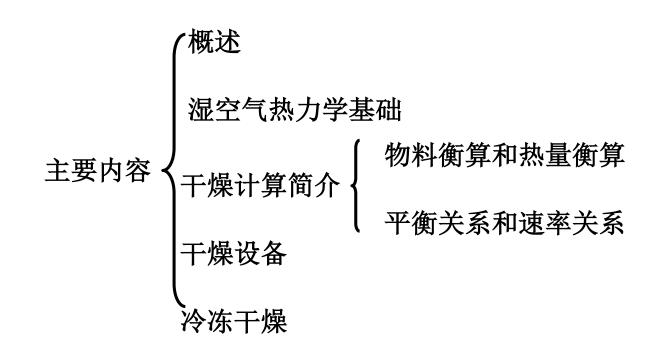




食品科学与生物工程学院

主讲教师: 李茜

目的:掌握干燥概念和原理;熟悉湿空气性质及湿焓图;了解干燥的物料衡算与热量衡算,以及干燥的平衡关系与速率关系;熟悉常见干燥设备类型;熟悉冷冻干燥原理和工作过程。



思考:

牛奶加工成奶粉过程中,水分如何脱除?

非油炸食品与油炸食品生产工艺的主要区别?

非油炸方便面,明显比油炸出来的要细和扁一些,这是为什

么?

微波炉加热食物为什么容易表面变硬?



1、干燥: 用加热的方法<mark>除去</mark>湿物料中的<mark>湿分,以获得固体产品</mark>的单元操作。

干燥和蒸发的异同点?

干燥的目的

- 1、延长食品货架期;
- 2、便于贮运;
- 3、加工工艺的需要。









常用去湿方法

(1) 机械去湿法

物料带水较多时,可先用压榨、离心过滤等机械分离方法除去大量的水。

(2)吸附去湿法

用某种干燥剂(如氯化钙、硅胶、分子筛等)通过吸附除去物料中的水分。

(3)热量去湿法

用热空气或其它高温气体为介质,使之掠过物料表面,用热能使物料中的水分汽化除去的方法称为"干燥"。

1、干燥:用加热的方法除去湿物料中的湿分,以获得固体产品的单元操作。





干燥方法

- 1、按操作压力不同:常压干燥、真空干燥(??)
- 2、按操作方式不同:间歇式干燥、连续式干燥。
- 3、按传热方式不同:对流干燥、传导干燥和辐射干燥(红外线、微波)。

食品生产中应用最多的是对流干燥。

干燥方式:按加热方式分类

》导热干燥: 热量通过与食品材料接触的加热面直接导入, 使材料中的水分汽化排除, 达到干燥的目的。

应用: 烤地瓜、烤锅盔。

》对流干燥(热风干燥):热量以对流的方式传递给湿物料,使食品材料中的水分汽化,以达到干燥目的,一般干燥介质为湿空气。

应用:沸腾、喷雾干燥器。

干燥方式:按加热方式分类

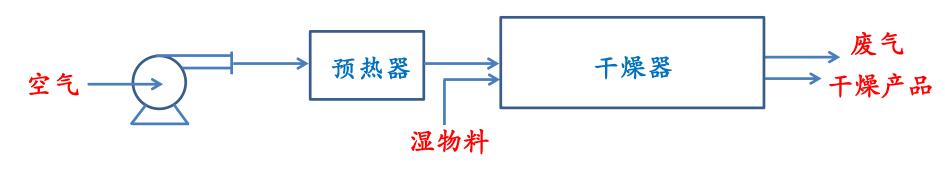
▶辐射干燥: 热量通过电磁波的形式由辐射加热器传递给食品材料表面, 再通过材料自身的热量传递, 使内部水分汽化, 达到干燥的目的。

应用: 红外线烤箱烤面包、微波干燥方便面。

微波炉加热为什么容易表面过于干燥?

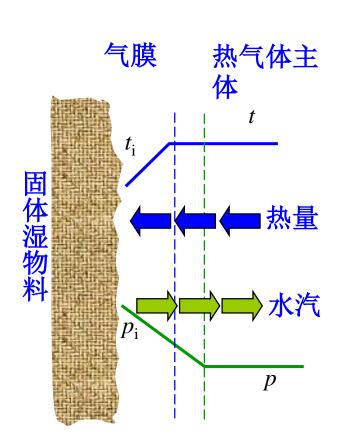
对流干燥(热风干燥)

- □ 通常使用干燥介质——热空气
- □ 对物料: 受热去湿; 对干燥介质: 冷却增湿



对流干燥示意图

对流干燥(热风干燥)



两相接触方式:气、固两相间同时进行反方向的热量与质量传递。

实质:属于传热和传质相结合的过程。

3、干燥操作既包含传热过程又包含传质过程,二者传递方向可能相同也可能不同。导热干燥一般二者方向相同;对流干燥二者方向相反。

4、干燥过程进行的条件

被干燥物料表面产生水汽(或其它蒸汽)的压力大于干燥介质中水汽(或其它蒸汽)的分压,压差越大,干燥过程进行越快。

湿空气:含有湿分的空气,是常用的干燥介质。由水分和绝干空气组成。

一、湿空气的状态参数

1、湿度 (H): 又称湿含量,湿空气中所含水蒸汽的质量 (m_v) 与绝干空气质量 (m_a) 之比。

$$H = \frac{m_v}{m_a} = \frac{n_v M_v}{n_a M_a} = \frac{18}{29} \frac{p_v}{P - p_v} = 0.622 \frac{p_v}{P - p_v} (kg / kg 绝千气)$$

式中: p_v : 水蒸汽分压---kg/m³;P: 湿空气总压---kg/m³

湿度也可以理解为单位质量 (1kg) 绝干空气所容纳的水蒸汽的质量。

2、相对湿度 (φ) : 湿空气中水蒸汽分压与同温度下水的饱和蒸汽压之比,衡量湿空气的不饱和程度 (??) ,反映湿空气的吸湿能力, φ 值越小,吸收水汽能力越强。

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \times 100\% \le 1$$

式中: p_v : 水蒸汽分压; p_s : 水蒸气饱和蒸汽压

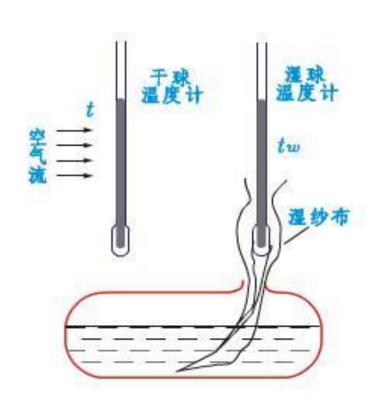
- >对于一定空气,温度升高,φ变小
- \triangleright 当 p_{ν} =0时, φ =0,表示湿空气不含水分,即为绝干空气。
- \triangleright 当 $p_v=p_s$ 时, $\varphi=1$,表示湿空气为饱和空气。
- 3、湿度与相对湿度关系:

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

4、干球温度t和湿球温度 t_w

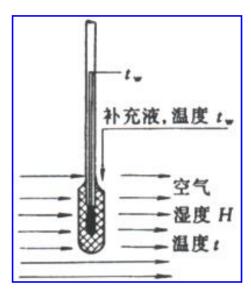
干球温度t: 在湿空气中用一般温度计测得的温度,即该空气的真实温度。

湿球温度tw:用湿纱布包扎温度计的感温部分,纱布下端浸在水中,维持 其润湿状态,就成为湿球温度计。将 湿球温度计置于湿空气中,经一段时 间稳定后,读数为湿球温度。



4、干球温度t和湿球温度 t_w

湿球温度形成原理: 因物质交换(湿度不同), 导致热量交换, 最终达到热、质的传递平衡。



湿球温度测量

不饱和空气与湿纱布

湿度差

水分汽化:向气相主体转移 (湿纱布水分蒸发--汽化热)

温度差

热量由气相主体传递给纱布中的水分

热湿平衡

$$t=t_{w}$$

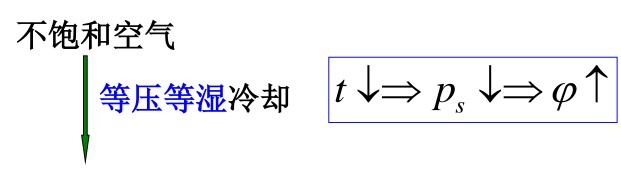
4、干球温度t和湿球温度 t_w

●说明

- ■湿球温度并不代表空气的真实温度,但它是干球温度和湿含量的函数。干湿球温度的差值反映了空气相对湿度大小。
- ●对于某一湿空气,其相对湿度越低,湿球温度值越低。对于饱和湿空气而言,其湿球温度与干球温度相等。
- 实际干燥操作中,常用干、湿温度计测量空气的湿度。

5、露点 (t_d)

将湿空气在总压和湿度保持不变的情况下冷却,当湿空气达到饱和时的温度。

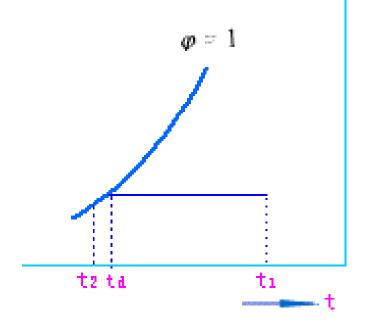


饱和空气

$$t = t_d;$$
 $H = H_{s,t_d};$
 $\varphi = 100\%$

5、露点 (t_d)

- ightharpoonup在露点时,空气的湿度为饱和湿度, $\varphi=1$ 。
- 》空气的总压一定,露点时的饱和水蒸汽压 p_{sd} 仅与空气的湿度H有关;湿度越大, t_d 越大。



5、露点 (t_d)

湿度 (H): 又称湿含量,湿空气中所含水蒸汽的质量 (m_v) 与绝干空气质量 (m_a) 之比。

$$H = \frac{m_v}{m_a} = \frac{n_v M_v}{n_a M_a} = \frac{18}{29} \frac{p_v}{P - p_v} = 0.622 \frac{p_v}{P - p_v} (kg / kg$$
绝千气)

式中: p_{ν} : 水蒸汽分压---kg/m³; P: 湿空气总压---kg/m³

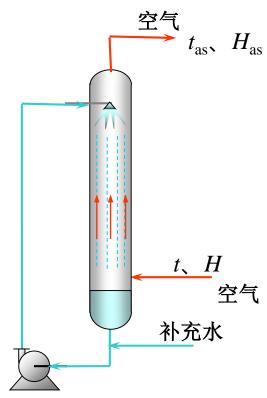
根据定义:
$$H = H_s = 0.622 \frac{p_v}{P - p_v} = 0.622 \frac{p_{sd}}{P - p_{sd}}$$

露点计算公式:
$$p_{sd} = \frac{HP}{0.622 + H}$$

求得 p_{sd} 后,查饱和水蒸气表可得 t_d 。

6、绝热饱和温度 t_{as}

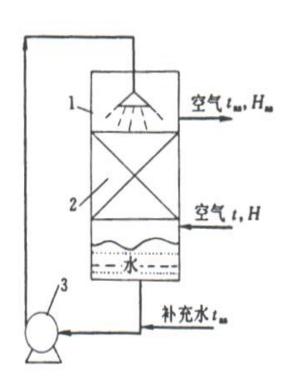
一定温度和湿度的空气在绝热饱和塔中与水成逆流接触,水作循环流动。达到稳定时,空气温度与水温相同,称为绝热饱和温度。



绝热饱和塔示意图

6、绝热饱和温度 t_{as}

绝热冷却达到的极限温度



绝热饱和冷却塔

不饱和空气与水绝热接触

湿度差

水分汽化:向气相主体传递 (汽化热为空气本身温度降低放出显 热,此热量被水汽携带至空气中)

随过程进行,沿塔高空气温度下降,湿度上升,焓维持不变

$$t = t_{as}$$

- 》在一个绝热饱和系统中,既不向外界散失热量,也不从外 界接受热量;
- ▶湿度为H的不饱和空气与大量水密切接触,由于空气不饱和,故水向空气中汽化;
- >由于在绝热条件下, 汽化热量来自空气, 使空气温度降低;
- >同时,不饱和空气逐渐被水汽饱和;
- >当空气达到饱和时,水分停止汽化,温度不再降低。

湿球温度 t_w 与绝热饱和温度 t_{as} 的关系:

(1) 共同点:

- 两者都不是湿气体本身的温度,但都和湿气体的温度t和湿度H有关。
- 对于空气和水的系统,两者在数值上近似相等。

(2) 不同点: (本质不同,热力学性质、取决于动力学因素)

- $\triangleright t_{as}$ 是大量水与空气接触达到平衡时的温度,过程中气体的温度和湿度都是变化的; t_{w} 是少量的水与大量的连续气流接触达到稳态时的温度,过程中气体的温度和湿度是不变的。
- ▶绝热饱和过程中,气、液间的传递推动力由大变小、最终趋近于零;测量湿球温度时,稳定后的气、液间的传递推动力不变。

露点饱和温度 t_d 与绝热饱和温度 t_{as} 的关系:

- 露点饱和: 在湿含量不变的条件下单靠降温达到。
- 绝热饱和:在与环境无热交换的条件下,既靠湿空气降温,又靠由降温提供的热使液态水汽化进入湿空气中增加湿含量而饱和。
- 通常: $t_{as} > t_d$

7、湿空气的比热容 (c_H) : 将湿空气中1 kg绝干空气及其所带的H kg水蒸气的温度升高1^{\mathbb{C}}所需吸收的热量。

$$c_H = c_a + c_v H$$

干空气和水蒸气在温度0~120℃范围内的平均定压比热容分别约为1.01和1.93 kJ/(kg·K)

$$\therefore c_H = 1.01 + 1.93H (kJ/kg$$
绝千气·K)

8、湿比体积(湿比容, ν_H): 含1 kg绝干空气的湿空气所占的体积,为单位质量绝干空气体积和相应的水气体积之和。

$$v_H = (\frac{1}{29} + \frac{H}{18}) \times 22.4 \times \frac{273 + t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$

=
$$(0.772 + 1.244H) \times \frac{273 + t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P} (m^3 / kg$$
 绝千空气)

式中: t: 湿空气温度; P: 湿空气压强

空气占据空间吗?标准状况下1mol气体的体积为?

9、湿空气的焓 (I): 是指含1 kg干空气的焓和相应水蒸汽 (H kg) 的焓之和。应用时,以 0° ℃时干空气和液态水的焓值为零作为计算起点。

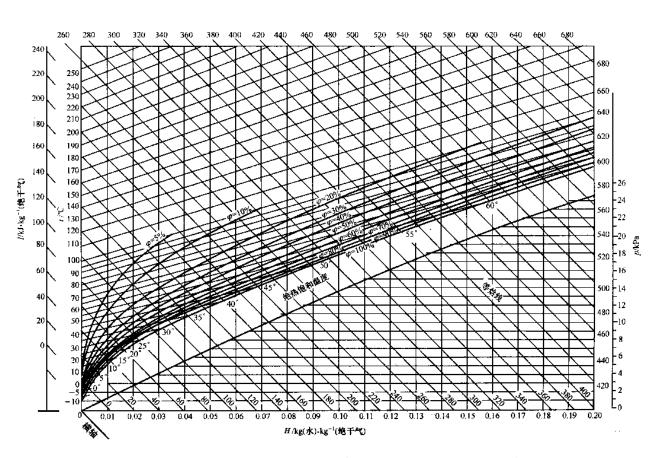
$$I = c_a t + (Lv_0 + tc_v)$$
 $H = 1.0t + (2500 + 1.93t)H(kJ/kg$ 绝干气)
或 $I = (1.0 + 1.93H)t + 2500H$

式中: t: 湿空气温度

二、湿空气的焓湿图及使用方法

1、湿空气的焓湿图

在湿数个只气参定态一空中是要的数湿。总的只立定个也气压各有的湿独就的下参两;空下参两;空立确状;空立确状

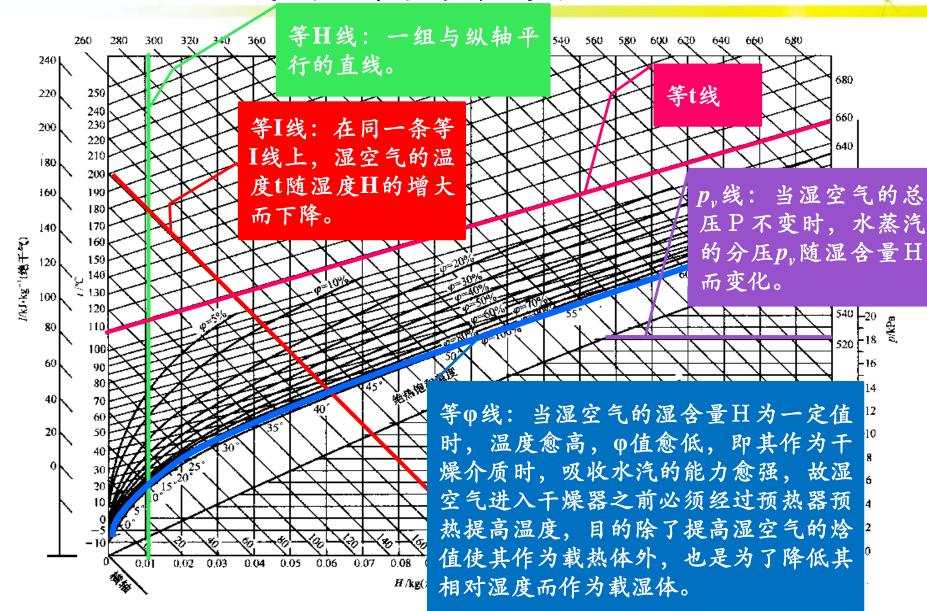


湿空气的焓湿图 (P=101.325kPa)

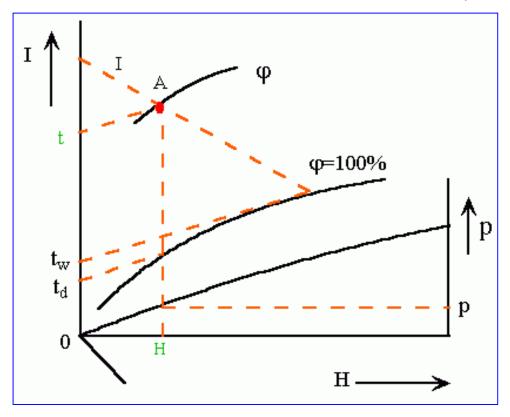
- 二、湿空气的焓湿图及使用方法
- 1、湿空气的焓湿图

由5种线群组成:

- ① 等湿线(等H 线): $0\sim0.2 \text{ kg/kg}$ (绝干气);
- ② 等焓线(等I线): 0~680 kJ/kg(绝干气);
- ③ 等温线(等t线): 0~250℃;
- ④ 等相对湿度线(等 φ 线): 5% ~100%;
- ⑤ 水蒸气分压线(p, 线): 0~26 kPa。

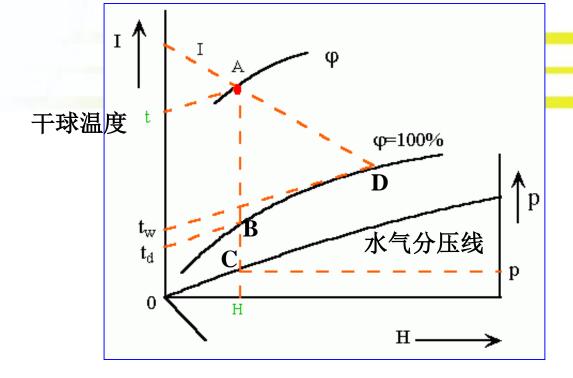


- 2、湿空气焓湿图的应用
- (1) 由I-H图上任一状态点确定湿空气的状态参数值



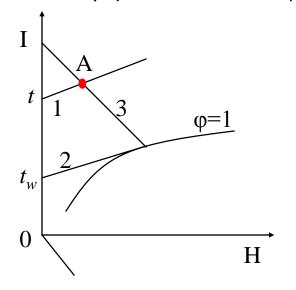
t_{as}?

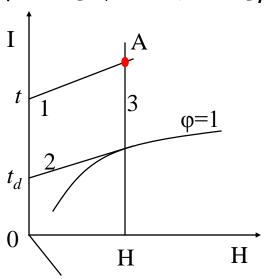
- \triangleright 不饱和湿空气: $t>t_w>t_d$
- \triangleright 饱和的湿空气: $t = t_w = t_d$

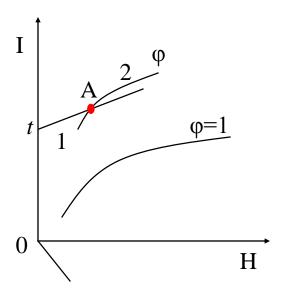


- (1)湿度H,由A点沿等湿线向下与水平辅助轴的交点H,即可读出A点的湿度值。
- (2)焓值I,通过A点作等焓线的平行线,与纵轴交于 I 点,即可读得A点的焓值。
- (3)水气分压P,由A点沿等温度线向下交水蒸气分压线于C,在图右端纵轴上读出水气分压值。
- (4)露点 t_d ,由A点沿等湿度线向下与 ϕ =100%饱和线相交于B点,再由过B点的等温线读出露点 t_d 值。
- (5)湿球温度 t_w (绝热饱和温度 t_{as}),由A点沿着等焓线与 ϕ =100%饱和线相交于D点,再由过D点的等温线读出湿球温度 t_w (即绝热饱和温度 t_{as} 值)。

- (2) 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:
 - (a) 湿空气的干球温度t和湿球温度 t_w
 - (b) 湿空气的干球温度t和露点 t_d
 - (c) 湿空气的干球温度t和相对湿度 ϕ



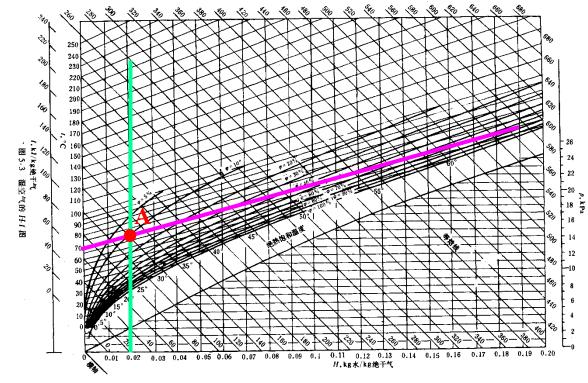




[例]已知湿空气的总压为101.3kN/m²,湿含量为H=0.02kg水/kg干空气,干球温度为 70° C。试用I-H图求解: (a)相对湿度 φ ; (b) 热焓I; (c)露点 t_d ; (d)湿球温度 t_w ; (e)水蒸汽分压 p_v 。

解:由已知条件: $P=101.3kN/m^2$,H=0.02~kg水/kg干空气,t=70%,在I-H图上定出湿空气的状态点A点。

arphi=10% $I \approx 123 ext{kJ/kg}$ 千空气 $t_d \approx 24 ext{°C}$ $t_w \approx 33 ext{°C}$ $p_v = 3 ext{kPa}$



1-3 湿物料的性质

※一、物料含水量的表示方法

1、湿基含水量 (w):水分在湿物料中的质量分数

$$w = \frac{W}{G} = \frac{$$
湿物料中水分的质量
湿物料的总质量

2、干基含水量 (X): 湿物料中的水分与绝干物料的质量之比

$$X = \frac{W}{G_c} = \frac{$$
湿物料中水分的质量
湿物料中绝对干料的质量

✓二者之间的关系:
$$w = \frac{X}{1+X}$$
 $X = \frac{w}{1-w}$

注:工业上常采用湿基含水量。

二、湿物料的水分活度aw

水分活度:湿物料中水蒸汽分压与同温下纯水的饱和蒸汽压之比。对干燥速率有决定作用,是湿物料干燥的重要因素。

- $\triangleright a_w < \varphi$ 时,吸附水分,水分从空气向物料转移,水分活度提高。
- $\triangleright a_w = \varphi$ 时,等湿,达到吸湿一解湿平衡,物料中水分不再变化。

三、湿物料中水分存在形式

1、按与物料结合方式

化学结合水、物理化学结合水、机械结合水

2、按去除的难易程度

结合水分:物化结合水分及机械结合的毛细管内的水分;结合力强,难除去。

非结合水分:物料中的吸附水分和空隙中的水分;机械结合,结合力较弱,易除去。

3、按能否干燥去除分类

自由水分: 物料中能被干燥除去的那部分水分。

平衡水分:在固定空气状态下物料具有的恒定含水量;湿物料在一定空气状态下干燥的极限。

- 1) 按与物料结合方式
- 1、机械结合水:存在于食品表面和粗毛细管中,与干物质结合较松弛,以液态存在,易于蒸发,干燥主要去掉这部分水。
- 2、物理化学结合水: 指吸附水、渗透水和结构水, 其中吸附水与物料结合比较牢固, 干燥时难于除去。
- 3、化学结合水:是经过化学反应按一定比例渗于干物质分子内部,与干物质结合比较牢固,若去掉这部分水必然引起物理性质和化学性质变化,这种水不是干燥要排除的。

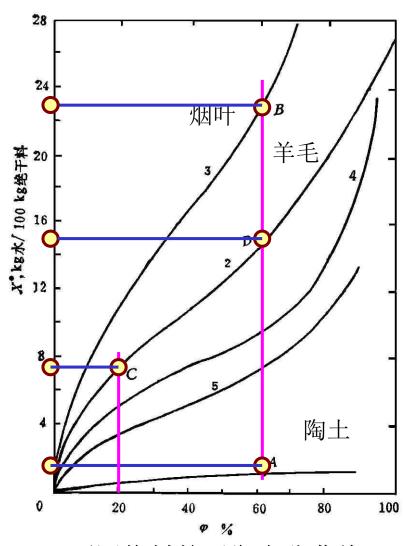
2) 按去除的难易程度

- 》结合水分:结合水分主要是物化结合的水分及机械结合中 毛细管水分,结合力强,水分活度小于1。其蒸汽压低于同 温度下纯水的饱和蒸汽压,故除去结合水分较困难。
- 》非结合水分:非结合水分是指结合力极弱的水分,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。水分活度近似等于1,即这种水分所产生的蒸汽压和纯水在同温度下产生的蒸汽压相近。干燥过程中除去非结合水分较容易。

3) 按能否干燥去除分类

- 1、平衡水分:物料中的水分与一定温度t、相对湿度 φ 的不饱和湿空气达到平衡状态,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。
- 2、自由水分: 物料水分中大于平衡水分的部分,即可以用干燥方法除去的水分。

注:平衡水分与自由水分的划分除取决于物料本身的性质,还取决于干燥介质的状态。

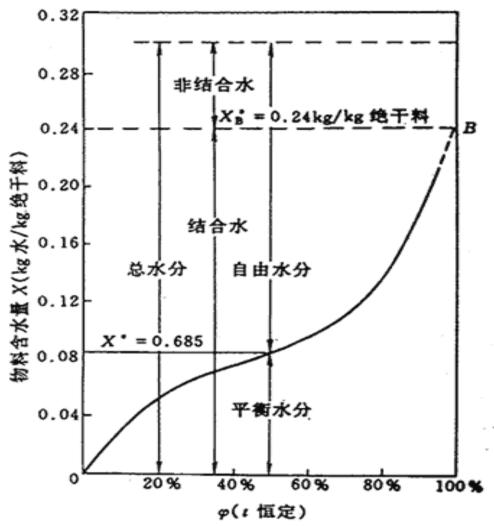


不同物料的平衡水分曲线

当空气φ=62%时, 陶土的 X*≈1 kg/kg绝干料; 烟叶的 X*≈23 kg/kg绝干料。

对同一种物料,如羊毛, φ=20%时, X*≈7.3 kg/kg绝干 料(C点);而当φ=62%时, X*≈14.5 kg/kg绝干料(D点)。

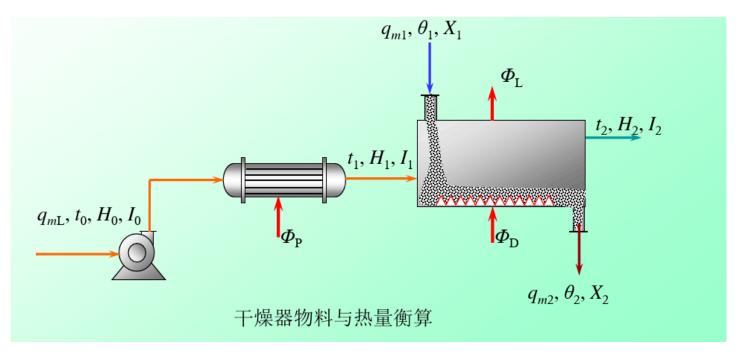
物料的总水分、平衡水分、自由水分、结合水分、非结合水分之间的关系见图示。



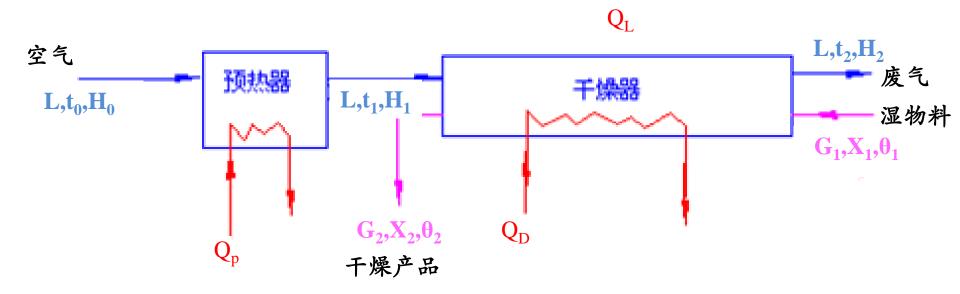
- ▶平衡水分与自由水分,结合水分与非结合水分是两种概念不同的区分方法。
- ▶ 物料的结合水分和非结合水分的划分只取决于物料本身的性质,而与干燥介质的状态无关。
- ▶平衡水分与自由水分则还取决于干燥介质的状态。当温度不变时,平衡水分随空气的相对湿度增大而增大;当相对湿度不变时,温度升高,平衡水分略有降低,但温度变化范围不大时,可认为平衡水分仅与相对湿度有关。平衡水分代表物料在一定空气状况下可以干燥的限度。
- >平衡水分一定是结合水,非结合水分一定是自由水。

- 干燥过程的物料衡算
- ① 湿物料的水分蒸发量
- ② 干燥空气用量

- 干燥过程的热量衡算
- ① 干燥系统消耗总热量
- ② 预热器的耗热量
- ③干燥器的耗热量



连续干燥器水分的物料衡算:



 $G_1 \, G_2$ ——干燥前后物料流量,kg物料/h; L——绝干气体流量,kg干气/h $H_1 \, H_2$ ——空气进出干燥器的湿度,kg水/kg干气;

 $\theta_1\theta_2$ ——物料干燥前后的温度, \mathbb{C} ; X_1X_2 ——物料进出干燥器的含水量

1、产品量和汽化水分量

若以 G_1 、 G_2 表示干燥前后湿物料的质量流量,以 G_C 表示绝干物料的质量流量,物料干燥前后的物质湿基含水量 w_1 、 w_2 ,则干燥过程中,绝干物料的量不变,即:

$$G_c = G_1(1-w_1) = G_2(1-w_2)$$

✓ 干燥产品量:
$$G_2 = G_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_2}$$

汽化水分量:
$$W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} (kg/h)$$

2、(干) 空气消耗量 L

以 G_C 表示绝干物料的质量流量,物料干燥前后的物质干基含水量 X_1 、 X_2 ,根据干燥中湿物料汽化的水分等于空气中增加的水分得:

$$W = L (H_2 - H_1) = G_c(X_1 - X_2)$$

$$L = \frac{G_c(X_1 - X_2)}{H_2 - H_1} = \frac{W}{H_2 - H_1} (kg/h)$$

L——绝干气体流量, kg干气/h;

 $H_1 H_2$ ——空气进出干燥器的湿度,kg水/kg干气。

3、单位空气用量

从湿物料中汽化1 kg水分所需的干空气量。

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{H_2 - H_1}$$

如果新鲜空气进入干燥器前先通过预热器加热,由于加热前后空气的湿度不变,以 H_0 表示进入预热器时的空气湿度,则有

✓
$$l = \frac{1}{H_2 - H_1} = \frac{1}{H_2 - H_0} (kg + 空气/kg 水分)$$

单位空气用量只与空气的最初和最终湿度有关,而与干燥过程所经历的途径无关。

4、湿空气(新鲜空气)的消耗量

$$L' = L (1 + H_0)(kg/h)$$

L——绝干空气流量, kg干气/h;

 LH_0 — 空气水分流量,kg水/h。

L——绝干气体流量, kg干气/h;

 H_0 ——空气进入干燥器的湿度,kg水/kg干气。

[例1]在一连续干燥器中,每小时处理湿物料1000kg,经干燥后物料的含水量由10%降至2%(w)。以热空气为干燥介质,初始湿度 H_1 =0.008kg水/kg绝干气,离开干燥器时湿度为 H_2 =0.05 kg水/kg绝干气,假设干燥过程中无物料损失。试求:水分蒸发量、空气消耗量、单位空气用量、湿空气的消耗量及干燥产品量。

解题要点: (1) 水分蒸发量:
$$W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} (kg/h)$$

(3) 干燥产品量:
$$G_2 = G_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_2}$$
 或 $G_2 = G_1 - W$

解: (1) 水分蒸发量:
$$W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2}$$

= $1000 \times \frac{0.1 - 0.02}{1 - 0.02}$
= $81.5 kg$ 次 / h

(2) 绝干空气消耗量

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{81.5}{0.05 - 0.008} = 1940 kg$$
 绝干气/h

原湿空气的消耗量为: $L'=L(1+H_1)=1940(1+0.008)=1960$ 湿空气/h

单位空气消耗量 (比空气用量) 为:

$$l = \frac{1}{H_2 - H_1} = \frac{1}{0.05 - 0.008} = 23.8 \text{kg}$$
绝千气/kg水

(3) 干燥产品量

方法1:
$$G_2 = G_1 \frac{1 - w_1}{1 - w_2} = 1000 \times \frac{1 - 0.1}{1 - 0.02} = 918.4 kg/h$$

方法2:
$$G_2 = G_1 - W = 1000 - 81.5 = 918.5 kg/h$$

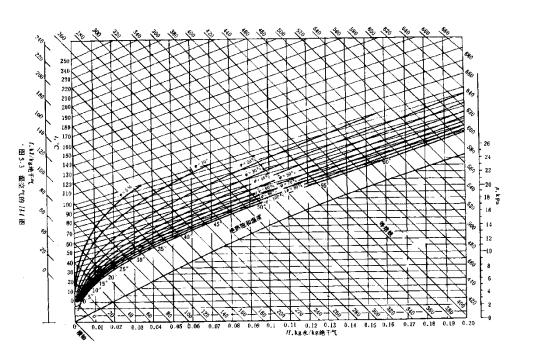
[例2]某糖厂的回转干燥器的生产能力为4030kg/h(产品),湿糖含水量为1.27%,于31℃进入干燥器,离开干燥器时的温度为36℃,含水量为0.18%,此时糖的比热为1.26kJ/kg绝干料。干燥用空气的初始状况为:干球温度20℃,湿球温度17℃,预热至97℃后进入干燥室。空气自干燥室排出时,干球温度为40℃,湿球温度为32℃,试求: (1) 蒸发的水分量; (2) 新鲜空气用量。

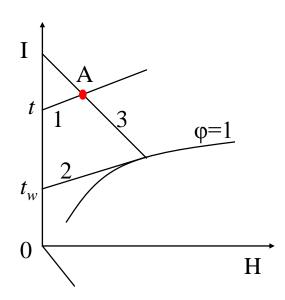
解题要点: 新鲜空气用量:
$$L'=L (1+H_0)(kg/h)$$
?

t₀=20℃, t_{w0}=17℃ 查I-H图得H₀

t₂=40℃, t_{w2}=32℃时 查I-H图得H₂

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





解: (1) 水分蒸发量:
$$W = G_2 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1}$$

= $4030 \times \frac{0.0127 - 0.0018}{1 - 0.0127}$
= $44.6kg$ 7 k / h

(2) 新鲜空气用量: 首先计算绝干空气消耗量

由图查得:

$$W = L (H_2 - H_1) = G_c(X_1 - X_2)$$

当 t_0 =20°C, t_{w0} =17°C时, H_0 =0.011kg水/kg绝干物料 当 t_2 =40°C, t_{w2} =32°C时, H_2 =0.0265kg水/kg绝干物料 绝干空气消耗量为:

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{44.6}{0.0265 - 0.011} = 2877.4 \text{kg}$$
 绝千气/h

新鲜空气消耗量为:

$$L'=L(1+H_0)=2877.4(1+0.011)=2909$$
新鲜空气 h

一、物料中水分汽化的过程

▶表面汽化控制

湿物料内部的水分能够迅速到达物料表面(即内部扩散速率远大于表面汽化速率),使物料表面保持充分的润湿状态。

对流干燥而言,要强化该阶段的干燥速率,可提高空气的温度,降低相对湿度,改善空气与物料的接触和流动情况,均有助于提高干燥速率。

▶内部扩散控制

湿物料内部的水分无法及时到达物料表面(即内部扩散速率远小于表面汽化速率),汽化表面不断向内部转移,物料表面温度不断升高。

要强化该阶段的干燥速率,必须从改善内部扩散着手,如:减少物料厚度、使物料堆积疏松、搅拌或翻动物料、采用微波干燥等。

联想:粮食晾晒后期要不断翻动。

水分的内部扩散和表面汽化是同时进行的,在干燥过程的不同阶段其速率不同,从而控制干燥速率的机理也不相同,速率较慢的是控制干燥速率的关键。

理论联系实际:微波炉加热食物为什么容易表面变硬?

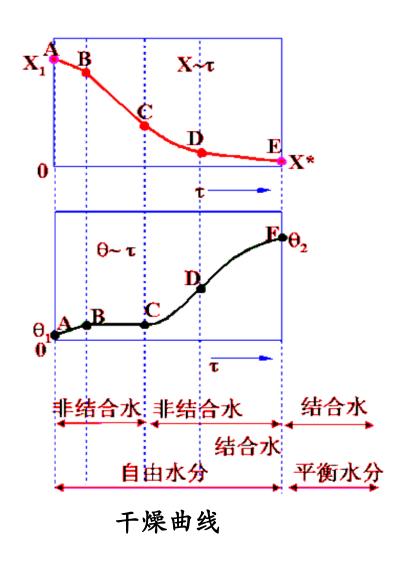
- 二、影响干燥速率的因素 (对对流干燥而言)
- 1、湿物料的性质与形状
- 2、物料的湿度
- 3、物料的温度
- 4、干燥介质的状态
- 5、干燥介质的流速
- 6、介质与物料的接触状况

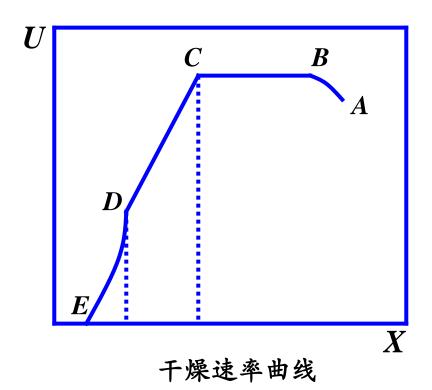
- 三、干燥曲线与干燥速率曲线
- 1、干燥速率:单位时间内、单位面积上被干燥物料所能 汽化的水分。

$$U = \frac{dW}{Adt}$$

2、干燥特性曲线:干燥过程中水分X随干燥时间t变化的曲线、物料表面温度 θ 随时间t变化的曲线及干燥速率u随时间t变化的曲线。

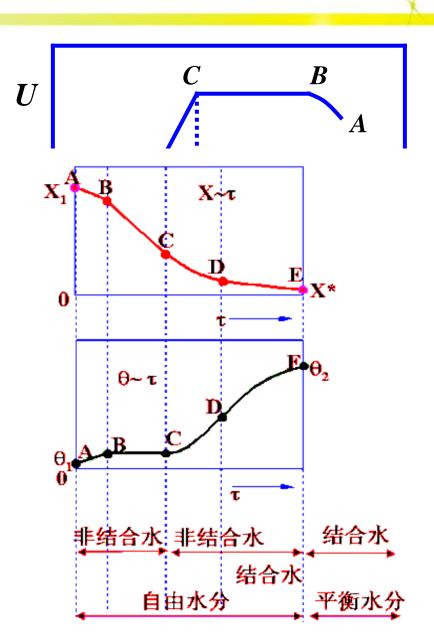
3、干燥速率曲线: 物料干燥速率u与物料含水量X的关系曲线。





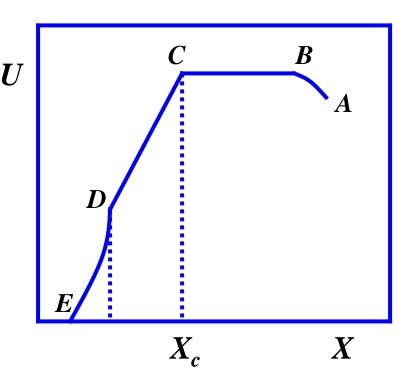
- 4、干燥过程:恒速干燥和降速干燥两个阶段。
 - (1) 恒速干燥阶段:
 - >除去的水分是非结合水;
 - >属于表面汽化控制阶段;
 - >物料表面的温度始终保持为空气的湿球温度;
 - ▶干燥速率维持不变,其大小主要取决于空气的性质, 而与湿物料的性质关系很小。

- (2) 降速干燥阶段
- > 为内部扩散控制
- > 干燥速率逐渐下降
- > 物料温度逐渐上升
- > 物料水分曲线趋于平缓



(2) 降速干燥阶段

- ►<u>临界含水量</u>: 恒速干燥与降速干燥阶段的转折点所对应的物料含水量。
- ▶ 临界含水量: X_c越大,在相同的干燥任务下所需的干燥时间加长。临界含水量与物料的性质、厚度、干燥速率有关。
- >第一降速阶段
- >第二降速阶段



干燥速率主要决定于物料本身的结构、形状和大小等,与空气的性质关系很小。

[例3]某小组在干燥实验中测得:湿纸板 G_1 =50g, G_2 =48g,干燥时间 $\triangle t$ =130s。已知纸板的绝干量 G_c =30g,尺寸: $150\times100\times7$ mm。试求其对应的干燥速率和平均干基含水量为多少?

解: (1) $A = 2 \times (0.15 \times 0.1 + 0.15 \times 0.007 + 0.1 \times 0.007) = 0.0335 m^2$

$$U = \frac{\Delta W}{A \times \Delta t} = \frac{(50 - 48) \times 10^{-3}}{0.0335 \times 130} = 4.592 \times 10^{-4} \, kg \, / \, m^2 \cdot s$$

(2)
$$X_1 = \frac{G_1 - G_C}{G_C} = \frac{50 - 30}{30} = 0.67 kg 水 / kg 绝干料$$

$$\overline{X} = \frac{(X_1 - X_C)}{2} = \frac{0.67 + 0.6}{2} = 0.63 kg \times / kg 绝干料$$

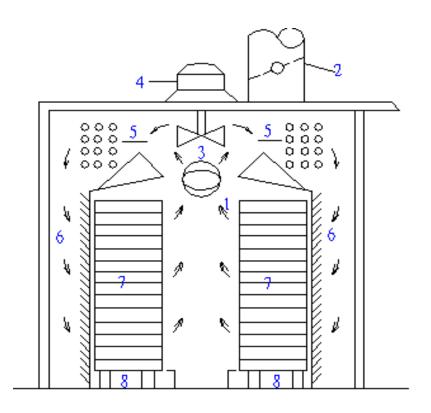
基本要求

- ①保证干燥产品的质量要求;
- ②干燥速率快、热效率高;
- ③ 操作控制方便、劳动条件好,成本低。

干燥器类型

类型	干燥器
对流干燥器	厢式干燥器
	气流干燥器
	沸腾干燥器
	转筒干燥器
	喷雾干燥器
传导干燥器	滚筒干燥器
	真空盘架式干燥器
辐射干燥器	红外线干燥器
介电加热干燥器	微波干燥器

一、箱式干燥器



厢式干燥器

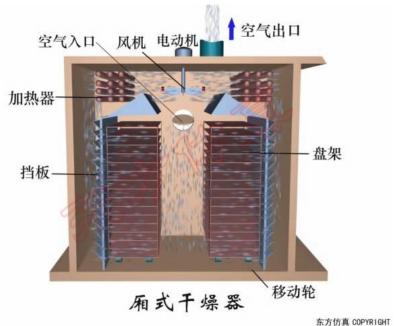
2. 空气出口; 3. 风机; 4. 电动机;
 5. 加热器; 6. 挡板; 7. 盘架; 8. 移动轮



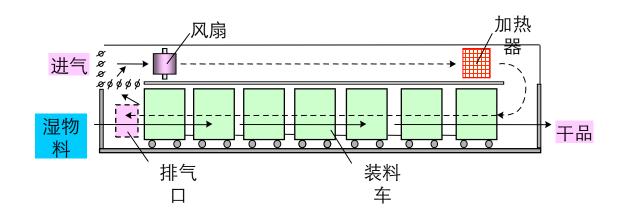


- 一、箱式干燥器
- 优点: 结构简单、制造容易、适应性强。
- 缺点: 干燥不均匀,干燥时间长,劳动强度大,操作条 件差。

>适用性:适用于干燥粒状、 片状和膏状物料,批量小、 干燥程度要求高、不允许粉 碎的脆性物料。



二、隧道式干燥器



结构与原理: 在狭长通道内设轨道,物料放置在一串小车上,小车可以连续地或间歇地在进、出通道。空气连续地在洞道内被加热并强制地流过物料表面,流程可安排成并流或逆流等。

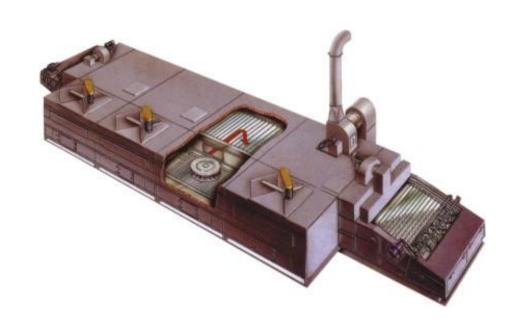


特点:简单、使用灵活,干燥器容积大,但小车在隧道内停留时间长,不适合热敏性物料。

适用性:适用于干燥块状食品,如果脯、蘑菇等。

三、带式干燥器

• 结构与原理: 干燥室中, 有一根或几根运输带 (食品行业常用金属 带),运送被干燥物料。 热空气与物料成逆流或 错流方向流动,将湿分 汽化后带出器外。



□ 对多层带,湿物料由最上层加入, 从最下部卸出。热空气预热后从 底部引入,又排气管排出。

三、带式干燥器

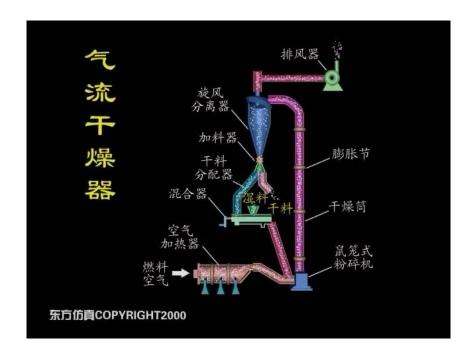
- 特点: 可连续化操作, 但干燥时间较长, 耗能高。
- 适用性:适合块状物体物料的干燥,如果蔬干制。



1-6 干燥设备 废 风机 四、气流干燥器 干燥管 旋风分离器 湿粉料 干物料 冷空气 蒸汽 热空气 冷凝水 板式换热器 气流式干燥系统

四、气流干燥器

》结构与原理:由加热系统、干燥室、加料系统、 分离回收系统组成,可利用高速的热气流使粉、粒 状的物料悬浮于其中,在 气力输送过程中进行干燥。

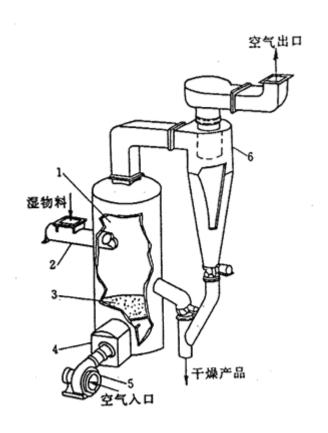


四、气流干燥器

- 优点:设备紧凑,结构简单;可以完全自动控制;对流 传热系数和传热温度差大,干燥器体积小,干燥速率快, 物料停留时间短,可在高温下干燥;热利用率高。
- 缺点:气流在系统中压降较大;干燥管长;在干燥过程中存在摩擦,易将产品磨碎;分离器的负荷大。
- 适用性:适合干燥颗粒或小块状不易黏结、不怕磨损的物料,如原粮、味精等。

五、沸腾床干燥器(流化床干燥)

• 结构与原理: 进入振动流 化床内的湿物料与热空气 在布风板上方接触,物料 颗粒悬浮于气流之中。物 料颗粒与热空气传热和传 质,达到干燥。合格的产 品由流化床的出料口排出。



1. 流化室; 2. 进料器; 3. 分布板; 4. 加热器; 5. 风机; 6. 旋风分离器

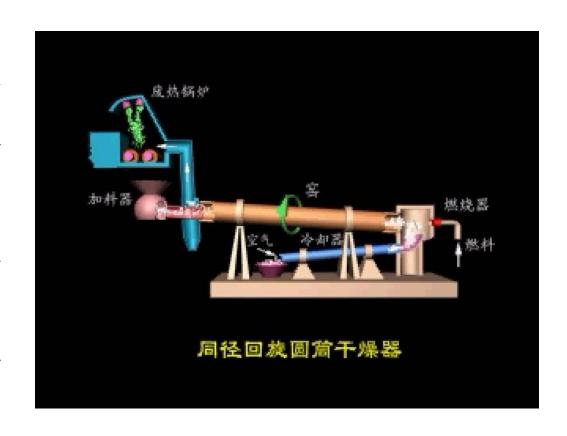
流化床式干燥器

五、沸腾床干燥器(流化床干燥)

- 优点:颗粒在干燥器内的停留时间可任意调节;气流速度小,物料与设备的磨损较轻,压降小;传热面大,物料的最终含水量低;结构简单、紧凑。
- 缺点:因颗粒在床层中高度混合,则可引起物料的短路和返混,物料在干燥器内的停留时间不均匀;操作控制复杂。
- 适用性:适合干燥颗粒状物料,如砂糖、鸡精、粮谷、 固体饮料等。

六、转筒干燥器

- 结构与原理
- 转筒:呈倾斜状,在 旋转时,借助重力的 作用使物料向低端输 送。
- 抄板:将物料抄起后 再洒下,增大干燥面 积,提高干燥速率; 同时促进物料向前运 动。

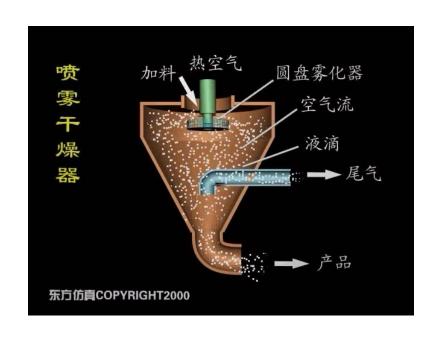


六、转筒干燥器

- 优点:处理量大,适应性强,生产能力大,操作控制方便,干燥时间可通过调节转筒的转速来控制,产品质量均匀。
- 缺点:设备笨重,热利用率低,结构复杂,占地面积大。
- 适用性: 干燥块状、大颗粒状物料,如板栗等。

七、喷雾干燥器

▶结构和原理:用雾化器将 稀料液喷成细雾滴分散于 热气流中,使水分迅速蒸 发而达到干燥的目的。

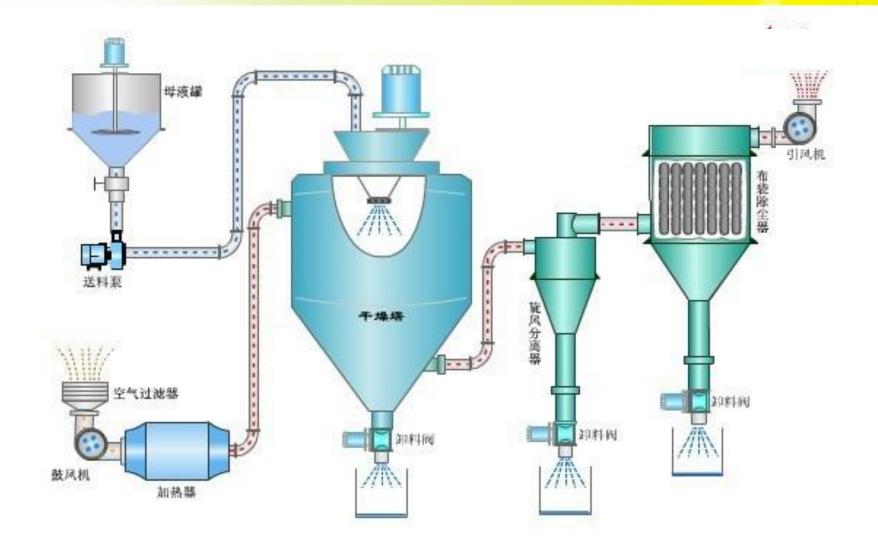


七、喷雾干燥器



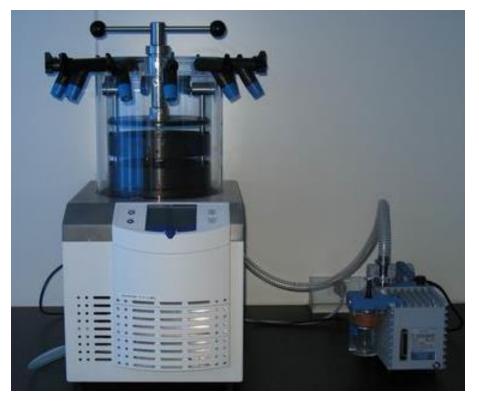


- 优点:干燥时间短,干燥温度低,适于热敏性物料;可 简化工艺流程;操作稳定,能连续、自动化生产;能满 足不同生产工艺的需要,应用广泛。
- 缺点:设备体积庞大;操作弹性较小,热利用率低、能 耗大。
- 应用性: 加工乳蛋制品、果蔬粉、糖制品、固体饮料等。



喷雾干燥器

八、真空干燥器





将含水物料冷冻到冰点以下,使水转变为冰,然后在较高真空下将冰转变为蒸汽而除去的干燥方法。物料可先在冷冻装置内冷冻,再进行干燥。

冻干食品的特点

❖优质:基本保持食品原有的色、香、味、形,维生素和蛋白质等营养物质损失少。

❖方便:食用或加工前,复水快,可直接食用或烹调。

❖不用冷藏:密封包装后,可在常温下长期贮存、运输和销售。

❖重量轻:满足宇航、旅游等人员需求。

❖成本高: 冻干食品成本是热风干燥食品的4~6倍。





干燥器选择步骤

- 1、首先根据湿物料的形态、干燥特性、产品的要求、处理量以及所采用的热源,进行干燥实验。
- 2、确定干燥动力学和传递特性,确定干燥设备的工艺尺寸。
- 3、结合环境要求,选择出适宜的干燥器型式。

本章小结

主要掌握知识点

- 1、湿空气的状态参数
- 2、湿球温度、绝热饱和温度形成原理及关系
- 3、理解焓湿图的应用
- 4、干燥过程物料衡算
- 5、湿物料性质(干基含水量、湿基含水量、水分活度)
- 6、平衡水分和自由水分、结合水分和非结合水分及关系
- 7、干燥速率及干燥速率曲线
- 8、干燥机理及干燥过程
- 9、了解干燥设备及应用

本章小结

名词解释及问答题

- 1、湿度、相对湿度
- 2、露点温度
- 3、干球温度、湿球温度、绝热饱和温度
- 4、湿物料水分活度
- 5、平衡水分、自由水分
- 6、结合水分和非结合水分
- 7、表面汽化控制、内部扩散控制
- 8、干燥速率
- 9、临界含水量
- 10、干燥机理

本章小结

主要公式及计算

1、干基含水量及湿基含水量关系
$$W = \frac{X}{1+X}$$
 $X = \frac{W}{1-W}$

2、水分蒸发量
$$W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{1 - w_1} (kg / h)$$

3、干空气消耗量
$$L = \frac{W}{H_2 - H_1} (kg + 空气/h)$$

4、单位空气用量
$$l = \frac{1}{H_2 - H_1} (kg/h)$$

5、湿空气的消耗量
$$L'=L$$
 $(1+H_0)(kg/h)$

6、干燥速率
$$U = \frac{dW}{Adt}$$

_	、填空题	
1,	相对湿度 φ : $0 \le \varphi \le 1$, φ 越, 空气吸湿的能力越强,	越
干燥		
2,	物料的干燥过程是属于和相结合的过程。	
3,	干燥操作中,不饱和湿空气经预热器后湿度,	温
度	。(不变,升高)	
4、	对于一定的湿空气,其露点温度湿球温度干	球
温度		
=	、判断题	
1,	恒速干燥阶段,所除去的水分为结合水分。()	
2,	可以根据湿空气的干球温度和湿球温度来确定湿空气的	状
态 (
3,	在一定温度下,物料中的结合水分与非结合水分的划分。	不
仅与	物料本身性质有关,且与空气状态有关。()	
4、	降速干燥阶段又称内部扩散控制阶段。()	
5、	恒速干燥阶段又称内部扩散控制阶段。()	

- 三、选择题
- 1、影响恒速干燥速率的主要因素是()。
- A. 物料的性质 B. 物料的含水量 C. 湿空气的状态
- 2、对于一定干球温度的空气,当其相对湿度愈低时,其湿球 温度()。
 - A.愈高 B. 不变 C.愈低 D.不一定,尚与其它因素有关
 - 3、当物料含水量X大于临界含水量 X_C 时,属()。
 - A.干燥速率为零 B.内部扩散控制

- C.降速干燥阶段 D.恒速干燥阶段
- 4、同一物料, 在一定的干燥速率下,物料愈厚,则临界含水 量()。
 - A. 愈低 B. 愈高 C. 不变 D. 不一定。
- 5、物料干燥时,物料中的水分在一定条件下是否能用干燥方 法除去而分为自由水分和()。
 - A. 束缚水分 B. 平衡水分 C. 化学结合水分 D. 毛细管水分

四、计算题

在一连续干燥器中干燥盐类结晶,每小时处理湿物料1000kg,经干燥后物料的含水量由40%降至5%(均为干基)。以热空气为干燥介质,初始湿度 $H_0=0.009$ kg水/kg绝干气,离开干燥器时湿度为 $H_2=0.039$ kg水/kg绝干气,假设干燥过程中无物料损失。试求:水分蒸发量、空气消耗量、干燥产品量。

会告見

