

DOI: 10.11779/CJGE20240624

室内加速水环境温度 PVC-P 土工膜老化试验研究

张宪雷¹, 刘贺松², 马少帅¹, 杨鹏鹏¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 新疆哈密抽水蓄能有限公司工程部, 新疆 哈密 839124)

摘 要: 增塑聚氯乙烯土工膜 (PVC-P) 作为主体防渗材料应用于面膜堆石坝和抽水蓄能电站库底防渗结构, 针对运行期 PVC-P 土工膜水环境下耐久性是否满足工程服役周期要求问题, 选用中国 3 种 PVC-P 土工膜展开室内加速水环境老化和轴向拉伸力学性能试验, 探究了 PVC-P 土工膜断裂应变的衰减规律; 运用阿伦尼乌斯公式构建了 PVC-P 土工膜水环境老化模型, 分析并预测了试验用土工膜使用寿命, 利用 20°C 试验温度自然老化最长时间 180 d 试验数据验证了模型的准确性。研究表明 PVC-P 土工膜寿命周期与库水温度、增塑剂的含量以及材料厚度有关, 20°C 温度下材料 A 服役周期 49.05 a, 材料 B 与材料 C 分别为 153.76, 181.30 a。

关键词: PVC-P 土工膜; 水环境老化试验; 阿伦尼乌斯公式; 老化模型; 寿命周期

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)12-2478-10

作者简介: 张宪雷 (1984—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事膜防渗结构研究。E-mail: zhangxianlei@ncwu.edu.cn。

Experimental study on accelerated aging of PVC-P geomembrane under controlled indoor water ambient temperature

ZHANG Xianlei¹, LIU Hesong², MA Shaoshuai¹, YANG Pengpeng¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Conservancy, Zhengzhou 450045, China;

2. Engineering Department of Xinjiang Hami Pumped Storage Co., Ltd., Hami 839124, China)

Abstract: The plasticized polyvinyl chloride (PVC-P) geomembrane as the primary impermeable material is applied in membrane faced rockfill dams and pumped storage power stations. Whether its service life under hydrolysis meets the durability during the operation period, we conduct the accelerated aging tests under hydrolysis and axial tensile mechanical property tests to investigate the attenuation of breaking strain using three PVC-P geomembranes. A hydrolysis aging model is constructed by Arrhenius formula, and the service life of geomembrane is analyzed and predicted. The accuracy of the model is verified using test data collected over 180 days at a temperature of 20°C. The research shows that the life cycle of PVC-P geomembrane is related to the temperature of reservoir water, the content of plasticizer and the thickness of membrane material. At 20 °C, the service cycle of material A is 49.05 years, while that of material B and material C is 153.76 years and 181.30 years respectively.

Key word: PVC-P geomembrane; aging test under hydrolysis; Arrhenius formula; aging model; service life

0 引 言

增塑聚氯乙烯 (PVC-P) 膜属于高分子聚合物, 具有质地柔软、造价低廉、施工简便、易于修复和防渗性能优等特点被广泛应用于水利水电工程防渗结构。20 世纪八九十年代, 中国土工膜主要以 PVC-P 土工膜为主, 其后被 PE 膜取代^[1]; 国外 PVC-P 土工膜应用广泛, 据国际大坝委员会 135 公告统计数据, 全球选用膜防渗的大型土/堆石坝已有 167 座, 其中

PVC-P 土工膜 76 座, 占比约 46%^[2]。中国受限于 PVC-P 土工膜合成加工技术和有关规范限制, 其优异的力学和水力性能未能充分体现, 目前使用 HDPE/PE 膜居多^[3]。近年来, 高面板堆石坝和深厚覆盖层面板堆石坝因相对刚性防渗面板与坝体变形协调性差致使面板破坏, 坝面主体防渗 PVC-P 土工膜因柔韧性好、适应坝体变形能力强备受坝工界青睐^[4], 规范^[5]根据建筑物级别规定永久性水工建筑物合理使用年限, 防渗

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52009045); 河南省教育厅面上基金项目 (252300420051) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.52009045) and Foundation of He'nan Educational Committee(Grant No.252300420051).

收稿日期(Received): 2024-06-28 修回日期(Revised): 2025-05-13 接受日期(Accepted): 2025-05-29 网络出版日期(Online): 2025-05-30

PVC-P 土工膜耐久性是否满足工程服役周期成为人们关注的核心问题。

国内外研究学者对 PVC-P 土工膜老化机理与影响因素在自然老化和人工加速老化方面取得了一定的研究成果。杨旭东等^[6]认为土工合成材料的老化本质上是高分子聚合物发生降解和交联反应；胡明治^[7]提出影响土工膜老化的因素包括紫外线、温度、氧气、应力、湿度、酸碱度、金属离子浓度和微生物的作用等；Gumargalieva 等^[8]建立了 PVC-P 土工膜老化指标并试验验证老化原因主要为增塑剂流失和降解；Ito 等^[9]研究认为 PVC-P 土工膜无机成分和增塑剂的流失是自然老化的主要原因，热老化主要降解机制为退火效应导致的分子链重排和聚集。PVC-P 土工膜自然老化时间长，需合理设计加速老化试验方案探究衰减规律，余红松等^[10]提出人工快速、大气暴露等为常用的老化试验方法；闫永生等^[11]分析了 PVC-P 土工膜自然老化与加速老化相关性的问题；李景宏^[12]通过人工加速老化试验得到 PVC-P 土工膜纵向拉伸强度的衰减规律；Lodi 等^[13]对暴露后的 PVC-P 土工膜测试发现膜材硬度增加；Ducoulombier 等^[14]认为酸/碱性条件下水解试验应该在不同温度下测试并预测寿命。

目前已建立了属于高分子聚合物材料的寿命预测诸多方法，Plota 等^[15]对 Arrhenius 模型、TTSP 原理、WLF 模型等转换方法做了详细介绍并给出了适用条件；胡利文^[16]等采用能量方法分析水下埋深 30 cm 的 PVC-P 土工膜老化衰减性能；何怡^[17]通过人工加速热老化及湿热老化加速试验建立了用于南水北调工程渠道防渗复合土工膜拉伸强度衰减规律模型，并预测了服役周期；Srinivas^[18]利用高温测试并结合外推理论预测了橡胶部件低温工作环境下的寿命；孙彦红等^[19]利用威布尔统计方程分析人工加速老化试验后 PVC-P 土工膜力学性能衰减数据，预测了户外寿命周期；娄本星等^[20]引入“老化度”概念，构建了温/湿度作用下复合土工膜耐久性预测模型。

综上所述，研究学者主要从老化机理、老化因素等方面探究 PVC-P 土工膜耐久性，大部分选用热氧老化、紫外线老化等技术手段缩短试验周期。研究成果表明 PVC-P 土工膜力学性能的衰减主要是增塑剂的流失造成的^[8-9]，水环境虽不能够溶解有机增

塑剂，但可能加速增塑剂迁移或流失。长期处于水下工作环境的膜防渗结构中 PVC-P 土工膜耐久性是人们关注的关键问题之一，展开室内加速水环境老化试验并预测其使用寿命具有实际工程应用价值。本文选用 3 种 PVC-P 土工膜开展室内加速水环境老化试验，构建了 PVC-P 土工膜水环境老化模型，并预测了服役周期，供工程设计参考。

1 试验条件

1.1 试验设备

试验设备主要包括水环境老化试验箱和轴向拉伸试验仪两部分，水环境老化试验选用苏珀仪器有限公司生产的 HH600 型电热恒温水箱，可调节温度范围室温-99℃（图 1），温度控制精度±0.2℃；轴向拉伸试验仪器选用 CMT4304 型电子土工合成材料万能试验机，最大拉伸荷载为 30.0 kN，最大行程为 2.1 m，位移量测范围为最大行程的 0.2%~100%，量测误差范围±0.5%。



图 1 HH600 型电热恒温水箱

Fig. 1 HH600 electric constant temperature water tank

1.2 试验材料

本次试验采用国内不同厂家生产的 3 种 PVC-P 土工膜，幅宽度均为 2.0 m，单幅卷材长度 45.0 m，依次命名为材料 A、材料 B 和材料 C。依据技术规范^[21-23]得到物理和力学性能指标，详见表 1。

PVC-P 土工膜成分化验分析成果表明合成原料主要为 PVC 树脂、增塑剂、填充剂、热稳定剂、紫外线吸收剂和抗氧化剂等，材料 B 和材料 C 组成成分和质量占比基本相同，主要为厚度差异，3 种膜材的组成成分及质量占比详见表 2。

表 1 土工膜主要参数表

Table 1 Main parameters of geomembranes

材料命名	平均厚度/mm	单位面积质量/(g·cm ⁻²)	断裂强度/MPa	屈服强度/MPa	断裂应变/%	屈服应变/%
材料 A	2.000	0.281	118.690	14.440	136.020	66.310
材料 B	2.000	0.261	751.740	15.010	170.650	69.830
材料 C	2.500	0.366	723.810	14.740	170.870	68.430

表 2 膜材主要成分及质量占比
Table 2 Main composition and mass proportion

材料命名	组成成分及占比/%						
	PVC 树脂	增塑剂 (DOP) ^①	填充剂	热稳定剂 ^②	抗氧化剂	紫外线吸收剂	其它
材料 A	57.21	20.32	19.32	1.31	1.21	0.51	0.12
材料 B	54.88	32.63	8.32	2.14	1.32	0.71	—
材料 C	55.11	32.71	8.24	2.14	1.30	0.50	—

注：①DOP 指邻苯二甲酸二辛酯；②热稳定剂主要为钙类稳定剂。

1.3 试验

试验内容主要包括试验温度的选定、试样的制备和轴向拉伸力学性能测试。

(1) 试验温度确定

依据 PVC-P 土工膜热重分析试验成果确定，3 种材料热重曲线如图 2 所示。由图可知材料 A 在 0~162℃残重比 (TG) 平稳缓慢下降，材料 B 和材料 C 在 0~240℃残重比较为稳定，表明膜内存在少量增塑剂流失。162, 240℃之后 PVC 树脂及其他成分开始分解导致膜残重比急剧下降，此时膜材内部分子结构已破坏。因此为防止聚氯乙烯分子结构破坏，并结合试验温度控制的可行性，试验设置 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90℃共计 7 组水温。

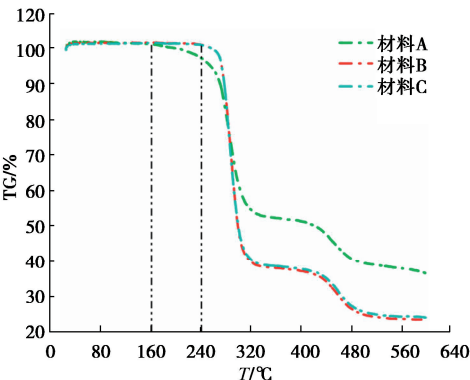


图 2 PVC-P 土工膜热重分析

Fig. 2 PVC-P geomembranes thermogravimetric analysis

(2) 试样制备

预实验成果表明试验用 PVC-P 土工膜在试验过程中纵横向尺寸及厚度均会发生变化，因此加速老化试验前裁制稍大于轴向拉伸标准试样，待达到试验时间时取出并裁制成规范^[23]要求的标准试样开展拉伸试验。

(3) 力学性能测试方法

除 20℃试验外，其余 6 组试验周期为 60 d，每 15 d 取样并使用电子万能试验机进行拉伸测试。拉伸测试控制试验环境温度为 20±2℃，每种膜相同试验条件下拉伸试样各取 5 个，取 5 个试样拉伸数据平均值作为最终试验成果。20℃试验温度条件下 3 种膜试验周期为 180 d，拉伸测试条件与上述 6 组试验完全一致，该温度下获取的长时间试样轴向拉伸试验数据不参与水环境老化模型的构建，仅用于验证模型的准确性。

1.4 试验条件控制

水环境加速老化试验过程中水箱内水面会浮起一层油状物质并存留在膜材表面，为 PVC-P 土工膜内部增塑剂或其他成分从膜内析出扩散至水体中所致。实际工程中水流冲刷带走膜表面及附近区域的大部分析出的增塑剂，土工膜附近区域水体中增塑剂浓度较低甚至趋近于零，为模拟水环境下膜防渗结构中土工膜实际工作环境，每 5 d 更换水箱内的水体，刷洗水箱内部附着物并将膜表面用吸水纸擦拭干净。

2 试验成果及初步分析

2.1 数据处理方法

工程应力计算公式如下：

$$\sigma_a = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中： σ_a 为工程应力 (MPa)； F 为轴向拉力 (N)； A 为截面面积 (mm²)。

工程应变计算公式为

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \quad (2)$$

式中： ε_a 为工程应变 (%)； L_0 为试样计量长度 (mm)； ΔL 为最大拉力时计量长度的伸长量 (mm)。

由式 (2) 可知上述计算公式假设拉伸过程中材料截面积不发生变化，但是随着拉伸试验进行材料长度逐渐增加导致受拉截面积不断变小，按照上述公式计算的工程应力-工程应变不能反映膜材真实力学特性。因此，应力及应变参考 Merry 等^[24]推导的真应力和真应变公式。真应变计算公式为

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_a) \quad (3)$$

式中： ε 为真应变； L_f 为试验结束时标距 (mm)。

真应力表达式为

$$\sigma = \frac{F}{A_{(\varepsilon_a)}} = \frac{F}{t_{(\varepsilon_a)} w_{(\varepsilon_a)}} = \frac{F}{t_{(\varepsilon_a)} w_{(\varepsilon_a)} (1 - \nu \varepsilon)^2} \quad (4)$$

式中： σ 为真实应力 (MPa)； $A_{(\varepsilon_a)}$ 为试样截面面积 (mm²)； $t_{(\varepsilon_a)}$ 为试样厚度 (mm)； $w_{(\varepsilon_a)}$ 为试样宽度 (mm)； ν 为泊松比，取 0.5。

2.2 真应力-真应变关系曲线

图 3 展示了根据式 (3)，(4) 计算并绘制得到 3 种 PVC-P 土工膜母材的真应力-真应变关系曲线，依

据曲线的变化趋势可分为以下 3 个阶段: ①第一阶段为 0—A 段, 此时应力随应变大致呈线性增长趋势, 称为线性阶段; ②第二阶段为 A—B 段, 此时应力随应变增长趋势逐渐加大, 称为屈服阶段; ③第三阶段为 B—C 段, 应力随应变再次线性增长 (斜率明显增大) 直至 PVC-P 土工膜拉伸断裂破坏, 称为强化阶段。

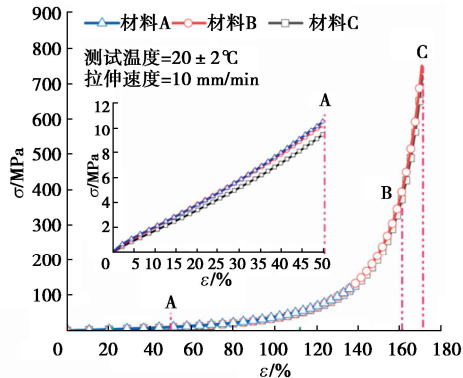


图 3 3 种土工膜真应力-应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curves of three geomembranes

由于 3 种材料真应力-真应变曲线趋势类似, 图 4 仅展示了材料 A 在 40~90℃ 试验条件下的真应力-真应变关系曲线。由图 4 (a)~4 (f) 可明显看出材料 A 力学性能随着温度升高真应力-真应变曲线第一阶段斜率增大, 断裂应变减小, 断裂应力增大。材料 B 和材料 C 力学性能随温度升高变化不明显, 受水环境老化影响程度小, 说明其稳定性较好, 同一试验温度下在 0~60 d 的真应力-真应变曲线非常接近, 特别是 40℃ 试验温度下曲线近乎重合。3 种材料均表现为 40℃ 条件下 0~60 d 曲线较为接近, 90℃ 条件下 0~60 d 曲线变化幅度最大。

2.3 屈服应变及屈服强度分析

图 5 展示了 3 种土工膜屈服应变 ε_s 和屈服强度 σ_s 随试验温度和时间的变化趋势。由图 5 可知, 随试验温度升高和试验时间的延长, 3 种材料的屈服应变和屈服强度均呈现出下降趋势, 说明在高水温环境作用下土工膜的力学性能衰减。试验前 15 d, 屈服应变和

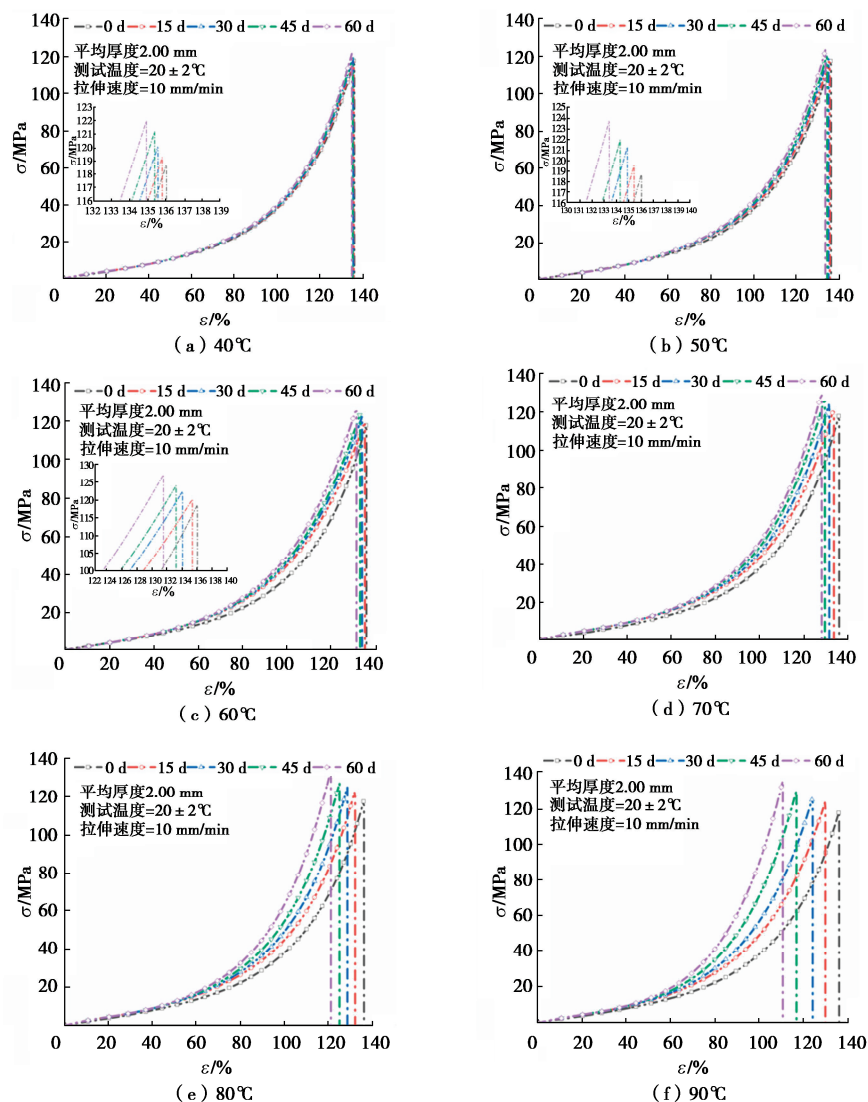


图 4 材料 A 真应力-真应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curves of material A

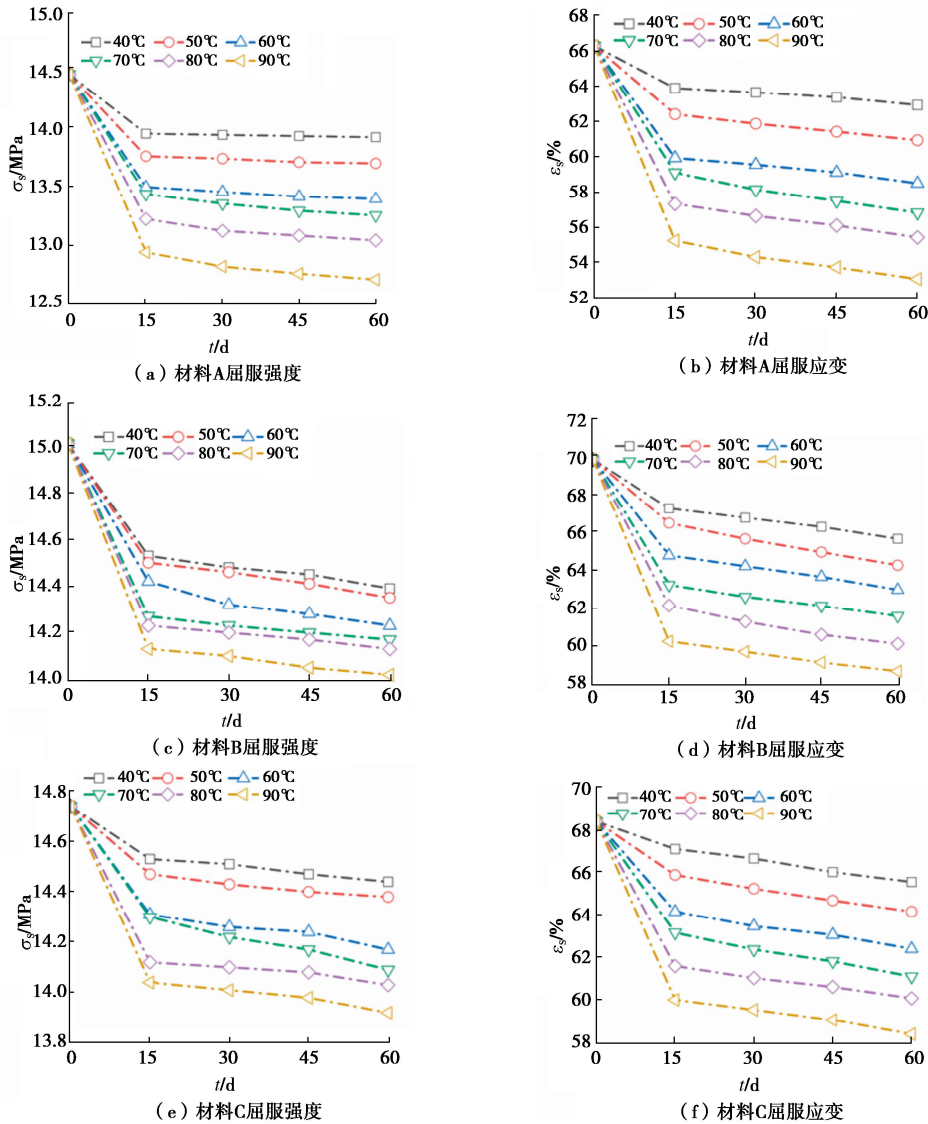


图5 PVC-P 土工膜屈服强度和屈服应变

Fig. 5 Yield strength and yield strain of PVC-P geomembranes

屈服强度下降幅度较大,而15 d之后降幅逐渐减小,说明试验初期 PVC-P 土工膜受水环境的影响作用较大,随着试验时间的延长,材料对水环境逐渐适应,其性能衰减速率变缓。对比数据可得材料 B 和材料 C 的屈服应变和屈服强度普遍高于材料 A,说明材料 B 和材料 C 试验过程中受到的影响较小,其增塑剂的流失量也相对较小,屈服抗性和延展性更优,更适合在复杂水环境中使用。

2.4 断裂应力、断裂应变分析

图6展示了所有试验水环境温度下的断裂应力和断裂应变随试验时间的变化趋势,3种材料的断裂应力随试验温度的增加和试验历时的增长持续增大,且随着温度的升高断裂应力增幅变大。材料 A 增幅较为明显,材料 B 与材料 C 的断裂应力增幅小于材料 A,进一步说明材料 A 的稳定性与其它两种土工膜相比较差。

所有试验温度下的断裂应变值则随试验历时延长

不断下降且降幅与试验温度呈正相关性。材料 A 断裂应变衰减速率远高于材料 B 和材料 C,材料 B 断裂应变衰减速率略高于材料 C,表明材料 B 和材料 C 的耐水环境老化性强于材料 A,平均厚度 2.5 mm 的材料 C 耐水环境老化能力优于平均厚度 2.0 mm 的材料 B,表明增大 PVC-P 土工膜的厚度可以减缓老化速率,延长服役周期。

综上所述,材料 A、材料 B 和材料 C 膜力学性能随试验历时和试验水环境温度变化趋势基本相似,主要表现为 40~90℃ 条件下断裂强度持续上升,断裂应变持续下降,试验温度的升高加速了断裂应力增长速率和断裂应变衰减速率。

3 数据处理及老模型构建

3.1 阿伦尼乌斯公式

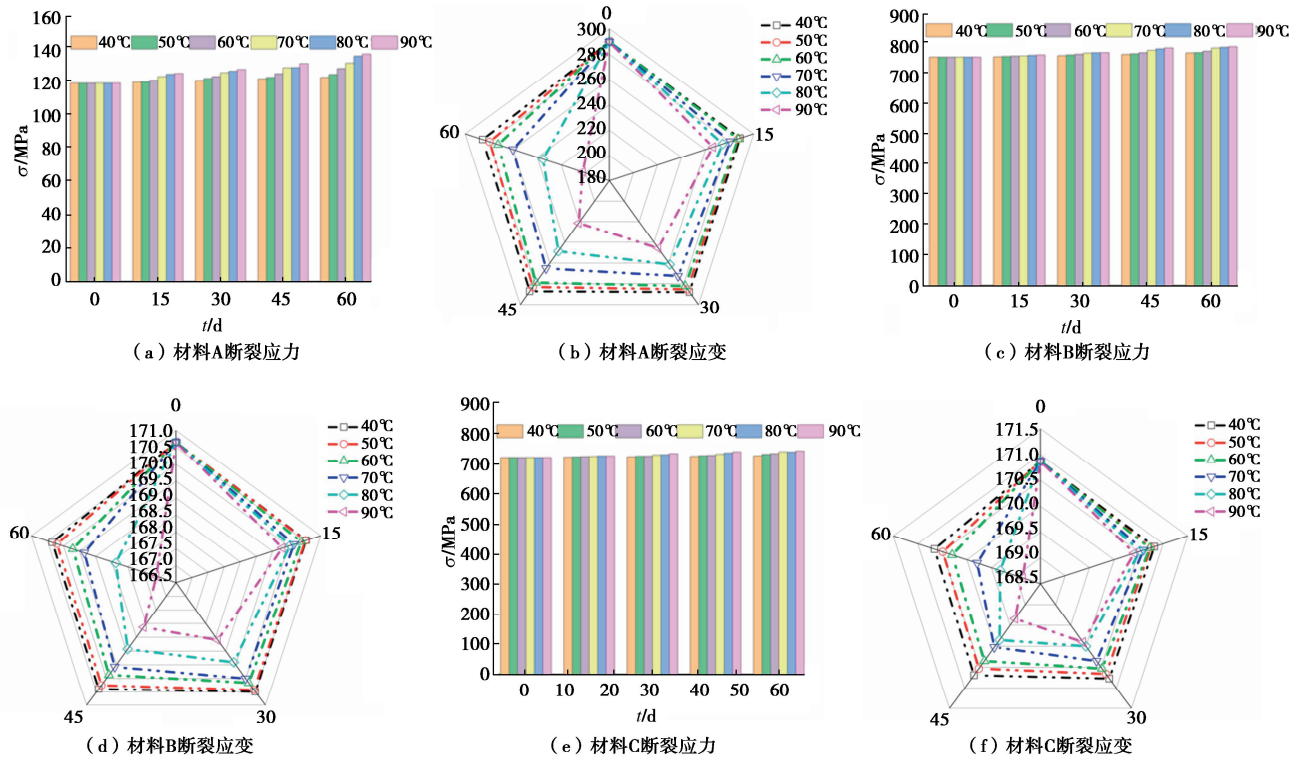


图 6 PVC-P 土工膜断裂应力和断裂应变

Fig. 6 Break stress and break strain of PVC-P geomembranes

高分子聚合物 PVC-P 土工膜的力学性能衰减速率随温度升高而加快, Van't Hoff 定量讨论高分子材料反应速率对温度的依赖关系, 指出温度每升高 10°C, 反应速率通常增加 (2~4) 倍; Arrhenius 通过大量实验与理论的论证揭示了反应速率常数对温度的依赖关系, 逐步建立了 Arrhenius 定理^[25]。阿伦尼乌斯公式主要有 3 种形式。

(1) 微分形式

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (5)$$

(2) 定积分形式

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + C \quad (6)$$

(3) 指数形式

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

式中: k 为温度 T 时的反应速率常数; A 为阿伦尼乌斯常数; E_a 为活化能 (J/mol); T 为热力学温度 (K); R 为摩尔气体常数 (J/mol/K); C 为常数。

3.2 水环境老化模型构建

膜防渗结构中 PVC-P 土工膜除满足工程防渗要求外, 需具备良好的延展性以适应坝体位移或地基的不均匀沉降, 断裂应变更值得关注。试验成果初步分析表明断裂应变衰减速率大于其它力学指标衰减, 因

此依据 3 种 PVC-P 土工膜的断裂应变率衰减规律构建老化模型, 分析其耐久性更具有实际意义。

分别采用零级、一级和二级降解动力学方程对水环境老化试验断裂应变数据进行拟合, 拟合结果表明零级降解动力学方程的决定系数 R^2 最大, 拟合效果最好。结合零级动力学公式构建如下 PVC-P 土工膜水环境老化模型:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - kt \quad (8)$$

式中: ε 为 PVC-P 土工膜老化时间 t 时的断裂应变 (%); ε_0 为 PVC-P 土工膜母材断裂应变 (%); t 为老化时间 (d)。

3.3 水环境老化模型参数拟合

运用构建的水环境老化模型, 即式 (8) 对所有试验成果进行拟合分析。图 7 和表 3 展示了 3 种 PVC-P 土工膜在不同水环境温度下的断裂应变随老化时间的拟合成果, 可以看出对 3 种 PVC-P 土工膜试验成果拟合的决定系数 R^2 均接近于 1, 拟合效果较好, 得到的参数 k 即为 3 种膜材在不同水环境温度下的老化速率。对式 (7) 两边取对数可得:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (9)$$

将 40~90°C 的热力学温度 T 的倒数与该温度下反应速率常数 k 的自然对数值作图并线性拟合, 线性拟合斜率为 $-E_a/R$, 截距为 $\ln A$ 。

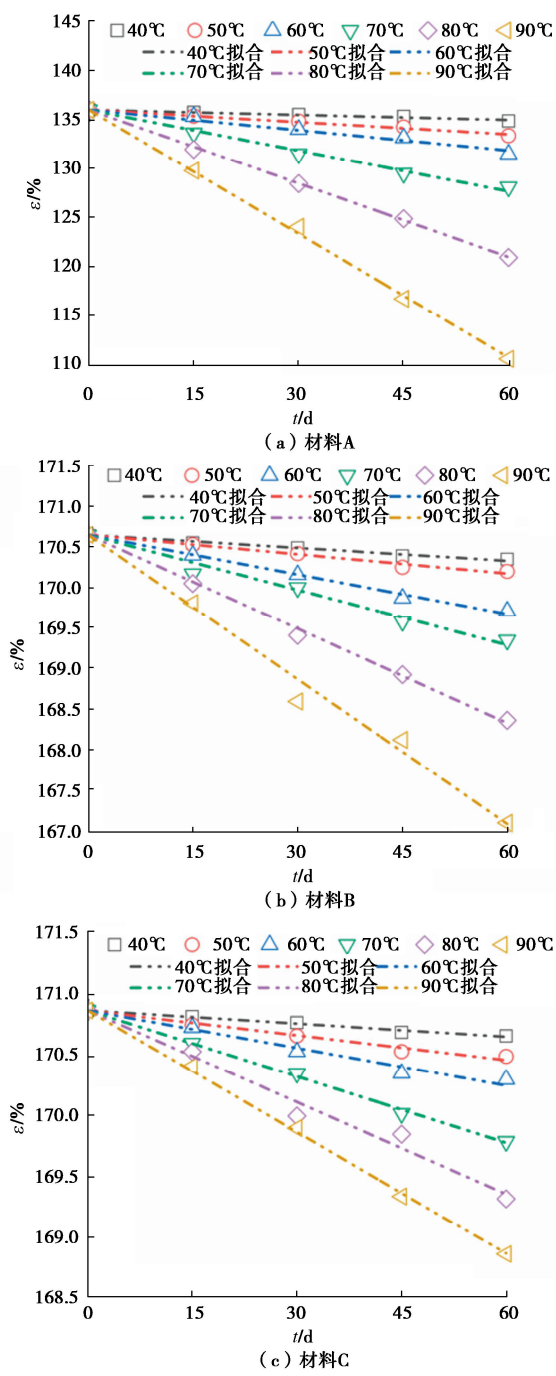


图 7 断裂应变线性拟合

Fig. 7 Break strain linear fitting

表 3 断裂应变线性拟合结果

Table 3 Linear fitting results of break strain

温度/ °C	材料 A		材料 B		材料 C	
	$k/(10^{-1})$	R^2	$k/(10^{-1})$	R^2	$k/(10^{-1})$	R^2
40.0	0.17	0.991	0.53	0.995	0.36	0.990
50.0	0.41	0.994	0.80	0.992	0.68	0.987
60.0	0.69	0.993	1.63	0.990	1.04	0.976
70.0	1.39	0.990	2.26	0.985	1.82	0.991
80.0	2.51	0.995	3.86	0.976	2.52	0.959
90.0	4.22	0.991	5.92	0.965	3.34	0.989

图 8, 表 4 展示了 3 种 PVC-P 土工膜 $\ln k$ 与 $1/T$ 的线性拟合结果, 6 组试验温度下拟合结果 R^2 均大于 0.99, 适用于阿伦尼乌斯公式。

表 4 $\ln k$ 与 $1/T$ 拟合结果
Table 4 Fitting results of $\ln k$ and $1/T$

膜材	$\ln k$	$-E_a/R$	R^2
材料 A	19.03	-7212.39	0.997
材料 B	12.48	-5560.71	0.994
材料 C	10.70	-5086.83	0.991

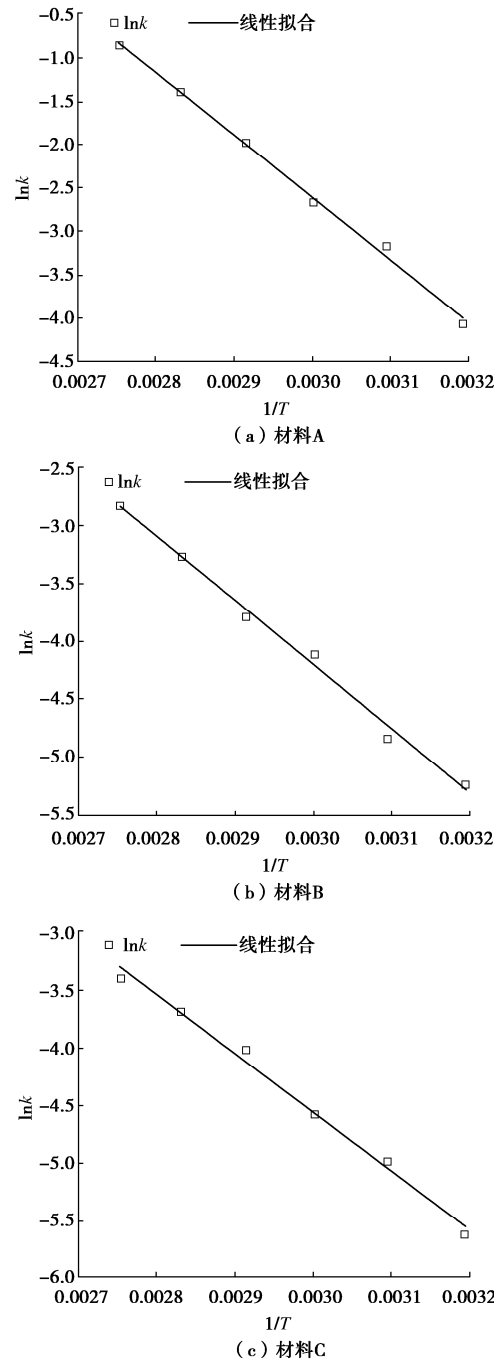


图 8 $\ln k$ 与 $1/T$ 线性拟合

Fig. 8 Linear fitting of $\ln k$ and $1/T$

先将表 4 中 $\ln A$ 及 $-E_a/R$ 代入式 (9) 可得出 3 种材料的老化速率 k_1, k_2, k_3 , 再将 k_1, k_2, k_3 分别代入式 (4) 即可得到 3 种 PVC-P 土工膜水环境老化模型。

材料 A 使用寿命预测模型为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - e^{(19.03-7212.39/T)t} \quad (10)$$

材料 B 使用寿命预测模型:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - e^{(12.48-5560.71/T)}t \quad (11)$$

材料 C 使用寿命预测模型:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - e^{(10.70-5086.83/T)}t \quad (12)$$

4 寿命周期预测

4.1 失效准则建立

高分子聚合材料寿命终止指标一般选择力学性能衰减至母材力学性能的 50%,这一过程历时被称为“半衰期”^[26]。PVC-P 土工膜断裂应变衰减至母材 50%时虽然膜材并未完全失效仍可继续发挥一定作用,可能对膜防渗结构正常运行产生潜在的安全隐患。因此本文将断裂应变衰减至规范^[5]规定的设计允许值的 50%作为失效准则。

4.2 水环境老化模型寿命预测

将面膜堆石坝实际运行过程中 PVC-P 防渗土工膜所处水环境年平均温度(热力学温度 T)以及 $\varepsilon = 0.5\varepsilon_0$ 分别代入式(10)~(12),可得到老化失效的时间,表 5 展示了面膜堆石坝中 PVC-P 土工膜在 15, 20, 25℃水环境下寿命预测成果。3 种 PVC-P 土工膜的使用寿命随着年平均水温升高均出现不同幅度的缩短。

表 5 土工膜使用寿命预测

Table 5 Prediction of service life of geomembranes			
年平均水温/℃	寿命预测值/a		
	材料 A	材料 B	材料 C
15.0	75.17	213.69	245.00
20.0	49.05	153.76	181.30
25.0	32.47	111.86	135.53

材料 A 与材料 B 膜厚度均为 2.0 mm,由于材料 A 增塑剂含量低于材料 B,其寿命周期低于材料 B;材料 B 和材料 C 增塑剂含量基本相同,膜厚小的材料 B 膜使用寿命略低于材料 C,原因为增塑剂的流失由土工膜表面向内部渐进,材料 C 膜厚度略大,老化速率略小于材料 B 膜。因此工作水环境温度是影响寿命周期的外部因素,增塑剂含量保持和稳定性是问题的本质,提高增塑剂的含量及其在聚合物之间微观结构是延长使用寿命的关键。

4.3 模型验证

为验证水环境老化模型寿命预测模型的准确性,试验获得所有试验用 PVC-P 土工膜 20℃水温浸泡 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 d 自然老化条件下的断裂应变,然后由式(10)~(12)分别预测 3 种 PVC-P 土工膜相应浸泡时间节点的断裂应变。选用 CORREL 统计函数模型对自然老化断裂应变测量值与理论公式预测值展开相关性分析,评估预测模型的准确性。相关系数 r 反映了二者间关系密切程度, $r=1$ 表示两变量完全线性相关, $r=-1$ 表示完全

负相关, $r=0$ 表示不相关。
图 9 展示了 3 种 PVC-P 土工膜在 20℃水环境自然老化断裂应变实测值与预测值的对比情况。从图 9 中可以看出,预测值与实测值整体上一致性较好。3 种 PVC-P 土工膜的相关系数均大于 0.998,表明预测值与实测值基本上呈完全线性相关,验证了 3 种 PVC-P 土工膜水环境老化寿命预测模型的可靠性。

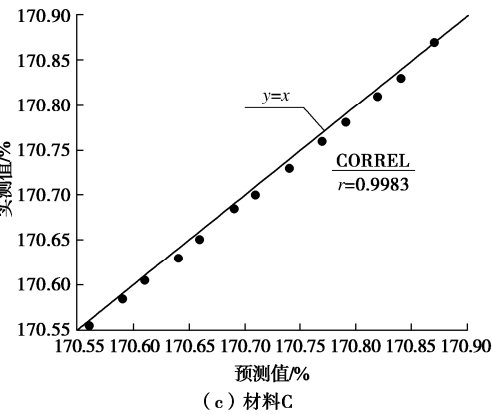
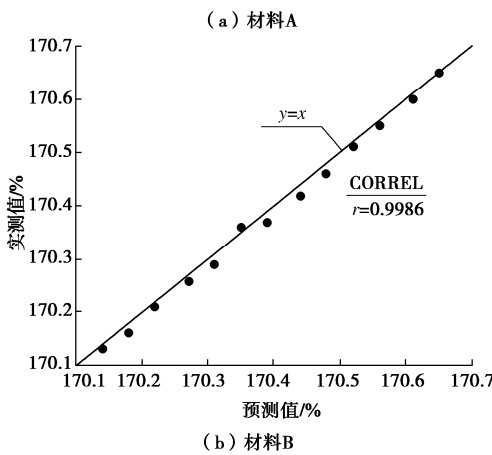
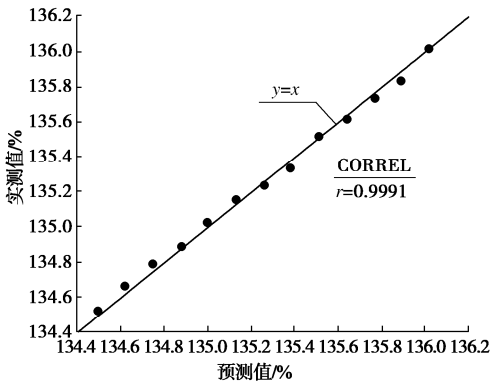


图 9 水环境老化模型验证

Fig. 9 Hydrolysis aging model validation

5 结论与展望

5.1 结 论

针对膜防渗结构中 PVC-P 土工膜水环境耐久性 问题,本文选用 3 种不同 PVC-P 土工膜开展室内加速 水环境老化试验,分析其力学性能衰减规律,构建了

数学模型及失效准则预测寿命周期, 主要得到3点结论。

(1) PVC-P 土工膜均具有水热老化性, 随时间推移及温度升高断裂应变、屈服应变及屈服强度等指标不断衰减, 断裂应力增大。

(2) PVC-P 土工膜断裂应变随试验时间的衰减符合零级降解动力学反应, 且满足阿伦尼乌斯公式。根据所构建水环境老化预测模型及失效准则可准确预测工程使用年限。

(3) 适当增加 PVC-P 土工膜内部增塑剂含量和膜厚或改进增塑剂交联结构增强稳定性以降低增塑剂流失, 延长膜防渗结构服役周期。

5.2 展望

试验研究虽然取得寿命周期预测成果, 但仍存在些许不足, 后续可从以下2方面进一步深入研究。

(1) 轴向拉伸试验尚不能真实反映工程实际, 后续可开展双向或多向拉伸试验研究水环境老化后力学衰减规律。

(2) 增塑剂流失未量化分析, 后续可开展色谱或质谱分析, 构建增塑剂流失量与评价指标的关系, 预测寿命周期。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 张宪雷、刘贺松参与研究内容设计; 张宪雷提供试验指导; 刘贺松、马少帅完成试验和分析; 张宪雷、刘贺松、杨鹏鹏参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by ZHANG Xianlei and LIU Hesong. The experiments were supervised by ZHANG Xianlei. The experiments and analyses were conducted by LIU Hesong and MA Shaoshuai. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Xianlei, LIU Hesong and YANG Pengpeng. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 1): 1-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. Progress of geomembrane seepage control technology for China reservoir dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S1): 1-9. (in Chinese))
- [2] ICOLD. Geomembrane Sealing Systems for Dams: Design Principles and Review of Experience (Bulletin 135)[R]. Paris: International Commission on Large Dams, 2010.
- [3] 王杰, 张宏洋, 张宪雷, 等. 平原水库堤坝胶接法施工土工膜水力性能研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(10): 100-108. (WANG Jie, ZHANG Hongyang, ZHANG Xianlei, et al. Study on hydraulic performance of geomembrane applied by adhesive bonding method for dyke and dam of plain reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, (Chinese and English), 2021, **52**(10): 100-108. (in Chinese))
- [4] 张宪雷, 刘云锋, 顾克, 等. 高面膜土石坝防渗结构中土工膜弯折(褶皱)试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1555-1561. (ZHANG Xianlei, LIU Yunfeng, GU Ke, et al. Experimental study on geomembrane bending (folding) in anti-seepage structure of membrane-faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1555-1561. (in Chinese))
- [5] 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范: SL 654—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (Code for Rational Service Life and Durability Design of Water Resources and Hydropower Projects: SL 654—2014[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [6] 杨旭东, 丁辛. 土工合成材料的老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2001, **30**(2): 34-39. (YANG Xudong, DING Xin. Study on aging properties of geosynthetics[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2001, **30**(2): 34-39. (in Chinese))
- [7] 胡明治. 浅谈土工膜老化机理[J]. 四川建材, 2019, **45**(6): 227-228. (HU Mingzhi. Discussion on aging mechanism of geomembrane[J]. Sichuan Building Materials, 2019, **45**(6): 227-228. (in Chinese))
- [8] GUMARGALIEVA K Z, IVANOV V B, ZAIKOV G E, et al. Problems of ageing and stabilization of poly(vinyl chloride)[J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, **52**(1): 73-79.
- [9] ITO M, NAGAI K. Analysis of degradation mechanism of plasticized PVC under artificial aging conditions[J]. Polymer Degradation and Stability, 2007, **92**(2): 260-270.
- [10] 余红松, 陈光存. 复合土工膜的老化试验研究[J]. 治淮, 2005(1): 29-32. (YU Hongsong, CHEN Guangcun. Aging test study of composite geomembrane[J]. Harnessing the Huahe Rive, 2005(1): 29-32. (in Chinese))
- [11] 闫永生, 杨旭东, 丁辛, 等. PVC 涂层膜材料老化研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2012, **41**(2): 44-54. (YAN Yongsheng, YANG Xudong, DING Xin, et al. Progress of study on the aging of PVC-coated membrane material[J].

- Synthetic Materials Aging and Application, 2012, **41**(2): 44-54. (in Chinese))
- [12] 李景宏. 土石坝土工膜渗透特性研究及应用[J]. 中国水能及电气化, 2021(6): 52-55. (LI Jinghong. Study and application of geomembrane permeability characteristics in earth-rock dam[J]. China Water Power & Electrification, 2021(6): 52-55. (in Chinese))
- [13] LODI P C, DE SOUZA BUENO B, VILAR O M. The effects of weathering exposure on the physical, mechanical, and thermal properties of high-density polyethylene and poly (vinyl chloride)[J]. Materials Research, 2013, **16**(6): 1331-1335.
- [14] DUCOULOMBIER L, DAKHLI Z, LAFHAJ Z. Durability of textile facing materials for construction: Implementation of an accelerated aging test by hydrolysis[J]. Journal of Industrial Textiles, 2016, **45**(6): 1288-1307.
- [15] PLOTA A, MASEK A. Lifetime prediction methods for degradable polymeric materials-a short review[J]. Materials, 2020, **13**(20): 4507.
- [16] 胡利文, 谢仁红. 真空预压土工膜光氧老化分析[J]. 水利水电科技进展, 2002, **22**(5): 47-49, 65. (HU Liwen, XIE Renhong. Photo-oxidation aging analysis of geomembrane used in vacuum preloading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, **22**(5): 47-49, 65. (in Chinese))
- [17] 何 怡. 南水北调工程复合土工膜老化特性及拉伸强度衰减规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. (HE Yi. Study on Aging Characteristics and Tensile Strength Attenuation Law of Composite Geomembrane in South-to-North Water Transfer Project[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [18] SRINIVAS K. Service life prediction of polymer rubber components using accelerated aging and arrhenius equation [EB/OL]. 2017. https://www.researchgate.net/publication/321316097_SERVICE_LIFE_PREDICTION_OF_POLYMER_RUBBER_COMPONENTS_USING_ACCELERATED_AGING_AND_ARRHENIUS_EQUATION.
- [19] 孙彦红, 皮 红, 郭少云. 聚氯乙烯薄膜使用寿命预测[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, **28**(8): 133-136. (SUN Yanhong, PI Hong, GUO Shaoyun. Lifetime prediction for PVC film[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, **28**(8): 133-136. (in Chinese))
- [20] 娄本星, 崔宏艳, 刘慧滢, 等. 赵口引黄灌区复合土工膜耐久性研究[J]. 人民黄河, 2022, **44**(11): 114-117. (LOU Benxing, CUI Hongyan, LIU Huiying, et al. Durability of composite geomembrane in Zhaokou Yellow River irrigation area[J]. Yellow River, 2022, **44**(11): 114-117. (in Chinese))
- [21] Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics: ASTM D5199-12. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [22] Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit Area of Geotextiles: ASTM D5261-10[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [23] Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes: ASTM D6693/D6693M-04[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [24] MERRY S M, BRAY J D. Geomembrane response in the wide strip tension test[J]. Geosynthetics International, 2015.
- [25] 赵学庄. 化学反应动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984. (ZHAO Xue Zhuang. Principle of Chemical Reaction Kinetics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1984. (in Chinese))
- [26] HSUAN Y G, KOERNER R M. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(6): 532-541.