

## 生物吸附-沉降法去除电镀废水中镉

代淑娟<sup>1</sup>, 魏德洲<sup>1</sup>, 白丽梅<sup>2</sup>, 周东琴<sup>1</sup>, 王玉娟<sup>1</sup>, 刘文刚<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004;

2. 河北理工大学 资源与环境学院, 唐山 063009)

**摘 要:** 以水洗废啤酒酵母为吸附剂, 采用吸附-沉降法, 研究水洗废啤酒酵母对电镀废水中镉的吸附规律及沉降效果。结果表明, 在废水中镉含量为 26 mg/L、pH 7、水洗废啤酒酵母用量 40 g/L(含水约 72%)、室温(约 18 °C)、搅拌速度 800 r/min、吸附时间 30 min、沉降 3.5 h 的条件下, 废水中镉的吸附率及吸附-沉降后镉的去除率均达 96%以上。并采用透射电子显微镜、电动电位及红外光谱分析手段, 分析水洗废啤酒酵母对镉的吸附机理。水洗废啤酒酵母对镉的吸附不仅发生菌体表面, 也发生在菌体内部。吸附过程存在化学络合、静电吸引、氢键等作用。

**关键词:** 电镀废水; 镉; 水洗废啤酒酵母; 生物吸附; 沉降

中图分类号: X 703

文献标识码: A

## Removing cadmium from cadmium-containing electroplating wastewater by biosorption-sedimentation

DAI Shu-juan<sup>1</sup>, WEI De-zhou<sup>1</sup>, BAI Li-mei<sup>2</sup>, ZHOU Dong-qin<sup>1</sup>, WANG Yu-juan<sup>1</sup>, LIU Wen-gang<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. College of Resource and Environment, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)

**Abstract:** The adsorption regular of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae* on cadmium in the wastewater of electroplating factory and sedimentation effect were studied by adsorption-sedimentation method using water-washing waste *saccharomyces cerevisiae* as adsorbent. The experimental results show that the adsorption rate and removing rate of cadmium are both above 96% under conditions with cadmium concentration in cadmium-containing electroplating wastewater about 26 mg/L, pH of 7.0, the dosage of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae* of 40 g/L (about 72% water) at 18 °C, the stirring revolution of 800 r/min, adsorption for 30 min and natural sedimentation for 3.5 h. The adsorption mechanism of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae* to cadmium is analyzed by TEM, Zeta potential and infrared spectroscopy of the cells. The results show that adsorbing effect occurs on the surface and inside of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae*. The chemistry chelating, electrostatic force, hydrogen bonding and so on all fountion in the adsorption process.

**Key words:** electroplating wastewater; cadmium; water-washing waste *saccharomyces cerevisiae*; biosorption; sedimentation

含镉废水是对环境污染最严重和危害最大的工业废水之一, 其成分复杂, 处理达标要求非常严格, 传统的物理化学法各有优缺点。化学沉淀法<sup>[1]</sup>虽能除去

废水中大部分镉离子, 但堆放的沉渣会造成二次污染; 铁氧体法<sup>[2]</sup>具有一定竞争力。但铁氧体在形成过程中, 若通气时间或蒸汽温度没有控制好, 形成的铁氧体晶

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50174014); 辽宁省自然科学基金资助项目(20042021); 辽宁省科技计划资助项目(2006223002)

收稿日期: 2008-03-19; 修订日期: 2008-06-10

通讯作者: 代淑娟, 高级工程师, 博士研究生; 电话: 15942300922; E-mail: shujuandai@163.com

体将不理想。此外,铁氧体法不能单独回收重金属;离子交换法<sup>[3]</sup>处理效果好,但树脂易受污染或氧化失效,再生频繁,操作费用高;膜分离法<sup>[4]</sup>具有污染物去除率高,能回收废水中的镉盐,工艺简单等优点,但其投资较高,膜孔易堵塞。这些都限制了膜分离法的大规模应用。生物法因能耗少,成本低,效率高,而且容易操作,最重要的是没有二次污染,因此引起了环保工作者的广泛关注<sup>[5-10]</sup>。

含重金属废水的生物吸附的过程是一个固-液接触的过程,要将生物吸附技术推向实际应用,必须使生物相和溶液能经济、有效地分离。据文献报导<sup>[11]</sup>及探索实验,废啤酒酵母对废水中重金属具有良好的吸附性能,同时具有良好的沉降性能,可以采用生物吸附-沉降法去除废水中的重金属离子。

本研究以水洗废啤酒酵母为吸附剂,以某电镀厂电镀废水为处理对象,采用吸附-沉降法去除电镀废水中的镉,获得较好的镉去除效果。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及处理对象

处理对象为某电镀厂含镉废水,其主要成分为镉含量为 26 mg/L、铅 0.054 mg/L、锌 1.16 mg/L、铬 0.183 mg/L,密度约  $1 \times 10^3$  g/m, pH 为 8.15。

废啤酒酵母取自某啤酒厂,该废啤酒酵母性脆,片状,有香味,含水分 4.49。废啤酒酵母经简单水洗预处理后用作生物吸附剂。水洗条件:废啤酒酵母与水比例 5:100、搅拌转数 500 r/min、搅拌时间 10 min,洗后经 5 000 r/min 离心分离,可溶相占废啤酒酵母的 26.48%,固相即为生物吸附剂,其含水量约为 72%,称作水洗废啤酒酵母。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 吸附实验

在含镉电镀废水中,加入一定量水洗废啤酒酵母,按不同的试验要求在一定条件下进行搅拌吸附,吸附后经 15 000 r/min 离心分离 5 min 除去菌体,测出上清液的镉浓度,按下式计算菌体对镉的吸附率  $Q$ :

$$Q = (1 - \rho/\rho_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\rho_0$  和  $\rho$  分别为吸附前后溶液中镉的浓度, mg/L。

#### 1.2.2 沉降实验

含镉电镀废水经水洗废啤酒酵母吸附后,静止沉淀一定时间,将上清液及沉淀物分别经 15 000 r/min

离心分离 5 min,分离后固相分别低温烘干、称量质量,按下式计算沉淀率  $R$ :

$$R = m_2 / (m_1 + m_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $m_1$  和  $m_2$  分别为沉淀后上清液中及沉淀物中离心分离出的菌体的质量, mg。

按下式计算吸附沉降后镉的去除率  $M$ :

$$M = Q \times R \times 100\% \quad (3)$$

### 1.3 分析检测方法

金属分析采用日本岛津 AA-6300 原子吸收分光光度计测定。

透射电子显微镜的分析程序为<sup>[12]</sup>:将吸附镉前、后的水洗废啤酒酵母用蒸馏水清洗 3 次;用戊二醛固定;酒精脱水;用包埋剂和脱水剂按浓度梯度分级换液浸透;用 Epon812 对浸透过的菌体进行包埋;用超薄切片切成共透射电镜测定用的薄片;镜检;拍照。

$\zeta$  电位测定:将吸附镉前、后的水洗废啤酒酵母用蒸馏水洗涤 3 次后,再用蒸馏水配成浓度为 0.05 g/L 溶液,用 HCl 和 NaOH 调节溶液 pH,用纳米粒度及 ZRTA 电位分析仪测定菌体细胞的电动电位。

红外光谱测定:将吸附镉前、后的水洗废啤酒酵母用蒸馏水洗涤 3 次,在 50~60 °C 时烘干,在玛瑙研钵中细磨至粒度小于 2  $\mu\text{m}$ ,用光谱纯 KBr200 mg 压片制样,在 Perkin Elmer Spectrum One FT-IR Spectrometer 红外光谱仪上用漫反射法测定。

## 2 结果及分析

### 2.1 吸附实验

在电镀废水中镉的浓度约为 26 mg/L、温度为室温(约 18 °C)的条件下,系统地考察了 pH 值、吸附剂用量、搅拌转数及吸附时间对吸附效果的影响。

#### 2.1.1 pH 值对吸附效果的影响

采用 HCl 作 pH 值调整剂,调整电镀废水 pH 至所需值,再加入水洗后废啤酒酵母 40 g/L,搅拌转数为 800 r/min,搅拌吸附时间为 10 min, pH 值对吸附效果的影响如图 1 所示。

由图 1 可以看出, pH 值对吸附效果的影响非常显著。当 pH 小于 4 时,吸附效果均较差;在 pH 值为 3.99 时,吸附率 88.57%;在 pH 值大于 4 较宽的范围内,均可获得较好的吸附效果。pH 值在 2~7 的范围内,吸附率随 pH 增大而增加。pH 值为 7 时,吸附率最大,

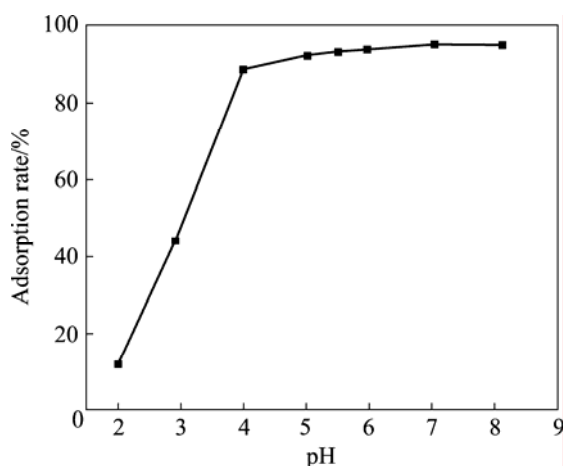


图 1 pH 值对吸附效果的影响

Fig.1 Effect of pH on adsorption results

达 95%, 在 7~8.15 时, 吸附率略呈降低趋势; 不调整 pH, 对废水直接进行吸附(pH 值为 8.15), 吸附率为 94.72%。由此可见, 该吸附剂吸附镉可在较宽的 pH 值范围内有效完成, 且中性 pH 值时, 吸附效果最好。不调 pH 值时(pH 为 8.15), 吸附效果也十分理想, 该特点对工艺的工业化实施十分有利, 可节约成本、方便操作 利于设备维护和水的排放。

### 2.1.2 吸附剂用量对吸附效果的影响

调整废水 pH 值至 7, 在搅拌转速为 800 r/min、搅拌吸附时间为 10 min 的条件下, 研究吸附剂用量对吸附效果的影响。实验结果见图 2。

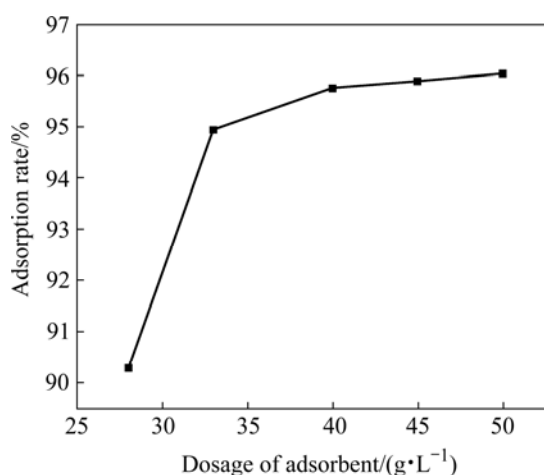


图 2 吸附剂用量对吸附效果的影响

Fig.2 Effect of adsorbent dosage on adsorption results

由图 2 可见, 随着水洗废啤酒酵母菌用量的增加, 镉的吸附率呈上升趋势。当吸附剂用量从 28 g/L 增至 40 g/L 时, 吸附率增加较快; 吸附剂用量超过 40 g/L,

吸附率增加缓慢。因此, 综合考虑技术经济指标, 吸附剂的适宜用量为 40 g/L, 与之对应的镉的吸附率为 95%。

### 2.1.3 搅拌转速对吸附效果的影响

调整废水 pH 值至 7, 在废啤酒酵母菌用量为 40 g/L、搅拌吸附时间为 10 min 的条件下, 研究搅拌转速对吸附效果的影响, 结果如图 3 所示。

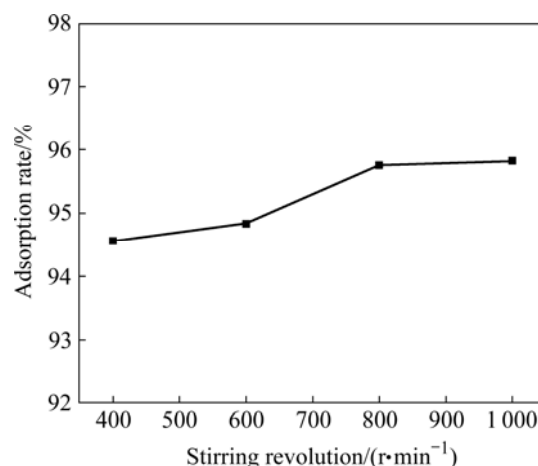


图 3 搅拌转速对吸附效果的影响

Fig.3 Effect of stirring revolution on adsorption results

由图 3 可见, 随着搅拌速度的增加, 水洗废啤酒酵母菌对电镀废水中镉的吸附率呈增加趋势, 但影响不显著, 搅拌速度从 400 r/min 增至 800 r/min, 吸附率从 94.56% 增至 95.75%, 搅拌速度从 800 r/min 增至 1 000 r/min 时, 吸附率由 95.75% 增至 95.81%, 增幅很小。可见, 搅拌速度为 800 r/min 时较适宜。

### 2.1.4 吸附时间对吸附效果的影响

在 pH 7、废啤酒酵母菌用量为 40 g/L、搅拌速度为 800 r/min 的条件下, 研究搅拌吸附时间对吸附效果的影响, 结果如图 4 所示。

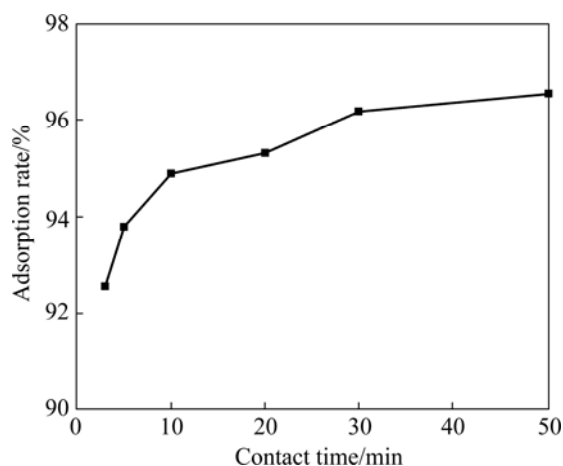


图 4 吸附时间对吸附效果的影响

Fig.4 Effect of adsorption time on adsorption results

由图 4 可见, 水洗废啤酒酵母菌对电镀废水中镉的吸附速度很快, 吸附 3 min 后, 吸附率已达到 92.55% 以上。随着吸附时间的增加, 镉吸附率呈增加趋势, 在 3~10 min 时, 镉吸附率增加幅度较大, 吸附 10 min 时, 镉吸附率达 95%; 吸附 10~30 min 时, 镉吸附率增加的幅度相对较小, 吸附 30 min 时, 镉吸附率达 96.18%。随着吸附时间的进一步延长, 对镉的吸附率增加比较缓慢。

## 2.2 沉降实验

将 40 mL pH 7、镉浓度为 26 mg/L 的电镀废水及 1.6 g 水洗废啤酒酵母菌加入容积为 100 mL 的烧杯中, 在 800 r/min 下磁力搅拌 30 min, 静止沉淀, 测定不同沉淀时间的沉降率, 实验结果如图 5 所示。

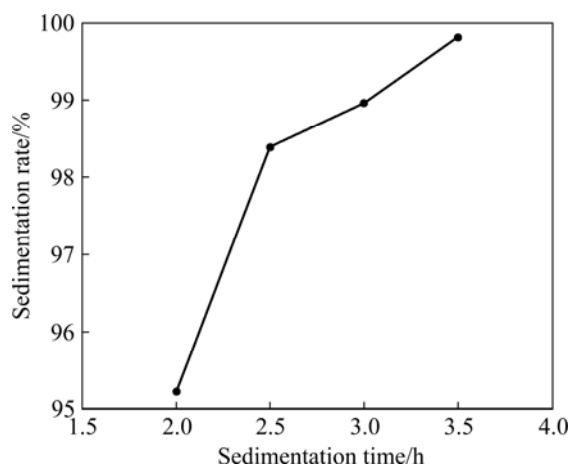


图 5 沉降率与沉淀时间的关系

Fig.5 Relationship between sedimentation rate and sedimentation time

由图 5 可见, 该吸附剂沉降性能很好, 沉淀 2 h 时, 沉淀率已达 95.23% 以上。随着沉淀时间的增加, 水洗废啤酒酵母沉降率呈上升趋势。沉降 3.5 h 时, 沉降率增加至 99.81%, 此时废水中镉的去除率达 96.00%, 废水中的镉浓度从 26 mg/L 下降到 1.04 mg/L。可见, 以水洗废啤酒酵母为吸附剂, 采用吸附-沉降法去除电镀废水中的镉, 可获得较好的指标。

## 2.3 结果分析

分别取吸附镉前后的水洗废啤酒酵母进行相应分析, 吸附条件为: 电镀废水镉浓度约为 26 mg/L、废啤酒酵母菌用量为 40 g/L、废水 pH 值为 7、室温约 18 °C、吸附时间为 30 min。

### 2.3.1 透射电镜分析

水洗废啤酒酵母菌及水洗废啤酒酵母菌吸附电镀废水前、后的 TEM 像如图 6 所示。

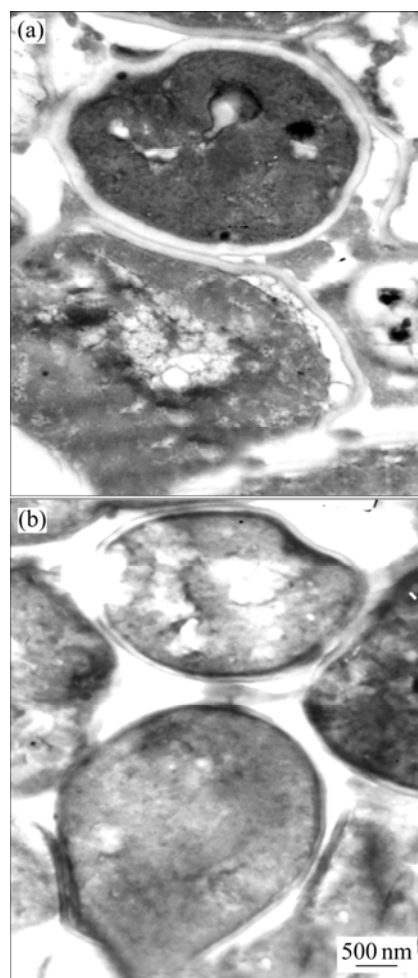


图 6 水洗废啤酒酵母的 TEM 像

Fig.6 TEM images of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae*: (a) Before adsorption; (b) After adsorption

图 6(a)所示为水洗废啤酒酵母像。由图 6(a)可以看出, 水洗废啤酒酵母形状不规则, 有凹陷部位, 近似椭圆形, 菌细胞大小不均, 总体上较大, 直径 3~8  $\mu\text{m}$ , 细胞壁厚约 100~200 nm 且薄厚不均, 并见有细胞壁脱落现象。其原因是废啤酒酵母来源于啤酒废菌体, 生产过程中菌细胞受到不同程度的破坏。图 6(b)所示为吸附电镀废水后的像。与图 6(a)比较, 细胞壁及与接近细胞壁的部分细胞质颜色变深变暗。认为在菌体表面、细胞壁内部均发生水洗废啤酒酵母对电镀废水中镉的吸附作用。因而, 透射电镜分析中颜色变暗是由于菌体吸附镉所致, 而颜色变化也发生在细胞壁与细胞质间隙及细胞质中, 可见, 也有镉吸附于细胞壁与细胞质间隙及细胞质中。

### 2.3.2 电动电位分析

水洗废啤酒酵母吸附电镀废水中镉吸附前后的电位分析如图 7 所示。

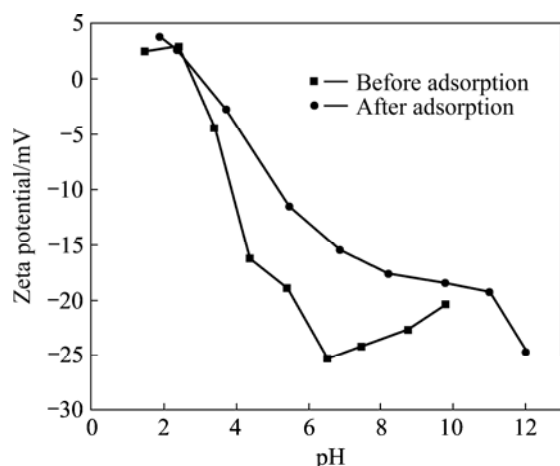


图7 水洗废啤酒酵母电位与 pH 值的关系

Fig.7 Relationship between Zeta potential of water-washing waste *saccharomyces cerevisiae* and pH

由图7可以看出,水洗废啤酒酵母的零电点约为 $\text{pH}=2.8$ ,其细胞表面主要含葡萄糖酸或含其它与羧基相关的多糖。当 $\text{pH}$ 值小于2.8时,菌表面带正电;当 $\text{pH}$ 值大于2.8时,菌表面带负电。当 $\text{pH}$ 值小于7时,随着 $\text{pH}$ 增大,菌表面动电电位呈减小趋势,带负电荷呈增加趋势,对带正电的镉离子的吸附能力增强。由图1可知, $\text{pH}=4\sim 8$ ,水洗废啤酒酵母对电镀废水中镉吸附效果均较好,而 $\text{pH}=4\sim 8$ 正是水洗废啤酒酵母带负电位较大的区间,这与图1的实验结果一致。可见吸附过程有静电吸引作用存在。

由图7还可看出,菌体吸附镉后,等电点增加到3.08,原因是菌体吸附溶液中镉等阳离子,使菌体所带正电量增加,从而导致菌体表面带负电绝对值减少,等电点增大。

### 2.3.3 红外光谱分析

水洗废啤酒酵母的红外光谱表明: $3\,419\text{ cm}^{-1}$ 为中心的宽带为 $-\text{NH}_2$ 和 $-\text{OH}$ 的伸缩振动吸收峰; $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 的峰为 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 反对称伸缩振动吸收峰;在 $1\,653\text{ cm}^{-1}$ 的强峰的是酰胺基 $\text{RCONH}_2$ 的伸缩振动酰胺I峰;在 $1\,528\text{ cm}^{-1}$ 的峰是酰胺基 $\text{CONH}_2$ 的伸缩振动酰胺II峰;在 $1\,458\text{ cm}^{-1}$ 的峰为 $-\text{CH}_2$ 剪式振动吸收和 $-\text{CH}_3$ 反对称弯曲振动吸收重叠峰; $1\,404\text{ cm}^{-1}$ 为 $-\text{O}=\text{C}-\text{NH}-$ 弯曲振动酰胺III峰; $1\,242\text{ cm}^{-1}$ 处是可能 $\text{C}-\text{N}$ 氨基的或多糖中的 $-\text{OH}$ 振动吸收峰; $1\,047\text{ cm}^{-1}$ 的峰是糖环中的 $-\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰; $550\text{ cm}^{-1}$ 的峰可能是硫代磷酸基 $\text{P}=\text{S}$ 的伸缩振动吸收峰,还有 $\text{P}-\text{O}-(\text{C})$ 的伸缩振动吸收峰。

水洗废啤酒酵母吸附镉后的红外光谱图表明:水洗废啤酒酵母吸附镉前后,部分峰形、峰位发生变化。

$3\,419\text{ cm}^{-1}$ 的 $-\text{NH}_2$ 和缔合 $-\text{OH}$ 峰向高波数位移约 $4\text{ cm}^{-1}$ ,且峰形变宽,表明 $-\text{NH}_2$ 和 $-\text{OH}$ 在吸附过程中起作用;烷基峰 $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 向高波数位移 $4\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,458\text{ cm}^{-1}$ 向低波数位移 $4\text{ cm}^{-1}$ ,表明有氢键和弱的分子间作用力产生; $1\,528\text{ cm}^{-1}$ 的酰胺峰向高波数位移约 $13\text{ cm}^{-1}$ ,说明酰胺基团在细胞对镉的吸附过程中起主要作用; $1\,047\text{ cm}^{-1}$ 的 $-\text{C}-\text{O}$ 峰位向高波数漂移 $8\text{ cm}^{-1}$ ,说明菌细胞的多糖参与了对镉的吸附过程。 $550\text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{P}=\text{S}$ 、 $\text{P}-\text{O}$ 峰位向高波数漂移 $16\text{ cm}^{-1}$ ,说明菌细胞中含磷基团 $\text{P}=\text{S}$ 、 $\text{P}-\text{O}$ 也参与了对镉的吸附作用。基团 $\text{P}=\text{S}$ 、 $\text{P}-\text{O}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{C}=\text{O}-\text{NH}-$ 、 $-\text{C}-\text{O}-$ 、 $-\text{OH}$ 中S、O、N等原子可提供孤对电子对与有空轨道的镉离子发生化学络合。可见,化学络合是吸附形式之一。

## 3 结论

1) 以水洗废啤酒酵母作为吸附剂,对电镀废水中镉进行吸附研究,在常规条件下,可获得吸附率96.18%吸附指标,沉降3.5 h,镉去除率达96%。经3级处理,废水可达排放标准。

2) 透射电镜分析结果表明,水洗废啤酒酵母细胞壁薄厚不均,且有脱落现象。说明其受到一定的破坏,因此,废水与细胞壁、细胞质均有接触机会,吸附作用发生细胞壁、细胞壁与细胞质间隙及细胞质中。

3) Zeta电位测试结果表明,水洗废啤酒酵母的等电点为2.8,吸附镉后细胞等电点变为3.08,细胞等电点低主要与细胞多糖含量较多有关,吸附作用发生后,细胞等电点增加,是由于细胞吸附了带正电的镉离子等。

4) Zeta电位及红外光谱分析结果表明:水洗废啤酒酵母与镉的吸附过程主要与细胞蛋白质及多糖成分中 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 等基团有关, $\text{P}=\text{S}$ 、 $\text{P}-\text{O}$ 也参与了吸附作用。吸附过程存在化学络合、静电吸引、氢键和范德华力作用。

## REFERENCES

- [1] 王璞, 闵小波, 柴立元. 含镉废水处理现状及其生物处理技术的进展[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(8): 14-17.  
WANG Pu, MIN Xiao-bo, CHAI Li-yuan. The status of treatment technology on wastewater containing cadmium and the development of Its bio treatment technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(8): 14-17.
- [2] 邱廷省, 成先雄, 郝志伟, 罗仙平. 含镉废水处理技术现状及

- 发展[J]. 四川有色金属, 2002(4): 38-41.
- QIU Ting-sheng, CHENG Xian-xiong, HAO Zhi-wei, LUO Xian-ping. Present situation and development for wastewater containing cadmium treatment technology[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2002(4): 38-41.
- [3] 张德强, 康海彦, 杨莉丽, 李娜, 高丽荣. 离子交换树脂吸附 Cd(II) 和 Pb(II) 的研究[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(增刊): 4-5, 23.
- ZHANG De-qiang, KANG Hai-yan, YANG Li-li, LI Na, GAO Li-rong. The study on adsorption of cadmium and lead by ion exchange resin[J]. Environment Science and Technology, 2003, 26(Suppl): 4-5, 23.
- [4] 邓娟利, 胡小玲, 管萍, 曾盛, 赵亚梅, 王广东. 膜分离技术及其在重金属废水处理中的应用[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 23-26.
- DENG Jian-li, HU Xiao-ling, GUAN Ping, ZENG Sheng, ZHAO Ya-mei, WANG Guang-dong. Membrane technology and its application in heavy metal wastewater treatment[J]. Material Guiding Report, 2005, 19(2): 23-26.
- [5] IQBAL M, SAEED A, ZAFAR S I. Hybrid biosorbent: An innovative matrix to enhance the biosorption of Cd(II) from aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1/2/5): 47-55.
- [6] HASHIM M A, CHU K H. Biosorption of cadmium by brown, green, and red seaweeds[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 97: 249-255.
- [7] HUANG Sui-liang. Cadmium adsorption by sediment in a turbulent tank[J]. Wat Res, 2001, 35(11): 2635-2644.
- [8] LODEIRO P, BARRIADA J L, HERRERO R, M E. DE VICENTE S. The marine macroalga *Cystoseira baccata* as biosorbent for cadmium(II) and lead(II) removal: Kinetic and equilibrium studies[J]. Environmental Pollution, 2006, 142(2): 264-273.
- [9] SAYGIDEGER S, GULNAZ O, ISTIFLI E S, YUCEL N. Adsorption of Cd(II), Cu(II) and Ni(II) ions by *lemna minor* L: Effect of physicochemical environment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 126(1): 96-104.
- [10] 苏秀娟, 朱一民, 沈岩柏, 魏德洲, 韩聪. 悬浮酵母菌对重金属 Cd<sup>2+</sup> 的吸附研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(11): 1107-1110.
- SU Xiu-juan, ZHU Yi-min, SHEN Yan-bai, WEI De-zhou, HAN Cong. Effect of Biosorption of Cd<sup>2+</sup> by suspended saccharomycete biomass[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(11): 1107-1110.
- [11] 刘振扬, 刘超. 啤酒酵母在处理含镉工业废水中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2006(7): 85-88.
- LIU Zhen-yang, LIU Chao. Research on the application of beer yeast in the treatment of Cd-containing wastewater[J]. Liquor-making Science and Technology, 2006(7): 85-88.
- [12] 王金发, 何炎明. 细胞生物学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- WANG Jin-fa, HE Yan-ming. Experimental tutorial of cell biology[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2004.
- [13] 何金兰, 杨克让, 李小戈. 仪器分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- HE Jin-lan, YANG Ke-rang, LI Xiao-ge. Apparatus analysis principle [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2002.
- [14] 孟令芝, 龚淑玲, 何永炳. 有机波谱分析[M]. 第二版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- MENG Ling-zhi, GONG Shu-ling, HE Yong-bing. Organ spectrum analysis[M]. Secondly Edition. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [15] SMITH R W, MISRA M, CHEN S. Hydrophobic bacteria as flocculating agents for mineral suspensions[J]. Engineering Foundation, 1994, 2: 499-456.

(编辑 陈爱华)