

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.021

# 间位芳纶针刺非织造布耐高温耐腐蚀性

张宇皓,韩万里,李思嘉,罗灵茜,汪大鹏

(嘉兴学院材料与纺织工程学院,浙江嘉兴 314001)

**摘要:**以间位芳纶纤维为原料,通过针刺非织造加工工艺制备了间位芳纶针刺非织造布,对其在 200℃高温、pH 值为 2,7 和 13 溶液中处理 48 h 后进行测试。结果表明,间位芳纶针刺非织造布表面在高温、酸碱和中性环境下出现一定程度的腐蚀,但纤网结构及纤维之间的缠结没有明显变化,对间位芳纶针刺非织造布的拉伸性能和透气性能没有明显影响。间位芳纶酰胺键中的 N—C 键出现了断裂,在 2 400 cm<sup>-1</sup> 位置上出现了 CO<sub>2</sub> 小分子片段对应的吸收峰,而经过处理后的间位芳纶纤维分子中苯环没有打开,样品仍具有优异的热稳定性,样品的初始分解温度在 415℃ 左右,在 560℃ 前样品的质量保持率仍可维持在 50% 以上。

**关键词:** 间位芳纶纤维; 针刺非织造布; 耐高温; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TS174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0116-05

## High Temperature Resistance and Corrosion Resistance of Meta-aramid Needle Punched Nonwovens

Zhang Yuhao, Han Wanli, Li Sijia, Luo Lingxi, Wang Dapeng

(Materials and Textile Engineering College, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

**Abstract :** The needle punch nonwovens were prepared using the meta-aramid fiber as raw materials by the nonwoven acupuncture process. The needle punch nonwovens were treated with different pH value solutions (pH values are 2, 7, 13) at 200℃ high temperature for 48 h and then tested. The results show that there is a certain degree of corrosion on the surface of meta-aramid needle punched nonwoven under high temperature, acid and alkali, and neutral environment, however, there is no obvious change in the web structure and the entanglement between the fibers, which has no obvious effects on the tensile properties and breathability of meta-aramid needle punched nonwoven. In addition, the N—C bond in the meta-aramid amide bond is broken, and the absorption peak corresponding to the CO<sub>2</sub> small molecule fragment appears at the 2 400 cm<sup>-1</sup> position, and the benzene ring of the treated meta-aramid fiber isn't opened. The samples still have excellent thermal stability. The initial decomposition temperature of each sample is around 415℃, and the mass retention rates of the samples can still be maintained above 50% before 560℃.

**Keywords :** meta-aramid fiber ; needle punched nonwoven ; high temperature resistance ; corrosion resistance

随着我国经济的迅速发展,各行各业对资源、能源的耗费日益增多,我国已成为原煤、钢铁、水泥和化纤生产第一大国,从而导致环境污染问题日益突出。目前,我国工业烟尘排放量巨大,主要来自于电力、钢铁、水泥、冶炼、化工等行业生产过程中的排放物<sup>[1]</sup>。近年来,国家高度重视空气排放污染物问题,环保部门对相关行业的高温烟气的除尘要求也更加严格,已出台相关环境治理政策<sup>[2-4]</sup>,要求排尘浓度由原来的 200 mg/m<sup>3</sup> 降低到 30~50 mg/m<sup>3</sup>,

部分地方城市甚至要求控制在 20~30 mg/m<sup>3</sup>。目前袋式除尘技术已能够完全满足烟气除尘和稳定可靠运行的需要,在烟气除尘中的应用也越来越广泛,其中滤料是袋式除尘器的关键材料,其性能直接影响袋式除尘器的过滤效果及使用寿命。随着国内排放标准的逐渐严格,耐高温材料的需求量和市场空间进一步增大,在大气污染治理中有着举足轻重的地位<sup>[5-6]</sup>。因此,研发高质量的耐高温滤料具有非常重要的意义。

**基金项目:** 嘉兴市公益科技计划项目(2018AY11006),国家级大学生创新训练项目(202010354007)

**通讯作者:** 韩万里,副教授,博士,主要研究方向非织造材料成型与制备 E-mail: jxwlhan@163.com

**收稿日期:** 2020-07-13

**引用格式:** 张宇皓,韩万里,李思嘉,等. 间位芳纶针刺非织造布耐高温耐腐蚀性[J]. 工程塑料应用,2020,48(9): 116-120.

Zhang Yuhao, Han Wanli, Li Sijia, et al. High temperature resistance and corrosion resistance of meta-aramid needle punched nonwovens[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 116-120.

间位芳纶又称芳纶 1313,全称为聚间苯二甲酰间苯二胺,属芳香族聚酰胺纤维,是一种优良的耐高温纤维,具有低刚度、高伸长率、耐高温、耐酸碱等优良特性,其产品主要应用于航空飞行服、高温化工过滤和高温绝缘产品中,是制备耐高温滤材的理想材料<sup>[7-9]</sup>。芳香族聚酰胺纤维大分子链的刚性大,结构稳定,采用熔体纺丝方法难以加工,通常由间苯二胺和间苯二甲酰氯缩聚后经溶液纺丝而成。由于间位芳纶纤维大分子结构中存在酰胺键,使其耐强酸、强碱性和耐高温水解性较差,在强酸和强碱的环境下会出现酰胺键水解断裂<sup>[10-13]</sup>,导致间位芳纶在高温过滤领域中的应用受到一定的限制。

为了研究间位芳纶针刺非织造布在高温环境下的耐酸碱腐蚀性,笔者采用 100% 间位芳纶短纤维,利用针刺非织造加工工艺制备了间位芳纶针刺非织造布。在此基础上,将间位芳纶针刺非织造布置于 200℃ 高温条件下,在 pH 值为 2,7,13 溶液中浸渍 48 h 处理,通过观察和测试间位芳纶非织造布的外观形貌、力学性能、透气性能、纤维结构和热性能,探讨间位芳纶针刺非织造布在高温下的耐腐蚀性,为耐高温针刺滤料生产和应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

间位芳纶短纤维:1.5 D/51 mm,保定锦年特种纤维制造有限公司;

NaOH:白色固体,西陇科学股份有限公司;

浓 HCl:36%~38%,浙江中星化工试剂有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

针刺热轧联合试验机:定制,常熟市伟成非织造成套设备有限公司;

强力测试机:YG(B)026H-250 型,温州大荣纺织仪器有限公司;

数字式织物透气量仪:YG461D 型,常州市中纤仪器有限公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:VERTEX 70 型,德国布鲁克(北京)有限公司;

热失重(TG)分析仪:TGAQ50 型,美国 TA 仪器公司;

数显电子天平:DC-320AS 型,南京苏测计量仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4800 型,日本日立公司;

电热恒温鼓风烘箱:FY101A 型,温州方圆仪器有限公司。

### 1.3 样品制备

选取 5 kg 间位芳纶纤维为原料,首先进行加油润滑和抗静电处理,经过两次开松后进入双锡林双道夫梳理机中梳理,喂入速度为 1 m/min,锡林线速度为 900 m/min,道夫线速度为 16 m/min,速度帘速度为 14 m/min,经梳理机梳理后的纤维成单纤维平行伸直状态。双道夫输出的双层叠加纤维网采用交叉铺网方式制备面密度为 200 g/m<sup>2</sup> 的间位芳纶纤网。间位芳纶纤网经过预针刺预处理,喂入速度为 4 m/min,针刺频率为 340 刺/min,针刺深度为 7 mm,针刺密度为 140 刺/cm<sup>2</sup>。再经过主针刺工艺成型,喂入速度为 2 m/min,针刺频率为 370 刺/min,针刺深度为 1.77 mm,针刺密度为 320 刺/cm<sup>2</sup>,输出速度为 1.6 m/min,最后制得间位芳纶针刺非织造布,其成型工艺如图 1 所示。

芳纶纤维 → 开松 → 梳理 → 成网 → 预刺 → 复刺 → 后处理

图1 间位芳纶针刺非织造布成型工艺图

### 1.4 样品处理

用去离子水稀释浓 HCl 和 NaOH,配置 pH 值为 2,7,13 的酸性、中性和碱性溶液,将未处理的间位芳纶针刺非织造布、浸渍在 pH 值为 2,7,13 的间位芳纶针刺非织造布分别标记为 1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,在 200℃ 的高温环境下分别对 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 样品进行处理,处理时间均为 48 h。

### 1.5 性能测试

形貌分析:用 SEM 观察样品表面形态。制样面积为 1 cm<sup>2</sup>,扫描前对样品表面进行喷金处理。

透气性按照 GB/T 5453-1997 测试,样品大小为 20 cm<sup>2</sup>,压力为 200 Pa。

拉伸性能按照 FZ/T 60005-1991 测试,夹持距离 50 mm,拉伸速度 100 mm/min。

FTIR 测试:扫描范围为 500~4000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。

TG 测试:氮气气氛,测试温度为 35~550℃,升温速率为 10℃/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 分析

在 200℃ 高温、经不同 pH 值溶液处理后,样品的 SEM 照片如图 2 所示。

从图 2a 可以看出,未处理的 1<sup>#</sup> 样品的间位芳纶纤维表面光滑,纤维截面为圆形,细度较为均匀。

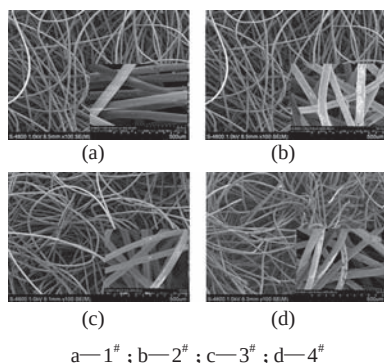


图2 不同处理后的间位芳纶针刺非织造布外观形貌 SEM 照片

另外,间位芳纶纤维之间交错排列分布较为均匀,纤维具有较高的杂乱度,从而制备的针刺非织造布各向同性较好。间位芳纶纤维通过相互无序排列和相互缠结包含,使制备的针刺非织造布具有较好的蓬松多孔结构,从而可有效地拦截尘埃颗粒,提高过滤效率,并能保持较小的过滤阻力<sup>[14]</sup>。间位芳纶纤维表面纵向光滑平直,截面呈圆形,具有优异的耐高温性能,可广泛应用在高温过滤领域。

从图 2b~图 2d 可以看出,2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 样品的间位芳纶纤维表面受到了不同程度的损伤。在 200℃高温、经 pH 值为 7 的溶液处理的 3<sup>#</sup> 样品,其表面的间位芳纶纤维有少部分存在损伤,且损伤程度较轻;在 200℃高温、经 pH 值为 2 和 13 的酸碱溶液高温处理后,2<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 样品的间位芳纶纤维的损伤程度比较严重,间位芳纶纤维的表面出现较多的腐蚀现象,受损伤纤维的根数也较多,尤其在酸性条件下,腐蚀纤维面积最大,纤维表面起皮严重,存在明显的沟槽,经酸碱腐蚀后,其皮层结构受到了破坏<sup>[15]</sup>。但总体来看,针刺非织造布的纤维缠结仍然是紧密的,说明间位芳纶针刺非织造具有较好的耐腐蚀性。

## 2.2 透气性能分析

间位芳纶针刺非织造布的透气性能可反映出纤网中的孔径大小及其分布,是影响过滤性能的一个重要因素。在 200℃高温、经不同 pH 值溶液处理后,间位芳纶针刺非织造布透气性能测试结果列于表 1。

表 1 不同处理后的间位芳纶针刺非织造布透气性能测试结果

| 样品编号           | pH 值 | 处理时间/h | 透气率/(mm·s <sup>-1</sup> ) |
|----------------|------|--------|---------------------------|
| 1 <sup>#</sup> | --   | --     | 2 562.4                   |
| 2 <sup>#</sup> | 2    | 48     | 2 461.6                   |
| 3 <sup>#</sup> | 7    | 48     | 2 452.0                   |
| 4 <sup>#</sup> | 13   | 48     | 2 402.8                   |

从表 1 可以看出,在 200℃、经不同 pH 值溶液处理后,样品的透气率有一定下降,但并没有发生明显变化。1<sup>#</sup> 样品的透气率最大,为 2 562.4 mm/s,4<sup>#</sup> 样品最小,为 2 402.8 mm/s,相比 1<sup>#</sup> 样品,减少

了 6.23%,而 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 样品透气率分别减少了 3.93% 和 4.31%。

间位芳纶针刺非织造布的透气性与其孔隙大小、体积分数和紧密度等密切相关。从图 2 也可以看出,经酸碱和中性溶液处理后的间位芳纶针刺非织造布内部的纤维之间的缠结程度和孔径分布没有发生明显变化。这表明在 200℃高温下,间位芳纶针刺非织造布经酸碱和中性溶液处理后,仍可以保持良好的透气性能。由此可见,在 200℃高温及酸碱和中性环境下,间位芳纶针刺非织造布仍可保持良好的纤网多孔结构,具有较好的过滤效率和较低的过滤阻力,可在 200℃高温及酸碱和中性环境中用作过滤材料。

## 2.3 拉伸性能分析

在 200℃、经不同 pH 值溶液处理后,间位芳纶针刺非织造布的拉伸曲线如图 3 所示。

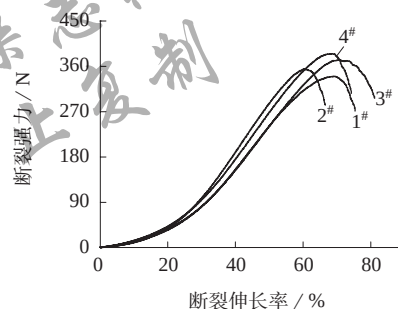


图3 不同处理后的间位芳纶针刺非织造布的拉伸曲线

由图 3 可以看出,经过处理后的 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 样品与未处理的 1<sup>#</sup> 样品的拉伸曲线整体趋势相同。1<sup>#</sup> 样品的断裂强力为 340.1 N,断裂伸长率为 66.55%;在 200℃高温、经 pH 值为 2 的酸性溶液处理后,2<sup>#</sup> 样品的断裂强力为 354.3 N,断裂伸长率为 56.1%,相比于 1<sup>#</sup> 样品,断裂强力增加了 4.17%,断裂伸长率降低了 10.45%,断裂强力略有增加;在 200℃高温,经 pH 值为 7 的中性溶液处理后,3<sup>#</sup> 样品的断裂强力为 372.3 N,断裂伸长率为 68.02%,断裂强力增大,而断裂伸长率基本没有变化;在 200℃高温,经 pH 值为 13 的碱性溶液处理后,4<sup>#</sup> 样品的断裂强力为 384.8 N,断裂强力增加了 13.14%,而断裂伸长率略有下降。由此可知,经处理后的间位芳纶非织造布的断裂伸长率和断裂强度有所变化,但变化幅度相差不大,说明在 200℃高温下,溶液的 pH 值对间位芳纶针刺非织造布的拉伸性能影响不大。

## 2.4 FTIR 分析

在 200℃高温、经不同 pH 值处理后,间位芳纶针刺非织造布的 FTIR 谱图如图 4 所示。

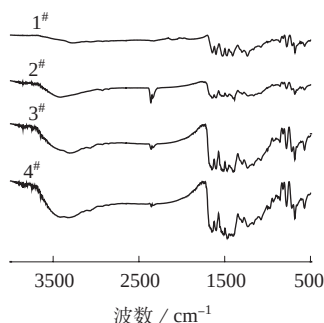


图4 不同处理后的间位芳纶针刺非织造布的 FTIR 谱图

间位芳纶纤维主要是由苯环和酰胺键构成的,从图4可以看出,在 $780\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是C—H(间二取代苯邻接三个H)的变形振动峰;波数为 $1487\text{ cm}^{-1}$ 和 $1537\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是苯环上的C=C不对称伸缩振动引起的; $1608\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是N—H变形振动峰,即酰胺Ⅱ峰;波数为 $1645\text{ cm}^{-1}$ 处是酰胺Ⅰ峰,即C=O伸缩振动峰;波数 $3272\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰为N—H伸缩振动峰。

从图4还可以看出,经过处理后的2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>样品在 $3370\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰明显增强,说明N—H键增多,由此可以预测间位芳纶纤维分子中酰胺键中的N—C键出现了一定的断裂<sup>[16]</sup>。在 $682, 722, 780\text{ cm}^{-1}$ 处的峰并未消失,说明C—H面外弯曲振动没有消失,即苯环没有打开。另外,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>样品在 $2400\text{ cm}^{-1}$ 位置上出现了 $\text{CO}_2$ 小分子片段对应的吸收峰,其中酸性条件下处理的2<sup>#</sup>样品的吸收峰最强。其主要原因是在氧气存在的环境中CO氧化成 $\text{CO}_2$ <sup>[17]</sup>。从FTIR谱图的形状和位置来看,经过不同pH值的溶液处理后,间位芳纶针刺非织造布内部化学结构没有产生明显的变化,说明该材料经不同处理后具有良好的耐腐蚀性。

## 2.5 TG 分析

在 $200^\circ\text{C}$ 高温、经不同pH值溶液处理后,间位芳纶针刺非织造布的TG曲线如图5所示。

由图5可以看出,从室温至 $105^\circ\text{C}$ ,样品的初始质量损失归因于释放吸附的水分。浸渍在不同pH值溶液的2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>样品所含水分较多,曲线下降明显。在 $105\sim 400^\circ\text{C}$ ,质量没有进一步发生明显的变化,样品质量只损失了1.5%左右,说明间位芳纶具有优异的热稳定性。在 $415^\circ\text{C}$ 左右,间位芳纶出现分解,此后,间位芳纶纤维的质量损失非常快,纤维降解显著。但当温度达到 $560^\circ\text{C}$ 时,样品的质量保持率仍维持在50%以上。由此可见,在约 $105^\circ\text{C}$ 之前,在溶液中浸渍过的2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>样品含有较多的水

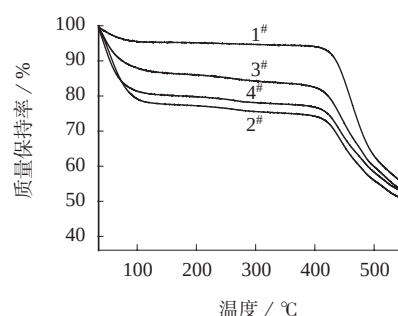


图5 不同处理后的间位芳纶针刺非织造布的 TG 曲线

分,温度升高后,样品的水分蒸发,质量损失较多。而在 $100\sim 400^\circ\text{C}$ 区间内,经过高温和不同pH值溶液处理后,2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>样品的纤维表面皮层结构遭到破坏和腐蚀,导致纤维超分子结构中的结晶度下降,分子间作用力下降,纤维无定形区阻碍分子链滑移能力较弱,从而使样品易降解,热失重质量较大。在 $400^\circ\text{C}$ 以上时,间位芳纶非织造布均出现裂解吸热现象,温度升高迫使分子振动、旋转等运动剧烈而导致其价键断裂,故TG曲线迅速下降。

## 3 结论

在 $200^\circ\text{C}$ 高温下,样品在酸碱和中性溶液环境中浸渍48 h后,对间位芳纶针刺非织造布的耐腐蚀性进行了研究,得出以下结论:

(1) 间位芳纶针刺非织造布表面纤维出现了一定程度的腐蚀,但没有破坏纤网的主体结构。

(2) 间位芳纶针刺非织造布的透气性能和拉伸性能没有明显变化,其中,在碱性条件下,透气性能降幅最大,为6.23%,断裂强力增幅最大,为13.14%;在酸性条件下,断裂伸长率降幅最大,为10.45%。

(3) 间位芳纶酰胺键中的N—C键出现断裂,而苯环没有打开,仍具有优异的热稳定性。

## 参考文献

- [1] 白媛,马新安,杨家密. 耐高温除尘过滤材料的研发现状及趋势[J]. 棉纺织技术, 2019, 47(10):78-81.  
Bai Yuan, Ma Xin'an, Yang Jiami. Development status and trend of high temperature resistance dust removing filter material[J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(10):78-81.
- [2] 王冬梅,邓洪,吴纯,等. 高温过滤材料的应用及发展趋势[J]. 中国环保产业, 2009(6):24-29.  
Wang Dongmei, Deng Hong, Wu Chun, et al. Application of filter materials with high temperature and their development trend[J]. China Environmental Protection Industry, 2009(6):24-29.
- [3] 马捷. 我国耐高温过滤材料的发展现状及市场潜力[J]. 化学工业, 2016, 34(1):18-21, 25.  
Ma Jie. The development status and market potential of high tem-

- perature resistance filtration materials in China[J]. Chemical Industry, 2016, 34(1):18–21, 25.
- [4] 葛庆彤, 杨振东, 吴海波, 等. 耐高温针刺滤料中的纤维损伤表征与研究[J]. 产业用纺织品, 2013(3):33–36.
- Ge Qingtong, Yang Zhendong, Wu Haibo, et al. Characterization and research on fiber damage of the high temperature resistant needle-punched filter material[J]. Technical Textiles, 2013(3):33–36.
- [5] 彭孟娜, 马建伟. 有机耐高温纤维及其在过滤材料中的应用[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(10):27–31.
- Peng Mengna, Ma Jianwei. Organic high temperature resistant fiber and its application in filtration materials[J]. Technical Textiles, 2017, 35(10):27–31.
- [6] 刘威, 金江, 马飞. 耐高温除尘过滤材料的进展[J]. 资源节约与环保, 2018(3):13–14.
- Liu Wei, Jin Jiang, Ma Fei. Development of high temperature resistant dust removal filter materials[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2018(3):13–14.
- [7] 季萍, 孙俊河, 何琴, 等. 芳香族聚酰胺纤维的性能与应用[J]. 中国纤检, 2010(23):76–77.
- Ji Ping, Sun Junhe, He Qin, et al. Study on property and application of aromatic polyamide fiber[J]. China Fiber Inspection, 2010(23):76–77.
- [8] Lee J, Broughton R M, Worley S D, et al. Antimicrobial polymeric materials: Cellulose and m-aramid composite fibers[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2007, 2(4):25–32.
- [9] Jain A, Vijayan K. Thermally induced structural changes in Nomex fibres[J]. Bulletin of Materials Science, 2002, 25:341–346.
- [10] 王艳丽, 吴玲娜, 金万慧, 等. 芳纶 1313 / PANOF 针刺滤料的制备及性能[J]. 现代纺织技术, 2019, 27(6):26–30.
- Wang Yanli, Wu Lingna, Jin Wanhui, et al. Preparation and properties of aramid 1313 (MPIA) / PANOF needle-punched filter material[J]. Advanced Textile Technology, 2019, 27(6):26–30.
- [11] 浦丽莉, 黄恒钧, 林鹏. 芳香族聚酰胺纤维改性技术研究进展[J]. 化学与黏合, 2013, 35(3):58–61.
- Pu Lili, Huang Hengjun, Lin Peng. Progress in modification of aramid fibers[J]. Chemistry and Adhesion, 2013, 35(3):58–61.
- [12] Villar-Rodil S, Nez-Alonso A M, Tascón J M D. Studies on pyrolysis of Nomex polyaramid fibers[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001, 58:105–115.
- [13] 郑玉婴, 蔡伟龙, 程雷. 耐酸型玻纤填充芳纶 1313 复合针刺毡滤料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(8):122–125.
- Zheng Yuying, Cai Weilong, Cheng Lei. Preparation and properties of acid resistant glass fiber / aramid fiber compound filter materials of needled felt[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(8):122–125.
- [14] 刘造芳, 张得昆, 张星. 芳纶针刺毡在高温下的孔径分布变化[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(3):315–321.
- Liu Zaofang, Zhang Dekun, Zhang Xing. Pore size distribution changes of aramid needle-punched felt in high temperature[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(3):315–321.
- [15] 牛鹏霞, 杨彩云. 芳纶编织绳耐酸碱碱性研究[J]. 合成纤维, 2010, 39(7):48–50.
- Niu Pengxia, Yang Caiyun. The study of aramid braided rope on acid and alkali resistance[J]. Synthetic Fiber in China, 2010, 39(7):48–50.
- [16] 王毅, 付维娟, 李焱, 等. 间位芳纶对位芳纶混和物的定量化学分析方法[J]. 棉纺织技术, 2018, 46(8):36–39.
- Wang Yi, Fu Weijuan, Li Ye, et al. Quantitative chemical analysis method for mixture of meta-aramid fiber and para-aramid fiber[J]. Cotton Textile Technology, 2018, 46(8):36–39.
- [17] 张洪亭. 芳纶纤维的热降解过程分析[J]. 上海纺织科技, 2012, 40(7):8–10.
- Zhang Hongting. Analysis of thermal degradation process of aramid fibers[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2012, 40(7):8–10.

.....

(上接第 109 页)

- of accelerated aging on polylactide containing plant extracts[J]. Polymers, 2019, 11(4):doi:10.3390/polym11040575.
- [14] 孙辉, 张恒源, 咸玉龙, 等.  $\text{TiO}_2$ -Ag / 聚乳酸纳米复合纤维的制备及其抗菌性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(4):1–6.
- Sun Hui, Zhang Hengyuan, Xian Yulong, et al. Preparation and antibacterial properties of  $\text{TiO}_2$ -Ag / poly(lactic acid) nano-composite fibers[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(4):1–6.
- [15] Zheng Minghuan, Zhang Shanshan, Chen Yifan, et al. Structure evolution of bio-based PLA / ENR thermoplastic vulcanizates during dynamic vulcanization processing[J]. Polymer Testing, 2020, 82:doi:10.1016 / j.polymer.2020.106324.
- [16] Haugan I N, Lee B, Maher M J, et al. Physical aging of polylactide-based graft block polymers[J]. Macromolecules, 2019, 52:8878–8894.
- [17] Jiang Ning, Li Yaomin, Yu Tao, et al. Effect of saline and alkaline solution aging on the properties of jute / poly(lactic acid) composites[J]. Polymer Composites, 2020, 41:1003–1012.
- [18] 吴梦奇, 曹新鑫, 何小芳, 等. PP / EPDM / 纳米  $\text{TiO}_2$  复合材料的制备与热性能[J]. 塑料, 2018, 47(7):13–18, 23.
- Wu Mengqi, Cao Xinxin, He Xiaofang, et al. Preparation and thermal performance research of polypropylene / ethylene propylene diene monomer / nano-titanium dioxide composite[J]. Plastics, 2018, 47(7):13–18, 23.
- [19] Lee J S, Hwang G H, Kwon Y S, et al. Impacts of cellulose nanofibril and physical aging on the enthalpy relaxation behavior and dynamic mechanical thermal properties of poly(lactic acid) composite films[J]. Polymer, 2020, 202:doi:10.1016 / j.polymer.2020.122677.