

Continuous Vacuum Drying

连续真空干燥

张志军 张世伟 唐学军 等 编著



科学出版社

连续真空干燥

Continuous Vacuum Drying

张志军 张世伟 唐学军等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

连续真空干燥是真空干燥的发展方向 and 趋势,它在提高生产效率,改善被干燥产品的品质方面具有重要价值。本书共分7章,围绕真空干燥的连续式生产理论、技术和应用进行阐述,主要内容有连续真空干燥基础、塔式连续真空干燥、带式连续真空干燥、盘式连续真空干燥、微波连续真空干燥和连续冷冻真空干燥等。

本书适合化工过程机械、流体机械及工程、工程热物理、热能工程、机械工程等专业的学生学习参考;也可以供从事食品加工、医药及副产品加工、机械、化工等行业技术人员设计参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

连续真空干燥 / Continuous Vacuum Drying / 张志军等编著. —北京:科学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-03-045668-7

I. ①连… II. ①张… III. ①真空干燥 IV. ①TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 218533 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015年9月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:300 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

干燥作为最古老的操作单元,目前仍是最现代的应用技术之一。作为从物料中去除水分的三种主要方法之一,干燥技术看起来相当简单,实际上非常复杂。干燥过程的实质是传热传质过程,并且伴随着各种各样的耦合场,如微波等。而且由于被干燥物料不同,干燥作业的方式不同,干燥技术的复杂性急剧增加。这都对干燥技术研究者提出了挑战。为了应对这些挑战,人们通过实验和数值计算来对干燥过程进行研究和描述,从而获得物料,设备的干燥特性,以改进设备和工艺,提高被干燥物料的品质。

随着技术的进步和社会的发展,人们对物料干燥的要求越来越高。一方面要求干燥后物料具有较好的品质,另一方面要求干燥的能耗要低。而真空干燥最突出的特点就是物料干燥后的质量好,甚至有些物料只能采用真空干燥。但是其干燥能耗高,设备复杂,不能适应大批量生产的需求。而真空连续干燥则可以实现物料的大批量处理,有利于降低干燥的能耗和单位物料的干燥成本。

笔者从事真空干燥技术接近十年,重点研究塔式连续真空干燥,对我国学者提出的这一新型干燥设备,做了深入的研究,并得到了国家自然科学基金青年基金的资助。与此同时,一些其他的连续真空干燥设备也出现了新的变化。笔者在从事研究的同时,感觉国内对连续真空干燥的重视不够,投入较少,在很大程度上制约了连续真空干燥技术的发展。

本书适合化工过程机械、流体机械及工程、工程热物理、热能工程、机械工程等专业的学生学习参考,使其了解和掌握连续真空干燥理论、设备结构,设计计算和相关干燥工艺;也可供从事食品加工、医药、农副产品加工、机械、化工等行业技术人员设计参考使用。

本书分为7章,第1章由张志军、徐成海编写,第2章由张世伟编写,第3章由张志军、唐学军和何翔编写(其中,唐学军编写“塔式连续真空干燥试验研究”一节,何翔编写“真空关风器”一节),第4章由徐成海编写,第5章由徐成海、张志军编写,第6章由张志军、徐成海编写,第7章由徐成海、张志军编写。全书得到了东北大学徐成海教授和中粮工程科技(郑州)有限公司(原国家粮食储备局郑州科学研究设计院)唐学军高级工程师的悉心指导,并且亲自参与撰写了部分章节,在此表示诚挚的谢意;另外本书的部分成果得到了国家自然科学基金青年基金“玉米连续真空干燥过程的双尺度传热传质特性与品质影响机理研究”(编号:31000665)、国

国家自然科学基金面上项目“乳酸菌喷雾冷冻干燥机理及干燥行为控制机制研究”和
国家自然科学基金面上项目“典型植物果实皮层组织在干燥过程中传质机理的研究”
(编号:51176027)的支持,在此对国家自然科学基金委员会表示感谢。

本书呈现的是连续真空干燥的最新成果,有些成果参考和引用了不少作者专
著和论文的内容,如微波连续真空干燥、连续冷冻真空干燥等部分,这里不能一一
列举,在参考文献中我们尽可能地予以注明,在此表示感谢。

张志军

2015年4月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 真空干燥特性	2
1.1.1 真空干燥原理	2
1.1.2 真空干燥热力学特性	4
1.1.3 真空干燥静力学特性	6
1.1.4 真空干燥动力学特性	6
1.2 真空干燥设备分类	8
1.3 真空干燥工艺的发展现状	8
1.4 真空干燥理论的研究现状.....	12
1.5 真空干燥技术的发展前景.....	13
1.5.1 真空干燥设备的发展方向.....	13
1.5.2 真空干燥工艺和理论的发展方向	14
1.5.3 真空干燥与其他学科的交叉应用	15
1.6 连续真空干燥技术的现状与前景.....	15
第 2 章 连续真空干燥基础	17
2.1 真空下的传热.....	17
2.1.1 气体的导热	17
2.1.2 气体的比热容	22
2.1.3 热辐射	25
2.2 真空下的传质.....	27
2.2.1 气体中的扩散	27
2.2.2 固体中的质量传递	31
2.3 真空获得设备.....	37
2.3.1 真空泵的主要参数	37
2.3.2 国产真空泵型号、规格和性能表示法	37
2.3.3 真空干燥常用真空泵	39
2.4 真空测量.....	42
2.4.1 弹性元件真空计	42
2.4.2 电容式薄膜真空计	42

2.4.3	电阻真空计	43
2.4.4	高压热阴极电离真空计	43
2.4.5	真空测量技术	43
2.5	真空阀门	45
2.5.1	真空阀门的型号	45
2.5.2	真空干燥常用阀门	46
2.5.3	阀门的密封材料	47
2.6	真空系统	47
2.6.1	真空系统设计的主要参数	47
2.6.2	抽气时间的计算	48
2.6.3	选泵与配泵	50
2.6.4	真空机组	51
2.7	真空检漏	51
2.7.1	最大允许漏率	51
2.7.2	静态升压检漏法	52
2.7.3	气泡检漏法	53
2.7.4	真空计检漏法	54
2.7.5	卤素检漏仪法	55
2.7.6	氦质谱检漏仪法	55
第3章	塔式连续真空干燥	57
3.1	塔式连续真空干燥概况	57
3.1.1	塔式连续真空干燥发展现状	57
3.1.2	塔式连续真空干燥的技术经济性	59
3.2	塔式连续真空干燥设备结构	63
3.2.1	塔式真空干燥仓	64
3.2.2	真空关风器	65
3.2.3	真空系统	68
3.2.4	供热方式	71
3.3	塔式连续真空干燥试验研究	72
3.3.1	中试型玉米塔式连续真空干燥试验	72
3.3.2	生产型玉米塔式连续真空干燥试验	78
3.4	塔式连续真空干燥理论研究	79
3.4.1	塔式干燥仓内颗粒流动特性模拟研究	79
3.4.2	塔式干燥仓内气体流动特性模拟研究	86
3.4.3	塔式真空干燥仓内供热系统流场模拟研究	109

3.4.4	玉米真空干燥水分在线测量	110
3.5	玉米真空干燥特性试验研究	111
3.5.1	玉米真空干燥试验设备、材料和方法	111
3.5.2	玉米真空干燥单因素试验研究	113
3.5.3	玉米真空干燥的正交试验研究	118
3.6	玉米真空干燥特性的理论研究	120
3.6.1	基于多孔介质理论的玉米真空干燥特性研究	120
3.6.2	基于三维实体模型的玉米真空干燥特性研究	139
第4章	带式连续真空干燥	152
4.1	带式真空连续干燥设备概况	152
4.2	带式连续真空干燥设备设计	157
4.2.1	布料机构	158
4.2.2	履带输送装置和纠偏装置	158
4.2.3	传送带速度和喷嘴摆动速度	159
4.2.4	剪切剥离机构和出料机构	161
4.2.5	加热和冷却系统	162
4.3	带式真空干燥试验研究	163
4.3.1	香蕉粉带式真空干燥试验研究	163
4.3.2	苦瓜浆带式真空干燥试验研究	164
4.4	带式连续真空干燥工艺过程的数学模型	168
4.4.1	带式连续真空干燥物料降温过程模型	168
4.4.2	带式连续真空干燥过程的数学模型	170
第5章	盘式连续真空干燥	178
5.1	盘式连续真空干燥机的结构	178
5.1.1	耙叶	179
5.1.2	加热圆盘的结构	182
5.1.3	进出料装置	183
5.2	物料在加热圆盘上的运动	184
5.2.1	物料在小加热圆盘上的运动	184
5.2.2	物料在大加热圆盘上的运动	188
5.3	扩散理论与盘式连续真空干燥机	190
5.3.1	扩散理论	190
5.3.2	盘式连续真空干燥的扩散理论模型	190
第6章	微波连续真空干燥	194
6.1	微波加热原理	194

6.2	微波真空干燥的特点及干燥箱内的微波分布特性	196
6.3	微波连续真空干燥设备	200
6.3.1	实验型微波连续真空干燥设备	200
6.3.2	中试型微波连续真空干燥设备	202
6.3.3	微波-红外集成连续真空干燥设备	204
第7章	连续冷冻真空干燥	207
7.1	冷冻真空干燥特性	207
7.1.1	冷冻真空干燥原理	207
7.1.2	冷冻真空干燥过程的传热传质特性	211
7.2	连续冷冻真空干燥设备	216
7.2.1	塔盘式连续冷冻真空干燥设备	217
7.2.2	隧道式连续冷冻真空干燥设备	217
7.2.3	国内第一套连续食品冻干机	217
7.2.4	连续进出料系统	218
参考文献	219

第 1 章 绪 论

干燥作为最古老的操作单元,目前仍是最现代的应用技术之一。作为从物料中去除水分主要三种方法之一,干燥技术看起来相当简单,实际上非常复杂。人们对干燥技术的了解还很肤浅,在许多方面尚存在“知其然而不知其所以然”的状况,尤其是被干燥物料结构、性能和成分各异,很难找出科学统一的规律来,还需要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。

三种去除水分的单元操作包括:过滤、蒸发和干燥。过滤是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,则称为浓缩。如果蒸发的目的是去除固态物料中的水分,则称为干燥,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。

干燥有以下几个目的:减轻物料的重量,以方便运输;降低物料的湿含量,以利于长期储藏和保管;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,大量的热能消耗在各种干燥过程中,据工业发达国家统计,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中均得到了应用。被干燥的物料主要有食品、谷物、水果和蔬菜、茶叶、中药饮片及中成药、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、煤和矿物等,数不胜数。干燥技术应用面广,研究干燥技术与设备的人员较多,据不完全统计,国内有 30 余所大专院校、20 余家科研单位、达百余家生产各种干燥设备的工厂拥有从事干燥技术研究人员。学术活动也很活跃,国际干燥技术交流会每两年一次,*Drying Technology* 杂志在世界各国公开发行。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技术交流会;在国内召开的学术交流会上,中国食品学会、中国工程热物理学会、中国化工学会、中国农业工程学会、中国农业机械学会和中国真空学会等单位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。

干燥方法和干燥机种类繁多,主要干燥方法有超声波干燥、接触吸收干燥、超临界流体干燥、热泵干燥、真空干燥和真空冷冻干燥等。根据不同的干燥方法所制成的各种干燥机有:隧道干燥机、箱式干燥机、转筒干燥机、转鼓干燥机、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、冲击干燥机、穿透干燥机、对撞流干燥机、过热蒸汽干燥机等。这些干燥方法和设备,很难用统一的标准进行分类,只有被干燥物料所处的环境压力容易鉴别,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,干燥室不但需要密封性能良好的外压容器,而且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,发展真空干燥是人类科学与技术进步的需要。而为了降低真空干燥的成本,提高效率,适应大批量的干燥作业,需要发展连续真空干燥技术。

1.1 真空干燥特性

1.1.1 真空干燥原理

真空干燥是在低于1个标准大气压(标准状态下每立方厘米中气体分子数为 2.687×10^{19} 个,1标准大气压= 1.01325×10^5 Pa)的环境条件下,去除物料中所含水分的过程。任何干燥过程都离不开被干燥物料、物料与周围环境之间、环境本身的传热传质特性。真空干燥与常压干燥一样,基本原理都是传热传质理论。所不同的是在真空干燥过程中,被干燥物料的周围环境为密闭的低压空间。真空干燥的过程中,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,克服分子间相互吸引力,飞入真空室的低压空间,从而被真空泵抽走。

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,氧含量低。因而能干燥容易氧化变质的物料和易燃易爆的危险品;对药品、食品和生物制品能起到一定的消毒灭菌作用,可以控制减少物料染菌或者抑制某些细菌的生长。

因为水在汽化过程中需要的温度是与压力成正比的,几种不同物质的汽化温度与蒸气压的关系如图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、食品和某些农副产品中的热敏性物料的干燥是有利的。例如,糖液超过 70°C 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°C 就分解,改变了原有的性能;蛋白质在高温下变性,改变了物料的营养成分等。同时在低温下干燥,对热能的利用率也是合理的。

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

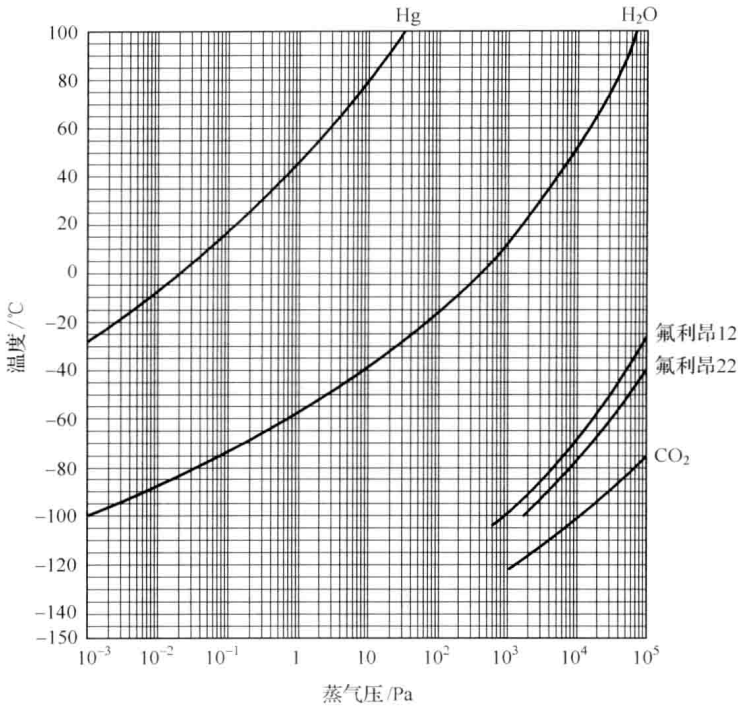


图 1-1 几种不同物质汽化温度和蒸气压的关系

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,边界层水膜就会破断,被干燥物料表面就会出现局部干裂现象,然后扩大到整个表面,形成表面硬化。真空干燥物料内和表面之间的压力差较大,在压力梯度作用下,水分会很快向表面移动,不会出现表面硬化,同时又能提高干燥速度,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,影响其美味。

真空干燥时内外温度梯度小,由逆渗透作用使得作为溶剂的水独自移动,克服了溶质散失的现象。有些被干燥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;还有些物料内含有危害人类健康有毒有害的物质成分,干燥后不允许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。因此,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、速溶等食品来。

真空干燥设备需要配置真空系统；在大型连续化生产设备上还需在其进、出料口处设置传动部件的真空动密封结构，由于这种结构内有易磨损元件，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。

1.1.2 真空干燥热力学特性

当水在不同的压力下蒸发时，其过程可用一条 $p-v$ 曲线来表示。在图 1-2 所示的 $p-v$ 曲线中，纵坐标为压力 p ，横坐标为比体积 v （每单位质量物质的体积）。曲线 AB 为饱和液体，在 AB 左侧，水呈液体状态；曲线 BC 称为饱和蒸汽线，在 BC 线的右侧，水呈蒸汽状态；在曲线 ABC 所围的下方，水是液气相共存的。 B 点表示一种临界状态，对应于这一状态，液体和蒸汽之间没有差别，当压力高于 B 点时，不存在液体状态的水。在干燥问题上，不用研究这一点的状态。对水来说，在被称为临界点 B 的压力已经是 22.064MPa，其对应温度已达 374℃，比体积为 0.00317m³/kg。分别称为临界压力、临界温度和临界比体积。

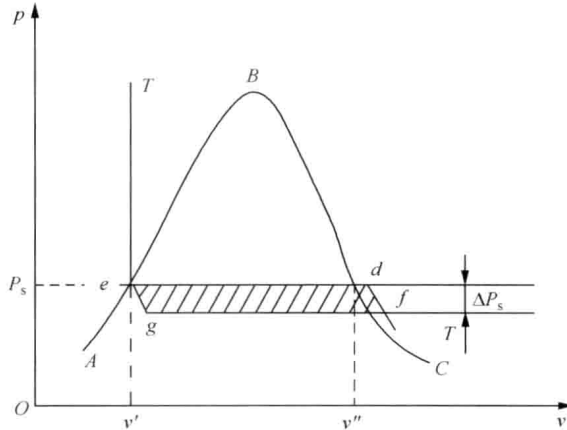


图 1-2 水的汽化特性曲线

$p-v$ 图中没有温度坐标，它实际上是由无数条等温曲线所组成的。这个图是由实验绘制而成的，其方法是在某一温度 T 下，等温压缩蒸汽，随着 p 的增加， v 减小，当达到某一压力 p_s 时， v 达到 d 点，这时蒸汽开始液化。从 d 点再加压时，更多的蒸汽液化，体积不断地减小而保持 p_s 不变，直到 e 点，全部蒸汽变为液体。由于液体是不可压缩的，于是 p 急剧增加而 v 保持不变，这样就得到了 T 的等温线。此线的特点是：在 e 点以左，压力 p 变化时，比体积 v 不变，这个比体积相当于液体水的比体积；在 de 段，比体积 v 在变化而压力 p_s 不变；在 d 点以右， p 和 v 都在变

化,全过程中,温度 T 是恒定的,所以称为等温线。如果在不同的温度条件下,重复上述实验,便可得到一系列的 d_1, d_2, \dots 和 e_1, e_2, \dots 点,连接这些点,即得出 ABC 曲线,所以 $p-v$ 图是表示水在蒸发时,温度、压力和比体积之间的关系曲线。

$p-v$ 图中的 de 线上是气液两相共存的,其特点是蒸汽压力不变,这个压力就是该温度下水的饱和蒸汽压,这时的蒸汽即为该温度下的饱和蒸汽。

为了定性地导出它们之间的相互关系,分析 $p-v$ 系统中的卡诺循环是由等温膨胀、绝热膨胀、等温压缩和绝热压缩 4 个过程组成的。设在压力 p 时,在与外界绝热的条件下,等压加热,则系统等温膨胀,体积增大,系统从热源吸收能量至 e 点达到沸腾,液体开始汽化,体积由 v' 增加到 v'' ,达到 d 点时,全部液体汽化结束。于是绝热膨胀至 f 点,此时仍是等温过程,但不等压,压力降落 Δp_s 。到 f 点后再冷凝,系统开始液化,放出热量并保持压力和温度不变,比体积从 v'' 减小到 v' ,当变化到 g 时,再绝热压缩至 e 点,则完成一个循环。这个循环所做的功,可以用面积 $edfg$ 来表示。因为压力改变 Δp_s ,温度改变 ΔT 数值很小,所以其面积可以用长方形 $\Delta p_s(v'' - v')$ 表示,即

$$dA = (v'' - v') \cdot dp_s \quad (1-1)$$

从热力学可知

$$dA = L \frac{dT}{T} \quad (1-2)$$

从而得

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{4.1868L}{T(v'' - v')} \quad (1-3)$$

式中, v'' 和 v' 分别为气体和液体水的比体积, m^3/kg ; L 为汽化潜热, kJ/kg ; p_s 为在温度 T 时的饱和蒸汽压, MPa ; T 为热力学温度, K 。

式(1-3)积分得

$$p_s = 4.1868 \frac{L}{v'' - v'} \ln T + C \quad (1-4)$$

式(1-4)就是克拉贝龙-克劳修斯公式。由公式可见:

(1) 水的汽化温度随着压力降低而降低,在真空条件下能实现低温汽化,这就是真空干燥的理论基础;

(2) 在压力 p_s 不变的情况下,对系统加热,为保持公式平衡,必须有更多的液体汽化,使干燥速度加快;

(3) 如果继续维持 T 不变,降低 p_s ,同样会有更多的液体转化为蒸汽,这也是

加快真空干燥速度的方法之一。

1.1.3 真空干燥静力学特性

真空干燥静力学研究的内容是干燥过程中物料的最初状态与最终状态之间的关系。这些关系是建立在物料衡算和热量衡算的基础上的。

假设在真空干燥器内物料没有损失,则干燥前后物料的质量不变,即

$$G = G_1 \frac{100 - w_1}{100} = G_2 \frac{100 - w_2}{100} \quad (1-5)$$

式中, G 是湿物料中绝对干物料的质量, kg/h; G_1 是进入干燥器的湿物料质量, kg/h; G_2 是干燥结束后干物料的质量, kg/h; w_1 和 w_2 分别为干燥前后物料中的含水量, %。由式(1-5)得

$$G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \quad (1-6)$$

在干燥器内蒸发出来的水分质量 W 为干燥前后物料质量之差,即

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{100 - w_2}{100 - w_2} - G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1} \quad (1-7)$$

蒸发这些水分所需要消耗的汽化热为

$$Q = W \cdot L \quad (1-8)$$

式中, W 为水蒸气质量, kg/h; L 为汽化潜热, kJ/kg; Q 为蒸发质量为 W 的水蒸气所消耗的热量, kJ/h。由于干燥所需的总热量还应包括物料本身的升温、真空室内原有空气的升温、开真空泵时带走的热量和真空室与周围环境的换热量等, 计算比较麻烦, 不易准确, 最好通过实验测定。

1.1.4 真空干燥动力学特性

真空干燥动力学主要讨论干燥过程中物料在任一时间内的湿度变化与各因素的关系。这里主要讨论干燥速度及其影响因素。

物料的干燥过程, 首先是物料表面的水分受热汽化并被真空设备排除, 物料表面的水分因汽化而逐渐减少, 并在物料内部与表面之间形成湿度差。内部的水分在湿度差的作用下, 不断向表面扩散, 在到达表面后汽化。在真空干燥过程中, 同时存在着压力差, 使得被汽化的水分子加速向真空空间移动。这是真空干燥优于其他干燥方法的一个重要原因。

干燥速度定义为单位时间内, 在单位干燥面积上, 被干燥物料所能汽化并排出的水分质量 W , 即

$$S = \frac{dW}{dt} \quad (1-9)$$

式中, S 为干燥速度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

还没有一个成熟的确定真空干燥速度的方式。对某种物料的真空干燥速度, 都是在某一特定干燥条件下由实验测得的。在实验中, 只要测出各个时间间隔内物料减轻的质量, 就能算出各个时期内物料的干燥速度, 并可画出表征干燥速度的曲线。图 1-3 是典型的真空干燥速度曲线, 干燥过程由 A 点开始, 这时物料内湿含量一定, 开始抽真空并加热, 干燥速度增加到 B 点而达到最大值。AB 段可称为加速干燥阶段。物料在允许温度范围内被加热到相应压力下的汽化温度而大量汽化, 受物料传热传质特性的限制, 干燥速度达到了最大值, 则进入到 BC 段, 称为等速干燥阶段。这时物料温度保持不变, 加入的热量供作汽化潜热和各项热损失, 随着真空系统对汽化蒸汽的不断排出, 保持了蒸发表面与空间的压力差, 使干燥持续进行。当过程进行到 C 点之后, 因物料的湿含量减少到了一定的程度, 从物料中蒸发出来的水分减少了, 在加热量不变的情况下, 物料温度开始升高, 蒸发表面与空间压力差减小, 干燥转入减速阶段。干燥速度由 C 点的最大值逐渐下降到 D 点而趋近于零。由于物料的性质不同, 水分在物料内的扩散难易不同, 干燥速度曲线有较大差别。图中横坐标表示物料的湿含量, C 点的湿含量称为临界点湿含量, 理论上等于物料中结合水与非结合水的分界点。

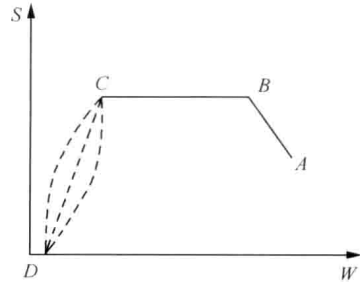


图 1-3 典型真空干燥速度曲线

在真空干燥过程中, 人们总是希望加快干燥速度, 缩短干燥时间。但是影响干燥速度的因素很多。

(1) 被干燥物料的状况: 物料的形状、大小尺寸、堆置的方法; 物料本身的湿含量、密度、黏度等物理性状。一般来说, 物料颗粒细而均匀、堆放松散、厚度薄, 内部水分少, 容易扩散。如果提高物料的初温, 经真空过滤或真空蒸发等前处理, 降低物料湿含量等, 有利于提高真空干燥速度。

(2) 干燥室的工作真空度: 真空度高, 有利于水分在较低的温度下汽化, 但真空度高不利于热的传导, 影响对物料的加热效果。为提高干燥速度, 应该根据物料的特性, 综合考虑真空度的影响。通常, 真空度应不低于 10^4 Pa 。

真空干燥设备的结构形式、加热方式和操作者的经验等都会影响真空干燥速度, 使得干燥时间和干燥速度的计算难度很大。

1.2 真空干燥设备分类

真空干燥设备的种类很多,大多数能够在常压下进行密闭干燥的干燥室都能实现真空干燥工艺。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、粉体和散粒物品干燥的箱式真空干燥设备;适合于果汁、牛奶、糖蜜、甘薯泥、番茄酱和婴儿食品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;适合于粉粒体物料的,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,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。

按生产方式可分为连续式和间歇(周期)式两种。真空干燥设备目前大都是间歇操作,连续生产应用不多,不适应大批量、大规模生产的需要。由于干燥容器内部是真空状态,将物料连续定量地加入或排出真空容器较为困难,气体渗漏不易解决,影响连续式生产的推广应用。

1.3 真空干燥工艺的发展现状

目前真空干燥的研究主要是研究各种物料的干燥特性和干燥工艺曲线,为进一步的实际生产服务。真空干燥广泛应用于食品、化工和医药等领域,而真空干燥技术中的冷冻真空干燥技术在生物细胞、材料领域有着广泛的研究和应用。

肖维强等(2004)选择在低温真空条件下对荔枝和龙眼进行干燥,研究结果表明,在真空 0.03~0.05MPa 时,每次干燥时间 12h 为宜;低温真空干燥能显著提高荔枝干和龙眼干的档次。

王娟等(2005,2006)采用国产设备(GZD-S 型)带式连续真空干燥设备,以香蕉为原料,研究在连续式真空干燥的条件下,加热板温度、真空度、进样量、输送带前进速度等因素对物料干燥的影响,给出了最佳干燥工艺。Bazyrna 等(2006)则通过试验和理论研究了香蕉的红外真空干燥过程,通过分析确定了红外的发射功率,