

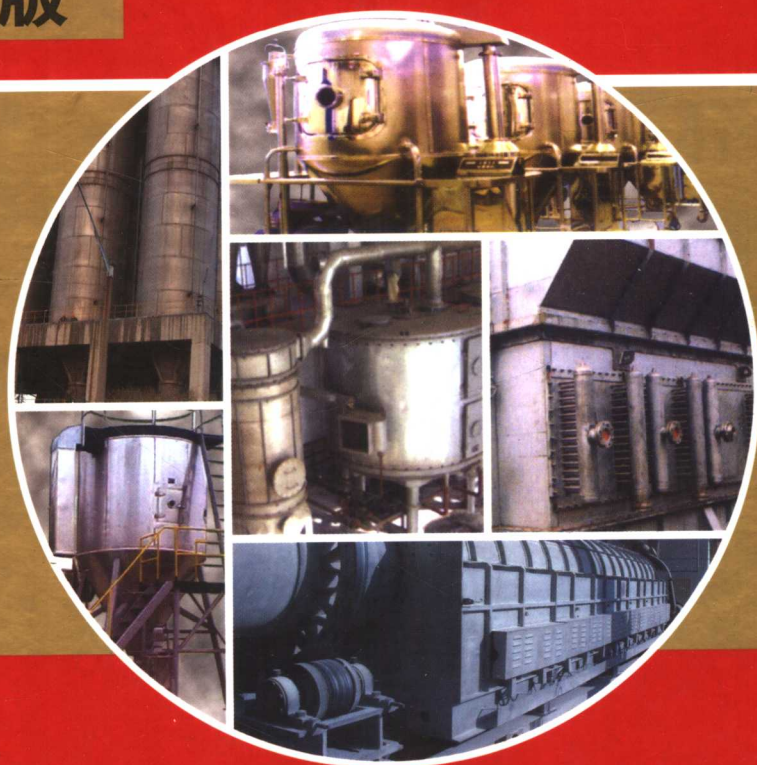
本书第一版获中国石油和化工协会科技进步奖

MODERN

DRYING TECHNOLOGY

现代干燥技术

第二版



潘永康 王喜忠 刘相东 主编



化学工业出版社

本书第一版获中国石油和化工协会科技进步奖

现代干燥技术

MODERN DRYING TECHNOLOGY

第二版

潘永康 王喜忠 刘相东 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是一本全面介绍干燥原理与技术的工具类专著,全书五篇共51章。第一篇介绍干燥过程的基本原理、模型模拟、计算方法及相关实验技术和测量方法等;第二篇介绍各种干燥方法和干燥器,其中介绍了各种对流、传导及辐射加热型的计20多种传统干燥器的工作原理、设计计算及应用实例;为适应干燥技术的发展,第二版新增第三篇新型干燥技术,其中介绍了包括近期开发的折射窗干燥技术等十多种尚在成熟阶段的新型干燥技术;第四篇介绍了食品、水果蔬菜、谷物、茶叶、中药饮片、药物、生物制品、乳品、染料、纤维状物料、纸、木材、聚合物、煤及矿物等的干燥;第五篇介绍了干燥过程的辅助系统,如热风炉及供热系统、通风及收尘系统、加料及排料装置,以及节能、安全操作等。此外,本书在序和绪论中介绍了国内外干燥技术的发展历史及当今的学术活动。

本书的宗旨是理论和实践相结合。参考本书可进行干燥方法和设备的选型、试验和设计,并可比较全面地了解干燥技术的发展动态。因此本书可供工厂技术人员、研究设计人员参考及作为研究生和本科生的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代干燥技术/潘永康,王喜忠,刘相东主编.
2版. —北京:化学工业出版社,2006.12
ISBN 978-7-5025-9361-2

I. 现… II. ①潘…②王…③刘… III. 干燥-
工业技术 IV. TQ028.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第161332号

责任编辑:戴燕红
责任校对:洪雅姝

文字编辑:丁建华 贾婷 刘莉珺 陈元
装帧设计:关飞

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张97¼ 字数2635千字 2007年5月北京第2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:228.00元

版权所有 违者必究

京化广临字2007—02号

现代干燥技术

名誉主编

Arun S. Mujumdar

国际干燥会议常任主席

新加坡国立大学 教授

萧成基

原北京化工研究院 教授级高级工程师

荣誉顾问

余国琮

天津大学 教授

中国科学院院士

Ceslaw Strumillo

波兰罗兹工业大学 教授

波兰科学院院士

国际干燥会议顾问团成员

企业界名誉顾问

孙中心 兰州瑞德干燥技术有限公司 总经理

周才君 林洲干燥设备有限公司 总经理

查国才 常州市一步干燥设备有限公司 总经理

《现代干燥技术》第二版编写人员

| | 编 者 | 单 位 |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 第二版序 | Arun S. Mujumdar (李建国译) | 新加坡国立大学 |
| 第二版前言 | | 潘永康等 |
| 第一版序 | Arun S. Mujumdar (李占勇译) | 新加坡国立大学 |
| 第一版前言 | 萧成基 | 原北京化工研究院 |
| 绪论 | | |
| 1 中国现代干燥技术发展概况 | 潘永康 | 天津科技大学 |
| 2 干燥技术的革新和未来趋势 | Arun S. Mujumdar | 新加坡国立大学 |
| 3 干燥原理、干燥方法和干燥器的选择 | 潘永康 | 天津科技大学 |
| 第一篇 干燥过程的基本原理 | 审稿人 潘永康 | |
| 第1章 湿气体和湿物料的性质 | 潘永康 | 天津科技大学 |
| 第2章 干燥中的试验技术和测量方法 | 潘永康 李建国 | 天津科技大学 天津科技大学 |
| 第3章 基本干燥过程的计算 | 潘永康 李建国 | 天津科技大学 天津科技大学 |
| 第4章 数学模型和模拟 | 刘相东 杨彬彬 | 中国农业大学 国家质检总局进出口食品安全局 |
| 第二篇 干燥方法和干燥器 | 审稿人 王喜忠 | 大连理工大学 |
| 第5章 隧道干燥和厢式干燥 | 翁颐庆 | 上海化工研究院 |
| 第6章 转筒干燥 | 于才渊 | 大连理工大学 |
| 第7章 转鼓干燥 | 翁颐庆 | 上海化工研究院 |
| 第8章 带式干燥 | 翁颐庆 | 上海化工研究院 |
| 第9章 盘式连续干燥器 | 张继军 董伟志 | 石家庄工大化工设备有限公司 石家庄工大化工设备有限公司 |
| 第10章 卧式桨叶式干燥器 | 孙中心 | 天华化工机械及自动化研究设计院 |
| 第11章 流化床干燥 | 潘永康 童景山 | 天津科技大学 清华大学 |
| 第12章 喷动床干燥 | 杨大成 刘伟民 徐圣言 | 石家庄工大化工设备有限公司 江苏大学 江苏大学 |
| 第13章 喷雾干燥 | 王喜忠 王宗濂 | 大连理工大学 中国林业科学研究院林产化学工业研究所 |

| | | | |
|--------|----------------------|---------------------------------------|--|
| 第 14 章 | 气流干燥 | 钱树德 | 天津大学 |
| 第 15 章 | 太阳能干燥系统 | 朱文学 | 河南科技大学 |
| 第 16 章 | 真空冷冻干燥 | 曹崇文 徐成海 | 中国农业大学 东北大学 |
| 第 17 章 | 微波和高温干燥 | 董铁有 | 河南科技大学 |
| 第 18 章 | 红外热辐射干燥及其工 程应用 | 李占勇 褚治德 | 天津科技大学 天津大学 |
| 第 19 章 | 冲击干燥、穿透干燥和冲 击穿透干燥 | 焦士龙 陈国华 | 天津大学 香港科技大学 |
| 第 20 章 | 对撞流干燥 | 刘登瀛 | 中国科学院工程热物理研究所 |
| 第 21 章 | 热泵干燥及化学热泵 | 王宝和 | 大连理工大学 |
| 第 22 章 | 污泥干燥 | 李占勇 | 天津科技大学 |
| 第 23 章 | 陶瓷干燥 | 李占勇 陈国华 | 天津科技大学 香港科技大学 |
| 第 24 章 | 造粒、粉碎及分级 | 李占勇 | 天津科技大学 |
| 第 25 章 | 造粒、粉碎及分级 | 孙中心 | 天华化工机械及自动化研究设计院 |
| 第三篇 | 新型干燥技术 | 审稿人 刘相东 | 中国农业大学 |
| 第 25 章 | 过热蒸汽干燥 | 曹崇文 | 中国农业大学 |
| 第 26 章 | 超临界干燥 | 王宝和 | 大连理工大学 |
| 第 27 章 | 脉动燃烧干燥 | 吴中华 刘相东 史勇春 Arun S. Mujumdar | 新加坡国立大学 中国农业大学 山东省科学院 新加坡国立大学 |
| 第 28 章 | 纳米材料干燥 | 王宝和 黄立新 | 大连理工大学 中国林业科学研究院林产化学工业研究所 |
| 第 29 章 | 高压电场干燥 | 梁运章 丁昌江 | 内蒙古大学 内蒙古大学 |
| 第 30 章 | 接触吸附干燥 | 李占勇 Tadeusz Kudra | 天津科技大学 加拿大多种能源研究所 |
| 第 31 章 | 其他新型干燥技术 | | |
| 1 | 声波场干燥 | 史勇春 | 山东省科学院 |
| 2 | 置换干燥 | 金 澎 童景山 谢奇珍 | 山东省科学院 清华大学 农业部农业规划设计院 |
| 3 | 感应加热干燥 | 李占勇 | 天津科技大学 |
| 4 | 多功能干燥 | 王宝和 | 大连理工大学 |
| 5 | 组合干燥 | 王喜忠 王宝和 | 大连理工大学 大连理工大学 |
| 6 | 折射窗干燥技术 | 黄立新 Arun S. Mujumdar | 中国林业科学研究院林产化学工业研究所 新加坡国立大学 |

| | | |
|--------------------|------------------|--------------------|
| 第四篇 生产部门的干燥过程 | 审稿人 潘永康 | 天津科技大学 |
| 第 32 章 食品和水果蔬菜干燥 | 潘永康 | 天津科技大学 |
| 第 33 章 谷物干燥 | 赵丽娟 | 天津科技大学 |
| | 曹崇文 | 中国农业大学 |
| 第 34 章 茶叶干燥 | 胡景川 | 杭州机械科学研究院 |
| 第 35 章 生物物料干燥 | 刘相东 | 中国农业大学 |
| | 肖志锋 | 中国农业大学 |
| 第 36 章 药物干燥 | Ceslaw Strumillo | 波兰罗兹工业大学 |
| | 李 楨 | 原上海医药设计院 |
| 第 37 章 中药饮片干燥 | 孙立立 | 山东省中医药研究院 |
| 第 38 章 中药提取物的干燥 | 钱筱琪 | 上海大川原干燥设备有限公司 |
| | 周永传 | 上海大川原干燥设备有限公司 |
| | 邓 修 | 上海大川原干燥设备有限公司 |
| 第 39 章 乳品及糖类的干燥 | 王宗濂 | 中国林业科学研究院林产化学工业研究所 |
| | 韩 磊 | 中国林业科学研究院林产化学工业研究所 |
| 第 40 章 染料干燥 | 刘广文 | 沈阳化工设计院 |
| 第 41 章 纤维状物料干燥 | 王宝和 | 大连理工大学 |
| 第 42 章 纸张和纸浆的干燥 | 姚春丽 | 北京林业大学 |
| 第 43 章 木材干燥 | 张璧光 | 北京林业大学 |
| | 高建民 | 北京林业大学 |
| | 伊松林 | 北京林业大学 |
| 第 44 章 聚合物干燥 | 李占勇 | 天津科技大学 |
| 第 45 章 煤及矿物干燥 | 杨国华 | 宁波大学 |
| 第五篇 干燥过程的辅助系统 | 审稿人 刘相东 | |
| 第 46 章 干燥器的加料及排料装置 | 翁颐庆 | 原上海化工研究院 |
| 第 47 章 热风炉及供热系统 | 朱文学 | 河南科技大学 |
| 第 48 章 通风及收尘系统 | 翁颐庆 | 原上海化工研究院 |
| 第 49 章 干燥系统的控制 | 李长友 | 华南农业大学 |
| 第 50 章 干燥过程的安全问题 | 王宝和 | 大连理工大学 |
| 第 51 章 干燥能源与焓分析 | 刘登瀛 | 中国科学院工程热物理研究所 |
| | 张璧光 | 北京林业大学 |
| 主题词索引 | 刘相东 | 中国农业大学 |

第二版序

非常荣幸能有机会为《现代干燥技术》一书的修订再版作序。我为此书在中国取得的巨大成功而感到欣喜。众所周知，近二十年来，干燥的研究开发工作在中国的发展几乎比世界任何地方都要广泛。在超过 60% 的商品的制造过程中，干燥是一项基本的操作，世界范围内大部分新兴经济都对干燥技术的研究和应用给予了密切关注。实际上，中国的研究者在干燥技术与设备的发展领域已作出了重大贡献。

由于能源消耗量大和近些年来能源价格的持续上涨，对开发更加高效的干燥系统的需求也将上升。这种新的干燥系统也决定着干燥产品的质量。这本书是专家们撰写的各章内容集合而成的优秀之作，介绍了大部分传统的和创新的干燥技术与干燥器。因此这本书对学术界（学生、教授等）和工业界工程师、经理人同样有益。它是任何与干燥有关的人桌上必备的参考著作。这个修订的新版本包含了对近年来工业相关的发展的综述，也提供了有关未来研究与开发的有价值的想法。

2002 年 8 月在北京举行的 IDS2002 的巨大成功和中国干燥技术研讨会的连续成功举行反映了中国干燥技术和研究开发的良好状态。我相信，通过不断的努力和让世界更好地了解中国的成就，中国能够引领国际干燥界的发展。区域性和国际性的干燥会议在各地的不断召开表明：世界已经认识到干燥是值得研究与开发的重要的多学科领域。

最后，我恭贺编者和撰稿人，因为他们做了一项出色的工作，此书包含了极为广泛的干燥研究和开发的成就。我确信此书将对中国乃至世界工业实践和效率的提高产生决定性的影响。此书的出版将是中国干燥研究与开发历史上的又一成功之作。我衷心地向个人和图书馆等同类机构推荐此书。

Arun S. Mujumdar

(新加坡国立大学机械工程系教授)

2007 年 5 月于新加坡

(李建国译)

第二版前言

《现代干燥技术》自 1998 年出版以来，受到了广大读者的喜爱，特别是被许多干燥器制造行业 and 用户单位的技术人员作为案头必备书籍，这是对我们最大的鼓励，同时也对本书提出了更高的要求。近几年来，我国干燥器的制造技术取得了长足的进展、干燥器的应用领域大为拓宽、干燥技术领域的研究水平明显提高。因此，10 年前编写的《现代干燥技术》在内容和深度上都需要更新，以适应我国干燥技术及设备制造和应用领域发展的需要。在此背景下，我们决定对《现代干燥技术》一书进行较大的修订，为读者提供一部新版的干燥技术工具书。

《现代干燥技术》第二版除基本上保持第一版总体结构并保持和发扬第一版的优点和长处外，对书中的内容和资料进行了更新。如干燥过程的基本原理、新型干燥技术等内容都做了较大的改动。并增加了一些新知识、新技术的内容，如纳米材料干燥、高压电场干燥、折射窗干燥以及污泥干燥、烟分析等内容，力求能较完整地反映干燥技术领域的现状和发展趋势。但限于编者的水平，遗漏和不足在所难免，恳请读者批评指正。

此次修订，除部分新增内容特邀了一些新作者参与编写外，其他基本还由原章节作者执笔修订。最后由潘永康、王喜忠和刘相东负责全书统稿和审定。

最后，我们对为本书的修订作出努力的所有朋友表示深切的谢意，由于他们的努力和支持才使本书得以面世。

编者

2006 年冬于北京

第一版序

干燥是一种古老而通用的操作。从农业、食品、化工、陶瓷、医药、矿产加工到制浆造纸、木材加工，几乎所有的产业都有干燥。干燥是一种高能耗的操作，在各种工业部门总能耗中，干燥耗能从4%（化学工业）到35%（造纸工业）。发达国家，如法国、英国、瑞典等，据资料记载高达12%的工业能耗用于干燥方面。发展中国家目前的干燥耗能较低，但今后势必迅猛增长。我认为用于干燥的能量与一个国家的生活水平存在一定的关系。

最近，对产品质量方面的要求促使人们对干燥技术产生兴趣。由于许多产品的质量取决于干燥，而获得优质产品常需要采用昂贵的干燥工艺。此外，还需考虑高产率、新工艺、安全操作、环境影响等。新“碳税”（根据矿物燃料燃烧释放到大气中的CO₂量而定）将进一步促进干燥能效的提高。

国际上开始关注并认识到干燥的重要性，大概始于1978年在加拿大麦吉尔大学召开的每两年一次的国际干燥会议（IDS）。在这以前，除前苏联以外，几乎没有哪一个国家试图将干燥发展成为一门真正的多学科领域。直到开始召开国际干燥会议（IDS），人们才知道跨越工业界限的构想与技术的相互交融。实际上，目前已成功地运用纸干燥的知识解决了食品生产中的一些主要干燥问题。同样可以认为，产品及工艺的根本界限消失了，或者说至少是变得模糊了。因此，一个领域的知识和经验可以运用于另一个领域。这样，人们就避免了“重新发明”。

我很荣幸能成为这项宏大、有价值的工程的名誉编辑。通过国内的研究和发展及国际上的有益交往的途径发展干燥技术，对于像中国这样一个经济迅速发展的国家来说是一条正确的道路。这种研究和发展的投资回报必定是显著的。遗憾的是，西方国家认为干燥技术已发展“成熟”，他们已开始逐步地缩减研究和发展的开支，这在今后10年无疑具有消极影响。随着全球经济的竞争愈加激烈，各国有必要增加而不是缩减研究和发展的投资。革新、降低成本、提高能效以及保护环境的技术均需开发，这不仅仅对干燥作业而言，而且对其他工业过程也如此。

作为编辑和《工业干燥手册》（Handbook of Industrial Drying）的主要撰稿人，我深知成功编撰《现代干燥技术》这样一流出版物，需要努力、时间、奉献、热情、牺牲和责任心。我恭贺编者和撰稿人，因为他们做了一项出色的工作。我很高兴地看到此书包括了极为广泛的文献资料，而且作者主要是中国人，从而又恰当地着重于本国所关心的方面。本书不仅包括了今后几十年仍将应用的传统干燥方法，而且为未来新技术的发展指出了方向。新技术的发展必然是以适应性设计和逐步改进现今的主要设计方法为基础。这不是一件容易的工作，它是以对当代干燥技术的全面了解为基础的。我希望在将来我们也能看到一些“革命性”的干燥技术——不是基于传统的干燥方法，而是基于与干燥几乎不相干的技术，如脉冲燃烧干燥器、运用超临界流体使气溶胶脱湿。此书为读者洞悉当今干燥技术状况和今后需要做的工作提供了有益的帮助。

我热切希望这本书将促进中国干燥技术的进一步发展。此书对工科学生、研究人员、教

授、干燥器设计者和工业干燥设备的使用者等均适用。它有助于评价国际干燥技术及帮助革新者构思新工艺。

我向所有参与此项工作的人员，包括书籍出版者表示祝贺，因为它是中国同类书籍中的第一次重大的尝试。我本人确实为能参与此项工作而万分喜悦。

Arun S. Mujumdar

1996年10月

(李占勇译)

第一版前言

干燥是许多工业生产中的重要工艺过程之一，它直接影响到产品的性能、形态、质量以及过程的能耗等。干燥技术的覆盖面较广，既涉及复杂的热、质传递机理，又与物系的特性、处理规模等密切相关，最后体现在各种不同的设备结构及工艺上。

我国的干燥技术，可以追溯到 6000 年前原始陶器制造及沿海晒盐等的干燥过程中；建国以来，一些现代的干燥技术（如喷雾干燥、气流干燥及流化床干燥等），在国内有关的工业生产中得到应用；但迄今尚有在运行的干燥装置有待于技术更新。自 20 世纪 70 年代以来，国内干燥技术的研究开发、设备制造及生产应用有了很大进展。随着科学技术迅猛发展以及学科和技术领域之间的交叉、渗透和生长，干燥技术亦出现了日新月异的不断进展，广大的科技工作者热切希望有一本能较全面反映现代干燥技术的专著，作为工作中的参考和启发。

经过多年的酝酿和组织，终于编撰出版了这本《现代干燥技术》的宏著。本书的内容覆盖了干燥过程的基本原理；各种不同的干燥方法及相应的设备装置；对一些有前景的新型干燥技术做了较全面的介绍；在各个主要行业中的专用干燥过程；干燥装置及系统中有关的一些工程设计问题等。内容丰富全面，既有具体的实际内容，又反映了干燥技术的新进展。对于广大的科技人员及高等院校的师生无疑是一本十分有益的专著。

本书是在潘永康教授和王喜忠教授的热心牵头下，花费了极大的精力，耗时数年，组织了全国 30 多位资深的干燥专家，还邀请了几位国际上著名的专家，共同编撰而成，此外还得到国内各有关方面的大力支持，始克于成。本书的出版，是我国干燥领域中的一件大事，相信这将有助于进一步推动我国干燥技术及其工业生产的发展提高，立足于世界之林，并准备迎接第 13 届国际干燥会议（IDS'2002 年）在中国的举行。

萧成基

1996 年 11 月于北京

目 录

| | | | |
|----------------------|----|--------------------------|----|
| 绪论 | 1 | 3 干燥原理、干燥方法和干燥器的选择 | 10 |
| 1 中国现代干燥技术发展概况 | 1 | 3.1 概述 | 10 |
| 2 干燥技术的革新和未来趋势 | 3 | 3.2 干燥原理 | 10 |
| 2.1 前言 | 3 | 3.3 干燥器的分类和选择 | 12 |
| 2.2 革新的定义及类型 | 4 | 3.4 结束语 | 18 |
| 2.3 干燥技术的革新概况 | 6 | 符号说明 | 19 |
| 2.4 干燥技术的未来趋势 | 9 | 参考文献 | 19 |
| 2.5 结束语 | 10 | | |

第一篇 干燥过程的基本原理

| | | | |
|------------------------------|----|-------------------------------|----|
| 第1章 湿气体和湿物料的性质 | 22 | 6 相间传热系数和传质系数 | 53 |
| 1 湿气体的性质和湿度图 | 22 | 7 干燥常数 | 56 |
| 1.1 纯物质的基本热物理性能 | 22 | 8 干燥动力学试验 | 58 |
| 1.2 湿空气(空气-蒸汽混合气)的基本性质 | 24 | 8.1 概述 | 58 |
| 1.3 湿度图 | 28 | 8.2 干燥动力学试验 | 58 |
| 2 湿物料的性质 | 34 | 8.3 由干燥试验估算传热传质性质 | 60 |
| 2.1 物料的湿含量 | 34 | 符号说明 | 60 |
| 2.2 物料的分类 | 34 | 参考文献 | 61 |
| 2.3 干燥的平衡 | 34 | 第3章 基本干燥过程的计算 | 62 |
| 2.4 物料和湿分的结合形式 | 35 | 1 干燥过程计算的目的 | 62 |
| 2.5 湿物料的结构特性和力学性质 | 36 | 2 总体热质衡算 | 62 |
| 符号说明 | 40 | 2.1 质量(物料)衡算 | 62 |
| 参考文献 | 41 | 2.2 热量衡算 | 63 |
| 第2章 干燥中的试验技术和测量方法 | 42 | 2.3 在湿度图上表示干燥过程 | 64 |
| 1 引言 | 42 | 3 微分热质衡算 | 66 |
| 2 物料湿含量和气体湿度的测定 | 42 | 4 在湿度图上表示微分衡算(外部条件控制过程) | 67 |
| 2.1 物料湿含量的测定 | 42 | 4.1 并流干燥过程轨迹的绘制 | 68 |
| 2.2 气体湿度的测定 | 43 | 4.2 逆流干燥过程轨迹的绘制 | 69 |
| 3 物料吸附平衡特性的测定 | 44 | 5 穿流干燥 | 69 |
| 3.1 物料的平衡湿含量 | 44 | 6 两相完全混合的干燥 | 71 |
| 3.2 吸附等温线的测量方法 | 44 | 7 间歇式干燥 | 71 |
| 3.3 影响平衡湿含量的因素 | 47 | 8 内部控制干燥过程的计算 | 72 |
| 4 湿分扩散率(或称湿分扩散系数) | 48 | 符号说明 | 79 |
| 4.1 试验测量方法 | 48 | 参考文献 | 80 |
| 4.2 影响扩散率的因素 | 49 | 第4章 数学模型和模拟 | 81 |
| 5 热导率 | 52 | 1 概述 | 81 |
| 5.1 试验测量方法 | 52 | 1.1 模型 | 81 |
| 5.2 影响热导率的因素 | 52 | 1.2 模拟 | 82 |
| | | 1.3 干燥过程的模型模拟 | 83 |

| | | | |
|----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 2 基于被干燥物料模型 | 83 | 4.1 有效湿分扩散系数 | 102 |
| 2.1 温度模型 | 83 | 4.2 热导率 | 105 |
| 2.2 湿度模型 | 84 | 4.3 对流换热系数与对流传质系数 | 106 |
| 3 基于干燥过程的模型 | 88 | 5 干燥过程模拟 | 108 |
| 3.1 固定床干燥模型 | 89 | 5.1 偏微分方程类型划分 | 108 |
| 3.2 流化床干燥模型 | 91 | 5.2 偏微分方程数值求解 | 109 |
| 3.3 气流干燥模型 | 93 | 5.3 有限元法简介 | 111 |
| 3.4 喷雾干燥模型 | 96 | 5.4 商业软件介绍 | 111 |
| 3.5 转筒干燥模型 | 97 | 符号说明 | 112 |
| 4 模型中热质传递参数的确定 | 102 | 参考文献 | 113 |

第二篇 干燥方法和干燥器

| | | | |
|----------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 第5章 隧道干燥和厢式干燥 | 115 | 1 概述 | 148 |
| 1 干燥机理及概述 | 115 | 2 转鼓干燥器的干燥机理及特点 | 148 |
| 1.1 概述 | 115 | 2.1 干燥器机理 | 148 |
| 1.2 干燥机理 | 115 | 2.2 特点 | 148 |
| 2 厢式干燥器结构和分类 | 116 | 3 转鼓干燥器的分类及结构形式 | 149 |
| 2.1 水平气流厢式干燥器 | 116 | 3.1 转鼓干燥器的分类 | 149 |
| 2.2 穿流气流厢式干燥器 | 118 | 3.2 转鼓干燥器的结构形式 | 149 |
| 2.3 真空厢式干燥器 | 121 | 4 转鼓干燥器规格及应用范围 | 154 |
| 3 隧道干燥器(洞道式干燥器) | 122 | 4.1 单鼓干燥器 | 154 |
| 3.1 隧道干燥器的结构和分类 | 123 | 4.2 双鼓干燥器 | 154 |
| 3.2 计算实例 | 128 | 4.3 对鼓干燥器 | 155 |
| 符号说明 | 129 | 4.4 带密闭罩的对鼓干燥器 | 156 |
| 参考文献 | 130 | 4.5 多鼓干燥器 | 156 |
| 第6章 转筒干燥 | 131 | 5 转鼓干燥的传热传质计算 | 156 |
| 1 概述 | 131 | 5.1 转鼓干燥的传热传质机理 | 156 |
| 1.1 转筒干燥器的工作原理 | 131 | 5.2 传热传质计算 | 157 |
| 1.2 转筒干燥器的特点 | 131 | 6 转鼓干燥器的设计和选用 | 159 |
| 2 转筒干燥器的分类和适用范围 | 131 | 符号说明 | 160 |
| 2.1 直接加热转筒干燥器 | 131 | 参考文献 | 160 |
| 2.2 间接加热转筒干燥器 | 134 | 第8章 带式干燥 | 161 |
| 2.3 复式加热转筒干燥器 | 136 | 1 概述 | 161 |
| 3 转筒干燥器的操作特性 | 137 | 2 带式干燥机的分类 | 161 |
| 3.1 抄板的持有量 | 137 | 3 带式干燥机的类型及操作原理 | 162 |
| 3.2 转筒干燥器内物料填充率 | 141 | 3.1 单级带式干燥机 | 162 |
| 3.3 转筒干燥器的传热 | 142 | 3.2 多级带式干燥机 | 163 |
| 3.4 转筒干燥器的传动功率 | 143 | 3.3 多层带式干燥机 | 164 |
| 4 转筒干燥器的结构和强度 | 144 | 3.4 冲击式带式干燥机 | 164 |
| 4.1 筒体 | 144 | 3.5 喷淋冷却带式造粒机 | 165 |
| 4.2 抄板 | 145 | 4 带式干燥机的结构及操作 | 165 |
| 4.3 滚圈和托轮 | 146 | 4.1 输送带 | 165 |
| 4.4 挡轮 | 146 | 4.2 加料装置 | 166 |
| 符号说明 | 147 | 4.3 循环风机和尾气排风机 | 166 |
| 参考文献 | 147 | 4.4 干燥介质加热装置 | 167 |
| 第7章 转鼓干燥 | 148 | 4.5 操作过程的调节控制 | 168 |

| | | | |
|-----------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 5 带式干燥机的应用实例 | 168 | 4.2 热轴转速 | 214 |
| 6 干燥机计算步骤及计算示例 | 169 | 4.3 溢流高度 | 214 |
| 6.1 恒速干燥阶段 | 169 | 4.4 斜度 | 215 |
| 6.2 降速干燥阶段 | 171 | 5 工业应用及计算实例 | 215 |
| 6.3 总传热系数 K_o 和 K_i 的计算 | 172 | 5.1 工业应用 | 215 |
| 7 校核计算及举例 | 172 | 5.2 计算实例 | 216 |
| 符号说明 | 176 | 符号说明 | 218 |
| 参考文献 | 177 | 参考文献 | 219 |
| 第 9 章 盘式连续干燥器 | 178 | 第 11 章 流化床干燥 | 220 |
| 1 盘式连续干燥器的总体结构 和特点 | 178 | 1 流态化技术基础 | 220 |
| 1.1 盘式连续干燥器的总体结构 | 178 | 1.1 流态化现象 | 220 |
| 1.2 盘式连续干燥器的特点和适用 范围 | 178 | 1.2 流化床的似液体特性 | 221 |
| 1.3 盘式连续干燥器国内外发展概况 | 179 | 1.3 颗粒的基本性质 | 221 |
| 2 盘式连续干燥器的工作原理 | 179 | 2 流化床的流体力学、传热和传质 | 226 |
| 2.1 工作原理 | 179 | 2.1 流化床的气体动力学 | 226 |
| 2.2 扩散理论及其在盘式连续干燥器 中的应用 | 180 | 2.2 流化床中的传热和传质 | 227 |
| 3 盘式连续干燥器的设计计算 | 186 | 3 流化床干燥设备 | 228 |
| 3.1 干燥速率和干燥器加热面的计算 | 186 | 3.1 单级圆筒型流化床干燥器 | 228 |
| 3.2 加热盘的结构和设计 | 187 | 3.2 卧式多室连续流化床干燥器 | 231 |
| 3.3 耙叶的设计 | 189 | 3.3 多层流化床干燥器 | 232 |
| 3.4 主轴功率的计算与确定 | 192 | 3.4 脉冲流化床干燥器 | 234 |
| 3.5 设计计算实例 | 195 | 3.5 冲击流干燥器 | 234 |
| 4 盘式连续干燥器的应用 | 196 | 3.6 离心流化床 | 235 |
| 4.1 用于有毒和易飘逸物料的干燥 | 196 | 3.7 流化床设备的简易设计法 | 236 |
| 4.2 用于湿分需回收物料的干燥 | 196 | 4 振动流化床 | 237 |
| 4.3 用于需氮气保护物料的干燥 | 196 | 4.1 振动流化床概述 | 237 |
| 4.4 用于膏状和高黏度物料的干燥 | 197 | 4.2 振动流化床的动力特性和空气 动力学 | 239 |
| 符号说明 | 198 | 4.3 振动流化床中的传热和传质 | 240 |
| 参考文献 | 198 | 4.4 振动流化床的结构设计 | 241 |
| 第 10 章 卧式桨叶式干燥器 | 200 | 5 惰性粒子流化床 | 243 |
| 1 概述 | 200 | 5.1 工作原理 | 243 |
| 1.1 桨叶干燥机的形式 | 200 | 5.2 惰性粒子 | 243 |
| 1.2 楔形桨叶式干燥器的结构及特点 | 203 | 5.3 惰性粒子流化床操作性能的影响 因素 | 244 |
| 2 传热传质 | 207 | 5.4 惰性粒子流化床的干燥曲线 | 245 |
| 2.1 传热模型 | 207 | 5.5 惰性粒子流化床装置 | 246 |
| 2.2 传热计算 | 209 | 5.6 惰性粒子流化床的工业应用 | 246 |
| 2.3 传质计算 | 211 | 符号说明 | 248 |
| 3 结构设计 | 212 | 参考文献 | 248 |
| 3.1 热轴 | 213 | 第 12 章 喷动床干燥 | 249 |
| 3.2 壳体 | 213 | 1 简介 | 249 |
| 3.3 其他 | 213 | 1.1 喷动床 | 249 |
| 4 干燥过程中的影响因素 | 214 | 1.2 喷动条件 | 249 |
| 4.1 物料黏性 | 214 | 1.3 喷动床与流化床 | 250 |
| | | 2 喷动床空气动力学特性 | 250 |

| | | | |
|--------------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 2.1 喷动机理 | 250 | 1.2 喷雾干燥的优缺点 | 279 |
| 2.2 最大压力降 (Δp_m) | 251 | 2 雾化器的结构和计算 | 280 |
| 2.3 压力降 (Δp_s) | 251 | 2.1 雾化机理 | 280 |
| 2.4 最低喷动速度 (u_{ms}) | 252 | 2.2 雾滴 (或颗粒) 的平均直径及其分布 | 282 |
| 2.5 最大床层高度 (H_m) | 253 | 2.3 气流式喷嘴 | 284 |
| 2.6 喷泉高度 (H_f) | 253 | 2.4 压力式喷嘴 | 292 |
| 2.7 气流分布 | 253 | 2.5 旋转式雾化器 | 301 |
| 2.8 物料运动规律 | 254 | 2.6 三种雾化器的特征 | 311 |
| 2.9 循环时间 t_c 与停留时间 \bar{t} | 256 | 3 空气-雾滴在喷雾干燥塔内的运动 | 312 |
| 3 热量传递 | 256 | 3.1 空气-雾滴的流动方向 | 312 |
| 3.1 空气与物料间的传热 | 256 | 3.2 热风分布装置和热风进出干燥塔的方式 | 314 |
| 3.2 器壁与床层物料间的传热 | 258 | 3.3 喷雾干燥操作中的粘壁问题 | 317 |
| 4 传质与干燥 | 258 | 4 喷雾干燥塔直径和高度的估算 | 321 |
| 4.1 外部条件控制下的传质 | 258 | 4.1 图解积分法 (此处从略, 请参考文献[1]) | 321 |
| 4.2 内部条件控制下的传质 | 259 | 4.2 干燥强度法 | 321 |
| 4.3 固态物料干燥的设计方程 | 259 | 4.3 体积给热系数法 | 322 |
| 5 床体结构改进 | 260 | 4.4 旋转雾化器的喷雾干燥塔直径的确定 | 322 |
| 6 导向管喷动床 | 262 | 4.5 喷雾干燥塔的某些经验数据 | 322 |
| 6.1 基本结构 | 262 | 4.6 行业 and 企业的某些标准 | 323 |
| 6.2 压力降-速度图 | 263 | 5 雾滴的传热和干燥 | 324 |
| 6.3 最低喷动速度 u_{ms} | 263 | 5.1 雾滴的传热和干燥原理 | 324 |
| 6.4 床层中气体和颗粒的运动规律 | 263 | 5.2 含有可溶性固体的液滴的蒸发 | 324 |
| 6.5 床层中颗粒的停留时间分布 | 263 | 5.3 含有不溶性固体液滴的蒸发 | 326 |
| 6.6 导向管设计 | 264 | 5.4 喷雾干燥产品的性质及其影响因素 | 327 |
| 7 喷动床设计 | 265 | 6 喷雾干燥的控制系统 | 328 |
| 7.1 主要部件设计 | 265 | 6.1 控制系统 A | 328 |
| 7.2 喷动床设计实例 | 266 | 6.2 控制系统 B | 329 |
| 7.3 喷动床的优化设计方法 | 267 | 6.3 控制系统 C | 329 |
| 8 喷动床应用 | 269 | 7 某些产品的干燥流程、操作条件及设备 | 330 |
| 8.1 HP110 型喷动床粮食干燥机 | 269 | 8 喷雾干燥的产品目录 | 334 |
| 8.2 颗粒物料的干燥 | 269 | 8.1 化学工业 | 334 |
| 8.3 悬浮液与溶液的干燥 | 270 | 8.2 食品工业 | 338 |
| 8.4 用惰性粒子作载体干燥膏状物料 | 270 | 8.3 医药和生物化学工业 | 339 |
| 8.5 包衣作业 | 271 | 8.4 鞣酸和纤维素工业 | 339 |
| 8.6 固态物料的加热与冷却 | 271 | 8.5 (屠宰) 废料和鱼工业 | 340 |
| 8.7 煤的低温焦化 | 271 | 8.6 环境控制 | 340 |
| 8.8 废橡胶低温热解 | 272 | 符号说明 | 340 |
| 8.9 多气体入口喷动床用于核燃料颗粒包覆 | 273 | 参考文献 | 341 |
| 8.10 粉末-颗粒喷动床半干法烟气脱硫 | 273 | 第 13 章 喷雾干燥 | 278 |
| 8.11 其他用途 | 274 | 1 喷雾干燥概述 | 278 |
| 符号说明 | 275 | 1.1 喷雾干燥原理和流程 | 278 |
| 参考文献 | 276 | | |
| 第 13 章 喷雾干燥 | 278 | 第 14 章 气流干燥 | 342 |
| 1 喷雾干燥概述 | 278 | 1 气流干燥概述 | 342 |
| 1.1 喷雾干燥原理和流程 | 278 | | |

| | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----|-----------------------|----------------|-----|
| 1.1 | 气流干燥的特点 | 342 | 4.1 | 太阳能集热器的结构 | 428 |
| 1.2 | 气流干燥的适用范围 | 343 | 4.2 | 集热器材料 | 430 |
| 2 | 气流干燥的基本原理 | 343 | 4.3 | 影响太阳能集热器的因素 | 434 |
| 2.1 | 颗粒在气流干燥管中的运动 | 343 | 4.4 | 集热器结构设计原则 | 436 |
| 2.2 | 颗粒在气流干燥管中的传热 | 346 | 5 | 太阳能干燥系统的设计计算 | 436 |
| 2.3 | 气流干燥的物料衡算和热量衡算 | 349 | 5.1 | 太阳辐射的计算 | 436 |
| 2.4 | 气流干燥管的压力损失 | 351 | 5.2 | 太阳能空气集热器的设计计算 | 440 |
| 3 | 气流干燥器的设计 | 352 | 5.3 | 太阳能空气集热器的模拟计算 | 449 |
| 4 | 气流干燥器设计计算示例 | 354 | 6 | 太阳能干燥系统的管理与控制 | 452 |
| 5 | 气流干燥管直径和高度的其他近似 计算方法 | 368 | 6.1 | 太阳能干燥系统的管理 | 452 |
| 5.1 | 费多罗夫法 (И. М. фeдopвo 法) | 368 | 6.2 | 太阳能干燥系统的控制 | 455 |
| 5.2 | 桐荣良三法 | 368 | 符号说明 | 457 | |
| 5.3 | 根据中试数据进行计算 | 369 | 参考文献 | 458 | |
| 6 | 气流干燥器形式和结构特点 | 371 | 第 16 章 真空冷冻干燥 | 460 | |
| 6.1 | 气流干燥装置的种类 | 371 | 1 | 真空冷冻干燥的特点和主要用途 | 460 |
| 6.2 | 直管式气流干燥器 | 373 | 1.1 | 真空冷冻干燥的特点 | 460 |
| 7 | 其他类型干燥器 | 381 | 1.2 | 真空冷冻干燥的主要用途 | 460 |
| 7.1 | 脉冲式气流干燥器 | 381 | 2 | 真空冷冻干燥原理 | 466 |
| 7.2 | 旋风式干燥器 | 387 | 2.1 | 预冻阶段 | 466 |
| 7.3 | 旋转气流快速干燥器 | 388 | 2.2 | 升华干燥阶段 | 468 |
| 7.4 | 倒锥式气液干燥器 | 405 | 2.3 | 解析干燥阶段 | 471 |
| 7.5 | 套管式气流干燥器 | 405 | 3 | 真空冷冻干燥设备 | 473 |
| 7.6 | 环形干燥器 | 406 | 3.1 | 冻干机的主要性能指标 | 473 |
| 7.7 | MST 旋风分离干燥器 | 407 | 3.2 | 冻干机的整体结构 | 475 |
| 7.8 | 文丘里气流干燥器 | 409 | 3.3 | 冻干箱的设计 | 480 |
| 7.9 | 低熔点物料干燥器 | 410 | 3.4 | 捕水器的设计 | 482 |
| 7.10 | 涡旋流气流干燥器 | 410 | 3.5 | 冻干机的制冷系统 | 483 |
| 7.11 | 喷射气流干燥器 | 411 | 3.6 | 冻干机加热系统 | 488 |
| 8 | 气流干燥管的结构和材质 | 411 | 3.7 | 冻干机的控制系统 | 489 |
| 8.1 | 气流干燥管的结构 | 411 | 3.8 | 真空冷冻干燥设备的选择 | 490 |
| 8.2 | 气流干燥管的材质 | 411 | 4 | 真空冷冻干燥工艺 | 491 |
| 符号说明 | | 413 | 4.1 | 冻干生物制品的工艺流程 | 492 |
| 参考文献 | | 414 | 4.2 | 冻干药品的工艺流程 | 498 |
| 第 15 章 太阳能干燥系统 | | 415 | 4.3 | 冻干食品的工艺流程 | 500 |
| 1 | 概述 | 415 | 4.4 | 真空冷冻干燥超细微粉材料 | 502 |
| 1.1 | 我国的太阳能资源 | 415 | 5 | 真空冷冻干燥机故障分析及处理 | 502 |
| 1.2 | 太阳能干燥的特点 | 417 | 5.1 | 真空度达不到要求 | 502 |
| 1.3 | 太阳能干燥系统的应用 | 418 | 5.2 | 制冷机的故障 | 505 |
| 2 | 太阳能干燥的基本过程 | 418 | 5.3 | 加热系统故障 | 505 |
| 3 | 太阳能干燥系统的构造 | 419 | 5.4 | 捕水器性能变差 | 506 |
| 3.1 | 太阳能干燥系统的构成 | 419 | 5.5 | 温度、真空度测量误差 | 506 |
| 3.2 | 太阳能干燥系统的类型 | 419 | 符号说明 | 506 | |
| 3.3 | 太阳能干燥系统配置形式 | 426 | 参考文献 | 506 | |
| 3.4 | 太阳能系统方案选择原则 | 428 | 第 17 章 微波和高频干燥 | 508 | |
| 4 | 太阳能集热器的结构及性能 | 428 | 1 | 概述 | 508 |
| | | | 2 | 介电加热干燥的基本原理 | 509 |