纤维织物/聚合物复合材料摩擦特性研究进展

冯 智[1],王 进[2],仝 哲[3,4*]

(1. 西安工程大学机电工程学院,西安 710048;2. 日照职业技术学院现代汽车系,山东 日照 276826;
3. 中北大学机械工程学院,太原 030051;4. 中北大学山西省先进制造技术重点实验室,太原 030051)

摘 要: 纤维织物/聚合物复合材料比强度高,结构/性能可设计性强,通过纤维组份与结构设计可实现低润滑与高耐磨特性,在航空、航天以及汽车行业上有巨大的应用前景。本文介绍了纤维织物/聚合物复合材料在摩擦学上的应用与进展。阐述了纤维织物/聚合物复合材料在不同润滑方式下的润滑与抗磨机理,对比分析了不同纤维种类的摩擦特性,并对纤维种类对复合材料润滑、减磨的影响方式与机理进行了讨论。阐述了纤维的结构形式对复合材料摩擦学行为的影响机理与规律。最后从复合材料的接触尺度与摩擦稳定性、界面优化与改性以及导热优化三方面提出了纤维织物/聚合物复合材料摩擦应用要解决的关键技术和问题,为聚合物基复合材料的摩擦应用提供理论参考。

关 键 词: 纤维织物;结构;聚合物基复合材料;摩擦磨损
中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9278(2025)07-0141-07
DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2025.07.021

Research progress in tribological properties of fiber fabrics-reinforced polymer matrix composites

FENG Zhi[1], WANG Jin[2], TONG Zhe[3,4*]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi′an Polytechnic University, Xi′an 710048, China; 2. School of Hyundai Automobile, Rizhao Polytechnic, Rizhao 276826, China; 3. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4. Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Fiber fabric-reinforced polymer composites exhibit exceptional specific strength and tunable structural properties, enabling the design of materials with low friction coefficients and high wear resistance through careful fiber architecture and composition optimization. These characteristics make them particularly promising for aerospace and automotive applications. This review systematically reported recent advances in the tribological performance of fiber fabric/polymer composites, analyzing their lubrication and wear mechanisms across different operational conditions. The friction characteristics of various fiber types were compared and their influence on lubrication behavior and wear patterns were elucidated. Furthermore, how fabric structure governs the tribological response of composites was investigated. Finally, three critical research challenges were identified: (1) contact scale dynamics and friction stability, (2) interface optimization and modification, and (3) thermal conductivity enhancement. This work provides fundamental insights to guide the development of high-performance tribological polymer composites for demanding engineering applications.

Key words: fiber fabric; architecture; polymer matrix composites; friction and wear

0 前言

聚合物基复合材料比强度高、抗辐射性强,在汽车、航空航天、化工以及船舶等工业领域有着广泛的应用。随着复合材料在工程应用领域的不断扩展,凭借其优异的耐腐蚀和自润滑特性,聚合物基复合材料展现出在摩擦学领域的应用潜力,因而其摩擦特性是聚合物滑动器件重点关注的指标。但受限于聚合物的低力学性能与热导率,其抗磨性往往不够理想,尤其是在高温、重载工况下。纤维织物/聚合物复合材料利用连续纤维的高力学性能能够在使用中承担主要载荷,显著提升复合材料的强度、韧性以及硬度等力学特性。同时借助与其路径连续的特点,复合材料材料的热导率同时也会得到有效改善,提升其高温与干摩擦特性。纤维织物的种类和结构对复合材料自身力学本构会产生重要影响,进而对摩擦性能产生影响。同时纤维的种类和结构润滑特性不同,因此也会对复合材料中的润滑行为产生重要影响,尤其是在干摩擦状态下。

收稿日期: 2024-09-27
*通信作者:仝哲(1986—),讲师,研究方向为摩擦学设计,zhetong@nuc.edu.cn

《中国塑料》编辑部版权归所有,未经书面许可,不得进行扫描、网络传播或用于其他商业目的;一经发现,即视为侵权,必究其法律责任。

深入研究纤维织物/聚合物复合材料的摩擦特性，探讨其影响因素和机理，对于优化材料设计、提高材料性能具有重要意义。本文旨在综述纤维织物/聚合物复合材料摩擦学研究现状，讨论纤维织物/聚合物复合材料摩擦、磨损机理，总结纤维种类、织物结构等特征参数对纤维织物/聚合物复合材料摩擦的影响规律的潜在机理，期望能够为复合材料在工程领域的应用提供理论参考和指导，推动复合材料在摩擦领域的深化应用。

1 纤维织物/聚合物复合材料摩擦、磨损机理

纤维织物典型结构如图1所示，复合材料由织物作为增强相，树脂为基体通过固化形成纤维增强复合材料。其中纤维为连续状态，通过不同的编织结构形成增强相，具有周期性结构，每个纤维束又由多跟单丝纤维组成。树脂为液态，通过流动填充纤维孔隙，然后经过加压与固化，最终形成块状固体复合材料。

纤维织物/聚合物复合材料在作为承载件使用时，纤维承受主要的载荷，因此具有高的拉伸强度与模量。当其处于滑动工况时，虽然纤维和聚合物基体同时与摩擦对偶面件接触，但由于纤维通常和聚合物基体的力学性能通常有数量级上的差距，因此纤维束的种类、结构形式会对复合材料摩擦特性产生重要的作用与影响。且不同的润滑方式下，纤维织物/聚合物复合材料的摩擦、摩擦状态以及潜在的机理也不同。

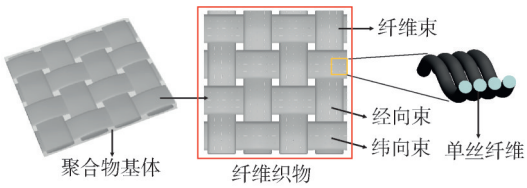


图1 典型纤维织物/聚合物复合材料结构

Fig. 1 Typical fiber fabric/polymer composite structure

1.1 液体润滑

油液润滑是现代工业常用的润滑方式，也是润滑效率较高的一种润滑方式。当处于流体润滑时，滑动配副之间通常不会直接接触，此时复合材料材料自身力学性能与润滑特性对系统的摩擦特性影响较小。由于摩擦热的产生，高的界面温度会降低润滑油的承载能力，因而此时对复合材料的导热特性提出较高的要求。利用高导热率纤维作为增强相，同时在聚合物基体中添加高导热率固体颗粒能够有效提高复合材料的导热特性，改善滑动界面的高温现象。当滑动系统处于重载状态时，润滑状态转变为边界润滑时，此时复合材料会和配副发生接触，随着滑动的进行，配副表面会形成液体与固体润滑膜，二者共同作用决定了系统摩擦特性，因此复合材料力学性能会对其摩擦特性产生影响[1]。由于润滑油的存在，油膜润滑在摩擦过程中的作用同样非常重要，油膜的形成速率以及厚度与复合材料的表面能密切相关[2]。由于纤维通常塑性较低，随着复合材料的磨损破坏，表面纤维发生脆性断裂、拔出与脱落，同时基体也会破碎脱落，此时复合材料表面会产生大量孔隙与空洞，比表面积增大，有利于润滑油的存储与吸附，能够在一定程度上提高复合材料的油润滑特性[3]。Rhee测试碳纤维织物/环氧复合材料的吸油特性，发现复合材料聚合物长时间与油液接触时，能够吸收一部分油液，进而充当润滑介质，但聚合物吸收油液后，其力学性能的变化趋势与相关机理尚不清楚，需进一步深入研究[4]。

相比油液润滑，水润滑具有环保、节能以及低成本等优势，在水润滑轴承方面得到广泛的关注。其润滑与减摩方式与油润滑类似，以液体润滑膜为主要润滑介质，利用液体的低剪切特性实现减摩。因此与油润滑相同，聚合物水润滑膜的形成也与水分子和聚合物之间的附着性密切相关。通过在聚合物基体中掺杂微纳颗粒可以改变材料表面润湿性，同时提高基体的硬度，有利于材料抗磨性的提高。Leonardo等研究指出随着还原氧化石墨烯(rGO)的添加，聚丙烯复合材料表面润湿性下降，提高了水膜在复合材料表面的流动，进而提高其润滑能力，同时复合材料的硬度也得到了提高，使得复合材料的润滑效率与抗磨性同时获得改善[5]。

武汉理工大学梁兴鑫等进行了织物增强聚氨酯(PU)复合材料水润滑测试，发现由于较低的黏度，以及其非极性特征，水与有机聚合物的吸附力较弱，因此难以形成高承载力的水润滑膜，当载荷较高时，水润滑膜容易破裂，因此摩擦因数通常较高。进一步，作者发现织物能够减小摩擦系数的波动，提高摩擦稳定性，这是由于纤维在复合材料中起到了应力缓冲的作用，减小了摩擦过程中振动引起的摩擦因数波动[6]。

1.2 固体润滑

通过优化聚合物基复合材料结构与组份可以提升复合材料的自润滑能力。当纤维织物/聚合物复合材料处于干摩擦状态时，滑动系统的摩擦特性依赖于纤维和基体的力学和润滑特性。如图2所示，滑动配副在滑动过程中，与基体和纤维接触，当纤维具有润滑特性时，与其他填料改性聚合物类似，会与基体同时附着在滑动配副表面形成固体润滑膜，凭借低的层间剪切特

《中国塑料》编辑部版权归所有，未经许可，不得进行任何内容的转载、扫描、网络传播或用于其他商业目的。一经发现，即追究侵权，必究其法律责任。

性，实现自润滑。以聚四氟乙烯(PTFE)为代表的聚合物织物依靠此润滑机理实现自润滑，在自润滑衬套上得到广泛的应用[7-8]。

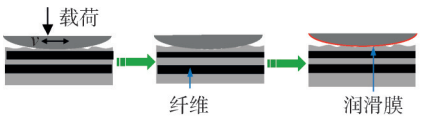


图 2　纤维织物/聚合物复合材料的润滑原理

Fig. 2　Lubrication mechanism of the fiber fabric/polymer composite

对于抗磨特性，在滑动的初始阶段，如图 3 所示，在摩擦过程中基体和纤维都受到剪切力的作用，但由于比聚合物基体的弹性模量高数个数量级，因此纤维比基体受到更大的应力，此时纤维承受主要载荷，同时纤维在达到屈服强度之前受到的剪切力更大，因此有利于复合材料的承载与抗磨。随着滑动的进行，复合材料表面发生破坏，纤维直接与滑动配副接触。由于纤维织物/聚合物复合材中较高的纤维体积含量，纤维与配副接触面积较大，凭借其高的力学性能，复合材料能够继续保持高的抗磨性。

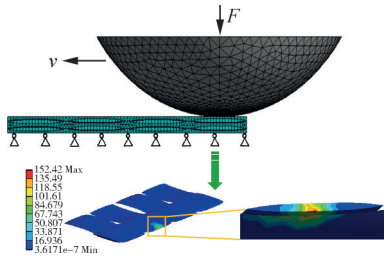


图 3　纤维织物/聚合物复合材料的摩擦受力分析

Fig. 3　Friction force analysis of the fiber fabric/polymer composite

2　织物种类对复合材料摩擦性能的影响

当前纤维织物/聚合物复合材料中纤维种类繁多，依据不同的滑动环境与工况对织物进行针对性的选取能够取得理想的润滑状态。织物从使用材料上主要可以划分为单种纤维与多种类纤维混编。

2.1　单种类纤维织物

纤维织物增强聚合物基复合材料由于高的比强度，最初在航空、航天上获得广泛关注，进一步研究人员发现碳纤维织物/聚合物复合材料作为滑动器件时，随着碳纤维的石墨化，复合材料表现出一定的自润滑特性[9-10]。复合材料摩擦工作时，滑动界面温升是摩擦设计要着重考虑的问题。碳纤维具有高的热稳定性，能够有效抵抗摩擦热带来材料软化，改善复合材料的抗磨能力[11]。碳纤维具有高的轴向力学特性，但其韧性通常较低，当其处于弯曲状态和受到非轴向方向剪切时易发生断裂，其磨屑可能进一步以磨粒的形式存在，加剧复合材料和配副的磨损[12]。玻璃纤维具有良好的抗拉强度、耐高温与氧化、成本较低，是碳纤维良好的替代品，可作为聚合物复合材料理想的增强相[13-14]。与碳纤维类似，玻璃纤维呈现高脆性与低韧性，因此其磨损破坏通常也以纤维的破碎与断裂形式呈现。但同时由于玻璃的非晶结构，其力学性能表现为各相同性，因此各个方向其摩擦特性相同[2]。玄武岩纤维具有比玻璃纤维更高的工作温度、更好的抗拉强度和模量以及良好的抗化学侵蚀性能，因此也被用作复合材料的增强材料[15-16]。Chairman 对比了玻璃纤维和玄武岩纤维织物增强环氧复合材料的干摩擦行为。结果表明玄武岩织物改性环氧表现出更优异的抗磨性，除了玄武岩的硬度更高外，玄武岩和环氧的高结合力也是其高抗磨性的原因之一，高的界面结合力能够使应力更有效的传递到纤维织物上[17]。Gong 等制备石墨纤维织物/聚酰亚胺(PI)复合材料，利用石墨纤维的高导热性与连续性，提高了复合材料在厚度和面内方向的导热率。进一步结合石墨的自润滑性，表现出较优异的自润滑与抗磨能力[18]。

无机物织物通常韧性较低，在滑动剪切作用下容易破损，尤其在滑动配副接触面积较小时。有机物织物韧性高，不易断裂，在聚合物复合材料也有着广泛的应用，尤其是在往复滑动工况下[19-20]。PTFE 使用温度范围广，可在－180～260 ℃长期使用，摩擦因数极低，是优异的固体润滑材料。PTFE 织物在工程上通常作为球轴承内衬使用，在轴承的往复滑动下，PTFE 发生塑化变形，随着配副的运动发生转移，在内衬和配副表面生成致密的转移膜，起到固体润滑作用。但由于 PTFE 的力学性能较低；容易发生冷塑变形，因此通常和其他纤维混编共同作用[21-22]。Li 等制备了 Kevlar 织物/聚乙二醇复合材料材料，采用销-盘接触的方式评价了其干摩擦特性，取得了 0.1 以下的摩擦因数。Kevlar 纤维的疏水特性提高了表面水膜的流动性，是取得低摩擦因数的基础，同时疏水性越强，其摩擦因数越低。进一步发现由于 Kevlar 纤维的高韧性，在滑动过程中破坏具有连续性，进而改善了复合材料的摩擦稳定性。但由于受到其低下的力学性能的限制，纤维发生了较为剧烈的磨损，需要进一步发展抗磨技术[23]。

2.2　多种类纤维混编织物

作为改性材料，无论是连续纤维或离散颗粒，单种类增强物由于性能局限，越来越不能满足日益扩展的

《中国塑料》编辑部版权归所有，未经书面许可，不得进行出售、转载或用于其他商业目的。本内容仅供个人学习、研究使用，如发现侵权，请及时联系我们，我们将依法追究其法律责任。

滑动环境与工况，因此多种类增强相协同改善复合材料摩擦学特性受到越来越多的关注[24-25]。对于纤维织物，可通过纤维混编的方式实现多种类纤维的协同作用。PTFE/Kevlar纤维织物在内衬自润滑材料上的应用即利用了PTFE低的力学性能和Kevlar高的韧性协同作用，为复合材料同时提供良好的润滑和抗磨性[26]。进一步研究发现温度对材料摩擦学特性的影响远大于滑动频率和载荷，摩擦温度在50～75 ℃时，复合材料为轻微的黏着磨损，当温度超过100 ℃复合材料磨损显著加剧[27]。棉纤维成本较低，与聚合物具有较强的兼容性和附着性，力学性能适中，因此与聚合物基体具与较强的界面粘接力，有效弥补PTFE的表面惰性。将PTFE与棉纤维进行混编能够发挥PTFE减摩优势，同时利用棉纤维和基体的高附着力提高复合材料抵抗破坏能力，进而实现抗磨性的改善[28]。PPS纤维是一种新型高性能纤维，具有优异的耐化学性、热稳定性、自阻燃性、非熔滴性和力学性能。因此PPS与PTFE的混编，也能够提高复合材料的摩擦特性，其减摩抗磨机理与PTFE/Kevlar混编纤维类似，都利用了不同纤维的润滑与高力学特性[29]。

3 织物结构对复合材料摩擦性能的影响

3.1 一维纤维

一维纤维单向连续纤维，不属于严格意义上的织物，但不同于短切纤维，一维纤维增强复合材料由于纤维的有序与连续性，同时凭借纤维力学性能各向异性，因此织物/聚合物复合材料力学性能在宏观上通常表现为各向异性，不同的方向上拥有不同的摩擦学特性。Sharma等制备了单向纤维增强聚醚酰亚胺复合材料，测试了与纤维方向呈不同角度的摩擦性质，发现平行与纤维方向滑动时，复合材料表现出最优的润滑与抗磨能力。当夹角超过45 °时，润滑性和抗磨性显著恶化。当非平行与纤维方向滑动时，纤维在剪切作用下易于拔出与脱落，进而发生磨粒磨损，因而加剧了复合材料的磨损[30]。

3.2 二维织物

二维织物是当前织物中应用较多织物结构，相比单向纤维能够在多方向上强化复合材料力学与表面性能，相比三维纤维能够做大限度减小纤维的屈曲度，较充分的体现纤维的高轴向力学性能，有利于保持复合材料的刚度与强度[31-32]。碳纤维织物凭借碳纤维的高力学性能赋予了复合材料高的比强度，在结构件中应用广泛。随着研究进行，研究人员发现碳纤维的高力学特性具有高抗磨性的理论基础，同时碳纤维的类石墨结构也能具有固体润滑的潜质，因此碳纤维增强复合材料在摩擦学领域得到发展[33-35]。二维织物中应用较多为平纹织物，如图4所示，纤维束呈正交方向，屈曲度较小，在微观上能够减小复合材料表面硬度非均匀现象，改善复合材料中树脂基体承载力的不足，提高复合材料整体抗磨能力。其摩擦机理与常用的PTFE/Kevlar二维纤维织物机理通常不同。PTFE/Kevlar通常以单层的形式进行应用，侧重于复合材料的自润滑性能。碳纤维、玻璃等高性能纤维等二维织物通常以多层织物制备而成的块体材料形式出现，在关注其摩擦学特性时，其力学性能通常也会纳入考虑[34, 36-37]。

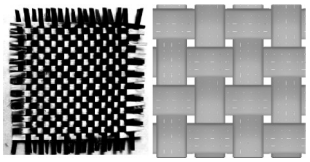


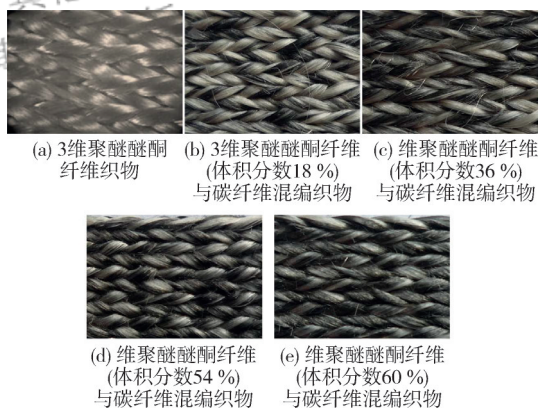
图4 平纹织物结构

Fig. 4 Plain weave fabric structure

二维织物增强树脂基复合材料滑动过程中滑动配副首先与基体接触，通过剪切、黏结等作用黏附在配副表面，形成固体转移膜，实现减摩作用。随着滑动的继续，滑动配副与纤维束接触，此时高力学性能的纤维束起到主要的承载作用，实现复合材料的抗磨作用。纤维的破坏形式主要为断裂、拔出以及磨损。对于平纹纤维，在垂直于滑动方向纤维受到横向剪切力，容易断裂，进而以磨粒的形式存在，可能会加剧配副的磨损，因此在进行摩擦设计时需要考虑纤维的拔出与断裂问题[38-39]。

3.3 三维织物

如图5所示，三维织物不同与二维纤维，主要采用三维立体编织工艺实现纤维交联，其纤维主要特点是弯曲度增大，没有明显的分层现象，显著改善复合材料



(a) 3维聚醚醚酮纤维织物　(b) 3维聚醚醚酮纤维(体积分数18 %)与碳纤维混编织物　(c) 维聚醚醚酮纤维(体积分数36 %)与碳纤维混编织物

(d) 维聚醚醚酮纤维(体积分数54 %)与碳纤维混编织物　(e) 维聚醚醚酮纤维(体积分数60 %)与碳纤维混编织物

图5 典型三维纤维织物结构[43]

Fig. 5 Typical three-dimensional fiber fabric structure

《中国塑料》编辑部版权所有，未经书面许可，不得进行任何内容的转载、扫描、网络传播或用于其他商业目的。违者将即视为侵权，必究其法律责任。

的层间剪切特性。对层叠二维织物采用“Z”钉的连接方式也可实现三维织物结构，其主要改善层叠复合材料的层间力学性能，但其表面纤维结构与二维织物结构类似，对其摩擦学特性影响较小[40-43]。

三维织物依据不同使用工况结构设计多样，形式复杂，标准化程度较低，在定制化结构复合材料中体现出独有的优势，通过纤维结构的设计实现应力、应变的重构。Arjmandi 建立了三维织物复合材料有限元模型，并采用 Archard 磨损定律进行了磨损仿真，探讨了关键滑动参数对磨损率的影响。结果表明，在较高的法向载荷和滑动速度下，三维编织物的磨损率增加，但摩擦因数变化的影响不显著。而在较高的滑动速度下，滑动配合面之间的滑动长度更大，导致磨损速度增加。在滑动磨损过程中，材料的抗剪强度降低，与配副的实际接触面积随着滑动速度的增加而增加，导致磨损率增加[44]。作者进一步探讨了三维织物增强水凝胶的摩擦学特性，发现织物结构对于滑动过程中的应力分配起到非常重要的作用，同时纤维束的几何形状也会对复合材料的刚度起到关键作用，因此应用三维织物增强复合材料作为滑动部件时，结构设计是关键[45]。当前三维织物在摩擦学上的应用较少，可以用有限元方法进行结构设计的仿真与计算，为复合材料的结构设计提供理论支撑。

3.4　多尺度纤维

织物增强聚合物基复合材料中各组分应力的传递主要依赖于结合界面，当界面力不足时，应力与载荷不能有效传递至高承载力的纤维，此时基体承担主要剪切力，进而发生大面积脱落与破坏，不能有效发挥纤维的高力学与高承载特性[46]。当前所用纤维单丝直径通常在微米尺度，纤维束则可达毫米尺度，且力学性能与树脂基体存在几何级倍数关系，因此在纤维和基体界面存在严重的应力-应变不匹配问题，非常容易导致基体的破坏。提高基体力学性能之外，提高纤维与基体的结合面积和结合力也是改善复合材料应力-应变分配的有效方法[47-49]。

如图 6 所示在微米尺度纤维表面修饰纳米尺度纤维可形成微纳多尺度结构，提高树脂与纤维结合面积，同时改善应力梯度，使得基体载荷能够更有效传递到纤维。单纤维复合材料破碎试验表明，碳纳米管沉积后，碳纤维/环氧复合材料的界面剪切强度得到了提高。进一步经过羧基化后，CNTs 与纤维和树脂的界面结合力都得到强化，其剪切、拉伸以及表面滑动特性都实现了提高。

Lin 等利用化学方法在 CFC 表面成功生成平均长

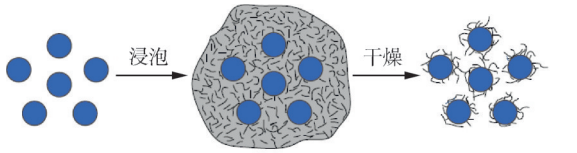


图 6　跨尺度纤维构建原理[50]

Fig. 6　Construction schematic of the cross-scale fiber[50]

度约为 150 nm，直径为 30～50 nm 聚苯胺纳米纤维，在界面处提供了有效的机械联锁，进而改善了复合材料的热、力学和摩擦学性能。碳纤维-聚苯胺-聚酰亚胺形成的梯度结构赋予的复合材料的高韧性、高强度是提高摩擦特性的关键[36]。如图 7 所示，Chen 等则在纤维织物间隙中利用水热法生成垂直方向的 TiO_2 棒状结构，从而形成微纳结构织物[51]。复合材料在高载荷和高速滑动条件下仍能保持较低的摩擦因数和磨损率。这主要是因为 TiO_2 纳米棒束表现出微纳多尺度界面增强，促进应力分布和微裂纹挠曲等。此外，TiO_2 纳米棒束可以促进均匀转移膜的形成，从而减少摩擦和磨损。这表明多尺度织物结构不仅可以凭借结构上的微纳结构改善复合材料抵抗破坏的能力，同时还可以通过对纳米尺度的物质进行选择，进而调节复合材料成膜特性，改善复合材料的润滑能力。

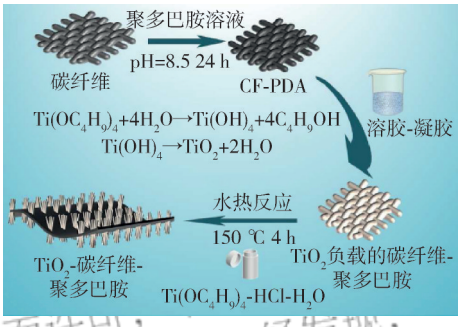


图 7　CF- TiO_2 多尺度结构[51]

Fig. 7　Multiscale structure of the CF-TiO_2[51]

摩擦热是滑动部件的摩擦特性重要的影响因素之一，尤其是进行干摩擦时，因此复合材料的导热特性是进行摩擦学设计要考虑的关键指标[52-54]，高温不仅会对材料的硬度等性能产生影响，还会影响到材料的结构[55]。纤维织物虽然具有连续的导热通道，但当纤维尺度过大时，局部的聚合物基体导热特性往往不够理想，同时当纤维自身导热率底下时，复合材料导热性往往也不能令人满意。He 等制备了 h-BN-$Ti_3C_2T_x$ 纳米杂化体，然后应用点击反应将其附着在 PPS/PTFE 织物表面，增强了织物复合材料的导热系数、拉伸强度和粘接强度。h-BN 提高了 MXene 支撑骨架的强度和导

《中国塑料》编辑部版权所有，未经书面许可，不得进行任何内容的转载、扫描、传播或用于其他商业目的；即涉嫌侵权，必究其法律责任

热系数，最后利用层状MXene-h-BN具有良好的润滑性能，实现了润滑和抗磨性的提升。在纤维表面沉积MoS_2提高纤维的比表面积和粗糙度，在提高纤维与PTFE基体的结合力的同时，复合材料的分解温度也得到明显改善，高温摩擦因数和磨损率得到明显降低。CF与MoS_2通过杂化结合，能够更好发挥二者之间的协同作用是关键[56]。

4 结语

织物增强聚合物基复合材料比强度高，结构多样，与工况的适配性强，通过选择不同的纤维种类和编制结构，能够实现导热、力学以及摩擦学特性的定向改善，因而在摩擦学应用上表现出巨大的应用前景。当前大量的研究也为织物增量聚合物基复合材料的摩擦设计提供了理论基础，表明织物增强聚合物基复合材料作为滑动部件具有潜在的巨大前景。

(1)织物增强聚合物基复合材料依靠凭借纤维连续的特点，相比短切纤维与填料增强复合材料极大提高了复合材料的力学特性，在作为承载件和滑动器件上具有潜在的优势。

(2)纤维的混编能够充分利用不同纤维的特性，依靠纤维间的协同作用进一步改善复合材料的润滑与抗磨能力。

(3)设计多尺度织物结构能够改善复合材料的应力-应变分配，宏观上提升复合材料的韧性与强度，有利于复合材料的抗磨特性。通过对微纳结构物质的选择进一步可实现复合材料润滑特性的调节。

但织物尺度较大，且聚合物自身热导率与力学性能低下，在高温环境与干摩擦时，摩擦热容易聚集，降低其力学性能。因此织物增强聚合物基复合材料摩擦学设计应从一下几方面进行发展。

(1)织物通常具有周期性结构，因此在复合材料中存在软-硬相间结构，因此滑动配副与其接触时在不同部位复合材料性能不同，降低摩擦稳定性，尤其是微纳磨损时，其尺度效应更为明显，因此在进行复合材料摩擦学设计时需考虑接触尺度问题。

(2)复合材料界面特性对于应力传递非常重要。当前织物纤维与聚合物基体力学性能差距大，应力不匹配现象明显，进行界面改性与微纳结构设计是种行之有效界面改性方法，可作为下一步研究的重点。

(3)纤维结构与路径对导热起到重要的作用，同时也会对复合材料整体受力产生明显影响，因此进行织物结构设计是复合材料摩擦设计要重点考虑的方向，尤其三维结构织物。同时聚合物基体自身的导热改性也是重要的影响因素，二者协同设计是复合材料导热改性的重要参考思路。

参考文献：

[1] Sun Y, 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.

[2] Agrawal S, Singh K K, Sarkar P K. A comparative study of wear and friction characteristics of glass fibre reinforced epoxy resin, sliding under dry, oil-lubricated and inert gas environments[J]. Tribology International, 2016,96:217-224.

[3] Singh K K, Kumar S. Tribological performance of graphene nanoplatelets filled glass/epoxy composites under dry, inert gas and oil-lubricated environmental conditions[J]. Materials Letters, 2021, 282:128881.

[4] Rhee K Y, Park S J, Hui D, et al. Effect of oxygen plasma-treated carbon fibers on the tribological behavior of oil-absorbed carbon/epoxy woven composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(5):2 395-2 399.

[5] Farfan-Cabrera L I, Pérez-González J, Iniestra-Galindo M G, et al. Production and tribological evaluation of polypropylene nanocomposites with reduced graphene oxide (rGO) for using in water-lubricated bearings[J]. Wear, 2021,477:203860.

[6] Chen J, Liang X, Guo Z, et al. Insight into the wear properties of fiber fabric surface-enhanced composite under water lubrication[J]. Tribology International, 2023,187:108714.

[7] Hu Y, Tan D Q, Xu C, et al. Influence of high temperature on the tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite[J]. Tribology International, 2022,174:107781.

[8] Lu G, Liu H, Qi X, et al. Multiscale insight to tribological mechanism of PTFE/aramid fiber composite liner containing PES/PMPS microcapsules under a high temperature environment[J]. Tribology International, 2024,192:109315.

[9] Li J, Cheng X H. Effect of surface treatment on the tribological performance of carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide composites[J]. Polymer Composites, 2009,30(1):59-65.

[10] Zhang G, Rasheva Z, Schlarb A K. Friction and wear variations of short carbon fiber (SCF)/PTFE/graphite (10vol.%) filled PEEK: Effects of fiber orientation and nominal contact pressure [J]. Wear, 2010,268(7-8):893-899.

[11] Kim S S, Park D C, Lee D G. Characteristics of carbon fiber phenolic composite for journal bearing materials[J]. Composite Structures, 2004,66(1-4):359-366.

[12] Wenbin L, Jianfeng H, Jie F, et al. A novel preparation approach for improving the mechanical and wet tribological properties of carbon fabric/phenolic composites[J]. Materials & Design, 2016, 103:356-364.

[13] Bagci M, Demirci M, Sukur E F, et al. The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites[J]. Wear, 2020,444-445:203159.

[14] Doumeng M, Ferry F, Delbé K, et al. Evolution of crystallinity of PEEK and glass-fibre reinforced PEEK under tribological conditions using Raman spectroscopy[J]. Wear, 2019,426-427:1 040-1 046.

[15] Xie J, Yao L, Xu F, et al. Fabrication and characterization of three-dimensional PMR polyimide composites reinforced with woven basalt fabric[J]. Composites Part B: Engineering, 2014,66: 268-275.

[16] 王宏亮，玄武岩纤维增强聚苯硫醚复合材料摩擦磨损性能的研究[J]. 中国塑料，2013,8.27:42-44.
WANG H L, Study on tribological behavior of basalt fiber reinforced polyphenylene sulfide composites. China Plastics, 2013,8(27):42-44.

[17] Chairman C A, Kumaresh Babu S P. Mechanical and abrasive wear behavior of glass and basalt fabric-reinforced epoxy composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013,130(1):120-130.

[18] Gong J, Liu Z, Yu J, et al. Graphene woven fabric-reinforced polyimide films with enhanced and anisotropic thermal conductivity [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016,87:290-296.

[19] Hazarika A, Deka B K, Kim D, et al. Growth of aligned ZnO nanorods on woven Kevlar® fiber and its performance in woven Kevlar® fiber/polyester composites[J]. Composites Part A: Ap-

《中国塑料》编辑部版权归所有，未经出版许可，不得进行任何内容的转载、摘编或用于其他商业用途，必究其法律责任。即视为侵权。

plied Science and Manufacturing, 2015,78:284-293.
[20] Woo S, Kim T. High-strain-rate impact in Kevlar-woven composites and fracture analysis using acoustic emission[J]. Composites Part B: Engineering, 2014,60:125-136.
[21] Qiu M, Yang Z, Lu 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.
[22] Yang M, Yuan J, Men X, et al. Effect of ZrB_2 particles incorporation on high-temperature tribological properties of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite [J]. Tribology International, 2016,99:289-295.
[23] Li D, Guo Z. Metal-organic framework superhydrophobic coating on Kevlar fabric with efficient drag reduction and wear resistance [J]. Applied Surface Science, 2018,443:548-557.
[24] Chen B, Zhang M, Li X, et al. Tribological properties of epoxy-based self-lubricating composite coating enhanced by 2D/2D h-BN/MoS_2 hybrid[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 147: 105767.
[25] Liu Y, Liu X, Zhang X, et al. Tribological properties and self-lubrication mechanism of in-situ grown graphene reinforced nickel matrix composites in ambient air[J]. Wear, 2022,496-497.
[26] Zhang W, Li J, Cheng S, et al. Synthetic of phenolic resin@SiO_2 containing PAO_6 to reinforce the tribological properties of PTFE/aramid fabric liner composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,31:157-164.
[27] 李伟博,刘　建,赵宁波,等. 温度对PTFE/Kevlar织物复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报,2024:1-14.
LI W B,LIU J,ZHAO N B, et al. The effect of temperature on the friction and wear properties of PTFE/Kevlar fabric composites [J]. Tribology, 2024:1-14.
[28] Zhang H, Zhang Z, Guo F, et al. The influence of plasma treatment on the tribological properties of hybrid PTFE/cotton fabric/phenolic composites [J]. Polymer Composites, 2009, 30(10): 1 523-1 531.
[29] He Y, Zhang Z, Wang Y, et al. Synergistic effects of bioprotein decoration and WS_2 @Ti_3C_2 nanohybrids on the interfacial and tribological performance of PPS/PTFE fabric composites[J]. Tribology International, 2023,186:108587.
[30] Sharma M, Rao I M, Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber-polyetherimide composites[J]. Tribology International, 2010, 43(5-6SI):959-964.
[31] Moghimi Monfared R, Ayatollahi M R, Barbaz Isfahani R. Synergistic effects of hybrid MWCNT/nanosilica on the tensile and tribological properties of woven carbon fabric epoxy composites [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018,96:272-284.
[32] Sorrentino L, Silva De Vasconcellos D, D'Auria M, et al. Flexural and low velocity impact characterization of thermoplastic composites based on PEN and high performance woven fabrics [J]. Polymer Composites, 2018,39(8):2 942-2 951.
[33] Fu Y, Zhou L, Yin T, et al. A new kind of resin-based wet friction material: non-woven fabrics with isotropic fiber networks as preforms[J]. Friction, 2021,9(1):92-103.
[34] Tong Z, Lu H, Guo F, et al. Preparation of small CNTs@Fe_3O_4 and alignment in carbon fabrics/epoxy composites to improve mechanical and tribological properties [J]. Journal of Materials Science, 2021,56(2):1 386-1 400.
[35] Tong Z, Li X, Ma Q, et al. Synergism of hollow MoS_2 nano-particles and WS_2 micro-particles on improving the tribological properties of carbon fiber fabric reinforced phenolic-based composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019,233(7):1 107-1 116.
[36] Lin Z, Jia X, Li Y, et al. Improved mechanical/tribological properties of polyimide/carbon fabric composites by in situ-grown polyaniline nanofibers [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021,258:123972.
[37] Rong Y, Zhao P, Shen T, et al. Mechanical and tribological properties of basalt fiber fabric reinforced polyamide 6 composite laminates with interfacial enhancement by electrostatic self-assembly of graphene oxide[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023,27:7 795-7 806.
[38] Wang B, Fu Q, Li H, et al. Mechanisms of simultaneously enhanced mechanical and tribological properties of carbon fabrics/phenolic resin composites reinforced with graphite nanoplatelets [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021,854:157176.
[39] Fei J, Zhang C, Luo D, et al. Bonding TiO_2 array on carbon fabric for outstanding mechanical and wear resistance of carbon fabric/phenolic composite[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 317:75-82.
[40] Xu H, Zhang L, Wang Y, et al. The effects of Z-stitching density on thermophysical properties of plain woven carbon fiber reinforced silicon carbide composites [J]. Ceramics International, 2015, 41(1):283-290.
[41] Zhang Y, Yan L, Miao M, et al. Microstructure and mechanical properties of z-pinned carbon fiber reinforced aluminum alloy composites[J]. Materials & Design, 2015,86:872-877.
[42] Wenbin L, Jianfeng H, Jie F, et al. Effect of aramid pulp on improving mechanical and wet tribological properties of carbon fabric/phenolic composites[J]. Tribology International, 2016,104:237-246.
[43] Qiu X, He F, Li J, et al. Tribological behavior of three-dimensional braided carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J]. Polymer Composites, 2014,36(12):2 174-2 183.
[44] Arjmandi M, Ramezani M, Giordano M, et al. Finite element modelling of sliding wear in three-dimensional woven textiles[J]. Tribology International, 2017,115:452-460.
[45] Arjmandi M, Ramezani M, Bolle T, et al. Mechanical and tribological properties of a novel hydrogel composite reinforced by three-dimensional woven textiles as a functional synthetic cartilage [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 115:123-133.
[46] Shangguan Q, Cheng X. Tribological properties of lanthanum treated carbon fibers reinforced PTFE composite under dry sliding condition[J]. Wear, 2007,262(11/12):1 419-1 425.
[47] Min B K, Nguyen V, Kim S J, et al. Surface plasmon resonance-enhanced near-infrared absorption in single-layer MoS_2 with vertically aligned nanoflakes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020,12(12):14 476-14 483.
[48] Lin Z, Gao B, Li X, et al. Effect of abrasive grain size on surface particle deposition behaviour of PTFE/bronze composites during abrasive wear[J]. Tribology International, 2019,139:12-21.
[49] Chen B, Jia Y, Zhang M, et al. Tribological properties of epoxy lubricating composite coatings reinforced with core-shell structure of CNF/MoS_2 hybrid[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019,122:85-95.
[50] Li M, Gu Y, Liu Y, et al. Interfacial improvement of carbon fiber/epoxy composites using a simple process for depositing commercially functionalized carbon nanotubes on the fibers[J]. Carbon, 2013,52:109-121.
[51] Chen B, Tong Y, Yang B, et al. Interface construction of micro/nano hierarchical structure to enhance the tribological performance of carbon fabric/phenolic composite [J]. Wear, 2023, 534-535: 205132.
[52] Sun Z, Zhao Z, Zhang Y, et al. Mechanical, tribological and thermal properties of injection molded short carbon fiber/expanded graphite/polyetherimide composites [J]. Composites Science and Technology, 2021,201:108498.
[53] Cheng B, Duan H, Chen S, et al. Effects of thermal aging on the blend phase morphology and tribological performance of PI/UHMWPE blend composites[J]. Wear, 2021,477:203840.
[54] He G, Li Y, Wu L, et al. Synergy of core-shell Cu@rGO hybrids for significantly improved thermal and tribological properties of polyimide composites[J]. Tribology International, 2021,161:107091.
[55] Chegdani F, El Mansori M, Bukkapatnam S T S, et al. Thermal effect on the tribo-mechanical behavior of natural fiber composites at micro-scale[J]. Tribology International, 2020,149:105831.
[56] 严云峰, 孟兆洁, 王建章, 等. 不同接枝量的CF-MoS_2纤维杂化体对PTFE复合材料高温摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2021,46(12):36-42.
YAN Y F,MENG Z J,WANG J Z,et al. The effect of different grafting extent of CF-MoS_2 hybrids on the tribological performance of PTF-based composites at high temperatures [J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(12): 36-42.

《中国塑料》编辑部版权所有，未经许可，不得进行任何商业用途，网络传播或用于其他出版目的，违者必究其法律责任。

欢迎投稿　欢迎订阅　欢迎刊登宣传资料