

DOI: 10.11779/CJGE201504002

气体压力和孔隙对垃圾土体气体渗透系数影响的研究

施建勇^{1, 2}, 赵义^{1, 2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 垃圾土的非饱和气体渗透系数是填埋场气体运移分析和抽气井设计的重要参数, 孔隙比、有机物含量、饱和度等是影响垃圾土渗透特性的主要因素。通过研制的垃圾土非饱和渗透试验仪, 进行了不同影响因素下的非饱和垃圾土气体渗透试验, 发现渗透系数随渗透压力呈现非线性特性, 可以用 Forchheimer 非达西渗流方程较好地拟合。孔隙比增加, 渗透系数增大, 非达西系数 B_a 逐渐减小, 分界点的气体压力减小; 有机物含量越高, 渗透系数越小, 分界点气体压力越大; 片状分布有机物使有效连通的渗透路径减少是垃圾土气体渗透特性降低的原因; 饱和度越高, 垃圾土的渗透系数越小, 分界点气体压力越大; 在试验的有效孔隙范围内, 渗透系数、分界点气体压力与有效孔隙呈现较好的相关关系、非达西系数变化不大。

关键词: 渗透性; 非达西系数; 分界点; 有效孔隙比; 气压力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0586-08

作者简介: 施建勇(1965-), 男, 江苏如皋人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn。

Influence of air pressure and void on permeability coefficient of air in municipal solid waste (MSW)

SHI Jian-yong^{1, 2}, ZHAO Yi^{1, 2}

(1. MOE Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The permeability coefficient of gas in municipal solid waste (MSW) is an important parameter for migration analysis and design of extraction well for gas in landfills. The permeability of MSW is mainly dependent on the void ratio, organic content, saturation degree and so on. In this study, the air permeability tests on unsaturated MSW are carried out under different influencing conditions by a new developed permeameter. It is found that there is a nonlinear relationship between permeability coefficient of MSW and seepage pressure of air, which can be better fitted by using the Forchheimer non-Darcy flow equation. With the increase of void ratio of MSW, the permeability coefficient increases, non-Darcy coefficient B_a decreases and the air pressure at demarcation point increases, respectively. With the increase of organic content in MSW, the permeability coefficient decreases and the air pressure at demarcation point increases, respectively. The flaky organic part will be spread and the connecting seepage path will be reduced in MSW, resulting in the attenuation of permeability for MSW. The higher the saturation degree in MSW, the smaller the permeability and the larger the air pressure at demarcation point. Within the effective porosity in the tests, there are better relationships among the permeability coefficient of MSW, the air pressure at demarcation point and the effective porosity, and the non-Darcy coefficients are changed in a narrow range.

Key words: permeability; non-Darcy coefficient; demarcation point; effective porosity; air pressure

0 引言

垃圾土体的气体渗透系数是垃圾填埋场设计中的重要参数之一, 其受到垃圾土的组成等因素的影响, 已有不少相关的研究文献报道^[1-3]。文献[1]和文献[4]研究成果认为, 气体渗透系数还与进气压力(气体流量)有关, 渗透系数随进气压力增加会下降。在填埋场中, 气体的压力范围变化较大^[4-13], 较多文献资料表明压力在 0.4~30 kPa 范围内^[5-10], 也有研究结果认

为压力会达到 100 kPa 甚至更高^[12-13]。气体压力影响渗透系数的原因尚不清楚, 但随着压力的增加, 气压梯度也会增加; 尤其在抽气井和注气井附近更加突出^[4]。流体在多孔介质中的流态发生变化引起渗透系数变化, 是一部分文献研究的结果^[14-17]; 其中, 流体的惯

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372268)

收稿日期: 2014-07-18

性力是主要影响因素^[15-16]。可见, 在选择气体渗透系数时, 填埋场内的气体压力也是需要考虑的因素之一。本文研究的目标是通过影响垃圾土渗透特性的因素变化试验, 分析压力对气体渗透系数的影响规律, 建立渗透系数、渗透气压与垃圾土主要参数的相关关系, 为实际垃圾填埋场设计提供参数确定方法。

1 试验仪器和试样配置

试样筒为有机玻璃圆柱体, 筒身长 60 cm, 内径 10 cm; 端部盖板为不锈钢金属板, 通过法兰盘由 6 颗螺栓和试样筒联接, 见图 1。试验气压量测采用 CKD 气压显示器, 其量测范围为 0~50 kPa, 精度 0.1 kPa; 气压显示器均匀布设在试样筒中间 42 cm 长的位置, 两端各有 9 cm 的距离用于进出气流的均匀。42 cm 试样段上的压差和气压梯度通过气压显示器读数可计算

得到。所测试样段的气压梯度 $-\frac{\partial P}{\partial L}$ 为

$$-\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{P_1 - P_2}{L}, \quad (1)$$

式中, P_1 为第一只气压显示器读数, P_2 为第 4 只气压显示器读数, L 为两只气压显示器之间试样的长度, 为 0.42 m。

气压显示器安装在试样筒壁; 为防止垃圾土样和水分侵入显示器, 在联接孔中放置陶土石。供气源为空气压缩机, 采用 CKD 精密调压阀调节进气压力。气体从试样筒中流出时, 通过压力表测量出气压力(也用 U型测压管复核); 通过玻璃转子流量计测量出气流量 Q 。所测试样段的平均流速 v 为

$$v = \frac{Q}{\pi r^2}, \quad (2)$$

式中, r 为试样的截面半径, 为 0.05 m。

压力和流量测量仪表经过国家法定的计量检定单位率定。

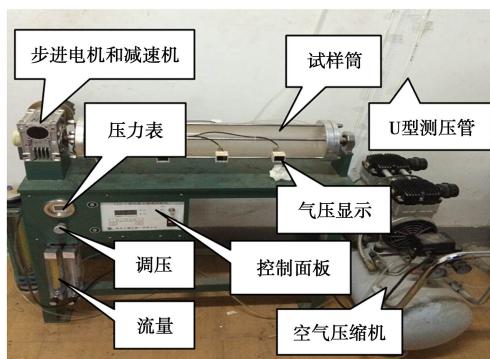


图 1 试验装置实物图

Fig. 1 Photo of test apparatus

经过试验检验, 设备的整体密封性能良好。垃圾土样人工配制而成, 控制有机物 4 个不同的含量分别

为 30%, 40%, 60%, 70%, 试样的初始孔隙比、含水率也进行了控制, 配样的比例和试验的组号分别见表 1 和表 2。

表 1 试样组份配比(干重质量百分比)

Table 1 Content of constituents (dry mass)

有机物含量/%	有机物				无机物	
	厨余/%	木屑/%	废纸/%	塑料/%	土/%	玻璃/%
30.00	12.50	7.50	2.50	7.50	61.25	8.75
40.00	16.67	10.00	3.33	10.00	52.50	7.50
60.00	25.00	15.00	5.00	15.00	35.00	5.00
70.00	29.20	17.50	5.80	17.50	26.25	3.75

第 1, 2, 3 组试验分别进行孔隙比、有机物含量和饱和度对垃圾土气体渗透性影响研究。通过试样不同初始参数的渗透试验, 分析气压力对渗透系数的影响规律。

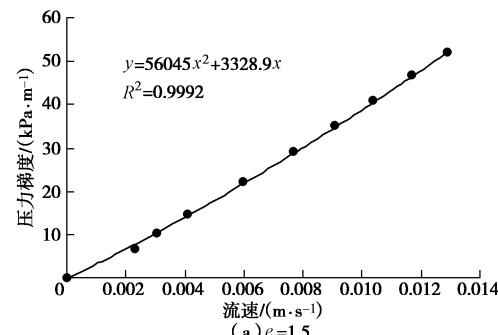
表 2 垃圾土试样编号

Table 2 Number of MSW samples

组号	试样编号	试样参数		
		孔隙比	饱和度/%	有机物含量/%
1	1-1	1.5	20.0	40.00
	1-2	2.0	20.0	40.00
	1-3	2.5	20.0	40.00
	1-4	3.0	20.0	40.00
2	2-1	2.0	20.0	30.00
	2-2	2.0	20.0	40.00
	2-3	2.0	20.0	60.00
	2-4	2.0	20.0	70.00
3	3-1	2.0	0.0	40.00
	3-2	2.0	20.0	40.00
	3-3	2.0	40.0	40.00
	3-4	2.0	60.0	40.00
	3-5	2.0	80.0	40.00
	3-6	2.0	90.0	40.00

2 试验结果与分析

饱和度 20.0%, 有机物含量 40.00%, 不同孔隙比试样的渗透试验结果见图 2。



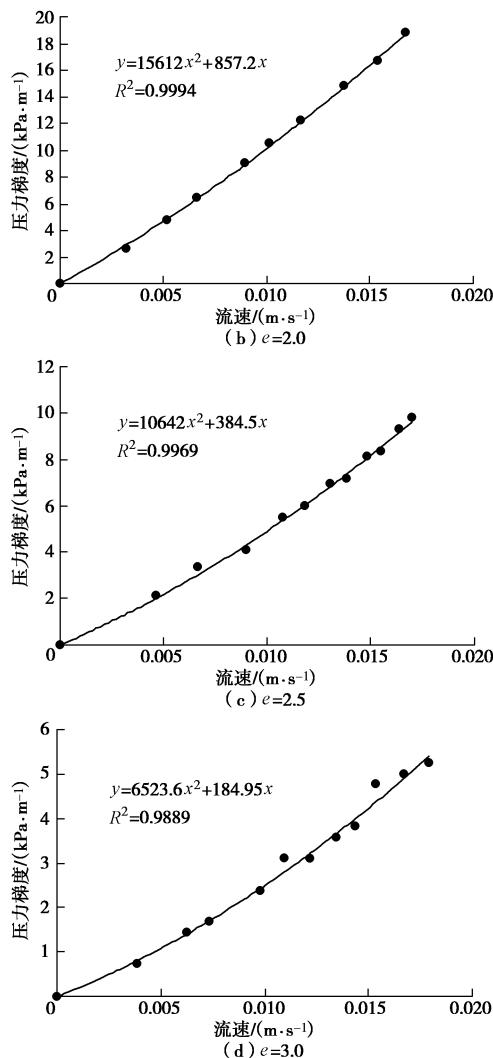


图 2 不同孔隙比下气压梯度与渗透速度的试验曲线

Fig. 2 Relationship between pressure gradient and permeability

velocity under different void ratios

由图 2 可见, 同一孔隙比下, 气压梯度与气体渗流速度成非线性关系, 随着气压梯度的增加, 流速增加的幅度减小, 即渗透系数下降; 不同的孔隙比试样的渗透试验, 随孔隙比增加, 垃圾土体试样中达到同样的气体渗流速度, 气压梯度减小, 定性地说, 渗透系数增加。在某一孔隙比下, 随着气压梯度的增加, 试样中的气体渗流速度增幅减小, 且可以用二次曲线较好地拟合。根据 Forchheimer 非达西渗流方程:

$$-\frac{\partial P}{\partial L} = av + bv^2 \quad , \quad (3)$$

式中, a 和 b 是常数, 取决于气体的性质和渗透介质本身的特性等。一般情况下取 $a = \frac{\mu}{K}$, μ 为气体的动力黏滞系数, $\mu = 1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; K 为垃圾体的固有渗透率, $K = k_a \mu / \rho_a g$, k_a 为垃圾土体的渗透系数; ρ_a 为气体的密度, $\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度 9.8 m/s^2 ; $b = B_a \rho_a$, B_a 称为非达西系数。式(3)变成为

$$-\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{\mu}{K} v + B_a \rho_a v^2 \quad . \quad (4)$$

Forchheimer 方程可看成是在达西定律的基础上增加了一个二次项, 此二次项表示惯性力的影响, 此外 Forchheimer 方程并未针对特定渗透介质提出, 具有一定的通用性。

由图 2 可以整理得到不同孔隙比下的渗透系数 k_a 和非达西系数 B_a , 见表 3。

表 3 渗透系数 k_a 和非达西系数 B_a 随孔隙比变化

Table 3 Variation of permeabilities and non-Darcy coefficients with void ratios

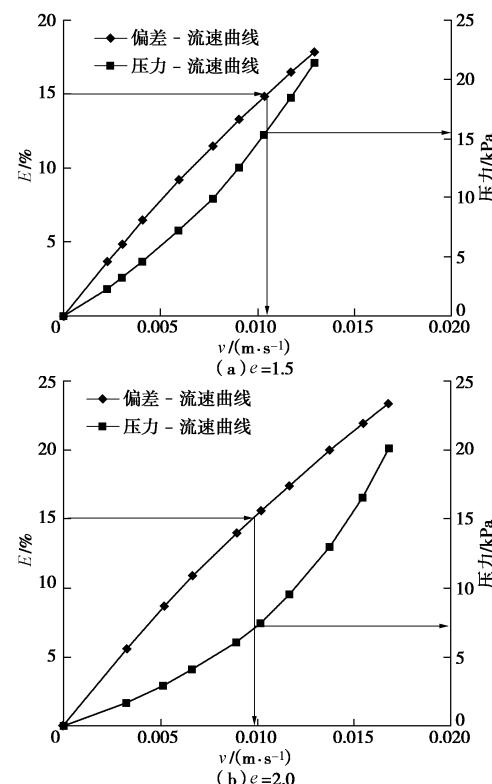
孔隙比	1.5	2.0	2.5	3.0
$k_a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.55×10^{-6}	1.32×10^{-6}	3.10×10^{-5}	6.38×10^{-5}
B_a / m^{-1}	4.65×10^7	1.41×10^7	8.83×10^6	5.41×10^6

由表 3 可见, 渗透系数随孔隙比增加逐渐增大, 渗透系数的大小与现有的文献结果比较吻合^[1, 18]; 非达西系数 B_a 随孔隙比增加逐渐减小。需要说明的是, 非达西系数 B_a 随孔隙比增加逐渐减小, 并不意味着随孔隙比增加惯性力的影响减小, 相反的是随孔隙比增加惯性力的影响在增加。主要原因是随孔隙比增加, 垃圾土体的渗透性提高, 气压梯度减小, 惯性力的影响比例提高, 惯性力或者非线性作用的影响更加明显。

选用偏差百分数 E

$$E = B_a \rho_a v^2 / \left(\frac{\mu}{K} v + B_a \rho_a v^2 \right) \quad . \quad (5)$$

可以计算出各组试样的偏差百分数 E 随流速 v 的变化关系曲线, 如图 3。同时, 将各流速对应的气体压力整理绘制在图 3。



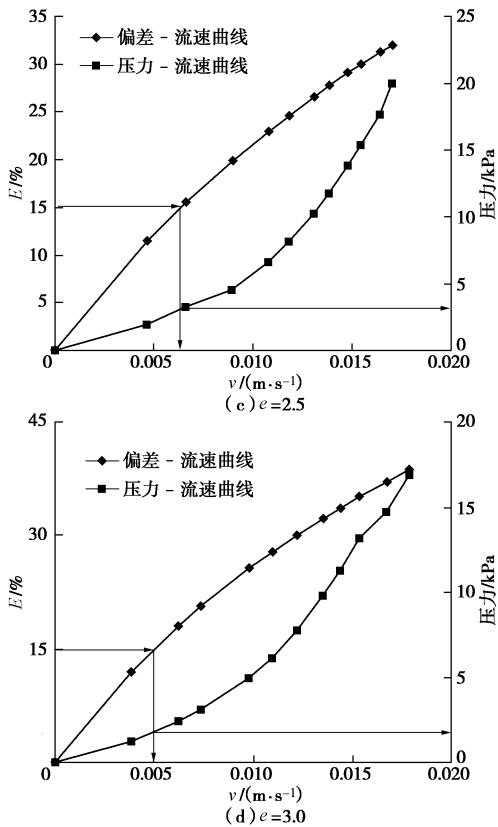


图3 不同孔隙比下偏差E, 压力和v的关系曲线

Fig. 3 Relationship among difference E , air pressure and velocity under different void ratios

由图3可见, 随着流速的增大, E 增大, 表明非达西项引起的气压损失增大。类似的工程实际认为, 未考虑非达西渗流的误差达到14.46%时, 就不能忽略非达西项影响^[19]。因此本文以 $E=15\%$ 作为分界, 当 $E<15\%$, 可用达西定律描述气体流动, 当 $E>15\%$, 就不能忽视非达西项引起的气压损失。对于 $e=1.5$ 的试样, 当流速大于0.011 m/s, 渗透气体压力16.34 kPa; $e=2.0$ 的试样, 当流速大于0.0098 m/s, 渗透气体压力7.77 kPa; $e=2.5$ 的试样, 当流速大于0.0065 m/s, 渗透气体压力4.14 kPa; $e=3.0$ 的试样, 当流速大于0.005 m/s, 渗透气体压力超过1.75 kPa后, E 会超过15%。可见, 孔隙比越大的试样达到同样的非达西渗流偏差时的渗透流速越低, 渗透气体的压力也越低; 把 $E=15\%$ 的流速和渗透气体压力分别称为分界点流速和分界点气体压力。在中国的垃圾填埋场中, 孔隙比较大^[19-20], 比较密实的情况孔隙比接近2.0, 疏松情况下会大于4.0; 在孔隙比大, 填埋疏松的垃圾填埋场, 在较低的气体压力下非达西项的影响会非常明显, 在进行抽气井设计和抽气量的计算时就需要考虑非达西渗流的影响。

饱和度为20.0%, 孔隙比为2.0以及有机物含量分别为30.00%, 60.00%和70.00%试样的气体平均流速和气压梯度的试验曲线(有机物含量为40.00%时的

平均流速和气压梯度试验曲线已经列于图2)如图4所示。

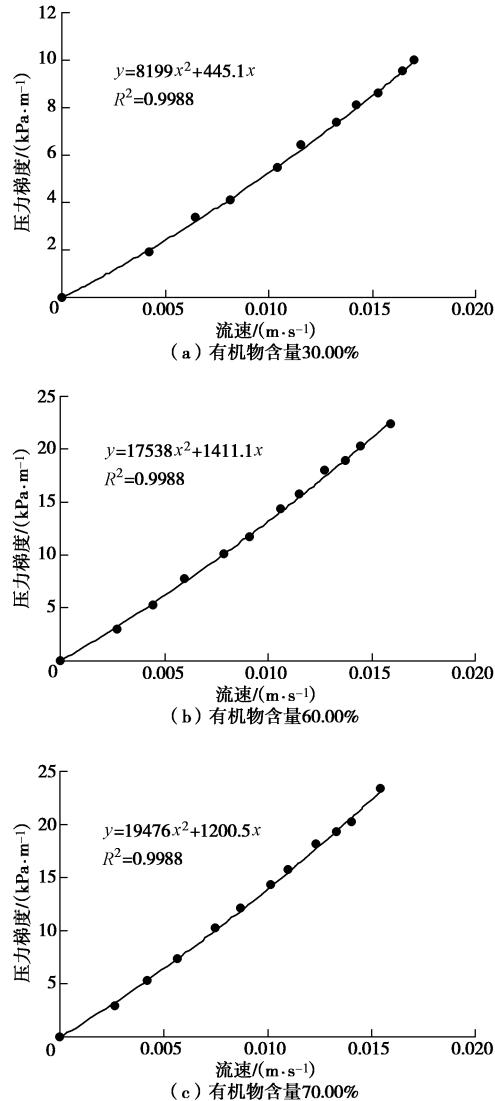


图4 不同有机物含量时的流速和气压梯度关系曲线

Fig. 4 Relationship between velocity and air pressure under different organic contents

由图4可以整理得到渗透系数和非达西系数随有机物含量变化的规律, 见表4。

表4 渗透系数 k_a 和非达西系数 B_a 随有机物含量变化

Table 4 Variation of permeabilities and non-Darcy coefficients with organic contents

有机物含量/%	30.00	60.00	70.00
$k_a/(m \cdot s^{-1})$	2.65×10^{-5}	1.03×10^{-5}	9.73×10^{-6}
B_a/m^{-1}	7.01×10^6	1.50×10^7	1.67×10^7

由图4和表4可以看出, 孔隙比和饱和度保持不变时, 随着垃圾土样中有机物含量的增多, 其气体渗透系数随之减小。此外, 非达西系数 B_a 随有机物含量的增加而增大。

不同有机物含量试验得到的偏差百分数 E , 气体

压力随流速 v 的变化关系曲线, 如图 5。

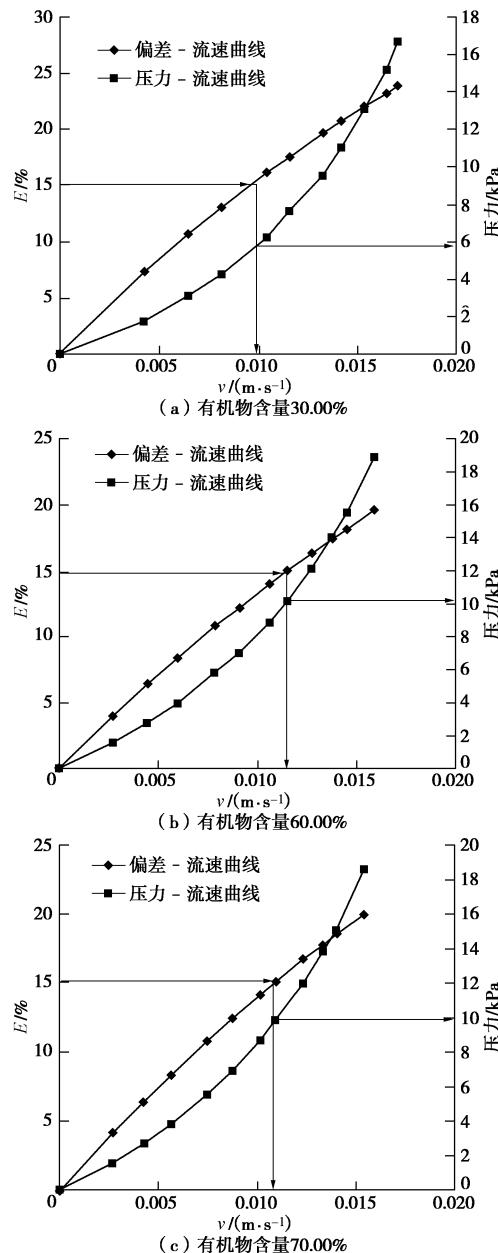


图 5 不同有机物含量下 E 、压力和 v 的关系曲线

Fig. 5 Relationship among difference E , air pressure and velocity under different organic contents

由图 5 可看到, 随着流速的增大, E 越大, 非达西项引起的气压损失越大。对于有机物含量 30.00% 的试样, 当流速大于 0.0095 m/s, E 超过 15%; 有机物含量 60.00% 的试样, 当流速大于 0.0114 m/s, E 超过 15%; 有机物含量 70.00% 的试样, 当流速大于 0.0116 m/s, E 超过 15%。试样的有机物含量越高, 其渗透系数越小, 使得非达西项引起的气压损失超过 15% 时的分界点流速越大。分界点气体压力随有机物含量变化见表 5。

表 5 表明, 分界点气体压力随有机物含量的增加而增大。在相同孔隙比和饱和度下, 有机物含量增加

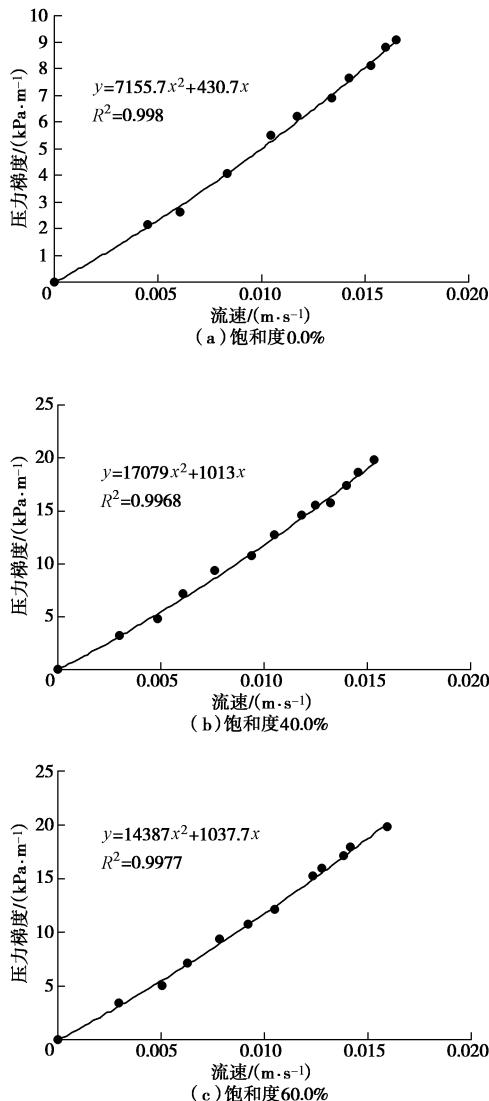
对渗透系数的影响是因为部分有机物成分(纸和塑料等)的颗粒呈现片状分布, 同样的孔隙比下, 单位体积内有效连通的渗透路径减少, 垃圾体的气体渗透特性降低, 所以渗透系数减小, 非达西系数增大, 分界点气体压力增大。

表 5 分界点气体压力随有机物含量变化

Table 5 Variation of air pressures at demarcation point with organic contents

有机物含量/%	30.00	60.00	70.00
压力/kPa	5.66	10.97	11.65

图 6 为孔隙为 2.0、有机物含量 40.00% 的试样在饱和度分别为 0.0%, 40.0%, 60.0%, 80.0% 和 90.0% 时气体平均流速和气压梯度的试验曲线(饱和度为 20.0% 时的流速和气压梯度关系曲线见图 2)。饱和度 0.0%, 40.0%, 60.0% 垃圾土样的试验结果只用 Forchheimer 公式进行拟合, 饱和度 80.0% 和 90.0% 垃圾土样的试验结果同时用 Forchheimer 和达西公式进行拟合。



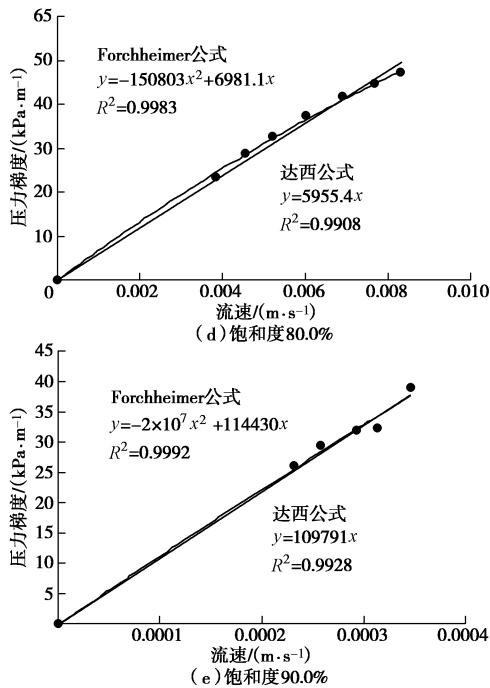


图 6 不同饱和度时的流速和气压梯度关系曲线

Fig. 6 Relationship between pressure gradient and permeability velocity under different saturated degrees

由图 6 可以看到, 随着饱和度增加, 垃圾土样的气体渗透系数随之减小, 非达西系数 B_a 增大。在试验压力范围内, 对于饱和度达到 80% 和 90% 的试样, 其试验曲线已经近似直线, 更适合用直线进行拟合, 非达西项的影响很小; 试验结果整理时只采用达西公式计算这两个试样的渗透系数。

由图 6 可以整理得到渗透系数和非达西系数随有饱和度变化的规律, 见表 6。

表 6 渗透系数 k_a 和非达西系数 B_a 随饱和度变化

Table 6 Variation of permeabilities and non-Darcy coefficients with saturated degrees

饱和度 /%	0.0	40.00	60.00	80.00	90.00
k_a /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.74×10^{-5}	1.17×10^{-5}	1.14×10^{-5}	1.99×10^{-6}	1.08×10^{-7}
B_a / m^{-1}	5.94×10^6	1.42×10^7	1.19×10^7	—	—

由图 6 和表 6 可以看出, 有机物含量和孔隙比保持不变时, 随着垃圾土样饱和度的增加, 其气体渗透系数减小, 非达西系数 B_a 增大。饱和度达到 80% 和 90% 的试样, 气体的非达西渗透现象基本消失。

不同饱和度试验得到的偏差百分数 E , 气体压力随流速 v 的变化关系曲线, 如图 7。

由图 7 可看到, 随着饱和度增加, 分界点的流速减小。对于饱和度 0.0% 的试样, 当流速大于 0.0106 m/s, E 超过 15%; 饱和度 40.0% 的试样, 当流速大于 0.0108 m/s, E 超过 15%; 饱和度 60.0% 的试样, 当流速大于 0.0116 m/s, E 超过 15%。试样的饱和度越高,

其渗透系数越小, 使得非达西项引起的气压损失超过 15% 时的分界点流速越大。分界点气体压力随饱和度变化见表 7。

表 7 分界点气体压力随饱和度变化

Table 7 Variation of air pressure at demarcation point with saturated degrees

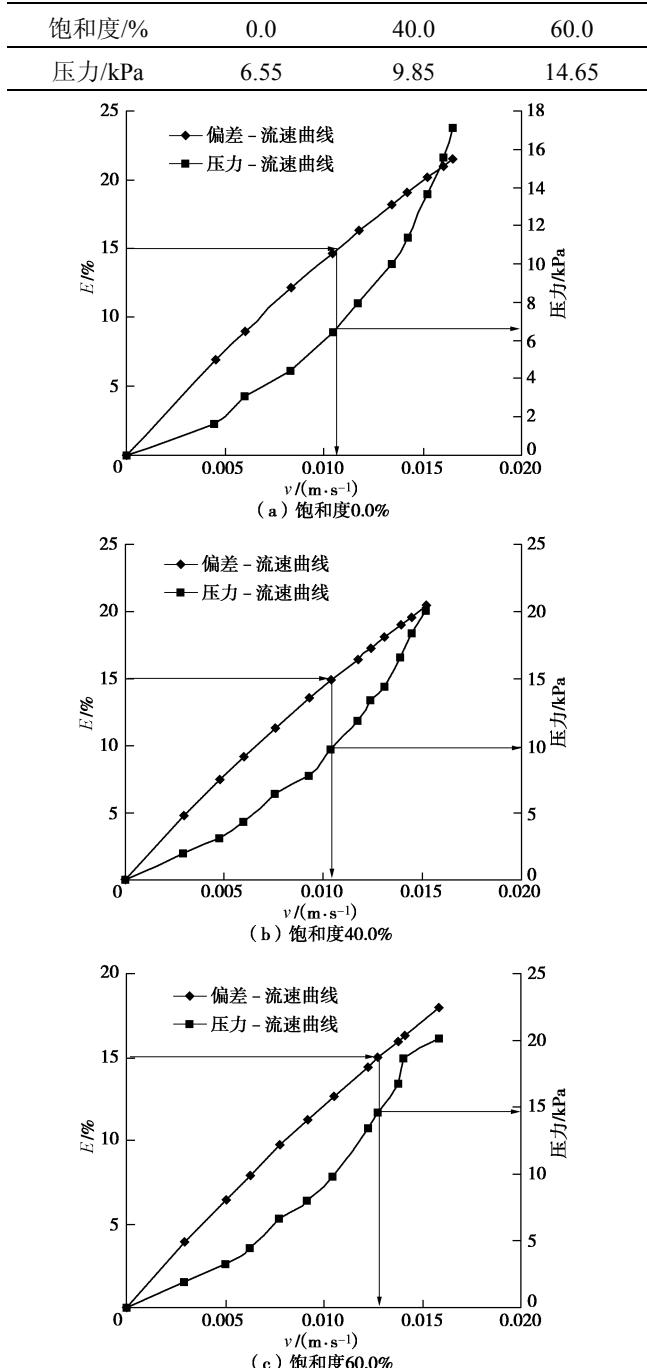
图 7 不同饱和度下 E , 压力和流速的试验曲线Fig. 7 Relationship among difference E , air pressure and velocity under different saturated degrees

表 7 表明, 分界点气体压力随饱和度的增加而增大。在相同孔隙比和有机物含量下, 饱和度增加对渗透系数的影响是因为部分孔隙被水占满, 同样的孔隙

比下，饱和度越高，气体可以渗透的路径减少，垃圾体的气体渗透特性降低，渗透系数减小，分界点气体压力增大。

由以上试验分析可知，影响渗透系数、非达西系数、分界点气体压力的敏感性参数首先是垃圾土的孔隙比，其次是饱和度，有机物含量的影响相对比较弱。而饱和度反映的是垃圾土体中被水占有的孔隙体积的比例，气体通过垃圾土体渗透的途径是其中未被水占有的孔隙，称之为有效孔隙。换言之，有效孔隙才是影响垃圾土体渗透特性的主要因素。

$$e_e = (1 - S_r) \times e, \quad (6)$$

式中， e_e 是有效孔隙比， S_r 是饱和度， e 是垃圾土体的孔隙比。

将上述 3 组试验得到的渗透系数、分界点气体压力与有效孔隙比 e_e 之间的关系整理成图 8、9。

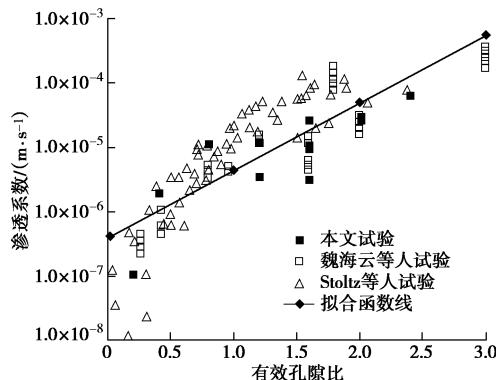


图 8 渗透系数与有效孔隙比关系

Fig. 8 Relationship between permeability coefficient and effective void ratio

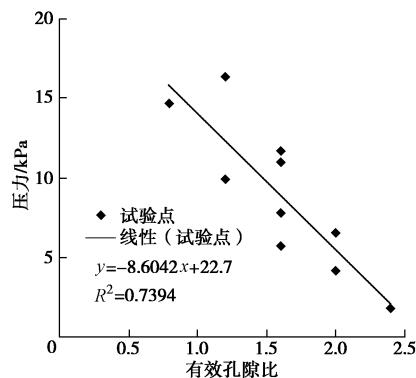


图 9 分界点气体压力与有孔隙比关系

Fig. 9 Relationship between air pressure at demarcation point and effective void ratio

在图 8 中，将魏海云等^[1]和 Stoltz 等^[7]的试验结果同时进行整理汇总。由图 8 可见，本文试验结果与相关文献的试验结果有较好的一致性，且渗透系数与有效孔隙比之间 ($e_e=0.03\sim3.0$) 可以近似用指数关系来拟合，如式 (7)。分界点气体压力与有效孔隙比

($e_e=0.8\sim2.4$) 可以近似用直线关系来表示，如式(8)。

$$k_a = 4 \times 10^{-7} \exp(2.42e_e), \quad (7)$$

$$p_e = 22.7 - 8.6e_e. \quad (8)$$

在实际工程应用中，可以根据气体压力和有效孔隙比判别非达西渗流的影响程度；气体压力高出式(8)计算结果时，需要考虑非达西渗流对工程设计的影响。

非达西系数与有效孔隙比的关系见图 10。

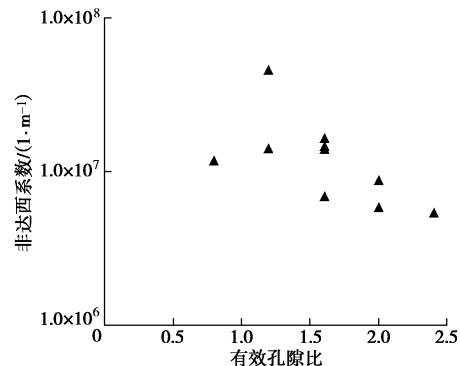


图 10 非达西系数与有效孔隙比关系

Fig. 10 Relationship between non-Darcy coefficient and effective void ratio

非达西系数在试验的有效孔隙比范围内变化幅度很小，可以选取平均值 10^7 m^{-1} 。

3 结 论

通过研制的非饱和垃圾土渗透仪，对不同孔隙比、不同有机物含量、不同饱和度下垃圾土的渗透试验，发现渗透系数随渗透压力有非线性特性；随着气压梯度的增加，试样中的气体渗流速度增幅减小，可以用 Forchheimer 非达西渗流方程较好地拟合。根据对比分析，得到以下结论：

(1) 随孔隙比增加渗透系数逐渐增大，非达西系数 B_a 逐渐减小；垃圾土体的渗透性提高，气压梯度减小，惯性力的影响比例提高；达到同样的非达西渗流偏差时的渗透流速降低，分界点的气体压力减小。

(2) 有机物含量越高，垃圾土的渗透系数越小，分界点气体压力越大；有机物成分的颗粒呈现片状分布，有机物含量增加使单位体积内有效连通的渗透路径减少，垃圾体的气体渗透特性降低，非达西系数增大。

(3) 饱和度越高，垃圾土的渗透系数越小，分界点气体压力越大；饱和度增加，部分孔隙被水占满，气体可以渗透的路径减少，垃圾体的气体渗透特性降低，分界点气体压力增大。

(4) 未被水占据的孔隙才是气体渗透的有效孔隙，在试验的有效孔隙范围内，渗透系数与有效孔隙近似呈现指数关系、分界点气体压力与有效孔隙呈现

近似直线关系、非达西系数变化不大。

致 谢：诚挚感谢魏海云博士提供气体渗透试验数据。

参考文献：

- [1] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 城市生活垃圾的气体渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1408 – 1415. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Experimental study on gas permeability of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1408 – 1415. (in Chinese))
- [2] 刘晓东, 施建勇. 基于土水特征曲线预测城市固体废弃物(MSW)非饱和渗透系数研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 855 – 862. (LIU Xiao-dong, SHI Jian-yong. Unsaturated conductivity of MSW based on soil-water characteristic curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 855 – 862. (in Chinese))
- [3] JAIN P, POWELL J, TOWNSEND T G, et al. Air permeability of waste in a municipal solid waste landfill[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(11): 1565 – 1573.
- [4] KALUARACHCHI J. Analytical solution to two-dimensional axisymmetric gas flow with Klinkenberg effect[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1995, **121**(5): 417 – 420.
- [5] YESILLER N, HANSON J L, LIU W L. Heat generation in municipal solid waste landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(11): 1330 – 1344.
- [6] MARTIN J W, STARK T D, THALHAMER T, et al. Detection of aluminum waste reactions and waste fires[J]. Journal of hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2013, **17**(3): 164 – 174.
- [7] STOLTZ G, GOURC J P, OXARANGO L. Liquid and gas permeabilities of unsaturated municipal solid waste under compression[J]. Journal of contaminant Hydrology, 2010, **118**(1): 27 – 42.
- [8] LIU X, SHI J, QIAN X, et al. Biodegradation behavior of municipal solid waste with liquid aspects: experiment and verification[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2013, **139**(12): 1488 – 1496.
- [9] LI Y C, ZHENG J, CHEN Y M, et al. One-dimensional transient analytical solution for gas pressure in municipal solid waste landfills[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2013, **139**(12): 1441 – 1445.
- [10] YU L, BATLLE F, CARRERA J, et al. Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(3): 1404 – 1416.
- [11] HETTISRACHCHI C H, MEEGODA J N, HETTIARATCHI J P A. Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement[J]. Waste Management, 2009, **29**(2): 1018 – 1025.
- [12] ARIGALA S G, TSOTSIDIS T T, WEBSTER I A, et al. Gas Generation, transport, and extraction in landfill[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1995, **121**(1): 33 – 44.
- [13] REDDY K R, KULKARNI H S, KHIRE M V. Two-phase modeling of leachate recirculation using vertical wells in bioreactor landfills[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2013, **17**(4): 272 – 284.
- [14] TEK M R. Development of a generalized Darcy equation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1957, **9**(6): 45 – 47.
- [15] GEERTSMA J. Estimating the coefficient of inertial resistance in fluid flow through porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974, **14**(5): 445 – 450.
- [16] CVETKOVIĆ V D. A continuum approach to high velocity flow in a porous medium[J]. Transport in Porous Media, 1986, **1**(1): 63 – 97.
- [17] FIROOZABADI A, KATZ D L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1979, **31**(2): 211 – 216.
- [18] KALLEL A, TANAKA N, MATSUTO T. Gas permeability and tortuosity for packed layers of processed municipal solid wastes and incinerator residue[J]. Waste Management, 2004, **22**(3): 186 – 194.
- [19] 宋兆杰, 李相方, 李治平, 等. 考虑非达西渗流的底水锥进临界产量计算模型[J]. 石油学报, 2012, **33**(1): 106 – 111. (SONG Zhao-jie, LI Xiang-fang, LI Zhi-ping, et al. A model for calculation critical production rates of water coning with consideration of non-Darcy flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, **33**(1): 106 – 111. (in Chinese))
- [20] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 35 – 39. (ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-min. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 35 – 39. (in Chinese))
- [21] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 2 版. 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]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))