

PANSHI GANZAOQI JI XINXING CHUANDAO GANZAO JISHU

盘式干燥器

及

新型传导干燥技术

张继军 杨大成 编著



化学工业出版社

PANSHI GANZAOQI JI XINXING CHUANDAO GANZAO JISHU

盘式干燥器 及 新型传导干燥技术

张继军 杨大成 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是作者多年开发、研究、设计和生产传导干燥设备的经验总结，既有干燥技术的理论知识，又有丰富的实践经验，实用性强。第1章为传导干燥技术的基础知识，包括湿气体、溶剂及湿物料的基本性质，以及热量、质量衡算等；第2~8章主要介绍盘式干燥器、内热流化床干燥机、真空带式干燥器、振动流动干燥机、桨叶干燥机、蒸汽管回转筒干燥机、管束干燥机7种当代新型传导干燥设备的基本原理和结构、工艺特点、工艺计算、产品以及使用维修；第9章介绍了传导干燥设备的选用原则。

本书可供从事传导干燥设备设计、生产和使用的工程技术人员参考，也可作为工科院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

盘式干燥器及新型传导干燥技术/张继军，杨大成编著. —北京：化学工业出版社，2015.3

ISBN 978-7-122-22964-9

I. ①盘… II. ①张…②杨… III. ①干燥机 IV. ①TM925.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 026371 号

责任编辑：张兴辉

文字编辑：林 媛

责任校对：边 涛

装帧设计：王晓宇

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：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数495千字 2015年5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

京化广临字 2015—9 号

前言

Foreword

干燥是许多工艺过程的重要单元操作，尤其在化工、制药等行业。干燥又是能耗较高的单元操作，据文献报道，已达全部工业能耗的12%之多，寻求节能的干燥技术一直是行业内永恒的目标。众所周知，传导干燥的热效率一般可达60%~80%，而常规对流干燥仅有30%~60%，推广节能传导干燥技术势在必行。然而，由于传导干燥器通常结构较为复杂，价格较高，在我国使用较晚，人们对其缺乏全面认识，推广使用率远不及对流干燥，因而，普及传导干燥知识是当务之急。近些年，随着国民经济的飞速发展，干燥技术也日新月异，体现这些进展的书籍也层出不穷，但绝大部分是介绍对流干燥的，传导干燥一般仅一带而过，远不能反映当代传导干燥技术的进步，也影响了传导干燥技术的推广使用。石家庄工大化工设备有限公司自成立以来，即以开发和推广节能传导干燥技术为己任，在研发和推广盘式干燥器、浆叶干燥机、蒸汽管回转筒干燥机、内热流化床干燥器等一系列传导干燥技术方面，投入了大量人力物力，在行业内独树一帜，取得了显著的经济效益和社会效益，积累了丰富的经验。总结多年来的设计生产经验，促进传导干燥技术的普及和提高，是我们编写本书的诚挚愿望，也希望借此弥补目前传导干燥技术缺少系统文献的缺憾。

盘式干燥器是目前国内研究较多，产品较成熟，节能效果好，生产和使用最广泛的传导干燥器，比较有代表性，因而，本书以盘式干燥器为主，兼顾其他已有较多应用的新型传导干燥技术，全面介绍了产品的基础技术研究、实验、结构与工艺设计、生产、使用等多方面内容，每种干燥器都给出了多种具体的应用实例，方便读者更好地理解该干燥器的性能和工艺特点，可作为用户选择干燥器时的参考。

干燥技术是一门实用技术，目前经验性的知识在设计中还占有重要地位，因而，本书没有过多描述纯理论上的内容，对干燥过程的基本传热传质计算以及结构设计，仍以实用的工程方法为主。干燥技术又是一门跨学科的综合技术，结构与针对具体物料的工艺设计密不可分，但目前行业内大多忽略工艺设计，本书对此作了强调和较充分的论述。本书在描述了传导干燥器传热传质方面的特点及共性外，也用了较多篇幅介绍其结构上的差异，强调了干燥器设计必须针对物料物性的理念，同时也介绍了干燥器在结构设计上的规范和技术改进的空间。

本书以实用技术为主线，是笔者多年开发、研究、设计和生产传导干燥设备的经验总结，既有理论知识，又有较全面的实践经验，内容较为丰富，可供从事传导干燥设备设计、生产和使用的工程技术人员参考，也可作为工科院校相关专业师生的教学参考书。希望借此书的出版发行，提高我国传导干燥设备研发及应用水平，普及传导干燥知识，促进节能传导干燥设备的推广使用，为建立节约型社会贡献一份力量。

本书包括绪论共10章，第1章描述了传导干燥技术的基础知识，包括湿气体、溶剂及湿物料的基本性质，以及热量衡算、质量衡算等。第9章介绍了传导干燥设备的选用原则，其余7章分别介绍了7种当代新型传导干燥设备，重点是第2章，引用了国内最新研究成果，全面详细地描述了盘式干燥器的各项技术。全书由张继军教授和杨大成高级工程师编写，编写工作得到河北工业大学及石家庄工大化工设备有限公司的全力支持，参考并引用了国内外一些研究者的论文或著述，以及部分工大公司技术人员的工艺设计方案和流程图，在此一并表示感谢！

由于笔者水平有限，所述内容难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

目录

CONTENTS

绪论	1
0.1 国内新型传导干燥技术概况	1
0.1.1 传导干燥的基本概念	1
0.1.2 我国新型传导干燥技术的进展	1
0.2 新型传导干燥的一般特点	2
第1章 传导干燥基础	5
1.1 湿气体性质	5
1.1.1 相对湿度	5
1.1.2 绝对湿度	5
1.1.3 湿空气比容 v_H	6
1.1.4 湿空气的比热容 c_H	6
1.1.5 湿空气的焓 I_H	6
1.1.6 露点 t_d	6
1.1.7 湿球温度 t_w	7
1.1.8 温度-湿度图	8
1.2 溶剂性质	9
1.2.1 饱和蒸气压 p_s	9
1.2.2 沸点	10
1.2.3 闪点	10
1.2.4 爆炸极限	10
1.3 湿物料性质	11
1.3.1 湿含量	11
1.3.2 临界湿含量 W_c	11
1.3.3 平衡湿含量 W_e	11
1.3.4 湿分与物料的结合形式	12
1.3.5 湿物料的形态	13
1.3.6 湿物料的热导率	13
1.3.7 安息角 α	14
1.4 质量衡算与热量衡算	14
1.4.1 质量衡算	14
1.4.2 热量衡算	15
本章符号说明	15
参考文献	16
第2章 盘式干燥器	17

2.1	基本工作原理与结构形式	18
2.1.1	基本工作原理	18
2.1.2	盘式干燥器的基本结构形式	19
2.2	扩散理论及传热传质	23
2.2.1	传导干燥过程简析	23
2.2.2	传导干燥中固定床层的传递阻力	23
2.2.3	扩散理论模型	24
2.3	干燥特性	29
2.3.1	盘式干燥器的干燥曲线	29
2.3.2	各种干燥参数对干燥过程的影响	30
2.4	主要结构	33
2.4.1	加热盘	33
2.4.2	耙叶	37
2.4.3	主轴系统	46
2.4.4	箱体	50
2.5	主要特点及与其他干燥方法对比	52
2.5.1	主要特点	52
2.5.2	与其他干燥方法对比	52
2.6	干燥工艺设计	53
2.6.1	干燥工艺设计的内容及程序	53
2.6.2	干燥实验技术	59
2.6.3	常压型盘式干燥器工艺设计	65
2.6.4	真空型盘式干燥器工艺设计	67
2.6.5	氮气保护及气体循环型盘式干燥器工艺设计	70
2.7	盘式干燥器的适用范围及典型应用实例	73
2.7.1	简易流程型——饲料级磷酸氢钙的干燥	74
2.7.2	常压操作型——硫铁矿粉干燥	75
2.7.3	真空溶剂回收型——维生素 C 干燥	76
2.7.4	氮气循环型——除草剂干燥	76
2.7.5	大型氮气循环型——聚甲醛干燥	77
2.7.6	化学反应型——盘式干法乙炔发生器	78
2.7.7	煅烧型——氧化铝低温焙烧	80
2.7.8	上传动式——硝酸钾干燥	80
2.7.9	烟道气传导加热型——轻质碳酸钙干燥	81
2.7.10	组合干燥	81
2.7.11	返干料工艺	85
2.8	产品型谱	86
2.9	安装、调整、使用、维护及常见故障排除	87
2.9.1	设备安装	87
2.9.2	试车及工艺调试	87
2.9.3	设备运行	87

2.9.4	设备维护与保养	87
2.9.5	常见故障及排除方法	88
2.10	盘式干燥器的节能	88
2.10.1	结构与工艺参数优化	88
2.10.2	冷凝水回用	89
2.10.3	气体循环式干燥	89
2.10.4	利用热泵技术回收干燥尾气热能	89
2.10.5	组合干燥	90
2.11	盘式干燥器的发展方向	90
2.12	盘式干燥器常用的附属装置	91
2.12.1	给排料装置	91
2.12.2	风机	98
2.12.3	除尘装置	99
2.12.4	热源	111
2.12.5	真空系统	122
	本章符号说明	128
	参考文献	129

第3章 内热流化床干燥机..... 131

3.1	基本原理与结构	131
3.1.1	传统流化床干燥技术	131
3.1.2	内热流化床干燥技术及传热机理	133
3.1.3	结构特点及主要结构设计	138
3.1.4	回转搅拌式内热流化床干燥机	145
3.2	主要特点及与其他干燥方法的对比	148
3.2.1	主要特点	148
3.2.2	与传统干燥方式的对比	148
3.3	工艺计算及主要附属设备选型	150
3.3.1	基于理论推导之关联式的计算方法	150
3.3.2	基于热平衡和质量平衡的工程算法	153
3.4	应用范围和重点应用例	156
3.4.1	草甘膦类散粒状结晶物料干燥	157
3.4.2	糖的干燥、冷却	158
3.4.3	重碱煅烧	159
3.4.4	闭路循环式内热流化床干燥	159
3.4.5	褐煤过热蒸汽内热流化床干燥	160
3.4.6	聚氯乙烯(PVC)干燥	160
3.4.7	ABS干燥	161
3.4.8	聚丙烯干燥	162
3.5	产品型谱及国内外生产的内热流化床干燥机	163
3.6	安装、调整、使用、维护、常见故障排除	165

3.6.1	设备安装	165
3.6.2	试车及工艺调试	165
3.6.3	设备运行	166
3.6.4	设备维护与保养	166
3.6.5	常见故障及排除方法	166
	本章符号说明	167
	参考文献	167
第4章	真空带式干燥器	169
4.1	基本原理与结构	170
4.1.1	基本原理	170
4.1.2	主要结构	171
4.1.3	干燥特性	176
4.2	主要特点	178
4.3	工艺计算及相关参数确定	178
4.3.1	干燥热量计算	178
4.3.2	传热系数	179
4.3.3	干燥面积计算	179
4.3.4	真空系统计算	180
4.3.5	计算实例	180
4.4	应用范围	181
4.5	产品型谱	181
	本章符号说明	182
	参考文献	182
第5章	振动流动干燥机	183
5.1	基本原理、结构及干燥特性	183
5.1.1	基本工作原理	183
5.1.2	主要结构	184
5.1.3	干燥特性	187
5.2	主要特点	190
5.3	工艺计算方法	191
5.3.1	干燥热量计算	191
5.3.2	干燥器加热面积	191
5.3.3	真空系统计算	191
5.3.4	计算实例	192
5.4	振动流动干燥机部分结构设计	192
5.4.1	激振器	192
5.4.2	隔振簧	194
5.5	应用范围和典型应用例	195
5.5.1	应用范围	195

5.5.2 典型应用实例	195
5.6 产品型谱	196
5.7 安装、调整、使用、维护、常见故障排除	196
5.7.1 设备安装	196
5.7.2 试车及工艺调试	197
5.7.3 设备运行	198
5.7.4 设备维护与保养	198
5.7.5 常见故障及排除方法	198
本章符号说明	199
参考文献	199
第6章 桨叶干燥机	200
6.1 桨叶干燥机的基本原理与结构	200
6.1.1 基本工作原理	200
6.1.2 结构特点及主要结构设计	201
6.1.3 桨叶干燥机的传热机理及干燥特性	205
6.2 主要特点	212
6.3 工艺计算	213
6.3.1 热量计算	213
6.3.2 干燥面积计算	213
6.3.3 常压干燥方式风量计算	213
6.3.4 计算实例	214
6.4 应用范围和重点应用实例	214
6.4.1 应用范围	214
6.4.2 重点应用实例	215
6.5 产品分类	218
6.5.1 常压型	218
6.5.2 真空及溶剂回收型	218
6.5.3 氮气保护及气体循环型	219
6.5.4 采用不同热源型	220
6.6 产品型谱	221
6.7 安装、调整、使用、维护、常见故障排除	222
6.7.1 设备安装	222
6.7.2 试车及工艺调试	222
6.7.3 设备运行	223
6.7.4 突发事件处理	223
6.7.5 设备维护与保养	224
6.7.6 常见故障及排除方法	224
本章符号说明	225
参考文献	225
第7章 蒸汽管回转筒干燥机	227

7.1 蒸汽管回转筒干燥机的基本原理与结构	227
7.1.1 基本工作原理	227
7.1.2 主要结构及其特点	229
7.1.3 干燥特性	234
7.2 主要特点	238
7.3 工艺计算实例	239
7.4 应用范围和重点应用实例	240
7.4.1 重碱煅烧	240
7.4.2 PTA、TA(精对苯二甲酸、粗对苯二甲酸)干燥	243
7.4.3 褐煤干燥及煤调湿	245
7.4.4 金属精矿粉的干燥	247
本章符号说明	248
参考文献	248
第8章 管束干燥机	250
8.1 基本原理与结构	251
8.1.1 工作原理	251
8.1.2 主要结构	252
8.1.3 干燥特性	255
8.2 主要特点	258
8.3 工艺计算	258
8.3.1 干燥热量计算	258
8.3.2 干燥面积计算	259
8.3.3 常压干燥方式风量计算	259
8.3.4 计算实例——玉米麸子管束干燥机工艺计算	259
8.4 应用范围和重点应用实例	260
8.4.1 应用范围及部分物料干燥数据	260
8.4.2 DDGS干燥	261
8.4.3 管束干燥机的几种不同工艺形式	262
8.5 其他形式的旋转管束干燥机	263
8.5.1 刨花板干燥机	263
8.5.2 倾斜管束式煤炭干燥机	265
8.6 产品型谱	267
8.7 安装、调整、使用、维护、常见故障排除	267
8.7.1 设备安装	267
8.7.2 试车及工艺调试	268
8.7.3 设备运行	268
8.7.4 突发事件处理	269
8.7.5 设备维护与保养	269
8.7.6 常见故障及排除方法	269
本章符号说明	270

参考文献	270
第 9 章 传导干燥设备的选用	272
9.1 传导干燥设备基本情况	272
9.2 按物料特性选择传导干燥设备	274
9.3 按操作特性选择传导干燥器	274
9.4 选择干燥器还需考虑的其他因素	275
参考文献	276
附录 石家庄工大化工设备有限公司简介	277

绪论

0.1 国内新型传导干燥技术概况

0.1.1 传导干燥的基本概念

工业干燥器对物料的加热通常有对流、传导、辐射、微波等方式，前两种占绝大多数。其中对流干燥的热介质直接接触物料，也称直接干燥，而传导干燥的物料则不与热介质接触，热量通过器壁传递给物料，也称间接干燥。

在传导干燥器中，一般设有静止或转动的加热壁面，以蒸汽、导热油、热水等做热源，热传递表面的温度 $-40\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，物料静止或被搅拌，蒸发出的湿气经真空系统或少量干气体携带排出。由于系统不需要热风作热源，因加热热风和尾气排放而损失的热量最小，物料的温度也仅略高于干燥器操作压力下湿分蒸发的温度，热量几乎全部用来脱出水分，理论热效率可接近100%，典型的能耗指标为 $3000\sim 4500\text{kJ/kg}$ （水），而直接干燥为 $4000\sim 6000\text{kJ/kg}$ （水）。同时，尾气少，饱和度高，粉尘夹带少，后处理设备负荷低，环境污染小，是真正的节能环保型干燥设备。传导干燥器一般结构较复杂，造价相对较高，但运行成本往往远低于同规模对流干燥设备，通过节能而回收的成本可使其更具竞争力。

在化工、医药、生物制品、食品等产品加工过程中，经常会涉及含水或含溶剂的热敏物料，或有毒有害、易燃易爆、易氧化的物料，如采用传统对流干燥方式，因风温过低而耗费大量干燥介质，导致成套设备组成复杂、庞大，投资高，能耗高，操作不便，溶剂回收困难，泄漏而导致的安全风险大，尾气处理难度高，环保难以达标，如采用氮气保护的对流干燥，运行成本则大幅度提高。传导干燥可在常压、真空、密闭环境下操作，干燥过程中不需要或仅需要少量气体介质携带湿气，上边所说的一切问题尽可迎刃而解。

0.1.2 我国新型传导干燥技术的进展

本书所讨论的新型传导干燥技术，泛指自20世纪80年代以来，我国自行开发并已取得较大推广应用的节能型传导干燥技术。1971年我国曾作过工业干燥设备调查，当时国内已在使用的传导干燥器仅有厢式干燥器、转鼓干燥器、真空耙式干燥器，以及个别直接用高温烟道气加热筒体的回转筒干燥器等。1991年石化行业再次进行了小范围的干燥设备调查，共调查了12家大型石化企业的42套进口干燥设备，其中对流式干燥器10套，传导式干燥器26套，属于对流传导组合式干燥器的内热流化床6套，显而易见，传导干燥技术在大化工企业的干燥设备中已占据了半壁以上江山。从不同行业的使用情况也可看出这一趋势，例如，玉米深加工行业是个新兴行业，相关淀粉和饲料及酒精生产企业，全国有数千家，其干燥设备的特点是，物料处理量大、价值低，干燥运行费用必须低廉才有竞争力，为此，他们一开始走的就是引进、对比、消化吸收的路子，没有在国内的以热风干燥为主的设备中筛选。当时经国家牵头，北京酒精厂和广州珠江啤酒厂分别引进了丹麦和德国的卧式回转圆盘干燥机，安徽一酒精厂和吉林黄龙、铁岭淀粉厂分别引进法国及美国、德国的管束（列管）干燥机，蒸汽单耗 $1.2\sim 1.4\text{kg}$ （蒸汽）/ kg （水），这些设备较好的运行指标引导了该行业的设备选择方向。目前，新型传导干燥方式已是这些行业的优先选择，节能效果非常突出。煤

气化和煤化工行业,以及电厂的褐煤提质,处理量极大,多在小时处理量几百吨以上,且要求连续无故障运行时间长,无燃烧和爆炸风险等,目前,煤的调湿干燥正在各种干燥方式中徘徊。传统的通风回转筒可能被淘汰,因高温烟道气产生新的污染,煤粉爆炸风险依然存在。蒸汽回转筒干燥器、倾斜管束干燥器和过热蒸汽型内热流化床干燥器是在选目标,这些全部是传导干燥方法,其中蒸汽回转筒和内热流化床有可能成为主流选型,内热流化床利用了很多新技术,如废气经加热或压缩为过热蒸汽循环使用,内置管束排出的冷凝水被用来预热煤等。早期我国PVC行业通常使用气流干燥、流化床干燥,或两者的组合,而现在,绝大多数PVC企业使用内热流化床或一种称为赫斯特气流干燥的技术,这两种干燥方式均为对流和传导组合加热方式,比单纯对流干燥方式节能,设备体积更小。精制盐行业在经历了多种对流干燥方式的徘徊后,目前规模较大的企业基本选用内热流化床,而污泥处理行业大多选用桨叶干燥器或桨叶与其他干燥方式的组合。

现代真空带式干燥器是机电一体化的高科技产品,传送带采用PTFE材质,厚度仅0.6mm,传热好,不粘料。给料、布料、传送带纠偏、带速、加热和冷却温度、排料、CIP在位清洗等全部自动化操作,计算机控制,产品符合GMP要求。德国、瑞士、日本一些公司都在批量生产这类产品,产品可在低温下大量连续干燥,保持生物活性及色香味,运行成本却比冷冻干燥低得多。我国过去不能生产该产品,一些科研院所和企业经过十几年的努力,现已能批量生产,规格品种基本满足市场需求,产品水平已接近国外同类产品,在中药提取物(如双黄连、灵芝、丹参、复方丹参、穿心莲、苦参、当归)以及食品保健品(如多聚低糖、咖啡、麦精、果珍)等干燥上取得成功。

振动流动干燥机是日本20世纪80年代的新产品,在保持药品的洁净度和无交叉污染方面有独到之处,密封性能和能耗也优于同类干燥器,我国几乎与国际同步开发了该产品,为制药和精细化工行业又增加了一种新型节能干燥产品。

盘式干燥器是比较典型的传导干燥设备,它的发展从一个侧面反映了我国传导干燥技术的进步。20世纪80年代以前,国内没有生产和使用这种设备的先例,桐荣良三在他的1975年版《干燥装置》中对盘式干燥器的应用也仅引用了无机盐一例,但目前,国内能检索到的有关盘式干燥器的科技文献近百篇,远超过国外的文献,生产的盘式干燥器规格近百种,最大直径已达3500mm,推广使用的物料数百种,在多次国家重点工程的国际招标中中标。盘式干燥器因其突出的节能、环保优势,已成为松散物料最有竞争力的干燥方式。

20世纪90年代至今,一批科技型企业进入干燥技术行业,极大提高了新产品研发和市场推广能力,促进工业干燥技术向节能、大型化迈进,到目前为止,国际上通行的传导干燥设备,我国绝大部分均可自行设计生产,其中桨叶干燥机面积达到160m²;盘式干燥机面积达到180m²,处理量400t/h的煤调湿和100万吨/年的PTA干燥用大型蒸汽管回转筒干燥机都已开发成功,一些需要真空或氮气保护的,具有自主知识产权的大型传导干燥设备已可完全替代进口,我国传导干燥技术已从简单模仿,过渡到自主创新和产品升级换代阶段。

0.2 新型传导干燥的一般特点

(1) 适于热敏及易燃易爆以及需要溶剂回收的物料干燥

传导干燥的加热方式全部为器壁传热,物料与热源不直接接触,受污染的概率小。在操作环境方面,按工艺不同通常可分为常压(微负压)、真空、密闭式等三种方式,其中常压传导干燥也与对流常压干燥不同,所用热风不承担加热物料任务,仅为降低排气湿度,避免尾气处理设备结露堵塞之用,因而风量很小,由排风而散失的热损失非常低。

大部分传导干燥设备都可以设计为在真空下操作,此时,湿分的沸点降低,物料可以在

温升不高的情况下蒸发湿分, 非常适合热敏性物料, 如加热温度不变, 沸点的降低相当于提高了传热温差, 因而提高干燥器的真空度, 就可以加快干燥的进程。如在真空带式干燥中, 操作压力可控制在 $0.7 \sim 2 \text{ kPa}$, 对应水的沸点低于 20°C , 即使热源温度 150°C , 物料也可以在温升不超过 20°C 情况下恒速干燥, 可以很好地保持热敏物料的色香味, 以及生物物料的活性。同时, 由于真空下氧气含量低, 易燃易爆易氧化物料得以保护, 还可以采用较高的加热温度而无安全风险。真空传导干燥设备密闭性好, 漏气量低, 尾气含不凝气体量小, 溶剂损失少且回收较为容易。

对于易燃易爆物料, 除了真空传导干燥外, 还可以在氮气保护的密闭条件下干燥, 为了防止氧气混入系统而采取正压操作, 此时氮气主要功能是隔绝氧气、保护物料或溶剂, 其氮气循环量比氮气保护的对流干燥要小得多, 维持操作空间在一个不大的正压范围即可, 设备结构可简化, 不必按压力容器设计和制造, 制作成本大大降低, 在这种情况下, 如溶剂需要回收, 采取直冷式冷凝, 回收成本也低于真空传导干燥通常所采用的间接式冷凝。

(2) 节能

众所周知, 对流干燥的热效率一般只有 $30\% \sim 60\%$, 而传导干燥在理论上可接近 100% , 实际装置中可达到 $60\% \sim 80\%$ 。一般情况下传导干燥比对流干燥节能 $20\% \sim 50\%$, 这是因为传导干燥不需要热风加热物料, 由排气散失的热损失非常小; 在恒速干燥段, 因真空或减压降低了溶剂沸点, 物料温升极小, 热量几乎全部用来蒸发湿分, 而在降速干燥段, 传导干燥用来提升物料温度的热量也远小于对流干燥, 在希望干燥到很低水分, 如接近或小于临界含水率时, 传导干燥节能优势较大。部分对流及传导干燥的耗能指标如表 0-1。

表 0-1 部分对流及传导干燥的耗能指标

干燥器种类	传热	能耗/[kJ/kg(H ₂ O)]	物料形态
旋转闪蒸干燥器	对流	4500~9000	滤饼
流化床干燥器	对流	4000~9000	粉粒状
喷雾干燥器	对流	4500~11500	液状
盘式干燥器	传导	3000~4500	粉粒状
桨叶干燥器	传导	3500~5000	膏状、滤饼
内热流化床	对流+传导	4000~6000	粉粒状

(3) 环保

传导干燥设备无论工作在减压、真空或正压状态下, 工作室密闭, 基本与大气隔绝, 泄漏很少, 即使有少量携湿气体, 但风速较低, 粉尘夹带少, 后处理设备负荷低, 粉尘排放量小, 有些简易型传导干燥器和蒸发量小的真空干燥器, 湿气体流量小, 湿度大, 流速低, 甚至可以不用除尘器而直接排放, 简化了流程, 降低了成套设备造价。

(4) 基本结构及造价

传导干燥器一般设有体积较大的传导加热面, 更新加热面的搅拌或回转装置, 密闭或能承受外压的工作腔体, 因而, 相对于结构简单的对流干燥器来讲, 传导干燥器结构要复杂一些, 制作难度较大, 造价较高。

(5) 运行成本较低

尽管传导干燥器造价较高, 但由于其优异的节能效果, 运行成本反而低于对流干燥。以一种膏状物料为例, 含水由 72% 降至 1% 以下, 热源为表压 0.45 MPa 的饱和蒸汽, 产量 100 kg/h , 对可选的桨叶干燥器(传导)和旋转闪蒸干燥器(对流)的运行成本进行了测算, 运行成本对比如图 0-1, 各项成本所占比例如图 0-2, 从成本构成分析, 蒸汽加电费占干燥成本的比例, 传导和对流式分别为 68% 和 83% , 而设备费只占干燥成本的 11% 和 6% , 可以认为, 能耗的大小是干燥设备运行成本的决定因素, 在选用干燥设备时必须充分加以

考虑。

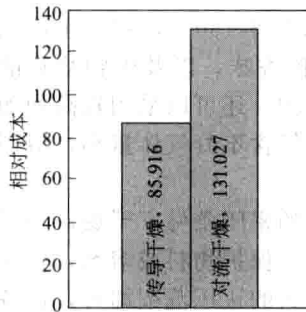


图 0-1 运行成本对比

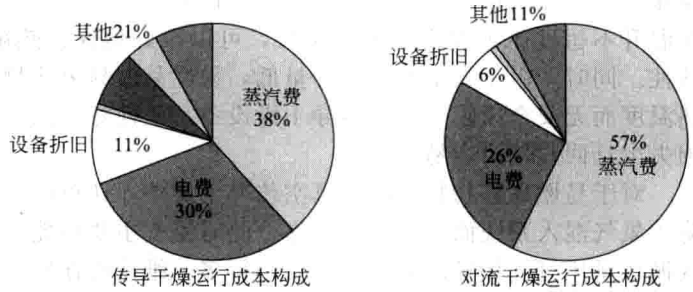


图 0-2 传导与对流干燥运行成本对比图

(6) 干燥速率及单机处理量

传导干燥属于器壁向料层的传热和料层内部物料之间的扩散传热，与加热面临近的料层传热系数较高，虽无对流干燥的边界层，但由于料层大多数较厚，传热阻力较大，如无搅拌或搅拌强度不够，加热面更新差，总体传热系数并不高，减压或真空不能提高传热系数。

大多数传导干燥的裸露面远小于加热面，料层厚度较大，如桨叶、耙式、管束等干燥器，料层内蒸汽排逸不及时，蒸汽分压较高，传质阻力较大，同时，接近加热面的物料位于深层，传热速率高于传质速率，热量不能全部用来蒸发水分，相当一部分热量用来提高料温，因而，常压操作下的厚料层传导干燥，排料温度一般高于对流干燥。尽管减压或真空可降低溶剂的沸点，加大湿分的扩散速率，但在料层较厚时，这一影响可能非常有限，致使传导干燥在大部分情况下的传质速率也不高，加强搅拌可以改善这种状况。

料层较薄或仅为料膜时，如盘式干燥器和真空转鼓干燥器、真空带式干燥器，提高操作真空度，湿分的沸点降低，在加热温度不变时，提高了传热温差，可维持较高的干燥速率，如在供热蒸汽压力 0.2MPa，真空度 87kPa 条件下，蒸发强度是常压下 2~2.5 倍，可见，传导干燥器提高干燥性能的关键是减薄料层，或提高搅拌强度。

第 1 章

传导干燥基础

1.1 湿气体性质

对流干燥的传热传质完全依靠热风,按传热计算的风量往往远高于按传质计算所需要的风量,因而热风与湿气混合物的相对湿度一般较低,距离饱和状态较远,传质过程对干燥过程影响相对较小,但传导干燥则不然,它的传热仅依靠器壁,传质则完全依靠物料内部和外部的扩散,湿分的蒸发以及在料层内外的扩散,一直要受到周围环境的温度、压力、湿气体性质的制约,因而,搞清干燥过程的湿气体状态对传导干燥至关重要。

传导干燥的湿气体大部分属于空气-水系统,但也有是在真空或氮气保护状态下的有机溶剂脱出,尽管湿气体成分可能比较复杂,但其气体状态大都与空气-水系统相似,因而下边的讨论仅以空气-水系统为例,其结果同样适于其他系统。

1.1.1 相对湿度

物料中的液体在受热或与干气体接触时,液体将汽化并扩散到空间中去,液体的蒸气分压逐渐增大,当接触时间足够长时,湿气体中液体蒸气分压就将达到最大值,两相处于动平衡状态,液体不再继续汽化,干燥过程终结。为了使干燥过程得以继续,传导干燥一般采取抽出蒸汽或提高湿气体中干气比例的办法,以维持一定的干燥速率,显然,只有当湿气体中蒸气的分压小于同温度下液体的饱和蒸气压时,湿气体才具有容纳湿分而作为载湿体的能力,它们之间的差距越大,容纳湿分的能力也越大。为了直观地看出湿气体距离饱和有多远,在一定的总压下,把湿气体中蒸气的分压 p_h 与同温度下液体的饱和蒸气压 p_s 之比定义为湿气体的相对湿度:

$$\phi = \frac{p_h}{p_s} \quad (1-1)$$

如忽略干燥器的泄漏,真空条件下传导干燥的相对湿度为 100%,湿气体中蒸气的分压在数值上等于物料表面该液体的饱和蒸气压,也等于干燥器内的总压,湿气体的绝对湿度等于该液体在总压下的饱和湿度。常压及氮气保护的传导干燥,湿气体相对湿度也远高于对流干燥,气体仅用来携带湿分,用量有限,这也是传导干燥比较节能的因素之一。

1.1.2 绝对湿度

单位质量绝干气体所含液体蒸气的质量,称为气体的绝对湿度 x ,也称湿度或湿含量,其表达式为:

$$x = \frac{n_h M_h}{n_g M_g} = \frac{p_h M_h}{p_g M_g} = \frac{p_h M_h}{(p - p_h) M_g} \quad (1-2)$$

式中 n_h, n_g ——液体蒸气和绝干气体的物质的量;

M_h, M_g ——液体蒸气和绝干气体的摩尔质量;

p_h, p_g ——液体蒸气和绝干气体的分压;

p ——湿气体的总压。

将式(1-1)代入式(1-2)得: $x = \frac{M_h \phi p_s}{M_g (p - \phi p_s)}$ (kg/kg), 对空气-水系统, $M_h = 18\text{g/mol}$,

$M_g = 29\text{g/mol}$, 故

$$x = 0.622 \frac{p_h}{p - p_h} = 0.622 \frac{\phi p_s}{p - \phi p_s} \quad (1-3)$$

1.1.3 湿空气比容 ν_H

在一定温度和压力下, 单位质量干空气与其携带的水蒸气量所占有的体积称为湿气体的比容, 简称湿比容, 其计算方法如下。

根据气体状态方程 $pV = nRT = \frac{m}{M}RT$ 和标准状态下 ($p = 101.33\text{kPa}$ 及 $T = 273\text{K}$), 1mol 气体的体积为 22.4L, 得 $R = 22.4/273\text{L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 故有:

$$\text{干空气比容为: } \nu_g = \frac{V}{m_g} = \frac{RT}{pM_g} = \frac{22.4}{273} \times \frac{(t_g + 273)}{1 \times 29} \quad (1-4)$$

$$\text{水蒸气比容为: } \nu_h = \frac{V}{m_h} = \frac{RT}{pM_h} = \frac{22.4}{273} \times \frac{(t_g + 273)}{1 \times 18} \quad (1-5)$$

绝对湿度为 x 的湿空气比容为

$$\nu_H = \nu_g + \nu_h x = (0.773 + 1.244x) \frac{t_g + 273}{273} \quad (1-6)$$

式中 ν_g ——干空气比容, m^3/kg ;

ν_h ——水蒸气比容, m^3/kg ;

ν_H ——混合湿气比容, m^3/kg 。

1.1.4 湿空气的比热容 c_H

湿空气的比热容是 1kg 干空气和其中的水蒸气组成的混合气体的比热容, 故

$$c_H = c_g + c_h x \quad (1-7)$$

在常压和 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内, 可近似将 c_g 和 c_h 视为常数, 其值分别为 $1.01\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $1.88\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 因而, 湿空气的比热容仅随湿度而变

$$c_H = 1.01 + 1.88x \quad (1-8)$$

式中 c_g ——干空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

c_h ——水蒸气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.1.5 湿空气的焓 I_H

湿空气的焓定义为 1kg 干空气及其携带的水蒸气焓值之和, 即

$$I_H = I_g + I_h x = (c_g + c_h x)t + r_0 x \quad (1-9)$$

式中 I_g ——干空气焓, kJ/kg ;

I_h ——水蒸气焓, kJ/kg ;

r_0 ——水蒸气潜热, kJ/kg ;

其中 $(c_g + c_h x)t$ 为湿气体的显热, 在常压及氮气保护传导干燥中是有些作用的, 尽管这种作用远不如对流干燥中那么大。 $r_0 x$ 为潜热, 干燥过程中不能被利用。

1.1.6 露点 t_d

在饱和状态到达以前, 将湿气体单独地 (即不与湿分或湿物料接触) 冷却时, 它的湿含量 x 不变化, 如果总压也维持不变, 则湿分蒸气的分压 p_h 也不变。但是, 随着温度的下降, 饱和蒸汽压 p_s 却降低了, 因此湿气体的相对湿度 ϕ 将逐渐增大, 直到 $\phi = 100\%$ 时, 湿气体到达饱和状态。此后再进一步降低温度时, 湿气体中的蒸气将立即冷凝析出, 从而使湿气体中的湿含量 x 减小。这种在总压和湿含量不变的条件下, 将湿气体冷却而达到饱和时的温