

高等学校教材

食品工程技术原理

宋纪蓉 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

食品工程技术原理

宋纪蓉 主 编

曹 炜 徐抗震 副主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程技术原理/宋纪蓉主编. —北京: 化学工业出版社, 2005.2
高等学校教材
ISBN 7-5025-6432-2

I. 食… II. 宋… III. 食品工程学 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 136123 号

高等学校教材

食品工程技术原理

宋纪蓉 主编

曹 炜 徐抗震 副主编

责任编辑: 何 丽

文字编辑: 伊守亮

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘 峰

*

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)

发行电话: (010) 64982530

<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 17 1/4 字数 424 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6432-2/G·1640

定 价: 30.00 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

前 言

近年来,食品加工技术的发展日新月异,我们每天都得益于食品新工艺的发展和应用,很多食品都是采用新工艺、新技术加工生产出来的。在国外,很多著名大学的食品科学与工程专业的同类课程内容包括了新工艺、新技术,如生物发酵技术、辐射加工技术、超滤技术、微波与远红外技术、微胶囊造粒技术、膨化技术和超临界萃取技术等内容。在国内,食品加工技术领域的新工艺和新技术还没有系统地编写成教材。特别是我国食品工业迅速发展,急需大量掌握新技术和新知识的应用型人才。因此建设新教材,传授新知识显得尤为重要和迫切。

食品工程技术原理是食品科学与工程本科专业学生必修的专业基础课。我们根据普通高等院校本科专业目录和专业介绍(1998年颁布)中关于食品科学人才培养的目标,即本专业培养具有化学、生物学、食品工程和食品技术知识,能在食品领域内从事食品生产技术管理、质量控制、产品开发、科学研究、工程设计等方面工作的食品学科的高级工程技术人才,结合西北大学食品科学与工程专业的科研优势和教学经验,经反复修改完成了这本内容新、涵盖内容广的教材。书中既有教学基本要求的内容,又有深入提高的内容,还有一些拓宽知识面的内容。全书12章的内容适合多学时教学之用,对于中等学时可以不讲授“食品的生物技术”一章;而对于少学时还可以不讲授“食品的微波与远红外加工技术”、“食品的微胶囊造粒技术”和“食品的膨化技术”等章节。不同学校可根据各自教学情况选学。

本书由宋纪蓉主编,曹炜、徐抗震副主编。参加书稿整理、审校、作图的有黄洁、马海霞、陈卫军、任莹辉、杜晓丹、王花丽、王勇、厉闾、庞伟等。

本书作为面向21世纪教学改革成果,经西北农林科技大学、陕西师范大学和陕西科技大学等高校从事食品科学与工程专业教学的专家审阅,提出了很好的修改建议,在此向关心本书的各位同仁表示谢意,同时欢迎读者对本书提出批评和建议。

编者

2004年9月

目 录

第1章 食品的干燥技术	1
1.1 概述	1
1.1.1 食品物料中水分存在的形式	2
1.1.2 食品物料湿含量的表示方法	3
1.1.3 水分活度	3
1.1.4 水分活度与食品的保藏性	4
1.1.5 干燥介质的特性	4
1.1.6 食品物料与干燥介质间的平衡关系	6
1.1.7 干燥机理	7
1.2 食品的冷冻干燥技术.....	10
1.2.1 冷冻干燥的原理.....	11
1.2.2 冷冻干燥装置.....	15
1.3 食品的喷雾干燥技术.....	16
1.3.1 雾化形式及喷雾器.....	17
1.3.2 喷雾干燥室和液滴在干燥室中的干燥.....	20
1.3.3 喷雾干燥装置系统.....	21
1.3.4 喷雾干燥与食品加工.....	24
第2章 食品的保藏技术	27
2.1 化学保藏.....	27
2.1.1 食品的腌渍保藏.....	27
2.1.2 食品的烟熏保藏.....	32
2.1.3 化学保藏剂保藏.....	34
2.2 物理保藏.....	35
2.2.1 辐照保藏.....	35
2.2.2 高压技术保藏.....	36
2.2.3 冷冻保藏.....	37
2.2.4 干燥和脱水保藏法.....	40
2.3 食品的包装和保藏.....	40
2.3.1 食品的包装材料.....	40
2.3.2 食品的包装方法.....	42
2.3.3 包装食品的杀菌.....	45
2.3.4 无菌包装.....	47
第3章 食品的保鲜技术	49
3.1 化学保鲜技术.....	49

3.1.1	概述	49
3.1.2	食品防腐剂	49
3.1.3	食品杀菌剂	51
3.2	气调保鲜技术	53
3.2.1	基本原理	53
3.2.2	气调储藏对鲜活食品生理活动的影响	53
3.2.3	气调保鲜的条件与管理	56
3.2.4	气调冷藏库	57
3.2.5	薄膜封闭层气调方法	59
3.3	涂膜保鲜技术	62
3.3.1	涂膜的基本原理	62
3.3.2	果蔬涂膜保鲜剂的种类	62
3.3.3	涂膜方法	64
3.3.4	涂膜处理存在问题及发展方向	65
3.4	植物激素和植物生长调节剂保鲜法	65
3.4.1	影响果蔬成熟的主要原因	65
3.4.2	乙烯	66
3.4.3	其他激素	67
3.5	食品的其他保鲜技术	68
3.5.1	减压保鲜技术	68
3.5.2	钙处理保鲜技术	68
第4章	食品的辐照加工技术	70
4.1	概述	70
4.1.1	食品辐照技术的概念	70
4.1.2	食品辐照技术的发展	70
4.1.3	食品辐照加工技术的优点	70
4.2	辐照产生的效应和对食品成分的影响	71
4.2.1	辐照源	71
4.2.2	辐照产生的基本效应	72
4.2.3	辐照对食品质量的影响	72
4.3	影响辐照加工效果的因素	76
4.4	辐照技术在食品加工中的应用	78
4.4.1	辐照杀菌	78
4.4.2	食品的辐照保藏与保鲜	79
4.4.3	辐照食品的安全性评价	80
第5章	食品的杀菌技术	82
5.1	概述	82
5.2	新型超高温杀菌技术	82
5.2.1	超高温杀菌的基本原理	83
5.2.2	UHT 杀菌食品的类型及其杀菌装置和效果	86

5.3 欧姆加热法超高温杀菌	90
5.3.1 欧姆加热原理	90
5.3.2 连续作业的欧姆加热装置及结构	91
5.3.3 欧姆加热、杀菌、无菌包装一体化系统	91
5.4 超高压杀菌技术	93
5.4.1 超高压杀菌技术的原理	94
5.4.2 瞬变高压与中温协同杀菌	96
5.5 脉冲强光杀菌技术	97
5.5.1 脉冲强光的原理	97
5.5.2 脉冲强光设备	98
5.5.3 脉冲强光杀菌的应用	99
5.6 超声波杀菌技术	100
5.6.1 超声波及其特性	100
5.6.2 超声波与物质的相互作用	101
5.6.3 超声波杀菌技术效果及影响因素	103
5.7 磁场杀菌技术	105
5.7.1 磁场的生物效应	105
5.7.2 磁场的杀菌技术	106
5.8 高压脉冲电场杀菌技术	109
5.8.1 脉冲电场杀菌的机理	109
5.8.2 脉冲电场杀菌技术的应用	111
5.9 感应电子杀菌技术	113
第6章 食品的微粒化技术	115
6.1 食品微粒化的原理	115
6.1.1 粉碎力的种类与形式	116
6.1.2 物料的力学性质	116
6.1.3 物料在粉碎过程中的变化	116
6.1.4 微粒化的能耗假说	117
6.1.5 微粒化动力学	120
6.2 食品微粒化的方法	120
6.3 粒度分布的测定原理与方法	121
6.3.1 粉碎物料的粒度与粒度分布	121
6.3.2 粒度分布的测定及其原理	124
6.4 食品的超微粉碎技术	126
6.4.1 超微粉碎技术的特点	126
6.4.2 超微粉碎设备及其原理	126
6.5 超微粉碎技术在食品中的应用	131
6.5.1 超微粉碎技术在巧克力生产中的应用	131
6.5.2 超微粉碎技术在功能性食品基料生产中的应用	133
6.5.3 超微粉碎技术在保健食品生产中的应用	135

6.5.4 超微粉碎技术在其他产品加工中的应用	137
第7章 食品的分离技术	138
7.1 食品的膜分离技术	138
7.1.1 膜分离的基本原理	138
7.1.2 分离膜应具备的条件	139
7.1.3 膜分离的特点	140
7.1.4 膜的种类、制备及维护	140
7.1.5 膜分离技术在食品工业中的应用	142
7.1.6 膜材料的开发趋势	144
7.2 食品的超临界萃取分离技术	144
7.2.1 超临界萃取的基本原理	145
7.2.2 超临界流体的选择	146
7.2.3 超临界流体的辅助溶剂效应	146
7.2.4 超临界流体萃取的工艺类型及装置	147
7.2.5 超临界萃取工艺在食品工业中的应用	148
7.2.6 超临界萃取技术的不足之处及应用前景	150
7.3 食品的液膜分离技术	151
7.3.1 液膜的基本概念	151
7.3.2 液膜体系及其所包裹的内相	152
7.3.3 液膜的分离机理	154
7.3.4 影响液膜稳定性和分离效果的因素	156
7.3.5 液膜分离技术的特点	156
7.3.6 液膜分离技术在食品工业中的应用	157
7.4 食品的分 子蒸馏分离技术	158
7.4.1 分子蒸馏的原理	158
7.4.2 分子蒸馏的过程	159
7.4.3 分子蒸馏的装置	159
7.4.4 分子蒸馏技术的特点	160
7.4.5 分子蒸馏技术在食品工业中的应用	161
7.4.6 分子蒸馏分离技术的应用前景	161
第8章 食品的浓缩与结晶技术	163
8.1 食品浓缩的分类和目的	163
8.2 食品的蒸发浓缩技术	163
8.2.1 蒸发浓缩的分类	164
8.2.2 蒸发浓缩过程对食品物料的影响	164
8.2.3 蒸发器的类型及选择	165
8.2.4 蒸发浓缩过程的节能与多效蒸发	165
8.3 食品的冷冻浓缩技术	169
8.3.1 冷冻浓缩的理论基础	170
8.3.2 冷冻浓缩的分类	171

8.3.3 冷冻浓缩的应用	172
8.4 食品的膜浓缩技术	174
8.4.1 膜浓缩的种类及操作原理	174
8.4.2 膜浓缩在食品中的应用	177
8.4.3 影响膜浓缩的因素	180
8.5 食品的结晶技术	182
8.5.1 结晶的基本原理	182
8.5.2 结晶方法	189
8.5.3 结晶过程的品质控制	191
第9章 食品的微波与远红外加工技术	195
9.1 微波加热的原理与特点	195
9.1.1 微波加热的基本原理	195
9.1.2 微波加热的特点	196
9.1.3 影响微波加热的主要因素	196
9.2 食品的微波杀菌技术	197
9.2.1 食品微波杀菌的机理	197
9.2.2 食品微波杀菌的应用	198
9.3 食品的微波干燥技术	199
9.3.1 微波干燥特点和机理	199
9.3.2 食品微波真空干燥	201
9.3.3 食品微波冷冻干燥技术	203
9.4 食品的微波保鲜技术	204
9.4.1 荔枝微波杀菌保鲜技术	204
9.4.2 微波在月饼保鲜中的应用	205
9.5 微波技术在其他食品加工中的应用	205
9.5.1 食品的微波烹调	205
9.5.2 食品的微波膨化	206
9.5.3 食品的微波解冻	206
9.5.4 食品的微波焙烤	207
9.6 食品的远红外加工技术	208
9.6.1 远红外加热的原理与特点	208
9.6.2 远红外技术在食品中的应用	210
第10章 食品的微胶囊造粒技术	212
10.1 基本概念	212
10.2 微胶囊的功能与局限	213
10.2.1 微胶囊的功能	213
10.2.2 微胶囊的局限	214
10.3 微胶囊造粒的步骤与分类	215
10.3.1 微胶囊造粒的步骤	215
10.3.2 微胶囊造粒的分类	215

10.4 微胶囊的释放	215
10.4.1 释放方法	215
10.4.2 释放模型	215
10.4.3 释放机理	216
10.5 微胶囊造粒技术的应用	216
10.5.1 微胶囊造粒技术在固定化酶和固定化细胞上的应用	217
10.5.2 微胶囊技术在传统液体产品固体粉末化过程中的应用	220
10.5.3 微胶囊技术在食品添加剂包囊化过程中的应用	222
第11章 食品的膨化技术	225
11.1 概述	225
11.1.1 膨化技术和膨化食品的发展概况	225
11.1.2 食品膨化技术的特点	225
11.2 挤压膨化技术原理	226
11.2.1 挤压膨化的基本原理	226
11.2.2 物料在挤压膨化过程中的变化	227
11.3 影响挤压膨化效果的因素	228
11.3.1 原料对膨化加工的影响	228
11.3.2 膨化设备对膨化加工的影响	229
11.4 物料在膨化过程中的变化	229
11.4.1 淀粉在膨化过程中的变化	229
11.4.2 可发酵性糖在膨化过程中的变化	231
11.4.3 纤维素在膨化过程中的变化	231
11.4.4 蛋白质在膨化过程中的变化	232
11.4.5 脂类物质在膨化过程中的变化	232
11.4.6 维生素在膨化过程中的变化	233
11.4.7 挤压过程中其他成分的变化	233
11.5 挤压膨化设备	234
11.6 挤压膨化技术在粮食深加工中的应用	235
11.6.1 在谷类食品加工中的应用	235
11.6.2 在发酵工业中的应用	235
11.6.3 在植物油脂工业中的应用	235
11.6.4 挤压膨化食品生产实例	236
11.7 气流膨化	236
第12章 食品的生物技术	238
12.1 食品的微生物发酵技术	238
12.1.1 食品加工相关的微生物	238
12.1.2 微生物的营养与代谢	239
12.1.3 影响微生物发酵的因素	240
12.1.4 发酵技术在食品工业中的应用	241
12.2 食品的酶处理技术	243

12.2.1 酶的化学本质及催化特性.....	243
12.2.2 食品工业用酶的来源和安全要求.....	244
12.2.3 酶处理技术在食品工业中的应用.....	246
12.2.4 酶技术应用前景.....	250
12.3 动植物细胞培养技术.....	252
12.3.1 动植物细胞培养技术基础.....	252
12.3.2 动植物细胞的生长与代谢.....	254
12.3.3 动植物细胞培养技术在食品工业中的应用.....	257
12.4 食品工业废弃物处理与利用.....	258
12.4.1 食品加工废物的回收和利用.....	259
12.4.2 食品工业废水的处理及排放.....	261
参考文献	265

第 1 章 食品的干燥技术

1.1 概述

脱水是保存食品最古老的方法。水果在太阳下暴晒，鱼和肉的熏烤等都是源于古代的干燥方法。食品干燥最主要的问题是水分的蒸发。干燥食品质量的减轻，方便运输，但是由于大部分传统干燥工艺采用高温干燥，干燥食品在质量上也有所下降。而消费者对食品质量的要求是：干燥后的产品能保留原有的色、香、味，而且食用方便。目前，许多新型干燥技术利用低温或减少干燥时间等，满足上述要求。另外，运用这些新技术还可以帮助产品产生独特的风味。

食品的干燥过程涉及复杂的化学、物理学和生物学的变化，对产品品质和卫生标准要求很高，有些干燥制品还要求具有良好的复水性。因此要根据物料的性质（黏附性、分散性、热敏性等）和生产工艺要求，并考虑投资费用、操作费用等经济因素，正确合理地选用不同的干燥方法和相应的干燥装置。

食品工业中的许多原料和半成品含有大量的水分，为使产品具有良好的保藏性并节约运输费用，要求尽可能降低其水分含量。从物料中除去水分是食品生产过程中常遇到的过程，也称为去湿。去湿所采用的方法主要有机械去湿、物理化学去湿和利用热能去湿三种。

机械去湿 是利用压榨、沉降、过滤、离心分离等方法去湿，应用于含水较多的物料。从能量利用的角度看较为经济，但一般机械方法脱水是有一定限度的，往往在机械去湿后尚需利用热能做出进一步的脱水。

物理化学去湿 是用吸湿性物质如石灰、无水氯化钙等进行吸附去湿，一般只用于少量水分的去除。

热能去湿 是使物料中的水分汽化，并由惰性气体带走或真空抽走的方法，简称为干燥。狭义的干燥是从固体物料中将水汽化除去的过程，广义的干燥则还包括将溶液、浆料等液态物料中的水汽化并制得固体物料的过程。

干燥是食品工业中应用最广泛的单元操作之一。果蔬的干制，奶粉的制造，面包、饼干的烘烤，淀粉的制造以及酒糟、酵母、麦芽、砂糖等的干燥都是典型的例子。

干燥可分为常压干燥和真空干燥两类。前者采用热空气或烟道气作为干燥介质，将汽化的水分带走；后者则用真空泵将水蒸气抽吸除去。

欲使水分汽化，必须将物料加热，根据传热方式的不同，又可分为以下三种干燥方法。

(1) **对流干燥（热风干燥）** 以热空气为热源，即对流传热将热量传给物料，同时又将汽化水分带走。热空气既是载体，又是载湿体。热风干燥一般多在常压下进行。

(2) **传导干燥** 靠间壁的导热将热量传给物料，热源可以是水蒸气、热水、热空气等。在常压下操作时，物体与气体间虽有热交换，但气体主要起载湿体的作用。传导干燥也可在真空下进行。

(3) **辐射干燥** 利用红外线、微波等作为热源，将热量传给物料，此方法与传导干燥的

不同仅在于热源的不同。

此外，食品工业中还常常应用两种干燥方法：一种是冷冻干燥，即先将水冻成冰，然后使其升华；另一种是喷雾干燥，常用于液体的干燥。这两种干燥方法在原理和方法上有其特殊性，而且在食品工业中有着非常重要的应用。

1.1.1 食品物料中水分存在的形式

食品物料是水分同固体间架之间以不同形式相结合的体系。通常只是简单地将食品物料中的水分分为结合水和非结合水。但食品物料的体系类似于胶体体系，其中的水分子处在间架分子力场中，且水分子随间架距离的增大，它们之间的结合力逐渐减弱。因此按水分与物料间架的结合形式可以将物料中的水分划分为以下几种。

(1) 化学结合水 经过化学反应后，按严格的数量比例，牢固地同固体间架结合的水分，只有在化学作用或特别强烈的热处理（如煅烧）才能除去，除去它的同时会造成物料物理性质和化学性质的变化，即品质的变化。化学结合水在物料中的含量较少。如晶体中的结晶水，这种水分不能用干燥方法除去，化学结合水的解离除去不应视为干燥。

(2) 物理化学结合水 包括吸附水分、渗透水分和结构水分，其中以吸附水分与物料的结合最强。

吸附结合水是指在物料胶体微粒内、外表面上因分子吸引力而被吸着的水分。胶体食品物料中的胶体颗粒与其他胶体相比，具有同样的微粒分散度大的特点，使胶体体系中产生巨大的内表面积，从而有极大的表面自由能，靠这种表面自由能产生了水分的吸附结合。

结构结合水是指当胶体溶液凝固成凝胶时，保持在凝胶体内部的一种水分，它受到结构的束缚，表现出来的蒸气压很低。果冻、肉冻凝即属此例。

渗透压结合水是指在溶液和胶体溶液中，被溶质所束缚的水分。这一作用使溶液表面的蒸气压降低，且溶液的浓度越高，溶质对水的束缚力越强，水分的蒸气压越低，水分越难以除去。

(3) 机械结合水 是食品湿物料内的毛细管中保留和吸着的水分以及物料外表面附着的湿润水分。这些水分依靠表面附着力、毛细力和水分黏着力而存在于湿物料中，这些水分的饱和蒸气压与纯水的饱和蒸气压几乎没有区别，在干燥过程中既能以液体形式又能以蒸汽的形式移动。

物料中水分与物料的结合力越强，水分就越难除去；反之，如结合力较小，则较易除去。因此，可以根据水分除去的难易，将水分分为结合水和非结合水。

非结合水分 是指结合力极弱的水分，水分活度近似等于1，即这种水分所产生的蒸气压和纯水在同温度下产生的蒸气压相近。属于非结合水的有上述机械结合水中的表面润湿水分和孔隙中的水分。

结合水分 主要是物化结合的水分及机械结合中的毛细管水分，水分活度小于1。由于结合时所产生的蒸气压低于同温度纯水所产生的蒸气压，结合水分中的吸附结合水多是胶体质点和其周围介质的界面上所吸附的水分。因胶体具有很大的表面积，故胶体结构的吸附能力很强，吸附结合水很多，吸附水分与物料的结合力很大。水分的吸附伴随着放热反应，称为水合热。渗透水分、结构水分与吸附水分不同，其主要区别在于结合有无放热反应，且结合力较吸附水分小。

结合水分与非结合水分的基本区别是其平衡蒸气压不同。非结合水的性质与纯水相同，其表现的平衡蒸气压即为同温度下纯水的饱和蒸气压。结合水则不同，因化学和物理化学因

素的影响,所表现的蒸气压低于同温度下的纯水的饱和蒸气压。

食品湿物料在干燥中所除去的水分主要是机械结合水和部分物理化学结合水。在干燥过程中,首先除去的是结合力最弱的机械结合水,然后是部分结合力较弱的物理化学结合水,最后才是结合力较强的物理化学结合水。在干制品中残存的是那些结合力很强,难以用干燥的方法除去的少量物理化学结合水和化学结合水。

1.1.2 食品物料湿含量的表示方法

食品湿物料无论是液态还是固态,无论其中水分以何种形式存在,均是固相与水的混合体系。在干燥工艺计算上,湿物料中的水分含量有两种表示方法:一种是湿基湿含量 w ,另一种是干基湿含量 w' 。

1.1.2.1 湿基湿含量

是以湿物料为基准,湿物料中水分占总质量的百分比。

即
$$w = \frac{m}{m_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 w ——湿基湿含量, %;

m ——水的质量, kg;

m_0 ——湿物料的总质量, kg。

干燥过程中,湿物料的总质量因失去水分而逐渐减小,因此用湿基水分含量进行计算时很不方便,而采用干基湿含量的表示方法。

1.1.2.2 干基湿含量

以不变的干物质为基准,指湿物料中水分与干物质质量的百分比。

即
$$w' = \frac{m}{m_c} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 w' ——干基湿含量, %;

m_c ——湿物料中干物质的质量, kg。

上述两种湿含量的换算关系如下:

$$w = \frac{w'}{1 + w'} \quad (1-3)$$

$$w' = \frac{w}{1 - w} \quad (1-4)$$

1.1.3 水分活度

水分与物料之间存在着各种各样的结合水,由拉乌尔定律可知,物料表面水分的蒸气压比同温度下纯水的蒸气压低,且不同的物料由于固相组成的差异,即使具有相同的水分含量,在同一温度条件下,物料表面的水分蒸气压也不相同。为了综合说明物料中水分的这一性质,提出了水分活度的概念。

水分活度(A_w)是指物料表面水分的蒸气压与相同温度下纯水的饱和蒸气压之比。

即
$$A_w = \frac{p_v}{p_s} \quad (1-5)$$

式中 A_w ——水分活度;

p_v ——物料表面水分的蒸气压, Pa;

p_s ——同温度下纯水的饱和蒸气压, Pa。

物料中自由水的蒸气压与同温度纯水的蒸气压接近,所以它的活度接近于1。对于理想的结合力为无限大的水分,其蒸气压可假设为0,所以其水分活度也趋近于0。实际上食品

物料中水与固相结合力不同，它们的水分活度在 0~1 之间。温度不变， A_w 增大表示了物料中水分汽化能力的增大，水分透过细胞膜的渗透能力增大，水分在物料内部扩散速率增大。物料湿含量与水分活度之间的关系不仅与温度有关，而且与食品物料的种类有关。

1.1.4 水分活度与食品的保藏性

食品的腐败变质通常是由微生物作用和生化反应所造成的，任何微生物进行正常的生长繁殖以及多数生化反应都需要以水作为溶剂或介质。由于微生物种类不同，对环境水分含量的要求也各不相同，但它们所能利用的水分主要是物料中的非结合水分，也称之为有效水分，只有有效水分才能被微生物、酶和化学反应所触及。有效水分可用水分活度进行估计。

1.1.4.1 干燥对微生物的作用

微生物生长繁殖与水分活度之间的依赖关系见表 1-1。从食品物料的角度而言，多数新鲜食品的水分活度在 0.99 以上，适合各种微生物生长。只有当水分活度降至 0.75 以下，食品的腐败变质才显著减慢；水分活度降至 0.70 以下，物料才能在室温下进行较长时间的储存。

表 1-1 微生物与水分活度的关系

A_w	微生物生长状况	A_w	微生物生长状况
<0.94	大多数细菌不能生长繁殖	<0.74	大多数霉菌不能生长繁殖
<0.85	大多数酵母不能生长繁殖	<0.62	几乎没有能够生长繁殖的微生物

目前的干燥方法通常采用的干燥温度不是很高，即使是高温干燥，因脱水时间极短，微生物只是随着干燥过程中水分活度的降低慢慢进入休眠状态。因此食品干燥过程不能代替食品必要的灭菌处理，应该在干制工艺中采取相应的灭菌措施，以保证干制品安全卫生，并延长货价寿命。

1.1.4.2 干燥对酶的作用

食品变质的原因除由微生物引起外，还常常因其自身酶的作用所造成。在通常的干燥过程中，初期酶的活性有所提高，是由于水分的减少造成基质浓度、酶浓度的提高造成的。此时因物料仍持有一定水分且温度并不高，因此酶的作用仍可继续。随着干燥过程的延伸，物料温度升高，水分含量进一步降低，酶的活性也逐渐减低。只有当水分含量降低到 1% 以下时才能完全抑制酶的活性，而通常的干燥很难达到这样低的水分含量。同干燥对微生物的作用一样，食品的干燥过程不能代替酶的钝化或失活处理。为了防止干制品中酶的作用，食品在干燥前需要进行酶的钝化或灭活处理。通常，酶在湿热条件下处理易于钝化，例如，在湿热 100℃ 下处理 1 min 几乎可使各种酶失活。但是酶在干热条件下却很难钝化，例如在干燥状态下，即便使用 204℃ 的高温处理，效果也很差。实际生产过程中一般是以耐热酶过氧化物酶的残留活性为参考指标，控制酶钝化失活的程度。

1.1.5 干燥介质的特性

在食品干燥生产过程中，从湿物料中除去水分通常采用热空气为干燥介质，研究干燥过程首先要了解湿空气的各种物理性质以及它们之间的相互关系。

干燥过程中，热空气既是载热体，又是载湿体。湿空气的水蒸气量不断发生变化，而绝干空气的质量恒定。为计算方便，湿空气的各项参数均以单位质量的绝干空气为准。

1.1.5.1 湿度

空气中的水分含量也用湿度表示，有两种表示方法，即绝对湿度和相对湿度。

(1) 绝对湿度 指单位质量绝干空气中所含有的水蒸气的质量，表示为：

$$r_m = \frac{\text{湿空气中水气质量}}{\text{湿空气中干空气质量}} = \frac{M_v n_v}{M_g n_g} \quad (1-6)$$

式中 r_m ——空气的绝对湿度, kg/kg 干空气;

M_v ——水的摩尔质量, 18 kg/kmol;

M_g ——空气的平均摩尔质量, 29 kg/kmol;

n_v, n_g ——水气和干空气的物质的量。

设湿空气总压为 p , 其中水气分压为 p_w , 则干空气分压为 $p - p_w$ 。将湿空气视为理想气体, 则组分的摩尔比等于其分压比。式 (1-6) 可写为:

$$r_m = 0.622 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (1-7)$$

式中 p_w ——湿空气中水蒸气的分压, Pa;

p ——湿空气的总压, Pa。

由上式可知, 湿空气的湿度与总压及其中的水蒸气分压有关。当总压一定时, 湿度则由水蒸气的分压所决定。

(2) 相对湿度 在一定的总压下, 湿空气中水蒸气分压与同温度下纯水的饱和蒸气压之比, 称为相对湿度, 表示为:

$$\varphi = \frac{p_w}{p_s} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 φ ——空气相对湿度;

p_s ——同温度纯水的饱和蒸气压, Pa。

相对湿度可以用来衡量湿空气的不饱和程度。当 $\varphi=1$, 表示空气已达到饱和状态, 不能在接纳任何水分; φ 值越小, 表明空气可接纳的水分越多; 绝干空气的相对湿度 $\varphi=0$ 。

将式 (1-8) 代入式 (1-7) 得:

$$r_m = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (1-9)$$

由此得饱和空气的湿度为:

$$r_m = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (1-10)$$

1.1.5.2 温度

湿空气的温度可用干球温度和湿球温度表示。用普通温度计测得的湿空气实际温度即为干球温度 θ 。若用湿纱布包扎温度计的感温部分, 纱布下端浸在水中, 以维持其处在湿润状态, 就成为湿球温度计。将湿球温度计置于湿空气中, 经过一段时间达到稳定后的温度, 称其为湿球温度。

测量水汽含量的简易方法是测量空气的湿球温度 t_w 。设初始时水温 and 空气温度相等, 但由于未饱和空气与水分之间存在湿度差, 水分必然汽化, 汽化所需的热量只能来自于水分本身, 故水分温度必然下降。水温降低后, 与空气间出现温度差, 从而空气中热量又会向水分传递。经过一段时间后, 过程达到稳定状态, 即由空气传给水分的热量等于水分汽化所需的热量, 水温维持不变。此温度即为空气的湿球温度。

湿球温度是指大量空气与少量水分长期接触后水面的温度, 它是空气湿度和干球温度的函数。

$$t_w = t - \frac{k_H}{\alpha} r_w (r_w - r_m) \quad (1-11)$$

式中, k_H 、 α 分别为气相的传热系数和给热系数; r_m 、 r_w 分别为湿球温度 t_w 下的湿度和汽化热。

1.1.5.3 湿空气的焓

湿空气的焓为干空气的焓和相应水汽的焓之和, 也常以干空气为计算基准。一般规定 0°C 时干空气和液态水的焓值为零。对温度为 t 、湿度为 r_m 的湿空气, 其焓为:

$$H = c_g t + r_m c_v t + r_m r_o \quad (1-12)$$

0°C 下水的汽化潜热 r_o 为 2490 kJ/kg , 故上式可化为:

$$H = (1.01 + 1.88 r_m) t + 2490 r_m \quad (1-13)$$

1.1.5.4 露点

将湿空气在总压和湿度保持不变的情况下冷却, 当湿空气达到饱和时的温度即为露点。若是空气的温度降到露点以下, 则所含超过饱和部分的水蒸气将以液态形式凝结出来。

设不饱和湿空气的温度为 t , 湿度为 r_m , 冷却至饱和状态时, 露点温度为 t_d , 空气中的水蒸气分压不变, 但等于 t_d 下的饱和蒸气压 p_{sd} , 而其饱和湿度 $r_{m,s}$ 等于原湿度 r_m , 则:

$$r_m = r_{m,s} = 0.622 \frac{p_{sd}}{p - p_{sd}} \quad (1-14)$$

1.1.6 食品物料与干燥介质间的平衡关系

1.1.6.1 物料的水分活度与空气相对湿度之间的关系

根据水分活度的定义可知, 测定水分活度可利用空气与物料的充分接触, 使空气中水蒸气分压和物料表面的水蒸气分压达到平衡, 此时的水蒸气分压与纯水的饱和蒸气压之比即为水分活度。

将完全干燥的食品物料置于各种不同相对湿度的实验环境中, 经过一定时间, 食品物料会吸收周围环境中的水蒸气水分, 并逐渐达到平衡。这时食品内所含的水分对应的相对湿度称之为平衡相对湿度。根据水分活度的定义和相对湿度的概念可知, 这时的相对湿度即为水分活度。

物料的水分活度与空气的平衡相对湿度是不同的两个概念, 分别表明物料与空气在达到平衡后双方各自的状态。如果食品物料与相对湿度数值比它的水分活度大的空气相接触, 即:

$$A_w < \varphi \longrightarrow \frac{p_v}{p_s} = \frac{p_w}{p_s} \longrightarrow p_v = p_w$$

式中 A_w ——水分活度;

φ ——空气相对湿度;

p_v ——物料表面水分的蒸气分压, Pa;

p_s ——同温度下纯水的饱和蒸气压, Pa;

p_w ——湿空气中水蒸气的分压, Pa。

由于蒸气压差的作用, 则食品物料将从空气中吸收水分, 直至达到平衡, 这种现象称为吸湿现象。如果食品物料与相对湿度值比它的水分活度值小的空气相接触, 则食品物料将向空气中逸出水分, 直至达到平衡, 这种现象称为去湿。上述过程中食品物料与空气中的水分始终处于一个动态的平衡过程。

1.1.6.2 平衡水分

由于物料表面的水蒸气分压与介质的水蒸气分压的压差作用, 使两相之间的水分不断地