

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

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: 为研究高温烟气中酸碱耦合作用对滤料性能的影响, 在3种不同温度(45, 75和130 °C)下对涤纶滤料进行酸碱交互老化试验. 发现涤纶滤料在高温酸碱耦合环境下的耐水解性能较差, 且先受到碱再受到酸腐蚀对滤料产生巨大影响. 在130 °C下, 经碱性环境和酸性环境的交互老化后, 滤料的拉伸断裂强度和面层剥离强度分别为由1 638.8, 143.1 N下降到1 100.8, 19.1 N, FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy)显示, C—O吸收峰减弱, 表明水解过程中的聚对苯二甲酸乙二醇酯大分子链断裂, 这也是发生水解和性能下降的主要原因.

关键词: 涤纶针刺毡; 钢铁行业废气; 高温酸碱交互; 机械性能; 表面形貌; 化学结构

中图分类号: TS 174

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)06-0883-07

Analysis of the Aging Behavior of Polyester Filter Media for Steel Companies in a Composite 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 study the effect of high-temperature flue gas on the performance of filter bags, acid-base interaction aging tests were conducted on polyester filter media at three different temperatures (45, 75 and 130 °C). The results revealed that polyester filter media exhibited poor resistance to hydrolysis in high temperature acid-base coupled environments, and when subjected to alkali followed by acid corrosion, the filter media experienced significant degradation. The tensile breaking strength and surface peeling strength of the filter media decreased from 1 638.8 and 143.1 to 1 100.8 and 19.1 N, respectively, after interactive aging in alkaline and acidic environments at 130 °C, FT-IR showed that the C—O absorption peak was weakened, indicating that the macromolecular chain of polyethylene terephthalate was broken during hydrolysis, which was the main reason for the occurrence of hydrolysis and performance degradation.

Key words: polyester needle felt; iron and steel industry waste gas; high temperature acid-base interaction; mechanical properties; surface morphology; chemical structure

钢铁产业作为中国社会的关键产业, 2019年钢产量高达9.96亿t, 占全球钢铁产量的53.3%^[1]. 由于钢铁企业产生大量的颗粒物, 对环境和人的健康造成严重影响^[2], 据GBD(global burden of disease)统计, 中国在2019年因空气污染而死亡的人数超过180万, 其中钢铁企业颗粒物排放约

占全国废气颗粒物排放的9.2%, 因此钢铁企业废气的排放受到了广泛关注. 近十年来钢铁企业颗粒物排放量呈下降趋势, 这是因为钢铁企业使用更加先进的技术, 工业结构明显优化, 但对钢铁企业颗粒物的控制仍然是重中之重. 袋式除尘器因其良好的过滤性能和经济性成为工业粉尘和

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174215); 辽宁省重点研发计划项目(2019JH2/10100004); 浙江省重点研发计划项目(2020C03089); 沈阳市社会治理科技专项(20-206-4-09); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项(2021JH1/10400023).

作者简介: 代峰(1998-), 男, 辽宁盘锦人, 东北大学博士研究生; 柳静献(1966-), 男, 河北元氏人, 东北大学教授, 博士生导师.

烟气控制的重要技术之一,滤袋作为其关键组成部分,其性能直接影响颗粒物过滤效率和颗粒物控制成本^[3].

钢铁企业排放的废气具有量大、污染物多、成分复杂等特点.通常钢铁的炼铁炉、钢铁二次烟气等场合除尘烟气温度大多在 40~130 ℃之间,且废气中含有大量的 SO₂、NO_x等酸性气体以及因脱硝过程中氨逃逸产生的少量碱性气体和脱硫过程中多余的碳酸氢钠^[4-5].当烟气温度在露点温度以下或温度波动大时,气体易在滤袋表面结露,致使滤袋在使用过程中表面呈单纯酸或酸碱交互的氛围,其理化性质很快受到破坏,且在高温酸碱环境下涤纶针刺毡水解严重,使得滤袋机械性能和过滤性能显著下降.在高压喷吹气流和含尘气流的冲击下,滤袋极易发生破损,导致滤袋失效.在 1 条或几条滤袋破损失效的情况下易造成连锁效应,导致整个除尘系统失效.滤袋破损不仅导致除尘效率降低,也会增加更换滤袋和设备维护的成本.因此,更深入地了解高温酸碱环境对涤纶滤料的影响和滤料的老化机理对于袋式除尘器的长期运行非常重要.

柳静献等^[6]研究了温度、时间因素对涤纶滤料水解特性的影响.发现涤纶针刺毡水解受温度、时间影响较大,135 ℃水解 12 h 后,纬向强力保持率下降到 61.6%,水解后纤维间空隙变大,滤料尺寸收缩. Gai 等^[7]采用碱处理和石磨相结合的工艺回收废聚酯纤维,发现碱处理后纤维强度严重降低. Yan 等^[8]通过显式溶剂模型深入了解了聚酯/棉混纺织物的水解机理,发现催化水分子的存在和数量对活化能有显著影响,而溶剂水分子的存在对活化能影响不大. Rostami 等^[9-10]研究了涤纶纤维在 10% 的氢氧化钠溶液中水解后的性能,对老化前后纤维的机械性能、直径等进行测量,发现碱处理的初始状态纤维发生严重失重,但超过一定时间后,失重率减慢.

大多数对涤纶针刺毡水解老化的研究是在高温蒸汽或低温碱性环境下,很少关注到高温酸碱交互环境下滤料的稳定性^[11-18].本文旨在进一步了解暴露于高温酸碱交互复杂环境下的涤纶滤料的性能变化和失效机理.通过在 45、75 ℃下进行 10% 氢氧化钠和 20% 硫酸溶液轮流浸泡,以及对浸酸或碱液的涤纶滤料在 130 ℃下轮流加热,来模拟涤纶滤料在高温酸碱环境下的失效过程.对老化前后涤纶针刺毡的理化性质进行详细地表征和研究,包括机械性能、物理化学结构和耐热性能.期望确定高温酸碱环境下涤纶滤料破

坏模式,为钢铁冶炼中的滤料耐老化研究提供参考.

1 材料和实验方法

1.1 材料

涤纶针刺毡测试材料由国内某企业提供,滤料基本性能参数如表 1 所示,其中 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 是指每分钟内,通过 1 m^2 截面的气体的体积.氢氧化钠购自中国广东汕头西陇科学股份有限公司,硫酸购自中国辽宁沈阳鑫盛化工有限公司,质量分数为 98%.

表 1 涤纶滤料基本参数	
Table 1 Parameters of polyester filter material	
参数	数值
面密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	544±7. 106
透气度/($\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$)	18. 86±1. 132
厚度/mm	1. 85±0. 083
平均纤维直径/ μm	16. 94±0. 805

1.2 实验方法

1.2.1 滤料的老化处理

首先,配置 20% 的硫酸溶液和 10% 的氢氧化钠溶液,如图 1①过程所示,配置好的溶液进行密封避光处理.然后,分别在 45、75 和 130 ℃下对涤纶针刺毡进行酸碱交互处理,酸碱交互处理过程如图 1②所示,在高温酸或碱环境中老化 2 h 后取出,经蒸馏水洗涤烘干后放入碱或酸环境中继续老化 2 h 后取出,经蒸馏水洗涤烘干,并在测试前密封,这样的试样称为“老化”试样.进行 130 ℃酸碱交互处理时,使用耐高温且疏水的材料将浸酸或碱液的涤纶针刺毡进行包裹,使用铝箔进行密封处理,并在 130 ℃的烘箱中加热 2 h.经测试,密封处理后的试样在 130 ℃的真空烘箱中加热 2 h 后,仍保持湿润.不同老化温度和酸碱腐蚀顺序对应的编号如表 2 所示.

1.2.2 机械性能测试

高温烟气导致滤料老化,在方向相反的烟气过滤气流和喷吹气流的双重反复下,使得滤袋很快破损,这是滤袋失效的主要原因,因此将拉伸断裂强力 and 面层剥离强力作为评价滤料性能的主要指标.使用美国英斯特朗 INSTRON3365 防护滤料强力仪对老化前后涤纶针刺毡的拉伸断裂强力 and 面层剥离强力进行测量,拉伸位移速度为 10.0 mm/min.测试滤料的尺寸为 400 mm×50 mm,进行面层剥离强力测试时,面层剥离示

意图如图 2 所示. 每组数据均由 5 个试样的测试值取平均值获得.

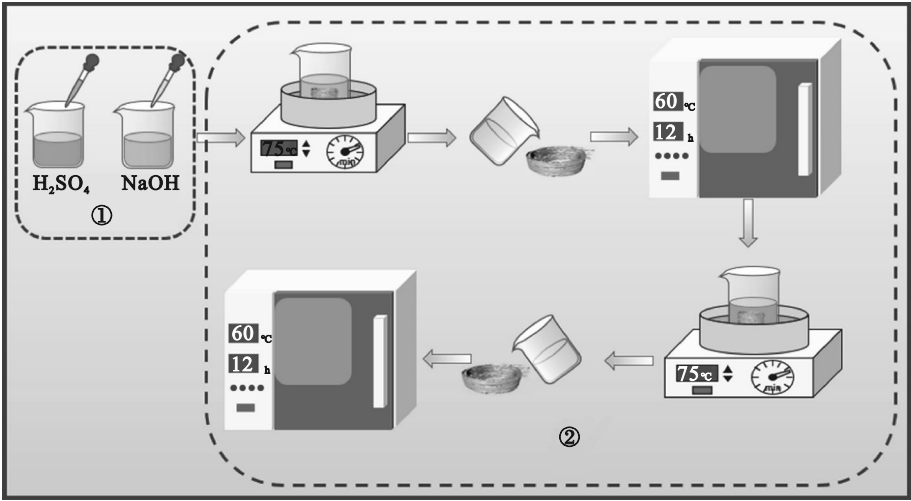


图 1 高温下酸碱交互腐蚀过程

Fig. 1 Acid-base interaction corrosion process at high temperature

表 2 不同编号试样对应的温度和酸碱腐蚀顺序
Table 2 Different numbered specimens corresponding to the temperature and acid-base corrosion order

试样	温度/℃	酸碱交互顺序	
P-0	没有任何处理,作为对照组		
P-1	45	H ₂ SO ₄	NaOH
P-2	45	NaOH	H ₂ SO ₄
P-3	75	H ₂ SO ₄	NaOH
P-4	75	NaOH	H ₂ SO ₄
P-5	130	H ₂ SO ₄	NaOH
P-6	130	NaOH	H ₂ SO ₄

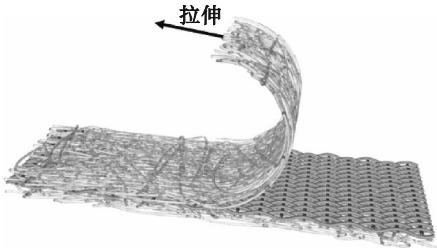


图 2 面层剥离示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surface layer peeling

1. 2. 3 面密度和透气度测试

面密度和透气度是评价针刺毡过滤性能的重要指标,通常情况下,非织造布机械性能、厚度随着面密度的增加而增大,透气度随着面密度增加而减小. 滤袋在运行过程中,面密度和透气度是评价滤袋是否正常工作的重要参数. 使用瑞士 TEXTTEST FX3300-IV 型数字式织物透气性测试仪对涤纶针刺毡的透气性能进行测量,测量面积为 20 cm²,测试压力为 200 Pa. 使用沈阳龙腾

ESJ220-4A 型万分之一分析天平测量针刺毡质量,测量尺寸为 100 mm×100 mm,并通过式(1)计算滤料面密度. 每组数据均由 5 个试样的测试值取平均值获得.

$$\sigma = \frac{m}{A}.$$
 (1)

式中:σ 为面密度, g/m²; m 为滤料质量, g; A 为滤料面积, m².

1. 2. 4 扫描电子显微镜(SEM)

高温酸碱环境下,纤维外表面发生水解老化,从而改变纤维直径和表面形貌,纤维直径和表面缺陷对纤维强力和滤料机械性能影响较大. 使用德国蔡司 Ultra Plus 型场发射扫描电镜对老化前后的涤纶纤维表面形貌进行观察,放大倍数为 500 和 2 000,并使用 Image J 对老化前后的 SEM 图片中纤维直径进行测量,定量分析高温酸碱交互环境对纤维直径的影响.

1. 2. 5 FT-IR 测量

针刺毡的强度很大程度取决于纤维的强度,而纤维的抗张强度主要取决于相对分子质量、纤维的皮芯结构及缺陷分布. 因此,对纤维内部基团进行观测来推断纤维是否发生水解以及聚对苯二甲酸乙二醇大分子链是否发生断裂尤为重要. 使用德国 BRUKER 傅立叶红外光谱仪对老化前后涤纶纤维内部基团的变化进行测试并分析,光谱采集范围为 400~4 000 cm⁻¹,每个光谱扫描 16 次,分辨率为 4 cm⁻¹,测试前对 KBr 进行干燥处理,将 KBr 和待测样品以 100:3 的质量比混合,并制成薄片进行测试.

1.2.6 耐热性能测试

经高温酸碱环境老化后的涤纶针刺毡的耐热性能极有可能发生变化.使用德国耐驰 STA449F3 型同步热分析仪对试样的失重率 TG 与失重速率 DTG 曲线进行测试,待测样品质量约为 5 mg,测试温度范围为 25~800 °C,测试条件为氮气氛围,升温速率为 10 °C·min⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 机械性能

图 3 显示了不同老化程度下涤纶针刺毡的拉伸断裂强力和面层剥离强力数据.由图 3a 可看出,未老化试样的纬向拉伸断裂强力大于经向,随着温度的升高,纬向拉伸断裂强力下降幅度较大,经 130 °C 碱酸交互作用 4 h 后,纬向拉伸断裂强力由 2 513.8 N 降为 899.3 N;经向拉伸断裂强

力由 1 683.8 N 降为 1 100.8 N.由图 3b 可看出,未老化试样的经向剥离强力大于纬向,高温酸碱交互作用对涤纶针刺毡的剥离强力影响较大,经 130 °C 碱酸交互作用 4 h 后,纬向面层剥离强力由 127.5 N 降为 17.4 N;经向面层剥离强力由 143.1 N 降为 19.1 N.机械性能的损失可以归结为水解过程中,纤维表层水解,与纤维主体脱离,纤维强力下降,导致纤维之间的缠绕力降低,其次是纤维中的大分子链断裂,使得纤维强力降低,导致滤料机械性能下降.高温潮湿,特别是在酸碱环境下,对滤料的拉伸断裂强力和面层剥离强力影响较大,烧结过程中的烟气温度通常为 100~150 °C,且含尘气流和清灰喷吹气流压力较大,极易造成滤袋破损或面层脱离,因此除尘过程中需保持工作温度在结露温度以上,以及控制腐蚀性气体排放浓度.

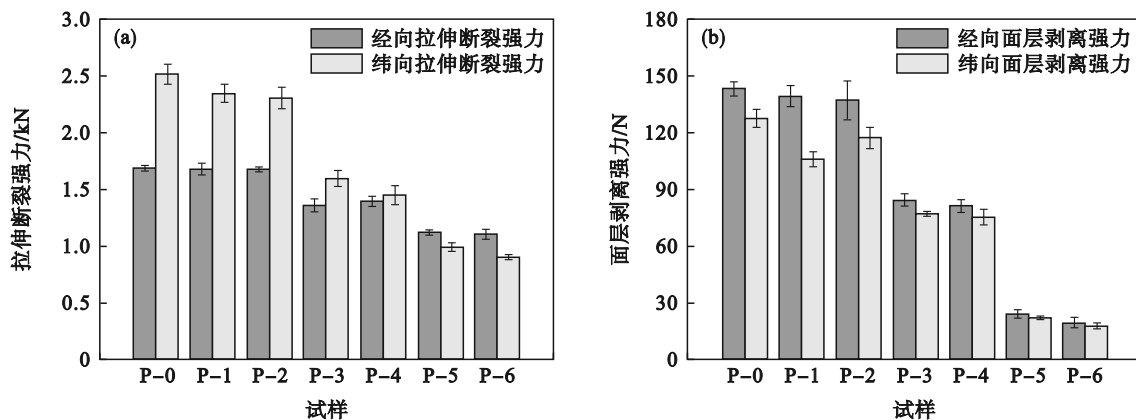


图 3 不同老化程度下滤料的机械性能

Fig. 3 Mechanical properties of filter media under different degrees of aging

(a)—拉伸断裂强力; (b)—面层剥离强力.

2.2 面密度和透气度

图 4 显示了不同老化程度的滤料的面密度和透气度的变化率.可以看出,随温度的升高,滤料的面密度变化率降低,透气度变化率升高,这是因为纤维水解生成的乙二醇、对苯二甲酸或对苯二甲酸钠从纤维表面脱落,导致滤料整体减重,且孔径增加.当温度较低时,酸碱交互顺序对面密度和透气度的变化率影响较小,如图 4 中 I 所示;当温度升高时,先受碱处理的影响大于先受到酸处理,如图 4 中 II 所示.温度对面密度和透气度的变化率影响较大,在 130 °C 酸碱交互环境下老化 4 h 后,滤料面密度降低了 55.3%、透气度增加了 98.1%,当改变酸碱交互顺序后,滤料面密度降低了 58.5%、透气度增加了 107.8%.

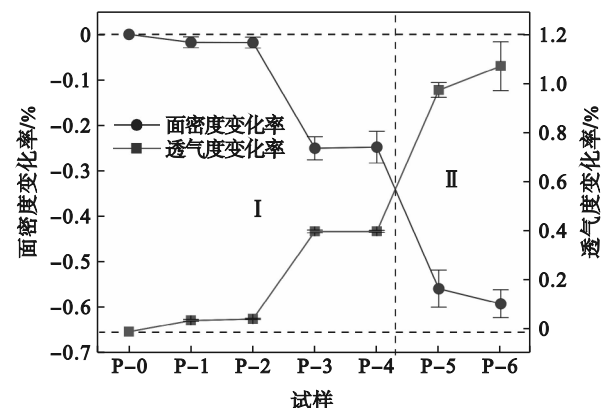


图 4 不同老化程度下滤料的面密度和透气度变化率

Fig. 4 Surface density and breathability of filter media under different degrees of aging

2.3 纤维表面形貌分析

在高温高湿,特别是存在酸、碱的环境下,涤

纶纤维极易发生水解,导致涤纶纤维被破坏.图5,图6分别为不同老化程度下滤料表面的SEM图像和与之对应的平均直径.图像显示,老化前纤维完整,表面光滑,平均纤维直径最大,为 $16.94\text{ }\mu\text{m}$,如图5a,图6a所示;在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的碱溶液和酸溶液交互浸泡4 h后,观察到纤维表面有少量纵向凹槽,纤维直径与未老化时相近,为 $16.47\text{ }\mu\text{m}$,如图5b,图6b所示;当温度升高到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,纤维表面变得粗糙,纵向出现大量凹槽,出现的凹槽增大了纤维与

溶液的接触面积,进一步加快了水解的速度,此时纤维直径是未老化时的76.4%,为 $12.95\text{ }\mu\text{m}$,如图5c,图6c所示;当温度升高到 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,纤维表面极其粗糙,表面遍布凹痕,可明显看出滤料孔径变大,此时纤维直径是未老化时的56.7%,为 $9.61\text{ }\mu\text{m}$,纤维直径较小,纤维与水分子接触面积减小,这也是水解速率先增加后减小的原因之一.随着温度的提升,纤维水解程度增加,纤维直径越小,导致了滤料的强度损失和过滤性能下降.

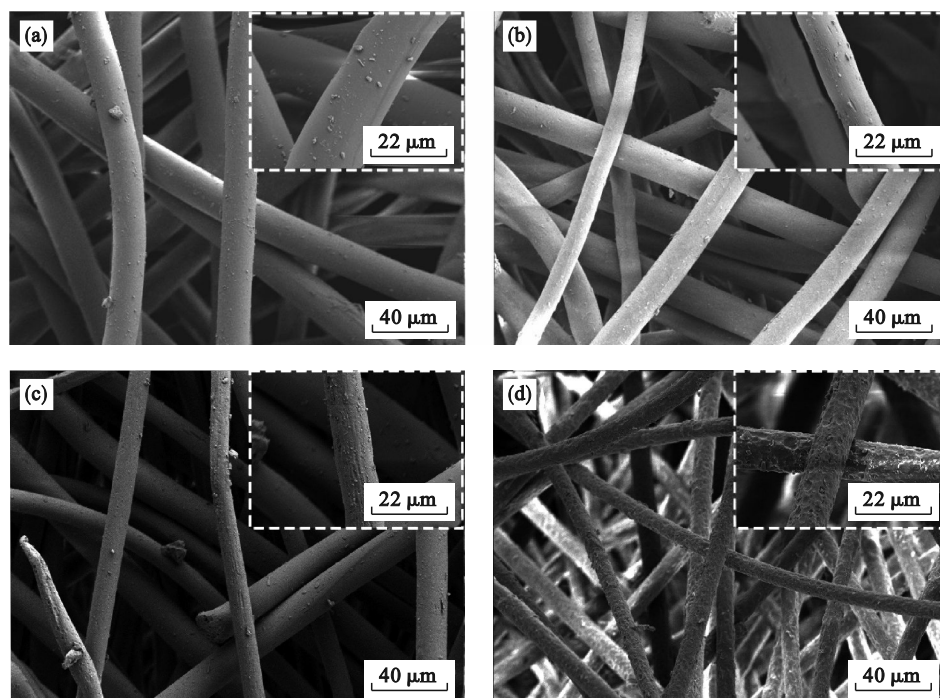


图5 SEM图像展示纤维表面形貌

Fig. 5 SEM images showing the fiber surface morphology

(a)—P-0; (b)—P-2; (c)—P-4; (d)—P-6.

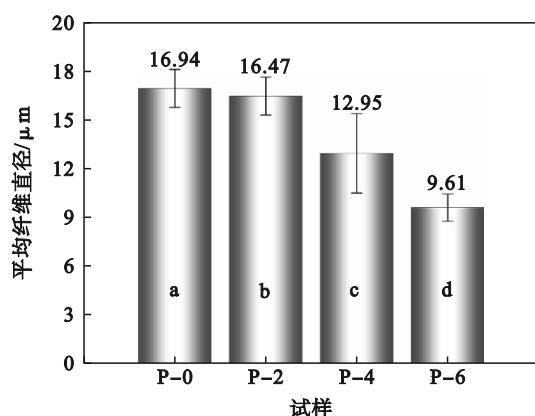


图6 SEM图像中4组试样对应的纤维直径

Fig. 6 Fiber diameters corresponding to the four groups of specimens in the SEM images

2.4 FT-IR分析

图7显示了4种不同老化程度下试样的FT-IR

光谱.可看出这4条曲线在相同的位置都有不同强度的峰,表明在高温酸碱环境下,涤纶纤维并没有产生新的官能团.涤纶滤料的化学成分为聚对苯二甲酸乙二醇酯,一般情况下,在 3420 cm^{-1} 附近对应O—H键的伸缩振动峰、在 1718 cm^{-1} 附近对应C=O键的伸缩振动峰、在 1243 cm^{-1} 附近对应C—O—C键的伸缩振动峰.纤维水解老化后,在 3420 cm^{-1} 处观察到O—H键的伸缩振动峰增强,且随着温度的升高,伸缩振动峰逐渐增强,表明纤维发生水解,且水解强度随温度的升高而增大;在 1718 cm^{-1} 和 1243 cm^{-1} 处观察到C=O键和C—O—C键的伸缩振动峰减弱,且随着温度的升高,伸缩振动峰逐渐减弱,表明聚对苯二甲酸乙二醇酯大分子链断裂程度随温度的升高而变大.

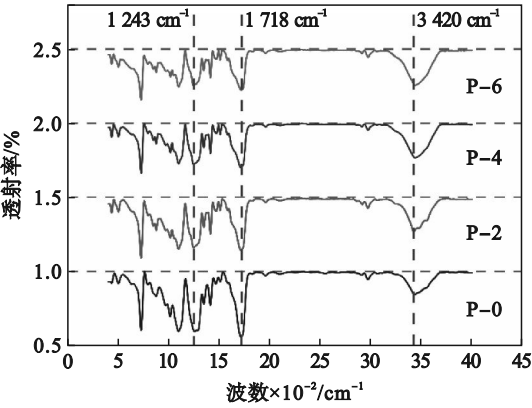


图 7 不同老化程度下滤料纤维红外光谱
Fig. 7 FT-IR spectra of fibers of filter media with different degrees of aging

图 8 显示了聚对苯二甲酸乙二醇酯在酸环境和碱环境下的反应结构示意图. 聚对苯二甲酸乙二醇酯在酸性环境下生成对苯二甲酸和乙二醇, 在碱性环境下生成对苯二甲酸钠和乙二醇. 在相同反应温度下, 在碱性环境下反应更快, 随着温度的升高, 聚对苯二甲酸乙二醇酯在酸性和碱性环境下的反应均加快, 当温度足够高、酸液碱液浓度足够大、反应时间足够长时, 涤纶纤维能够完全水解.

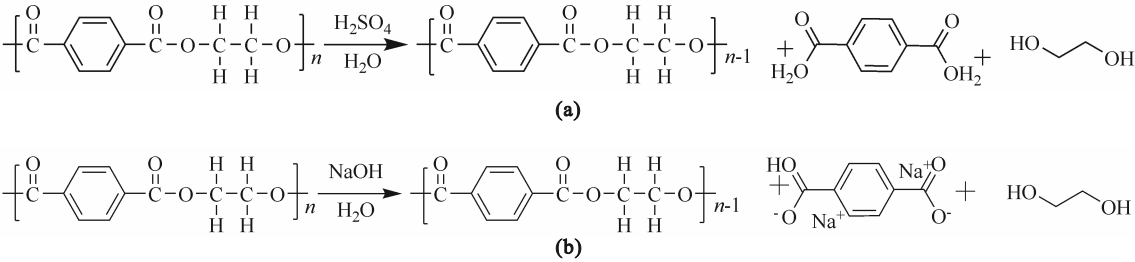


图 8 分子链断裂结构图
Fig. 8 Molecular chain breakage structure diagram
(a)—在酸溶液中; (b)—在碱溶液中.

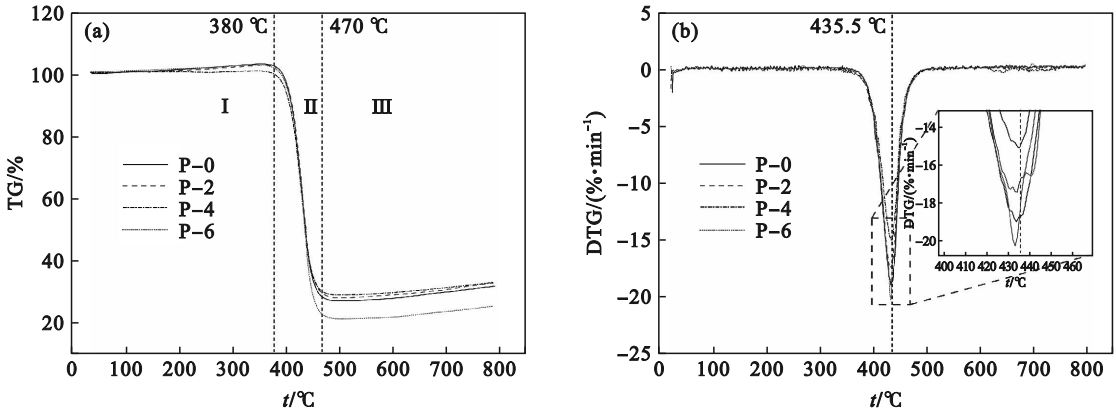


图 9 不同老化程度下滤料耐热性能
Fig. 9 Heat resistance of filter media under different aging levels
(a)—失重率 TG 曲线; (b)—失重速率 DTG 曲线.

2.5 耐热性分析

不同老化程度的涤纶针刺毡在高温环境下的失重率 TG 和失重速率 DTG 曲线如图 9 所示. 由图 9a 可看出, 4 组试样的热解曲线趋势相似, 热解过程分为三个阶段: 4 组试样在 I 阶段的失重率曲线平稳, 温度为 25~380 °C, 此阶段的涤纶滤料没有发生明显热解, 说明老化后的试样在 380 °C 以下, 短时间内不会发生热解; II 阶段是涤纶针刺毡的快速失重阶段, 温度为 380~470 °C, 此过程是热解的主要阶段; 涤纶针刺毡在 III 阶段热解完全, 由白色变为炭黑色, 并附着在氧化铝坩埚内表面. 由图 9b 可看出, 未老化试样在 435.5 °C 时的失重速率最大, 老化后试样的失重速率曲线峰值向左偏移, 且峰值对应的失重速率增加, 说明老化后滤料在小于 435.5 °C 时即可达到失重速率最大值, 且随着老化程度的增加, 峰值对应的失重速率也增加, 说明处理后的滤料的耐热性能较差. 涤纶滤料在单一的热环境下, 耐热解性能较好, 处理后的滤料与原滤料相比, 在 II 阶段的失重速率较快, 在 I 阶段没有明显区别.

3 结 论

1) 老化后滤料的拉伸断裂强力和面层剥离强力下降明显,这是由于滤料在高温、高湿、高腐蚀性环境下,涤纶纤维严重水解老化,纤维强度以及纤维之间的缠绕强度减小。

2) 涤纶滤料的失重率和透气度随着老化温度的升高而增大,当老化温度较低时,酸碱交互顺序对水解老化程度影响较小,当温度升高到130℃时,先受到碱环境老化对滤料的影响较大。

3) 处理后的纤维表面非常粗糙,产生较多凹痕,且纤维直径减小严重,这也是滤料强力下降和透气度增加的主要原因。

4) FT-IR显示,老化后试样的C—O—C键的伸缩振动峰减弱,说明了聚对苯二甲酸乙二醇的分子链发生断裂,断裂程度随温度的升高而变大。

5) 高温酸碱环境对涤纶滤料的机械性能、物理化学结构的影响较大,当温度较高时,酸碱交互顺序对老化程度影响较大。综合以上因素,钢铁企业除尘时,应尽量控制烟气温度,防止滤料表面结露以及降低腐蚀性气体浓度。

参考文献:

- [1] 杨艳艳,谢丹平,付建平,等.钢铁生产行业二(噁)英污染特征变化及其排放因子[J].环境科学,2022,43(8):3990-3997.
(Yang Yan-yan, Xie Dan-ping, Fu Jian-ping, et al. Pollution characteristics and emission factors of PCDD/Fs from iron and steel industry[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 3990-3997.)
- [2] Kumar S S, Muthuselvam P, Pugalenth V, et al. Toxicoproteomic analysis of human lung epithelial cells exposed to steel industry ambient particulate matter (PM) reveals possible mechanism of PM related carcinogenesis[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 483-492.
- [3] 柳静献,毛宁,孙熙,等.我国袋式除尘技术历史、现状与发展趋势综述[J].中国环保产业,2022,2022(1):47-58.
(Liu Jing-xian, Mao Ning, Sun Xi, et al. Review of the history, current situation and development trend of filter materials for dust removal in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022, 2022(1): 47-58.)
- [4] Tian J Q, Li Y Q, Zhou X, et al. Overwhelming low ammonia escape and low temperature denitration efficiency via MnO_x-decorated two-dimensional MgAl layered double oxides [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(3): 1925-1934.
- [5] Leng H, Gao J M, He M Y, et al. Parameter optimization on experimental study to reduce ammonia escape in CO₂ absorption by ammonia scrubbing [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 23(1): 75-81.
- [6] 柳静献,汤佳丽,毛宁.温度和时间因素对滤料水解特性的影响[J].安全与环境学报,2022,22(4):2123-2130.
(Liu Jing-xian, Tang Jia-li, Mao Ning, et al. Influence of temperature and time on the hydrolysis characteristics of filter media [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(4): 2123-2130.)
- [7] Cai M, Zhang X, Sun B, et al. Durable mechanical properties of unidirectional flax fiber/phenolic composites under hydrothermal aging[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 220: 109264.
- [8] Yan Z F, Lian J, Li M T, et al. Deeper insight into hydrolysis mechanisms of polyester/cotton blended fabrics for separation by explicit solvent models [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 596-605.
- [9] Rostami R, Zarrebini M, Mandegari M, et al. A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 117998.
- [10] 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.
- [11] Mamalis D, Floreani C, Brádaigh C M Ó. Influence of hygrothermal ageing on the mechanical properties of unidirectional carbon fibre reinforced powder epoxy composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225: 109281.
- [12] Kini M V, Pai D. The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment-a review [J]. *Materials Today*, 2021, 52: 689-696.
- [13] Farhan K Z, Johari M A M, Demirboğa R. Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 345: 128339.
- [14] Pan Y, Yan D. Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution [J]. *Composite Structures*, 2020, 261(12): 113285.
- [15] Jia H C, Chen H X, Sheng Y P, et al. Effect of laboratory aging on the stiffness and fatigue cracking of asphalt mixture containing bamboo fiber [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130120.
- [16] Jesthi D K, Nayak R K. Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites [J]. *Composites Part B*, 2019, 174: 106980.
- [17] Carra G, Carvelli V. Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents [J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 1019-1026.
- [18] Huang W Z, Zhang B, Abeer A, et al. Effects of alkali solution on the durability of sewing thread made of modified polyphenylene sulfide and polytetrafluoroethylene [J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(7/8): 778-789.