

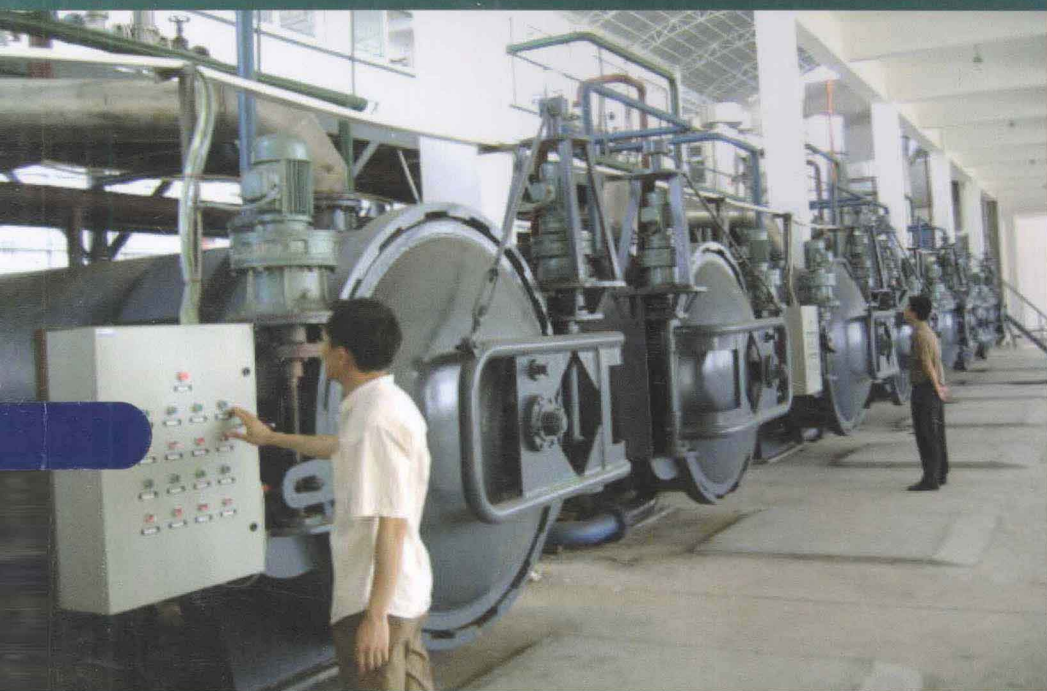


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代固态发酵技术

——理论与实践

▶▶▶ 陈洪章 著



MODERN SOLID STATE FERMENTATION:
THEORY AND PRACTICE

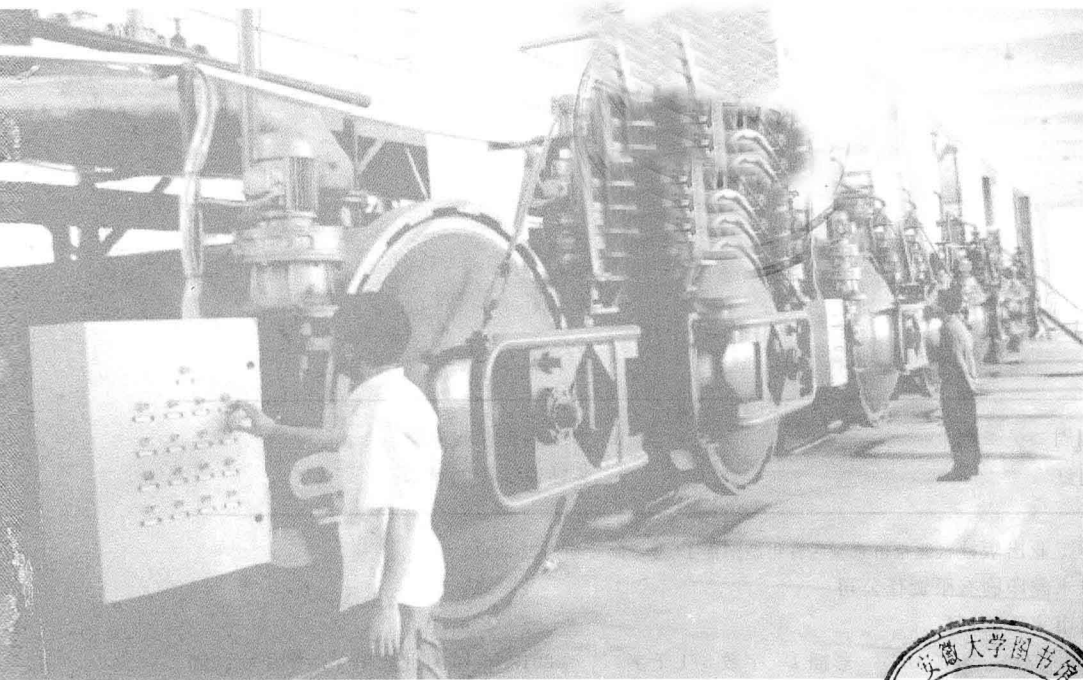


化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代固态发酵技术 ——理论与实践

▶▶▶ 陈洪章 著



MODERN SOLID STATE FERMENTATION:
THEORY AND PRACTICE



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代固态发酵技术——理论与实践/陈洪章著.
北京: 化学工业出版社, 2013. 5
ISBN 978-7-122-16874-0

I. ①现… II. ①陈… III. ①固态发酵
IV. ①Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 061100 号

Translation from the English language edition: Modern Solid State Fermentation: Theory and Practice by Hongzhang Chen

Copyright © Springer Science+Business Media B. V. 2013

Springer Science+Business Media B. V. is part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved.

责任编辑: 傅四周 吴刚
责任校对: 战河红

文字编辑: 张春娥
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 彩插 1 字数 371 千字 2013 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 79.00 元

版权所有 违者必究

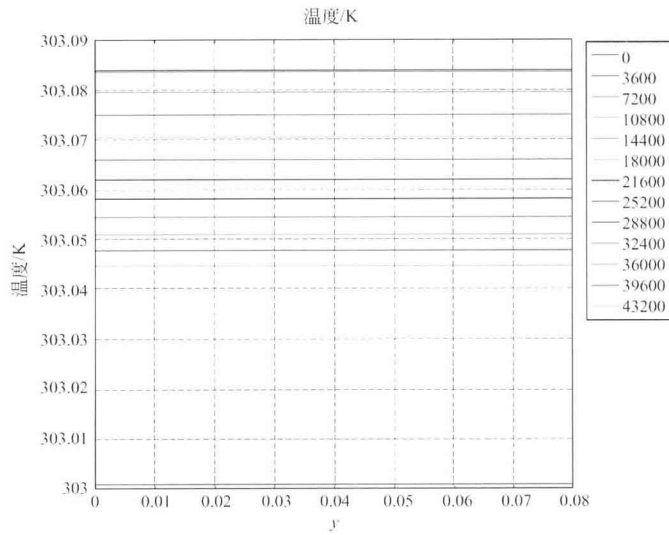


图2-17 0~12h基质内温度变化 (文见45页)

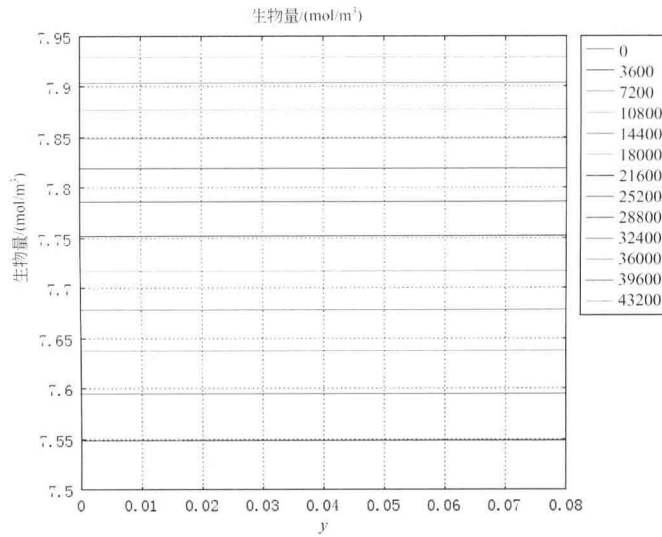


图2-18 0~12h基质内菌体分布的变化 (文见45页)

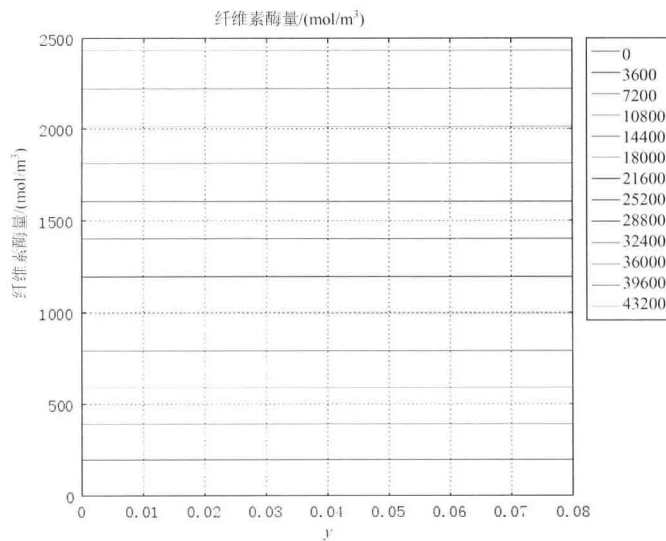


图2-19 0~12h基质内纤维素酶分布的变化 (文见46页)

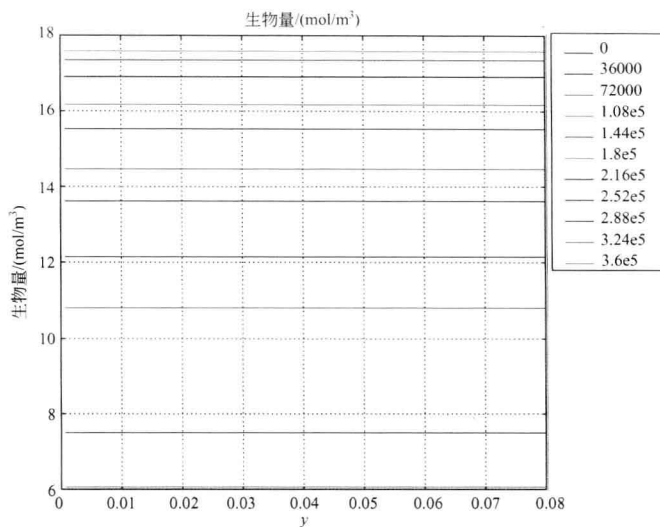


图4-22 静置培养下斜卧青霉固态发酵过程中生物量的变化 (文见137页)

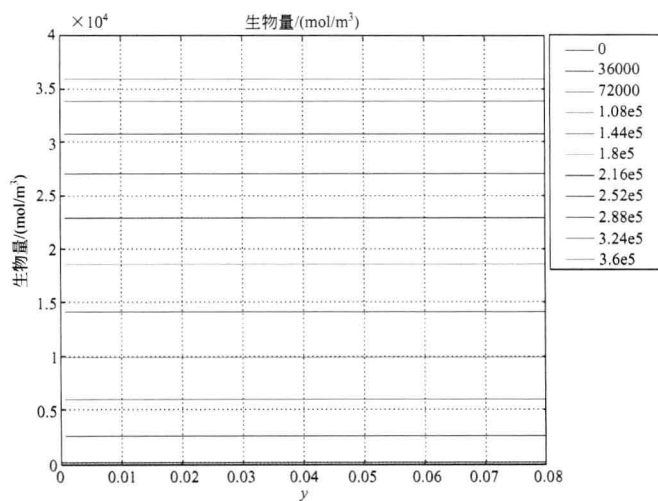


图4-23 静置培养下斜卧青霉固态发酵过程中纤维素酶的变化 (文见137页)

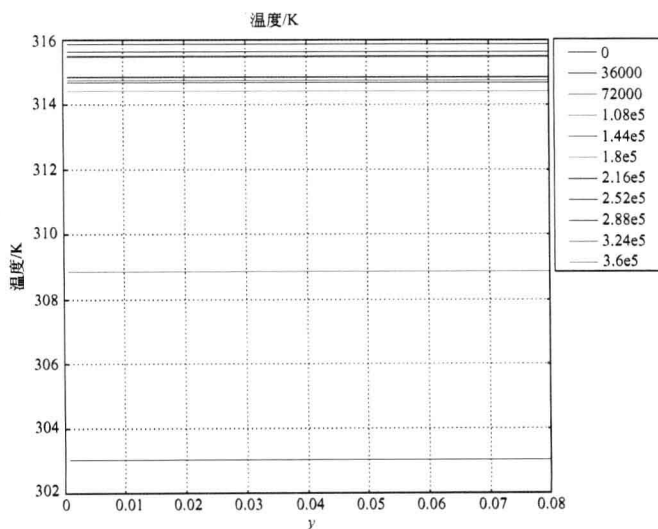


图4-24 静置培养下斜卧青霉固态发酵过程中基质温度的变化 (文见138页)

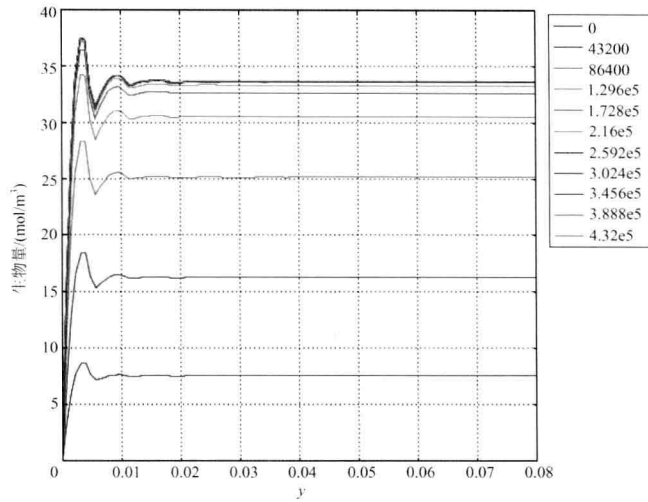


图4-25 强制通风下斜卧青霉固态发酵过程中生物量的变化 (文见139页)

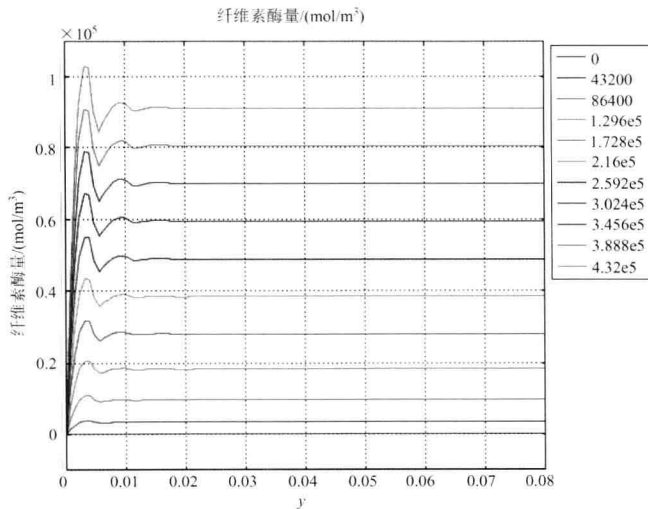


图4-26 强制通风下斜卧青霉固态发酵过程中纤维素酶的变化 (文见139页)

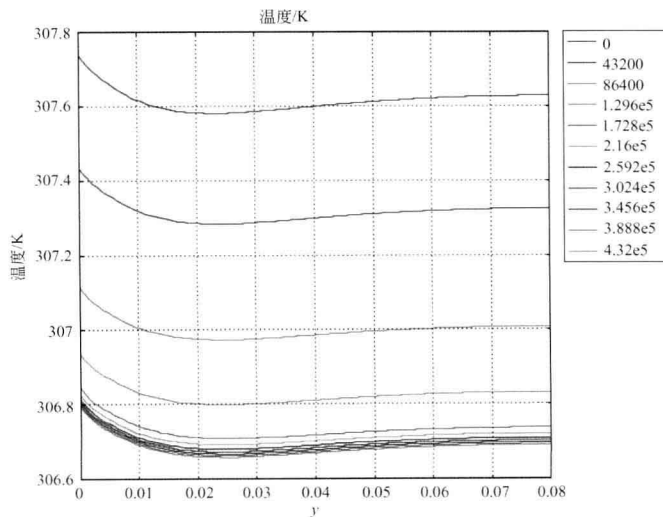


图4-27 强制通风下斜卧青霉固态发酵过程中基质温度的变化 (文见140页)

前言

F O R E W O R D

固态发酵技术起源于中国，具有悠久的历史。因其具有节水、节能、高得率、清洁等优势，逐渐受到各国的重视。经过近几十年的迅速发展，我国已成为发酵工业大国，发酵工业占全国工业总产值的比例逐年提高。但由于人们对固态发酵本质认识不够深入，以及相关的发酵设备及其配套工艺研发滞后，造成了固态发酵在大规模应用中仍存在诸多问题。现有的与固态发酵相关的书籍多侧重于发酵工艺的描述，而忽视了对固态发酵工艺中基本原理的探究。本书以作者近十几年在固态发酵领域所获得的科研成果及其相关产业化为主体内容，对固态发酵的原理和应用进行了系统介绍，以期提升我国固态发酵工业的技术水平，促进固态发酵工业更好的发展。

本书从固态发酵的本质出发，以自然界的固态发酵过程为指导，深入研究固态发酵过程中微生物的生物学特性；借鉴多孔介质理论，结合“三传一反”原理，重点研究固态发酵的工艺过程。用基本理论解释固态发酵现象，突出固态发酵的独特优势。因此，每一章都从原理、技术、工艺、应用等几方面展开论述。通过对基本原理的阐述，衍生出相关的技术；通过不同技术间的偶合，建立起成熟的工艺；通过多工艺的有机整合，建立了现代固态发酵技术平台，使读者能更清晰地认识固态发酵，知其然，更能知其所以然。

本书首先介绍了固态发酵的本质内涵及其发展历程；其次，分别从生物学角度和过程工程学角度论述固态发酵的本质及其影响因素；再次，详细介绍了好氧固态发酵、厌氧固态发酵、吸附载体固态发酵的基本原理、配套工艺及其产业化的相关情况；最后，基于作者对固态发酵的研究及认识，提出了固态发酵的发展前景。

作者在该方面的研究得到了国家重点基础研究发展计划（“973”计划）（2011CB707401）和国家高技术研究发展计划（“863”计划）（SS2012AA022502）的资助。另外，我的硕士和博士研究生的研究工作是本书得以出版的重要前提，特别是研究生段颖异、张志国、贺芹、李冠华、马力通、王宁等参与本书中部分章节的写作和许多文字工作。在本书编著过程中，参考了国内外前辈和同行们撰写的书籍和期刊论文资料，在此一并表示衷心感谢。

本书不当之处诚请读者批评指正，并欢迎来函指导。

陈洪章

2013年8月于北京市中关村北二条1号

中国科学院过程工程研究所

E-mail: hzchen@home.ipe.ac.cn

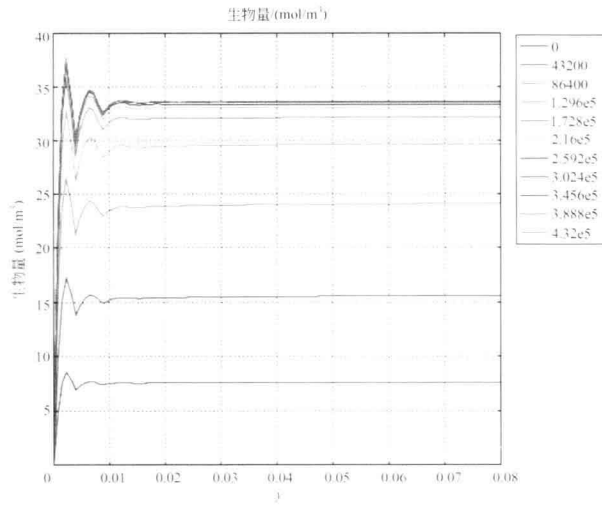


图4-28 气相双动态下斜卧青霉固态发酵过程中生物量的变化 (文见140页)

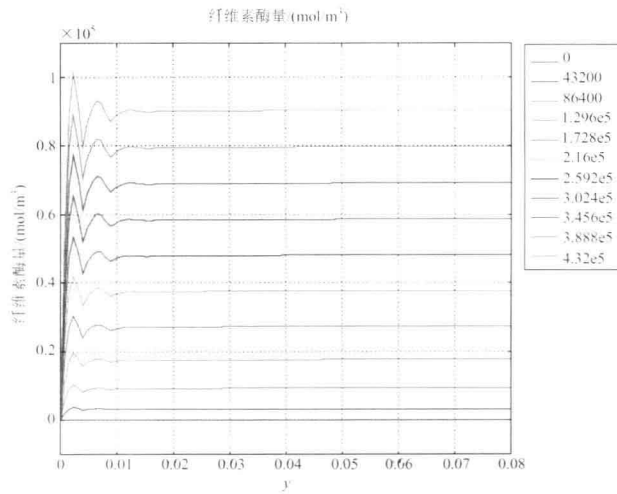


图4-29 气相双动态下斜卧青霉固态发酵过程中纤维素酶的变化 (文见141页)

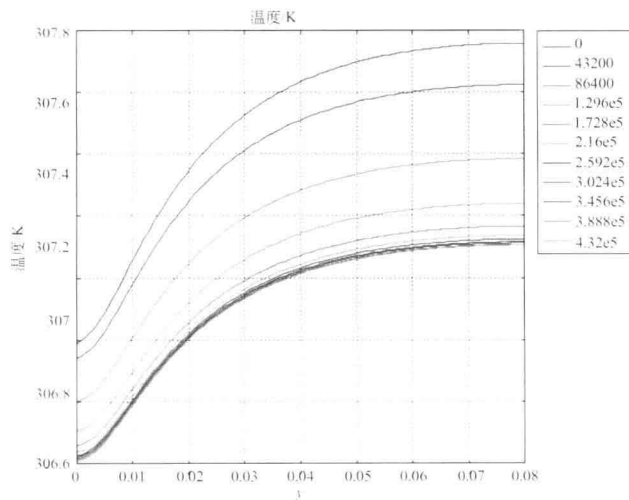


图4-30 气相双动态下斜卧青霉固态发酵过程中基质温度的变化 (文见141页)

目录

C O N T E N T S

第1章 绪论

1.1 固态发酵简介	1
1.1.1 固态发酵的内涵	1
1.1.2 固态发酵与液态发酵的区别	3
1.1.3 固态发酵的优势及应用	4
1.2 现代固态发酵的调控	6
1.2.1 基于固态发酵生物学特性的发酵调控	6
1.2.2 基于固体基质特性的发酵调控	6
1.3 固态发酵工程的发展	11
1.3.1 固态发酵的上游工程	11
1.3.2 固态发酵的中游工程	13
1.3.3 固态发酵的下游及辅助工程	16
1.3.4 发酵产品的后处理	17
参考文献	18

第2章 固态发酵生物技术学原理

2.1 固态发酵生物生理学概述	20
2.1.1 微生物代谢特征	20
2.1.2 固态发酵界面特性及其对微生物代谢的影响	23
2.1.3 固态基质中的丝状微生物生长	26
2.1.4 固态基质中的细菌生长	36
2.1.5 固态基质中的酵母菌生长	38
2.1.6 基于“分段拼接”思想的营养性载体基质固态发酵过程数值模拟	39
2.2 固态发酵固相基质特性	48
2.2.1 适用于固态发酵的固体基质种类	48
2.2.2 固态发酵固体基质的前处理	53
2.2.3 影响固态发酵的原料特性参数	54

2.3 固态发酵大规模无菌操作技术与接种技术	55
2.3.1 固态发酵大规模无菌操作技术	55
2.3.2 固态发酵接种技术	58
参考文献	58



第3章 固态发酵工程与过程放大原理

3.1 固态发酵的本质	61
3.1.1 发酵基质三相配比与微生物生理的关系	61
3.1.2 气相基质的特点及在固态发酵中的作用	65
3.1.3 蒸散过程对固态发酵的影响	65
3.2 固态发酵系统传递过程原理	67
3.2.1 固态发酵质量热量传递概论	68
3.2.2 固态发酵基质热量、湿分和溶质传输过程的理论基础	69
3.2.3 影响传递过程的固态基质物性参数	73
3.2.4 营养性载体基质的传递性质随菌体生长的变化	75
3.3 微生物生长中的物质能量传递	88
3.3.1 基质中空气的分布与传递	89
3.3.2 微生物对基质中热量传递过程的影响	89
3.3.3 微生物生长对基质水分传递的影响	90
3.4 固态发酵反应器的设计与放大	91
3.4.1 固态发酵反应器	92
3.4.2 影响固态发酵反应器设计的因素	93
3.4.3 固态发酵反应器放大原则	95
参考文献	98



第4章 好氧固态发酵

4.1 好氧固态发酵生物学及物理学基础	101
4.1.1 好氧固态发酵研究概况	101
4.1.2 好氧微生物与营养	102
4.1.3 好氧固态发酵中的物理化学作用	104
4.1.4 好氧固态发酵反应器	108
4.2 混菌固态发酵技术	109
4.2.1 混菌固态发酵的研究概况	109
4.2.2 混菌固态发酵工艺原理	109
4.2.3 混菌固态发酵评价	111

4.2.4	混菌固态发酵的关键技术	112
4.2.5	混菌固态发酵在生产中的应用	112
4.3	静态密闭式好氧固态发酵技术	114
4.3.1	浅盘式好氧固态发酵技术	114
4.3.2	填充床式好氧固态发酵技术	119
4.4	动态密闭式固态发酵技术	124
4.4.1	转鼓式好氧固态发酵技术	125
4.4.2	气固流化床式好氧固态发酵技术	130
4.4.3	气相双动态好氧固态发酵技术	131
4.4.4	不同工艺操作条件下固态基质发酵过程数值模拟	134
	参考文献	143



第5章 厌氧固态发酵

5.1	厌氧固态发酵的生物学及物理学基础	147
5.1.1	厌氧固态发酵与好氧固态发酵的异同	147
5.1.2	厌氧固态发酵的生物学基础	148
5.1.3	厌氧固态发酵的物理学基础	150
5.2	厌氧固态发酵的类型	151
5.2.1	混菌厌氧固态发酵	151
5.2.2	纯种厌氧固态发酵	163
5.3	厌氧固态发酵反应器	164
5.3.1	乙醇发酵反应器	165
5.3.2	沼气干发酵反应器	167
5.4	厌氧固态发酵的应用	169
5.4.1	在饲料青贮中的应用	169
5.4.2	有机固体废物厌氧固态处理	172
	参考文献	175



第6章 吸附载体固态发酵原理与应用

6.1	吸附载体固态发酵概论	178
6.1.1	吸附载体固态发酵	178
6.1.2	吸附载体固态发酵的优点	179
6.2	吸附载体固态发酵材料	182
6.2.1	惰性载体材料特性	182
6.2.2	惰性载体材料种类	182

6.2.3	吸附载体固态发酵原料处理	183
6.2.4	惰性载体上的微生物生长特性	185
6.3	吸附载体固态发酵的基本工艺及反应器	188
6.3.1	填充塔式吸附载体固态发酵	188
6.3.2	重复批次吸附载体固态发酵	188
6.3.3	连续式吸附载体固态发酵	189
6.3.4	卧式吸附载体固态发酵	192
6.4	吸附载体固态发酵工艺优化	193
6.4.1	含水量对吸附载体固态发酵的影响	193
6.4.2	水活度以及底物浓度对吸附载体固态发酵的影响	195
6.4.3	载体尺寸大小对吸附载体固态发酵的影响	195
6.4.4	载体堆积高度对吸附载体固态发酵的影响	198
6.5	吸附载体固态发酵的应用	199
6.5.1	以聚氨酯泡沫为载体固态发酵法生产克拉维酸	199
6.5.2	以聚氨酯泡沫为载体固态发酵法生产碱性蛋白酶	204
6.5.3	固态发酵生产克拉维酸的连续化及其反应器	209
6.5.4	以聚氨酯泡沫为载体固态发酵法生产黄原胶	216
6.5.5	以聚氨酯泡沫为载体固态发酵法生产细菌纤维素	219
6.6	吸附载体固态发酵的前景	220
6.6.1	吸附载体固态发酵的经济可行性及发展前景	220
6.6.2	吸附载体固态发酵存在的问题	220
	参考文献	221



第7章 现代固态发酵的发展趋势和应用前景

7.1	固态发酵的发展趋势	224
7.1.1	对固态发酵本质的深入认知	225
7.1.2	固态发酵在线监测技术的研究与应用	225
7.1.3	固态发酵设备的研制	225
7.1.4	混合菌群的认识及广泛应用	226
7.1.5	多学科交叉中的固态发酵	227
7.2	固态发酵的应用前景——以固态发酵为核心的生物质生物转化技术体系的构建	227
7.2.1	生物质生物转化体系的特殊性	227
7.2.2	固态发酵特征与生物质生物转化适用性	231
7.2.3	以固态发酵为核心的生物质生物转化研究进展	234
	参考文献	242

第1章

绪论

自从固态发酵工业诞生至今，一直为人类提供生活必需品，但对其本质的研究较少，发展缓慢。20世纪40年代以来，丙酮-丁醇和青霉素的需求量激增带动了整个发酵工业的迅速崛起，固态发酵工业的发展亦获得新的契机，脱除农产品加工的色彩，在化工、制药、环境领域发挥了重要作用。然而，从整个发酵工业来看，固态发酵仅占很小的份额。较之于液态发酵，固态发酵质热传递效率低、参数难于监测控制，反应器的设计和放大以及工艺调控困难。尽管固态发酵本身所需能耗和水量较低，但在以产品快速供应为主要目标的20世纪后半叶，固态发酵本身的优势被液态发酵的便捷性所掩盖，没有受到重视。

20世纪末以来，液态发酵所带来的能源、环境问题日益凸显。液态发酵过程中的能耗高、有机废水量大等问题成为限制发酵工业可持续发展的主要问题。人们开始重新注意到固态发酵节水、节能、成本低等优势，因而固态发酵的原理和应用成为近年来发酵工业的研究热点，为整个生物、化工产业的可持续发展指出了更为明朗的方向。

本书介绍了近年来学者们在固态发酵原理和应用方面所取得的研究进展，目的不仅仅是让读者了解固态发酵的研究现状，更希望能够引起更为深入的思考。本章将系统陈述固态发酵的内涵、现状，强调固态发酵的生物学、传递过程原理，为实现固态发酵的工业化、集约化、自动化提供设计思路。

1.1 固态发酵简介

1.1.1 固态发酵的内涵

发酵（Fermentation）是指微生物在无氧或者有氧条件下，对营养物质进行分解代谢、合成代谢、次生代谢等生理活动，积累人类所需的微生物体或微生物代谢产物的过程。因此，发酵过程的三要素是：明确的目标产物，生产菌株，以及满足菌株生产所需要的培养环境（营养、温度、湿度、氧气等）。

固态发酵独有的特点在于其培养基呈固态,在满足菌体生长代谢的水活度条件下,基质中几乎没有自由流动水^[1]。因此,固态发酵是以气相为连续相,以液膜及其覆盖的固相为固定相的三相系统。需要指出的是,基质含水量与自由流动水的含量没有必然联系。对于持水力较强的固相基质,例如植物原料、甜菜等,即使发酵基质的含水量在80%以上,固相之间的自由流动水仍较少,含水量并不是界定固态发酵的唯一标准。

依据基质的可降解性可以将发酵基质分为两类:一类是以农作物(如麸皮、豆饼等)或农林废弃物(秸秆、甘蔗渣、木屑等)为底物,固体基质既构成了发酵的物理结构,对菌体的生长起承载作用;又具有化学活性,能够为微生物生长提供碳源、氮源、生长因子,因而称这类基质为营养性载体基质^[2]。另一类是以聚氨酯泡沫、大孔树脂、珍珠岩和蛭石等多孔介质为代表的惰性载体,这类物质为化学惰性,不易被微生物分解利用,在发酵过程中仅起支撑作用;微生物通过分散在多孔介质间隙的培养液获得营养,因此称这类基质为惰性载体发酵基质^[3]。在上述两类基质中,以粮食作物和农林废弃物为固体底物的营养性载体基质应用较早,至今仍然是固态发酵的主流基质,在实际生产应用中占主导地位。

通过各类生产菌株(丝状真菌、酵母、细菌、伞菌等)在固态基质中的生长代谢,固态发酵为人类的日常生活提供了大量可口食品:如果不是酵母在面团中的代谢作用产生酸和二氧化碳,人们就无法品尝到蓬松/易消化的面包;曲霉在豆腐中生长为人们创造了可口的腐乳;伏特加、威士忌、米酒、茶叶的生产都离不开固态发酵。表1-1给出了固态发酵的生产对象,以此可以发现,自人类文明产生之初,固态发酵技术就一直在为人类提供生产、生活所必需的产品。近些年,固态发酵技术的应用领域更是得到了极大的拓展,渗入到环境、资源、化工领域,这是液态发酵所不能比拟的。霉菌在固态基质中的培养优于其在液体中的培养,某些霉菌在固态培养条件下能够代谢产生更多的次级代谢产物。农业或食品加工的废弃物也常常通过固态发酵生产饲料或生防试剂而得以利用。因此,固态发酵在现代发酵工业中是不可或缺的。

■ 表 1-1 固态发酵产品发展历程

时间	固态发酵和(或)固态发酵产品
公元前 2000 年	面包
公元前 1000 年	酱,酒曲
公元前 550 年	曲酸
7 世纪	曲酸传入日本
15 世纪	红曲、神曲、半夏曲、淡豆豉等中药
16 世纪	烟叶陈放
18 世纪	使用苹果皮发酵制醋,发酵没食子酸用于制革和印刷等
1860 ~ 1900 年	污水处理
1900 ~ 1920 年	生产曲酸和真菌酶类
1920 ~ 1940 年	生产真菌酶,葡萄糖酸,柠檬酸
1940 ~ 1950 年	青霉素的大量生产

续表

时间	固态发酵和（或）固态发酵产品
1950 ~ 1960 年	类固醇的生产转化
1960 ~ 1980 年	生产青霉素和蛋白饲料
1990 年至今	生物修复, 生物脱毒, 生物转化, 生物制浆。黄曲霉毒素, 赭曲霉毒素, 细菌内毒素, 赤霉素, 玉米赤霉烯酮, 头霉素, 纤维素酶, β -葡萄糖苷酶, 羧甲基纤维素酶, 漆酶, 木聚糖酶, 锰过氧化物酶, α -淀粉酶, 蛋白酶, 葡萄糖氧化酶, 谷氨酰胺酶, 肌醇六磷酸酶, 鞣酸酶, 反丁烯二酸, 柠檬酸, 乳酸, 草酸, 没食子酸, 谷氨酸

1.1.2 固态发酵与液态发酵的区别

固体发酵基质的含水量可以有效控制在 12%~80% 之间, 大多含水量在 60% 左右。与固态发酵相反, 典型的深层液体发酵的发酵液中含水量在 95% 以上。当前发酵工业所使用的主要是深层液态发酵, 尽管这种技术已经经过了较长期的应用和研究, 但是它仍然存在着许多难以克服的缺点, 需要采用新的技术加以解决。固态发酵与液态发酵的详细比较见表 1-2。

■ 表 1-2 固态发酵与液态发酵的比较^[1]

固态发酵	液态发酵
培养基中没有游离水的流动, 水是培养基中含量较低的分	培养基中始终有游离水的流动, 水是培养基中主要组分
微生物从湿的固态基质吸收营养物, 营养物浓度存在梯度	微生物从溶解水中吸收营养物, 营养物浓度始终不存在梯度
培养体系涉及到气、液、固三相, 气相是连续相	培养体系大多仅涉及气液两相, 而固相所占比例低, 且是悬浮在液相中; 液相为连续相
接种量比较大, 大于 10%	接种量比较小, 小于 10%
微生物所需氧主要来自于气相, 只需少量无菌空气, 能耗低	微生物所需氧来自于溶解氧, 需要消耗较大能量以用于微生物溶解氧需求
气体循环和通气不仅可提供氧气和排除挥发性产物, 而且也排除代谢热量	气体循环和通气仅仅提供氧气和排除挥发性产物, 代谢热量需要冷却水排除
微生物吸附于固态底物的表面或渗透到固态底物内生长	微生物均匀分布在培养体系中
产物浓度高	产物浓度低
生产率高, 产品得率高	生产率较低
高底物浓度可以产生高的产物浓度	高底物浓度产生非牛顿流体, 需要补料系统
所需通气的压力低	需要较高气源压力
代谢热去除困难, 易出现局部过热问题	发酵温度容易控制
不均一性	均一性
缺乏有效在线监测手段, 过程控制比较困难	实现了发酵过程的在线监测与控制
提取工艺简单可控, 没有大量有机废液产生, 但提取物纯化较难	需要去除大量高浓度有机废水, 分离设备的体积常很大, 费用高, 但产物纯化较容易
使用固体原料, 在发酵过程中, 糖化与发酵过程同时进行, 简化操作工序, 节约能耗	一般发酵原料需要经过较复杂的加工, 消耗能量大

续表

固态发酵	液态发酵
在需要大量供氧过程中,空气通过固体层的阻力较小,能量消耗少,固态发酵中固态颗粒提供的液体表面积比深层液体发酵中气泡提供的界面高得多	在好氧发酵中,需要克服静液层阻力才能将供氧通过深的液层,消耗能量大
固体培养基的水活度在 0.99 以下,适宜于水活度在 0.93~0.98 的微生物生长,限制了应用范围,同时也限制了某些杂菌生长	适用于大多数微生物的生长
代谢热驱除比较困难,主要依靠通气蒸发冷却,易造成局部水分缺乏	代谢热驱除比较容易通过冷却水控制,不存在通气造成水分缺乏
固态发酵微环境利于微生物分化,特别是丝状真菌分化代谢	液态发酵环境抑制微生物分化代谢,不利于次生代谢产物生产
所需设备不完善,缺乏在线传感仪器,机械化程度低,产品不稳定,重复性差	所需设备完善,自动化程度高,技术比较成熟
可在敞开式容器中进行	在密闭容器中进行
自然富集发酵或人工强化菌种发酵	采用单一菌株纯种或限定菌株混合发酵
扩大了固态发酵的应用范围	限于传统食品的生产
增加了操作能耗,设备投资较大	操作能耗低,设备投资小,劳动强度大
原料成本较低	原料成本较高
产品后处理简单,可直接烘干	适宜于分离纯化高附加值产品

1.1.3 固态发酵的优势及应用

与液态发酵相比,充足的供氧成为固态发酵的优势,固态发酵产生的有机废水少,产物浓度高;固态环境更符合丝状真菌的天然生境,许多霉菌在固态培养条件下生产能力更强。固态发酵可利用多种价格低廉的工农业残渣作为底物生产高附加值产品,因而固态发酵被认为是可再生性资源综合利用最有希望的途径。

目前,固态发酵的产品主要包括传统食品(食醋、酱油、风味调料等)、微生物菌体(单细胞蛋白、螺旋藻、食用菌、活菌疫苗等)、微生物酶类(淀粉酶、葡萄糖苷酶、纤维素酶等)以及其他微生物代谢产物(核苷酸、脂类、维生素、氨基酸等)等。以下做一简单介绍。

1.1.3.1 固态发酵在食品、酿酒行业的应用

固态发酵起源于传统食品生产领域,且相应的生产技术沿用至今,一直以来都为人们提供日常生活所必需的酒、酱、醋等必需品。面包是以淀粉为原料,采用酵母菌发酵,产量居固态发酵食品之首。干酪是以畜乳为原料,在乳酸链球菌和乳酪链球菌混合发酵下,经过凝乳酶的作用成型,再经过细菌或霉菌的进一步固态发酵,最终制成极富营养价值,又美味可口的食品。酱油、豆酱,是以大豆或其他豆类为主原料生产的调味品,采用米曲霉作为发酵微生物,以大豆及小麦粉为培养基固态发酵培养米曲。酿醋是在酿酒的基础上再经过醋酸菌的发酵,使酒精转变为醋酸,传统食醋的酿酒阶段和醋酸发酵阶段都可采用固态发酵法进行。腐乳是以豆腐干为原料,经过毛霉发酵,将豆腐中的蛋白质进行分解,产生美味可口的腐乳产品。腌菜,作为一种美味可口的调味菜,是乳酸菌在蔬菜上固态发

酵后得到的产品。白酒也是自古以来社会生活必不可少的消费品，后面将做详述。

1.1.3.2 固态发酵在医药化工领域的应用

随着固态发酵技术的革新，其应用领域也得到拓展，在医药化工领域固态发酵也展现出较好的前景。

乳酸、柠檬酸很久以前就实现了固态发酵工业化生产。近些年，固态发酵技术也用于探索生产富马酸、草酸、亚麻酸等。以乳酸生产为例，丝状真菌或细菌均可作为固态发酵的生产菌株；且发酵底物广泛，木薯、甜菜或甘蔗渣、胡萝卜加工废渣等农业废弃物均可作为底物。Soccol 等人比较了利用 *R. oryzae* 固态与液态发酵法生产乳酸，其中固态发酵支持物由营养盐与甘蔗渣组成，结果证明，固态发酵生产水平及生产率均高于液态发酵。Richter 利用细菌干酪乳酸杆菌 (*L. paracasei*) 比较乳酸固态及液态发酵，得到了相似的结论^[3]。

微生物的次级代谢产物，如氨基酸、维生素等生物活性物质均具有较好的医用和工业应用价值。近年来的报道表明，人们已成功使用固态发酵技术生产抗生素、霉菌素、细菌内毒素、植物生长素、免疫类药物、生物碱等次级代谢产物。甘薯黑斑病菌 (*Ceratocystis fimbriata*) 在木薯残渣、苹果渣、大豆、咖啡渣等固态底物上生长迅速，产孢子能力强，可产多种风味化合物。除上述外，固态发酵也在其他多种生物活性产品的生产中得到了成功应用，如生物表面活性剂、麸酸胺、色素、维生素、类胡萝卜素、黄原胶等。

1.1.3.3 固态发酵在能源环境领域的应用

固态发酵是解决能源危机、治理环境污染的重要手段之一^[4,5]。农业残渣常含有丰富的营养，可以为微生物的生长提供理想的生境。所以人们倾向于综合利用工农业残渣，使废弃物变为有价值的原料，减轻环境污染。因此，固态发酵在生物燃料、生物农药、生物转化、生物解毒及生物修复等方面都获得了应用。

固态发酵生产燃料乙醇是目前研究的热点。其优点在于：可消除糖的萃取过程，节省成本；固态发酵过程无废水排放；能耗低。很多学者从不同的角度研究了固态发酵生产乙醇的过程，取得较好结果。

人们越来越重视利用昆虫病原体及寄生真菌来控制害虫的方法。利用固态发酵生产真菌杀虫剂不仅使得生产成本得以降低，而且药物对害虫的毒力也有极大提高。培养具有杀虫能力的真菌如球孢白僵菌 (*Beauveria bassiana*)、毛豆炭疽病菌 (*Colletotrichum truncatum*) 等，是开发可感染繁殖体（像分生孢子、衣原体孢子、卵孢子、受精卵孢子等）的主要途径。在这方面，中国科学院过程工程研究所做出了卓有成效的工作，其发明的“压力脉动固态发酵反应器”已成功地工业化培养了苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*, 简称 Bt)，毒力达到 10000U/mg，处于国际领先地位^[5]。

固态发酵的另一重要应用是利用微生物转化农作物及其废渣，以提高其营养价值。生物转化常用的菌株为白腐菌。如木薯是非洲、亚洲及南美洲地区人民最重要的食物之一，但它的蛋白质、维生素、矿物质含量低，也缺乏含硫氨基酸。已有几种固态发酵方法可以改善其营养价值。很多农作物残渣也可被用来生产高蛋白物质或单细胞蛋白，如柑橘皮 (*Penicillium camemberti*、*P. roquefortii*)、黑麦 (*Fusarium* sp.)、芒果与海枣工业废渣 (*Pleurotus ostreatus*)、甜菜根 (Fungi)、麦草 (*Phanerochate chrysosporium*, *Pleurotus*