

新型防渗材料 GCL 的若干特性试验

李 宪¹,束一鸣¹,武良金¹,夏子方²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.江苏远大新纺织联合发展有限公司,江苏 南京 210002)

摘要 :简要介绍土工合成材料黏土衬垫(GCL)产品的发展、现阶段的用途、结构和特性;对 GCL 中主要工作构件膨润土的用途、特性及工作机理进行简单介绍和分析,并通过试验方法研究其自由膨胀特性.此外,探讨了 GCL 力学特性的试验方法,阐述了土工合成材料黏土衬垫在工程应用中应该注意的问题,并对其研究和应用前景进行展望.

关键词 防渗材料;GCL;膨润土;蒙脱石;膨胀指数;抗拉强度;剥离强度

中图分类号 :TU59;TU502 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2004)07-0027-04

随着环境工程、地下工程等对防渗要求的不断提高,土工合成材料黏土衬垫(Geosynthetic Clay Liner,简称 GCL)作为一种新型防渗土工复合材料正逐步得到工程界的认可,并且在越来越多的工程领域中得到应用.

在过去的 10 年中,国外很多设计工程师和环保部门逐渐用 GCL 来代替压实黏土垫层(Compacted Clay Liner,简称 CCL).因为 GCL 在拉伸、局部下陷与冻融循环等情况下湿水具有极低的导水率($K_w < 10^{-11}$ m/s),另外还具有良好的自我修复能力等特性,所以常被用在固体垃圾填埋场的衬垫系统、封顶系统和地铁防渗等工程中.GCL 在水利工程中的应用,现阶段主要是渠道和土石坝防渗等方面,例如德国 Eberswalde 渠道采用 GCL 作为防渗材料.GCL 还用在运输设施(铁路和公路)和岩土工程中,作为环保隔离带.另外,现已有将 GCL 用作加油站地下油罐的第二防护层以防止地下水污染的工程实例.

GCL 产品具有众多优点,所以其应用领域不断扩大,我国已有厂家开发和生产 GCL 产品,但基本都处于起步阶段.

1 GCL 的结构

GCL 是在两层土工合成材料之间夹封膨润土,通过针刺、缝合或黏合而成的一种复合材料(也有的 GCL 产品只有一层土工膜,其上用水溶性黏合剂黏合一层薄薄的膨润土).覆盖层土工织物可以是无纺布物,也可是有纺织物.采用针刺工艺可使上层土工织物的一部分纤维穿过膨润土和下层土工织物,使

三者形成一个整体.穿透底层土工织物的纤维靠自身纠缠和摩擦或通过加热的方法使它和土工织物层结合在一起.Koerner 按结构组成将几种基本的 GCL 产品分类为黏合 GCL(双层)、针刺 GCL、缝合 GCL 和黏合 GCL(单层),见图 1.

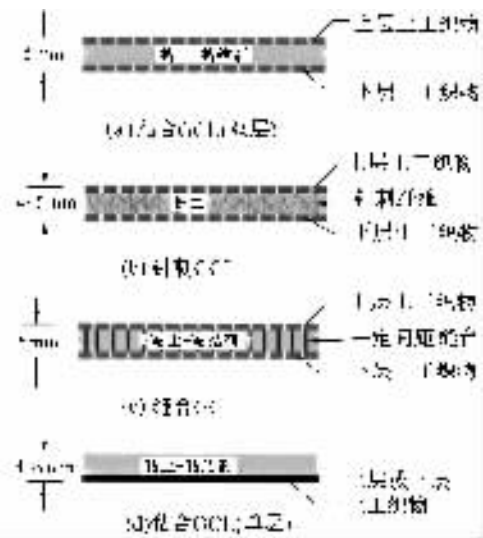


图 1 GCL 结构组成示意图

2 GCL 的特性和优点

GCL 作为一种新型防渗材料,其渗透系数很小(一般在 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10}$ m/s 之间).国外一些专家对 GCL 的渗透特性进行了很多研究,取得不少成果.通过大量试验,人们发现影响其渗透性的因素主要有:GCL 产品总厚度、蒙脱石含量、吸着层厚度、水化液体特性、矿物部分的空隙率和上覆压力大小等.

GCL 有许多优点,包括:①良好的自我修复能力

作者简介:李宪(1978—),男,山东济宁人,硕士研究生,从事土工合成材料应用研究.

(此优点使其较土工膜有很大的优势);②适应较大的不均匀沉降;③安装快捷、操作简单、造价低;④如合理安装,透水率很低,且便于维修;⑤不依赖当地材料的可用性;⑥能够承受反复冻融影响;⑦较小的厚度富有较大的气体空间;⑧不需野外渗透试验;⑨水合 GCL 为有效的气体隔板;⑩减小了下伏压缩层的过载负荷.当然,也有一些不足需在今后的研究和工程实践中不断改进,例如:较低的剥离强度,与其他矿物的潜在交界面问题,倾向于离子交换(对钠质膨润土 GCL 而言).

现在国外很多垃圾填埋工程中已使用 GCL 代替 CCL,其原因是多方面的:①GCL 的渗透系数比 CCL 的小得多(CCL 的渗透系数约为 1×10^{-9} m/s,而 GCL 的渗透系数约为 1×10^{-11} m/s);②CCL 需在现场施工,而 GCL 是在工厂加工,现场铺设,因此施工速度快;③CCL 厚度约为 60~90 cm,而 GCL 约为 1.2~1.5 cm,大大增加了填埋场的容量;④不可能在任何施工场地都会有合适的黏土作为 CCL 的材料,而 GCL 可以由工厂运至任何施工地点;⑤在 CCL 的施工过程中,质量保证步骤很复杂,需要高度熟练和有技术的监理人员,而 GCL 的施工相对简单,仅需直接的常规的监理;⑥CCL 的费用变化幅度较大,估价约为 13.58~135.83 元/m²,而对于大的场地,GCL 的费用仅需 11.41~16.30 元/m².

3 膨润土

GCL 产品之间最重要的区别在于用在 GCL 中膨润土的形式和矿物成分的差异.例如,膨润土是颗粒状还是粉末状,膨润土中 Mg²⁺ 和 Fe³⁺ 等离子的含量,是钠质膨润土还是钙质膨润土.钠质膨润土与钙质膨润土相比,具有较大的吸水率和膨胀系数、在水介质中分散性好、胶质价高、加热稳定性好等特性,所以在 GCL 中一般使用钠质膨润土. GCL 产品之所以具有极低的透水性,主要是因为夹层中膨润土的存在,因此任何影响膨润土水力渗透性的因素都将影响 GCL 的水力渗透性,如:膨润土中蒙脱石含量、膨润土粒径分布等.所以对 GCL 中膨润土特性的研究,特别是对影响其渗透特性的一些方面的研究是必要的.

3.1 膨润土的定义和应用

膨润土也被称作斑脱岩或膨石岩,它最早发现于美国怀俄明州的古地层中,为黄绿色的黏土,因加水膨胀成悬浮状或糊状,后来人们就把具有这种性质的黏土统称为膨润土.膨润土的主要矿物成分是蒙脱石,含量一般在 85%~90%,另外含有少量的长石、石英、方解石及火山玻璃等,可呈白色,含有少

量杂质的膨润土呈淡绿、粉红等颜色.膨润土加水后体积膨胀,在水中呈悬浮状,水少时呈糊状.膨润土的基本性能取决于蒙脱石的含量和矿物特性.一般膨润土具有良好的膨胀性、吸附性、黏结性、胶体分散性、阳离子交换性能等特性.

膨润土的用途非常广泛,可用作悬浮剂、黏合剂、乳胶稳定剂、土壤改良剂和饲料添加剂,还可用于日用化工,另外油漆、润滑剂等生产过程中也会用到膨润土.

3.2 膨润土的膨胀机理

膨润土中的主要成分蒙脱石是一种层状结构的硅铝酸盐,由 2 层硅氧四面体夹 1 层氢氧化铝八面体构成(其结构与电荷分布如图 2 所示),分子式为 $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$,沿 C 轴方向以一定间距重叠起来,晶层叠置的规律性受同晶置换的类型、层间吸附阳离子的种类以及层电荷的分布等因素影响.蒙脱石单位晶体层之间吸附的阳离子极易水化而吸附水分子,吸水后发生膨胀,体积可增大数倍或数十倍.

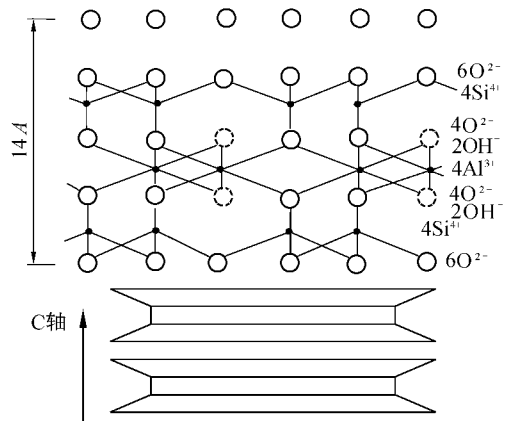


图 2 蒙脱石结晶格架示意图

3.3 防渗膨润土的要求

GCL 主要是利用膨润土遇到与膨润土兼容的液体发生膨胀的特性进行防渗,所以对防渗用途的膨润土有一些特殊的要求:只有渗透系数 $K \leq 10^{-9}$ m/s,并且能够抗百年老化的膨润土,才能称为防渗膨润土.

对于防渗膨润土的各项指标,各个国家皆不相同,也很不规范.德国在其所建的几个固体垃圾卫生填埋场中,对防渗膨润土做了以下要求:①体积膨胀大于或等于 26 倍;②筛余率(0.063 mm 孔径)小于或等于 25%;③含水率小于或等于 13%;④吸水率大于或等于 580%;⑤吸蓝量大于或等于 380 mg/g;⑥Fe₂O₃ 及 FeO 含量小于或等于 10%;⑦CaO 及 MgO 含量小于或等于 10%.另外膨润土的 pH 值对其渗透系数也有重要影响,试验证明当防渗膨润土的 pH > 8 时,其抗渗能力递减得很快,更有甚者,半年内

就会失效. 所以还应当要求防渗膨润土的 $\text{pH} \leq 9$.

3.4 膨润土自由膨胀试验

膨润土的自由膨胀试验可以用来测试其膨胀特性, 一般用膨胀指数来反映其膨胀特性的大小. 膨胀指数大小与温度、压力和水化液体的类型等因素有关.

根据美国 ASTM 标准及参考中国工程经验, 笔者对几种膨润土的膨胀指数进行了试验: 将称量的 $2.00 \text{ g} \pm 0.01 \text{ g}$ 烘干的膨润土试样慢慢加入盛有 100 mL 蒸馏水(或去离子水)的量筒内水化, 静止放置至少 18 h 后对膨润土试样水化后的体积进行量测.

试验中应注意以下一些问题: ①必须先将膨润土试样研碎, 使之能够 100% 通过 100 目(0.154 mm)的美国标准筛, 200 目(0.076 mm)的美国标准筛的最小通过率为 65%; ②取烘干后的膨润土试样放入量筒时, 必须小心以防止洒落; ③每次取膨润土试样不要多于 0.1 克, 并且在整个添加试样过程中要保持较慢的速度(因为一次性加入过多会使膨润土聚集成块, 从而使其不能充分水化); ④向量筒内添加膨润土试样时不要使用漏斗, 因为它可能会使膨润土与水结合聚集成块; ⑤膨润土试样水化沉降过程中不要晃动量筒, 让其自行沉降; ⑥为了使膨润土试样充分水化, 膨润土浸水变湿—与水结合水化—沉降至量筒底部, 这一过程至少需要 10 min; ⑦将 2.00 g 膨润土试样加完后, 必须用滴管小心地冲洗量筒内壁上附着的黏土矿物颗粒; ⑧膨润土试样加完后静止放置时一定要用玻璃塞盖住量筒; ⑨测量时应忽略任何低密度的絮状物质(有时呈浅白色), 记录时应从沉降的膨润土顶部精确至 0.5 mL 的体积量.

笔者选择了几个厂家生产的膨润土, 对其自由膨胀指数按照上面的试验方法进行测定, 结果见表 1.

表 1 膨润土自由膨胀体积测试结果

试样	2 g 膨润土自由膨胀体积/mL							变异系数 $C_v/\%$
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均值	标准差	
1	30.5	30.0	29.5	30.0	31.5	30.3	0.76	2.5
2	10.0	11.0	13.5	12.0	10.5	11.4	1.39	12.1
3	26.0	24.5	27.5	28.0	27.0	26.6	1.39	5.2
4	19.5	20.0	20.0	21.5	21.0	20.4	0.82	4.0
5	14.5	16.0	16.5	14.0	15.5	15.3	1.11	7.2

通过试验, 并结合防渗膨润土体积膨胀大于或等于 26 倍的指标要求, 可以看出 1 号试样(每 2 g 膨润土平均体积膨胀为 30.3 mL)和 3 号(每 2 g 膨润土平均体积膨胀为 26.6 mL)符合防渗要求, 可以用在 GCL 中作为主要的防渗构件.

膨润土在不同的液体中进行自由膨胀试验会得到不同的膨胀体积. 在酸性水溶液中, 膨润土自由膨胀时膨胀量最大, 考虑到膨润土浆的 pH 值一般大

于 8, 产生这个结果的原因可能是酸与孔隙水中的碱中和, 使得膨润土更加膨胀. 膨润土用海水浸泡后发生最低限度的膨胀, 其原因是海水中较多的多价阳离子抑制了膨润土的膨胀. 膨润土由 MSW 冲洗液水化, 膨胀指数仅为蒸馏水中的一半, 这是由于淋滤液中的溶解物引起的. 另外膨润土在钾、氯和钙电解质溶液中不膨胀, 所以在有这些电解溶液存在的环境中不能使用 GCL 作为防渗材料.

4 GCL 的力学特性

GCL 在地铁、固体垃圾卫生填埋等工程中已得到广泛应用, 尤其是在国外. 但是在工程中, 边坡处较高的剪应力、热应力和地基的不均匀沉降等都是对 GCL 力学特性考验, 从而影响其防渗性能. 所以加强对 GCL 的力学特性研究, 提高其抗拉强度和剥离强度等力学特性是完全必要的.

4.1 GCL 的抗拉强度

抗拉强度是 GCL 的一个重要的力学参数, 其大小会影响到 GCL 的渗透系数等其他特性. GCL 中膨润土几乎不能抗拉, 所以在 GCL 中抗拉强度的主要载体是上下层的土工织物(或土工膜). GCL 抗拉强度的测试分为径向和纬向, 试验中应分别进行.

对于 GCL 产品的质量检测, 现阶段我国尚没有国标和行标, 仅有企业标准. 目前我国建材测试单位多依据美国 ASTM 标准对 GCL 进行检测. 依据美国 ASTM 标准, 把尺寸为 $20.32 \text{ cm} \times 10.16 \text{ cm}$ (4 in $\times$ 8 in) 的 GCL 试样在相对湿度为 $65\% \pm 5\%$ 、温度为 $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ($70^\circ\text{F} \pm 4^\circ\text{F}$) 条件下, 以 $30 \text{ cm/min} \pm 1 \text{ cm/min}$ ($12 \text{ in} \pm 0.5 \text{ in}$) 的速率张拉, 测得的数据经过必要的处理就是 GCL 的抗拉强度. 我国对于土工织物的测试多采用《公路土工合成材料试验规范》, 试样尺寸为 $20 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 在 5 cm/min 的拉伸速率下进行测试.

综合考虑到我国现有标准、工程实际和国外的一些工程经验, 笔者对 GCL 抗拉强度按照以下方法进行了试验: 将尺寸为 $20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的 GCL 试样在相对湿度为 $65\% \pm 5\%$ 、温度为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的条件下, 以 10 cm/min 的速率进行张拉. 试验中, 对 GCL 试样径向和纬向都进行了抗拉强度测试, 结果见表 2.

由试验结果可以看出, 该 GCL 产品的径向抗拉强度比其纬向抗拉强度大将近一倍, 其径向延伸率也比纬向延伸率大. 这主要是由 GCL 上、下层土工织物(或土工膜)的特性决定的.

4.2 GCL 的剥离强度

GCL 的剥离强度是一个十分重要的力学特性指标, 它是检验针刺 GCL 的抗剪峰值的参照指标, 在

某种程度上还会影响到 GCL 的渗透系数。

表 2 GCL 抗拉强度试验结果

序号	径向拉伸		纬向拉伸	
	抗拉强度/ (N·cm ⁻¹)	延伸率/ %	抗拉强度/ (N·cm ⁻¹)	延伸率/ %
1	600	15	306	8
2	556	16	357	9
3	644	16	305	9
4	572	14	332	7
5	598	15	319	9
6	611	16	325	8

注 径向拉伸的抗拉强度平均值为 596.8 N/cm,标准差 $\delta = 30.7$,变异系数 $C_v = 5.1\%$ 纬向拉伸抗拉强度平均值为 324 N/cm,标准差 $\delta = 19.3$,变异系数 $C_v = 6.0\%$ 。

对 GCL 剥离强度的测试,我国很多单位多采用测试其抗拉强度的方法(美国 ASTM 标准)进行。为此,笔者在试验中也采用这种方法(试验结果见表 3)。

由试验结果可以看出,GCL 径向剥离强度和纬向剥离强度基本上相等,比其抗拉强度要小得多。GCL 的剥离强度主要与连接上下层土工织物的纤维强度有关。还与连接上下层土工织物的纤维的工艺有关。例如是缝合、黏结,还是采用针刺,针刺是采用矩形还是梅花形。另外,GCL 中与针刺纤维或缝合纤维相连的上下层土工织物纤维的强度也是其剥离强度的影响因素。

表 3 GCL 剥离强度试验结果 N/cm

序号	径向 剥离强度	纬向 剥离强度	序号	径向 剥离强度	纬向 剥离强度
1	40	37	4	38	29
2	45	34	5	26	38
3	34	41	6	35	35

注 ①本试验中的 GCL 试样同抗拉强度试验中的试样。②径向剥离强度平均值为 36.3 N/cm,标准差 $\delta = 6.4$,变异系数 $C_v = 17.6\%$ 纬向剥离强度平均值为 35.7,标准差 $\delta = 4.1$,变异系数 $C_v = 11.5\%$ 。

未加筋的 GCL 比通过缝合或针刺加筋的 GCL 的抗剪性能低很多,其抗剪强度随膨润土含水量的增大而降低,随剪切速率的下降而下降。试验证明用自来水水化后的未加筋 GCL 试样的抗剪强度与膨润土的抗剪强度相差不大。

5 GCL 在工程应用中应注意的问题

- a. 未加筋的 GCL 抗剪强度较低,应尽量避免用在坡度较陡的地方。
- b. GCL 用作垃圾填埋场的衬垫时,一定要注意其与淋滤液中化学物质的兼容性,可以做化学兼容性试验,以测定其水力渗透系数是否有大幅度增加。
- c. GCL 的透气性不可忽视,在干燥地区建议 GCL 和土工膜共同使用,以确保有毒有害气体溢出量符合设计与环保要求。

6 结 语

GCL 是一种新型土工复合材料,主要利用膨润

土遇水膨胀的特性进行防渗,所以对防渗膨润土提出一定要求是必要的。另外,在工程实际中对其力学特性也有一定的要求,因此如何提高其力学特性也是人们需要解决的问题。GCL 还有其他的重要特性,如流量损失、水力传导率和水化特性等,尚需进一步做特性试验。

GCL 作为一种新型复合材料,以其良好的防渗性能在环境工程、地下工程中得到广泛应用,此外还可用于土石坝防渗、渠道防渗等工程中。GCL 在我国工程中应用时间不长,现阶段主要应用于固体垃圾填埋场的防渗衬垫、封顶系统和地铁防渗,随着对 GCL 性能的不断研究和其性能的不断完善,其应用前景会越来越广泛。

参考文献:

[1] Lake C B, Rowe R K. Swelling characteristics of needlepunched, thermally treated GCLs[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(2): 77 ~ 101.

[2] Lake C B, Rowe R K. Diffusion of sodium and chloride through geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(2): 103 ~ 131.

[3] Koerner R M, Carson D A, Daniel D E, et al. Current status of the clicinnati GCL test plots[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(4~6): 341 ~ 365.

[4] Estornell P, Daniel D. Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(10): 1593 ~ 1606.

[5] Koerner R M. Designing with geosynthetics[M]. New Jersey: Fourth Edition, 1997. 613 ~ 647.

[6] Bouazza A. 土工织物粘土垫层[J]. 水利科技译文, 2002(3): 1 ~ 4.

[7] Hsin Yu Shan. 土工织物粘土垫层[J]. 水利科技译文, 2002(3): 5 ~ 13.

[8] 鞠建英. 防渗膨润土的研究及其在工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5): 27 ~ 29.

[9] JTJ/T 060—98, 公路土工合成试验规范[S].

[10] 王钊. 国外土工合成材料的应用研究[M]. 香港: 现代知识出版社, 2002. 412 ~ 424.

(收稿日期 2004-02-23 编辑 高建群)

