

崔春芳 童忠良 编著

干燥新技术 及应用

GANZAO XINJISHU
JI YINGYONG



化学工业出版社

崔春芳 童忠良 编著

干燥新技术 及应用

GANZAO XINJISHU
JI YINGYONG



化学工业出版社

·北京·

本书全面介绍了干燥技术与设备在工业生产中的应用。同时,对干燥操作的安全、节能和干燥技术的未来发展趋势以及干燥装置的附属设备也做了系统的阐述。

全书共九章。第一章为绪论,介绍了干燥过程基本原理、干燥过程与技术研究、干燥设备使用的研究等;第二章为干燥工艺与现代干燥技术,介绍了国内较成熟的干燥工艺与现代干燥技术以及尚在发展阶段的新型干燥技术;第三章为干燥机与干燥过程的辅助系统;第四章至第九章重点介绍了绿色生物农药与农药干燥技术、中药材干燥原理与技术、林产化学工业品与木材干燥技术、食品与食品添加剂干燥技术、粮油化学品与粮食干燥技术、染料加工与染料干燥技术。

本书集干燥技术普及与干燥设备信息介绍为一体,适用于工业干燥工程技术人员、干燥设备用户、相关行业的科研人员学习,也可供干燥设备制造企业的营销人员参考。

干燥技术与设备

应用

UNIVERSITY OF CHINA PRESS
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

干燥新技术及应用/崔春芳,童忠良编著. —北京:
化学工业出版社, 2008. 7
ISBN 978-7-122-03176-1

I. 干… II. ①崔…②童… III. 干燥-工业技术
IV. TQ028. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097405 号

责任编辑: 夏叶清
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 张 艳
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 装: 北京市白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 613 千字 2009 年 1 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

干燥技术与设备在化工、石油化工、医药、生物工程、轻工、食品等行业应用十分广泛。

干燥是工业耗能相当大的一个单元操作,据资料记载,发达国家工业耗能的14%被用于干燥,有些行业的干燥耗能甚至占到生产总耗能的35%,而且这个数字在不断地增大。同时,运用矿物燃料作为热源进行干燥操作产生大量的二氧化碳等气体。干燥设备的尾气(这些气体中夹带一些粉尘)对大气环境有不良的影响,这对于日益引起全球关注的“环境保护”是一个极大的挑战。

几乎所有的工业都离不开干燥操作,虽然正确地了解干燥技术及干燥设备的工作机理有助于成功地完成干燥过程,但是仍然需要不断地投入人力和物力去进一步进行干燥技术的研究和开发,以使其在生产高质量产品的同时,有效地利用能源,减少对环境的不利影响,并且更易于实现过程操作和控制。因此干燥技术与设备在绿色精细化工领域的应用已成为当前研究的热点之一。

本书以干燥过程的基本知识入手,着重介绍了各类型干燥技术的原理、特点、设备类型选择及其工艺设计,并附有应用实例、设计示例和计算举例,便于读者参考使用。同时,本书对干燥操作的安全、节能和干燥技术的未来发展趋势以及干燥装置的附属设备也做了系统的阐述。

全书共九章。第一章为绪论,介绍了干燥过程基本原理、干燥过程与技术研究、干燥设备使用的研究等;第二章为干燥工艺与现代干燥技术,介绍了国内较成熟的干燥工艺与现代干燥技术以及尚在发展阶段的新型干燥技术;第三章为干燥机与干燥过程的辅助系统;第四章到第九章重点介绍了绿色生物农药与农药干燥技术、中药材干燥原理与技术、林产化学品与木材干燥技术、食品与食品添加剂干燥技术、粮油化学品与粮食干燥技术、染料加工与染料干燥技术。

本书的出版旨在为绿色精细化工、石油化工、医药、生物工程、轻工、食品等行业干燥工程技术人员提供一本解决装置设计、制造、操作、研究及技术改造等方面问题的简明实用手册。本书集干燥技术普及与干燥设备信息介绍为一体,适用于化工干燥工程技术人员、干燥设备用户、精细化工相关行业的科研人员学习,也可供干燥设备制造企业的营销人员参考。

本书编写过程中得到了有关专家以及许多干燥技术前辈和同仁的支持与帮助,特在此向他们表示感谢。高洋、高新、王瑜、童凌峰、王月春、韩文彬、沈光欣等同志为本书的资料收集、插图及计算机输入和编排付出了大量劳动,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免会有遗漏或不妥之处,请读者指正以便编者在再版时修正。

编 者

2008.1

目 录

第一章 绪论	1
第一节 干燥过程基本原理	1
一、概述	1
二、湿气体和湿物料的性质	3
三、干燥动力学	3
四、干燥过程中的热质传递	5
第二节 干燥过程与技术研究	5
一、生物物料干燥中的工艺试验技术	6
二、生物物料基本干燥过程的计算	7
三、生物物料测量方法	8
四、干燥数学模型和模拟	8
第三节 干燥设备使用的研究	9
一、采用不同加热方法的干燥设备的适用范围	9
二、根据物料状态选定干燥设备	9
三、影响干燥设备生产能力的因素	10
四、干燥设备选型前的计算	12
五、干燥设备选型技术概述	12
六、干燥设备选型说明	16
七、实验室喷雾干燥装置	17
第四节 对干燥的认识与设备的评价	18
一、关于干燥曲线	18
二、干燥设备性能评价	19
三、环境负荷与干燥技术的局限性	19
四、对干燥的认识和评价分析	20
第五节 国内外干燥技术的研究与进展	20
一、概述	20
二、国内外干燥技术研究	21
三、国内外干燥技术探索	23
四、国内外干燥技术进展	27
五、日本谷物干燥机机械化政策措施	28
第六节 我国干燥设备的技术现状及未来趋势	29
一、干燥设备的技术现状	29
二、干燥设备的未来趋势	32
三、我国干燥设备与技术的应用市场前景	35

四、干燥设备行业整合提升与技术管理	39
五、我国无机盐行业用干燥设备发展现状与产品特点	40
六、依靠科技推动干燥行业发展	41
七、干燥技术在我国国民经济中的地位和作用	43
第二章 干燥工艺与现代干燥技术	46
第一节 干燥工艺与干燥技术介绍	46
一、喷雾干燥工艺流程	46
二、气流干燥工艺与流化床干燥技术	49
三、太阳能干燥工艺与干燥技术应用	51
四、真空冷冻干燥工艺与干燥技术应用	56
五、微波辐射与高频干燥工艺流程	60
六、气体射流冲击干燥技术与工艺流程	64
第二节 各行业干燥技术工艺	65
一、食品生产加工干燥技术工艺	65
二、造纸（纸浆与纸张）加工干燥技术工艺	66
三、医药生产与生物制品加工干燥技术工艺	69
四、陶瓷制品在生产中的干燥工艺	73
五、木材加工干燥技术工艺	73
六、化工产品生产干燥技术工艺	74
第三节 CPE 干燥工艺与技术的研究	80
一、CPE 的干燥原理	80
二、CPE 的干燥特性	80
三、CPE 的干燥工艺	80
四、干燥器类型的选择	81
五、CPE 干燥的工程数据	81
第四节 真空冷冻干燥技术的现状及发展趋势	81
一、概述	81
二、冻干设备的现状及发展趋势	82
三、冻干工艺的现状及发展趋势	83
四、冻干理论的研究现状及发展趋势	84
五、我国真空冷冻干燥设备与研发市场	84
六、微波真空干燥灭菌（浸膏、提取物）的工艺技术	85
第五节 ACR 的干燥工艺及设备	86
一、压力式喷雾干燥造粒机理	86
二、压力喷雾干燥机系统组成	86
三、技术要点	87
四、喷雾干燥 ACR 产品特性	87
第六节 现代新型超临界流体干燥技术	87
一、超临界流体干燥技术的研究进展	88
二、超临界流体干燥技术的机理	90

三、超临界流体干燥的工艺流程与设备	93
四、超临界流体干燥过程的影响因素	95
五、超临界流体干燥技术的应用	96
第七节 羧基络合剂干燥新工艺与新技术	97
一、概述	97
二、羧基络合剂的物料特性及其干燥特性分析	98
三、羧基络合剂物料干燥新工艺的提出	99
四、羧基络合剂物料干燥新工艺系统的研制开发	99
五、羧基络合剂物料干燥新工艺系统的工业化应用	99
六、新工业化干燥系统特点	100
第三章 干燥机与干燥过程的辅助系统	102
第一节 强力粉碎干燥机	102
一、QGS 型强力粉碎干燥机	102
二、旋转闪蒸干燥机和超细粉干燥机	103
第二节 气流干燥机	104
一、旋风式气流干燥机	104
二、脉冲气流干燥机	105
第三节 带式干燥机	105
一、概述	105
二、工作原理	106
三、单级带式干燥机	106
四、多级带式干燥机	106
五、冲击式带式干燥机	106
第四节 辐射干燥机	106
一、概述	106
二、主要辐射干燥机简介	107
第五节 微波加热干燥机	108
一、微波加热工艺与技术	108
二、微波-对流干燥	108
第六节 流化床干燥机	109
一、流化床干燥技术发展过程	109
二、流化床干燥机的分类	111
三、流化床干燥装置简述	112
四、流化床干燥装置操作方法	115
五、流化床干燥制粒	118
第七节 滚筒转鼓干燥机	122
一、滚筒转鼓干燥机简介	122
二、单滚筒转鼓干燥机	123
三、双滚筒转鼓干燥机	123
第八节 干燥过程的辅助系统	124

一、蒸汽加料器	124
二、热风炉及供热系统	125
三、通风及收尘系统	126
四、干燥热源	129
五、沸腾干燥设备常见质量问题及故障排除	131
第四章 绿色生物农药与农药干燥技术	134
第一节 国内外生物农药发展与展望	134
一、生产规模	134
二、国内外研究热点及趋势	134
三、我国生物农药发展分析	136
四、我国生物农药发展方向及需要解决的问题	137
第二节 生物农药及我国的产业发展	137
一、发展生物农药产业的迫切性	137
二、我国生物农药产业发展概况	138
三、我国生物农药产业发展存在的问题及对策	138
四、农药中间体绿色生产技术集成	140
第三节 积极推动生物农药技术的发展	140
一、我国生物农药技术的发展现状	140
二、生物农药发展与产业的障碍	141
三、发展生物农药的重大意义	142
四、如何促进生物农药的发展	142
五、生物农药的市场前景	143
第四节 我国农药干燥技术研究产业	144
一、我国农药干燥产业基础研究现状	144
二、我国农药干燥技术水平	145
三、我国农药干燥产业发展趋势	145
四、市场供求状况及干燥技术发展前景	146
五、农药干燥产业发展建议	146
第五节 农药类干燥设备选型	147
第六节 强化沸腾干燥机在农药生产中的应用	147
一、强化沸腾干燥机的工作原理	147
二、强化沸腾干燥机的特点	148
三、强化沸腾干燥机的应用情况	148
第七节 农药干燥设备现状及未来趋势	148
一、概述	148
二、农药干燥的特点	149
三、农药生产的干燥设备	149
四、农药干燥设备的发展趋势	151
五、农药干燥设备的设计要点	152
第五章 中药材干燥原理与技术	154

第一节 概述	154
一、中药材的资源 and 分类	154
二、中药资源的开发利用	155
三、我国中药企业与产业现状	157
四、我国中药企业与产业的发展趋势	160
五、我国中药企业与产业的潜力与瓶颈	161
六、我国中药产业的市场与环境	162
七、中药制药工程技术的研究	165
八、中药质量研究与质量控制方法	168
九、中药材及其饮片质量控制	169
十、中药防潮工艺技术的最新研究进展	172
第二节 中药材采后初加工及干燥前预处理	173
一、中药材初加工技术	173
二、中药材储藏保鲜技术	174
第三节 中药材干燥方法与工艺	174
一、中药材储藏及干燥过程中的主要变化	174
二、中药材的干燥方法	175
三、中药材干燥过程中的模拟计算	177
四、中药材干燥工艺	178
第四节 中药材提取物干燥技术	180
一、中药材提取物的发展及现状	180
二、中药材提取液浓缩新工艺进展	181
三、中药材提取工艺的研究	184
四、中药材提取物的干燥方法	185
五、中药材提取物干燥过程中的研究	186
第五节 微波萃取技术在中药及天然产物提取中的应用	187
一、中药微波萃取的机理	187
二、中药微波萃取的特点	187
三、中药微波萃取的应用	187
第六节 中药饮片干燥	189
一、中药饮片干燥的重要性	190
二、中药饮片干燥方法	191
三、去脂胶囊提取液的制备与喷雾干燥方法	193
第七节 中药材干燥主要设备与应用	194
一、中药材干燥主要设备	194
二、“三合一”干燥设备应用方案	197
三、微波中药干燥设备的应用与维护	199
第八节 中药材干燥新技术、新工艺的应用	201
一、中药材低温吸附干燥新技术	201
二、中药材新技术、新工艺的发展应用	203

三、酒溶性颗粒剂的制备方法	208
四、混悬性颗粒剂的制备方法	208
五、泡腾性颗粒剂的制备方法	209
六、环糊精在中药颗粒剂中的应用	209
第九节 中药颗粒剂的质量要求	210
一、中药颗粒剂制法、性能与要求	210
二、影响中药颗粒剂质量的因素	210
第六章 林产化学品与木材干燥技术	212
第一节 概述	212
一、林产化学工业的定义与领域	212
二、发达国家林产化学工业的概况	213
三、发展中国家的林产化学工业	214
四、我国林产化学工业现状	214
五、我国林业生物质能源的开发与利用	215
第二节 林产化工基本操作单元与设备	217
一、水蒸气蒸馏工艺与设备	217
二、溶剂提取工艺与设备	219
三、榨磨工艺与设备	221
四、萃取工艺与设备	222
五、蒸馏工艺与设备	223
第三节 林产化工产品的干燥技术与工艺	225
一、松籽油的保健机理与功效	225
二、采用水蒸气蒸馏加工松脂	226
三、松节油间歇蒸馏与连续蒸馏的差别	226
四、松针中的芳香精油提取技术	227
五、萃取松针中的天然香料精油用新溶剂	230
第四节 林产化工产品生产过程中的工艺与干燥设备	231
一、沉降、过滤分离原理及设备	231
二、溶解、发酵、沉淀洗涤辅助设备	232
三、分离、水解、澄清与干燥设备	233
第五节 木材干燥设备选择	234
一、概述	234
二、常用木材干燥设备选择	234
第六节 木材干燥技术的研究	238
一、木材干燥的理论研究	238
二、静电场下木材干燥实验研究	239
三、木材干燥应力的研究	241
四、木材干燥过程的检测与质量控制	243
五、木材制品的加工与干燥技术	245
六、木材干燥技术的发展趋势	248

七、木材干燥理论基础研究方向	249
八、干燥技术的科技创新	250
九、关于木材烘干过程工艺技术的制定	250
十、木材干燥研究的发展方向	252
第七节 木材干燥设备的现状与发展趋势	253
一、我国木材干燥设备的现状	253
二、国际干燥设备的发展趋势	254
第八节 木材干燥设备应用	254
一、木材微波干燥窑与防霉杀虫设备	255
二、木材真空干燥窑	257
三、微波真空干燥设备	258
四、除湿干燥设备	259
五、木材太阳能干燥设备、工艺及应用	261
六、木材干燥方法和干燥窑设备的应用	264
第九节 木材干燥技术的综合利用	266
一、木材干燥领域的拓展——竹制品基材的干燥	266
二、以木废料为能源的木材干燥技术	266
三、木废料能源汽水炉供热调湿木材干燥技术	267
四、用焚烧垃圾能源干燥木材	267
第七章 食品与食品添加剂干燥技术	269
第一节 食品添加剂的现状和发展趋势	269
一、食品添加剂市场	269
二、营养添加剂	270
三、复合营养强化剂	270
四、食品抗氧化剂	271
五、食品添加剂新品	272
六、食品添加剂的复配	274
七、中国食品添加剂国际贸易消费概况	274
八、绿色食品添加剂和干燥技术的发展趋势	276
第二节 食品干燥加工原理	277
一、食品干燥储藏原理	277
二、食品干制的基本原理	278
三、干制过程中食品的主要变化	278
第三节 食品与食品添加剂干燥新工艺	279
一、微波加热杀菌干燥机在调味料行业中的应用	279
二、鱼粉添加剂的干燥制粉加工工艺	280
三、魔芋葡甘聚糖干燥工艺和方法的研究	280
四、南瓜粉喷雾干燥生产线工艺研究	283
五、米邦塔仙人掌真空干燥工艺的研究	285
六、脱水蔬菜两种干燥工艺的实验研究	290

第四节 食品干燥技术与设备	293
一、干燥技术的应用与最新动向	293
二、喷雾干燥	294
三、真空带式干燥	295
四、真空冷冻干燥	296
五、流动层造粒干燥	297
六、应用微波的组合式干燥机	298
第五节 微波干燥食品的现状及其发展前景	299
一、微波干燥的基本原理及特点	299
二、微波干燥食品在国内外的发 展概况	301
三、微波干燥食品发展前景	301
四、微波干燥技术在食品工业中的应用	304
第六节 食品的真空冷冻干燥技术	305
一、食品真空冷冻干燥原理及设备	305
二、农产品的真空冷冻干燥技术	306
三、果蔬的真空冷冻干燥	307
四、冷冻干燥应用实例	309
五、真空冷冻干燥技术在水产品加工中的应用	311
第七节 我国食品干燥机动向分析	312
一、蔬菜干燥设备	313
二、过热溶剂蒸气流化床干燥机	313
三、真空冷冻干燥设备	313
四、系列新型滚筒干燥机	314
五、HG 滚筒刮板干燥机	314
六、封闭循环带式干燥机	314
七、高速混合制粒干燥机	314
八、多功能包衣干燥机	314
九、茶叶微波杀青干燥机	315
第八章 粮油化学品与粮食干燥技术	316
第一节 世界粮油加工业的现状与发展趋势	316
一、规模化生产和集约化经营	316
二、不断采用新技术,提高资源利用率	316
三、营养、卫生、安全和绿色成为加工产品的主流	317
四、深加工、多产品是高效增值的重要途径	317
五、产品标准体系和质量控制体系越来越完善	318
第二节 我国油脂工业的现状和发展战略	318
一、我国油脂的生产规模与产品消费概况	318
二、我国食用植物油加工业的基本情况	321
三、我国粮油高新实用技术的推广内容和粮油科技发展的重点	322
四、我国油脂行业的现状和发展中存在的主要问题	323
五、新时期油脂市场和产业发展的展望	323

六、全面提升油脂行业 and 企业的竞争力	325
第三节 粮食干燥设备和技术市场	327
一、概述	327
二、粮食与农产品干燥设备技术市场需求	327
三、DXG 系列新型低温循环式谷物干燥机	329
四、小型行走式粮食及农产品干燥机	329
五、JGST 系列顺逆流干燥机	330
六、棉籽饼粕盘式连续干燥器	330
七、谷物干燥设备发展趋势	331
第四节 粮食干燥技术的发展与最新动向	332
一、我国粮食干燥的现状	332
二、玉米低温真空烘干研究	333
三、水稻低温干燥设备	333
四、SHY 原生态粮食干燥机组	333
五、几种典型的粮食干燥工艺	334
六、新型节能保质粮食干燥工艺与设备研究	337
第五节 智能化移动式粮食干燥机	341
一、新型粮食就仓干燥技术及装备	341
二、智能化移动式粮食干燥机基本原理设计	342
三、智能化移动式粮食干燥机的特点	343
四、智能化移动式粮食干燥机的主要组成部分	343
五、干燥机产品状况分析	343
六、智能化移动式粮食干燥机的创新优势	344
第六节 粮食干燥系统设计 with 品质 AHP 综合评价	344
一、粮食干燥系统工艺设计	345
二、粮食干燥系统中设备选型的原则	347
三、粮食干燥车间布置	348
四、粮食干燥机设计	349
五、粮食干燥品质 AHP 综合评价	350
第九章 染料加工与染料干燥技术	355
第一节 概述	355
一、染料	355
二、染料产品命名	355
第二节 染料加工技术	356
一、染料加工技术发展历程	356
二、染料加工的基本内容	357
第三节 染料干燥技术的发展	358
一、我国成为世界染料生产第一大国	358
二、推动染料干燥设备的自主创新	359
三、节约能源——开发组合干燥机	359
第四节 染料加工技术开发与发展趋势	360
一、染料加工技术开发程序	360

二、开发染料加工技术应满足的条件	360
第五节 染料干燥技术发展简述、特点与设计根据	361
一、干燥技术发展简述	361
二、染料干燥的特点	361
三、干燥机设计的主要根据	362
第六节 染料的分离设备	362
一、板框压滤机	362
二、全自动压滤机	363
三、自清洗过滤机	364
四、三足式离心机	364
五、卧式刮刀卸料离心机	365
六、卧式螺旋离心机	366
七、碟片离心机	367
八、脱盐用纳滤膜	367
第七节 液状染料加工工艺	368
一、液状染料的优点	369
二、液状染料加工配方的基本构成	370
三、影响分散体稳定性的因素	370
四、液状染料稳定性的测定	370
第八节 染料干燥设备	372
一、载体喷雾流化床干燥机	372
二、桨叶式干燥机	372
三、旋风干燥机	373
四、耙式干燥机	374
五、旋转闪蒸干燥机	374
六、薄膜-流化床干燥机	375
七、气流-沸腾干燥机	376
八、二级气流干燥机	376
九、桨叶式干燥机串联系统	376
十、喷雾带式干燥机	376
十一、喷雾流化干燥机	377
十二、压力式喷雾干燥机	377
十三、气流式喷雾干燥机	377
十四、离心式喷雾干燥机	378
第九节 喷雾造粒干燥技术及其在染料生产中的应用	378
一、压力式喷雾造粒干燥机理	379
二、工艺流程	379
三、喷雾造粒干燥技术在染料生产中的应用经验	379
四、选用和使用喷雾造粒干燥装置时应注意的事项	380
五、喷雾造粒干燥实际操作中的注意事项	381
参考文献	383

第一章 绪 论

第一节 干燥过程基本原理

一、概述

干燥分离操作指通过应用热能将固体、半固体或液体物料中的液体成分蒸发为气体，使物料转变为固体。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体的浓缩（蒸发），也不包括机械脱水，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变和生成固体终产品。干燥在化学、食品、农业、生物技术、聚合物、陶瓷、制药、制浆和造纸、矿产和木材加工等工业中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，约 200 多种干燥机（器）已应用于工业化生产，其中出现了许多被广泛应用的新型干燥机。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。据资料记载，发达国家工业耗能的 14% 被用于干燥，有些行业的干燥耗能甚至占到生产总耗能的 35%，而且这个数字在不断地增大。国外有不同研究报道，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%。在美国，每年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。

不同的物料有以下不同的干燥原因：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）；产品的空隙率可以达到 99.9%；干燥时间可以从 0.25s 到 5 个月；生产能力可以从 0.10kg/h 到 100t/h；生产速度可以从 0（静态）到 2000m/s；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 0.1kPa 到 2500kPa；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，必须了解热量、质量和动量传递的基本原理和原料特性。准确地说，即使在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。试验规模、试验人员的实际经验以及熟练掌握的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，要做好初步的选择，因为通常会有多种不同的干燥设备可以满足某一特定的应用。

同时，运用矿物燃料作为热源进行干燥操作产生大量的二氧化碳等气体。干燥设备的尾气（这些气体中夹带一些粉尘）对大气环境有不良的影响，这对于日益引起全球关注的“环境保护”是一个极大的挑战。

1. 湿物料的干燥过程

干燥的条件为干燥介质（通常为热空气）的流动速度、湿度和温度。

当热空气从湿物料表面稳定地流过时，由于空气的温度高，物料的温度低，因此空气与物料之间存在着传热推动力，空气以对流的方式把热量传递给物料，物料接受了这些热量，用来汽化其中的水分，水分不断地被气流带走，物料的湿含量不断下降。当物料的湿含量下降到平衡水分时，干燥过程结束。

物料干燥过程中，存在着传热和传质两个相互的过程，所谓传热就是热空气将热量传递给物料，用于汽化其中的水分并加热物料，传质就是物料中的水分蒸发并迁移到热空气中，使物料水分逐渐降低，得到干燥。

2. 干燥过程的特点

在干燥过程中，由于物料总是具有一定的几何尺寸，即使是很细的粉料，从微观也可看成是有一定尺寸的颗粒，实际上上述传热传质过程在热气流与物料颗粒之间和物料颗粒内部的机理是不相同的，在干燥理论上就将传热传质过程分为热气流与物料表面的传热、传质过程和物料内部的传热传质过程。由于这两种过程的不同而影响了物料的干燥过程，两者在不同干燥阶段起着不同的主导和约束作用，这就导致了一般湿物料干燥时前一阶段总是以较快且稳定的速度进行，而后一阶段则是以越来越慢的速度进行，所以我们就将干燥过程分为等速干燥阶段和降速干燥阶段。

（1）等速干燥阶段 在等速干燥段内，物料内部水分扩散至表面的速度，可以使物料表面保持着充分的湿润，即表面的湿含量大于干燥介质的最大吸湿能力，所以干燥速度取决于表面汽化速度。换句话说，等速段是受汽化控制的阶段。由于干燥条件（气流温度、湿度、速度）基本保持不变，所以干燥脱水速度也基本一致，故称为等速干燥阶段，此一阶段热气流与物料表面之间的传热、传质过程起着主导作用。因此，提高气流速度和温度，降低空气湿度就都有利于提高等速阶段的干燥速度。等速阶段物料吸收的热量几乎全部都用于蒸发水分，物料很少升温，故热效率很高。可以说等速段内的脱水是较容易的，所去除的水分，纯属非结合水分。

（2）降速干燥阶段 随着物料的水分含量不断降低，物料内部水分的迁移速度小于物料表面的汽化速度，干燥过程受物料内部传热、传质作用的制约，干燥的速度越来越慢，此阶段称为降速干燥阶段，有以下几个特点。

① 降速段的干燥速率与物料的湿含量有关，湿含量越低，干燥速率越小。

② 降速段的干燥速率与物料的厚度或直径很有关系，厚度越大，干燥速率越小。

③ 当降速阶段开始以后，由于干燥速率逐渐减小，空气传给物料的热量，除作为汽化水分使用之外，尚有一部分将使物料的温度升高，直至最后接近于空气的温度。

④ 降速段的水分在物料内部进行汽化，然后以蒸汽的形态扩散至表面，所以降速阶段的干燥速率完全取决于水分和蒸汽在物料内部的扩散速度。因此也把降速段称作内部扩散控

制阶段。

⑤ 在降速阶段，提高干燥速度的关键不再是改善干燥介质的条件，而是提高物料内部湿分扩散速度的问题。提高物料的温度，减小物料的厚度都是很有有效的办法。

相对等速干燥阶段，降速段的干燥脱水要困难得多，能耗也要高得多。所以为了提高干燥速度，降低能耗，保证产品品质，在生产工艺允许的情况下，应尽可能采取打散、破碎、切短等方法减小物料的几何尺寸，以有利于干燥过程的进行。

二、湿气体和湿物料的性质

1. 物料性能及干燥特性

① 物料的形态 大至成型的木材、陶瓷制品以及片状、纤维状、颗粒状、细粉状直至膏糊状和液体物料，都是工业上需要干燥的物料。故选择干燥机应首先依据物料的形态。

② 物料的各种物理特性 包括密度、堆密度、粒径分布、热容以及物料的黏附性能等。黏附性能的高低，对进出料和某些形式的干燥机的工作有很大的影响，黏附严重时干燥过程无法进行。

③ 物料在干燥过程中的特性 包括受热的热敏性，有些物料在受热后会变色和分解变质。另外，干燥过程中物料的收缩将使成型制品开裂或变形，从而使产品品质降低甚至报废。

④ 物料与水分结合的状态 决定了干燥的难易程度、能量消耗水平和在干燥机内所需停留时间的长短，这与选型有很大的关系。例如，对难干燥的物料主要是给予较长的停留时间，而不是强化干燥的外部条件。

2. 对干燥产品的要求

① 对干燥产品形态的要求。在某些情况下这一点显得特别重要。如在食品干燥中，对产品几何形状的要求是能否使产品含水率达到干燥要求的关键。再如像洗衣粉、染料等为利于速溶并避免粉尘飞扬，选择干燥机时必须应用喷雾造粒装置。

② 对干燥均匀性的要求。

③ 对产品的卫生的要求。

④ 对产品的一些特殊要求。如对咖啡、香菇、蔬菜等物料的干燥，要求产品能保持其特有的香味，故不能采用高风温的快速干燥。

3. 湿物料含水量的波动情况及干燥前的脱水

进入干燥机的物料含水率应尽可能避免较大的波动，若含水量变大，将使干燥机产量下降或干燥产品达不到含水率要求，若含水率变小，则出口排气温度上升，产品过度干燥，不单会使干燥机热效率下降，有时还会使产品温度上升，从而影响产品质量。

对于高湿物料（含水率 60% 以上），在干燥前应尽可能应用机械脱水（压滤、离心脱水等）给予预脱水。机械脱水的设备费用虽较高，但其操作费用之低廉是热风干燥无法与之相比的。

三、干燥动力学

A. S. Mujumdar 认为：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 又随时间 t 线性下降，同时伴随着蒸发的开始，