

含沙高浊水最佳絮凝条件的确定

李冬梅^{1,3}, 施周¹, 金同轨², 王和平³, 梅胜³

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 广东工业大学建设学院, 广东 广州 510643)

摘 要: 在含沙量为 $85\text{kg}/\text{m}^3$ 的悬浊液中投加阳离子高分子聚合物, 研究不同絮凝条件下絮体的自由沉速、结构密实程度、浑液面沉速与上清液余浊等的变化规律。利用“分维”作为定量控制参数研究含沙高浊水絮凝效果达最佳时的絮凝条件(如搅拌速率、搅拌时间、高分子浓度等), 探讨了最佳絮凝条件下不同原始泥沙浓度对絮体分形结构的影响规律。实验得出 $85\text{kg}/\text{m}^3$ 泥沙絮体结构密实性达最佳时的水力剪切强度 Gt 值存在两个临界值: 快速絮凝阶段 $Gt_1=2350$, 慢速絮凝阶段 $Gt_2=12420$ 。

关键词: 含沙高浊水; 絮体; 絮凝条件; 分形结构; 分形维数; Gt 值

中图分类号: TV149; TU991.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2006)03-0015-04

絮体结构和形态在很大程度上影响着水处理流程的运行工况、最终出水质量和成本费用。而絮体的结构受絮凝条件的制约。本文以“分维”作为定量控制参数, 借助沉降技术及图像分析技术对不同絮凝条件下含沙量为 $85\text{kg}/\text{m}^3$ 的悬浊液架桥絮体的形态学参数进行分析与研究, 探讨最佳絮凝条件的确定方法与思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试验装置

材料与试验装置见文献^[1]。

1.2 分析方法

絮体形态学特征: 絮体经临界点干燥仪干燥后再经喷金处理采用扫描电镜摄像确定。

絮体当量粒径 d_{50} : 通过体视显微摄像仪测试絮体的长轴与短轴得到。

絮体沉速 V_{∞} : 由沉降实验测得的单个絮体在单位时间内的沉降高度并利用絮体当量粒径与容器筒径修正求得^[2]。

絮体有效质量密度: 从被测絮体的沉速和当量球体直径根据下式^[3]计算得到:

$$V_{\infty}^2 = \frac{4d_{50}g}{3\rho_l C_d} (\rho_c - \rho_l) \quad (1)$$

式中, V_{∞} 是修正后的絮体终了沉速; C_d 是当量球体的阻力系数。

分维: 根据不同絮凝时间(10s、50s、3min、10min)拍摄的絮体照片及沉降实验数据分别计算絮体的二维分维 D_2 与质量分维 D_3 ^[1]。

2 结果与讨论

2.1 最佳搅拌速率的确定

含有一定比例悬浮固体的高浊度水, 在混凝与絮凝过程中对搅拌速度有着特殊的要求。控制搅拌速度能提供工程上所需要的某种密实程度的絮体(具有较高的分维值 D)^[4]。

2.1.1 最佳快速搅拌速率 r_1

图1 PDA 动态监测结果表明: 在剪切速率过高(450r/min) 过低(120r/min) 时形成的絮体易于破碎。而搅拌速率为 300r/min 时, R 比值上升至最高值后, 下降速度最缓慢, 絮体破碎率最低。因为在流场剪切强度很高(450r/min) 时, 絮凝体周围的水力紊动强度大(406s^{-1}), CP 链可能断裂, 泥沙颗粒与/或絮体间的结合键被打断而形成散碎的絮体。进入慢速絮凝阶段后, 长时间搅拌使散碎絮体在运动过程中通过颗粒本身所带的 CP 对它的二次吸附, 形

收稿日期: 2005-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50078043)

作者简介: 李冬梅(1972-), 女, 博士后, 主要研究方向为水处理理论与技术; 联系电话: 020-87253120; E-mail: ldm108@163.com。

成了再次稳定散碎的絮体,因而不絮凝。悬浊液中絮体粒径分布偏差很大($\sigma=113.4$),絮团密实程度低($\rho_s=1244 \text{ kg/m}^3$)。慢速絮凝结束后,可观察到浑液面沉降速度慢($u=0.79 \text{ mm/s}$),静沉 20min 测得的上清液余浊高($C_e=697 \text{ NTU}$),分维值最小($D_3=1.86$),絮体结构松散脆弱(见图 2(a)),絮凝效果差。

当搅拌速率较低(120r/min)时,由于搅拌强度不够,CP 链蜷缩在悬浊液中的某些局部区域,像张“网”一样卷扫着周围的泥沙颗粒,形成粒径较大的絮体。快速搅拌 10s 结束后,一部分泥沙颗粒还处于原始粒子状态。小絮体与颗粒之间或小絮体之间的结合键较弱,在较长时间的剪切絮凝条件下,絮体容易破碎,粒径迅速下降(图 1)。在凝聚与破碎到达相对平衡态时,小絮体之间很松散地“挨”在一起(见图 2(c)),絮凝体分维值低。

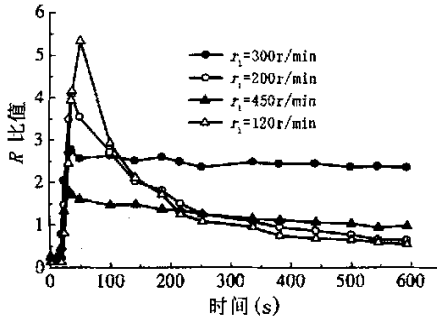


图 1 R 比值随絮凝时间的变化

Fig.1 Ratio R versus flocculation time

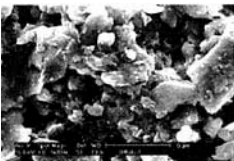


图 2(a)

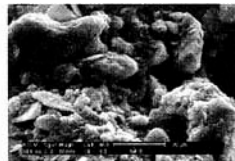


图 2(b)

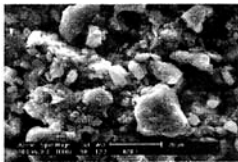


图 2(c)

图 2 稳定态时泥沙絮体分形结构扫描照片(放大倍数为 1000X)

Fig.2 Scanning electron micrograph of fractal structure of mudsands aggregates at stable state

而搅拌速率为 300r/min 时,有效剪切速率使絮体不断经受着絮凝-破碎-再絮凝,使仍较脆弱的絮体片段重新排列或使絮体内部的颗粒重新分布。絮体与泥沙颗粒及小絮体不断接触碰撞、渗透,以 RLCA 模式生长。大量 CP 链深入到整个悬浊液中,成为絮体

间或颗粒间的连接“骨架”而发生有效架桥絮凝。絮团内部紧密连接,形成长程交联网而不被水力剪切破碎。这种网状泥沙絮体粒径较大,致密度高($\rho_s=1367 \text{ kg/m}^3$,图 2(b)),悬浊液中絮体粒度分布较均匀,偏差最小($\sigma=91.1$),分维值最高($D_3=2.07$)。从静沉实验观察得到,浑液面沉降速度快($u=1.39 \text{ mm/s}$),静沉 20min 测得的上清液余浊低($C_e=427 \text{ NTU}$),泥沙颗粒的 CP 架桥絮凝效果最好。

2.1.2 最佳慢速搅拌速率 r_2

在 $r_1=300 \text{ r/min}$ 时,改变慢速絮凝强度: $r_2=70 \text{ r/min}$ 、120r/min、180r/min。实验证明,转速为 120r/min 时浑液面沉速最快,上清液余浊也最低(图 3)。或高或低的搅拌速率(70r/min、180r/min)絮凝形成的絮体结构密实程度较差,平均质量分维 D_3 下降(图 3),絮凝效果相对较差。

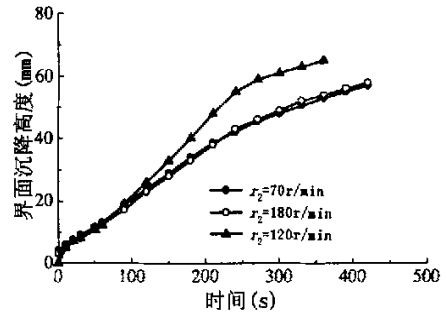


图 3 浑液面沉降高度随时间的变化

Fig.3 Settling height of turbid liquid layer versus time

较长时间的慢速絮凝系动强度直接影响着絮体的分形构造。强度不够时,絮体之间或絮体与颗粒之间不能有效碰撞与互相渗透;而强度过大时,絮体将会破碎,不利于形成沉降性能较好的絮体。

2.2 最佳剪切时间的确定

2.2.1 最佳快速搅拌时间 t_1

在最佳剪切强度($r_1=300 \text{ r/min}$, $r_2=120 \text{ r/min}$)下,图 4 PDA 动态监测结果表明:快速絮凝时间过短(5s)或过长(50s)均不能使絮凝效果达到最佳状态。

在快搅时间为 10s 时, R 曲线下降速率较慢,上清液余浊最低。此时,絮体内部牢固吸附着许多小絮体,小絮体在絮体内部紧密填充、结合,絮体孔隙率小,密实程度高,分维值最大($D_2=1.90$)。时间过短(5s)时,CP 链来不及均匀分散到悬浊液中与颗粒表面接触。进入慢速絮凝阶段后,泥沙颗粒表面覆盖的 CP 链不均匀,絮体孔隙率增加,絮凝效果降低,分维值下降($D_2=1.88$)。而时间过长(50s)时,架桥絮体会在较高的搅拌强度下破碎,小絮体间不能相互有效聚

结而处于分散状态。进入慢速絮凝后, 由于周围流场的作用及仍具一定活性的 CP 链的吸附能作用下, 小絮体之间又互相粘结, 但此时絮体结构孔隙率较高, 密度较小, 上清液余浊最高, 絮团内部处于高度分散的状态, 分维值下降 ($D_2=1.87$)。快速絮凝时间过长或过短均会产生相对较脆弱的絮体构型, 该种絮体分维值均比 10s 情况下的分维值要小。

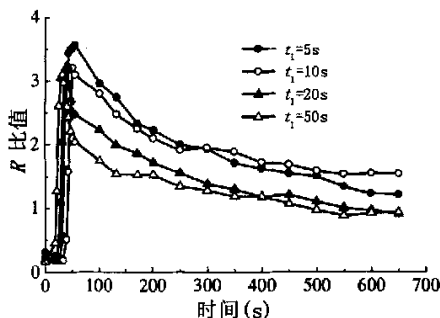


图4 R 比值随絮凝时间的变化

Fig.4 Ratio R versus flocculation time

2.2.2 最佳慢速搅拌时间

在最佳快速搅拌强度下 ($r_1=300\text{r/min}$, $t_1=10\text{s}$), 在慢速絮凝时间为: 0s、50s、3min、10min 时, 絮体分维值首先呈增加趋势, 增至某一值后又以微小的幅度下降。当絮凝过程进行到一定阶段 (180s), 分维值达最大 ($D_2=1.83$, $D_3=2.15$), 絮体结构的密实程度达最佳 (絮体结构的动态演变过程见文献^[9]), 对应的孔隙率最小, 粒度分布最集中, 沉速也最快。

因此, 对于实际高浓度悬浊液处理工程, 利用“分维”作为定量控制手段合理控制絮凝阶段的剪切强度与时间很重要。否则絮体分形结构的最佳密实性会改变, 影响着絮体的沉降性能与后续的污泥脱水效果。

从上面的讨论可知, 快速与慢速絮凝阶段的速度梯度与絮凝时间存在临界值, 该值能使絮体的分形结构密实程度达最佳状态。因此得出对应的操作参数 Gt 值也存在两个临界值: 快速絮凝阶段 $Gt=2350$, 慢速絮凝阶段 $Gt=12420$ 。在临界絮凝条件下, 泥沙絮体的混凝性能与沉降性能良好, 对应的平均质量分维值高。

2.3 CP 浓度对絮体沉降性能与密实性的影响

实验发现: 当 CP 浓度从 1% 变化到 0.01% 时, 泥沙絮体的最佳絮凝状况发生在 0.1% 的浓度, 它不仅使泥沙絮体粒径较大且分布较集中, 且生成的絮体构造孔隙率最低, 相同絮凝时间下形成的絮体的

分维值 (D_3 , 0.1%=2.07) 相对要高。

在 CP 浓度为 1% 时, 观察到有大量原始泥沙粒子存在且絮体粒径随时间变化不大, 整个絮体形态的改变不明显。这是因为, 在短暂的快速絮凝阶段, 大量 CP 链由于高浓度带来的粘度较大的问题使架桥絮凝发生在局部而不能深入到整个悬浊液中, 一部分 CP 链发生“空”架桥絮凝。在慢速絮凝阶段, 絮团内部保持较差的连接, 没有形成长程交联网^[9]。泥沙絮体致密度较低, 沉速下降, 上清液余浊较高 ($C_e=823\text{NTU}$), 分维值较低 (D_3 , 1%=1.98)。而在 0.01% 浓度时, 实验中观察到所有原始泥沙粒子几乎全部消失, 架桥絮凝有效。因为 CP 使絮体表面带上了与泥沙颗粒表面不同符号的电荷, CP 链与颗粒构成的絮团间有着更强的静电吸引力。浓度较低时, CP 链的吸附速率与伸展速率均增加。链在溶液中会占据较大体积, 一条链可能不仅仅与一个泥沙颗粒发生架桥絮凝作用^[7], 泥沙颗粒与链充分接触, 絮凝效果较好, 上清液余浊低 ($C_e=262\text{NTU}$)。但 CP 浓度较低 (0.01%) 时, 形成的架桥絮体孔隙率较高, 整个絮团的生长机理是聚集体—聚集体架桥, 泥沙絮团密度下降, 分维值较低 (D_3 , 0.01%=1.93)。另外, CP 浓度较低时, 如要达到同样的处理效果, 需要稀释许多倍, 严重浪费水资源, 所以选择合适的 CP 浓度很重要。

另外, 当 CP 浓度较高时 (1%), 絮体粒径到达峰值的时间滞后 (约为 50s)。CP 链由于高粘度的影响导致吸附速率与伸展速率明显降低, 短暂 (10s) 的快速搅拌不能使 CP 链完全伸展到泥沙颗粒表面, 部分已得到架桥絮凝的絮体内含有大量的原始泥沙粒子, 絮体粒径小, 内部孔隙率低。随着剪切絮凝的进行, CP 链逐渐伸展到泥沙颗粒表面, 生成了孔隙率相对较大的絮体构造, 分维降低。当絮凝与破碎达相对平衡态时, 分维又进一步提高, 絮体密实。所以, 当 CP 浓度较高时, 快速絮凝时间需延长。

3 原始含沙量对絮体分形结构的影响规律

在最佳絮凝条件下, 改变悬浊液的原始含沙量 (30kg/m^3)。实验结果表明^[9], 原始含沙量变化时的絮体分形结构的动态演变过程与 85kg/m^3 时基本一致。但原水含沙量较高时的絮体结构要密实些, 表现在絮体的分维显著提高。正如 La Mer 模型^[10]与 Serge Stoll 计算机模拟^[11]的由覆盖面积确定絮凝概率一样, 吸附到 CP 链上的颗粒数主要影响着絮凝速率, 在某种程度上影响着絮体的结构。含沙量越高,

絮凝速率越快,在 CP 链较强的架桥作用能与吸附能的共同作用下,颗粒与絮体能获取较多链的表面覆盖,形成的絮体孔隙率低,对应的“分维”值也越高。

4 结 论

不同絮凝条件下分形絮体的形态学参数,如絮体自由沉速、孔隙率、浑液面沉速与上清液余浊存在明显的差异,“分维”可作为定量控制参数控制絮凝效果达最佳时的水力剪切条件。在快速与慢速絮凝阶段的水力剪切强度 Gt 值存在两个临界值:快速絮凝阶段 $Gt=2350$,慢速絮凝阶段 $Gt=12420$ 。在临界絮凝条件下,絮体粒径较大,悬浊液中絮体粒度分布较均匀,偏差最小;浑液面沉速高,上清液余浊低;絮体分形构造的密实程度高,分维值高。高分子浓度较高时,快速絮凝时间需延长。在最佳操作条件下,不同原水含沙量对絮体分形结构的影响规律基本一致。但原水含沙量越高,絮体结构越密实,分维显著提高。

参考文献:

[1] 李冬梅,金同轨,梅胜,等.含沙高浊水架桥絮体的质量分形[J].

中国给排水,2004,20(11):52-54.

- [2] 卢寿慈主编.工业悬浮液-性能、调制及加工[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [3] P Tang, J Greenwood, J A Raper. A model to describe the settling behavior of fractal aggregates [J]. J Colloid Interface Sci., 2002, (247):210-219.
- [4] Serge Stoll & Jacques Buffle. Computer simulation of flocculation progresses: the roles of chain conformation and chain /colloid concentration ratio in the aggregate structures [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, (205):290-304.
- [5] 李冬梅,等.黄河泥沙架桥絮体分形结构的动态演变研究[J]. 给水排水,2004,30(11):1-5.
- [6] M Elimelich, J Gregory, X Jia, R Williams. Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation[M]. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995.
- [7] S F Sun. Physical chemistry of macromolecules: Basic principles and issues[M]. Wiley- Interscience, New York, 1994.
- [8] 李冬梅.黄河泥沙架桥絮体的分形特性研究[D].西安建筑科技大学博士学位论文,2004.
- [9] La Mer V K. Rheological phenomena of clay sols in connection with the charge distribution on the micelles [J]. Discuss Faraday Soc., 1966, (42):248-257.

DETERMINATION OF OPTIMUM FLOCCULATION CONDITIONS IN HIGH TURBID WATER CONTAINING SAND

Li Dong-mei^{1,2}, Shi Zhou¹, Jin Tong-gui², Wang He-ping³, Mei Sheng³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China)

Abstract: Through dosing cationic polymer into turbid suspended liquor containing 85kg/m^3 of mud sand, the changing regularities of floc's free settling rate and structure compact degree, turbid liquid surface settling rate, and residual turbidity of supernatant under the conditions of different flocculations were studied; "fractal dimension D" was used as qualitative control paramant to study the flocculation conditions, such as stirring rate, stirring time, polymer concentration under which the flocculation efficiency of high turbid water containing sand is optimum; the influence of different initial concentration under the condition of optimum flocculation on floc's fractal structure. The experiment derived that hydraulic shearing strength Gt value when the structure compactness of floc containing 85kg/m^3 mud sand reaching the optimum has two critical values: Gt_1 in quick flocculation stage= 2350 , Gt_2 in slow flocculation stage= 12420 .

Key words: high turbid water containing sand; bridging floc; flocculation condition; fractal structure; fractal dimension; Gt value

简 讯

沙特阿拉伯将建世界最大海水淡化工厂

首尔讯,韩国斗山重工及建筑业集团公司于日前称,它已经赢取 8.5 亿美元的订单,在沙特阿拉伯修建全世界最大规模的海水淡化厂和一处热电站。此项目要求斗山集团修建一处每天能生产 88 万吨淡水的工厂,供 300 万人饮用。此外,项目还包括修建一处 917 兆瓦的热电站。项目将于 2009 年 6 月全部完成,预计总共占地 110 公里,全部设施将修建于吉达南部及位于面向红海的沙特阿拉伯西部。从该工厂制造出的淡水和电能将供给伊斯兰教的麦加圣地和麦地那圣地。斗山官员说:斗山集团修建的海水淡化工厂占全球市场的 25%。它现正在修建第八座工厂,其中大部分都地处中东地区。

(张 浩)