

文章编号: 1000-7598-(2006) 05-0740-05

固化污泥的工程性质及微观结构特征

曹永华¹, 闫澍旺¹, 赵乐军²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津市市政工程研究院, 天津 300051)

摘 要: 通过室内试验, 向污泥中添加不同比例的石灰、土和粉煤灰, 研究了不同配合比下固化污泥的工程性质。研究发现, 采用适当的配合比情况下, 固化污泥的强度可以满足填埋的要求, 渗透性也有很大提高; 采用冷冻干燥技术和扫描电镜研究了固化污泥的微观结构, 发现固化后污泥的密实性有较大的提高, 这是其强度提高的一个重要原因; 应用分形几何的理论, 对由扫描电镜获取的固化污泥微观结构图像进行了定量分析, 结果表明, 分形维数和强度之间有较强的正相关性。

关 键 词: 污泥固化; 扫描电镜; 污泥; 分形维数

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge

CAO Yong-hua¹, YAN Shu-wang¹, ZHAO Le-jun²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: Landfill is a prevalent method for wastewater sludge disposal. Laboratory tests were conducted to study engineering property of sludge solidified by fly ash, lime and silty clay of varied ratios. The experiment results revealed that the strength of solidified sludge was as high as it is required for landfill; and permeability was improved significantly. Using freeze-drying technology and scanning electron microscope (SEM), the microstructure of solidified sludge is studied. It is found that the compactness of sludge was improved after solidification, which is an important reason for strength improvement. Applying theory of fractal geometry, quantitative analysis is carried out on the SEM images. The analysis reveals a considerable positive correlation between fractal dimension and strength.

Key words: sludge solidification; SEM; sludge; fractal dimension

1 引 言

污泥是水处理过程中形成的以有机物为主要成分的泥状物质, 容易腐化发臭、颗粒较细、密度较小、含水率高且不易脱水, 呈胶状结构的亲水性物质^[1]。污泥中有机质、N、P 含量很高, 重金属含量也很高, 同时还含有大量的病原微生物。若处理不当, 会随雨水等进入水体, 引起二次污染, 因而污泥处理技术已成为重要的环保课题之一。污泥的处理方式主要有投海、焚烧和填埋等。投海由于对海洋环境的危害, 基本上已经被取消。焚烧则由于较高的处理成本, 其应用也受到了限制。相对于其他处理方式, 卫生填埋具有更大的应用前景。当前污泥填埋的主要方式是和城市生活垃圾混合填埋, 但由于垃圾和污泥分属环卫和市政两个不同的行政

部门管理, 在管理体制上还需进一步理顺, 在技术方面, 由于脱水后污泥含水量一般在 200 % 以上, 这一含水率通常不能满足填埋场的要求, 因此, 污泥需要再处理, 才能送生活垃圾填埋场填埋。当污水处理厂距离垃圾填埋场比较远, 或者垃圾填埋场不愿意接受污泥时, 污泥必须单独填埋, 单独填埋使得填埋场更加专业化, 而且污泥单独填埋也存在着一些技术难题, 主要是污泥土力学性质(一般用抗剪强度表示)很差, 不适于填埋^[2~4]。污泥的渗透性非常低, 很难通过固结或晾晒降低其含水量来提高强度。因此, 必须寻求一种经济有效的途径, 使得污泥强度提高, 从而满足单独填埋的要求, 这一过程称之为污泥的固化。Chu 等^[5] 利用铜渣和水泥对污泥进行了固化, 但其固化材料成本很高, 不具有通用性; Lim 等^[6] 利用石灰、粉煤灰和黄土进行

了固化,但对固化材料的性质和强度增长机理等方面缺乏必要的陈述。国内关于污泥处理方面的文章以综述为主^[7],系统性研究鲜有报道。天津大学岩土工程研究所对污泥固化进行了大量的试验研究,采用石灰、粉质黏土、粉煤灰等常见的材料固化污泥,对固化污泥的工程特性和微观结构进行了比较系统的研究,本文将对其部分成果进行介绍。

2 固化试验

2.1 试验材料及仪器

拟固化的污泥来自天津市某污水处理厂,呈深黑色,伴有浓烈的恶臭,有机物组分占总固体含量的 36%。固化材料有粉质黏土(简称土)、石灰、粉煤灰。土为天津地区粉质黏土,塑限为 21.5%,塑性指数 13.9;粉煤灰来自天津市某电厂。各材料含水量见表 1。

表1 材料含水量

Table 1 Moisture content of material

材料	污泥	土	石灰	粉煤灰
含水量/%	245.3	17.8	37.5	40.5

渗透系数测定使用南 55 渗透仪,方法为变水头法。采用微型十字板(图 1)测量污泥十字板强度;以无侧限抗压强度触探仪(图 2)测量无侧限抗压强度。

2.2 试验方案

固化试验方案分为两组:石灰+土+污泥、石灰+粉煤灰+污泥。将两组方案按不同的质量百分含量和污泥混合,并充分搅拌。固化方案见表 2。作为比较,对纯污泥进行了相应的试验,为方便,将纯污泥称为 0 号试样。



图 1 微型十字板

Fig.1 Torsional vane shear tester

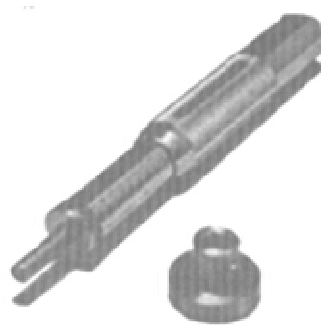


图 2 无侧限抗压强度触探仪

Fig.2 Pocket penetrometer

表 2 固化试验方案

Table 2 Solidification scheme

试样号	石灰 /%	粉煤灰 /%	污泥 /%	试样号	石灰 /%	土 /%	污泥 /%
A1	10	30	60	L1	10	20	70
A2	10	40	50	L2	10	30	60
A3	20	20	60	L3	10	40	50
A4	20	30	50	L4	20	20	60
				L5	20	30	50

2.3 试验结果及分析

各试样的渗透系数见表 3。

表 3 渗透系数 K_{10}

Table 3 Permeability coefficient

参数	试样号									
	0	A1	A2	A3	A4	L1	L2	L3	L4	L5
$K_{10}/10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.7	1.6	1.9	2.8	2.5	1.6	1.2	1.5	2.2	2.3

纯污泥的渗透系数很小,渗透系数随着固化材料掺量的增加呈现增长的趋势,且石灰+粉煤灰+污泥固化方案试样的渗透系数总体要高于石灰+土+污泥固化方案试样,这说明了就提高渗透性而言,粉煤灰的作用比土更显著。

固化污泥的强度是随着时间的推移和含水量的降低而得到提高的。将试样作自然风干养护,以观测其强度和含水量随时间的变化规律。

测量强度的同时取少量试样测其含水量。在 70 °C 恒温环境中连续烘烤 24 h 至干燥(温度不宜过高,以防止污泥中有机物的损失),根据下式推算出含水量:

$$w = \left(\frac{m}{m_s} - 1 \right) \times 100 \% \quad (1)$$

式中 w 为含水量; m 为湿土重; m_s 为干土重。

为了研究试样强度的发展过程,分阶段进行了 5 次测量,分别测量了 5, 10, 15, 20, 25 d 的强度和相应的含水量。测量结果如图 3 和图 4 所示。

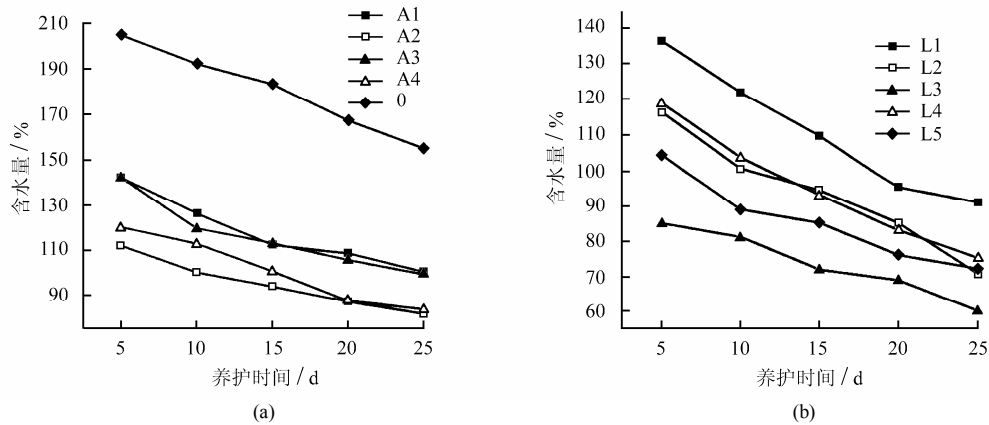


图 3 含水量随时间变化图

Fig.3 Relationship between moisture content and age

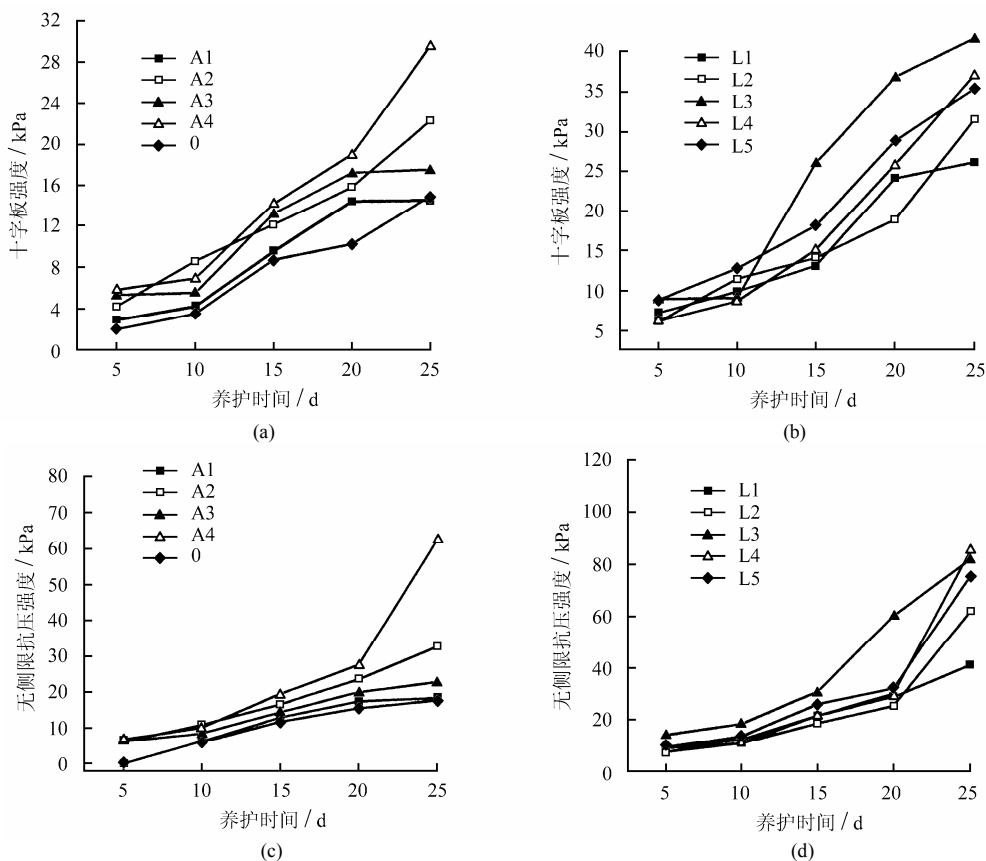


图 4 强度随时间变化图

Fig.4 Relationship between strength and age

从图 3 可知,随着时间的推移含水量逐渐降低,纯污泥的含水量一直都是最高的,这是其强度比较低的原因之一;从图 4 来看,随着时间的推移强度稳步增长。20 d 后, L3 强度达到填埋要求,即无侧限抗压强度 ≥ 50 kPa^[8]; 25 d 后, A4, L2, L4, L5 也达到。强度的增长一方面源于含水量的减小,使土颗粒之间的结合水膜变薄;另一方面是因为石灰等固化材料的掺入。开始强度的增长比较缓慢,后期强度增长较快。固化材料掺量较大时,固化污泥强度发展更快。前期所有试样的强度比较接近,后

期由于强度增速的差别,强度的差别变得明显,较大固化材料掺量的试样具有较高的强度。L3 强度最高,这与预期的 L5 强度最高相悖,可能与原污泥含水量不均匀性有关,图 3 也表明了 L5 试样的含水量高于 L3。

3 微观结构研究

3.1 扫描电镜试验

对微观结构的研究主要是应用扫描电镜和分形几何的理论^[9]进行的。

试样制作包括干燥、镀金等程序。扫描电镜试验要求干燥土样,如果采用常规的风干或者烘干法,土体必然收缩,从而改变了土体原有的结构。为此,本试验采用冷冻干燥法干燥土样,使用仪器为ALPHA1-4 冷冻干燥机。在 Philips XL-30 型扫描电镜(SEM)上进行。根据固化方案的特点,选取 A1, A2, A4, L2, L3, L5 为研究对象,以考察固化材料含量的变化对微观结构的影响。为了对比固化前后微观结构的变化,对纯污泥也进行了扫描电镜的研究。对龄期为 5 d(固化初期)和 25 d(固化末期)的试样进行了研究。由扫描电镜得到的典型形貌如图 5~8 所示,放大倍数为 800。

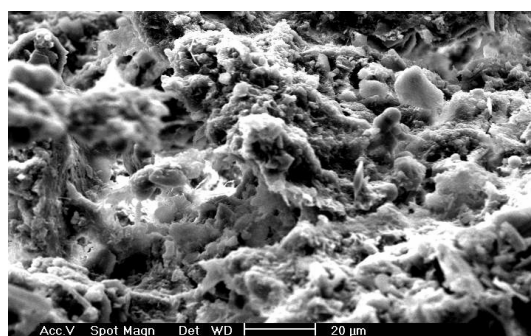


图 5 龄期为 5 d 的纯污泥 SEM 图像
Fig.5 SEM image of sludge at age of 5 days

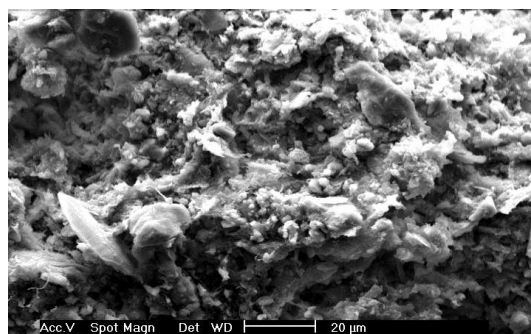


图 6 龄期为 25 d 的纯污泥 SEM 图像
Fig.6 SEM image of sludge at age of 25 days

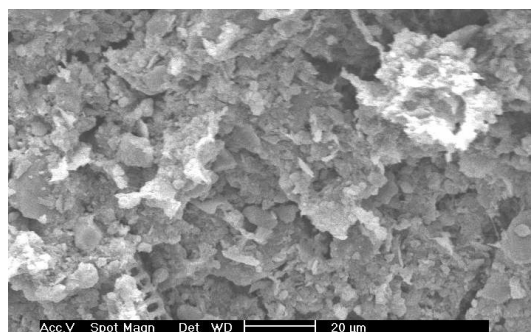


图 7 龄期为 5 d 的 L3 试样 SEM 图像
Fig.7 SEM image of L3 at age of 5 days

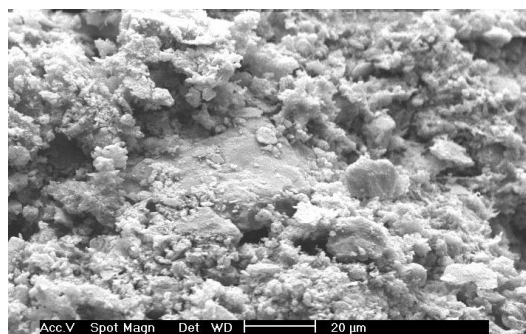


图 8 龄期为 25 d 的 L3 试样 SEM 图像
Fig.8 SEM image of L3 at age of 25 days

从 SEM 图像(白色代表土体,黑色代表孔隙)可以看到,固化前污泥,即使龄期到 25 d 时,土体中的孔隙含量还是很高的,这就决定了其强度很难满足填埋要求,而固化后污泥的密实性得到了提高。对于同一试样,随着时间的推移,其密实性也逐渐得到提高。密实性的提高是其强度得以提高的一个重要原因。

3.2 微观结构的定量分析

土体实际上是具有统计意义上的自相似的分形结构特征,因此可以采用自相似的方法来定量的描述复杂土体的分形特征,从本质上揭示土体的力学行为^[10~13]。

本文将 SEM 图像进行二值化、去噪等处理,计算其平面分维,研究其与固化污泥强度之间的关系。典型的二值化图像见图 9。

分形维数采用计盒维数,计算结果如表 4。

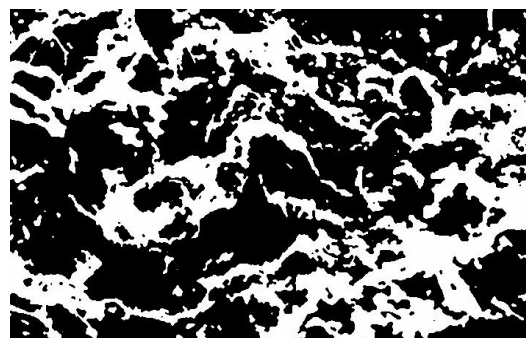


图 9 龄期为 5 d 的纯污泥二值化图像
Fig.9 Binary image of sludge at age of 5 days

表 4 试样不同龄期的分形维数
Table 4 Samples' fractal dimensions at varied ages

龄期/d	0	A1	A2	A4	L2	L3	L5
5	1.687	1.712	1.729	1.711	1.734	1.758	1.745
25	1.726	1.729	1.743	1.770	1.761	1.771	1.778

分形维数随着养护时间的增长而增长,随着固化材料掺量的增长而增长,与密实度的变化趋势一

致,说明分形维数的大小可以反映试样密实度的高低。既然如此,分形维数应该和试样强度有较强的相关性,图10表示出了这种相关性。拟合方程中 x 为分形维数, y 为强度指标, R^2 为回归系数。

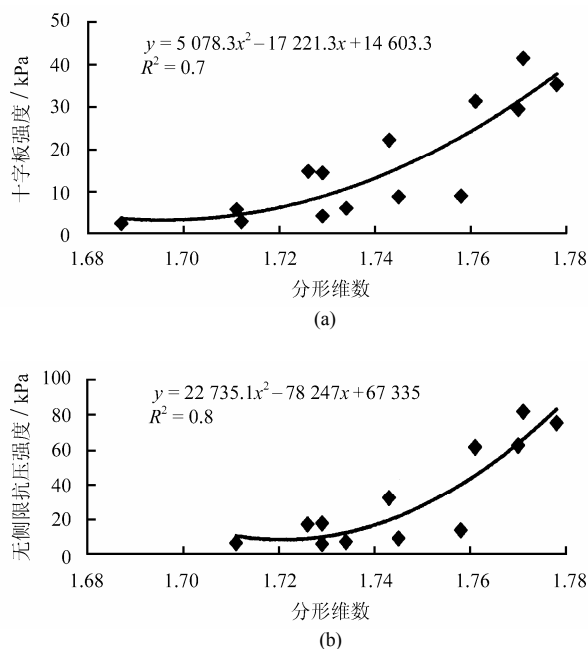


图10 分形维数与强度关系图

Fig.10 Relationship between fractal dimension and strength

4 结 论

采用室内试验方法对污水处理厂污泥进行了固化研究。结果表明,石灰、粉煤灰和土对污泥的固化作用比较明显,采用适当的配比,进一步干化后,强度完全可以满足填埋的要求。

微观结构的研究表明,固化材料的掺入提高了污泥的密实性,这是强度得以提高的重要原因。分形维数和试样强度有较强的正相关性,因此,分形维数可以在一定程度上反映试样的强度。

参 考 文 献

- [1] 杨国清. 固体废物处理工程[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Koeing A, Kay J N, Wan I M. Physical properties of dewatered wastewater sludge for landfilling[J]. **Water Science and Technology**, 1996, 34(3): 533—540.
- [3] Knut Wichmann, Andreas Riehl. Mechanical properties of waterwork sludges-shear strength [J]. **Water Science and Technology**, 1997, 36(11): 43—50.
- [4] Stone R J, Ekwue E I, Clarke R O. Engineering properties of sewage sludge in Trinidad[J]. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1998, 70(2): 221—230.
- [5] Sungjin Lim, Wangi Jeonb, Jaebok Leec, et al. Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess[J]. **Water Research**, 2002, 36(17): 4 177—4 184.
- [6] Chu J, Lim T T, Goi M H. Potential use of stabilized sewage sludge for land reclamation[J]. **Journal of the Institution of Engineers, Singapore**, 2002, 42(6): 36—42.
- [7] 戚海雁, 何品晶, 章骅. 给水厂排泥水及污泥的处置[J]. **上海环境科学**, 2002, 21(7): 442—443.
QI Hai-yan, HE Ping-jing, ZHANG Hua. Disposal of residual and sludge in water supply plant[J]. **Shanghai Environment Sciences**, 2002, 21(7): 442—443.
- [8] 姚刚. 德国的污泥利用和处置(II)[J]. **城市环境与城市生态**, 2000, 13(2): 24—26.
YAO Gang. Sewage sludge treatment, use and disposal in Germany(II)[J]. **Urban Environment & Urban Ecology**, 2000, 13(2): 24—26.
- [9] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman and Company, 1983.
- [10] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 分形理论在黄土湿陷性的微结构效应研究中的应用[J]. **非线性动力学学报**, 1996, 3(4): 360—366.
HU Rui-lin, LI Xiang-quan, GUAN Guo-lin, et al. Application of fractal theory in study of microstructure effect on loess collapsibility[J]. **Journal of Nonlinear Dynamics in Science and Technology**, 1996, 3(4):360—366.
- [11] Moore C A, Donaldson C F. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(1): 105—116.
- [12] 董平, 徐永福. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. **岩土力学**, 2002, 23(4): 400—405.
DONG Ping, XU Yong-fu. Fractal models for the soil-water characteristics of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 400—405.
- [13] 谢学斌, 潘长良. 排土场散体岩石粒度分布与剪切强度的分形特征[J]. **岩土力学**, 2004, 25(2): 287—291.
XIE Xue-bin, PAN Chang-liang. Fractal characteristics of size distribution and shear strength of bulky rock material in waste pile of mines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 287—291.