



Fundamentals, Equipment and Applications
of Solid-state Fermentation

固态发酵

原理、设备与应用

许赣荣 胡文锋 主编



化学工业出版社
生物·医药出版分社

Fundamentals, Equipment and Applications
of Solid-state Fermentation

固态发酵 原理、设备与应用

许赣荣 胡文锋 主编



化学工业出版社
生物·医药出版分社

·北京·

定价：38.00元

ISBN 7-03-018883-7

图书在版编目 (CIP) 数据

固态发酵原理、设备与应用/许贇荣, 胡文锋主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 5

ISBN 978-7-122-04967-4

I. 固… II. ①许…②胡… III. ①生物发酵-原理②生物
发酵-生物反应器 IV. Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 030046 号

责任编辑: 傅四周 孟嘉 史懿
责任校对: 郑捷

装帧设计: 周遥

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: 北京云浩印刷有限责任公司

装订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 524 千字 2009 年 6 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: 78.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国固态发酵技术，历史最为悠久，尤其是好氧微生物的固态发酵技术，领先于世界其他国家数千年，技术最为全面，产品最为丰富；西方国家，历史上的液态发酵技术（如应用于啤酒和葡萄酒行业）相对较强，现代以来，液态好氧发酵技术称雄于世界，而固态发酵起步较晚，技术所涉及的领域及产品种类较少。本书的编写过程中采纳了十多年来，尤其是近年来国内外固态发酵原理、设备及应用的研究成果，从中发现一些值得深思的现象。在我国固态发酵技术文献资料往往注重于固态发酵过程操作技术的描述或总结，基础理论研究相对薄弱，研究时观察的角度较为单一，方法较为陈旧。比如，对固态发酵微生物的研究，我国研究者的研究大多根据微生物学的常规知识，用常规的培养方法分离微生物，用普通的形态观察或生化特性对菌种进行初步鉴定，用平板计数法等简单的方法研究固态发酵过程中微生物数量的变化等。而国外近几十年来，对固态发酵技术的研究开展得如火如荼，比如西方的研究者在研究固态发酵的某一技术问题，往往是多学科、多层次，从不同的角度，通过不同的手段来研究，并热衷于探索其规律性，建立数学模型。如对微生物菌体量的研究方法就包括：采用间接的物理和化学方法测定菌体量；用共焦扫描式激光显微镜研究霉菌菌丝在培养基的空间分布；用数学模型描述菌丝体末端、菌丝体的分枝生长的定量关系；用压差法和成像分析法测定菌体量；通过呼吸量测定菌体生物量等。在固态发酵技术领域，国际知名杂志上发表的高水平论文也以外国研究者居多。国外对固态技术的研究思路及研究手段，有许多方面值得我们学习。

固态发酵的生产是一个庞大的系统工程，包括原料预处理、微生物、发酵工艺、发酵设备及下游工程五大系统。全书共分为12章，前6章重点介绍上述5个系统，并介绍了固态发酵的质量传递和热量传递的最新研究成果。固态发酵设备方面重点介绍了固态发酵反应器。第7~12章是固态发酵技术的应用。除了系统介绍固态发酵技术和设备外，书中内容尽可能较为全面地反映近年来国内外在固态发酵领域的研究成果。但因编者水平及能力的限制，书中难免会遗漏一些重要的内容，欢迎同行批评指正。

本书第1章至第9章以及第12章，主要由许贛荣编写；第6章中有关酱油的部分内容由谢韩编写；第9章中有关醋的部分内容由吴珏编写。第10章和第11章主要由胡文锋、罗文华和何谦等编写。

此书完成之时正是我本科阶段的母校——华南理工大学（原华南工学院）建校56周年及研究生阶段母校——江南大学（原无锡轻工业学院、无锡轻工大学）建校50周年之际。谨以此书献给这两所培育了成千上万发酵工程专业人才的学校。

许贛荣

2009年2月于江南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固态发酵的定义	1
1.2 固态发酵技术发展简史	1
1.2.1 传统固态发酵技术	2
1.2.2 近现代固态发酵技术	3
1.3 固态发酵基本过程	4
1.3.1 原料预处理	4
1.3.2 物料的输送	4
1.3.3 菌种扩培	4
1.3.4 固态发酵过程及控制	4
1.3.5 固态发酵产品的后处理	5
1.4 固态发酵的特点	5
1.5 固态发酵的应用	6
1.5.1 在酿酒行业的应用	6
1.5.2 在食品工业中的应用	6
1.5.3 在农业中的应用	6
1.5.4 在医药中的应用	7
1.5.5 在环境保护中的应用	7
1.5.6 在其他行业的应用	7
1.6 固态发酵技术的展望	8
1.6.1 固态发酵过程基础理论的研究	8
1.6.2 固态发酵反应器的设计和放大	8
1.6.3 加强固态发酵设备与其他设备的配套研究	9
1.6.4 固态发酵过程及产品污染的控制	9
参考文献	9
第 2 章 固态发酵原料预处理、蒸煮及灭菌技术	11
2.1 发酵原料及预处理	11
2.1.1 固态发酵培养基的主要原料	11
2.1.2 固态物料的物性参数	13
2.1.3 原料预处理的方式	14
2.2 原料蒸煮、膨化及焙炒	18
2.2.1 原料的熟化方式	18
2.2.2 蒸煮	18
2.2.3 原料的膨化处理	27
2.2.4 炒麦机	28
2.2.5 原料的无蒸煮技术	28
2.2.6 原料的物理及化学处理法	29
2.3 固态物料的输送	29

2.3.1	固态物料输送的特点	29
2.3.2	固态物料的输送相关的设备及设施	30
	参考文献	31
第3章	固态发酵微生物及其培养技术	32
3.1	固态发酵微生物	32
3.1.1	固态发酵优势微生物和特征微生物	32
3.1.2	传统固态发酵过程的多菌种混合发酵	34
3.2	微生物生态学及在固态发酵中的应用	35
3.2.1	传统的微生物生态学	35
3.2.2	微生物分子生态学技术及在固态发酵微生物中的应用	40
3.2.3	白酒发酵微生物的代谢	41
3.3	霉菌	41
3.3.1	霉菌简述	41
3.3.2	霉菌的生长繁殖	42
3.3.3	霉菌生长的影响因素	42
3.3.4	霉菌孢子的培养	45
3.3.5	真菌的分离纯化	47
3.3.6	霉菌的育种及保藏	48
3.4	固体种曲扩大培养技术	49
3.4.1	红曲曲种的培养	50
3.4.2	根霉种曲的表面培养技术	51
3.4.3	厚层通风制种曲	51
3.4.4	活性干酵母固态培养技术	52
3.4.5	种曲培养机纯粹培养三级种	52
3.5	固态发酵菌体量的测定	53
3.5.1	固态发酵生物量的特点	53
3.5.2	细胞生物量直接检测法	53
3.5.3	细胞生物量间接检测法	54
	参考文献	56
第4章	固态发酵生物反应器	58
4.1	固态发酵生物反应器的构造和基本性能要求	58
4.2	固态发酵生物反应器的分类	58
4.3	传统固态发酵设施或装置	59
4.3.1	培养瓶	59
4.3.2	滚动瓶	60
4.3.3	半透性塑料袋	60
4.3.4	堆积发酵	60
4.3.5	地窖发酵	61
4.3.6	酿缸发酵	63
4.4	现代固态发酵反应器	63
4.4.1	浅盘式培养反应器	64
4.4.2	填料床型反应器	67
4.4.3	转鼓式生物反应器	68

4.4.4	连续翻料强制通风型生物反应器	73
4.4.5	间歇式搅拌翻料强制通风型反应器	74
4.4.6	固态连续发酵生物反应器	77
4.4.7	气相双动态固态发酵生物反应器	79
4.5	固态发酵反应器的配套设备	80
4.5.1	无菌空气制备系统	80
4.5.2	固态发酵罐的罐内接种装置	83
4.5.3	固态发酵反应器的自动控制	83
4.6	固态发酵生物反应器性能的分析及选择	85
4.7	固态发酵反应器的放大	87
	参考文献	87
第5章	固态发酵物质和热量的传递及平衡	89
5.1	概述	89
5.2	固态发酵物料的特性	89
5.2.1	物料层和顶空层的物料的宏观分析	89
5.2.2	物料层的微观分析	90
5.2.3	固态发酵物料的非均质性	90
5.2.4	固态发酵过程中的物质传递	91
5.3	固态发酵过程氧的传递	91
5.3.1	气体传递的基本原理	91
5.3.2	湿菌体层模型	94
5.3.3	固态发酵氧传递过程	95
5.3.4	固态发酵氧传递的限速步骤	96
5.3.5	工程变量对固态发酵传氧的影响	97
5.3.6	摄氧速率	97
5.4	水的传递与物料平衡	98
5.4.1	固态发酵过程中水的存在形式	98
5.4.2	水活度和水分含量	99
5.4.3	水分的传递	100
5.4.4	水平衡方程	101
5.4.5	水分蒸发及蒸发热的去除	104
5.5	物料质量传递与物料平衡	105
5.5.1	固态发酵基质的浓度梯度及扩散	105
5.5.2	发酵培养物的物料衡算	106
5.5.3	菌体量和培养物干基总量关系	107
5.5.4	固态发酵基质的消耗	107
5.5.5	固态发酵产物生成动力学的研究	108
5.5.6	补料发酵	108
5.6	热量传递和平衡	109
5.6.1	概述	109
5.6.2	热量传递	113
5.6.3	各种固态发酵反应器热量平衡	116
	参考文献	120

第 6 章 固态发酵及下游过程	121
6.1 固态发酵生产的 4 个阶段	121
6.2 固态发酵的操作方式	121
6.2.1 固态分批发酵过程	121
6.2.2 固态分批发酵微生物的生长	122
6.3 固态发酵工艺条件及控制	125
6.3.1 固态发酵温度控制	125
6.3.2 固态发酵反应器的通风	130
6.3.3 搅拌(翻料)	132
6.3.4 固态发酵物料水分的控制策略	134
6.3.5 pH 及酸度的控制及测定	136
6.4 固态发酵污染控制技术	136
6.4.1 固态发酵杂菌污染问题	136
6.4.2 固态发酵常见污染及原因	136
6.4.3 无菌检查	137
6.4.4 固态发酵污染控制	137
6.5 固态发酵产品的灭菌技术	139
6.5.1 影响灭菌效果的因素	139
6.5.2 固态发酵产品的灭菌方法	139
6.5.3 包装后的固态发酵产品的灭菌	141
6.6 固态发酵产品的干燥技术	141
6.6.1 固态产品的干燥方法	142
6.6.2 含湿多孔介质的水分蒸发机理及干燥过程	142
6.6.3 影响干燥速率的因素	142
6.6.4 干燥设备	143
6.7 其他下游处理技术——挥发性物质的固态发酵生产及回收	143
6.8 发酵产品的取样及检测	143
参考文献	144
第 7 章 酒曲的固态发酵及设备	145
7.1 曲的功能及作用	145
7.2 曲的分类	145
7.3 固态制曲技术概述	146
7.3.1 酒曲培养过程、基本要求及特点	146
7.3.2 制曲培养期间酒曲微生物的生长规律	146
7.3.3 酒曲贮存期间微生物及酶的变化	147
7.3.4 酒曲质量指标	148
7.4 麦曲	148
7.4.1 传统麦曲	148
7.4.2 纯种麦曲	149
7.5 大曲	151
7.5.1 块曲曲模的大小及形状对酒曲质量的影响	152
7.5.2 高温曲	153
7.5.3 中温曲	154

7.5.4	其他类型的大曲	155
7.6	小曲	155
7.6.1	绍兴酒药	156
7.6.2	邛崃米曲	156
7.6.3	甜酒药	157
7.6.4	纯种根霉小曲	158
7.7	生料酒曲	158
7.8	麸曲	158
7.8.1	糖化麸曲的生产	159
7.8.2	麸皮固体酵母培养	159
7.9	红曲	160
7.9.1	红曲微生物	160
7.9.2	色素红曲	161
7.9.3	酿酒用红曲	163
7.9.4	功能性红曲	163
7.10	乌衣红曲和黄衣红曲	166
7.10.1	乌衣红曲	166
7.10.2	黄衣红曲	167
7.11	制曲生产设施或设备	167
7.11.1	散曲和小曲的培养设施和用具	167
7.11.2	传统块曲制造设备及设施	168
7.11.3	现代块曲生产设备和设施	169
	参考文献	171
第8章	固态发酵酒和醋	172
8.1	大曲白酒的固态发酵	172
8.1.1	固态发酵白酒的生产技术特点	172
8.1.2	大曲白酒的固态发酵过程	173
8.1.3	大曲白酒典型生产工艺	173
8.1.4	几种大曲白酒的生产工艺技术	175
8.2	小曲白酒的固态发酵	177
8.2.1	先培菌糖化后发酵的半固态发酵法	177
8.2.2	边糖化边发酵的半固态发酵法	177
8.3	其他固态发酵白酒	178
8.3.1	麸曲白酒	178
8.3.2	生料固态发酵酿酒	179
8.4	固态发酵黄酒	179
8.4.1	黄酒的分类	179
8.4.2	传统黄酒生产工艺	180
8.4.3	黄酒的机械化生产	181
8.5	固态发酵食醋	182
8.5.1	食醋固态酿造的基本原理及工艺流程	182
8.5.2	山西陈醋	183
8.5.3	镇江香醋	184

参考文献	188
第9章 固态发酵食品	189
9.1 固态发酵酱油	189
9.1.1 酱油生产基本过程	189
9.1.2 酱油酿造微生物	189
9.1.3 米曲的培养	190
9.1.4 酱油固态发酵工艺	194
9.2 固态发酵酱	195
9.2.1 大豆酱	195
9.2.2 甜面酱	197
9.3 豆豉和纳豆的发酵	199
9.3.1 豆豉	199
9.3.2 纳豆	200
9.3.3 食品纤溶酶	201
9.4 腐乳和干酪	202
9.4.1 腐乳	202
9.4.2 干酪	204
9.5 腌菜类	204
9.5.1 腌菜发酵微生物	204
9.5.2 腌菜生产工艺	205
9.6 其他固态发酵食品	206
9.6.1 肉制品固态发酵	206
9.6.2 花粉的发酵破壁	207
参考文献	207
第10章 固态真菌培养技术和设备	209
10.1 食用菌	209
10.1.1 平菇培养技术	210
10.1.2 双孢菇	211
10.1.3 金针菇培养技术	214
10.2 药用真菌	215
10.2.1 槐栓菌培养技术	215
10.2.2 灵芝培养技术	217
10.2.3 云芝培养技术	219
10.2.4 蛹虫草子实体的人工栽培	221
10.3 真菌培养设备	223
10.3.1 传统生产设备	223
10.3.2 食用菌的机械化生产设备	224
10.3.3 实验室设备	226
参考文献	226
第11章 固态发酵在农业中的应用	227
11.1 固态发酵酶制剂	227
11.1.1 纤维素酶	227
11.1.2 植酸酶	230

11.2 固态发酵生物脱毒	231
11.2.1 豆粕发酵	231
11.2.2 棉籽饼粕	235
11.2.3 菜籽饼粕	237
11.3 固态发酵饲料	238
11.3.1 青贮饲料	238
11.3.2 固态发酵生物饲料	240
11.3.3 乳酸菌固态发酵饲料及在断奶仔猪生产中的应用	241
11.4 固态发酵生物农药	242
11.4.1 苏云金芽孢杆菌	242
11.4.2 白僵菌	243
11.4.3 绿僵菌	245
11.4.4 农用抗生素	245
11.5 固态发酵肥料	246
11.5.1 微生物肥料	246
11.5.2 有机堆肥	247
11.5.3 发酵床养殖(“零排放”养殖)	248
参考文献	252
第12章 固态发酵在其他行业的应用及设备	253
12.1 固态发酵技术在生物质能源领域的应用	253
12.1.1 淀粉质原料固态发酵乙醇	253
12.1.2 纤维乙醇	253
12.1.3 来自固态生物废弃物的生物质能源	257
12.2 固态发酵技术在环境保护中的应用	258
12.2.1 生物质废弃物的种类	258
12.2.2 微生物的作用机理	258
12.2.3 餐厨垃圾的堆肥技术	259
12.2.4 餐厨垃圾的沼气发酵技术	259
12.3 烟叶的固态发酵	261
12.3.1 烟叶发酵的本质	262
12.3.2 烟叶发酵工艺	262
12.3.3 烟叶发酵的得与失	262
12.4 茶叶的固态发酵	263
12.4.1 发酵茶的分类	263
12.4.2 发酵茶的制作工艺技术	263
12.5 中药发酵	265
12.5.1 中药发酵的分类	265
12.5.2 中药发酵的机理	266
12.5.3 中药发酵的优点	266
12.5.4 中药发酵方法	267
12.5.5 中药发酵注意事项	267
12.6 固态发酵技术在生物冶金中的应用	267

12.6.1	生物浸矿的含义	267
12.6.2	生物浸矿微生物及其培养	268
12.6.3	微生物浸矿反应工艺	269
12.6.4	浸矿生物反应器	270
	参考文献	271

第 1 章 绪 论

1.1 固态发酵的定义

固态发酵 (solid-state fermentation) 过程可定义为微生物在几乎没有游离可流动水的培养基质上的生长过程及生物反应过程。相对于液态发酵而言, 固态发酵培养基水分含量较低, 一般在 40%~60% (湿基)。但是物料含水量并不是界定固态发酵或液态发酵的唯一标准。有的固态发酵, 即使在物料含水量高的情况下 (如湿基含水在 70% 以上), 液态水也不能作为连续相存在, 物料吸水性非常好, 物料仍然呈现较好的固态特性, 这类发酵仍可称为固态发酵或半固态发酵。例如植物原料的青贮发酵或酸菜的发酵, 物料的含水量都很高, 但物料中的水大多是非游离的可流动水, 其液态性不明显。

固态发酵物料, 或称为基质 (substrate), 既是微生物生长的营养源, 又是微生物生长的微环境, 还是发酵产物的聚集地。基质包括各种谷物原料、腐朽的木材, 堆积的肥料或青贮饲料, 甚至包括土壤。组成培养基的成分大多数是大分子物质, 如淀粉、蛋白质或纤维素类物质。在反应器内的物料层 (fermenting bed), 则是微生物菌体、培养基及发酵产物的混合物。固态发酵反应器内的物料可分为两相: 固态相 (物料层) 和气相。宏观上固态发酵物料层可看成是均一相。但从微观上看, 物料层同时存在固、液、气 3 种物质状态: 固态基质、与固态基质紧密结合的液态相 (包括少量的游离水) 和物料颗粒间隙中的气相。在某些情况下 (如强制通风的填料床式固态发酵, 流化床固态发酵), 气流可贯穿物料层, 发酵物料颗粒 (不连续的固相) 可视为分布于气相为连续相的环境中。液态发酵反应器内虽然也包含两相, 即发酵液和分散在液相中的气泡。液态发酵罐内的顶空层, 虽是连续的气相, 但其对于发酵的传质传热影响很小, 一般不考虑其作用。半固态发酵, 如黄酒发酵、小曲酒发酵, 由于物料含水量较高, 在发酵过程中, 发酵基质的大分子逐渐被分解成小分子溶质, 半固态的物料逐渐转变为连续液相为主的状态。

有些固态发酵是微生物生长在惰性载体表面上进行生物反应的情况, 如固定化细胞, 惰性载体本身并不能被微生物利用, 这类似于有些固态发酵物料中所加入的填充物, 比如稻壳、麸皮、玉米芯等。这些填充料的加入, 起到疏松物料、便于透气的作用, 它们含有少量的可被微生物利用的营养物, 但大多是不可酶解的物质。这种情况, 也可归属于固态发酵范围。

由于在物料层内同时存在固、液、气三相, 故各相之间存在界面。由于发酵物料颗粒较小, 具有很高的比表面积 (表面积与体积之比); 这为水分、氧气-二氧化碳交换及热量传递提供了很大的交界面。随着发酵的进行, 固体颗粒变小或变成空心状, 菌体量增加。

1.2 固态发酵技术发展简史

固态发酵技术最早可能始于酒曲的制造及酿酒。晋代的江统在《酒诰》中写道: “酒之所兴, 肇自上皇, 或云仪狄, 又云杜康。有饭不尽, 委余空桑, 郁积成味, 久蓄气芳, 本出于此, 不由奇方”。在农业出现前后, 贮藏谷物的方法粗放。天然谷物受潮后会发霉和发芽, 吃剩的熟谷物也会发霉。这些发霉发芽的谷粒, 就是上古时期的天然曲蘖, 将之浸入水中, 便发酵成酒。人们受到自然发酵的启发, 开始人工制作酒曲并用之于酿酒。

固态发酵技术的演变, 可划分为两个阶段: 传统固态发酵技术和现代固态发酵技术。传统技术仍得到传承和演绎; 高质量的名优发酵产品, 传统固态工艺还具有不可替代的作用。

1.2.1 传统固态发酵技术

从世界范围来考察固态发酵技术的历史，固态发酵技术应用于食品的制造可能都是最早的固态发酵技术应用的实例。微生物在谷物上发霉的过程，即天然的固态发酵过程。在农耕时期的初期甚至早于农耕时期，人们便发现发霉的谷物会自行转化为甜美的酒，发酵的乳酪其风味优于普通的奶酪，这些发现都有可能促使人们开始观察发霉的过程，并尽量模仿其制法。《书经·说命篇》中有“若作酒醴，尔惟曲蘖”。“曲”的繁体字是“麴”，这个字形象地表明“麴”是麦子等谷物原料经霉（包）制而成的，即是发霉的谷粒制成的，麴本身既是糖化发酵剂，又是酿酒原料。

在长沙马王堆西汉墓中出土的帛书《养生方》和《杂疗方》中可看到我国先秦时期的药酒酿造工艺记载，这是迄今为止发现的最早的完整的酿酒工艺技术的文字记载。其中有一例“醪利中”的制法共包括了十道工序。从记载的酿造技术来分析，当时已采用固态法生产的酒曲作为发酵引物。而且还采用了两种酒曲，酒曲先浸泡，后取曲汁用于酿酒。

《周礼·官伯》记载王室“酱用百有二十缶”。从酱的生产用具来看，这也是一种半固态的发酵方式。在《齐民要术》中提到了“酱清”、“豆酱清”、“酱汁”和“清酱”。说明酱油在我国已有数千年的历史。酱油酿造过程中的两个重要步骤，即制曲和发酵都属于固态发酵。



图 1-1 山东诸城凉台出土东汉时期的画像砖——《庖厨图》中的酿酒画面

图 1-1 为山东诸城凉台出土的东汉时期的画像砖——《庖厨图》中的酿酒的场景，几乎把当时酿酒的全过程都表现出来了。包括以下工序：捣碎曲块、曲的浸渍、蒸饭、米饭和曲汁的混合、酒的发酵、酒的过滤、灌装。

制曲、酿酒、酱油生产是古代固态发酵技术的典范。这些技术流传至今数千年，仍然具有强大的生命力。在此主要以制曲技术为

例，介绍固态发酵技术的发展。在历史上，制曲技术经历了几次较重要的技术革新，现简介如下。

(1) 散曲 最早的酒曲培养法应是散曲，即用蒸熟的谷物，经微生物自然接种后培养的酒曲。在远古时代大多数曲采用此法生产。散曲的糖化发酵力不强。汉代王莽时期，官方规定酿酒时的曲米比例为 1:2，酒曲用量是米用量的 50%，说明酒曲糖化发酵力不高。

(2) 散曲到块曲的转变 由于散曲必须摊于地面或竹匾等，占地面积大。产量受限。而块曲制成一定的形状，可叠加起来，或放在容器内（夹在秸秆，草中）。块曲的发展，可能是当时已发现块曲的糖化发酵力高（应是根霉菌大量繁殖的结果）。

西汉杨雄所著的《方言》一书中有 7 个字是表示酒曲的。其中有些属于“饼曲”（即块状曲）。东汉的《四民月令》中记载了一例较为完整的制曲过程，这是有文字记载以来首例的制曲工艺的描述。

(3) 块曲制造技术的发展 东汉末的曹操时代，九酝春酒法，用曲 30 斤，可酿 9 石米，曲米比达到 1:30。到了北魏时代，贾思勰的《齐民要术》中共有 9 例酒曲制法的详细记载，都是块曲，块曲的制造有了专门的曲模，《齐民要术》中称为“范”，有铁制的圆形范，有木制的长方体范，其大小各异。如“神曲”是用手团成的，直径 2.5 寸，厚 9 分圆形块曲，还有一种被称为“笨曲”的则是用 1 尺见方、2 寸厚的木制曲模，用脚踏制而成^①。其中所记述的“神曲”的用量只占

① 东汉时计量单位与现代计量单位换算关系为：1 斤 = 222.73g，1 石 = 120 斤 = 26.728kg，1 寸 = 2.304cm，1 分 = 0.2304cm，1 尺 = 23.04。

米用量的3%左右，糖化发酵力已相当于现在的“小曲”，这充分说明当时的制曲技术已达到相当高的水平。

(4) 酒曲技术的成熟 唐宋时期的酒曲生产技术基本成型。北宋末期的朱肱著《北山酒经》，对当时的制曲酿酒技术进行了全面而精辟的总结。其中所提到的掌握制曲时的物料水分、温度、适时通风和翻料技术等，在现代也仍然有相当高的借鉴作用。

值得一提的是在北宋的《北山酒经》中则记载了一种制曲时人工接种的方式，即：“团成饼子，以旧曲末逐个为衣”。即把新制成的曲块团放在陈曲粉末上滚动一下，陈曲粉末便粘在新曲团的表面，陈曲末中因有大量的霉菌孢子，可以在曲团上迅速繁殖，形成生长优势。由于可以人为地选择质量较好的陈曲作为曲种，这就可以择优汰劣。通过年复一年的人工选育，自然淘汰，质量优越的曲种（实际上是微生物菌种）就保留下来了。

宋代出现红曲。因为红曲菌比米曲霉、黑曲霉和根霉更难培养，其培养技术更加复杂。但明代宋应星的《天工开物》和李时珍的《本草纲目》中详细记载的红曲制法，已在技术上基本上解决了许多技术难题。如曲种的添加，培养过程中的分段吃水，适时堆积及翻料等。见图1-2。

传统白酒的酿造是一种典型的固态发酵技术，在元代已有记载。大规模的生产始见于明代。无论是制曲（大曲），还是泥窖或陶缸发酵，均属固态发酵。白酒固态发酵，采用地窖为发酵容器，大（小）曲为糖化发酵剂，最早实施了边糖化边发酵的工艺；采用填充料（谷糠），既稀释了淀粉的浓度，又可作为吸附剂，将发酵所产生的易挥发酒精吸附在这些填料中。这些技术至今仍是中國白酒的主流方法。

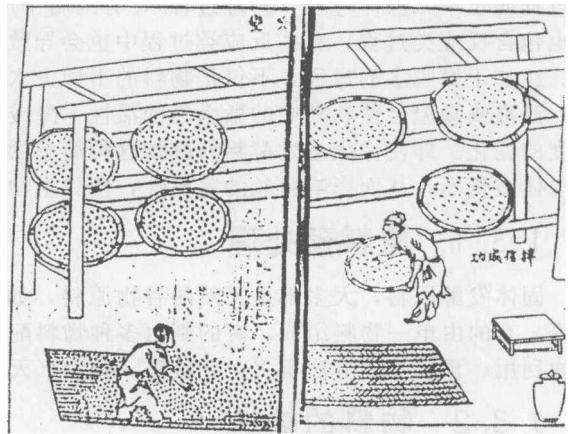


图1-2 明代红曲的制造过程

中国人民在数千年前即开始观察、采食食用菌的实践活动。食用菌的生产也源远流长，在东汉时期已有了人工栽培食用菌的记载；公元14世纪的元朝期间，食用菌栽培已经积累了丰富的经验。当前世界范围大量栽培的食用菌中，大多起源于我国。

在西方，传统的固态发酵技术除了奶酪的固态发酵之外，还有青贮技术和堆肥技术。青贮技术是将农产品在中温进行厌氧乳酸菌发酵；而堆肥技术则是先在中温下继而在高温下利用嗜热菌对固态有机物进行处理。所涉及的微生物不仅有霉菌，还有细菌和放线菌。

1.2.2 近现代固态发酵技术

中国传统固态发酵技术在古代便传入日本，一些固态发酵产品，如清酒、日本烧酎、纳豆、酱油、食醋的生产都带有中国固态发酵技术的烙印。近代以来，日本的固态发酵技术在某些领域领先于中国。比如，日本早于中国开始进行了固态发酵产品中微生物的分离工作。

1891年，日本人Takamine首次将米曲的培养技术引入到美国。当时将这种米曲称为Taka-Koji。当时已采用转鼓式反应器来大规模生产米曲。1913年，在加拿大ONTARIO的Hiram Walker & Sons工厂，就采用Taka-Koji替代麦芽用于生产蒸馏酒。

中国在酒曲方面开展工作则是在20世纪30年代左右。这也是中国科学家在微生物学及发酵领域应用现代科学技术最早从事的研究领域之一。

20世纪中叶以来，固态发酵生产抗生素、有机酸、酶制剂、生物饲料、生物农药、食用菌和微生物固态发酵生物堆肥等新型固态发酵产品需求量激增，针对这些产品的固态发酵技术和设备及辅助设备的发展日新月异。在固态发酵设备方面形成了浅盘式、填料床式、转鼓式、间歇搅拌及通

风的圆盘制曲机、气相双动态固态发酵装置等几大系列的设备。在固态发酵理论方面，以巴西学者 David Mitchell 等为代表，开展了大量的基础性研究，他们较系统地研究了固态发酵微生物生长动力学、基质消耗及产物形成动力学、热量传递、质量传递的规律，并结合小型或中试规模的试验，推导出了一批固态发酵工程设计及计算的数学模型。

1.3 固态发酵基本过程

固态发酵生产的基本过程包括原料的预处理阶段（备料、成型、灭菌、物料降温、进料）、菌种扩培阶段、菌体生长阶段（包括孢子萌发阶段）、发酵阶段（发酵控制，如通风、控温、控湿、搅拌翻料）、后处理阶段（出料、浸泡及产品提取、烘干、磨粉或磨浆、灭菌处理等操作）。有的操作过程属于单元操作过程（物理过程），有的属于反应类过程（生物化学过程）。有的单元操作过程中也包含反应类过程；有些反应类过程中也会导致物理变化；这些单元操作过程和反应过程相互影响。比如干燥脱水的过程，不仅是物料的干燥失水过程，而且物料中的微生物也会因干燥脱水而死亡；升温或降温会使物料中的微生物的活性下降或上升，使酶活力下降或增强，从而导致生物反应速度的变化。即使像固态发酵物料翻拌这种简单的操作，也会因物料的翻拌而导致蔓延在物料中的菌丝体被折断，从而影响菌丝的完整性，使其生物活性变差。

1.3.1 原料预处理

固体发酵原料，大多都是天然的谷物原料，如小麦、稻米、大豆（或豆粕）、麸皮、木屑和秸秆等。有的由单一物料组成，有的则由多种物料配成。原料预处理的目的是使这些原料更适合被微生物利用。预处理的方法很多，如破碎、蒸煮（灭菌）、压制成型（块曲制造）、冷却等。

1.3.2 物料的输送

大多数情况下，发酵物料的预处理、发酵和后处理 3 个过程是分别在不同的设备中完成的，故物料的输送是必需的。固态类物料的流动性能差，其输送不像液态发酵那样可完全用泵输送。固态物料输送的方式很多，有关内容在第 2 章将详细介绍。

1.3.3 菌种扩培

固态发酵的微生物，有的是天然接种，有的是人工培养后接种。

固态发酵所接种的菌种，有液态种和固态种两类。其扩大培养有固态种曲和液态种两种方式。菌种扩大培养的相关内容将在第 3 章介绍。

1.3.4 固态发酵过程及控制

固态发酵是微生物在几乎没有游离水的固态培养基上生长、代谢，并产生代谢产物的过程。基本上属于生物反应类过程。固态发酵生物反应器的种类很多，有关内容将在第 4 章介绍。根据发酵的目的，固态发酵分为两种基本类型：①以微生物（及孢子）的培养为目的；②以酶解反应及代谢产物的生产为目的。比如以菌种培养为目的的种曲的培养过程、食用菌的繁殖属于第一种类型。但有的过程既包含微生物的培养，也包括酶解、大分子生物合成反应等。如酒曲的培养和酱油米曲的培养，既包含原料的部分酶解反应，也包括生物大分子酶的合成的反应。而固态白酒的发酵，酱油的发酵，则以曲中各种酶系降解原料中的淀粉和蛋白质，生成小分子化合物的反应为主。

固态发酵过程涉及物质的传递和热量的传递。由于固态物料的非均质性及不同固态发酵反应器的特点，物质和热量传递呈现非常复杂的规律，故不能用液态发酵的模式来解决其问题。例如，发酵物料温度的控制，既有热传导机制，更有对流传热机制发挥作用。这将在第 5 章予以重点介绍。发酵温度、物料的水分、通风，搅拌（或物料的翻料）及空气湿度、物料的 pH 值是最重要的控制条件，其详细的内容将在第 7 章介绍。

1.3.5 固态发酵产品的后处理

应根据不同的产品类型采用不同的后处理方式。后处理的主要操作单元包括：烘干、磨粉、筛分、灭菌、调配、分装等。有些固态发酵产品，如酒曲和酱油米曲是粗酶制剂，酶和发酵基质混为一体，而且发酵产品中含有的残余蛋白质和淀粉等营养物质，可作为进一步的发酵原料，这类发酵产品只需经过简单的加工处理（如磨粉或干燥）就可直接投入到下一阶段的生产。也有的固态发酵产品和固态发酵基质需先行分离提纯，如固态发酵酶制剂、氨基酸、有机酸、抗生素等需通过浸泡，使产物转移到水溶液中。再通过压榨，将固形物分离掉。有些固态发酵产品是挥发性的，如传统的白酒发酵，需通过蒸馏，纯化挥发性产物。这部分内容也将将在第7章加以介绍。

1.4 固态发酵的特点

Viniegra-Gonzalez^[1]总结了固态培养特点，认为固态发酵物料的水活度低。由于固态发酵物料的颗粒特性、颗粒粒径大小不同的特性、菌丝缠绕导致物料结块特性，使基质的混合和扩散都较困难，容易形成温度、基质浓度及产物浓度的梯度。由于固体物料的比热容值比水的比热容值要小得多，且物料水分含量低，故物料热传导系数很小。但单位体积发酵基质的产热量却较多。氧气和其他非极性气体的溶解度和扩散性较好。霉菌的固体培养，比液态培养更容易产生孢子。某些霉菌在固态培养状态下产生的酶更多，次级代谢产物的产率更高，如青霉素、赤霉素。但固体培养，菌体量的测定比较困难。

固态发酵多是开放式发酵系统，比较容易进行多菌种的混合发酵。我国许多的发酵产品是多菌种发酵，随着微生物发酵的不断进行，培养基的生态环境发生变化，微生物的种群会按一定的规律发生演变。也可以说，传统固态发酵易污染杂菌。

许多固态发酵，只需在选定的谷物原料中加适量的水就能制成微生物可以生长的培养基，不像液态发酵的培养基那样复杂。由于固态物料的水分含量较低，水活度值较低，杂菌不易生存。即使染菌，对固态发酵的影响也相对较小。有的固态发酵产品，无需提取纯化，直接可用于生产或直接使用。相对于液态发酵来说，传统固态发酵方式，能量消耗低，生产成本低；但传统固态发酵手工操作较多，故劳动强度大。

Durand 等对固态发酵和液态发酵的特点进行了比较。见表 1-1。

表 1-1 固态发酵和液态发酵的比较^[2]

项 目	固 态 发 酵	液 态 发 酵
培养基质水分含量	低	高
水活度	较低的水活度，杂菌因此而不易生长	水活度高，许多微生物都可生长
培养基	原料种类少，但成分不完全明确，无机盐种类要求不多；培养基体积分数高，高基质浓度导致产品浓度高，故体积生产率高	由多种纯度高、化学物质明确的组分配合而成，培养基体积分数较低，故体积生产效率较低；高基质浓度导致流体流变学的问题，需要流加培养
通风问题	由于物料层压力降较小，故通风动力消耗不大	需要高压空气，从气相到液相的传氧系数较小
混合问题	颗粒内的混合是不可能，微生物的生长主要受到营养物质的扩散问题	可剧烈搅拌，营养物质的扩散不是制约微生物生长的主要因素
产热	代谢热的去除较为困难，常导致过热	水的相对含量高，发酵液温度控制较容易
控制	由于在线测定及菌体量的测定不易进行，发酵过程控制很困难	许多在线检测已经实用化或正在研发中，易检测菌体量，易自动控制
下游过程	由于体积产物浓度较高，下游处理较容易进行，萃取时易污染基质成分	产物浓度相对稀，下游过程需分离掉大量水分，产品的纯化相对较易
污染	没有大量的水污染	产生大量的废水
动力学研究	微生物生长动力学和传递动力学研究不够	微生物生长动力学和传递动力学研究充分，可用于指导发酵反应器的设计和放大