

# 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

等湿线——等*x*线

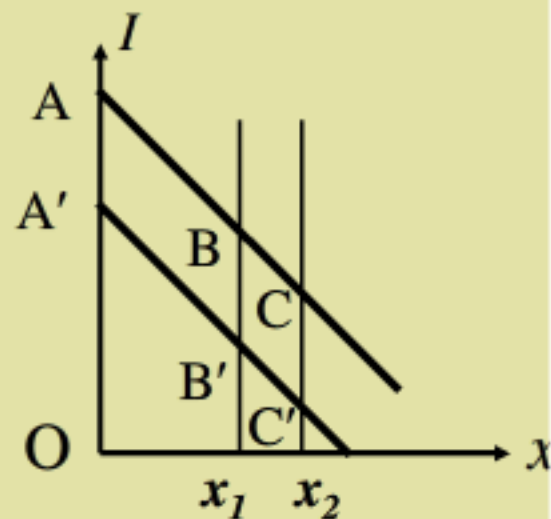
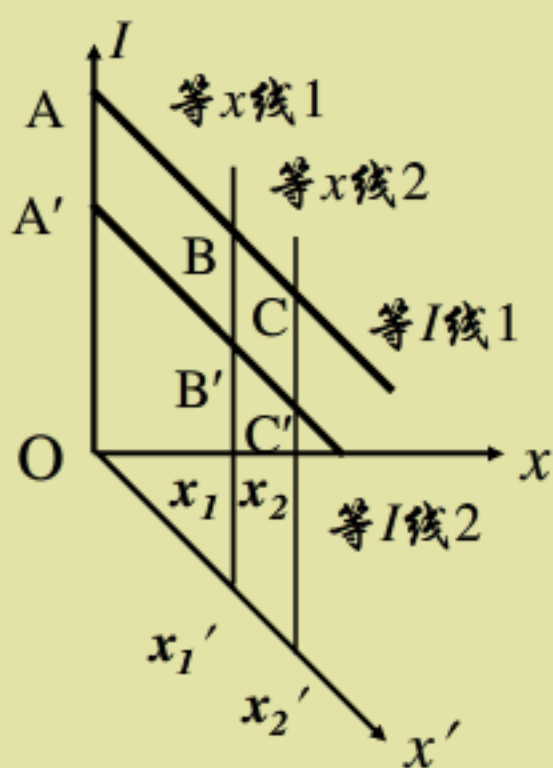
等热量线——等*I*线

等干球温度线——等*t*线

等湿球温度线(绝热饱和线)——等*t<sub>wb</sub>*线

等相对湿度线——等*φ*线

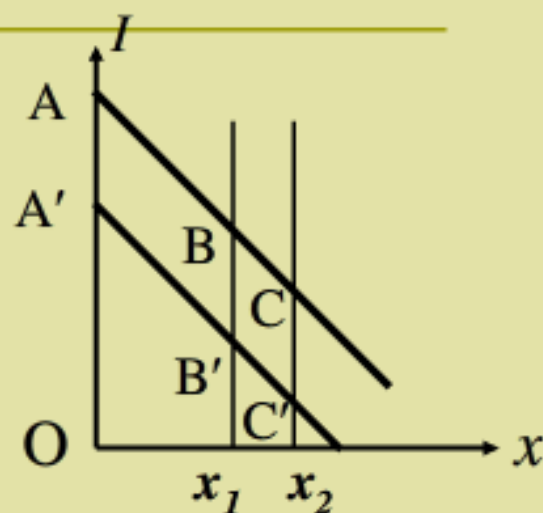
水蒸气分压线



## 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(kg水汽/kg干空气)/mm, 则线段 $Ox_1$ 代表的湿含量值为 $x = R_x |Ox_1|$  (kg水汽/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 $45^\circ$ 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 $I = R_i |OA|$  (kJ/kg干空气)。

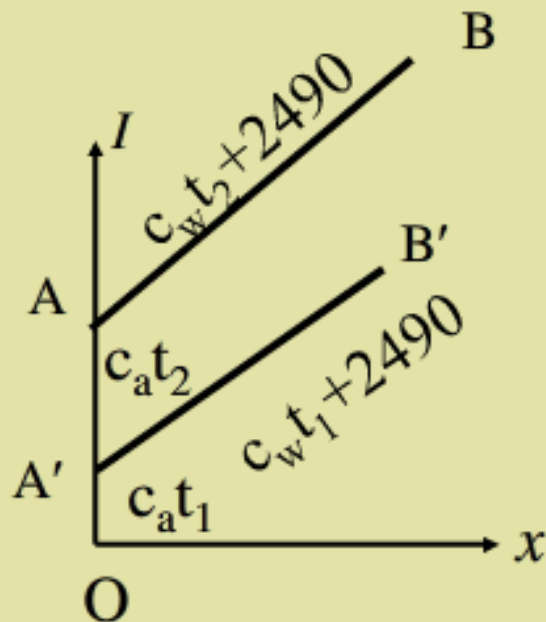
在作图时应标明比例尺 $R_x$ 和 $R_i$ , 通常 $R_x/R_i=2000$ 。

### 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 $\varphi$ 线)

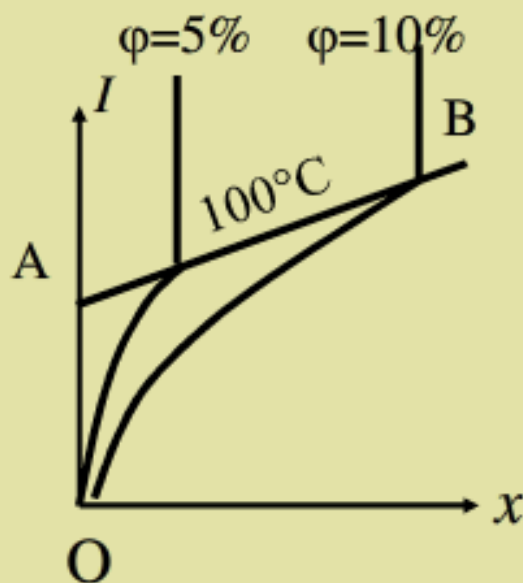
根据式(6-7)

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

得:

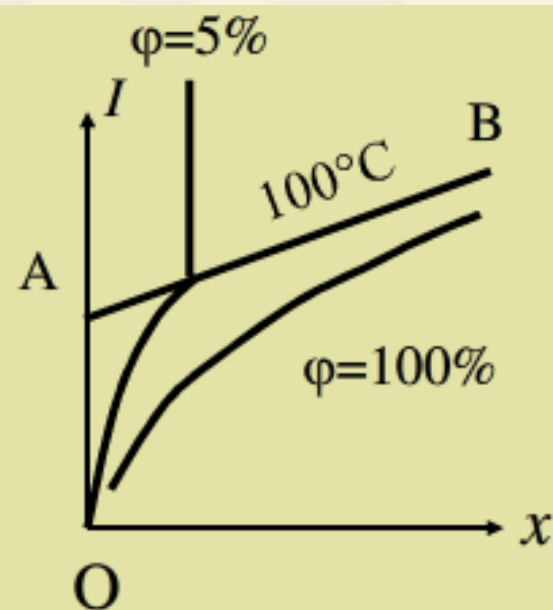
$$p_{sw}(t) = \frac{x p}{(0.622 + x) \varphi} \quad (6-15)$$

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





$\varphi=100\%$ 的等 $\varphi$ 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 $\varphi$ 值用下式修正

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

$\varphi'$ 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)

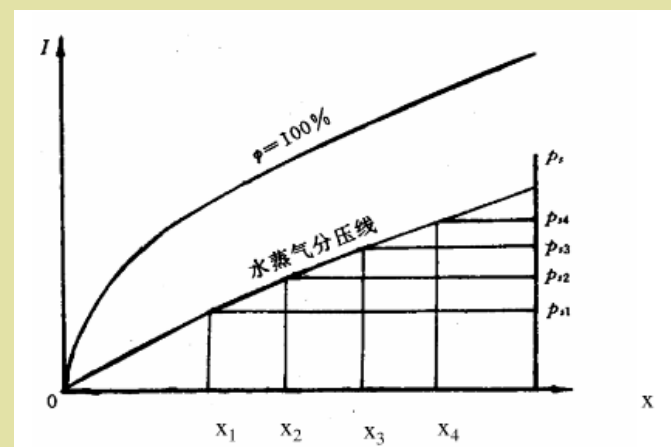
$$\begin{aligned} X &= \text{水蒸气质量 } m_w / \text{干空气质量 } m_a \\ &= 0.622 \left( = 18/29 \right) p_w / p_s \\ &= 0.622 p_w / (p - p_w) = 0.622 \Phi p_s / (p - \Phi p_s) \end{aligned}$$

$$p_{sw}(t) = \frac{x p}{(0.622 + x) \phi}$$

得空气中水蒸气分压为

$$p_w = \phi p_{sw} = \frac{x p}{(0.622 + x)}$$

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:

$$I = I_{ac} - (X_{ac} - X)ct_{ac} = (I_{ac} - X_{ac}ct_{ac}) + cXt_{ac}$$

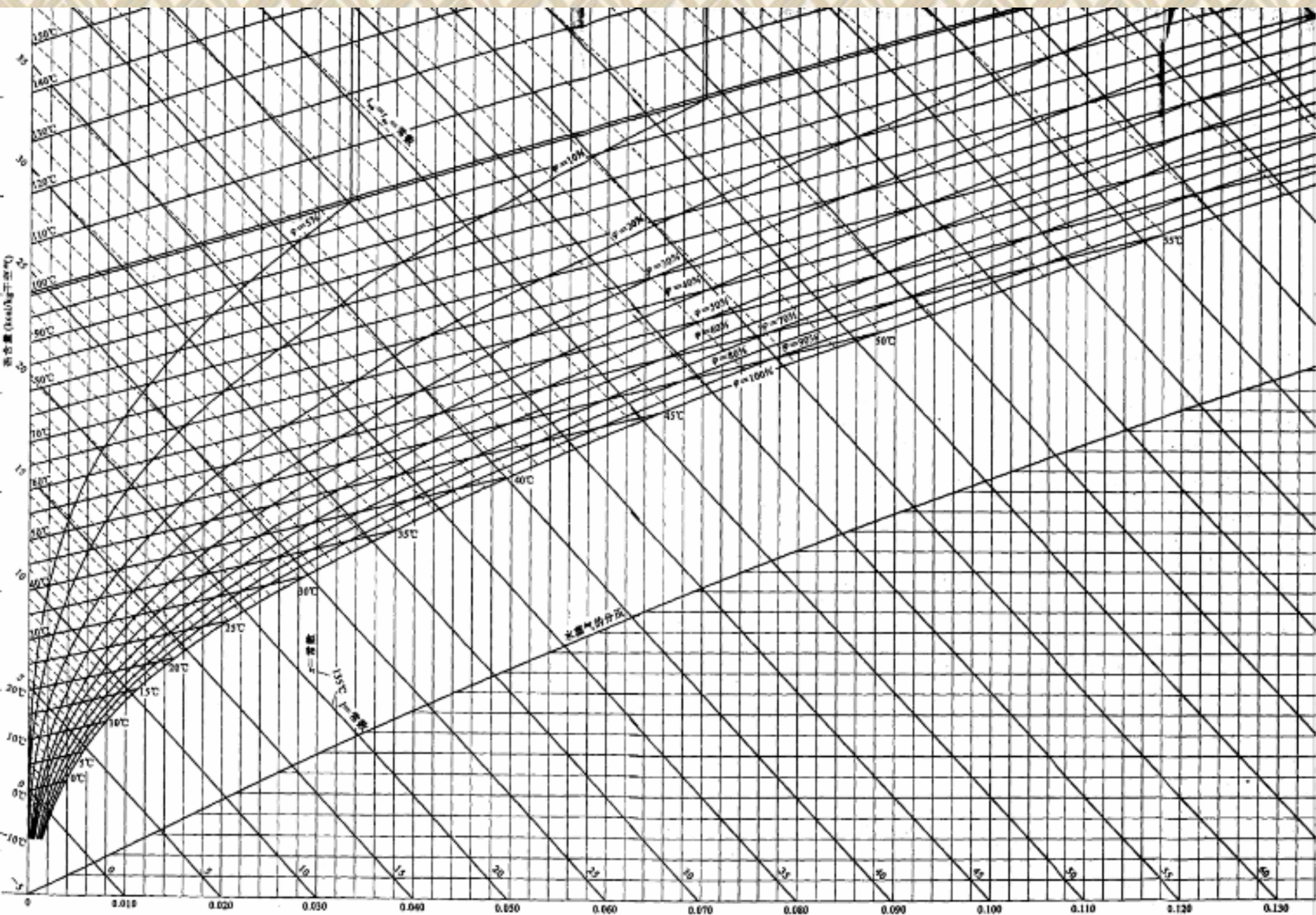
而湿空气的湿球温度 $t_{wb}$ 近似等于绝热饱和温度 $t_{ac}$ , 故有

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

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 $\phi=100\%$ 的等 $\phi$ 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。

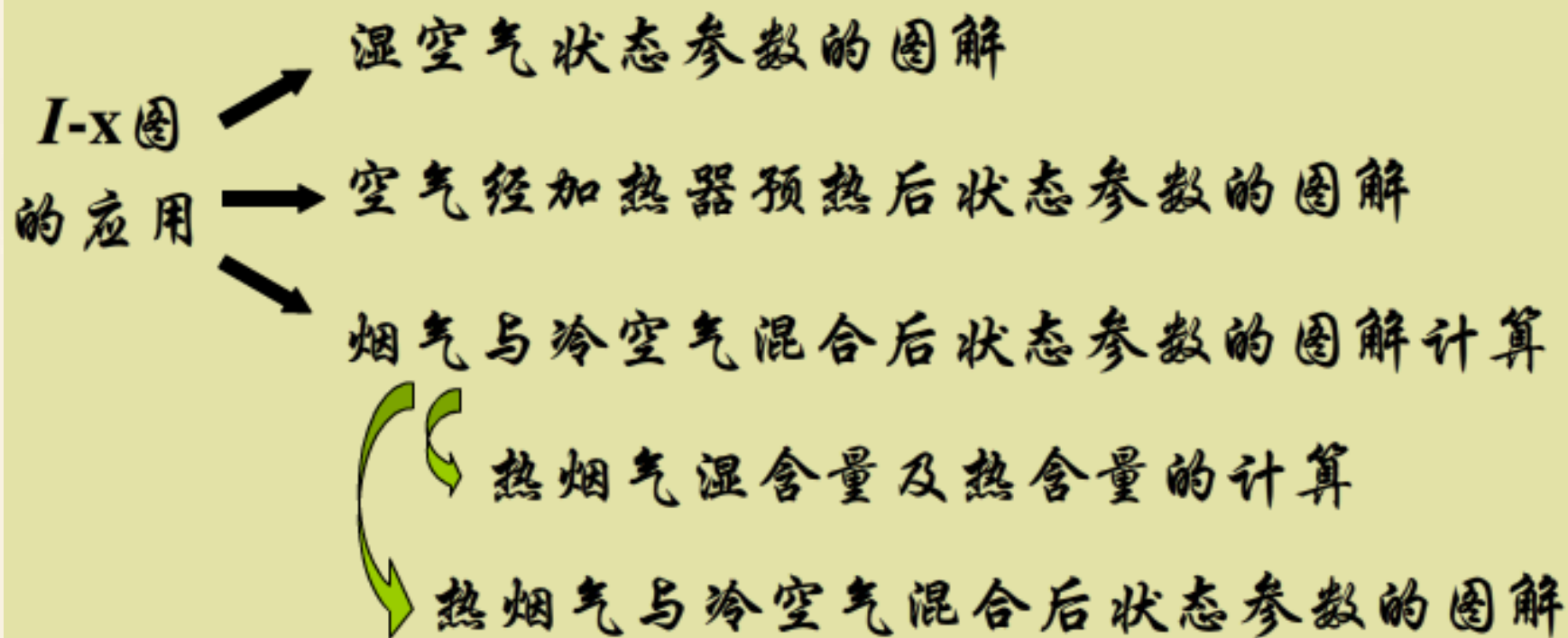




附录十一 湿空气  $t$ - $x$  图 ( $p = 99.3 \text{ kPa}$ ,  $t = -10 \sim 200^\circ\text{C}$ )



## 二、 $I$ - $x$ 图的应用



### 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  $q_h = l I_1$

空气离开带走热量  $q_0 = l I_2$

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。

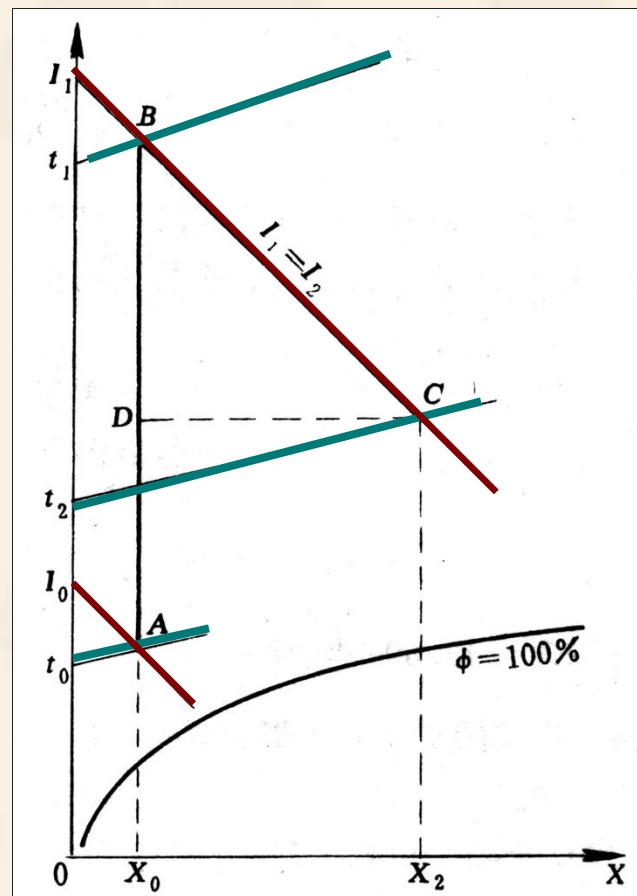


图3.2 理论干燥过程

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)

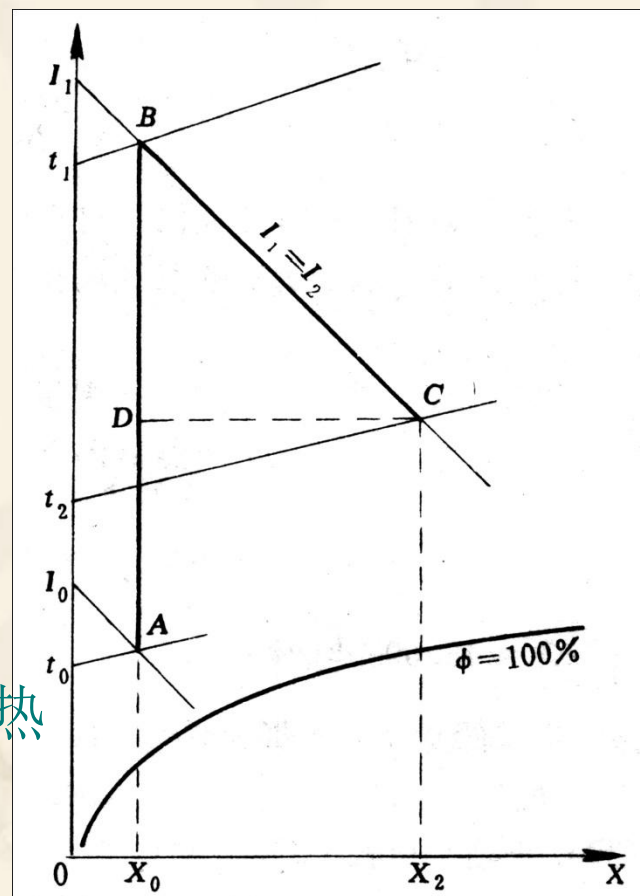
$$q_h - q_0 = l_{th} (I_1 - I_2) = \Delta$$

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

$$q_h - q_0 = l(I_1 - I_2) = \Delta$$

在大多数情况下,  $\Delta > 0$ , 即损失的热量大于补充的热量, 此时  $I_1 > I_2$  实际干燥过程也可以在  $I-X$  图上表示和计算, 如图3.3。

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

$$\begin{aligned} \Delta &= l(I_1 - I_2) = (I_1 - I_2) / (x_2' - x_0) \\ &= DE M_i / DF M_x \end{aligned}$$

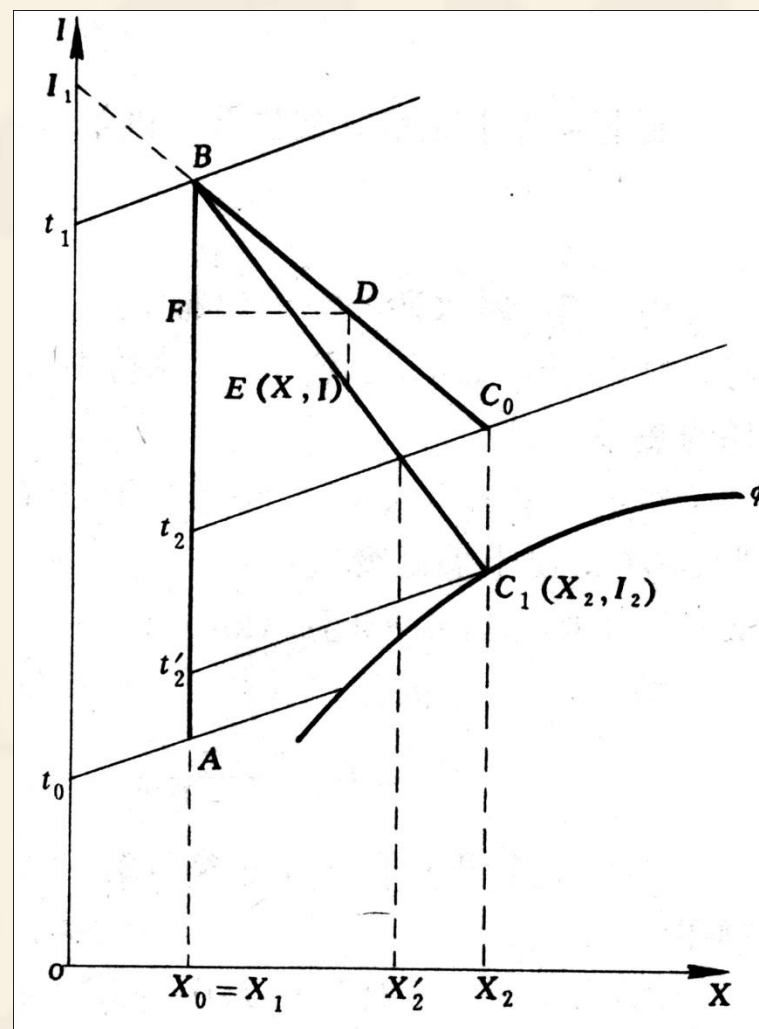


图3.3 实际干燥过程,  $\Delta > 0$

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 $I_1$ 到达 $C_0$ ，即 $BC_0$ 表示理论干燥过程；对于实际干燥过程，由于其热含量 $I_2 < I_1$ ， $BC_1$ 必然要比 $BC_0$ 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 $BC_0$ 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。

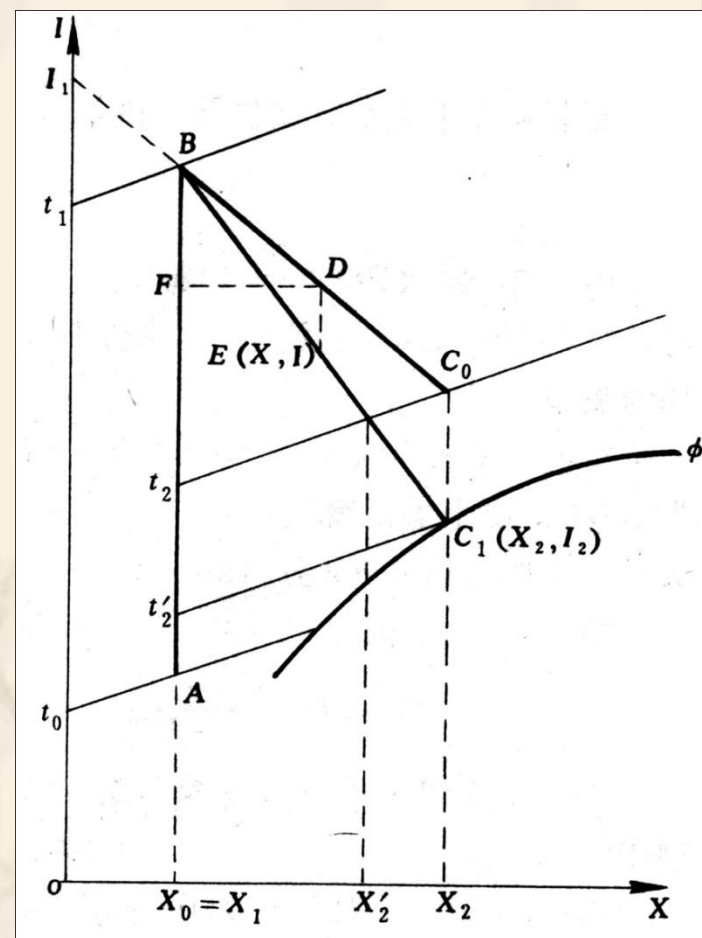
$$DE = \Delta \cdot DF \cdot M_x / M_i$$

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

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



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℃，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℃，出干燥器温度为80℃，干坯比热0.85kJ/(kg·℃)

解: (1) 每小时蒸发水分量

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

(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

$$l(l_1 - l_2) = (q''_m + q''_{tr} + q_l) - (q'_m + q'_{tr} + q_{ad})$$



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

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

(3) 在I-X图上作出理论干燥过程 $ABC_0$ 线见图3.4, 根据 $t_0$ 为 $15^{\circ}\text{C}$ , 每千克干空气具有的湿含量 $x_0$ 为 $0.008 \text{ kg/kg}$ , 在I-X图上作A点, 此时 $I_0 = 8 \text{ kcal/kg}$  ( $33 \text{ kJ/kg}$ )。

沿等湿线与 $I_1 = 39 \text{ kcal/kg}$  ( $163 \text{ kJ/kg}$ ), 相交于B点, B点参数  
 $t_1 = 140^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = x_0 = 0.008 \text{ kg/kg}$ , 然后沿等I线至 $\Phi = 60\%$ 相交于C<sub>0</sub>点, 得  
 $x_2 = 0.044 \text{ kg/kg}$ 。

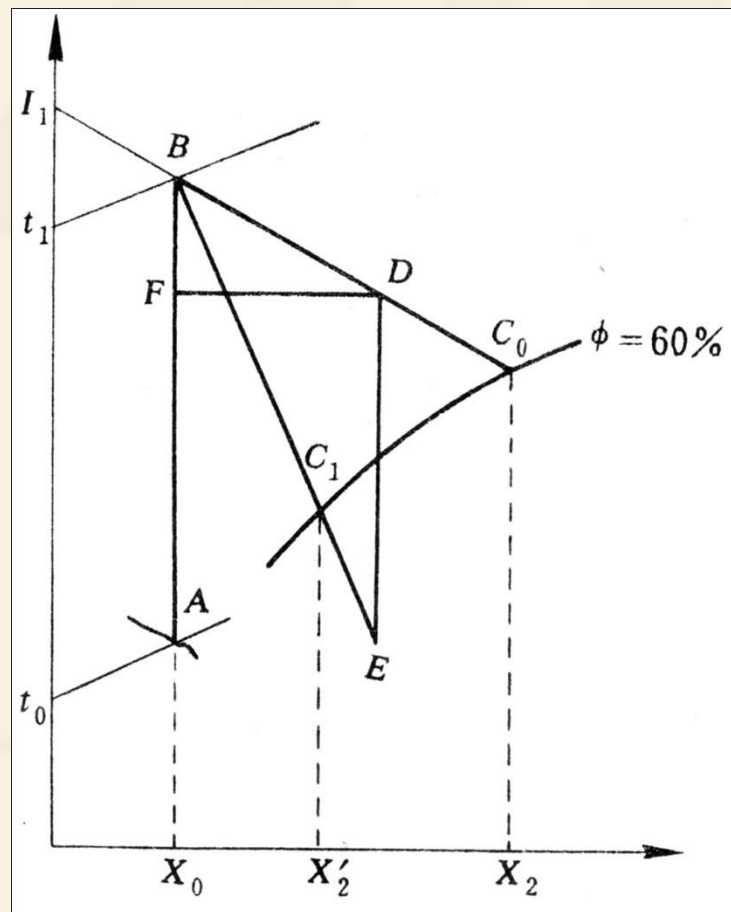


图3.4 例题2附图



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

$$\text{空气量 } L = l W = W / (x_2' - x_0) = 45.69 / (0.027 - 0.008) = 2405\text{ kg/h}$$

$$\text{热量 } Q = l (I_1 - I_0) W = 2405 (163 - 33) = 312650\text{ kJ/h}$$

