

研究论文

螺旋管式二次流混合器的混合性能

刘 丹¹, 张忠国^{1,2}, 赵可卉¹, 栾兆坤³, 程言君¹, 李继定², 荣立明¹, 宋 云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: 考察了以聚合氯化铝 (PACl) 作为混凝剂时, 混合器的曲率、螺距、管长、水流速率以及混合过程的 GT 值等对螺旋管式二次流混合器混合性能的影响。研究发现, 混合器的管长、水流速率以及曲率对该混合器混合性能具有高度显著影响, 而螺距具有显著影响, 四者影响的显著性由高到低依次为管长、水流速率、曲率和螺距; 实验范围内, 二次流管的最佳长度为 12 m, 且在电中和及卷扫混凝时均出现两个最佳 GT 值。

关键词: 混凝; 絮凝; 混合器; 二次流; 聚合氯化铝

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.10.005

中图分类号: X 703.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 10-2707-06

Mixing performance of helical secondary-flow mixer used in coagulation

LIU Dan¹, ZHANG Zhongguo^{1,2}, ZHAO Kehui¹, LUAN Zhaokun³, CHENG Yanjun¹,

LI Jiding², RONG Liming¹, SONG Yun¹

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

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

³ 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, tube length, flow rate and GT value (the product of root-mean-square velocity gradient and detention time) of a helical secondary-flow mixer used in coagulation with polyaluminum chloride (PACl) on its performance were investigated. The helical secondary-flow mixer was prepared by twining a rubber tube round a cylinder, and kaolin suspension was used as simulated wastewater for this experiment. It was found that tube length, curvature and flow rate of the mixer had highly significant impacts on mixing effect, similarly pitch had significant impact. And the impacts of the four factors decreased as follows: tube length, flow rate, curvature and pitch. 12 m was the optimal tube length among three tube lengths of 12 m, 18 m and 24 m. As for electrically neutral coagulation, the secondary-flow mixer with a tube length of 24 m also achieved an excellent mixing effect. In addition, there existed two optimal GT values for both electrically neutral and sweep coagulation. The

2010-12-26 收到初稿, 2011-03-23 收到修改稿。

联系人: 张忠国。第一作者: 刘丹 (1983—), 女, 硕士, 助理研究员。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2009AA063901); 国家科学技术部科研院所技术开发研究专项资金项目 (2008EG111021, 2010EG111021); 北京市优秀人才培养资助项目 (20071D1100500388)。

Received date: 2010-12-26.

Corresponding author: ZHANG Zhongguo, m zhang@163.com

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2009AA063901), the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China "Special Funds of Technological Development for Scientific Research Institutes" (2008EG111021, 2010EG111021) and the Beijing Talents Training Funding Project (20071D1100500388).

optimal GT values were 21000 and 35000 for the former, and 19000 and 32000 for the latter.

Key words: coagulation; flocculation; mixer; secondary flow; polyaluminum chloride

引 言

混合是混凝过程中必不可少的一个阶段,目前主要的混合方式包括水泵混合、隔板混合、搅拌混合、管道混合、扩散混合和射流混合等。根据不同工艺设计的混合设备种类也多种多样,而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,应用日益广泛。

流体在作曲线运动时,由于离心力的存在,将在与其主流流动方向垂直的截面内产生二次流(或称次流)。二次流能够增加流体的湍动程度,强化传质和传热,因此在化工领域得到广泛应用^[1-6],如换热器(如蛇管换热器)^[7]、化学反应器^[8]、酶聚合反应器^[9]以及膜过程^[10-11]等。此外,一些研究者也将二次流用于絮凝过程^[12-14]。但由于流体流经弯曲管道时,水流速率越快,二次流现象越明显,强化传质作用越显著,所以将二次流用于混凝过程的混合阶段,其作用才可能得以充分发挥。

本文采用目前应用日益广泛、具有诸多优点的聚合氯化铝(PACl)作为混凝剂,以混凝、沉淀后上清液的残余浊度作为评价指标,通过实验研究了采用二次流理论的螺旋管式混合器的混合效果,主要考察混合过程的 GT 值、水流速率,螺旋管的曲率、螺距和管长等因素对该混合器混合性能的影响规律,以便为其设计及优化奠定一定的基础。

1 实验部分

实验采用的二次流混合器由橡胶软管缠绕于圆柱体上构成,其结构参数主要包括二次流管(橡胶软管)的长度 L 、内径 d_i 、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^[15]。为了评价该混合器的混合性能,采用半连续实验,流程如图1所示,其中橡胶软管的内径为8 mm。原水箱中装有由自来水人工配制的高岭土悬浊液,浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,药剂箱内为PACl溶液,浓度为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。高岭土(化学纯)由北京旭东化工厂生产,粒径分布范围为 $0.275\sim 39.8\text{ }\mu\text{m}$,平均体积粒径为 $10.1\text{ }\mu\text{m}$ 。PACl是市售(南宁化工股份有限公司)粉末状产品,碱化度 (OH/Al)

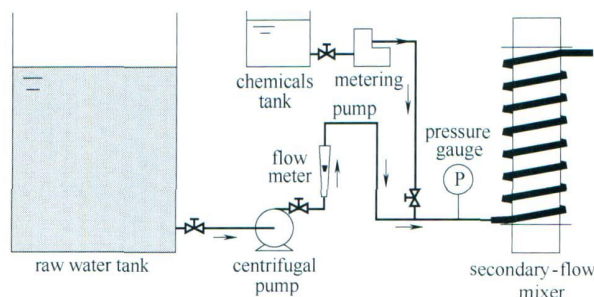


图1 二次流混合器混合实验流程

Fig 1 Experimental system with secondary-flow mixer

及 Al_2O_3 含量分别为1.35和30%。投加PACl的高岭土悬浊液经二次流混合器混合后,量取1 L,通过JTY型六联混凝实验搅拌器进行慢速搅拌(搅拌强度为 $G=15\text{ s}^{-1}$,搅拌时间为10 min),然后静止沉降10 min,最后取上清液测残余浊度。通过残余浊度反映混合器的混合效果。每个条件下的实验均重复1~2次,残余浊度取均值。实验温度为 $(23.0\pm 1.0)\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据前期研究结果^[16],对于电中和混凝,PACl用量为 $2.16\text{ mg Al}\cdot\text{L}^{-1}$,终了pH值为7.0;对于卷扫混凝,PACl用量为 $54.0\text{ mg Al}\cdot\text{L}^{-1}$,终了pH值为8.0。

2 结果与讨论

2.1 混合器混合性能的主要影响因素

2.1.1 GT 值的影响 G 值是表示混凝过程中混合或搅拌强度的一个重要参数,水流在螺旋管内流动的 G 值表达式见文献[15]。将 G 值与水流在混合器内的总水力停留时间 T 相乘,则可得到表征混合过程的一个重要量纲1参数 GT 值(亦称为Camp准数)。

GT 值对该混合器电中和混凝混合效果的影响如图2所示,图中曲线是利用ORIGIN软件对数据点进行平滑(smoothing)处理得到的结果。由图可看出,二次流管的长度越大,其 GT 值一般也较大。这是由于在相同流率、曲率及螺距的情况下,管长越大,水力停留时间 T 越大,从而使 GT 值增大。图中显示,该混合器存在两个最佳 GT 值,一个出现于管长为12 m和18 m时,约为21000,这与前人研究结果^[17]很接近;另一个出现

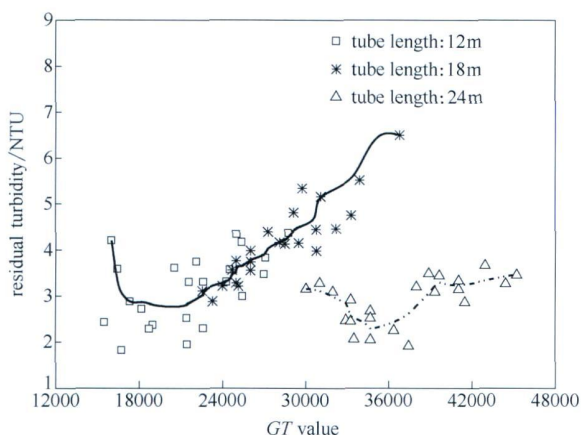


图 2 GT 值对混合器电中和混凝混合效果的影响

Fig 2 Effect of GT value on mixing effect of secondary-flow mixer in electricity neutral coagulation

(kaolin: $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; T : 24°C ; PACl : $2.16 \text{ mg Al} \cdot \text{L}^{-1}$; final pH: 7.0; pitch: 80 mm; inner diameter: 80 mm; screw diameter: 58 mm)

于管长为 24 m 时, 约为 35000, 而管长为 18 m 的混合器混合效果较差。这种出现两个最佳 GT 值的情况, 与 Rossini 等^[18] 发现存在一长一短两个最佳快速搅拌时间的情况类似。对于管长为 12 m 和 24 m 的混合器, 其混合效果先随 GT 值的增加而提高 (余浊降低), 达到最佳效果后, 则随 GT 值的增加而降低 (余浊升高)。对于管长为 12 m 的情况, 混合器的混合效果先随 GT 值的增加而提高主要是由于随着 GT 值的增加, 混合作用越来越充分, 凝聚效果提高, 但当 GT 值过大时, 随着 GT 值的增加, 絮体的破碎情况加剧, 混合作用恶化。对于管长为 24 m 的情况, 则可能是业已破碎的絮体由于搅拌时间继续增加 (由前所述, 24 m 管长的混合器 GT 值较大主要是由于二次流管较长, 导致水力停留时间增加), 相互间重新发生凝聚作用而长大; 另一个原因可能是颗粒间在 12 m 长的二次流管内发生的主要是第二最低位能点的凝聚作用, 而在 24 m 长的二次流管内发生的主要是第一最低位能点的凝聚作用。对于管长为 18 m 的混合器, 其混合效果则随 GT 值的增加而降低 (余浊升高), 其主要原因是 GT 值过大。

GT 值对该混合器卷扫混凝混合效果的影响如图 3 所示, 图中曲线是利用 ORIGIN 软件对数据点进行平滑处理得到的结果。与电中和混凝时的情况类似, 存在两个最佳 GT 值, 一个在管长为 12 m 和 18 m 时, 约为 19000, 另一个出现于管长为

24 m 时, 约为 32000, 均略低于电中和混凝时的情况。这与卷扫混凝时混凝剂用量较高具有一定的关系^[19]。与电中和混凝时的结果较为类似的是, 其混合效果同样先随 GT 值的增加而提高 (余浊降低), 达到最佳效果后, 则随 GT 值的增加而降低 (余浊升高)。但与电中和混凝时不同的是, 管长为 24 m 的混合器在其最佳 GT 值时的混合效果明显劣于管长为 12 m 和 18 m 的混合器在其最佳 GT 值时的混合效果。对于管长为 18 m 的混合器, 其混合效果较差, 且随 GT 值的增大, 体系的余浊升高。其原因与电中和混凝时的情况相同。

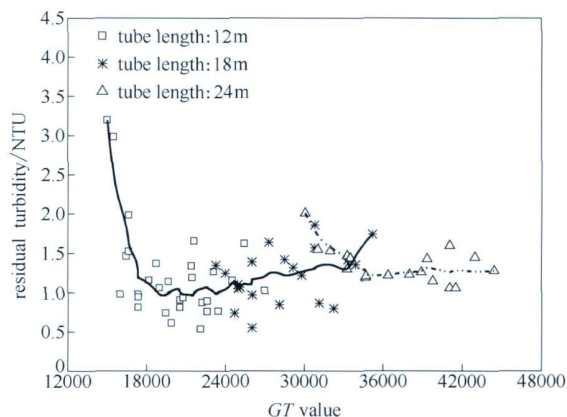


图 3 GT 值对混合器卷扫混凝混合效果的影响

Fig 3 Effect of GT value on mixing effect of secondary-flow mixer in sweep coagulation

(kaolin: $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; T : 24°C ; PACl : $54.0 \text{ mg Al} \cdot \text{L}^{-1}$; final pH: 8.0; pitch: 80 mm; inner diameter: 80 mm; screw diameter: 58 mm)

应该说明的是, GT 值是混合器结构及水力条件的综合参数, 涵盖混合器的螺旋曲率、螺距、管长及水流速率等诸多因素, 因此它对混合器混合性能的影响反映了各因素的综合效应。

2.1.2 曲率的影响 曲率影响混合器的二次流, 所以影响混合器的混合效果。根据 Palazoglu 等^[20] 的研究结果, 当螺旋圆管的直径一定时, 若螺旋曲率较小, 由于二次流的强度较小, 密度较大的颗粒将聚集在圆管底部的内侧, 不能很好地分散, 且若流体的流率也较低, 则颗粒在圆管内侧的聚集将减弱; 但若螺旋曲率较大, 由于二次流的强度增加, 密度较大的颗粒将在圆管底部半面内随涡旋流动的流体运动, 且其停留时间将接近密度较小的颗粒, 混合更加均匀。由此可见, 曲率较小时, 因密度较大颗粒的聚集, 不利于混凝混合过程的进行, 但当

曲率较大时, 因密度较大的颗粒能够很好地分散, 且随流体作涡旋运动, 从而有利于提高混合效果。不过, 曲率过大时, 二次流引起的流体剪切作用将增大, 不利于颗粒间的聚结, 而且较大密度颗粒的停留时间将缩短^[18-19, 21]。但应说明的是, 对于密度较小、接近流体密度的颗粒, 其沿管轴向方向的分布比较均匀, 在圆管截面的上部随流体作涡旋运动, 螺旋的曲率对其停留时间及停留时间分布的影响很小^[18]。

对于实验采用的二次流混合器, 因与其他因素(主要是管长)的交互作用, 曲率对其混合效果的影响规律较为复杂。当二次流管的长度分别为 12 m 和 18 m 时, 混合器的混合效果随曲率的减小而提高, 体系的余浊相应地随曲率的减小而降低, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示。这是由于随着曲率的降低, 混合器的 GT 值减小^[15], 更加适宜于混合。但当二次流管的长度为 24 m 时 [图 4(c)], 曲率

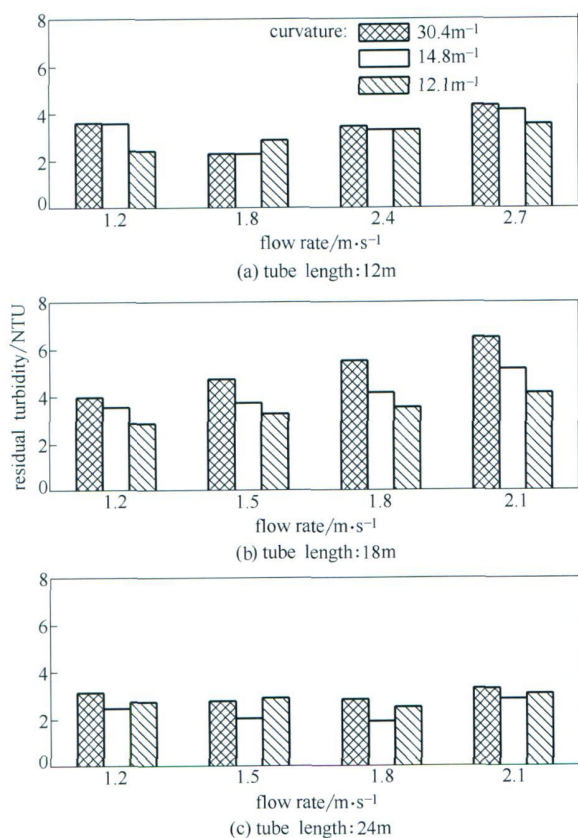


图 4 曲率对混合器混合效果的影响

Fig 4 Effect of curvature on mixing effect for helical secondary-flow mixer

(kaolin: $100 mg \cdot L^{-1}$; final pH: 7.0; PACl: $2.16 mg Al \cdot L^{-1}$; T : $24^{\circ}C$; pitch: 8.0 mm)

为 $14.8 m^{-1}$ 的混合器的混合效果优于曲率为 $30.4 m^{-1}$ 和 $12.1 m^{-1}$ 的混合器的混合效果, 其原因也主要在于曲率为 $14.8 m^{-1}$ 的混合器的 GT 值更适于混合过程。根据上述实验结果, 曲率为 $30.4 m^{-1}$ 时的混合效果最差, 其他两种曲率均可得到较好的混合效果, 且二者非常接近。因此可以认为, 曲率为 $12.1 \sim 14.8 m^{-1}$ 时较利于二次流混合器的混合作用。

2.1.3 螺距的影响 螺距对混合器混合效果的影响规律也比较复杂。当二次流管的曲率为 $30.4 m^{-1}$ 和 $12.1 m^{-1}$ 时, 混合器的混合效果随螺距的增加而提高, 如图 5(a) 和图 5(c) 所示。其主要原因在于随着螺距的增加, 混合器的 GT 值减小^[15], 更加适宜于混合。但当二次流管的曲率为 $14.8 m^{-1}$ 时 [图 5(b)], 螺距为 8.0 mm 的混合器的混合效果优于螺距为 16.0 mm 的混合器的混合效果。

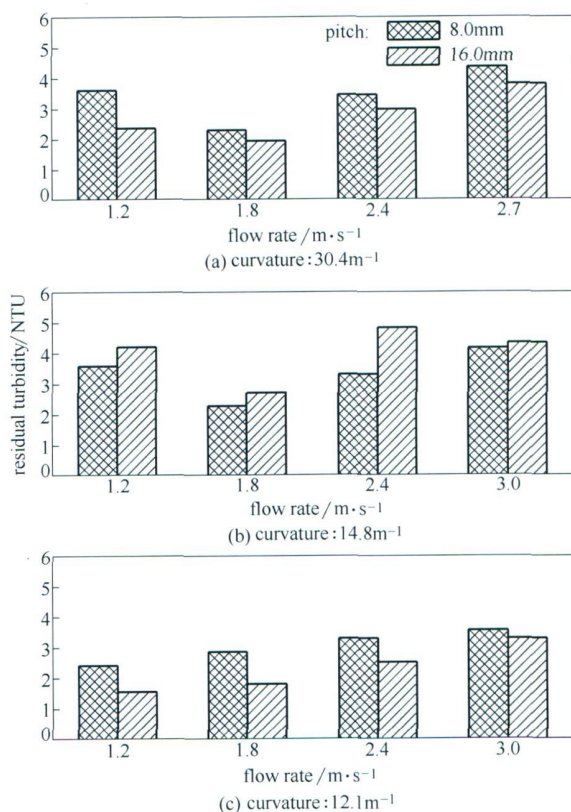


图 5 螺距对混合器混合效果的影响

Fig 5 Effect of pitch on mixing effect for helical secondary-flow mixer

(kaolin: $100 mg \cdot L^{-1}$; final pH: 7.0; PACl: $2.16 mg Al \cdot L^{-1}$; T : $24^{\circ}C$; tube length: 12 m)

表 1 各因素对二次流混合器混合效果影响的显著性

Table 1 Significance of impacts of some factors on mixing effect of secondary-flow mixer

Variance source	Degree of freedom	Mean square deviation	F value	Correlation probability	Significance
pitch, b	1	0.410	4.61	3.52×10^{-2}	significance
tube length, L	2	21.4	240	1.42×10^{-32}	high significance
flow rate, v	5	9.97	112	1.55×10^{-32}	high significance
curvature radius, r_a	2	7.78	87.3	5.59×10^{-20}	high significance
bL	2	1.32	14.8	3.97×10^{-6}	high significance
bv	5	0.846	9.50	5.43×10^{-7}	high significance
Lv	4	1.51	17.0	7.73×10^{-10}	high significance
bLv	4	0.0519	0.583	6.76×10^{-1}	no influence
br_a	2	1.36	15.2	3.06×10^{-6}	high significance
Lr_a	4	3.53	39.7	1.58×10^{-17}	high significance
bLr_a	4	0.202	2.27	7.02×10^{-2}	relative significance
vr_a	10	0.266	2.99	3.28×10^{-3}	high significance
bvr_a	10	0.213	2.39	1.63×10^{-2}	significance
Lvr_a	8	0.387	4.34	2.60×10^{-4}	high significance
$bLvr_a$	8	0.445	5.00	6.01×10^{-5}	high significance

2.1.4 管长的影响 管长影响混合器的混合效果主要是由于管长影响原水的水力停留时间。因为快速搅拌存在最佳的搅拌时间，过长或过短均不利于絮凝。图 2 和图 3 均表明，管长为 12 m 的混合器在电中和混凝和卷扫混凝时均可得到最佳的混合效果，此外在电中和混凝时，管长为 24 m 的混合器也可得到极佳的混合效果。但对于管长为 24 m 的混合器，由于其长度较大，原水流经时的压降也较大。这会增加离心泵等输送设备的投资及动力消耗，使原水的处理成本提高。因此在实际水及废水处理工程中，根据实验结果，可采用管长为 12 m 的混合器。当然，该数据是实验范围内的最佳管长，实际最佳管长尚需进一步研究。

2.2 影响混合器混合性能的各因素的显著性

为了考察各因素对二次流混合器混合性能影响的显著性，以便指导混合器的设计，优化混合器性能，对不同管长、不同螺距、不同曲率的混合器在不同水流速率下混合处理电中和混凝体系的实验结果进行了方差分析，结果见表 1。由表可看出，二次流混合器的管长、水流速率以及曲率对其混合性能的影响高度显著，而螺距对其混合性能具有显著影响。这 4 个因素对二次流混合器混合性能影响的显著性由高到低的顺序依次为管长、水流速率、曲率、螺距。

3 结 论

(1) 实验范围内（管长分别为 12、18、24 m），二次流管的最佳长度为 12 m，且 24 m 长的

二次流管在电中和混凝时也可得到极佳的混合效果。

(2) 二次流混合器在电中和混凝时的最佳 GT 值略高于卷扫混凝，且在电中和混凝时，存在一大一小两个最佳 GT 值，分别为 21000 和 35000；在卷扫混凝时，最佳 GT 值分别为 19000 和 32000。

(3) 二次流混合器的管长、水流速率以及曲率对其混合性能的影响高度显著，而螺距对其混合性能具有显著影响，四者影响的显著性由高到低的顺序为管长、水流速率、曲率、螺距。

References

[1] Hu Zhenjun (胡振军), Shen Jiarui (神家锐). Heat transfer enhancement and secondary flow induced by turbulators [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 1997, 18 (1): 69-72

[2] Colorado-Garrido D, Santoyo-Castelazo E, Hernández J A, García-Valladares O, Juárez-Romero D Heat transfer of a helical double-pipe vertical evaporator: theoretical analysis and experimental validation [J]. *Applied Energy*, 2009, 86 (7/8): 1144-1153

[3] Kuakivi D N, Moulin P, Charbit F Dean vortices: a comparison of woven *versus* helical and straight hollow fiber membrane modules [J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, 171: 59-65

[4] Ahlborn Boye, Groves Stuart Secondary flow in a vortex tube [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1997, 21: 73-86

[5] Zhan Hanhui (湛含辉), Zhang Xiaoqi (张晓琪), Dai Caisheng (戴财胜), Zhang Jingjing (张晶晶). Influence of secondary flow in water-only cyclone on its separation mechanism [J]. *Mining and Metallurgical Engineering* (矿冶工程), 2002, 22 (2): 57-59

[6] Naphon Paisarn Thermal performance and pressure drop of

- the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, **34** (3): 321-330
- [7] Huang Weixing (黄卫星), Chen Wenmei (陈文梅). *Engineering Fluid Mechanics (工程流体力学)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 163-180
- [8] Agrawal S, Nigam K D P. Modelling of a coiled tubular chemical reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, **84** (3): 437-444
- [9] Buchanan I D, Nicell J A, Wagner M. Reactor models for horseradish peroxidase catalysed aromatic removal [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124** (9): 794-802
- [10] Moulin P, Rouch J C, Serra C, Clifton M J, Aptel P. Mass transfer improvement by secondary flows: dean vortices in coiled tubular membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1996, **114**: 235-244
- [11] Liu Jianwen (刘建文), Zhan Hanhui (湛含辉), Shan Zhongjian (单忠键), He Xuwen (何绪文), Yin Chenglong (尹承龙). Experimental research on theory and design of dean vortices for strengthening mass transfer [J]. *Water & Wastewater Engineering (给水排水)*, 2004, **30** (2): 74-77
- [12] Vigneswaran S, Setiadi T. Flocculation study on spiral flocculator [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1986, **29** (2): 165-188
- [13] Huang Tinglin (黄廷林), Cao Chong (曹翀). A study on tubular coagulator used in the pellet coagulation process [J]. *Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering (西安冶金建筑学院学报)*, 1991, **23** (2): 213-222
- [14] Casey Jones S, Sotiropoulos Fotis, Amirtharajah Appiah. Numerical modeling of helical static mixers for water treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, **128** (5): 431-440
- [15] Zhang Zhongguo (张忠国), Liu Dan (刘丹), Luan Zhaokun (栾兆坤), Cheng Yanjun (程言君), Li Jiding (李继定), Song Yun (宋云), Rong Liming (荣立明). Mixing characteristic of a helical secondary flow mixer used in coagulation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering (环境工程学报)*, 2010, **4** (6): 1219-1223
- [16] Zhang Zhongguo (张忠国), Luan Zhaokun (栾兆坤), Zhao Ying (赵颖), Cui Jianhua (崔建华), Chen Zhaoyang (陈朝阳), Li Yanzhong (李燕中). Breakage and regrowth of flocs coagulation with polyaluminum chloride (PACl) [J]. *Environmental Science (环境科学)*, 2007, **28** (2): 346-351
- [17] Cui Junhua (崔俊华), Li Fuqin (李福勤), Hua Yuzhi (华玉芝). The research on the best coagulative *GT* value of common mine water [J]. *Energy Environmental Protection (能源环境保护)*, 2000, **14** (3): 33-34
- [18] Rossini M, Garrido J G, Galluzzo M. Optimization of the coagulation-flocculation treatment: influence of rapid mix parameters [J]. *Water Research*, 1999, **33** (10): 1817-1826
- [19] Andreu Villegas Rafael, Letterman Raymond D. Optimizing flocculator power input [J]. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1976, **102** (2): 251-263
- [20] Palazoglu T K, Sandeep K P. Effect of tube curvature ratio on the residence time distribution of multiple particles in helical tubes [J]. *Lebensm. Wiss. u. Technol.*, 2004, **37**: 387-393
- [21] Salengke S, Sastry S K. Residence time distribution of cylindrical particles in a curved section of a holding tube: the effect of particle concentration and bend radius of curvature [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, **27**: 159-176