

# 以氧化还原电位作为缺氧-好氧法工艺反硝化反应模糊控制的参数

马 勇<sup>1</sup> 彭永臻<sup>1,2</sup> 王淑莹<sup>2</sup> 王晓莲<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;  
2. 北京工业大学北京市水质科学重点实验室, 北京 100022)

**摘要:**以淀粉废水为研究对象,重点研究了氧化还原电位(ORP)作为缺氧-好氧法(A/O)工艺反硝化反应模糊控制参数的可行性,研究表明缺氧区末端硝酸氮浓度与 ORP 值具有很好的相关性,可以作为 A/O 工艺内循环回流量和外碳源投加的模糊控制参数,并建立了 ORP 模糊控制器。单独控制内循环回流量维持反硝化区末端 ORP 值为 $(-86 \pm 2)$  mV,或单独控制外碳源投加量维持反硝化区末端 ORP 值为 $(-90 \pm 2)$  mV,可实现 A/O 工艺脱氮的最优控制。

**关键词:**A/O 工艺;氧化还原电位;内循环回流量控制;外碳源投加控制;模糊控制

中图分类号:X703.1

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)02-0039-05

## Fuzzy control for anoxic/oxic process denitrification using oxidation-reduction potential

MA Yong<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>1,2</sup>, WANG Shu-ying<sup>2</sup>, WANG Xiao-lian<sup>2</sup>

(1 Faculty of Municipal and Environmental Engineering, Harbin institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Beijing Key Laboratory of Water Science, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** The relativity between nitrate concentration at the end of anoxic zone and oxidation-reduction potential (ORP) was studied by using starch wastewater. Results show that the relativity between them is very good, and ORP can be worked as nitrate recirculation flow and external carbon dose on-line fuzzy control parameters respectively. The ORP fuzzy controller was designed. The controlling nitrate recirculation flow and external carbon dose, keeping ORP in  $(-86 \pm 2)$  mV and  $(-90 \pm 2)$  mV, respectively, can realize A/O process as the optimal control for nitrogen removal.

**Key words:** A/O process; oxidation-reduction potential; nitrate recirculation flow control; external carbon dose control; fuzzy control

污水处理尤其是活性污泥法污水处理系统,属于复杂的动态工程系统,无法找到精确的数学模型来描述,而模糊控制理论正是解决这类复杂系统的有力工具<sup>[1]</sup>。缺氧-好氧法(A/O)工艺是目前城市污水厂应用最广的一种脱氮工艺,然而其脱氮效率一般为 60%~70%,很难进一步提高。当前污水排放量越来越大,大大超过污水厂设计负荷,并且污水厂进水有机负荷和氮负荷变化波动很大。另外国家颁发的城镇污水处理厂污染物排放新标准(GB18918—2002)也已实施。提高污水处理过程的自动化控制,实现以最优出水水质和节能为目标的智能控制系统是解决当前污水处理厂问题的关键。

反硝化反应中只有把好氧区生成的硝化液回流

到缺氧区反应才会顺利进行,另外反硝化反应顺利进行须有充足的有机碳源,而污水厂进水负荷每时每刻都在变化,进水碳氮比有时相差 6~10 倍,当进水碳氮比过低时,导致反硝化反应因碳源不足而受到抑制,大大降低总氮去除率,因此需要外加碳源并对其控制。为了实现 A/O 工艺的在线控制,必须寻找一个参数既能反映硝酸氮浓度的变化,又能作为计算机控制参数。国外已研制出了氨氮和硝酸氮浓度在线仪,但其价格昂贵、检测需要前处理、维护烦琐,并没有在污水厂得到广泛应用。而氧化还原电位(ORP)传感器能在线检测、响应快、精确度高、价格低,可应用 ORP 作为 SBR 法过程控制参数<sup>[2]</sup>,但从未见到采用 A/O 工艺处理城市污水时在在线检

收稿日期:2003-11-13;修回日期:2003-12-11

基金项目:国家“863”资助项目(2003AA601010);北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200310005003)

作者简介:马勇(1976-),男,博士生;彭永臻(1949-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事污水生物处理及其智能控制的研究,通讯联系人,010-67391827。

测的 ORP 值作为控制参数的研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

试验所用反应器材料为聚氯乙烯塑料,装置如图 1 所示,反应器分为 6 个格室,其中前 2 个格室缺氧运行,后 4 个格室好氧运行,反应器体积为 48 L,二沉池采用竖流式,体积为 20 L。试验的进水、回流

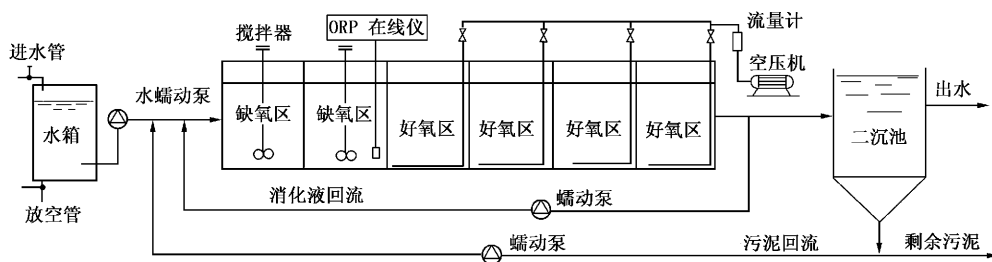


图 1 A/O 工艺试验模型图

### 1.2 试验用水与测试方法

试验采用模拟生活污水为考察对象,通过控制不同的淀粉投量达到不同的 COD 值,投加  $\text{NaHCO}_3$  控制进水 pH 值为 7~8。人工合成废水配方为 (g/L): 淀粉 0.2~0.6, 氯化铵 0.1~0.30,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.02~0.033,  $\text{NaHCO}_3$  0.05~0.15,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.09,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.03,  $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.003。

试验中测定 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、pH 值、总碱度、溶解氧、ORP 值、活性污泥等采用国家规定的标准方法,水样值经过滤后测定。溶解氧测定采用 WTW-300i 溶解氧在线仪,pH 值和 ORP 值均采用 Hanna 在线测定仪。

## 2 结果与分析讨论

### 2.1 ORP 值与缺氧区末端硝酸氮浓度的关系

#### 2.1.1 ORP 值和缺氧区硝酸氮浓度的相关性

为了验证 ORP 值作为 A/O 工艺反硝化反应模

污泥和硝化液回流流量采用蠕动泵控制,进水流量为 144 L/d,温度由自动控温仪控制在  $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,试验过程中污水在缺氧池和好氧池的水力停留时间 ( $t_{\text{hr}}$ ) 分别为 2.6 h 和 5.5 h,污泥停留时间 ( $t_{\text{sr}}$ ) 为 12~15 d,活性污泥质量浓度为  $(2.5 \pm 0.1)\text{g/L}$ ,进水碱度为 360 mg/L,好氧区溶解氧 (DO) 质量浓度为 2 mg/L,污泥回流比为 0.8(质量比,下同),内循环回流比为 2.5(内循环控制时可变化)。

糊控制参数的可行性,必须寻找 ORP 值与缺氧区硝酸氮浓度之间的规律性以及 ORP 值的控制范围,试验以第 2 格室作为研究对象。

图 2 是改变内循环回流量时 ORP 值和硝酸氮浓度之间的关系,试验进水 COD 值为 400 mg/L,进水氨氮为 55 mg/L;图 3 是改变外碳源投量时 ORP 值和硝酸氮浓度之间的关系,试验进水 COD 值为 250 mg/L,进水氨氮为 50 mg/L。从图 2 和图 3 可知,无论改变内循环回流量还是外碳源投加量,第 2 格室的 ORP 值和硝酸氮浓度都具有好的相关性。大量试验表明,ORP 值和硝酸氮浓度之间的相关性具有很强的稳定性,不受外界干扰的影响。如图随着内循环回流量的增加或外碳源投加量的减少,第 2 格室的 ORP 值和硝酸氮浓度都以相关性的关系增加,反之亦然。综上所述,利用 ORP 值作为 A/O 工艺反硝化反应的控制参数具有很好的可靠性和可行性。

(上接第 38 页)

- [3] Font R, Fullana A, Conesa J A, et al. [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001, (1): 927 - 941.
- [4] Xiaoge Chen, Jeyaseelan S, Graham N. [J]. Waste Management, 2002, 22(7): 755 - 760.
- [5] Rozada F, Calvo L F, Garcia A I. [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(3): 221 - 230.
- [6] Xiaoge Chen, Jeyaseelan S. [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(7): 585 - 591.

- [7] Conesa J A, Marcilla A, Prats D, et al. [J]. Waste Mgmt And Res, 1997, 15(3): 293 - 305.
- [8] Duplemann R, Richarz W, Stambach M R. [J]. Can J Chem Engrg, 1991, 69(2): 953 - 963.
- [9] 刘振海. 化学分析手册—热分析[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2000. 47 - 54.
- [10] 陈镜泓, 李传儒. 热分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 120 - 121.
- [11] Ahuja P, Singh P C, Upadhyay S N, et al. [J]. Int J Chem Technol, 1996, (3): 306 - 312. ■

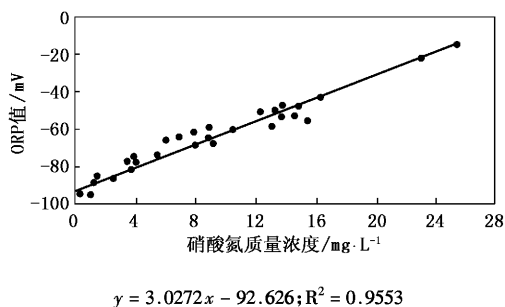


图2 改变内循环流量时 ORP 值和硝酸氮浓度的相关性

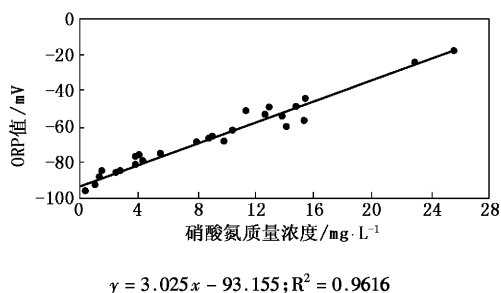


图3 改变外碳源投量时 ORP 值和硝酸氮浓度的相关性

### 2.1.2 控制内循环回流量和控制外碳源投加时最佳 ORP 值的确定

试验中维持进水 COD 值为 400 mg/L, 进水总氮 58 mg/L, 调节内循环回流量, 在线测定第 2 格室 ORP 值, 并取样测定第 2 格室的硝酸氮和出水总氮浓度。图 4 为试验结果, 可知随着内循环回流比的增加, 出水总氮和硝酸氮浓度逐渐降低, 当内循环回流比增至 2.3 时, 出水硝酸氮和总氮浓度最低, 总氮去除率达到 74.8%, 对应第 2 格室的 ORP 值为 -86 mV; 然而再增加内循环回流比, 硝酸氮和总氮去除率反而降低, 并伴随着能耗增加, 这一结论证明了并不是内循环回流量越大总氮去除率就越高, 还与进水中的有机物含量和缺氧区反硝化潜力有关。实验中无论是改变进水水质、水量还是其他参数, 硝酸氮和总氮去除率都在 ORP 值为  $(-86 \pm 2)$  mV 时达到最大, 充分证明了可以应用 ORP 值控制内循环回流量。

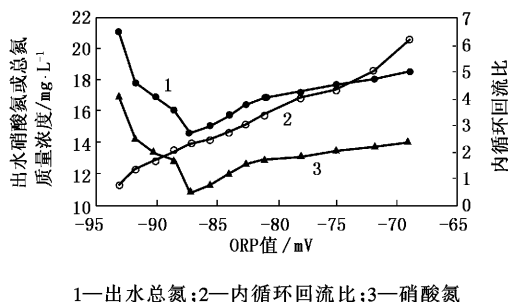


图4 控制内循环时最佳 ORP 值的确定

试验进水 COD 值 250 mg/L、BOD 值 120 mg/L、总氮 55 mg/L, 采用甲醇作为外碳源 (COD 值为 600 mg/L)。改变投加到缺氧区第 1 格室的外碳源投量, 在线测定第 2 格室 ORP 值, 并取样测定第 2 格室硝酸氮和出水总氮浓度。图 5 为试验结果, 由图可得随着外碳源投量增加, 总氮和硝酸氮去除率逐渐增加。未投加外碳源时, 由于进水 C 与 N 浓度比过低, 反硝化反应因得不到充足碳源而受到抑制, 出水硝酸氮和总氮浓度都很高。为了提高总氮的去除率, 应外投碳源并对其控制, 投加过多, 会加大外碳源的使用费用、增加耗氧量以及污泥产量; 投加过少, 达不到理想效果。当控制外碳源投量维持第 2 格室 ORP 测定值为  $(-90 \pm 2)$  mV 时 (对应的硝酸氮质量浓度为 1 mg/L) 可以以相对最少的外碳源投量实现最大程度上总氮的去除, 计算表明相对于未投加碳源时硝酸氮去除率提高了 62.6%, 总氮去除率提高了 51.34%。另外试验也证明该 ORP 值具有很强的稳定性和重现性, 适宜作为外碳源投加的控制参数。

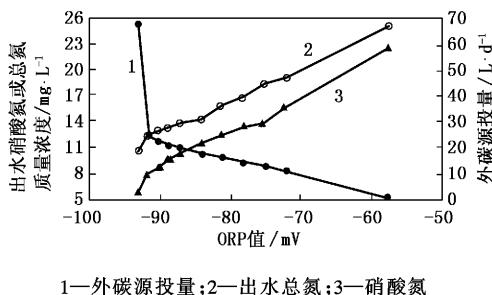


图5 控制外碳源投加时最佳 ORP 值确定

### 2.2 理论分析

A/O 工艺内循环控制的的目的之一, 是保证缺氧区硝酸氮充分, 以充分利用缺氧区的反硝化潜力, 如果缺氧区硝酸氮浓度为零, 缺氧区会处于厌氧状态, 因而不会充分利用缺氧区的反硝化潜力, 另外当缺氧区末端硝酸氮浓度太低时, 反硝化速率很低 (一般以内源反硝化为主), 这都会降低总氮的去除率, 所以缺氧区出水硝酸氮质量浓度不应低于 1 mg/L<sup>[3]</sup>, 如果缺氧区硝酸氮浓度过高, 不但会增加内循环动力能耗, 而且好氧区的溶解氧会随内循环进入缺氧区, 严重影响反硝化反应进行。笔者试验获得最佳 ORP 值  $(-86 \pm 2)$  mV 对应的缺氧区末端硝酸氮质量浓度为 1.5 ~ 2.5 mg/L。

内循环控制的另一目的是降低出水总氮浓度, 在缺氧区最大程度地去除硝酸氮, 提高反硝化速率。

根据活性污泥1号模型(ASM1),反硝化速率 $r_{den}$ 可以表示为: $\mu_{H,max} \frac{S_{S,AN}}{K_S + S_{S,AN}} \frac{S_{NO,AN}}{K_{NO} + S_{NO,AN}} X_{BH}$ ,式中 $S_{NO,AN}$ 代表缺氧区硝酸氮浓度、 $S_{S,AN}$ 代表缺氧区有机物浓度、 $K_S$ 和 $K_{NO}$ 分别代表 $S_S$ 和 $S_{NO}$ 的半饱和常数。很明显 $r_{den}$ 受内循环的影响,内循环流量增加时,大量硝化液回流到缺氧区, $S_{NO}$ 值将会提高,而 $S_{S,AN}$ 将会降低。试验获得内循环控制时最优ORP值对应的硝酸氮质量浓度为2 mg/L,而ASM1中 $K_{NO}$ 为0.5,所以 $r_{den}$ 值基本上不受 $S_{NO}$ 的限制, $S_{S,AN}$ 成为限制反硝化速率的主要因素,文献[4]充分证明了控制内循环回流量维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度为2 mg/L时,可以充分提高对进水中COD的利用率,这和提高反硝化速率,降低出水总氮浓度是一致的。

当进水COD与总氮浓度比很低时,虽然控制内循环可以充分利用进水中COD,一定程度上提高系统反硝化速率,但反硝化所需碳源远远不足时,需要外加碳源,试验证明当维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度为1 mg/L时(即控制ORP值为-90 mV),对应的外碳源投量其性能比价最高,利用效率也最高,这和P.Samuelssohn等人试验结果一致[5]。

### 2.3 反硝化反应模糊控制器的建立

模糊控制器的输入变量越多控制精度越高,实现起来也越困难。笔者采用了应用最广的二维控制器,以在线测定的ORP值与给定的ORP设定值之间的偏差 $E$ 和该偏差的变化量 $C_E$ 这两者的综合信息作为模糊控制器的输入变量,而输出变量分别取内循环回流量和外碳源投加量的增量 $\Delta u$ 。

模糊控制器的输入和输出变量都是确定量,而模糊控制算法本身要求模糊变量。这就需要首先将精确的输入变量经模糊化处理变为模糊变量。根据运行试验和经验, $E$ 和 $C_E$ 的论域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ 。 $\Delta u$ 的论域为 $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7\}$ ,然后将它们整形化处理。由于模糊控制器的控制规则表现为一组模糊条件语句,输入和输出变量均定义为7个词汇:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)和PB(正大),这样既方便规则的制定,又保证控制性能。这里选择了描述简单、计算方便的三角形函数。

模糊控制规则易于用计算机语言的条件语句来描述,根据规则和经验编制出的控制规则如表1。

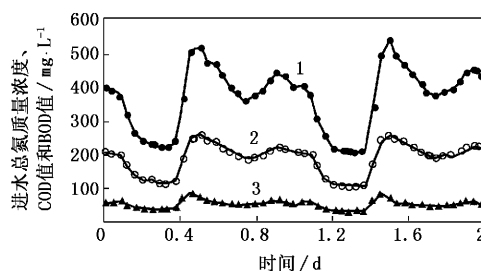
表1 ORP在线模糊控制规则

误差 $E$	误差的变化 $C_E$						
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	O
NM	PB	PB	PB	PM	PS	O	NS
NS	PB	PM	PM	PS	O	NS	NM
O	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PM	PS	O	NS	NM	NM	NB
PM	PS	O	NS	NM	NB	NB	NB
PB	O	NS	NM	NB	NB	NB	NB

由表1可见,模糊控制器根据其控制规则输出的是一个模糊量,这个模糊量不能直接控制被控系统,还必须经过非模糊化处理将其转换成确定量。笔者采用加权平均法作为非模糊化处理方法,这种方法可以充分利用模糊推理结果、模糊子集提供的有用信息量,得到ORP在线模糊控制表,可有效地提高计算速度。经过论域反变换可得内循环回流量或外碳源投加量的精确控制量。

### 2.4 反硝化反应模糊控制器的应用

为了验证ORP模糊控制器是否可以有效地控制内循环回流量和外碳源投量,使ORP值维持在设定值。进行了动态试验,试验过程中动态改变淀粉和氯化铵投加量,配制成如图6所示进水水质,每隔1 h取样测定进水COD、BOD、总氮、第2格室硝酸氮、出水硝酸氮和总氮质量浓度。



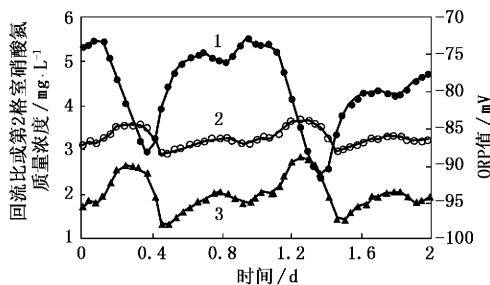
1—进水COD值;2—进水BOD值;3—进水总氮

图6 进水COD值、BOD值和总氮质量浓度

图7为采用ORP在线模糊控制器控制内循环回流量的结果,由图可知通过动态调整内循环回流量,ORP值稳定控制在 $(-86 \pm 2)$  mV,第2格室硝酸氮质量浓度维持在 $(2 \pm 0.5)$  mg/L。因此ORP模糊器可以迅速克服进水水质的干扰,实现最优控制。

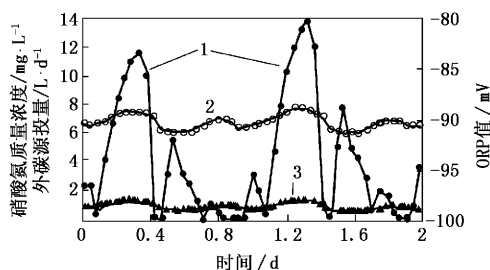
图8为采用ORP在线模糊控制器控制外碳源投加的结果,由图可知通过动态改变外碳源投量,可以稳定控制ORP值维持在 $(-90 \pm 2)$  mV,同时第2格室硝酸氮质量浓度维持在 $(1 \pm 0.25)$  mg/L,硝酸氮

去除率平均提高了 32.43%,总氮去除率平均提高了 27.6%。



1—回流比;2—ORP值;3—硝酸氮

图7 模糊控制内循环时第2格室硝酸氮质量浓度及ORP值



1—外碳源投量;2—ORP值;3—硝酸氮

图8 模糊控制外碳源投量时第2格室硝酸氮质量浓度和ORP值

## 2.5 内循环和外碳源控制的联合

以上试验表明内循环回流量和外碳源投加2种控制策略都可有效降低出水硝酸氮和总氮浓度,并且都以ORP值反馈缺氧区末端硝酸氮浓度来实现系统的最优控制,所以应同时应用上述2种控制策略,达到系统高效、低耗的目的。

控制内循环可以充分利用缺氧区反硝化潜力,

提高对进水溶解性COD的利用率。由于提高内循环回流量所增加的动力消耗相对于外碳源投加所需费用低得多,所以首先应用ORP模糊器控制内循环,假如使用内循环控制无法实现出水总氮的排放标准,表明进水碳源不足,此时外投碳源以提高系统反硝化速率,实现出水总氮达标排放。另外需要确定外碳源的最大投量,而假如硝化反应受到毒性物质抑制,无论投加多少外碳源都将无济于事。

## 3 结语

以淀粉废水作为研究对象,试验研究得出缺氧区末端硝酸氮质量浓度和ORP值有很好的相关性,可作为反硝化反应的控制参数。维持缺氧区末端的ORP值处于 $(-86 \pm 2)$ mV,可实现内循环回流量的最优控制;维持缺氧区末端的ORP值处于 $(-90 \pm 2)$ mV,可实现外碳源投加的最优控制。

以ORP值作为模糊控制参数设计出了构造简单,运行稳定的模糊控制器,并根据实际需要提出了外碳源和内循环综合控制系统,可以迅速响应进水负荷的变化,具有良好的动态品质,易于在线控制,可显著提高A/O工艺反硝化速率,降低出水硝酸氮和总氮浓度以及运行费用。

## 参考文献

- [1] Tsai Y P, et al. [J]. Wat Environ Res, 1996, 68(6): 1045 - 1053.
- [2] 彭永臻,邵剑英,周利. [J]. 中国给水排水, 1997, 13(6): 6 - 11.
- [3] Londong J. [J]. Wat Sci Tech, 1992, 26(5 - 6): 1087 - 1096.
- [4] Zhiguo Yuan, Oehmen A, Ingldsen P. [J]. Wat Sci Tech, 2002, 45(4 - 5): 29 - 36.
- [5] Samuelsson P, Carlsson B. [J]. Water Science and Technology, 2001, 43(1): 115 - 122. ■

## 《全国粉体加工设备购销指南》(第二版)征订通知

粉体工业是一个跨行业的领域,涉及化工、医药、冶金、矿山、建材、精细陶瓷、农业等多个行业,其加工过程涉及到的设备种类很多。为了给粉体加工企业购买设备和设备选型提供便利,中国化工信息中心《现代化工》编辑部和中国粉体工业信息网于2001年联合编辑出版了第一版《全国粉体加工设备购销指南》。

第二版《全国粉体加工设备购销指南》已于2003年底出版,在第一版的基础上进行了核实更新,收录企业由原来的1041家增加到1651家,同时收录了100多家日本相关企业的产品信息,涉及的粉体加工设备包括粉碎、筛分、研磨、分级、固液分离、混合、选料、过滤、乳化和

包覆、干燥、成型、烧结、送料、输送、收尘、包装、环保及其他辅助设备。企业按照地区划分编排次序,并附有产品索引。每本定价100元人民币。

户名:北京中化信深达信息技术有限责任公司

账号:30922770 - 1610

开户行:农行亚运村支行营业室

联系人:杨瑞影

单位:中国化工信息中心《现代化工》编辑部

地址:北京安外小关街53号(100029)

电话:010 - 64444095, 64444090 转分机 842

传真:010 - 64437104