

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.121



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



加载介质对 HDPE 土工膜鼓胀变形力学性质的影响

李政¹, 李旺林¹, 汪万升¹, 于海瑞², 薛霞¹

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 水发规划设计有限公司, 济南 250013)

摘要:为研究加载介质对土工膜鼓胀变形力学性质的影响,选择 0.2、0.3、0.6 mm 三种厚度的 HDPE 土工膜为研究对象,使用鼓胀变形专用试验设备,分别以气体和液体作为加载介质,在 1 kPa/s 的注入速率下开展环形约束下的球形鼓胀变形试验,并借助偏光显微镜着重分析土工膜鼓胀破坏的微观形态变化与差异及破坏机理。结果表明:在相同环境条件下,液胀下的胀破压力比气胀下约平均高出 34%,液胀破坏时鼓胀高度比气胀下约平均高出 22%;气、液胀下土工膜鼓胀变形表现为不同的弹性、屈服、强化和破坏变形阶段;气胀时土工膜为线状破坏面,微观上表现为高分子链段的均匀拉伸变形与断裂,液胀时土工膜均为带状破坏面,微观上表现为高分子链段不均匀拉伸变形与断裂;加载介质对土工膜球形鼓胀变形力学性质和破坏特征的影响主要与介质自身性质、膜下压力荷载分布和高分子链段的重新取向、重结晶有关。建议采用液体介质开展土工膜鼓胀破坏强度试验。

关键词:土工膜;压力介质;气胀;液胀;鼓胀变形;破坏形态

中图分类号:TU44 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)01-0110-08

Influence of loading medium on mechanical properties of geomembrane bulging deformation

LI Zheng¹, LI Wanglin¹, WANG Wansheng¹, YU Hairu², XUE Xia¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250002, P. R. China; 2. Shuifa Planning and Design Co. Ltd, Jinan 250013, P. R. China)

Abstract: In order to find out whether the loading medium has an effect on the mechanical properties of geomembrane bulging deformation, HDPE geomembranes with three thicknesses of 0.2 mm, 0.3 mm and 0.6 mm were selected as the research objects. Using the special test equipment for bulging deformation, we used air and liquid as the loading media respectively. At the injection rate of 1 kPa/s, the spherical bulging deformation test under annular constraints was carried out, and the microscopic morphology changes and differential failure mechanisms of geomembrane bulging failure were emphatically analyzed by means of a polarizing microscope. The results show that under the same environmental conditions, the bursting pressure under liquid bulging is about 34% higher than that under air bulging, and the bulging height under liquid bulging is about 22% higher than that under air bulging. The bulging deformation of geomembranes under air and liquid

收稿日期:2023-07-29

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2019MEE106)

作者简介:李政(1995-),男,主要从事水利工程研究,E-mail:1062091626@qq.com。

李旺林(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:cswlw@163.com。

Received: 2023-07-29

Foundation item: Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR2019MEE106)

Author brief: LI Zheng (1995-), main research interest: water conservancy engineering, E-mail: 1062091626@qq.com.

LI Wanglin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cswlw@163.com.

bulging shows different stages of elastic, yield, strengthening and failure deformation. The geomembrane presents a linear failure surface during air bulging, which is manifested as uniform tensile deformation and fracture of the polymer chain segments at the micro level. The geomembrane presents a banded failure surface during liquid bulging, which is manifested as uneven tensile deformation and fracture of the polymer chain segments at the micro level. The influence of the loading medium on the mechanical properties and failure characteristics of the spherical bulging deformation of the geomembrane is mainly related to the properties of the medium itself, the distribution of pressure load under the membrane and the reorientation and recrystallization of polymer chains. According to the research results, it is recommended to use liquid medium to carry out the strength test for the bulging failure of the geomembrane.

Keywords: geomembrane; pressure medium; air bulging; liquid bulging; bulging deformation; damage mode

土工膜具有防渗效果优异、造价低、适应性强等优点,被广泛应用于平原水库的大面积防渗^[1]。水库建成后,受地基不均匀沉降、库区降雨和库水渗漏等因素影响,膜下土体间隙中气体或液体的迁移加剧,可能引发土工膜气胀或液胀现象^[2];若鼓胀情况严重,将导致土工膜损毁失效,对防渗体系造成不同程度的渗漏危害^[3-4]。

在土工膜气、液胀变形力学性质相关研究中,张宪雷等^[5]进行了不同类型土工膜力学特性试验,对比分析了其液胀破坏形态和力学性质的差异性;李旺林等^[6]研制了多种不同规格的土工膜气胀变形专用试验设备,分析土工膜环向约束条件下球形鼓胀变形的特性;Xu等^[7]利用自主研发的设备进行了土工膜环向约束下的气胀试验,分析土工膜鼓胀变形的基本特性和影响因素;Li等^[8]提出在土工膜下抽真空以减小气胀风险,并通过现场试验验证了其可行性;Wang等^[9]研制了相关设备,研究平原地区水库运行时土工膜出现气胀的时期与影响因素;尹春杰等^[10]、张宪雷等^[11]利用低场核磁共振技术分析变形状态下PVC膜的孔隙特征与抗渗性能,构建了PVC-P土工膜微观孔隙度与渗透量的数学模型。已有研究主要针对土工膜在单一加载介质(气体或液体)下的鼓胀变形特性,对于土工膜在不同加载介质下力学特性与破坏形态的对比分析相对较少。

为探明土工膜在不同加载介质下力学性质与破坏特征的异同点,将其概化为环向约束下的土工膜鼓胀变形,并利用自行研制的土工膜鼓胀变形专用试验设备,进行0.2、0.3、0.6 mm三种厚度HDPE土工膜环向约束条件下的气胀和液胀变形试验,以探讨加载介质对土工膜鼓胀变形力学性质和破坏机理的影响。

1 试验设计

1.1 试验设备

采用的土工膜鼓胀试验设备包括试验平台、测

控系统和加载系统3部分。其中,试验平台主要包括控制面板、法兰盘、显示系统、电液伺服多通道控制系统软件;测控系统主要包括压力传感器、激光位移传感器和高清视频录像机;加载系统包括液压系统、气压系统,分别采用气体、液体作为加载介质,完成土工膜的气胀、液胀试验,试验平台结构示意图见图1。

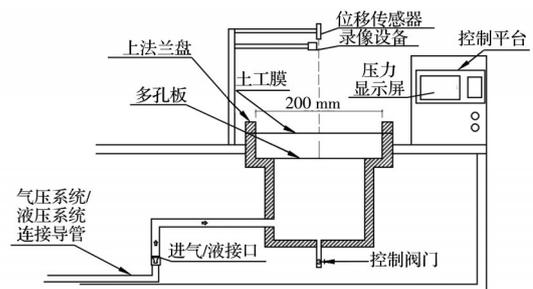


图 1 试验平台结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of the test platform

气压加载系统主要由无油气泵、调压阀以及导管组成,首先将气泵加压至额定压力,再通过出口处调压阀调节至试验要求的压强,最后经输气导管连接进气口,使压强稳定的气体通过多孔板稳定输入试验腔体内。液压加载系统主要由电液伺服控制系统、电液伺服阀、液压油缸、液缸、油泵及导管组成,基本原理为油泵持续输出液压油缸中的液压油,从而带动活塞将液缸中的水体通过导管经多孔板压入试验腔体内,输出速率可通过电液伺服系统控制。同时,将两种导管与进气(液)口的尺寸相统一,从而在同一试验平台实现气胀和液胀试验。压力传感器位于法兰盘底部,可检测气、液胀试验时腔体内的压力。

依据目前比较成熟的美国土工合成材料多轴拉伸试验标准^[12]要求,试验设备的夹具直径最小为450 mm。Pincus等^[13]的研究结果表明,当夹具直径与膜厚之比达到60以上时,HDPE土工膜的应力-应变关系曲线及分布特性大致相同。因此,试验选

用法兰盘直径为 200 mm, 夹具直径与膜厚比值分别为 333、666、1 000, 满足要求。

1.2 试验材料

试验选择工程中常用的 3 种厚度的 HDPE 土工膜(以下简称土工膜), 其常规试验指标见表 1。

表 1 试验材料常规指标

Table 1 Routine indices of test materials

类型	厚度/mm	断裂强度/(kN/m)	断裂伸长率/%
土工膜	0.2	5.5	718
土工膜	0.3	7.2	631
土工膜	0.6	16.6	759

1.3 试验方案

为探究不同加载介质对土工膜鼓胀变形力学性质的影响, 选择气体、液体两种加载介质。目前, 在平原地区水库、垃圾填埋场及地面蓄液工程等相关水利工程中, 土工膜鼓胀变形的案例统计较少, 很难得到不同工况下实际工程中土工膜的气胀加载速率和破坏规律。因此, 结合实际工程情况, 参考文献[7]等有关土工膜气胀试验加载速率的研究成果以及现有气、液胀试验设备对加载速率控制能力的差别, 选择 1 kPa/s 作为试验加载速率, 以统一评价土工膜的力学性能。土工膜气、液胀试验方案见表 2。

表 2 土工膜气胀和液胀试验方案

Table 2 Test protocol for geomembrane air and liquid bulging

试验组	加载介质	土工膜类型	加载速率/(kPa/s)
A-1	气体	0.2 mm 土工膜	1
A-2	液体	0.2 mm 土工膜	1
B-1	气体	0.3 mm 土工膜	1
B-2	液体	0.3 mm 土工膜	1
C-1	气体	0.6 mm 土工膜	1
C-2	液体	0.6 mm 土工膜	1

1.4 张应力和应变计算公式

采用文献[6]中气胀和液胀下的张应力计算公式, 表达土工膜的张应力, 见式(1)。

$$T = \frac{D^2 + 4h^2}{16h} P \quad (1)$$

式中: T 为试样张应力, kN/m; D 为环向约束孔径, mm; h 为冠顶鼓胀高度, mm; P 为膜下鼓胀压力, MPa。

采用文献[6]中的试样应变计算公式计算土工膜应变, 见式(2)。

$$\varepsilon = \frac{4h^2 + D^2}{4hD} \arcsin \frac{4hD}{4h^2 + D^2} - 1 \quad (2)$$

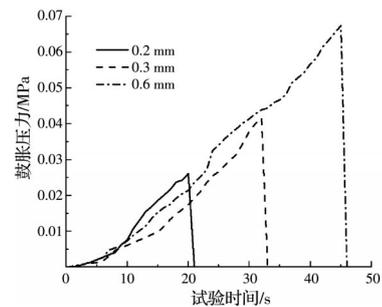
式中: ε 为土工膜应变。

2 试验成果及分析

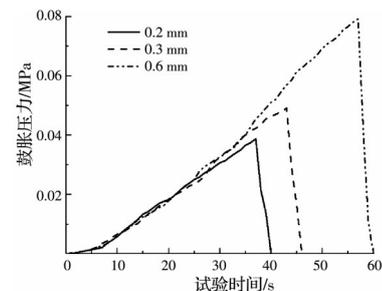
2.1 气、液胀试验

分别以气体和液体作为加载介质, 进行气、液胀对比试验, 每组平行鼓胀试验次数不少于 6 次。

试验前, 将直径约 250 mm 的圆形试样安装在上、下法兰盘之间, 并保持试样平整无张力。土工膜鼓胀试验时, 首先打开鼓胀试验软件, 启动压力传感器和激光位移传感器, 确认仪器均正常工作后, 开始进行土工膜鼓胀试验; 记录试验过程中的试验时间、鼓胀压力和鼓胀高度, 当土工膜出现鼓胀破坏时, 立即停止试验。将鼓胀压力和鼓胀高度的相关数据代入式(1)、式(2), 得到土工膜鼓胀高度-鼓胀压力曲线、张应力-应变曲线; 对比不同试样破坏形态, 总结土工膜的典型破坏形态。将试验时间与鼓胀压力数据整理后, 得到气、液胀下土工膜鼓胀变形的试验时间-鼓胀压力曲线, 如图 2 所示。



(a) 气胀试验



(b) 液胀试验

图 2 土工膜鼓胀变形的试验时间-鼓胀压力曲线

Fig. 2 Time-bulge pressure curves of geomembrane bulge test

2.2 鼓胀压力-鼓胀高度

不同加载介质下土工膜的鼓胀高度-鼓胀压力曲线如图 3 所示。

由图 3 可见, 不同加载介质下土工膜的鼓胀高度-鼓胀压力曲线形态相似, 但试样胀破时的鼓胀高度和胀破压力有较大差异。气胀与液胀下土工膜的鼓胀高度-鼓胀压力曲线整体趋势大致相同, 但当试样达到相同鼓胀高度时, 液胀下的鼓胀压力偏高, 该趋势持续至试样出现破坏。不同加载介质下

土工膜鼓胀变形破坏时的鼓胀高度和胀破压力见表 3。

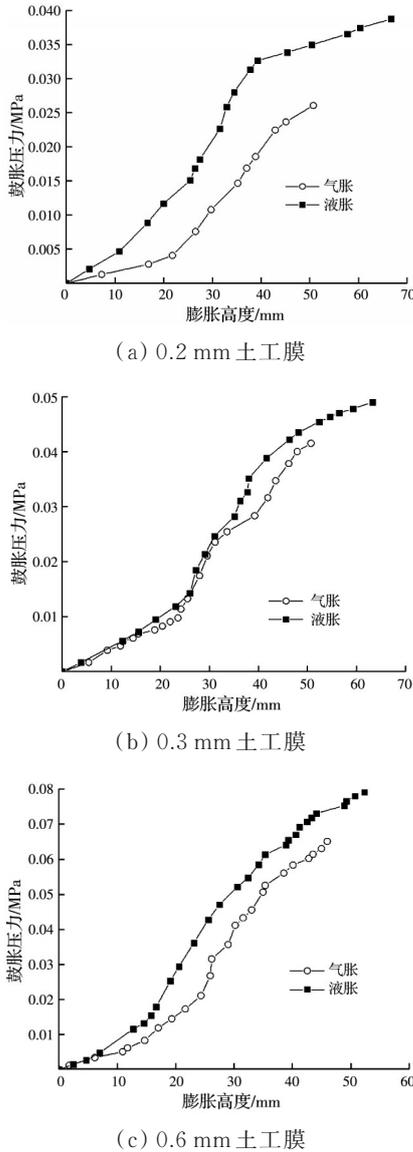


图 3 土工膜气胀和液胀的鼓胀高度-鼓胀压力曲线

Fig. 3 Bulge height-bulge pressure curves of geomembrane air and liquid bulging

表 3 土工膜的鼓胀高度与胀破压力

Table 3 Geomembrane bulge height and burst pressure

膜厚/ mm	气胀试验		液胀试验	
	鼓胀高度/ mm	胀破压力/ MPa	鼓胀高度/ mm	胀破压力/ MPa
0.2	50.67	0.026 1	66.41	0.038 8
0.3	50.68	0.040 7	63.25	0.049 1
0.6	45.91	0.067 4	52.26	0.079 2

由表 3 可见,加载介质会影响土工膜球形鼓胀变形时的鼓胀高度和鼓胀压力,试样胀破时的鼓胀高度和胀破压力差值较大,因此加载介质对二者的影响程度相对较高。液胀下土工膜胀破时的鼓胀高度相较气胀下约高 14%~30%,平均高 22%;液

胀下土工膜胀破时的胀破压力相较气胀下约高 17%~50%,平均高 34%。随着膜厚的增加,液、气胀下土工膜胀破压力的差值缓慢减小,鼓胀高度的差值也缓慢减小。

2.3 张应力-应变

不同加载介质下土工膜的张应力-应变曲线见图 4。

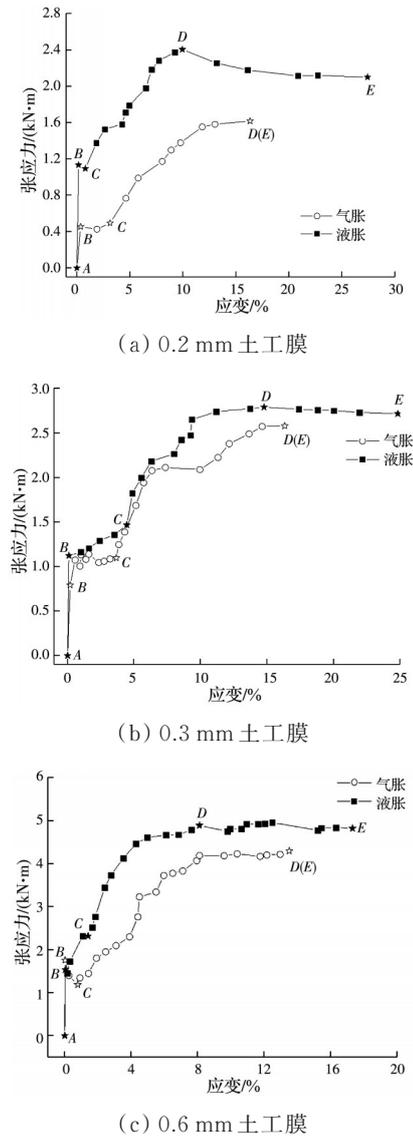


图 4 土工膜气胀和液胀下张应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curves of geomembrane air and liquid bulging

由图 4 可见,不同加载介质下土工膜张应力-应变曲线均可分为弹性阶段(AB)、屈服阶段(BC)、强化阶段(CD)和破坏阶段(DE);气胀变形偏向于脆性材料破坏的力学特性,因此破坏阶段在曲线中表现为一点 E;液胀变形偏向于塑性材料破坏的力学特性,破坏阶段在曲线中表现为较长的弱化破坏阶段(DE),每个阶段曲线形态和变形过程略有差异。弹性阶段,气、液胀下张应力-应变曲线近乎重合,张

应力与应变呈线性增长,液胀下张应力的弹性极限相对较高。屈服阶段,当弹性张应力达到极值点后,土工膜均会发生水平屈服滑移的塑性变形,且随着应变的增加上下波动,但气胀下屈服滑移更加显著,而液胀下曲线的屈服滑移比较短暂。强化阶段,气、液胀下土工膜的张应力均随应变的增加持续增大,并达到强化极限的最高强度。破坏阶段,气、液胀下土工膜的变形过程明显不同:气胀下土工膜达到强化最大强度后迅速产生变形破坏,塑性变形较小;液胀下土工膜达到强化最大强度后,在冠顶区域发生较大的局部塑性拉伸变形,变形曲线表现为较长的弱化或局部变形曲线段,直至发生变形破坏。

不同加载介质下土工膜鼓胀变形时,其张应力-应变曲线和变形过程略有差异,加载介质对其影响程度相对较低。由于气、液胀下土工膜变形过程的不同,二者张应力-应变曲线的最终变形量区别较小,其中液胀下试样的最终变形量较气胀约高5%~10%。随着膜厚的增加,在气、液胀变形过程中,同一应变下张应力差值呈降低趋势。

2.4 鼓胀破坏形态

在不同加载介质作用下,土工膜的宏观破坏形态对比见图5。选择0.2 mm土工膜典型气胀和液胀破坏试样的部分区域(分别为未变形区域A、法兰盘压痕B、球形鼓胀区域C、带状破坏面D、局部裂口E),在偏光显微镜下观察各处的微观破坏形态,结果见图6、图7。

土工膜宏观破坏形态表现出较大差异。气胀破坏为受拉破坏,土工膜均在冠顶区域出现线状破坏面,表现为爆破;破坏长度约9~15 cm,占冠顶长度的1/2~2/3;破口处土工膜完全断裂,裂口处局部塑性变形程度较小。液胀破坏表现为顶破坏和张拉破坏:0.2 mm土工膜产生带状破坏,出现一条通过冠顶大圆曲线的条状裂纹,裂纹处塑性变形较大,膜显著变薄,约为初始厚度的1/2~1/3;0.3 mm土工膜产生带状破坏,冠顶区域出现两条长度不一的条状裂纹,裂纹长度约为冠顶长度的1/4~1/2,裂纹处局部塑性变形相对较小;0.6 mm土工膜出现带状破坏,冠顶处产生短条状裂纹,裂纹长度约为冠顶长度的1/2,裂纹处局部塑性变形较小。

土工膜的微观破坏形态也表现出较大的差异。在偏光显微镜下观察发现,土工膜未变形区域如图6(a)、7(a)所示,表层圆形缩孔分布紧致,呈线性有序排列;法兰盘压痕处如图6(b)、7(b)所示,痕迹明显,仅内侧局部发生拉伸变形。气胀时球形鼓胀区

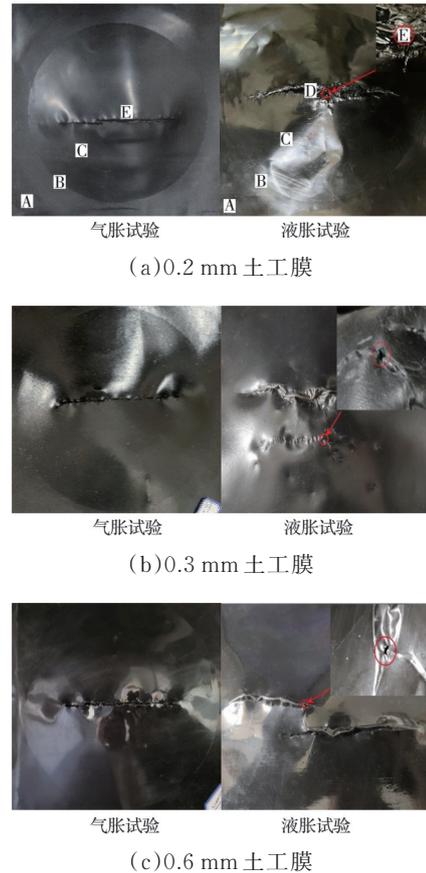


图5 土工膜气胀和液胀破坏形态对比

Fig. 5 Comparison of geomembrane air and liquid bulging failure modes

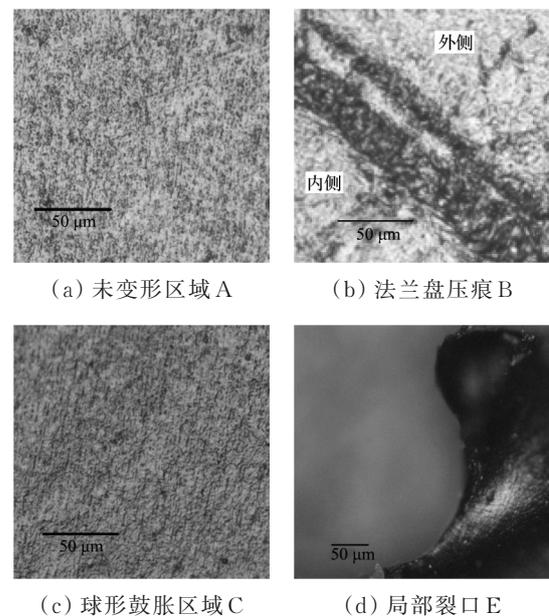


图6 0.2 mm 土工膜气胀破坏局部显微细节图

Fig. 6 Local microscopic details of 0.2 mm geomembrane air bulging failure

域如图6(c)所示,表层缩孔均匀拉伸变形,其形状由圆形演变为矩形;裂口处如图6(d)所示,局部有明显凸起。液胀时球形鼓胀区域如图7(c)所示,表

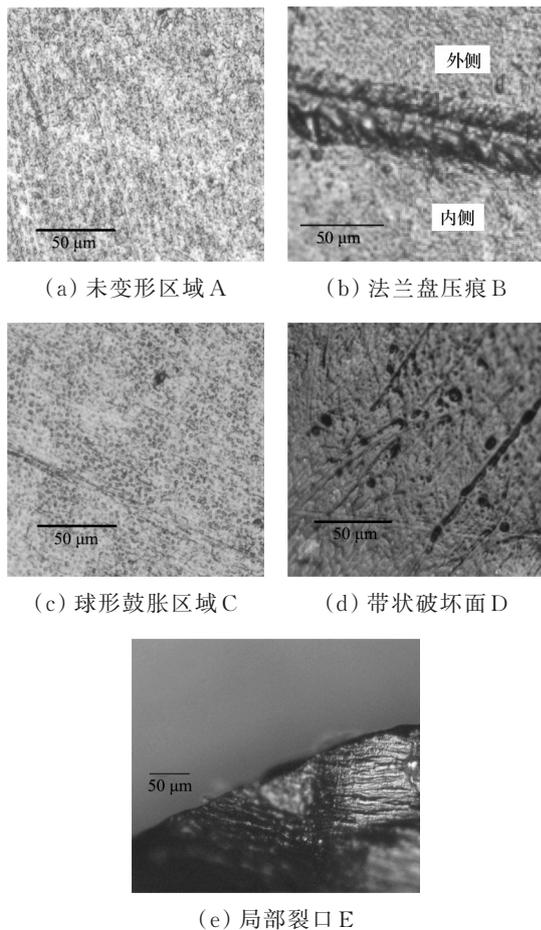


图 7 0.2 mm 土工膜液胀破坏局部显微细节图
Fig. 7 Local microscopic details of 0.2 mm geomembrane liquid bulging failure

层缩孔出现不均匀拉伸变形,部分缩孔由圆形演变为矩形,局部厚度变薄,但仍有部分缩孔未发生明显变形;带状破坏面如图 7(d)所示,部分缩孔被进一步拉伸变形;裂口处如图 7(e)所示,平整度较高。未变形区域 A 处,气、液胀时土工膜表层缩孔均紧密有序排列;法兰盘压痕 B 处,气、液胀时痕迹显著,均在痕迹内侧出现局部拉伸变形,而外侧几乎未发生变形;球形鼓胀区域 C 处,气胀时土工膜表层大量缩孔出现较为均匀的拉伸变形,由圆形演变为矩形,而液胀时表层部分缩孔经不均匀拉伸变形进而演变为长短各异的矩形,但部分缩孔仍保持圆形,导致土工膜局部厚度不均;带状破坏面 D 处,气胀时无该区域;液胀时该区域土工膜表层部分缩孔被进一步拉伸,但仍有部分缩孔维持圆形不变;局部裂口 E 处,气胀破坏时裂口处较粗糙,局部土工膜出现显著凸起,而液胀破坏时裂口光滑,平整度较高。

3 不同加载介质差异破坏机理分析

在不同加载介质作用下,土工膜球形鼓胀变形

时表现出的力学性质和破坏特征存在一定差异,主要原因在于,土工膜变形时其宏观和微观破坏机理存在差异。

从宏观角度分析,加载介质的黏滞性、压缩特性及膜下压力荷载分布存在差异。气体具有较强的可压缩性,且黏滞度较小,其流动性也相对更大;因此,高压区气体能快速向低压区扩散,使得腔内高、低压气体迅速混合,同时向各个方向均匀传递压力,因而膜下气压力分布较为均衡。试样开始气胀变形后,在均匀气压力作用下,土工膜整体出现鼓胀变形,冠顶处膜厚度变薄且张拉应力最大^[3],成膜过程中所形成的局部强度薄弱区率先发生破坏,并沿横向条纹强度薄弱区迅速扩张,形成张拉破坏裂缝带,瞬间产生气胀破坏。液体黏滞度高于气体,且几乎不可压缩,其流动性相对较差;加压后压力快速传递,腔体内部流体压强分布相对不均,膜下液压力在中心区域相对较高,而在周围环向区域相对较低。试样液胀变形后,由于液体几乎不可压缩,因而在冠顶区域膜下持续形成一个液压力相对较高的分布区。冠顶区域在持续不均匀的液压力作用下发生顶胀作用,并发生不同程度的塑性变形,同时出现相对较高的顶胀破坏压力。土工膜液胀破坏时,除了沿大圆曲线的张拉应力外,还受到向上的顶胀作用;因此,液胀破坏时并非沿大圆(或小圆)形成一条明显的线状张拉破坏带,而是出现一条或数条塑性拉伸带状破坏面。

从微观角度分析,不同加载介质作用下土工膜中高分子链段的运动滑移与需要克服的作用力略有不同。土工膜由大量排列较为紧密整齐的高分子聚乙烯链组成,链段之间主要通过分子作用力相互缠结^[14]。气胀变形时,在膜下持续均匀增加的气压力作用下,大量高分子链段沿着外力方向发生较均匀且不可逆的相对滑移,链段间的缠结不断被解开并进行重新取向,直至发生气胀破坏。在这个过程中,主要克服不同链段的分子间作用力,因而其破坏压力相对较低。液胀变形时,由于膜下液压力分布不均匀,在液压力的作用下,大量高分子链段沿着外力方向发生链段的解缠结,链段重新取向并发生重结晶;随着冠顶区域膜下不均匀液压力的持续增加,大量的高分子链段持续被迫发生运动,导致高分子链排列取向强度提高,高分子链段持续发生相互滑移和断裂,直至发生液胀破坏。此过程中主要克服不同链段的分子间作用力及链段内部的共价键,而共价键强度远高于分子间作用力,因此破坏压力相对较高。

4 结论

1) 加载介质对土工膜胀破时的胀破压力、鼓胀高度和破坏形态影响较大。液胀下胀破时的胀破压力比气胀下平均约高34%，最高为50%；液胀下胀破时的鼓胀高度比气胀下平均约高22%，最高为30%。随着膜厚的增加，气、液胀下胀破压力之差缓慢减小，鼓胀高度之差亦缓慢减小。

2) 加载介质影响土工膜胀破时的破坏形态。气胀破坏在宏观上表现为线状破坏面，微观上表现为高分子链段的均匀拉伸变形与断裂；液胀破坏在宏观上表现为带状破坏面，微观上表现为高分子链段的不均匀拉伸变形与断裂。

3) 加载介质影响土工膜鼓胀变形发生与发展的过程及张应力-应变曲线。气、液胀下土工膜鼓胀变形表现为不同的弹性、屈服、强化和破坏变形阶段：弹性阶段，二者特征相似，但液胀下张应力的弹性极限相对较高；屈服阶段，气胀下持续时间相对较长，屈服滑移较为显著；强化阶段，二者特征相似，但液胀下张应力的极限强度相对较高；破坏时，气胀下鼓胀变形迅速胀破，而液胀下则在冠顶产生较大的局部变形，表现出较大的最终变形量。气、液胀鼓胀变形过程中，相同应变下的张应力差值呈降低趋势。

4) 加载介质对土工膜球形鼓胀变形力学性质和破坏特征的影响，从宏观角度分析，主要与介质的黏滞性、压缩特性、膜下压力荷载分布有关；从微观角度分析，不同加载介质作用下，土工膜中高分子链段的运动滑移与需要克服的作用力略有不同。

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 Y M, WU H M, JIANG X Z. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup 1): 1-9. (in Chinese)
- [2] CAO X S, YUAN J P, HE G L, et al. In situ test and analysis method of air bulging under geomembranes in a shallow-lined reservoir [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(1): 24-34.
- [3] 李旺林, 李志强, 魏晓燕, 等. 土工膜缺陷渗漏引起气胀的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1161-1165.
LI W L, LI Z Q, WEI X Y, et al. Air expansion caused by leakage water resulting from geomembrane defects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1161-1165. (in Chinese)
- [4] 岑威钧, 陈司宁, 李邓军, 等. 考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 413-418.
CEN W J, CHEN S N, LI D J, et al. Characteristic analysis of 3D seepage field of a geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 413-418. (in Chinese)
- [5] 张宪雷, 马仲阳, 吴云云. 面膜堆石坝不同品种土工膜力学特性[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 940-952.
ZHANG X L, MA Z Y, WU Y Y. Mechanical properties of different geomembranes in membrane-faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 940-952. (in Chinese)
- [6] 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 W L, LIU Z L, MENG X T, 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)
- [7] 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.
- [8] LI W L, LI Z Q, SU X C, et al. Field experimental of eliminating geomembrane air expansion by vacuumizing for plain reservoir [J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 42(1): 20160276.
- [9] WANG L J, LIU S H, SHEN C M, et al. Laboratory test and modelling of gas pressure under geomembrane subjected to the rise of groundwater in plain reservoirs [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1): 81-96.
- [10] 尹春杰, 张宪雷. 基于低场核磁共振技术变形状态下PVC膜孔隙特征研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 180-183.
YIN C J, ZHANG X L. Study on pore characteristics of PVC geomembrane under low field NMR deformation [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(7): 180-183. (in Chinese)
- [11] 张宪雷, 尹春杰, 马仲阳, 等. 基于低场核磁共振技术PVC-P土工膜微观渗透机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 880-889.
ZHANG X L, YIN C J, MA Z Y. Micropermeation mechanism of PVC-P geomembrane by low field NMR technology [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 880-889. (in Chinese)
- [12] Standard test method for bursting strength of textile

- fabrics—Diaphragm bursting strength tester method: ASTM D 5617—04 (2015) [S]. ASTM International, 2015.
- [13] PINCUS H J, MERRY S M, BRAY J D. Size effects for multi-axial tension testing of HDPE and PVC geomembranes [J]. Geotechnical Testing Journal, 1995, 18(4): 441-449.
- [14] 段芳莉, 金义矿, 颜世钊. 半晶态聚合物拉伸变形的微观机理[J]. 力学学报, 2016, 48(2): 369-377.
- DUAN F L, JIN Y K, YAN S D. Microstructure evolution during tension deformation of semi-crystalline polymer[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(2): 369-377. (in Chinese)

(编辑 朱备)