

喷雾干燥

第二版

王喜忠 于才渊 周才君 编著



化学工业出版社

喷雾干燥

第二版

王喜忠 于才渊 周才君 编著

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

喷雾干燥/王喜忠, 于才渊, 周才君编著. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2003.1
ISBN 7-5025-4062-8

I. 喷… II. ①王…②于…③周… III. 喷雾干燥 IV. TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 106569 号

喷 雾 干 燥

第 二 版

王喜忠 于才渊 周才君 编著

责任编辑: 谢丰毅

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(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

三河市东柳装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 14¼ 字数 385 千字

2003 年 2 月第 2 版 2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4062-8/TQ·1601

定 价: 30.00 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

第 1 版 前 言

喷雾干燥技术在工业上应用已有近百年的历史。在过去只限于奶粉、蛋粉等少数成品的生产，但到现在，由于此项技术的研究和发展，已在化学工业、食品工业、医药、农药、陶瓷、水泥、冶金等工业生产中使用，从而扩展了喷雾干燥技术的应用范围。

很多工业产品是从溶液制成粉末的，传统的方法需要经过蒸发、结晶、过滤、干燥、粉碎、筛析等一系列过程。采用喷雾干燥技术后，用雾化器喷出溶液，在热气流作用下直接生成粉末产品，因而大大地简化了生产流程，节省了投资费用，改善了劳动条件，而且还提高了产品的产量和质量。因此，喷雾干燥技术有其广阔的发展前景。

喷雾干燥过程涉及到溶液（或悬浮液）的雾化、传热和传质以及气-固分离等过程。本书主要叙述喷雾干燥的基本原理，三种类型雾化器的结构、性能和计算方法以及干燥室主要尺寸的计算，并举例说明计算方法和步骤，还列举了大型设计例题。为了适合各方面的需要，本书还叙述了干燥介质的性质、物料和热量衡算以及辅助设备的构造和计算等基本知识。此外，本书广泛地列举了国内外喷雾干燥技术在各种工业中的应用。在这些工业中所处理的原料液性质有很大差异，产品的要求也各异，因而在生产流程、操作方法、原料液前处理的要求等方面也各不相同，因此介绍它们有助于各有关工业推广应用喷雾干燥技术，对于技术革新和技术革命也许能起一点参考作用。

本书在编写过程中，得到上海染化十厂、吉林化学工业公司设计院和染料厂、陕西咸阳陶瓷研究所、化工部第六设计院等单位的热情支持和大力协助，提供很多宝贵资料，谨于此致谢。

本书在编写过程中承我院郑锡胤同志提供资料，完稿后，复承

林纪方、沈自求教授校阅全稿，提出很多宝贵意见，谨于此表示衷心的感谢。

由于我们在这方面的理论和实践知识不足，缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

大连工学院化工系

郭宜祜

王喜忠

1982年3月

第2版前言

本书自1983年出版发行以来，对中国的喷雾干燥技术的发展 and 普及起到了积极促进作用，受到读者好评。20年来，中国的喷雾干燥技术与装备，发生了根本性的变化，已接近当代的国际水平，喷雾干燥技术所服务的行业也有了较大的扩展，这不仅促进了干燥技术的发展，同时也使很多行业的生产工艺和产品质量有着根本的改变，甚至也产生了过去所没有的新产品。

综上所述，本书第1版的内容已不能全面地反映当今喷雾干燥技术的实际情况。因此，作者将20年来国内外干燥发展所积累的丰富经验以及作者们的试验、设计、制造和操作的实践，总结归纳，去粗取精，编写出反映当代技术水平的实用新书——《喷雾干燥》第2版。

第1版作者之一的郭宜祜教授，因病已离开了我们，我们将永远不忘郭宜祜教授执着认真的态度对本书（第1版）所做出的贡献。我们是踏着郭教授的足迹一丝不苟地完成了第2版《喷雾干燥》的编写工作。在此书即将出版之际，我们也深深缅怀我们的老师郭宜祜教授。

本书在编写过程中，得到江苏省无锡市林州干燥设备厂的大力支持并提供实际操作数据，丰富了本书的内容，在此致以谢意。

我们在编写过程中，深感知识的不足，缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2002年8月于大连

内 容 简 介

本书共分 8 章，内容有：干燥过程的基本知识、雾化器的结构和计算、雾滴的传热和干燥、喷雾干燥器的结构和计算、喷雾干燥的节能和未来发展趋势、喷雾干燥系统的附属装置、喷雾干燥的工业应用。本书囊括了喷雾干燥技术的各个方面，是非常实用的科技书籍，根据本书所述的方法可进行喷雾干燥的计算设计。

本书可供从事干燥技术的工程技术人员使用，也可供有关大专院校师生阅读。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 喷雾干燥的基本知识	1
1.1.1 喷雾干燥的基本流程	1
1.1.2 喷雾干燥的过程阶段	2
1.2 喷雾干燥的优缺点	5
1.2.1 喷雾干燥的优点	5
1.2.2 喷雾干燥的缺点	6
1.3 喷雾干燥的流程布置	6
第 2 章 干燥过程的基础知识	16
2.1 湿空气的性质和 I - x 图	16
2.1.1 湿空气的性质	16
2.1.2 湿空气的 I - x 图	23
2.1.3 I - x 图的用法	25
2.2 干燥过程的物料和热量衡算	26
2.2.1 物料衡算	27
2.2.2 热量衡算	29
2.3 干燥过程的图解算法	31
2.4 物料中的水分状态和干燥速率	34
2.4.1 物料中的水分状态	34
2.4.2 干燥速率	36
第 3 章 雾化器的结构和计算	40
3.1 雾化机理	40
3.1.1 滴状分裂	41
3.1.2 丝状分裂	42
3.1.3 膜状分裂	42
3.2 雾滴 (或颗粒) 的平均直径及其分布	44
3.2.1 数据的表示方法	44

3.2.2 平均直径	47
3.3 气流式雾化器	50
3.3.1 气流式雾化器的操作原理	50
3.3.2 气流式喷嘴的结构	52
3.3.3 各种变量对液滴尺寸的影响	60
3.3.4 平均滴径的计算	65
3.3.5 气流式喷嘴尺寸的确定	73
3.4 压力式雾化器	77
3.4.1 压力式雾化器的操作原理	77
3.4.2 压力式喷嘴的结构	80
3.4.3 喷嘴的操作特性	85
3.4.4 喷嘴结构尺寸对流量系数的影响	89
3.4.5 操作参数对液滴尺寸的影响	90
3.4.6 平均滴径的计算和液滴尺寸分布	92
3.4.7 压力式喷嘴主要尺寸的确定	98
3.5 旋转式雾化器	109
3.5.1 操作原理	109
3.5.2 光滑盘(无叶片盘)旋转雾化器	112
3.5.3 叶片轮(非光滑盘)旋转雾化器	121
3.6 静电雾化	144
3.6.1 静电雾化原理及基本流程	144
3.6.2 静电雾化产生离子(束)的模型	149
3.6.3 平均滴径的计算	151
3.6.4 静电雾化的工业应用	152
3.7 雾化器的比较与选择	162
3.7.1 雾化器的比较	162
3.7.2 雾化器的选择	163
第4章 雾滴的传热和干燥	168
4.1 干燥过程阶段	168
4.2 纯液滴的蒸发	170
4.2.1 单个液滴的蒸发	170
4.2.2 纯液体的雾滴群的蒸发	175
4.3 含有可溶性固体的液滴蒸发	176

4.3.1	单个液滴的蒸发	176
4.3.2	含有可溶性固体的雾滴群的蒸发	181
4.4	含有不溶性固体的液滴蒸发	181
4.5	对喷雾干燥产品性质的影响因素	186
4.5.1	操作参数对产品性质的影响	186
4.5.2	空心颗粒形成的机理	187
第 5 章	喷雾干燥器的结构和计算	188
5.1	干燥器内空气-雾滴（或颗粒）的流动方向	188
5.1.1	空气-雾滴并流流动	188
5.1.2	空气-雾滴逆流流动	193
5.1.3	空气-雾滴混合流流动	194
5.2	空气（热风）分布器	195
5.2.1	旋转雾化器的喷雾干燥器的热风分布器	196
5.2.2	喷嘴雾化器的干燥器的热风分布器	202
5.3	干燥器锥形底出料和排气方式的组合	206
5.4	喷雾干燥操作中的粘壁问题	207
5.4.1	半湿物料粘壁	208
5.4.2	低熔点物料的热溶性粘壁	213
5.4.3	干粉的表面粘附	214
5.5	干燥器直径和高度的计算	215
5.5.1	雾滴在气流中的运动	215
5.5.2	用图解积分法计算干燥器的直径	221
5.5.3	用图解积分法计算干燥器高度	225
5.5.4	用干燥强度法估算干燥器容积	233
5.5.5	用体积给热系数法估算干燥器容积	233
5.5.6	旋转雾化器的喷雾干燥器直径的确定	234
5.5.7	喷雾干燥器的某些经验数据	234
5.5.8	行业和企业的某些标准	237
5.6	喷雾干燥系统计算举例	238
5.6.1	计算举例之一	238
5.6.2	计算举例之二	250
5.6.3	计算举例之三	253
第 6 章	喷雾干燥的节能和未来发展趋势	260

6.1 喷雾干燥的节能	260
6.1.1 喷雾干燥的热效率	260
6.1.2 喷雾干燥的节能措施	260
6.2 喷雾干燥的未来发展趋势	268
第7章 喷雾干燥系统的附属装置	270
7.1 空气加热器	270
7.1.1 蒸汽加热器	270
7.1.2 燃油加热器	278
7.1.3 燃气加热器	280
7.1.4 电加热器	282
7.2 风机	283
7.2.1 风机在喷雾干燥系统中的布置方式	283
7.2.2 风机的选用方法	284
7.3 旋风分离器	286
7.3.1 旋风分离器的工作原理	286
7.3.2 旋风分离器的分类及特点	287
7.3.3 结构和操作条件对分离效率的影响	289
7.3.4 旋风分离器的压力降	291
7.4 袋滤器	294
7.4.1 袋滤器的结构与操作原理	294
7.4.2 滤袋材料	295
7.4.3 常用袋滤器的类型及适用范围	296
7.5 湿法除尘器	301
7.5.1 湿法除尘器的工作原理	301
7.5.2 湿法除尘器的类型及结构特点	301
7.6 粉体的排出装置	304
7.7 成品的气流输送系统	309
7.8 干燥设备的清洗	313
第8章 喷雾干燥的工业应用	315
8.1 某些特定物料的干燥条件和干燥方式	317
8.2 喷雾干燥在化学工业中的应用	326
8.2.1 洗衣粉	327
8.2.2 塑料、树脂	331

8.2.3	有机染料、颜料	333
8.2.4	农药	337
8.2.5	肥料	340
8.2.6	陶瓷材料	345
8.2.7	矿物提浓物	353
8.2.8	普通无机和有机化学品	356
8.2.9	喷雾干燥在化学工业中新领域的应用	357
8.3	喷雾干燥在食品工业中的应用	365
8.3.1	奶制品	365
8.3.2	蛋类	378
8.3.3	饮料	380
8.3.4	香料	381
8.3.5	植物性蛋白质	381
8.3.6	水果	385
8.3.7	蔬菜	391
8.3.8	碳水化合物	392
8.4	喷雾干燥在医药和生物化学工业中的应用	394
8.4.1	概述	394
8.4.2	酶	396
8.4.3	抗生素	399
8.4.4	血清、疫苗、血浆和血浆代用品	400
8.4.5	酵母	401
8.4.6	维生素	404
8.4.7	药用胶(金合欢、黄蓍、刺梧桐、藻朊酸钠)	404
8.5	喷雾干燥在木材化学工业中的应用	405
8.5.1	丹宁(鞣酸)粉的制备	405
8.5.2	造纸废液的回收	407
8.6	喷雾干燥在屠宰业和渔业中的应用	409
8.6.1	屠宰场副产品的喷雾干燥	409
8.6.2	鱼产品的喷雾干燥	412
8.7	喷雾干燥尾气的处理及其在环境控制中的应用	415
8.7.1	满足粉尘排放要求的系统	415
8.7.2	满足特殊气味排放要求的系统	416

8.7.3 除去有毒气体的系统	418
附录	423
1. 干空气的物理性质	423
2. 烟道气的物理性质	424
3. 空气-水系统焓-湿图 (低温、中温、高温)	425
4. 空气-四氯化碳系统焓-湿图 (压力 101.325 kPa)	428
5. 水的物理性质	429
6. 饱和水蒸气表 (按温度排列)	430
7. 饱和水蒸气表 (按压力排列)	432
8. 标准筛目对照表	434
9. 常用单位换算	437
主要参考文献	442

第 1 章 概 述

喷雾干燥是将原料液用雾化器分散成雾滴，并用热空气（或其它气体）与雾滴直接接触的方式而获得粉粒状产品的一种干燥过程。原料液可以是溶液、乳浊液或悬浮液，也可以是熔融液或膏状物。干燥产品可根据需要，制成粉状、颗粒状、空心球或团粒状。

1.1 喷雾干燥的基本知识

1.1.1 喷雾干燥的基本流程

喷雾干燥装置所处理的原料液虽然有很大差别，所得产品也有很大不同，但它们的流程却基本上相同。图 1-1 为一个典型的喷雾干燥系统流程图。如图所示，原料液由贮料罐 1 经过滤器 2 由泵 3 输送到喷雾干燥器 11 顶部的雾化器 5 雾化为雾滴。新鲜空气由鼓风机 8 经过滤器 7、空气加热器 6 及空气分布器 4 送入喷雾干燥器

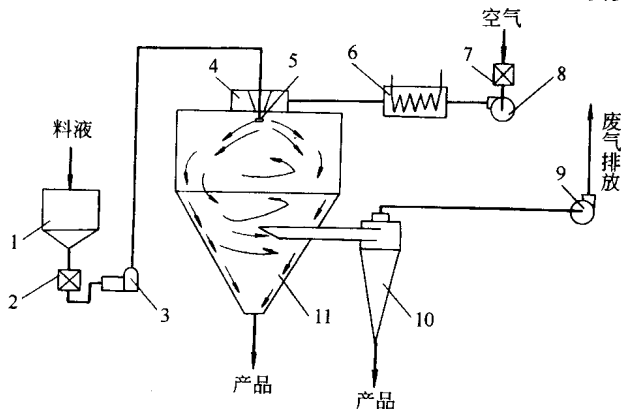


图 1-1 喷雾干燥系统流程图

- 1—贮料罐；2—料液过滤器；3—输料泵；4—空气分布器；
5—雾化器；6—空气加热器；7—空气过滤器；8—鼓风机；
9—引风机；10—旋风分离器；11—喷雾干燥器

11 的顶部，与雾滴接触、混合，进行传热与传质，即进行干燥。干燥后的产品由塔底引出。夹带细粉尘的废气经旋风分离器 10 由引风机 9 排入大气。

喷雾干燥所用的干燥介质绝大多数是空气。对于在空气中容易产生爆炸或燃烧的有机溶剂，应使用惰性气体（例如氮气）作为干燥介质，流程也将改为闭路循环系统（见图 1-8）。有机溶剂进行回收，惰性气体循环使用。

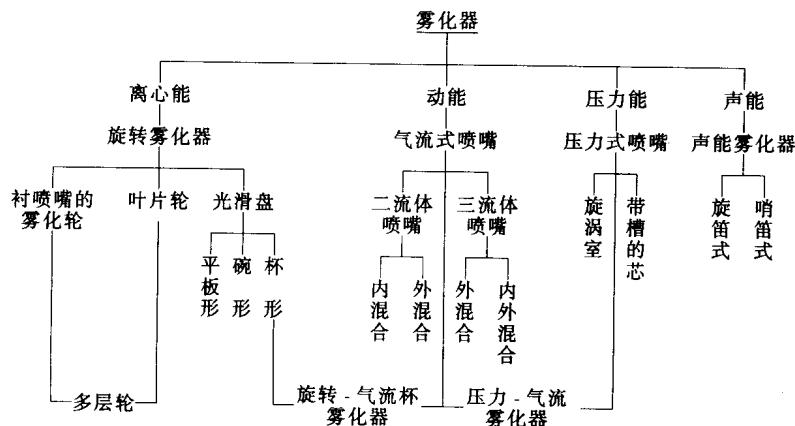
1.1.2 喷雾干燥的过程阶段

喷雾干燥可分为三个基本过程阶段：料液雾化为雾滴；雾滴和干燥介质接触、混合及流动，即进行干燥；干燥产品与空气分离。

(1) 喷雾干燥的第一阶段——料液的雾化

料液雾化为雾滴和雾滴与热空气的接触、混合是喷雾干燥独有的特征。雾化的目的在于将料液分散为微细的雾滴，具有很大的表面积，当其与热空气接触时，雾滴中水分迅速汽化而干燥成粉末或颗粒状产品。雾滴的大小和均匀程度对产品质量和技术经济指标影响很大，特别是对热敏性物料的干燥尤为重要。如果喷出的雾滴大小很不均匀，就会出现大颗粒还没达到干燥要求，而小颗粒却已干燥过度而变质。因此，料液雾化所用的雾化器是喷雾干燥的关键部件。目前常用的雾化器可作如表 1-1 所示的分类。常用的雾化器有

表 1-1 雾化器的分类



气流式、压力式和旋转式。在第3章中将做详细讨论。

(2) 喷雾干燥的第二阶段——雾滴和空气的接触（混合、流动、干燥）

雾滴和空气的接触、混合及流动是同时进行的传热传质过程，即干燥过程。此过程在干燥塔内进行。雾滴和空气的接触方式，混合与流动状态决定于热风分布器的结构型式、雾化器在塔内的安装位置及废气排出方式等。

在干燥塔内，雾滴-空气的流向有并流、逆流及混合流。雾滴与空气的接触方式不同，对干燥塔内的温度分布、雾滴（或颗粒）的运动轨迹、颗粒在干燥塔中的停留时间及产品性质等均有很大影响。

雾滴的干燥过程也经历着恒速和降速阶段。研究雾滴的运动及干燥过程，主要是确定干燥时间及干燥塔的主要尺寸。上述这些问题将在第4章及第5章详述。

(3) 喷雾干燥的第三阶段——干燥产品与空气分离（通常称为气-固分离）

喷雾干燥的产品大多数都采用塔底出料，部分细粉夹带在排放的废气中，这些细粉在排放前必须收集下来，以提高产品收率，降低生产成本；排放的废气必须符合环境保护的排放标准，以防止环境污染。

喷雾干燥通常采用的气-固分离方法，可有下列几种组合方式。

- a. 只用旋风分离器一级分离后排放，如图1-1所示。
 - b. 采用旋风分离器和布袋过滤器二级气固分离后排放，如图1-2所示。通常采用此法。
 - c. 采用旋风分离器和湿法除尘（文丘里洗涤器）二级气固分离方法，如图1-3所示。
 - d. 只采用布袋过滤器一级分离方法，如图1-4所示。年产5000 t白炭黑的喷雾干燥就采用此流程。
 - e. 采用静电除尘技术，进行一级气-固分离，如图1-5所示。
- 气-固分离设备，将在第7章做详细介绍。

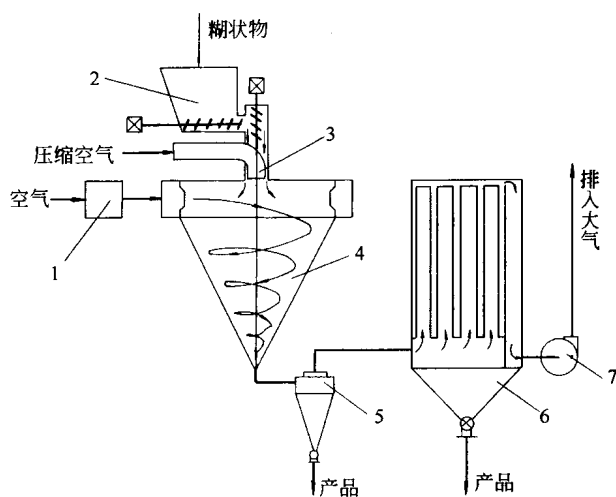


图 1-2 二级气固分离的喷雾干燥流程 (具有布袋过滤器)

- 1—空气加热器；2—贮罐；3—二流体雾化器；4—喷雾干燥塔；
5—旋风分离器；6—布袋过滤器；7—引风机

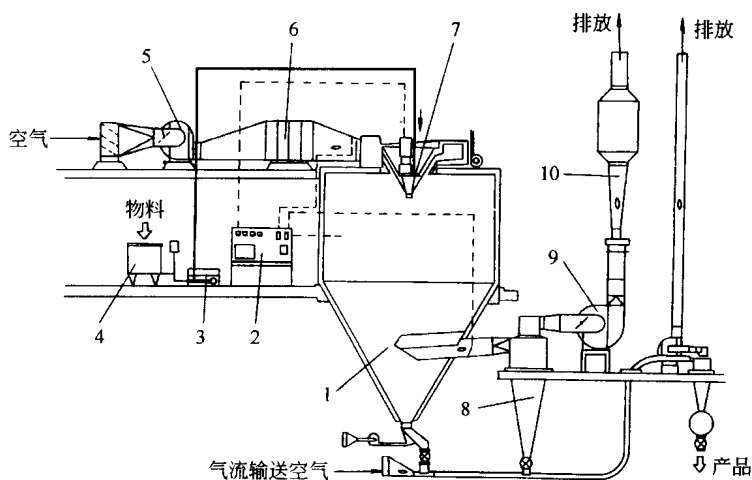


图 1-3 二级气固分离的喷雾干燥流程 (具有文丘里洗涤器)

- 1—喷雾干燥塔；2—控制板；3—料液泵；4—料液贮罐；5—鼓风机；
6—空气加热器；7—雾化器；8—旋风分离器；9—引风机；10—文丘里洗涤器