

## 洞道式水产品烘干房的热量衡算

达式奎

(上海水产学院)

### 提 要

洞道式水产品烘干房的供热,系由水分蒸发热  $Q_v$ 、物料及运载工具升温吸热  $Q_s$ 、排潮失热  $Q_c$  及烘道各项热损失  $Q_l$  等四项热量所组成。而混合风的温度  $t$ , 及湿含量  $x$ 。则由相应方程式来计算。本文并讨论了以下诸问题:

1. 有关干燥过程供热  $Q_r$  的计算方法,
2. 以干基为准和以湿基为准问题的研究,
3. 关于混合风状态的确定,
4. 干燥介质参数的选定。

水产品烘干房,是干制水产品的重要装置。有部份废气循环的水产品烘干房,由于具有结构简单,建造方便,渔货处理量大,适于多种水产品的干燥加工等优点,在我国渔区已被广泛采用。近年来我们直接为福建、江苏、浙江等省设计新造和改建近三十座水产品烘干房,在这过程中,不断总结改进,最后投产效果较好,并已在国内推广,基本上具备热效率高、运转费用低等优点。例如排烟温度低(小于  $260^{\circ}\text{C}$ ),排潮热损失小,这同国外有的烘干机排烟温度高(约  $480^{\circ}\text{C}$ ),排潮热损失大,进行比较,其经济效果要高得多。我国现有的烘干房每生产一公斤干紫菜需要燃料费 0.28 元,如用国外上述的烘干房每生产一公斤干紫菜则需燃料费 1.0 元。现在,在几年反复实践的基础上,我们已经初步建立了一套包括工艺、热力、空气动力、机电等系统的设计计算方法。热量衡算则是其中的重要环节,本文将就其计算要点作简要叙述,并对有关问题加以讨论。

### 计 算 要 点

有部份废气循环的洞道式水产品烘干房,其热量消耗  $Q_r$  由四个方面组成:(1)物料及运载工具的升温吸热  $Q_s$ , (2)水分蒸发热  $Q_v$ , (3)排潮失去的显热  $Q_c$ , (4)建筑物散热及漏风热损失  $Q_l$ 。即是:

$$Q_r = Q_s + Q_v + Q_c + Q_l \quad (1)$$

现将(1)式中各项的计算式简述如下:

### 1. 物料及运载工具的升温吸热 $Q_s$

$Q_s$  系由物料升温吸热  $Q_{fs}$ 、竹帘升温吸热  $Q_{ss}$  和烘车升温吸热  $Q_{cs}$  等三项组成。即

$$Q_s = Q_{fs} + Q_{ss} + Q_{cs} \quad (2)$$

$$\text{式中: } Q_{fs} = G_{fs} C_{fs} (t_{f_1} - t_0) - W_f C_w (t_{f_1} - t_2) \quad (3)$$

$$Q_{ss} = G_s C_{st} (t_0 - t_0) - W_s C_w (t_{s_1} - t_2) \quad (4)$$

$$Q_{cs} = G_c C_c (t_{c_1} - t_0) \quad (5)$$

式中:  $G_{fs}, G_s, G_c$ ——分别代表物料, 竹帘及烘车之重量[kg/hr];

$C_{fs}, C_{st}$ ——分别代表物料, 竹帘进烘道时之比热[kcal/kg°C];

$t_{f_1}, t_{s_1}, t_{c_1}$ ——分别代表物料、竹帘、烘车出烘道时之温度[°C];

$t_0, t_2$ ——分别代表物料等进烘道时温度及排潮温度[°C];

$W_f, W_s$ ——分别代表物料、竹帘所蒸发的水分量[kgH<sub>2</sub>O/hr];

$C_w, C_w$ ——分别代表烘车, 水的比热[kcal/kg°C]。

### 2. 水分蒸发热 $Q_v$

全部烘道每小时蒸发水份量  $W_w$  应为物料蒸发水份量  $W_f$  与竹帘水分蒸发量  $W_s$  之和, 即

$$W_w = W_f + W_s \quad (6)$$

水的蒸发热可以直接从水的汽化热表查取, 也可按下式计算,

$$Q_v = W_w \times (595 - 0.54t_2) \quad (7)$$

### 3. 排潮失去的显热 $Q_0$

由下式计算

$$Q_0 = L_{OGD} \times (0.24 + 0.46x_0) (t_2 - t_0) \quad (8)$$

式中:  $L_{OGD}$ ——以干空气为计算单位之排潮重量流量[kgD/hr]; (kgD 代表公斤干空气)

$t_0, x_0$ ——分别代表补充新鲜空气之温度(°C), 及湿含量[kgH<sub>2</sub>O/kgD]

### 4. 建筑物散热及漏风热损失 $Q_l$

这一部份热量理论计算有困难, 影响因素较多, 一般或按经验公式计算或按经验数据确定, 根据我们的经验  $Q_l$  约为  $(Q_s + Q_v + Q_0)$  的 15%—30%

$$Q_l = (0.15—0.30)(Q_s + Q_v + Q_0) \quad (9)$$

### 5. 混合风状态的确定

在有部份废气循环的洞道式水产品烘干房的热量衡算中, 确定混合风状态也是一个

重要课题。

(1) 混合风温度  $t_0$  有部份废气循环的洞道式水产品烘干房中干燥介质(即热空气)在对物料进行加热干燥后其中一部份经排潮口排出, 而大部份又回到加热室与外界补充进来的新鲜空气混合组成混合风。总的鼓风量是由烘道中的风速, 烘道截面积以及烘道数(双烘道烘干房此数为 2)的乘积决定。在稳定的干燥过程中, 烘干房中干燥介质流量有下列关系:

$$L_{OGD} = L_{RGD} + L_{OGD} \quad (10)$$

式中:  $L_{OGD}$ ——混合风(总鼓风)的重量流量[kgD/hr];

$L_{OGD}$ ——补充新风的重量流量, 在无漏风的情况下即为排潮重量流量(kgD/hr)。

当回风与补充新风混合后根据热力学第一定律可以计算得混合风温度  $t_0$

$$t_0 = \frac{L_{RGD}(0.24 + 0.46x_2)t_2 + L_{OGD}(0.24 + 0.46x_0)t_0}{L_{RGD}(0.24 + 0.46x_2) + L_{OGD}(0.24 + 0.46x_0)} \quad (11)$$

式中:  $t_0$ ——混合风温度[°C];

$x_2$ ——回风之湿含量[kgH<sub>2</sub>O/kgD]。

(2) 混合风的湿含量  $x_0$ 。根据质量守恒定律可得:

$$x_0 = \frac{L_{RGD}x_2 + L_{OGD}x_0}{L_{RGD} + L_{OGD}} \quad (12)$$

式中:  $x_0$ ——混合风的湿含量[kgH<sub>2</sub>O/kgD]。

混合风温度  $t_0$  及湿含量  $x_0$  算得后可配合干燥过程所需供热  $Q_r$  及混合风重量流量  $L_{OGD}$  而算出烘道进风温度  $t_{A_0}$ 。此外由于主风机通常是在混合风状态下工作的, 而风机的特性又是以体积流量与全压来表征的, 故在选择确定风机时需要根据混合风温度、湿度、与重量流量来确定。由此可见正确确定混合风状态实属必要。

## 有关问题的讨论

### 1. 有关干燥过程所需热量 $Q_r$ 的计算方法

对于干燥过程所需热量  $Q_r$  可有不同的计算方法, 正如前述我们是从四种热量消耗来进行计算的, 这四种耗热之和以  $Q_r$  表示; 也有其他的方法, 即按温湿图法进行计算, 其实质与我们的方法相似, 也是用四种耗热之和来表征, 不同的是我们在物料等升温吸热  $Q_s$  的计算时以湿基为准而该法则以干基为准。按  $I-x$  图的计算方法表面上似乎有些不同, 实际上其计算项目仍然可以归结为四种热量之和, 计算式如下:

$$Q_r = L_{OGD}(I_2 - I_0) + Q_1 + Q'_s - W_w t_0 \quad (13)$$

式中:  $I_2, I_0$ ——分别为回风, 补充新风之热含量[kcal/kgD];

$Q'_s$ ——以干基为准则的物料, 运载工具等升温吸热[kcal/hr]。

不难证明

$$L_{OGD}(I_2 - I_0) - W_w t_0 = L_{OGD}(0.24 + 0.46x_0)(t_2 - t_0) + 4H_t W_w + 0.46W_w(t_2 - t_0) \quad (14)$$

式中:  $\Delta H_{i_0}$ ——在  $t_0$  时水之汽化热[kcal/kgH<sub>2</sub>O]

式(14)右端第一项为排潮失去的显热(严格地讲,排潮中补充新鲜空气所耗废的热量),右端第二及第三项乃系水分蒸发热。

## 2. 关于以干基为准和以湿基为准的探讨

干燥过程中重量为  $G_1$  的物料等,当进入烘道后其温度由  $T_0$  逐渐上升到出料温度  $T_1$ ,在升温的同时其中水分也不断蒸发,到出料时重量已减至  $G_2$ ,即有  $(G_1 - G_2)$  的水分在  $T_0$  到  $T_1$  的温度下汽化的,此蒸汽被干燥介质(空气流)所带走,温度变成排潮温度  $T_2$ ,由排潮口排出。所以物料等干燥初态为  $G_1(T_0, w_1)$ ,终态为  $G_2(T_1, w_2) + (G_1 - G_2)_{T_2}$ , [其中  $w_1, w_2$  分别表示湿物料(进料)与干物料(出料)之水分含量]。在这实际干燥过程中物料等升温吸热与水分蒸发热二者之和  $Q_{ev}$  应由下述四部分所组成:①物料实际升温吸热,②物料等中水分实际蒸发热,③在温度低于排潮温度  $t_2$  时物料等中蒸发出去的水蒸气升温至  $T_2$  应吸收的热量,④在温度高于  $t_2$  时物料等中蒸发出去的水蒸气温度降至  $T_2$  应放出的热量。即  $Q_{ev}$  应按下列式计算:

$$Q_{ev} = \int_{T_0}^{T_1} C_m G dT + \int_{T_0}^{T_1} \Delta H_v \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT + \int_{T_0}^{T_2} C_g dT \int_{T_0}^T \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT - \int_{T_1}^{T_2} C_g dT \int_{T_1}^T \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT \quad (15a)$$

式中:  $Q_{ev}$ ——实际干燥过程中物料升温吸热与水分蒸发热之和;

$\Delta H_v$ ——在温度  $T$  时物料等水分蒸发热[kcal/kgH<sub>2</sub>O];

$G$ ——物料等之重量;

$C_m, C_g$ ——分别代表物料等,水蒸气之比热[kcal/kg °C];

$T_1$ ——物料等之出料温度[°K] = 273 +  $t_1$ ;

$T_2$ ——排潮温度[°K] = 273 +  $t_2$ 。

根据热力学,系统的热函  $H$  系由某组成的物料等质量  $G$ , 温度  $T$  和压力  $P$  所决定,而压力实际对本系统影响甚小(常压干燥)故可以把  $H$  看成是  $G$  与  $T$  的函数。当上述初终态确定以后  $\Delta H$  为恒值,可以说

$$\Delta H_m = Q_{ev} = \int_{T_0}^{T_1} C_m G dT + \int_{T_0}^{T_1} \Delta H_v \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT + \int_{T_0}^{T_2} C_g dT \int_{T_0}^T \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT - \int_{T_1}^{T_2} C_g dT \int_{T_1}^T \left( \frac{-\partial G}{\partial T} \right) dT \quad (15b)$$

要解出上式必先找出  $G$  与  $T$  的关系式,它取决于物质本性,物料等在干燥过程中的分布状态以及干燥介质组成,温度,速度等,故具体实地求算很困难。不过,由于  $H$  是状态函数它的变化  $\Delta H$  仅取决于系统的初态与终态而与过程无关,故可通过下列两不同过程来分别计算,这样不仅求算方便而且结果也严格相等。

(A)如图 1 所示物料等升温汽化之过程为:(1)物料等  $G_1(T_0, w_1)$  由初温  $T_0$  加热至终温  $T_1$ , (2)在  $T_1$  温度下有  $(G_1 - G_2)$  的水蒸发成蒸汽,即成为  $G_2(T_1, w_2)$  的干物料及

$(G_1 - G_2)_{\tau, T_1}$  的水蒸气。(3)  $G_2(T_1, w_2)$  不变,  $(G_1 - G_2)_{\tau, T_1}$  温度降至  $T_2$ , 即成为  $(G_1 - G_2)_{\tau, T_2}$ , 即前述之终态。

沿着这样过程, 系统的  $\Delta H_m$  可按下列式计算:

$$\Delta H_m = \int_{T_0}^{T_1} G_1 C_d dT - \int_{G_1}^{G_2} \Delta H_{v, T_1} dG + \int_{T_1}^{T_2} (G_1 - G_2) C_p dT \quad (16a)$$

$$\simeq G_1 C_d (T_1 - T_0) + (G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1} + (G_1 - G_2) C_p (T_2 - T_1) \quad (16b)$$

$$\simeq G_1 C_d (T_1 - T_0) + (G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1} - (G_1 - G_2) C_w (T_1 - T_2) \quad (16c)$$

式中:  $C_d$ ——湿物料等在水分含量为  $w_1$  时之比热[kcal/kg°C];

$\Delta H_{v, T_1}$ ,  $\Delta H_{v, T_2}$ ——分别为湿物料等在  $T_1, T_2$  之蒸发潜热[kcal/kgH<sub>2</sub>O]。

(16c)式中之  $G_1 C_d (T_1 - T_0) - (G_1 - G_2) C_w (T_1 - T_2)$  即以湿物料为基准之物料等升温吸热,  $(G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1}$  为蒸发水份之蒸发热  $Q_{v0}$ 。

(B) 如图2所示, 物料等之汽化升温过程为 (1) 物料等  $G_1$  在初温  $T_0$  有  $(G_1 - G_2)$  蒸发成水蒸汽及生成  $G_2(w_2, T_0)$  之干物料, (2)  $G_2(w_2, T_0)$  之干物料等升温至  $T_1$  成  $G_2$

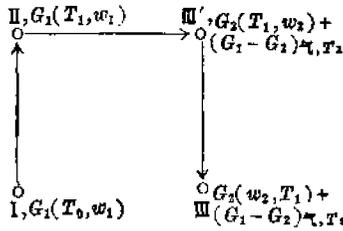


图1 物料等升温汽化过程

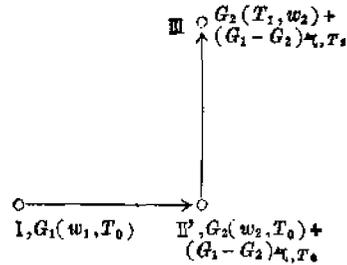


图2 物料等汽化升温过程

$(w_2, T_1)$ ,  $(G_1 - G_2)$  之水蒸汽升温至  $T_2$  即为终态 III。沿这样过程系统  $\Delta H$  可按下列式计算:

$$\Delta H_m = \int_{T_0}^{T_1} G_2 C_d dT - \int_{G_1}^{G_2} \Delta H_{v, T_1} dG + \int_{T_1}^{T_2} (G_1 - G_2) C_p dT \quad (17a)$$

$$\simeq G_2 C_d (T_1 - T_0) + (G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1} + (G_1 - G_2) C_p (T_2 - T_0) \quad (17b)$$

$$\simeq G_2 C_d (T_1 - T_0) + (G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1} + (G_1 - G_2) C_w (T_2 - T_0) \quad (17c)$$

式中:  $\Delta H_{v, T_1}$ ——在  $T_0$  时湿物料等之蒸发潜热[kcal/kgH<sub>2</sub>O];

$C_d$ ——干物料等之比热[kcal/kg°C]。

(17c)式之  $(G_1 - G_2) \Delta H_{v, T_1} + (G_1 - G_2) C_w (T_2 - T_0)$  即为物料中蒸发的水份从  $T_0$  蒸发成  $T_2$  的蒸汽所需要的热量, 而  $G_2 C_d (T_1 - T_0)$  为以干物料为基准之物料等升温吸热。

按(15), (16), (17)式算出的  $\Delta H$  应相等, 即无论以干物料为基准还是以湿物料为基准虽然它们的热力学过程各异且与实际过程也不同但所算得的物料等升温吸热及水份蒸发热却均应与实际过程之  $Q_{v0}$  相等。所以这种  $Q_{v0}$  不仅可用干物料为基准来计算, 也可用湿物料为基准来计算, 甚至还可以在干燥过程前一阶段(预热阶段)取湿基为准, 后一阶段(材料加热阶段)取干基为准来计算<sup>[3]</sup>。

在水产品烘干房的热量衡算中我们是以湿物料为准,因为各类水产品原料的比热可以从有关手册查得,计算比较方便,若以干物料为基准则由于成品含水率无一定标准,随生产要求而异,其比热不易查取,计算时感到不便。

干燥工艺所研究的系统由两部份组成,一为上述的物料等(包括烘车及竹帘)它在干燥过程中的热函增值  $\Delta H_m$  已如(15),(16),(17)式所示;另外一部份即为干燥介质(即引进的新鲜空气),其在干燥过程中(包括预热)之热函增量  $\Delta H_d$  如(8)式所示。干燥过程所需供热应当为系统热函增量  $\Delta H = \Delta H_m + \Delta H_d$  与建筑物热损失(包括烘道漏风热损失)  $Q_l$  二者之和,这就给出了(1)式的热力学依据。

从热力学的观点来看(1)式的计算是严格的,只是由于(16c)式系从(16a)式简化而来所以按(3),(4),(5),(7)式来计算物料等升温吸热及水分汽化热[当然(8)式也有类似情况]就不够严格,但就干燥工艺的角度来看,这种计算还是切实可行的。

### 3. 关于混合风状态的确定

在  $I-x$  图法中求取混合风状态是先确定回风状态点与补充新风状态点,把这两点联成直线然后以回风与新风重量流量的比例按杠杆法定出混合风状态点<sup>[2]</sup>。我们则用(11),(12)式计算求取,异途而同归。

在时产干紫菜 10.5 公斤的烘干房工艺设计中,我们用  $I-x$  图的计算作了对照比较,按我们的方法算得  $Q_r = 225 \times 10^3$  [kcal/hr], 混合风温度  $t_o = 46.2^\circ\text{C}$  湿含量  $x_o = 33.9 \times 10^{-3}$  [kgH<sub>2</sub>O/kgD], 而按  $I-x$  图法则算得  $Q_r = 229 \times 10^3$  [kcal/hr],  $t_o = 45.9^\circ\text{C}$ ,  $x_o = 33.4 \times 10^{-3}$  [kgH<sub>2</sub>O/kgD] 两者计算结果比较接近。按  $I-x$  图法也要计算  $Q_o$  及估算  $Q_l$ , 由于受到图线精度及使用条件(例如大气压必须为 760mmHg 或 745mmHg)的限制,一般用此法算得的结果误差略大一些。而现在我们用的计算方法只要有关数据精确可以得到较高的精度。并且因为概念易懂,方法简便,不象  $I-x$  图有一套特有的概念,因此本法较为易为非干燥专业的水产工作者所掌握推广。

### 4. 干燥介质参数的选定

在有部份废气循环的水产品烘干房热量衡算中,由于补充新风的状态(相对湿度  $\phi_o$  和温度  $t_o$ ) 基本可以选定,这样干燥介质还有四个主要参数即回风温度  $t_2$ 、回风相对湿度  $\phi_2$ (即排潮温度、湿度),烘道风速  $v$ , 和烘道进风温度  $t_{d1}$ , 在四个参数中只要选定三个就行了,其他一个参数可以通过计算而确定。我们认为代表回风状态的  $t_2$ ,  $\phi_2$  既确定排潮风量,排潮失热,又对物料的干燥速度有双重影响(温度、湿度),所以通常是选定  $t_2$ ,  $\phi_2$  及  $v$  而着手计算的。至于进风温度  $t_{d1}$ , 在热量衡算中仅是用来计算物料等的升温吸热  $Q_{d1}$ , 而  $Q_o$  实际上远比  $Q_o$  小在热量衡算中的影响较小。当然在干燥速度方面烘道进风温度  $t_{d1}$ , 也相当重要,所以必须计算出  $t_{d1}$  以与干燥试验(或生产实践中所累积)的数据相对照,如有出入则应通过改变回风量  $L_{RGD}$ ,  $t_2$ ,  $\phi_2$  使其接近。以下是它们对  $t_{d1}$  影响的数学分析。

#### (1) $L_{RGD}$ 对 $t_{d1}$ 的影响

由于

$$t_{A_1} = t_0 + \frac{Q_r}{(L_{RGD} + L_{OGD})(0.24 + 0.46x_0)} \quad (18)$$

把(8)、(11)、(1)、式代入(18)式有

$$t_{A_1} = t_2 + \frac{Q_s + Q_v + Q_l}{(0.24 + 0.46x_0)(L_{RGD} + L_{OGD})} \quad (19)$$

取偏导数

$$\left(\frac{\partial t_{A_1}}{\partial L_{RGD}}\right) = -\frac{(Q_s + Q_v + Q_l)}{(0.24 + 0.46x_0)(L_{RGD} + L_{OGD})^2} \quad (20)$$

由此可见减少回风量  $L_{RGD}$  可使烘道进风温度  $t_{A_1}$  上升。

(2)  $\phi_2$  对  $t_{A_1}$  的影响

由于

$$x_2 = 0.622 \frac{\phi_2 P_2}{B - \phi_2 P_2} \quad (21)$$

式中:  $B$ ——大气压(mmHg);

$P_2$ ——回风温度  $t_2$  时水的饱和蒸汽压(mmHg);

0.622——水蒸汽之分子量 18 与绝干空气分子量 29 之比。

$$L_{OGD} = \frac{W_w}{x_2 - x_0} \quad (22)$$

将(21)式代入(22)式再代入(18)式有

$$t_{A_1} = t_2 + \frac{Q_s + Q_v + Q_l}{\left[ L_{RGD} + \frac{W_w(B - \phi_2 P_2)}{(0.622 + x_0)\phi_2 P_2 - x_0 B} \right] (0.24 + 0.46x_0)} \quad (23)$$

取偏导数

$$\left(\frac{\partial t_{A_1}}{\partial \phi_2}\right) \approx \frac{0.622 B W_w P_2 (Q_s + Q_v + Q_l)}{(0.24 + 0.46x_0)(L_{RGD} + L_{OGD})^2 [(0.622 + x_0)\phi_2 P_2 - x_0 B]^2} \quad (24)$$

由(24)式可见进风温度  $t_{A_1}$  随回风相对湿度  $\phi_2$  之增加而上升。

(3)  $t_2$  对  $t_{A_1}$  之影响

(19)式表示  $t_{A_1}$  与  $t_2$  基本成直线关系,故  $t_{A_1}$  随  $t_2$  的增加而上升。

### 参 考 文 献

- [1] 丁绪淮等,1956. 化工操作的原理与设备. 科技出版社.
- [2] 鲁利耶,1956. 干燥作业. 教育出版社.
- [3] 藤田重文,1963. 化学工学 III. 东京化学同人株式会社.
- [4] Treybal, R. E., 1968. Mass-Transfer Operations 2nd edit. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [5] Курочкин В. Л., 1976. инженерно-физический журнал. 28(1):113—145.

## HEAT BALANCE IN TUNNEL DRIERS FOR FISHERY PRODUCTS

Da Shikui  
(*Shanghai Fisheries College*)

### Abstract

The heat supply for the circulating air in tunnel driers of partial recirculating waste moist gas comprises of four heat consumptions, (i. e. the sensible heat of exhaust gas, heat of evaporation, heat of elevation of materials and transport equipments, and the heat loss during drying process). The temperature ( $t_e$ ) and humidity ( $x_e$ ) of mixing gas are calculated by means of corresponding equations with clear conception.

The following suggestions are consulted with the aid of mathematical treatment:

1. The total heat supply calculated with other different methods can also be summarized into four similar terms.
2. The sensible heat and heat of evaporation either with dry or wet base are proved to be perfectly identical with the real case.
3. The values obtained for the properties of air mixture from the tunnel drier both by I-X chart and by calculation are in close agreements.
4. The choice of parameters of drying medium is considerably important in drying processes design. Accompanying the velocity of drying medium, the temperature ( $t_d$ ) and humidity ( $x_d$ ) of the exhaust moist gas are suggested as basic parameters.