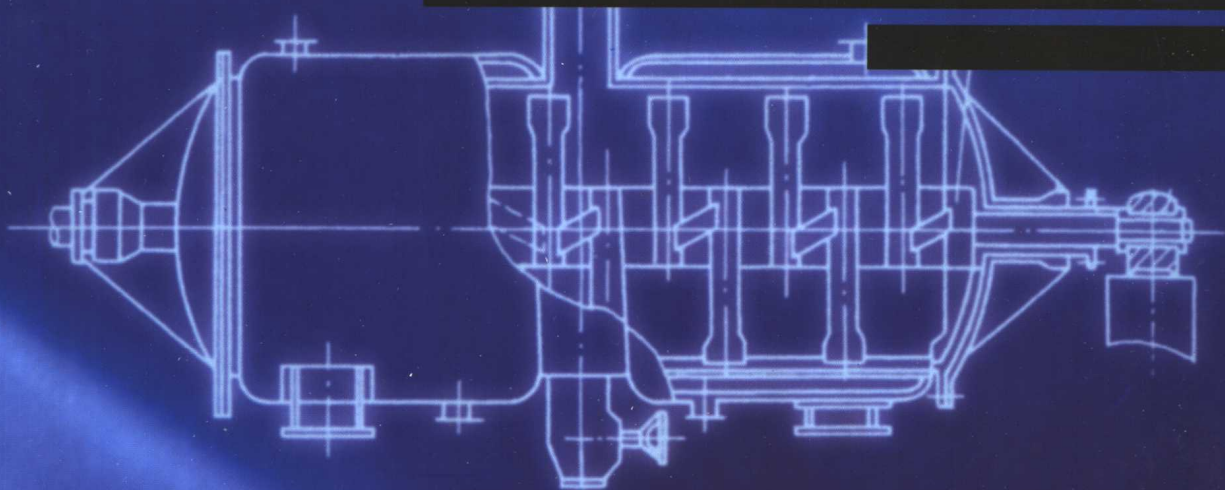


徐成海 张世伟 关奎之 主编

真空干燥



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

真 空 干 燥

徐成海 张世伟 关奎之 主编

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

真空干燥/徐成海,张世伟,关奎之主编. —北京:
化学工业出版社, 2003. 11
ISBN 7-5025-4927-7

I. 真… II. ①徐…②张…③关… III. 真空干燥 IV. TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 102803 号

真 空 干 燥

徐成海 张世伟 关奎之 主编

责任编辑:戴燕红

文字编辑:操保龙

责任校对:李 林

封面设计:关 飞

*

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

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 28¼ 字数 707 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4927-7/TQ·1864

定 价: 58.00 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

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了真空干燥技术及设备的有关知识，内容包括真空干燥技术基础，多种普通真空干燥设备的结构设计，传热传质计算，真空冷冻干燥技术与设备，多种物料的真空干燥工艺，真空汽相干燥，适合于真空干燥的各种真空系统的设计与计算等知识。

本书是作者多年科研、教学和生产实践经验的总结，内容丰富，深入浅出，可作为相关专业大学本科和硕士研究生教学参考书，也可供化工、机械、电工、轻工、食品和医药等行业从事科研、设计、制造和应用等工程技术人员使用。

前 言

干燥是化工过程重要的单元操作，在其他许多工业生产中也是重要的工艺过程之一。按不同的分类方法，干燥可以分成很多种类。如果按工艺过程中物料周围所处的压力划分，则可以分为常压干燥和真空干燥两大类。

真空干燥有许多优点。在真空环境下，水分的沸点降低了，可以实现低温干燥，为热敏性物料的干燥提供了有利条件；氧分压降低了，避免了物料在干燥过程中的氧化变质现象，保障了被干燥物料的质量，在缺氧状态下杀死了一些细菌，抑制了一些细菌的繁殖生长；真空干燥过程可以回收一些有毒有害气体，防止了环境的污染，可称为“绿色环保型”干燥。由于真空干燥有这些优点，其应用领域相当广泛。除化工行业外，食品工程、医药工程、生物工程、电工行业等领域都要用到真空干燥，在纳米科技领域中，真空干燥也有一席之地。

本书是在多年教学与科研实践基础上编著的。书中内容涉及真空科学与技术，制冷科学与技术，传热传质理论，生物工程，医药工程，食品工程，机械工程，电力工程等学科。它是学科交叉的产物，由于在国内还没见到专门讨论真空干燥的书籍。因此，编写本书试图较全面地反映我国当前真空干燥的技术水平、应用特点和发展趋势，力求能达到促进真空干燥事业发展的目的。

该书可为化工过程机械学科硕士研究生的学位课程教学参考书，其目的是使研究生对真空干燥理论、设备结构、设计计算、真空干燥工艺等几个方面进行学习，为培养开拓创新能力打下基础。书中内容便于自学，适合于流体机械及工程、工程热物理、热能工程、机械工程等专业学生学习参考。也可供从事医药、食品加工、农副产品加工、机械、电工等行业技术人员使用。

本书共分六章，第1、第4章由徐成海编写，第2章由王德喜编写，第3章由关奎之编写，第5、第6章由张世伟编写，全书由徐成海统稿。东北大学李云奇教授审查了初稿；甘肃省科学院兰州磁性材料研究所赵克中研究员给予了大力支持；很多研究生参加了书稿的打印工作；书中引用到不少作者专著中的基础理论或论文内容。在此向他（她）们深致谢意。

由于科学技术的飞速发展和作者水平的局限，书中难免有不妥之处，恳请读者指正。

仅以此书献给东北大学建校80周年！

编 者

2003年4月15日

目 录

1 绪论	1
1.1 真空干燥特性	2
1.2 真空干燥设备的种类	3
1.3 真空干燥技术与设备的应用	5
1.3.1 普通真空干燥设备的应用	5
1.3.2 真空冷冻干燥技术的应用	7
1.4 真空干燥设备的选择	14
1.4.1 根据物料的性质选择真空干燥设备	14
1.4.2 根据产品产量选择真空干燥设备容量	15
1.4.3 真空干燥设备性能的选择	15
1.4.4 真空冷冻干燥设备的选择	15
1.4.5 真空干燥设备的效率	17
1.5 真空干燥技术的发展前景	17
1.5.1 真空干燥设备的发展方向	17
1.5.2 真空干燥工艺的发展方向	18
1.5.3 真空干燥技术在交叉学科中的发展	18
2 真空干燥技术基础	21
2.1 真空环境的特性	21
2.1.1 热分子压力效应	22
2.1.2 热流逸现象	23
2.1.3 气体分子密度的涨落	23
2.1.4 稀薄气体传输现象的特点	23
2.2 湿气体的性质	24
2.3 湿物料的性质	29
2.3.1 物料的湿含量	29
2.3.2 物料的分类	29
2.3.3 物料和水分的结合形式	30
2.3.4 湿物料的结构特性和力学性质	31
2.3.5 干燥收缩及干燥应力	32
2.4 低压下的传热	35
2.4.1 气体的导热	35
2.4.2 气体的比热容	41
2.4.3 热辐射	43
2.4.4 辐射传热	44

2.4.5	微波加热	53
2.5	低压下的传质	58
2.5.1	气体中的扩散	58
2.5.2	固体中的质量传递	61
2.5.3	相际传质	65
2.5.4	传质系数	70
2.6	真空干燥的力学特性	74
2.6.1	真空干燥的热力学过程	74
2.6.2	真空干燥静力学	76
2.6.3	真空干燥动力学	76
3	普通真空干燥技术与设备	78
3.1	概述	78
3.2	真空箱式干燥设备	80
3.2.1	真空箱式干燥设备的结构及其特点	80
3.2.2	真空箱式干燥设备的热计算	86
3.2.3	真空箱式干燥设备的技术参数	89
3.3	真空耙式干燥设备	90
3.3.1	真空耙式干燥设备的组成	90
3.3.2	真空耙式干燥机的结构与设计	91
3.3.3	真空耙式干燥设备的特点及应用	93
3.4	滚筒式真空干燥机	95
3.4.1	真空干燥室的结构设计	95
3.4.2	真空回转接头和压力回转接头	100
3.4.3	滚圈和托轮	101
3.4.4	旋转机构及电动机的额定功率	101
3.5	双锥回转型真空干燥设备	102
3.5.1	双锥回转型真空干燥机的结构设计	102
3.5.2	双锥回转型真空干燥机的传动计算	105
3.5.3	双锥回转型真空干燥机的热计算	107
3.5.4	双锥回转型真空干燥设备的应用	110
3.6	真空转鼓干燥设备	113
3.6.1	真空转鼓干燥机的设计	113
3.6.2	真空转鼓干燥机的传热传质计算	116
3.6.3	真空转鼓干燥机的规格及参数	117
3.7	真空圆盘刮板干燥设备	118
3.7.1	真空圆盘刮板干燥机的结构	118
3.7.2	物料在加热圆盘上的运动	122
3.7.3	真空圆盘刮板干燥机的电动机功率	126
3.8	圆筒搅拌式真空干燥设备	129
3.8.1	圆筒搅拌式真空干燥设备的结构	129

3.8.2	圆筒搅拌式真空干燥设备的性能及应用	132
3.9	真空振动流动干燥设备	134
3.9.1	真空振动流动干燥设备的结构及特点	134
3.9.2	真空振动流动干燥设备的性能及其影响因素	136
3.9.3	真空振动流动干燥设备的应用	140
3.10	真空带式干燥设备	141
3.10.1	真空带式干燥机的结构设计	142
3.10.2	真空带式干燥机干燥过程计算	144
3.10.3	真空带式干燥设备的特点及应用	146
3.11	木材真空干燥设备	147
3.11.1	木材真空干燥基本原理	147
3.11.2	木材真空干燥设备的设计	151
3.11.3	木材真空干燥设备的应用	156
3.12	纸浆模塑制品真空干燥设备	157
3.12.1	纸浆模塑制品真空干燥设备的组成	158
3.12.2	真空模塑干燥机的结构	160
3.12.3	纸浆模塑制品真空干燥设备的性能及其影响因素	164
4	真空冷冻干燥技术与设备	167
4.1	概述	167
4.1.1	国外冷冻干燥技术的发展史	167
4.1.2	我国冻干技术的发展及应用	168
4.1.3	冻干技术目前存在的问题	170
4.1.4	冻干技术的常用术语	170
4.2	真空冷冻干燥的基本原理	172
4.2.1	真空冷冻干燥的基本过程	173
4.2.2	预冻过程的传热模型	176
4.2.3	升华干燥过程的传热传质模型	183
4.2.4	一维解析干燥的传热传质模型	192
4.2.5	冻干箱通道内的流动与传热研究	193
4.3	真空冷冻干燥设备	204
4.3.1	冻干机的主要性能指标	205
4.3.2	冻干机的整体设计	205
4.3.3	冻干箱的设计	221
4.3.4	捕水器的设计	229
4.3.5	冻干机的制冷系统设计	239
4.3.6	冻干机加热系统的设计	255
4.3.7	冻干机的控制系统	258
4.3.8	冻干设备的故障分析及处理	263
4.4	真空冷冻干燥工艺	265
4.4.1	冻干生物制品的工艺流程	266

4.4.2	冻干生物制品的典型工艺	276
4.4.3	冻干药品的工艺流程	280
4.4.4	冻干食品的工艺流程	288
4.4.5	食品冻干的典型工艺	296
4.4.6	真空冷冻干燥超细微粉材料	305
4.5	真空冷冻干燥的前后处理设备	306
4.5.1	食品冻干前处理设备的总体布局	306
4.5.2	食品冻干的前处理典型设备	307
4.5.3	食品冻干的后处理设备	314
4.5.4	几种适合于真空包装的薄膜	317
5	真空汽相干燥	320
5.1	真空汽相干燥的原理	320
5.1.1	变压器干燥的目的	320
5.1.2	变压器干燥的方法	321
5.1.3	真空汽相干燥的原理与特点	325
5.2	真空汽相干燥设备	327
5.2.1	总体结构	327
5.2.2	真空罐	327
5.2.3	蒸发器	331
5.2.4	加热系统	334
5.2.5	冷凝系统	336
5.2.6	真空系统	338
5.2.7	控制系统	341
5.2.8	水冷系统	343
5.2.9	注油系统	345
5.2.10	其他附件	346
5.2.11	典型设备示例	346
5.3	真空汽相干燥工艺	347
5.3.1	真空汽相干燥工艺流程	347
5.3.2	准备阶段	347
5.3.3	加热阶段	348
5.3.4	中间降压与恢复加热阶段	349
5.3.5	低真空阶段	350
5.3.6	高真空阶段	350
5.3.7	真空注油	351
5.3.8	充气和排油	351
5.3.9	中间蒸馏和最后蒸馏	352
5.3.10	二次处理	352
5.3.11	典型工艺	352
5.3.12	真空汽相干燥用油	352

5.4 真空汽相干燥的使用	355
5.4.1 汽相干燥设备的安全与防爆	355
5.4.2 汽相干燥设备的维护	359
5.4.3 汽相干燥处理常见故障及排除方法	360
6 真空干燥设备常用真空系统	363
6.1 真空系统的组成	363
6.1.1 概述	363
6.1.2 真空干燥设备中常用真空泵	365
6.1.3 真空测量仪器与真空测量技术	383
6.1.4 真空阀门	392
6.1.5 真空密封	397
6.1.6 真空材料	399
6.1.7 真空继电器	403
6.1.8 除尘器	404
6.1.9 冷凝器	406
6.1.10 真空干燥设备中常用真空系统示例	408
6.2 真空系统设计与计算	414
6.2.1 真空系统设计的已知条件和基本要求	414
6.2.2 真空系统的设计程序	415
6.2.3 真空系统设计中的主要参数计算	415
6.2.4 流量与流导计算	416
6.2.5 选泵与配泵	421
6.2.6 抽气时间计算	424
6.3 真空系统的故障与维护	426
6.3.1 真空检漏概述	426
6.3.2 常用检漏方法	427
6.3.3 常用真空泵的故障及其消除方法	431
6.3.4 真空系统的安装、调试与维护	436
附录	438
主要参考文献	442

1 绪 论

从物料中去除水分主要有三种方法：过滤、蒸发和干燥。过滤是用以分离悬浮液中所含固体微粒的有效方法。蒸发通常是指溶液或物质中含有水分因受热而汽化分离的过程，如果蒸发的结果只是物质浓度的变化，而仍保持液体状态时称之为浓缩。如果蒸发的目的是去除固态物料中的水分，则称之为干燥，如果水分是在固态下升华去除的，则称为升华干燥。过滤、蒸发和干燥过程没有化学变化，都属于物理过程。

干燥既是最古老的单元操作，也是最现代的应用技术之一。目前，人们对干燥技术的了解还很肤浅，在许多方面尚存在着“知其然而不知其所以然”的状况，尤其是被干燥物料的结构、性能和成分各异，很难找出科学统一的规律来，还需要经过科技工作者的不断努力，才能使其逐渐成熟，以便更好地为人类服务。

干燥的目的是减轻物料的质量，以方便运输；降低物料的湿含量，以利于长期贮藏和保管；还有些地方，干燥是工艺过程的需要。例如，煤的干燥是燃烧的需要，矿物干燥是冶炼的需要等。在人类的生活中有大量的热能，消耗在各种干燥过程中，据工业发达国家的统计，干燥过程的能耗占国民经济总能耗的 15% 左右。

干燥技术的用途相当广泛。在国民经济的许多领域都应用着干燥技术，需干燥的物质主要有：食品、谷物、水果和蔬菜、茶叶、中药片剂及中成药、西药制剂、乳制品、生物物料、染料、化工纤维、纸张和纸浆、木材和木制品、各种聚合物、煤、矿等。由于干燥技术的应用面广，研究干燥技术与设备的人员较多。据不完全统计，国内有从事干燥技术研究人员的大专院校 30 余所，科研单位 20 余家，生产各种干燥设备的工厂达百余家。学术活动也很活跃，国际干燥技术交流会每两年一次，*Drying Technology* 杂志在全世界各国公开发行人。中国化工学会化学工程专业委员会的干燥学组，每两年召开一次全国性的干燥技术交流会；中国制冷学会第六专业委员会，每三年召开一次全国性的真空冷冻干燥学术交流会；中国农机学会、中国真空学会等单位，在国内召开的学术交流会上，都有干燥技术方面的论文发表。《化工学报》、《化工进展》、《化学工程》、《化工机械》、《真空科学与技术》、《真空》、《真空与低温》等许多杂志，都刊登干燥技术与设备方面的论文。

干燥器和干燥方法的种类繁多。干燥器主要类型可归纳为：隧道干燥器、箱式干燥器、转筒干燥器、转鼓干燥器、带式干燥机、盘式干燥机、桨叶式干燥机、流化床干燥机、振动流动干燥机、喷雾干燥机、气流干燥机、太阳能干燥机、微波和高频干燥机、红外热辐射干燥机、冲击流干燥机、穿透干燥机、对撞流干燥机、过热蒸汽干燥机。干燥方法主要有：声波场干燥、接触吸附干燥、超临界流体干燥、热泵干燥、冷冻干燥等。这些干燥设备和方法，很难用统一的标准进行分类，当以被干燥物料所处的环境压力鉴别时，可以明显地区分为常压干燥和真空干燥。

真空干燥设备较复杂。干燥室要求是密封性能良好的外压容器，需要配置一套能抽水蒸气的真空系统。因此，设备成本高，运转费用也高。但是，真空干燥有许多突出的特点，有许多物料必须采用真空干燥才能保证其性能要求。因此，发展真空干燥是人类科学与技术进

步的需要。

1.1 真空干燥特性

真空干燥的过程就是将被干燥物料置放在密闭的干燥室内，用真空系统抽真空的同时对被干燥物料不断加热，使物料内部的水分通过压力差或浓度差扩散到表面，水分子在物料表面获得足够的动能，在克服分子间的相互吸引力后，逃逸到真空室的低压空间，从而被真空泵抽走的过程。

在真空干燥过程中，干燥室内的压力始终低于大气压力，气体分子数少，密度低，含氧量低，因而能干燥容易氧化变质的物料、易燃易爆的危险品等。对药品、食品和生物制品能起到一定的消毒灭菌作用，可以减少物料染菌的机会或者抑制某些细菌的生长。

因为水在汽化过程中其温度与蒸气压是成正比的，其比例关系如图 1-1 所示。所以真空干燥时物料中的水分在低温下就能汽化，可以实现低温干燥。这对于某些药品、食品和农副产品中热敏性物料的干燥是有利的。例如，糖液超过 70℃ 部分成分就会变成褐色，降低产品的商品价值；维生素 C 超过 40℃ 就分解，改变了原有性能；蛋白质在高温下变性，改变了物料的营养成分等。另外，在低温下干燥，对热能的利用率是合理的。

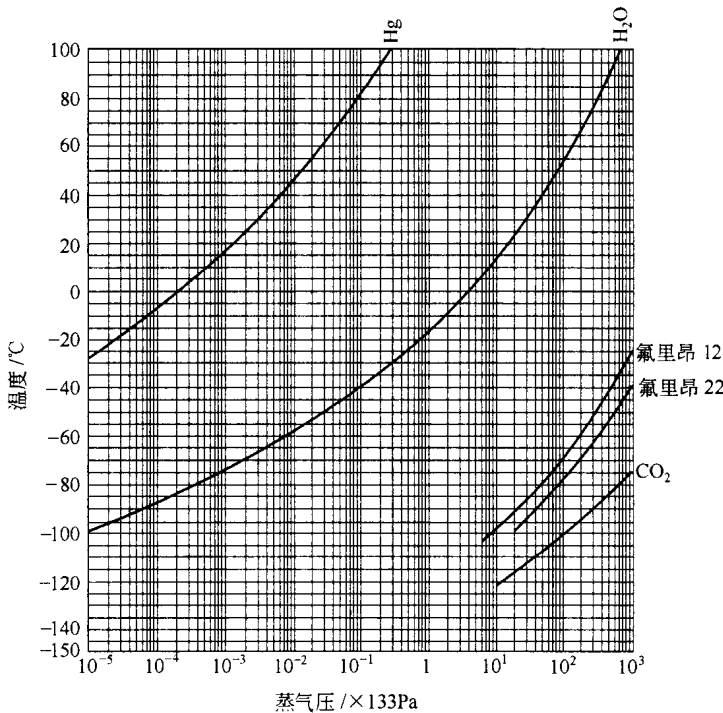


图 1-1 水汽化温度和蒸气压的关系

真空干燥可消除常压干燥情况下容易产生的表面硬化现象。常压热风干燥，在被干燥物料表面形成流体边界层，受热汽化的水蒸气通过流体边界层向空气中扩散，干燥物内部水分要向表面移动。如果其移动速度赶不上边界层表面的蒸发速度，边界层水膜就会破裂，被干燥物料表面就会出现局部干裂现象，然后扩大到整个外表面，形成表面硬化。真空干燥物料内和表面之间压力差较大，在压力梯度作用下，水分很快移向表面，不会出现表面硬化。同

时能提高干燥速率，缩短干燥时间，降低设备运转费用。

真空干燥能克服热风干燥所产生的溶质失散现象。热风干燥使被干燥物料内部和表面形成很大的温度梯度，促使被干燥物料中某些成分散发出去。尤其是食品，会散失香气，影响其味道。真空干燥时物料内外温度梯度小，由逆渗透作用使得作为溶剂的水独自移动，克服了溶质散失现象。有些被干燥的物料内含有贵重的或有用途的物质成分，干燥后需要回收利用；还有些被干燥物料内含有危害人类健康的，有毒有害的物质成分，干燥后废气不允许直接排放到空间环境中去，需要集中处理。只有真空干燥才能方便地回收这些有用和有害的物质，而且能做到密封性良好。从环境保护的意义上讲，有人称真空干燥为“绿色干燥”。

真空干燥容易实现产品多样化。以食品干燥为例，可以通过控制温度和真空度，使产品发泡、膨化，生产出酥脆、速溶等食品。

真空冷冻干燥是在真空干燥之前先将物料冷冻到该种物料的共晶点温度以下，待物料完全冻结后再进行真空干燥。因此，真空冷冻干燥除具有上述真空干燥的特性外，还因预先冻结时固定了物料的外形，形成了固体骨架，干燥后能保持形状基本不变，物料内的物质成分分布均匀，形成多孔状物质结构，容易吸水。对于食品物料，真空冷冻干燥（以下简称冻干）后，能保持物料的色、香、味、营养成分、形状基本不变；对药品物料，能保证药效不变，定量准确，无污染；对生物制品、活菌、活毒、离体生物组织物料，冻干后能保持其活性，以便于应用。冻干物料含水率可以达到很低，方便长途运输和长期贮藏。

虽然真空干燥设备有诸多优点，但其需要配置真空系统，在大型连续化生产设备上还需要在进出口处设置传动部件的真空动密封结构。由于这种结构元件，容易造成泄漏，使用过程中需要定期检查，及时更换，给用户增添了麻烦。真空干燥设备还有制造成本高，运转费用贵，造成干燥后的产品价格高，特别是冻干产品价格更高等一系列缺点。但是，由于其具有独特的干燥特性，好多物料不得不采用真空干燥工艺。

1.2 真空干燥设备的种类

真空干燥设备的种类很多，大多数干燥室能够密闭的常压干燥设备都能实现真空干燥。在真空干燥技术领域里，可以把真空干燥设备分成普通真空干燥和特种真空干燥两大类。

普通真空干燥设备主要包括：适合于液体、浆体、粉体和颗粒物品干燥的箱式干燥设备；适合于果汁、牛奶、糖蜜、甘薯泥、番茄酱等干燥的滚筒式真空干燥设备；适合于橙汁、番茄汁、速溶茶和速溶咖啡等生产的带式真空干燥设备；适合于粉体颗粒物料的，如维生素C等干燥的真空振动流动干燥机；还有圆筒搅拌型真空干燥机、双锥回转型真空干燥机、耙式真空干燥机、圆盘刮板真空干燥机等。

特种真空干燥设备主要有：真空冷冻干燥设备、低频真空干燥设备和气相真空干燥设备等。

如果按真空干燥设备的用途划分，可以分成食品真空干燥机、药品真空干燥机、木材真空干燥机、聚合物真空干燥机、化工产品真空干燥机等。

如果按加热方式，可以将真空干燥设备分成传导加热、辐射加热、微波加热和气相加热等类型。

近些年来，真空冷冻干燥设备发展很快，其种类也比较多，分类方法主要有以下几种。

① 按冻干面积分为大、中、小三种。通常认为 50m^2 以上的为大型冻干机； $5\sim 50\text{m}^2$ 的为中型冻干机； 5m^2 以下的为小型冻干机。市场上供应的最小冻干机为 0.1m^2 ，非标准冻干机还有 0.02m^2 的。

② 按用途分为医药用冻干机和食品用冻干机两种。医药用冻干机要求其制造精度高，所用材料好，必须符合 GMP（最佳医药制造管理和品质管理规则）标准要求；功能齐全，一般都应该设置在位自动清洗装置（CIP）和在位灭菌装置（SIP），并根据需要设置压盖机构和取样机构。食品用冻干机通常是辐射加热，对搁板的加工精度要求相对较低，冻干面积较大。

③ 按物料的冷冻地点分为冻干合一型和冻干分离型。冻干合一型是指物料的冷冻和干燥均在冻干箱内进行，冻干箱内的搁板里既能制冷又能加热，被冻干物料放在搁板上，主要依靠传导进行预冻和加热，辐射传热是次要的。医药用冻干机多为冻干合一型，目的是保持物料清洁卫生，防止污染。冻干分离型是指预冻在冷库、速冻机或液态容器里进行，干燥时再将预冻好的物料移到干燥箱（仓）内，目的是节约能源，节省干燥时间，提高生产效率，降低产品成本，这种冻干机以辐射加热为主，多适用于食品冻干机。

④ 按冷冻方式可分为静态冷冻（static freezing）、动态冷冻（dynamic freezing）、离心冷冻（centrifugal freezing）、滚动冷冻（shell freezing）、旋转冷冻（spin freezing）、喷雾冷冻（spray freezing）、气流冷冻（airblast freezing）等。具体选用何种冷冻方式，应该根据物料性质和冷冻干燥工艺要求而定。

⑤ 按捕水器（水气凝结器）安放的位置，分为内置式和外置式两种。内置式的捕水器安放在冻干箱内，可放在冻干箱搁板的两侧、下部或后部。内置式冷冻干燥机节省占地面积，被抽气体到捕水器去的阻力小，省去了干燥箱与捕水器之间的连接管道和阀门，经济性好。但内置式捕水器与搁板之间距离较近，影响搁板加热的均匀性，容易出现热桥，影响捕水器捕水特性，还有些内置式捕水器化霜时需要停止工作，影响了生产周期和生产效率。外置式捕水器安放在冻干箱外，需要一个独立外壳，用管道和阀门将冻干箱和捕水器连接起来，其优缺点与内置式刚好相反。

⑥ 按所采用的真空系统，分水蒸气喷射泵型和捕水器加机械泵型两种。水蒸气喷射泵真空系统不用捕水器，能直接大量抽出水蒸气，抽气量大、效率高，抽气量可以控制，但需要水蒸气作为动力，锅炉产生水蒸气的压力容易波动，影响泵的性能，烧锅炉容易造成环境污染，因此只有少量食品采用这种系统。捕水器加机械泵系统中需要为捕水器配置一套制冷系统。一般单级压缩机的制冷系统，蒸发器表面最低温度为 -35°C ；双级压缩机的制冷系统可达到 -50°C ；复叠式压缩机制冷系统能达到 -80°C 。根据真空度的需要，在捕水器前面可配置罗茨泵加水环泵机组、罗茨滑阀泵机组、罗茨放片泵机组，或者只配置能直排大气的各种机械真空泵。

⑦ 按冻干箱内搁板上的加热方式分为直接加热和间接加热两种。直接加热是用电或各种载热媒体直接加热搁板，加热速度快，节约能源，但容易造成搁板温度不均匀、难控制。间接加热需要有换热器，热媒经换热器被加热之后再用泵打入搁板进行循环加热，其优缺点与直接加热式刚好相反。

⑧ 按加热所采用的工质，分油、水、水蒸气加热以及电加热几种。油的价格高，载热量少，循环量大；水在搁板流道内容易结垢，降低通道截面积，影响换热效果；水蒸气的温度和压力不好控制；电加热搁板温度均匀性不好。因此，近年来各厂都配制各种适合于制冷

和加热两用的冷热媒工质，如乙二醇、R11 等。

⑨ 按生产方式分连续式和间歇（周期）式两种。连续式冻干机造价高，生产量大，适合于单一品种物料大规模生产；间歇式冻干机的优缺点与连续式刚好相反。

1.3 真空干燥技术与设备的应用

1.3.1 普通真空干燥设备的应用

箱式真空干燥设备的运转实例见表 1-1。在真空干燥箱内，可以实现泡沫真空干燥。料液先经搅打混入空气或添加如碳酸铵之类能产生气体的物质。然后通过接触加热，在减压下因气体膨胀，形成可借真空度来控制的泡沫层，泡沫层干燥的制品具有结构组织疏松，速溶性好的优点。因此，泡沫真空干燥法常用来作为制取速溶食品的一种简便方法。例如，麦乳精、代乳粉、水果粉、速溶咖啡、速溶茶等食品的加工。泡沫真空干燥法的操作要点在于当干燥初期水分较多且液体体积黏度还不高时，不易高真空操作。否则泡沫层发泡隆起很高，容易溢出盘外，且此时气泡易破裂，失去了应当保留到后期发泡的气体量。当浆料干燥到一定程度后，此时提高真空度，产生的气泡就有一定的稳定度，不易破裂，形成稳固的蜂窝状骨架，以便进一步干燥。

表 1-1 箱式真空干燥设备的运转实例

物 料	医药品	医药品	染 料	铜 粉	溶 剂	树 脂	酵 母	糕点糖果
处理量/kg	200	130	900	500	960	150	70	350
原料水分(湿基)/%	15	40	66	5	92.2	15	80	10
制品水分(湿基)/%	0.5	1	4.5	0	0	0.8	11	4
原料堆积密度/kg·L ⁻¹	0.5	0.25	1.2	2.0	1.2	0.55	1.0	—
温度/℃	60	75	132	60	150	50~95	40	80
干燥时间/h	20	16	10	2	3	10	30	2.4
干燥面积/m ²	20	17	35	6.4	26	15	7	21
真空度/×133Pa	25	5	36	50	—	5~10	4~60	10
热源	温水	温水	蒸汽	温水	蒸汽	温水	温水	温水
动力/kW	11	7.5	7.5	1.5	—	3.7	11	11

圆筒搅拌型真空干燥机的运转实例见表 1-2。

对称双锥回转型真空干燥机的运转实例见表 1-3。表中所列只是应用实例，仅是实际应用中的一小部分。

真空滚筒干燥设备主要用于食品干燥，对于果汁之类有热黏结性的食品在高温下会熔化发黏，很难从滚筒表面上刮下，也难以粉碎。因此，必须在刮料前先行冷却，使它成为较脆的薄层，以便顺利地进行刮除和粉碎。单滚筒真空干燥机可以用来干燥大量的马铃薯片；双滚筒干燥机在国外食品工业上用于干燥苹果沙司、牛奶、预煮粮食制品、甘薯泥、胡桃粉、番茄酱、南瓜酱和香蕉酱等。

真空带式干燥机适用于橙汁、番茄汁、牛奶、速溶茶和速溶咖啡等的干燥。如果要制取高度膨化的制品，同样可在料液中先加碳酸铵之类膨松剂或高压下充入氮气，利用分解产生的气体或溶解的气体，加热后形成气泡而使其膨松。真空带式干燥机比普通带式干燥机的费用高，所以它只限于干燥热敏性和易氧化的物料。

真空振动流动干燥机目前主要用来干燥药品（如脑复康、氟哌酸、痢特灵、铜粉、硬质

酸钙、白钢玉粉、保洁粉等。硫糖铝原药粉、100[#]彩电荧光屏磨料、土霉素盐酸盐原药粉、160目陶土粉等四种物料干燥的实验情况见表1-4。

表 1-2 圆筒搅拌型真空干燥机的运转实例

物 料	树脂 颜料	合成树 脂粉末	白 土	无机 药品	有机 药品	有机药 品中间体	工业用 洗涤剂
原料装入量/kg	340	1300	40	350	1000	500	2000
原料含水率(干基)/%	81.2	2	25	3	57	150	125
产品含水率(干基)/%	11.1	1	0	0.1	0	0.2	10.5
原料粒径/mm	—	≤2	微粉	粉状	微粉	块状	粉状
原料密度/kg·m ⁻³	600	700	650	630	840	500	910
干燥时间/h	3.5	2	24	3	7	2.5	8
干燥器直径/m	0.8	1.3	0.48	0.73	0.96	0.96	1.15
干燥器长度/m	1.5	3	0.75	2.5	5	3	4.5
物料填充率(容积)/%	74.5	48	45	53	34	50	49
总传热面积/m ²	3.1	12.1	0.6	5.8	26	10.2	15
夹套内热源	温水	温水	蒸汽	温水	温水	温水	蒸汽
蒸汽压力(绝压)/kg·cm ⁻²	—	—	2.9	—	—	—	2.8
热载体入口温度/℃	80	80	—	80	85	65~85	—
操作真空度/×133Pa	10	20	0.1	100	10~80	100~150	100
搅拌形式回转数/r·min ⁻¹	5.4	12	15	10	10	5	5
功率/kW	3.7	15	1.5	3.7	7.5	5.5	15
真空装置	回转 真空泵	回转 真空泵	回转 真空泵	水喷 射泵	蒸汽 喷射泵	水环式 真空泵	水环式 真空泵
排气量/m ³ ·min ⁻¹	1.9	1.6	—	—	—	4.7	—
功率/kW	3.7	2.2	—	—	—	11	—
集尘装置	无	5m ² 袋式 过滤器	—	无	袋式 过滤器	5m ² 袋式 过滤器	有

表 1-3 双锥回转型真空干燥机的运转实例

物 料	片状合 成树脂	无机药品 结晶体	粉状无 机盐类	片状有 机药品	粉状有 机药品	粉状 医药品
原料装入量 /kg	340	300	800	250	1100	1400
原料含水率(干基)/%	0.5	5	2	0.1	19	4
产品含水率(干基)/%	0	0.1	0	0	0.2	0.5
原料粒径/mm	3×3×4	针状结晶	20目以下	—	30目以下	微粉
原料密度/kg·m ⁻³	700	420	800	700	550	460
干燥时间/h	2	5	4	1.5	7.5	5~6
干燥器容积/m ³	0.96	1.5	1.87	0.6	3.3	9.16
干燥器直径/m	1.2	1.43	1.57	1.08	1.9	2.7
回转直径/m	1.55	1.75	1.83	1.2	2.3	3.65
物料填充率(容积)/%	50.5	48	53.5	59.5	60	33.2
总加热面积/m ²	4.5	5.1	7.5	3.3	10.9	21.8
夹套内热源	热油	温水	温水	温水	蒸汽	温水
蒸汽压力(绝压)/kg·cm ⁻²	—	—	—	—	1.5	—
热载体入口温度/℃	80~120	60~90	40~80	45	—	70
操作真空度(绝压)/×133Pa	0.1	30	50	25	50	0.8
回转数/r·min ⁻¹	5	4	4	5.1	6	1.25
功率/kW	2.2	1.5	1.5	0.75	7.5	5.5
真空装置	活塞式 真空泵	蒸汽 喷射器	水环式 真空泵	水环式 真空泵	水喷 射泵	回转 真空泵
排气量/m ³ ·min ⁻¹	10	—	4.7	共用	—	—
功率/kW	1.5	—	11	—	—	—
集尘装置	0.8m ² 袋式 过滤器	无	无	旋风 分离器	4m ² 袋式 过滤器	旋风 分离器

表 1-4 四种物料干燥的实验情况

项 目	硫糖铝原药粉	100 [#] 彩电荧屏磨料	土霉素盐酸盐原药粉	160 目陶土粉
湿料堆积密度/kg·m ⁻³	738	1058	609	914
干料堆积密度/kg·m ⁻³	816	1168	650	925
密度/kg·m ⁻³	—	2350	—	2100
初始含水率/%	45~50	18~20	13	1.6
最终含水率/%	8~10	<2	1.5~2	<0.5
粒度/mm	0.147(占 70%~80%)	0.02~0.11	0.833	0.096
黏结性	较强	无	强	弱
热敏温度/℃	<90	<400	<100	—
杂质含量/%	—	<0.1(铁)	—	—
一次加料量/kg	30	48.72	20.6	31
湿填充率/%	81.3	92	68	68
干填充率/%	42.3	69.2	56.6	66.3
初始含水率/%	49	18	13	1.6
最终含水率/%	6.5	1	2.29	0.57
振幅/mm	3	2.6~2.8	2.5	3
振动频率(1450r/min)/Hz	24	24	24	24
容器内压力/Pa	$5.3 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$	$6 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$	$5.3 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$	$6.7 \times 10^3 \sim 7.3 \times 10^3$
加热蒸汽压/MPa	0.25~0.32	0.28~0.30	0.2~0.05	0.3
干燥时间/h	2.75	1.33	1.5	0.916

1.3.2 真空冷冻干燥技术的应用

真空冷冻干燥技术的应用相当广泛。

1.3.2.1 在医药方面的应用

(1) 在西药生产中的应用

冻干技术应用于西药生产大约是在 1935 年,最早的冻干产品有培养基、荷尔蒙、维生素等。1942 年第二次世界大战时,由于战争的需要,大量抗生素都采用了冻干法生产。此后的几十年间,世界各国用冻干法生产的西药品种越来越多,注射用的各种针剂,几乎全都用冻干法生产。还有些原料用药、研制的新药等,用冻干法生产能提高产品质量。国内生产的各种抗生素、循环器官用药、中枢神经用药等针剂逐渐都采用了冻干法生产。例如,蝮蛇抗栓酶、小牛胸腺肽、安苄青霉素钠、利君沙、蛇毒、青霉素、链霉素等都是冻干法生产的。

(2) 在中药生产中的应用

冻干技术在中药生产中的应用比较晚,早期只是用来干燥中药原料或单一的中成药。例如,人参、鹿茸、鹿鞭、鹿尾巴、灵芝、山药、天麻、枸杞、蛙油、冬虫夏草、蜂王浆等。近些年在日本开始汉药(中药)改革,采取汉药西制的办法,抛弃熬药壶,采用中药西制工艺,将配制好的中成药经浸渍、提取、过滤、浓缩、真空冷冻干燥后,再制成粉剂、片剂或针剂,解决了吃中药难、携带不方便的问题,也改变了人们对中药只治慢性病,不治急病的看法。原来中药以口服为主,通过消化器官吸收,循环慢、效率低。制成针剂注射使用,中药和西药一样通过血液循环吸收,见效快。同时,中药无副作用,普遍受到人们的重视。日本学者飯田先生来华讲学时,曾介绍过冻干葛根糖和五味子的事情,并谈到一般中药及配制好的汤药,均可抽汁、浓缩、冻干后制成针剂或片剂。我国是中药发源地,中药的制药改革发展却很慢,发展冻干技术是中药改革的方向。

1.3.2.2 在医疗事业上的应用

1940 年冻干人血浆开始进入市场,之后的几十年内,采用冻干法长期保存动脉、骨骼、