第 45 卷 第 4 期
2013 年 8 月

西 安 建 筑 科 技 大 学 学 报(自然科学版)
J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)

Vol. 45 No. 4
Aug. 2013

静水中上升气泡对颗粒运动影响的数值模拟研究

张鸿雁[1],许 琳[1,2],崔海航[1]

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院,西安 710055;2. 西安有色冶金设计研究院,西安 710001)

摘 要:静水中的上升气泡会诱导产生流场,进而影响到水中颗粒物的运动,这一气-液-固三相流动的问题在水处理领域中大量存在,需要建立行之有效的方法来加以研究. 首先采用相场方法模拟了气-液两相流动,刻画了气泡在静水中上升、膨胀、变形的动态过程,得到了气泡上升所诱导的外部流场;随后将颗粒引入气-液两相流场,考虑颗粒在受到重力、浮力、流体 Stokes 力作用下的运动行为,从而建立了静水中上升气泡作用下颗粒运动的力学模型. 在此基础上,研究了颗粒的粒径、分布的展向位置、垂向位置等参数对颗粒运动的影响. 通过与滤池反冲洗中滤料颗粒跃动实验结果的比较,可以认为数值模拟很好地反映了上升气泡对颗粒运动的影响,即颗粒运动的微观机制.

关键词:气泡;气-液两相流;相场方法;颗粒运动;反冲洗滤池

中图分类号:O 359.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7930(2013)04-0582-05

在不同领域内,针对单个上升气泡在静水中上升的分析研究已经比较成熟,主要包括理论分析、实验研究和数值模拟,可借鉴的结果较多. 基于 CFD 技术的两相流动数值模拟方法,可以很好地描述气泡随时间上升、变形的完整过程和主要参数的影响[1-6]. 针对气泡与固体颗粒的相互作用问题,目前从热力学分析、动力学研究等角度开展了研究,考虑了颗粒与气泡的碰撞等因素[5],例如在气浮反应中研究了上升气泡周围细小颗粒的浓度以及分布规律等[6-7].

尽管如此,对于在气—液两相共同作用下的固体颗粒运动问题,目前可借鉴的经验公式有限,而且由于场合不同大都具有一定的局限性. 直接采用气—液—固三相的数值模拟,计算条件要求很高,目前大都停留在早期的研究阶段. 鉴于三相流动直接模拟较困难,及气— 液两相流水中上升气泡的模拟更成熟,本文采取分步处理的方法,首先通过相场方法模拟气—液两相流动,在此基础上引入固体颗粒,研究气泡的上升、变形及流场的变化使得颗粒上升并沉降的过程,据此合理描述气泡带动微小颗粒上升的过程,并与滤池反冲洗过程中滤料流失的实验进行比较.

1 数值模拟

1.1 气-液两相流动方程

本文采用 Comsol Multiphysics 4.1 软件进行计算,对气—液层流两相流采用相场方法进行模拟,支配方程组包括考虑表面张力的 N-S 方程及不可压缩流体的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\nabla(\rho v v)=-\nabla p+\nabla\cdot\left[\mu(\nabla v+\nabla v^{T})\right]+\rho g+F \tag{1}$$

$$\nabla\cdot v=0 \tag{2}$$

式中:v 为速度矢量;ρ 为流体密度;μ 为动力粘性系数;p 为压强;F 为表面张力源项. 此外,对于气 - 液界面的描述则通过引入相函数的方法,利用相场方法,计算的方程如下,

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+u\cdot\nabla\varphi=\nabla\cdot\frac{\gamma\lambda}{\varepsilon_{pf}^{2}}\nabla\psi \tag{3}$$

收稿日期:2012-12-27 **修改稿日期**:2013-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11JK0530、2010JK658、21005058)

作者简介:张鸿雁(1961-),女,陕西西安人,教授,主要从事环境流体力学方面研究.

其中,φ 为相场变量,ψ 为相场辅助变量($\psi = -\nabla\cdot\varepsilon_{pf}^2\nabla\varphi + (\varphi-1)\varphi + \frac{\varepsilon_{pf}^2}{\lambda}\partial f/\partial\varphi$),$\gamma = \chi\varepsilon_{pf}^2$ 为迁移调节参数,给定值为 1,$\varepsilon_{pf} = \frac{t_{pf,h}\max}{2}$ 为界面厚度参数,$\lambda = \frac{3\varepsilon_{pf}\sigma}{\sqrt{8}}$ 为混合能量密度,表面张力系数 $\sigma = 0.0728$ N/m. 气—液界面为相场变量 $\varphi = 0$ 的位置,据此可以确定气泡在不同时刻的位置[8].

1.2　滤料颗粒运动模型

在两相流场的基础上,假设滤料颗粒为圆球形,其当量直径为 dm,对处于气泡诱导的流场中的颗粒进行受力分析,主要考虑滤料颗粒受到重力 G、浮力 F、流场的斯托克斯力 F_{Stokes} 的影响,

$$F_{合} = m\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t} = G + F_{浮} + F_{\text{Stokes}} \tag{4}$$

其中颗粒所受的重力为 $G = \frac{1}{6}\pi d_m^3\rho_m g$,浮力为 $F_{浮} = \frac{1}{6}\pi d_{\mathrm{m}}^3\rho_{\mathrm{w}}\mathrm{g}$,Stokes 力为 $F_{\text{stokes}} = -6\pi\mu a U$[9],$U$ 为气泡与颗粒间的相对运动速度.

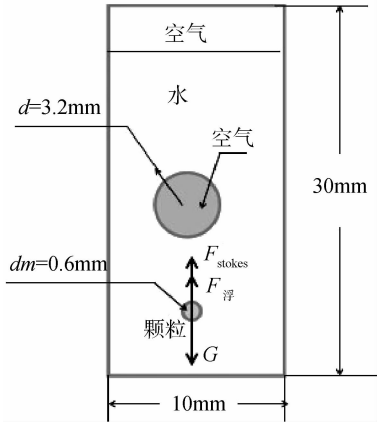


图 1　数值模拟使用的二维几何模型及颗粒受力分析

Fig. 1　Schematic diagram of 2-D geometrical model and the forcesapplied to particle in numerical simulation

1.3　数值仿真

本文针对气水反冲洗滤池中,颗粒跃动及流失问题进行模拟. 建立如下图所示的二维仿真模型,整个计算域分为三部分:静水、气泡、上部空气,这一过程中不考虑水的流入,故下部、左右两侧均为无滑移边界条件,上部边界为出流边界条件,气泡上升至水—空气界面处将与空气融合并消失. 模拟仅针对单个气泡进行模拟计算,气泡初始时刻位于计算域的底部在水中保持静止. 需要指出,上部的空气可以有效地减小气泡上升至出口瞬间对整个计算域内流场的影响,与实际的物理问题更为接近,是模拟必需的部分.

模拟的主要几何参数如图所示,由于本文主要考虑气泡的启动及其对颗粒的带动问题,因此计算区域的尺度相应地缩小. 本文气泡直径固定为 $d = 3.2$ mm,初始位置距离水管底部为 5 mm,依据研究问题的不同,颗粒的初始位置可布置于气泡下方或上方. 模拟所用的主要物性参数见表 1.

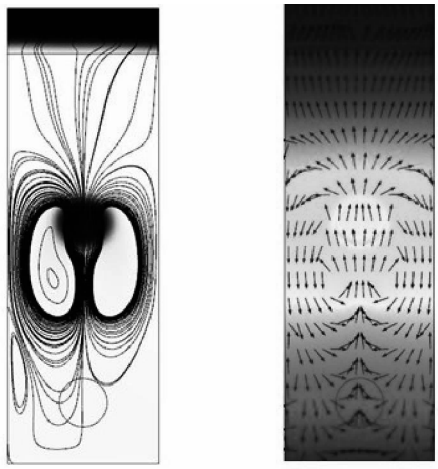
表 1　数值仿真的主要物性参数

Tab. 1　Main physical parameters in numerical simulation

	密度 ($\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$)	粘度 ($\mathrm{Pa\cdot s}$)	表面张力 ($\mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$)
水	1e3	$1\mathrm{e}^{-3}$	0.0728
气泡	1.22	$1.789\mathrm{e}^{-5}$	
颗粒	2.2e3		

2　仿真结果

通过数值仿真,首先可以得到气泡的动态上升过程,以及这一过程所诱导产生的外部流场,图 2 给出了气泡上升某一瞬时计算域内的压力、速度、流线分布. 从速度分布和流线图可以看出,由于气泡密度小于水,在浮力作用下气泡由静止开始自由上升运动,在上升过程中,会带动静水使其产生运动,且气泡周围流线密集,在气泡尾部形成回流区,这一区域的速度存在垂直向上的分量,是带动颗粒运动的主要区域. 从图 2(右)中可以看出由于重力的作用,静水压力分布自上而下逐渐增加,而在气泡内部由于表面张力的作用,其压强大于外部的液体的压强分布. 根据模拟结果可以计算得出流场中气泡的上升平均速度约为 0.225 m/s,而在引入二维修正的情况下,同时考虑侧壁面对整个流场的影响后,相应的气泡在三维无限大空间中的速度约为 0.35 m/s[10],与文献中给出的实验测量值一致,一定程度上证明了本文仿真的正确性.



t=0.12 s 流线分布图　　t=0.12 s 压力、速度分布图

图 2　$t = 0.12$ s 时流场的流线以及压力、速度分布图

Fig. 2　Distributions of streamline of flow field, velocity and pressure at $t = 0.12$ s

从图3可以清楚地看出气泡在上升过程中的变形与膨胀,气泡体积逐渐增加,且形状逐渐从圆形变成扁状,宽度加大.随后研究了颗粒的不同展向位置、垂向高度及半径对运动的影响.

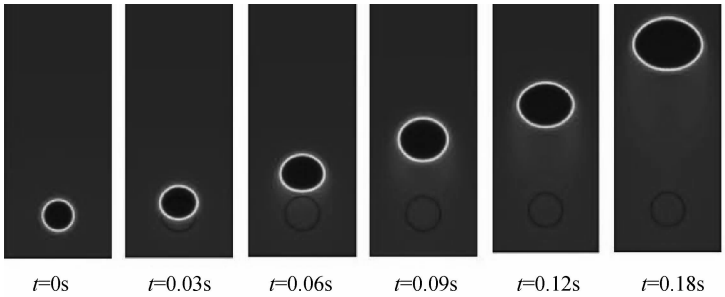


图3 气泡上升过程中的变形膨胀

Fig. 3 Distortion and inflation in the bubble rising

2.1 颗粒不同展向位置的影响

气泡在上升过程中,在表面张力、液体压力和周围流场的影响下会不断发生变形,同时气泡的变形又会影响周围水体的流场,两方面相互作用形成了气泡的真实形状.在流场力的作用下研究颗粒的运动状况.为了更好地观察颗粒上升后的沉降过程,故选择气泡下方高度为2 mm的水平位置处的颗粒为研究对象,颗粒半径为0.05 mm,质量为1.15×10^{-6} g.气泡在浮力作用下开始向上运动.颗粒将会受流场影响,开始脱离初始位置向上运动.对于不同时刻,气泡上升变形以及颗粒的上升模拟结果如图4.可以看到,不同时刻气泡的上升位置不同,并且伴随着逐渐变形的过程.由于颗粒距离气泡对称轴的展现位置的差异,它们的上升高度存在差异,即位于气泡正下方的颗粒所受到流场对其的影响最大,越远离气泡,颗粒所受流场影响越小,受到向上的斯托克斯力越小.此外,颗粒还具有水平运动的速度,速度方向均指向对称轴,表现为气泡正下方的颗粒呈聚拢状态,中心处向上突起,对称轴处的颗粒上升最快.对于较重颗粒,通常这一垂向上升高度较小,此时在实验中可以清晰的观察到沙床表面由于气泡启动所产生的凸起,本文的数值模拟验证这一现象.

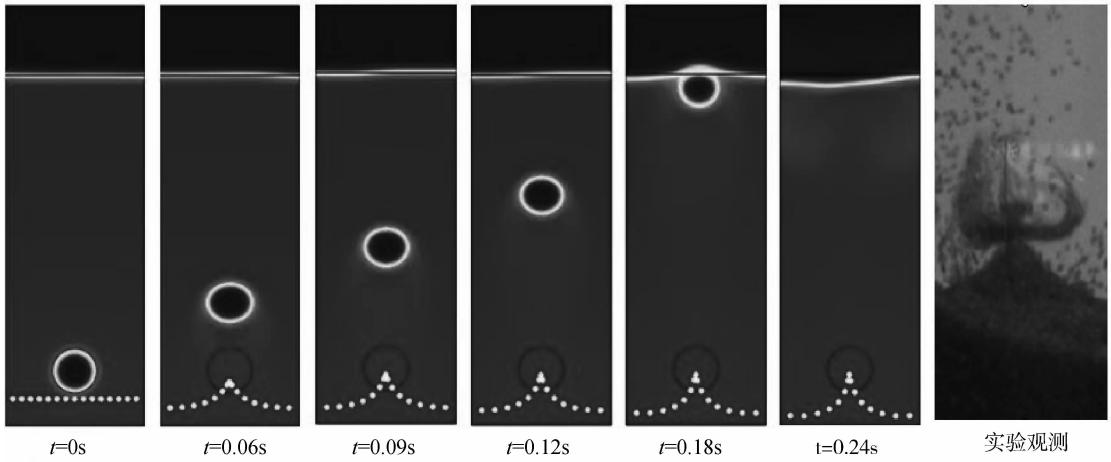


图4 不同时刻气泡上升变形、较重颗粒的位置变化以及与实验的比较

Fig. 4 Snap shots about the deformation of rising bubble, the change of positions of particles at different transverse location and the comparison with experimental observation

2.2 颗粒半径对上升高度的影响

在气泡正下方不同半径的颗粒所受到流场的影响也是不同的.分别在气泡正下方高度为2 mm处加入半径不同的颗粒,初始状态均为静止.气泡依靠浮力上升,颗粒也会伴随流场向上运动.不同半径的颗粒所能上升的最大高度如图5所示.由图5可见,气泡正下方颗粒半径越小,则其受流场的影响越大,即可以被气泡带起的高度越大,重力的影响逐渐减弱.存在一个临界启动半径Rcr,小于这个半径的颗粒(图中Rcr左侧部分的颗粒)可以被气泡带起并向上运动,而大于这个半径的颗粒(图中Rcr右侧部分的颗粒),由于其重力较大,所以会向下运动并沉到水管底部.颗粒上升高度与颗粒粒径之间为非线性关系.

2.3 气泡与不同颗粒之间的距离分析

颗粒的半径不同,其受力大小也存在差异,在气泡影响下向上运动到达最大高度的时刻也不同.而

在颗粒到达最大高度的时刻,气泡的上升幅度也不同.图 6 给出了小于临界启动半径的颗粒到达最高点时,气泡的上升高度对比图.可以看出,颗粒半径越大,其上升到最大高度时气泡的上升高度越小,则整个过程所需的时间越短,颗粒就会越快下沉.而颗粒半径越小,则被气泡带动上升的时间越久、高度越大,颗粒越不容易下沉.

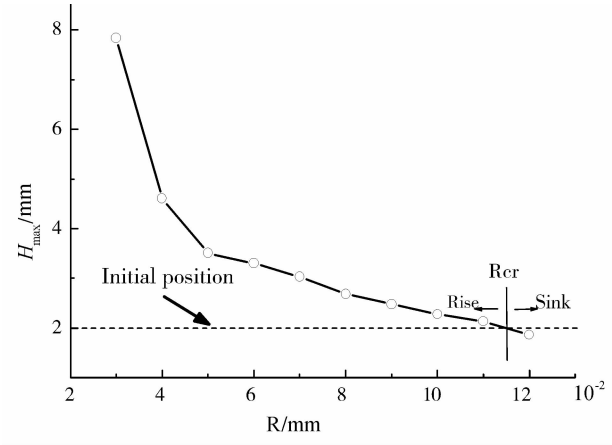


图 5　不同半径的颗粒所能上升的最大高度

Fig. 5　Relationship of rising maximum height vs. the diameter of particles

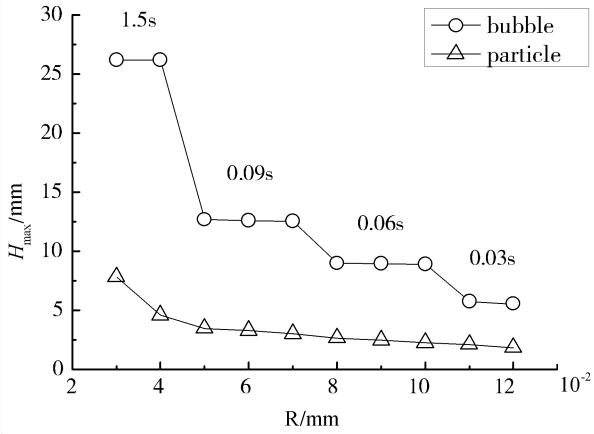


图 6　颗粒上升到最大高度时所对应气泡位置

Fig. 6　The relative position of bubble when particle reaches the maximum height

2.4　颗粒垂向位置的影响—颗粒的再启动

由于实际水体中很多悬浮颗粒的存在,且水管下部又有新气泡依靠浮力向上运动对流体产生影响.所以这些悬浮颗粒是否会被气泡带动继续上升也需要进一步计算研究.由于实际水体中悬浮颗粒分布比较复杂,计算过程中很难精确地确定颗粒的位置,所以本文只做定性的分析气泡上升对上方颗粒运动的影响,即将颗粒分布状态简化为颗粒在气泡上方均匀分布,如图 7 中所示.由上述结果所知,小半径颗粒下沉所需时间较长,那么在气泡上方设置小半径颗粒进行计算.结果如下图所示,当悬浮在水中的小半径固体颗粒受到下方的另一新生气泡的顶托作用时又会上升,且上升距离大于第一次气泡带起的距离.上升一段距离后又会跌落,随着测量高度的升高,悬浮颗粒的浓度越来越小.但如此反复就有小部分颗粒越升越高,直至这部分颗粒流失.模拟结果与实验观测基本相符.

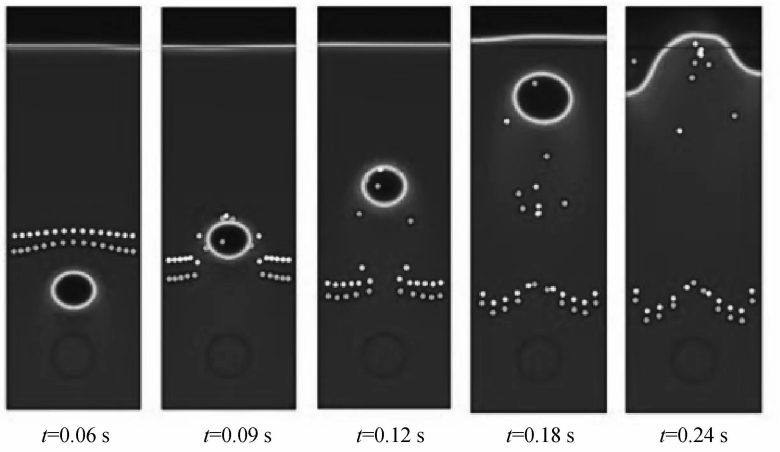


图 7　悬浮颗粒被二次气泡带起过程

Fig. 7　Process of re-floating of suspending particle by the second rising bubble

本文中颗粒为普通沙砾,属于疏水性物质,与气泡存在差别.计算过程中选择颗粒的直径很小,为 0.6 mm,体积为 0.11 mm^3,较气泡的体积相比小很多.且沙砾的浓度分布较小,所以文章中讨论时可以忽略固体颗粒对气水两相流体的影响.该研究属于三相流问题的研究,且目前对三相流体同时模拟也很重要,但在其算法上仍存在一定困难,较难以实现,对工程问题模拟不适用.所以本文首先采用两相流的模拟方法计算气-水运动,再进一步引入第三种物质颗粒实现三相流研究.

在实际的工业问题中,关于颗粒被气泡影响的运动也是目前研究应该关心的主要问题之一.尤其在反冲洗滤池中,颗粒的运动以及再次启动受气泡影响更为明显.滤池是给水厂净水工艺中的一个重要构

筑物,滤层过滤能力的再生是滤池稳定高效运行的关键所在.采用合理的反冲洗技术可使滤池经常处于最优的工作状态,有利于节水节能、提高水质,还能起到延长滤层使用周期及增大滤层截污能力的作用.现行的水厂滤池反冲洗过程大都采用气—水同时反冲洗工艺,其中气泡的存在会直接影响到滤料颗粒的运动,控制不当易出现滤料流失现象,破坏滤层[11].针对这一问题目前已开展了相关的研究工作,但研究主要集中于反冲洗系统工艺参数的优化,例如研究进气量、进水量与滤料流失、节能之间关系等,很少涉及针对这一问题微观机制的研究,即研究上升气泡作用下颗粒的运动行为这一关键环节.而本文的研究正以滤池颗粒运动为研究背景,并得出上述结论.进一步的工作可对实际滤池中颗粒的运动研究能够提供理论支持.

3 讨论及结论

本文研究水管中气泡上升对颗粒的影响,采用了相场方法模拟了气-液两相流动,将实际的水管问题进行一定程度的简化,忽略三维影响,使用二维仿真计算出气泡、流场及颗粒的运动.但是二维流场的计算与之前研究的文献比较[10],仍能较真实地刻画出气泡在静水中上升、膨胀、变形的动态过程,获得了气泡上升所诱导的外部流场.在此基础上,将颗粒引入两相流场,这种方法使得整个流场的计算更为稳定.

整个过程考虑颗粒在受到重力、浮力、流体 Stokes 力作用下运动行为,获得了对气泡作用下颗粒起动的合理描述.通过研究了展向位置、颗粒半径、垂向位置等参数对颗粒运动的影响,对反冲洗滤池实验中的沙床变形、不同颗粒启动高度差异、及颗粒再启动的机理进行解释.通过与实验结果的比较认为,本文的数值模拟较好地反映了颗粒起动这一过程的微观机制.通过进一步的工作可为精确控制反冲洗工艺和更多实际中的气泡影响颗粒运动的问题提供理论依据.

参考文献 References

[1] WANG Huan-ran, ZHAO Zhi-xin, LI Yan-peng, XI Guang. The numerical simulation of using Level Set method for underwater two bubble motion[J]. Academic Journal of Xi'an Jiaotong University,2009(7)11-15.

[2] JU Hua, CHEN Gang, LI Guo-dong. The numerical simulation of rising bubble motion characteristics in static water[J]. Xi'an University of Science and Technology Journal,2011:344-349.

[3] CHEN Bin, KAWAMURA T. The numerical simulation of a single rising bubble in still water[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2005(11):980-982.

[4] ZHU Ren-qing, LI Yan-cheng. The numerical simulation of bubbles' upward movement in the water[J]. Journal of jiangsu university of science and technology,2010(10):417-422.

[5] WANG Han, ZHANG Zhen-yu, YANG Yong-ming, et al. Viscosity effects on the behavior of a rising bubble[J]. Journal of Hydrodanamics,Ser. B,2010:81-89.

[6] ZHENG Wen, YONG Jun-hai, PAUL Jean-Claude. Simulation of bubble[J]. Graphical Model,2009:227-239.

[7] CHEN Quan-yuan, ZHANG Jing-sheng, WANG Dian-zuo. The new progress of effect between bubble and particle [J]. Metallic Ore Dressing Abroad,2001(2):17-24.

[8] MA Qian-li, YAO Qiang. The simulation of sedimentary process to Ultrafine particles' upward movement in a single bubble[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25(6):727-733.

[9] CAI Wang-feng, XU Chun-jian, ZHOU Ming. The theoretical research of the distribution of the ambient concentration of micro-particles and the efficiency of adhesion around ascending bubble in a Slurry system[J]. Chinese J. chem. Eng. ,10(5):550-557.

[10] The reference manual of Comsol Multiphysics4.1, CFD Module,The Phase Field Interface.

[11] YAN Zong-yi. Low Reynolds number flow theory[M]. Beijing:Beijing University Press, 2002:110.

[12] XU Mai-rong, LIU Cheng-yun. The change of lifting bubble about radius and speed in water[J]. college physics, 2008(11):14-17.

[13] 高培培.滤澈气水反冲洗滤料颗粒跃动规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011(5).
GAO Pei-pei. The regular research of particle movement in air-water back flush filter[D]. Xi'an: Xi'an University of Arch. & Tech. ,2011(5).

(下转第596页)

[10] 陈坚斌,张正辉,张 超.建筑安全系统管理与控制研究[J].中国安全生产科学技术,2008,4(5):162-165.
CHENG Jian-bin,ZHANG Zheng-hui,ZHANG Chao. Study on system management and controlling of construction safety[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008,4(5):162-165.
[11] 徐小平,张来斌,段礼祥,等.基于层次分析法的往复压缩机组安全评价指标体系研究[J].工业安全与环保,2012,38(1):28.
XU Xiao-ping,ZHANG Lai-bin,DUAN Li-xiang,et al. Research on reciprocating compressors safety assessment system based on AHP[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012,38(1):28.

Performance researchtwo on the stage relative evaluation of construction safety management

ZHANG Shi-lian, WU Mei-cun

(Faculty of Construction Management and Real Estate,Chongqing University,Chongqing 400045,China)

Abstract:The two stage relative evaluation method , based on Data Envelopment Analysis(DEA)construction safety management performance evaluation method, is introduced to improve the performance of construction safety management evaluation, eliminate the influence of different regional basic conditions, and reflect people's subjective effective efforts in improving construction safety management performance. In this paper based on the analysis of relative literatures, the author established the evaluation index system of regional security management performance and, combined with analytic hierarchy process(AHP)the index weight is given; finally , the method is applied in construction safety management performance evaluation analysis in 30 areas of China in 2010 and 2011 year.

Key words: *construction safety*; *performance evaluation*; *analytic hierarchy process(AHP)*; *two stage relative evaluation*; *data envelopment analysis(DEA)*

Biography:ZHANG Shi-lian, Professor, Chongqing 400045 P. R. China, Tel:0086-13608338753, E-mail:zslian@cqu.edu.cn

(上接第586页)

Numerical simulation about the influence of rising bubble on particle movement in static water

ZHANG Hong-yan, XU Lin, CUI Hai-hang

(1. School of Environment and municipal engineering, Xi'an Univ of Arch & Tech, Xi'an 710055, China;
2. Xi'an non-ferrous metallurgical institute of clesign & research, Xi'an 710001, China)

Abstract:Rising bubble will induce flow field, and then affect the movement of particles in static water. There are many gas- liquid-solid three-phase flow problems in the water treatment field, for which we need to establish an effective method of study. This paper used the phase field method to simulate the gas-liquid two phase flow. Two important results, the dynamic processes of bubble rising, expansion and deformation and the induced external flow field of this rising bubble, were obtained from simulation directly. Particles were introduced into this system and their movement under the gravity, buoyancy and Stokes force was investigated. So far, the model of particle movement under the action of rising bubble was established. On this basis, we studied the effect of different parameters, including particle size, the transverse distribution and the vertical position was studied. To compare with the previous experiment about the particles movement in backwash filter, it can be seen that the numerical simulation reflects the microscopic mechanism of particle movement by rising bubble rise very well.

Key words: *Bubble*; *gas-liquid two phase flow*; *the phase field method*; *particles movement*; *backwash filter*

Biography:ZHANG Hong-yan, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-13363965345, E-mail:zhanghongyan@xauat.edu.cn