

# 紫外线消毒器水力特性的研究

张光辉, 顾平, 于丹丹

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 采用示踪实验研究紫外线消毒器的水力特性。结果表明, 进出口方向和相对位置对反应器的水力特性没有显著影响, 随着雷诺数的增大, 反应器的水力特性参数逐渐接近于推流条件。同时利用计算流体力学(CFD)技术模拟紫外线消毒器的流场, 计算水流的累积停留时间分布  $F(t)$  并与示踪试验的结果相比较, 发现 CFD 模拟能够较好地反映紫外线消毒器的水力条件, 二者  $F(t)$  的差别主要是由于示踪试验中的实际条件偏离理想条件所致; 随着雷诺数的增加, 反应器内各部分水流  $F(t)$  的差别逐渐缩小。

**关键词:** 示踪实验; 计算流体力学(CFD); 水处理; 紫外线消毒器; 累积停留时间分布

中图分类号: TQ085.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2008)02-016-05

作为一种绿色的消毒技术, 紫外线(UV)消毒已经被认可并开始应用于污水处理, 国内的最大处理规模已达到 52 万  $m^3/d$ 。然而, 由于受到形态结构等因素的影响, 实际 UV 消毒器的水力条件很难达到理想的推流状态, 故反应器内各部分水流的停留时间并不相同; 此外, 因处理水中部分污染物对 UV 的吸收, 消毒器内的 UV 剂量分布也不均匀, 从而影响了 UV 的消毒效果。因此, 有必要对反应器的水力特性进行研究, 为改善 UV 系统消毒效果提供参考, 对 UV 消毒技术的推广具有积极的意义。

计算流体力学(CFD)建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上, 兼有理论性和实践性的双重特点, 是当前研究流体力学运动规律的第三种基本方法, 最近几年随着计算机技术的高速发展, 在化工、航空、机械、水利等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。然而, CFD 在水处理领域的研究, 国外尚处于起步阶段<sup>[2-4]</sup>, 国内也仅限于模拟二沉池、清水池和臭氧接触池等方面<sup>[5-7]</sup>。本文通过示踪试验研究进出口的方向及相对位置对 UV 消毒器水力特性的影响, 并在特定的进出口组合方式下, 采用 CFD 技术模拟水流在反应器内的流场, 计算其累积停留时间分布  $F(t)$  并与示踪试验的结果比较, 探讨 CFD 在 UV 消毒方面应用的可行性。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 示踪试验

示踪试验装置如图 1 所示。原水(自来水)经潜水泵提升进入 UV 消毒器, 某一时刻在消毒器的进口以脉冲信号方式注入示踪剂(结晶紫), 记录时间并同时在出口取样。用分光光度计测定出水的吸光度, 计算示踪剂的浓度, 分析其水力特性参数, 每组试验重复 3 次。调节阀门的开启度控制反应器流量的大小, 试验中流量控制在 1.0~4.0  $m^3/h$ , 原水温度介于 9.7~12.5  $^{\circ}C$ 。UV 消毒器的参数见表 1(长径比为反应器轴向和径向有效尺寸的比值)。

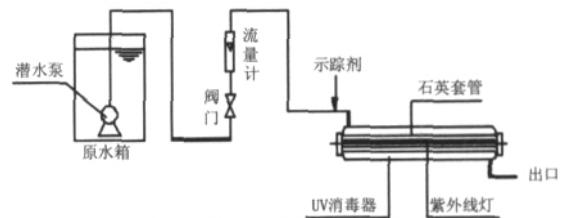


图 1 示踪试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of tracer test

为研究进出口的方向和相对位置对反应器水力特性的影响, 示踪试验中将 UV 消毒器设计为两个进口和两个出口, 见图 2。进口 1 为法向进口, 垂直于反应器壁面; 进口 2 为切向进口, 与反应器壁面相

收稿日期 2006-11-15

基金项目 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601130)

作者简介 张光辉(1976-), 男, 讲师, 研究方向为水处理及污水资源化, 联系电话: 022-27405059, E-mail: z\_gh@163.com.

表 1 UV 消毒器参数

Table 1 Parameters of UV disinfectant

指标	数值
反应器内径(cm)	8.3
石英套管外径(cm)	2.8
反应器总长(cm)	130
进出口距离(cm)	120
长径比	21.8

切。出口 1 和 2 均为法向出口,位于反应器主体的两侧。示踪试验中通过改变进出口的组合方式及反应器的流量,分析其对水力特性参数的影响。

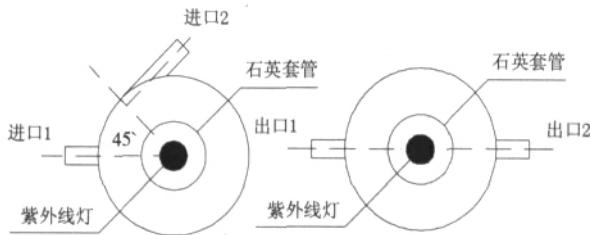


图 2 紫外线消毒器剖视图

Fig.2 Cross-section of UV disinfectant

## 1.2 CFD 几何模型和计算网格

根据示踪实验中的 UV 消毒器参数,构造用于 CFD 计算的反应器几何模型,如图 3 所示。反应器的主体部分为空心圆柱,两端为近似半球形,过水断面为圆环,水从石英套管外壁和反应器内壁之间的环形区域通过。反应器的两端、石英套管和不锈钢壁之间的密封性良好,以保证紫外线灯不与水接触。

UV 消毒器的几何体需要被划分为若干个网格单元,以满足计算的需要。由于石英套管外壁和反应器内壁附近水流的速度梯度远大于中心区域,如果采用相同的网格密度,则壁面附近的计算会产生较大的误差,因此划分网格之前需要在壁面区域设定边界层,以增大网格密度并提高计算的精度。本次计算中划分的网格总数约为 32 万个。

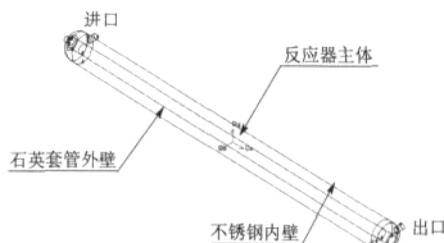


图 3 简化的 UV 消毒器几何体

Fig.3 Simplified geometry of UV disinfectant

## 1.3 CFD 计算模型和边界条件

利用 CFD 计算之前,需要确定计算模型和边界条件。本文的研究对象为水,其流态为紊流,因研究

中雷诺数(Re)在 2434~9734 之间波动(见表 2),变化范围较大,故选用重整化群(Renormalization Group RNG)k-ε 双方程模型,以适应计算低雷诺数 Re 流体的需要。该模型基于连续方程和动量守恒方程。

进口边界条件:设置水流速度在反应器的进口处均匀分布,且垂直于进口断面;出口边界条件:定义为自由流出条件。

壁面条件:采用静止壁面条件,因壁面材质为石英玻璃和不锈钢,表面比较光滑,参照水力学的相关资料<sup>[9]</sup>,壁面的粗糙系数取 0.009,绝对粗糙度取 0.01 mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 示踪试验

#### 2.1.1 进出口方向及相对位置的影响

在示踪试验中改变反应器进出口的方向和相对位置,研究其对水力特性参数的影响(见表 2)。表中  $t_{10}$ 、 $t_{50}$ 、 $t_{90}$  分别为示踪剂流出 10%、50%、90%所需的时间; $\bar{t}$ 、HRT 分别为示踪剂的实际和理论停留时间; $t_p$  为示踪剂峰值出现的时间。由表 2 可知,反应器进口的方向选择切向或者法向,进口和出口位于反应器的同侧或异侧,均对其水力特性参数没有显著的影响。由此可以判断,进口方向和相对位置不是反应器水力条件的决定因素。这是因为反应器的长径比高达 21.8,此时径向尺寸的影响可以忽略不计,而且进口和出口都非常接近反应器的两端,无论采用何种进出口组合方式,水流在反应器内的运动迹线的长度都不会有太大的变化,也不会发生明显的短

表 2 不同进出口组合在各流量下的水力特性参数

Table 2 Parameters of hydraulic characteristics at different flowrates

流量 (m <sup>3</sup> /h)	Re	参数	组合方式			
			进口 1 出口 1	进口 1 出口 2	进口 2 出口 1	进口 2 出口 2
1.0	2434	$t_{90}/t_{10}$	3.05	3.20	1.95	2.07
		$t_{50}/\bar{t}$	0.90	0.91	0.97	0.96
		$t_p/\text{HRT}$	0.37	0.39	0.65	0.58
		$\bar{t}/\text{HRT}$	0.51	0.59	0.74	0.68
2.0	4867	$t_{90}/t_{10}$	2.49	2.38	2.53	2.53
		$t_{50}/\bar{t}$	0.93	0.94	0.83	0.82
		$t_p/\text{HRT}$	0.67	0.75	0.62	0.74
		$\bar{t}/\text{HRT}$	0.83	0.84	0.80	0.76
3.0	7301	$t_{90}/t_{10}$	1.97	1.96	2.29	2.28
		$t_{50}/\bar{t}$	0.97	0.97	0.95	0.96
		$t_p/\text{HRT}$	0.74	0.79	0.79	0.71
		$\bar{t}/\text{HRT}$	0.84	0.80	0.86	0.91
4.0	9734	$t_{90}/t_{10}$	2.44	2.24	2.64	2.62
		$t_{50}/\bar{t}$	0.89	0.87	0.85	0.85
		$t_p/\text{HRT}$	0.78	0.79	0.83	0.86
		$\bar{t}/\text{HRT}$	0.89	0.85	0.92	0.95

流现象 因此进口方向对水力特性参数的影响不大。

由水力学的理论可知,水流从切向进入反应器可以产生旋流,能够增大紊动强度,从这个意义上分析,水流在反应器内的混合程度较法向进口方式更为均匀,流态更加接近推流。由表 2 可知,当 UV 消毒器的长径比较大时,进口方向垂直或相切于反应器主体以及进出口位于反应器的同侧或异侧,并不是成为影响反应器水力特性的主要因素。从生产厂商的角度出发,通常选择进口和出口垂直于反应器的主体且位于异侧,这样加工难度和费用比切向进口要低得多,同时也便于施工安装。

### 2.1.2 雷诺数的影响

本研究中 UV 消毒器的流量为 1.0 ~ 4.0 m<sup>3</sup>/h, Re 由 2434 增大到 9734,故反应器的流态属于紊流。参数  $t_{50}/t_p$ 、 $t_p/HRT$ 、 $\bar{t}/HRT$  随流量(或 Re)的增加呈递增的趋势,逐渐向 1.0 靠近,说明反应器的水力条件逐渐接近推流。

参数  $t_{50}/\bar{t}$  低于 1.0,说明反应器内存在死角,这是由 UV 消毒器的结构本身造成的。首先,反应器的进出口距端头有一小段距离,该区域为潜在的死角;其次,由于研究的需要,示踪实验所用的消毒器有 2 个进口和 2 个出口,但每次实验时只有一个进口和出口处于工作状态,而闲置的进口和出口就会成为死角,因而延长了示踪剂在该区域滞留的时间,造成累积停留时间分布  $F(t)$  出现明显的拖尾现象, $F(t)$  的定义见文献[9]。随着流量(或 Re)的增大,水流的紊动程度不断增加,死角内的示踪剂与附近区域水流之间的动量和质量传递作用越来越强烈,因而滞留在反应器内的示踪剂逐渐被水流所置换,死角的影响逐渐被弱化,反映到累积停留时间分布曲线上则为拖尾时间越来越短(见图 4)。

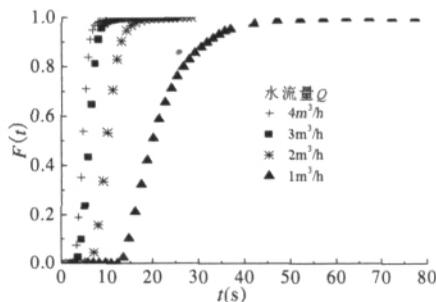


图 4 示踪试验的累积停留时间分布  
Fig.4 Distribution of cumulative residence time in tracer test

当 Re 增大到 9734 时,参数  $t_p/HRT$  和  $\bar{t}/HRT$  仍然小于 1.0,说明反应器的有效容积小于实际容积。

这是因为进出口至反应器邻近端头的部分属于无效容积,所以一般 UV 消毒器的有效容积都小于其实际容积。随着流量(或 Re)的增大,过水断面的圆环中心区域和反应器壁面附近的流速差异逐渐缩小,水流的径向混合程度愈来愈剧烈,死角的影响逐渐被削弱,示踪剂在反应器内的停留时间越来越接近理论平均停留时间,因而  $t_p/HRT$  和  $\bar{t}/HRT$  的数值逐渐增大,水流在整体上越来越接近推流状态。从这层意义上考虑,在相同的紫外线剂量辐射下,增大 Re 有利于提高反应器的消毒效果。

### 2.2 CFD 模拟

#### 2.2.1 CFD 模拟的水流迹线

CFD 模拟的水流迹线试验表明,无论采用何种进出口组合方式,反应器的进口端附近区域都形成了涡流场,水流产生剧烈的混合,但水流运动到反应器的三分之一段开始逐渐稳定下来,直至流出反应器为止。虽然切向进口方式的紊动段稍长一些,但水流迹线在总体上没有明显的区别。由此可以推测,反应器的长径比较大时,即使入口段产生剧烈的紊流,但由于径向尺寸较小,这股水流运动到反应器的一定位置时就会减弱下来,从而稳定地通过反应器。因此,只要 Re 足够大,反应器的流态就可以保持紊流,且运动也比较稳定。

#### 2.2.2 CFD 模拟的累积停留时间分布

图 5 是采用 CFD 技术模拟计算的水流在 UV 消毒器内的累积停留时间分布  $F(t)$ 。当流量为 1.0 m<sup>3</sup>/h 时,  $F(t)$  的分布范围较宽,反应器内存在明显的拖尾现象,但随着流量(或 Re)的增大,反应器内各部分水流的紊动程度不断增加,拖尾现象逐渐被弱化。当流量继续增加到 4.0 m<sup>3</sup>/h 时,反应器内各部分水流之间的  $F(t)$  分布已经非常接近,拖尾现象基本消失。

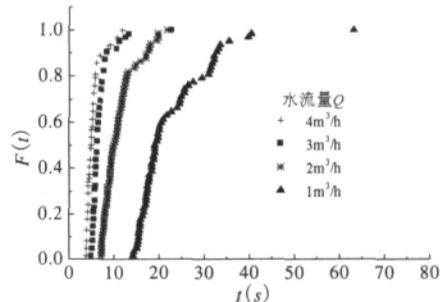


图 5 CFD 模拟的累积停留时间分布  
Fig.5 Distribution of cumulative residence time in CFD simulation

### 2.3 CFD 模拟与示踪试验的比较

图 6 是 CFD 模拟与示踪试验的结果比较,二者

的  $F(t)$  分布基本吻合,说明 CFD 模拟能够在一定程度上反映 UV 消毒器的水力特性。然而,整体上 CFD 模拟的  $F(t)$  分布范围比示踪试验的结果要窄一些,这种现象主要是由实验中示踪剂注入反应器所形成的实际信号与脉冲信号之间的差异所造成的:理想示踪试验的条件是在某时刻向反应器的进口以脉冲信号方式注入示踪剂,但在实际的示踪试验中,因反应器进水管段的水压作用,将一定体积的示踪

剂溶液完全注入反应器进口需要一定的时间,因而示踪剂的实际信号偏离了脉冲信号。鉴于实际试验中的示踪剂需要经历一小段时间才能完全进入反应器,进而发生紊流扩散,最终从反应器流出,因此其  $F(t)$  的分布范围必然大于理想示踪试验的结果,而 CFD 模拟计算中示踪剂的注入满足理想脉冲信号的条件,故其  $F(t)$  的分布范围比实际示踪试验小,与图 6 的结果一致。

从图 6 还可以看出,当流量为  $4.0 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$  时,CFD 模拟与示踪试验的  $F(t)$  分布均有一定的差异;而当流量为  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$  时,二者的  $F(t)$  分布最为接近。这是因为随着流量的降低,反应器进水管路的水压下降,则示踪剂注入反应器所需要的时间也会随之缩短,故示踪剂的实际信号越来越接近脉冲信号,所以  $F(t)$  分布逐渐接近理想示踪试验的结果,二者之间的差别也逐渐缩小。鉴于 CFD 模拟建立在理论分析和试验研究的基础上,该方法能够在一定程度上反映 UV 消毒器内的流场,因此可以利用 CFD 技术对反应器的水力条件进行深入研究和优化,以改善短流和拖尾现象,从而提高反应器的消毒效果,对 UV 消毒技术的推广具有重要意义。

### 3 结论

当紫外线消毒器的长径比较大时,径向尺寸的影响基本可以忽略,进口垂直或平行于反应器主体以及进出口位于反应器的同侧或异侧对水力特性没有显著的影响。

随着雷诺数  $Re$  的增大,紫外线消毒器的其它水力特性参数总体上呈增加的趋势,水流的拖尾现象也随之被弱化,水流状态逐渐接近推流,因而在相同的 UV 剂量下,增大雷诺数可以提高反应器的消毒效果。

利用 CFD 技术模拟水流在 UV 消毒器内的流场,计算累计停留时间分布  $F(t)$  并与示踪试验相比较,结果表明 CFD 模拟能够较好地反映 UV 消毒器的实际水力条件,二者  $F(t)$  的差别主要是由于示踪试验中的实际条件偏离理想条件所致。随着  $Re$  的增加,反应器的各部分水流  $F(t)$  之间的差别在逐渐缩小。

### 参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体动力学分析 - CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2004:1-4.
- [2] Ernest R Blatchley III, Zdravka Do-Quang, Marie-Laure Janex et al. Process modeling of ultraviolet disinfection [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(6):63-69.

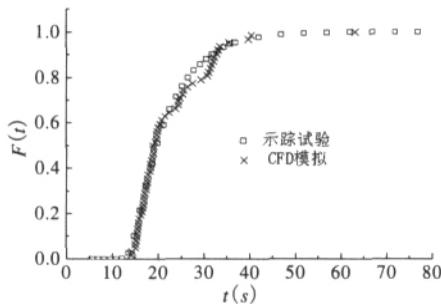


图 6(a)  $Q=1.0 \text{ m}^3/\text{h}$

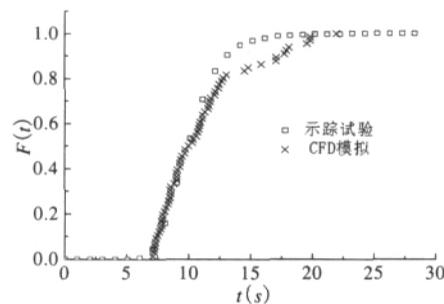


图 6(b)  $Q=2.0 \text{ m}^3/\text{h}$

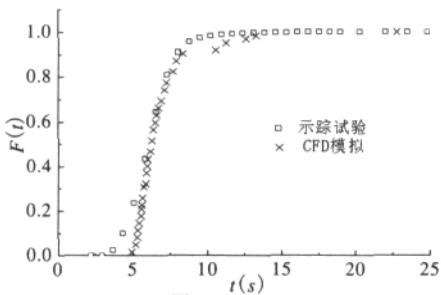


图 6(c)  $Q=3.0 \text{ m}^3/\text{h}$

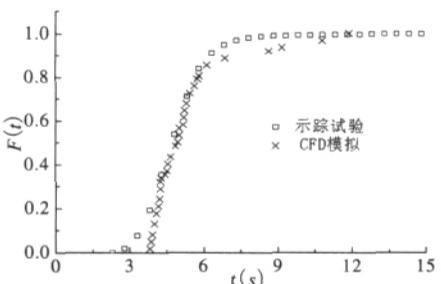


图 6(d)  $Q=4.0 \text{ m}^3/\text{h}$

图 6 示踪试验与 CFD 模拟的累积停留时间分布比较  
Fig.6 Comparison of cumulative residence time distribution between CFD simulation and tracer test

- [3] Fariborz Taghipour, Angelo Sozzi. Modeling and design of ultraviolet reactors for disinfection by-product precursor removal [J]. *Desalination*, 2005, 176(1-3): 71-78.
- [4] Seokjong Byuna, Jeongik Ohb, Bo-Young Lee, et al. Improvement of coagulation efficiency using instantaneous flash mixer (IFM) for water treatment [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 268(1-3): 104-110.
- [5] 刘文君, 崔磊. 应用计算流体力学优化清水池[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(5): 1-5.
- [6] 屈强, 马鲁铭, 朱伟. 周边式二沉池流态数值模拟[J]. *水处理技术*, 2006, 32(5): 23-25.
- [7] 缪佳, 李继, 张金松, 等. CFD在臭氧接触系统优化中的应用[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(10): 46-49.
- [8] 吴持恭. 水力学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 179-185.
- [9] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 79-83.

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF UV DISINFECTOR

ZHANG Guang-hui, GU Ping, YU Dan-dan

(College of Environmental Science and Engineerin, Tianjin university, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Hydraulic characteristics of the UV disinfectant was investigated by tracer experiment. The results showed that there was little effect on hydraulic characteristics of UV disinfectant in in-outlet direction and relative position; and hydraulic parameters were gradually close to these under plug-flow condition with Re number increasing. The flow field was simulated by computational fluid dynamics, and distribution of cumulative residence time calculated conformed to that by tracer experiment well. The difference between calculated value and experimental data decreased with Re number increasing.

**key words:** tracer experiment; computational fluid dynamics; water treatment; UV disinfectant; distribution of cumulative residence time

(上接第15页)

- [11] Tae-Hyoung Eom, Chang-Hwan Lee, Jun-Ho Kim, et al. Development of an ion exchange system for plating wastewater treatment [J]. *Desalination*, 2005, (180): 163-172.
- [12] S Kocaoba, G Akcin. Removal of chromium (III) and cadmium (II) from aqueous solutions [J]. *Desalination*, 2005, (180): 151-156.
- [13] S Rengaraj, Kyeong-Ho Yeon, So-Young Kang, et al. Studies on adsorptive removal of Co (II), Cr (III) and Ni (II) by IRN77 cation-exchange resin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, (B92): 185-198.
- [14] Rong Zhang, Saravanamuthu Vigneswaran, Huu Hao Ngo, et al. Magnetic ion exchange (MIEX) resin as a pre-treatment to a submerged membrane system in the treatment of biologically treated wastewater [J]. *Desalination*, 2006, (192): 296-302.
- [15] Nasiman Sapar, Azni Idris, Noor Hisham Ab Hamid. Total removal of heavy metal from mixed plating rinse wastewater [J]. *Desalination*, 1996, 106: 419-422.
- [16] Sevgi Kocaoba, Gökşel Akcin. Removal and recovery of chromium and chromium speciation with MINTEQA2 [J]. *Talanta*, 2002, (57): 23-30.
- [17] So-Young Kang, Jong-Un Lee, Seung-Hyeon Moon, et al. Competitive adsorption characteristics of Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, and Cr<sup>3+</sup> by IRN-77 cation exchange resin in synthesized wastewater [J]. *Chemosphere*, 2004, (56): 141-147.

## HEAVY METAL REMOVAL FROM INDUSTRIAL WASTEWATER BY ION EXCHANGE TECHNOLOGY

LI Hong-yan<sup>1</sup>, LI Ya-xin<sup>1</sup>, LI Shang-ming<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Heavy metal ions in industrial wastewater have more toxicity and are difficult to be degraded biologically. The concentration of these ions in wastewater has become high, and the standards of wastewater disposal have been strict more and more. Thus the wastewater discharging has turned into a difficult issue. Presently, ion exchange technology has achieved many fruits in the field of heavy metal wastewater discharging with qualified standards, and has had many successful application in this field. Their applied fruits are reviewed, and various parameter, such as pH value, solution concentration, resin dosage, contact time and operating conditions, affecting the technology are discussed in this paper.

**Key words:** heavy metal; industrial wastewater; ion exchange