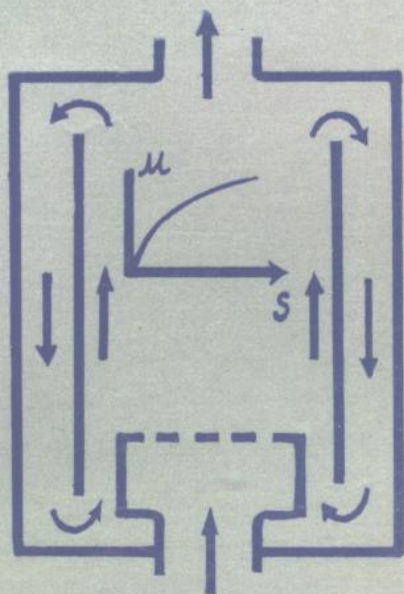


生物反应工程原理

贾士儒 编



南开大学出版社

生物反应工程原理

贾士儒 编

南开大学出版社

内容简介

本书从酶促反应过程、微生物反应过程和动植物细胞培养过程三个方面，系统介绍生物反应工程的基本理论。可作为高等学校生物、发酵、食品、制药、环保、微生物等专业的教材或教学参考书，也可供科研人员参考。

生物反应工程原理

贾士儒 编

南开大学出版社出版
(天津八里台南开大学校内)
邮政编码300071 电话34.9318
新华书店天津发行所发行
天津市宝坻县印刷厂印刷

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.5

字数: 180千 印数: 1—4000

ISBN7-310-00326-8/Q·11 定价: 1.90元

序

生物学是一门古老而又年轻的科学，与医学和农学有着天然的联系。在生物学的发展史上，由于开始是化学，后来是物理学和数学向生物学的渗透，以1953年DNA双螺旋结构模型的提出为里程碑，生物学进入了它发展史上的新的历史阶段，即分子生物学时期。另一方面，随着科学与技术的发展，对生物资源的利用也进入了一个新的时期：从简单地直接用作食物和药物向纵深发展为在受控条件下利用生命过程本身作为产品的生产与加工的手段，由此而产生了种类数以千计的产品，形成了新的现代产业，即生物工业。

在现代生物工业发展过程中，生物学与工程学，特别是化学工程学的结合，形成了一门新的应用科学，即生物反应工程学，将反应速度论、传递现象、设备工程、动力学以及最优化等化学工程方法与生命过程及其产品的生产结合起来。现代生物工业已经成为当今世界举足轻重的工业领域之一，但阐述这个工业过程的理论著作却寥寥无几，国内此前竟无一本，实为憾事。本书的出版正好填补了这一空白。编者贾士儒是青年教师，从国外留学归来后即在我校首次开设了“生物反应工程”课程，作了很好的尝试。现在出版的是他经过整理的讲稿。从事或有兴趣于生物反应工程的人士终

于有了第一本国人编著的生物反应工程入门书可读，实在是值得高兴的事。爱为之序。

姚国雄

于中华人民共和国
建国40周年国庆日

符 号 表

英文字母

- 频率系数 (式2—31),
管型反应器的截面积〔米²〕,
常数
- a 气液比表面积〔米²/米³〕,
实际污泥转换率 (又称污泥转换系数)
- a' 实际耗氧系数〔克氧/克BOD〕
- B 常数
- b 污泥自身氧化速率系数〔1/天〕
- b' 污泥内生呼吸常数〔克氧/(克MLVSS 小时)〕
- 反应系统中的溶氧浓度〔摩尔/升〕,
常数
- D 稀释率〔1/小时〕,
反应器直径〔米〕,
在有字母添加时, 为以添字表示的物质和状态的
扩散系数〔米²/秒〕
- [D] 无活性酶的浓度
- D_{crit} 临界稀释率〔1/小时〕
- D_r 搅拌浆叶的直径〔米〕
- [DO] 溶解氧浓度〔摩尔/升〕
- d 颗粒 (d_p) 或气泡 (d_G) 的直径〔毫米〕

- E 无因次酶的浓度,
固定化前酶的量〔克或千克〕
- E' 固定化后酶的量〔克或千克〕
- E_a, E_d 活化能〔千焦/摩尔〕
- e 酶的浓度
- e' 电子所带电荷 (0.160222×10^{-18} 库仑)
- F 法拉第常数
- F_{im} 固定化时酶活性保持率
- f 无字母添加时为反应液的体积流量, 有字母添加时为添字所表示状态的体积流量〔米/小时〕
- g 微生物的浓缩系数
- H 亨利常数
- ΔH 酶促反应的反应热 (式2-32)
- ΔH 微生物反应的反应热
- ΔH^\bullet 焓变
- h, h^-, h^{--} Michaelis pH函数
- i 抑制物浓度〔摩尔/升〕
- K 常数
- K_m 米氏常数〔摩尔/升〕
- K_p 分配系数
- K_s 底物饱和常数〔摩尔/升〕
- K_1, K_2 解离常数
- $k_{+1}, k_{-1}, k_{+2}, k_{-2}, k'_{+1}, k'_{-1}$ 基元反应速率常数
- 数
- 一级反应速率常数〔1/小时〕
- k_d 酶失活常数〔1/小时〕

- k_L 气液间液界膜内的传质系数〔米/小时〕
 $k_L a$ 容积传氧系数〔1/小时〕
 l 反应器的长度(或高度)〔米〕
 微生物膜内的距离〔米〕
 m 底物(如碳源)的维持代谢系数〔摩尔底物/(克菌体·小时)〕
 m_{O_2} 氧的维持系数〔摩尔氧/(克菌体·小时)〕
 N 无添加字母时,为底物,或BOD的流速(传质速率)〔摩尔/(小时·米²)〕
 n 搅拌转速
 反应器级数
 OAR 氧的吸收速率〔摩尔/(升·小时)〕
 P 系统的总压〔公斤/米〕或〔大气压〕,
 功率消耗〔焦耳〕
 P_s 搅拌功率消耗
 P_Q 通风功率消耗
 P_r 生产率
 P_v 体积功率消耗
 P 产物浓度,〔摩尔/升〕,
 有添加字母时,为固定化酶载体内的底物浓度,
 分压
 Q 代谢热,
 通风量〔升/小时〕
 Q_{O_2} 比呼吸速率〔摩尔氧/(克菌体小时)〕
 Q_{CO_2} 二氧化碳比生成速率
 R 气体常数,

- 固定化酶颗粒的半径〔米〕
- RQ 呼吸商
- r 半径方向上的距离〔米〕，
再循环比，
反应速率
- r_p 产物生成速率〔摩尔/（升·小时）〕
- $-r_s$ 底物的消耗速率〔摩尔/（升·小时）〕
- r_x 菌体或污泥的生成速率〔克/（小时·升）〕
- s 微生物与动植物细胞培养中的底物浓度〔摩尔/升〕
- s 酶促反应中的底物浓度〔摩尔/升〕
- T 绝对温度〔°K〕
- t 时间〔小时〕
- V 反应器体积〔升〕或〔立方米〕，
反应器中反应液的体积
- v_s 液体速度（第二篇），
气体速度（第三篇）〔米/小时〕
- W $1-r(g-1)$ （式3-144）
- w 常数（式3-51）
- X 无因次菌体浓度，动植物细胞浓度
- x ES复合物浓度，
菌体浓度〔克菌体/升〕，
有字母添加时，为相应情况下的菌体浓度〔克菌体/升〕
- Y 菌体得率或产物得率
（见式3-104）

希腊字母

α	常数
β	反应系数 (式3-205), 常数
δ	液膜厚度〔米〕
ϵ	固定化酶反应器内的空隙率
η	有效系数
θ	无因次时间
μ	微生物比生长速率〔1/小时〕
μ_L	液体粘度〔帕·秒〕
$-\gamma$	底物的比消耗速率〔摩尔底物/(克菌体·小时)〕
π	圆周率, 代谢产物的比生成速率〔摩尔产物/(克菌体·小时)〕
ρ_L	液体的密度〔公斤/米 ³ 〕
σ	表面张力〔牛顿/米〕
τ	空间时间〔小时〕
χ	转化率或反应率

下标字母

\cdot	初始值
A	成分A
ΔTP	以生成ATP为基准
e^-	以有效电子为基准
B	成分B
C	以碳源为基准
CO_2	二氧化碳

d	失活或倍增
e	有效值
eq	平衡状态时的数值
free	游离酶
G	气相, 生长
E	固定化载体内, 世代
i	第i号, 气液界面处的值
i _M	进入
K _{cat}	以总有效能为基准
L	液相
M	维持
max	最大值
n	第n号
O ₂	氧
out	流出
P	产物, 分配, 颗粒
r	再循环
s	固液界面液侧, 底物
st	静止期
t	时间

- 菌体
- /• 由底物变到菌体
- 与气相分压相平衡的数值
- 稳态时的数值
- 总括

准 数

- Re 雷诺 (Reynolds) 准数 (= $nD_T^2 \rho / \mu_L$)
- Da 达姆克勒 (Damköhler) 准数 [= $r_{max} / (k_L a \cdot c)$]
- Sc 施米特 (Schmidt) 准数 [= $\mu_L / (\rho_L D)$]
- 舍伍德 (Sherwood) 准数 (= KD_r / D)
- Φ 西勒 (Thiele) 准数 [$R (r'_{max} / D_c \cdot K_m)^{\frac{1}{2}}$]

目 录

符号表

第一篇 绪 论	(1)
第一节 学习目的与方法	(1)
第二节 生物反应工程的历史与展望	(4)
第二篇 酶促反应过程	(7)
第一章 酶促反应过程的特征	(7)
第一节 酶的基本概念	(7)
第二节 固定化酶及其性质	(13)
第三节 酶促反应过程的特点	(16)
第二章 均相系酶促反应动力学	(17)
第一节 影响酶促反应速率的因素	(18)
第二节 单底物酶促反应动力学	(19)
第三节 多底物酶促反应动力学	(32)
第四节 酶的失活动力学	(37)
第三章 多相酶促反应动力学	(44)
第一节 固定化酶反应动力学基础	(45)
第二节 外部和内部的扩散过程	(51)
第三节 复合酶系统的反应动力学	(58)
第四节 固定化酶的失活动力学	(62)
第四章 酶反应器	(66)
第一节 酶反应器及其操作	(66)

第二节	理想的酶反应器	(74)
第三节	固定化酶反应器的应用	(83)
第四节	设计原理与操作的优化	(95)
第三篇	微生物反应过程	(100)
第一章	微生物反应过程的特征	(102)
第一节	基本概念	(102)
第二节	微生物反应的特点	(114)
第二章	微生物反应的质能平衡	(116)
第一节	菌体得率	(117)
第二节	物料衡算	(124)
第三节	能量平衡	(127)
第四节	微生物反应热	(128)
第五节	代谢过程中的物质平衡	(131)
第三章	微生物反应动力学	(135)
第一节	生长速率	(136)
第二节	底物的消耗速率	(147)
第三节	代谢产物的生成速率	(148)
第四节	混合生长动力学	(151)
第四章	培养操作	(156)
第一节	分批式操作	(157)
第二节	流加式操作	(165)
第三节	连续式操作	(169)
第五章	物质传递	(184)
第一节	氧的溶解度与微生物的呼吸	(185)
第二节	氧的传递理论	(188)
第三节	体积溶氧系数及其影响因素	(193)
第四节	微生物反应系统中的氧传递	(204)

第五节	溶氧方程与溶氧速率的调节	(211)
第六章	微生物反应器	(217)
第一节	机械搅拌式发酵罐	(217)
第二节	自吸式生物反应器	(222)
第三节	塔式反应器	(223)
第四节	生物废水处理设备	(225)
第四篇	动植物细胞的培养过程	(235)
第一章	特性	(235)
第一节	动物细胞培养的特性	(235)
第二节	植物细胞培养的特性	(239)
第二章	生长模型与培养操作	(241)
第一节	动植物细胞的生长模型	(241)
第二节	动植物细胞的培养操作	(243)
第三章	动植物细胞培养用反应器	(248)
第一节	植物细胞培养用反应器	(248)
第二节	动物细胞培养用反应器	(249)

第一篇 绪 论

生物反应工程是化学反应工程原理与生物反应工艺过程有机结合的产物，是解决与生物反应过程的设计和作相关的工程技术问题的新学科，是生物化学工程的主要分支之一。生物反应工程理论在生物技术的各个领域，特别是生物反应器的选型与设计、操作技术、生物过程的开发和优化等方面具有不可缺少的作用。本篇首先介绍学习生物反应工程理论的意义、研究对象和方法，然后介绍生物反应工程理论的发展历史。

第一节 学习目的与方法

一、意义

在自然界中，生物学或生物化学现象可以说是千变万化，在这些现象中起主要作用的是生物反应。并且，无论是在种类上，还是在规模上它都在迅速增加，而且一般很复杂。这是由于生物反应本身与环境因素的影响所致。例如，酶分子在催化反应中会受到反应液中某种成分的诱导或抑制；微生物细胞由于环境因素的影响而出现自身的变异等等。这些复杂的反应过程难以进行综合研究。但是，这些生物反应过程，根据生物体的不同，可大致分为酶促反应过程、微生物反应过程（包括单一微生物的反应过程和多种微生物的混合反应过程）和动植物细胞培养过程三个部分（表

1-1)。

生物技术是一门将微生物学、生物化学和生物系统加工技术综合应用的科学⁽¹⁾。这种综合应用，就是利用生物反应进行有用物质的工业化生产。虽然生物反应过程与化学工业上的化学反应过程是明显不同的，但是对反应过程做定量的、动力学方面的研究都是各自所要探讨的最基本的问题。

另外，从生物反应器的设计和操作来看，有必要研究生物反应速率和与之相关影响因素之间的定量与定性的关系。再有，生物反应过程的最优化设计、操作和控制；反应过程动力学特性方面的研究；计算机的应用；数学模型的建立等，都需要以速率的概念为基础，以定量地探讨生物反应过程。

今天，遗传工程技术的应用可成倍地提高产物（蛋白质或其它物质）的产率，但是，在工业生产中仍离不开对这些“工程菌株”的动力学描述。在这方面，已有学者从事了一定的理论研究，并提出了一些描述生物反应过程的数学模型⁽²⁻³⁾。

二、研究对象与方法

生物反应工程研究的是以工业规模进行的生物反应的规律。比如：研究工业生产中生物反应的速率问题；影响生物反应速率的各种因素以及如何获得最优的反应结果等问题。实验室中使用小型反应器研究生物反应的速率，其速率关系式中的诸参数，如反应体积浓度、温度、反应时间等都是些简单的物理量。但是，在实际生产用的生物反应器中情况就变得很复杂，这些简单的物理量也变得复杂了。这是由于在一个工业生物反应器中，总是存在一定程度的物料返混，