

GUWU GANZAOJI DE YUANLI YU GOUZAO

邵耀坚 刘道被 肖俊铭 郑官杞 编



谷物干燥机的原理 与构造

机械工业出版社

谷物干燥机的原理与构造

邵耀坚 刘道被 肖俊铭 郑官杞 编



机械工业出版社

本书是根据农业生产对谷物干燥机的日益迫切需要而编写的。书中较系统地综述了谷物干燥的基本原理,分析了各种干燥过程,概括地介绍了目前国内外研制的主要机型、辅助设备及其测试方法,并附有例题及设计计算实例。本书可供农机、农业、粮食等部门的科研、教学、生产、管理人员参考;其中的基本原理及计算方法部分,也可供其他部门从事干燥技术的有关工程技术人员参考。

谷物干燥机的原理与构造

邵耀坚 刘道被 肖俊铭 郑官杞 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张14¹/₄·插页1·字数 346千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—1,180·定价 3.20 元

*

统一书号: 15033·5760

前 言

解放以来，在中国共产党的正确领导下，经过亿万农民和广大农业技术人员及干部的艰苦奋斗，使粮食生产有了较快的发展。例如，1982年我国粮食总产量达到35343万吨，比上年增长8.7%，比历史最高水平的1979年增长6.4%。

我国土地辽阔，气象万千。在谷物收获季节，往往遇到阴雨天，使谷物因不能晾晒而发芽霉变，造成严重损失。据农业部门统计，在一般年景，全国每年因霉变而损失的谷物达数十亿斤，严重时可达100~200亿斤，约占全国每年粮食总产量的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就多达70多亿斤。

为了减少谷物的损失，自五十年代以来，全国各地的农机、农业和粮食部门都积极开展对谷物干燥机械的研制工作，取得了一定的成绩。到1981年，全国已鉴定并定型的农用谷物干燥机有20多种，已投产推广使用的有10多种，保有量达九千多台套，大部分属于中小型。这些干燥设备如按干燥工艺和结构形式来分类，可分为固定床式、转筒式、循环式、流化斜槽式及喷泉式；如按加热形式可分为间接加热式和直接加热式；如按采用的能源可分为燃煤、燃油、电能、沼气、谷物残余物和太阳能等机型。为了促进谷物干燥机的研制工作，1981年农机部委托南京农业机械化研究所等单位对全国11种中、小型谷物干燥机进行了生产对比试验，对各种样机的性能、技术经济指标和烘干品质做了较全面的测定，积累了大量的技术资料。中国农业机械学会收获加工机械专业委员会还召开了全国谷物干燥技术学术讨论会，对我国谷物干燥技术的发展方向、干燥能源、干燥工艺、部件结构和技术参数等问题进行了讨论，并对今后如何加速发展我国谷物干燥机械化事业提出了许多建议。

由于我国各地区的自然环境、生产规模、经济条件、技术水平和能源情况有所不同，故谷物干燥的问题至今尚未能全面解决。因此，如何因地制宜地研制出各种大、中、小型的结构先进、性能良好、效率较高、能耗较低和造价适宜的谷物干燥设备，是农机、农业和粮食等部门广大工作人员所共同关心的问题。

本书编写的目的是为从事谷物干燥设备的设计、制造和使用工作者介绍有关谷物干燥的基础理论、各类谷物干燥机的基本结构及技术参数、设计原理和使用测试方法，以有助于开展谷物干燥设备的研制工作。

由于谷物的种类很多，包括稻谷、小麦、玉米、高粱、大麦、小米等，而产量则以前三者居多，故本书主要研究稻谷、小麦和玉米三种谷物的干燥问题。此外，由于国外干燥机种类繁多，故本书除介绍我国现有的谷物干燥设备外，还适当介绍了国外各种类型谷物干燥设备的构造原理和使用经验。

本书以华南农学院农机系邵耀坚教授为主编，刘道被同志为副主编，参加编写的还有肖俊铭和郑官杞同志。

由于编者水平有限，书中如有不当之处，请读者给予指出，以便再版时加以修正。

目 录

前言

第一篇 谷物干燥原理

第一章 干燥介质	1
第一节 湿空气的基本性质	1
第二节 湿空气的 $I-d$ 图	17
第三节 $I-d$ 图的应用	21
第四节 炉气	27
第二章 谷物中的水分及干燥方法概述	39
第一节 谷物中的水分	39
第二节 谷物的含水率	41
第三节 谷物干燥的基本方法	44
第三章 谷物的生理特性及其他特性	52
第一节 谷物的生理特性	52
第二节 谷物的热物理特性	56
第三节 谷物的空气动力特性	58
第四节 谷物的物理机械性质	63
第四章 干燥过程的计算及图解	65
第一节 谷物干燥的基本流程	65
第二节 干燥室的物质衡算	66
第三节 干燥室的热量衡算	69
第四节 加热空气干燥过程的图解计算	74
第五节 相当理论过程、经济性比较及高低温干燥分析	79
第六节 加热空气干燥的其他方案	83
第七节 炉气干燥的图解计算	90
第八节 谷物结露及冷却过程的计算	93
第五章 谷物干燥过程的机理、特性及影响因素	98
第一节 干燥过程的机理及缓苏问题	98
第二节 谷物的吸湿含水率及平衡含水率	99
第三节 谷物干燥特性曲线及干燥阶段	103
第四节 干燥速度及干燥时间的计算	106
第五节 影响谷物干燥过程的主要因素	108

第二篇 谷物干燥机的构造、使用及辅助设备

第六章 谷物干燥机的构造及使用	113
第一节 仓式干燥装置及通风贮存设施	113
第二节 竖箱谷物干燥机	127

第三节	流化斜槽式谷物干燥机	139
第四节	转筒式谷物干燥机	148
第五节	我国研制的中小型谷物干燥机的构造及性能	151
第七章	谷物干燥机的辅助设备	157
第一节	固体燃料的燃烧及炉灶	157
第二节	炉灶热平衡及热效率	162
第三节	燃烧温度	164
第四节	火花扑灭及除尘装置	165
第五节	通风机的选择	166

第三篇 谷物干燥机的设计与测试

第八章	谷物干燥的测定设备及其使用	175
第一节	温度的测量仪表及其使用方法	175
第二节	空气湿度的测量仪表及其使用方法	177
第三节	谷物含水率的测定方法	179
第四节	压力与流速的测量仪表及其使用方法	182
第五节	烟气快速分析	184
第九章	谷物干燥机的试验	188
第一节	试验的分类和目的	188
第二节	试验的内容和方法	188
第三节	谷物干燥机的主要评价指标及分析	197
第十章	谷物干燥机的设计计算	203
第一节	对谷物干燥机的基本要求	203
第二节	谷物干燥机的设计方法与步骤	204
第三节	谷物干燥机设计计算实例	204
附录一	空气的物理性质	218
附录二	湿空气的 $I-d$ 图	插页
参考文献		220

第一篇 谷物干燥原理

第一章 干燥介质

谷物干燥的实质是排除谷物中的部分水分。干燥过程是：使谷物外部的和内部的部分水分排放出来，变为蒸气，再被周围的干燥介质所吸收。为使谷物不断地干燥，必须及时更换干燥介质。此外，干燥介质吸收水蒸气的能力如何，将直接影响干燥过程的快慢。所以，在未研究具体的干燥过程之前，先了解干燥介质的基本性质是十分必要的。

谷物干燥中的干燥介质常用湿空气及炉气。

第一节 湿空气的基本性质

一、湿空气的成分及状态方程式

(一) 湿空气的成分

地球周围的空气通常称为大气。由于地球表面的江、湖、河、海蒸发的水蒸气不断进入大气，使自然界的空气总含有一些水蒸气。这种含有水蒸气的空气称湿空气。为方便分析计算，将湿空气看成是由于空气与水蒸气组成的混合气体。

大气中不带水蒸气的干空气由表 1-1 所示的几种气体组成。在正常情况下，干空气的组成比例基本不变。

表 1-1 干空气的成分

组成气体	氮 气 N_2	氧 气 O_2	稀有气体	二氧化碳 CO_2
重量(%)	75.53	23.14	1.28	0.05
体积(%)	78.09	20.95	0.93	0.03

大气中的水蒸气含量的多少，随季节及天气的变化而异。而水蒸气含量的变化，将引起湿空气的状态变化，因而影响干燥速度的变化。所以，湿空气中水蒸气含量的多少，是谷物干燥过程中必须引起重视的主要问题之一。

(二) 湿空气的状态方程式

任何实际的气体分子都是有体积的，气体分子之间也有吸引力。为方便分析计算，假设气体的分子没有体积，分子之间也没有吸引力，这样的气体，热力学中称为理想气体。

理想气体在自然界中是不存在的，它是一种便于分析计算而抽象出来的气体。但是，在常压常温下，湿空气、炉气等实际气体都可看作是近似理想气体。这是因为，在常温常压下，湿空气或炉气中的气体分子之间的距离比气体分子本身的径向尺寸大得多，因此，气体分子

间的吸引力可忽略不计, 气体分子本身的体积与气体所占容积相比也可忽略不计。

由于湿空气及炉气可看作是近似理想气体, 因此, 可用理想气体状态方程式来描述湿空气或炉气的压力、温度及体积(或比容)之间的关系:

$$pV = GRT \quad (1-1)$$

$$pv = RT \quad (1-2)$$

式中 p —— 气体的绝对压力 (公斤力/米²);

V —— 气体所占的总体积 (米³);

G —— V 米³ 的气体重量 (公斤);

R —— 气体常数 (公斤力·米/公斤·K), 其数值与气体性质有关(对于干空气, $R_g = 29.3$; 对于水蒸气, $R_{wq} = 47.1$);

T —— 气体的绝对温度 (K);

v —— 每公斤气体所具有的体积, 称比容 (米³/公斤)。

二、湿空气的状态参数

湿空气的状态是用一些说明状态特性的物理量来表示的, 这些物理量称为状态参数。

湿空气的状态参数有温度、压力、比容(或重度)、焓、相对湿度、含湿量及湿球温度等, 分别介绍如下:

(一) 温度

温度是标志空气冷热程度的参数。测量温度的标尺称温标。目前国际上通用的温标有两种: 摄氏温标 t (°C) 与绝对温标 T (K)。

摄氏温标的刻度是这样确定的: 在 1 标准大气压下, 以纯水的冰点为 0°C, 纯水的沸点为 100°C, 在 0°C 与 100°C 之间划分为 100 等分, 每一等分就是摄氏温标 1°C。

绝对温标的 1K 与摄氏温标的 1°C 有相同的间隔, 但绝对温标的计算起点比摄氏温标低 273.16°C, 两者的关系是:

$$T = 273.16 + t \quad (1-3)$$

此外, 英、美等国有关书籍过去采用华氏温标 (°F), 它规定在 1 标准大气压下, 纯水的冰点和沸点分别为 32°F 及 212°F。摄氏温标与华氏温标(其符号亦为 t) 的关系如下:

$$t \text{ } ^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (t \text{ } ^\circ\text{F} - 32) \quad (1-4)$$

(二) 压力

1. 压力的概念及其表示方法

垂直作用在单位面积上的力称压力, 以 p 表示。气体的压力可看作是气体的大量分子在无规则的热运动中频繁撞击容器壁的结果。

(1) 压力的单位

压力的单位常用三种方法表示:

1) 用单位面积的作用力表示

若容器壁的总面积为 f , 作用于容器壁的总压力为 P , 则

$$p = \frac{P}{f}$$

根据上式可知: 若力的单位用“公斤力”, 面积的单位用“米²”, 则压力的单位为“公斤力/米²”。

因为这个单位太小，工程上常以“公斤力/厘米²”作为压力的单位，两者关系为：

$$1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤力/米}^2$$

2) 用液柱高度表示

测定风道或烟道中的气体压力时，因其压力较小，常用里面盛有水或水银的U型压力计测量其压力，并以液柱的高度表示压力的大小。

如图 1-1 所示，液柱作用在容器底面积 f 上的总压力 P 等于液柱的重量，即

$$P = hf\gamma$$

式中 h ——液柱高度，

γ ——液体重度。

液柱对容器底压力 p 为

$$p = \frac{P}{f} = h\gamma$$

上式改为

$$h = \frac{p}{\gamma} \quad (1-5)$$

根据上式，就可将压力 p 换算成相应的液柱高度。例如，已知水的重度为 1000 公斤力/米³，则与压力 $p = 1 \text{ 公斤力/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤力/米}^2$ 相对应的水柱高度 h 为

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{10000}{1000} = 10 \text{ 米水柱} = 10000 \text{ 毫米水柱}$$

同理，已知水银的重度为 13595 公斤力/米³，则与压力 $p = 1 \text{ 公斤力/厘米}^2$ 相对应的水银柱高度 h 为

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{10000}{13595} = 0.7356 \text{ 米汞柱} = 735.6 \text{ 毫米汞柱}$$

根据以上实例还可得出

$$1 \text{ 毫米水柱} = 1 \text{ 公斤力/米}^2$$

$$1 \text{ 毫米汞柱} = 13.6 \text{ 公斤力/米}^2 = 13.6 \text{ 毫米水柱}$$

3) 用气压表示

在压力容器中，容器内的压力较高，用上述两种压力单位表示都不方便，而改用气压表示。

工程上规定 1 公斤力/厘米² 的压力为 1 工程气压，简称气压，即

$$\begin{aligned} 1 \text{ 气压} &= 1 \text{ 公斤力/厘米}^2 \\ &= 1000 \text{ 毫米水柱} \\ &= 735.6 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

(2) 大气压力、标准大气压

在地球表面上有一层很厚的空气层，此空气层的重量对地面所形成的压力称大气压力，用符号 B 表示。大气压力的大小随地理位置及气候条件而变化。例如，广州市冬季的平均大气压为 765 毫米汞柱，夏季平均为 754 毫米汞柱，而拉萨冬季的平均大气压为 490 毫米汞柱，夏季平均为 468 毫米汞柱。国际上把纬度 45° 海平面上全年平均气压规定为标准大气压

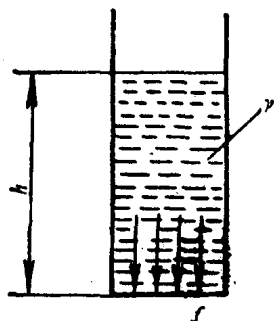


图1-1 用液柱高度表示压力

(或称物理大气压), 其值为 760 毫米汞柱 (0°C), 它与其它压力单位的关系是:

$$1 \text{ 标准大气压} = 760 \text{ 毫米汞柱} = 10332 \text{ 毫米水柱} = 1.0332 \text{ 公斤力/厘米}^2 \\ = 1.0332 \text{ 气压}$$

(3) 表压力、真空度、绝对压力

日常所使用的压力表或真空表, 均处在大气压力的作用之下, 因此, 用压力表或真空表测得的压力不是容器内气体的真正压力, 而是“真正压力”与当时当地的大气压力 B 的差值。容器内气体的真正压力称绝对压力。

当容器内气体的绝对压力 P 高于大气压力 B 时 (图 1-2), 绝对压力与大气压力之差称表压力 p_{by}

$$p_{by} = P - B \quad (1-6)$$

当容器内气体的绝对压力 P 低于大气压力 B 时 (图 1-3), 大气压力与绝对压力之差称真空度 p_{zh}

$$p_{zh} = B - P \quad (1-7)$$

根据公式 (1-6) 及 (1-7), 可得出绝对压力的计算公式:

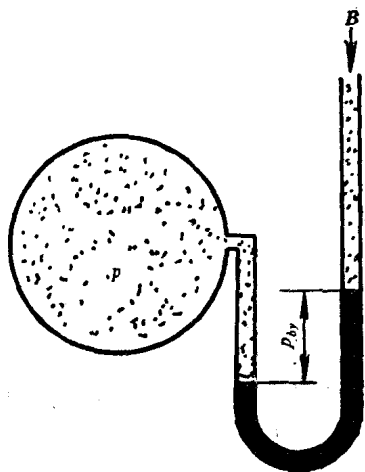


图1-2 表压力 p_{by}

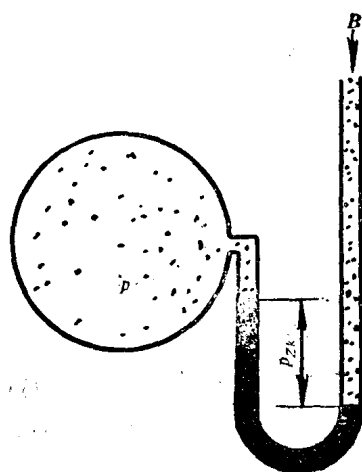


图1-3 真空度 p_{zh}

$$P = B + p_{by} \quad (1-8)$$

$$P = B - p_{zh} \quad (1-9)$$

公式 (1-8) 及 (1-9) 说明: 在 P 不变的情况下, p_{by} 及 p_{zh} 均随 B 的大小而变化, 即 p_{by} 与 p_{zh} 不是完全由状态确定, 因而不是状态参数。所以, 利用状态方程式 (1-1) 或 (1-2) 计算状态参数时, 必须用绝对压力 P (它是由状态而定的状态参数) 代入该式。

绝对压力以后简称压力。

2. 水蒸气分压力、饱和与未饱和空气

(1) 水蒸气分压力

所谓分压力, 就是假定混合气体中各组成气体单独存在并具有与混合气体相同的温度与容积时对容器壁所施加的压力。

对于理想气体, 由于气体分子本身没有体积, 分子之间也没有作用力, 因此, 各种气体分子的运动互不影响, 就好象它们各自单独存在一样。所以, 理想混合气体全部分子碰撞容器壁的总结果, 必然等于各组成气体的分子各自碰撞容器壁的结果的总和, 也就是说, 理想混合气体的总压力必等于各组成气体的分压力的总和, 这就是道尔顿定律。

由于由于空气与水蒸气组成的湿空气在常温常压下可看成是理想气体, 因此, 湿空气的总压力 P 应等于干空气的分压力 p_g 与水蒸气的分压力 p_{zq} 之和, 即:

$$P = p_g + p_{zq} \quad (1-10)$$

干燥过程中用的湿空气就是自然界的大气, 所以, 湿空气的总压力 (以后简称压力) P

就是当时当地的大气压力 B 。据此，上式可改写成：

$$B = p_g + p_{z,q} \quad (1-11)$$

大气压力 B 的数值随地理位置及气候条件的不同而不同，可在有关设计手册中查得，或直接用大气压力表测得。

湿空气中的水蒸气分压力 $p_{z,q}$ 越大，表示湿空气中的水蒸气分子数越多（即水蒸气的含量越多），湿空气越潮湿，因而使谷物干燥速度降低。所以，水蒸气分压力的大小，是影响谷物干燥过程的一个重要因素。

(2) 饱和与未饱和空气

湿空气中的水蒸气分压力 $p_{z,q}$ 的最大值是多少？或者说，湿空气中最多能容纳多少水蒸气量呢？为回答这个问题，请先观察下列现象：设有一密闭容器，容器内盛有温度为 t_1 的湿空气。现向容器内加入温度亦为 t_1 的水蒸气，则湿空气中的水蒸气含量将增加，水蒸气分压力也相应增大。但当水蒸气分压力 $p_{z,q}$ 增大至某一极限值 $p_{b,h}$ 时，不管再加入多少水蒸气， $p_{b,h}$ 值都不变。此时，所加入的水蒸气不是被湿空气所容纳，而是凝结成水滴从湿空气中分离出来（再加入多少水蒸气，就凝结多少水滴）。这种在一定温度下容纳的水蒸气量已达最大值（因而水蒸气分压力也达最大值）时的湿空气称饱和湿空气，简称饱和空气。相应地，饱和空气中的水蒸气称为饱和蒸气，水蒸气分压力称为饱和分压力，以 $p_{b,h}$ 表示。在饱和空气下，谷物无法实现干燥。

实验表明，当湿空气的温度由 t_1 升高至 t_2 时，水蒸气饱和分压力也由 $p_{b,h,1}$ 提高至 $p_{b,h,2}$ 。例如，在标准大气压下，湿空气温度 t 为 0°C 时，湿空气中的水蒸气饱和分压力 $p_{b,h}$ 为 4.6 毫米汞柱； 30°C 时，为 31.548 毫米汞柱； 60°C 时，为 148.791 毫米汞柱。

各种温度下的 $p_{b,h}$ 值可在本书附录一或水蒸气表中查得，亦可用下列经验公式计算之（当 t 小于 100°C 时）：

$$\lg p_{b,h} = 0.662 + \frac{7.5 t}{238 + t} \quad (1-12)$$

式中 $p_{b,h}$ 的单位是毫米汞柱， t 的单位是 $^\circ\text{C}$ 。

在一定的温度下，若湿空气中的水蒸气含量还未达到最大值，则湿空气还有容纳水蒸气的能力。这种还具有容纳水蒸气能力的湿空气称未饱和空气。相应地，未饱和空气中的水蒸气称未饱和蒸气，又称过热蒸气。显然，在同一温度下，未饱和空气中的水蒸气分压力 $p_{z,q}$ 必小于饱和空气中的水蒸气饱和分压力 $p_{b,h}$ ，即：

$$p_{z,q} < p_{b,h}$$

$p_{z,q}$ 的数值可据未饱和空气的露点在水蒸气表中查得。

什么叫露点呢？请看下面的分析：

若将未饱和空气在水蒸气分压力 $p_{z,q}$ 保持不变的情况下逐渐冷却到某一温度时，未饱和空气中的水蒸气将变成饱和蒸气。若继续冷却，已达饱和状态的水蒸气就会结露，析出水滴。这个开始结露时的温度称露点，以 $t_{l,d}$ 表示。 $t_{l,d}$ 可用露点仪测出，但不准确。较方便的方法是在 $I-d$ 图上确定。

必须指出，在一定的条件下，饱和空气与未饱和空气是可以互相转化的。例如，当温度不变时，向空气加入水蒸气，可使未饱和空气变成饱和空气。反之，从空气中取出水蒸气，可使饱和空气变成未饱和空气。再如，当湿空气中的水蒸气含量保持不变时，将空气冷却到

露点温度, 可使未饱和空气变成饱和空气。反之, 提高空气温度 (因而提高了水蒸气容纳水蒸气的能力), 又可将饱和空气变成未饱和空气。这就是干燥过程中为什么要提高干燥介质温度的原因。不过, 干燥介质的温度不能随意提高, 允许提高到什么程度, 应由干燥工艺确定。

(三) 湿度

1. 绝对湿度

每立方米湿空气中所含水蒸气的重量称湿空气的绝对湿度, 以符号 Z 表示。设湿空气的体积为 V 米³, 其中的水蒸气重量为 G_{zq} 公斤, 则绝对湿度 Z 为:

$$Z = \frac{G_{zq}}{V} \quad (\text{公斤/米}^3)$$

由于湿空气是由干空气与水蒸气均匀混合的气体, 且干空气与水蒸气在各自的分压力作用下具有与湿空气相同的温度和体积 (如图 1-4 所示), 因此, 根据公式 (1-1) 可得:

$$p_{zq} V_{zq} = G_{zq} R_{zq} T$$

据此, 可求得 Z 的计算公式:

$$Z = \frac{G_{zq}}{V} = \frac{G_{zq}}{V_{zq}} = \frac{p_{zq}}{R_{zq} T} = \gamma_{zq} \quad (1-13)$$

式中 V ——湿空气的体积 (米³),
它等于水蒸气在其分压力 p_{zq} 下所占体积 V_{zq} ;

G_{zq} ——湿空气中的水蒸气重量 (公斤);

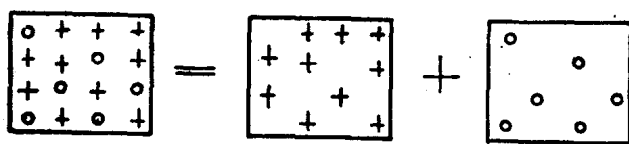
p_{zq} ——水蒸气分压力 (公斤力/米²);

R_{zq} ——水蒸气的气体常数;

γ_{zq} ——水蒸气在其分压力 p_{zq} 及温度 T 时的重度 (重度即单位体积具有的重量, 又称容重)。

公式 (1-13) 说明, 绝对湿度 Z 随温度 T 及水蒸气分压力 p_{zq} 的变化而变化, 在数值上等于水蒸气的重度 γ_{zq} 。当 T 一定时, p_{zq} 增大, 则绝对湿度 Z 亦相应增大。当 p_{zq} 增大至该温度下的饱和分压力 p_{bh} 时, 即湿空气变成饱和空气时, Z 就达到最大值, 称为饱和绝对湿度, 以 Z_{bh} 表示。 Z_{bh} 的值见附录一。

由于 Z 的数值 (即 γ_{zq} 的数值) 随 T 、 p_{zq} 而变, 因此, Z 的数值只说明湿空气中所含水蒸气量的多少, 而不能直接说明湿空气的干湿程度。例如, 若湿空气的绝对湿度 $Z = \gamma_{zq} = 17.2$ (克/米³), 这样的湿空气是较干燥还是较潮湿呢? 这要看湿空气的温度而定。如果湿空气的温度是 20℃, 则湿空气中的水蒸气含量已达最大值, 因 20℃ 时的饱和空气的饱和绝对湿度 Z_{bh} 的数值也为 17.2 (克/米³)。如果湿空气的温度是 40℃, 则含有 17.2 (克/米³) 的湿空气还很干燥, 因与 40℃ 相对应的饱和空气的饱和绝对湿度 Z_{bh} 的数值是 50.8 (克/米³)。由此可见, 绝对湿度相同的两种空气, 其干湿程度未必相同, 而必须在相同温度下, 才能比较空气的干湿程度, 这在应用上是不方便的。为方便比较空气的干湿程度, 常采用下面介绍的



湿空气	=	干空气	+	水蒸气
体积 V	=	V_g	=	V_{zq}
温度 T	=	T	=	T
压力 B	=	p_g	+	p_{zq}
重量 G	=	G_g	+	G_{zq}

图 1-4 湿空气、干空气、水蒸气三者间的体积、温度、压力和重量的关系

相对湿度。

2. 相对湿度

所谓相对湿度，就是未饱和空气的绝对湿度 Z 与同温下饱和空气的饱和绝对湿度 Z_{bh} 的比值，以 φ 表示，即：

$$\varphi = \frac{Z}{Z_{bh}} = \frac{\gamma_{zq}}{\gamma_{bh}} \quad (1-14)$$

由上式可以看出： φ 值越小， γ_{zq} 就比 γ_{bh} （饱和空气的重度）小得多，湿空气还能容纳水蒸气的能力就越大； φ 值越大，则 γ_{zq} 越接近于 γ_{bh} ，湿空气再吸收水蒸气的能力就越弱；当 $\varphi = 0$ 时，说明空气中没有水蒸气（全为干空气， $\gamma_{zq} = 0$ ）；当 $\varphi = 1$ 时，则 $\gamma_{zq} = \gamma_{bh}$ ，即为饱和空气。所以，相对湿度 φ 的大小，直接说明湿空气接近饱和状态的程度，故又称为饱和度。

若将 $\gamma_{zq} = \frac{p_{zq}}{R_{zq}T}$ 及 $\gamma_{bh} = \frac{p_{bh}}{R_{zq}T}$ 代入公式 (1-14)，得：

$$\varphi = \frac{\gamma_{zq}}{\gamma_{bh}} = \frac{p_{zq}}{p_{bh}} \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad \varphi = \frac{\gamma_{zq}}{\gamma_{bh}} \times 100\% = \frac{p_{zq}}{p_{bh}} \times 100\% \quad (1-16)$$

必须指出：若将湿空气在保持水蒸气含量不变（即 p_{zq} 不变）的情况下定压加热，使其温度由 t_1 升至 t_2 ，则湿空气的相对湿度 φ 将由 φ_1 降为 φ_2 ，这可从公式 (1-15) 得到解释：在加热过程中 p_{zq} 不变，而 p_{bh} 则增大了（它按加热后的温度 t_2 在水蒸气表中查得），因而 φ 值变小了。由于定压加热可降低湿空气的相对湿度，因而可提高湿空气吸收水蒸气的能力。至此，再次说明了干燥过程中为什么要提高干燥介质温度的原因。

(四) 含湿量

在干燥过程中，常需确定湿空气中的水蒸气量，并可用水蒸气的增量表示干燥过程中除去的水分。以什么方式来表达湿空气中的水蒸气量最方便呢？若用前面介绍的绝对湿度来表示，则温度变化时，空气的体积也随之变化，虽然其中的水蒸气绝对含量不变，但每 1 米³ 体积内含有的水蒸气量相应也变化了，绝对湿度的数值也就不同了。若用 1 公斤湿空气所含有的水蒸气量来表示，虽没有随空气温度变化的问题，但在干燥过程中，从谷物中蒸发的水蒸气不断进入空气，这样，不但使湿空气中的水蒸气含量不断变化，也使湿空气的总重量发生变化。所以，以湿空气的体积或重量为基准来表示湿空气中的水蒸气含量，都会给计算带来麻烦。由于湿空气在状态变化过程中，其中的干空气重量总是不变的，因此，为计算方便，下面以 1 公斤干空气为基准来计算湿空气中的水蒸气量。

在 1 公斤干空气中所含水蒸气的重量称湿空气的含湿量，以符号 d 表示。若在 G_g 公斤干空气中含有 G_{zq} 公斤（或 1000 G_{zq} 克）水蒸气量，则含湿量 d 为：

$$d = \frac{G_{zq}}{G_g} \times 1000 \text{ (克/公斤干空气)} \quad (1-17)$$

必须指出：1 公斤干空气与 1 公斤湿空气是不同的。例如，在 $\left(1 + \frac{d}{1000}\right)$ 公斤湿空气中，干空气的重量 = $\left(1 + \frac{d}{1000}\right) - \frac{d}{1000} = 1$ 公斤。

由于湿空气中的干空气与水蒸气在各自的分压力作用下具有和湿空气相同的体积 V 和温度 T ，故据理想气体状态方程式可得：

$$G_{zq} = \frac{p_{zq} V}{R_{zq} T} \quad (a)$$

$$G_g = \frac{p_g V}{R_g T} \quad (b)$$

将公式 (a)、(b) 代入公式 (1-17)，则

$$\begin{aligned} d &= 1000 \times \frac{G_{zq}}{G_g} = 1000 \times \frac{R_g}{R_{zq}} \times \frac{p_{zq}}{p_g} = 1000 \times \frac{29.3}{47.1} \times \frac{p_{zq}}{p_g} \\ &= 622 \frac{p_{zq}}{p_g} \quad (\text{克/公斤干空气}) \end{aligned} \quad (c)$$

因 $p_{zq} = \varphi p_{bh}$ 及 $p_g = B - p_{zq}$ ，因此，公式 (c) 又可变为：

$$d = 622 \frac{p_{zq}}{B - p_{zq}} = 622 \frac{\varphi p_{bh}}{B - \varphi p_{bh}} \quad (\text{克/公斤干空气}) \quad (1-18)$$

由上式可以看出：当大气压力 B 一定时，相应于每一个 p_{zq} ，就有确定的 d 值，故 p_{zq} 和 d 是同一性质的参数。

当空气达到饱和状态时，相应的含湿量达到该温度下的最大值，称饱和含湿量，以 d_{bh} 表示：

$$d_{bh} = 622 \frac{p_{bh}}{B - p_{bh}} \quad (\text{克/公斤干空气}) \quad (1-19)$$

在同温同压下， $d_{bh} > d$ ，两者之差 ($d_{bh} - d$) 显示了湿空气进一步容纳水蒸气的能力，因此，将“ $d_{bh} - d$ ”称为湿空气的湿容量。由公式 (1-19) 可以看出：降低 B 或增大 p_{bh} （即提高温度）都可使 d_{bh} 增大因而湿容量 ($d_{bh} - d$) 也增加。这就是说，提高干燥介质的温度或降低它的总压力都可以增大它的吸湿能力。初搞干燥的人常常提出这样的问题：鼓风与抽气相比，哪一种好？根据以上分析，就可以有根据地回答：若只考虑增大湿容量，则抽气比鼓风好。但是，影响干燥过程的因素很多，特别是当干燥设备的密封性能不好时，由于漏气，使抽气总量中有相当一部分是未通过被干燥物料的冷空气，因而影响了通过被干燥物料的风量，进而影响干燥效果。所以，鼓风还是抽气，需具体分析后才能选定，并在设计及制造工艺上加以保证。

(五) 比容与重度

1. 比容

每公斤气体所具有的体积（容积）称比容，以符号 v 表示。

但是，“每公斤气体”指的是每公斤湿空气还是每公斤干空气呢？如前所述，用湿空气的重量作为计算比容的基准是不方便的，因为在干燥过程中，湿空气不断吸收水蒸气，使湿空气的重量不断增加。因此，为使计算方便，和含湿量一样，仍以干空气的重量作为计算比容的基准，即以1公斤干空气所具有的湿空气体积作为湿空气的比容。现设在 V 米³湿空气中有 G_g 公斤干空气，则比容 v 为：

$$v = \frac{V}{G_g} \quad (\text{米}^3/\text{公斤干空气})$$

由于湿空气的体积 V 等于同温度的干空气在其分压力 p_g 作用下所具有的体积 V_g ，故上式可

改写为:

$$v = \frac{V}{G_g} = \frac{V_g}{G_g} = \frac{R_g T}{p_g} = \frac{R_g T}{B - p_{z,q}} \\ = 29.3 \frac{T}{B - p_{z,q}} \quad (\text{米}^3/\text{公斤干空气}) \quad (1-20)$$

式中的 B 是当地大气压, 单位是: “公斤力/米²”。

在干燥过程中, 较常遇到的情况是已知 d 而不是已知 $p_{z,q}$, 为此, 公式 (1-20) 可改成如下形式, 即:

先将公式 (1-18) 整理成:

$$p_{z,q} = \frac{Bd}{622 + d}$$

再将上式代入公式 (1-20), 并整理后可得:

$$v = 47.1 \frac{T}{B} \cdot \frac{622 + d}{1000} \quad (\text{米}^3/\text{公斤干空气}) \quad (1-21)$$

上式中 B 的单位仍为 “公斤力/米²”。当 B 的单位改用 “毫米汞柱” 时, 可根据 1 毫米汞柱等于 13.6 公斤力/米² 的关系, 将上式改为:

$$v = 3.46 \frac{T}{B} \cdot \frac{622 + d}{1000} \quad (\text{米}^3/\text{公斤干空气}) \quad (1-22)$$

由公式 (1-21) 及 (1-22) 可以看出: 在一定的大气压力 B 下, v 由 T 与 d 决定, 故 v 是一个独立的状态参数。在确定干燥过程的风量时, 要用到这个参数。

2. 重度

1 米³ 湿空气的重量称湿空气的重度 (又称容重), 以符号 γ 表示, 其数值等于 1 米³ 湿空气中的干空气与水蒸气重量的总和, 即:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{G_g}{V} + \frac{G_{z,q}}{V} = \frac{p_g}{R_g T} + \frac{p_{z,q}}{R_{z,q} T} = \frac{B - p_{z,q}}{R_g T} + \frac{p_{z,q}}{R_{z,q} T} \\ = \frac{B}{R_g T} \left[1 - \frac{p_{z,q}}{B} \left(1 - \frac{R_g}{R_{z,q}} \right) \right] \quad (a)$$

上式中的 $p_{z,q}$ 可由公式 (1-18) 求得:

$$p_{z,q} = \frac{Bd}{622 + d} \quad (b)$$

将公式 (b) 及 $R_g = 29.3$ 、 $R_{z,q} = 47.1$ 代入公式 (a), 并整理后可得:

$$\gamma = 0.03413 \frac{B}{T} \left(1 - 0.378 \frac{d}{622 + d} \right) \\ = 0.02123 \frac{B}{T} \cdot \frac{1000 + d}{622 + d} \quad (\text{公斤/米}^3 \text{湿空气}) \quad (1-23)$$

公式 (1-23) 中 B 的单位是 “公斤力/米²”。若 B 的单位改用毫米汞柱, 则公式 (1-23) 改为:

$$\gamma = 0.464 \frac{B}{T} \left(1 - 0.378 \frac{d}{622 + d} \right) \\ = 0.289 \frac{B}{T} \cdot \frac{1000 + d}{622 + d} \quad (\text{公斤/米}^3 \text{湿空气}) \quad (1-24)$$

在公式 (1-24) 中, 当 $d = 0$, 即为干空气的重度 γ_g :

$$\gamma_g = 0.464 \frac{B}{T} \quad (1-25)$$

在标准大气压下, 即当 $B = 760$ 毫米汞柱的时候, 干空气的重度 $\gamma_g = 0.464 \frac{760}{T} = \frac{353}{T}$ 。

对比公式 (1-24) 与 (1-25) 可以看出: 由于公式 (1-24) 圆括号内的数值必小于 1, 故有:

$$\gamma < \gamma_g$$

这就是说, 湿空气比干空气轻。这个结论对干燥过程及粮仓设计非常重要: 为及时排除谷物蒸发出来的水蒸气, 对于自然通风的设备, 应将排气口设置在顶部或尽可能靠近顶部, 否则, 比干空气轻的湿空气将浮集在顶部, 并逐渐变为饱和空气而析出水滴, 此水滴重新滴在谷物上, 影响干燥效果或使谷物变质。

(六) 焓

焓是一个复合的状态参数。在热工学中已经证明, 若气体状态变化是在定压过程中进行, 则过程前后气体的热量变化等于气体的焓差。在干燥过程中, 湿空气的状态变化可看作定压过程, 故可用焓差来表示湿空气状态变化过程前后的热量变化。

湿空气的焓也是以 1 公斤干空气作为计算基准, 即 $t^\circ\text{C}$ 时 1 公斤干空气所具有的湿空气 (其重量 = $1 + \frac{d}{1000}$ 公斤) 的焓等于 1 公斤干空气的焓与 $\frac{d}{1000}$ 公斤水蒸气的焓之和, 以 I 表示:

$$I = i_{g,t} + \frac{d}{1000} i_{z,g,t} \quad (\text{千卡/公斤干空气}) \quad (1-26)$$

式中 $i_{g,t}$ —— $t^\circ\text{C}$ 时 1 公斤干空气的焓 (千卡/公斤干空气);

$i_{z,g,t}$ —— $t^\circ\text{C}$ 时 1 公斤过热水蒸气的焓 (千卡/公斤水蒸气)。

然而, $i_{g,t}$ 及 $i_{z,g,t}$ 的值又如何确定呢? 如上所述, 过程前后气体的热量变化可用气体的焓差 (焓的增加或减小) 来表示, 这就是说, 焓的绝对值是无关紧要的, 要紧的是焓的相对值 (焓差)。这和“温度”这个概念是一样的: 所谓多少度, 都是相对于某一选定的零值而言的。据此, 可人为地选定 0°C 的干空气及水的焓值等于零, 大于 0°C 的为正值, 小于 0°C 的为负值。这样, $t^\circ\text{C}$ 的干空气的焓 $i_{g,t}$ 可用下式表示:

$$i_{g,t} = i_{g,0} + 0.24 (t - 0) = 0.24 t \quad (\text{千卡/公斤干空气}) \quad (1-27)$$

式中 $i_{g,0}$ —— 干空气在 0°C 的焓, $i_{g,0} = 0$;

0.24 —— 干空气的定压重量比热, (千卡/公斤干空气 $^\circ\text{C}$);

t —— 干空气温度 ($^\circ\text{C}$)。

同理, 过热水蒸气在 $t^\circ\text{C}$ 的焓 $i_{z,g,t}$ 可用下式表示:

$$i_{z,g,t} = i_{z,0} + 595 + 0.47 (t - 0) = 595 + 0.47 t \quad (\text{千卡/公斤水蒸气}) \quad (1-28)$$

式中 $i_{z,0}$ —— 水在 0°C 的焓, $i_{z,0} = 0$;

595 —— 0°C 的水变成饱和水蒸气时所吸收的汽化潜热 (千卡/公斤水蒸气);

0.47 —— 过热水蒸气的定压重量比热 (千卡/公斤水蒸气 $^\circ\text{C}$);

t —— 过热水蒸气的温度 ($^\circ\text{C}$), 其数值等于干空气的温度。

将公式 (1-27) 及 (1-28) 代入公式 (1-26), 则得 $t^\circ\text{C}$ 时以 1 公斤干空气为基准的湿空气的焓 I :

$$\begin{aligned}
 I &= 0.24t + (595 + 0.47t) \frac{d}{1000} = \left(0.24 + 0.47 \frac{d}{1000}\right)t + 595 \frac{d}{1000} \\
 &= ct + 595 \frac{d}{1000} \quad (\text{千卡/公斤干空气})
 \end{aligned}
 \quad (1-29)$$

式中 c ——湿空气的定压重量比热,

$$c = 0.24 + 0.47 \frac{d}{1000} \quad (\text{千卡/公斤湿空气}^\circ\text{C}).$$

由公式 (1-29) 可以看出, 湿空气的焓由两部分组成: 一部分 (ct) 是干空气与过热水蒸气的显热, 它是湿空气从 0°C 加热到 $t^\circ\text{C}$ 所需的热量; 另一部分 $\left(595 \frac{d}{1000}\right)$ 是水蒸气的汽化潜热。在干燥过程中, 只能利用湿空气温度降低时所放出的部分显热, 至于水蒸气的潜热, 是不能直接利用的。这是因为, 只有当湿空气的温度降至露点之下时 (即湿空气变成过饱和状态时), 水蒸气才会凝结成水, 放出潜热。在干燥过程中是不允许产生“凝结成水”或使空气达到饱和状态的现象的。

由公式 (1-28) 还可看出: 当 t 、 d 一定时, 则 I 亦随之而定。所以, I 是一个独立的状态参数。

(七) 干球与湿球温度

在干燥过程中, 常用干、湿球温度计测量湿空气的相对湿度。

干、湿球温度计是由两支相同的水银温度计组成, 如图 1-5 所示。其中一支的水银球用纱布包起来, 并将纱布的下端浸在有水的容器中, 利用纱布的毛细管作用使水银球表面的纱布经常处于湿润状态, 这样的水银球称为湿球, 这支温度计称为湿球温度计, 它所测的温度称湿球温度。另一支水银温度计的水银球上不包什么东西, 称干球温度计, 它可直接测出空气的一般温度, 称干球温度。在一般情况下, 湿球温度 t_w 低于干球温度 t 。为什么两支温度计的读数不相同呢?

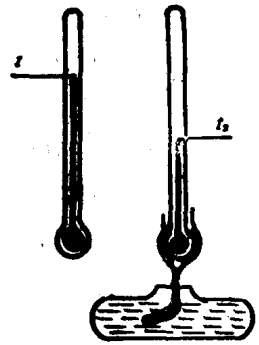


图 1-5 干湿球温度计

所谓湿球温度, 实际上就是湿球纱布中水的温度。假设开始时湿空气的温度与水温相等, 此时, 若湿空气处在饱和状态, 湿纱布上的水就不会蒸发, 两支温度计的读数也相等。若湿空气尚未达到饱和 ($\varphi < 100\%$), 就有吸收水蒸气的能力, 从而使纱布中的水分有蒸发的机会。而水分蒸发需要热量, 此热量首先从水本身吸取, 使水温下降, 形成湿纱布的水与周围空气的温差。由于有温差, 周围空气就要向湿纱布中的水传热。温差越大, 周围空气向水传热越快。当水温降到某一温度时, 空气传给水的热量正好等于水分蒸发所需要的热量。此时, 水分蒸发所需热量全靠空气传给, 无需再从水本身吸热, 因而水温不再下降。这个“不再下降”时的湿纱布的水温, 就是湿球温度 t_w 。湿空气的相对湿度 φ 越小, 吸收水蒸气的能力越强, 湿纱布中的水分蒸发越快, 湿球温度就越低。因此, 可用干湿球温度计来确定湿空气的相对湿度。下面分析它们之间的具体关系。

当湿球温度计的读数稳定时 (即达到湿球温度时), 周围空气传给湿纱布中的水的热量 Q 应等于水蒸发所需的热量 Q_{ev} , 即

$$Q = Q_{ev} \quad (1-30)$$

根据传热原理, 周围空气传给水的热量 Q 可用下式表示,