

自流排砂沼气池设计与试验*

罗涛 陈闯 梅自力 韩智勇 李淑兰

(农业部沼气科学研究所工程技术研究中心, 成都 610041)

【摘要】 为实现自流排砂,以圆柱形沼气池为研究对象,进料管设计为弦向,使反应器内部流体产生旋流,并利用 Fluent 软件对其流场进行模拟分析,确定泥砂最易在底部左下角区域沉积。按水力相似准则建立试验模型,设计排砂管与进料管的夹角为 150°,以含砂量为 10% 的清水作为试验流体,批量连续进料,对自流排砂反应器与常规反应器的排砂性能进行比较。结果表明:自流排砂反应器在第 3 次排砂就能收集到泥砂,第 5 次排砂排砂率可达 86.13%,前 19 次平均排砂率是常规反应器的 3.81 倍,第 5~22 次的平均排砂率为 82.17%,明显优于常规反应器。

关键词: 沼气池 旋流 排砂率 自流

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0114-04

Design and Experiment of Automatic Flushing Basin of Biogas Digester

Luo Tao Chen Chuang Mei Zili Han Zhiyong Li Shulan

(Biogas Engineering Research Center, Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

Abstract

Taking the physical model of cylindrical biogas digester as the research project to design automatic flushing basin of biogas digester, the flow of the digester was rotated by designing feed pipe to be tangential. Fluent was used to analyze the process. It was found that the grit deposition area that was on lower left bottom. Based on the theory of hydraulic similarity, the design digester and the conventional digester were established. The angle between grit discharge pipe and feed pipe was designed for 150° according to the sedimentation law. Water was used as experiment fluid, whose sand contents were 10%. The results showed that sand would be collected at the 3rd discharging at design digester, the grit removal rate was up to 86.13% at the 5th, the average grit removal rate for 19 times was 3.81 times of the conventional, and the average of the 5th to 22nd was 82.17%. The grit removal result of conventional was exceeded by the design.

Key words Biogas digester, Rotational flow, Grit removal rate, Automatic flushing

引言

发酵物料泥砂的去除是沼气工程长期高效运行的关键^[1]。沼气工程一般采用批式发酵和连续发酵 2 种工艺,前者不会产生泥砂沉积、堵塞等问题,但其产气分布不均衡,厌氧消化效率低,投入产出比差;后者采用沉砂池或水解沉砂等措施对原料中的

泥砂进行沉淀预处理,投资大、沉淀效果差,严重影响反应器的产气效率^[2~5]。所有连续发酵沼气工程在实际运行过程中都定期整体清掏反应器以排出泥砂,耗费大量的人力、物力,且需大量的时间来重新启动发酵系统。

国外对连续发酵工艺反应器内部不溶性物料的动力学规律相关研究较多,但反应器内泥砂的排出

收稿日期: 2012-01-17 修回日期: 2012-02-09

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B03)

作者简介: 罗涛,助理研究员,主要从事生物质能源开发及利用研究,E-mail: luotao145@yahoo.com.cn

通讯作者: 梅自力,研究员,主要从事生物质能源开发及利用研究,E-mail: m13880233242@163.com

方法未见报道^[6-7]。沉砂池中广泛采用旋流原理,使泥砂沉积于紊流较小的区域后集中排出,但应用在沼气池内部泥砂方面的排除较少^[8]。

本文以圆柱形沼气池为研究对象,通过合理布置进料管位置,使反应器内部产生旋流,利用 Fluent 对其旋流流场进行数值分析,确定底部紊流较小的区域,即泥砂沉积集中区域,以指导排砂管设计,并按照水力相似准则,建立试验模型,进行常规反应器与自流排砂反应器的排砂性能比较试验。

1 反应器设计

1.1 反应器整体设计

反应器池体为圆柱型,底部为平面,进料管设计为弦向,与底面中心线水平间距为 L ,与底面垂直距离为 D ,深入反应器长度为 K 。设计 2 个进料管 A、B 关于池体轴线中心对称,如图 1 所示。其设计原理为:含有泥砂的发酵物料经进料管进入反应器,带动发酵液在其内形成旋流,发酵完成后,剩余液体从反应器顶部溢流堰溢出,由出料管排出,泥砂则在自身体积力作用下,沉积于反应器底部紊流较小的区域,2 个进料管形成的流场关于池体轴线对称,可扩大进料的作用范围。

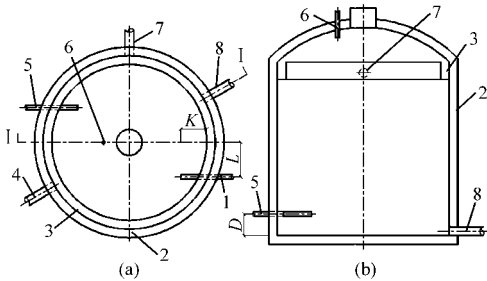


图 1 反应器示意图

Fig. 1 Sketch map of digester

(a) 俯视图 (b) I-I 剖面图

1. 进料管 A 2. 沼气池 3. 溢流堰 4. 排砂管 A
5. 进料管 B 6. 沼气管 7. 出料管 8. 排砂管 B

1.2 数值模拟

以池体内径为 4 m、池壁高度为 4 m、有效容积为 50 m^3 的设计反应器为研究对象,进行数值模拟分析。其中, $D = 500\text{ mm}$, $L = 800\text{ mm}$, $K = 1\,000\text{ mm}$, 进料管内径为 60 mm。

1.2.1 控制方程与边界条件

反应器进料过程的流场属于一般不可压缩水流流动问题,数值模拟采用 Reynolds 平均 N-S 方程、标准 ϵ 紊流模型封闭 Reynolds 方程描述^[9]。进料管来流顺畅,进入反应器前的流动是充分发展的均匀紊流,因此进口边界条件设为速度进口边界,采用断面平均流速,为 2.9 m/s 。

1.2.2 数值格式与网格划分

采用非结构化网格剖分计算区域,有限体积法进行控制方程离散^[10]。采用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE 算法)处理,二阶迎风格式,隐式求解。利用 Fluent 6.3 进行计算,以进、出口流量差值作为是否收敛依据,精度小于 0.5% 认为计算收敛。为减小计算量,并满足精度要求,将模型划分为 2 个区域,反应器高度 1 m 以上采用六面体网格,以下区域采用混合网格,网格数量约为 1.55×10^6 个。

1.3 模拟模拟结果及分析

平行于底面的 3 个剖面流速分布图如图 2 所示,其距离分别为 0.5、0.3 和 0.1 m。0.5 m 剖面的流速为 $5.02 \times 10^{-1} \sim 2.90\text{ m/s}$;0.3 m 剖面的流速为 $4.41 \times 10^{-3} \sim 5.02 \times 10^{-1}\text{ m/s}$;0.1 m 剖面的流速为 $1.24 \times 10^{-3} \sim 4.63 \times 10^{-1}\text{ m/s}$ 。剖面流速分布

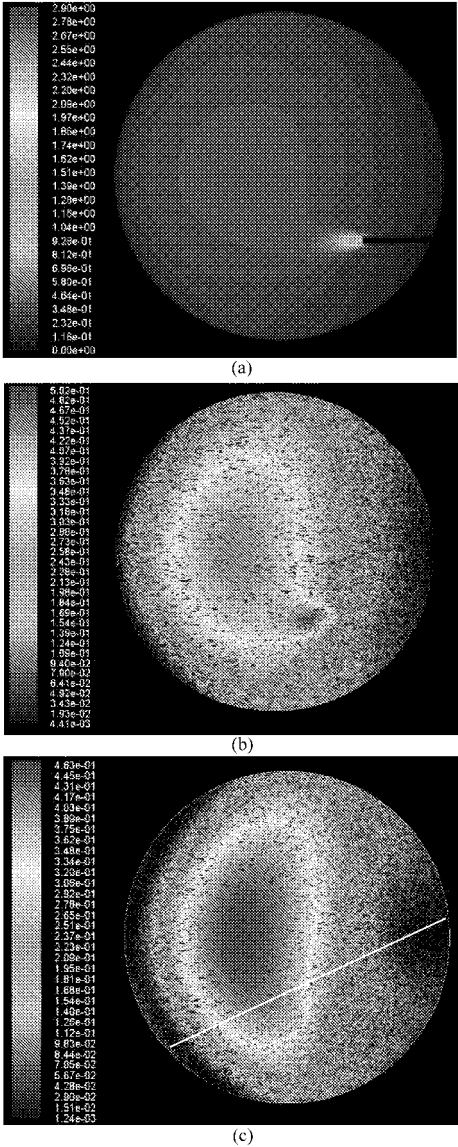


图 2 流速分布图

Fig. 2 Velocity field

(a) 0.5 m (b) 0.3 m (c) 0.1 m

从进料口自上而下逐渐减小,利于泥砂向反应器底部沉积。0.5 m 剖面,流速从进料管管口向四周迅速减小。0.3、0.1 m 剖面,管口前方流速较大,流体更新速度快;后方流速较小,流体更新速度慢。0.1 m 剖面,左边和右上角区域流速最小,流速变化均匀、紊流影响弱。

由图 1 中进料口 A 进料,含有泥砂的流体进入反应器后,挟砂力骤减,泥砂在向底部沉积的同时,在水平方向上受离心力作用,使其向池壁方向运动,因此认为泥砂最易沉积于反应器底部左下角区域,进料口 A、B 交替进料,流场叠加认为泥砂最易沉积在右上角和左下角区域,如图 2c 白线所示,且沉积后不易被泛起^[11~13]。综上,认为设计排砂管与白线重合,可获得最大自流排砂率。

2 反应器泥砂运动规律试验

2.1 试验装置

反应器按水力相似准则缩小,比例 $L_r = 9$,设计反应器编号为 I,常规反应器编号为 II,示意图分别如图 1、3 所示。

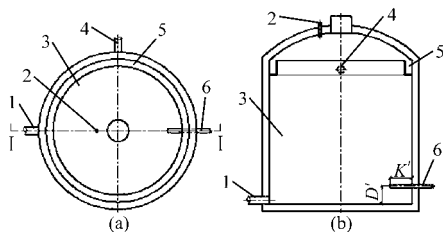


图 3 常规反应器示意图

Fig. 3 Sketch map of conventional digester

(a) 俯视图 (b) I-I 剖面图

1. 排砂管 2. 沼气管 3. 沼气池 4. 出料管 5. 溢流堰 6. 进料管

反应器 I 的结构尺寸为:池体内径为 0.44 m,池壁高度为 0.48 m,有效容积为 0.07 m^3 ,进料管内径为 14 mm,排砂管内径 35 mm。其中, $D = 63 \text{ mm}$, $L = 80 \text{ mm}$, $K = 150 \text{ mm}$,进料管和排砂管的夹角为 150° 。反应器 II 的结构尺寸同反应器 I,进料管、排砂管设计为径向。其中, $D' = 63 \text{ mm}$, $K' = 150 \text{ mm}$ 。试验装置主要由反应器、进料泵和进料池等组成^[12,14]。进料泵选用舟山佳璐水族器材制造有限公司 LP-555 型泵,额定功率 22 W,最大扬程 1.6 m,最大流量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,泵口内径 13 mm,用橡皮软管与进料管连接,整体置于进料池内。

2.2 试验方法

以清水作为试验流体。因粪便中泥砂含量可达其总固体(TS)质量分数的 8%~10%,所以设计试验流体含砂量为 10%^[4,15]。结合工程实际,以 40~65 目砂(粒径 $d > 0.2 \text{ mm}$)作为试验用砂,进料时间

间隔设计为 1 h,可使悬浮泥砂完全沉淀^[16~17]。

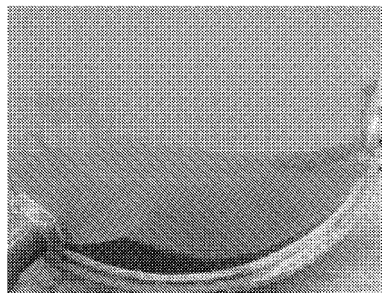
试验方法:试验开始前将 2 个反应器装满清水,批量连续进料,每次向进料池中投入 1 000 g 干砂和相应比例的清水,搅拌使泥砂在进料池中处于悬浮状态,进料完毕后自流排砂一次,排出量为 1/10 有效容积,并测量排砂量。将排出流体的水滤掉,在 105°C 温度下加热 10 h 后称量,即为排砂量^[14]。排砂量除以进砂量可得排砂率。为便于试验比较,设计反应器采用单管进料。

2.3 试验结果与分析

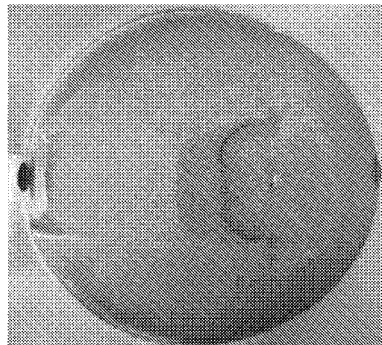
2.3.1 泥砂运动规律分析

反应器 I 和反应器 II 分别进行了 22 次、19 次排砂试验。反应器 II 第 19 次排砂,进料管被泥砂完全堵塞,无法进料;为便于比较,反应器 II 试验停止后,反应器 I 再进行 3 次排砂后停止试验,整个试验过程进料正常、无堵塞现象。

泥砂沉积结果如图 4 所示,反应器 II 内有大量泥砂,堆积在排砂管口周围,阻碍了新进泥砂向排砂管口移动;反应器 I 内泥砂沉积量相对较小,排砂管的排砂作用可使泥砂沉积区域得到有效排除,泥砂的沉积区域与模拟分析结果相符,设计排砂管和进料管之间形成了顺畅的排砂流道。



(a)



(b)

图 4 反应器泥砂沉积图片

Fig. 4 Picture of digester basin

(a) 反应器 I (b) 反应器 II

反应器 I 排砂效果明显优于反应器 II,主要因为:①泥砂在反应器 I 内的水平运动距离较反应器 II 短,与流体分离后,在沉降时间一定条件下,缩短进料口与排砂口的距离,有利于泥砂排出。②旋

流作用使反应器 I 内泥砂往侧壁方向移动——沉积区域向侧壁偏移,有利于沉积泥沙从排砂管排出。

③反应器 I 的排砂管设计在泥砂沉积区域,反应器自身的压力作用,可使得进入反应器的大部分泥砂由排砂管排出,少部分在流道两侧堆积后自然塌落,达到动态平衡;而反应器 II 的进砂量远大于排砂量与塌落量之和,因而造成管路堵塞。

2.3.2 排砂率分析

两反应器的泥砂排砂率如图 5 所示,反应器 I 的排砂率明显高于反应器 II。反应器 I 的排砂率规律呈现先短暂缓慢增长后迅速增长,最后维持较高值,第 3 次排砂时首次收集到泥砂,第 5 次时排砂率达到 86.13%,第 5 ~ 22 次的平均排砂率为 82.17%。反应器 II 第 5 次排砂时才能收集到泥砂,之后排砂率缓慢增长,第 12 次排砂率达到最大值 38.8%后逐渐降低。对两者前 19 次排砂效果进行比较,反应器 I 累计排砂量为 12 839.4 g,平均排砂率为 67.58%;反应器 II 累计排砂量为 3 366.8 g,平均排砂率为 17.72%,反应器 I 的排砂率是反应器 II 的 3.81 倍。因此可以认为设计反应器可以有效地排出其内部的泥砂,延长反应器的整体清掏周期。

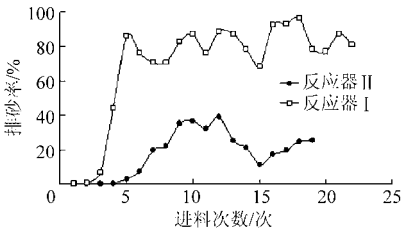


图 5 反应器排砂率

Fig.5 Grit removal rate of digesters

3 结论

- (1) 进料管设计为弦向,带动设计反应器内流体形成旋流,使泥砂沉积区域向侧壁方向偏移,设计排砂管于沉积区域,可形成顺畅的泥砂流道,显著提高排砂率。
- (2) 两个进料管交替进料流场叠加,认为泥砂容易沉积在左下角和右上角 2 个区域,且沉积后不易被泛起。
- (3) 反应器 I 前 19 次排砂的平均排砂率是反应器 II 的 3.81 倍,第 5 ~ 22 次的平均排砂率为 82.17%,认为设计反应器可以有效地排出进入其内的泥砂,延长反应器的整体清掏周期。

参 考 文 献

1 韩芳,林聪. 畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 1):41 ~ 47.
Han Fang, Lin Cong. Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.1):41 ~47. (in Chinese)

2 Shiue L L, Jian S L, Yu H W, et al. Strategy of controlling the volumetric loading rate to promote hydrogen-production performance in a mesophilic-kitchen-waste fermentor and the microbial ecology analyses [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(18): 8 682 ~8 687.

3 农业部人事劳动司. 沼气生产工[M]. 北京:中国农业出版社,2008.

4 李倩,蓝天,寿亦丰,等. 热肥联产大型鸡场废弃物沼气工程技术[J]. 中国工程科学,2011,13(2):35 ~39.
Li Qian, Lan Tian, Shou Yifeng, et al. Biogas technology combined with heat, power and fertilizer of large scale poultry farm [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(2): 35 ~39. (in Chinese)

5 Sánchez E, Travieso L, Weiland P, et al. Effect of influent strength changes on the performance of a down-flow anaerobic fixed bed reactor treating piggery waste [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 36(1): 73 ~82.

6 Font R, Lopez J M. Kinetics of insoluble-substrate fermentation in mixed continuous-flow systems [J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(10): 3 097 ~3 109.

7 Héctor A R, António A V, José A T. Kinetic modeling of enzymatic saccharification using wheat straw pretreated under autohydrolysis and organosolv process [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 36(1): 100 ~107.

8 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.
Wang Jiaquan, Jiang Wentao, Wang Gan. Grit removal efficiency of new type high-effective rotational flow grit chanber [J]. China Water & Waste Water, 2007, 23(15): 98 ~100. (in Chinese)

9 孙东坡,张艳艳,王鹏涛,等. 1 000 MW 电厂循环水进水池三维紊流数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2008(6): 99 ~102.
Sun Dongpo, Zhang Yanyan, Wang Pengtao, et al. Numerical simulation of three dimensional turbulent flow for inlet conduit of typical power plants [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(6): 99 ~102. (in Chinese)

- Jia Honglei, Wang Zenghui, Ma Chenglin, et al. Chopping and throwing mechanism of corn straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 96 ~ 99. (in Chinese)
- 22 丛宏斌, 李汝莘, 李洪江, 等. 玉米收获机茎秆堆放装置设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 107 ~ 111.
Cong Hongbin, Li Ruxin, Li Hongjiang, et al. Design of stacking mechanism for corn straw on combine [J]. Transaction of the CSAE, 2010, 26(5): 107 ~ 111. (in Chinese)
- 23 丛宏斌, 李明利, 李汝莘, 等. 4YQK-2型茎秆青贮打捆玉米收获机设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 96 ~ 100.
Cong Hongbin, Li Mingli, Li Ruxin, et al. Design of 4YQK-2 combine harvester for corn and straw ensilage [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 96 ~ 100. (in Chinese)
- 24 张道林, 孙永进, 赵洪光. 自走式穗茎兼收型玉米联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 79 ~ 82.
Zhang Daolin, Sun Yongjin, Zhao Hongguang. Design and experiment of the self-propelled combine harvester for corn and stalk [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 79 ~ 82. (in Chinese)
- 25 贺俊林, 胡伟, 郭玉富, 等. 扶禾杆在不对行导入玉米茎秆中的运动仿真[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 125 ~ 128.
He Junlin, Hu Wei, Guo Yufu, et al. Kinematic simulation of no-row feed-in mechanism with guide-rod for corn harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 125 ~ 128. (in Chinese)
- 26 陈志, 韩增德, 颜华, 等. 不分行玉米收获机分禾器适应性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 50 ~ 52.
Chen Zhi, Han Zengde, Yan Hua, et al. Orthogonal validation experiment on crop divider of corn-harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 50 ~ 52. (in Chinese)
- 27 贺俊林, 佟金, 陈志, 等. 指形拨禾轮分禾机构的虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 53 ~ 57.
He Junlin, Tong Jin, Chen Zhi, et al. Virtual design and kinematic simulation for feed-in mechanism with finger rotor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 53 ~ 57. (in Chinese)
- 28 Calmer Marion. Universal corn head mounting system: US, US20050120694 [P]. 2005-06-09.
- 29 朱纪春, 陈金环. 国内外玉米收获机械现状和技术特点分析[J]. 农业技术与装备, 2010(4): 23 ~ 24.
Zhu Jichun, Chen Jinhuan. Present situation and technical characteristics analysis of corn combine harvester in home and abroad [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2010(4): 23 ~ 24. (in Chinese)
-

(上接第 117 页)

- 10 孙宏宇, 董玉平, 周淑霞, 等. 基于 Fluent 的固定床生物质气化炉冷态压力场研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 94 ~ 97.
Sun Hongyu, Dong Yuping, Zhou Shuxia, et al. Analysis of fixed-bed biomass gasifier cold internal pressure field based on Fluent [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 94 ~ 97. (in Chinese)
- 11 段存福, 郑传林. 沉砂池运行条件的改进[J]. 山东商业职业技术学院学报, 2004, 4(2): 77 ~ 78.
Duan Cunfu, Zheng Chuanlin. The improvement of gritchamber with rotational flow [J]. Journal of Shangdong Institute of Commerce and Technology, 2004, 4(2): 77 ~ 78. (in Chinese)
- 12 柴诚敬, 张国亮. 化工流体流动与传热[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 13 明宗富, 雒征. 沉砂池泥砂运动规律的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 67 ~ 70.
Ming Zongfu, Luo Zheng. Study on laws of sediment movement in settling basins [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2): 67 ~ 70. (in Chinese)
- 14 蒋定生, 高鹏, 徐学选, 等. 水窖沉砂池结构形式试验设计[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 27 ~ 31.
Jiang Dingsheng, Gao Peng, Xu Xuexuan, et al. Trial study on designing of sand-settling tank for runoff harvesting [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 27 ~ 31. (in Chinese)
- 15 姚爱莉, 杨可俊, 赵跃新, 等. 高效处理鸡粪沼气的研究和设计[J]. 中国沼气, 1990, 8(8): 30 ~ 33.
- 16 刘焕芳, 宗全利. 一种新型平流式沉砂池的设计[J]. 工业水处理, 2005, 25(4): 71 ~ 74.
Liu Huanfang, Zong Quanli. Design of a new-type rectangular sediment tank [J]. Industrial Water Treatment, 2005, 25(4): 71 ~ 74. (in Chinese)
- 17 李涛. 沉砂池的设计及不同池型的选择[J]. 中国给水排水, 2001, 17(9): 37 ~ 42.