

漏斗式涡流反应器的水力特性研究

任勇翔¹, 姜 晗^{1, 2}, 林 雪³

(1. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068;
3. 中航飞机西安飞机分公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 为提高药剂与水的混合效率、改善水处理的效果, 对采用水力混合方式的漏斗式涡流反应器进行了数值模拟和水力特性试验研究。结果表明, 依靠切向进水和进出水口的高差可使反应器内水流形成稳定涡旋, 依靠喉口可强化返混作用。反应器的水力流态介于完全混合式和推流式之间, 混合效率受切向进水流速的影响, 进水流速为 0.1~1.5 m/s 时涡旋尺度接近药物颗粒直径, 有利于颗粒之间的碰撞, 混合效果好; 进水流速为 0.2 m/s 时, 混合效果最好。同时反应器只需通过水泵控制, 大大节省了耗能。

关键词: 漏斗式涡流反应器; 数值模拟; 水力特性; 返混作用

中图分类号: TU991.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2016)02-0265-05

A research on hydraulic characteristics of a funneling vortex reactor

REN Yongxiang¹, JIANG Han^{1, 2}, LIN Xue³

(1. Key Laboratory of Northwestern Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China;
3. AVIC Xi'an Aircraft Industry (group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: To enhance the mixing effectiveness of water and agent and to improve the efficiency of water treatment, the numerical simulation and hydraulic characteristics of a funnel vortex reactor by the hydraulic mixing were studied. The results showed that the stable vortex could be obtained by means of the tangential inflow and height difference between inlet and outlet of the reactor. The aditus laryngis could effectively enhance the backmixing function. The flow regime was between continuous flow and plug flow, and the mixing efficiency was only dependent on the velocity of inflow. When the inlet velocity ranged from 0.1 m/s to 1.5 m/s, the vortex size was close to the diameter of agents particle, in favor of the collisions and mixing among the vortex. The best effects of mixing could be achieved when the inflow velocity was 0.2 m/s. Meanwhile, the reactor only needed to be controlled by the pump, and then the energy consumption would decreased considerably.

Key words: funnel vortex reactor; numerical simulation; hydraulic characteristics; back mixing function

反应器内的流体动力学特性决定着水与药剂接触的程度, 控制着反应器内物质的传输, 是影响其处理效率的重要因素。根据 Kolmogoroff 局部各向同性紊流理论^[1]可知, 紊流中存在各种尺度不等的涡旋, 涡旋流动能有效地促进水中微粒的扩散与碰撞, 提高混合效率。另外, 按照 Camp 和 Stein 提出的速度梯度理论^[2], 速度梯度越大混合效果越好。涡流反应器是通过流速的变化以及水流和反应器内壁的摩擦阻力形成的涡旋流动^[3], 产生较大的速度梯度, 利用提高水中药剂的扩散效率, 达到药剂与水流的完全混合。近年来, 通过改变反应器内置结构, 从而使水流在反应器内形成涡流的研究较多 (包括多极管式混合器^[4], 搅拌混合器^[5-6]等), 在提高水流返混的同时, 也增强了反应器内物质的传输与扩散。但是, 依然存在结构复杂, 维护不便

等不足。

2000年, 日本学者提出了一种铁水预处理的冶金新技术, 即利用进出水口的高度差所具有的重力势能来使铁水与反应剂进行高效的混合^[7]。刘向军等^[8]在处理铁水时利用重力势能并使铁水切向流入漏斗形反应器, 形成旋涡流动, 反应剂颗粒能高效地加入铁水中, 与铁水较好混合, 混合效率可以达到95%以上, 且该工艺具有过程紧凑、耗时少、混合过程几乎无动力消耗等优点。由于铁水的密度远大于水, 高效混合难度也远大于水, 因此存在将这种漏斗形涡流反应器运用于水处理领域的可能性。

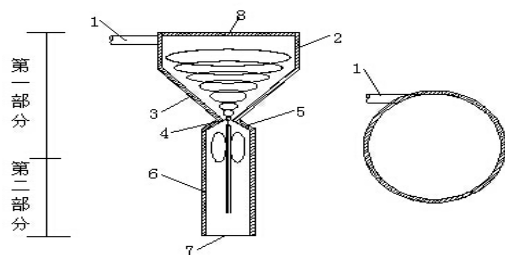
通过数值模拟和示踪试验的方法对漏斗式涡流反应器的水力特性进行研究, 以期提高反应器内部水流的涡旋流动及返混作用, 为改善水处理的效果提供科学依据。

1. 装置与方法

1.1 试验装置

图1为漏斗式涡流反应器示意图,按照FLUENT软件模拟出的最佳几何参数加工制造^[8].反应器体积为12.3 L,该漏斗式涡流反应器各部分尺寸如下:(1)第一柱体的直径为0.3 m,高度为0.09 m;(2)收缩锥体的上直径为0.3 m,下直径为0.02 m,高度为0.15 m;(3)扩张锥体的上直径为0.02 m,下直径为0.1 m,高度为0.03 m;(4)第二柱体的直径为0.1 m,高度为0.3 m;(5)漏斗式涡流反应器的总高度为0.57 m.

进水切向进入反应器,在第一柱体内旋转向下流动,产生涡流,此时药剂同时从进药口射入,因受到涡流卷吸,随水流一起运动.二者一起由收缩锥体进入扩张锥体,经过喉口部分时,由于突然进入截面较小部分,因此产生了很大的速度向下流动.当进入扩张锥体时,由于截面突然变大,受水流纵向射流的卷吸,在扩张锥体和第二柱体的近壁处出现较大的回流区并产生负压,此时液体在这个区域内发生多次回流,然后流体平稳地从出水口流出反应器.



1—进水管 2—第一柱体 3—收缩锥体 4—喉口 5—扩张锥体 6—第二柱体 7—出口 8—进药管

图1 漏斗式涡流反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of funneling vortex reactor

1.2 数学模型与计算方法

利用FLUENT软件对反应器不同的切向进水流速下的水流轨迹进行模拟,模拟采用离散相模型,是基于有限体积法(Finite Volume Method, FVM) FLUENT6.3.26进行数值计算,涡流反应器内部水的流动主要是依靠重力作用下的流动,并且可以产生旋流流动,其模型采用的是k-epsilon双方程湍流模型,其控制方程通用形式如下:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, z 向的速度矢量, S 为用户定义的源相.

对于连续相的水,采用欧拉方法研究其流动规律,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 双方程模型;对于固体粉末离散相,在拉格朗日坐标下采用随机轨道模型研究其运动规律.流场计算选用了SIMPLEC算法,代数方程的求解采用了Guss-Seidle迭代法.颗粒相的控制方程采用一组常微分方程,采用Gill算法.

1.3 示踪试验与方法

采用SX751电导率仪测定电导率.试验进水为自来水,在进水稳定后,从进水口快速投加NaCl作为示踪剂,调节进水泵阀大小来控制进水口射流速度,用喉口及出口处的电导率来代表示踪剂浓度.

利用停留时间分布(Residence Time Distribution)来分析反应器的水力特性,以Danckwerts等人^[9]建立的反应器流动模型为依据.水力特性用液龄分布函数 $E(t) = QC(t)/m$ 表示,其中: Q 是流量(L/s), m 是注入的示踪剂量(g), $C(t)$ 是 t 时刻出水中NaCl浓度(g/L).为了更直观地反映不同HRT条件下试验结果的不同,将测定结果进行无量纲化(归一化),得主要计算公式如下^[10-11]:

(1)标准化浓度: $C(\theta) = C(t)/C_0$, 其中:

$C(t)$ 是不同取样时间出口示踪剂的浓度(g/L), C_0 是初始向反应器注射的示踪剂浓度(g/L).

(2)标准化时间: $\theta = t/HRT$, 其中: t 是反应器的取样时间, HRT 是理论水力停留时间(min).

(4)方差: $\sigma^2 = \int_0^\infty (t - \bar{t})^2 E(t) dt$, 表示对平均值的离散程度.

(5) N 为多级全混流模型中,串联完全混合的单元个数, $N = 1/\sigma^2$. N 值越大,串联个数越多,越趋于推流式,反之,越趋于完全混合式. N 为1时,为完全混合式, N 趋于 ∞ 时,为推流式.

(6) $1/Pe$ 表示反应器轴向扩散传递和内部对流传流的相对大小,即返混程度, $Pe = 2/\sigma^2$.

(7)真空区比例为: $V = 1 - \bar{t}/HRT$.

2 结果与讨论

2.1 数值模拟

当药剂切向喷射到水中时,随水流边流动边混合,同时发生化学反应.对于这个过程进行一个完整的数学描述是非常困难的,必须对其进行合理简化,因此水按照牛顿流体处理,密度取20℃时的值,计算粘度按照常数处理,取 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

由于切向进水可以增加水流在第一柱体和收缩锥体内的紊流程度,并形成更多的回流,延长水力停留时间,故选择切向进水,且进水流速的大小,

对反应器内的药物和水流轨迹有明显影响, 因此改

变进水流速进行数值模拟如图2所示。

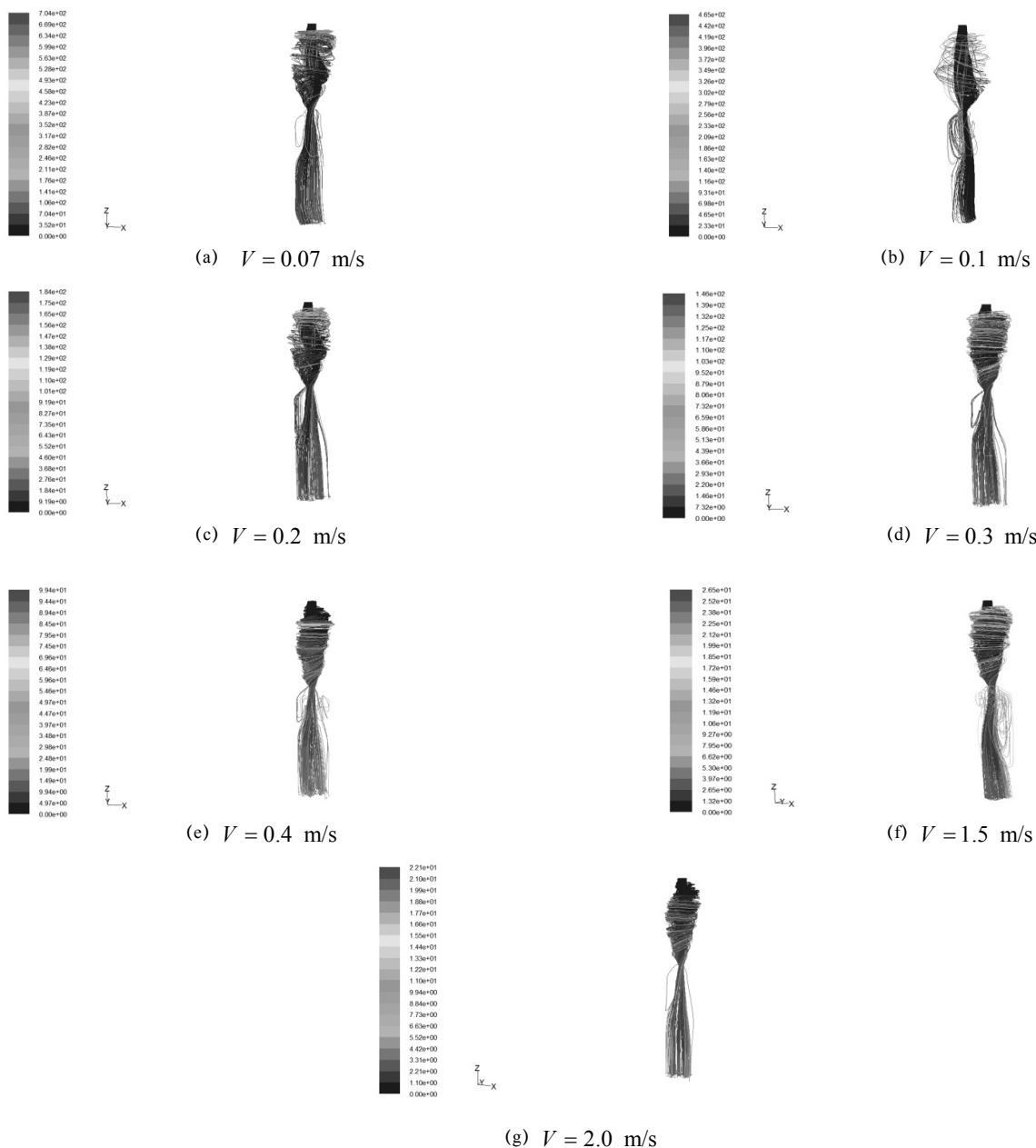


图2 不同进水速度时的药物轨迹

Fig.2 Agent trajectory at different inlet flow rates

由图2可以看出,随着进水流速的增大,水力停留时间缩短. 尽管进水流速为0.07 m/s时,水力停留时间最长,但水流程经喉口后,在扩张锥体与第二柱体上部产生的回流量很少. 之后,随着流速的增加,回流量增加,当进水流速为0.2 m/s时,回流量为最大,当进水流速再增加时,回流量反而逐渐减小,当流速为2.0 m/s时,基本无回流;由图2(f)和图2(g)还可以看出,虽然有少部分药剂能够长时间回流在反应器内,但大部分药剂在未充分扩散之前就流出了反应器. 因此,切向进水流速对反应器内的水力流态影响很大,决定着药剂在水的扩散和与水的混合效果. 进水流速的改变,导致药剂与

水的运动轨迹发生变化,使药剂的水力停留时间及回流量也发生了变化. 图2的结果表明,进水流速为0.2 m/s时,药剂可相对长的时间回流在反应器内,延长了药剂与水的混合时间,有助于提高混合效果. 故,应将反应器的进水流速控制在0.1~1.5 m/s之间,其中进水流速为0.2 m/s时最佳.

反应器的混合效果可以从以下两个方面看出: (1) 由图2可以发现不同进水流速下的药物轨迹图均较为饱满,可认为参与混合的药物量大. (2) 根据卡尔马廓洛夫(kolmogoroff)的微涡旋理论^[12]可知,当涡旋尺度越接近药物颗粒直径时,越有利于颗粒间的碰撞,混合效果越好. 其中微涡旋尺度为

$\lambda_0 = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4}$, 式中 ν 为水的运动粘滞系数, $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ε 为单位质量水体耗散的有效能耗. 由于篇幅限制, 不同进水流速下的湍流耗散图不展示于此. 根据结果分析, 试验采用干粉投加方式, 药物直径为 $70 \mu\text{m}$, 密度为 $2\,360 \text{ kg/m}^3$, 加药速度为 $0.000\,7 \text{ m/s}$, 当涡旋尺度为 $7 \times 10^{-5} \text{ m}$ 时, 有效能耗理论值为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^3$. 进水流速为 $0.1 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 时, 有效能耗差距不大, 均在 $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 左右, 有效能耗值均接近理论值, 说明涡流尺度接近颗粒直径, 颗粒碰撞剧烈, 因此反应器在进水流速为 $0.1 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 时的混合效果好. 与传统混合方式相比, 烧杯试验的数值模拟^[13]发现机械搅拌的有效能耗理

论值约为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$, 而实际最佳水力条件下的有效能耗约为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$; 而采用水力混合的折板反应器的有效能耗是根据反应器构造逐级递减^[14], 逐级接近理论值. 因此漏斗式涡流反应器有效能耗值接近理论值显著, 优于机械混合与其他水力混合, 有利于颗粒间的碰撞与混合.

2.2 示踪试验解析

由于水流经过喉口后, 在其下部会形成部分真空以及大量气泡, 故以第二柱体内有无明显气泡为界限将反应器分为两部分, 如图 1 所示. 对第一部分和整体分别进行研究. 表 1 为不同进水流速下的水力参数.

表 1 不同进水流速下漏斗式涡流反应器水力参数
Tab.1 Hydraulic parameters of funneling vortex reactor at different inlet flow rates

	进水流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	HRT/min	方差	$1/Pe$	N	真空区/%
第一部分	0.1	3.36	1.06	0.53	0.94	85.12
	0.2	1.62	0.96	0.48	1.04	58.85
	0.3	1.14	0.71	0.36	1.41	41.52
	0.4	0.84	0.52	0.26	1.92	4.76
	0.5	0.67	0.62	0.31	1.61	5.97
	0.6	0.55	0.65	0.33	1.54	7.27
整体	0.1	4.18	0.61	0.31	1.41	84.05
	0.2	2.05	0.49	0.25	2.04	57.35
	0.3	1.39	0.40	0.20	2.50	40.05
	0.4	1.04	0.34	0.17	2.94	3.85
	0.5	0.83	0.42	0.21	2.38	3.61
	0.6	0.69	0.47	0.22	2.22	3.33

从表 1 可以看出 $0 < 1/Pe < 1$, 并且随着进水流速的增加先减小后增大, 反应器内流态介于完全混合式和推流式之间. 并且随着进水流速的增大, 逐渐形成稳定涡旋, 水力停留时间逐渐缩短. 当反应器形成稳定涡流后, 由于水流经过喉口后截面积急剧增大, 产生回流, 返混作用增强. 进水流速达到 0.4 m/s 时, 喉口下部大量回流, 返混作用最强.

观察 N 值发现, 串联级数均小于 3, 说明反应器的流态最多由 3 个完全混合的单元串联而成. 0.1 m/s 时由于水流不稳定, 没有形成规律性的涡流, 因此 N 值最小. 随着涡流的逐渐稳定, N 增大. 进水流速增大到 0.4 m/s 时, 串联级数最多, 同时由于流速的增大, 水流的冲击增强, 喉口下部的返混剧烈. 由于反应器的值 N 均较小, 说明在漏斗式涡流反应器中水流返混作用占主要地位, 推流并不明显. 就整个反应器而言 N 值为 $2 \sim 3$, 流态介于完全混合式和推流式之间.

从表 1 可看出, 真空区的存在会减少反应器的有效容积. 结果表明, 进水流速 0.1 m/s 时涡旋不明显, 由于速度较小, 反应器容积利用率差; 0.2 m/s 、 0.3 m/s 形成稳定涡流, 但是由于涡旋没有充满整个椎体部分, 因此真空区较大, 反应器容积利用率只有 50% 左右. 0.4 m/s 、 0.5 m/s 、 0.6 m/s 也形成稳定涡流, 但真空区急剧减小, 反应器容积利用率均大

于 96%. 可见 0.4 m/s 为进水临界流速, 在大于 0.4 m/s 后真空区无明显变化, 此时可认为反应器的空间得到充分利用.

不同进水流速下涡流反应器示踪剂响应分布情况如图 3(a)和图 3(b)所示, 图 3(a)是第一部分的流态分布, 图 3(b)是反应器整体的流态分布. 可见, 不同进水流速情况下, 示踪剂出现最大峰值的 θ 值均小于 1, 意味着实际的水力停留时间小于理论水力停留时间, 这主要是由于反应器存在真空区所致.

将试验结果与数值模拟对比发现, 反应器内的水力流态分析结果基本一致, 均是随着进水流速的增加, 水力停留时间缩短, 并在喉口下部存在回流区, 返混作用明显. 但在数值模拟中最佳进水流速为 0.2 m/s , 水力特性试验的最佳进水流速为 0.4 m/s , 这是由于数值模拟是在理想情况下的理论分析, 没有考虑到反应器的空间利用率的影响, 虽然最佳进水流速存在差异, 但是数值较为接近. 因此示踪试验对数值模拟的结果进行了良好的修正与补充.

与传统混合方式相比较, 机械混合是依靠电动机带动叶轮转动, 使水流高速旋转, 电动机功率根据水量和转速变化而变化, 一般功率按 $4.2 \sim 17 \text{ kW/m}^3$ 计算^[15]; 水力混合应用较多的是静态混合器, 是依靠有一定压力的原水高速通过水射器射入反应器内部, 带动水流旋转, 一般功率按 7 kW/m^3 左右

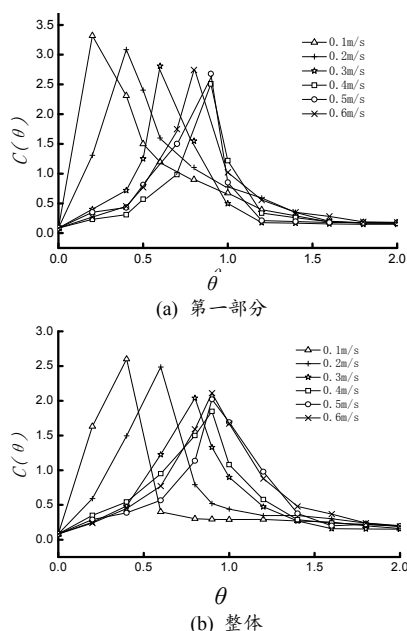


图3 不同进水流速下示踪剂的流态分布
Fig.3 Response distribution of the tracer at different inlet flow rates

计算^[16].而漏斗式涡流反应器只需通过水泵控制进水流速,再利用简单的内部构造实现水流的旋转,本研究中0.1~1.5 m/s的进水流速消耗功率很小,很容易实现,功率仅为1.5 kW/m³左右.因此漏斗式涡流反应器可大大降低耗能.

3 结论

(1) 漏斗式涡流反应器在切向进水流速为0.1~1.5 m/s时涡旋尺度均接近药物颗粒直径,有利于颗粒之间的碰撞,利用反应器内的混合.

(2) 计算机数值模拟与示踪试验结果吻合较好,药物与水流轨迹受切向进水流速影响明显.数值模拟发现水力停留时间和回流量随切向进水流速变化而改变,切向进水流速为0.2 m/s时回流量最大.示踪试验结果对数值模拟的结果进行了良好的修正与补充.结果表明,反应器的流态介于完全混合式和推流式之间,反应器内存在真空区,真空区的存在影响着反应器的空间利用率.其中切向进水流速在0.2 m/s时,水流经过喉口后会产生大量回流,混合效果最好.

(3) 漏斗式涡流反应器与传统混合方式相比较,大大降低了耗能,是一种高效且节能的混合反应器.

参考文献 References

[1] 童祯恭, 胡锋平. 涡流澄清技术在污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2009, 35(9): 117-119.
TONG Zhengong, HU Fengping. Implement of whirling clarification technique in wastewater treatment[J]. Technology of water treatment, 2009, 35(9): 117-119.
[2] CAMP T R, STEIN P C, PHILIP C. Velocity gradients and internal work in fluid motion[J]. Journal of Boston Socie-

ty of Civil Engineering, 1943(30): 219-237.

- [3] 熊伟, 胡锋平, 朱纘文. 微涡流澄清工艺应用现状与研究进展[J]. 给水排水工程, 2012, 6(30): 70-76.
XIONG Wei, HU Fengping, ZHU Hongwen. The application status research progress of the micro-vortex flocculation technology[J]. Water Supply & Drainage Engineering, 2012, 6(30): 70-76.
[4] 蒋斌, 雷鹏举, 栾兆坤, 等. 多级涡管式混合器的设计与混合效能[J]. 环境化学, 1997, 16(6): 567-574.
JIANG Bin, LEI Pengju, LUAN Zhaokun, et al. Design and application test of muliti-tube eddy rapid mixer[J]. Environmental henistry, 1997, 16(6): 567-574.
[5] STEWART R L, BRIDGWATER J, ZHOU Y C, et al. Simulated and measured flow of granules in a bladed mixer-a detailed comparison [J]. Chemical Engineering Science, 2001, (56): 5457-5471.
[6] KANEKO Yasunobu, SHIOJima Takeo, HORIO Masayuki. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation [J]. Powder Technology, 2000, 108(1): 55-64.
[7] 横谷真一郎. 旋回流による精煉プロセスへの適用[J]. 材料とプロセス, 2000, (13): 81-89.
[8] 任勇翔, 林雪. 一种涡流式混合沉淀一体器 ZL201310173167.3[P]. CN103351043A/2013.
[9] LEVENSPIEL O. Chemical reaction engineering[M]. 3rd ed. New York: Hamilton Printing Company, 1999.
[10] LUK S H, MERZ W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5(4): 289-301.
[11] 孙立柱, 沈耀良, 李媛, 等. ABR 反应器水力混合性能研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2010, 23(3): 6-9.
SUN Lizhu, SHEN Yaoliang, LI Yuan, et al. A study on hydraulic characteristics of ABR[J]. Journal of Suzhou University of and Technology(Engineering and Technology). 2010, 23(3): 6-9.
[12] 丁美兰. 旋流扰流絮凝池流场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 14-17.
DING Meilan. Numerical simulation of fluid field in rotational-disturbed flocculator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 14-17.
[13] 邹琳. 水处理絮凝动力学的试验研究和数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007: 50-67.
ZOU Lin. The experimental study and numerical simulation on flocculent kinetics for drinking water treatment[D]. Nanjing: Hohai University, 2007: 50-67.
[14] 余昌全. 基于 FLUENT 与 PIV 技术的折板絮凝流场特性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012: 34-62.
YU Changquan. Characteristic analysis of flow field of folded-plate flocculation based on technology of FLUEN and PIV[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012: 34-62.
[15] 上海市市政工程设计院. 《给水排水设计手册》(第9册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 173-174.
Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) CO., LTD. Water supply & drainage design handbook (9th), Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 173-174.
[16] 陆柯. 城市给水系统能耗分析与节能给水研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 13-21.
LU Ke. Analysis of urban water treatment plant and energy saving technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 13-21.

(编辑 沈波)