

摩擦学学报

TRIBOLOGY



纸基摩擦材料与不同含碳量钢配副之间的摩擦学性能及其失效机理研究

孙涛 樊恒中 苏云峰 宋俊杰 付业伟 张永胜 胡丽天

Tribological Performance and Failure Mechanism of Paper-Based Friction Materials Sliding against Steels of Different Carbon Contents

SUN Tao FAN Hengzhong SU Yunfeng SONG Junjie FU Yewei ZHANG Yongsheng HU Litian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氟化非晶碳基薄膜摩擦学行为对配副材料的依赖性

Mating Material-Dependence of Tribological Behavior of Fluorinated Amorphous Carbon-Based Films

摩擦学学报. 2017, 37(3): 357 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.03.011>

不同配副下ZrB₂-SiC复相陶瓷的摩擦学性能

Influences of Velocity, Load and Counterpart Material on the Tribological Behavior of ZrB₂-SiC Composites

摩擦学学报. 2017, 37(5): 581 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.003>

TC4合金微弧氧化膜的摩擦磨损性能及其失效机理研究

Investigation of Friction and Wear Performance and Failure Mechanism of PEO Coating on TC4 Alloy

摩擦学学报. 2019, 39(1): 50 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018116>

B₄C/hBN复相陶瓷与球墨铸铁配副在乳化液润滑下的摩擦学性能研究

Tribological Behavior of B₄C/hBN Ceramic Composites Sliding against Ductile Iron in Emulsion

摩擦学学报. 2017, 37(6): 791 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.010>

非晶碳基薄膜材料水环境摩擦学研究进展

Progress in Tribological Performances of Carbon-Based Films in Liquid Lubrication Environments

摩擦学学报. 2017, 37(2): 270 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.02.018>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2019253

纸基摩擦材料与不同含碳量钢配副之间的摩擦学性能及其失效机理研究

孙涛¹, 樊恒中^{2*}, 苏云峰², 宋俊杰², 付业伟¹, 张永胜^{2*}, 胡丽天²

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室 先进润滑与密封材料研究中心, 陕西 西安 710072;

2. 中国科学院兰州学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用湿法成型辅助热压工艺制备了纸基摩擦材料. 分别考察了纸基摩擦材料在无油状态和富油状态下与不同碳含量钢配副材料的摩擦适配性, 并通过磨损表面形貌分析和探讨了其在无油状态下的失效机理. 结果表明: 在无油状态下, 随配副材料硬度增高, 纸基摩擦材料的摩擦系数下降, 摩擦稳定性提升, 磨损率降低, 高硬度的65Mn钢与纸基摩擦材料的适配性较好. 纸基摩擦材料在无油状态下主要表现为由疲劳裂纹引发的纤维脱粘与拔出导致材料失效. 在富油状态下, 配副材料的硬度对纸基摩擦材料的摩擦性能无显著影响, 润滑油膜和摩擦膜的形成能有效减轻对配副材料的微观切削作用, 从而抑制材料的磨损.

关键词: 纸基摩擦材料; 润滑状态; 配副硬度; 摩擦学性能; 摩擦机理

中图分类号: TQ174.75; TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2020)04-0477-12

Tribological Performance and Failure Mechanism of Paper-Based Friction Materials Sliding against Steels of Different Carbon Contents

SUN Tao¹, FAN Hengzhong^{2*}, SU Yunfeng², SONG Junjie², FU Yewei¹,
ZHANG Yongsheng^{2*}, HU Litian²

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Xi'an 710072, China

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: Paper-based friction material was prepared by wet-forming assisted hot-pressing process. The compatibility of steel pairs with different carbon contents and paper-based friction materials in oil-free state and oil-rich state was investigated, respectively. The friction mechanism in oil-free and oil-rich state was also discussed through wear surface analysis. Results showed that in the oil-free state, as the hardness of the matching material increased, the friction coefficient of the paper-based friction material decreased, the friction stability increased, and the wear rate decreased. The 65Mn steel with high hardness had better compatibility with paper-based friction materials. The failure mode of paper-based friction material in the oil-free state was fiber debonding and pulling-out caused by fatigue cracks. In the oil-rich state, the hardness of the steel had no significant effect on the tribological properties of the paper-based friction

Received 17 December 2019, revised 10 February 2020, accepted 18 February 2020, available online 28 July 2020.

*Corresponding author. E-mail: hzhfan@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968833; E-mail: zhysh@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968026.

The project was supported by the National Key Research and Development Project (2017YFB0308300), the National Natural Science Foundation of China (51902317) and the Youth Innovation Promotion Association CAS (2013272).

国家重点研发计划项目(2017YFB0308300), 国家自然科学基金项目(51902317)和中国科学院青年创新促进会人才专项(2013272)资助.

material. The formation of oil film and friction film effectively reduced the micro-cutting effect on the material, and hereby reduced the wear of the material.

Key words: paper-based friction material; lubricating state; hardness of the matching material; tribological properties; friction mechanism

纸基摩擦材料(Paper-based Friction Material)通常采用湿法成型的造纸方式抄造出纸基摩擦材料原纸,再经树脂浸渍固化而成,其组分主要包括纤维增强体、摩擦性能调节剂和树脂粘合剂等^[1-3]。由于纸基摩擦材料具有机械性能良好、动摩擦系数稳定、摩擦噪音小以及使用寿命长等优异特性,被广泛应用于各类车辆和工程机械、机床、船舶等湿式离合制动装置中^[4]。近年来,纸基摩擦材料因其在高转速、大压力和高温等苛刻工况条件下的显著优势,已开始逐渐替代传统摩擦材料,成为绿色环保、可持续发展的一种新型摩擦材料。

目前对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的研究主要集中在组分的选择和比例调控上,例如增强纤维的种类和尺寸、粘合剂的类型和含量,以及其他增强填料和性能改进剂的选择和含量等,并探索其对纸基摩擦材料动摩擦系数、摩擦稳定性和磨损率的影响和作用机制^[5-14]。研究表明:增强纤维、粘合剂以及填料的种类、相对含量、纤维和颗粒尺寸以及性能改进剂对纸基摩擦材料机械性能和摩擦性能均有显著的影响。此外,纸基摩擦材料孔隙率、表面微结构和油温等对摩擦磨损性能和制动性能的影响也进行了大量研究^[15-21]。

针对材料组分、气孔率等微结构对纸基摩擦材料摩擦学性能影响的研究已相对比较完善,而对纸基摩擦材料与不同摩擦配副之间的适配性,以及摩擦工况条件对纸基摩擦材料摩擦学性能的影响鲜有报道。现有研究多以钢配副与铜配副对比研究配副材料硬度

对摩擦材料性能的影响^[22-23],但不能排除配副材料的差异对试验结果产生的干扰。此外,研究发现润滑油能有效降低摩擦材料的磨损,稳定摩擦系数^[24-25],因此研究纸基摩擦材料在不同润滑状态下的摩擦行为,揭示润滑状态(无油和富油)对纸基摩擦材料的作用机理具有重要意义。

基于以上研究背景,本试验拟选择含碳量不同的钢作为摩擦配副材料,考察纸基摩擦材料与不同摩擦配副之间在不同润滑条件下的摩擦学性能,探讨纸基摩擦材料与钢作为摩擦配副时的摩擦适配性,并揭示纸基摩擦材料在不同润滑条件下的失效机理。

1 试验部分

1.1 纤维纸基摩擦材料的制备

本试验中采用长度为3~5 mm的PAN基短切碳纤维和长度为3~6 mm的芳纶纤维作为基体纤维,其中碳纤维的主要指标如下:拉伸强度3.0 GPa,密度1.76~1.78 g/cm³,应变值1.76%~1.78%。以硅藻土、氧化铝、二氧化硅和碳酸钙为增强填料;选择石墨作为主要的摩擦性能调节剂。整体制备过程如图1所示:将表面改性处理后的碳纤维和芳纶纤维基体材料分别与增强填料、摩擦性能调节剂、分散剂和水按照一定的配比进行均匀分散并混合,然后用打浆机制成纤维浆液,再经过滤、干燥处理后初步制备成纸基摩擦材料原纸,最后采用改性酚醛树脂溶液浸渍并热压固化后形成纸基摩擦材料,其中热固化参数为热压温度170 ℃、

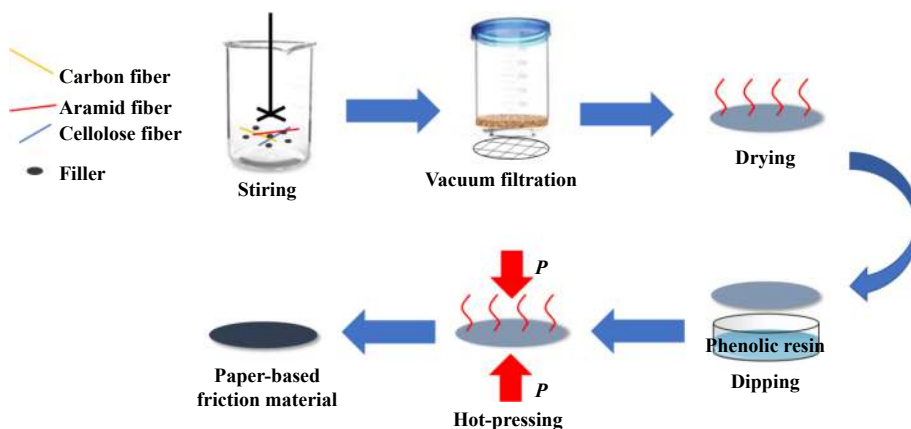


Fig. 1 Schematic diagram of paper-based friction material fabrication

图1 纸基摩擦材料制备示意图

压力5 MPa、热压时间5 min, 最终制备的样品厚度为0.8 mm.

1.2 摩擦配副材料的选择

摩擦配副材料表面硬度的大小是摩擦过程中的重要影响因素之一, 为考察纸基摩擦材料与不同钢配副材料之间的适配性, 本试验中选择未热处理的20[#]、35[#]、45[#]和65Mn钢作为摩擦副材料, 其主要的区别是随含碳量的增加, 摩擦配副的表面硬度逐渐增大. 摩擦配副材料含碳量和表面维氏硬度数据列于表1中.

表1 配副材料的含碳量与表面维氏硬度

Table 1 Carbon content and surface Vickers hardness of matching material

Item	20 [#] -Steel	35 [#] -Steel	45 [#] -Steel	65Mn-Steel
w(C)/%	0.17~0.24	0.32~0.40	0.42~0.50	0.62~0.70
HV	200.4±16.3	219.6±7.5	282.9±15	310.2±3.8

1.3 摩擦性能测试

在美国Center公司生产的UMT-3摩擦磨损试验机上进行摩擦学性能研究, 采用栓-块接触、往复运动的方式(往复1次行程为4.95 mm), 摩擦试验示意图如图2所示. 摩擦配副材料为不同牌号的 $\Phi 6$ mm×15 mm商业钢, 材料表面粗糙度 R_a 约为0.02~0.05 μm . 下试样为25.0 mm×25.0 mm×0.8 mm的纸基摩擦材料片, 将其粘在25.0 mm×25.0 mm×4 mm的钢块上. 在室温 20 ± 2 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 $18\%\pm 5\%$ 下考察试样在不同润滑状态(无油和富油)和不同载荷工况下的摩擦学性能. 其中, 油品选择N32[#]机油, 试验频率固定为5 Hz, 载荷15~30 N(预加载时间为10 s), 摩擦试验时间30 min.

1.4 物相组成、微观结构和磨损表面表征

用日本生产的JSM-5600LV型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)表征分析纸基摩

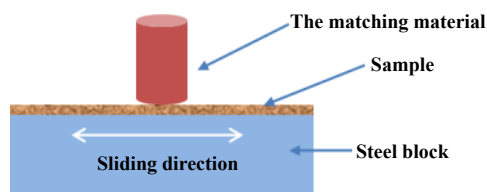


Fig. 2 Schematic diagram of the friction experiment of paper-based friction material

图2 纸基摩擦材料的摩擦示意图

擦材料初始表面、磨损表面以及摩擦配副磨损表面形貌, 表征之前对样品表面进行喷金处理. 利用能谱分析仪(Energy Dispersive System, EDS)分析样品表面及磨斑表面的物相组成, 采用KLA-Tencor表面粗轮廓仪测量样品表面粗糙度, 采用维氏硬度仪测量摩擦配副的表面硬度.

2 结果与讨论

2.1 纤维纸基摩擦材料表面形貌

图3分别给出了纸基摩擦材料表面光学照片(OM)和表面扫描电子显微形貌照片(SEM). 从图3(a)可以看出, 纸基摩擦材料组分分布均匀、表面平整, 通过KLA-Tencor表面粗轮廓仪测得样品表面粗糙度约为 0.87 ± 0.05 μm . 由图3(b, c), 可以看出, 纤维经过充分分散成型后呈现出随机分布状态, 且纤维之间通过相互无序交错排列和相互叠桥状分布, 使得纤维间产生了较多大小分布不均的孔隙结构. 此外, 粘结剂树脂在纸基摩擦材料中以包裹纤维和黏团状分布, 在摩擦材料各种成分中通过粘连作用使得成分间具有一定强度而形成整体结构. 由于粘结剂分布的不均匀性, 进一步使得纸基摩擦材料孔隙大小和分布呈现无规律性.

2.2 纸基摩擦材料在无油状态下的摩擦学性能

分别考察了不同摩擦配副材料与纸基摩擦材料

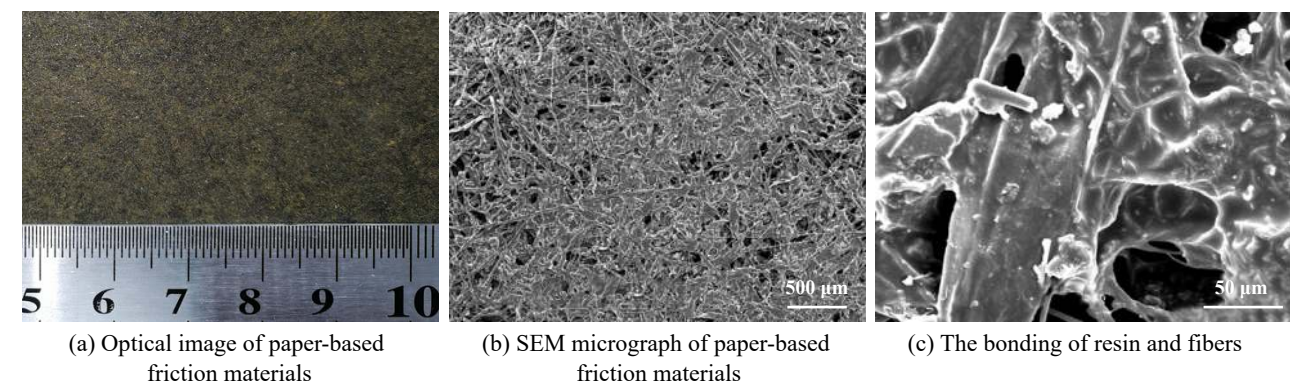


Fig. 3 SEM micrographs and optical images of surface of paper-based friction materials

图3 纸基摩擦材料的表面光学照片和表面SEM照片

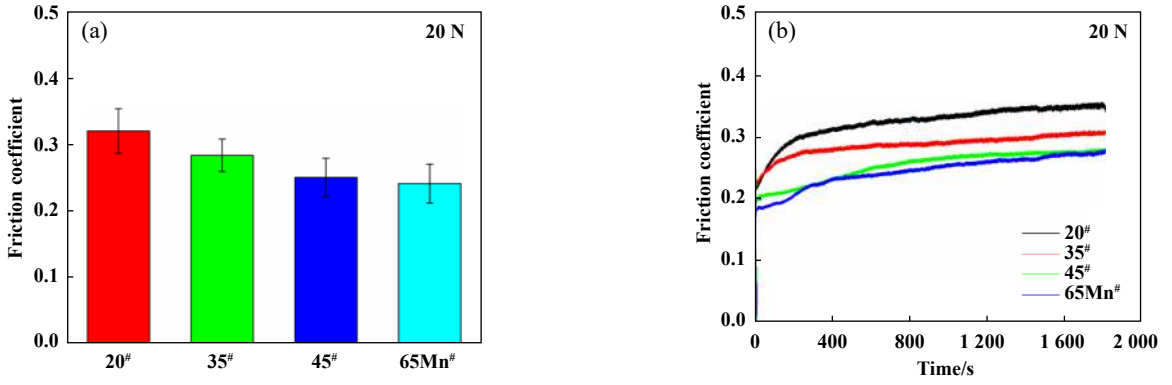


Fig. 4 Mean friction coefficient (a) and friction curves (b) between paper-based friction material and different pairs in the oil-free state

图4 纸基摩擦材料与不同对偶在无油状态下的平均摩擦系数(a)与摩擦曲线(b)

在无油状态下的摩擦学性能,结果如图4所示.可以看出,摩擦配副材料对纸基摩擦材料的摩擦学性能具有显著的影响.对于本研究中选择摩擦配副材料,随着钢牌号的增大,材料的塑性降低,强度和硬度逐渐增大.从试验结果可知,随着摩擦配副材料的表面硬度增大,纸基摩擦材料的摩擦系数呈下降趋势,但依旧保持较高的摩擦系数.图5给出了纸基摩擦材料与不同摩擦配副在无油状态,不同载荷下的摩擦系数.

从图5中可以看出,纸基摩擦材料与不同配副表现出相同的规律,随着载荷的增大,纸基摩擦材料的摩擦系数均表现出增大的趋势,且在高载荷下摩擦系数随时间持续上升.在较低载荷下,与不同摩擦配副对摩时摩擦系数更为平稳.

由于式样磨损量小,反光性差等原因无法定量测量其磨损率,因此我们通过观察其磨损形貌的SEM照片定性分析其磨损率大小.图6和图7分别给出了纸基

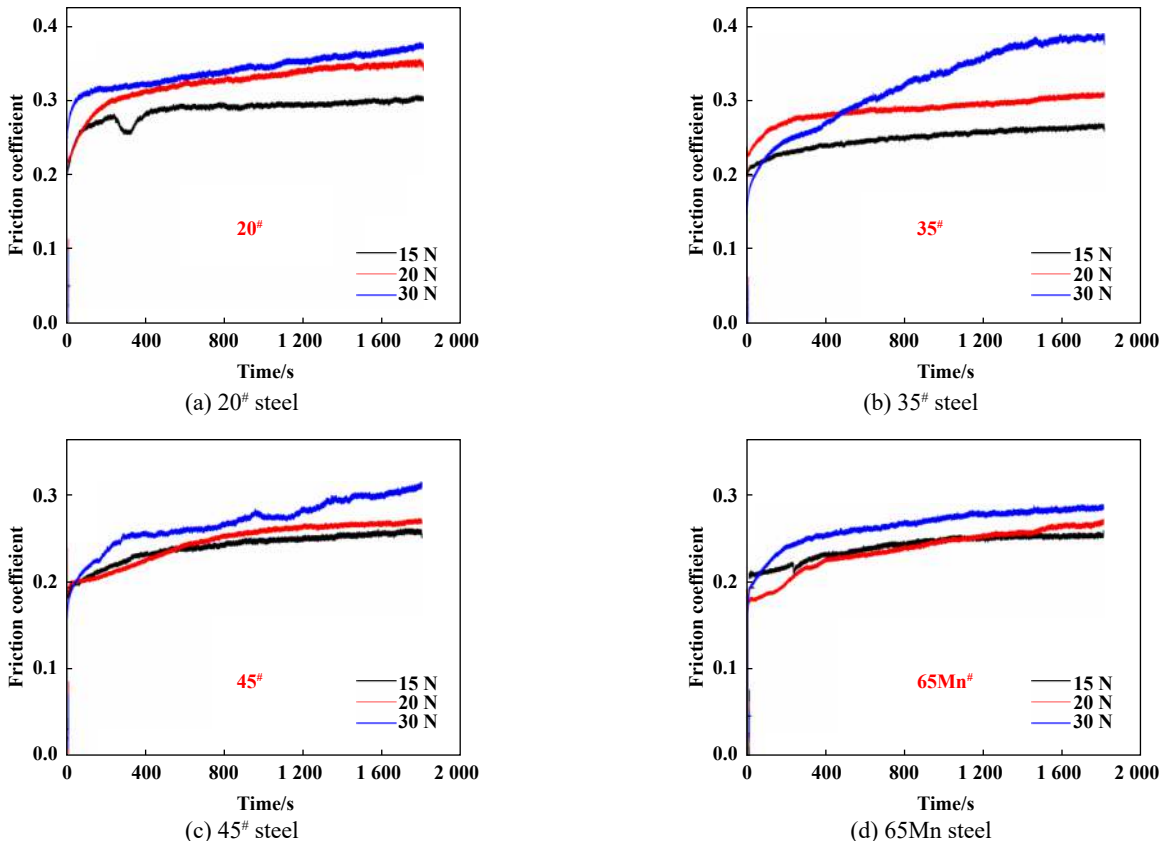


Fig. 5 Friction coefficients of paper-based friction materials with different pairs under different load in the oil-free state

图5 纸基摩擦材料与不同对偶在无油状态不同载荷条件下的摩擦系数

摩擦材料在15 N和30 N下的磨损表面形貌的SEM照片. 从图6~7中可以看出, 纸基摩擦材料在无油状态下与不同摩擦副对摩时均表现出严重的磨损, 纤维大量裸露在摩擦面, 纤维周围填充了大量的磨屑, 磨屑堆积后局部形成光滑连续的粘结区域. 对比不同摩擦副发现, 纸基摩擦材料经较低硬度的配副材料对摩后, 试样表面的磨屑较多, 大量孔隙被磨屑堵塞[见图6(a~b)]. 而随着摩擦副硬度的增大, 试样磨损明显降低, 高硬度的65Mn钢与样品摩擦过程中表现出较为优异的摩擦适配性[图6(d)]. 而对比载荷影响发现, 同一配副材料随载荷的增大纸基摩擦材料试样表面磨损明显增大, 孔隙堵塞现象加重, 这也在一定程度反映摩擦系数持续上升的原因, 如图7所示. 因此, 从摩擦系数和磨损率两者结果综合比较可知: 在合适载荷下, 随配副硬度的增加, 纸基摩擦材料摩擦系数稳定且磨损率较低. 无油状态下, 较高硬度的钢材料更适合作为纸基摩擦材料用配副件的选择.

从表面磨斑形貌和元素分析(图8)可知, 纸基摩擦材料表现出黏着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损三种主要的磨损形式. 这主要与基体材料的组分有直接的关系, 纸基摩擦材料填料在树脂固化后形成颗粒, 这些

颗粒在表面形成一系列的小突起, 材料与配副件在压力作用下两个接触面将通过分子间作用发生黏着, 产生黏着磨损. 此外, 粘结区域还发现了大量铁元素, 说明配副材料表面因磨损产生磨粒并发生转移[图8(a)]. 摩擦材料与配副相对滑动, 在接触区造成较大的应力和塑性变形, 在长期反复的交变应力作用下, 摩擦材料及对偶件表面薄弱环节处引发疲劳裂纹, 逐步扩展[图8(b)], 最后以微细薄片形式剥落下来, 并使得增强纤维也发生脱粘[图8(c)]、断裂^[26]. 另外, 在摩擦过程中, 伴随着材料表层温度的升高, 导致材料产生热疲劳, 长期反复热应力作用加速材料表面裂纹的产生与扩展, 从而加速材料的疲劳磨损.

2.3 纸基摩擦材料在富油状态下的摩擦学性能

纸基摩擦材料作为湿式摩擦材料目前主要应用在油润滑状态下, 因此进一步考察了其在油(N32#机油)润滑状态下与不同摩擦配副之间的适配性, 结果如图9所示. 由图9可得, 在油润滑状态下与不同硬度配副材料表现出优异的摩擦适配性, 摩擦系数曲线光滑平稳, 测试周期内摩擦系数保持在0.13~0.14之间, 说明润滑状态是影响纸基摩擦材料摩擦系数的关键因素之一. 此外, 对比无油和富油两种润滑状态下的

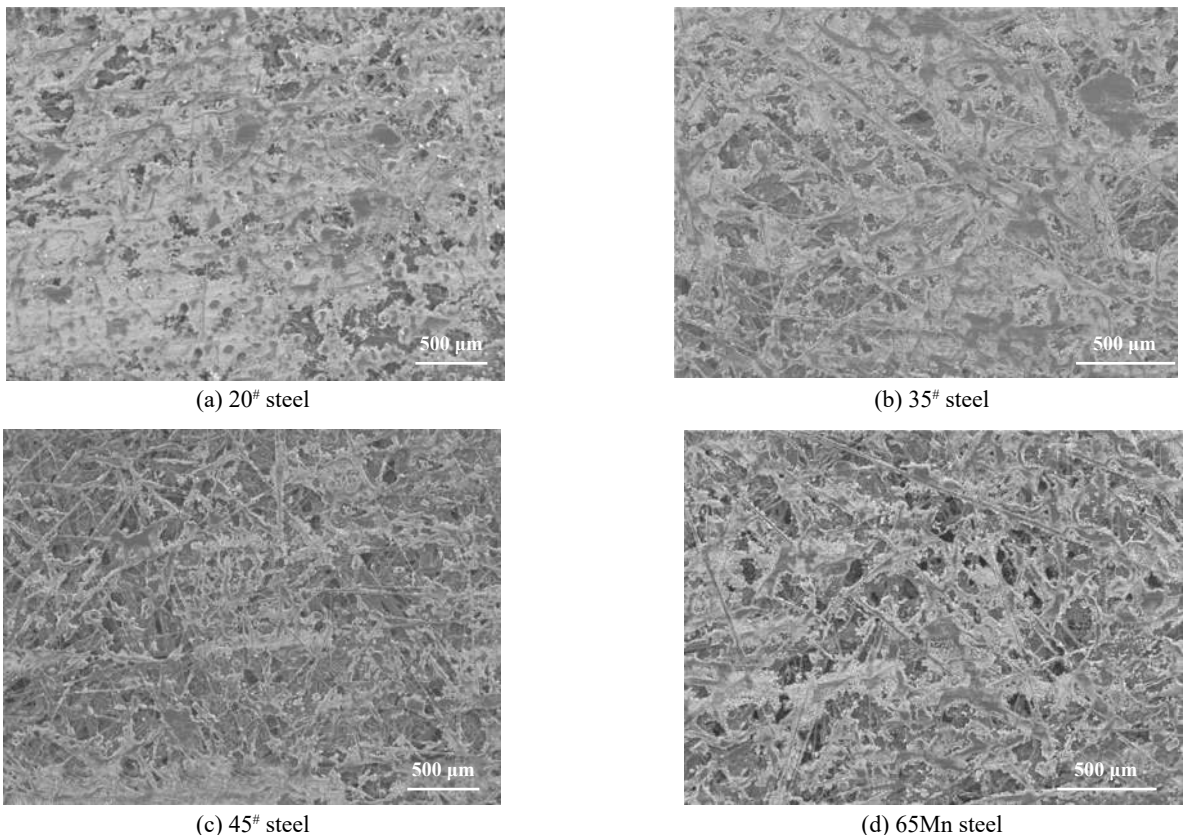
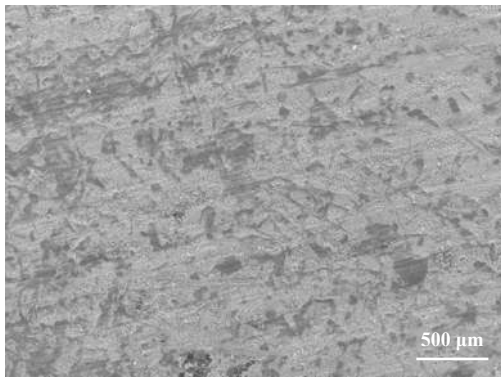
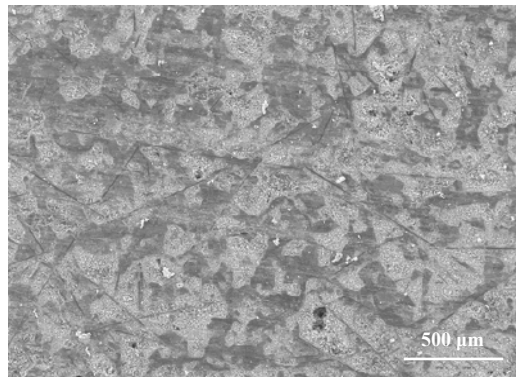


Fig. 6 Worn surface of sample with different matching material under 15 N load

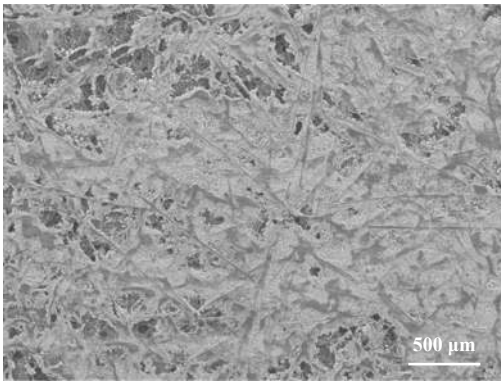
图6 在15 N载荷下, 和不同配副材料对摩后试样的磨损形貌



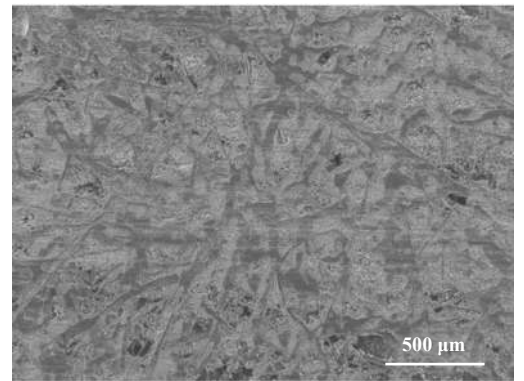
(a) 20# steel



(b) 35# steel



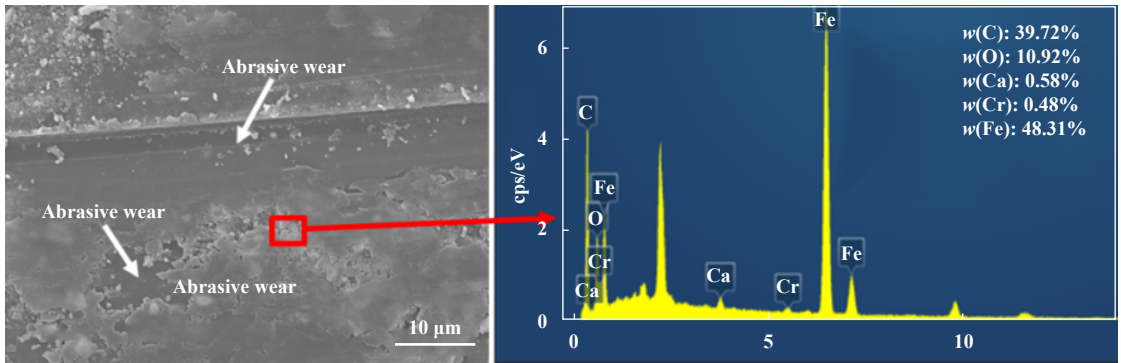
(c) 45# steel



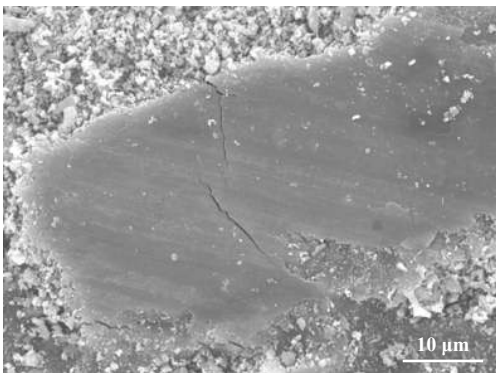
(d) 65Mn steel

Fig. 7 Worn surface of sample with different matching material under 30 N load

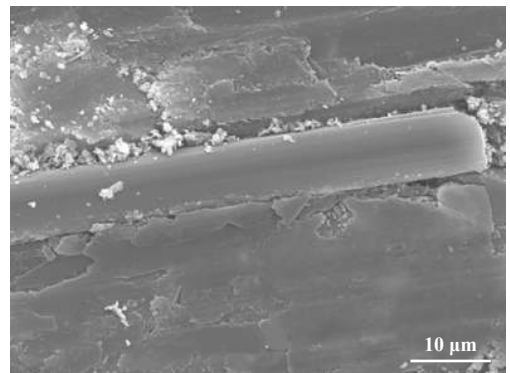
图7 在30 N载荷下, 和不同配副材料对摩后试样的磨损形貌



(a) Abrasive wear and adhesive wear



(b) Fatigue micro-crack



(c) Debonding of fiber

Fig. 8 Wear mode of paper-based friction materials in the oil-free state

图8 无油状态下纸基摩擦材料的磨损形式

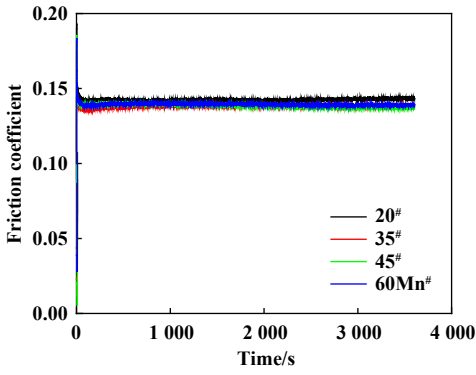


Fig. 9 Friction curves of paper-based friction material between different matching materials under oil-lubricating status

图 9 油润滑状态下, 纸基摩擦材料与不同配副的摩擦曲线

摩擦系数可以看出, 如图10所示, 无油润滑状态下纸基摩擦材料摩擦系数高且波动大(最大接近0.32), 润滑油可以显著改善纸基摩擦材料与不同摩擦配副之间的摩擦系数及其稳定性, 摩擦系数均保持在0.13~0.14之间, 表现出了优异的摩擦学性能.

在油润滑状态下, 纸基摩擦材料与不同硬度的摩擦配副对磨后的磨损形貌如图11所示. 由图11可知, 在油润滑状态下经不同硬度的配副材料对磨后, 纸基摩擦材料均能保持良好的孔隙率, 且纤维呈桥叠状分

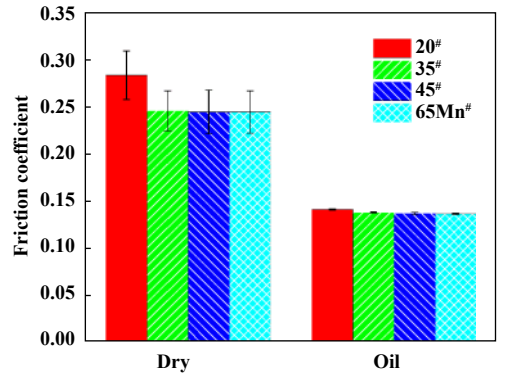
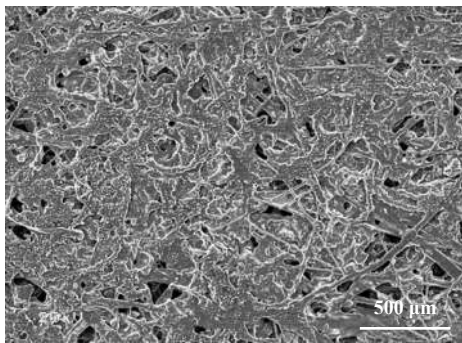


Fig. 10 Comparison of friction coefficient of paper-based friction material between different matching materials under oil-free and oil-lubricating status

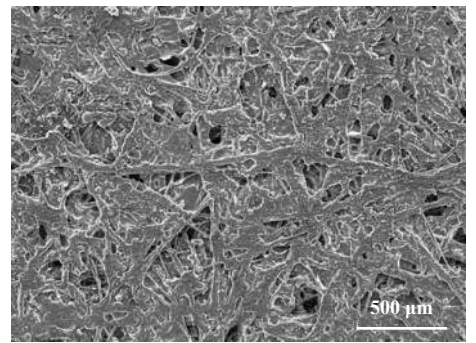
图 10 无油摩擦与油润滑状态下, 纸基摩擦材料与不同配副的摩擦系数对比

布, 树脂粘结剂的包裹良好, 材料表面磨屑较少, 材料整体磨损较小. 表明富油润滑状态下不同牌号钢配副材料表面硬度对纸基摩擦材料磨损性能影响较小.

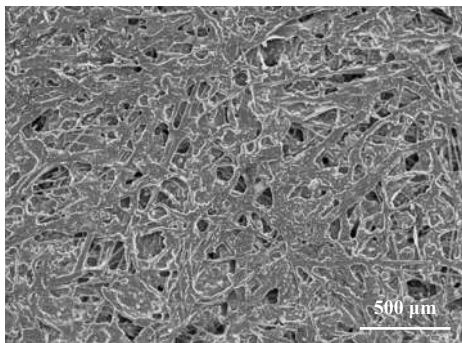
图12为纸基摩擦材料与配副材料在无油和富油润滑状态下的典型磨损表面形貌对比照片. 由磨损形貌放大对比图[图12(a)]可知, 相比于无润滑油摩擦后的磨损表面, 富油状态下纸基摩擦材料表面增强纤维未出现脱粘、断裂等现象, 且充分润滑后的磨损表面



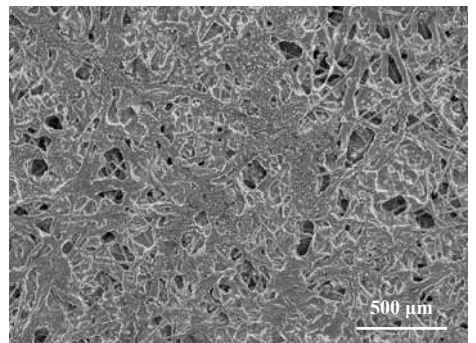
(a) 20# steel



(b) 35# steel



(c) 45# steel



(d) 65Mn steel

Fig. 11 Worn surface of paper-based friction materials with different matching material under 15 N load and rich lubricating oil

图 11 在载荷为15 N、富油状态下, 和不同配副材料对磨后纸基摩擦材料的磨损形貌

产生了较为连续的摩擦膜,覆盖于材料表面保护了增强纤维,使之不易断裂,并固定残留的游离磨屑,有效抑制了材料的磨粒磨损。由于纸基摩擦材料保持了良好的孔隙率,使得润滑油流通性较好,能很好地带出摩擦表面的游离磨屑,同时摩擦过程中产生的大部分摩擦热也通过润滑油的热交换作用被吸收,有利于降低材料的表面温度,保证材料的初始性能^[24]。因此,孔隙率是衡量纸基摩擦材料摩擦学性能的重要因素之一。通过比较两种润滑状态下配副材料的磨损表面,我们发现:无润滑油状态下的配副材料表面含有大量的碳元素和氧元素,表明纸基摩擦材料树脂基体在配副表面产生了粘附作用[见图12(b)].而油润滑状态下

的配副材料表面未发现树脂黏着的痕迹但存在大量颜色较深的斑点,经元素分析发现其氮元素与氧元素含量较多,说明深色斑点为吸附在配副表面的油膜[图12(c)].油膜的存在不但减小了树脂的黏着作用,还明显使得犁沟划痕的数量变少,能有效减轻磨粒磨损^[27]。

2.4 摩擦机理

由其磨损表面形貌和磨损形式可推测出纸基摩擦材料在无油环境下的摩擦机理,如图13所示。在摩擦初始阶段,增强纤维起主要承载作用,纸基摩擦材料与光滑的配副材料对磨的损伤较小,如图13(a)所示。随着摩擦过程的进行,摩擦表面聚集了大量摩擦热,使得纸基摩擦材料表面被树脂包裹的凸起颗粒与

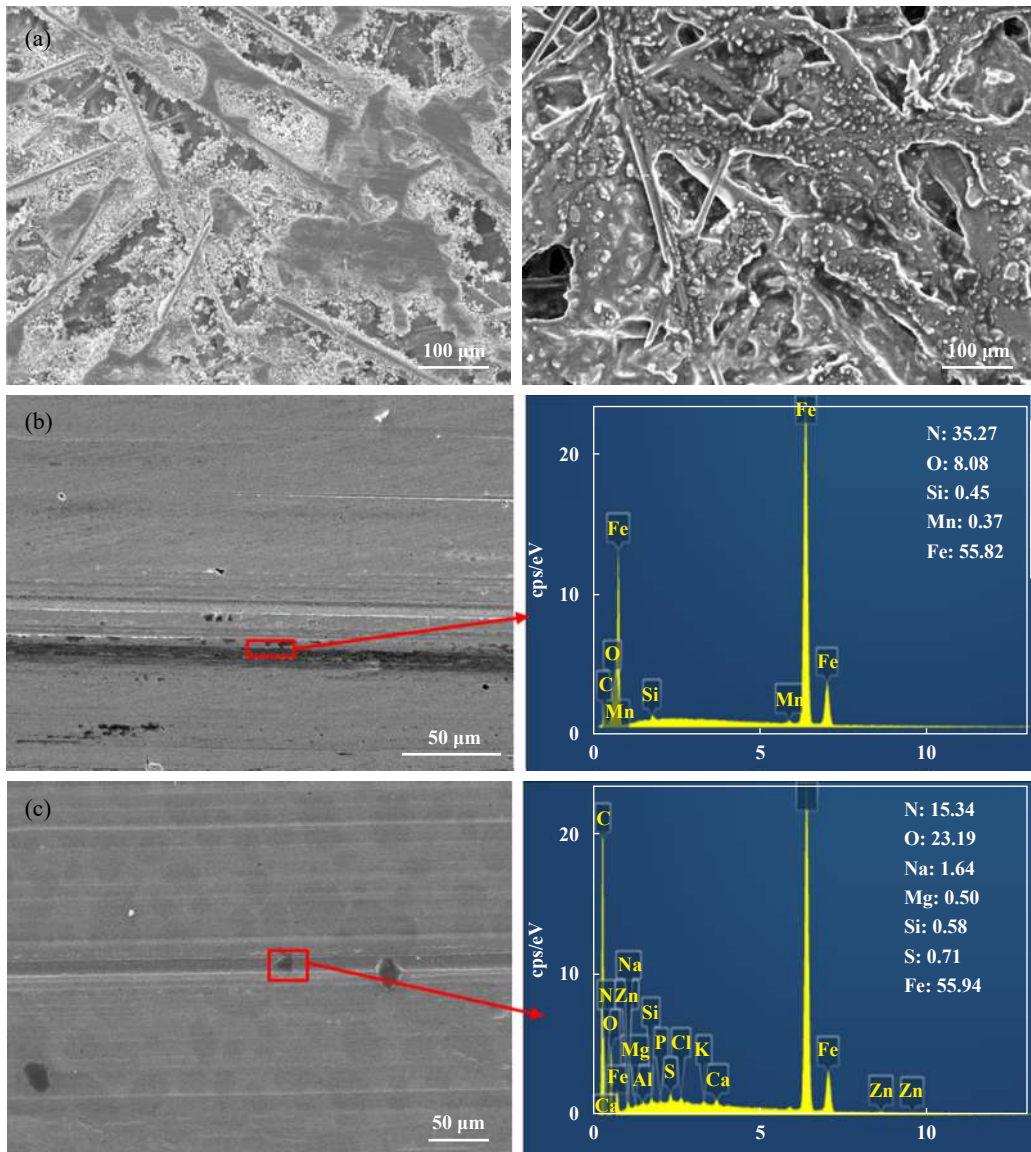


Fig. 12 (a) Comparison of worn surfaces under oil-free and oil-lubricated conditions; (b) Worn surface and element analysis of pairs under oil-free status; (c) Worn surface and element analysis of pairs under oil lubrication

图12 (a)无油与油润滑状态下,材料磨损表面对比;(b)无油状态下,配副磨损表面与元素分析;(c)油润滑状态下,配副磨损表面与元素分析

配副材料表面的微凸体在压力作用下通过分子间作用力形成黏着点, 黏着点处硬度低的凸起颗粒于次表面产生微裂纹并脱落形成三体磨屑^[28-29], 如图13(b)所示. 此外, 在正压力作用下增强纤维被磨削切平从而断裂, 而游离的三体磨屑通过犁削摩擦表面加速了纤维的断裂过程, 在树脂基体处形成大量犁沟, 并对配副材料造成损伤^[31]. 长期的交变应力作用下, 在树脂与纤维结合等薄弱环节处引发疲劳裂纹, 如图13(c)所示. 大量的磨屑和断裂纤维逐渐堵塞孔隙, 加速材料表层温度的升高, 导致材料产生热疲劳, 长期反复

热应力作用加速材料表面裂纹的产生与扩展, 从而加速材料的疲劳磨损, 如图13(d)所示. 裂纹的加速扩展降低了树脂与纤维的界面结合强度, 纤维与树脂基体脱粘, 并在交变应力作用下拔出, 导致材料失效. 65Mn钢配副由于其表面硬度较大, 能减轻三体磨屑对配副材料的微观切削作用, 从而减轻配副材料的磨损. 同时, 硬度较大的配副有助于抑制配副表面硬质颗粒向纸基摩擦材料表面的转移, 从而减少摩擦表面的配副磨粒, 相较硬度低的钢配副材料表现出更优异的摩擦学性能.

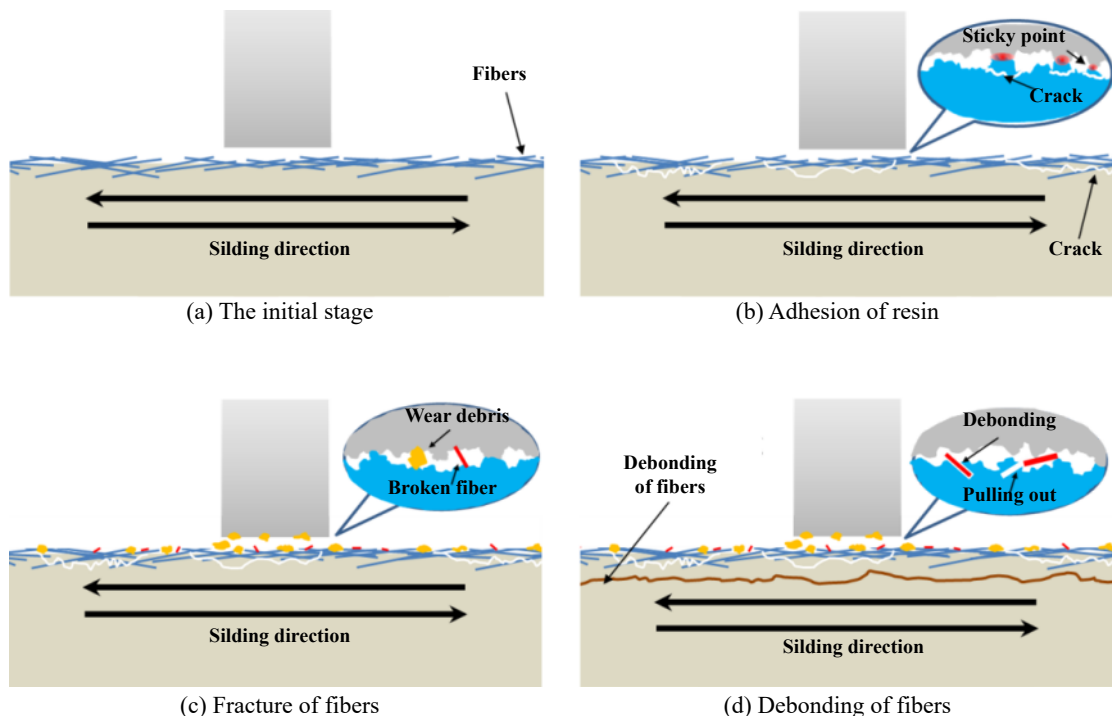


Fig. 13 Schematic diagram of the friction mechanism of paper-based friction materials in the oil-free state

图13 纸基摩擦材料在无油状态下的摩擦机理示意图

图14给出了纸基摩擦材料在富油状态下的润滑机理. 纸基摩擦材料的多孔结构使得润滑油通过毛细作用能迅速浸润纸基摩擦材料的孔隙. 在摩擦过程中, 由于润滑油中的极性分子与纸基摩擦材料的组分形成物理/化学结合, 在摩擦界面形成一层油膜, 材料整体处于流体动压润滑状态, 如图14(a)所示. 但配副材料表面的微凸体和纸基摩擦材料依然会发生局部机械接触, 由微凸体和油膜压力共同承担法相载荷, 油膜减小了纸基摩擦材料与配副材料的实际接触面积, 从而降低了材料的动摩擦系数^[17, 26]. 润滑油的吸入与挤出使得磨屑排出接触面, 减小了材料的磨粒磨损, 此外流通的润滑油能吸收聚集在摩擦表面的摩擦热, 降低表面温度, 能有效抑制材料的热磨损与黏着

磨损, 如图14(b)所示. 脱离摩擦材料的树脂粘结剂与较软的填料颗粒在油膜压力与剪切力作用下于接触面局部区域形成摩擦膜, 如图14(c)所示. 摩擦膜覆盖于树脂基体与纤维表面, 可有效抑制表面微裂纹的产生, 减少犁沟和切削效应的发生, 从而降低了材料的磨损率^[31-32]. 由此可见, 摩擦膜和油膜的协同润滑作用有效减轻了纸基摩擦材料表面磨粒对钢配副材料的微观切削, 降低了配副材料表面硬度的影响作用.

3 结论

a. 考察了高性能纤维纸基摩擦材料无油和富油两种润滑状态下与不同碳含量钢配副材料的摩擦适配性. 无油状态下, 配副材料的硬度显著影响纸基摩

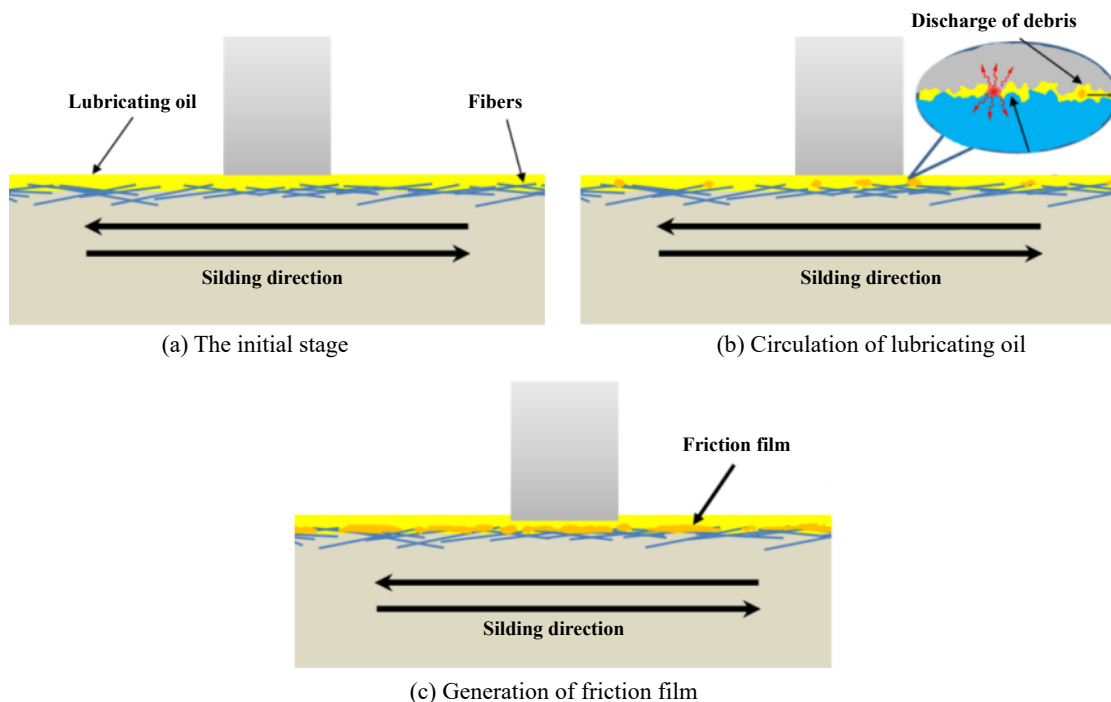


Fig. 14 Schematic diagram of the friction mechanism of paper-based friction materials in the rich oil state

图 14 纸基摩擦材料在富油状态下的摩擦机理示意图

擦材料的摩擦学性能, 较高硬度的配副材料具有更好的耐磨性, 并有助于降低纸基摩擦材料的表面磨损和破坏失效。

b. 润滑油是调节纸基摩擦材料和不同配副材料间摩擦磨损性能的重要介质, 不仅可以使摩擦系数维持在稳定的范围(0.13~0.14)内, 同时显著抑制磨损和延长纸基摩擦材料的服役寿命。

c. 纸基摩擦材料在无油状态下主要表现为黏着磨损、磨粒磨损和热疲劳磨损三种磨损形式, 由疲劳裂纹引发的纤维脱粘与拔出是导致材料失效的主要原因; 在富油状态下, 润滑油能吸收大量的摩擦热并带走摩擦表面的磨屑, 有效抑制了热磨损与磨粒磨损。

参考文献

- [1] Lu Zhaoqing, Chen Jie, Zhang Dakun. Influence of PEO and CPAM on the formation of the base paper for paper-based friction material[J]. China Pulp & Paper, 2013(2): 22–25 (in Chinese) [陆赵情, 陈杰, 张大坤. PEO和CPAM对纸基摩擦材料原纸性能的影响[J]. 中国造纸, 2013(2): 22–25]. doi: [10.11980/j.issn.0254-508X.2013.02.005](https://doi.org/10.11980/j.issn.0254-508X.2013.02.005).
- [2] Hu Wenjing, Lu Zhaoqing, Xie Yi, et al. Effects of the surface modification of fiber on mechanical properties of paper-based friction material[J]. China Pulp & Paper, 2017, 36(2): 12–17 (in Chinese) [胡文静, 陆赵情, 谢璠, 等. 纤维表面改性对纸基摩擦材料原纸强度性能的影响[J]. 中国造纸, 2017, 36(2): 12–17]. doi:

[10.11980/j.issn.0254-508X.2017.02.003](https://doi.org/10.11980/j.issn.0254-508X.2017.02.003).

- [3] Wang Beibei, Lu Zhaoqing, Chen Jie. Friction and wear properties of paper-based friction materials[J]. China Pulp & Paper, 2015, 34(3): 25–30 (in Chinese) [王贝贝, 陆赵情, 陈杰. 纸基摩擦材料摩擦磨损性能的研究[J]. 中国造纸, 2015, 34(3): 25–30]. doi: [10.11980/j.issn.0254-508X.2015.03.006](https://doi.org/10.11980/j.issn.0254-508X.2015.03.006).
- [4] Lu Y. A combinatorial approach for automotive friction materials: effects of ingredients on friction performance[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(3–4): 591–598. doi: [10.1016/j.compscitech.2005.05.032](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.032).
- [5] Fu Yewei, Li Hejun, Li Kezhi, et al. Effect of carbon fiber on the friction and wear behavior of paper-based friction material[J]. Tribology, 2004, 24(6): 555–559 (in Chinese) [付业伟, 李贺军, 李克智, 等. 碳纤维对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(6): 555–559]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2004.06.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2004.06.016).
- [6] Fei J, Wang H K, Huang J F, et al. Effects of carbon fiber length on the tribological properties of paper-based friction materials[J]. Tribology International, 2014, 72: 179–186. doi: [10.1016/j.triboint.2013.12.017](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.12.017).
- [7] Fei Jie, Li Hejun, Fu Yewei, et al. Effect of reinforced fiber on the performance of paper-based friction material[J]. Lubrication Engineering, 2010(10): 1–4 (in Chinese) [费杰, 李贺军, 付业伟, 等. 增强纤维对纸基摩擦材料性能的影响[J]. 润滑与密封, 2010(10): 1–4]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2010.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2010.10.001).
- [8] Hu Jian, Liang Yun, Zheng Chisong, et al. The effect of resin content on the properties of wet paper-based friction material[J].

- Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(11): 39–42 (in Chinese) [胡健,梁云,郑焜嵩,等.树脂含量对湿式纸基摩擦材料性能的影响[J].机械工程材料,2006,30(11):39–42]. doi: [10.3969/j.issn.1000-3738.2006.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3738.2006.11.013).
- [9] Fei J, Li H J, Fu Y W, et al. Effect of phenolic resin content on performance of carbon fiber reinforced paper-based friction material[J]. Wear, 2010, 269(7-8): 534–540. doi: [10.1016/j.wear.2010.05.008](https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.05.008).
- [10] Fei Jie, Li Hejun, Qi Lehua, et al. Effect of graphite content on the friction and wear performance of paper-based friction materials[J]. Tribology, 2007, 27(5): 451–455 (in Chinese) [费杰,李贺军,齐乐华,等.石墨含量对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].摩擦学学报,2007,27(5):451–455]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2007.05.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2007.05.011).
- [11] Fei Jie, Li Hejun, Qi Lehua, et al. Effect of Al_2O_3 content on the friction and wear performance of carbon fiber reinforced paper-based friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2008(4): 70–73 (in Chinese) [费杰,李贺军,齐乐华,等. Al_2O_3 含量对碳纤维增强纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].润滑与密封,2008(4):70–73]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2008.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2008.04.019).
- [12] Zhang Xiang, Li Kezhi, Li Hejun, et al. Effect of graphite particle size on friction and wear performance of paper-based friction material[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(6): 638–642 (in Chinese) [张翔,李克智,李贺军,等.石墨粒度对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].无机材料学报,2011,26(6):638–642]. doi: [10.3724/SP.J.1077.2011.00638](https://doi.org/10.3724/SP.J.1077.2011.00638).
- [13] Zhou L, Fu Y W, Yin T, et al. Synergetic effect of epoxy resin and carboxylated nitrile rubber on tribological and mechanical properties of soft paper-based friction materials[J]. Tribology International, 2019, 129: 314–322. doi: [10.1016/j.triboint.2018.08.020](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.020).
- [14] Fei J, Luo D, Zhang C, et al. Friction and wear behavior of SiC particles deposited onto paper-based friction material via electrophoretic deposition[J]. Tribology International, 2018, 119: 230–238. doi: [10.1016/j.triboint.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.003).
- [15] Li Hejun, Fei Jie, Qi Lehua, et al. Effect of porosity percentage on the friction and wear performance of carbon fiber reinforced paper-based friction materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(6): 1159–1164 (in Chinese) [李贺军,费杰,齐乐华,等.孔隙率对碳纤维增强纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].无机材料学报,2007,22(6):1159–1164]. doi: [10.3321/j.issn:1000-324x.2007.06.029](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-324x.2007.06.029).
- [16] Deng Haijin, Li Xueqin, Li Ming. Influence of porosity of paper-based friction materials on compressure-resilience and tribology properties[J]. Tribology, 2007, 27(6): 544–549 (in Chinese) [邓海金,李雪芹,李明.孔隙率对纸基摩擦材料的压缩回弹和摩擦磨损性能影响的研究[J].摩擦学学报,2007,27(6):544–549]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2007.06.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2007.06.010).
- [17] Fu Yewei, Li Hejun, Fei Jie, et al. Effect of temperature on friction performance of paper-based friction materials[J]. Tribology, 2005, 25(6): 87–91 (in Chinese) [付业伟,李贺军,费杰,等.温度对碳纤维增强纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].摩擦学学报,2005,25(6):87–91]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2005.06.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2005.06.018).
- [18] Davi Coby L, Sadeghi F, Krousgrill Charles M. A simplified approach to modeling thermal effects in wet clutch engagement: analysis and experimental comparison[J]. Journal of Tribology, 2000, 122: 110–118. doi: [10.1115/1.555370](https://doi.org/10.1115/1.555370).
- [19] Grambo R E, Dowell R E, Mackay I. Oil-immersed static coefficient of friction-definition and methods of determination[C]. SAE Technical paper, 1984, 841065: 865-861. doi: [10.4271/841065](https://doi.org/10.4271/841065)
- [20] Lu J H, Li Y F, Wang Y, et al. Effect of pre-impregnated organosilicon layer on friction and wear properties of paper-based friction materials[J]. Wear, 2018, 416: 6–13. doi: [10.1016/j.wear.2018.09.009](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.09.009).
- [21] Cho H-R, Je Y, Chung K-H. Assessment of wear characteristics of paper-based wet friction materials[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(5): 705–711. doi: [10.1007/s12541-018-0084-1](https://doi.org/10.1007/s12541-018-0084-1).
- [22] Ran Liping, Yi Maozhong, Wang Chaosheng, et al. Wear behavior of C/C-Cu composites under different loads and couple parts[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2007(4): 595–601 (in Chinese) [冉丽萍,易茂中,王朝胜,等.不同载荷和对偶下C/C-Cu复合材料的摩擦磨损性能[J].中南大学学报(自然科学版),2007(4):595–601]. doi: [10.3969/j.issn.1672-7207.2007.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7207.2007.04.003).
- [23] Li Shenfei, Fu Yewei, Li Hejun, et al. Effect of mating materials on friction and wear properties of resin-based friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(7): 35–39 (in Chinese) [李慎飞,付业伟,李贺军,等.对偶材料对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].润滑与密封,2014,39(7):35–39]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2014.07.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2014.07.008).
- [24] Fu Yewei, Li Hejun, Li Kezhi. Friction performance of paper type friction material in limited lubricating condition[J]. Lubrication Engineering, 2005, (3): 40–43 (in Chinese) [付业伟,李贺军,李克智.控制润滑状态下纸基摩擦材料的摩擦特性研究[J].润滑与密封,2005,(3):40–43]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2005.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2005.03.014).
- [25] Ge Yicheng, Yi Maozhong, Huang Boyun, et al. Influence of lubrication on tribology properties of C/C composites[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, (8): 1405–1409 (in Chinese) [葛毅成,易茂中,黄伯云,等.润滑状态对C/C复合材料摩擦磨损特性的影响[J].中国有色金属学报,2004,(8):1405–1409]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0609.2004.08.026](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0609.2004.08.026).
- [26] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese) [温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].北京:清华大学出版社,2002].
- [27] Milayzaki T, Matsumoto T, Yamamoto T. Effect of visco-elastic property on friction characteristics of paper-based friction materials for oil immersed clutches[J]. Journal of Tribology, 1998, 120: 393–398. doi: [10.1115/1.2834439](https://doi.org/10.1115/1.2834439).

- [28] Yevtushenko A, Ivanyk E. Determination of temperatures for sliding contact with applications for braking systems[J]. *Wear*, 1997, 206(1-2): 53–59. doi: [10.1016/S0043-1648\(96\)07318-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07318-8).
- [29] Zum Gahr K-H. Wear by hard particles[J]. *Tribology International*, 1998, 31(10): 587–596. doi: [10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6).
- [30] Doi K, Mibe T, Matsui H, et al. Brake judder reduction technology –brake design technique including friction material formulation[J]. *JSAE Review*, 2000, 21(4): 497–502. doi: [10.1016/S0389-4304\(00\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(00)00072-2).
- [31] Österle W, Dörfel I, Prietzel C, et al. A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test[J]. *Wear*, 2009, 267(5-8): 781–788. doi: [10.1016/j.wear.2008.11.023](https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.023).
- [32] Österle W, Urban I. Third body formation on brake pads and rotors[J]. *Tribology International*, 2006, 39(5): 401–408. doi: [10.1016/j.triboint.2005.04.021](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.021).