

摩擦学学报

TRIBOLOGY



自润滑关节轴承用织物衬垫摩擦学研究进展

袁军亚, 杨明明, 李佩隆, 赵鑫, 张招柱

Progress Research on the Tribology of Fabric Liner for Self-Lubricating Joint Bearings

YUAN Junya, YANG Mingming, LI Peilong, ZHAO Xin, ZHANG Zhaozhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能

Tribological Properties of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings with PTFE/PPS Fabric Liners

摩擦学学报. 2018, 38(5): 547 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.007>

石墨烯掺杂的陶瓷和金属自润滑材料研究进展

Research Progress on Graphene Doped Ceramic and Metal Self-lubricating Materials

摩擦学学报. 2019, 39(4): 511 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019001>

食品口腔摩擦学研究进展

Progress of Oral Tribology in Food

摩擦学学报. 2019, 39(1): 118 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018058>

电接触材料摩擦学研究进展

Research Progress on Tribology of Electrical Contact Materials

摩擦学学报. 2019, 39(5): 656 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019025>

口腔正畸摩擦研究进展

Research Progress of Orthodontic Friction

摩擦学学报. 2018, 38(2): 238 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020102

自润滑关节轴承用织物衬垫摩擦学研究进展

袁军亚, 杨明明, 李佩隆, 赵鑫, 张招柱*

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

摘要: 自润滑关节轴承用织物衬垫因其兼具抗冲击、耐腐蚀和承载能力大等优异特性, 使其在高端装备润滑领域发挥着重要作用. 本文中综述了近年来自润滑织物衬垫的摩擦学研究进展, 包括外部试验参数影响机制、织物衬垫编织工艺选择、填料增强及界面修饰等. 相关研究表明: 织物衬垫的摩擦学性能与衬垫界面黏结性能、热性能、转移膜性能以及织物编织工艺密切相关, 但获得它们与摩擦学性能之间的量化经验关系仍具有很大挑战. 此外, 总结了自润滑织物衬垫的相关摩擦学机理, 并在此基础上提出了自润滑织物衬垫可能的发展趋势.

关键词: 织物衬垫; 摩擦磨损; 填料增强; 界面改性

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)02-0280-13

Progress Research on the Tribology of Fabric Liner for Self-Lubricating Joint Bearings

YUAN Junya, YANG Mingming, LI Peilong, ZHAO Xin, ZHANG Zhaozhu*

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

Abstract: The fabric liners for self-lubricating joint bearings play an important role in the field of high-end equipment lubrication due to their excellent characteristics of impact resistance, corrosion resistance, and large load carrying capacity. This article summarizes the recent tribological research progress of self-lubricating fabric liners, including the mechanism of external test parameters, fabric liner weaving technology selection, filler reinforcement and interface modification. Related studies have shown that the tribological properties of fabric liners are closely related to the interfacial adhesion properties, thermal properties, transfer film properties and fabric weaving technology of the liners, but obtaining quantitative empirical relationships between them and tribological properties are still very challenging. The tribological mechanism of self-lubricating fabric liners is further summarized, and the study trends of self-lubricating fabric liners in future are proposed.

Key words: fabric liners; friction and wear; filler enhancement; interfacial modification

自润滑关节轴承是一种球面滑动轴承, 主要由带有内球面的外圈、外球面的内圈以及自润滑衬垫组成, 因其兼具结构紧凑、承载能力强、耐腐蚀和免维护等优点, 而被广泛应用于航空航天、精密机械等高端装备领域^[1-3]. 图1为自润滑关节轴承的实物图和三维结构示意图. 自润滑衬垫材料作为自润滑关节轴承

的服役行为和使用寿命^[4-6]. 目前, 自润滑衬垫材料大致可以分为金属背衬层状复合材料、聚合物及其填充复合材料、聚四氟乙烯(PTFE)纤维织物复合材料三类^[7]. 其中, PTFE纤维织物复合材料具有突出的剪切强度、抗断裂韧性、耐腐蚀性和结构整体性, 表现出其他材料无可比拟的工艺性、可设计性和使用性能^[8-11]. PTFE纤维织物衬垫材料主要由PTFE纤维与其他的高

Received 12 June 2020, revised 28 June 2020, accepted 30 June 2020, available online 28 March 2021.

*Corresponding author. E-mail: zzzhang@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968098.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51805516).

国家自然科学基金项目(51805516)资助.

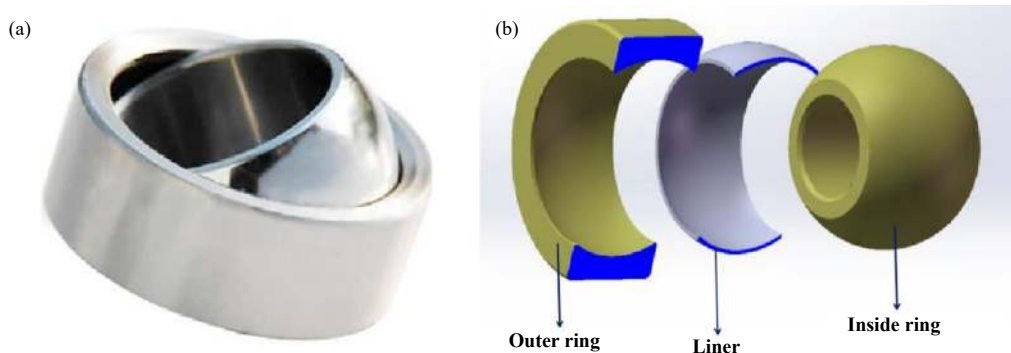


Fig. 1 Physical drawing (a) and three-dimensional structure diagram (b) of self-lubricating joint bearings

图1 自润滑关节轴承的实物图 (a)和三维结构示意图 (b)

性能增强纤维(芳纶纤维、玻璃纤维和碳纤维等)混合编织而成的薄层织物与树脂基体(酚醛树脂、环氧树脂和聚酰亚胺树脂等)复合而成。混编织物的目的在于将构成组分的优势特性集成在一起从而形成新型织物,使得织物衬垫兼具PTFE纤维的高润滑性和增强纤维优良的力学性能。

PTFE纤维织物衬垫工作面以自润滑性能良好的PTFE纤维为主,背面则以强度高和黏结性好的增强纤维为主。在织物衬垫的内部,纤维与树脂基体之间构成双连续相的结构,因而纤维/树脂的界面黏附性能对织物衬垫的摩擦磨损性能至关重要^[12-13]。然而PTFE纤维与其他的高性能增强纤维表面光滑且缺乏有效的活性基团,使得混编织物与树脂基体的界面结合性能较差。在摩擦过程中,树脂基体受到的外界应力无法及时、有效地转移至织物纤维,使得在纤维/树脂界面处产生应力集中,进而诱导织物衬垫内部微裂纹的产生和拓展,加剧织物衬垫材料的磨损^[14]。同时,在高温和高速等运行工况条件下,环境温度和摩擦热对树脂基体的氧化、降解作用,易造成织物衬垫承载能力和摩擦学性能的大幅下降^[15-16]。因此,有必要调节纤维/树脂的界面黏结性能和改善树脂基体的热性能,进而实现织物衬垫材料在高温、重载和高速等苛刻工况条件下的稳定、长效运行。目前对织物衬垫的研究大多集中在对织物的表面处理(改善织物与树脂基体的界面结合力)及填料添加(改善织物衬垫力学性能、热性能及转移膜性能)。此外,织物衬垫复合材料的摩擦磨损性能还与织物衬垫的组织结构、经纬纱密度以及摩擦载荷、速度和温度等因素有关,需要系统阐述织物编织工艺及试验参数对织物衬垫摩擦学性能的影响规律^[17-21]。

综上所述,开展织物衬垫摩擦学性能研究对其性能指标的改善和使用寿命的提高具有十分重要的意义。本文作者从外部试验参数影响机制、织物衬垫编

织工艺选择、填料增强及界面修饰4个方面全面综述了近年来自润滑织物衬垫材料摩擦学性能的研究现状,归纳总结了自润滑织物衬垫的相关摩擦磨损机理,并在此基础上提出了自润滑织物衬垫材料摩擦学可能的发展趋势。

1 外部试验参数对织物衬垫复合材料摩擦磨损性能的影响机制

1.1 应用载荷

应用载荷的增加使得织物衬垫复合材料遭受来自外界更加强烈的压缩和剪切应力,加剧金属对偶对织物衬垫的切削和犁沟效应。与此同时,织物衬垫内部也更易产生应力集中,引发微裂纹的生成并拓展至衬垫表面,产生严重磨损。此外,高载荷诱导产生的热效应也是加剧织物衬垫磨损的1个重要因素^[22-25]。Yuan等^[26]对PTFE/Nomex酚醛树脂基复合材料在不同载荷条件下的摩擦学性能进行研究,发现复合材料的磨损率随载荷的增加持续上升,而摩擦系数随载荷的增加呈下降趋势。应用载荷的增加使得PTFE/Nomex复合材料表面遭受更加严重的压缩和剪切作用,同时诱导更多摩擦热的生成。鉴于酚醛树脂基体较弱的热稳定和热传导能力,大量的摩擦热在滑动界面处产生并累积,会导致树脂基体热氧化和热降解,使得树脂基体的承载能力大幅下降。与此同时,在织物/树脂界面处产生严重的应力集中,诱使树脂基体产生裂纹并从织物表面脱落,暴露的织物纤维在失去树脂的保护后,更被金属对偶拔出和切断,产生严重的磨损。而大量的PTFE纤维在摩擦界面处被粉碎成细小的磨屑,参与到转移膜的生成过程,促进材料摩擦系数的降低。此外,摩擦温升会导致复合材料剪切强度的下降,使得复合材料摩擦系数进一步降低。Su等^[27]在研究glass/PTFE酚醛树脂基复合材料摩擦学性能随载荷变化时,同样发现复合材料的摩擦系数随应用载荷的增加

而降低, 磨损率随载荷的增加而持续上升.

Qiu等^[28]对PTFE/芳纶织物衬垫施加不同的阶跃负载, 同时保证试验期间载荷平均值一致的前提下, 考察载荷比对织物衬垫摩擦学性能的影响. 结果表明: 随着载荷比的增加, 负载的波动加大, 导致稳定的PTFE转移膜不易在对偶表面生成, 降低了织物衬垫抵抗磨损的能力, 加速了衬垫的磨损. 与此同时, 随着载荷比的加大, 最大应用载荷增加, 进一步加剧了织物衬垫的磨损, 如图2所示.

1.2 滑动速度

滑动速度对聚合物复合材料摩擦学性能的影响主要可以归结为滑动界面处温度的影响. 滑动速度的增加极大地加剧了摩擦界面处摩擦热的生成, 加之聚合物自身为热的不良导体, 使得摩擦界面处的温度急速攀升, 导致聚合物基体软化、降解, 进而产生严重磨损. Liu等^[29]研究了PTFE/Kevlar酚醛-环氧(6:4)混合树脂基复合材料摩擦学性能随滑动速度的变化, 发现复合材料的摩擦系数和磨损率均随滑动速度的增加而呈现上升的趋势. 通过观察磨损表面形貌可以看出, 随着滑动速度增加, 复合材料的结构遭到明显的破坏, PTFE纤维逐渐耗尽, Kevlar增强纤维断裂、拔

出, 导致复合材料平均摩擦系数和磨损率的上升. 与此同时, 复合材料结构的破坏导致转移膜的性能变得不稳定, 使得复合材料摩擦系数的波动变得更大. Ren等^[30]研究了PTFE/Nomex酚醛树脂基复合材料的摩擦系数和磨损率随滑动速度的变化规律, 结果显示复合材料的摩擦系数和磨损率随滑动速度的增加先呈现出1个最低值, 而后逐渐增加. 在较低滑动速度条件下, 织物复合材料的主要磨损机理是疲劳磨损和黏着磨损. 随着滑动速度的增加, 摩擦界面处的温度上升到一定值, 使得树脂黏附剂软化, 复合材料的磨损面在摩擦过程中被对偶抛光, 促使复合材料的摩擦系数和磨损率呈现出一定程度的下降. 然而, 滑动速度的进一步增加导致过量的摩擦热在滑动界面处累积, 诱使树脂黏附剂分解以及复合材料机械性能、抗磨性能的大幅下降, 如图3所示.

1.3 环境温度

温度对织物衬垫摩擦磨损性能的影响相较于滑动速度的影响更加直接和剧烈. 随着温度的逐步上升, 聚合物基体的状态由无定形的玻璃态转变为高弹态, 随后进入黏流态, 导致聚合物基体失去承载能力, 织物衬垫材料的摩擦学性能也因此受到严重的影响^[31].

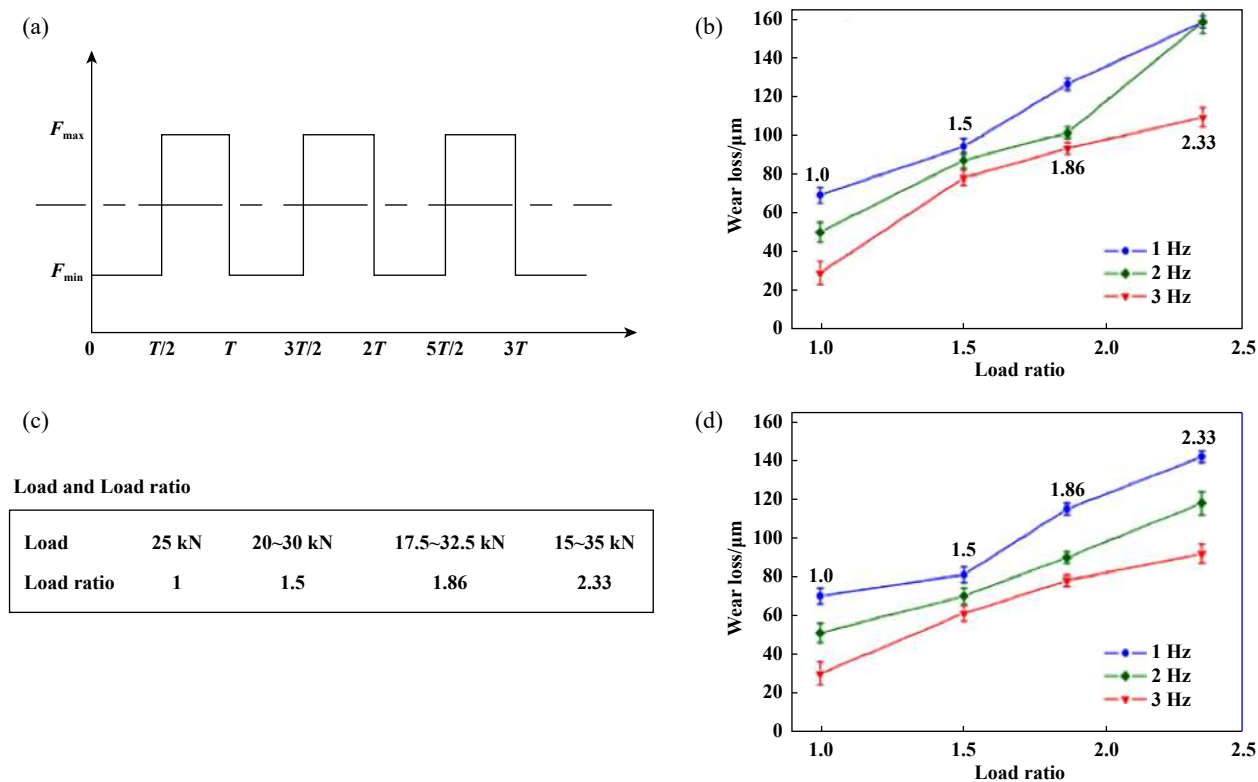


Fig. 2 (a) Step-load spectrum; (b) Load and load ratio; Variation of the wear loss at three different swivel frequencies with an increasing applied load ratio under different load cycles; (c) 20 min, (d) 40 min

图2 (a) 阶跃载荷频谱; (b) 载荷和载荷比; 三种不同旋转频率织物衬垫的磨损量在不同负载周期 (c) 20 min, (d) 40 min条件下随载荷比的变化

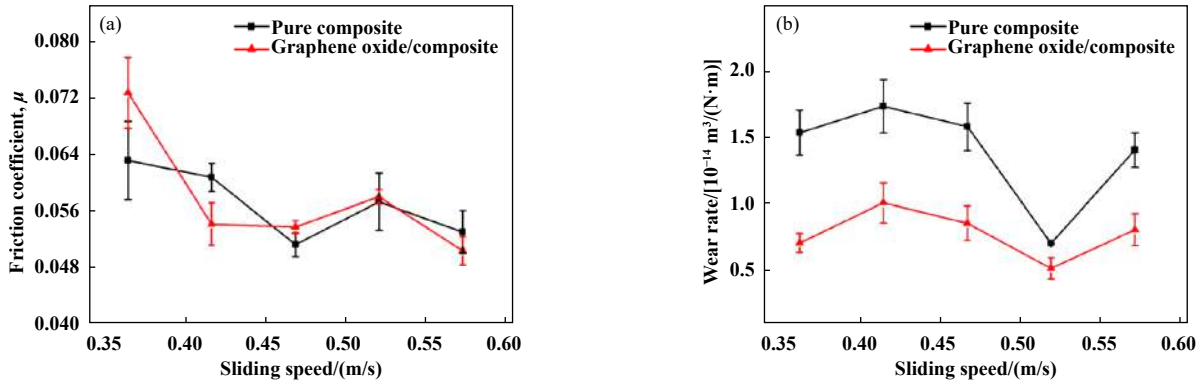


Fig. 3 Effect of sliding speed on the friction coefficient (a) and wear rate (b) for unfilled and graphene oxide filled fabric composite. The applied load in the tests was 85 MPa

图 3 未填充和氧化石墨烯填充织物复合材料的摩擦系数 (a) 和磨损率 (b) 随滑动速度的变化. 试验应用载荷为 85 MPa

Yang等^[32]研究环境温度对PTFE/Nomex酚醛树脂基复合材料摩擦学性能的影响,发现复合材料的磨损率和摩擦系数随环境温度的升高分别呈现上升和下降趋势. 温度升高使得树脂基体软化、降解,在摩擦过程中树脂基体极易从织物表面脱落,失去对织物的保护作用,导致大量的织物纤维被切断和拔出,造成严重磨损. 与此同时,存在于滑动界面处的PTFE纤维磨屑和树脂基体剪切强度的降低促进织物复合材料摩擦系数的降低. Su等^[33]在研究glass/PTFE酚醛树脂基复合材料摩擦学性能随环境温度变化规律时,同样发现材料的磨损率和摩擦系数随温度上升分别呈上升和下降的趋势. 温度升高引起树脂黏附剂软化,容易在摩擦过程中被对偶抛光,使得复合材料的摩擦系数降低. 同时,温度的升高会导致复合材料承载能力和耐磨性能的下降,使得磨损率上升,如图4所示.

2 织物编织工艺对织物衬垫复合材料摩擦磨损的影响

纤维织物作为织物衬垫材料的骨架结构,其编织

结构、密度等工艺参数对织物衬垫材料的磨损机理、适用工况条件等均会产生重要影响. 探究织物编织工艺与织物衬垫复合材料摩擦磨损性能之间的内部关联机制,对选择适用于不同具体摩擦工况条件的织物编织工艺具有实际的指导意义.

2.1 织物编织结构

织物的编织结构主要可以分为平纹、斜纹和缎纹三种. 以这三种组织为基础加以变化或联合使用几种组织,可以得到各种各样的组织结构. Yang等^[34]选择平纹, 1/3斜纹, 8/3缎纹三种编织结构的Kevlar/PTFE酚醛树脂基衬垫作为研究对象,探讨织物编织结构对衬垫材料摩擦学性能的影响. 结果显示在三种编织结构的衬垫材料中, 8/3缎纹织物衬垫的摩擦系数最低, 磨损率最高. 与此同时,平纹织物衬垫的减摩性能最差,却保持着最高的抗磨性能. 在摩擦过程中,PTFE纤维结构被摩擦剪切力和压缩力破坏,形成的磨屑和树脂碎片一起被转移至衬垫材料的凹处,为后续的摩擦过程提供润滑作用. 相比于平纹结构衬垫, 1/3斜纹和8/3缎纹结构衬垫表面含有更大比例的PTFE纤维,

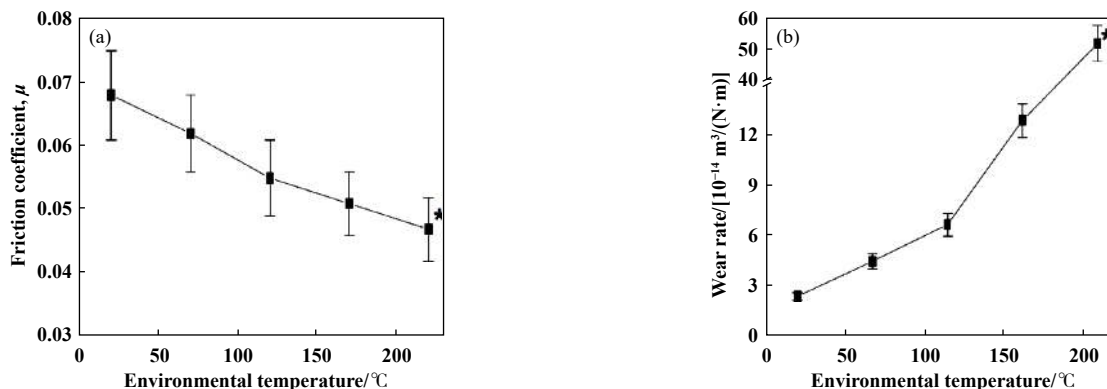


Fig. 4 Effect of the environmental temperature on the friction and wear properties of the plasma treated-hybrid glass/PTFE fabric composite at the load 52.4 MPa. (The data marked with * represent that the composites cannot slide for 120 min under this condition)

图 4 等离子处理混纺glass/PTFE织物复合材料在应用载荷为52.4 MPa时的摩擦系数及磨损率随环境温度的变化

这些PTFE纤维在剪切力作用下发生塑性变形并迅速填充衬垫材料的凹处,因而呈现出较低的摩擦系数和较高的磨损率. Gu等^[35]将不同编织结构的Kevlar/PTFE酚醛树脂基织物衬垫分成润滑区、增强区和键接区3个部分,摩擦磨损试验表明平纹织物衬垫材料更适用于高载工况条件,8/3缎纹织物衬垫更适用于低载工况. 当应用载荷为10 MPa时,磨损主要发生在织物衬垫的润滑区. 相较于8/3缎纹织物衬垫,平纹织物衬垫因其较为粗糙的表面和较低的PTFE含量,表现出较高的摩擦系数和磨损率. 而当应用载荷增加至30 MPa时,磨损进入衬垫的增强区域,在此部分平纹织物衬垫拥有比1/3斜纹和8/3缎纹结构衬垫更高的PTFE比例,因而呈现出最好的抗磨性能. 织物衬垫在润滑区域的主要磨损机理是疲劳磨损和摩擦力的剪切作用. 而在增强区域,开始出现纤维/树脂的界面脱黏和纤维断裂现象,如图5所示.

2.2 织物经纬纱密度

在织物中,单位长度内排列的经纬纱根数,称为织物的经纬纱密度. 密度的大小,直接影响织物的外观、厚度、强力和耐磨性等物理机械指标. Chen等^[36]以Nomex纱线为经纱,PTFE纱线为纬纱,织造Nomex/PTFE平纹织物衬垫,考察经纬纱密度对衬垫摩擦磨损性能的影响,经纱密度依次选取280、320、360、400和440根/10 cm,纬纱密度依次选取为280、300、320、340和360根/10 cm. 得到以下结果:在纬纱密度一

定的情况下,随着经纱密度的提高,衬垫复合材料的摩擦系数和磨损量均会逐渐降低;在经纱密度一定的情况下,随着纬纱密度的提高,衬垫复合材料的摩擦系数和磨损量同样逐渐降低. 经纬纱密度对织物衬垫复合材料摩擦磨损的影响主要体现在织物的紧密度上,经纬纱密度越大,衬垫材料越紧凑,单位面积内起承载和自润滑作用的纱线越多,摩擦和磨损性能就会得到相应提升. Qi等^[37]研究纬纱密度对PTFE/Kevlar49酚醛树脂基织物衬垫在重载工况条件下摩擦学性能的影响规律(以PTFE为纬纱),结果显示纬纱密度在300~350根/10 cm之间时,织物衬垫表现出更为优异的摩擦磨损性能. 当纬纱密度低于300根/10 cm时,PTFE纤维不能够提供足够的润滑作用,而当纬纱密度高于350根/10 cm时,织物衬垫的承载能力下降,不能够满足重载工况的要求.

3 填料填充对织物衬垫复合材料摩擦磨损的影响

引入填料是提升织物衬垫摩擦学性能最简单、有效且应用最为广泛的改性方法. 目前,应用于织物衬垫摩擦学性能增强的填料种类繁多,包括金属氧化物、金属硼化物、金属硫化物、碳基填料、陶瓷和天然矿物等^[38-40]. 这些填料通过改善织物衬垫材料的承载能力、热性能、转移膜与对偶结合力或充当微滚动轴

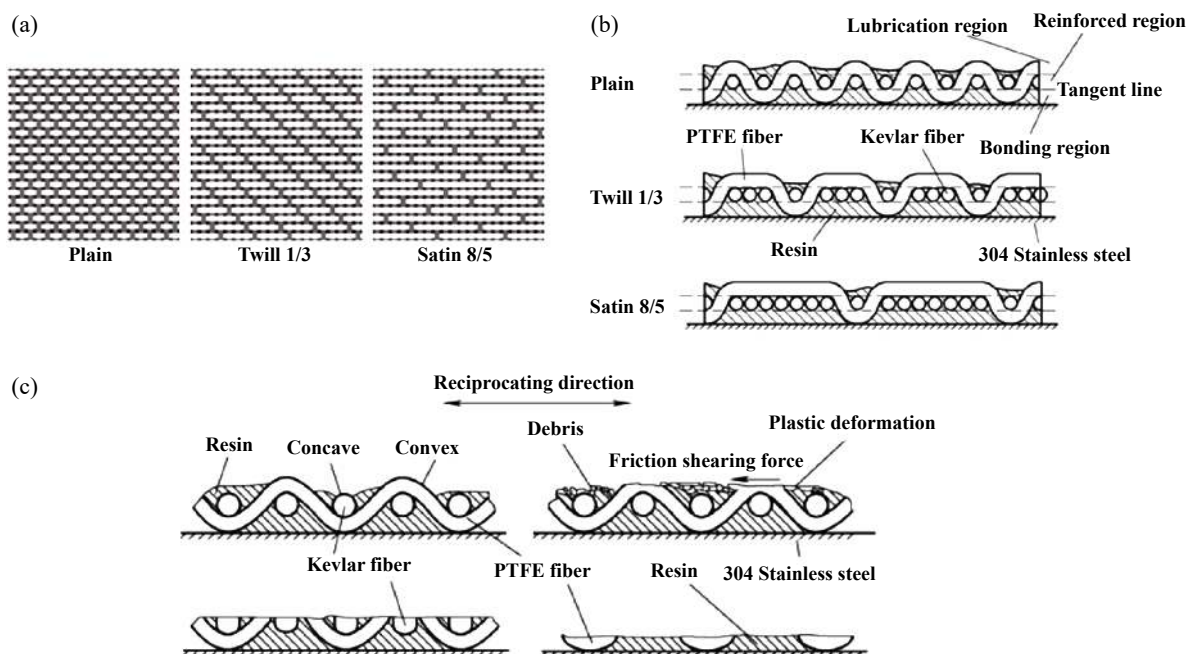


Fig. 5 (a) Schematic showing different weave patterns; (b) Section view of the three weave structures of fabric composites; (c) Regional wear model showing the wear process of plain fabric composites

图5 (a) 三种编织结构示意图; (b) 三种不同编织结构织物复合材料的剖视图; (c) 平纹织物复合材料磨损过程的区域磨损模型

承的作用, 实现织物衬垫材料摩擦磨损性能的提升。与此同时, 越来越多的研究者将两种或多种填料同时应用于织物衬垫的摩擦学性能提升, 抑或是合成新型的异质结材料, 用以获得单一填料无法实现的增强效应, 比如硬质和软质填料组合, 不同维度填料组合或不同功能填料组合^[41-43]。在这里, 我们根据填料组成将填料分为单一填料和复合填料。

3.1 单一填料

填料的种类按功能划分可以大致分为增强填料和润滑填料, 增强填料以高硬度、高导热、抗氧化的陶瓷及金属氧化物颗粒为主, 润滑填料则以金属硫化物和碳基填料等二维层状材料为主。Fan等^[44]将有机蒙脱土添加到PTFE/Kevlar 49酚醛树脂基织物衬垫中, 用于提高衬垫材料的摩擦学性能。摩擦测试结果表明有机蒙脱土可以有效提升衬垫的摩擦磨损性能, 同时蒙脱土质量分数为2%时对织物衬垫摩擦学性能的增强作用最佳。Yang等^[45]研究硼化锆颗粒对PTFE/Nomex酚醛树脂基衬垫材料高温摩擦学性能的影响, 结果显示硼化锆颗粒的引入有效地改善了织物衬垫的热稳定性和承载能力, 极大地降低了衬垫在高温环境中的

磨损量(图6)。Ren等^[46]研究纳米和微米 WS_2 增强PTFE/Nomex织物的滑动摩擦行为, 结果表明两种尺寸 WS_2 均可以有效降低织物衬垫的摩擦系数和磨损率, 但纳米和微米尺寸 WS_2 填料的最佳质量分数分别为2%和4%。Zhang等^[47]研究氧化锌纳米颗粒对PTFE/Kevlar织物衬垫摩擦学性能的影响, 摩擦磨损试验显示氧化锌纳米颗粒增强填料可以有效降低织物衬垫的摩擦系数和磨损率, 并当氧化锌颗粒质量分数为5%时, 增强效应最为显著。

3.2 复合填料

在实际应用过程中, 单一种类的填料通常难以实现对织物衬垫材料减摩、耐磨性能的同时提升, 需要联合两种甚至多种填料的特性, 完成不同种类填料对织物衬垫材料摩擦学性能的协同增强效应。Li等^[48]研究纳米 Si_3N_4 颗粒和亚微米的 WS_2 颗粒对PTFE/Kevlar织物衬垫摩擦学性能的影响。摩擦磨损测试结果表明纳米 Si_3N_4 颗粒可以有效降低织物衬垫的磨损量, 但却不能减小织物衬垫的摩擦系数, 而联合添加纳米 Si_3N_4 颗粒和亚微米的 WS_2 颗粒可以同时降低织物衬垫的磨损量和摩擦系数, 这主要归因于联合颗粒可以

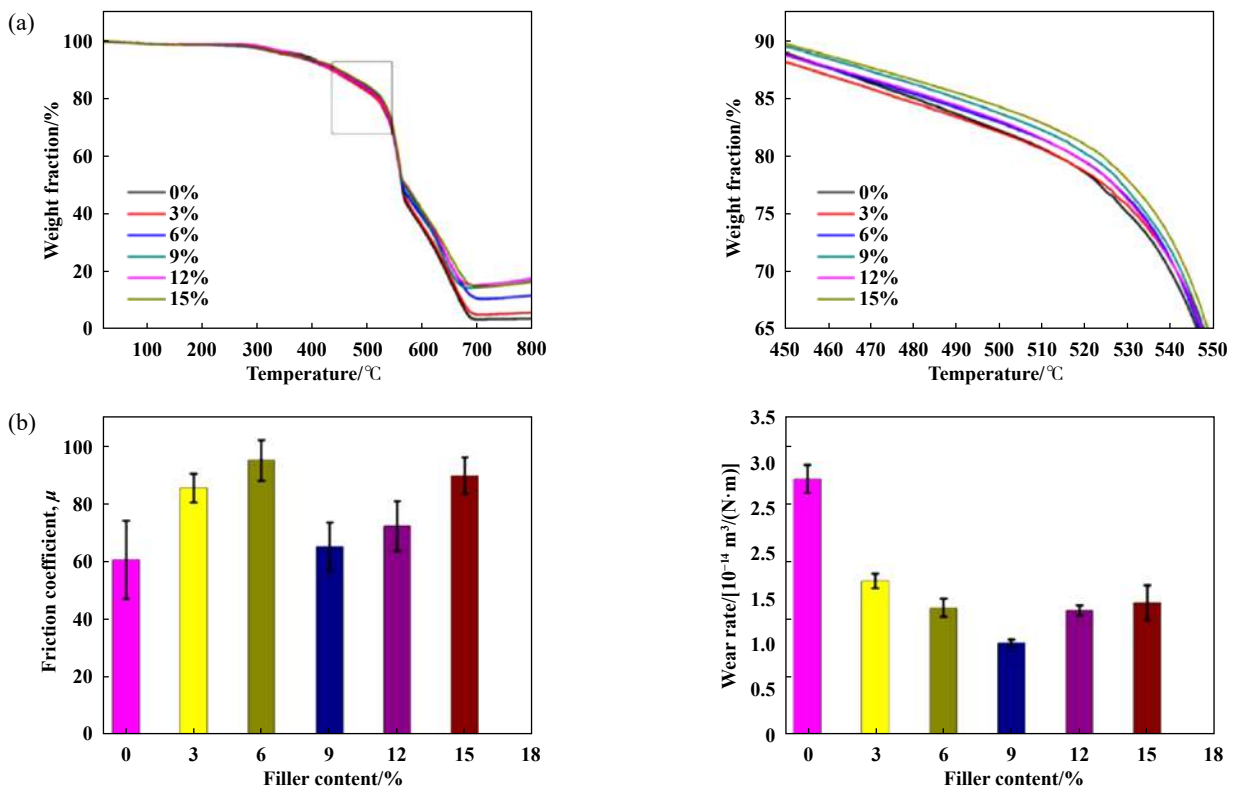


Fig. 6 (a) TGA curves of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composites filled with different content of ZrB_2 particles; (b) Friction coefficient and wear rate of ZrB_2 filled hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite as a function of filler content (60 MPa, 0.26 m/s and 200 °C)

图6 (a) 填充不同含量 ZrB_2 颗粒PTFE/Nomex酚醛树脂基复合材料的热重曲线; (b) PTFE/Nomex酚醛树脂基复合材料的摩擦系数和磨损率随 ZrB_2 颗粒含量的变化 (60 MPa, 0.26 m/s和200 °C)

促进织物衬垫生成薄、均匀且坚韧的摩擦转移膜。这些性能优异的转移膜可以有效抑制金属对偶与织物衬垫的直接接触,同时填充的微纳米颗粒可以在摩擦副之间起到微滚动轴承的作用。此外,织物衬垫填充微纳米颗粒后的磨屑尺寸大幅减小,这些小尺寸的磨屑可以在摩擦过程中填充到衬垫磨损表面的缝隙中,对织物衬垫起到一定的修复作用,进一步提高织物衬垫的摩擦学性能(见图7)。Yang等^[49]研究 AlB_2 和氟化石墨对PTFE/Nomex酚醛树脂基衬垫材料摩擦学性能的协同增强作用。研究结果表明:相较于单一的 AlB_2 或氟化石墨增强填料,联合添加 AlB_2 和氟化石墨更有利于织物衬垫材料摩擦磨损性能的提升,这主要源于

AlB_2 与氟化石墨之间的协同增强效应,赋予织物衬垫高的热传导、负载承受能力以及优异的润滑性能。Yuan等^[50]通过调控不同比例的氮化硼纳米片和碳纳米管进行共价交联获取不同构成的 $\text{BN}_{1-x}\text{C}_x$ 杂化纳米片,并研究杂化纳米片对Nomex/PTFE织物衬垫摩擦学性能的影响。在这种杂化纳米片构型中,碳纳米管刚性棒状结构插入到二维的氮化硼柔性纳米片中,使得氮化硼的卷曲效应和碳管的团聚状态得到有效地抑制,因此避免了氮化硼和碳管在织物衬垫中的大规模团聚现象。摩擦磨损试验显示当氮化硼和碳管摩尔比为1:1时, $\text{BN}_{0.5}\text{C}_{0.5}$ 填充的织物衬垫材料呈现出最优的摩擦学性能。

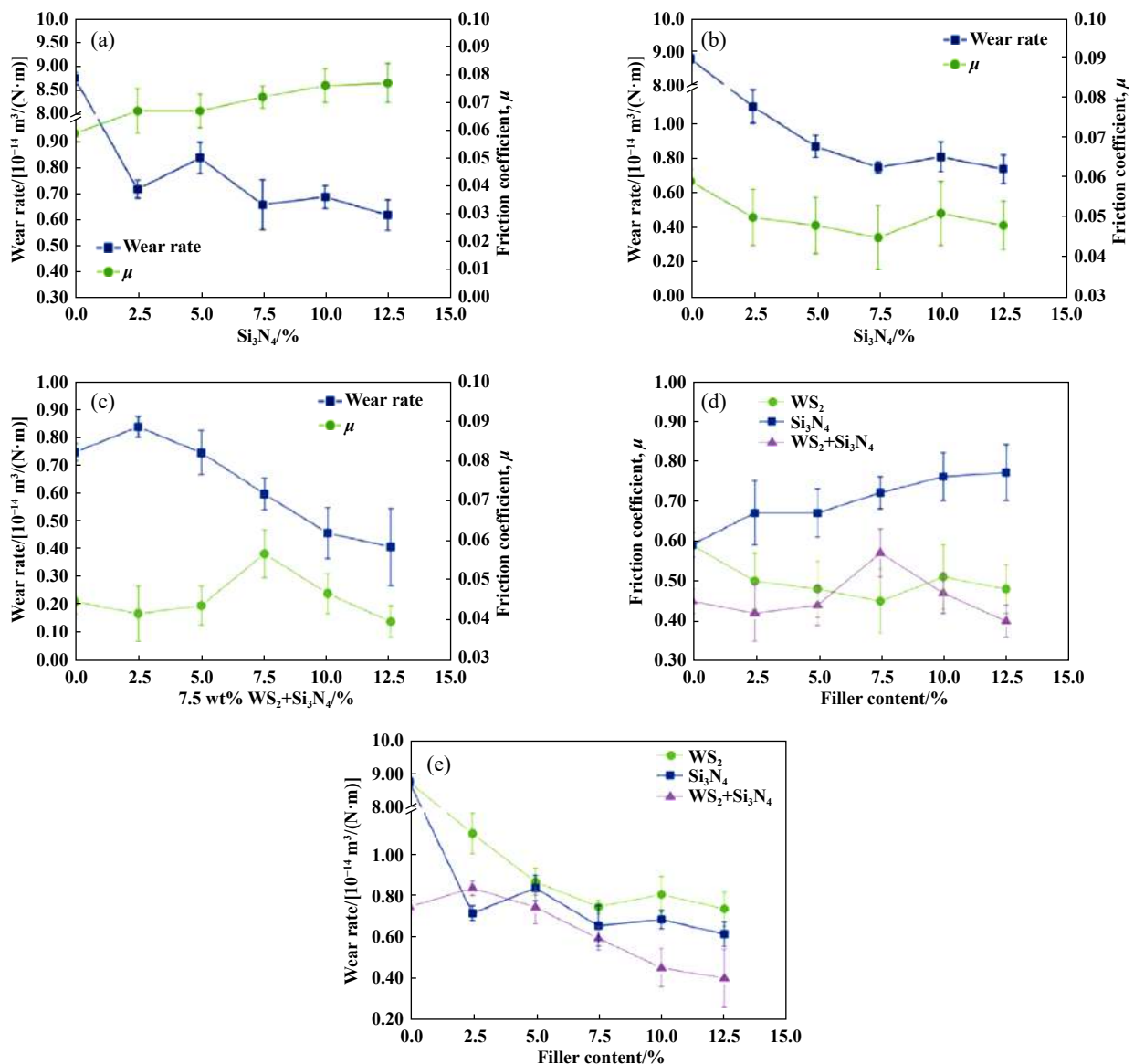


Fig. 7 Variation of the friction coefficient/wear rate and their standard deviation of the hybrid PTFE/Kevlar fabric composites with different filler contents

图7 PTFE/Kevlar混纺织物复合材料的摩擦系数/磨损率随填料含量的变化

4 界面修饰对织物衬垫复合材料摩擦磨损的影响

界面是织物衬垫材料极为重要的微结构, 它作为织物纤维与树脂基体连接的纽带, 对织物衬垫的物理、化学及力学性能有着至关重要的影响. 首先, 界面影响到纤维与基体之间的应力传递, 从而决定织物衬垫的强度; 其次, 界面影响到织物衬垫损伤累积与裂纹的传播历程, 从而决定织物衬垫的断裂韧性; 最后, 界面直接影响织物衬垫的耐环境、介质稳定性及织物衬垫材料的功能性. 因此, 许多研究者探索通过改善织物衬垫材料的界面黏附性能提升复合材料的摩擦学性能. 目前, 主要的织物纤维表面改性技术可以大致分为物理改性、化学改性和纳米材料界面过渡层构建3个方面.

4.1 物理改性方法

物理改性方法是利用等离子体表面改性、高能辐射改性、冷冻处理等物理手段改变纤维表面形貌和结构, 提升织物衬垫材料的界面黏附性能, 进而增强衬

垫材料的耐磨、承载性能. Zhang等^[51]利用液氮冷冻处理PTFE/Kevlar织物, 提升PTFE/Kevlar酚醛树脂复合材料的耐磨性能, 结果表明PTFE和Kevlar纤维经冷冻处理后表面粗糙度明显增加, 有助于提升织物纤维与树脂基体之间的机械联锁作用. 摩擦磨损试验显示, 相较于未改性的织物衬垫材料, 经冷冻处理的织物衬垫在不同载荷和温度条件下均表现出更低的磨损率, 这主要归因于织物衬垫界面黏附性能的改善. Qiu等^[52]研究超声改性对PTFE/芳纶复合材料转移膜形成机制和摩擦学性能的影响, 结果表明织物纤维经超声处理后, 织物衬垫可以在更短的时间内形成连续和稳定的PTFE转移膜, 使得改性后的织物衬垫呈现出更低的摩擦系数和磨损量. 此外, 织物衬垫经超声改性后, 在摩擦过程中仅产生黏着磨损, 而未改性的织物衬垫材料在测试过程中出现严重的黏着和磨粒磨损现象, 如图8所示. Ren等^[53]研究空气等离子体处理对PTFE/Nomex酚醛树脂基织物衬垫摩擦学性能的影响. 结果表明PTFE纤维和Nomex纤维经空气等离子

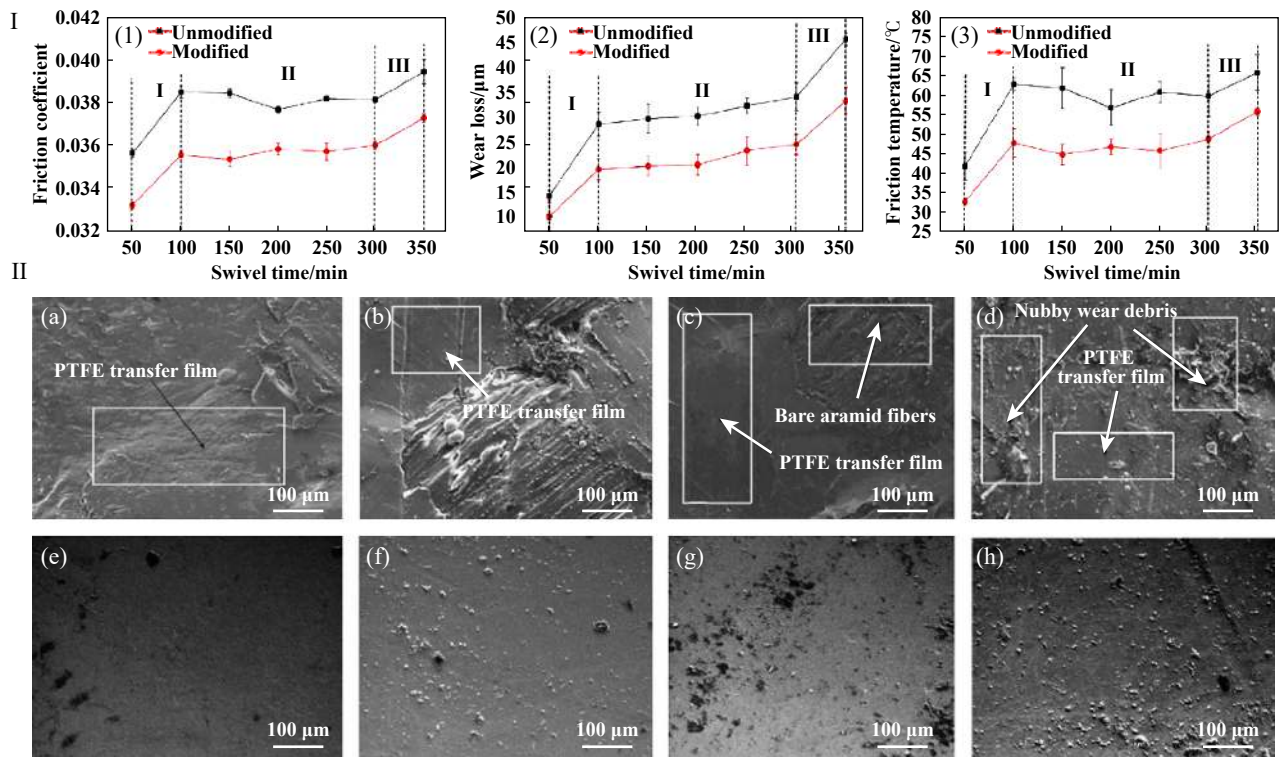


Fig. 8 Tribological performances of the self-lubricating radial spherical plain bearings with the liners modified and unmodified along with swivel time: (1) friction coefficient; (2) wear loss; (3) friction temperature; SEM micrographs of the worn surfaces of the liners modified and unmodified as well as their counter surfaces under different swivel times ($f=2.5$ Hz, $p=30$ MPa): (a) modified, $t=200$ min; (b) unmodified, $t=200$ min; (c) modified, $t=350$ min; (d) unmodified, $t=350$ min; (e) counter surface of (a); (f) counter surface of (b); (g) counter surface of (c); (h) counter surface of (d)

图 8 改性和未改性自润滑球面轴承衬垫随转动时间的摩擦学性能: (1) 摩擦系数; (2) 磨损量; (3) 摩擦温度; 改性和未改性衬垫在不同转动时间条件下磨损面的扫描电镜照片 ($f=2.5$ Hz, $p=30$ MPa): (a) 改性, $t=200$ min; (b) 未改性, $t=200$ min; (c) 改性, $t=350$ min; (d) 未改性, $t=350$ min; (e~h) 分别对应为 (a~d) 对偶磨损表面形貌

体处理后表面粗糙度和活性基团含量显著增加,树脂基体对纤维织物的浸润性大幅提高,从而提升了织物衬垫材料的界面黏附性能.摩擦磨损试验显示经空气等离子体处理后,织物衬垫在不同载荷和滑动速度条件下的摩擦系数和磨损率均呈现出不同程度的降低,这主要归因于纤维/树脂界面黏附性能的改善.

4.2 化学改性方法

化学改性方法主要包括化学接枝、化学涂敷、酸碱刻蚀和电化学改性等方法,通过在纤维表面引入活性功能基团或构建粗糙表面,促进树脂对织物纤维的浸润,同时在纤维与树脂之间形成化学键接,改善纤维与树脂基体之间的界面黏附性能,进而实现织物衬

垫材料摩擦学性能的提升.胡仁松等^[54]研究磷酸酯偶联剂接枝改性处理PTFE/芳纶纤维复合编织衬垫对自润滑关节轴承黏结性能和摩擦磨损性能的影响.结果表明:磷酸酯偶联剂接枝改性处理衬垫可以有效提高轴承衬垫的黏结性能;织物衬垫经接枝改性后,自润滑关节轴承的摩擦系数、磨损量以及摩擦温升均明显降低,表明轴承的摩擦学性能得到明显地提升.Yuan等^[55]利用聚多巴胺涂层作为界面中间层,在Nomex/PTFE织物表面接枝氨基硅烷,并研究该接枝改性对织物衬垫机械和摩擦学性能的影响.结果显示,Nomex/PTFE织物衬垫经接枝改性后的界面黏附性能和耐磨性能均呈现出显著地增长,如图9所示.

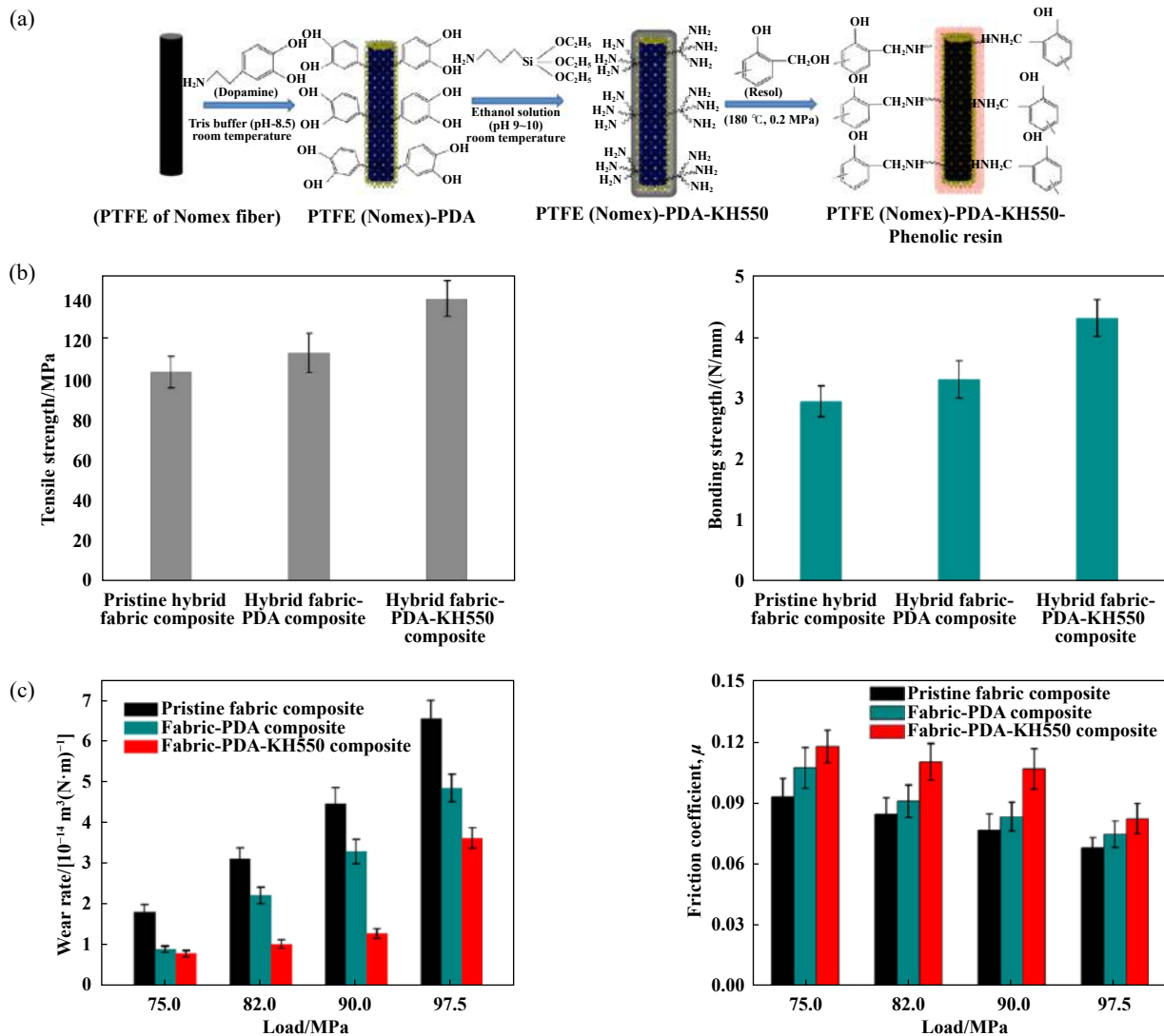


Fig. 9 (a) Illustration of procedure for preparing amino functionalized PTFE and Nomex fibers; (b) The tensile and bonding strength of pristine fabric, fabric-PDA and fabric-PDA-KH550 composites; (c) Wear rate and friction coefficient of pristine fabric, fabric-PDA and fabric-PDA-KH550 composites as a function of applied load (0.26 m/s, 120 min)

图9 (a) PTFE和Nomex纤维氨基功能化过程示意图;(b)未改性,多巴胺改性以及PDA-KH550联合改性织物复合材料的拉伸和剥离强度;(c)未改性,多巴胺改性以及PDA-KH550联合改性织物复合材料的磨损率、摩擦系数随应用载荷的变化规律(0.26 m/s, 120 min)

4.3 纳米材料界面过渡层构建

通过在自润滑织物衬垫界面处引入纳米材料界面过渡层, 缓解织物纤维与树脂基体之间的模量不匹配, 同时通过提高纤维表面粗糙度, 增强树脂对纤维织物的浸润性及树脂与纤维之间的机械啮合效应, 实现织物衬垫材料界面黏附性能的提升. 此外, 存在于织物衬垫界面过渡层的纳米材料可以在织物衬垫内部构建热传导通道, 改善织物衬垫材料的热稳定及热传导性能. 与此同时, 在摩擦过程中, 这些纳米颗粒被转移至摩擦界面, 可以促进转移膜的生成及转移膜与

对偶的结合. Qiu等^[56]研究稀土处理对PTFE/Kevlar自润滑织物衬垫界面性能及摩擦、磨损性能的影响. 结果显示, 织物衬垫经稀土改性后, 衬垫材料的剥离强度较未改性时增加两倍, 同时衬垫的磨损机理也从磨粒磨损转变为轻微的黏着磨损. 织物衬垫经稀土处理后摩擦学性能的改善, 一方面归功于织物衬垫界面性能的提升; 另一方面, 氯化镧在摩擦热的作用下转变成氧化镧晶体, 进一步赋予织物衬垫优异的抗磨损润滑性能. Yuan等^[57]在Nomex/PTFE织物表面原位生长氧化锌纳米晶须, 并研究氧化锌纳米晶须的引入对织物

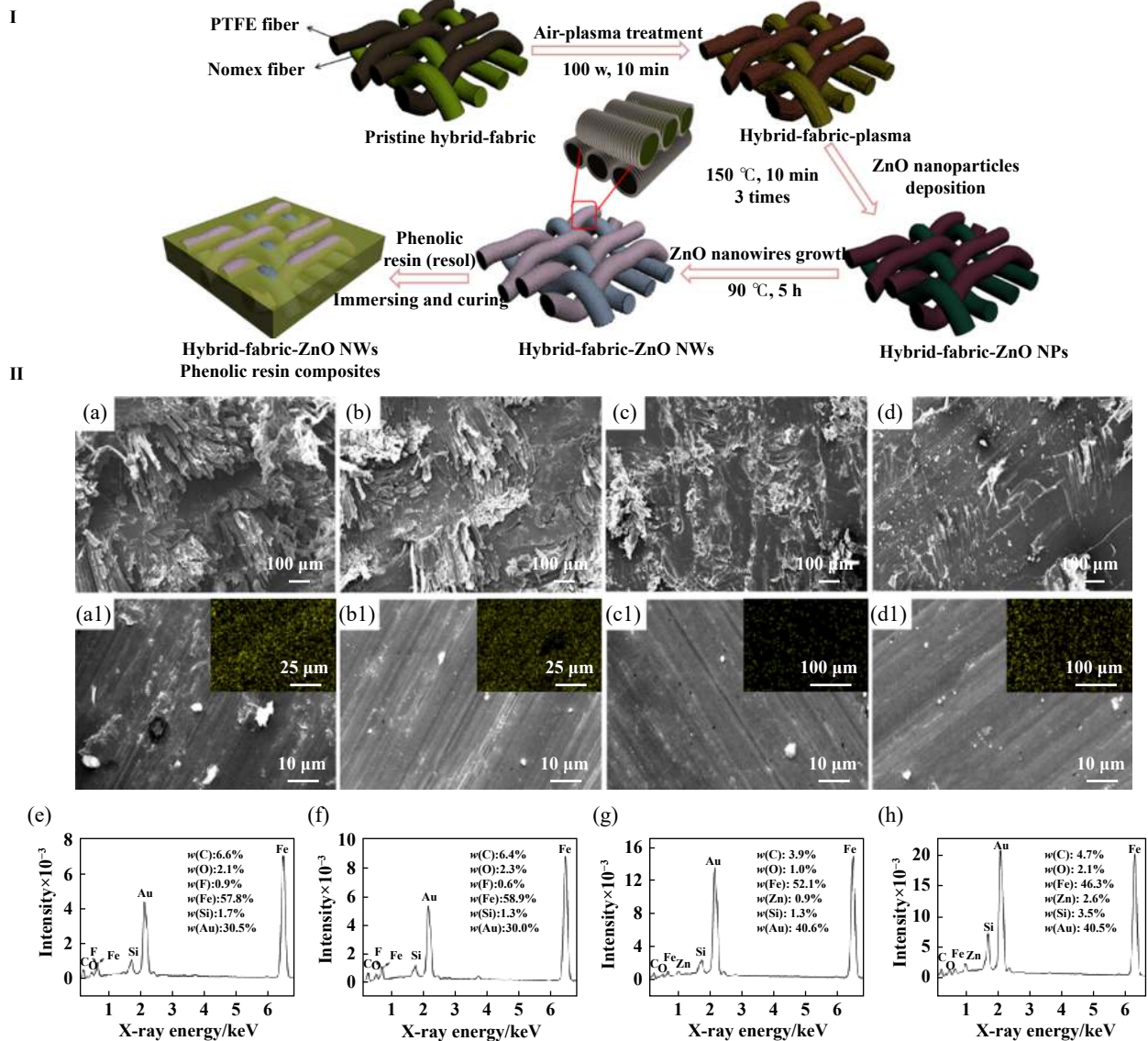


Fig. 10 (I) Schematic illustration of the preparation procedure for hybrid-fabric-ZnO NWs composites; (II) SEM images of the worn surfaces for pristine (a), air-plasma treated (b), ZnO NPs deposited (c), and ZnO NWs grafted (d) hybrid-fabric composites (82.5 MPa, 0.26 m/s, 120 min); (a₁~d₁) are the corresponding counterface pins images of (a~d), respectively; (e~h) are the corresponding EDS results of (a₁~d₁), respectively

图 10 (I) 氧化锌纳米晶须改性混纺织物复合材料准备过程示意图; (II) 未改性(a), 空气等离子体处理 (b), 氧化锌纳米颗粒沉积 (c), 氧化锌纳米晶须接枝 (d) 混纺织物复合材料磨损表面扫描电镜照片; (a₁~d₁) 分别为 (a~d) 对偶表面形貌; (e~h) 分别为 (a₁~d₁) 的EDS结果

衬垫摩擦学性能的影响. 机械测试结果表明织物衬垫经生长改性后的界面黏附性能得到了明显地改善, 同时保留了织物原有的力学强度和柔韧性. 摩擦磨损测试结果显示织物衬垫经生长改性后的耐磨性能得到了极大的提升, 这一方面源于织物衬垫界面性能的改善抑制了摩擦过程中的界面应力集中, 使得衬垫的磨损由树脂脱落、纤维拔出转变为纤维的薄化. 另一方面, 存在于织物衬垫界面处的氧化锌纳米晶须在摩擦过程中被转移至摩擦界面, 参与到摩擦转移膜的生成过程, 使得摩擦转移膜更加均匀、致密, 如图10所示.

5 总结与展望

目前, 国内外研究者在自润滑关节轴承用织物衬垫方面已做了大量研究, 对织物衬垫摩擦磨损机制形成了不同的认识. 由于材料的摩擦磨损性能不属于材料固有的性能, 而是受到摩擦学系统如接触条件、工况、环境和介质等多方面因素的影响, 因而织物衬垫编织工艺设计、转移膜的生成及其与对偶表面的黏结强度以及摩擦磨损机制等还需进一步研究.

a. 纤维织物作为织物衬垫的骨架结构, 因此纤维织物的编织结构和编织密度将直接影响织物衬垫的摩擦磨损性能. 目前, 纤维织物衬垫的结构、组分与织物衬垫摩擦学性能之间的关联研究仍然不够全面, 特别是对适用于不同特殊或极端工况条件织物衬垫编制工艺的选择还缺乏理论支撑. 因此需要通过多次试验验证适用于不同具体工况条件的纤维织物编制工艺.

b. 在转移膜性能方面, 织物衬垫中的PTFE纤维在摩擦过程中, 能快速在对偶表面形成低剪切强度转移膜, 使材料表现出较低的摩擦系数, 但其粘结性和耐磨性较差, 不能承受高载荷. 填料的引入可以提高织物衬垫的热性能、承载能力, 改善织物衬垫转移膜与对偶面的黏结性能, 增强织物衬垫的摩擦学性能. 然而, 填料填充对织物衬垫摩擦学性能具体的增强机理, 目前还处于理论与实验研究相结合的阶段, 所以研究填料填充剂与特定摩擦系统之间的匹配效应, 对选择合适的填料填充剂具有重要意义. 此外, 探索简单、有效的填充材料表面改性方法用以提高其在织物衬垫中的分散性, 仍旧是未来研究的主要方向.

c. 在界面结合性能方面, 织物衬垫中织物纤维与树脂基体之间的界面结合较弱, 容易在摩擦过程中引发应力集中, 在衬垫内部产生微裂纹并拓展到表面, 使得织物衬垫的磨损现象表现为树脂脱落和纤维拔出、切断. 织物衬垫经界面改性后的磨损现象转变为

纤维薄化. 目前关于纤维表面改性的方法很多, 大都取得了一定的成功, 但开发出简单、无损、绿色以及低成本的纤维表面改性方法, 仍将是当前织物衬垫界面改性的努力方向.

参考文献

- [1] Aderikha V N, Shapovalov V A. Mechanical and tribological behavior of PTFE-polyoxadiazole fiber composites. Effect of filler treatment[J]. *Wear*, 2011, 271(5-6): 970-976.
- [2] Gu D P, Duan C S, Fan B L, et al. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite in vacuum[J]. *Tribology International*, 2016, 103: 423-431. doi: 10.1016/j.triboint.2016.08.004.
- [3] Li Xijun, Qiu Ming, Yuan Wenzheng. Research progress on tribological properties of self-lubricating materials liner for spherical bearings[J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(9): 12-15 (in Chinese) [李喜军, 邱明, 袁文征. 自润滑关节轴承衬垫材料摩擦学性能的研究进展[J]. *煤矿机械*, 2009, 30(9): 12-15]. doi: 10.3969/j.issn.1003-0794.2009.09.006.
- [4] Ishikawa T, Chou T W. Thermoelastic analysis of hybrid fabric composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1983, 18(8): 2260-2268. doi: 10.1007/BF00541828.
- [5] Lu J J, Qiu M, Li Y C. Numerical analysis of self-lubricating radial spherical plain bearings and investigations on fatigue damage mechanisms of the liner[J]. *Tribology International*, 2016, 96: 97-108. doi: 10.1016/j.triboint.2015.12.025.
- [6] Cai Shengzong, Duan Hongyu, Wang Wen. Experiment for tribological properties of fiber fabric type self-lubricating material[J]. *Bearing*, 2015, (3): 45-49 (in Chinese) [蔡盛宗, 段宏瑜, 王文. 纤维织物型自润滑材料摩擦学性能试验[J]. *轴承*, 2015, (3): 45-49]. doi: 10.3969/j.issn.1000-3762.2015.03.012.
- [7] Wang Che, Yang Liying, Wang Shouren, et al. Research status and prospect on new materials for spherical plain bearings[J]. *Bearing*, 2018, (10): 62-66 (in Chinese) [王彻, 杨丽颖, 王守仁, 等. 新型关节轴承材料的研究现状及展望[J]. *轴承*, 2018, (10): 62-66].
- [8] M J, Yang Y L, Qi X W. Tribological performances of fabric self-lubricating liner with different weft densities under severe working conditions[J]. *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, 2015, 40: 293-300.
- [9] Qi X W, Jia Z N, Yang Y L. Influence of the dispersion of nano titanium dioxide on the tribological performance of fabric self-lubricating liner[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130: 2100-2105. doi: 10.1002/app.39343.
- [10] Ren G N, Zhang Z Z, Zhu X T, et al. Tribological behaviors of hybrid PTFE/nomex fabric/phenolic composite under dry and water-bathed sliding conditions[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57: 1116-1121. doi: 10.1080/10402004.2014.937887.
- [11] Qiu Ming, Zhou Zhansheng, Zhou Dawei, et al. Tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings with PTFE/PPS fabric liners[J]. *Tribology*, 2018, 38(5): 547-553

- (in Chinese) [邱明, 周占生, 周大威, 等. 聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 547–553].
- [12] Yang M M, Yuan J Y, Guo F, et al. A biomimetic approach to improving tribological properties of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composites[J]. *European Polymer Journal*, 2016, 78: 163–172. doi: [10.1016/j.eurpolymj.2016.03.013](https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.03.013).
- [13] Qiu Ming, Li Zhengguo, Li Yingchun, et al. Effect of liner modification on the tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings under tilting oscillation[J]. *Tribology*, 2014, 34(1): 59–64 (in Chinese) [邱明, 李正国, 李迎春, 等. 倾斜摆动条件下衬垫改性对自润滑关节轴承摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 59–64].
- [14] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F, et al. Effects of air plasma treatment on tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114: 3980–3986. doi: [10.1002/app.30994](https://doi.org/10.1002/app.30994).
- [15] Ren G N, Zhang Z Z, Zhu X T, et al. High-temperature tribological performance of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 104: 146–151. doi: [10.1016/j.compscitech.2014.09.011](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.09.011).
- [16] Gu D P, Zhang L X, Chen S W, et al. Reciprocating sliding wear of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites along different orientations[J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 20877. doi: [10.1039/C8RA03290D](https://doi.org/10.1039/C8RA03290D).
- [17] Shen X J, Gao P D, Liu Z L, et al. Elastic properties of the fabric liner and their influence on the wear depth of the spherical plain bearing[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2014: 836386.
- [18] Sun W B, Gu Y Z, Yang Z J, et al. Enhanced tribological performance of hybrid polytetrafluoroethylene/Kevlar fabric composite filled with milled pitch-based carbon fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135: 46269. doi: [10.1002/app.46269](https://doi.org/10.1002/app.46269).
- [19] Xue Yahong, Chen Jigang, Guo Sumin, et al. Finite element simulation and experimental test of the wear behavior for self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Friction*, 2018, 6(3): 297–306. doi: [10.1007/s40544-018-0206-x](https://doi.org/10.1007/s40544-018-0206-x).
- [20] Qiu Ming, Zhou Dawei, Pang Xiaoxu. Effect of weave process of fabric liner on tribological properties of self-lubricating spherical plain bearing[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(9): 1867–1872 (in Chinese) [邱明, 周大威, 庞晓旭. 织物衬垫编织工艺对自润滑关节轴承摩擦学性能的影响[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1867–1872]. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2017.09.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2017.09.026).
- [21] Wang Xiumei, Luo Linhui, Lai Weiqing, et al. Calculation model of elastic properties of polytetrafluoroethylene-aramid/phenolic resin twill fabric liner at different wear stages[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(2): 337–346 (in Chinese) [王秀梅, 骆林惠, 赖卫清, 等. 聚四氟乙烯-芳纶/酚醛树脂斜纹织物衬垫不同磨损阶段弹性常数计算模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 337–346].
- [22] Su F H, Zhang Z Z, Liu W M. Friction and wear behavior of hybrid glass/PTFE fabric composite reinforced with surface modified nanometer ZnO[J]. *Wear*, 2008, 265: 311–318. doi: [10.1016/j.wear.2007.10.013](https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.10.013).
- [23] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F, et al. Study on the tribological behavior of hybrid PTFE/cotton fabric composites filled with Sb₂O₃ and melamine cyanurate[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 1061–1066. doi: [10.1016/j.triboint.2009.03.002](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.002).
- [24] Xiang Dinghan, Pan Qinglin, Yao Zhengjun. Friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene fabric composite spherical bearing in swaying[J]. *Tribology*, 2003, 23(1): 72–75 (in Chinese) [向定汉, 潘青林, 姚正军. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 72–75]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2003.01.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2003.01.017).
- [25] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F. A study on the sliding wear of hybrid PTFE/kevlar fabric/phenolic composites filled with nanoparticles of TiO₂ and SiO₂[J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53: 678–683. doi: [10.1080/10402001003672228](https://doi.org/10.1080/10402001003672228).
- [26] Yuan J Y, Zhang Z Z, Yang M M, et al. Carbon nanotubes coated hybrid-fabric composites with enhanced mechanical and thermal properties for tribological applications[J]. *Composites: Part A*, 2017, 102: 243–252. doi: [10.1016/j.compositesa.2017.08.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.08.006).
- [27] Su F H, Zhang Z Z, Liu W M. Tribological behavior of hybrid glass/PTFE fabric composites with phenolic resin binder and nano-TiO₂ filler[J]. *Wear*, 2008, 264: 562–570. doi: [10.1016/j.wear.2007.04.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.04.007).
- [28] Qiu M, Yang Z P, Lu J J, et al. Influence of step load on tribological properties of self-lubricating radial spherical plain bearings with PTFE fabric liner[J]. *Tribology International*, 2017, 113: 344–353. doi: [10.1016/j.triboint.2017.02.047](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.047).
- [29] Liu Y Y, Xu N, Wang Y, et al. Preparation and tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric self-lubricating composites[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 361: 196–205.
- [30] Ren Guina, Zhang Zhaozhu, Zhu Xiaotao, et al. Influence of lubricant filling on the dry sliding wear behaviors of hybrid PTFE/Nomex fabric composite[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(10): 3716–3724. doi: [10.1007/s10853-014-8081-y](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8081-y).
- [31] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F, et al. Enhanced wear properties of hybrid PTFE/cotton fabric composites filled with functionalized multi-walled carbon nanotubes[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 116: 183–190. doi: [10.1016/j.matchemphys.2009.03.008](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.03.008).
- [32] Yang M M, Zhu X T, Ren G N, et al. Influence of air-plasma treatment and hexagonal boron nitride as filler on the high temperature tribological behaviors of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *European Polymer Journal*, 2015, 67: 143–151. doi: [10.1016/j.eurpolymj.2015.03.027](https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.027).
- [33] Su F H, Zhang Z Z, Guo F, et al. Friction and wear properties of fabric/phenolic composites with plasma treated-hybrid glass/PTFE fabric[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67: 981–988. doi: [10.1016/j.compscitech.2006.06.010](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.010).
- [34] Yang Y L, Gu D P, Deng W. Effects of weaves on the tribological

- properties of hybrid kevlar/PTFE fabric composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 139: 125–128.
- [35] Gu Dapeng, Yang Yulin, Qi Xiaowen, et al. Influence of weave structures on the tribological properties of hybrid Kevlar/PTFE fabric composites[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(5): 1044–1051. doi: [10.3901/CJME.2012.05.1044](https://doi.org/10.3901/CJME.2012.05.1044).
- [36] Chen Tao. Study on design and friction properties of solid self-lubricating fabric liner composites[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2014(in Chinese) [陈涛. 固体自润滑织物衬复合材料的设计及摩擦性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2014].
- [37] Qi X W, Ma J, Jia Z N, et al. Effects of weft density on the friction and wear properties of self-lubricating fabric liners for journal bearings under heavy load conditions[J]. *Wear*, 2014, 318: 124–129. doi: [10.1016/j.wear.2014.06.027](https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.027).
- [38] Yuan J Y, Zhang Z Z, Yang M M, et al. TiB₂ reinforced hybrid-fabric composites with enhanced thermal and mechanical properties for high-temperature tribological applications[J]. *Tribology International*, 2017, 115: 8–17. doi: [10.1016/j.triboint.2017.05.006](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.006).
- [39] Sun Y S, Zhang Q, Gao L, et al. Experimental study on tribological properties of carbon/polytetrafluoroethylene hybrid fabric reinforced composite under heavy loads and oil lubrication[J]. *Tribology International*, 2016, 94: 82–86. doi: [10.1016/j.triboint.2015.08.019](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.019).
- [40] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F. Tribological behaviors of hybrid PTFE/nomex fabric/phenolic composite reinforced with multiwalled carbon nanotubes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124: 235–241. doi: [10.1002/app.33594](https://doi.org/10.1002/app.33594).
- [41] Ren G N, Zhang Z Z, Song Y M, et al. Effect of MWCNTs-GO hybrids on tribological performance of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 146: 155–160. doi: [10.1016/j.compscitech.2017.04.022](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.04.022).
- [42] Li H L, Zeng F P, Yin Z W, et al. A study on the tribological behavior of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites filled with nano-SiC and/or submicron-WS₂ fillers[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37: 2218–2226. doi: [10.1002/polb.23400](https://doi.org/10.1002/polb.23400).
- [43] Yang Y L, Ma J, Qi X W, et al. Fabrication of nano serpentine-potassium acetate intercalation compound and its effect as additive on tribological properties of the fabric self-lubricating liner[J]. *Wear*, 2014, 318: 202–211. doi: [10.1016/j.wear.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.003).
- [44] Fan Bingli, Yang Yulin, Feng Chan, et al. Tribological properties of fabric self-lubricating liner based on organic montmorillonite (OMMT) reinforced phenolic (PF) nanocomposites as hybrid matrices[J]. *Tribology Letters*, 2015, 57(3): 1–12. doi: [10.1007/s11249-015-0473-x](https://doi.org/10.1007/s11249-015-0473-x).
- [45] Yang M M, Yuan J Y, Men X H, et al. Effect of ZrB₂ particles incorporation on high-temperature tribological properties of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *Tribology International*, 2016, 99: 289–295. doi: [10.1016/j.triboint.2016.03.033](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.033).
- [46] Ren Guina, Zhang Zhaozhu, Zhu Xiaotao, et al. WS₂-filled hybrid PTFE/Nomex fabric composites with improved antiwear property[J]. *Journal of Materials Science*, 2015, 50(3): 1065–1070. doi: [10.1007/s10853-014-8663-8](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8663-8).
- [47] Zhang Huijuan, Zhang Zhaozhu, Guo Fang, et al. Friction and wear of hybrid PTFE/kevlar fabric composite filled with ZnO nanoparticles sliding against steel, copper, and aluminum[J]. *Tribology Transactions*, 2009, 52(6): 833–840. doi: [10.1080/10402000903125378](https://doi.org/10.1080/10402000903125378).
- [48] Li H L, Yin Z W, Jiang D, et al. Tribological behavior of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites with nano-Si₃N₄ and submicron size WS₂ fillers[J]. *Tribology International*, 2014, 80: 172–178. doi: [10.1016/j.triboint.2014.07.006](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.07.006).
- [49] Yang M M, Zhang Z Z, Yuan J Y, et al. Synergistic effects of AlB₂ and fluorinated graphite on the mechanical and tribological properties of hybrid fabric composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 143: 75–81. doi: [10.1016/j.compscitech.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.03.005).
- [50] Yuan J Y, Zhang Z Z, Yang M M, et al. Coupling hybrid of BN nanosheets and carbon nanotubes to enhance the mechanical and tribological properties of fabric composites[J]. *Composites Part A*, 2019, 123: 132–140. doi: [10.1016/j.compositesa.2019.05.010](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.010).
- [51] Zhang Zhaozhu, Zhang Huijuan, Guo Fang, et al. Enhanced wear resistance of hybrid PTFE/Kevlar fabric/phenolic composite by cryogenic treatment[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(22): 6199–6205. doi: [10.1007/s10853-009-3862-4](https://doi.org/10.1007/s10853-009-3862-4).
- [52] Qiu M, Miao Y W, Li Y C, et al. Film-forming mechanisms for self-lubricating radial spherical plain bearings with hybrid PTFE/aramid fabric liners modified by ultrasonic[J]. *Tribology International*, 2015, 87: 132–138. doi: [10.1016/j.triboint.2015.02.025](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.02.025).
- [53] Ren G N, Zhang Z Z, Zhu X T, et al. Combined effect of air-plasma treatment and lubricant filling on the dry sliding wear behavior of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 100: 204–211. doi: [10.1016/j.compscitech.2014.06.015](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.06.015).
- [54] Hu Rensong, Qiu Ming, Li Yingchun, et al. Effect of phosphate ester coupling agent modified liner on properties of self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(1): 41–44 (in Chinese) [胡仁松, 邱明, 李迎春, 等. 磷酸酯偶联剂改性衬垫对自润滑关节轴承性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(1): 41–44]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2015.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2015.01.009).
- [55] Yuan J Y, Zhang Z Z, Yang M M, et al. Surface modification of hybrid-fabric composites with amino silane and polydopamine for enhanced mechanical and tribological behaviors[J]. *Tribology International*, 2017, 107: 10–17. doi: [10.1016/j.triboint.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.013).
- [56] Qiu M, Li Y C, Chen L, et al. Effects of rare earth treatment on tribological properties of self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Wear*, 2013, 305: 274–279. doi: [10.1016/j.wear.2012.12.021](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.021).
- [57] Yuan J Y, Zhang Z Z, Yang M M, et al. Combined effects of interface modification and nano-reinforcement via nano-enhanced interphase in hybrid-fabric composites for tribological applications[J]. *Polymer Composites*, 2019: 25199.