

“十五”国家重点图书

生物催化

孙志浩 主编

工艺学



化学工业出版社
现代生物技术与医药科技出版中心

“十五”国家重点图书

生物催化工艺学

孙志浩 主编



化学工业出版社
现代生物技术与医药科技出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

生物催化工艺学/孙志浩主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 2

ISBN 7-5025-6473-X

I. 生… II. 孙… III. 生物-催化剂-生产工艺
IV. TQ426. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 011165 号

“十五”国家重点图书

生物催化工艺学

孙志浩 主编

责任编辑: 郎红旗

文字编辑: 周 侗 陈 曦

责任校对: 陈 静

封面设计: 关 飞

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
现代生物技术与医药科技出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 43¼ 字数 1067 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6473-X/Q · 130

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《生物催化工艺学》编写人员

主 审 欧阳平凯 (南京工业大学, 教授、院士)
副主审 罗贵民 (吉林大学, 教授)
雷肇祖 (上海工业微生物研究所, 教授级高工)

主 编 孙志浩 (江南大学, 教授)
副主编 许建和 (华东理工大学, 教授)
杨立荣 (浙江大学, 教授)
徐 岩 (江南大学, 教授)
周 华 (南京工业大学, 副教授)

主要参编人员

韦 萍 (南京工业大学, 教授)
徐 虹 (南京工业大学, 教授)
杨 晟 (中国科学院上海植物生理与生态研究所, 副研究员)
郑 璞 (江南大学, 副研究员)
吴坚平 (浙江大学, 副教授)
徐 毅 (华东理工大学, 副教授)
潘 江 (华东理工大学, 讲师)
王 栋 (江南大学, 讲师)

本书得到国家重点基础研究发展计划（973 计划）“生物催化和生物转化中关键问题的基础研究”项目（2003CB716008）的资助。

值此工业生物技术产业大发展的时期，编著出版《生物催化工艺学》一书，可说是非常有意义、非常适时的。

这本著作的主要内容既包括与生物催化相关的反应、产品与生产过程，还详细涉及生物催化剂的特性与筛选、生物催化的分子生物学工具、蛋白质分子定向进化、蛋白质工程、酶反应工程、非传统介质中的生物催化、生物催化过程设计，以及生物催化在化工、轻工、制药中的应用等，几乎涵盖了从基本概念、理论基础、实践应用以及发展前景等生物催化领域的全部内容。

该书内容很新，知识面广，而且有相当深度，充分反映了世界发展动态，也体现了当前我国生物催化领域的水平。

——中国工程院院士 欧阳平凯

（“973”计划“生物催化和生物转化中关键问题的基础研究”项目首席科学家）

序

自然的生态系统目前正受到现代生产方式的严重挑战，其结果造成能源短缺、资源匮乏、环境污染等问题，对人类生存构成威胁。人类需要一种遵循地球生态系统规律的，能使自然与社会环境协调发展的生态化超现代化生产方式。其核心思想是资源生态化利用，其核心技术为工业生物技术。实现资源生态化利用不仅要效法自然界的生态系统，还要注重现代工程技术、现代生物技术在生态化系统应用中理论和技术的创新。合理利用生物加工过程，可以解决人类面临的资源、能源、环境与健康等重大问题，并实现可持续发展。

生物技术、信息科学和材料科学被认为是当今世界的三大前沿科学技术。早期的生物技术主要包括生物资源的加工和发酵。20世纪70年代以来，随着微生物学、生物化学、遗传学、细胞学和分子生物学以及现代实验技术、电子技术、计算机技术的发展和运用，生物技术得到了极大的发展。

在21世纪，生物技术的作用将更加突出。美国科学家预言，美国的第二个硅谷将不是半导体产业，而是潜力巨大、正在兴起的生物技术产业。从现代生物技术突飞猛进的发展及其对医药、保健、环境、农业、能源等方面的重大作用来看，21世纪无疑将是生物技术的时代。

目前，各类生物的基因组学和蛋白质组学的研究快速地发展，特别是催化基因组学和催化蛋白质组学及代谢工程的发展，为人类解密各种生物体内各种合成途径和新陈代谢途径，以及利用这些生物体内的合成途径来生产化学品，提供了前所未有的特殊机会。模仿自然界，用工业生物技术手段来取代传统的物质加工方式，是实现资源利用生态化和可持续发展的一个重要趋势。工业生物技术的核心是生物催化，是一个典型的化学、生物学和工程学交叉点。

生物催化具有过程高效温和、与环境兼容的特点，是资源利用生态化的一个重要方面。人们广泛认为，生物催化将是生物技术继医药与农业革命以后的生物技术革命的第三个浪潮，是“21世纪化学工业的基本工具”。以生物催化为核心内容的工业生物技术在支撑新世纪社会进步与经济的技术体系中的地位已经被提到空前的战略高度。

近年来，生物催化在生物技术中的地位正在上升，生物技术正在从传统医药、农业向生物化工方面逐渐转移。不久的将来，将有超过50%的有机化学品使用生物技术来生产。可以断言，21世纪生物化工将是最大的化工产业。

值此工业生物技术产业大发展的时期，编著出版《生物催化工艺学》一书，可说是非常有意义、非常适时的。这本著作的主要内容既包括与生物催化相关的反应、产品与生产过程，还详细涉及生物催化剂的特性与筛选、生物催化的分子生物学工具、蛋白质分子定向进化、蛋白质工程、酶反应工程、非传统介质中的生物催化、生物催化过程设计，以及生物催化在化工、轻工、制药中的应用等，几乎涵盖了从基本概念、理论基础、实践应用以及发展前景等生物催化领域的全部内容。与国外某些类似的有关书籍 [如美国2004年最新出版的专著 *Biocatalysis: Fundamentals and Applications* (Bommarius A S, Riebel B R)、德国1999年出版的 *Biocatalysis: From Discovery to Application* (Fessner W-D)、奥地利2000

年出版的 *Biocatalysis* (Griengl H) 以及 20 世纪 90 年代初美国加州大学 (Clark, D.) 和欧洲生物催化委员会编著的两本同名书 *Applied Biocatalysis*] 相比,《生物催化工艺学》的编写较注重酶作为生物催化剂的性能和生物催化反应的过程特点,更关注不同学科、不同领域的交叉综合,内容更系统、更深入。该书内容很新,知识面广,而且有相当深度,充分反映了世界生物催化领域的发展动态,也体现了当前我国生物催化领域的水平。

参加本书编写的都是国内长期从事生物催化领域研究和教学工作的第一线专家学者,主要有江南大学、华东理工大学、浙江大学、南京工业大学等学校的教授、老师。编者根据自己多年教学和科研的经验,收集了大量国内外研究论文、专利文献与综述文献,并参考了最近国内外与生物催化相关的专著。本书力图较系统地介绍生物催化的基本方法、基础理论和研究进展,并注意多报道介绍国内科技工作者与编著者自己在本领域的工作实绩和成果,使读者感到更实际、更易接受。

本人作为国家重点基础研究发展计划(973 计划)“生物催化和生物转化中关键问题的基础研究”项目的首席科学家,很愿意为本书作序,并负责审核全书内容。

近年来,随着世界生物技术革命的第三次浪潮、市场经济的发展和生物催化产业的兴起,我国生物催化产业的研究、开发和应用也非常热门,而对科研人员真正有参考价值的书却很难找到,更缺乏相应的教材。国内一些高校相关专业的研究生和高年级本科生已经开设了“生物催化”课程或类似的课程,一般以原版专著、综述、研究论文为参考资料,国内缺少有关“生物催化”领域的基础理论、反应原理和应用以及关于该领域发展动态、最新进展的教科书。本书的出版将为我国工业生物技术,特别是生物催化产业的科学、持续发展提供一本很好的参考书,将更好地促进我国新兴生物催化领域的发展,同时也能对适应我国教学改革要求、培养科技创新人才、指导我国生物与化学学科建设发挥应有的促进作用。

中国工程院院士
南京工业大学校长

欧阳平凯

2004 年 7 月

前 言

近年来,随着世界生物技术革命的第三次浪潮——工业生物技术和生物化工产业的兴起,我国生物催化技术的研究、开发和应用也非常热门,而对科研人员真正有参考价值的书却很难找到,更缺乏相应的教材。国内一些高校相关专业的研究生和高年级本科生已经开设了“生物催化”课程或类似的课程,一般以原版专著、综述、研究论文为参考资料,国内缺少有关生物催化领域的基础理论、反应原理和应用以及关于该领域发展动态、最新进展的教科书。

编写此书的目的是通过介绍生物催化工艺技术的基本知识及应用实例,以期对从事生物催化领域技术工作的有关人员能有所帮助,为我国工业生物技术,特别是生物催化产业的持续、科学发展提供一本很好的参考书,更好地为促进我国新兴生物催化领域的发展服务。同时也可供生物技术、生物化工及相关专业的研究生或大学生作为学习参考,对培养科技创新人才、适应我国教学改革要求、指导我国生物与化学学科建设发挥应有的促进作用。

参加本书编写的都是国内长期从事生物催化领域研究和教学工作的第一线专家学者,主要有江南大学、华东理工大学、浙江大学、南京工业大学等学校的教授、老师,他们以江南大学历年讲授的《生物催化与手性技术》教材为基础编写了此书。编者根据自己多年教学和科研经验,收集了大量国内外研究论文、专利文献与综述文献,并参考了最近国内外与生物催化相关的专著。本书力图较系统地介绍生物催化的基本概念、基础理论、工艺过程、应用实例和研究进展。

本书第1章绪论介绍生物催化的基本概念、主要内容与发展趋势。第1篇为基础篇,从第2章至第12章,分别介绍生物催化微生物学基础、应用酶学基础、手性化学基础、生物有机化学与生物催化、生物催化剂的来源与筛选、生物催化剂的修饰与改造、生物催化剂的发酵生产、酶的纯化与表征、非水相生物催化、固定化生物催化剂与生物催化反应器,着重阐述生物催化基本知识 with 理论。第2篇为应用篇,从第13章至第22章,分别以L-氨基酸、D-氨基酸、有机酸、2-芳基丙酸、L-肉碱、D-泛解酸内酯、除虫菊酯、短链脂肪酸酯、手性环氧化物及邻二醇、香草醛等典型的生物催化产品为实例,详细阐述生物催化工艺技术的过程及应用。

本书主要章节由孙志浩编写(第1章、第3章、第8章、第11章、第12章、第15章、第17章、第18章、第22章),主要参与编写的有:浙江大学杨立荣、吴坚平编写第4章、第9章、第19章,华东理工大学许建和、徐毅、潘江编写第10章、第16章、第21章,江南大学徐岩、李艳、王栋编写第2章、第6章、第20章,南京工业大学周华、徐虹、韦萍编写第5章、第13章、第14章,中国科学院上海植物生理与生态研究所杨晟编写第7章,江南大学郑璞参与编写第15章、第22章,全书由孙志浩整理、编纂,许建和、杨立荣、徐岩、周华协助审校。江南大学生物催化研究室胡中桥老师以及博士生赵丽青、柳志强、何军邀、李永红、刘宇鹏,硕士生俞宏峰、冷泳、郑丽蓉、华蕾、王明君、王丰收、钟萍等协助进行了本书的整理、校对等工作。

十分荣幸的是本书得到欧阳平凯院士、罗贵民教授、雷肇祖教授级高工的审核,他们在

百忙之中抽出很多时间对本书全文认真地进行了、一丝不苟地进行了审阅，提出了不少非常有见地的、宝贵的修改意见，特别是欧阳平凯院士欣然为本书作序，为本书增光添彩，在此我代表全体编者向他们致以诚挚的敬意与衷心的感谢。

感谢国家重点基础研究发展计划（973 计划）“生物催化和生物转化中关键问题的基础研究”项目（2003CB716008）的资助，还要感谢众多关心和支持本书出版的业内同仁与朋友们，感谢化学工业出版社，是他们的鼓励和帮助才使本书能顺利、及早问世。

由于编者水平有限，加上涉及的内容广泛、知识比较前沿、发展又很快，书中难免出现错误和不足，敬请专家同仁和广大读者批评指正。

江南大学 孙志浩
2004 年 6 月

内 容 提 要

本书内容包括 3 部分共 22 章。第 1 章绪论, 介绍生物催化的基本概念、主要内容与发展趋势。第一篇为基础篇, 包括第 2 章至第 12 章, 分别介绍生物催化的微生物学基础、应用酶学基础、手性化学基础、生物有机化学与生物催化、生物催化剂的来源与筛选、生物催化剂的修饰与改造、生物催化剂的发酵生产、酶的纯化与表征、非水相生物催化、固定化生物催化剂与生物催化反应器, 着重阐述生物催化基本知识 with 理论。第二篇为应用篇, 包括第 13 章至第 22 章, 分别以酶法制备 L-氨基酸、酶法制备 D-氨基酸、固定化细胞方法生产 L-苹果酸与 L(+)-酒石酸、生物催化法制备手性 2-芳基丙酸、酶法生产 L-肉碱、微生物酶法拆分制备 D-泛解酸内酯、酶法生产光学活性拟除虫菊酯、脂肪酶非水相催化生产短链脂肪酸酯、酶法拆分手性环氧化物及邻位二醇、香草醛等生产实践为实例, 详细阐述了生物催化工艺技术的过程及应用。

本书内容有一定的理论深度, 同时结合典型生物催化产品的工艺实例, 并介绍了许多有关生物催化前沿性的内容。主要可用作高校生物工程、精细化工等学科的研究生及高年级本科生的教材或参考教材, 也可供从事生物化工、医药、食品、饲料、发酵等行业以及其他有关生物技术领域的科技工作者、企业生产人员阅读参考。

目 录

1 绪论	1
1.1 生物催化的基本概念	1
1.1.1 生物催化与生物催化工艺学	1
1.1.2 生物催化的产生与发展	3
1.1.3 生物催化研究的重要意义	7
1.2 生物催化的主要内容	8
1.2.1 生物催化的主要方式	8
1.2.2 生物催化反应的特点	9
1.2.3 生物催化研究的主要内容	12
1.2.4 生物催化的应用	12
1.3 生物催化发展趋势	15
1.3.1 生物催化的研究动态	15
1.3.2 生物催化的发展趋势与前景	18
1.3.3 我国生物催化产业的发展策略与建议	20
参考文献	23

基础篇

2 微生物学基础	27
2.1 生物催化剂与微生物	27
2.1.1 生物催化剂	27
2.1.2 微生物是生物催化剂的宝库	27
2.2 微生物的形态与分类	27
2.2.1 微生物的基本特点	27
2.2.2 微生物的分类与命名	29
2.2.3 常用的工业微生物	30
2.3 微生物细胞的结构及功能	34
2.3.1 原核生物和真核生物	34
2.3.2 核糖体	36
2.3.3 生物膜与蛋白质的运输	37
2.4 微生物的遗传和变异	38
2.4.1 遗传变异的物质基础	38
2.4.2 遗传信息的传递和基因表达	41
2.4.3 微生物的变异	41
2.5 代谢工程与微生物代谢的调控	42
2.5.1 微生物代谢调控的基本特点	42
2.5.2 酶活性的调控	43

2.5.3	酶合成的调控	46
2.5.4	微生物代谢调控的模式	50
2.5.5	代谢的人工调控	53
2.5.6	代谢工程	55
2.6	微生物的生长与环境条件	56
2.6.1	微生物的营养	56
2.6.2	微生物的培养方法	59
2.6.3	环境条件对微生物生长和代谢的影响	60
2.6.4	极端环境与极端微生物	61
	参考文献	63
3	应用酶学基础	65
3.1	酶的基本概念	65
3.1.1	酶是生物催化剂	65
3.1.2	酶的化学本质	68
3.1.3	酶的分类和命名	69
3.2	酶的结构与功能	72
3.2.1	酶蛋白的结构	72
3.2.2	酶的活性中心	77
3.2.3	酶催化反应机制	78
3.3	酶动力学和抑制作用	84
3.3.1	单底物酶催化反应动力学	85
3.3.2	多底物酶催化反应动力学	91
3.3.3	影响酶反应速率的因素	93
3.3.4	酶的抑制	95
3.4	生物催化用酶	98
3.4.1	对酶的认识	98
3.4.2	酶作为生物催化剂的优点	99
3.4.3	酶作为生物催化剂的缺点	101
	参考文献	102
4	手性化学基础	103
4.1	手性概念的提出	103
4.2	手性的意义	105
4.2.1	对映体的不同作用行为	105
4.2.2	单一对映体手性化合物的重要意义	106
4.3	有机分子的三维结构与手性	106
4.3.1	异构体	106
4.3.2	立体异构	108
4.3.3	手性与光学活性	112
4.3.4	手性与不对称性	115

4.4	构型的联系和测定	117
4.4.1	构型的联系	117
4.4.2	构型的测定	119
4.5	对映体组成的测定	122
4.5.1	比旋光度的测量	122
4.5.2	对映体过量	123
4.5.3	手性色谱法	123
4.5.4	核磁共振光谱 (NMR) 法	124
4.6	生物催化的手性化学	125
4.6.1	生物催化反应的选择性	125
4.6.2	对映选择率 E	126
	参考文献	128
5	生物有机化学与生物催化	129
5.1	概述	129
5.1.1	生物有机化学的发展	129
5.1.2	生物有机化学的主要研究方向及内容	131
5.2	生物体内的有机化学	132
5.2.1	生物有机化学中的立体效应	133
5.2.2	生物体内发生的基本有机化学反应类型	135
5.3	生物催化的有机化学反应	137
5.3.1	生物催化反应与有机化学合成	137
5.3.2	生物催化的水解反应	138
5.3.3	生物催化的氧化还原反应	140
5.3.4	生物催化的缩合反应	141
5.3.5	生物催化的加成反应	142
5.3.6	生物催化的卤化和脱卤反应	143
5.3.7	生物催化的胺化反应	143
5.3.8	生物催化的酯化反应	144
5.3.9	生物催化的降解反应	144
	参考文献	145
6	生物催化剂的来源与筛选	146
6.1	概述	146
6.1.1	生物催化剂的概念	146
6.1.2	生物催化剂来源与多样性	146
6.1.3	生物催化剂的寻找和发现	149
6.2	微生物酶筛选的策略	150
6.2.1	常规生物催化剂筛选的一般策略	150
6.2.2	从极端微生物中筛选极端酶的策略	156
6.2.3	未培养生物催化剂的发现策略	158

6.3	微生物和酶的一般筛选方法	159
6.3.1	从自然界发现产酶微生物	159
6.3.2	生物催化剂的高效筛选	163
6.4	优良菌种选育	166
6.4.1	自然选育	167
6.4.2	诱变选育	167
6.5	从生境中微生物基因组 DNA 筛选酶的方法	171
6.5.1	从土壤和水样中提取 DNA	171
6.5.2	土壤微生物 DNA 文库的构建	172
	参考文献	173
7	生物催化剂的修饰与改造	175
7.1	生物催化剂的化学修饰	176
7.1.1	酶蛋白修饰的目的	177
7.1.2	酶蛋白修饰的方法	177
7.1.3	酶蛋白修饰的局限性	180
7.2	生物催化剂的有理设计改造	181
7.2.1	生物催化剂的有理设计工具与方法	181
7.2.2	有理设计应用的成功例子	183
7.2.3	有理设计的局限性与展望	185
7.3	生物催化剂的定向进化	185
7.3.1	酶的定向进化的产生及定义	185
7.3.2	定向进化方法	188
7.3.3	定向进化应用的成功例子	192
7.3.4	定向进化的发展概况	196
7.4	目的物的检验方法：筛选和选择	197
7.4.1	筛选	198
7.4.2	选择	199
7.5	生物催化剂改造的研究概况与展望	200
7.5.1	生物催化剂改造的研究概况	200
7.5.2	生物催化剂的组合改造	201
7.5.3	生物催化剂改造的展望	201
	参考文献	203
8	生物催化剂的发酵生产	205
8.1	微生物产酶菌种	205
8.1.1	对产酶微生物菌种的要求	205
8.1.2	常用的产酶微生物	206
8.1.3	产酶菌种的保藏	207
8.1.4	产酶菌种的退化	208
8.2	产酶培养基	209

8.2.1	微生物发酵与产酶原料	210
8.2.2	培养基配制与灭菌	213
8.3	种子培养与发酵产酶	218
8.3.1	产酶发酵工艺流程	218
8.3.2	产酶发酵方法	218
8.3.3	种子扩大培养	219
8.3.4	无菌操作的接种技术	220
8.4	微生物生长与发酵产酶动力学	221
8.4.1	微生物的生长繁殖规律	221
8.4.2	发酵产酶的模式	222
8.4.3	细胞生长动力学	223
8.4.4	产酶动力学	223
8.5	发酵条件对产酶的影响	224
8.5.1	温度	224
8.5.2	pH 值	225
8.5.3	溶解氧 (供氧)	225
8.5.4	搅拌	226
8.5.5	泡沫	226
8.5.6	湿度	226
8.6	发酵染菌和防治	227
8.6.1	杂菌污染的途径	227
8.6.2	杂菌污染的原因及防止措施	227
8.6.3	噬菌体的危害和防止措施	228
8.7	工业用生物催化剂与酶制剂	229
8.7.1	工业用生物催化剂的要求	229
8.7.2	商品酶的剂型	229
	参考文献	230
9	酶的纯化与表征	231
9.1	酶或蛋白质的分析与检测	232
9.1.1	纯度的标准	232
9.1.2	酶活的测定	232
9.1.3	蛋白质的测定	232
9.1.4	蛋白质的化学分析	234
9.2	酶的分离和纯化	235
9.2.1	分离纯化概述	235
9.2.2	酶的提取	236
9.2.3	分离纯化方法	240
9.2.4	结晶	253
9.2.5	选择性变性纯化	254
9.3	酶的稳定性	254

9.3.1	纯化过程中的稳定性	254
9.3.2	酶的保存	255
9.3.3	酶的修饰对稳定性的作用	256
9.4	分离纯化过程设计策略	257
9.4.1	材料的选择	257
9.4.2	预处理	257
9.4.3	酶性质的初步研究	258
9.4.4	制定酶的纯化步骤	258
9.4.5	提取、分离和纯化方法评价	260
	参考文献	260
10	非水相生物催化	262
10.1	引言	262
10.2	典型的生物催化介质系统	265
10.2.1	单一的水或缓冲溶液系统	265
10.2.2	水-有机溶剂单相系统	266
10.2.3	水-有机溶剂两相系统	266
10.2.4	含有表面活性剂的乳液或微乳液系统	267
10.2.5	微水有机溶剂单相系统	268
10.2.6	超临界流体系统	268
10.2.7	离子液体介质系统	269
10.2.8	无溶剂或少溶剂反应系统	270
10.3	非水溶剂的影响及其选择原则	270
10.3.1	非水溶剂对酶选择性的影响	271
10.3.2	非水溶剂对酶稳定性的影响	271
10.3.3	非水溶剂的选择原则	272
10.4	水活度的影响及其控制方法	273
10.4.1	酶的柔性 with “必需水”	273
10.4.2	水活度与酶的活性	274
10.4.3	水活度缓冲体系	275
10.5	添加剂对非水相生物催化反应的影响	276
10.5.1	无机盐类添加剂	276
10.5.2	有机助溶剂	277
10.5.3	多醇类添加剂	277
10.5.4	表面活性剂	277
10.6	非水介质中酶的活化方法	279
10.6.1	有机溶剂中酶的活力为何不如水相中高	279
10.6.2	如何提高有机相酶的催化活力	281
10.7	非水相生物催化的主要特征	283
10.7.1	酶在有机溶剂中的催化活性	283
10.7.2	酶在有机溶剂中的稳定性	283

10.7.3	溶剂对酶选择性的调控作用	284
10.7.4	非水相酶催化的其他特征	285
10.8	非水相生物催化的典型反应	286
10.8.1	酯合成反应	287
10.8.2	酰胺化反应	292
10.8.3	多肽合成反应	293
10.8.4	氧化还原反应	294
	参考文献	296
11	固定化生物催化剂	299
11.1	固定化生物催化剂概述	299
11.1.1	固定化生物催化剂的定义	299
11.1.2	固定化生物催化剂的研究历史与发展	300
11.1.3	固定化生物催化剂的优缺点	301
11.2	固定化生物催化剂制备方法	302
11.2.1	固定化生物催化剂的制备原则	302
11.2.2	固定化方法	303
11.2.3	各种固定化方法的优缺点比较	310
11.3	固定化生物催化剂的性质	311
11.3.1	固定化生物催化剂的特征参数	311
11.3.2	固定化后催化活性的变化	312
11.3.3	固定化对生物催化剂稳定性的影响	312
11.3.4	固定化对生物催化反应动力学的影响	314
11.4	评价固定化生物催化剂的指标及其测定	317
11.4.1	固定化生物催化剂的活力及其测定	317
11.4.2	偶联率及相对活力的测定	318
11.4.3	固定化生物催化剂的半衰期	318
11.4.4	单位产品的生物催化剂消耗	318
11.5	固定化生物催化剂的应用	319
11.5.1	固定化生物催化剂的应用	319
11.5.2	固定化生物催化剂应用的几个例子	319
11.6	固定化技术研究新进展	321
11.6.1	共固定化技术	321
11.6.2	酶的定向固定化技术	322
11.6.3	交联酶晶体	323
11.6.4	脂质体包埋	325
	参考文献	326
12	生物催化反应器	327
12.1	生物催化反应器概述	327
12.1.1	生物催化反应器的基本概念	327
12.1.2	生物反应器的特点	328