

# 污泥固化/稳定化技术现场试验研究

朱伟<sup>1</sup>, 吉顺健<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>, 郑修军<sup>3</sup>

(1.河海大学环境科学与工程学院; 2.河海大学科学研究院;  
3.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** 固化/稳定化技术能够解决污泥处理处置中的难题,是一种高效、经济的污泥处理处置技术。但是目前对于固化/稳定化处理设备以及运行工艺方面缺少研究,对现场处理后的效果也缺少相应的评价。结合苏州甬直污水处理厂污泥固化/稳定化处理现场中试试验的需要,研制了一套污泥固化/稳定化处理设备,采用自主研发的固化/稳定化材料开展了污泥固化/稳定化处理的现场试验。现场研究的结果表明,所研制的设备及工艺能够满足污泥固化/稳定化处理的要求,处理后的污泥能够进入填埋场进行安全填埋。

**关键词** 污泥; 固化/稳定化; 现场试验

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1003-6504(2009)05-0131-04

## Field Experiment on Solidification/Stabilization of Sludge

ZHU Wei<sup>1</sup>, JI Shun-jian<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, ZHENG Xiu-jun<sup>3</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering; 2.Research Academy;  
3.School of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract**: Solidification/stabilization(S/S) as an efficient and cost effective treatment process can be applied to the disposal of sludge. However there are few studies on equipment and techniques of S/S as well as effect of field disposal of sludge. According to pilot scale experiment of S/S for sludge in Luzhi Wastewater Treatment Plant, Suzhou, a S/S equipment for disposing sludge was developed and field experiment was done with self-manufactured materials for S/S. Results indicated that the equipment and techniques can satisfy the requirement of S/S and the treated sludge can be transported to the landfill site for landfilling.

**Key words**: sludge; solidification/stabilization; field experiment

由于污水管网收集率提高和污水厂污染物排放标准越来越严格,我国污泥产量呈不断增加的趋势,目前我国每年排放干污泥约为 550 万~600 万吨<sup>[1]</sup>。污泥处理、处置的主要方法有 填埋、堆肥、焚烧等,其中填埋处置时污泥含水率高、力学性质差,会引起填埋场滑坡等工程灾害;污泥中含有重金属及病原菌是污泥堆肥时不可小视的问题;污泥焚烧设备及运行费用昂贵,在我国目前的经济水平下能够投资运行的污水厂并不多见。因此,寻找污泥处理的新技术是十分迫切的。固化/稳定化方法是一种廉价、可行的污泥处理技术,可以降低污泥流动性、提高污泥强度、稳定污泥中重金属等污染物,它不仅可作为污泥卫生填埋、最终处置及利用的预处理方法<sup>[2-3]</sup>,而且可以将污泥转为土材料进行资源化再利用<sup>[4-6]</sup>。技术和经济性两方面都表明污泥固化/稳定化技术是一种适合我国国情的污

泥处理方法<sup>[5]</sup>。

目前对污泥固化/稳定化技术的研究侧重于对固化/稳定化材料及固化/稳定化污泥含水率、强度、重金属浸出毒性等指标进行研究<sup>[7-9]</sup>,但这些研究都局限于实验室,中试规模上的应用研究尚未见报道。由于现场应用和室内试验间存在“尺寸效应”,同时室内试验难以对处理设备及工艺开展研究,因此需要开展现场研究,解决实际工程中的设备、工艺问题,同时对现场研究成果进行检测。

针对室内研究中存在的问题和不足,本项目研制一套污泥固化/稳定化处理设备,在甬直污水处理厂开展现场应用研究。对现场处理效果进行检测,为污泥固化/稳定化设备的设计及工艺优化提供依据。

### 1 甬直污水厂及污泥处理问题

甬直镇是位于苏州城东的工业型乡镇,甬直镇污

收稿日期: 2008-01-09; 修回: 2008-05-12

基金项目: 江苏省社会发展计划项目(BS2007156),天津市应用基础研究计划项目(07JCYBJC07600)

作者简介: 朱伟(1962-)男,教授,博士,主要从事河流、湖泊的水环境问题研究(电话)025-83786710(电子信箱)weizhu863@126.com。

水处理厂主要处理来自工业企业排放的废水,约占总量的 90%,工业废水中以印染废水为主。用直污水处理厂的进入水质较差,COD 有时超过 1500mg/L,色度为 200~300 倍,呈暗红色。

用直镇污水处理厂污泥主要来自二沉池和生物处理构筑物,未经消化。脱水污泥含水率在 80%左右,含有病原微生物、有机污染物及铬、锌、铜等重金属。目前用直镇污水处理厂将污泥丢弃在洼地,这种处置方式污染地表水,甚至恶化地下水水质,散发的气体有害人体健康和污染大气。将用直污水厂污泥进行焚烧处理所需运输和焚烧费用不菲,另外污泥中含有大量重金属,进行大规模堆肥处理也不可行。为了实现污泥安全处置,采用较为廉价的固化/稳定化技术能够被与用直污水处理厂情况相似的乡镇污水处理厂接受并推广应用。

## 2 设备及工艺研究

### 2.1 污泥固化/稳定化工艺及设备研制

污泥固化/稳定化技术主要原理为:将脱水污泥和固化/稳定化材料搅拌均匀,材料中的水泥遇水后发生水化反应,从而提高污泥抗压强度,降低含水率,稳定其中污染物。现场应用采用具体工艺如下:脱水污泥堆放在储泥斗中,固化/稳定化材料放置在储料斗中,通过进泥装置将储泥斗中的脱水污泥输送至搅拌桶中,开启加料装置和搅拌装置,加料和搅拌采用可调速技术,搅拌均匀后开启出泥装置,将固化/稳定化污泥排出固化/稳定化设备。

研制的污泥固化/稳定化设备采用钢结构,图 1 为设备结构图,主要包括以下装置:储泥斗、螺旋进泥输送机、搅拌设备、加药设备、螺旋出泥输送机。储泥斗为上立方体,下锥体,进泥采用螺旋输送进泥器,从储泥斗底部进泥,在搅拌桶上方出泥,圆形搅拌桶内采用交错双螺旋搅拌浆叶,可进行正反搅拌,确保污泥与固化/稳定化材料混合均匀,底部留有应急出泥口,储料斗为锥体,位于搅拌桶上方,储料斗底部配置加料装置,可调整加料速度,排泥也采用螺旋输送机,从搅拌桶底部将固化/稳定化污泥排出,排泥口高于地面 1.8m,下方可停放运输工具;另外,还配有设备运行控制箱。

### 2.2 设备性能

将固化/稳定化处理设备在用直污水处理厂进行现场运行调试,对工艺进行优化,选择满足用直污水处理厂污泥处理要求的设备运行参数。经过多次现场试验,将满足实际工程需要的设备主要性能参数确定为:储泥斗容积为 4m<sup>3</sup>、搅拌桶容积为 2m<sup>3</sup>、螺旋进泥装置进泥速度为 3t/h、材料投加速度为 0.1t/min,搅拌时间 3min,处理量 30t/d。

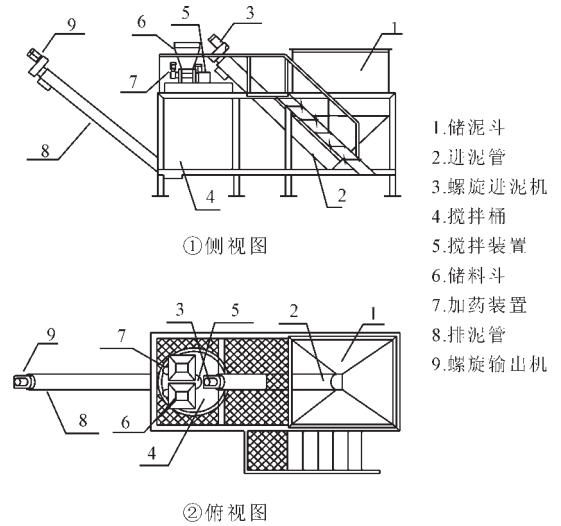


图1 污泥固化/稳定化处理设备结构图

Fig.1 The equipment structure of sludge solidation/stabilization

## 3 污泥固化/稳定化现场试验

### 3.1 试验材料

试验所用污泥为用直镇污水厂脱水污泥,污泥基本性质见表 1,辅助添加剂为自主研制的 B01 型辅助添加材料,所用水泥为标号 32.5# 的普通硅酸盐水泥。

表 1 污泥基本性质

Table 1 Basic characteristics of sludge

含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	有机质 (%)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
80.7	1.01	53.2	534	43.1	527

### 3.2 试验方法

#### 3.2.1 现场固化/稳定化处理污泥

在室内研究成果基础上,现场每次试验时污泥量定为 1t,水泥量定为 0.2t,现场应用研究时固化/稳定化处理采用配比见表 2。

表 2 固化/稳定化方案

Table 2 The project of Solidation/Stabilization

污泥(t)	水泥(t)	辅助添加剂 B01(t)			
1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4

#### 3.2.2 现场固化/稳定化污泥性质的检测

污泥填埋处置时必须满足以下要求:含水率<65%,抗压强度>50kPa<sup>[2]</sup>,Cu、Zn、Cr 浸出浓度不超过限定值(Cu 75mg/L, Zn 75mg/L, Cr 12mg/L)<sup>[10]</sup>。污泥固化/稳定化处理后,从含水率、无侧限抗压强度和重金属浸出量来评价固化/稳定化污泥是否满足填埋要求。

固化/稳定化污泥达到 7 天龄期时,依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)取 3 个平行样,测定含水率和无侧限抗压强度,将上述取样后剩余泥样置于阴凉通风处风干,按锥体四分法取 10.000g 风干样

品,按照《固体废物浸出毒性浸出方法-水平振荡法》(GB5086.2-1997)进行毒性浸出试验,用原子吸收分光光度计(AAA320CRT)测溶液中铜、锌、铬的浓度,浸出试验设置 3 个平行样。

### 3.3 固化/稳定化处理的效果

#### 3.3.1 固化/稳定化对含水率影响研究

不同 B01 添加量时固化/稳定化污泥含水率如图 2 所示,现场含水率比室内试验含水率小,两者都随 B01 添加量增加而降低。

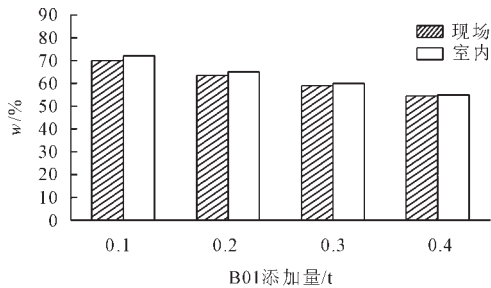
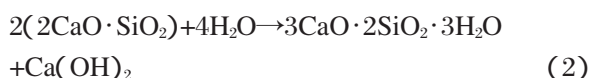
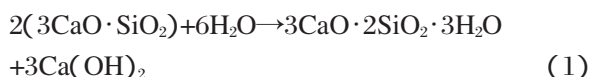


图2 含水率与B01添加量的关系

Fig.2 The relationship between water content and B01 content

从图 2 可以看出,含水率随 B01 添加量增加呈直线降低趋势。污泥中添加 B01 后,固体含量增加;另外,B01 可促进水泥水化反应,将更多的自由水转化为结晶水和矿物水<sup>[9]</sup>,所以 B01 添加量越多,固化/稳定化污泥的含水率就越低。

现场试验含水率结果比室内结果低,差距不超过 2%。现场试验搅拌功率和浆叶剪切力大于室内设备,对污泥菌胶团的破坏力也大于室内搅拌设备,污泥中菌胶团破坏后内部包含的水分被释放,污泥脱水性能增加<sup>[11]</sup>,所以现场试验中释放的水分量高于室内试验,引起水泥水化反应式(1)、(2)中 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液饱和度低于室内试验,反应式(1)、(2)更易正向进行,更多自由水转变为化学结合水,所以现场试验含水率结果比室内结果低。



污泥填埋时含水率应小于 65%,从图 2 可以看出,现场试验中辅助添加剂 B01 添加量达到 0.2t 后,固化/稳定化污泥的含水率低于 65%,满足填埋处置的含水率要求。

#### 3.3.2 固化/稳定化对抗压强度影响研究

不同 B01 添加量时固化/稳定化污泥无侧限抗压强度如图 3 所示,抗压强度随 B01 添加量增加而提高,并且室内试验无侧限抗压强度高于现场试验结果。

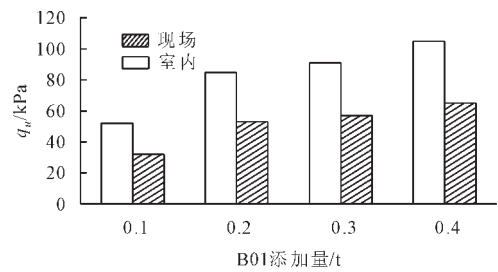


图3 无侧限抗压强度与B01添加量的关系

Fig.3 The relationship between unconfined compressive strength and B01 content

从图 3 可以看出,固化/稳定化污泥抗压强度随 B01 添加量增加而提高。污泥含水率过高不利于水泥水化物的形成,因为水量过高水泥颗粒过于分散,颗粒水化反应后将不能连成整体,从而不能形成骨架结构,因此固化体得强度难于形成<sup>[12-13]</sup>。添加 B01 后,一方面通过 B01 的强吸水性和凝聚作用,减少水泥颗粒在空隙水中分布的距离,促进水泥颗粒在水化反应后形成整体,最终提高强度;另一方面 B01 中含有无机粘土矿物,它的掺入为污泥提供了骨架,因此有利于在水泥水化产物通过胶结作用将这些无机骨架颗粒连成整体骨架,最终形成固化/稳定化污泥的强度,所以随着 B01 添加量增加,固化/稳定化污泥的抗压强度也不断提高<sup>[5]</sup>。

另外,室内试验无侧限抗压强度高于现场试验结果。现场试验搅拌设备对污泥菌胶团的破坏力大于室内搅拌设备,从而现场试验中释放的水分量高于室内试验,造成固化/稳定化污泥中水灰比提高,水泥凝结时间延长<sup>[14]</sup>,无侧限抗压强度降低<sup>[15]</sup>。因此在现场应用中,要做到搅拌均匀所需时间越短越好,减少对菌胶团的破坏。

室内试验的抗压强度约为现场试验结果的 1.6 倍,将 1.6 称为修正系数,在以后的研究中可以根据室内试验结果,除以修正系数,折算出现场试验固化/稳定化的抗压强度。现场试验中,B01 添加量达到 0.2t 后,固化/稳定化污泥无侧限抗压强度大于 50kPa,满足填埋处置的抗压强度要求。

#### 3.3.3 固化/稳定化对 Cu、Zn、Cr 浸出毒性影响研究

不同 B01 添加量时固化/稳定化污泥 Cr、Cu、Zn 浸出量如图 4 所示,其中 Cu 浸出毒性最大,Cr 次之,Zn 最小。B01 添加量低于 0.2t 时现场试验重金属浸出量低于室内试验结果,添加量超过 0.2t 后两者无明显差距。

从图 4 可以看出,三种重金属浸出量都随 B01 添加量增加而减少。水泥水化反应时,重金属会同 OH<sup>-</sup>或硅酸盐结合成含钙的盐类、吸附在高比表面积 C-S-H 粒子上、或进入晶体结构中<sup>[16]</sup>,而且 B01 添加

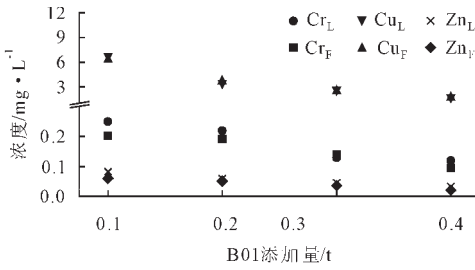


图4 重金属浸出量与B01添加量的关系(L:lab ; F:field)  
Fig.4 The relationships between different heavy metal leaching content and B01 content(L:lab; F:field)

量增加后水化产物更易形成整体,重金属可以更多地被水化产物吸附和包裹,所以随着辅助添加剂 B01 添加量的增加,Cu、Zn、Cr 浸出毒性都明显降低。

B01 添加量低于 0.2t 时现场试验重金属浸出量低于室内试验结果,可能是由于现场试验中反应式(1)、(2)更易正向进行,引起水化硅酸钙产量也多于室内试验,更多的重金属被水化产物吸附和包裹。从图 4 看出,现场试验和室内试验固化/稳定化污泥的 Cu、Zn、Cr 浸出量都低于填埋场限制值 (Cu 75mg/L, Zn 75mg/L, Cr 12mg/L)。

3.4 固化/稳定化处理技术的经济性分析

现场试验所用水泥的成本为 280 元/t, 自制辅助添加剂 B01 成本为 160 元/t, 不同配比的固化/稳定化材料成本见表 3。结合不同配比固化/稳定化污泥含水率、抗压强度和浸出毒性,可以看出,1:0.2:0.2(污泥:水泥:B01)为现场应用中的推荐配比,此配比的固化/稳定化材料成本为 88 元/t。表 4 将固化/稳定化技术与焚烧、堆肥处理方式进行经济性比较<sup>[17]</sup>,可以看出污泥固化/稳定化处理技术是一种廉价的污泥处理方式,值得大规模推广。

表 3 不同配比时固化/稳定化成本

Table 3 The costs of different Solidation/Stabilization proportion (元/t)

配比(S:C:B)	1:0.2:0.1	1:0.2:0.2	1:0.2:0.3	1:0.2:0.4
成本	72	88	104	120

表 4 污泥不同处理方式经济性比较

Table 4 The costs of different sludge treatment (元/t)

固化/稳定化	焚烧	堆肥
88~120	800~1000	300~350

4 结论

(1)现场试验研究表明,本项目所研制的污泥固化/稳定化处理设备现场运行情况良好,能够满足实际工程需要。

(2)污泥经过固化/稳定化处理后含水率得以降低,强度得到提高,并且对重金属类污染物具有较好的稳定作用,能够满足填埋处置的要求。

(3)本项目所研发的固化/稳定化材料具有高效、

廉价的特点,每吨脱水污泥的固化/稳定化材料成本为 88 元,较其他处理方式具有较强的成本优势,能够进行大规模推广。

(4)现场试验中较大搅拌功率和较长搅拌时间会破坏污泥絮凝态结构,导致固化/稳定化效果的降低,在设备的研制中需要对此问题加以考虑。

[参考文献]

[1] 马娜,陈玲,何培松,等. 城市污泥资源化利用研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1) 86-89.  
Ma Na, Chen Ling, He Pei-song, et al. Study on resource reuse of municipal sewage sludge[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(1) 86-89.(in Chinese)

[2] 赵乐军,戴树桂,辜显华. 污泥填埋技术应用进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4) :27-30.  
Zhao Le-jun, Dai Shu-gui, Gu Xian-hua. Study on development of sludge landfilling[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(4) :27-30.(in Chinese)

[3] 王伟,袁光钰. 我国固体废弃物处理处置现状与发展[J]. 环境科学, 1997, 18(2) 87-90.  
Wang Wei, Yuan Guang-yu. The status and development of solid waste treatment and disposal in China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1997, 18(2) 87-90.(in Chinese)

[4] Gurjar B R. Sludge Treatment and Disposal[M]. The Netherlands : A A Balkema, 2001 97-101.

[5] 李磊,朱伟,林城. 骨架构建法进行污泥固化处理的试验研究[J]. 中国给排水, 2005 21(6) :41-43.  
Li Lei, Zhu Wei, Lin Cheng. Experimental study on sludge solidification by using skeleton construction method[J]. China Water & Wastewater, 2005 21(6) :41-43.(in Chinese)

[6] Kamon M, Inazumi S, Rajasekaran G, et al. Evaluation of waste sludge compatibility for landfill cover application[J]. Soil and Foundations, JGS, 2002 42(4) :13-27.

[7] 石太宏,汤兵. 印刷线路板厂含铜污泥固化处理工艺研究[J]. 环境工程, 2000 18(3) :47-49.  
Shi Tai-hong, Tang Bing. Study of solidification treatment of sludge containing copper from printed circuit board plant[J]. Environmental Engineering, 2000 18(3) :47-49.(in Chinese)

[8] 朱伟,李磊,林城. 生物与化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(6) :933-938.  
Zhu Wei, Li Lei, Lin Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6) :933-938.(in Chinese)

[9] 朱伟,林城,李磊,等. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007 28(5) :1020-1025.  
Zhu Wei, Lin Cheng, Li Lei, et al. Solidification/stabilization of sludge using calcium-bentonite as additive[J]. Environmental Science, 2007 28(5) :1020-1025.(in Chinese)

(下转第 137 页)

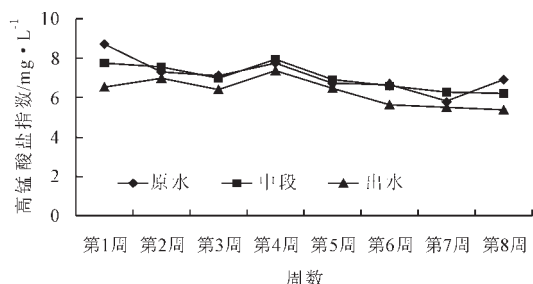


图6 悬浮球流化池工艺出水高锰酸盐指数浓度变化曲线  
Fig.6 Variation of COD<sub>Mn</sub> concentration of suspended packing fluidized tank

由于原水高锰酸盐指数浓度较高,因此悬浮球流化池工艺对后续工序的高锰酸盐指数去除效果以及出厂水高锰酸盐指数达到要求有很大的帮助。悬浮球流化池系统对高锰酸盐指数的去除效果不明显主要有两方面的原因:一是浊度去除效果不明显,影响有机物在悬浮填料生物膜上的传质降解效率,降低了高锰酸盐指数的去除效果;二是进水中过高的氨氮会影响其异养菌对有机物的去除<sup>[3]</sup>,因为在生物膜中同时发生硝化反应的硝化菌和降解高锰酸盐指数的异养菌,存在争夺生存空间和溶解氧的竞争,使异养菌活性有所降低。另外,由于亚硝酸盐氮积累,在检测高锰酸盐指数浓度时,亚硝酸盐氮消耗高锰酸钾造成了出水高锰酸盐指数变大。

### 3 结论

悬浮球流化池中试验表明,悬浮球流化

池日常设备维护工作量少,运行管理较简单。悬浮球生物预处理工艺出水水质稳定,氨氮的去除率在73%~91.8%,高锰酸盐指数的去除率最高可达23.4%。作为预处理工艺能有效去除原水中过高的氨氮含量,并可去除部分有机物,提高原水的可生化性,而且可以减少后续常规处理药剂的投加量,能够保证实现净水目标。

### [参考文献]

- [1] 张忠详,钱易. 废水生物处理新技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
Zhang Zhong-xiang, Qian-Yi. New Technologies for Biological Wastewater Treatment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 陈洪斌,梅翔,高延耀,等. 悬浮物对源水生处预处理装置运行的影响和冲洗[J]. 同济大学学报, 2001, 29(4): 489-494.  
Chen Hong-bin, Mei-Xiang, Gao Ting-yao, et al. Study on the influence and backwashing of suspended solid of polluted raw water bio-pretreatment pond operation [J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(4): 489-494. (in Chinese)
- [3] 刘辉. 全流程生物氧化技术处理微污染原水[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.  
Liu-Hui. The Technology of Entire Process Biological Oxidation for Micropolluted Raw Water Treatment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [10] GB18598-2001, 危险废物填埋污染控制标准[S].  
GB18598-2001, Standard for Pollution Control on the Sanitary Landfill Site for Hazardous Wastes[S]. (in Chinese)
- [11] 薛向东,金奇庭,朱文芳,等. 超声对污泥流变性及絮凝脱水性的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 897-902.  
Xue Xiang-dong, Jin Qi-ting, Zhu Wen-fang, et al. Influence of ultrasound on the rheological characterization and the flocculating dewaterability of sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 897-902.
- [12] Glasser F P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 52: 151-170.
- [13] Adaska W S, Tresouthick S W, West P B. Solidification and stabilization of wastes using portland cement[R]. Skokei, Illinois: Portland Cement Association, 1991: 1-16.
- [14] 沈卫,刘昌胜,顾燕芳. 磷酸钙骨水泥的水化反应、凝结时间及抗压强度[J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(2): 129-135.  
Shen Wei, Liu Chang-sheng, Gu Yan-fang. Hydration reaction, setting time and compressive strength of calcium phosphate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1998, 26(2): 129-135. (in Chinese)
- [15] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 645-649.  
Chu Cheng-fu, Hong Zhen-shun, Liu Song-yu, et al. Prediction of unconfined compressive strength of cemented soils with quasi-water-cement ratio[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 645-649. (in Chinese)
- [16] Glasser F P. Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms[A]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993: 1-31.
- [17] 张义定,高定,陈同斌,等. 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析以北京市为例[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 234-238.  
Zhang Yi-ding, Gao Ding, Chen Tong-bin, et al. Economical evaluation of different techniques for treatment and disposal of sewage sludge in Beijing[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 234-238. (in Chinese)