

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0020



## 好氧颗粒污泥处理城市污水的农田适灌性

严爱兰<sup>1</sup>, 戚毅婷<sup>1</sup>, 郑知金<sup>2</sup>

(1. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 湖州市埭溪镇农业服务中心, 浙江 湖州 313023)



严爱兰

**摘要:** 利用好氧颗粒污泥处理城市污水, 探讨城市污水用于农田灌溉的可行性. 研究表明: 经过好氧颗粒污泥处理过的污水, 污水中的化学需氧量为 130 mg/L, 悬浮物为 50 mg/L, 总氮 20 mg/L, 总磷只有 1.5 mg/L, 出水中的 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 去除率达到 60% 和 55%; 好氧颗粒污泥对污水中的氮、磷去除效果一般, 去除率分别为 50% 和 53%; 出水中重金属去除率比较高, 镉质量浓度  $1.0 \times 10^{-5}$  mg/L, 小于《农田灌溉水质标准》镉的标准值 0.006 mg/L, 出水中铅质量浓度 0.02 mg/L, 小于标准值 0.1 mg/L, 出水中锌、铜、汞、铬的质量浓度也远远低于标准中的质量浓度值. 结果表明, 好氧颗粒污泥处理过的城市污水的出水可以用于农田灌溉, 出水中 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub>、氮、磷、重金属等指标完全达到《农田灌溉水质标准》要求.

**关键词:** 城市污水; 好氧颗粒污泥; 脱氮除磷; 农田灌溉; 重金属

**中图分类号:** S277.9; TV93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)06-0531-05

严爱兰, 戚毅婷, 郑知金. 好氧颗粒污泥处理城市污水的农田适灌性[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(6): 531-535.

Yan Ailan, Qi Yiting, Zheng Zhijin. Farmland irrigation of city sewage treated by aerobic granular sludge[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(6): 531-535. (in Chinese)

## Farmland irrigation of city sewage treated by aerobic granular sludge

Yan Ailan<sup>1</sup>, Qi Yiting<sup>1</sup>, Zheng Zhijin<sup>2</sup>

(1. Institute of Hydraulic &amp; Environmental Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. Huzhou Daixi Town Agricultural Service Center, Huzhou, Zhejiang 313023, China)

**Abstract:** The irrigation possibility of city sewage treated by aerobic granular sludge was explored. Results show that after the sewage was treated by aerobic granular sludge, the removal rates of COD<sub>Cr</sub> and BOD<sub>5</sub> in its effluents were 60% and 55% respectively; the removal rates of nitrogen and phosphorus were 50% and 53% separately; the removal rate of heavy metal was very high. The content of cadmium in the effluents was less than  $1.0 \times 10^{-5}$  mg/L. The Farmland Irrigation Water Quality Standard, whose value is less than 0.006 mg/L. Pb content in the effluents is 0.02 mg/L, less than the standard value of 0.1 mg/L. And the contents of other heavy metals, such as zinc, copper, mercury, chromium in the effluents were also much lower than the content values in the standard. So, the effluents of city sewage treated by aerobic granular sludge could be applied to farmland irrigation, and the indexes of COD<sub>Cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, nitrogen, phosphorus, and other heavy metals in the effluents fully meet the requirements of the standard of the Farmland Irrigation Water Quality.

**Key words:** city sewage; aerobic granular sludge; dephosphorization and deoxidation; irrigation farmland; heavy metal

收稿日期: 2015-01-30; 网络出版时间: 2015-06-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150603.1017.009.html>

基金项目: 浙江省水利厅重点科技项目(RB1407)

作者简介: 严爱兰(1977—), 女, 浙江江山人, 讲师, 博士(yal200@126.com), 主要从事农村水环境安全研究.

戚毅婷(1986—), 女, 浙江湖州人, 助教(qyt-198615@163.com), 主要从事农村水利工程结构研究.

根据浙江省水利科技发展“十二五”规划,在国家实行最严格的水资源管理的大背景下,在极端气候愈加频繁的现实条件下,农业方面迫切需要全面推进节约用水、循环用水。据粗略估计,农业用水大户的用水总量已经占到了总用水量的60%<sup>[1]</sup>,这些用水靠天然降水远远不能满足农业用水量的需求,加上现有的地表水资源被严重污染而且水资源枯竭,导致农业用水非常短缺,严重制约了农业生产的发展<sup>[2]</sup>,因此有必要寻找更多的水资源用于农业灌溉。若城市污水经处理后用于农田灌溉,可充分利用土壤对污染物的吸附、分解、迁移、转化及农作物吸收、降解作用,达到消除污染物目的,实现城市污水无害化、资源化处理要求,防止区域河流受污水污染,既可以解决农田灌溉水资源不足的问题,又有利于农业丰收。

目前常用的城市污水处理方法是用活性污泥进行污水处理,但存在很多弊端,比如很难同时达到去除有机物和脱氮除磷,且产生的剩余污泥量很大<sup>[3-5]</sup>;为了去除污水中的氮磷等营养物质以及后续大量剩余污泥的处理,往往需要增加设备和基建,加大了处理成本,而好氧颗粒污泥在处理污水工艺方面比普通活性污泥更能节约成本且处理效果好<sup>[6]</sup>。

为了探讨城市污水经过好氧颗粒污泥处理之后,能否满足《农田灌溉水质标准》(GB5084—2005)的要求,同时考虑工程投资和运行费用,文中采用实验室装置,研究好氧颗粒污泥处理城市污水之后用于农田灌溉的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验污泥

试验所用接种污泥为曝气池的普通活性污泥,污水处理厂服务范围主要为主城区污水处理系统,废水主要成分和生活污水、少量工业废水,生活污水中主要污染物有营养物质(氮和磷)、有机物(COD或BOD)以及悬浮固体(SS),工业废水中主要包括印染、化工、纺织、饮料等废水,大致比例为40%,36%,15%,9%。

### 1.2 试验装置

试验装置如图1所示。采用序批式活性污泥法(sequencing batch reactor activated sludge process, SBR),反应器呈圆柱状,材料为有机玻璃,反应器的直径为90 mm,高为1 200 mm,有效体积为8 L。出

水体积为有效容积的50%,表面上升气速为3.10 cm/s。反应器的运行周期设定为4 h,其中进水15 min、曝气180 min、沉淀25~30 min、排水10 min,闲置5~15 min。各阶段的时间通过液位控制器来控制。试验系统放在实验室内,实验室温度控制在15~25℃。

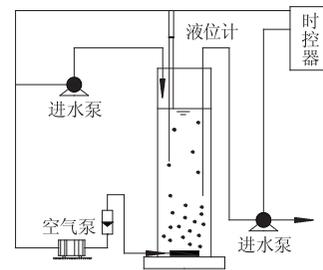


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental instrument

### 1.3 分析项目及方法

表1为分析的项目及测定方法<sup>[7]</sup>,其中主要项目为污泥容积指数(SVI)、污泥质量浓度(MLSS)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、硫化物(S)、阴离子表面活性剂(AS)、全盐量(TS)、氯化物(CL)、重金属离子(HMI)等的去除情况。

表1 指标测试方法  
Tab. 1 Measuring method of index mg/L

项目	保存方法	测定方法
SVI	现取现测	目测法
MLSS	-	重量法,103~105℃烘干
COD <sub>Cr</sub>	加H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 至pH<2,2~5℃冷藏	重铬酸钾法
BOD <sub>5</sub>	冷冻,pH<2	在20±1℃下培养5 d,分别测定样品培养前后的溶解氧
ρ(SS)	-	重量法,103~105℃烘干
ρ(TN)	加H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 至pH<2	过硫酸钾氧化 紫外分光光度法
ρ(TP)	加H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 至pH<2 2~5℃冷藏	过硫酸钾消解——钼锑抗分光光度法
ρ(S)	用NaOH调至中性, 加2 mL 1 mol/L 乙酸锌和1 mL 1 mol/L NaOH	碘量法
ρ(AS)	4℃冷藏	亚甲基蓝分光光度法
ρ(TS)	2~5℃冷藏	重量法
ρ(CL)	2~5℃冷藏	硝酸银滴定法
ρ(HMI)	2~5℃冷藏	原子吸收分光光度计法

## 2 结果与分析

### 2.1 好氧颗粒污泥的培养

SBR反应器接种污水处理厂曝气池的活性污泥,闷曝1周,随着反应器的运行,在反应器中可以发现污泥形态转变过程见图2。

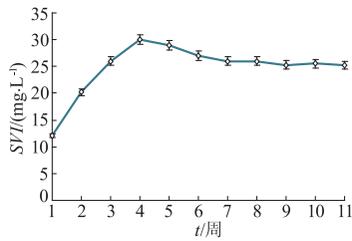


图2 好氧颗粒污泥培养阶段与 SVI 值的关系

Fig. 2 Relationship between aerobic granular sludge cultivated phase and SVI

整个过程可以分为3个阶段:第一阶段污泥复活阶段,反应器接种污泥为活性污泥,反应器运行7 d后,反应器中好氧颗粒污泥 SVI 量从 12.0 mg/L 缓慢上升至 20.2 mg/L,系统中的污泥质量浓度 MLSS 降低,此阶段可以认为是污泥的复活期. 第二阶段驯化阶段,继续运行 15 d 后, SVI 稳定在 30 mg/L 左右的水平,这个阶段可以称为反应器中微生物的驯化阶段. 第三阶段污泥颗粒化阶段,驯化期后的 30 d 中,反应器中污泥的 SVI 量大幅下降,并维持在 25 mg/L 以下,而 MLSS 处在很高的水平,接近 8 mg/L. 用 15 倍显微镜对 SBR 中污泥形态进

行观测,发现反应器中出现了好氧颗粒污泥,且颗粒较密实,颗粒的粒径主要在 0.2 mm,但是颗粒形状不规则,因此把此阶段称为污泥的颗粒化阶段. 由此可见,在 SBR 系统中,只要有一定的生物活性污泥作为接种污泥,就可以培育出好氧颗粒污泥,用以处理废水.

## 2.2 有机物 COD<sub>Cr</sub> 等的去除效果

在 SBR 系统中,当好氧颗粒污泥形成并稳定运行 10 d 后,对 SBR 系统中经好氧颗粒污泥处理的污水水质进行测定,测定结果见表 2. 由表可知,好氧颗粒污泥可以有效去除城市污水中的 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub>. 城市污水进水中 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 质量浓度  $\rho_{进}$  变化范围为 200 ~ 700 mg/L 和 120 ~ 420 mg/L,污水经好氧颗粒污泥吸收转化,出水中 COD 和 BOD<sub>5</sub> 质量浓度  $\rho_{出}$  分别为 90 ~ 150 mg/L 和 30 ~ 70 mg/L,可见好氧颗粒污泥对污水中 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 的去除率 TRR 较高,平均去除率分别达到 60% 和 55%. 随着反应器的运行,污水中的颗粒性污染物越多,则总去除率 TRR 越高. 说明在利用好氧颗粒污泥对废水中的 COD<sub>Cr</sub> (包括 BOD<sub>5</sub>) 的处理可以达到经济、便捷、高效的处理效果.

表2 污水进水和出水水质  
Tab. 2 Quality of sewage influent and effluent

项目	$\rho_{进}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\rho_{出}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		TRR/%	$\rho_{标}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		
	变化范围	平均值	变化范围	平均值		水作	旱作	青菜
SS	70 ~ 500	250	25 ~ 90	50	85	≤150	≤200	≤100
COD <sub>Cr</sub>	200 ~ 700	400	90 ~ 150	130	60	≤200	≤300	≤150
BOD <sub>5</sub>	120 ~ 420	240	30 ~ 70	58	55	≤80	≤150	≤80
TN	30 ~ 80	40	15 ~ 25	20	50	≤12	≤30	≤30
TP	1.7 ~ 4.8	4.0	0.5 ~ 2.5	1.5	53	≤5	≤10	≤10
AS	3.2 ~ 5.0	4.4	3.0 ~ 4.6	4.0	10	≤5.0	≤8.0	≤5.0
TS	500 ~ 1300	780	320 ~ 760	20	20		≤1000	
S	1.0 ~ 5.0	3.0	0.1 ~ 0.7	0.5	82		≤1.0	
CL	25 ~ 35	30	20 ~ 30	25	10		≤250	

由表 2 可知,参照《农田灌溉水质标准》(GB5084—2005)要求,青菜灌溉的要求最高,出水中的化学需氧量质量浓度  $\rho_{标}$  最高不得大于 150 mg/L、悬浮物最高不得大于 100 mg/L,总氮不得大于 30 mg/L,总磷不得大于 10 mg/L,阴离子表面活性剂不得大于 5.0 mg/L,经过好氧颗粒污泥处理过的城市污水,污水中的化学需氧量为 130 mg/L,悬浮物为 50 mg/L,总氮为 20 mg/L,总磷只有 1.5 mg/L,上述指标完全达到《农田灌溉水质标准》要求.

## 2.3 脱氮除磷效果

农作物生长需要氮、磷元素,若土壤中氮磷含量不足,则会影响作物生长,故灌溉用水中含少量氮磷元素,不但无害而且有益于提高农作物的产

量,因此,较理想的状况是通过好氧颗粒污泥处理的污水较普通活性污泥法处理污水中的氮磷去除率低. 卢然超等<sup>[8]</sup>、高景峰等<sup>[9]</sup>采用实验室反应器,通过普通活性污泥驯化出具有脱氮除磷功能的好氧颗粒污泥. 对照表 2 可以看出,通过好氧颗粒污泥的吸收转化,出水时总氮达到 15 ~ 25 mg/L,对于水作而言,总氮质量浓度偏高,总磷质量浓度在 2.5 mg/L 以下,参照《农田灌溉水质标准》要求污水中氮磷质量浓度符合灌溉标准. 汪善全等<sup>[10]</sup>的研究表明,好氧颗粒污泥去除氮磷率达到 75% 以上,但文中好氧颗粒污泥去除氮磷的效果氮只有 50%,总磷为 53%,这个结果表明,污水中含有较多的氮、磷,若用来灌溉对农作物生长是有益的. 因此,经过好

氧颗粒污泥处理过的污水用于农田灌溉,不但可以节省处理成本,还有益于作物生长。

#### 2.4 去除重金属效果

城市污水中含有部分工业废水,工业废水中通常含有重金属,常见的重金属离子如镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、锌(Zn)、汞(Hg)等是污水中典型的有毒有害污染物质,若这些重金属一旦滞留于土壤,则对作物的生长极具危害性,会累积在作物体内,进入食物链<sup>[11]</sup>,且危害极大,较少的含量就有毒害作用,这在普通的活性污泥处理污水时,必须慎重考虑。传统去除方法废水中的重金属方法主要有膜分离、离子交换、电渗析等。这些方法能达到一定的处理效果,但有很多缺陷,如能耗大、运行费用高、处理效果不够理想等<sup>[12]</sup>。表3为处理前后污水中重金属离子质量浓度。由表可知,采用好氧颗粒污泥法处理城市污水,可有效去除重金属离子。有研究<sup>[13-14]</sup>表明,好氧颗粒污泥由于结构致密且表面积大,是一种良好的重金属吸附剂。Liu等<sup>[15]</sup>利用好氧颗粒污泥分别对污水中有毒有害重金属 $Cd^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 的吸附进行了研究,若好氧颗粒污泥的质量浓度达到100 mg/L时,在污水中 $Cd^{2+}$ 质量浓度越多,去除率越高。文中试验表明,经过好氧颗粒污泥处理过的污水,出水中镉的质量浓度为 $1.0 \times 10^{-5}$  mg/L,小于《农田灌溉水质标准》镉的质量浓度要求( $\leq 0.006$  mg/L),出水中铅质量浓度为0.02 mg/L,小于标准值0.10 mg/L,出水中锌、铜、汞、铬的质量浓度也远远低于标准中的质量浓度值。由此可见,好氧颗粒污泥可以吸附污水中的重金属,使出水中的重金属质量浓度满足农田灌溉要求。

表3 处理前后污水中重金属离子质量浓度

Tab.3 Concentration of heavy metal ion and number of bacterium in influents and effluents mg/L

项目	$Cd^{2+}$	$Pb^{4+}$	$Zn^{2+}$	$Cu^{2+}$	$Hg^{2+}$	$Cr^{6+}$
$\rho_{进}$	$5.0 \times 10^{-5}$	0.008	0.06	0.09	$5.0 \times 10^{-5}$	0.05
$\rho_{出}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.002	0.02	0.03	$2.0 \times 10^{-5}$	0.02
$\rho_{标}$	$\leq 0.006$	$\leq 0.100$	$\leq 2.000$	$\leq 1.000$	$\leq 0.001$	$\leq 0.100$

### 3 结论

1) 在SBR反应器中,只要有一定的生物量,就可以生成颗粒污泥,颗粒污泥形态转变过程可以分为3个阶段:第一阶段为污泥复活阶段,第二阶段为驯化阶段,第三阶段为污泥颗粒化阶段。3个阶段对污水均有处理效果,但在污泥颗粒化阶段效果最好。

2) 经过好氧颗粒污泥处理过的污水,污水中的

化学需氧量质量浓度为130 mg/L,悬浮物为50 mg/L,总氮20 mg/L,总磷只有1.5 mg/L,小于《农田灌溉水质标准》中的要求。出水中重金属镉质量浓度小于 $1.0 \times 10^{-5}$  mg/L,铅质量浓度为0.02 mg/L,参照《农田灌溉水质标准》要求,均小于标准值,出水中锌、铜、汞、铬的质量浓度也远远低于标准中的质量浓度值,满足农田灌溉要求。

#### 参考文献(References)

- [1] 黄玉源,黄益宗,李秋霞,等.广州市污水灌溉对菜地土壤和蔬菜的影响[J].环境化学,2005,24(6):731-732.  
Huang Yuyuan, Huang Yizong, Li Qiuxia, et al. The impact of Guangzhou city sewage irrigation on vegetable soil and vegetables [J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(6): 731-732. (in Chinese)
- [2] 严爱兰,郑知金,戚毅婷.农村生活污水一级处理水灌溉对青菜生长品质影响[J].排灌机械工程学报,2015,33(4):352-355.  
Yan Ailan, Zheng Zhijin, Qi Yiting. Effect on cabbage quality with rural sewage primary treatment water irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(4): 352-355. (in Chinese)
- [3] 迟寒,刘毅慧,杨凤林,等.好氧颗粒污泥处理城市生活污水[J].水处理技术,2006,32(8):73-77.  
Chi Han, Liu Yihui, Yang Fenglin, et al. Treatment of municipal domestic sewage with aerobic granular sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2006, 32(8): 73-77. (in Chinese)
- [4] 竺建荣,刘纯新.好氧颗粒污泥的培养及理化特征[J].环境科学,1999,20(2):38-41.  
Zhu Jianrong, Liu Chunxin. Cultivation and physico-chemical characteristics of granular activated sludge in alternation of anaerobic/aerobic process [J]. Environmental Science, 1999, 20(2): 38-41. (in Chinese)
- [5] 周延年,韦甦,姚新卫,等.工业园区废水好氧颗粒污泥的培养[J].工业水处理,2010,30(5):30-32.  
Zhou Yannian, Wei Su, Yao Xinwei, et al. Cultivation of aerobic granular sludge with the wastewater from industrial park [J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(5): 30-32. (in Chinese)
- [6] 饶彤彤,王立,李军,等.不同流态对好氧污泥颗粒化的影响[J].中国给水排水,2011,27(15):88-90.  
Rao Tongtong, Wang Li, Li Jun, et al. Effect of different flow patterns on aerobic sludge granulation [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(15): 88-90. (in Chinese)

- [ 7 ] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 3版. 北京:中国环境科学出版社,1997.
- [ 8 ] 卢然超,张晓建,张悦,等. SBR 工艺污泥颗粒化对生物脱氮除磷特性的研究[J]. 环境科学学报,2001,21(5):99-104.  
Lu Ranchao, Zhang Xiaojian, Zhang Yue, et al. Effect of the sludge granulation on nitrogen and phosphorus removal in SBR process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21 (5):99-104. (in Chinese)
- [ 9 ] 高景峰,陈冉妮,苏凯,等. 好氧颗粒污泥同时脱氮除磷实时控制的研究[J]. 中国环境科学,2010,30(2):180-185.  
Gao Jingfeng, Chen Ranni, Su Kai, et al. Real time control of simultaneous nitrogen and phosphorus removal by aerobic granular sludge [J]. China Environmental Science,2010,30(2):180-185. (in Chinese)
- [ 10 ] 汪善全,张胜,李晓娜,等. 高浓度 Vc 生产废水培养好氧颗粒污泥的试验研究[J]. 环境科学学报,2007,28(10):2244-2248.  
Wang Shanquan, Zhang Sheng, Li Xiaona, et al. Experimental investigation of aerobic granule cultivation in high strength Vc wastewater [J]. Environment Science, 2007,28(10):2244-2248. (in Chinese)
- [ 11 ] 马晓,李军,韦甦. 不同接种污泥对好氧污泥颗粒化的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(21):36-42.  
Ma Xiao, Li Jun, Wei Su. Influence of different seed sludge on aerobic sludge granulation [J]. China Water and Wastewater, 2010,26(21):36-42. (in Chinese)
- [ 12 ] Liu Y Q, Tay J H. Influence of starvation time on formation and stability of aerobic granules in sequencing batch reactors [J]. Bioresour Technol, 2008, 99 (5): 980-985.
- [ 13 ] Liu Yu, Yang Shufang, Tan S F, et al. Biosorption kinetics of Cadmium( II ) on aerobic granular sludge [J]. Process Biochemistry, 2003, 38(7):997-1001.
- [ 14 ] Lodi A, Solisoio C, Converti A, et al. Caduim, Zinc, Copper, Silver and Chromium( III ) removal from wastewaters by Sphaerotilus natans [J]. Bioproc Eng, 1998, 19(3):197-203.
- [ 15 ] Liu Yu, Yang Shufang, Tan S F, et al. Aerobic granules: A novel zinc biosorbent [J]. Letters in Applied Microbiology, 2002, 35 (6):548-551.

(责任编辑 徐云峰)

(上接第520页)

- [ 8 ] Wereley S T, Lueptow R M. Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor-Couette flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 364(1):59-80.
- [ 9 ] Deng R, Yohanes A D, Ye C M. Taylor vortex flow in presence of internal baffles [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(16):4598-4605.
- [ 10 ] Lee S H, Chung H T, Park C W, et al. Experimental investigation of slit wall effects on Taylor - Couette flow [J]. Fluid Dynamics Research, 2009, 41(4):1-12.
- [ 11 ] 刘栋,朱鹤,王颖泽,等. 沟槽壁面对泰勒涡流稳定性影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(3):242-246.  
Liu Dong, Zhu Jian, Wang Yinze, et al. Numerical simulation of the slit wall effect on flow Taylor - Vortex flow stability [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(3):242-246. (in Chinese)
- [ 12 ] Kim J S, Kim D H, Gu B, et al. Simulation of Taylor - Couette reactor for particle classification using CFD [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 373:106-110.
- [ 13 ] 欧特尔. 普朗特流体力学基础[M]. 北京:科学出版社,2008.

(责任编辑 盛杰)