

水厂生产废水结团凝聚处理的中试研究^{*}

黄廷林 解 岳 丛海兵 任 磊 王峰慧 侯社芽 王惠萍 王 峰

提要 利用结团凝聚技术,以西安市某水厂生产废水为处理对象进行了处理规模为 10~39.5 m³/h 的中试研究。研究结果表明,用结团凝聚技术处理水厂生产废水是完全可行的,且具有处理效率高、出水水质好、排泥浓度高等特点。当原水含水率在 98.53%~99.95% 范围内变化时,水力负荷可达 4.45~17.25 mm/s,出水浊度 2~20 NTU,连续排泥含水率 93.8%~96%,排泥可直接进入脱水机脱水;相应的工艺操作参数为:PAM 投量为 2.2~4.7 mg/g 干泥,PAC(Al₂O₃)投量为 1 mg/g 干泥。

关键词 结团凝聚 流化床 PAM PAC 水厂生产废水

近年来,随着水资源供需矛盾的日益突出及水环境污染的不断加剧,水厂生产废水的治理与回用日益受到关注。水厂生产废水主要来自滤池反冲洗水和沉淀池排泥水,其所含的主要杂质是粘土颗粒及在水处理过程中投加的水处理药剂。传统的处理工艺是混凝-沉淀-浓缩-脱水或浓缩-脱水,传统工艺处理效率低,构筑物多,占地面积大。近几十年来,一种高效的固液分离技术——结团凝聚技术得到了系统、深入的研究^[1~6]。本试验研究是在实验室小试研究基础上,将结团凝聚技术应用于水厂生产废水处理的中试研究。

1 工艺原理

1.1 结团凝聚机理

在传统的絮凝工艺中,脱稳颗粒的碰撞结合完全是一种随机的过程。Vold 模型认为,絮体成长过程是脱稳颗粒向既成絮体的逐一附着过程。Sutherland 模型认为,絮体成长过程不仅存在着脱稳颗粒向既成絮体的逐一附着过程,而且存在着高倍既成絮体间的随机结合。他们还分别用计算机对絮体成长过程进行了定量化模拟,得出了各自模型的数学表达式,Vold 模型和 Sutherland 模型的表达式分别为下两式。

$$\begin{aligned}e &= 1.813 \times 10^{-2} d_f^{-0.676} \\e &= 1.3 \times 10^{-3} d_f^{-1.1}\end{aligned}$$

^{*}陕西省教育厅重点产业化培育项目(01ZC21)。

- 渗滤液. 给水排水, 1996, 22(5): 15~18
- 3 Knox K. Leachate treatment with nitrification of ammonia. Water Res, 1985, 19(7): 895~904
- 4 邹莲花,等. 城市生活垃圾填埋场渗滤液处理的试验研究. 给水排水, 1996, 22(5): 13~14
- 5 Burton S A Q, et al. Ammonia and nitrogen fluxes in landfill site: Applicability to sustainable landfilling. Waste Manage and Res, 1998, 16(1): 41~53
- 6 沈耀良. 废水处理中的几种廉价吸附剂. 重庆环境科学, 1995, 17(3): 49~53
- 7 高俊敏,等. 沸石在水处理中的应用. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(1): 114~117
- 8 中国科学院地质研究所著. 沸石矿物与应用研究, 北京: 科学出版社, 1979
- 9 Curkovic L, et al. Metal ion exchange by natural and modified zeolite. Water Res, 1997, 31(6): 1379~1382
- 10 何杰,等. 动态法研究天然沸石去除氨氮效果. 水处理技术, 1999, 25(6): 358~361
- 11 楼莉萍,等. 沸石吸附铵离子的若干性质的研究. 浙江大学学报, 2001, 27(1): 28~32
- 12 孙家寿,等. 天然沸石吸附剂除铅性能. 武汉化工学院学报, 1998, 20(3): 32~36
- 13 王罗春,等. 垃圾填埋场渗滤液回灌及其影响. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1): 44~46
- 14 古阶祥. 沸石. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980
- 作者通讯处: 100084 清华大学环境科学与工程系
电话: (010) 62771129 (0) 13601095026
E-mail: jianguoj@mail. tsinghua. edu. cn
收稿日期: 2002-10-17

式中 ρ_e ——絮凝体有效密度, g/cm^3 ;

d_f ——絮凝体粒径, cm 。

从以上两式可以得出相似的结论,即随着絮凝体粒径的增大,其有效密度呈负指数关系急剧下降,其综合沉降性能不可能随粒径增大而大的提高。两种模型中 Sutherland 模型由于考虑了高倍粒子间的结合,反映了颗粒结合时的随机排列导致絮体内部空隙率随粒径增大而提高的传统絮凝过程的特点,更符合实际絮凝体的成长过程。但是,要从根本上提高絮凝体的沉降性能,就必须改变上述两种模型所描述的传统絮凝工艺中絮凝体的成长模式。

要改变上述模型给出的 ρ_e 与 d_f 关系所表述的传统絮凝过程絮体的成长模式,其关键就是通过施加外力对絮体成长过程进行干预,使初始粒子按逐一附着方式实现最大限度的有序排列。在结团凝聚工艺中,脱稳后的低倍粒子进入高体积浓度的结团体泥渣悬浮层,并附着在既成絮体表面。在上升水流和机械搅动的联合作用下,絮体颗粒受到了水流剪切力、颗粒间的摩擦力、挤压力等外力的作用,迫使随机附着在絮体表面的在这些外力作用下被动地移向最佳附着点或脱落后重新附着,大大降低了低倍絮体粒子附着的随机性,使絮体的成长过程始终处于一种被动的有序、规则成长状态,形成结构密实的球形絮凝体——结团絮凝体。

附加外力同时会引起絮体的破碎,因此需要投加助凝剂以增加絮体内部的结合强度,阻止絮体的破碎。当絮体增大到一定程度时,附加外力与内部结合力达到平衡,絮体不再增大。因此,脱稳的低倍粒子、高体积浓度下搅拌产生的附加外力和助凝剂对絮体内部结合力的提高是结团凝聚技术的关键。

1.2 上向流流化床中的平衡

在上向流流化床中存在着颗粒运动平衡和物料平衡。运动平衡指的是结团体悬浮层的上升速度等于水流上升速度与絮体颗粒拥挤沉速之差,可用式(1)表示:

$$u_b = u_w - u_f \quad (1)$$

式中 u_b ——悬浮层上升速度, cm/s ;

u_w ——水流上升速度, cm/s ;

u_f ——絮体颗粒拥挤沉速, cm/s 。

根据爱因斯坦方程,颗粒拥挤沉速 u_f 与平均自由沉速 u_p 的关系满足式(2):

$$u_f/u_p = (1 - V_f)^n \quad (2)$$

式中 u_p ——絮凝体颗粒平均自由沉速, cm/s ;

V_f ——絮体颗粒体积分数;

n ——指数。

根据阿兰(Allen)公式,颗粒的自由沉速为 $u_p = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_w)^2 g^2}{\mu_w} \right]^{1/3} d_f$, 其中 ρ_p 为絮体颗粒视密度; ρ_w 为水的密度,取 $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$; g 为重力加速度, $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 。考虑到 $\rho_p - \rho_w = \rho_e$,则由式(2)可得:

$$u_f = 25.75 (1 - V_f)^n (\rho_e^2 / \mu)^{1/3} d_f \quad (3)$$

物料平衡指的是进出悬浮层的固体物料质量相等,可用式(4)表示:

$$C_0 u_w A = \left[u_b V_f \rho_p - \rho_w \left(u_b V_f - \frac{C_0 u_w}{s} \right) \right] A + C_t u_w A \quad (4)$$

式中 C_0, C_t ——进出水浓度, g/cm^3 ;

ρ_p ——絮体视密度;

s ——固体颗粒干密度,取 2.65 g/cm^3 ;

A ——悬浮层过水断面面积, cm^2 。

忽略 C_t , 式(4)可简化为: $u_b = 0.623 C_0 u_w / V_f \rho_e$ 。将 u_b, u_f 代入式(1),得到悬浮层的平衡关系:

$$u_w = \frac{25.75 (1 - V_f)^n V_f \rho_e^{5/3} d_f}{(V_f \rho_e - 0.623 C_0) \mu^{1/3}} \quad (5)$$

运行中,进水量(u_w)、进水水质特别是悬浮固体浓度(C_0)、搅拌强度和投药量(影响 ρ_e, d_f)的改变都会改变悬浮层的平衡状态,但是处理系统本身的自适应功能,将保证一旦原有平衡状态破坏后,能够在新的条件下达成新的平衡。

2 试验系统及试验内容

2.1 试验系统

中试装置示意图见图1。设计时对装置进出水方式、搅拌器形式、悬浮层高度等进行了充分的比较和计算,以确保絮体颗粒受到均匀的附加外力和脱稳初始粒子在悬浮层中有足够的停留时间。用活塞泵投加混凝剂和助凝剂,投加混凝剂是为了使颗粒进

一步脱稳形成初始粒子,因而混凝剂的投加点应离开流化床一定距离,保证颗粒有足够的脱稳凝聚时间,但距离不宜太大,否则会形成高倍粒子。投加助凝剂的目的是为了增强初始粒子与絮体的结合强度,其最佳投加点应在流化床的入口处,既能使助凝剂均匀分散,又能保证初始粒子和絮体表面对助凝剂都有一定的吸着率,提高两者间结合强度,避免过早投加形成高倍粒子。

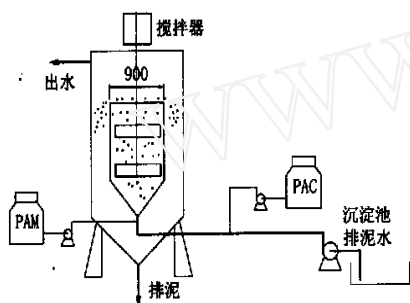


图1 试验装置示意

2.2 混凝剂和助凝剂

混凝剂为固体聚合氯化铝(PAC), Al_2O_3 有效含量23%,投加浓度5%。助凝剂为聚丙烯酰胺(PAM),分子量100万,投加浓度0.1%~0.3%。

2.3 试验水样

试验是在西安市某水厂进行的,水样为该水厂沉淀池排泥水,含水率为98.53%~99.96%,颗粒电位-16.5 mV,pH为7.6。

2.4 试验内容

本项研究是在已完成的实验室小型动态试验研究基础上进行的,其目的是验证在现场中试条件下结团凝聚技术处理水厂生产废水的可行性;优化工艺操作条件和控制参数,为该技术应用于生产实际和技术设备的产业化提供依据。试验研究的内容包括:确定悬浮层中适宜的水流上升流速、机械搅拌强度以及混凝剂及助凝剂投加量、浓缩泥渣排放条件,考察试验系统抗水力负荷和水质变化的冲击能力,提出主体处理设备的处理系统的改造设计方案。

3 试验结果及分析

3.1 PAM投加

投加PAM能大大增大絮体内部的结合强度,从而大幅度提高结团絮凝体承受外部致密作用力的能力。随着PAM投量的增加,形成的球状结团絮凝体

的有效密度。不断提高,粒径 d_f 也有所增大,絮体沉降性能显著改善,悬浮层体积分数 V_f 增大。但投加量增加到一定程度时,附着到结团体上的PAM达到饱和状态,再增加投量作用不大,也不经济。现场试验条件下,获得的PAM适宜投量为2.2~4.7 mg/g干泥。

3.2 PAC投加

投加混凝剂PAC是为了使水中颗粒脱稳凝聚,形成适宜的初始粒子。虽然水厂生产废水中的颗粒在前置水厂净化过程中已经过脱稳,但有时其电位仍能维持较高的数值(可达-16.5 mV),产生一定的静电排斥作用。造成废水中颗粒具有较负的电位的原因是多方面的,其中生产废水的再度混合与输送搅拌是重要原因之一,且絮体在输送过程中破碎严重,在此条件下投加混凝剂可起到进一步脱稳、形成理想初始粒子的作用,否则出水浊度偏高。试验所得的适宜PAC(Al_2O_3)投量为1 mg/g干泥。

试验过程中,为了考察PAC投量对结团体致密过程和出水效果的影响,根据出水浊度的变化情况,对水厂生产废水(处理系统进水)中颗粒的电位进行了不定期测定(测定仪器:ZEEMOM2C-2000型ZETA电位仪)。结果发现,当水中颗粒电位在-10 mV左右时,无需投加PAC仍能获得良好的处理效果。投加PAC对结团体的致密过程影响不显著,但对较高电位下的出水水质(浊度)影响显著。另外,由于水厂生产废水中固体颗粒的电位大多数情况下在-10 mV左右,此时PAC投加与否对系统的处理效果影响不大。

3.3 悬浮层中的搅拌强度

流化床中施加的机械搅拌和高体积浓度流化床中上升水流产生的水力搅拌作用是有效形成结团絮凝体的必要条件。随着搅拌强度的提高,结团絮凝体形成的致密作用力增强,其有效密度随之提高,但絮体粒径 d_f 由于剪切作用的增强有所减小。适宜的搅拌强度应该是保证形成既有较高的密度又有较大粒径,以获得具有最佳沉降性能结团絮凝体为目标所对应的搅拌强度。试验条件下,得出的适宜搅拌强度为6~10 r/min。

3.4 水流上升速度

固体颗粒在悬浮层中的停留时间为 $T = \frac{V_f H(1 -)}{C_0 u_w} s$, 其中 H 为悬浮层高度, 为结团体空隙率。当进水固体浓度 C_0 较高时, 为了保证停留时间和出水水质, 必须降低水流上升流速 u_w , 增加悬浮层体积分数 V_f 。从表 1 可看出, 随着处理系统进水含水率的提高, 可获得更高的上升流速。

表 1 部分试验结果

序号	进水流量 / m ³ /h	上升流速 / mm/s	进水含水率 / %	出水浊度 / NTU	排泥含水率 / %	PAM 投量 / mg/g 干泥
1	10.2	4.45	98.53	20	93.77	2.5
2	14.6	6.37	98.92	12	94.60	2.8
3	17.0	7.42	99.11	19	95.15	3.2
4	20.0	8.73	99.31	21	95.40	4.0
5	31.7	13.84	99.56	18	95.42	2.9
6	26.5	11.57	99.62	8	95.62	3.6
7	28.7	12.53	99.71	2	95.65	4.7
8	30.5	13.32	99.91	7	95.60	2.2
9	35.5	15.50	99.92	6	96.00	4.3
10	39.5	17.25	99.96	5	94.90	4.7

当水流上升流速 u_w 较低时, 尽管水力搅拌作用减弱, 但较高的悬浮层体积浓度增强了絮体间的摩擦、挤压等致密作用力, 强化了絮体的致密过程。从表 1 可看出, 随着水流上升流速的减小, 颗粒密度加大, 排泥含固量提高。

3.5 进水固体浓度

当进水固体浓度变化较小时, 出水水质稳定, 浊度均低于 10 NTU。进水浓度过高时, 出水浊度偏高 (20 NTU)。尽管在较高的进水固体浓度条件下, 为了保证足够的结团体形成时间, 在较大程度上降低了水流上升流速, 但相对而言, 进水固体浓度的提高并没有造成水流上升速度的同比例降低。1 # 和 10 # 试验的进水固体浓度相差了 37 倍, 而水流上升速度仅相差了 3.9 倍。

3.6 抗冲击负荷能力

现场试验还对设备的抗冲击负荷能力进行了试验研究: 在原水含水率基本稳定的条件下, 出水量在 10 s 内变化幅度可达 23 m³/h; 在处理水量基本稳定的情况下, 进水含水率可从 99.96 % 降到 98.53 %, 两种情况下的出水水质相对于进水固体浓度而言在

短时间波动较小(对废水处理而言, 一般情况下出水浊度在几十个 NTU 以下均能满足处理要求), 说明设备有很强的抗水量、水质冲击负荷的能力。但当水质水量变化较大时应及时调整投药量, 以使悬浮层达到新的平衡。否则, 将会破坏结团絮凝体的形成条件和结团体悬浮层的运动平衡条件, 导致出水水质恶化, 不能正常发挥结团凝聚的优越工艺性能。在此试验条件下, 通过提高 PAM 投量, 处理系统 2 min 内即能恢复稳定, 达成新的平衡状态。

4 结论与建议

(1) 用结团凝聚技术处理水厂生产废水是可行的。当原水含水率在 98.53 % ~ 99.96 % 范围内变化时, 适宜的 PAM 投量为 2.2 ~ 4.7 mg/g 干泥, PAC (Al₂O₃) 投量为 1 mg/g 干泥, 搅拌强度 6 ~ 10 r/min, 水流上升流速 4.45 ~ 17.25 mm/s, 排泥含水率 93.8 % ~ 96 %, 投加 2 mg/g 干泥左右的 PAM 后, 排泥可直接进入脱水机脱水。

(2) 处理设备抗水质水量冲击负荷能力强。

(3) 建议: 为了保证系统的稳定运行, 应尽可能采用自动投药和排泥设备, 根据进水情况自动调整投药量和排泥量。

参考文献

- 黄廷林, 曹. 管式絮凝器用于结团凝聚工艺的研究. 西安冶金建筑学院学报, 1991, 23(2): 213 ~ 221
- 黄廷林, 曹. 投药条件对结团凝聚工艺的影响. 西安冶金建筑学院学报, 1991, 23(4): 404 ~ 411
- 黄廷林, 曹. 结团体致密的动力条件研究. 西安冶金建筑学院学报, 1993, 25(1): 53 ~ 59
- 黄廷林. 结团体流化床的运动平衡. 给水排水, 1996, 22(3): 8 ~ 11
- 黄廷林. 结团造粒流化床中造粒动力条件研究. 给水排水, 1998, 24(5): 25 ~ 29
- Tambo N, Wang X C. The mechanism of pellet flocculation in a fluidized-bed operation. J Water SRT - Aqua, 1993, 42(2): 67 ~ 76

作者通讯处: 710055 西安建筑科技大学环境与市政工程学院
电话: (029) 2202729 (O)

E-mail: huangtinglin @263.net

王峰慧 侯社芽 王惠萍 王 峰

710054 西安自来水公司

修回日期: 2002-10-8

ABSTRACTS

Ammonia Nitrogen Removal from Refuse Landfill Leachate by Zeolite Adsorption Process Jiang Jianguo et al (6)

Abstract : Facing the problem of high ammonia nitrogen contained refuse landfill leachate treatment and to reduce the cost of this treatment , a laboratory bench-scale study of zeolite adsorption process was explored for the feasibility and efficiency. By the experiment it was found that a NH_3 - N removal of 78 % was obtained under conditions of zeolite granule size of 30 ~ 16 orders and that the potential adsorption capacity was 15.5 mg NH_3 - N per gram of zeolite. In case of the same adsorption time , zeolite size and leachate flux , higher inflow NH_3 - N concentration is , higher adsorption speed is obtained. It is believed that as adsorption agent for NH_3 - N removal from refuse landfill leachate , zeolite could be feasible.

Pilot Study on Pellet Coagulation Process Treating Wastewater in Waterworks Huang Tinglin et al (9)

Abstract : A pilot plant of pellet coagulation (PC) process with capacity of 10 ~ 39.5 m^3/h was carried out to treat wastewater of a waterworks in Xi'an. The experimental results show that PC process , which is characterized with high hydraulic load , good effluent quality , and high sludge concentration , can be well used to treat waterworks wastewater. For this facility in case when the raw wastewater has moisture content of 98.53 % ~ 99.95 % , the hydraulic load , effluent turbidity and moisture content of the drained sludge are 4.45 ~ 17.25 mm/s , 5 ~ 20 NTU and 93.8 % ~ 96.0 % respectively. The outlet sludge of this plant could be transfer direct into dewatering machine. The dosages of PAM and PAC(A1203) are controlled at 2.2 ~ 4.7 mg per gram of dry sludge respectively.

On Power Consumption of Catalyse Electrolytic Removal of COD and NH_3 - N from Refuse Leachate

..... Wang Min et al (13)

Abstract : The impact factors on the specific power consumption and current efficiency of COD and NH_3 - N removal , such as the material of electrode , the current density , the gap between electrodes and the specific electrolytic area for electrolyte were studied. The study proved that removal rate increased and the specific power consumption for COD and NH_3 - N removals decreased in case of reduced gap between electrodes and adoption of SPR anode. Also higher removals were obtained in case of higher current density and specific electrolytic area , however , the specific power consumption increased at the same time.

A Study on the Inherent Shortcomings and Countermeasures of the A^2/O Process Zhang Jie et al (22)

Abstract : The inherent shortcomings of A^2/O process , thereinto the contrary competition of nitrifying bacteria , denitrifying bacteria and polyphosphate accumulating organisms for organic loading , sludge age and carbon sources impeded the promotion of their application for N and P removal. Many experts conducted a lot of studies and exploited many processes. But until now the overall effect of biological nutrient removal is not good enough. The authors of this paper think that it is needed to develop new processes whose carbon source is PHB and develop a dual-sludge system , in which the nitrifying bacteria and denitrifying bacteria shall work separately. Theoretical bases and concrete introduction shall be provided for the practical application of A^2/O processes.

Ultrasonic Abatement of Aqueous Trace Level Pollutants : Polychlorinated Biphenyls Zhang Guangming (30)

Abstract : The sonolysis of aqueous polychlorobiphenyls (PCBs) at trace level was investigated. Operative parameters including the frequency and intensity of ultrasonic , ambient temperature and saturating gases were examined. Pseudo first-order-rate constants of PCBs degradation under various conditions were obtained. The results showed that sonolysis could degrade aqueous PCBs effectively , and 358 kHz was the best frequency. Application of combined Ar and O_2 as saturating gas , and usage of small size probe could enhance sonification significantly.

Research on the Operational Characteristic of HCR in the Treatment of Petrochemical Wastewater

..... Zhang Dongshu et al (41)

Abstract : A pilot plant experiment of high-loaded compact reactor (HCR) treating petrochemical wastewater was presented in the paper and the operational feature of the HCR was studied. The experimental results showed that HCR had high oxygen transfer rate , quick start-up ability , high sludge loading and great buffering capacity. Compared with the conventional process , HCR could be efficiently reduce the construction cost of the wastewater treatment facility and mitigate the shortage of land resource.

Application of Hydrolysis-Coagulation-Combined Aeration Tank for Dyeing-Printing Wastewater Treatment

..... Qi Peishi et al (44)

Abstract : A composite process composed of hydrolysis-coagulation-combined aeration tank was applied for dyeing-printing wastewater treatment . The performance showed that the effluent could meet the national discharge standard ,