



教育部高职高专规划教材

酶 工 程

梁传伟 张苏勤 主编

胡本高 主审



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

酶 工 程

梁传伟 张苏勤 主编
胡本高 主审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

酶工程/梁传伟, 张苏勤主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-7872-2

I. 酶… II. ①梁…②张… III. 酶 生物工程-高等学校: 技术学院-教材 IV. Q814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 132515 号

教育部高职高专规划教材

酶 工 程

梁传伟 张苏勤 主编

胡本高 主审

责任编辑: 张双进

责任校对: 边 涛

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 206 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7872 2

定 价: 16.00 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

生物技术类专业规划教材编审委员会

主任委员：王红云

副主任委员：张义明 杨百梅 赵玉奇 陈改荣 于文国

委员：（按姓氏汉语拼音排序）

卞进发	蔡庄红	陈改荣	陈剑虹	程小冬
高 平	高兴盛	胡本高	焦明哲	李文典
李晓华	梁传伟	刘书志	罗建成	盛成乐
孙祎敏	王世娟	杨百梅	杨艳芳	于文国
员冬梅	藏 晋	张苏勤	周凤霞	

内 容 提 要

本书在内容编排上力求体现高职高专特色,突出实用性。在注重强调基础的同时,突出启发性、实用性及理论与实践的紧密结合,旨在加强对学生能力的培养。

根据国内外酶工程的最新进展,结合作者的教学实践和科研成果编写而成。本书主要介绍酶的生产和应用的基本理论、基本技术及其最新进展和发展趋势,内容包括绪论,酶动力学,微生物发酵产酶,动植物细胞培养产酶,酶的提取与分离纯化,酶分子修饰,酶、细胞和原生质体固定化,酶的应用等共7章。

本书可作为高职高专生物技术类专业学生用书,也可供相关行业的生产技术、科研人员参考。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 酶的基本概念与发展史.....	1
一、酶是一种生物催化剂.....	1
二、酶学研究简史.....	2
三、酶工程发展概况.....	3
第二节 酶催化作用的特点.....	4
一、高效性.....	4
二、专一性.....	4
三、反应条件温和.....	4
四、酶的活性受调节控制.....	5
第三节 酶的组成、分类与命名.....	5
一、酶的组成.....	5
二、酶的命名.....	5
三、国际系统分类法及编号.....	6
复习思考题.....	8
第二章 酶动力学	9
第一节 酶促反应动力学.....	9
一、单底物动力学.....	9
二、多底物动力学.....	11
第二节 影响酶促反应的因素.....	11
一、底物浓度对酶促反应的影响.....	12
二、酶的浓度对酶促反应的影响.....	12
三、温度对酶促反应的影响.....	12
四、pH 对酶促反应的影响.....	13
五、其他因素的影响.....	14
复习思考题.....	16
第三章 酶的发酵生产	17
第一节 酶生物合成的基本理论.....	18
一、RNA 的生物合成——转录.....	18
二、蛋白质的生物合成——翻译.....	19
三、酶生物合成的调节.....	21
第二节 酶发酵生产常用的微生物.....	23
一、枯草芽孢杆菌.....	24
二、大肠杆菌.....	24
三、黑曲霉.....	24

四、米曲霉	24
五、青霉	25
六、木霉	25
七、根霉	25
八、毛霉	25
九、链霉菌	25
十、啤酒酵母	26
十一、假丝酵母	26
第三节 发酵工艺条件及控制	26
一、细胞活化与扩大培养	26
二、培养基的配制	27
三、pH 调节	28
四、温度的调节控制	29
五、溶解氧的调节控制	29
六、提高酶产量的措施	31
第四节 固定化细胞发酵产酶	33
一、固定化细胞生长	33
二、固定化细胞发酵产酶的工艺条件控制	34
第五节 动、植物细胞发酵产酶	35
一、动植物细胞的特性	35
二、植物细胞发酵的特点	35
三、植物细胞发酵产酶的工艺条件控制	36
四、动物细胞发酵	38
复习思考题	39
第四章 酶的分离纯化	40
第一节 细胞破碎	40
一、机械破碎法	40
二、超声波法	40
三、渗透压法	40
四、化学破碎法	40
五、生物破碎法	41
第二节 酶的提取	42
一、酶提取的主要方法	42
二、酶提取过程的注意事项	42
第三节 酶的提纯	43
一、酶提纯的主要方法	43
二、调整酶溶解度的方法	43
三、根据酶分子大小、形状不同的方法	45
四、根据酶分子电荷性质的方法	47
五、根据酶分子专一性结合的方法	50

六、其他分离方法	53
七、酶纯化方法的选择	56
八、酶纯度的评价	56
第四节 工业生产中酶纯化过程的生物安全措施	59
复习思考题	60
第五章 酶分子修饰	61
第一节 金属离子置换修饰	61
第二节 大分子结合修饰	62
一、通过修饰提高酶活力	63
二、通过修饰增加酶的稳定性	63
三、通过修饰降低或消除抗原性	64
第三节 肽链有限水解修饰	64
第四节 酶蛋白侧链基团修饰	65
一、氨基修饰剂	65
二、羧基修饰剂	65
三、胍基修饰剂	66
四、巯基修饰剂	66
五、酚基修饰剂	66
六、分子内交联剂	66
第五节 氨基酸置换修饰	67
第六节 物理修饰	68
复习思考题	68
第六章 酶与细胞固定化	69
第一节 酶固定化	69
第二节 酶和菌体固定化	70
一、酶和菌体固定化的方法	70
二、固定化酶的性质	75
三、固定化酶的应用	76
第三节 微生物、植物和动物细胞固定化	78
一、细胞固定化的方法	78
二、固定化微生物细胞的应用	80
三、固定化植物细胞	81
四、动物细胞固定化	81
第四节 原生质体固定化	83
一、原生质体的制备	84
二、原生质体固定化	84
三、固定化原生质体的应用	85
第五节 酶反应器选型与设计	86
一、酶反应器类型	86
二、酶反应器选择	86

复习思考题	87
第七章 酶的应用	88
第一节 酶在医药方面的应用	88
一、酶在疾病诊断方面的应用	88
二、酶在疾病治疗方面的应用	91
三、酶在药物制造方面的应用	95
第二节 酶在食品工业中的应用	98
一、酶在淀粉类食品工业中的应用	99
二、酶在乳品工业中的应用	101
三、酶在酿酒工业中的应用	101
四、酶在果蔬类食品加工中的应用	102
五、酶在肉类食品和鱼类食品加工中的应用	103
六、酶在焙烤食品中的应用	103
七、酶在食品添加剂生产中的应用	103
第三节 酶在轻工、化工方面的应用	106
一、酶在饲料工业中的应用	106
二、酶在洗涤剂工业中的应用	109
三、酶在有机酸工业中的应用	111
四、酶在纺织、皮革、造纸工业中的应用	113
第四节 酶在环境保护方面的应用	114
一、酶在环境监测方面的应用	115
二、酶在废水处理方面的应用	115
三、酶在可生物降解材料开发方面的应用	116
第五节 酶在生物技术领域的应用	116
一、酶在除去细胞壁方面的应用	116
二、酶在大分子切割方面的应用	117
三、酶在分子拼接方面的应用	118
复习思考题	119
第八章 实验	120
实验一 酶活力的测定	120
实验二 淀粉酶在酒精生产中的应用	122
实验三 影响酶活性的因素比较	124
实验四 酶的固定化	126
参考文献	129

第一章 绪 论

【学习目标】

1. 理解酶的概念及其化学本质；
2. 掌握酶的组成和酶催化作用的特点；
3. 了解酶分类及命名的原则和方法。

酶(enzyme)是一种由活细胞产生的具有生物催化功能的生物大分子,现在发现的种类有蛋白酶类、核酸酶类以及抗体酶类等。

酶能够在常温常压的温和条件下高效专一地催化各种生化反应。在生物体内,酶参与几乎所有的物质转化过程,没有酶的催化作用就没有生物体的一切生命活动。

现在酶已被广泛应用于轻工、化工、食品、医药、环保以及生物工程等各个领域,并形成生物技术的一个重要分支——酶工程。酶工程(enzyme engineering)就是研究酶的生产和应用的一门技术性学科,是将酶学与工程学结合起来而形成的一项高新技术,其主要内容包括酶的产生、酶的分离纯化、酶的固定化、酶的修饰改造以及酶反应器等。

第一节 酶的基本概念与发展史

一、酶是一种生物催化剂

酶是一种由活细胞产生的具有生物催化功能的生物大分子。现在,已知的酶都是由生物体合成的,除少数具有催化能力的RNA外,其化学本质都是蛋白质。它们大部分存在于细胞体内,少部分分泌到体外。

一切生命活动都是由新陈代谢的正常运转来维持的,新陈代谢是生命活动的最重要的特征之一。而酶则是促进生物体内一切代谢活动的物质,没有酶的作用代谢反应就无法进行,生命也即停止。酶在生物体内发生的作用主要有以下几种类型。

- ① 催化代谢反应,建立各种各样代谢途径和代谢体系;
- ② 执行具体的生理机能,如乙酰胆碱酯酶能水解乙酰胆碱,参与神经传导;
- ③ 协同激素等生理活性物质在体内发挥信号转换、传递和放大作用,调节生理过程和生命活动,如腺苷酸环化酶对糖类代谢的调节;
- ④ 清除有害物质,起着保卫作用,如超氧歧化酶能破坏超氧负离子,从而防止脂质超氧化。

可以看出,酶能在多种水平上对生命活动进行调节,是生命活动不可或缺的生物催化剂。因此,研究酶的理化性质及其作用机理,对于阐明生命现象的本质和规律具有十分重要的意义。

二、酶学研究简史

人类早在几千年前就已经开始利用微生物酶来制造食品和饮料。据记载,在 4000 多年前的夏禹时期中国就有了酿酒技术,到了 3000 多年前的周朝,我们的先人已经会制造饴糖、面酱等。但是,那时的人们并不知道酶是什么样的物质,只是不自觉地利用了酶的催化作用。

人们真正认识到酶的存在和作用开始于 19 世纪 30 年代。1833 年,佩恩(Payen)和帕索兹(Persoz)从麦芽的水提物中用乙醇沉淀得到了一种可以促进淀粉水解成可溶性糖但对热不稳定的活性物质,他们称这种物质为淀粉酶(diastase),由此开始了人类对酶本质的研究。

1857 年,巴斯德(Pasteur)通过对酵母的乙醇发酵研究,认为在活酵母细胞内存在一种可以使糖发酵生成乙醇的物质,进而提出了发酵是由微生物引起的概念。1878 年德国的库尼(Kühne)首先把这种物质称为酶(enzyme)。

1894 年日本的高峰让吉用米曲霉固体培养法生产“他卡”淀粉酶,用做消化剂,使之成为世界上第一个商品酶制剂产品。人们由此开始了有目的地进行酶的生产和应用。

1896 年德国学者巴克纳(Buchner)兄弟在研究酵母时发现,不含酵母细胞的抽提液也能使糖发酵酒精,从而阐明了发酵是酶的作用的化学本质。他们的成功为 20 世纪酶学和酶工程学的发展揭开了序幕,并因此获得了 1911 年诺贝尔化学奖。

进入 20 世纪后,酶学得到了迅速发展。1902 年,亨利(Henri)在研究蔗糖酶水解蔗糖的反应中发现酶与底物之间存在某种关系,即酶与底物的作用是通过酶与底物生成配合物而进行的,由此提出了中间产物学说。1913 年,米彻利斯(Michaelis)和曼吞(Menten)根据中间学说导出了著名的酶促反应的基本动力学方程——Michaelis 和 Menten 方程,简称米氏方程。

1926 年,萨姆纳(Sumner)首次成功地从刀豆中提取出脲酶结晶,并证明了酶的本质是蛋白质,为酶化学奠定了基础。此后的 50 多年中,人们普遍接受了“酶是具有生物催化功能的蛋白质”的观点。迄今为止,已发现存在于生物体内的酶有近 8000 种,而且每年都有新酶被发现。

1960 年,法国的雅各(Jacob)和莫诺德(Monod)提出了操纵子学说,阐明了酶生物合成的调节机制,使酶的生物合成可以按照人们的意愿加以调节控制。1969 年日本的千畑一郎博士经过近 10 年努力,在世界上第一个把固定化酶应用于工业生产,成功开辟了固定化酶应用的新时代。在此基础上,人们又研制了各种固定化酶反应器。固定化酶的工业应用和酶反应器的出现是酶工程发展的新标志。

1982 年,切克(Thomas Cech)等人发现四膜虫的 rRNA(核糖体核糖核酸)前体在完全没有蛋白质的情况下能够进行自我剪接加工,催化得到成熟的 rRNA 产物。也就是说, rRNA 本身是催化剂。切克将这种具有催化功能的 RNA 称为核酸酶(ribozyme)。

1983 年,阿尔特曼(Sidney Altman)等人研究发现核糖核酸酶 P(RNase P)的 RNA 部分 M1 RNA 具有核糖核酸酶 P 的催化活性,同样能单独催化 tRNA 前体的 5'-端成熟。

RNA 具有生物催化活性这一发现改变了有关酶的概念,被认为是现代生物学中的一个重大突破。为此, T. Cech 和 S. Altman 共同获得了 1989 年度的诺贝尔化学奖。

1986 年, Schultz 和 Learner 两个小组同时报道, 用事先设计好的过渡态类似物做半抗原, 按照标准单克隆抗体制备法获得了具有催化活性的抗体, 被称为抗体酶 (abzyme)。这一酶学上的重要突破为酶的结构功能研究和抗体与酶的应用研究开辟了全新的领域。

随着基因工程的崛起, 细胞融合技术、DNA 重组技术等生物技术被广泛地引入到酶学研究中来, 使其形成了一门重要的生物工程技术分支——酶工程, 并已显示出广阔而诱人的前景。

三、酶工程发展概况

酶工程是在酶的生产和应用过程中逐步形成并发展起来的学科。它是酶学、微生物学的基本原理与化学工程有机结合而产生的边缘科学技术, 主要指自然酶制剂在工业上的大规模应用, 包括酶的产生、酶的分离纯化、酶的固定化以及生物反应器四个部分。酶工程是生物工程技术的主要内容之一, 对酶进行目的明确的生产和应用是从 19 世纪末开始的。

1894 年, 日本的高峰让吉首先从米曲霉中制备获得“他卡”淀粉酶, 用做消化剂, 开创了近代酶的生产和应用的先河。1908 年, 德国的罗姆 (Rohm) 从动物胰脏中制备获得胰酶用于皮革的软化。同年, 法国的波伊登 (Boidin) 利用制得的细菌淀粉酶进行纺织品的褪浆。1911 年, 德国人威尔斯丁 (Wallerstein) 利用木瓜蛋白酶防止啤酒的浑浊。然而, 在 20 世纪前几十年中, 酶的生产和应用一直停留在从动植物或微生物细胞中提取酶并加以应用的阶段, 酶的工业化生产受到一定限制。

1949 年, 日本开始采用微生物液体深层培养法进行细菌 α -淀粉酶的发酵生产, 开启了现代酶制剂工业的序幕。随着发酵工程技术的发展, 许多酶制剂都采用微生物发酵方法进行生产, 微生物酶的生产进入到了大规模工业化阶段。

20 世纪 60 年代以后, 伴随固定化酶、固定化细胞的崛起和微生物学、遗传工程及细胞工程的发展使酶工程进一步地向纵深发展。1969 年日本的千畑一郎首次成功地在工业上应用固定化氨基酰化酶生产 L-氨基酸。1978 年, 日本的铃木等人采用固定化细胞生产 α -淀粉酶取得成功。固定化酶具有稳定性高、可反复使用、产物纯度高、可连续化及自动化等特点。

然而, 固定化技术难以克服细胞壁对胞内产物向胞外分泌所产生的障碍。为此, 人们在原来固定化技术的基础上又发展起了固定化原生质体技术。1986 年, 中国著名生物工程专家郭勇等人采用固定化原生质体技术生产碱性磷酸酶、葡萄糖氧化酶、谷氨酸脱氢酶等相继取得成功, 为胞内酶的连续生产开辟了崭新的途径。

为了更好地发挥酶的催化功能, 人们又提出了酶分子的改造和修饰, 即通过一定的技术方法改变酶的某些特性和功能。近 20 多年来, 酶分子修饰技术发展很快, 其主要方法有酶分子主链修饰、酶分子侧链集团修饰、酶分子中金属离子置换修饰等。酶分子经加工改造后, 可导致有利于应用的许多重要性质与功能的变化。如德重等人利用蛋白水解酶的有限水解作用, 将 L-天冬氨酸酶的活力提高了 3~6 倍。随着蛋白质工程的发展, 基因工程技术和酶分子修饰得到了很好的结合, 如用细胞融合技术、DNA 重组技术改良产酶的菌种, 使之能源源不断地生产出适合人类需要的酶来。

最近 20 多年中, 非水系统酶反应技术的研究已成为酶工程研究领域的一个热点。与水溶液中酶的催化相比, 非水系统酶的催化具有提高非极性底物或产物浓度、进行在水溶液中无法进行的合成反应、减少产物对酶的反馈抑制作用等特点, 有着重要的理论意义和应用

价值。

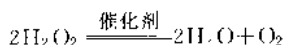
现在,酶工程已经成为生物工程技术主要的内容之一,在轻工、化工、食品、医药、环保等各个方面展现出了极为广阔和诱人的前景。

第二节 酶催化作用的特点

酶是生物催化剂,具有催化剂的共性,只要有少量酶存在即可大大加快反应的速率,使反应迅速达到平衡而不改变反应的平衡点,并且在反应的前后酶的自身不发生变化。然而,和其他非酶催化剂相比,酶又具有自身显著的特性,主要有四个方面:高效性、专一性、反应条件温和以及酶的活性受调节控制。

一、高效性

因为酶催化时所需活化能很低,催化效率远比非酶催化剂高。但由于非酶催化的反应速率太低,不容易观察,酶催化反应速率和在相同 pH 及温度条件下非酶催化反应速率可直接比较的例子很少。在可比较的情况下,酶的催化效率比非酶催化剂的催化效率高 $10^7 \sim 10^{13}$ 倍。例如过氧化氢 (H_2O_2) 在铁离子或过氧化氢酶的催化作用下均能发生分解反应生成氧和水,反应式如下:



在一定条件下,1mol 铁离子可催化 10^{-5} mol 过氧化氢分解;相同条件下,1mol 过氧化氢酶则可催化 10^5 mol 过氧化氢分解,过氧化氢酶的催化效率是铁离子的 10^{10} 倍。

二、专一性

酶的专一性是指在一定的条件下,一种酶只能催化一种或一类结构相似的底物进行某种类型反应的特性。这是酶最重要的特性之一,也是酶与其他非酶催化剂最主要的不同之处。酶催化的高度专一性是酶在各个领域广泛应用的重要基础。

不同的酶其专一性有所不同,主要表现为以下三种情况。

① 很多酶只能催化一种底物进行一种快速反应,这种高度的专一性称为绝对专一性。如脲酶只能催化尿素的反应,或者以很低的速率催化结构相似的类似物。

② 有些酶能催化一类底物起反应,特异性较低,人们称之为相对专一性。如蔗糖酶既能催化水解蔗糖,也能催化水解棉子糖,因为它们有相同的化学键。

③ 还有些酶能催化底物的立体异构体之一起反应,表现为高度的立体特异性,被称为立体异构专一性。有人也把这种情况归为绝对专一性中。如乳酸脱氢酶只催化 L(+)-乳酸脱氢,不能催化 D(-)-乳酸脱氢。

三、反应条件温和

反应条件温和是酶催化作用和非酶催化作用之间的另一个显著差别。酶催化作用一般都可常温、常压、近乎中性的 pH 条件下进行,而一般非酶催化剂的催化作用则大多需要高温、高压和极端的 pH 条件下才能进行。如用酸水解淀粉生产葡萄糖,需要 0.25~0.3MPa (表压)、140~150℃ 和耐酸设备;而用酶水解淀粉,在 65℃ 下,用一般设备即可。这为简化设备、降低成本和改善劳动强度创造了条件。

四、酶的活性受调节控制

酶对反应条件极为敏感,其活性是受调节控制的。酶活性的调控方式很多,主要包括酶浓度调节、共价修饰调节、激素调节、抑制剂调节、反馈调节以及金属离子和其他小分子化合物调节等。人们可以通过简单的改变酶浓度或者添加抑制剂等方法来控制 and 调节酶反应的进行。

第三节 酶的组成、分类与命名

一、酶的组成

除少数已经鉴定的具有催化活性的 RNA 分子外,几乎所有的酶都是蛋白质,所以和其他蛋白质一样,酶也具有四级空间结构形式。根据酶的组成成分可以将酶分为以下三类。

1. 单体酶

单体酶是指仅有一个活性部位的多肽链构成的酶,其相对分子质量在 13000~35000 之间。这类酶很少,且都是水解酶,如胰蛋白酶等。

2. 寡聚酶

这类酶由若干相同或者不同的亚基组成,这些亚基一般没有活性,必须相互结合后才有活性,其相对分子质量从 35000 至几百万,如 3-磷酸甘油醛脱氢酶等。

3. 多酶复合体

多酶复合体是指由多种酶彼此嵌合形成复合体进行连续反应的体系。这种多酶复合体有利于一系列反应的进行,其相对分子质量很高,一般都在几百万以上。

有些酶的活性仅仅决定于其本身的蛋白质结构,这类酶属于简单蛋白质,如脲酶、蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶以及核糖核酸酶等。大多数酶只有在与非蛋白组分结合后才表现出酶的活性,这类酶属于结合蛋白质,其非蛋白组分称为辅助因子。酶蛋白和辅助因子结合后所形成的复合物称为全酶。全酶可以表示如下:

$$\text{全酶} = \text{酶蛋白} + \text{辅助因子}$$

在催化反应中,酶蛋白与辅助因子所起的作用不同,酶反应的专一性取决于酶蛋白本身,而辅助因子本身无催化能力,其作用是在酶促反应中传递电子、原子或某些化学集团,维持酶的活性和完成酶的催化过程。辅助因子可以是金属离子(如铁、铜、锌、镁、钙、钾、钠等),也可以是有机化合物。有机辅助因子可以依据其与酶蛋白结合的程度分为辅酶和辅基。前者为松散结合,可透析除去,如 NAD^+ 、 NADP^+ 、CoQ、硫辛酸、生物素等;后者为紧密结合,如 FMN、FAD 等。二者的区别只在于它们与酶蛋白结合的牢固程度不同,并无明显界限。

二、酶的命名

酶的命名通常有两种方法,即习惯命名法和国际系统命名法。

1. 习惯命名法

1961 年以前酶的命名都是采用习惯命名法,其依据的主要原则如下。

(1) 根据酶所作用的底物命名 如催化水解淀粉的酶叫淀粉酶,催化水解蛋白质的酶叫

蛋白酶。有时还加上来源以区别不同来源的同一种酶，如木瓜蛋白酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶等。

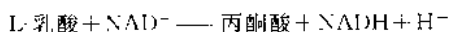
(2) 根据催化反应的性质及类型命名 如氧化酶、转移酶、水解酶等。

(3) 结合上述两个原则综合命名 如催化琥珀酸脱氢反应的酶叫琥珀酸脱氢酶等。

在许多情况下，这种习惯的、非系统的或未指明催化性质的命名法是不其合理的，经常会出现一种酶多个名称或一个名字多个酶共用的情况。为了适应酶学的发展，避免上述情况的发生，国际酶学委员会于1961年提出了一套系统的命名方案和分类原则。

2. 国际系统命名法

按照国际系统命名法，每一种酶有一个系统名称和一个习惯名称。酶的系统名称应当明确标明酶的底物及催化反应的类型。例如乳酸脱氢酶的反应为：



这个反应的底物是L-乳酸和 NAD^+ ，类型是氧化还原反应。因此这个酶的系统名称为：L-乳酸、 NAD^+ 氧化还原酶。

三、国际系统分类法及编号

国际系统分类法中的分类原则是：

- ① 根据酶所催化反应的性质，把酶分为六大类，分别用1、2、3、4、5、6的编号来表示（见表1-1）；
- ② 根据底物中被作用的基团或键的特点再将每一大类分为若干亚类；
- ③ 每一亚类中再分为若干小类；
- ④ 每一小类中包含若干个具体的酶。

表 1-1 酶的国际分类

分类	名 称	催化反应的类型		示 例
1	氧化还原酶	$\text{A} + \text{B} \longrightarrow \text{A} + \text{B}^+$	电子转移	醇脱氢酶
2	转移酶	$\text{AB} + \text{C} \longrightarrow \text{A} + \text{BC}$	转移功能团	己糖激酶
3	水解酶	$\text{AB} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{AH} + \text{B} + \text{OH}^-$	水解反应	胰蛋白酶
4	裂合酶	$\text{AB} \longrightarrow \text{A} + \text{B}$	键的断裂	乙酰乳酸合酶
5	异构酶	$\text{A} \longrightarrow \text{B}$	分子内基团转移	木糖异构酶
6	合成酶（或连接酶）	$\text{A} + \text{B} \longrightarrow \text{AB}$	键形成与ATP水解偶联	丙酮酸羧化酶

根据国际系统命名法，每一种酶除了有一个系统名称外，还有一个系统编号，其系统编号由四个数字组成，数字之间用“.”隔开。第一个数字表示该酶属于六大类中的哪一类；第二个数字表示该酶属于此大类中的哪一个亚类；第三个数字表示该酶属于上述亚类的哪一个小类；第四个数字表示这一具体的酶在该小类中的序号。编号之前往往加注EC，EC是国际酶学委员会（Enzyme Commission）的缩写。如胰蛋白酶的系統编号为EC3.4.21.4，第一个数字“3”表示该酶是水解酶（第三大类）；第二个数字“4”表示它是水解酶的第四亚类，催化的反应类型为水解肽键；第三个数字“21”表示该酶属于第四亚类中的第二十一小类，此小类为丝氨酸蛋白酶，在活性部位上有一至关重要的丝氨酸残基；第四个数字“4”表示该酶是这一小类中的特定序号。当酶的编号仅有前三个数字时，就已经清楚地表明了这個酶的特性：反应性质、底物性质、键的类型。

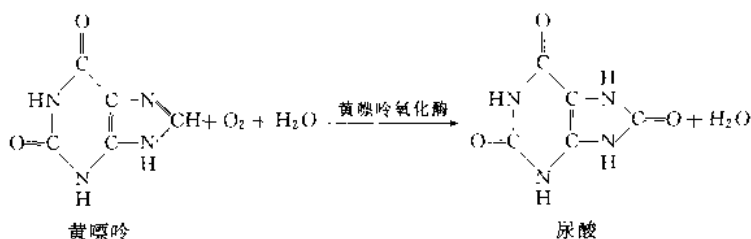
六大类酶简介如下。

1. 氧化还原酶 (oxido-reductases)

氧化还原酶催化氧化还原反应，其催化反应的通式为



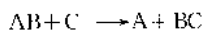
被氧化的底物 (A) 为氢或电子供体，被还原的底物 (B) 为氢或电子受体。系统命名时，将供体写在前面，受体写在后面，然后再加上氧化还原酶字样，如黄嘌呤：氧化还原酶 (习惯名为黄嘌呤氧化酶)。



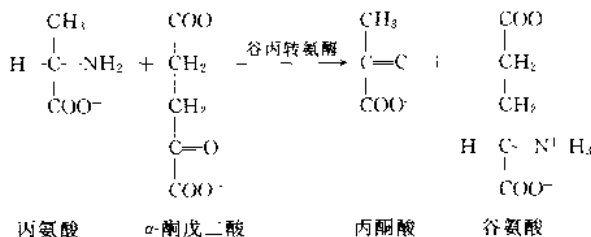
氧化还原酶在体内参与产能、解毒和某些生理活性物质的合成。重要的主要有各种脱氢酶、氧化酶、过氧化物酶、氧合酶等。

2. 转移酶 (transferases)

转移酶催化功能基团的转移反应，其催化反应的通式为



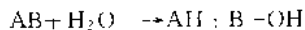
这类酶的系统命名是“供体：受体某基团转移酶”。如丙氨酸：酮戊二酸氨基转移酶 (习惯名为谷丙转氨酶)。



转移酶在体内将某基团从一个化合物转移到另一个化合物，参与核酸、蛋白质、糖类以及脂肪的代谢与合成。重要的主要有酰基转移酶、糖苷基转移酶、酮醛基转移酶、磷酸基转移酶、含氮基转移酶、含硫基团转移酶等。

3. 水解酶 (hydrolases)

水解酶催化水解反应，其催化反应的通式为

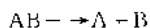


水解酶的系统命名是先写底物的名称，再写发生水解作用的化学键位置，其后再加上水解酶即可，如核苷酸磷酸水解酶等。

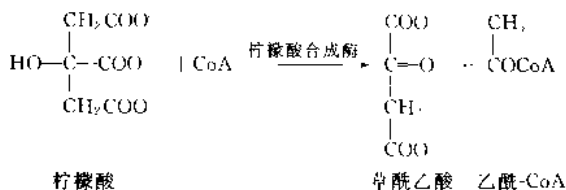
这类酶在体内外起降解作用，一般不需要辅酶，是人类应用最为广泛的酶。重要的有糖苷酶、肽酶以及各种脂肪酶等。

4. 裂合酶 (lydses)

裂合酶催化一个化合物裂解成为两个较小化合物及其逆反应，其催化反应的通式为



这类酶的系统命名为“底物-裂解的基团-裂合酶”，如柠檬酸裂合酶 (柠檬酸合成酶)。



裂合酶可脱去底物上某一基团而形成一个双键，或可相反地在双键处加入某一基团，重要的有醛缩酶、水化酶、脱氨酶等。

5. 异构酶 (isomerases)

异构酶催化各种同分异构体的相互转化，其催化反应的通式为

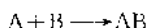


异构酶按照异构化的类型不同分为六个亚类，命名时分别在底物名称后加上异构酶、消旋酶、变位酶、表异构酶、顺反异构酶等，如木糖异构酶。

此类酶是为了生物代谢的需要而对某些物质进行分子异构化，分别进行外消旋、差向异构、顺反异构、酮醛异构、分子内裂解、分子内转移等。

6. 连接酶或合成酶 (ligases)

连接酶能催化一切必须与 ATP 分解相偶联，并由两种物质合成一种物质的反应，其反应通式为



这类酶的系统命名是在两个底物的名称后面加上连接酶，如谷氨酸：氨连接酶等。

连接酶关系着很多生命物质的合成，其特点是需要 ATP 等高能磷酸酯作为结合能源。

有关酶的系统分类的更详细的知识可查阅有关专门著作。

复习思考题

1. 理解酶的基本概念及化学本质。
2. 什么是酶工程？
3. 酶催化作用的特点有哪些？
4. 什么是全酶？辅酶和辅基有何区别？
5. 简述酶的国际系统分类法。
6. 试指出系统编号为“EC3.4.21.4”的酶，其编号中的各个数字的含义。