

特约专栏

# 碳纤维布复合材料摩擦性能研究进展

潘广镇<sup>1</sup>, 齐乐华<sup>1</sup>, 付业伟<sup>2</sup>, 李慎飞<sup>2</sup>, 李贺军<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

(2. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 高性能纤维织物增强树脂基复合材料是一种独特的先进复合材料, 与短切纤维或长纤维等增强形式相比, 其整体式结构更利于纤维间的载荷传递, 具有承载能力高、耐冲击、不易破裂与剥离等特点, 并且可以贴覆在复杂曲面不发生褶皱。摩擦学方面最早被应用于航空航天等高科技领域的关节轴承, 提高了其承载能力、耐磨性能和免维护服役性能。随着技术发展和工艺进步, 成本不断降低, 此类复合材料的摩擦特性在民用领域得到重视。其中, 碳纤维布复合材料承载能力、耐热性能和摩擦磨损性能更加优异, 在重载滑动轴承、湿式离合器和汽车同步器齿环等领域得到了广泛关注和研究。介绍了近年来国内外碳纤维布复合材料组分构成、制备工艺和摩擦磨损机理方面的研究现状, 并对其发展方向进行了展望。

**关键词:** 碳纤维布; 复合材料; 摩擦性能; 磨损; 纳米填料

**中图分类号:** TH117. 1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2015)06-0453-08

## Progress in Tribological Properties of Carbon Fabric Composites

PAN Guangzhen<sup>1</sup>, QI Lehua<sup>1</sup>, FU Yewei<sup>2</sup>, LI Shenfei<sup>2</sup>, LI Hejun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Resin based high performance fabric reinforced composites is a unique advanced composite material, compared with composites reinforced by chopped fiber or filament, which is more conducive to transfer load between fibers because of the overall structure. It has many advantages such as high load capacity, excellent impact resistance, and excellent tear resistance, etc. Besides, it can drape or conform to curved surfaces without wrinkling. As to tribological applications, it was first used for bearing joints in aerospace and other high-tech fields, which increased their carrying capacity, wear resistance and maintenance-free service performance. With technology development and process improvement, the composites prices continue to decline and its friction properties start to be valued in civilian areas. Amongst these composites, carbon fabric composites have attracted overwhelming interest in tribology, due to their superior load capacity, heat resistance, and friction properties. Progress of research on constituents, processing technology and friction and wear mechanisms of carbon fabric composites are reviewed. The development prospect is also discussed.

**Key words:** carbon fabric; composites; tribological property; wear; nano-filler

## 1 前言

碳纤维、Kevlar 纤维、高强玻璃纤维和超高分子量聚乙烯纤维等一系列高性能纤维的出现, 使得复合材料

技术得到了迅速的发展<sup>[1]</sup>。高性能纤维的增强作用赋予了新型复合材料高比强度、高比模量、低密度、抗疲劳和热稳定性良好等传统复合材料不具备的优点, 采用高性能纤维增强的新型复合材料也因此被称为先进复合材料<sup>[2-3]</sup>。先进复合材料的出现满足了航空、航天等高科技领域对新材料的需求, 促进了相关领域的跨越发展<sup>[4-5]</sup>。

采用高性能纤维织物作为增强体的树脂基复合材料(简称纤维织物复合材料)是一种特殊的先进复合材料,

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51221001, 51472203)

第一作者: 潘广镇, 男, 1986年生, 博士研究生

通讯作者: 齐乐华, 女, 1957年生, 教授, 博士生导师, Email: qilehua@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.06.06

也是最具有发展潜力的一种纤维增强复合材料<sup>[6]</sup>。纤维织物的纺织结构与其他纤维增强形式(短切纤维或长纤维)相比,结构更加规律有序,整体式结构更利于纤维之间的力的传递和承载,从而赋予其独特的增强效果。纤维织物复合材料承载能力高、耐冲击、不易破裂与剥离,并且容易模压成型,可以贴合在复杂曲面而不发生褶皱。正是由于以上各方面的优点,美英法德等发达国家 20 世纪 60 年代相继开发出了应用于航空用关节轴承上的具有减摩特性的纤维织物复合材料<sup>[7]</sup>。纤维织物减摩复合材料的应用提高了关节轴承的承载能力、耐磨性能和免维护服役性能。但由于技术难度和制备成本等原因,该技术长期被限制应用于航空航天等高科技领域。随着技术发展和工艺进步,纤维织物复合材料的成本不断降低,纤维织物复合材料的摩擦学应用开始向民用领域转移。近年来纤维织物复合材料在民用领域的摩擦学应用吸引了广泛的关注和研究,碳纤维布复合材料(简称碳布复合材料)更因碳纤维高比强、自润滑和耐温高等优点,成为各个摩擦材料厂家争相开发的一种可用于极端苛刻工况的新型高性能摩擦材料。目前,采用碳布复合材料开发的高性能汽车同步器齿环、重载离合器摩擦片和重载滑动轴承等产品已经见诸报道,极大提高了产品的承载和热负荷性能<sup>[8]</sup>。

本文将重点评述近年来碳布复合材料摩擦特性的研究进展,并对碳布复合材料摩擦特性研究的发展方向进行了展望。

## 2 碳布复合材料的组分

碳布复合材料通常包含碳纤维织物、树脂粘接剂和填料等 3 种组分,3 种组分对复合材料的综合性能都有着重要影响。研究碳布复合材料组分构成是优化摩擦性能的基础,也是针对不同应用场合和工况条件开发对应产品的需要。

### 2.1 碳布编织结构及含量

碳布的编织种类繁多,按照碳布中纱线的取向,可分为单向编织碳布、双向编织碳布和多轴向编织碳布。双向编织碳布在摩擦领域的应用最为广泛,按其编织结构又可分为平纹、斜纹和缎纹 3 种,3 种编织结构(图 1)的碳布的各项物理性能对比详见表 1<sup>[9]</sup>。平纹碳布的经纱和纬纱每隔一根纱交织一次,其特点是交织点多,质地坚牢、挺刮、布面匀整且正反面相同,较为轻薄,耐磨性好。斜纹碳布相邻经(纬)纱上连续的经(纬)组织点排列成斜线、表面呈现连续斜线织纹。构成斜纹的一个循环组织至少要有 3 根经纱和 3 根纬纱,因此织制

斜纹碳布比平纹碳布复杂。斜纹碳布经纬交织比平纹碳布少,所以斜纹碳布不及平纹碳布坚牢,但柔韧性和表面的光滑程度更好。缎纹碳布经线(或纬线)浮线较长,交织点较少,它们虽形成斜线,但不是连续的,相互间隔距离有规律而均匀。缎纹碳布相比于平纹碳布和斜纹碳布,更光滑,更美观,缺点在于容易刮丝。根据纤维单束中碳纤维的单丝数量,其规格又可以进一步区分为 1K、3K、6K、12K 和 24K 及以上大丝束碳布。小丝束(12K 以下)平纹碳布织造简单、强度可靠和耐磨性好,在摩擦领域中的应用较为常见。

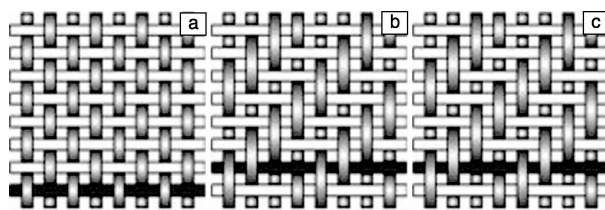


图 1 3 种碳布编织结构示意图: (a) 平纹, (b) 斜纹, (c) 缎纹<sup>[9]</sup>  
Fig. 1 Schematic diagrams showing different weave patterns: (a) plain, (b) twill and (c) satin<sup>[9]</sup>

表 1 不同编织结构碳布的性能对比

Table 1 General properties of various weaves of carbon fabric

Property	Plain	Twill	Satin
Stability	Good	Acceptable	Poor
Drape	Poor	Good	Excellent
Porosity	Acceptable	Good	Excellent
Smoothness	Poor	Acceptable	Excellent
Balance	Good	Good	Poor
Symmetrical	Excellent	Acceptable	Very poor
Crimp	Poor	Acceptable	Excellent

纤维丝束的单丝数量和编织密度会对碳布表面的纹理、纤维的强度利用率和树脂的浸渍效果等产生影响<sup>[9]</sup>,进而对碳布复合材料的摩擦性能造成影响。随着纤维束内单丝数量的增加,复合材料表面凸起区域减少,导致粗糙峰的机械接触减少,引起动摩擦系数降低。同时单丝数量会影响润滑油膜的形成和材料散热,随着单丝数量的增加摩擦材料的瞬时制动稳定性降低,摩擦系数的压力稳定性降低,转速稳定性略有提高,耐磨性能提高<sup>[10]</sup>。随着碳布编织密度的增大,复合材料的动静摩擦系数均减小,制动压力对动摩擦因数的影响减弱,循环制动过程中的摩擦稳定性增强<sup>[11]</sup>。

碳布的编织结构对复合材料的力学性能和摩擦性能

都有明显的影响, Bijwe J 等<sup>[9,12-13]</sup>的研究表明, 斜纹碳布对于复合材料的强度、模量和层间剪切强度的增强效果都最佳, 缎纹第二, 平纹第三, 但增强之后复合材料的硬度和断裂延伸率3者的排序正好反过来。单向干式磨料磨损试验结果表明, 低载荷(10 N)工况条件下斜纹的耐磨性能最佳、缎纹次之, 平纹的最差, 载荷增加编织结构对耐磨性能的影响减小, 高载荷(40 N)工况条件下3种复合材料的磨损率一致。干式多种磨损模式(粘着磨损、微动磨损、磨料磨损和气体冲蚀磨损)试验表明, 编织结构对磨损的影响没有一致的规律, 没有一种编织结构在所有工况下都具有最好的耐磨性能, 这与不同磨损模式下的磨损机理有关。

另外, 碳布的含量对于复合材料的力学和物理特性以及摩擦磨损性能也有着重要的影响。材料的磨损和材料的层间剪切强度密切相关<sup>[12]</sup>, 纤维和树脂的比例合适时纤维和基体的界面结合好, 纤维在磨损过程中仅被磨薄, 起到很好的提高耐磨性的作用。碳布的含量过高时, 树脂含量不足, 纤维得不到很好浸润和粘接, 摩擦过程中纤维会发生大量的脱粘、断裂和粉碎, 进而充当磨粒造成材料的严重磨损。碳布含量过少时, 复合材料的基体得不到很好的增强, 降低了复合材料摩擦承载能力, 而且摩擦过程中容易发生基体的撕裂和脱粘, 因而复合材料的磨损率较高。综合考虑复合材料的摩擦承载能力和耐磨性能, 碳布叠层复合材料的最佳树脂含量为55%~65%(体积分数)<sup>[6,14]</sup>。

## 2.2 树脂粘接剂

碳布是碳布复合材料的骨架, 是复合材料高比强度、高比模量等一系列优异机械性能的来源基础。但是, 研究表明单纯的纤维和织物并不能发挥出纤维的固有强力<sup>[15]</sup>。树脂固化后成为碳布复合材料的基体, 将各个组分连接成一个紧密的整体, 各种材料在性能上互相取长补短, 产生协同效应, 使复合材料的综合性能优于原组成材料。

树脂对碳布复合材料的摩擦性能、耐热性能、成型工艺和产品价格都具有直接影响。对树脂的性能要求主要有: ①良好的组分相容性, 能够与碳布复合材料中的各组分形成良好的界面结合, 能够与碳纤维形成完整界面是需要考虑的重要因素。②稳定的摩擦系数和低磨损率, 并具有良好的耐温性能。③适宜的模量和硬度, 保证摩擦面形成稳定的接触并且摩擦过程中不产生噪音。

碳布复合材料在摩擦学应用研究中所涉及的树脂包括聚四氟乙烯、聚醚酰亚胺、聚醚醚酮、聚酰胺(尼龙)、聚乙烯、酚醛、乙烯酯、不饱和聚酯和环氧等。其

中聚四氟乙烯、聚醚酰亚胺、超高分子聚乙烯和聚醚醚酮等树脂不仅耐温性能优异, 而且具有非常好的自润滑性能, 研究主要集中在减摩润滑材料, 而限于价格高的原因, 所针对的研究背景通常是航空航天等高科技领域的滑动轴承和关节轴承。环氧树脂和酚醛树脂作为最早开发出来的传统树脂, 具有成型工艺成熟可靠、机械性能好以及成本低等优点, 因此是民用领域研究中采用最多的树脂粘接剂, 针对两种树脂的改性技术对摩擦性能的影响也是研究的热点之一。

## 2.3 填料

填料能够改变复合材料的热性能、力学性能和阻尼性能等机械物理性能, 对于碳布复合材料, 填料还能够显著改善摩擦过程中碳纤维的脆断引起的剧烈磨损问题, 针对填料对碳布复合材料摩擦性能的影响研究也是研究热点之一。

石墨、 $\text{MoS}_2$  粉和 PTFE 粉等填料, 具有良好的自润滑作用, 摩擦过程中有助于在对偶表面形成低摩擦系数转移膜, 从而降低复合材料的摩擦系数和磨损率, 是碳布复合材料研究中最常用的填料。苏峰华等<sup>[16]</sup>研究了辐照 PTFE 粉和  $\text{MoS}_2$  粉改性碳布复合材料的摩擦磨损性能, 发现  $\text{MoS}_2$  可以明显改善碳布复合材料的摩擦磨损性能, 而 PTFE 的加入则不利于其摩擦磨损性能的改善; 当  $\text{MoS}_2$  质量分数在 5%~15% 之间时,  $\text{MoS}_2$  可以有效降低碳布复合材料的摩擦系数; 当  $\text{MoS}_2$  质量分数为 10% 时,  $\text{MoS}_2$  改性碳布复合材料的综合摩擦磨损性能最佳。周先辉等<sup>[17]</sup>研究了钢背衬碳纤维织物/环氧复合材料在环-环端面干摩擦状态下的摩擦学特性, 发现  $\text{MoS}_2$  粉在降低衬层摩擦因数的同时能够抑制环氧树脂向对偶钢环表面的粘结; 石墨对衬层的减摩效果优于  $\text{MoS}_2$  粉, 但摩擦温升引起树脂向偶件表面转移增多使得减摩效果大大降低。齐乐华等<sup>[18]</sup>研究了石墨含量对表面形貌和摩擦磨损性能的影响, 发现石墨的固体润滑作用, 主要造成了中间动摩擦系数的下降, 而对锁止静摩擦系数的影响却很小(图2); 石墨可以明显降低复合材料的动摩擦系数, 并有助于提高动摩擦系数的稳定性。Suresha B 等<sup>[19]</sup>研究了硅烷偶联剂处理的石墨对碳布复合材料的改性作用, 发现石墨能够显著提高复合材料的拉伸强度、拉伸模量和硬度等力学性能, 并能够提高复合材料干式条件下的耐磨料磨损性能, 10% 含量的复合材料的磨损率最低, 综合力学性能最优。二体摩擦试验发现, 石墨加入后均匀分散在复合材料基体中, 能够和其他组分形成良好的协同作用, 有效改善纤维拔出、纤维剥离和基体撕裂等剧烈磨损问题。

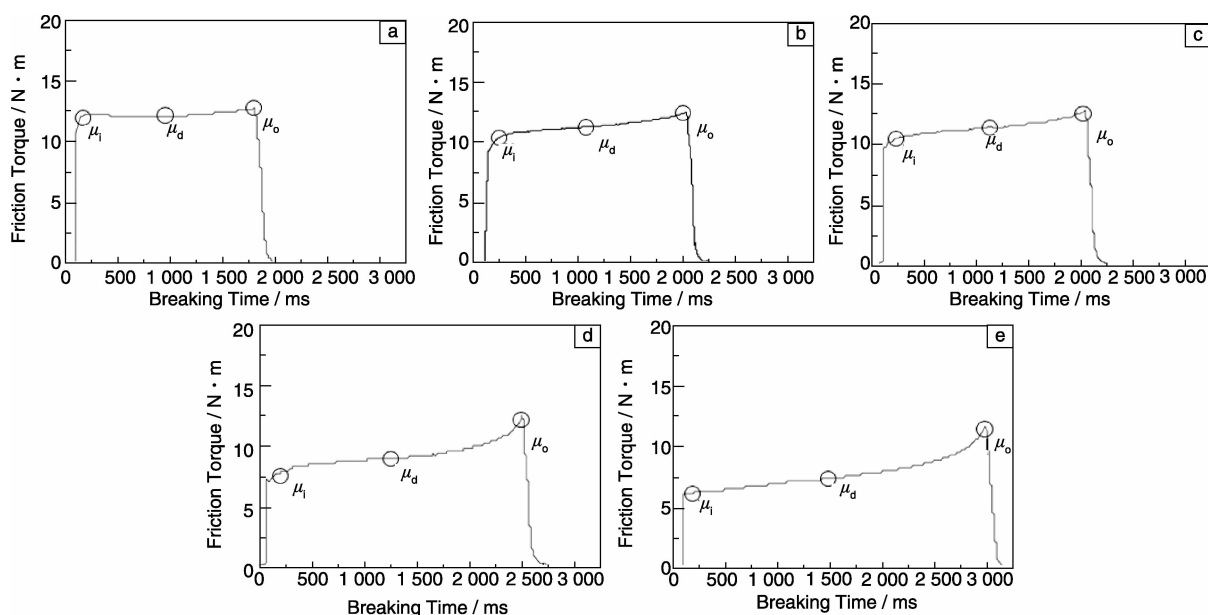


图 2 不同石墨含量试样的摩擦力矩曲线: (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15%, (e) 20%,  $\mu_i$  - 起始动摩擦系数;  $\mu_d$  - 中间动摩擦系数;  $\mu_o$  - 锁止静摩擦系数<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Friction torque curves of samples with different graphite content: (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15% and (e) 20%,  $\mu_i$ -initial dynamic friction coefficient;  $\mu_d$ - medial dynamic friction coefficient;  $\mu_o$ -lock-up static friction coefficient<sup>[18]</sup>

$\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiC}$  等莫氏硬度超过 7 的填料属于高硬度填料, 具有良好的耐磨损性能, 但会在制动噪声和损伤对偶表面方面产生副作用, 因此使用时粒径宜细, 且用量不宜过大。Kumaresan K 等<sup>[20]</sup>研究了  $\text{SiC}$  填料对碳布复合材料摩擦磨损性能的影响规律。研究发现,  $\text{SiC}$  填料的加入能够提高复合材料的杨氏模量、表面硬度, 但会减少断裂延伸率。 $\text{SiC}$  使得磨损时材料的破坏发生在固体颗粒的界面, 减少了复合材料表面的犁沟磨损和两个摩擦原件间的粘着, 并能在摩擦面形成稳定的转移膜, 添加后复合材料的耐磨损性能提高了 21% ~ 35%。Subbaya K M 等<sup>[21]</sup>采用正交设计法研究了  $\text{SiC}$  改性碳布复合材料的三体磨损行为, 发现  $\text{SiC}$  能够提高碳布复合材料的耐磨性能, 方差分析结果表明, 负载对  $\text{SiC}$  改性碳布复合材料的磨损具有显著影响。Ramesh B N 等<sup>[22]</sup>研究了硅烷偶联剂处理的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对碳布复合材料三体磨损模式下摩擦磨损性能的影响规律。研究结果表明,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  有效提高了碳布复合材料的耐磨性能, 随着拖磨距离的增大复合材料的磨损量增大了, 但是磨损率减小了。

纳米粒子具有“小尺寸效应”、“界面效应”、“量子尺寸效应”和“宏观量子隧道效应”等一系列特殊性能, 出现后立即引起各国科技界的高度重视, 近年来随着其特殊摩擦学性能被发现, 也成了碳布复合材料增强改性材料的研究热点。碳布复合材料中常用的纳米粒子有碳

纳米材料、层状粘土矿物, 以及纳米颗粒的金属或他们的有机和无机化合物。张招柱等<sup>[23-25]</sup>对多种纳米粒子对碳布复合材料的摩擦性能的影响展开了研究, 发现不同纳米粒子与树脂间相互作用存在差异, 并影响摩擦面转移膜的形成, 纳米  $\text{CaCO}_3$ 、纳米  $\text{TiO}_2$  和纳米  $\text{SiO}_2$  加入都能够提高碳布与粘接树脂间的结合强度从而提高复合材料的拉伸强度, 同时有利于复合材料在对偶面形成均匀的转移膜, 明显改善了碳布复合材料的摩擦磨损性能。纳米  $\text{CaCO}_3$  对于提高耐磨性最有效, 纳米  $\text{SiO}_2$  对于减小摩擦系数和提高复合材料的强度最有效。张新瑞等<sup>[26]</sup>研究了表面改性碳纳米管对碳布复合材料的摩擦性能的影响, 发现改性碳纳米管能够显著提高碳布复合材料的摩擦学性能, 提高压力承载能力和高速承载能力。表面改性有助于改善碳纳米管的分散性能, 提高碳纳米管与树脂的界面结合能力。改性后的复合材料在多种工况条件下的摩擦性能都表现最优, 碳纳米管的最佳质量分数为 6%。Park D C 等<sup>[27]</sup>研究了纳米炭黑对碳布复合材料的摩擦性能的影响, 发现只采用纳米炭黑改性的复合材料在干式条件下的摩擦系数最低, 但是湿式条件下纳米炭黑和 PTFE 共同改性的复合材料的摩擦性能最优。

已有研究表明, 填料的加入能够改善碳布复合材料的物理机械性能, 并提高碳布复合材料的摩擦承载能力; 高硬度填料的加入有利于减小对偶面的粗糙度, 从而减

小摩擦面的应力集中;具有自润滑性能的填料的加入能够在摩擦表面形成一层转移膜,起到减小摩擦系数提高耐磨性的作用;填料的加入有利于形成连续、均匀且牢固的转移膜;高强度填料的加入使复合材料结晶度提高;填料的加入能够阻止次表面层的变形和裂纹传递<sup>[28]</sup>。

### 3 碳布复合材料的制备工艺

碳布复合材料通常采用树脂浸渍技术和模压固化的方式进行生产,一般采用的浸渍方法为真空浸渍工艺。碳布复合材料的制备过程包括碳布预处理、浸渍树脂、模压固化和剪裁等工序。具体制备工艺根据碳布的表面处理方法和材料配方的差异以及实际使用过程中的应用场所和性能要求的不同而变化。随着工程应用对摩擦性能要求的不断提高,碳布复合材料的制备工艺也有了进一步的发展。

#### 3.1 碳布的表面处理

碳纤维表面具有较低的表面活性,未经处理碳纤维表面与树脂的结合力小,影响了碳布复合材料的整体力学性能的发挥。而且,纤维强度与石墨化度密切相关,高强度纤维的石墨化度高,表面惰性更大<sup>[29]</sup>。碳纤维经过适当的表面处理能增加纤维表面的粗糙度并且改变表面的化学组成,改善纤维与基体树脂之间的界面粘接,充分发挥增强纤维的高强度和高模量特性,使其强度利用率达到80%~90%;而未经表面处理碳纤维的强度利用率仅为55%~60%<sup>[29]</sup>。因此,对碳布进行表面处理,是碳布使用过程中需要重视的问题。常用的碳纤维的表面处理方法有浓酸氧化、等离子处理、阳极氧化、硅烷偶联剂处理、纳米SiO<sub>2</sub>沉积以及联合浓硝酸氧化和硅烷偶联剂处理等。

苏峰华等<sup>[30]</sup>研究了等离子处理碳布复合材料的摩擦学性能,发现经过等离子体处理后,在碳布的表面产生了许多活性基团,表面活性元素的含量明显增多;碳布的浸润性增大,提高了其与粘结剂的结合强度和结合量,增强了织物纤维束间的结合力,从而提高了碳布复合材料的摩擦学性能和力学性能。

门学虎等<sup>[31]</sup>研究指出采用混合酸氧化改性使碳纤维表面生成了活性含氧基团,并对纤维表面产生刻蚀,增加碳纤维织物的比表面积,提高了胶粘剂的浸润性和粘结性,明显提高了碳布复合材料的减摩耐磨性能和承载能力,使碳布复合材料的承载能力提高了60%、磨损率降低了65.9%。

Tiwari S等<sup>[32-38]</sup>研究了等离子处理、伽玛辐射、氧化处理和纳米YbF<sub>3</sub>表面处理对碳布复合材料摩擦性能的

影响,发现低温氮氧等离子体能够改变纤维的表面形貌并且引入很多极性基团,从而提高了纤维与树脂的粘接力,增强了复合材料的力学性能和耐磨性,氧气的加入优于纯氮气的效果;伽玛辐射能够增加碳纤维表面的粗糙度和引入活性基团,并且降低了碳纤维的结晶度和石墨结构的扭曲;纳米YbF<sub>3</sub>表面处理能够减小碳布复合材料的摩擦系数降低其磨损率,层间剪切强度的实验结果和耐磨损性能存在线性相关,0.3%(质量分数)剂量YbF<sub>3</sub>处理的复合材料的层间剪切强度和耐磨损性能都最好。

张新瑞等<sup>[39-40]</sup>通过HNO<sub>3</sub>氧化法对碳纤维布进行了表面改性,制备了聚酰亚胺复合材料,并在干式条件下研究了表面改性对复合材料摩擦磨损性能的影响。研究表明表面改性增加了纤维表面的粗糙程度并显著增加了氧元素含量,从而提高了碳布与树脂间的界面结合力,提高了复合材料的摩擦磨损性能。另外,该团队还采用溶胶凝胶法在碳纤维布表面制备了纳米尺度的SiO<sub>2</sub>薄膜对碳纤维布进行表面改性,发现该方法提高了纤维和树脂的表面结合强度,减少了摩擦过程中纤维脱落造成的磨粒磨损,从而极大地提高了复合材料的摩擦磨损性能。

#### 3.2 成型工艺

碳布复合材料的成型工艺主要包括手糊成型工艺、传递模工艺和真空浸渍工艺等,由于相关工业技术的成熟度比较高,碳布复合材料在成型时通常遵循现有成熟工艺,针对碳布复合材料成型工艺的研究较少。

Bijwe J等<sup>[14]</sup>研究表明,手糊成型工艺制备的复合材料相比浸渍工艺制备的复合材料具有较高的韧性,但具有较低的强度。赵普等<sup>[41]</sup>研究了不同压制成型温度对碳纤维织物增强PES-C/PTFE复合材料力学性能的影响。发现提高压制成型温度有助于提高复合材料的弯曲强度和层间剪切强度。

### 4 摩擦磨损机理

碳布复合材料磨损表面形貌及变化的研究是目前分析其摩擦及磨损机理的主要手段。碳布复合材料表面受纤维束编织纹理的影响凹凸不平,实际接触面积与表观接触面积有很大的差别。碳布复合材料的摩擦性能和纤维束与树脂基体的结合强度密切相关。摩擦过程中,在压力和剪切力作用下,碳布复合材料的凸起纤维束最先承力,纤维束与树脂基体结合强度好的情况下,纤维主要被磨损减薄,复合材料的摩擦性能稳定、耐磨性能好;纤维束与树脂基体结合强度差的情况下,纤维发生大量的断裂、拔出和粉碎,复合材料摩擦稳定性差、磨损严重。

Bijwe J 等<sup>[6,9,14]</sup>研究指出碳布复合材料的磨损和材料的层间剪切强度密切相关,纤维和基体结合好的情况下,纤维在磨损过程中仅被磨薄,碳布复合材料的耐磨性能好;纤维和基体结合不好的情况下,摩擦过程中纤维会发生大量的断裂和粉碎,造成磨损的增加。

Sharma M 等<sup>[42]</sup>指出,层间剪切强度和模量是影响碳布复合材料磨粒磨损性能的两个最重要因素。以聚醚醚酮为基体的碳布复合材料的主要磨损机理是疲劳失效造成的微犁沟、微切削和微裂纹,以聚醚醚酮为基体的碳布复合材料的主要磨损机理是塑性区的横向裂纹(图 3)。

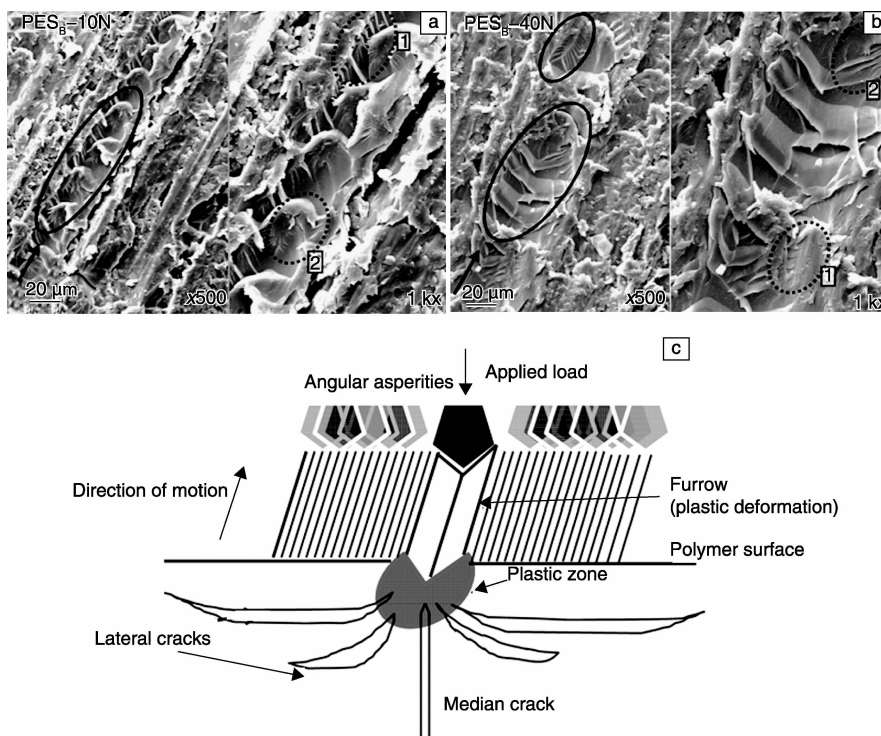


图 3 不同压力下纯聚醚醚酮基体碳布复合材料 SiC 磨粒磨损后 SEM 照片: (a)10N 和 (b)40N (标记 1 和 2 的裂纹带表明损伤机制为横向脆性破坏), 磨损机理示意图 (c): 当尖锐的凸起滑过脆性材料的平坦表面时塑性区会有横向裂缝<sup>[42]</sup>

Fig. 3 SEM images of pure PES polymer carbon fabric composites surface abraded against SiC paper under: (a) 10 N and (b) 40 N, marker 1 and 2 for array of cracks supporting lateral brittle failure; Schematic illustration of wear mechanism when sharp asperities slide over a flat surface of a brittle material, indicating the lateral cracks under plastic zone (c)<sup>[42]</sup>

Sharma A 等<sup>[43]</sup>研究指出,粘着磨损形式下,载荷的增加会增大碳布的所承受的应力同时增加摩擦热,从而造成纤维破坏的程度加剧,破坏形式包括纤维微裂纹、微切削和纤维的粉碎,随后纤维碎片被剥离或拔出。

苏峰华等<sup>[30,44]</sup>研究指出碳纤维织物复合材料摩擦过程中纤维脆断和纤维与树脂的结合性差是造成磨损严重的原因,碳纤维织物的磨损分为严重磨损和稳定磨损两个阶段,其中严重磨损阶段的磨损量占了总磨损量的 87%。

周先辉等<sup>[45]</sup>研究指出,浸油润滑条件下,轻载高速启动可显著提高单向碳织物/环氧复合材料的摩擦磨损性能,边界润滑状态下的碳织物/环氧复合材料主要表现出黏着磨损特性,对偶摩擦表面形成的网状转移膜能够改善材料的摩擦学性能;平纹碳布复合材料的表面织物纹理利于润滑油深入到摩擦表面各区域,在重载下表现出

较低的摩擦系数。

## 5 结 语

国内外学者在碳布复合材料组分构成、制备工艺和摩擦磨损机理方面做了大量的理论和实验研究,并取得了一系列成果。但就目前的研究成果来看,摩擦磨损机理方面的理论不够系统深入,有待通过多学科交叉研究和摩擦过程中表面物理化学变化的研究提出更具指导意义的新理论。碳布表面处理方法和纳米颗粒改性是近年来的研究热点,相关研究工作使碳布复合材料的物理机械性能和摩擦磨损性能不断提高。探索更科学高效的碳布表面处理方法,多种纳米颗粒协同改性,以及物理/力学性能和摩擦磨损性能的协同研究是碳布复合材料未来研究的重要方向。

## 参考文献 References

- [1] Du Shanyi(杜善义). 先进复合材料与航空航天[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2007, 24(1): 1-12.
- [2] Zhang Kaomin(张靠民), Li Min(李敏), Gu Yizhuo(顾轶卓), et al. 先进复合材料从飞机转向汽车应用的关键技术[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2013, 32(11): 685-695.
- [3] Mallick P K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*[M]. CRC Press, 2010.
- [4] Du Shanyi. Advanced Composite Materials and Aerospace Engineering [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] Shaojie C. Composite Technology and Large Aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 3: 015.
- [6] Bijwe J, Rattan R. Carbon Fabric Reinforced Polyetherimide Composites; Optimization of Fabric Content for Best Combination of Strength and Adhesive Wear Performance[J]. *Wear*, 2007, 262(5): 749-758.
- [7] Liu Pei(刘沛). *Tribological Properties of High Performance Fabric Reinforced Polytetrafluoroethylene Composites* (高性能织物增强聚四氟乙烯复合材料摩擦学性能研究)[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [8] Lin Changhong(林长宏). *Application Research on Synchronizer Ring of Carbon Fiber* (碳纤维布在同步器齿环上的应用研究)[D]. Jilin: Jilin University, 2004.
- [9] Bijwe J, Rattan R. Influence of Weave of Carbon Fabric in Polyetherimide Composites in Various Wear Situations [J]. *Wear*, 2007, 263(7): 984-991.
- [10] Fei Jie(费杰), Huang Jianfeng(黄剑锋), Cao Liyun(曹丽云), et al. 炭布/树脂复合摩擦材料的湿式摩擦学性能[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2013(3): 70-75.
- [11] Zhang Zhaomin(张兆民), Fu Yewei(付业伟), Zhang Xiang(张翔), et al. 编织密度对炭布增强树脂基摩擦材料湿式摩擦学性能影响[J]. *Lubrication Engineering* (润滑与密封), 2013, 38(5): 64-68.
- [12] Rattan R, Bijwe J. Carbon Fabric Reinforced Polyetherimide Composites; Influence of Weave of Fabric and Processing Parameters on Performance Properties and Erosive Wear [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 420(1): 342-350.
- [13] Rattan R, Bijwe J, Fahim M. Influence of Weave of Carbon Fabric on Low Amplitude Oscillating Wear Performance of Polyetherimide Composites[J]. *Wear*, 2007, 262(5): 727-735.
- [14] Bijwe J, Rattan R. Influence of Content of Carbon Fabric on the Low Amplitude Oscillating Wear Performance of Polyetherimide Composites[J]. *Tribology Letters*, 2006, 23(3): 223-229.
- [15] Yang Caiyun(杨彩云). 碳纤维、碳纤维织物及炭布在复合材料中强度利用率的研究[J]. *Fiber Composites* (纤维复合材料), 1998, 15(3): 46-50.
- [16] Su Fenghua(苏峰华), Zhang Zhaozhu(张招柱), Wang Kun(王坤), et al. MoS<sub>2</sub> 和 PTFE 改性炭布复合材料的摩擦磨损性能[J]. *Tribology* (摩擦学学报), 2005, 25(4): 338-342.
- [17] Zhou Xianhui(周先辉), Sun Yousong(孙友松), Wang Wanshun(王万顺). 钢背衬碳纤维织物/环氧复合材料干摩擦特性研究[J]. *Lubrication Engineering* (润滑与密封), 2007, 32(7): 29-33.
- [18] Pan Guangzhen(潘广镇), Qi Lehua(齐乐华), Fu Yewei(付业伟), et al. 石墨改性炭布复合材料湿式摩擦磨损性能研究[J]. *Tribology* (摩擦学学报), 2012, 32(4): 360-366.
- [19] Suresha B, Ramesh B N, Subbaya K M, et al. Mechanical and Three-Body Abrasive Wear Behavior of Carbon-Epoxy Composite with and without Graphite Filler[J]. *Journal of Composite Materials*, 2010, 44(21): 2509-2519.
- [20] Kumaresan K, Chandramohan G, Senthilkumar M, et al. Dry Sliding Wear Behaviour of Carbon Fabric Reinforced Epoxy Composite with and without Silicon Carbide[J]. *Composite Interfaces*, 2011, 18(6): 509-526.
- [21] Subbaya K M, Suresha B, Rajendra N, et al. Taguchi Approach for Characterization of Three-Body Abrasive Wear of Carbon-Epoxy Composite with and without SiC Filler[J]. *Composite Interfaces*, 2012, 19(5): 297-311.
- [22] Ramesh B N, Suresha B, Chandramohan G, et al. Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Microfiller-Filled Carbon-Epoxy Composites; a Factorial Design Approach[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2011, 18(9): 783-800.
- [23] Su F, Zhang Z, Liu W. Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fabric Composites Filled with Several Nano-Particulates [J]. *Wear*, 2006, 260(7): 861-868.
- [24] 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 TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> [J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53(5): 678-683.
- [25] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F. Tribological Behaviors of Hybrid PTFE/Nomex Fabric/Phenolic Composite Reinforced with Multi-walled Carbon Nanotubes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124(1): 235-241.
- [26] Zhang X, Pei X, Wang Q. Study on the Friction and Wear Behavior of Surface-Modified Carbon Nanotube Filled Carbon Fabric Composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2011, 22(12): 2157-2165.
- [27] Park D C, Kim S S, Kim B C, et al. Wear Characteristics of Carbon-Phenolic Woven Composites Mixed with Nano-Particles [J]. *Composite Structures*, 2006, 74(1): 89-98.
- [28] Blanchet T A, Kennedy F E. Sliding Wear Mechanism of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE Composites[J]. *Wear*, 1992, 153(1): 229-243.
- [29] Wang Yunying(王云英), Meng Jiangyan(孟江燕), Chen Xuebin(陈学斌), et al. 复合材料用碳纤维的表面处理[J]. *Sur-*

- face Technology(表面技术), 2007, 3.
- [30] Su Fenghua(苏峰华), Zhang Zhaozhu(张招柱), Wang Kun(王坤), et al. 等离子处理碳纤维织物复合材料的摩擦学性能[J]. *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报), 2009, 19(4): 437–442.
- [31] Men Xuehu(门学虎), Jiang Wei(姜葳), Zhang Zhaozhu(张招柱), et al. HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>氧化改性碳布复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. *Tribology*(摩擦学学报), 2006, 26(5): 443–447.
- [32] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Adhesive Wear Performance of Polyetherimide Composites with Plasma Treated Carbon Fabric[J]. *Tribology International*, 2011, 44(7): 782–788.
- [33] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Polyetherimide Composites with Gamma Irradiated Carbon Fabric: Studies on Abrasive Wear[J]. *Wear*, 2011, 270(9): 688–694.
- [34] Tiwari S, Sharma M, Panier S, et al. Influence of Cold Remote Nitrogen Oxygen Plasma Treatment on Carbon Fabric and Its Composites with Specialty Polymers[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(4): 964–974.
- [35] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Gamma Radiation Treatment of Carbon Fabric to Improve the Fiber-Matrix Adhesion and Tribo-Performance of Composites[J]. *Wear*, 2011, 271(9): 2 184–2 192.
- [36] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Role of Nano-YbF<sub>3</sub>-Treated Carbon Fabric on Improving Abrasive Wear Performance of Polyetherimide Composites[J]. *Tribology Letters*, 2011, 42(3): 293–300.
- [37] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Tribological Studies on Polyetherimide Composites Based on Carbon Fabric with Optimized Oxidation Treatment[J]. *Wear*, 2011, 271(9): 2 252–2 260.
- [38] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Strengthening of a Fibre-Matrix Interface: a Novel Method Using Nanoparticles[J]. *Nanomater Nanotechnol*, 2013, 3(3): 1–8.
- [39] Zhang X, Pei X, Zhang J, et al. Effects of Carbon Fiber Surface Treatment on the Friction and Wear Behavior of 2D Woven Carbon Fabric/Phenolic Composites[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 339(1): 7–12.
- [40] Zhang X, Pei X, Jia Q, et al. Effects of Carbon Fiber Surface Treatment on the Tribological Properties of 2D Woven Carbon Fabric/Polyimide Composites[J]. *Applied Physics A*, 2009, 95(3): 793–799.
- [41] Zhao Pu(赵普), Jia Qian(贾倩), Wang Qihua(王齐华). 碳纤维织物增强 PES-C/PTFE 复合材料的摩擦学性能研究[J]. *Tribology*(摩擦学学报), 2008, 28(6).
- [42] Sharma M, Bijwe J, Mitschang P. Abrasive Wear Studies on Composites of PEEK and PES with Modified Surface of Carbon Fabric[J]. *Tribology International*, 2011, 44(2): 81–91.
- [43] Sharma A, Rattan R, Batra N K. Characteristics of Polyetherimide with Carbon Fabric Composites in Adhesive Wear[J]. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2013, 3(5): 1 992–1 995.
- [44] Su Fenghua(苏峰华), Zhang Zhaozhu(张招柱). 碳纤维织物与 Nomex 纤维织物复合材料摩擦学性能研究[C]//2006 National Tribology Conference Proceedings (1)(2006 全国摩擦学学术会议论文集(一)). 2006.
- [45] Zhou Xianhui(周先辉), Sun yousong(孙友松), Wang Wanshun(王万顺). 碳纤维织物/环氧复合材料油润滑下摩擦学性能[J]. *Tribology*(摩擦学学报), 2014, 3: 018.

(编辑 惠琼)