归因于较高的磨粒摩擦。也就是说,粗糙的表面具有更多的微凸体,容易在摩擦界面上引起剧烈的机械交互作用。由图8可知,在100~250℃范围内,随温度升高,所有试样摩擦系数均呈现逐渐增大的趋势,且粗糙度越大越明显。

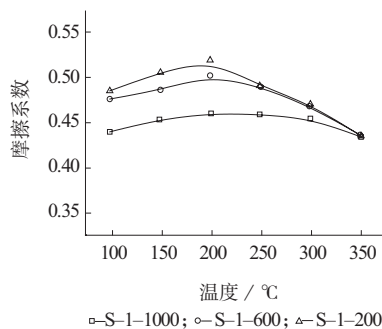
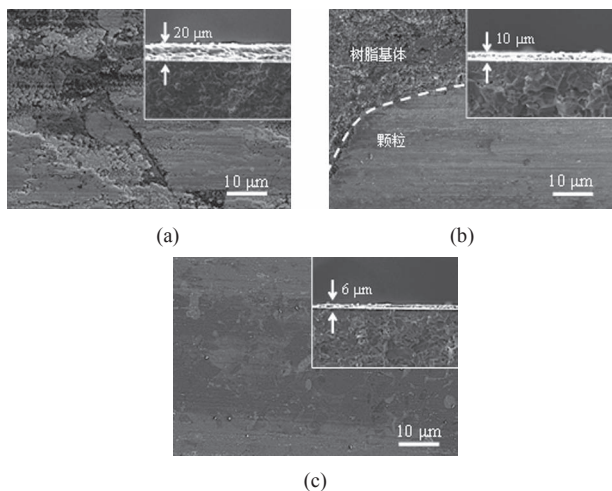


图8 S-1材料热衰退性与颗粒表面粗糙度关系

当温度超过 250℃,所有样品的摩擦系数出现不同程度的下降,即出现热衰退现象。其中,S-1-200的热衰退最为严重,其次是S-1-600和S-1-1000。这是因为S-1-200和S-1-600界面剧烈机械交互作用过程中产生更多磨屑,在微凸体周围被截留、堆积,随后在压力载荷、剪切应力、温度的共同作用下发展成摩擦膜。摩擦膜生长越快,粘着摩擦力增加越明显。但当温度超过 250℃,S-1-200和S-1-600会出现严重热衰退现象。这与摩擦膜的厚度密切相关。

图9为不同试样摩擦膜微观形貌。图9a~图9c分别给出了S-1-200,S-1-600和S-1-1000对应摩擦膜的微观形貌和截面,膜层厚度分别为20,10,6 μm左右。这说明,随颗粒表面粗糙度增加,膜层厚度逐渐增大。粗糙颗粒表面具有相对较厚的摩擦膜,该类型摩擦膜中有机粘结剂的绝对含量较高,高温下发生热降解会导致摩擦膜加速破坏,从而引起严重的热衰退。



a—S-1-200;b—S-1-600;c—S-1-1000

图9 不同试样摩擦膜微观形貌

就材料在本测试过程中的磨损表现而言,测试中无明显磨损发生,这由陶瓷的高硬度决定。这一

问题已被广泛报道<sup>[5,8,9]</sup>,本研究不再赘述。

### 3 结论

重点研究了陶瓷增强树脂基摩擦材料摩擦膜物理特征与摩擦学性能之间的关系。得出如下结论:

(1) 摩擦系数随树脂基体中酚醛粘结剂含量增加而降低。颗粒表面粗糙度较大的材料在较低温度下具有较高摩擦水平,但在较高温度下会出现严重热衰退现象。

(2) 摩擦膜的剪切变形抗力随树脂基体中粘结剂含量增加而降低,导致摩擦系数降低。

(3) 颗粒表面粗糙度较大有利于形成较厚的摩擦膜,但对于树脂基摩擦材料的抗热衰退性不利。

### 参考文献

- [1] 陈海龙,杨学锋,王守仁,等.改性酚醛树脂陶瓷摩擦材料的摩擦磨损性能[J].材料工程,2019,47(6):108-113.  
Chen Hailong, Yang Xuefeng, Wang Shouren, et al. Tribological properties of modified phenolic resin ceramic friction materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6):108-113.
- [2] 张大斌,周元康,杨绿,等.玻纤石纳米粉体对原位复合的PF及其摩擦材料性能的影响[J].材料工程,2008(10):187-190.  
Zhang Dabin, Zhou Yuankang, Yang Lu, et al. Effect of mass fraction of palygorskite nano-particles on phenolic resin and tribological behavior of friction materials by in-situ method [J]. Journal of Materials Engineering, 2008, (10):187-190.
- [3] Boz M, Kurt A. The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the friction performance of automotive brake friction materials[J]. Tribology International, 2007, 40:1161-1169.
- [4] Cho M H, Cho K H, Kim S J, et al. The role of transfer layers on friction characteristics in the sliding interface between friction materials against gray iron brake discs[J]. Tribology Letter, 2005, 20:101-108.
- [5] Mat ějka V, Lu Yafei, Jiao Long, et al. Effects of silicon carbide particle sizes on friction-wear properties of friction composites designed for car brake lining applications[J]. Tribology International, 2010, 43:144-151.
- [6] Lazim A R Mat, Kchaou M, Hamid M K Abdul, et al. Squealing characteristics of worn brake pads due to silica sand embedment into their friction layers[J]. Wear, 2016, 358-359:123-136.
- [7] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions [J]. Wear, 1999, 232:163-167.
- [8] Sun Weitao, Zhou Wenlong, Liu Jianfa, et al. Development of a new composite friction material with excellent fade resistance by employing oversized ceramic particles[J]. Tribology Letter, 2018, 66.doi:10.1007/s11249-017-0974-x.
- [9] Cho K H, Jang H, Hong Y S, et al. The size effect of zircon

- particles on the friction characteristics of brake lining materials [J]. Wear, 2008, 264: 291–297.
- [10] Österle W, Urban I. Friction layers and friction films on PMC brake pads[J]. Wear, 2004, 257: 215–226.
- [11] Dadkar N, Tomar B S, Satapathy B K. Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications[J]. Materials Design, 2009, 30: 4369–4376.
- [12] Huang Xiaoqin, Pelegri A A. Finite element analysis on nano-indentation with friction contact at the film / substrate interface[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 1311–1319.
- [13] Sahin M, Çetinarlan C S, Akata H E. Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials[J]. Materials Design, 2007, 28: 633–640.
- [14] Wan Shanhong, Bach H, Tran, Anh Kiet, et al. The influence of water addition on high temperature tribological properties of interstitial free steel sliding against different counterparts[J]. Tribology Transactions, 2018, 61: 713–725.
- [15] Menapace C, Leonardi M, Vlastimil M, et al. Dry sliding behavior and friction layer formation in copper-free barite containing friction materials[J]. Wear, 2017, 398–399: 191–200.
- [16] Jie Fei, He Junli, Ye Weifu, et al. Effect of phenolic resin content on performance of carbon fiber reinforced-paper-based friction material[J]. Wear, 2010, 269: 534–540.
- [17] Ho Shuching, Chern-lin Jiin Huey, Ju Chienping. Effect of phenolic content on tribological behavior of carbonized copper-phenolic based friction material [J]. Wear, 2005, 258: 1764–1774.
- [18] Cho M H, Kim S J, Kim D, et al. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study[J]. Wear, 2005, 258: 1682–1687.
- [19] Saffar A, Shojaei A. Effect of rubber component on the performance of brake friction materials[J]. Wear, 2012, 274–275: 286–297.
- [20] Sun Weitao, Zhou Wenlong, Liu Jianfa, et al. The size effect of SiO<sub>2</sub> particles on friction mechanisms of a composite friction material[J]. Tribology Letter, 2018, 66. doi:10.1007/s11249-018-0987-0.
- [21] Tang Changbin, Liu Daoxin, Tang Bin, et al. Influence of plasma molybdenizing and shot-peening on fretting damage behavior of titanium alloy[J]. Applied Surface Science, 2016, 390: 946–958.
- [22] 马少博. 复合固体润滑膜摩擦学性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学 2017.
- Ma Shaobo. Study on the tribological behaviors of the composite solid lubricating film [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University 2017.
- [23] Tyman J H P, Morris L J. The composition of cashew nut-shell liquid (CNSL) and the detection of a novel phenolic ingredient [J]. Journal of chromatography A, 1967, 27: 287–288.
- [24] 陈文杰, 孟祥铠, 王玉明, 等. 机械密封织构化表面粗糙度效应的有限元模型与摩擦学特性分析 [J]. 摩擦学学报, 2019(5): 523–531.
- Chen Wenjie, Meng Xiangkai, Wang Yuming, et al. Finite element model and tribological properties analysis of textured mechanical seals considering roughness effect[J]. Tribology, 2019(5): 523–531.
- [25] 何振鹏, 谢海超, 张淳, 等. 表面粗糙度对不对中滑动轴承润滑特性的影响 [J]. 润滑与密封, 2019, 44(11): 7–16.
- He Zhenpeng, Xie Haichao, Zhang Chun, et al. Influences of lubrication characteristics of misaligned sliding bearings by surface roughness models [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(11): 7–16.

## 优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 20 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2019 年 20 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 4 000 人次的会议代表通讯录。

### 邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

### 银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.net>