

喷雾干燥手册

[丹麦] K·马斯托思 著

黄照柏 冯尔健 等译



中国建筑工业出版社

喷雾干燥手册

[丹麦] K·马斯托思 著

黄照柏 冯尔健 等译

中国建筑工业出版社

本书是一部介绍喷雾干燥原理和应用的专著。全书共五篇。除对喷雾干燥的基本原理及主要工艺进行一般介绍外，着重介绍了喷雾干燥的工艺装置，如雾化器及干燥室的结构、布置和设计。同时对喷雾干燥器的运行控制、监测方法、辅助设备也进行了叙述，并分门别类介绍了应用概况。

本书内容充实，理论分析与实际应用密切结合。可供化工、轻工、建材、食品等专业从事喷雾干燥工作的工程技术人员阅读，也可供有关院校师生参考。

Spray Drying Handbook

K. Masters

George Godwin Limited

Third edition—1979

* * *

喷雾干燥手册

黄照柏 冯尔健 等译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：20³/₄ 字数：554 千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷

印数：1—5,900册 定价：2.55元

统一书号：15040·4507

译 者 的 话

从本世纪二十年代发展起来的喷雾干燥工艺已经成为多种产品干燥的最优方法，其应用范围还在不断扩大，以至人们在生产和日常生活中所接触到的许多东西都和它有着直接的联系。因此对这一先进技术的理论、设计计算和应用问题加以全面介绍显然有着重要意义。

本书作者马斯托思(K. Masters)长期从事喷雾干燥研究，他在分析整理国际上有关喷雾干燥理论和应用的大量文献的基础上编写出的这本书深受读者欢迎，初版后六年中接连出了三版。本书系照一九七九年第三版译出。

本书由黄照柏、冯尔健、游恩溥、谭运升、徐洁、李丽莲、史军、吴崇厚和许鹤鸣合译，由黄照柏、冯尔健进行全稿的整理、统一和校核工作，刘合心、陈世兴和杨宏儒参加了部分整理工作。

由于我们的水平有限，译文中难免存在错误和不妥之处，望读者指正。

译 者

1982年9月

第三版序言

看到全世界对喷雾干燥技术的兴趣在不断增长，实在令人高兴。我没有料到本书初版后才短短六年，人们对它的要求就如此迫切，以致必须予以重新修订，出此内容更加全面的第三版。我借此机会详细地修订全文，并将近几年来收到的许多修改意见归纳了进去。主要变动是加强了设计及计算过程的内容，以米制为主要单位以及按作者字母顺序排列文献索引。

本版仍然分为五篇。第一、二篇很多内容是重新编写的，增加了许多近期发展情况。介绍应用问题的第五篇也作了修改，补充了一些新的应用领域。各篇中都使用了米制单位，如摄氏温度、米、卡、毫米、WG等，而将相应的英制单位的数据附列在括号内。没有采用国际标准单位制（SI单位），理由与第一版序中所阐述的相同。经过反复思考，我决定还是保留旧的单位制。因为这种单位制在目前采用喷雾干燥器技术的工业中还是应用最广泛的。

我曾接到许多要求介绍喷雾干燥历史背景的来信。因此在绪论中加了一段1945年以前喷雾干燥历史的简述。其目的并不是对百年来的情况详加研究，而是旨在介绍几个喷雾干燥主要的发展阶段，并向读者指出例如再循环、改善热利用率等方面的许多见解虽在多年前已经提出，但直到最近十来年被实际采用，以满足当前工业上的需要。

第一篇的一个重要特点是新加一章，专论干燥器设计，其中介绍了开式循环及闭式循环干燥系统的要点。设计仍然是以经验方法为基础。喷雾干燥器设计的理论方法虽然也有介绍，但是由于这一系统的动力学数据目前还不能作准确测定，因而实际应用价值就很有限。今天的设计还是以根据工厂经验所作的中间试验

厂的生产试验为基础。

旧版最使人感到意外成功的一点是对专利资料的介绍深受欢迎。专利是产品和生产工艺情报的首要来源。本版在这方面又做了许多工作，对1971年以后发表的专利提供了一个更详细的目录。尼罗（Niro）喷雾干燥公司的J·都詹森先生在编写这一重要资料中帮了我很大的忙，没有他的帮助，这一目录是拿不出来的。同时我还要感谢都詹森先生在编写第十三章中的密切配合。

第五篇的工业生产应用还是采用旧版中的主要产品分类方法。目前除了喷雾干燥器用于发电站及燃烧装置烟道气的 SO_2 -HCl干法吸收外，还没有见到什么惊人的新的应用资料发表，这方面的潜力是很大的。处理发电工业中所产生的大量烟道气需要世界上最大的喷雾干燥装置。第一批大型喷雾吸收器可能是八十年代初期就要面临的任务。

第三版中包含喷雾干燥原理，设计及工艺布置的最新发展情况。旋转式雾化器的性能已能更准确地预先加以估算。干燥室的设计完全能满足工厂对粉料提出的很严格的指标要求。无论是开式、闭式或半闭式系统目前都已发展到能满足工厂中对喷雾干燥器的下列四项重要要求：

无环境污染 须满足排放粉尘和臭气的地区标准和国家标准。

操作安全 干燥器在运转时应无起火及爆炸的危险，并能按现行标准为操作工提供良好的工作环境。

比较高的热利用率 考虑到今天的燃料价格，这是人人都关心的问题。

比较高的产品质量 这是保证生产竞争能力的一个重要因素。

没有哥本哈根尼罗喷雾干燥公司管理部门的协作以及采用该公司许多图片的许可，本书的编写可以说是不可能的。在肯定公司（我的东家）的重要作用的同时必须着重指出，本书中关于喷雾干燥及其原理、应用等的阐述完全是出自我个人的观点，并不

一定与公司的观点一致。

喷雾干燥仍然是一种比较新的干燥技术，还处于不断发展中。第三版中材料的选择不免带有个人的主观成分。关于重要文献的选入都是经过慎重考虑的，如果读者对本书感觉有什么疏漏或需增补的地方，欢迎提供宝贵的改进意见。

K. Masters

丹麦 哥本哈根

1979

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 基本原理和定义

第一章 喷雾干燥基础：工艺流程和干燥器总体结构	18
1.1 工艺流程	18
1.2 工艺布置	29
1.3 运行参数对满足产品要求的作用	46
第二章 料雾的表示方法	48
2.1 术语	48
2.2 数据的表示方法	52
2.3 数据分析	55
第三章 干燥原理、热量衡算及物料衡算、热利用率	67
3.1 干燥原理	67
3.2 喷雾干燥器的热量衡算与物料衡算	86
3.3 热利用率	90
第四章 组成喷雾干燥器的设备	100
4.1 前言	100
4.2 干燥介质及物料通过喷雾干燥器的流程	100
4.3 喷雾干燥器系统的设备组成	103
第五章 喷雾干燥器的特性估算和设计	125
5.1 前言	125
5.2 中间工厂试验对干燥器设计及特性估算的重要性	126
5.3 停留时间的重要性	133
5.4 特性估算和设计程序	135
5.5 喷雾干燥器设计原则(设备的选择及确定尺寸)	137
5.6 例题	146

第二篇 喷雾干燥的工艺过程

第六章 雾化	156
6.1 引言	156
6.2 雾化的基本机理	156
6.3 雾化器的类型	158
6.4 在工业雾化条件下基本雾化机理的应用	159
6.5 旋转式雾化器	160
6.6 喷嘴雾化器	199
6.7 声波雾化	240
6.8 雾化器的选择	241
第七章 料雾与干燥空气的混合与流动	248
7.1 引言	248
7.2 一般原理	254
7.3 雾滴轨迹特性	258
7.4 雾滴在干燥室中的运动	259
第八章 雾滴和料雾的干燥	282
8.1 引言	282
8.2 纯液体雾滴的蒸发	284
8.3 含溶解固体物的雾滴蒸发	302
8.4 含不溶固体物的雾滴蒸发	311
8.5 在非空气介质中的干燥	315
8.6 干燥后的干燥制品性质	318
8.7 物料干燥前后的粒度差	320
8.8 湿料雾及其干粉的粒度分布	323
第九章 干燥产品的分离与回收	324
9.1 引言	324
9.2 从排出的干燥空气中分离粉料的设备的选择	327

第三篇 操作实践

第十章 控制系统	333
10.1 A类控制系统	335

10.2	B类控制系统	337
10.3	进料系统的控制	338
10.4	联锁装置	338
10.5	全自动喷雾干燥器	341
10.6	防火与防爆	344
10.7	防止着火、爆炸或干燥室内部损坏	347
10.8	处理具有爆炸及(或)着火可能性物料的的注意事项	350
第十一章 操作监测		351
11.1	空气流的测定	351
11.2	管道中空气速度的测定	356
11.3	测定空气中载粉量	371
11.4	评价声音对环境的影响(噪音级)	392
11.5	测量雾滴和干粉粒度	397

第四篇 辅助设备概述

第十二章 辅助设备概述		398
12.1	空气加热器	398
12.2	风机	404
12.3	机械粉料分离器	418
12.4	风送粉料	454
12.5	泵	459
12.6	清洗设备	462

第五篇 喷雾干燥在工业中的应用

第十三章 喷雾干燥的应用		464
13.1	产品目录	464
13.2	专利介绍	472
第十四章 在化学工业中的应用		504
14.1	塑料、树脂	505
14.2	陶瓷材料	509
14.3	洗涤用粉料(洗涤剂、肥皂、表面活性剂)	520
14.4	农药	528

14.5	染料、颜料	531
14.6	化肥	537
14.7	浮选矿石浓缩料和水泥的加工	542
14.8	无机化学制剂	550
14.9	有机化学制剂	553
14.10	喷雾冷却、吸收、浓缩以及雾化反应等工业应用选录	553
第十五章 在食品工业中的应用		559
15.1	乳制品	559
15.2	蛋	586
15.3	食品及植物抽提物	589
15.4	水果和蔬菜	598
15.5	碳水化合物	603
第十六章 药物及生化工业中的应用		606
16.1	引言	606
16.2	酶	613
16.3	抗菌素	615
16.4	血清、疫苗、血浆及其代用品	616
16.5	微生物	617
16.6	酵母	618
16.7	维生素	621
16.8	药用胶	622
16.9	菌丝体	622
16.10	单细胞蛋白质	624
16.11	饲料抗菌素	626
第十七章 在林产化学工业中的应用		627
17.1	鞣酸工业	627
17.2	纤维素工业	629
第十八章 在屠宰废料及鱼类加工工业方面的应用		631
18.1	屠宰场副产品	631
18.2	鱼渣的喷雾干燥	635
文献		639

绪 论

1. 定 义

按照定义，喷雾干燥是使液态的物料经过喷雾进入热的干燥介质中转变成干粉料。它是包括干燥在内的颗粒物料一次连续处理过程。进料可以是溶液、悬浮液或糊状物。制成的干料呈粉状、粒状或聚结成团块。干料的形状与进料的物理及化学性质，干燥器的设计及操作等有关。喷雾干燥操作在许多工业中能满足干料质量指标的要求，产品便于作进一步加工或直接供消费者使用。经过近二十年来的深入研究和发 展，喷雾干燥已成为能干燥许多品种的产品、竞争能力很强的干燥方法。使用喷雾干燥的产品品种还在继续增加（参阅第十三章），因而今天喷雾干燥已与人们日常生活所使用的许多制品联系起来了，值得在绪论中用一节来加以简述。

2. 与日常生活的联系

喷雾干燥已在所有主要工业部门中推广使用，从条件要求最高的食品及制药厂到重化学工业中产量大的部门如矿物及粘土加工中均已使用。从我们每天所接触到的许多物料及制品上就可说明喷雾干燥的广大使用范围。仅从我们最感兴趣的生活用品方面就可明显的说明这一点。

从食品到家庭用具，和喷雾干燥就有许多联系。各种物品在制造过程中要求使用不同类型的粉料。例如，我们可以先从所购买的食品的滋味和价格以及所使用的家庭用具的质量上考虑，就很可能接触到大量的食品以及我们家庭用具与喷雾干燥操作有直

接和间接的联系。食品中可能就有速溶咖啡、咖啡助饮剂、干蛋粉、乳粉、汤料、婴儿食品，可能还有粉状干酪、水果等。上述例子都是与喷雾干燥直接联系的。喷雾干燥的食品外观好，营养成分保留完好，而且便于使用。因为它们是按要求配制成和混合均匀。虽在干燥后呈各种形状，如乳粉可能是团块状(速溶的)，蛋粉、汤料、咖啡助饮剂为粉状，干水果为粒状，但都是高度分散而易于溶化的。除上述直接供食用的食品外，还有一些烹调用喷雾干燥制品。例如调味品(大蒜、辣椒)、香料、凝乳酶以及饼干点心里的配料等。肉类、蔬菜、鲜果等食品则是与喷雾干燥有间接联系。由被屠宰的动物提供肉类，而动物的饲养需用喷雾干燥的脱脂乳、乳清，或加脂的乳制品，或其他含蛋白质的制品。这些制品外观要求不高，而颗粒大小及均一性必须适于动物消化。各种蔬菜及鲜果需用喷雾干燥的化肥及农药进行培植。在这里使用的粉料应具有良好的分散性能，粉料的粒度分布及水分有重要意义。

从食品转到通常家庭用品也可列举很多例子。可能最熟习的是用喷雾干燥制成的家庭用洗涤剂，与此类似的还有肥皂粉，表面活性剂以及增白剂等。在盥洗间还可看到喷雾干燥的药用制品，化妆品等。药品中如抗菌素之类要求在高度无菌条件下制成粉末，然后制成片剂投入市场。喷雾干燥的粉状药品是最适合人体器官快速吸收的。许多化妆品例如擦面粉、唇膏通过喷雾干燥进行配料。家庭用具与家具方面也广泛地用到喷雾干燥。装饰墙面的砖是用着色的喷雾干燥的粘土压制成。刷墙需用喷雾干燥制成的颜料。电器绝缘材料也是先经过喷雾干燥，然后压制成电子工业以及供电用的各种部件。电子工业中还大量使用喷雾干燥制成的铁氧体，压制成各种形状用在电话机，收音机，电视机中。许多家庭用具所装配的电动机里也有铁氧体制成的转子。这些制品在压制过程中要求严格的粒度分布，喷雾干燥可以满足这一要求。

要列出家庭中完整的与喷雾干燥制品有联系的物料单还必须

提出:

(1) 塑料, 许多日用塑料制品的制造过程中就包括一个喷雾干燥工序。

(2) 纺织品, 喷雾干燥制成的染料能使用具及纺织品具有丰富多采的颜色。

(3) 文具, 许多印刷用油墨的制造要经过喷雾干燥, 而喷雾干燥的高岭土则用于纸张的制造。

(4) 鞋、提包以及皮革制品, 喷雾干燥的鞣制剂(烤胶)与制革是密切相关的。

(5) 淀粉, 人类最需要的基本物质之一, 在加工过程中就包括喷雾干燥。喷雾干燥的淀粉及其衍生物(糖, 糖浆)大量用于冰淇淋、糖果、糕点、果酱、罐头、冰冻水果, 软性饮料等的制造。在非食品制造厂中还将喷雾干燥淀粉用于纺织品、纸张、印刷品及胶粘剂的制造。

还可以列举许多例子, 不过这已足够说明问题了。从这些各式各样的喷雾干燥制品足以说明喷雾干燥设备具有满足广大范围的粉状制品的要求的能力。

3. 喷雾干燥包括的内容

喷雾干燥包括将原料(如无其他说明即指含水物料)雾化(atomization)为料雾, 使料雾与干燥介质(如无其他说明即指空气)接触形成水分蒸发。料雾的干燥直进行到得出的干料含水量符合要求。然后将干料从空气中回收。上述四个步骤是按照工厂中最常见的喷雾干燥器, 即开式循环、并流喷雾干燥器的情况(参阅图0-1)划分的。

雾化原文为 atomization 容易引起误会, 它和原子(atom)或核物理毫不相干; 而是将大量的液体分裂为千百万细小的液滴或雾滴, 形成料雾。一立方米的液体可分成约 2×10^{12} 个均匀的约100微米的液滴。这一过程所需能量可通过离心力, 压力, 动

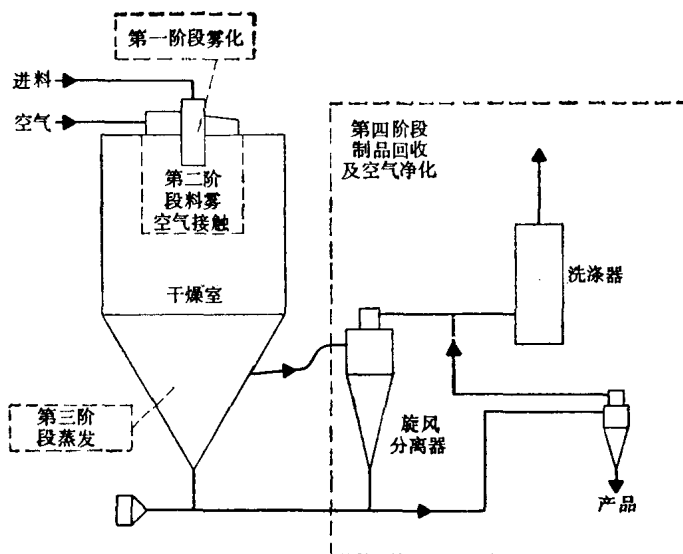


图 0-1 开式循环并流喷雾干燥设计中各操作阶段示意图

力或声波作用提供。料雾与空气接触后，雾滴与热空气相遇，水分从雾滴表面蒸发。蒸发速度是很快的，由于料雾中雾滴的表面积很大。以直径为100微米的 2×10^{12} 雾滴计算总表面积约为60000米²。如果喷雾干燥车间设计正确，则获得的干料悬浮在干燥空气中，从空气中有效地回收干料就成为主要的问题了。按照具体安装的设备来解释这些过程是不成的，因为喷雾干燥操作并不可能明显分成可以进行个别观察的几个步骤。

任何形式的干燥器都采用给喂入的物料供热和调节干燥介质湿度的办法来除去水分。喷雾干燥器也不例外。热量是由热空气供给。将物料喷成雾状进入热空气中而使水分加速蒸发。湿度是通过调节气流速度及温度进行控制。虽然绝大多数都采用热空气来除去每一雾滴中的水分，但有时由于操作要求精确、严格需先将干燥介质除去水分，然后再加热到稍高于室温。这也是喷雾干燥基本类型的一种，称为低温喷雾干燥。另一种类型是泡沫喷雾

干燥[81], 这里是在进料中导入一种气体然后雾化以产生含有空泡的特殊泡沫状颗粒而达到较低的体积密度。还有一种是将物料喷到冷冻的空气中使雾滴冻结, 然后在真空中升华以除去水分。这种喷雾干燥称为冷冻喷雾干燥。如果只要求用冷空气使雾滴凝结成固体, 则称这一过程为喷雾冷冻。还有用干燥室作喷雾反应器的, 用于液体与热的气体介质发生化学反应而生成新的化合物的情况。由于液体在雾化状态下与气体接触, 料雾的表面积大, 可加速反应速度。这一过程称为喷雾反应。吸收也是反应的一种形式。在这方面, 喷雾干燥器也用作喷雾吸收器以除去发电站及煅烧炉烟气中的毒性气体(HCl)及脱硫。加进去的碱液喷成雾状吸收烟气中的 SO_2 及 HCl 等。喷雾干燥的这种应用方式称为喷雾吸收。

喷雾干燥室也可用于干燥以外的目的, 用作喷雾浓缩是由来已久了。事实上用雾化技术将液体干燥及浓缩可追溯到一百年前的专利资料, 后面讨论喷雾干燥历史时还会讲到。

虽然喷雾干燥操作大多数是用空气作为干燥介质, 用后将空气排入大气中(开式循环)。有时也用一种非活性气体, 例如氮代替空气作为干燥介质。在含有可燃的或爆炸性的溶剂时, 用非活性气体可以防止爆炸危险。非活性气体在闭式系统中通过再循环不断地在干燥过程中重新使用。在干燥室内由于蒸发而进入干燥气体中的溶剂可通过洗涤-冷凝系统进行回收。有机溶剂及稀释剂就是这样被蒸发及回收。有些产品可能在开式干燥系统的干燥室中形成具有潜在爆炸性的粉末与空气的混合物, 则可采用直接加热的半闭式干燥系统, 人称“自钝性系统”。在直接加热的空气加热器中控制过剩的助燃空气量, 使干燥室内含氧量保持在6%以下, 爆炸或着火情况就可避免了。产品放出臭气或某些毒性或活性物质时, 空气排空之前要除臭或消毒, 可采用直接或间接加热的半闭式干燥系统。这种系统与生产能力相同的开式循环干燥器放出大量废气的情况进行对比, 它只有极少废气排空。排出这样少的废气可以在排空之前比较容易和经济地进行消毒处理

(参阅图1-13及1-15)。

喷雾干燥设计及其闭式循环、半闭式喷雾干燥、喷雾冷冻、喷雾反应吸收以及喷雾冷冻干燥等各种形式示于图 0-2 中。

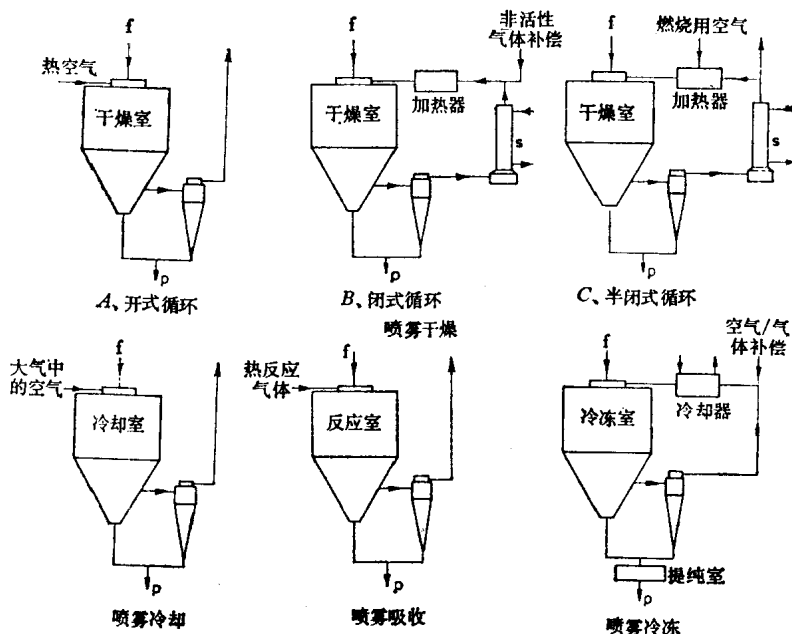


图 0-2 带雾化装置的喷雾干燥器及有关悬浮物料的处理设备布置图

f —进料； p —产品； s —洗涤器，冷凝器，冷却器

在本文的开头已经着重指出，喷雾干燥过程可以处理种类繁多的制品和满足不同工业提出的各种质量指标。这样大的使用范围导致这种干燥器的设计很难标准化，每种产品为了满足要求的指标需用特殊的方法进行单独处理。但是只要满足制品要求，不论干燥器设计成何种型式，都能保持喷雾干燥的优点。