

沸石分子筛和活性炭吸附/脱附甲苯性能对比<sup>\*</sup>周春何 卢晗锋 曾立 黄海凤<sup>#</sup>

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要** 考察了甲苯在 NaY 型沸石分子筛(简称为 NaY)、13X 型沸石分子筛(简称为 13X)、H<sup>β</sup> 型沸石分子筛(简称为 H<sup>β</sup>)、MCM-22 型沸石分子筛(简称为 MCM-22)和 ZSM-5 型沸石分子筛(简称为 ZSM-5)上的吸附/脱附性能, 同时与椰壳活性炭(AC)的吸附/脱附性能进行对比。结果表明, 各吸附剂对甲苯的平衡吸附量大小依次为: AC > NaY > H<sup>β</sup> > 13X > MCM-22 > ZSM-5, 甲苯从吸附剂表面脱附难易程度依次为: AC > NaY、13X > H<sup>β</sup> > MCM-22 > ZSM-5; ZSM-5 对甲苯的平衡吸附量和吸附强度都最小, 这是由于甲苯无法进入 ZSM-5 的内部孔道造成的; 在低甲苯质量浓度(<1 000 mg/m<sup>3</sup>)时, NaY 平衡吸附量超过 AC, 因此 NaY 更适合应用在低浓度有机废气吸附治理中; Langmuir 吸附方程比 Freundlich 吸附方程更符合沸石分子筛吸附甲苯的行为。

**关键词** 沸石 活性炭 吸附 脱附 甲苯

**Relative performance of zeolites and activated carbon in gaseous phase adsorption and desorption of toluene** Zhou Chunhe, Lu Hanfeng, Zeng Li, Huang Haifeng. (College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310014)

**Abstract:** The relative performance of five commercial zeolites (NaY, ZSM-5, MCM-22, H<sup>β</sup> and 13X) and a coconut activated carbon in gaseous phase adsorption/desorption of toluene was studied in the lab. The observed adsorptive loadings of toluene on the small adsorbents were in the declining order of AC > NaY > H<sup>β</sup> > 13X > MCM-22 > ZSM-5. Under the TPD conditions, the order of the desorption time was the same as the loadings (AC > NaY, 13X > H<sup>β</sup> > MCM-22 > ZSM-5). Among the zeolites, NaY performed just a little differently from AC in the adsorption and desorption runs. Based on the effects of influent flow rate and toluene concentration on the breakthrough profiles, the adsorption of toluene process was primarily controlled by either internal diffusion (NaY) or external diffusion (ZSM-5). The loading data were well represented by the Langmuir adsorption isotherm model; the adsorption capacities were influenced less by toluene concentration at an low concentration. The experimental results suggest NaY molecular sieves is more fit to remove low concentration VOCs from waste gaseous streams.

**Keywords:** zeolites; activated carbon; adsorption; desorption; toluene

挥发性有机物(VOCs)的净化方法主要有吸附技术、吸收技术、直接燃烧法、催化燃烧技术、生物净化技术、电晕法和等离子体净化技术等<sup>[1-5]</sup>。目前, 对于许多工艺过程产生的低浓度有机废气(直接排放又会超标)的治理, 活性炭吸附被认为是运行费用低、净化效果好、应用理想的工艺路线, 工业应用也最广<sup>[6-8]</sup>。但在实际工业应用中, 活性炭存在再生困难、吸附性能受水气影响大、吸附饱和时在热气流再生过程中易发生火灾等缺点<sup>[9]249, [10, 11], [12]1051, [13]</sup>。沸石分子筛具有均匀微孔, 其孔径与一般分子大小相当, 是由 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和碱金属或碱土金属组成的无机微孔材料, 具有耐高温、不可燃、良好的热稳定性和水热稳定性等优点, 目前已广泛应用于石油裂解、吸附、催化等领域<sup>[14-16]</sup>, 但对 VOCs 的吸附研究尚

少。因此, 笔者以椰壳活性炭(AC)为参照, 考察了 5 种常见沸石分子筛对甲苯的吸附/脱附性能。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料和试剂

甲苯(分析纯)、AC、NaY 型沸石分子筛(简称为 NaY)、13X 型沸石分子筛(简称为 13X)、H<sup>β</sup> 型沸石分子筛(简称为 H<sup>β</sup>)、MCM-22 型沸石分子筛(简称为 MCM-22)和 ZSM-5 型沸石分子筛(简称为 ZSM-5)。

### 1.2 吸附剂表征

沸石分子筛和 AC 的比表面积和孔容在 Micro-meritics ASAP2020C 型吸附仪上测定。测定前, 样品于 250 °C 下脱附 2 h 以上。程序升温脱附(TPD)

第一作者: 周春何, 女, 1984 年生, 硕士研究生, 研究方向为大气污染控制。<sup>#</sup> 通讯作者。

<sup>\*</sup> 浙江省科技厅重大专项资助项目(No. 2007C13042)。

实验在 Micromeritics Autochem 2910 型化学吸附仪上进行,用 25 mL/min 的纯氮气流吹扫,在 10~500 °C 内以 5 °C/min 的速率进行程序升温控制,热导池检测信号。

### 1.3 甲苯吸附实验

甲苯吸附实验装置见图 1。其中,标准空气由 2 个三通分成 3 路气:第 1 路用于脱附,将样品在 350 °C 下脱附 2 h,以去除样品吸附的杂质;第 2 路进入甲苯发生器;第 3 路作为稀释气。第 1、2 路配成一定浓度、空速的甲苯气体进入吸附管进行吸附,尾气由 GC 9790 气相色谱仪分析。

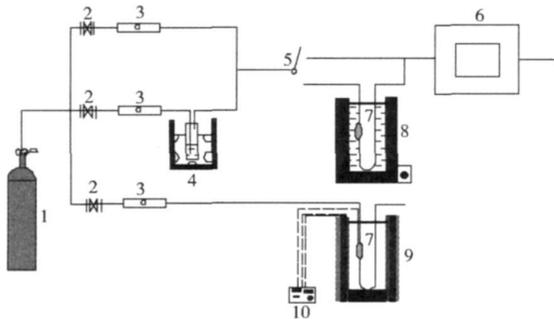


图 1 甲苯吸附实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

1—标准空气钢瓶;2—截止阀;3—流量计;4—甲苯发生器;  
5—换阀;6—气相色谱仪;7—吸附管;8—恒温水浴锅;  
9—加热炉;10—A1-8089 程序升温控制仪

吸附实验中,沸石分子筛和 AC 的装填量均为 1 g,吸附温度为 40 °C,吸附床层为 8 mm×50 mm。

平衡吸附量计算公式为:

$$q = \frac{F \times c_0 \times 10^{-9}}{W} \left( t_s - \int_0^{t_s} \frac{c_t}{c_0} dt \right) \quad (1)$$

式中:  $q$  为平衡吸附量, g/g;  $F$  为气体流速, mL/min;  $t$  为吸附时间, min;  $c_0$ 、 $c_t$  分别为进气、吸附  $t$  min 后尾气中甲苯质量浓度, mg/m<sup>3</sup>;  $W$  为吸附剂的装填量, g;  $t_s$  为吸附平衡时间, min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料结构性质表征

从表 1 可知,除了 MCM-22 外,沸石分子筛孔容

随着比表面积增大而增大。这可能是 MCM-22 的孔道尺寸较大有关,因为在相同比表面积下,孔道尺寸与孔容成正比。NaY 的比表面积和孔容接近 AC,但其微孔比表面积和微孔孔容比 AC 大,表明 NaY 具有良好的吸附结构。

### 2.2 吸附性能比较

#### 2.2.1 穿透时间

穿透时间是选择吸附剂的一项重要参数。在吸附连续运行过程中,进气浓度一定时,尾气浓度达到进气浓度的 5% (质量分数) 时,即该吸附层已穿透。从开始吸附到穿透所持续的时间为穿透时间,穿透时间愈长则吸附效果愈好。从图 2 可知, AC 和 NaY 的吸附效果明显优于其他沸石分子筛。

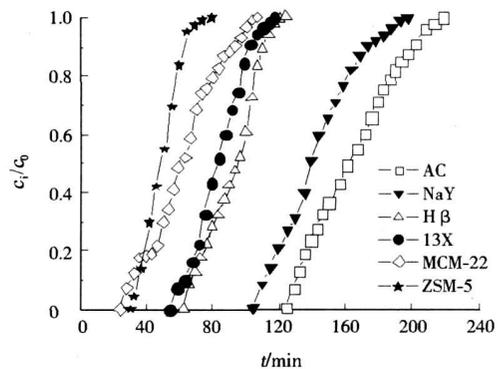


图 2 吸附剂对甲苯的吸附穿透曲线 ( $c_0 = 1.645$  mg/m<sup>3</sup>, 空速 ( $v$ ) = 60 000 mL/(h·g))

Fig. 2 Breakthrough curves of toluene on the adsorbents

#### 2.2.2 吸附量

从表 2 可知,各吸附剂对甲苯的平衡吸附量大小依次为: AC > NaY > H<sup>β</sup> > 13X > MCM-22 > ZSM-5, NaY 是吸附甲苯较理想的沸石分子筛;结合表 1 可知,各吸附剂对甲苯的平衡吸附量总体上呈现随比表面积增大而增大的趋势,这表明吸附剂的绝大部分比表面积都参与了吸附,与 ZHAO 等<sup>[12]1052-1053</sup> 提出的结论一致;ZSM-5 的单位面积吸附量最小,可能是 ZSM-5 孔道尺寸小于 0.6 nm,而甲苯动力学尺寸在 0.6 nm 左右,导致甲苯难以进入 ZSM-5 内部孔道,吸附只发生在 ZSM-5 外表面。

表 1 沸石分子筛和 AC 的结构性质  
Table 1 Structural properties of the adsorbents

吸附剂	比表面积 / (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	微孔比表面积 / (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	外表面积 / (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔容 / (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	微孔孔容 / (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔道尺寸 / nm
AC	935.56	762.09	173.47	0.41	0.30	0.3~4.4 <sup>[17,18]</sup>
NaY	818.42	762.69	55.73	0.38	0.31	0.66~0.74 <sup>[19]246</sup>
H <sup>β</sup>	499.37	386.73	112.64	0.33	0.19	0.56~0.67 <sup>[19]251-252</sup>
13X	407.46	362.75	44.71	0.29	0.18	0.66~0.74 <sup>[19]246</sup>
MCM-22	413.37	319.72	93.65	0.38	0.16	0.40~1.82 <sup>[20]</sup>
ZSM-5	373.81	289.02	84.79	0.18	0.12	0.51~0.56 <sup>[19]250</sup>

表2 吸附剂对甲苯的平衡吸附量和吸附平衡时间  
( $\omega = 1\ 645\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,  $v = 60\ 000\ \text{mL}/(\text{h} \cdot \text{g})$ )  
Table 2 Adsorptive loading, breakthrough time, saturation time of the toluene adsorption runs

吸附剂	平衡吸附量 $/(g \cdot g^{-1})$	单位面积吸附量 $/(g \cdot m^{-2})$	吸附平衡时间 $/\text{min}$
AC	0.268 7	$1.876\ 5 \times 10^{18}$	218.5
NaY	0.232 6	$1.856\ 9 \times 10^{18}$	197.5
H $\beta$	0.150 2	$1.965\ 2 \times 10^{18}$	124.0
13X	0.136 2	$2.183\ 9 \times 10^{18}$	117.0
MCM-22	0.100 3	$1.585\ 3 \times 10^{18}$	107.0
ZSM-5	0.077 9	$1.361\ 5 \times 10^{18}$	79.0

设甲苯为单分子层吸附,理论上单位面积吸附量约为  $3.536\ 8 \times 10^{18}$  个/ $\text{m}^2$ 。从表2可知,理论单位面积吸附量均大于选取的6种吸附剂的实际单位面积吸附量,说明甲苯并没有完全在沸石分子筛和AC表面覆盖,有些微小孔道内,由于动力学尺寸限制致使甲苯无法进入孔道。比较各沸石分子筛,13X的实际单位面积吸附量最大,但其对甲苯的平衡吸附量比NaY小。

### 2.3 脱附性能比较

从图3可知,沸石分子筛表面的甲苯均在  $50\ ^\circ\text{C}$  左右开始脱附,  $300 \sim 380\ ^\circ\text{C}$  时完全脱附。根据出峰位置和峰宽,甲苯从吸附剂表面脱附难易程度依次为:  $\text{AC} > \text{NaY}, 13\text{X} > \text{H}\beta > \text{MCM-22} > \text{ZSM-5}$ 。

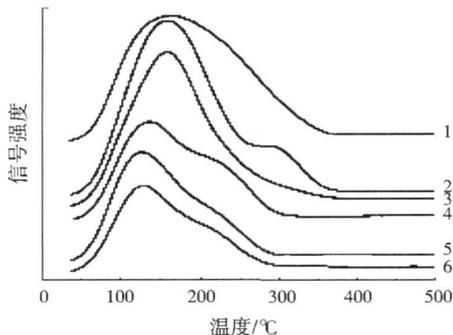


图3 吸附剂对甲苯的TPD曲线

Fig. 3 Toluene TPD profiles of the adsorbents  
1-AC; 2-NaY; 3-13X; 4-H $\beta$ ; 5-MCM-22; 6-ZSM-5

吸附强度和孔道内扩散阻力决定了甲苯脱附性能。AC的孔道尺寸分布在一个较宽的范围内,甲苯从AC表面脱附主要取决于孔道内扩散阻力<sup>[21]</sup>,低温时大孔脱附,高温时小孔脱附;而沸石分子筛具有规整孔道结构,且孔道尺寸分布较窄,因此吸附强度是决定甲苯从沸石分子筛表面脱附的主要因素。在沸石分子筛骨架结构中SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>摩尔比(简称为SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)决定了其表面性质和吸附强度,一般认为, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>越小,表面酸性越大,导致表面有机分子吸附强度越大<sup>[19]250</sup>。NaY和13X的SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>最小( $< 5$ ), H $\beta$ 、MCM-22和ZSM-5的SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> $> 25$ ,

因此导致NaY、13X表面甲苯难以脱附。

### 2.4 进气中甲苯浓度对吸附的影响

从图4可知,AC、NaY和ZSM-5对甲苯的吸附等温线均属于典型的I型。在进气中甲苯质量浓度较低( $< 1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ )时,甲苯浓度的微小变化导致平衡吸附量迅速增大,这是典型的微孔吸附现象<sup>[22]</sup>;当进气中甲苯质量浓度为  $500 \sim 1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$  时,AC和NaY平衡吸附量发生交叉,即在低甲苯浓度时,NaY平衡吸附量超过AC。因此,认为NaY更适合应用在低浓度有机废气吸附治理中。

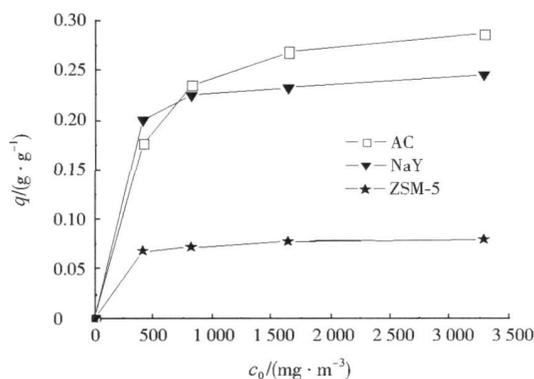


图4 AC、NaY和ZSM-5对甲苯的吸附等温线受进气中甲苯质量浓度的影响( $v = 60\ 000\ \text{mL}/(\text{h} \cdot \text{g})$ )

Fig. 4 Adsorptive loadings of toluene on AC, NaY and ZSM-5 vs. influent concentration

### 2.5 空速对吸附的影响

利用空速变化考察了3种吸附剂的外扩散阻力影响。从图5可知,ZSM-5对甲苯的吸附速率随空速增大明显加快(吸附穿透曲线变陡),而且空速为  $30\ 000, 60\ 000\ \text{mL}/(\text{h} \cdot \text{g})$  的两条吸附穿透曲线出现了交叉点,表明ZSM-5吸附甲苯时存在较明显的外扩散效应。NaY和AC对甲苯的吸附速率随空速的变化不如ZSM-5明显,而且没有出现这种现象,也从侧面说明了ZSM-5对甲苯是外表面吸附,而不是孔内吸附(存在内扩散效应),这与前面的结论是一致的。

### 2.6 吸附等温方程

根据图4及甲苯浓度和甲苯分压的转换,AC、NaY和ZSM-5吸附甲苯的行为采用Langmuir吸附等温方程(见式(2))和Freundlich吸附等温方程(见式(3))进行拟合,结果见表3。

$$\frac{q}{q_m} = \frac{kP}{1+kP} \quad (2)$$

$$q = k_f P^{1/n} \quad (3)$$

式中: $q_m$ 为最大吸附量,  $g/g$ ;  $k$ 为Langmuir平衡常数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $P$ 为甲苯分压,  $\text{Pa}$ ;  $k_f$ 为与吸附剂和吸附质

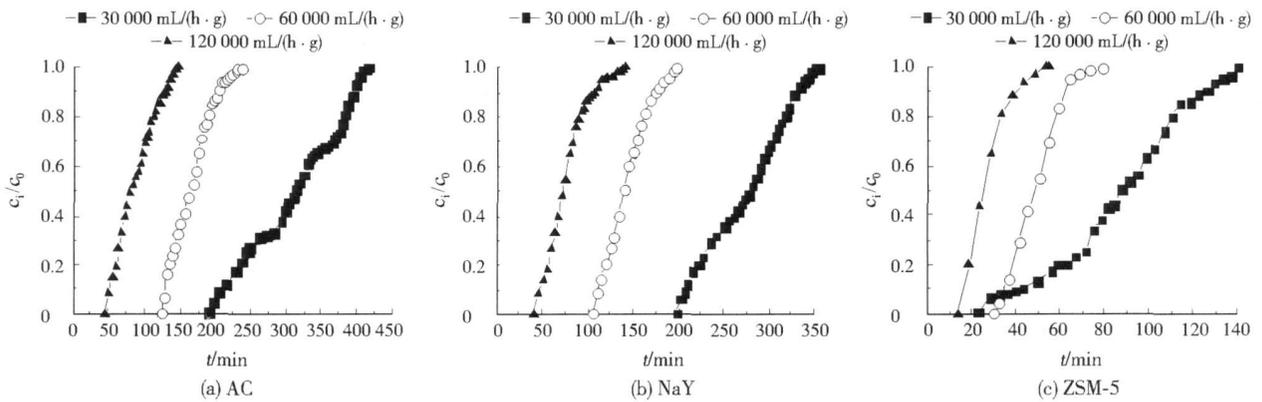
图5 AC、NaY和ZSM-5对甲苯的吸附穿透曲线受空速的影响( $c_0 = 1\ 645\ \text{mg}/\text{m}^3$ )

Fig. 5 Breakthrough curves of toluene on AC, NaY and ZSM-5 at 3 GHSV

表3 Langmuir和Freundlich吸附等温方程拟合

Table 3 Langmuir and Freundlich isotherms of the experimental adsorptive loading data

吸附剂	Langmuir			Freundlich		
	$q_m / (\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$k / \text{Pa}^{-1}$	$R^2$	$k_f / \text{Pa}^n$	$n$	$R^2$
AC	0.323 4	0.992 2	0.992 2	0.109 2	4.314 4	0.906 3
NaY	0.250 9	0.391 9	0.986 7	0.164 6	10.741 1	0.937 6
ZSM-5	0.081 7	0.491 7	0.988 6	0.057 7	12.903 2	0.966 2

的特性及温度有关的 Freundlich 常数,  $\text{Pa}^n$ ;  $n$  为与温度有关的常数,  $n \geq 1$ 。

从表3可知,沸石分子筛的最大吸附量比AC小,这与它们比表面积、孔容的大小一致;Langmuir吸附等温方程的 $R^2$ 都在0.98以上,因此AC、NaY和ZSM-5吸附甲苯的行为采用Langmuir吸附等温方程拟合程度好于Freundlich吸附等温方程。

### 3 结论

(1) 5种沸石分子筛中,NaY的平衡吸附量最大,接近AC的平衡吸附量,但甲苯较难脱附;ZSM-5对甲苯的平衡吸附量和吸附强度都最小,这是由于甲苯无法进入ZSM-5的内部孔道造成的。

(2) 在低甲苯质量浓度( $< 1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ )时,NaY平衡吸附量超过AC,因此NaY更适合应用在低浓度有机废气吸附治理中。

(3) Langmuir吸附方程比Freundlich吸附方程更符合沸石分子筛吸附甲苯的行为。

### 参考文献:

[1] 樊奇,羌宁.挥发性有机废气净化技术研究进展[J].四川环境,2005,24(4):40-45.  
 [2] 唐运雪.有机废气处理技术及前景展望[J].湖南有色金属,2005,21(5):31-35.  
 [3] 黄立维,谭天恩,施耀.高压脉冲电晕法治理有机废气实验研究[J].环境污染与防治,1998,20(1):4-7.  
 [4] 卢晗锋,黄海凤,刘华彦,等.Cu-Mn-O制备条件对其催化燃烧

甲苯性能的影响[J].环境污染与防治,2008,30(5):26-28.

[5] 吕唤春,潘洪明,陈英旭.低浓度挥发性有机废气的处理进展[J].化工环保,2001,21(6):324-327.  
 [6] 张春菊,叶代启,吴军良.先进实用挥发性有机废气吸附与催化净化技术[J].能源环境保护,2005,19(4):5-8.  
 [7] 刘宁锴,陆烽,郝群英,等.吸附-催化燃烧法处理低浓度有机废气[J].污染防治技术,1997,10(4):218-219.  
 [8] 乔惠贤,尹维东,栾志强,等.大风量VOCs废气治理[J].环境工程,2004,22(1):36-38.  
 [9] GUILLEMOT M, MIJOIN J, MIGNARD S, et al. Volatile organic compounds (VOCs) removal over dual functional adsorbent/catalyst system[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007, 75(3/4).  
 [10] ILIYAS A, ZAHEDI NIAKI M H, EIC M, et al. Control of hydrocarbon cold-start emissions: a search for potential adsorbents[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2007, 102(1/2/3):171-177.  
 [11] PIRES J, CARVA A. Adsorption of volatile organic compounds in Y zeolites and pillared clays[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2001, 43(3):277-287.  
 [12] ZHAO X S, MA Q, LU G Q. VOC removal: comparison of MCM-41 with hydrophobic zeolites and activated carbon[J]. Energy & Fuels, 1998, 12(6).  
 [13] SERRANO D P, CALLEJA G, BOTAS J A, et al. Characterization of adsorptive and hydrophobic properties of silicalite-1, ZSM-5, TS-1 and Beta zeolites by TPD techniques[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 54(1):1-9.  
 [14] 滕加伟,赵国良,谢在库,等.ZSM-5分子筛晶粒尺寸对C<sub>6</sub>烯烃催化裂解制丙烯的影响[J].催化学报,2004,25(8):602-606.

(下转第44页)

水的处理效果;磷酸二氢钾加入量为 0.5 g/L 时, COD 去除率和 SCP 获得量达到最大。

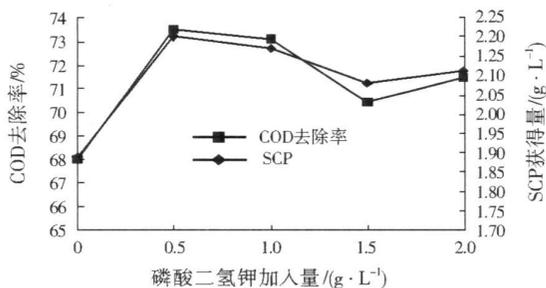


图3 磷酸二氢钾加入量对 COD 去除率和 SCP 获得量的影响

Fig.3 Effect of KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> concentration on COD removal and SCP yield

### 2.4 DO 影响

在确定上述最佳条件后,研究了 DO 对产朊假丝酵母处理马铃薯淀粉废水的影响。产朊假丝酵母利用马铃薯淀粉废水中的有机物质生产 SCP 的过程中,不仅需要氮源和碳源物质,DO 也是产朊假丝酵母生长所必需的营养物质之一。本研究中设定了两种产朊假丝酵母的生长环境来研究 DO 对产朊假丝酵母处理马铃薯淀粉废水的影响,一种是经灭菌后的马铃薯淀粉废水(废水 DO 含量较少),另一种则为不灭菌的马铃薯淀粉废水。两种不同的生长环境下,废水处理效果和产朊假丝酵母生长情况见表 1。

表 1 DO 对 COD 去除率和 SCP 获得量的影响  
Table 1 Effect of dissolved oxygen on COD removal and SCP yield

生长环境	废水 COD / (mg·L <sup>-1</sup> )	SCP 获得量 / (g·L <sup>-1</sup> )	COD / (mg·L <sup>-1</sup> )	COD 去除率/%
不灭菌	5 074	2.23	1 340	74.86
灭菌		1.05	2 860	46.34

从表 1 可知,产朊假丝酵母在灭菌后马铃薯淀粉废水中的生长情况明显比不灭菌差,可见 DO 在产朊假丝酵母利用马铃薯淀粉废水中有机物质生产 SCP 的过程中必不可少,是影响其进行物质生产和能量代谢的关键环境因素之一。不灭菌马铃薯淀粉废水中原有的微生物与产朊假丝酵母具有的协同效应,也对改善废水的处理效果有一定贡献。

### 3 结论

(1) 产朊假丝酵母在马铃薯淀粉废水中生长的 pH 适应范围较宽。在 pH 为 3.5~5.5 时,COD 去除率和 SCP 获得量均呈现先增大后减小的变化,但

变化的范围不大。

(2) COD 去除率和 SCP 获得量随产朊假丝酵母接种量的增大而增大;接种量大于 10% 时,COD 去除率和 SCP 获得量增大趋势较平缓。综合经济效益和环境效益,10% 的接种量较为合理。

(3) 无机盐对产朊假丝酵母处理马铃薯淀粉废水具有较重要的作用,向该废水中加入适量的磷酸二氢钾,COD 去除率和 SCP 获得量均明显增大。

(4) 除氮源和碳源物质外,DO 是产朊假丝酵母净化和资源化利用马铃薯淀粉废水的必需营养物质之一,是影响产朊假丝酵母进行物质生产和能量代谢的关键环境因素之一。

### 参考文献:

- [1] 陶德录. 马铃薯淀粉废水中提取饲料蛋白和微生物制剂的研究[J]. 饲料广角, 2007(13): 32-34.
- [2] 刘宁. 单细胞蛋白概况及其应用的探讨[J]. 农业科技与装备, 2007(6): 50-52.
- [3] 贺淹才. 白地霉和产朊假丝酵母[J]. 中国饲料, 1997(7): 38-40.
- [4] IBRAHIM R M, KIANI M A, KHAN S, et al. Production of single cell protein from rice polishings using *Candida utilis*[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2004, 20(3): 297-301.
- [5] 李素玉. 无机盐在酵母菌净化玉米淀粉工业废水中的作用[J]. 辽宁大学学报, 2002, 29(3): 283-286.

责任编辑:黄 苇 (修改稿收到日期:2008-10-31)

(上接第 41 页)

- [15] 白尔铮, 胡云光. 四种增产丙烯催化工艺的技术经济比较[J]. 工业催化, 2003, 11(5): 7-12.
- [16] 晋春, 贾银娟, 范彬彬, 等. Y 型分子筛固载席夫碱钴配合物的合成、表征及催化苯乙烯环氧化性能[J]. 石油学报, 2006, 22(4): 6-11.
- [17] 张丽丹, 王小宁, 韩春英. 活性炭吸附二氧化碳性能的研究[J]. 北京化工大学学报, 2007, 34(1): 76-80.
- [18] 陈女, 吴倩, 李佟茗. 几种椰壳活性炭材料的孔结构分析[J]. 上海化工, 2006, 31(11): 13-16.
- [19] 徐如人, 庞文琴. 分子筛与多孔材料化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 刘百军, 侯辉娟, 高山松, 等. MCM-22 和 ITQ-2 分子筛负载型催化剂加氢裂化性能的对比研究[J]. 催化学报, 2007, 28(1): 34-38.
- [21] 刘守新, 陈曦, 张显权. 活性炭孔结构和表面化学性质对吸附硝基苯的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1194.
- [22] CHIANG A S T, LEE C K, CHANG Z H. Adsorption and diffusion of aromatics in AlPO<sub>4</sub>-5[J]. Zeolites, 1991, 11(4): 380-386.

责任编辑:黄 苇 (修改稿收到日期:2008-12-16)