

新型废水厌氧处理工艺——内循环厌氧反应器

甘树福,徐文彬,王国胜,刘玲

(广东工业大学环境科学与工程学院,广东广州 510006)

摘要 :介绍内循环(IC)厌氧反应器的发展、基本结构、运行机理。分析该反应器的工艺过程,指出该工艺具有处理效率高、抗冲击能力强等优点。针对 IC 反应器存在的缺陷,人们对该反应器进行技术改进,通过提高它的内循环的气量进行处理低浓度有机废水,增加外循环装置缩短 IC 反应器的启动周期。

关键词 :内循环厌氧反应器;厌氧生物处理;水力模型

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2006)02-0048-04

A new anaerobic wastewater treatment technique : Internal circulation anaerobic reactor

GAN Shu-fu, XU Wen-bin, WANG Guo-sheng, LIU Ling

(College of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract :The development, fundamental structure and working mechanisms of the internal circulation (IC) anaerobic reactor were introduced. The IC reactor has many characteristics such as highly wastewater treatment efficiency and strongly resistance to shock loading. To eliminate the defects of IC reactor, studies on its improved technique have been made. The improved IC reactor can treat wastewater of low organic concentration as the amount of internal circulation has been increased. Its startup period has been shortened by an externally added circulating device.

Key words :internal circulation anaerobic reactor; anaerobic biological treatment; hydraulic model

内循环厌氧反应器(Internal Circulation Anaerobic Reactor,以下简称 IC 反应器)是荷兰 PAQUEC 公司于 20 世纪 80 年代中期在 UASB 反应器的基础上开发成功的第三代高效厌氧反应器^[1],反应器内高浓度的污泥和良好的泥水传质效果,使其在处理效率方面比 UASB 反应器更具优越性。PAQUES 公司在 1985 年初建造了第一个 IC 中试反应器,1988 年建立了第一个生产性规模的 IC 反应器^[2]。我国于 1996 年开始引进 IC 反应器技术^[3],该反应器以其启动周期短、处理量大、投资少、占地面积省、运行稳定等优点而深受瞩目,并已成功应用于啤酒生产、造纸及食品加工等行业的生产污水处理中。目前,进一步研究开发 IC 反应器、推广其应用范围已成为废水厌氧生物处理的热点之一。

1 IC 反应器构造及工艺原理

IC 反应器可以看作是由两个 UASB 反应器串联而成的,具有很高的高径比,一般为 4~8,其高度可达 16~25 m。IC 反应器由 5 个基本部分组成:混合区、污泥膨胀床区、内循环系统、精处理区和沉淀区。其中内循环系统是 IC 反应器工艺的核心构造,它由一级三相分离器、沼气提升管、气液分离器和泥水下降管组成(见图 1)。

经过调节 pH 值和温度后的废水进入反应器底部混合区,与从反应器上部返回的厌氧污泥颗粒和废水均匀混合,由此对进水进行了稀释和均质作用,从而大大减轻了冲击负荷及有害物质的不利影响。

废水和颗粒污泥混合物在进水与循环水的共同推动下,进入污泥膨胀床区,由于回流的影响,此部

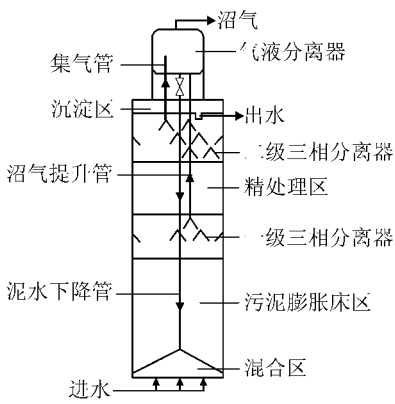


图 1 IC 反应器构造示意图

分产生较大的上升流速,最大可达 $10 \sim 20 \text{ m/h}^{[4]}$,废水中的大部分有机物在这里被转化成沼气,沼气被一级三相分离器收集,沿着提升管并携带着混合液提升至气液分离器,分离出的沼气从气液分离器的顶部沼气排出管排出。

分离出的泥水混合液将沿着泥水下降管返回到反应器底部的混合区,并与底部的颗粒污泥和进水充分混合,实现了混合液的内循环。实现内循环的气提动力来自于上升的和返回的泥水混合物中气体含量的差别,因此,泥水混合物的内循环不需要外加动力。反应器内液体内循环促进了基质和颗粒污泥的接触,而且有很大的升流速度,故提高了传质效果,促进了产甲烷细菌的繁殖和增长,并使污泥膨胀床区去除有机物的能力增强。

经污泥膨胀床区处理后的废水除一部分参与内循环外,其余污水通过一级三相分离器进入精处理区继续进行处理,可去除废水中的剩余有机物,使废水得到进一步的净化,提高了出水水质。由于大部分有机物已被降解,所以精处理区的 COD 负荷较低,产气量也较小。精处理区产生的沼气由二级三相分离器收集,通过集气管进入气液分离器并通过沼气排出管排出。经净化的水从沉淀区沉淀后由出水管排走,颗粒污泥则返回精处理区污泥床。

2 IC 反应器的水力模型

IC 反应器内部能够形成循环回流,而且水力剧烈混合,这一点与空气提升式反应器(Air Lift Reactor)的液体循环很相似。Pereboom 等^[5]于 1994 年在空气提升式反应器水力模型的基础上提出了 IC 反应器的水力模型,其形式如下:

$$\epsilon_{gr} = \frac{u_{Lr}}{1.35 + 0.24(u_{Lr} + u_{gr})^{0.93}} \quad (1)$$

$$u_{Lr} = \left[\frac{2gh_D(\epsilon_{gr} - \epsilon_{gd}) - \Delta H}{K_T} + \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2 \frac{K_B}{(1 - \epsilon_{gd})^2} \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中: ϵ_{gr} 为沼气提升管中的持气率,%; u_{Lr} 为沼气提升管中的表观液相上升速度, m/s ; u_{gr} 为沼气提升管中的表观气相上升速度, m/s ; h_D 为气-液扩散高度, m ; ϵ_{gd} 为泥水下降管中的持气率,%; ΔH 为沼气提升管与泥水下降管间的液位差, m ; K_T 为顶部阻力损失系数; K_B 为底部阻力损失系数; A_r 为沼气提升管面积, m^2 ; A_d 为泥水下降管面积, m^2 。

其中,式(1)是关于空气提升式反应器的著名经验公式,于 1976 年由 Hills 得到。然而该水力模型还存在着简化、不尽合理、计算参数难确定、计算复杂等问题,其合理性和实用性还有待进一步研究。

式(2)的原型式(3)是基于空气提升式反应器的能量守恒提出的理论方程,这一方程也得到了广泛认可。

$$u_{Lr} = \left[\frac{2gh_D(\epsilon_{gr} - \epsilon_{gd})}{\left[\frac{K_T}{(1 - \epsilon_{gr})^2} + \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2 \frac{K_B}{(1 - \epsilon_{gd})^2} \right]} \right]^{0.5} \quad (3)$$

3 工艺优缺点

IC 反应器与作为第二代厌氧反应器的优秀代表 UASB 反应器相比,具有以下技术优点:①有机负荷高,水力停留时间短。内循环提高了污泥膨胀床区的液相上升流速,因而水力停留时间短,而且强化了废水中有机物和颗粒污泥间的传质,使 IC 反应器的有机负荷远远高于普通 UASB 反应器。IC 反应器具有很高的容积负荷,在处理 $\rho(\text{COD})$ 为 $10\,000 \sim 15\,000 \text{ mg/L}$ 的土豆加工废水时的负荷可达 $30 \sim 40 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,在处理如 $\rho(\text{COD})$ 为 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ mg/L}$ 的啤酒废水时负荷可达 $20 \sim 25 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ^[6];②抗冲击负荷能力强,运行稳定性好。内循环的形成使得 IC 反应器污泥膨胀床区的实际水量远大于进水水量,循环回流水稀释了进水,且可利用内循环回流的碱液,这大大提高了反应器的抗冲击负荷能力和缓冲 pH 值变化能力。此外,废水还要经过精处理区继续处理,故反应器运行通常很稳定;③占地面积省,基建投资省。在处理同量的废水时,IC 反应器的进水容积负荷率是普通 UASB 反应器的 4 倍左右,污泥负荷率为 UASB 反应器的 $3 \sim 4$ 倍^[7],故其所需的容积仅为 UASB 反应器的 $1/4 \sim 1/3$,节省了基建投资;加上 IC 厌氧反应器一般采用高径比为 $4 \sim 8$ 的高瘦型塔式外形,故其占地面积少,因而比较适合于用地紧张的企业采用。④节能。IC 厌氧反应器的内循环是在沼气的提升作用下实现的,利用沼气膨胀做功,在无须外加能源的条件下实现了内循环废水回流,因而可不需外加动力,节省能耗;⑤启动期短。IC 反应器的启动期比 UASB

反应器要短,UASB反应器的启动周期长达4~6个月,而IC反应器启动期一般仅为1~2个月^[8]。

然而,作为新一代的高效厌氧反应器的IC反应器仍然存在着以下缺点及值得重视的地方:①污泥分析表明^[9],IC反应器比UASB反应器内含有较高浓度的细微颗粒污泥,加上水力停留时间相对短和较大的高径比,所以与UASB反应器相比,IC反应器出水中含有更多的细微固体颗粒,这不仅使后续沉淀处理设备成为必要,还加重了后续设备的负担。②内循环厌氧反应器出水的SS浓度与表面水力负荷以及产气率呈正相关性,在高负荷运行时,受产气率的影响尤其大^[10],故要控制好表面水力负荷及产气率,以提高出水水质。③由于采用内循环技术和分级处理,IC反应器高度一般较高,而且内部结构相对UASB反应器要复杂,这增加了施工安装和日常维护的困难,高径比大就意味着进水泵的能量消耗大,运行费用高,所以反应器的选择必须从建设和运行费等各方面进行综合考虑。④因反应器内水流是上向流,并通过三相分离器,故三相分离器的设计应考虑其实际过流断面,避免局部水流速度过大,既要达到良好的分离效果,又要防止水流状态不均的现象。⑤研究表明^[11],泥水混合物的循环量不仅与沼气的产量有关,而且与循环管的长度和直径等有关。为了加大泥水混合物的循环量,提高处理负荷,必须优化循环管的长度和直径的设计。⑥对于IC反应器,较高的混合液上升流速(2.65~4.35 m/h)有利于反应器稳定运行;在容积负荷为35.0 kg/(m³·d)和进水pH值为8.5时,反应器具有最大的COD去除率,故在设计IC反应器时要充分考虑反应器进水浓度、上升流速和反应器高度间的关系^[12]。

4 工程应用及改进

自1988年第一座生产性规模的IC反应器投入运行以来,全球已建成的IC反应器大部分用于处理啤酒废水,目前中国已有三家啤酒厂引进了此工艺^[13]。以沈阳华润雪花啤酒有限公司采用的IC反应器为例^[8],IC反应器高16 m,有效容积70 m³。每天处理COD平均质量浓度为4300 mg/L的啤酒废水400 m³,在满负荷运行下容积负荷稳定在25~30 kg/(m³·d),COD去除率稳定在80%。公司在解决处理生产废水问题的同时,在经济上也获得较大收益。每年节省排污费75万元,沼气回收利用价值45万元,IC反应器年运行费用仅为62万元。可见,IC反应器处理工艺达到了技术与经济的优化。

IC反应器工艺也成功地应用于制浆废水处理。在2000年,福建省南纸股份有限公司成功地引进了

荷兰PAQUEC公司的IC厌氧反应塔处理TMP和DIP制浆废水^[14],目前整个废水处理系统运行稳定,处理效果好,运行成本低,包括折旧处理成本仅为0.55元/t。IC反应器结构独特,适合处理TMP和DIP制浆高浓度混合废水,能够应对废水的高负荷冲击和高悬浮物^[15]。

IC反应器工艺在国外,尤其在欧洲的应用较为普遍,运行经验也比国内成熟许多,不但已在啤酒生产、柠檬酸生产、土豆加工、造纸等生产领域内的废水处理上取得很大的成功,而且正日益扩展应用范围,其规模也越来越大。荷兰SENSUS公司建造了容积为1100 m³的IC反应器处理菊粉(inuline)生产废水^[4]。1995年该反应器初期运行时,日处理COD质量浓度约为7200 mg/L的废水,水力负荷达30 kg/(m³·d),COD去除率稳定在70%~80%。而据其估算,如果采用UASB反应器处理同样的废水,反应器容积将达2200 m³,建设投资及占地面积也将大大增加。

Driessen和Yspeert的研究表明^[16],IC反应器应用于低浓度奶制品废水、中浓度食品加工废水、高浓度酿酒废水等工业废水处理,可处理工业废水COD的质量浓度在1000~23000 mg/L,容积负荷可达35 kg/(m³·d),低浓度废水水力停留时间低至2.6 h,COD去除率与容积负荷和水力停留时间无关,这一点在工程应用上值得借鉴。

IC反应器通常应用于处理高浓度有机废水。针对内循环厌氧反应器对低浓度、有毒有害有机废水的处理因内循环气量不足而不能正常运行的缺点,陈广元^[17]对IC反应器进行了改进,对处理低浓度有机废水进行试验研究,反应器同时采用了脉冲进液与附加供气系统,额外增加了内循环的气量。吴根义等人^[18]设计与制作了一种实验用附加气IC反应器,采用强制性附加气提高循环气量,进而加大内循环量使其在处理两类废水时达到更高处理效率,通过对比试验发现,该反应器较普通内循环反应器启动时间缩短38 d,最大容积负荷提高20%,进水浓度为500 mg/L时仍能正常运行。

为了缩短IC反应器启动周期,改善启动初期的传质作用,丁建南等人^[19]对IC反应器进行了改造,增加了外循环装置,并在相同条件下与未附加外循环装置的IC反应器进行了对比试验。结果表明,附加外循环装置可有效提高启动初期IC反应器内的泥水混合程度,强化传质过程,大大缩短启动周期,保证IC反应器快速、平稳启动。

5 结语与展望

综上所述,IC反应器具有超高的容积负荷率,

运行稳定,去除率均较高等特点,现已在土豆加工、啤酒、造纸、柠檬酸等生产废水处理中成功应用,取得了较好的环境效益和经济效益。IC反应器作为一种高技术的新型超高效厌氧反应器的开发,有着重要的理论意义和实用价值,具有很大的发展前景和应用潜力,值得大力推广应用^[20]。目前,一些学者对附加气IC反应器和附加外循环IC反应器等改进型IC反应器进行试验研究,并取得了可喜的成果,这必将大大推动IC反应器的发展。

然而,IC反应器作为新一代的厌氧反应器,仍有一些值得研究的地方,比如反应器的结构设计有待优化以提高整个反应器的效率,水力模型的合理性和实用性有待研究,厌氧反应器颗粒污泥的研究将会成为热点。

参考文献:

[1] LETTINGA G, FIELD J, VAN LIER J, et al. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near futur[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(10): 5-12.

[2] 王凯军. 厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器[J]. 环境科学, 1998, 19(1): 94-96.

[3] 邵希豪, 喻俊, 范国东, 等. 内循环厌氧反应器(IC)探讨[J]. 中国沼气, 2001, 19(1): 27-33.

[4] HABETS L H A. Anaerobic treatment of inuline effluent in and internal circulation reactor[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(10): 189-197.

[5] PEREBOOM J H F, VEREIJKEN T L F M. Methanogenic granule development in full scale internal circulation reactors[J]. Wat Sci Tech, 1994, 30(8): 9-21.

[6] 申立贤, 杜兵. 厌氧处理技术(UASB)现状与展望[C]//北京市环境保护科学研究院. 跨世纪的环境保护科学技术. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 76-82.

[7] 张忠祥, 钱易. 废水生物处理新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 381-382.

[8] 吴允, 张勇. 啤酒生产废水处理新技术——内循环反应器[J]. 环境保护, 1997(9): 18-19.

[9] PEREBOOM J H F. Size distribution model for methanogenic granules from full scale UASB and IC reactors[J]. Wat Sci Tech, 1994, 30(12): 211-221.

[10] 吴静, 陆正禹, 胡纪萃, 等. 内循环厌氧反应器启动研究[C]//中国沼气学会. 2000年国际沼气技术与持续发展研讨会论文集. 北京: 中国沼气学会, 2000: 137-141.

[11] 龚钢明, 邵希豪, 蔡宝国. IC厌氧反应器的内循环装置[J]. 中国沼气, 2002, 20(1): 23-25.

[12] 丁丽丽, 任洪强, 华兆哲, 等. 内循环厌氧反应器的运行特性[J]. 中国给水排水, 2002, 18(11): 46-48.

[13] 王锴, 买文宁, 郭成超. 厌氧内循环反应器研究进展[J]. 工业水处理, 2003, 23(12): 4-7.

[14] 崔延龄. IC厌氧反应技术应用于制浆废水处理[J]. 国际造纸, 2003, 22(4): 45-48.

[15] 陈志强. IC厌氧反应器在制浆造纸废水处理中的应用[J]. 中国造纸, 2004, 23(3): 37-39.

[16] DRIESSEN W, YSPEERT P. Anaerobic treatment of low, medium and high strength effluent in the agro-industry[J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(8): 221-228.

[17] 陈广元. 附加气循环IC反应器处理低浓度有机废水[J]. 中国沼气, 2002, 20(4): 22-23.

[18] 吴根义, 杨仁斌, 魏清伟. 试验用附加气厌氧内循环反应器的设计与制作[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 29(5): 394-396.

[19] 丁建南, 于一尊, 金志农. 附加外循环IC反应器启动试验[J]. 中国沼气, 2004, 22(4): 29-31.

[20] 胡纪萃. 试论内循环厌氧反应器[J]. 中国沼气, 1999, 17(2): 3-6.

(收稿日期: 2005-01-18 编辑: 高渭文)

(上接第47页)

突发性水污染事故时能实现不间断供水。

d. 加强对水源地的保护和监督管理 根据水功能区水环境容量严格实施区域污染物排放总量控制, 确保水源地水质达到功能区划要求。

参考文献:

[1] 龚若愚, 周源岗. 柳江柳州水环境容量[J]. 水资源保护, 2001(1): 31-32.

[2] 杨柳俊. 南通港闸区污水处理厂尾水排放对水环境的影响分析[J]. 水资源保护, 2004(6): 52-55.

[3] 杨柳俊. 阳鸿石油码头水环境风险事故影响评价[J]. 水资源保护, 2005(5): 46-48.

[4] 魏文达. 江河水污染预警预报系统建设模式的探讨[J]. 广西水利水电, 2000(3): 4-8.

[5] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].

(收稿日期: 2004-11-25 编辑: 高渭文)