

螺旋管式二次流混合器的混合特征

张忠国^{1,2} 刘丹^{1,3} 栾兆坤⁴ 程言君¹ 李继定² 宋云¹ 荣立明¹

(1. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089 2. 清华大学化学工程系, 北京 100084

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

4. 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)

摘要 考察了用于混凝过程的螺旋管式二次流混合器的曲率、螺距和水流速度等主要因素对其水头损失、 G 值以及 GT 值的影响规律。研究发现, 该混合器的水头损失、 G 值及 GT 值均随曲率、水流速度的增大而增大, 随螺距的增加而降低; 除螺距和水流速度的交互作用对 GT 值没有影响外, 该混合器的螺距、曲率、水流速度以及这3个因素间(包括两两之间以及三者之间)的交互作用对混合器 G 值、 GT 值的影响均高度显著, 3个因素影响的显著性顺序为水流速度>曲率>螺距。

关键词 混凝 絮凝 混合器 二次流 螺旋管

中图分类号 X703.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)06-1219-05

Mixing characteristic of a helical secondary flow mixer used in coagulation

Zhang Zhongguo^{1,2} Liu Dan^{1,3} Luan Zhaokun⁴ Cheng Yanjun¹ Li Jiding² Song Yun¹ Rong Liming¹

(1. Environment Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China

2. Department of Chemical Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. School of the Earth Sciences and Resources China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

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

Abstract The effects of curvature, pitch and flow rate on head loss, G and GT values were investigated for a helical secondary-flow mixer used in coagulation. The experimental results showed that the head loss, G and GT values of the mixer increased with increasing curvature and flow rate, but decreased with increasing pitch. At the same time, excepted that the interaction of pitch and flow rate did not affect the GT value, the curvature, flow rate and pitch of the mixer and the interactions between any two factors or among three factors had highly significant effects on G and GT values, and the significance of the effects was flow rate>curvature>pitch.

Key words coagulation; flocculation; mixer; secondary flow; helical pipe

混合是混凝过程的必需环节, 一般借助混合设备的水力作用或机械搅拌作用完成。无机混凝剂在混合阶段发生水解, 并与原水中的颗粒物相互作用, 使之脱稳并相互碰撞、聚结, 完成凝聚反应。相对絮凝过程而言, 混合过程更为复杂, 也更为重要^[1]。因此, 强化混凝效果应首先从提高混合效果着手, 这样能起到事半功倍的作用。混合设备种类繁多, 管道混合器因具有结构简单、成本低廉、操作维护方便、能耗较低等优点, 目前应用日益广泛。

二次流(或称次流)是指流体在作曲线运动(如在螺旋管或盘管内流动)时, 因离心力的作用而在与主流流动方向垂直的截面上产生的流动现象。二次流能够增加流体的湍动程度, 强化传质和传热, 其研究及应用比较广泛^[2~7]。在混凝技术领域, 也有人开展了关于二次流的研究与应用工作^[8~10], 但关

于其水力学特征及混合强度方面的系统实验研究尚未见报道。

本研究以螺旋管作为流道, 使水流通过时产生二次流, 用于强化混凝反应的混合过程, 以获得优异的混凝效果。该二次流混合器的特点在于: ①流体流动呈活塞流状态, 流场比较均匀, 不存在死区, 速度梯度差异小, 絮体不会因速度梯度差异大而发生

基金项目: 国家科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2008EG111021, 2009EG111021); 北京市优秀人才培养项目(20071D1100500388); 北京市财政资金项目(PXM 2007-178203-048995-FCG-A); 北京市科学技术研究院萌芽计划资助项目

收稿日期: 2009-06-20 修订日期: 2009-07-02

作者简介: 张忠国(1974~), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事污水处理及饮用水净化技术与设备的研发与工程设计工作。

E-mail: cn_zhang@163.com

破碎现象; ②流场的速度梯度大, 传质效率高, 混合效果好; ③结构简单, 易于实现, 成本低廉; ④压力损失小, 能耗低。该研究系统考查了该二次流混合器的水头损失、 G 值以及 GT 值的主要影响因素, 以便为该混合器的设计及优化奠定一定的基础。

1 实验部分

1.1 实验装置及其流程

实验采用的二次流混合器由橡胶软管缠绕于圆柱体(如有机玻璃管等)上构成, 其结构参数主要包括二次流管(橡胶软管)的长度 L 、内径 d 、螺距 b 、螺旋直径 D_c 以及螺旋曲率(螺旋半径 $D_c/2$ 的倒数)等, 如图 1 所示。

实验装置流程如图 2 所示。利用离心泵将原水箱内的自来水泵入混合器, 记录每次实验的水温、流量 V 、混合器进水压力 P_1 以及混合器的结构参数等。因混合器出水仅经一段 5 m 长直管排入外部环境, 故其出水压力 P_2 记为 0(表压)。

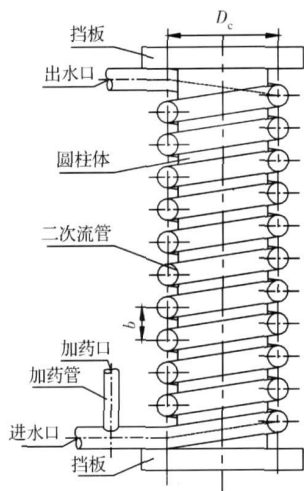


图 1 螺旋管式二次流混合器的结构示意图
Fig. 1 Structure of helical secondary flow mixer

实验过程中, 流经螺旋管的水流速度范围为 0.96~3.6 m/s 依次为 0.96 1.2 1.5 1.8 2.1 2.4 2.7 3.0 3.3 和 3.6 m/s。螺旋管的曲率分别为 12.1 14.8 和 30.4 m⁻¹, 螺距分别为 8 16 和 24 mm。

1.2 混合器 G 值及 GT 值的数学表达

G 值是表示混凝过程中混合或搅拌强度的一个重要参数。根据 Carissim i 和 Rub b^[11], 水流在螺旋管内流动的 G 值可表达为:

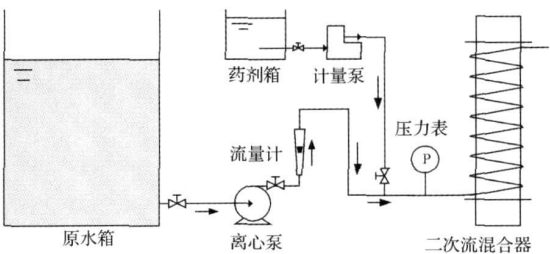


图 2 二次流混合器混合实验流程

Fig. 2 Experiment system with the secondary flow mixer

$$G = \sqrt{\frac{\rho g \Delta H}{\mu t}} \tag{1}$$

式中: G 为水流的平均速度梯度, s⁻¹; ΔH 为水流通过单位长度螺旋管的水头损失, m/m; ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; μ 为水的黏度, Pa·s; t 为水流在单位长度螺旋管内的水力停留时间, s/m。

如若考虑水流在混合器内的总水力停留时间 T , 即将 G 与 T 相乘, 则可得到表征混合过程的一个重要无量纲参数 GT 值。

应该说明的是, 通过该方法算得的 G 值及 GT 值, 均略高于实际情况, 因实验中将管壁摩擦所消耗的能量也计算在内。

2 结果与讨论

2.1 螺旋管式二次流混合器的水头损失

流体流经混合器时的水头损失是衡量其能耗大小的一个重要参数, 也是其性能的一个重要评价指标, 还是设计混凝系统时选择水流输送设备(如离心泵)的依据。

流体流经弯曲管道时, 二次流、管壁摩擦以及流动分离均会引起水头损失, 所以流体在弯曲管道中

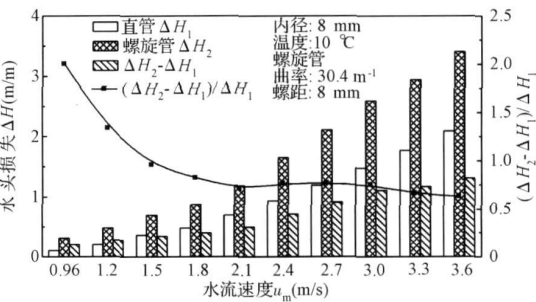


图 3 二次流管与直管水头损失的比较
Fig. 3 Comparison of head loss between the secondary flow pipe and straight pipe

的流动阻力较直管为大^[12]。图 3 表明, 在相同的条件下, 水流通过单位长度螺旋管式二次流管的水头损失 ΔH_2 高于直管的水头损失 ΔH_1 , 且流速越大, 二者间的水头损失差异越大, 但前者相对后的水头损失增长率却减小。当管内水流速度 (水的流量与其流通面积之比) 高于 2.1 m/s 时, 二次流管相对直管的水头损失增长率变化很小。

螺旋管式二次流混合器的曲率和流速对其单位长度水头损失 ΔH 的影响如图 4 所示。二次流管的曲率对其水头损失的影响非常明显。在二次流管的螺距及其他条件一定时, 水流通过二次流管的水头损失随曲率的增加而增大。如在螺距为 8 mm , 水流速度为 3.6 m/s 时, 水流通过曲率为 12.1 m^{-1} 的二次流管的水头损失为 2.4 m/m , 而在曲率为 30.4 m^{-1} 的二次流管内的水头损失却高达 3.41 m/m 。

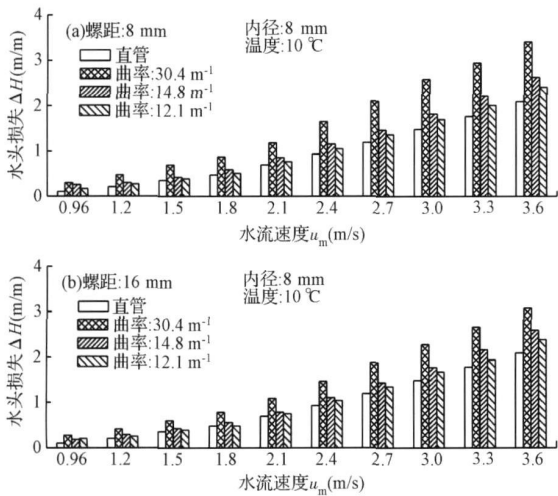


图 4 二次流管的曲率及水流速度对其水头损失的影响

Fig. 4 Effects of curvature and flow rate on head loss for the secondary flow pipe

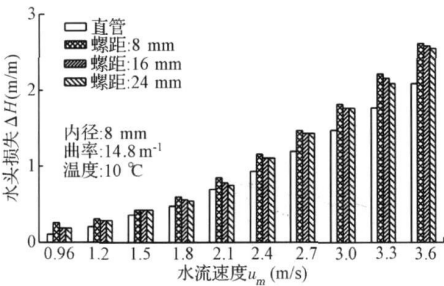


图 5 二次流管的螺距及水流速度对其水头损失的影响

Fig. 5 Effects of pitch and flow rate on head loss for the secondary flow pipe

二次流管的螺距和流速对其水头损失的影响如图 5 所示。由图可见, 二次流管的螺距越大, 水流的水头损失越小, 但变化不明显。

2.2 二次流混合器的混合强度

2.2.1 混合器的结构参数和水力条件对 G 值的影响
螺旋管式二次流混合器的曲率和流速对 G 值的影响如图 6 所示。二次流管的曲率对 G 值的影响非常明显。在二次流管的螺距及其他条件一定时, 水流通过二次流管的 G 值随曲率的增加而增大。如在螺距为 8 mm , 水流速度为 3.6 m/s 时, 水流流经曲率为 12.1 m^{-1} 的二次流管的 G 值为 $8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, 而在曲率为 30.4 m^{-1} 的二次流管内的 G 值却高达 $9.54 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。该图同时表明, 水流速度越高, G 值越大。

二次流管的螺距和流速对其 G 值的影响如图 7 所示。由图可见, 二次流管的螺距越大, G 值越小, 但变化不明显。

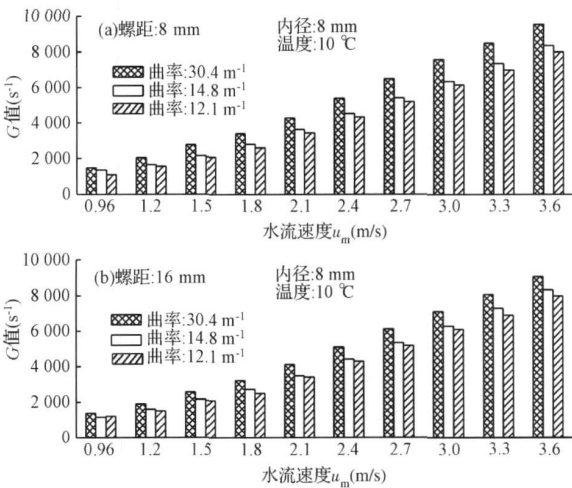


图 6 二次流管的曲率及水流速度对其 G 值的影响

Fig. 6 Effects of curvature and flow rate on G value for the secondary flow pipe

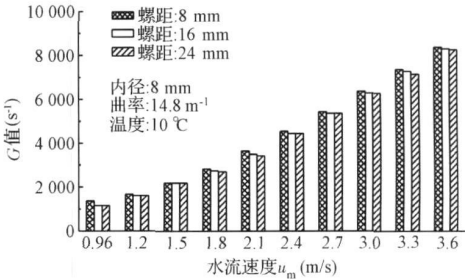


图 7 二次流管的螺距及水流速度对其 G 值的影响

Fig. 7 Effects of pitch and flow rate on G value for the secondary flow pipe

为了考察各因素对二次流混合器混合强度影响的显著性差异,对实验结果进行方差分析,分析结果详见表 1。由表可看出,二次流混合器的螺距、曲率、水流速度以及这 3 个因素间的交互作用对混合

器 G 值的影响均高度显著。其中螺距、曲率、水流速度三者影响的显著性由高到低的顺序为水流速度 > 曲率 > 螺距。

表 1 各因素对 G 值影响的显著性
Table 1 Significance of effects of some factors on G value

方差来源	自由度	均方差	F 值	相伴概率	显著性
螺距 b	1	5.63×10^5	8.36×10^2	6.41×10^{-37}	高度显著
曲率半径 r_a	2	8.60×10^6	1.28×10^4	1.26×10^{-79}	高度显著
水流速度 v	9	7.64×10^7	1.13×10^5	1.90×10^{-123}	高度显著
$b \times r_a$	2	1.81×10^5	2.69×10^2	1.09×10^{-30}	高度显著
$b \times v$	9	8.94×10^3	1.33×10	2.21×10^{-11}	高度显著
$r_a \times v$	18	1.53×10^5	2.27×10^2	2.82×10^{-48}	高度显著
$b \times r_a \times v$	18	8.94×10^3	1.33×10	1.03×10^{-14}	高度显著

2.2.2 混合器的结构参数和水力条件对 GT 值的影响

螺旋管式二次流混合器的曲率和水流速度对其 GT 值的影响如图 8 所示。二次流管的曲率对其 GT 值的影响非常显著。在二次流管的螺距及其他条件一定时,水流流经二次流管的 GT 值随曲率的增加而增大。如在管长为 6 m,螺距为 8 mm,水流速度为 3.6 m/s 时,水流通过曲率为 12.1 m^{-1} 的二次流管的 GT 值为 1.33×10^4 ,而在曲率为 30.4 m^{-1} 的二

次流管内的 GT 值为 1.58×10^4 。该图同时表明,水流速度越高, GT 值越大。这说明在实验范围内,水流速度较水流的流经时间对 GT 值的影响更为显著。

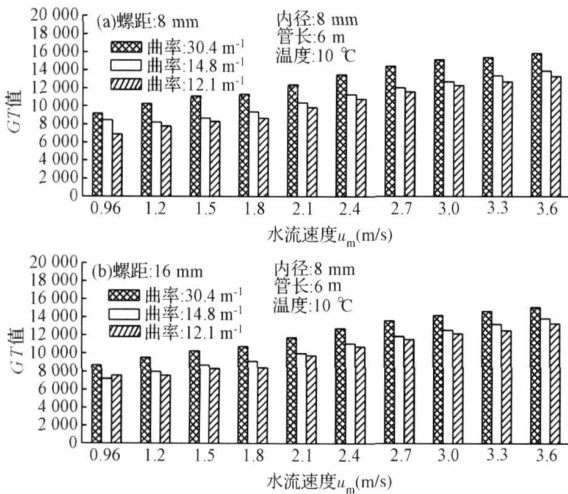


图 8 二次流管的曲率及水流速度对其 GT 值的影响
Fig 8 Effects of curvature and flow rate on GT value for the secondary flow pipe

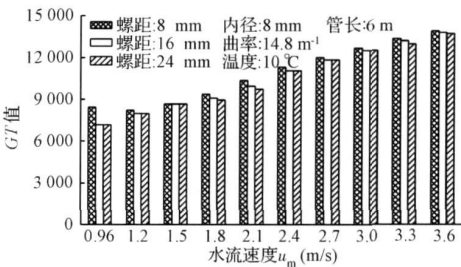


图 9 二次流管的螺距及水流速度对其 GT 值的影响
Fig 9 Effects of pitch and flow rate on GT value for the secondary flow pipe

二次流管的螺距和水流速度对其 GT 值的影响如图 9 所示。由图可见,二次流管的螺距越大, GT 值越小,但变化不明显。

为了考察各因素对二次流混合器 GT 值影响的显著性差异,对管长为 6 m 的二次流混合器的实验结果进行方差分析,分析结果详见表 2。由表可看出,二次流混合器的螺距、水流速度、曲率以及这 3 个因素间的交互作用(除螺距与水流速度之间的交互作用)对混合器 GT 值的影响均高度显著,但螺距

与水流速度之间的交互作用对混合器的 GT 值没有影响。螺距、水流速度、曲率三者影响的显著性由高到低的顺序为水流速度 > 曲率 > 螺距。

表 2 各因素对 GT 值影响的显著性
Table 2 Significance of the effects of some factors on GT value

方差来源	自由度	均方差	F 值	相伴概率	显著性
螺距 b	1	4.04×10^6	3.74×10^2	1.88×10^{-27}	高度显著
曲率半径 r_a	2	5.95×10^7	5.51×10^3	4.76×10^{-84}	高度显著
水流速度 v	9	5.87×10^7	5.43×10^3	1.56×10^{-68}	高度显著
$b \times v$	2	5.38×10^3	4.98×10^{-1}	8.70×10^{-1}	没有影响
$b \times r_a$	9	1.25×10^6	1.15×10^2	2.74×10^{-21}	高度显著
$v \times r_a$	18	1.39×10^5	1.29×10	2.01×10^{-14}	高度显著
$b \times v \times r_a$	18	1.01×10^5	9.31	1.97×10^{-11}	高度显著

3 结 论

(1) 二次流混合器的水头损失、 G 值及 GT 值均随曲率、水流速度的增大而增大, 随螺距的增加而降低; 此外, GT 值随二次流管长度的增加而增大。

(2) 二次流混合器的螺距、曲率、水流速度以及这 3 个因素间 (包括两两之间以及三者之间) 的交互作用对混合器 G 值的影响均高度显著, 3 个因素影响的显著性顺序为水流速度 > 曲率 > 螺距。

(3) 二次流混合器的螺距、曲率、水流速度以及这 3 个因素间 (包括两两之间以及三者之间, 但螺距和水流速度的交互作用对 GT 值没有影响) 的交互作用对混合器 GT 值的影响均高度显著, 3 个因素影响的显著性顺序为水流速度 > 曲率 > 螺距。

参 考 文 献

[1] Dhamappa H. B., Verink J., Fujiwara O., *etal* Optimal design of a flocculator Water Research, **1993**, 27(3): 513~ 519

[2] 胡振军, 神家锐. 扰流元诱发的二次流及其在强化传热中的应用. 工程热物理学报, **1997**, 18(1): 69~ 72

[3] Colorado-Carrido D., Sancho-Castelazo E., Hernández J. A., *etal* Heat transfer of a helical double-pipe vertical evaporator: Theoretical analysis and experimental validation Applied Energy, **2009**, 86(7~ 8): 1144~ 1153

[4] Kuakivi D. N., Moulin P., Charbit F. Dean vortices A

comparison of woven versus helical and straight hollow fiber membrane modules Journal of Membrane Science, **2000**, 171(1): 59~ 65

[5] Ahlborn B., Groves S. Secondary flow in a vortex tube Fluid Dynamics Research, **1997**, 21(2): 73~ 86

[6] 湛含辉, 张晓琪, 戴财胜, 等. 水介旋流器中二次流对分选原理的影响试验研究. 矿冶工程, **2002**, 22(2): 57~ 59

[7] Naphon P. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins International Communications in Heat and Mass Transfer, **2007**, 34(3): 321~ 330

[8] Vigneswaran S., Settiadi T. Flocculation study on spiral flocculator Water, Air & Soil Pollution, **1986**, 29(2): 165~ 188

[9] 黄廷林, 曹翀. 管式絮凝器用于结团絮凝工艺的研究. 西安冶金建筑学院学报, **1991**, 23(2): 213~ 222

[10] Casey Jones S., Sotiropoulos E., Amirthanajah A. Numerical modeling of helical static mixers for water treatment Journal of Environmental Engineering, **2002**, 128(5): 431~ 440

[11] Carissini E., Rubio J. The flocs generator reactor-FGR: A new basis for flocculation and solid-liquid separation International Journal of Mineral Processing, **2005**, 75(3~ 4): 237~ 247

[12] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学 (第 2 版). 北京: 化学工业出版社, **2005**, 153~ 159