

食品干燥设备

郑州粮食学院

前 言

干燥是利用热能除去固体物料中水分的单元操作。在粮食、食品等工业上，干燥操作有着广泛的应用。通常干燥的目的有以下几个方面：

1、便于贮存 粮食或食品的贮存性能与水分的含量有着极其密切的关系，粮食的贮藏仅在水分低于某一数值时，才能安全保存到使用期。对于密封贮藏（Sealed storage），其理想水分，因作物不同而不尽相同。如小麦为18%、大米为20%、荞麦与甘薯为20%。据农业部门统计，在一般年景，我国每年因干燥未跟上，因粮食发生霉变而损失的谷物达数十亿斤，严重时可达100~200亿斤，约占全国每年粮食产量的1~3%。例如1980年，仅湖北、安徽、浙江、江苏、上海五个省市因天雨未及时干燥而损失的粮食多达35多亿公斤。

2、利于运输、节省费用 由于各地区的人口分布和粮食产地不能相适应，因此，产粮地区往往并不是消费使用地区，这样，粮食搬迁与运输是难以避免的。如果运输的粮食中含大量水分，在经济上无疑是不合理的。例如，多年来，我国都是将东北的高水分玉米（一般水分为20%）调进关内，在北京、天津建烘干机来处理，这在经济上是一个极大的浪费。一般每年从东北调进关内的高水分玉米在五亿公斤左右。假定一年就按调进五亿公斤计算，水分为20%的高水分玉米，在关内烘干降到安全水分13%，那么五亿公斤粮食中烘出的水分重量就达4020多万公斤。若每节火车

箱按60吨载重计，每40节车箱一列，这些无用的水分就装载17列车。

3、便于加工 粮食和食品的加工生产过程中，水分的多少直接影响到生产工艺的性能和产品指标。如水分高的稻谷，小麦其流动性差，易堵塞，造成筛理困难。制粉时，水分过高，胚乳就难以从麸皮上刮净。切好的挂面不进行干燥则难以包装；饼干，面包在包装前边必须进行干燥。

4、便于使用 粮食和食品仅在含水量在某一标准时，才便于使用。如结晶后的葡萄糖。

5、必备过程 在食品加工过程中，有些过程必须采用干燥才能实现，同时，使食品发生必要的生物化学变化。

由于干燥可以达到以上的目的，因此，作为一种单元操作无疑会在食品、轻工、化工等工业生产的各个领域中得到广泛的应用。其加工对象有原料，半成品和成品。在大型的工业生产线上，干燥可能作为一个工段而存在；但在小型的工厂中，它可能成为主要的工艺生产线或生产设备而存在。

干燥是通过蒸发的形式将固体物料的水分除去的操作。但它又不同于蒸发，区别在于得到的产品不同，蒸发仅仅是将液态物料进行浓缩，而干燥则要求得到含一定水分的固态产品。但在某些低浓度的物料干燥的初始阶段（如喷雾干燥）水分的蒸发机理与蒸发单元操作中并无什么区别，相当于纯水的蒸发。这给干燥的研究带来了很大方便。

干燥是质热传递同时进行的复杂过程。外界（有时为干燥介质）将热量传递给物料，物料将水分传递给外界。干燥速率的大小取决

于两者作用的综合结果，因此，凡是影响传热、传质的因素都对干燥过程有影响。干燥过程是一如此复杂的过程，以致于干燥科学的发展不得不借助于其它科学的成果。传热、传质、湿度键合理论、不可逆过程热力学、扩散及流变科学的理论已深透于干燥的研究中。另外大型电子计算机的应用把干燥的研究又推进了一大步。

无论在自然科学还是工艺方面，干燥由于其具有巨大的经济活动性，已经有必要作一门独立的科学了。干燥的实践方面、如干燥工艺学和设备、仪器随着干燥理论的发展而发展。

干燥科学的发展可分为五个重要的阶段：

- 1、湿气体的流体力学与热力学的创立。
- 2、干燥动力学的研究与干燥过程中物理基础的建立。
- 3、干燥工艺基本原理的发展。
- 4、干燥过程作为复杂的质能传递过程的解释。
- 5、毛细管材料的干燥。

在第五项毛细管材料的干燥认为是物料外部和内部感应区的相分离过程。而且，感应区不仅是表征参数空间分布的因素，而且是与外界无关的沉淀物——一种物质状态形式。具有不同物理性质的外部感应区会引起干燥过程中的内部感应区的发展。这一发展可以用不同的向量梯度如温度、水分、压力来表示。

干燥科学包括干燥机理的解释和干燥速率的计算。其实际应用在于干燥器的研制与设计，以及各种控制仪器和附属设备的选用及设计。物料的性质不同决定了干燥机理的不同，干燥时所采用的干燥形式也将不同，干燥速率也不相同。干燥介质的性质将直接影响到干燥器的性能和干燥过程的经济性。因此，有必要对物料的性质

和干燥介质的性质加以了解。干燥科学的最终目的是为了设计出更为合理的干燥器以推进工业的发展，为此，我们在对其它问题讨论的基础上，着重讨论干燥器的设计问题。

由于干燥过程中采用热蒸发的方式将水除去，同时由于受到传质、传热速率的限制，热利用率往往很低，因此干燥过程中的能耗已直接涉及到了干燥过程的经济性。干燥节能已成为当前很重要的研究课题之一。同时理论分析与实践相结合，使得这领域已取得了很大成果。太阳能的开发和低品位能的利用是这一研究领域的主要内容。物料的多样化使得干燥形式多样化，从而干燥器的形式也千差万别。小而简单的箱式干燥器，大有几十米高的气流式干燥器等等。近年来又出现了各种各样的复合干燥器也在工业生产中得到了应用。如喷雾干燥与流化干燥器的组合、喷雾干燥器与气流器干燥器的组合，振动流化床的出现以及冷冻干燥及膨化干燥器的应用等都表示了干燥科学的发展。

工业生产的经济性决定了优化理论在干燥过程中的应用。由于涉及到干燥过程中的指标各种各样，其优化的目标函数也有很多，但不外乎以下几个方面：

- 1、能量的消耗及考虑干燥速率时引起的经济性（有时考虑设备投资费用）。

- 2、产品的生产量作为目标函数。

- 3、产品质量作为目标函数。

应予指出，在产品质量为目标函数时，其目标函数的选择因对产品的要求不同有很大的差异，可以是抗坏血酸的损失，微生物的保留蛋白质的变性，以及酶等有机体的变化。过程中涉及到了复杂

机理, 我们难以过多地进行讨论。但采用某些干燥方法如冷却干燥则能明显地提高干燥产品的质量, 不过, 这要以付出昂贵的操作费为代价。

主要参考文献

[1] A.S.Ginzburg Present Problems and Tasks of Development of Drying Science. Drying Technology, 3(3) 445-457, 1985.

[2] Marcus Karel et al Advances In Optimication of Food Dehydration with Respect To Quality Retention Drying' 85 (4th, 1984, Tyoto, Japan)

[3] 申保庆, 张孟洁 我国粮食烘干机的现状问题, 粮食干燥技术, 1983, 12.

[4] 方明 梁明汉 干燥系统性能评价指标, 第二次上海干燥会议, 1986.

第一章 干燥介质与湿物料的性质

§ 1—1 干燥介质的性质

干燥介质有许多种，但在干燥中应用最多的是空气。空气是多种气体的混合物，但我们在干燥计算过程中，常简单的将空气看作由水分和绝干空气（不含有水份）两种成分组成，并把这一混合物称为湿空气。湿空气的性质及其之间的相互转化在设计计算中经常用到，为此我们对此作一简单介绍。

一、湿空气的性质

湿空气由绝干空气和水分两部分混合而成。绝干空气，即不含有水分的空气，(Goff、1949)曾定义为平均摩尔质量为 28.966 g/mol 的气体混合物，其各种组分的含量见表(1—1)。

绝干空气的成分将随地区变生变化，然而，GOH 的数字在进行工程计算时是足够精确的。

表 1—1 绝干空气的成分

成分	氧 气	氮 气	氩	二氧化碳
摩尔分率	0.2095	0.7809	0.0093	0.0003

湿空气的性质主要有湿度 H 、相对湿度百分数 φ 、比容 v_s 、比热 C_H 、 I_H 、干球温度 t 、湿球温度 t_w 、露点 t_d 、绝热饱和温度 $t_{a,s}$ 等。它们的定义及计算公式如下：

1、湿度：湿空气中单位质量绝干空气中所含有的水蒸气的质

量，单位为 kg 水 / kg 绝干空气。若湿空气按理想气体处理，则计算算式为：

$$H = 0.622 \frac{p}{P-p} \quad (1-1)$$

或

$$H = 0.622 \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad (1-2)$$

式中：p—湿空气中的水蒸气分压；

P—湿空气的总压；

p_s —饱和空气中的水蒸气分压；

φ —相对湿度。

2、相对湿度百分数：在一定的总压下，湿空气中水蒸气分压 p 与同温度下水的饱和蒸气压 p_s 的比的百分数，称为相对湿度百分数，简称为相对湿度，即

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \times 100\% \quad (1-3)$$

3、比容 含有 1 kg 绝干空气的湿空气所具有的容积称为湿空气的比容，又称湿容积，即

$$v = \frac{\text{m}^3 \text{ 湿空气}}{\text{kg 绝干空气}} \quad (1-4)$$

对于常压下温度 t 时的湿空气的比容，用下式计算

$$v = v_g + v_w = (0.773 + 1.244H) \frac{t+273}{273} \quad (1-5)$$

式中， v_g 、 v_w 分别表示绝干空气与水蒸气的比容。

4、比热(显热) 常压下 1 kg 绝干空气和其中的 H kg 水蒸气的温度升高 1 °C 所需要的总热，称为湿空气的比热，又称为显热。

$$C_H = C_g + HC_v = 1.01 + 1.88H \quad (1-6)$$

5、 I_H ：湿空气的焓为其绝干空气与水蒸气的焓之和。若以 1 kg 绝干空气为基准，则湿空气的焓为：

$$I_H = I_g + HI_v \quad (1-7)$$

当基准态和基准温度选为 0 °C 绝干空气及液态的水时，其计算式变为：

$$\begin{aligned} I_H &= C_g t + H(r_0 + C_w t) = C_H t + Hr_0 \\ &= (1.01 + 1.88H)t + 2490H \end{aligned} \quad (1-8)$$

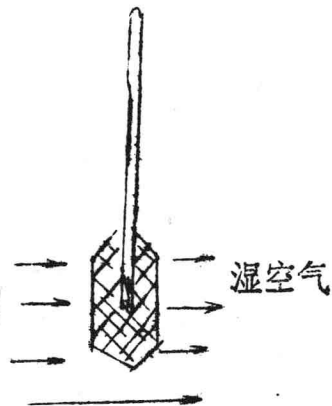
6、干球温度与湿球温度 用普通的温度计测得的湿空气的温度称为干球温度。用湿球温度计测得的湿空气温度称为湿球温度。

湿球温度计的构成如图

(1-1)。在普通的温度计上，包上一层湿润的纱布即构成湿球温度计，其计算式如下

$$t_w = t - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_{s,t_w} - H) \quad (1-9)$$

式中， H_s 、 t_w — t_w 时饱和



图(1-1) 湿球温度计的构成

空气的湿度, kg 水/kg 绝干空气;

K_H ——传质系数, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \Delta H$;

α ——传热膜系数, $\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

在实际测量时, 空气流速应大于 5 m/s , 这时测量较为准确,

α/K_H 可取 1.09 .

7、绝热饱和温度 $t_{a,s}$ 其计算式如下:

$$t_{a,s} = t - \frac{Y_0}{C_H} (H_{a,s} - H) \quad (1-10)$$

式中, r_0 ——水的气化潜热, KJ/Kg ;

C_H ——湿空气的比热, $\text{KJ}/\text{Kg} \cdot \text{K}$;

$H_{a,s}$ ——空气在 $t_{a,s}$ 时的饱和湿湿度, kg/kg 干空气。

8、露点 将不饱和蒸气冷却到有第一个液滴析出时的湿度称为该湿空气的露点, 此时 $\varphi = 100\%$, 则

$$p_s = \frac{H_{s, td} P}{0.622 + H_{s, td}} \quad (1-11)$$

然后根 p_s 值由饱和水蒸气压表查得相应的温度即为空气的露点 t_d .

二、I—H 图的构成原则及应用

在干燥计算中, 常常要计算湿空气的各种参数, 而利用公式直接计算是很麻烦的。因此, 人们就将空气的参数间的各种函数关系绘成图表, 这给干燥计算带来很大方便。

1、I—H 图的构成原理

① 湿空气的 I—H 图是在总压为 101.3 KN/m^2 的压力下制

成的。纵坐标与横坐标交角 135° 。这样可以增加读数的准确性。

② 纵坐标表示焓值，单位 KJ/Kg 绝干气。

③ 横坐标为湿空气的湿度，单位 kg 水/ kg 绝干气。

④ 水平线为辅助坐标。

I—H图由等湿线、等焓线、等干球温度线、等相对湿度线及蒸气压线构成，见图(1—2) (大小 $210 \times 160mm^2$)，下面介绍I—H图的应用。

2、I—H图的应用

湿空气可以看作水蒸气和绝干空气的混合物，根据相律可得：

$$f = c - p + 2 \quad (1-12)$$

所以 $f = 2 - 1 + 2 = 3$

上式中， f ——湿空气的自由度数；

c ——组分数， $c = 2$ ；

p ——相数， $p = 1$ 。

在总压一定时， $f = 2$ ，湿空气的状态将由两变量决定，因此，对于湿空气的参数，任意知道两个即可求出其它的参数。I—H图所绘出的正是这些参数之间的关系，通常I—H图中，总压一定，若知道任意两个参数，则湿空气的状态也就确定了。

(1) 确定湿空气的状态参数

由以上分析可知，知道了湿空气任意两个独立参数，就可以在I—H图上找出湿空气的所有其它参数了。

(2) 确定湿空气的露点

如图(1—3)，当确定了空气的状态点后，就可以找到空气

的露点了。由于空气在露点时呈饱和状态，因此可以从湿空气的状态点出发，沿等H线直至与 $\varphi = 100\%$ 线相交，此点的温度便是湿空气的露点。

(3) 表示状态变化过程

在干燥操作中，进行着各种各样的过程，下面仅举几个最常用的过程。

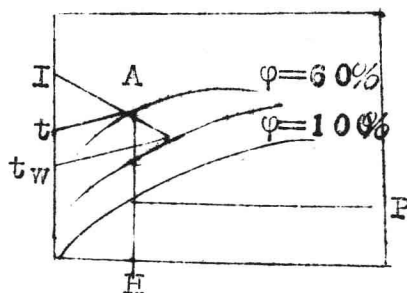
a. 加热过程

在气流干燥过程中，为了提高空气的干燥能力总是将空气予热后再送于干燥器中。这个予热过程在I—H图上的变化为等湿增焓过程。如图(1-4)所示，其变为

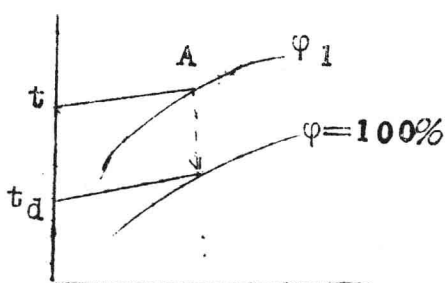
$$\Delta I = I_2 - I_1$$

b. 干燥过程

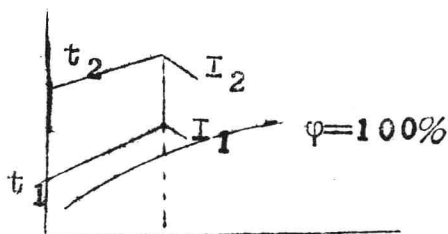
预热后的热空气进入干燥室后，传热给物料，使物料中的水分蒸发。在这个过程中，空气的湿度增加。由于水分蒸发后，其汽化潜热又带回空气中，当不考虑水的显热、物料升温及热损失



图(1-2) 露点的求法

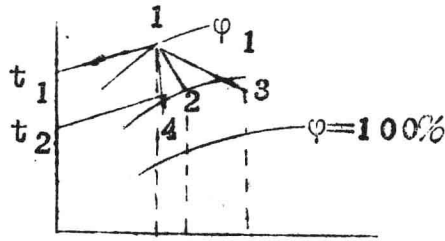


图(1-3) 露点的确定



图(1-4) 加热过程

时，此过程可看作是等焓增湿过程，在I—H图上的表示见图(1—5)中的1→2的变化过程。实际的干燥过程并不是等焓过程，其变化可能是1→3或1→4的变化过程。



图(1-5) 干燥过程

c、去湿过程

经过干燥器中的空气其含水量相当大，干燥能力已很低了。尤其是在闭式干燥器中，应该把增湿后的空气中的水分除去一部分。同时在其场所，如空气调节，通常也要进行去湿过程。

空气的去湿方法很多，我们仅对干燥过程中常用的冷却去湿法加以介绍。空气冷却时，温度下降，湿度不变，沿等H线下降。当达到饱和状态时， $\phi = 100\%$ ，则空气中的水分开始析出并沿 $\phi = 100\%$ 线移动。如图(1—6)中的过程1→2→3。3点即为去湿后的空气状态，此时的湿度 $H_3 < H_2$ 达到了去湿的目的。

d、不同状态的空气的混合过程

设有状态不同的湿空气1和2，两空气混合后可利用物料衡算和能量衡算来确定其湿度和。

物料衡算

$$m_1 H_1 + m_2 H_2 = (m_1 + m_2) H_c \quad (1-13)$$

能量衡算

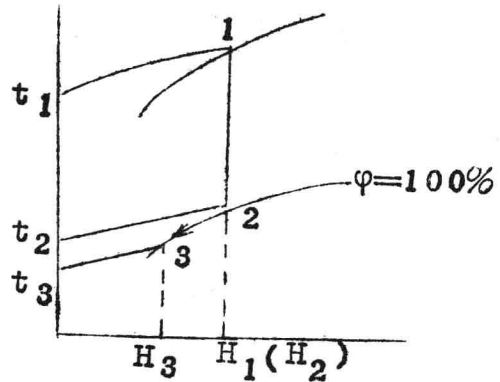
$$m_1 I_1 + m_2 I_2 = (m_1 + m_2) I_c \quad (1-14)$$

由(1-13)和
(1-14)式得

$$\frac{H_2 - H_c}{H_c - H_1} = \frac{I_2 - I_c}{I_c - I_1}$$

$$= \frac{m_1}{m_2}$$

(1-15)



图(1-6) 去湿过程

式(1-15)称为杠杆规则, 解得

$$H_c = \frac{m_1 H_1 + m_2 H_2}{m_1 + m_2} \quad (1-16a)$$

$$I_c = \frac{m_1 I_1 + m_2 I_2}{m_1 + m_2} \quad (1-16b)$$

式中, m_1, m_2 ——混合前两空气的量, kg 绝干气;

I_1, I_2 ——混合前两空气的焓, kg / kg 绝干气;

H_1, H_2 ——混合前两空气的湿度, kg 水 / kg 绝干气;

I_c ——混合空气的焓, KJ / Kg 绝干气;

H_c ——混合空气的湿度, kg / kg 绝干气。

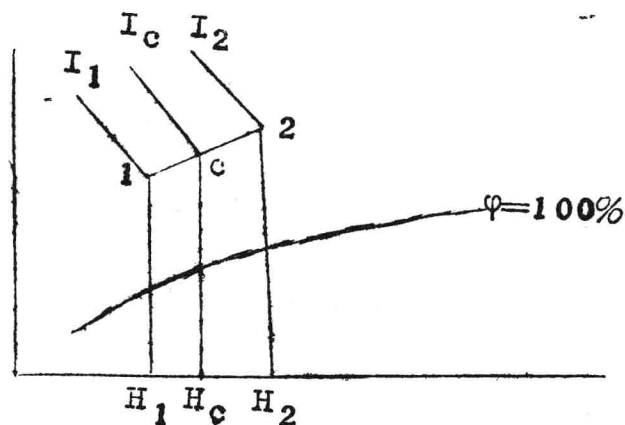
混合过程在 I-H 图上的表示见图(1-7)。

三、总压 P 对 I-H 图的影响

温度相同而总压不同的条件下, 使 1 kg 绝干空气饱和所使用的水量是不同的。这很容易证明:

$$H = 0.622 \frac{P}{P - P_s} = 0.622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \quad (1-17)$$

当 $\varphi = 100\%$ 时,



图(1-7) 混合过程

$$H_s = 0.622 \frac{P_s}{P - p_s}$$

当 t 一定时, p_s 也就一定且 $H_s = f\left(\frac{1}{p}\right)$ 。即在不同的总压下,

对于 1 kg 绝干空气需不同数量的水蒸气进行饱和。由此得出, 空气的相对湿度与总压有关。

不同地区的大气压不同, 即在常压下操作的干燥, 其总压将随地区的变化而变化, 有时会带来很大的偏差, 因此在干燥计算时应予考虑, 一般是查各种总压下的 $I-H$ 图或是给相对湿度 φ 加以校

正系数:

$$\varphi_{\gamma} = \varphi \gamma \quad (1-18)$$

式中, φ ——总压为 101.3 kN/m^2 时空气相对湿度;

φ_p ——总压为 p 时相对温度、湿度下的湿空气的相对湿度;

γ ——校正系数。

因为

$$H = \frac{0.622}{\frac{p}{\varphi p_s} - 1} \quad (1-19)$$

所以, 空气的湿度只与 p/φ 有关。不同压力的 $t-H$ 图中,

$\varphi = \cos n_t$ 线可说明空气的湿度特性。在 H 和 t 为定值时, p/φ

也为定值 $p/\varphi = \text{常数}$, 因此有下式

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \quad (1-20)$$

将上式代入式(1-18)得:

$$\gamma = \frac{p}{101.3} \quad (1-21)$$

$$\varphi_p = \varphi \frac{p}{101.3} \quad (1-22)$$

式(1-22)即为压力 p 时的相对湿度计算式。

第二节 湿物料的性质

§ 1—2—1 湿物料水分的表示法

湿物料中的水分一般有两种表示方法，即：

一、湿基含水量 ω

湿基含水量定义为单位质量的湿物料中的水分含量，其表达式为：

$$\omega = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料的总质量}} \times 100\% \quad (1-23)$$

二、干基含水量 x

干基含水量定义为单位质量绝干物料中的水分含量，其表达式为：

$$x = \frac{\text{湿物料中水分的质量}}{\text{湿物料中绝干物料的质量}} \quad (1-24)$$

上述两种浓度的关系为：

$$x = \frac{\omega}{1 - \omega} \quad (1-25)$$

$$\omega = \frac{x}{1 + x} \quad (1-25a)$$

应指出，工业生产中物料含水量通常以湿基含水量表示，但由于在干燥过程中，湿物料的总质量因失去水分而不断减少，绝干物料的质量却是不变的，因此，在干燥器计算中，以干基含水量表示较为方便。