

引用格式: 孟影, 吴宁, 袁志清, 等. PTFE 包覆连续氧化铝纤维缝纫线的磨损行为[J]. 航空材料学报, 2024, 44(4): 68-76.

MENG Ying, WU Ning, YUAN Zhiqing, et al. Wear behavior of PTFE-coated continuous alumina fiber sewing thread[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(4): 68-76.

PTFE 包覆连续氧化铝纤维缝纫线的磨损行为

孟 影^{1,2}, 吴 宁^{1,2*}, 袁志清³, 张一帆^{1,2}, 陈 利^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 复合材料研究院 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; 3. 石家庄海关技术中心, 石家庄 050000)

摘要: 结合上浆及二维编织技术制备部分包覆结构 F-3、F-4、F-5 连续氧化铝纤维缝纫线, 使用自研实验装置研究包覆结构对缝纫线与针孔间磨损行为的影响。使用 3D 轮廓仪表征不同包覆结构缝纫线的轮廓外观和摩擦作用下的损伤形态演变; 通过拉伸性能测试, 表征缝纫线在不同摩擦次数下的强度保持率; 通过磨断次数来评价缝纫线在不同实验参数下的磨损性能。结果表明: 包覆工艺参数的变化影响缝纫线表面轮廓的起伏状态, 导致磨损后断口产生的毛羽长度随着包覆纱根数的增多和编织节距的增加而增大; 相比原纱和浆纱, 缝纫线的耐磨性显著提高; 随着摩擦次数的增加, 缝纫线拉伸强度保持率均呈现快速下降后趋于平缓的趋势, 当摩擦次数达到 30 次时, F-3、F-4、F-5 缝纫线拉伸强度保持率分别为 12.89%、28.82%、18.35%; 随着摩擦距离、纱线张力的增加, 摩擦角度的减小, 缝纫线的磨断次数逐渐下降。

关键词: 连续氧化铝纤维; 缝纫线; 磨损; 包覆结构

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000232

中图分类号: V258⁺.3; TQ343⁺.41

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)04-0068-09

Wear behavior of PTFE-coated continuous alumina fiber sewing thread

MENG Ying^{1,2}, WU Ning^{1,2*}, YUAN Zhiqing³, ZHANG Yifan^{1,2}, CHEN Li^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Institute of Composite Materials, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Technology Center of Shijiazhuang Customs District, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Combined with sizing and two-dimensional knitting technology, continuous alumina fiber sewing threads with partial covering structures of F-3, F-4 and F-5 were prepared, and the effect of covering structure on the wear behavior between sewing threads and pinholes was studied by using a self-developed experimental device. The contour appearance of sewing threads with different coating structures and the damage morphology evolution under friction were characterized by 3D profilometer. Through the tensile tests, the strength retention rate of sewing thread under different rubbing times was characterized. The wear performance of sewing thread under different experimental parameters was evaluated by the number of wear breaks. The results show that the change of coating process parameters affects the fluctuation state of sewing thread surface profile, which leads to the increase of hairiness length after wear with the increase of coating yarn number and knitting pitch. Compared with the original yarn and sizing yarn, the wear resistance of sewing thread is significantly improved. With the increase of rubbing times, the strength retention rate of sewing thread shows a rapid decline and then tends to be flat. When rubbing times reach 30 times, the strength retention rates of F-3, F-4 and F-5 sewing threads are 12.89%, 28.82% and 18.35% respectively. With the increases of friction distance and yarn tension and the decrease of friction angle, the number of wear-out of sewing thread decreases gradually.

Key words: continuous alumina fiber; sewing thread; wear; semi-coated structure

连续氧化铝纤维因其优异的力学性能、高的热稳定性和固有的抗氧化性,可作为耐高温结构复合材料的纤维增强体,在超高温隔热防护方面有广泛应用前景,为航空航天、汽车、工业等应用领域问题提供新的解决方案^[1-3]。在复合材料预制体成型技术中,缝合技术因其自动化程度高,可快速成型的优势而被广泛应用。缝合技术是指在厚度方向上引入缝纫线使多层织物连接成三维立体织物的技术,可以极大改善复合材料的层间损伤容限^[4]。然而连续氧化铝纤维缝纫线因本身固有的脆性和相应的低损伤容限,使其无法承受织物和针孔的摩擦作用,因此增强连续氧化铝纤维缝纫线的耐磨性至关重要^[5-6]。

提高缝纫线耐磨性常见的方法有:二次上浆^[7-8]、纱线加捻^[9-10]、混合纺纱^[11-12]、二维管状编织^[13-15]等。其中纤维上浆是一种增强耐磨性的常用方法,纤维经过上浆处理后,其表面形成耐磨保护层而使纱线具有更高的耐磨性。二维编织结构由编织纱和芯纱两部分相接触但不连接的纤维构成,芯纱处于伸直平行的状态,编织纱对芯纱包缠紧密、牢固^[16],二维编织的扭转平衡结构增加了其应力分布的均匀性和耐磨性,使其与传统加捻丝束相比得到了更广泛的应用^[17]。

目前针对缝纫线耐磨性测试的问题,国内外学者通过特定的实验装置对其进行了针对性的研究。牛天军等^[18]采用曲柄滑块机构自制摩擦仪模拟缝纫线与缝合针间的摩擦,自制摩擦仪主要通过缝纫线磨断的往复次数来评价缝纫线的耐磨性。王东宁等^[19]采用 TM 式丝抱合力试验机对碳纤维缝纫线试样进行耐磨性测试,该装置通过钢针的共同左右往复移动对试样进行摩擦,并在计时器上显

示摩擦次数,这种摩擦方式可以模拟缝纫线在缝合过程中既受到拉力又受到摩擦力的情况。Munshi 等^[20]研制了一套实验方法并将其应用在磨损试验机上,对粗、中和细三种典型的缝纫线的断裂强度和耐磨性进行了测试,并利用扫描电子显微镜 (SEM)对磨损后的表面结构进行了研究。孙宝忠等^[21]为研究缝纫线在缝纫前后表面特性的变化,自制缝纫线耐磨仪,主要探究缝纫线/缝纫线间和缝纫线/缝合针间的摩擦损伤。然而,目前用于模拟实际缝合工况中针孔与连续氧化铝纤维缝纫线之间磨损行为的研究鲜见文献报道。

本工作通过上浆及二维编织技术制备表面部分包覆的连续氧化铝纤维缝纫线^[22],同时利用自制的模拟缝纫线/针孔间摩擦工况的实验装置,研究不同包覆结构缝纫线在摩擦作用下的损伤过程演变、摩擦次数对缝纫线拉伸强度保持率的影响及实验参数对缝纫线磨损性能的影响。通过 3D 轮廓仪观察缝纫线不同包覆结构的表面起伏波动情况及摩擦后纤维束的毛羽分布情况,采用 SEM 扫描电镜表征氧化铝纤维单丝的摩擦断裂损伤形式,通过拉伸性能测试研究缝纫线摩擦后强度保持率的变化。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

连续氧化铝纤维,由东珩国纤新材料有限公司生产,其参数见表 1。采用自制改性 TPU 上浆剂,对纤维进行二次上浆处理,上浆率为 15%。缝纫线的包覆纤维为聚四氟乙烯纤维,线密度为 500D,纱线强力为 16.23 N,线径为 0.175 mm^[23],由杭州钧力线带有限公司生产。

表 1 连续氧化铝纤维参数
Table 1 Parameters of continuous alumina fiber

Linear density/ tex	Twist/ (twist · m ⁻¹)	Average breaking strength/ N	Density/ (g · mL ⁻¹)	Monofilament diameter/μm	Ply yarn/number of strands
200	110	≥50	2.9-3.2	13	Triple yarn

1.2 缝纫线试样制备

图 1 为连续氧化铝纤维缝纫线制备过程示意图,将 400 tex 连续氧化铝纤维浸过自制上浆剂进行二次上浆处理,再通过 24 锭二维编织机将聚四氟乙烯纤维作为包覆纱包覆在连续氧化铝纤维表面。为保证连续氧化铝纤维作为缝纫线主体,控制其质量占比不低于 50%,通过计算得出,包覆纱的

股数最多为 5 股。分别选择 3 股、4 股和 5 股的包覆纱制备三种不同包覆结构的连续氧化铝纤维缝纫线,通过设定不同的编织节距来保证三种缝纫线表面覆盖率为 34% 左右,研究耐磨性最优的部分包覆结构,实验参数见表 2。

1.3 耐磨性实验

图 2 为自制的摩擦装置示意图。此装置主要

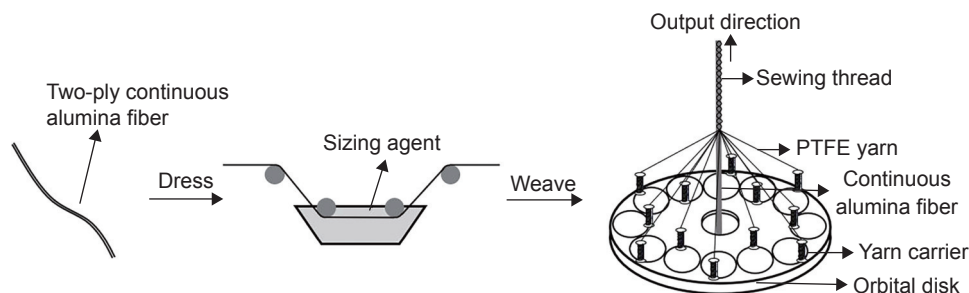


图1 缝纫线制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sewing thread preparation process

表2 缝纫线相关参数

Table 2 Sewing thread related parameters

Number	Woven yarn/number of strands	Weaving pitch/mm	Linear density/tex	Weaving angle/(°)	Coverage coefficient/%
F-3	3	2	684.3	44.5	33.97
F-4	4	6	720	17.5	34.93
F-5	5	19	772.3	5.5	34.79

模拟缝合过程中缝纫线/针孔间摩擦工况,主要由磨头、滑块、导纱孔、导轮、砝码和控制面板组成。为接近实际缝合过程中的摩擦行为,设计磨头的半径为 0.22 mm,与缝合针针尖的半径一致,磨头的

材质选用 Cr12MoF。导纱孔固定在标尺上,通过调节导纱孔的位置,实现摩擦角度的变化。导轮对称固定在装置两侧以控制缝纫线和砝码的稳定运动。

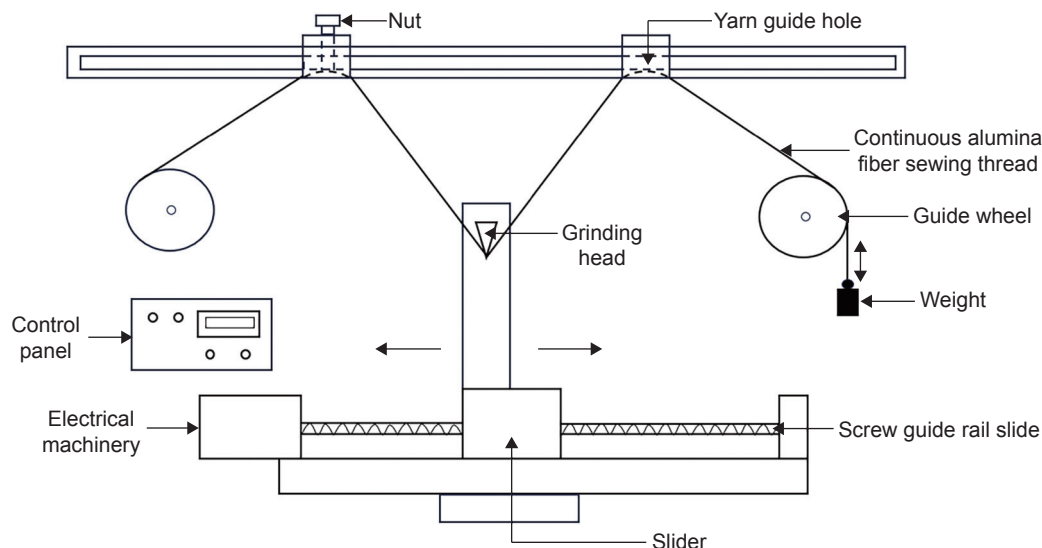


图2 摩擦装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of friction device

操作过程:裁取 70 cm 的试样,将缝纫线一端从导纱孔穿过,使用螺母将其固定,再将缝纫线另一端绕经磨头,穿过另一侧导纱装置,由砝码控制张力。实验开始时,启动实验装置,滑块带动磨头与缝纫线发生相对运动,实现对缝纫线的摩擦测试,当缝纫线磨断后,停止测试,记录缝纫线摩擦次数。

通过大量预实验,发现将摩擦实验装置的纱线张力、摩擦速率、摩擦距离、摩擦角度等参数分别设定为 0.8 N、200 次/min、100 mm、75°时,表面状态的差异较为显著。

1.4 缝纫线表面形貌表征

使用 3D 轮廓仪观察三种包覆结构缝纫线在摩擦前后的表面轮廓及毛羽分布情况,对缝纫线磨损

前后的形貌进行图像表征。采用 SEM 扫描电镜观察连续氧化铝纤维磨损后的表面形貌特征,样品用双面导电胶带固定在方形不锈钢支架上。

1.5 拉伸性能

为测试三种缝纫线磨损后的拉伸性能,在自制的摩擦装置上对缝纫线进行一定次数的摩擦后,利用岛津 AGS-J 1KN 万能强力机对其进行拉伸强度

测试,通过统计剩余拉伸强度来表征缝纫线的损伤程度,测试标准参考 GB/T 3362—2017《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》。拉伸试样如图 3 所示,在缝纫线两端采用环氧树脂胶粘贴纸质加强片,拉伸试样的有效长度为 150 mm,测试速度为 20 mm/min,为防止测试误差,每种试样测试 10 个,计算其平均值。

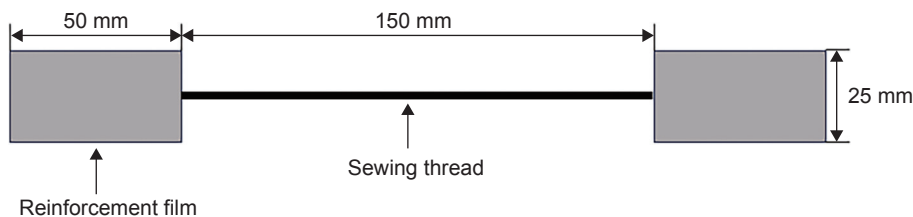


图 3 拉伸装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stretching device

拉伸强度保持率:

$$K = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为拉伸强度保持率; σ_1 为磨损后缝纫线的拉伸强度; σ_0 为未磨损缝纫线的拉伸强度。

2 结果与讨论

2.1 磨损对缝纫线宏微观形貌演变的影响

2.1.1 缝纫线表面形貌对比

图 4 为缝纫线表面形貌和表面起伏波动曲线。由图 4 可知, F-3 缝纫线包覆结构为一根包覆纱交替并重复覆盖两根包覆纱, 包覆纱的浮动长度较短, 结构较紧密。F-4 缝纫线表面结构为两根包覆纱分别交替并重复覆盖单根包覆纱, 缝纫线表面

包覆纱分布较均匀。F-5 缝纫线表面结构为两根包覆纱分别交替并重复覆盖三根包覆纱, 包覆纱的浮动长度较长, 交织点处纱线的堆积数量较多。三种缝纫线表面呈现出不同的起伏波动, 由于包覆结构的不同所造成的表面起伏波动周期不同。通过对比可以看出, F-3 缝纫线和 F-4 缝纫线表面起伏存在规律性, 且波动周期较短, 说明缝纫线的结构稳定, 各部分性能差异不大。而 F-5 缝纫线因较大的编织节距, 使其表面起伏无明显规律, 聚四氟乙烯纤维在缝纫线轴向上由螺旋状逐渐变成较平直状, 推断其与连续氧化铝纤维严重分离, 缝纫线的结构较松散, 不稳定。

2.1.2 磨损后缝纫线表面形貌对比

图 5 为三种缝纫线不同摩擦次数下的磨损形态。由图 5 可以看出, 随着摩擦次数的增加, 磨损

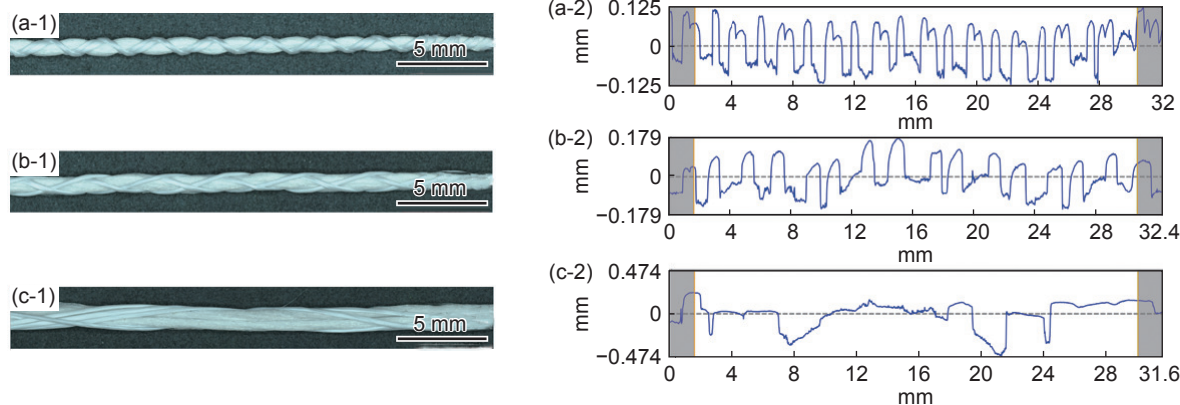


图 4 缝纫线表面形貌和表面起伏波动曲线 (a) F-3; (b) F-4; (c) F-5; (1) 表面形貌; (2) 起伏波动曲线

Fig. 4 Surface topographies and surface fluctuation curves of sewing thread (a) F-3; (b) F-4; (c) F-5; (1) surface morphologies; (2) fluctuation curves

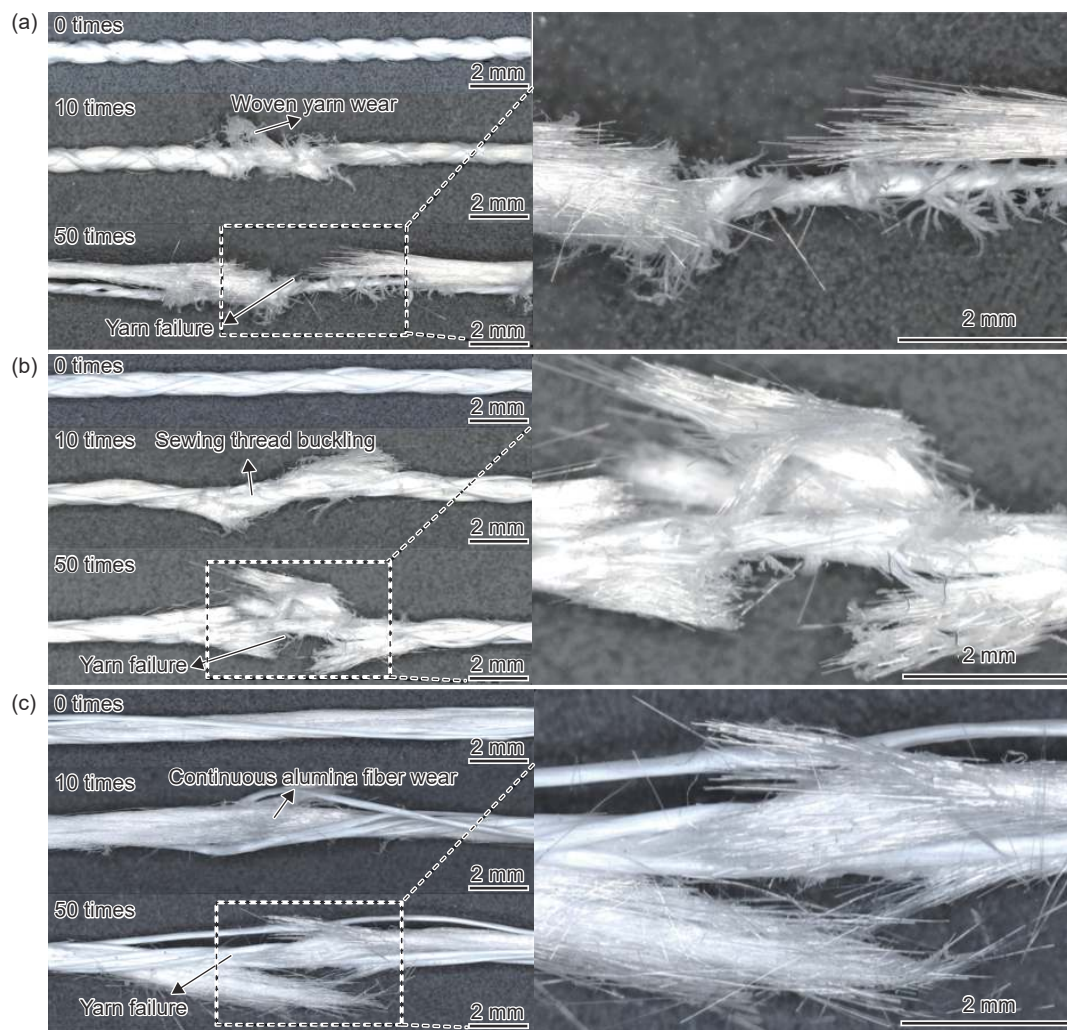


图5 三种缝纫线不同摩擦次数下的磨损形态示意图 (a)F-3; (b)F-4; (c)F-5

Fig. 5 Wear pattern diagrams of three kinds of sewing thread under different friction times (a)F-3; (b)F-4; (c)F-5

程度逐渐增加^[24],当摩擦达到一定次数后,连续氧化铝纤维断裂,缝纫线失效,仅剩包覆纱。

由图5(a)看出, F-3 缝纫线在摩擦初期缝纫线结构未被破坏,但上层包覆纱发生磨损,产生部分毛羽,连续氧化铝纤维磨损程度较小。随着摩擦次数的不断增加,连续氧化铝纤维磨损严重,从包覆纱中抽离出来,缝纫线失效。摩擦过程中产生的部分毛羽与包覆纱缠结在一起,缝纫线磨损处纤维断口整齐,毛羽较短。

由图5(b)看出, F-4 缝纫线在摩擦初期,缝纫线整体结构较完整。当缝纫线以一定角度弯折并与磨头摩擦接触过程中,磨头的往复移动使连续氧化铝纤维产生滑移,缝纫线结构形态发生变化,但整体损伤不明显,产生的毛羽较少。在经过一定次数摩擦后,连续氧化铝纤维发生断裂,缝纫线失效,磨损处两侧纤维均呈现整齐的断面,有大量毛羽脱落。

由图5(c)看出, F-5 缝纫线在摩擦初期因磨头的摩擦作用使连续氧化铝纤维与包覆纱分离。在

经过一定次数摩擦后,连续氧化铝纤维发生断裂,缝纫线结构失效,但包覆纱的损伤不明显。缝纫线磨损断裂处两侧纤维毛羽较长,且呈现出扇形的分散形态,与未磨损纤维相比,疏密分布差别较大。

为探究 F-3、F-4 和 F-5 缝纫线磨损形态的具体原因,对比三种缝纫线的磨损过程。图6为三种缝纫线磨损模型示意图。三种缝纫线在编织过程中,具有相同的编织速度,不同的编织节距和编织角。在相同的编织速度条件下,编织节距越小,包覆纱在编织过程中所受的张力越大,对连续氧化铝纤维的包裹越紧密。从缝纫线的磨损形态来看, F-3 和 F-5 缝纫线的连续氧化铝纤维在摩擦过程中保持平直。F-3 缝纫线的编织节距最小,因此在摩擦过程中连续氧化铝纤维变形能力差,不易产生滑移。同时由于 F-3 缝纫线包覆纱的角度(编织角)较大,在磨头与包覆纱接触时,磨头移动时产生的阻力较大,对缝纫线的磨损较严重,因此包覆纱也出现了明显的断纱现象。F-5 缝纫线编织节距较大,编织

角较小, 较小的编织角使包覆纱与磨头间的摩擦力变小, 但由于包覆纱的浮动长度较长且包覆结构较松散, 从而产生露芯现象, 易出现薄弱部分。因此在摩擦过程中缝纫线的完整性易被破坏, 结构形态变差, 致使包覆纱嵌入到纤维中, 纤维暴露出来与磨头直接接触。随后, 暴露的连续氧化铝纤维直接

受到磨头的强烈磨损, 当其不能承受反复的摩擦作用时, 就会发生断裂。F-4 缝纫线由于良好的包覆结构, 包覆纱对纤维的包裹力较小, 使连续氧化铝纤维具有一定的变形能力但缝纫线的完整性未被破坏, 从而使缝纫线发生屈曲, 增加了摩擦接触面, 缝纫线损伤较小^[25]。

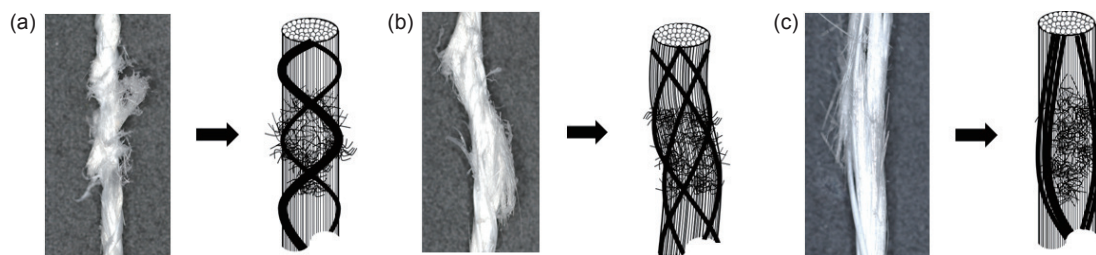


图6 三种缝纫线磨损模型示意图 (a)F-3; (b)F-4; (c)F-5

Fig. 6 Wear models of three kinds of sewing thread (a)F-3; (b)F-4; (c)F-5

2.1.3 单丝摩擦磨损断面分析

图7为连续氧化铝纤维摩擦断裂后的扫描电镜图。由图7(a)可以清楚地观察到在摩擦过程中, 连续氧化铝纤维呈现出复杂的磨损状态和断裂形式。由图7(b)看到实验过程中磨头对浆膜的摩擦作用, 包覆在纤维表面的浆膜产生了明显的磨

痕。同时在纤维断裂过程中, 纤维出现了断面整体凹陷、断面凹凸不平 and 楔形断面等多种断裂形态(图7(c)~(e))。此外, 在纤维反复摩擦过程中很可能由于磨头较尖锐, 摩擦力、张力及剪切力等综合作用下造成纤维局部受力, 使纤维内部断裂不同时, 出现如图7(f)所示的块状纤维脱落。

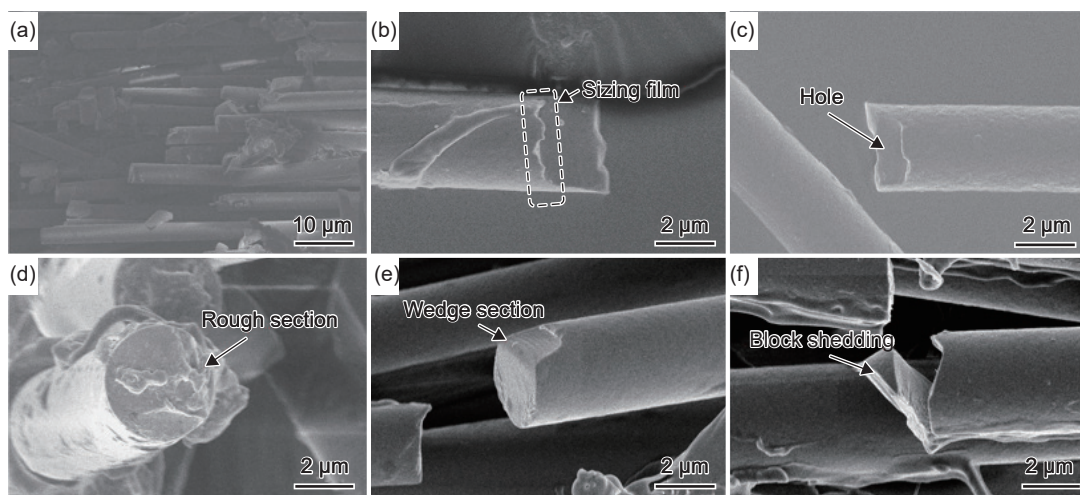


图7 连续氧化铝纤维摩擦断裂后的截面和表面形貌 (a)纤维断裂; (b)浆膜脱落; (c)孔洞; (d)粗糙截面; (e)楔形断面; (f)块状脱落

Fig. 7 Cross-sections and surface morphologies of continuous alumina fiber after friction fracture (a) fiber breakage; (b) sizing film; (c) holes; (d) rough section; (e) wedge section; (f) mass shedding

2.2 磨损对缝纫线拉伸强度的影响

2.2.1 缝纫线初始拉伸强度

图8为不同包覆结构缝纫线的拉伸强度。为使缝纫线之间具有可比性, 已将表面包覆纱去除。由图8可知, 连续氧化铝纤维在表面编织包覆纱后对其拉伸性能影响较小, 拉伸强度较浆纱略有降低

但均高于原纱。可见纤维经过上浆处理后一定程度上减少了编织过程造成的损伤。F-4 缝纫线和 F-5 缝纫线的拉伸强度相接近, F-3 缝纫线较 F-4 缝纫线的拉伸强度减小了 3.10%。主要原因可能是 F-3 缝纫线由于编织节距小, 包覆纱张力较大, 在编织过程中包覆纱对纤维造成的损伤也较大, 导致其

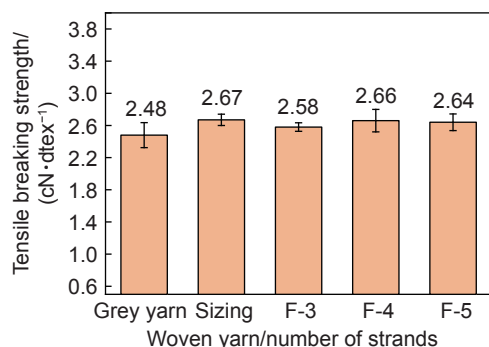


图8 缝纫线拉伸强度

Fig. 8 Tensile breaking strength of sewing thread

拉伸强度有所降低。

2.2.2 磨损后缝纫线的拉伸强度保持率

图9为缝纫线经不同摩擦次数后的拉伸强度保持率。由图9可知,缝纫线的拉伸强度保持率随着摩擦次数的增加均呈现出明显的下降趋势。

试样在经过10次摩擦后,原纱和浆纱均已发生断裂,而三种缝纫线的强度保持率较原纱和浆纱提高了50%左右。说明连续氧化铝纤维表面编织包覆纱后,其耐磨性显著提高。当经过30次摩擦时,三种缝纫线的强度保持率分别为12.89%、28.82%、18.35%。在摩擦次数超过30次后,F-3和F-5缝纫线的强度保持率趋于平稳。由上文分析可知,缝纫线拉伸强度主要依靠连续氧化铝纤维,但由于连续氧化铝纤维的耐磨性较差,在包覆纱保护

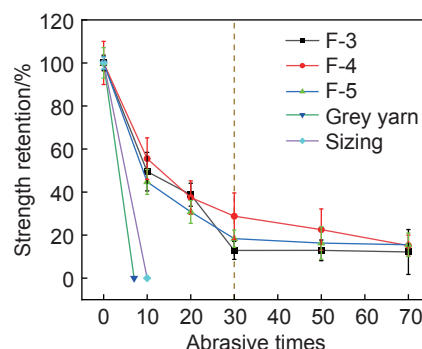


图9 缝纫线拉伸强度保持率

Fig. 9 Tensile strength retention rate of sewing thread

的情况下,其损伤仍比包覆纱严重,所以在摩擦过程中连续氧化铝纤维先发生断裂。此时F-3、F-5缝纫线中连续氧化铝纤维已磨损严重,测得的拉伸强度主要是包覆纱的拉伸强度。F-4缝纫线在摩擦次数超过30次后,其强度保持率仍有下降,说明F-4缝纫线耐磨性最好。

对比F-3、F-4和F-5缝纫线在摩擦30次之前的剩余强度保持率,可以发现在前10次摩擦中,F-5缝纫线的拉伸强度下降最快,强度保持率降低为45%。摩擦次数在20~30次之间时,F-3缝纫线的拉伸强度下降最快,强度保持率降低为12.1%。

2.3 实验参数对缝纫线磨损性能的影响

图10为不同实验参数下缝纫线磨断次数。由图10(a)可知,缝纫线的磨断次数随着摩擦角度的

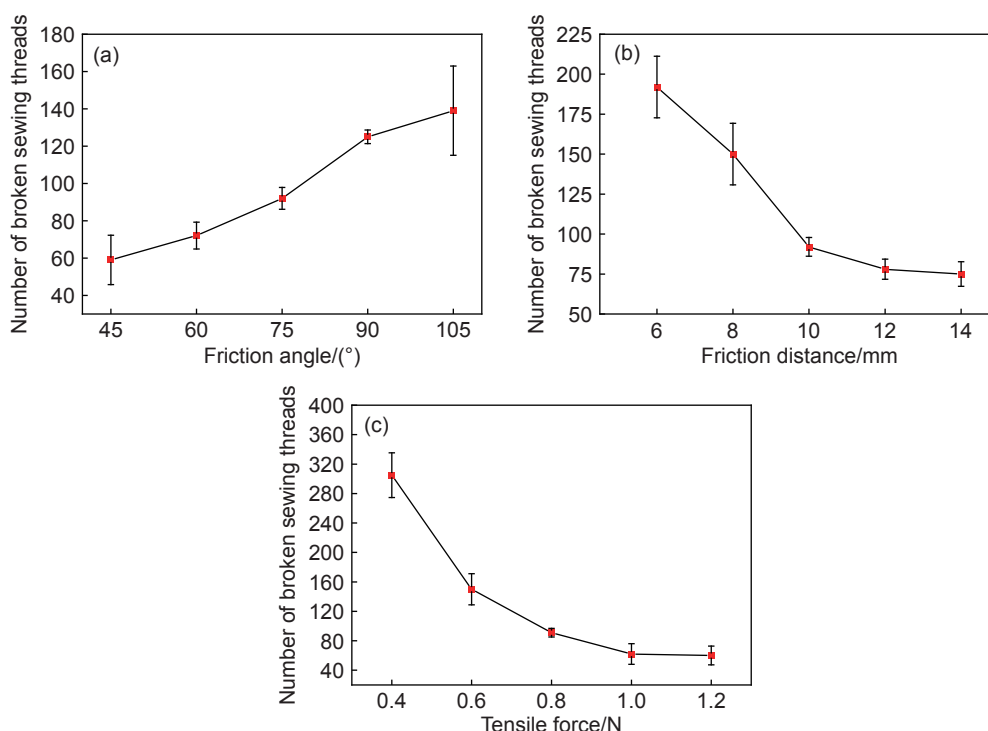


图10 实验参数对缝纫线磨断次数的影响 (a)摩擦角度;(b)摩擦距离;(c)张力

Fig. 10 Effects of experimental parameters on number of thread breaks (a)friction angle; (b)friction distance; (c)tensile force

增加而逐渐增加,从误差分析中可以看出,摩擦角度过大或过小,都可能造成缝纫线磨损性能的不稳定。由图 10(b)可知,缝纫线的磨断次数随着摩擦距离的增加而逐渐下降,当摩擦距离超过 10 mm 时,随着摩擦距离的增加,缝纫线的磨断次数下降缓慢。由图 10(c)可知,在摩擦实验中,对缝纫线施加的张力越大,缝纫线的磨断次数越少。其中当张力由 0.4 N 变为 0.6 N 时,缝纫线的磨断次数下降最快,下降了约 50%。

3 结论

(1)制备了三种不同包覆结构的连续氧化铝纤维缝纫线,通过上浆和二维编织技术提高其耐磨性,使用自制的摩擦装置模拟缝纫针对缝纫线的摩擦损伤,缝纫线因包覆结构不同而呈现出不同的损伤形貌。随着编织节距的增大和编织纱股数的增加,缝纫线断口处毛羽长度逐渐增大。连续氧化铝纤维出现了断面整体凹陷、断面凹凸不平、楔形断面和块状纤维脱落等多种断裂形态。

(2)部分包覆缝纫线相较原纱和浆纱,其拉伸性能变化不明显,但其耐磨性显著提高。在经过 10 次摩擦后,原纱和浆纱均已断裂,缝纫线的强度保持率较原纱和浆纱提高了 50% 左右。在经过 30 次摩擦后,三种缝纫线的剩余断裂强度保持率分别为 12.89%、28.82%、18.35%,F-4 缝纫线表现出更好的耐磨性。

(3)摩擦角度、摩擦距离和纱线张力参数的设定对缝纫线的磨损性能有一定的影响,缝纫线的磨断次数随着摩擦角度的增加而逐渐增加,随着摩擦距离和纱线张力的增加逐渐减小。

参考文献:

- [1] STEINHAUSER U B W, GORING J, et al. A new concept for thermal protection of all-mullite composites in combustion chambers[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2000, 20(5): 651-658.
- [2] CLAUSS B, SCHAWALLER D. Modern aspects of ceramic fiber development[J]. *Advances in Science and Technology*, 2006, 50: 1-8.
- [3] SCHOLZ H, VETTER J, HERBORN R, et al. Oxide ceramic fibers via dry spinning process-from lab to fab[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2020, 17(4): 1636-1645.
- [4] 王显峰, 高天成, 肖军. 复合材料缝合技术的研究进展[J]. *纺织学报*, 2019, 40(12): 169-177.
- [5] WANG H F, GAO T C, XIAO J. Research progress of stitching technology of composite materials[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(12): 169-177.
- [6] PFEIFER S, DEMIRCI P, DURAN R, et al. Synthesis of zirconia toughened alumina(ZTA) fibers for high performance materials[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(3): 725-731.
- [7] 吴宁, 杨宏宇, 朱超, 等. 捻度对石英纤维缝合线磨损行为的影响[J]. *天津工业大学学报*, 2021, 40(4): 45-51.
- [8] WU N, YANG H Y, ZHU C, et al. Effect of twist on wear behavior of quartz sewing thread[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2021, 40(4): 45-51.
- [9] REIFLER F A, SANCHEZ F A L, CLEMENS F J, et al. Flexible ceramic-reinforced polyurethane composite coatings on synthetic fibers: process of continuous liquid film coating and its influence on the coating thickness[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(8): 1207-1213.
- [10] XIE K, XU Y, SHEN H, et al. Effect of coating process on morphology, bending rigidity and wearability of polyester harness cords[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, 50(2): 187-204.
- [11] RUDOLF A, GERSAK J, UJHELYIOVA A, et al. Study of PES sewing thread properties[J]. *Fibers and Polymers*, 2007, 8: 212-217.
- [12] MA J, FAN B, GAO Y, et al. Effects of Kevlar® 29 yarn twist on tensile and tribological properties of self-lubricating fabric liner[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2017, 46(8): 1698-1714.
- [13] 王灿灿. 基于包芯复合纱线的产品开发及其性能研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2019.
- [14] WANG C C. Product development and property research of core-spun composite yarn[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2019.
- [15] ZHANG Y, GHASEMZADEH S, KOTLIAR A M, et al. Fibers from soybean protein and poly(vinyl alcohol)[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 71(1): 11-19.
- [16] OGALE A, MITSCHANG P. Tailoring of textile preforms for fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2004, 34(2): 77-96.
- [17] 王荣荣, 马崇启, 黄故. 丙纶/玻璃纤维包芯纱的研制[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2007(3): 41-44.
- [18] WANG R R, MA C Q, HUANG G. Investigation of polypropylene/glass core spun yarn[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2007(3): 41-44.
- [19] PEREIRA M A, CHIMISSO F E G. Synthetic ropes jackets made of polyester and high modulus polyethylene(HMPE): comparison of abrasion wearing behavior[C]// The 9th youth symposium on experimental solid mechanics. Trieste, Italy: [s. n.], 2010: 7-9.

- [16] 赵倩娟, 焦亚男. 二维编织包芯绳索的结构与拉伸性能[J]. *纺织学报*, 2012, 33(3): 48-52.
ZHAO Q J, JIAO Y N. Structure and tensile properties of 2-D braided cored rope[J]. *Journal of Textile Research*, 2012, 33(3): 48-52.
- [17] DAVIES P, DURVILLE D, DO V T. The influence of torsion on braided rope performance, modelling and tests[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 417-423.
- [18] 牛天军, 陈南梁. 复合材料用缝合线的拉伸与摩擦性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2008(2): 16-19.
NIU T J, CHEN N L. Research of the drawing and abrasion property of sewing yarn used in composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2008(2): 16-19.
- [19] 王东宁, 焦亚男. 二维编织碳纤维缝合线耐磨性能的研究[J]. *天津工业大学学报*, 2008, 27(6): 11-14.
WANG D N, JIAO Y N. Abrasion properties of 2D braided carbon fiber sewing thread[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2008, 27(6): 11-14.
- [20] MUNSHI V G, PAI S D, UKIDVE A V. Studies on abrasion of sewing threads with scanning electron microscopy[J]. *Textile Research Journal*, 1982, 52(12): 776-779.
- [21] 孙宝忠, 宁福军. 缝纫线表面特性与缝纫质量的关系的研究[J]. *国际纺织导报*, 2002(3): 81-84.
SUN B Z, NING F J. Investigation on surface characteristic of sewing thread after and before sewing[J]. *Melliand China*, 2002(3): 81-83.
- [22] 吴宁, 孟影, 侯琦琳, 等. 一种半包覆结构连续氧化铝纤维复合缝纫线的制备方法: CN202211353684.4[P]. 2022-12-30.
WU N, MENG Y, HOU Q L, et al. Preparation method of continuous alumina fiber composite sewing thread with semi-coated structure: CN202211353684.4 [P]. 2022-12-30.
- [23] 崔兰芳, 孙永兴. 耐磨自润滑材料的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2009, 22(1): 62-67.
CUI L F, SUN Y X. Study on wear-resistant self-lubricating materials[J]. *Journal of Liaocheng University (Nat Sci)*, 2009, 22(1): 62-67.
- [24] BUENO M A, LAMY B, RENNER M. Effect of grain size and abrasion duration on the state of textile fabric surfaces[J]. *Wear*, 2002, 253(3/4): 448-457.
- [25] TOURLONIAS M, BUENO M A. Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process[J]. *Composites Part A*, 2016, 80: 228-236.

收稿日期: 2023-12-29; 修订日期: 2024-01-29

基金项目: 天津市海河实验室科学研究项目(22HHXCJC00007)

通讯作者: 吴宁(1981—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为高性能纤维及织物成型加工中的损伤评价与改善、纺织结构复合材料, 联系地址: 天津市西青区精武镇宾水西道399号天津工业大学(300387), E-mail: wuning@tiangong.edu.cn

(责任编辑: 徐永祥)