文章编号:0253-2468(2003)02-0194-07 中图分类号:X52,O647.11 文献标识码:A

气浮过程中的界面相互作用

郭瑾珑¹,王毅力²,李大鹏³,汤鸿霄¹ (1.中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室,北京 100085; 2.北京林业大学资源与环境学院,北京 100083; 3.北京航空航天大学环境工程学院,北京 100083)

摘要:首先讨论了水体颗粒物的基本性质以及气泡的形成过程,而后对气液界面上胶体颗粒的吸附进行分析.其次讨论了气 浮过程中,气泡与颗粒物之间的相互作用,对气泡与颗粒物之间的碰撞进行分析.结合紊流气浮的理论与应用,在气浮过程 中的界面相互作用分析的基础上,设计了一种新型集成的溶气气浮水处理工艺,即逆流共聚气浮工艺.并对其运行情况进行 了研究,探讨了其中的界面相互作用对气浮效深的影响,进一步与传统工艺进行了对比.

关键词:气浮;界面相互作用;气泡;颗粒物

Interfacial interaction between the bubbles and particles in the flotation process

GUO Jinlong¹, WANG Yili², LI Dapeng³, TANG Hongxiao¹ (1. SKLEAC, Research Center for Ecorenvironmental Sciences, CAS, Beijing 100085; 2. College of Natural Resource and Environment, Beijing Forest University, Beijing 100083; 3. Department of Environmental Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract : The basic properties of the suspended particles in water body and the bubble nucleation process was presented , then the adsorption of the particles on the stagnant gas/liquid interface was analyzed, the interaction between the suspended particles and bubbles during flotation process was discussed, and the collision models were compared. On the basis of turbulent flotation, a new kind of dissolved air flotation methr od name counter current co-flocculation flotation (CCC-FF) was put forward. The interfacial interactions in the CCC FF reactor and their influr ence on the turbidity removal were analyzed, and the operational parameters of the reactor were optimized. Furthermore, the comparison be tween the conventional and CCC-FF water purification method was carried out.

Key words : flotation ; interfacial interaction ; bubble ; particle

气浮是一种行之有效的水处理技术,尤其是对含高天然有机物、低温低浊、含色度水的处 理非常有效.其单元操作的实质就是在絮凝剂作用下,使气泡与水中的污染物相互粘附,形成 聚集体并在浮力作用下上浮去除.气浮过程中颗粒物与气泡的相互作用分为碰撞、粘附与分离 3 个过程,碰撞主要由颗粒与气泡的物理性质及其周围的水力学条件决定;粘附是颗粒与气泡 间液膜变薄与破裂的过程,由此形成稳定的接触湿周来维持聚集体的稳定^[1].固体颗粒在气泡 表面的吸附是气浮过程中最重要的步骤,取决于颗粒与气泡表面的物理化学性质.随着机理研 究的进一步深入,气浮工艺改进也在快速发展之中.

结合紊流气浮的理论与应用,本文首先讨论了气浮过程中的界面相互作用,进而设计了一种新型集成的溶气气浮水处理工艺,并对其运行情况进行了分析研究.

1 气泡与水体颗粒物

水中的颗粒物拥有荷电表面,可以认为界面处存在一种双电层结构.颗粒通常保持分散状

收稿日期:2002-11-25

态,其稳定性通常就是由荷电颗粒的静电排斥所造成的.对界面反应及其影响因素的分析方法 通常分为化学方法和物理方法,前者认为胶体是有一定化学结构的聚集体,其表面电荷是由颗 粒表面上存在的复杂离子基团离解产生,而胶体的脱稳则是由于如络合生成、质子转移等化学 相互作用导致;后者强调胶体脱稳中的物理因素如反离子吸附、电动电位降低等的重要性^[2].

1.1 水体颗粒物

现代环境化学中,水体颗粒物的范畴广义定义为1 nm 以上的实体物质^[3]. 与溶解的低分 子相比,颗粒物的最大特点是其不均一性或多分散性,主要表现为尺度分布多分散、形态多样 性、反应活性区各异、电学特性显著、界面效应强烈以及组合体系复杂等^[2].

气浮水处理过程中,颗粒物是主要去除对象之一.颗粒去除过程中的胶体电位能和作用力 力由双电层作用力、van der Waals 引力、Born 斥力和水合作用力共同影响^[4].此外界面还受到 憎水效应、表面张力、表面活性剂等其它因素的影响^[5].溶剂化层对界面相互作用有很大的影 响,尤其是溶剂化层结构的有序性和厚度在颗粒相互作用中有极为重要的意义^[6].随着研究的 深入,憎水长程引力在研究中受到日益广泛的关注^[7].

1.2 气泡的形成

7

溶液中气泡的产生主要有 3 种途径^[8]:1. 均相各向同性液体发生相变;2. 化学反应;3. 溶 解气体释放. 气浮工艺中根据气泡产生方式不同也分为多种,如散气气浮、电聚浮以及溶气气 浮(DAF),等等^[6]. 由于其诸多优点,DAF 在水处理工程中是应用最为广泛的一种气浮方式. 下 面就溶气气浮涉及到的一些概念进行分析讨论.

1.2.1 超饱和度 超饱和度反映溶液中溶解气体量与饱和溶解量之间的关系,其定义为^[8]:

$$-1 = X_{\rm b}/X_{\rm i} - 1$$

其中 X_i 为液相中气体的饱和摩尔分数, X_b 为超饱和液体中气体的摩尔分数. 根据 Henry 定律,可以得到超饱和压力为 $P = P_i \cdot P_i$ 为标准大气压力. 根据 Laplace 方程,气腔中由于 曲率半径 R 所引起的压力提高为^[9]:

$$P = 2 / R \tag{2}$$

其中 为气液两相界面张力. 联立上述两式就可以求得超饱和液体中气腔稳定存在的临 界曲率半径.

1.2.2 气泡形成 根据溶液性质、超饱和度大小以及气泡的成核 位置,可以将气泡形成机理分为以下几种^[9]:

型:经典均相成核.在系统超饱和前没有气腔存在,气泡形 成所需的超饱和度很高,甚至会超过100.气泡一旦形成将上浮到 表面,不会在同一位置形成新气泡,如图1所示.型:经典异相 成核.其产生条件与型基本相同,气泡在容器壁、光滑表面或悬 浮颗粒上形成,而后长大、脱离,并留下一部分气体,如图2所示. 由于饱和度降低以及浓度梯度的变化,该处形成气泡的速率会大 大降低,但是实验观察到此处会连续产生气泡,这主要是由于该 处气腔存在的缘故.后续气泡的形成称为型或型成核.

型:准经典成核.在超饱和前液体中就存在气腔,由于此类 气腔半径小于临界半径,故存在一个成核能垒,只有克服这一能 垒才能够形成气泡,如图3所示 R₁ 气泡的形成.





(1)



型:非经典成核.超饱和前存在的气腔曲率半径大于临界 成核半径,所以不存在成核能垒,型成核可能在型或型成 核后发生.随着超饱和度的降低,临界曲率半径逐渐增大,当其与 气腔半径相等时,气泡停止产生,如图3所示 R2 气泡的形成.

不同界面属性对气泡形成具有很大的影响^{10]}.一旦气核形 成,它就会不断长大直至脱离基体,气泡的成长速率受分子扩散 速率、液体惯性、粘性、表面张力等多种因素控制.尽管控制气泡 初始形成的关键因素还不是很明确,但可以肯定影响气泡最终长 大的因素是分子扩散.与基体相接触的气泡在长大过程中主要受 基体的粘附阻力、气液界面的表面张力以及气泡长大过程中的惯 性力、压力和浮力,它们共同作用决定了气泡的长大、粘附与分 离.

气液界面的吸附量与特征吸附 时间主要受颗粒与界面间'可接触性(accessibility)'的影响,而两 者的可接触性取决于液相中颗粒间的絮凝能垒和颗粒与界面间 的吸附能垒^[11],前者影响颗粒絮凝,从而影响液相主体中分散颗 粒数量,也即可吸附量;后者决定可吸附的自由颗粒中被吸附到 界面上的比例.

1.3 界面胶体吸附

2 气泡与颗粒的相互作用

7

20 世纪 60 年代早期, Derjaguin 和 Dukhin 对悬浮颗粒物的气 浮去除进行研究,提出了三区作用模型^[12]. 如图 4 所示,区域 1 为 液相主体区域,该区域的主要作用力为水流动力.在惯性力与重 力的共同作用下,悬浮颗粒物沿流线朝向气泡表面运动,液流粘 性对该运动施以阻力.

区域 2 为剪切力区域.运动气泡周围的水流剪力使气泡上表型准经典成核; R₂ 大于临界成核面吸附的颗粒物向其下半部移动,颗粒物或者吸附粒子因其性质半径,代表型:非经典成核不同而不均匀地分布在气泡表面.当阴离子与阳离子的扩散系数^{Fig.3}Type pseudo classical and Type 不同时,可产生较强电场^[13].因此,区域 2 中颗粒的运动还受扩散

与电场力的影响,朝向气泡表面吸引或排斥.在区域1与区域2中,颗粒与气泡的相互作用属 于碰撞过程,对于胶体颗粒,扩散与电场的作用要大于重力与惯性力的作用.

区域 3 为粘附作用区. 一旦液膜厚度降低到几百纳米以下,表面力将会在碰撞过程中起主导作用. 从热力学角度而言,液膜一旦形成,其自由能将有异于主体自由能,多出的自由能称作分离(wedging apart or disjoining) 压力,代表液膜内部压力与液相主体压力之差^[12]. 区域 3 中气泡与颗粒物的相互作用可以看作是粘附子过程.

通过上面对气泡周围流场的分析,可以将气泡与胶体颗粒的相互作用分为以下三个子过 程^[13]:1.碰撞过程,两者近距离相遇;2.稳定粘附过程,指液膜的排除与破裂,三相接触线扩 展形成稳定的接触湿周;3.如果剪切力超过粘附力,则会发生气泡颗粒聚集体的分离.胶体颗





粒能否被气浮去除的条件是,在与气泡的相互碰撞过程中,能 否形成稳定的三相接触,这主要受颗粒物的动能影响^[13].有效 粘附效率公式可以表述如下^[14]:

 $E_{\rm col} = E_{\rm c} \cdot E_{\rm a} \cdot E_{\rm s}$

式中: *E*_{col}为有效粘附率, *E*_s为单位时间内,和气泡相遇的 颗粒数与气泡投影面积上通过的总颗粒数的比值, *E*_a为粘附 效率, *E*_s为粘附稳定效率.在上述三个子过程的研究中,关于 碰撞效率模型的研究相对较多,这些模型中通常将复杂的粘附 过程作以简化.



Fig. 4 Division of the function area

near the bubble surface

(3)

2.1 碰撞模型

由于表面活性剂或杂质的污染,气泡表面的可动性会大大降低,所以对碰撞模型的研究通常假定气泡表面是不可动的.

因为不能确定气泡表面可动性受阻碍的程度,所以很难确定这些碰撞模型的适用性.近期一些 实验研究表明气泡表面并非为完全不可动,尤其是在气浮过程中,碰撞与表面活性物质被气泡 表面吸附的过程是同时进行的^[15].

通过对气溶胶絮凝的研究,Langmuir 将小液滴视为一个质点,得出由惯性沉积导致的碰撞效率公式,这是气泡颗粒碰撞的第一个模型^[16].通过对流线函数的研究,Sutherland 建立了气泡-颗粒体系的碰撞模型^[17],为而后的研究奠定了基础,该模型在高速绕泡流的截留情况下能够给出非常好的近似结果^[18].

液相主体中的运动颗粒接近气泡表面时,两个界面间的液膜受到压缩,水动力阻力将导致 颗粒法向运动速度降低.由于速度差,颗粒将受到朝向气泡表面的惯性力,其正作用(inertial positive force)朝向气泡表面,称为水动力压力,而颗粒速度剪切分量是产生离心力的原因(惯性 的负作用),将阻碍颗粒物在气泡表面的沉积.Dai 等综合分析了颗粒与气泡的碰撞,重点考虑 了气泡表面的可动性、液体流态以及颗粒惯性力对碰撞效率的影响,提出 Dukhin 模型^[19].

通过对单个捕集者效率的分析, Edzwald 提出一个颗粒碰撞模型^[20]. 模型认为颗粒与气泡 的碰撞主要受布朗扩散、截留、重力沉降以及惯性作用的影响,单个捕集者的总效率为以上各 作用的加和. Edzwald 模型指出在气浮反应区,截留作用占主导地位,而 Fukushi 等认为反应区 为紊流流态,有能量耗散发生,截留作用只在混合末尾或气浮分离区发生,气泡与絮体是在紊 流中絮凝,粘附过程基于群体平衡模型^[21].

通过理论分析,不同研究者在不同实验条件下提出多种碰撞模型^[19,22],但是由于各模型的 假定及水动力学条件(表面可动性、惯性影响、气泡与颗粒物尺度等)不同,很难对其进行综合 比较.模型预测值随颗粒尺度的增加而偏高,其主要原因是气泡表面可动性与颗粒物惯性作用 的影响.偏高的碰撞效率预测可能是由于忽略了惯性力的负作用,而如果气泡表面不可动,惯 性力作用引起的剪切力较大,容易使颗粒离心脱离气泡^[22,23].

3 逆流共聚气浮反应器研究

无论从反应机理还是从反应器设计上,气浮与传统沉淀水处理工艺都有较大的区别,所以 如何充分利用气浮的优点、优化工艺参数需要详细地研究确定^[24]. 溶气气浮的发展经历了几 个阶段,由最初的大容积、低负荷池型逐渐向集成、紧凑型发展,近年来提出了紊流气浮的概

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

23 卷

念,并对之进行了研究开发与应用^[25].在此基础上,作者提出设计并研究了一种逆流共聚气浮 工艺(CCC-FF),在该工艺中充分利用了界面的接触絮凝作用,改善了气浮工艺的运行条件^[26]. 3.1 实验设备与材料

实验原水由自来水与高岭土(北京朝阳旭东化工厂)混合配制到预定浊度,实验过程中水 温稳定在 7~15 内;实验用絮凝剂为液体聚合氯化铝(PAC,淄博净水剂厂).其它装置如下: 提升泵:25DBZ-55;投药泵:ES-B15VC-230N1(IWAKI Pumps Co.,Ltd.);浊水配水泵:Model HD Type MA(Barnant Company);在线浊度仪:1720C(Hach Company);其它浊度仪:2100N IS(Hach Company);流动电流:带 DURA-TRAC 远控传感器的 SCC3000XR 型流动电流控制器(Chemtrac. Systems. Inc.).利用氯化锂(Z-6100 Polarized Zeeman Atomic Absorption Spectrophotometer,HITACH Company)为示踪剂,测量逆流共聚反应器中水力特征.溶气回流水由压力溶气系统提供,溶气 系统用直接传动式空气压缩机(PUMA)、离心泵(25DBZ-75)将空气与自来水一起压入溶气罐, 然后由管道输送至释放器(MJ型)减压释放,溶气罐的压力维持在 380kPa.

逆流共聚气浮反应器为圆柱形,内径 18.4 cm,有效高度为 200 cm,反应器上每隔 20 cm 有 孔径为 5 cm 的圆孔,用活接连接,作为原水与回流水进水口以及采样孔.溢渣槽内径为 304 cm.溶气回流水进口距反应器底部 30 cm.

3.2 工艺流程

7





逆流共聚气浮反应工艺流程如图 5 所 示,实验中首先配置一定浊度的原水,经过提 升泵进入逆流共聚气浮反应柱上方,絮凝剂 在提升泵的吸水口加入,溶气回流水在反应 柱的底部通入,两者逆向流动;水体中的悬浮 颗粒物与气泡相互碰撞、絮凝长大,利用气泡 的浮力上升到反应柱顶部,通过调节出水管 的阀门使生成的浮渣溢流排出;气浮反应柱 中,气泡、颗粒物在原水与回流水的共同冲击 下,形成稳定的悬浮层,有效拦截向上浮升的 气泡与随水流向下运动的悬浮颗粒物;处理 过的水流经流动电流仪、在线浊度仪检测后 进入下一处理单元.

3.3 反应器中的界面作用

图 6 简要给出了逆流共聚气浮反应器中

不同部分所起的作用. 气泡-絮体共聚悬浮层拦截随水流向下运动的絮体颗粒,同时上升的气 泡与悬浮层中的共聚体发生粘附,共聚体密度随粘附气泡数量的增加而降低,最终上浮到反应 器顶部去除;透过悬浮层的微小颗粒物随水流向下运动,与溶气回流水相遇,在气泡的形成中 起到凝结核的作用,并随着气泡上升到悬浮层中,这样就可以维持悬浮层的不断更新. 在气泡-絮体共聚悬浮层及气泡-絮体共聚段,气泡、絮体互为接触介质,充分发挥气浮过程中的接触絮 凝作用. 在 300~350 L/h 处理水量,10%回流的情况下,共聚悬浮层主要分布距原水进口 40~ 100 cm 的范围.

在反应器内 ,一方面 ,气泡作为悬浮粒子增加了水体中的粒子浓度 ,从而增加了絮凝体之

间的碰撞频率,有助于絮体的长大及稳定;另一方面,气泡作为接触 介质,通过碰撞与表面作用粘附水中絮体,吸附在气泡表面的絮体 在表面力作用下进一步絮凝;多个絮体与气泡相互粘附形成共聚 体,既能增加上升浮力,又能够有效拦截水中粒子;粒子表面絮凝剂 水解产物的聚合形态在气泡与絮体相互作用过程中进一步络合,发 生化学结构重排,有助于粘附捕集更多悬浮粒子.

如上所述,通过接触絮凝作用,气泡与絮体相互结合长大,生成 的共聚体密度较小,利于上浮去除;悬浮层中,气泡作为接触介质, 能够接触结合更多絮体,同时悬浮层能够对原水质及水力负荷有一 定缓冲作用,随着处理水量的增加,悬浮层向下移动,直到出水水质 超标.利用LiQ 作为示踪剂,作者考察了逆流共聚气浮反应器中的 接触絮凝作用,同时测量了气浮反应过程中反应器沿程浊度的变 化,验证了接触絮凝悬浮层的存在.



图 6 共聚反应柱分段示意图 Fig. 6 Functional sections in the

通过实验分析得到了逆流共聚气浮工艺参数.相对于传统的絮 CCC-FF tank 凝/气浮或者絮凝/沉淀工艺,该工艺有很大的优越性,不同工艺之间的参数对比如表1所 示^[27,28].

| Table 1 Comparison of the operational parameters between the conventional and CCC-FF purification method | | | | |
|--|---|--|----------------------|--|
| | 传统絮凝/平流沉淀 | 传统絮凝/平流气浮 | 逆流共聚/气浮(实验) | |
| 参数 | | 停留时间 | | |
| 混合 | $1 \sim 2 \min$ | $1 \sim 2 \min$ | — | |
| 絮凝 | 20 ~ 30 min | 20 ~ 30 min | — | |
| 沉淀/气浮 | $1.0 \sim 3.0 \text{ h}$ | 15 ~ 30 min | 6.0 ~ 11.0 min | |
| 其它参数 | | | | |
| 表面负荷 | $1 \sim 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ | $5 \sim 12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ | 9 ~ 16 $m^3/(m^2 h)$ | |
| 回流比 | — | 10 % ~ 15 % | 8 % ~ 15 % | |
| 反应器深 | 3.0 ~ 3.5 m | 1.2 ~ 2.0 m | 2.0 ~ 2.5 m | |

表1 不同工艺运行参数对比

逆流共聚气浮反应器充分发挥了气浮水处理工艺中接触絮凝的优点,使絮凝与气浮反应 在一个单元中完成,共聚悬浮层提供了接触絮凝反应的场所.反应器中气泡起到接触絮凝介质 的作用,增强了悬浮颗粒物的絮凝效果,充分发挥絮凝剂的粘附效果;水中的悬浮颗粒物为气 泡的形成提供凝结核,提高溶气回流水的释气效率.共聚悬浮层提高了气泡与絮体的接触碰 撞,有效地拦截去除水中的悬浮物;絮凝、气浮两个单元操作都在逆流共聚气浮反应器中完成, 节省了水处理工艺流程的占地面积及基建费用,缩短了工艺水力停留时间,有利于实现系统的 自动化控制.

4 结论

本文首先讨论了水体颗粒物的基本性质以及气泡的形成过程,而后对气液界面上胶体颗 粒的吸附进行分析.在此基础上,讨论了气浮过程中,气泡与颗粒物之间的相互作用,对气泡与 颗粒物之间的碰撞进行分析.结合紊流气浮的理论与应用,在气浮过程中的界面相互作用分析 的基础上,设计了一种新型集成的溶气气浮水处理工艺,并对其运行情况进行了研究,探讨了 其中的界面相互作用对气浮效果的影响,进一步对比了其与传统工艺的优越性.

参考文献:

- [1] Schulze H. Physico-chemical elementary processes in flotation an analysis from the point of view of colloid science including processes engineering considerations[A]. In: D. W. Fuerstenau (Ed.), Develop. Miner. Process. Vol. 4[C]. Amsterdam: Elsevier Press, 1984: 348
- [2] 汤鸿霄,钱易,文湘华.水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理:(第一版)[M].北京:中国环境科学出版社,2000.1-267
- [3] 汤鸿霄. 微界面水质过程的理论与模式应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20 (1): 1-9
- [4] Jegatheesan V, Vigneswaran S. Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable conditions
 [J]. Wat, Res, 2000, 34(7): 2119-2131
- [5] Valkovska D, Danov D, Ivanov I. Surfactants role on the deformation of colliding small bubbles[J]. Colioids Surf A, 1999, 156: 547-566
- [6] 王毅力. 高效絮凝/溶气气浮(DAF)水质净化集成系统的研究[D]. 博士学位研究生学位论文. 北京:中国科学院生 态环境研究中心. 2000
- [7] Tyrrell J, Attard P. Images of nanobubbles on hydrophobic surfaces and their interactions [J]. Phy Rev Let, 2001, 87 (17): 176104-1-176104-4
- [8] Jones S, Evans G, Calvin K. Bubble nucleation from gas cavities a review [J]. Adv, Colloid Interface Sci., 1999, 80: 27-50
- [9] Lubetkin S, Blackwell M. The nucleation of bubbles in supersaturated solutions[J]. J Colloid Interface Sci , 1988 , 26: 610-625
- [10] Ryan W, Hemmingsen E. Bubble formation in water at smooth hydrophobic surfaces[J]. J Colloid Interface Sci , 1993 , 157 : 312 317
- [11] Abdel-Fattah A I El-Genk M S. On colloidal particle sorption onto a stagnant air/water interface [J]. Adv Colloid Interface Sci , 1998, 78: 237-266
- [12] Derjaguin B, Dukhin S. Theory of flotation of small and medium size particles [J]. Trans Inst Min Metall., 1961, 70: 221-246
- [13] Ralston J, Fornasiero D, Hays R. Bubble-particle attachment and detachment in flotation [J]. Int J Miner. Process, 1999, 56: 133-164
- [14] Dai Z, Fornasiero D, Ralston J. Particle-bubble collision models a review[J]. Adv. Colloid Interface Sci., 2000, 85: 231 256
- [15] Sam A, Gomez C, Finch J. Axial velocity profiles of single bubbles in water froth solutions [J]. Int J Min Process, 1996, 47 (3/4): 177-196
- [16] Langmuir I, Blodgett K. Mathematical investigation of water droplet trajectories [J]. J Meteorol, 1948, 5: 175-187
- [17] Sutherland K. Physical chemistry of flotation XI. Kinetics of the flotation process[J]. J Phys Chem, 1948, 52: 394-425
- [18] Schulze H. Hydrodynamics of bubble-mineral particle collisions, Min. Process. Extractive Metall. Rev., 1989, 5: 43-76
- [19] Dai Z, Dukhin S, Fornasiero D, et al. The inertial hydrodynamic interaction of particles and rising bubbles with mobile surface. J. Colloid Interface Sci., 1998, 197: 275 – 292
- [20] Edzwald J. Principles and applications of dissolved air flotation [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31(3/4): 1-23
- [21] Fukushi K, Tambo N, Matsui Y. A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31(3-4): 25-35
- [22] Dai Z, Fornasiero D, Ralston J. Particle-bubble collision models a review[J]. Adv. Colloid Interface Sci., 2000, 85: 231 256
- [23] Nguyen A. Particle bubble encounter probability with mobile bubble surfaces[J]. J. Miner Process, 1998, 55: 73-86
- [24] Han M, Kim W, Dockko S. Collision efficiency factor of bubble and particle (tp) in DAF: theory and experimental verification[J].
 Wat Sci Tech, 2001, 43(8): 139–144
- [25] Kuru H. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions) [J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(8): 1-7
- [26] 郭瑾珑. 气浮及过滤过程中的接触絮凝研究[D]. 博士学位研究生学位论文. 北京:中国科学院生态环境研究中心. 2002
- [27] 许保玖, 安鼎年. 给水处理理论与设计(第一版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. 78-350
- [28] degaard H. Optimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31 (3/4): 73-82