

农用谷物烘干机具资料汇编

第一机械工业部农业机械研究院

第一机械工业部技术情报所

农用谷物烘干机具资料汇编

第一机械工业部农业机械研究院

(内部资料)

•

第一机械工业部技术情报所编辑出版

北京印刷二厂印刷

中国书店(北京琉璃厂西街)经售

•

1979年1月北京

代号: 78—12·北京: 0.75元

前 言

随着农业学大寨运动的深入发展,农业机械化水平的逐步提高,我国粮食产量逐年增加。但是收获季节多逢雨季,广大农村缺乏干燥机械,谷物全靠自然晾晒,不能及时晒干,不仅大批粮食发芽、霉烂造成严重损失,而且使用大量劳力,影响其他作物的种植和管理,阻碍了农业生产的发展。近年来,不少地区研制了一些谷物干燥技术和设备,积累了一些经验,但还存在一些问题,目前还处在研究和发展阶段。为了保证粮食的丰产丰收和提高劳动生产率,减轻劳动强度,尽快提高农用干燥机的研制速度,我们在全中国农用谷物干燥机具技术经验交流会议资料的基础上,搜集了一些国内外谷物干燥技术方面的资料进行了汇编,供有关部门和技术人员参考。

由于我们技术水平有限,编辑工作中有不少缺点和错误,请读者批评指正。

目 录

一、谷物干燥的基础知识	(1)
(一) 粮食干燥技术基础知识	
郑州工学院粮油工业系	(1)
(二) 谷物干燥一般原理及类型	(13)
(三) 红外辐射干燥技术	
上海远红外粮食烘干机研制小组	(22)
(四) 关于太阳能干燥谷物简介	
吉林师范大学物理系	(28)
(五) 微波加热干燥的基本原理	
摘自上海科技情报所《微波干燥技术的进展》	(32)
二、我国谷物干燥机具发展的概况	
第一机械工业部农业机械研究院	(45)
三、现有农用干燥机具简介	(47)
(一) 稻谷风干设备	(47)
(二) 土圆仓多管自然通风保粮装置	(49)
(三) 谷物汽力烘干机	(53)
(四) 烤烟带烘粮—安农型烘干机	(55)
(五) 5HJ-0.5型简易谷物烘干机	(56)
(六) 丰收——75型谷物烘干机	(57)
(七) 农用中型谷物干燥设备	(60)
(八) 粮食干燥生产线——水暖烘干机	(63)
(九) 机械化场院	(67)
(十) 农安——电热种子烘干机	(69)
(十一) LJ-75-10×2型高频粮食烘干机	(74)
(十二) 晋中 5HY-1型远红外粮食烘干机	(77)
(十三) 远红外辐射粮食烘干机	(78)
(十四) 太阳能人造场	(81)
(十五) 镜式太阳能粮食烘干机	(83)
四、国外谷物干燥系统的发展	(85)
五、日本谷物干燥机具的发展动向	(87)
六、美国农场机械化谷物干燥技术	(89)
七、英国谷物干燥机具的概况	(91)

一、谷物干燥的基础知识

(一) 粮食干燥技术基础知识

粮食干燥过程是一个复杂的传热、传湿的过程。而且伴随着粮食本身的生物化学的品质变化。在干燥过程中，不仅要减少粮食中的多余水分达到安全贮藏的标准，而且要保证粮食的食用品质不降低并尽量改善其食用品质。因此，必须合理地组织干燥工艺的各个环节。

粮食干燥技术包括三个部分：即粮食干燥的基础理论、粮食干燥工艺、粮食干燥机械的计算和设计。现将粮食干燥的基础理论介绍如下：

要使粮食干燥，必须消耗能量，使粮食受热，将粮食中的水分汽化排走，从而达到干燥的目的。单靠粮食本身是不能完成这一过程的，需要一种物质与粮食接触，带走粮食中汽化出来的水分，这种物质称为干燥介质。

粮食干燥技术中常用的干燥介质是空气、加热空气、烟道气和空气的混合气体（又称炉气）。在对流热力干燥过程中，干燥介质在与粮食接触的时候，以对流方式将热量传给粮食，使粮食升温，促使其中水分汽化，然后又将这部分水分带走，干燥介质在这里起着载热体和载湿体的双重作用。

在高频电流、微波、红外辐射等干燥过程中，所使用的干燥介质只起着载湿体的作用。不论用何种方式进行粮食干燥。总离不开干燥介质，即空气、加热空气或炉气。因为必须对干燥介质的特性和粮食的干燥特性有所了解，然后才能研究粮食干燥过程。

1. 干燥介质的基本特性

自然界的空气中总是含有水蒸汽的。从干燥技术角度来看，空气是干气体和水蒸汽的机械混合物，称为湿气体。当我们提到空气时，总是把它当作湿空气对待的。

空气加热后仍然是一种湿气体。

炉气是指炉子中燃料的燃烧产物和湿空气的混合物。炉气也是一种湿气体。

湿气体都是由干气体和水蒸汽两部分组成的。湿气体所处的状态特征，可以使用某些物理量来表示。表明物理特性的各个量就称为状态参数。湿气体的常用状态参数有：总压力、干气体和水蒸汽的分压力，温度、湿度、湿含量、比容和焓等。

(1) 湿空气的压力

湿空气的压力就是总压力，通常用大气压力表测得的压力就是湿空气的总压力。用符号 P_t 表示。

湿空气由干空气和水蒸汽组成，干空气或水蒸汽单独占有与湿空气同样体积时所具有的分压力用符号 P_d 表示，水蒸汽的分压力用符号 P_s 表示。

取一容器，内部充满湿气体，则此时湿气体的压力为 P_t ，体积为容器的体积，用 V_t 表示。湿气体中干空气的分子集中起来占有体积 V_d ，而水蒸汽占有体积 V_s ，这时

$$V_t = V_d + V_s \quad 1$$

如设想将 V_t 容器内的水蒸汽分子全部抽出去，则容器内只有干空气，干空气的分压力

为 P_g , 占有体积 V_g , 可用气体状态方程式来表示它的参数关系:

$$P_g V_g = G_g R_g T \quad 2$$

式中 G_g ——容器内干空气的重量

R_g ——干空气的气体常数

T ——干空气的绝对温度。干空气和水蒸汽混合在一起, 它们温度是一样的。也就是湿空气的温度。

如果将容器内的干空气全部抽走, 则容器内只有水蒸汽分子。水蒸汽分压力为 P_s , 占有体积 V_s , 则可写出:

$$P_s V_s = G_s R_s T \quad 3$$

式中 G_s ——水蒸汽的重量

R_s ——水蒸汽的气体常数

在容器为 V_z 、总压力为 P_z 情况下, 写出其中干空气和水蒸汽的状态方程:

$$P_z V_z = G_g R_g T$$

$$V_z = \frac{G_g R_g T}{P_z} \quad 4$$

$$P_z V_z = G_s R_s T$$

$$V_z = \frac{G_s R_s T}{P_z} \quad 5$$

将公式 4、5 的关系代入公式 1, 则得:

$$V_z = \frac{G_g P_g T}{P_z} + \frac{G_s P_s T}{P_z}$$

$$P_z V_z = G_g R_g T + G_s R_s T \quad 6$$

将公式 2、3 的关系代入公式 6 得

$$P_z V_z = P_g V_g + P_s V_s$$

$$\text{即 } P_z = P_g + P_s \quad 7$$

公式 7 说明, 湿气体的总压力等于干气体分压力 P_g 和水蒸汽分压力 P_s 之和。这就是道尔顿定理。

道尔顿定理表明, 几种理想气体在一容器中混合, 混合后气体的总压力等于各气体分压力之和。湿空气中水蒸汽的数量很小, 湿空气的压力服从道尔顿定理。

(2) 湿空气的湿度

湿空气的湿度是表明湿空气中含有水蒸汽量的多少的一个状态参数。每一立方米的湿空气中所含水蒸汽的重量, 称为湿空气的绝对湿度或水蒸汽的重度。以符号 r_s 表示, 单位是公斤/米³。

在相同温度与压力下, 湿空气的绝对湿度 r_s 和饱和湿空气的绝对湿度 r_{sb} 之比称为湿空气的相对湿度, 用符号 φ 表示。

$$\varphi = \frac{r_s}{r_{sb}} 100\% \quad 8$$

相对湿度表明湿空气接近饱和状态的程度, 也就是它的潮湿程度。

根据湿空气中水蒸汽的状态方程式:

$$P_s V = G_s R_s T$$

$$\text{得: } r_s = \frac{G_s}{V} = \frac{P_s}{R_s T}$$

式中 P_s ——水蒸汽分压力 (公斤/米²)

V ——湿空气容积 (米³)

G_s ——水蒸汽重量 (公斤)

R_s ——水蒸汽的气体常数。 $R_s = \frac{848}{M}$

$$R_s = \frac{848}{18} = 47.1 \text{ (公斤, 米/公斤}^\circ\text{K)}$$

T ——水蒸汽的绝对温度 ($^\circ\text{K}$)

在相同温度下, 当水蒸汽达到饱和状态时, 可近似的写成上述状态方程式:

$$r_{sb} \approx \frac{P_{sb}}{R_{sb} T}$$

则

$$\varphi = \frac{r_s}{r_{sb}} \approx \frac{\frac{P_s}{R_s T}}{\frac{P_{sb}}{R_{sb} T}} \approx \frac{P_s}{P_{sb}}$$

$$\varphi = \frac{P_s}{P_{sb}} 100\%$$

9

从公式 9 可以看出:

在一定温度下 (饱和水蒸汽分压力 P_{sb} 为一定值), 湿空气的相对湿度随水蒸汽分压的增加而提高。湿空气的饱和水蒸汽分压是温度的函数, 湿空气的水蒸汽分压为一定时, 将湿空气加热后, 由于 P_{sb} 值的增大而使相对湿度 φ 减小, 则湿空气吸收水蒸汽的能力提高。

当湿空气冷却时, 其温度降低到水蒸汽分压力 P_s 对应下的饱和温度时, 湿空气中水蒸汽达到饱和状态。由于 $P_s = P_{sb}$, 则 $\varphi = 100\%$ 。例如, 在气温低的冬季进行粮食干燥时, 干燥机废气排出口呈现一片看得见的白蒸汽, 这说明在该温度下废气已达饱和。

当湿空气达到饱和时的温度称为饱和温度, 以 t_b 表示, 这一温度又称为“露点”。

(3) 湿空气的比容

一公斤干空气重的湿气体的容积称为湿空气的比容。用符号 v_0 表示。其单位是:

立方米湿空气/公斤干空气

湿空气中干空气的状态方程为:

$$P_d V = G_d R_d T$$

$$\frac{V}{G_d} = \frac{R_d T}{P_d}$$

$$v_0 = \frac{V}{G_d} = \frac{R_d T}{P_d} \text{ 米}^3 \text{ 湿空气/公斤干空气}$$

根据 $P_d = P_g + P_s$; $P_s = \varphi P_{sb}$

$$\text{则: } v_0 = \frac{R_g T}{P_g - \varphi P_{s_b}} \quad 10$$

在粮食干燥技术中, 通常在大气压下工作。湿空气的总压力 P_g 等于大气压力 B 。

从公式10可以看出, 当大气压为一定时, 湿空气的比容取决于湿空气的温度和相对湿度。

湿空气的比容是一个重要参数。根据供应给烘干机的干空气重量 (公斤/小时) 和比容, 可算出湿空气的消耗量 V_{s_b} (米³/小时)

$$V_{s_b} = L_g V_0 \quad 11$$

(4) 湿空气的湿含量

在含有一公斤干空气的湿空气中水蒸汽的数量称为湿空气的湿含量, 用符号 d 表示。计算单位是克水蒸汽/公斤干空气。

应特别注意的是公斤干空气, 说明这不同于1公斤的湿空气。是把水蒸汽的重量算在1公斤干空气之外, 也就是说在 $1 + \frac{d}{1000}$ 公斤的湿空气中含有 d 克的水蒸汽。

$$d = \frac{G_s}{G_g} 1000 \text{ 克水蒸汽/公斤干空气} \quad 12$$

由一公斤干空气和 d 克水蒸汽组成的湿空气, 它的温度为 T , 体积为 V , 则干空气和水蒸汽的状态方程为:

$$P_g V = G_g R_g T$$

$$P_s V = G_s R_s T$$

由于 $G_g = 1$ 公斤。 $G_s = \frac{d}{1000}$ 公斤。将以上两式写成

$$P_g V = R_g T$$

$$P_s V = \frac{d}{1000} R_s T$$

将两式相除。整理后得:

$$d = \frac{P_s R_g}{P_g R_s} \times 1000$$

$R_g = 29.3$; $R_s = 47.1$ 代入上式得:

$$d = 622 \frac{P_s}{P_g} = 622 \frac{P_s}{B - P_s} = 622 \frac{\varphi P_{s_b}}{B - \varphi P_{s_b}} \quad 13$$

对于饱和湿空气, 在饱和水蒸汽分压力 P_{s_b} 下对应的湿空气的湿含量达到最大值, 称饱和湿含量。用符号 d_s 表示:

$$d_s = 622 \frac{P_{s_b}}{B - P_{s_b}} \quad 14$$

在同温度同压力下, 饱和湿空气的湿含量 d_s 与湿空气的湿含量 d 之差称湿空气的湿容量。用符号 D 表示。

$$D = d_s - d \text{ 克水蒸汽/公斤干空气} \quad 15$$

湿空气的湿容量 D 又称为湿空气的“吸湿力”, 它反应了湿空气进一步容纳水蒸汽的本领, 在 t 温度下, 含有一公斤干空气的湿空气还可再容纳 $(d_s - d)$ 克水蒸汽。当 $D = 0$ 时,

说明湿空气已达饱和，再也不能作为干燥介质了。

未饱和的湿空气之湿含量不依温度而变，它是大气压力与水蒸汽分压力的函数。而饱和湿含量 d_s 却随温度的升高而增加（因为饱和水蒸汽分压力增加），这说明提高干燥介质的温度，可以增加它在干燥过程的吸湿能力。

(5) 湿空气的焓

过去在粮食干燥技术中，常使用湿空气热含量这一名词，这是不确切的。今后应用湿空气的焓代替湿空气的热含量。焓是一个复合的状态参数。

湿空气的焓由干空气和水蒸汽的焓组成。湿空气的焓 I 等于 1 公斤干空气为计算基准的干空气和水蒸汽的焓之和。湿空气的重量则为 $(1+0.001d)$ 公斤。干空气与水蒸汽的焓值都以 0°C 作为计算的起点。我们以 0°C 时的干空气的焓值作为计算湿空气的基准，大于它的为正值，小于它的为负值。干燥过程中，我们只注意湿空气与粮食接触时和离开它时的焓差。

湿空气的焓 I 可用下式表示：

$$I = I_g + I_s \frac{d}{1000} \text{ 千卡/公斤干空气} \quad 16$$

① I_g ——干空气的焓

$$I_g = C_g \times t \quad \text{千卡/公斤干空气}$$

式中： C_g ——干空气比热； $C_g = 0.24$ 千卡/公斤干空气 $^\circ\text{C}$ ；

t ——干空气温度， $^\circ\text{C}$

$$\textcircled{2} I_s \frac{d}{1000}$$

I_s ——水蒸汽的焓，千卡/公斤水蒸汽

$\frac{d}{1000}$ ——公斤水蒸汽/公斤干空气

湿空气中的水蒸汽是种过热蒸汽，它的焓又等于在 0°C 时饱和水蒸汽的汽化潜热与从 0°C 到 $t^\circ\text{C}$ 时的过热蒸汽的过热（又称显热）的和：

$$I_s = I_{s0} + C_{gu} \times t \text{ 千卡/公斤水蒸汽}$$

式中 I_{s0} ——在 0°C 时饱和水蒸汽的汽化潜热， $I_{s0} = 595$ 千卡/公斤水蒸汽

C_{gu} ——过热蒸汽比热， $C_{gu} = 0.47$ 千卡/公斤水蒸汽 $^\circ\text{C}$

t ——过热蒸汽温度

这样，当在温度为 $t^\circ\text{C}$ 时，一公斤干空气的湿空气即 $1+0.001d$ 公斤湿空气的焓为：

$$I = 0.24t + (595 + 0.47t) \frac{d}{1000} \text{ 千卡/公斤干空气} \quad 17$$

从公式 17 可以看出，当 $t = 0$ 和 $d = 0$ 时，湿空气的焓等于零，这就是湿空气的焓值的计算基准。

干燥过程中，将湿空气加热至 $t^\circ\text{C}$ 后，就是加热了空气，对干燥介质而言，其中干空气的焓和水蒸汽的显热是可以利用的。

炉气与加热空气基本类似，只是炉气由于燃烧燃料（煤）而产生，燃料中又含有水分，因此炉气比同温度下的加热空气的湿含量要大一些。

2. 粮食的干燥特性

粮食的性质在有关课程中有详细论述, 本节只研究与粮食干燥有关的粮食热物理性质及粮食中含水量的表示方法。

(1) 粮食含水量的表示方法

粮食含水量的多少, 在粮食部门, 通常称为粮食水分的多少, 通常用粮食中所含水分百分率的值来区别粮食水分的大小。

粮食总含有水分, 可以把粮食当成粮食的干物质和水的机械混合物。

$$G = G_s + W \quad \text{公斤} \quad 18$$

式中 G ——粮食的重量(公斤)

G_s ——粮食中干物质的重量(公斤)

W ——粮食中水分的重量(公斤)

粮食干燥技术中, 有两种方法来表示粮食水分的大小。

① 干基水分表示法

粮食中的水分含量与其干物质的重量的比值的百分率称为粮食的干基水分。

$$\omega_s = \frac{W}{G_s} \cdot 100\% \quad 19$$

式中 ω_s ——粮食的干基水分(%)

W ——粮食中的水分重量(公斤)

G_s ——粮食中干物质重量(公斤)

因为在干燥过程中, G_s 的重量不变; 粮食干基水分的大小变化, 只随着粮食中水分的多少而改变, 因此, 这种水分表示方法用于科学试验。

② 湿基水分表示法

粮食中水分量与其总重量比值的百分率称为湿基水分。

$$\omega = \frac{W}{G} \cdot 100\% \quad 20$$

式中 ω ——粮食的湿基水分(%)

W ——粮食中水分的重量(公斤)

G ——粮食的重量(公斤)

这种粮食水分表示方法, 通常用于粮食贮藏的业务换算。而平常所说粮食水分的大小, 在不特加说明的情况下, 通指粮食的湿基水分。

例: 有一批粮食, 总重1000公斤, 其中水分200公斤, 这批粮食的湿基水分就是20%, 在贮藏业务中和通常我们所说的, 这批粮食水分是20%。

每批粮食的水分都由专门仪器测定, 得出其值的大小。

③ 干基水分与湿基水分的换算:

粮食水分的两种表示方法之间存在着一定的关系, 对一批粮食来说, 其干基水分总是大于湿基水分, 两者之间的换算, 采用下式:

$$\omega = \frac{\omega_s}{1 + \omega_s} \cdot 100\% \quad 21$$

$$\omega_g = \frac{\omega}{1-\omega} \cdot 100\%$$

22

根据上面公式，可以制成干基水分与湿基水分的换算图或表。

(2) 粮食的比热

使 1 公斤的粮食的温度升高 1°C 所需要的热量称为粮食的比热，又叫粮食的热容量，用符号 C 表示，其单位是千卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

粮食的比热可以当成粮食绝对干物质的比热与其中水分比热的机械混合量。

多数的研究者都得出粮食的比热与其中水分含量的多少有密切关系，成直线函数关系，粮食的水分越大，则其比热值越高。在粮食干燥技术中，采用下式计算其比热。

$$C = C_g + \frac{1-C_g}{100} \cdot \omega$$

23

式中 C_g ——粮食干物质的比热，通常取

$$C_g = 0.37 \text{ 千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C};$$

ω ——粮食水分 (%)

将 $C_g = 0.37$ 代入上式，得一简单计算式：

$$C = 0.37 + 0.0063\omega$$

例 试求粮食水分为 20% 时的比热？

解 $C = 0.37 + 0.0063 \times 20$

$$= 0.37 + 0.126$$

$$\approx 0.50 \text{ 千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$$

(3) 粮食的导热性

粮食的导热性就是粮食传导热量的能力，通常以粮食的导热系数的大小来衡量其导热的能力。

粮食的导热系数是指一米厚的粮堆里在上层和底层的温度相差 1°C 的条件下，在一小时内通过一平方米的粮堆表面面积的热量，用符号 λ 表示，其单位是千卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

在干燥过程中，粮食的传热不同于一般干物料的传热，因为粮粒的毛细管中总有水分存在，水分对导热性能有影响，热的传递总是和粮食内部的质（水分）传递密切联系，而粮粒之间总又充满着大量的空气，因此，粮食中的热传导是一个复杂的现象。

在 20°C 时，空气的 $\lambda = 0.0217$ 千卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ ，水的 $\lambda = 0.510$ 千卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ ，而粮食的导热系数通常是 $0.1 \sim 0.2$ 千卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ 。由此可见，粮食的导热系数随着粮堆中空气的减少（孔隙率越低）和水分的加大而增大。单粒粮食的导热系数要比粮堆的大。 $\omega = 20\%$ 的小麦粮堆的导热系数为 0.1 大卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ ，而其单粒粮的导热系数达 0.57 大卡/米 $\cdot$ 小时 $\cdot^\circ\text{C}$ 。

不同粮食的导热系数见下表

粮食的导热系数也可以根据其水分而计算出来。当粮食的干基水分不超过 25% 时，小麦和玉米的导热系数可按下列公式计算：

$$\lambda = 0.060 + 0.002\omega_{\text{小麦}}$$

$$\lambda = 0.318 + 0.006\omega_{\text{玉米}}$$

综合上述，粮食的水分越大，导热系数越大，所以高水分粮食容易受热，粮温上升得快，

粮食的导热系数表

品 种	粮食温度 (°C)	水 分 (%)	导 热 系 数 (大卡/米·小时·°C)
小 麦	20	22.8	0.198
小 麦	16.6	17.8	0.131
小 麦	10.0	17.5	0.0915
大 麦	17.5	18.6	0.153
燕 麦	18.0	17.7	0.119
黑 麦	16.7	11.7	0.173
黍	10.0	11.9	0.144

有利于干燥过程的进行；单粒粮食的导热系数比粮堆（厚粮层）的导热系数大4~5倍，因此采用气流干燥，喷动床干燥，流化床干燥，使干燥介质与粮粒表面接触，就能增强干燥效果。

(4) 粮食的导温系数

粮食的导温系数是个综合系数，它包括了粮食的导热系数及热容量。用符号 a 表示，其单位是米²/小时。

$$a = \frac{\lambda}{cr}$$

24

式中 a ——导温系数 (米²/小时)

λ ——导热系数 (千卡/米·小时·°C)

c ——粮食热容量 (千卡/公斤·°C)

r ——粮食的容重 (公斤/米³)

cr 的乘积称为体积热容量，它表明物体贮热的能力大小，如果粮食的 λ 一定， cr 的值越大，则 a 值越小，也就是粮食的贮热能力大，粮食则不易加热升温，也不容易冷却。

为了近似说明这一问题，就前述的粮食的情况举例：取粮食的热容量为0.5，粮堆的容重为0.75，单粒粮的容重（比重）为1.15，粮堆及单粒粮的导热系数为0.1及0.57，根据公式24，计算粮堆及粮粒的导温系数：

$$a_{id} = \frac{\lambda}{cr} = \frac{0.1}{0.5 \times 0.75} = 0.267 \text{ 米}^2/\text{小时}$$

$$a_{il} = \frac{\lambda}{cr} = \frac{0.57}{0.5 \times 1.15} = 0.993 \text{ 米}^2/\text{小时}$$

由此可知，单粒粮食的导温系数比粮堆的大2—3倍，单粒粮比粮堆更容易受热升温，有利于干燥过程的进行。因此，从粮食的导温系数来看，对流热力干燥时，流化床、喷动床、悬浮床的粮食干燥都是有发展前途的。

(5) 粮食的受热允许温度

在干燥过程中，粮食受热后，本身温度升高，因为粮食是活的有机体，温度过高则要损害它，种子粮则失去其发芽能力，商品粮则失去食用价值，所以粮食必然有个允许受热的最高温度。干燥过程中，还有个时间的作用长短的影响，高温干燥介质短时间作用粮食，则不致损害其品质，因此粮食受热允许温度与受热作用是密切相关的。

不少研究人员，通过实验，建立了一些粮食受热允许温度方程式，下面公式是其中的一种：

$$t = \frac{2350}{0.37(100 - \omega) + \omega} + 20 - 10 \lg \tau$$

25

式中 t ——粮食的受热允许温度；

ω ——粮食的水分 (%)

τ ——干燥时间 (分钟)

例：有批粮食的水分 ω 为20%，干燥过程中，其受热作用时间为10分钟，求粮食受热允许温度 t ？

$$t = \frac{2350}{0.37(100 - \omega) + \omega} + 20 - 10l_s \tau = \frac{2350}{0.37(100 - 20) + 20} + 20 - 10l_s \cdot 10 \approx 57^\circ\text{C}$$

在干燥过程中，该批粮食的最高受热温度不超过 57°C 为宜。

3. 粮食干燥过程中的湿热传导

粮食干燥过程可以分成干燥静力学和干燥动力学两部分来研究。

粮食干燥静力学研究粮食与周围空气接触相互作用的过程。

粮食放在一定状态的空气中，粮食与空气的相互作用，可以朝两个方面发展。

一是粮食表面总有水分，这部分水分蒸气压力为 P_i ，而周围空气中的水分蒸气分压力为 P_s ，如果 $P_i < P_s$ ，则粮食从空气中吸收水分，则其水分含量逐渐增大；反之，如果 $P_i > P_s$ ，则粮食表面的水分逐渐向空气中放出水分，于是粮食水分蒸发出来，粮食的水分含量则逐渐降低，不论是那一种情况，经过一段时间之后，粮食表面水蒸汽的分压力 P_i 和空气中水蒸汽的分压力 P_s 要趋向平衡，最后达到相等即 $P_i = P_s$ 。这时粮食不再吸收（或放出）水分。精确地说，粮食吸收（或放出）的水分等于放出（吸收）的水分，它们之间形成了动平衡状态。在动平衡状态下粮食的水分就叫粮食的平衡水分，用符号 ω_p 表示。

粮食的平衡水分与空气中水蒸汽的分压力有关，也就是与空气的相对湿度 φ 有关，可以说，在一定温度下，粮食的平衡水分是空气相对湿度的函数：

$$\omega = f(\varphi)$$

26

粮食表面水蒸汽分压力的大小与粮食本身的水分有关，如图1所示。当粮食水分 ω 为零时（实际上不可能），则其表面的水蒸汽分压力 P_i 为零，如果粮食水分 ω 增大，则 P_i 值也增加，当粮食水分增加到一定值 ω_x 时，粮食表面水蒸汽分压力增大到和饱和水蒸汽分压力 P_b 相等。从此往后，粮食水分再增加，那么粮食表面水蒸汽分压力再也不能增大了，因为已达到了饱和状态，换句话说，当周围空气的相对湿度 $\varphi = 100\%$ 时，粮食从空气中吸附水分，它所能达到的最大湿含量，也就是粮食表面水蒸汽分压力达到饱和，这时粮食的水分称为吸湿水分，用符号 ω_x 表示。

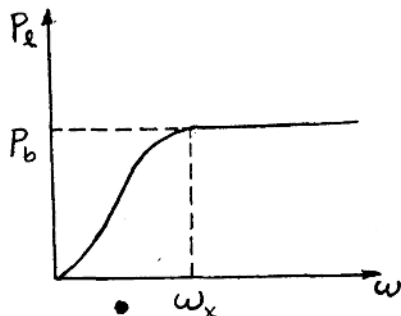


图 1

粮食的吸湿水分 ω_x 成了粮食水分的一个重要分界点，因为当粮食水分大于其吸湿水分时，那 $\omega > \omega_x$ ，粮食表面水蒸汽分压力恒等于同温下水的饱和蒸汽分压力，这时，粮食表面与水的表面没有差异，粮食表面水分的汽化和水的自由表面的水分汽化是相当的，这说明大于 ω_x 的那一部分水分只是把粮粒当成“容器”而贮积在粮粒中，与粮食本身没有什么形式的结合，或者结合力太小，可以忽略不计。这样我们将大于吸湿水分的那一部分水分称为自由水分（或非结合水分），将小于粮食吸湿水分的粮粒中水分称为结合水分。粮食干燥的目的就是在除去自由水分和一部分结合水分，使粮食水分达到安全贮藏的水分标准。

粮食干燥动力学研究粮食干燥的机理及在干燥过程中，粮食的水分、温度是如何随着时

间而变化的。

粮食的干燥曲线：将一定条件下的粮食水分变化与时间之间的关系用图线表示出来，所得的曲线称为该条件下的干燥曲线。 $\omega_s = f(\tau)$ 。

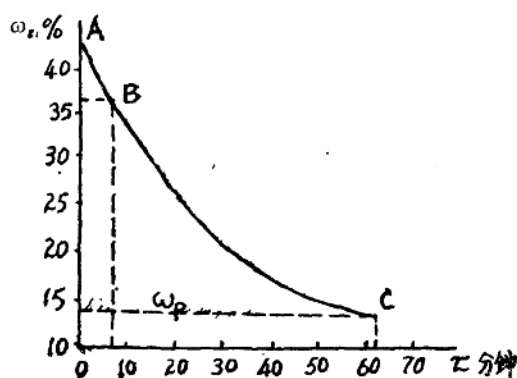


图 2

图2是小麦粮层厚度为25毫米，干燥介质温度为70°C，其相对湿度为12%，穿过粮层的速度为0.1米/秒条件下的小麦干燥曲线。

从图2可以看出，粮食的原始水分比较高，干燥介质的温度和速度都比较低的条件下，干燥过程中一开始，粮食水分的下降是条直线(AB)，从B点开始，粮食水分下降按曲线进行，到达C点之后，粮食水分不再下降。据此，可以将干燥过程分为两个阶段，由A至B，粮食水分变化是等速进行的，称为等速干燥段。或者叫第一干燥段；由B至C，粮食水分变化

是降速进行的，称为降速干燥段，或者叫第二干燥段。

干燥速度曲线：

干燥速度是表示单位时间内粮食水分的变化率。 $\left(\frac{d\omega_s}{d\tau} \text{ \% / 小时}\right)$ 。干燥速度显然是 $\omega_s =$

$f(\tau)$ 函数对时间的一次导数，即 $-\frac{d\omega_s}{d\tau} = f_1(\omega_s)$ ，这里的负号表示粮食水分随着时间的推移而降低。也可以用干燥过程中任一时间内的干燥速度与粮食水分的关系表示这一变化：

$$-\frac{d\omega_s}{d\tau} = f_1(\omega_s)$$

表示干燥速度与粮食水分(或干燥时间)之间的关系的图线称为干燥速度曲线。

将图2用图解法，可绘成干燥速度曲线，以图3表示。

在干燥曲线上的任一点作切线，它和水平轴线之间的夹角 φ 的正切 $t_g \varphi$ ，即为这一时间的干燥速度。图3上的N则表示在等速干燥阶段，干燥速度是个常数，是不变的，即：

$$N = -\frac{d\omega_s}{d\tau} \text{ \% / 小时}$$

在干燥第二阶段干燥曲线上的BC段是个曲线，干燥速度是个变化着的量，逐渐下降，图3也表示这一变化。

在干燥过程中，粮食的温度也是随着时间而变化的，表示干燥过程中粮食的温度与时间之间的关系曲线，称为粮食的温度曲线 $\theta = f_2(\tau)$

图4是西德美阿格公司所作出的小麦干燥曲线和温度曲线。从图4上可以看出，粮食在干燥过程中，一开始粮食温度上升，粮食水分很少降低，这一阶段可以称为粮食的予热阶段。

图4的曲线1是表示粮食温度在予热、干燥、冷却阶段的变化，曲线2是干燥曲线。

粮食在干燥过程中，有予热段，等速干燥段和降速干燥段，但是粮食干燥的机理则是复

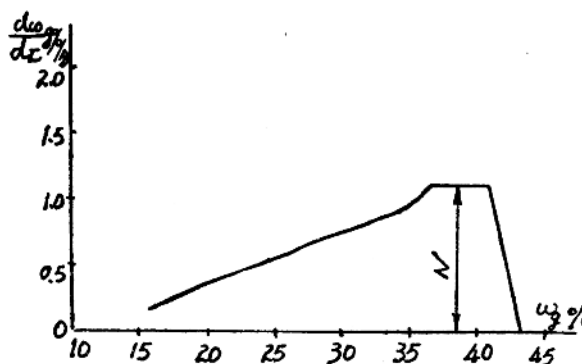


图 3

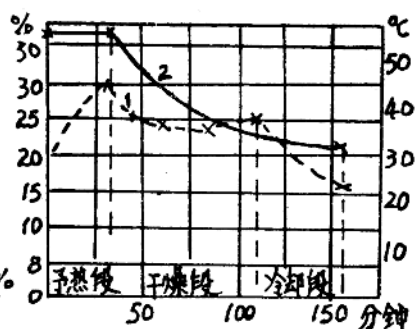


图 4a

杂的，可以简单地描述为：将一批粮食放置在烘干机内进行干燥，设粮食的水分是均匀分布的，其温度也是一致的，也就是说，粮食具有单一的温度场和湿度场。我们用参数不变的干燥介质，对粮食进行烘干，首先粮食受热，粮温急骤上升。这个暂短时间内，粮食水分还没有汽化，或者汽化很微小的一点水分，这个时期就叫予热段。这个阶段是很短的，有时，小型实验也难以测出。紧接着粮食表面水分大量汽化，粮食干燥按等速阶段进行，而这时粮食温度由于表面水分汽化则有所下降。在等速阶段，粮食水分汽化速度和自由表面水分汽化速度的规律是相同的。

随着粮食表面水分的汽化，粮食内部的水分则要转移到粮食表面来，由于粮食水分从内部转移到表面的速度慢于表面水分汽化的速度，则粮食干燥速度不能保持等速干燥，于是，开始降速干燥阶段，这时粮食水分汽化表面开始向粮粒内部深入，粮食的本身温度也逐渐升高，当粮食干燥到一定标准时，则需要停止干燥，将温度过高的粮食逐渐冷却下来，冷却过程中也能降低一部分水分，冷却后的粮食即可入仓保藏。

等速干燥段的粮食干燥速度，也就是说粮食表面自由水分的蒸发速度，用下式表示：

$$q = \alpha_{sh}(P_1 - P_r) \frac{760}{B} \text{ 公斤/米}^2 \text{ 小时} \quad 27$$

式中 q ——粮食表面水分蒸发强度（速度）（公斤/米²·小时）

α_{sh} ——粮食干燥时其水分交换系数（公斤/米²·小时·毫米汞柱）

P_1 ——粮食表面水蒸汽分压力（毫米汞柱）

P_r ——粮食周围介质中水蒸汽分压力（毫米汞柱）

B ——大气压力（毫米汞柱）

在降速干燥阶段，粮食内部水分大于表面水分，形成了水分梯度。粮食某一层湿含量为 u ，在离该层法线方向 Δh 上的另一层湿含量为 $u + \Delta u$ ，则两层之间的湿含量差为 $u + \Delta u - u = \Delta u$ ，那么，湿度梯度则用下式表示：

$$ghad u = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{(u + \Delta u) - u}{\Delta h} = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta h} = \frac{\partial u}{\partial h} \text{ 公斤/公斤干物质} \cdot \text{米}$$

水分传递（交换）的速度则用下式表示：

$$q_s = -Kr_0 \frac{\partial u}{\partial h} = -Kr_0 \Delta u \text{ 公斤/米}^2 \cdot \text{小时} \quad 28$$

在干燥过程中, 粮食表面的温度比中心的高, 产生了温度梯度, 从而引起热量的转移, 使热能深入到粮粒毛细管内部, 这会导至物料中水分从热的地点向冷的地点转移, 显然, 在对流热力干燥中, 温度梯度数值很小, 常常忽略不计。但在高频电场干燥, 辐射干燥时, 温度梯度则是有利于粮食内部水分向表面转移。

近三十年来, 许多国家对粮食干燥理论进行了研究, 提出了不少的假设, 目前多数的研究者认为: 在粮食干燥过程中, 在一般情况下, 粮食干燥处于降速阶段进行, 粮食水分的下降是根据曲线而变化的。在过程结束时, 粮食水分达到该条件下的平衡水分。粮食中水蒸汽的分压力与干燥介质中水蒸汽的分压力之差是粮食干燥的推动力。任一时间的干燥速度与该干燥介质参数作用下可以去除的粮食水分成正比, 通用下式表示:

$$-\frac{d\omega_s}{d\tau} = K(\omega_s - \omega_p) \quad 29$$

式中 ω_s ——粮食的干基水分 (任一时间水分, 又称瞬时水分) %;

ω_p ——在干燥介质参数作用下的粮食平衡水分 (干基) %;

τ ——干燥时间 (分钟或小时)

K ——与干燥条件等有关的干燥系数 (小时⁻¹)

分离变量, 对上式进行积分, 则得:

$$\frac{\omega_s - \omega_p}{\omega_{1s} - \omega_p} = e^{-K\tau} \dots \dots \dots 30$$

式中 ω_{1s} ——粮食干燥前的原始干基水分 (%)

一般认为, 干燥过程开始时, 粮粒切面积上水分分布成抛物线状, 则 $\ln(\omega_s - \omega_p)$ 与 τ 之间成一直线关系。但实际上在粮食干燥过程开始时, 粮粒内水分分布是均匀的, 这样在半对数座图上作出的 $\ln(\omega_s - \omega_p)$ 与 τ 之间的关系线是一曲线, 而非直线。

粮食干燥实验还表明, 如果用 $\omega_{动}$ 代替 ω_p , 即用动平衡水分代替平衡水分, 那么在半座标图上, $\ln(\omega_s - \omega_{动})$ 与 τ 之间的关系成一直线关系。

由于粮食品种不同, 干燥条件不同, $\omega_{动}$ 和 K 值也就有多种值, 但对同一种粮食在一定的干燥条件下, $\omega_{动}$ 和 K 值应该是一个常数, 这样通过实验, 可以作出粮食在一定条件下的干燥曲线, 然后求出 K 值, 则能对粮食干燥时间进行计算。

粮食干燥时间的计算:

如果粮食干燥前的水分为 ω_1 , 干燥后的粮食水分为 ω_2 , 那么干燥所需的时间, 可根据公式29导出:

$$\frac{\omega_{1s} - \omega_p}{\omega_{2s} - \omega_p} = K\tau$$

$$\tau = \frac{\omega_{1s} - \omega_p}{K(\omega_{2s} - \omega_p)} \text{ 小时} \quad 31$$

干燥系数 K , 根据实验可得出。例如干燥介质温度不大于110°C时, 干燥玉米时的干燥系数 K 值, 可按下式求得:

$$K = \frac{1}{a - bt}$$

32

式中 $a = 4.49$; $b = 0.0358$;

t = 干燥介质温度

必须说明的是, 虽然对粮食干燥理论进行了不少研究, 得出了不少的公式, 但是还是不能用这些公式来计算粮食烘干机。目前粮食烘干机的设计计算, 仍然用经验公式或半经验公式。粮食干燥理论的研究仍然是重要的课题。

(二) 谷物干燥一般原理及类型

谷物干燥大都是采用空气做介质, 排除谷物蒸发的水分。谷物水分的蒸发主要是谷粒的表面水分, 谷粒内的水分逐渐向表面扩散, 最后达到均匀干燥的目的。为了使水分蒸发和扩散需要供给一定的热能, 这种热能通常是由强制通过谷物的气流供给。热能既可以利用自然空气本身所含有的热量, 也可以给予补充加热。当气流通过谷层移动时, 气流所能提取和输送走的水分多少与气流温度、相对湿度、流速、输送距离和被干燥谷物的状态有关。气流的干燥能力取决于谷物含水量与气流相对湿度的平衡。各种谷物与不同相对湿度气流平衡时的含水量 (%湿基) 见表 1 (当气流温度为 25°C 时)。

表 1

种籽含水量 (%) \ 空气相对湿度 (%)		15	30	45	60	75	90	100
谷 物								
玉 米	籽 粒	6.6	8.4	10.4	12.9	14.7	18.9	24.6
燕 麦		5.7	8.0	9.6	11.8	13.8	18.5	24.1
稻 谷		5.6	7.9	9.8	11.8	14.0	17.6	—
高 粱		6.4	8.6	10.5	12.0	15.2	18.8	21.9
大 豆		—	0.2	7.4	9.7	13.2	—	—
小 麦		6.3	8.6	10.6	11.9	14.6	19.7	25.6

由表 1 可以看出: 采用温度为 25°C, 相对湿度为 75% 的自然空气强制通过含水量为 16% 的大豆, 最后干燥的大豆含水量最低只能达到 13.2%。但是如果给予补充加热将气流的相对湿度降低到 60%, 则最后大豆含水量可以干燥到 9.7%。当气流相对湿度与含水量接近平衡时干燥 (蒸发) 很慢, 以致不能使谷物得到进一步的干燥。

空气的温度对气流的干燥能力也有很大的影响。温暖而相对潮湿的天气比相对湿度相同而较冷的天气具有较大的干燥能力。例如采用温度为 21°C、相对湿度为 60% 的空气干燥谷物, 其干燥能力比温度在 10°C、相对湿度相同时大约高 40%。

用任何方法加热空气, 空气的含水量虽然不变, 但持水的能力却逐渐增加。采用加热气流干燥谷物就是利用空气的这一特性。空气持水能力随温度升高而增加的情况见表 2。

由此可见, 提高空气的温度可以增加其吸收和提取水分的能力, 即给空气补充加热可降低其相对湿度, 增加其干燥能力。一般温度每升高 1°C, 其相对湿度降低 4.5% (升高 1°F 降低 2.5%)。空气的相对湿度在温度升高 20°F 后 (11.1°C) 几乎降低一半。此外, 靠加热