

EKS 纤维与腈纶纤维的结构及性能对比研究

谢冰冰¹,冯隆隆¹,张瑞云^{1,2*},方斌³,伍枝平⁴

(1.东华大学 纺织学院 纺织面料技术教育部重点实验室,上海 201620;2.上海市纺织智能制造与工程
一带一路国际联合实验室,上海 201620;3.绍兴禾素时代抗菌材料科技有限公司,浙江 绍兴 312000;
4.杭州天晨新材料科技有限公司,浙江 杭州 311200)

摘要:EKS 纤维是一种具有显著吸湿发热性能的亚丙烯酸盐系纤维。对比了 EKS 纤维和腈纶纤维的表面形态,测试与分析了两种纤维的力学性能、摩擦性能、比电阻、卷曲性能、吸放湿性能及吸湿发热性能。结果表明,相比于腈纶纤维,EKS 纤维横截面为圆形,纵向结构粗糙,具有断裂强度、摩擦系数、比电阻和卷曲率小,线密度、断裂伸长率和回潮率大等特点。EKS 纤维的吸、放湿速率随时间呈指数形式衰减,纤维的初始吸、放湿速率分别为 $0.39\% \text{ min}^{-1}$ 、 $8.94\% \text{ min}^{-1}$,达到吸、放湿平衡所用时间比腈纶纤维长。EKS 纤维具有较好的吸湿发热性,吸湿发热最高升温值为 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,比腈纶纤维高 $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
关键词:EKS 纤维;腈纶纤维;形态结构;性能测试;吸湿发热;吸放湿性能

中图分类号:TS102.5

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2023)03-0069-09

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Comparison of structure and properties of EKS and acrylic fibers

XIE Bingbing¹,FENG Longlong¹,ZHANG Ruiyun^{1,2*},FANG Bin³,WU Zhiping⁴

(1. Key Laboratory of Textile Fabric Technology, Ministry of Education, College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Belt and Road Joint Laboratory of Textile Intelligent Manufacturing, Shanghai 201620, China;
3. Shaoxing Bioserica Era Antibacterial Material Technology Co., Ltd., Shaoxing 312000, China;
4. Hangzhou Tianchen Advanced Material Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract : EKS fiber is a subacrylate fiber with significant hygroscopic-heating properties. In this study, the surface morphologies of EKS and acrylic fibers were compared, and their mechanical properties, friction properties, specific resistance, curling properties, moisture absorption and liberation properties, and hygroscopic-heating properties were tested and analyzed. The results showed that compared with the acrylic fiber, the EKS fiber featured a circular cross section and rough longitudinal structure as well as low breaking strength, friction coefficient, specific resistance and curl rate; moreover, it featured a high linear density, elongation at break, and moisture recovery rate. With the initial absorption rate and liberation rate being $0.39\% \text{ min}^{-1}$ and $8.94\% \text{ min}^{-1}$, respectively, the moisture absorption and liberation rates of the EKS fiber decreased exponentially with time, and the time required to achieve the absorption and liberation balance was

收稿日期:2022-09-06

基金项目:上海市科学技术委员会科技创新行动计划“一带一路”国际合作项目(21130750100)

作者简介:谢冰冰(1998—),女,硕士研究生,研究方向为吸湿匀缓发热面料开发。E-mail: xiebing49@163.com

* 通信作者,张瑞云,女,教授,研究方向为新型纤维面料设计与开发、纺织 CAD 技术等。Tel: 15221999857, E-mail: ryzhang@dhru.edu.cn

longer than that for the acrylic fiber. The EKS fiber exhibited good hygroscopic-heating properties with a maximum hygroscopic-heating value of 8.2 °C, which was 4.7 °C higher than that for the acrylic fiber.

Key words : EKS fiber; acrylic fiber; morphological structure; performance testing; hygroscopic-heating; moisture absorption and liberation properties

随着生活水平的提高,人们越来越关注纺织品的功能性和舒适性。吸湿发热材料通过吸收空气中或人体所散发的水蒸气,将其转化成液态放热以达到保暖的目的^[1]。在低温、湿冷的秋冬季节,吸湿发热材料的合理运用可以在不增加织物厚度的情况下给人体补充热量,减少皮肤因为汗液蒸发而产生的湿冷感^[2],有很好的应用前景。目前市面上有许多不同种类的吸湿发热纤维材料,包括改性腈纶纤维、改性聚丙烯酸纤维、亚丙烯酸盐系纤维及超细旦抗起球腈纶等^[3-4]。

应用吸湿发热纤维开发具有热湿舒适性的保暖面料是国内外研究的热点之一。吸湿发热纤维中的 EKS 纤维(亚丙烯酸盐系纤维),是日本东洋纺公司开发的化学纤维材料^[5],属于腈纶基纤维。其原理是通过交联反应将大量的氨基、羧基、羟基和氰基等亲水基团引入到聚丙烯酸分子上^[1],使纤维的回潮率大幅度提高,达到 26%。该纤维内部结构形似蜂窝,有利于水分的附着,可迅速吸收人体产生的汗液或汗气并产生热量,达到发热保暖的效果。EKS 纤维还具有调控 pH 值、阻燃、抗起球和防静电等多种功能^[6]。目前,国内外已经有许多学者对 EKS 纤维的成分鉴别、纺纱工艺的配置、产品的开发与应用等方面进行了深入研究。刘启滨等^[7]利用燃烧法、显微镜法、溶解法等检验方法对 EKS 纤维进行成分鉴别,得出 EKS 纤维燃烧后不熔不缩、有特殊气味,且具有特有的中红外吸收光谱图等特点,为 EKS 纤维的快速鉴别提供了有效方法。朱伟俊等^[5]采用赛络纺生产了混纺比为 40:35:25 的精梳长绒棉/超细腈纶/EKS 针织纱,纱线质量符合要求。黄学水等^[8]将 EKS 纤维与黏胶纤维进行混纺,并以此混纺纱、双抗腈纶纱和锦纶包氨纶纱为原料,制备了胖花罗纹组织结构的针织内衣面料,该面料具有较好的保暖效果,吸湿放热最高升温值达 4.6 °C。但是前人研究中,对 EKS 纤维的性能,特别是吸湿性能的研究较少。

为了解 EKS 纤维与其他腈纶基纤维在形态结构及性能上的区别,本文选取腈纶纤维为对比纤维,对两种纤维的线密度、微观形态、力学性能、摩擦性能、比电阻、卷曲性能、回潮率、吸放湿性能以及吸湿发热性能进行了测试与分析,对比 EKS 纤维与腈纶纤维在不同性能方面的优劣性,并建立 EKS 纤维的吸、放湿速率回归方程,为后续 EKS 纤维的合理开发与应用提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

普通腈纶纤维(名义线密度为 1.11 dtex,名义长度 38 mm,上海日舒科技纺织有限公司);EKS 纤维(名义线密度为 1.11 dtex,名义长度 35 mm,山东陵县恒丰有限公司)。

1.2 实验仪器

Y171 型纤维切断器(常州第二纺织机械厂),TM3000 台式扫描电子显微镜(株式会社日立制作所),LLY-06E 型电子纤维强力仪(莱州市电子仪器有限公司),XCF-1A 型纤维摩擦系数测试仪(上海新纤仪器有限公司),XR-1A 型纤维比电阻测试仪(上海新纤仪器有限公司),YG362B 型纤维卷曲弹性仪(太仓宏大纺织仪器有限公司),YG747 通风式快速八篮烘箱(陕西长岭纺织机电科技有限公司),DHG-9023A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司),WTH0T1 温度测试仪(福州望云山信息科技有限公司),GDW-1000L 高精度恒温恒湿箱(合肥安科环境试验设备有限公司)。

1.3 性能测试

1.3.1 线密度

参照 GB/T 14335—2008《化学纤维 短纤维线密度试验方法》^[9],采用中段切断称重法测量纤维的实际线密度。

1.3.2 微观形态

采用 TM3000 台式扫描电子显微镜分别对 EKS 纤维和腈纶纤维的横向和纵向形态进行扫描分析,纤维横截面制样方法用哈氏切片制样法。

1.3.3 力学性能

参照 GB/T 14337—2022《化学纤维 短纤维拉伸性能试验方法》^[10]进行测试。每种纤维测试 50 次,取其平均值。

1.3.4 摩擦性能

采用 XCF-1A 纤维摩擦系数测试仪,选用摩擦辊转动法,调节摩擦辊转速为 30 r/min,张力夹负荷为 0.1 cN,测试时间 10 s,每种纤维测试 20 次,取其平均值。

1.3.5 比电阻

根据 GB/T 14342—2015《化学纤维 短纤维比电阻试验方法》^[11]进行测试。每种纤维测 4 次,取其平均值。

1.3.6 卷曲性能

根据标准 GB/T 14338—2022《化学纤维 短纤维卷曲性能试验方法》^[12]进行测试。每种纤维测试 20 次,取其平均值。

1.3.7 回潮率

回潮率是用来表示纤维吸湿性能的常用指标,回潮率越大,纤维的吸湿性能越强。参照 GB/T 6503—2017《化学纤维 回潮率试验方法》^[13]进行测试,每种纤维测 3 次,取平均值。

1.3.8 吸、放湿性能

吸湿性能测试:称取 1 g 的纤维放入 105 ℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 2 h,烘焙后称取纤维的质量,记为干质量。随后将纤维迅速移至温度为 20 ℃,湿度为 65% 的大气条件中,称取纤维初始质量。将纤维尽量保持蓬松状态,在该环境中吸湿,每隔 10 min 记录一次纤维质量^[14]。每种纤维测 3 次,取平均值^[15]。

放湿性能测试:称取 1 g 的纤维放入相对湿度为 100% 的盛水容量瓶中,密封静置 48 h,使纤维充分吸湿^[16];随后将纤维取出迅速移至温度为 20 ℃,湿度为 65% 的大气条件中称取纤维初始质量,使纤维尽量保持蓬松状态在该环境中放湿,每隔 10 min 记录一次纤维质量,直至放湿平衡;然后将纤维放入 105 ℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 2 h,烘焙后称读纤维的质量,记为干质量。每种纤维测 3 次,取平均值^[14-15]。

1.3.9 吸湿发热性能

参照标准 GB/T 29866—2013《纺织品 吸湿发热性能试验方法》^[17],将开松过的纤维放在 105 ℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 2 h,称取干燥后的样品各 10 g,放入正方形网格袋中再继续烘焙 1 h,取出后放到干燥皿中进行冷却。然后将纤维置于温度为 20 ℃,相对湿度 90% 的恒温恒湿箱中,使用温度传感器每 12 s 对试样进行一次测量,测量时间为 1 h。

2 结果与讨论

2.1 纤维线密度

测试可知,EKS 纤维实测线密度为 1.22 dtex,变异系数(coefficient of variation,CV)值为 7.16%;腈纶纤维实测线密度为 1.04 dtex,CV 值为 5.27%。EKS 纤维的实测线密度大于腈纶纤维,且纤维变异系数较大,表明 EKS 纤维间粗细分布不均匀率较大,纺纱时容易造成纱线条干不匀。

2.2 纤维微观形态

EKS 纤维和腈纶纤维的横、纵向形态如图 1 所示。从图中可以看出,普通腈纶横截面为不规则圆形,而 EKS 纤维的横截面为规则的圆形。两种纤维都有纵向沟槽,腈纶纤维的沟槽长且深,但是数量较少;而 EKS

纤维的纵向结构比腈纶粗糙,分布着较多的细、浅沟槽。

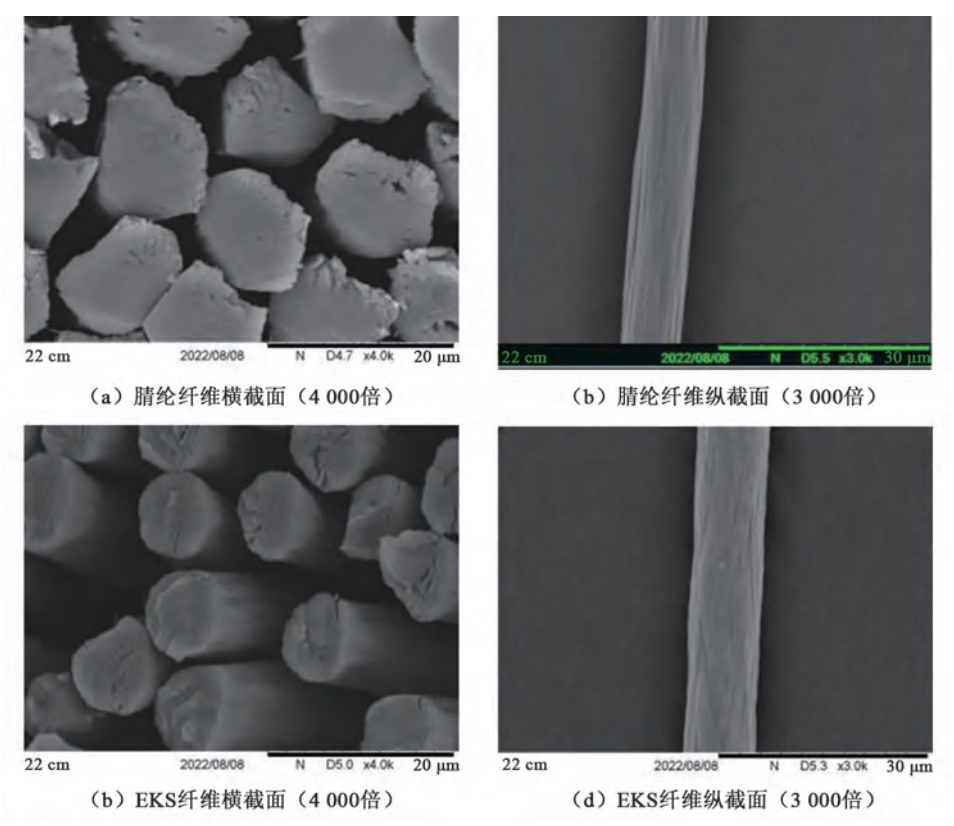


图 1 腈纶纤维和 EKS 纤维的横、纵向扫描电镜图

Fig.1 Transverse and longitudinal scanning electron microscopy images of acrylic and EKS fibers

2.3 纤维力学性能

纤维的力学性能是其最重要的性能之一,两种纤维的测试结果如表 1 所示。从表中可以看出,EKS 纤维的断裂强力、断裂强度均小于腈纶纤维,仅为腈纶的 52.5%,而断裂伸长、断裂伸长率大于普通腈纶,其断裂伸长率为腈纶的 2.11 倍,说明 EKS 纤维的力学性能较差,但韧性较好。造成 EKS 强力低的原因是其经过改性后,结晶度变低^[1],结晶度越低纤维的强度也越小。由于 EKS 强力较低,一般不适用于纯纺,因此需要与其他纤维混纺来提高纱线强力。

表 1 纤维力学性能

Table 1 Mechanical properties of the fibers

纤维	断裂强力/cN	断裂强度/(cN·dtex ⁻¹)	断裂伸长/mm	断裂伸长率/%
EKS 纤维	1.76	1.58	5.53	55.25
腈纶纤维	3.40	3.01	2.62	26.21

2.4 纤维摩擦性能

纤维表面摩擦性能影响后续纺纱、织造过程^[18],EKS 纤维和腈纶纤维的摩擦系数如表 2 所示。由表 2 可以看出,无论是 EKS 纤维还是普通腈纶纤维,其动摩擦系数都小于静摩擦系数,符合纺纱过程中对纤维摩擦的要求。EKS 纤维的动、静摩擦系数都略小于腈纶纤维,这是由于其本身截面形状为较规整的圆形,且表面沟槽细小、深度较浅,而腈纶纤维表面沟槽深且长,所以摩擦系数更大。

表 2 纤维摩擦性能

Table 2 Frictional properties of the fibers

纤维	静摩擦系数 μ_s	动摩擦系数 μ_d
EKS 纤维	0.239 4	0.225 1
腈纶纤维	0.261 5	0.240 2

2.5 纤维比电阻

纤维比电阻影响产品的最终质量及舒适度,EKS 纤维和腈纶纤维的比电阻如表 3 所示。比电阻的大小会影响纤维的可纺性能,比电阻越大,越易产生静电^[19],使纤维成纱质量降低。从表 3 可以看出,EKS 纤维的质量比电阻和体积比电阻均小于腈纶纤维,这表明 EKS 纤维抗静电性能较好,在纺纱过程不易产生纤维缠绕、断头等现象。主要是因为 EKS 纤维回潮率高,吸湿性能好,纤维导电性强。

表 3 纤维比电阻

Table 3 Specific resistance of the fibers

纤维	电阻/ Ω	体积比电阻/ $(\Omega \cdot \text{cm})$	质量比电阻/ $(\Omega \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$
EKS 纤维	7.60×10^6	2.42×10^7	2.85×10^7
腈纶纤维	2.56×10^7	8.14×10^7	9.61×10^7

2.6 纤维卷曲性能

在纺纱时,纤维的卷曲可以提高纤维之间的摩擦力和抱合力,形成具有一定强力的纱线^[20]。EKS 纤维和腈纶纤维的卷曲性能如表 4 所示。从表 4 中可以看出,EKS 纤维的卷曲数与腈纶相近,但是卷曲率及卷曲回复率均小于腈纶纤维。说明 EKS 纤维受力之后,维持卷曲的能力较腈纶差,这会导致纺纱过程中纤维抱合力变小,影响纤维成纱质量。

表 4 纤维的卷曲性能

Table 4 Curling properties of the fibers

纤维	每 25 mm 卷曲数	卷曲率/%	卷曲回复率/%
EKS 纤维	8.30	6.32	6.92
腈纶纤维	8.35	10.98	10.21

2.7 纤维回潮率

根据测试可知,腈纶的回潮率很低,只有 1.92%。而 EKS 纤维的回潮率达到了 23.06%,是腈纶纤维的 12.01 倍,是常见天然纤维回潮率的 2~3 倍^[18]。主要原因是 EKS 纤维中含有较多的氨基、羧基、羟基和氰基等亲水基团,所以吸湿能力强。和腈纶纤维相比,EKS 纤维表面粗糙、沟槽多、比表面积大,使得可吸附的水分子数增多,提高了纤维的回潮率。

2.8 纤维吸、放湿性能

2.8.1 纤维吸、放湿曲线

EKS 纤维和腈纶纤维的吸湿、放湿曲线如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,随着时间延长,EKS 纤维吸湿质量变化较为显著,而腈纶纤维吸湿质量几乎不发生变化,两种纤维的吸湿速率都呈现先快后慢的趋势。EKS 纤维在 75 min 之前的吸湿较快,随后吸湿减缓,直至 220 min 以后,纤维吸湿质量不发生明显变化,达到吸湿平衡状态,此时纤维的平衡回潮率为 14.79%。而同一时刻下,腈纶的回潮率仅为 0.83%,两种纤维差异

大。从图 2(b)可以看出,两种纤维的放湿速率都呈现先快后慢的趋势,腈纶的放湿速率低于 EKS 纤维。EKS 纤维在经过 20 min 的放湿过程后,回潮率趋于稳定,约为 16.06%,而腈纶纤维仅在 10 min 内就达到了稳定状态,平衡回潮率约为 1.30%。两种纤维在高湿状态下的回潮率与标准大气条件下差异较大,EKS 纤维在高湿环境中回潮率为 79.27%,约为标准大气条件下的 5 倍,吸湿性明显优于腈纶纤维。

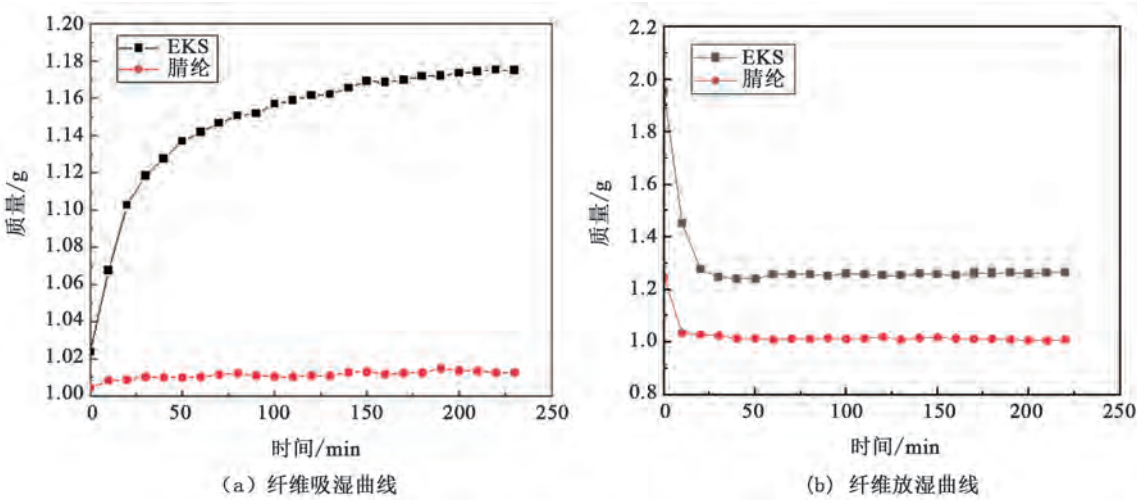


图 2 EKS 和腈纶纤维的吸、放湿曲线

Fig.2 Moisture absorption and liberation curves of EKS and acrylic fibers

2.8.2 纤维吸、放湿速率回归方程

纤维的吸、放湿速率会影响服装面料的热湿舒适性^[21]。从图 2 可以看出,在测试时间内,EKS 纤维和腈纶纤维的吸湿速率、放湿速率随时间不断发生改变,特别是 EKS 纤维,在吸、放湿初始阶段速率变化十分明显。所以,建立纤维吸湿、放湿速率对时间的回归方程十分必要,这有利于总结 EKS 纤维吸湿和放湿速率的变化规律,在实际生产中能更好地根据需要控制 EKS 纤维混纺比,为设计具有热湿舒适性的功能面料提供参考。

根据菲克方程可推导出纤维吸、放湿曲线理论上为指数函数曲线^[22],因此,可将纤维回潮率对时间的回归方程通式表示为公式(1):

$$W = a + be^{-ct} ,$$

(1)

式中:W 为回潮率,%;a、b、c 为常数;t 为时间,min。为研究 EKS 纤维的吸湿、放湿规律,用 Origin pro 2022 对实验数据进行拟合,求出 a、b、c 三个常数,得到 EKS 纤维和腈纶纤维吸湿、放湿回潮率对时间的回归方程如表 5,可以看出,方程相关系数 R²大于 0.93,表明两种纤维的吸、放湿回潮率回归方程与实验数据曲线吻合度较高。

表 5 吸湿、放湿回潮率对时间的回归方程

Table 5 Regression equations to time of moisture absorption and desorption rates

纤维	吸湿回潮率回归方程	放湿回潮率回归方程
EKS 纤维	$W = 14.984\ 1 - 14.984\ 1e^{-0.025\ 7t}$	$W = 16.055\ 04 + 63.211\ 02e^{-0.141\ 45t}$
	$R^2 = 0.961\ 01$	$R^2 = 0.991\ 85$
腈纶纤维	$W = 0.857\ 91 - 0.857\ 91e^{-0.024\ 2t}$	$W = 1.301\ 71 + 23.773\ 51e^{-0.208\ 17t}$
	$R^2 = 0.930\ 37$	$R^2 = 0.984\ 38$

纤维吸湿、放湿速率 V 定义为标准情况下,单位质量的纤维材料瞬间吸收或放出的水分的量。结合式(1) 可将纤维吸、放湿速率对时间的回归方程通式表示为公式(2)^[23]:

$$V = \left| \frac{dW}{dt} \right| = | - bce^{-ct} | ,$$

(2)

式中: V 为吸湿、放湿速率, %/min; b 、 c 为常数; t 为时间, min。根据表 5 所求得的回潮率回归方程, 计算得到两种纤维吸湿、放湿速率对时间的回归方程, 见表 6, 对应的回归方程曲线如图 3 所示。

表 6 吸湿、放湿速率对时间的回归方程

Table 6 Regression equation to time of moisture absorption and liberation rates

纤维	吸湿速率回归方程	放湿速率回归方程
EKS 纤维	$v=0.385\ 09e^{-0.025\ 7t}$	$v=8.941\ 20e^{-0.141\ 45t}$
腈纶纤维	$v=0.020\ 76e^{-0.024\ 2t}$	$v=4.948\ 93e^{-0.208\ 17t}$

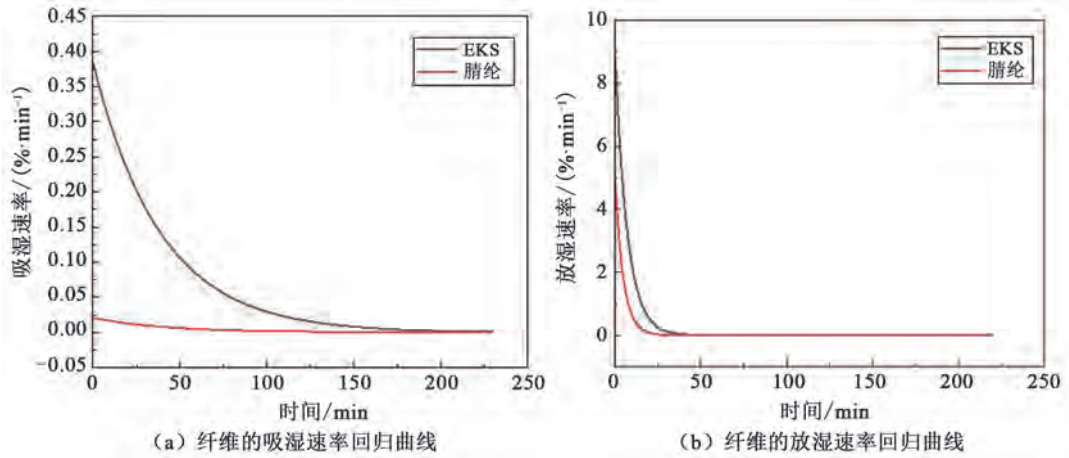


图 3 EKS 和腈纶纤维的吸、放湿速率回归曲线

Fig.3 Regression curves of moisture absorption and liberation rates of EKS and acrylic fibers

由图 3 可知,在整个吸、放湿的试验过程中,EKS 纤维、腈纶纤维的吸、放湿速率都有呈指数形式衰减的趋势。在初始吸、放湿时,纤维内部与环境中的水分含量差异大,所以纤维开始大幅度吸湿、放湿,此时吸、放湿速率较大。随着时间的延长,纤维与周围环境水分子量差异变小,纤维吸、放湿速率逐渐减小,直至降为 0。

由图 3(a) 可以看到,EKS 纤维的初始吸湿速率为 0.39% min⁻¹,而腈纶纤维的初始吸湿速率仅为 0.02% min⁻¹,差异明显。相对于腈纶来说,随着时间的延长,EKS 纤维的吸湿速率变化更加显著。在标准状态下,经过约 200 min 的吸湿过程,EKS 纤维达到吸湿平衡。由图 3(b) 可知,在放湿起始阶段,EKS 纤维和腈纶纤维的放湿速率分别为 8.94% min⁻¹、4.95% min⁻¹,放湿速率较吸湿速率大。放湿 40 min 后,两条曲线基本重叠,进入放湿平衡状态。

2.9 纤维吸湿发热性能

EKS 纤维和腈纶纤维吸湿发热温度曲线如图 4 所示。从图中可以看出,在温度为 20 ℃,湿度为 90% 的环境下,两种纤维的吸湿发热曲线都呈现先上升后下降的趋势,其中 EKS 纤维的最高升温值为 8.2 ℃,吸湿发热效果更加显著。在初始阶段,两种纤维的升温速率都呈指数上升。相比于腈纶纤维,EKS 纤维的最高升温值更高,维持最高温度的时间也更长,原因是 EKS 纤维中含有较多的氨基、羧基、羟基和氰基等亲水基团,在初始阶段亲水基团开始发挥作用,能快速吸收大量水分子并转化为热能,此时升温速率较快。随着吸湿的

不断进行,纤维吸湿速率减缓,通过吸湿发热产生的热量也随之减少。但纤维内吸收的水分子量逐渐增多,纤维吸湿产生的热量既要提供给纤维,又要提供给纤维内的水分子,使得升温速率不断减小。对于普通腈纶纤维,纤维的回潮率约为 2%,吸湿性较差,所以通过吸湿产生的热量较少,吸湿发热曲线峰值比 EKS 纤维低 4.7℃,升温保持在较低的水平。

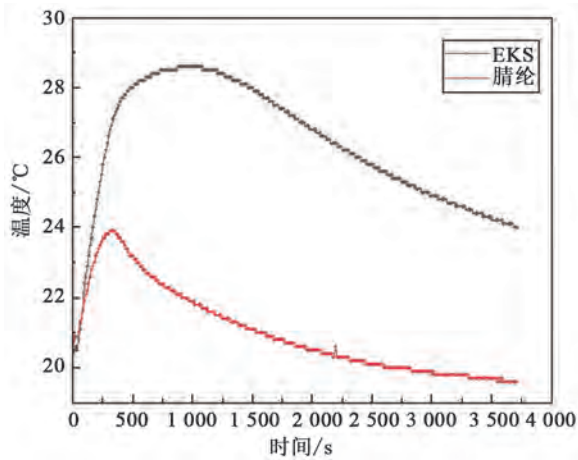


图 4 EKS 和腈纶纤维吸湿发热曲线

Fig.4 Hygroscopic-heating curves of EKS and acrylic fibers

3 结论

本文通过对比 EKS 纤维和普通腈纶纤维性能得到以下结论：EKS 纤维线密度比普通腈纶大,纤维线密度不匀率较大；EKS 纤维横截面为圆形,纵向有较多细小且深度浅的裂纹；EKS 纤维的断裂强力、断裂强度均小于普通腈纶纤维,而断裂伸长、断裂伸长率大于普通腈纶；EKS 纤维的动、静摩擦系数都略小于腈纶纤维；EKS 纤维的体积比电阻和质量比电阻小于腈纶纤维,在后续加工中不易产生静电；EKS 纤维的卷曲率、卷曲回复率小于腈纶纤维,会影响纤维间的摩擦力及抱合力；EKS 纤维的回潮率为 23.06%,是腈纶的 12.01 倍,且纤维吸湿、放湿平衡回潮率大,吸湿滞后性大；EKS 纤维在吸湿、放湿过程中的吸湿、放湿速率是不断变化的,随着时间的延长,纤维的吸湿、放湿速率呈指数形式衰减,最终趋于 0；EKS 纤维的吸湿发热性好,吸湿发热最高升温值与普通腈纶相差 4.7℃。

参考文献：

[1] 葛露露, 崔沂, 张瑞云, 等. 基于吸湿发热纤维的毛型面料开发[J]. 毛纺科技, 2020, 48(7): 1-7. DOI:10.19333/j.mfkj.20191101807.

[2] 韩雪晴, 张俐敏, 程隆棣. 吸湿匀缓发热三层针织物的后整理研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2022, 39(3): 35-42.

[3] 姚文丽, 高姝一, 马磊, 等. 改性腈纶吸湿发热机织物结构设计与性能研究[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(12): 22-27.

[4] 黄小蝶, 崔沂, 张瑞云, 等. 多组分发热保暖针织物的热湿舒适性评价[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(6): 55-59. DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2020.06.018.

[5] 朱玮俊, 李永清. 精梳长绒棉超细腈纶 EKS 赛络纺针织纱的生产[J]. 棉纺织技术, 2014, 42(10): 36-39.

[6] 杜凯, 刘正芹. 吸湿发热纤维的研究进展[J]. 上海毛麻科技, 2014(2): 41-43.

[7] 刘启滨, 曹月婵. EKS 纤维成分定性鉴别研究[J]. 中国纤检, 2019(5): 70-72. DOI:10.14162/j.cnki.11-4772/t.2019.05.019.

- [8]黄学水,李忠,李宪涛. Ekslive 放热针织内衣的开发[J]. 现代纺织技术, 2013, 21(2): 41-43. DOI:10.19398/j.att.2013.02.011.
- [9]中国纺织工业协会. 化学纤维 短纤维线密度试验方法: GB/T 14335—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10]中国纺织工业联合会. 化学纤维 短纤维拉伸性能试验方法: GB/T 14337—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [11]中国纺织工业联合会. 化学纤维 短纤维比电阻试验方法: GB/T 14342—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12]中国纺织工业联合会. 化学纤维 短纤维卷曲性能试验方法: GB/T 14338—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [13]中国纺织工业联合会. 化学纤维 回潮率试验方法: GB/T 6503—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [14]任钦, 俞灏, 张佩华, 等. 新型改性腈纶达芙丝纤维性能研究[J]. 针织工业, 2022(1): 36-38.
- [15]舒桂芳, 田绘, 吴婷, 等. 一种纤维吸放湿性能的测试方法[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(8): 38-40.
- [16]刘慧娟, 刘杰, 桂早霞, 等. 几种蛋白质改性纤维的吸放湿性能研究[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(7): 15-17. DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2021.07.004.
- [17]中国纺织工业联合会. 纺织品 吸湿发热性能试验方法: GB/T 29866—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [18]于伟东. 纺织材料学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2006.
- [19]缪定蜀. 破解新型纤维可纺性差的途径[J]. 纺织器材, 2020, 47(2): 56-61.
- [20]肖海英, 陈征兵. 纤维卷曲的功能分析[J]. 纺织科技进展, 2008(3): 22-24. DOI:10.19507/j.cnki.1673-0356.2008.03.008.
- [21]万玉芹, 吴丽莉, 俞建勇. 竹纤维吸湿性能研究[J]. 纺织学报, 2004, 25(3): 14-16. DOI:10.13475/j.fzxb.2004.03.004.
- [22]王建明, 李永锋, 郝新敏, 等. 生物基锦纶 56 和锦纶 66 的结构与吸放湿性能评价[J]. 纺织学报, 2021, 42(8): 1-7. DOI:10.13475/j.fzxb.20210300507.
- [23]毛月, 王妮, 刘丽芳, 等. 中空黏胶纤维吸、放湿性能研究[J]. 国际纺织导报, 2017, 45(4): 4-8.