

第三章 干燥过程与设备

干燥是指利用热能将固体物料中的水分蒸发并排出的过程。

□干燥过程的分类

- 按操作压力：常压干燥、真空干燥。真空干燥适于处理热敏性及易氧化的物料，或要求成品中含湿量低的场合。
- 按操作方式：连续式干燥、间歇式干燥。连续操作具有生产能力大、产品质量均匀、热效率高以及劳动条件好等优点；间歇操作适用于处理小批量、多品种要求干燥时间较长的物料。

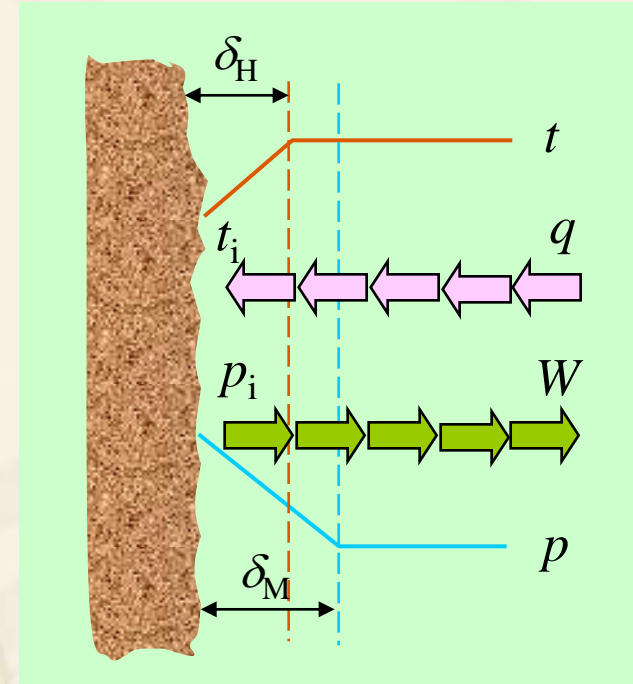
➤ 按传热方式：传导干燥、对流干燥、辐射干燥。辐射干燥按传热机理不同又分为：红外线干燥和微波干燥（介电加热干燥）。

①**传导干燥** 热能通过传热壁面以传导方式传给物料，物料中的湿分被汽化带走，或用真空泵排走。例如物料可以铺在热滚筒上进行干燥。在传导干燥过程中，热量是从热表面穿过湿物料的，所以热效率高。在操作中，应注意避免与热壁面接触的材料层因过高温而变质。

②**对流干燥** 使干燥介质直接与湿物料接触，热能以对流方式加入物料，产生的蒸汽被干燥介质带走。

干热气体流过湿物料的表面，物料表面温度低于气体温度；由于温差的存在，气体以对流方式向固体物料传热，使湿份汽化；在分压差的作用下，湿份由物料表面向气流主体扩散，并被气流带走。

热能以**对流给热的方式**由热干燥介质（通常热空气）传给湿物料，使物料中的水汽化。物料内部的水分以气态或液态形式扩散至物料表面，然后汽化的蒸汽从表面扩散至干燥介质主体，再由介质带走的干燥过程称为对流干燥。



优点：受热均匀，所得产品的含水量均匀。

缺点：热利用率低。

□在工业上应用最普遍的是对流干燥。通常使用的干燥介质是空气，被除去的湿分是水分。空气既是载热体又是载湿体。

□物料的干燥过程是属于传热和传质相结合的过程。

□干燥过程进行的条件：被干燥物料表面所产生水蒸汽（或其它蒸汽）的压力大于干燥介质中水蒸汽（或其它蒸汽）的分压，压差越大，干燥过程进行越快。所以干燥介质须及时将汽化的水汽带走，以保持一定的汽化水的推动力。

对流干燥中，**传热和传质同时发生**

传热过程

干燥介质 \xrightarrow{Q} 湿物料表面 \xrightarrow{Q} 湿物料内部

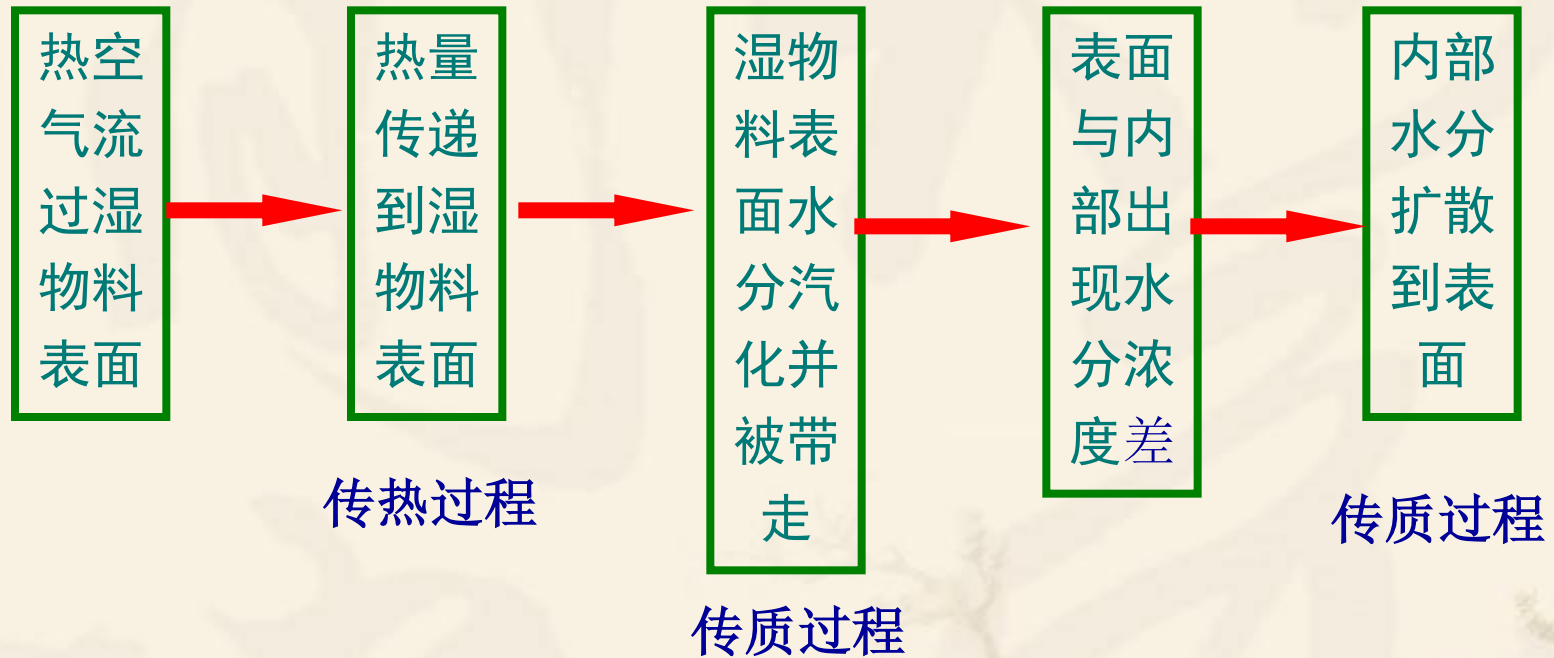
传质过程

湿物料内部 $\xrightarrow{\text{湿分}}$ 湿物料表面 $\xrightarrow{\text{湿分}}$ 干燥介质

干燥介质为干热空气。

对流干燥过程实质

干燥过程



干燥过程推动力

传质推动力：物料表面水蒸气分压 $>$ 热空气中的水蒸气分压

传热推动力：热空气的温度 $>$ 物料表面的温度

③**辐射干燥** 由辐射器产生的辐射能以电磁波形式达到物体的表面，被物料吸收而重新变为热能，从而使湿分气化。例如用红外线干燥法将自行车表面油漆烘干。

④**介电加热干燥** 将需干燥的物料置于**交频电场**内，利用高频电场的交变作用将湿物料加热，水分汽化，物料被干燥。

优点：干燥时间短，干燥产品均匀而洁净。

缺点：费用大。

第一节 湿空气

一、湿空气的主要参数

1. 绝对湿度

每立方米湿空气中所含水蒸气的质量称为空气的**绝对湿度**，以 ρ_w 表示（ g/m^3 ），在数值上就是水蒸气在其分压下的密度。

当空气被饱和时，空气的绝对湿度称为**饱和绝对湿度**，以 ρ_s 表示，对应的饱和水蒸气分压以 p_s 表示。

2. 相对湿度

指空气的绝对湿度和同温度下饱和绝对湿度之比。用 Φ 表示。

$$\Phi = \rho_w / \rho_s \times 100\% = p_w / p_s \times 100\%$$

相对湿度表示空气接近**饱和的程度**，如果相对湿度小，表明有较大的吸收水蒸气能力。

3. 湿含量

指湿空气下，每千克干空气中所含水蒸气的质量（千克），以X表示：

$$X = \text{水蒸气质量 } m_w / \text{干空气质量 } m_a = 0.622 \left(\frac{18}{29} \right) p_w / p_s \\ = 0.622 p_w / (p - p_w) = 0.622 \Phi p_s / (p - \Phi p_s);$$

4. 热含量

湿含量为X的湿空气的热含量指：1千克干空气的热含量和X千克水蒸气热含量的总和，以I表示，单位为kJ/kg干空气。

当温度为t℃时，

- 1千克干空气所具有的热含量

$$I_a = C_a t,$$

其中C_a为空气比热，近似取1kJ/kg K。

- 水蒸气热含量I_w = 2490 + 1.93t kJ/kg;

其中2490：0℃水的汽化潜热，kJ/kg;

1.93：水蒸气的比热，kJ/(kg·℃)。

湿含量为X的湿空气的热含量为：

$$I = I_a + X I_w = t + (2490 + 1.93t)X$$

5. 露点

露点：湿空气的湿含量不变，被冷却一直冷却到湿空气达到饱和状态而将凝结成水的温度称为露点，以 $t_{d,p}$ ℃表示。

露点与相对湿度对照表

露点温度 Dew-point	相对湿度 Relative humidity	含水率 Moisture Content	
℃	%	PPM	%
-50	0.169	38.96	0.0038
-40	0.533	127.5	0.0127
-30	1.64	377.76	0.0377
-20	4.44	1025	0.1025
-10	11.15	2573.68	0.2573
0	26.12	6027.63	0.6027
10	52.52	12117.1	1.2117
20	100	23072.37	2.3072

6. 干、湿球温度

干球反映实际湿空气的实际温度，湿球温度—温度计用浸没在水里的纱布包住，导致水温下降，当水温不再下降时温度计指示温度。

根据干球温度 t_d 和干湿球温度差 $\Delta t = t_d - t_w$ ，可查出空气的相对湿度；如 $t_d = 24.4^\circ\text{C}$ ， $t_w = 20^\circ\text{C}$ ， $\Delta t = 4.4^\circ\text{C}$ ，查表（附录7）得到 $\Phi = 67\%$ 。

若湿空气已饱和，则干球温度、湿球温度和露点三者相等。

例1 干湿球温度计的干球为22℃，湿球温度16℃，试计算空气的相对湿度

解：设干球温度为 t_d ，湿球温度为 t_w ，空气中水蒸气质量浓度为 ρ_∞ ，湿球表面上的水蒸气质量浓度为 ρ_w 。

根据湿球温度计的**热平衡**，湿球从空气中所得热量等于水蒸气所消耗的热量： $\alpha(t_d - t_w) = g \gamma$

其中 g 表示蒸发的水分量， γ 表示水的汽化热(湿球温度下)

对湿球的**传质过程**，表示为

$$g = \alpha_D (\rho_w - \rho_\infty); \text{ 其中 } \alpha_D \text{ 为对流传质系数, m/s}$$

$$\text{因此 } (\alpha/\alpha_D)(t_d - t_w) = (\rho_w - \rho_\infty) \gamma$$

根据公式： $\alpha/\alpha_D = C_p \rho Le^{2/3}$ ； C_p --空气的定压比热， ρ --空气密度。

$$Le = Sc/Pr; \quad Sc = \nu/D$$

空气在平均温度 $(22+16)/2 = 19^\circ\text{C}$ 时，密度 $\rho = 1.210 \text{ kg/m}^3$ ；

比热 $C_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ ， $Pr = 0.703$ ； $\nu = 14.97 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

$$D = D_0 (T/T_0)^{3/2} = 0.22 \times (292/273)^{3/2} = 24.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Sc = 14.97 \times 10^{-6} / (24.4 \times 10^{-6}) = 0.614$$

$$Le = 0.614 / 0.703 = 0.873$$

湿球表面上的空气可认为是饱和的，其饱和蒸气从附录8中查得
 $P_W=1817\text{Pa}$

则： $\rho_W = M_A P_W / RT = 18 \times 1817 / (8314 \times 289) = 0.0136 \text{ kg/m}^3$
16°C时水的汽化热 $\gamma = 2463 \text{ kJ/kg}$ ； 代入

$(\alpha/\alpha_D)(t_d - t_w) = (\rho_W - \rho_\infty) \gamma$ 和 $\alpha/\alpha_D = C_p \rho L e^{2/3}$ 得：

$$1.005 \times 1.21 \times 0.873^{2/3} \times (22 - 16) / 2463 = 0.0136 - \rho_\infty$$

$$\rho_\infty = 0.0109 \text{ kg/m}^3$$

根据理想气体状态方程，可求出水蒸气在空气中的分压为：

$$P_\infty = RT \rho_\infty / M = 8314 \times 295 \times 0.0109 / 18 = 1485.2 \text{ Pa},$$

由附录8查得22°C水蒸气的饱和蒸气压为

$$P_W' = 2644 \text{ Pa}$$

故相对湿度 $\Phi = 1485.2 / 2644 \times 100\% = 56.17\%$

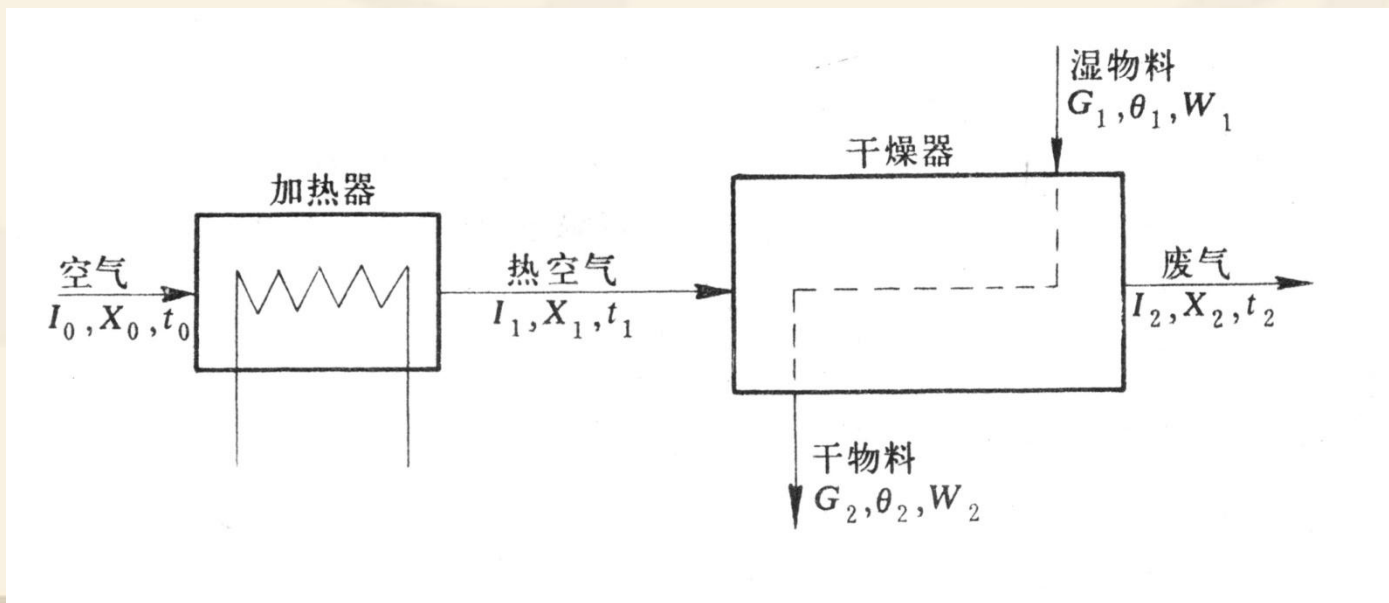
二、湿空气的I—X图

I—X图表示在既定的大气压下的湿空气主要参数：热含量I、湿含量X、温度t、相对湿度 Φ 和水蒸气分压 P_w 之间的图解关系。

干燥器中湿空气各特征物理量的关系图解见p97附图。

第二节 干燥器的物料平衡与热量平衡

利用热空气对物料进行干燥的流程如图所示，空气进入加热器被加热后进入干燥器，在干燥器内把热量传给物料用于蒸发物料中的水分，然后排出干燥器。湿物料进入干燥器后被空气加热，并蒸发其中的水分，干燥后的物料由干燥器卸出。



一、物料平衡

两个概念:

物料的绝对水分是指物料中所含水分量M与绝对干物料量 G_d 之比, 用百分数表示, 即:

$$W_a = M/G_d \times 100\%;$$

相对水分是指物料中所含水分量M与湿物料量 G_w 之比, 即: $W_r = M/G_w$;

$$\text{故 } W_a = W_r / (1 - W_r) \times 100\%;$$

$$W_r = W_a / (1 + W_a) \times 100\%;$$

如: 物料中绝对水分为12%, 其相对水分
 $W_r = 0.12 / (1 + 0.12) = 10.7\%$;
相对水分为10.7%, 绝对水分
 $W_a = 0.107 / (1 - 0.107) = 12\%$ 。

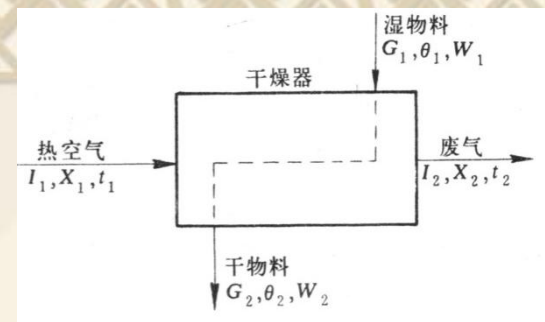
而 干燥器中蒸发水分量

$$\begin{aligned} W &= G_1 W_r' - G_2 W_r'' = G_1 (W_r' - W_r'') / (1 - W_r'') \\ &= G_2 (W_r' - W_r'') / (1 - W_r') \end{aligned}$$

式中: W —每小时蒸发的水分量, kg/h;

G_1, G_2 : 进出干燥器的物料量, kg/h;

W_r', W_r'' : 进出干燥器的相对水分, %



进入干燥器的物质质量等于出干燥器物质质量：

$$L_1 + L_1 X_1 + G_1 = L_2 + L_2 X_2 + G_2$$

L_1, L_2 ----进出干燥器干空气量，kg/h；

X_1, X_2 ----进出干燥器空气的湿含量，kg/kg

假设通过干燥器的干空气量为 L ，干燥器中蒸发水分量为 W

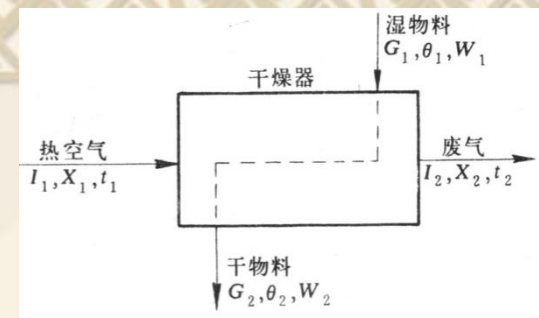
$$W = L(X_2 - X_1) = L(X_2 - X_0)$$

$$L = W / (X_2 - X_1) = W / (X_2 - X_0)$$

若以每蒸发1千克水所消耗的干空气量 l 表示：

$$l = L / W = 1 / (X_2 - X_0) \quad \text{kg干空气 / kg水}$$

二、热量平衡



进入干燥器热平衡，首先应确定热平衡范围，计算取0℃作为基准温度，以每蒸发1千克水所消耗的热量为计算单位。

1. 干燥器收入热量

(1) 干燥介质带入热量 $q_h = I_1$ kJ/kg

(2) 湿砖坯带入显热，为绝对干坯及其中水分带入热量之总和

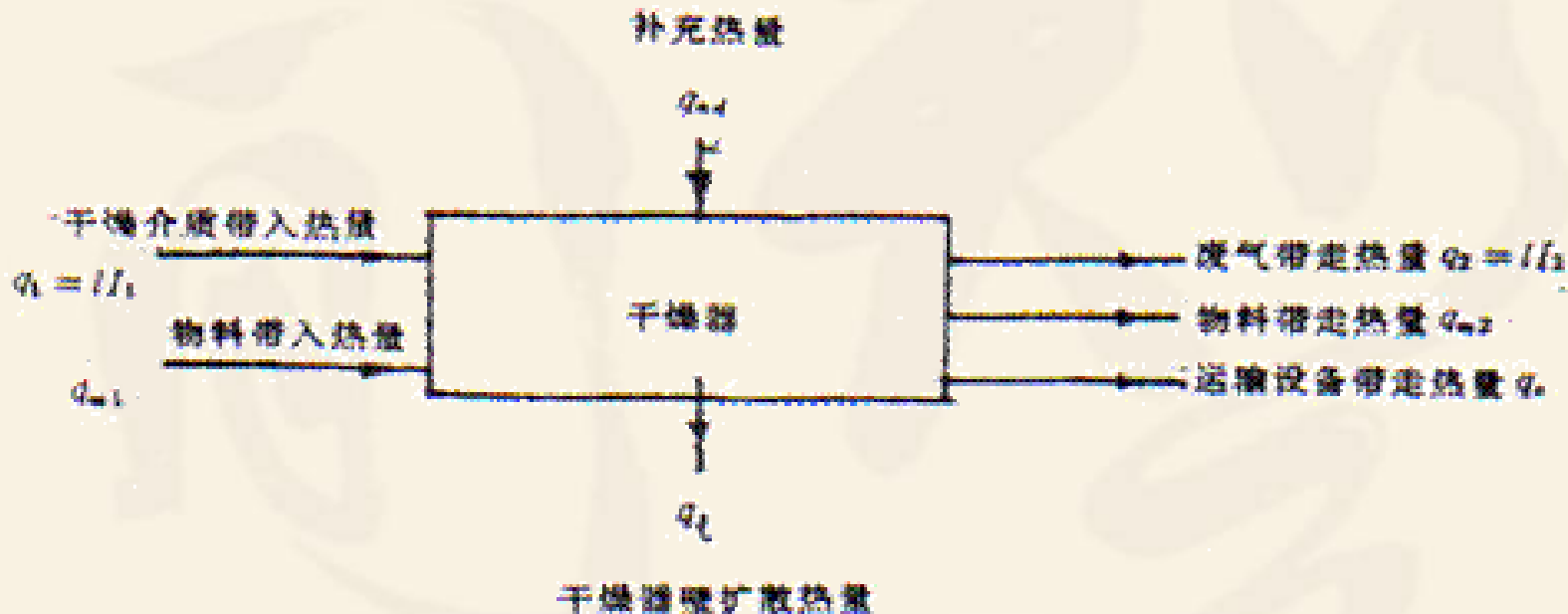
$$q'_m = (G_0 C_0 \theta_1 + M_1 C_w \theta_1) / W$$

式中 G_0 : 绝对干物料质量, kJ/(kg·℃);

M : 物料中所含水分量;

C_0 、 C_w : 分别为绝对干物料及水的比热,
kJ / (kg·℃);

θ_1 : 入干燥器物料温度, ℃



(3) 托板或运输设备带入热量

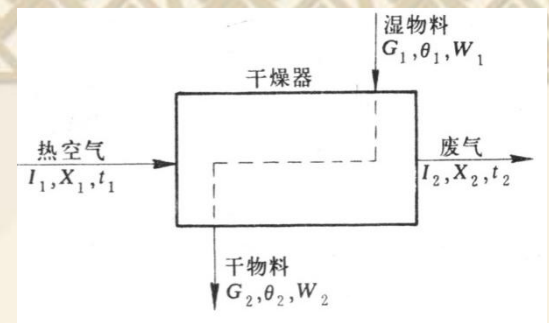
$$q'_{tr} = (G_{tr} \cdot C_{tr} \cdot t_1) / W \quad \text{kJ/kg}$$

式中 G_{tr} , C_{tr} , t_1 : 托板或运输设备质量、比热及干燥器温度

(4) 每千克水分在干燥器中补充的热量 (如粉磨烘干)

$$Q_{ad} = Q_{ad} / W \quad \text{kJ/kg}$$

式中 Q_{ad} : 在干燥器中补充的热量, kJ/h。



2. 干燥器支出的热量

- (1) 空气离开干燥器带走热量 $q_0 = I_2$
- (2) 干坯带走显热 $q''_m = (G_0 C_0 \theta_2 + M_2 C_w \theta_2) / W$
- (3) 托板或运输设备带走热量 $q''_{tr} = (G_{tr} \cdot C_{tr} t_2) / W$
- (4) 散失到干燥器周围的热量 $q_1 = KF(t_w - t_a) / W$

式中 F : 干燥器外表面, m^2 ; t_w 、 t_a : 干燥器壁与环境温度, $^{\circ}C$

平衡方程:

$$q_h + q'_m + q'_{tr} + q_{ad} = q_0 + q''_m + q''_{tr} + q_1$$

第三节 干燥过程

一、物料中水分的结合形式

(1) 物料中所含的水分包括物理水和化学结合水两大类。

(2) 物料中所含的水分还可分类为自由水和大气吸附水。

自由水是由物料直接与水接触而吸附的水分，存在于物料的大毛细管中，物料表面水蒸气分压等于物料表面温度下的饱和水蒸气压。大气吸附水存在于微细毛细管中及物料细分散的胶体颗粒表面的水，与物料结合牢固。

气孔分类

- ① 和大气相通的气孔称为开口气孔
- ② 贯穿制品的气孔称为连通气孔
- ③ 不和大气相通的气孔称为闭口气孔

如图3.5，在图中

➤与 $\Phi = 1$ 相平衡的水分是大气吸附水的最高点，超过此点即为自由水。

➤与 $\Phi < 1$ 相平衡的水分都属于大气吸附水。

➤在曲线左边不能进行干燥反而吸湿。物料中平衡水分就是在一定干燥制度下物料达到的最小水分。

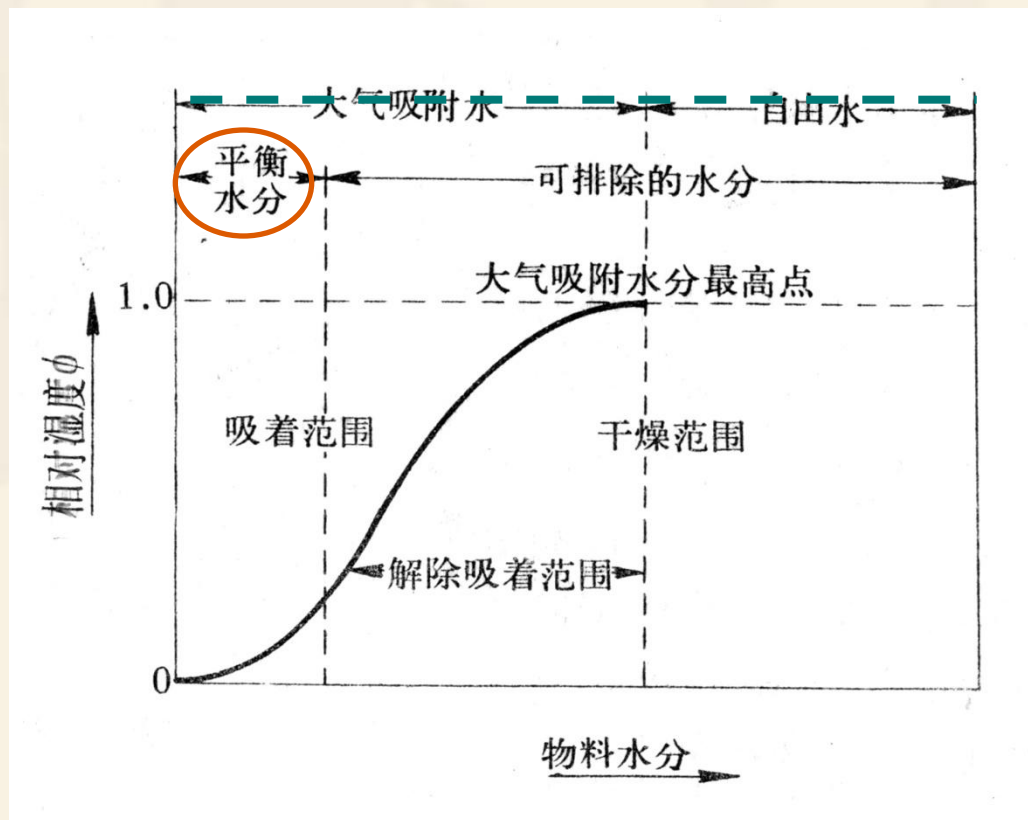


图3.5 自由水与大气吸附水

二、对流干燥过程

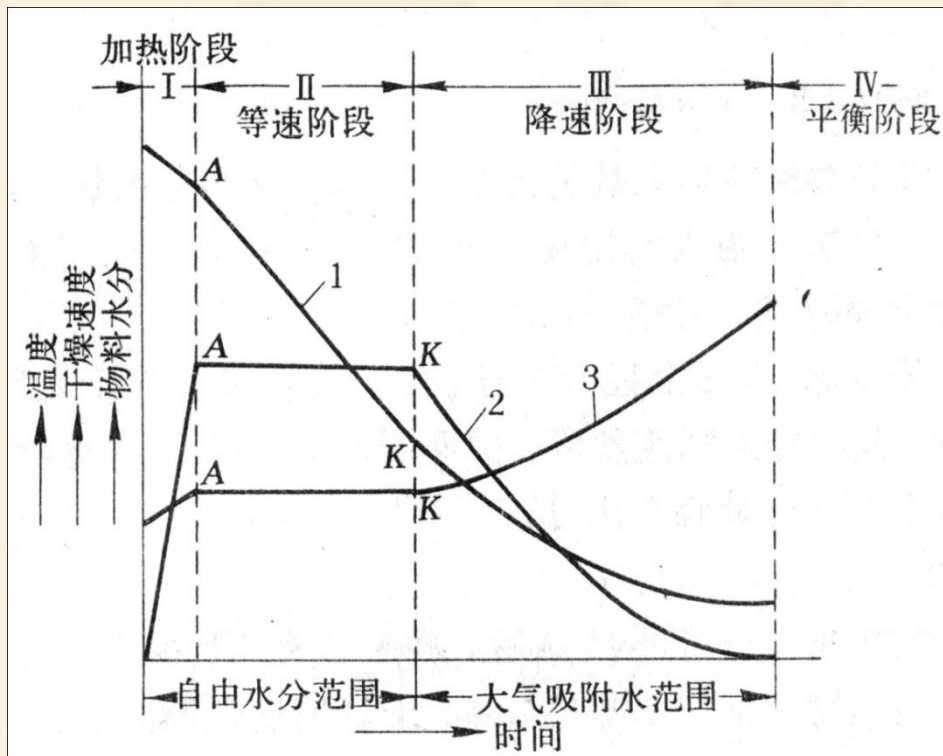
耐火材料在干燥过程中不发生化学反应，干燥介质具有恒定的温度和恒定的相对湿度时，研究和分析物料干燥速度、蒸发水分量、及表面温度随时间变化关系。

1) 加热阶段

单位时间传给物料表面的热量大于表面水分蒸发所消耗的热量，表面温度升高。

2) 等速干燥阶段

干燥以恒定的速度进行。表面温度不变，干燥速度取决于外扩散能力。



1. 物料水分随时间的变化关系；
2. 干燥速度与时间的关系
3. 物料表面温度改变与时间的关系

等速干燥阶段其干燥速度用外扩散公式： $g = \alpha_D M (p_f - p_m) / RT$

P_f 物料表面水蒸气分压， p_m 介质水蒸气分压

蒸发水分量与传递热量成正比，干燥速度可用传热公式：

$$dQ/d\tau = \gamma dW/d\tau = \alpha F (t_m - t_f)$$

将两式进行比较，可得：

$$g = dW / (F d\tau) = (\alpha / \gamma) \cdot (t_m - t_f) = B (t_m - t_f)$$

式中 t_m 干燥介质温度， t_f 物料表面温度

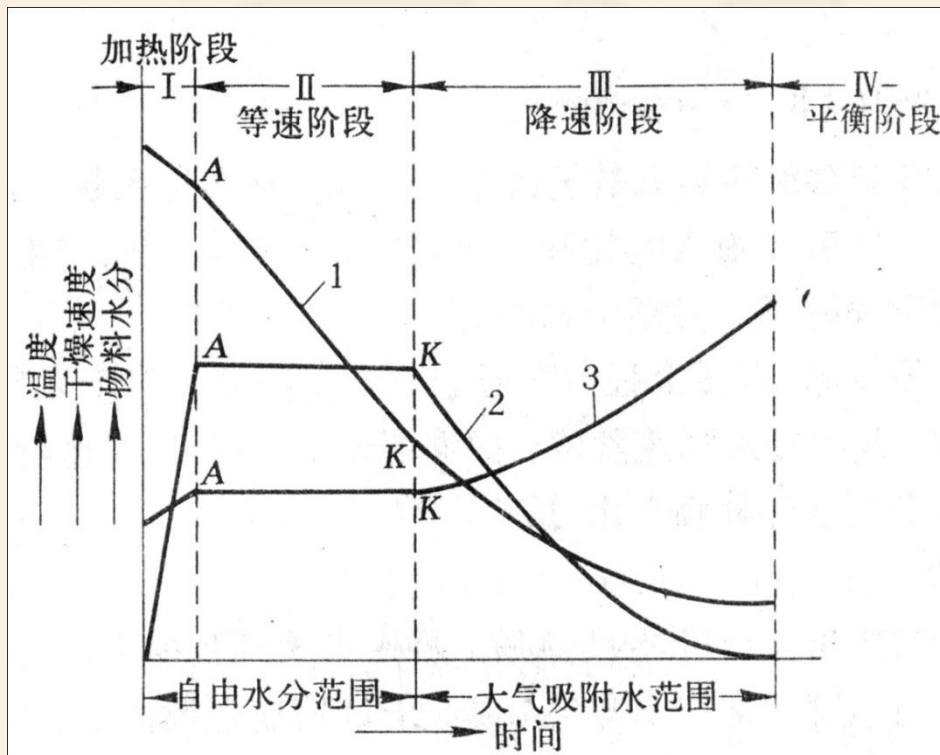
B 称为汽化系数（= α / γ ）， $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ α 对流换热系数， γ 汽化热

3) 降速干燥阶段

超过K点后，进入大气吸附水的排除阶段。干燥速度逐渐降低，干燥速度受内扩散控制，物料表面温度上升。

4) 平衡阶段

达到平衡水分，物料中水分不再随时间变化，干燥速度停止，物料表面温度加热到介质干球温度，干燥过程停止。



1. 物料水分随时间的变化关系；
 2. 干燥速度与时间的关系
 3. 物料表面温度改变与时间的关系
- 图K点为等速阶段转向为降速阶段的转变点，此时物料总的平均水分为**临界水分**。

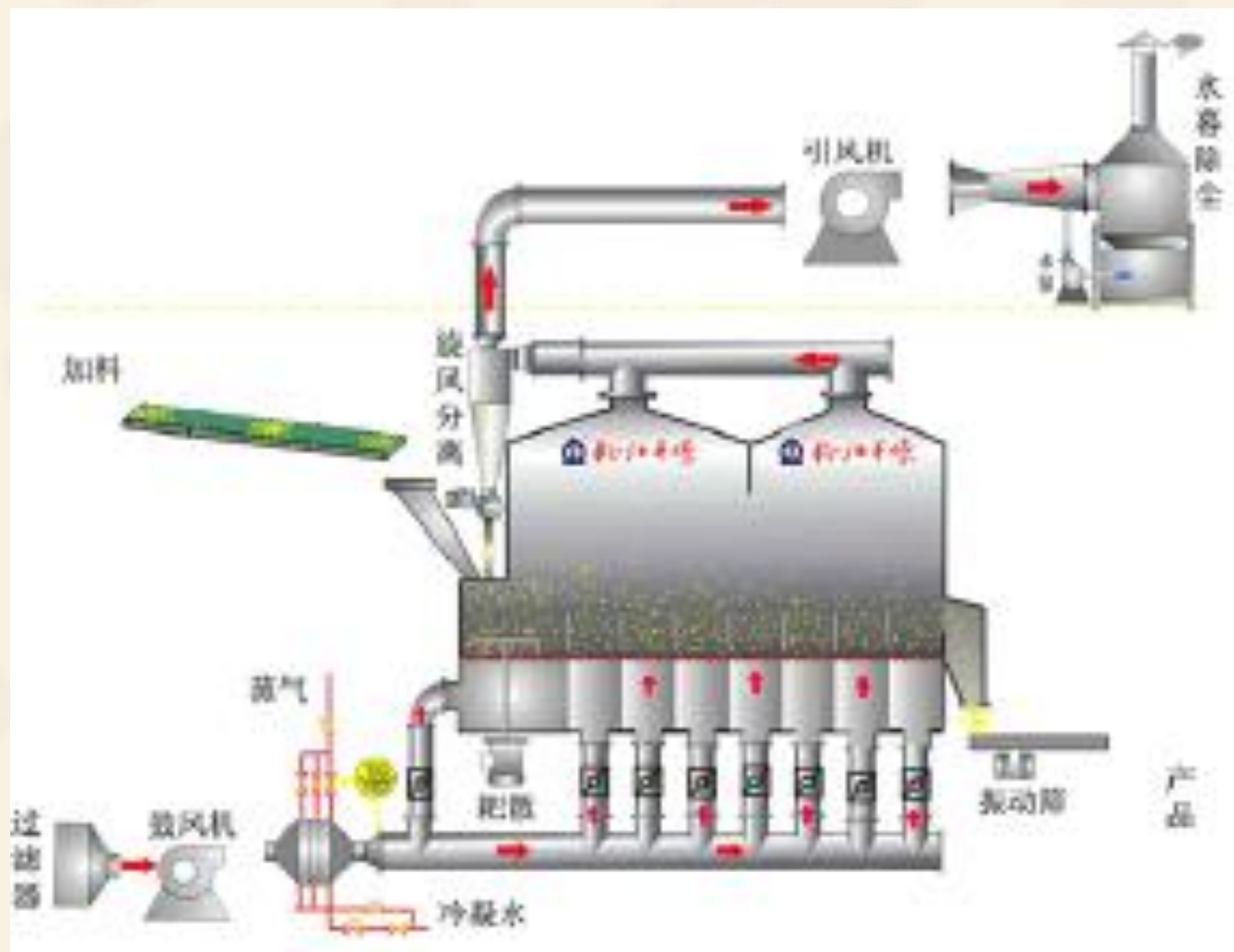
影响干燥速度的因素

物料的干燥过程，主要是依靠干燥介质的传热和物料中的水变为蒸汽向干燥介质扩散两个过程来实现的，这两个过程进行的速度越快，则干燥速度就越大。因此影响干燥速度的因素，实质上是影响传热速度与扩散速度的因素。

- ❖ **a 干燥介质的温度** 干燥介质的温度越高，干燥速度就越大。
- ❖ **b 干燥介质的相对湿度** 相对湿度越低，水分汽化也就越快，因此干燥速度就会越大。增大排风量可以及时排除由于干燥后湿度增大的干燥介质，更换成湿度较低的干燥介质。

- ❖ **c 干燥介质的流速** 干燥介质的流速越高，对流传热量越大；同时干燥介质的流速越高，则可以减薄物料表面层流底层的厚度（它是传热及蒸汽扩散的主要阻力），对传热和传质都有好处，可以强化干燥速度。但是流速过大，粉状物料易飞扬，而且流体阻力会增加，从而加大能量消耗。回转烘干机出筒体风速一般控制在 $1.5 \sim 3\text{m/s}$ 为宜。
- ❖ **d 干燥介质与物料的接触面** 干燥介质与物料的接触面越大，则干燥速度越高。故在干燥时将固体物料破碎（可以增大表面积，还可以缩短内部扩散的途径，降低扩散阻力），或使物料在悬浮状态下干燥，或在回转烘干机内增加扬料板或格板都能增加干燥介质与物料的接触面积，提高干燥速度，缩短干燥时间。

流化床干燥机



- ❖ **e 物料的性质、结构** 物料的性质、结构不同，它的化学组成与水分结合的方式就不同。有的物料主要以非结合水为主；有的物料以结合水为主。很明显，结合水越高，干燥时间越长（因结合水的蒸汽压较低，同时内部水的扩散阻力也较大）。另外，物料的性质、结构不同，在同样条件下干燥，其干燥速度也不一样。水泥工业中，矿渣比粘土易干燥；而同为粘土，塑性较大的粘土就比疏松结构的粘土较难于干燥。
- ❖ **f 物料的水分量** 物料的最初水分，最终水分（干燥要求的）以及临界水分，它们决定着等速干燥阶段及降速干燥阶段的长短。因此，影响到干燥时间。由于等速阶段的干燥速度大于降速阶段的干燥速度，因此，临界水分太高以及要求的最终水分过低，都会增大降速阶段的时间，使总的干燥时间增长。
- ❖ **g 干燥机的构造** 合理的尺寸、结构型式、良好的密封和操作情况，以及适当地提高回转烘干机的转速，将有利于提高干燥速度、缩短干燥时间。

1. 施密特(Schmidt)准数, Sc

Pr (流体动量和热量传递能力的相对大小)

施密特准数在对流传质计算中的作用与普兰特准数在对流传热中的类似。

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

2. 伍德准数(Sherwood)准数, Sh

Nu (流体对流换热能力)

舍伍德准数相当于对流传热中的努塞尔特准数。

$$Sh = \frac{kL}{D_{AB}}$$

例3 空气以3.1 m/s的速度沿水平砖坯表面流动，湿砖坯表面温度为15℃，空气温度为20℃，空气中水蒸气分压为750Pa，在空气流动方向上水平表面长度l为0.1m，求每平方米表面积每小时蒸发水分量。

解：蒸发水分量 $G = \alpha_D M_A (p_{A1} - p_{A2}) / RT$

由附录1查得20℃时空气的 $\mu = 1.506 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

空气的雷诺数 $Re = vl / \mu = 3.1 \times 0.1 / 1.506 \times 10^{-5} = 20600$

对流传质的准数方程式伍德准数 $Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3}$;

$$Sc = u/D$$

从表查得水蒸气在空气中的扩散系数 $D_0 = 0.22 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，并进行温度修正：

$$D = (T/T_0)^{3/2} D_0 P_0/P = (290.5/273)^{3/2} 0.22 = 0.241 \text{ cm}^2/\text{s},$$

$$u/D = 0.625;$$

$$Sh = 0.664 \times 20600^{1/2} \times 0.625^{1/3} = 81.47$$

$$Sh = \alpha_D l/D;$$

$$\alpha_D = S_h \cdot D/l = 81.47 \times 0.241/10 = 1.963 \text{ cm/s} = 70.68 \text{ m/h}$$

$$\text{蒸发水分量 } G = \alpha_D M_A (p_{A1} - p_{A2})/RT$$

在干燥开始阶段，表面水分多，其表面水蒸气分压可认为在该温度下的饱和水蒸气压，温度 15°C ，查附录得到水蒸气分压为 1708Pa 。

$$p_{A1} = 1708\text{Pa}; \quad p_{A2} = 750\text{Pa}$$

所以

$$g = 70.68 \times 18 \times (1708 - 750) / (8314 \times 288) = 0.51 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

三、物料中水分的内扩散——湿传导与热湿传导

在潮湿物料中，由水分梯度引起的内扩散，称为湿传导（湿扩散）。

根据扩散基本定律，单位时间内从单位表面积排出的水分量：

$$G_w = -D(dC/dX)_f ;$$

$$(dC/dX)_f = 2(C_T - C_f)/(\delta/2)$$

式中 D ：水分湿扩散系数；

$(dC/dX)_f$ ：表面水分梯度，如图3.7。

该情形仅适于存在水分梯度而无温度梯度，故适用于等速干燥阶段。

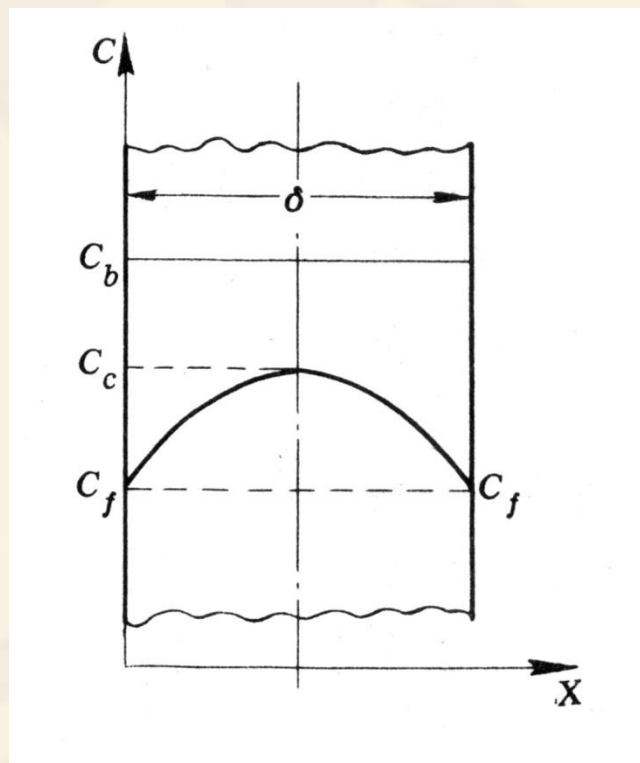


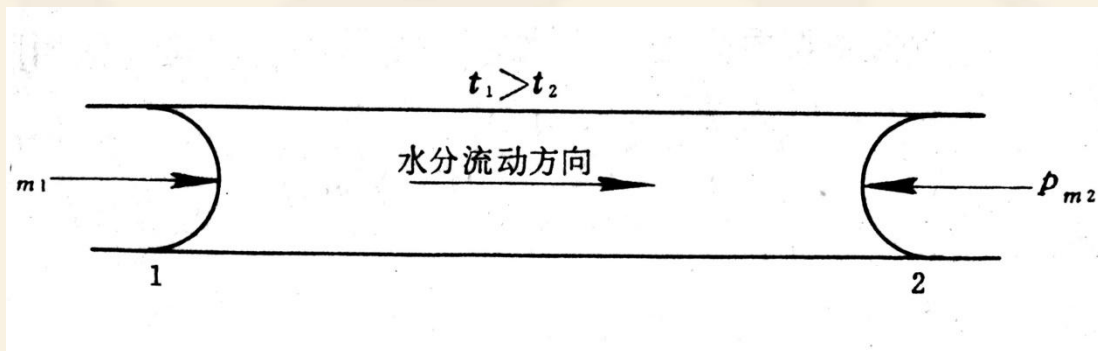
图3.7 物料干燥时水分的分布
 C_b 开始时物料水分；
 C_c 物料中心的水分
 C_f 物料表面的水分

若有**温度梯度**引起水分移动为**热湿传导**。干燥时物料内部水分的移动可以看成水沿毛细管的流动如图3.8。毛细管液体弯月面上的压强表示为：

$$p_M = p - 2a/r,$$

当毛细管两端温度 $T_1 > T_2$,

$$p_{M1} - p_{M2} = 2(a_2 - a_1)/r$$



在较高温度下高温处弯月面压强较大而形成压强差。

由于热湿传导引起水分移动的速度为：

$$Gh_w = -B\partial t/\partial X = -D\rho_0 K\partial t/\partial X \quad \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

式中 D ：水分湿扩散系数， m^2/h ；

ρ_0 ：绝对干物料密度， kg/m^3 ；

K ：热湿传导系数， $1/^\circ\text{C}$ 。

四、物料在干燥过程的收缩与变形

耐火制品在干燥时，水分的减少其线尺寸收缩，制品线尺寸与所含水分之间关系为：

$$l = l_0 + (W_1 - W_2) M_w \cdot \text{tg}\Phi$$

上式可进一步改写为

$$l = l_0 [1 + (W_1 - W_2) M_w \cdot \text{Tg}\Phi / l_0] = l_0 [1 + \alpha (W_1 - W_2) M_w]$$

式中： $\alpha = \text{TG}\Phi / l_0$ ，称为线膨胀系数，对粘土制品为0.004~0.007之间。