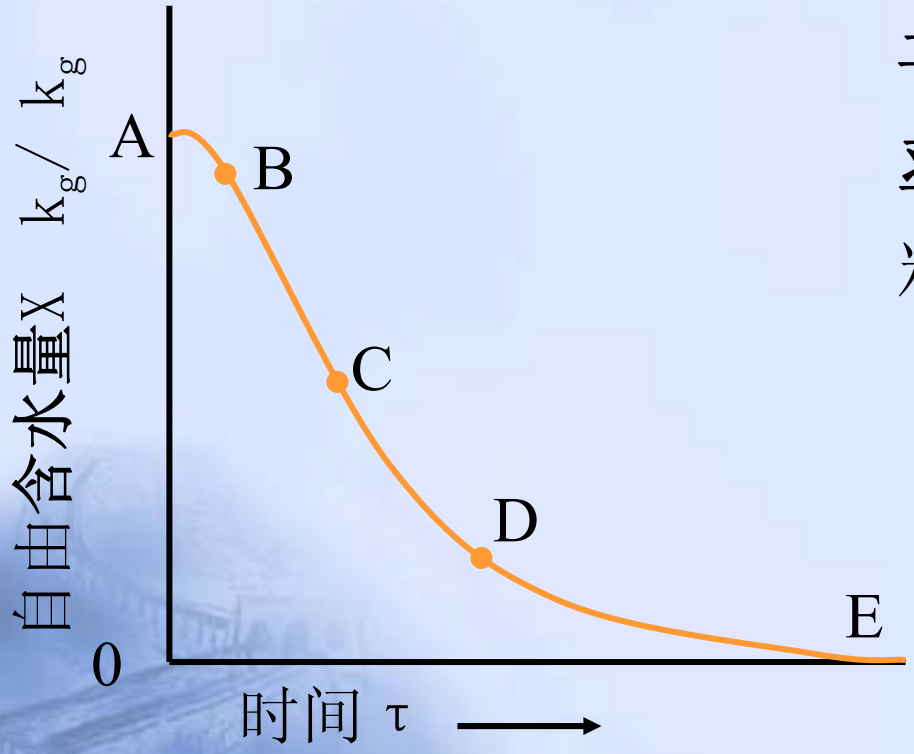
第三节　干燥速率与干燥过程的计算

一、物料在定态空气条件下的干燥速率

- 恒定干燥条件：空气的温度、湿度、流速及物料接触方式不变。

1、干燥动力学实验

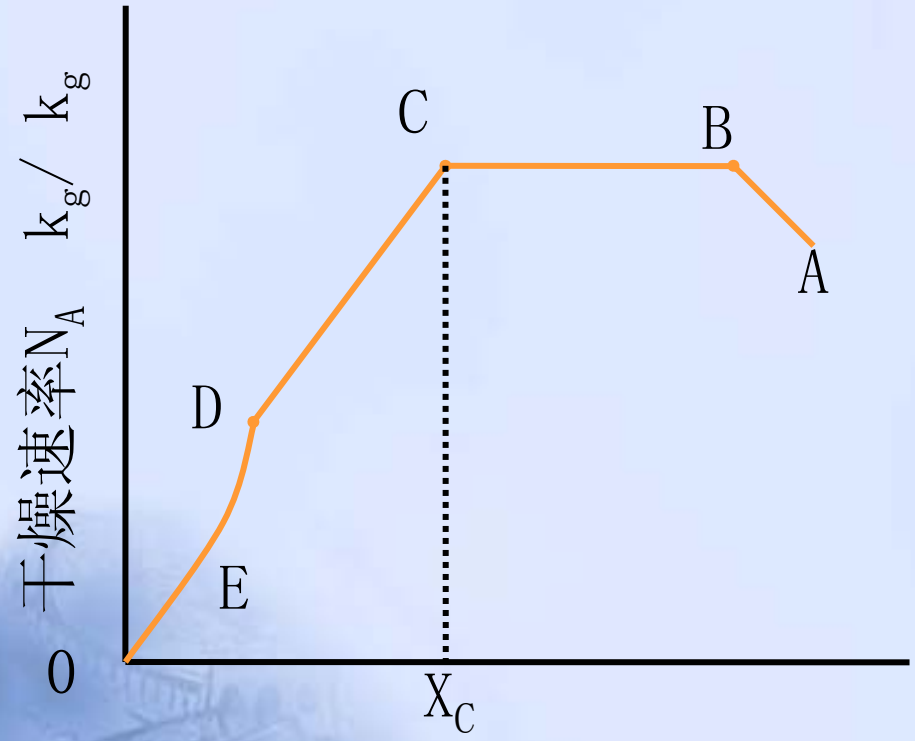
用温度t、相对湿度φ及流速保持不变的空气流干燥小块固体物料，物料表面处的空气状况基本相同，随着干燥时间的延续，水分被不断汽化。湿物料的质量减少，自由含水量X与时间 τ 的关系如下。



(a) 干燥曲线

干燥速率或水分汽化速率—单位时间、单位物料表面被汽化的水分。

$$N_A = -\frac{G_C d_X}{A d_\tau}$$



自由含水量 X ⟶

(b)干燥速率曲线

由干燥曲线各点求斜率 $\frac{dX}{d\tau}$ ，再根据干燥速率公式计算N_A可得干燥速率曲线 $N_A=f(X)$

对指定的物料，干燥速率与空气的状态有关系，即空气的温度、湿度不同，速率曲线的位置就不同。

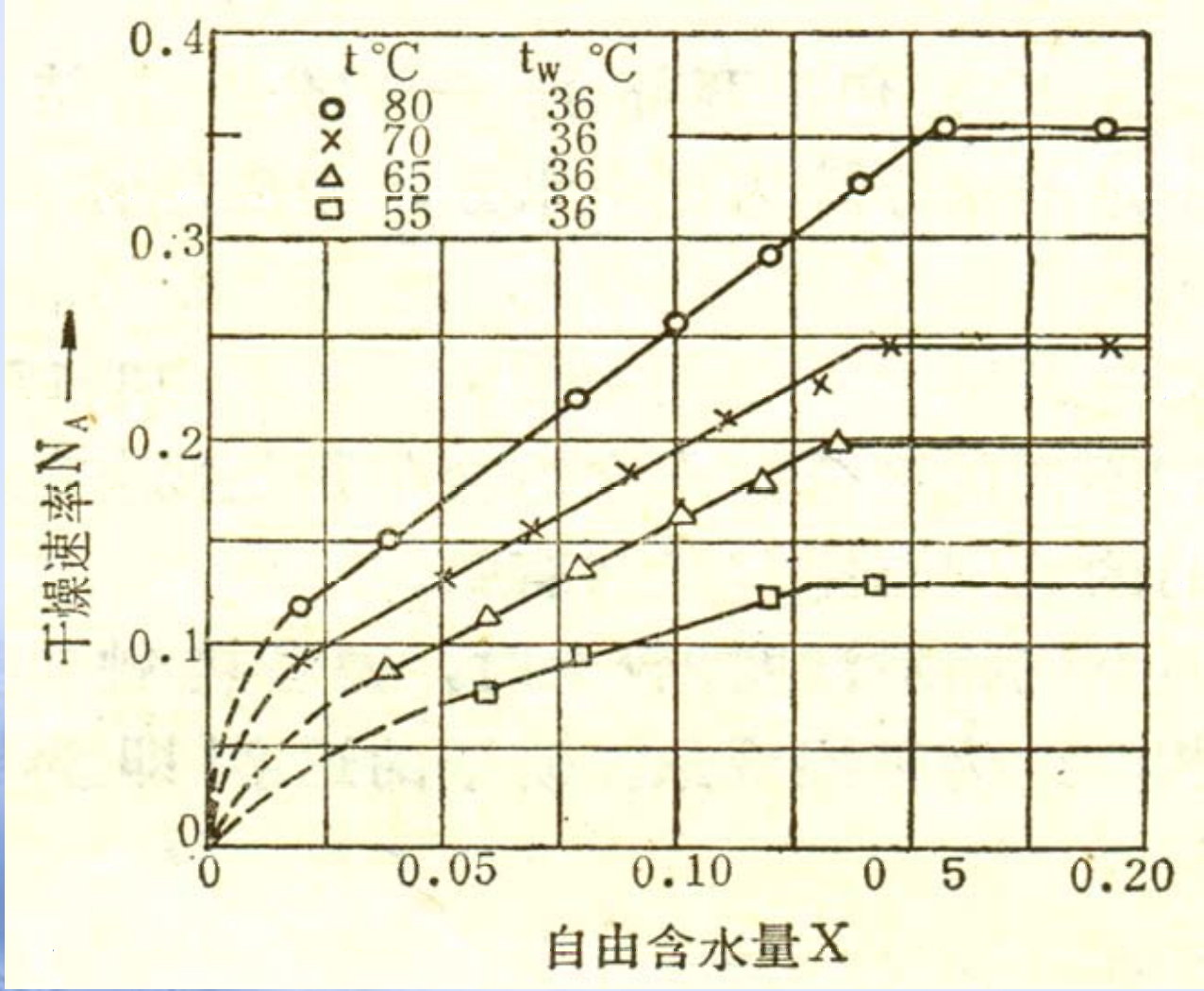


图14-13 石棉纸浆的干燥速率曲线

根据干燥速率曲线，物料的干燥速率从B点到C点是保持恒定的，干燥速率并不随含水量的减少而改变，称其为*恒速干燥阶段*。

从A到B为物料的预热阶段，此阶段所需时间很短，通常归并在恒速阶段处理，对于含水量低于X_c，直到平衡含水量X*这一阶段内，干燥速率随着含水量的减少而降低，*称为降速干燥阶段*，C点为降速与恒速段的分界点，称为临界点。该点的干燥速率仍等于恒速阶段的干燥速率，与C点对应的物料含水量X_C称为临界含水量，从中扣除平衡含水量后则称为临界自由含水量X_C。

2、恒速干燥阶段

当物料最初非常潮湿，其表面层的水分可认为全部是非结合水分，在干燥时，物料与空气间的传热、传质过程和测定湿球温度时的情况相类似，经过较短的接触时间后，物料表面即达空气的湿球温度t_w，且维持不变，按传质速率式

$$N_A=k_H(H_w-H)$$

在恒速干燥阶段，干燥速率的大小是由物料表面水分水分汽化的速率而定。因此，恒速干燥阶段又称表面汽化控制阶段。影响恒速干燥阶段速率的因素有k_H和（H_w-H），即增大空气流速便能提高k_H，提高空气的温度降低H，以增大（H_w-H），此外，水分从物料表面汽化的速率与空气和物料接触的方式有关。

恒速干燥特点：

1. $N_A = N_{AC} = \text{const.}$
2. 物料表面温度为 t_w
3. 去除的水分为非结合水分
4. 影响 N_A的因素：

恒速干燥阶段——表面汽化控制阶段

只与空气的状态有关，而与物料种类无关

$$\left.\begin{array}{l} t\uparrow \rightarrow (t - t_w)\uparrow \\ H\downarrow \rightarrow (H_w - H)\uparrow \\ u\uparrow \rightarrow \alpha\uparrow \quad k_H\uparrow \end{array}\right\} \quad N_{AC}\uparrow \quad N_A\uparrow$$

3、降速干燥阶段：

在降速干燥阶段，干燥速率的变化规律与物料的性质及内部结构有关。降速的原因如下：

①实际汽化表面减小

②汽化面内移

③平衡蒸汽压下降

④固体内部水分的扩散极慢

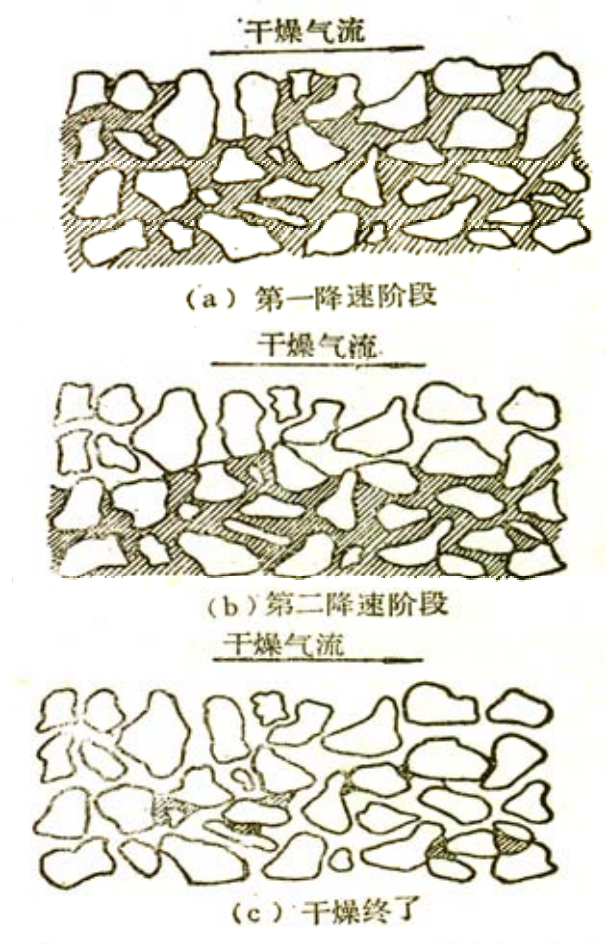


图14-14　水分在多孔物料中的分布

4、临界含水量及其影响因素

临界湿含量与物料的结构、料层厚度、干燥介质的性质以及物料的分散程度有关。

①吸水性物料的临界含水量大于非吸水性物料的临界含水量这是因为对于相同的初始含水量，吸水性强的物质内部水分所占的比例大，而外部水分所占 的比例小，在干燥曲线上表现为吸水性强的物质由水平线转变为曲线的转折点出现的早。

②料层越薄，临界含水量越小；

③干燥介质的气速越高，物料的干燥速率越高，临界含水量越高；

④物料分散的越细，临界含水量越小

⑤气体介质的相对湿度越小，干燥速率越高，临界含水量越高。

5、干燥操作对物料性状的影响

在恒速阶段，物料表面温度维持在湿球温度。因此，即使在高温下易于变质、破坏的物料，仍然允许在恒速阶段采用较高的气流温度，以提高干燥速率及热的利用率。在降速阶段，物料温度逐渐升高，所以，在干燥后期须注意不使物料温度过高。

二、间歇干燥过程的计算

在恒定空气条件下，物料从自由含水量X_1干燥到X_2所需时间，可根据相同情况下的干燥速率式写成：

$$\int_0^{\tau} d_{\tau} = -\frac{G_c}{A}\int_{X_1}^{X_2} d_X / N_A$$

可分别就恒速和降速两个阶段，分别求解

1、恒速阶段的干燥时间

$$\int_0^{\tau_1} d\tau = -\frac{G_c}{A}\int_{X_1}^{X_c}\frac{dX}{N_A}$$

在恒速阶段中，N_A=常数。

$$\boxed{\tau_1 = \frac{G_c}{A}\cdot\frac{X_1 - X_C}{N_A}}$$

在恒速干燥阶段中，物料表面温度等于湿球温度，空气传热给物料的传热速率与水分汽化带走潜热的速率相等。

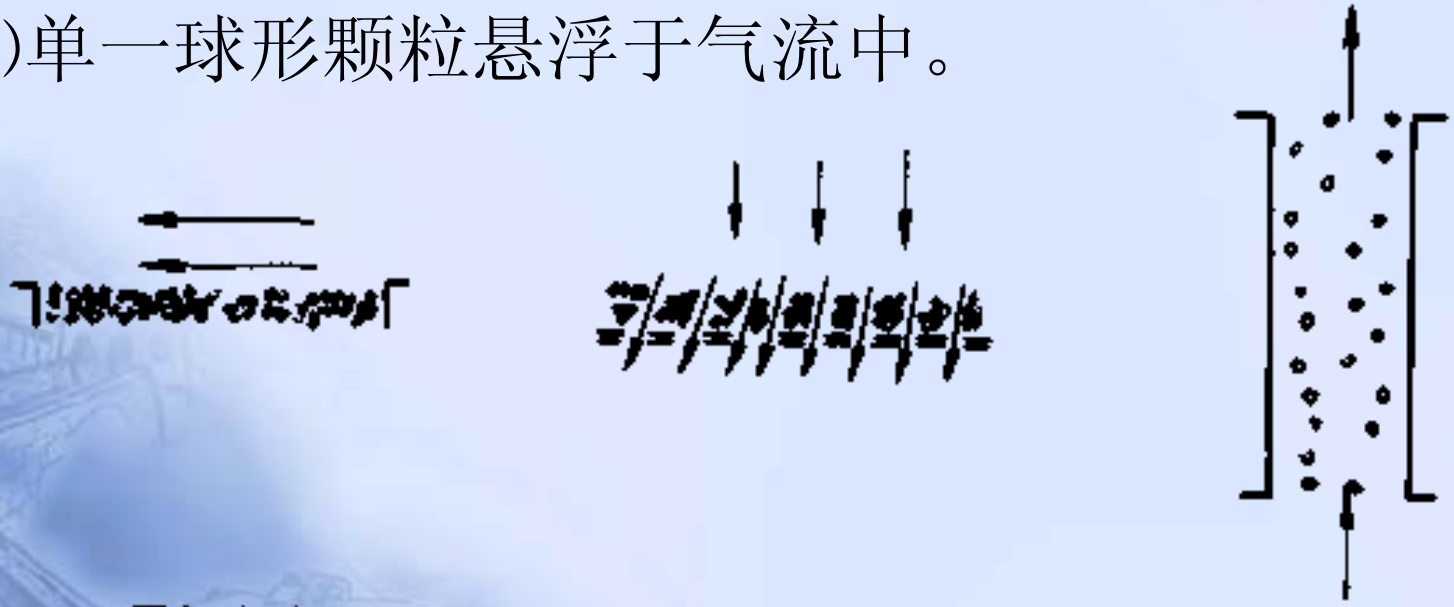
$$\boxed{N_A = k_H(H_W - H) = \frac{\alpha}{r_W}(t - t_W)}$$

气流与物料的接触方式对给热系数的影响很大。

(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。



a. 平行流过　　b. 穿过床层　　c. 悬浮颗粒

图 14-16　气流与物料的相对运动方式

2、降速阶段的干燥时间 τ_2

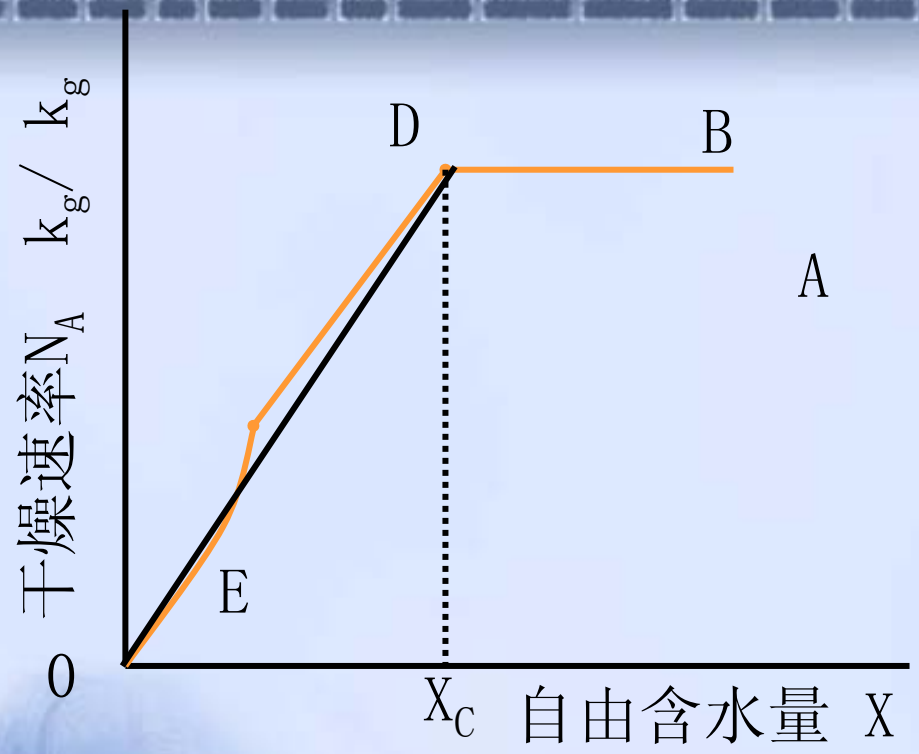
当$X=X_C$（自由含水量），降速阶段开始

$X=X_2$时， $\tau=\tau_2$

$$\int_0^{\tau_2} d_\tau = -\frac{G_c}{A}\int_{X_c}^{X_2}\frac{d_X}{N_A}$$

N_A与自由含水量有关，$N_A=f(X)$则

$$\tau_2 = \frac{G_c}{A}\int_{X_2}^{X_c}\frac{d_X}{f(X)}$$



(b) 干燥速率曲线

若把降速阶段的干燥曲线近似当做通过原点和临界点的直线，即：$N_A=K_X \cdot X$

$$K_X = \frac{(N_A)恒}{X_C}$$

$$\tau_2 = \frac{G_C}{A}\int_{X_2}^{X_1}\frac{dx}{\frac{(N_C)恒}{X_C}X}$$

$$= \frac{G_C X_C}{(N_A)恒A}\int_{X_2}^{X_C}\frac{dx}{X}$$

$$\tau_2 = \frac{G_C}{K_X A}\ln\frac{X_C}{X_2}$$

对间歇操作，计入装卸时间后，每一个干燥周期所用时间

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau'$$

3 干燥结束时的物料温度:

在恒速阶段时 $\theta_{表} = t_w$

在降速阶段, 物料表面不再能保持时球温度不变.

做物料恒算: d_τ 瞬间中气固之间的的传热量应 等于水 分气化及物料升温所需的热量

$$\alpha A(t-\theta)d_\tau = -rG_C dx + G_C C_m d\theta \qquad (1)$$

$t \rightarrow$	气率温度为一定值	^oC
$\theta \rightarrow$	瞬间的物料温度	^oC
$C_m \rightarrow$	固体物的比热	$kJ\ (kg\ .^oc)^{-1}$
$r \rightarrow$	水的气化热	$kJ\ (kg\ .^oC)^{-1}$

在降速阶段，设：

$$N_A = -\frac{G_C dx}{A d_\tau} = K_x X \qquad (2)$$

联立(1)，(2)求解消去 dt 得

$$-\frac{\alpha(t-\theta)}{K_X X} dX = -r d_X + C_m d\theta$$

边界条件为：

$X = X_C$	$\theta = t_w$
$X = X_2$	$\theta = \theta_2$

解得:

$$t-\theta_2=(t-t_w)\left\{\frac{rX_2-C_m(t-t_w)\left(\frac{X_2}{X_C}\right)^{\frac{X_C}{C_m(t-t_w)}}}{rX_C-C_m(t-t_w)}\right\}$$

上式使用条件为:

1、 物体内部温度均一,即指悬浮颗粒或藻层物料;

2、 降速阶段的速率与物料的自由含水量成正比

3、水的气化热r,物料比热Cm均取常数.

,

三、 连续干燥过程的一般过程

1、连续干燥过程的特点：（并流）

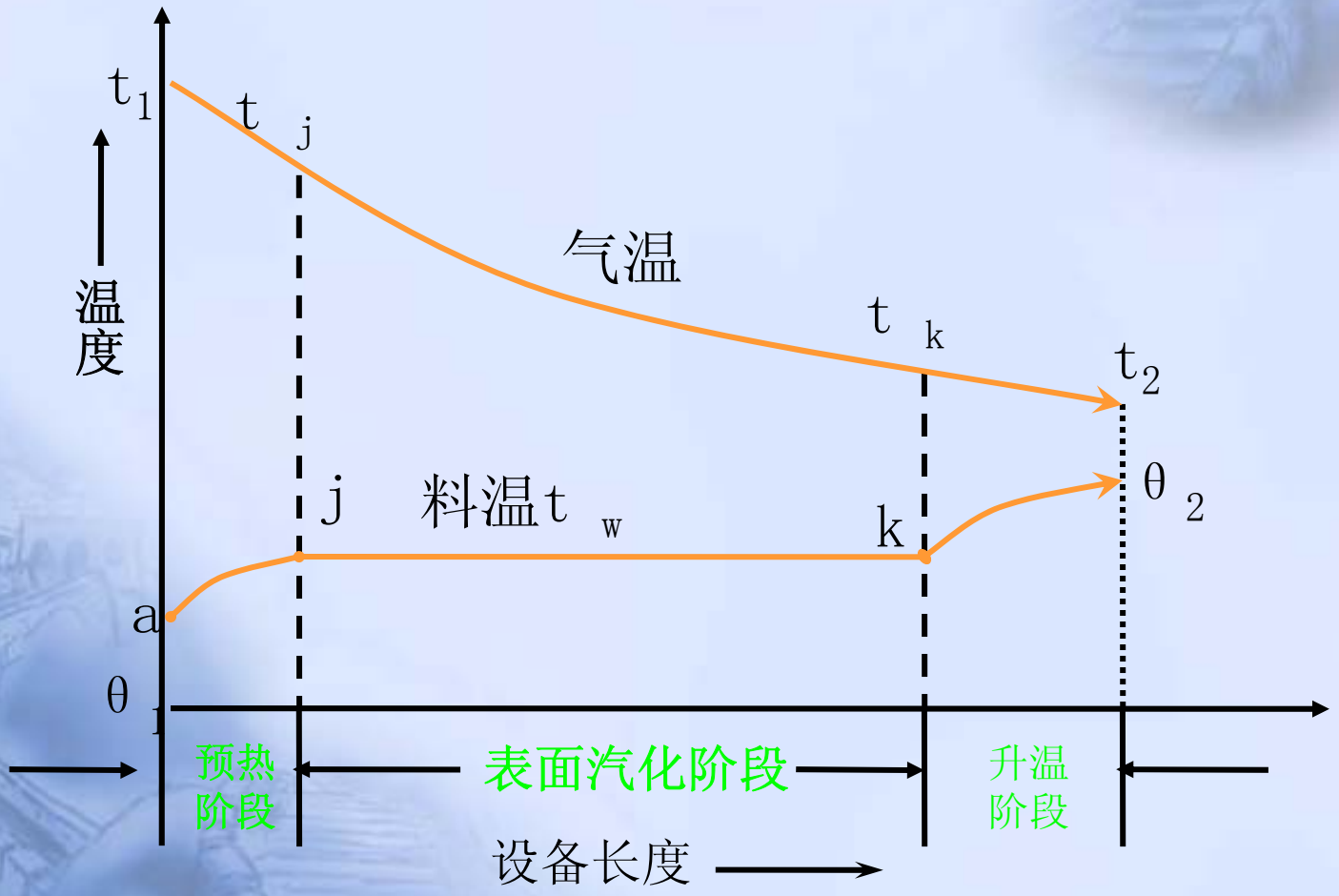


图14-20 并流干燥器内气、固两相温度的变化

当物料的含水量大于临界含水量 $X_C\ (X \succ X_c)$

1 预热阶段 物料 $\theta_1 \uparrow = t_w$ 所以空气 $H \uparrow t \downarrow$

2 表面水分气化段(不存在恒速段)物料温度$\theta = t_w$ ，但不存在恒速段. 若不计热损失，气体绝热增湿.

3 升温段 物料表面水分气化完毕 $\theta \uparrow = \theta_2$ 此时不能假设

$$N_A \neq K_X.X$$

注意：和定态空气条件下的降速阶段不同, 与同一物料接触的空气状态不断变化.

2 连续干燥过程的数学描述

连续干燥为一定态过程，即湿空气与物料状态的流动途径不断变化，但干燥气内某些确定部分的空气和物料状态不随时间变化. 因此用欧拉法(即站岗发)对其进行数学描述

取设备微元写出物料衡算式，热量衡算式与相际传质传热速率式. 而相际传质，传热速率方程中分别包含界面温度与界面上气体的饱和温度，对气固系统，要确定其是十分复杂的 . 另外还要列出物料内部的传热传质速率方程

微元塔段的传热速率 $$VC_H dt = \alpha a(\theta - t)dz$$

传质速率 $$Vd_H = N_A adz$$

四、 连续干燥过程的物料衡算与热量衡算

1、物料衡算：

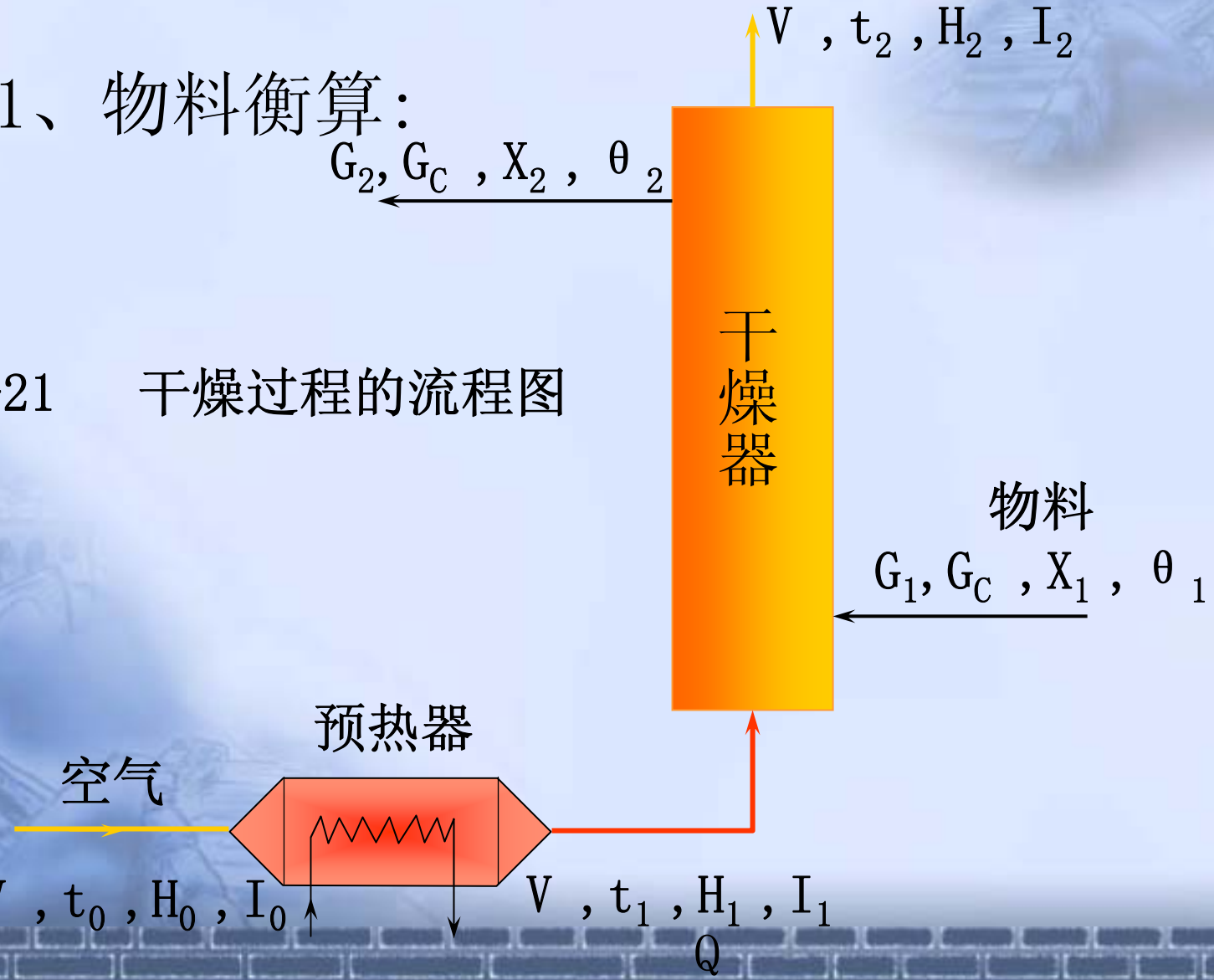


图 14-21 干燥过程的流程图

以干燥 器为控制体对平衡水分做物料衡算

$$W = G_C(X_1 - X_2) = V(H_2 - H_1)$$

W ---$kg.s^{-1}$; 在干燥过程中被除去的水分

G_C ---kg干料/s

V ---kg干气/s

X_1, X_2 ---自由含水量 ,kg水/kg干料

H_1, H_2 ---kg水/kg干气

湿基含水量w:每Kg湿物料中所含有的水分质量

$$X = \frac{w}{1-w}$$

$$G_C = (1-w_1) = G_2(1-w_2)$$

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

w_1、w_2—分别为进出干燥器的湿物料含水量，Kg/Kg湿物料

G_1、G_2—分别为进出干燥器的干燥产品量，Kg/s（湿基）

2　热量衡算：

㊀预热器

$$Q = V(I - I_0)$$

$$= V\left[(C_g t_1 + C_V H_1 t_1 + r_0 H_1) - (C_g t_0 + C_V H_0 t_0 + r_0 H_0)\right]$$

$$= V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_0)$$

$$= V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_0) - V(C_g + C_V H_1)t_2 + V(C_g + C_V H_1)t_2$$

$$= \underbrace{V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2)}_{\text{空气在干燥器放出的热量}} + \underbrace{V(C_g + C_V H_1)(t_2 - t_0)}_{\text{废气带走的热量}}$$

干燥器

以干燥器为控制体做热量衡算

进入干燥器的热量：$G_C C_S \theta_1 \quad G_C X_2 C_L \theta_1 \quad WC_L \theta_1$

带出干燥器的热量：$G_C X_2 C_L \theta_2 \quad G_C C_S \theta_2$

热量损失：$\theta_{损}$

$$\theta = V(I_1 - I_2) = G_C C_S \theta_2 + G_C X_2 C_L \theta_2 - G_C C_S \theta_1 - G_C X_2 C_L \theta_1 - WC_L \theta_1 + \theta_{损}$$

$$VI_1 = VI_2 + G_C(C_S + X_2 C_L)\theta_2 - G_C(C_S + X_2 C_L)\theta_1 - WC_L \theta_1 + \theta_{损}$$

$$V(C_g + C_V H_1(t_1 - t_2) = V(H_2 - H_1)(r_0 + C_V t_2 - C_L \theta_1) + G_L C_{m2}(\theta_2 - \theta_1) + Q_{损}$$

3 物料衡算式与热量衡算式的联立求解

设计性问题：已知 G_C、θ、X_1、X_2（由干燥任务规定）

H_1由空气初始状态决定，

$Q_{损}$由传热一章的有关公式计算，由经济条件决定.

物料出口 θ_2是干燥末期气固两相之间及物料内部传质，传热过程综合结果，不能任意给定. 一般应由实验测定 。

联立物衡和热衡可求得 V H_2

4　连续干燥过程的热效率

干燥器热量衡算式:

$$V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2) = V(H_2 - H_1)(r_0 + C_V t_2 - C_L \theta_1) + G_C C_{m2}(\theta_2 - \theta_1) + \theta_{损}$$

$$Q_1 = V(H_2 - H_1)(r_0 + C_V t_2 - C_L \theta_1)$$

Q_1 表示 $V(H_1 - H_2)$ ⟶ 的水分由进口状态加热气化或废气出口状态所消耗的热量

$Q_2 = G_2 C_{m2}(\theta_2 - \theta_1)$ ⟶ 物料温度升高所带走的热量

$$V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2) = \theta_1 + \theta_2 + \theta_{损}]$$

将上式带入预热器热量衡算式

$$Q = \underbrace{V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2)}_{\text{空气在干燥器中放出的热}} + \underbrace{V(C_g + C_V H_1)(t_2 - t_0)}_{\text{废气带走的热}}$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_{损}$$

$$\theta_3 = (C_g + C_V H_1)(t_2 - t_0) \longrightarrow$$ 废气带走的热量

干燥过程的经济性主要取决于热量的有效利用过程, 从上式可知, 空气在预热器中所获得的能量消耗预四个方面.

Q_1 是直接用来干燥物料的,

Q_2 是为达到规定含水量而不可避免的, 因此, 定义热效率

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q}$$

提高效率的措施:

a 、 降低废气出口温度. t_2

b、提高空气的预热温度 t_1

二、影响热效率的因素

1. t_0、t_1一定时，$t_2 \downarrow \rightarrow \eta \uparrow$

$H_2 \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$

传热推动力$(t - t_w) \downarrow$，传质推动力$(H - H_w) \downarrow$

因此，t_2不能过低，一般规定t_2比进入干燥器时空气的湿球温度t_w高20 ~ 50℃。

2. t_0、t_2一定时，$t_1 \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$

3. 回收废气中热量

4. 加强管道保温，减少热损失

五　理想干燥过程的计算

1.　干燥过程的简化

假设.

- 所有水分都是在表面气化阶段除去的, 物料保持一定温度不变实质上是假设物料内部水分向表面扩散的速率远大于表面气化速率.　使物料表面温度计饱和温度与内部传递过程无关 .
- 忽略被除去水分带入干燥器的热量和设备热损失.

$$VI_1 = VI_2 \underbrace{- WC_L\theta_1}_{\text{忽略}} + \underbrace{G_C C_{m2}(\theta_2 - \theta_1)}_{\theta_1 = \theta_2} + \underbrace{\theta_{损}}_{\text{忽略}}$$

所以　$\boxed{I_1 = I_2}$　即理想干燥过程为等焓过程.

2 理想过程的计算： 并流操作

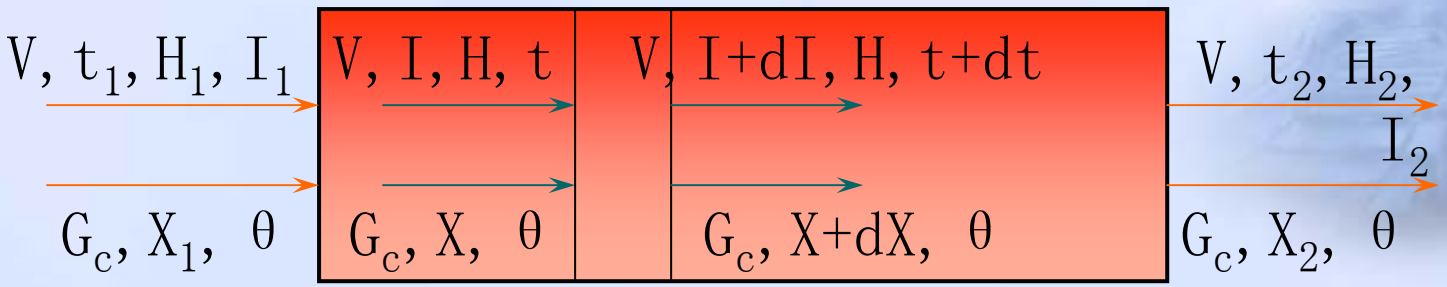


图 13-22 理想干燥过程的数学描述

物料衡算：

$$Vd_H = -Gdx \text{积分得} V(H_2 - H_1) = G_C(X_1 - X_2)$$

热量衡算： 根据理想干燥过程的两点假设

$$d_I = 0 \text{积分得} I_1 = I_2 \text{或}$$

$$\boxed{(C_g + C_V H_1)t_1 + r_0 H_1 = (C_g + C_V H_2)t_2 + r_0 H_2}$$

传质传热速率式

微元体内传热 $C_H V dt = \alpha a (t - \theta) d_V$

微元体内传质 $V d_H = k_H a (H_0 - H) d_V$

H_0—物料表面温度 θ 下气体的饱和温度。 。

d_V —为控制体

联立物衡算式，热衡算式及传热，传质速率式。可解决理想干燥过程的计算问题

在理想干燥器中，θ（ 不变）

所以 $$-C_H V dt = r_0 V d_H$$

带入微元体内传热方程中 $$r_0 V d_H = \alpha a (t-\theta) d_{\bar{V}}$$

求出物质表面温度

$$V d_H = k_H a (H_0 - H) d_{\bar{V}} = \frac{\alpha}{r_0}(t-\theta) d_{\bar{V}}$$

即 $$\theta = t - \frac{k_H r_0}{\alpha}(H_0 - H)$$

说明：物料表面温度 θ 等于与它接触的空气湿球温度 t_w

将传热和传质速率积分可得所需设备容积 $\overline{V}$ 。

积分传热速率式（因为容积传热系数 αa 比传质系数 $k_H a$ 更容易得到）。

$$\overline{V} = \frac{V}{\alpha a}\int_{t_2}^{t_1}\frac{C_H\,dt}{(t-\theta)} \qquad (C_H V dt = \alpha a(t-\theta)d_{\overline{V}})$$

在理想干燥过程中

$$\theta = t_W , I = Const .$$

找出 C_H 与 t 的关系 通过数值积分算 $\overline{V}$（V为气体流量）

$$C_H = C_g + C_V H = const$$

$$\overline{V} = \frac{VC}{\alpha a} \ln \frac{t_1 - t_W}{t_2 - t_W}$$

改变该式形式如下

$$VC_H (t_1 - t_2) = \alpha a \overline{V} \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_W}{t_2 - t_W}} = \alpha a \overline{V} \frac{(t_1 - t_W) - (t_2 - t_W)}{\ln \frac{t_1 - t_W}{t_2 - t_W}}$$

$$VC_H(t_1 - t_2) = \alpha a \overline{V} \Delta t_m$$

设计型计算时

已知 G_C, X_1, X_2, H_1

选择 t_1, t_2

求得 $V, H_2, \theta, \overline{V}$

3 理想干燥过程的热效率

$$V(C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2) = \theta_1 + \theta_2 + \theta_{损}$$

$$Q_2 = 0, \theta_{损} = 0$$

气体在干燥器内所出的热量全部用于气化水分

$$Q_1 = (C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{损}$$

$$Q = V(C_g + C_V H_1)(t_2 - t_0)$$

$$Q_1 = (C_g + C_V H_1)(t_1 - t_2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{损}$$

$$Q = V(C_g + C_V H_1)(t_2 - t_0)$$

$$\eta_{理想} = \frac{Q_1}{Q} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}$$ 所以$t_1\uparrow, t_2\downarrow$,可使$\eta\uparrow$.

13--3--6 实际干燥过程所需要容积的估算

对于某些干燥过程可简化为理想干燥过程，例如，临界含水量低，颗粒尺寸有很小的松散物料的干燥，但大多数情况下，不能简化为理想干燥过程。前面讲过，物料内部的传热与传质将对干燥产声影响。使问题变得更复杂。迄今为止，还没有成熟的理论解决问题的办法。往往是通过实验室或凭经验解决问题。因此，对实际干燥过程做出某种程度的简化，然后粗略估算所需设备的容积。

参见课本（P248页）

13-3-6　实际干燥过程所需要容积的估算

对于某些干燥过程可简化为理想干燥过程，例如，临界含水量低，颗粒尺寸有很小的松散物料的干燥，但大多数情况下，不能简化为理想干燥过程。前面讲过，物料内部的传热与传质将对干燥产生影响。使问题变得更复杂。迄今为止，还没有成熟的理论解决问题的办法。往往是通过实验室或凭经验解决问题。因此，对实际干燥过程做出某种程度的简化，然后粗略估算所需设备的容积。

参见课本（P248页）