

DOI: 10. 13475 /j. fzx. 20180102707

# 高强聚丙烯纺粘针刺土工布的耐久性能

邓宗才, 董智福

(北京工业大学 城市与重大工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要** 为研究高强聚丙烯纺粘针刺土工布(HPP)的耐老化性能和耐化学腐蚀性能,采用热氧老化、酸与碱腐蚀液和纯水浸泡等实验,研究了不同温度和不同化学环境对其耐久性的影响,将其与普通聚丙烯土工布(PP)耐久性进行对比。结果表明:当样品在热氧化温度为 110、120、130 °C 条件下处理 25 d 时,HPP 土工布质量保留率分别为 99.06%、98.85% 和 98.10%; PP 土工布质量保留率分别为 98.89%、98.78% 和 97.78%; HPP 土工布纵向断裂强度保留率分别为 75.00%、67.25% 和 64.71%, PP 土工布纵向断裂强度保留率分别为 72.15%、65.56% 和 54.00%。在 3 种不同液体处理下 HPP 土工布的强度损失率均未超过 5.00%,表明 HPP 土工布具有良好的耐腐蚀和耐水浸泡性。通过 Arrhenius 定理拟合出 HPP 土工布热氧反应速率表达式,预测出 HPP 土工布使用 50 a 后的强度保留率为 27.30%。

**关键词** 聚丙烯纺粘针刺土工布; 热氧老化; 寿命预测; 耐久性; 老化机制

中图分类号: TS 176 文献标志码: A

## Durability of high strength polypropylene spunbonded needle punctured geotextile

DENG Zongcai , DONG Zhifu

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering , Ministry of Education ,  
Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China)

**Abstract** In order to study the aging resistance and chemical corrosion resistance of high strength coarse denier polypropylene spunbonded needle punctured geotextile ( HPP ) , samples were measured by thermo-oxidative aging , acid and alkali solution and pure water immersion. The effects of different temperatures and different chemical environments on their durability were studied and compared with the durability of ordinary polypropylene geotextiles( PP ) . The results show that the mass retention rates of HPP geotextiles after treating for 25 d are 99.06% , 98.85% and 98.10% , respectively , at 110 °C , 120 °C and 130 °C . The retention rate of PP geotextiles after treating for 25 d is 98.89% 98.78% and 97.78% , respectively. The retention rate of longitudinal fracture strength of HPP geotextiles after treating for 25 d is 75.00% , 67.25% and 64.71% , respectively at 110 °C , 120 °C and 130 °C . At the same temperature circumstance the retention rate of longitudinal fracture strength of PP geotextiles is 72.15% , 65.56% and 54.00% , respectively. The strength loss rate of HPP geotextiles treated by three kinds of liquids is less than 5% , indicating HPP has good corrosion resistance. The expression of the thermal reaction rate of HPP geotextiles is fitted by Arrhenius theory , and the retention rate of HPP geotextiles predicted is 27.30% after 50 a.

**Keywords** polypropylene spunbonded needle punctured geotextile; thermal oxygen aging; life prediction; durability; aging mechanism

土工布作为土工材料的一种,已经广泛应用于公路、铁路建设、农业和环保等领域,其发展对促进

行业进步和国家经济建设有着重要的意义。目前土工布按照加工和生产方式的不同分为:机织土工布、

收稿日期: 2018 - 01 - 12

修回日期: 2018 - 08 - 13

基金项目: 国家科技部重点专项资助项目 ( 2016YFB0303200 2016YFB0303201)

第一作者简介: 邓宗才(1961—)男,教授,博士。主要研究方向为结构材料。E-mail: dengzc@bjut.edu.cn。

编织土工布和非织造土工布。非织造土工布比机织和编织土工布具有更好的延伸性、力学性能和水平渗透过滤性能,且成本低,生产效率高,是交通、矿山和垃圾掩埋场使用的理想材料,虽然起步较晚,但发展迅猛<sup>[1-3]</sup>。聚丙烯纤维非织造土工布,具有强度高、耐酸碱性好、耐腐蚀、耐低温、耐霉变,且具有质量轻、成本低等优点,使其在土木工程领域得到广泛应用,尤其在地下耐酸、碱环境和高寒等恶劣环境中具有不可替代的地位<sup>[4-5]</sup>。

目前,欧美发达国家已建立土工布老化相关标准,如国际标准化组织的 ISO 标准、美国 ASTM 和 AATCC 标准、欧洲 EN 标准等<sup>[6]</sup>。我国对新型土工布开发和应用研究较晚,纺粘非织造土工布一般为聚酯土工布。近年来,国家加大了对聚丙烯纺粘土工布的开发力度,国内企业生产开发了新型高强聚丙烯纺粘针刺非织造土工布(HPP 土工布)。与普通聚丙烯土工布相比,HPP 土工布具有强度高、过滤性好等优势;但是目前缺少关于 HPP 土工布耐老化和耐腐蚀性能的实验数据,制约了其推广使用,因此,迫切需要研究新型 HPP 土工布在使用环境条件下的服役寿命、失效及抗老化机制等问题,以较准确地评估 HPP 土工布的热氧化和耐腐蚀等性能。为此,本文通过热氧老化实验和酸、碱腐蚀与纯水浸泡实验,对其在不同环境下的耐久性能进行了实验和理论研究,分析土工布在不同温度下的热氧老化及不同腐蚀环境下的耐腐蚀性能;并针对热氧环境建立 HPP 土工布寿命预测方程,以期 HPP 土工布的推广应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与设备

聚丙烯纺粘长丝非织造土工布,天鼎丰非织造布有限公司;短切聚丙烯土工布,山东路德公司;1 800 W 加热棒,新韶光公司;硫酸,山东大成公司;氢氧化钙,天津君正公司。

上海市巴姆仪表公司生产的 KH-55 A 型电热恒温箱;英国 Hounsfield 公司生产的 H10 K-S 型力学试验机。

### 1.2 土工布样品的制备

土工布试样按照 GB/T 13760—2009《土工合成材料取样和试样准备》取样。高强聚丙烯纺粘针刺土工布试件简称为 HPP 土工布,短切聚丙烯土工布试件简称为 PP 土工布。2 种土工布的外形尺寸均为 300 mm × 200 mm,采用游标卡尺进行准确测量,精度为 0.02 mm。其中 HPP 土工布面密度为

200 g/m<sup>2</sup>,PP 土工布面密度为 400 g/m<sup>2</sup>。

### 1.3 热氧老化实验方法与性能测试

热氧老化实验温度设为 110、120、130 ℃。按照 GB/T 17631—1998《土工布及其有关产品抗氧化性能试验方法》将 HPP 和 PP 土工布垂直悬挂在烘箱中的试样架上,避免与金属接触,防止土工布加速降解而影响实验结果。整个实验中,烘箱内温度波动不大于 ±1 ℃,温度分布偏差不大于 ±1.5 ℃,空气中氧气体积分数为 21%。

将土工布放置在烘箱中热氧老化 25 d,期间每隔 5 d 取出 5 片土工布试样,用精度为 0.5 g 的天平测试其质量变化,按照 GB/T 15788—2005《土工布及其有关产品宽条拉伸试验》测试土工布断裂强度,并分析质量和断裂强度的衰减规律。

### 1.4 化学耐久性实验方法与性能测试

按照 GB/T 17632—1998《土工布及其有关产品抗酸、碱液性能的试验方法》进行酸、碱腐蚀和纯水浸泡的 3 组化学耐久性实验。将 HPP 土工布试样在不受任何应力的情况下放置于容器中,试样之间、试样与容器之间以及试样与液体表面之间间隔至少为 10 mm。硫酸溶液和氢氧化钙悬浊液每天至少搅拌 1 次。液体和试样避光放置,通过恒温器装置使溶液温度保持在(60 ± 1) ℃。

3 组耐久性实验中每组土工布的腐蚀期均为 20 d,每隔 5 d 取出 5 片土工布试样,将取出的试样放入水中清洗,然后置于 0.01 mol/L 的碳酸铵溶液中清洗,最后再用水清洗,以确保腐蚀液被清洗干净,于室温下晾干,再测量土工布质量、断裂强度<sup>[5]</sup>。化学溶液具体配制方法如下。

1) 酸腐蚀实验配方:浓度为 0.025 mol/L 的硫酸溶液(pH = 1.3),水为 3 级水(评价我国地表水水质的一种分级)。

2) 碱腐蚀实验配方:氢氧化钙饱和悬浮液,质量浓度为 2.5 g/L(pH = 11.65),水为 3 级水。

3) 纯水浸泡实验配方:水为 3 级水。

## 2 结果及讨论

### 2.1 热氧老化实验结果分析

#### 2.1.1 土工布试样的质量损失及分析

聚丙烯的热氧降解主要是对分子链化学键的氧化,随着温度升高最终导致化学键断裂、物理机能的下降,宏观上表现出质量、强度的降低。图 1 示出实测的不同温度下土工布热氧化后质量保留率与时间的关系曲线。

由图 1 可知,在 3 种温度下,随着时间的延长,

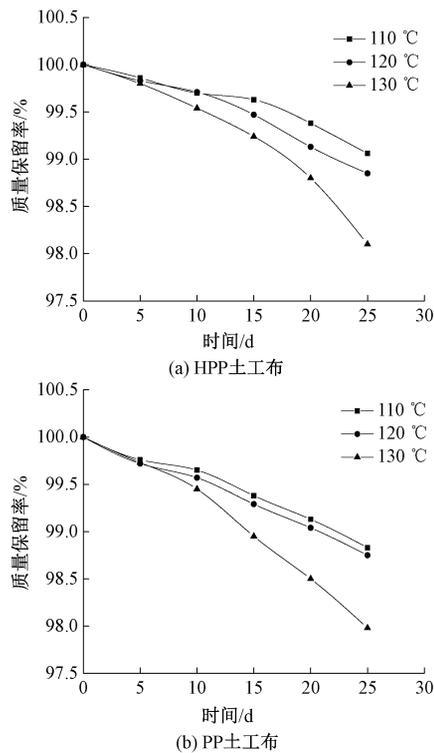


图 1 土工布热氧老化过程中质量保留率与时间关系曲线  
Fig. 1 Curves of mass retention rate versus time in thermo-oxidative aging of HPP geotextiles ( a) and PP geotextiles ( b)

HPP 土工布的质量保留率逐渐减小,且热氧老化温度越高,质量损失越快越多。随着热氧老化温度升高,HPP 土工布质量保留率的差异逐渐增大。110 °C 时,HPP 土工布在前 15 d 质量减少较为缓慢,15 d 后质量减少的速率增大。这是因为 HPP 土工布在前 15 d 的热氧化反应主要发生于织物表面,随着时间的延长,热氧化反应逐渐向织物的内部发展,热氧化反应速率加快。120 °C 时,热氧化速率加快的时间比 110 °C 时提前了 5 d,表明提高温度使 HPP 土工布热氧老化反应的速率加快。130 °C 时,曲线的斜率明显增大,表明 HPP 土工布质量减少速率加快。25 d 时 3 种温度土工布的质量保留率分别为 99.06%、98.85%、98.10%。同 HPP 土工布质量变化规律相似:110、120 °C 时,PP 土工布在前 10 d 质量减少较为缓慢,10 d 后曲线斜率增大;130 °C 时,5 d 后质量减轻速率明显提高,25 d 时质量保留率为 97.78%。

2 种土工布在 3 种温度下质量变化趋势类似,但是 110 °C 时,HPP 和 PP 土工布的质量减轻速率开始增大的时间分别为 15 d 和 10 d,25 d 时 HPP 与 PP 土工布的最终质量保留率分别为 99.06% 和 98.89%。表明 HPP 土工布热氧化反应从纤维表面开始向其内部发展的时间晚于 PP 土工布,最终质

量保留率高于 PP 土工布。130 °C 时,HPP 土工布的质量保留率曲线的斜率明显小于 PP 土工布,25 d 时质量保留率分别为 98.10% 和 97.78%。表明温度越高,HPP 与 PP 土工布的耐热氧化性能差距越大。

### 2.1.2 土工布试样的力学性能分析

不同温度下 2 种土工布断裂强度与热氧老化时间的关系如图 2 所示。其中 HPP 土工布在 130 °C 时实验数据离散性较大,5 个热氧老化时间下 5 组数据的变异系数分别为 2.5%、5.2%、6.1%、6.5% 和 8.5%。PP 土工布在 120 °C 时数据离散性较大,5 组数据的变异系数分别为 1.5%、3.6%、5.8%、6.5% 和 9.5%。2 种土工布的断裂强度保留率如图 3 所示。

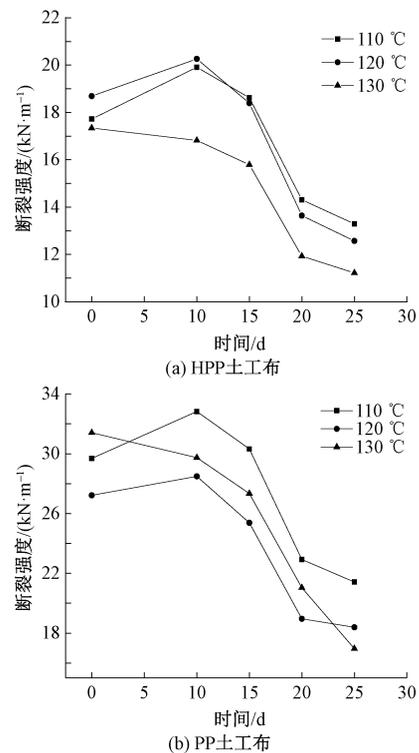


图 2 不同温度下 2 种土工布纵向断裂强度与热氧老化时间的关系曲线

Fig. 2 Curve of longitudinal breaking strength and thermo-oxidative aging time of HPP geotextiles ( a) and PP geotextiles ( b) at different temperatures

由图 2 可知,2 种土工布的热氧老化反应中,断裂强度降低过程经历了缓和—剧烈—缓和 3 个主要阶段。HPP 土工布在 110、120 °C 时,前 10 d 纵向断裂强度有微弱的增长,10 d 时纵向断裂强度分别增长 12.36%、8.39%。110 °C 时,10 ~ 15 d 时 HPP 土工布纵向断裂强度开始缓慢降低,此阶段反应较为缓和,15 ~ 20 d 断裂强度快速降低,20 d 后纵向断裂强度减小的速率开始放缓。120 °C 时,10 d 后

HPP 土工布纵向断裂强度迅速降低。130 °C 时, HPP 土工布纵向断裂强度未见增长,一直呈明显下降趋势,15 ~ 20 d 纵向断裂强度降低速率加快,20 ~ 25 d 纵向断裂强度下降的趋势开始放缓。3 种温度下 HPP 土工布纵向断裂强度分别为 13.41、12.62、11.22 kN/m。

由 PP 土工布纵向断裂强度变化可知:110、120 °C 时,PP 与 HPP 土工布纵向断裂强度变化规律类似,PP 土工布在前 10 d 下降速率明显快于 HPP 土工布,尤其在 10 ~ 15 d 期间差异显著;130 °C 时,PP 土工布纵向断裂强度一直在快速降低。3 种温度下 PP 土工布最终纵向断裂强度为 21.72、18.39、16.96 kN/m。

HPP 和 PP 土工布的断裂强度变化可分略微增加、缓和降低、剧烈降低和缓和降低 4 个阶段。其机制是:聚丙烯是结晶型高分子,在前期 0 ~ 10 d,由于热氧老化环境下分子内部结晶继续发展,断裂强度会出现微弱上升,土工布化学性质相对稳定;在中期 10 ~ 15 d,热氧对材料的损伤影响逐渐显现,老化开始向材料内部扩展,断裂强度缓慢下降;在后期 15 ~ 20 d,随着材料中积累的过氧化物等活性中间物质浓度的越来越高,热氧老化速率加快,热氧老化反应向材料内部扩展,使聚丙烯大分子发生破坏,导致断裂强度快速下降<sup>[7-8]</sup>;20 ~ 25 d 后热氧老化反应速率逐渐放缓。

图 3 示出 2 种土工布纵横向断裂强度保留率。可以看出,随着热氧老化温度的升高,2 种土工布的强度保留率均呈现不同程度的下降。相同温度下,HPP 土工布抗热氧老化性能优于 PP 土工布。110 °C 时 HPP 土工布纵、横向强度保留率分别高于 PP 土工布 2.85% 和 2.16%;120 °C 时 HPP 土工布纵、横向强度保留率高于 PP 土工布 1.69%、8.95%;130 °C 时 HPP 土工布纵、横向强度保留率高于 PP 土工布 10.71%、7.78%。随着温度升高,2 种土工布耐热氧老化性能的差异逐渐显现,HPP 土工布横、纵向强度保留率明显高于 PP 土工布。即温度升高,HPP 土工布抗热氧老化能力明显优于 PP 土工布。

2.1.3 HPP 土工布寿命推算

HPP 土工布寿命化学反应计量式为



化学反应速率  $\gamma$  可定义为

$$\gamma = k [A]^a [B]^b [C]^c$$

式中:[A]、[B]、[C]为反应物的浓度; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $e$ 、 $f$ 为平衡化学反应计量式的系数,与反应物、生成物的浓度有关; $k$ 为化学反应速率常量,与化学反应的温度

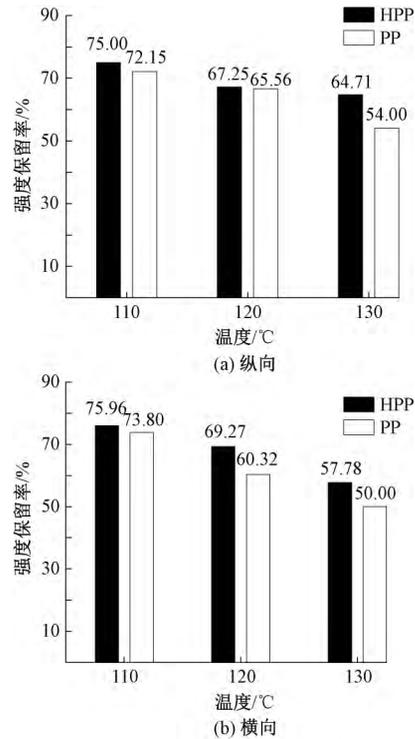


图 3 2 种土工布纵、横向断裂强度保留率

Fig. 3 Longitudinal (a) and lateral (b) breaking strength retention rate of two geotextiles

及压力有关。

化学反应速率的级数  $n$  为

$$n = a + b + c$$

大多数化学反应的速率级数为 0、1 或 2。各化学反应级数的化学反应速率见表 1。表中:  $[A]_t$  为  $t$  时刻反应物 A 的浓度,  $[A]_0$  为初始浓度;  $x = [A]_t / [A]_0$ , 用方程  $x = f(t)$  表示, 反应速率用  $dx/dt$  表示。

表 1 化学反应速率

Tab. 1 Chemical reaction rates

反应级数	$x = f(t)$	$dx/dt$
0	$x = 1 - kt$	$-k$
1	$x = \exp(-kt)$	$-k[A]$
2	$x = 1 / (1 + [A]_0 kt)$	$-k[A]^2$

高分子聚合物的老化反应级数通常为 0、1 或 2, 由于无法提前确定材料热氧老化的反应级数, 因此只能分别将实验数据代入表 1 各个函数去拟合, 偏差最小的(相关系数最大)即为反应级数的方程, 从而确定不同温度下材料的反应速率常数<sup>[9-14]</sup>。作  $\ln k$  与相应温度  $1/T$  的 Arrhenius 数据图形进行线性拟合, 确定出方程  $\ln k = a(1/T) + b$ , 求得某种温度  $T_0$  下的反应速率常量:  $k(T_0) = \exp[a(1/T_0) + b]$ 。求得反应速率常量  $k(T_0)$  后, 可计算给定时间  $t$  的土工布强度的保留率  $x(t) = F(t) / F_0$ , 具体计算过程如下: 热氧老化温度分别为 110、120、130 °C, 氧浓度为标准大气氧浓度, 分别用表 1 中的 3 种化学反应级数函数进

行拟合。经比较, 1 级反应函数拟合的相关性最好, 结果如图 4 所示, 确定该热氧老化反应级数为 1。

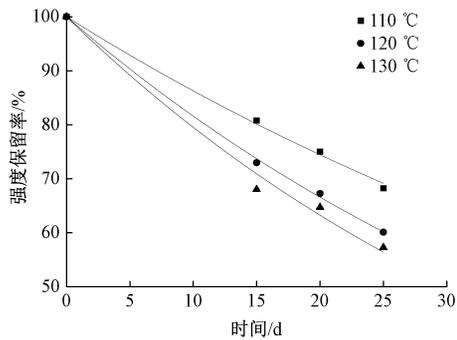


图 4 热氧老化 1 级反应拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of thermo oxidative aging order 1 reaction

由拟合函数得到 HPP 土工布在 3 种温度下的热氧老化反应速率常数  $k$ , 分别为 0.011 82、0.018 29、0.024 82。

应用 Arrhenius 公式做因变量  $\ln k$  与自变量  $1/T$  的直线, 得到反应速率函数方程

$$\ln k = -5\,677.44/T + 10.355\,92$$

北京年平均气温为 12.2 °C, 氧气体积分数为 21%, 经计算 HPP 土工布热氧老化反应速率常数为  $\ln k = -5\,677.44/(273 + 12.2) + 10.355\,92 = -9.551$ , 则  $k = 7.113 \times 10^{-5}$ 。假设工程设计年限 50 a, 热氧环境下 50 a 时 HPP 土工布的强度保留率  $x(50) = e^{-kt} = e^{-7.113 \times 10^{-5} \times 365 \times 50} = 27.30\%$ 。

## 2.2 化学耐久性实验结果分析

### 2.2.1 HPP 土工布试样的质量损失及分析

文献 [15 - 18] 表明, 普通聚丙烯土工布 (PP) 具有良好的耐化学腐蚀性能, 因此, 本文重点研究 HPP 土工布的耐酸、碱和耐水浸泡性能。HPP 土工布不同温度和溶液下的质量保留率与时间的关系曲线如图 5 所示。

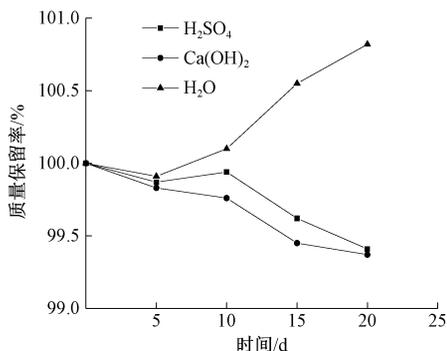


图 5 不同液体环境下 HPP 土工布的质量保留率

Fig. 5 Mass retention rates of HPP geotextiles in different liquid environments

HPP 土工布在浓度为 0.025 mol/L 的硫酸环境 (pH = 1.3) 下, 最终质量保留率为 99.41%; 在质量

浓度为 2.5 g/L 的氢氧化钙悬浮液的碱环境 (pH = 11.65) 下质量损失最大, 最终质量保留率为 99.37%; 但在纯水环境下 HPP 土工布质量增加。这是因为水分子与其他离子相比体积较小, 其渗透进入 HPP 土工布的速率较大, 使水分子较容易沿着聚丙烯的大分子链或聚丙烯的大分子链段间的空隙继续向土工布内部渗透, 导致在纯水环境下 HPP 土工布质量增加。而在酸、碱环境, 其溶质的硫酸根离子、钙离子会与水分子结合形成水化离子, 使分子半径增大, 向聚丙烯材料内部扩散的速率减小。可见, HPP 土工布在水中质量增大, 在酸环境下质量减少较小, 在碱环境下质量减少较大。但在 2 种腐蚀液体中, 质量损失率均未超过 1.0%, 说明 HPP 土工布的耐酸、碱性良好。

### 2.2.2 HPP 土工布试样的强度损失及分析

不同液体环境、不同时间下 HPP 土工布纵、横向断裂强度保留率与时间的关系曲线如图 6 所示。其中 HPP 土工布在硫酸溶液中强度离散性较大, 5 组数据的变异系数分别为 2.1%、1.5%、5.6%、4.8%、5.0%。

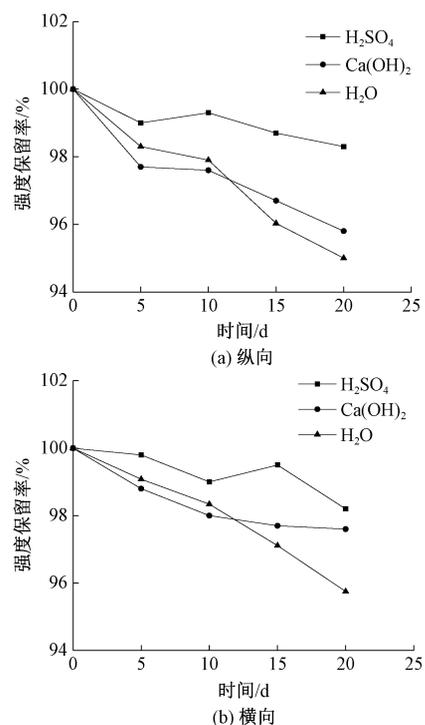


图 6 HPP 土工布纵、横向断裂强度保留率与时间的关系曲线

Fig. 6 Curves of longitudinal (a) and lateral (b) breaking strength retention rate and time of HPP geotextiles

由图 6 可见, HPP 土工布纵、横向断裂强度保留率变化规律相似, 曲线较为平缓, 表明在不同液体环境下 HPP 土工布强度衰减很小。20 d 时, 硫酸浓度为 0.025 mol/L 的酸环境下 HPP 土工布横、纵向断

裂强度保留率均为 98.20%；在 2.5 g/L 的氢氧化钙悬浊液的碱环境中，纵向强度保留率为 95.80%，横向强度保留率达到 97.60%；纯水中纵向强度保留率最小，为 95.00%，横向强度保留率为 95.75%。可知：20 d 时，HPP 土工布在纯水环境下强度损失最大，碱环境下次之，酸环境下最小。原因为：聚丙烯是由大量无极性高分子当量烷烃链构成，当聚丙烯浸泡在非氧化性酸、碱溶液中，酸和碱中的离子与水分子形成水化离子，使分子半径增大，减小水化离子向聚丙烯分子内部的扩散速率，即使当水化离子渗入到聚丙烯分子中，不会与聚丙烯分子发生化学反应而改变分子结构。也就是说这些介质的渗入，不会消除大分子间的范德华力，或者作用很微弱。

水分子体积较小，对聚丙烯材料的渗透速率较大，水分子渗入到聚丙烯分子中后，聚丙烯分子体系内的抗氧化等相关添加剂以及其他可溶性物质的溶解、迁移或抽出，导致 HPP 土工布断裂强度下降较多。整体看 3 种液体中，土工布并未发生较明显的强度衰减，表明 HPP 土工布具有良好的耐酸、碱和耐水浸泡的性能。

### 3 结 论

1) 随着热氧老化时间的延长，HPP 和 PP 土工布的质量及横、纵向断裂强度均出现不同程度的下降；相同温度下，HPP 土工布的热氧老化性能优于 PP 土工布。随着温度升高，HPP 土工布表现出较好的耐热氧老化性能。

2) 温度为 110、120、130 °C 热氧老化至 25 d 时，HPP 土工布质量保留率分别为 99.06%、98.85% 和 98.10%，而 PP 土工布质量保留率分别为 98.89%、98.78% 和 97.78%；HPP 土工布纵向断裂强度保留率分别为 75.00%、67.25% 和 64.71%，PP 土工布纵向断裂强度保留率分别为 72.15%、65.56% 和 54.00%。表明 HPP 的耐热氧老化性能明显优于 PP 土工布，具有较好的耐热氧老化性能。

3) 根据 Arrhenius 定理拟合出 HPP 土工布热氧反应速率表达式。以北京的环境条件为依据，预测出 HPP 土工布在热氧老化环境下使用 50 a 后的强度保留率为 27.30%。

4) HPP 土工布在水中质量增大，在酸环境下质量减少较小，在碱环境下质量减少较大；并且在 2 种腐蚀液体中，质量损失率均未超过 1.00%，HPP 土工布表现出良好的耐酸、碱性能。

5) HPP 土工布在 0.025 mol/L 酸环境下横、纵向断裂强度保留率均为 98.20%；在 2.5 g/L 的氢氧

化钙悬浊液的碱环境下，纵向强度保留率达到 95.80%；在纯水中纵向强度保留率为 95.00%。HPP 土工布经过 20 d 的酸、碱腐蚀和纯水浸泡，强度损失率均未超过 5.00%，表明 HPP 土工布耐酸、碱和耐水浸泡的性能良好。 FZXB

### 参考文献:

- [1] 姜瑞明, 钱竞芳. 聚丙烯纺粘法针刺非织造土工布应用前景分析[J]. 山东纺织科技, 2015, 56(4): 39-42.  
JIANG Ruiming, QIAN Jingfang. Application prospect of polypropylene spunbonded needle-punched geotextiles [J]. Shandong Textile Science Technology, 2015, 56(4): 39-42.
- [2] 全汉容. 用于垃圾填埋场防护与排水的非织造土工布的耐化学性研究[J]. 产业用纺织品, 2004, 22(9): 23-26.  
QUAN Hanrong. Chemical resistance of nonwoven geotextiles for protection and drainage in waste landfills [J]. Technical Textiles, 2004, 22(9): 23-26.
- [3] MATHUR A, NETRAVALI A N, O'ROURKE T D. Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles [J]. Geotextiles & Geomembranes, 1994, 13(9): 591-626.
- [4] HALSE Y, KOERNER R M, JR A E L. Effect of high levels of alkalinity on geotextiles: part 1: Ca(OH)<sub>2</sub> solutions [J]. Geotextiles & Geomembranes, 1987, 5(4): 261-282.
- [5] DIESING W E, GRUBB D G, SABANAS R M, et al. Comparison of the durability of geotextiles in an alkaline mine tailings environment [J]. Geosynthetics International, 2015, 8(1): 49-80.
- [6] 倪冰选, 张鹏. 土工布老化性能及测试标准研究[J]. 中国纤检, 2011(14): 52-54.  
NI Bingxuan, ZHANG Peng. Research on aging performance and test standard of geotextile [J]. China Fiber Inspection, 2011(14): 52-54.
- [7] 李洋, 李培耀, 郭兵, 等. 聚丙烯热氧加速老化评估和使用寿命的研究[J]. 塑料工业, 2015(11): 93-96.  
LI Yang, LI Peiyao, GUO Bing, et al. Study on accelerated aging assessment and service life of polypropylene [J]. China Plastics Industry, 2015(11): 93-96.
- [8] 杨旭东, 丁辛, 薛育龙, 等. 自然环境下聚丙烯土工织物的老化行为[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2007, 33(1): 57-61.  
YANG Xudong, DING Xin, XUE Yulong, et al. Ageing performances of polypropylene geotextiles under outdoor environment conditions [J]. Journal of Donghua

- University( Natural Science Edition) , 2007 , 33 ( 1 ) : 57 - 61.
- [ 9 ] 郑智能. 土工合成材料的耐久性试验研究 [ D ]. 重庆: 重庆交通大学, 2003: 51 - 61.  
ZHENG Zhineng. Prediction of the retaining rate of geosynthetics strength through using theory of reaction kinetics [ D ]. Chongqing: Journal of Chongqing Jiaotong University , 2003: 51 - 61.
- [ 10 ] 钱欣, 郑荣华, 蔡鹏. 聚丙烯的热氧老化及其影响因素 [ J ]. 浙江工业大学学报, 2002 , 30 ( 5 ) : 475 - 480.  
QIAN Xin , ZHENG Ronghua , CAI Peng. Thermal oxidative ageing and thermal stabilization of polypropylene [ J ]. Journal of Zhejiang University of Technology , 2002 , 30 ( 5 ) : 475 - 480.
- [ 11 ] MUELLER W , JAKOB I , LI C S , et al. Durability of polyolefin geosynthetic drains [ J ]. Geosynthetics International , 2009 , 16 ( 1 ) : 28 - 42.
- [ 12 ] 陈键, 张桂云, 黄仕锋, 等. 聚丙烯热氧老化机理的研究 [ J ]. 中国塑料, 2015 , 29 ( 7 ) : 63 - 66.  
CHEN Jian , ZHANG Guiyun , HUANG Shifeng , et al. Study on aging mechanism of polypropylene [ J ]. China Plastics , 2015 , 29 ( 7 ) : 63 - 66.
- [ 13 ] 胡萍, 刘佐民, 姜明, 等. 聚丙烯热降解性能研究 [ J ]. 合成材料老化与应用, 2006 , 35 ( 3 ) : 27 - 30.  
HU Ping , LIU Zuomin , JIANG Ming , et al. Research on thermal degradation property of polypropylene [ J ]. Synthetic Materials Aging and Application , 2006 , 35 ( 3 ) : 27 - 30.
- [ 14 ] 刘煜, 王浩江, 杨育农. 聚丙烯材料耐候性能研究进展 [ J ]. 合成材料老化与应用, 2013 # 2 ( 6 ) : 48 - 53.  
LIU Yu , WANG Haojiang , YANG Yunong. Development progress in weatherability of polypropylene materials [ J ]. Synthetic Materials Aging and Application , 2013 # 2 ( 6 ) : 48 - 53.
- [ 15 ] 秦永瑞. PP 非对称固液分离膜在恶劣条件下结构与性能的研究 [ D ]. 杭州: 浙江理工大学, 2014: 52 - 58.  
QIN Yongrui. The research on structure and properties of polypropylene asymmetric solid-liquid separation membrane in harsh conditions [ D ]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University , 2014: 52 - 58.
- [ 16 ] 李文发. SBS 改性 PP 材料在酸碱盐介质中的耐腐蚀性能研究 [ J ]. 北京化工大学学报, 1988 ( 4 ) : 103 - 111.  
LI Wenfa. Anti corrosion properties of PP/SBS blend material in man-made brine , NaOH , H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub> [ J ]. Journal of Beijing Institute of Chemical Technology , 1988 ( 4 ) : 103 - 111.
- [ 17 ] JEON H Y. Assessment of chemical resistance of textile geogrids manufactured with PET high performance yarn [ J ]. Polymer Testing , 2005 ( 24 ) : 339 - 345.
- [ 18 ] HAN Y J. Chemical resistance and transmissivity of nonwoven geotextiles in waste leachate solutions [ J ]. Polymer Testing , 2006 , 25 ( 2 ) : 176 - 180.

( 上接第 60 页 )

- [ 14 ] 沈巨磊. 废弃混纺纤维复合材料及其力学性能研究 [ D ]. 大连: 大连工业大学, 2010: 20 - 35.  
SHEN Julei. Waste blended fiber composite material and its mechanical properties [ D ]. Dalian: Dalian Polytechnic University , 2010: 20 - 35.
- [ 15 ] 朱文斌. 热粘合法制备三组分非织造布的工艺设计及其机械和声学性能研究 [ D ]. 上海: 东华大学, 2014: 8 - 30.  
ZHU Wenbin. Study of the process design of tricomponent thermally bonded nonwovens and the mechanical and acoustic performance [ D ]. Shanghai: Donghua University , 2014: 8 - 30.
- [ 16 ] 陈星波, 刘攀, 郁国强, 等. 特种纸用低熔点聚酯纤维热性能及结晶度分析 [ J ]. 纸和造纸, 2016 , 35 ( 3 ) : 17 - 21.  
CHEN Xingbo , LIU Pan , YU Guoqiang , et al. Thermal performance and crystallinity of low melting point polyester fiber for special paper [ J ]. Paper & Paper Making , 2016 , 35 ( 3 ) : 17 - 21.