

PENWU

GANZAO

喷雾干燥

郭宜枯 王喜忠 编



化学工业出版社

喷雾干燥

郭宜祐 编
王喜忠

化学工业出版社

本书叙述了喷雾干燥的基本原理，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，并附有例题。为了适合各方面的需要还叙述了干燥介质的性质、物料和热量衡算以及辅助装置的一些基本知识。此外，还介绍了喷雾干燥在各种工业中的应用，以便使它在可能的条件下得到推广。

本书可供从事喷雾干燥工作的工程技术人员和高等学校有关专业的师生阅读参考。

喷 雾 干 燥

郭宜祐 编
王喜忠

•

化学工业出版社出版

(北京和平里社区十六号楼)

北京市通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $13^{5/8}$ 插页1 字数303千字印数1—8,110

1983年9月北京第1版1983年9月北京第1次印刷

统一书号15063·3521 定价1.45元

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

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 喷雾干燥的基本知识	1
第二节 喷雾干燥的优缺点	5
第二章 干燥过程的基础知识	7
第一节 湿空气的性质和 $I-x$ 图	7
第二节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	19
第三节 干燥过程的图解算法	24
第四节 干燥器的热效率	29
第三章 雾化器的结构和计算	39
第一节 雾化机理	39
第二节 雾滴和颗粒的平均直径及其分布	44
第三节 气流式雾化器	51
第四节 压力式雾化器	85
第五节 旋转式雾化器	115
第六节 雾化器的比较和选择	152
第四章 空气-雾滴在塔内的运动	159
第一节 喷雾干燥塔内空气-雾滴的流动方向	159
第二节 雾滴、颗粒在气流中的运动和塔径、塔高的计算	167
第三节 热风进出干燥塔的方式和热风分布装置	191
第四节 喷雾干燥操作中的粘壁问题	198
第五章 雾滴的传热和干燥	210
第一节 概述	210
第二节 纯液滴的蒸发	212

第三节	含有可溶性固体的液滴蒸发	219
第四节	含有不溶性固体的液滴蒸发	226
第五节	喷雾干燥产品的性质及其影响因素	232
第六章	喷雾干燥设计举例	235
设计举例之一		235
设计举例之二		251
设计举例之三		259
第七章	喷雾干燥的附属装置	265
第一节	空气预热器	265
第二节	气体-粉末分离装置	271
第三节	喷雾干燥成品的排出装置	291
第四节	成品的气流输送系统	297
第五节	干燥设备的清洗	302
第八章	喷雾干燥的工业应用	304
第一节	喷雾干燥在化学工业中的应用	306
第二节	喷雾干燥在食品工业中的应用	349
第三节	喷雾干燥在医药和生物化学工业中的应用	383
第四节	喷雾干燥在木材化学工业中的应用(丹宁-纤维 工业)	395
第五节	喷雾干燥在屠宰业和渔业中的应用	399
第六节	喷雾干燥近年来的发展趋势	406
附表 1	饱和蒸汽和饱和水性质(以温度为基准)	412
附表 2	饱和蒸汽和饱和水性质(以压力为基准)	421
附表 3	有正方筛孔的纤维筛网	428
附 图	空气的 $1-x$ 图	插页
参考文献		429

第一章 概 述

喷雾干燥是采用雾化器将原料液分散为雾滴，并用热空气干燥雾滴而获得产品的一种干燥方法。原料液可以是溶液、乳浊液或悬浮液，也可以是熔融液或膏糊液。干燥产品可根据生产要求制成粉状、颗粒状、空心球或团粒状。

第一节 喷雾干燥的基本知识

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，它们的流程却基本上相同。图 1-1 是一个典型的喷雾干燥装置流程图。

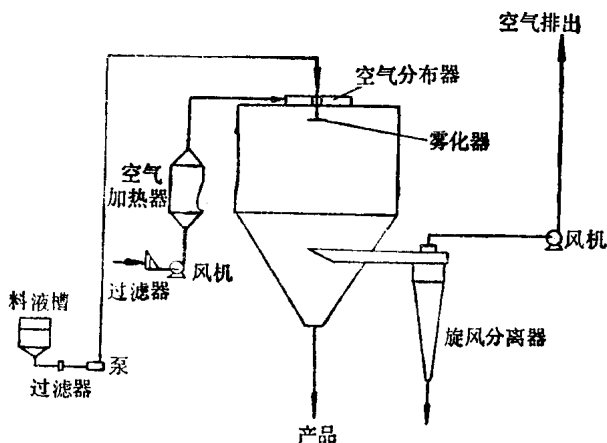


图 1-1 喷雾干燥装置流程图

由图可见，原料由泵送至雾化器。空气经过滤器和加热

器（直接喷油燃烧升温或间接加热）后作为干燥介质送至干燥室中。

由于原料性质和产品要求不同，原料预处理是十分重要的。例如，原料若为溶液，须滤去所含悬浮杂质；若为悬浮液，须搅拌均匀；若为医药或生物化学产品，须采取过滤、杀菌等严格措施。

喷雾干燥所用的干燥介质大多数是空气。但对于在空气中容易爆炸或燃烧的有机溶剂，就应使用惰性气体（例如氮气），流程也将改为封闭系统，以便回收溶剂后循环使用干燥介质。

喷雾干燥可分为四个阶段：料液雾化为雾滴；雾滴与空气接触（混合和流动）；雾滴干燥（水分蒸发）；干燥产品与空气分离。现分别说明如下。

（1）料液雾化 料液雾化的目的在于将料液分散为微细的雾滴，雾滴的平均直径一般为20~60微米，因此具有很大的表面积，当其与热空气接触时，雾滴迅速气化而干燥为粉末或颗粒状成品。雾滴大小和均匀程度对于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有达到干燥要求，而小颗粒却已干燥过度而变质。因此，使料液雾化所用的雾化器是喷雾干燥器的关键部件。目前常用的雾化器有下列三种：

① 气流式喷嘴 采用压缩空气或蒸汽以很高的速度（300米/秒或更高）从喷嘴喷出，靠气液两相间的速度差所产生的摩擦力，使料液分裂为雾滴。

② 压力式喷嘴 采用高压泵使高压液体通过喷嘴时，将压力能转变为动能而高速喷出分散为雾滴。

③ 旋转式雾化器 料液在高速转盘（圆周速度为90～140米/秒）中受离心力作用从盘中甩出而雾化。

目前在我国工厂中采用气流式喷嘴的最多，因为这种喷嘴的制造、安装、检修都较为简便，一般工厂都能自己加工制造。但是气流式喷嘴的主要缺点是动力消耗太大。压力式喷嘴在应用时也受到一些限制，其主要原因是喷嘴易堵塞、易磨损，高压泵也不易得到，而这些问题随着生产的发展是可以解决的。旋转式雾化器在我国应用不广，其主要问题是转盘及其传动轴的转速较高（7000～25,000转/分），要解决材质和加工制造问题，应由专门工厂制造和供应。对于大产量的喷雾干燥，不宜采用动力消耗大的气流式喷嘴，应采用压力式喷嘴和转盘式雾化器。关于雾化机理和各种雾化器的结构、性能和计算方法，将在第三章中讨论。

（2）雾滴-空气接触（混合和流动） 在干燥室内，雾滴和空气接触方式有并流式、逆流式和混流式三种。图1-1所示的为并流接触，干燥空气从室顶进入，雾化器也在室顶喷雾，并流向向下流动。若干燥空气从室底进入，雾化器仍在室顶，则为逆流流动。若雾化器放在室底向上喷雾，干燥空气从室顶吹下，则成为先逆流、后并流的混合式接触（见图1-2）。

雾滴和空气的接触方式不同，对于干燥室内的温度分布、液滴、颗粒的运动轨迹、物料在室中的停留时间以及产品性质有很大影响。

在并流系统中，最热的干燥空气与水分含量最大的液滴接触，因而迅速蒸发，液滴表面温度接近于空气的湿球温度，同时空气的温度也显著降低，因此从液滴到干燥成品的整个历程中，物料的温度不高，这对于热敏性物料的干燥是特别

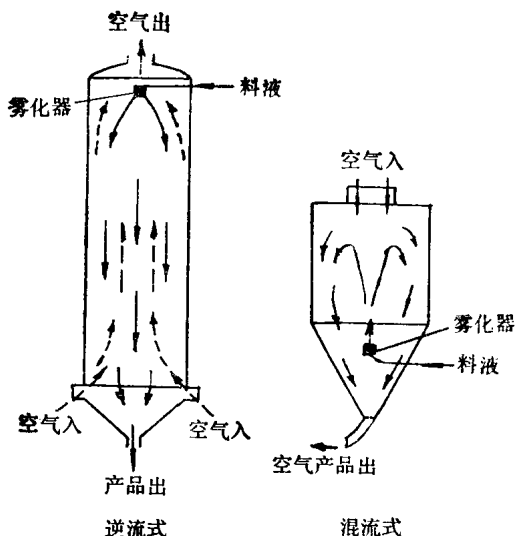


图 1-2 逆流式和混流式喷雾干燥器

有利的。这时，由于迅速蒸发，液滴膨胀甚至破裂，因此并流操作时所得产品常为非球形的多孔颗粒，具有较低的松密度。对于逆流系统，则情况与上述相反。在塔顶喷出的雾滴与塔底上来的湿空气相接触，因此蒸发速度较并流式的为慢，在塔底最热的干燥空气与最干的颗粒相接触，因此若干燥产品能经受高温，需要较高的松密度时，用逆流系统最合适。此外，在逆流系统中，平均温度差和分压差较大，停留时间较长，有利于传热和传质，热的利用率也高。在混流式系统中，兼有上述二者的优点，介于二者之间。这种流向也适用于热敏性物料，产品的粉粒较大，可自由流动。

关于雾滴-空气接触的详细论述见第四章。

(3) 雾滴干燥 (水分蒸发) 雾滴干燥时，也经历着恒速阶段 (第一干燥阶段) 和降速阶段 (第二干燥阶段)，这

与普通物料在常规干燥设备中所经历的历程是完全相同的。

雾滴与空气接触，热量即由空气经过雾滴四周的界面层（即饱和蒸汽膜）传递给雾滴，于是雾滴中的水分汽化，通过界面层进入空气中，因而这是热量传递和质量传递同时发生的过程。此外，雾滴离开雾化器的速度要比周围空气的速度大得多，因此，还有二者之间的动量传递。传热和传质速率是温度、湿度和液滴周围空气的传递性质的函数，也是雾滴直径和雾滴-空气之间相对速度的函数。为解决雾滴干燥这一复杂问题曾提出各种模型。迄今为止提出来的计算公式都是半经验式。

研究雾滴干燥主要是求出完成干燥要求所需的干燥时间，由此求出干燥室的主要尺寸。物料在干燥室中的停留时间要大于（至少要等于）物料干燥所需的时间。雾滴中所含固体有可溶的也有不溶的，二者计算干燥时间的公式不同。关于干燥过程的基本原理、计算方法以及雾滴干燥所需干燥时间的计算，将分别在第二章和第五章中讨论。

（4）干燥产品与空气的分离 雾滴干燥后的产品降落到干燥室的锥体四壁并滑行至锥底通过星形阀之类的排灰装置排出，少量细粉随空气流入旋风分离器中进一步分离（见图1-1）。然后将这两部分成品输送到另一处混合后贮入成品库中或直接送去包装成袋。还有一种分离方法是将锥底部分的粗细成品连同空气全部吸入旋风分离器或袋滤器中进行分离。关于各种分离装置以及其他附属设备将于第七章讨论。

第二节 喷雾干燥的优缺点

喷雾干燥的一个最显著的特征就是将液体雾化为非常微细的雾滴（20~60微米），因而具有很大的表面积，也即显著地

增大了水分的蒸发表面，大大地缩短了干燥时间。喷雾干燥的很多优缺点都是与它的这一特征分不开的。

喷雾干燥的优点：

(1) 物料的干燥时间很短（通常为15~30秒，甚至只有几秒钟）。在高温介质中，颗粒表面温度接近于纯液体的绝热饱和温度。由于瞬间干燥和物料表面温度低，喷雾干燥特别适宜于热敏性物料的干燥，例如食品、医药、有机盐和染料等。

(2) 容易改变操作条件以调节或控制产品的质量指标，例如粒度分布、最终湿含量等。

(3) 根据工艺上的要求，产品可制成粉末状、空心球状或疏松团粒状，通常不需要粉碎即得成品，而且能在水中迅速溶解，例如速溶脱脂奶粉、速溶咖啡等。

(4) 简化了工艺流程。以溶液为例，如采用一般干燥方法时，在干燥前需要进行蒸发、结晶、过滤或离心分离等过程，在干燥后需要粉碎、筛析等过程。如采用喷雾干燥，则在干燥塔内可直接将溶液制成粉末状产品，这就节省了大批设备如蒸发器、结晶器、过滤机、粉碎机、振动筛等，还节省了管线、操作人员等。此外，喷雾干燥容易实现机械化、自动化，还能减轻粉尘飞扬、改善劳动环境。

喷雾干燥的缺点为：

(1) 容积给热系数较小，对于不能用高温载热体（低于150℃）干燥的物料，所用设备就显得庞大一些。而在低温操作时，空气消耗量大，因而动力消耗量也随之增大。

(2) 对气-固混合物的分离要求较高。对于很细的粉末状产品，要选择可靠的气固分离装置，以免产品的损失和对周围环境的污染。因此分离装置比较复杂。

第二章 干燥过程的基础知识

喷雾干燥所除去的液体通常为水，所用的干燥介质一般为高温低湿空气。也有除去的液体是有机溶剂，所用的干燥介质为氮气或其他惰性气体，并采取密闭循环方式操作。但是不管所除去哪一种液体，所用的是哪一种干燥介质，在干燥过程中干燥介质的性质变化，基本原理是相同的，因此本章只讨论用空气除去料液中的水分来说明干燥过程中湿空气性质的变化规律。

第一节 湿空气的性质和I-x图

1. 湿空气的性质

含有水蒸汽的空气称为湿空气。表示空气中水汽含量多少有如下几种方法：

(1) 水蒸汽分压 p_w 当总压 P 一定时，空气中水蒸汽分压愈大，水汽含量就愈高。根据分压定律，水蒸汽分压 p_w 与干空气分压 p_a 之比 $\frac{p_w}{p_a}$ 等于水汽分子数 n_w 与干空气分子数 n_a 之比，即：

$$\frac{p_w}{p_a} = \frac{n_w}{n_a}$$

因总压 P 等于分压之和： $P = p_w + p_a$ ，或 $p_a = P - p_w$ ，故上式变为：

$$\frac{p_w}{P - p_w} = \frac{n_w}{n_a} \quad (2-1)$$

(2) 空气的湿含量 (简称湿度) x 在干燥过程中, 由于物料中的水分蒸发到空气中去, 湿空气的重量不断地增加, 但是其中干空气量始终不变。因此, 为了便于作物料衡算, 空气的湿含量以每公斤重的干空气中含有若干公斤重的水蒸汽来表示, 以 x 表示之:

$$x = \frac{n_w M_w}{n_a M_a}$$

代入 (2-1) 式, 得:

$$x = \frac{p_w}{P - p_w} \cdot \frac{M_w}{M_a}$$

式中 M_w ——水蒸汽分子量, $M_w = 18$;

M_a ——干空气平均分子量, $M_a = 29$ 。

将分子量之值代入式中, 则

$$x = 0.622 \frac{p_w}{P - p_w} \quad (2-2)$$

(3) 空气的相对湿度, φ 在一定温度下, 含有最大水蒸汽量的空气称为饱和空气。达到饱和的湿空气不能再容纳水汽, 也即在这一温度下的湿物料不能再向饱和空气中蒸发水分, 无法进一步干燥。

在一定温度下, 饱和空气中的水蒸汽分压称为饱和蒸汽压 (以 p_s 表示), 可由实验测定之, 也可从手册中查得。在某一温度下空气中水蒸汽分压 p_w 与同一温度下的饱和蒸汽压 p_s 之比称为相对湿度, 以 φ 表示之:

$$\varphi = \frac{p_w}{p_s} \quad (2-3)$$

当 $p_w = p_s$ 时, $\varphi = 1$ (或以百分比表示, 为100%), 说明空气已经饱和。显然, φ 值比 1 愈小, 则空气离饱和愈远。温度愈高, 饱和蒸汽压 p_s 值也愈高。因此, 提高空气温度时, p_w 值不变而 p_s 值增大, 所以相对湿度 φ 就降低了, 空气的带水能力也提高了, 故通常总是用热空气作为干燥介质。

例2-1 已知湿空气中水蒸汽分压为 $p_w = 17.54$ 毫米汞柱, 总压为 $P = 760$ 毫米汞柱。求此湿空气在 20°C 时的相对湿度 φ 。若将此空气分别加热到 50°C 和 120°C , 各求其相对湿度是多少?

解 从饱和水蒸汽表查得 20°C 时饱和水蒸汽压, $p_s = 17.54$ 毫米汞柱。因此, 湿空气在 20°C 时的相对湿度为:

$$\varphi_{20} = \frac{17.54}{17.54} = 1$$

由此说明湿空气已被水蒸汽所饱和, 不能作为干燥介质。

当此湿空气加热到 50°C 时, 查表, $p_s = 92.51$ 毫米汞柱, 因此得:

$$\varphi_{50} = \frac{17.54}{92.51} = 0.189, \text{ 或 } 18.9\%$$

说明空气温度升高时, φ 减小, 又可作为干燥介质。

当温度升高到 100°C , 而总压仍为 760 毫米汞柱时, 水就开始沸腾, 此时最大蒸汽压等于外界总压。如继续提高温度, 只能使气体过热, 这时蒸汽压仍为 760 毫米汞柱。因此, 在 120°C 时,

$$\varphi_{120} = \frac{17.54}{760} = 0.0231 \text{ 或 } 2.31\%$$

(4) 湿空气的热含量 I 用空气来干燥湿物料时, 空气和物料之间不仅有水分的转移, 还有热量的交换。因此,

有必要知道空气的另一性质——热含量。

湿空气的热含量 I 等于干空气的热含量 ($C_a t$) 与水蒸汽的热含量 ($i x$) 之和。以 1 公斤干空气作为基准, 则湿空气的热含量为:

$$I = C_a t + i x = 0.24 t + i x \text{ 千卡/公斤干空气,}$$

式中 C_a ——干空气比热, $C_a = 0.24$ 千卡/公斤·°C,

i ——在温度为 t °C 时水蒸汽的热含量, 千卡/公斤。

若以 0°C 的水作为基准, 则在 t °C 时水蒸汽的热含量为:

$$i = 595 + 0.46 t$$

此处 595——水在 0°C 时的汽化潜热, 千卡/公斤;

0.46——水蒸汽的比热, 千卡/公斤·°C。

将此代入上式中, 则湿空气的热含量为:

$$\begin{aligned} I &= 0.24 t + (595 + 0.46 t) x \\ &= (0.24 + 0.46 x) t + 595 x \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中, $0.24 + 0.46 x = C$, 称为湿空气的比热, 或简称为湿比热。

(5) 空气的绝热冷却过程和绝热饱和温度图 2-1 为一空气增湿塔, 不饱和空气由塔底进入, 水从塔顶淋下, 气液两相在填料层中接触, 气体从塔顶排出, 水从塔底排出, 又送到塔顶使空气增湿。如果塔的保温很好, 则热量传递只在气液两相之间进行, 对周围环境是绝热的。与空气相接触的水的温度可能高于或低于空气温度, 最后所得结果是一致的。这里, 设以气温高于水温的情况进行分析。

若气温高于水温, 则由于两者之间的温度差, 空气将其显热传递给水, 而空气本身则不断冷却。与此同时, 一部分水接受空气显热而汽化, 热以潜热形式由水汽带回到不饱和的空气中。