

国外现代食品科技系列

工业化干燥原理与设备

【加拿大】Arun S. Mujumdar 著

张 懋 范柳萍 等译

GUIDE TO INDUSTRIAL DRYING
PRINCIPLES EQUIPMENT AND NEW DEVELOPMENTS



中国轻工业出版社

CHINA LIGHT INDUSTRY PRESS

国外现代食品科技系列

工业化干燥原理与设备

[加拿大] Arun S. Mujumdar 著

张 懋 范柳萍 等译

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业化干燥原理与设备/(加)穆朱姆达(Mujumdar, A. S.)
著;张懋等译. —北京:中国轻工业出版社, 2007. 2
(国外现代食品科技系列)
ISBN 7-5019-5689-8

I. 工... II. ①穆... ②张... III. ①食品加工 -
工业化 - 干燥 - 理论 ②食品加工 - 干燥 - 食品加工
设备: 化工设备 - 研究 IV. TS205 TS203
TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 128796 号

Copyright 2004 Arun S. Mujumdar

责任编辑: 李亦兵 张 靓

策划编辑: 李亦兵

责任终审: 滕炎福

封面设计: 刘 鹏

版式设计: 马金路

责任校对: 吴大鹏

责任监印: 胡 兵 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社(北京东长安街6号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2007年2月第1版第1次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16

字 数: 369千字

书 号: ISBN 7-5019-5689-8/TS·3299

定 价: 35.00元

著作权合同登记 图字: 01-2005-2829

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

50230K1X101ZYW

译 者 序

干燥是食品、化工加工中重要的单元操作,它不仅是产品品质的保证手段之一,而且直接影响产品的加工成本。由于科学技术的迅猛发展和学科领域的交叉和相互渗透,古老的干燥技术也出现了日新月异的巨大变化。本书是国际干燥权威 Arun S. Mujumdar (国际干燥系列会议的常任主席,原加拿大 McGill 大学教授,现新加坡国立大学教授) 的最新著作。在本书中汇编了近年来他对于干燥理论和实践的系统思考,阐述了工业化干燥的新进展,并探讨了工业化干燥所需的装备保证。本书有三方面特点:一是强调工业化,将干燥原理与干燥机类型有机地结合起来,并以此划分章节,这在目前我国已出版的干燥类著作中比较少见;二是强调干燥技术的研发,与一般介绍普通干燥技术的著作相比,可让读者领略干燥技术研究前沿的魅力;三是强调实用,所介绍的干燥机均为目前在国际工业干燥界应用广泛的机型。

由于我国有关工业化干燥方面的著作很少,本书中译本的出版无疑填补了这方面的空缺。本书具有内容丰富、系统性强、信息量大、注重实际、跟踪发展趋势等特点,我们相信它对我国的有关专业人员会起到启迪思路、开阔视野的作用。

本书由张慇(江南大学教授、博导)、范柳萍(江南大学副教授)、胡庆国(江南大学博士生)、曹晖(江南大学博士生)、张骏(江南大学硕士生)、陈德慰(江南大学博士生)、宋贤聚(江南大学博士生)、方忠祥(江南大学博士生)、单良(江南大学副教授)、安建申(江南大学博士生)、段续(江南大学博士生)共同翻译完成,其中张慇、段续和安建申译目录、序言、前言和附录,陈德慰译第1章,胡庆国译第2、3、4、7章,范柳萍、段续译第5章,宋贤聚译第6章,曹晖和张慇译第8、9、10章,张骏和张慇译第11章,单良译第12章,方忠祥译第13章。全书由张慇统稿。

由于本书原版涉及干燥领域各个前沿和应用方面,给翻译带来了不少困难,译稿中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

译者

2006年2月

序

在发达国家,作为一个主要的工业能源消费者,热力干燥是一个在许多工业领域有极其重要作用的单元操作。随着世界经济的迅速发展,具有高效能源利用率和有利环保的干燥技术,将得到快速的发展。实际上,在如中国和印度等发展中国家,对干燥产品的需求正在以较快的速度增长。这一几乎以指数级增长的事实,已被许多有关对干燥基础研究的文献报道所证实。

在过去的 20 多年,虽然出版了大量有价值的有关工业干燥技术的文献和干燥方面的初级读物,但具有简明指导意义的书籍屈指可数。本书的出版是对 2000 年 S. Devahastin 博士编辑的《Mujumdar 工业干燥技术指南》的修正更新,书中介绍了工业干燥的基本原理,有关术语,干燥机的分类、选型,常用干燥机的详细介绍,以及现代工业干燥技术的最新进展。本书尤其适合那些时间紧迫,无暇进入图书馆的读者。本书的前一版本,经工作在干燥技术一线的工程人员、希望了解相关知识的学术工作者,以及科学研究人员的使用,获得了较大的成功。

我希望本书对自学者、工程师和研究人员有所帮助。对从事干燥技术和干燥设备的生产者有所裨益。本书内容的编排,适合学术研究人员或工业干燥操作人员,进行快速地了解,而不必考虑复杂的数学或理论模型。本书可作为专业课的教材或补充教材,在许多国家,我已进行了有益的尝试,并获得了成功。

本书的出版得到了许多人的大力支持和帮助,在此,不能将他们的名字一一列出。然而,我尤其要感谢下列几位,他们是:Mumbai 大学化学工程研究所的 J. B. Joshi 教授和 B. N. Thorat 博士,是他们鼓励我撰写本书,又使我有在“IWSID2004”大会上发言的机会;感谢 Dharmendra Kumar Sinha 先生对本书的出版所做的准备和艰辛的校对工作;还要感谢 Sakamon Devahastin 博士、陈国华博士、Md. Raisul Islam 博士,黄丽欣、吴中华以及朴丽劳博士,是他们承担了本书的部分章节。Purnima Mujumdar 参与了出版工作。深深感谢我的麦吉尔大学的老师 W. J. Murray Doglous 教授对本书所做的指导。是他为我树立了光辉的榜样,使我对干燥技术产生了兴趣,并深爱自己所从事的事业。幸运的是,来自 20 多个国家的研究生、博士后、访问学者分享了我的快乐,他们为本书的出版作出了巨大的贡献。没有他们的支持和帮助,完成本书对我来说简直是不可能的。

最后,我想趁此书完成之际,追忆我的父母,他们教给了我起码的做人道理,在人生的路上,他们是我战胜困难的勇气源泉和巨大的精神支柱。所有的一切荣誉应归于我的母校,UDCT 男校友基金会。深深感谢我的母校 UDCT(现在称为 MUDICT),以最好的老师给了我良好的教育和指导。

Arun S. Mujumdar
新加坡国立大学

前 言

在化学工业和对各种材料的处理的工业过程中(包括热敏性物料),随时可能遇到干燥操作工艺。在制药工业,在使用化学溶剂对物料进行沉淀以得到中间体或最终产品时,通常使用干燥技术使溶剂的残留量降到最低。在造纸工业和纺织制造业,由于其中间工艺大多具有添加水的程序,最终的操作也需要干燥工艺。在大型热处理工业,如造纸和纺织工业中,现在干燥技术变得尤为重要。

干燥的理论与实践,来源于 20 世纪 30 年代 Ceaglske、Houghen、Sherwood、Newit、McCabe、Marshall 等所做的早期工作。在过去的 30 多年中,Arun Mujumdar 和他的合作伙伴对于干燥理论进行了持续的大量试验研究,他们的工作得到了市场的认可。而这一重要的富有挑战性的工作,在工业领域曾经被忽视。

干燥过程中的传热、传质通常利用对流、传导、辐射或上述的结合来实现。当然,在本书中提到的还有特例,如冷冻干燥。不足为奇,考虑到原料的多样性和加工目的的不同,有报道 400 多种型号的干燥机,其中 100 多种在工业中得到普遍应用。让人惊奇的是,在第二次世界大战中用于石油冶炼的催化粉碎流化床技术,后来在干燥技术和气体学领域均得到了进一步的发展应用。快干和喷动床干燥机还在争论中。当然,选择合适的干燥设备是一项繁琐、复杂的工作,需要进行选型前的试验研究。

写此前言的目的之一是为了感谢我认识了 40 年的我的学生所做的杰出的工作,他在加拿大的麦吉尔大学做了大部分的干燥研究工作。对本书的出版,他付出了令人难以想象的艰辛,而他仅仅是本书的普通编写者。在此,很高兴地告诉大家,经 Mumbai 大学的 B. N. Thorat 博士进行整理,本书即将在 2004 年年底举行的“2004 国际工业干燥学术研讨会”上与读者见面。在 UDCT,我度过了一生中的大部分时光。我很高兴,他能作为 UDCT 的优秀男校友被 UDCT 校友会所认可,将此次研讨会和本书捐献给 UDCT 校友基金会。我相信,本指南会像它的名字一样永远充满活力。最后对本书的出版,奉上我衷心的祝贺和真挚的祝福。

M. M. Sharma

UDCT 大学杰出教授

2004 年 10 月 26 日

目 录

1 干燥基本原理	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 基本原理和术语	(2)
结束语	(12)
参考文献	(14)
2 工业干燥机的分类及选择	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 干燥机的分类	(17)
2.3 干燥机的选择	(19)
2.4 基于干燥质量干燥机的选择	(22)
结束语	(24)
参考文献	(25)
3 用于颗粒状固体、浆状和片状原料的干燥机	(26)
3.1 引言	(26)
3.2 用于颗粒和颗粒状固体的干燥机	(26)
3.3 用于浆料和悬浮液的干燥机	(30)
3.4 用于片状物料的干燥机	(35)
3.5 选择干燥机和干燥系统	(36)
结束语	(41)
参考文献	(42)
4 微粒状固体生产所用的干燥机	(43)
4.1 引言	(43)
4.2 不同进料方式的干燥机	(44)
4.3 新型干燥技术	(47)
结束语	(49)
参考文献	(49)
5 流化床干燥技术	(50)
5.1 引言	(50)
5.2 流化床干燥机设计所需的基本知识	(53)

5.3	流化床干燥机的类型：分类和选择	(62)
5.4	流化床干燥模型	(75)
5.5	设计过程	(79)
5.6	设计步骤	(84)
5.7	设计注意事项和安全措施	(86)
	结束语	(87)
	参考文献	(89)
6	喷雾干燥	(92)
6.1	引言	(92)
6.2	基本原理和分类	(93)
6.3	特殊喷雾干燥机类型和选择	(97)
6.4	设计考虑	(100)
6.5	喷雾干燥的 CFD 模拟	(104)
6.6	新进展和未来趋势	(104)
	结束语	(111)
	参考文献	(111)
7	生物材料的干燥：现状与进展	(115)
7.1	引言	(115)
7.2	干燥对生物产品质量的影响	(115)
7.3	常用的生物材料干燥机	(116)
7.4	一些新型干燥技术	(117)
	结束语	(120)
	参考文献	(121)
8	热泵辅助干燥	(123)
8.1	引言	(123)
8.2	具有不同热量输入模式的热泵辅助干燥机	(125)
8.3	干燥概念和数学模型	(126)
8.4	模拟结果和讨论	(130)
	结束语	(136)
	参考文献	(136)
9	过热蒸汽干燥(SSD)	(139)
9.1	引言	(139)
9.2	过热蒸汽干燥的基本原理	(140)
9.3	过热蒸汽干燥机的分类和选择	(141)

9.4 食品的过热蒸汽干燥	(153)
9.5 多种应用	(155)
9.6 废汽的利用	(156)
结束语	(157)
参考文献	(157)
10 电场在脱水和干燥中的应用	(161)
10.1 引言	(161)
10.2 电渗透脱水(EOD)	(161)
10.3 促进电渗透脱水的方法	(164)
10.4 EOD 的工业应用	(165)
10.5 电力-水力干燥(EHD)	(166)
结束语	(166)
参考文献	(166)
11 脉冲燃烧喷雾干燥(PCD)	(170)
11.1 引言	(170)
11.2 脉冲燃烧喷雾干燥概念	(172)
11.3 脉冲喷雾干燥的试验研究	(174)
11.4 流体动力学计算模型	(176)
结束语	(179)
参考文献	(179)
12 全球对干燥系统的研发需求及机遇	(181)
12.1 引言	(181)
12.2 干燥系统研发的历史回顾	(181)
12.3 研发需求及作用	(185)
12.4 创新的主要特征	(186)
12.5 创新的强化	(189)
12.6 常规和新型干燥技术	(190)
12.7 干燥技术的一些研发需求	(194)
结束语	(194)
参考文献	(195)
13 研究与开发、创造性以及大学与企业互动的必要性	(197)
13.1 引言	(197)
13.2 研究模式：大学与企业的互动作用	(197)
13.3 研发的意义	(202)

13.4 创造力和创新	(209)
13.5 关于影响因子和对研究影响力的评价	(211)
13.6 概论	(216)
附录 ARUN S. MUJUMDAR 的出版物	(218)
1 引言	(218)
2 审稿期刊上的文章	(218)
3 相关著作(1999—2004 年的部分清单)	(233)
4 专著的部分章节(1983—1997 年的部分清单)	(240)
5 技术报告(仅列出 1990—1997 年主要项目)	(243)
6 主编著作及会刊	(243)

1 干燥基本原理

1.1 引言

干燥分离操作是通过应用热能将固体、半固体或液体原料中的液体成分蒸发为气相,使原料转变为固体。但冷冻干燥是个特例,由于干燥温度低于被去除液体的三相点温度,液体成分直接由固态升华为气态。干燥的定义中不包括液态的浓缩(蒸发),机械脱水如过滤、离心、沉淀,以及从凝胶中超临界萃取水分生成的多孔气凝胶(萃取),或所谓的通过分子筛干燥液体和气体(吸附)。干燥加工的两个必要特征是发生相转变和生成固体终产品。干燥在化学、农业、生物技术、食品、聚合物、陶瓷、制药、制浆和造纸、矿产和木材加工等工业都是必不可少的操作。

干燥也许是最古老、最普通和最多样化的化工单元操作。据文献报道有 400 多种干燥设备,其中 100 多种被广泛应用。与蒸馏相比,由于大量的蒸发潜热和使用热空气(通常都是)作为干燥介质的低效率,干燥是最耗能的单元操作。不同研究报道,工业干燥所消耗的能源占美国、加拿大、法国和英国总能源消耗的 10% ~ 15%,占丹麦和德国的 20% ~ 25%。其中后者是来源于行业根据强制的能源审核数据,因此更为可靠。

干燥的能耗范围可以从占化学工业非常低的小于 5% 到占造纸工业的 35%。例如,在美国,每年度干燥设备所占的资本仅为 8 亿美金,因此,绝大部分的消耗是操作成本,而不是最初的设备投资。

不同的原料有其以下不同干燥原因:便于操作,便于保藏,减少运输成本,获得理想的产品质量等。在许多加工中,不恰当的干燥可能会导致产品质量不可逆转的破坏而无法出售。

在阐述干燥基本原理以前,有必要解释干燥独特的特点,这些特点使干燥领域的研发更有趣、更具挑战性。

干燥产品的尺寸可以从几微米到数十厘米(厚度或深度);产品的空隙率可以从 0 到 99.9%;干燥时间可以从 0.25s(纸绢干燥)到 5 个月(某些硬木种类);生产能力可以从 0.10kg/h 到 100t/h;生产速度可以从 0(静态)到 2 000m/s(纸绢);干燥温度从低于三相点到高于液体的沸点;操作压力可以从 0.1 ~ 2 500kPa;热能可以通过传导、对流、辐射、电磁方式连续或间接传送。

很明显,不可能有能够应用到所有或几个不同干燥设备的单一设定程序。当准备设计干燥设备或分析已有的干燥设备时,必须了解传热、传质和动量传递的基本原理和原料特性。准确地说,即使是最简单的干燥机中所包括的所有过程,也是高度非线性的,因此按比例放大通常是很困难的。实验室试验和试验规模,以及实际经验和熟悉原理对于开发一个新的干燥设备是必不可少的。干燥设备销售企业必须专注于,通

常也仅能提供某一小类的干燥设备。因此,买家必须熟悉各类干燥设备的基础知识,在去干燥设备销售企业之前,有能力做初步的选择。通常会有多种不同的干燥设备可以满足某一特定的应用。

1.2 基本原理和术语

干燥是个很复杂的操作,它包括瞬时的传热、传质和几个速率过程,如物理或化学变化,反过来,这些变化会导致产品质量的改变和传热、传质机理的改变。物理变化包括:收缩、膨胀、结晶、玻璃化转变。在某些场合,可能会产生期望的或不期望的化学或生化反应而导致固体产品在色泽、组织、气味或其他方面的变化。例如,在生产催化剂时,干燥条件会改变催化剂的内部表面积而显著影响催化剂的催化活力。

干燥的形成是通过提供热量给湿物料实现液体的蒸发。如前面所述,热量的传递可以通过对流(直接干燥设备)、传导(接触或间接干燥设备)、辐射或将湿物料放置于微波或电磁场中来实现。超过85%的工业干燥设备是以热空气或直接燃烧气体作为干燥介质的对流型设备。超过99%的应用涉及水分的去除。所有的模式除了介电干燥(微波和电磁)以外,都是在被干燥物料的界面提供热量,所以热量主要由传导传递到物料内部。液体在传递到载气(或对于非对流型干燥设备采用的真空)前必须先传递到物料的界面。

物料内部水分的传递可能包括以下任一个或多个传质机理:

液体扩散,湿物料的温度低于液体的沸点时;

水蒸气扩散,液体在物料内蒸发时;

克努森(Knudsen)扩散,干燥发生在非常低的温度和压力时,如冷冻干燥;

表面扩散(可能,尽管还没有证实);

静水压差,当内部蒸发速率超过蒸汽由固体物料向环境传递的速率时;

以上机理的组合。

另外应当注意在干燥过程中由于被干燥物料的物理结构的改变,水分传递的机理随着干燥时间的流逝可能也会发生改变。

1.2.1 空气-水分混合物和含水固体的热力学特性

1.2.1.1 湿度测定法

如前所述,绝大部分干燥设备是直接干燥(对流)类型。换句话说,热空气既是提供蒸发所需热能的介质,又是把从产品中的蒸发水分携带走的载体。主要例外的是冷冻干燥和真空干燥,由于它们的成本比常压干燥设备高很多,所以也主要是用于热敏性物料的干燥。另一个例外是新出现的采用过热蒸汽干燥(Mujumdar, 1995)。在某些场合,如采用滚筒干燥机干燥糊状食品时,大部分或全部的热量是通过传导间接提供的。

用热空气干燥意味着在一个绝热的干燥机内对空气进行加湿和冷却。因此,在设计与计算这类干燥设备时,必须知道湿空气的温湿特性。表1-1总结了空气-水系统的主要热力学和传递特性。表1-2列出了在干燥和湿度测定方面常遇到的一些专业术语的简要定义,同时也包括一些本书没有确切地讨论的专业术语。

表 1-1 空气-水系统的主要热力学和传递特性

性质	方 程 式
P_v	$P_v = 100 \exp[27.0214 - (6.887/T_{\text{abs}}) - 5.32 \ln(T_{\text{abs}}/273.16)]$
Y	$Y = 0.622 RH P_v / (P - RH P_v)$
c_{pg}	$c_{pg} = 1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2} T + 6.1759 \times 10^{-4} T^2 - 4.097 \times 10^{-7} T^3$
λ_g	$\lambda_g = 2.425 \times 10^{-2} - 7.889 \times 10^{-5} T - 1.790 \times 10^{-8} T^2 - 8.570 \times 10^{-12} T^3$
ρ_g	$\rho_g = PM_g / (RT_{\text{abs}})$
μ_g	$\mu_g = 1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8} T - 3.187 \times 10^{-11} T^2 + 1.319 \times 10^{-14} T^3$
c_{pv}	$c_{pv} = 1.883 - 1.6737 \times 10^{-4} T + 8.4386 \times 10^{-7} T^2 - 2.6966 \times 10^{-10} T^3$
c_{pw}	$c_{pw} = 2.8223 + 1.1828 \times 10^{-2} T - 3.5043 \times 10^{-5} T^2 + 3.601 \times 10^{-8} T^3$

资料来源: Mujumdar, 1995; Pakowski 等人, 1991。

表 1-2 湿度测定和干燥中常遇到的术语的定义

术语/符号	意 义
绝热饱和温度, T_{as}	在绝热条件下, 未饱和气体和液体蒸发到达的气体平衡温度[注: 对气-水系统, 它等于湿球温度(T_{wb})]
结合水	与固体基质物理(或化学)结合的水分, 表现在它的蒸汽压比同温度下纯水的低
恒速干燥段	在恒定干燥条件下, 每个干燥区域的蒸发速率是不变的干燥阶段
露 点	未饱和的空气-蒸汽混合气体到达饱和的温度
干球温度	用一(干)温度计放置于蒸汽-气体混合气中所测得的温度
平衡含水率, X^*	在一给定温度和压力下, 潮湿固体与气体-蒸汽混合气体到达平衡时的水分含量(对于非吸湿性固体为零)
临界水分含量, X_c	恒定的干燥速率刚开始下降时的水分含量(在恒定的干燥条件下)
降速干燥段	(在恒定的干燥条件下)干燥速率随时间而下降的干燥阶段
自由水分含量, X_f	在给定的温度和湿度下, 超过平衡水分含量的水分含量
$X_f = X - X^*$	
湿热容量	每单位质量的干空气和它所结合的蒸汽的温度上升 1K 所需的热量[kJ/(kg·K)]
绝对湿度	每单位质量的干空气所含的水蒸气质量
相对湿度	在气体-蒸汽混合气体中水蒸气的分压与相同温度下的平衡蒸汽压之比
非结合水	表现为蒸汽压与相同温度下的纯水的蒸汽压相等的固体中的水分
水分活度, A_w	固体中水分的蒸汽压与相同温度下纯水的蒸汽压之比
湿球温度, T_{wb}	当大量的空气-蒸汽混合气体与表面接触时的液体温度。在纯对流干燥, 在恒速干燥段干燥表面到达的湿球温度

图 1-1 是空气-水的热力学性质图, 它显示了在一个绝对大气压、0~130℃条件下, 温度(横坐标)与湿空气的绝对湿度(纵坐标, kg 水/kg 干空气)的关系。按照热力学定义, 可在图上绘出代表湿度百分含量的曲线和绝热饱和曲线。

湿度图上的绝热饱和温度和湿球温度的等式如下所示 (Geankopolis, 1983):

$$\frac{Y - Y_{as}}{T - T_{as}} = - \frac{c_s}{\lambda_{as}} = - \frac{1.005 + 1.88Y}{\lambda_{as}} \quad (1-1)$$

和

$$\frac{Y - Y_{wb}}{T - T_{wb}} = - \frac{\frac{h}{M_{air} k_y}}{\lambda_{wb}} \quad (1-2)$$

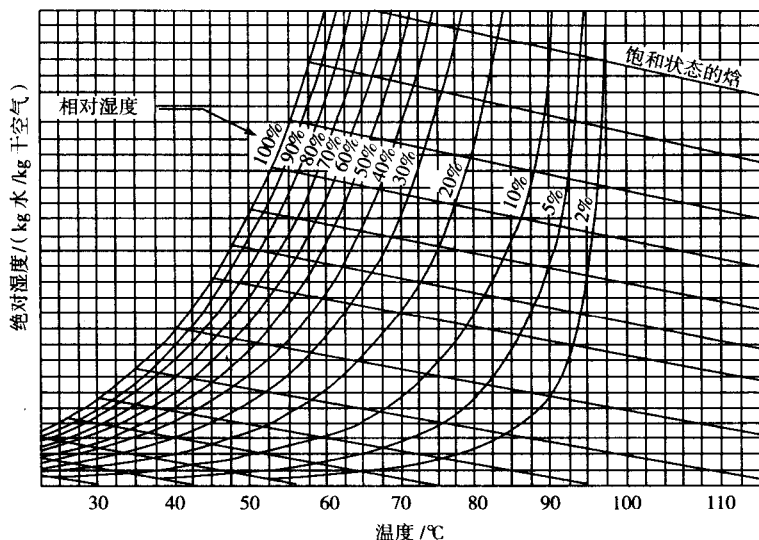


图 1-1 空气-水蒸气系统的湿度图

比率 ($h/M_{air}k_y$), 定义为湿度比, 对空气-水蒸气混合物, 其值处于 0.96 ~ 1.005 之间; 因此, 它约等于湿热容量 c_s 。如果湿度的作用可忽略, 对空气-水系统, 绝热饱和温度和湿球温度 (分别为 T_{as} 和 T_{wb}) 几乎相等。然而, 必须注意的是, T_{as} 和 T_{wb} 是两个完全不同的概念。绝热饱和温度是气体温度和一个热力学实体。在湿度图上 Y_{as} 与 T_{as} 呈直线关系, 代表气体在绝热干燥机内的路径。相反, 湿球温度是与传热和传质速率相关的参数, 它指的是液相的温度。在恒速干燥阶段, 如果传热方式完全是对流传热, 则干燥物料的表面保持着湿球温度。作为热质交换相似的结果, 湿球温度与材料表面的几何形状无关。

许多工程手册提供了更为详细的、包括一些其他额外信息以及更宽的温度范围的湿度图。Mujumdar (1995) 也给出了包括多种气-有机物蒸气系统的湿度图。

1.2.1.2 平衡水分含量

平衡水分含量 (EMC) 是指在恒定的温度和湿度条件下, 湿物料与空气达到平衡时的水分含量。在恒定温度下, 平衡水分含量对相对湿度作图得到的曲线定义为吸湿等温线。将固体物料放置在不断增加湿度的空气中得到的等温线称为吸附等温线; 将固体物料放置在不断降低湿度的空气中得到的等温线称为解吸等温线。很明显, 由于后者的固体物料中水分含量逐渐降低, 因此在干燥上更具有吸引力。大部分干燥物料都表现出“滞后

现象”,即两条等温线之间的不一致。

图 1-2 是典型的吸湿等温线形状。它具有三个明显的区域 A、B、C,在每个不同的区域,水分与固体基质的结合有不同的结合机理。在 A 区域,水分被牢固地吸附,不能参与反应;在此区域,水分为单分子层吸附,因此吸附和解吸等温线没有明显的差别。在 B 区域,水分的结合较为松散。由于细微毛细管的限制作用,蒸汽压低于同温度下的平衡蒸汽压。在区域 C,被截留的水分存在于较粗毛细管内。它可参与反应和作为溶剂。

如今已提出许多假说来解释滞后现象,对此专题,读者可查阅参考文献(Bruin 和 Luyben,1980;Fortes 和 Okos,1980;Bruin,1988)以获取更多信息。

图 1-3 显示了不同种类固体的平衡含水率曲线的形状。图 1-4 显示了在表 1-2 中定义的不同类型的含水率。解吸等温线也与外部压力有关。然而,在所有有价值的实际操作中,可忽略此因素的影响。

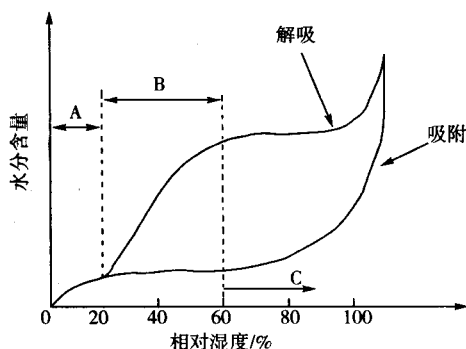


图 1-2 典型吸湿等温线

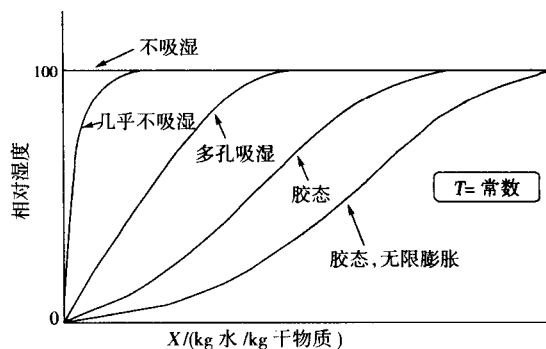


图 1-3 不同类型固体的平衡含水率曲线

按照 Keey (1978) 的报道,平衡水分含量与温度的相互关系可表示为:

$$\left[\frac{\Delta X^*}{\Delta T} \right]_{\psi = \text{常数}} = -\alpha X^* \quad (1-3)$$

此处 X^* 是干基平衡水分含量; T 是温度; ψ 是空气的相对湿度。参数 α 的范围是从 0.005 到 0.01K^{-1} 。如果没有适用的数据,可用此关系式估计与温度有关的 X^* 。

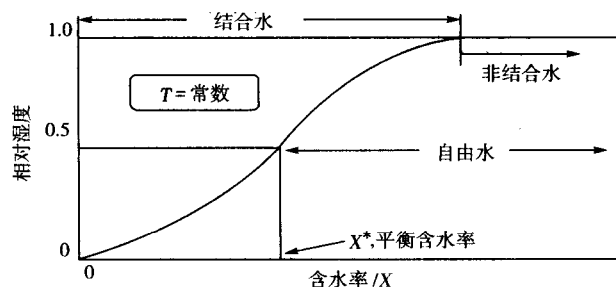


图 1-4 不同类型的含水率

对于吸潮的固体,吸附水分的焓比纯液体的低,其差值等于此结合能,该结合能也定义为湿焓, ΔH_w (Keey, 1978)。它包括吸附热、水合热和溶解热,并可用下式估计:

$$\left. \frac{d(\ln \psi)}{d \frac{1}{T}} \right|_{X=\text{常数}} = - \frac{\Delta H_w}{R_g T} \quad (1-4)$$

以 $\ln(\psi)$ 对 $1/T$ 作图是线性的,其斜率为 $\Delta H_w/R_g$, 此处 R_g 是理想气体常数 [$R_g = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$]。结合水蒸发所需的总能量为蒸发潜热和溶解热之和;后者是水分含量 X 的函数。对游离水来说,溶解热为零,且随着 X 的下降而增大。由于湿焓是降低结合水蒸发压力的原因,因此在同样相对湿度条件下,几乎所有的食品材料的湿焓都是一样。

对大多数食品,水的结合能是正数;它通常是水分含量的单调下降的函数。对非结合水,其值为零。对疏水性材料(如花生油、在较低温度下的淀粉),水的结合能可以是负数。

通常,水吸附数值必须由实验测定。在文献报道中,有基于从理论到纯经验的 80 多个关系式。其中应用最广泛的两个分别是由 Wolf 等人(1985)和 Iglesias 与 Chirife(1982)提出的。除了温度外,水吸附受食品的物理结构和成分的影响较大。毛孔的组织 and 大小,以及在干燥过程中的凝胶化作用,都会引起固体对水的结合能力产生显著的变化。

1.2.1.3 水分活度

在食品材料中,可用于供微生物生长、芽孢发芽和参与各种化学反应的水与它的相对蒸气压或水分活度 A_w 有关。水分活度 A_w 定义为潮湿的食品系统内的水分分压 p 与在相同温度下纯水的饱和蒸气压 p_w 的比率。因此,水分活度 A_w 也等于周围湿空气的相对湿度,定义为:

$$A_w = \frac{p}{p_w} \quad (1-5)$$

依据食品材料的种类的不同(如高、中、低吸湿性固体材料),可观察到不同形状的 X 对 A_w 的曲线。

表 1-3 列出了微生物生长或芽孢发芽的最小 A_w 。如果通过脱水或加入水分结合剂,如糖、甘油或盐,将 A_w 降低至此最小 A_w 之后,微生物的生长则受到抑制。然而,那些添加剂应不影响食品的风味或其他质量指标。因为用可溶性的添加剂来降低 A_w ,即使是降低 0.1,也需要大量的添加剂,因此对于高水分食品,脱水作为降低 A_w 的方法特别具有吸引力。图 1-5 显示了不同种类食品的水分活度与水分含量的关系曲线图。Rockland 和 Benchat (1987) 提供了关于水分活度及其应用的有关结果的范围很广的汇编材料。

表 1-3 微生物生长或芽孢发芽的最小水分活度 A_w

微生物	A_w	微生物	A_w
在肉类上产生黏液的微生物	0.98	黑曲霉	0.85
假单胞菌属,蜡样芽孢杆菌芽孢	0.97	大多数霉菌	0.80
肉毒杆菌芽孢	0.95	耐高盐细菌	0.75
沙门氏菌	0.93	嗜旱真菌	0.65
大多数细菌	0.91	嗜高渗(压)酵母	0.62
大多数酵母	0.88		

资料来源: Brockmann, 1973。

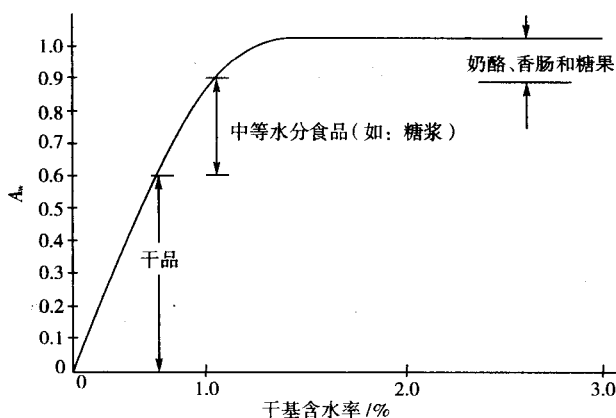


图 1-5 不同种类食品的水分活度与水分含量的关系

图 1-6 表示了在食品体系中，变质反应速率是 A_w 的函数这一一般规律。在干燥期间，除了微生物被破坏外（在 $A_w > 0.7$ 时是最典型的），氧化、非酶褐变（美拉德反应）和酶促反应即使在很低的 A_w 下都可能发生。因为变质反应通常不能被预测，所以在选择干燥过程时很有必要进行实验室或小规模试验以确保没有变质反应发生。

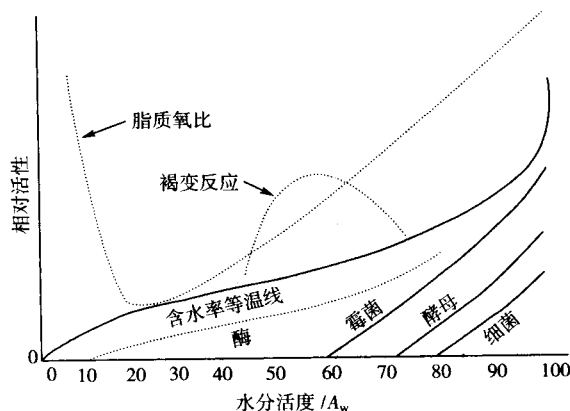


图 1-6 食品体系中作为水分活度函数的变质反应速率的一般规律

1.2.2 干燥动力学

考虑到在固定干燥条件下湿固体的干燥过程。在大多数情况下，经过最初阶段的调整后，干基含水率 X 随时间 t 线性下降，同时伴随着蒸发的开始。然后跟着是 X 与 t 的非线性下降，直到很长一段时间后，被干燥固体到达其平衡含水率 X^* ，干燥过程结束。就自由水分（游离水）而言，可定义为：

$$X_f = X - X^* \quad (1-6)$$

在 $X_f = 0$ 时，干燥速率下降到零。按常规，在恒定干燥条件下，干燥速率定义为：

$$N = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \text{ 或 } -\frac{m_s}{A} \frac{dX_f}{dt} \quad (1-7)$$

此处 N [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] 是水分蒸发的速率； A 是蒸发面积（可以与传热面积不同）； m_s 是固体干重。如果 A 未知，则干燥速率可用每小时蒸发多少千克水来表示。

N 对 X （或 X_f ）的关系图称为干燥速率曲线，通常在恒定干燥条件下获得。注意，在实际干燥机中，被干燥材料通常处于不同的干燥条件（如不同的气-固相对速率、不同的温度和湿度、不同的流动方向）。因此，采用一种方法在操作条件范围外进行内插或外推有限的干燥速率数据是必要的。