强化絮凝工艺中絮凝体特征参数分析与研究

常　颖[1]　张金松[2]　王宝贞[1]　汪义强[2]　黄晓东[2]　赫俊国[1]

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,哈尔滨　150090;　2 深圳市水务(集团)有限公司,深圳　518031)

摘要　通过对混凝反应过程中絮凝体特征参数,即粒径分布、平均粒径、分形维数的分析,进行强化絮凝网格与普通网格絮凝型式的比较,从而对絮凝过程中强化絮凝网格的微涡旋及动力学控制指标对絮凝体形成的影响给出定量描述,并以此为基础优化絮凝网格技术,改善混凝处理效果,实现1 NTU的沉后水浊度控制目标。

关键词　强化絮凝　粒径分布　分形维数　絮凝体

在国家863项目——“南方地区安全饮用水保障技术”中提出示范工程出厂水浊度低于0.1 NTU,保证率大于90%的水质目标。在分解目标的浊度控制研究中,为实现出厂水0.1 NTU的水质目标,混凝—沉淀工艺需保证沉后水浊度不大于1 NTU,因此需要保证良好的混凝处理效果。

混凝反应过程中形成的絮凝体质量直接影响着混凝处理效果[1~3],为此,本文主要从优化絮凝形式的角度出发,提出有针对性的絮凝强化控制工艺,通过改善水流条件来创造最佳的絮凝体成长环境,以实现良好的混凝处理效果和相应的浊度控制指标。

1　试验方案

试验在南方某水厂进行,水厂设计规模为35万m^3/d,采用预氧化—混凝(机械混合—普通网格絮凝)—斜管沉淀—砂滤—消毒工艺。该水厂处理低浊、高藻、微污染水库水时,混凝处理效果不佳,致使沉淀池斜管表面极易聚集大量絮凝体,增加了排泥次数及运行管理难度,同时滋生大量红虫,引起水质异嗅异味等。为此,本试验研究在普通网格的基础上,改变絮凝网格的设计及运行控制指标,采用强化絮凝网格技术来优化现有絮凝型式。

强化絮凝网格技术是从微涡旋理论[4,5]出发,通过调整普通网格的孔眼尺寸,控制过网准则数Fr(即弗劳德数,$Fr = v^2/gL$),提供絮凝体颗粒合理有效碰撞的水力条件。当网眼尺度越小时,水流过网的扰动强度降低越多,过网后絮凝体成长越快,形成的颗粒越大越松散、越容易破碎;当网眼尺度越大时,水流过网的扰动越强,形成的颗粒越小、越密实。为了能形成密实而且粗大的絮凝体颗粒,在絮凝各阶段控制不同的网孔尺寸和絮凝速度,即过网准则数Fr,形成沉降性能好的絮凝体颗粒。试验研究运用现代结构表征技术对强化絮凝网格和普通网格的絮凝体特征结构给出定量描述,通过对其各特征参数的分析与比较,从根本上反映试验工艺形成的微涡旋对絮凝体形成的影响;并最终通过实际运行效果对两种型式的絮凝程度给出定性说明。

1.1　试验条件

试验原水为水库水。试验期间原水水质较为稳定,平均浊度5.25 NTU,高锰酸盐指数3 mg/L,TOC 2.5 mg/L,藻类4 000万个/L以上,NH_3-N 0.2~0.3 mg/L,pH 6.5~7.1。试验期间原水浊度的变化曲线见图1。

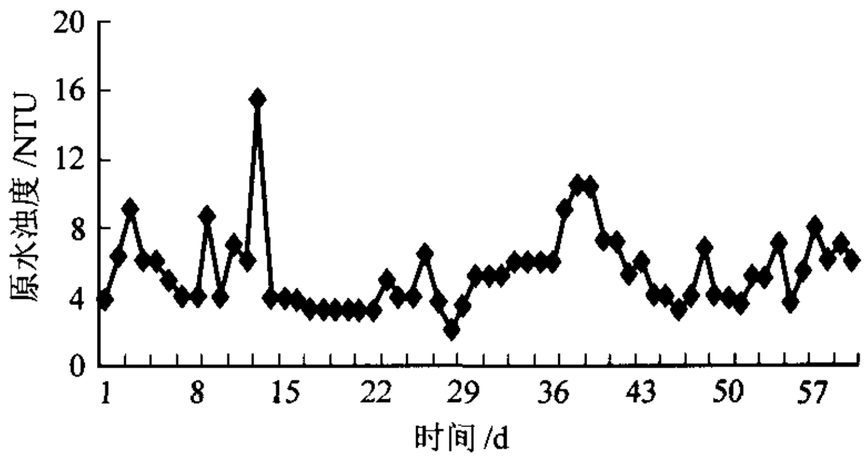

图1　试验期间原水浊度变化

原水采用预臭氧处理,臭氧投加量1.5 mg/L。混凝剂为聚氯化铝(PAC)。

该水厂机械混合池、网格絮凝池和斜管沉淀池为合建式,絮凝池共4组8格,每格设计水量1 800

国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2002AA601120)。

万方数据

m^3/h。试验研究分别选在 4# 和 5# 絮凝池进行，其中 4# 絮凝池装填强化絮凝网格，5# 絮凝池装填普通网格。混合、絮凝时间分别为 0.5 min，14.6 min，共 29 个竖井，每个竖井的反应时间约为 0.5 min。絮凝池内竖井按水流方向排列编号，其形式及对应的絮凝时间分别见图 2 和表 1。

27′	27′	26′	27′	27′	27	27	26	27	27
13′	14′	25′	22′	21′	21	22	25	14	13
12′	15′	24′	23′	20′	20	23	24	15	12
11′	16′	17′	18′	19′	19	18	17	16	11
10′	9′	8′	7′	6′	6	7	8	9	10
混合池	2′	3′	4′	5′	5	4	3	2	混合池

4# 絮凝池　　5# 絮凝池

图 2　4# 和 5# 絮凝池竖井排列形式

表 1　不同竖井对应的絮凝时间

竖井编号	7	11	15	19	21	23	25	27
絮凝时间/min	2.7	4.9	7.0	9.2	10.3	11.4	12.4	13.5

1.2　试验设备布设说明

5# 絮凝池以速度梯度理论设计，竖井内网格布设前密后疏，过网流速分 29 cm/s，23 cm/s 和 5.9 cm/s 三级，对应的网格尺寸分别为 80 mm×80 mm（竖井 2～10），110 mm×110 mm（竖井 11～21），第三级未布设网格（竖井 22～27）。过渡段无整流措施。

4# 絮凝池是基于微涡旋理论，通过对过网准则数 *Fr* 的控制设计的。反应段速度分两级，第一级（竖井 2～26）过网流速为 23.7 cm/s，过网准则数 *Fr* 控制在 0.15～0.3，侧重于絮凝体的碰撞，第二级（竖井 27～过渡段）的过网流速为 5.9 cm/s，*Fr* 控制在 0.05～0.15，侧重于絮凝体的成长。强化絮凝网格的尺寸均为 32 mm×32 mm，通过对网格布设层数及间距的调整控制水流速度。5# 和 4# 絮凝池内的网格均采用不锈钢材质，焊接固定。

1.3　图像分析系统

试验过程中，利用人工从絮凝池中取样，通过摄影仪进行絮凝体的观察和图像采集，并通过 DH－CG400 将图形信息传入计算机，采用 MiVnt 分析软件进行图像解析。整个取样过程需缓慢操作，以防絮凝体破碎。上述图像分析系统可实现对检测颗粒物的几何参数、光密度参数、形态学参数及孔洞等参数的分析，并可对检测数据作进一步的统计分析。

2　试验结果

在确定了最佳强化絮凝工艺的网格布设方案后，通过生产性试验确定混凝剂的最佳投加量为 1.8 mg/L 时，可使试验工艺的沉后水浊度低于 1 NTU。为此，在可实现浊度控制目标的前提下，主要针对 PAC＝1.8 mg/L 时的强化絮凝网格和普通网格的絮凝体特征结构进行比较和分析。

2.1　絮凝体粒径变化分析

从图 3 和图 4 的变化曲线可以看出，沿絮凝池的各竖井，随着絮凝时间的进行，粒径分布曲线逐渐向右推进，在较高的分布范围内絮凝体出现的频率逐渐增多，致使沿着各竖井形成的絮凝体逐渐增大，小粒径絮凝体的比例逐渐减少。

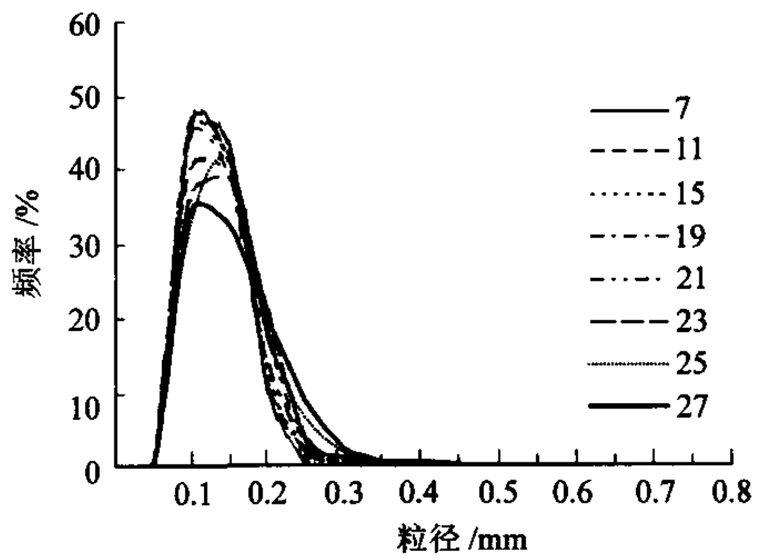

图 3　5# 絮凝池各竖井内絮凝体粒径分布

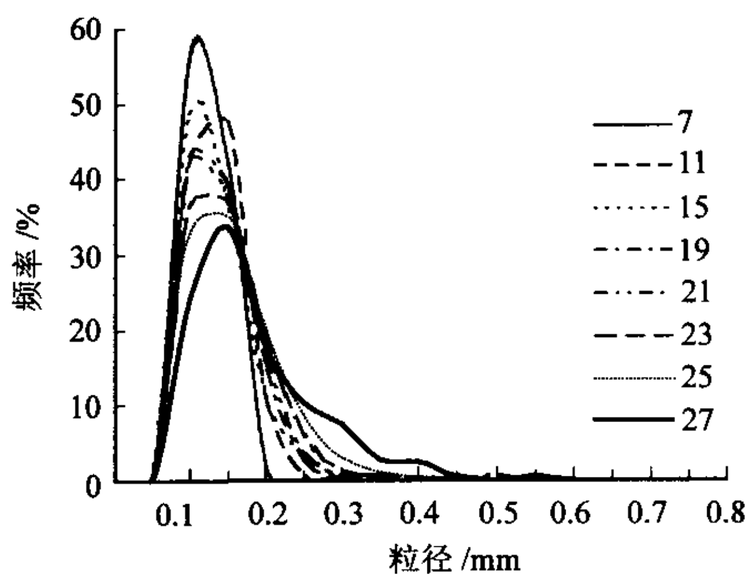

图 4　4# 絮凝池各竖井内絮凝体粒径分布

此外还进行了普通网格和强化絮凝网格絮凝池末端最终形成的絮凝体颗粒的粒径分布对比。从表 2 可以看出，絮凝池末端，絮凝体颗粒主要分布在＜0.2 mm 的粒径范围内，其数量占整个颗粒数量的 70%～80%。通过进一步的比较发现，对于这部分较小的粒径分布范围（＜0.2 mm），强化絮凝网格内形成的絮凝体出现频率要比普通网格的低 38.5%，从而说明强化絮凝网格絮凝最终形成的絮凝体粒径的整体水平较高，进行了较完全的絮凝，必将获得更

万方数据

表 2　5#和 4#絮凝池末端竖井 27 粒径分布对比

分布范围/mm	5#絮凝池/%	4#絮凝池/%	4#高出 5#百分比/%
[0.00,0.10)	34.68	24.30	-29.9
[0.10,0.15)	32.25	33.67	4.4
[0.15,0.20)	20.38	17.72	-13.0
[0.20,0.25)	8.77	10.38	18.4
[0.25,0.30)	2.56	7.59	196.5
[0.30,0.35)	0.54	2.78	414.8
[0.35,0.40)	0.54	2.53	368.5
[0.40,0.45)	0.27	0.51	88.9
[0.45,0.50)	0.00	0.00	—
[0.50,1.00]	0.00	0.51	—

好的混凝处理效果。而对于较大的粒径分布范围，强化絮凝网格表现出更多的出现频率，从而比普通网格絮凝形成了更多较大的絮凝体颗粒。

通过试验发现，在限定水流速度的情况下，通过在絮凝池中进一步强化絮凝网格尺寸，增设多层强化絮凝网格可以增加水流中微涡旋的比例和强度，从而大幅度地提高颗粒碰撞次数；同时微涡旋的离心惯性效应也将大大加速亚微观传质，从而有利于混凝剂的进一步扩散，提高大颗粒絮凝物的比例，有效地提高絮凝程度，改善絮凝效果。

在上述分析的基础上，还进行了普通网格和强化絮凝网格各竖井内絮凝体平均粒径的变化分析。从图 5 可以看出，絮凝初期，强化絮凝网格提供的湍流剪切力较大，形成的絮凝体平均粒径较小，竖井 7 内，普通网格内絮凝体的平均粒径高出强化絮凝网格 10%以上；但随着絮凝的进行，强化絮凝网格的絮凝体逐渐增大，并大于普通网格内的絮凝体，絮凝末端竖井 27 内，强化絮凝网格内的絮凝体平均粒径高出普通网格 15%以上，获得了较大的平衡粒径。

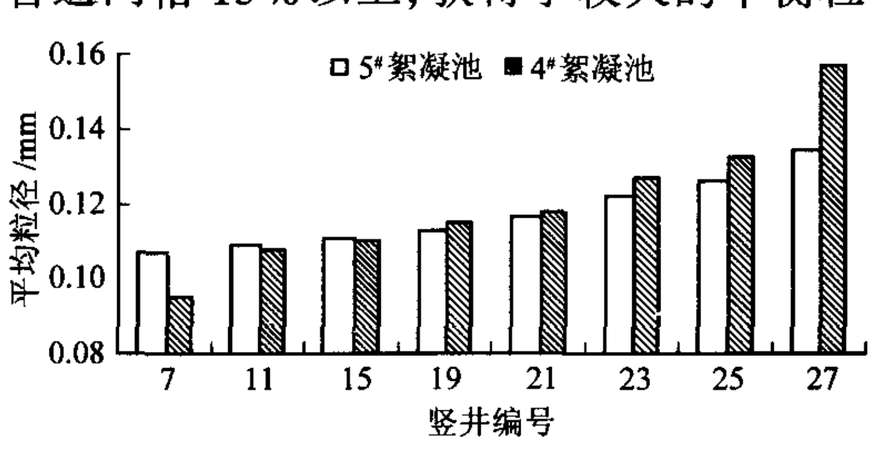

图 5　5#和 4#絮凝池各竖井内絮凝体平均粒径

结果表明，强化絮凝网格布设过程中着重对流态的动力学控制，改善了絮凝过程。絮凝初期，通过加密强化网格层数，强化了初级絮凝条件，为絮凝体颗粒提供了更多的碰撞机会，较大的混合强度使絮凝体快速成长；絮凝后期，水流趋于平缓，絮凝体颗粒进一步长大，从而保证了后续沉淀条件的要求。

2.2　絮凝体分形维数变化分析

为进一步描述强化絮凝网格所创造的水流条件对絮凝体特征结构的影响，应用分形理论分析絮凝体的结构状态。

一般在宏观上分形可看作是大小碎片聚集的状态，是没有特征长度的图形、构造和现象的总称。分形的重要特征在于自相似性和标度不变性。通过对絮凝体的分形构造分析，可以用一个非整数维数来给这些看起来形状复杂而又不规则的颗粒物构建一种数学框架，从而做出定量的描述。

试验过程中，利用图像分析系统测定絮凝体的投影面积(A)，周长(P)，按公式 $A \propto P^{D_f}$ 计算絮凝体的二维分形数(D_f)。一般来说，絮凝体的分形维数值越大，絮凝体就越密实[6~8]。

从图 6 可以看出，絮凝初期，强化絮凝网格的湍流剪切力与惯性力较大，致使絮凝体的密实度较高，分形维数较大；随着絮凝的进行，絮凝颗粒物的逐渐凝聚与添加，其粒径在逐渐增大的同时，密实度也逐渐降低，分形维数减小，结构趋向于松散。

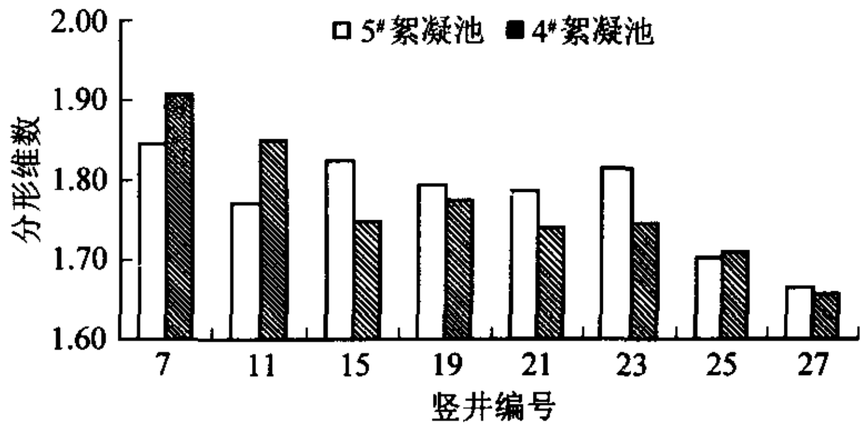

图 6　5#和 4#絮凝池各竖井内絮凝体分形维数

从图 6 还可看出，普通网格内絮凝体密实度的变化不是很平稳，分形维数波动较大，从而反映出其网格布设不合理，未能很好地控制水流条件，致使絮凝体在整个絮凝过程中未能获得良好的成长环境，说明存在着能量上的不合理分配与浪费。

依据 Stokes 公式，絮凝过程中颗粒物的密度与粒径大小成反比关系，即随着颗粒物尺寸的逐渐增大，其密度逐渐减少。图 5 和图 6 就可以很好地表

万方数据

示出这种变化规律。对于强化絮凝网格絮凝形式，其末端的平衡粒径高出普通网格15%以上，如果依据密度-粒径变化公式，其末端絮凝体的分形维数应是较低的，而实际上其末端絮凝体的分形维数却与普通网格基本一致，相差不多，进一步说明采用强化絮凝网格絮凝可获得较密实的絮凝体颗粒。

不同的絮凝池型，对应的水流条件各不相同，形成的絮凝体也各不相同。通过运用现代结构表征技术，可以对絮凝过程中絮凝体的特征结构给出定量描述，从而可以更加直观地反映出水流变化以及各阶段絮凝动力学控制指标对絮凝体形成的影响，以提出合理的控制与描述体系。对于混凝处理效果的分析，应是建立在絮凝体各特征参数，粒径分布、平均粒径、分形维数等综合考虑的基础上，权衡各特征参数的控制水平，以形成沉降性能良好的絮凝体颗粒。

2.3 浊度变化分析

鉴于上述分析可以得出，强化絮凝网格可获得较大及较密实的絮凝体颗粒，为反映其混凝处理效果，还进行了普通网格和强化絮凝网格各竖井内10 min静沉浊度的测定。从图7可以看出，随着絮凝的进行，絮凝程度的加深，静沉浊度逐渐降低。与普通网格相比，絮凝初期，强化絮凝网格并未获得较低的静沉浊度；后期，随着絮凝体的逐渐成长，颗粒的逐渐变大与密实，获得了较低的静沉浊度。絮凝末端竖井27内，强化絮凝网格的静沉浊度低于普通网格近0.5 NTU，同样相应的斜管沉淀池出水低于0.4 NTU，实现了1 NTU的水质目标。

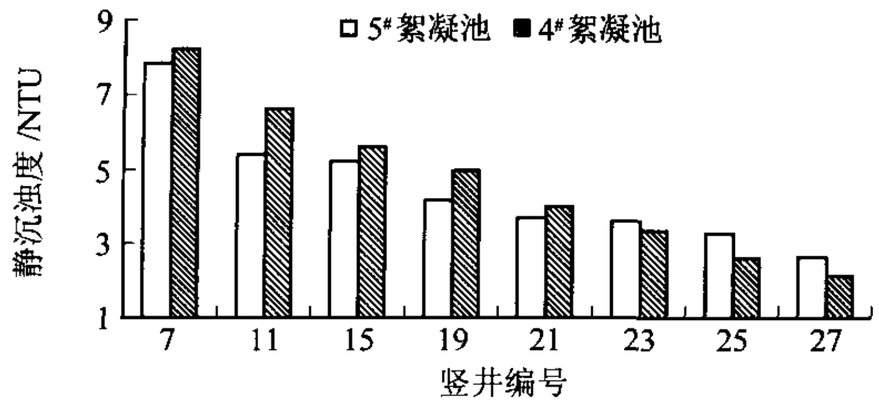

图7 5#和4#絮凝池各竖井静沉浊度

2.4 其他指标

生产性试验期间还进行了其他水质指标的检测，对混凝沉淀处理效果进行了比较。强化工艺在高锰酸盐指数及藻类去除率上分别高出普通网格工艺约3%～5%和3%；同时，其水头损失低，能量利用率高，在设计负荷条件下运行，强化絮凝网格絮凝池的平均水头损失为25 cm，而普通网格絮凝池的平均水头损失为39.5 cm，强化工艺可节约能耗36.7%，从而证明强化絮凝网格技术在同等絮凝能耗下，挖潜能力更大，能量利用率更高。

试验结果表明，采用强化絮凝网格技术处理南方低浊、高藻、微污染水库水具有较好的适应性，比水厂原生产应用的普通网格絮凝具有明显的优势。

3 结论

本试验研究采用先进的图像分析处理技术，对普通网格和强化絮凝网格从微观角度定量描述絮凝体形态和结构，并从宏观角度以实际运行处理效果定性说明絮凝程度，从而反映出采用强化絮凝网格的技术优势。试验研究发现，采用强化絮凝网格可获得尺度大、密实度高的絮凝体，并且在较小的粒径分布区间，强化絮凝网格内形成的絮凝体出现的频率比普通网格工艺低38.5%，从而获得了较完全的絮凝。

参考文献

1 赫俊国，宋学峰，金昌锦，等. 微涡旋混凝低脉动沉淀技术处理低温低浊水. 中国给水排水，1999，15(4)：17～19

2 王鹤立，肖树宏，赫俊国，等. 常规混凝沉淀给水处理工艺的强化. 给水排水，1999，25(6)：1～4

3 王琳，王宝贞，王绍文，等. 用革新技术改善水处理厂运行性能. 环境科学，2000，20(4)：353～356

4 王绍文. 惯性效应在絮凝中的动力学作用. 中国给水排水，1998，14(2)：13～16

5 孙哲，杨基先，赵耀. 关于网格混凝反应机理的几点认识. 哈尔滨建筑大学学报，1998，31(2)：45～49

6 金同轨，张建锋，高湘，等. 黄河泥沙的混凝形态和絮体构造模型问题. 中国土木工程学会水工业分会第四届理事会第一次会议论文集. 宁波. 2002. 184～187

7 肯尼思·法尔科内著. 分形几何—数学基础及其应用. 曾文曲，刘世耀，戴连贵，等译. 沈阳：东北大学出版社，2001. 1～49

8 Da-hong Li, Jerzy Ganczarczyk. Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes. Environ Sci Technol, 1989, 23(11): 1385～1389

○通讯处：150090 哈尔滨工业大学二校区2430信箱

E-mail：acerine@sohu.com

收稿日期：2004－05－08

修回日期：2004－12－26

万方数据