

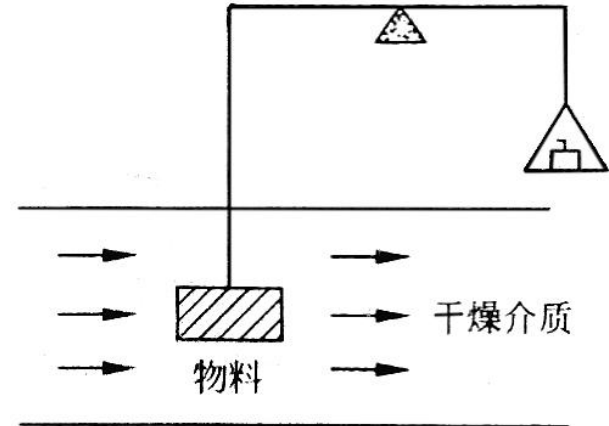
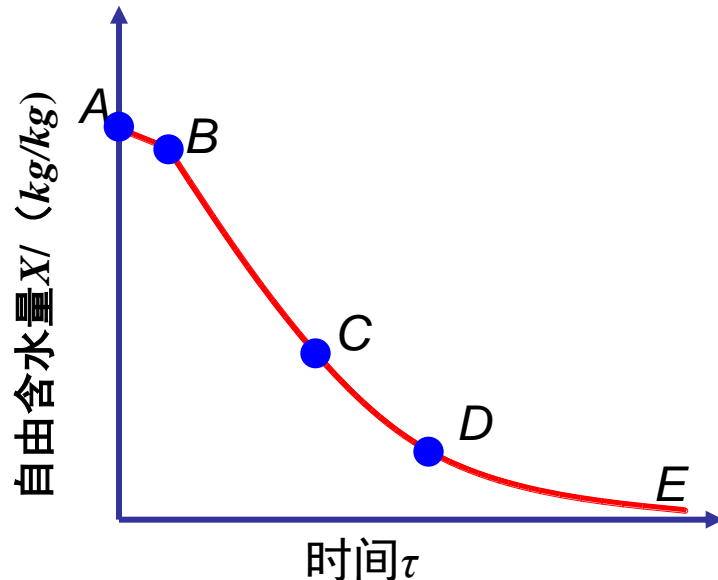
## 干燥速率与干燥时间

对一定干燥任务，干燥器尺寸取决于干燥时间和干燥速率  
通过实验测定干燥速率。

恒定干燥条件下的干燥实验：气体温度、湿度恒定、气-固接触方式一定、经过物料表面的流速一定。

为保证恒定干燥条件，通常采用大量空气干燥少量物料，以使气体的温度、湿度和流速在干燥器中恒定不变。

干燥实验为间歇操作，物料的温度和湿含量随时间连续变化：



# 干燥速度和干燥速率的定义

**干燥速度  $N$** ：干燥器单位时间内汽化的湿分量 (kg湿分/s)。

$$N = -\frac{dW}{d\tau} = -G \frac{dX}{d\tau}$$

对形状不规则的物料，干燥面积不易求出，则用干燥速度计算。

式中：  $N$  —— 干燥器的干燥速度， kg/(m<sup>2</sup> s)；

$G$  —— 绝干物料的质量， kg；

**干燥速率(干燥通量)  $U$** ：干燥器单位时间内在物料单位表面积上汽化的湿分量 (kg湿分/(m<sup>2</sup> s)) 。

$$U = -\frac{dW}{Sd\tau} = -\frac{G}{S} \cdot \frac{dX}{d\tau}$$

对形状规则的物料，干燥面积易得，使用干燥速率较为方便。

式中：  $U$  —— 干燥器的干燥速率， kg/s；

$W$  —— 汽化水份量， kg；

$S$  —— 物料表面积， 即干燥面积， m<sup>2</sup>。

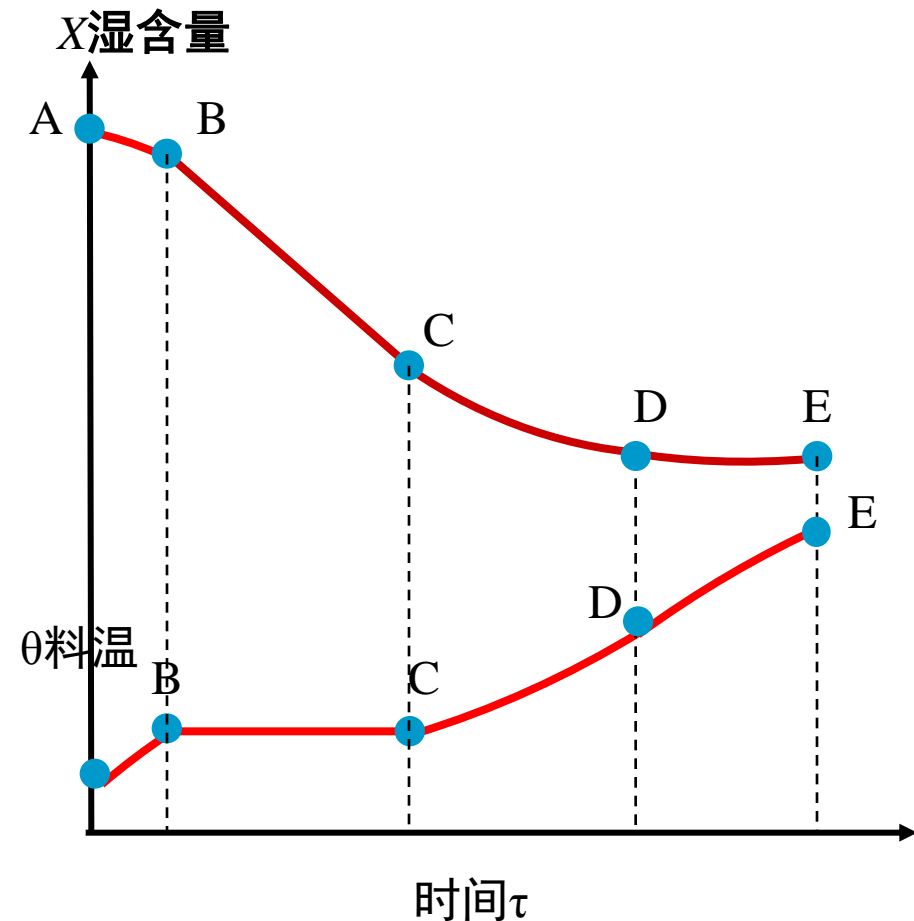
**干燥曲线：**物料湿含量  $X$  与干燥时间  $\tau$  的关系曲线。

**预热段：**

初始湿含量  $X_1$  和温度  $\theta_1$  变为  $X$  和  $t_w$ 。物料吸热升温以提高汽化速率，但湿含量变化不大。

**恒速干燥段：**

物料温度恒定在  $t_w$ ， $X \sim \tau$  变化呈直线关系，气体传给物料的热量全部用于湿份汽化



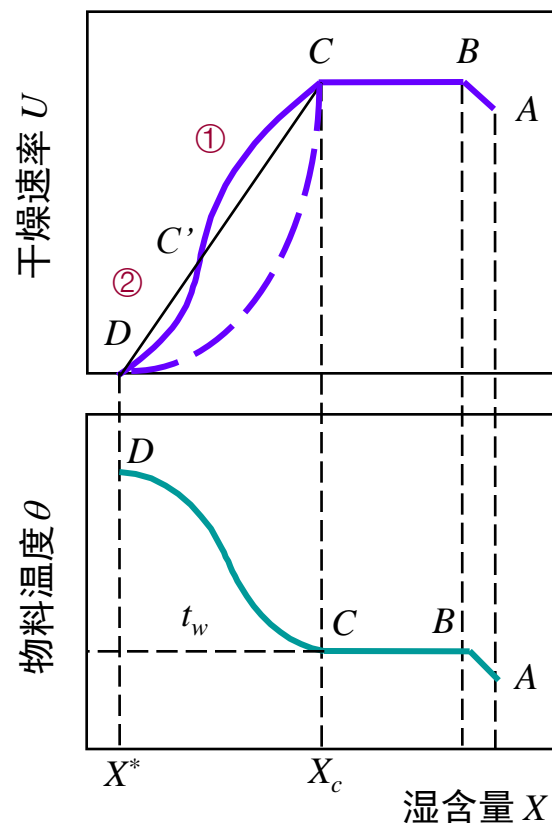
**降速干燥段：**

物料开始升温， $X$  变化减慢，气体传给物料的热量仅部分用于湿份汽化，其余用于物料升温，当  $X = X^*$ ， $\theta = t$ 。

## 干燥速率曲线：干燥速率 $U$ 与湿含量 $X$ 的关系曲线。

由于物料预热段很短，通常将其并入恒速干燥段；  
干燥过程分为恒速干燥和降速干燥两个阶段，以临界湿含量  $X_c$  为界。

物料的湿含量由  $X_1$  变为  $X_2$   
当  $X$  的变化跨过  $X_c$  时，干燥有两个阶段组成；  
当  $X_1 < X_c$  或  $X_2 > X_c$  时，干燥只有一个阶段，即降速或恒速干燥段。



## 影响干燥因素

**恒速干燥段：**物料表面湿润， $X > X_c$ ，除去非结合水分

物料表面充分湿润，干燥速率由湿份汽化速率控制，取决于物料外部的干燥条件，故此段又称为表面汽化控制阶段。

显然，提高空气的温度、降低空气的湿度或提高空气的流速，均能提高恒速干燥速率。

**降速干燥段：** $X < X_c$

物料实际汽化表面变小 (出现干区)，汽化表面内移；

平衡蒸汽压下降 (各种形式的结合水作用)；

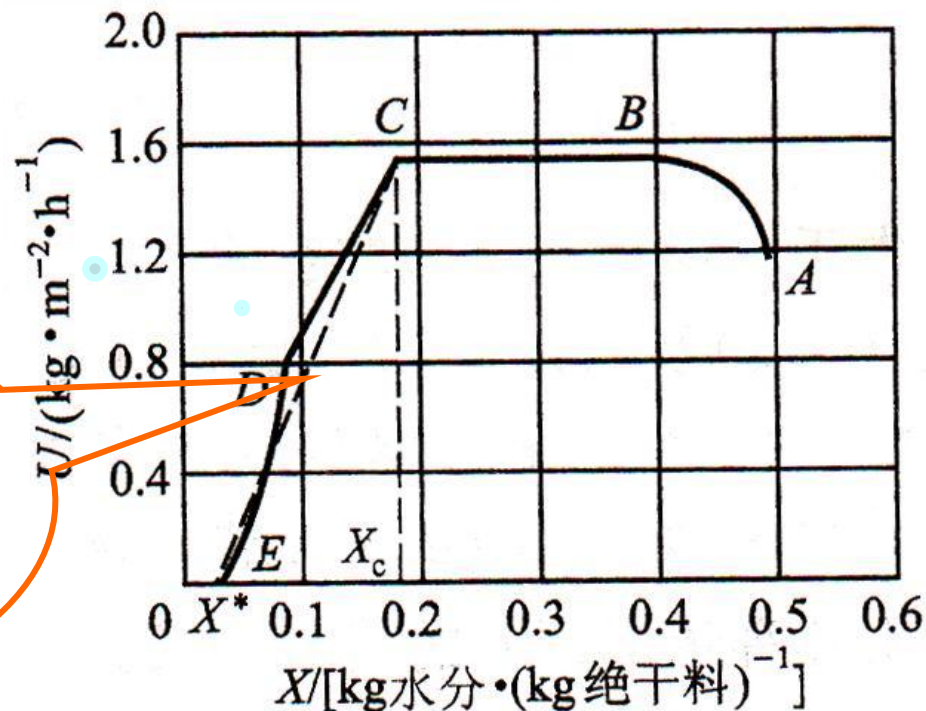
固体内部水分扩散速度极慢 (非多孔介质)。

降速段干燥速率取决于湿份与物料的结合方式，以及物料的结构，而物料外部的干燥条件对其影响不大。

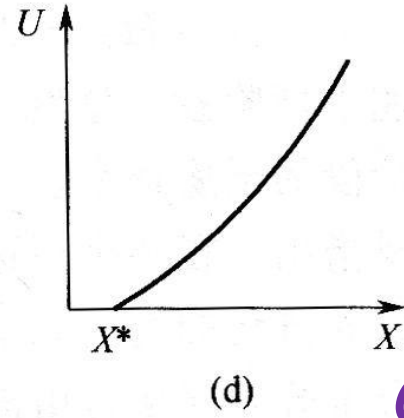
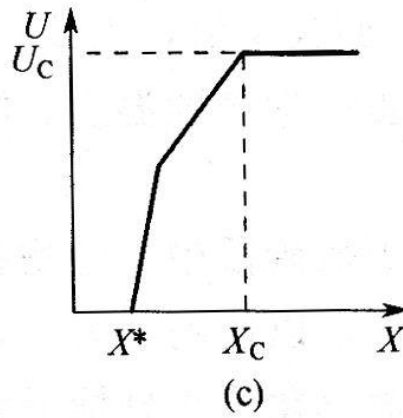
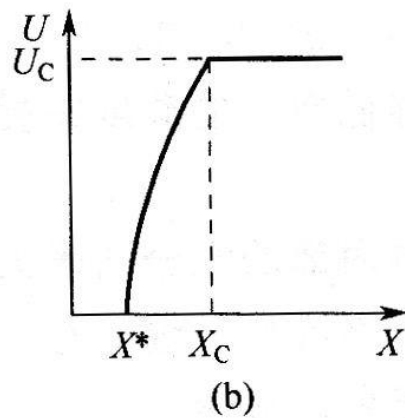
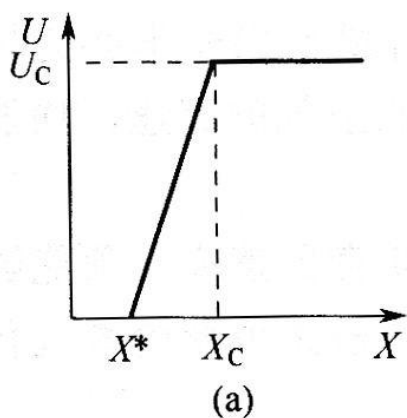
故，此段又称为内部扩散控制阶段。

实际汽化  
表面减小

- 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。



降速阶段的干燥速率曲线形状随物料的内部结构而异



## 临界含水量

临界含水量 $X_c$ 越大，则转入降速阶段越早，完成相同的干燥任务所需的干燥时间越长。临界含水量不是物料的物理参数，它受物料的性质、干燥器的种类和干燥条件的影响。

无孔吸水性物料的 $X_c$ 比多孔物料大；

物料的堆积厚度薄或在有搅动的干燥器内干燥， $X_c$ 较小；

干燥介质的 $t$ 高， $H$ 低，流速快，恒速干燥速度快， $X_c$ 大；

**注意：**干燥介质的 $t$ 过高， $H$ 过低，恒速干燥速度过快，可能导致物料表面紧缩，既影响产品质量，也增加了传热和传质阻力。

$X_c$  与物料的厚度、大小、干燥速率有关，一般需由实验测定。

## 干燥时间

若已知干燥速率曲线，则可以从物料干燥曲线上直接读取干燥时间。

## 恒速段的干燥时间

若已知物料的  $X_1$  和  $X_c$ ，则恒速段的干燥时间为

$$\tau = \int_0^{\tau_1} d\tau = -\frac{G}{U_c S} \int_{X_1}^{X_c} dX = \frac{G(X_1 - X_c)}{U_c S}$$

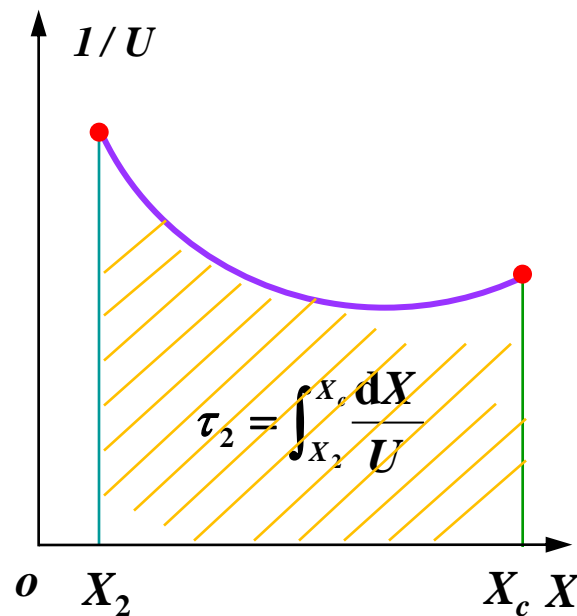


## 降速段的干燥时间

### 图解积分法

当降速段的  $U \sim X$  呈非线性变化时，应采用图解积分法。

$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = -\frac{G}{S} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{U} = \frac{G}{S} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{U}$$



在  $X_2 \sim X_c$  之间取一定数量的  $X$  值，从干燥速率曲线上查得对应的  $U$ ，计算  $1/U$ ；  
作  $1/U \sim X$  图，计算曲线下面阴影部分的面积。

## 解析法

当降速段的  $U \sim X$  呈线性变化时，可采用解析法。

降速段干燥速率关系：

$$\frac{U}{U_c} = \frac{X - X^*}{X_c - X^*}$$

斜率

$$U = \frac{U_c}{X_c - X^*} (X - X^*) = k_X (X - X^*)$$

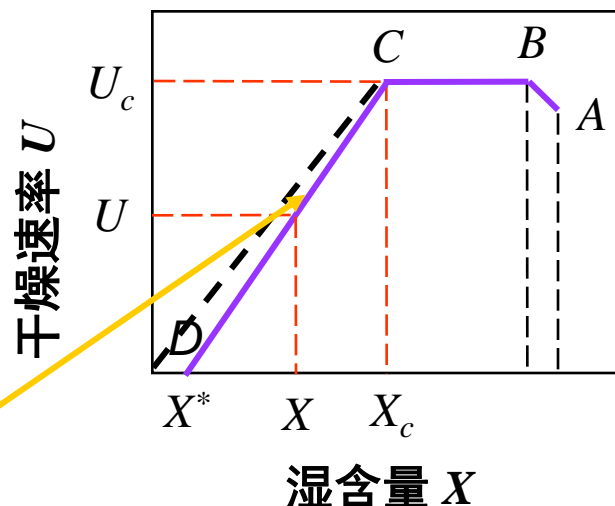
$$\tau_2 = \frac{G}{S} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{U} = \frac{G(X_c - X^*)}{SU_c} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{X - X^*} = \frac{G(X_c - X^*)}{SU_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*}$$

当缺乏平衡水分的实验数据时，可以假设  $X^* = 0$ ，则有

$$\tau_2 = \frac{GX_c}{SU_c} \ln \frac{X_c}{X_2}$$

总干燥时间

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \text{ 或 } \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau' \quad \text{辅助操作时间}$$



**[例11-9]**将500kg湿物料由 $w_1=15\%$ 干燥到 $w_2=0.8\%$ (均为湿基)。已知干燥条件下降速干燥速率曲线为直线，物料的临界含水量 $X_c=0.11$ ，平衡含水量 $X^*=0.002$ ，等速阶段 $U_c=1\text{kg}/(\text{m}^2\text{ h})$ ，操作中干燥表面积为 $40\text{ m}^2$ ，求干燥时间。

绝干物料量  $G=G_1(1-w_1)=500(1-0.15)=425\text{kg}$

物料的干基含水量  $X_1=\frac{w_1}{1-w_1}=\frac{0.15}{1-0.15}=0.1765\text{kg水分}/\text{kg绝干料}$

$$X_2=\frac{w_2}{1-w_2}=\frac{0.008}{1-0.008}=0.00806\text{kg水分}/\text{kg绝干料}$$

已知： $U_c=1\text{ kg水}/(\text{m}^2\text{ h})$ ， $S=40\text{ m}^2$ ， $X_c=0.11$ ， $X^*=0.002$

$$\tau_1=\frac{G(X_1-X_c)}{U_c S}=\frac{425(0.1765-0.11)}{40}=0.7066\text{h}$$

$$\tau_2=\frac{G}{S}\int_{X_2}^{X_c}\frac{dX}{U}=\frac{G(X_c-X^*)}{SU_c}\ln\frac{X_c-X^*}{X_2-X^*}=\frac{425(0.11-0.002)}{40}\ln\frac{0.11-0.002}{0.00806-0.002}=3.305\text{h}$$

$$\tau=\tau_1+\tau_2=0.7066+3.305=4.012\text{h}$$

**【例11-10】** 在恒定干燥条件下，将湿物料从 $X_1=0.44$ 干燥到 $X_2=0.06$ 。由实验得到该物料含水量 $X$ 与干燥率 $U$ 间的关系列于附表11-2中。已知物料能提供的干燥表面积为 $0.05 \text{ m}^2$ 干燥面积/kg绝干料。求干燥时间。

干燥过程包括等速和降速两个干燥阶段，且降速干燥速率线是曲线。

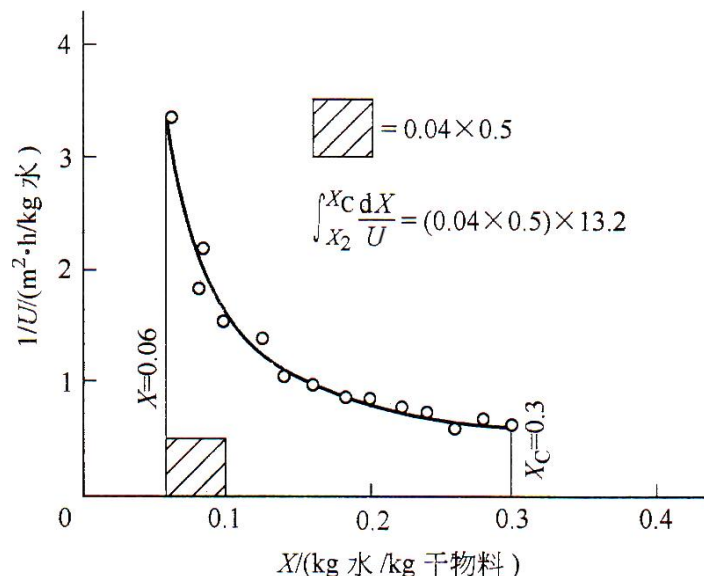
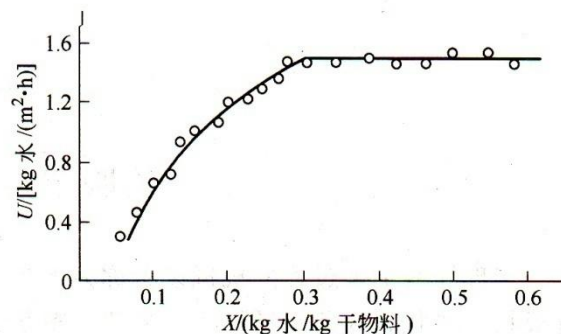
临界点的数据为： $X_c = 0.3 \text{ kg水分/kg绝干料}$ ， $U_c = 1.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$

恒速阶段干燥时间

$$\tau_1 = \frac{G(X_1 - X_2)}{SU_c} = \frac{1 \times (0.44 - 0.3)}{1.5 \times 0.05} = 1.87 \text{ h}$$

降速阶段干燥时间

$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = -\frac{G}{S} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{U}$$



$$\tau_2 = \int_0^{\tau_2} d\tau = -\frac{G}{S} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{U} = \frac{G}{S} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{U} = 5.28 \text{ h}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 1.87 + 5.28 = 7.15 \text{ h}$$