

# 糠醛废水前期优化处理试验研究

湛含辉, 罗彦伟, 韦小利

(湖南工业大学 环保研究所, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 通过对糠醛废水进行必要的前期预处理, 使其pH值升高至9.70~9.80, 然后利用混凝沉降中流体力学作用基本原理, 在适当流体剪切力的作用下, 在不同的无机混凝药剂、有机药剂组合方式下, 对糠醛废水进行处理效果的对比试验, 结果表明: 在选用合理的混凝沉降模式条件下, 无机混凝药剂与有机药剂联合使用处理糠醛废水, 可以使其浊度由233 NTU降到4.3 NTU; 加入适量沉降载体——泥土, 浊度(396 NTU)则可降到2.7 NTU。

**关键词:** 糠醛废水; 流体力学; 混凝剂; 混凝; 絮凝

**中图分类号:** X703

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-2611(2007)01-0062-05

## The Experiment Study on Optimal Pretreatment of Furfural Wastewater

Zhan Hanhui, Luo Yanwei, Wei Xiaoli

(Environmental Protection Research Institute, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** Through eliminate pollution and control water quality, a study on optimal pretreatment of furfural wastewater was carried out. During the study, the pH of wastewater rise to 9.70~9.80, then made use of stream physical power chemical action basal principle in the middle of coagulation fallout and a contrast test was carried out under effect of shearing force in appropriate fluid and the combined mode of different inorganic coagulant and organic agents. As a result, a combination of them to handling furfural waterwaste can reduce the turbidity to 4.3 NTU from 233 NTU and add the appropriate amount settlement carrier earth, turbidities (396 NTU) may be lowered to 2.7 NTU under the conditional mode of reasonable inorganic coagulant.

**Key words:** furfural wastewater; fluid force chemistry; coagulant; coagulation; flocculation

糠醛<sup>[1-7]</sup>又名呋喃甲醛, 分子式是 $C_5H_4O_2$ , 其分子量为96.08, 相对密度为1.159 8, 熔点为 $-38.7^\circ C$ , 沸点为 $161.7^\circ C$ , 纯品是无色液体, 有特殊香味。它可用于生产合成纤维、合成橡胶、合成树脂、清漆、电绝缘材料、防腐剂、香烟的香料、塑料、铸造树脂、医药、农药、燃料等。糠醛生产的基本原理是以富含多聚戊糖的植物玉米芯为原料, 在催化剂(稀酸, 如稀硫酸或稀盐酸)的催化作用下进行高温加热, 使多聚戊糖水解为戊糖, 然后在同样条件下使戊糖脱水生成糠醛。由于原料来源广泛, 生产工艺简单等特点, 糠醛生产成为农产品深加工、农民增收、出口创汇的主导产业, 也成为乡镇企业发展的重点项目。

然而, 由于糠醛行业在生产过程中每吨产品要产

生30 t以上颜色为土黄色、呈混浊状, pH值在4.0~6.0左右的糠醛废水<sup>[6]</sup>, 废水中除含1.5%~2.5%的乙酸醛类和糠类<sup>[2]</sup>外, 还含其它微量有机酸、醛等, 对微生物有毒性。如果直接排放, 会造成受纳水体的严重污染, 而且由于糠醛“三废”治理困难, 环保问题多年来成为制约糠醛行业发展的瓶颈, 废水处理一直是阻碍该产业健康发展的绊脚石。因此, 寻求有效的处理工艺, 净化糠醛生产排放的废水, 改善受纳水体的质量, 具有明显的经济效益和环境效益。

## 1 糠醛废水处理研究现状

糠醛废水传统的处理方法主要有厌氧生物处理法<sup>[1-5]</sup>、电渗析分离处理法<sup>[6, 8, 9]</sup>、催化氧化联合活性

收稿日期: 2006-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574111)

作者简介: 湛含辉(1961-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教授, 博士后, 主要从事水处理技术及设备的研究和开发工作。

炭和混合离子交换树脂处理法<sup>[10, 11]</sup>、加碱中和法<sup>[11]</sup>、直接回收法<sup>[11]</sup>等。

厌氧生物处理法是利用厌氧微生物的代谢过程, 在无需提供氧气的情况下, 把有机物转化为无机物和少量细胞物质, 这些无机物主要包括大量的生物气(即沼气)和水<sup>[8]</sup>; 厌氧处理的过程即菌种驯化的过程, 它是利用废水对微生物种群进行自然筛选, 并使微生物对污染物逐步适应的过程。

电渗析分离电渗析器主要由钛钎极板、聚乙烯均相离子交换膜和无回路聚丙烯编织网隔板组成, 阴、阳离子交换膜交替排列, 分隔成若干小室, 当引入糠醛废水时, 在直流电场的作用下, 由阴、阳离子交换膜的选择透过性, 产生离子( $H^+$ 和 $Ac^-$ )的定向迁移, 离子迁移的结果: 一面使废水净化, 一面使乙酸浓缩, 达到回收有用物质和控制废水水质的双重目的。

催化氧化联合活性炭和混合离子交换树脂处理法是将废水先经过活性炭吸附, 再将滤液通过混合离子交换树脂过滤的一种废水处理方法。

加碱中和法工艺简单, 用碱液(生石灰)去中和废水, 以降低含酸量, pH值可达6~9, 但不能解决有机物(COD)对水质的污染问题, 其废水排放不符合国家排放标准。

直接回收法是利用醛水混合物具有共沸物性质, 对废水进行蒸发, 产生醛水混合蒸汽, 再经冷凝、脱水, 产生一部分糠醛, 蒸发后的残液含有醋酸, 或用加碱中和法, 或用乙酸乙酯萃取法回收醋酸, 即将残液冷却至30℃左右, 送至萃取塔。酸/酯相比重轻, 集于上层, 送往酯回收塔回收乙酸乙酯。将含醋酸残液送至蒸馏塔, 以进一步清除杂质, 在醋酸精馏塔内把甲酸分离出来; 另一部分即为醋酸产品, 分别回收起来。在萃取塔内得到的水/酯混合物作为残液, 再进入脱水装置分离出酯, 这部分酯和回收塔回收的乙酸乙酯经溶剂槽返回萃取塔, 集中残液的水则排入下水, 即可达到排放标准。此法虽然达到了国家的排放标准, 但在蒸发过程中需要大量的热量, 投资较高, 而且操作过程复杂, 从经济角度分析并不适用。

由于糠醛废水中所含的杂质浓度较高, 直接用“电渗析分离处理法”、“催化氧化联合活性炭和混合离子交换树脂处理法”、“厌氧处理法”等方法进行处理, 不但成本较高, 而且会使处理设备和试剂失去活性, 影响处理效果, 所以, 为了获得较好的处理效果, 应对糠醛废水进行必要的前期预处理。这样不但能使废水满足电渗析装置稳定运转对水质的要求, 防止膜的污染、中毒, 保证膜的良好性能, 保证活性炭的吸附活性和交换树脂的稳定性能, 保证菌种的生存条件, 而且降低了成本。所以, 对糠醛废水前期处理的研究很有必要。本文针对这一问题, 通过加入各种混

凝剂以及交叉联合使用, 对糠醛废水前期优化处理进行了试验研究。

## 2 试验设计基础理论

由于糠醛废水处理的效果最终是通过混凝沉降效果来体现的, 而混凝沉降的效果本质上是药剂与污染物颗粒的作用好坏的反映, 因此, 了解药剂与颗粒的作用过程在废水处理中至关重要。药剂与污染物颗粒作用的过程实质上是个混凝过程。混凝是以形成絮体为中心的单元净化过程, 它的效果是由混凝剂的化学作用和构筑物的流体动力学作用两方面来决定的。湛含辉等人在研究混凝过程中把混凝分成凝聚和絮凝2个过程, 认为凝聚过程主要是通过加入的混凝剂与水中胶体颗粒迅速发生电中和压缩双电层脱稳, 脱稳颗粒再相互凝聚形成初级微絮凝体; 絮凝过程则是水中胶体在加入混凝剂进行脱稳之后, 相互接触碰撞, 在吸引力作用下合并成长为粗大而密实的沉降絮凝体的过程。由此提出的混凝过程的物理模型把混凝沉降过程分为混合、凝聚和絮凝3个阶段<sup>[12, 13]</sup>(见图1)。

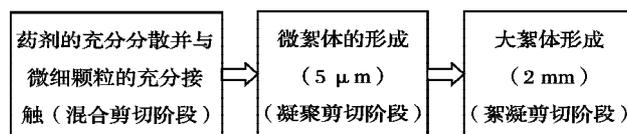


图1 混凝沉降(剪切)过程物理模型

Fig. 1 Physical model in the process of coagulation

由此可知: 只有胶体颗粒与充分分散的药剂充分接触, 才有可能充分地形成微絮体, 也才有可能充分地或高效地(在短时间内)形成大絮体。也就是说充分地混合剪切, 才有高质量的凝聚, 才可能有高效的絮凝。

因此对糠醛废水而言, 药剂要想与污染物颗粒很好地作用, 必须满足2个重要条件: 首先, 药剂颗粒本身要能均匀地分散在污染物颗粒周围, 分散得越均匀, 药剂的作用效果就发挥得越好越充分; 此外, 在保证药剂在颗粒周围的分散性均匀的前提下, 还要保证颗粒与药剂作用后能够相互碰撞粘结, 使颗粒由小变大, 即形成大絮体, 只有这样才能取得良好的混凝沉降效果。由于药剂的分散与颗粒的凝结都与流体力化学原理中的混凝剪切密切相关, 因此, 选择合适的混凝搅拌条件对糠醛废水前期处理的沉降效果十分重要。本文涉及的试验就是在充分考虑流体剪切力影响和选用合理的试验反应模式的条件下设计的。

## 3 试验

### 3.1 试验材料与仪器

试验原材料: 糠醛废水取自吉林某大中型糠醛厂, 已经过一定的处理, 其pH值在4.0~6.0之间, 废

水呈黄褐色、浑浊状，有一定的刺鼻气味。

试验药剂：硫酸亚铁、氯化铁、聚丙烯酰胺（PAM）、生石灰和泥土等。

试验主要仪器：GDS-3B 光电式浊度仪、pH-3C 型精密酸度计、混凝试验装置、秒表、量筒（1 000 mL、500 mL、50 mL）等。

### 3.2 试验方法

#### 3.2.1 糠醛废水预处理

首先称 100 g 生石灰溶于 1 L 水中，将其浑浊液与糠醛废水按 3:100 混合，使糠醛废水的 pH 值升高到一定范围（9.70~9.80），经预处理过的糠醛废水即下文所指的废水。

#### 3.2.2 试验方法

取废水少许测其原（加药剂前）浊度与 pH 值，之后取废水 1 L 于搅拌桶中，放在混凝装置对应的位置处，装上叶片，开动混凝装置稳压电源，按一定的试验模型进行实验。此实验中主要涉及到浊度的测量、pH 值的测量、混凝装置转速的控制等。

##### 1) 浊度的测量

测量前首先要对 GDS-3B 光电式浊度仪进行校准（用纯净水校准其浊度要达到 -1.0，用标准板校准达到 19.3，并且保证盛水槽的玻璃内外要干净无水雾），然后取待测液少许于盛水槽中，测其浊度，显示数字稳定即为所测数据。

##### 2) pH 值的测量

测量前要对 pH-3C 型精密酸度计进行校准，然后将玻璃极插入待测液中轻轻搅拌，待数字稳定后读数即可。

##### 3) 混凝试验装置的使用

混凝试验装置如图 2，试验中叶片尺寸固定，搅拌强度的变化通过调整转数来实现。

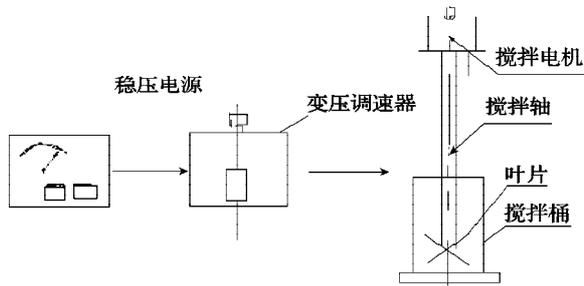


图 2 混凝试验装置  
Fig. 2 Facility of coagulation

图 2 中，把时间分为 2 个阶段，即初始搅拌和絮凝搅拌。做混凝试验时，先打开混凝装置稳压电源，通过变压调电器来调节转速。

### 3.3 试验结果与讨论

#### 3.3.1 不同种类的无机混凝药剂对废水处理效果的影响试验

将搅拌转速调到 80 r/min，然后加入一定量的无机

混凝药剂，并开始计时，5 min 后，静置 2 min，取上层清液测其浊度，相关数据见表 1。

表 1 无机混凝药剂种类对废水处理效果的影响  
Table 1 The effect of the kind of coagulants to the treatment results of wastewater

药剂种类	原水浊度 /NTU	出水浊度 /NTU	药剂质量浓度 /%	药剂用量 /mL
FeSO <sub>4</sub>	233	28.6	1	10
FeCl <sub>3</sub>	233	21.2	1	10

由表 1 试验数据可知：单独加无机混凝药剂，FeCl<sub>3</sub> 对废水的净化效果比 FeSO<sub>4</sub> 对废水的净化效果要好些，这可能是因为 Fe<sup>3+</sup> 与 Fe<sup>2+</sup> 相比，Fe<sup>3+</sup> 在水解聚合生成氢氧化物沉淀过程中的中间产物（也就是铁的单核或多核羟基配离子引起的）所带的电荷比 Fe<sup>2+</sup> 水解聚合生成氢氧化物沉淀过程中的中间产物高，因而电性中和作用较好，从而混凝效果就较好。

#### 3.3.2 无机混凝药剂用量对废水浊度的影响试验

将搅拌转速调到 80 r/min，然后加入一定量的无机混凝药剂，并开始计时，5 min 后，静置 2 min，取上层清液测其浊度和 pH 值，改变药剂用量重复以上操作，相关数据见表 2。

表 2 无机混凝药剂 FeCl<sub>3</sub> 用量对废水处理效果的影响  
Table 2 The effect of the dosage of coagulants to the treatment results of wastewater

药剂用量 /mL	原水浊度 /NTU	出水浊度 /NTU	药剂质量浓度 /%
1	233	21.2	1
2	233	19.6	1
5	233	15.4	1
20	233	46.2	1

由表 2 试验数据可知：改变无机混凝药剂的用量对废水的净化处理效果有一定影响。适当增加无机混凝药剂用量，可以在一定程度上降低废水的浊度，而过量增加无机混凝药剂用量，废水的浊度反而升高。究其原因是由无机混凝药剂 FeCl<sub>3</sub> 的混凝机理引起的。

铁盐的混凝，一般来说是以电性中和和卷扫作用为主要作用机制的，以 FeCl<sub>3</sub> 作混凝剂时，投放剂量一般已超出其氢氧化物沉淀的溶度积，因而胶体的脱稳是由水和铁离子在水解聚合生成氢氧化物沉淀过程中的中间产物，也就是铁的单核或多核羟基配离子引起的。这些带正电荷的水解产物通过静电中和减弱了胶粒间的斥力，使胶粒得以借范德华力凝聚在一起。由于在一定范围内的过量投放能使已解稳胶体重新悬浮，因而静电中和主要不是通过压缩胶粒表面双电层而是通过表面吸附造成的。当投放剂量很大时，铁的氢氧化物沉淀能迅速产生，形成对胶粒的卷扫作用，当胶粒浓度很低时，常以卷扫机制去除水中胶体粒

子。而在试验中投加量增大, 处理效果反而变差, 这是由于当混凝剂  $\text{FeCl}_3$  过量投加时, 胶粒表面电荷会发生逆转, 造成胶体的重新悬浮的缘故。说明卷扫作用机制并不是此条件下混凝的主要机制。因此, 药剂必须适量, 才能达到较好的混凝效果, 达到较好的降低废水浊度的目的。

### 3.3.3 有机药剂聚丙烯酰胺 (PAM) 对废水处理效果的影响试验

将搅拌转速调到 200 r/min, 然后加入一定量的有机药剂, 并开始计时, 2 min 后将搅拌转速调至 80 r/min, 再过 3 min 后, 静置 2 min, 取上层清液测其浊度和 pH 值, 相关数据见表 3。

表 3 有机药剂聚丙烯酰胺处理废水的效果

Table 3 The result of the PAM to the treatment of wastewater

药剂名称	原水浊度 / NTU	出水浊度 / NTU	药剂质量浓度 / %	药剂用量 / (mg · L <sup>-1</sup> )
PAM	233	6.5	0.1	0.5

由表 3 与表 1 对比可知: 有机药剂比无机混凝剂对废水的净化效果要好, 且消耗量少; 此外, 由实验过程中观察到的试验现象可知, 有机药剂沉降速度要比无机沉降速度快, 这主要是由于无机混凝药剂与有机药剂混凝机理不同造成的。

阴离子型和非离子型高分子量絮凝剂聚丙烯酰胺 (PAM) 对带负电荷胶粒的脱稳作用是通过高分子不同链节或重复单元在胶粒上的吸附引起的。由于一个线性成分分子可以同时被几个胶粒吸附, 因而高分子絮凝剂能起粒间架桥, 使胶粒聚沉的作用即絮凝沉降作用, 其絮凝能力与分子量大小及分子构型有关。一般说, 分子量越大, 分子的支化与交联越少 (链状展开越好), 则其粒间架桥作用就越强, 否则就越弱。而无机混凝剂的混凝机理主要是电性中和作用 (卷扫作用不占主要地位), 作用的胶粒对象较少, 因而混凝效果不如高分子絮凝剂聚丙烯酰胺。

此外, 废水中的  $\text{Ca}^{2+}$  可能在一定程度上起到无机混凝药剂 (协电解质) 电性中和的作用, 这可能也是絮凝效果更好的原因。

### 3.3.4 无机与有机药剂联合使用对废水处理效果的影响试验

将搅拌转速调到 80 r/min, 加入一定量的无机混凝药剂, 并开始计时, 搅拌 2 min 后, 再加一定量的有机药剂, 并将搅拌转速调至 200 r/min, 又过 2 min 后, 再将转速调至 80 r/min, 经过 3 min 后, 静置 2 min, 取上层清液测其浊度和 pH 值, 相关数据见表 4。

由表 4 试验数据可知: 无机与有机药剂联合使用对废水的净化效果比单独用任何一种的效果都好, 这可能是因为加有药试剂与无机混凝药剂, 可以相互弥补缺陷, 从而使净化效果更佳缘故。

表 4 无机与有机药剂联合使用处理废水的效果

Table 4 The result of using PAM and  $\text{FeCl}_3$  to the treatment of wastewater

药剂名称	原水浊度 / NTU	出水浊度 / NTU	质量浓度 / %		药剂用量 / (mg · L <sup>-1</sup> )	
			$\text{FeCl}_3$	PAM	$\text{FeCl}_3$	PAM
$\text{FeCl}_3$ + PAM	233	4.3	1	0.1	10	0.5

### 3.3.5 沉降载体——泥土对混凝沉降试验的影响

此试验是先将一定量的泥土 (0.5 g/L) 加入到原废水中, 配制成新废水, 然后再重复以上几个试验, 对试验效果进行对比, 并分析试验结果 (废水中加泥土是为了提高废水浊度, 增加比重, 以提高试验效果。这里, 泥土同时也起到了沉降载体的作用)。

只加无机混凝药剂 (有机药剂) 时, 先将搅拌转速调到 80 r/min (200 r/min), 然后加一定量的无机混凝药剂 (有机药剂), 并开始计时, 5 min 后, 静置 2 min, 取上层清液测其浊度和 pH 值, 记下相关数据见表 5、表 6 (表 7)。当无机混凝药剂与有机药剂联合使用时, 先将搅拌转速调到 80 r/min, 加一定量的无机混凝药剂, 并开始计时, 搅拌 2 min 后, 再加一定量的有机药剂, 并将搅拌转速调至 200 r/min, 又过 2 min 后, 将转速调至 80 r/min, 再过 3 min 后, 静置 2 min, 取上层清液测其浊度和 pH 值, 相关数据见表 8。

表 5 无机混凝药剂  $\text{FeCl}_3$  对新废水的处理效果

Table 5 The result of using  $\text{FeCl}_3$  to the treatment of new wastewater

药剂名称	新废水浊度 / NTU	出水浊度 / NTU	药剂质量浓度 / %	药剂用量 / (mg · L <sup>-1</sup> )
$\text{FeCl}_3$	396	19.4	1	10

表 6 无机混凝药剂  $\text{FeCl}_3$  用量对新废水的处理效果的影响

Table 6 The effect of the dosage of  $\text{FeCl}_3$  to the treatment results of new wastewater

药剂用量 / mL	新废水浊度 / NTU	出水浊度 / NTU	药剂质量浓度 / %
1	396	19.4	1
2	396	17.8	1
5	396	13.8	1
20	396	34.5	1

表 7 有机药剂 PAM 对新废水的处理效果

Table 7 The result of using PAM to the treatment of new wastewater

药剂名称	新废水浊度 / NTU	出水浊度 / NTU	药剂质量浓度 / %	药剂用量 / (mg · L <sup>-1</sup> )
PAM	396	5.1	0.1	0.5

表 8 无机  $\text{FeCl}_3$  与有机药剂 PAM 联合使用  
对新废水的处理效果

Table 8 The result of using PAM and  $\text{FeCl}_3$  to  
the treatment of new wastewater

药剂名称	原水浊度 /NTU	出水浊度 /NTU	药剂质量浓度 /%		药剂用量 /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	
			$\text{FeCl}_3$	PAM	$\text{FeCl}_3$	PAM
$\text{FeCl}_3$ +PAM	396	2.7	1	1	10	0.5

将表 5~8 的数据与不加泥土时的数据进行对比可知, 在废水中适当加些泥土不但不会增加废水的浊度, 反而会起到絮凝剂的作用, 这主要是因为泥土溶于水以后, 一方面可以看作是胶体, 带有电荷, 可以吸附小颗粒, 一定程度上达到净化废水的目的; 另一方面可能是泥土的加入起到增加晶种的作用, 能诱导和加快絮凝小颗粒相互粘结成大颗粒, 进而改善絮凝沉降效果。

## 4 结论

糠醛废水前期净化的最好途径是将废水中的杂质转变成容易析出且溶解度小的结晶小颗粒。其实质是将分散在废水中的稳定杂质离子或化合物脱稳, 再在一定条件下与相关药剂形成晶体小颗粒, 并最终从废水中分离出来, 从而降低废水的浊度, 达到净化废水的目的。由于原糠醛废水中杂质含量比较大, pH 值在 4.0~6.0 之间, 直接加有机药剂或无机混凝药剂都不能使其水质得到改善, 这可能是因为 pH 值较小时, 无机混凝药剂和有机药剂都不能发挥好的混凝沉降作用引起的。由试验发现: 逐渐升高原糠醛废水 pH 值到一定程度 (9.70~9.80), 再加无机或有机药剂会出现絮凝小颗粒, 这也在一定程度上验证了无机或有机药剂发挥絮凝作用受溶液 pH 值的影响。本试验就是在将原糠醛废水的 pH 值调高到一定程度的情况下进行的研究。由上述试验结果可得出如下结论:

1) 单独加无机混凝药剂时, 其混凝机制主要是电性中和作用 (卷扫作用可能存在, 但不是主要机制), 凝聚颗粒较小, 沉降速度较慢, 混凝效果不是很好, 处理后废水浊度仍然较高。增加药剂用量可以提高净化效果, 但药剂过量会升高废水浊度, 起反作用, 这是

由于胶粒表面电荷发生逆转, 造成胶体的重新悬浮的缘故。

2) 单独加有机药剂时, 絮凝颗粒较大, 沉降较快, 絮凝效果较好, 且用量少; 这主要是由有机药剂的性能特点和絮凝机理决定的, 部分原因也可能是废水中的  $\text{Ca}^{2+}$  (生石灰调 pH 值) 起到了无机混凝药剂电性中和的作用, 进而使废水的净化效果变好。

3) 无机与有机药剂联合使用可以互相弥补缺陷, 使絮凝颗粒大而实, 沉降速度快, 对废水的净化效果更好。

4) 加泥土可以进一步降低废水的浊度, 使净化处理效果更好。

## 参考文献:

- [1] 甘海南, 李善平, 勾怀亮, 等. 糠醛废水处理工程的调试运行实例[J]. 云南环境科学, 2000, 19(增刊): 182-184.
- [2] 闫秀丽, 苏会东. 厌氧生物法处理糠醛废水的研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2001, 18(1): 90-91.
- [3] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 2-3.
- [4] 田冬梅, 邓桂春, 臧树良, 等. 糠醛废水治理技术的进展[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 1999, 26(3): 271-276.
- [5] 任鸿均. 糠醛生产中的三废治理[J]. 发展论坛, 2000(7): 4-6.
- [6] 张和, 赵增国, 周立. 糠醛废水综合治理技术[J]. 石油化工, 1998, 27(7): 525-528.
- [7] 史伟明, 张楠. 糠醛生产“三废”情况的调查[J]. 黑龙江环境通报, 2002, 26(1): 57-58.
- [8] 全国电渗析技术秘书组. 电渗析技术资料选编[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1977: 207-209.
- [9] 张根生. 电渗析水处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 28-34.
- [10] 吴林友, 曹中秋, 韩光喜, 等. 催化氧化处理糠醛废水[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 183-184.
- [11] 冯晓领, 李承文. 糠醛生产中的废水处理[J]. 辽宁化工, 2000, 29(2): 117-118.
- [12] 湛含辉, 张晓琪, 湛雪辉, 等. 混凝机理物理模型中混合剪切阶段的研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 4-6.
- [13] 湛含辉, 张晓琪, 胡岳华. 混凝机理及其试验研究[J]. 矿冶工程, 2003, 23(5): 27-30.