

# 疏浚泥固化处理的优化设计研究

朱伟<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>, 张春雷<sup>1</sup>, 赵建<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; 2. 河海大学土木工程学院, 南京 210098)

**摘要:**将疏浚泥固化处理后的力学性质指标作为优化设计的约束条件,二次污染问题以及造价作为优化的目标函数,建立了固化处理的多目标优化设计模型。通过对固化处理进行优化设计可以解决力学性质、二次污染以及造价三者之间存在的矛盾,为建立系统的固化理论奠定了基础。并采用所建立的优化模型对大亚湾疏浚泥的固化处理进行了优化设计。

**关键词:**疏浚泥; 固化; 力学性质; 二次污染; 多目标优化

**中图分类号:**X705 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6504(2005)04-0087-03

海洋、航道以及湖泊的建设、清淤过程中都要产生大量的疏浚泥,国外常采用再生资源化处理技术将疏浚泥转化为可以再生利用的土工材料,固化处理是再生资源化中较为成熟的技术<sup>[1]</sup>。目前国内外对于固化处理技术的研究主要集中在固化材料的选取和固化后力学性质的改善上<sup>[2-3]</sup>。但是疏浚泥产生地一般多为污染严重的海区、河道或湖泊,固化处理后的疏浚泥是否会对环境造成二次污染也是固化技术推广中的关键性问题。目前国内关于疏浚泥及其固化后二次污染的研究开展较少,仅限于简单的室内淋滤或浸泡试验<sup>[4-5]</sup>,而且没有同工程实用性和经济可行性结合起来考虑。因此系统的疏浚泥固化处理技术应当综合考虑工程实用、环保以及经济可行三方面的要求。

传统的固化处理方法一般是首先确定一种主要固化材料,然后再通过添加不同比例的辅助固化材料以达到降低造价的目的,但是这样得到的固化设计结果往往只是一个“可行解”,不一定是“最优解”,而且没有考虑二次污染问题。对于固化处理技术的优化设计问题实际上可以归结为在满足工程实用(力学性质)的基础上,使得造价和对环境的二次污染达到最小,即力学性质是一个可以根据工程需要预先知道的约束条件,而造价和环境影响因素是优化设计的目标函数。这样疏浚泥固化处理的优化设计问题实际上可以转化为一个多目标的最优决策问题。

## 1 疏浚泥固化处理的多目标优化模型

### 1.1 优化的约束条件

在工程当中较为实用的评价疏浚泥固化后力学性

质的指标为一定龄期的无侧限抗压强度,根据处理后应用目的的不同确定出不同的强度指标<sup>[6]</sup>。固化后的强度与固化材料的种类、添加量以及龄期有直接的关系<sup>[6]</sup>,根据强度的要求得到的约束条件如式(1)所示。

其中  $f$  为通过试验获得的强度与固化材料种类、添加量以及龄期关系的函数,  $g_1, g_2, \dots, g_n$  为不同固化材料的添加量,  $t$  为龄期,  $T$  为达到要求强度所需要的最长时间,  $q_u$  为需要达到的强度指标。

$$\begin{cases} Q = f(g_1, g_2, \dots, g_n, t) & q_u \\ g_1, g_2, \dots, g_n & 0 \\ t & T \end{cases} \quad (1)$$

根据研究<sup>[7]</sup>,主要固化材料往往存在一个最小添加量的问题,当主料的添加量小于最小添加量时对疏浚泥是没有固化效果的,假定  $g_{\pm}$  为固化主料,固化主料最小添加量的约束条件为:

$$g_{\pm} \geq \min C_0 \quad (2)$$

$C_0$  为固化主料的最小添加量,可以通过无侧限抗压强度试验获得。

式(1)和式(2)即为优化设计的约束条件。

### 1.2 优化的目标函数

固化材料的价格是决定固化技术成本的关键因素,目前一般都采用复合型固化材料以降低固化的成本。实际应用当中以满足 1.1 的约束条件为前提使得按不同比例添加的固化材料成本最低,即

$$\min \text{cost} = \text{cost}_1 * g_1 + \dots + \text{cost}_n * g_n \quad (3)$$

式中  $\text{cost}$  为固化材料总价格,  $\text{cost}_1, \dots, \text{cost}_n$  为不同种类固化材料的单价,  $g_1, \dots, g_n$  为相应的固化材料添加量。

如果疏浚泥中含有对环境有害的污染物质,所采用的固化处理技术还要保证疏浚泥中的有害物质对周围环境的二次污染最小。根据 Myers<sup>[8]</sup> 等对纽约州疏浚的研究表明,疏浚泥中可溶性污染物的二次污染主要以溶出为主,因此可以通过疏浚泥固化后的溶出试

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50379011);国家高新技术研究发展计划项目(2003AA601100);国家重点实验室开放基金资助。

作者简介:朱伟(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事固体废弃物的处理与管理方面的研究工作,(电话)025-83787870(电子信箱)mr\_lilei@sohu.com。

验确定污染物的溶出量和固化措施的相关关系。二次污染的目标函数可以表示为：

$$\min Env = P(g_1, g_2, \dots, g_n, t) \quad (4)$$

其中  $P$  为通过试验获得的污染物质溶出量与固化材料种类、添加量以及龄期的函数,  $g_1, g_2, \dots, g_n$  为不同固化材料的添加量,  $t$  为龄期。

综合(1)、(2)、(3)、(4)可以将疏浚泥固化处理的优化设计问题转化为如下的多目标优化问题：

$$\left\{ \begin{array}{l} V - \min \quad Model = \{cost, Env\} \\ s. t. \quad f(g_1, g_2, \dots, g_n, t) \leq q_u \\ \quad \quad g \geq \min C_0 \\ \quad \quad t \leq T \\ \quad \quad g_1, g_2, \dots, g_n \geq 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

## 2 大亚湾疏浚泥固化处理的优化设计

作为上述建立的优化模型的一个应用实例,对大亚湾疏浚泥的固化处理进行了优化设计。本试验所用淤泥的取泥点位于广东省惠州市大亚湾石油化学工业区内,该疏浚泥为典型海洋沉积相,属于第四系沉积层(Q<sup>m</sup>)。张春雷<sup>[7]</sup>对于这种海相疏浚泥分别采用单一型和复合型固化材料的固化效果进行了深入研究,根据其研究的成果,采用以水泥为主要固化材料,粉煤灰为辅助固化材料的处理措施具有较好的效果。

### 2.1 固化处理的力学性质研究

试验中首先选用水泥进行了单一固化材料和强度关系研究,不同龄期下水泥添加量和强度的关系如图 1 所示。由图 1 可以看出,对于本试验所用疏浚泥存在着最低水泥添加量  $C_0$ ,若水泥含量低于这个最小添加量便没有固化效果。

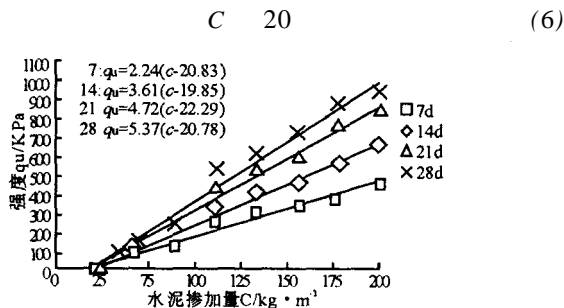


图1 单一水泥添加量和强度关系

在明确主要固化材料最小添加量的基础上,通过添加粉煤灰以降低固化材料的成本,复合型固化材料不同龄期下添加量和强度的关系如表 1 所示。结合单一固化材料的试验结果,对强度  $q_u$  与水泥(C)和粉煤灰(F)添加量以及龄期进行回归分析,并规定其 7 天龄期的抗压强度达到 100kPa,可以得到：

$$q_u = e^{0.018C + 0.005F + 0.034t + 3.0} \quad 100 \quad (7)$$

$$t = 7 \quad (8)$$

对回归方程进行显著性检验,  $n = 25$ ,  $\alpha = 0.01$  时相应的相关系数为 0.505,而式(7)的相关系数为 0.965 > 0.505,说明疏浚泥固化后强度与固化材料和龄期呈十分显著的线性相关关系。

式(6)、(7)、(8)即为大亚湾疏浚泥固化设计的约束条件。

表 1 复合型固化材料添加量和强度关系

固化材料(kg/m <sup>3</sup> )			强度 $q_u$ (kPa)			
水泥	粉煤灰	龄期	14d	21d	28d	
30	30	7d	41.8	62.4	68.8	77.7
30	60	7d	43.8	62.0	81.6	92.1
30	90	7d	64.3	79.0	92.0	116.0
30	120	7d	50.4	72.0	85.0	104.8
30	150	7d	59.8	85.3	120.6	124.0
40	40	7d	65.6	132.7	148.6	162.1
40	80	7d	85.8	142.0	166.7	180.0
40	120	7d	109.0	162.1	214.0	238.6
40	160	7d	90.6	138.2	193.9	225.0
40	200	7d	96.8	180.0	251.7	280.0
50	10	7d	100.0	140.0	183.3	218.5
50	30	7d	100.7	143.4	184.8	230.3
50	50	7d	111.3	191.6	251.3	280.0
50	75	7d	158.3	230.0	299.2	320.0
50	100	7d	125.6	220.0	273.1	298.3

### 2.2 固化处理的二次污染问题研究

在研究土壤入渗和物质迁移中常用电导率值来确定土壤中溶质的浓度,即土壤溶液中溶质的浓度与电导率成线性关系<sup>[9]</sup>,而造成疏浚泥二次污染问题的主要物质以可溶性污染物为主,在降雨以及地下水的作用下其中大部分污染物质以可溶性离子形式存在,浸出液电导率的变化实际上反映了可溶性污染物浓度的变化。近年来土壤学的研究结果也表明土壤电导率这一参数本身包含了反映土壤品质和物理性质的丰富信息<sup>[10]</sup>。因此本文为了避免对疏浚泥浸出液中每一种污染物的成份都进行分析,采用电导仪测定浸出液电导率的变化,这种变化反映了大多数污染物浸出规律,更具有代表性。

根据对力学性质的研究成果,单一型固化材料选用在 1m<sup>3</sup> 淤泥中分别添加 40kg,75kg,100kg 的水泥,复合型固化材料选用在 1m<sup>3</sup> 淤泥中添加 40kg 水泥为主料,并再分别添加 40kg、80kg、120kg 的粉煤灰作为辅助固化材料。试验采用平行试验,共制样 2 组,每组疏浚泥试样重 100g,和固化材料充分混合搅拌均匀。将上述制备的疏浚泥试样和原泥试样加入 300mL 的自来水(pH = 7.0)置于封闭容器中,连续对水样电导率的变化进行 28d 监测,电导率随时间的变化关系如

图 2,3 所示。

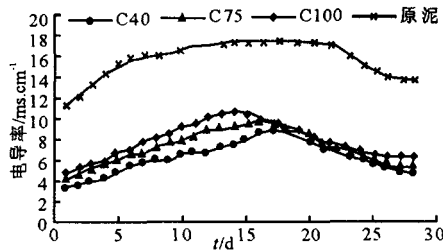


图2 单一固化材料溶出试验中电导率和时间关系

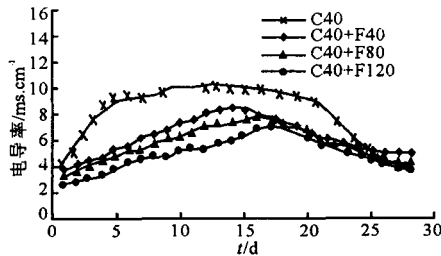


图3 复合固化材料溶出试验中电导率和时间关系

从图中可以反映出：

(1) 固化后疏浚泥污染物的溶出量大大低于原泥污染物的溶出量,所以固化处理措施可以减少疏浚泥中污染物对周围环境的二次污染;

(2) 污染物的溶出量和水泥的添加量成反比关系,随着水泥添加量的增加污染物的溶出量在减少;

(3) 随着粉煤灰添加量的增加,疏浚泥中污染物的溶出量也在增加,说明添加廉价的辅助固化材料虽然可以降低造价并可以提高固化的效果,但同时对环境的二次污染程度也在增加,这也意味着需要对固化处理需要进行优化设计。

对污染物的释放阶段进行回归分析可以得到：

$$Env = -0.03C + 0.033F + 2.041nt + 5.16 \quad (9)$$

对回归方程进行显著性检验,  $n = 60$ ,  $\alpha = 0.01$  时相应的相关系数为 0.325,而式(9)的相关系数为 0.918 > 0.325,说明疏浚泥固化后污染物的溶出与固化材料和龄期成十分显著的线性相关关系。

### 2.3 优化设计模型及其最优解

综合式(6)、(7)、(8)、(9)即为大亚湾疏浚泥固化设计的优化模型,采用分层序列法<sup>[11]</sup>解上述优化问题,其最优解为:每 1m<sup>3</sup> 疏浚泥中添加水泥 55.6kg,粉煤灰 51.2kg。

$$\begin{cases} V - \min & cost = 0.3 \times C + 0.03 \times F \\ & Env = -0.03C + 0.033F + 2.041nt + 5.16 \\ s. t. & q_u = e^{0.018C + 0.005F + 0.034t + 3.0} < 100 \\ & C \leq 20, F \leq 0 \\ & t \leq 7 \end{cases} \quad (10)$$

### 3 结论

(1) 通过添加辅助固化材料降低固化处理的成本

和固化后的力学性质或二次污染之间存在矛盾,因此需要通过优化设计解决它们之间的矛盾,做到在尽可能低的造价和对环境二次污染最小的前提下,满足工程实用性的要求。

(2) 固化处理的优化设计问题实际上可以转化为一个多目标优化设计问题,多目标优化设计理论可以较好的解决固化处理技术在造价、力学强度和二次污染之间存在的矛盾。

(3) 由于目前对于疏浚泥固化处理二次污染问题的研究尚处于起步阶段,本文仅仅通过溶出试验中电导率的变化反映总离子浓度变化,事实上需要通过更深入的试验研究对各种代表性污染物建立不同的优化目标函数。

(4) 对于强度以及二次污染问题同固化材料、龄期的相关关系本文仅仅通过回归方法得到,需要开展从机理方面对它们的关系开展研究,提出更符合实际情况的相关关系。

#### [参考文献]

- [1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39-41.
- [2] 荀勇. 含工业废料的水泥系固化剂加固软土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 210-213.
- [3] 寺师昌明,田中洋光,光本司,等.  $\cdot$ メント系安定处理土の基本特性に関する研究[J]. 港湾技术研究所报告, 1980, 19(1): 33-57.
- [4] 侯玉,卓建民,黄汉禹,等. 深圳河疏浚污染土淋溶水模拟试验[J]. 中山大学学报, 1998, 37(1): 114-117.
- [5] 李玉华,吕炳南,张景成,等. 河底淤泥固化处理及相关试验[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(6): 66-69.
- [6] 潘林有. 温州软土水泥土抗压强度与养护龄期、水泥掺含量的关系[J]. 温州大学学报, 2002, 3: 68-71.
- [7] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 河海大学硕士学位论文, 2003.
- [8] Myers T E, Stark T D, Gibson A C, et al. Management Plant for the Disposal of Contaminated Material in the Craney Island Dredged Material Management Area [R]. Technical Report, WESTREL9320, 1993, 129.
- [9] 孙玉龙,郝振纯,陈启慧,等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 69-71.
- [10] Rhoades J D, Shouse P J, Alves N A, et al. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54, 46-54.
- [11] 唐焕文,秦学志. 最优化方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1994.

(收稿 2004-07-01; 修回 2004-09-08)

cyte; Comet assay

### Air Environment Assessment of Artificial System by Genetic Algorithms

XIONG Zhong-hua, CHEN Qi,  
ZHENG Xiu-mei, ZHANG Hong-jun  
(China Research Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0083-03-EA

**Abstract:** Cognition function of brain was simulated by artificial nerve network by changing threshold limit value of linking point. BP network model based on genetic algorithms was used to assess air quality in some area with national air quality criteria as inputting samples of the network. The results were in conformity with comprehensive index method.

**Key words:** genetic algorithms; artificial system; BP network; environment assessment; comprehensive index method

### Effects of Temperature and MLSS on Endogenous Denitrification Via Nitrite

WANG Shao-po, PENG Yong-zhen,  
WANG Shu-ying, ZHANG Yan-ping  
(Key Laboratory of Water Quality Science and  
Water Environment Recovery Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0085-03-EA

**Abstract:** Laboratory experiments were conducted to study the effects of temperatures and MLSS on endogenous denitrification via nitrite with SBR reactor operating in denitrification mode. Results showed the endogenous denitrification rate via nitrite increased as temperature became higher among experimental temperature range. When temperature increased 10°C, the endogenous denitrification rate raised to 3 times. On the other hand, MLSS has a positive effect on endogenous denitrification rate. When mixed liquor suspended solids (MLSS) changed from 4g/L to 12g/L, the endogenous denitrification rate increased from 0.0259gN/(gVSS<sub>d</sub>) to 0.0378 gN/(gVSS<sub>d</sub>), which indicates reaction time is saved by adopting higher MLSS.

**Key words:** biological nitrogen removal; endogenous denitrification; temperature; mixed liquor suspended solids (MLSS)

### Study on Optimal Design of Dredged Spoils Solidification

ZHU Wei<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>,  
ZHANG Chun-lei<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>  
(1. College of Environment Science and Engineering,  
2. College of Civil Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0087-03-EA

**Abstract:** Multiobjective optimization model for solidification is established based on mechanical characters as restriction condition and secondary pollution and cost as optimization goal. The contradiction between mechanical characters, secondary pollution and cost by optimal design can be solved, which will lay a base to establish systemic solidification theory. Dredged spoils solidification in Dayawan was optimal designed by the model.

**Key words:** dredged spoils; solidification; mechanical character; secondary pollution; multiobjective optimization

### Study on Electrolysis Treatment of Zymogenic Wastewater

CUI Long-zhe<sup>1</sup>, LI Li-zhong<sup>1</sup>, WU Gui-ping<sup>1</sup>,  
TIAN Jun<sup>1</sup>, Jeong Tae-seop<sup>2</sup>  
(1. College of Chemistry and Life Science,

Central South University for Nationalities, Wuhan 430074;  
2. Chonbuk National University, Korea Chonju 561756)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0090-02-EA

**Abstract:** Based on the experiment of electrolytic oxidation of non-biodegradable organic pollutants after biologic process in a zymogenic plant, the impact of factors such as flocculation agent, NaCl concentration, electric current intensity and pH on removal of COD and color were studied, and their mechanism were analysed as well.

**Key words:** electrolysis; zymogenic wastewater

### Study on Performance of Zeolites Modified Clay-liners

DONG Jun, ZHAO Yong-sheng, YANG Ji-dong,  
FAN Dong-ling, GUO Xiao-dong  
(College of Environment and Resource,  
Jilin University, Changchun 130026)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0092-03-EA

**Abstract:** Different percentage of zeolites was used to modify natural clay to study permeability, contaminants-removal ability and feasibility of leachate leaking control of zeolites modified clay-liners. Experiment results indicated that the permeability of liner is proportional to percentage of zeolites. If the ratio of zeolites and clay is proper, the permeability of liner can be less than current standard of  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, and the pollutants-removal ability is enhanced. Therefore, it is feasible that zeolites modified natural clay can be used as material of landfill liners.

**Key words:** zeolites; liner; modify; natural clay

### Study on Disposal Technology of Residual Sludge in Municipal Wastewater Treatment

LI Ya-dong<sup>1</sup>, LI Hai-bo<sup>1</sup>, LIANG Hao<sup>2</sup>  
(1. School of Life Science, Hubei University, Wuhan 430062;  
2. Wuhan Erlangmiao Wastewater Treatment Plant,  
Wuhan 430063)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0095-02-EA

**Abstract:** This paper briefly analysed the present status of wastewater treatment, production of residual sludge and disposal technology. The feasibility of making protein foam extinguishing agent by residual sludge recycling was also introduced.

**Key words:** municipal wastewater; residual sludge; protein foam extinguishing agent

### Study on Adhesive Produced with Waste Foamed Polystyrene Plastics

SONG Xue-jun<sup>1</sup>, SUN Ting<sup>1</sup>,  
XU Qiang<sup>2</sup>, WU Shi-wei<sup>2</sup>  
(1. School of Science, Northeastern University, Shenyang 110004;  
2. Department of Chemistry, Shenyang  
Normal University, Shenyang 110034)

Abstract ID:1003-6504(2005)04-0097-03-EA

**Abstract:** A kind of low cost adhesive was produced with petroleum cracking by-product as major solvent and waste foamed polystyrene plastics (FPS) as raw material. The prescription choice of adhesive preparation was studied, and the properties were tested.

**Key words:** solvent; foamed polystyrene plastics; adhesive

### Pilot Scale Study on MBR Process in Removal of COD from Pharmaceutical Manufacturing Wastewater

XIANG Zhen<sup>1</sup>, CHEN Shu-juan<sup>2</sup>,  
WANG Lian-jun<sup>1</sup>, MA Jie<sup>3</sup>  
(1. School of Chemical Engineering, Nanjing  
University of Technology, Nanjing 120094;