

气浮接触区气泡-颗粒碰撞效率影响因素分析

王静超¹, 马 军², 刘 芳²

(1. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

[摘要] 对气浮接触区气泡-颗粒碰撞过程及其动力学模型进行了深入分析, 并重点讨论了颗粒尺寸、气泡尺寸、水温、颗粒密度等参数对碰撞效率的影响。通过此项研究, 可进一步加深对气浮净水机理的认识, 对实际气浮净水工艺的设计、运行有较强的指导意义。

[关键词] 气浮; 接触区; 气泡; 颗粒; 碰撞效率

[中图分类号] TG174.2 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2008)09-0066-04

Influential factor analysis of the bubble-particle collision efficiency in the contact zone of dissolved air flotation

Wang Jingchao¹, Ma Jun², Liu Fang²

(1. Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300040, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The dynamic model and process of bubble-particle collision in the contact zone of dissolved air flotation (DAF) has been analyzed. The effects of the parameters, such as the sizes of particles and bubbles, water temperature, particle density, etc. on the collision efficiency are discussed emphatically. It shows that deeper understanding about the mechanism of air flotation water purification is obtained. It is beneficial to the design and operation of the DAF technology.

Key words: air flotation; contact zone; air bubble; particle; collision efficiency

气浮净水工艺不仅是工业废水处理领域中常用的处理单元, 也是强化去除水中有机污染物、藻类、嗅味和强化处理低温低浊水的关键技术之一。该工艺已成功地应用于低温、低浊、高藻水的处理, 是目前公认的处理此类水体的行之有效的固液分离手段, 并广泛应用于世界各国特别是北欧国家的给水及污水处理厂^[1]。

接触区是高压释气水中微气泡群与混凝水中絮体颗粒混合、碰撞、黏附的重要场所, 其运行效果好坏直接影响着气浮净水效果。笔者对气浮接触区中气泡与絮体颗粒(后文叙述中简称其为颗粒)的碰撞过程进行了深入研究, 重点讨论了影响碰撞效率的各主要因素及工艺参数, 从而进一步加深了我们对气浮净水机理的认识, 并对实际气浮净水工艺的设计、运行有一定的指导作用。

1 有效黏附效率、黏附效率、碰撞效率

以 J. K. Edzwald 等^[2,3]为代表的西方学者认为, 气浮接触区气泡与絮体颗粒的黏附结合过程可分解为下面两个相对独立的子过程: (1) 气泡与颗粒的碰撞, 即二者间距逐步缩小至相遇的过程; (2) 气泡与颗粒的黏附, 即二者之间液膜厚度逐渐变薄至破裂, 并最终形成稳定三相接触角的过程。相应的有效黏附效率模型见式(1):

$$E = \eta_c \alpha_{pb} (1 - \beta_{pb}) \quad (1)$$

式中: η_c ——碰撞效率, 即气泡与颗粒能够发生碰撞的概率;

α_{pb} ——黏附效率, 即碰撞发生后气泡与颗粒能够进一步结合为一体的概率;

β_{pb} ——黏附不稳定效率, 即气泡与颗粒碰撞并结合为一体后, 由于水流扰动或其他不稳定因素作用而再次分离的概率。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(59825106)

上述几个基本概念中, 关于黏附效率 α_{pb} 及黏附不稳定效率 β_{pb} 的研究不多, 一般认为前者主要取决于化学预处理状况(如混凝剂种类、混凝剂投量、pH 等), 而后者除了受化学预处理状况影响外, 还受气浮池水力学特征影响, 二者一般由实验确定。关于碰撞效率 η_c 的研究相对较多, 各国学者相继提出了多种形式的碰撞效率模型, 其原因主要是由于推导过程中所作假设及依据的水动力学条件(气泡表面可动性、惯性影响等)不同所致。

2 气泡-颗粒碰撞效率模型

第一个气泡-颗粒碰撞效率模型由 Langmuir 提出。他在研究气溶胶絮凝过程时把液体小颗粒理想化为质点, 并由此得出了由惯性沉积导致的碰撞效率模型^[4]。此外, Sutherland 引入流函数概念建立了新的气泡-颗粒碰撞效率模型, 该模型形式简单、应用方便, 同时也为后续的相关研究工作奠定了基础^[4]。之后, 又有许多学者陆续提出了不同形式的碰撞效率模型^[4]。下面, 我们重点介绍 J. K. Edzwald 等西方学者针对气浮接触区气泡-颗粒碰撞过程提出的碰撞效率模型, 这是笔者所作研究工作的基础。

20 世纪 90 年代, J. K. Edzwald 等把单个捕集者效率概念引入气浮接触区的气泡-颗粒碰撞过程, 提出了新的碰撞效率模型。该模型认为^[2,3,5], 气泡(作为捕集者)与尺寸相对较小的颗粒(为被捕集者)之间的碰撞过程主要受布朗扩散作用、截留作用、重力沉降作用及惯性作用影响, 单个捕集者总效率(即气泡与颗粒的碰撞效率)为以上各单独作用效率的加和。根据这一理论, 气泡-颗粒碰撞效率可由式(2)~式(6)表述:

$$\eta_c = \eta_D + \eta_I + \eta_G + \eta_{IN} \quad (2)$$

$$\eta_D = 6.18 \left(\frac{K_B T}{g \rho_w} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (3)$$

$$\eta_I = 1.5 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (4)$$

$$\eta_G = \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (5)$$

$$\eta_{IN} = \frac{g \rho_p \rho_w d_b d_p^2}{324 \mu^2} \quad (6)$$

式中: η_c ——总碰撞效率;

η_D 、 η_I 、 η_G 、 η_{IN} ——分别代表与布朗扩散作用、截留作用、重力沉降作用、惯性作用相对应的单独碰撞效率。

该碰撞效率模型适用条件为: (1) 气泡体积远远大于颗粒; (2) 气泡周围水层为 Stocks 流, 即 $Re_b < 1$ 。

3 主要碰撞作用机制分析

为了比较各单独碰撞效率的相对大小及找出控制碰撞过程的主要碰撞作用机制, 我们利用自己编制的计算机程序对不同颗粒尺寸所对应的各单独碰撞效率数值进行计算, 得到图 1 所示计算结果。计算依据工艺条件参数为^[6]: 平均水温 25℃, 颗粒密度 1 010 kg/m³, 气泡直径 40 μm(后面相关计算依据同样的工艺条件参数)。同时, 表 1 中列出了典型颗粒尺寸所对应的各单独碰撞效率数值。

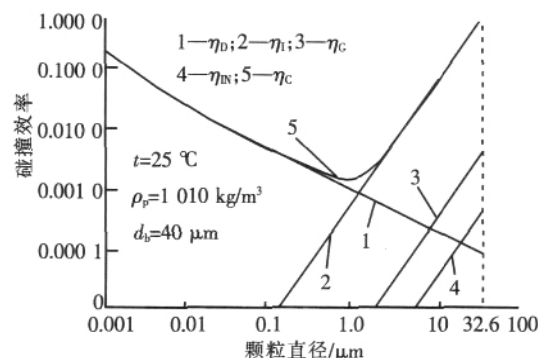


图 1 各碰撞效率相对大小示意

表 1 典型颗粒尺寸对应的各单独碰撞效率数值

颗粒直径/μm	$\eta_D \times 10^5$	$\eta_I \times 10^5$	$\eta_G \times 10^5$	$\eta_{IN} \times 10^5$	$\eta_c \times 10^5$
0.001	20 903	0.000 09	0.000 000 07	0.000 000 2	20 903
0.01	4 503	0.009	0.000 007	0.000 02	4 503
0.1	970	0.9	0.0007	0.003	971
1.0	209	94	0.07	0.2	303
3.0	100	843	0.64	1.7	945
10.0	45	9 375	7.1	18.7	9 446
32.6	20	99 634	75	199	99 929

分析图 1 及表 1 可知, 颗粒尺寸不同时主要碰撞机制也有所不同:

(1) 当 $d_p < 1.0 \mu\text{m}$ 时, 截留作用、重力沉降作用、惯性作用可忽略不计, 碰撞过程由布朗扩散作用控制, 此时碰撞效率表达式近似为:

$$\eta_c = 6.18 \left(\frac{K_B T}{g \rho_w} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (7)$$

(2) 当 $1.0 \mu\text{m} < d_p < 3.0 \mu\text{m}$ 时, 重力沉降作用、惯性作用可忽略不计, 碰撞过程由布朗扩散作用和截留作用控制, 此时碰撞效率表达式近似为:

$$\eta_c = 1.5 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 + 6.18 \left(\frac{K_B T}{g \rho_w} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (8)$$

(3) 当 $d_p > 3.0 \mu\text{m}$ 时, 布朗扩散作用、重力沉降作用、惯性作用可忽略不计, 碰撞过程由截留作用控制, 此时碰撞效率表达式可近似为:

$$\eta_c = 1.5 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (9)$$

4 碰撞效率影响因素分析

4.1 颗粒尺寸对碰撞效率的影响

分析图 1 可得下述结论: 在颗粒直径为 $1.0 \mu\text{m}$

附近,碰撞效率存在极小值。极小值左边,随颗粒尺寸增加碰撞效率单调递减;极小值右边,随颗粒尺寸增加碰撞效率单调递增。进一步通过计算机程序计算可知,在图1所示工艺条件参数下,当 $d_p=0.92\mu\text{m}$ 时,碰撞效率有最小值 $\eta_{C,\min}=0.003\ 004$ 。

进一步分析可知,上述极值点左边区域属于原水未投药情况下的胶体粒子范畴。尽管此时碰撞效率具有较高数值,但由于胶体粒子憎水性能较差而导致其与气泡碰撞后的黏附效率 α_{pb} 很低,因此二者的有效黏附效率 E 的数值很小,导致该区域范围内颗粒的气浮效果并不好。

而对于极值点右边区域,随颗粒尺寸增大,碰撞效率和黏附效率均具有较高数值,因此气泡与颗粒的有效黏附效率 E 也具有较高数值,气浮效果良好。由图1可知,此时增大颗粒尺寸有利于提高碰撞效率。因此,气浮之前进行混凝预处理以形成较大尺寸的絮体颗粒有利于增强碰撞效率和气浮净水效果。

4.2 气泡尺寸对碰撞效率的影响

由式(7)~式(9)可知,碰撞效率随气泡尺寸增大而减小。我们利用计算机程序计算了不同气泡尺寸所对应的碰撞效率数值,得到图2所示计算结果。由图2可知,降低气泡尺寸可大大提高碰撞效率。

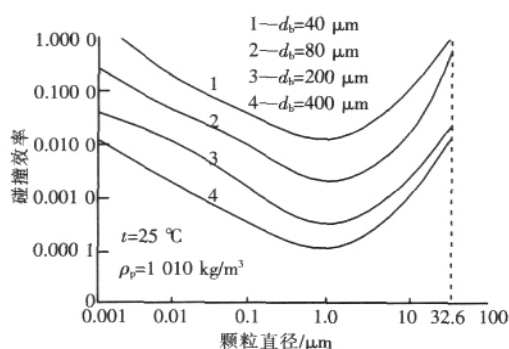


图2 碰撞效率随气泡尺寸变化示意

气浮净水技术之所以在20世纪60年代以后得到迅猛发展,其主要原因就是当时出现的特制溶气释放器能够稳定产生大量微细气泡,从而使得气浮净水效果得到很大提高。

4.3 温度对碰撞效率的影响

由式(7)~式(9)可知,对于直径 $<3.0\mu\text{m}$ 的颗粒,碰撞效率随温度增加而增大;而对于直径 $>3.0\mu\text{m}$ 的颗粒,碰撞效率数值基本不受温度影响。图3中分别计算了 $t=0$ 和 $t=25$ 所对应的碰撞效率数值,并作了对比。

由图3可知,碰撞效率受温度影响很小。从这

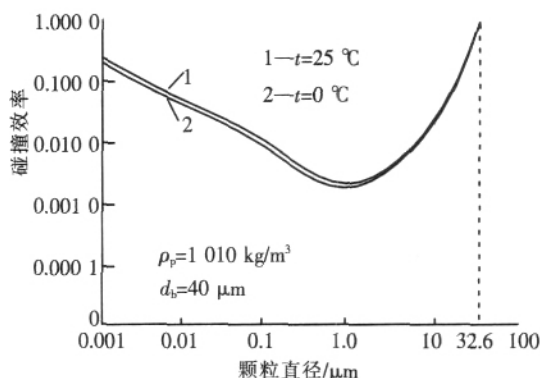


图3 碰撞效率随温度变化示意

一角度分析可知,气浮净水工艺对季节变化导致的温度变化具有更强的抗冲击能力,更适于冬季寒冷地区低温低浊水的处理。

4.4 颗粒密度对碰撞效率的影响

由式(7)~式(9)可知,碰撞效率表达式中没有颗粒密度一项,因此颗粒密度对碰撞效率的影响可忽略不计。图4中分别计算了不同颗粒密度所对应的碰撞效率数值并作了对比。

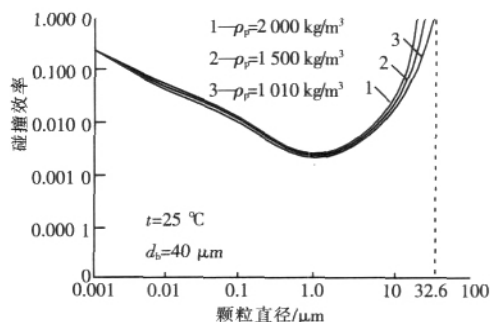


图4 碰撞效率随颗粒密度变化示意

由图4可知,颗粒密度对碰撞效率的影响很小,而且颗粒尺寸越小颗粒密度对碰撞效率的影响越小。相比之下,沉淀工艺则受絮体颗粒密度变化的影响较大。众所周知,对于结构疏松的飘轻絮体,经过沉淀池后很难下沉。而如果采用气浮工艺,则不存在这一问题。相反,由于絮体颗粒密度小而导致其上浮阻力小,会更容易被气泡黏附而去除。因此,对于低温低浊水、高色度水及高藻水,由于经混凝预处理后产生的飘轻絮体很难在后续沉淀池中下沉,采用气浮工艺更为合适。

5 结论

笔者对气浮接触区气泡-颗粒碰撞过程进行了深入分析,重点讨论了颗粒尺寸、气泡尺寸、水温 and 颗粒密度等参数对碰撞效率的影响。

所得主要结论为:(1)对于气泡-颗粒碰撞过程,颗粒尺寸不同其主要碰撞作用机制不同:当 $d_p < 1.0$

μm 时, 布朗扩散作用为主要碰撞作用机制; 当 $d_p > 3.0 \mu\text{m}$ 时, 截留作用为主要碰撞作用机制; 当 $1.0 \mu\text{m} < d_p < 3.0 \mu\text{m}$ 时, 布朗扩散作用、截留作用都是主要碰撞作用机制。(2) 针对常见气浮净水工艺条件参数进行计算可知: 当 $d_p = 0.92 \mu\text{m}$ 时, 碰撞效率具有极小值; 当 $d_p < 0.92 \mu\text{m}$ 时, 碰撞效率随颗粒尺寸增加而递减; 当 $d_p > 0.92 \mu\text{m}$ 时, 碰撞效率随颗粒尺寸增加而递增; 气浮之前进行混凝预处理以形成较大尺寸的絮体颗粒有利于增强碰撞效率和气浮净水效果。(3) 降低气泡尺寸可大大提高碰撞效率和气浮净水效果。(4) 碰撞效率受温度和颗粒密度影响很小, 可忽略不计。(5) 从碰撞理论角度分析进一步证实, 气浮工艺更适合于低温低浊水、高色度水及高藻水的处理。

[参考文献]

[1] Kiuru H J. 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(18): 1-7.

[2] Edzwald J K, Malley J P Jr, Yu C. A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment [C]. IWSA/IAWPRC joint Specialized Conference on Coagulation, Flocculation, Filtration, Sedimentation and Flotation, 1990: 141-150.

[3] Malley J P, Edzwald J K. Concepts for dissolved air flotation treatment of drinking water [J]. J. Water SRT-Aqua, 1991, 40(1): 7-17.

[4] Dai Z, Fornasiero D, Ralston J. Particle-bubble collision models-a review [J]. Adv. Colloid Interface Sci., 2000, 85(2-3): 231-256.

[5] 郭瑾瑜, 王毅力, 李大鹏, 等. 气浮过程中的界面相互作用 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 194-200.

[6] Baeyens J, Mochtar I Y, Liers S, et al. Plugflow dissolved air flotation [J]. Wat. Environ. Res., 1995, 67(7): 1027-1035.

[作者简介] 王静超(1974—), 2004年毕业于哈尔滨工业大学, 博士。现为天津市自来水集团有限公司高级工程师, 主要从事给水处理工艺管理与研究。电话: 13342095766, E-mail: w_jc@sina.com.

[收稿日期] 2008-05-08(修改稿)

(上接第 53 页)

4 结论与建议

(1) 实验表明, 微电解的最佳条件为 $\text{pH}=3.0$, 反应时间 180 min; Fenton 氧化的最佳条件是 H_2O_2 投加质量浓度为 1.5 g/L, $\text{pH}=3.0$, 反应时间 120 min。经微电解—Fenton 组合处理后, 苯胺的总去除率达到 96.1%, COD 的总去除率达到 75%, 苯胺的质量浓度从 2 528 mg/L 降到 100 mg/L 以下, 改善了废水的生化性, 有利于废水后续生化处理。

(2) 苯胺经过微电解—Fenton 组合处理, 在紫外区 230、280 nm 处的两个吸收峰都明显减小, 助色基团—NH—被破坏, 胺基被转化成铵根离子而进入溶液, 苯环类物质发生了开环反应, 生成中间产物戊烯酸, 最终被氧化成 H_2O 和 CO_2 。

[参考文献]

[1] 漆新华, 庄源益, 袁有才, 等. 超临界水氧化法处理苯胺废水 [J]. 环境污染与防治, 2001, 23(2): 56-60.

[2] 顾浩飞, 安太成, 文晟, 等. 超声光催化降解苯胺及其衍生物研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 593-597.

[3] 陶红, 高廷耀, 刘军, 等. 13X 沸石吸附处理水中苯胺的性能及应用 [J]. 工业水处理, 2002, 22(10): 22-25.

[4] Chamarro E, Marco A, Esplugas S. Use of Fenton reagent to improve organic chemical biodegradability [J]. Water Research, 2001, 35(4): 1047-1051.

[5] Aravindhan R, Fathima N N, Rao J R, et al. Wet oxidation of acid brown dye by hydrogen peroxide using heterogeneous catalyst Mn-salenY zeolite: A potential catalyst [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(1): 152-159.

[6] Neamtu M, Zaharia C, Catrinescu C, et al. Fe-exchanged Y zeolite as catalyst for wet peroxide oxidation of reactive azo dye Procion Marine H-EXL [J]. Apply. Catalyst. B: Environmental, 2004, 48(4): 287-294.

[7] 陈德恒. 有机结构分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 78-83.

[8] Jin A, Ming C L, Parichat C. Kinetics of aniline degradation by Fenton and electro-Fenton processes [J]. Water Research, 2006, 40(6): 1841-1847.

[9] Anber M, Meyerstein, Neta P, et al. Reactivity of aromatic compounds towards hydroxyl radicals [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1966, 70(8): 2660-2662.

[作者简介] 龚跃鹏(1983—), 南京工业大学 2008 届硕士研究生, 研究方向: 废水处理技术。电话: 025-83587349, Email: zsbshen@njut.edu.cn.

[收稿日期] 2008-04-22(修改稿)

· 简 讯 ·

恩施定期监测重点企业

湖北省恩施州今年加大了区域限批落实力度, 进一步建立健全节能减排长效机制。

督促重点排污企业、污水处理厂电厂的脱硫设施安装在线监测设备, 对全州 64 家重点企业实行定期监测制度。对违

反或不执行国家环保法规、不履行环境监管职责、干扰和限制环境执法、包庇纵容企业违法排污的政府和部门, 都要依法依规严肃处理。不仅要给予行政处分, 情节严重的, 还要追究刑事责任。(摘自中国环境报 2008-07-29)