

谷物干燥学

上册

无锡轻工业学院

一九八四年二月

上册 目录

第一章	湿空气的特性
1-1	湿空气的特性及其关系式
一	湿空气的压力
二	湿空气的绝对湿度
三	湿空气的相对湿度
四	湿空气的湿含量
五	湿空气的重度和比容
六	湿空气的热含量
七	湿空气的干球温度与湿球温度
1-2	湿空气的特性图
1-3	I-X图的基本应用
一	用以确定空气的状态参数
二	用以表示过程的状态变化
1.	加热、冷却过程
2.	绝热干燥过程
三	用以解决两种湿空气的混合
1-4	湿空气的非理想气体定律特性
第二章	空气干燥的物料衡算和热量衡算
2-1	谷物干燥的基本流程
2-2	干燥室的物料衡算
一	谷物中水分含量的计称
二	干燥过程中谷物失水量的计称
三	空气消耗量的计称
2-3	干燥室的热量衡算

- 2-4 干燥过程的图解计算
- 2-5 干燥过程经济性的比较
- 2-6 空气干燥过程的几种主要变型方案
 - 一 在干燥室内加热的干燥
 - 二 中间加热的干燥
 - 三 废气循环干燥
- 2-7 用炉气作为干燥媒质时的图解计算
- 2-8 冷却过程的作用及其计算

第三章

- 干燥过程的机理和谷物干燥的特性
- 3-1 干燥过程的机理
 - 一 表面汽化与内部扩散
 - 二 水分和物料结合的形式
 - 三 平衡水分和吸湿水分
- 3-2 湿物料的干燥特性曲线及谷物的干燥特性
 - 一 湿物料的干燥特性曲线
 - 二 干燥速率及干燥时间的计算
 - 三 谷物的干燥特性
- 3-3 I - X 图上绝热饱和线和等干燥势线的绘制
- 3-4 影响谷物干燥过程的主要因素

第四章

- 谷物干燥设备的供热系统
- 4-1 燃料的种类和成分
 - 一 燃料的分类
 - 二 各种燃料的特性
 - 三 固体燃料的性质
 - 四 液体燃料的性质
 - 五 气体燃料的性质

- 4-2 燃料的燃料计算
 - 一 燃料的热值
 - 二 燃烧时所需空气量和生成烟气量的计算
 - 三 燃烧温度计算
 - 四 烟道气空气混合物湿含量、热含量的计算
- 4-3 燃料的燃烧过程及燃烧设备
 - 一 固体燃料的燃烧及燃烧设备
 - 二 液体燃料的燃烧及燃烧设备
 - 三 气体燃料的燃烧及燃烧设备
 - 四 炉膛容积和炉膛容积的计算
 - 五 燃烧室的热效率
 - 六 火花扑灭装置
 - 七 通风机的选择
 - 八 加热装置

第五章

- 谷物热力干燥操作条件
- 5-1 干燥过程对谷物品质的影响
- 5-2 几种主要谷物的热力干燥操作条件
 - 一 小麦的热力干燥条件
 - 二 稻谷的热力干燥条件
 - 三 玉米的热力干燥条件
 - 四 种用谷物的热力干燥条件
 - 五 其它谷物的热力干燥条件
 - 六 虫害感染谷物的热力干燥条件
- 5-3 小结

第一章 湿空气的特性

在干燥机中对谷物进行干燥的时候，首先要把冷的谷物和它所含有的水分加热到一定的程度，这是予热过程；还要使已经予热过的水分变成水蒸汽，并脱离谷物，这是干燥过程。予热和干燥都需要热量，单靠谷物本身不可能达到这一要求，必须有一种气态物质在和谷物直接接触时把热能传给谷物，同时吸入从谷物表面蒸发出来的水蒸汽，并把水蒸汽带出干燥机，使谷物达到干燥的目的。这种在干燥过程中传热传湿的媒介物质，简称干燥媒质或干燥介质。

在应用红外线辐射、高频电流或接触加热等干燥方法时，干燥媒质就是只起载湿体的作用。

在各种谷物干燥方法中，应用最广泛的干燥媒质是空气，加热空气和烟道气空气混合气体（简称炉气）。

谷物的干燥过程和干燥介质的状态及其变化情况有密切的关系，因此要很好掌握一个干燥过程，就必须掌握干燥介质的特性。

由于空气和烟道气都不是绝对干燥的，除了极大部分是干气体外，还含有一些水分呈蒸汽状态均匀分布于干气体中，所以它们是一种干气体与水蒸汽的混合物，称之为湿气体。虽然在谷物干燥期间，空气中所含水蒸汽重量的比例常不足十分之一，但是水蒸汽分子的存在，对干燥过程则具有深刻的影响，所以本章着重讨论湿空气的基本特性，而对于炉气来讲，在谷物干燥所使用的温度范围内，烟道气必须经过大量空气的稀释降温才能作为干燥介质。因此，在干燥性能上和空气并无明显的差别。下节所述湿空气的各种特性及计算图表等，也可适用于炉气。

1-1 湿空气的特性及其关系式

湿空气的特性可以用一些物理量来加以说明，这些物理量就称为湿空气的状态参数。常用的状态参数有压力、温度、湿度、比容以及热含量等。其中湿度是用来表示湿空气中水蒸汽含量多少的参数。常用的有水蒸汽的分压力、绝对湿度、相对湿度和湿含量。湿空气的温度参数常用的有干球温度、湿球温度和露点。上述各种湿空气之热力学特性在下节分别加以说明。

一、湿空气的压力

空气有一定的重量，在单位面积上它有一定的压力，在标准状态下，就是海平面上，当空气的温度为 0°C 时，1平方米面积上的空气压力是760[毫米汞柱]，这叫做物理上的大气压。在大气压状况下，可将湿空气看作是一种理想气体，故道尔顿分压定律对于湿空气仍能适用。

由于湿空气中主要成分为氧、氮与水蒸汽，因此，利用道尔顿定律可表示为下式

$$P = P_{\text{氧}} + P_{\text{氮}} + P_v \quad (1-1a)$$

其中，氧与氮气可合并成干空气，则公式可写成

$$P = P_a + P_v \quad (1-1b)$$

式中， P 为湿空气压力 [毫米汞柱]

$P_{\text{氧}}$ 、 $P_{\text{氮}}$ 为氧气、氮气在湿空气中之分压力 [毫米汞柱]

P_v 为水蒸汽在湿空气中之分压力 [毫米汞柱]

P_a 为干空气在湿空气中之分压力 [毫米汞柱]

在一定的温度下，饱和蒸汽具有一定的压力，在一定容积一定温度的湿空气中，水蒸汽的含量愈多，它的分压 P_v 就愈大，当 P_v 增加到这一温度下的饱和压力时，水蒸汽在湿空气中的含量就达到最大，再增加的话，就将会发生水汽的凝结，这种饱和了水蒸汽的湿空气，我们称之为饱和空气，这时水蒸汽的分压即为湿空气温度下相应的饱和压力，用 P_{vs} 表示。随着湿空气温度的提高，相应的饱和压力也随着增加。例如，在 20°C ，湿空气的饱和压力 $P_{vs} = 17.54$ [毫米汞柱]，温度升至 60°C 时，其饱和压力为 149.40 [毫米汞柱]。所以，如果总压力等于大气压 B 的话，饱和空气中干空气的分压，就将随着温度的升高而减小。当温度升高到大气压下的饱和温度时，饱和空气所用的空间就全部为水蒸汽所占据，不再有干空气存在，这时：

$$B = P_{vs} \quad P_a = 0$$

即使温度再升高，但若总压力保持不变的话，则水蒸汽的压力也不可能再升高，而保持等于总压力。

饱和水蒸汽的一些主要参数：压力 P_{vs} 、重度 γ_{vs} 和热含量 h_{vs} 与温度之间的关系，可查阅附录一。

湿空气作为干燥介质，它的温度必须远离于水蒸汽的凝结温度，故其中所含的干空气与水蒸汽均可应用理想气体定律，以正确地表示其压力、温度与体积间关系。

对于湿空气：

$$PV = GRT \quad (1-2a)$$

这里， P 为空气的压力 [公斤/米²]

G 为空气的重量 [公斤]

V 为 G 公斤空气所占的容积 [米³]

T 为空气的绝对温度 [$^{\circ}\text{K}$]

R 为气体常数 [公斤米/公斤 $\cdot^{\circ}\text{K}$]

在湿空气中干空气和水蒸汽都占据了整个容积 V ，两者温度都等于 T ，它们的重量分别为 G_a 和 G_v ，分压力为 P_a 和 P_v 则

$$P_a V = G_a R_a T \quad (1-2b)$$

$$P_v V = G_v R_v T \quad (1-2c)$$

这里， R_a 、 R_v 为干空气和水蒸汽的气体常数 [公斤米/公斤 $\cdot^{\circ}\text{K}$]
两式相加可得：

$$(P_a + P_v) V = (G_a R_a + G_v R_v) T$$

$$P V = G_{\text{湿}} R_{\text{湿}} T \quad (1-2d)$$

这里， $G_{\text{湿}}$ 为湿空气的重量，显然 $G_{\text{湿}} = G_a + G_v$

$R_{\text{湿}}$ 为湿空气的气体常数

由以上的推导可以看出

$$R_{\text{湿}} = \frac{G_a R_a + G_v R_v}{G_{\text{湿}}} \quad (1-3)$$

1 [米³] 空气的重量 (以公斤表示) 称为该空气的密度，以 γ 表示，则：

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\text{湿}} &= \frac{G_{\text{湿}}}{V} & B &= \gamma_{\text{湿}} R T \\ \gamma_a &= \frac{G_a}{V} & P_a &= \gamma_a R_a T \\ \gamma_v &= \frac{G_v}{V} & P_v &= \gamma_v R_v T \end{aligned} \right\} \quad (1-2e)$$

$$\gamma_a + \gamma_v = \frac{G_a + G_v}{V} = \frac{G_{\text{湿}}}{V} = \gamma_{\text{湿}} \quad (1-4)$$

二、湿空气的绝对湿度

在1 [米³]的湿空气中，可含水蒸汽的重量，称为该湿空气的绝对湿度，单位为[公斤/米³]，这些水蒸汽也占有着这1 [米³]的容积，所以湿空气的绝对湿度正好等于湿空气中水蒸汽的重量 γ_v ，为使它的数值不小于1，所以绝对湿度也常用[克/米³]表示。

三、湿空气的相对湿度

在湿空气中水蒸汽所具有的分压设为 P_v ，如果维持总压力不变，而将湿空气逐渐冷却，则这时相应的饱和蒸汽压力将逐渐减小，当温度降低到某一数值，它相应的饱和蒸汽压力 P_{vs} 正好等于湿空气中水蒸汽的分压 P_v 时，湿空气就达到了饱和状态，如果温度再降低的话，水蒸汽就开始冷凝，结雾分出，湿空气达到饱和状态的这一温度称为露点。在饱和状态下，1米湿空气中所含水蒸汽的量，是在此温度下所可能达到的最大的极限含量，也即为饱和状态下水蒸汽的重量，用 γ_{vs} 表示。

可以看出，湿空气中的水蒸汽是处于过热状态的，它的温度高于 P_v 压力下相应的饱和温度。

如果保持湿空气的温度不变，要使它达到饱和状态，就必须增加其中水蒸气的含量，这时湿空气中水蒸气的重量 γ_v 将会增大，当它达到这一温度下的极限值 $\gamma_v = \gamma_{vs}$ 时，湿空气也就达到了饱和状态。

可以看出，湿空气中水蒸气的重量 γ_v 总要比同温度下相应的 γ_{vs} 小，它最大的数值是等于 γ_{vs} 。

1 [米³]湿空气中所含水蒸气的重量 γ_v 和同温度同总压下，1 [米³]容积中水蒸气的最大含量 γ_{vs} 两者之比，称为湿空气的相对湿度，用 ϕ 表示：

$$\phi = \frac{\gamma_v}{\gamma_{vs}} \quad (1-5a)$$

这一参数表明湿空气接近饱和状态的程度，所以也称为饱和度，它也常用百分数来表示，这时，

$$\phi = \frac{\gamma_v}{\gamma_{vs}} \times 100\% \quad (1-5b)$$

当 $\gamma_v = \gamma_{vs}$ 时，湿空气达到了饱和状态，相对湿度 $\phi = 100\%$ 或等于1。

γ_{vs} 的数值取决于温度，它可以由水蒸气表来查得。

由式(1-2c)已知

$$p_v = \gamma_v R_v T$$

在同一温度下达到饱和状态时，则

$$p_{vs} = \gamma_{vs} R_v T$$

严格地说，这个公式只适用于理想气体，但在实际工程操作条件下，由此引起的误差一般不超过2%，所以应用它仍具有足够正确性。

这样，就很容易得到

$$\phi = \frac{\gamma_v}{\gamma_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (1-5c)$$

式中， P_{vs} 为湿空气温度下相应的饱和压力，它也决定于湿度，可以由蒸汽表查得。

当湿空气的温度升高到超过总压力下水的沸点时，公式(1-5)中的 P_{vs} 应该用总压力代入，因为这时水蒸气的饱和压力不再继续随着温度升高而保持等于总压力不变。

相对湿度的数值，在绝对干燥空气中为零，而在被蒸汽所饱和的空气中为1。

相对湿度在干燥中为一重要性质，其大小即表示湿空气的饱和程度，也就是表示湿空气获取水分的能力。相对湿度大，对干燥是不利的。为使空气的相对湿度减小而提高其吸收水分的能力，一般多将湿空气加热，因为从公式(1-5)可看出，当温度升高时，可以增大 P_{vs} ，则 ϕ 下降。

四、湿空气的湿含量和湿容量

假设有一容积为 V [米³] 的湿空气，由 G_v [公斤] 水蒸汽和 G_a [公斤] 干空气所组成，则它们的状态方程式为

$$P_v V = G_v R_v T$$

$$P_a V = G_a R_a T$$

两式相比得

$$\frac{P_v}{P_a} = \frac{G_v R_v}{G_a R_a} \quad \frac{G_v}{G_a} = \frac{P_v R_a}{P_a R_v} \quad (1-6)$$

湿空气进一步吸收水分的能力，用 $d_{vs} - d$ 表示，单位为 [克/公斤干空气]。

可以看出， d_{vs} 随温度的升高和总压力的降低而加大，与此相应空气的湿容量也跟着增大。

五、湿空气的热含量

在常压下将 1 [公斤] 物质从 0 [°C] 加热到任一温度 t [°C] 时所需的热量，称为此物质在 t [°C] 时的热含量。

湿空气包括两个部分：干空气和水蒸汽。所以它的热含量是这两部分热含量的总和，通常以含 1 [公斤] 干空气的湿空气的热含量来进行计称。

1 [公斤] 干空气在 t °C 时的热含量为

$$I_a = C_a t \text{ [千卡/公斤干空气]}$$

这里， C_a 为干空气的定压比热 [千卡/公斤·°C]

在含 1 [公斤] 干空气的湿空气中所含水蒸汽的量为 x [公斤] $= \frac{d}{1000}$ [公斤]，这是一种过热蒸汽，因此，每公斤蒸汽的热含量为

$$I_v = I_{vs} + C_v (t - t_{dp})$$

温度为

这里， I_{vs} 为 t_{dp} 的饱和蒸汽的热容量，[千卡/公斤]； t_{dp} 为温度 t 、相对湿度 ϕ 的湿空气的露点 [°C]； C_v 为过热蒸汽的比热，在压力小于大气压时，它主要与温度有关，当 $t < 300^\circ\text{C}$ 时，一般取 $C_v = 0.47$ [千卡/公斤·°C]，实用上已足够准确，不难看出 $C_v(t - t_{dp})$ 一项为过热热。

I_{vs} 可以用下式计称：

$$I_{vs} = 595 + 0.47 t_{dp}$$

这里, 595 为 0°C 时, 水蒸汽的蒸发潜热, $[\text{千卡/公斤}]$
因此, 湿空气的热含量为

$$I = I_a + I_v x = C_a t + (595 + 0.47t)x \left[\frac{\text{千卡}}{\text{公斤干空气}} \right] \quad (1-8a)$$

对于干空气来说, 在通常情况下可以认为, 比热与温度无关, 取为常数 $C_a \approx 0.24 [\text{千卡/公斤}\cdot^{\circ}\text{C}]$ 。

由此可得:

$$I = (0.24 + 0.47x)t + 595x [\text{千卡/公斤湿空气}] \quad (1-8b)$$

由式 (1-8b) 可以看出, 湿空气的热含量由两部分所组成, 一部分是它的湿热 $(0.24 + 0.47x)t$, 它是干空气和水蒸汽从 0°C 加热到 $t^{\circ}\text{C}$ 时所需的热量, 另一部分则是水蒸汽的潜热, $595x$ 。

在干燥过程中, 利用介质的显热将物料加热, 介质自身温度降低, 但介质中所含的潜热则不能被利用, 只有当湿空气的温度降低至露点以下时, 这部分热量才会被放出来, 但这时会发生水汽的凝结。在干燥过程中, 这种情况一般是不允许发生的。

如果在干燥过程中, 没有任何热量损失, 介质将热量传给物料, 使水分汽化。汽化了的水分又为介质所带走, 这样传给物料的热量又再回到介质中去, 对于介质来说, 它的热含量仍保持不变, 这种湿空气的热含量保持不变的干燥过程, 我们称之为理论干燥过程, 也即绝热干燥过程。

六、湿空气的湿度和比容

由式 (1-4) 已知, $\gamma_{\text{湿}} = \gamma_a + \gamma_v$

而

$$\frac{\gamma_v}{\gamma_a} = \frac{G_v}{G_a} = x = \frac{d}{1000}$$

$$\therefore \gamma_{\text{湿}} = \gamma_a (1 + 0.001d) \quad (1-9a)$$

根据理想气体的状态方程，可以得到干空气的重度为

$$\gamma_a = \gamma_0 \frac{P_a T_0}{P_0 T}$$

式中：

γ_0 ——干气体在标准状态下的重度 [公斤/米³]

T_0 ——等于 273 [°K]

P_0 ——等于 760 [毫米汞柱]

将这些数值代入上式中，可得

$$\gamma_a = \gamma_0 \frac{273}{760} \frac{P_a}{T} = 0.3595 \gamma_0 \frac{B - P_v}{273 + t} \quad (1-10)$$

因此

$$\gamma_{\text{湿}} = 0.3595 \gamma_0 \frac{B - P_v}{273 + t} (1 + 0.001d) \quad (1-9b)$$

对于湿空气来说，上式中的 $\gamma_0 = 1.293$ [公斤/米³]

$$\begin{aligned} \therefore \gamma_{\text{湿}} &= 0.3595 \times 1.293 \frac{B - P_v}{273 + t} \left(1 + 0.622 \frac{P_v}{B - P_v}\right) \\ &= \frac{0.4648}{273 + t} (B - 0.378 P_v) \quad (1-9c) \end{aligned}$$

可见，湿空气的重度主要决定于两个参数：温度 t 与蒸汽分压 P_v 。在干燥时物料中汽化出来的水分为介质所带走，因此，介质中水蒸汽的含量增加，分压提高而重度下降，湿空气的重度要比干空气小，这是因为水的分子量 (18.02)，要比干空气 (28.96) 小，在总压力不变的情况下，随着空气湿度的提高，

它的平均分子量将会下降，因此重度减小。

不难得到湿空气的比容为：

$$V_{\text{湿}} = \frac{1}{\gamma_{\text{湿}}} [\text{米}^3/\text{公斤湿空气}] \quad (1-11)$$

在干燥操作中，介质作为载湿体。它所含的水蒸汽量会不断增加，介质的重量也就发生变化。因此，使用 $V_{\text{湿}}$ 就甚感不便，为了使问题简化，所以常以含有一公斤干空气时湿空气的容积来进行计称，用 V_0 表示。实际上

$$V_0 = V_a = \frac{R_a T}{P_a} = \frac{R_a T}{B - P_v} = \frac{R_a T}{B - \phi P_v} \quad (1-12)$$

V_0 的单位为 $[\text{米}^3 \text{湿空气}/\text{公斤干空气}]$ ，由式 (1-12) 可以看出，在一定的的大气压力下， V_0 决定于温度 T 和相对湿度 ϕ 。不同温度和相对湿度下，湿空气的 V_0 值可见附表二。这张表在决定干燥所用通风机的风量时常需用到。

在 1 米^3 的湿空气中，所含水蒸汽的量如为 γ_v ，而含有一公斤干空气的湿空气的容积为 V_0 ，因此，湿含量

$$d = \gamma_v' V_0 [\text{克}/\text{公斤干空气}] \quad (1-7c)$$

七、湿空气的干球温度和湿球温度

干球温度，即在湿空气中用一般温度计所测定的温度。如果在一般温度计的感温球上覆盖一层湿纱布，纱布的下端浸泡在水槽中，当不饱和的空气吹过此温度计的湿纱布时，湿纱布内的水分即开始蒸发，纱布与感温球部位的温度因而下降，低于空气的温度，这时热量就由空气传至湿纱布，直至达到某种温度平衡。在这种情况下，所传递的热量应等于液体自纱布蒸发时所需之汽化潜热，达到平衡时的温度依空气条件与湿空

气面过纱布的流速而异。此平衡温度称为湿空气的湿球温度 (T_{wb})。

所以，湿球温度不代表空气的真正温度，而是说明空气的一种状态和性质的物理量，它只决定于湿空气的温度和湿度，当气温一定时，相对湿度愈小，水分愈易蒸发，水温下降愈大即湿球温度愈低。所以用一支干球温度计和一支湿球温度计，可组成一个湿度计，用来测定空气的相对湿度。根据干球温度和干湿球温度差两个数值，可在附录三的湿度计表中查出空气湿度的数值。

例 1-1 已知大气压 $B = 760$ [毫米汞柱]，空气的温度 $t_0 = 25 [^{\circ}\text{C}]$ ， $\phi_0 = 85\%$ ，试求此湿空气的湿含量 d ，重度 $\gamma_{\text{湿}}$ ，热含量 I 、比容 V_0 、水蒸汽分压 P_v 和露点温度 t_{dp} 。

解 (1) 已知 $t_0 = 25^{\circ}\text{C}$ ，由附录一可以查得 $P_{vs}^{25} = 23.76$ [毫米汞柱]， $\phi_0 = 85\%$

$$\therefore P_v = 0.85 \times P_{vs}^{25} = 0.85 \times 23.76 = 20.2 \text{ [毫米汞柱]}$$

(2) 湿含量

$$d = 622 \frac{P_v}{B - P_v} = 622 \frac{20.2}{760 - 20.2} = 17 \text{ [克/公斤干空气]}$$

(3) 重度

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{湿}} &= 0.4648 \frac{B - 0.378 P_v}{273 + t} \\ &= 0.4648 \times \frac{760 - 0.378 \times 20.2}{273 + 25} = 1.17 \text{ [公斤/米}^3 \text{湿空气]} \end{aligned}$$

(4) 热含量

$$\begin{aligned} I &= (0.24 + 0.47 d) t + 595 d \\ &= (0.24 + 0.47 \times \frac{17}{1000}) \times 25 + 595 \frac{17}{1000} = 16.3 \text{ [千卡/公斤干空气]} \end{aligned}$$