

武若冰, 王东升, 李涛. 2008 絮体性能及其工艺调控的研究与进展 [J]. 环境科学学报, 28(4): 593-598

Wu R B, Wang D S, Li T. 2008 A critical review on floc structure strength and process control [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 28(4): 593-598

# 絮体性能及其工艺调控的研究与进展

武若冰, 王东升\*, 李涛

中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2007-03-20 录用日期: 2008-01-10

**摘要:** 絮体结构和强度特征是絮凝过程的重要参数. 在简要回顾絮体分形结构研究的基础上, 对絮体结构与强度的测定方法、絮体结构形成的影响因素及其工艺调控的研究进展进行了概括性介绍. 结合部分实验研究, 着重讨论了水力条件对于絮体性能的影响和絮体重组、历史的演化机理. 结果表明, 逐步增强的水力剪切条件有助于改善絮体的结构和强度.

**关键词:** 絮体结构; 絮体强度; 分形; 工艺调控

文章编号: 0253-2468(2008)04-593-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

## A critical review on floc structure strength and process control

WU Ruobing, WANG Dongsheng, LI Tao

State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 20 March 2007 accepted 10 January 2008

**Abstract:** Floc strength and structure are particularly important parameters in flocculation. In this paper, the fractal theory of floc structure is briefly addressed. The current situation in the research on floc structure and strength measurement, the parameters that influence floc characteristics and control of the floc formation process are critically reviewed. Combined with experimental results, specific attention has been paid to the relationships among hydraulic conditions, floc structure and floc strength. These results indicate that gradually increasing shear can improve the structure and strength of flocs. Finally, the mechanism of floc restructuring and floc history is discussed.

**Keywords:** floc structure; floc strength; fractal aggregates; process control

### 1 引言 (Introduction)

絮体结构和强度是絮凝工艺中最重要的基本参数之一, 对水处理效率有着重要影响. 分形能较好的反映絮体的结构特征 (Thill et al., 2000; Jiang et al., 1996; Bushell et al., 2002), 但由于絮体形成过程的复杂性, 要精确描述该过程仍存在较大困难. 颗粒物组成和物理化学条件均会影响絮体的结构和强度特征 (Li et al., 2006). 絮体强度主要取决于颗粒间结合键的强弱 (Tambo et al., 1979; Bache et al., 1997), 包括单个结合键的强弱及键的个数. 絮体内部键能的加大和密度增加, 均会使絮体强度加大. 当絮体表面应力大于絮体内部结合键的强度时, 絮体将发生破碎 (Boller et al., 1998). 迄今为

止, 已有大量关于絮体结构和强度的研究, 本文将对絮体结构、强度的测定方法和影响条件及其工艺控制的研究进展进行较系统的论述.

### 2 絮体结构测定及其工艺调控 (Floc structure measurement and control)

絮体结构与水力条件、絮凝机理等有密切联系. 实际水处理过程中的絮体通常应该被考虑为具有 2~3 个特征分形维数, 或者说具有多重分形结构 (Jarvis et al., 2005; Wu et al., 2002). 絮体分形结构的测量方法、影响因素和调控方法已成为目前研究的重点和热点.

#### 2.1 絮体结构研究方法

2.1.1 实验研究 基于实验的研究手段主要包括:

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 20477054, 50578155)

Supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 20477054, 50578155)

作者简介: 武若冰 (1982-), 男; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: wgd@cee.ac.cn

Biography: WU Ruobing (1982-), male; \* Corresponding author, E-mail: wgd@cee.ac.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光散射技术、沉降技术和二维影像分析技术等。光散射技术是基于 Rayleigh-Gans-Debye (RGD) 散射理论:

$$I(Q) \propto Q^{-D_f} \quad (1)$$

式(1)中,  $I(Q)$ 是散射强度,  $Q$ 为光强矢量,  $D_f$ 为絮体分形维数。

光散射技术的准确性主要受被测定颗粒的粒度范围影响, 过高浓度的悬浊液也会影响测定结果。因此, 目前光散射主要应用于单分散体系的测量。由于构成实际絮体的初始颗粒物的成分非常复杂, 而且有不同的光折射率, 因此将该方法用于实际絮体尚存在不少局限。对于粒径较小的无机颗粒物与腐殖酸絮体, 光散射方法较好地反映了这类絮体的结构特征 (Li et al., 2006; Yu et al., 2006)。但该方法对于天然有机物体系尚不适用 (Jarvis et al., 2005)。

沉降法是根据絮体在沉降过程中的一些参数而通过计算得到絮体结构特征的一种方法。

$$v = \frac{d_0^{-D_f} d^{D_f-1} (\rho_s - \rho_l) g}{18\mu} \quad (2)$$

式(2)中,  $v$ 是最终的沉降速度,  $d_0$ 为初始颗粒的直径,  $d$ 为絮体的直径,  $\rho_s$ 为颗粒的密度,  $\rho_l$ 为液体的密度,  $\mu$ 为悬浊液的粘度系数,  $g$ 为重力加速度,  $D_f$ 为分形维数。将公式(2)取对数, 就可以通过迭代法计算絮体的分形维数 (Johnson et al., 1996)。

与其它两种方法相比, 沉降法可以应用于大多数絮体的测定, 特别是大颗粒絮体。絮体的孔隙率也会对测定结果产生影响。此外, 必须使颗粒的最终沉降过程处于层流状态。

影像分析法利用显微镜及影像分析软件测定絮体的分形维数 (Chakraborti et al., 2003; Li et al., 2006)。通常有两种计算途径, 一是通过颗粒的面积和特征长度的关系, 作面积对特征长度的双对数曲线后得到的斜率值即为二维分形维数值; 二是通过影像的计盒法得到二维计盒维数。但是, 影像分析方法只能有效的计算出絮体的二维投影维数, 而不能计算三维分形维数。此外, 由于该方法需要选取大量样本, 因此, 在实际应用中受到较多的限制。

2.1.2 理论与数值模拟研究 上文所述方法均是根据实验观测结果对分形维数进行计算, 但是由于实验手段或仪器的限制, 上述方法并不能完全满足

实际的需要。

1981年, Witten等发展了扩散限制聚集模型 (Diffusion Limited Aggregation), 由此揭开了颗粒聚集过程数值模拟的先河。此后又进行了诸多改进, 发展出扩散受限絮团聚集模型 (Diffusion Limited Cluster-Cluster Aggregation)、反应受限聚集模型 (Reaction Limited Aggregation)和反应受限絮团聚集模型 (Reaction Limited Cluster-Cluster Aggregation)。这4个模型相结合, 较为完整的模拟了实际状态下的颗粒聚集过程。前两种模型主要反映了快速聚集过程, 所形成的絮团的分形维数为 1.7~1.8。后两种模型主要针对慢速聚集过程, 所形成絮团的分形维数为 1.9~2.1。

尽管数值模拟手段大大加深了人们对于颗粒聚集过程的认识, 但毕竟是计算机根据既定规则而进行的迭代过程, 并不能替代理论研究。针对影像分析只能得到二维分形数据的缺陷, Lee等总结出以下公式用于预测三维分形维数 (Lee et al., 2004)。

$$D_3 = 1.391 + 0.01 e^{164D_2} \quad (3)$$

式(3)中,  $D_3$ 为三维分形维数,  $D_2$ 为二维分形维数。该预测方法所得到的三维分形维数与光散射方法所得的分形维数非常吻合。L等 (2005)发展了根据絮体的粒径分布预测絮体分形维数的计算方法, 克服了以往计算方法需要假设絮体粒径分布需要满足幂律分布的缺陷并用该方法研究了活性污泥絮体。研究表明, 随着污泥龄的增长, 活性污泥絮体的结构越来越密实, 且适当的搅拌有利于形成较为密实的活性污泥絮体。但由于该方法的基本假设是絮体结构是严格的自相似结构, 因此, 仍需要进行进一步的研究与改进。

由于絮体形成过程从本质上可以看成是处于平衡态的胶体在一定的物理化学条件作用下逐步转化为远离平衡态的有序结构, 即分形结构的过程。因此, 统计力学是研究此种变化过程的有力手段。作者基于统计力学的观点, 从理论上推导了絮体的分形结构并得出絮体的分形维数与絮体所接受的能量成正比, 即湍流条件下所形成的絮体较为密实, 而较弱的水力剪切条件下形成的絮体较为疏松的结论。

2.2 絮体形成的影响因素与工艺调控

水质、水温、投药量和水力条件等都会影响絮

体性状,絮体调控就是通过研究这些条件对絮体性状的影响,找出最适合的工艺条件.水力条件主要通过影响颗粒物之间的碰撞以及颗粒物与聚集体之间的相互作用影响絮体的性状.絮凝速率正比于水力剪切强度.剪切力越大,絮体越密实.但是由于颗粒的结合与破碎同时存在,如果混合太过剧烈,反而会影响颗粒的有效碰撞.因此,合理选择水力剪切的梯度,才能得到性状良好的絮体.

由于绝大多数絮体的内部结合力不仅仅限于范德华力,因此,其生长具有明显的不可逆性(Gregory et al., 2004).该现象表明,絮体一旦发生破碎,将很难恢复,从而将对后续的工艺产生不利影响.因此,制备高强度的絮体是工艺调控的重点. Francois用絮体的多级生长模型解释了高岭土-铝絮体在不同剪切条件下破碎后其粒径不能恢复到原有水平的问题(Francois, 1987). Gregory(2004)提出了絮体恢复指数用以表征絮体可逆性程度的大小. Spice等(1998)发现结构紧密的絮体中,由于内部颗粒之间紧密粘附,因此颗粒间的排斥力达到最小值,从而提高了絮体的强度.从这个角度看,絮体强度与结构的调控是统一的.但是传统的循环剪切,由于破碎过程所施加的剪切力过大,会产生许多较小的聚集体并影响最终的出水效果.由于絮体对水力条件的变化是敏感的,所以在絮体形成过程中以较小的梯度逐步增加剪切力,可能会促使絮体发生重组,改善絮体的结构和强度特性.后文中将通过作者的实验结果对此进行较为详细的说明.

混凝的物化条件通过影响静电排斥和范德华引力的平衡而影响混凝效率.一般来说,颗粒浓度增加,絮体的孔隙率变小,絮体的抗剪切力增强. Bouyer等通过研究不同 pH值对粘土-铝絮体性状的影响,表明在同样的水力条件下, pH=3.5时絮体的平均粒径是 pH=5时的两倍大.原因是 pH的增加减弱了初级颗粒间的作用力,从而增加了絮体的强度(Bouyer et al., 2005). pH值还通过影响金属混凝剂的水解速率,从而决定了所生成的水解产物的种类、数量和所带的电荷,因此,在不同的 pH值下会产生不同大小和密实程度的絮体.对于铝系混凝剂而言, pH值的最佳范围介于 7.2~7.6之间(Gregory et al., 2003). Matsu的研究表明,随着 pH和铝盐剂量的增加,颗粒脱稳和絮体形成的时间减少(Matsu et al., 1998). pH也控制了化学反应的

化学计量,影响了颗粒及混凝剂的表面电荷,从而影响了颗粒表面和混凝剂之间的吸附动力学趋势.

水温的高低对混凝效果也有明显的影响.这主要是由于水温对于 pH水的粘度有明显影响,比如硫酸铝,当水温低于 5℃时,水解的速度变得非常缓慢.此外,水温低,水的粘度大,水流的剪切力也增大;导致颗粒布朗运动减弱,胶粒间的碰撞几率减少,不利于已脱稳胶粒的相互絮凝,影响絮体的形成和长大.

关于絮体结构的变化,目前主要存在絮体重组(floc structure)与絮体历史(floc history)两种理论.前者认为絮体水力搅拌条件和絮体之间的碰撞可能导致絮体内部的结合键发生重组,从而使得絮体结构发生变化(Thill et al., 1998).絮体重组发生在絮凝的各个阶段,但初始阶段的絮体较稳定后的絮体更容易发生重组.此外,由于粒径较小的絮体通常被卷入到水力搅拌所形成的漩涡,而不是被其侵蚀,因此小絮体的重组并不明显(Thill et al., 2000).后者认为絮体的结构与絮体以往的形成过程(比如是否经过破碎)有密切联系(Coufort et al., 2005).但是对于这两种作用的机理,目前仍存在较多的争论.

根据 DLA等数值模型,絮体内部存在着许多孔洞而且这些孔洞通常被位于其外围的分支结构所阻挡,从而使其不能与外界的颗粒物接触.当其外围分支结构被破坏时,外界的颗粒物便可能进入絮体内部,从而使得絮体结构更加密实.而由于在高水力剪切条件下絮体破碎的可能性较高,所以这样条件下形成的絮体中的内部孔隙也就有更多的机会被外界的颗粒物所填充,因而其分形维数就相对较高.絮体破碎阶段的分形维数明显高于其他阶段,可能也与该原因有关.作者认为这可能是絮体重组的另一个机理.作者的实验也支持这一结论.图 1显示了笔者所做实验中在不同机理情况下絮体的分形维数(武若冰, 2007).

粒度上达到平衡的絮体仍有使得其结构更加密实的潜力.由于絮体对水力条件变化的敏感性,在“40+60”的条件下,絮体表面的结合键比其他水力条件下形成的絮体的表面结合键更容易被破坏.因此,絮体内部的孔洞暴露出来并被填充,絮体变得更加密实.下一节将会看到,这种结构上的变化将带来絮体强度的明显改善.

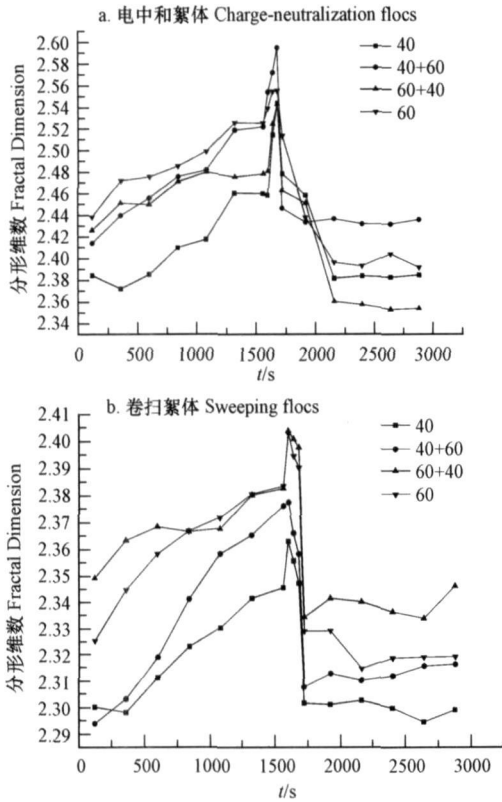


图 1 对照实验组中絮体分形维数变化特征

Fig 1 Fractal dimensions of flocs in the control experiment

(以“40+60”为例,混凝实验按如下方式进行:200 r·min<sup>-1</sup>的速度快搅 1m<sup>in</sup>在快搅启动的同时投加混凝剂,接下来分别以 40、45、50、55 r·min<sup>-1</sup>和 60 r·min<sup>-1</sup>的速度进行各 5m<sup>in</sup>慢搅,25m<sup>in</sup>慢搅结束后,以 400 r·min<sup>-1</sup>的转速进行 2m<sup>in</sup>破碎,最后,以 40 r·min<sup>-1</sup>的转速进行 20m<sup>in</sup>的絮体恢复过程,其他实验类似于“40+60”的进行过程,只是具体的搅拌条件有所不同。

Taking the “40+60” as an example, flocculation experiments were carried out as follows: rapid mixing at 200 r·min<sup>-1</sup> for 1 min and then the required amount of alum was added to the beaker at the beginning of rapid mixing, then followed by slow stirring at 40 r·min<sup>-1</sup> for 5 min, followed by a further slow stirring at 45 r·min<sup>-1</sup>, 50 r·min<sup>-1</sup>, 55 r·min<sup>-1</sup> and 60 r·min<sup>-1</sup> for 5 min each. After that a breakage stage at 400 r·min<sup>-1</sup> for 2 min was used and finally the flocs were allowed to reform for 20 min at 40 r·min<sup>-1</sup>. The other processes are similar to “40+60”.)

### 3 絮体强度及其实验研究 (Floc strength and experiment study)

迄今为止,絮体强度的测定方法主要分为宏观和微观两类方法,宏观测定方法主要是依据絮体的粒径与水动力条件间的关系,是目前研究絮体强度的主要手段。

#### 3.1 研究方法

絮体强度因子是一种直接利用絮体粒径表征

絮体强度的方法 (Jarvis et al., 2005),如式(4)所示。

$$\text{絮体强度因子} = \frac{d(2)}{d(1)} \times 100 \quad (4)$$

式(4)中, d(1)为破碎前絮体的稳定平均粒径(μm),而 d(2)为絮体破碎后的稳定平均粒径(μm),该因子越高,表明絮体具有越强的抗剪切能力,且絮体强度与絮体粒径成反比。

强度因子所需的参数较少,使用方便,因此,得到了广泛的应用,但是,由于不同研究中使用了不同的破碎剪切条件,因此,很难直接将不同研究得到的强度因子值相比较,关于这方面的研究,到目前为止尚没有公认的结果。

由于絮体的破碎与其所受到的剪切能量有关,因此,有如下经验公式(5) (Sharp et al., 2006)。

$$\log d = \log C - \gamma \log G \quad (5)$$

式(5)中, d是絮体的直径(μm), C是表征絮体强度的常数, G为平均速度梯度(s<sup>-1</sup>), γ为稳定絮体粒径常数,与絮体破碎模式及微涡旋的尺度有关, log C仅适用于在固定的剪切速率或实验条件下比较絮体的强度,对一固定的剪切速率, log C越大,絮体强度越强,但是不同实验中并不能用 log C来比较絮体的强度,同时它也不能提供在增加的剪切速率下絮体的强度信息,这信息可由 γ提供, γ越大,随着剪切力的增加,絮体越易破碎。

如果用搅拌浆的平均转速(RPM)代替速度梯度 G可得其改进形式(Sharp et al., 2006)。

$$\log d = \log C - \gamma \log RPM \quad (6)$$

Bache等研究了高岭土-铝絮体(Bache et al., 1989)和腐殖酸-铝絮体(Bache et al., 2001),推导出一个计算絮体强度的理论公式。

$$\frac{1}{4} \pi d^3 \sigma = 2 \times \rho_w \cdot \frac{\pi}{6} \eta^3 \times \sqrt{3} \frac{\epsilon^{3/4}}{\nu^{1/4}} \quad (7)$$

式中, d为絮体粒径(μm); σ为絮体强度(N·m<sup>-2</sup>); ρ<sub>w</sub>为水的密度(kg·m<sup>-3</sup>); η为水的粘度(N·s·m<sup>-2</sup>); ν为运动粘度(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>); ε为能量耗散(N·m·s<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>)。计算结果表明,在高的 G<sub>av</sub>值下,絮体粒径较小但强度较大,此外,根据该公式, Bache等人还得出混凝剂存在一个最佳投药量,这个投药量的两端絮体强度都会下降。

Bache等人虽然得到了一个用于确定絮体强度的理论方法,但仍存在一些缺陷:没有引入分形的概念以及将絮体完全考虑成固体,虽然絮体具有固体的某些特性,但由于絮体内部含有较高的水分,

因而又具有某些流体的特性,因此将絮体视为黏滞性较高的流体是较为合适的.结合宾汉切应力(Yang 2003)得到式(8):

$$\tau_B = 1.1 \frac{(d_i/d_0)^{D_F-3} \left( \frac{F}{d_0} \right)}{1 - (d_i/d_0)^{D_F-3}} \quad (8)$$

式(8)中,  $\tau_B$ 为宾汉极限切应力,  $D_F$ 为絮团分形维数,  $F$ ,  $d_i$ 和  $d_0$ 分别代表了初始颗粒物间的结合力、初始颗粒物和稳定颗粒物的直径.絮体的强度便可以由式(8)计算得到.

宏观方法所得的强度结果均为相对指标,不能表征絮体的绝对强度.因而近几年出现了直接测定单个絮体间作用力的研究.该技术最大的优点在于直接测定絮体,因而能够得到絮体如何破碎及哪个部位发生破碎等信息.微观方法主要包括通过测定使絮体发生破碎所需的拉伸力而得到的微观机理手段(Micromechanical approach)(Yeung et al., 1996; Yeung et al., 1997)和利用光敏纤维将处于载玻片上的絮体压迫至破碎以测定絮体强度的微观操作方法(Micromanipulation)(Zhang et al., 1999).

### 3.2 电中和絮体的强度

表1显示了作者所作中絮体的强度因子和恢复因子(武若冰, 2007).

表1 絮体的强度因子和恢复因子

Table 1 Strength factor and recovery factor of flocs

对照实验组 Control experiment	强度因子 Strength factor	恢复因子 Recovery factor
40+60	46	63
60+40	37	50
40	18	37
60	40	67

表1中的强度因子表明,“40+60”条件下形成的絮体具有较好的强度和可恢复性.根据式(8),絮体的强度的计算结果如表2所示.

表2 根据方程(8)计算所得的絮体强度

Table 2 Strength of flocs before breakage calculated by equation (8)

对照实验组 Control experiment	$d_i/\mu\text{m}$	$d_0/\mu\text{m}$	$D_F$	$\tau_B$
40+60	397.376	4	2.54	0.0091F
60	380.121	4	2.52	0.0089F
60+40	446.927	4	2.48	0.0065F
40	595.708	4	2.45	0.0049F

根据表2所示,在电中和点所形成的絮体的强

度依次为“40+60”>“60”>“60+40”>“40”.这个结果与表1中所示的结果一致.在递增剪切条件下形成的絮体与其它条件下形成的絮体相比具有较高的强度.絮体强度不仅与初始颗粒之间的结合力有关,而且与絮体中孔隙的分布也有密切关系.在剪切强度逐渐上升的过程中,一些小颗粒或者颗粒的聚集体进入了较大絮体的孔隙内部,因而絮体结构更加密实,最终导致了絮体强度升高.

## 4 展望 (Development directions)

絮体结构与强度是混凝科学研究的重要课题,几十年来一直引起了广泛的关注.但由于絮体自身结构的复杂性,许多问题至今仍然未能彻底解决,需要做更深入的探讨和分析.

1)探索能够反映各种絮体结构和强度表征手段所得结果之间关系的方法至关重要.在此基础上,可以在统一的基础上比较和研究各种方法得出的实验结论,做出统一的评价并总结出相应的规律.光散射方法是一种无损检测,而且便于实现自动化,有望发展成为在线检测技术,用于对实际水处理过程中的絮体结构进行实时监控.此外,实验和计算结果表明将絮体考虑为粘滞性较高的流体也能够得出正确的结论.在此基础上,结合多重分形理论与一些微观表征手段,发展出能够进一步计算絮体内部不同区域应力强度的方法将有助于更深入的分析絮体的破碎位置.

2)统计力学是联系平衡体系与非平衡体系的有效桥梁,在以往工作的基础上,借助统计力学进一步研究多重分形结构将是富有意义的.在此基础上与絮体的强度计算相结合,可以掌握絮体在哪些位置容易发生破碎的信息,从而有针对性的进行改进,提高水处理的效率.此外,从混凝动力学的角度研究絮体的碰撞过程将有可能从另一个角度探讨絮体结构的变化过程及其原因,帮助我们更深入的理解水力条件对于絮体结构的影响并指导实践.

3)在以往研究的基础上,进一步研究改进的循环剪切条件下各阶段的时间以及剪切力增加梯度对絮体强度的影响;找出在得到最优的絮体强度的约束条件下的渐增梯度和各个阶段的持续时间,有可能缩短整个混凝过程所需的时间,对提高水处理设施的效率有积极意义.

责任作者简介:王东升,男,37岁,博士,研究员.目前主要进行微界面水质过程及计算模式、水体颗粒物与沉积物、吸附

絮凝理论、高效纳米絮凝剂和高效水处理工艺技术等方面项目研究。

#### Reference

- Bache D H Rasooli E R 2001 Characteristics of Alumino-Humic Flocs in Relation to DAF Performance [ J ]. *Water Science & Technology* 43 ( 8 ): 203—208
- Bache D H Johnson C McGilligan J F et al 1997. A Conceptual View of Floc Structure in the Sweep Floc Domain [ J ]. *Water Science & Technology* 36 ( 4 ): 49—56
- Bache D H Al-Ani S H 1989. Development of a System for Evaluating Floc Strength [ J ]. *Water Science & Technology* 21 ( 6 ): 529—537
- Bellouti M Alves M M Novais J M et al 1997. Flocs vs Granules Differentiation by Fractal Dimension [ J ]. *Wat Res* 31 ( 5 ): 1227—1231
- Boller M Blaser S 1998. Particles Under Stress [ J ]. *Water Science & Technology* 37 ( 10 ): 9—29
- Bouyer D Coufort C Lin A et al 2005. Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 292 ( 2 ): 413—428
- Bushell G C Yan Y D Woodfield D et al 2002. On Techniques for the Measurement of the Mass Fractal Dimension of Aggregates [ J ]. *Advances in Colloid and Interface Science* 95 ( 1 ): 1—50
- Chakraborti R K Gardner K H Atkinson J F et al 2003. Changes in Fractal Dimension During Aggregation [ J ]. *Wat Res* 37 ( 4 ): 873—883
- Coufort C Bouyer D Line A 2005. Flocculation related to local hydrodynamics in a Taylor-Couette reactor and in a jar [ J ]. *Chem Eng Sci* 60 ( 8-9 ): 2179—2192
- Francois R J 1987. Strength of Aluminium Hydroxide Flocs [ J ]. *Wat Res* 21 ( 9 ): 1023—1030
- Gregory D Carlson K 2003. Relationship of pH and Floc Formation Kinetics to Granular Media Filtration Performance [ J ]. *Environ Sci Technol* 37 ( 7 ): 1398—1403
- Gregory J Yuliseken M A 2004. The reversibility of floc breakage [ J ]. *Int J Miner Process* 73 ( 2-4 ): 251—259
- Jarvis P Jefferson B Parsons S A 2005. Floc structural characteristics using conventional coagulation for a high to low alkalinity surface water source [ J ]. *Wat Res* 40 ( 14 ): 2727—2737
- Jarvis P Jefferson B Parsons S A 2005. Breakage regrowth and fractal nature of natural organic matter flocs [ J ]. *Environ Sci Technol* 39 ( 7 ): 2307—2314
- Jiang Q Logan B E 1996. Fractal dimension of aggregates from shear devices [ J ]. *JAWWA* 80 ( 2 ): 1040—1046
- Johnson C P Li X Y Logan B E 1996. Settling Velocity of Fractal Aggregates [ J ]. *Environ Sci Technol* 30 ( 6 ): 1911—1918
- Li T Zhu Z Wang D S et al 2006. Characterization of floc size strength and structure under various coagulation mechanisms [ J ]. *Powder Technol* 168 ( 2 ): 104—110
- Li X Y Leung R P C 2005. Determination of the fractal dimensions of microbial flocs from the change in their size distribution after breakage [ J ]. *Environ Sci Technol* 39 ( 8 ): 2731—2735
- Matsui Y Yuasa A Furuya Y et al 1998. Dynamic Analysis of Coagulation With Alum and PACl [ J ]. *JAWWA* 90 ( 10 ): 96—106
- Sha P E L Jarvis P Parsons S A et al 2006. The Impact of Zeta Potential on the Physical Properties of Ferric-NOM Flocs [ J ]. *Environ Sci Technol* 40 ( 12 ): 3934—3940
- Spicer P T Parsons S E Raper J et al 1998. Effect of shear schedule on particle size density and structure during flocculation in stirred tanks [ J ]. *Powder Technol* 97 ( 1 ): 26—34
- Tambo N Hozumi H 1979. Physical characteristics of flocs II: strength of flocs [ J ]. *Wat Res* 13 ( 5 ): 421—427
- Thill A Veerapaneti S Simon B et al 1998. Determination of structure of aggregates by confocal scanning laser microscopy [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 204 ( 2 ): 357—362
- Thill A Lambert S Moustier S et al 2000. Structural interpretations of static light scattering patterns of fractal aggregates [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 228 ( 2 ): 386—392
- Waite T D 1999. Measurement and Implications of Floc Structure in Water and Wastewater Treatment [ J ]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects* 151 ( 1-2 ): 27—41
- Wu R B 2007. Floc structure strength and control [ D ]. Beijing Research Center for Eco-Environmental Science 27—50 ( in Chinese)
- Wu R M Lee D J Waite T D et al 2002. Multilevel structure of sludge flocs [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 252 ( 2 ): 383—392
- Yang T S Xiong X Z Zhan X L et al 2003. On flocculation of cohesive fine sediment [ J ]. *Hydro Sci Eng* 25 ( 2 ): 65—77
- Yeung A Gibbs A Pelton P 1997. Effect of Shear on the Strength of Polymer Induced Flocs [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 196 ( 1 ): 113—115
- Yeung A K C Pelton P 1996. Micromechanics: A New Approach to Studying the Strength and Breakup of Flocs [ J ]. *J Colloid Interface Sci* 184 ( 2 ): 579—585
- Yu J F Wang D S Ge X P et al 2006. Flocculation of kaolin particles by two typical polyelectrolytes: A comparative study on the kinetics and floc structures [ J ]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects* 290 ( 1-3 ): 288—294
- Zhang Z Sisk M L Mashmoush Y H et al 1999. Characterisation of the Breaking Force of Latex Particle Aggregates by Micromanipulation [ J ]. *Particle & Particle System Characterization* 16 ( 6 ): 278—283

#### 中文参考文献

- 武若冰. 2007. 絮体结构、强度及其调控研究 [ D ]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 27—50