

GCL 的气体渗透性研究

陈小红¹ 王协群²

(1. 武汉电力职业技术学院 建设工程系,湖北 武汉 430079; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要: GCL 作为垃圾填埋场封盖系统的主要复合材料,其气体渗透性是一种很重要的性质,也是决定垃圾填埋场成败的关键。气体渗透分为平流和扩散两种过程,根据雷诺数来判别这两种渗透过程的基本准则,给出了平流与扩散过程中气体渗透量的计算公式;总结了影响 GCL 透气性的主要因素,包括外部气压、GCL 的含水量以及与其共同作用的土工膜的完好程度,并简略分析了这些因素影响 GCL 透气性的原因。

关键词: GCL; 气体渗透; 雷诺数; 平流; 扩散; 影响因素

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A

1 概述

垃圾的处理(处置)方法主要有焚烧、堆肥和填埋等,其中卫生填埋法是目前国内外应用最为广泛的垃圾处置方式^[1]。土工合成材料粘土垫(Geosynthetic Clay Liner)简称 GCL,是一种新型的复合土工合成材料,它是在两层土工合成材料(土工织物或土工膜)之间夹封膨润土粉末(或膨润土颗粒),并通过针刺、缝合或粘合而成的一种复合材料^[2]。近年来,GCL 以其低透水性、较强的自愈合能力、安装简易等优点广泛应用于垃圾填埋场封盖系统中。垃圾填埋场危害性的物质不仅仅是沥滤液,气体的泄漏也会污染大气、水源,甚至造成严重的中毒事件^[3]。所以,研究 GCL 的透气性、采取防止气体散逸的措施具有重要意义。

2 GCL 中气体运动的相关计算

气体的运动分为平流和扩散两种形式。平流是指当产生气压梯度(即气压不同)时,气体从气压高的一方流向气压低的一方。扩散是指气体分子从浓度大的一方运动到浓度小的一方^[4],所以,对于不同的气体运动方式要采用不同的计算公式。

2.1 气体状态的判断

在流体力学中,液体平流运动的计算一般采用达西定律,与液体不同的是气体具有可压缩性,其动力粘滞性和运动粘滞性都会随温度的变化而发生变化。要使用达西定律对气体进行相关计算,必须首先假定温度是一个常量,实际上,气体的动力粘滞性和运动粘滞性随温度的变化程度并不是很大,温度在 15 ~ 25℃ 变化时,动力粘滞性和运动粘滞性的变化程度分别为 3% 和 7%,所以可以忽略温度的变化,用达西定律对气体平流运动进行计算。另外,在使用达西定律前需要用雷诺数来判断流动类型。雷诺数的表达式为:

$$R_e = \frac{vd}{\nu} \quad (1)$$

式中 v 为渗透速度, m/s; d 为材料的平均孔径, m; ν 为液体的运动粘滞系数, m²/s。对于达西定律的适用范围,对研究者提出了不同的看法,但尚未达成共识。Bear(1972)认为雷诺数 R_e 应为 1 ~ 10。Yu(1985)认为 $R_e < 6$ 时适用。McBean 等(1995)指出材料孔径小于 2.0 mm 时适用,然而当气体流动速度足够大的时候,会发生气体扩散运动而使达西定律失效^[5]。所以,个人认为选用 $R_e < 6$ 作为气体平流运动的判断较为合适。

2.2 平流运动时气体渗透量的计算

当气体状态条件符合平流运动时,可以引入达西定律计算气体流量。

$$Q = -\frac{k}{\mu} A \nabla P \quad (2)$$

式中 Q 为单位时间体积流量, m³/s; A 为横截面面积, m²; ∇P 为压力梯度, Pa/m; k 为材料固有渗透性, m²; μ 为流体的动力粘滞系数, Pa · s。

对于线形流动,以上公式可变为:

$$Q = -\frac{k}{\mu} A \frac{dP}{dx} \quad (3)$$

方程(3)只对每个孔隙区域中的气体计算是成立的。当 GCL 单位面积质量恒定且气体运动为等温过程时,方程(3)可以进行积分,积分后的结果(4)式可以应用于 GCL 整个区域的计算。

$$Q_2 = \left(\frac{k}{\mu}\right) A \frac{P_1^2 - P_2^2}{2P_2 L} \quad (4)$$

式中 Q_2 为通过 GCL 下表面气体体积流量, m³/s; A 为横截面面积, m²; P_1 为 GCL 上表面气压, Pa; P_2 为 GCL 下表面气压, Pa; k 为材料固有渗透性, m²; μ 为流体的动力粘滞系数, Pa · s; L 为 GCL 厚度, m。

2.3 扩散运动时气体渗透量的计算

对于气体扩散运动的计算,可以用下式表示:

$$Q = F_g A = - D_e A \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (5)$$

式中 Q 为单位时间体积流量, m^3/s ; A 为气体通过的介质面积, m^2 ; F_g 为单位面积的传质速率, kg/m^2s ; C 为扩散物质的浓度, kg/m^3 ; Z 为垂直于横截面的坐标, m ; D_e 为物质的有效扩散系数, m^2/s 。

上式负号说明气体扩散方向与气体浓度升高方向相反。从(5)式可以看出单位面积的传质速率 F_g 与两点间的浓度梯度是呈线性变化的^[6]。 D_e 与 k 的作用是相似的。与 k 相比较,所不同的是 D_e 会随流体和透水介质的特性(诸如分子质量、孔隙率、饱和度等)发生变化。

当 GCL 的饱和度较低时,气体的扩散只会发生在空气充满的体积中,但当饱和度很大的时候,气体的扩散不仅发生在空气所占的体积中,水所占的体积中也会发生空气的扩散,所以对 D_e 的贡献来自两部分^[6]:

$$\begin{cases} D_e = D_a + HD_w \\ D_a = \theta_a D_a^* T_a \\ D_w = \theta_w D_w^* T_w \end{cases} \quad (6)$$

式中 θ_a 为空气体积含量; D_w 为液体体积含量; D_a 为在气体状态下的扩散系数, m^2/s ; D_w 为在液体中的扩散系数, m^2/s ; H 为浓度平衡条件下对达西定律的修正系数; D_w^* 气体在开敞液态介质中的扩散系数, (m^2/s) ; D_a^* 为气体在开敞气态介质中的扩散系数, m^2/s 。

$$\begin{cases} T_a = \frac{\theta_a^{2x+1}}{n^2} \\ T_w = \frac{\theta_w^{2y+1}}{n^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 T_a 为 D_a 的修正系数; T_w 为

D_w 的修正系数;其中 x 和 y 可以由以下的限制条件求出:

$$\begin{cases} \theta_a^{2x} + (1 - \theta_a)^x = 1 \\ \theta_w^{2y} + (1 - \theta_w)^y = 1 \end{cases} \quad (8)$$

3 影响 GCL 透气性的因素

3.1 气压的影响

气压是控制气体渗透的一个主要因素,随着气压的升高,介质两个表面的气压差会逐渐拉大,这样,气体更容易从气压高的介面流向气压低的介面(图 1)。在一定状态下,其透气量的大小取决于透气材料的渗透系数。材料的渗透系数是材料的固有属性,它是不依赖于流体的一个参数。渗透系数还与材料的孔径有关,水化后的 GCL 渗透系数是非常小的,所以它不会是控制流体在介质中通过的主要因素^[4]。另外, H · A · Bouazza, T. Vangpaisal^[7], 在测试 GCL 与土工膜介面气体渗透特性的时候,得出的结论可以有力地证明气压与气体渗透速率的关系。从图 1 中不难看出,气体渗透速率与气压的线性变化关系。

3.2 含水量的影响

GCL 在干燥状态下,膨润土是散粒状的,其接触面会存在或大或小的缝隙,这也为气体的流通提供了通道。但是,当 GCL 周围的含水量逐渐增大,膨润土作为一种亲水性的矿物质,会很快从周围环境中吸收水分,并发生水化反应这一化学过程。层

状蒙脱石晶体之间的吸水和蒙脱石晶体内层间域的吸水会导致膨润土内部产生膨胀应力。膨胀应力的增加会阻止水扩散进行,进而抑制水渗透,增强防水效果。水化后的膨润土会变成凝胶状,这时,膨润土颗粒大部分形状发生改变,之前存在的通道也会闭合,成为一种良好的隔水隔气屏障。GCL 的透气性与含水量的变化之间存在密切的关系,一般来说,含水量越高,膨润土的水化程度会越充分,产生的胶体悬浮液也会越致密,GCL 的渗透性会降低。H · Y · Shan, J · T · Tao(2000)^[8] 通过试验得出 GCL 的渗透性与含水量之间的关系如图 2 所示。从图中可以看出气体通过 GCL 的渗透性与含水量的关系。在含水量较小的时候,GCL 的渗透系数比较大,而当含水量大于 150% 之后,气体的渗透性就很低了。

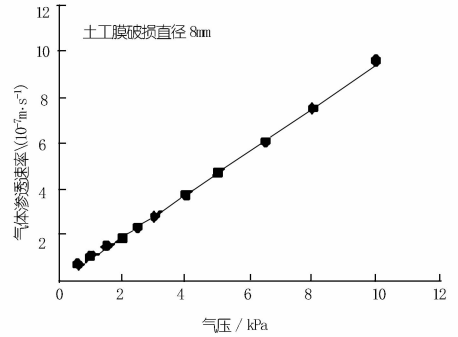


图 1 气体渗透速率随气压变化

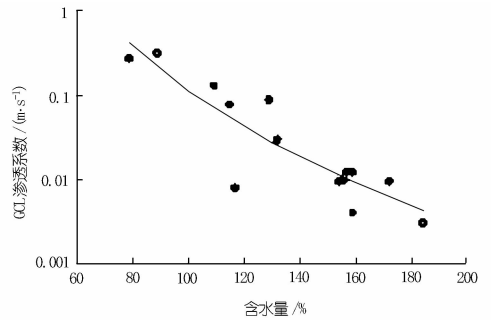


图 2 GCL 气体渗透性和含水量之间的关系

3.3 土工膜破损的影响

GCL 作为防渗材料使用时一般与土工膜结合使用,理论上认为土工膜是没有缺陷的隔水屏障。但实际上,在施工的过程中,钉子和固体垃圾等带尖角的硬物体会损伤土工膜,而使土工膜在带缺陷的状态工作。这种无意中遗留下的缺陷对 GCL 的透气性能也有很大的影响,但这种影响并不是孤立的,它会随着外界因素的不同而产生不同的结果。GCL 含水量较低时,气体渗透率随着土工膜缺陷直径的增大而增大。GCL 含水量较高时,气体渗透率与土工膜之间的变化关系将会发生变化:压力差小于 1 kPa,土工膜的缺陷大小对 GCL 气体渗透率的影响并不明显;压力差大于 1 kPa,土工膜缺陷处的直径越小,通过 GCL 气体的渗透率越高^[7]。从图 3 中可以很清楚地看到这种变化关系。

3.4 膨润土移动的影响

GCL 中膨润土移动是一种普遍现象。GCL 出厂时是干燥状态的,散粒的膨润土在搬运的过程中很容易发生移动。当 GCL 在使用过程中与水接触水化后,膨润土的性状发生改变,触变性也随之提高。由于基底材料粒径的不同、上覆保护层种类

的区别以及应力集中现象等因素的影响,依然会发生不同程度方厚度小于原来的平均厚度,更有甚者只剩下两层土工织物,而膨润土都移动到了周围。这样又提高了气体渗透的可能性。

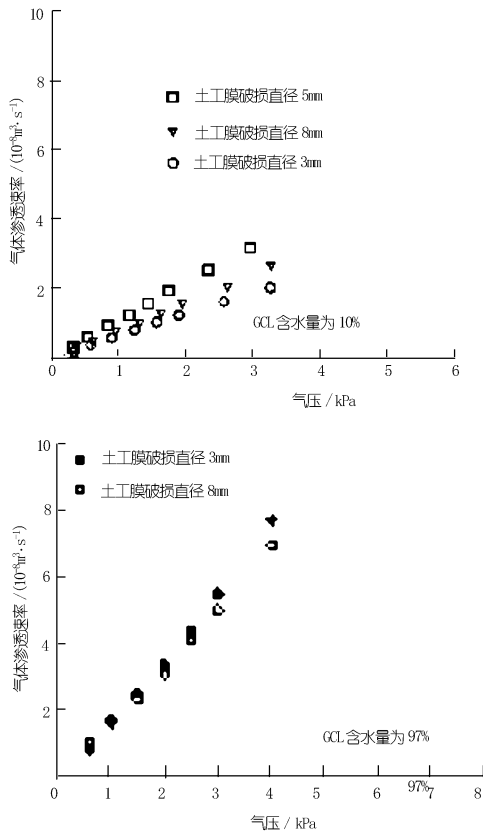


图3 土工膜不同破损对 GCL 渗透速率的影响

4 结语

气体渗透是一个很复杂的现象,其中伴随着平流和扩散两

(上接第 68 页)

定、强度也固定的旋涡,且其下游远场尾流几乎完全一致。但采用两个小圆柱控制时,在主圆柱附近偏下方也存在一个位置固定、强度也固定的旋涡,只是强度比偏上方的旋涡小;而采用一个小圆柱控制时,在偏下方仅隐约有一个位置固定的小涡存在。当雷诺数偏大(接近 150)时,两个小圆柱的控制效果更好。

4 结语

圆柱的个数、相对位置和大小都明显影响着绕流流场结构,据此归纳了圆柱相对位置对多圆柱绕流特性的影响。如:双柱绕流按排列方式和间距比划分为多种不同流态;三柱呈“品”字布置,当间距比小于临界值时,出现明显的偏流现象, $L/d > 3$ 时不再出现偏流现象;三柱呈倒“品”字布置,在任何间距比下,流动状态相对于来流几乎都是对称分布的,上游两个圆柱的绕流特性比较相似;对于绕正方形排列的四圆柱绕流,实验研究发现上游两圆柱后没有旋涡形成和脱落,下游两圆柱旋涡脱落反相同步,而数值模拟得到上下游圆柱后都有明显的旋涡脱落;对于带附属小圆柱的绕流,可调整附属小圆柱的位置到最佳抑制区域,从而抑制主圆柱尾流中的旋涡脱落,使流场稳定。

的移动现象^[9]。发生移动后的 GCL 表面变得凹凸不平,很多地个不同的过程,本文分别介绍了两种状态下的计算方法。但是,在气体渗透过程中,平流和扩散并不是截然分开的,它们是伴随着一起发生的,所以这也给精确计算带来了很大的麻烦。另外, GCL 气体渗透过程中的影响因素很多,诸如气压,含水量,周围介质的破损等都会对渗透过程产生影响,特别是共同作用介质的破损又是难于预测的,所以,在应用 GCL 的过程中,要采取合理的措施如极力避免对周围介质不必要的损伤,提前对 GCL 进行水化等,使 GCL 的气体渗透过程更易于衡量。

参考文献:

- [1] 杨军,黄涛,杨立中. 垃圾填埋场的灾害隐患及其对策. 灾害学, 2004, 19(4): 13-17.
- [2] 王钊. 土工合成材料. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 朱爽,刘志斌. 垃圾填埋场的环境问题及对策. 辽宁工程技术大学学报, 2005, (24) (增刊): 250-252.
- [4] Didier G, Bouazza A, Cazaux D. Gas permeability of geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 2000, (18): 235-250.
- [5] Bouazza A, Vangpaisal, T. An apparatus to measure gas permeability of geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 2003, (21): 85-101.
- [6] Michel Aubertin, Mostafa Achib, Karine Autbier. Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. Geotextiles and Geomembranes, 2000, (18): 215-233.
- [7] Bouazza A, Vangpaisal T. Laboratory investigation of gas leakage rate through a GM/GCL composite liner due to a circular defect in the geomembrane. Geotextiles and Geomembranes, 2006, (24): 110-115.
- [8] Shan H Y, Tao J T. Measurement of air permeability of geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 2000, (18): 251-256.
- [9] 陈小红,王协群. 土工合成材料膨润土垫性能探讨. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 53-56.

(编辑:刘忠清)

参考文献:

- [1] 张爱,张陵. 等边布置三圆柱绕流的数值分析. 应用力学学报, 2003, (1).
- [2] 李景银, K Lam, K TChan, RMCSO. 绕正方形排列的顺排四个圆柱的流动研究. 工程热力学, 2004, (1).
- [3] 李椿莹,彭少波,吴子牛. 附属小圆柱对主圆柱绕流影响的数值模拟. 北京航空航天大学学报, 2003, (11).
- [4] Zdravkovich, M. M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. Journal of Sound and Vibration 101, 511-521.
- [5] Zdravkovich, M. M. Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 28, 183-200.
- [6] Sumner, D., Price, S. J. & Paidoussis, M. P., 2000. Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow. Journal of Fluid Mechanics 411, 263-303.
- [7] Tasno M. et al, Effects of interference among three equidistantly arranged cylinder in a uniform flow, Fluid Dynamics Research, 1998, (22): 297-315.
- [8] Oertel H J. Wakes behind blunt bodies. Ann Rev Fluid Mech, 1990, (22): 539-564.

(编辑:徐诗银)