

14.1 概述

14.1.1 固体去湿方法和干燥过程

- 目的

去湿以便于贮藏、使用或进一步加工

- 物料的去湿方法

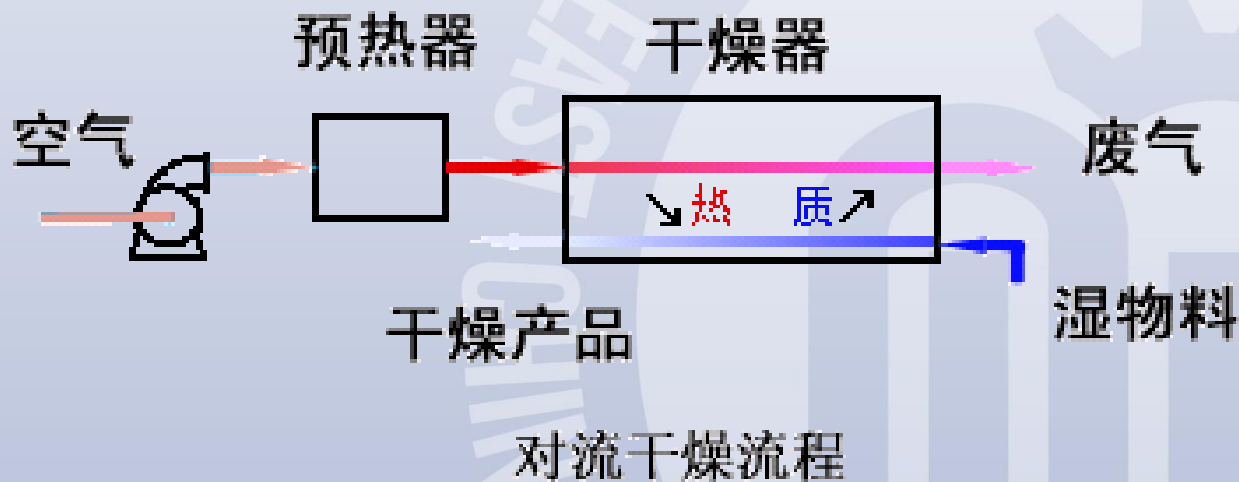
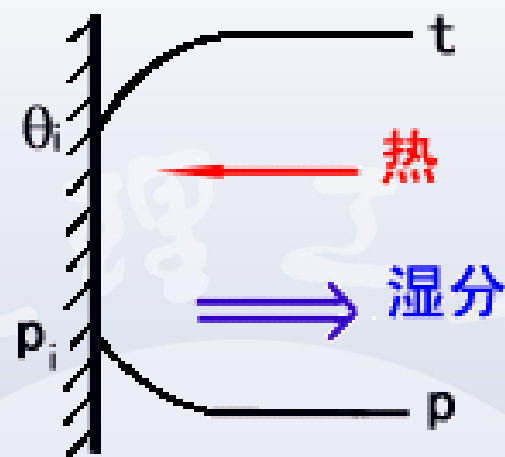
- 机械去湿：过滤，离心

- 吸附去湿：干燥剂吸附

- 供热干燥：供热汽化湿分

- 其他干燥方法：真空干燥，冷冻干燥，微波干燥

- 对流干燥过程的特点
热质同时反向传递
- 对流干燥操作的经济性



主要取决于能耗和热的利用率

热气和冷水接触：

气体温度高于水，热量从气体传递至水；

气相水的分压 $p_{\text{水汽}} < \text{水温下的饱和蒸气压} p_{\theta}$ ，

水由液体向气相蒸发；（反向传递）

热水的直接空气冷却：热量从水传递至气相，

$p_{\theta} > p_{\text{水汽}}$ 水汽化转到气相；（同向传递）

水汽化吸热、水汽冷凝放热，显然涉及传热！

过程方向判断：传质， p_{θ} 和 $p_{\text{水汽}}$ 大小

传热与传质速率

$$q = \alpha(\theta_i - t)$$

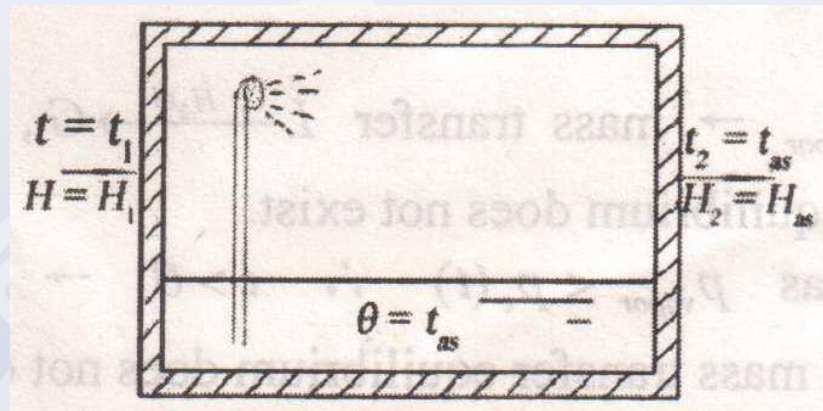
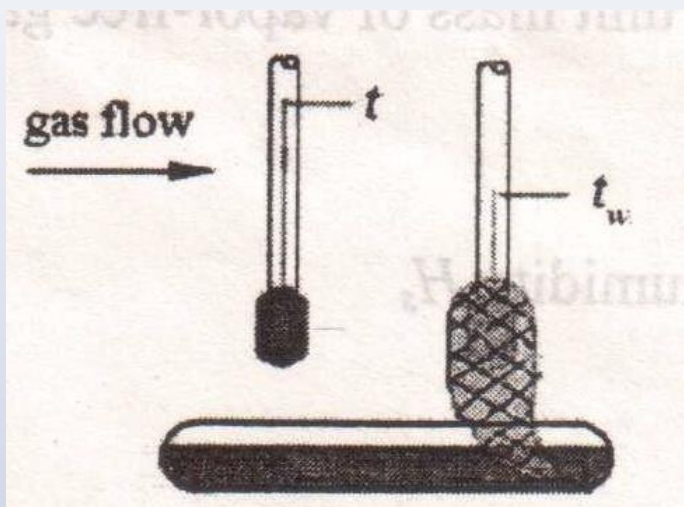
$$N_A = k_g(p_\theta - p_{\text{水汽}})$$

空气的湿度H：单位质量干气体带有水的质量。

空气-水体系：

$$H = \frac{M_{\text{水}}}{M_{\text{气}}} \times \frac{p_{\text{水汽}}}{p - p_{\text{水汽}}}$$

湿球温度 t_w ：大量空气与少量水接触，传热达到平衡时的温度。



湿空气的焓 l ：每1kg干气及其所带水汽同时具有的焓。

$$I = C_g t + C_v H t + \gamma_0 H$$

$$I = (1.01 + 1.88H)t + 2500H$$

绝热饱和温度 t_{as} ：不饱和空气绝热增湿至饱和且达到平衡（传质与传热）时的温度。

$$t_{as} = t - \frac{\gamma_{as}}{C_H} (H_{as} - H)$$

湿空气状态参数:

水汽分压 $p_{\text{水汽}}$ 与露点温度 t_d :

空气湿度 H :

相对湿度 φ :
$$\varphi = \frac{p_{\text{水汽}}}{p_s}$$

湿球温度 t_w (热平衡时)

湿空气的焓 I :

绝热饱和温度 t_{as} : (绝热饱和热平衡时)

湿空气的比体积 v : 1kg干气及其所带 H kg水汽所占的总体积。 m^3/kg 干气

14.2 干燥静力学

14.2.1 湿气体的性质

温度,湿汽分压(t, p)——状态本质参数,
过程传递方向的判据

湿度,焓(H, I)——过程物料衡算、热量衡算
的基本参数

相对湿度 (φ) ——饱和程度的度量

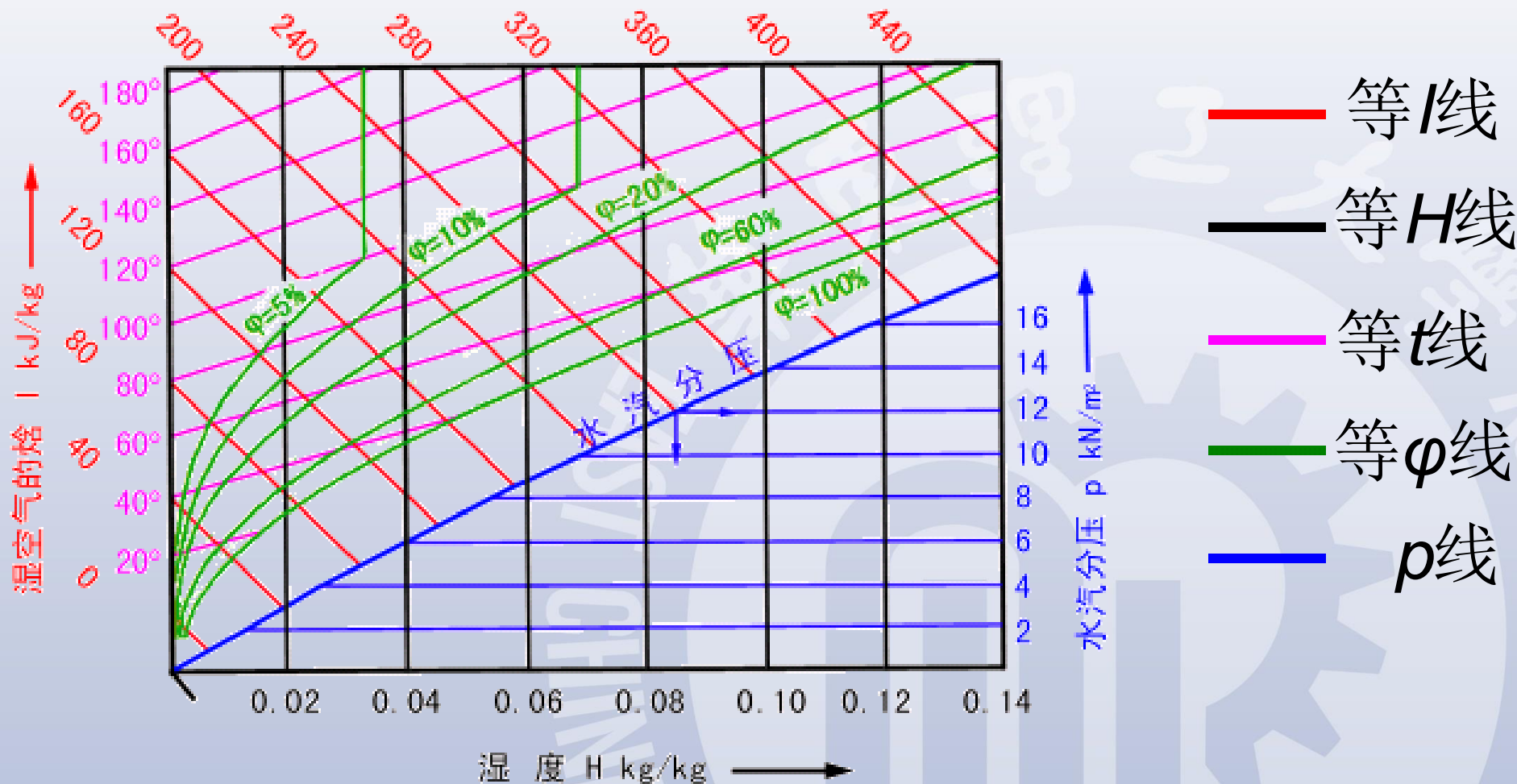
湿球温度 t_w ,绝热饱和温度 t_{as} ——过程的极限参数

露点温度 t_d —— p 的测量

湿气体比体积 v_H ——计算气体体积流量的基本参数

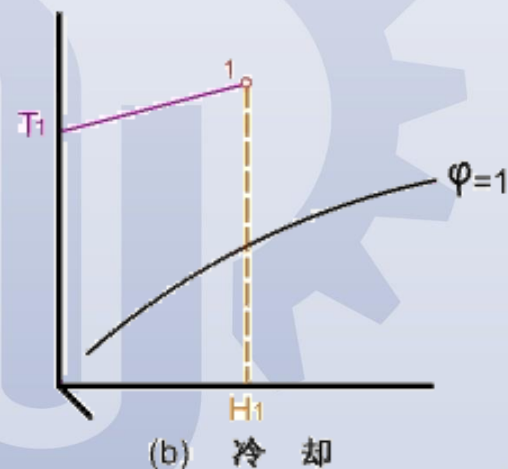
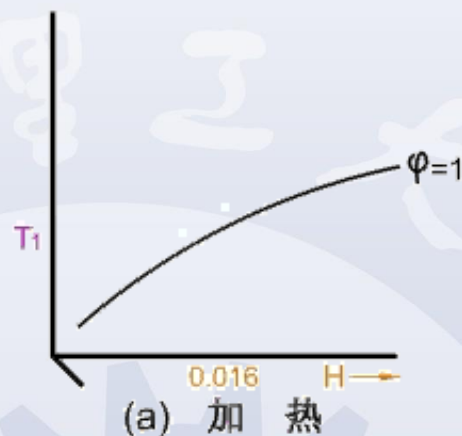
$$v_H = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} H)(t + 273)$$

空气-水系统的I-H图(总压100kPa)

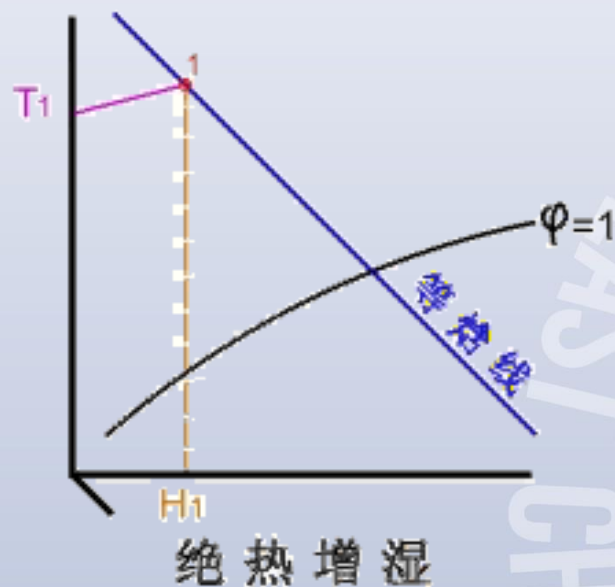


14. 2. 2湿空气状态变化过程

- 加热与冷却过程
不计阻力，湿空气经间壁加热或冷却过程属等压过程。
- 加热： t 升高 p 不变， p 不变， H 不变， ϕ 减小，表明湿空气接纳水汽的能力增强。
- 冷却：若 t_2 高于露点，则为等湿过程；若 t_2 低于露点，则必有部分水汽凝结出来，湿度降低。



绝热增湿过程



一般忽略绝热增湿过程的焓增量，将其视为等焓过程。

两股气流的混合

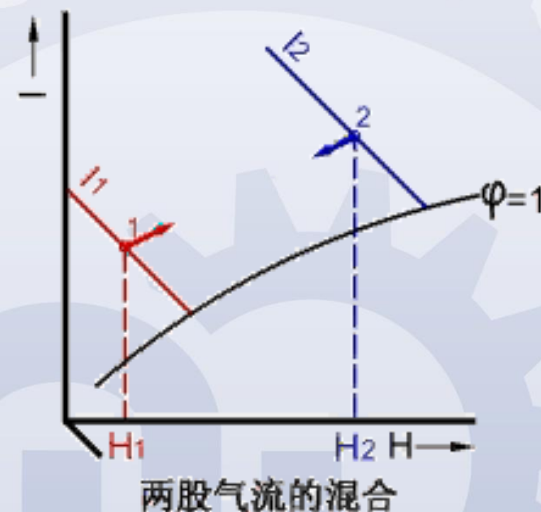
物料衡算：

干气： $V_1 + V_2 = V_3$

水分： $V_1 H_1 + V_2 H_2 = V_3 H_3$

焓衡算： $V_1 I_1 + V_2 I_2 = V_3 I_3$

显然，混点 C 在 A 、 B 联线上，
且符合杠杆规则




華東理工大學
 EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

湿空气性质小结

(1) 当总压一定时，表征空气状态只有两个独立参数。即已知两个相互独立的参数即可（在I-H图上）确定一个湿空气状态点，其他参数也可以或确定。

(2) t 、 t_w 、 t_{as} 、 t_d 关系

$$\varphi=1, \quad t=t_w=t_{as}=t_d$$

$$\varphi<1, \quad t>t_w=t_{as}>t_d$$

14.2.3 水分在气-固两相间的平衡

• 湿物料含水量的表示

干基: X_t kg水/kg绝对干料

湿基: w kg水/kg湿物料

换算关系:
$$X_t = \frac{w}{1-w}$$

$$w = \frac{X_t}{1+X_t}$$

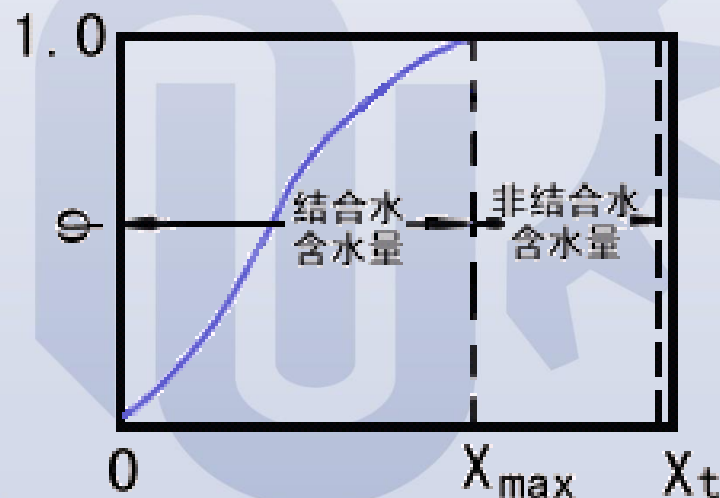
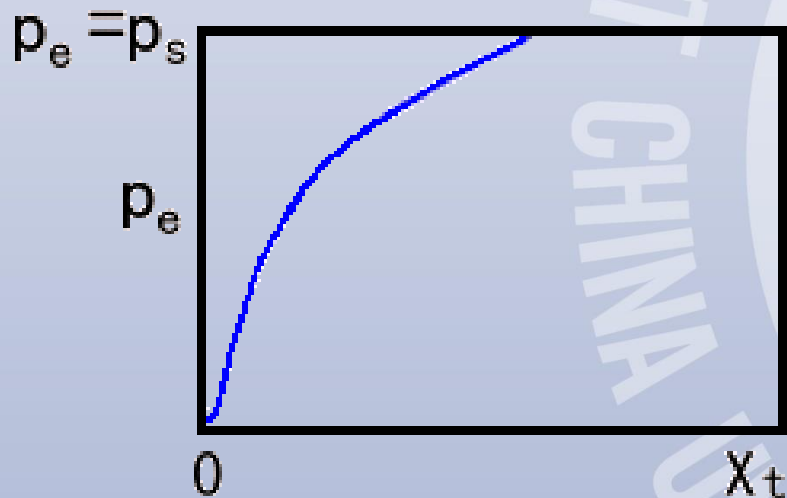
G kg湿料, 含水 w kg水/kg湿料,

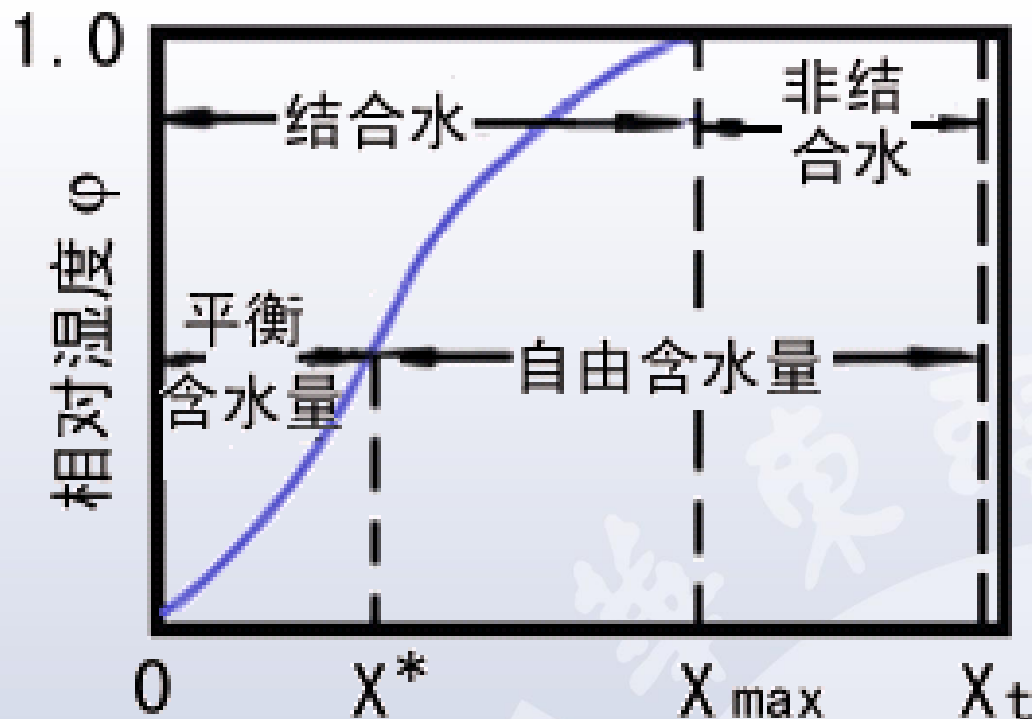
则绝对干料量 $G_c = G(1-w)$

• 结合水与非结合水

水分性质	结合力	平衡蒸汽压
非结合水	机械力	$p_e = p_s$
结合水	化学力, 物理化学力	$p_e < p_s$

• 平衡蒸汽压曲线

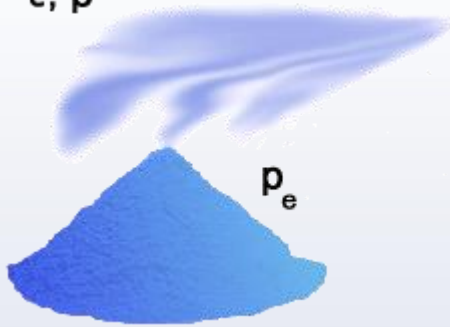




小结

- (1) 结合水与非结合水是以结合力来区分的，表现为平衡蒸汽压不同，其大小只与湿固体的性质有关而与气体状态无关。
- (2) 平衡水、自由水是以传质的平衡状态划分的，不仅与湿料的性质有关还与气体状态有关。相同湿料，气体 ϕ 越小则 X^* 越低。

t, p



- 平衡水分与自由水分

设用 $\phi=0.4$ 不饱和空气干燥湿固体，时间足够长。

- 最初含非结合水, $p_e = p_s > p$ 固 $\xrightarrow{\text{质}}$ 气
- 结合水, $p_e < p_s$ $p_e > p$ 固 $\xrightarrow{\text{质}}$ 气
- 当结合水 $p_e < p_s$ $p_e = p$ 时, 固 $\xrightarrow{\text{质}}$ 气

此时，固体中的含水量 X^* 称对应该空气状态的平衡水， $X_t - X^*$ （包括非结合水和部分结合水）为所有被指定状态空气带走的水分，称自由水。

14.3 干燥速率与干燥过程计算

14.3.1 物料在定态空气条件下的干燥速率

干燥动力学实验

恒定干燥:

干燥过程中, 气体状态 t , φ , u 保持不变。记取物料试样的自由含水量 $X(=X_t - X^*)$ 与时间 t 的关系, 得到干燥曲线。

干燥曲线与干燥速率曲线

(1) 干燥曲线

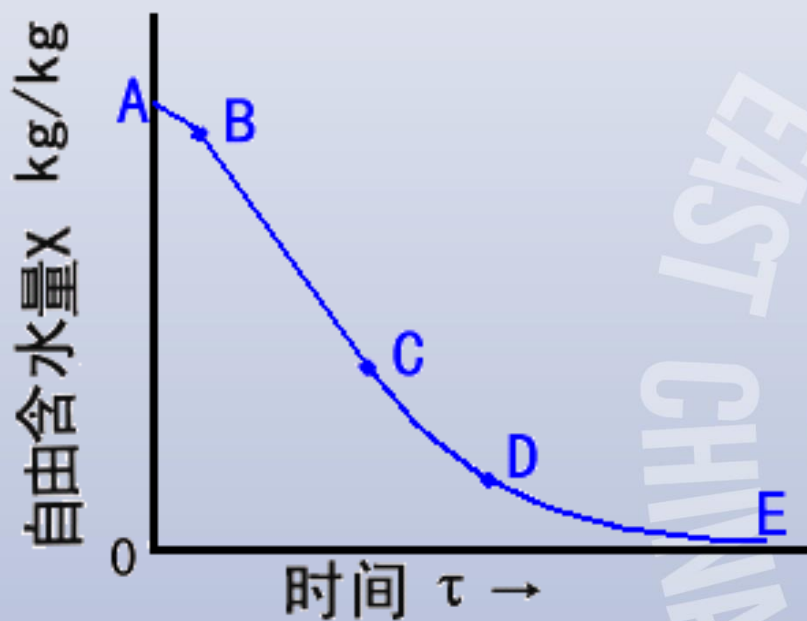
定义：干燥速率

$$N_A = - \frac{G_c dX}{A d\tau}$$

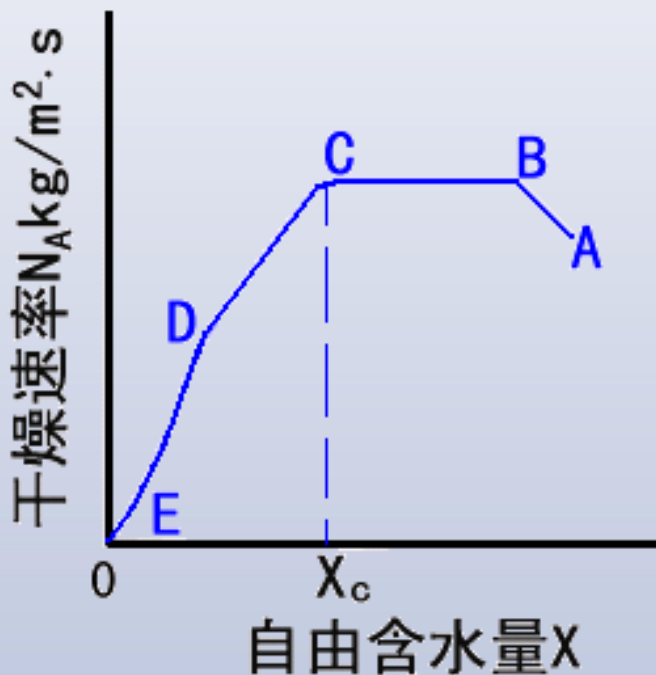
G_c : 试样中绝对干燥物料的质量, kg;

A : 试样暴露于气流中的表面积, m^2 ;

X : 物料的自由含水量,
 $X = X_t - X^*$, kg水/kg干料;



(2) 干燥速率曲线



AB: 预热阶段

BC: 恒速段, $\theta = t_w$ 不变

$$N_{A恒} = k_H (H_w - H) = \frac{\alpha}{r_w} (t - t_w)$$

CD: 第一降速段, θ 上升 N_A 下降

DE: 第二降速段, θ 上升 N_A 下降

(3) 讨论

- 恒速阶段与降速阶段

	恒速阶段	降速阶段
去除水分	非结合水	内部非结合水, 结合水
表面温度	$\theta = t_w$	$\theta = t_w \sim t$
影响速率 主导因素	空气性质, 流速 与物料性质无关	固体内部水分扩散速率

- 临界含水量 X_c

其他干燥条件相同, 若物料分散越细, 恒速阶段去除的非结合水越完全, X_c 越少;

若恒速阶段干燥速率越快, 则可能有更多的内部非结合水来不及去除, X_c 就越多。

- 空气条件对 $N_{A\text{恒}}$ 、 X_c 和 X^* 的影响

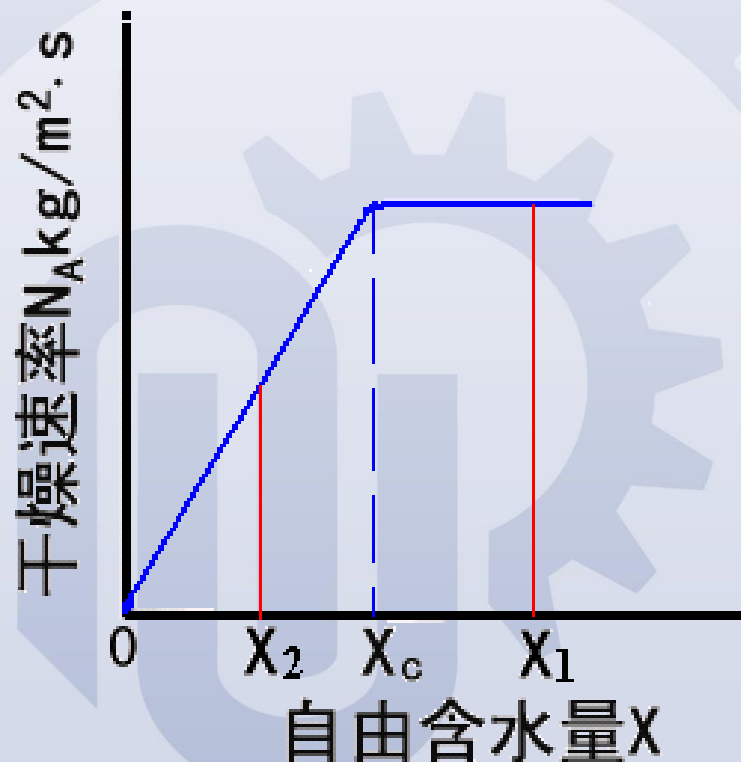
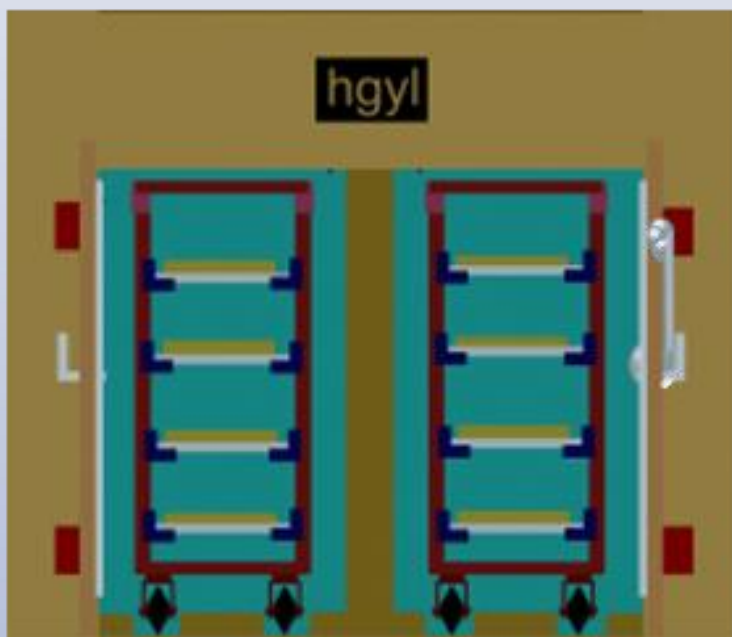
(1) 空气温度 t 、湿度 H 不变，流速 u 增加，则 N_A 加快，从而导致 X_c 上升，而 X^* 而不变；

(2) 空气湿度 H 、流速 u 不变，温度 t 升高，则 N_A 加快， X_c 升高， X^* 因空气 H 不变， t 升高即 ϕ 下降而下降。

14.3.2 间歇干燥过程的计算 命题

已知：干料量 G_c ，干燥面积 A ，干燥速率曲线

求： $X_1 \rightarrow X_2$ 的干燥时间



14.3.2.1 恒速阶段的干燥时间 τ_1
因为

$$N_A = -\frac{G_c dX}{A d\tau} = \text{const}$$

所以

$$\tau_1 = \frac{G_c}{A} \frac{X_1 - X_2}{N_{A\text{恒}}}$$

其中

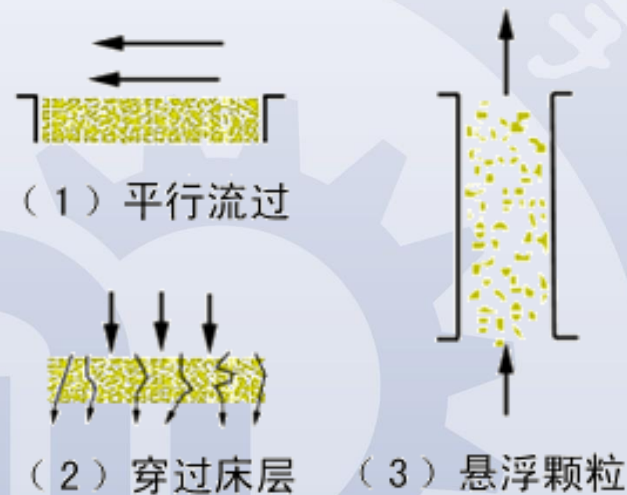
$$N_{A\text{恒}} = k_H (H_w - H) = \frac{\alpha}{r_w} (t - t_w)$$

• 传质速率的估算

$$N_{A\text{恒}} = k_H (H_w - H) = \frac{\alpha}{r_w} (t - t_w)$$

干燥计算中常用经验的给热系数进行计算

- (1) 空气平行于物料表面流动
- (2) 空气自上而下或自下而上穿过颗粒堆积层
- (3) 单一球形颗粒悬浮于气流中



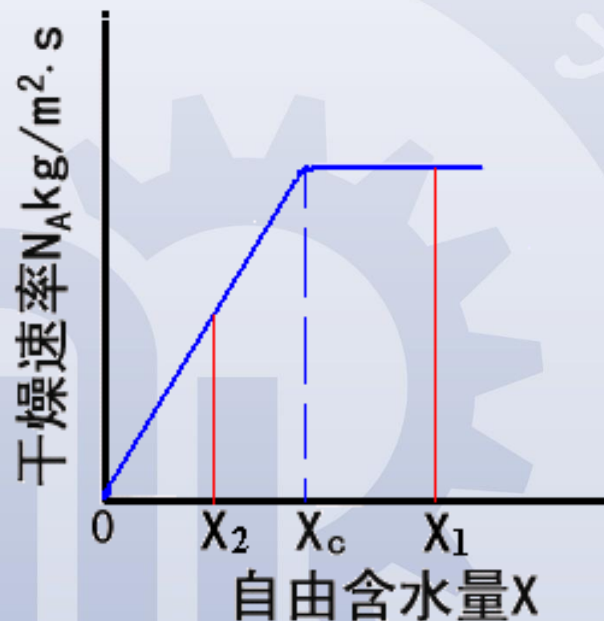
14.3.2.2 降速阶段的干燥时间 τ_2

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

若降速段干燥速率曲线为直线, $K_x = \text{const}$

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{-G_c}{AK_x} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{X - X^*}$$

$$\therefore \tau_2 = \frac{G_c}{AK_x} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

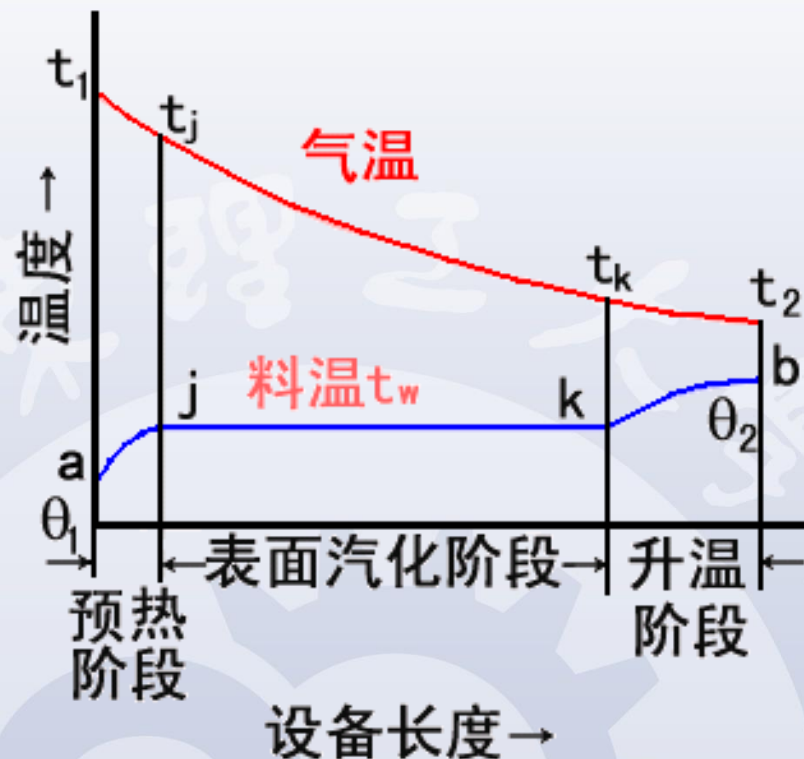


所以, 间歇干燥时间 $\tau = \tau_1 + \tau_2$

14.3.3 连续干燥过程的一般特性

连续干燥过程的特点

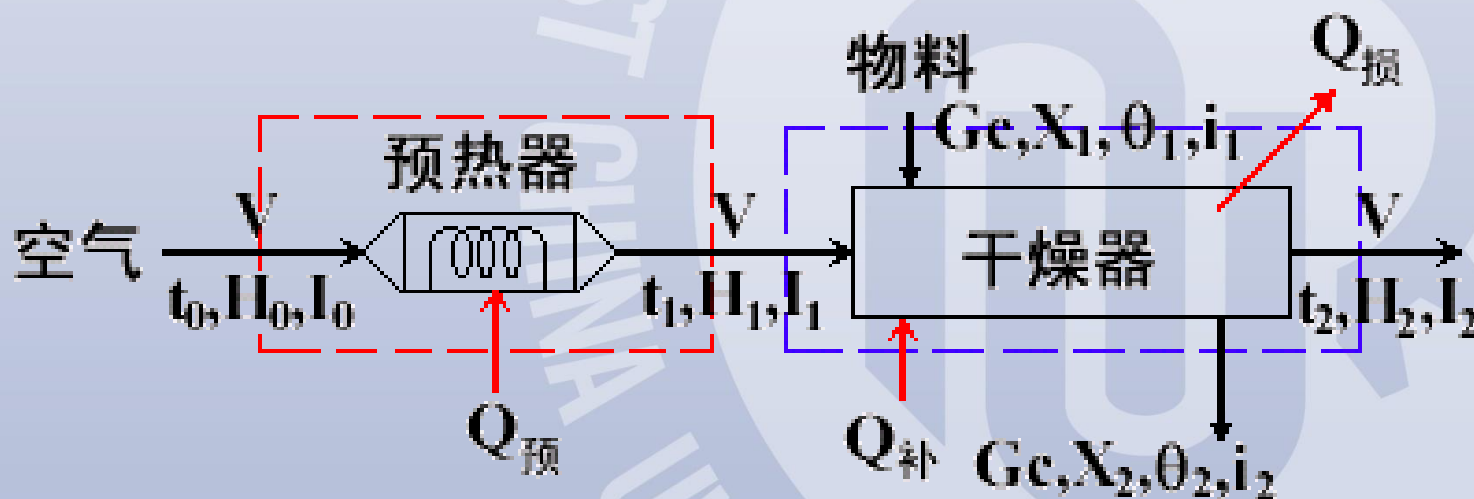
- (1) 沿设备长度方向，气体状态不再恒定， $t \uparrow$ ， $H \downarrow$ 。
- (2) 无恒速阶段、降速阶段，只分为预热阶段、表面汽化阶段和升温阶段。
- (3) 若忽略热损失，表面汽化阶段：
物料 $\theta = t_w = \text{const}$ ，
气体为绝热增湿，等焓过程



14.3.4 连续干燥过程的物料衡算与热量衡算

预热器的物料衡算与热量衡算

- 预热器：取控制体
- 物料衡算： $H_0 = H_1$
- 热量衡算： $Q_{\text{预}} = V(I_1 - I_0) = V(1.01 + 1.88H_0)(t_1 - t_0)$



干燥器的物料衡算与热量衡算

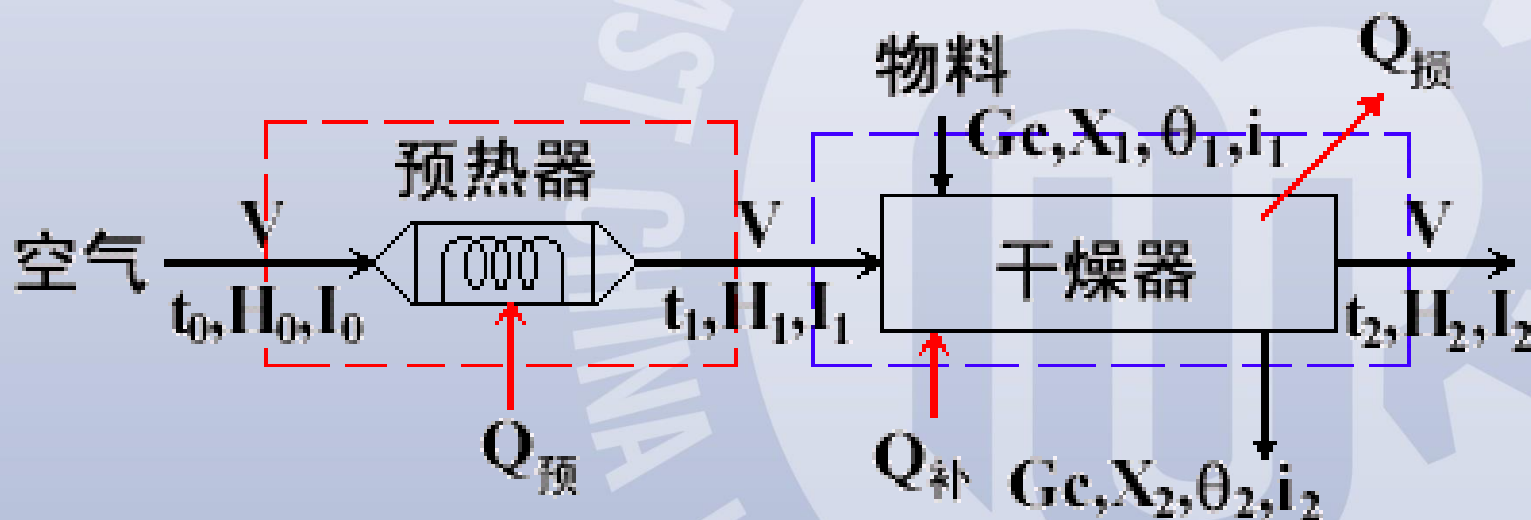
取控制体

物料衡算: $V(H_2 - H_1) = G_c(X_1 - X_2) = W$

热量衡算: $VI_1 + G_c i_1 + Q_{\text{补}} = VI_2 + G_c i_2 + Q_{\text{损}}$

其中: 物料的焓 $i = (C_s + C_L X) \cdot \theta_2$

C_s ——绝干料比热; C_L ——湿分比热;



14.3.5 干燥器内热量分配及热效率

• 空气在干燥器中放出热量的分析

设 $Q_{\text{补}}=0$ ，则整个干燥过程共加入热量即为

$$Q_{\text{预}} = VC_{H1}(t_1 - t_0)$$

	带入干燥器焓	带出干燥器焓
空气 (干气量V)	$VC_{H1}t_1 + r_0H_1$	$VC_{H1}t_2 + r_0H_1$ $W(r_0 + C_v t_2)$
物料 (干料量G _c)	$G_c C_{m1} \theta_1$	$G_c C_{m2} \theta_2$

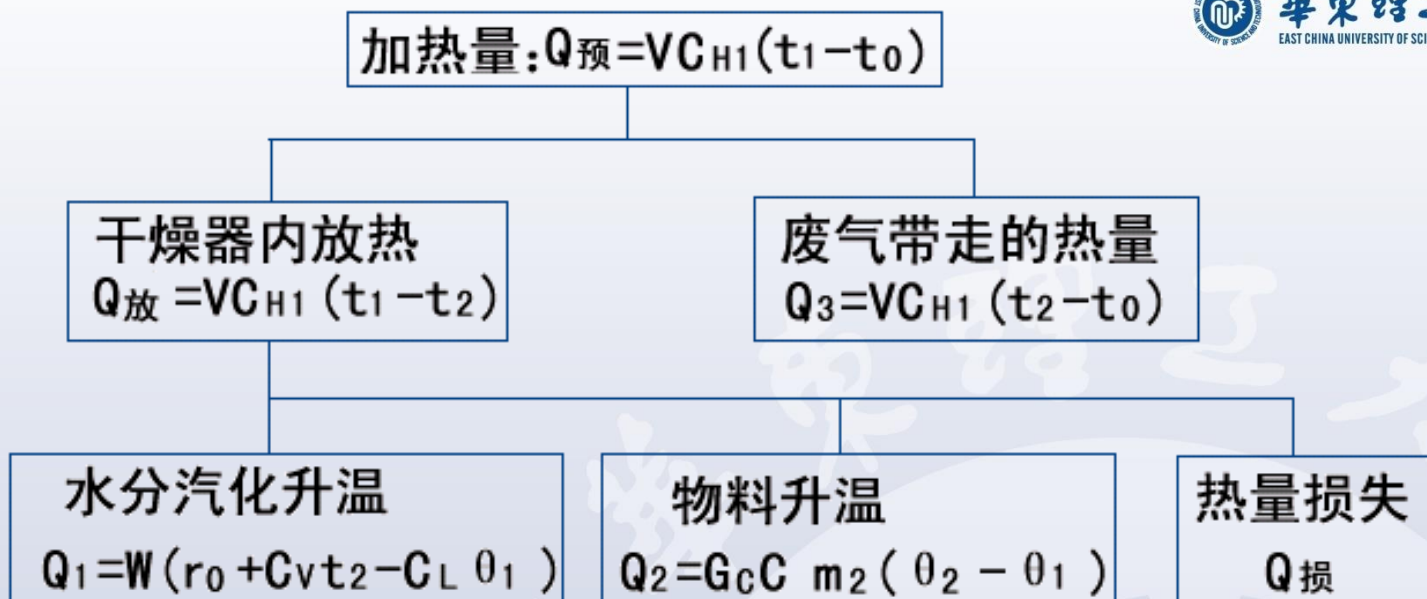
Diagram illustrating the heat balance in a dryer. A curved arrow shows heat being carried out by the air. A straight arrow shows heat being carried in by the material. The material's heat balance is shown as $G_c C_{m1} \theta_1 = G_c C_{m2} \theta_2 + W C_L \theta_1$.

其中 $W = G_c(X_1 - X_2) = V(H_2 - H_1)$;

$$C_{H1} = C_g + C_v H_1;$$

$$C_{m2} = C_s + C_L X_2$$

• 热量分配



结论:

- 预热器提供的热量除一部分在干燥器内释放外，尚有部分未被利用。
- 气体在预热器内所释放的热量，主要消耗于三个方面，即直接用于干燥目的的水分汽化升温 Q_1 ，为达到规定含水量不可避免的物料升温 Q_2 和干燥过程的热量损失 $Q_{\text{损}}$ 。

- 热效率 η

定义
$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{\text{预}}}$$

按上述分析，则

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{\text{预}}} = \frac{Q_{\text{放}} - Q_{\text{损}}}{Q_{\text{预}}} = \frac{Q_{\text{预}} - Q_3 - Q_{\text{损}}}{Q_{\text{预}}}$$

所以，提高干燥器热效率的措施

- 减少干燥器热损失
- 减少废气带出热 Q_3 ，提高 t_1 ，降低 t_2 。
- 采用废气循环及中间加热等方式

14.3.6 理想干燥过程的计算

干燥过程的简化——理想干燥过程

定义：① $\theta_1 = \theta_2$ （物料不升温 $Q_2=0$ ）

② $WC_L \theta_2 \approx 0$;

③ $Q_{\text{损}} \approx 0$

特点：理想干燥过程中气体经历了等焓过程（绝热增湿过程），即 $I_1 = I_2$

- 理想干燥过程的热效率

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{\text{预}}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{预}}}$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{预}} + Q_{\text{损}}}{Q_{\text{预}}} = \frac{Q_{\text{放}}}{Q_{\text{预}}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}$$

显然, $t_1 \uparrow$, $t_2 \downarrow$ 则 $\eta \uparrow$

14.4 干燥器

14.4.1 干燥器的基本要求

- (1) 能够适应被干燥物料
- (2) 设备的生产能力要高
- (3) 能耗的经济性

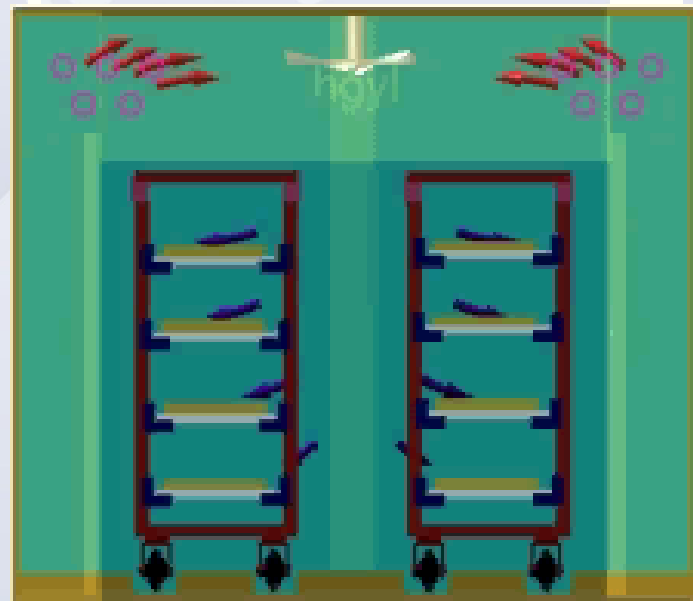
14.4.2 常用工业干燥器

厢式干燥器

又称烘箱或烘房

特点：结构简单，对物料适应性强，但生产效率低，劳动强度大，产品质量不均匀

适用：规模小，干燥品种需经常更换，干燥条件变动大，干燥时间长的场合。



喷雾干燥器



干燥介质加热和输送系统

喷雾干燥器

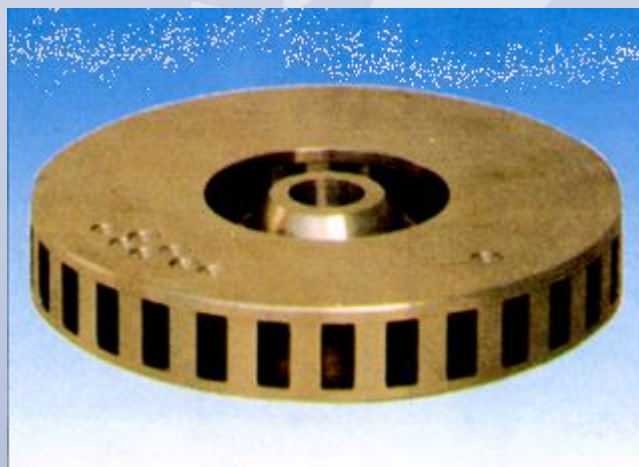
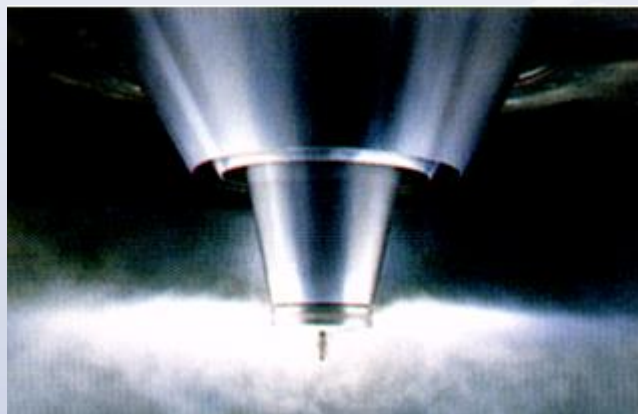
气固分离系统

优点：物料停留时间短，适宜热敏性物料，过程易于连续化自动化。

缺点：设备占空间大，气固混合物分离要求高。

雾化器类型

压力喷嘴, 离心转盘, 气流式喷嘴



气流干燥器

干燥介质加热输送系统

被干燥物料的加入系统：干燥管；气固分离和粉尘回收系统。

常用加料器：滑板，星形，转盘，螺旋式，锥体。



优点：结构简单，占地面积小，活动部件少，造价低，操作稳定便于控制，热损失低，热效率高。尤其适宜于非结合水的干燥。

缺点：流动阻力大，对粉尘回收装置要求高。对结块，不易分散的物料需性能好的加料装置，有时还需附加粉碎过程

流化干燥器

特点：结构简单，造价低，活动部件少，操作维修方便，与气流相比阻力较低，磨损轻，气固分离易以及热效率高。适宜处理粒径6~30mm粉粒状物料。

基本类型： 单层
 多层流化床
 卧式多室



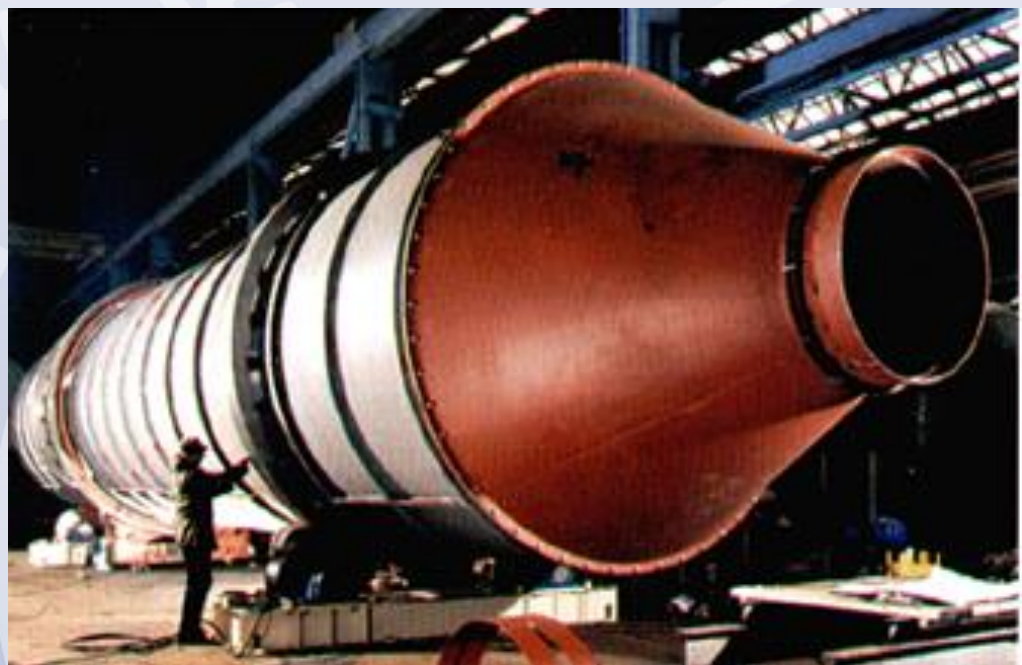
转筒干燥器

转筒是一个与水平成 $1/15 \sim 1/50$

倾斜度的圆筒。有直接加热和间接加热两种方式。

特点：机械化程度高，操作稳定可靠，对不同物料适应性强，产品质量均匀。生产能力大，流动阻力小。

缺点：设备笨重，结构复杂，成本高，制造安装检修麻烦。占地面积大，热效率低。



- 抄板爪直立式——处理粘性或较湿物料
- 抄板爪 45° / 90° ——处理散粒料或较干的物料



直立式



45°



90°

耙式真空干燥器

间接加热，密闭操作且一般为间歇

优点：对物料适应性强，可处理浆状，膏状，粉状物料以及在空气中易氧化的有机物。

缺点：干燥时间长，生产能力低，结构复杂，维修量大。

