

DOI: 10.13475/j.fzxb.20171202708

纤维及其制品摩擦性能测试方法的研究进展

向忠, 刘杨, 钱淼, 吴震宇, 胡旭东, 周香琴

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 为有效解决纤维及其制品在生产过程中的摩擦问题,提升产品综合性能,对现阶段纤维及其制品生产及使用过程中因摩擦引起的常见缺陷、摩擦性能研究背景及研究价值进行了介绍。阐述了点接触型、线接触型和面接触型纤维及其制品摩擦性能测试方法,分析了不同研究方法的特点、适用范围及其最新进展,并对纤维摩擦性能部分研究成果进行总结。分析认为:纤维及其制品的摩擦性能研究涉及多学科交叉,需加强纤维及其制品微观接触模型及摩擦性能表征方式、与纺织工艺相匹配的测试方法及测试精度提升等方面研究,同时需要纺织、机械、材料和数学等学科人才团队协同创新来推动纤维及其制品摩擦性能的研究进展。

关键词 纤维; 纤维制品; 摩擦性能; 测试方法; 摩擦因数

中图分类号: TS 103 文献标志码: A

Research progress in test methods of friction properties of fiber and its products

XIANG Zhong, LIU Yang, QIAN Miao, WU Zhenyu, HU Xudong, ZHOU Xiangqin

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Aiming at effectively solving the problems caused by friction during fiber and its products production process to improve the overall performance of fiber and its products, the defects of fiber and its products caused by friction, research background and significance of frictional properties were reviewed. Three kinds of test methods for studying fiber and its products' frictional properties, which are point contact, line contact and area contact, were illustrated from fundamental methods, application scope and the latest progress in detail firstly. And then some research results on fiber and fabric frictional properties were summarized. In conclusion, the study for frictional properties of fiber and its products needs the cooperation of multi-disciplinary teams in fields of materials, mathematics and textiles. With combined innovation of development of mesoscopic contact friction model and corresponding surface friction coefficient distribution method, and development of high-precision frictional properties testing rig according to fiber weaving process, the research on frictional properties of fiber and its products can be improved.

Keywords fiber; fiber product; frictional property; testing method; friction coefficient

随着复合材料工业的发展,各种新型材料不断涌现,很多新型纤维以不同的形态存在于复合材料中^[1],推动了产业用纺织品行业的迅速崛起。为了最大限度地发挥产业用纤维在复合材料中的高强度特性,很多情况下它是以无捻纤维束及其交织的形式存在于纺织品中,但无捻纤维束交织成形和布卷成形过程中存在的技术难题又限制了该行业的发

展。对纤维及其制品摩擦性能及其影响因素的研究,对于解决上述问题具有重要意义。

摩擦性能用于表征物体与另一物体沿接触面切线方向运动或有相对运动的趋势时,2个物体的接触面之间阻碍其相对运动的力的作用特性,是描述物体表面性质的重要方式之一^[2]。纤维及其制品摩擦性能一般用摩擦阻力或摩擦因数进行评价,由

收稿日期: 2017-12-14 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1609205, 51605443); 浙江省自然科学基金资助项目(LR18E050001); 浙江省重点研发计划资助项目(2018C01027); 浙江省科技厅公益基金资助项目(2017C31053)

第一作者简介: 向忠(1982—),男,博士,副教授。主要研究方向为纺织装备智能化、信息化、绿色化。

通信作者: 胡旭东, E-mail: xdhu@zstu.edu.cn。

于纤维及其制品多由几何尺度细小的纤维加工而成,且存在较好的柔韧性,使其摩擦性能与刚性物体摩擦性能变化规律存有较大差异。纤维与纤维之间、纤维与载体(如传动机构、皮肤等)表面之间的摩擦贯穿于整个纤维加工和使用过程,并在较大程度上影响和决定了纤维制品的加工质量与风格参数,对纤维摩擦性能及其影响因素和测试方法展开研究,具有重要的科学与应用价值。

纤维的种类、线密度、捻度以及所采用的表面润滑剂等参数的变化,均会改变纤维的摩擦性能。若摩擦过大,则易产生断纱、断头和纱线起毛等现象,并对后续采用其织造成型的织物的质量、力学性能和手感造成一定影响。其次,在将纱线加工成织物的织造过程中,纱线的运动速度、张力、摩擦体半径等工艺参数的变化,也在很大程度上影响着纱线的摩擦性能,继而对织物性能造成影响,如出现卷边、起毛等。再次,经织造而成的织物在后续加工中,还将经历卷绕、退卷、染整等工艺处理。以织物卷绕为例,若织物的摩擦因数较小时,如玻璃纤维,则易造成多层织物之间因摩擦力过小而出现层间经向或纬向滑移^[3],严重影响成型布卷质量与后续工艺的进行;而在织物的连续传递过程中,若与机件之间存有太大的摩擦,同样会造成织物表面起毛等。最后,织物在使用过程中,其表面摩擦性能还在很大程度上决定了柔顺度和滑爽度,进而影响织物的手感与风格,对其展开研究还有利于掌握织物手感与织物设计方法之间的定量关系。

为此,大量研究者从纤维特性、工艺参数、接触类型等方面分析了纤维摩擦性能的影响因素,并对纤维摩擦性能测试方法展开了研究。本文详细综述了纤维丝束、纱线和织物的表面摩擦性能及其测试方法的发展状况,并对该技术发展所面临的问题进行了分析,以期对纤维及其制品摩擦性能的研究与应用提供帮助。

1 纤维及其制品摩擦性能测试方法

由于纤维摩擦的复杂性,对其研究多在实验研究的基础上展开;实现纤维摩擦性能的精确测量,是分析纤维摩擦性能的重要基础。按照滑动体间的接触类型可将纤维摩擦性能的测试方法分为点接触型、线接触型和面接触型 3 类^[2]。

1.1 点接触型纤维摩擦性能测试方法

点接触型纤维摩擦性能测试方法主要用于单根纤维表面摩擦性能的研究,根据纤维长短的不同,又可分为短纤维摩擦性能测定方法和长丝摩擦性能测

定方法 2 种。

1.1.1 短纤维摩擦性能测试方法

短纤维表面摩擦性能测试方法的基本原理是:通过让 2 根纤维在一定力作用下交叉压紧,测量相互之间发生移动时的摩擦力来实现纤维间摩擦因数的测定。图 1 示出基于悬臂梁工作原理的短纤维摩擦性能测试原理。测试时,上方的纤维 F_u 首先竖直向下移动,在位置 1 碰到下方固定纤维 F_d 后继续向下移动到位置 2,根据在竖直方向上的变形量 Δh 可计算出施加的正压力;此后, F_d 在水平方向横向移动时,由于摩擦力作用而引起 F_u 在水平面内的侧弯,根据侧弯量即可计算对应的摩擦力与摩擦因数。

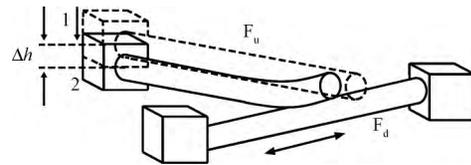


图 1 短纤维摩擦性能测定方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing method for staple fiber frictional properties

20 世纪 90 年代前期,有研究人员基于此原理并配合显微镜对微观变形进行观测的方法对短纤维之间的摩擦因数进行测量^[4],但由于该方法是基于纤维形变量间接计算求解正压力及纤维摩擦性能,故测量精度不高;为实现纤维间摩擦性能的精确测量,该方法还有待进一步改进与提高。

1.1.2 长丝摩擦性能测试方法

图 2 示出长丝摩擦性能测试平台的基本构架。其工作原理为:长丝 F_{L1} 的一端固定于 O 点,另外一端跨过固定纤维丝 F_{L2} 在重力 G 作用下自由悬挂。记 F_{L2} 与 O 点的水平距离为 s , F_{L1} 与 F_{L2} 所在平面法线方向夹角为 β ,则 F_{L2} 所受正压力值为 $G\sin\beta$;当 F_{L2} 在水平方向上移动时,在摩擦力作用下带动 F_{L1} 的自由端一起移动,直到 F_{L1} 自由端有滑动趋势,根据此时 F_{L2} 的偏转角 α 及滑动距离 x 可知,长丝所受摩擦力值为 $G\sin\alpha$ 。据此,获取 s 、 x 值后,即可求解获得对应的摩擦因数 μ_s ,计算公式为

$$\mu_s = \frac{G\sin\alpha}{G\sin\beta} = x/s$$

由图 2 可知,长丝摩擦性能测试方法结构简单,使用方便,但由于长丝尺度小,摩擦因数数值数量级小,造成该方法测试精度较难控制。随着硬件精度的提高,出现了诸多针对长丝^[5-6]、有捻纱线^[7]等摩擦性能研究的基于此原理改进的测试平台。

1.2 线接触型纤维摩擦性能测试方法

线接触型纤维摩擦多发生于无捻纤维束内部纤维间及纤维加捻过程中。开展无捻纤维束内部纤维

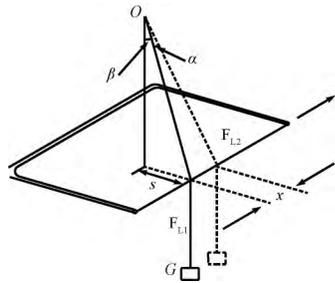


图 2 长丝摩擦性能测定方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of testing method for filament frictional properties

丝之间的摩擦性能研究,对玻璃纤维/碳纤维等复合增强材料及产业用纺织品行业具有重要意义。常用的无捻纤维束内部纤维丝之间摩擦因数的测量方法有抽拔法和平铺法 2 种;纤维加捻是增强纤维强度的主要纺纱工艺,对有捻纱线内部纤维之间的摩擦性能展开研究,有益于改进加捻工艺参数,对其多采用扭曲法进行测量。

1. 2. 1 无捻纤维束摩擦性能测试方法

抽拔法是对无捻纤维束间摩擦性能进行测试研究的方法,可较好地获取实际使用过程中无捻纤维束内部纤维在自由工况下的摩擦性能,其基本原理如图 3 所示。测试时,在施加恒定正向压力后,通过测量将单根纤维或纱线从组织中抽出的力 F_c ,即可通过计算获得纤维间的摩擦因数。

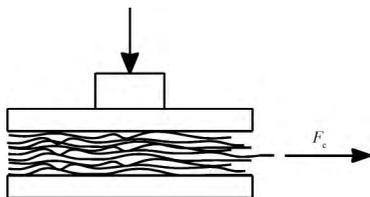


图 3 无捻纤维束间摩擦性能测试方法

Fig. 3 Test method for fiber frictional properties in untwisted filaments

近年来,纤维增强复合材料的快速发展,使得抽拔法在界定复合材料界面性能方面得到了广泛应用和长足发展^[8-9],提高单丝拔出测量精度是提高成型产品性能的重要发展方向^[10-12]。

1. 2. 2 纤维层间摩擦性能测试方法

平铺法主要用于研究纤维排列夹角对纤维之间摩擦性能的影响,其基本原理如图 4 所示。图 4 (a) 示出测试时纤维的分层排列情况,夹角 ϕ 可在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变换;对应的测试平台如图 4 (b) 所示。在平板 P_u 、 P_d 上如图 4 (a) 所示均匀平铺纤维, P_u 的一端与力传感器相连接, P_d 固定在分度盘上并与分度盘一起被固定在带滚轮的小车上。利用恒速电动机带动小车和 P_d 一起移动,则力传感器测

得的力 F_p 即为板间纤维之间的摩擦力。通过转动分度盘即可改变层间夹角 ϕ ,实现上下层纤维之间角度的变化,研究不同夹角下纤维之间摩擦因数的差异性。

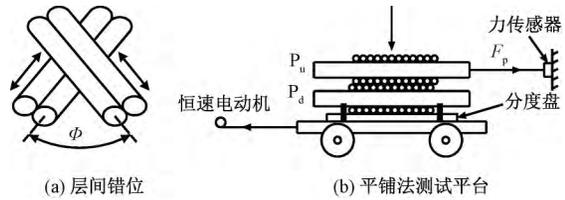


图 4 纤维层间摩擦性能测试方法

Fig. 4 Test method for frictional properties of fiber layers. (a) Principle of layered dislocation; (b) Test rig of tiling method

早期研究中,研究者主要采用该方法研究锦纶纤维间夹角对摩擦因数的影响^[13]。近年来,纤维增强复合材料的高速发展,使得该方法在研究纤维铺层结构对提高复合材料表面性能、力学性能方面的重要性日趋明显。

1. 2. 3 有捻纤维内部摩擦性能测试方法

扭曲法是测试以一定的转数捻合在一起的纤维间或纱线间摩擦性能的方法,其测试原理如图 5 所示。以 2 根捻合在一起的纤维为例,记扭转次数为 n ,捻回角为 ψ ,测试时在 2 根纤维相异的两端施加初始张力 F_{i0} ,然后逐步增加纤维另一端的拉力,并记录 2 根纤维相对滑动时的拉力临界值 F_{i1} ,则可根据下式来测定纤维之间的摩擦因数:

$$\mu_t = \ln\left(\frac{F_{i1}}{F_{i0}}\right) \frac{1}{\pi n \psi}$$

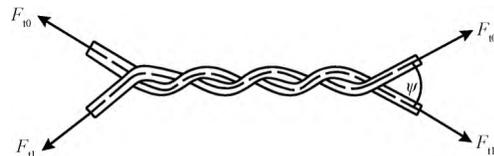


图 5 扭曲法测定纤维摩擦性能示意图

Fig. 5 Schematic diagram of twist method for fiber frictional properties

扭曲法作为研究有捻纱线内部纤维之间摩擦因数的一种方法,具有普遍适用性和简洁性的特点,可真实地反映织物内部纱线间接触的情况。尤其是随着硬件设备精度的不断提高,该方法已成为研究有捻纱线内部纤维间摩擦因数的一种重要方法^[14-15]。

1. 3 面接触型摩擦性能测试方法

面接触型纤维摩擦性能测试方法用于实现对织物表面摩擦性能的测试,包括织物之间和织物与其他载体表面之间的摩擦性能。根据测试平台的结构和运动形式的不同,测试方法又可分为平面摩擦法、

圆盘摩擦法和绞盘摩擦法 3 种。

1.3.1 平面摩擦法

在对织物表面摩擦性能的研究中,基于平面摩擦法的测试系统具有重要地位。图 6 示出平面摩擦法原理。根据牵引方式不同,其又可分为滑块牵引式和织物牵引式 2 种。

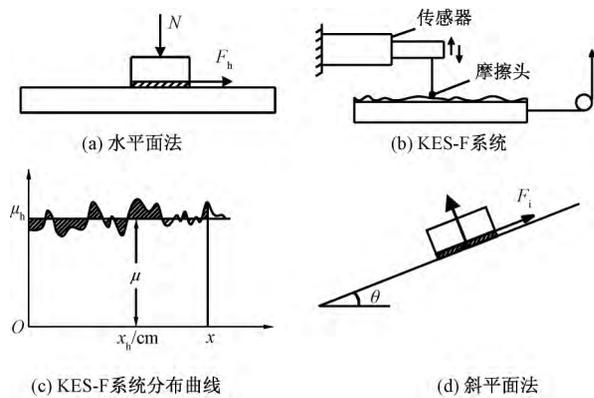


图 6 平面摩擦法测试原理示意图

Fig. 6 Schematic diagrams for fabric surface friction coefficient test system. (a) Horizontal method; (b) KES-F system; (c) Distribution curve of KES-F system; (d) Inclined method

在滑块牵引式结构中,正压力 N 一般由滑块自身质量提供,根据测得的摩擦力 F_h 即可进行摩擦因数的计算;而为确保正压力的恒定性,牵引机构和滑块之间必须采用柔性连接机构,这在很大程度上增加了确保牵引力方向一致性的难度,故其测试精度较低,后期许多研究人员对牵引的方式进行了改进^[16-18],一定程度上提高了测试的精度。在织物牵引式结构中,正压力可通过伺服机构比例给定,而织物则可在张紧后平移,测试精度较高,如: Bertaux 等^[19-20]基于此研究了织物表面的摩擦因数与人体触感的关系;王华吉^[21]等则是研究了复合材料摩擦性能的各向异性;而 Das 等^[22-23]立足于此方法,对实验平台进行持续改进;最为典型的案例为日本 KES-F 系统,其基本测试原理如图 6(b) 所示。通过控制摩擦头的结构尺寸,在进行摩擦性能测试的同时,还可获取摩擦力与织物织造参数之间的制约关系。图 6(c) 示出通过该系统获得的摩擦因数 μ_h 与水平位移 x_h 的分布曲线,计算织物表面的平均摩擦因数 μ_a ,该计算结果还可为进行织物风格分析及织物设计提供参照。 μ_a 的计算公式为

$$\mu_a = \frac{1}{x_h} \int \mu_h dx_h$$

此外,还可采用图 6(d) 所示的斜面法测试系统来分析织物表面摩擦性能,该方法通过改变平面的倾斜角 θ 来测量静摩擦因数。当 θ 值逐渐增加时,

滑块在重力作用下产生的下滑趋势加剧,当滑块开始滑动时测得静摩擦力 F_i ,由对应的倾斜角和滑块质量即可求解出静摩擦因数。该测试方法的主要优点是实现简单,但测试精度一般,且只能对静摩擦因数进行测量^[24]。

1.3.2 圆盘摩擦法

纤维种类、织造参数、整理工艺等均会对纺织品表面摩擦性能造成影响,其中各向异性特性是纺织品表面摩擦性能与刚性物体表面摩擦性能的主要区别之一。采用平面法进行织物摩擦性能测试时,一般只可获取织物经纬纱 2 个正交方向上的表面性能,而难以对织物的总体表面性能进行描述^[25]。据此,陈贵翠等^[26-28]提出了纤维制品旋转圆盘法摩擦性能测试系统,该系统的基本构造如图 7 所示。其工作原理为:将待测样品铺放在旋转台上,并与之一起旋转,上方设有可施加正压力的球形摩擦头,并通过力传感器实时接收每个接触点的摩擦力。这样,在 1 个旋转周期内,即可测量获取织物在各个方向上的摩擦性能,提高了测试效率。

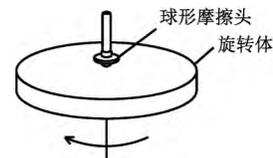


图 7 圆盘摩擦法原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of rotary disc method for frictional properties

1.3.3 绞盘摩擦法

无论是平面摩擦法还是圆盘摩擦法,其本质上还是属于平面摩擦机制的研究,而在实际的生产应用中,无论是纤维束、纱线还是织物,多数以卷筒的形式进行存储和运输,故对曲面摩擦机制的研究和相关测试平台的设计,对提高纱线质量、织物卷绕质量有着重要的意义。1953 年,Howell 首次对绞盘式曲面摩擦性能测试方法的测试原理进行了完备的理论分析,并基于此研究了羊毛的摩擦性能^[29]。由于结构简单、使用便捷和测试精度高等优点,现普遍用于纤维、织物等的摩擦因数的测定,诸多织物摩擦性能测试实验系统和织物风格仪及摩擦因数仪也基于该原理设计。图 8 为绞盘摩擦法原理示意图。工作时,将待测样品悬挂于一圆形摩擦辊上,记纤维包络角度为 φ ,样品的一端施加张力 F_{j0} ,另一端连接力传感器等测力元件,通过测得该端张力 F_{j1} ,即可按下式计算纤维摩擦因数:

$$\mu_j = \ln\left(\frac{F_{j0}}{F_{j1}}\right) \frac{1}{\varphi}$$

在实际应用过程中,可通过改变摩擦辊的材料

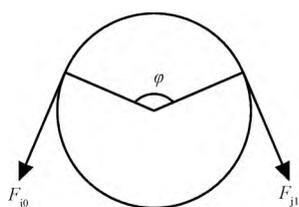


图 8 绞盘摩擦法原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of capstan method for frictional properties

来研究样品与不同材料表面的摩擦因数。设计摩擦辊为被动状态时,一端施加固定拉力 F_{j0} ,另一端设计为可拉动,观察摩擦辊有开始转动的趋势时,认为此时的拉力 F_{j1} 为静摩擦力,即可进行静摩擦因数的测量。若设计摩擦辊为主动转动的状态,则可进行动摩擦因数的测量研究。

绞盘摩擦法是针对纤维制品等柔性材料表面摩擦性能设计的测试方法。在应用初期,仍是基于 Amonton 线性摩擦定律对诸多实验现象和结果进行分析,随着非线性摩擦定律在纤维及其制品摩擦性能研究领域的广泛使用,有研究人员将非线性摩擦定律和样品抗弯刚度考虑进绞盘摩擦法的分析原理中,对绞盘法的测试原理进行了理论补充^[30]。许多研究基于绞盘的基本原理,设计测试平台从纤维性能参数^[31]、纺纱工艺参数^[33-35]、织造工艺参数^[36-38]以及实际应用中的诸多运动参数^[32,35]等角度对纤维制品的摩擦性能进行了研究。

2 纤维产品摩擦性能影响因素分析

2.1 纱线摩擦性能研究

文献[31,40,42]研究了纤维类型、尺寸、线密度等参数对纱线摩擦性能的影响;Kilic 等^[14]通过研究发现,在混纺纱线中,各成分的占比不同,对纱线之间和纱线与其他物质载体之间的摩擦性能有着相异的影响;刘晓明等^[41]研究发现,玻璃纤维的线密度对纱线的耐磨性有影响。也有一些研究人员从织造过程的工艺参数角度出发,研究了纺纱速度、退捻工艺、表面处理方式等对纱线摩擦性能的影响^[39,42],如 Lang 等^[33]研究发现,纱线的摩擦力随着表面润滑油膜厚度的减小而上升。还有一些研究人员将关注点聚焦在纱线本身的应用工况上,研究载体种类、载体半径、移动速度和张力等对其摩擦性能的影响,研究发现:纤维束间的摩擦因数与纤维束间的相对运动方向有关,且与移动速度呈负相关,而纤维束和其他物质载体间的摩擦因数与载体表面形貌有关,且与相对移动速度呈正相关;而纱线表面摩擦

因数随着纱线移动速度的增加而增大,随着张力的增加而减小。

分析发现,基于实验法对纤维束、纱线等摩擦性能进行研究得出的诸多现象、结论,在理论分析上忽视纤维作为柔性材料所具有的性能与金属材料的差异性。对此,Gassara 等^[43]利用拍摄织物运动状态图片的方法,将纤维受力变形作为摩擦因数计算过程的重要依据进行研究,对理解和分析纤维接触模型与摩擦性能的关系具有重要借鉴意义。也有一些研究人员从纤维表面的微观结构入手,构建了纤维接触的微观模型,为理解和分析纤维与纤维之间、与其他物体表面之间的摩擦特性提供了理论参考^[44-45]。

2.2 织物摩擦性能研究

在织物摩擦性能研究方面^[46-47],一些研究人员从织物性能参数的角度分析了纤维类型、纱线结构、织物结构等对织物表面摩擦性能的影响,发现单面针织物表面摩擦因数最低,同时紧密结构的织物和含弹性纱的织物表现出较大的摩擦值^[18,22,49]。另外一些研究人员还分析了滑移速度、摩擦方向和湿度等对织物应用过程中摩擦性能的影响,研究表明:织物的摩擦阻力随着滑移速度的增加而增大^[16];对于含弹性纱的织物,表面摩擦因数随着湿度的增加而增加;而对于碳纤维,其在湿态下的摩擦因数值相对稳定^[22,48-49]。随着对织物实验研究的深入,研究人员发现传统的 Amonton 线性摩擦定律并不适用于织物摩擦性能的研究,并且提出只用动摩擦因数和静摩擦因数不能完全表征纤维织物表面摩擦性能的观点^[17,23]。对此,一些研究人员提出用摩擦功、表面摩擦因数分布等新的方法来表征纤维织物表面摩擦性能^[46-47];随着对服装面料的手感和舒适度要求的提高,越来越多的研究人员将织物表面摩擦性能与人的主观触感结合起来,综合分析评定织物的表面摩擦性能与面料舒适度之间的关系^[19-20,50],其中较为典型的案例为东华大学研发的 CHES-FY 系统^[51]。

3 结束语

目前,对天然纤维等传统纺织产品摩擦性能的研究已日趋完善,与纤维、纱线、织物相关的测试方法及数学模型等均得到了长足的改进与提升,但是,随着纤维增强复合材料在航空、汽车、军事、环保、仿生学等领域的应用推广,推动了产业用纺织品行业的兴起,对玻璃纤维、碳纤维等以纤维束形式进行层铺或编制纺织品的摩擦性能的理论及实验研究仍不

够深入,前期研究结果的不足也逐渐显现。如在对纤维束中纤维摩擦性能的理论研究方面,虽然许多研究人员基于纤维表面的微观结构,提出了纤维间微观接触模型,为纤维间摩擦性能的研究提供了基础依据,但是在无捻纤维束相互接触过程中,存有纤维互相嵌入等现象,载荷变化、纤维线密度等参数变化均会造成摩擦性能的变化;此外,玻璃纤维、碳纤维织物的经纬密一般较小,由经纬纱交织叠加形成的峰谷幅值差异较大,织物与织物间或织物与其他物质载体表面之间的接触方式并不是严格意义上的平面接触,而是由多个峰值点形成的多点接触,或是波面与波面之间的线或面接触。当改变织物之间的相互位置时,上下层织物间的接触模型也发生改变,摩擦性能也随之改变,并对织造、卷绕等工艺造成影响,有关这方面的研究仍相当匮乏。

此外,在实验研究方面,通过对前述诸多研究方法的总结发现,测试过程中存在的最大问题仍是精度问题。实际应用中,往往会出现测试条件相同但测试结果偏差较大、重复性差等现象;同时,多数摩擦性能测试方法的设计原理与纤维制品在生产织造过程中的工艺特性仍存有较大差异,实验结果对生产实践的指导作用仍有待提升。

前期的研究已为人们进行纤维及其制品微观接触数学建模提供了方法上的指导。为了提高纤维及其制品摩擦性能数学模型与测试系统的可靠性和准确性,可从微观接触模型角度入手,对纤维、织物之间,纤维、织物与其他物质载体之间的微观接触模型进行研究,建立织物纺织学性能参数与织物表面摩擦性能之间的数学模型,并开发与之相匹配的测试系统,采用摩擦功、表面摩擦因数分布等新的方法来表征纤维织物表面摩擦性能,为分析和理解纤维和织物表面摩擦性能提供理论基础。

总之,对纤维摩擦性能的研究是涉及材料学、数学和纺织学的多学科交叉的前沿研究,处在并将长期处在一个不断探索和完善的阶段,仍需要进行大量的学习和研究。

FZXB

参考文献:

[1] FAZELI M, KERN M, HOFFMANN G, et al. Development of three-dimensional profiled woven fabrics on narrow fabric looms [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 86(12): 1328 - 1340.

[2] GUPTA B. *Friction in Textile Materials* [M]. Boca Raton: CRC Press Incorporated, 2008: 1 - 39.

[3] 周香琴, 万祖干. 玻纤机织工艺特性研究及机构创新 [J]. *玻璃纤维* 2012(5): 7 - 11 23.
ZHOU Xiangqin, WAN Zugan. Glass fiber weaving

process study and mechanism innovations [J]. *Fiber Glass* 2012(5): 7 - 11 23.

- [4] BRISCOE B J, WINKLER A. A statistical analysis of the frictional forces generated between monofilaments during intermittent sliding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1985, 18(11): 2143.
- [5] ALIREZAZADEH A, ZARREBINI M, GHANE M, et al. Fiber-on-fiber friction measurement using hanging fiber method [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2018, 109(5): 636 - 646.
- [6] EDDINE G H, BARBIER G, KOCHER C W, et al. Experimental evaluation of transverse friction between fibers [J]. *Tribology International*, 2018, 119: 112 - 122.
- [7] ABDELLAHI S B, NAGHASHZARGAR E, SEMNANI D. Meso modeling of silk wire rope scaffolds in tissue engineering [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2017, 47(3): 377 - 389.
- [8] SCHÖN J. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite [J]. *Wear*, 2004, 257(3): 395 - 407.
- [9] 王彧婕. 介质阻挡放电等离子体改性芳纶纤维的界面性质的研究 [D]. 成都: 四川大学 2007: 3 - 24.
WANG Yujie. The study on interfacial properties of aramid fiber modified with air plasma method of dielectric barrier discharge [D]. Chengdu: Sichuan University 2007: 3 - 24.
- [10] DONG Z, SUN C T. Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(12): 1863 - 1869.
- [11] ZHU D, SORNAKOM C, MOBASHER B, et al. Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar® 49 fabric [J]. *Composites part A: Applied Science and manufacturing*, 2011, 42(7): 868 - 879.
- [12] LÓPEZ-GÁLVEZ H, RODRIGUEZ-MILLÁN M, FEITO N, et al. A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain wave of aramid fibers [J]. *Mechanics Research Communications*, 2016, 74: 52 - 56.
- [13] HUFFINGTON J D, STOUT H P. The friction of fiber assemblies [J]. *Wear*, 1960, 3(1): 26 - 42.
- [14] KILIC G B, SÜLAR V. Frictional properties of cotton-tencel yarns spun in different spinning systems [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(8): 755 - 765.
- [15] HOBBS R E, RIDGE I M L. A new estimate of the yarn-on-yarn friction coefficient [J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2018, 53(4): 191 - 196.
- [16] RAMKUMAR S S, UMRANI A S, SHELLY D C, et al. Study of the effect of sliding velocity on the frictional properties of nonwoven fabric substrates [J]. *Wear*,

- 2004 ,256(3-4):221-225.
- [17] RAMKUMAR S S , RAJANALA R , PARAMESWARAN S , et al. Experimental verification of failure of Amontons' law in polymeric textiles [J]. *Journal of Applied Polymer Science* ,2004 ,91(6):3879-3885.
- [18] VAN Amber R R , LOWE B J , NIVEN B E , et al. The effect of fiber type , yarn structure and fabric structure on the frictional characteristics of sock fabrics [J]. *Textile Research Journal* ,2015 ,85(2):115-127.
- [19] BERTAUX E , LEWANDOWSKI M , DERLER S. Relationship between friction and tactile properties for woven and knitted fabrics [J]. *Textile Research Journal* ,2007 ,77(6):387-396.
- [20] BERTAUX E , DERLER S , ROSSI R M , et al. Textile , physiological , and sensorial parameters in sock comfort [J]. *Textile Research Journal* ,2010 ,80(17):1803-1810.
- [21] 王华吉 ,赵衡柱 ,吴新跃 ,等. 复合材料筒摩擦系数各向异性影响因素研究 [J]. *导弹与航天运载技术* ,2015(3):64-68.
WANG Huaji , ZHAO Hengzhu , WU Xinyue , et al. Study on the factors of the anisotropic friction of composite canister [J]. *Missiles and Space Vehicles* ,2015(3):64-68
- [22] DAS A , KOTHARI V K , VANDANA N. A study on frictional characteristics of woven fabrics [J]. *Autex Research Journal* ,2005 ,5(3):113-140.
- [23] DASA A , KOTHARI V K , NAGARAJU V. Frictional characteristics of woven suiting and shirting fabrics [J]. *Indian Journal of Fiber & Textile Research* ,2007 ,32(3):337-343.
- [24] 翟亚丽 ,张一风. 织物表面静摩擦系数测定仪的研制 [J]. *纺织器材* 2006(2):26-29.
ZHAI Yali , ZHANG Yifeng. Development of the friction factor determiner on the fabric surface [J]. *Textile Accessories* ,2006(2):26-29.
- [25] 任建 ,王正伟. 用圆盘法测试织物表面摩擦性能的研究 [J]. *纺织科技进展* 2007(6):23-24 27.
REN Jian , WANG Zhengwei. Testing frictional properties of fabric surface by a new disc method [J]. *Process in Textile Science & Technology* 2007(6):23-24 27.
- [26] 陈贵翠 ,张立峰 ,孙博. 机织物表面摩擦性能的测试方法研究 [J]. *轻纺工业与技术* 2010 39(6):47-49.
CHEN Guicui , ZHANG Lifeng , SUN Bo. Study on the testing method of the frictional performance of woven fabrics [J]. *Light and Textile Industry and Technology* ,2010 39(6):47-49.
- [27] 张立峰 ,陈贵翠. 浅析织物表面摩擦性能的研究方法 [J]. *山东纺织科技* 2010 51(6):38-40.
ZHANG Lifeng , CHEN Guicui. Analysis of the research method of frictional properties of fabric surface [J]. *Shandong Textile Science & Technology* ,2010 51(6):38-40.
- [28] 张立峰 ,孙博 ,陈贵翠. 机织物表面摩擦性能的检测系统分析研究 [J]. *轻纺工业与技术* ,2010 39(6):44-46.
ZHANG Lifeng , SUN Bo , CHEN Guicui. System analysis and study on the frictional performance of woven fabrics [J]. *Light and Textile Industry and Technology* ,2010 39(6):44-46.
- [29] HOWELL H G. 24: the general case of friction of a string round a cylinder [J]. *Journal of the Textile Institute Transactions* ,1953 ,44(8/9):359-362.
- [30] JUNG J H , PAN N , KANG T J. Generalized capstan problem: bending rigidity , nonlinear friction , and extensibility effect [J]. *Tribology International* ,2008 ,41(6):524-534.
- [31] RAMKUMAR S S , SHASTRI L , TOCK R W , et al. Experimental study of the frictional properties of friction spun yarns [J]. *Journal of Applied Polymer Science* ,2003 ,88(10):2450-2454.
- [32] 刘晓艳 ,陈美玉. 高性能纤维的摩擦系数测试研究 [J]. *中国纤检* 2002(6):43-45.
LIU Xiaoyan , CHEN Meiyu. Study on the friction coefficient of high performance fiber [J]. *China Fiber Inspection* 2002(6):43-45.
- [33] LANG J , ZHU S , PAN N. Frictional behavior of synthetic yarns during processing [J]. *Textile Research Journal* ,2003 ,73(12):1071-1078.
- [34] SVETNICKIENE V , C IUKAS R , C IUKAS R. Investigation of friction properties of yarns from natural fibers [J]. *Mechanics* ,2009 ,75(1):73-77.
- [35] KUHM D , BUENO M A , KNITTEL D. Fabric friction behavior: study using capstan equation and introduction into a fabric transport simulator [J]. *Textile Research Journal* ,2014 ,84(10):1070-1083.
- [36] 朱凡凡 ,卢雨正 ,郭明瑞 ,等. 涤纶赛络集簇纱摩擦性能研究 [J]. *棉纺织技术* 2017 45(1):35-39.
ZHU Fanfan , LU Yuzheng , GUO Mingrui , et al. Friction properties research of polyester siro condensed yarn [J]. *Cotton Textile Technology* ,2017 ,45(1):35-39.
- [37] ROSELMAN I C , TABOR D. The friction and wear of individual carbon fibers [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* ,1977 ,10(8):1181.
- [38] CORNELISSEN B , RIETMAN B , AKKERMAN R. Frictional behaviour of high performance fibrous tows: friction experiments [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* ,2013 ,44:95-104.
- [39] NIKONOVA E A , PAKSHVER A B. The friction properties of textile yarns [J]. *Fibre Chemistry* ,1973 ,4(6):657-660.
- [40] CHAKLADAR N D , MANDAL P , POTLURI P. Effects of inter-tow angle and tow size on carbon fiber friction [J]. *Composites Part A: Applied Science and*

- Manufacturing ,2014 ,65: 115 - 124.
- [41] 刘晓明,蒋金华,陈南梁,等. 玻璃纤维纱线的摩擦性能及其影响因素的研究 [J]. 产业用纺织品, 2008 (2): 28 - 32.
- LIU Xiaoming, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang, et al. Study of friction and wear of glass fiber yarn and its influencing factors [J]. Technical Textiles, 2008 (2): 28 - 32.
- [42] BEDEZ Ute T. A comparative study between the dynamic friction characteristics of compact and siro yarns [J]. Journal of Textile & Apparel, 2016, 26(1): 55 - 63.
- [43] GASSARA H E, BARBIER G, KOCHER C W, et al. Experimental evaluation of transverse friction between fibers [J]. Tribology International, 2018, 119: 112 - 122.
- [44] CORNELISSEN B, DE R M B, RIETMAN B, et al. Frictional behaviour of high performance fibrous tows: a contact mechanics model of tow-metal friction [J]. Wear, 2013, 305(1/2): 78 - 88.
- [45] CORNELISSEN B, DE R M B, RIETMAN B, et al. Frictional behavior of carbon fiber tows: a contact mechanics model of tow-tow friction [J]. Textile Research Journal, 2014, 84(14): 1476 - 1488.
- [46] YAO B, YANG Y, ZHANG Z, et al. Measurement system for characterizing surface friction properties of textile materials [J]. The International Society for Optical Engineering, 2013, 8916(8): 706 - 714.
- [47] 高瑞强. 基于 CHES-FY 系统的织物摩擦性能表征 [D]. 上海: 东华大学, 2014: 1 - 26.
- GAO Ruiqiang. Characterization of fabric friction performance by CHES-FY system [D]. Shanghai: Donghua University, 2014: 1 - 26.
- [48] 陈韦态. 湿度对弹性针织物摩擦系数的影响 [J]. 国外丝绸, 2009, 24(6): 8 - 9.
- CHEN Weitai. Effect of humidity on friction coefficient of elastic knitted fabric [J]. Silk Textile Technology Overseas, 2009, 24(6): 8 - 9.
- [49] 李辉, 杜建华, 王浩旭, 等. 碳纤维织物增强树脂基摩擦材料摩擦学性能研究 [J]. 功能材料, 2017, 48(4): 4100 - 4104.
- LI Hui, DU Jianhua, WANG Haoxu, et al. Research of tribological characteristics of resin matrix composites reinforced by woven fabric of carbon fiber [J]. Journal of Frictional Materials, 2017, 48(4): 4100 - 4104.
- [50] BAUSSAN E, BUENO M A, ROSSI R M, et al. Experiments and modelling of skin-knitted fabric friction [J]. Wear, 2010, 268(9/10): 1103 - 1110.
- [51] SUN F, GAO R, HU X, et al. Experimental study on an effective method for the friction property of fabrics by the comprehensive handle evaluation system for fabrics and yarns system [J]. Textile Research Journal, 2018, 88(8): 882 - 891.