

城市雨水管理

## 雨水系统旋流沉砂池的设计及性能研究

崔宇<sup>1</sup>, 王文海<sup>1</sup>, 林翔<sup>1</sup>, 王亚婧<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 为避免雨水中的重质固体颗粒物沉积,进而使排水通畅、缓解城市内涝,设计了一种用于雨水管道的旋流沉砂池,通过环形堰、导流筒等特定的结构,实现小雨量时有效除砂、大雨量时自动减小阻力而有效泄洪;利用底部的消能格栅抑制过流紊动,有效避免沉淀后的颗粒物再次悬浮而随水流溢出;进出水管道同高程布置,有利于既有管道系统的改造。通过 CFD 软件进行流态模拟及实验室模型试验,研究了沉砂池的内部流态及对各类重质颗粒物的去除效果。结果表明,该旋流沉砂池能达到预期的设计目标。

**关键词:** 雨水; 旋流沉砂池; 计算流体力学; 消能; 流动阻力

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0124-06

## Design and Performance of Vortex Grit Chambers for Stormwater System

CUI Yu<sup>1</sup>, WANG Wen-hai<sup>1</sup>, LIN Xiang<sup>1</sup>, WANG Ya-jing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** A vortex grit chamber was designed to avoid the deposition of heavy solid particles in stormwater system, to ensure the drainage capability, and to alleviate urban flooding risks. The device could effectively remove sands in light rains and release floods, by automatically adjusting the resistance through its specific structures such as the annular weir and the draft tube. The design could trap particles by using a bottom grid to dissipate the energy and to reduce flow turbulence. The inlet and outlet pipes were arranged at the same level, to facilitate retrofitting existing pipeline systems. The flow pattern was modeled in CFD software and tested in laboratory model, to study the internal flow of the grit chamber and the removal efficiency of different heavy particles. The results showed that the new design of the vortex grit chamber achieved the desired design objectives.

**Key words:** stormwater; vortex grit chamber; CFD; energy dissipation; flow resistance

自 20 世纪 60 年代起,旋流沉砂技术在国外开始推行,经过几十年的发展,在排水污染控制领域衍生出多种装置,而且在雨水径流污染控制领域也有

些研究进展。例如,加拿大 Stormceptor 兼有浮油和砂粒去除功能,但该池型结构较复杂,制造和维护管理也相对复杂;波兰 Vortechs<sup>TM</sup> 对颗粒物的去除率在

小强度降雨时较高,但在大雨时不稳定,存在沉淀物再悬浮问题。目前,国内对旋流沉砂技术的研究及应用多停留在污水处理领域,在雨水处理领域的研究及应用案例较少<sup>[1~4]</sup>。另外,国内针对雨水径流污染问题的研究已有较多成果<sup>[5~7]</sup>,但针对重质颗粒物污染控制的技术研究相对较少。

管道沉积物堵塞是城市内涝的主要原因之一,因此需对进入管道的颗粒物在源头沉淀处理,并及时进行管道清淤,加强对管道沉积物污染的控制<sup>[8,9]</sup>。为此,笔者设计了一种新型雨水管道用旋流沉砂池,旨在优化池型水力条件,实现小雨量时有效除砂、大雨量时自动减小阻力而有效排泄暴雨径流,同时简化维护管理。

## 1 池型设计

新型雨水管道用旋流沉砂池由进水管、砂粒沉降区、砂粒收集区、格栅、中心筒环形堰、过滤网等构成。本研究设计了无导流筒及格栅池型 a、有导流筒无格栅池型 b、有导流筒及格栅池型 c,经 CFD 模拟和实验室试验探究池型的影响。

雨水沿入流管道切向进入沉砂池,砂粒经重力与离心沉降作用截留于收集区,处理后的雨水经出流管道排出。该沉砂池的设计有六大特点:一是利用水力特性尽可能小水损地实现自旋流;二是导流筒的设计将引导水流旋流运动并均匀布水;三是池底消能格栅的设计,能减缓或阻止二次上升涡流的形成;四是倒圆台面的设计,运用浅池理论更多地捕捉砂粒沉降;五是入流管道与出流管道水平连接,方便改造工程选用;六是环形堰的设计,是实现雨水管道用沉砂池自动换挡功能的关键,即实现中小雨流量时有效除砂、大雨流量时有效泄洪。

## 2 数值模拟研究

### 2.1 模型建立与模拟

模拟过程运用 CFD 软件,如图 1 所示,用 GAMBIT 分别绘制池型 a、b 和 c,模拟流体定流量通过池体时的流态,为池型设计提供依据。

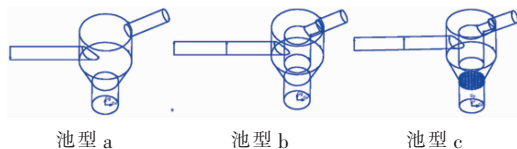


图 1 三种池型示意

Fig. 1 Diagram of three types of vortex grit chamber

经划分网格—设定边界条件—数值求解—定性分析池内流线—定量分析池体截面处速度矢量的过程分析水流运动规律,并运用离散相数值模型 Discrete Model 解析粒子的运动轨迹,即用材质接近石英砂的不同粒径颗粒运动轨迹来模拟砂粒在三种池型中的流动规律,进一步评价池型的可行性。

### 2.2 模拟结果分析

三种池型的流线对比见图 2。可知,池型 a 中流体流线不规整、旋流不明显;池型 b 流线较规整、旋流较明显,沉降区呈螺旋下降,砂粒收集区呈现清晰的二次上升涡流;有导流筒和格栅的池型 c 中格栅上部的流线和池型 b 相似,格栅下部由于格栅的存在旋流受到破坏,无明显二次上升涡流。

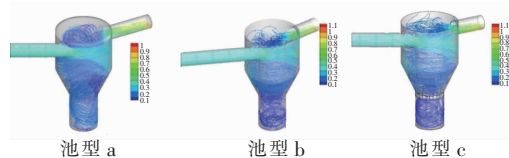


图 2 三种池型的流线

Fig. 2 Streamline of three types of vortex grit chamber

三种池型的横、纵剖面速度矢量图对比见图 3。

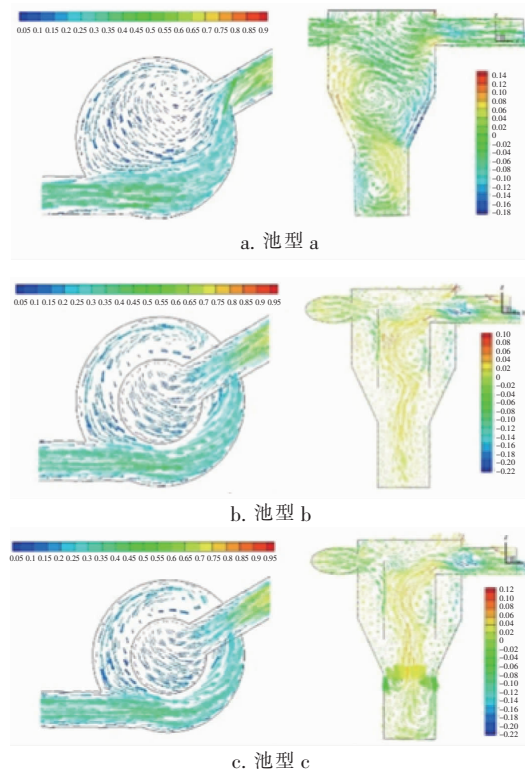


图 3 三种池型的横、纵剖面速度矢量图

Fig. 3 Speed vector of cross and longitudinal section of vortex grit chambers

横、纵剖面速度矢量图对应的速度为  $Z$  方向的分速度。对比池型 a 与池型 b 可以看出,池型 a 的旋转流体中心产生了偏移,发生了短流,可判断其沉砂效果不好;而池型 b 中导流筒的设置校正了中心偏移,来流经池体再从导流筒底部向上最终由出流管道流出,增加了水流的有效停留时间,并减缓了出流的紊动。对比池型 b 和池型 c 可以看出,池型 b 速度方向向下的螺旋流速度较小,筒中心上升的螺旋流速度较大,可见,二次上升涡流对砂粒的沉降起到了一定的副作用;而池型 c 中格栅的设置使其以下的砂粒收集区二次上升涡流运动速度接近于零,可有效避免颗粒物的二次悬浮。

显然,大粒径砂粒更容易沉淀,而特别小的砂粒很难沉淀并淤塞管道,污水厂中用对 0.2 mm 砂粒的去除率来评价除砂性能,本研究进一步提高要求,模拟 0.1 mm 粒径颗粒的运动轨迹,设定进水速度为 0.46 m/s。结果表明,只有池型 a 中出现了极小部分砂粒逃逸,可见导流筒环形堰不仅加强了水流旋流效果、增加了水流停留时间,而且限制了溢流高程,的确增强了颗粒沉淀效果;池型 c 中格栅下部砂粒收集区颗粒的运动轨迹无螺旋运动,与速度矢量图得出的格栅破坏二次上升涡流运动的结论一致。

模拟的后处理过程从三种池型的流线图、截面处速度矢量图及颗粒运动轨迹三个方面进行了对比分析,肯定了导流筒环形堰及格栅的设计,且发现了流场中存在的一些不利于砂粒沉降的现象,为后续设备的优化提供了思路和依据。

### 3 试验研究

由于数值模拟和实际情况存在一定差异,因此采用实验室模型试验进一步研究池型 c 在不同工况下对不同粒径砂粒的去除效果。

#### 3.1 模型尺寸确定

##### 3.1.1 模型几何比尺

本试验在与原型几何尺寸相似的模型中进行,缩小后的试验模型池体与原型池体相比,向心加速度对颗粒起了相对多一些的作用。对模型池体中的实际砂粒受力分析显示,砂粒主要受重力及离心力作用,根据离心加速度与重力加速度的比值计算得到分离因数  $f$  为 0.112,即砂粒所受离心力远小于重力,因此本试验中重力起主导作用,流动阻力以越过中心筒的局部阻力为主,可用弗劳德相似准则设计模型。由  $Fr_p = Fr_m$  可得,速度比尺为  $\lambda_v = \lambda_l^{1/2}$ ,流量

比尺为  $\lambda_Q = \lambda_v \lambda_l^2 = \lambda_l^{5/2}$ ,其中角标 p 代表原型池体,角标 m 代表模型池体, $\lambda$  为原型池体与模型池体中物理量的比尺。

#### 3.1.2 试验模型制作

在道路情况最不利时,设道路两侧均为单算雨水口且间距为 30 m、道路红线宽为 40 m,则单个雨水口的汇水面积为 600 m<sup>2</sup>。利用暴雨强度公式,取北京的地方参数,重现期为 3 年,降雨历时为 10 min,沥青路面径流系数为 0.9,得到 3、2、1、0.5、0.25 年等不同重现期下的流量分别为 19.2、17.22、13.84、10.46、7.08 L/s。

为满足规范要求<sup>[10,11]</sup>,设原型池体的直径为 1 200 mm,进、出水管道的直径均为 300 mm,中心筒的直径为 600 mm。现假定池体处理效果至少满足刚好溢流情况时的处理雨水量,即 3 年一遇雨水量 19.2 L/s,考虑模型内径为 100 mm 的管材容易获得和实验室流量条件的限制,取模型长度比尺  $\lambda_l = 3$ ,即原型池体几何尺寸为试验模型池体尺寸的 3 倍,则流量比尺  $\lambda_Q = 15.58$ ,则 3 年重现期对应的试验模型流量应大于或等于 1.23 L/s。图 4 为池体的尺寸及试验模型。

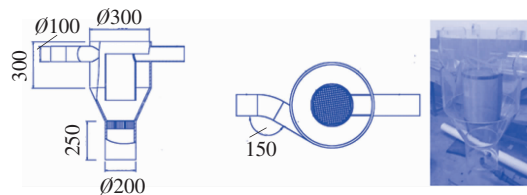


图 4 池体的尺寸及试验模型

Fig. 4 Diagram of chamber's size and model in test

#### 3.2 试验步骤

试验装置如图 5 所示。由进口处进水,通过超声波流量计计量进水流量,待流量稳定后,向沉砂池中均匀地投入脱水 3 min 的砂粒,其中一部分砂粒随水流出,被过滤纱布截留,其他大部分砂粒沉降到沉砂区;沉砂池运行 10 min 后停止运行,将纱布与其拦截的砂粒一起放入脱水机脱水 3 min,然后称重,通过滤网截留砂粒的质量与投入砂粒的总质量比值来确定除砂率。

分别测定 0.075 ~ 0.125、0.125 ~ 0.15、0.15 ~ 0.18、0.18 ~ 0.25、0.25 ~ 0.5、0.5 ~ 0.71 mm 六种不同粒径砂粒在 2.6、1.3、1.1、0.8 和 0.6 L/s 这五种流量下的去除率。由后续试验过程可得,1.1 L/s 为刚好不发生溢流时的流量,1.3 L/s 为半满流即充



满度为0.5时的流量,2.6 L/s为满流流量。

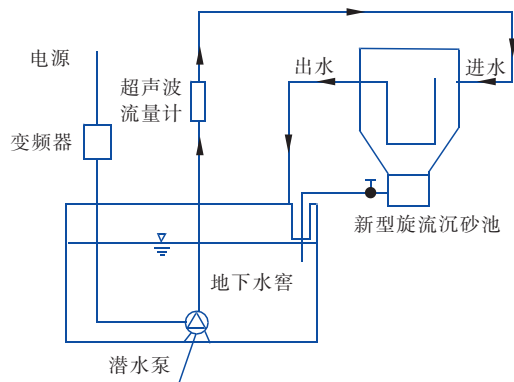


图5 试验装置

Fig. 5 Diagram of experimental set-up

为了研究中心筒部过滤网的设置对除砂率的影响,即是否有大量水流携带砂粒经中心筒孔洞随二次上升涡流流出池体,在取下不锈钢细过滤网的情况下对0.5~0.71、0.25~0.5、0.18~0.25 mm三种粒径砂粒重复上述试验;为了研究中心筒的设置对除砂效果的增强作用,在取下中心筒的情况下对0.075~0.125、0.125~0.15、0.15~0.18 mm三种粒径砂粒重复上述试验。

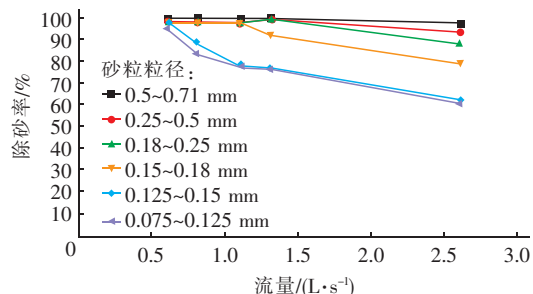
### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 除砂率

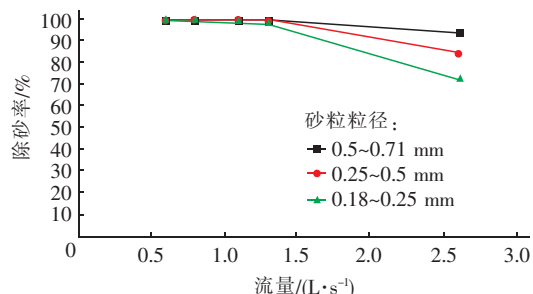
图6为不同流量下的除砂率。可以看出,随着流量的逐渐增大,沉砂池的除砂率逐渐降低。但是,带中心筒的池体在不溢流情况下的除砂率基本上都在75%以上,对较大粒径砂粒的去除率都在95%以上,能维持较高的去除率。在满流的情况下,来水大部分从导流筒上方溢流,因此除砂率较低,即便如此,带中心筒的池体的除砂率最低也在60%以上,说明在满流时沉砂池对砂粒也能起到一定的去除作用。

由图6(b)不带过滤网的池体对不同流量下较大粒径砂粒的去除率曲线与图6(a)带过滤网的池体对比可知,确实有部分水流携带砂粒经中心筒孔洞随二次上升涡流流出池体,但流量<1.3 L/s时数据差值很小,且0.18~0.25 mm粒径砂粒在两种情况下的去除率差值只有15%,说明只在大流量下才有部分水流穿过中心筒孔卷入二次上升涡流从而影响池体除砂率,但中心筒堰水平面下筒外池体中旋流运动占主体,这有效地保证了大流量时池体的除砂率,才能在满流情况下仍保持60%以上的除砂

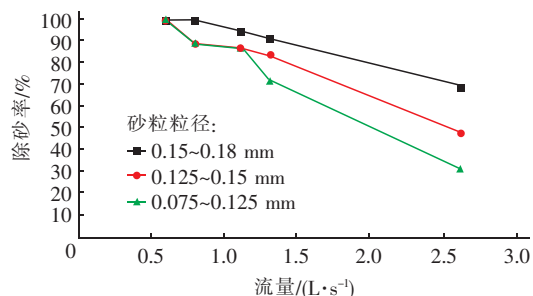
率。也可得出,中心筒上过滤网的设置对除砂率及流场影响不大,实际应用时可直接用不透水筒替代。对比图6(c)不带中心筒的池体对不同流量下0.18 mm以下粒径砂粒的去除率曲线与图6(a)带中心筒的池体的数据可知,中心筒堰的设置可显著提高池体的除砂率。



a. 带中心筒带纱网



b. 带中心筒不带纱网



c. 不带中心筒及纱网

图6 不同流量下的除砂率

Fig. 6 Sand removal rate under different flow

#### 3.3.2 水损分析

除砂率是评价雨水管道用旋流沉砂池的一个重要指标,同时,优化水力条件、减小水损也是本池型设计的目标,尤其在大流量下快速泄流以避免积水成为其主要目标时。本试验取带中心筒池型测不同流量下的水损,在池体进、出水管道底部位置各接一段玻璃管,玻璃管的液位表示该处动能所转化的势能,两处玻璃管液位差即为池体水损。表1的数据显示,虽然随流量增加水损亦逐渐增加,但各流量

下池体的水损普遍偏小。刚好产生溢流水量即最不利工况下对应的原型池体水损仅为84~90 mm。

表1 不同流量下池体的水头损失(带中心筒)

Tab.1 Head loss of chamber under different fluid (with center tube and gauze)

流量/(L·s <sup>-1</sup> )	0.6	0.8	1.1	1.3	2.6
模型水损/mm	17~18	22~23	20~24	28~30	29~30
原型水损/mm	51~54	66~69	60~72	84~90	87~90

## 4 性能评估

### 4.1 处理能力评估

根据前人对污水中砂粒沉降性能的研究<sup>[12]</sup>,业内普遍将0.2 mm左右粒径的砂粒作为代表进行研究,原因在于更大的砂粒易于沉淀而更小的砂粒随水漂移不易沉淀下来,现对粒径为0.15~0.18 mm的砂粒进行去除率评估。设一雨水口汇水面积为600 m<sup>2</sup>,降雨历时10 min,径流系数取0.9,由试验结果及计算得到不同重现期的流量及带中心筒过滤网

表2 不同重现期的流量及模型池体对0.15~0.18 mm粒径砂粒的去除率

Tab.2 Flow of different return period and removal rate of 0.15~0.18 mm sand by chamber model

重现期/年	0.5	1	2	3	5	10	20	30	50	100
原型流量/(L·s <sup>-1</sup> )	10.50	13.80	17.20	19.20	21.70	25.10	28.4	30.4	32.90	36.30
模型流量/(L·s <sup>-1</sup> )	0.67	0.89	1.10	1.23	1.39	1.61	1.82	1.95	2.11	2.33
除砂率/%	98.69	98.05	97.70	93.79	92.26	90.65	88.91	85.50	81.24	79.36

### 4.2 适用性分析

本研究提出的雨水系统用旋流沉砂池,可以大批量装设于雨水口或雨水检查井中,或与其一体化预制。在市政管路上装设的位置宜为源头处,如城市重要交通干线处雨水口或雨水井处。若对现有雨水口或雨水井进行改造,该池型进出水管道同轴的设计便于与现设施管顶平接进出水管道连接。为便于定期的底砂清掏及池体维护,另外设计了轻质一体化格栅及提砂斗,便于去除池底积砂和清洗。

为避免源头沉砂池数量过多而带来的高建设成本和管理成本,有时也需要在干管上设置沉砂池,本实验室研究数据表明,按比例放大后的沉砂池,其除砂效率一般会略有下降。其换算关系尚需要进一步的研究。

## 5 结论

经CFD模拟、试验研究及性能评估,新设计的雨水管道用旋流沉砂池相对既有沉砂井有三个方面的优势:①在小流量下,水中重质颗粒物可有效沉淀;②在大流量下,水流阻力系数自动变小,有利于泄放暴雨径流;③有效避免沉淀后的颗粒物再次悬

浮而随水流溢出。同轴进出水设计也有利于在现有管线内添加与改造,但其缺点在于竖向尺寸有所增加,导致制作成本和施工成本均略有上升。池型结构、材料、工艺等环节进一步优化后,有望应用于实际工程。

## 参考文献:

- [1] 汪家权,蒋文韬,王淦. 新型高效旋流沉砂池除砂效果研究[J]. 中国给水排水,2007,23(15):98-100.
- [2] 王晓玲,周莎莎,郎建,等. 旋流沉砂池除砂废水流场与结构参数优化模拟[J]. 工程力学,2012,29(6):300-307.
- [3] 李俊奇,吴熙,车伍,等. 多级集成化流体动力旋流分离器[P]. 中国专利:CN201120536893.3, 2012-09-05.
- [4] 李广贺,张旭,王宏,等. 多功能复合型固-液旋流分离器[P]. 中国专利:CN02153487.X,2003-04-16.
- [5] 张善发,李田,高廷耀. 上海市地表径流污染负荷研究[J]. 中国给水排水,2006,22(21):57-60.
- [6] 周赛军,任伯帆,邓仁健. 蓄水绿化屋面对雨水径流中污染物的去除效果[J]. 中国给水排水,2010,26

(5):38-41.

- [7] 潘国庆,车伍,李俊奇,等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J]. 中国给水排水,2008,24(22):25-29.
- [8] 李海燕,徐波平,徐尚玲,等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. 环境科学,2013,34(3):919-926.
- [9] 潘国庆,车伍,李海燕,等. 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响[J]. 环境科学学报,2009,29(4):771-776.
- [10] 中国建筑标准设计研究院. 排水检查井[M]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [11] 中国建筑标准设计研究院. 雨水口[M]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [12] 颜漂. 曝气沉砂池特性与优化研究[D]. 北京:北京建筑大学,2014.



作者简介:崔宇(1995-),女,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为城市水环境科学与工程。

E-mail:cuiyu15510247086@126.com

收稿日期:2016-06-05

(上接第123页)

式能够更好地降低污泥比阻,提高脱水效果。碱改性煤渣作为吸附调理剂的同时,也起到骨架结构的作用,能够增强新形成的污泥絮体强度,以至于在挤压下不会由于剪切力而破碎,从而使得污泥的脱水效果增加。另外,碱改性煤渣在污泥脱水上的应用也使得煤渣这一固体废弃物得到了资源化利用。

#### 参考文献:

- [1] Yue X, Li X M, Wang D B, *et al.* Simultaneous phosphate and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removals for landfill leachate using modified honeycomb cinders as an adsorbent[J]. J Hazard Mater, 2011, 190(1/3):553-558.
- [2] Zhu J, Baig S A, Sheng T, *et al.*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{MnO}_2$  assembled on honeycomb briquette cinders (HBC) for arsenic removal from aqueous solutions[J]. J Hazard Mater, 2015, 286:220-228.
- [3] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y. Recycling of wood chips and wheat dregs for sludge processing[J]. Bioresour Technol, 2001, 76(2):161-163.
- [4] Thapa K B, Qi Y, Clayton S A, *et al.* Lignite aided dewatering of digested sewage sludge[J]. Water Res, 2009, 43(3):623-634.
- [5] Chen C, Zhang P, Zeng G, *et al.* Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid[J]. Chem Eng J, 2010, 158(3):616-622.
- [6] 马维超,沈伟,余庚星,等. 新型高压板框式脱水机对

污泥脱水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11):120-122.

- [7] Pengthamkeerati P, Satapanajaru T, Chularuengsoarn P. Chemical modification of coal fly ash for the removal of phosphate from aqueous solution[J]. Fuel, 2008, 87(12):2469-2476.
- [8] Lin B, Li S, Hou X J, *et al.* Preparation of high performance mullite ceramics from high-aluminum fly ash by an effective method[J]. J Alloys Compd, 2015, 623:359-361.



作者简介:马维超(1982-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为污水深度处理。

E-mail:supermc@126.com

收稿日期:2016-10-15