

# 计算流体力学法臭氧接触池水力条件优化

袁蓉芳<sup>1</sup>,周北海<sup>1</sup>,施春红<sup>1</sup>,顾军农<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院 北京 100083; 2. 北京自来水集团水质监测中心 北京 100085)

**摘要:**采用计算流体力学技术,模拟了北京某水厂臭氧接触池中水的流态分布及水力效率。通过流体停留时间分布(RTD)的分析,得知臭氧接触池的 $T_{10}/HRT$ 为0.466,短流现象明显,水力效率低。在臭氧接触池中增加导流板后, $T_{10}/HRT$ 值可提高20.38%,但 $T_{90}/HRT$ 高达1.316,回流现象明显;设置横挡板,可将 $T_{10}/HRT$ 提高15.88%,同时 $T_{90}/HRT$ 降至0.821,RTD更为集中,流场更接近理想活塞流。因此,增加横挡板有利于臭氧接触池水力效率的提高。

**关键词:**计算流体力学;臭氧接触池;水处理;水力效率;停留时间分布

中图分类号:TU991.2

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0228-04

## Application of computational fluid dynamics for optimization of hydraulic efficiency of ozone contactor

YUAN Rongfang<sup>1</sup>, ZHOU Beihai<sup>1</sup>, SHI Chunhong<sup>1</sup>, GU Junnong<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China;  
2. Water Quality Monitoring Center, Beijing Waterworks Group, Beijing 100085, P. R. China)

**Abstract:** Computational fluid dynamics is used to simulate the hydraulic efficiency of the ozone contactor in a water plant in Beijing and to optimize the contactor by calculating the retention time distribution (RTD) of the fluid. The result shows that the value of  $T_{10}/HRT$  of the existing contactor is 0.466, and the phenomenon of obvious short circuiting and backflow which result in low hydraulic efficiency exists in the contactor. After optimization, the value of  $T_{10}/HRT$  of the contactor in the presence of guide plates is 0.561, making the hydraulic efficiency increased by 20.38%. However, the value of  $T_{90}/HRT$  is 1.316, which means that the phenomenon of backflow existed. The value of  $T_{10}/HRT$  of the contactor in the presence of horizontal baffles is 0.540, making the hydraulic efficiency increased by 15.88%, and the value of  $T_{90}/HRT$  reduces to 0.821. That means the concentration ratio of RTD increased, and the hydraulic efficiency of whole flow field is improved significantly in the presence of horizontal baffles.

**Key words:** computational fluid dynamics; ozone contactor; water treatment; hydraulic efficiency; retention time distribution

臭氧具有很强的氧化能力,可有效去除水中的有机污染物,并对细菌和病毒(包括“两虫”)具有很强的灭活能力<sup>[1-3]</sup>。臭氧接触池(ozone contactor)是指将臭氧气体扩散到水中,使臭氧与水接触并发生反应的处理构筑物。臭氧接触池的水力效率是影响处理效果的主要因素之一,停留时间分布(residence time distribution, RTD)是最重要的水力指标<sup>[4-5]</sup>。常用的臭氧接触池水力效率优化研究方法,包括示踪实验法和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟法。通过示踪实验测定臭氧接触池的水力停留时间分布函数,因受限于现场条件而无法实现<sup>[6]</sup>,而通过CFD模拟,可精确且直观地得到臭氧接触池内水流流态和速度的分布情况<sup>[4-5,7-15]</sup>。

本文通过CFD模拟分析北京A水厂臭氧接触池内水流流态及停留时间分布(retention time distribution, RTD)函数,确定臭氧接触池的水力效率,提出实现理想活塞流的改

进方案。

### 1 模拟系统建立方法

该水厂臭氧接触池设计处理水量为 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,设1座2格,每格宽5 m,长29.2 m,有效水深6 m,超高1 m,进水口直径0.9 m,出水口溢流至活性炭滤池。接触池内部分若干个廊道,包括安装臭氧曝气头的曝气室和未安装臭氧曝气头的反应室,剖面如图1所示。

#### 1.1 网格划分

采用二维模拟,模型结构简单,规律性强,宜采用结构网格划分,四边形单元,网格长度50 mm,划分结果如图2所示。

#### 1.2 模型选择

本研究涉及气液两相,宜采用多相流方法。在多相流的

研究中,目前几乎都采用欧拉—拉格朗日(Eulerian-Lagrangian)方法或欧拉—欧拉(Eulerian-Eulerian)方法。欧拉—拉格朗日方法对应的 CFD 模型为离散型模型(discrete phase model),欧拉—欧拉方法则对应 VOF(volume of fluid)模型、

混合物(mixture)模型和欧拉(Eulerian)模型。综合考虑研究内容、物理模型以及数学模型的优缺点,本文选用欧拉模型,采用标准  $k-\epsilon$  模型求解连续性方程及动量方程。

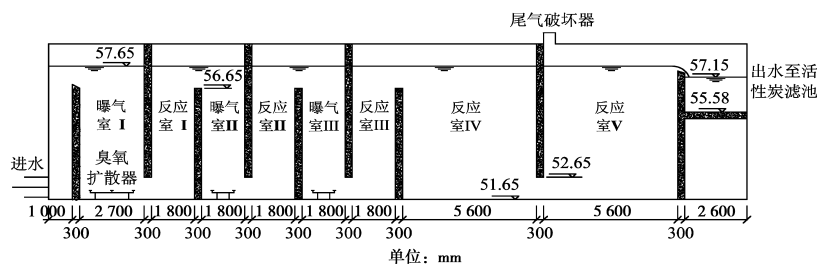


图 1 臭氧接触池剖面

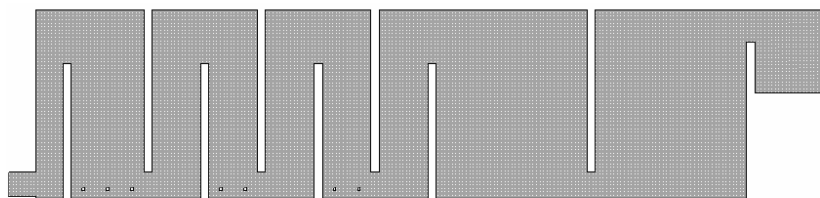


图 2 臭氧接触二维网格

### 1.3 边界条件

#### 1) 进水口

进口处流速确定基于质量守恒原则,即单位时间内三维物理模型进入流场的质量(体积)等于单位时间二维数学模型进入流场的质量(体积)。臭氧接触池进水口采用速度入口(velocity-inlet)。假设速度分布均匀,得进水口流速  $0.1929 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 2) 出水口

出水口设置为压力出口(pressure-outlet)。出水口和外界空气接触,可认为相对压力为 0。

#### 3) 进气口

气体入口设为质量入口(mass-flow-inlet)。采用 3 段曝气,曝气体积比为 2:1:1。设定臭氧投加量为  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,接触时间 15.8 min,并按照臭氧发生器产生的臭氧体积分数 10% 计算(质量分数为 14.3%),3 段气体质量流量分别为  $4.3 \times 10^{-6}$ 、 $3.2 \times 10^{-6}$  和  $3.2 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

#### 4) 出水口

出水口设置为压力出口。

#### 5) 壁面

除以上 4 种边界条件外,其余边界设定为壁面(wall)。一般而言,水泥的粗糙度为 0.5,粗糙高度 0.3~3.0 mm。本研究采用粗糙度 0.5,粗糙高度 1.0 mm。

### 1.4 迭代和收敛

要求连续性方程残差小于 0.01,其他小于 0.001,水力条件不随迭代次数的改变而变化,且进口流量和出口流量平衡(误差小于 0.001)时,方可确认计算结果收敛。

### 1.5 停留时间

使用欧拉模型,引入第三相(水)作为示踪剂,加入示踪剂 1 s 后停止,考察出口处示踪剂浓度变化。

## 2 现有池型模拟

### 2.1 速度场

A 水厂现有池型的速度等值线云图及速度矢量线图如图 3 所示。

由图 3 可知,在池内的不同区域,水流速度差异较大,短流和回流现象均较严重。水流主要在靠近隔室的墙壁处流动,每个隔室都存在短流现象,长隔室中更为明显。在靠近外墙的部分有很多与流体速度逆向的回流,回流颗粒需要很长时间才能重新回到主流体的行进过程中。因此,短流和回流现象的存在均会影响水在流场内的停留时间<sup>[7]</sup>。

### 2.2 水力效率

为定量分析臭氧接触池的水力效率,下面采用非稳态模型进行考察。

理想反应器的基本类型包括完全混合流反应器(continuous stirred tank reactor, CSTR)和活塞流反应器(plug flow reactor, PFR)。臭氧接触池构造相对复杂,包括主流区和回流区,其中主流区缺乏混合,类似于 PFR,而回流区则类似于 CSTR。采用  $T_{10}$  (10% 示踪剂流出反应器所需时间)作为有效接触时间的考察指标。 $T_{10}$  可通过接触池的 RTD 获得,而 RTD 则受接触池的几何形状及运行状况的影响<sup>[3]</sup>。通过考察  $T_{10}$  与水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)的比值  $T_{10}/\text{HRT}$ ,即可获得臭氧接触池的水力效率<sup>[7]</sup>。接触池一般因存在死角、沟流、短流而偏离理想反应器,不可能达到理想的推流, $T_{10}/\text{HRT}$  在 0.1~1.0 之间<sup>[4]</sup>。此外, $T_{50}$  和  $T_{90}$  (50% 和 90% 示踪剂流出反应器所需时间)与 HRT 的比值  $T_{50}/\text{HRT}$  和  $T_{90}/\text{HRT}$  也是衡量水力特性的重要参数。 $T_{10}/\text{HRT}$  表示短流程度,而  $T_{90}/\text{HRT}$  代表回流程度,二者越接近 1,接触池越近似 PFR<sup>[11]</sup>。

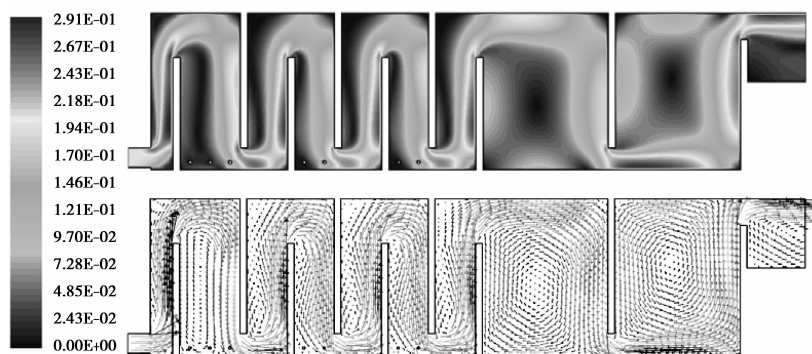


图 3 现有池型下的流场

现有池型的 HRT 分布如图 4 所示。起初水的累计流出率较低,420 s 后开始大幅增长,600 s 后增长缓慢。 $T_{10}/HRT$  为 0.466,说明短流现象明显,水力效率低。因此,需要对现有池型进行优化,以获得更好的水力效率。

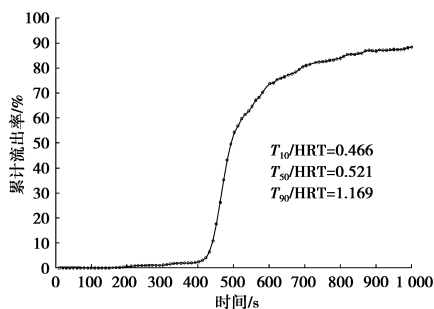


图 4 现有池型停留时间分布

### 3 水力效率优化

常用的臭氧接触池优化方法包括改变接触池的内部尺寸、增加穿孔墙、增设导流板以及增设横挡板<sup>[7]</sup>。前 2 种方法对原设计改动较大,可行性较低,而后 2 种方法不会对现有池型进行较大改动,可操作性强。

#### 3.1 导流板

在各个隔室的连接处增加导流板,相当于增加“渐扩”段,流体在前进过程中逐渐上升,能够较均匀地分布在各个隔室内。导流板将流体分布 2 部分,这 2 部分流体应按其质量比,在后续的反应室内占有相同的空间。导流板安装在 I、II、III 号曝气室和反应室的连接处,厚度 0.2 m,前段横板长 0.3 m,后端斜板高 0.5 m,考察导流板与池底的距离和横板与斜板夹角对水力效率的影响。

##### 1) 池底距离

考察导流板与池底距离对 RTD 的影响,结果如图 5 所示。

图 5 表明,增加导流板可提高臭氧接触池的水力效率,使反应室左侧的空间得到更为充分的利用。导流板与池底距离对 RTD 有较明显的影响。当导流板与池底距离分别为 0.2、0.3 和 0.4 m 时, $T_{10}/HRT$  分别为 0.473、0.561 和 0.502,其水力效率较原结构的 0.466 分别提高 1.50%、20.38% 和 7.73%。 $T_{50}/HRT$  和  $T_{90}/HRT$  也有一定程度的

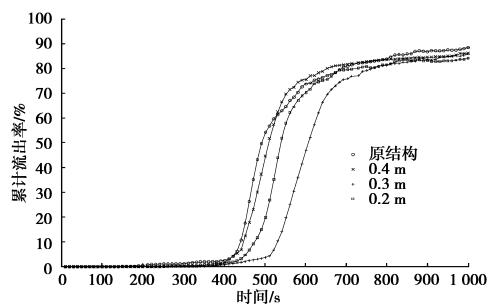


图 5 导流板位置对水力效率的影响

提高。导流板与池底距离为 0.3 m 时,水力效率最高。其原因为,二者距离为 0.3 m 时,水流分布更为均匀,接触池内空间得到了更好的利用。因此,选择导流板与池底的距离为 0.3 m。

##### 2) 导流板夹角

考察导流板夹角对 RTD 的影响,结果如图 6 所示。

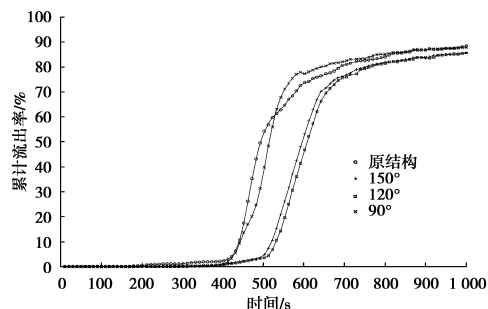


图 6 导流板夹角对水力效率的影响

图 6 表明,导流夹角对臭氧接触池的水力效率存在影响。夹角过大或过小都会降低接触池的水力效率。当导流板夹角分别为 150°、120°和 90°时, $T_{10}/HRT$  相应地为 0.549、0.561 和 0.468,其水力效率分别提高 17.81%、20.38% 和 0.86%。导流板夹角为 90°时,导流板上水流量极低,不能起到很好的分流作用,故水力效率变化不大。夹角为 120°水力效率最好。因此,导流板最优夹角为 120°。

但是,加入导流板后, $T_{50}/HRT$  和  $T_{90}/HRT$  也有一定程度的提高,导流板与池底距离 0.3 m,夹角 120°时, $T_{90}/HRT$  高达 1.316,会增大池中水的回流,不利于气液传质,故考虑改变优化方式,通过增设横挡板优化接触池水力条件。

### 3.2 横挡板

#### 1) 单挡板

横挡板长度是影响水力效率的一个重要因素。挡板设置过短,会在拐角处造成较大程度的短流;挡板设置过长,拐角处的过流断面过窄,流体流速增加,也会增加流体的紊流程度,同样不利于气液传质。

为不影响曝气室内曝气效果,横挡板加在反应室内。水流更靠近右侧挡板,因此横挡板加在右侧池壁上。反应室 I、II 和 III 的挡板向下,安装横挡板的位置应离自由液面近一点;反应室 IV 的挡板向上,横挡板位置应离池底进点,这样可使改变流向后的水有较大的空间流动。

反应室 I、II 和 III 内的横挡板长 0.9 m,安装在距离池底 3 m 处;反应室 IV 内的横挡板长 2.8~4.7 m,安装在距离池底 2 m 处。反应室 V 距离出口较近,不安装横挡板。所有挡板厚 20 cm。反应室 IV 内横挡板长度对 HRT 的影响如图 7 所示。

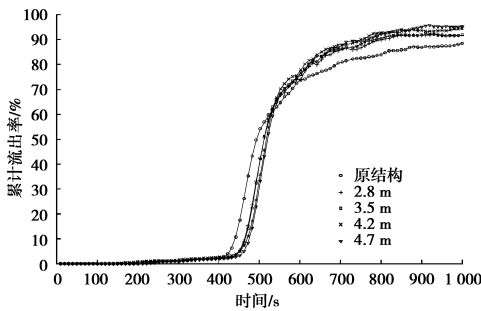


图 7 单挡板下挡板长度对水力效率的影响

由图 7 可知,当反应室 IV 内挡板长度分别为 2.8、3.5、4.2 和 4.7 m 时, $T_{10}/HRT$  分别为 0.489、0.492、0.496 和 0.502,较优化前提高 4.94%、5.58%、6.44% 和 7.73%;而  $T_{90}/HRT$  有所降低,分别降至 0.848、0.829、0.791 和 0.808,降低较晚离开流场的颗粒的停留时间,RTD 更为集中,水力效率得到优化。接触池的  $T_{10}/HRT$  随挡板长度的增加而增大,但  $T_{10}/HRT$  变化较小,水力条件优化不明显,故考虑增加挡板数量。

#### 2) 三挡板

反应室 I、II、III 和 IV 内的右挡板分别安装在距离池底 1.5 和 4.5 m 处,左挡板安装在距离池底 3.0 m 处;反应室 I、II 和 III 内的横挡板长 0.9 m,反应室 IV 内的横挡板长 2.8~4.7 m。反应室 V 距离出口较近,不安装横挡板。所有挡板厚 20 cm。反应室 IV 内横挡板长度对 HRT 的影响如图 8 所示。

由图 8 可知,当反应室 IV 内挡板长度分别为 2.8、3.5、4.2 和 4.7 m 时, $T_{10}/HRT$  分别为 0.508、0.521、0.540 和 0.544,提高了 9.01%、11.80%、15.88% 和 16.74%,水力效率得到优化; $T_{90}/HRT$  有所降低,分别降至 0.833、0.846、0.821 和 0.810,RTD 更为集中,水力效率得到优化。由于挡板长 4.7 m 时,水力效率较 4.2 m 增加不多,但挡板过长会使得池内体积减小,因此宜采用 4.2 m。

此外,增加挡板的数量能够显著提高接触池的长宽比, $T_{10}/HRT$  值明显升高,故采用三挡板,反应室 IV 内挡板长度

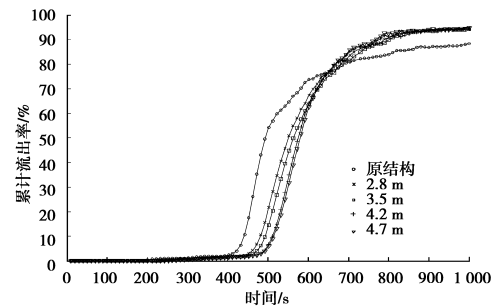


图 8 三挡板下挡板长度对水力效率的影响

4.2 m,这样可获得最好的优化效果。

## 4 结论

1) A 水厂臭氧接触池现有池型的短流现象较明显,水力效率较低。

2) 增加导流板可提高臭氧接触池的水力效率, $T_{10}/HRT$  有较大提高,但  $T_{90}/HRT$  过高,回流现象明显。

3) 增加横挡板可提高臭氧接触池的水力效率。在三挡板的情况下,优化反应室的尺度可使流场更接近理想活塞流。

### 参考文献:

- [1] von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. oxidation kinetics and product formation[J]. Water Research, 2003, 37(7): 1443-1467.
- [2] Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part II. disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine[J]. Water Research, 2003, 37(7): 1469-1487.
- [3] 于玉娟,尹军,张小雨,等. 饮用水中“两虫”的危害及其去除灭活[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2008, 25(2): 15-17.  
YU Yujuan, YIN Jun, ZHANG Xiaoyu, et al. Harmfulness and removal of Cryptosporidium and Giardia in drinking water [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2008, 25(2): 15-17.
- [4] Huang T H, Brouckaert C J, Pryor M, et al. Application of computational fluid dynamics modelling to an ozone contactor [J]. Water SA, 2004, 30(1): 51-56.
- [5] Wols B A, Uijttewaalt W S J, Rietveld L C, et al. Residence time distributions in ozone contactors [J]. Ozone Science & Engineering, 2008, 30: 49-57.
- [6] 刘文君,崔磊. 应用计算流体力学优化清水池水力效率[J]. 中国给水排水, 2005, 21(5): 1-5.  
LIU Weijun, CUI Lei. Application of computational fluid dynamics for optimization of hydraulic efficiency of clearwell [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(5): 1-5.
- [7] 缪佳,李继,张金松,等. CFD 在臭氧接触系统优化中的应用 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(10): 46-49.  
MIAO Jia, LI Ji, ZHANG Jinsong, et al. Application of computation fluid dynamics to optimization of ozone contactor [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(10): 46-49.

- [3] 崔振河,刘普增.降低沥青混合料加热成本的途径[J].路面机械与施工技术,2006,23(12):19-24
- [4] 徐世法.高节能低排放型温拌沥青混合料的技术现状与应用前景[J].公路,2005,(7):195-197.
- [5] 聂文志.废沥青路面旧料再生技术应用[J].石油工程建设,2006,32(3):23-25.
- [6] 程玲,闫国杰,陈德珍,等.温拌沥青混合料摊铺节能减排效果量化研究[J].环境工程学报,2010,4(9):2151-2155.
- [7] Birgisdóttir H, Bhandar G, Hauschild M Z, et al. Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: recycling of bottom ash in road construction or land-filling in Denmark evaluated in the ROAD-RES mode I[J]. Waste Management, 2007,27(4):75-84.
- [8] PRé Consultants. SimaPro LCA Software. [EB/OL]. [2009]. <http://www.pre.nl/simapro/>. Accessed on October 30, 2010
- [9] PE International. Gabi Software. [EB/OL]. [2009]. <http://www.gabi-software.com/>. Accessed on October 30, 2010.
- [10] 耿翠洁.道路工程中再生利用垃圾焚烧炉渣、废旧水泥混凝土的生命周期评价[D].上海:同济大学,2011.
- [11] Hauschild M, Jeswiet J, Alting L. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2005,54(2): 1-21
- [12] 陈德珍,耿翠洁,孙文洲,等.焚烧炉渣集料用于道路铺筑的节能减排定量[J].建筑材料学报,2011,14(1):71-77.

(编辑 吕建斌)

(上接第257页)

- [8] Phares D E, Rokjer D M, Crossley I A, et al. Modeling and validating the effective hydraulic detention time for a 10 mgd ozone contactor at the Lake Washington Surface Water Treatment Plant, Melbourne, Florida[J]. Ozone Science & Engineering, 2009, 31: 262-276.
- [9] 森冈崇行,汪兆康.采用模拟系统设计臭氧接触池[J].中国给水排水,2006,22(2):49-51.  
MORIOKA T, WANG Zhaokang. Use of simulation system for design of ozone contact tank[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(2): 49-51.
- [10] Ta C T, Hague J. A two-phase computational fluid dynamics model for ozone tank design and troubleshooting in water treatment[J]. Ozone Science & Engineering, 2004, 26: 403-411.
- [11] 金俊伟,刘文君,刘丽君,等.影响清水池  $t_{10}/T$  值的因素试验研究[J].给水排水,2004,30(12):36-39.  
JIN Junwei, LIU Weijun, LIU Lijun, et al. Study on the influencing factors on  $t_{10}/T$  in clear water tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(12): 36-39.
- [12] Zhang J P, Huck P M, Anderson W B, et al. A computational fluid dynamics based integrated disinfection design approach for improvement of full-scale ozone contactor performance [J]. Ozone Science & Engineering, 2007, 29: 451-460.
- [13] Zhang J P, Huck P M, Stublely G D, et al. Application of a Multiphase CFD Modelling approach to improve ozone residual monitoring and tracer testing strategies for full-scale drinking water ozone disinfection processes[J]. Journal of Water Supply Research and Technology-aqua, 2008, 57(2): 79-92.
- [14] Audenaert W T M, Callewaert M, Nopens I, et al. Full-scale modelling of an ozone reactor for drinking water treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 157(2-3): 551-557.
- [15] Kulkarni A A, Ekambara K, Joshi J B. On the development of flow pattern in a bubble column reactor: experiments and CFD [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 1049-1072.

(编辑 薛婧媛)