

# 混凝土损伤塑性模型在软基上船闸设计中的应用

苏超<sup>1</sup>, 刘崇巍<sup>1</sup>, 邓西标<sup>1</sup>, 李劲松<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 广西壮族自治区水利水电勘察设计院, 南宁 580000)

**摘要:** 利用有限元计算软件 ABAQUS, 以某软基上的船闸闸首为基本计算结构, 建立了闸首-地基三维有限元模型, 分析了在同一工况下弹性模型和弹塑性模型的应力分布规律, 求出了配筋模型中钢筋的拉应力, 并根据计算结果及相关公式对配筋效果进行了检验。检验结果显示, 配筋设计符合安全要求。

**关键词:** 混凝土损伤塑性模型; 软基; 有限元计算; 钢筋应力; 配筋检验

**中图分类号:** TV 691 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0563-05

## Application of concrete damage plasticity model in the lock design of soft foundation

SU Chao<sup>1</sup>, LIU Chongwei<sup>1</sup>, DENG Xibiao<sup>1</sup>, LI Jinsong<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China; 2. Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 580000, China)

**Abstract:** According to the basic calculation structure of a ship lock head on the soft foundation, a three dimensional finite element model of lock head and foundation was developed using finite element software ABAQUS. The stress distributions of elastic model and elastoplastic model under the same working conditions were calculated and analyzed. The tensile stress of the reinforced model was calculated. Finally, the reinforcement effects were verified based on the calculation results and relevant formula.

**Key words:** concrete damage plasticity model; soft foundation; finite element calculation; rebar stress; reinforcement verification

目前大部分的国内外学者对船闸进行有限元分析时, 只是将船闸作为素混凝土结构进行弹性分析, 不考虑混凝土的塑性变化, 而且在完成配筋计算后也很少对配筋效果进行检验。但是在软基船闸的有限元分析中, 往往会出现结构拉应力值远大于混凝土抗拉强度的情况, 因此仍将混凝土视为弹性体就不能很好地反映船闸的实际受力情况。另外在配筋时, 不论哪一种配筋方法, 都是根据特征截面的情况进行配筋, 没能完全考虑结构的整体性, 所以配筋是否真的合理还需检验。本文以某船闸工程为例, 利用 ABAQUS 分别进行弹性和弹塑性有限元分析计算, 并利用其可植入钢筋的功能, 对配筋后的船闸再次进行塑性有限元计算分析, 以检验配筋效果。

## 1 混凝土塑性损伤模型计算原理

ABAQUS 中提供了混凝土塑性损伤本构模型, 这种模型是在线弹性模型的基础上增加了不可恢复变形影响。其应变由弹性应变与塑性应变两部分组成。

$$\xi = \xi^e + \xi^p \tag{1}$$

式中:  $\xi^e$  为弹性部分;  $\xi^p$  为塑性部分。

应力-应变损伤关系为:

$$\sigma = (1-d) D_0^e (\epsilon - \epsilon^p) = D^e (\epsilon - \epsilon^p) \tag{2}$$

式中:  $D_0^e$  为无损伤时的弹性刚度;  $D^e$  为有损伤的弹性刚度;  $d$  为损伤因子。从式(2)中可以看出是混凝土的失效导致了弹性刚度的退化。

屈服函数决定了失效与损伤的状态。

$$F(\sigma, \xi) = \frac{1}{1-a} (q - 3ap + \beta(\xi^p) \sigma_{\max} - r(-\sigma_{\max}) -$$

$$\sigma_c(\xi^p) \leq 0 \tag{3}$$

式中:  $a, r$  分别为材料常数;  $p$  为有效静水压力;  $q$  为有效应力;  $\sigma_t$  和  $\sigma_c$  分别为有效张拉凝聚应力和压缩凝聚应力。

流动势决定了塑性流动, 其表达式如下:

$$\xi^p = \lambda \frac{\partial G(\sigma)}{\partial \sigma} \tag{4}$$

式中:  $\lambda$  为非负塑性因子。该模型定义了塑性势, 使用非关联

收稿日期: 2014-09-12 修回日期: 2014-11-03 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0827.001.html>

基金项目: 2014年江苏省普通高校研究生科研实践计划项目“软基上船闸结构优化设计和质量通病防控技术研究”(2014B25514)

作者简介: 苏超(1960-), 男(满族), 吉林梅河口人, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂水工结构的数值分析与优化设计研究及混凝土温控防裂研究。E-mail: csu@hhu.edu.cn

通讯作者: 刘崇巍(1988-), 男, 安徽人, 主要从事船闸水闸数值仿真模拟。E-mail: 1194211980@qq.com

塑性流动法则,所以需要使用非对称方程求解<sup>[1-3]</sup>。

## 2 计算模型及混凝土计算参数

本文的算例是江苏省某建于软基上的船闸,其治理标准为三级,结构定位为二级。该船闸结构口门宽为 23 m,闸室长为 230 m,门槛水深为 4 m,上、下闸首顶高程均为 5.4 m,底高程均为-6.5 m,闸室顶高程 5.2 m,底高程为-5.1 m,闸首、闸室均对称布置(图 1,图 2),在计算中仅对上闸首进行计算分析。

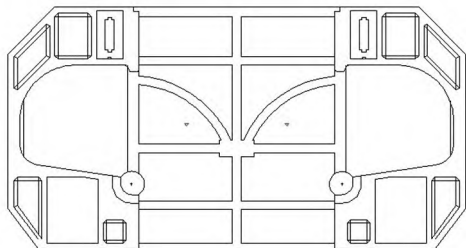


图 1 上闸首俯视图

Fig. 1 Overhead view of Head bay

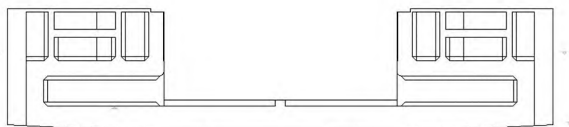


图 2 上闸首正视图

Fig. 2 Front view of head bay

闸首模型采用混凝土塑性损伤模型进行计算,见图 3,闸首-地基模型的坐标原点定于零高程处, $X$ 轴垂直于水流方向指向左岸, $Y$ 轴顺水流方向指向下游, $Z$ 轴竖直向上。考虑上闸首结构的形态、所受荷载情况及地基状况,地基模型的高度为上闸首高度的 3 倍,宽度亦为上闸首模型的 3 倍。

闸首-地基模型采用 C3D8 单元和 C3D6 单元进行划分,划分结果见图 4。船闸混凝土大部分为 C30 混凝土,其弹性模量为 26.5 GPa,泊松比为 0.2。参考 ABAQUS 用户手册案例中提供的数据,确定了 C30 混凝土压缩和拉伸时应力和损伤因子随非线性应变变化关系,其具体关系见表 1 和表 2<sup>[4]</sup>。

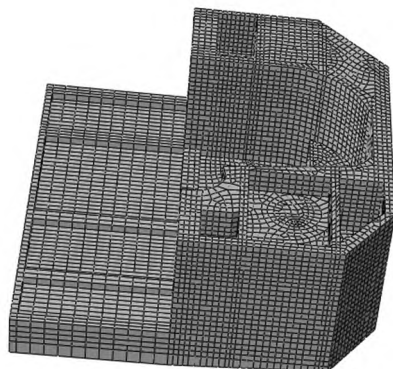


图 3 闸首有限元模型

Fig. 3 Finite element model of lock head

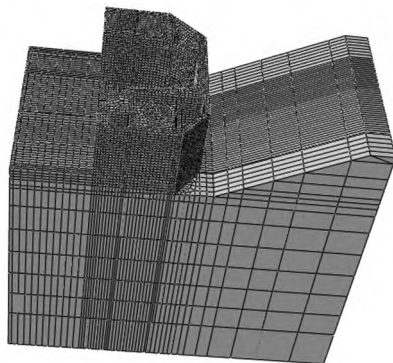


图 4 闸首-地基有限元模型

Fig. 4 Finite element model of lock head and foundation

表 1 混凝土压缩时应力和损伤因子随非线性应变变化

Tab. 1 Variations of concrete compression stress and damage factor with inelastic strain

非线性应变 (%)	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.36	0.50	1.00
应力/MPa	24.01	29.20	31.70	32.35	31.76	30.37	28.50	21.90	14.89	2.95
损伤因子	0.00	0.12	0.24	0.34	0.42	0.50	0.56	0.71	0.82	0.96

表 2 混凝土拉伸时应力和损伤因子随非线性应变变化

Tab. 2 Variations of concrete tensile stress and damage factor with inelastic strain

非线性应变 (%)	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.50
应力/MPa	1.78	1.45	1.11	0.96	0.80	0.53	0.35	0.16	0.07	0.04
损伤因子	0.00	0.30	0.55	0.70	0.80	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99

## 3 有限元计算结果及对比

### 3.1 有限元计算结果

由于运行期(上闸门关)工况为最不利工况,所以采用此工况进行计算对比。

在弹性模型中,闸首结构在顺水流方向位移较小;横河向位移由低到高逐渐增大,最大值出现在闸首结构顶层;因该地基为软基,所以竖向位移较大,竖向位移整体呈反拱形,底板中轴线为船闸竖向位移的最小处,其值为-48.77 mm,

最大值位于边墩与回填土接触处,其值为-67.50 mm。图 6、图 7 为运行期(上闸门关)工况下,结构的主拉应力、主压应力云图。在该工况下,底板上表面,廊道进、出水口处均处于受拉状态,结构其余部分则处于受压状态。在闸首切角变形处底部,产生了局部拉应力集中,最大值为 5.13 MPa。底板上表面拉应力值较大,均超过了 2.00 MPa,底板上表面及门槛处的拉应力超过了混凝土的抗拉强度设计值,应对其进行配筋设计。该工作状况下,量值较大的主压应力分布的范围较大,主要分布在边墩底板下表面的中间,主压应力最大

值出现在下游底板下表面中间部位,其值为 2.27 MPa,该值小于混凝土的抗压强度设计值。闸首位移和应力规律与整体结构的拱形变形趋势相吻合。在闸首切角变形处底部的应力集中区消失,混凝土塑性区主要出现在船闸底板横槛处,在廊道口处也出现了少量的塑性区。

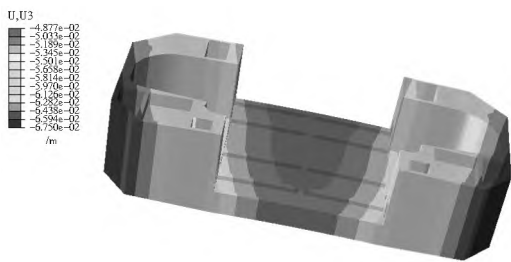


图 5 竖向位移云图

Fig. 5 Displacement nephogram in the vertical direction

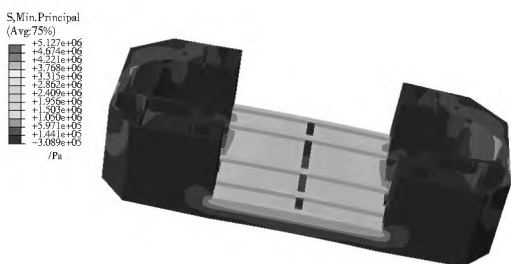


图 6 主拉应力分布云图

Fig. 6 The nephogram of principal tensile stress

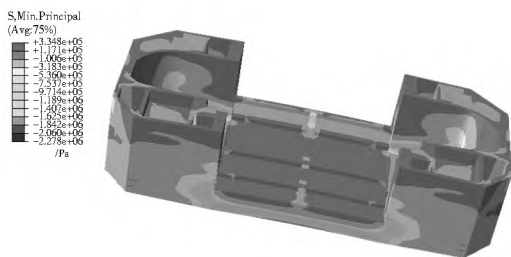


图 7 主压应力分布云图

Fig. 7 The nephogram of principal compressive stress

在弹塑性模型中,位移变化趋势与弹性模型相同,底板中轴线为船闸竖向位移的最小处,其值为-48.37 mm,最大值位于边墙与回填土接触处,其值为-67.91 mm。图9-图11为运行期(上闸关门)工况下,结构的主拉应力、主压应力、塑性区分布云图。在该工况下,底板上表面,廊道入水口,廊道出水口处处于受拉状态,结构其余部分处于受压状态,其中底板的上表面拉应力的量值较大,拉应力的最大值出现在上闸首下游的门槛处,其值为 1.77 MPa。量值较大的主压应力分布的范围较大,主要分布在边墩底板下表面的中间,主压应力最大值出现在下游底板下表面中间部位,其值为

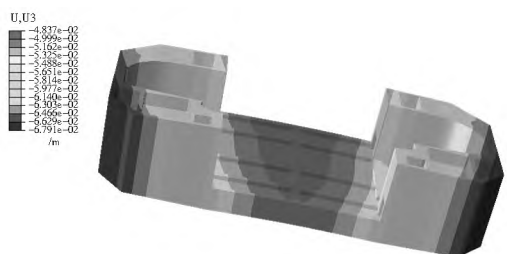


图 8 竖向位移云图

Fig. 8 Displacement nephogram in the vertical direction

2.06 MPa。闸首位移和应力规律与整体结构的拱形变形趋势相吻合。在闸首切角变形处底部的应力集中区消失,混凝土塑性区主要出现在船闸底板横槛处,在廊道口处也出现了少量的塑性区。

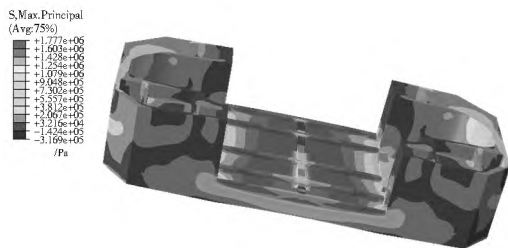


图 9 主拉应力分布云图

Fig. 9 The nephogram of principal tensile stress

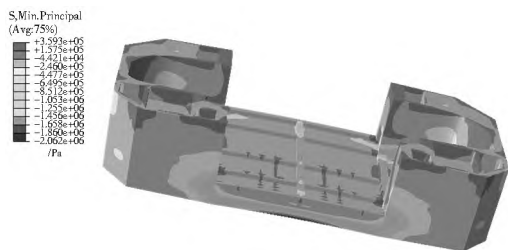


图 10 主压应力分布云图

Fig. 10 The nephogram of principal compressive stress

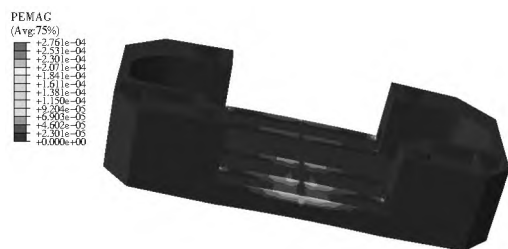


图 11 塑性区示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the plastic zone

### 3.2 两种有限元计算结果的对比

通过比较两种计算模型的计算结果可以看出,在位移方面二者相差不大,而在应力方面却有较大的差距,如表 3、表 4 所示。引起这种情况的主要原因是,位移主要是由地基决定的,两次计算地基没有变化,所以位移变化不大;而弹塑性计算中当混凝土进入塑性变形后就产生了应力重分布现象,这使得结构应力,特别是拉应力值大大降低。由于混凝土会发生塑性变形,而在弹性计算中混凝土的拉应力值已远超过其抗拉强度值,所以考虑混凝土的塑性变化很有必要,其计算结果也更合理。

表 3 不同本构模型下船闸最大位移对比

Tab. 3 Comparison of the maximal displacement values under different constitutive models

mm			
工况	顺河向最大位移	横河向最大位移	竖向最大位移
弹性计算工况	- 2.58	8.69	- 67.5
塑性计算工况	- 2.63	9.11	- 67.91

表 4 不同本构模型下船闸应力值对比

Tab. 4 Comparison of the stress values under different constitutive models

本构模型	MPa			
	底板上表面及横槛最大mises应力值	最大拉应力值	底板上表面及横槛最大拉应力值	底板下表面最大压应力值
弹性本构模型	3.27	5.13	3.25	2.27
塑性本构模型	2.06	1.78	1.77	2.06

### 4 船闸配筋及配筋效果检验

目前主要有两种配筋方法,一种是结构力学配筋法,另一种是应力配筋法。本文按应力配筋法利用自编软件进行配筋计算,计算结果见表 5。

由于配筋计算是以素混凝土结构计算结果为依据得出的,所以配筋结果是否真的合理还需检验。为了检验配筋效果,利用 ABAQUS 提供的植入钢筋的功能对配筋后的闸首进行弹塑性有限元分析,其中钢筋的模拟采用了桁架单元,结果见图 12。

表 5 配筋计算结果

Tab. 5 Reinforcement table

配筋位置	闸首底板	闸首门槛
钢筋选择	12#36	16#36

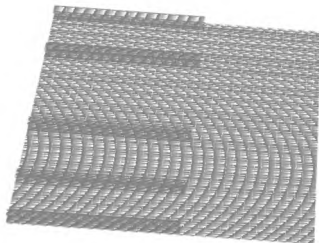


图 12 钢筋有限元模型

Fig. 12 Finite element model of steel

在检验配筋效果时一是看塑性计算后的塑性区是否大幅度减小,二是根据公式计算混凝土的裂缝宽度,看是否超过允许值。图 13 为配筋后的塑性区范围,配筋后仅在底板上表面处还存在少量的塑性区,与图 11 相比不仅塑性区范围大大减少,而且深度变浅。根据规范,以受拉钢筋应变结果为基础的最大裂缝宽度计算公式为<sup>[9-16]</sup>

$$w_{max} = a_1 a_2 a_3 \cdot \frac{\sigma}{E} (3c + 0.01 \frac{d}{\rho}) \quad (5)$$

式中:  $a_1, a_2, a_3$  为常数;  $\rho$  为有效配筋率;  $d$  为钢筋直径;  $\sigma$  为纵向钢筋受拉应力。



图 13 配筋后的塑性区示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the plastic zone after reinforcement

图 14 显示了隐藏混凝土及地基部分后的底板钢筋部分,钢筋最大拉应力为 33 90 MPa,由式(5)计算可得其裂缝宽度为 0 062 mm,小于 0 25 mm,闸首底板及门槛配筋设计符合安全要求。

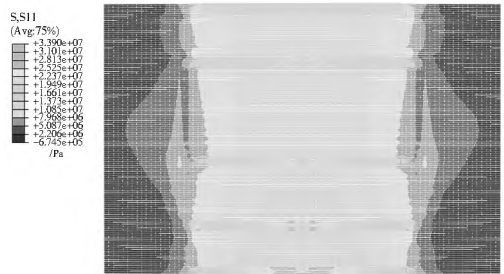


图 14 底板钢筋拉应力云图

Fig. 14 Tensile stress nephogram of base steel

### 5 结语

在软基船闸有限元分析中,弹性计算得到的结果中拉力往往大于混凝土的抗拉极限值,这说明混凝土会进入塑性状态,所以若在计算中能够考虑混凝土的塑性变化,则将会得到更合理的计算结果。利用 ABAQUS 中的塑性损伤本构模型以及植入钢筋的功能,对配筋后的船闸进行计算分析,并且通过对比配筋前后的塑性区范围及计算裂缝宽度,能够对配筋是否合理进行评价,这种方法对类似工程有一定参考价值。

### 参考文献(References):

- [1] 夏志泉. 塑性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990: 40-47. (XIA Zhigao. Plastic mechanics[M]. Shanghai: Tongji university press, 1990: 40-47. (in Chinese))
- [2] 庄茁, 由小川, 廖剑峰, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 170-178. (ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianfeng, et al. The finite element analysis and application base on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2009: 170-178. (in Chinese))
- [3] 张建华, 丁磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 230-233. (ZHANG Jianhua, DING Lei. The basic knowledge of ABAQUS and senior case[M]. Beijing: Publishing House of electronics industry, 2012: 230-233. (in Chinese))
- [4] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 227-228. (WANG Jinchang, CHEN Yekai. The application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang university press, 2006: 227-228. (in Chinese))
- [5] 任威威, 苏超. 闸首底板热学参数反演分析与温度场预测[J]. 科学技术与工程, 2013(13): 2586-2590. (REN Weiwei, SU Chao. Back analysis for thermal parameters of lock Soleplate and prediction of concrete temperature field[J]. Science Technology and Engineering, 2013(13): 2586-2590. (in Chinese))
- [6] 苏超, 崔满菡, 李炳华. 三维有限单元法在某大型分离式船闸闸室中的应用[J]. 南水北调与水利科技. 2013(5): 133-137. (SU Chao, CUI Mihan, LI Binghua. Application of three dimensional finite element method in the structure analysis of lock

chamber in the large scale separate ship lock [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013 (5): 133-137. (in Chinese)

[7] 卜丁, 杨斌. 船闸闸室结构三维有限元仿真分析[J]. 水运工程, 2010(445): 105-109. (BU Ding, YANG Bin. Three dimensional finite element simulation analysis of lock chamber structure [J]. Port and Waterway Engineering, 2010(445): 105-109. (in Chinese))

[8] 赵斌, 王志远, 王梅枝. 富春江船闸变形观测资料分析[J]. 大坝观测与土工测试, 2001(5): 7-11. (ZHAO Bin, WANG Zhiyuan, WANG Meizhi. Deformation data analysis for Fuchunjiang navigation lock [J]. Dam observation and geotechnical tests, 2001(5): 7-11. (in Chinese))

[9] 龙丽吉, 康海贵, 高鑫林. 有限元分析及应力配筋法在大型复杂混合式船闸结构设计中的应用[J]. 水运工程, 2013, 482(8): 141-146. (LONG Liji, KANG Haigui, GAO Xirilin. Application of finite element analysis and stress reinforcement method for structural design of large scale hybrid ship lock [J]. Port and Waterway Engineering, 2013, 482(8): 141-146. (in Chinese))

[10] JTJ 307-2001, 船闸水工设计规范[S]. (JTJ 307-2001, Code for Design of Hydraulic Structures of Shiplocks[S]. (in Chinese))

[11] SL 191-2008, 水工混凝土结构设计规范[S]. (SL 191-2008, Design Specification for Hydraulic Concrete Structures[S]. (in Chinese))

[12] Cook R D. Concepts and applications of finite element[M]. John Wiley & Sons, 2007.

[13] Schutter G D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete element using degree of hydration based material laws [J]. Computer and Structures, 2002, 80 (27-30): 2035-2042.

[14] Mathews P M. Vibrations of a beam on elastic foundation[J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1958, 38(3-4): 105-115.

[15] 姜弘道, 王国仪, 谈广鸣. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 北京, 水利水电出版社, 2009: 193-226. (JIANG Hongdao, WANG Guoyi, TAN Guangming. Hydraulic reinforced concrete structures[M]. Beijing, China WaterPower Press, 2009: 193-226. (in Chinese))

[16] 李社平, 赖红兰. 船闸设计要点分析[J]. 中国水运, 2011(9): 22-23. (LI Shepin, LAI Honglan. The key point analysis of lock [J]. China Water Transport, 2011(9): 22-23. (in Chinese))

(上接第 505 页)

[5] 钟恒文. 生活污水的 Fenton 氧化处理[J]. 中国给水排水, 2003, 19(8): 46-47. (ZHONG Hengwen. sludge of Fenton oxidation treatment [J]. China Water & Waste Water, 2003, 19(8): 46-47. (in Chinese))

[6] 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 等. Fenton 试剂与 CPAM 联合调理对污泥脱水效果的影响研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3538-3543. (MA Junwei, LIU Jiewei, CAO Rui. Sludge Dewaterability with combined conditioning using fenton's reagent and CPAM [J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3538-3543. (in Chinese))

[7] 杨斌, 杨家宽, 唐毅, 等. 粉煤灰和生石灰对生活污水污泥脱水影响研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 98-99. (YANG Bin, YANG Jiaokuan, TANG Yi. Effect of fly ash and quick lime on sanitary sewage [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(4): 98-99. (in Chinese))

[8] Jennifer L, Dalton, Kevin H, Gardner, et al. Properties of Portland cement made from contaminated sediments [J]. Resources Conservation and Recycling, 2004, 41(3): 227-241.

[9] 谢敏, 施周, 李淑展. 污泥脱水性能参数比阻检测的若干问题研讨[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 15-16. (XIE Min, SHI Zhou, LI Shuzhan. Sludge dewatering performance parameters [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(3): 15-16. (in Chinese))

[10] 王力. 利用磷石膏、粉煤灰和电石渣固化城市污水处理厂污泥试验研究[D]. 重庆大学, 2012. (WANG Li. Solidification of sludge from municipal wastewater treatment plants with phosphogypsum, fly ash and carbide slag [D]. Chongqing University, 2012. (in Chinese))

[11] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate [J]. Industrial Water Wastes, 1962, 7: 17-22.

[12] 刘宏. CPAM 污泥脱水絮凝剂的制备, 性能及机理研究[D]. 重庆大学, 2007. (LIU Hong. Study on synthesis and properties and mechanism of sludge dewatering flocculant CPAM [D]. Chongqing University, 2007. (in Chinese))

[13] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate [J]. Industrial Water Wastes, 1962, 7: 17-22.

[14] Qian J W, Xiang X J, Yang W Y, et al. Flocculation performance of different polyacrylamide and the relation between optimal dose and critical concentration [J]. European polymer journal, 2004, 40(8): 1699-1704.