DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.019

上升流速对三相分离器分离效果影响的三维稳态模拟*

郝飞麟¹ 沈明卫²

(1. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310015; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

【摘要】 以 Eulerian 多相流模型为理论框架,利用计算流体力学(CFD)技术对厌氧反应三相分离器中 USAB 反应器在不同设计流速下的固、液、气三相三维流场以及分离效率进行模拟分析,模拟中采用的 5 种设计上升流速 分别为:0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 m/h。模拟结果表明:设计上升流速对反应器内部流动的影响明显,实际的液 相平均流速约为设计上升流速的 3 倍左右,气相的平均流速比液相的高约 10%;固相平均速度比设计上升流速低, 约为其 1/2 弱,固相的最大垂直上向流速与设计上升流速完全一致。低的设计上升流速下的固、气分离率略高于 高的上升流速情况,分离率差别小于 2%。实际工程试验表明,理论模拟值与实测值相对误差在 8% 以内。

关键词: 厌氧发应器 三相分离器 上升流速 多相流 三维模拟 计算流体力学 中图分类号: X703; TQ028 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0101-07

3-D Static Simulation of the Effect of Upward Flow Velocity on Separation Efficiency of Three-phase Separator in UASB Reactor

Hao Feilin¹ Shen Mingwei²

College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China
 College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract

With the aim to evaluate the appropriate upward flow velocity in UASB reactor, the separation efficiency of solid, liquid, gas in three-phase separator (TS) of USAB reactor was simulated via CFD technology based on Eulerian multi-phase model. Five upward flow velocities (UFV) as 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 m/h were adopted in simulation for a typical UASB reactor. The result showed that the UFV had an obvious effect on the flow pattern inside the TS, the average velocity of liquid in the whole UASB reactor was around 3 times of the designed UFV, the average velocity of gas was 10% higher than that of the liquid, the average velocity of solid was lower and about half of the designed UFV, and the maximal solid UFV was in the same level with the UFV. The separation efficiency of solid and gas was higher in low UFV than that in the higher situation, while the difference was less than 2%. Site experiment showed a good agreement between the simulated data and measured one with a relative error within 8%.

Key words UASB, Three-phase separator, Upward flow velocity, Multi-phase flow, 3-D simulation, CFD

引言

在全球低碳经济的大环境下,污/废水处理领域 中厌氧反应器的优势和重要性逐渐被人们重新认识 和重视^[1-4],这包括厌氧反应器的关键设备——三 相分离器(three-phase separator, 简称 TS)。由于三 相分离器结构与工作机理的复杂性,人们对其内部 固、液、气三相的实际运动理论、规律知之甚少,国内 应用和研究的重点多停留在模仿、结构改良分析和 性能试验研究方面^[1-3,5]。按固液和气液两相分离

收稿日期: 2011-03-17 修回日期: 2011-05-08

^{*} 浙江省自然科学基金资助项目(Y307166)和浙江省教育厅资助项目(Y201018484)

作者简介:郝飞麟,高级工程师,主要从事生态与环境保护研究,E-mail: shenhao@ zju. edu. cn

理论和方法进行设计^[2],其基础为固体的沉淀理论 和欧洲专利结构,合理目精确的设计理论与模拟分 析手段国内外均未见相关报道,这极大地限制了厌 氧反应器技术的进一步发展。近年来,以计算流体 动力学(CFD)为手段的分析技术在污/废水处理领 域已有应用[6~11],使人们对水处理领域一些简单结 构内流体的运动有了明晰且精确的认识,但对厌氧 反应器, 尤其是 UASB 和 EGSB 反应器, 由于其结构 较为复杂且涉及多相流体运动,虽在国内外已经有 很大的应用市场^[6~10],但 CFD 技术仍未曾涉足,大 型生产规模的三相分离器的结构在国外仍属专利, 有关设计方法及参数也未见报道^[2]。

本文以国内应用最为广泛的欧洲专利三相分离 器为对象,在通过 CFD 模拟重要工艺设计参数—— 厌氧反应器上升流速对分离器内部固体颗粒、液体 和气体的三维运动影响情况的基础上,分析上升流 速对三相分离器分离性能的影响,进而探索 CFD 技 术在三相分离器理论设计与分析方面应用的可行 性。

1 模拟理论

反应器内混合液在三相分离器内部的流动为固 体、液体和气体三相的混合流动,其较成熟的描述方 程分为以流体为主的 Eulerian Multiphase Model 和 强调颗粒运动的 Particle Transport (Lagrangian Particle Tracking) Model 两类^[12~16]。由于反应器混 合液中固、气颗粒小且较轻,所以其模拟模型选择以 连续流为基础的 Eulerian Multiphase Model 中的 Inhomogeneous Model 连续流体模型,考虑各相的特 性和各相之间的相互作用,基于单项液体流动的 N-S方程,包括动量方程、连续性方程、相体积守恒 方程、压力控制方程和总能量方程[17],各方程表述 如下:

$$r_{\alpha}$$
——多相流中 α 相所占的体积分数
 ρ_{α} —— α 相的密度, kg/m³
 U_{α}, U_{β} —— α, β 相的速度矢量, m/s
 ∇ ——哈密顿算子 Γ ——散度

N.——流体的相数

 \otimes —

 μ_{a} —

 $(\Gamma_{\alpha\beta}^{+}U_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^{+}U_{\alpha})$ ——由相之间质量传递引 起的动量传递

S_M——流体外部体积力引起的动量源相

Μ_____其他相对 α 相产生的作用力 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (r_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_{p}} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (2)$$

 $\Gamma_{\alpha\beta}$ ——单位体积的 β 相流向 α 相的质量流 量,kg/($m^3 \cdot s$)

相体积守恒方程

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha} = 1 \tag{3}$$

压力控制方程

$$p_{\alpha} = p \quad (\alpha = 1, 2, \cdots, N_p) \tag{4}$$

总能量方程

$$\frac{\partial (r_{\alpha}\rho_{\alpha}e_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (r_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha}e_{\alpha}) =$$

$$\nabla (r_{\alpha}\lambda_{\alpha}T_{\alpha}) + r_{\alpha}\tau_{\alpha} \nabla U_{\alpha} + S_{E\alpha} + Q_{\alpha} +$$

$$\sum_{\beta=1}^{N_{p}} (\Gamma_{\alpha\beta}^{+}e_{\beta\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^{+}e_{\alpha\beta}) \qquad (5)$$

式中 e_{α} —— α 相的内能,J

—α相的热传导率,W/(m·K) λ_{a} —

 τ_{α} — —α相的剪切应力,Pa

 $S_{E\alpha}$ -—内部热源

 一流体内其他相向 α 相的传热率, W/s Q_{α} - $\Gamma_{\alpha\beta}^{+}e_{\beta\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^{+}e_{\alpha\beta}$ ——由其他相向 α 相质量传递 引起的热量传递速率,W/s

 T_{α} —— α 相的温度, K

气泡和污泥颗粒作为分散相在流体中的运动用 颗粒模型(particle model)来模拟,假设两种颗粒 β 均为球形,在连续流体 α 中受到流体对其的多种作 用力

$$M_{\alpha\beta} = M_{\alpha\beta}^{D} + M_{\alpha\beta}^{L} + M_{\alpha\beta}^{LUB} + M_{\alpha\beta}^{VM} + M_{\alpha\beta}^{TD} + M_{S} + \cdots$$
(6)

等式右边所示的作用力分别为:拖拽力、浮力、壁面 润滑力、虚质量力、紊流扩散力和颗粒间的碰撞力 等。其中每一种力的计算根据实际情况均有多种模 型可选,颗粒的最终运动则按经典力学确定。

反应器内的混合液虽流速较低,但在流经具有 复杂结构的三相分离器时仍会产生紊流,其控制模 型较多且对结果影响较大,本文采用应用较广的 k-Epsilon(水)和 Dispersed Phase Zero Equation(气、固)模型^[12-16]:

k-Epsilon 紊流模型

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}k_{\alpha}) + \nabla \cdot \left\{ r_{\alpha} \left[\rho_{\alpha}U_{\alpha}k_{\alpha} - \left(\mu + \frac{\mu_{\iota\alpha}}{\sigma_{k}}\right)\nabla k_{\beta} \right] \right\} = r_{\alpha}(p_{\alpha} - \rho_{\alpha}\varepsilon_{\alpha})$$
(7)
$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}\varepsilon_{\alpha}) + \nabla \cdot \left[r_{\alpha}\rho_{\alpha}\varepsilon_{\alpha} - \left(\mu + \frac{\mu_{\iota\alpha}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla\varepsilon_{\alpha} \right] = r_{\alpha}\frac{\varepsilon_{\alpha}}{k_{\alpha}}(C_{\varepsilon 1}p_{\alpha} - C_{\varepsilon 2}\rho_{\alpha}\varepsilon_{\alpha})$$
(8)
式中 $k_{\alpha}, k_{\varepsilon}$ ——单位质量流体的紊流动能, J/kg

式中 k_{α}, k_{β} — 单位质量流体的紊流动能, J/kg ε_{α} — 流体的紊流耗散率, W/m³

$$\mu_{i\alpha}$$
 你们以来加州及,自己的
 $\sigma_{e},\sigma_{k},C_{e1},C_{e2}$ ——常数,分别取 1.3、1.0、
1.44、1.92

Dispersed Phase Zero Equation 紊流模型

$$\mu_{id} = \frac{\rho_d \mu_{ic}}{\rho_c \sigma} \tag{9}$$

式中 μ_ι——紊流粘度,Pa·s

 σ ——紊流的 Prandtl 数

下标 c、d 分别表示连续体状态和分散颗粒状态。

模拟中涉及气泡和污泥颗粒的数量和尺寸,对 应工程上调试的接种量,模拟开始设定一初始浓度, 进而气泡和污泥颗粒的数量按生成和流失确定(模 拟期间没有污泥废弃),其中污泥的产生量^[18]

$$P_{X,\text{VSS}} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d n_{\text{SRT}}} + \frac{f_d k_d YQ(S_0 - S) n_{\text{SRT}}}{1 + k_d n_{\text{SRT}}} + Q_{nb\text{VSS}}$$
(10)

式中 Q---流入反应器的水量,m3/d

Y----细胞合成产量,取 0.08 g(VSS)/g (COD)

k_d──细胞衰减系数,取0.03 g/(g·d)

*f*_d——以细胞残骸存留的生物体比率,取 0.15

S₀——进水中的可溶 COD,g/m³

n_{srt}——污泥龄,取50 d

产气按 100% 为 CH₄估算:假设与 COD 的比率 为 0.35 L/g COD^[18],产气的浓度分布与污泥的浓度分布—致。

2 模拟

在厌氧反应器中,应用最广的是上流式污泥床 (UASB)和厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)反应器^[1], 目前国内工程上使用的三相分离器均是在欧洲专利 和荷兰 Paques 公司专利的基础上进行的变形和改型,其典型结构为三层相互交错的人字形挡板。 图 1 为一典型 UASB 厌氧反应器单元,底部为布水 系统,假设原水均匀进入反应器,下部为厌氧反应部 分,上部为三相分离器,顶部出水(反应器池体超高 部分略),人字形挡板底部三角区域内排气(气体收 集系统略)。模拟单元结构尺寸为 1 200 mm(长) × 1 000 mm(宽) × 5 000 mm(高),实际结构以基本单 元为基础,在长度和宽度方向上扩展。这样的选取 既考虑了流经三相分离器固、气的浓度发展与分布, 又可控制模拟模型的计算量。



模拟模型的网格划分采用非结构化四面体网格,三相分离器部分网格较密,最大长度 35 mm,下 部厌氧反应器部分较疏,最大长度 500 mm,网格总数1293029个,其整体划分情况如图2 所示。

模拟采用 Ansys CFX 12.1 进行,根据 UASB 实



图 2 厌氧反应器模拟单元网格划分 Fig. 2 A schematic view of grid scheme of UASB

际设计的上升流速,模拟分析 5 种上升流速:0.50、 0.75、1.00、1.25 和 1.50 m/h 对三相分离器气、液、 固分离效果和内部流动的影响。模拟的初始条件、 参数取值、模型选取如表1所示。

表1 模拟的初始条件、参数取值及设置

Tab. 1 Some initial condition, characteristics and settings of simulation

项目	取值及设置	项目	取值及设置		
厌氧反应器特征	进水:4000 mg/L COD _{Cr}	环境参数	25℃,大气压力:101 325 Pa		
污泥颗粒特征	出水:1200 mg/L COD Cr (70%) 62.5~5 mm ^[19] ,密度:1050 kg/m ^{3[20~21]}		相间传输:粒子模型 拖拽力·Ishii Gidaspow 模型		
三相分离器材质	塑料,PP		提升力: Saffman Mei 模型		
液/气耦合模型 ^[17]	相间传输: 粒子模型 拖拽力: Ishii Zuber 模型 提升力: Legenfre Magnaudent 模型 虎质量力, 系数 0.5	液/面耦合模型。"	∝		
	而軍力: 示気 0.5 面润滑: Frank 模型 流扩散力:Favre Averaged 流传播:Satio Enhanced Eddy Viscosity 模型	紊流模型	气相:Dispersed Phase Zero Equation 模型 固相:Dispersed Phase Zero Equation 模型, Solid Pressure 模型: Gidaspow 模型		
浮力模型	Density Difference 模型		视州:K-Epsilon, wall Function: Scalable, Buovancy Turbulence: Production &		
紊流初始状态	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio		Dissipation 模型		
求解方法	有限体积法,全隐式多网格耦合求解	w 11 +# mi	水 :No-slip		
收敛准则	RMS ,0. 000 1	Wall 侯型	气/固:Free-slip 模型		
气泡特征	φ100~300 μm ^[19] , 空气,25℃	求解方案	高分辨率,双精度		
预接种污泥量	100 kg/m ³ (干),均匀分布	迭代参数	步长:2s,步数:400		

3 模拟结果及讨论

模拟计算在工作站上进行,主要结果如表 2 和 图 3~5 所示。表 2 为 5 种设计上升流速下,UASB 反应器内部固、液、气三相运动特征和三相分离器分 离效率的模拟值。从表中可看出,实际的液相平均 流速(不是严格的垂直方向上升流速)远大于设计 的上升流速,约为设计上升流速的 3 倍左右,液相流 速分布并不均匀,垂直方向的最大流速是平均流速 的 2 倍左右,而且由于三相分离器的存在,出现各个 方向的乱流现象;总体上,设计上升流速增加的比例 与平均流速增加的比例相近,如设计上升流速从 0.50 m/h增加到 0.75 m/h时,增加了 1.5 倍,而平 均流速从 1.43 m/h增加到 2.17 m/h,增加 1.5 倍左 右,这样方便了实际工程中从已知实例向未知工程 的扩展;同时,设计上升流速的较小变化对反应器内 部实际水流的变化影响较大,如 0.25 m/h的改变会 造成 3 倍左右的平均流速变化。气相的平均流速接 近液相的平均流速,但比液相的平均流速高约 10%,气相的最大垂直向上流速比设计上升流速增

	表 2	模拟特征结果				
Tab. 2	Characteri	istic res	sults of	the	simula	ation

会 料			设计上升流速/m·h ⁻¹		
参奴	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
液相流速/m·h ⁻¹	1.43 (Ave.)	2.17 (Ave.)	2.92 (Ave.)	3.62 (Ave.)	4.33 (Ave.)
	2.74 (Z Max.)	4.32 (Z Max.)	5.02 (Z Max.)	6.39 (Z Max.)	7.67 (Z Max.)
气相流速/m·h⁻¹	1.58 (Ave.)	2.39 (Ave.)	3.22 (Ave.)	4.01 (Ave.)	4.80 (Ave.)
	3.23 (Z Max.)	4.72 (Z Max.)	6.28 (Z Max.)	8.07 (Z Max.)	9.17 (Z Max.)
固相流速/m·h ⁻¹	0.23 (Ave.)	0.35 (Ave.)	0.48 (Ave.)	0.62 (Ave.)	0.77 (Ave.)
	0.50 (Z Max.)	0.75 (Z Max.)	1.00 (Z Max.)	1.25 (Z Max.)	1.50 (Z Max.)
固相分离率/%	81.1	80. 8	80. 5	79.3	80. 2
气相分离率/%	96. 9	96.2	96.4	95.6	95.5

注:流速数据中的"Z Max."表示垂直向上的速度分量;"Ave."表示平均值。气、固相的分离率指其产生率被分离的质量比率,通过顶部 逸出固、气相的质量流量计算。





Fig. 4 Gas velocity streamline simulation of TS (upflow: 0.5 m/h)



加幅度较大,约为设计上升流速的6倍左右,这种变 化是由于液体与气体巨大的密度差引起的。相比之 下,固相由于密度较液相稍大,其平均速度比设计上 升流速低,约为其1/2弱,随着设计上升流速的增 加,固相的平均流速增加,且其增加比例与设计上升 流速的增加比例极为接近。

特别需要注意的是,固相的最大垂直向上流速 与设计上升流速完全一致。从分离效率总体来看, 气相的分离率(捕获率)较高,5种情况下均在 95.5%以上,而且受设计上升流速的影响不大,是一 种理想的气体捕获设计;相比之下,三相分离器对固 相的分离性能总体偏低,约80%左右,同样受设计 上升流速的影响不大,但固、气的分离效率在低的设 计上升流速下更易得到保障,反应器的停留时间将 是控制参数之一,这说明三相分离器的沉淀理论设 计理念有需要提高的地方。

图 3 为液相在三相分离器部分的运动模拟情况,顶部为反应器出口,下部为三相分离器,厌氧反 应器部分略,可以看到其在挡板部分流速较下部明 显提高、紊流加剧;图 4 所示为气相在三相分离器部 分的运动模拟情况,与液相较相似,不同点在于其紊 流中向下流较少,且其在三相分离区域的速度与下 部厌氧反应区的速度变化不大,其从顶部的溢出部 分是由于液相紊流夹带,直接穿越挡板狭缝的部分; 相比之下,图 5 所示固相的流场较简单,在三相分离 器区域流向、流速变化平缓且紊流相对较少,其从顶 部的溢出部分同样是由于液相紊流夹带,直接穿越 挡板狭缝的部分,很难观察到固相在三相分离器挡 板上的沉淀和回流,这也许是上升液相流速较高的 原因,同时也可能与模拟中固相颗粒粒径假设较为 集中有关。

4 实际工程验证

上述反应器的结构参数是于 2006 年底实际设 计的浙江某垃圾渗滤液处理工程使用的厌氧反应 器,实际工程规模较大,相当于40个模拟单元的规 模(高度与实际情况一致),预接种量及进水污染物 生化需氧量(COD)负荷(含回流稀释废水)与模拟 所设一致(平均值),数据测试在接种培菌 10 d 后开 始,通过调节厌氧反应器进水泵的流量实现设计的 上升流速(计算值),通过厌氧反应器池壁不同高度 的取样管测定反应器混合液内的平均固、气相含量。 检测指标为悬浮性固体(suspended solid,简称 SS) 和气体总体积,其中水中气体体积用医用注射器抽 吸,然后测量计算活塞的位置读数与液位读数之差, 悬浮性固体采用直接测定法测量(即将水样通过滤 纸后,干燥固体残留物及滤纸,将所称质量减去滤纸 质量,即得悬浮性固体),通过检测反应器出水中的 SS 和含气量,计算确定三相分离器的分离效率。为 维持较为稳定的流场,每种设计上升流速情况下指 标的测定均在调节后的第2天进行,其分离率的特 征数据与预测值的对比如表3所示。

从表中看出,实测值与预测值的基本规律一致, 各设计上升流速情况下分离率比较接近,这也说明 设计上升流速对三相分离器的分离率影响有限。另 外,实测值均较预测值低,在模拟中采用的固、气颗 表 3 三相分离器分离率预测值与实测值的比较 Tab. 3 Comparison of simulated and in-situ measured separation ratio

	•						
		设计上升流速/m·h ⁻¹					
麥奴		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	
	预测值	81.1	80.8	80.5	79.3	80.2	
固相分离率/%	实测值	75.4	75.2	75.0	74.8	74.4	
	相对误差	7.56	7.45	7.73	6.02	7.80	
	预测值	96. 9	96.2	96.4	95.6	95.5	
气相分离率/%	实测值	91.3	90.7	90.5	88.7	88.5	
	相对误差	6.13	6.06	6.52	7.78	7.91	

粒直径范围比较集中且均为理想球形,而实际情况 出入较大,各种尺寸均有,这可能是造成预测值与实 测值差别的原因之一,但两者的相对误差小于8%, 说明模拟理论与实际情况吻合较好,经过进一步改 进可用于实际三相分离器的开发、研究。 性能预测,初步的试验表明其预测值与实测值的相 对误差在8%以内。

(2)在5种设计上升流速(0.50、0.75、1.00、
1.25和1.50m/h)的情况下,低的上升流速可获得较高的固、气分离率,但差别不大,小于2%;说明设计上升流速不是UASB设计最主要的控制参数。

(3)设计上升流速对反应器内部流动的影响明显,实际的液相平均流速(不是严格的垂直方向上升流速)远大于设计的上升流速,约为设计上升流速的3倍左右;气相的平均流速接近液相的平均流速,但比液相的平均流速高约10%;固相平均速度比设计上升流速低,约为其1/2弱,固相的最大垂直向上流速与设计上升流速完全一致。

(4)由于缺乏基础数据描述固、气相颗粒的分 布与动力学特征以及多相流模拟的复杂性,模拟结 果反映出的一些初步结论需要进一步的试验验证和 理论探索。

5 结论

(1)CFD 技术可用于三相分离器的流场模拟、

参考文献

颜智勇,胡勇有,凌霄. 厌氧颗粒污泥膨胀床中三相分离器的优化设计[J]. 工业用水与废水,2003,34(4):5~8.
 Yan Zhiyong, Hu Yongyou, Ling Xiao. Optimized design of three-phase separator in anaerobic granular-sludge, expanded-bed (EGSB) reactor [J]. Industrial Water & Wastewater, 2003, 34(4): 5~8. (in Chinese)

2 黄正华. 分步式三相分离器的结构与设计[J]. 中国沼气, 2006, 25(2):25~27.

Huang Zhenghua. Structure and design of step-by-step gas-liquid-sludge separator [J]. China Biogas, 2006, 25(2): 25 ~ 27. (in Chinese)

3 黄健. EGSB 反应器中三相分离器的设计及实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2005. Huang Jian. A design and test study of the three-phase separator in EGSB reactor [D]. Hefei: Hefei Industrial University, 2005. (in Chinese)

4 郭永福,郭维华. 厌氧 UASB 反应器中新型三相分离器的实验研究 [J]. 苏州科技学院学报:工程技术版, 2003, 16(2):29~33, 48.

Guo Yongfu, Guo Weihua. The experimental study on the new gas-liquid-sludge separator in upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2003, 16(2): 29 ~ 33, 48. (in Chinese)

- 5 邓志安.重力式三相分离器内流场泥砂沉积规律研究[J].石油机械,2002,30(3):1~3. Deng Zhian. The research of mud and sand deposition rule in the gravity type oil-gas-water separator [J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(3):1~3. (in Chinese)
- 6 Cazarez O, Montoya D, Vital A G, et al. Modeling of three-phase heavy oil-water-gas bubbly flow in upward vertical pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(6): 439 ~ 448.
- 7 Hashemian S J, James A. Gas-solid-liquid separator in anaerobic treatment of wastewater [J]. Water Research, 1990, 2(3); 381 ~ 382.
- 8 Abdullah Yasar, Nasir Ahmad, Muhammad Nawaz Chaudhry, et al. Sludge granulation and efficiency of phase separator in UASB reactor treating combined industrial effluent [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(5): 553 ~ 558.
- 9 Narnoli S K, Indu Mehrotra. Sludge blanket of UASB reactor: mathematical simulation[J]. Water Research, 1997, 31(4): 715 ~ 726.
- 10 Cláudia E T Caixeta, Magali C Cammarota, Alcina M F Xavier. Slaughter house wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor [J]. Bioresource Technology, 2002, 81(1): 61 ~ 69.

- 12 Ranganathan Panneerselvam, Sivarama Savithri, Gerald Devasagayam Surender. CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(12): 1 331 ~1 344.
- 13 Xinyu Zhang, Goodarz Ahmadi. Eulerian Lagrangian simulation of liquid-gas-solid flows in three-phase slurry reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(18): 5 089 ~ 5 104.
- 14 Van Sint Annaland M, Dean N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of gas-liquid-solid flows using a combined front tracking and discrete particle method [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(22): 6188 ~ 6198.
- 15 Pameerselvam R, Savithri S, Surender G D. CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidized bed reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6): 1 119 ~ 1 135.
- 16 Wang Feng, Mao Zaisha, Wang Yuefa, et al. Measurement of phase holdups in liquid-liquid-solid three-phase stirred tanks and CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(22): 7535 ~ 7550.
- 17 ANSYS CFX. ANSYS CFX handbook version 12. 1[M]. UK: CFX Company, 2009.
- 18 Metcalf & Eddy Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse I III [M]. 4th ed. Beijing: McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.
- 19 Torsten Pietsch, Ralf Mehrwald, Ralf Grajetzki, et al. Macro- and microscopic in-situ observation of gas bubbles and sludge particles in a biogas tower reactor [J]. Water Research, 2002, 36(11): 2836 ~ 2842.
- 20 刘永红, 贺延龄, 李耀中, 等. UASB 反应器中颗粒污泥的沉降性能与终端沉降速度[J].环境科学学报, 2005, 25(2):176~179.

Liu Yonghong, He Yanling, Li Yaozhong, et al. The settling characteristics and terminal velocity of granular sludge in UASB reactor [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(2): 176 ~ 179. (in Chinese)

- 21 杨世关,赵青玲,张杰,等.两种厌氧反应器培养颗粒污泥的对比试验[J].农业工程学报,2007,23(1):183~187. Yang Shiguan, Zhao Qingling, Zhang Jie, et al. Comparative experiment of anaerobic granular sludge cultivation in two kinds of anaerobic reactors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1):183~187. (in Chinese)
- 22 朱洪光,毕峻玮,石惠娴. 全混式厌氧反应器搅拌方式分析与优化[J]. 农业机械学报,2011,42(6):127~131.
 - Zhu Hongguang, Bi Junwei, Shi Huixian. Analysis and optimization of different mixing method in completly mixed digesters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):127 ~131. (in Chinese)

(上接第 88 页)

12 白美健,许迪,李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. 水利学报, 2010, 41(6):732~738.

Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong. Effects of spatial variability of infiltration on basin irrigation performance under different microtopography conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6):732 ~738. (in Chinese)

- 王维汉,缴锡云,彭世彰,等. 基于稳健设计理论的畦灌质量敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):37~42.
 Wang Weihan, Jiao Xiyun, Peng Shizhang, et al. Sensitivity analysis of border irrigation performance using robust design theory [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 37~42. (in Chinese)
- 14 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- 15 聂卫波. 畦沟灌溉水流运动模型与数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009. Nie Weibo. Research on water flow model and numerical simulation for border and furrow irrigation [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009. (in Chinese)
- 16 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社, 2001.