

紫外光老化土工膜和土工布的界面剪切特性

章玲玲¹, 李昊楠², 林海²

(1. 江西交通职业技术学院建筑工程学院; 2. 南昌大学工程建设学院)

摘要:为研究土工合成材料界面强度的演化特征,利用大尺寸紫外光老化模型试验箱,对土工膜和土工布分别进行了长达80 d和40 d的老化试验。将定期所取老化试样分别用于开展土工膜-砂土、土工布-砂土和土工膜-土工布界面的温控剪切试验,并定量分析了紫外光老化对这3种界面剪切强度的影响。结果表明,紫外光老化对土工膜的界面剪切强度的影响强于土工布,老化土工膜-土工布界面的剪切强度随着紫外光老化时间增加表现出先增强后减小的规律。

关键词:土工膜;土工布;剪切强度;紫外光;老化;界面

Interfacial shear properties of geomembrane and geotextile under ultraviolet aging//Zhang Lingling¹, Li Haonan², Lin Hai² (1. School of Architectural Engineering, Jiangxi V&T College of Communications; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University)

Abstract: To investigate the evolution characteristics of the interface strength of geosynthetics, a large-scale ultraviolet (UV) aging model test chamber was used to conduct aging tests on geomembrane (GMX) and geotextile (GT) for up to 80 days and 40 days, respectively. Periodically collected aged specimens were utilized to perform temperature-controlled direct shear tests on GMX-sand, GT-sand, and GMX-GT interfaces. The influence of UV aging on the shear strength of these three interfaces was quantitatively analyzed. The results show that UV aging has a stronger effect on the shear strength of the GMX interface than on the GT interface. Furthermore, the shear strength of the aged GMX-GT interface exhibits a trend of initial increase followed by a decrease with prolonged UV aging time.

Key words: geomembrane; geotextile; shear strength; ultraviolet; aging; interface

土工膜凭借其低渗透性、良好的环境适应性和变形协调能力,已成为面板堆石坝、尾矿库和垃圾填埋场等水利和环保工程中的主要防渗结构^[1-6]。土工布常作为土工膜的保护层与其直接接触并铺设于各类边坡中^[7-10]。工程中土工膜和土工布的大面积铺设和施工常需要较长时间,导致其在工程建设过程中不可避免地暴露在阳光和空气中。土工膜和土工布在紫外线作用下的性能稳定期是其耐久性设计的重要考虑因素,然而实测依据的缺乏和老化机理研究的不足使得工程界在土工合成材料耐久性设计方面的规定仍然模糊^[11-15]。Rowe等^[16-19]基于土工膜和土工布的工作环境分析了材料老化速率和服役寿命,服役寿命通常按照材料中的抗氧化剂消耗情况或抗拉强度老化折减比为依据。我国对土工合成材料在复杂环境下的老化行为的研究相对滞后,同时,关于土工合成材料老化的研究多侧重于抗拉性

质的劣化^[13,20-21]。然而,填埋场等工程中土工膜和土工布等土工合成材料的服役寿命不仅取决于抗拉强度,其界面剪切特性随老化过程的演化规律更直接关乎边坡的滑移稳定性。以土工膜-土工布界面为代表的土工合成材料界面剪切强度是控制边坡安全的关键因素,土工膜和土工布的界面剪切特性是20世纪90年代初以来的持续研究热点^[1,8,22-24]。大尺寸直剪试验结果被认为最接近工程中滑坡发生时应力状态,适合用于开展土工合成材料界面剪切特性研究^[8,22,25-28]。紫外光老化一段时间后的土工合成材料界面剪切特性研究将丰富并完善我国土工合成材料的耐久性设计体系^[29]。

近年来,考虑土工合成材料老化的界面剪切特性研究为填埋场长期安全的评估提供了一个新角度^[30-31]。然而,目前对老化土工合成材料界面剪切特性方面的研究尚处于初始阶段,紫外线老化时长

基金项目:国家自然科学基金项目(42060218);江西省自然科学基金项目(20242BAB23048,20224BAB203039)

作者简介:章玲玲(1990—),女,讲师,硕士,主要从事土工合成材料研究。E-mail:870706797@qq.com

通信作者:林海(1986—),男,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:linhai@ncu.edu.cn

对土工合成材料界面剪切特性的影响尚不清楚,而现有规范缺乏确保耐久性和控制暴露时间的规定。本文开展紫外光老化后的土工膜和土工布的界面剪切试验,揭示紫外光老化引起的界面剪切特性演化机理,以期为复杂环境中土工膜和土工布等土工合成材料的应用提供科技支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土工合成材料为山东天海新材料工程有限公司所提供的 1.5 mm 厚的高密度聚乙烯(HDPE)单糙面(共挤压延技术制成)土工膜和针刺聚酯长丝土工布(单位质量为 600 g/m²)。这两种材料目前在国内工程中应用非常广泛。土工膜试样的抗穿刺强度为 573 N,其拉伸断裂强度和屈服强度分别为 31.6、25.1 N/mm,对应的断裂伸长率和屈服伸长率分别为 782%和 14%。土工布试样的拉伸断裂强度为 41.4 N/mm,断裂伸长率为 62.9%,抗撕破强度和顶破强度分别为 1.187、6.7 kN。为了更好地对比分析紫外光老化对土工膜和土工布的界面剪切特性影响,分别开展两种土工合成材料与砂土界面的剪切试验。试验用砂为江西省南昌市一般砂土,天然干密度为 1.46 g/cm³,颗粒级配曲线见图 1。

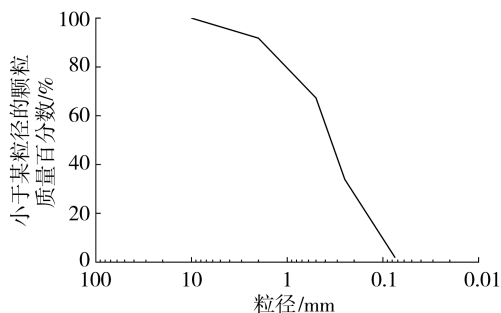


图 1 试验用砂的颗粒级配曲线

1.2 老化试验装置

紫外光老化试验装置采用南昌大学与济南科岩试验仪器有限公司联合研制的大尺寸紫外光老化模型试验箱,如图 2 所示。紫外光老化试验过程参照 ASTM G154—23《材料辐照用荧光紫外线(UV)灯装置操作标准规范》、GB/T 16422.3—2022《塑料实验室光源暴露试验方法》和 GB/T 31899—2015《纺织品耐候性试验紫外光曝晒》的相关规定。该试验装置能够实现多层大面积(155 cm×115 cm)的土工合成材料试样同时被老化,老化环境采用辐照强度 0.89 W/m² 的 UVA-340 型(40W)荧光紫外灯管照射形成。紫外光在黑板温度为 60℃ 条件下曝晒 8 h,接着在黑板温度为 50℃ 条件下冷凝 4 h。考虑土工布的耐紫外光老化能力远弱于土工膜,本次试验中土工布的最长紫外光

老化时间取 40 d,每 10 d 取样 1 次;土工膜的最长紫外光老化时间取 80 d,每 20 d 取样 1 次。



图 2 紫外光老化模型试验箱

1.3 剪切试验装置

剪切试验采用自主研发的温控应力应变直剪仪(图 3),剪切盒内试样尺寸为 100 mm×100 mm,根据试验需要可以确保土工合成材料实现水下剪切,设备温度通过计算机控制上下剪切盒内循环流动的液体来实现。设备采用滚动膜片气缸施加法向力,采用电机伺服控制等应变或等应力方式施加剪切力,具有加荷稳定、方便、测量数据直观的特点。剪切过程中,伺服电机匀速推动水平传力杆,在使下剪切盒保持匀速移动的同时,使上剪切盒保持固定不动。试验过程中使用力传感器测量法向应力和水平剪力,采用位移计测量竖向位移和水平位移。直剪仪能够提供 0~600 kPa 的法向压力和剪切应力,仪器剪切速率可设置范围为 0.01~3 mm/min,最大剪切位移为 20 mm。上、下剪切盒间设置了滚珠排以减小上下剪切盒之间的摩阻力。加工制作了可调节尖齿高度(0~1 mm)的不锈钢尖齿板,用于不同法向压力下的土工合成材料固定^[21,23-24]。



图 3 温控应力应变直剪仪

1.4 试验方法

为便于与一般条件下土工合成材料界面的剪切试验结果进行对照,本文选取工程中最常遇到的法向应力(σ_n)区间进行分析(50、100、200、300、400 kPa)。综合考虑试验的精准性以及已有研究成果的可比性,所有界面剪切试验均在 1 mm/min 的

剪切速率和 20℃ 的室温下进行。试验方案如表 1 所示。

表 1 剪切试验方案

剪切界面	老化时间/d
老化土工膜-砂土	0, 20, 40, 60, 80
老化土工布-砂土	0, 10, 20, 30, 40
老化土工膜-土工布	0, 10, 20, 30, 40

剪切试验的步骤为:①分别将经历过不同紫外光老化时间的土工膜和土工布试样小心地裁剪为 100 mm×100 mm 的矩形。②在下剪切盒中放入高度合适的刚性垫块和不锈钢尖齿板,确保土工膜或土工布试样与下剪切盒表面平齐。下剪切盒中的土工合成材料试样在尖齿板和夹具的作用下被牢牢固定。对于老化土工膜-砂土和老化土工布-砂土界面剪切,安装好上剪切盒后装入砂土试样后进行剪切;对于老化土工膜-土工布界面剪切,上剪切盒装入土工膜试样后依次再装入尖齿板和传力垫块(图 4)。③施加法向应力待沉降稳定后,开始匀速剪切试验至结束。

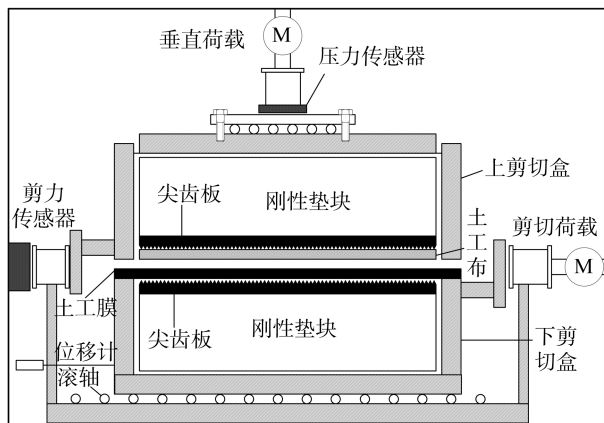


图 4 试样布置示意图

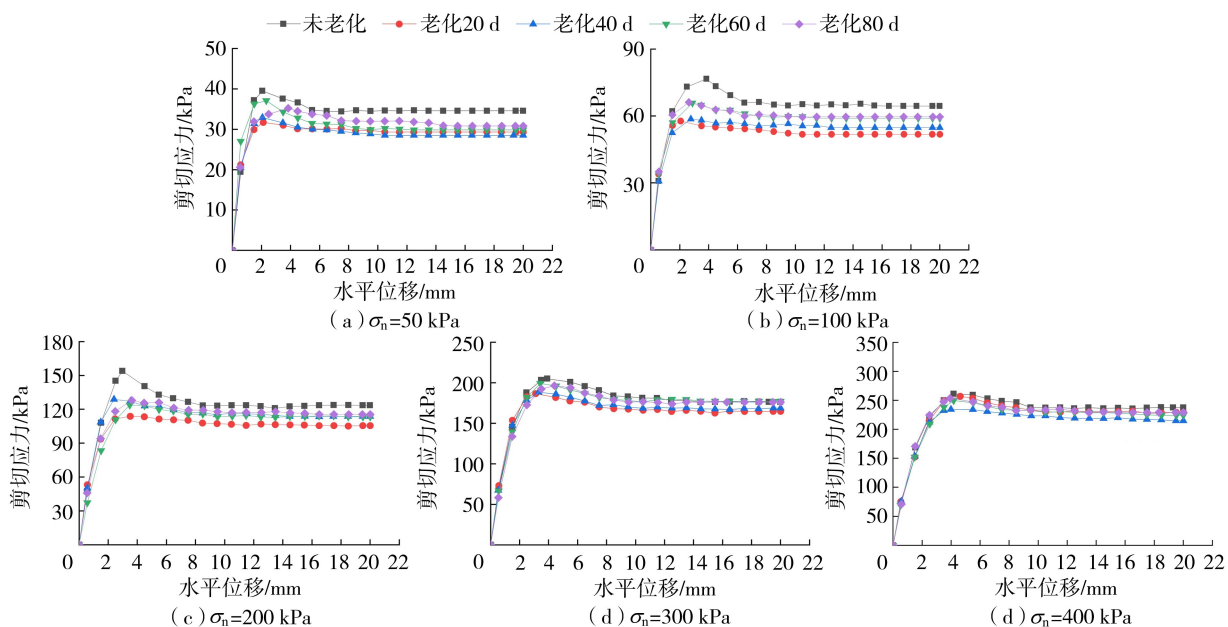


图 5 不同紫外光老化时间下土工膜-砂土界面剪切应力-位移关系曲线

2 试验结果与分析

2.1 老化土工膜-砂土界面剪切特性

不同紫外光老化时间下的土工膜-砂土界面的剪切应力-位移关系曲线如图 5 所示。可以看出,老化土工膜和未老化情况类似,仍表现出明显的峰值剪切强度和峰值后软化。老化土工膜-砂土界面在较小水平位移(2~5 mm)达到其峰值剪切强度。老化土工膜-砂土界面的峰值剪切强度特性如图 6 所示。老化土工膜-砂土界面的峰值剪切强度小于未老化土工膜-砂土界面,老化时间为 20d 或 40d 时即可达到最小极值,继续增加紫外光照射时间还会使界面剪切强度有所回升(图 6(a))。经历不同老化时间的土工膜-砂土界面剪切强度包线仍表现出较好的线性,鉴于试验结果拟合所得界面黏聚力很小,为方便试验结果对比分析,假定黏聚力为 0 时的界面剪切摩擦角如图 6(b)所示^[25-26]。未老化土工膜-砂土界面的峰值摩擦角最大(34.3°),相对未老化情况紫外光老化时间为 20、40、60、80 d 的界面峰值摩擦角分别下降了 2.4°、3.1°、1.8°、1.6°。

2.2 老化土工布-砂土界面剪切特性

不同紫外光老化时间下的土工布-砂土界面剪切应力-位移关系曲线如图 7 所示,在各级法向应力作用下土工布-砂土界面在较大水平位移(12~20 mm)时达到峰值剪切强度,土工布-砂土界面的峰值后软化现象不太明显。紫外光老化 40 d 范围内,土工布-砂土界面剪切强度变化不大(图 8),峰值摩擦角随老化时间的增大只有 1.6° 范围的波动,变化幅度最大仅为 4.2%。

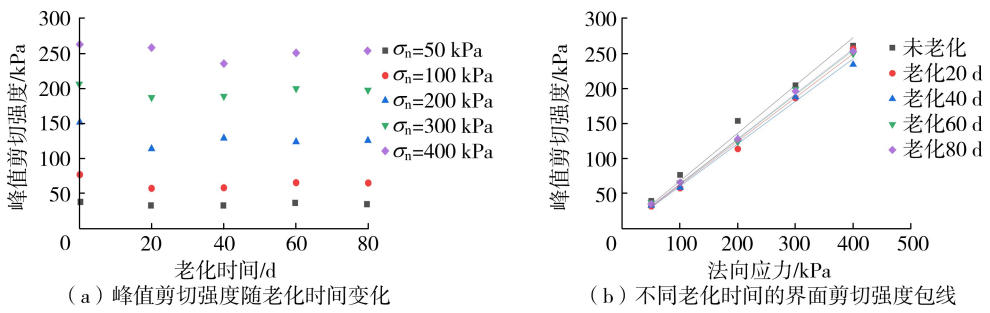


图6 老化土工膜-砂土界面的峰值剪切强度特征

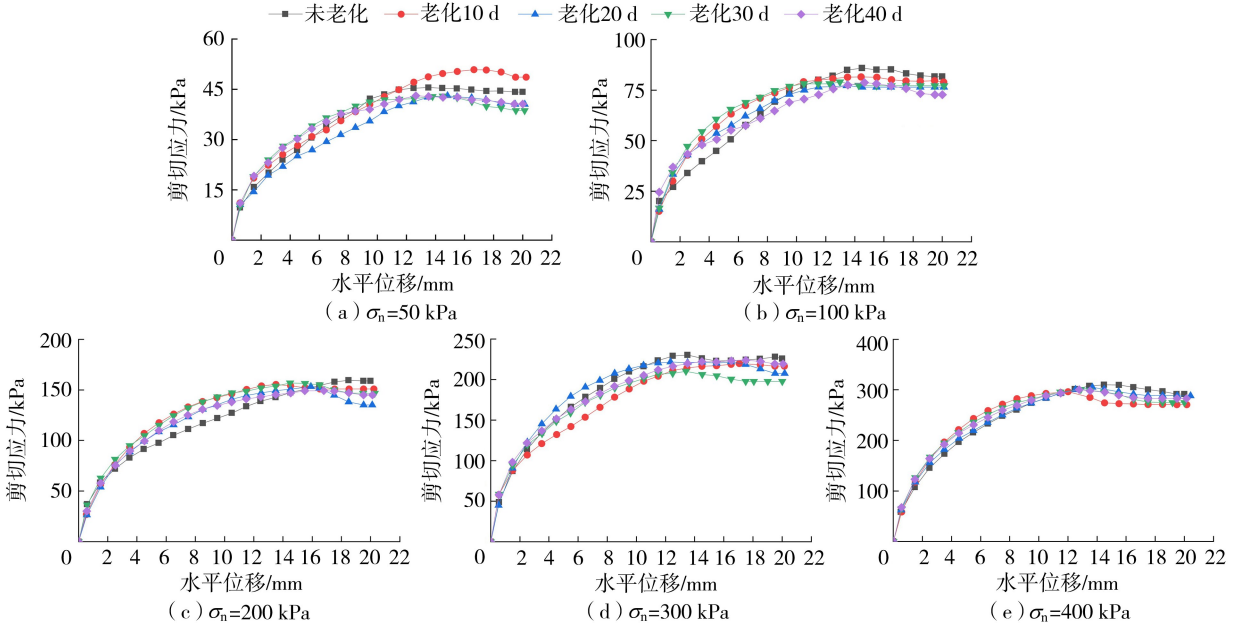


图7 不同紫外光老化时间下土工布-砂土界面剪切应力-位移关系曲线

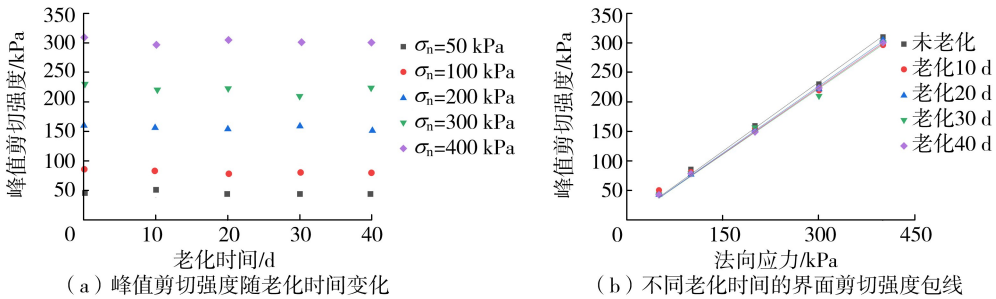


图8 老化土工布-砂土界面的峰值剪切强度特征

2.3 老化土工膜-土工布界面剪切特性

不同紫外光老化时间下老化土工膜-土工布界面的剪切应力-位移关系曲线如图9所示。各级法向应力作用下土工膜-土工布界面在水平位移为4~7 mm时达到峰值剪切强度。剪切应力随剪切位移的增加缓慢降低,当水平位移发展至15~20 mm之后达到较为稳定的大位移剪切强度。老化土工膜-土工布界面的峰值剪切强度和峰值后软化现象显著,在同一法向应力下紫外光老化土工膜-土工布界面的峰值后软化程度随老化时间的增长一般表现出先增大后减小的规律。土工膜-土工布界面达到峰值剪切强度所需的剪切位移随老化时间有不断增大

趋势。在各级法向应力作用下,当土工膜和土工布的紫外光老化时间同时从0 d分别增加至10 d和20 d时,老化土工膜-土工布界面峰值剪切强度相对于未老化情况的比值可高达168%和151% (如图10(a))。随着老化时间继续增加至30 d和40 d,老化土工膜-土工布界面相对未老化情况的峰值剪切强度比值为82%~136%和73%~139%。老化土工膜-土工布界面的峰值剪切强度与法向应力表现出良好的线性关系(如图10(b))。紫外光老化时间从0 d增加至10 d和20 d时,土工膜-土工布界面峰值摩擦角分别从18.3°增大至19.2°和20.5°;当老化时间增大至30 d和40 d时,界面峰值摩擦角明

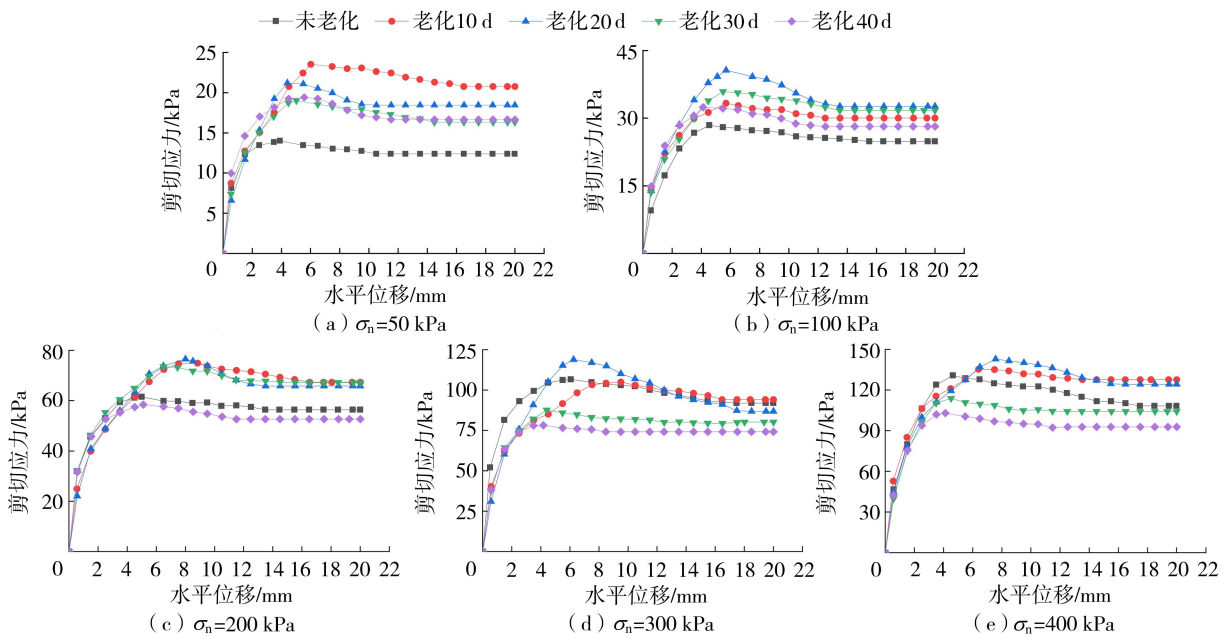


图9 不同紫外光老化时间下土工膜-土工布界面剪切应力-位移关系曲线

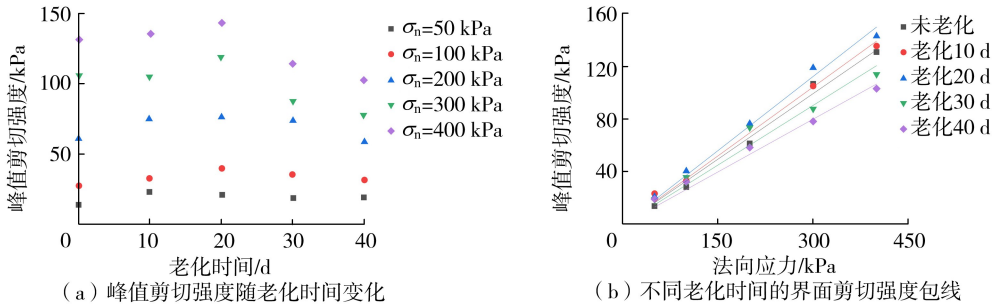


图10 老化土工膜-土工布界面的峰值剪切强度特征

显减小,峰值摩擦角减小至 16.8° 和 14.9° 。这表明紫外光老化对土工膜-土工布界面的峰值摩擦角随老化时间的变化呈现先增大后减小的规律。

2.4 讨论

从紫外光老化土工膜和土工布的界面剪切试验结果可以看出,不同土工合成材料的界面剪切强度随紫外光老化时间的变化规律是有差异的。为了深入分析这种差异的内在原因,参照 SL 235—2012《土工合成材料测试规程》对紫外光老化土工膜和土工布进行了标准拉伸试验。紫外光老化土工膜和土工布的断裂拉伸强度和断裂伸长率如图 11 所示,

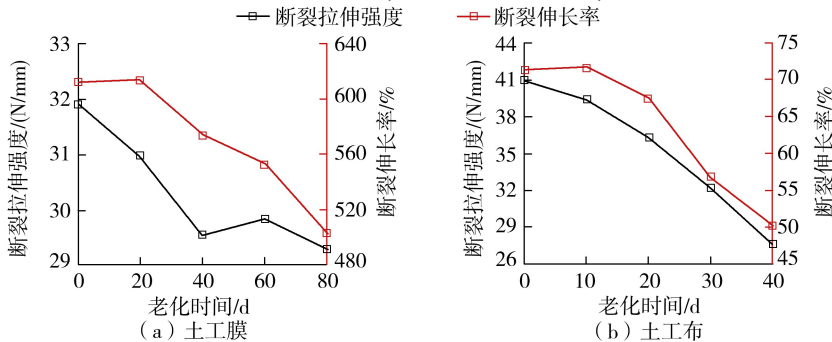


图11 紫外光老化土工膜和土工布的拉伸性能

土工膜和土工布的断裂拉伸强度和断裂伸长率都随紫外光老化时间增加整体上表现出明显的减小规律。拉伸试验结果证实紫外光照射会使土工膜和土工布延展性降低,即土工膜和土工布材料的表面会变得更脆,这与耐热和化学老化情况类似^[31]。图 11(a) 中土工膜老化 60 d 的拉伸强度略高于老化 40 d 和 80 d 情况,这是由于土工合成材料试验存在一定的离散性,不过这也说明土工膜拉伸强度随老化时间劣化程度变缓了。综合图 4、图 6 和图 8 可以得出,限制土工膜和土工布在工程中的暴露时间非常有必要,而这个限制暴露时间应小于本试验中

的紫外光加速老化 20 d 所对应的现场时间。工程中需要进一步通过室外自然老化试验来与加速老化试验建立对应关系。土工合成材料边坡耐久性分析应考虑紫外线老化引起的材料拉伸性能和界面抗剪性能的变化,在工程设计和抗滑稳定分析中的老化影响亟须引起工程人员的重视。

3 结论

a. 老化土工膜和土工布的界面剪切应力位移关系曲线形式与未老化情况相比没有发生大的变化,试验老化时间范围内各界面都呈现出良好的线性强度包线。

b. 紫外光老化前期土工膜-砂土界面抗剪能力减小,老化时间达 40 d 后界面剪切强度会稍有回升。

c. 尽管紫外光老化会显著减少土工布的拉伸强度,但土工布-砂土界面的剪切强度并没有随老化时间发生明显变化。

d. 老化土工膜-土工布界面的剪切强度随着紫外光老化时间增加表现出先增强后减小的规律。相比未老化土工膜-土工布界面,紫外光老化 20 d 使界面摩擦角增加了 2.2° ,老化 40 d 则变成减小 3.4° 。

参考文献:

[1] Rowe R K. Protecting the environment with geosynthetics: 53rd Karl terzaghi lecture[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(9): 04020081.

[2] 田晓丹,姜晓桢,殷友超,等. 基于土工膜透声特性的膜下垫层渗透变形声波特征试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(2): 31-37. (Tian Xiaodan, Jiang Xiaozhen, Yin Youchao, et al. Experimental study on acoustic characteristics of seepage deformation of geomembrane cushion based on sound transmission characteristics of geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(2): 31-37. (in Chinese))

[3] 何若飞. 北疆某水电工程土工膜斜墙围堰设计与施工[J]. 水利水电技术, 2014, 45(6): 37-40. (He Ruofei. Design and construction of geomembrane inclined wall cofferdam for a hydropower project in north Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(6): 37-40. (in Chinese))

[4] 王樱峻,雷显阳,姜晓桢,等. 抽水蓄能电站进出水口土工膜局部变形适应性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 51-54. (Wang Yingjun, Lei Xianyang, Jiang Xiaozhen, et al. Adaptability analysis of local deformation of geomembrane at inlet and outlet of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 51-54. (in Chinese))

[5] 甘磊,刘静楠,谭海劲,等. 土工膜防渗低水头平原水库

渗流场及膜体稳定性[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 45-50. (Gan Lei, Liu Jingnan, Tan Haijin, et al. Seepage field and membrane stability of a low-head plain reservoir with geomembrane anti-seepage measures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 45-50. (in Chinese))

[6] 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 Weijun, Chen Sining, Li Dengjun, 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))

[7] Yang Yonghao, Wei Zuoran, Cao Guansen, et al. A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(2): 187-192.

[8] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[9] 唐琳,唐晓武,余巍,等. 单向拉伸对土工织物反滤性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 785-788. (Tang Lin, Tang Xiaowu, She Wei, et al. Influence of uniaxial tensile strain on filtration characteristics of geotextiles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 785-788. (in Chinese))

[10] 刘杰,谢定松. 反滤层设计原理与准则[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 609-616. (Liu Jie, Xie Dingsong. Design principles and guidelines of filters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 609-616. (in Chinese))

[11] Morsy M S, Rowe R K, Abdelaal F B. Longevity of 12 geomembranes in chlorinated water [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(4): 479-495.

[12] Rowe R K. Long-term performance of contaminant barrier systems[J]. Géotechnique, 2005, 55(9): 631-678.

[13] 方远远,张鹏程. 聚丙烯与聚酯长丝针刺土工布耐久性研究[C]//中国水利学会 2021 学术年会论文集第三分册. 北京: 中国水利学会, 2021: 260-265.

[14] 邓宗才,董智福. 高强聚丙烯纺粘针刺土工布的耐久性[J]. 纺织学报, 2018, 39(11): 61-67. (Deng Zongcai, Dong Zhifu. Durability of high strength polypropylene spunbonded needle punctured geotextile [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(11): 61-67. (in Chinese))

[15] 刘英,于咏妍,聂松林,等. 聚丙烯长丝非织造土工布材料特性分析[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(1): 39-42. (Liu Ying, Yu Yanyong, Nie Songlin, et al. Characteristics analysis of polypropylene filament nonwoven geotextiles [J]. Technical Textiles, 2020, 38(1): 39-42. (in Chinese))

[16] Rowe R K, Ewais A M R. Ageing of exposed geomembranes at locations with different climatological conditions [J].

- Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3):326-343.
- [17] Rowe R K, RimaL S, Sangam H. Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2):137-151.
- [18] Rowe R K, Abdelaal F B, Islam M Z. Aging of high-density polyethylene geomembranes of three different thicknesses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5):04014005.
- [19] Müller W W, Jakob I, Li C S, et al. Durability of polyolefin geosynthetic drains[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(1):28-42.
- [20] 向锐,雷国元,徐亚,等. 填埋场环境下 HDPE 膜老化特性及其对周边地下水污染风险的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4):978-986. (Xiang Rui, Lei Guoyuan, Xu Ya, et al. Aging behaviors of HDPE geomembrane in landfill environment and its impact on pollution risk of surrounding groundwater [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4):978-986. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 林伟岸,张宏伟,詹良通,等. 填埋场斜坡上土工膜受力特性的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12):2268-2275. (Lin Weian, Zhang Hongwei, Zhan Liangtong, et al. Centrifugal model tests on stress characteristics of geomembranes placed on landfill slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12):2268-2275. (in Chinese))
- [23] Lin Hai, Zhang Lingling, Xiong Yuechen. Research on shear strength of needle-punched GCL by simple-shear of composite liner[J]. Engineering Geology, 2018, 244:86-95.
- [24] 施建勇,雷省. 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):998-1004. (Shi Jianyong, Lei Sheng. Slope stability analysis method considering transfer of sliding failure surface and influence of engineered berm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6):998-1004. (in Chinese))
- [25] 林海,韩卓韦,施建勇. 土工合成材料界面剪切破坏机理和峰值强度分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7):99-106. (Lin Hai, Han Zhuowei, Shi Jianyong. Interface shear failure mechanisms and peak strength analysis of geosynthetics [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7):99-106. (in Chinese))
- [26] 韩卓韦,林海,施建勇. 不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5):962-967. (Han Zhuowei, Lin Hai, Shi Jianyong. Shear characteristics of hydrated needle-punched GCL + GM composite liners at different temperatures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5):962-967. (in Chinese))
- [27] 侯娟,邢行,徐东,等. 土工膜-土工布界面动力剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2):365-376. (Hou Juan, Xing Xing, Xu Dong, et al. Experimental study on dynamic shear characteristics of a geomembrane-geotextile interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2):365-376. (in Chinese))
- [28] Chao Zhiming, Fowmes G, Mousa A, et al. A new large-scale shear apparatus for testing geosynthetics-soil interfaces incorporating thermal condition [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(5):999-1010.
- [29] Rowe R K, Reinert J, LI Y, et al. The need to consider the service life of all components of a modern MSW landfill liner system [J]. Waste Management, 2023, 161:43-51.
- [30] Xu Gaojie, Shi Jianyong. Effect of UV radiation on shear behaviour between geotextile and geomembrane interface [J]. Geosynthetics International, 2025, 32(3):440-453.
- [31] Abdelaal F B, Solanki R. Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(1):55-68. (收稿日期:2024-10-29 编辑:俞云利)

(上接第 73 页)

- [23] 王斌,郭帅帅,冯杰,等. 基于 SWAT 的积雪消融对高寒区农田土壤水分影响模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):271-278. (Wang Bin, Guo Shuaishuai, Feng Jie, et al. Simulation on effect of snowmelt on cropland soil moisture within basin in high latitude cold region using SWAT [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):271-278. (in Chinese))
- [24] 张丽娜,孙颖娜,申智鹏,等. DEM 分辨率及气象数据对寒区永翠河小流域径流 SWAT 模拟的影响[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10):19-22. (Zhang Lina, Sun Yingna, Shen Zhipeng, et al. Effect of DEM resolution and meteorological data on runoff SWAT simulation of Yongcui River small watershed in cold region [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10):19-22. (in Chinese))
- [25] 胥鹏君,孙颖娜. 基于 SWAT 模型的西南岔河流域洪水资源利用潜力分析[J]. 吉林水利, 2024(10):67-71. (Xu Pengjun, Sun Yingna. Analysis of flood resource utilization potential in the Southwest Chahe River Basin based on SWAT model [J]. Jilin Water Resources, 2024(10):67-71. (in Chinese)). (收稿日期:2024-12-03 编辑:熊水斌)