



国外优秀科技著作出版专项基金资助

工业生物技术 译著系列

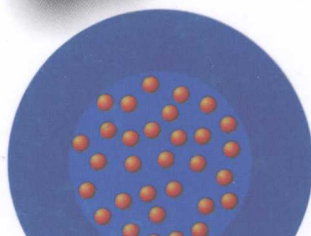
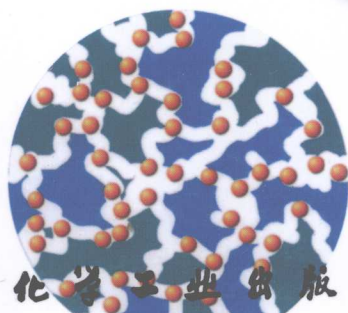
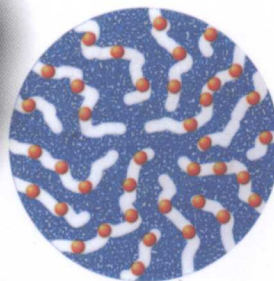
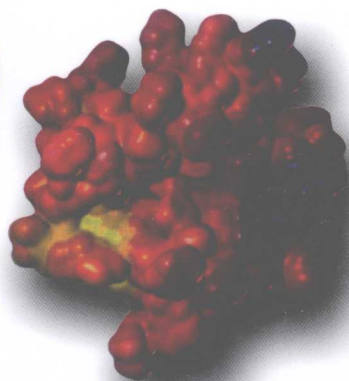
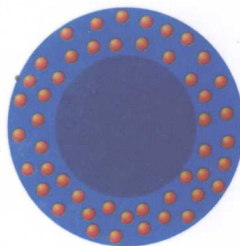
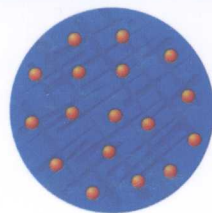
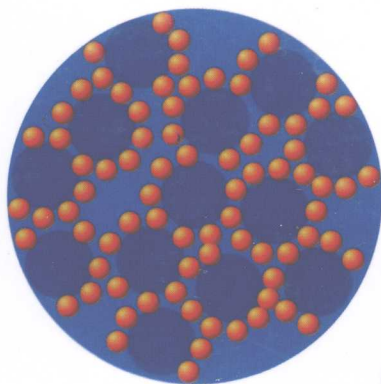
载体固定化酶

—— 原理、应用和设计

Carrier-bound Immobilized Enzymes:
Principles, Applications and Design

[荷] 曹林秋 (Linqiu Cao) 著

杨 晟 袁中一 译



化学工业出版社



国外优秀科技著作出版专项基金资助

工业生物技术译著系列

载体固定化酶

——原理、应用和设计

**Carrier-bound Immobilized Enzymes:
Principles, Applications and Design**

[荷] 曹林秋 (Linqu Cao) 著

杨 晟 袁中一 译



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

载体固定化酶——原理、应用和设计/[荷] 曹林秋著;
杨晟, 袁中一译. —北京: 化学工业出版社, 2008.1

(工业生物技术译著系列)

书名原文: Carrier-bound Immobilized Enzymes: Principles,
Applications and Design

ISBN 978-7-122-01600-3

I. 载… II. ①曹…②杨…③袁… III. 酶-固化-研究
IV. Q814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 183957 号

Carrier-bound Immobilized Enzymes: Principles, Applications and Design, 1st
edition/by Linqiu Cao

ISBN 978-3-527-31232-0

Copyright©2005 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Ger-
many. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by WILEY-
VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.

本书中文简体字版由 WILEY-VCH 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-2167

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 朱 恺

责任校对: 王素芹

装帧设计: 潘 峰

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 28 3/4 字数 562 千字 2008 年 3 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: 69.00 元

版权所有 违者必究

国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS OF EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (FFBEST)

管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会副委员长
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会名誉会长
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪
潘德润 朱静华 王印海 龚七一
俸培宗 魏 然

委 员 (按姓氏笔画顺序排列)：

王子镐	王心芳	王印海	王光建	王行愚
申长雨	冯 霄	冯孝庭	朱家骅	朱静华
刘振武	杨晋庆	李 彬	李伯耿	李学勇
李静海	吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	俸培宗	徐 宇	徐静安
黄少烈	曹 光	曹湘洪	龚七一	盛连喜
阎三忠	葛 雄	焦 奎	曾宝强	谭竹洲
潘德润	戴猷元	魏 然		

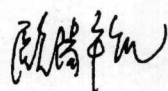
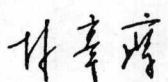
秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

“工业生物技术译著系列” 前言

生物技术在 20 世纪 80 年代与 90 年代分别为生物医药与农业带来了革命性的飞跃。以生物催化与生物转化为主要内容的工业生物技术，被视为生物技术的第三次重大应用，已成为发达国家的重要科技与产业发展战略。我国在政府和同行专家的大力支持下于 2003 年批准了第一个生物催化和生物转化的国家 973 项目。在该 973 项目的组织过程中，我们首先注意到了一本由德国几位著名专家编写的“industrial biotransformations”。该书是迄今为止世界上第一部汇集工业生物转化过程的权威著作。因此，着手翻译了这本书，以供 973 项目组内部使用，并在化学工业出版社的建议和支持下于 2005 年 8 月公开出版该书。在此期间，我们又陆续看到国外出版的一些非常好的工业生物技术图书（主要是 Wiley 出版社），逐步产生了做一个“工业生物技术译著系列”的想法，以介绍国外该领域的工作经验和最新进展，为我国的工业生物技术的发展做些贡献。

“工业生物技术译著系列”得到了杨胜利院士和同行们的大力支持。该系列丛书由化学工业出版社出版。我们非常欢迎国内外同行推荐该领域的好书。原版书出版社不限于 Wiley。原则上，选择这些书的条件是：内容符合工业生物技术、水平较高、互相之间没有太多重叠、有较宽泛的读者群。

2005 年 8 月 28 日

序言中文版

酶的固定化技术是现代生物技术及其工业化环节中的一个核心技术。自 20 世纪 60 年代第一个使用固定化酶的生物催化工艺商业化以来,固定化酶的材料、技术和理论得到了迅速发展。当前,固定化酶的设计已经摆脱了传统的模式并逐渐过渡到理性设计的时代,即固定化技术不仅仅被用来实现酶的重复使用或过程的控制^①,而且重点逐渐放在用适当的固定化酶技术来改善酶的催化性能及活性、稳定性及选择性^②。因此,在某种意义上固定化酶技术已经成为酶的基因工程的互补技术。

今天,有关固定化酶的技术文献每年都呈不断增长的趋势。保守估计到目前为止有超过 7000 份的文献资料,其中包括各种科技期刊杂志上的文章和专利文献。一方面,人们对固定化酶的认识越来越深刻,另一方面,固定化酶作为一个学科却一直缺乏一个相应的统一的理论支持。对于一个初涉此领域的学者和工程技术人员来说,这不仅仅意味着有太多的相关资料可供参考,还要花费大量的时间去查找你要的东西。在很多情况下,很可能是千头万绪无从下手或者在迫不及待地读完所查询到的资料后往往有一种近乎失望的心情。这是因为这些文献资料之间的时间跨度太长,各种文献资料中所用的方法和材料的差异太大,关联性、可比性太差。不难想象,很难直接从这些文献资料中得到有益的启示和帮助。另外,一个更主要的原因或许是,固定化酶技术是一门跨越多种学科的区域,它不仅涉及生物化学,有机合成化学,分析化学,蛋白质化学,酶学,聚合物化学,材料学等学科,而且往往和工艺过程及反应器的设计等学科紧密关联。固定化酶技术的这一特点本身就意味着一个优秀的固定化酶的设计是很难依靠一个人的力量来完成的。直到今天,很多工业生产上用的固定化酶很难说是一步设计出来的,大部分都是工程技术及研发人员在多年的生产实践中不断改进的结果。

在多年固定化酶的实践和理论研究中,我个人一个重要的感受就是,尽管目前正值酶的固定化技术的成熟和转型期,并且也不乏固定化酶方面的科技文章,专利文献,综述,章节,单行本见诸于世,但仍然缺乏一部对固定化酶的理论与实践进

① Cao, L.; L. M. van Langen; R. A. Sheldon (2005) Immobilised enzymes; Science or Art. Current Opinion in Chemical Biology, 9: 217-226

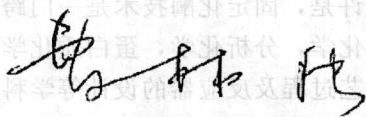
② Cao, L.; L. M. van Langen; R. A. Sheldon (2003) Immobilised enzymes; carrier-bound or carrier-free? Current Opinion in Biotechnology, 14: 387-394

行全面分析和总结的著作。因此,在近5年多的研究时间里,我分析研究了近几千份酶固定化技术方面的资料,第一次尝试性地对固定化酶的理论和方法进行了系统的分类、研究和总结,力图从中找出普遍适用的原则、理论用于指导各种固定化酶的设计即合成或选择固定化载体以及固定化方法和固定化条件的选择。

鉴于固定化酶性能不外乎包括催化活性、选择性和稳定性这三个方面,在该书英文原版的写作过程中,在各个章节的安排上,就围绕着如何使用和设计各个具体的固定化酶的方法来分别获得稳定的、高活性的或高选择性的固定化酶。同时也对影响固定化酶的活力、选择性和稳定性的各种影响因素进行了尽可能详细和系统化的分析和总结。书中的各个例子都是经过精心选择并服务于所在的章节。除此之外,为了给读者对书中引用的例子和提出的各种理论解释有一个直观的理解,作者亲自制作了300多幅图表。

在写作本书的过程中,作者本人力图将固定化酶以一门系统化的学科介绍给各个层面的读者,并希望这不仅仅是一本为科研人员而写的工具书,而且可以作为化学、生物、医学系高年级学生,研究生,博士生的教科书。值得一提的是,书中的有些理论和思想已被成功地用于固定化青霉素酰化酶和其他工业用固定化酶的设计,并成功用于工业生产。当本书的英文版面世之际,我曾经对朋友说,如果我当时有这样的一本书,也许固定化酶的历史要重写的。但朋友却说,正因为有了这本书,固定化酶技术的历史会要重写的。所以我由衷地希望每位中文版的读者都能从这本书的中文版中得到对你们的固定化酶方面的研究工作带来有益的启示和帮助,并祝你们人人能成为改写固定化酶历史的专家和学者。

对各位老师优秀准确的翻译工作,作者表示真诚地感谢并欢迎各位读者能够对本书存在的不足之处提出宝贵的意见和指正。



2007年8月于荷兰

译者前言

承欧阳平凯院士的推荐，林章凛教授与荷兰曹林秋博士的联系和落实，我们迅速选择和邀请了一批在生物技术和酶工程方面研究有成的研究员和教授，经过近一年的努力完成了翻译。曹博士在荷兰富有长期的工作经验，在酶的固定化和工业应用上有着丰富的经验和卓越的成就，并查阅了 1800 多篇文献和综述，写成了专著“Carrier-bound Immobilized Enzymes: Principles, Applications and Designs”（载体固定化酶——原理、应用和设计）。本书是近代酶工程的极佳专著，全面介绍了固定化酶的历史，特别表述了近 40 年固定化酶的蓬勃发展。书中以四章详细介绍酶的固定化技术：基于吸附的酶固定化技术、共价结合的酶固定化技术、酶的包埋技术和酶的微囊化技术。而且又推介了一类非传统的酶固定化技术，为今后的研究与开发提供了创新的思路。

“载体固定化酶”的出版，适逢国内外生物技术革命的第三次浪潮——工业生物技术大发展的开始阶段。本书的出版是恰逢其时。本书对酶工程研究人员将是周密的工具书和技术手册，将加速生物催化剂的改造，得到长命的高效专一的高效率的绿色工业技术，用于医药、化工和能源工业中。掀起工业生物技术新的热潮。

参加本书主译的人员在翻译过程中逐字逐句，反复推敲，再三斟酌，表现了各位专家在科学上一丝不苟的态度，以及对原作者和广大读者高度负责的精神。

参加翻译的有中国科学院上海生命科学研究院的袁中一研究员和杨晟研究员、广西科学院的黄日波教授、暨南大学的姚冬生教授和刘大岭教授、南京工业大学的卢定强教授、周华副教授和姚忠副教授、华东理工大学的许建和教授、浙江工业大学的郑裕国教授、浙江大学的蔡瑾副教授、中国科学院大连化学物理研究所的马小军研究员、军事医学科学院的张惟材研究员、吉林大学的冯雁教授、中国科学院武汉病毒研究所的周亚凤研究员、中国科学院成都生物研究所杨顺楷研究员，感谢郑华宝博士帮助完成本书的统筹工作，感谢华东理工大学的潘江、徐毅等老师，中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所的王金刚、傅向阳、曹传增、蒋宇等博士，以及余宏、杨俊杰、孙周通、邵丽君、王攀、刁刘洋、胡世元、张大龙、肖晗、李键、周毅屏、汪前、李松、黄东键、刘婷婷、李卉、吴玉峰、陈一倩、谢谚、赵丽丽、欧伶、郑高伟、鞠鑫、李爱涛、陈兵等各单位的研究员协助本书的翻译、整理和校对等工作。

我们高度赞赏化学工业出版社的同仁为了这本高质量专著的及时出版所付出的

最后,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”的资助。

杨 晟 袁中一

2007 年 12 月

前 言

酶是活细胞内的生物催化剂。它们在细胞代谢中卓越的表现归因于它们内在的催化特性。此外，它们在特定细胞部位中的活力可以得到进一步增强，例如位于细胞膜内、附着于细胞膜上或形成多功能酶复合体（如纤维素降解小体）。

酶技术专家重新改造了前述天然形式的“酶固定化”。他们已寻找了自己的固定化生物催化剂仿生学解决方案，用于制造分析仪器（如葡萄糖生物传感器），或者在工厂用于从外消旋前体材料生产手性胺等产品。这些迈向友好的“绿色技术”的起始步伐目前正在成为推动力。事实上，新兴的“白色生物技术”概念（在“生物炼制工厂”中基于可再生资源 and 生物催化剂的可持续化学工艺）不仅仅基于代谢工程改造的微生物发酵，同样也建立在酶反应器中用作各式催化剂的经蛋白质工程技术改造后固定在载体上的酶之上。通常，以固定化技术稳定和重复使用酶催化剂的技能已被频繁证明是赋予酶催化工艺经济性的关键步骤之一。

《载体固定化酶》一书中，曹林秋博士纵览了这个重要领域，涵盖了固定化方法用于酶技术的历史和现状。在简要介绍酶固定化百年历史后，他详尽讨论了酶吸附、共价结合和包埋的方法，以及这些人工环境中影响固定化酶性能的规律。在本书的结论章中，他对最新发展也作了权威性评述，例如将基因工程改造酶的固定化位点、人工标签还有经可逆固定化到合成高聚物上改变性质的酶等用于固定化。因此，作者写的这本书内容结构清晰，选项和实验方案容易选择，能够满足工业界酶学专家和学术界研究者各自的需求。

祝贺本书作者完成了如此之多数据的全面收集和组织。预祝本书读者在固定化生物催化剂的研发和应用上成果不断。

Rolf D. Schmid
2005 年 5 月于斯图加特

目 录

1 序：固定化酶——历史、现状和展望	1
1.1 序	1
1.2 过去	3
1.2.1 发展早期（1916 年~20 世纪 40 年代）	4
1.2.2 发展早期（20 世纪 50 年代）	4
1.2.3 发展期（20 世纪 60 年代）	5
1.2.4 发展中期（20 世纪 70 年代）	7
1.2.5 发展后期（20 世纪 80 年代）	10
1.2.6 合理设计期（20 世纪 90 年代至今）	12
1.3 固定化酶：过去的启示	14
1.3.1 固定化方法	14
1.3.2 多样性对多用性	15
1.3.3 互补对取舍	17
1.3.4 修饰对固定化	18
1.4 发展预见	24
1.4.1 进一步发展的空间	24
1.4.2 方法的整合	25
1.5 参考文献	26
2 基于吸附的固定化方法	42
2.1 引言	42
2.2 吸附的种类	42
2.3 吸附式酶固定化方法的原理	44
2.3.1 单层原理	44
2.3.2 稳定化原理	45
2.3.3 酶分子的分布	47
2.4 载体的理化性质要求	48
2.4.1 物理性质要求	48
2.4.2 载体的化学性质	51
2.5 决定酶催化特性的因素	53

2.5.1	活力含义	53
2.5.2	酶的稳定性	65
2.5.3	选择性	72
2.6	利用吸附制备固定化酶	77
2.6.1	传统的吸附法	77
2.6.2	非传统的吸附	96
2.6.3	以吸附为基础的双重固定化	101
2.7	参考文献	114
3	共价结合酶固定化	137
3.1	导言	137
3.2	载体的物理性质	138
3.2.1	载体的表面	140
3.2.2	结合位点的密度	142
3.2.3	孔的相关性质	143
3.2.4	颗粒大小	145
3.2.5	载体的形状	146
3.3	载体的化学性质	147
3.3.1	载体结合活性基团 (CAG)	149
3.3.2	载体结合惰性基团	151
3.3.3	间隔臂	152
3.4	酶: 用于共价结合的氨基酸残基	153
3.4.1	氨基酸残基的反应性	155
3.4.2	活力氨基酸的位置	155
3.5	酶性能的影响因素	156
3.5.1	活力保留	157
3.5.2	固定化酶的稳定性	171
3.5.3	固定化酶的选择性	182
3.6	活性载体的制备	187
3.6.1	合成活性载体	188
3.6.2	惰性载体前体	201
3.6.3	惰性载体的相互转换	207
3.6.4	活性官能团的相互转化	229
3.7	参考文献	233
4	酶的包埋	256
4.1	前言	256

4.2	包埋的定义	257
4.3	载体的要求	259
4.3.1	物理条件	259
4.3.2	化学条件	260
4.4	包埋的影响	261
4.4.1	包埋酶的活性	262
4.4.2	稳定性	265
4.4.3	选择性	267
4.5	各种包埋酶的制备	268
4.5.1	传统的包埋过程	269
4.5.2	非常规包埋技术	289
4.6	参考文献	301
5	酶的微囊化	316
5.1	介绍	316
5.1.1	概述	316
5.1.2	回顾	316
5.1.3	微囊化酶的优势和劣势	317
5.2	微囊化方法的分类	317
5.2.1	传统的微囊化方法	317
5.2.2	非常规微囊化方法	319
5.2.3	基于微囊化的双重固定方法	319
5.2.4	微囊化后载酶方法	321
5.3	微囊化的影响	322
5.3.1	微囊化酶的活力	322
5.3.2	微囊化酶的稳定性	323
5.3.3	异构选择性	323
5.4	微囊化酶的制备方法	323
5.4.1	界面法	323
5.4.2	表面活性剂相关的中空微球	327
5.4.3	相反转	334
5.4.4	预设计后填装包封胶囊	336
5.4.5	非传统的胶囊化方法	338
5.5	参考文献	345
6	非传统的酶固定化	355
6.1	引言	355

6.2	包被为基础的酶固定化	356
6.2.1	单层包被	356
6.2.2	相转换法包被	357
6.2.3	物理吸附多重酶包被	357
6.2.4	通过中介形成的多重酶分子层	357
6.2.5	亲和配体介导的酶包被	359
6.2.6	可溶性酶-聚合体的包被	360
6.2.7	酶催化胶体化的多酶分子层	360
6.2.8	溶胶-凝胶包被和共价吸附	361
6.2.9	电化学沉积	361
6.2.10	应用小孔载体进行酶包被	361
6.3	位点特异的固定化	362
6.3.1	通过生物特异性配体-酶相互作用的位点特异的固定化	365
6.3.2	引入化学标签	365
6.3.3	固定化配体(底物类似物)与酶结合	370
6.3.4	遗传工程标签	373
6.4	有机溶剂中的酶固定化	375
6.4.1	有机溶剂中的共价结合	375
6.4.2	有机溶剂中酶的包埋	377
6.4.3	有机可溶性酶衍生物的固定	377
6.4.4	有机溶剂中酶在支持物上的吸附	377
6.5	印迹酶固定法	378
6.5.1	分子印刷(迹)-多点连接	378
6.5.2	印迹-交联	379
6.5.3	包埋-印迹	380
6.5.4	结晶和交联	380
6.5.5	聚合和交联	381
6.5.6	分子内交联-印迹	381
6.5.7	固定后印迹	382
6.5.8	冻干印迹	382
6.6	稳定化-固定化	383
6.6.1	通过结合配体稳定	384
6.6.2	通过添加稳定剂作为构象赋形剂来稳定	385
6.6.3	通过固定前修饰来稳定	385
6.7	基于修饰的酶固定化	388
6.7.1	先固定后修饰	388
6.7.2	修饰后聚合	389

6.7.3 固定化前的改良技术	390
6.8 后固定化技术	397
6.8.1 引言	397
6.8.2 后处理的分类	398
6.8.3 物理方法	399
6.8.4 化学方法	404
6.8.5 前景	409
6.9 可逆可溶固定化酶	409
6.9.1 pH 易起反应的活泼聚合物	410
6.9.2 温敏活泼聚合物	412
6.9.3 溶剂敏感酶——聚合物结合物	412
6.9.4 基于离子强度敏感型聚合物的可逆可溶性固定化酶	414
6.9.5 光敏聚合物的可逆可溶固定化酶	414
6.10 参考文献	415
索引	434

1 序：固定化酶——历史、现状和展望

1.1 序

自 20 世纪后半叶，科研人员已投入大量精力开发研究水不溶固定化酶，并投入实际应用^[2]。这些应用的成功证明它们都得益于固定化酶，而非原酶。例如，可重复使用的固定化酶因有效反复使用和反应器的过程控制，而使工业生产降低成本^[3,4]；固定化酶又可制作稳定的生物传感器，反复测定工业产品和临床检测^[5~11]；还可作为纯化蛋白质和酶亲和吸附剂^[12]；还作为固相蛋白质化学的基础工具^[13,14]；以及作为蛋白质药物体内缓释微囊^[15]。与溶液酶相比，功效大增（图 1.1）。

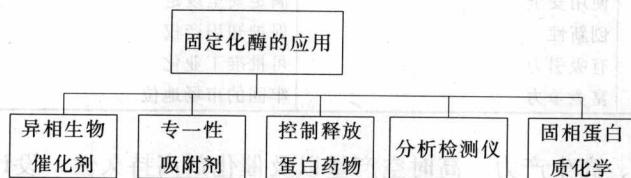


图 1.1 固定化酶的应用范围

然而，不论固定化酶如何制得，也不论其性质如何，按定义来说，任何一种固定化酶都必须具有两大基本功能：非催化功能（NCF）和催化功能（CF）。NCF 促进催化剂从应用环境中分离、固定化酶的反复运转与反应过程的调节控制等；CF 主要用于在一定时间和空间中催化转化目标物质（或底物）（图 1.2）。

NCF 主要相关于固定化酶的非催化部分的物理性质和化学性质，尤其是几何性质，即载体的形状、厚度和长度。而 CF 则相关催化性质，如活力、专一性、稳定性、pH 和温度曲线。高效固定化酶所具 NCF 和 CF 的选择总标准列于表 1.1^[16]。

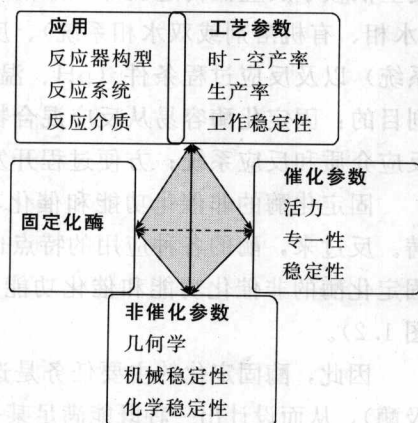


图 1.2 一种固定化酶的 NCF 和 CF 的关系及其应用

实践中，为了减少副反应，获得对底物

表 1.1 高效固定化酶的原则^[16]

参 数	要 求	优 点
非催化功能	合适的颗粒大小及形状 合适的机械特性 水重吸量低 有机溶剂中稳定性好	分离方便,反应易控制 反应器设计灵活 易除去水 不必改变孔径,扩散限制少
催化功能	高容积活力($U \cdot g^{-1}$) 高选择性 底物专一性广 在有机溶剂中稳定 热稳定性 操作稳定性 构象稳定性	高产率,高时空产量 副反应少,下游工艺及产品分离容易,污染少 适应底物结构多样性 利用有机溶剂改变反应的平衡常数 提高温度,缩短反应时间 节约成本 调节酶特性
固定化酶	可循环应用 适用性广 可重复生产 设计快速便捷	催化剂成本降低 适应过程的多样性 保证产品质量 对反应过程开发了解快,毋需学习
生态与经济的考虑	体积小 易处理 合理设计 使用安全	固体废物处理成本低 易生物降解,环境污染小 避免烦琐的筛选 满足安全规定
知识产权	创新性 有吸引力 富竞争力	保护知识产权 可批准工业化 牢固的市场地位

结构高度适应性、高生产力、高时空产量以及催化剂高持久性,设计的催化过程必须符合期望的活力、选择性、底物专一性、生产力和时空产量等各方面的要求。另一方面,固定化酶非催化功能的选择——特别是它的几何特性的选择——在很大程度上依赖于反应器构造设计(如批式、搅拌釜、柱状流及活塞流)、反应介质类型(水相、有机溶剂或双水相系统)、反应系统(浆状、液-液系统、液-固系统或固-固系统)以及反应过程条件(pH、温度、压强)等。设计非催化特性是为了实现下列目的:固定化酶容易从反应混合物中分离;反应器设计较灵活;适合于多种不同反应介质和反应系统;方便过程开发和下游处理,尤其便于过程控制。

固定化酶的非催化功能和催化功能这两种要求决定了固定化酶最终应用的范畴。反过来,酶的各种应用的特点也决定了这两大基本要素的设计和选择。总之,固定化酶的非催化功能和催化功能是一个整体,是固定化酶最终应用的基础(见图 1.2)。

因此,酶固定化的主要任务是选择一种适当的固定化方法(载体、固定化条件及酶),从而设计出一种既能满足某一应用的催化需求(生产率、时空产量、稳定性和选择性)又能满足非催化需求(如分离、调节控制、下游工艺)的生物催化剂。非催化功能和催化功能都满足需求的固定化酶被称为“高效固定化酶”。因此,开发一个