

# 第四章 干燥理论

在颗粒制备工艺中，除干法制粒外，都有颗粒干燥步骤，以下简要介绍干燥原理及常用干燥技术及干燥设备。

## 第一节 干燥原理

干燥是利用热能使湿颗粒中的湿气汽化，并利用热气流或真空带走汽化了的湿分，从而获得干颗粒的操作。按照热能供给湿物料的方式，干燥法可分为：①传导干燥；②对流干燥；③辐射干燥；④介电加热干燥，而在制药工业中应用最普遍的是对流干燥。

### 一、干燥原理概述

对流是指流体内部（气体、液体或固体）通过混合作用，热量从一点传递到另一点。对流干燥过程中，湿物料与热空气接触时，热空气将热能传导至物料表面，再由表面传至物料内部，这是一个传热过程，同时湿物料接受热量后，其表面水分首先汽化，物料内部水分以液态或气态扩散到物料表面，并不断向空气中汽化，这是一个传质过程。因此干燥是热量传导和物质传导同时进行的过程，同时干燥速率也受热量传导和物质传导两个因素的影响。

### 二、物料中的水分

湿物料的水分活度（ $a_w$ ）不仅与物料的储藏性有关，而且决定了干燥进行的方向： $a_w < \phi$  时，吸附水； $a_w = \phi$  时，达到平衡； $a_w > \phi$  时，解吸水分（干燥）；其中  $\phi$  为相对湿度。

#### （一）平衡水分与自由水分

在一定空气条件（一定温度、湿度）下，根据物料中所含水分能否干燥除去来划分平衡水分与自由水分。当物料与一定温度、湿度的空气相接触时，如果物料表面的水分蒸气压与空气中水的蒸汽分压不相等时，物料就会释放出水分或吸

## 48 | 药物制粒技术

收水分，最终水分将在气、固两相间达到平衡，此时湿物料中的含水量称为该物料的平衡水分，以  $X^*$  表示。在该空气条件下，平衡水分是干燥除不去的水分；物料中的水分超过  $X^*$  的那部分水分，称为自由水分，是在干燥过程中能除去的水分。

### (二) 结合水分和非结合水分

根据物料中水分除去的难易程度来划分结合水分和非结合水分。

结晶水、物料中小毛细管内的水分、细胞内的水分等，均是借化学力或物理化学力与物料相结合的水分，与物料具有较强的结合力，这部分水称为结合水。含结合水的物料表面产生的水蒸气压低于同温度下纯水的饱和蒸气压，干燥速率缓慢。那些机械地附着在物料表面的水分，或物料堆积层中大空隙中的水分，与固体相互结合力较弱，称为非结合水。含非结合水的物料表面产生的水蒸气压等于同温度下纯水的饱和蒸气压，干燥速率较快。

## 三、干燥速率

所谓干燥速率是指单位时间、单位干燥面积上汽化的水分质量，其表达式如下。

$$N_A = -\frac{G_C dX}{A d\tau} \quad (4-1)$$

式中  $N_A$ ——干燥速率， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

$G_C$ ——湿物料中所含绝干物料的质量， $\text{kg}$ ；

$dX$ ——物料的干基含水率的变化， $\text{kg}$  水分/ $\text{kg}$  绝干物料；

$A$ ——物料暴露于气流中的表面积， $\text{m}^2$ ；

$d\tau$ ——干燥时间 ( $\text{s}$ ) 内水分的蒸发量。

### (一) 干燥速率曲线

干燥速率可由实验测定。干燥曲线如图 4-1 所示，干燥速率曲线由干燥曲线的斜率整理而得，如图 4-2 所示。

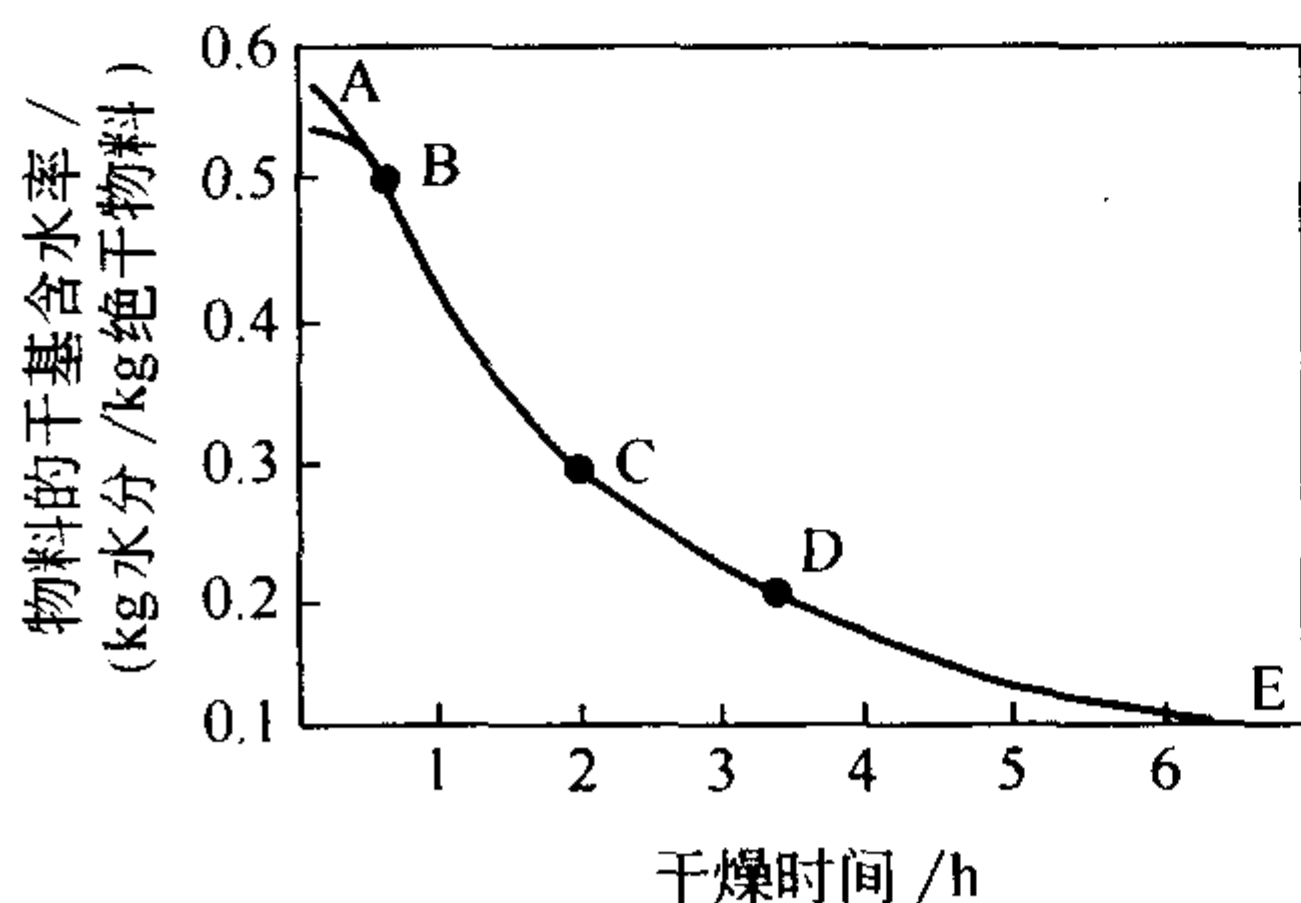


图 4-1 恒定干燥条件下的干燥曲线

### (二) 曲线分析

AB 段：A 点代表时间为零时的情况，AB 为湿物料不稳定的加热过程，在该过程中，物料的含水量及其表面温度均随时间而变化。物料含水量由初始含水量降至与 B 点相应的含水量，而温度则由初始温度升高（或降低）至与空气的湿球温度相等。一般该过程的时间很短，在分析干燥

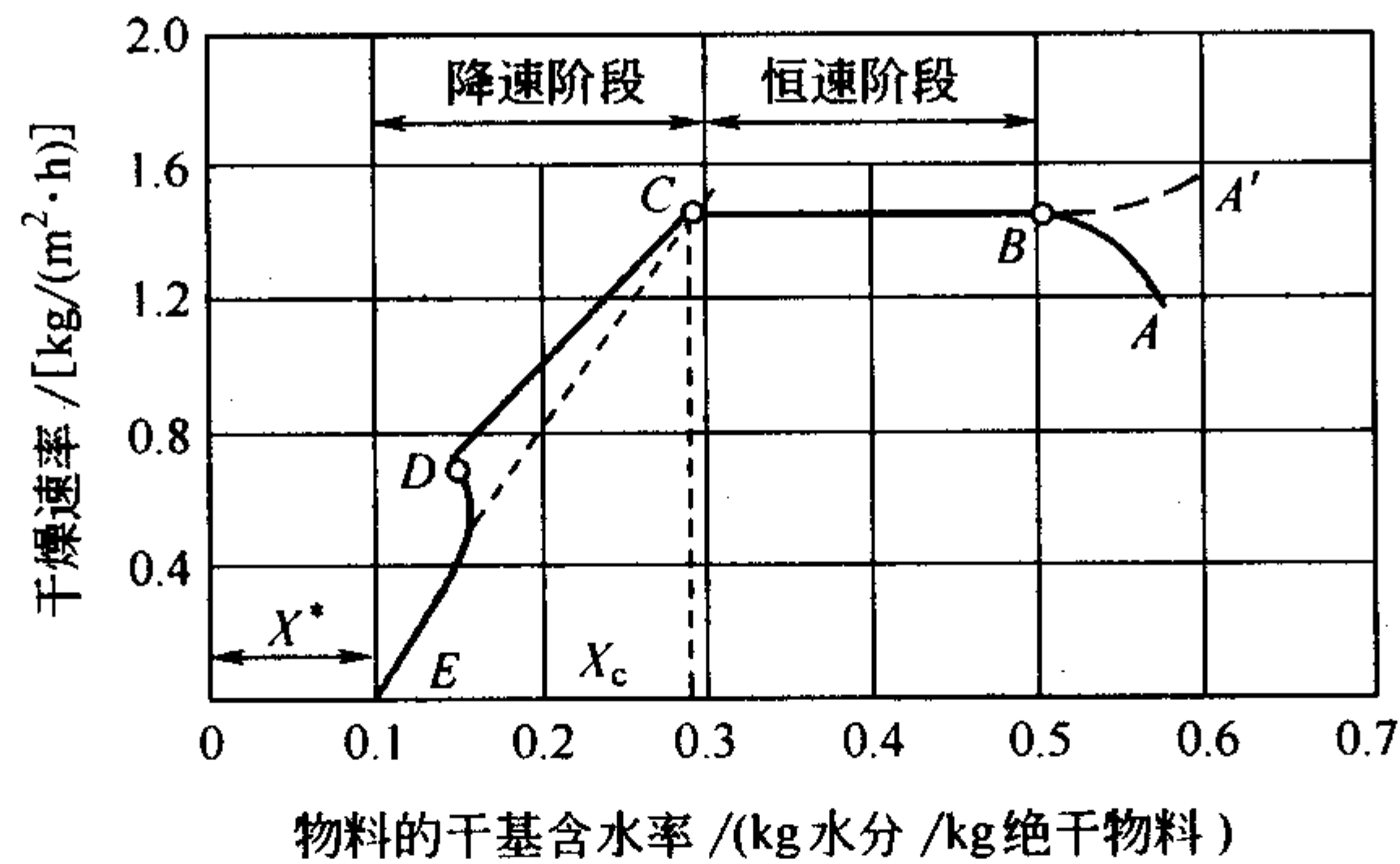


图 4-2 恒定干燥条件下的干燥速率曲线

过程中常可忽略，将其作为恒速干燥的一部分。

**BC 段：**在 BC 段内干燥速率保持恒定，称为恒速干燥阶段。在该阶段湿物料表面温度为空气的湿球温度  $t_w$ 。

**C 点：**由恒速阶段转为降速阶段的点称为临界点，所对应湿物料的含水量称为临界含水量，用  $X_c$  表示。

**CDE 段：**随着物料含水量的减少，干燥速率下降，CDE 段称为降速干燥阶段。干燥速率主要取决于水分在物料内部的迁移速率。不同类型物料结构不同，降速阶段速率曲线的形状不同。某些湿物料干燥时，干燥曲线的降速段中有一转折点 D，把降速段分为第一降速阶段和第二降速阶段。D 点称为第二临界点。但也有一些湿物料在干燥时不出现转折点，整个降速阶段形成了一条平滑曲线。降速阶段的干燥速率主要与物料本身的性质、结构、形状、尺寸和堆放厚度有关，而与外部的干燥介质流速关系不大。

**E 点：**E 点的干燥速率为零， $X^*$  即为操作条件下的平衡含水量。

需要指出的是，干燥曲线或干燥速率曲线是在恒定的空气条件下获得的，对指定的物料，空气的温度、湿度不同，速率曲线的位置也不同。

### (三) 干燥过程

分析考察干燥曲线和干燥速率曲线可知，干燥过程可分为恒速干燥和降速干燥两个阶段。

#### 1. 恒速干燥阶段

恒速干燥的前提是湿物料表面全部润湿。即湿物料水分从物料内部迁移至表面的速率大于水分在表面汽化的速率。

由于此阶段汽化的是非结合水分，故恒速干燥阶段的干燥速率的大小取决于物料表面水分的汽化速率。因此，恒速干燥阶段又可称为表面控制阶段，该阶段

## 50 | 药物制剂技术

特点为：①干燥速率为常数；②在该阶段除去的水分为非结合水分；③恒速干燥阶段的干燥速率只与空气的状态有关，而与物料的种类无关。

### 2. 降速干燥阶段

到达临界点以后，即进入降速干燥阶段，此阶段分为两个过程。

(1) 实际汽化表面减小 随着干燥过程的进行，物料内部水分迁移到表面的速率已经小于表面水分的汽化速率。物料表面不能再维持全部润湿，而出现部分“干区”，即实际汽化表面减少。因此，以物料总面积为基准的干燥速率下降。去除的水分为结合水分、非结合水分。

(2) 汽化面内移 当物料全部表面都成为干区后，水分的汽化面逐渐向物料内部移动，传热是由空气穿过干料到汽化表面，汽化的水分又从湿表面穿过干料到空气中，降速干燥阶段又称为物料内部迁移控制阶段。显然，固体内部的热、质传递途径加长，阻力加大，造成干燥速率下降。即为图中的  $DE$  段，直至平衡水分  $X^*$ 。在此过程，空气传给湿物料的热量大于水分汽化所需要的热量，故物料表面的温度升高。降速干燥阶段特点如下。

- ① 随着干燥时间的延长，干基含水率  $X$  减小，干燥速率降低。
- ② 物料表面温度大于湿球温度。
- ③ 除去的水分为非结合水分、结合水分。
- ④ 降速干燥阶段的干燥速率与物料种类、结构、形状及尺寸有关，而与空气状态关系不大。

### (四) 临界含水量 $X_c$

物料在干燥过程中经历了预热阶段、恒速干燥阶段、降速干燥阶段，用临界含水量  $X_c$  (图 4-2 中  $C$  所对应湿物料的含水量) 加以区分， $X_c$  越大，越早地进入降速阶段，完成相同的干燥任务所需的时间越长。 $X_c$  的大小不仅与干燥速率和时间有关，而且由于影响两个阶段的因素不同，因此确定  $X_c$  值对强化干燥过程也有重要意义。

由于物料的除湿过程经历两步，故干燥速率不仅取决于空气的性质及干燥操作条件，而且还与物料中所含水分的性质有关。

## 第二节 干燥设备

由于制药工业中被干燥物料的性质、干燥程度、生产能力大小不同，所采用的干燥器也不相同。根据前文介绍的四种干燥类型，各个类型常用的干燥器主要有以下四种。

① 传导干燥——真空干燥器、滚筒干燥器、冷冻干燥器；

② 对流干燥——气流干燥器、流化床干燥器、喷雾干燥器、厢式干燥器等；

③ 辐射干燥——红外线干燥器；

④ 介电加热干燥——微波干燥器。

颗粒干燥最普遍使用的干燥器为厢式干燥器、隧道式烘房、流化床干燥器和喷雾干燥器。

### 一、厢式干燥器

厢式干燥器又称盘式干燥器，是最老的干燥器之一，常压厢式干燥器如图 4-3 所示。物料用盘盛装，料盘摆在架车上逐层逐排放入，用蒸汽或电作为热源，箱内热空气可循环及部分排放，以使干燥较均匀。虽热效率低，但仍在大量的使用，也在继续制造，原因是结构简单，操作不经常照管也无明显问题。但不少物料干燥时需翻盘、翻粉，热敏性物料常易变色，亦不适用于带溶剂物料的干燥。由于物料堆积，其内层传热、传质差，因而干燥速率低。

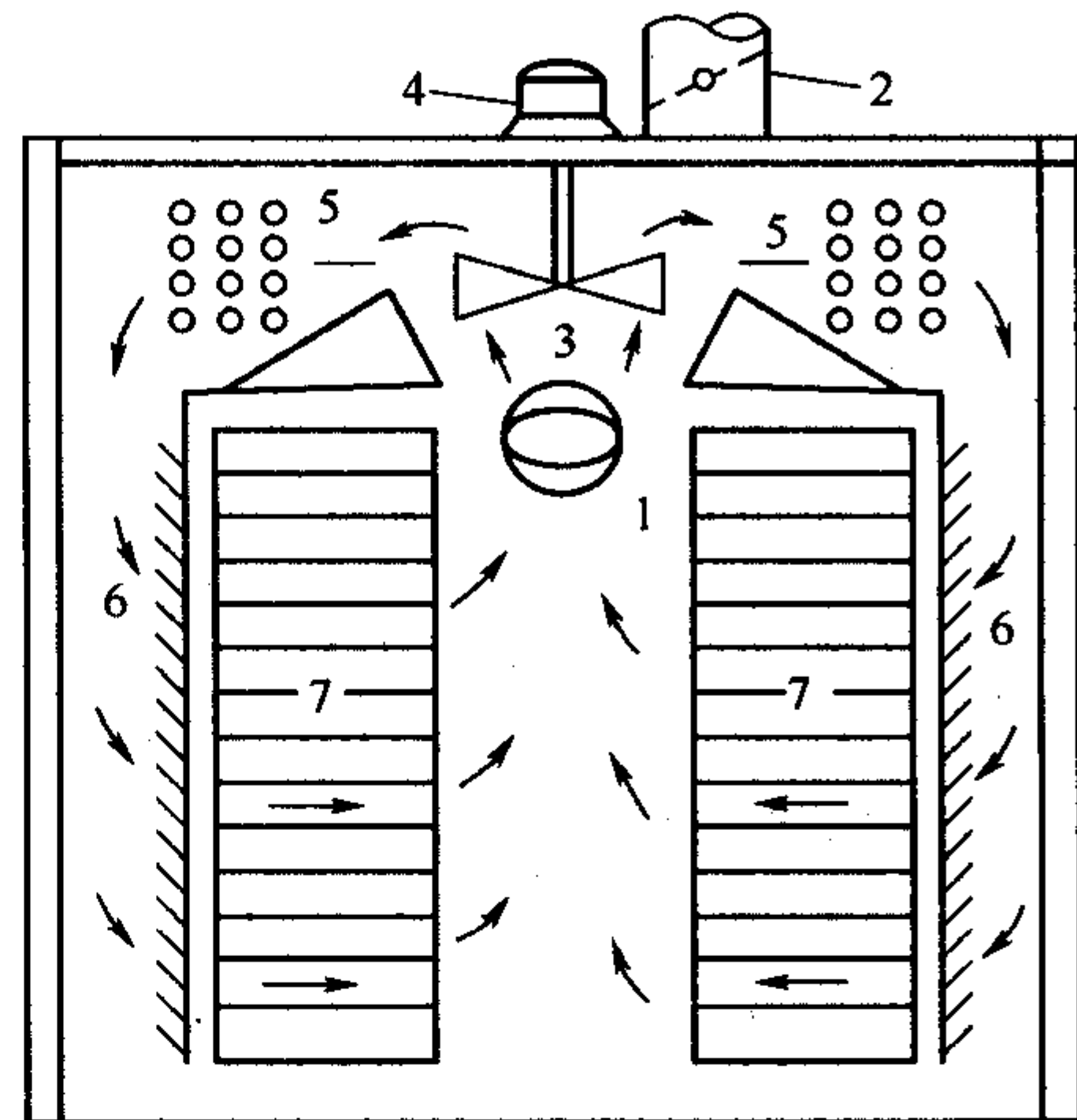


图 4-3 厢式干燥器

- 1—空气入口；2—空气出口；3—风机；
- 4—电动机；5—加热器；
- 6—挡板；7—盘架

### 二、隧道式烘房

隧道式烘房如图 4-4 所示，系将料盘分置于特制小车上，可逐车间歇进、出隧道，以增加产量及提高热效率。其他结构与箱式干燥器相似。

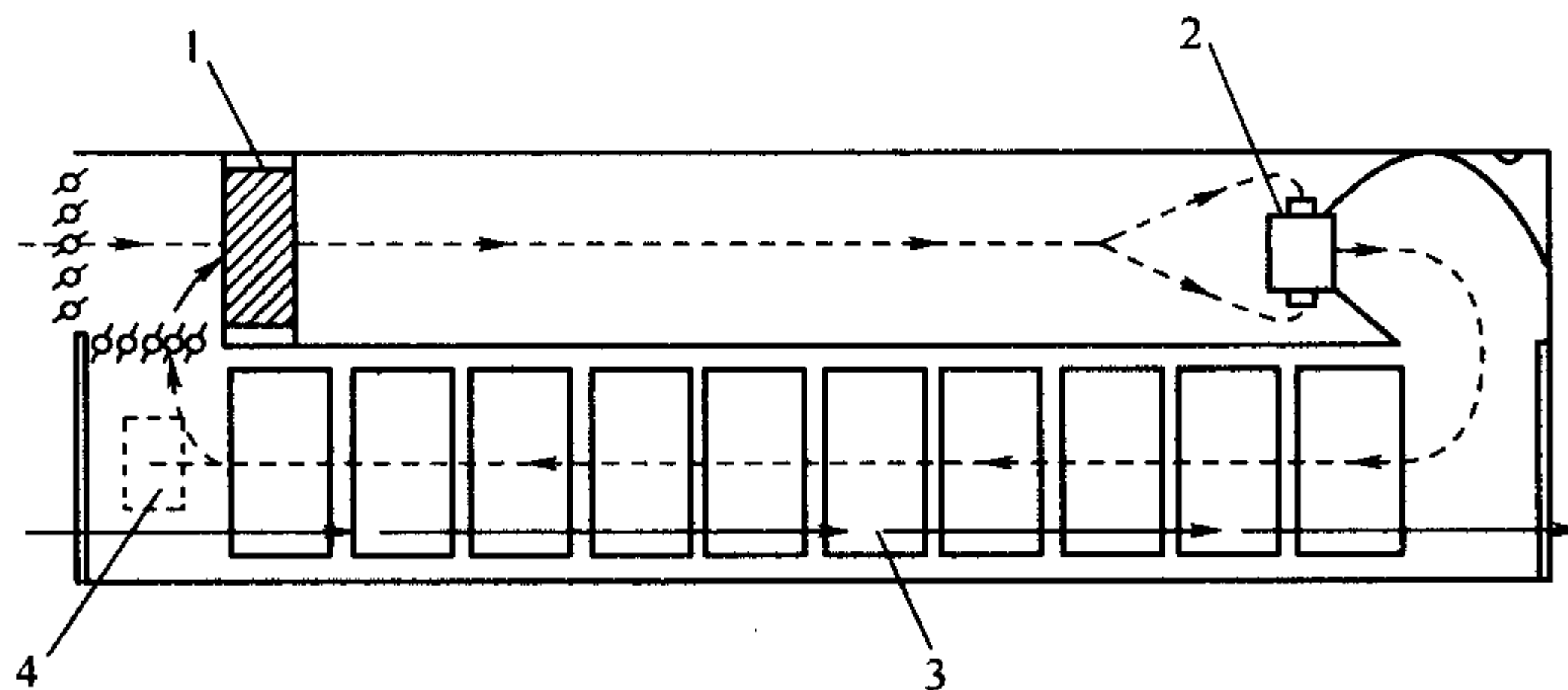


图 4-4 隧道式烘房示意图

- 1—加热器；2—风扇；3—装料车；4—排气口

### 三、流化床干燥器

流化床干燥器是近年来发展的一种新型高效干燥器，已广泛应用于颗粒干燥。干燥时由于气固两相逆流接触，剧烈搅动。固体颗粒悬浮于干燥介质之中，具有很大的接触表面积，无论在传热、传质、容积干燥强度、热效率等方面都很优良。传动机构不接触物料，不会因设备磨损而混入杂质，这对于要求纯度较高的医药等工业尤为重要。由于适应不同物料要求及对成品的不同要求，也就出现了下列几种不同型式的流化干燥器。

#### (一) 普通流化床干燥器

##### 1. 单层圆筒型流化床干燥器

单层圆筒型流化床干燥器示意图如图 4-5 所示。湿物料由加料器送入干燥器内多孔气体分布板上，经加热后的空气进入流化床底部的分布板与物料接触（气流在颗粒临界流化速度和沉降速度之间），使物料呈悬浮状态并在作上下翻动的过程中得到干燥，干燥后的产品由卸料口溢流而流出，废气由干燥器的顶部排出，后经旋风分离器回收其中夹带的粉尘后由排风机排空。

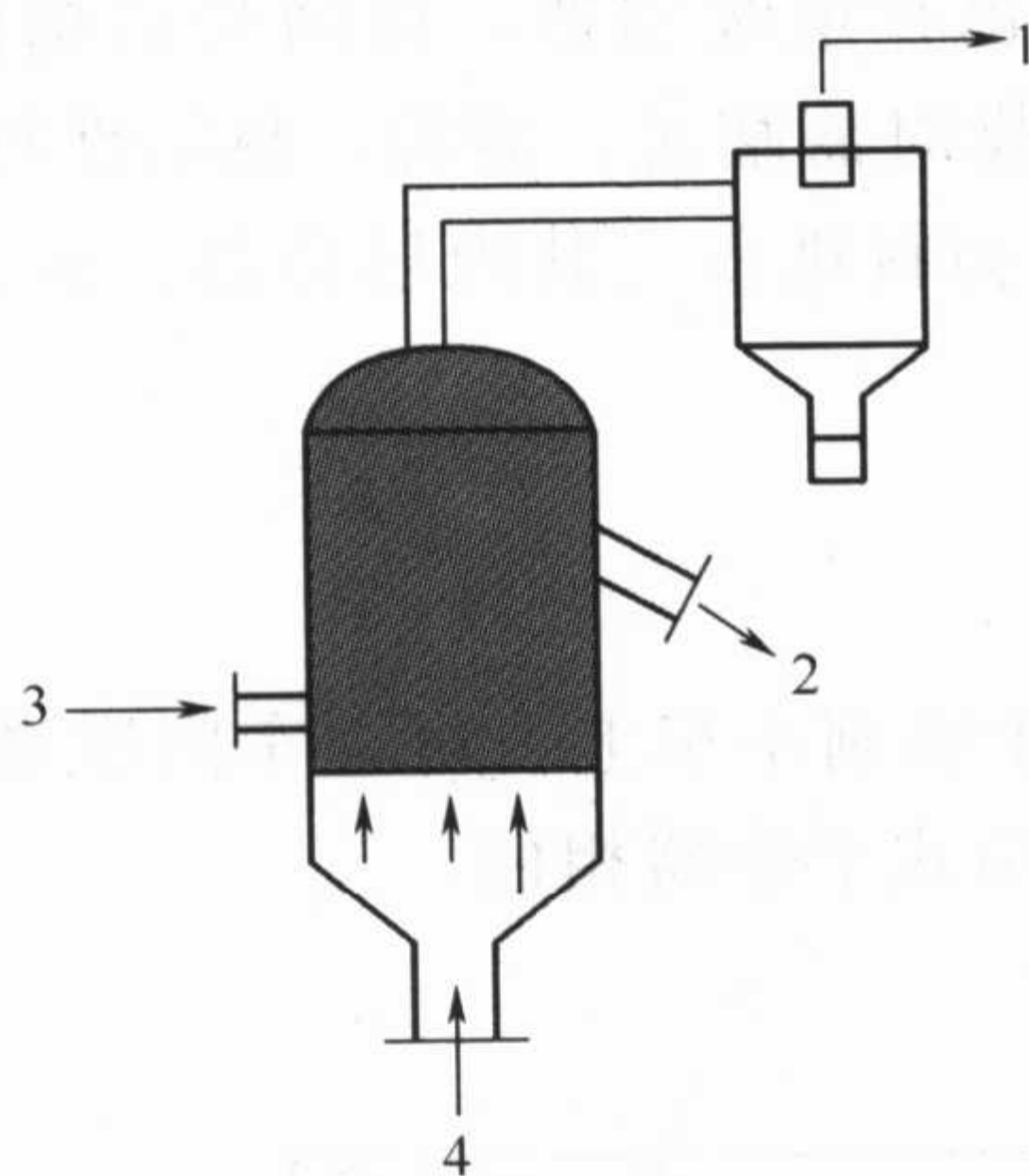


图 4-5 单层圆筒型流化床干燥器示意图

1—废气；2—干颗粒；3—湿颗粒；4—热风

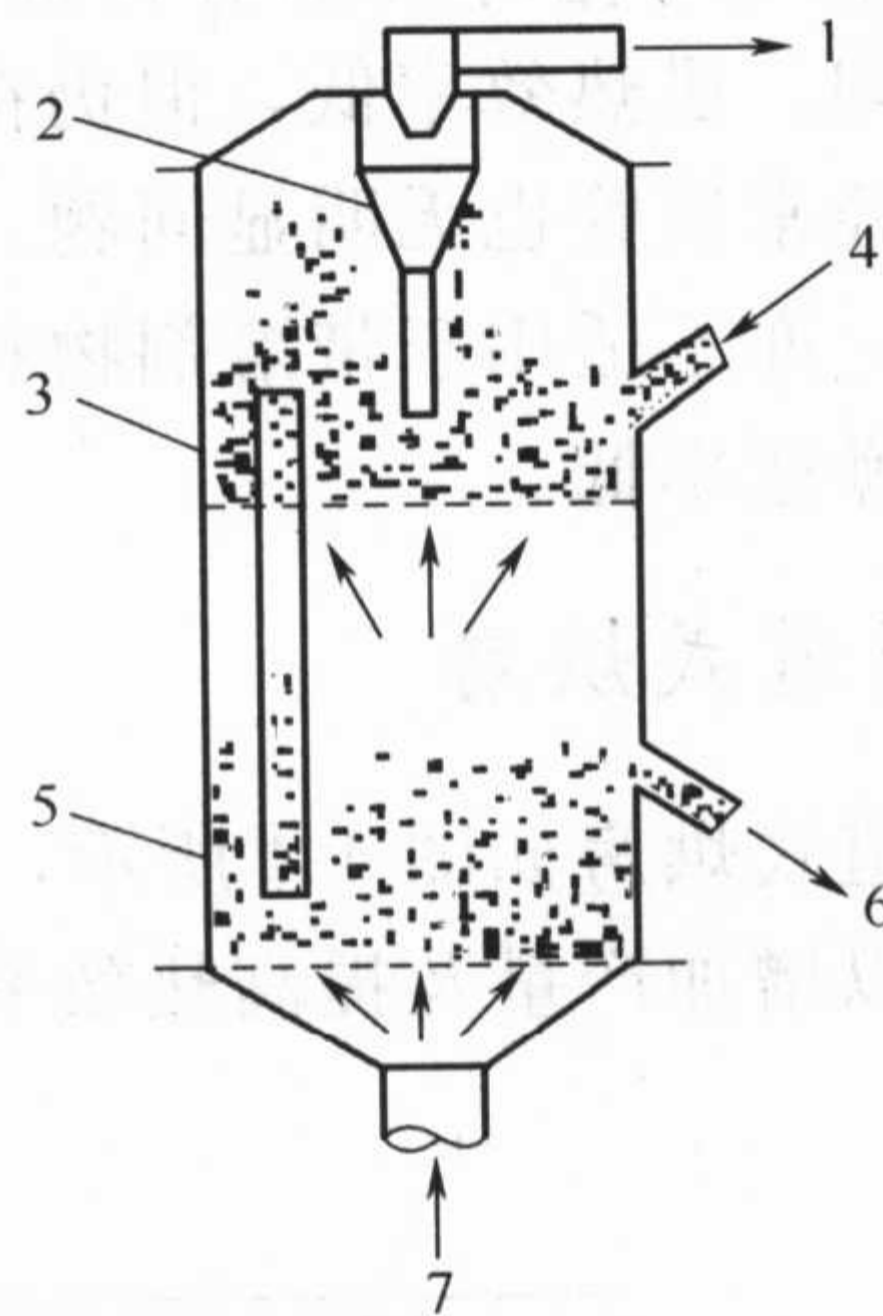


图 4-6 多层圆筒型流化床干燥器

1—气体出口；2—床内分离器；3—第一层；4—加料；5—第二层；6—出料；7—热空气

单层圆筒型流化床干燥器仅适用于易干燥的颗粒，特别是颗粒物料表面水分的干燥，并且要求颗粒含水量不得超过 15%，否则颗粒流动性差，易结块，且干燥程度不均匀。

##### 2. 多层圆筒型流化床干燥器

多层圆筒型流化床干燥器克服了单层圆筒型流化床干燥器所得干燥产品干燥程度不均匀的缺点。如图 4-6 所示，被干燥的物料由最上层的加料口加入，热空气由干燥器的底部送入，在床层内进行逆向流动。颗粒由第一层经溢流管流到第二层，最后由出料口排出。热空气由下而上与各层物料接触后，从干燥器顶部排出。这种干燥器虽然多层床因分布板增加，引起床层阻力也相应增加。但当物料为降速干燥阶段时，与单层床相比，由于停留时间大大减少，床层阻力相应减少。并且多层床热效率较高，故适用于降速干燥阶段较长的物料以及湿含量较高（一般在 14% 以上）物料的干燥。

### 3. 卧式多室流化床干燥器

卧式多室流化床干燥器示意图如图 4-7 所示。其结构主要由沸腾干燥室、旋风分离器、细粉捕集室（袋滤器）和排风机等组成。

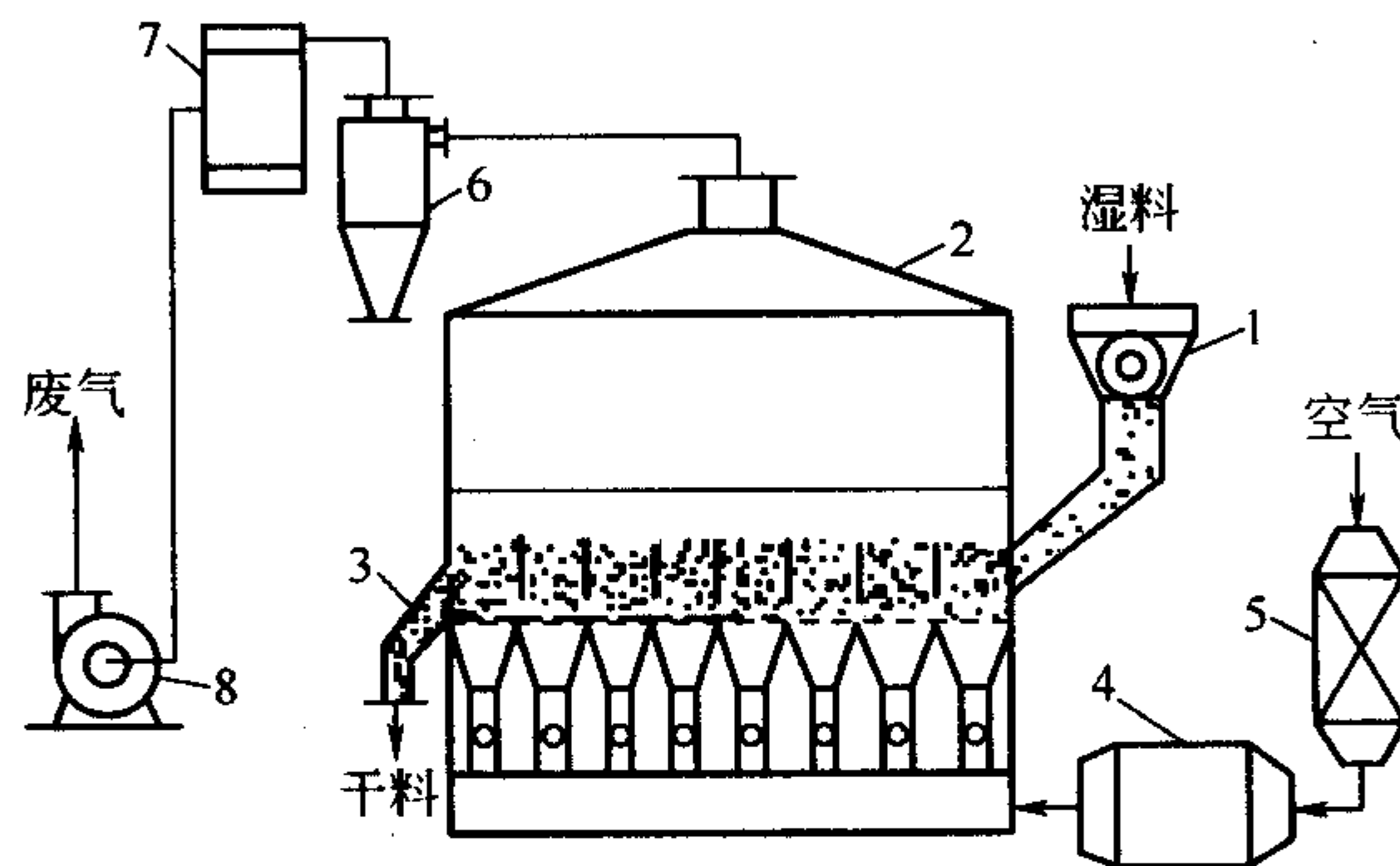


图 4-7 卧式多室流化床干燥器

1—摇摆式颗粒进料器；2—干燥器；3—卸料器；4—加热器；  
5—空气过滤器；6—旋风分离器；7—布袋滤器；8—排风机

(1) 沸腾干燥室 沸腾干燥室底部由两块多层板组成，上铺一层筛网，孔板下面有几个进风阀门，热气流可经多孔板高速进入，因此湿颗粒进入沸腾室后，立即在多孔板上下翻腾，快速地与热气流进行热交换，蒸发的水蒸气经扩大层随热气流带走。由于颗粒在室内不停翻腾，流动性很强，在沸腾室下部形成连续的沸腾层，并向出口方向移动。湿颗粒流化干燥约 20min，当沸腾层内温度持续在 40℃ 左右时，表示颗粒已干燥，打开出料阀门，干颗粒即由出口放出。

(2) 旋风分离器 湿热空气沿切线方向进入旋风分离器，夹带的粗粉沉于分离器底部，湿热空气与细粉再进入细粉捕集室内。

(3) 细粉捕集室 主要由几组布袋滤器组成，室的一端连接排风机，另一端与旋风分离器的风道相连，沸腾室中湿热空气经布袋滤器滤过排出，细粉则留在

## 54 | 药物制粒技术

袋内，待操作结束后由布袋底部放出。

(4) 排风机 操作时，先开蒸汽加热器，扣好布袋滤器，开动排风机，使沸腾器内部干燥，然后加湿颗粒，调好风量，保持一定温度。

卧式多室流化床干燥器由于被分隔成多室，可以调节各室的空气量，同时，流化床内增加了挡板，可避免物料走短路排出，干燥产品的含水率也较均匀。主要特点是改善了物料的停留时间分布，从而可制得均匀干燥产品。另一优点是易使物料的冷却和干燥结合在同一设备中进行，即在尾部增设一冷却室，出料直接包装，简化流程和设备。这类干燥器目前在颗粒干燥中应用已较多，适合干燥各种难以干燥的4~14目散粒状物料，这些物料的初湿量一般在10%~30%，干燥后物料的终湿量一般在0.02%~0.3%。

## (二) 改型流化床干燥器

### 1. 喷动流化床干燥器

喷动流化床是在流化床的基础上改型得到的，喷动气体从底部中心孔高速喷入，气体从锥底进入，夹带一部分固体颗粒向上运动，形成中心通道。在床层顶部颗粒似喷泉一样，到锥底又被上升气流喷射上去。颗粒在流化气体作用下迅速干燥，即在喷动床内流化气和喷动气的共同作用下完成物料的干燥。喷动流化床结合了流化床及喷动床的优点，克服流化床容易结块的缺点，增强了气固接触和混合，具有较高的传热、传质速率，适用于流化性能差的粗颗粒和易黏结物料的干燥。整个系统集雾化、颗粒包衣、干燥等工序于一体，系统密闭，操作简便，无粉尘污染。喷动流化床物料的运动情况如图4-8所示。

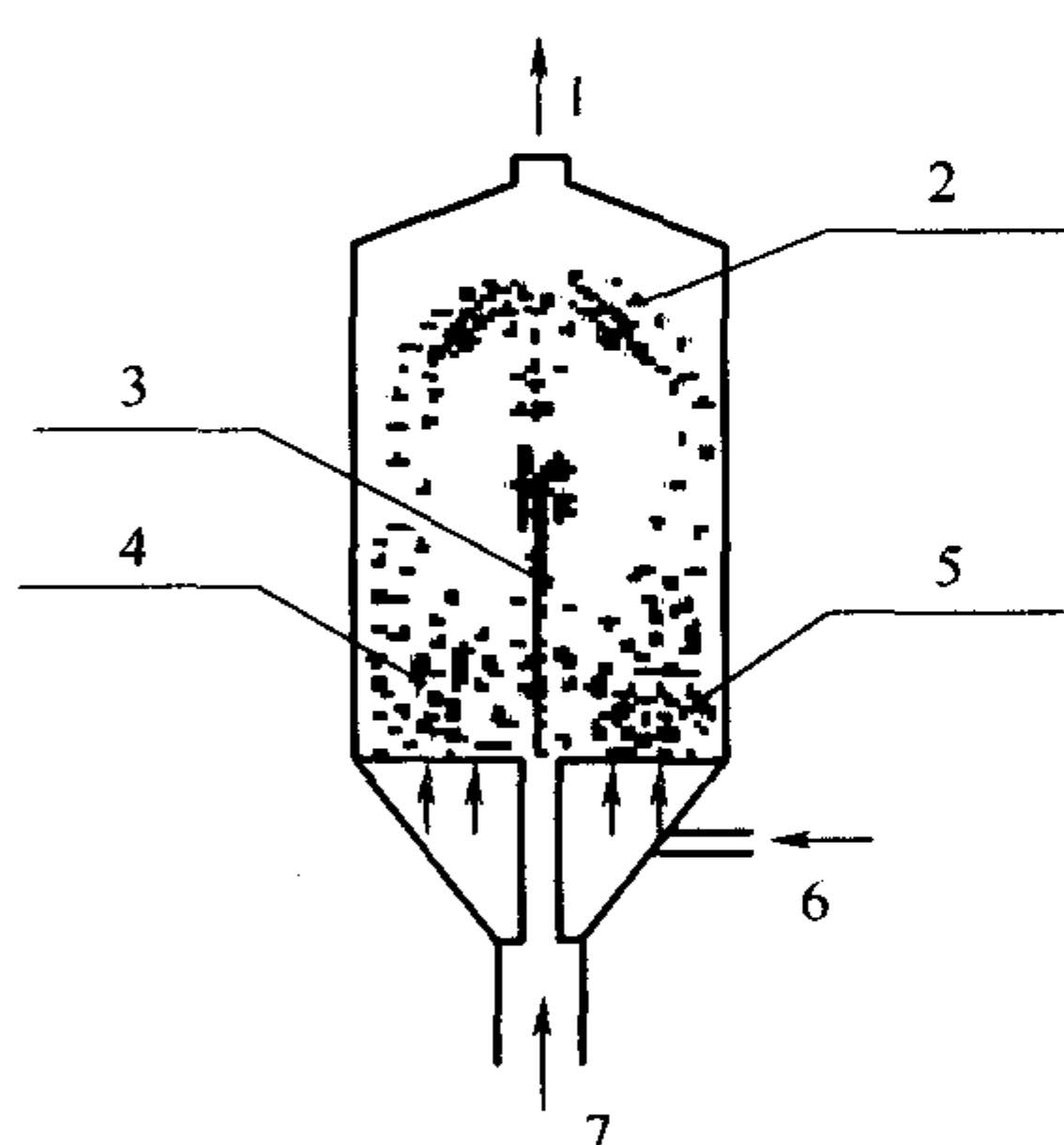


图4-8 喷动流化床干燥器

1—气体出口；2—喷泉区；3—喷射区；  
4—环隙区；5—气流分布板；  
6—流化气体；7—喷动气体

部颗粒似喷泉一样，到锥底又被上升气流喷射上去。颗粒在流化气体作用下迅速干燥，即在喷动床内流化气和喷动气的共同作用下完成物料的干燥。喷动流化床结合了流化床及喷动床的优点，克服流化床容易结块的缺点，增强了气固接触和混合，具有较高的传热、传质速率，适用于流化性能差的粗颗粒和易黏结物料的干燥。整个系统集雾化、颗粒包衣、干燥等工序于一体，系统密闭，操作简便，无粉尘污染。喷动流化床物料的运动情况如图4-8所示。

### 2. 振动流化床干燥器

振动流化床是一种很成功的改型流化床，将机械振动加于流化床即为振动流化床，床层可以垂直振动、水平振动或与床层轴线成一定角度作振动。通过机械振动使物料松动、抛掷，同时加入热空气作为干燥介质，使物料呈流化状态。物料在这种流化状态下，在不断向前运动的过程中与热空气充分混合与分散，进行热交换，达到物料干燥的目的。

振动流化床与一般对流流化床相比具有以下优点：①控制振幅和振动频率可比较容易和准确地控制颗粒在床层中的停留时间（特别是颗粒度分布广的粉粒），在连续操作时可得到活塞流型；②振动促进流化，使空气需要量减少，从而使颗



粒夹带量降低；③对于湿含量大，易于团聚、黏结的颗粒，振动有助于使之分散，从而使流化和干燥效果好；④可以较缓和地处理物料，使颗粒的破碎和磨损较少。振动流化床干燥器是一种强化的有特殊用途的干燥装置，它通常供物料最终干燥之用。由于在干燥过程中由机械振动促进流态化，不仅有利于边界层湍流，强化传热传质，而且还确保了干燥设备在相当稳定流体力学条件下工作。振动流化床干燥器是一种新技术，它适于干燥不易流动的物料（如颗粒太粗或太细、易于黏结或成团等），以及特殊要求的物料（如要求保持晶形完整、晶体闪光度好等）。

### 3. 喷雾流化床干燥器

喷雾流化床干燥器如图 4-9 所示，是利用雾化器将溶液雾化，喷入颗粒剧烈运动的流化床内，借助溶液本身的显热、结晶热及流化介质的热量，使水分蒸发、结晶、干燥并在一步内完成。溶液在雾化过程中未碰到床中原有颗粒前，已部分蒸发结晶，形成新的品种。而在雾化过程尚未蒸发的溶液，便与床中原有结晶接触而涂布于其表面，使颗粒长大，并一步得到干燥，即形成粒状产品，这是喷雾流化干燥器用于制粒方面的原理。喷雾流化床干燥器适用于可喷雾的溶液或稀浆状的物料。喷雾流化床干燥器制粒产品的平均粒径为 0.3~3.0mm，大者可达 8~20mm。可通过调节操作参数来控制粒径的大小。如尿素的喷雾流化床干燥器制取的产品，其粒径可达 8~25mm。在中、小型喷雾流化床干燥器内，有时在筛板上部设置搅拌装置，强制混合，防止死床，此设备可间歇操作也可连续操作。

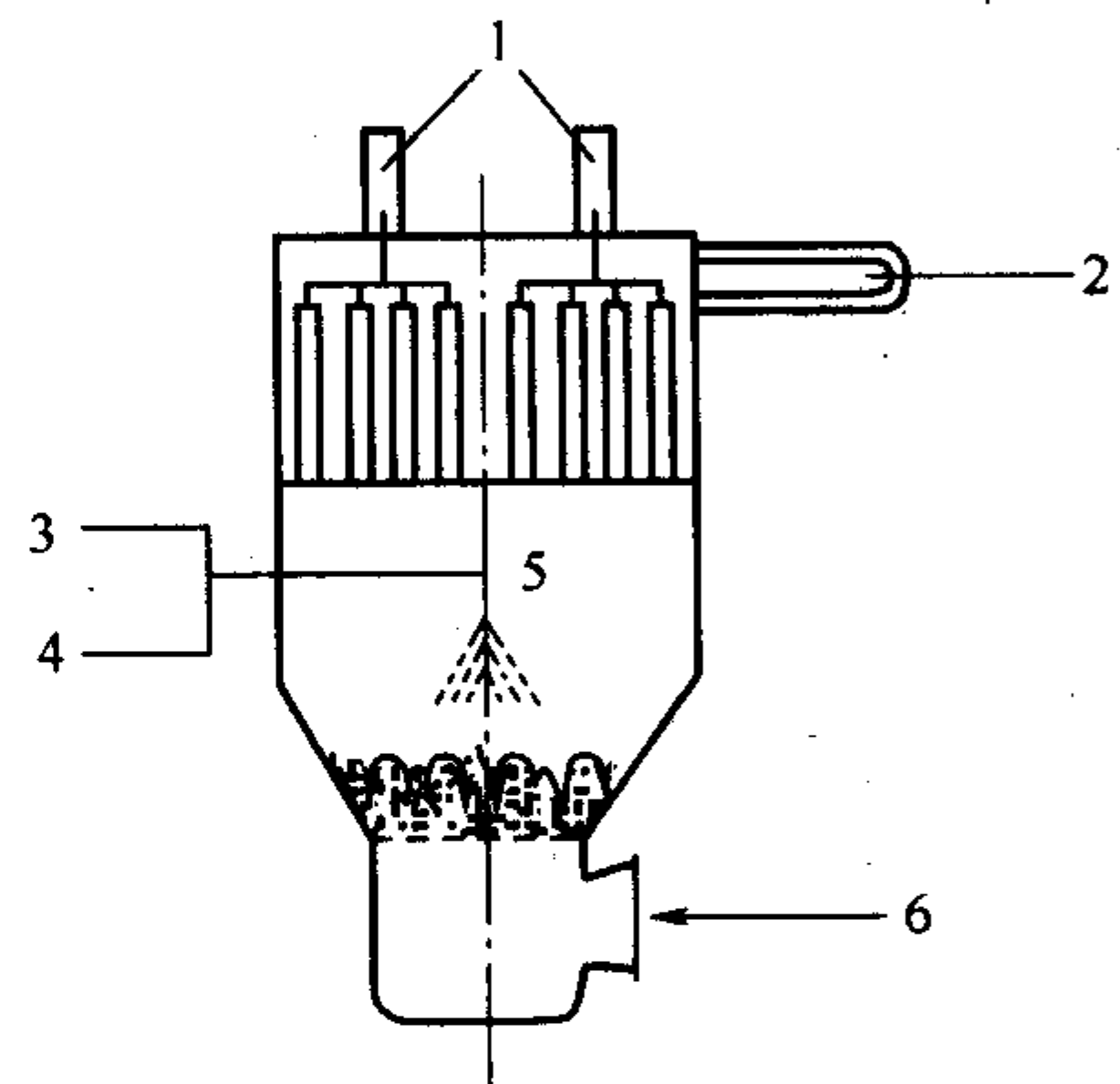


图 4-9 喷雾流化床干燥器

1—气缸；2—风门；3—压缩空气；  
4—黏合剂；5—喷枪；6—热空气

### 4. 脉冲流化床干燥器

脉冲流化床干燥将传统流化床的恒定送风改变为周期性送风，通过调节气流的脉冲频率或脉冲气流导通率，使通过孔板的气体流量或流化区发生周期性变化，对物料进行干燥。脉冲式流化床干燥器的主要结构特点是在干燥室底部的周围装有几根热空气进口管，在每根热空气进口管上装有脉冲阀。它们按一定的频率和次序开启，开启时间与床层厚度和物料性能有关，一般为 0.08~0.20s。当气体突然引进时，在短时间内形成一个脉冲，使粒子剧烈流化，促使物料之间进行强烈的传热与传质。当阀门关闭时床层的流化状态逐渐消失，则物料处于静止状态，但此时应仍通入部分气体完全通过床层，以便下一个脉冲能有效地在床中

## 56 | 药物制粒技术

传递。脉冲流化床干燥器能有效克服沟流、死区和局部过热等传统流化床常见的弊端，因而适用于一些不易流动的物料，如颗粒太粗或太细，易于黏结成团及干燥温度不允许超过 50~80℃ 的结晶药物如四环素族的抗生素和其他药物颗粒。

### 5. 惰性粒子流化床干燥器

加装惰性粒子的流化床干燥过程可分为传热传质与粉碎研磨两步。就单个粒子而言，粒子首先被热空气加热而蓄积热量，然后料液被喷洒在其表面上形成一层料膜，其后，粒子和热空气同时向料膜传热，同时料膜向热空气释放传递水分，待料膜变干后，由弹性变为脆性，随后，在惰性粒子的碰撞、摩擦及搅拌的作用下，物料便自小球表面以片状或粉状剥离，粉状物料随气流进入分离器，片状物料在床内继续被粉碎，待物料粉碎至一定粒径时，随气流进入分离器分离为干燥成品。惰性粒子流化床干燥器适用于液状、膏糊状物料的干燥，为流化干燥器的应用开辟了一条新的途径。

## 四、喷雾干燥器

喷雾干燥器是空气初滤后由加热器加热，产生的热空气经若干级过滤（按药品等级选用），然后于干燥室顶部蜗壳通道由热风分配器产生均匀旋转的气流进入干燥室内。物料经过滤通过离心式雾化盘或压力喷嘴，产生分散、微细的料雾，料雾与旋流的热空气接触，水分迅速蒸发，在极短的时间内物料得到干燥。此设备适合于溶液、乳浊液、悬浊液、糊状液等流动性好的液状料干燥。

### 参 考 文 献

- 1 于佳滨等. 物料干燥原理及方法. 农机化研究, 2004, 3: 49
- 2 周淳等. 多层振动流化床干燥机工作原理及特点. 沈阳化工, 1995, (1): 34
- 3 郑建荣. 流化床喷雾制粒机若干机理的研究. 华东理工大学学报, 2003, 29, (1): 104
- 4 张琦等. 一种新型干燥装置——脉冲流化床干燥器. *Industrial Furnace*, 2005, 27 (2): 9
- 5 宫国清. 脉冲式流化床干燥器操作特性的研究. 南京林业大学学报, 1997, 21 (S1): 7
- 6 李选友等. 惰性粒子流化床干燥液态及膏糊状物料的研究. 南京林业大学学报, 1997, 21 (add): 127
- 7 叶京生. 惰性粒子喷动流化床——膏状物料干燥新方法. 通用机械, 2004. 9