

湿空气的I-x图

用分析法计算空气的状态参数及干燥过程相当繁琐，工程上为简化计算，将有关湿空气性质的数学解析式制成湿度图。

一、I-x图的组成

等温线——等x线

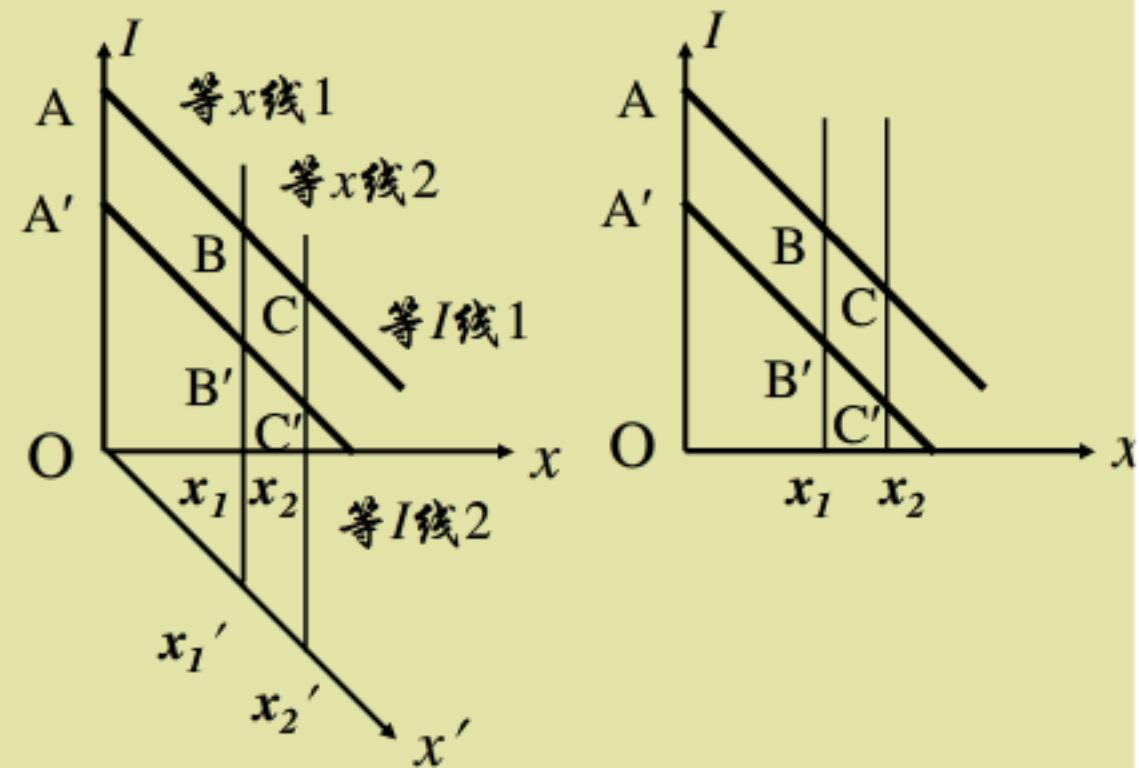
等热量线——等I线

等干球温度线——等t线

等湿球温度线(绝热饱和线)——等 t_{wb} 线

等相对湿度线——等 φ 线

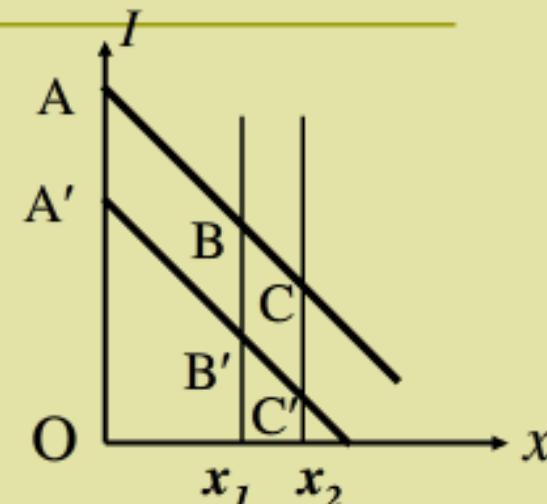
水蒸气分压线



1. 等湿含量线(等x线)

等湿含量线是一簇平行于纵轴的直线。

令 R_x 代表横轴的比例尺($\text{kg水汽}/\text{kg干空气}$)/mm, 则线段 Ox_1 代表的湿含量值为 $x=R_x|Ox_1|(\text{kg水汽}/\text{kg干空气})$ 。



2. 等热含量线(等I线)

等热含量线是一簇平行于斜横轴 Ox' 、与水平横轴成 45° 夹角的直线。

令 R_i 代表纵轴的比例尺(kJ/kg干空气)/mm, 则通过A点的等热含量线的值 $I=R_i|OA|(\text{kJ/kg干空气})$ 。

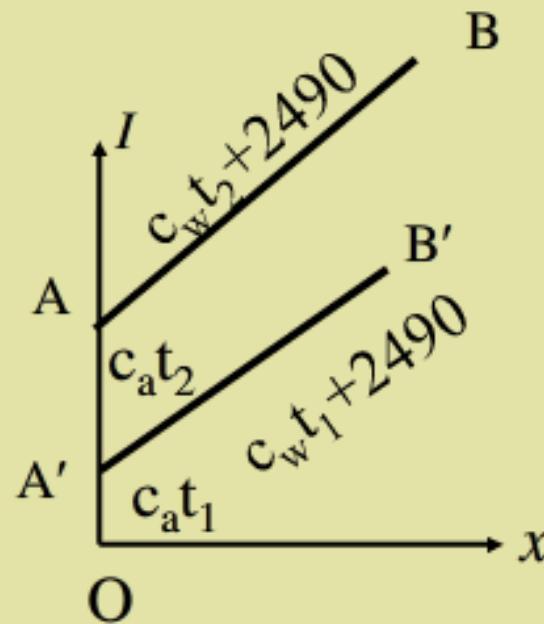
在作图时应标明比例尺 R_x 和 R_i , 通常 $R_x/R_i=2000$ 。

3. 等干球温度线(等I线或简称等温线)

根据式(6-10), 湿空气的热含量为

$$I = c_a t + (c_w t + 2490)x$$

当温度一定时, c_a 和 c_w 都是定值, 热含量 I 只是湿含量 x 的一次函数, 故等干球温度线是一簇直线, 截距为 $c_a t$, 斜率为 $c_w t + 2490$ 。



4. 等相对湿度线(等 φ 线)

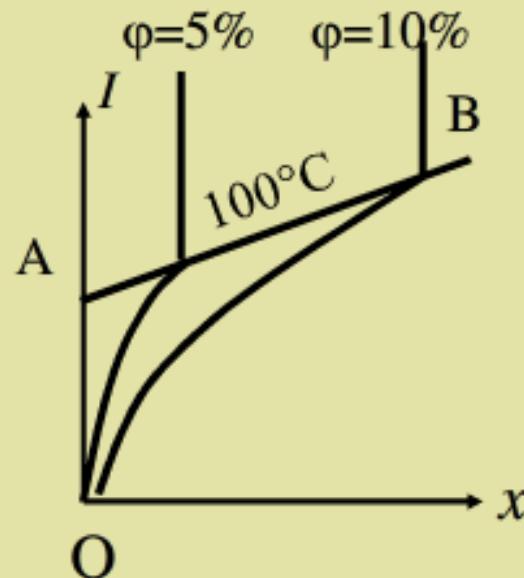
根据式(6-7)

$$x = 0.622 \frac{\varphi p_{sw}}{p - \varphi p_{sw}}$$

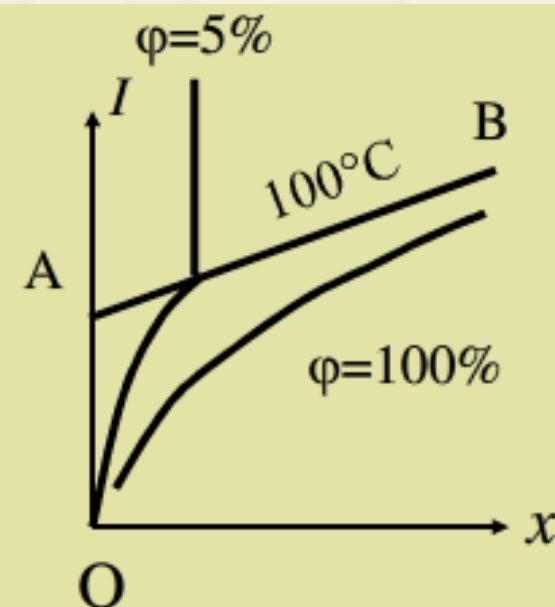
得：

$$p_{sw}(t) = \frac{x p}{(0.622 + x)\varphi} \quad (6-15)$$

空气的总压 p 及相对湿度 φ 给定后，上式是一簇向上微凸的曲线，在沸点处(100°C) $p_{sw}(t)=p$ ，等 φ 线突变为垂直向上的直线。



$\varphi=100\%$ 的等 φ 线称为湿空气的饱和线。饱和线以下的区域，空气处于不稳定的过饱和状态；饱和线以上的区域是未饱和区，相对湿度越小的区域离饱和线越远，空气的干燥能力越强。



在I-x图上通常标明作图时的空气总压 p ，当实际大气压 p' 与图上的大气压值有较大偏差时，应将图中查得的 φ 值用下式修正

$$\varphi' = \varphi \frac{p'}{p}$$

φ' 为对应于实际大气压 p' 的相对湿度。

5. 水蒸气分压线

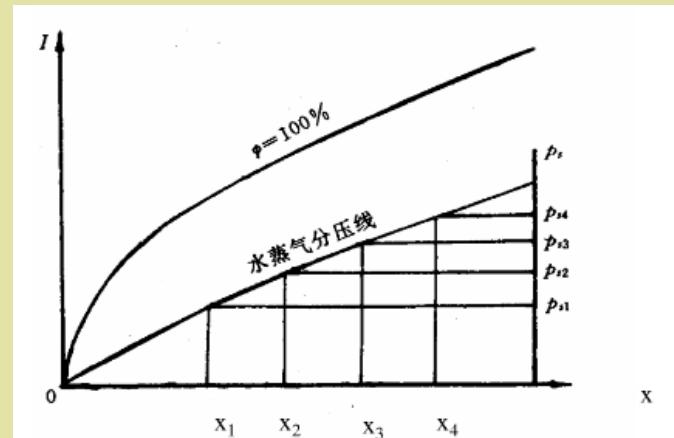
根据式(6-15)

$$\begin{aligned} X &= \text{水蒸气质量 } m_w / \text{干空气质量 } m_a \\ &= 0.622 (=18/29) p_w / p_s \\ &= 0.622 p_w / (p - p_w) = 0.622 \Phi p_s / (p - \Phi p_s) \end{aligned}$$

$$p_{sw}(t) = \frac{xp}{(0.622+x)\varphi}$$

得空气中水蒸气分压为

$$p_w = \varphi p_{sw} = \frac{xp}{(0.622+x)}$$



空气的总压 p 已知时，上式是一条通过原点并向上微凸的曲线，位于饱和区内。

6. 等湿球温度线(等 t_{wb} 线)

由绝热饱和过程得：

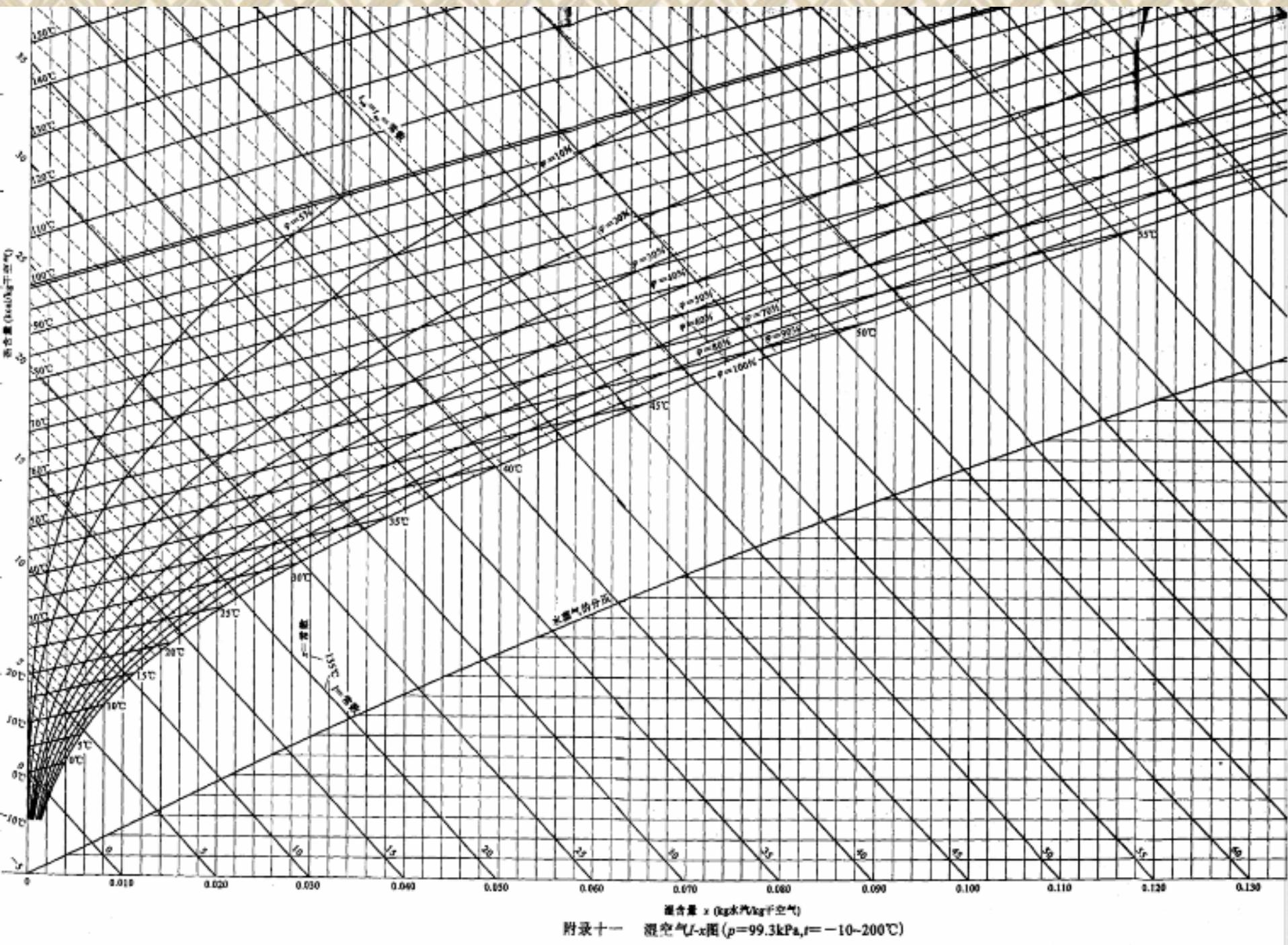
$$I = I_{ac} - (x_{ac} - x)ct_{ac} = (I_{ac} - x_{ac}ct_{ac}) + cxt_{ac}$$

而湿空气的湿球温度 t_{wb} 近似等于绝热饱和温度 t_{ac} ，故有

$$I = (I_{ac} - x_{ac}ct_{wb}) + cxt_{wb} \quad (6-17)$$

当绝热饱和温度 t_{ac} (湿球温度 t_{wb})给定时,水的比热 c 为已知数,该温度下的湿含量 x_{ac} 和热焓 I_{ac} 可由 $t=t_{ac}$ 的等温线与 $\varphi=100\%$ 的等 φ 线的交点获得,也是已知数。因此,热焓 I 与湿含量 x 的关系是线性的,如附录十一和附录十二中的虚线。

当空气的温度较低或计算要求不高时,也可以用等热含量线近似代替等湿球温度线。



附录十一 湿空气*J-x*图 ($p=99.3\text{kPa}, t=-10\text{--}200^{\circ}\text{C}$)

二、I-x图的应用

I-x图
的应用

湿空气状态参数的图解

空气经加热器预热后状态参数的图解

烟气与冷空气混合后状态参数的图解计算

热烟气湿含量及热含量的计算

热烟气与冷空气混合后状态参数的图解

三、理论干燥过程和实际干燥过程

1. 理论干燥过程

$$q_h = q_0,$$

干燥介质带入热量 $q_h = I_1 - I_1$

空气离开带走热量 $q_0 = I_2 - I_0$

$$\text{所以 } I_1 = I_2$$

理论干燥过程，即等热焓过程。也就是说热空气的热含量只用于蒸发水分，蒸发水分的热量又全部随被蒸发的水分回到热空气中。

理论干燥过程在I-X图上的表示和计算如图3.2。

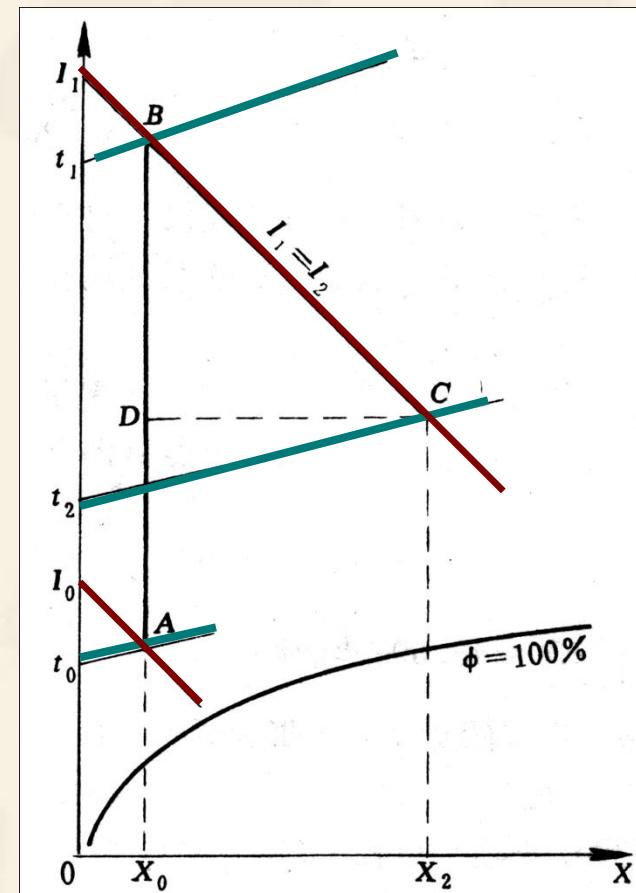


图3.2 理论干燥过程

用I-X图来计算理论干燥过程时，蒸发每千克水空气消耗量 l_{th} ,

$$l = 1/(X_2 - X_1) = 1/(DC \cdot M_x) \text{ kg/kg}$$

DC- $(X_2 - X_0)$ 线段长度， MM;

M_x —湿含量比例尺， kg/(kg·mm)

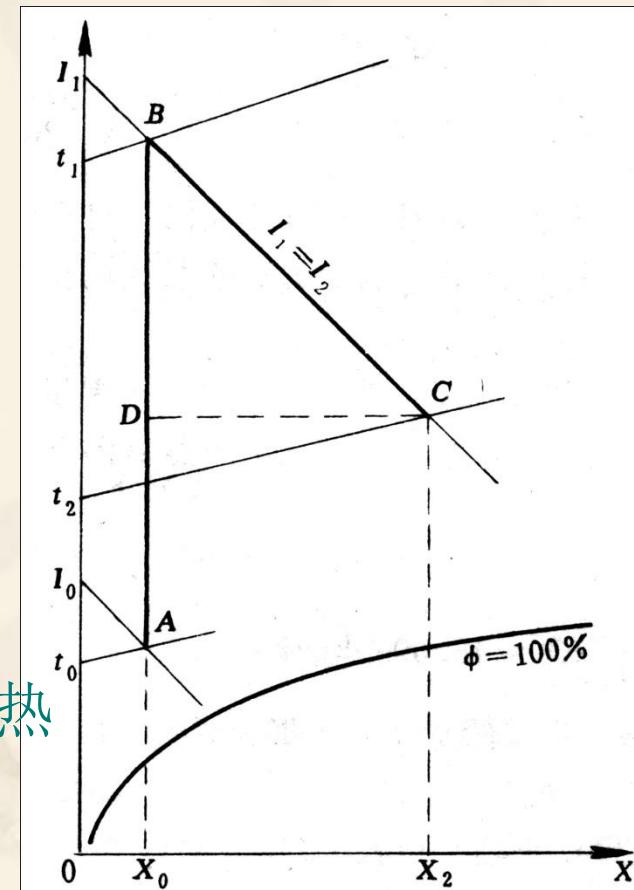
$$q_h - q_0 = l_{th} (I_1 - I_2) = \Delta$$

热量消耗 q_{th} 即为空气在加热器中获得的热量

$$q_{th} = l_{th} (I_1 - I_0) = (AB \cdot M_i) / (DC \cdot M_x) \text{ kJ/kg}$$

AB— $(I_2 - I_0)$ 线段长度， mm;

M_i —热含量比例尺， 每千克干空气长度热含量， kJ/kg·mm



2. 实际干燥过程

$$q_h - q_0 = l(l_1 - l_2) = \Delta$$

在大多数情况下， $\Delta > 0$ ，即损失的热量大于补充的热量，此时 $l_1 > l_2$ 。实际干燥过程也可以在 $l-X$ 图上表示和计算，如图3.3。

$$l = 1/(x_2' - x_0)$$

$$\Delta = l(l_1 - l_2) = (l_1 - l_2)/(x_2' - x_0)$$

$$= DE M_i / DF M_x$$

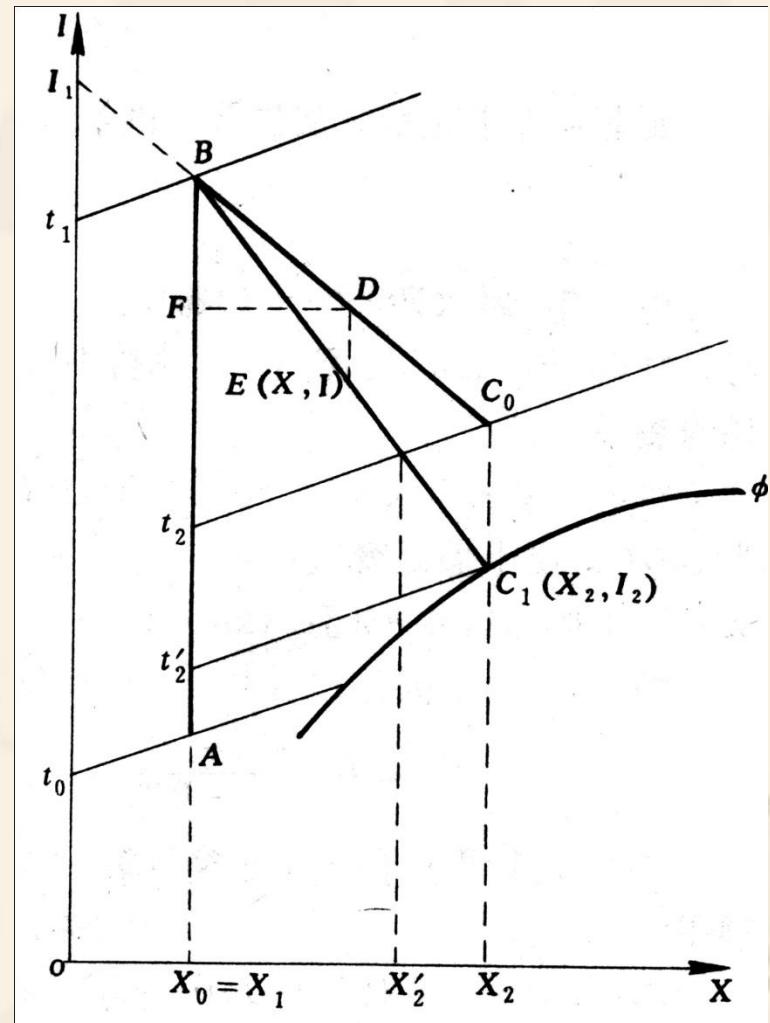


图3.3 实际干燥过程， $\Delta > 0$

空气经加热由状态A到达B后。对于理论干燥过程，则沿等热含线I₁到达C₀，即BC₀表示理论干燥过程；对于实际干燥过程，由于其热含量I₂<I₁，BC₁必然要比BC₀为陡。设E点为实际干燥过程的某一状态点，其参数为(X、I)，由E点沿等湿含量线引直线向上交BC₀于D点，由D点引水平线DF交AB于F点。对实际干燥过程中任意点E。

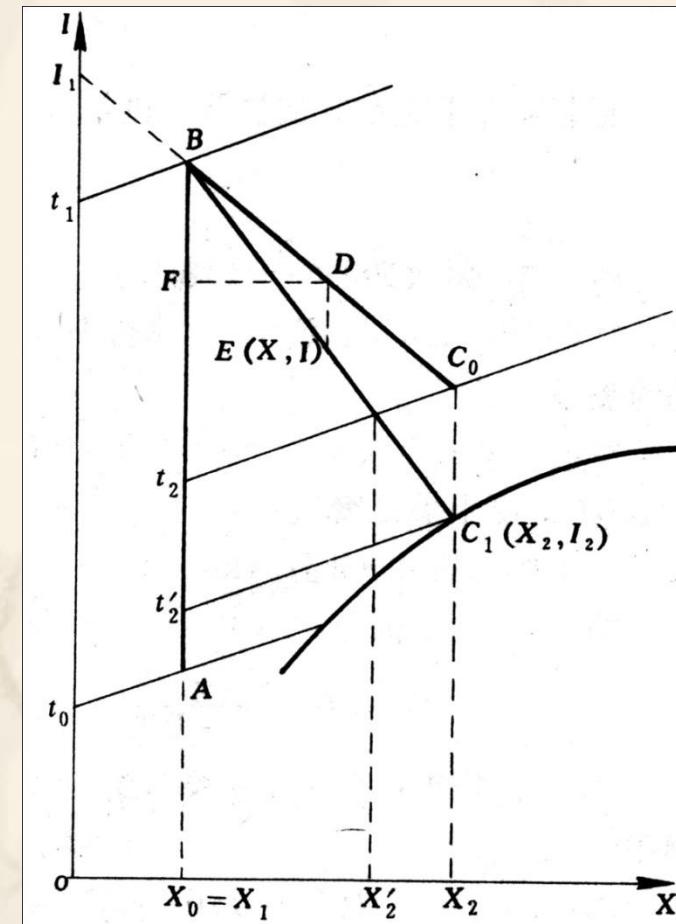
$$DE = \Delta \cdot DF \cdot M_x / M_i$$

实际干燥过程蒸发每千克水消耗的空气量为：

$$l = 1/(x_2' - x_0)$$

蒸发1千克水分加热器应供给空气的热量或称实际热量消耗为

$$q = l (I_1 - I_0) = (I_1 - I_0)/(x_2' - x_0) \text{ kJ/kg}$$



例2 耐火砖坯体在干燥器中进行干燥，进料量 G_1 为1000kg/h，进口处坯体相对水分 $Wr' = 6\%$ ，出口处坯体相对水分 $Wr'' = 1.5\%$ ，计算蒸发1千克水分所需的空气量和消耗的热量。已知空气温度 t_0 为15°C，每千克干空气湿含量 x_0 为0.008kg/kg，进干燥器的空气温度 $t_1=140^\circ\text{C}$ ，出口干燥器废气相对湿度 $\Phi= 60\%$ ，坯体进干燥器温度25°C，出干燥器温度为80°C，干坯比热0.85kJ/(kg ·°C)

解：(1) 每小时蒸发水分量

$$\begin{aligned} W &= G_1(Wr' - Wr'') / (1 - Wr'') \\ &= 1000 \times (0.06 - 0.015) / (1 - 0.015) = 45.69 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

(2) 进行干燥器热量平衡计算，以求得在干燥器中损失的热量

$$I(I_1 - I_2) = (q''_m + q''_{tr} + q_l) - (q'_m + q'_{tr} + q_{ad})$$

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

$$G_0 = G_1(1 - W_r') = 1000(1 - 0.06) = 940 \text{ kg};$$

$$M_1 = 1000 \times 6\% = 60 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} q'_m &= (940 \times 0.85 \times 25 + 60 \times 4.187 \times 25) / 45.69 \\ &= 574.64 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

其中 $q''_m = (G_0 C_0 \theta_2 + M_2 C_w \theta_2) / W$

$$G_2 = G_1(1 - W_r') / (1 - W_r'') = 1000(1 - 0.06) / (1 - 0.015) = 954 \text{ kg};$$

$$M_2 = G_r W r'' 1000 \times 6\% = 14.31 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} q''_m &= (940 \times 0.85 \times 80 + 14.31 \times 4.187 \times 80) / 45.69 \\ &= 1504 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

加热运输设备实际消耗热量，假设：

$$q_{tr}'' - q_{tr}' = 990 \text{ kJ/kg}$$

散失于周围的热量，其计算结果： $q_1 = 1045 \text{ kJ/kg}$

实际干燥过程中，蒸发每千克水分所损失的热量

$$\begin{aligned} l(l_1 - l_2) &= \Delta = (1504 - 574.64) + 990 + 1045 \\ &= 2964.36 \text{ kJ/kg} = 708 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

(3) 在I-X图上作出理论干燥过程ABC₀线见图3.4, 根据t₀为15°C, 每千克干空气具有的湿含量x₀为0.008 kg/kg, 在I-X图上作A点, 此时I₀=8 kcal/kg(33 kJ/kg)。

沿等湿线与I₁=39 kcal/kg (163 kJ/kg), 相交于B点, B点参数t₁=140°C, x₁=x₀=0.008 kg/kg, 然后沿等I线至Φ=60%相交于C₀点, 得x₂=0.044 kg/kg。

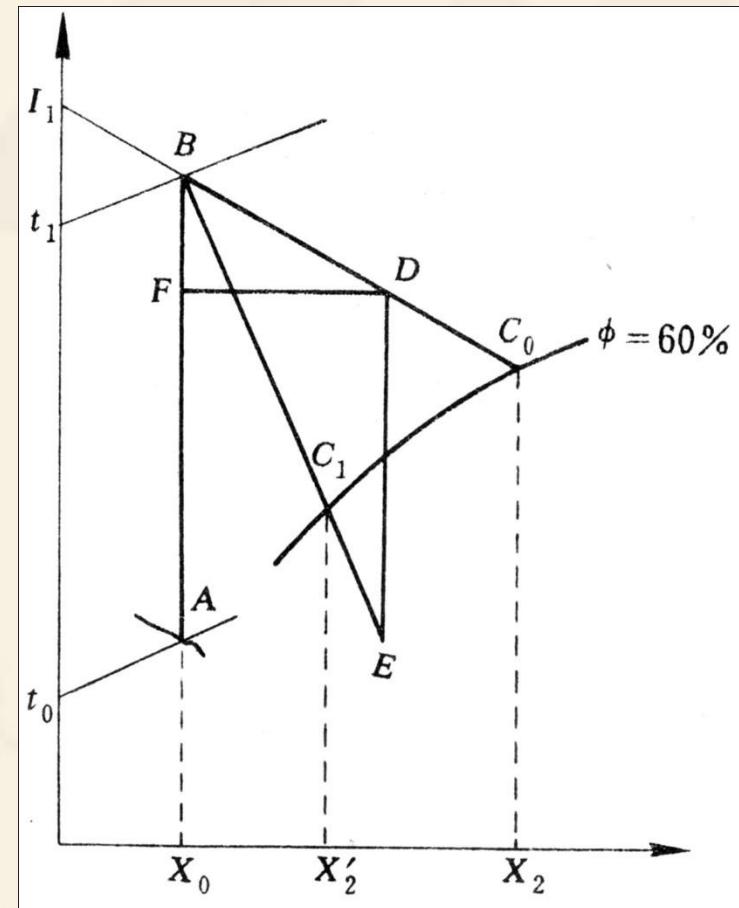


图3.4 例题2附图

再求出实际干燥过程线 BC_1 。在 BC_0 线上任取一点D，量取 $DF = 57 \text{ mm}$, $DE = \Delta DF M_x/M_i = 708 \times 57 \times 0.0004/0.2 = 81 \text{ mm}$, 连接BE线与 $\phi = 60\%$ 线相交于 C_1 点， C_1 点即为实际干燥过程的终点，根据 C_1 点查得在实际干燥过程中每千克干空气的湿含量 $x_2' = 0.027 \text{ kg/kg}$ 。

(4) 计算每小时消耗空气量及热量

$$\text{空气量 } L = W = W / (x_2' - x_0)$$

$$= 45.69 / (0.027 - 0.008) = 2405 \text{ kg/h}$$

$$\text{热量 } Q = l (l_1 - l_0) W = 2405 (163 - 33) = 312650 \text{ kJ/h}$$

