



7.3 干燥速率与干燥时间

7.3.1 物料中所含水分性质

7.3.2 恒定干燥条件下的干燥速率

7.3.3 恒定干燥条件下恒速阶段干燥时间

7.3.4 恒定干燥条件下降速阶段干燥时间





7.3.1 物料中所含水分性质

一、物料与水分结合方式

吸附水分：湿物料的粗糙外表面附着的水分。

毛细管水分：多孔性物料的孔隙中所含的水分。

溶胀水分：是物料组成的一部分，可透入物料细胞壁内，使物料的体积为之增大。





二、平衡水分与自由水分

1. 平衡水分 (X^*)

——不能用干燥方法除去的水分。

$$X^* = f(\text{物料种类、空气性质})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{不吸水物料的 } X^* \text{ 小} \\ \varphi \uparrow \rightarrow X^* \uparrow \\ t \uparrow \rightarrow X^* \downarrow \end{array} \right.$$

2. 自由水分 ($X - X^*$)

——可用干燥方法除去的水分。





三、结合水分与非结合水分

1. 结合水分

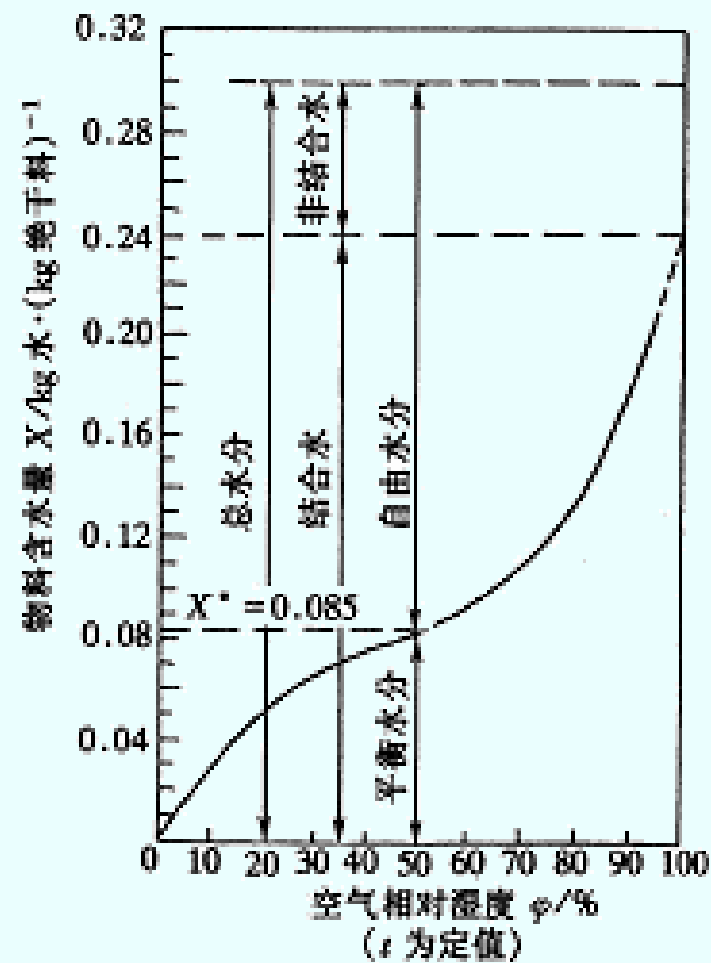
——水与物料结合力强， $p_w < p_s$ 。

2. 非结合水分

——水与物料结合力弱， $p_w = p_s$ 。

结合水分与非结合水分只与材料的性质有关，而与空气的状态无关，这是与平衡水分的主要区别。平衡水分一定是结合水分。





固体物料(丝)中所含水分的性质





【例7-4】在常压25℃下，水分在ZnO与空气间的平衡关系为：

相对湿度 $\phi = 100\%$ ，平衡含水量 $X^* = 0.02$ kg水/kg干料

相对湿度 $\phi = 40\%$ ，平衡含水量 $X^* = 0.007$ kg水/kg干料

现ZnO的含水量为0.25 kg水/kg干料，令其与25℃， $\phi = 40\%$ 的空气接触，求物料的自由水分、平衡水分、结合水分和非结合水分。





7.3.2 恒定干燥条件下的干燥速率

恒定干燥条件：空气的温度、湿度、流速及物料接触方式不变。

一、干燥速率定义

——单位时间、单位干燥面积汽化水分量。

$$U = \frac{dW}{Ad\tau} \quad [\text{kg水}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

$$\because W = G_C (X_1 - X) \quad \longrightarrow \quad dW = -G_C dX$$

$$\therefore U = -\frac{G_C dX}{Ad\tau}$$

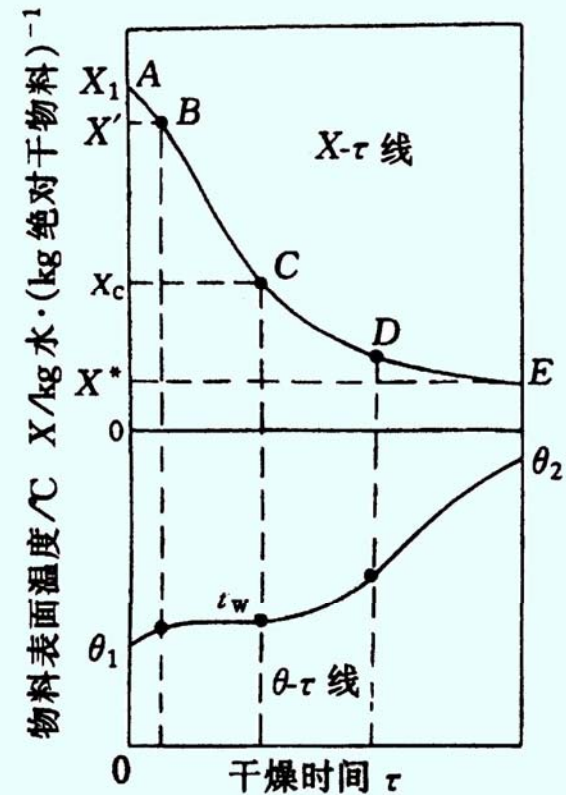




二、干燥曲线及干燥速率曲线

1. 干燥曲线

——用于描述物料含水量 X 、干燥时间 τ 及物料表面温度 θ 之间的关系曲线。



恒定干燥条件下物料的干燥实验曲线





2. 干燥速率曲线

ABC段：恒速干燥阶段

AB段：预热段

BC段：恒速段

CDE段：降速干燥阶段

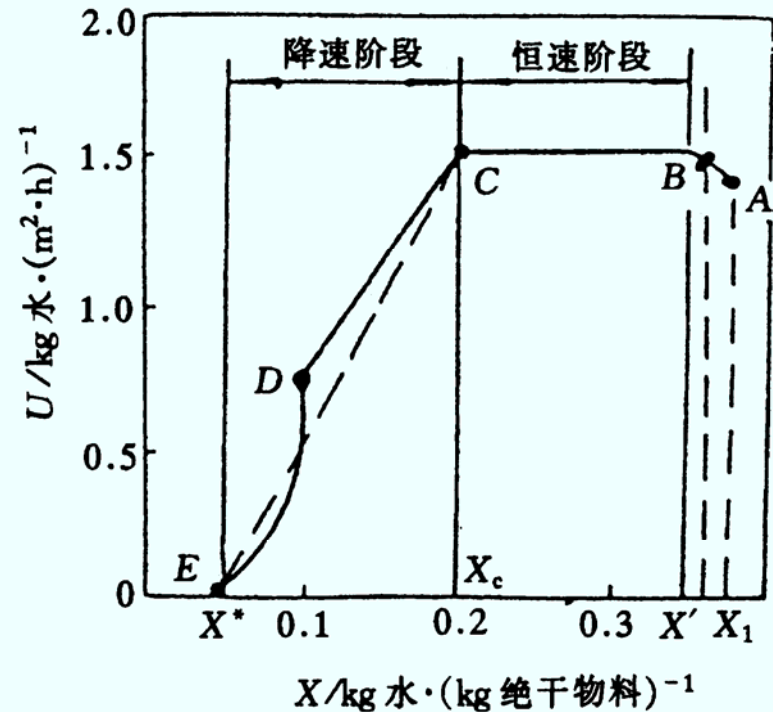
$\tau \uparrow \rightarrow X \downarrow, U \downarrow$

C点：临界点

X_C ：临界含水量

E点：平衡点

X^* ：平衡水分



恒定干燥条件下的干燥速率曲线





三、恒速干燥阶段

前提条件：湿物料表面全部润湿。

汽化速率（传质速率）：

$$G_w = k_H (H_w - H) = U \quad [\text{kg水}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

传热速率： $Q = \alpha A (t - t_w) = G_w A r_w$

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

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

——恒速干燥速率





恒速干燥特点:

1. $U = U_C = \text{const.}$
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 U 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

$$\left. \begin{array}{l} t \uparrow \rightarrow (t - t_w) \uparrow \\ H \downarrow \rightarrow (H_w - H) \uparrow \\ u \uparrow \rightarrow \alpha \uparrow, k_H \uparrow \end{array} \right\} U_C \uparrow (U \uparrow)$$





四、降速干燥阶段

{ 实际汽化表面减小
汽化面内移

降速干燥阶段特点：

1. $\tau \uparrow \rightarrow X \downarrow, U \downarrow$
2. 物料表面温度 $\theta > t_w$
3. 除去的水分为非结合、结合水分
4. 影响 u 的因素：
与物料种类、尺寸、形状有关，
与空气状态关系不大。





五、临界含水量 X_C

$X_C = f$ (物料结构、厚度、分散程度、空气状态)

1. 吸水性物料 X_C 大于不吸水性物料 X_C
2. 物料层越薄、分散越细， X_C 越低
3. 恒速干燥 u_C 越大， X_C 越高。

t, u 一定， $H \uparrow \rightarrow X_C \downarrow, X^* \downarrow, U_C \downarrow$ 。

t, H 一定， $u \uparrow \rightarrow X_C \uparrow, X^*$ 不变， $U_C \uparrow$ 。





7.3.3 恒定干燥条件下恒速阶段干燥时间

由干燥速率定义式： $U = -\frac{G_C dX}{Ad\tau}$

$$\longrightarrow d\tau = -\frac{G_C dX}{AU} \longrightarrow \int_0^{\tau_1} d\tau = \int_{X_1}^{X_C} -\frac{G_C}{AU} dX$$

对于恒速干燥： $U = U_C = \text{const.}$

$$\tau_1 = \frac{G_C}{AU_C} (X_1 - X_C)$$

↑
恒速干燥所需时间





U_C 的来源:

(1) 由干燥速率曲线查得

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

求取 α 经验关联式:

(1) 气体流动方向与物料平行

$$\alpha = 0.0204G^{0.8} \quad [\text{w/m}^2 \text{ k}]$$

$$G = 2500 \sim 3000$$



质量流速 $[\text{kg/m}^2 \text{ hr}]$





(2) 气体流动方向与物料垂直

$$\alpha = 1.17G^{0.37} \quad G = 4000 \sim 20000 \text{ [kg/m}^2 \text{ hr]}$$





7.3.4 恒定干燥条件下降速阶段干燥时间

当 $X < X_c$ 时，进入降速干燥阶段

$$\int_0^{\tau_2} d\tau = \int_{X_c}^{X_2} -\frac{G_c}{AU} dX \quad \longrightarrow \quad \tau_2 = \int_{X_2}^{X_c} \frac{G_c}{AU} dX$$

求 U 的方法：

- (1) 图解积分法
- (2) 近似算法

总干燥时间： $\tau = \tau_1 + \tau_2$

