

加压溶气气浮微气泡产生机理及工程应用研究

时玉龙¹, 王三反¹, 武 广², 陈 霞³

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院 寒旱区水资源综合利用教育部工程研究中心, 甘肃兰州 730070;
2. 上海中申环境工程有限公司, 上海 201206; 3. 聊城大学建筑工程学院, 山东聊城 252059)

[摘要] 目前广泛应用的加压溶气气浮设备的最主要问题是运行能耗过大。通过对加压溶气气浮设备微气泡产生机理的研究, 得出了加压溶气系统在微气泡产生过程中的两个耗能关键点, 并提出降低能耗的改进措施。指出了压力溶气罐内空气溶解过程中气体分散成核步骤中最小能量 Δf 的存在及其理论表达式。阐述了叶轮散气和气浮泵气浮装置在微气泡发生机理方面的转变和节能方面的优势。

[关键词] 加压溶气气浮; 微气泡; 能耗; 表面活性剂

[中图分类号] TQ993 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2012)02-0020-04

Study on the mechanism of the micro-bubble formation of pressure dissolved air flotation and application

Shi Yulong¹, Wang Sanfan¹, Wu Guang², Chen Xia³

(1. *Engineering Research Center of Water Resources Utilization in Cold and Drought Region, Section of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*
2. *Shanghai Jorsun Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai 201206, China;*
3. *School of Architecture & Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China*)

Abstract: The most important problem of the widely used pressure dissolved air flotation equipment is large energy consumption. By means of studying the mechanism of micro-bubbles formation, key points of the two energy-consuming processes are obtained, and the corrective measures for the reduction of energy consumption are put forward. The existence of the minimum energy Δf in the air dispersing and nucleation steps, during the process of air dissolving inside the pressure dissolved gas pot, and the theoretical expression of it are pointed out. The transform of impeller air diffusing and gas flotation pump equipment in the aspect of micro-bubble formation mechanism and their superiority in energy saving are expounded.

Key words: dissolved air flotation; micro-bubble; energy consumption; surfactant

1 气浮工艺

气浮工艺是利用系统产生的微气泡与目标去除物及其聚合体结合, 形成夹气絮体。夹气絮体在浮力的作用下上浮到液相表面形成稳定的浮渣层, 并最终伴随浮渣层的去除从液相主体中分离。

气浮工艺对液相中难以自然沉降的悬浮物有很好的分离效果, 在许多行业的水处理中得到了广泛应用。从最先的石油化工行业中含油废水的油水分离和采矿酸洗废水、冶金电镀废水中金属离子的收集分离, 发展到后来造纸行业木质纤维素的收集和印染行业中染料颗粒的去除^[1-2], 也有研究人员将气浮工艺应用在制革废水和抗生素生产废水的预处理上。近年来针对富营养化严重的微污染源和景观

水体治理也有很多工程案例采用气浮工艺去除其中的藻类、腐殖质等大分子有机物。此外应用气浮工艺对剩余污泥进行浓缩, 取得了比常规的重力浓缩或机械脱水更优的脱水率^[3]。气浮工艺在工业废水处理、资源回收、水源水净化和污泥浓缩等方面都发挥着独特的重要作用。

气浮工艺按照微气泡的产生方式可以分为三类: 电解气浮、散气气浮、溶气气浮^[4]。目前国内外应用最广泛的为溶气气浮类别中的加压溶气气浮。

2 加压溶气气浮

加压溶气气浮设备主要由气浮池体和与之配套的加压溶气微气泡发生系统组成。并且多数设备采用部分回流加压溶气方式。

加压溶气微气泡发生系统主要由循环水泵、空气压缩机、压力溶气罐和释放器组成。系统利用空压机提供的压缩空气和高扬程水泵提供的循环水流在溶气罐内形成高压,使空气以溶解态气体分子和非溶解态微小气核的形式分散在过饱和溶气水中,过饱和溶气水在经过系统末端的释放器时以微气泡的形式释放,参与目标去除物的分离去除。压力溶气罐是加压溶气系统的关键组成部分。

压力溶气罐的发展分为3个阶段:最初的空腔构造,发展为喷淋式填料溶气罐以及本研究的射流式溶气罐。射流式溶气罐是在罐体内加装射流管,凭借射流管在喉结处形成的负压,结合进口的压缩空气,进一步提高了气液两相的相对压差,起到强化空气溶解作用,其实际应用效果明显优于传统溶气罐。

3 加压溶气系统微气泡产生机理

尽管加压溶气系统被广泛用为微气泡的发生装置,但仍存在一定不足,其中最突出的问题就是能耗太大,能源利用不合理。实际工程应用数据表明,加压溶气系统的能耗占到整个气浮设备总能耗的50%以上,能源消耗成为气浮设备运行过程中的主要成本投入。从过程上分析系统主要耗能环节有2个:压力溶气罐内空气的溶解和释放器中微气泡的析出。下面从微气泡形成机理出发分析能耗关键点。

3.1 释放器中微气泡的产生机理

加压溶气系统前端压力溶气罐产生的过饱和溶气水经管道输送,在系统末端的释放器排出。由于释放器内腔构造对过饱和溶气水的减压消能作用,使过饱和溶气水在通过释放器时,伴着饱和溶气水自身势能的减小和局部流场环境压力的降低。当压力降到空气和水的分离压时,发生气穴效应,之前溶解于水中的分子态空气以微气泡形式释放出来。气穴产生微气泡的过程可分为3个步骤:第1步是饱和溶气水中溶解态空气分子以气团的形式析出,此过程中需要借助容器壁面、水中的悬浮颗粒抑或是先前存在的没有溶解的微气泡来提供成核表面;第2步是气团在释放器内部剧烈水流剪切力作用下,分裂成数目众多直径细小的微小气核;第3步是气核脱离释放器的紊动剧烈区,流向外部流场,并伴随液相上升流动成长为微气泡。这期间伴随着液相溶解气体向气核内部扩散传质的发生,并存在气核的合并^[5]。由于第3步中气液两相传质进行得比较缓慢,所以此步为控制步骤。主要的耗能环节为第1

步,此步骤的实质是气泡从无到有的过程,这个过程的实现使得饱和溶气水体系中气液两相界面面积突增,液体体系的表面自由能骤然升高。而体系本身总是自发的趋于能量降低。因此要实现这个过程就必须克服一个最小的能量值 ΔF (气穴成核能垒)^[6]。其表达式为:

$$\Delta F = \frac{16}{3} \pi \gamma^3 (P_0 - P_a)^{-3} \quad (1)$$

式中: γ ——气液界面界面张力, N/m;

P_a ——外部流场大气压力, Pa;

P_0 ——饱和溶气水的气相压力, Pa。

ΔF 以气穴效应产生气核需要克服的最小能量被广泛引用。其本质为分子态溶解气体以气核析出的逸出功。当气核自身的能量大于 ΔF 时,就会从液相中以气泡核的形式释放出来。

3.2 压力溶气罐中空气的溶解机理

空气在溶气罐内的溶解过程可分为2步:第1步是凭借气液两相的压差和剧烈的水流湍动将压缩空气压入液相主体中,并在其内部形成分散的微气泡;第2步是微气泡内部的气体和外部的液相主体之间,在气相压差的推动作用下,微气泡内部的气体透过气液界面向液相主体发生扩散传质过程,这个过程符合Whitman双膜理论和Fick定律^[7]。传质过程使微气泡内一部分气体以分子态溶解到液相中。伴随着气相向液相传质过程的发生,微气泡内部的气压逐渐降低,而由于压缩空气源源不断地通入,微气泡外部液相主体的压力始终维持在一个高值。微气泡在外部流场压力和水流剪切力的共同作用下分裂为数个直径更小的微气泡,新形成的小直径微气泡继续重复上述的由传质到分裂的过程。最终在压力溶气罐的作用时间内,形成有一定量未溶解直径接近 D_0 气核存在的过饱和溶气水,此处的临界直径 D_0 为此工况条件下气核所能稳定存在的最大直径。

空气在射流式溶气罐形成的过饱和溶气水中有2种存在状态:即分子态溶解的空气和未溶解气核,并且以分子态形式溶解的空气在比例上占优。上述2个步骤中第2个步骤即气液传质过程为控制步骤。主要的耗能环节为第1步,该步骤的实现是凭借压缩空气势能的降低对液相主体做功,从而将空气以微气泡的形式分散到液相中,使气液两相界面面积骤增,气液混合体系的表面自由能升高。根据气穴效应气核形成阶段中成核能垒 ΔF 的存在推断,要实现空气以微气泡形式向液相中分散,也必须克服

一个最小的能量值 Δf , 此处称之为气体分散成核能垒, 用来表示这个过程中压缩空气所必须具备的最小能量, 并且推断 Δf 表达式应与 ΔF 类似:

$$\Delta f = k\epsilon\gamma^x(P_a - P_0)^y \quad (2)$$

式中: γ ——气液界面界面张力, N/m;

P_a ——压缩空气的压力, Pa;

P_0 ——射流管喉结处的负压值, Pa;

ϵ ——湍动动能系数;

k, x, y ——常数。

Δf 与 ΔF 的主要区别是引入了湍动动能系数 ϵ 来描述气液两相间相互混合的剧烈程度。因为在一定区间内湍动动能越高, 气液两相之间的掺混程度越剧烈, 气液两相之间的接触面积越大, 越有利于气相向液相的传质, 气体的溶解也就越快。

通过上述对微气泡形成机理的分析得出, 加压溶气系统能耗的关键点为: 压力溶气罐内压缩空气向液相中分散气核的转化和释放器内分子态溶解空气以气核形式的析出。要对加压溶气系统进行节能优化就必须采取措施降低 2 个能耗关键点的能量消耗。此外从宏观层面分析, 加压溶气系统先溶气后释气的微气泡产生机理存在能量利用不合理的问题。压力溶气罐内瞬时高压与释放器中的气液分离压之间数十倍的压差所蕴含的势能在产生微气泡过程中被浪费掉。因此在对现有加压溶气系统节能改进的同时还可考虑推广更节能高效的微气泡产生方式。

4 加压溶气系统的改进

针对加压溶气系统微气泡产生过程中存在的能耗大及能源利用不合理的现状。可以从两方面着手对其加以改进: 一方面在维持原有的先溶气再释气的微气泡发生理念的前提下, 对现有的加压溶气气浮设备的构成及操作进行改进; 另一方面是采取以叶轮散气为主的微气泡直接产生装置。

4.1 对现有加压溶气系统进行改进

从微气泡产生机理分析得出, 加压溶气系统 2 个能耗关键点分别是克服 ΔF 和 Δf 时消耗的能量。由 ΔF 和 Δf 的表达式(1)、(2)可以看出两者均与 γ 的指数次方成正比, 与气液两项气压差 ΔP 的指数次方成反比。通过采取措施降低气液两相的界面张力 γ 或提高气压差 ΔP , 克服 ΔF 和 Δf 时消耗的能量也随之降低, 加压溶气系统就达到了节能目的。

4.1.1 提高气液两相气压差 ΔP

气浮设备在同样工况下, 采用第 3 代压力溶气

罐能显著提高气液两相气压差 ΔP 。因其加装射流管后对空气溶解具有突出的强化作用, 可提高加压溶气系统的效率和能源利用率。国内同济大学最早开展此项研究, 其设备已经在工程中得到广泛应用。

4.1.2 降低气液两相界面张力 γ

降低气液两相界面张力 γ 最直接的方法就是向溶气罐内投加表面活性剂。L. A. Féris 等的实验研究表明: 在水力负荷和对 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮体去除率一致条件下, 投加表面活性剂油酸钠可以使溶气罐的操作压力从 3 MPa 降低到 2 MPa, 显著降低 33%⁽⁸⁻⁹⁾。压力溶气罐操作压力的降低, 可以选择低功率空压机和循环水泵, 节省初期成本投入与后期运行能耗。

表面活性剂的投加要遵循一定的原则。如废水中含有类似酚类、脂肪酸类等两亲型物质, 则需考虑少量投加或者不投加; 像石油废水、含焦油的煤气洗涤废水等中含有疏水性基团的颗粒, 要谨慎确定投加量, 如果投加量过大可能会使其形成更稳定的乳化液; 如纸浆废水和分离洗煤废水等中含有亲水性颗粒, 对表面活性剂的投加无需特别加以限制, 正常投加即可。通常情况下推荐根据具体水质, 通过实验确定表面活性剂的最佳投加量。

4.2 节能高效的微气泡的产生

叶轮气浮和气浮泵气浮装置舍弃了以先高压溶气再低压释气为主的微气泡产生方式, 而是采取以叶轮组件直接散气产生微气泡。

4.2.1 采用叶轮引气、散气产生微气泡

叶轮引气气浮装置通过旋转叶轮产生的负压, 将周围环境中的空气引入到散气叶轮处, 然后由叶轮高速旋转产生的剧烈扰动和摩擦, 直接将空气剪切分散成微气泡。国外最先推出了以涡凹气浮为代表的叶轮气浮设备。国内研究人员也对叶轮气浮设备进行了一些实际应用上的探索, 并取得了较理想的效果。宫磊等采用涡凹气浮设备处理滇池含藻水, 在气浮时间为 1 min, 分离时间为 6 min, 聚丙烯酰胺 (PAM) 投加质量浓度为 2 mg/L 的条件下, 对藻类和浊度的去除率分别为 95.9% 和 93.2%⁽¹⁰⁾。管晓涛等将涡凹气浮应用在污水处理厂剩余活性污泥的浓缩上, 气浮工艺浓缩后污泥含水率为 93%~94%⁽¹¹⁾, 明显优于传统的污泥浓缩方式。

4.2.2 采用气浮泵产生微气泡

气浮泵产生微气泡的原理是压力溶气技术与叶轮散气技术的结合。气浮泵一般为高压旋喷泵, 该泵设有专用进气口, 进气口处设有调节阀, 可调节进气

量,从而控制气水比,直接影响最终微气泡的直径大小。旋喷泵在运行过程中借助进气口处叶轮高速旋转所形成的负压,将空气吸入泵腔,在泵腔内气体借助高压和剧烈的湍流,将空气高效快速地溶解于水中,与此同时高速旋转的叶轮将一部分吸入的空气直接剪碎为微气泡。因此最终产生的微气泡量为溶气释气量与叶轮碎气量之和。与叶轮气浮相比气浮泵比较新颖,近几年逐步被应用于试验研究和工程实践领域。袁鹏等采用气浮泵作为微气泡发生装置对新型竖流气浮反应器进行了实验研究,在气浮泵工作压力为 0.40~0.45 MPa,吸气量为 8% 的工况条件下,产生的微气泡平均直径为 50 μm ,该设备对乳品废水和机械加工废水 COD 去除率分别达到 50% 和 75% 以上,对 SS 和油类物质去除率分别超过 85% 和 80%^[12]。杨勇对旋喷泵进行改进,并将其应用于气浮设备中,在气浮泵工作压力为 0.48 MPa,吸气量为 9% 的工况条件下,90% 的微气泡直径小于 80 μm ^[13]。

此外研究人员还分别对金属管和金属孔板作为微气泡发生装置进行了实验研究和阐述,并认为其是一种低能耗的微气泡发生装置^[14-15]。但目前大多还只是停留在实验研究阶段。

叶轮和气浮泵微气泡发生装置的应用,使气浮设备更简约。叶轮散气完全省略了传统气浮设备的压力溶气系统和出水回流系统,气浮泵气浮装置也仅保留了出水回流系统,安装操作更便捷。并在一定程度上降低了设备长期运行过程中的能源消耗。但与加压溶气气浮装置比较两者仍存在需要完善之处。如设备运行不是很稳定,有时会在微气泡量不足或微气泡直径偏大的情况,会对出水水质产生一定影响。此外,由于 2 种微气泡发生装置比较成熟的技术都掌握在国外企业的手中,尤其是气浮泵的核心技术,这就使得设备的成本偏高,影响其在国内的推广应用。当务之急是如何与机械等相关专业合作,开发出具有自主知识产权的叶轮气浮装置和气浮泵。

5 结论

(1) 加压溶气气浮系统微气泡产生过程中 2 个能量消耗关键点为:压力溶气罐内压缩空气向液相中分散气核的形成和释放器内分子态溶解空气以气核形式析出。在气穴成核能垒 ΔF 的基础上,推断出气体分散成核能垒 Δf 的存在,并给出其理论表达式。

(2) 在维持传统的先高压溶气再低压释气微气

泡产生机理前提下,采用加装射流管的第 3 代压力溶气罐或按照一定原则在压力溶气系统中投加表面活性剂,可以在一定程度上解决系统能耗大的问题。

(3) 叶轮散气和气浮泵等高效节能微气泡发生装置在能量利用上更合理,其研发和推广将是未来气浮设备发展的主导方向。

[参考文献]

- [1] Rubio J, Souza M L, Smith R W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(3): 139-155.
- [2] Rodrigues R T, Rubio J. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 82(1): 1-13.
- [3] 何群彪, 高廷耀. 剩余活性污泥气浮浓缩技术研究[J]. 同济大学学报, 1995, 23(4): 417-420.
- [4] 张自杰. 排水工程下册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 523-536.
- [5] Dupre V, Ponasse M, Aurelle Y, et al. Bubble formation by water release in nozzles—I. mechanisms[J]. Water Research, 1998, 32(8): 2491-2497.
- [6] Takahashi T, Miyahara T, Mochizuki H. Fundamental study of bubble formation in dissolved air pressure flotation[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1979, 12: 275-280.
- [7] Eckenfelder W W. Industrial water pollution control[M]. 3rd edition. New York: McGraw-Hill Companies, Inc. 2000: 159-161.
- [8] Féris L A, Rubio J. Dissolved air flotation (DAF) performance at low saturation pressures[J]. Filtration and Separation, 1999, 36(9): 61-65.
- [9] Féris L A, Gallina C W, Rodrigues R T, et al. Optimizing dissolved air flotation design and saturation[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(8): 145-157.
- [10] 宫磊, 徐晓军, 魏在山, 等. 小型 CAF 气浮设备处理滇池含藻水的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 88-91.
- [11] 管晓涛, 胡铎平, 骆文旭, 等. CAF 工艺浓缩剩余活性污泥的可行性研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1): 37-39.
- [12] 袁鹏, 张景成, 彭剑锋, 等. 新型竖流气浮反应器工作性能与应用研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(1): 59-63.
- [13] 杨勇. 旋喷加压溶气气浮机理与实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2007.
- [14] 徐振华. 气浮工艺中金属微孔管制造微气泡的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [15] Zimmerman W B, Tesar V, Butler S, et al. Microbubble generation[J]. Recent Patents on Engineering, 2008, 2(1): 1-8.

[作者简介] 时玉龙(1986—), 2009 级兰州交通大学环境与市政工程学院在读研究生。电话: 15117119169, E-mail: yuchengshiedu@163.com。

[收稿日期] 2011-09-15(修改稿)