

微生物发酵法生产 2,3-丁二醇的研究进展

纪晓俊,朱建国,高 振,任路静,黄 和
(南京工业大学制药与生命科学学院,南京 210009)

摘要:从发酵菌株、发酵底物、发酵工艺以及分离提取方法等方面概述了微生物发酵法生产 2,3-丁二醇的研究进展,并讨论了 2,3-丁二醇发酵过程中存在的问题,同时指出,选育理想菌株并进一步对 2,3-丁二醇的生化代谢途径中不同酶的动力学行为展开针对性的研究、应用数学工具优化发酵工艺并在此基础上对 2,3-丁二醇的系列衍生物进行开发应用是今后研究的重点。

关键词:2,3-丁二醇;微生物发酵法;进展

中图分类号:TQ923

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2006)08-0023-05

Research progress in production of 2,3-butanediol by fermentation

Ji Xiao-jun, Zhu Jian-guo, Gao Zhen, Ren Lu-jing, Huang He

(College of Life Science and Pharmacy, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The progress in the production of 2,3-butanediol from the bioconversion of renewable biomass resources by some bacterial species is discussed, including microbe strains, substrates, fermentation process and downstream recovery process. The problems with the process of 2,3-butanediol fermentation are discussed. It is pointed out that the research emphasis should be placed on screening ideal microbe strains, understanding the kinetic behavior of different enzymes involved in the biochemical pathway, using the mathematic tools to optimize the fermentation process, and exploiting the potential function of its derivatives.

Key words: 2,3-butanediol; microorganism fermentation; progress

2,3-丁二醇广泛用于化工、食品、燃料以及航空航天等多个领域,目前化学法生产 2,3-丁二醇主要是以石油裂解时产生的四碳类碳氢化合物在高温、高压下水解得到的。同生物法相比,化学法不仅成本高,而且过程烦琐,不易操作,所以一直很难实现大规模工业化生产,其用途也没有得到充分的开发。用生物法来制备 2,3-丁二醇既符合绿色化工的要求,又可以克服化学法生产的困难,同时可以实现人类社会生产由传统的以不可再生化石资源为原料的石油炼制向以可再生生物质资源为原料的生物炼制转型^[1],逐渐减少对日益枯竭的石油资源的依赖。近年来,随着石油价格的日益攀升,用微生物发酵法生产 2,3-丁二醇,并对其衍生物进行开发应用逐渐引起了人们的关注。

1 发酵菌株

自然界中的某些细菌具有产 2,3-丁二醇的能力,主要包括克雷伯氏菌属(*Klebisella*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)等,见表 1。在这

些细菌中,克雷伯氏菌属的产酸克雷伯氏菌(*Klebsiella oxytoca*)和芽孢杆菌属的多黏芽孢杆菌(*Bacillus polymyxa*)显示出较高的生产 2,3-丁二醇的潜力^[2-3],尤其是前者,因为其具有宽广的底物范围以及对培养条件具有很好的适应能力等优点,所以经常用于生物合成 2,3-丁二醇。而后者虽然产 2,3-丁二醇的能力不及前者,但其能够分泌淀粉酶^[2],因而可以直接利用淀粉类物质发酵产 2,3-丁二醇;而且该菌株产生的 2,3-丁二醇主要是 D 型 2,3-丁二醇^[4-5],常用于制备手性 2,3-丁二醇,因而也是微生物发酵法生产 2,3-丁二醇的热门菌株之一。

2 发酵底物

微生物可以利用很多糖类为碳源发酵产 2,3-丁二醇,其中葡萄糖是最经常使用的一种碳源。但是 *K. oxytoca*、*B. polymyxa* 等菌株还可以利用木糖以及阿拉伯糖等五碳糖为碳源,并将其转化为 2,3-丁二醇^[2-3]。Yu 等^[19-21]对利用 *K. pneumoniae* 以经预处理的木材为碳源直接转化生产 2,3-丁二醇

收稿日期:2006-05-11;修回日期:2006-06-12

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2005114);江苏省博士后科研资助计划项目

作者简介:纪晓俊(1982-),男,硕士生, xiaojunji@126.com;黄和(1974-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事生物质可再生资源的利用及微生物代谢工程研究,通讯联系人,025-86990023, huangh@njut.edu.cn。

表 1 产 2,3-丁二醇发酵菌株研究情况

菌种	学名	碳源	2,3-丁二醇最高 质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	得率 ^① / $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
产气气杆菌	<i>Aerobacter aerogenes</i>	葡萄糖	36.5	0.30	[6]
解淀粉芽孢杆菌	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	葡萄糖	30	0.33	[7]
地衣芽孢杆菌	<i>Bacillus licheniformis</i>	葡萄糖、蔗糖、淀粉等	5.16	0.44	[8]
多黏芽孢杆菌	<i>Bacillus polymyxa</i>	葡萄糖	13	0.29	[9]
多黏芽孢杆菌	<i>Bacillus polymyxa</i>	淀粉	38	0.28	[10]
多黏类芽孢杆菌	<i>Paenibacillus polymyxa</i>	葡萄糖	—	—	[11]
产气肠杆菌	<i>Enterobacter aerogenes</i>	葡萄糖	110	0.48	[12]
阴沟肠杆菌	<i>Enterobacter cloacae</i>	玉米纤维来源的葡萄糖、木糖、阿拉伯糖等	34.4	0.43	[13]
产酸克雷伯氏菌	<i>Klebsiella oxytoca</i>	木糖	49	0.33	[14]
产酸克雷伯氏菌	<i>Klebsiella oxytoca</i>	糖蜜	98.6	0.48	[15]
肺炎克雷伯氏菌	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	乳清渗透物	13.7	0.39	[16]
肺炎克雷伯氏菌	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	葡萄糖	39.6	0.43	[17]
黏质沙雷氏菌	<i>Serratia marcescens</i>	蔗糖	—	—	[18]

注:①以任何一种糖为碳源时,2,3-丁二醇的理论得率均为 $0.50 \text{ g/g}^{[14]}$ 。

进行系统的研究,分别研究了酸解、酶解以及混菌培养在该过程中的应用。Cao 等^[22]则直接将磨碎的玉米芯经预处理后作为 *K. oxytoca* ATCC 8724 发酵产 2,3-丁二醇的碳源。除上述糖类之外, Lee 和 Maddox 等^[16,23]还利用乳糖作为碳源进行了 2,3-丁二醇连续发酵研究。此外,糖蜜、蔗糖以及麦芽糖等也被作为碳源用于发酵产 2,3-丁二醇^[5,10,15]。

3 发酵工艺

3.1 pH 对发酵过程的影响

pH 在调节细菌的代谢过程中起着重要的作用,尤其是在含有大量复合产物的发酵过程中,pH 对发酵结果的影响尤为明显。2,3-丁二醇发酵过程中含有相当多的副产物,如 3-羟基丁酮、乙醇、乙酸、乳酸等。2,3-丁二醇生成路线以及这些副产物生成路线的相关酶最适 pH 并不一致,因而发酵过程中 pH 不仅会影响细菌的生长,还会影响细菌的代谢过程^[9]。一般,碱性条件有利于有机酸的生成,此时 2,3-丁二醇的产量较低;而在酸性条件下,有机酸的产量则下降至碱性条件下的 1/10,产物中的主要成

分为 2,3-丁二醇^[24]。Raspoet 等^[25]发现一株地衣芽孢杆菌 *B. licheniformis*,以葡萄糖为碳源,当 pH 为 6.0 时 2,3-丁二醇的产量最高。Jansen 等^[14]发现 *K. oxytoca* 在厌氧条件下以木糖为碳源,当 pH 为 5.2 时菌体生长速度最快,2,3-丁二醇的产量也最高。因此,2,3-丁二醇发酵过程中的最佳 pH 与所使用的菌株以及底物相关。

3.2 溶氧对发酵过程的影响

虽然 2,3-丁二醇是典型的厌氧代谢产物,但是当以 *K. pneumoniae* 为出发菌株时,适当的通气可以增加 2,3-丁二醇的产量。Long 和 Patrick 对此的解释是:通气过程中伴随着搅拌,通过搅拌可使底物和产物在发酵液中均匀分散,因而可以提高发酵的效率。Laube 等^[26]发现, *B. polymyxa* 在静置摇瓶与振荡摇瓶中相比,消耗更少的底物木糖并产生较少的 2,3-丁二醇。他最初对此的解释是:后一种情况下,发酵过程中的产物 CO_2 能够及时释放,从而加快了木糖代谢的速率,提高了 2,3-丁二醇产量。然而进一步研究发现,当转速为 125 r/min 时,2,3-丁二醇的产量比转速为 300 r/min 时的产量高,故过多的通

(上接第 22 页)

[30] 孔德领,代军,陈长治,等.球形纤维素固定化 DNA 制备免疫吸附剂[J].高等学校化学学报,2000,21(12):1848-1851.

[31] 邹长军.球形纤维素固定 Anti-HBsAg 单克隆抗体制备免疫吸附剂[J].化学与生物工程,2004(1):32-33.

[32] Jolita A, Liesiene J, Niemeyer B. Evaluation of cellulose-based biospecific adsorbents as a stationary phase for lectin affinity chromatography [J]. Journal of Chromatography B, 2006, 831(1/2):24-30.

[33] 李欣,李朝兴,何炳林.磁性珠状纤维素亲和吸附剂的制备与应用[J].高等学校化学学报,1998,19(6):994-999. ■

气对2,3-丁二醇的形成不利。

Jansen 等^[14]在以木糖为碳源利用 *K. oxytoca* 发酵产2,3-丁二醇时发现,受通气量直接影响的参数——氧气传输速率(OTR)是影响2,3-丁二醇产量的最重要因素。3-羟基丁酮是发酵过程中2,3-丁二醇的前体物质,研究发现,溶氧(DO)对该步的转化也有影响。Moes 等^[27]在利用 *B. subtilis* 发酵产2,3-丁二醇时发现,该过程中不同的溶氧水平会影响终产物中3-羟基丁酮和2,3-丁二醇的组成比例;进一步研究发现,当DO含量在100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以上时主要产物是3-羟基丁酮,当DO含量在100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以下时主要产物是2,3-丁二醇,因此可以通过改变DO含量使2种产物以可逆的方式相互转化。Beronio 和 Tsao^[28]进一步研究了OTR对 *K. oxytoca* 分批发酵产2,3-丁二醇过程的影响,研究发现,发酵过程可以分为2个阶段:能量生长偶联阶段和能量生长非偶联阶段。在能量生长偶联阶段,菌体细胞生长与供氧量偶联,在此阶段2,3-丁二醇可获得最大产量;而能量生长非偶联阶段只有当DO含量达到某一极限时才发生。通过不断地增加通入气体中氧气的分压,可对氧气传质系数进行控制,使溶氧水平维持恒定,从而可以使 *K. oxytoca* 的生长维持在平衡状态,并可抑制2,3-丁二醇产生过程中的主要副产物乙醇的产生。此外,通气量不仅会影响2,3-丁二醇的产量,还会影响某些菌株终产物中2,3-丁二醇的光学活性。

Nakashimada 等^[29]在培养 *P. polymyxa* 时发现,增加氧气的供给量会降低产物中混旋型2,3-丁二醇(*meso*-)的比例,从而显著增加*D*型2,3-丁二醇[(*2R,3R*)-]的比例。因此,发酵过程中2,3-丁二醇的得率可以通过控制氧气供给量来调控。发酵过程中菌体细胞可利用的氧气量取决于发酵液的DO水平,而DO水平可以通过气相中的氧气分压(氧气比例)调节,因此氧气分压可作为控制发酵过程的参数。Syu 等^[30]在 *K. oxytoca* 发酵过程中,利用神经网络对发酵过程的动力学参数进行了预测,并在此基础上进一步对如何使用神经网络对不同氧气分压条件下有效控制发酵过程进行了研究^[31]。

3.3 添加因子对发酵过程的影响

营养因子包括维生素以及微量元素等。Nilegaonkar 等^[32]发现向 *B. licheniformis* 的培养基中添加蛋白胨或牛肉膏,可以提高2,3-丁二醇的产量。Laube 等^[26]也发现通过增加 *B. polymyxa* 培养基中麦芽浸膏的浓度,木糖的利用率以及2,3-丁二醇的

产量均得到了提高。

蛋白胨、牛肉膏以及麦芽浸膏等不仅可为菌体生长提供丰富的氮源,还可提供众多对菌体细胞代谢起关键作用的营养因子,所以对发酵过程十分有利。但由于它们成本较高,限制了其在工业上的大规模应用。为了降低工业生产过程中的成本,必须使用无机氮源来替代或部分替代这些价格相对较高的有机氮源。尿素作为一种既便宜又富含氮的化合物,很适合于工业发酵使用,已被广泛添加到不同的底物如麦芽水解物以及木材水解物中供发酵产2,3-丁二醇使用^[33]。Laube 等^[34]还发现当以 *B. polymyxa* 为出发菌株时,添加某些金属离子也可以提高2,3-丁二醇的产量。向含质量分数为0.5%酵母膏的培养基中分别单独添加 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 以及同时添加 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} , 结果表明,添加任一种金属离子后的2,3-丁二醇浓度均比未添加任何金属离子时的高,并且当它们的浓度分别为40 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 和1.7 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 时对发酵过程最有利。Laube 等^[34]进一步向含有0.5%的酵母膏中加入磷酸钾和磷酸钠,使磷酸根离子的浓度为78 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 此时发现2,3-丁二醇的得率明显提高,最终从起始质量分数为5%的葡萄糖可获得质量浓度为13.8 g/L的2,3-丁二醇,比只添加 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 时均高,于是他们认为影响菌体代谢和2,3-丁二醇得率最主要的因素为磷酸根离子而不是金属离子。综合考虑以上因素(Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 以及 PO_4^{3-})的影响,2,3-丁二醇的终质量浓度为15.4 g/L,是酵母膏质量分数为1.5%时的89%。因此,通过向含低浓度酵母膏(质量分数0.5%)培养基中添加 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 以及 PO_4^{3-} , 可以用来代替含高浓度酵母膏(质量分数1.5%)的培养基,进一步通过添加不同的无机盐可以完全代替含酵母膏的培养基,这势必可以避免在工业生产中使用酵母膏等有机氮源,从而降低了生产过程的成本。

3.4 培养方式对发酵过程的影响

Lee 和 Maddox^[16,23]在使用乳清渗透物作为原料连续发酵产2,3-丁二醇过程中,以海藻酸钙将 *K. pneumoniae* 细胞固定在填充床反应器中,发现2,3-丁二醇的生成速率显著提高。同时,Ramachandran 和 Goma^[17]在连续生物反应器中研究供氧速率和稀释率对 *K. pneumoniae* 发酵产2,3-丁二醇过程的影响时发现,当菌体细胞的生长速率大于某一特定值时,不论如何调整稀释率,2,3-丁二醇的生成速率都保持不变。由此,他们认为菌体细胞生长和产物2,3-丁二醇的生成是非偶联的,并进一步提出了

在细胞固定化的基础上循环使用菌体细胞的方式以获得高产量的 2,3-丁二醇。在此基础上,Zeng 等^[12]在利用 *E. aerogenes* DSM 30053 发酵产 2,3-丁二醇过程中采用了一种微滤系统,从而实现了菌体细胞的有效循环利用。在最佳条件下,2,3-丁二醇的生成速率、终浓度和得率均明显提高。进一步通过 pH 调控策略来有效控制抑制性副产物乙酸的产生,2,3-丁二醇的生成速率、终质量浓度和转化率可分别高达 5.4 g/(L·h)、110 g/L 及 97%。

4 分离提取方法

从发酵液中分离提取 2,3-丁二醇所面临的主要困难是其与水具有很高的亲和力,因而难以与水分离;而且 2,3-丁二醇沸点较高(达 180℃),在达到蒸馏温度之前,发酵液中的可溶部分就会浓缩成浓厚的油状积块,从而减慢 2,3-丁二醇的蒸发速率,因此不宜采用减压蒸馏的方法来提取^[2]。多级萃取^[2]曾被应用于 2,3-丁二醇的分离提取,该过程中可以使用多种溶剂作萃取剂,如乙酸乙酯、乙醚以及正丁醇等。研究发现,利用乙醚萃取效果最好,萃取一次即可回收发酵液中 75% 的 2,3-丁二醇,另外相应的副产物 3-羟基丁酮、乙醇以及丁二酮的回收率也分别达到 65%、25% 和 75%~90%,但这种方法因溶剂使用量较大且成本较高等只限于实验室规模,而不适合于大规模工业化生产。此外,真空膜蒸馏法也可用于 2,3-丁二醇的分离提取。Qureshi 等^[35]曾在真空膜蒸馏过程中使用一种具有微孔结构的聚四氟乙烯膜,这种膜可以允许水蒸气顺利通过,却能够阻止 2,3-丁二醇通过,采用这种方法,2,3-丁二醇的终质量浓度可高达 430 g/L。除上述方法外,Garg 等^[24]认为逆流汽提法最适合于 2,3-丁二醇的分离提取。但是,2,3-丁二醇的分离提取一直是制约微生物发酵法生产 2,3-丁二醇发展的瓶颈之一,因此开发高效率、低成本的分离提取工艺是降低生产成本、扩大生产规模的关键。

5 研究展望

微生物发酵法生产 2,3-丁二醇因利用可再生生物质资源而日益备受关注。但是,若要提高微生物发酵工艺相对于化学合成工艺的竞争力,必须应用分子生物学、微生物代谢工程等现代生物技术手段,提高 2,3-丁二醇发酵水平,同时开发高效率、低成本的 2,3-丁二醇产品提取工艺。目前国内微生物发酵产 2,3-丁二醇的研究还属空白,理论研究和

工业生产均与国外先进水平存在着不小的差距,今后研究中应该从以下几个方面展开:

(1)重视菌株的选育,在前人研究的基础上,着重选育产副产物少以及能够对木质纤维素水解液直接转化利用并适合高密度培养的菌株;

(2)在对发酵过程进行动力学分析的基础上利用数学工具模拟优化发酵过程,以优化发酵工艺,并在此基础上开发高效率、低成本的分离提取工艺;

(3)进一步研究 2,3-丁二醇生化合成路径中关键酶的酶学性质,尤其是参与不同构型 2,3-丁二醇合成的酶,为 2,3-丁二醇的高产及其相关构型的有效控制奠定基础;

(4)对 2,3-丁二醇的系列衍生物进行开发应用,以进一步拓宽其应用领域。

参考文献

- [1] Ragauskas A J, Williams C K, Davison B H, et al. The path forward for biofuels and biomaterials[J]. *Science*, 2006, 311(5760): 484-498.
- [2] Syu M J. Biological production of 2, 3-butanediol[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001, 55(1): 10-18.
- [3] Tran A V, Chambers R P. The dehydration of fermentative 2, 3-butanediol into methyl ethyl ketone[J]. *Biotechnol Bioeng*, 1987, 29(2): 343-351.
- [4] Ui S, Masuda T, Masuda H, et al. Mechanism for the formation of 2, 3-butanediol stereoisomers in *Bacillus polymyxa*[J]. *J Ferment Technol*, 1986, 64(6): 481-486.
- [5] Mas C D, Jansen N B, Tsao G T. Production of optically active 2, 3-butanediol by *Bacillus polymyxa*[J]. *Biotechnol Bioeng*, 1988, 31(3): 366-377.
- [6] Singh M P, Krishnan P S. Fermentative production of 2, 3-butanediol by *Aerobacter aerogenes*[J]. *Arch Microbiol*, 1959, 34(2): 154-157.
- [7] Alam S, Capit F, Weigand W A, et al. Kinetics of 2, 3-butanediol fermentation by *Bacillus amyloliquefaciens*: Effect of initial substrate concentration and aeration[J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 1990, 47(11): 71-84.
- [8] Perego P, Converti A, Del Borghi M. Effects of temperature, inoculum size and starch hydrolyzate concentration on butanediol production by *Bacillus licheniformis*[J]. *Bioresour Technol*, 2003, 89(22): 125-131.
- [9] Groleau D, Laube V M, Martin S M. The effect of various atmospheric conditions on the 2, 3-butanediol fermentation from glucose by *Bacillus polymyxa*[J]. *Biotechnol Lett*, 1985, 7(1): 53-58.
- [10] Afschar A, Vaz Rossell C, Jonas R, et al. Microbial production and downstream processing of 2, 3-butanediol[J]. *J Biotechnol*, 1993, 27(33): 317-329.
- [11] Nakashimada Y, Marwoto B, Kashiwamura T, et al. Enhanced 2, 3-butanediol production by addition of acetic acid in *Paenibacillus polymyxa*[J]. *J Biosci Bioeng*, 2000, 90(6): 661-664.

- [12] Zeng A P, Biebl H, Deckwer W D. Production of 2,3-butanediol in a membrane bioreactor with cell recycle[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1991, 34(4):463-468.
- [13] Saha B C, Bothast R J. Production of 2,3-butanediol by newly isolated *Enterobacter cloacae* [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1999, 52(3):321-326.
- [14] Jansen N B, Flickinger M C, Tsao G T. Production of 2,3-butanediol from D-xylose by *Klebsiella oxytoca* ATCC 8724[J]. Biotechnol Bioeng, 1984, 26(4):362-369.
- [15] Afschar A S, Bellgardt K H, Rossell C E, et al. The production of 2,3-butanediol by fermentation of high test molasses[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1991, 34(5):582-585.
- [16] Lee H K, Maddox I S. Microbial production of 2,3-butanediol from whey permeate[J]. Biotechnol Lett, 1984, 6(12):815-818.
- [17] Ramachandran K B, Goma G. 2,3-butanediol production from glucose by *Klebsiella pneumoniae* in a cell recycle system[J]. J Biotechnol, 1988, 9(1):39-46.
- [18] Bahadur K, Dube J N. Study of 2,3-butanediol formation by *Serratia marcescens* [J]. Arch Microbiol, 1958, 32(1):16-19.
- [19] Yu E K C, Levitin N, Saddler J N. Production of 2,3-butanediol by *Klebsiella pneumoniae* grown on acid hydrolyzed wood hemicellulose [J]. Biotechnol Lett, 1982, 4(11):741-746.
- [20] Yu E K C, Deschatelets L, Saddler J N. The combined enzymic hydrolysis and fermentation of hemicellulose to 2,3-butanediol[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1984, 19(6):365-372.
- [21] Yu E K C, Chan M K H, Saddler J N. Butanediol production from lignocellulosic substrates by *Klebsiella pneumoniae* grown in sequential coculture with *Clostridium thermocellum* [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1985, 22(6):399-404.
- [22] Cao N, Xia Y, Gong C S, et al. Production of 2,3-butanediol from pretreated corn cob by *Klebsiella oxytoca* in the presence of fungal cellulase [J]. Appl Biochem Biotechnol, 1997, 63/64/65:129-139.
- [23] Lee H K, Maddox I S. Continuous production of 2,3-butanediol from whey permeate using *Klebsiella pneumoniae* immobilized in calcium alginate[J]. Enzyme Microb Technol, 1986, 8(7):409-411.
- [24] Garg S, Jain A. Fermentative production of 2,3-butanediol: A review [J]. Bioresour Technol, 1995, 51(2):103-109.
- [25] Raspoet D, Pot B, De Deyn D, et al. Differentiation between 2,3-butanediol producing *Bacillus licheniformis* and *Bacillus polymyxa* strains by fermentation product profiles and whole-cell protein electrophoretic patterns[J]. Syst Appl Microbiol, 1991, 14(1):1-7.
- [26] Laube V M, Groleau D, Martin S M. 2,3-butanediol production from xylose and other hemicellulosic components by *Bacillus polymyxa* [J]. Biotechnol Lett, 1984, 6(4):257-262.
- [27] Moes J, Griot J M, Heinze K E, et al. A microbial culture with oxygen-sensitive product distribution as a potential tool for characterizing bioreactor oxygen transport[J]. Biotechnol Bioeng, 1985, 27(4):482-489.
- [28] Beronio Jr P B, Tsao G T. Optimization of 2,3-butanediol production by *Klebsiella oxytoca* through oxygen transfer rate control [J]. Biotechnol Bioeng, 1993, 42(11):1263-1269.
- [29] Nakashimada Y, Kanai K, Nishio N. Optimization of dilution rate, pH and oxygen supply on optical purity of 2,3-butanediol produced by *Paenibacillus polymyxa* in chemostat culture [J]. Biotechnol Lett, 1998, 20(12):1133-1138.
- [30] Syu M J, Hou C L. A neural network study on the dynamic identification of a fermentation system [J]. Bioproc Biosyst Eng, 1997, 17(4):203-213.
- [31] Syu M J, Hou C L. Neural network predictive control by MIMS monitored 2,3-butanediol fermentation by *Klebsiella oxytoca* [J]. Bioproc Biosyst Eng, 1999, 21(2):141-149.
- [32] Nilegaonkar S, Bhosale S B, Kshirsagar D C, et al. Production of 2,3-butanediol from glucose by *Bacillus licheniformis* [J]. World J Microbiol Biotechnol, 1992, 8(4):378-381.
- [33] Sivakumar A, Swaminathan T, Baradarajan A. Effect of urea on the production of 2,3-butanediol by *Klebsiella oxytoca* [J]. Bioproc Biosyst Eng, 1995, 13(1):49-50.
- [34] Laube V M, Groleau D, Martin S M. The effect of yeast extract on the fermentation of glucose to 2,3-butanediol by *Bacillus polymyxa* [J]. Biotechnol Lett, 1984, 6(8):535-540.
- [35] Qureshi N, Meagher M M, Hutkins R W. Recovery of 2,3-butanediol by vacuum membrane distillation [J]. Sep Sci Technol, 1994, 29(13):1733-1748. ■

中电电气新型变压器事业部向石油、石化和冶金行业进军

中电电气新型变压器事业部是中电电气总公司于2006年2月初成立的,它将致力于为石油、石化和冶金行业提供专业变压器。

目前新型变压器事业部的主打产品——半包封干式变压器 SGR 系列产品是一种安全、环保、可靠的配电产品,集中电电气的 SC、SG10 两个系列产品的优点于一身,性价比达到了相当高的程度。该产品可在生产环境比较恶劣的条件下使用,定位为石油、石化和冶金行业专用变压器。从新型变压器事业部成立到现在不到半年的时间,SGR 系列变压器的销售额已经达到了 4 000 多万元,而且目前应

用 SGR 系列产品的用户中,因产品本身质量问题而产生的售后服务率为零,也就是说,还没有 1 台正在运行的产品出现过质量问题。

2006 年,SGR 系列干式变压器的销量计划达到 800 万台,销售额达到 1 亿元,要实现 400% 的增长率;2007 年其销售额目标是 3 亿元。

“围绕市场与引领市场并重,满足现实需求,适当超前,实现从被动适应市场搞研发,向主动引领市场的转变”,这是中电电气建立创新型企业集团的一个原则。(刘佳)