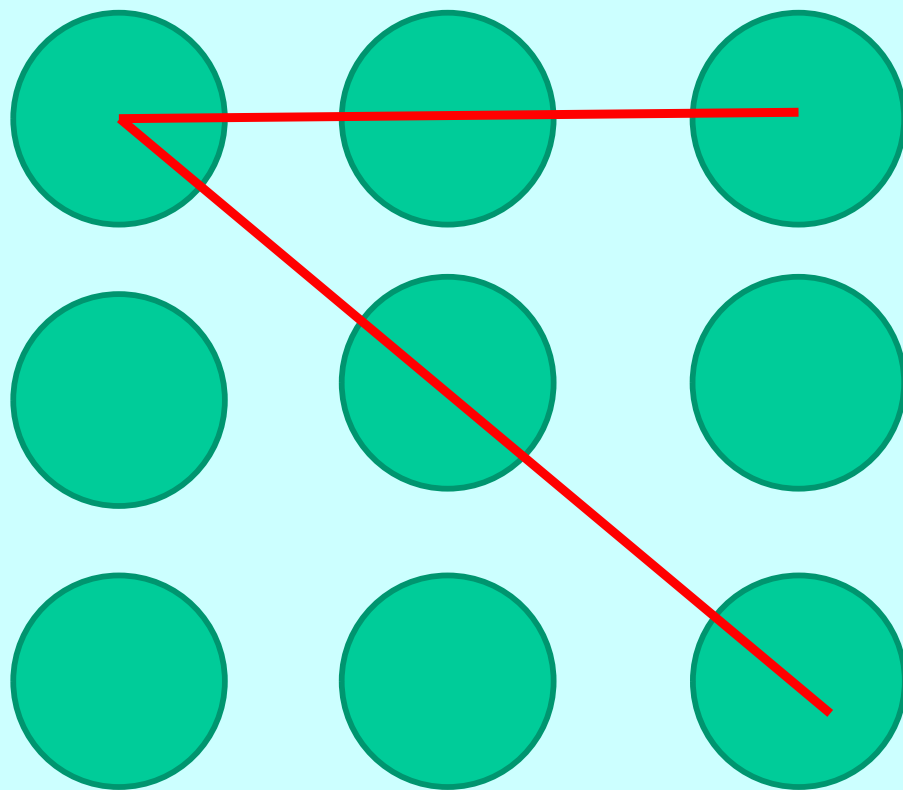


手势签到



第14章 固体干燥

14.1 概述

14.1.1 固体去湿方法和干燥过程

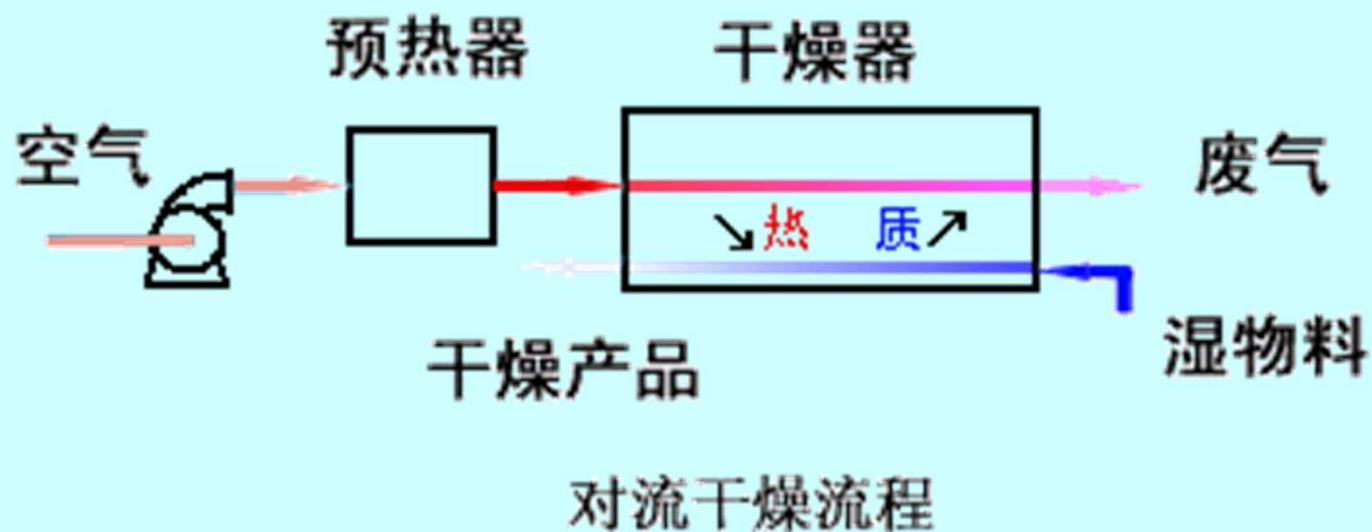
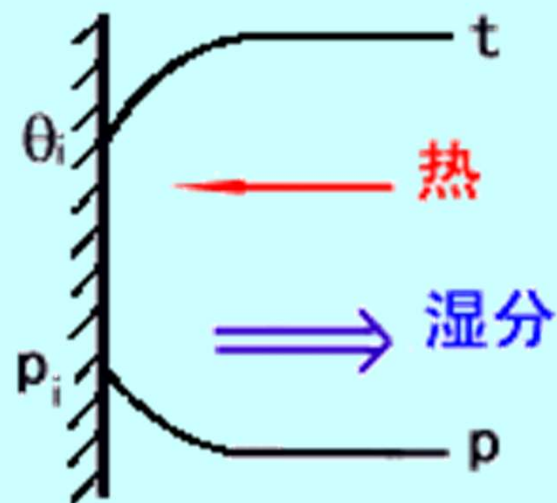
- 目的

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

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

湿空气性质

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

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \times 100\%$$

$$\nu_H = (0.773 + 1.244H) \times \frac{273+t}{273} \times \frac{1.013 \times 10^5}{P}$$

$$c_H = 1.01 + 1.88H$$

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

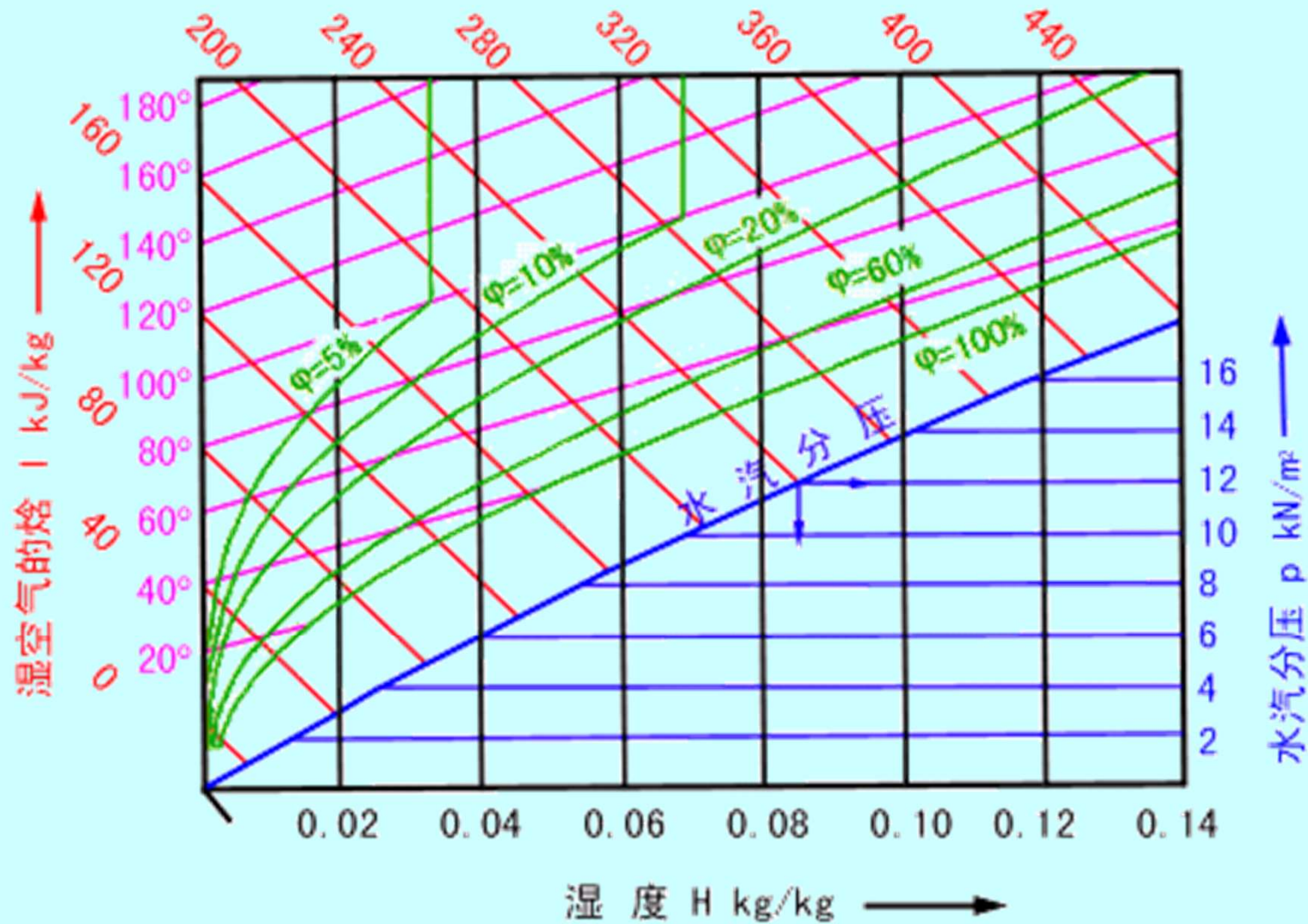
$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H)$$

$$t_{as} = t - \frac{r_0}{c_H} (H_{as} - H)$$

$$t_d$$

总压一定，
两个参数决
定空气状态

空气-水系统的I-H图(总压100kPa)



- 等 I 线
- 等 H 线
- 等 t 线
- 等 ϕ 线
- p 线

问题:

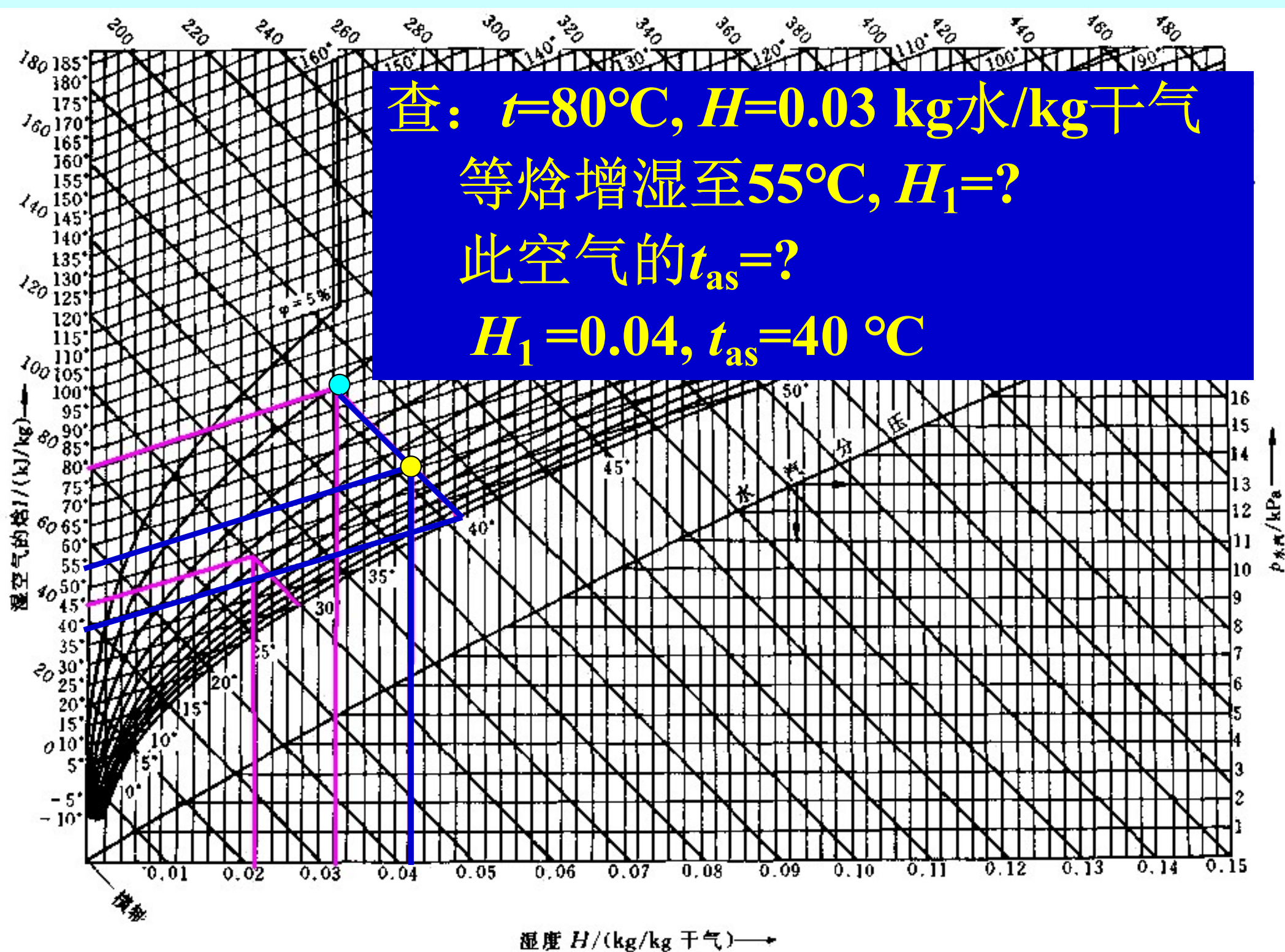
$t=80^{\circ}\text{C}$, $H=0.03$ kg水/kg干气

等焓增湿至 55°C , $H_1=?$

此空气的 $t_{\text{as}}=?$



查: $t=80^{\circ}\text{C}$, $H=0.03 \text{ kg水/kg干气}$
 等焓增湿至 55°C , $H_1=?$
 此空气的 $t_{\text{as}}=?$
 $H_1=0.04$, $t_{\text{as}}=40^{\circ}\text{C}$



问题:

$$t_w=30^{\circ}\text{C}, t=45^{\circ}\text{C}, H=?$$

提示:

路易斯规则:

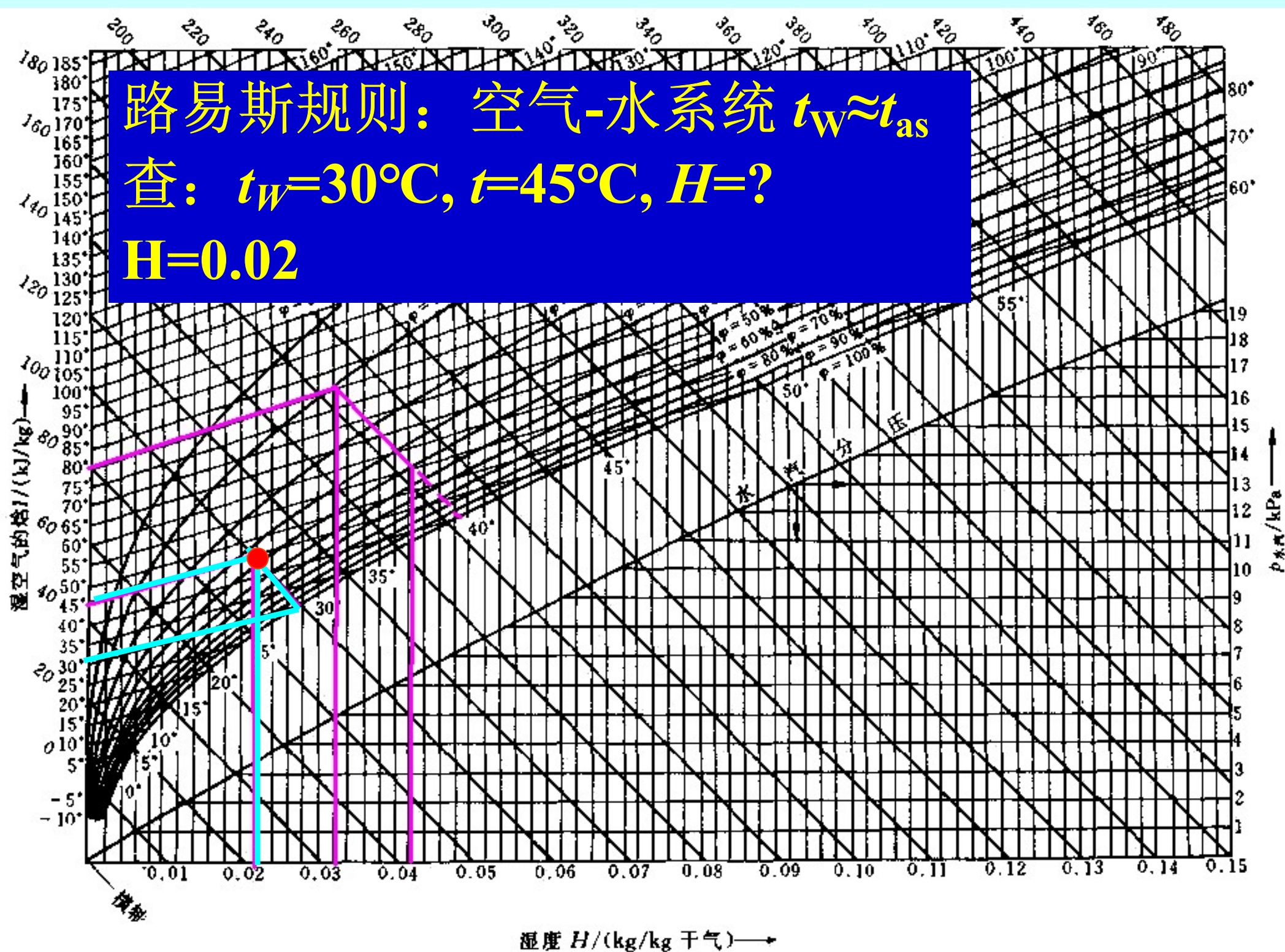
空气-水系统 $t_w \approx t_{as}$



路易斯规则：空气-水系统 $t_w \approx t_{as}$

查： $t_w = 30^\circ\text{C}$, $t = 45^\circ\text{C}$, $H = ?$

$H = 0.02$



湿空气性质小结

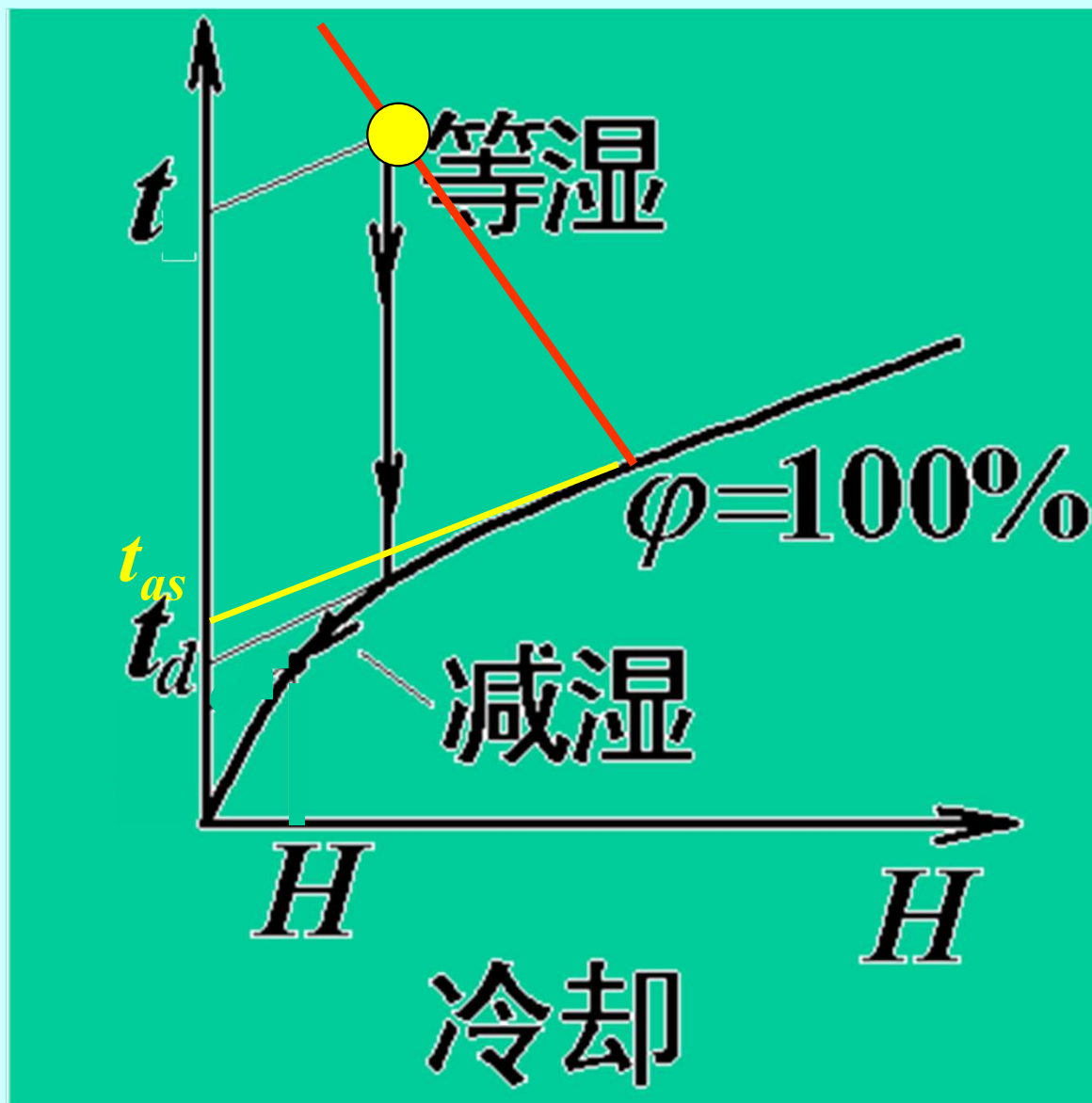
(1) 当总压一定时，表征空气状态只有两个独立参数。即已知两个相互独立的参数即可（在I-H图上）确定一个湿空气状态点，其他参数也可以或确定。

(2) t 、 t_w 、 t_{as} 、 t_d 关系（ $\varphi=1$ ， $\varphi<1$ ）

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

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

图示 t 、 t_w 、 t_{as} 、 t_d



$\varphi=1$, $\varphi<1$,
四个温度的关系?

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

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

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 $G_c = G(1 - w)$

问题7:

- 1、结合水和非结合水以什么区分？各自的特点是什么？
- 2、平衡水和自由水以什么区分？
- 3、“在一定空气状态下物料中不能除去的水分”这句话是否意味着这部分水再也无法除去了？举例子说明。

✓ 物料中的几种水分

1、 结合水分与非结合水分

----**取决于物料本身的性质，与空气状况无关。**

非结合水-----机械地附着在物料表面的水分，或物料堆积层中大空隙中的水分

特点：与固体相互结合力较弱，较易去除；

非结合水的性质与纯水的相同，

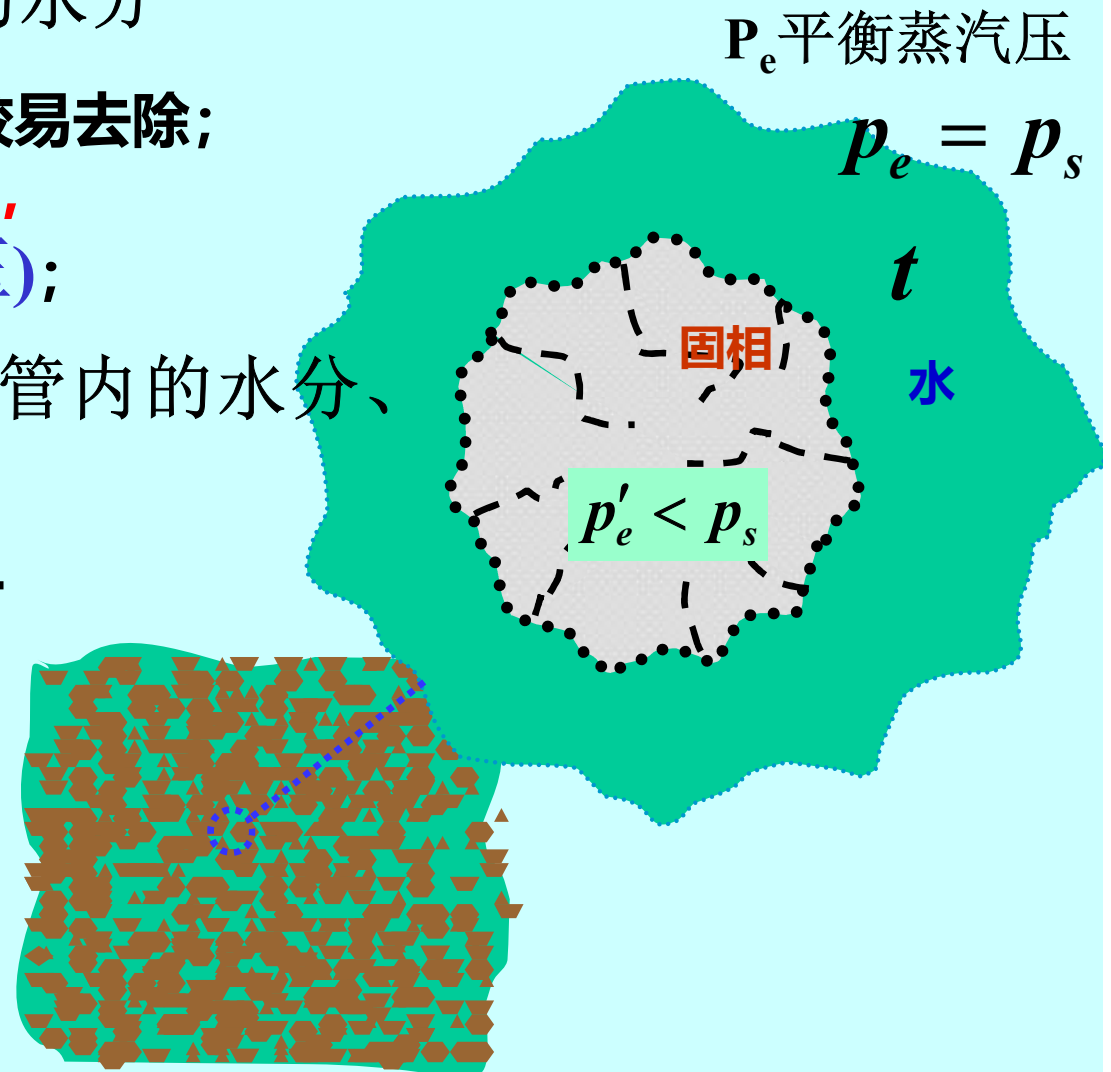
$P_e = P_s$ (水的饱和蒸汽压)；

结合水-----结晶水、小毛细管内的水分、细胞内的水分等。

特点：结合水的平衡蒸气压 P_e' 低于

同温下水的饱和蒸气压 P_s ；
借化学力或物理化学力
与固体相结合，难去除。

$P_e' < P_s$



✓ 物料中的几种水分

2、平衡水分与自由水分 ----取决于物料本身的性质、空气状态。

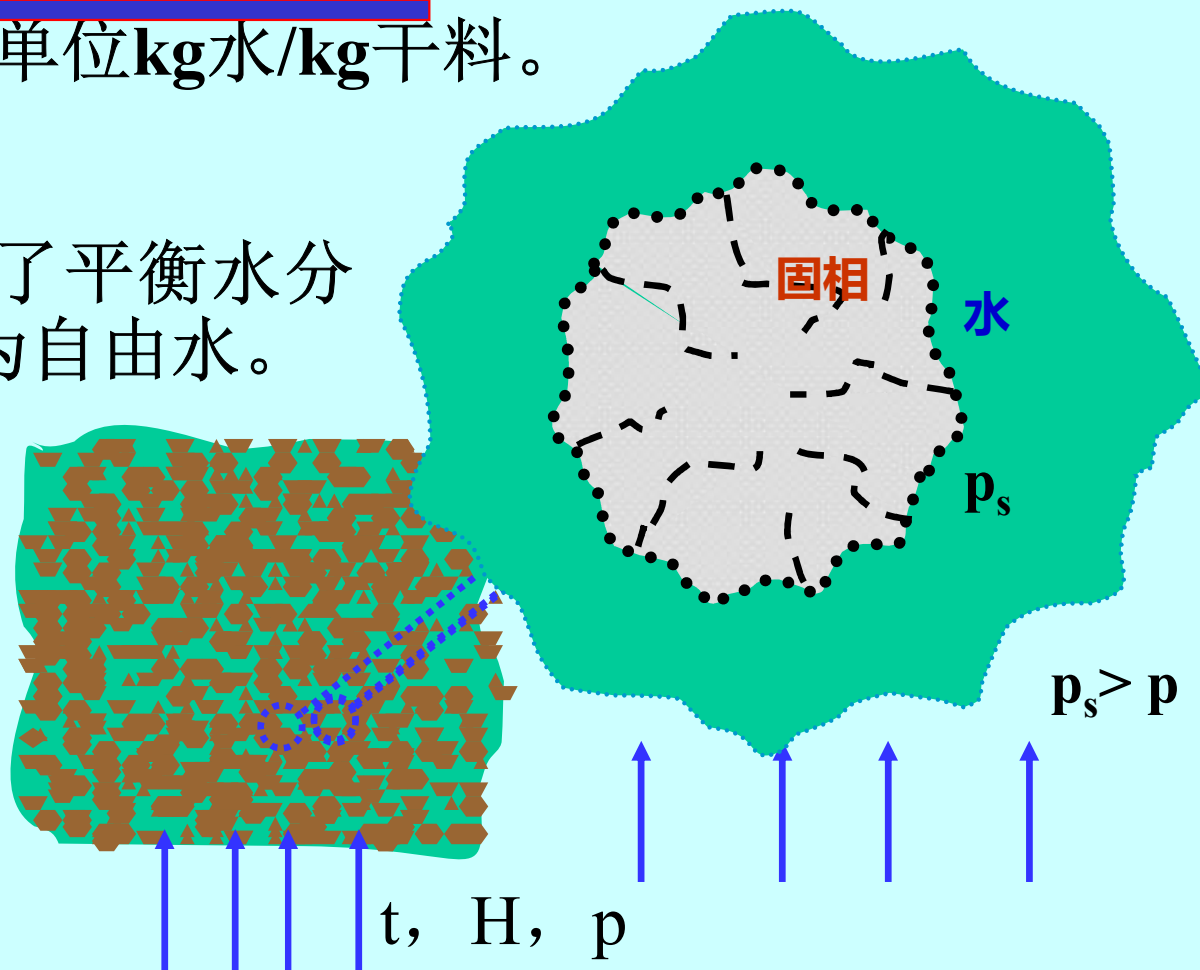
什么是**平衡水分**? -----在一定空气状态下的干燥极限

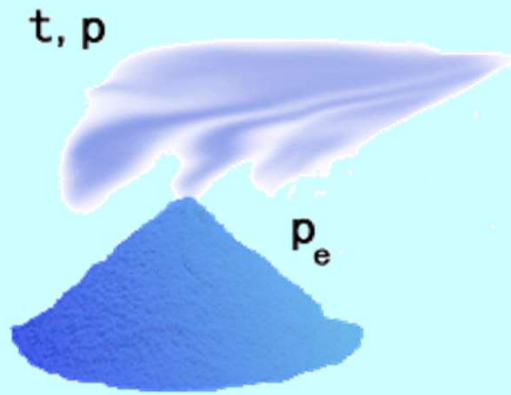
在一定空气状态下，湿物料中的**恒定含水量**称为该物料的平衡水。也就是在一定空气状态下物料中不能除去的水分。用 X^* 表示，单位 kg水/kg干料 。

什么是**自由水分**?

物料总水分中，除了平衡水分以外的那部分水，称为自由水。

思考：“在一定空气状态下物料中不能除去的水分”这句话是否意味着这部分水再也无法除去了?





• 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。

p_e 平衡蒸汽压， p_s 水的饱和蒸汽压

➤ 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

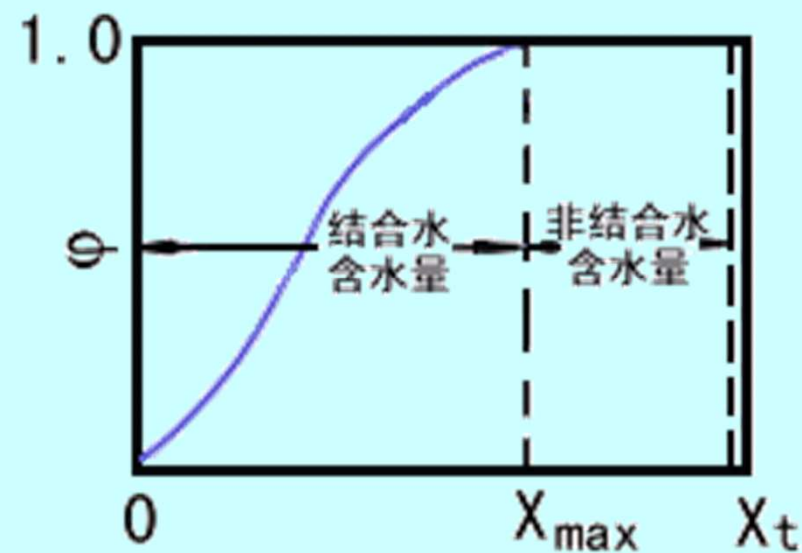
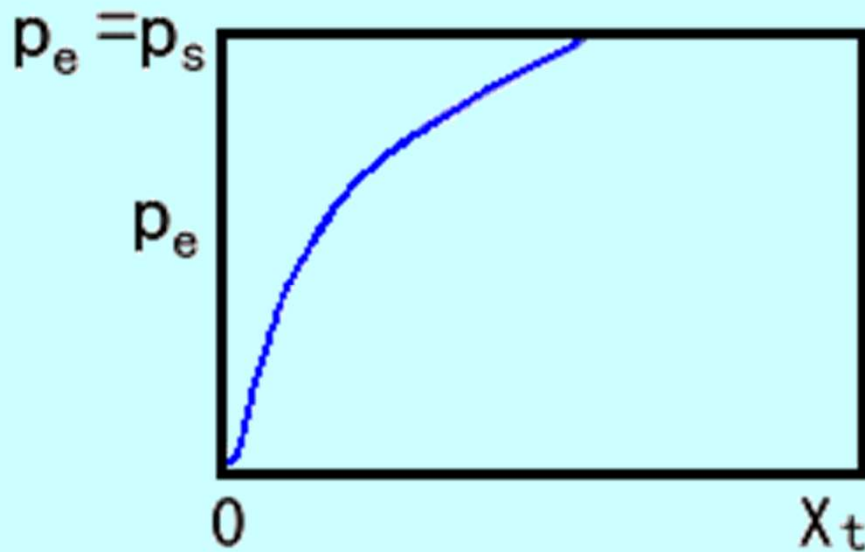
此时，固体中的含水量 X^* 称对应该空气状态的平衡水分， $X_t - X^*$ （包括非结合水和部分结合水）为所有被指定状态空气带走的水分，称自由水分。

p_e 平衡蒸汽压, p_s 水的饱和蒸汽压

- 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 (平衡蒸汽压与含水量 X_t 关系)

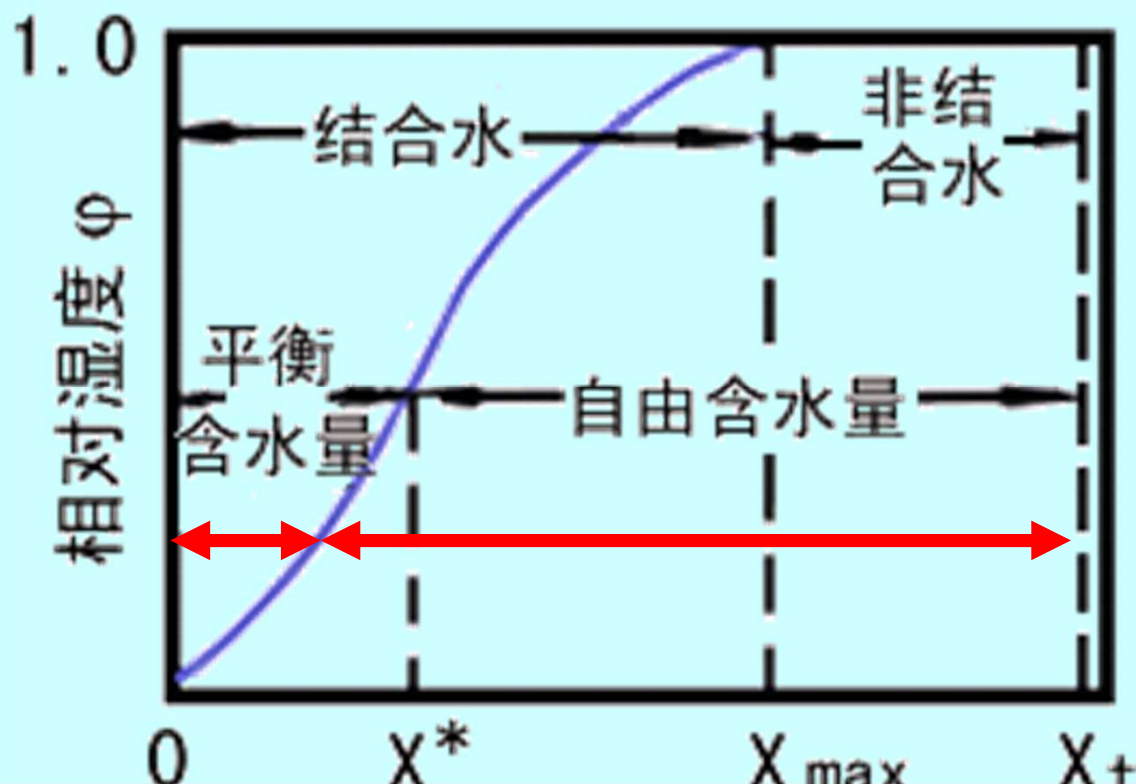


$$\phi = \frac{p_e}{p_s}$$

总结

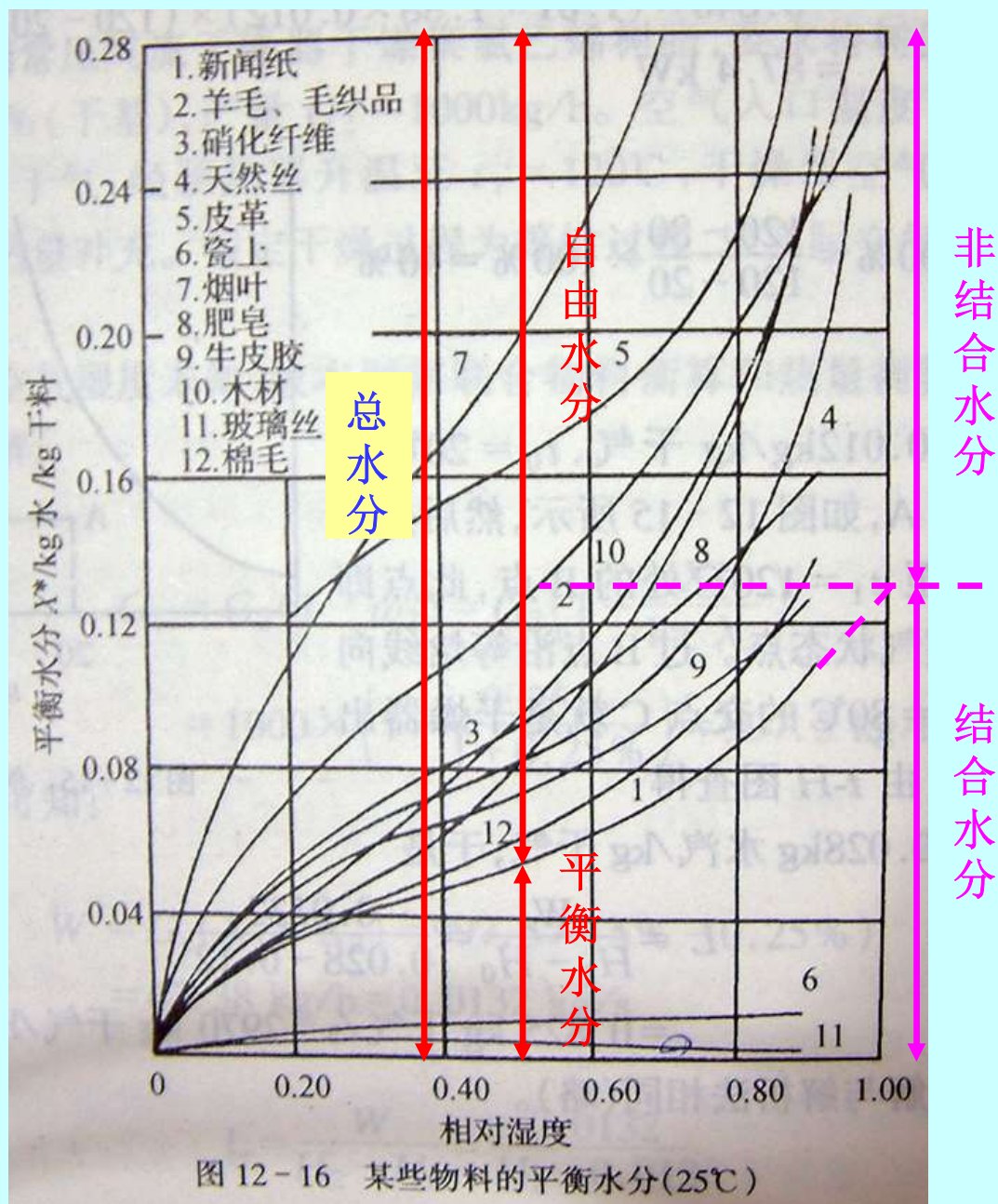
- (1) **结合水与非结合水**是以结合力来区分的，表现为**平衡蒸汽压**不同，其大小只与湿固体的性质有关而与气体状态无关。
- (2) **平衡水、自由水**是以传质的平衡状态划分的，不仅与湿料的性质有关还与气体状态有关。相同湿料，**气体 ϕ 越小则 X^* 越低**。

$$\phi = \frac{p_e}{p_s}$$



找出新闻纸的平衡水分、自由水分、非结合水、结合水

$$\varphi=0.5$$



问题8:

- 1、恒定的干燥条件是什么？干燥速率如何表示？
- 2、恒速和降速干燥阶段各除去什么水？
- 3、画出干燥干燥曲线与干燥速率曲线。
- 4、干燥速率下降的原因是什么？

14.2.4 干燥速率和干燥时间-----干燥动力学

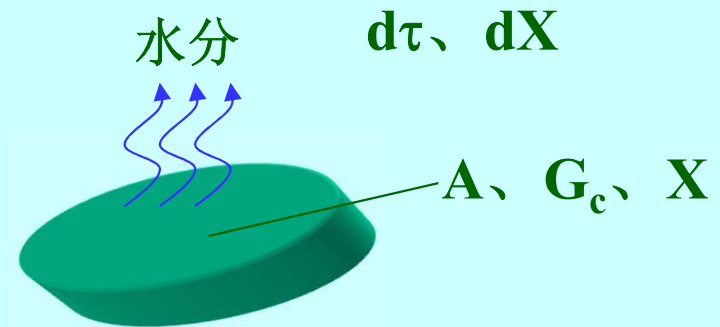
干燥动力学可以解决干燥室尺寸问题

一、干燥速率: $kg/(m^2 \cdot s)$

单位时间、单位干燥表面所汽化的水分量，称为干燥速率

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

干燥速率定义



其中 G_c ——绝干物料质量， kg ；

A ——干燥面积， m^2 ；

X ——物料中干基含水率， kg 水/ kg 干料。

二、干燥过程及机理

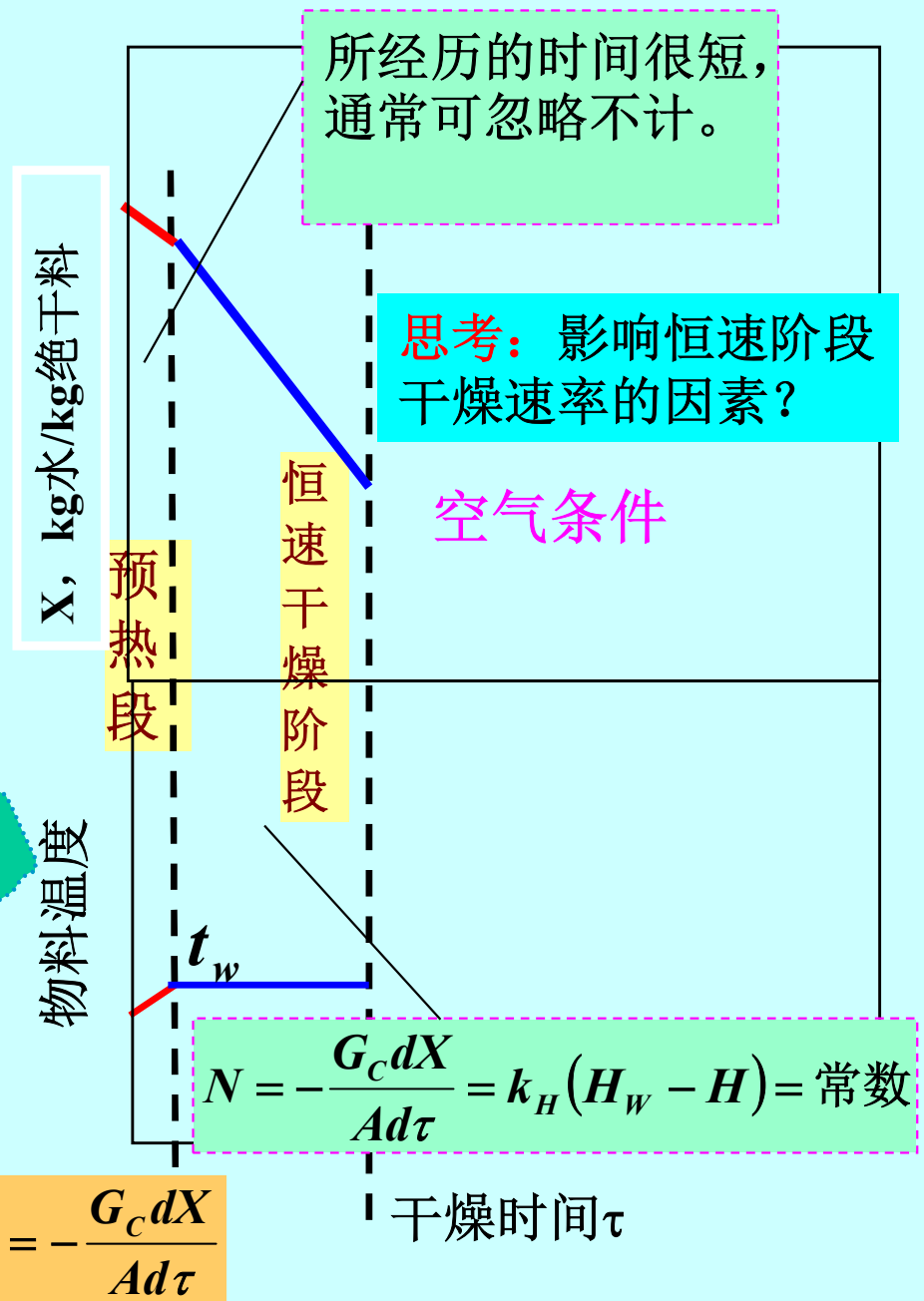
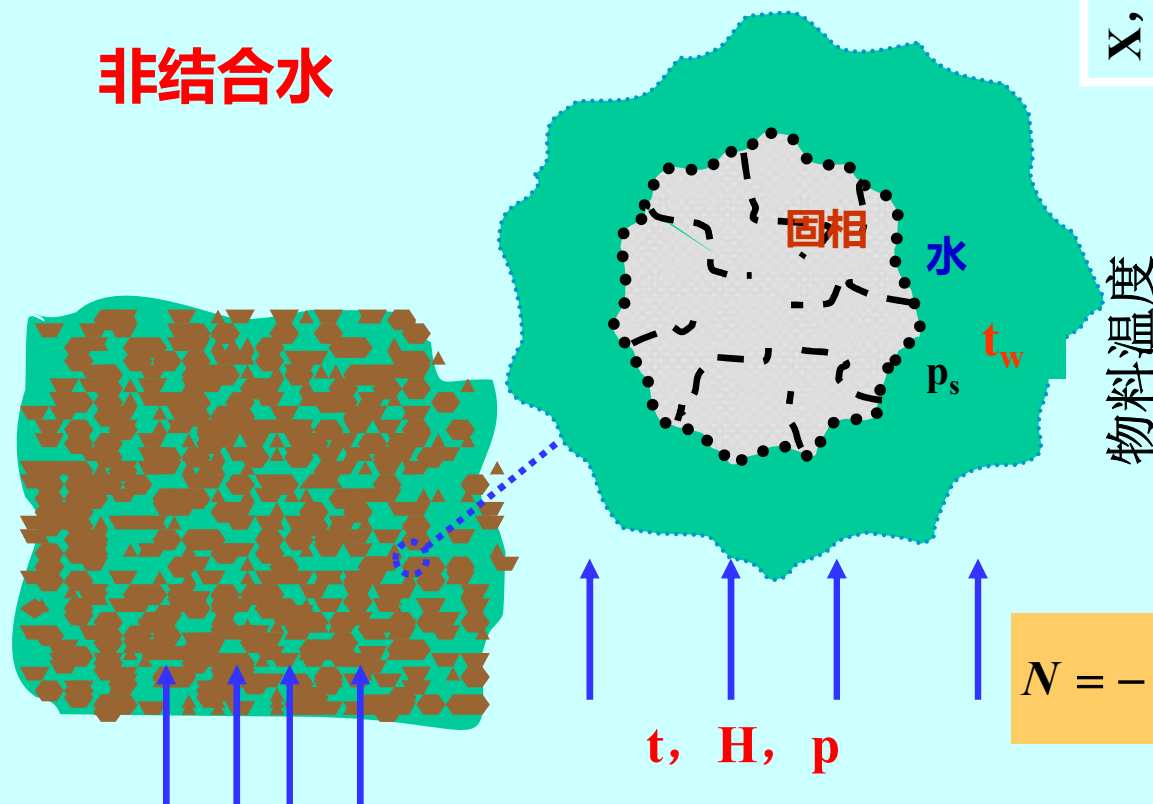
恒定干燥条件:

- ① 湿空气的状态（温度、湿度）不变、
- ② 空气流速不变、
- ③ 与物料的接触方式不变

思考:

恒速阶段除去的是什么水?

非结合水



二、干燥过程及机理

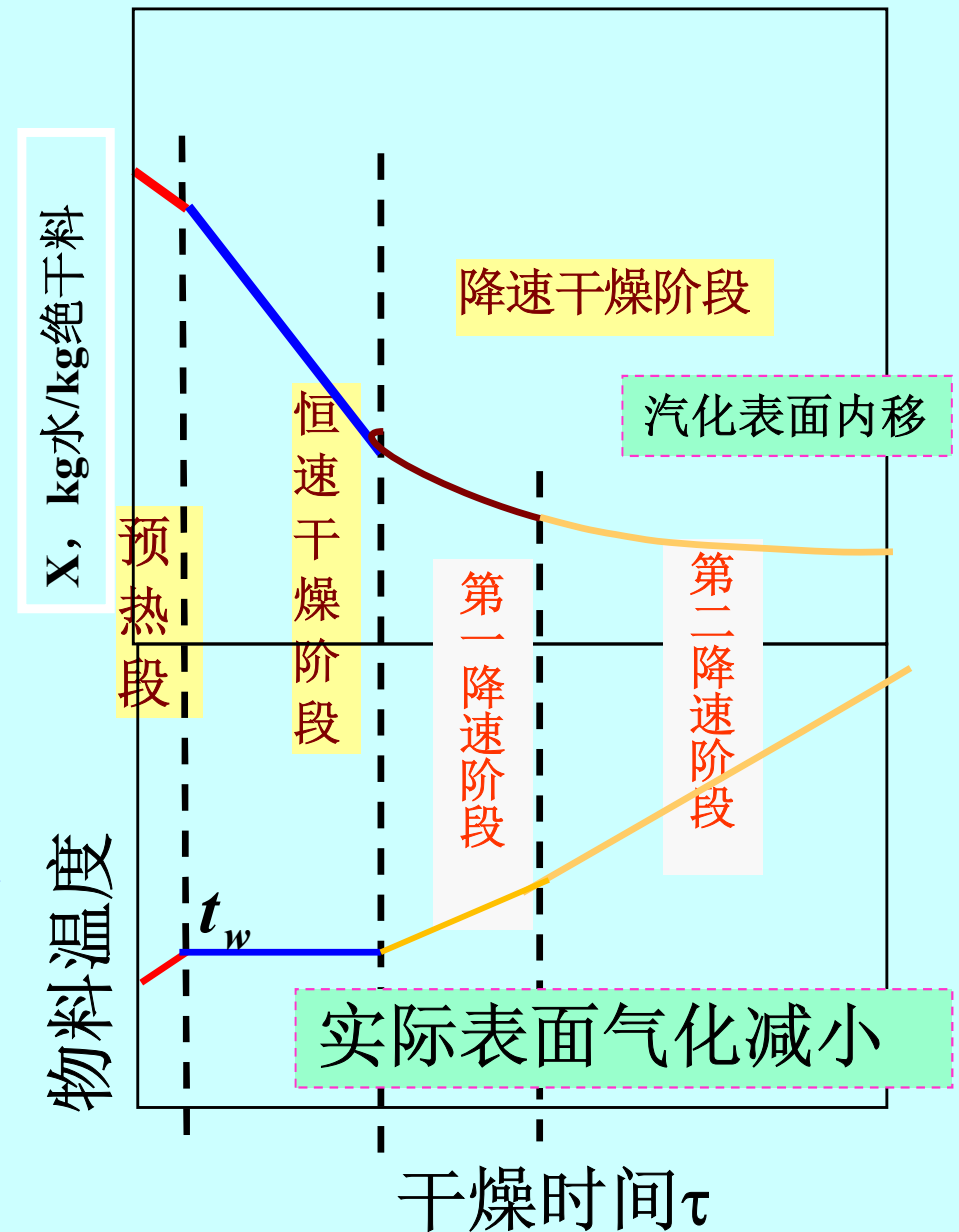
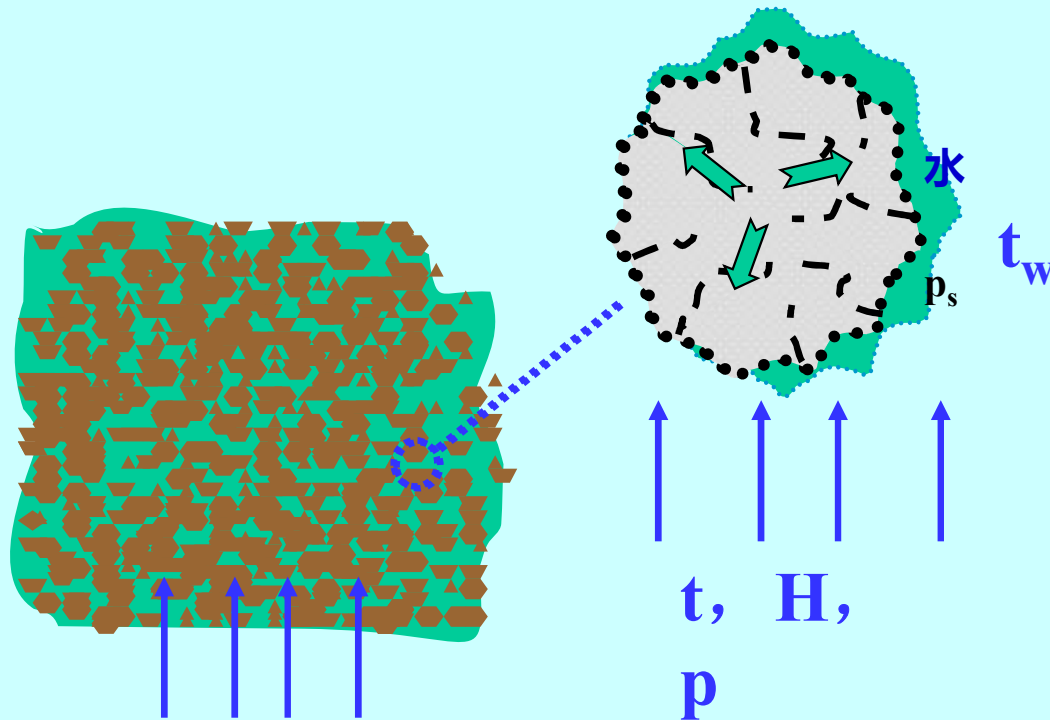
整个干燥过程可分为三个阶段：

预热段、恒速段、降速段

$$N = -\frac{G_c dX}{Ad\tau}$$

思考：降速阶段除去的是什么水？

非结合水和部分结合水

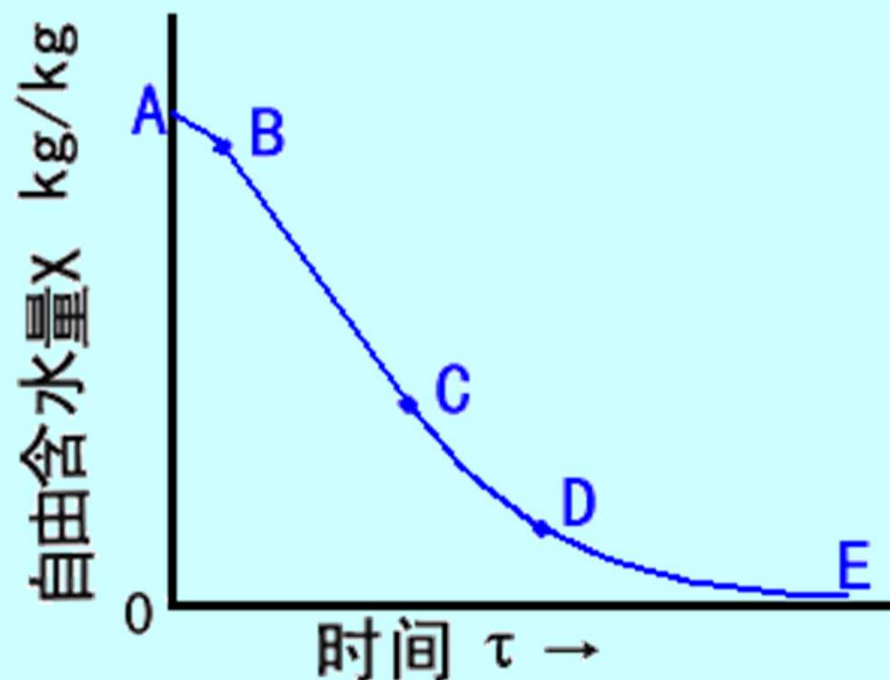


干燥曲线与干燥速率曲线

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。

干燥速率

(1) 干燥曲线



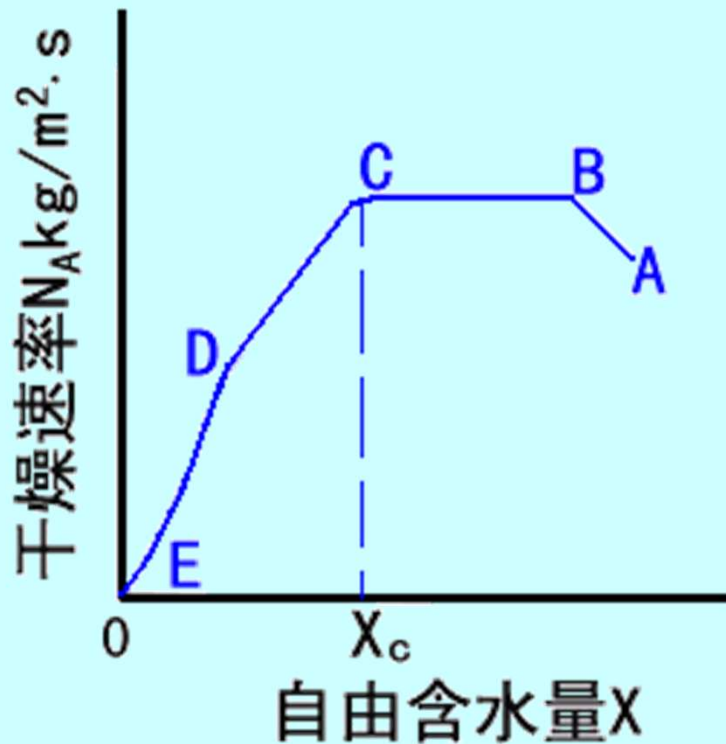
$$N = -\frac{G_c dX}{A d\tau}$$

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

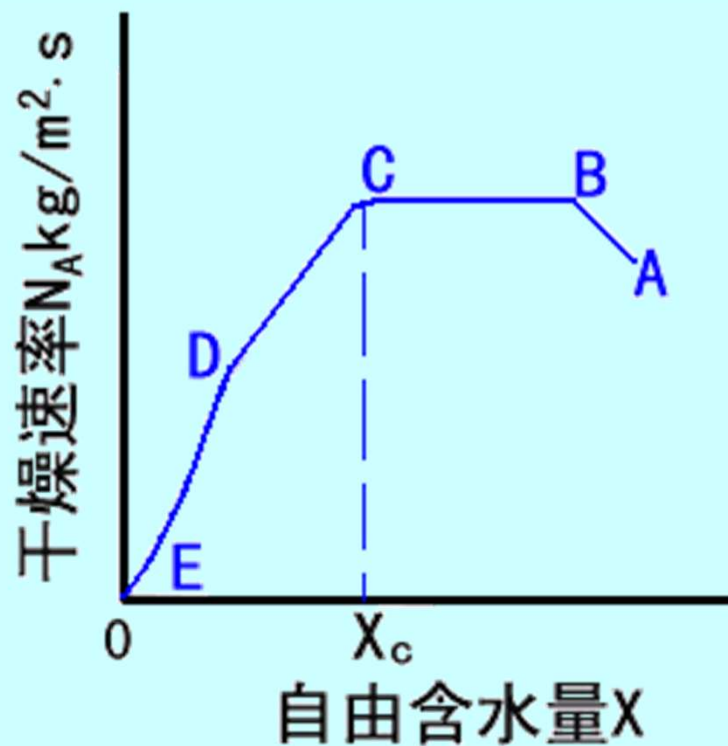
BC : 恒速段, $\theta = t_w$ 不变

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

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

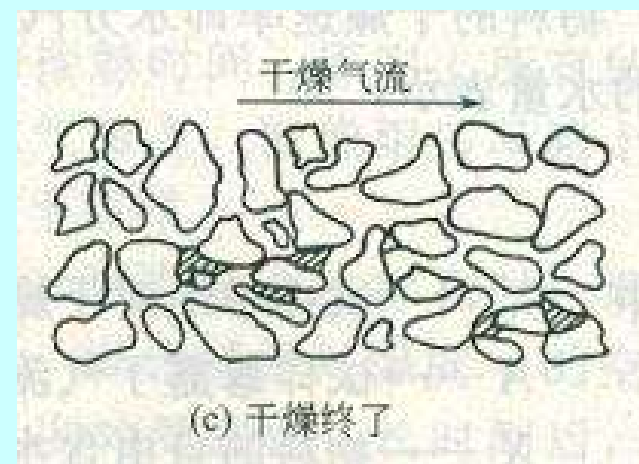
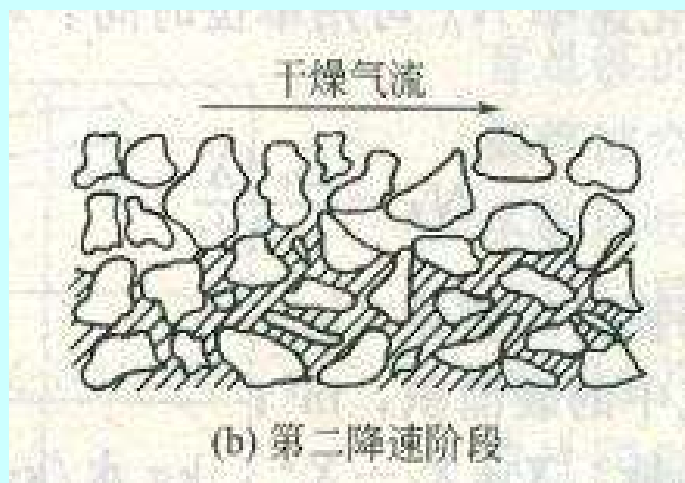
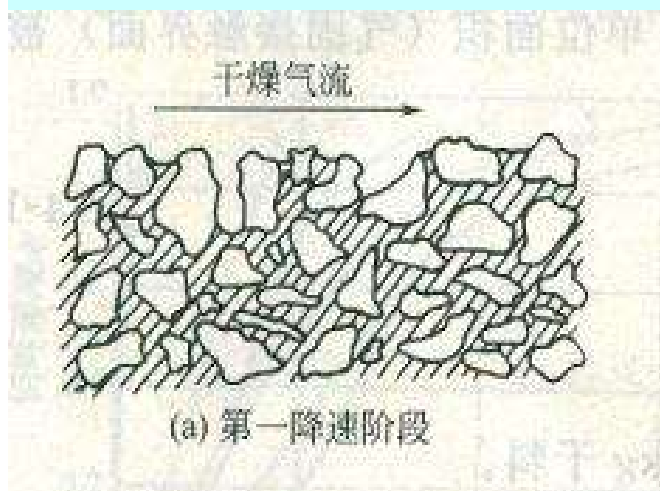
N_A 下降原因



CD段 N_A 下降原因：实际汽化表面减小

DE段 N_A 下降原因：

- ①汽化表面内移；
- ②结合水的干燥，平衡蒸汽压下降；
- ③固体内部水分扩散速率低。



问题9:

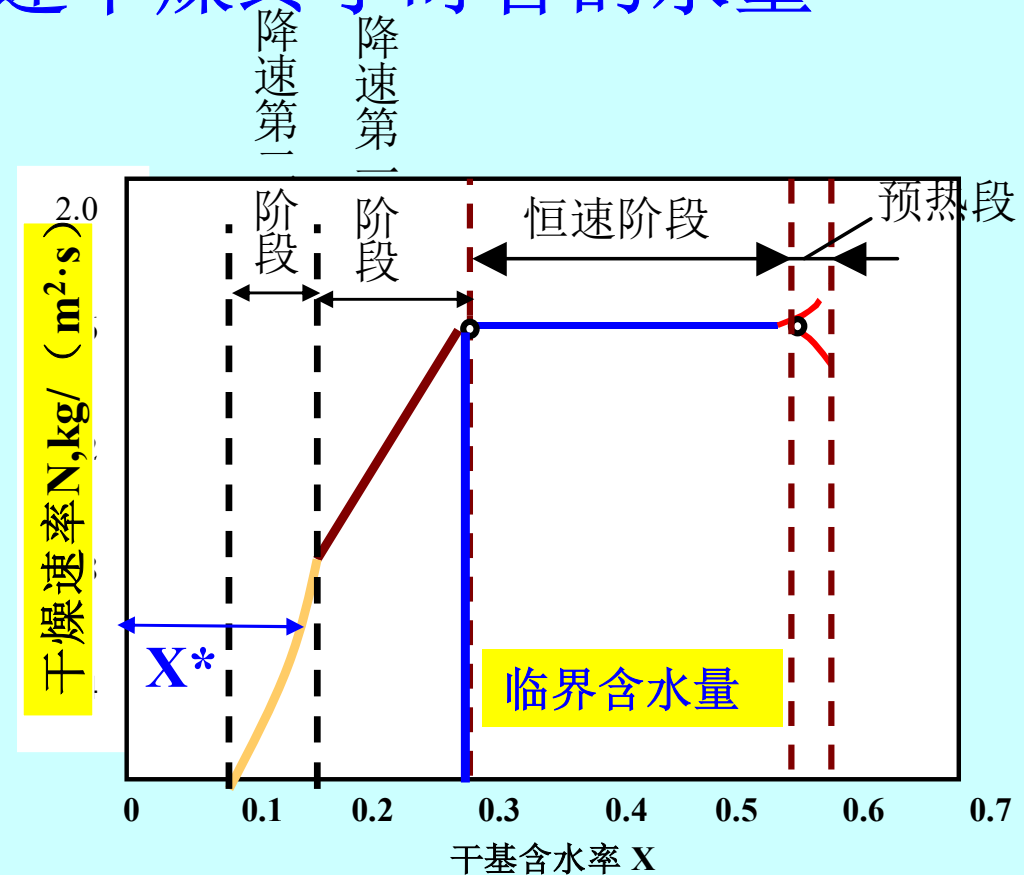
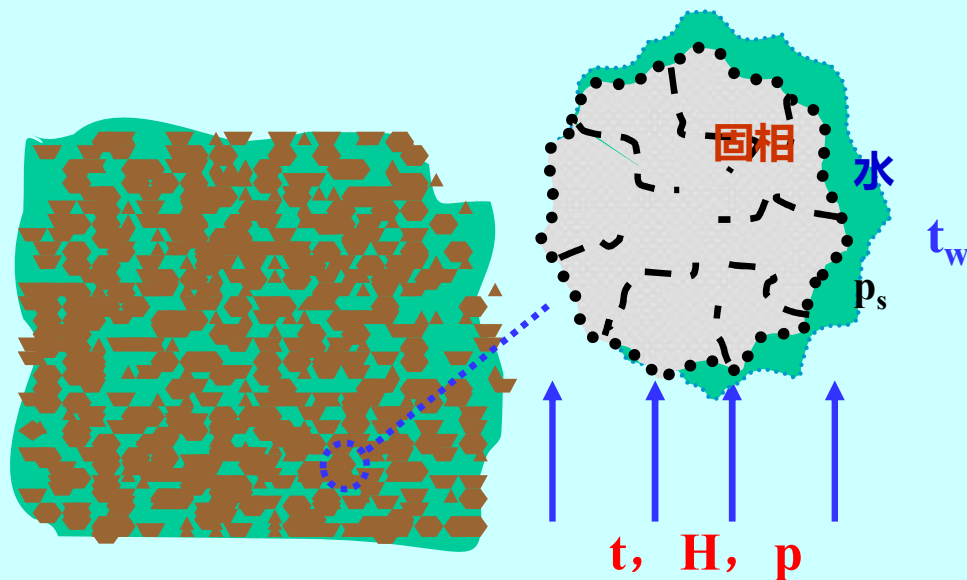
- 1、什么是临界含水量？影响临界含水量大小的因素是什么？
- 2、空气温度 t 、湿度 H 不变，流速 u 增加，则 N_A 加快， X_c ， X^* 如何变化，为什么？
- 3、空气湿度 H 、流速 u 不变，温度 t 升高，则 N_A 加快， X_c ， X^* 如何变化，为什么？

二、干燥过程及机理

临界含水量 X_c ——物料在恒速干燥终了时含的水量

思考：影响临界含水量大小的因素？

- 干燥介质状况（流速、温度、湿度等）
- 物料本身的结构、性质、厚度等



恒定干燥条件下的干燥速率曲线

临界自由含水量
= 临界含水量 - 平衡含水量
(X^*)

练习 在恒定干燥条件下将含水**20%**（干基，下同）的湿物料进行干燥，开始时干燥速度恒定，当干燥至含水量**5%**时，干燥速度开始下降，再继续干燥至物料恒重，并设法测得此时物料含水量为**0.05%**，则物料的临界自由含水量为_____。

- A 5% B 20%**
C 0.05% D 4.95%

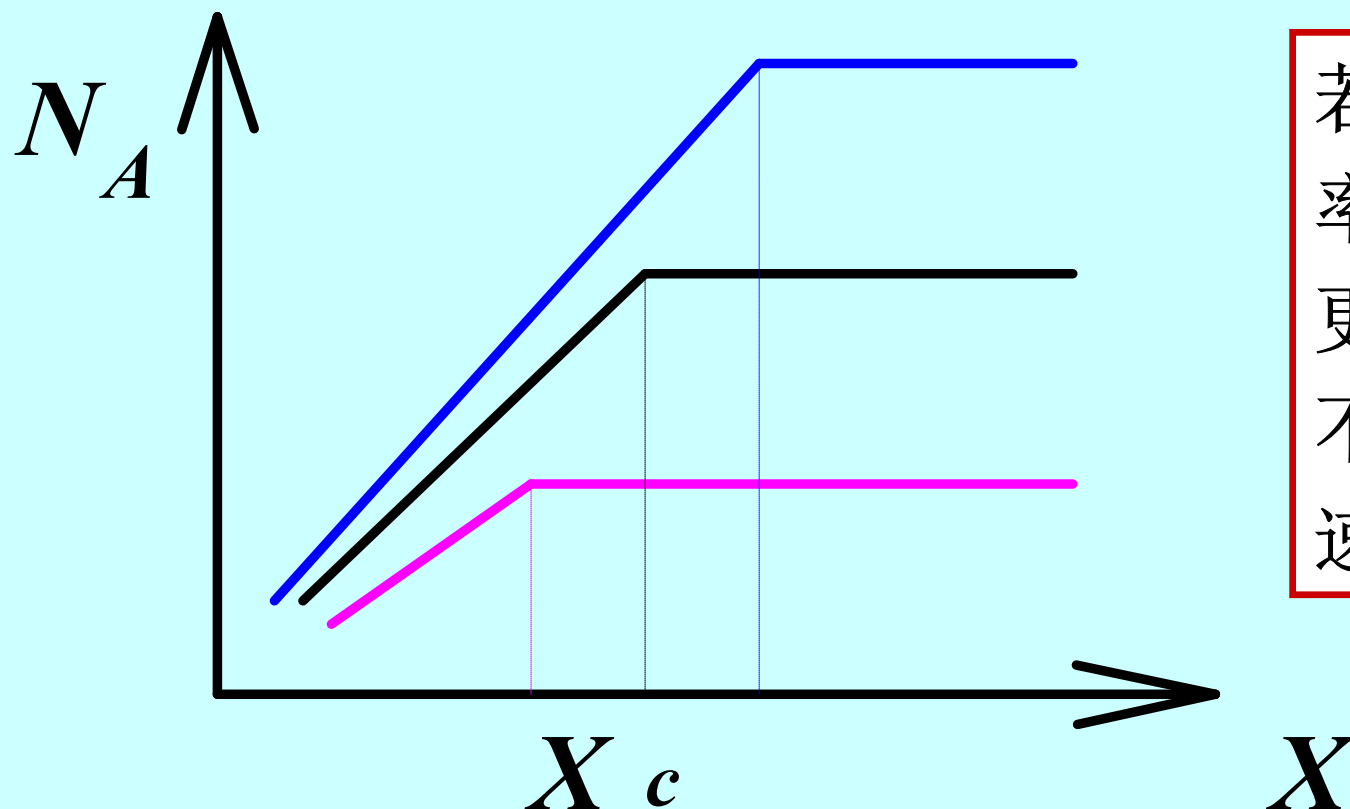


练习 在恒定干燥条件下将含水**20%**（干基，下同）的湿物料进行干燥，开始时干燥速度恒定，当干燥至含水量**5%**时，干燥速度开始下降，再继续干燥至物料恒重，并设法测得此时物料含水量为**0.05%**，则物料的临界自由含水量为_____。

A 5% B 20% C 0.05% D 4.95%

（临界含水量） 5-（平衡含水量） 0.05=4.95， D

- ✓ 干燥介质变化时，临界含水量多少取决于恒速段干燥速率的大小，
- ✓ 恒速段干燥速率越低，临界含水量越低



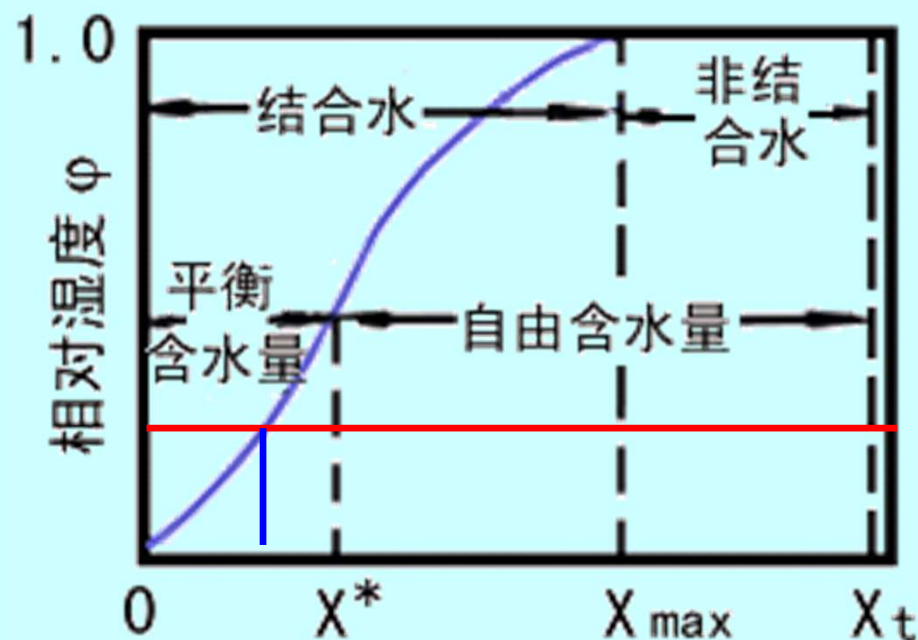
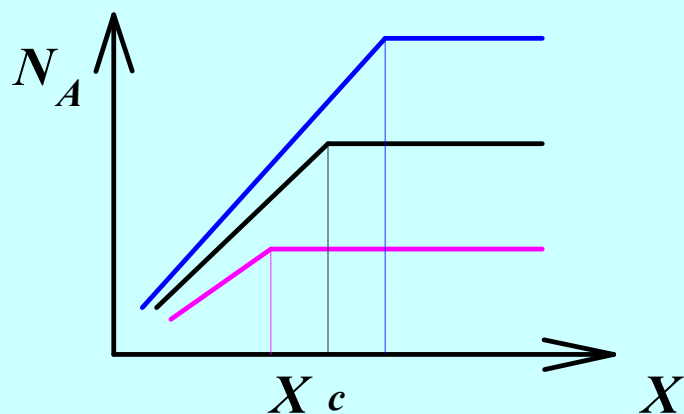
若恒速阶段干燥速率越快，则可能有更多的非结合水来不及去除就进入降速阶段， X_c 就越大。

讨论

空气条件对 $N_{A恒}$ 、 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，则 X_c 上升，而 X^* (因空气状态)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 t 升高即 ϕ 下降而下降。



讨论

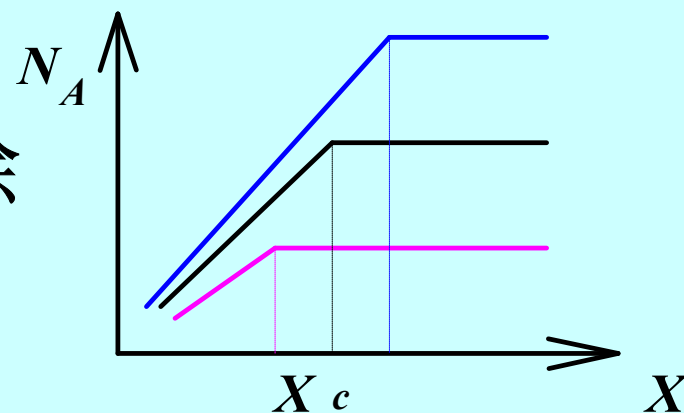
临界含水量 X_c 的影响

物料本身的结构、性质、厚度等影响

- 其他干燥条件相同，若物料越薄、分散越细，恒速阶段去除的非结合水越完全，则 X_c 越小；

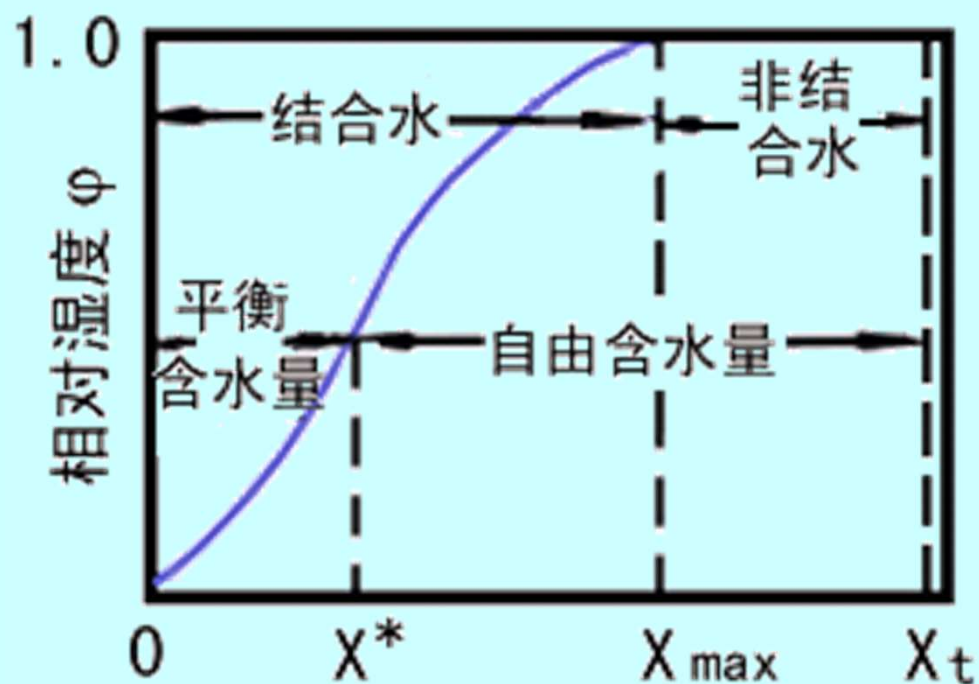
干燥介质状况（流速、温度、湿度等）影响

- 若恒速阶段干燥速率越快，则可能有更多的非结合水来不及去除就进入降速阶段，则 X_c 就越大。



思考

干燥介质（空气）的 t 、 H 、 u 增大，平衡含水量如何变化？



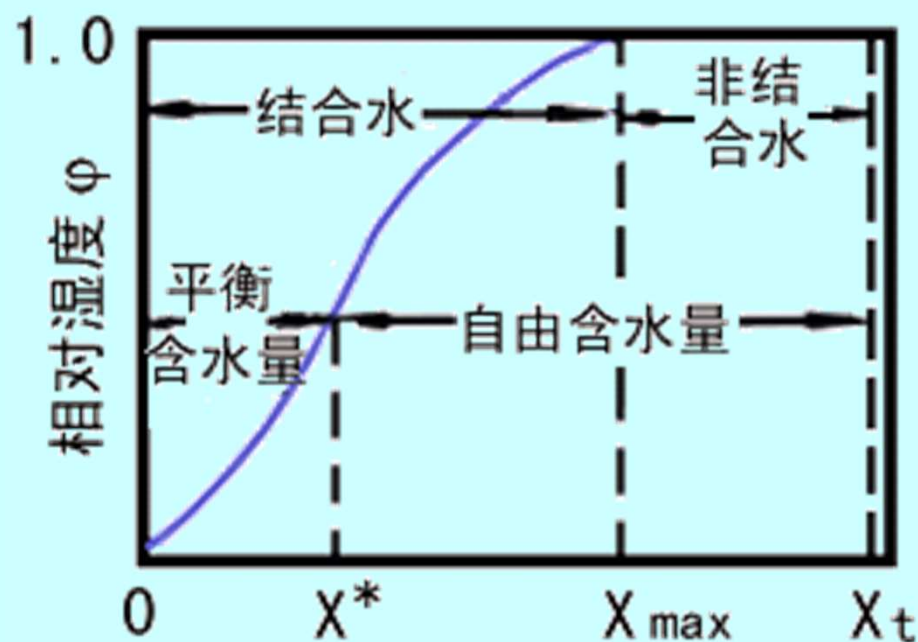
思考

干燥介质（空气）的 t 、 H 、 u 增大，平衡含水量如何变化？

若 $t \uparrow$ ， $\phi \downarrow$ ，平衡含水量 \downarrow ；

若 $H \uparrow$ ， $\phi \uparrow$ ，平衡含水量 \uparrow ；

若 $u \uparrow$ ， ϕ 不变，平衡含水量不变。

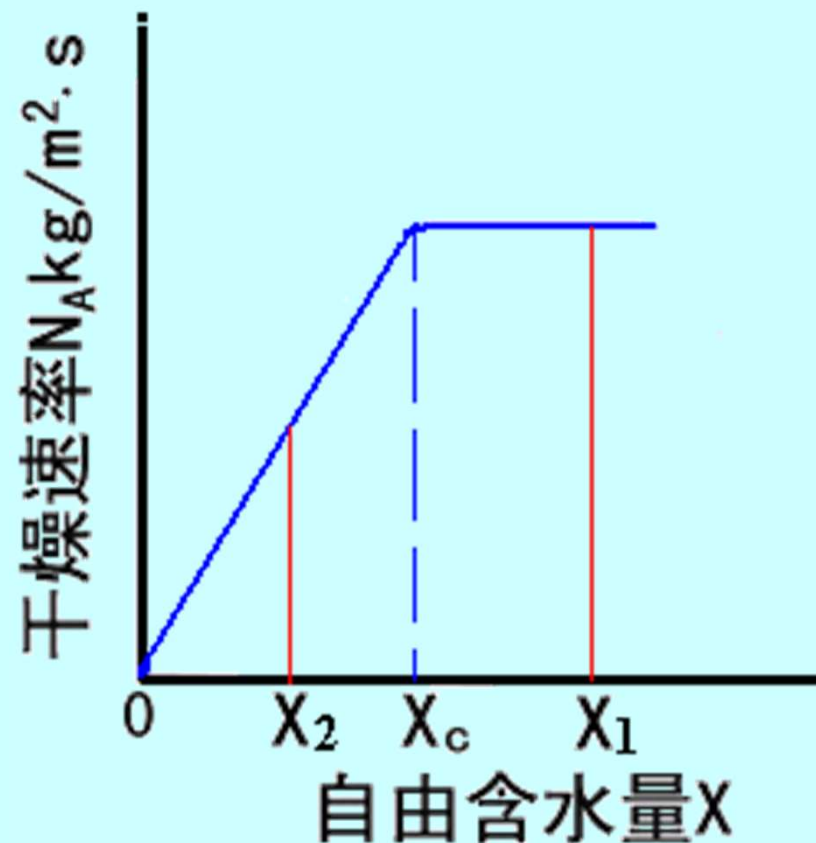
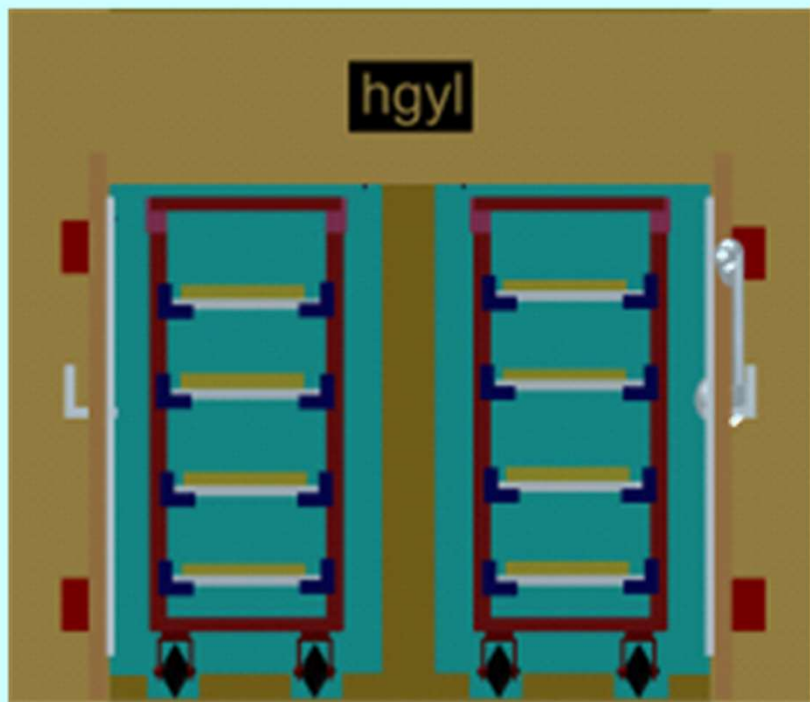


14.3.2 间歇干燥过程的计算

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（ X 为自由含水量）



14.3.2.1 恒速阶段的干燥时间 τ_1

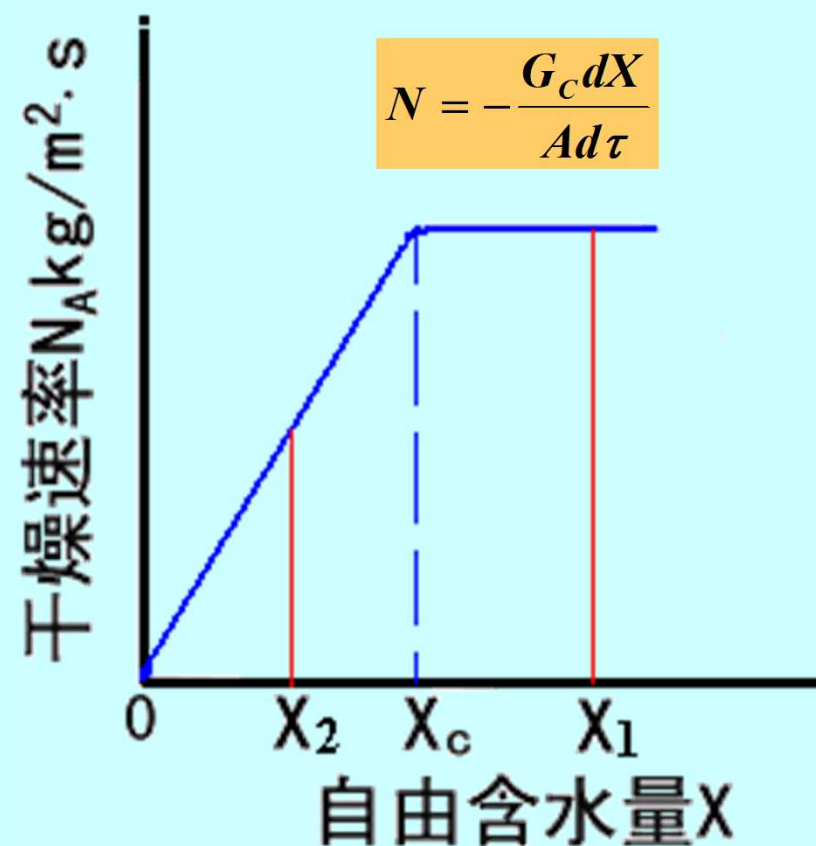
$$\because N = -\frac{G_c dX}{Ad\tau} = \text{常数} = N_A$$

$$\therefore \int_0^{\tau_1} d\tau = \frac{G_c}{AN_A} \int_{X_c}^{X_1} dX$$

$$\tau_1 = \frac{G_c(X_1 - X_c)}{AN_A}$$

其中 $N_A = k_H(H_w - H)$

$$= \frac{\alpha}{r_w}(t - t_w)$$



14.3.2.2 降速阶段的干燥时间 τ_2

$$\therefore N_A = -\frac{G_c dX}{Ad\tau} = K_x X$$

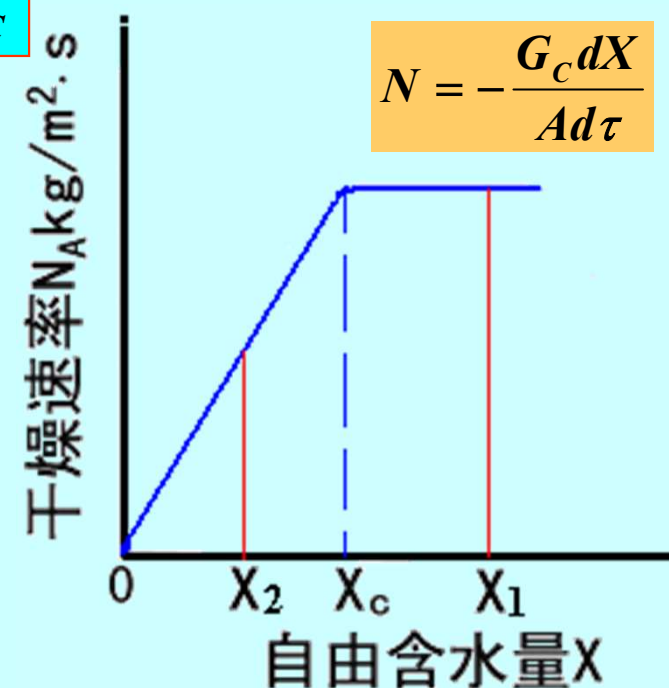
若降速段干燥速率曲线为直线, $K_x = \text{const}$

$$\int_0^{\tau_2} d\tau = \frac{-G_c}{AK_x} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{X}$$

$$\text{斜率 } K_x = \frac{N_{\text{恒}}}{X_c}$$

$$\therefore \tau_2 = \frac{G_c}{AK_x} \ln \frac{X_c}{X_2}$$

间歇干燥时间 $\tau = \tau_1 + \tau_2$



若X为含水量，干燥时间 τ 的计算

$$\tau_1 = \frac{G_c (X_1 - X_c)}{AN_c}$$

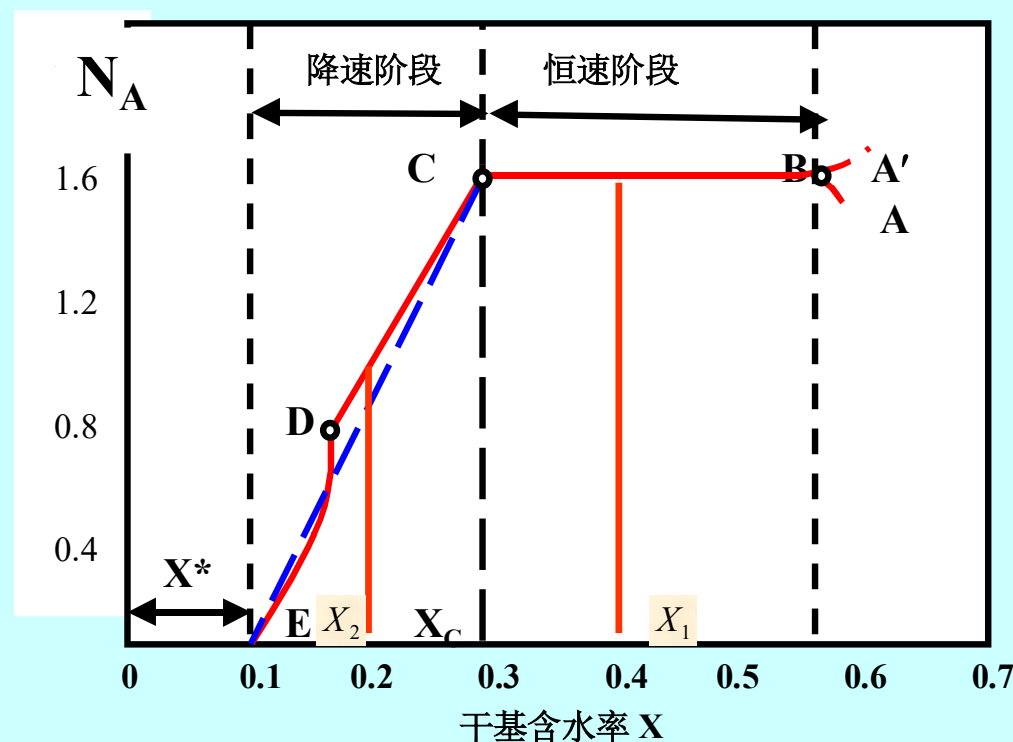
$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = \frac{G_c}{A} \int_{X_2 - X^*}^{X_c - X^*} \frac{dX}{N}$$

若降速阶段的干燥曲线可近似为直线，则

$$\text{斜率 } K_X = \frac{N_A}{X_c - X^*}$$

$$\tau_2 = \frac{G_c (X_c - X^*)}{AN_A} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

间歇干燥时间 $\tau = \tau_1 + \tau_2$



恒定干燥条件下的干燥速率曲线

- **例** 某物料在定态空气条件下间歇干燥，每批物料的处理量为**500kg**干料，干燥面积为**20m²**，已知恒速干燥阶段的干燥速率为**1.2kg/(m²·h)**，干燥时间为**1.5h**。求物料从**0.12kg水/kg干料**干燥到**0.006kg水/kg干料**所需的时间。
- 物料的平衡含水量近似为零，降速阶段的干燥速率与自由含水量成正比。

- 解：恒速干燥时间

$$\tau_1 = \frac{G_c}{A(N_A)_{\text{恒}}} (X_1 - X_c) \quad 1.5 = \frac{500}{20 \times 1.2} (0.12 - X_c)$$

- 临界含水量 $X_c = 0.048 \text{kg水} / \text{kg干料}$

- 降速阶段干燥时间

$$\tau_2 = \frac{G_c X_c}{A(N_A)_{\text{恒}}} \ln \frac{X_c}{X_2} = \frac{500 \times 0.048}{20 \times 1.2} \ln \frac{0.048}{0.006} = 2.079 \text{hr}$$

- 总的干燥时间

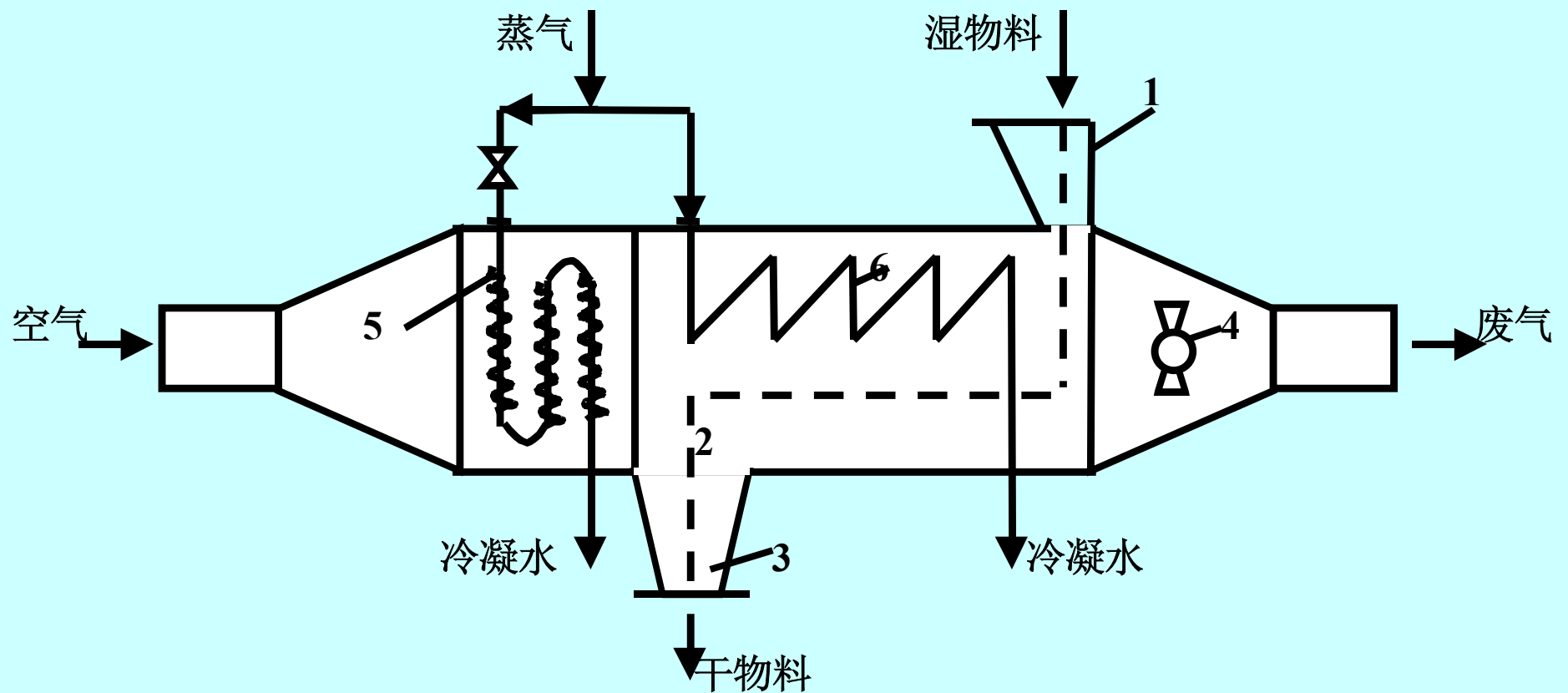
$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 1.5 + 2.079 = 3.579 \text{h}$$

问题10

间歇干燥过程和连续干燥过程的区别？

一、连续干燥过程的一般特性

间歇干燥过程和连续干燥过程的区别？

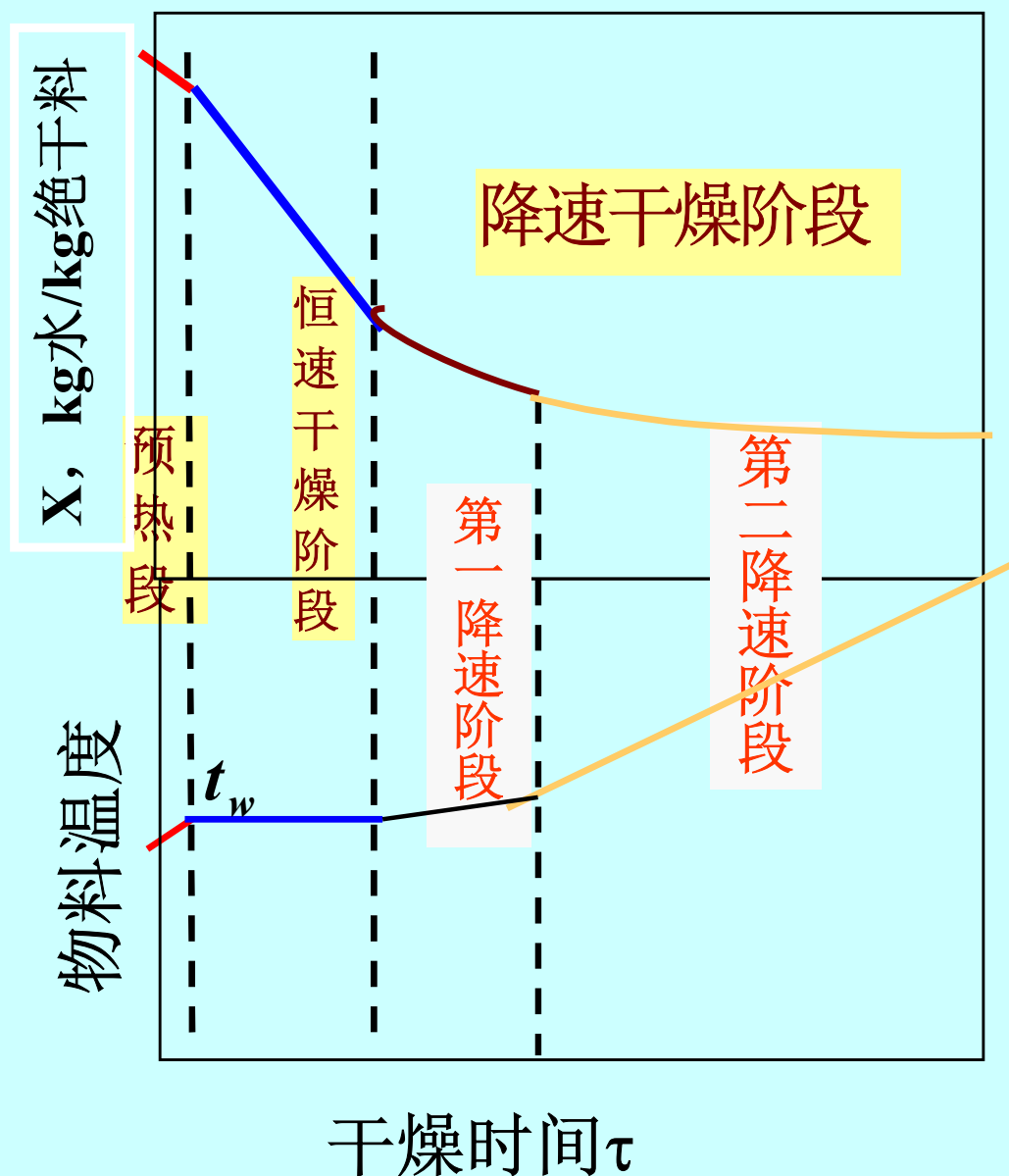


空气干燥器的流程图

1—进料口；2—干燥室；3—卸料口；4—抽风机；5、6—空气加热器

一、连续干燥过程的一般特性

间歇干燥过程特点



恒定干燥条件:

- ① 湿空气的状态（温度、湿度）不变
- ② 空气流速不变
- ③ 与物料的接触方式不变

整个干燥过程可分为三个阶段:

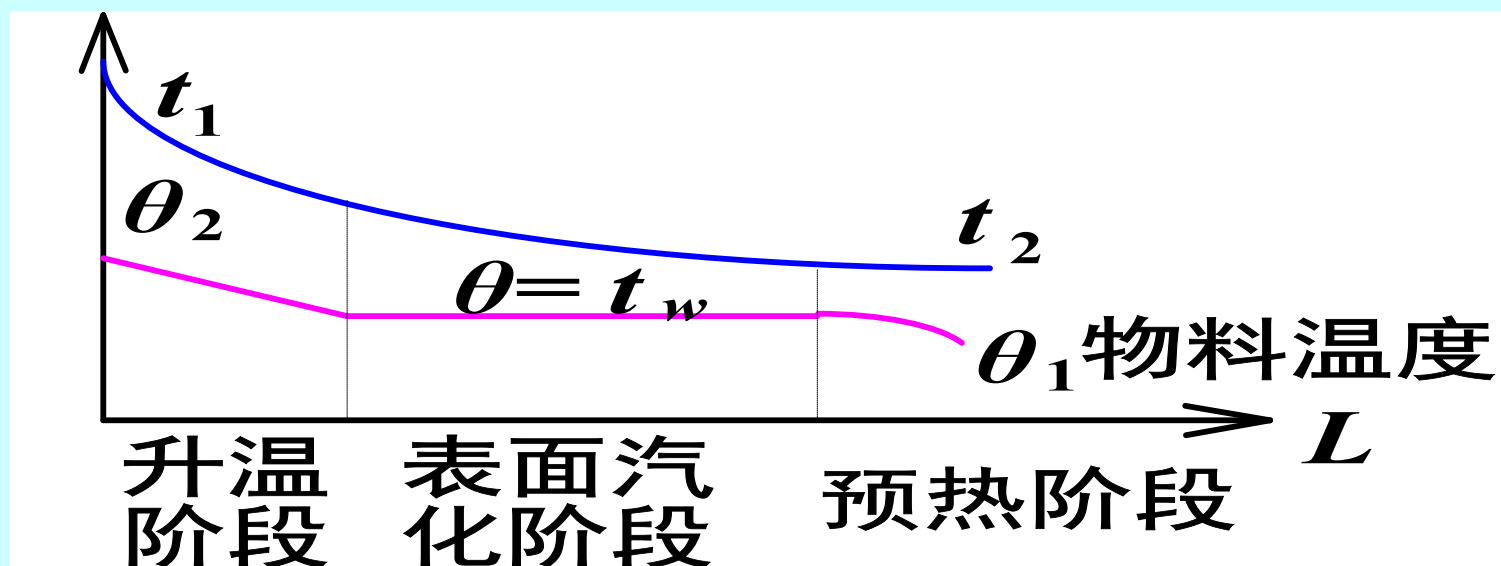
预热段、恒速阶段、
降速阶段

一、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， $t \downarrow H \uparrow$ 。
- (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，等焐过程



作业： 1、 3、 4、 5、 6、 8、 9、 10、 12