

# 谷氨酸发酵过程最佳操作曲线的确定<sup>\*</sup>

方柏山 林金清

(华侨大学化工与生化工程系, 泉州 362011)

**摘要** 从理论和实践上确定了综合考虑谷氨酸发酵过程温度、pH 和通风量的最佳操作曲线, 提出运用调优操作研究发酵过程最佳操作曲线的新方法。

**关键词** 谷氨酸, 发酵, 操作曲线, 最优化

**分类号** TQ 922.1

发酵过程最佳操作曲线的确定是有效地实现发酵过程在线调优的关键。由于发酵过程机理复杂, 涉及因素众多, 且各因素间联系非常密切, 从机理上要获得较为全面地描述发酵过程的最佳操作曲线是很困难的, 至少目前是不可能的。因此, 只得从宏观上加以研究, 目前报道的多为实验室规模, 且往往只考虑某个因素(如溶解氧、pH 值或温度)。能够直接用于工业且较全面考虑各因素同时影响最佳操作曲线确定的方法尚未见报道, 这严重地削弱了计算机在发酵工业中应起的优化控制的重要作用, 以致不少厂家与发酵罐联接的计算机仅起记录数据或代替手动的作用。即使用于过程调节, 所遵循的也往往是凭经验而定的操作曲线。为此, 我们在研究谷氨酸发酵工艺条件优化方法的同时, 就谷氨酸发酵的 pH、温度及通气量总体优化的操作曲线进行探讨。结果表明, 该方法简单实用, 对于确定谷氨酸发酵最佳操作曲线及实现过程在线调优有较好的参考价值。

## 1 确定操作曲线的方法及结果

在研究谷氨酸发酵工艺条件优化方法的过程中, 我们发现选择适当的自变量, 经过统计调优分析, 不仅能够优化静态的工艺条件, 还能就动态的操作曲线的确定给予方向性的指导。基于 30 批记录数据及 27 个自变量的逐步回归分析, 我们获得如表 1~3 所示的结果。

表 1 以产酸率为目标的 pH 操作曲线

$t/h$	0	4	8 <sup>①</sup>	16	20	26
平均值	6.50	7.56	7.41	7.16	6.95	6.77
优化方向	升	降	降	降	升	降
优化值	6.7	7.3	7.2	7.1	7.1	6.6
边界值 <sup>②</sup>	6.7	7.0	7.0	7.0	7.5	6.4

①  $F=3.68>2.89=F_{(1,28)}^{0.1}$ ; ② 边界值指 30 批数据中对应时间下相应变量所出现的最大或最小值, 下同

\* 本文 1994-07-11 收到; 福建省自然科学基金资助项目

表 2 以产酸率为目标的温度操作曲线

$t/h$	0	4	8 <sup>①</sup>	16	20	26
平均值	33.1	33.8	34.7	36.0	37.0	37.6
优化方向	升	升	升	升	降	降
优化值	34.0	34.5	36.5	36.5	36.5	36.5
边界值	34.0	34.5	36.5	38.0	36.0	36.0

①  $F=4.66>4.2=F_{(1,28)}^{0.05}$

表 3 以产酸率为目标的风量操作曲线

$t/h$	0	4	8	16	20 <sup>①</sup>
平均值	3.81	3.76	7.64	10.86	11.31
优化方向	升	升	降	降	降
优化值	4.20	4.20	6.00	9.00	11.00
边界值	4.50	4.45	1.85	4.35	8.70

①  $F=4.24>4.2=F_{(1,28)}^{0.5}$

以转化率为目标的 pH、温度和风量的操作曲线的变化趋势同表 1~3. 对转化率最有影响的因素分别为第 20 h 的 pH 值( $F=2.94>2.89=F_{(1,28)}^{0.1}$ )、第 8 h 的发酵温度( $F=5.53>4.2=F_{(1,28)}^{0.5}$ )和第 20 h 的风量( $F=4.64>4.2=F_{(1,28)}^{0.5}$ ). 优化的确定是以优化方向、各变量的平均值及边界值、后述的实例验证和理论分析为依据的.

2 实例验证

为了验证所获得的优化操作曲线的可信度,我们挑选了 30 批记录数据中产酸率和转化率都是最高的第 23 批数据和最差的第 10 批数据进行比较. 结果如图 1~3.

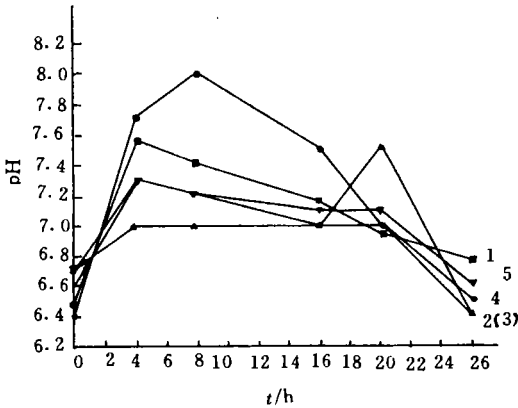


图 1 谷氨酸发酵 pH 随时间变化

1. 平均值;2. 边界值;3. 第 23 批发酵;  
4. 第 10 批发酵;5. 优化值

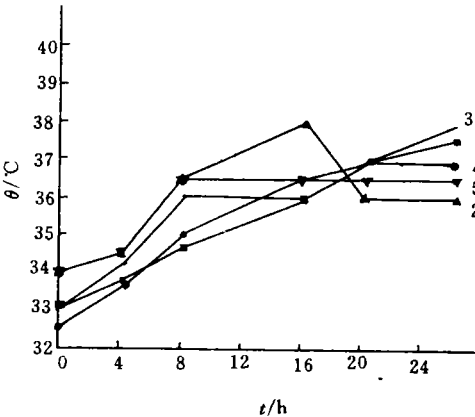


图 2 谷氨酸发酵温度随时间变化

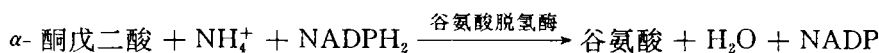
(各条曲线含义同图 1)

图 1~3 表明,产酸率及转化率最高的第 23 批发酵,无论是在温度、pH 或通风量方面都比最差的第 10 批发酵更接近于优化操作曲线. 而且,无论是在温度、pH 还是通风量方面,第 23 批发酵中最重要的变量总是处在优于第 10 批发酵相应变量的状态. 可以预言,若第 23 批中

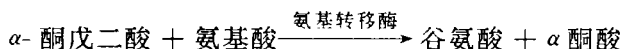
某些劣于第 10 批的次要变量的状态得以改善, 其产酸率和转化率必将有所提高。

### 3 理论分析

谷氨酸发酵是糖的需氧氧化和氨同化的生物化学合成过程。微生物在发酵过程中代谢生成谷氨酸, 首先要形成谷氨酸的碳架。作为主要碳源形成碳架的糖代谢, 主要是通过糖酵解途径(EMP)、单磷酸己糖支路(HMP)和三羧酸循环(TCP)等来实现的。在发酵过程中微生物还利用氨作为氮源合成菌体蛋白质及大量生成谷氨酸。发酵过程中铵离子被同化氨基化, 与糖代谢生成的  $\alpha$ -酮戊二酸生成谷氨酸, 其主要反应为还原性氨基化, 即



其次是转氨作用, 即



在谷氨酸发酵过程中, pH 值的变化是谷氨酸发酵的综合指标。发酵前期, 由于幼龄细胞的氨、氮利用率较高, pH 值随之升高。当 pH 值升至一定程度后, 它不但有利于抑制杂菌生长, 也可防止由于 pH 值低和生长旺盛而长菌不产酸。但前期 pH 值长期过高, 对菌体生长不利。糖代谢缓慢, 生长时间延长。图 1 中第 23 批和第 10 批发酵液 pH 的操作曲线反映了这些规律, 即产酸率和转化率最好的第 23 批发酵, 其初始 pH (6.6) 比最差的第 10 批高 (pH=6.4), 第 4 h 的 pH 值 (7.3) 比第 10 批的低 (pH=7.7)。且至第 8 h 降至 7.2 而第 10 批的 pH 反而升高到 8。从作者所得

到调优的结果看(见表 1), 初始 pH 值应高些, 第 4 h 和第 8 h 应低些。参考 30 批发酵中相应时间下 pH 的平均值和边界值, 可考虑初始、第 4 和 8 h 的 pH 优化值分别为 6.7、7.3 和 7.2。由于谷氨酸脱氢酶在 pH 值较大 (7.0~7.2) 时活性较高, 氨基转移酶在弱碱性环境 (7.2~7.4) 中作用虽好, 但作用不大, 而且过高 pH 会导致菌体自溶及谷氨酸转成谷氨酰胺。综合考虑优化方向、平均值和边界值, 参考第 23 和第 10 批发酵过程相应时间下的 pH 值, 本文建议第 16、20 和 26 h 下的 pH 优化值分别为 7.1、7.1 和 6.6。

微生物生长及产物代谢的最合适温度是酶反应速度最快和酶蛋白的钝化程度最低的协调平衡温度。由于幼龄菌种不耐高温, 前期温度过高, 菌种生长繁殖虽然加快但易于衰老。中后期, 菌体生长已基本结束, 为了促进谷氨酸的大量形成, 需适当提高温度, 加快谷氨酸发酵过程酶催化反应速度。因此, 在综合考虑优化方向、平均值、边界值、第 23 批和第 10 批的温度曲线基础上, 我们提出如图 2 所示优化的温度操作线, 即初始温度 34℃, 发酵 4 h 后达到 34.5℃,

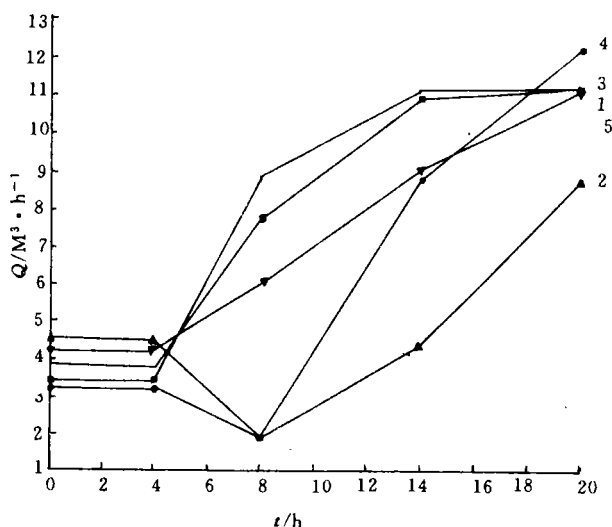


图 3 通风量  $Q$  随时间变化(各条曲线含义同图 1)

第 8 h 达到  $36.5^{\circ}\text{C}$  后维持恒温。

谷氨酸产生菌是兼性好气菌,在谷氨酸发酵过程中供氧情况如何直接影响菌体的生长和谷氨酸累积,在长菌阶段适当通风可延长菌体生长对数期,使总菌量增加。但如果供氧过量,在生物素限量的情况下,就会抑制菌体生长。在发酵阶段,若供氧不足,发酵的主产物便由谷氨酸转化为乳酸。供氧过量,则不利于  $\alpha$ -酮戊二酸进一步还原氨基化。图 3 及表 3 表明:第 23 批发酵通风量的控制总体上不及第 10 批,但其变化趋势更符合理论上的要求和 30 批发酵的总体规律。即生长期通风低,发酵期通风高,且就转化率和产酸影响最显著的第 20 h 通风量而言,第 23 批比第 10 批好。由此我们在平均值及边界值曲线间选定了 4 h 内通风量恒为  $4.2\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,而 4 h 后通风量随时间近乎直线递增。

## 4 结束语

谷氨酸发酵过程 pH、温度和通风量的最佳操作曲线确定是提高产酸率、转化率及实现操作过程优化控制的关键。本文提出的运用调优操作系统研究发酵过程 pH、温度和通风量最佳操作曲线的新方法具有简单、科学和实用的优点。虽然该方法尚无法定量求解出最佳曲线值,但它指出的优化方向和优化值域有助于人们根据具体情况灵活掌握。由于受到原始生产数据来源的限制,本文所确定的优化操作曲线时间间隔大些。运用此方法于众多精确的原始记录数据,必将得到更为可靠、完美的最佳操作曲线。

## 参 考 文 献

- 1 方柏山,林金清. 谷氨酸发酵调优操作模型. 华侨大学学报(自然科学版),1994,15(3):331~334
- 2 上海味精厂编. 味精生产. 北京:轻工业出版社,1978. 86~92
- 3 天津轻工业学院,大连轻工业学院,无锡轻工业学院等编. 氨基酸工艺学. 北京:轻工业出版社,1986. 110~130

## Determination of the Optimum Operation Curves in Glutamic Acid Fermentation

Fang Baishan Lin Jinqing

(Dept. of Chem. & Biochem. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** In glutamic acid fermentation, the optimum operation curves of temperature, pH and airflow rate were determined comprehensively in theory and in practice. On this basis, a new method of evolutionary operation (EVOP) was proposed to study the optimum operation curves in the process of fermentation.

**Keywords** glutamic acid, fermentation, operation curve, optimum