

DOI: 10.11779/CJGE20220151

面膜堆石坝不同品种土工膜力学特性

张宪雷¹, 马仲阳¹, 吴云云²

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对面膜堆石坝主体防渗材料常用的几个品种土工膜力学性能, 展开了土工膜单向拉伸、液胀、耐局部划痕损伤和适应颗粒垫层变形能力的试验性研究。试验分析成果表明: 1.0 mm 厚的膜材中 PVC-HX 膜的杨氏模量、应力应变线性弹性区间和适应变形能力方面具有一定优越性; 划痕长度、方向和深度占膜厚比值相同的条件下, TPO 膜耐局部划痕损伤能力较强, PVC-HX 膜仍展现良好的耐损伤极限强度和极限延伸率, 能够满足膜防渗结构力学性能要求; 厚度大于 0.8 mm 的 HDPE/PE 膜刚度偏大, 适应变形和耐局部划痕损伤能力偏低, 不适用于高水头压力下多孔隙介质垫层的膜防渗结构。试验成果分析表明膜厚大于 1.0 mm 的 PVC-HX 膜和 TPO 膜在高面膜堆石坝膜防渗结构中应用具有潜在优势, 工程设计厚度不大于 0.8 mm 的土工膜可优先选择 HDPE/PE 膜。

关键词: 面膜堆石坝; 土工膜; 杨氏模量; 液胀强度; 划痕损伤

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)05-0940-13

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

Mechanical properties of different geomembranes in membrane-faced rockfill dam

ZHANG Xianlei¹, MA Zhongyang¹, WU Yunyun²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Hohai University, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Nanjing 210024, China)

Abstract: Aiming at the mechanical properties of several geomembranes (GMs) commonly used as the main impervious materials of membrane-faced rockfill dam (MFRD), the uniaxial tensile tests, liquid expansion tests, local scratch resistance tests and capability to accommodate deformation tests are carried out. The test results show that compared to other GMs, the PVC-HX with the thickness of 1.0 mm is superior in the Young's modulus, linear elastic range of stress-strain and capability to accommodate deformation. Under the same scratch length, direction and ratio of depth to thickness, the TPO has strong resistance to the local scratch damage. However, the PVC-HX behaves satisfactorily in the ultimate strength against damage and the ultimate elongation, which can meet the mechanical performance requirements of impervious structures of the GMs. The HDPE/PE with thickness greater than 0.8 mm has high stiffness, low capability to accommodate deformation and local scratch damage, therefore, it is not suitable for the impervious structures of the GMs under high pressure and porous medium cushion. The comprehensive results indicate that the PVC-HX and TPO with thickness greater than 1.0 mm have potential advantages in the impervious structures of high MFRDs, and the HDPE/PE is recommended when the thickness is less than 0.8 mm required in engineering design.

Key words: membrane-faced rockfill dam; geomembrane; Young's modulus; liquid expansion strength; scratch damage

0 引言

质轻柔软、便于施工、防渗性能优、造价低廉和延展性强的土工膜广泛应用于水库大坝防渗工程^[1]。国内水库大坝土工膜防渗起源于 20 世纪 80 年代除险加固工程^[2], 后推广至新建低坝永久工程和围堰临时工程, 21 世纪 20 年代高坝膜防渗关键技术研究取得重大进展^[3-7], 2015 年成功应用于老挝南欧江六级软岩堆石坝实际工程^[8]。国际上欧美国家已基本掌握高坝土工膜裸露防渗技术, 据国际大坝委员会 2010

年不完全统计, 全球已有 167 座大型土/堆石坝选用土工膜防渗, 其中 PVC 膜 76 座, 占比 45%, 小型土石坝约 126 座, PVC 膜 54 座, 占比 43%^[9]。

面膜堆石坝膜防渗材料主要包括由高分子聚合物制成的塑料类和沥青土工膜, 沥青土工膜防渗土石坝主要分布于法国及曾受其殖民的地区, 但应用于大型

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609087, 51709114); 国家重点研发计划基金项目(2018YFC0406803)

收稿日期: 2022-02-11

土/堆石坝数量较少, 仅占文献[9]统计数据的 11%^[10], 其它国家大部分使用塑料类土工膜。塑料类土工膜主要包括聚乙烯类土工膜 (PE/HDPE 膜等)、PVC 膜和热塑性聚烯烃膜 (TPO 膜), 不同国家或区域选用的类型不同, 主要与当地土工膜应用历史和工程实践经验有关^[11], 如欧美国家除法国以外大部分选用 PVC 膜, 亚洲和非洲国家选用 PE/HDPE 膜居多。中国 20 世纪八九十年代主要使用 PVC 膜, 受当时工业生产技术水平低、工程设计和施工经验不足, 逐步被 PE/HDPE 膜取代^[12]。目前国内土工膜大部分应用于中低坝, 0.5~0.8 mm 厚度膜材基本满足防渗性能要求, 但作用水头高、施工条件复杂高坝深库, 膜厚一般不小于 1.5 mm, 而 1.0 mm 厚度以上的 PE/HDPE 膜硬度明显偏高, 类似于板材, 难以适应复杂的运行与施工条件, 特别是周边缝处坝体/坝肩不均匀沉降引起较大差异位移处。虽然国内土工膜研究成果取得多方面进展, 但仍未突破“高分子防渗膜厚度薄、易老化、不安全和不耐用”等习惯思维约束, 现行设计规范^[13-14]也在一定程度上限制土工膜在中高坝推广应用。

中国水利工程土工膜品种选用同样与其发展历程和工程应用经验有关, 目前从材料制品到工程应用大部分产品均为 PE/HDPE 膜。国内研究学者一般以防渗结构特性为重点内容, 期望通过结构优化或工程措施以弥补材料自身缺陷, 进而突破技术瓶颈, 鲜有学者以材料属性基础研究为重点, 推动技术革新。

1 试验

1.1 试验材料

HDPE/PE、PVC 和 TPO 膜是目前面膜堆石坝膜防渗结构常选用的防渗材料。试验选用国内商用土工膜和国外使用 PVC 膜, 选用的国产和国外 PVC 膜分别记作 PVC-HX 和 PVC-CAPI。土工膜厚度选择不仅要满足防渗性能要求, 而且要满足抗氧化、抗紫外线照射老化, 施工过程中温度作用、结构弯折和风荷载

吹胀作用等要求。一般情况下, 增加土工膜厚度可提高防渗性能和耐久性, 但造成柔韧性降低, 特别是 HDPE/PE 膜硬度明显偏高。本文选用的 HDPE 膜的厚度为 0.5, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 mm, PE 膜厚度为 0.5, 0.8, 1.0 mm, PVC-HX 膜 1.0, 2.0, 2.85 mm。因受国际专利保护材料不对外销售, 笔者团队仅获取了少量 3.65 mm 厚 PVC-CAPI 膜, 受限于目前国内生产技术, 生产的 PVC 膜达不到此厚度, 故选用国产 3.65 mm 厚 TPO 膜展开对比分析。材料主要技术参数见表 1。

1.2 单向拉伸试验

单向拉伸试验控制试验环境温度设定 $24 \pm 2^\circ\text{C}$, 依据《土工合成材料测试规程》(以下简称《规程》)开展拉伸试验, 试验设备主要包括土工合成材料万能试验机和三维数字图像采集与处理设备 (3D-DIC)。万能试验机参数: 最大载荷 30.0 kN, 最大行程 2.1 m, 变形量监测范围为最大行程的 0.2%~100%, 误差 $\pm 0.5\%$ 以内; 3D-DIC 设备参数: 最高分辨率 1200 万像素 (4096×3000), 拍摄频率 5 Hz, 位移分辨率 0.01 pixel, 应变分辨率 10 微应变, 应变测量范围 0.005%~2000%。试样选用哑铃型, 位移加载速率为 5 mm/min, 万能试验机与 3D-DIC 配合使用获取轴向和横向变形量, 为增强图像处理数据识别度, 试样表面标记密集特征点。

1.3 液胀试验

液胀试验控制试验环境温度为 $24 \pm 2^\circ\text{C}$, 试样直径为 6.0 cm, 有效测试直径为 3.05 cm。试验设备选用土工膜液胀试验仪, 液体流入速率 170 mL/min, 环形夹具直径 30.5 mm, 最大控制压力 2.5 MPa。《规程》将土工膜覆盖在高弹性橡胶薄膜上, 试验时使薄膜与试样同时液胀变形直至试样胀破, 记录加载薄膜至土工膜胀破时的压力, 修正试验数据获得土工膜的液胀强度。本次试验选用的液胀试验仪去除橡胶薄膜, 液压泵直接充水直至试样胀破, 仪器可实时采集液胀压力和体积, 略去液胀强度修正, 直接获取试验数据。

表 1 土工膜主要参数表

Table 1 Typical parameters of GMs

| 技术指标 | 土工膜名称 | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|--------|-------|----------|------|--|
| | HDPE | | | | | PE | | | TPO | PVC-HX | | PVC-CAPI | | |
| 平均厚度/mm | 0.5 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 2.0 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 3.65 | 1.0 | 2.0 | 2.85 | 3.65 | |
| 单位面积质量/ (g·cm ⁻²) | 0.082 | 0.096 | 0.114 | 0.135 | 0.194 | 0.074 | 0.066 | 0.1 | 0.608 | 0.14 | 0.278 | 0.354 | 0.42 | |
| 断裂强度/MPa | — | — | — | — | — | — | — | — | 4.31 | 14.97 | 13.28 | 13.79 | 7.74 | |
| 屈服强度/MPa | 1.94 | 1.75 | 1.64 | 1.62 | 2.8 | 1.77 | 1.27 | 1.0 | 1.32 | 4.09 | 4.51 | 3.01 | 1.75 | |
| 断裂延伸率/ % | — | — | — | — | — | — | — | — | 144 | 166 | 185 | 256 | 257 | |
| 屈服延伸率/ % | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 2.0 | 33.0 | 34.0 | 35.0 | 38.0 | |

注: 技术指标依据 SL235—2012《土工合成材料测试规程》测定; “—”表示未能在拉伸过程中发生损坏。

1.4 耐局部损伤能力试验

耐局部损伤土工膜拉伸试验选用窄条形试样（宽 5.0 cm，长 10 cm），试样均沿纵向纹理剪裁，使用专门划痕工具在试样中心位置制作划痕损伤，划痕长度为 2.0 cm，划痕深度取膜厚 10%，均未贯穿试样。损伤划痕包括与试样轴向垂直的横向划痕、与试样轴向平行的竖向划痕和与试样轴向呈 45° 夹角的斜向划痕（以下称为横向划痕、竖向划痕、斜向划痕）。运用土工合成材料万能试验机开展拉伸试验，位移控制速率设定为 5 mm/min。

1.5 适应颗粒垫层变形能力试验

适应颗粒垫层变形能力试验选用水工结构实验室研发的专用试验设备，土工膜上部为高压仓，底部为不均匀碎石垫层，试样直径为 10.0 cm，有效测试区域直径为 6.0 cm；不均匀垫层碎石选用粒径为 5~31 mm，其中 5~10 mm 占 60%，16~31 mm 占 40%。土工膜铺设于碎石垫层上，初始施加压力 0.4 MPa，待试样紧贴垫层后调整试验压力至 1.0 MPa，使试样在压力作用下适应表观不平整的碎石垫层而变形，保持压力恒定 6.0 h 后泄压并取出土工膜，量测其变形量，然后静置试样 12 h 后再次量测变形量。

2 单向拉伸力学特性分析

2.1 应变分析

杨氏模量、屈服应力和屈服应变是土工膜力学特性的重要评价指标，一般由单向拉伸试验获得。Chevalier 等^[15]提出了运用 DIC 技术测量土工膜试样应变分布的方法，并分析了试样的应变场和应力场分布；Aydilek 等^[16]使用 DIC 技术测量了多种土工合成材料拉伸试验的应变分布，并与引伸计测得的值进行比较，两者应变差的绝对值小于 10%；Górszczy 等^[17]使用 DIC 对土工格栅拉伸试验进行观测，并将观测结果与土工格栅拉伸试验有限元数值模拟结果进行对比分析。试验选用土工合成材料万能试验机和 3D-DIC 技术相结合的方法开展力学特性研究，图 1 为单向拉伸试验示意图。

工程实际一般将延伸率描述为工程应变，但研究表明工程应变仅适用于小变形，大变形时工程应变与真实应变存在较大差异，Merry 等^[18]运用微积分原理

推导了试样标距范围内的应变理论计算公式，并被 ASTM D5323-92^[19]收录选用，其表达为

$$\epsilon_a = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_{aE}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{aE} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2)$$

式中： ϵ_{aE} 为轴向工程应变； ΔL 为试样变形增量； L_0 为试样初始标距； L_f 为试验结束时标距； ϵ_a 为理论应变。

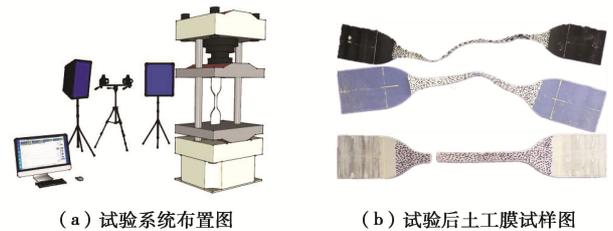


图 1 单向拉伸试验示意图

Fig. 1 Diagram of uniaxial tensile tests

2.2 应力分析

试样轴向变形量增加，横向和纵向（膜厚方向）变形量减小，横截面面积在轴向拉伸过程中是变化的，可表达为

$$A_u = W_{\epsilon_a} T_{\epsilon_a} \quad (3)$$

式中：

$$W_{\epsilon_a} = W_{\epsilon_a=0}(1 - \mu_y \epsilon_a) \quad (4)$$

$$T_{\epsilon_a} = T_{\epsilon_a=0}(1 - \mu_z \epsilon_a) \quad (5)$$

应力可按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{A_u} = \frac{F}{W_{\epsilon_a=0} T_{\epsilon_a=0} (1 - \mu_y \epsilon_a) (1 - \mu_z \epsilon_a)} \quad (6)$$

式中： A_u 为试样截面面积； W_{ϵ_a} 为试样宽度； T_{ϵ_a} 为试样厚度； $W_{\epsilon_a=0}$ 为试样初始宽度； $T_{\epsilon_a=0}$ 为试样初始厚度； μ_y 为横向泊松比； μ_z 为纵向泊松比； σ 为轴向应力； F 为轴向拉力。

文献[20]研究表明沿土工膜卷材经向和纬向剪裁试样的力学性能存在差异，运用三维数字图像分析技术和轴向拉伸试验可获取土工膜的横向和纵向泊松比，泊松比试验分析成果见表 2。

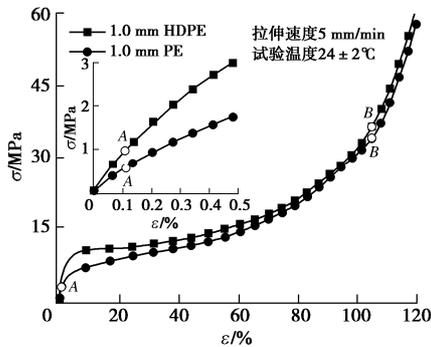
由式（1），（6）得到土工膜的轴向应变和轴向应力，图 2 展示了试验用 5 品种土工膜的应力-应变关系

表 2 土工膜泊松比

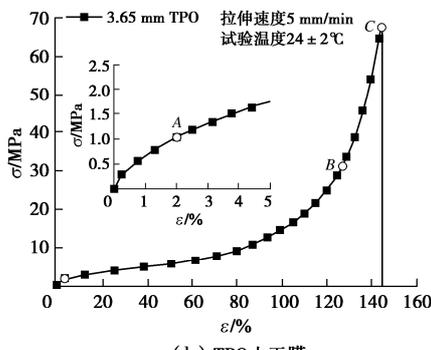
Table 2 Poisson's ratios of GMs

| 名称 | HDPE | | | | | PE | | | | | PVC-HX | | PVC-CAPI | | TPO | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|----------|--|-----|--|
| 厚度 h/mm | 0.50 | 1.00 | 1.20 | 1.50 | 2.00 | 0.50 | 0.80 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.85 | 3.65 | 3.65 | | | |
| μ_y | 0.53 | 0.42 | 0.46 | 0.60 | 0.44 | 0.56 | 0.50 | 0.43 | 0.44 | 0.42 | 0.51 | 0.54 | 0.51 | | | |
| μ_z | 0.47 | 0.58 | 0.54 | 0.40 | 0.56 | 0.44 | 0.50 | 0.57 | 0.56 | 0.58 | 0.49 | 0.46 | 0.49 | | | |

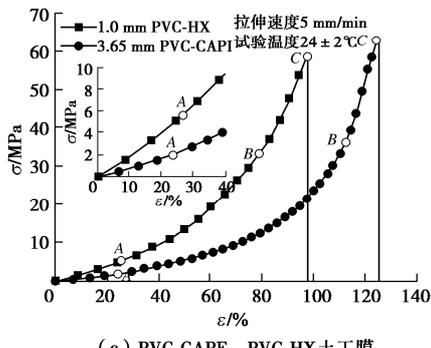
曲线, 曲线形式基本相同, 可划分为 3 个典型阶段:
 ①第一阶段, 初始点 0 到点 A 曲线线性变化, 称为线性阶段;
 ②第二阶段, 点 A 到点 B 曲线呈弯曲非线性缓慢增长, 称为屈服阶段;
 ③第三阶段, 点 B 至试样断裂点 C, 应力随应变线性快速增大, 称为强化阶段;
 其中 A 点为屈服点。图 2 (a) 展示了 1.0 mm 厚 HDPE 膜应力应变曲线, 轴向应变 0~0.1%内应力随应变线性增加, 0.1%~108%内应力的增长变缓, 自应变 108%后应力快速增长, 呈线性变化; 屈服应力为 0.85 MPa, 屈服应变为 0.1%。图 2 (b) 显示 3.65 mm 厚的 TPO 膜轴向应变 0~2.0%内应力随应变线性增加, 2.0%~124.0%内应力的增长变缓, 124.0%至试样断裂应变区间内应力快速增长, 基本呈线性变化, 在 2.0%应变处应力应变曲线开始出现弯曲, 进入屈服阶段, 屈服应力为 1.35 MPa。



(a) HDPE、PE 土工膜



(b) TPO 土工膜



(c) PVC-CAPI、PVC-HX 土工膜

图 2 应力-应变关系曲线

Fig. 2 Relationship between stress and strain

图 2 (c) 展示了 3.65 mm 厚的 PVC-CAPI 膜轴向应变 0~23.0%内应力随应变线性增长, 23.0%~112.0%内应力的增长较快, 曲线出现弯曲变化; 112.0%至断裂应变 124.5%区间内应力快速增长, 基本呈线性变化; 屈服点位于应变 23%处, 屈服应力为 1.99 MPa。PE/HDPE 膜同属聚乙烯材料, 而 PVC-HX 与 PVC-CAPI 属于聚氯乙烯, 同类分析成果基本相同, 分析结果详见表 3。

由表 3 可以看出 HDPE 膜曲线分段点屈服应力与厚度呈正相关性, 即厚度越厚屈服应力越大, 而 PE 膜和 PVC-HX 膜与厚度增加呈负相关性, 屈服应力随厚度增加而降低; HDPE/PE 膜线性应变区间与厚度变化无关, PVC-HX 膜线性应变区间随厚度增加呈增宽趋势。厚度均为 1.0 mm 条件下, 屈服应力 PVC-HX>HDPE>PE 膜, 屈服应变 PVC-HX>HDPE=PE 膜。

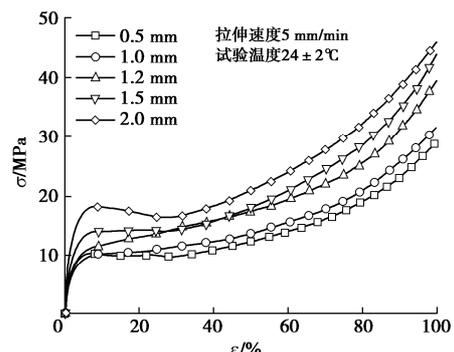
表 3 应力-应变特征点参数

Table 3 Parameters of characteristic points in stress-strain curves

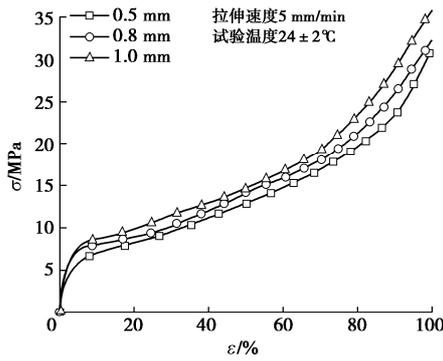
| 材料 | 厚度/mm | ε_A /% | σ_A /MPa | ε_B /% | σ_B /MPa |
|----------|-------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| HDPE | 0.5 | 0.1 | 0.83 | 110 | 39.39 |
| | 1.0 | 0.1 | 0.85 | 108 | 40.37 |
| | 1.2 | 0.1 | 0.96 | 112 | 55.65 |
| | 1.5 | 0.1 | 0.93 | 109 | 58.43 |
| | 2.0 | 0.1 | 1.19 | 111 | 60.15 |
| PE | 0.5 | 0.1 | 1.78 | 95 | 26.99 |
| | 0.8 | 0.1 | 0.69 | 90 | 26.10 |
| | 1.0 | 0.1 | 0.59 | 87 | 27.04 |
| PVC-HX | 1.0 | 26.0 | 5.53 | 82 | 36.20 |
| | 2.0 | 28.0 | 5.35 | 85 | 32.38 |
| | 2.85 | 33.0 | 5.25 | 105 | 52.15 |
| PVC-CAPI | 3.65 | 23.0 | 1.99 | 112 | 36.06 |
| TPO | 3.65 | 2.0 | 1.35 | 124 | 28.84 |

2.3 杨氏模量

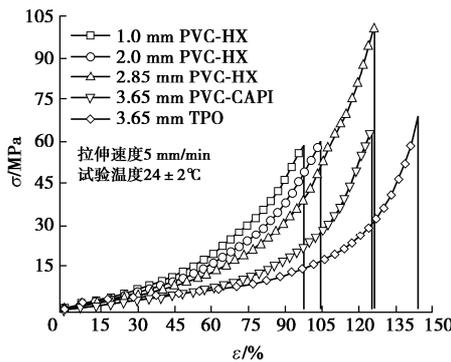
图 3 展示了 HDPE、PE 和 PVC-HX 膜不同厚度及 3.65 mm 厚 PVC-CAPI 和 TPO 膜的应力-应变关系曲线, 其中 HDPE/PE 膜的应变较大, 应变达到 500%时尚未断裂破坏, 图 3 中仅列出 100%以内的应变, 而其它类土工膜在应变 150%以内均发生断裂破坏。从初始应变 0 开始选取应力应变曲线的区间进行线性拟合, 以拟合方差 $R^2 \geq 0.995$ 为控制条件获取土工膜杨氏模量, 线性应变区间和杨氏模量分析成果见表 4。



(a) HDPE 膜



(b) PE膜



(c) PVC-CAPE、PVC-TPO土工膜

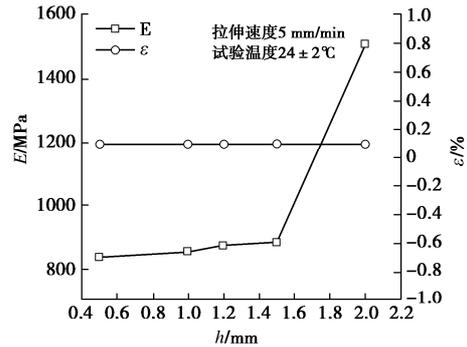
图3 试验用土工膜应力应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of GMs used in tests

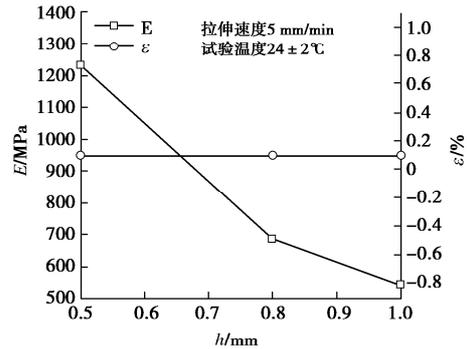
由图3知HDPE膜整体上应力随厚度增加而增大；PE膜线性应变内的应力水平随厚度增加而减小，达到应力屈服点之后随厚度增加而增大；PVC-HX膜的整体应力水平随厚度增加而降低，并且厚度越大断裂应力和断裂应变越大。

图4展示了杨氏模量/屈服应变与土工膜厚度关系，HDPE/PE膜的线性应变区间不随厚度变化，HDPE膜的杨氏模量随厚度增加而增大，而PE膜随厚度增加而减小；PVC-HX膜屈服应变随厚度增加而增大，杨氏模量降低。由表4可知1.0 mm厚度的HDPE、PE和PVC-HX膜的杨氏模量分别为853.57, 545.22, 21.27 MPa，HDPE膜的模量最大，是PVC-HX膜的40倍，PE膜的杨氏模量虽小于HDPE膜，但比PVC-HX膜的杨氏模量大24.6倍；HDPE/PE膜的屈服应变较小，均为0.1%，远低于PVC-HX膜的屈服应变26.0%。因此，PVC-HX膜具有较低杨氏模量和较大的屈服应变，柔韧性和延展性较好。厚度均为3.65 mm的PVC-CAPI膜和TPO膜相比，PVC-CAPI膜的杨氏模量低，屈服应变大，柔韧性相对较好。

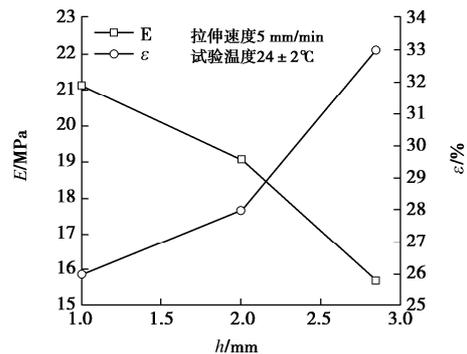
综上所述，PVC-HX膜的杨氏模量较低，屈服应变大，增加厚度未降低柔韧性；HDPE膜的屈服应变较低，杨氏模量高，膜材越厚刚度越大，在满足防渗和耐久性的前提下宜选用厚度不大于1.0 mm的膜；厚PE膜的杨氏模量呈现降低的趋势，虽低于HDPE



(a) HDPE膜



(b) PE膜



(c) PVC-HX膜

图4 杨氏模量/屈服应变与膜厚的关系

Fig. 4 Relationship between Young's modulus/yield strain and thickness

表4 杨氏模量成果表

Table 4 Values of Young's modulus

| 材料 | 厚度 h / mm | 线性区间/ % | 杨氏模量 E / MPa | R^2 |
|----------|----------------|------------|-------------------|--------|
| HDPE | 0.50 | [0, 0.10] | 837.11 | 0.9998 |
| | 1.00 | [0, 0.10] | 853.57 | 0.9978 |
| | 1.20 | [0, 0.10] | 874.82 | 0.9990 |
| | 1.50 | [0, 0.10] | 883.60 | 0.9999 |
| | 2.00 | [0, 0.10] | 1509.41 | 0.9996 |
| PE | 0.50 | [0, 0.10] | 1228.00 | 0.9970 |
| | 0.80 | [0, 0.10] | 689.07 | 0.9998 |
| | 1.00 | [0, 0.10] | 545.22 | 0.9996 |
| PVC-HX | 1.00 | [0, 26.0] | 21.27 | 0.9960 |
| | 2.00 | [0, 28.0] | 21.11 | 0.9960 |
| | 2.85 | [0, 33.0] | 19.05 | 0.9950 |
| PVC-CAPI | 3.65 | [0, 23.0] | 15.70 | 0.9950 |
| TPO | 3.65 | [0, 2.0] | 49.57 | 0.9960 |

膜, 但与 PVC-HX 膜相比仍具有较高的模量, 屈服应变较小, 可用于面膜防渗结构拉伸位移不大的中低面膜堆石坝。3.65 mm TPO 膜的杨氏模量远低于 HDPE/PE 膜, 解决了厚膜刚度大问题, 尽管杨氏模量稍高于 PVC-HX 和 PVC-CAPI 膜, 屈服应变仅为 2%, 在不均匀沉降较小的面膜堆石坝中具有竞争性。

3 液胀试验成果及分析

3.1 压力强度-液胀体积

束一鸣等^[21]对 PE 膜液胀试验分析得出液胀极限荷载与膜厚、支持层孔径之间的关系, 用于工程设计复核计算而减免重复繁杂的液胀试验; 李旺林等^[22]将土工膜气胀变形近似简化为环形约束球形鼓胀变形, 分析了试验设备孔径对土工膜胀破压力的影响; Xu 等^[23]研究表明环约束条件下, 土工膜的液胀强度与试验装置的直径、加载速率和土工膜缺陷有关。因此, 液胀强度及适应此种变形的能力是值得关注的。图 5 展示了液胀试样胀破后的形态, 0.5 mm 厚 HDPE 膜呈塑性破坏, 随厚度增加转为脆性破坏, 而 PE 膜均呈塑性破坏, PVC-HX 和 PVC-CAPI 膜为韧性破坏, TPO 膜为脆性破坏。

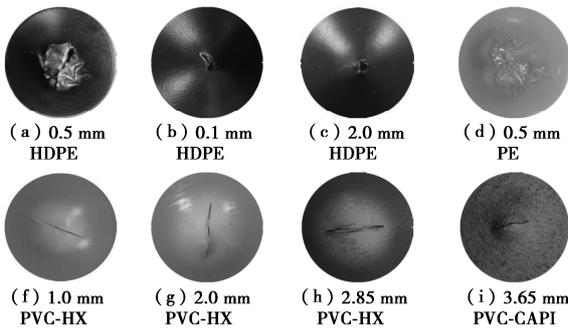


图 5 液胀试验破坏试样

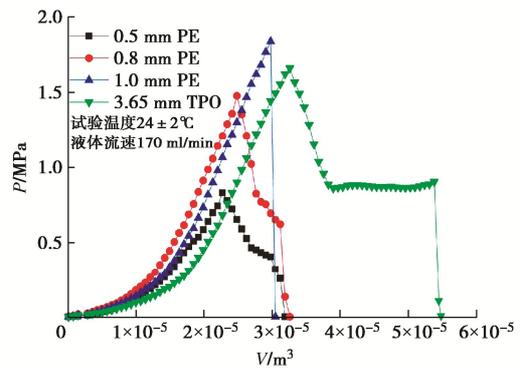
Fig. 5 Failure specimens in liquid expansion tests

图 6 为土工膜压力强度-体积关系曲线, 由图 6 (d), 6 (e) 可知液胀体积较小时, 压力强度随体积线性增加, 随后压力强度与液胀体积关系曲线呈非线性变化趋势, 直至出现明显的拐点。

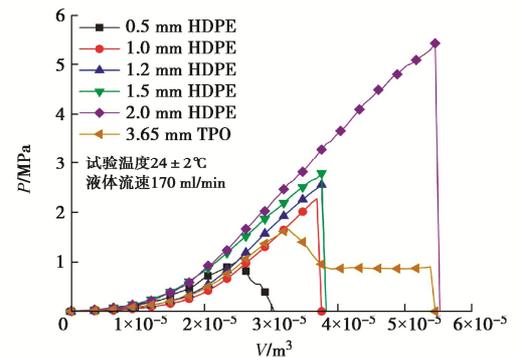
图 6 (a), 6 (b) 显示曲线拐点之后膜厚小于 1.0 mm 的 HDPE/PE 膜和 TPO 膜压力强度-液胀体积曲线趋势相似, 表现为液胀体积增加压力强度迅速减小, 压力强度降低至最大值 1/2 以后, 压力强度保持不变而液胀体积持续增大直至胀破, 称此阶段为压力强度平台期, TPO 膜压力强度平台期持续时间相对较长, 膜厚小于 1.0 mm 的 HDPE/PE 膜持续时间较短; 膜厚不小于 1.0 mm 的 HDPE/PE 膜、PVC-CAPI 和 PVC-HX 膜曲线趋势基本一致, 表现为压力强度线性快速增长, 直至土工膜胀破破坏。

由图 6 中 (a), 6 (b) 和表 5 可知, 0.5 mm 厚 HDPE/PE 膜、0.8 mm 厚 PE 膜和 3.65 mm 厚 TPO 膜

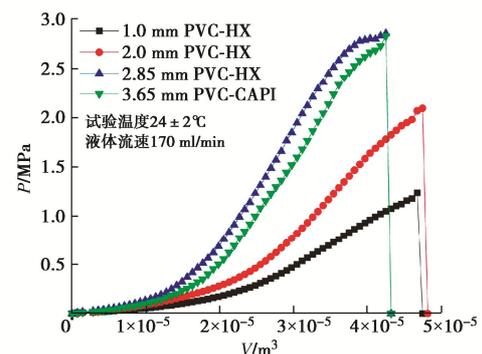
压力强度最大值分别为 1.100, 0.829, 1.476, 1.659 MPa, 液胀体积分别为 2.55×10^{-5} , 2.27×10^{-5} , 2.20×10^{-5} , $3.26 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, 压力强度达到峰值后均先后出现液胀体积增加压力强度迅速下降和恒定不变过程; 其中 TPO 膜恒定压力强度持续较长, 体积增量占总液胀体积的 30%, 其它平台期持续时间较短。除上述品种土工膜外, 其它试样均未出现平台期, 压力强度-液胀体积曲线达到峰值后, 胀破压力强度突降为 0 MPa。由图 6 (a), 6 (b), 6 (c) 可知 HDPE/PE 膜和 PVC-HX 膜峰值强度随膜厚度增加而增大, HDPE/PE 膜的破坏形式由塑性破坏转变为脆性破坏, 厚度大于 1.0 mm 的 PVC-HX 膜均为脆性破坏; 图 6 (f) 为 1.0 mm 厚 HDPE/PE 膜和 PVC-HX 膜压力强度-液胀体积曲线, 可以看出峰值强度和最大液胀体积由大到小顺序分别为 HDPE>PE>PVC-HX, PVC-HX>HDPE>PE。3.65 mm 厚 PVC-CAPI 和 2.85 mm 厚 PVC-HX 膜峰值强度相当, 分别为 2.837, 2.862 MPa, 试验用土工膜中峰值强度最大。



(a) 不同厚度PE与TPO液胀全程



(b) 不同厚度HDPE与TPO液胀全程



(c) 不同厚度PVC-HX/CAPI液胀全程

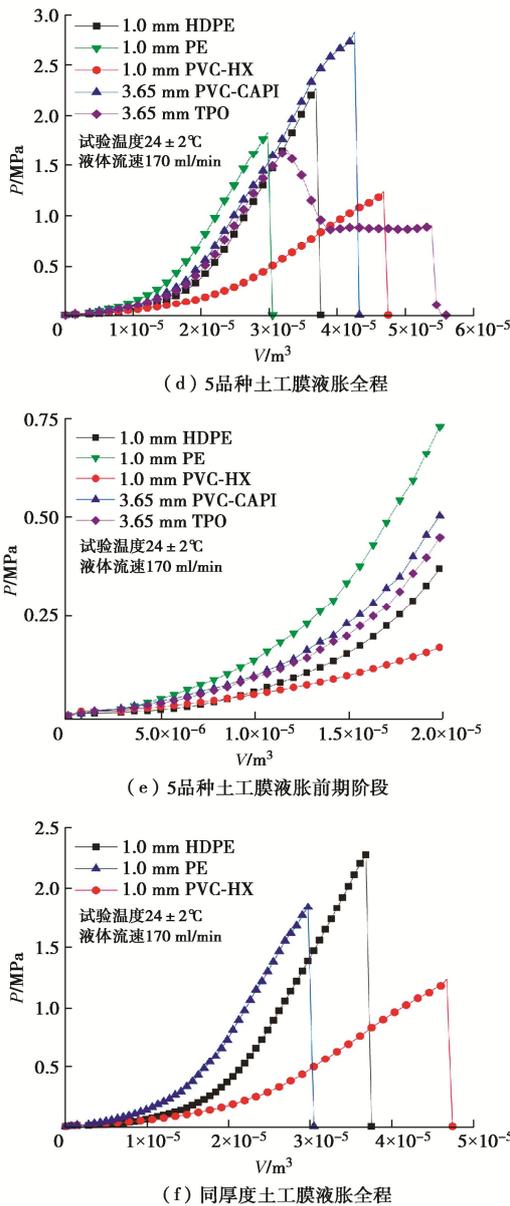


图6 压力强度-液胀体积关系曲线

Fig. 6 Relationship between pressure intensity and liquid expansion volume

综上所述, HDPE、PE 和 TPO 膜压力强度-液胀体积

曲线可划分 3 个阶段, 第一阶段压力强度随液胀体积线性增加; 第二阶段, 压力强度-液胀体积非线性增长, 至峰值处出现明显的弯曲拐点, 此阶段力学性能表现为塑性变形; 第三阶段, 压力强度达到峰值后先快速降低后恒定不变, 最后快速降低为零, 试样破坏。PVC 膜压力强度-液胀体积曲线因压力强度达到峰值后瞬间发生胀破破坏, 其特征基本可以分为两个阶段, 即压力强度线性增长阶段和屈服变形破坏阶段。

3.2 液胀强度

液胀峰值强度反映了土工膜能够承受的最大水头压力, 相应的液胀体积反映了土工膜适应多孔隙垫层或持力层局部凹陷变形的能力。虽然 HDPE、PE 和 TPO 膜与 PVC 膜的压力强度-液胀体积曲线形式不同, 但压力强度达峰值前的趋势基本相同, 工程设计更关注峰值强度前的力学特性, 为便于评价液胀性能, 本文重点研究压力强度峰值前的特性。选用改进的幂函数对液胀曲线进行拟合分析(拟合参数见表 6), 由拟合函数可得到任一压力强度下的液胀体积, 或任一液胀体积所承受的压力强度。函数表达式为

$$P = P_m e^{-0.5 \left(\frac{X - X_c}{W} \right)^2} \quad (7)$$

式中: P_m 为液胀峰值强度; X_c 为峰值强度时液胀体积; P 为液胀强度; X 为液胀体积; W 为拟合参数。

图 7 展示了 HDPE、PVC-CAPI 和 TPO 膜拟合函数值与实测数据拟合度, 可知 PVC-CAPI、TPO 膜拟合曲线与实测数据一致性较好, PVC-CAPI 膜拟合平均误差为 0.0596 MPa, 占液胀峰值强度的 2.1%; TPO 膜拟合平均误差 0.0069 MPa, 占液胀峰值强度的 0.42%; HDPE 膜拟合值与实测值差值较大, 平均误差为 0.081 MPa, 占液胀峰值强度的 7.39%。

拟合曲线在液胀体积初始阶段与实测值基本吻合, 其余阶段偏差稍大, 但基本反映了曲线变化趋势。因此, 选用式(7)描述土工膜的液胀强度是合理的。

表5 液胀强度特征值

Table 5 Characteristic values of liquid expansion strength

| 材料名称 | 厚度 h/mm | 峰值强度 P_m/MPa | 峰值强度对应体积 $V_p/(10^{-5}\text{m}^3)$ | 最大液胀体积 $V_m/(10^{-5}\text{m}^3)$ | 平台期范围 $V/(10^{-5}\text{m}^3)$ |
|----------|------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| HDPE | 0.50 | 1.100 | 2.55 | 2.98 | 2.60~2.83 |
| | 1.00 | 2.274 | 3.68 | 3.68 | 0.00 |
| | 1.20 | 2.482 | 3.75 | 3.75 | 0.00 |
| | 1.50 | 2.789 | 3.75 | 3.75 | 0.00 |
| | 2.00 | 5.432 | 5.45 | 5.45 | 0.00 |
| PE | 0.50 | 0.829 | 2.27 | 3.12 | 2.55~2.97 |
| | 0.80 | 1.476 | 2.20 | 3.12 | 2.76~3.12 |
| | 1.00 | 1.596 | 2.98 | 2.98 | 0.00 |
| PVC-HX | 1.00 | 1.236 | 4.68 | 4.68 | 0.00 |
| | 2.00 | 2.095 | 4.75 | 4.75 | 0.00 |
| | 2.85 | 2.862 | 4.25 | 4.25 | 0.00 |
| PVC-CAPI | 3.65 | 2.837 | 4.25 | 4.25 | 0.00 |
| TPO | 3.65 | 1.659 | 3.26 | 5.53 | 3.75~5.38 |

表 6 液胀模型拟合参数

Table 6 Fitting parameters of liquid expansion model

| 名称 | $h/$ mm | $P_m/$ MPa | $X_c/$ (10^{-5}m^3) | $W/$ (10^{-5}m^3) | 平均误差/百分 比/% |
|--------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| HDPE | 0.50 | 1.100 | 2.55 | 0.63 | 0.0813/7.39 |
| | 1.00 | 2.274 | 3.68 | 0.82 | 0.0044/0.19 |
| | 1.20 | 2.482 | 3.75 | 0.94 | 0.0000/0.00 |
| | 1.50 | 2.789 | 3.75 | 1.08 | 0.0868/3.11 |
| | 2.00 | 5.432 | 5.45 | 1.75 | 0.1406/2.59 |
| PE | 0.50 | 0.829 | 2.27 | 0.54 | 0.0429/5.18 |
| | 0.80 | 1.476 | 2.48 | 0.61 | 0.0025/0.17 |
| | 1.00 | 1.896 | 2.98 | 0.74 | 0.0015/0.08 |
| PVC-H X | 1.00 | 1.236 | 4.68 | 1.22 | 0.0031/0.25 |
| | 2.00 | 2.095 | 4.75 | 1.25 | 0.0015/0.07 |
| | 2.85 | 2.862 | 4.25 | 1.40 | 0.0197/0.69 |
| PVC-C API | 3.65 | 2.837 | 4.25 | 1.24 | 0.0596/2.10 |
| TPO | 3.65 | 1.659 | 3.26 | 0.76 | 0.0069/0.42 |

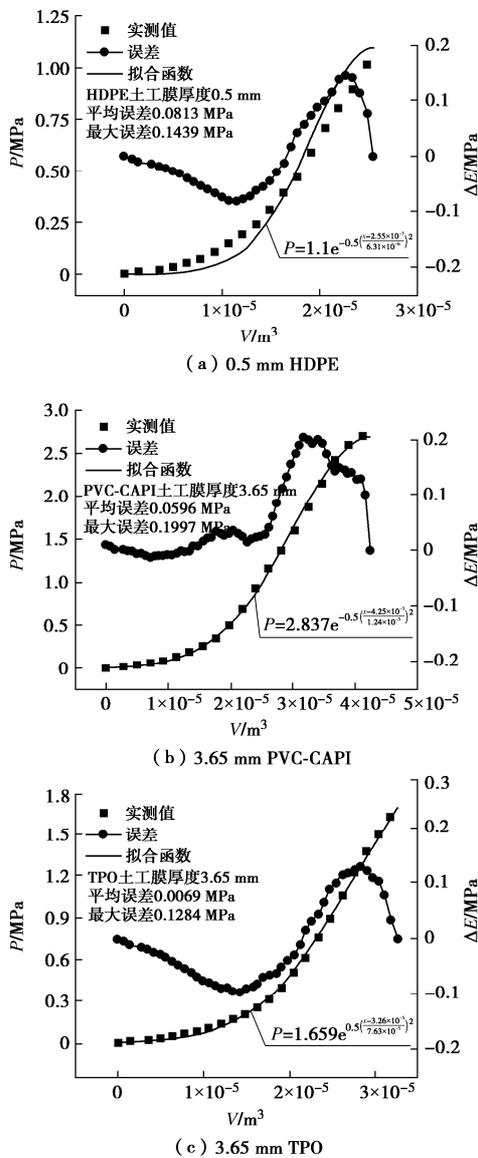


图 7 液胀模型拟合分析

Fig. 7 Fitting analysis of liquid expansion model

3.3 分析与讨论

液胀强度是指悬空土工膜顶胀破坏时的水压力集

度, 一般作为材料极限状态下力学性能的评价指标。实际工程中土工膜液胀体积受下部垫层约束, 悬空度并非无限大, 颗粒垫层聚集形成的孔隙为土工膜液胀悬空空间, 垫层颗粒形成的孔隙深度是胀破变形的控制因素, 因此正常使用状态下安全性能更值得关注。

工程应用的材料允许液胀强度 P_a 应根据实测的极限液胀强度 P_m 确定,

$$P_a = P_m / R \quad (8)$$

式中: R 为综合液胀强度折减系数, 取 2.5。

规范^[13]规定垫层料应连续级配, 最大粒径 80~100 mm, 颗粒垫层采用比较普遍的扁圆砾, 不使用角砾, 垫层颗粒可能最不利排列试验, 按最大的粒径 100 mm。依据垫层颗粒排列试验^[24], 假设垫层表面大致平整, 基于设计垫层颗粒可能最不利排列方式进行试验, 按环形排列形成的孔隙深度 h 为圆砾石半径的 1/4。按照图 8 所示数值分析模型可以构建孔隙深度、圆砾石半径和球冠体积计算表达式, 模型满足两个假定条件: ①4 个圆砾石间孔隙面积最大; ②圆砾石交叉构成的孔隙用等面积圆表示。

$$R_m = R \left(\frac{2m}{\pi} - \frac{m}{2} + \frac{1}{2m} \right) \quad (9)$$

$$h_m = R_m / m \quad (10)$$

$$m = R / h \quad (11)$$

$$V = \pi h_m^2 (3R_m - h_m) / 3 \quad (12)$$

式中: R_m 为球冠所在球体的半径; R 为圆砾石的半径, 取 50; h_m 为球冠的弦高; h 为孔隙深度; m 为孔深参数; V 为球冠体积。

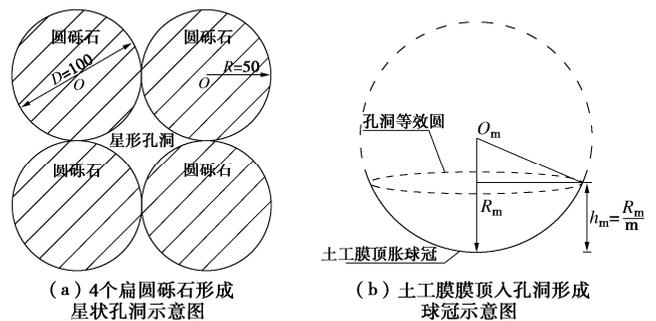


图 8 数值分析模型

Fig. 8 Numerical analysis model

液胀试验试样初始有效液胀直径为 30.5 mm, 按照上述计算公式反演扁圆砾石粒径 106.0 mm, 与规范要求最大粒径 100.0 mm 相近。经计算, 砾石架空空间 (即悬空度) 等效球直径为 33.5 mm, 球冠高度为 8.75 mm, 所对应架空空间体积为 $1.44 \times 10^{-5} \text{m}^3$, 依据式 (7) 可求得土工膜达到球冠高度最大值时的液胀强度, 计算成果见表 7。除 0.5 mm 厚 HDPE/PE 膜的计算液胀强度与允许值相近外 (PE 膜超出了允许值),

其它试样的计算液胀强度均小于允许液胀强度，发生胀破的风险较小。因此，工程设计针对 0.5 mm 厚度的 HDPE/PE 膜膜下颗粒垫层级配曲线应予以关注。

表 7 液胀强度

Table 7 Liquid expansion strengths

| 材料名称 | 厚度 h/mm | 计算液胀强度 P/MPa | 极限液胀强度 P_m/MPa | 允许液胀强度 P_a/MPa |
|----------|------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| HDPE | 0.50 | 0.42 | 1.100 | 0.44 |
| | 1.00 | 0.15 | 2.274 | 0.91 |
| | 1.20 | 0.20 | 2.482 | 0.99 |
| | 1.50 | 0.28 | 2.789 | 1.12 |
| | 2.00 | 0.39 | 5.432 | 2.17 |
| PE | 0.50 | 0.36 | 0.829 | 0.33 |
| | 0.80 | 0.16 | 1.476 | 0.59 |
| | 1.00 | 0.30 | 1.596 | 0.64 |
| PVC-HX | 1.00 | 0.22 | 1.236 | 0.49 |
| | 2.00 | 0.28 | 2.095 | 0.84 |
| | 2.85 | 0.45 | 2.862 | 1.14 |
| PVC-CAPI | 3.65 | 0.32 | 2.837 | 1.13 |
| TPO | 3.65 | 0.29 | 1.659 | 0.66 |

4 耐局部损伤能力分析

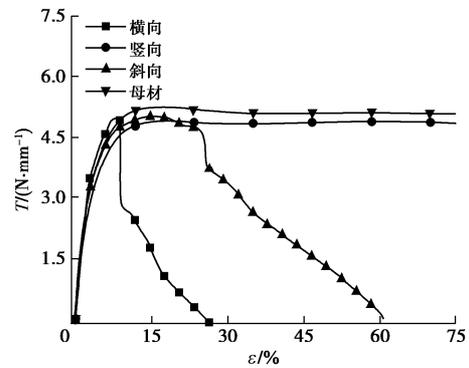
厚度较薄的土工膜虽然能满足抗渗要求，但施工时受外界影响因素干扰较大，难免出现局部缺陷如顶破、刺破或划痕损伤等，缺陷的土工膜在工程质检中较易于排查，但划痕损伤土工膜由于特征不明显且未发生损坏而难以被检测。徐光明等^[25]研究了 HDPE 膜因施工损伤而引发的断裂机制，结果表明损伤对膜的实际工程性能有很大影响；岑威钧等^[26]针对不同厚度的 HDPE 膜试样分别设置横缝、竖缝等缺陷进行单向拉伸试验，探究了损伤对土工膜力学特性的削减规律。因此，开展损伤土工膜的拉伸力学特性研究对工程实际具有一定的意义。

4.1 损伤试验成果初步分析

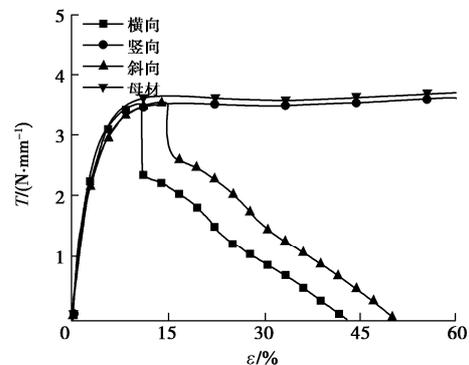
根据 1.4 节耐损伤能力试验方案开展试验，获得的拉伸强度-延伸率曲线如图 9 所示。可知在延伸率较小时划痕对土工膜拉伸强度的影响较小，损伤试样与母材的特征曲线基本重合，拉伸强度随延伸率的增加线性增长，随后出现弯曲点，拉伸强度随延伸率非线性增大，达到峰值强度后，划痕损伤试样的拉伸强度开始低于无损母材强度。因此，划痕损伤会造成土工膜力学特性衰减。

图 9 (a)，7 (b) 展示的 0.5 mm 厚 HDPE/PE 膜的试验成果曲线趋势相似，0.5 mm 厚 HDPE 膜横向划痕和斜向划痕试样分别于延伸率 8.8%，25.2%处在划痕处发生开裂，防渗性能失效；0.5 mm 厚 PE 膜横向划痕和斜向划痕试样分别于延伸率 10.80%，14.85%处在划痕部位出现开裂，划痕转变为贯穿缝；2.85 mm

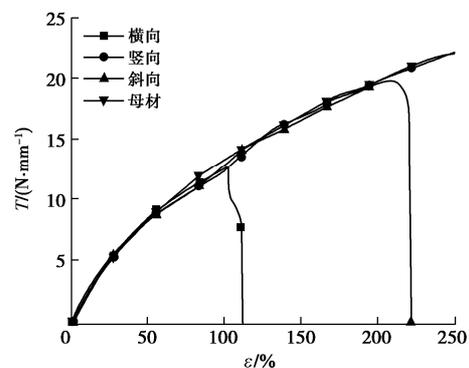
厚 PVC-HX 膜横向划痕和斜向划痕试样分别于延伸率 102.8%，209.4%处在划痕部位出现划痕开裂；3.65 mm 厚 PVC-CAPI 膜横向和斜向划痕试样分别于延伸率 110.2%，249.3%处划痕处裂开；3.65 mm 厚 TPO 膜横向/斜向划痕试样在划痕处均未出现断裂破坏。



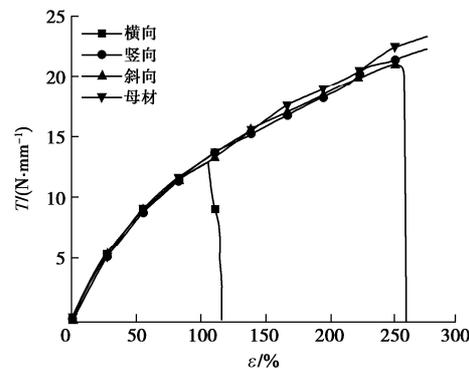
(a) 0.5 mm HDPE



(b) 0.5 mm PE



(c) 2.85 mm PVC-HX



(d) 3.65 mm PVC-CAPI

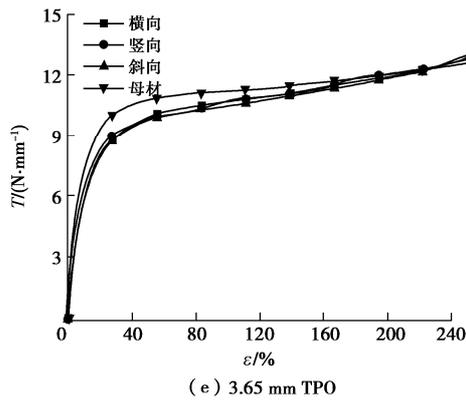


图 9 拉伸强度-延伸率关系曲线

Fig. 9 Relationship between tensile strength and elongation

试验用土工膜自划痕开裂转为贯穿缝后拉伸强度迅速降低, 直至断裂破坏; 竖向划痕试样均未出现划痕开裂的现象, 拉伸强度随延伸率的增加缓慢接近母材。因此, 横向划痕对土工膜的力学特性影响最大, 斜向划痕次之, 竖向划痕影响较小。

4.2 局部损伤力学特性分析

划痕损伤土工膜试样破坏失效时, 划痕部位开裂, 由划痕损伤转变为缝状损坏, 即认为土工膜防渗性能失效。损伤试样拉伸破坏失效时的延伸率可视为极限

延伸率, 失效前最大拉伸强度可视为极限拉伸强度, 图 10 为试验用 1.0 mm 厚不同划痕土工膜的拉伸强度-延伸率分布曲线, 可知竖向划痕试样均未发生拉伸破坏; 横向划痕土工膜失效时的延伸率由大至小排序为 PVC-HX>PE>HDPE, PE/HDPE 膜远小于 PVC-HX 膜; 斜向划痕土工膜失效时 PE 膜延伸率稍大于 PVC-HX 膜, HDPE 膜最小; 横向/斜向划痕土工膜极限拉伸强度由大至小排序为 PVC-HX>HDPE>PE。因此 PVC-HX 膜耐损伤能力稍强, PE/HDPE 膜相差不大。

表 8 为土工膜不同划痕损伤试样的极限延伸率及极限拉伸强度, 可以看出划痕厚度占膜厚 10% 的 HDPE 和 PE 膜横向/斜向划痕对应的极限延伸率和极限拉伸强度均随厚度增加而增大, 厚度相同的同品种土工膜横向划痕下极限延伸率和极限拉伸强度小于斜向划痕, 横向划痕造成的损伤程度更高。3.65 mm 厚 TPO 膜试样在横/斜/竖向划痕下未拉伸破坏, 受划痕影响程度最小, 耐局部损伤能力最强, 但厚度较大, 工程造价偏高; 3.65 mm 厚 PVC-CAPI 膜与 2.0 mm 厚 PVC-HX 膜相比, 横/斜向划痕下极限延伸率和极限拉伸强度相当, 但厚度差值近 1 倍, 工程造价高, 经济实用性低。

表 8 损伤试样拉伸强度/延伸率表

Table 8 Tensile strengths/elongations of damaged specimens

| 材料 | 厚度/mm | 横向 | | 斜向 | |
|----------|-------|---------|------------------------------|---------|------------------------------|
| | | 极限延伸率/% | 极限拉伸强度/(N·mm ⁻¹) | 极限延伸率/% | 极限拉伸强度/(N·mm ⁻¹) |
| HDPE | 0.50 | 8.80 | 5.13 | 25.20 | 5.20 |
| | 1.00 | 77.27 | 9.55 | 104.53 | 10.53 |
| | 1.20 | 78.20 | 10.05 | 110.81 | 10.58 |
| PE | 0.50 | 10.80 | 3.68 | 14.85 | 3.95 |
| | 0.80 | 83.94 | 6.50 | 203.88 | 6.89 |
| | 1.00 | 96.73 | 8.62 | 254.67 | 22.62 |
| PVC-HX | 1.00 | 156.23 | 10.41 | 225.14 | 13.82 |
| | 2.00 | 189.30 | 16.66 | 269.16 | 19.47 |
| | 2.85 | 102.80 | 12.80 | 209.40 | 19.90 |
| PVC-CAPI | 3.65 | 110.20 | 9.40 | 249.30 | 21.00 |

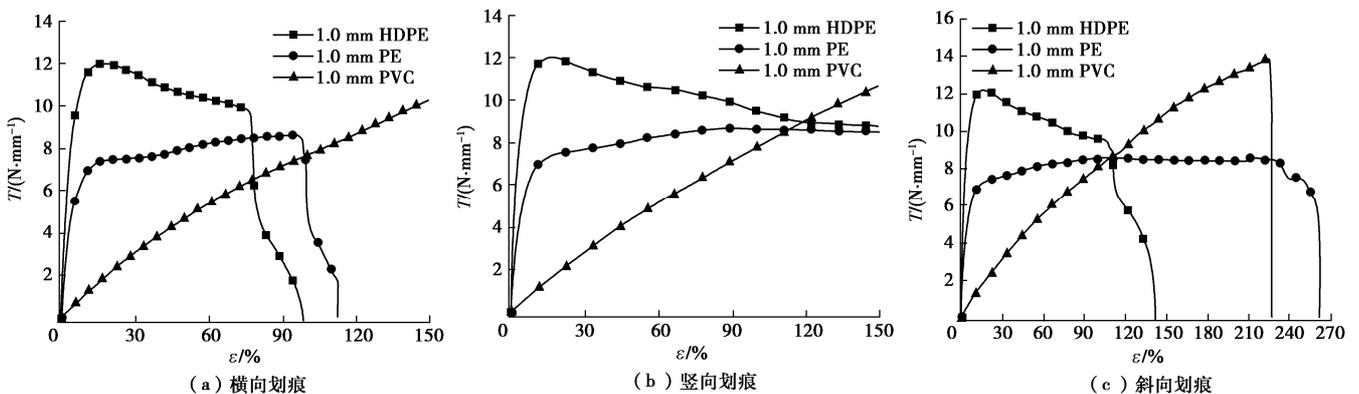


图 10 损伤试样拉伸强度-延伸率关系曲线

Fig. 10 Relationship between tensile strength and elongation of damaged specimens

表9 土工膜变形量统计表
Table 9 Deformations of GMs

| 名称 | 厚度/mm | 初始变形量/mm | 12 h 后变形量/mm | 回复量/mm | 回复率/% |
|----------|-------|----------|--------------|--------|-------|
| HDPE | 0.50 | 8.20 | 5.60 | 2.60 | 31.71 |
| | 1.00 | 7.40 | 3.90 | 3.50 | 47.30 |
| | 1.20 | 7.10 | 2.70 | 4.40 | 61.97 |
| | 1.50 | 6.80 | 2.30 | 4.50 | 66.18 |
| | 2.00 | 6.40 | 1.70 | 4.70 | 73.44 |
| PE | 0.50 | 8.80 | 7.70 | 1.10 | 12.50 |
| | 0.80 | 7.80 | 5.90 | 1.90 | 24.36 |
| | 1.00 | 7.70 | 4.70 | 3.00 | 38.96 |
| PVC-HX | 1.00 | 7.30 | 1.90 | 5.40 | 73.97 |
| | 2.00 | 5.10 | 0.20 | 4.90 | 96.08 |
| | 2.85 | 4.35 | 0.15 | 4.20 | 96.55 |
| PVC-CAPI | 3.65 | 5.65 | 0.05 | 5.60 | 99.12 |
| TPO | 3.65 | 3.45 | 0.65 | 2.80 | 81.16 |

综上所述,横向/斜向划痕损伤不同程度的衰减了土工膜力学性能,增加膜的厚度可降低损伤程度但提升了工程造价;1.0 mm 厚的 PVC-HX 膜的耐损伤能力比 PE/HDPE 膜稍强, TPO 膜的耐损伤能力强于其它土工膜,但单价较高。因此,不宜依靠增加膜厚降低损伤影响,宜提升工程管理、施工监理和质量监督力度降低外界不利因素造成划痕损伤,并结合工程实际情况合理选用土工膜,确保工程质量。

5 适应颗粒垫层变形能力分析

面膜堆石坝膜防渗结构中土工膜铺设于垫层之上,垫层一般包括中粗砂、砂砾石、碎石等,土工膜与垫层直接接触,紧密贴合在细观相对不平整的垫层表面。若土工膜适应变形能力较差,可能会在局部产生较大的变形而发生局部拉伸损坏。吴海民等^[27]对土工膜非散粒体垫层进行研究,分析了 PE 膜适应坝体变形能力的工程特性,与传统无砂混凝土垫层材料的工程特性进行了对比分析;姜晓帧等^[28]基于最大熵原理对土工膜与垫层颗粒间接触力随机状态研究表明膜与垫层颗粒间接触力大小分布满足以压力和单位面积接触点数为参数的指数分布规律。因此,开展土工膜适应变形能力研究是必要的。

图 11 (a), 11 (b) 分别展示了泄压后和泄压静置 12 h 后土工膜形态,可看出 0.5 mm 厚 HDPE/PE 膜在 1.0 MPa 压力作用下表面凹凸不平并产生明显的变形纹理,泄压静置 12 h 后大部分纹理清晰;2.85 mm 厚 PVC-HX 土工膜表面有细微的变形纹理,泄压静置 12 h 有小部分纹理存在;3.65 mm 厚 PVC-CAPI 膜表面凹凸不平,但未形成纹理,泄压静置 12 h 后表面基本恢复平整;3.65 mm 厚 TPO 膜初始泄压后和泄压静置 12 h 后表面均有明显变形纹理分布。

表 9 统计了所有试样初始泄压和泄压后静置 12 h 的变形量,0.5 mm 厚 HDPE 和 PE 膜变形量最大,分别为 8.20, 8.80 mm, 回复量分别为 2.60, 1.10 mm, 部分深度较浅纹理回复平整,较深纹理则无恢复;TPO

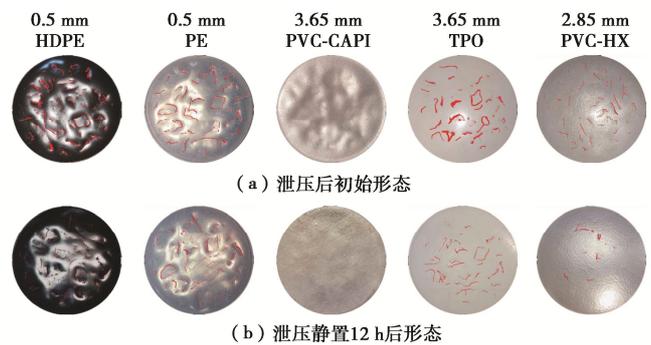


图 11 泄压后土工膜变形图

Fig. 11 Deformations of GMs after pressure relief

膜变形量最小为 3.45 mm, 回复量为 2.80 mm, 大部分纹理回复平整,部分较深的纹理未恢复;PVC-CAPI 变形量为 5.65 mm, 回复量为 5.60 mm, 变形基本恢复,仅留有较浅凹凸变形;2.85 mm 厚 PVC-HX 变形量为 4.35 mm, 回复量为 4.20 mm, 表面仅留有极少纹理。泄压静置 12 h 后土工膜的回复量视为弹性变形量,不可回复的视为塑性变形量。定义变形回复量与初始泄压变形量的比值为变形回复率,可作为适应颗粒垫层变形能力判别指标,变形回复率越大表明弹性好,适应颗粒垫层变形能力越强。HDPE/PE/PVC-HX 膜变形回复率随膜厚度增加而增大,但膜厚大于 1.0 mm 的 HDPE/PE 膜在相邻颗粒之间并未完全接触到颗粒间的孔隙内表面而处于悬空状态, PVC-HX 膜能够较好的紧贴孔隙内表面,表明其具有良好的柔韧性。3.65 mm 厚 PVC-CAPI 膜和 TPO 膜变形回复率,适应变形能力强,但因 PVC-CAPI 膜不存在悬空度而优于 TPO 膜。1.0 mm 厚 PVC-HX、HDPE 和 PE 膜, PVC-HX 膜变形回复率高于 HDPE 膜, PE 膜回复率最小,其适应变形能力优于 HDPE/PE 膜。

综上所述, HDPE、PE 和 PVC-HX 膜均表现为膜材越厚适应颗粒垫层变形能力越强,但 HDPE 膜因厚度增加刚度变大,存在临近颗粒之间出现架空现象而不利于结构安全稳定,膜厚度的选用不宜大于 0.8 mm。膜厚均为 1.0 mm 的 PVC-HX 膜变形回复率明显

高于 PE 膜, 并且能够完全贴合孔隙内表面, 变形回复率在 70%以上, 适宜在高面膜堆石坝中应用。3.65 mm 较厚的 PVC-CAPI 膜和 TPO 膜适应颗粒垫层变形能力强, 但单位面积质量的造价高。

6 结 论

(1) PVC-HX 膜的杨氏模量低, 具有宽泛的线弹性区间, 柔韧性较好; HDPE/PE 膜刚度偏大, 柔韧性相对差, 建议在满足其它要求的条件下尽量选择薄膜; 厚度较大的 TPO 膜的杨氏模量低, 但线弹性区间小, 适宜用于沉降变形不大的面膜堆石坝。

(2) PVC-HX 膜液胀试验呈韧性破坏, 胀破风险低; HDPE/PE 膜随厚度增加破坏形式由韧性破坏转变为脆性破坏, 但薄膜胀破风险高, 宜根据工程实际谨慎选择; TPO 膜虽呈脆性破坏, 但允许液胀强度大, 使用风险低。

(3) TPO、PVC-HX/CAPI 膜具有较强的耐局部划痕损伤能力, 损伤破坏时仍具有较大的延伸率和极限拉伸强度; 与 PVC-HX 膜具有相同厚度的 HDPE/PE 膜耐损伤能力稍差, 运输、仓储和施工过程中应予以加强防护。

(4) PVC-HX 和 TPO 膜适应垫层变形能力强, 1.0 MPa 压力下能够紧贴颗粒垫层孔隙面, 其它土工膜塑性变形大或未能完全贴合垫层颗粒间的孔隙面而处于架空状态, 对膜防渗结构安全性不利。

参考文献:

- [1] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 20-26. (SHU Yiming. Progress in geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 20-26. (in Chinese))
- [2] 顾淦臣. 土工薄膜在坝工程建设中的应用[J]. 水力发电, 1985, 11(10): 43-50. (GU Ganchen. Application of geomembrane in dam construction[J]. Water Power, 1985, 11(10): 43-50. (in Chinese))
- [3] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 高面膜堆石坝发展的需求与关键技术: 高面膜堆石坝关键技术(一)[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 1-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. Need and key technology on development of high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam (I)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 1-9. (in Chinese))
- [4] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法: 高面膜堆石坝关键技术(二)[J].

- 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 10-15. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach: key technology of high membrane faced rockfill dam (II)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 10-15. (in Chinese))
- [5] 吴海民, 束一鸣, 姜晓桢, 等. 高面膜堆石坝运行状态下土工膜双向拉伸力学特性: 高面膜堆石坝关键技术(三)[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 16-22. (WU Haimin, SHU Yiming, JIANG Xiaozhen, et al. Biaxial tensile mechanical property of geomembrane used as high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam(III)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 16-22. (in Chinese))
- [6] 吴海民, 束一鸣, 滕兆明, 等. 高堆石坝面防渗土工膜锚固区夹具效应破坏模型试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 30-36. (WU Haimin, SHU Yiming, TENG Zhaoming, et al. Model tests on failure properties of geomembrane anchorage due to clamping effect in surface barrier of high rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 30-36. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 宁宇, 喻建清, 崔留杰. 软岩堆石高坝土工膜防渗技术[J]. 水力发电, 2016, 42(5): 62-67, 105. (NING Yu, YU Jianqing, CUI Liujie. Anti-seepage of geomembrane for high soft rock filling dam[J]. Water Power, 2016, 42(5): 62-67, 105. (in Chinese))
- [9] ICOLD. Geomembrane Sealing Systems for Dams: Design Principles and Return of Experience (Bulletin 135)[R]. Paris: International Commission on Large Dams, 2010.
- [10] SCUERO A, VASCHETTI G. Geomembrane sealing systems for dams: ICOLD bulletin 135[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 29.
- [11] CAZZUFFI D, MORACI N, CALVARANO L S, et al. The influence of vertical effective stress and geogrid length on interface behavior under pullout conditions[J]. Geosynthetics, 2014, 32(2): 40-50.
- [12] 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. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S1): 1-9. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL 274—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for rolled earth-rock fill dams: SL 274—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [14] 国家能源局. 碾压式土石坝施工组织设计规范: NB/T 35062—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Design Code for Construction Planning of Rolled Earth-Rock Dam: NB/T 35062—2015[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [15] CHEVALIER L, CALLOCH S, HILD F. Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials[J]. European Journal of Mechanics, 2001, **20**(2): 169-187.
- [16] AYDILEK A H, GULER M, EDIL T B. Use of image analysis in determination of strain distribution during geosynthetic tensile testing[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, **18**(1): 65-74.
- [17] GÓRSZYK J, MALICKI K. Digital image correlation method in monitoring deformation during geogrid testing[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2019, **27**(2(134)): 84-90.
- [18] MERRY S M, BRAY J D. Geomembrane response in the wide strip tension test[J]. Geosynthetics International, 1996, **3**(4): 517-536.
- [19] Standard Practice for Determination of 2% Secant Modulus for Polyethylene Geomembranes: ASTM D5323-92[S]. 2018.
- [20] ZHANG X L, MA Z Y, WU Y Y, et al. Response of mechanical properties of polyvinyl chloride geomembrane to ambient temperature in axial tension[J]. Applied Sciences, 2021, **11**(22): 10864.
- [21] 束一鸣, 叶乃虎. LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验[J]. 水利水电科技进展, 2003, **23**(5): 1-3, 69. (SHU Yiming, YE Naihu. Simulation test for Mullen burst limit load of LDPE geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, **23**(5): 1-3, 69. (in Chinese))
- [22] 李旺林, 刘占磊, 孟祥涛, 等. 土工膜环向约束气胀变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(6): 1147-1151. (LI Wanglin, LIU Zhanlei, MENG Xiangtao, et al. Experimental study on air expansion deformation of geomembrane under ring-restrained conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1147-1151. (in Chinese))
- [23] XU F, LI W L, LIU Z L, et al. Study of factors that influence geomembrane air expansion deformation under ring-restrained conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(3): 178-183.
- [24] 束一鸣, 陆忠民, 侯晋芳, 等. 土工合成材料防渗排水防护设计施工指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (SHU Yiming, LU Zhongmin, HOU Jinfang. Guide for Design and Construction of Seepage Control and Drainage Protection of Geosynthetics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))
- [25] 徐光明, 章为民, 彭功勋. HDPE 膜的力学特性受损伤影响初步研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, **32**(1): 76-80. (XU Guangming, ZHANG Weimin, PENG Gongxun. Effect of damage on mechanical behavior of HDPE geomembrane[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2004, **32**(1): 76-80. (in Chinese))
- [26] 岑威钧, 波兰汗·开肯, 刘凤茹. 缺陷和损伤土工膜的拉伸特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, **41**(1): 69-73. (CEN Weijun, BOLANHAN Kaiken, LIU Fengru. Experimental study on tensile properties of defective and damaged geomembranes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, **41**(1): 69-73. (in Chinese))
- [27] 吴海民, 束一鸣, 滕兆明, 等. 高堆石坝面膜防渗体非散粒体垫层工程特性试验: 高面膜堆石坝关键技术(五)[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(1): 29-36, 66. (WU Haimin, SHU Yiming, TENG Zhaoming, et al. Experimental research on engineering property of non-granular cushion for high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam(V)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, **35**(1): 29-36, 66. (in Chinese))
- [28] 姜晓桢, 束一鸣. 基于最大熵原理的土工膜与垫层颗粒间接触力随机状态分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 1): 49-55. (JIANG Xiaozhen, SHU Yiming. Stochastic analysis of contact force between geomembrane and particle underlayer based on principle of maximum entropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S1): 49-55. (in Chinese))