



高等职业教育农业部“十二五”规划教材
项目式教学教材

F_{ajiao} 发酵 Shipin Shengchan Jishu 食品生产技术

杨昌鹏 主编



◆ 编写体例新颖

◆ 实践操作突出

◆ 技术先进实用

中国农业出版社

杨昌鹏 主编

中国农业出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

发酵食品生产技术 / 杨昌鹏主编. —北京: 中国农业出版社, 2014. 7

高等职业教育农业部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-109-19251-5

I. ①发… II. ①杨… III. ①发酵食品-生产工艺-
高等职业教育-教材 IV. ①TS26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 116848 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 李 恒

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 17.25

字数: 416 千字

定价: 38.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

教材包括绪论和白酒生产、果酒生产、啤酒生产、酱油生产、食醋生产、发酵乳生产以及其他发酵食品生产（黄酒、豆腐乳、豆豉、发酵菜品、味精、柠檬酸等）7个生产项目。书中实训内容丰富、覆盖面广，有利于各院校结合专业特点和自身的实训条件进行相应的选择。

本教材体现了行动导向的教学理念，按照项目导向教学模式和“项目概述、实践操作、理论链接、知识拓展、学习思考”的结构进行编写，适于采用“做中学、做中教”的教学模式进行教学。本教材体例新颖、内容充实、覆盖面广，且实训突出、技术实用、理论简明，并积极反映了近年来食品发酵行业的新技术、新成果，适于高职高专食品加工技术、食品生物技术、生物技术及应用、生物制药等专业使用，还可作为相关生产科技人员的参考用书或作为岗前培训的教材。

编审人员名单

主 编 杨昌鹏

副主编 王国军 刘兰泉

编 者 (以姓名笔画为序)

王国军 王荣荣 刘兰泉

杨昌鹏 张 铎 潘嫣丽

主 审 李全阳

前言

《发酵食品生产技术》是依据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》等文件的精神，在中国农业出版社的组织领导下编写的。

本教材系统全面地阐述了发酵食品的先进生产技术及其基础理论，由有企业实践经验的教师参加编写，编写时以岗位能力需求为导向，以食品加工企业的典型发酵产品为载体设计教学项目，将发酵产品的典型生产技术组装到有形产品的生产工艺中，力求使教材内容对接职业标准和岗位要求，并体现行业特色，体现专业教学标准，体现“真实任务、真实工艺、真实生产、真实产品”和“做中学、做中教”的教学要求，既有利于提高学生学习兴趣，又便于培养学生的综合职业能力，很适于高素质技术技能型人才的培养。

本教材具有适应面广、结构合理、内容新颖、体例创新、图表丰富、理论简明、实训突出、技术实用、可操作性强等特点，适于采用“做中学、做中教、教学做一体化”的教学模式进行教学。全书涉及的实训内容丰富、覆盖面广，各院校可从不同的教学计划的整体优化出发，结合自身的实验实训条件，根据需要有所侧重，进行相应的选择，挑选出最需要的部分组织教学，其余可作为拓宽学生知识的阅读材料。

本教材由杨昌鹏主编，并负责全书的统稿。编写的具体分工是：广西农业职业技术学院杨昌鹏负责编写绪论、项目2的任务3和全书所有项目的项目概述；重庆三峡职业学院刘兰泉负责编写项目1的任务1和项目7的任务6；广西农业职业技术学院潘嫣丽负责编写项目1的任务2、项目2的任务1、任务2，项目7的任务2、任务3；黑龙江农业职业技术学院王国军负责编写项目3；河北化工医药职业技术学院张铎负责编写项目4和项目5；信阳农林学院王荣荣负责编写项目6，项目7的任务1、任务4、任务5。

本教材由广西大学轻工与食品工程学院李全阳教授主审，在此深表谢意！在编写过程中得到了广西农业职业技术学院、重庆三峡职业学院、黑龙江农业职业技术学院、河北化工医药职业技术学院、信阳农林学院的大力支持，在此表示衷心的感谢！

本教材在编写过程中,广泛参考和引用了众多专家、学者的著作和论文,限于篇幅不能一一列出,在此一并致以诚挚的谢意。

鉴于编者的知识水平有限,编写时间短促,难免有错漏之处,敬请各位同行、广大读者批评指正。

编者

2014 年 2 月

目 录

前言

绪论	1
项目 1 白酒生产	11
任务 1 生产浓香型大曲白酒	11
子任务 1 制作大曲	11
子任务 2 酿造浓香型大曲白酒	14
任务 2 生产小曲白酒	27
子任务 1 制作小曲	27
子任务 2 酿造小曲白酒	31
项目 2 果酒生产	39
任务 1 生产红葡萄酒	40
子任务 1 培养酒母	40
子任务 2 酿造红葡萄酒	44
任务 2 生产苹果酒	66
任务 3 生产香蕉酒	73
项目 3 啤酒生产	80
任务 1 生产普通啤酒	81
子任务 1 生产麦芽	81
子任务 2 制备麦芽汁	94
子任务 3 酿造啤酒	107
任务 2 生产全麦黑啤酒	130
项目 4 酱油生产	133
任务 1 生产低盐固态酱油	134
子任务 1 制作酱油种曲和成曲	134
子任务 2 低盐固态酱油发酵	142
任务 2 生产高盐稀态酱油	154

项目 5 食醋生产	161
任务 1 生产米醋	162
任务 2 生产苹果醋	184
项目 6 发酵乳生产	191
任务 1 生产凝固型发酵乳	192
任务 2 生产发酵乳饮料	201
项目 7 其他发酵食品生产	209
任务 1 生产黄酒	209
任务 2 生产豆腐乳	224
任务 3 生产豆豉	236
任务 4 生产发酵菜品	242
任务 5 生产柠檬酸	248
任务 6 生产味精	256
参考文献	267

绪 论

一、发酵技术发展简史

发酵技术的发展经历了漫长的岁月。人类利用微生物的代谢产物作为食品和医药,已有几千年的历史。最初人们对发酵的认识来源于果汁或谷物类,它们在酿造过程中产生了气泡,被称之为发酵。对于许多人来说,发酵仅仅意味着生产酒精,至今人们常常以起泡现象作为直观发酵的指标。而现代微生物学家则认为:借助微生物在有氧或无氧条件下的生命活动来制备微生物菌体,或生产其直接代谢产物或次级代谢产物的过程均称为发酵。

发酵技术起源很早,但它的蓬勃发展只有近几百年的历史,其发展大致经历为以下几个时期。

(一) 天然发酵时期

酿酒是人类最早通过实践所掌握的发酵技术之一。大约在公元前 6000 年,就有人开始用大麦芽酿造啤酒。公元前 2000 年,人类已经会用葡萄酿造葡萄酒。我国在公元前 221 年就会制酱、酿醋和豆腐乳,其后还有制备酱油、泡菜、奶酒、干酪及面团发酵、粪便和秸秆沤制等历史。这些产品都是数千年来凭借人类的智慧和经验,在没有亲眼见到微生物的情况下巧妙地利用微生物所获得的产品。那时人们对“发酵”的本质并未十分清楚,不知道发酵和微生物的关系,当然也就不会人为地控制发酵过程,只能凭经验进行家庭作坊式生产,产品在生产中经常会被杂菌污染,因此这个时期称为天然发酵时期或经验发酵技术时期。主要产品是食品,如各种饮料酒、酱、醋、腐乳、酸乳等。

(二) 纯种培养发酵时期

1680 年,荷兰博物学家安东·列文虎克(Anthonie van Leeuwenhock)制造了显微镜,使人们第一次用肉眼看到了微生物,证明了在发酵过程中有大量活的微生物的存在。1857 年法国生物学家巴斯德证明了酒精发酵是由活酵母发酵引起的,发酵现象是由微生物进行的化学反应,随之发明了著名的低温杀菌法,挽救了法国葡萄酒酿造业,使其免受酸败之灾。巴斯德因此被称为“发酵之父”。1872 年,布雷菲尔(Brefeld)创建了霉菌纯粹培养方法,被称为近代细菌学之父。

19 世纪末,德国的布赫纳兄弟(Eduard Buchner & Hans Buchner)用磨碎的酵母细胞制成酵母汁,加入大量蔗糖后也发现有乙醇(酒精)形成,从而进一步说明磨碎的酵母细胞同样能使糖液发酵成酒精,并将此具有发酵能力的物质称为酒化酶。至此,发酵现象的真相才真正被人们了解。随后,柯赫发明了固体培养基,得到了微生物的纯培养物,由此建立了单种微生物的分离和纯种培养技术。在纯种培养技术建立之前,对微生物的利用还是天然发酵时期,使用的微生物往往是混合菌种,而后则是靠人类的智慧控制微生物的生态系统,才

把单一的微生物菌种用于各种发酵工业，在产品防腐和稳定质量等方面起到了重要作用。

从 19 世纪末到 20 世纪 30 年代这段时期的产品有面包酵母、淀粉酶、蛋白酶、甘油、乙醇、丙酮、丁醇、乳酸和柠檬酸等，主要是一些厌氧发酵和表面固体发酵产生的初级代谢产物。在这个时期值得一提的是英国 Weizman 发明了丙酮-丁醇发酵这种纯种培养技术并实现了工业化。这是发酵工程第一个转折点，发酵由食品工业向非食品工业发展。在丙酮-丁醇发酵生产中，为防止杂菌的侵入，建造了用低碳钢制造的圆柱形发酵罐，并采用加压蒸汽灭菌和无菌接种技术，为丙酮-丁醇发酵解决了染菌问题，同时也为 20 世纪 40 年代需氧发酵的成功奠定了基础。

（三）深层培养发酵技术时期

发酵技术在经历了纯种培养发酵时期之后，迎来了深层培养发酵技术时期，又称通气搅拌发酵时期。1928 年英国细菌学家弗莱明（A. Fleming）发现能抑制葡萄球菌生长的点青霉，其产物称为青霉素，并确认青霉素对伤口感染有很好的治疗效果。这一发现在当时并没有引起人们的高度重视。到了 20 世纪 40 年代，第二次世界大战爆发，对抗感染药物的极大需求促使人们重新研究了青霉素。由于青霉素生产是需氧发酵，很容易受到杂菌污染，所以就借鉴了丙酮-丁醇发酵的经验，成功地建立起深层通气培养法和一整套培养技术，其中包括向发酵罐内通入大量的无菌空气、通过搅拌器将无菌空气打成细泡并均匀分布、培养基的灭菌和无菌接种等技术，使培养过程中的温度、pH、通气量和营养物的供给等都得到了控制。通气搅拌液体深层发酵技术的建立使需氧菌的发酵生产走上了大规模工业化。这些技术为以后的微生物工业提供了新的概念和模式，成为当代微生物工业兴旺发达的开端。经过半个世纪多的努力，目前青霉素的发酵水平、提取收率和质量有了大幅度的提高，从而推动了抗生素工业乃至整个发酵工业的快速发展，这是发酵工业的一个里程碑。

青霉素发酵生产的成功，给人类医疗保健事业作出了巨大贡献。同时给发酵工程带来了第二个转折点，青霉素研发成功，推进了链霉素、氯霉素、金霉素、土霉素、新霉素、红霉素等抗生素发酵工业的迅猛发展。

（四）代谢控制发酵时期

20 世纪 50 年代是一个近代发酵工业的鼎盛时代，新产品、新技术、新工艺和新材料不断出现，生产规模和应用范围不断扩大。氨基酸发酵工业、酶制剂工业和有机酸工业获得了突出的发展，这时期的产品较多，有抗生素、氨基酸、核苷酸、酶制剂、有机酸、多糖、单细胞蛋白和维生素等，还有生物转化、酶转化的产品等。

随着基础生物科学即生物化学、酶化学、微生物遗传学等学科的飞速发展，再加上新型分析方法和分离方法的发展，发酵技术取得了长足的进步，迎来了代谢控制发酵时期。1956 年由日本木下祝郎发明了谷氨酸发酵技术：从 DNA 分子水平上，利用微生物变异株通过代谢调节，控制微生物的代谢途径，使之进行最合理的代谢，积累大量有用的发酵产物。这种发酵技术在赖氨酸等一系列氨基酸以及核苷酸物质发酵生产中得到了广泛应用，而且在抗生素等次级代谢产物的发酵中也得到了广泛的应用。它标志着发酵技术的第三个转折点的到来：切断支路代谢、酶的活力调控、酶的合成调控（反馈控制和反馈阻遏）、解除菌体自身的反馈调节、突变株的应用等。

（五）基因工程时期

1980年之后，随着细胞融合技术、基因操作技术等生物技术的发展，发酵技术又取得了突飞猛进的发展。打破了生物种间障碍，能定向地制造出新的有用的微生物；增加微生物体内控制代谢产物产量的基因拷贝数，可以大幅度地提高目标产物的产量；将动物、植物或某些微生物特有产物的控制基因植入细胞中，快速经济地大量生产这些产物；将具有不同性能的多种质粒植入，使新菌株可清除污染或以非粮物质为原料进行发酵生产或环境保护；人类基因组测序完成后向功能基因组学转变——功能基因及其表达产物的获得，等等。另外，微生物、动植物、藻类等细胞大规模培养，都表明了发酵工程进入了又一个新的时期——基因工程时期。

二、发酵食品的种类

发酵食品是指人们利用有益微生物来加工制造的一类食品，具有独特的风味，如酸乳、干酪、酒酿、泡菜、酱油、食醋、豆豉、黄酒、啤酒、葡萄酒等。现在发酵食品已经成为食品工业中的重要分支。发酵食品通常分为以下五类：

酒精饮料：如蒸馏酒、黄酒、果酒、啤酒等。

发酵乳制品：如酸乳、酸性奶油、马奶酒、干酪等。

发酵豆制品：如豆腐乳、豆豉、纳豆等。

发酵蔬菜（蔬菜腌制品）：如泡菜、酸菜等。

发酵调味品：如醋、黄酱、酱油、甜味剂（如天冬甜味精）、增味剂（如5'-核苷酸）和味精等。

三、发酵食品微生物

发酵食品微生物是指经发酵过程制造食品时所利用的微生物。最常用的有酵母菌、曲霉以及细菌中的乳酸菌、醋酸菌、黄短杆菌、棒状杆菌等。

（一）细菌

用于发酵食品中的细菌，主要有醋酸杆菌、非致病棒杆菌和乳酸菌3种。

1. 醋酸杆菌 常见于腐烂的水果、蔬菜、酸果汁、醋和饮料酒中。属革兰氏阴性无芽孢杆菌，兼性好氧，但易出现退化型。退化型菌体出现树枝状、丝状等弯曲状。老培养物中的菌株革兰氏染色也常常出现变化。醋酸杆菌能氧化乙醇使之成为乙酸，因而是制造食醋的主要菌种。

2. 非致病棒杆菌 经常从土壤、水、空气和被污染的细菌培养皿或血平板中分离得到。非致病棒杆菌中的谷氨酸棒杆菌、力士棒杆菌、解烃棒杆菌经常用于味精（L-谷氨酸盐）的生产。它们能将糖分解成有机酸，并将含氮物质分解成铵离子，再进一步合成谷氨酸并积累于发酵液中。

3. 乳酸菌 能产生乳酸，是发酵乳制品制造过程中起主要作用的一类菌。按其対糖发

酵特性可分为同型发酵菌和异型发酵菌。

同型发酵菌在发酵过程中,能使发酵液中 80%~90% 的乳糖转化成乳酸,仅有少量的其他副产物。常用的菌种有:干酪乳杆菌、保加利亚乳杆菌、嗜酸乳杆菌,瑞士乳杆菌、乳酸乳杆菌、乳链球菌、嗜热链球菌及乳链球菌丁二酮乳新亚种。

异型发酵菌在发酵过程中,能使发酵液中 50% 的乳糖转化为乳酸,另外 50% 的糖转变为其他有机酸、醇、二氧化碳、氢等。在食品中使用的菌种有葡聚糖明串珠菌和乳脂明串珠菌。

(二) 酵母菌

食品工业中常用的酵母菌有酿酒酵母、椭圆酵母、卡尔酵母和异常汉逊酵母四种。

1. 酿酒酵母 大多呈椭圆形,长与宽之比为 2:1。对酒精有较大的耐力,能发酵葡萄糖、麦芽糖、半乳糖、蔗糖及 1/3 棉籽糖,但不能发酵乳糖和蜜二糖,不能同化硝酸盐。常存在于酒曲、果皮、发酵的果汁以及果园的土壤中。是酿酒工业中最常用的菌,也是啤酒酿造中典型的上面发酵酵母;还可发酵制面包;它的转化酶可以转化糖,也可用于巧克力的制作。

2. 椭圆酵母 细胞为卵圆形,其他生化特性与酿酒酵母相似,除能耐较高浓度的乙醇外,还能耐较高的葡萄汁酸度和较低浓度的二氧化硫,因而常用于葡萄酒的酿造。

3. 卡尔酵母 是啤酒酿造中典型的底面酵母。它的形态与生化特性都与酿酒酵母相似,不同之处是它具有完全发酵棉籽糖的能力。

4. 异常汉逊酵母 细胞呈圆形、椭圆形或腊肠形。在特定条件下能生成发达的假菌丝。能发酵葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、半乳糖、棉籽糖,不能发酵蜜二糖和乳糖。能同化硝酸盐,分解杨梅苷。由于能产生乙酸乙酯,因而在改善食品风味中能起一定作用。如白酒和无盐发酵酱油的增香都可采用此菌。

(三) 霉菌

它是丝状真菌的统称,不是分类学上的名称。凡在营养基质上长有菌丝体的真菌统称为霉菌。它包括分类上很不同的许多真菌,如藻状菌纲、子囊菌纲、担子菌纲和半知菌纲。食品工业中常用的霉菌有毛霉属、根霉属、曲霉属和地霉属 4 个属。

1. 毛霉属 具有毛状的外形,无假根和匍匐枝,菌丝无横隔,孢子囊梗直接由菌丝体生出。繁殖方式可以由子囊孢子直接萌发,也可由接合孢子进行繁殖。毛霉能产生蛋白酶,因而有分解大豆的能力。中国在制作豆腐乳、豆豉时即利用毛霉分解蛋白质产生鲜味。某些种毛霉还具有较强的糖化力,能糖化淀粉。中国酒药中的毛霉就属此类。毛霉还可用于酒精和有机酸工业原料的糖化和发酵过程。

2. 根霉属 菌丝体产生匍匐枝,匍匐枝末端长有假根。这是与毛霉属区别的主要形态特征。根霉具有很强的糖化酶活力,能使淀粉分解为糖,是酿酒工业常用的糖化菌。

3. 曲霉属 菌丝体分枝并具有横隔,分生孢子从分化了的菌丝(具有厚壁的足细胞)上直立长出。分生孢子的形状、大小、颜色和纹饰都是鉴别曲霉种的重要依据。

曲霉具有分解有机物质的能力。在酿造等工业中得到广泛应用。它具有多种强活性的酶系。例如应用于酿酒的糖化菌具有液化、糖化淀粉的淀粉酶,同时还有蔗糖转化酶、麦芽糖

酶、乳糖酶等；有些菌能产生较强的酸性蛋白酶，可用来分解蛋白质或用作食品消化剂。黑曲霉所产生的果胶酶，常用于果汁澄清，柚苷酶和陈皮苷酶用于柑橘类罐头去苦味或防止产生白色沉淀，葡萄糖氧化酶则用于食品的脱糖和除氧。

曲霉能产生延胡索酸、乳酸、琥珀酸等多种有机酸，其中草酰乙酸和乙酰辅酶 A 通过缩合成为柠檬酸。在食品工业中应用较多的曲霉属的菌有宇佐美曲霉、黄曲霉、米曲霉和黑曲霉等。这些曲霉在中国的传统食品豆酱、酱油、白酒、黄酒中起着重要的作用。

4. 地霉属 其菌落类似于酵母，故为酵母状霉菌。但它有真菌丝，菌丝有横隔，成熟后菌丝断裂成裂生孢子。裂生孢子多为长筒形，也有方形或椭圆形。一般多呈白色。地霉常见于泡菜、腐烂的果蔬以及动物粪便中。白地霉的菌体蛋白质营养丰富，可供食用或作饲料用。

四、菌种的选育与复壮

(一) 菌种选育

根据微生物遗传变异的特点，微生物学工作者在生产实践中已经试验出一套行之有效的微生物育种方法：主要包括自然选育、诱变育种、杂交育种。为了获得适合大规模工业生产所需的优良生产菌种，一般首先是从自然界分离筛选具有产生目标产物能力的菌种，但这样获得的菌种的生产能力往往较低，生理生化特性不一定能满足生产要求，还需要进行大量的诱变选育，进一步提高其生产能力，改善性能；也可以对现有的生产菌种进行改造，即经诱变育种，选育出符合实际生产需要的菌株。自然界中微生物资源异常丰富，土壤、水、空气、腐败的动植物残骸，都是微生物的主要集居和生长繁衍的场所。其种类之多，至今仍然是一个难以估测的未知数。以其集居环境（包括特殊和极端环境）、营养类型、生存方式、生理类型、代谢途径、合成能力等比较，均居生物界之冠。因此，微生物资源的开发和应用是当今世界瞩目的重大课题。

菌种的分离，不仅是把混杂的各类微生物有效地分开，得到纯种，更重要的是根据生产实际的要求，有的放矢、快速、准确地将能产生所需产物，或具有某种生化反应性能的菌种，从大量的微生物中挑选出来。有时是设计一种在分离阶段便能识别所需菌种的方法，更多的是利用特定的方法分离，获得所需菌种后，再进行识别。为了使获得的菌种能满足工业生产的需要，须考虑各种性能指标。因此，菌种分离和筛选的方法和策略就十分重要。

一般的菌种分离纯化和筛选步骤可分为采样、增殖培养、分离、筛选与毒性试验等几个步骤。

(二) 菌种复壮

随着菌种保藏时间的延长或菌种的多次转接传代，菌种的优良生产性状会出现劣化或有些遗传标记会出现丢失，这种现象常称为菌种退化。因此，需及时进行退化菌种的复壮。菌种复壮可通过纯种分离和性能测定等方法来实现。主要措施包括从退化菌种的群体中找出少数尚未退化的个体，以达到恢复菌种的原有典型性状。也可以在菌种的生产性能尚未退化前经常而有意识地进行纯种分离和生产性能测定工作，以达到菌种的生产性能逐步有所提高。

五、发酵条件的控制

(一) 发酵条件控制的内容

发酵条件控制一般包括以下内容：发酵培养基配方与灭菌的控制；菌体浓度与生长量的控制；基质浓度的控制；通气量（溶解氧浓度）与搅拌转速的控制；发酵过程的温度控制；发酵过程的 pH 控制；种龄与种量的控制；泡沫的控制；CO₂ 排出量控制；污染杂菌的控制；氧化还原电位控制等。

此外，对于发酵终点的判断也同样重要。生产不能只单纯追求高生产力，而不顾及产品的成本，必须把二者结合起来。合理的放罐时间是由实验来确定的，就是根据不同的发酵时间所得的产物产量计算出发酵罐的生产力和产品成本，采用生产力高而成本又低的时间，作为放罐时间。确定放罐的指标有：产物的产量、过滤速度、氨基氮的含量、菌丝形态、pH、发酵液的外观和黏度等。发酵终点的确定，需要综合考虑这些因素。

(二) 发酵参数的测量

为了对发酵过程实施有效的控制，需要进行发酵参数的检测。发酵参数是发酵过程及其菌株的生理生化特征数据，反应环境变化和细胞代谢生理变化的许多重要信息。发酵参数可分为物理参数（如温度、压力、体积、流量等）、物理化学参数（如 pH、溶解氧、溶 CO₂、氧化还原电位、气相成分等）、化学参数（如基质浓度、产物浓度等）、生物学参数（如生物量、细胞形态）。根据发酵参数的不同，测量的原理、方法也不同。各种参数发酵过程检测技术的测量方法与原理如表 0-1 所示。

表 0-1 发酵参数的测量方法及原理

参数	测量方法	测量原理
温度	热敏电阻	电阻随温度的改变而改变
压力	隔膜	隔膜直接感受压力的变化
压力	压敏电阻	电阻随承受压力的大小而改变
发酵液体积	压差传感器	静压差与液层深度成正比
发酵液体积	荷重传感器	传感器电阻与荷重成正比
气体流量	热质量流量计	气流带走的热量与质量流量成正比
液体流量	蠕动泵	转速与流量成正比
搅拌转速	频率计数器	光反射计数
pH	复合玻璃电极	电极对 H ⁺ 呈特异反应
溶解氧	复膜氧探头	氧通过膜扩散探头在金属电极上进行电子转移反应产生电流
黏度	旋转黏度计	剪力与剪速之比随黏度而变化
生物量	浊度法	入射光因细胞的散射作用而衰减
泡沫	电导或电容探头	探头与液面及电极组成回路

发酵参数的变化信息是通过安装在发酵罐内的传感器检测，由变送器转换为标准信号，

通过二次仪表显示、记录,或传送给计算机处理。传感器有不同的分类方法,按测量方式分,可分为离线传感器、在线传感器、原位传感器;按测量原理分,可分为力敏元件、热敏元件、光敏元件、磁敏元件、电化学元件以及生物感受膜等制作的传感器。如果将传感器安装在发酵罐内,直接与发酵液接触,给出连续响应信号(如温度、压力、pH、溶氧等的测量),这种传感器则属于原位传感器。

发酵过程中参数的控制很重要,目前发酵工艺控制的方向是转向自动化控制,因而希望能开发出更多更有效的传感器用于过程参数的检测。

(三) 影响发酵的主要因素及其调控

在上述发酵参数中,对发酵过程影响较大的有温度、pH、溶解氧浓度等因素。

1. 温度 温度对发酵过程的影响是多方面的,它会影响各种酶反应的速率,改变菌体代谢产物的合成方向,影响微生物的代谢调控机制。除这些直接影响外,温度还对发酵液的理化性质产生影响,如发酵液的黏度、基质和氧在发酵液中的溶解度和传递速率、某些基质的分解和吸收速率等,进而影响发酵的动力学特性。产物的生物合成最适发酵温度是既适合菌体的生长,又适合代谢产物合成的温度。它随菌种培养基成分培养条件和菌体生长阶段不同而改变。

理论上,整个发酵过程中不应只选一个培养温度,而应根据发酵的不同阶段,选择不同的培养温度。在生长阶段,应选择最适生长温度。在产物分泌阶段,应选择最适生产温度。但实际生产中,由于发酵液的体积很大,升降温度都比较困难,所以在整个发酵过程中,往往采用一个比较合适的培养温度,使得到的产物产量最高,或者在可能的条件下进行适当的调整。发酵温度可通过温度计或自动记录仪表进行检测,通过向发酵罐的夹套或蛇形管中通入冷水热水或蒸汽进行调节。工业生产上所用的大发酵罐在发酵过程中一般不需要加热,因发酵中释放了大量的发酵热,在这种情况下通常还需要加以冷却,利用自动控制或手动调整的阀门,将冷却水通入夹套或蛇形管中,通过热交换来降温,保持恒温发酵。

2. pH pH对微生物的生长繁殖和产物合成的影响有以下几个方面:①影响酶的活性,当pH抑制菌体中某些酶的活性时,会阻碍菌体的新陈代谢;②影响微生物细胞膜所带电荷的状态,改变细胞膜的通透性,影响微生物对营养物质的吸收及代谢产物的排泄;③影响培养基中某些组分和中间代谢产物的离解,从而影响微生物对这些物质的利用;④影响菌体代谢,pH不同往往引起菌体代谢过程的不同,使代谢产物的质量和比例发生改变。此外,pH还会影响某些霉菌的形态。

发酵过程中,pH的变化取决于所用的菌种培养基的成分和培养条件。培养基中的营养物质的代谢是引起pH变化的重要原因。发酵液的pH变化乃是菌体产酸和产碱的代谢反应的综合结果。每一类微生物都有其最适的和能耐受的pH范围,大多数细菌生长的最适pH为6.3~7.5,霉菌和酵母菌为3~6,放线菌为7~8。而且微生物生长阶段和产物合成阶段的最适pH往往不一样,需要根据实验结果来确定。

为了确保发酵的顺利进行,必须使其各个阶段经常处于最适pH范围之内,这就需要在发酵过程中不断地调节和控制pH的变化。首先需要考虑和试验发酵培养基的基础配方,使它们有个适当的配比,使发酵过程中的pH变化在合适的范围内。如果达不到要求,还可在发酵过程中补加酸或碱。过去是直接加入酸(如硫酸)或碱(如氢氧化钠)来控制,现在常

用的是以生理酸性物质硫酸铵和生理碱性物质氨水来控制,它们不仅可以调节 pH,还可以补充氮源。当发酵液的 pH 和氨氮含量都偏低时,补加氨水,就可达到调节 pH 和补充氨氮的目的;反之, pH 较高,氨氮含量又低时,就补加硫酸铵。此外,用补料的方式来调节 pH 也比较有效。这种方法,既可以达到稳定 pH 的目的,又可以不断补充营养物质。最成功的例子就是青霉素发酵的补料工艺,利用控制葡萄糖的补加速率来控制 pH 的变化,其青霉素产量比用恒定的加糖速率和加酸或碱来控制 pH 的产量高 25%。目前已试制成功适合于发酵过程监测 pH 的电极,能连续测定并记录 pH 的变化,将信号输入 pH 控制器来指令加糖、加酸或加碱,使发酵液的 pH 控制在预定的数值。

3. 溶解氧浓度 对于好氧发酵,溶解氧浓度是最重要的参数之一。好氧微生物深层培养时,需要适量的溶解氧以维持其呼吸代谢和某些产物的合成,氧的不足会造成代谢异常,产量降低。微生物发酵的最适氧浓度与临界氧浓度是不同的。前者是指溶解氧浓度对生长或合成有一最适的浓度范围,后者一般指不影响菌体呼吸所允许的最低氧浓度。

为了避免生物合成处在氧限制的条件下,需要考察每一发酵过程的临界氧浓度和最适氧浓度,并使其保持在最适氧浓度范围。现在已可采用复膜氧电极来检测发酵液中的溶解氧浓度。要维持一定的溶氧水平,需从供氧和需氧两方面着手:在供氧方面,主要是设法提高氧传递的推动力和氧传递系数,可以通过调节搅拌转速或通气速率来控制。同时要有适当的工艺条件来控制需氧量,使菌体的生长和产物形成对氧的需求量不超过设备的供氧能力。目前已知发酵液的需氧量受菌体浓度、基质的种类和浓度以及培养条件等因素的影响,其中以菌体浓度的影响最为明显。发酵液的摄氧率随菌体浓度增大而增大,但氧的传递速率随菌体浓度的增加而减少,因此可以控制菌的比生长速率比临界值略高一点,达到最适菌体浓度。这样既能保证产物的比生产速率维持在最大值,又不会使需氧大于供氧。这可以通过控制基质的浓度来实现,如控制补糖速率除控制补料速度外,在工业上,还可采用调节温度(降低培养温度可提高溶氧浓度)、液化培养基、中间补水、添加表面活性剂等工艺措施,来改善溶氧水平。

六、发酵技术的应用现状及发展趋势

(一) 应用现状

发酵技术给人类社会生产力的发展带来了巨大的潜力,涉及解决人类所面临的食物与营养、健康与环境、资源与能源等重大问题。

发酵工业的各类产品已广泛应用于轻工、医药、食品、畜牧、能源、环境等领域中。发酵技术具有原料来源丰富、产物专一、废弃物对环境的污染小或容易处理等优点,因此在医药工业、食品工业、农业、冶金工业、环境保护等方面得到了快速的发展。在一些发达国家,发酵工业的总产值占到国民生产总值的 5% 左右。我国也在 20 世纪 80 年代以后,大力发展了发酵工业。

发酵技术在食品工业上有着广泛的应用。例如以糖类物质为主要原料发酵酿造葡萄酒、白酒、黄酒和啤酒,以牛乳为原料发酵生产奶酒、乳酪、酸乳等发酵乳制品,以淀粉类物质为主要原料发酵生产谷氨酸、赖氨酸等,以豆类、谷物、蔬菜为原料发酵生产酱油、醋、腐乳和泡菜等,以及用多种原料混合生产单细胞蛋白等。