doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240190

金属冶炼企业除尘用涤纶滤料在超温环境下的劣化分析

柳静献，乔志博，毛 宁，代 峰
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：金属冶炼企业规模化生产过程中产生的超温烟气危害人体健康并对环境产生危害，因此烟尘控制受到广泛关注．涤纶滤料是冶炼领域广泛应用的滤袋材质，但设备因各种因素会产生大量超温烟气，导致涤纶滤料的物理和化学结构发生变化进而失效．为研究超温对滤料性能的影响，在7种不同温度下对涤纶滤料进行超温劣化试验．结果表明，其耐分解性能较差，在220 ℃超温劣化后，拉伸断裂强力和断裂伸长率分别由2 022. 81 N，75. 4%降至1 388. 27 N，58. 1%．红外光谱分析显示，C—O伸缩峰强度下降，表明样品在超温环境下大分子链发生断裂，这是产生热分解和水解反应以及性能下降的主要原因．

关 键 词：涤纶滤料；高温烟气；机械性能；化学结构；表面性状
中图分类号：TS 174 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3026(2026)03-0081-07

Analysis of Degradation of Polyester Filter Media Used in Dust Removal in Metal Smelting Enterprises Under Overtemperature Environment

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

Abstract: The large-scale production process of metal smelting enterprises generates overtemperature flue gas, which is hazardous to human health and the environment. Therefore, dust control has received considerable attention. Polyester filter media is a widely used filter bag material in the smelting industry, but equipment may produce excessive overtemperature flue gas due to various factors, leading to changes in the physical and chemical structure of the polyester filter media and thus causing failure. To study the effect of overtemperature on the performance of the filter media, overtemperature degradation tests were conducted on polyester filter media at seven different temperatures. The results reveal that its thermal decomposition resistance is poor. After overtemperature degradation at 220 ℃, the tensile breaking strength and elongation at break significantly decrease from 2 022. 81 N and 75. 4% to 1 388. 27 N and 58. 1%, respectively. The infrared spectra show a decrease in the intensity of the C—O stretching peak, indicating that the macromolecular chains within the samples break under overtemperature environments. This is identified as the main reason for thermal decomposition, hydrolysis reactions, and performance degradation.

Key words: polyester filter medium; high-temperature flue gas; mechanical property; chemical structure; surface property

金属冶炼在中国的社会中占据非常重要的 地位.2023年，中国钢材的产量为13.62亿t，位居

收稿日期：2024-10-24
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(52174215，52304210)；辽宁省科学技术计划项目(2021JH1/10400023).
作者简介：柳静献(1966—)，男，河北元氏人，东北大学教授，博士生导师.
通信作者：柳静献，E-mail：liujingxian@mail.neu.edu.cn.

全球第一,占全球产量的62.8%[1-2].由于金属冶炼企业在生产和制造钢材的过程中产生大量粉尘,主要表现为对人体健康的影响、对生产的影响、对大气的污染以及对精密仪器的磨损.粉尘对人体健康影响较大,轻者引起呼吸道感染,重者可导致尘肺病.据健康效应研究所(HEI)统计,2023年中国大陆地区因空气污染问题直接或间接引发的死亡人数达到2 483 961人,其中金属冶炼企业的粉尘无序排放问题最为突出,占全国废气颗粒物排放总量的11.3%.这一现状引起了全社会各界的广泛关注,因此对金属冶炼企业产生粉尘的控制迫在眉睫.

袋式除尘器是一种高效干式除尘器[3],其除尘效率极高,对于大部分粉尘都能达到99.5%以上.滤袋作为袋式除尘器的核心部件,其性能直接关系到粉尘过滤的效率和成本效益.

金属冶炼行业生产过程中产生的排放气体具有量大、内含化学物质成分复杂、温度高等特点[4].滤料的过滤是通过孔径通道的筛分作用实现的.在袋式除尘器运行工况中,设备因受热面结渣、积灰,给水温度过高、锅炉负荷增加等诸多因素,会出现较长时间超过国家标准中所规定的工作温度环境工况(以下简称"超温"),这会使滤料发生热形变和热收缩,进而导致滤料纤维形变.该形变易造成过滤效果和过滤特性下降.当温度超过130 ℃时,涤纶滤料在恶劣条件下,尤其是超温环境下,其理化特性会迅速受损,发生严重热分解,导致滤袋的机械强度和过滤效能大幅下降.在袋式除尘器的运行过程中,喷吹气流与含尘废气的不断冲击会加速滤袋的磨损和破损,进而引发滤袋失效.一旦单条或多条滤袋失效,可能会产生连锁反应,最终导致袋式除尘器乃至企业除尘过滤系统全面瘫痪.同时,涤纶过滤袋的破损不但提高了更换滤袋和维修保养的频率,还显著增加了企业安全运行的整体成本,更会导致除尘效率的下降,进而使得作业人员的健康受到影响.因此,深入探究超温环境对涤纶滤料性能的影响及其劣化机制,对于确保袋式除尘器长期稳定运行并高效除尘至关重要.

郭静等[5]研究了聚丙烯腈(PAN)纤维的3种水解途径,以及PAN纤维的水解过程与腈纶滤料的回收利用,在推动纤维差异化发展、促进纤维的循环利用及增强环境保护意识等方面均具有重要意义.Dubelley等[6]研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯(涤纶)的水解稳定性.湿热暴露引起的化学反应是众所周知的,并提出了降解的各种动力学表达式.基于已有研究的数据,提出了新的降解模型,该模型将温度和湿度的影响结合在1个方程中.柳静献等[7-8]研究了温度、时间等因素对多种常用滤料在规定工作温度下水解特性的影响.结果表明,涤纶滤料的水解过程显著受到温度与时间的双重作用.具体而言,在135 ℃水解12 h后,其纬向强度保持率降至61.6%,同时纤维间的空洞增大,导致滤料尺寸发生收缩.Kumagai等[9]利用热重分析(TG)研究了聚酰亚胺蒸汽热解过程中的热解和水解行为,发现通过降低温度以防止热解和提高蒸汽接触效率以增强材料内的水解,可以实现高产率的单体回收.Rostami等[10]深入分析了涤纶纤维在低浓度NaOH溶液处理后的性能变化,对溶液处理前后涤纶的断裂拉伸强度等机械性能以及纤维直径进行测量,揭示了NaOH溶液会导致纤维初期显著失重,但随时间推移,失重速率逐渐减缓的现象.值得注意的是,以往关于涤纶或其他典型滤料(如玻璃纤维、芳纶)水解劣化的研究多聚焦于工作温度下的蒸汽、低温碱性或酸性环境等方面[11-18],而对超温状态下涤纶滤料的稳定性研究较少且并不系统.

本文致力于深入研究涤纶滤料在超温环境下性能演变及失效机制.通过将滤料置于烘箱中分别加热至120,140,160,180,200,220,250 ℃并维持120 min,模拟涤纶滤料在超温环境下的失效过程,全面而系统地探究其劣化前后的机械强度、收缩特性、物理化学结构、宏观与微观形貌以及耐热性能等理化性质变化.期望借此明确涤纶滤料在超温环境下的失效模式,为金属冶炼行业中涤纶滤袋的抗劣化研究提供坚实的理论支撑与实践指导.

1 实验材料与方法

1.1 实验材料和实验设备

实验所用涤纶滤料样品由国内某知名企业供应,其基本性能参数如表1所示.加热装置选用BINDER FD 240型烘箱;性能检测装置选用ESJ220-4A电子分析天平、FX3300-IV型数字式织物透气性测试仪、INSTRON防护滤料强力仪、BRUKER傅里叶变换红外光谱仪、STA449F3型同步热分析仪,并使用Dino-Lite手持式数字显微镜对缝纫线形貌进行观察.

表1　本实验用涤纶样品基本参数

Table 1　Basic parameters of polyester samples used in experiment

面密度/(g·m^{-2})	透气度/(m·min^{-1})	厚度/mm
587.56	18.86	2.01

1.2　实验方法

1.2.1　滤料的劣化处理

采用平行取样法,裁剪若干组涤纶滤料,每组包含长320 mm、宽50 mm的滤布经向、纬向样品各5条,以及150 mm×150 mm正方形试验样品5片.经向指滤布编织时机器运行的方向(以下简称经向),纬向指与经向垂直的方向(以下简称纬向).

将涤纶滤料平整均匀地放置于烘箱上、下两层的各个位置,分别设置120,140,160,180,200,220,250 ℃,持续时间为2 h.加热结束后将滤料置于自然环境下干燥1 h,待样品自然冷却后取出并密封保存,用于测试.

表2　不同编号样品对应的温度

Table 2　Temperatures corresponding to different numbered samples

样品编号	温度/℃
T0	没有任何处理,作为对照组
T1	120
T2	140
T3	160
T4	180
T5	200
T6	220
T7	250

通过手持式数字显微镜观察涤纶滤料样品劣化后的形貌变化,同时采用多种设备对其断裂强力、断裂伸长率、面密度、透气性、收缩率和官能团等参数进行检测,分析其性能变化的原因.

1.2.2　机械性能测试

在非正常工作温度条件下,滤袋易遭受劣化,特别是在长期且来自四面八方的含尘废气的待过滤气流与设备本身的喷吹气流的多重、持续冲击下,滤袋的损坏速度会显著加快,成为滤袋失效的决定性因素.因此,评估滤料抗磨损性能时,主要聚焦于其拉伸断裂强力及断裂伸长率这2项关键指标.采用强力仪对各样品进行测量,设定拉伸位移速率为100 mm/min.所用样品尺寸为340 mm×50 mm,测试时每组数据均由5个样品的测试值取平均值获得.

1.2.3　面密度和透气性能测试

采用数字式织物透气性测试仪进行测量,在方形样品中部随机选择一处,放入测试仪,检测面积和压力分别选取20 cm^{2}和200 Pa.采用ESJ220-4A天平对尺寸为150 mm×150 mm的方形样品进行多次重复的质量测量,并依据式(1)计算得到样品的面密度.最终数据采用平均值法对每组5个方形样品的测量数据进行处理.

$$\sigma=\frac{M}{S}. \tag{1}$$

式中:σ为样品的面密度,g/m^2;M为样品的质量,g;S为样品的表面积,m^2.

1.2.4　宏微观形貌分析

在超出正常工作温度的环境下,涤纶纤维外表面发生热分解劣化,导致其微观结构发生变化,纤维的熔融状态与表面形貌在劣化过程中发生显著改变,其中表面缺陷对纤维强度和滤料的整体机械性能产生重要影响.为探究超温环境对纤维表面的具体影响,例如收缩率、表面颜色等,以及微观碳化情况,采用Dino-Lite手持式数字显微镜,在200倍放大率下观察了劣化前后涤纶纤维样品的表面形貌.同时,借助Image J软件对劣化前后的宏观样品图片进行边缘直径精确测量与分析.

1.2.5　傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测量

采用BRUKER傅里叶变换红外光谱仪对经过劣化处理前后的样品内部官能团和分子链的变化进行检测.通过分析样品内部官能团吸收峰强度的变化推断样品内部化学反应的程度以及大分子链的断裂情况.光谱采集范围为:400~4 000 cm^{-1},每个光谱频段均扫描16次,分辨率设定为4 cm^{-1}.

1.2.6　热失重分析

该方法研究物质在加热过程中的质量变化.本实验使用STA449F3型同步热分析仪对经过劣化处理前后的样品进行热重分析(TG),检测其热重曲线.每次在氧化铝坩埚中称取约5 mg样品,分析仪内腔充满氮气气氛,以15 ℃/min的升温速率从25 ℃升至800 ℃.

2　实验结果与讨论

2.1　机械性能

由图1a可知,没有经过劣化处理样品的纬向拉伸断裂强力明显大于经向.在超温状态下,随温度的升高,经向拉伸断裂强力大幅下降.在220 ℃作用2 h后,纬向拉伸断裂强力由2 022.81 N降为

1 388.27 N;经向拉伸断裂强力由1 294.36 N降为687.57 N.经250 ℃作用2 h后,样品几乎完全破碎,拉伸断裂强力几乎为0.由图1b可以看出,未经热分解样品的纬向断裂伸长率明显大于经向.经220 ℃作用2 h后,纬向断裂伸长率由75.4%降至58.1%,断裂伸长保持率为77.05%.经向断裂伸长率由54.7%降至44%,断裂伸长保持率为80.43%.经250 ℃作用2 h后,样品几乎完全破碎,断裂伸长率几乎为0.样品总体趋势为先降低后略微增加再大幅降低.机械性能的小幅增加可以归结为纤维受热后发生熔化,导致多股纤维粘连纠缠在一起,从而增加了纤维的拉伸断裂强力.样品机械性能的损失应归结为在热分解过程中,样品表层遭受热解,与内部基材分离,进而导致样品的拉伸断裂强力下降和样品内部各纤维丝之间的相互纠缠能力减弱.同时,劣化过程中环境温度的上升会导致样品内部大分子链发生断裂,也加剧了这一趋势.两个因素的叠加导致样品抗磨损能力下降.可以看出,超温状态下温度对滤料的机械性能影响较大.

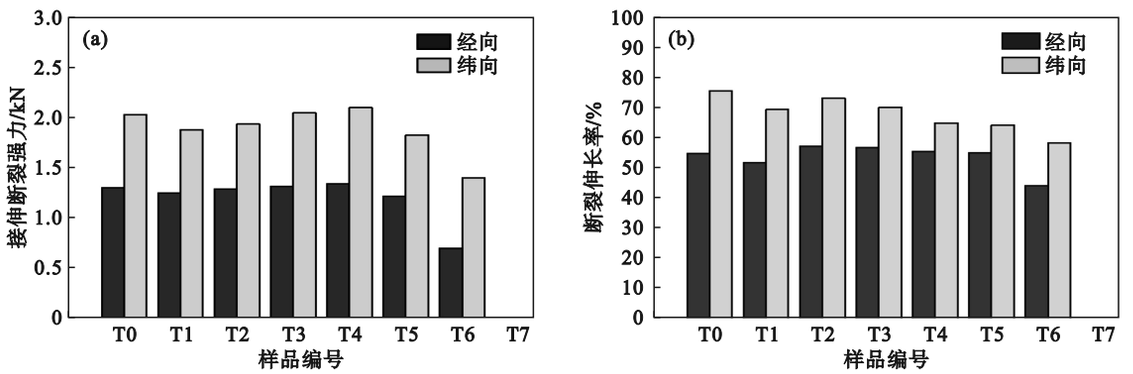


图1 不同劣化程度样品的机械性能

Fig. 1 Mechanical properties of samples at different levels of degradation

(a)—拉伸断裂强力;(b)—断裂伸长率.

2.2 面密度和透气性

图2展示了劣化过程中不同温度对样品面密度和透气度的影响.随着环境温度升高,样品的面密度逐渐降低,而透气度升高,这将导致材料结构变得稀疏,涤纶纤维之间的空隙增大,从而使滤料过滤效率降低、过滤阻力减小.这是因为涤纶滤料在超温状态下发生热分解,产生了对苯二甲酸、乙二醇、氢气、苯酚、二氧化碳、水和灰黑等物质,导致滤料面密度下降,纤维间空隙增大进而透气性增强.当样品处于a阶段时,面密度和透气性变化较快,这是因为样品受温度的影响发生了剧烈的热分解反应.当样品处于b阶段时,变化较慢,这是因为滤料受温度影响互相发生粘连、扭曲、纠缠,使滤布短时间变得更加致密.当样品处于c阶段时,面密度和透气性变化急剧加快,这是因为样品开始出现微小破洞和部分融化,增大了纤维之间的空隙,使透气性最终增加了17.28%,面密度最终降低了12.53%.

2.3 滤料形貌宏观和微观变化分析

从宏观来看,热分解试验后涤纶滤料表面出现了收缩现象,且温度越高,收缩程度越明显.随着温度的升高,涤纶滤料表面开始呈现微黄色.涤纶滤料热分解前后表面形貌、尺寸变化与未处理样品尺寸的对比如图3所示.

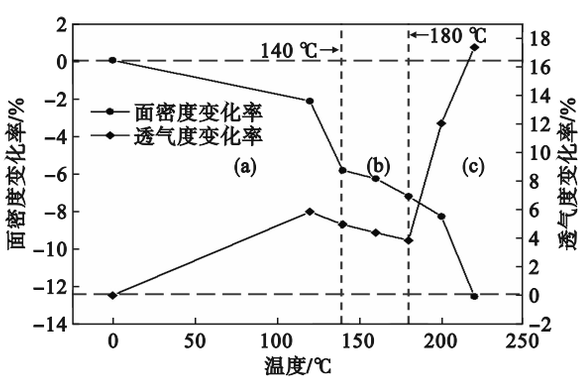


图2 不同劣化程度样品的面密度和透气性能

Fig. 2 Surface density and air permeability of samples at different degradation levels

收缩率变化曲线如图4所示.随着劣化过程中环境温度的升高,样品长度开始出现缩短现象,经向长条样品出现收缩而纬向样品长度变化不大.180 ℃时变化幅度开始增大,从正常工作温度下的1.17%增加到3.93%,开始出现明显的收缩现象.经向滤料长度变化明显大于纬向,160 ℃时变化幅度开始增大,从正常工作温度下的1.12%增加到8.47%.经向收缩变化较大、尺寸稳定性较差,是因为经向基布中包含了更多的长纤

维,而纬向基布中长纤维数量较少,当长纤维受热发生收缩时,经向收缩现象更明显.

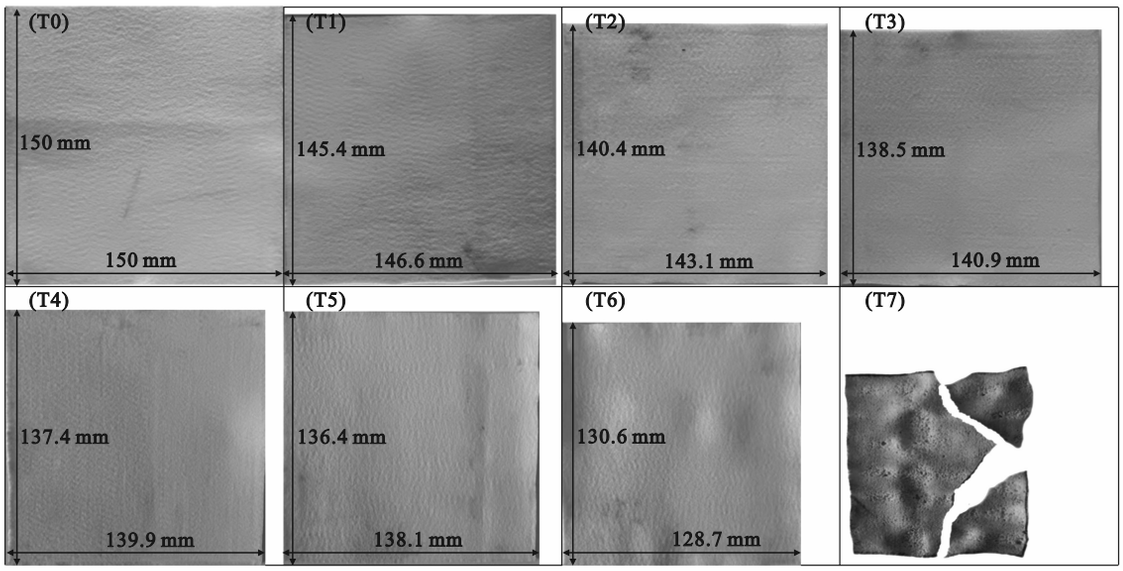


图3　不同劣化程度下样品尺寸

Fig. 3　Sample sizes at different degradation levels

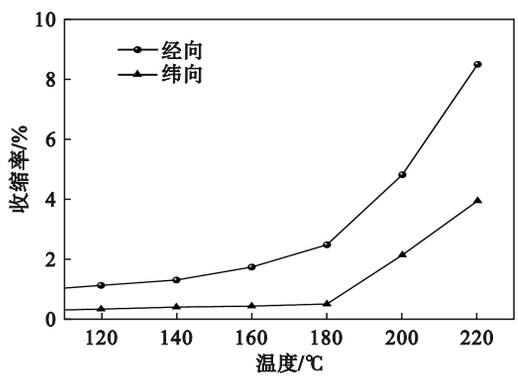


图4　不同劣化程度下样品收缩率

Fig. 4　Sample shrinkage rates at different levels of degradation

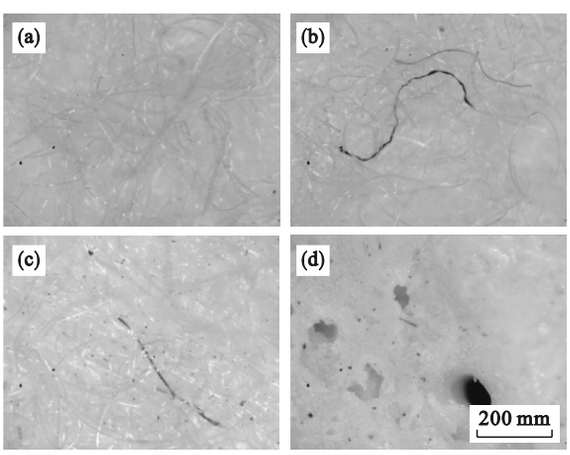


图5　纤维表面形貌

Fig. 5　Fiber surface morphology

(a)—未劣化;(b)—160 ℃;(c)—220 ℃;(d)—250 ℃.

滤袋在超温状态下持续一定时间后发生收缩现象,通常会导致滤袋的过滤面积减小,这会极大影响过滤效果,同时会增大滤袋的破损风险.由于滤袋的过滤面积减小,其承受的压力会相应增加,可能导致滤袋更易出现孔洞,进而造成生产过程中的物料泄漏,使作业人员处于污染环境中,这可能引发一系列的职业健康问题.

从微观来看,涤纶滤料热分解前后不同劣化程度的显微图像如图5所示.劣化前涤纶滤料纤维表面光滑笔直,呈现白色,排布均匀有序,纤维粗细基本一致,纤维间隙较小.经过热分解后,涤纶纤维发生破坏、发黄,出现部分碳化甚至熔融形成孔洞,完全失去过滤效果.

2.4　红外光谱 FT-IR 测量分析

图6为3种不同劣化程度的涤纶滤料的红外光谱.O—H键的伸缩振动峰主要在3 420 cm^{-1}附近,C=O的伸缩振动峰主要在1 718 cm^{-1}附近,C—O—C的伸缩振动峰主要在1 245 cm^{-1}附近.样品经过劣化处理后,C=O和C—O—C的伸缩振动峰强度减弱.可以从图中1 720 cm^{-1}和1 245 cm^{-1}处伸缩振动峰的透过率看出,且随着温度的升高呈规律性减弱.表明涤纶PET分子结构中酯基发生了明显的热分解反应,尤其是酯基中与羰基相连的C—O基团的结构发生变化,大分子链开始随着环境温度的增加发生更高程度的断裂.O—H键对应的波数为3 420 cm^{-1},随着劣化过程环境温度的升高,其透过率逐渐增大,表明纤维在热分解过程的同时与空气中的水分子结合,发生水

解反应,且水解反应的强度随温度的升高而增大.

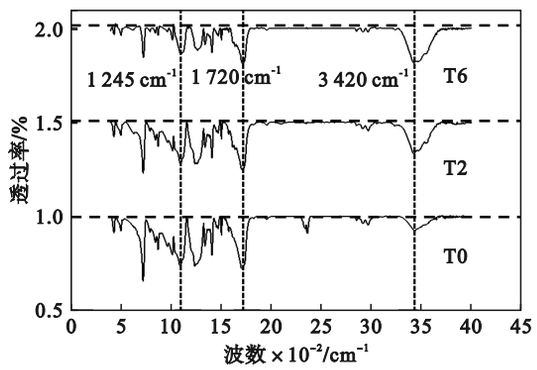


图6 样品的红外光谱

Fig. 6 Infrared spectra of samples

2.5 热重分析

不同劣化程度的涤纶滤料在氮气保护氛围下,将涤纶纤维从常温加热至800 ℃,加热速率恒定在15 ℃/min.图7为升温过程中的失重率曲线.T0,T1,T5样品的曲线呈相似走势,其热解进程可明确划分为3个阶段:在Ⅰ阶段,即温度为25~375 ℃时,各组样品的TG曲线平滑,表明样品在此阶段未经历明显的热解反应.主要为物理变化,如水分的蒸发.这意味着劣化后的样品在375 ℃以下能维持质量稳定;在Ⅱ阶段,即温度为375~485 ℃时,涤纶滤料迅速失重,此阶段是热分解的主要过程.随着温度的升高,涤纶样品发生聚酯分子链的断裂.分解反应包括无规断链和链端解聚,这一化学分解过程生成了多种产物,包括但不限于对苯二甲酸、乙二醇、氢气、苯酚、二氧化碳和水蒸气等,出现快速失重,失重率可达80%~90%.同时,随着热分解反应加剧,形成初步的碳层,这是热解反应的直接且重要的物理表现.涤纶滤料在Ⅲ阶段热解完全,失重减缓并趋于稳定.在Ⅱ阶段剩余的物质进一步碳化,形成残碳.最终,与未经处理的滤料相比,经过劣化处理的涤纶滤料在单一热环境下的残余碳含量相对较低.这一现象可归因于劣化过程中部分分子链的断裂,引起分子量的降低.

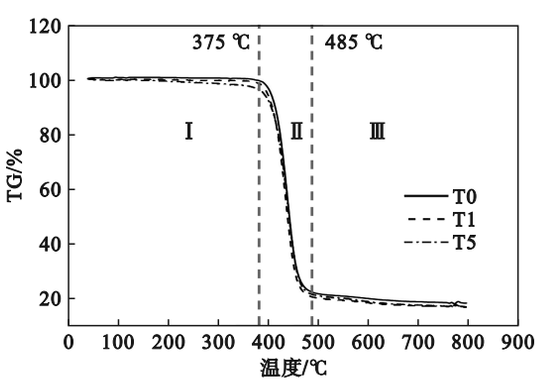


图7 不同劣化程度下样品失重率曲线

Fig. 7 Weight loss percentage curves of samples at different degradation levels

3 结 论

1)涤纶滤料在经历劣化后,拉伸断裂强力为原纬向的68.63%和经向的53.12%;断裂伸长率为原纬向的77.05%和经向的80.43%,均显著下降,导致其机械性能发生退化.具体体现为纤维本身的强度显著降低,纤维间原有的紧密缠绕程度和互相结合力明显减弱,进而影响了滤料的整体性能与使用寿命.

2)涤纶滤料的面密度随劣化温度的升高而降低,透气度随劣化温度的升高而增大.当劣化温度为120 ℃时,滤料劣化程度和速率均较小;当温度升高至180 ℃时,滤料劣化速率明显增大;当温度超过220 ℃时,滤料整体被快速破坏,完全丧失过滤性能.

3)经过劣化处理后的涤纶滤料样品的形态与质地均呈现出显著变化.样品发生了肉眼可见的收缩现象,表面由光滑转为粗糙,部分纤维开始发黄和碳化,大部分纤维熔融粘连在一起,甚至出现破洞.这是涤纶滤料强度显著下降与透气性异常升高的主要原因,严重影响其效能和寿命.

4)傅里叶变换红外光谱显示,劣化后样品中C=O和C—O—C的伸缩振动峰强度随温度升高呈规律性减弱,表明样品内部分子链发生断裂,且该断裂反应过程的剧烈程度与劣化环境温度呈正相关.

5)当滤袋长时间处于超温环境时,其理化性能会发生显著变化;环境温度超过临界值时,滤料会出现大面积破损与解体,完全丧失过滤效能.

参考文献:

[1] 罗忠河.2023年我国粗钢产量为10.19亿吨与2022年持平[EB/OL].(2024-01-22)[2024-03-22]. www.csteelnews.com/xwzx/ylnc/202401/t20240122_84064.html.
(Luo Zhong-he. In 2023, China's crude steel production is 1.019 billion tons, which is the same as in 2022 [EB/OL]. (2024-01-22)[2024-03-22]. www.csteelnews.com/xwzx/ylnc/202401/t20240122_84064.html.)

[2] 郭二宝,吕梅群,刘兴成,等.热冲击对燃煤电厂袋式除尘滤料织物性能的影响[J].环境工程,2023,41(3):84-89,102.
(Guo Er-bao, Lyu Mei-qun, Liu Xing-cheng, et al. Effect of thermal shock on fabric properties of bag filter materials for coal-fired power plants[J]. *Environmental Engineering*,

2023，41(3)：84-89，102.）

［3］ 郭凯帆，刘净兰，荣彦.袋式除尘器应用现状及研究［J］.建材与装饰，2017（19）：166-167.
（Guo Kai-fan，Liu Jing-lan，Rong Yan. Application status and research of bag filter［J］. *Construction Materials & Decoration*，2017（19）：166-167.）

［4］ 温杰，杨佳美，李蒲，等.我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征［J］.环境科学，2018，39(11)：4885-4891.
（Wen Jie，Yang Jia-mei，Li Pu，et al. Chemical source profiles of PM emitted from the main processes of the iron and steel industry in China［J］. *Environmental Science*，2018，39(11)：4885-4891.）

［5］ 郭静，相恒学.聚丙烯腈纤维的水解及其产品应用［J］.合成纤维，2009，38(7)：5-8.
（Guo Jing，Xiang Heng-xue.Hydrolysis of polyacrylonitrile fiber and its product application［J］. *Synthetic Fiber in China*，2009，38(7)：5-8.）

［6］ Dubelley F，Planes E，Bas C，et al. Predictive durability of polyethylene terephthalate toward hydrolysis over large temperature and relative humidity ranges［J］. *Polymer*，2018，142：285-292.

［7］ 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（1）：47-58.
（Liu Jing-xian，Mao Ning，Sun Xi，et al. Review of history，present situation and development trend of bag dust removal technology in China［J］. *China Environmental Protection Industry*，2022（1）：47-58.）

［8］ 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. Influence of temperature and time on the hydrolysis characteristics of filter media［J］. *Journal of Safety and Environment*，2022，22(4)：2123-2130.）

［9］ Kumagai S，Hosaka T，Kameda T，et al. Pyrolysis and hydrolysis behaviors during steam pyrolysis of polyimide［J］. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*，2016，120：75-81.

［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］ Awaja F，Pavel D. Recycling of PET［J］. *European Polymer Journal*，2005，41(7)：1453-1477.

［12］ Cai M，Zhang X，Sun B Z，et al. Durable mechanical properties of unidirectional flax fiber/phenolic composites under hydrothermal aging［J］. *Composites Science and Technology*，2022，220：109264.

［13］ Gao J，Dai Y Y，Wang X，et al. Effects of different fluorination routes on aramid fiber surface structures and interlaminar shear strength of its composites［J］. *Applied Surface Science*，2013，270：627-633.

［14］ 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.

［15］ Huang W Z，Zhang B，Alassod 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.

［16］ Lyu Y R，He H W，Chen F X，et al. Polyphenylene sulfide（PPS）fibrous felt coated with conductive polyaniline via in situ polymerization for smart high temperature bag-filter［J］. *Materials Research Express*，2019，6(7)：075706.

［17］ Wang Y J，Tian M W，Qu L J，et al. Polytetrafluoroethylene yarns with thermal stability and fire retardance by scrolled-membrane spinning［J］. *The Journal of the Textile Institute*，2017，108(2)：293-299.

［18］ 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.