

新型竖流气浮反应器工作性能与应用研究

袁鹏^{1,2} 张景成¹ 彭剑峰² 宋永会²

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090;

2. 中国环境科学研究院水污染控制研究室, 北京 100012)

摘要 根据紊流气浮理论,开发了一种新型竖流气浮反应器,试验研究了它的工作性能以及实际应用效果。该反应器采用气液混合泵作为溶气设备,分离区内原水与溶气水逆向流动,采用水力方式排渣。试验结果表明,溶气效率随工作压力和吸气量的增大而增大,但同时大气泡也会随之增多;试验条件下微气泡平均尺寸为 $50\ \mu\text{m}$ 左右,工作压力对释放的微气泡尺寸影响不大;分离区高度影响气泡-絮体共聚悬浮层的厚度和稳定性,进而影响处理效果。应用新型竖流气浮反应器处理实际的乳品废水和机械加工废水,COD去除率分别达到50%和75%以上,SS去除率超过85%。新型竖流气浮反应器作为小型污水处理设备,具有良好的可应用性。

关键词 竖流气浮反应器 工作性能 应用 废水处理

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)01-0059-05

Performances and application of a novel vertical current flotation reactor

Yuan Peng^{1,2} Zhang Jingcheng¹ Peng Jianfeng² Song Yonghui²

(1. Faculty of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090;

2. Laboratory of Water Pollution Control of Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

Abstract A novel vertical current flotation reactor was developed based on turbulent flotation theory. Its operation performances and application were evaluated by wastewater treatment. The gas-liquid mixed pump was applied as air-dissolved apparatus in the flotation reactor. Raw water and air-dissolved water flow adversely in the separation zone and the scum was removed by hydraulic power. The experimental results show that the saturation efficiency increases with the increases of operational pressure and air mass. The enhanced operational pressure and air mass induced the formation of large-size bubbles; the operational pressure had no significant effect on the micro-bubble size, which had an average diameter of $50\ \mu\text{m}$, released from recycle water; the height of separation zone could influence the thickness and stabilization of bubble-floc aggregate blanket, and then influence the removal efficiency of turbidity. The novel vertical current flotation reactor was employed to purify the wastewater from dairy industry and mechanical industry. The removal rate of COD could reach up to 50% and 75%, respectively, and the SS removal rate could be up to 85% in both treatment processes. This study shows that the novel vertical current flotation reactor would be a promising equipment for water and wastewater treatment.

Key words vertical current flotation reactor; operation performance; application; wastewater treatment

气浮法是水处理中一种高效、快速的固液分离技术,根据气泡产生方式的不同可分为多种工艺形式,如散气气浮、电解气浮以及压力溶气气浮(DAF)等。由于具有诸多优点,DAF成为水处理工程中应用最为广泛的一种气浮方式^[1]。对于低温、低浊、富藻水体的净化处理以及城市生活污水和各种工业废水处理,应用DAF均可以取得良好的处理效果。传统的压力溶气气浮虽然得到了广泛的应用,但也存在着一些严重的问题,如占地面积大,工

艺流程复杂,专用设备较多,微气泡层在分离区分布不均匀^[2],刮渣机运行时影响出水水质等。针对上述问题,根据紊流气浮理论^[3],开发了一种新型竖流气浮反应器。在该新型竖流气浮反应器内,溶气水与原水在垂直方向上逆向流动,将传统的平流气浮池转化为立体的气浮反应器。而且溶气系统采用

收稿日期:2006-05-01; 修订日期:2006-09-05

作者简介:袁鹏(1979~),女,硕士,主要从事污水处理技术研究工作。E-mail:yuanpeng1997@163.com

气液混合泵代替了 DAF 的压力溶气罐、储气罐、空压机等设备,排渣采用水力排渣方式省去了刮渣机,这样大大简化了工艺流程,降低了占地面积,节省了初次投资和运行能耗,有利于气浮工艺小型化、设备化和自动化。

本文作者对新型竖流气浮反应器的工作性能进行了研究,考察了不同工况条件下溶气效率、释放的微气泡尺寸的变化以及分离区高度对试验的影响。并将此反应器应用到实际乳品废水和机械加工废水处理中,验证了此工艺的可行性和高效性。

1 材料和方法

1.1 试验装置

新型竖流气浮反应器包括溶气系统、竖流气浮反应器和加药系统 3 部分(图 1)。溶气系统包括气液混合泵 1 台,型号为 20FPD04Z,稳压分离罐 1 个,容积为 4 L。投药系统包括贮药罐和蠕动泵。竖流气浮反应器用有机玻璃制成,分为溶气水扩散区、固液分离区和水力排渣区。扩散区高度 500 mm,内径 150 mm;分离区高度可调(350 mm、550 mm、750 mm),内径 250 mm。排渣区与分离区相连,为倒锥形结构,高度 200 mm。

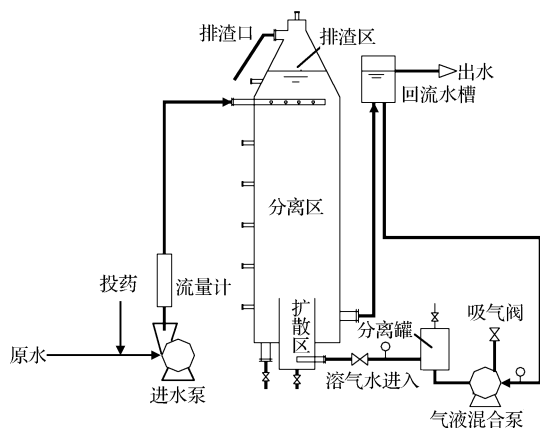


图 1 新型竖流气浮反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of novel vertical current flotation reactor

1.2 工艺流程

原水经过进水泵从反应器上部经布水系统均匀进入反应器,絮凝剂在进水泵的吸水口前端加入,部分气浮出水通过气液混合泵进行溶气回流,同时空气从气液混合泵吸气口吸入。溶气水从反应器扩散区底部切线进入,原水与溶气水在反应器内逆流流动,充分混合。水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器顶部,生成的浮渣层厚度不断增加、浓缩,在压力作用下溢流排出。反应器出水由底部引出经过回流水箱排出。

1.3 测定和分析方法

释气量测定:减压条件下,采用间歇法测定溶气水的气体释放量,释放的气体量通过置换的水量计量^[4]。测定装置^[5]如图 2 所示。溶气系统出水通过阀门减压以后进入三角集气瓶,微气泡与水流在三角瓶上部得以分离,待释出气体全部进入量气管,通过调节水准球液位使量气管中的气体压力与外界大气压相同,从量气管刻度读取气体体积数即为释气量,水样体积则由量筒中溢流水量确定。

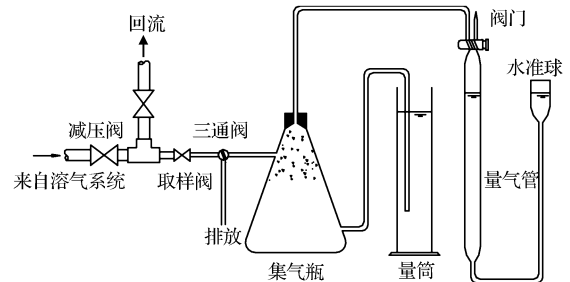


图 2 释气量测试装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement of released air capacity

微气泡尺寸测定^[5]:采用气泡稳定时间法间接测定释放出的微气泡的平均直径。“气泡稳定时间”指微气泡群的下界面浮升至某一固定高度时所需的时间,从而得到微气泡的平均上升速度。根据斯托克斯公式可知,气泡尺寸一定时在水中的上浮速度是定值,由斯托克斯公式计算出微气泡的平均直径。该方法简单直观,缺点是不能反映微气泡的级配分布情况。

COD、SS、浊度和油类分析均采用国家标准分析方法^[6]。

2 结果与讨论

2.1 溶气效率及其影响因素

在气浮系统中,溶气系统溶解空气的能力可以用溶气效率来评价。溶气效率反映了设备的溶气性能,直接影响去除效率和处理成本,因此了解和确定气浮设备的溶气效率对评价其工作性能是至关重要的。溶气效率定义为实际释气量与理论溶气量的比值^[7]:

$$\eta = V_C / V_T \times 100\% \quad (1)$$

式中:

η ——溶气效率(%) ;
 V_C ——实际释气量(mL/L) ;
 V_T ——理论溶气量(mL/L)。

理论溶气量可以理解为单位体积的加压溶气水常压下释气时所能释放出气体体积的最大值^[8]。计算公式为:

$$V_T = 7500 \times Kt \times p \quad (2)$$

式中:

Kt ——空气溶于水的亨利系数(mL/L·MPa),
 p ——溶气罐内气体的相对压强,即表压(MPa)。

在实际气浮净水过程中,可用释气量间接表征溶气效率^[4]。当以气液混合泵作为溶气设备时,工作压力和吸气量是影响其释气量的重要参数。本试验测定了不同工作压力和吸气量条件下溶气系统的释气量,结果如图 3 所示。释气量测定水温为 27℃,气液混合泵进气量采用气体流量计进行测量,吸气量为气液混合泵进气量与过水量的比值,以百分比形式表示。从图 3 中可以看出,工作压力在 0.25~0.45 MPa 条件下,释气量均随吸气量的增大而增大;而吸气量相同时,释气量随工作压力的增大而增大。当吸气量增大到 10% 时,试验观察到有不溶大气泡产生。在高压高吸气量(0.45 MPa, 10%) 条件下,释气量明显增大,可能是由于不溶大气泡进入测定装置,使测定结果偏高。

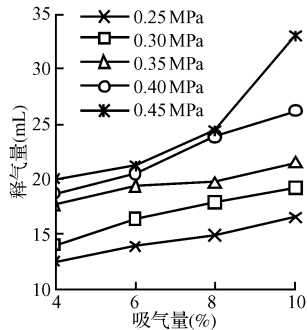


图 3 不同工况溶气系统释气量
 Fig. 3 Released air capacity under different operating conditions

图 4 表示了 27℃, 溶气压力为 0.4 MPa 下, 实际吸气量、释气量与理论溶气量之间的关系, 理论溶气量计算采用公式(2), 查得 27℃ 亨利系数为 0.0217。从图 4 可以看出, 吸气量为 6.6% 时, 实际吸气量与理论溶气量存在交叉点, 即当吸气量 < 6.6% 时, 气液混合泵气体吸入量低于理论溶气

量, 理论上经过足够的时间吸入的空气可以完全溶解; 当吸气量 > 6.6% 时, 气体吸入量高于理论溶气量, 这样必然有一定量的空气不能溶于水中, 从图 4 中还可以发现, 实际释气量总是小于理论溶气量, 因此气液混合泵溶气系统中必须设有气液分离罐, 将水中未溶解的大气泡排出, 防止大气泡进入反应器影响处理效果。因此, 为尽量提高溶气设备的溶气效率和缩小气液分离罐的容积, 试验选择溶气系统工作压力为 0.40~0.45 MPa, 吸气量为 8%。

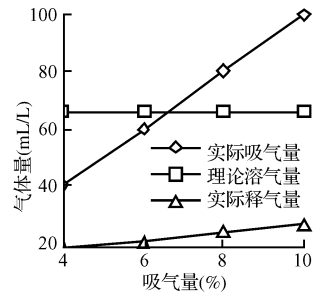


图 4 实际吸气量、理论溶气量与实际释气量关系
 Fig. 4 Relationships of practical inspiratory, theoretical dissolved and practical released air capacities

2.2 微气泡尺寸及其影响因素

微气泡尺寸是评价气浮反应器工作性能的重要指标, 传统气浮工艺中溶气释放器作为减压释放装置是影响微气泡大小和数量的主要因素。本试验选用气液混合泵作为溶气设备, 采用普通闸阀作为减压释放装置, 避免了溶气释放器易堵塞的问题。本试验中采用气泡稳定时间法测定了不同工作压力时进入气浮反应器的微气泡的状态和平均尺寸。从表 1 中可以看出, 溶气压力在 0.3~0.45 MPa 范围内, 微气泡的稳定时间、上升速度和直径相差不大, 表明工作压力对微气泡的状态和尺寸的影响并不显著。大量的试验研究和工程实践表明, 微气泡直径在 10~100 μm 范围内均能取得满意的净水效果^[9], 其

表 1 不同溶气压力下微气泡平均直径

Table 1 Average diameter of micro-bubble under different operating pressures

工作压力 (MPa)	气泡稳定时间 (s)	气泡上升速度 (mm/s)	气泡直径 (μm)
0.25	145	1.655	55
0.30	170	1.412	51
0.35	180	1.333	49
0.40	185	1.297	49
0.45	192	1.250	48

中直径在 $40\ \mu\text{m}$ 左右最佳^[3,8]。本次试验测定的微气泡尺寸在 $50\ \mu\text{m}$ 左右,与气浮工艺所需的最佳气泡尺寸非常接近,而且基本不随工作压力的变化而波动,这说明该溶气系统可以产生理想尺寸的微气泡,而且具有较强的稳定性。

2.3 分离区高度对水中悬浮物去除效果的影响

新型气浮反应器采用竖流方式运行,大大提高了分离区(图1)的利用效率^[10,11]。根据紊流气浮理论,在分离区内,溶气回流水与经絮凝反应的原水逆向流动,水体中的悬浮颗粒物与气泡相互碰撞、絮凝长大,并在原水与溶气回流水的共同冲击下形成稳定的悬浮层,悬浮层向上浮升,可有效拦截上升的气泡与随水流下行的悬浮颗粒物^[12]。由此可见,分离区高度对悬浮层的形成和稳定性有着至关重要的影响,进而影响气浮反应器的运行效果。

试验中考察了3个不同的分离区高度对浊度去除率的影响,试验原水浊度约为150 NTU,采用面粉配制,气浮停留时间为20 min,回流比为30%,混凝剂采用聚合氯化铝(PAC),结果如图5所示。分离区高度越大对浊度的去除越有利。分离区高度0.75 m时,投药量在20~100 mg/L范围内,浊度去除率均在85%左右;当分离区高度降低到0.55 m时,投药量20 mg/L,浊度去除率只有70%,随着投药量增加到80 mg/L时,去除率才逐渐增加到85%左右。可见,适当降低分离区高度时,必须增加投药量,才能获得相当的处理效果。当分离区高度降低至0.35 m时,不同投药量条件下浊度的去除率均不超过70%。产生上述现象的主要原因是,竖流气浮反应器运行时会在分离区内形成气泡-絮体共聚悬浮层,只有悬浮层达到足够的厚度,才能有效地捕捉向下流动的絮凝体。另一方面,只有分离区高度足

够大,才能使悬浮层对做上升运动的气泡进行最大程度的利用,增加悬浮层厚度,进而更加有效地去除水中的絮凝体。而当分离区高度很小时(如本试验的0.35 m),形成的气泡-絮体共聚体很快流出分离区,进入水力排渣区,因此在分离区内无法形成或只能形成很薄的悬浮层,不能形成对絮凝体的有效拦截,影响对悬浮物的去除效果。

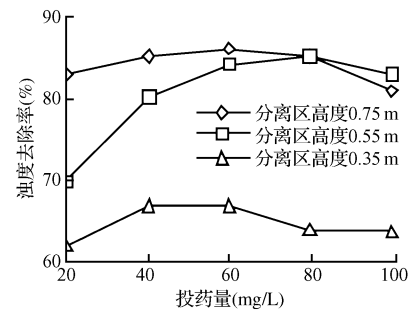


图5 分离区高度对浊度去除效果的影响

Fig. 5 Effect of separation zone height on removal efficiency of turbidity

2.4 新型竖流气浮反应器对实际废水的处理效果

为验证新型竖流气浮反应器处理实际废水的可行性,对该气浮反应器分别处理乳品废水和机械加工废水的处理效果进行了考察。原水水质、工况条件和处理效果如表2所示。从表2中可以看出,新型竖流气浮反应器对2种实际废水中的SS和浊度均有很好的去除效果,但是对于机械加工废水处理选择的水力停留时间和投药量要高于乳品废水处理。表2中该反应器对乳品废水的COD去除率稍低,为52.5%,主要是因为试验所用乳品废水中含糖量较高(为20%左右),造成水中溶解性COD较高,气浮工艺无法去除。

表2 新型竖流气浮反应器对实际废水的处理效果

Table 2 Performances of vertical current flotation reactor for practical wastewater treatment

原水	工况条件		污染物去除效果			
			监测项目	原水	出水	平均去除率(%)
乳品 废水	处理水量	140 L/h	COD	1200 ~ 1300 mg/L	480 ~ 650 mg/L	52.5
	水力停留时间	15 min	SS	120 ~ 160 mg/L	12 ~ 18 mg/L	87.4
	投药量(PAC)	40 mg/L	浊度	260 ~ 300 NTU	30 ~ 50 NTU	81.0
	回流比	30%				
机械 加工 废水	处理水量	70 L/h	COD	400 ~ 1000 mg/L	100 ~ 220 mg/L	75.2
	水力停留时间	30 min	SS	400 ~ 700 mg/L	50 ~ 80 mg/L	85.5
	投药量(PAC)	80 mg/L	浊度	300 ~ 500 NTU	30 ~ 40 NTU	88.4
	回流比	30%	油类	13 ~ 18 mg/L	2 ~ 4 mg/L	80.7

注:溶气系统工作压力0.45 MPa,吸气量8%

研究表明,新型竖流气浮反应器用于食品加工类或是机加含油类废水生化前预处理效果理想,适用性强。

3 结 论

(1)与传统气浮工艺相比,新型竖流气浮反应器工艺流程简单,占地面积小,操作维护简单,易于实现自动控制。

(2)提高工作压力和吸气量,可以提高新型竖流气浮反应器溶气系统的溶气效率,但同时会造成大尺度气泡的生成,对处理效果产生不利影响。工作压力为 0.40 ~ 0.45 MPa,吸气量为 8% 是较为合适的工况条件。工作压力对产生的微气泡尺寸影响不大,平均直径为 50 μm 。

(3)分离区高度将会影响气泡-絮体共聚悬浮层的厚度和稳定性,进而影响处理效果。本试验条件下,0.75 m 的分离区高度可以保证满意的处理效果。

(4)新型竖流气浮反应器处理实际的乳品废水和机械加工废水,均取得了较好的处理效果,COD 去除率分别达到 50% 和 75% 以上,SS 和油类物质去除率分别超过 85% 和 80%,表明该反应器作为小型污水处理设备,应用前景广泛。

参 考 文 献

- [1] Gergory R., Zabel T. F. Sedimentation and Flotation, In: Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies, A. W. W. A. 4th ed. McGraw Hill, New York, USA. **1990**;367 ~ 453
- [2] Lundh M., Jonsson L., Dahlquist J. Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation. *Wat. Res.*, **1999**,34(1):21 ~ 30
- [3] Kiuru H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). *Wat. Sci. Tech.*, **2001**,43(8):1 ~ 7
- [4] 陈福泰,王红宇,王东升,等. 压力溶气气浮工艺中溶气效率测定方法述评. *环境污染治理技术与设备*, **2004**,5(4):1 ~ 3
- [5] 陈翼孙,胡斌. 气浮净水技术. 北京:中国环境科学出版社, **1992**
- [6] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第3版). 北京:中国环境科学出版社, **1989**
- [7] 王文海. 加压溶气气浮设备理论溶气量的计算. *环境污染治理技术与设备*, **2002**,3(7):35 ~ 38
- [8] 王静超,马军,韩宏大. 探讨气浮工艺的若干技术参数. *中国给水排水*, **2004**,20(6):22 ~ 24
- [9] Vlaški A., Van Breemen A. N., Alaerts G. J. The role of particle size and density in dissolved air flotation and sedimentation. *Wat. Sci. Tech.*, **1997**,36(4):177 ~ 189
- [10] Haarhoff J., Edzwald J. K. Modelling of floc-bubble aggregate rise rates in dissolved air flotation. *Wat. Sci. Tech.*, **2001**,43(8):175 ~ 184
- [11] Han M., Kim W., Dockko S. Collision efficiency factor of bubble and particle(abp) in DAF: Theory and experimental verification. *Wat. Sci. Tech.*, **2001**,43(8):139 ~ 144
- [12] 郭瑾珑,李大鹏,汤鸿霄. 逆流共聚气浮水处理工艺研究. *中国给水排水*, **2002**,18(7):12 ~ 16