

化工设备设计全书

# 干燥设备

《化工设备设计全书》编辑委员会  
金国森 等编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

化工设备设计全书

# 干燥设备

《化工设备设计全书》编辑委员会  
金国森 等编

化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心  
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

干燥设备/金国森等编. —北京:化学工业出版社,2002.7  
(化工设备设计全书)  
ISBN 7-5025-3829-1

I. 干… II. 金… III. 干燥-化工设备 IV. TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 032864 号

---

化工设备设计全书

干燥设备

《化工设备设计全书》编辑委员会

金国森 等编

责任编辑:戴燕红

责任校对:蒋宇

封面设计:蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 30¼ 字数 1020 千字

2002年8月第1版 2002年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-3829-1/TQ·1533

定 价: 65.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

京工商广临字 2002—24 号

## 《化工设备设计全书》编辑委员会

主任委员	袁  纽	中国石油和化工勘察设计协会					
副主任委员	华  峰	中国石化集团上海医药工业设计院					
	洪德晓	全国化工设备设计技术中心站					
委  员	叶文邦	钱小燕	黄正林	汪  扬	金国森	应道宴	
	魏兆灿	秦叔经	虞  军	曹文辉			

## 前 言

《化工设备设计全书》第一版由原化学工业部化工设备设计技术中心站组织全国高校、科研、设计、制造近百家单位参与编写。

《化工设备设计全书》以结构设计、强度计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规范、计算实例等方面进行了系统的阐述，并对相应的化工原理作简介。《全书》在重视结构设计、强度计算的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的效率，降低设备的成本，以求实现化工单元操作的最佳化，并力求反映当前国内及国际的先进技术。《全书》自20世纪80年代出版发行后，因其内容的实用性，得到化工、石化、医药、轻工等相关行业的设备专业人员欢迎。

近十余年来，我国化工装置的设计，化工设备的研究、开发、制造和标准化工作有了较大的发展，建造设备用的结构材料也有了新的进展，有必要对《全书》的内容加以更新、补充，以适应现代工程建设要求，满足广大工程技术人员，特别是年青一代工程技术人员的需要。中国石油和化工勘察设计协会、中国石化集团上海医药工业设计院、全国化工设备设计技术中心站组成了《化工设备设计全书》编辑委员会，负责《全书》的修订工作。《全书》的修订原则是“推陈出新”，以符合现代工程建设要求。

《化工设备设计全书》计划出版十五种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《干燥设备》，主要论述工业粉体的干燥。内容着重设计和实用，主要介绍干燥过程的理论基础，各种干燥设备的原理、结构、性能、设计计算方法，以及干燥设备的主要辅助设备设计等。

本书由下列人员参加编写：第一章 四川大学轻工食品学院徐荣翰，第二章 四川大学化工学院陈文靖，第三章、第十一章第一节和第十二章 南京化学工业公司设计院胡尔明，第四章 湖南省化工设计院李明西，第五章 上海医药工业设计院金国森，第六章 上海神州食品工程设备有限公司郭加宁，第七章 化学工业第二设计院王春风，第八章 化学工业第二设计院鲍焕霞，第九章、第十章和第十一章第二、三节 金宝医疗器材（上海）有限公司程嘉庆，第十三章 化学工业第二设计院蒋明钊。由中国石化集团上海医药工业设计院金国森统一全稿。

《化工设备设计全书》编辑委员会

2002年1月

## 内 容 提 要

《化工设备设计全书》计划出版十五种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书主要介绍干燥过程的理论基础，论述了厢式和带式干燥器、流化床干燥器、气流干燥器、喷雾干燥器、滚筒干燥器、回转圆筒干燥器、红外线和远红外线干燥器、高频干燥器和微波干燥器、真空耙式干燥器、立式干燥器、竖式粉碎气流干燥器、组合干燥器等的原理、结构、性能和设计计算方法，以及干燥设备的主要辅助设备设计。并列举了一些干燥器实例。

本书可供从事干燥设备设计、制造、使用单位的技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

# 目 录

<p><b>第一章 绪论</b> ..... 1</p> <p>  一、干燥技术的概况 ..... 1</p> <p>  二、被干燥物料的特性 ..... 1</p> <p>  三、各种干燥装置的特性 ..... 2</p> <p>  四、干燥技术的进展 ..... 9</p> <p>  五、各种干燥器在工业上的应用 ..... 10</p> <p>  六、干燥器的分类及选型 ..... 11</p> <p><b>第二章 干燥过程基础</b> ..... 13</p> <p>  一、关于摩擦系数 <math>\lambda</math> 值的计算 ..... 13</p> <p>  二、关于过渡区阻力系数 <math>\zeta</math> 值的计算 ..... 13</p> <p>  三、关于沉降速度 <math>u_t</math> 的计算 ..... 14</p> <p>  <b>第一节 湿气体的性质</b> ..... 14</p> <p>    一、相对湿度 <math>\phi</math> ..... 14</p> <p>    二、湿含量 <math>x</math> ..... 16</p> <p>    三、热含量 <math>I</math> 及干基比热容 <math>c_{H1}</math> ..... 16</p> <p>    四、露点 <math>t_d</math> ..... 16</p> <p>    五、湿球温度 <math>t_w</math> ..... 17</p> <p>    六、绝热饱和温度 <math>t_{as}</math> ..... 17</p> <p>    七、湿比容 <math>v</math> ..... 18</p> <p>    八、<math>t-x</math> 图 ..... 19</p> <p>    九、烟道气 ..... 20</p> <p>  <b>第二节 湿物料的性质</b> ..... 22</p> <p>    一、湿度 <math>m</math> ..... 22</p> <p>    二、湿含量 <math>M</math> ..... 22</p> <p>    三、湿分与物料的结合方式 ..... 22</p> <p>    四、湿物料的吸湿平衡 (状态) ..... 23</p> <p>    五、物料的分散度 ..... 24</p> <p>    六、湿物料的热导率 ..... 25</p> <p>  <b>第三节 物料衡算与热量衡算</b> ..... 25</p> <p>    一、物料衡算 ..... 25</p> <p>    二、热量衡算 ..... 26</p> <p>  <b>第四节 外部质热传递</b> ..... 27</p> <p>    一、对流 ..... 27</p> <p>    二、辐射 ..... 30</p> <p>    三、传导 ..... 30</p> <p>    四、等速段干燥速度的计算 ..... 32</p> <p>  <b>第五节 内部质热传递</b> ..... 34</p> <p>    一、湿物料的干燥过程 ..... 34</p> <p>    二、湿分传递机理 ..... 36</p> <p>    三、干燥过程质热传递微分方程组 ..... 37</p> <p>    四、特征干燥曲线 ..... 37</p> <p>    五、降速段近似计算 ..... 37</p>	<p>  <b>第六节 设计计算示例 (气流干燥器加速段的计算)</b> ..... 39</p> <p>    一、湿球温度 <math>t_w</math> 和预热段末空气温度 <math>t_c</math> 的计算 ..... 39</p> <p>    二、气流干燥微分方程组的推导 ..... 39</p> <p>    三、气流干燥微分方程组 ..... 40</p> <p>    四、空气湿度和干燥管压降的计算 ..... 40</p> <p>    五、计算条件 ..... 40</p> <p>    六、计算结果 ..... 41</p> <p>    七、主要影响因素 ..... 42</p> <p><b>第三章 厢式和带式干燥器设计</b> ..... 44</p> <p>  <b>第一节 水平气流厢式干燥器</b> ..... 45</p> <p>    一、热风的速度 ..... 45</p> <p>    二、物料层的间隔 ..... 45</p> <p>    三、物料层的厚度 ..... 45</p> <p>    四、风机的风量 ..... 45</p> <p>    五、水平气流厢式干燥器实例 ..... 46</p> <p>  <b>第二节 穿流气流厢式干燥器</b> ..... 47</p> <p>    一、干燥物料的飞散 ..... 47</p> <p>    二、热风的泄漏 ..... 47</p> <p>    三、物料层的厚度 ..... 47</p> <p>    四、热风量的调节 ..... 47</p> <p>    五、穿流气流厢式干燥器实例 ..... 47</p> <p>    六、穿流气流厢式干燥器和水平气流厢式干燥器中干燥速度的比较 ..... 48</p> <p>    七、厢式干燥器应用实例 ..... 48</p> <p>  <b>第三节 真空厢式干燥器</b> ..... 49</p> <p>    一、真空干燥器的结构及特点 ..... 49</p> <p>    二、主要用途 ..... 49</p> <p>    三、国内真空厢式干燥器生产规格及技术数据 ..... 50</p> <p>  <b>第四节 洞道式干燥器</b> ..... 50</p> <p>    一、洞道式干燥器的结构 ..... 50</p> <p>    二、干燥器小车 ..... 53</p> <p>    三、计算实例 ..... 53</p> <p>  <b>第五节 水平气流带式干燥器</b> ..... 55</p> <p>  <b>第六节 穿流气流带式干燥器</b> ..... 55</p> <p>    一、干燥物料的成形 ..... 55</p> <p>    二、穿流气流带式干燥器实例 ..... 56</p> <p>  <b>第七节 穿流气流干燥的计算</b> ..... 60</p> <p>    一、穿流气流和水平气流干燥速度的比较 ..... 60</p>
---	--

二、穿流气流干燥器设计 .....	60	三、倒锥式气流干燥器 .....	126
三、穿流气流干燥器的计算 .....	61	四、套管式气流干燥器 .....	127
四、穿流气流干燥速度的计算 .....	63	五、脉冲式气流干燥器 .....	127
五、穿流气流带式干燥时间的决定 .....	65	六、旋风式气流干燥器 .....	127
六、设计实例 .....	66	七、中等停留时间旋风分离干燥器 .....	130
七、带式干燥器设计要求 .....	67	八、旋转气流快速干燥器 .....	131
<b>第四章 流化床干燥器设计</b> .....	<b>73</b>	九、气流干燥管的材质及其选择 .....	135
第一节 流化床干燥的基本原理 .....	73	十、气流干燥管壁厚的计算 .....	136
一、流化过程的基本概念 .....	73	十一、气流干燥管结构 .....	142
二、流化床的流体力学 .....	76	十二、气流干燥器使用实例 .....	142
三、流化床内的传热过程 .....	82	第四节 气流干燥器的设计实例 .....	150
第二节 流化床干燥器主要技术参数的确定 .....	83	一、设计步骤 .....	150
一、固体物料直径的确定 .....	83	二、基本假设 .....	150
二、颗粒物料的空隙率 .....	84	三、计算例题 .....	150
三、物料的比表面积和形状系数 .....	84	<b>第六章 喷雾干燥器设计</b> .....	<b>155</b>
四、自然堆积角 $\varphi_r$ .....	85	第一节 喷雾干燥的原理与特点 .....	155
五、流化速度和床层横截面积 .....	85	一、喷雾干燥的原理 .....	155
六、流化床床层高度 .....	86	二、喷雾干燥的特点 .....	155
第三节 流化床干燥器的内部结构 .....	87	三、液滴的干燥特性 .....	155
一、分布板 .....	87	四、喷雾干燥的使用范围 .....	159
二、气体预分布器 .....	92	第二节 喷雾干燥器的型式 .....	160
第四节 流化床干燥器的分类和型式 .....	93	一、按生产流程分类 .....	160
一、流化床干燥器的分类 .....	93	二、按喷雾和气体流动方向分类 .....	162
二、流化床干燥器的型式 .....	93	三、按雾化方法分类 .....	163
第五节 流化床干燥器的设计计算 .....	97	第三节 喷雾干燥器的设计原则 .....	164
一、卧式多室流化床干燥器的设计计算 .....	97	一、确定操作参数 .....	164
二、多层流化床干燥器的设计计算 .....	99	二、确定颗粒尺寸和大小分布 .....	164
三、喷雾床干燥器的设计计算 .....	101	三、确定产品的松密度 .....	165
四、振动流化床干燥器的设计计算 .....	103	四、确定进料浓度 .....	165
五、几种流化床干燥器的计算实例 .....	105	五、干燥温度的选择 .....	165
第六节 流化床干燥器的使用实例 .....	112	六、成品排出的方法 .....	166
一、聚丙烯流化床干燥器 .....	112	七、粉尘的回收 .....	167
二、高密度聚乙烯流化床干燥器 .....	114	八、对喷雾干燥器的设计要求 .....	167
三、聚乙烯流化床干燥器 .....	114	第四节 雾化器 .....	168
<b>第五章 气流干燥器设计</b> .....	<b>117</b>	一、扩大液滴表面积的计算 .....	168
第一节 气流干燥的基本原理 .....	117	二、压力式雾化器 .....	168
一、气流干燥的特点 .....	117	三、离心式雾化器 .....	177
二、粒子在气流干燥管内的运动 .....	117	四、气流式雾化器 .....	182
三、粒子在气流干燥管中的传热 .....	119	第五节 喷雾干燥器的组成及其设计 .....	184
四、气流干燥管的压力损失 .....	120	一、供料装置 .....	186
第二节 气流干燥器的设计计算 .....	121	二、热风分配器 .....	188
一、设计参数的确定 .....	121	三、干燥室 .....	190
二、结构尺寸的计算 .....	122	四、粘壁清除装置 .....	192
第三节 气流干燥装置的型式 .....	124	五、控制系统 .....	195
一、气流干燥装置的种类 .....	124	六、喷雾干燥器 CIP 自动清洗装置 .....	196
二、直管式气流干燥器 .....	125	七、喷雾干燥器塔体安装注意事项 .....	198
		第六节 喷雾冷却干燥器 .....	199



第七节 喷雾干燥器设计应用实例	200
一、喷雾干燥器直径和有效高度计算	200
二、喷雾干燥器热效率分析	201
三、国内喷雾干燥器应用实例	201
四、国产喷雾干燥器主要技术参数	208
五、国外喷雾干燥器应用实例	211
六、新型喷雾干燥器	218
<b>第七章 滚筒干燥器设计</b>	220
一、滚筒干燥器的主要特点	220
二、滚筒干燥器的型式	220
第一节 滚筒干燥的基本原理	223
一、料膜的形成和干燥时间	223
二、滚筒干燥过程中的传热与传质	228
第二节 滚筒干燥器的结构设计	233
一、结构组成和总体设计	233
二、滚筒组件设计	233
三、传动功率计算与传动装置的选择	259
四、布膜和刮料装置设计	261
五、其他附件的设计	275
第三节 滚筒干燥器设计实例	282
一、设计的条件	282
二、计算实例	283
<b>第八章 回转圆筒干燥器设计</b>	298
第一节 回转圆筒干燥器参数的确定	299
一、流向的选择	299
二、载热体的选择	300
三、回转圆筒干燥器的类型	300
四、设备规格参数的设计和确定	303
第二节 回转圆筒干燥器的结构设计	310
一、筒体	310
二、滚圈	318
三、支承装置	322
四、传动装置	332
五、回转圆筒部件的润滑	338
六、筒体的衬里	338
七、转筒的进出料及密封	339
第三节 回转圆筒干燥器计算例题	343
一、已知条件	343
二、物料衡算和热量衡算	344
三、设备参数计算和确定	344
四、筒体设计	345
五、滚圈设计	347
六、托轮及轴承计算	347
七、挡轮及轴的计算	348
八、传动装置的确定设计依据	349
<b>第九章 红外线和远红外线干燥器</b>	

<b>设计</b>	351
第一节 红外线和远红外线干燥原理和特点	351
一、红外线的基本知识	351
二、红外线辐射的基本原理	351
三、红外线和远红外线干燥原理和特点	355
第二节 红外线和远红外线干燥器的组成和分类	356
一、红外线和远红外线干燥器的主要组成部分	356
二、部分红外线和远红外线干燥器的型式	358
第三节 辐射能发生器结构及辐射涂层的选择	361
一、电热式远红外线辐射器	361
二、非电热源辐射器	366
三、远红外线涂层的选择	367
第四节 红外线和远红外线干燥器设计应用实例	370
一、炉体设计	370
二、辐射器的选定和工艺布置	371
三、红外线和远红外线干燥器应用实例	373
<b>第十章 高频干燥器和微波干燥器设计</b>	375
第一节 高频干燥和微波干燥的基本原理	375
一、高频干燥与微波干燥的频谱	375
二、高频干燥的基本原理和特点	375
三、微波干燥的基本原理和特点	377
第二节 高频干燥器和微波干燥器的结构	378
一、高频干燥器	378
二、微波干燥器	383
第三节 高频干燥器与微波干燥器的设计	388
一、高频介质干燥器的参数选择和计算	388
二、几种高频干燥设备简介及应用实例	389
三、微波干燥器的功率计算和升温计算	390
四、微波灭菌干燥器	395
第四节 高频干燥器和微波干燥器的安全防护	396
一、高频和微波对人体健康的影响和伤害作用	396
二、使用微波干燥器的安全标准	397
三、高频干燥器和微波干燥器的防护措施	397
<b>第十一章 其他干燥器设计</b>	400
第一节 真空耙式干燥器	400
一、真空耙式干燥器的原理和特点	400

二、真空耙式干燥装置的主要设备和结构	400
三、真空耙式干燥器使用实例	402
第二节 立式干燥器	404
一、立式干燥器的原理和特点	404
二、几种类型的立式干燥器结构简介	404
三、立式干燥器的应用实例	407
第三节 竖式粉碎气流干燥器	407
一、竖式粉碎气流干燥器的原理和特点	408
二、竖式粉碎气流干燥器的结构	408
三、竖式粉碎气流干燥器的应用	409
<b>第十二章 组合干燥器设计</b>	410
第一节 气流流化干燥器	410
一、气流-卧式多室流化干燥器	410
二、气流-锥形流化干燥器	412
第二节 喷雾流化干燥器	412
第三节 喷雾气流干燥器	414
第四节 流化移动床干燥器	415
第五节 其他	416
一、喷雾干燥和带式干燥的组合	416
二、粉碎气流干燥和流化床干燥的组合	416
<b>第十三章 干燥器主要辅助设备设计</b>	417
第一节 固体物料供排料装置	417
一、螺旋加料器	417
二、斗式提升机	421
三、圆盘给料机	423
四、星形加料器	425
五、带式加料机	429
六、摇摆式颗粒加料机	431
七、定量加料器	431

八、文氏加料器	433
九、柱塞泵	434
第二节 供热装置	435
一、蒸汽加热器	435
二、烟道气加热器	437
三、电加热器	440
第三节 除尘装置	443
一、除尘系统的设计	443
二、旋风除尘器	444
三、袋式除尘器	447
四、湿式除尘器	449
第四节 风机的选择	452
第五节 干燥器的测试仪表	454
一、温度的测定仪表	454
二、风压的测量仪表	455
三、蒸汽压力的测定仪表	455
四、流量的测试仪表	455
五、料位计	455
六、电流计(交流)	455
第六节 保温及保温材料	455
一、保温材料	455
二、保温层厚度的计算	455
三、保温结构	458
<b>附录 A 《回转圆筒用托轮、挡轮》</b>	
HG 21546.1~3—93	460
<b>附录 B 《回转圆筒进出料箱密封装置》</b>	
HG 21546.4~6—93	464
<b>符号说明</b>	468
<b>参考文献</b>	471

# 第一章 绪 论

干燥技术的应用,在我国具有十分悠久的历史。闻名于世的造纸技术,就显示了干燥技术的应用。《天工开物》一书中,描述了人工加热干燥过程,总结了我国劳动人民的干燥实践,反映了我国古代劳动人民的高度智慧。在解放前,我国干燥技术的应用,一般仍停留在手工作坊的阶段。解放以后,干燥技术的应用发展很快,20世纪50年代初期,分散悬浮态干燥技术(如气流干燥器等)开始工业应用,干燥技术的研究工作也普遍开展,高效的干燥器也在生产中应用。随着工业现代化的进展,化学工业的机械化、大型化和自动化水平的提高,作为化工单元操作设备之一的干燥器,也必将更加迅速的发展。

## 一、干燥技术的概况

干燥的目的是除去某些原料、半成品中的水分或溶剂,就化学工业而言目的在于,使物料便于包装、运输、贮藏、加工和使用。具体为:

(1) 悬浮液和滤饼状的化工原料和产品,可经干燥成为固体,便于包装和运输。

(2) 不少的化工原料和产品,由于水分的存在,有利于微生物的繁殖,易霉烂、虫蛀或变质,这类物料经过干燥便于贮藏。例如生物化学制品、抗生素及食品等,若含水量超过规定标准,易于变质,影响使用期限,需要经干燥后才有利于贮藏。

(3) 为了使用方便。例如食盐、尿素和硫酸铵等,当其干燥到含水率为0.2%~0.5%左右时,物料不易结块,使用比较方便。

(4) 便于加工。一些化工原料,由于加工工艺要求,需要粉碎(或造粒)到一定的粒度范围和含水率,以利于再加工和利用。如磷矿石经粉碎干燥可以提高化学反应速度;催化剂半成品的造粒干燥,可使其保持一定含水率和粒度范围,有利于压片成型等。

(5) 为了提高产品的质量。某些化工原料和产品,其质量的高低与含水量有关。物料经过干燥处理,水分除去后,有效成分相应增加,提高了产品质量。例如涤纶切片在纺丝前,干燥到含水率为0.02%以下,可以防止在抽丝时产生气泡,提高丝的质量。

化学工业中的干燥方法有三类:机械除湿法、加热干燥法、化学除湿法。机械除湿法,是用压榨机对湿物料加压,将其中一部分水分挤出。物料中除去的水分量主要决定施加压力的大小。物料经机械除湿后仍保留很高的水分,一般为40%~60%左右。粒状

物料或不许受压的物料可用离心机脱水,经过离心机除去水分后,残留在物料中的水分为5%~10%左右。其他,还有各种类型的过滤机,也是机械除湿法常用的设备。机械除湿法只能除去物料中部分自由水分,结合水分仍残留在物料中。因此,物料经过机械除湿后含水量仍然较高,一般不能达到化工工艺要求的较低的含水量。加热干燥法,是化学工业中常用的干燥方法,它借助热能加热物料、气化物料中的水分。除去1kg的水分,需要消耗一定的热量。例如用空气来干燥物料时,空气预先被加热送入干燥器,将热量传给物料,同时气化物料中的水分,形成水蒸气,并随空气带出干燥器。物料经过加热干燥,能够除去物料中的结合水分,达到化工工艺上所要求的含水量。化学除湿法,是利用吸湿剂除去气体、液体和固体物料中少量的水分。由于吸湿剂的除湿能力有限,仅用于除去物料中的微量水分,化工生产中应用极少。

化学工业中固体物料的干燥,一般是先用机械除湿法,除去物料中大量的非结合水分,再用加热干燥法除去残留的部分水分(包括非结合水分和结合水分)。

## 二、被干燥物料的特性

### 1. 物料的状态

(1) 溶液及泥浆状物料,如工程废液及盐类溶液等。

(2) 冻结物料,如食品、医药制品等。

(3) 膏糊状物料,如活性污泥及压滤机滤饼等。

(4) 粉粒状物料,如硫酸铵及树脂粉末等。

(5) 块状物料,如焦炭及矿石等。

(6) 棒状物料,如木材等。

(7) 短纤维状物料,如人造纤维等。

(8) 不规则形状的物料,如陶瓷制品等。

(9) 连续的薄片状物料,如带状织物、纸张等。

(10) 零件及设备的涂层,如机械产品的涂层等。

2. 物料的物理化学性质 被干燥物料的物理性质是决定干燥介质种类、干燥方法和干燥设备的重要因素,因此,干燥器的设计者要了解:

(1) 物料的化学性质。如组成、热敏性(软化点、熔点或分解点),物料的毒性,可燃性,氧化性和酸碱性(度)、摩擦带电性、吸水性等。

(2) 物料的热物理性质。如物料含水率、假密度、真密度、比热容、热导率及粒度和粒度分布等。

对于原料液还应当知道浓度、粘度及表面张力等。

(3) 其他性质,如膏糊状物料的粘附性、触变性(即膏糊状物料在振动场中或在搅动条件下,物料可从塑性状态,过渡到具有一定流动性的性质),这些性质在设计干燥器及加料器时可加以利用。

3. 物料与水分结合的性质 固体与水分结合的方式是多种多样的,它可以是物料表面附着的,也可以是多孔性物料孔隙中滞留的水分,也可以是物料所带的结晶水分及透入物料细胞内的溶胀水分等。物料与水结合方式不同,除去的方法也不尽相同。例如物料表面附着的水分和大毛细管中的水分,是干燥可以除去的;化学结合水,不属于干燥的范围,经干燥后,它仍残存在物料中。

### 三、各种干燥装置的特性

#### 1. 干燥器的特性

干燥器的特性包括:

(1) 干燥器对被干燥物料的适应能力。如能否达到物料要求的干燥程度,干燥产品的均匀程度。

(2) 这种干燥器对产品的质量有无损害。因为有的产品要求保持结晶形状、色泽,有的产品要求在干燥中不能变形或龟裂等。

(3) 干燥装置的热效率高(一般而言,干燥装置热利用好,则热效率高;相反,则热效率低),这是干燥的主要技术经济指标。

此外,还应了解干燥器的经济处理能力,干燥设备的生产强度或干燥速率。干燥强度大,所用设备小,其固定投资较少,否则相反;干燥系统的阻力大小,决定干燥系统机械能的消耗,系统的阻力小,机械能消耗少,操作费用就低。干燥器附属设备的多少,有时可能影响这种干燥器的应用。例如,悬浮态干燥装置(如流化床干燥器、气流干燥器等),离不开有效的粉尘分离设备,可靠的通风设备和湿物料的供给装置等,虽然干燥器本身尺寸不大,但由于辅助设备很笨重,应用受到限制。同时,还要求干燥设备操作控制方便,劳动条件良好。

#### 2. 主要干燥装置的特性

(1) 喷雾干燥装置 喷雾干燥器是处理溶液、悬浮液或泥浆状物料的干燥器。它是用喷雾的方法,使物料成为雾滴分散在热气流中,物料与热空气呈并流、逆流或混流的方式互相接触,使水分迅速蒸发,达到干燥目的。采用这种干燥方法,可以省去浓缩或过滤等化工单元操作,可以获得  $30\sim 500\mu\text{m}$  的粒状产品,而干燥时间极短。一般干燥时间为  $5\sim 30\text{s}$ ,适用于高热敏性物料和料液浓缩过程中易分解的物料的干燥,产品流动性和速溶性好。喷雾干燥器中气固两相接触表面积大,但是气固两相呈稀相流动,故容积传热系数小,一般为  $23\sim 116\text{W}/\text{m}^3\cdot\text{C}$ ,热风温度

在并流操作时为  $250\sim 500\text{C}$ ,逆流操作时为  $200\sim 300\text{C}$ 。工业规模的喷雾干燥器,热效率一般为  $40\%\sim 50\%$ 。国外带有废热回收的喷雾干燥器,热效率可达到  $70\%$ ,这种设备只有在大于  $100\text{kg}(\text{水})/\text{h}$  的生产能力时才比较经济。

工业上应用的喷雾方法有三种形式:①离心式雾化器。其回转速度一般为  $4000\sim 20000\text{r}/\text{min}$ ,最高可达  $50000\text{r}/\text{min}$ 。②压力式雾化器。是用泵将料液加压到  $1\times 10^7\sim 2\times 10^7\text{Pa}$ ,送入雾化器,将料液喷成雾状。③气流式雾化器。用压力为  $2\times 10^5\sim 5\times 10^5\text{Pa}$  的压缩空气或过热蒸汽,通过喷嘴将料液喷成雾滴。在我国,压力式和离心式雾化器用得较多,小型喷雾干燥装置也有用气流式雾化器的。喷雾干燥装置的流程如图 1-1 所示。

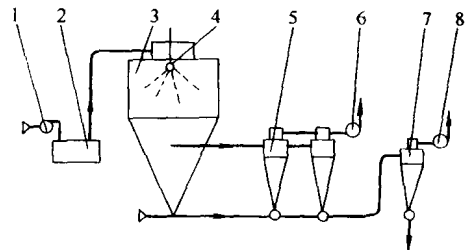


图 1-1 喷雾干燥装置流程

- 1—鼓风机; 2—空气加热器; 3—喷雾干燥塔;  
4—雾化器; 5—一级旋风除尘器; 6—一级抽风机;  
7—二级旋风除尘器; 8—二级抽风机

料液通过雾化器,喷成雾滴分散在热气流中。空气经鼓风机,送入空气加热器加热,然后进入喷雾干燥塔,与雾滴接触干燥。产品部分落入塔底,部分由一级抽风机吸入一级旋风除尘器,经分离后,将废气放空。塔底的产品和旋风除尘器收集的产品,由二级抽风机抽出,经二级旋风除尘器分离后包装。

喷雾干燥的产品为细粒子,为了适应环境保护法令的要求,喷雾干燥系统只用旋风除尘器分离产品、净化废气还是不够的,一般还要用袋式除尘器净化,使废气中的含尘量低于  $50\text{mg}/\text{m}^3$  气体(标准状态),或用湿式洗涤器,可将废气含尘量降到  $15\sim 35\text{mg}/\text{m}^3$  气体(标准状态)。

(2) 流化床干燥装置 流化床干燥器又名沸腾床干燥器,其装置流程如图 1-2 所示。

散粒状的固体物料,由螺旋加料器加入流化床干燥器中,空气由鼓风机送入燃烧室,加热后送入流化床底部经分布板与固体物料接触,形成流态化,达到气固相的热质交换。物料干燥后由排料口排出。废气由流化床顶部排出,经旋风除尘器组回收,被带出的产品,再经洗涤器和雾沫分离器后放空。

流化床干燥器具有以下特点,它适用于无凝聚作

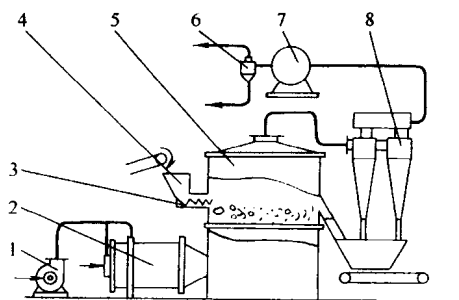


图 1-2 单层圆筒形流化床干燥装置流程

- 1—鼓风机；2—燃烧室；3—螺旋加料器；  
4—料斗；5—流化床干燥器；6—雾沫分离器；  
7—洗涤器；8—旋风除尘器组

用的散粒状物料的干燥，颗粒直径可从  $30\mu\text{m} \sim 6\text{mm}$ ；设备结构简单；生产能力大，从每小时几十千克至  $4 \times 10^5\text{kg}$ ；热效率高，对于除去物料中的非结合水分，热效率可达到 70% 左右，对于除去物料中的结合水分时，热效率约为 30% ~ 50%；容积传热系数可达到  $2326 \sim 6978 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；物料在流化床中的停留时间，与流化床的结构有关，如设计合理，物料在流化床中的停留时间可以任意延长。其缺点是热空气通过分布板和物料层的阻力较大，一般约为  $490 \sim 1470\text{Pa}$ 。鼓风机的能量消耗大。对单层流化床干燥器，物料在流化床中，处于完全混合状态，部分物料从加料口到出料口，可能走短路而直接飞向出口，造成物料干燥不均匀。为了改善物料在流化床中干燥的均匀性，一般多采用不同结构的流化床。如具有控制物料短路的挡板结构的单层流化床、卧式多室流化床、多层流化床等，如图 1-3 所示。

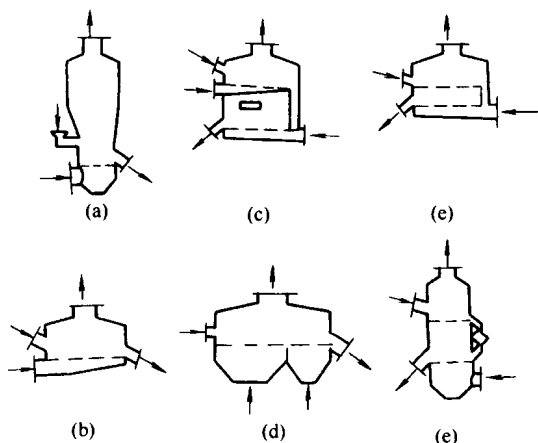


图 1-3 不同类型的流化床干燥器

- (a) 圆筒形单层流化床；(b) 长方形单室流化床；  
(c) 空气使用一次的两层流化床；(d) 卧式多室流化床；  
(e) 空气使用两次的圆形两层流化床

采用多层流化床干燥器，可以增加物料的干燥时间，改善干燥产品含水的均匀性，从而易于控制产品的干燥质量。但是，多层流化床干燥器因层数增加，分布板相应增多，床层阻力增加。同时，各层之间，物料要定量地从上层转移至下层，又要保证形成稳定的流化状态，必须采用溢流装置等，这样又增加了设备结构的复杂性。对于除去结合水分的物料，采用多层流化床是恰当的。例如山东新华制药厂，采用双层流化床干燥含水率 15% ~ 30% 的氨基匹林；一些涤纶纺丝厂，采用五层流化床干燥涤纶树脂，使产品含水率达到 0.03% 左右。

卧式多室流化床干燥器，由于分隔成多室，可以调节各室的空气量，同时，流化床内增加了挡板，可避免物料走短路排出，干燥产品的含水量也较均匀。若在操作上对各室的风量、气温加以调节，或将最末几室的热风二次利用，或在床内添加内加热器等，还可提高热效率。

(3) 气流干燥装置 气流干燥器广泛应用于粉粒状物料的干燥，其流程如图 1-4 所示。

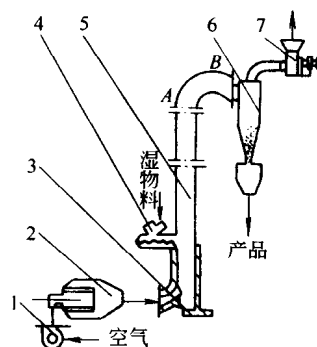


图 1-4 气流干燥器流程

- 1—鼓风机；2—燃烧炉；3—积料排出口；4—加料器；5—气流干燥管；  
6—旋风除尘器；7—抽风机

被干燥的物料直接由加料器加入气流干燥管中，空气由鼓风机送入燃烧炉，加热后，进入气流干燥管的底部。高速的热气流，使加入的粉粒状湿物料加速并分散地悬浮在气流中，在气流加速和输送的过程中完成对湿物料的干燥。如果在气流干燥装置中，再增加湿物料分散机或小块状物料粉碎机，这种装置还可用于滤饼状物料及块状物料的干燥。

气流干燥的特点是，由于被干燥的物料分散地悬浮在气流中，物料的全部几何表面积都参与传热和传质，所以有效传热、传质面积大，容积传热系数高，一般为  $2326 \sim 6978 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。日本三元筑波株式会社在设计中，对含非结合水分的物料，取容积传热系数  $1163 \sim 3479 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；对含结合水分的多孔

物料, 取容积传热系数  $582 \sim 1163 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ; 对流程中有高分散物料的分散机时, 取容积传热系数  $3479 \sim 11630 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。经过气流干燥的物料, 非结合水分几乎可以全部除去, 如对结晶盐类, 产品中的残留水分约为  $0.3\% \sim 0.5\%$ , 对吸附性很强的物料, 产品中的残留水分约为  $2\% \sim 3\%$ 。气流干燥操作气速大, 一般对分散性良好的物料, 取操作气速  $10 \sim 40 \text{ m/s}$ , 因此, 物料在干燥器中的停留时间短, 一般约为  $0.5 \sim 2 \text{ s}$ , 最长可达  $7 \text{ s}$ 。物料出气流干燥器的温度接近于空气的湿球温度  $60 \sim 70^\circ\text{C}$  左右, 因此, 气流干燥器适用于热敏性物料的干燥。气流干燥器的结构简单, 目前使用的气流干燥器, 干燥管高为  $6 \sim 20 \text{ m}$ , 管径为  $0.3 \sim 1.5 \text{ m}$ 。如干燥  $2.5 \times 10^4 \text{ kg/h}$  煤或  $1.5 \times 10^4 \text{ kg/h}$  硫酸铵的气流干燥管的管径为  $0.7 \text{ m}$ , 高为  $15 \text{ m}$ 。生产能力大, 如处理石英砂  $2.5 \times 10^4 \text{ kg/h}$ , 尿素  $6.0 \times 10^4 \text{ kg/h}$ 。气流干燥器的散热面积小, 热损失可以控制在  $5\%$  左右, 因此, 热效率较高。例如热风温度  $400^\circ\text{C}$  以上、废气排出温度  $60 \sim 100^\circ\text{C}$  时, 热效率可达  $60\% \sim 75\%$ 。但在干燥物料中的结合水分时, 由于进干燥器的空气温度较低, 热效率约为  $20\%$  左右。气流干燥器的主体设备很小, 设备投资费低, 占地面积小, 且可连续操作, 易于实现自动控制。但是, 气流干燥器的附属设备较大, 操作气速高, 物料在气流的作用下, 冲击管壁, 以及物料间的相互碰撞, 物料和管子的磨损较大, 对于粒度和晶形要求十分严格的物料, 不宜采用。例如六角形的晶体硫酸铵, 用气流干燥前后, 粒度分布如表 1-1 所示。

其次, 气流干燥也不适于粘附性很强的物料, 如粗制的葡萄糖等。此外, 对于干燥过程中易产生微粉、又不易分离的物料, 以及需要空气量极大的物料, 都不宜采用气流干燥。

目前, 我国使用中小型气流干燥器较多, 使用大型装置较少; 使用直接加料的流程较多, 使用有其他附属装置(如分散机、粉碎机、分级机等)的流程较少。但是对气流干燥管的改型和强化都有不少发展, 如脉冲式、旋风式、倒锥式气流干燥器等。

(4) 回转圆筒干燥器 回转圆筒干燥器的流程如图 1-5 所示。它由低速旋转的倾斜圆筒(筒内壁安装有翻动物料的各式抄板)及燃烧炉、加料器、旋风分离器、洗涤器等主要设备构成。

并流操作时, 湿物料从回转圆筒高的一端加入,

干燥用烟道气与物料并流进入, 湿物料在抄板的作用下, 把物料分散在干燥用的烟道气中, 同时向前移动, 物料在移动中直接从气流中获得热量, 使水分汽化, 达到干燥的目的, 直到回转圆筒干燥器低的一端卸出产品。

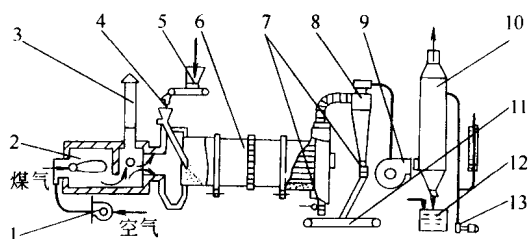


图 1-5 回转圆筒干燥器流程

- 1—鼓风机; 2—燃烧室; 3—排气管;  
4—进料管; 5—加料器; 6—回转圆筒干燥器;  
7—产品排出口; 8—旋风除尘器;  
9—抽风机; 10—洗涤器; 11—运输机;  
12—循环水池; 13—水泵

回转圆筒干燥器内, 物料与气流的流动方向, 随物料的性质和产品要求的最终湿含量而定。通常回转圆筒干燥器采用逆流操作。逆流操作时, 干燥器内传热与传质推动力比较均匀, 适用于不允许快速干燥的非热敏性的物料。一般逆流操作干燥产品的含水量较低。并流操作只适用于含水量较高, 允许干燥速度快, 不分解, 在干燥完成时不能耐高温的热敏性物料。

对于耐高温及清洁度没要求的矿产品、粘土及耐火材料等, 可用烟道气为干燥介质; 对于产品清洁度要求高的物料, 则可采用热空气作干燥介质。干燥介质的温度可在  $100 \sim 1400^\circ\text{C}$  范围内。如果气体进口温度为  $200^\circ\text{C}$ , 湿物料的含水量较高, 回转圆筒干燥器的容积气化强度为  $2.8 \times 10^{-3} \sim 4.2 \times 10^{-3} \text{ kg(水)}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ (干燥器), 热效率为  $30\% \sim 50\%$  左右; 若气体进口温度为  $500^\circ\text{C}$ , 容积气化强度在  $9.7 \text{ kg(水)}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ (干燥器)左右, 热效率约为  $60\%$  左右。回转圆筒干燥器的抄板如设计合理, 可使物料粒子的  $90\%$  处于悬浮状态, 回转干燥器的操作气速, 与粒子的物性和形状大小有关, 一般粒子直径约  $1 \text{ mm}$  时, 气速可取  $0.3 \sim 1 \text{ m/s}$ , 若粒子直径在  $5 \text{ mm}$  左右, 气速可取  $3 \sim 4 \text{ m/s}$ , 回转圆筒干燥器的容积传热系数约为  $161 \sim 233 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

表 1-1 硫酸铵气流干燥前后粒度分布

产品名称	干燥前后	粒度分布, %				
		0.4~1(mm)	0.3~0.4(mm)	0.2~0.3(mm)	0.15~0.2(mm)	<0.15(mm)
硫酸铵	前	12.0	77.5	5.5	2.3	2.7
	后	1.2	72.8	14.5	8.2	3.3

回转圆筒干燥器在化学工业中，广泛地用于各种粒状物料和小块状物料的干燥，如硫酸铵、石灰石、黄铁矿、磷酸盐等，若在转筒中的内部结构设计恰当（如在转筒的物料进口端挂上链条等），还可用于膏状物料的干燥。由于转筒的转数可在 $1\sim 10r/min$ 和倾角可在 $2^\circ\sim 10^\circ$ 范围内调节，因之，可以调节物料在干燥过程中的停留时间，所以被干燥湿物料的含水量范围较广。如硫酸铵含水量为 $3.5\%$ 左右，而酸式磷酸钙沉淀的含水量为 $55\%\sim 57\%$ 。

回转圆筒干燥器直径约为 $0.3\sim 5.2m$ ，长可达 $20m$ 左右。由于转速很低，回转线速度约为 $0.2\sim 0.3m/s$ ，流体阻力小，鼓风机动力消耗少，操作连续，生产能力适应范围大。其缺点是结构较复杂，钢材消耗较多，设备占地面积较大。目前，我国用作硫酸铵、硝酸铵、氮磷复合肥料、磷矿、硫精矿及碳酸钙的干燥等。

(5) 滚筒干燥器 滚筒干燥器是一种以传导传热方式使物料加热、水分汽化的干燥器，其结构如图 1-6 所示。

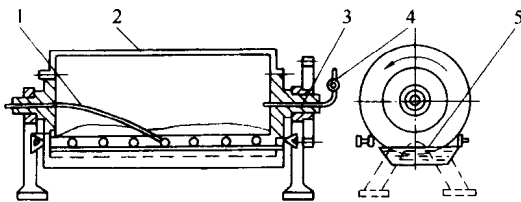


图 1-6 滚筒干燥器

- 1—冷凝水排出管；2—干燥滚筒；  
3—卸料刮刀；4—加热蒸汽管；5—料槽

滚筒是一个外表面经过加工的金属空心圆筒，被传动装置带动，转速约为 $4\sim 10r/min$ 。加热蒸汽从颈通入并在筒内冷凝，冷凝水由虹吸排管排除。筒体外壁部分浸入被干燥的料浆中，使一层物料布于滚筒外壁而被加热，水被汽化，散于周围空气中，滚筒转动一周，物料完成干燥，结片于外壁，然后由刮刀卸料。

滚筒干燥器直径为 $0.5\sim 1.5m$ ，长为 $1\sim 4m$ ，其蒸发能力（即干燥物料能力）与料浆的浓度、滚筒尺寸、滚筒转速、产品含水量、加热蒸汽的压力以及物料的性质等因素有关。当加热蒸汽压力为 $1\times 10^5\sim 2\times 10^5Pa$ （表压）时，滚筒表面蒸发强度约为 $4.2\times 10^{-3}\sim 9.7\times 10^{-3}kg/(m^2\cdot s)$ ；当加热蒸汽压力为 $3\times 10^5\sim 4\times 10^5Pa$ （表压）时，其蒸发强度约为 $8.5\times 10^{-3}\sim 15.3\times 10^{-3}kg/(m^2\cdot s)$ 。滚筒干燥器为传导加热，无干燥介质带走的热损失，因而热利用率高，一

般在 $70\%$ 以上。通常每干燥湿物料中的 $1kg$ 水分，大约消耗 $1.2\sim 1.5kg$ 加热蒸汽。加热蒸汽至物料层的总传热系数约为 $175\sim 233W/(m^2\cdot s\cdot ^\circ C)$ 。

由此可见，滚筒干燥器具有如下特点：①操作连续，能够得到均匀的产品；②干燥时间短，一般约为 $7\sim 30s$ ，干燥产品没有处于高温的危险，适合于热敏性物料的干燥，但壁面也有可能产生过热；③料浆粘度高或低均能干燥；④热效率高；⑤因干燥器内不会残留产品，少量物料也可以干燥；⑥滚筒干燥的操作参数调整范围广，并易于调整；⑦机内易于清理，改变用途容易；⑧废气不带走物料，因此不需除尘设备等。

滚筒干燥器较广泛地用于浆状物料的干燥，例如干燥酵母、抗菌素、乳糖、淀粉浆、亚硝酸钠、染料、碳酸钙及蒸馏废液等。

(6) 厢式干燥器 厢式干燥器是指外形像箱子的干燥器。干燥器外壁是绝热层，内部结构则种类繁多。应根据物料的性质、状态和生产能力的大小选用适当结构。

① 干燥少量的物料，或不允许结晶受到破坏以及贵重的物料，一般采用内部结构为支架的厢式干燥器。物料装在浅盘里，置于支架上，物料层的厚度一般为 $10\sim 100mm$ ，空气由风机送入，经预热器加热至所需温度，吹过物料表面，使物料干燥。空气吹过物料表面的速度，由物料的粒度决定，一般以物料不致被气流带走为宜。这种结构的干燥器，因为产量较小，常用人工加料和卸料。其结构如图 1-7 所示。

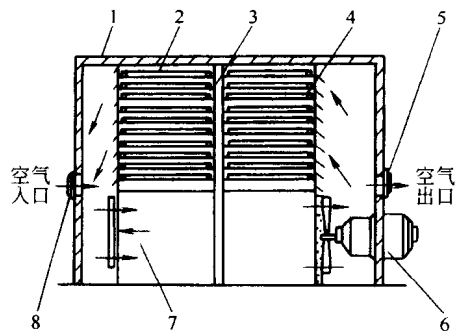


图 1-7 厢式干燥器

- 1—厢式干燥器外壳；2—物料盘；3—物料支架；  
4—可调节叶片；5—空气出口；6—风机；  
7—加热器；8—空气入口

厢式干燥器的干燥产品含水量不太均匀，干燥速度低，干燥时间长，生产能力小，热利用率差，但是，它适应性好，各种状态的物料均可用它干燥，因此应用较广。

② 对于生产能力不大，物料是热敏性的或易氧化的，可采用具有密封外壳的、在真空条件下操作的厢式干燥器，又称真空厢式干燥器。

③ 对于生产能力较大的厢式干燥器，盘架很多，若再采用厢内固定支架式的结构，装卸料时均需在干燥器内操作，劳动条件差，热损失也大。可以将内部的固定支架，改为带支架的小车，车架上安放装满物料的浅盘，人工加料完成后，再将小车推入厢内，进行干燥。这种干燥器，目前多用于触媒、酶制品、颜料的干燥等。

④ 对于批量大，具有一定形状物料的干燥，其干燥时间很长，则可把厢式干燥的外壳设计成狭长的洞道，洞道内铺设铁轨。用一系列的小车装载物料。装料后进入洞道，在铁轨上向出口端缓慢移动，小车彼此紧靠，用进口端机械推动，或靠轨道的倾斜(1/200)而自由滑动。洞门必须严密，洞宽不超过

3.5m。洞长决定于物料所需的干燥时间，通常不超过50m。干燥介质可用空气或烟道气，其速度以有效洞道截面计算时不小于2~3m/s，其最大速度一般以不吹走物料为限。干燥操作可以采用并流或逆流。其结构如图1-8所示。

这种干燥器的结构多样，操作较简单，能量消耗不大，适于物料连续长时间的干燥，多用于砖瓦、陶瓷坯、木材、人造丝及皮革的干燥。

⑤ 对于挤条成型的膏状物的干燥，如触媒的生产，常用连续的链式翻板或链网式干燥机。它的外形与洞道式干燥器相似，内部载运物料的是链板或链网组成的输送机。被干燥的膏状物料由挤条机挤成7~10mm条状，自动均匀地装载在回传的链板或链网上，热风通过物料层进行干燥。干物料在出口端通过链板的翻动而卸下或从链网上掉下。干燥器宽2m左右，长约10~30m。链网的运动速度约为0.26~1

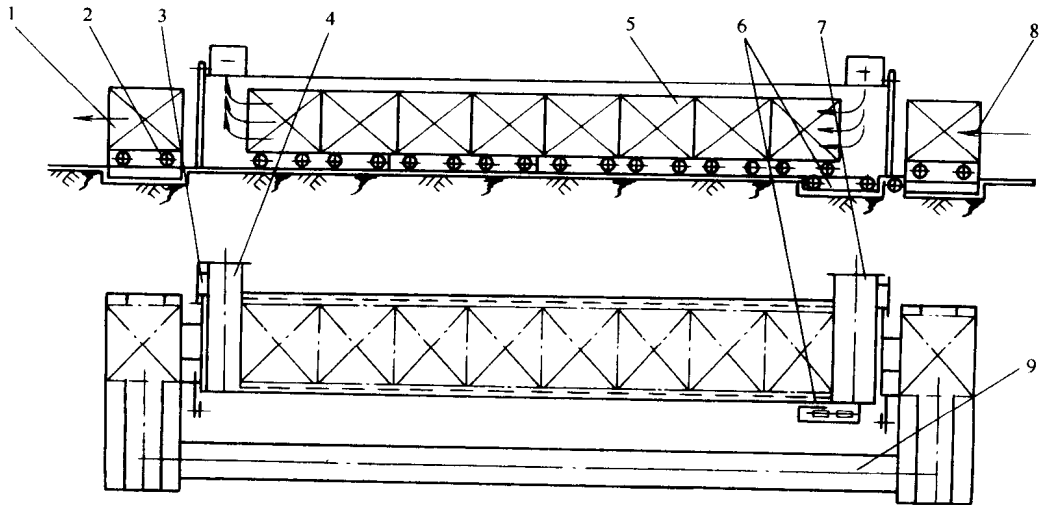


图 1-8 洞道式干燥器

1—干燥物料出口；2—转向小车；3—拉开式门；4—废气出口；5—小车；  
6—移动小车的结构；7—干燥介质进口；8—湿物料进口；9—回车道

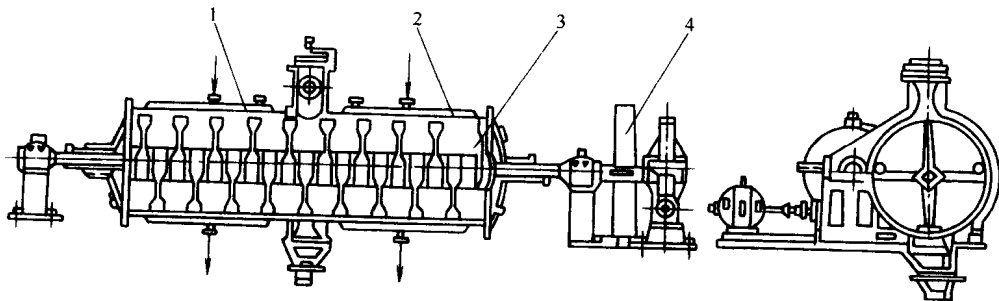


图 1-9 耙式真空干燥器

1—外壳；2—蒸汽夹套；3—水平搅拌器；4—传动装置



m/min, 蒸发强度约为  $5.6 \times 10^{-4} \sim 2.8 \times 10^{-3} \text{ kg (水)/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。单层的链板或链网干燥器, 由于物料对链板是静止的, 干燥的均匀性较差。如果物料允许翻动, 这种干燥器可设计成多层的, 物料从最上层加料, 经过一层链板干燥后, 物料翻落在下一层链板或链网上干燥, 经过几次翻动, 物料干燥更加均匀, 干燥强度也较高。这种干燥器除用在膏状物料的挤条干燥外, 还可用作粒状物料、短纤维状物料(如棉花、纤维素、羊毛等)的干燥。

(7) 真空耙式干燥器 真空耙式干燥器是一种传导加热干燥器。物料不直接与加热介质接触, 适用于干燥少量的、不耐高温的和易于氧化的泥状、膏状物料, 其含水率为 15%~90%。这种干燥器的结构如图 1-9 所示。

干燥器内的水平耙式搅拌器的叶片是由铸铁或钢制成, 安装在方形轴上, 一半叶片方向向左, 另一半向右。轴的转速为 7~8r/min, 它是由带减速箱的电机带动。同时采用了自动转向装置, 使轴的转动方向, 在每隔 5~8min 内改变搅拌器的转动方向一次。

操作时, 先开动搅拌器, 加入被干燥的物料, 并将加料口关闭, 同时通入蒸汽加热, 加热蒸汽的压力一般为  $2 \times 10^5 \sim 4.05 \times 10^5 \text{ Pa}$  (表压)。用真空泵抽出水蒸气和不可凝缩气体, 一般物料干燥时, 真空度约为  $9.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。这种干燥器的水分蒸发强度, 随物料的性质、湿度、加热蒸汽压力及真空度等的不同而异。例如, 在真空度为  $9.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ , 加热蒸汽压力为  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$  (表压) 时, 将马铃薯淀粉从初水分为 40% 干到 20%, 干燥器的水分汽化强度为  $1.39 \times 10^{-3} \sim 1.94 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。

真空耙式干燥器的操作比厢式干燥器的劳动强度低, 能回收物料中的有用湿分, 操作条件好, 管理比较方便。其缺点是生产能力低, 设备结构比较复杂, 搅拌器叶片易损坏等。这种干燥器在染料和医药工业中应用较多。例如, 干燥还原染料中间体、蒽醌磺酸、还原橄榄绿 R 及水杨酸中间体等。

(8) 竖式(移动床)干燥器 是一种利用被干燥物料的自重, 在干燥器中垂直向下运动的干燥器, 称为竖式干燥器或移动床干燥器。其结构如图 1-10 所示。外壳为直立的通道, 内部安装有减慢物料向下运动的横向栅板和纵向栅板, 物料连续地从干燥器上部加入, 被栅板分散在竖式干燥器的整个截面, 并且不断地向下运动。热风从燃烧室向上流动, 从顶部排除。干燥产品从干燥器底部卸出。如果在竖直的干燥器中填满了物料, 连续而密集地向下移动, 则干燥时间可以任意调节。这种干燥器在谷物干燥方面应用较多, 还用于煤球干燥, 其他在树脂干燥也是可行的。

竖式干燥器的特点如下:

① 结构简单, 管理方便, 运转噪音小。

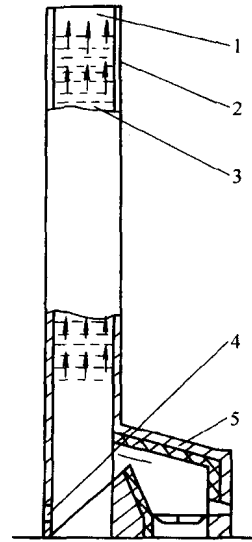


图 1-10 竖式干燥器

1—湿物料进口; 2—纵向栅;  
3—横向栅; 4—干料出口;  
5—燃烧室

② 干燥介质流速低, 一般采用  $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}$  (以设备空截面计算), 穿过物料层的阻力小, 能量消耗低。例如每干燥 1000kg 谷物消耗能量约为  $0.5 \sim 1.6 \text{ kW}$ 。

③ 排除的废气, 在大多数情况下, 都可以达到很高的饱和程度, 热能消耗较少, 热效率较高。每气化 1kg 水分的耗热量约为 4123~4689kJ。

④ 物料停留时间可以任意控制, 因此, 对产品含水量可以控制很低。

⑤ 竖式干燥器仅适用于散粒物料的干燥, 例如矿石、粒状树脂、谷物等。

⑥ 竖式干燥器金属耗量较大, 但这种干燥器也可采用钢筋混凝土或其他合适的建筑材料建造。

⑦ 采用的风速较低, 不易产生粉尘带出, 因此, 不需要除尘设备。

(9) 红外线干燥器 红外线和可见光线一样都是电磁波。波长为  $0.72 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的叫近红外线; 把波长为  $2.5 \sim 1000 \mu\text{m}$  的叫远红外线。红外线干燥器就是利用红外线源发出的红外线, 照射被干燥物料的表面, 部分红外线被物料吸收后, 在物料内部转变成热能, 加热物料使水分汽化, 达到干燥的目的。

红外线干燥器的结构特点与厢式干燥器相似。其工艺特点为:

① 加热物料的速度快, 物料内温度分布均匀。利用红外线干燥粒状物料、薄层物料、纺织品等, 其