



第八章 干燥

Chapter 8

第一节 基本概念

Basic Concepts

8—1 Importance and Purpose of drying

(重要性和目的)

- **Significance of Drying Process as an Unit Operation**
 - It is widely used in every walk of life. E.g. Food stuff, wood processing, plastics industry, paper making etc.
- **It is one of the oldest methods of preserving food.**
 - Primitive societies practiced the drying of meat and fish in the sun long before recorded history.
 - Today the drying of foods is still important as a method of preservation. Dried foods can be stored for long periods without deterioration occurring.
- **The principal reasons for this are that**
 - ❖ The microorganisms which cause food spoilage and decay are unable to grow and multiply in the absence of sufficient water .
 - ❖ Many of the enzymes which promote undesired changes in the chemical composition of the food cannot function without water.

(Without moisture or water, the enzyme activity is inactivated)



The Purpose of Drying

- Easy for preservation or store
 - Drying makes food or raw food materials have long shelf life. (in terms of microorganism and enzyme action).
 - Need small space of storehouse
- Convenient for transportation
 - Weight and volume are greatly reduced,improves significantly the efficiency of transportation In terms of loading and unloading
- Convenient for consumer use
 - E.g. milk powder,dried vegetables etc.

8—2 Classification, Definition and Contained Processes for Drying

8.2.1 Dehydration and Drying

- Dehydration By Mechanical Method
- Dehydration By Physical-Chemical Method
- Dehydration By Heating Method
(Removing Solvent from solids by heating is called drying—The definition of drying)



Dehydration by Mechanical Method

- The moisture is removed by filtration , Express, Suction, and Centrifugation. These methods are used only in the case that the moisture dose not need to be totally removed.
- 即通过过滤、压榨、抽吸和离心分离等方法除去湿分，这些方法应用于溶剂无需完全除尽的情况，已在前面讲述。

Dehydration Physical-Chemical Method

- The moisture is absorbed by the materials that have absorptive capacity to the moisture.
 - E.g. lime, potassium calcium and so on.
- 用吸湿性物料如石灰、无水氯化钙等吸收水分。因这种方法费用高，操作麻烦，故只适用于小批量固体物料的去湿，或用于除去气体中的水分。

8.2.2 Heat Dehydration and Drying Definition

- By means of heating, the solvent is evaporated from the materials, and the vapor is expelled in time.
- 即借热能使溶剂从物料中溶化,并排除所生成的蒸气来除去湿分。
- **Drying** is the operation that by means of heating the water and other moisture kept by the solid materials are evaporated and the vapor is removed in time.
- 用加热的方法使水分或其它溶剂汽化,藉此来除去固体物料中湿分的操作,称为固体的**干燥**。

Ways of Classification for Drying Process

● Classified by Pressure

- Atmospheric pressure drying
- Vacuum Drying

● Classified by Operation Method

- Batch drying
- Continuous Drying

● Classified by Mode of Heat Transfer

- Conduction
- Convection
- Radiation
- Dielectric drying (高频干燥)

8.2.3 Two Processes are Contained in the Drying Process

- Drying of foods implies the removal of water from the foodstuff. In most cases, drying is accomplished by vaporizing the water that is contained in the food, and to do this the latent heat of vaporization must be supplied. There are, thus, two important process-controlling factors which enter into the unit operation of drying:
 - the transfer of heat to provide the necessary latent heat of vaporization,
 - the movement of water or water vapour through the food material and then away from it to effect the separation of water from foodstuff.
 - These two processes are affected each other, their directions are opposite

8.2.4 Most Commonly Used Drying Processes and New Drying Technologies

- (1) Air and contact drying under atmospheric pressure. In air and contact drying, heat is transferred through the foodstuff either from heated air or from heated surfaces. The water vapour is removed with the air.
- (2) Vacuum drying. In vacuum drying, advantage is taken of the fact that evaporation of water occurs more readily at lower pressures than at higher ones. Heat transfer in vacuum drying is generally by conduction, sometimes by radiation.
- (3) Freeze drying. In freeze drying, the water vapour is sublimed off from frozen food. The food structure is better maintained under these conditions. Suitable temperatures and pressures must be established in the dryer to ensure that sublimation occurs. (**New tech.**)
- (4) Static electric drying. (**New tech.**)

8—3 The Condition which is indispensable for drying process to be progressed

- In order to make the drying process carry out, the following condition must be satisfied:
- The fractional Pressure of the moisture on the surface of the material being dried must be larger than the fractional pressure of the moisture of the heating medium.

$$p_{sw} > p_{mw}$$

第二节 湿空气热力学

Psychrometrics

- Contents:
- ❖ State Parameters of Air-water vapor Mixture
- ❖ Psychrometric Chart

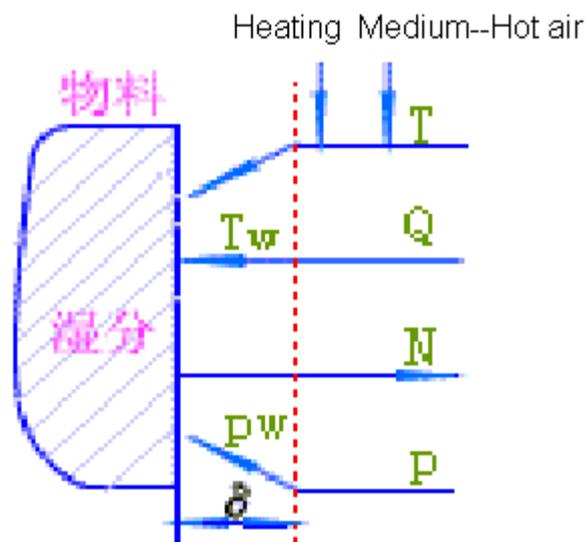
Go forward

第二节 湿空气热力学 Psychrometrics

内容：湿空气的性质，湿度图 (Properties of Air-water vapor mixture, Psychrometric chart)

8—4 湿空气的性质 Properties of Air-Water Vapor Mixture

湿空气是干空气和水气的混合物。在对流干燥过程中，最常用的干燥介质 (Drying Medium) 是湿空气，将湿空气预热成热空气后与湿物料进行热量与质量交换，可见湿空气既是载热体 (Heat Carrier)，也是载湿体 (Moisture Carrier)。在干燥过程中，湿空气的水气含量、温度及焓等性质都会发生变化。所以，在研究干燥的过程之前，首先要了解表示湿空气性质或状态的参数，如温度，相对湿度、干球湿度、露点、湿球温度、比容 (湿容积)、比热、焓及绝热饱和温度等的物理意义及相互间的关系。



1. 湿度 Humidity

(1) 绝对湿度(absolute humidity), 简称湿度 (humidity) 又称为湿含量。它以湿空气中所含水蒸汽的质量与绝对干空气的质量之比表示, 使用符号 H , 其单位为 kg 水/ kg 干空气

$$H = \frac{\text{湿空气中水汽的质量}}{\text{湿空气中干空气的质量}} = \frac{M_w n_w}{M_g n_g} \quad (8-1)$$

因气体的质量等于气体的摩尔数乘以分子量, 则

$$\begin{aligned} \therefore \frac{n_w}{n_g} &= \frac{p_w}{p_g} = \frac{p_w}{P - p_w} \\ \therefore H &= \frac{M_w}{M_g} \times \frac{p_w}{P - p_w} \end{aligned} \quad (8-2)$$

式中：

M_w —水汽的分子量，kg/kmol；

M_g —空气的平均分子量，kg/kmol。

在干燥过程中，湿空气中水汽的质量是变化的，而干空气仅作为载热体和载湿体，其质量或质量流量是不变的。因此，用单位质干空气作基准计算湿空气的湿计则很方便。

将 $M_w=18$ ， $M_g=29$ 代入式 (8-2) 可得

$$H = \frac{18p_w}{29(P - p_w)} = 0.622 \frac{p_w}{P - p_w} \quad (8-3)$$

由式 (8-3) 可见，湿度与湿空气的总压及其中的水汽分压有关，当总压一定时，则由水汽的分压决定。

若式 (8-3) 中的水汽分压为同温度下水的饱和蒸汽压 p_s ，则表明湿空气呈饱和状态，此时湿空气的绝对湿度称为饱和湿度 H_s ，即

$$H_s = 0.622 \frac{p_s}{P - p_s} \quad (8-4)$$

(2) 相对湿度 (Relative Humidity) 在一定温度及总压下，湿空气的水汽分压 p_w 与同温度下水的饱和蒸汽压 p_s 之比的百分数，称为相对湿度，用符号 φ 表示，即

$$\varphi = \frac{p_w}{p_s} \times 100\% \quad (8-5)$$

当相对湿度 $\varphi = 100\%$ 时，表示湿空气中的水汽已达到饱和，此时水汽的分压为同温度下水的饱和蒸汽压，亦即湿空气中水汽分压的最高值。相对湿度越低，则距饱和程度越远，表示该湿空气的吸收水汽能力越强。故，湿度 H 只能表示出水汽含量的绝对值，而对相对湿度 φ 值却能反映湿空气吸收水汽的能力。

由式 (8-5) 可知，相对湿度 φ 值随着湿空气中水汽的分压及温度 (因 $P_s = f(t)$) 而变。即

$$\varphi = f(p_w, t)$$

因 $p_w = \varphi p_s$ 将其代入式 (8-3) 中，得

$$H = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad (8-6)$$

由上式可见，当总压一定时，空气的湿度 H 随着空气的相对湿度及温度而变，即：

$$H=f(\varphi, t)$$

2. 湿空气的比容

(1) 湿比容亦称湿容积(humid volume or specific volume)。它是每单位质量绝对干空气中所具有的空气和水蒸汽的总容积,用符号 v_H 表示,

$$\text{即 } v_H = \frac{m^3 \text{湿空气}}{\text{kg绝对干空气}} = 1 \times v_g + H \times v_w \quad (8-7)$$

常压下,温度为 T 的湿空气比容可由下式计算。

干空气的比容

$$\begin{aligned} v_g &= \frac{1}{\rho_0} \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p} \\ &= \frac{22.41}{29} \times \frac{t+273}{273} \quad (\text{Here } \rho_0 = 22.41/M_g, p = p_0) \quad (8-8) \\ &= 0.773 \frac{t+273}{273} m^3/kg \end{aligned}$$

水汽的比容,

$$v_w = \frac{22.41}{18} * \frac{t+273}{273} = 1.244 \frac{t+273}{273} m^3/kg \quad (8-9)$$

湿空气的比容

$$v_H = (v_g + H v_w) = (0.773 + 1.244H) \times \frac{t+273}{273} m^3 \text{湿空气/kg干气} \quad (8-10)$$

(2) 密度 (Density of Air-water vapor mixture)

湿空气的质量与体积之比称为湿空气的密度。

$$\rho = (1 + H) / v_H \quad \text{kg 湿空气/m}^3 \text{湿空气} \quad (8-11)$$

3. 湿空气的焓 Enthalpy of Wet Air

(1) 湿空气的焓(Enthalpy)为干空气的焓和水汽的焓之和。或称湿空气的热含量，用符号 I 表示，单位是 kJ/kg 干空气。每 1kg 干空气的湿空气所具有的焓。

$$I = I_g + I_v H \quad (8-12)$$

式中 I_v — 水汽的焓，kJ/kg；

I_g — 干空气的焓，kJ/kg；

H — 空气的湿度，kg/kg 干空气。

I — 湿空气的焓 kJ/kg 干空气

上述空气的焓是根据干空气及液态水在 0℃ 时焓为零作基准而计算的，因此，对于温度为 t 及湿度为 H 的湿空气，其焓包括由 0℃ 的水变为 0℃ 的水汽所需的潜热及湿空气由 0℃ 升温至 T 所需的显热之和，即

$$I = (C_g + C_v H) t + r_0 H \quad (8-13)$$

式中 r_0 —0 时水的汽化潜热， $r_0=2492\text{kJ/kg}$ 。

将 C_g 、 C_v 及 r_0 值代入式 (8-13) 中，可得

$$I=(1.01+1.88H)t+2492H \quad (8-14)$$

由式 (8-14) 可见，湿空气的温度 t 越高，湿度 H 愈大，则焓 I 越大。湿空气的焓 I 值随空气的温度 t 及湿度 H 而变。

(2) 湿比热容 Specific Heat

即比热，简称湿热 (humid heat)。在常压下，将 1kg 干空气和其 1kg 干空气和其所带有的 H kg 水汽升高温度 1 所需的热量，称为湿比热，用符号 C_H 表示，单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ })$ ，即

$$C_H = C_g + C_v H \quad (8-15)$$

式中

C_g —干空气的比热， $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ；

C_v —水汽的比热， $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ；

H —空气的湿度， $\text{kg 水}/\text{kg 干空气}$ 。

在工程计算中，通常取 C_v 及 C_g 为常数，即

$C_g=1.01\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, $C_v=1.88\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, 将 C_g , C_v 值代入式 (8 - 15) 中, 得

$$C_H = 1.01 + 1.88H \quad (8-16)$$

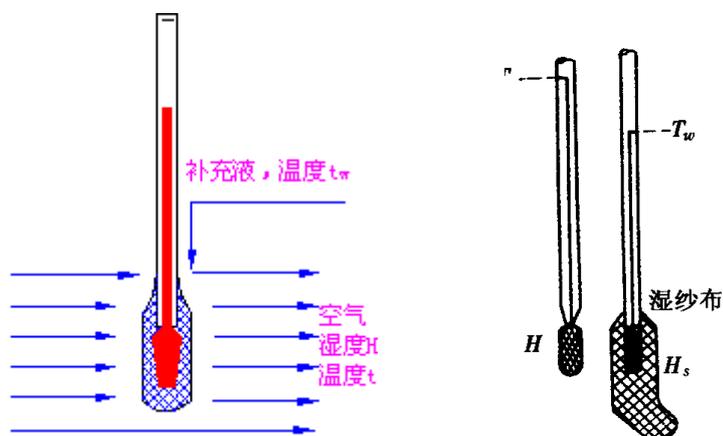
可见, 湿热 C_H 仅随空气的湿度而变。

4. 湿空气的温度

(1) 干球温度 (dry bulb temperature) 湿空气的温度 t 是用普通温度计测得的, 此温度称为干球温度(dry bulb temperature), 为湿空气的真实温度, 。

(2) 湿球温度 wet bulb temperature

如图 8-2 所示, 温度计 A 的感温球露在空气中, 称为干球温度计, 所测得的温度为空气的干球温度 t , 简称为空气的温度。



温度计 B 的感温球用纱布包裹, 纱布用水保持湿润,

这支温度计称为湿球温度计，它在空气中所达到的平衡或稳定的温度称空气的湿球温度(wet bulb temperature),用号 t_w 表示。不饱和空气的湿球温度 t_w 低于干球温度 t 。

用湿球温度计测定空气湿球温度的机理如下：设有大量的不饱和空气，其温度为 t ，水汽分压为 p_w ，湿度为 H 。该空气以高速(通常气速 $> 5 \text{ m/s}$ ，以减少辐射和热传导的影响)通过湿球温度计的湿布纱表面，如图。若开始时设湿纱布水分的初温高于空气的露点，则纱布表面的水蒸汽压比空气中水汽分压高，水汽便自湿纱布表面汽化，并扩至空气主体中去，汽化水分所需的潜热，首先只能取自湿纱布中水的显热，因而使水温下降。当水温低于空气的干球温度时，热量则由空气传向纱布中的水分，其传热速率随着两者温差增大而增大，最当由空气传入纱布的传热速率恰好等于自纱布表面汽化水分需的传热速率时，则两者达到平衡状态，这时湿纱布中的水温即保持恒定。称这恒定或平衡的温度为该空气的湿球温度。因湿空气的流量大，在流过湿纱布表面时可认为其温度和湿度均不改变。应指出的是：湿球温度实际上是湿纱布中水分的温度，而并不代表空气的真实温度，由于此温度由湿空气的温度、湿度所决定，故称其为湿空气的湿球温度，所以它是表明湿空气状态或性质的一

种参数。对于某一定干球温度的湿空气，其相应的温度越低，湿球温度值越低。而对于饱和湿空气而言，其湿球温度与干球温度相等。

假设湿空气的温度为 t ，湿球温度为 t_w ，则空气向纱布表面的传热速率为

$$Q = A (t - t_w) \quad (8-17)$$

式中：

Q —为传热速率，W；

a —空气至湿纱布的对流传热系数， $W/(m^2 \cdot s)$ ；

A —空气与湿纱布的接触表面， m^2 。

同时湿纱布中水分向空气的传质速率为

$$N = k_H A (H_w - H) \quad (8-18)$$

式中

N —传质速率， kg/s ；

k_H —以湿度差为推动力的传质系数， $kg/(m^2 \cdot s \cdot \Delta H)$ ；

A —空气与湿纱布的接触面积， m^2 ；

H_w —湿空气在温度为 t_w 下的饱和湿度 ,kg 水/kg 干空气 ;

H —空气的湿度 , kg 水/kg 干空气。

因湿球处的热量达平衡状态 , 空气向湿纱布表面的传热速率应等于水分汽化所需的热量 , 即

$$Q = N r_w \quad (8-19)$$

式中

r_w —水在湿球温度 t_w 时的汽化潜热 , kj/kg。

将式 (8-17)、(8-18)、代入式 (8-19) 中可得

$$aA(t - t_w) = k_H A(H_w - H) r_w$$

整理上式可得

$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{a} (H_w - H) \quad (8-20)$$

式中的 k_H 与 a 为通过同一气膜的传质系数与对流传热系数。当温度不太高 , 气流速度足够大时 , 可认为热、质传递均以对流为主。实验表明 , k_H 与 a 都与 Re 数的 0.8 次幂成正比 , 故 k_H 与 a 之比值与流速无关 , 只与物性有关。对空气和水系统 , 经测定 $a/k_H = 1.09 \text{ kj/kg} \cdot \text{C}$ 。可见 ,

湿球温度是湿空气的温度和湿度的函数，即 $t_w=f(t,H)$ ，反之，湿空气的 t 、 H 一定， t_w 亦必为定值

(3) 露点 Dew point

不饱和的空气在湿含量 H 不变的情况下冷却，达到饱和状态时的温度，称为该湿空气的露点(dew point)，用符号 t_d 表示。露点是湿空气的一个物理性质，当达到露点时，空气的湿度为饱和湿度，如式(8-4)所示。

若已知饱和湿度 H_s 则用式(8-4)求出饱和蒸汽压 p_s 。

当空气从露点继续冷却时，其中部分水蒸汽便会以露点形式凝结出来。

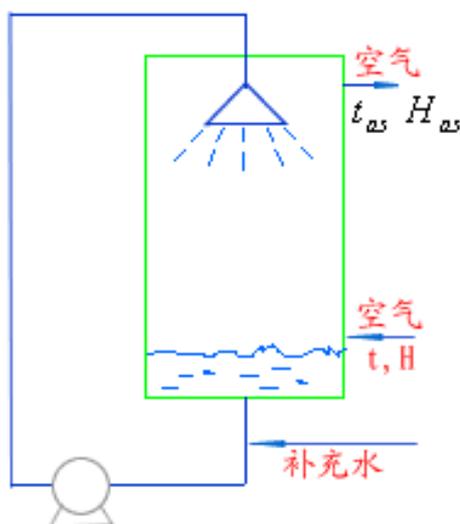
空气的总压一定，露点时的饱和水蒸汽压 p_s 仅与空气的湿度 H_s 有关，即 $p_s=f(H_s)$ 或 $t_d=f(H_s)$ 。湿度越大， t_d 越大，如已知空气的总压 P 及湿度 H_s ，可由式(8-4)求得饱和水蒸汽压 p_s ，然后，由饱和水蒸汽压表查得对应的温度，即为空气的露点。同样，已知空气的总压和露点，即可求得空气的湿度，此即露点法测定空气湿度的依据。

Please pay a particular attention here!

The acquisition of dew point is an equi-humidity process.

(4) 绝热饱和温度 Adiabatic Saturation temperature

绝热饱和过程：下图所示为一绝热饱和器，设有温度为 t ，湿度为 H 的饱和空气在绝热饱和器内与大量水接触，水用泵循环，若设备保温良好，则热量只在汽液两相之间传递，而对周围环境是绝热的。这时可认为水温完全均匀，故水向空气中汽化时所需的潜热，只能取自空气中的显热，这样，空气的温度下降，而湿度增加，即空气失去显热，而水汽将此部分热量以潜热的形式带回空气中，故空气的焓值可视为不变（忽略水汽的显热），这一过程为空气的绝热降温增湿过程及等焓过程。



绝热增湿过程进行到空气被水汽所饱和，则空气的温度不再下降，而等于循环水的温度，称此温度为该空气的绝热饱和温度(adiabatic saturation temperature)，用符号 t_{as} 表示，其对应的饱和湿度为 H_{as} ，此刻水的温度亦为 t_{as} 。

现进一步分析这过程，在空气绝热增湿过程中，空气失去的是显热，而得到的是汽化水带来的潜热，空气的温度和湿度虽随过程的进行而变化，但其焓值不变。进入绝热饱和器时湿空气的焓为

$$I_1 = C_H t + H r_0 \quad (8-21)$$

离开绝热饱和器时湿空气的焓为

$$I_2 = C_{H_{as}} t_{as} + H_{as} r_0 \quad (8-22)$$

式中

r_0 — 0°C 下水的汽化潜热， kJ/kg 。

因湿空气在绝热增湿过程中为等焓过程，所以

$$I_1 = I_2 \quad (8-23)$$

$$\text{即：} C_H t + H r_0 = C_{H_{as}} t_{as} + H_{as} r_0$$

$$\text{又因 } C_H = 1.01 + 1.88H \quad C_{H_{as}} = 1.01 + 1.88H_{as}$$

其中 H 和 H_{as} 的值与 l 相比皆为一很小的数值，故可视为 C_H 、 $C_{H_{as}}$ 不随湿度而变，即 $C_H=C_{H_{as}}$ ，将式 (8-21)、(8-22) 代入式 (8-23) 中，得

$$t_{as} = t - \frac{r_0}{C_H}(H_{as} - H) \quad (8-24)$$

由式 (8-22) 可见，当物系性质 (C_H , r_0) 及相平衡关系 $H_{as}=f(t_{as})$ 已定，绝热饱和温度 t_{as} 是空气状态函数，即

$$T_{as}=f(t, H)$$

实验测定表明，对空气 - 水系统， $a/k_H=C_H$ 。

$$\text{比较} \begin{cases} t_{as} = t - \frac{r_0}{C_H}(H_{as} - H) \\ t_w = t - \frac{k_H r_w}{a}(H_w - H) \end{cases} \xrightarrow{a/k_H=C_H} \text{得: } t_w = t_{as}$$

式 (8-24) 与式 (8-20) 比较，可得 $t_{as}=t_w$ ，可认为绝热饱和温度 t_{as} 和湿球温度 t_w 数值相等。不过应强调指出的是：绝热饱和温度 t_{as} 与湿球温度 t_w 是两个完全不同的概念。但是两者都是湿空气状态 (t 和 H) 的函数。**特别是对空气 - 水汽系统，两者在数值上近似相等**，这给干燥计算带来很大的方便。因湿球温度 t_w 是比较容易测定的，而 $t_w = t_{as}$ ，则可根据空气的干球温度 t 和绝热饱和温度 t_{as}

(因 $t_{as} = t_w$)，从空气的湿度图中，查得空气的湿度 H 。

Please pay a particular attention to the t_{as} and t_w , their acquisition is an equi-enthalpy process.

从上述结论可看出，表示空气的性质的三个温度 t 、 t_w (或 t_{as})及 t_d 的大小，对于不饱和湿空气为

$$t > t_w > t_d$$

对于已达饱和的湿空气则有 $t = t_w = t_d$

例 8-1 已知湿空气的总压为 101.3kN/m^2 ，相对湿度为 50%，干球温度为 20°C 。试求：

- (a) 湿度 H
- (b) 水蒸汽分压 p
- (c) 露点 t_d
- (d) 焓 I
- (e) 如将 500kg/h 干空气预热至 117°C ，求所需热量 Q ；
- (f) 每小时送入预热器的湿空气体积 V 。

解 $P=101.3\text{kN/m}^2$, $\varphi = 50\%$, $t=20$, 由饱和水蒸汽表查得 , 水在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时之饱和蒸汽压为 $p_s=2.34\text{kN/m}^2$

(a) 湿度 H

$$\begin{aligned} H &= 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \\ &= 0.622 \times \frac{0.50 \times 2.34}{101.3 - 0.5 \times 2.34} \\ &= 0.00727\text{kg水/kg干气} \end{aligned}$$

(b) 水蒸汽分压

$$p = \varphi p_s = 0.5 \times 2.34 = 1.17\text{kN/m}^2$$

(c) 露点 t_d

露点是空气在湿度 H 或水蒸汽分压 p 不变的情况下 , 冷却达到饱和时的温度。所以可由 $p=1.17\text{kN/m}^2$ 查饱和水蒸汽表 , 得到对应的饱和温度 $t_d=9$ 。

(d) 焓 I

$$\begin{aligned} I &= (1.01 + 1.88H)t + 2492H \\ &= (1.01 + 1.88 \times 0.00727) \times 20 + 2492 \times 0.00727 \\ &= 38.6\text{KJ/kg干空气} \end{aligned}$$

(e) 热量 Q

$$\begin{aligned}
 Q &= 500 \times (1.01 + 1.88 \times 0.00727) \times (117 - 20) \\
 &= 4966 \text{kJ/h} = 13.8 \text{kw}
 \end{aligned}$$

(f) 湿空气体积 V

$$\begin{aligned}
 V &= 500nH \\
 &= 500 \times (0.773 + 1.244H) \times \frac{t + 273}{273} \\
 &= 500 \times (0.773 + 1.244 \times 0.00727) \times \frac{20 + 273}{273} \\
 &= 419.7 \text{m}^3/\text{h}
 \end{aligned}$$

8—5 湿空气的湿度图 Psychrometric Chart

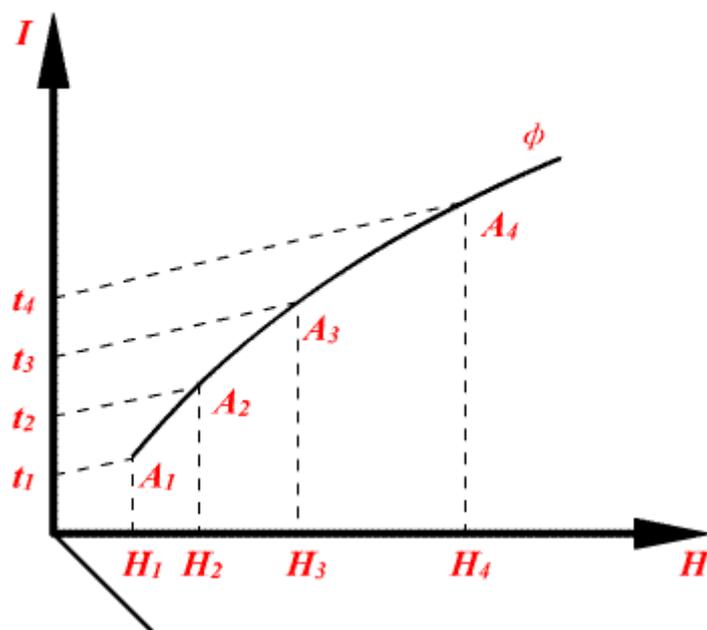
湿度图 $\begin{cases} \text{温度—湿度图}(t-H) \\ \text{焓—湿度图}(I-H) \end{cases}$ Two kinds of psychrometric chart

湿空气性质的各参项数 (p 、 t 、 ϕ 、 H 、 I 、 t_w 等)，只要规定其中两个互相独立的参数，湿空气状态即被确定。确定参数的方法可用前述的公式进计算，但相对繁琐而且有时需要用试差法求解。工程上为了方便起见，用算图的形式来表示湿空气各项性质之间的关系，这样计算过程就会变得比较简便。下面介绍一种湿空气的湿度图，焓湿图（即 $I-H$ 图），如图（8-5）所示。此图中关联了空气与水系统的水蒸汽分压、湿度、相对湿度、温度及焓等各项参数。

1. 焓湿图的构造 Structure of Psychrometric Chart

在工程计算中，常用的是以湿空气的焓值 I 为纵坐标，湿度 H 为横坐标的焓湿图，即 I - H 图。

图是根据总压等于标准大气压，即 $P=101.3\text{kN/m}^2$ (760mmHg) 为基础而标绘的。为了避免图中许多线条挤在一起而难以读出数据，故两轴采用斜角坐标系，其间夹



角为 135° 。又为了便于读取湿度数据，将横轴上湿度 H 的数值投影于与纵轴正交的辅助水平轴上。图上共有五种线，图上任一点都代表一定温度 t 和湿度 H 的湿空气状态。现将图上各曲线分述如下：

(1) 等湿度线(等 H 线, Iso-humidity line), 是一组与纵轴平行的直线。在同一根等 H 线上不同的点都具有相同的湿度值, 其值在水平辅助线上读出。

(2) 等焓线(等 I 线, Iso-Enthalpy line), 是一组与横轴平行的直线。在同一根等 I 线上不同的点所代表的湿空气的状态不同, 但都具有相同的焓值, 其值在纵轴上读出。

(3) 等温线(等 t 线, Iso-temperature line), 将式 (8-14) $I=(1.01+1.88H)t+2492H$ 改写成

$$I=1.01t+(1.88t+2492)H \quad (8-14a)$$

由上式可知, 当空气的干球温度 t 不变时, I 与 H 成直线关系, 故在 I-H 图中对应不同的 t, 可作出许多等 t 线。

由式 (8-14a) 可以看出, 各种不同的温度的等温线, 与水平轴成倾斜, 其斜率为 $(1.88t+2492)$, 故温度愈高, 其斜率愈大。因此, 这许多成直线的等 t 线并不是互相平行的。

(4)等相对湿度线 (等 φ 线 is0-relative humidity line), 是根据式 (8-6)

$$H = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s}$$

绘制而成的, 是一组从坐标原点散发出来的曲线。当湿空气的总压 $P = 101.3 \text{ kN/m}^2$ 时 $\varphi = f(H, p_s)$, 亦即 $\varphi = f(H, t)$ 。对于某一定值的 φ , 若已知一个温度 t , 就可查得一个对应的水蒸汽压 p_s , 再用式 (8-6) 算出一个对应的湿度 H , 将许多 (t, H) 点连接起来, 就成为某一 φ 值的相对湿度线, 如图 8-6 所示。按上述方法, 可绘出如图 8-5 中的 $\varphi = 5\%$ 至 100% 的一系列曲线。

由图中可见, 当湿空气的湿度 H 为一定值时, 温度愈高, 其相对湿度值愈低, 即其作为干燥介质时, 吸收水汽的能力愈强, 故湿空气进入干燥器之前必须经过预热器预热提高温度, 目的除了提高湿空气的焓值使其作为载热体外, 也是为了降低其相对湿度而作为载湿体。

图中 $\varphi = 100\%$ 的曲线称为饱和空气线, 此时空气完全被水汽所饱和。饱和空气线以上 ($\varphi < 100\%$) 为不饱和区域, 此区对干燥操作有意义; 饱和线以下为过饱和空气区, 此湿空气成雾状, 它会使物料增湿, 故在干燥操作中要避免。

(5) 水蒸汽分压线 (partial pressure line of water vapor), 该线表示空气的湿度 H 与空气中的水蒸汽分压 p_w 之间关系曲线, 可按式 (8-3) 作出。式 (8-3) 改写成

$$p_w = \frac{PH}{0.622 + H} \quad \left(H = \frac{18p_w}{29(P - p_w)} = 0.622 \frac{p_w}{P - p_w} \quad (8-3) \right)$$

由此式可知, 当湿空气的总压 P 不变时, 水蒸汽的分压 p_w 随湿度 H 而变化。水蒸汽分压标于右端纵轴上, 其单位为 kN/m^2 。

2、焓湿图的使用法 Usage of Psychrometric Chart

利用 $I-H$ 图查取湿空气的各项参数非常方便。只要知道表示湿空气性质的各项参数中的任意两个在图上有交点的参数, 就可以在 $I-H$ 图上定出一个交点, 这点即表示湿空气所处的状态, 由此点即可求出其它各项参数。

两类问题 $\left\{ \begin{array}{l} \text{已知图中的一点确定该点所对应的状态参数} \\ \text{已知状态参数在图中确定一点} \end{array} \right.$

例如, 图 8-7 中 **A 点代表一定状态的湿空气**, 则

(1) 湿度 H , 由 A 点沿等湿线向下与水平辅助轴的交点 C, 即可读出 A 点的湿度值。

(2)焓值 l , 通过 A 点作等焓线的平行线 , 与纵轴交于 E 点 , 即可读得 A 点的焓值。

(3)水蒸汽分压 p_w , 由 A 点沿等湿线向下交水蒸汽分压线于 B , 在图右端纵轴读出水蒸汽分压值。

(4)露点 t_d , 由 A 点沿等湿线向下与 $\frac{p_i}{p} = 100\%$ 饱和线相交于 F 点 , 再由过 F 点等温线读出露出点 t_d 值。

(5)湿球温度 t_w (绝热饱和温度 t_{as}) , 由 A 点沿着等焓线与 $\phi = 100\%$ 饱和线相交于在 D 点 , 再由过 D 点的等温线读出湿球温度 t_w (即绝热饱和温度 t_{as}) 值。

通过上述查图可知 , 首先必须确定代表湿空气的状态点 (例如图 8-7 中的点 A) , 然后才能查得各种参数。

How to determine the state point in the chart?

Among the parameters, only two of them are independent, therefore , if two parameters are known, the state point can be determined.

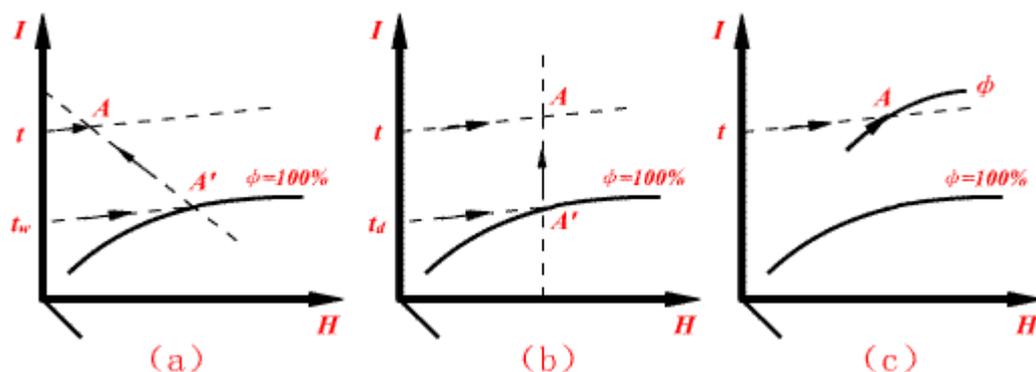
通常根据下述已知条件之一来确定湿空气的状态点 , 已知条件是

(1) 湿空气的干球温度 t 和湿球度 t_w ,

(2) 湿空气的干球温度 t 和露点 t_d ,

(3) 湿空气的干球温度 t 和相对湿度 φ 。

例 8-2 已知湿空气的总压为 101.3kN/m^2 , 相对湿度为 50% , 干球温度为 20°C 。试用 I-H 图求解 :



(a) 水蒸汽分压 p ;

(b) 湿度 H ;

(c) 热焐 I ;

(d) 露点 t_d ;

(e) 湿球温度 t_w ;

(f) 如将含 500kg/h 干空气的湿空气预热至 117°C , 求所需热量 Q 。

解 :

由已知条件： $P = 101.3\text{kN/m}^2$ ， $\varphi_0 = 50\%$ ， $t_0=20$ 在 I-H 图上定出湿空气的状态点 A 点。

(a) 水蒸汽分压 p

由 A 点沿等 H 线向下交水蒸汽分压线于 B，在图右边纵坐标上读出得 $p=1.2\text{kN/m}^2$ 。

(b) 湿度 H

由 A 点沿等 H 线交水平辅助轴于 C 点，读得 $H = 0.0075\text{kg 水/kg 干空气}$ 。

(c) 热焓 I

通过 A 点作等 I 线的平行线，交纵轴于 E 点，读得 $I_0 = 39\text{kJ/kg 干空气}$ 。

(d) 露点 t

由 A 点沿等 H 线与 $\varphi = 100\%$ 饱和线相交于 D 点，由等 t 线读得 $t=10$ 。

(e) 湿球温度 t_w

由 A 点沿等 I 线与 $\varphi = 100\%$ 饱和线相交于 F 点，由等 t 线读得 $t_w=14$ （即 $t=14$ ）。

(f) 热量 Q

因湿空气通过预热器加热其温度不变，所以可由 A 点沿等 H 线向上与 $t_1 = 117$ 线相交于 G 点，读出 I_1 138kJ/kg 干空气（即湿空气离开预热器之焓值）。含 1kg 干空气的湿空气通过预热器气所获得的热量为

$$Q' = I_1 - I_0 = 138 - 39 = 99 \text{kJ/kg}$$

每小时含 500kg 干空气的湿空气通过预热所获得的热量为

$$Q = 500 Q'$$

$$= 500 \times 99 = 49500 \text{kJ/h} = 13.8 \text{kw}$$

通过上例的计算过程说明，采用焓湿图来求取湿空气的各项参数，与用数学计算相比，不仅计算迅速简便，而且物理意义也较明确。

第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算

Mass Balance and Energy Balance for Drying Process

对流干燥过程是用热空气除去被干燥物料中的水分，所以空气在进入干燥器前应经预热器加热。热空气在干燥器中供给湿物料中水分汽化所需的热量，而汽化的水分又由空气带走，所以干燥过程的计算中应通过干燥器的物料衡算和热量衡算计算出湿物料中水分蒸发、空气用量和所需热量，再依此选择适宜型号的鼓风机、设计或选择换热器等。

8-6 干燥过程中的物料衡算 Mass Balance

一、物料含水量的表示方法 The expression of the water content of materials

物料中含水量有两种表示方法，即

1、湿基含水量 w (Wet basis water content) 即是以湿物料为计算基准的物料中水分的质量分率或质量百分数。The ratio of mass of water in the wetted material to that of total wet material.

$$w = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料的总质量}} \quad (8-23)$$

2、干基含水量 X (Water content based on the dried material) 不含水分的物料通常称为绝对干物料或称干料。以绝对干物料为基准的湿物料中含水量，称为干基含水量，亦即湿

物料中水分质量与绝对干料的质量之比。 The ratio of mass of water in the wetted material to that of absolutely dry material in the wet material.

$$X = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料中绝对干料的质量}} \quad (8-24)$$

Why should we know the two expressing methods for water content?

1. Water content based on the wet material is easily understood by people, it is actually the percentage concentration.

2. Water content based on the dry material is easily used for calculation. In other words, The calculation by it, the procedure of calculation would be very much simple.

在工业生产中，通常是以湿基含水量来表示物料中含水分的多少。但是由于湿物料的质量在干燥过程中因失去水分而逐渐减少，故用湿基含水量表示，不能将干燥前后物料的含水量直接相减以表示干燥所除去的水分。而绝对干料的质量在干燥过程中是不变的，故用干基含水量计算较为方便。这两种含水量之间的换算关系如下

$$X = \frac{w}{1-w} \text{kg水/kg干物料}$$

$$w = \frac{X}{1+X} \text{kg水/kg湿物料} \quad (8-25)$$

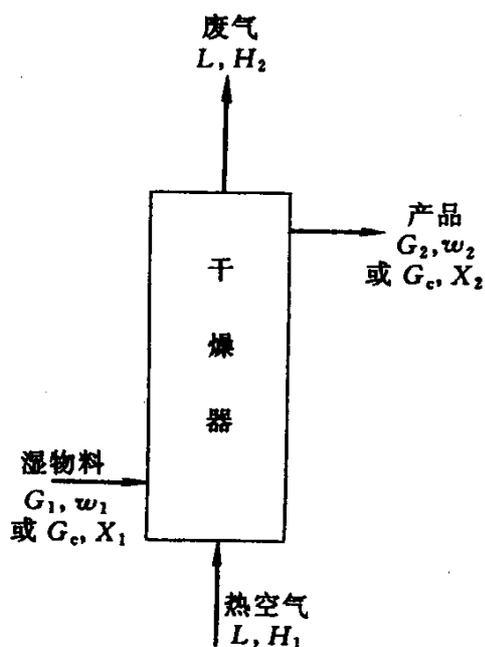
二、物料衡算 Mass Balance

Purpose of Mass Balance

1. To determine the amount of water evaporated provided that the wet material is dried to a prescript water content.
2. To determine the amount of dry air needed for fulfill the drying task

通过物料衡算可确定将湿物料干燥到规定的含水量所蒸发的水分量、空气消耗量。

对于干燥器的物料衡算而言，通常已知条件为单位时间（或每批量）物料的质量、物料在干燥前后的含水量、湿空气进入干燥的状态（主要指温度、湿度等）。



1、水分蒸发量（quantity of water to be removed）

对图 8-9 所示的连续干燥器作水分的物料衡算，以 1h 为基准。

设

G_1 —进入干燥的湿物料质量，kg/h；

G_2 —出干燥器的产品质量，kg/h；

G_c —湿物料中绝对干料的质量，kg/h；

w_1 、 w_2 —干燥前后物料的湿基含水量，kg/kg 湿物料；

X_1 、 X_2 —干燥前后物料的干基含水量，kg 水/kg 干物料；

L —进、出干燥器的湿空气的湿度，kg/h；

H_1 、 H_2 —进、出干燥器的湿空气的湿度，kg 水/kg 干空气；

W —水分蒸发量，kg/h。

若不计干燥过程中物料损失量，则在干燥前后物料中绝对干料的质量不变，即

$$G_c = G_1(1 - w_1) = G_2(1 - w_2) \quad (8-26)$$

由式(8-26)可得 G_1 ， G_2 之间的关系

$$G_1 = G_2 \frac{1 - w_2}{1 - w_1} \quad (8-27)$$

$$G_2 = G_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_2}$$

干燥器的总物料衡算为

$$G_1 = G_2 + W \quad (8-28)$$

则蒸发的水分量为

$$\begin{aligned} W &= G_1 - G_2 = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} \\ &= G_2 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} \end{aligned} \quad (8-29)$$

若以干基含水量表示，则水分蒸发量可用下式计算，

$$W = G_c (X_1 - X_2) \quad (8-30)$$

2、干空气消耗量 (Amount of dry air to be consumed)

通过干燥器的湿空气中绝对干空气的质量是不变的。又因湿物料中蒸发出来的水分被空气带走，故湿物料中水分减少量即等于空气中水汽的增加量，即

$$W = L(H_2 - H_1) \quad (8-31)$$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} \quad (8-31 \text{ a})$$

此式两边除以 W ，得

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{H_2 - H_1} \quad (8-32)$$

每蒸发 1 kg 水分所消耗的干空气量，称单位空气消耗量，单位为 kg 干空气 / kg 水分。(The amount of dry air consumed for removal of 1 kg water by evaporation is called unit dry air consumption.)

由式(8-32)可见，空气消耗量仅与湿空气的初始及最终的湿度 H_1 、 H_2 有关。如以 H_0 表示预热前的湿度，而空气经预热前、

后的湿度不变，故 $H_0 = H_1$ ，则式 (8-32) 可写成

$$l = \frac{1}{H_2 - H_0} \quad (8-33)$$

亦即单位消带量仅与 H_2 、 H_0 有关，与路径无关。而 H_0 愈大， l 亦愈大。而 H_0 是由空气的初温 t_0 及相对湿度 φ_0 所决定，所以在其它条件相同的情况下， l 将随 t_0 及相对湿度 φ_0 的增加而增大，亦即，对同一干燥过程而言，夏季的空气消耗量比冬季的为大，故选择输送空气的鼓风机等装置，须按全年中最大空气消耗量而定。

例 8-3 今有一干燥器，处理湿物料量为 800kg/h。要求物料干燥后含水量由 30% 减至 4%（均为湿基）。干燥介质为空气，初温为 15℃，相对湿度为 50%，经预热器加热至 120℃，试求：

(a) 水分蒸发量 W ；

(b) 空气消耗量 L 、单位消耗量 l ；

(c) 如鼓风机装在进口处，求鼓风机之风量 V 。

解 (a) 水分蒸发量 W

已知

$$w_1 = 30\%, w_2 = 4\%$$

$$\begin{aligned} W &= G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} \\ &= 800 \times \frac{0.3 - 0.04}{1 - 0.04} = 216.7 \text{ kg水/h} \end{aligned}$$

(b) 空气消耗量 L、单位空气消耗量

由 I-H 图查得，空气在 $t_0 = 15$ ， $\varphi_0 = 50\%$ 时的湿度为 $H_0 = 0.005 \text{ kg 水/kg 干空气}$ 在 $t_2 = 45$ ， $\varphi_2 = 80\%$ 时的湿度为 $H_2 = 0.052 \text{ kg 水/kg 干空气}$ ，空气通过预热器湿度不变，即 $H_0 = H_1$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

$$= \frac{216.7}{0.052 - 0.005} = 4610 \text{ kg dried gas/h}$$

$$l = \frac{l}{H_2 - H_0} = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

$$= \frac{1}{0.052 - 0.005}$$

$$= 21.3 \text{ kg dried gas/kg water}$$

(c) 风量 V

$$v_H = (0.773 + 1.244 * H_0) \frac{t_0 + 273}{273}$$

$$= 0.822 \text{ m}^3/\text{kg dried gas}$$

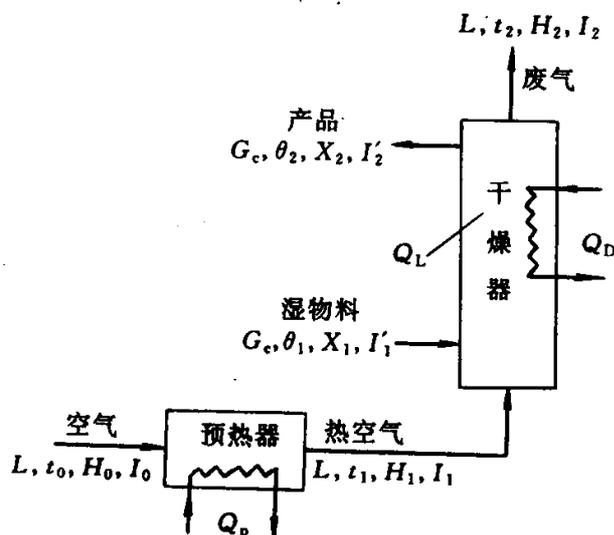
$$V = Lv_H = 4610 * 0.822 = 3790 \text{ m}^3/\text{h}$$

8-7 干燥过程的热量衡算 Heat Energy Balance

通过干燥器的热量衡算可以确定物料干燥所消耗的热量或干燥器排出空气的状态 (H_2 、 l_2)

热量衡算时以汽化 1 kg 水分为计算基准，温度以 0 为基准。

一、预热器的加热量计算 The requirement of heat for the preheater



如图 8-10 所示，若忽略预热器周围热损失，加入预热器中的热量为

$$q_p = \frac{Q_v}{W} = l(I_1 - I_0) \quad (8-34)$$

q_p 的单位为 kJ/kg 水分。

二、干燥器的热量衡算 Energy Balance for Dryer

1、输入热量 The total heat energy input into the dryer

(1) 空气进入干燥器带入热量 l_1 。

(2) 湿物料进入干燥器带入热量 $q'M$ 进入干燥器的湿物料量为 $G_1 = G_2 + W$ ，其中 G_2 带入的热量为 $\frac{G_2}{W} C_M \theta_1$ ，被蒸发水分 W 带入

的热量为 $\frac{W}{W} C_M \theta_1$ ，则

$$q'_M = \frac{G_2}{W} C_M \theta_1 + C_w \theta_1$$

式中

q'_M —湿物料带入的热量，kJ/kg 水分；

θ_1 —进入干燥器的湿物料温度，；

C_M —干燥后的物料的比热，kJ/kg，可用下式计算

$$C_M = (1 - w_2) C_5 + w_2 C_w$$

C_5 —绝对干物料的比热，kJ/kg；

(3) 干燥器内补充加入的热量 q_d ，kJ/kg 水分。

2、输出热量 The heat energy output from dryer

(1) 干燥后的物料 G_2 带出的热量为 $\frac{G_2}{W} C_M \theta_2$ ， θ_2 为物料出干燥的温度，。

(2) 废空气出干燥带走的热量为 I_{12} ， I_2 为空气出干燥器的焓。

(3) 干燥器的周围热损失 q_1 。

在稳定干燥过程中，干燥器的热量衡算式为

$$q_d + U_1 \frac{G_2}{W} C_M \theta + C_w \theta_1 = \frac{G_2}{W} C_M \theta_2 + U_2 + q_l \quad (8-36)$$

$$q_d = l(I_2 - I_1) + \frac{G_2}{W} C_M (\theta_2 - \theta_1) + q_l - C_w \theta_1$$

将式(8-32)代入式(8-36)中，得

$$\frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = q_d - \frac{G_2}{W} C_M (\theta_2 - \theta_1) - q_l + C_w \theta_2 \quad (8-37)$$

若此式等号右边各项及 H_1 、 I_1 、 t_2 为已知时，此式与式(8-14)，即

$$I_2 = (1.01 + 1.88H_2)t_2 + 2492H_2 \quad (8-14)$$

联立解，可求出空气出干燥器时的状态参数 H_2 与 I_2 。

H_2 与 I_2 也可以从湿空气的 I - H 图上求得。如图 8-11 所示，若进预热器的冷空气的干、湿球温度 t_0 与 t_w 为已知，则其状态点为图中 A 点。若要求空气在预热器中由 t_0 加到 t_w ，则空气出预热器的状态点为图中 B 点。由式(8-37)可知，若等号右边各项为已知，各项之和用 q 表示，即

$$\sum q = q_d - \frac{G_2}{W} C_M (\theta_2 - \theta_1) - q_l + C_w \theta_2$$

$$\text{则有 } \frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = \sum q$$

式中 I_1 、 H_1 与 $\sum q$ 已知，在 I - H 图上可以画出斜率为 $\sum q$ 的直线。该直线与 t_2 线相交于 C' 点， C' 即为空气出

干燥器的状态点。

当 $\sum q = 0$ 时，由上式可知 $I_2 = I_1$ ，即干燥器内的干燥过程为等焓过程，此时，由 B 点沿等焓线 I_1 线画至与 t_2 相交于 C 点，C 点即为空气出干燥器的状态点。

例 8-4 有一气流干燥器，用于干燥某晶体物料。已知干燥器的生产能力为每年 $2 \times 10^6 \text{kg}$ 晶体产品，年工作日为 300 日，每日三班连续生产。物料湿基含水量 $W_1 = 20\%$ ， $W_2 = 2\%$ ，晶体比热 $C_s = 1.25 \text{J/kg}$

物料在干燥器，内由 15°C 升至 45°C 。冷空气的温度为 15°C ，相对湿度为 70%，经预热器升温至 90°C 送入干燥器，若废气离开干燥器的温度为 65°C ，且预热器及干燥器中的热损失均不计，干燥器亦不补充加热。

试求 (a) 水分蒸发量；

(b) 干空气用量 L

(c) 已知预热中加热蒸汽的绝对压力为 196.1kPa ，试求预热中加热蒸汽的用量。

解 (a) 水分蒸发量 W

$$\text{产品量 } G_2 = \frac{2 \times 10^6}{300 \times 24} = 278 \text{kg/h}$$

$$W = G_2 \left(\frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} \right) = 278 \times \left(\frac{0.2 - 0.02}{1 - 0.2} \right) = 62.55 \text{kg/h}$$

(b) 干空气用量 L

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{W}{H_2 - H_0}$$

在 I-H 图上由 $t_0 = 15$, $\varphi = 70\%$ 查出 $H_0 = H_1 = 0.0075 \text{ kg 水 / kg 干空气}$,

$I_0 = 35 \text{ J / kg 干空气}$;

由 $t_1 = 90$ 查得 $I_1 = 11 \text{ kJ / kg 干空气}$, 而 H_2 由下列两式联合求解

$$\frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = q_d - \frac{G_2}{W} C_M (\theta_2 - \theta_1) - q_l + C_w \theta_2$$

$$I_1 = (1.01 + 1.88H_2) t_2 + 2492H_2$$

其中 : $q_d = 0$, $q_l = 0$

$$\begin{aligned} C_M &= (1 - w_2)C_s + w_2C_w \\ &= (1 - 0.002) * 1.25 + 0.02 * 4.174 = 1.31 \text{ kJ / kg} \end{aligned}$$

$$\frac{I_2 - I_1}{H_2 - H_1} = 0 - \frac{278}{62.55} \times 1.31 \times (45 - 15) - 0 + 4.17 \times 45 = 13.1$$

$$I_2 = (1.01 + 1.88H_2) \times 65 + 2492H_2 = 65.65 + 2614.2H_2$$

联立上两式解得 $I_2 = 116.156 \text{ kJ / kg 干空气}$ 、 $H_2 = 0.01932 \text{ kg 水 / kg 干空气}$

$$L = \frac{62.55}{0.01932 - 0.0075} = 5290 \text{ kg 干空气 / h}$$

(c) 预热器中加热蒸汽用量 D

预热器中加入热量

$$Q_p = L(I_1 - I_0) = 5290 \times (116 - 35) = 4.28 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

加热蒸汽压力为 196.1kPa，蒸汽的汽化潜热 $r=2206 \text{ kg/h}$

第四节 干燥速率和干燥时间 Drying Rate and Drying Time

8—8 物料中所含水分的性质 Characteristics of moisture contained by the material

一、结合水分与非结合水分 Bound Water and Unbound Water

根据物料与水分结合力的状况，可将物料中所含水分分为结合水分 (bound water) 与非结合水分 (unbound water)。

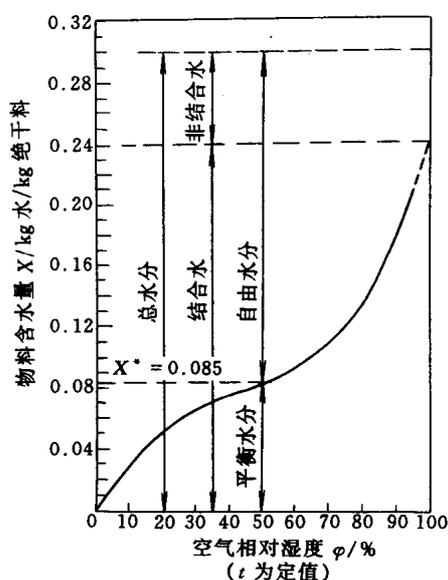
结合水分 (Bound Water) 包括物料细胞壁内的水分、物料内毛细管中的水分、及以结晶水的形态存在于固体物料之中的水分等。这种水分是藉化学力或物理化学力与物料相结合的，由于结合力强，其蒸汽压低于同温度下纯水的饱和蒸汽压，致使干燥过程的传质推动力降低，故除去结合水分较困难。

非结合水分 (Unbound Water) 包括机械地附着于固体表面的水分，如物料表面的吸附水分、较大孔隙中的水分等。物料中非结合水分与物料的结合力弱，其蒸汽压与同温度下纯水的饱和蒸汽压相同，因此，干燥过程中除去非结合水分较容易。

用实验方法直接测定某物料的结合水分与非结合水分较困难，但根据其特点，可利用平衡关系外推得到。如图 8-12 中所示为在一定温度下，由实验测定的某物料（丝）的平衡曲线（图中实线部分），现将该平衡曲线延长（图中虚线部分）与 $w=100\%$

的纵轴相交，交点以下的水分为该物料的结合水分，因其蒸汽压低于同温下纯水的饱和蒸汽压。交点以上的水分为非结合水分。

二、平衡水分与自由水分 (Equilibrium moisture and free moisture)



The Diagram above expresses both the equilibrium relationship between water content of material and that of air-water mixture and the relationship between variety of water contents.

根据物料在一定的干燥条件下，其中所含水分能否用干燥方法除去来划分，可分为平衡水分 (equilibrium water) 与自由水分 (free water)。

当一定温度 t 、相对湿度 ϕ 的未饱和的湿空气流过某湿物料

表面时，由于湿物料表面水的蒸汽压大于空气中水蒸汽分压，则湿物料的水分向空气中汽化，直到物料表面水的蒸汽压与空气中水蒸汽分压相等时为止，即物料中的水分与该空气中水蒸汽达到平衡状态，此时物料所含水分称为该空气条件（ t 、 φ ）下物料的平衡水分。平衡水分随物料的种类及空气的状态（ t ， φ ）不同而异，图 8-13 示出，在同一 t 下的某些物料的平衡曲线。对于同一物料，当空气温度一定，改变其 φ 值，可得不同的平衡水分曲线所示。由物料的含水量 X ，即（ $X-X^*$ ）称为自由水分。

8-9 固体物料的干燥机理 Drying Mechanism of Solid material

当固体物料的含水量超过其平衡含水量时与干燥介质接触，虽则在开始时水分均匀地分布在物料中，但由于湿物料表面水分的汽化，遂形成物料内部与表面的湿度差，由于物料内部的水分借扩散作用向表面移动而在表面汽化，汽化的水分被介质及时带走，从而达到使固体物料干燥的目的。

水分自内部向表面扩散与表面汽化是同时进行着，但在干燥过程不同的时间，干燥机理并不同。其原因在于受到物料的结构、性质、湿度等条件和干燥介质的影响。实际上，在干燥过程中，一些物料中水分表面汽化的速率小于内部扩散的速率，称为表面汽化控制；另一些物料中水分表面汽化的速率大于内部扩散的速率，称为内部扩散控制。而内部扩散控制与表面汽化控制两者速

率相等的情况则很少。

一、表面汽化控制 Surface vaporize-controlled drying

某些物料，如纸、皮革等，其内部的水分能迅速地达到物料的表面，因此水分去除为物料表面上水分的汽化速率所限制。这种情况，只要物料表面保持足够潮湿，物料表面的温度可取为空气的湿球温度。因此，空气与物料表面间的温度为一定值。水汽化的速率可依水面汽化计算之，此类干燥操作，完全由周围干燥介质的情况而定。

二、内部扩散控制 Internal Diffusion-controlled Drying

某些物料如木材、陶土等，其内部扩散速率较表面汽化速率为小，当表面干燥后，内部水分不能及时扩散到表面，因之蒸发表面向物体内部移动，这种情况，必须设法增加内部的扩散速率，或降低表面的汽化速率。例如，在木材的干燥中，常须采用湿空气为干燥介质，即系基于此理，否则木材表面干燥而内部潮湿，将引起因表面干燥收缩而发生拗曲的现象。

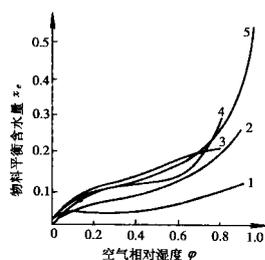


图 8-2 某些食品的吸湿等温线
 1. 纤维素 (20°C) 2. 蛋白质 (25°C)
 3. 马铃薯淀粉 (25°C) 4. 牛肉 (20°C)
 5. 马铃薯 (20°C)

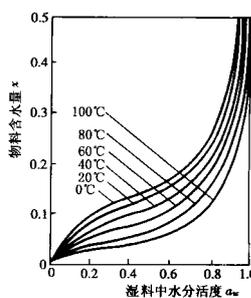


图 8-3 马铃薯的吸湿等温线

8-10 恒定干燥条件下的干燥速率 Rate Of Drying Under The Constant Drying Conditions

恒定干燥条件，即干燥介质的温度、湿度、流速及与物料接触方式，在整个干燥过程中均保持恒定。

一、干燥速率 Rate of Drying

干燥速率 (rate of drying) 为单位时间内在单位干燥面积上汽化的水分量 W ，如用微分式表示则为

$$u = \frac{dW}{A \cdot d\tau}$$

式中 u —干燥速率, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$;

W —汽化水分量, kg

A —干燥面积, m^2

τ —干燥所需时间, h

而 $dW = -G_c \cdot dX$

故式 (7 - 3 8) 可写成

$$u = \frac{dW}{A \cdot d\tau} = -\frac{G_c \cdot dX}{A \cdot d\tau} \quad (8-39)$$

式中 G_c —湿物料中绝对干料的量, kg

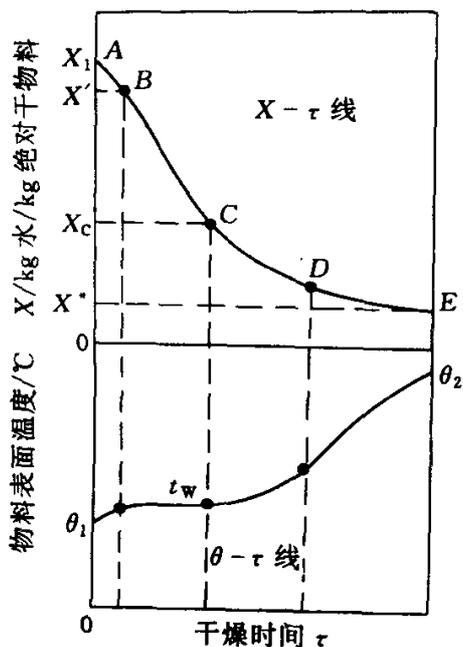
X —湿物料中干基的含水量, kg 水 /kg 干物料

式(8-39)中的负号表示物料含水随着干燥时间的增加而减少

二、干燥曲线与干燥速率曲线 Drying Curves and Drying Rate Curve

干燥过程的计算内容包括确定干燥操作条件,干燥时间及干燥器尺寸,为此,须求出干燥过程的干燥速率。但由于干燥机理及过程皆很复杂,直至目前研究得尚不够充分,所以干燥速率的数据多取自实验测定值。为了简化影响因素,测定干燥速率的实验是在恒定条件下进行。如用大量的空气干燥少量的湿物料时可以认为接近于恒定干燥情况。

下图所示为干燥过程中物料含水量 X 与干燥时间 t 、物料表面温度 的关系曲线,此曲线称为干燥曲线。



(A)

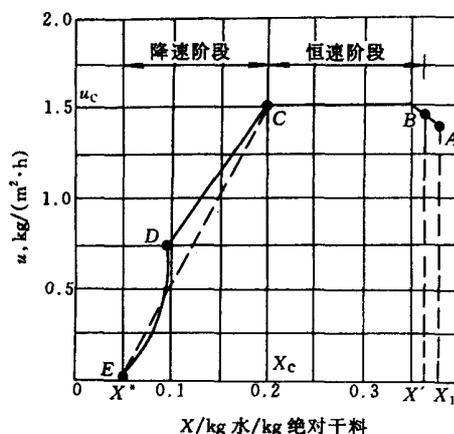


图 7-12 恒定干燥条件下的干燥速率曲线

(B)

图 (A) 所示为物料干燥 u 与物料含水量 X 关系曲线，称为干燥速率曲线。

由图 (B) 中可见，干燥过程分为恒速干燥和降速干燥两个阶段。

1. 恒速干燥阶段 (Constant Rate Period), 此阶段的干燥速率如图 8-15 中 BC 段所示。这一阶段中, 物料表面充满着非结合水分, 其性质与液态纯水相同。在恒定干燥条件下, 物料的干燥速率保持恒定, 其值不随物料含水量多少而变。

在恒定干燥阶段中, 由于物料内部水分扩散速率大于表面水分汽化速率, 故属于表面汽化控制阶段。空气传给物料的热量等

于水分汽化所需的热量。物料表面的温度始终保持为空气的湿球温度（不计辐射传热量），这阶段干燥速率的大小，主要取决于空气的性质，而与湿物料的性质关系很小。

图中 AB 段为物料预热段，此段所需时间很短，干燥计算中往往忽略不计。

2. 降速干燥阶段（Falling-Rate Drying Period）如图所示，干燥速率曲线的转折点（C 点）称为临界点，该点的干燥速率 U_c 。仍等于等速阶段的干燥速率，与该点对应的物料含水量，称为临界 X_c 。当物料的含水量降到临界含水量以下时，物料的干燥速率亦逐渐降低。

图中所示 CD 段为第一降速阶段（The First Falling-rate Drying Period），这是因为物料内部水分扩散到表面的速率已小于表面水分在湿球温度下的汽化速率，这时物料表面不能维持全面湿润而形成“干区”，由于实际汽化面积减小，从而以物料全部外表面积计算的干燥速率下降。

图中 DE 段称为第二降速阶段（The Second Falling-rate Drying Period），由于水分的汽化面随着干燥过程的进行逐渐向物料内部移动，从而使热、质传递途径加长，阻力增大，造成干燥速率下降。到达 E 点后，物料的含水量已降到平衡含水量 X^* （即平衡水分），再继续干燥亦不可能降低物料的含水量。

降速干燥阶段的干燥速率主要决定于物料本身的结构、形状和大小等。而与空气的性质关系很小。这时空气传给湿物料的热量大于水分汽化所需的热量，故物料表面的温度不断上升，而最后接近于空气的温度。

综上所述，当物料中的含水量大于临界含水量 X_c 时，属于表面汽化控制阶段，亦即等速干燥阶段；而当物料含水量小于临界含水量 X_c 时，属于内部扩散控制阶段，即降速阶段。而当达到平衡含水量 X^* 时，则干燥速率为零。实际上，在工业生产中，物料不会被干燥到平衡含水量，而是在临界含水量和平衡含水量之间，这需视产品要求和经济核算而定。

8-11 恒定干燥条件下干燥时间的计算 The Calculation of Drying Time Under the Constant Drying Conditions

在恒定干燥情况下，物料从最初含水量 X_1 干燥至最终含水量 X_2 所需的时间，可根据在相同情况下测定的如图 8-15 所示的干燥速率曲线和式 (8-39) 求取。

一、恒速干燥阶段 The Time Required in Constant Rate Period

设恒速干燥阶段的干燥速率为 u_0 ，根据式 (8-39) 干燥速率定义，有

$$\frac{G}{W} C_M \theta$$

Separating variables take integrity on two sides of the formula

$$\int_0^{\tau_1} d\tau = -\frac{G_c}{A u_0} \int_{X_1}^{X_2} dX \qquad \tau_1 = \frac{G_c}{A \cdot u_0} (X_1 - X_0) \quad (8-40)$$

二、 降速干燥阶段 The Time Required in Falling-rate Period

在此阶段中，物料的干燥速率 u 随着物料中自由水分含量 Free Water Content ($X-X^*$) 的变化而变化，可将从实验测得的干燥速率曲线表示成如下的函数形式

$$u = -\frac{G_c \cdot dX}{A \cdot d\tau} = f(X - X^*)$$

Separating Variables it becomes:

$$d\tau = -\frac{G_c}{A} \frac{dX}{f(X - X^*)}$$

$$\int_0^{\tau_2} d\tau = -\frac{G_c}{A} \int_{(X_1-X^*)}^{(X_2-X^*)} \frac{1}{f(X - X^*)} dX \quad (8-41)$$

$$\therefore \tau_2 = -\frac{G_c}{A} \int_{(X_1-X^*)}^{(X_2-X^*)} \frac{1}{f(X - X^*)} dX$$

To finish the integrity above, the concrete form of function $f(X-X^*)$ should be known, Or the Drying rate

curve should be known.

于是，降速干燥阶段所需的干燥时间 t_2 为解式 (8-41) 时，可用图解积分法，如图 (B) 所示。令纵轴为 $1 / f(X-X^*)$ ，横轴为 $(X-X^*)$ ，其积分极限则为 (X_2-X^*) 至 (X_0-X^*) 。应指出的是，用图解积分法求干燥时间时，须具备从实验获得的该阶段的干燥速率曲线。

Simplification of Drying Curve

The curve CE can be replaced by the linear line CE.

The slope of the linear line CE can be known by the geometry relation.

Setting the equation of the linear line CE is $f(X-X^*) = K_x(X-X^*)$, the slope of the CE line K_x .

$$K_x = \frac{u_0}{X_c - X^*} \quad (8-42)$$

当缺乏物料在降速阶段的干燥速率数据时，可用近似计算处理，这种近似计算法的依据，是假定在降速阶段中干燥速率与物料中的自由水分含量 $(X-X^*)$ 成正比，即用临界点 C 与平衡水分点 E 所连结的直线 CE [图 (B) 中 CE 虚线] 代替降速干燥阶段的干燥速率曲线。

$$\begin{aligned} \tau_2 &= -\frac{G_c}{A} \int_{(X_1-X^*)}^{(X_2-X^*)} \frac{1}{f(X-X^*)} d(X-X^*) \\ &= -\frac{G_c}{A} \int_{(X_1-X^*)}^{(X_2-X^*)} \frac{1}{K_x(X-X^*)} d(X-X^*) \\ &= -\frac{G_c}{A \cdot K_x} \int_{(X_1-X^*)}^{(X_2-X^*)} \frac{1}{(X-X^*)} dX \\ \therefore \tau_2 &= \frac{G_c(X_c - X^*)}{u_0 A} \ln \frac{(X_c - X^*)}{X_2 - X^*} \quad (8-43) \end{aligned}$$

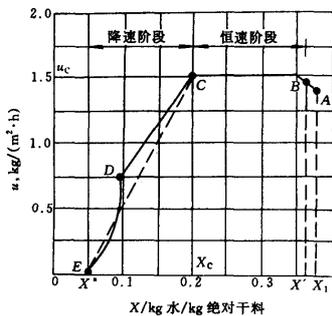
物料所需的干燥时间，即物料在干燥器内停留时间为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (8-44)$$

对于间歇操作的干燥器而言，还应考虑装卸物料所需的时间 τ' ，则每批物料干燥周期为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau' \quad (8-45)$$

例 8 - 5 有一间歇操作干燥器，有一批物料的干燥速率曲线



如图所示。若将该物料由含水量 $w_1 = 27\%$ 干燥到 $w_2 = 5\%$ (均为湿基)，湿物料的质量为 200kg，干燥表面积为 $0.025\text{m}^2/\text{kg}$ 干物料，装卸时间 $\tau' = 1\text{h}$ ，试确定每批物料的干燥周期。

解 绝对干物料量

由图中查到该物料的临界含水量 $X_c=0.20\text{kg 水/kg 干物料}$ ，平衡含水量 $X^*=0.05\text{kg 水/kg 干物料}$ ，由于 $X_2 < X_c$ ，所以干燥过程应包含恒速和降速两个阶段，各段所需的干燥时间分别计算。

解 绝对干物料量 $G_c = G_1(1-w_1) = 200 \times (1-0.27) = 146\text{kg}$

干燥总表面积 $A = 146 \times 0.025 = 3.65\text{m}^2$

将物料中的水分换算成干基含水量

$$\text{最初含水量 } X_1 = \frac{w_1}{1-w_1} = \frac{0.27}{1-0.27} = 0.37\text{kg 水/kg 干物料}$$

$$\text{最终含水量 } X_2 = \frac{w_2}{1-w_2} = \frac{0.05}{1-0.05} = 0.053\text{kg 水/kg 干物料}$$

由图 7-12 中查到该物料的临界含水量 $X_c=0.20\text{kg 水/kg 干物料}$ ，平衡含水量 $X^*=0.05\text{kg 水/kg 干物料}$ ，由于 $X_2 < X_c$ ，所以干燥过程应包括恒速和降速两个阶段，各段所需的干燥时间分别计算。

a. 恒速阶段 τ_1

由 $X_1=0.37$ 至 $X_c=0.20$ ，由图 7-12 中查得 $u_c=1.5\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

$$\tau_1 = \frac{G_c}{u_c A} (X_1 - X_c) = \frac{146}{1.5 \times 3.65} \times (0.37 - 0.20) = 4.53\text{h}$$

b. 降速阶段 τ_2

由 $X_c=0.20$ 至 $X_2=0.053$ ， $X^*=0.05$ 代入式 (7-37)，求得

$$K_x = \frac{u_c}{X_c - X^*} = \frac{1.5}{0.20 - 0.05} = 10\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$\tau_2 = \frac{G_c}{K_x A} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*} = \frac{146}{10 \times 3.65} \ln \frac{0.20 - 0.05}{0.053 - 0.05} = 15.7\text{h}$$

c. 每批物料的干燥周期 τ

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau' = 4.53 + 15.7 + 1 = 21.2\text{h}$$

第四节 干燥器 Dryer

In this passage, the commonly used dryers in industry will be discussed. The contents included are structure, working principles, advantages and disadvantages as well as selection principles.

(1) 对干燥器的基本要求 The Basic Requirements to Dryer

适应被干燥物料的多样性和不同产品规格要求

Versatility and adaptability to a variety of materials to be dried

▲ 被干燥物料的多样性：湿物料从形态上分，可能是块、颗粒、粉末、纤维状，也可能是溶液、悬浮液或膏状物料；从物性上分，由于物料内部结构以及与水分结合强度的不同，机械强度、粘结性、热敏性、有无污染、有无毒性以及减湿过程中的变形和收缩性能上的差异也很大。

▲ 产品规格要求的多样性 The Adaptability to variety standard requirements of the dried products：

各种产品对质量的要求也各不相同，例如对最终含水量的高低、粉尘及产品的回收要求、能源供应条件等等。适应于被干燥物料的外观性状是对干燥器的最基本要求。

设备的生产能力要高 High productivity

▲ 影响设备生产能力的因素 factors that influence on the capacity of the equipments：湿物料达到指定干燥程度所需的时间。

▲ 提高生产能力的方法 Methods for promoting the productivity：

应尽可能缩短降速阶段的干燥时间。例如：将物料尽可能地分散，即可以降低物料的临界含水量，使水分更多地在速度较高的恒速阶段除去，又可以提高降速阶段本身的速率，无疑这对提高干燥器的生产能力是有利的。

能耗的经济性 Economical energy consumption

前已述及，干燥是一能耗较大的过程。因此，提高干燥器的热利用率尤其重要。主要途径：

▲ 减少废气带热 (It is lower for exhaust vapor to bringing the heat out.)，为此，干燥器结构应能提供有利的气、固接触，在物料耐热允许的条件下空气的入口温度尽可能高。

▲ 在干燥器内设置加热面 这些措施均可减少干燥空气的用量，减少废气带热损失。

▲ 还有流向问题 (Parallel flow or counterflow)，在相同的进、出口温度下，逆流操作可获得较大的传热 (传质) 推动力，设备容积较小。

干燥器除满足上述条件之外，还应便于操作、控制等。

(2) 干燥器分类 Classification of Dryer

工业上应用的干燥器有数百种之多，到目前为止，还没有统一的分类方法。常用的做法是根据不同准则对干燥器进行分类。

▲ 按干燥器操作压力 (Classification according to pressure) .

 常压式干燥器

 真空式干燥器

▲ 按干燥器的操作方式 (Classification according to operational methods) .

📖 间歇操作

📖 连续操作干燥器

▲ 按加热方式 (Classification according to heating methods) .

📖 对流干燥器

📖 传导干燥器

📖 辐射干燥器

📖 介电加热干燥器

▲ 按干燥器的构造 (Classification according to structure of dryer) .

📖 喷雾干燥器

📖 流化床干燥器

📖 回转圆筒干燥器

📖 滚筒干燥器

📖 各种厢式干燥器等。

此外 ,也可按干燥介质的种类、被干燥物料的物理形态等进行分类。

8—12 工业上常用干燥器 Commonly used Dryer in Industry

(1) 厢式干燥器 (盘架式干燥器)

● 原理 (Principles) : 主要是以热风通过湿物料的表面 , 达到干燥的目的。

- **分类 (Classification):**

水平气流厢式干燥器(热风沿物料的表面通过) Horizontal air flow cabinet Dryer

穿流气流厢式干燥器 (热风垂直穿过物料) Penetrating Air Flow Cabinet Dryer

真空厢式干燥器。 Vacuum Cabinet Dryers

- **结构 (Structure):** 图所示为水平气流厢式干燥器的示意图，其结构为多层长方形浅盘叠置在框架上，湿物料在浅盘中的厚度由实验确定，通常为 10--100mm，视物料的干燥条件而定。一般浅盘的面积约为 0.3--1m²，新鲜空气由风机抽入，经加热后沿档板均匀地进入各层之间，平行流过湿物料表面。空气的流速应使物料不被气流带走，常用的流速范围为 1--10m/s，

厢式干燥器的加热方式有两种。

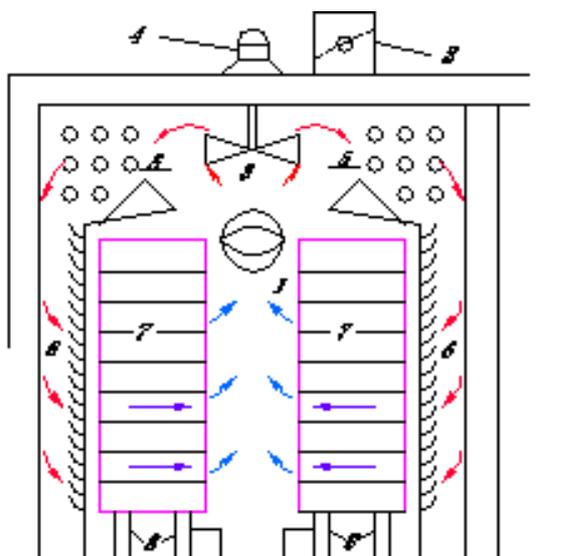


图9.6.1 厢式干燥器（小车式）
1-空气入口 2-空气出口 3-风扇 4-电动机
5-加热器 6-挡板 7-盘架 8-移动轮

在操作上也常采用废气循环法。

●**优点 (Advantages)**: 构造简单, 设备投资少, 适应性强, 物料损失小, 盘易清洗。因此对于需要经常更换产品、小批量物料, 厢式干燥器的优点十分显著。尽管新型干燥设备不断出现, 厢式干燥器在干燥工业生产中仍占有一席之地。

●**主要缺点 (Principal Disadvantages)**: 物料得不到分散, 干燥时间长; 若物料量大, 所需的设备容积也大; 工人劳动强度大, 如需要定时将物料装卸或翻动时, 粉尘飞扬, 环境污染严重; 热利用率低。此外, 产品质量不均匀。

●**应用**: 厢式干燥器多应用在小规模、多品种、干燥条件变动大, 干燥时间长的场合。

(2) 洞道式干燥器 Tunnel Dryer

• 结构 (Structure)

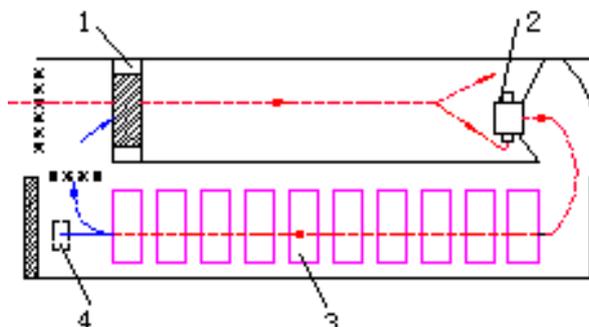


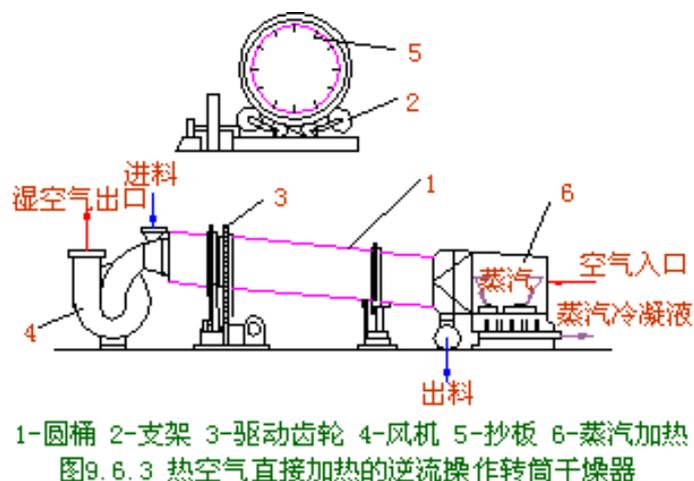
图9.6.2 洞道式干燥器
1-加热器 2-风扇 3-装料车 4-排气口

如图 9.6.2 所示,干燥器为一较长的通道,被干燥物料放置在小车内、运输带上、架子上或自由地堆置在运输设备上,沿通道向前移动,并一次通过通道。被干燥物料的加料和卸料在干燥室两端进行。空气连续地在洞道内被加热并强制地流过物料,流程可安排成并流、逆流或空气从两端进中间出。

•特点 (Advantages): 洞道式干燥器可进行连续或半连续操作。其制造和操作都比较简单,能量的消耗也不大,适用于具有一定形状的比较大的物料,如皮革、木材、陶瓷等的干燥。

(3) 转筒式干燥器 (回转式干燥器) (Rotary Drum Dryer)

• 结构:



如图 9.6.3 所示, 湿物料从转筒较高的一端加入, 热空气由较低端进入, 在干燥器内与物料进行逆流接触。

- 优点 (): 生产能力大, 操作稳定可靠, 对不同物料的适应性强, 操作弹性大, 机械化程度较高。

- 缺点 (): 设备笨重, 一次性投资大; 结构复杂, 传动部分需经常维修; 安装、拆卸困难; 物料在干燥器内停留时间长, 且物料颗粒之间的停留时间差异较大, 故不适合于对温度有严格要求的物料。

- 应用 (): 主要用于处理散粒状物料, 但如返混适当数量的干料亦可处理含水量很高的物料或膏糊状物料, 也可以在用干料做底料的情况下干燥液态物料, 即将液料喷洒在抛洒起来的干料上面。

(4) 气流式干燥器 Air Dryer

●结构：

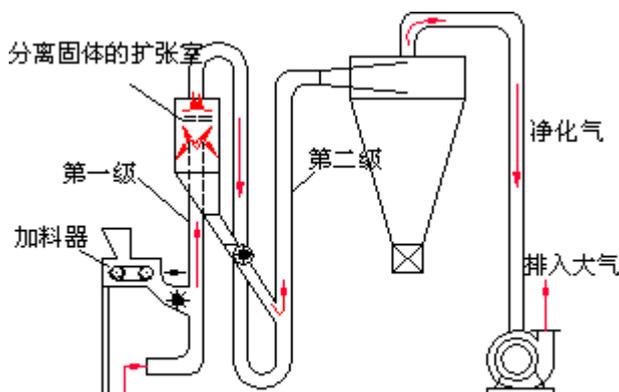


图 两段式气流干燥器

气流干燥装置主要由空气加热器、加料器、干燥管、旋风分离器和风机等设备组成。其主要设备是直立圆筒形的干燥管，其长度一般为 10--20m，热空气（或烟道气）进入干燥管底部，将加料器连续送入的湿物料吹散，并悬浮在其中。介质速度应大于湿物料最大颗粒的沉降速度，于是在干燥器内形成了一个气、固间进行传热传质的气力输送床。一般物料在干燥管中的停留时间约为 0.5--3 秒，干燥后的物料随气流进入旋风分离器，产品由下部收集，湿空气经袋式过滤器（或湿法、电除尘等）回收粉尘后排出。

- **优点：**
 - 气、固间传递表面积很大，体积传质系数很高，干燥速率大。一般体积蒸发强度可达 $0.003\text{--}0.06\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$ ；
 - 接触时间短，热效率高，气、固并流操作，可以采用高温介质，对热敏性物料的干燥尤为适宜；
 - 由于干燥伴随着气力输送，减少了产品的输送装置；
 - 气流干燥器的结构相对简单，占地面积小，运动部件少，易于维修，成本费用低。

- **缺点：**
 - 必须有高效能的粉尘收集装置，否则尾气携带的粉尘将造成很大的浪费，也会对形成对环境的污染；
 - 对有毒物质，不易采用这种干燥方法。但如果必须使用时，可利用过热蒸汽作为干燥介质；
 - 对结块、不易分散的物料，需要性能好的加料装置，有时还需附加粉碎过程。
 - 气流干燥系统的流动阻力降较大，一般为 $3000\text{--}4000\text{Pa}$ ，必须选用高压或中压通风机，动力消耗较大。

- **应用：**气流干燥器适宜于处理含非结合水及结块不严重又不怕磨损的粒状物料，尤其适宜于干燥热敏性物料或临界含水量低的细粒或粉末物料。对粘性和膏状物料，采用干料返混方法和适宜的加料装置，如螺旋加料器等，也可正常操作。

(5) 流化床干燥器 (沸腾床干燥器) Fluidized bed Dryer

●原理：流化床干燥器是流态化原理在干燥中的应用，流态化原理已在上册中叙述。在流化床干燥器中，颗粒在热气流中上下翻动，彼此碰撞和混合，气、固间进行传热、传质，以达到干燥目的

●结构：如图 9.6.5 所示，湿物料由床层的一侧加入，由另一侧导出。热气流由下方通过多孔分布板均匀地吹入床层，与固体颗粒充分接触后，由顶部导出，经旋风器回收其中夹带的粉尘后排出。流化干燥过程可间歇操作，但大多数是连续操作的。

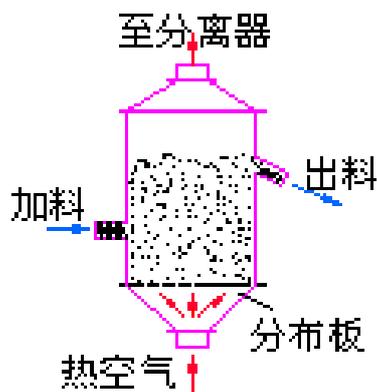


图9.6.5
单层圆筒沸腾床干燥器

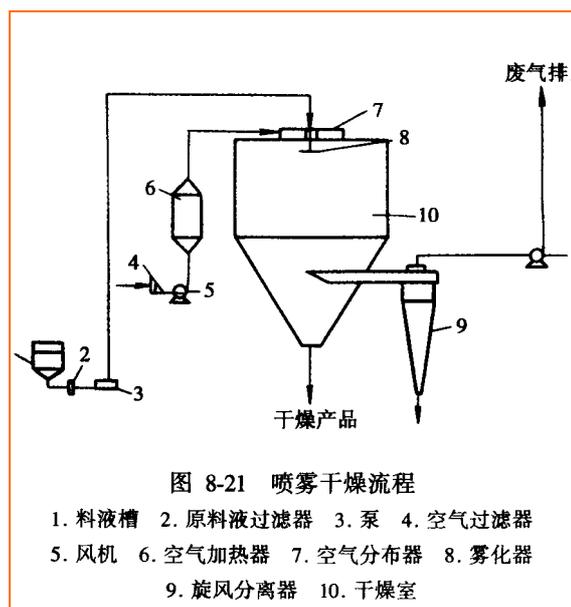
●优点：□与其它干燥器相比，传热、传质速率高，因为单位体积内的传递表面积大，颗粒间充分的搅混几乎消除了表面上静止的气膜，使两相间密切接触，传递系数大大增加；□由于传递速率高，气体离开床层时几乎等于或略高于床层温度，因而热效率高；□由于气体可迅速降温，所以与其他干燥器比，可采用更高的气体入口温度；□设备简单，无运动部件，成本费用低；□操作控制容易。

有时也可采用多层流化床或流化床的改进型式。

(6) 喷雾干燥器 Spraying Dryer

- **原理**：在喷雾干燥器中，将液态物料通过喷雾器分散成细小的液滴，在热气流中自由沉降并迅速蒸发，最后被干燥为固体颗粒与气流分离。

- **流程 (flow)**：如图 9.6.6 所示，热空气与喷雾液滴都由干燥器顶部加入，气流作螺旋形流动旋转下降，液滴在接触干燥室内壁前已完成干燥过程，大颗粒收集到干燥器底部后排出，细粉随气体进入旋风分离器分出。废气在排空前经湿法洗涤塔(或其他除尘器)以提高回收率，并防止污染。



- **优点**：

📖 干燥过程极快，适宜于处理热敏性物料；

📖 处理物料种类广泛，如溶液、悬浮液、浆状物料等皆可

📖 喷雾干燥可直接获得干燥产品，因而可省去蒸发、结晶、过滤、粉碎等工序；

📖 能得到速溶的粉末或空心细颗粒；□过程易于连续化、自动化。

- 缺点：

- ◇ 热效率低；

- ◇ 设备占地面积大、设备成本费高；

- ◇ 粉尘回收麻烦，回收设备投资大。

8—13 干燥器的选择 Selection of Dryer

干燥器的选择是一个受诸多因素影响的过程。在选择干燥器时，要考虑下列因素：The factors to be considered

(1) 被干燥物料的性质 The properties of materials to be dried

选择干燥器的最初方式是以被干燥物料的性质为基础的。选择干燥器时，首先应考虑被干燥物料的形态，物料的形态不同，处理这些物料的干燥器也不同。

(2) 湿物料的干燥特性 Drying properties of wet materials

湿物料不同，其干燥特性曲线或临界含水量也不同，所需的干燥时间可能相差悬殊，应选择不同类型的干燥器。故应针对湿物料的

- ▶ 湿分的类型(结合水、非结合水或二者兼有)Types of moisture ;
- ▶ 初始和最终湿含量 Initial moisture content and final moisture content ;
- ▶ 允许的最高干燥温度 The tiptop temperature allowed ;
- ▶ 产品的粒度分布 The distribution of granularity of the products ;
- ▶ 产品的形态、色、光泽、味等的不同而选择不同类型的干燥器。

Selecting according to the configuration, color, blare, taste of the products

(3) 处理量 Productivity

被干燥湿物料的量也是选择干燥器时需要考虑的主要问题之一。一般来说,处理量小,宜选用厢式干燥器等间歇操作的干燥器,处理量大的,连续操作的干燥器更适宜些。当然,操作方式并不是生产能力的唯一因素。

(4) 回收问题 reclaim problems

干燥过程的回收问题主要是指:

- 粉尘回收; □ 溶剂回收。

(5) 能源价格、安全操作和环境因素 The factors of energy price, safe operation and environment.

逐渐上升的能源价格、防止污染、改善工作条件和安全性方面日益严格的立法,对设计和选择工业干燥器具有直接的作用。为节约能源,在满足干燥的基本条件下,应尽可能地选择热效率高的干燥器。若排出的废气中含有污染环境的粉尘或有毒物质,应选择合适的干燥器来减少排出的废气量,或对排出的废气能加以处理。此外,在选择干燥器时,还必须考虑噪音问题。干燥器的最终选择通常将在设备价格、操作费用、产品质量、安全及便于安装等方面提出一个折衷方案。在不肯定的情况下,应作一些初步的试验以查明设计和操作数据及对特殊操作的适应性。对某些干燥器,作大型实验是建立可靠设计和操作数据的唯一方法。

干燥器选择步骤 (Steps for selecting the dryer): 进行干燥器的选择时,首先是根据湿物料的形态、干燥特性、产品的要求、处理量和以及所采用的热源为出发点,进行干燥实验,确定干燥动力学和传递特性,确定干燥设备的工艺尺寸,结合环境要求,选择出适宜的干燥器型式,若几种干燥器同时适用时,要进行成本核算及方案比较,选择其中最佳者。

8—14 干燥新技术与新设备

1. 干燥新技术

(1) 过热蒸汽干燥

该项技术是最近发展起来的新技术,它是指利用过热蒸汽直接与被干燥物料接触而除去水分的一种干燥方式。常压过热蒸汽干燥流程。

与传统的热风干燥相比,过热蒸汽干燥具有以下优点:

由于余热的回收利用,过程的热效率高,节能效果显著;

干燥产品的质量好;

传热传质效率高;

有利于环境保护、安全性好。

其主要缺点是:

干燥设备投资大;

不宜干燥热敏性物料;

在有些情况下,不能获得较低湿含量的产品。

(2) 对撞流干燥器

对撞流干燥是一种适用于干燥分散物料的先进干燥设备。它是以两股(或多股)高速流动的气流在一定的容器内迎面相撞,其中至少有一股气流携带有待干燥的颗粒物料或液滴,该湿物料即在各气流相撞

形成的对撞区内完成其干燥过程。原理图。

该干燥器具有以下突出优点：干燥强度大，特别是在干燥表面水或弱结合水物料时尤其显著；干燥品质好；设计与运行简单，大体上没有运动部件和转动件，设备紧凑，并可在干燥的同时结合进行造粒、粉碎、冷却和化学反应等项工艺操作。

(3) 静电干燥技术

将物料置于高压场中进行干燥；能耗低；温度低。特别适用于热敏性物料的干燥。

(4) 热泵干燥技术

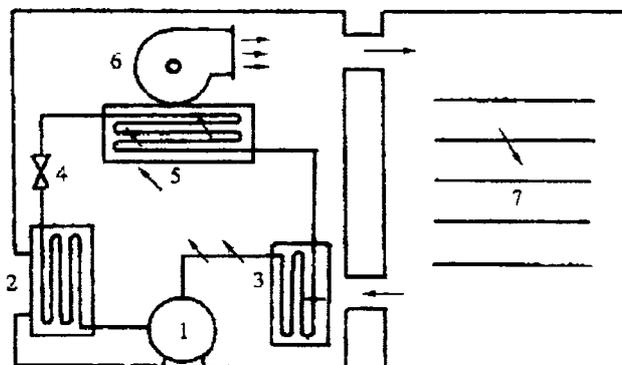


图 1 热泵干燥系统工作原理

1. 压缩机 2. 热泵蒸发器 3. 除湿蒸发器 4. 膨胀阀 5. 冷凝器 6. 风机 7. 干燥室

特点：1. 能耗低； 2. 温度低。

(5) 真空冷冻干燥技术

2. 干燥新设备

(1) 流化床喷雾造粒干燥流化床喷雾造粒干燥是将液体雾化和流态化干燥组合起来的干燥过程，流程图。该流程将造粒、混合、干燥过程在一个设备内完成，也称一步造粒法。该设备可将液态物料干燥成大颗粒状产品，流化床喷雾造粒的平均粒径为 $0.3 \sim 3.0\text{mm}$ ，大者可达 $8 \sim 20\text{mm}$ 。此干燥过程可连续操作，亦可间歇操作。

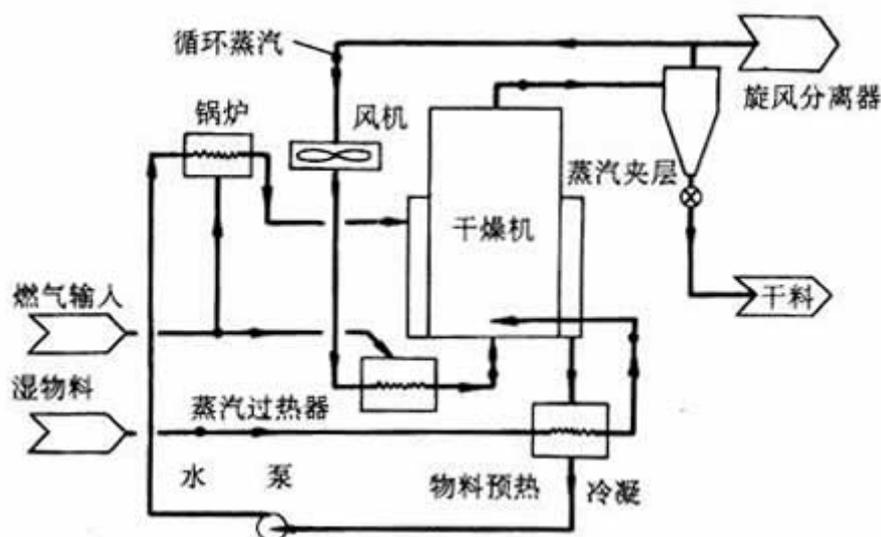
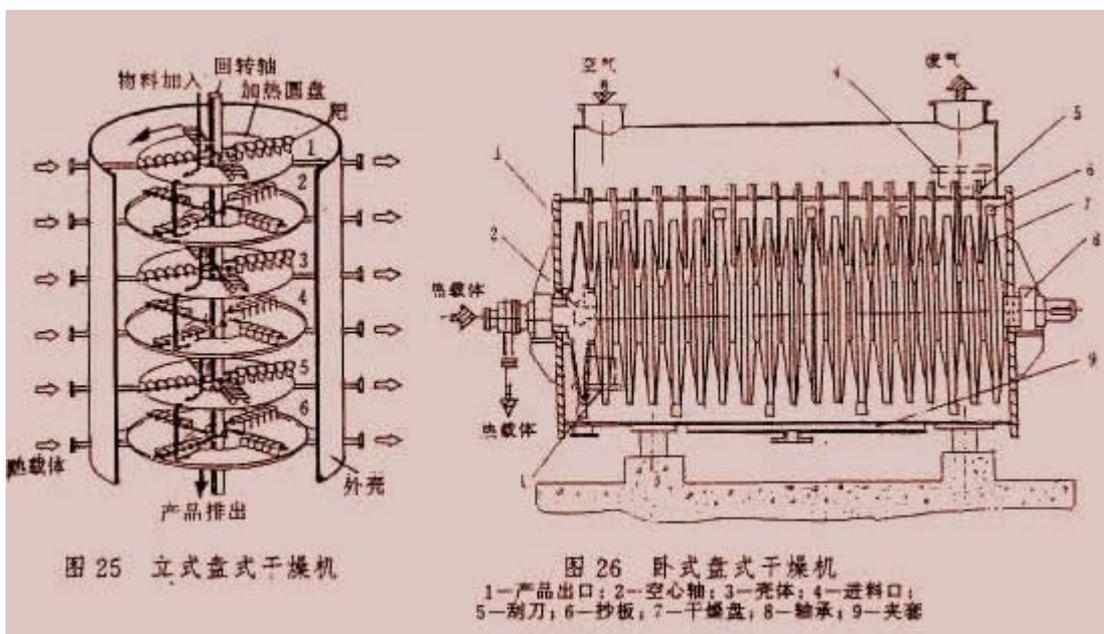


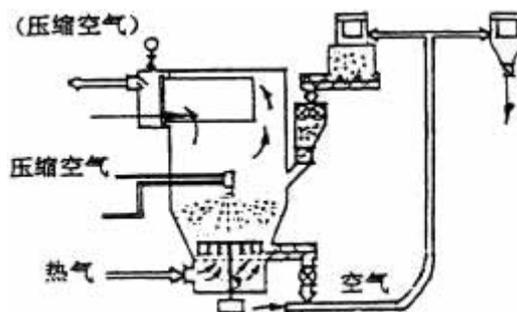
图-流化床喷雾造粒干燥流程

(3) 旋转快速（或称旋转闪蒸）干燥器旋转快速干燥器的流程。加料器中的湿物料被定量地加入到干燥器下部，与由底部进入的热风接触，在不断旋转的搅拌器的作用下，湿物料与热风充分混合，促进传热和传质，加速了物料的干燥。粗颗粒被分级器分离下来后落入干燥器底部继续干燥。该种干燥器适用于膏状物、糊状物、滤饼等物料的干燥。

(4) 圆盘干燥器 圆盘干燥器主要部件是空心加热盘，是传导加热干燥的一种型式。这种装置有两种型式。一种是立式结构，湿物料从最上一盘加入，逐步落入各盘，盘上有耙齿搅拌，干燥后物料由最后一盘排出，图示。另一种是卧式圆盘干燥器，湿物料从一端进入，从另一端排出，干燥介质逆流流动。这是一种新开发的型式，盘结构图示。夹套、空心轴、空心叶片通入水蒸气加热，是节能型干燥器之一。



流程图：



常压过热蒸汽干燥流程：