

微涡流絮凝工艺处理低温低浊微污染水的优化

王 艺¹, 戴红玲^{1,2}, 周 政¹, 胡锋平¹, 邱祖民², 徐巧玲¹, 胡文杰¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌大学 资源环境与化工学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 采用微涡流强化混凝工艺处理低温低浊微污染水,并结合正交试验和 CFD 数值模拟进行工艺优化。结果表明,微涡流强化混凝对低温低浊微污染水的处理效果较好,浊度去除率可达到 70% 以上、 UV_{254} 去除率在 40% 以上。影响浊度去除率的因素排序为投配比 > 絮凝时间 > 加药量;影响 UV_{254} 去除率的因素排序为投配比 > 加药量 > 絮凝时间。通过正交试验得到最优工况如下:第 1 絮凝反应室设置 3/5 的 HJTM-2 型涡流反应器和 2/5 的 HJTM-1 型涡流反应器,絮凝时间为 12.6 min,加药量为 40 mg/L,此时微涡流絮凝工艺对浊度和 UV_{254} 的去除率分别可达 85.6% 和 59.0%。数值模拟结果与试验结果一致,3/5 的 HJTM-2 型 + 2/5 的 HJTM-1 型涡流反应器投配组合可在絮凝池上部产生稳定的立体接触絮凝区,降低絮凝池上部涡旋尺度,更有利于低温低浊微污染水的絮凝。

关键词: 低温低浊微污染水; 微涡流絮凝; 工艺优化; 计算流体力学

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0041-08

Optimization of Micro Vortex Flocculation Process for Treatment of Low Temperature and Low Turbidity Micro-polluted Water

WANG Yi¹, DAI Hong-ling^{1,2}, ZHOU Zheng¹, HU Feng-ping¹, QIU Zu-min²,
XU Qiao-ling¹, HU Wen-jie¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Micro vortex enhanced coagulation process was used to treat low temperature and low turbidity micro-polluted water. The process was optimized using a combination of orthogonal tests and CFD numerical simulations. The results showed high removal rates in turbidity and UV_{254} , which was reduced by more than 70% and 40%, respectively. The impact on turbidity removal was vortex reactor dosing ratio > flocculation time > coagulant dosage; the impact on UV_{254} removal was vortex reactor dosing ratio > coagulant dosage > flocculation time. The optimal working condition was using 3/5 of HJTM-2 type vortex reactor and 2/5 of HJTM-1 type vortex reactor in the first flocculation chamber, with a flocculation time of 12.6 min and a coagulant dosage of 40 mg/L. The removal rates of turbidity and

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20192BAB206038、20181BAB206037); 国家自然科学基金资助项目(61872141); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2018-S241)
通信作者: 戴红玲 E-mail: dhl781228@126.com; 胡锋平 E-mail: hufengping22@126.com

UV₂₅₄ were 85.6% and 59.0%, respectively. The numerical simulations results showed consistent with the experiments. The combination of 3/5 HJTM-2 and 2/5 HJTM-1 vortex reactors was effective in flocculation in low temperature and low turbidity water, since a stable three-dimensional contact flocculation zone was formed, and the reduction of vortex scale occurred at the top section of the flocculation tank.

Key words: low temperature and low turbidity micro-polluted water; micro vortex flocculation; process optimization; computational fluid dynamics (CFD)

低温低浊微污染水通常指温度在 10℃ 以下、浊度 < 30 NTU、混凝沉淀困难的一类地表微污染水^[1-4]。其低温低浊特性不利于混凝发生,表现为低温条件下水体黏滞系数大、胶体颗粒运动能力弱、碰撞絮凝困难^[5]。有研究显示^[6-7],低温下铝盐絮体分形维数小、结构松散脆弱、成长缓慢,会造成高投药量和短过滤周期;低浊条件下,水中胶体颗粒数量少,形成絮体细小,难以沉淀分离^[8-9]。为保证出水水质达标,水厂常采用增大投药量或投加助凝剂的方式,然而这种方式成本较高,一方面提高了药剂费用,另一方面产生了大量待处理絮凝污泥^[10],且铝盐混凝剂大量投加存在水质安全隐患。因此,低温低浊水对常规水处理工艺提出了巨大挑战,已成为一个国内外热点问题。

华东交通大学拥有自主知识产权的微涡流强化混凝技术,其核心是 ABS 塑料制成的空心球体涡流反应器,在工程上已有较为广泛的应用^[11-13],因其在常规水力絮凝池内设置扰流组件——涡流反应器,增加了水中微小涡旋的比例,产生类似异向絮凝中布朗运动的颗粒碰撞方式,大大促进了胶体颗粒脱稳凝聚,提升了絮凝效果,从而使其处理低温低浊微污染水成为可能。然而由于其絮凝流态复杂不清、机理不明,使其在工程应用上缺少指导性,难以有效控制絮凝流态。

近年来,随着计算流体力学(CFD)软件的发展成熟,絮凝动力学和絮凝流态可视化得到了广泛研究^[14-16]。基于此,笔者拟采用微涡流强化混凝技术对低温低浊微污染水进行处理,探究最优工况及影响因素主次关系,并对各工况进行相应的流态模拟,结合试验结果,确定适于低温低浊微污染水处理的微涡流絮凝方式,旨在为实际工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验试剂与水样

试验阶段采用的混凝剂为聚合氯化铝(PAC),

其为黄色粉粒,氧化铝含量为 30%,盐基度为 83.4%,pH 值(1%水溶液)为 3.5~5,水不溶物 ≤ 1.2%。试验原水取自华东交通大学孔目湖,水温为 0.5~7.8℃、pH 值为 6.4~6.9、浊度为 5.116~11.778 NTU、UV₂₅₄ 为 0.105~0.140 cm⁻¹。各指标均采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)中的标准方法测定。

1.2 试验装置

试验装置为涡流澄清池(内设絮凝第 1 反应室、第 2 反应室及斜管沉淀区),设计水量为 10 m³/h,池子尺寸 D×H 为 2 000 mm×2 500 mm,其具体设计参数见图 1。

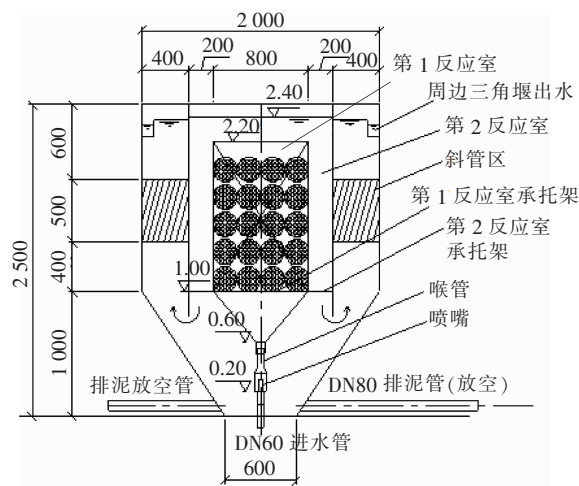


图1 涡流澄清池剖面

Fig.1 Profile of vortex clarifier

在涡流澄清池第 1 反应室中设置不同型号(HJTM-1、HJTM-2)和数量的微涡流反应器以形成不同投配比。HJTM-1 型涡流反应器的球径为 200 mm,开孔孔径为 25 mm,每层开孔数分别为 1、6、12、12、16、20、16、12、12、6、1,开孔比为 45%;HJTM-2 型涡流反应器的球径为 200 mm,开孔孔径为 35 mm,每层开孔数分别为 1、6、12、12、16、12、12、6、1,开孔比为 60%。

1.3 正交试验设计

设计 $L_9(3^4)$ 正交表进行 3 因素 3 水平正交试验。以浊度和 UV_{254} 去除率为评价指标,分别衡量微涡流絮凝工艺在低温低浊环境下除浊和除天然有机物的能力^[17]。试验不考虑各因素之间的交互作用,正交试验因素水平设置见表 1,工况设置见表 2。

表 1 因素水平设置

Tab. 1 Design of factors and levels

因 素	水平		
	1	2	3
A:投配比	1	2	3
B:絮凝时间/min	17.2	12.6	10.3
C:加药量/(mg·L ⁻¹)	30	35	40
注: 投配比为 1 指第 1 反应室全为 HJTM-2 型涡流反应器;投配比为 2 指第 1 反应室为 3/5 的 HJTM-2 型涡流反应器 + 2/5 的 HJTM-1 型涡流反应器;投配比为 3 是指第 1 反应室不放涡流反应器。			

表 2 正交试验方案

Tab. 2 Scheme of orthogonal test

工况编号	A	B	C
1	1	17.2	30
2	1	12.6	35
3	1	10.3	40
4	2	17.2	35
5	2	12.6	40
6	2	10.3	30
7	3	17.2	40
8	3	12.6	30
9	3	10.3	35

1.4 CFD 数值模拟

1.4.1 数学模型选择

不同投配比下微涡流澄清池模型及网格设置如图 2 所示。

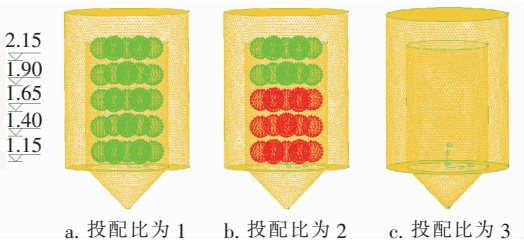


图 2 不同投配比的涡流澄清池网格模型

Fig. 2 Mesh model of vortex clarifier with different dosing ratios

模型网格选用四面体网格,其服帖性好,适用于不规则边界。对于本研究中的涡流澄清池,运动流

体控制方程包括连续性方程和动量方程。考虑到水流在池体和微涡流反应器中流动时流速会发生改变形成湍流,故控制方程还包含湍动能 $k-\varepsilon$ 方程。

1.4.2 边界条件设置

① 进口边界。涡流澄清池内的流动属于不可压缩流,故采用流速边界。设置模拟温度为 5℃,动力黏度为 1.518 8 mPa·s,水力直径为 0.032 m,考察流量分别为 6、8、10 m³/h(对应絮凝时间分别为 17.2、12.6、10.3 min),相关计算参数见表 3。

表 3 Fluent 计算参数

Tab. 3 Calculation parameters for Fluent

项 目	6 m ³ /h	8 m ³ /h	10 m ³ /h
速度/(m·s ⁻¹)	2.07	2.76	3.45
雷诺数	43 613	58 151	72 688
湍流强度/%	4.2	4.1	3.9

② 出口边界。采用自由出流,适用于不可压缩流中完全发展出流的情况。

③ 壁面边界。固体边界采用无渗透、无滑移条件的标准壁面函数,流体材料选择水体(water-liquid),按照温度调节水的密度和黏度。

④ 自由边界面。自由边界面采用刚盖假定,该假定认为水体流动时,自由表面始终不变,类似一道墙壁,但墙壁上的切向速度不为零,即流体可沿固壁滑移。对一些自由水面位置随时间变化不大的情况可以得到满意的计算结果。因此设置池顶上方的自由面为 symmetry。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

各工况进出水浊度变化如图 3 所示。可以看出,工况 1~6 对浊度的去除率在 70% 以上,出水浊度基本维持在 2 NTU 以下,工况 7~9 对浊度的去除率不足 50%,出水浊度在 3 NTU 左右。工况 7~9 未投加涡流反应器,视为普通水力澄清池。可见普通水力澄清池对低温低浊水的处理效果并不理想,投加涡流反应器后增加了絮凝池中流态复杂性,产生大量微小涡旋,不仅有利于混凝剂的快速扩散,而且提高了颗粒碰撞凝聚几率,使除浊能力显著提升^[16]。相比于工况 1~3,工况 4~6 的除浊能力又有明显提升,其中工况 5 的除浊率最高,达到 85.6%。说明涡流反应器不同投配比产生的不同水力条件对颗粒碰撞凝聚和絮体破碎的影响也有区别,从而造成不同的絮凝除浊效果。研究中 3/5 的

HJTM-2型涡流反应器+2/5的HJTM-1型涡流反应器的投配组合更有利于低温低浊水的除浊。

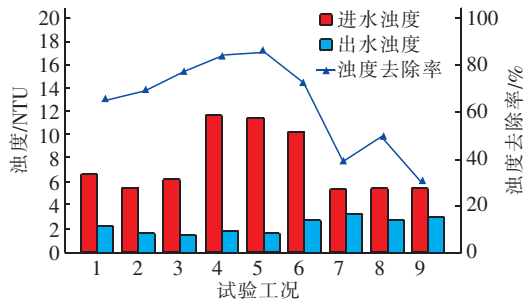


图3 不同工况下进出水浊度与浊度去除率

Fig.3 Influent and effluent turbidity and its removal rate under different working conditions

UV₂₅₄作为一种评价水体中有机物的综合指标,可以表征天然水体中腐殖质等含有共轭双键(C=C、C=O等)及芳香结构的天然有机物含量。不同工况下进出水UV₂₅₄的变化如图4所示。

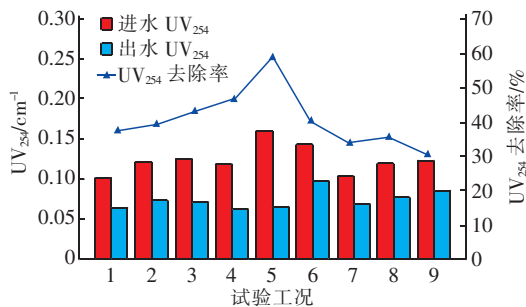


图4 不同工况下进出水UV₂₅₄与UV₂₅₄去除率

Fig.4 Influent and effluent UV₂₅₄ and its removal rate under different working conditions

由图4可知,UV₂₅₄去除率曲线与浊度去除率曲线趋势基本一致,因为冬季水体中腐殖质类天然有机物含量较多,水中浊度颗粒组成多为腐殖质胶体颗粒,此类天然有机物被认为吸附在颗粒和胶体表面并延伸出类似环状或尾状的空间形体^[18]。其中,工况1~6对UV₂₅₄的去除效果较好,工况1~3及工况6的去除率在40%左右,工况4、5的去除率在50%左右,工况5最高,达到59.0%,未设置涡流反应器的工况7~9对UV₂₅₄的去除率在35%左右。这是因为传统混凝工艺一般使用PAC作为混凝剂,其混凝机理以吸附电中和作用为主^[19],对腐殖质一类带负电胶体的混凝效果较好,但是由于在低温条件下混凝剂扩散不均且水解不充分,因此去除效果不佳,往往要加大混凝剂投加量才能达到理想的去除效果。投加涡流反应器后池中微涡旋比例增大,

有利于混凝剂扩散水解,产生合适的流态促使其更好的发挥吸附和电中和作用,故产生较好的去除效果。同时,PAC和腐殖质类物质形成的絮体(AHF)聚集在涡流反应器内部产生立体接触絮凝作用,有研究显示^[20],将AHF回流用于混凝对天然有机物具有较好的去除效果,其去除机理主要为吸附作用,符合Freundlich模型,属于多层物理吸附。

以9个工况对浊度和UV₂₅₄的去除率为评价指标,极差分析和相应因素指标见表4。其中 k_i 为每个因素3个水平相应指标值的平均值, R 为极差,反映了因素对试验指标的影响程度。

表4 浊度去除率和UV₂₅₄去除率的极差分析

Tab.4 Range analysis of removal rates of turbidity and UV₂₅₄

项 目	浊度去除率			UV ₂₅₄ 去除率		
	A	B	C	A	B	C
k_1	0.701	0.625	0.623	0.400	0.394	0.378
k_2	0.806	0.679	0.656	0.488	0.447	0.389
k_3	0.440	0.643	0.668	0.332	0.379	0.453
R	0.366	0.054	0.045	0.156	0.068	0.075
因素排序	A > B > C			A > C > B		
最优工况	A ₂ B ₂ C ₃			A ₂ B ₂ C ₃		

极差分析结果表明,对于浊度的去除,投配比是第1影响因素,絮凝时间是第2影响因素,加药量是第3影响因素。对于UV₂₅₄的去除,投配比依然是最大影响因素,但加药量的影响要大于絮凝时间。最优工况均出现在投配比为2、絮凝时间为12.6 min、加药量为40 mg/L时,即工况5。

试验数据的方差分析结果如表5所示。其中, F 值反映了试验因素的显著性大小,取显著性水平为0.10,以此时的临界 F 值为基准衡量试验因素的显著性大小。

表5 浊度去除率和UV₂₅₄去除率的方差分析结果

Tab.5 Variance analysis of removal rates of turbidity and

UV₂₅₄

项 目	浊度去除率				UV ₂₅₄ 去除率			
	A	B	C	误差	A	B	C	误差
偏差平方和	0.214	0.004	0.003	0.010	0.037	0.008	0.010	0.000
自由度	2	2	2	2	2	2	2	2
F	14.267	0.267	0.200		12.333	2.667	3.333	
$F_{\text{临}(0.10)}$	9.000	9.000	9.000		9.000	9.000	9.000	
显著性	显著	非显著	非显著		显著	非显著	非显著	

方差分析结果显示,对浊度的去除,试验因素的

主次关系为投配比 > 絮凝时间 > 加药量,对 UV_{254} 的去除则是投配比 > 加药量 > 絮凝时间,与极差分析结果一致。其中,对于浊度和 UV_{254} 去除率,在显著性水平为 0.10 下,投配比均为显著性影响因素,因此在微涡流絮凝工艺工况组合的选择上应优先选择最佳投配比。

2.2 CFD 数值模拟

取澄清池中心纵剖面计算各工况下的流场速度

矢量,结果如图 5 所示。其中图 5(a) ~ (c) 为不同流量下不投加涡流反应器的速度矢量,图 5(d) ~ (f) 为第 1 反应室全放 HJTM-2 型涡流反应器,图 5(g) ~ (i) 为第 1 反应室放 3/5 的 HJTM-2 型 + 2/5 的 HJTM-1 型涡流反应器的速度矢量。在同一投配比下,不同流量的池内速度矢量分布基本一致,只是流速大小有所区别。但对不同投配比工况来说,池内流态有所不同。

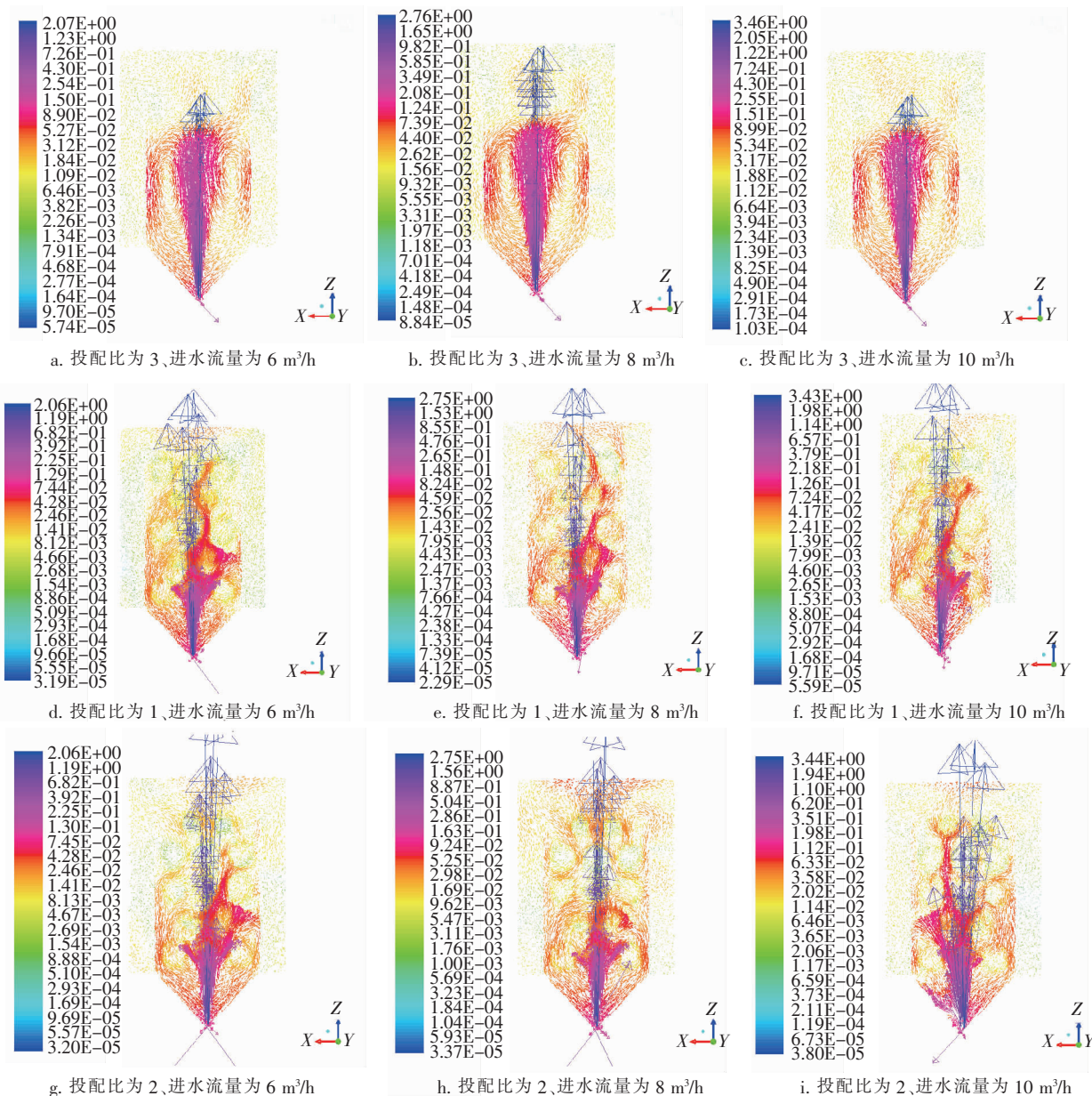


图 5 不同工况下絮凝池中心纵剖面速度矢量

Fig. 5 Velocity vector of central longitudinal section of flocculation tank under different working conditions

未投加涡流反应器时,水流经过喉管射入澄清池,在水流阻力作用下,其冲量转化为动量,从而在

池内下半段,水流沿对称轴形成对称状大涡旋[见图 5(a) ~ (c)]。大涡旋对混凝剂在水中的扩散混

合有一定的促进作用,但由于大涡旋主要卷动水中颗粒运动而不易使其发生有效碰撞,因此絮凝前半段形成大涡旋不能使胶体颗粒发生足够的有效碰撞而使其脱稳。尤其对于低温低浊水,其黏滞系数大、水中胶体颗粒运动性差、亲水性胶体水化膜厚、水中颗粒少、对前半段絮凝发生有效碰撞要求更高,因此传统澄清池的水力条件对低温低浊水的絮凝收效甚微。并且,在水流从第1反应室到第2反应室的转角处存在部分绿色区域,可视为死水区,使得有效絮凝区域减少,不利于絮凝。

投加涡流反应器后,水流射入澄清池,在绕流经过涡流反应器时发生边界层分离从而沿涡流反应器形成大量微小涡旋[见图5(d)~(i)],微小涡旋流速差大、离心惯性力大、湍动程度更高,更有利于胶体颗粒碰撞脱稳,发生微涡流凝聚作用。同时,涡流反应器内部流速较小,可吸附发生共沉淀作用沉降的絮体,保护已形成絮体不被剪切破坏,产生立体接触絮凝作用。另外,涡流反应器在池内起到了一定的配水作用,第1反应室到第2反应室的转角区域没有明显的死水区。故投加涡流反应器后涡流澄清池水力条件有利于提高低温低浊水的处理效果。另一方面,在相同进水流量下,相对于投配比为1[见图5(d)~(f)]时,投配比为2的流态[见图5(g)~(i)],第1反应室上部两层涡流反应器内部呈现明显的绿色区域,流速较小,而投配比为1时并不明显。说明在投配比为2的情况下,在絮凝池上部两层涡流反应器区域内可形成更稳定的立体接触絮凝区,保护絮凝池上部较为松散脆弱的絮体免于剪切破碎。

选取最优絮凝时间为12.6 min,分别对投配比为1和2的工况流态进行模拟,对模拟结果取标高分别为1.15、1.40、1.65、1.90、2.15 m的横截面(分别为5层涡流反应器球心所在横截面),选择Facet average计算两种流态下各层的平均涡旋尺度值,结果如图6所示。可知,前3层两种涡流反应器投配比的涡旋尺度基本相同,从第4层开始,只投加HJTM-1型涡流反应器的涡旋尺度明显大于两种反应器组合的涡旋尺度,并且还有增大的趋势。而将HJTM-1和HJTM-2型涡流反应器组合投加后,从第4层开始,其增长趋势放缓,涡旋尺度维持在0.5~0.6 mm之间。涡流澄清池上部悬浮着粒径较小、结构松散的絮体,根据Kolmogoroff微涡旋

理论,絮体粒径与涡旋尺度大小一致时絮凝效果最好。结合试验结果可知,HJTM-1和HJTM-2型涡流反应器组合投配可使絮凝池后半段仍然维持较小的涡旋尺度,因此更有利于低温低浊水的絮凝。

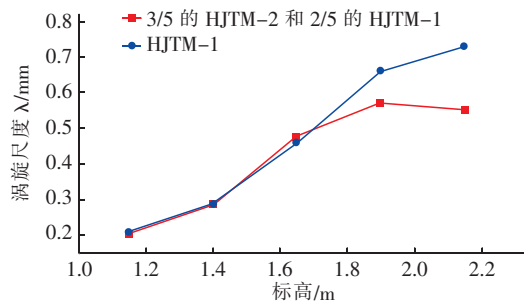


图6 絮凝时间为12.6 min时不同投配比、不同高度的涡旋尺度

Fig. 6 Vortex scale of different dosing ratios and heights under flocculation time of 12.6 min

3 结论

① 微涡流强化混凝对低温低浊微污染水的处理效果较好,其浊度去除率可达到70%以上、 UV_{254} 去除率在40%以上,均高于普通水力澄清池(浊度去除率不足50%、 UV_{254} 去除率为35%左右)。

② 正交试验结果表明:影响浊度去除率的因素排序为投配比>絮凝时间>加药量;影响 UV_{254} 去除率的因素排序为投配比>加药量>絮凝时间。在显著性水平为0.10时,投配比为显著性影响因素,加药量和絮凝时间为非显著性影响因素。最优工况为工况5,即投配比为3/5的HJTM-2型涡流反应器+2/5的HJTM-1型涡流反应器、絮凝时间为12.6 min、加药量为40 mg/L,此时浊度去除率为85.6%、 UV_{254} 去除率为59.0%。

③ 在相同投配比下,不同流量对应的澄清池内水流流态基本一致;而不同投配比下的水流流态则有所不同,投加微涡流反应器后池内微涡旋比例明显增加,符合微涡流凝聚和立体接触絮凝发生所需要的流态。

④ 3/5的HJTM-2型+2/5的HJTM-1型微涡流反应器的投配组合优于单独投放HJTM-1型微涡流反应器。以3/5的HJTM-2型+2/5的HJTM-1型组合投放微涡流反应器时,在絮凝池第1反应室上部两层微涡流反应器内流速更小,可以产生更稳定的立体接触絮凝区,而且该组合下絮凝池上方两层微涡流反应器区域的涡旋尺度明显小于

单独投放 HJTM-1 型时的,更适于低温低浊微污染水的絮凝。

参考文献:

- [1] 刘海龙,任宇霞,张忠民. 低温污水前置强化混凝[J]. 环境科学,2018,39(5):2239-2248.
Liu Hailong, Ren Yuxia, Zhang Zhongmin. Enhanced coagulation as a pretreatment for low temperature wastewater[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2239-2248(in Chinese).
- [2] 黄廷林,赵阳,文刚. 西北地区低温低浊地表水气浮工艺中试研究[J]. 给水排水,2015,41(11):41-45.
Huang Tinglin, Zhao Yang, Wen Gang. Pilot study on water and air flotation technology for low temperature and low turbidity in Northwest China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(11): 41-45(in Chinese).
- [3] 杨家轩,马军,王艳杰,等. 超声预处理强化混凝处理低温低浊水的中试研究[J]. 中国给水排水,2016,32(3):31-34.
Yang Jiaxuan, Ma Jun, Wang Yanjie, et al. Ultrasonically enhanced coagulation of low turbidity and low temperature water[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(3): 31-34(in Chinese).
- [4] 汪志永,戴红玲,周政,等. 低温低浊水处理技术的研究与应用[J]. 水处理技术,2016,42(10):20-24.
Wang Zhiyong, Dai Hongling, Zhou Zheng, et al. Research and application of low temperature and low turbidity water treatment technology[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(10): 20-24(in Chinese).
- [5] Yu W Z, Gregory J, Li G B, et al. Effect of humic acid on coagulation performance during aggregation at low temperature[J]. Chem Eng J, 2013, 223: 412-417.
- [6] Xiao F, Zhang B J, Ma J, et al. Effects of low temperature on floc fractal dimensions and shape factors during alum coagulation[J]. Journal of Water Supply, 2009, 58(1): 21-27.
- [7] Li D M, Wu C R, Wang Y Z, et al. Enhanced treatment properties of iron oxide amended sands coupled with polyelectrolyte to humic acid[J]. Water Environment Research, 2017, 90(2): 136-143.
- [8] Liu J, He J G, Yuan Y X, et al. Effects of different coagulants on flocculation performance and floc properties in northwest China raw water treatment[J]. Water Sci Technol, 2015, 15(3): 599-605.
- [9] Baghvand A, Zand A D, Mehrdadi N, et al. Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2010, 6(5): 442-448.
- [10] Shen Y H. Treatment of low turbidity water by sweep coagulation using bentonite[J]. J Chem Technol Biotechnol, 2005, 80(5): 581-586.
- [11] 童祯恭,卢普平,谌贻胜. 微涡旋混凝工艺用于醴陵铁路水厂改造[J]. 中国给水排水,2012,28(4):79-81.
Tong Zhengong, Lu Puping, Chen Yisheng. Application of micro-vortex coagulation process in reconstruction engineering of Liling Railway Water Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(4): 79-81(in Chinese).
- [12] Tong Z G. The vortex flocculation clarification technology and its application in water treatment[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(3): 1820-1825.
- [13] Tong Z G. Study on the technology of vortex clarification and its application in wastewater treatment[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2013, 12(3): 537-542.
- [14] Wójtowicz R, Talaga J. Identification of turbulent liquid flow in a tubular reactor with different width baffles[J]. Chemical Engineering Communications, 2015, 203(2): 161-173.
- [15] Fan W B, Li W G, Gong X J, et al. Evaluation of the effect of a hydraulic impeller in a flocculation basin on hydrodynamic behavior using computational fluid dynamics[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(4/5): 1361-1374.
- [16] 童祯恭,冯治华,童承乾,等. 涡旋澄清池沉淀区结构参数的固液两相流数值模拟[J]. 华东交通大学学报,2015,32(2):109-116.
Tong Zhengong, Feng Zhihua, Tong Chengqian, et al. Numerical simulation on solid-liquid two-phase flow of structure parameters in sedimentation zone of vortex clarifier[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(2): 109-116(in Chinese).
- [17] 艾恒雨,孙晓君,杜青林,等. 絮凝方式对净水厂排泥特性的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(5):134-137.
Ai Hengyu, Sun Xiaojun, Du Qinglin, et al. Effect of different flocculation equipments on sludge discharge in water treatment plant[J]. China Water & Wastewater,

(下转第 52 页)