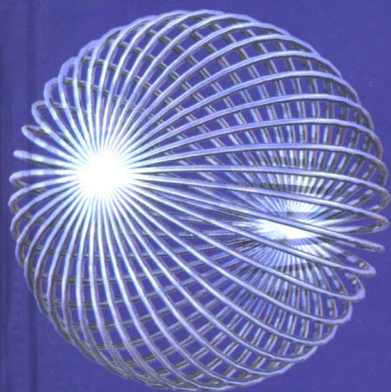


# M

Mujumdar's Practical Guide  
to Industrial Drying

Sakamon Devahastin 编著



## 干燥过程原理 与设备及新进展

—— Mujumdar 关于工业干燥技术的论述

史勇春 等 / 译

● 济南出版社

# 干燥过程原理与设备及新进展

——Mujumdar 关于工业干燥技术的论述

## **Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying**

Sakamon Devahastin 编著

史勇春 张 莲 许崇庆 张 伟 李 胜 翻译

潘永康 刘相东 通审

济南出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

干燥过程原理与设备及新进展: Mujumdar 关于工业干燥技术的论述/(加)德瓦哈森(Devahastin, S.)编著;史勇春等译. —济南:济南出版社, 2002. 8  
ISBN7-80629-756-1

I. 干… II. ①德…②史… III. ①固体—干燥—化工过程②干燥—化工设备 IV. TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 056299 号

**济南出版社出版发行**

(地址:济南市经七路 251 号 邮编:250001)

**青岛胶南印刷厂印刷**

(地址:青岛胶南市珠山路 120 号 邮编:266400)

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:13.25

字数:210 千 印数:1-3000 册

定价:60.00 元

(如有倒页、缺页、白页,请直接与承印厂调换)

## 翻译委员会

主任委员:史勇春

副主任委员:张 莲 许崇庆

译者:史勇春 张 莲 许崇庆 张 伟 李 胜

校者:董宪华

通审:潘永康 刘相东

---

## 译者的话

---

干燥技术是许多工业产品生产的终端工艺过程,干燥设备的性能直接影响到产品的性状、质量、价值以及能源消耗。为了提高工业产品质量,降低能源消耗和成本,保护环境,对干燥技术及设备提出了更高的要求,因此干燥技术已越来越多地得到学术界及工业界的重视。

国际著名干燥学者、国际干燥技术研讨会(IDS)创始人 Arun S. Mujumdar 教授在干燥技术及应用领域具有丰富的理论和实践经验,充分了解世界干燥技术及发展的最新成果。他在本书中汇集了大量有关干燥技术及设备的知识和信息,简明扼要、深入浅出地介绍了各种干燥技术及设备的类型、特性、优缺点等,既有相当的理论性,又有较强的实用性,使读者可以在很短时间内得到有关干燥技术的丰富信息。

山东天力干燥设备有限公司多年来从事干燥技术开发、干燥设备研制、销售、安装和技术咨询服务,对我国干燥技术的发展作出了我们的贡献。在工作中我们发现有些用户缺少对干燥技术的深入了解,在选择和使用干燥设备时对性能和技术指标的把握不够准确,需要一本比较好的教材帮助他们掌握这方面的知识。我们带着欣喜的心情翻译了这本书,奉献给干燥界的科研工作者及用户。

限于译者水平,文中有不妥和失误之处,敬希读者批评指正。

译者

2002年6月·济南

---

## 中译本序

---

干燥是许多工业生产中的重要工艺过程之一。我国的干燥技术可以追溯到 6000 年前的原始陶器制造及海滨晒盐等工艺中的干燥过程。到了 20 世纪初,干燥已成为化学工程领域中的单元操作之一。一些现代干燥技术(如喷雾干燥、流化干燥等)亦不断出现和应用,然而与蒸馏、吸收、传热等单元操作相比,干燥方面的基础研究和应用研究工作仍显得相对薄弱一些,因而许多问题的处理仍处于“技艺”(art)和经验,而不甚“科学”(science)和系统化的状况中。

国际著名干燥学者 A. S. Mujumdar 教授及其高足 S. Devahastin 有鉴于此,编写了本书,内容深入浅出,简明扼要地阐明了干燥领域的概貌和一些技术要领及发展前瞻,使读者能花较短的时间,了解到问题的主流,是一本很好的专题性实用指南。3 年前国内出版了潘永康、王喜忠教授主编的大型专著《现代干燥技术》。我相信,此大小两书一详一简,将使国内的干燥科技工作者及应用者获益匪浅。

本书由山东省科学院能源研究所山东天力干燥设备有限公司组织翻译,由潘永康、刘相东二教授审校全书,还有许多同志参与出版成书,他们的日常工作都很繁忙,能挤出时间完成本书,贡献给读者,是十分可欣慰之事。谨为之序。

萧成基

2002 年 6 月·北京

---

## 中文版序

---

近 20 年来,全球范围内对于干燥技术发展的关注程度几乎呈指数比例增长。1978 年首次召开的国际干燥技术研讨会(以后每两年一届),以及随后于 1982 年创刊的可载入史册的全球发行杂志《干燥技术》(Drying Technology),极大地激发了学术界和工业界对于干燥技术研究的兴趣。最初对于干燥技术研究的热点是对高能耗操作过程的节能研究,后来又集中在为满足用户需求而进行的提高产品质量的研究上,和近年来根据法规要求而进行的降低环境危害的研究。我认为世界各地的干燥机构都在共享彼此的研究成果。作为极少的几个例外,中国的工业界在干燥领域知识进步中得到的收益较大,而贡献相对较少。我希望这种状况会尽快得以改变,因为干燥作为一个应用学科,工业界的实践和研发工作将对其发展起到更大的作用。

我第一次接触中国的学术界是在 1984 年。那年我到天津轻工业学院(现为天津轻工业大学)做一个题为“干燥原理与实践”的系列讲座,在那里我第一次与潘永康教授进行了愉快的接触。当时我为中国有人在干燥技术研究方面表现出的强烈兴趣而感到惊喜,这就不难解释为什么后来在中国对于干燥技术研究的热情以及研究发展的速度要远超过世界的其他地方。1997 年,内容翔实、实用价值高的中文干燥手册——《现代干燥技术》出版了,这是中国的干燥技术知识发展深、广和在不长的时间内取得了快速进展的例证。2002 年将在北京召开第 13 届国际干燥技术研讨会(IDS'2002),这将是向全世界的干燥界展示中国的一个良机。什么是中国干燥领域发展过程中最引人注目和独特的方面呢? 我个人的看法就是工业界和政府的有力推动。而在其他大多数国家中,这种推动则主要来自学术界,是他们利用有限的资源和自身学术进步的需求而取得的。

我编撰本书的目的(其中我在加拿大 McGill 大学的博士生 Sakamon Devahastin 给予了很大的帮助)是想把大量有关干燥的有价值的信息与知识汇集在一起,以便那些学术界及非学术界的读者们能在尽可能短的时间内了解它们。本书的开头给出了一些基本的定义与原理,读者可从中清楚地了解到各种干燥设备的类型、特性、优缺点以及它们的发展历程,甚至未来研究的趋势。工程师们通常很少有大量时间去阅读和研究浩如烟海的文献资料,这些文献

资料不易得到、昂贵或特别笨重,因此手头上有这样一本浓缩的概要性书籍是很有帮助的,而中文版的发行会使更多的读者受益。我希望本书能够达到上述目的。本书拟翻译成 8 种语言出版,其他各版本也都在翻译和出版过程中。中文版是第一个翻译出版的版本,它令我很自豪地看到了我的出版计划已经有了一个成功的开头。

我真诚地感谢在本书的翻译出版过程中做出努力的潘永康、刘相东、史勇春、张莲。感谢他们为本书所做的一切,包括计划、翻译、校对、出版和发行。我希望读者能发现本书确实对他们有所帮助,是由潘永康、王喜忠编撰的《现代干燥技术》一书的补充而不是替代。

我很高兴能得到来自读者的评论、建议和批评,我在新加坡的电子邮箱地址是:mpeasm@nus.edu.sg.

Arun S. Mujumdar  
机械工程教授  
新加坡国立大学  
新加坡



---

## 英文版序

---

热力干燥是许多工业领域中非常重要和通用的一种单元操作。我们很难找到日常生活中的某件日用品在其生产过程中未作过干燥处理。即使是我们日常生活中常见的不锈钢,其中所含的镍,在从镍矿中提炼之前也要先干燥。干燥操作是高能耗的,其生产过程中所需的能量来自矿物燃料的燃烧,因而会对环境产生危害。工业化国家中,工业能耗的 15%~25% 被用于热力脱水。随着全球经济的繁荣,干燥所要求的能耗也将相应提高。因此,有必要对干燥过程有较好的理解,并确保在市场制约的经济范围内,尽可能高效地利用该工艺操作。因此跟踪时下和即将出现的新技术是非常重要的。

虽然干燥技术由来已久,但对其深入细致的研究仅开始于几十年以前。最初对固体热力干燥简单机理的解释来自几位化学家;该领域内早期的著作是由 MIT(美国麻省理工学院)的已故教授 T. K. Sherwood 在 20 世纪 20 年代后期出版的。顺便说一下, T. K. Sherwood 教授在 McGill 大学获得了他化学工程的第一个学位。其后, W. H. Gauvin 博士和之后的 A. S. Mujumdar 教授也在 McGill 大学为干燥的科学理论以及将其提高到世界水平作出了重大贡献。其他几位 McGill 大学的同事继续从事着干燥研究(主要是农产品、食品和纸张),从而使 McGill 大学在过去的几十年中成为世界级的干燥研究中心之一。

本书内容包括精心选择的被广大工程技术人员所推崇的 Mujumdar 教授的著作。人们普遍认为干燥方面的资料非常分散,在有些情况下甚至花很多代价也难以得到。写本书的目的就是汇编这些信息,让工业界和学术界的广大工程技术人员和学者可以非常方便地得到这些信息。本书对那些没有时间来研读大部头论文集的工业界工程师们特别有用。我们希望本书能涵盖现有及将来工业干燥的原理及应用,能更适宜于自学,而目前这种专门的参考书还很少。

本书对干燥机制造者及应用者都适用。干燥机生产厂家的生产和销售人员必须对他们的竞争对手和有竞争力的干燥机有非常详细的了解,他们的客户当然希望满意于自己的选择是正确的。

本书的选题设计是为了使学术界和工业界的学者对下述领域有一快速的了解:固体干燥的基本理论和术语、工业干燥机的分类和选择、对常用的各种

干燥机全面分类的描述、对常见工业干燥技术的深入讨论、干燥技术的最新发展和将来的发展趋势。本书还涉及对干燥研究和各种基本理论的讨论,包括工业界和大学之间相互合作的需要、干燥方面的革新以及为促进干燥发展而进行的全球合作。这对干燥理论今后的发展非常重要。

本书在教科书和手册之间架起桥梁,消除了两者在主题上的隔阂,对与工业工程师和科学家最紧密相关的资料做了集中说明,为那些希望更详细了解或更深入讨论某个专题的读者提供了参考文献。此处集中在“须知”,也可以称其为“你要知道的工业干燥方面的每一件事,但不知道去问谁”。本书以简单、深刻但容易读懂的方式包含了一个干燥大师的思想。

很多人在本书的编辑过程中给予了各种各样的帮助,我在这里很荣幸地对他们表示感谢。首先感谢 Mujumdar 教授允许我做这项工作,并给予我指导和支持,不然此项工作殊难完成。Purnima Mujumdar 夫人非常友好地替我准备了几份原稿和本书的主题索引。同样非常感谢 Siripon Anantawaraskul 为我准备的各种图表。我的家人特别是我母亲 Sumalee 给我无数的支持,对此我也表示深切感谢。最后,当然不是最少,要感谢我的挚友 Pattita 在此项工作中的不断支持。

虽然本书的主题是“干燥”,我相信读者可以发现本书通俗易懂,有趣并且有用。热忱欢迎对本书感兴趣的读者的建议和批评。

Sakamon Devahastin  
加拿大,蒙特利尔

---

## 英文版前言

---

一些有关描述干燥操作的教科书甚至各种手册常给人的(错误的!)印象是已经很好地理解了“干燥”,但当我真正细读有关干燥和干燥设备的文献时,我发现 20 多年前关于这方面的有广度和深度的材料非常少,我常对此困惑不解。因为干燥无所不在,很难发现什么产品在其生产过程中与干燥无关。干燥是常被看作“技艺”的一种工业过程。显然,很有必要为将来的干燥技术和应用建立一个非常稳固的基础理论。我认为,教育和培训是促进对干燥和干燥设备深入理解的关键。

国际干燥技术研讨会(IDS)就是为此而建立的。这一系列会议的成功,验证了我最初的设想和乐观估计。干燥技术在过去的 20 年里已经取得了重大进展,但仍有一些还有待完善。我的一位积极上进的博士生 Sakamon Devahastin 编写了本书,其目的是让人们以非常小的代价广泛获得我的有关干燥的一些论著。我曾设法收集广泛分布在我数百种专著中的各种信息和技术知识,使之形成一种资料。我曾试想加入一些我个人对干燥机分类和选择的推荐方法、干燥和干燥机的研究和发展需要以及革新的个人评价。当然,所有这一切都源于我个人的工业咨询和职业培训经验。不是所有读者都会同意我的每一种观点,但是当读者发现其对干燥重要性和规模的理解超过在别的教科书中对干燥的理解时,我和我的学生 Sakamon 为出版此书所做出的努力还是值得的。

本书的目的是作为专题的实用指南,而不是最后结论。本书会增补一些摘自《工业干燥手册》(第二版,Marcel Dekker,纽约,美国)和其他一些专著中的详细注释。它可以作为干燥工程学生的训练指南,也可以作为工业技术人员干燥技术快速入门的概述教程,他们无需为此陷入繁杂的数学分析。研究者将会发现可以花最少的时间和精力获得在此领域中相当深度的知识。

我们希望本书对干燥设备销售者和使用者都有帮助。同时,对干燥机生产厂家的销售和市场人员了解干燥设备和竞争对手会有所帮助。干燥设备的购买者在过去 20 年里对干燥已非常熟悉和了解,所以改进设计、更快地引入

技术革新对维持或提高市场份额越显重要。

真诚欢迎读者对这本专著各个方面和干燥技术本身提出意见,希望读者不会觉得读这本书太枯燥。

Arun S. Mujumdar

加拿大, 布罗萨德

# 目 录

<b>第一章 干燥基本原理</b> .....	(1)
1. 概述 .....	(1)
2. 基本原理和技术 .....	(2)
结束语 .....	(18)
参考文献 .....	(20)
<b>第二章 工业干燥机的分类与选择</b> .....	(23)
1. 概述 .....	(23)
2. 干燥机的分类 .....	(25)
3. 干燥机的选择 .....	(28)
4. 基于产品质量的干燥机选择 .....	(32)
结束语 .....	(35)
参考文献 .....	(36)
<b>第三章 粒状、浆状、薄页物料干燥机</b> .....	(37)
1. 概述 .....	(37)
2. 颗粒物料干燥机 .....	(38)
3. 浆状物料和悬浮液干燥机 .....	(44)
4. 薄页物料干燥机 .....	(52)
5. 干燥机和干燥系统的选择 .....	(53)
结束语 .....	(62)
参考文献 .....	(62)
<b>第四章 颗粒物料干燥机</b> .....	(63)
1. 概述 .....	(63)
2. 用于各种物料的干燥机 .....	(64)
3. 新的干燥技术 .....	(70)
结束语 .....	(72)
参考文献 .....	(73)
<b>第五章 流化床干燥技术</b> .....	(74)
1. 概述 .....	(74)

2. 分类及选型标准 .....	(75)
3. 干燥动力学基础 .....	(81)
4. 不同类型流化床干燥机的特点 .....	(82)
5. 设计考虑 .....	(87)
6. 新型流化床干燥机 .....	(90)
结束语 .....	(94)
参考文献 .....	(95)
<b>第六章 干燥技术的革新及未来趋势 .....</b>	<b>(99)</b>
1. 概述 .....	(99)
2. 创新:类型及共有特征 .....	(100)
3. 干燥技术创新实例 .....	(103)
结束语 .....	(111)
参考文献 .....	(112)
<b>第七章 未来的过热蒸汽干燥技术 .....</b>	<b>(114)</b>
1. 概述 .....	(114)
2. 过热蒸汽干燥的基本原理 .....	(116)
3. 过热蒸汽干燥机的分类和选择 .....	(117)
4. 其他应用 .....	(132)
5. 蒸汽乏汽利用 .....	(133)
结束语 .....	(135)
参考文献 .....	(135)
<b>第八章 全球干燥技术的研究与进展 .....</b>	<b>(139)</b>
1. 概述 .....	(139)
2. 历史回顾 .....	(140)
3. 一些统计资料 .....	(142)
结束语 .....	(146)
参考文献 .....	(147)
<b>第九章 一些有关研究与开发,创造性及校—企互动方面的想法 .....</b>	<b>(148)</b>
1. 概述 .....	(148)
2. 研究模式:校—企合作 .....	(149)
3. 研究开发的意义 .....	(152)
4. 创造与发明 .....	(157)

<b>附录一 过热蒸汽的传递和热力学性质</b> .....	(159)
1. 概述 .....	(159)
2. 过热蒸汽的传递/热力学性质公式 .....	(160)
结束语 .....	(162)
参考文献 .....	(163)
<b>附录二 Arun S. Mujumdar 教授的论著(1984 – 1999)</b> .....	(165)
1. 概述 .....	(165)
2. 在前述期刊中的论著 .....	(166)
3. 会议文献(部分目录) .....	(180)
4. 书的部分章节 .....	(184)
5. 技术报告(仅主要项目) .....	(188)
6. 已编辑书籍和学报卷册 .....	(189)
<b>主题索引</b> .....	(190)

## 干燥基本原理

Arun S. Mujumdar 和 Sakamon Devahastin

### 1 概述

干燥是利用热能将固体、膏状或液体物料中的液体蒸发排除,而获得固体产品的过程。在冷冻干燥的特殊情况下,干燥发生在三相点以下,湿分由固态直接升华为气态。干燥定义本身不包括液体浓缩(蒸发),机械脱水过程如过滤、离心分离、沉降,以及利用超临界萃取将凝胶体变为孔隙率极高的气凝胶或用分子筛(吸附)法实现液体或气体所谓的“干燥”。干燥过程的基本特征就是相变,且最终产品为固体。干燥是化工、农业、生物技术、食品、树脂、陶瓷、制药、制浆和造纸、矿业以及木材加工行业基本的生产过程。

干燥或许是最古老、最通用和最多样化的化工单元操作。在文献中记载的 400 多种型式的干燥机中,有 100 多种型式应用较多。因为高的汽化潜热和由于以热空气作为干燥介质(最常见)所固有的低效率,使干燥成为可与蒸馏相比的高能耗的单元操作。调研表明,在美国、加拿大、法国、英国,工业干燥能耗占全国总能耗的 10%~15%,而在丹麦和德国则高达 20%~25%。后



一个数据来自于工业界的强制能量审计,因而更可靠。

干燥能耗低至占化工行业的 5%,高至占造纸工业的 35%。在美国,每年在干燥机方面的花费估计为 8 亿美元,因而干燥机的主要花费是在运行过程当中,而不是它的初始投资。

各种物料的干燥常缘于以下一种或几种原因:使物料流动性好,易于装卸,易于保存和贮藏,减少运输费用,获得希望的产品质量等等。在很多生产过程中,不恰当的干燥会导致产品质量无法挽回的损失,从而使产品无法销售。

在涉及基本原理以前,有必要关注以下这些对干燥研究和发展领域带来魅力和挑战性的特征:

- 产品粒度可以小至微米,大至几十厘米(厚度或深度);
- 产品孔隙率可以从 0 到 99.9%;
- 干燥时间从 0.25s(干燥棉纸)到 5 个月(某种硬木);
- 生产能力从 0.10kg/h 到 100t/h;
- 生产速度从 0(静止)到 2000m/s(棉纸);
- 干燥温度从低于三相点到高于液体临界点;
- 工作压力从几分之一毫巴到 25 个大气压;
- 热量通过对流、传导、辐射或电磁场连续或间断传递。

显然,不会有一个单一的设计程序可以适用于所有或几个不同的干燥机。所以,当进行干燥机设计或分析已有的干燥机时,就要结合物料特性(质量)考虑热量、质量和能量传递。从机械方面而言,所有的生产过程,包括最简单的干燥机都是高度非线性的,所以对干燥机的模拟放大是非常困难的。实验室试验、小规模试验、现场经验以及临场应变对开发一种新型干燥机的应用是非常重要的。干燥机制造商仅需要提供特殊的和通用的小范围内的干燥设备,所以购买者需要在购买前对干燥机种类有所了解,并且做简单的初步选择,以便达到预期目的。通常,会有几种不同的干燥机均可适合于某种给定的用途。

## 2 基本原理和技术

干燥是一种复杂的过程,包含几种速率过程的瞬间热质传递,如物理和化学变化,这种变化会引起产品质量和热质传递机理的变化。物理变化可以包括收缩、膨胀、结晶、玻璃化转变。有些时候,一些希望的或不希望的化学或生物反应会导致固体产物颜色、结构、气味或其他特性的改变。例如在催化剂的