doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240206

多因素耦合环境下间位芳纶缝纫线的老化特性

代 峰，柳静献
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：为研究高温、高湿和腐蚀性耦合环境下间位芳纶缝纫线的老化特性，在不同温度（75，130和150 ℃）下采用酸性溶液和碱性溶液对缝纫线进行交互老化，并对老化前后缝纫线的力学性能、耐折性、回潮率、化学成分和微观形貌进行了分析．系统研究了温度、时间和酸碱腐蚀顺序对老化程度的影响．结果表明：老化温度和酸碱腐蚀顺序对缝纫线性能影响较大；温度为150 ℃时，经酸碱二次交互腐蚀后缝纫线的断裂强力保持率和断裂伸长率和保持率分别为37. 1%和20. 9%；老化后缝纫线的回潮率明显增加，热稳定性降低，主要原因是老化后的芳纶分子链发生了断裂．

关 键 词：芳纶缝纫线；滤袋；耦合老化；机械性能；水解
中图分类号：TS 174 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3026(2026)02-0117-08

Aging Characteristics of Meta-Aramid Sewing Threads Under Multi-factor Coupling Environment

DAI Feng, *LIU Jing-xian*
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the aging characteristics of meta-aramid sewing threads in coupled high-temperature, high-humidity, and corrosive environments, interactive aging treatments were performed using acidic and alkaline solutions at different temperatures (75, 130, and 150 ℃). The mechanical properties, flex resistance, moisture regain, chemical composition, and microscopic morphology of the threads before and after aging were analyzed. A systematic study was conducted on the effects of temperature, time, and the sequence of acid and alkali corrosion on the aging degree. The results indicate that both aging temperature and the sequence of acid and alkali corrosion significantly influence thread performance. At 150 ℃, the breaking strength retention rate and retention rate of elongation at break of the threads after secondary alternating acid and alkali corrosion are 37. 1% and 20. 9%, respectively. Aged threads exhibit significantly increased moisture regain and reduced thermal stability, primarily due to molecular chain breakage in the aramid polymer after aging.

Key words: aramid sewing thread; filter bag; coupling aging; mechanical property; hydrolysis

滤袋因其优异的耐温性和耐腐蚀性被广泛应用于工业除尘领域[1]．缝纫线作为滤袋的关键组成部分，在缝制过程中会受到不同程度的拉伸载荷[2]．工业废气组成复杂，通常伴有高温、高湿、酸性气体（SO_2）和碱性颗粒（烧碱、氧化钙）[3-4]．当工业废气温度低于露点温度或不稳定时，废气中的水分会在纤维表面凝结[5]．当酸性气体和碱性物质穿过纤维时，纤维会因酸碱相互作用而受到

收稿日期：2024-11-07
基金项目：国家十四五重点研发计划项目（2022YFC2503201）；国家自然科学基金资助项目（52174215）；辽宁省科技攻关专项（2021JH1/10400023）．
作者简介：代 峰（1998—），男，辽宁盘锦人，东北大学博士研究生．
通信作者：柳静献，E-mail：liujingxian@mail.neu.edu.cn.

腐蚀.脉冲喷吹清灰时,滤袋会反复受到高压气流的冲击,由于应力集中,缝纫线容易发生断裂.

间位芳纶(MPIA)缝纫线主要用于缝制MPIA滤袋.MPIA缝纫线在使用过程中不可更换,因此缝纫线使用寿命会影响滤袋的整体寿命[6].MPIA具有良好的化学稳定性和热稳定性[7].然而,MPIA的化学结构在恶劣环境下会迅速降解.

分析聚合物老化行为的方法有很多,包括力学性能测试、扫描电子显微镜(SEM)分析、热重分析、回潮率分析、红外光谱分析等.力学性能的变化直接反映了材料性能的变化.柳静献等[8]在较低温度下研究了酸碱交互腐蚀对芳纶滤料的老化作用,发现老化后滤料的机械性能以及滤料对颗粒物的过滤效率明显下降.Nguyen-Tri等[9]发现力学性能的变化与聚合物的形态和分子量的变化直接相关.Rozy等[10]利用扫描电子显微镜观察到老化聚苯硫醚纤维表面存在大量裂纹.Gu等[11]通过热重分析研究了四官能度厚朴酚基环氧单体(MTEP)/双酚A型环氧树脂(E51)/4,4'-二氨基二苯砜(DDS)共混体系在N_2气氛下的热稳定性,发现联苯结构的稳定和交联密度的提高是碳收率提高的主要原因.碳收率越高,树脂的阻燃性越好.Rostami等[12]研究了涤纶和聚丙烯纤维在碱性环境下的水解反应.发现经碱性处理后聚酯纤维的回潮率提高.Huang等[13]通过傅里叶变换红外光谱(FT-IR)观察到,氢氧化钠溶液处理后,改性聚苯硫醚(MPPS)/聚四氟乙烯(PTFE)缝纫线的C—S发生了旋转或断裂.

目前,针对滤袋缝纫线耐腐蚀性的研究较少,而且大多是通过提高老化温度、增加酸性、提高碱性溶液浓度来加速老化.为模拟缝纫线在多因素耦合环境下的老化过程,本文采用20%的H_2SO_4溶液和10%的NaOH溶液在不同温度(75,130和150 ℃)下对缝纫线进行交互腐蚀.通过分析缝纫线的力学性能、化学成分、表面形貌、热稳定性和亲水性来研究多因素耦合老化对缝纫线的影响,以提高对缝纫线在恶劣环境下降解机制、机械性能和热性能的理解.

1 材料和实验方法

1.1 材料

本文使用的MPIA缝纫线由中国东莞市盛芯特殊绳带有限公司提供.氢氧化钠(NaOH)和硫酸(H_2SO_4)购自天津市大茂化学试剂厂.缝纫线的性能如表1所示.工况环境下缝纫线附近的酸碱度如图1所示.

表1 MPIA缝纫线基本参数

Table 1 Basic parameters of MPIA sewing threads

线密度/dtex	股数	断裂强力/N	断裂伸长率/%
878.4	3	25.9	28.9

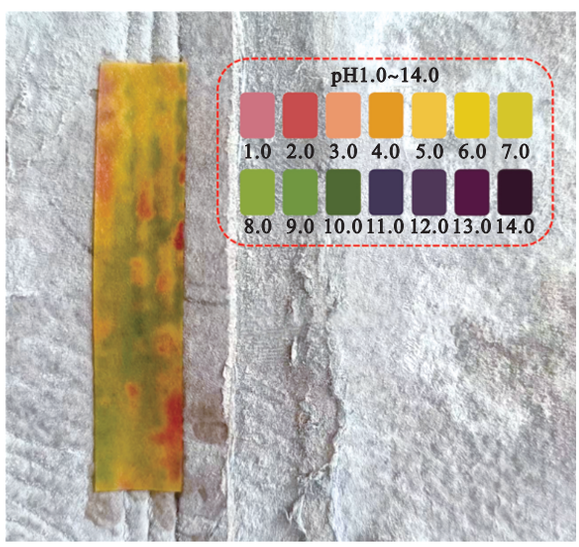


图1 工况环境下缝纫线附近的酸碱性

Fig. 1 Acidity and alkalinity near sewing threads under working condition

1.2 老化过程

将缝纫线浸泡在不同温度的H_2SO_4或NaOH溶液中.处理后的样品在进行下一步操作前用超声波清洗机清洗,并在常温环境下干燥至恒重.最后一次处理后,样品用超声波清洗机清洗并干燥至恒重.老化过程如图2所示.循环1次为一次交互腐蚀,循环2次为二次交互腐蚀.不同样品的老化状态如表2所示.当进行130和150 ℃下的老化时,使用疏水性材料将酸或碱溶液浸湿的缝纫线包裹,并置于烘箱中加热.实验证明,加热2 h后缝纫线仍保持湿润状态.

1.3 材料表征

缝纫线的拉伸性能是评价缝纫线品质的主要指标.采用INSTRON 3365万能拉伸试验机测定MPIA缝纫线的拉伸性能,十字头速度为100 mm/min.每组数据由20个样本的测试值取平均得到.

采用ZB-NZ135A耐折度测定仪对缝纫线的折叠耐久性进行研究.折叠频率为(175±10次/min),折叠角度为(135±2°),测试弹簧张力为9.81 N.

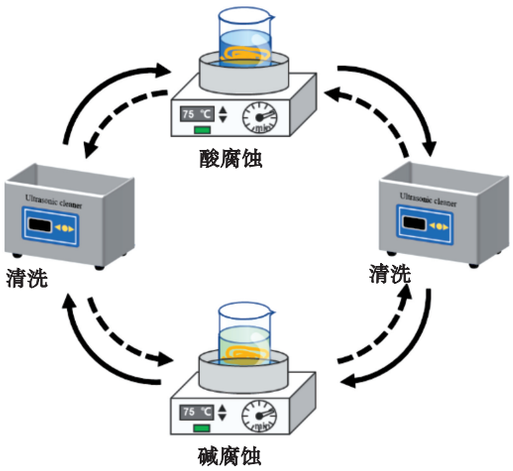


图2　实验过程示意图

Fig. 2　Schematic diagram of experimental procedure

表2　样品老化状态

Table 2　Sample aging conditions

样品	时间/h	温度/℃	一次交互腐蚀		二次交互腐蚀	
T–1	1	75	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4	NaOH
T–2	1	75	NaOH	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4
T–3	3	75	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4	NaOH
T–4	3	75	NaOH	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4
T–5	4	75	H_2SO_4	NaOH		
T–6	4	75	NaOH	H_2SO_4		
T–7	4	75	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4	NaOH
T–8	4	75	NaOH	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4
T–9	6	75	H_2SO_4	NaOH		
T–10	6	75	NaOH	H_2SO_4		
T–11	8	75	H_2SO_4	NaOH		
T–12	8	75	NaOH	H_2SO_4		
T–13	6	75	H_2SO_4	H_2SO_4		
T–14	6	75	NaOH	NaOH		
T–15	8	75	H_2SO_4	H_2SO_4		
T–16	8	75	NaOH	NaOH		
T–17	1	130	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4	NaOH
T–18	1	130	NaOH	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4
T–19	1	150	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4	NaOH
T–20	1	150	NaOH	H_2SO_4	NaOH	H_2SO_4

注：对照组样品用T–0表示，不做老化处理.

回潮率是表征纤维老化程度的重要指标.根据ASTM D2654–89a标准测定缝纫线的回潮率.该方法利用烘箱干燥技术计算织物在标准大气条件下(21±1)℃和相对湿度(65±2)%下的回潮率[14].缝纫线在标准气氛下达到水分平衡后称得质量m_1.高温会影响缝纫线的老化程度，故将试样置于65 ℃的干燥环境中干燥至恒重，并记录质量m_0.样品回潮率计算如下式.每组数据由20个样本的测试值取平均得到.

$$W=(m_1-m_0)/m_0\times 100\%.$$

式中：W为缝纫线的回潮率；m_1为样品在水分平衡时的质量；m_0为烘箱干燥后样品的质量.

采用Bruker红外光谱仪对老化前后的MPIA缝纫线进行红外光谱分析.以4 cm^{-1}的分辨率对样品进行扫描，获得400~4 000 cm^{-1}波数的光谱.

热重分析(TGA)是一种测量样品质量随温度升高而变化的热分析技术.使用STA449F3型同步热分析仪测定MPIA缝纫线的热稳定性.测量在氮气氛围中进行，温度范围为25~1 000 ℃，升温速率为10 ℃/min.所有样品测量前在干燥器中干燥24 h.测得的样品质量约为5 mg.

使用Gemini 300扫描电子显微镜对样品的纤维形态进行评估.测试前，在样品表面溅射镀金以保证导电性.施加10 kV的加速电压，放大倍数为2 000.

2　结果与讨论

2.1　机械性能分析

机械性能的退化是缝纫线失效的主要原因.拉伸断裂强力和断裂伸长率是评估缝纫线机械性能的关键指标.老化温度、老化时间和酸碱腐蚀顺序对缝纫线的机械性能影响较大.

温度对缝纫线拉伸断裂强力和断裂伸长率的影响如图3所示.MPIA滤袋的正常使用温度应低于150 ℃.因此，本文的腐蚀温度设置为75，130和150 ℃.可以看出，缝纫线的拉伸性能随腐蚀温度的升高而降低.当温度为150 ℃时，经酸碱溶液二次交互腐蚀后，缝纫线的拉伸断裂强力保持率和断裂伸长率保持率分别为37.1%和20.9%.力学性能随着腐蚀温度的升高而降低，这是因为温度的升高导致分子活性增加，从而使碰撞更有效、反应速率加快[15].

单次腐蚀时间对缝纫线拉伸性能的影响如图4所示.滤袋的平均使用寿命约为3年，但在恶劣环境下使用时，滤袋寿命会缩短.缝纫线是滤袋必不可少的部件，在使用过程中无法更换.因此，缝纫线的性能直接影响滤袋的功能和使用寿命.从图中可以看出，时间的增加对缝纫线拉伸性能影响较小.这进一步证明，在多因素耦合环境下，缝纫线会在短时间内失效，这与观察到的

现象相吻合.

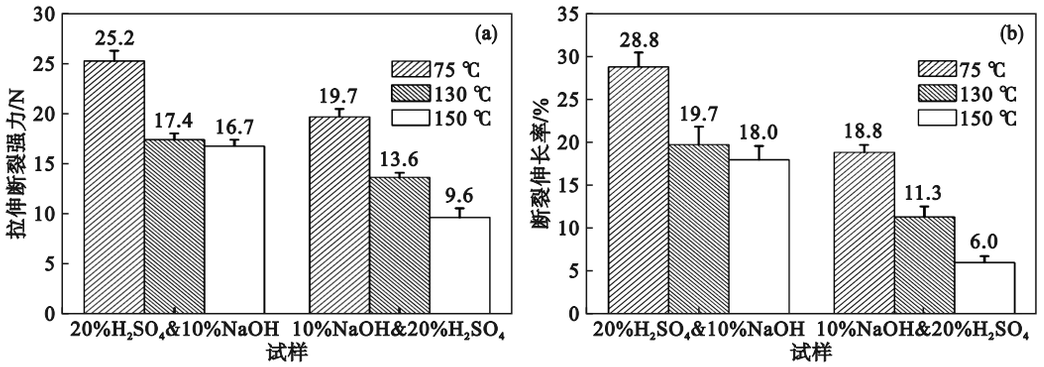


图3 MPIA缝纫线的拉伸性能与老化温度的关系

Fig. 3 Relationship between tensile properties and aging temperature of MPIA sewing threads

(a)—拉伸断裂强力;(b)—断裂伸长率.

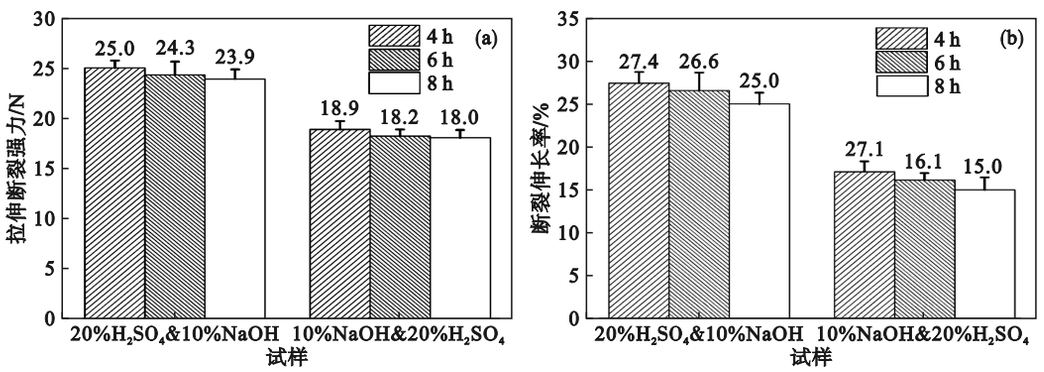


图4 MPIA缝纫线的拉伸性能与老化时间的关系

Fig. 4 Relationship between tensile properties and aging time of MPIA sewing threads

(a)—拉伸断裂强力;(b)—断裂伸长率.

酸性气体和碱性物质对材料的腐蚀是复杂的,可分为3种情况:①酸性气体和碱性物质同时与滤袋接触,导致酸性物质和碱性物质部分中和,在这种情况下缝纫线仅受酸性或碱性物质的腐蚀;②酸性气体首先与材料接触,在这个过程中,材料先被酸腐蚀,再被碱腐蚀;③碱性物质首先与材料接触,在这个过程中,材料先被碱腐蚀,然后被酸腐蚀.目前的大部分研究主要针对缝纫线在单一酸或碱环境下的腐蚀.本文讨论高温高湿环境下的②和③情况.

酸碱腐蚀顺序对缝纫线拉伸性能的影响如图5所示.酸和碱腐蚀顺序的改变对缝纫线的拉伸性能有显著影响.主要原因是MPIA在酸溶液和碱溶液中产生的物质不同.MPIA在酸溶液中水解产生间苯二甲酸,其在水溶液中的溶解度较小[16].因此,MPIA在酸性溶液中的产物黏附在纤维表面,减缓随后的腐蚀进程.MPIA在碱性溶液中产生对苯二甲酸钠,其在水中的溶解度较大,可完全溶于水,不会对后续的腐蚀过程造成影响[17].

图6为酸腐蚀、碱腐蚀和酸碱交互腐蚀对缝纫线拉伸性能的影响.其中,T-9,T-10,T-11,T-12为酸碱交互腐蚀后样品的拉伸数据;T-13,T-14为酸腐蚀后样品的拉伸数据;T-15,T-16为碱腐蚀后样品的拉伸数据.结果表明:20% H_2SO_4溶液对MPIA缝纫线拉伸性能的影响大于10% NaOH溶液.对MPIA缝纫线拉伸性能影响程度由小到大依次为:H_2SO_4+NaOH,NaOH+NaOH,H_2SO_4+H_2SO_4,NaOH+H_2SO_4.

滤袋的高效和长期运行依赖于缝纫线的优越性能,特别是其在初始使用和老化期间的拉伸性能.缝纫线的直径对缝纫线性能的影响最为显著.本文研究了多因素耦合老化对不同直径缝纫线(0.15,0.20,0.25和0.32 mm)拉伸性能的影响.图7为老化对不同直径缝纫线的断裂强力保持率和断裂伸长率保持率的影响.缝纫线的拉伸性能随缝纫线直径的增大而增强.老化后,直径较小的缝纫线的断裂强力保持率和断裂伸长率保持率下降较大.当使用环境比较复杂或环境中存在

腐蚀性物质时,应选用直径较大的缝纫线缝制的滤袋.

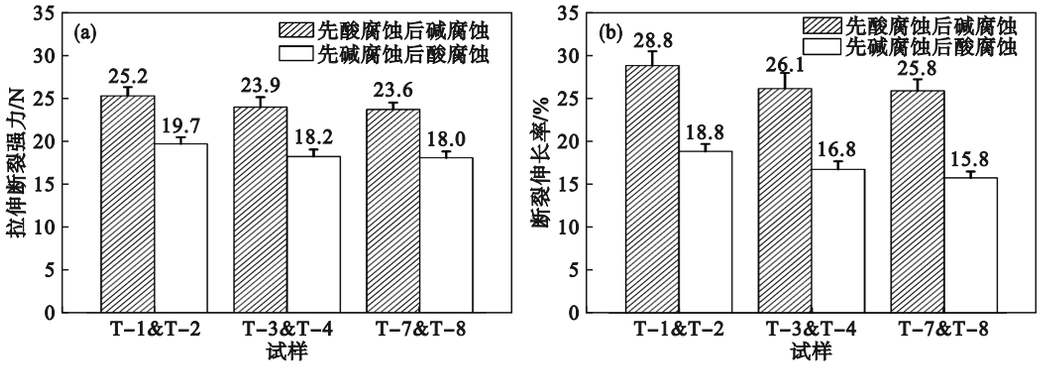


图5　MPIA缝纫线的拉伸性能与老化顺序的关系

Fig. 5　Relationship between tensile properties and aging sequence of MPIA sewing threads

(a)—拉伸断裂强力;(b)—断裂伸长率.

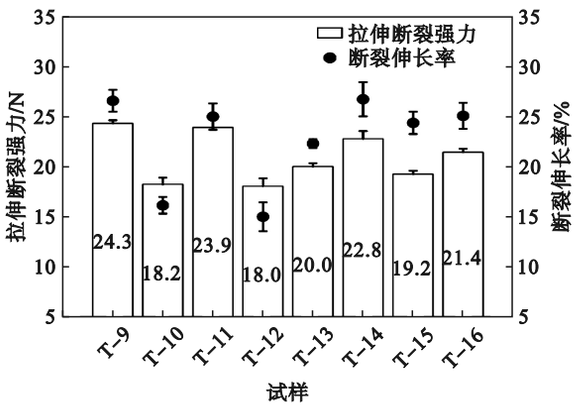


图6　PMIA缝纫线在酸碱交互腐蚀、单一酸腐蚀和碱腐蚀下的拉伸性能

Fig. 6　Tensile properties of PMIA sewing thread under alternating acid and alkali corrosion, single acid corrosion, and alkali corrosion

脉冲射流清洗过程中的高压气流会使缝纫线反复弯曲.因此,有必要对缝纫线老化前后的耐折性能进行测试和分析.图8为不同老化程度下缝纫线耐折性能的变化.多因素耦合老化对缝纫线的耐折性能有非常显著的影响.缝纫线经H_2SO_4和NaOH溶液(温度为150 ℃,时间为1 h)的二次交互腐蚀后,平均耐折次数从928.5次降至12.5次.改变腐蚀顺序后,缝纫线的平均折叠寿命为4.6次.缝纫线折叠耐久性的下降可归因于其机械性能的下降和脆性的增加[18].

2.2　回潮率分析

不同老化程度下MPIA缝纫线的回潮率如表3所示.可以看出,老化后试样的回潮率明显增加,且回潮率的变化趋势与机械性能的变化趋势相似.回潮率的增加表明纤维的吸湿能力增强,从而使缝纫线更加容易受到酸性气体和碱性颗粒物的腐蚀.缝纫线回潮率增加主要归因于两个因素:一是水解导致MPIA缝纫线中羧基数量增加,羧基是亲水基团,有助于增强纤维吸收水分的能力;二是老化后的纤维表面变得粗糙,表面存在大量裂纹,导致其结合水的能力增强.

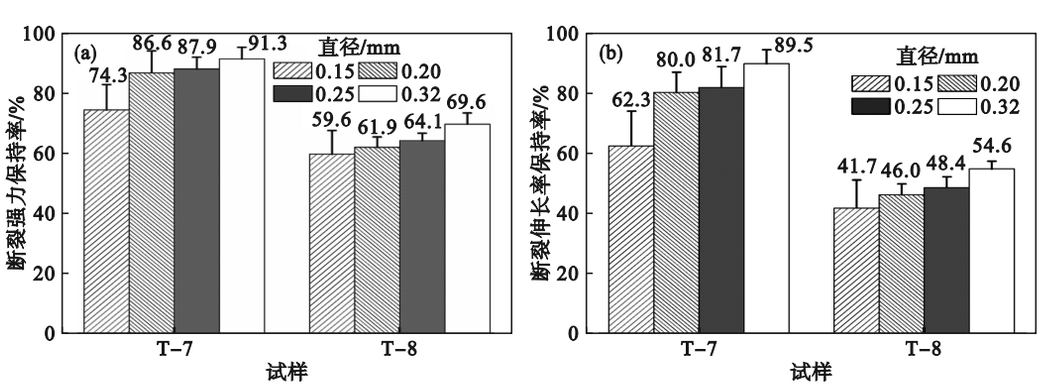


图7　不同直径PMIA缝纫线在多因素耦合作用下的拉伸性能变化

Fig. 7　Variation of tensile properties of PMIA sewing threads with different diameters under multi-factor coupling

(a)—拉伸断裂强力保持率;(b)—断裂伸长率保持率.

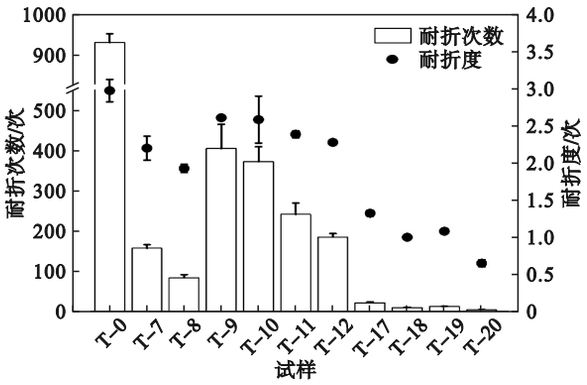


图8 缝纫线耐折性能变化

Fig. 8 Change of flex resistance of sewing threads

2.3 官能团分析

水解会导致MPIA大分子链断裂,特别是主链上的官能团和端基,如酰胺键和酰胺端基.图9a为多因素耦合老化前后MPIA缝纫线的红外光谱图.老化后缝纫线的FT-IR光谱发生明显变化,特别是在3 450 cm^{-1}处的亚胺基吸收峰和1 080 cm^{-1}处的酰胺键拉伸峰.MPIA缝纫线水解通常伴随着亚胺基的形成和酰胺键的减少.分子链的变化可归因于水解反应.MPIA在酸性和碱性环境下的水解化学反应结构如图9b所示.MPIA在NaOH溶液中水解生成间苯二甲酸钠和间苯二胺;在H_2SO_4溶液中水解生成间苯二甲酸和间苯二胺.

表3 样品在不同老化状态下的回潮率

Table 3 Moisture regain of samples at different aging conditions

样品	回潮率/%
T-0	6. 19±0. 006
T-7	8. 17±0. 008
T-8	10. 53±0. 016
T-18	10. 47±0. 021
T-20	13. 44±0. 014

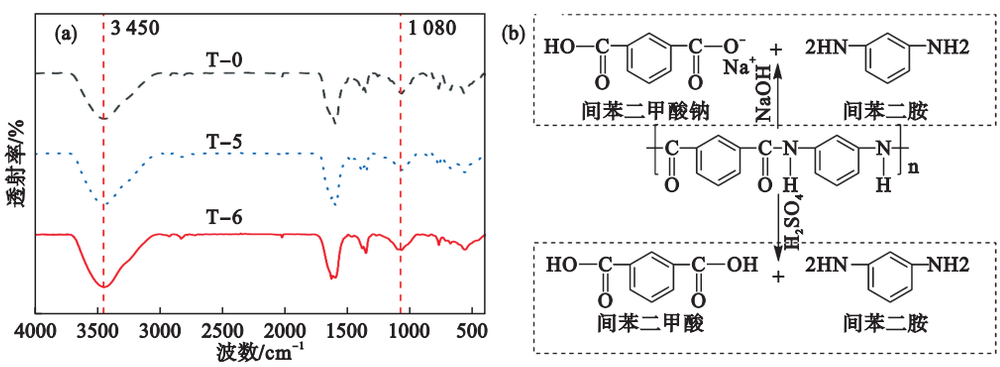


图9 老化前后纤维的红外光谱和纤维水解的化学结构图

Fig. 9 Infrared spectrum of fiber and chemical structure diagram of fiber hydrolysis before and after aging

(a)—红外光谱;(b)—芳纶水解结构图.

2.4 热稳定性分析

图10为不同环境下老化后样品的TG和DTG曲线.MPIA的热降解可分为4个阶段:第1阶段为0~100 ℃,该阶段热失重速率较大,主要由于缝纫线中的水分蒸发;第2阶段温度范围为100~400 ℃,除T-20号样品外,其他样品没有发生明显的热降解,T-20号试样在25~400 ℃发生热降解的主要原因是该样品的老化程度更大,分子链发生了严重断裂,生成大量单体,且单体在25~400 ℃下会发生挥发;第3阶段为400~600 ℃,该阶段缝纫线发生明显失重,失重速率随老化程度的增加而增大,该阶段失重的主要原因是聚间苯二甲酰间苯二胺的热分解,热降解主要发生在第3阶段[19];第4阶段为600~1 000 ℃,此阶段缝纫线发生缓慢的热失重,直至纤维完全碳化.

图11a~图11d分别为样品T-0,T-5,T-6和T-8的SEM图像.从图中可以看出,未老化的缝纫线纤维表面非常光滑,纤维粗细均匀且排列紧密.老化后的纤维表面比较粗糙,纤维变细且表面有大量附着物.纤维表面的形貌与缝纫线的力学性能是相互关联的.缝纫线的机械性能随纤维表面损伤程度的增加而降低.

图11e~图11g分别为样品T-0,T-19和T-20的显微图像.可以看出,未经处理的纤维为白色,老化后纤维的颜色变为棕黄色.高温环境下,经酸溶液和碱溶液二次交互腐蚀后,缝纫线变细,且缝纫线的纤维黏结在一起.改变酸和碱的腐蚀顺序后,缝纫线纤维之间变得蓬松,纤维变脆,更容易发生断裂.

耦合老化后,纤维直径发生显著变化.通过测定不同环境下老化纤维的直径,分析了多因素

耦合老化对MPIA纤维直径的影响.图12为T-0，T-5，T-6，T-8试样的纤维平均直径.结果表明，纤维平均直径随老化程度的增加而减小.纤维平均直径减小的主要原因是在老化过程中，纤维表面与内部反应之间缺乏同步性，导致纤维表皮脱落.

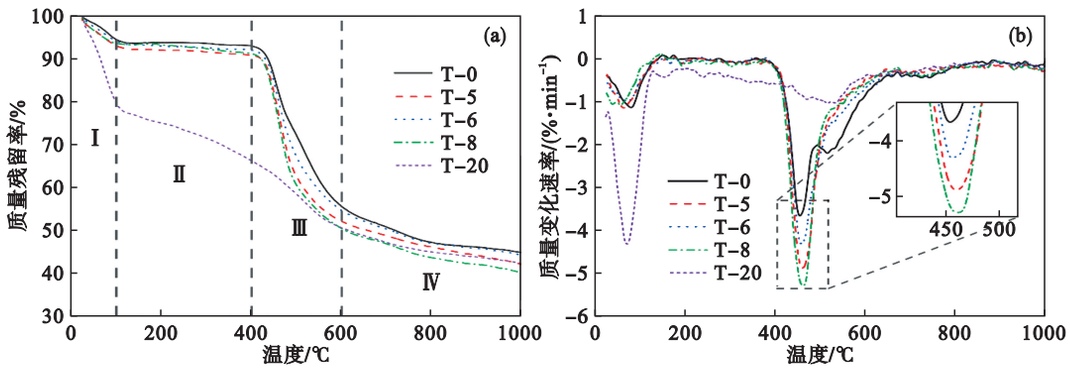


图 10　不同老化程度下缝纫线的热失重

Fig. 10　Thermogravimetric curves of sewing threads under different aging degrees

(a)—失重率TG曲线；(b)—失重速率DTG曲线.

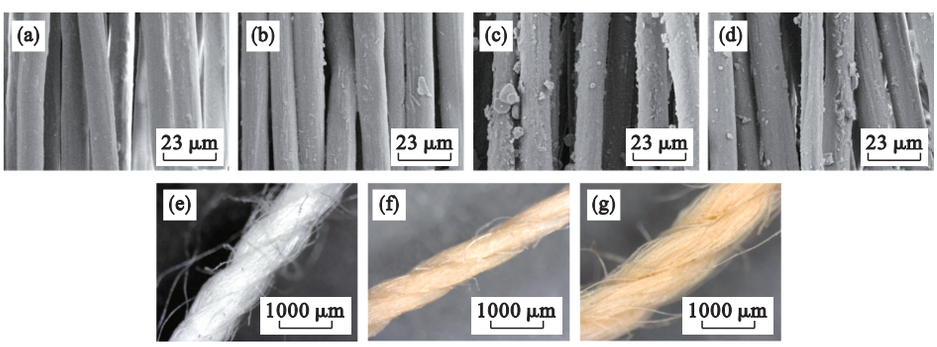


图 11　纤维的SEM图像和电子显微镜图像

Fig. 11　SEM images and electron microscope images of fibers

(a)—T-0；(b)—T-5；(c)—T-6；(d)—T-8；(e)—T-0(放大图)；(f)—T-19；(g)—T-20.

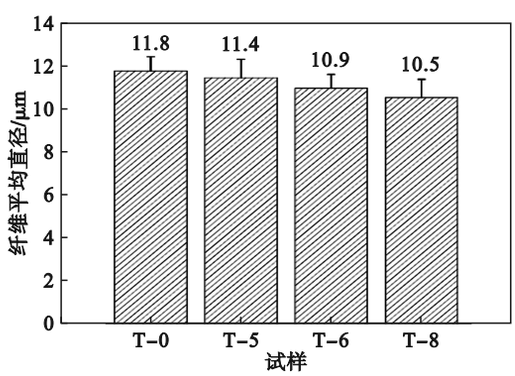


图 12　不同老化程度下纤维平均直径的变化

Fig. 12　Changes in fiber mean diameter under different aging degrees

3　结　　论

1）老化温度对缝纫线老化程度的影响较大，在其他影响因素不变的情况下，当老化温度从75 ℃增至150 ℃时，缝纫线的拉伸断裂强力和断裂伸长率分别从25.2 N和28.8%减小到16.7 N和18%.

2）酸碱腐蚀顺序变化时，缝纫线的老化程度有明显变化.主要原因是缝纫线在酸性环境下会生成间苯二甲酸，其难溶于水，会附着在纤维表面，从而减缓老化进程.

3）在不考虑缝纫线直径对滤袋过滤效率影响的情况下，可以适当增加缝纫线的直径来提高缝纫线的耐腐蚀性.

4）在复杂环境下，缝纫线的老化机理通常比较复杂.根据本文研究结果提出以下延长缝纫线使用寿命的方法：控制环境温度和湿度；使用PTFE浸渍缝纫线以增强其耐腐蚀性；使用酸性溶液对缝纫线进行预腐蚀处理.

参考文献：

[1] Singh P, Mukhopadhyay A, Gupta P. Performance of surface finished polyester filter media exposed to different dust types with the variation of dust concentration [J].

Powder Technology, 2023, 426:118614.

[2] Huang W Z, Shen H, Xu G B. Structure and properties of sewing thread made of modified polyphenylene sulfide and polytetrafluoroethylene [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 125117.

[3] 代峰, 柳静献. 钢铁企业除尘用涤纶滤料在复杂烟气环境下的老化行为分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 883-889.
(Dai Feng, Liu Jing-xian. Analysis of the aging behavior of polyester filter media for steel companies in a composite environment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2024, 45(6): 883-889.)

[4] Wu Y J, Xu Z Y, Liu S Q, et al. Emission characteristics of $PM_{2.5}$ and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148782.

[5] Yao Y P, Han Z Q, Tian W, et al. Three condensation paths of exhaust and its five effects on exhaust gas recirculation (EGR) cooler fouling and thermal performance: a review [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 47: 103099.

[6] Zhou Y F, Sun Z H, Jiang L, et al. Flexible and conductive meta-aramid fiber paper with high thermal and chemical stability for electromagnetic interference shielding [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 533: 147431.

[7] Wan S, Li Z, Du Z J, et al. Synergistic effects of aramid fibre and resorcinol-formaldehyde-latex-coated aramid fibre on improving the wear resistance of nitrile rubber composites [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2023, 32(5): 533-541.

[8] 柳静献, 代峰, 毛宁. 酸碱交互腐蚀对芳纶滤料性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(7): 1034-1040.
(Liu Jing-xian, Dai Feng, Mao Ning. Effect of acid-base interaction corrosion on properties of aramid filter [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(7): 1034-1040.)

[9] Nguyen-Tri P, El Aidani R, Leborgne É, et al. Chemical ageing of a polyester nonwoven membrane used in aerosol and drainage filter[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, 101: 71-80.

[10] Rozy M I F, Ito K, Une K, et al. A continuous-flow exposure method to determine degradation of polyphenylene sulfide non-woven bag-filter media by NO_2 gas at high temperature [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(12): 2881-2889.

[11] Gu H W, Cao Q, Li J H, et al. Enhancing the comprehensive performance of bisphenol a epoxy resin via blending with a bio-based counterpart[J]. *Polymer*, 2023, 280: 126038.

[12] Rostami R, Zarrebini M, Mandegari M, et al. The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 97: 118-124.

[13] Huang W Z, Zhang B, Alassod A, et al. Influence of sulfuric acid solution on the durability of high-performance modified polyphenylene sulfide and polytetrafluoroethylene sewing thread for high-temperature filtration [J]. *Textile Research Journal*, 2022, 92(15/16): 2541-2552.

[14] Maou S, Meftah Y, Bouchamia I, et al. Alkali-treated date palm fiber-reinforced unsaturated polyester composites: thermo-mechanical performances and structural applications [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2023, 32(12): 1581-1593.

[15] Li H L, Zhang K F, Fan X T, et al. Effect of seawater ageing with different temperatures and concentrations on static/dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173: 106910.

[16] Jafari P, Barzegar-Jalali M, Hemmati S, et al. Determination of the solubility profile of isophthalic acid in some aqueous solutions of betaine-based deep eutectic solvents: study the extent of H-bonding interactions between starting materials of deep eutectic solvents in aqueous medium[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2023, 35:101208.

[17] Park Y, Shin D S, Woo S H, et al. Sodium terephthalate as an organic anode material for sodium ion batteries [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(26): 3562-3567.

[18] Li Q H, Gao Y T, Hu W F. Folding endurance and damage mechanisms of SiC fiber braided fabrics [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(23): 38339-38350.

[19] Shu R, Zhang Q, Zhao Y B, et al. An efficient method to recycle and reuse meta-aramid from used dust filter bags[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 299: 121692.