

DOI: 10.11779/CJGE202105022

不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的剪切特性

韩卓韦^{1, 2}, 林 海^{*1, 2}, 施建勇³

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省尾矿库工程安全重点实验室, 江西 南昌 330031;

3. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要: 针刺 GCL 和糙面土工膜 (GM) 组成的复合防渗衬里应用广泛, 其在用于处置矿物冶炼废物或固体废弃物等情况时可能面临变化的温度环境。针对复合衬里剪切强度的温度效应问题, 利用大尺寸温控水浴直剪仪对水化针刺 GCL+GM 复合衬里开展了不同温度下不限定剪切破坏面的整体剪切试验。获得了复合衬里在 10℃~70℃ 温度范围内的剪切强度, 揭示了复合衬里在不同水化温度条件和法向应力下的剪切破坏特征。试验结果表明: 复合衬里的应力位移曲线在所有测试温度下都表现出明显的峰值和后峰值软化现象; 复合衬里的峰值剪切强度和大位移抗剪能力均在接近室温的 20℃ 条件下达到最大值, 升高或降低温度都将使得复合衬里的剪切强度出现明显减小; 温度环境的改变对复合衬里的剪切强度和破坏模式影响显著, 温度效应对含土工合成材料边坡稳定安全的影响应引起重视。

关键词: 温度; 针刺 GCL; 复合衬里; 剪切强度; 破坏特征

中图分类号: TU411.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0962-06

作者简介: 韩卓韦(1995—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事土工合成材料界面特性及工程勘察相关的研究工作。E-mail: hzw0427mxd@163.com。

Shear characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liners at different temperatures

HAN Zhuo-wei^{1, 2}, LIN Hai^{1, 2}, SHI Jian-yong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Tailings Reservoir

Engineering Safety of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Key Laboratory of Geomechanics and

Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The composite liner consisting of needle-punched GCL and textured geomembrane (GM) is widely used, and changing temperature environment can be encountered when it is used to deal with mining-smelting waste or municipal solid waste. Aiming at the temperature effect of the shear strength of the composite liner, the large-scale temperature-controlled water-bath direct shear apparatus is used to carry out the whole shear tests without pre-determined failure surface for the hydrated needle-punched GCL+GM composite liner at different temperatures. The shear strengths of the composite liner in the range of 10℃~70℃ are obtained, and the shear characteristics of the composite liner under different temperatures as well as normal stress are revealed. The test results show that obvious peak strengths and obvious post-peak softening phenomena occur at the stress-displacement curve at all the test temperatures. The peak shear strength and large-displacement shear resistance of the composite liner achieve the maximum value at the room temperature of about 20℃, and either increasing or decreasing temperature can cause obvious reduction in the shear strength of the composite liner. The change of temperature has a significant effect on the shear strength and failure modes of the composite liner, and accordingly attention should be paid to the temperature effect on the stability of slopes containing geosynthetics.

Key words: temperature; needle-punched GCL; composite liner; shear strength; failure characteristic

0 引言

有色金属冶炼池、城市卫生填埋场和输水渠道等环保和水利工程需要有效的岩土防渗结构, 由糙面土工膜 (GM) 与土工复合膨润土衬垫 (GCL) 组成的 GM+GCL 复合衬里凭借良好的水力防渗性能常作为

备选之一^[1]。由于 GCL 内部膨润土水化之后的剪切强度极低, GM+GCL 复合衬里的剪切强度容易成为相应

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41702324; 41530637; U1765207)

收稿日期: 2020-05-08

*通信作者 (E-mail: linhai@nchu.edu.cn)

边坡滑移失稳的控制因素^[2-3]。室内常温水化条件下的剪切试验发现, GM/GCL 界面和针刺 GCL 内部界面在剪切过程中都会表现出明显的峰值强度及后峰值软化, 复合衬里内峰值剪切强度最薄弱位置会随法向应力增加而从 GM/GCL 界面变换到 GCL 内部界面^[4-5]。不限定剪切破坏面的 GM+GCL 复合衬里整体剪切试验相比单界面剪切试验更能反应复合衬里的真实剪切特性^[6-7]。

在一些防渗工程中, 土工合成材料可能处于非常温的温度环境^[8-9]。Koerner 等^[10]通过对 Philadelphia 某一填埋场长达 10.5 a 的监测发现, 填埋场封盖系统的温度环境会随季节而发生变化, 其温度与当地季节温度相吻合并在 0℃~30℃循环。填埋场内部发生的有机物降解及各类化学反应可使内部温度超过 60℃^[11]; 铝矿和镍矿等有色金属冶炼过程中的酸浸废土则可达到近 100℃的高温^[12-13]。在温度 0℃~33℃土工布与土工膜的界面强度会随温度的增加稍许增大^[14]。温度升高会导致 GCL 内部加筋纤维软化, 其内部剪切破坏模式由纤维从土工布一侧抽出转变为纤维拉断, 并且导致 GCL 内部剪切强度降低^[15-18]。

已有土工合成材料界面剪切强度的相关研究多基于常温下的剪切试验, 不同水化温度条件下 GM+GCL 复合衬里剪切特性的研究有助于人们更进一步明确复合衬里在不同水化温度条件下的抗滑移稳定能力。针对 GM+GCL 复合衬里剪切强度的温度效应问题, 本文利用大型温控水浴直剪仪开展了不同温度条件下的 GM+GCL 复合衬里整体剪切试验。试验过程中不限定剪切破坏面, 允许剪切位移在 GCL 内部或 GCL/GM 界面自由发展, 试验控制因素涵盖 10℃~70℃的温度环境和高低法向压力范围, 研究覆盖了工程中可能遇到的绝大部分情况。通过对比分析 GM+GCL 复合衬里整体剪切强度在不同温度条件下的变化规律, 揭露了 GM+GCL 复合衬里剪切特性的温度影响效应。

1 试验介绍

1.1 试验材料

试验中所采用的糙面土工膜 (GM) 为长沙建益新材料有限公司提供的 2 mm 厚单糙面 HDPE 土工膜; GCL 为上海仁众实业有限公司提供的针刺加筋型 GCL (单位质量 5000 g/m²), 其构成为一层有纺布与一层无纺布之间夹持膨润土并通过针刺纤维缝合而成。针刺 GCL: 厚度为 6 mm, 密度为 5000 g/m², 拉伸强度为 156 N/cm, 剥离强度为 11.4 N/cm, 膨胀系数为 12.5 mL/g, 法向渗透系数为 4.32×10^{-9} cm/s。糙面土工膜 GM: 厚度为 2.0 mm, 粗糙高度为 0.25 mm,

穿刺强度 N 为 534 N, 屈服强度为 29 N/mm, 屈服伸长率为 12%, 密度为 0.94 g/cm³。

1.2 试验设备

试验采用自主研制的大尺寸温控水浴直剪仪 (图 1), 试样剪切面积为 300 mm×300 mm, 上、下剪切盒均置于饱和水箱内。试验过程中通过电脑和温度传感器调节并控制水箱内的加热装置使得水温维持在设定温度。仪器所能施加的最大法向应力和剪切应力均为 2.2 MPa; 所能达到的最大水平位移为 45 mm; 剪切速率可调控范围为 0.01~10 mm/min。可以满足土工合成材料在工程中遇到的绝大多数情况。

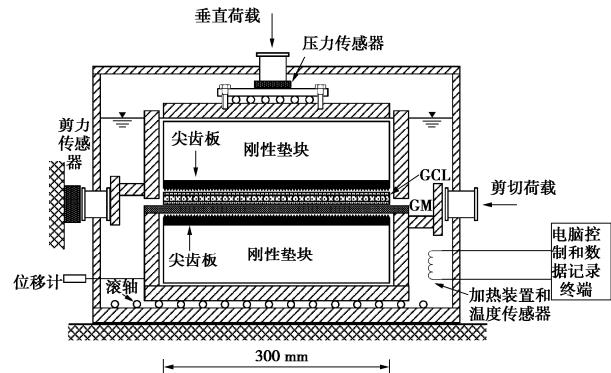


图 1 大型温控水浴直剪仪

Fig. 1 Large-scale temperature-controlled submerged direct shear apparatus

GCL 与 GM 背面的牢靠固定是保证复合衬里剪切试验结果准确的关键^[2, 4]。为了解决现有固定方法中存在的一些问题, 采用不锈钢板密布钻孔并配备平头螺丝的方法加工制作了可调节尖齿高度 (0~1 mm) 的不锈钢尖齿板。通过前期试验证明, 随着试验法向压力的增加适当调小尖齿高度, 可以实现对土工合成材料快速有效的固定。

1.3 试验步骤和方法

首先, 裁剪 300 mm×370 mm 的 GM 长条形状试样和 300 mm×300 mm 的针刺 GCL 试样。随后在下剪盒中依次放入适当高度的刚性垫块、尖齿板和 GM 试样, 使得 GM 试样糙面与下剪盒表面刚好平齐。安装上剪盒, 并在上剪盒中依次放入初步水化后的 GCL 试样, 尖齿板及刚性垫块。在水箱内注水直至水位漫过所测试样 2 cm 以上, 最后安装水箱盖及位移计。由于土工膜沿剪切方向的长度大于与之接触的 GCL 试样, 因此合理地避免了剪切过程中的面积修正问题。为了尽可能地消除剪切速率与 GCL 水化固结时间对试验结果的影响, 在前人研究的基础上, 本文所有试验的剪切速率均设定为 0.1 mm/min, 并对 GCL 采取推荐的两步水化法。第一步, 先将裁剪好的 GCL 试样

于水中浸泡 48 h，并在其上部施加 0.1 kN 左右的竖向压力以减小膨润土吸水产生的不均匀膨胀。第二步，将初步水化完成后的 GCL 试样装入仪器，使其在设定的试验温度和法向应力下继续恒温水化 24 h。根据复合衬里可能面临的温度环境和应力情况，将试验温度范围确定为 10℃~70℃；将法向应力范围确定为 100~1800 kPa。

2 破坏模式

通过仔细观察 GM+GCL 复合衬里剪切后的破坏形态发现，复合衬里的整体剪切破坏模式会温度而发生变化，剪切过后的 GCL 试样如图 2 所示。

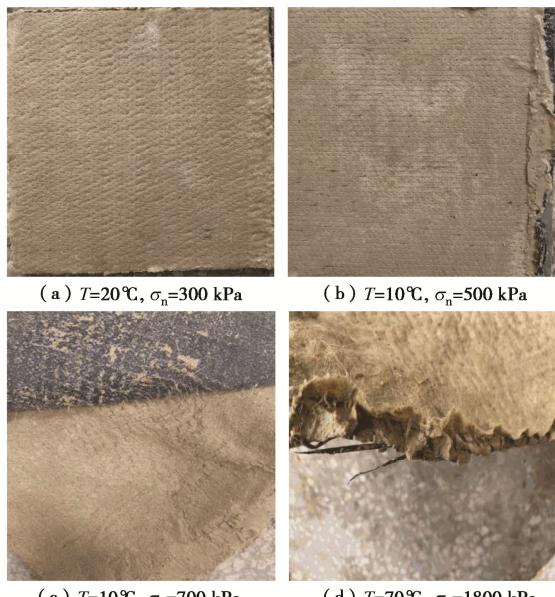


图 2 各试验条件下 GCL 试样的典型破坏模式

Fig. 2 Typical failure modes for GCL under specific test conditions

当 $\sigma_n \leq 300$ kPa 时，复合衬里仅在 GM/GCL 界面发生了相对位移，并且 GCL 内部纤维未出现明显的拉伸变形，此时复合衬里在所有试验温度下均只在 GM/GCL 界面发生了剪切破坏（图 2(a)）。当 $\sigma_n = 500$ kPa， T 为 10℃~50℃ 时，复合衬里同时在 GM/GCL 界面和 GCL 内部界面发生了较明显的剪切位移，可以观察到 GCL 内部部分纤维出现了明显拉伸，此时复合衬里在 GM/GCL 界面和 GCL 内部界面同时发生了剪切破坏（图 2(b)）。当 $\sigma_n = 700$ kPa 时，可以观察到各个试验温度下复合衬里均在 GCL 内部界面发生了相对位移，并且 GCL 内部纤维出现了明显拉伸甚至大面积拉断的情况，这一现象在温度越低时越明显（图 2(c)），这说明此时剪切破坏全部发生在 GCL 内部界面。当 $\sigma_n \geq 900$ kPa 时，随着法向应力的不断增加， T 为 10℃~50℃ 下 GCL 内部纤维相继出现了拉断的情况，断裂纤维数量随着温度的增加不断减小。特

别地， $T = 70^\circ\text{C}$ 时复合衬里在所有法向压力条件下又回到了 GM/GCL 界面剪切破坏模式；即使法向应力增加至 1800 kPa，GCL 内部纤维仍然表现为以整体拉伸为主，仅有边缘处的少部分纤维被拉断（图 2(d)）。

3 应力位移关系

不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的整体剪切应力位移曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，各温度环境下复合衬里的剪切应力位移曲线始终表现出明显的峰值强度和后峰值软化特性，但在同一法向应力作用下，不同水化温度条件时复合衬里的峰值剪切强度和大位移抗剪能力却发生了很大变化，温度改变对复合衬里的应力位移关系影响显著。

水化 GCL+GM 复合衬里达到峰值剪切强度所需的位移随环境温度变化也发生一定的改变（图 4）。总体来看，当法向应力不太大时 ($\sigma_n \leq 700$ kPa)，峰值位移随温度的增加而减小；而在较高的法向应力条件下 ($\sigma_n > 700$ kPa)，峰值位移随温度的增加而增大。特别地，复合衬里在 70℃ 的水化温度和高法向应力作用下，试验得到的峰值位移显著增大。出现这种异常现象的原因是，该试验条件下针刺 GCL 内部界面和 GM/GCL 界面的峰值强度较为接近，二者之间相互影响产生了渐进破坏。第 2 节中，GCL 和 GM 的破坏模式证实了这一推断。可以看出，温度变化对复合衬里剪切特性的影响并非是单向的。

4 峰值剪切强度

水化针刺 GCL+GM 复合衬里整体剪切峰值强度随温度的变化规律如图 5 所示。在 10℃~70℃ 温度范围内，各级试验法向应力下复合衬里的峰值强度均在 $T = 20^\circ\text{C}$ 时达到最大值，温度升高或降低都会使得峰值强度减小，70℃ 条件时峰值强度的降低比例甚至高达 36%~74%。而当 $T < 20^\circ\text{C}$ 时，温度降低会使得土工膜与 GCL 土工布一侧的接触面变得更加光滑，从而使得复合衬里的整体剪切强度也降低^[17]。当 $T > 20^\circ\text{C}$ 时，聚丙烯和 HDPE 等聚合材料在高温下会软化，从而在法向应力作用下 GM 的糙面凸起高度不断降低，并且材料软化对 GM/GCL 界面摩擦也会产生一定的影响。另外，针刺 GCL 试样内部加筋纤维的剪切伸长率会由于材料性质软化而随温度的升高不断增加。加筋纤维的松弛使得 GCL 内部剪切强度在高温时出现明显降低，这也是导致复合衬里峰值强度降低的另一个因素。综上，温度变化对聚合材料力学性能的影响导致了复合衬里整体剪切强度在高温时的降低。

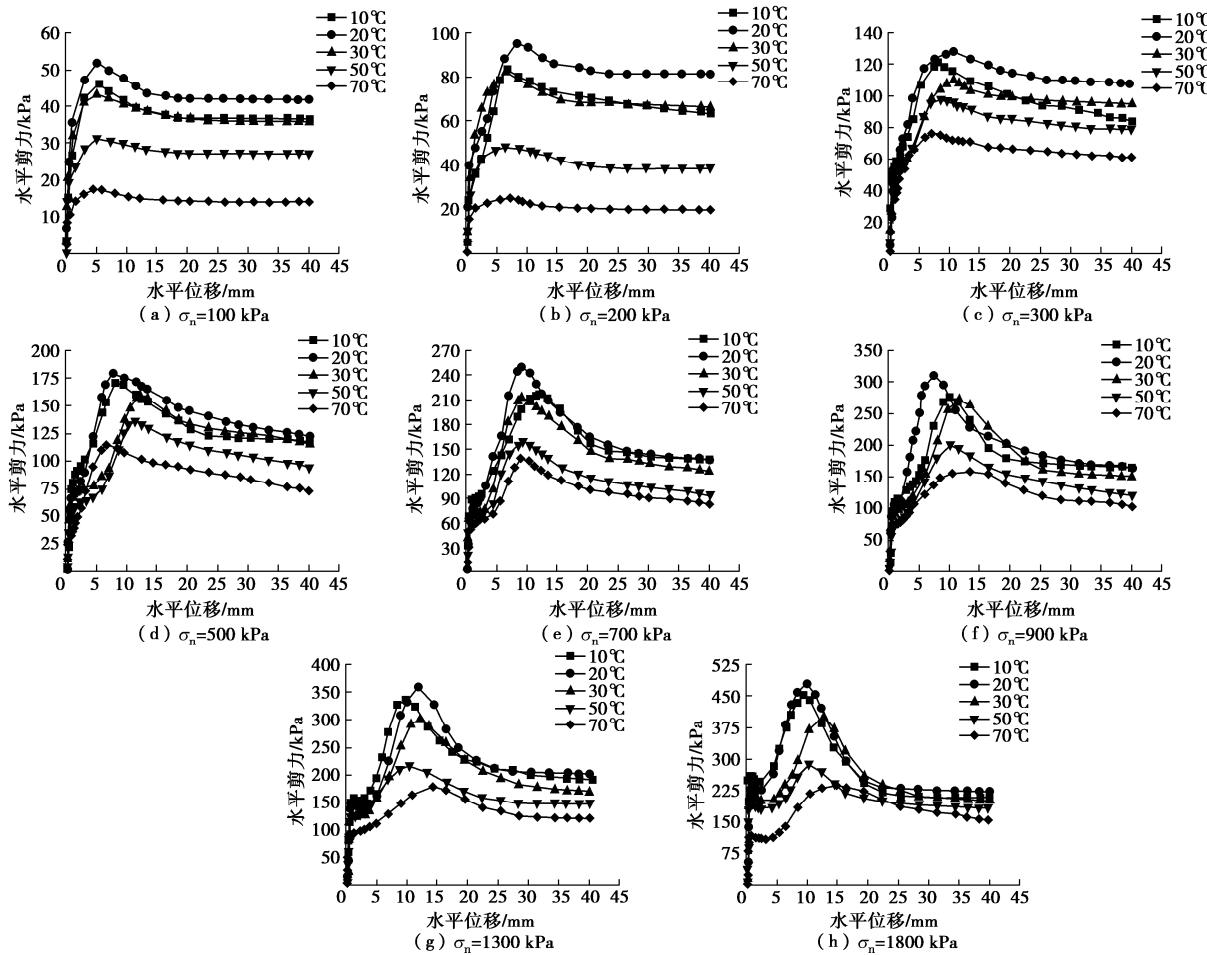


图3 不同温度下 GM+GCL 复合衬里剪应力 - 位移曲线

Fig. 3 Shear stress-displacement curves of GM + GCL composite liners at different temperatures

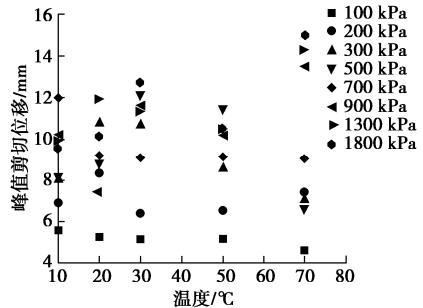


图4 不同温度下 GM+GCL 复合衬里的峰值位移

Fig. 4 Peak displacements of GM + GCL composite liners at different temperatures

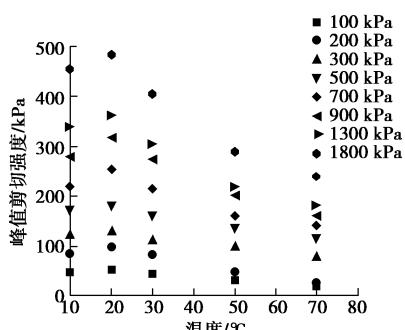


图5 峰值剪切强度与温度的关系

Fig. 5 Relationship between peak shear strength and temperature

不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的峰值剪切强度包线如图 6 所示。从图中可以看出，复合衬里所受法向应力越大时，峰值强度包线随温度增加而降低的幅度也越大。所有试验温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的峰值强度与法向应力均表现出明显的非线性关系，峰值摩擦角随法向应力 σ_n 的增加而减小。邓肯-张非线性模型可以较好地模拟各温度下复合衬里的峰值强度包线：

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[\phi_0 + \Delta\phi \cdot \lg \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right) \right] , \quad (1)$$

式中， ϕ_0 、 $\Delta\phi$ 为拟合试验结果所得到的模型常数， P_a 为大气压强。

具体拟合参数详见图 6。

5 大位移抗剪能力

水化针刺 GCL+GM 复合衬里有时需要经过非常大的剪切位移才可以达到稳定的残余强度，由于设备最大剪切位移的限制，本文试验有部分情况下没有达到稳定的残余强度。尽管如此，复合衬里的剪切应力位移曲线在过峰值后的软化现象为越来越平缓（图

3), 剪切位移 $\delta = 38 \text{ mm}$ 时的大位移抗剪力可在一定程度上反映出复合衬里残余剪切强度的温度效应影响。各法向应力作用下复合衬里大位移抗剪力与温度之间的关系如图 7 所示。从图中可以看出, 各级法向应力作用下复合衬里在 $\delta = 38 \text{ mm}$ 时的抗剪力均随温度的升高表现出先增大后减小的变化规律, 并且在 $T = 20^\circ\text{C}$ 时取得最大值。温度升高或降低均会对复合衬里大位移抗剪能力产生削弱作用, 特别在 $T = 70^\circ\text{C}$ 的温度条件下, 大位移抗剪力甚至可以降低至 $T=20^\circ\text{C}$ 时的 29%~76%。

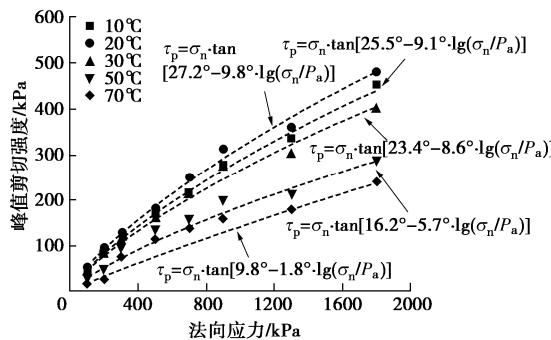


图 6 不同温度下 GM+GCL 复合衬里的峰值剪切强度包线

Fig. 6 Peak shear strength envelopes of GM+GCL composite liners at different temperatures

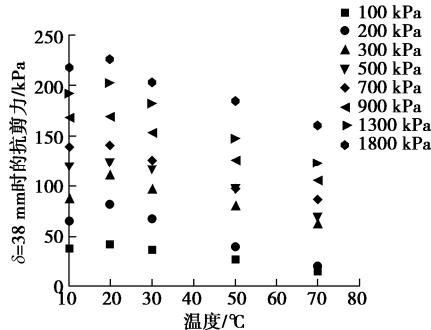


图 7 大位移抗剪力 ($\delta = 38 \text{ mm}$) 与温度的关系

Fig. 7 Relationship between large-displacement shear resistance at $\delta = 38 \text{ mm}$ and temperature

不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里在 $\delta=38 \text{ mm}$ 时的抗剪力拟合包线如图 8 所示, 邓肯-张模型(式

(1)) 同样可以很好地拟合各个试验温度下复合衬里的大位移抗剪力包线, 具体拟合参数详见图 8。温度对水化针刺 GCL+GM 复合衬里大位移抗剪力的影响同样归结于聚合材料力学性能的温度效应。为了揭露高于室温的温度环境对复合衬里剪切强度影响的定量规律, 峰值剪切强度和大位移抗剪力 ($\delta=38 \text{ mm}$) 拟合得到的强度模型参数随温度变化的规律如图 9 所示。已有数据显示, 强度参数 ϕ_0 和 $\Delta\phi$ 都与温度呈线性关系。然而, 温度对水化针刺 GCL+GM 复合衬里剪切强度的影响机理值得进一步探索。

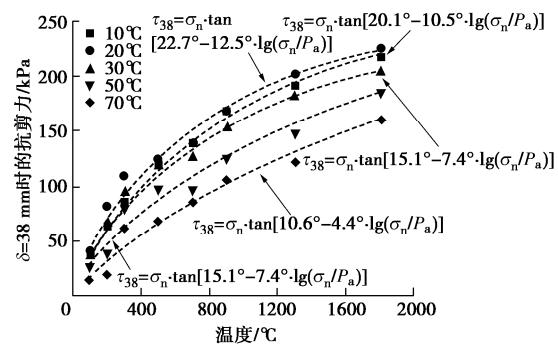


图 8 不同温度下 GM+GCL 复合衬里大位移抗剪力拟合曲线 ($\delta = 38 \text{ mm}$)

Fig. 8 Large-displacement shear resistance fitting curves of GM+GCL composite liners at different temperatures ($\delta = 38 \text{ mm}$)

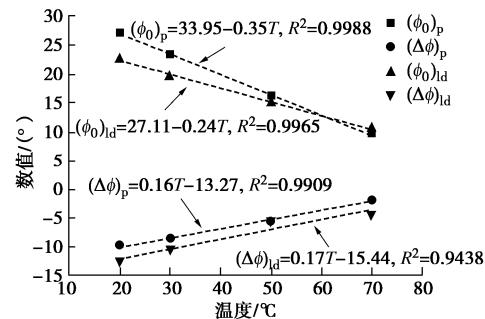


图 9 温度对复合衬里剪切强度参数的影响

Fig. 9 Effects of temperature on shear strength parameters of composite liner

6 结 论

利用大尺寸温控水浴直剪仪对水化针刺 GCL+GM 复合衬里开展了不同温度条件下的整体剪切试验, 剪切过程中不限定剪切破坏面, 通过对比不同温度时复合衬里的剪切破坏特征及力学特性, 得到 5 点结论。

(1) 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的剪切应力位移曲线在 $10^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 的温度条件下均表现出明显的峰值强度及后峰值软化特性。复合衬里的峰值剪切强度和大位移抗剪力随温度变化非常显著。

(2) 温度和法向应力直接影响复合衬里的剪切破坏模式。当 T 为 $10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 时, $100 \sim 1800 \text{ kPa}$ 的法向应力范围内, 复合衬里随着法向应力的增加会由 GM/GCL 界面破坏逐渐转变为 GCL 内部破坏; 当 $T = 70^\circ\text{C}$ 时, 复合衬里在各级法向应力作用下只发生 GM/GCL 界面破坏。

(3) 在 $10^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 时, 复合衬里在 $T = 20^\circ\text{C}$ 时的剪切强度最大, 升高或降低温度都会使复合衬里的峰值剪切强度减小。 $T = 70^\circ\text{C}$ 时的剪切强度相比 $T = 20^\circ\text{C}$ 时最大可降低 74%。

(4) 在所有试验温度下, 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的剪切强度包线在 100~1800 kPa 的法向应力范围内均表现出明显的非线性。剪切强度包线会因温度变化而发生改变, 复合衬里所受法向应力越大, 强度包线随温度增加而降低的幅度越大。

(5) 室温实验得到的土工合成材料剪切强度参数不宜直接用于温度环境差异大的工程分析, 温度对界面剪切强度的影响不可忽略。聚合材料力学性能的温度效应影响是复合衬里整体剪切强度随温度变化的主因, 土工合成材料剪切强度的温度影响机理有待进一步深入探索。

参考文献:

- [1] 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 (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and Construction of Modern Sanitary Landfills[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [2] FOX P J, SURA J M, NYE C J. Dynamic shear strength of a needle-punched GCL for monotonic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(7): 04015025.
- [3] TOUZE-FOLTZ N, BANNOUR H, BARRAL C, et al. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**: 656 - 672
- [4] FOX P J, STARK T D. State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement ten-year update[J]. Geosynthetics International, 2015, **22**(1): 3 - 47.
- [5] 张宏伟, 林伟岸, 詹良通, 等. 土工膜 /GCL 界面剪切强度特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(2): 123 - 130. (ZHANG Hong-wei, LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, et al. Experiment study on shear strength of GM/GCL interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(2): 123 - 130. (in Chinese))
- [6] 林 海, 章玲玲, 刘小文, 等. 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪破坏特征[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1660 - 1667. (LIN Hai, ZHANG Ling-ling, RUAN Xiao-bo, et al. Simple-shear failure characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liner[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1660 - 1667. (in Chinese))
- [7] 林 海, 施建勇, 钱学德. 水化针刺 GCL 剪切破坏机理的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1374 - 1380. (LIN Hai, SHI Jian-yong, QIAN Xue-de. Experimental research on shear failure mechanism of hydrated needle-punched GCLs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1374 - 1380. (in Chinese))
- [8] YESILLER N, HANSON, J L, YEE E H. Waste heat generation: a comprehensive review[J]. Waste Management, 2015, **42**(5): 116 - 179.
- [9] NAVID H Jafaria, TIMOTHY D Stark, TODD Thalhamer. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills[J]. Waste Management, 2017, **59**(1): 286 - 301.
- [10] KOERNER G R, KOERNER R M. Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(2): 72 - 77.
- [11] HANSON J L, CHRYSOVERGIS T S, YESILLER N, et al. Temperature and moisture effects on GCL and textured geomembrane interface shear strength[J]. Geosynthetics International, 2015, **22**(1): 110 - 124.
- [12] STARK T D, MARTIN J W, GERBASI G T, et al. Aluminum waste reaction indicators in a municipal solid waste landfill[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(3): 252 - 261.
- [13] LISTYARINI S. Designing heap leaching for nickel production that environmentally and economically sustain[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2017, **8**(12): 799 - 803.
- [14] AKPINAR M V, BENSON C H. Effect of temperature on shear strength of two geomembrane-geotextile interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, **23**: 443 - 453.
- [15] GHAZIZADEH S, BAREITHER C A. Stress-controlled direct shear testing of geosynthetic clay liners II: assessment of shear behavior[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(5): 667 - 677.
- [16] GHAZIZADEH S, BAREITHER C A. Temperature effects on the peak and large-displacement shear strength of needle-punched reinforced GCLs[C]// Geosynthetics 2019, 2019, At Houston.
- [17] GHAZIZADEH S, BAREITHER C A. Temperature-Dependent shear behavior of geosynthetic clay liners[J]. Geotechnical Frontiers, 2017, **280**(3): 288 - 298.
- [18] BAREITHER C A, SOLEIMANIAN M, GHAZIZADEH S. Direct shear testing of GCLs at elevated temperature and in a non-standard solution[J]. Geosynthetics International, 2018, **25**(3): 350 - 368.