



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第10期

Vol.9 No.10

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

10
2015

目 次

综 述

非平衡等离子体降解废水中有机污染物研究进展 王保伟 董博 刘震 段晓菲 李艳平(4613)

水 污 染 防 治

高氨废水自养半亚硝化过程 N_2O 释放特性 吕永涛 鞠恺 王磊 张雪玲 孙婷(4623)

磷酸铵镁结晶技术处理模拟氨氮废水 余荣台 申亚群 任洪强(4627)

天然氧化纤维素的吸附性能 耿存珍 夏延致 王未君 赵昔慧(4632)

常州市平原环状河网水环境改善方案情景模拟 赵轩 薛祥山 徐速 许申来 徐一剑(4637)

掺铁碳羟基磷灰石复合物对铅离子废水的吸附 曾荣英 罗春香 龚道新 唐文清 冯泳兰 彭刚(4643)

化学改性对活性炭吸附磺胺甲恶唑和布洛芬的影响 高珊珊 赵竞博 田家宇 姜欣欣 崔福义(4650)

有机负荷冲击对固定床厌氧反应器启动及古菌群落动态影响 赵洪颜 于海茹 陈迪 朴仁哲 李虎林 崔宗均(4655)

偶氮染料脱色菌 *Lysinibacillus* sp. FS1 的脱色性能 苏萌 陶然 杨扬 麦晓蓓 张敏 王团团(4664)

预处理-水解酸化-厌氧-好氧工艺对玉米淀粉废水有机污染物的降解 闫海红 年跃刚 周岳溪 殷勤 高鹏 郭晓娅(4673)

厌氧氨氧化反应过程的三维荧光光谱解析 刘怡心 李卫华 申慧彦 张二杨(4680)

碳酸根型镁铝水滑石对铬酸根和磷酸根离子的吸附性能 林巧莺 陈岳民(4687)

乙萘酚和甲萘胺在超高交联树脂上的竞争吸附 孟冠华 吴玉玲 刘宝河(4697)

盐度对人工渗滤系统中煤渣和陶粒除磷过程的影响 薛倩 刘月敏 崔婷婷 孙力平 杜金山 胡鑫(4705)

碱度对膜生物反应器硝化过程和膜污染的影响 胡苗苗 洪俊明 李尚惠 戴兰华 陈向强 谢小青(4711)

铁碳微电解预处理强酸高盐印染中间体废水 乔鹏 张毅 黄天寅 张后虎 刘锋 路逸居(4717)

高分子重金属螯合剂 PATD 的制备及其去除 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 性能 刘志勤 陈锋(4724)

奥贝尔氧化沟工艺中异养菌动力学参数测定与分析 杨侃 刘玉玲 马昭(4731)

铝铁复合淀粉絮凝-微波/ H_2O_2 氧化协同处理垃圾渗滤液 林亲铁 黎宏飞 朱笑仪(4735)

采出水中硫酸钙在膨润土表面的沉积过程 李珊 李彦 屈撑园(4741)

再生水补水人工湖水域聚类划分及水质指标时空分布特征 蒋云龙 熊家晴 王晓昌 张银婷 王楠 张青青(4746)

海藻酸钠包埋凹凸棒土颗粒吸附剂的制备及其对单宁酸的吸附 于年吉 王海玲 朱兆连 郑为升 闫智超(4753)

天然超细针状羽绒粒子对染料的吸附性能 陈凤翔 程凡 刘欣 董兵海 王世敏 赵丽 许祖勳 万丽(4759)

2009—2014 年河北平原浅层地下水硝态氮特征及其来源 鹿会从 刘福亮 付海燕 付胜霞 李晓玉 张灿灿 高太忠(4766)

强化混凝过程絮体形态对锑(V)去除效果的影响 贺维鹏 高源 童丽 施周 刘佳(4773)

不同磷条件下高温胁迫对铜绿微囊藻增殖的影响及其恢复 李婷 景元书 韩玮(4780)

焦化废水中总氮的构成及在生物工艺中的转化 吕鹏飞 刘雷 吴海珍 韦朝海(4789)

不同粒径高浓度粉末活性炭组合 UF 膜工艺特征和过滤效果 王彩虹 闫新秀 王瑾丰 牛晓君 梁恒 李圭白(4797)

基于 BioWin 软件对 A^2/O 工艺的模拟与优化 马昭 刘玉玲 杨侃(4803)

Mn_3O_4 催化臭氧化钴井废水的作用机理 王兵 张悦 任宏洋 岳丞(4811)

铁碳微电解联合两相 UASB 处理丙烯酸废水 孙丽华 骆坚平 董娜 王晓燕 李安峰(4817)

连锁控制的 A/O -MBR 工艺处理石化社区生活污水 冯任驰 黄冬根 陈齐全 张凌 武子南 蔡诗华 徐斌(4823)

响应曲面法优化工业高钙废水制硫酸钙晶须的工艺 崔益顺 付凌杰 李国勇 向云刚(4828)

具有 SR-Fenton 和光催化活性的 $Co-TiO_2$ 的制备及其活性 吉芳英 刘亭役 陈晴空 邹秋林(4833)

无机盐离子对负载型催化剂 Co_3O_4/GO 降解 PVA 废水的影响 段元东 吕伟 李玉龙 李洁冰 李登新(4839)

钢渣处理电厂循环冷却排污水中有机磷 周振 乔卫敏 沈雪莲 王一方 胡大龙 王罗春(4845)

电絮凝法处理石油裂化催化剂废水 陈光光 胡奇 李耀彩 胡威夷 高大文(4850)

改性 ZSM-5 介孔沸石分子筛对焦化尾水吸附行为及动力学 唐海 沙俊鹏 宋珍霞 安东 汪林杰(4857)

不同树叶提取液绿色合成纳米铁的制备及应用 郭梦羽 翁秀兰 曾慎亮 陈祖亮(4864)

苯胺污染事故应急处置技术评估体系及其应用 时圣刚 曹敬灿 封莉 梁文艳 张立秋(4871)

木质素基水凝胶对亚甲基蓝染料的吸附性能 徐继红 穆新科 洪思明 叶冬 苏娅(4877)

水污染防治

磁性介孔碳吸附模拟废水中的结晶紫	高美娜	唐然肖	翟炎洲	刘伟华	王春(4883)
TiO ₂ -rGO 制备及其对亚甲基蓝溶液的降解	刘晶晶			宋存义	童震松(4890)
纳米 SiO ₂ 对 Pb ²⁺ 污染水源水混凝过程的影响	刘艳静			徐慧	王东升(4897)
氧化镁改性沸石去除猪场废水中氨氮的性能及机理	郭俊元	王茜	罗力	邹长武	王卓(4903)
化学氧化技术在地下水修复中的应用	尹贞	廖书林	马强	张进锋	李月中(4910)
粉末吸附材料协同 HPAM 强化混凝消除微污染水中 OCPs	夏传			刘鹏宇	武福平(4915)
超声和 H ₂ O ₂ 对双酚 A 模拟废水的毒性源头消减	江子建			陈秀荣	赵建国(4921)

大气污染防治

基于灰色层次分析法的船舶废气 SO _x 减排技术评价	杨少龙	韩志涛	潘新祥	严志军(4928)				
气固两相流在穿越液池过程中气固分离特性数值分析	吴 暄		李海广	武文斐(4935)				
桂林地区大气细颗粒物(PM _{2.5})工业排放源清单	罗恢泓	廖 雷	王敦球	游少鸿	唐 颀	廖家英	宋韶华	文建辉(4942)
脉冲放电协同负载型氧化物催化剂降解甲醛	董冰岩	黄崇伟	江小华	周海金	施志勇	兰水荣(4947)		
三氧化二镍改性活性焦的脱硫性能及机理				蒋金池	黄 田	杨志山(4953)		
湿式电除尘器系统流场数值模拟分析				李立锋	叶兴联	杨 丁(4959)		
基于 matlab 北京市 PM _{2.5} 动态分区统计预报模型的开发	程念亮			李军杰	李云婷	孙 峰(4965)		
旋转电极式电除尘器清灰寿命实验方法设计	姚宇平			赵海宝	何毓忠	王贤明(4971)		
不同喷枪在 CFB 锅炉 SNCR 工程中的应用	张仲飞			陈李荔	王岳军	刘学炎	吴忠标(4977)	
聚多巴胺/蒙脱土复合材料对 SO ₂ 的吸附性能	曾安然			陈汝盼	林志杰	林松柏(4982)		
铈钴比率及过渡金属掺杂对 Pd/Ce _x Zr _{1-x} O ₂ 催化剂性能的影响	汪银环			程 昊	王树东	王树东(4987)		
改性分子筛二氧化碳捕集材料的制备及其性能	张学诗			王亚军	齐树亭	孟庆强(5000)		
烧结烟气脱硫颗粒物的变化特性	杨 勇	宋存义	童震松	冷廷双	薛泽海	孙国通(5011)		
温度对新旧聚苯硫醚滤料力学性能的影响	王桂林	张 宇	王 森	边 疆	薛泽海	孙国通(5011)		
基于支持向量机的选择性催化还原脱硝系统运行优化	王桂林	张 宇	王 森	边 疆	薛泽海	孙国通(5011)		
天津地区环境监测点 PM _{2.5} 量化分析模型	朱险峰	陈可意	余 辉	唐 逸	曲昌盛	曲昌盛(5017)		

固体废物处置

基于磷脂脂肪酸法分析 A + OSA 污泥减量工艺微生物群落结构	宁欣强	乔文文	张 蕾	高 旭(5024)			
通风速率对烟草废料堆肥腐熟及元素变化影响	赵桂红	李梓木	于艳玲	李冬梅	冯玉杰(5031)		
垃圾焚烧炉渣铁磁性物质提取及特性表征			魏云梅	周 英	石德智(5037)		
厢式隔膜压滤机深度脱水最优过滤压力	朱桂华	王万斌	张丽欣	邓 玲	邓 玲(5045)		
城市污泥过热蒸汽与热风干燥特性	张绪坤	姚 斌	苏志伟	孙瑞晨	罗 俊	吴 起	邢 普(5049)
一种西夫碱配合物对煤中金属离子的选择性络合				孔建飞	王继仁	张春华(5055)	
各因素对煅烧高硅磷石膏基水泥强度的影响	武 杰	阚黎黎	李建锡	徐 悦	徐 悦(5059)		
高炉渣对 Zn(II) 的吸附性能			刘金亮	陈莉荣	王 哲	王 哲(5065)	
基于微波辅助和响应曲面设计提取煤矸石中氧化铝	刘成龙	夏举佩	自桂芹	余复幸	谢宇充	谢宇充(5071)	
改性污泥脱水性能的中试研究			孟令鑫	汪家权	张 辉	张 辉(5078)	

土壤污染防治

蔗渣生物炭对砖红壤吸附氧氟沙星的影响	陈 森	唐文浩	葛成军	彭黎旭(5083)	
铬污染土壤的单一/复合还原处理及其长期稳定性研究		姜革红	陈 灿	向仁军(5091)	
外源有机酸对小飞扬草(<i>Euphorbia thymifolia</i> L.) 修复镉污染土壤的影响	詹淑威	潘伟斌	赖彩秀	吴 俭	吴 俭(5096)

环境生物技术

麦芽糖假丝酵母降解苯酚和 4-氯酚的特性	任 燕	岳秀萍	王国英	贾子龙(5103)		
两种电子供体对光合藻类微生物燃料电池产电性能及小球藻生长的影响	刘承鸿	游志敏	佟海龙	于 荆	何 燕(5109)	
外电阻对 MFC 型生物毒性检测器性能的影响	常定明	卢智昊	吴陈巍	陈 瑶	蔡兰坤	张乐华(5113)
阴极硝化耦合阳极反硝化实现微生物燃料电池技术脱氮	黄丽巧		易筱筠	韦朝海	冯春华	冯春华(5118)

环境监测与评价

溴离子对水体化学需氧量测定的影响	李兆冉	盛彦清	孙启耀	曲璞璇(5125)
------------------------	-----	-----	-----	-----------

气固两相流在穿越液池过程中气固分离特性数值分析

吴 暄^{1,2} 李海广¹ 武文斐¹

(1. 内蒙古科技大学内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要 利用在欧拉-拉格朗日框架下建立的气液固三相流动数学模型, 实现气固两相流穿越液池过程中气液固三相流动的数值模拟。模拟结果直观地揭示出了三相流动形态以及颗粒的运动、分离行为过程。通过对颗粒数的统计计算, 获得了分级效率曲线及其变化规律。数值模拟结果发现, 气固两相流穿越液池过程中的气固分离主要经历了3个分离作用阶段; 细小颗粒的分离效率明显低于大粒径颗粒的分离效率, 10 μm 和 1 000 μm 粒径颗粒分离效率分别为 88.2% 和 99.8%; 随着下降管出口流速和下降管出口静态淹没深度的增加, 颗粒分离效率提高, 其中小粒径颗粒的分离效率提高明显, 而随后受其影响的程度减弱。

关键词 液池 气液固三相 分离效率 数值模拟

中图分类号 X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)10-4935-07

Numerical analysis on separation characteristics of gas-solid in process of gas-solid flow passing through pool

Wu Xuan^{1,2} Li Haiguang¹ Wu Wenfei¹

(1. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayan Obo Multi-Metallic Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract A mathematical model of gas-liquid-solid three-phase flow was established in the Euler-Lagrange framework. It was used to study gas-liquid-solid three-phase flow in the process of gas-solid flow passing through pool base on experimental verification. The flow characteristics of gas-liquid-solid three-phase flow were studied and the movement of particles was intuitionistic revealed. The classification efficiency curves were obtained. The results indicate that the process of gas-solid separation involved three stages. The separation efficiency of 10 micron particle or 1 000 micron particle is 88.2% or 99.8%, respectively. With the increasing of the outlet gas velocity and the static submerged depth of downcomer outlet, the separation efficiency increased. Moreover, the effect of these on small particles is more obvious than on big particles.

Key words pool; gas-liquid-solid three phases; separation efficiency; numerical simulation

大气中悬浮颗粒物聚集是雾霾天气的形成原因。减少悬浮颗粒物排放, 最有效手段就是除尘。其中, 含粉尘颗粒气体通过穿越液池完成气固分离的洗涤净化技术在工业除尘、环境保护和卫生安全等众多领域都有着广泛的应用^[1,2]。笔者前期研究发现, 气体穿越液池过程中所具有的独特气液流动形式为气固分离创造了条件^[3]。由于该过程存在着极为复杂的气液固三相流动, 因此, 目前的研究还主要集中在气液两相流动^[4-6]或气固两相流动^[7]方面。而有关该过程中颗粒运动分离特性的研究较少。本研究将在前期研究的基础上进一步揭示实现气固分离的作用机理并给出气固分离效果的定量表

征。但由于三相流动的复杂性, 以及三相下实验测量的局限性, 该过程中颗粒运动及分离规律的实验开展存在困难。而在气液固三三相的模拟方面, Xu Yonggui 等^[8]利用欧拉-拉格朗日方法建立数学模型, 研究了颗粒对气泡在液体中上升运动的影响。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51166010); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2014MS0530); 内蒙古科技大学创新基金资助项目(2011NCL020)

收稿日期: 2014-07-20; **修订日期:** 2014-09-12

作者简介: 吴暄(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大气污染物控制的数值模拟。E-mail: wxgj@163.com

Panneerselcam R. 等^[9]采用欧拉-欧拉方法对机械搅拌槽内气液固三相中的固体颗粒悬浮特性进行了数值模拟。由于欧拉-拉格朗日方法在颗粒的运动轨迹跟踪、颗粒碰撞受力分析以及颗粒数量统计方面有着更好的优势。因此,采用数值模拟方法,在欧拉-拉格朗日框架下建立气液固三相流动数学模型,对气固两相流在穿越液池过程中的三相流动特征和颗粒微观运动、分离过程进行模拟,并通过颗粒统计获得分离效率及其变化曲线,从而实现对气固两相流在穿越液池洗涤净化过程中的颗粒分离规律进行数值预测。

1 模型的建立

1.1 物理模型

参照激冷式气流床气化炉洗涤室的结构特点^[2],同时考虑计算量。数值模拟所用物理模型如图1所示。气固两相流通过下降管进入液池,并在反折穿越液池的过程中完成气固分离。其主要几何尺寸,下降管直径 $d = 150 \text{ mm}$,液池直径 $D = 480 \text{ mm}$,液池高 $H = 3\ 000 \text{ mm}$ 。

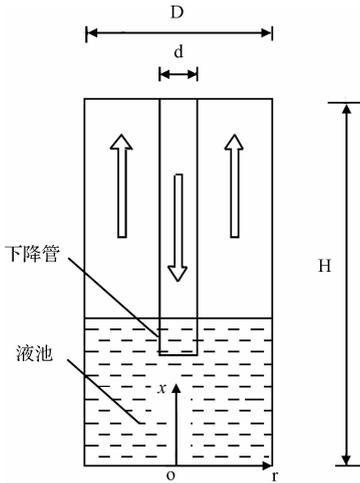


图1 物理模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of physical model

1.2 数学模型

1.2.1 假设条件

简化和假设如下:①颗粒为球形固体颗粒;②流动过程中无热质传递现象;③由于合成气体中所含凝渣量不多^[10]。故只考虑气液相对离散颗粒相的影响。

1.2.2 连续相数学模型

在 Euler 坐标系下考察气液连续相。气液两相

连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \\ \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + F_v = & \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; u_i 为方向上的速度; p 为压力; μ 为粘度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为 Reynolds 应力项; F_v 为体积力源项。

湍流模型采用 RNG k - ε 湍流方程。湍动能 ε 方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散 ε 方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: G_k 为湍动能产生项; $C_{1\varepsilon} = 1.42$ 、 $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho a^3 (1 - a/a_0)}{1 + \beta a^3}$

其中, $a = \frac{SK}{\varepsilon}$, $a_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

气液两相间界面跟踪采用以下模型:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中: α_{ij} 为网格中第 q 相体积分, $\sum_{q=1}^m \alpha_q = 1$ 。 m 表示有 m 相流体。

用连续表面张力模型表征气液相界面的表面张力。

$$F_s = \sigma k \Delta \nabla \alpha_q \quad (6)$$

式中: σ 为表面张力系数, k 为曲率。

1.2.3 离散相数学模型

离散相采用直接模拟蒙特卡诺(DSMC)方法^[11]。

单颗粒运动方程为:

$$\alpha = F/m + g \quad (7)$$

式中: α 为颗粒加速度; m 为颗粒质量; g 为重力加速度; F 为颗粒所受合力,主要有流体对颗粒的曳力

F_d 、重力、Magnus 力 F_m 、浮力 F_b 以及附加质量力 F_r 。考虑到水的黏性不大,故忽略 Basset 力的影响。

$$\begin{cases} F_d = \frac{\pi r_p^2}{2} C_d \rho_c |u_c - u_p| (u_c - u_p) \\ F_m = \pi r^3 \rho_c \omega (u_c - u_p) \\ F_r = \frac{2}{3} \pi r^3 \rho_c \frac{d}{dt} (u_c - u_p) \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_d 为单颗粒曳力系数; r_p 为颗粒半径; ρ_c 为气相或液相密度; u_c 为气液混合相速度。 u_p 为颗粒线速度。在颗粒受力计算上,本文依据所划分的颗粒计算网格中气相或液相所占容积份额的比重,来判断颗粒是处于气相中还是液相中,从而计算出颗粒所受到的作用力。

在某一颗粒计算网格内,取样颗粒 i 和取样颗粒 j 所代表的真实颗粒发生碰撞的概率 P_{ij} 与颗粒 i 以相对速度 G_{ij} 在 Δt 时间内运动所掠过的体积和该体积内颗粒 j 的数浓度有关,可表达为^[12]:

$$P_{ij} = \frac{w_j}{V_i} \pi \left(\frac{d_{pi} + d_{pj}}{2} \right)^2 G_{ij} \Delta t \quad (9)$$

式中: w_j 为取样颗粒 j 的数目权重; V_i 为取样颗粒 i 所在网格的体积 (m^3); d_{pi} 为颗粒 i 的直径 (m); d_{pj} 为颗粒 j 的直径 (m); G_{ij} 为颗粒 i 和 j 的相对速度 (m/s)。

取样颗粒 i 和同一网格内其他所有颗粒的碰撞概率 P_i 为^[12]

$$P_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} = \sum_{j=1}^N \frac{w_j}{V_i} \pi \left(\frac{d_{pi} + d_{pj}}{2} \right)^2 G_{ij} \Delta t \quad (10)$$

式中: N 为取样颗粒 i 所在网格的取样颗粒总数。

依据式(10),可运用修正的南布方法^[11]确定与颗粒 i 发生碰撞的颗粒。即在产生 $[0,1]$ 之间的均匀随机数 R 后,用

$$j = \text{int}[R \times N] + 1 \quad (11)$$

根据式(11)选择与颗粒 i 可能发生碰撞的备选颗粒。随后,利用随机数 $R(0 < R < 1)$ 来判断颗粒 i 是否与颗粒 j 发生碰撞,如

$$R > \frac{j}{N} - P_{ij} \quad (12)$$

满足,则颗粒 i 和颗粒 j 在该时间段内将发生碰撞。颗粒 i 和颗粒 j 的线速度和角速度采用硬球模型来计算得到^[12],即

$$\text{若 } \frac{n \cdot G^0}{G^0 ct} < \frac{2}{7f(1+e)}, \text{ 则}$$

$$\begin{cases} V_i = V_i^0 - (n - ft)(n \cdot G^0)(1+e) \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ V_j = V_j^0 - (n - ft)(n \cdot G^0)(1+e) \frac{m_i}{m_i + m_j} \\ \omega_i = \omega_i^0 + \frac{5}{d_i}(n \cdot G^0)(n \times t)(1+e) \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ \omega_j = \omega_j^0 + \frac{5}{d_j}(n \cdot G^0)(n \times t)(1+e) \frac{m_i}{m_i + m_j} \end{cases} \quad (13)$$

若 $\frac{n \cdot G^0}{G^0 ct} < \frac{2}{7f(1+e)}$, 则

$$\begin{cases} V_i = V_i^0 - [(1+e)(n \cdot G^0)n + \frac{2}{7}|G_{ct}^0|t] \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ V_j = V_j^0 - [(1+e)(n \cdot G^0)n + \frac{2}{7}|G_{ct}^0|t] \frac{m_i}{m_i + m_j} \\ \omega_i = \omega_i^0 - \frac{10}{7d_i}|G_{ct}^0|(n \times t) \frac{m_j}{m_i + m_j} \\ \omega_j = \omega_j^0 - \frac{10}{7d_j}|G_{ct}^0|(n \times t) \frac{m_i}{m_i + m_j} \end{cases} \quad (14)$$

式中: f 为摩擦系数; e 为恢复系数; ω 为颗粒角速度。碰撞前的相对速度 $G^0 = V_i^0 - V_j^0$;切向方向上单位矢量 $t = G_{ct}^0 / |G_{ct}^0|$;相对速度切向分量 $G_{ct}^0 = G^0 - (G^0 \cdot n)n + 0.5 \times d_i \omega_i^0 \times n + 0.5 \times d_j \omega_j^0 \times n$ 。

采用以下方法计算颗粒分离效率。

$$\eta = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (15)$$

式中: m 为 t_0 到 t 时间段内被分离的颗粒总数; M 表示从 t_0 到 t 时间段内被分离和被捕获的总颗粒数。

1.3 模型的求解

基于 fluent6.2 商业软件,非稳态气液连续相流动数值模拟在欧拉框架下完成。在软件计算过程中存储各个时间段的气液两相速度、相容积份额、fluent 计算网格数据以及 fluent 网格编号等信息。在拉格朗日框架下采用 VC++ 自行编制颗粒计算网格划分以及离散颗粒跟踪计算程序,该程序能逐一调取气液两相计算数据和气液连续相计算网格信息,并可将其耦合进颗粒的受力、跟踪计算当中,从而实现颗粒离散相与气液连续相的耦合计算。在本文所研究的三相流动过程中,颗粒会时时刻刻处于不同的连续相中,因此,需要对颗粒所处的相环境做出较为准确的判断。在此,本文根据颗粒计算网格中气液相所占容积份额的比重,来判断颗粒所处的

相环境,从而计算出颗粒与气相或液相之间的作用。当颗粒计算网格内全部为气相或液相占据时,则该网格中的颗粒将继受气相或液相作用,并同时对该颗粒进行统计;当颗粒计算网格中既有气相又有液相时,采用乘同余法^[13]生成 $[0,1]$ 之间随机数,在根据该颗粒计算网格中气液所占容积份额比重,来判断颗粒是处于液相还是气相。假定颗粒一旦进入液相就认为被捕获而不再发生脱离。若判断为捕获,则对该颗粒进行统计并受液相作用。在一时间段内完成所有颗粒轨道跟踪计算后,便可获得该时间段内颗粒被捕获分离的数量。

数值模拟计算参数选取如下:气体密度为 1.29 kg/m^3 ;液体密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;颗粒选用石英砂,其密度为 2490 kg/m^3 ;气体运动粘度为 $2.38 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;液体运动粘度为 $1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$;下降管入口风速依据工业运行条件选为 3 m/s ;颗粒摩擦系数为 0.3 ;颗粒恢复系数为 0.8 。

在入口颗粒分布上,参照气化炉工业运行时气化室出来的煤渣颗粒分布规律,并按照颗粒级配进行入口颗粒的配比。其中,粒径为 $10 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 17% ;粒径为 $20 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 17% ;粒径为 $50 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 17% ;粒径为 $300 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 17% ;粒径为 $1 \times 10^3 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 16% ;粒径为 $1 \times 10^4 \mu\text{m}$ 颗粒的级配为 16% 。

2 结果与讨论

2.1 模型的验证

为验证本文所建数学模型计算结果的合理性,将计算得到颗粒分布与文献^[10]中实验装置上实验测得的颗粒分布进行对比。参照实验条件,将入口颗粒简化为几个主要粒径颗粒,其对应的粒径分别为 840 、 420 、 250 、 178 和 $150 \mu\text{m}$ 。在实验中煤渣的进料量为 18 kg/h ,经折合约每秒钟需投入大约 40000 多个颗粒。由于拉格朗日方法是逐个跟踪颗粒的运动,因此,无法按实验给料量进行如此之多的颗粒的跟踪计算。但为力求获得与实验结果一致的物理现象,对每次加入颗粒的粒径及其分布与实验条件一致。

图2为数值模拟结果与实验结果的比较。图中所示的是液体中颗粒的质量百分比轴向分布。正如前面所论述的,由于在所加入的颗粒量还是在所获取数据的时间上,模拟计算无法与文献中的实验保持完全精确一致,所以计算结果与实验结果之间难

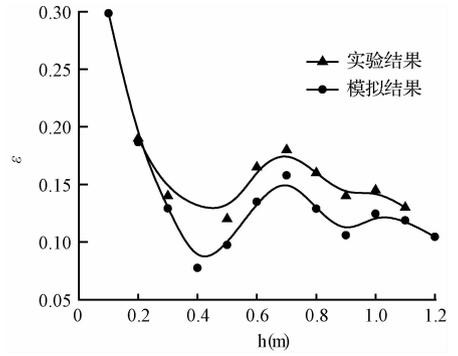


图2 数值模拟结果与实验结果的比较

Fig. 2 Comparison of simulated axial mass fraction of particles with experimental results

免存在一些误差。但是从图中曲线分布可以看到,数值计算结果与实验结果的总体趋势是一致的,能够反映出较一致的物理规律,即颗粒浓度分布的波动性,并且峰值出现的位置也基本一致。这说明本文所建立的数学模型预测结果的合理性。

由于三相系统的复杂性,针对该过程中颗粒统计并计算分离效率的实验研究还未有相关文献可参考,为此,在实验验证的基础上,将利用数值模拟技术的优势,进行这方面的探索性研究工作。

2.2 气液固三相体系下气固分离过程及分析

气固两相流在穿越液池的过程中气体所含的绝大部分固体颗粒被液体捕获而进入液体中,从而实现气固分离。分析图3所示的气液流动状态,可以发现,气固两相流穿越液池完成气固分离过程经历了以下3个主要分离阶段:气体冲击液池时,气体中的固体颗粒因惯性作用与液体发生碰撞而被液体捕获,该阶段为冲击分离阶段;气体冲出下降管在液池中产生大量气泡,这些激发出来的气泡使准备随气体一同穿越液池的部分较小粒径颗粒得到进一步的捕获,该阶段为泡沫分离阶段;在液面处,气泡破裂所

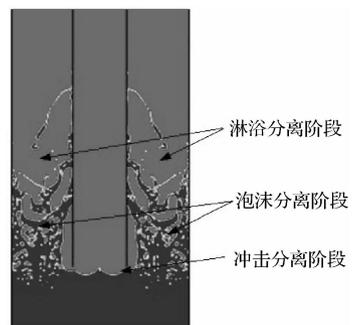


图3 气固分离作用阶段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gas-solid separation process

飞溅的液滴随上升气流带入液池上部空间,随后其中的大部分液滴会在自身重力作用下回落至液面,从而形成对钻出液面的细小颗粒的淋浴作用,该阶段为淋浴分离阶段。

图 4 为数值模拟得到的气液固三相流动分离过程效果图。从数值模拟得到的效果图可以清晰地看到,气体携带着不同粒径的固体颗粒进入液池,在反折穿越液池的过程中,大粒径颗粒在冲击分离阶段就凭借自身较大惯性进入液池,并逐渐沉降到液池底部。而较小粒径的颗粒则被气体带到了液池的鼓泡区,从而进入泡沫分离阶段。在该阶段,颗粒被液体捕集并在液池中悬浮,随液体一起流动并逐渐沉降。一些更细小的颗粒则被一个个沿着下降管外壁上升的气泡所夹裹而钻出液面,并进入淋浴分离阶段。在液池上部空间,在被重力分离下来的液滴的淋浴作用下,随气流一起钻出液面的大部分细小颗粒被下落的液滴所捕获,一同落回液池中。另外从图 4 中还可以看到,在经过冲击分离阶段、泡沫分离阶段以及淋浴分离阶段的重重洗涤净化作用之后,只有较少的细小颗粒能进入液池上部的空间,并随气体一道流出。

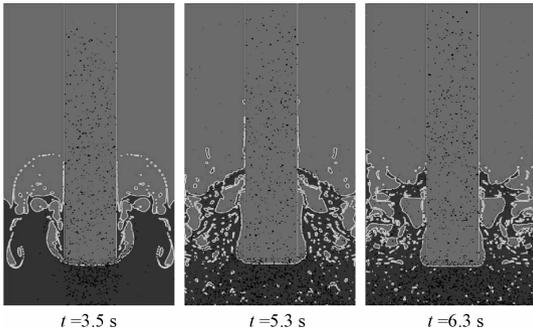


图 4 气液固三相流动行为过程数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of gas-liquid-solid three phases flow

图 5 展示了数值模拟得到的某一时刻不同粒径颗粒在随气体穿越液池过程中所经历的流动、分离过程。如图 5 所示,可以清晰地、直观地展示颗粒的运动、分离的整个过程。随气体进入液池的颗粒,在经历了冲击分离阶段、泡沫分离阶段和液滴的淋浴分离阶段后,绝大部分颗粒得到了分离。而能逃脱 3 个分离作用阶段,钻出液池的为较少的细小粒径颗粒。

2.3 颗粒分离效率随时间的变化规律

图 6 为两种粒径颗粒分离效率随时间的变化曲

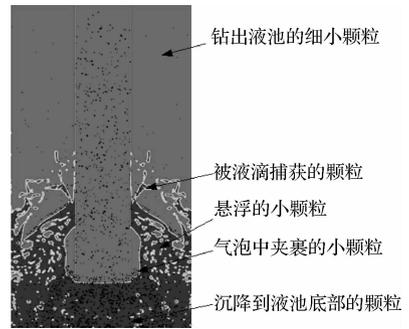


图 5 颗粒运动、分离过程分析

Fig. 5 Analysis of separation process of particles

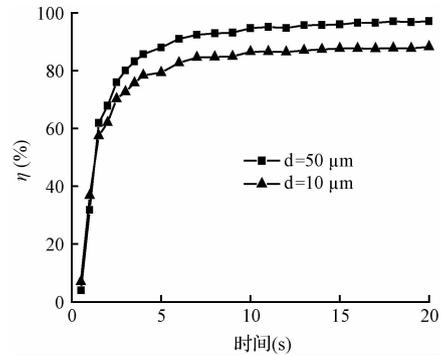


图 6 颗粒分离效率随时间的变化规律

Fig. 6 Change law of separation efficiency varying with time

线。从图中可以看出,在气固两相流进入液池的初始不稳定阶段,颗粒分离效率的增长是迅速的;当三相流动进入相对稳定阶段后,颗粒分离效率的变化趋于平缓。依据本文计算条件,在趋于稳定后,提取数据,获得粒径为 50 和 10 μm 的颗粒分离效率分别约为 98.1% 和 88.2%。对于大粒径颗粒,因其惯性大,跟随性差,易被液体捕获。而小粒径的颗粒,其惯性小,跟随性好。此外,文献[14]中实验测得粒径为 50 μm 颗粒分离效率分别为 98%。本研究计算得出的分离效率与实验结果较为接近。在有关该过程气固分离性能实验数据较为匮乏的条件下,该比较可以在一定程度上对本文计算结果的准确性形成验证。

2.4 颗粒分级效率变化规律

图 7 为颗粒的分级效率曲线。从图中所示曲线可知,随着颗粒粒径的增加,分离效率增大并趋于稳定。依据本文计算条件,粒径大于 300 μm 的颗粒具有较高分离效率,粒径为 10 000 μm 的颗粒几乎被全部捕获分离,而粒径小于 50 μm 的颗粒,其分离效率相对较低。粒径较小颗粒跟随性好,更易被

气体挟裹而一起流动;粒径较大颗粒,其跟随性较差,更容易在冲击分离阶段和泡沫分离阶段被液体捕获而实现分离。

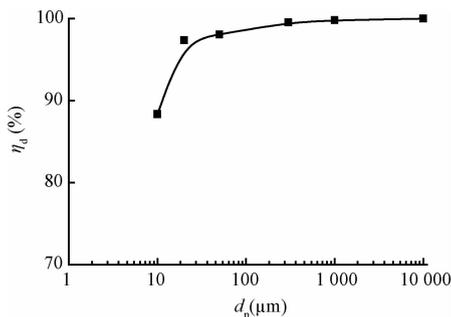


图7 颗粒的分级效率曲线

Fig.7 Classification efficiency curve of particles

2.5 颗粒分级效率随气流速度的变化规律

图8中所示曲线为不同下降管出口气速下的颗粒被捕获的分级效率变化规律。从图中可见,下降管出口气速对细小颗粒的分离效率的影响较大;而相比之下,下降管出口气速对粒径较大颗粒的影响较弱。其影响机理在于,颗粒的惯性作用以及液池内所激发的泡沫、液滴量随着气速的提高而得到增大,从而增加了不同尺度颗粒被液体捕获的可能性。而大粒径颗粒惯性作用及沉降作用较强,其在进入液池后更易被液体捕获并更易沉降到液池底部,因此对其的影响不明显。

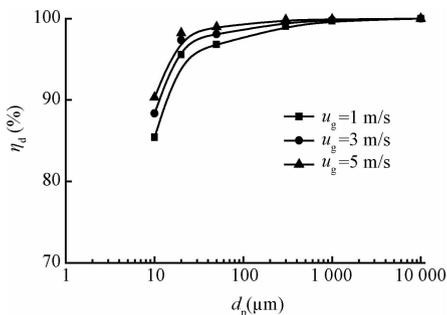


图8 下降管出口气速对颗粒分级效率的影响

Fig.8 Influences of downcomer outlet gas velocity on classification efficiency

此外,从图8所示颗粒被捕获的分级效率变化曲线可以发现,随着气速的增加,不同粒径颗粒的分离效率的差别变得不明显。这说明当气体流速增加到一定范围后,气速对颗粒捕集效率的影响减弱。实际上,气速对该过程中气固分离产生影响是双重的:一方面,随着气速的增加,气体对池内液体的扰

动增强,液滴量增多,不论在冲击分离阶段,在泡沫分离阶段,还是在淋浴分离阶段,均提升了颗粒与液体间的接触机会,使颗粒被捕获分离的概率提高;另一方面,随着气速的增大,气体对颗粒的携带作用也得到增强,同时气速的增大又使得气体的带液量增加,这相应的会降低气固的分离效果。因此,综合分析可知,仅依靠气流速度来提高颗粒分离效率是有限的。

2.6 颗粒分级效率随下降管出口静态淹没深度的变化规律

图9给出了不同下降管出口处静态浸没深度对颗粒被分离的分级效率的影响。从图中可以看出,随着下降管出口浸没液池深度的增加,小粒径颗粒的分离效率增加相对明显。其影响机理在于,随着下降管浸没液池静态深度的增加,增长了有效行程,增强了气体对液体的扰动,所激发的泡沫、液滴量增多,从而提高了颗粒被捕集的可能性。但同时,随着静态淹没深度的提高,液池内液面波动增大,并且气体对液滴的携带量也将增加,这又不利于对液滴所挟裹颗粒的分离。因此,单独依靠提升静态液位来提高分离效率的能力是有限的。

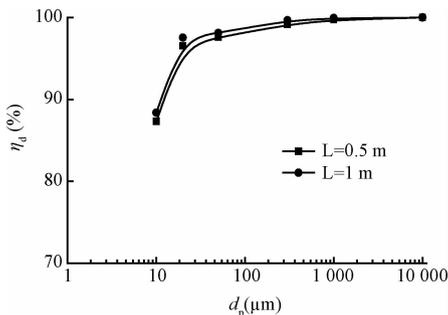


图9 下降管出口处静态浸没深度对颗粒分级效率的影响

Fig.9 Influences of static submerged depth of downcomer outlet on classification efficiency

3 结论

(1)在气固两相流穿越液池过程中,气固的分离主要通过3个分离作用阶段实现,分别是冲击分离阶段、泡沫分离阶段和淋浴分离阶段。

(2)依据本文计算条件,10、50和1 000 μm 粒径颗粒分离效率分别为88.2%、98.1%和99.8%。细小颗粒的分离效率明显低于大粒径颗粒的分离效率,并且随着粒径的增大,分离效率的差别就越小。颗粒分级效率曲线呈现先较快增长,后趋于平缓的

变化趋势。

(3)随着下降管出口气速的增加,颗粒分离效率提高,其中小粒径颗粒的分离效率提高明显,而随后受其影响的程度减弱。

(4)随着下降管出口静态淹没深度的增加,小粒径颗粒分离效率增加明显,而大粒径颗粒受其影响较弱。

参 考 文 献

- [1] Mycock J. C. , Mckenna J. D. , Theodore L. Handbook of Air Pollution Control Engineering and Technology. New York: CRC Press, **1995**, 133-171
- [2] 王辅臣,于广锁,龚欣,等.大型煤气化技术的研究与发展.化工进展, **2009**, 28(2):173-180
Wang Fuchen, Yu Guangsuo, Gong Xin, et al. Research and development of large-scale coal gasification technology. Chemical Industry and Engineering Progress, **2009**, 28(2): 173-180 (in Chinese)
- [3] 吴暄,高慧杰,王丽芳,等.气化炉内气体穿越液池过程中气泡特性的数值模拟.动力工程学报, **2013**, 33(12): 962-968
Wu Xuan, Gao Huijie, Wang Lifang, et al. Bubble characteristics of syngas during passing through cistern in gasifier. Journal of Chinese Society of Power Engineering, **2013**, 33(12): 962-968 (in Chinese)
- [4] 郭强强,王亦飞,潘飞,等.复合型洗涤冷却室内液滴夹带规律研究.中国电机工程学报, **2014**, 34(11): 1769-1778
Guo Qiangqiang, Wang Yifei, Pan Fei, et al. Research on droplet entrainment in the composite quench chamber. Proceedings of the CSEE, **2014**, 34(11): 1769-1778 (in Chinese)
- [5] 王灵萍,王亦飞,郭强强,等.洗涤冷却管内垂直降膜流动特性.化工学报, **2013**, 64(6):1959-1968
Wang Lingping, Wang Yifei, Guo Qiangqiang, et al. Flow characteristics of vertical falling film in scrubbing-cooling pipe. CIESC Journal, **2013**, 64(6): 1959-1968 (in Chinese)
- [6] 付碧华,王亦飞,林岚,等.洗涤冷却管出口处的射流深度和界面波动特性.化工学报, **2011**, 62(7):1817-1823
Fu Bihua, Wang Yifei, Lin Lan, et al. Penetration depth and characteristics of interface fluctuation at quenching pipe outlet. CIESC Journal, **2011**, 62(7): 1817-1823 (in Chinese)
- [7] 李铁,吴暄,袁竹林.水煤浆气化炉冷却管内气固两相流动与传热过程数值研究.中国电机工程学报, **2010**, 30(14):77-82
Li Tie, Wu Xuan, Yuan Zhulin. Numerical research on gas-solid two-phase flow and heat transfer in cooling pipe coal-water-slurry of gasifier. Proceedings of the CSEE, **2010**, 30(14): 77-82 (in Chinese)
- [8] Xu Yonggui, Liu Mingyan, Tang Can. Three-dimensional CFD-VOF-DPM simulations of effects of low-holdup particles on single-nozzle bubbling behavior in gas-liquid-solid systems. Chemical Engineering Journal, **2013**, 222:292-306
- [9] Panneerselvam R. , Savithri S. , Surender G. D. CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor. Chemical Engineering Research and Design, **2008**, 86(12):1331-1344
- [10] 贺必云.新型洗涤冷却室内多相流动特征的研究.上海:华东理工大学硕士学位论文, **2005**
He Biyun. Study on multiphase flow characteristics of the new type of scrubbing-cooling chamber. Shanghai: Master Dissertation of East China University of Science & Technology, **2005** (in Chinese)
- [11] 李静海,欧阳洁,高士秋,等.颗粒流体复杂系统的多尺度模拟.北京:科学出版社, **2005**
- [12] Tsuji Y. , Tanaka T. , Yonemura S. Cluster patterns in circulating fluidized beds predicted by numerical simulation (discrete particle model versus two-fluid model). Powder Technology, **1998**, 95(3):254-264
- [13] 邹峥,乐晓波,刘石坚.基于 Petri 网模型的随机数生成器.计算机工程, **2012**, 36(12):72-74
Zou Zheng, Yue Xiaobo, Liu Shijian. Random number generator based on petri nets model. Computer Engineering, **2012**, 36(12): 72-74 (in Chinese)
- [14] 方德明,陈冰冰.大气污染控制技术及设备.北京:化学工业出版社, **2005**