

谷物干燥基础理论讲义

广东省农机研究所

1981年10月

一九八〇年八月——九月在我所举办“全国谷物干燥基础理论短训班”期间，根据华南农学院刘道被老师，南京粮食学校王立老师，四川粮食学校张安云老师提供的讲稿内容，汇编成这一本《谷物干燥基础理论讲义》，仅供有关专业人员参考，如有差错，请予指正。

广东省农机研究所

一九八一年十月

目 录

第一章 传热学基本知识	(1)
第一节 稳定导热	(1)
第二节 对流换热	(3)
第三节 热辐射	(7)
第二章 干燥介质	(11)
第一节 气体的热力性质及热量计算	(11)
第二节 湿空气的基本性质	(24)
第三节 湿空气的I—d图	(29)
第四节 I—d图的应用	(33)
第五节 烟道气和空气的混合气体特性	(39)
第三章 粮食干燥基本原理	(46)
第一节 粮食的水份、比热、导热性和导温性	(46)
第二节 粮食干燥机理	(51)
第三节 粮食的干燥曲线及干燥速度曲线	(55)
第四节 粮食热力干燥条件	(57)
第四章 粮食干燥设备的基本计算	(60)
第一节 干燥室的物料衡算	(60)
第二节 干燥介质消耗量的计算	(61)
第三节 热量消耗量的计算	(61)
第四节 干燥过程的计算	(65)
第五节 粮食干燥设备与炉气的制备输送	(68)

第一章 传热学基本知识

哪里有温差存在，那里就有热量转移现象发生——热量总是由高温物体传到低温物体。传热学就是研究热量转移（传递）规律的一门科学。

学习传热学的目的是掌握传热过程的规律，熟悉控制传热（包括增强传热与减弱传热）过程的方法。

传热是一个复杂的过程。为便于分析研究，一般把传热划分为三种基本形式：导热、对流换热和热辐射。

导热是指物质各部分没有相对位移，只通过冷热部分的直接接触而发生的热交换现象。

流动的流体和固体表面接触时，流体和固体之间的热交换现象称对流换热，简称放热。

热辐射是一种以电磁波的形式来传播热量的现象。如太阳能传到地面，就是以热辐射的方式进行。

实际的传热过程往往是上述三种基本形式的综合，例如，锅炉内的烟气传热给管内流动的水时，首先是烟气以对流与辐射换热的方式将热传给管壁的外表面，然后以导热方式传过管壁，最后管壁的内表面再以对流的方式传给水。这种热流体将热量经间壁传给冷流体的现象称传热。

由于传热学的参考书较多，这里仅介绍有关基本概念及其计算公式，不作详细推导。

第一节 稳定导热

当热量从固体的一侧传到另一侧时，在固体内部进行的传热过程是一种纯粹导热过程。这里仅介绍温度不随时间而变化的稳定导热。

一、平壁的导热

如图 1—1 所示，设平壁的表面积为 F 米²，厚度为 δ 米，平壁一侧的温度均为 t_1 ，另一侧的温度均为 t_2 ， t_1 、 t_2 均不随时间而变化，而 $t_1 > t_2$ ，则导过平壁的热量 Q 与面积 F ，温差 $\Delta t = t_1 - t_2$ 及导热所进行的时间 τ 成正比，而与壁厚 δ 成反比，即

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} F \tau = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} F \tau \text{ 大卡} \quad (1-1)$$

$$\text{或 } q = \frac{Q}{F \tau} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-2)$$

式中：q ——称热流量，即单位时间内通过单位等温面（物体内温度相同的面）的热量。

λ ——导热系数，单位为“大卡/米·时·℃”，其数值等于每小时每平方米面积上，每米厚度的温差为1℃时的导热热量。

导热系数是表明物体导热能力大小的热物性参数，它与物质的结构、重度（或容量）、温度、湿度、压力等因素有关。对于同一材料，随着重度、温度、湿度、压力的升高，其导热系数一般也会增大。表1—1中列出了常用材料的导热系数。

从表1—1可以看出，金属的导热系数较大，而气体有较小的导热系数，这就是多孔性材料的导热系数较小，有空气层的墙保温性较好的原因。

式（1—2）可以改写成如下形式：

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{R} \tag{1-3}$$

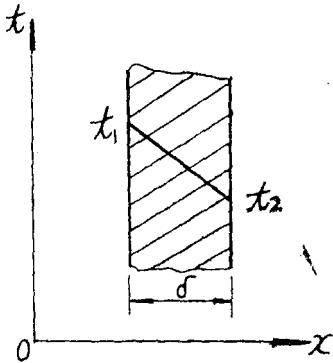


图 1—1

表 1—1 几种常用材料的导热系数

材 料 名 称	λ (大卡/米·时·℃)	材 料 名 称	λ (大卡/米·时·℃)
水蒸汽	0.01~0.08	玻 璃	0.6~0.9
空 气	0.02~0.067	石灰泥	0.6~1.0
水	0.47~0.59	松木（垂直木纹）	0.15
石 棉	0.08~0.10	松木（顺木纹）	0.30
玻璃纤维	0.03~0.04	银	350~360
泡沫塑料	0.02~0.04	铜	300~340
矿渣棉	0.04~0.05	铝	180~200
软木板	0.04~0.08	黄 铜	80~100
硅藻土	~0.15	钢·生铁	40~50
耐火砖	0.9~1.2	合金钢	15~30
红 砖	0.5~0.7	锅炉水垢	0.5~2.0
混凝土	0.7~1.1	烟 渣	0.05~0.10

式（1—3）与电学中的欧姆定律 $I = \frac{V}{R}$ 相似；热流量q相当于电流I；温度差（也叫温压） Δt 相当于电压v；而 $R = \frac{\delta}{\lambda}$ 则相应于电阻r。因此，将R称为“热阻”。

引进热阻的概念后，则通过三层壁（图1—2）的热流量q为：

$$q = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_1 + R_3} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时}$$

$$\text{式中: } R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

$$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}$$

若为更多层, 例如为n层时, 则

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{n} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-4)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

式中: δ_i ——第i层壁的厚度, 米。

λ_i ——第i层壁的导热系数, 大卡/米·时·°C

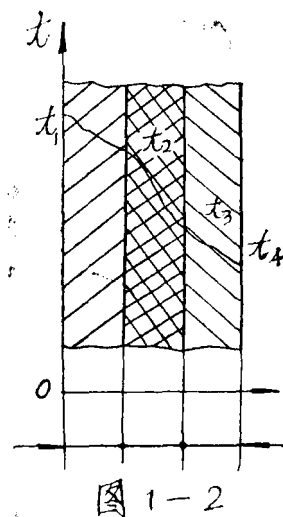


图 1-2

二、圆筒壁的导热

设一单层圆筒壁长为l, 内径为 d_1 , 外径为 d_2 , 内壁温度为 t_1 , 外壁温度为 t_2 , 且 $t_1 > t_2$, 则通过每米管长的热流量 q_l 为:

$$q_l = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{\Delta t}{R_l} \text{ 大卡/米} \cdot \text{时} \quad (1-5)$$

式中: R_l ——圆筒壁的热阻

$$R_l = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \text{ 米} \cdot \text{时} \cdot \text{°C/大卡}$$

当 $t_1 < t_2$ 时, 按式(1-5)计算的 q_l 将为负值, 说明热量由外表面传到内表面。

如果是多层圆筒壁, 则

$$q_l = \frac{t_1 - t_{n+1}}{n} \text{ 大卡/米} \cdot \text{时} \quad (1-6)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$$

第二节 对 流 换 热

流体与固体壁的对流换热, 是一个很复杂的换热过程。对流换热的强度, 不仅与流体的物理性质有关, 也与流体的运动性质, 运动速度及固体壁面形状大小等很多因素有关。

根据运动的原因, 流体的运动可分为“受迫运动”与“自由运动”。受迫运动是由机械力(如水泵、风机)的作用引起的; 自由运动是由于流体冷、热各部分的密度不同

所产生的“浮升力”引起的。

根据运动的性质，流体的运动可分为层流与湍流两种。由于流体总有粘性，因此，流体的运动速度在同一剖面上是不均匀的。层流时，流体平行于壁面的方向分层地流动，不会发生这一层的流体跑到另一层里去的现象，其流速按抛物线分布（图 1—3）。湍流时，流体的运动是不规则的，其内部不断发生扰动和混合，因而速度比较均匀（图 1—4）。但是，在靠近壁面处的流速很小，可看作是层流，这很薄的一层，称层流边界层。根据雷诺的实验，流体在管内的运动性质决定于“雷诺数” Re ：

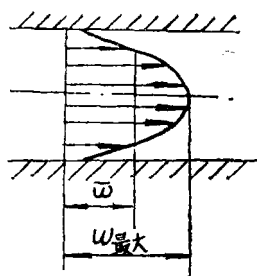


图 1—3

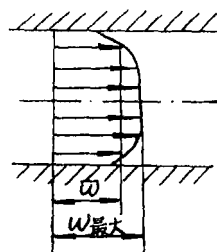


图 1—4

$$Re = \frac{\omega l \rho}{\mu}$$

式中： ω ——流体流动速度 米/秒；

l ——流道的定型尺寸，米（若为圆管，则取管径 d ）；

ρ ——流体的密度，即单位容积内流体的质量，它与重度 γ 、重力加速度 g 的关系是：

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4;$$

μ ——流体的粘度，公斤·秒/米²。

当 $Re < 2300$ 时，管内流体的流动为层流；当 $Re > 10000$ 时，为湍流； $Re = 2300 \sim 10000$ 之间为过渡阶段。 Re 是一个无因次的数。

层流时，换热主要靠流体本身的导热，而流体的导热系数较小，热阻较大，故换热速度较慢。湍流时，流体的主流部分混扰厉害，层流边界层很薄，因而热阻小，换热速度快。由于影响对流换热的因素很多，要求出对流换热的热量是比较困难的。牛顿提出下列计算换热量的公式。

$$Q = \alpha (t_{\text{流}} - t_{\text{壁}}) F \text{ 大卡/时} \quad (1-7)$$

$$\text{或 } q = \frac{Q}{F} = \alpha (t_{\text{流}} - t_{\text{壁}}) = \frac{t_{\text{流}} - t_{\text{壁}}}{\frac{1}{\alpha}} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-8)$$

式中： $t_{\text{流}}$ ——流体的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{\text{壁}}$ ——壁面的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

F ——换热面积，米²；

α ——放热系数，大卡/米²·时·℃；

$1/\alpha$ ——热阻，米²·时℃/大卡。

上述公式看来很简单，实际上并不简单，只不过把一切复杂的问题都集中在放热系数 α 这个量上。 α 的计算公式是在实验的基础上整理出来的。 α 的数值范围变化很大，表1—2是一些工业用换热器中放热系数的大致范围，供估计或核对计算结果时参考。

表 1—2 放 热 系 数 α

换 热 情 况	α （大卡/米 ² ·时℃）
空气自由运动时	5~30
空气在管内受迫运动时	10~100
蒸气在管内受迫运动时	100~2000
水在管内受迫运动时	500~10000
水 沸 腾 时	2000~10000
水蒸汽的膜状凝结时	4000~15000
水蒸汽的珠状凝结时	40000~120000

一、流体自由运动时的放热

若在空气中放有热的管道或热壁，则其周围的空气受热后因密度减小而向上运动（自由运动，亦称自然对流）。流体自由运动的放热（又称自然对流放热）强度主要取决于壁面温度 $t_{\text{壁}}$ 及壁面温度与流体温度 $t_{\text{流}}$ 之差。当 $t_{\text{壁}}$ 越高，温差 $t_{\text{壁}} - t_{\text{流}}$ 越大，则放热愈强烈。在实验基础上，整理出计算放热系数 α 的公式如下：

$$N_u = C (G_r \cdot P_r)^n \quad (1-9)$$

式中： $N_u = \frac{\alpha l}{\lambda}$ ，称努谢尔特准则，它是反映对流换热强度的准则；

$G_r = \frac{l^3 g \beta \Delta t}{\nu^2}$ ，称格晓夫准则，它是反映流体自由运动流态的准则；

$P_r = \frac{\nu}{a}$ ，称普朗特准则，它是反映流体物性的准则。

l ——对放热起主要影响的壁面几何尺寸，称定型尺寸，米；

β ——流体的容积膨胀系数。对于气体 $\beta = \frac{1}{T}$ ，（ T 为绝对温度）1/℃；

Δt ——温差， $\Delta t = t_{\text{壁}} - t_{\text{流}}$ ，℃；

g ——重力加速度，米/秒²；

ν ——流体的运动粘度， $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，米²/秒；

a ——流体的导温系数， $a = \frac{\lambda}{C_p \gamma}$ 米²/时；

γ ——流体的重度，公斤/米³；

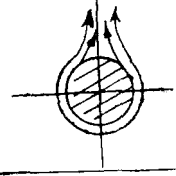
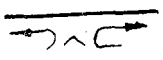
C_p ——流体的定压重量比热，大卡/公斤℃；

m ——表示计算式（1—9）中各物理参数时，应以平均温度 $t_m = \frac{t_{\text{壁}} + t_{\text{流}}}{2}$ 为准。

这种温度称定性温度。

C 、 n ——常数，由表 1—3 选取。

表 1—3 式（1—9）中的常数 C 及 n 值

表面形状 及位置	流 动 情 况 示 意	C · n 值			定型尺寸 l (米)	适 应 范 围 $G_r \cdot P_r$
		流态	C	n		
垂直平壁 及 垂直圆柱		层流	0.59	$\frac{1}{4}$	高 度 h	$10^4 \sim 10^9$
		湍流	0.12	$\frac{1}{3}$		$10^9 \sim 10^{12}$
水 平 圆 柱		层流	0.53	$\frac{1}{4}$	圆柱外径 d	$10^4 \sim 10^9$
		湍流	0.13	$\frac{1}{3}$		$10^9 \sim 10^{12}$
热面朝上 的水平壁		层流	0.54	$\frac{1}{4}$	矩形取两边 长的平均值 圆盘取 0.9d	$10^5 \sim 2 \times 10^7$
		湍流	0.14	$\frac{1}{3}$		$2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$
热面朝下 的水平壁		层流	0.27	$\frac{1}{4}$	同 上	$3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^{14}$

二、流体在管内受迫运动时的放热

（一）层流时的放热

管内流体流动在 $Re < 2300$ 时为层流，其放热系数 α 可用下式计算：

$$Nu = 0.15 Re^{0.33} Pr^{0.43} G_r^{0.1} \left(\frac{P_r}{P_{r\text{壁}}} \right)^{0.25} \quad (1-10)$$

上式应用条件：

1. 适用于 $\frac{L}{d} > 50$ 的长管（ L —管的长度）；
 2. 定型尺寸取管子直径 d ；
 3. 定性温度取流体的平均温度 $t_{\text{流}}$ ；但 $P_{\text{壁}}$ 则以壁温 $t_{\text{壁}}$ 作为定性温度。
- 对于非圆形管，用当量直径 $d_{\text{当}}$ 后仍可用上式。

$$d_{\text{当}} = \frac{4f}{U} \quad (1-11)$$

式中：f——流道断面积，米²

U——被流体润湿的流道周边，米。

当管长L小于50d时，按式(1-10)计算的 α 应乘上长度校正系数 ϵ_c （由图1-5查之）。

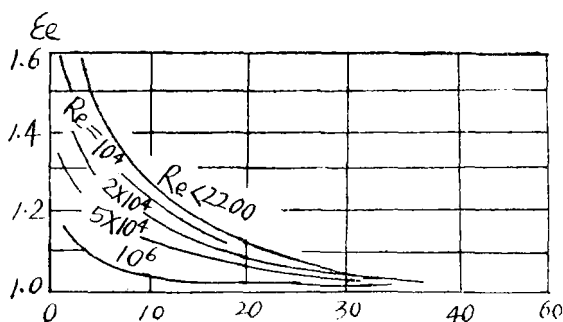


图 1-5

(二) 湍流时放热

湍流时，可用下式计算放热系数：

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{壁}}} \right)^{0.14} \quad (1-12)$$

上式应用条件：

1. 适应于 $P_r = 0.6 \sim 17000$ ， $R_e > 10^4$ 的情况；

2. 定型尺寸取管子直径d。若非圆管，则取当量直径 $d_{\text{当}} = \frac{4f}{U}$ ；

3. 定性温度取流体的平均温度 $t_{\text{流}}$ ，但其中的 $\mu_{\text{壁}}$ 则以壁温为准（壁温下的动粘度）。对于长度小于50d的短管，按式(1-12)计算的 α 应乘上修正系数 ϵ_c （仍在图1-5中查之）。

(三) 流体横向流过管簇时的放热（略）

第三节 热 辐 射

前两节介绍的导热及对流换热，都是在物体（固体或流体）互相接触的情况进行的，而两物体间的辐射换热则不需要直接接触。

任何物体，只要它的温度高于绝对零度（ $t > -273^\circ\text{C}$ ），就都具有放射辐射能的能力，其辐射量为物体温度的函数。当一物体的辐射能Q投射到另一物体时（图1-6），被吸收了 Q_A ，反射了 Q_R ，透过了 Q_D ，且有

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

$$\text{或 } \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = A + R + D = 1$$

式中 $A = \frac{Q_A}{Q}$ 称吸收率, $R = \frac{Q_R}{Q}$ 称反射率,

$D = \frac{Q_D}{Q}$ 称透过率。

当 $A = 1$, 则 $R = 0$, $D = 0$, 说明投射到物体上的辐射能全部被吸收了, 这种物体称为“绝对黑体”或“黑体”。工程上不存在真正的绝对黑体, 大部分物体的吸收率都小于 1。

对于一般的固体和液体, 实际上不能透过辐射能, 即 $D = 0$, 此时

$$A + R = 1$$

上式说明: 凡善于吸收的物体, 就不能很好地反射; 反之, 如物体善于反射, 则它的吸收能力一定很差。

任何物体在单位时间内从单位表面积上辐射出去的辐射能, 称为辐射力, 以符号 E 表示, 其大小与物体的性质、表面状况及温度有关。物体的辐射力 E , 斯蒂芬——波尔兹曼确定出下列关系式:

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-13)$$

式中: T ——物体的绝对温度, $^{\circ}\text{K}$;

C ——辐射系数, $\text{大卡/米}^2 \cdot \text{时} (^{\circ}\text{K})^4$ 。 C 的数值取决于物体的特性、表面情况和温度, 对于绝对黑体, $C = 4.96 \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} (^{\circ}\text{K})^4$, 常以 C_0 来表示。对于其他物体 $C < C_0$ 。

由式 (1-13) 可知, 在相同温度下, 物体的辐射力以黑体为最大。将 C 与 C_0 比较, $\frac{C}{C_0} = \varepsilon$, 就得到表征物体的另一特性, 并称 ε 为黑度。当 $\varepsilon = 1$ 时, 则为绝对黑体, 其他物体的 $\varepsilon < 1$, 称灰体。

灰体的黑度 ε 在数值上等于它的吸收率 A , 即 $\varepsilon = A$ 。这就是说, 物体的吸收能力越强, 其辐射能力也越大。几种材料的黑度见表 1-4

表 1-4 几种材料的黑度

材 料 名 称	黑 度 ε
磨 光 的 钢 铸 件	0.52~0.56
生 锈 的 铁 板	0.685
镀 锌 铁 皮	0.23
抛 光 的 铝	0.052
粗 糙 红 砖	0.93
混 凝 土	0.63
耐 火 砖	0.71~0.85

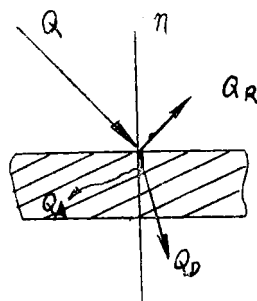


图 1-6

工业上常见的辐射换热，为两固体间的相互辐射，辐射换热计算较复杂，它与两物面的吸收率、反射率、形状、大小及两者间的距离和相互位置都有关系。

一、两平行平壁间的辐射换热

如图 1—7 所示，两平行平壁间的辐射换热可用下式计算：

$$q = A_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-14)$$

式中： A_n —相当吸收率，可用下式计算：

$$A_n = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}$$

C_0 —黑体的辐射系数 = 4.96 大卡/米²·时(°K)⁴

T_1 —较热物体的温度，°K

T_2 —较冷物体的温度，°K

A_1 —较热物体的吸收率

A_2 —较冷物体的吸收率

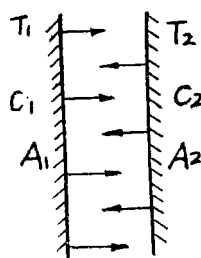


图 1-7

二、密闭空间内的物体与周围壁之间的辐射换热

如图 1—8 所示，小物体被大物体包围，它们之间的辐射换热可用下式计算：

$$Q = A_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 \text{大卡/时} \quad (1-15)$$

$$\text{或 } q = \frac{Q}{F} = A_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{大卡/米}^2 \cdot \text{时}$$

$$\text{式中： } A_n = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right)}$$

称 A_n 为相当吸收率。

T_1 、 T_2 分别为被包围及外围物体的温度，°K。

F_1 、 F_2 分别为被包围及外围物体的辐射面积，米²。

A_1 、 A_2 分别为被包围及外围物体的吸收率。

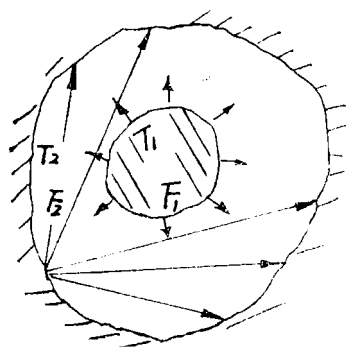


图 1-8

第四节 传热概说

当热流体(温度为 t_1) 通过固体壁传热给冷流体(温度为 t_2) 时，其热流量 q 可用下式计算：

$$q = K(t_1 - t_2) \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-16)$$

式中的K称传热系数,单位是“大卡/米²·时℃”,若引入热阻概念,则传热系数K为热阻R的倒数,即:

$$K = \frac{1}{R}, \quad q = K(t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

在传热过程中,热流体到固体壁的热阻

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} \quad (\because q = \alpha_1 \Delta t = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha_1}} = \frac{\Delta t}{R_1},$$

$$\therefore R_1 = \frac{1}{\alpha_1}), \text{ 固体壁的热阻 } R_2 = \frac{\delta}{\lambda}, \text{ 从固}$$

体壁的另一侧到冷流体的热阻

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_2}. \text{ 总热阻应等于各热阻之和, 即:}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$\text{因此, } K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-17)$$

若为多层平壁, 则

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-18)$$

若为圆筒壁, 则每米管长的热流量q为 $q_s = k_c(t_1 - t_2)$ 大卡/米·时 (1-19)
式中, k_c 为每米管长的传热系数:

$$k_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2}} \text{ 大卡/米} \cdot \text{时} \cdot \text{℃} \quad (1-20)$$

必须指出, 在对流换热的同时, 总伴随着辐射换热。因此, 上述公式中的放热系数 α_1 或 α_2 应包括辐射换热和对流换热两个方面, 即 $\alpha = \alpha_{\text{对流}} + \alpha_{\text{辐射}}$ (1-21)
式中: $\alpha_{\text{对流}}$ ——对流换热的放热系数, 按对流换热公式计算之。

$\alpha_{\text{辐射}}$ ——辐射换热的放热系数,

$$\alpha_{\text{辐射}} = \frac{A_n C_o \left[\left(\frac{T_{\text{流}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{壁}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{流}} - T_{\text{壁}}} \quad (1-22)$$

由于传热系数的计算很麻烦, 因而传热计算十分费时。为简化计算, 在要求不很精确时, 可从有关手册选取传热系数的数值。

根据传热系数K的公式, 可以找出增强传热或减弱传热的方法: 增强传热时, 应设法减小热阻, 特别是设法减小各项热阻中最大的那一项; 减弱传热时(如要求保温时), 应设法增大热阻。

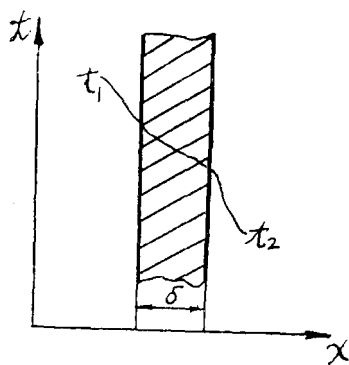


图 1-9

第二章 干燥介质

在谷物干燥过程中，为使谷物不断地干燥，必须用一种能容纳水蒸汽的物质将谷物中蒸发的水分及时带走。这种起载湿体作用的物质称干燥介质(或称工质)。常用的干燥介质有空气及炉气(烟道气空气混合气体)。在对流热力干燥中，加热谷物和使谷物中水分汽化所需的热能全靠干燥介质以对流换热的方式传给谷物，此时，干燥介质不仅是载湿体，而且还是载热体。由此可见，干燥介质在干燥过程中是不可缺少的，而干燥介质的状态如何，将直接影响干燥过程。因此，在未研究具体的干燥过程之前，首先了解干燥介质的基本特性是十分必要的。

作为干燥介质的空气或炉气，是由于气体与水蒸汽组成的混合气体。为叙述方便，下面先介绍干气体的热力性质，在此基础上再介绍由于气体与水蒸汽组成的混合气体——湿气体的热力性质。此外，湿空气的焓——湿图对干燥过程的分析与计算很有用处，因此，在本教材的第三节里将介绍该图的绘制原理及应用。

第一节 气体的热力性质及热量计算

一、气体的状态参数

在这一节里，干气体简称为气体。

气体的状态是通过说明状态特性的各物理量来表示的，这些物理量称为状态参数。

常用的状态参数有温度、压力、比容(或重度)、内能、焓、熵等六个参数。其中，温度、压力、比容三个参数可直接或间接地用仪器测量出来，属基本参数；而内能、焓、熵三个参数是由基本参数导出的，故称导出参数。

对应于气体的每一个状态，各状态参数都有一定的数值。状态参数的全部或一部分发生变化，气体的状态也相应地发生了变化。由此可见：状态参数确定后，气体的状态也就确定了。下面，分别介绍三个基本参数，至于三个导出参数，则仅介绍干燥中常用的焓(见第二节)。

(一) 温度

温度是标志物体冷热程度的参数。温度高表示较热的状态，温度低表示较冷的状态。若用分子运动学说来解释，则：温度愈高，分子热运动愈强烈，即分子热运动的平均速度愈大，反之，温度愈低，分子热运动的平均速度愈小。

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($^{\circ}\text{C}$)与绝对温标($^{\circ}\text{K}$)。

摄氏温标(又称百度温标)规定：在1标准大气压下，纯水的冰点为 0°C ，纯水的

沸点为100℃。在0℃与100℃之间划分为100等分，每一等分就是摄氏温标1℃。

绝对温标每1°K与摄氏温标每1℃在数值上完全相等。在1标准大气压下，纯水的冰点为273.16°K（工程上取273°K已足够准确），沸点为373.16°K。

两种温标的关系为：

$$T = t + 273.16 \quad (2-1)$$

式中：T——绝对温标°K

t——摄氏温标℃

此外，英、美等国还习惯采用华氏温标（°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和212°F。摄氏温标与华氏温标（其符号亦用t）的关系如下：

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (t^{\circ}\text{F} - 32) \quad (2-2)$$

（二）压力

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，而压力的方向总是垂直于容器内壁。

1. 压力的单位

压力的单位常用的有三种：

（1）用单位面积的作用力表示

单位面积上所受到的垂直作用力称压力，以符号p表示，即：

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

式中：P——作用于容器壁的总压力；

f——容器壁的总面积。

根据上式可知：若力的单位用“公斤”，面积的单位用“米²”，则压力的单位为“公斤/米²”。因为这个单位太小，工程上常以“公斤/厘米²”作为压力的单位，其关系为：

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

英、美等国以“磅/英寸²”作为压力单位。

$$1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 14.21 \text{ 磅/英寸}^2$$

（2）用液柱高度表示

在测定风道中的气体压力或压力差时，常用里面盛有水或水银的U型压力计，以液柱的高度表示压力的大小。

如图2—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。

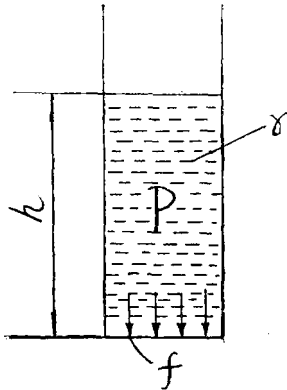


图 2—1

液柱对容器底的压力 p 为

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

上式可变为:

$$h = \frac{p}{\gamma} \quad (2-3)$$

根据上式, 就可将压力换算成相应的液柱高度。例如, 已知水的重度为 1000 公斤/米³, 水银的重度为 13595 公斤/米³, 则与 $p = 1$ 公斤/厘米² 相对应的液柱高度为:

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

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

由此得出:

$$1 \text{ 米水柱} = 1000 \text{ 公斤/米}^2$$

$$1 \text{ 毫米水柱} = 1 \text{ 公斤/米}^2$$

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

(3) 用气压表示

在高压容器中, 容器的压力很高, 压力单位不宜用液柱高度表示, 而改用气压表示。

工程上规定 1 公斤/厘米² 的压力为 1 工程气压, 简称气压, 即:

$$1 \text{ 气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ = 10000 \text{ 毫米水柱} \\ = 735.6 \text{ 毫米汞柱}$$

2. 大气压力、标准大气压

地球表面有几百公里厚的大气层, 大气的重量对地球表面的压力称大气压力, 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。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, 或称物理大气压, 其值为 760 毫米汞柱 (0℃)。它与其他压力单位的关系是:

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

3. 表压力、真空度、绝对压力

由于压力表或真空表本身处在大气压力的作用之下, 因此, 用压力表或真空表所测得的压力不是容器内气体的真正压力 (即绝对压力), 而是绝对压力和当时当地的大气压力 B 的差。

当容器内的气体的绝对压力 p 高于大气压力 B 时 (图 2-2), 压力表所指示的压力 $p_{\text{表}}$ (称表压力) 为绝对压力超出大气压力的部分:

$$p_{\text{表}} = p - B \quad (2-4)$$

当容器内的气体的绝对压力 p 低于大气压力 B 时(图2-3), 真空表所示的压力 $p_{\text{真空}}$ (称真空度)为绝对压力低于大气压的部分:

$$p_{\text{真空}} = B - p \quad (2-5)$$

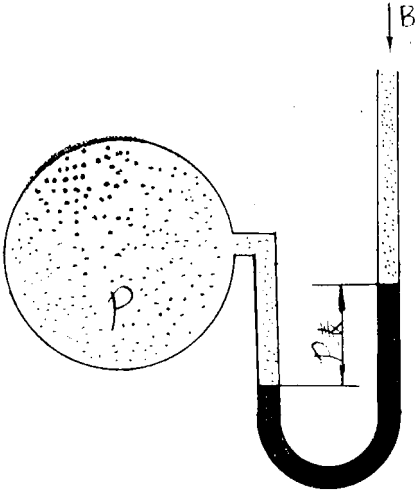


图 2-2

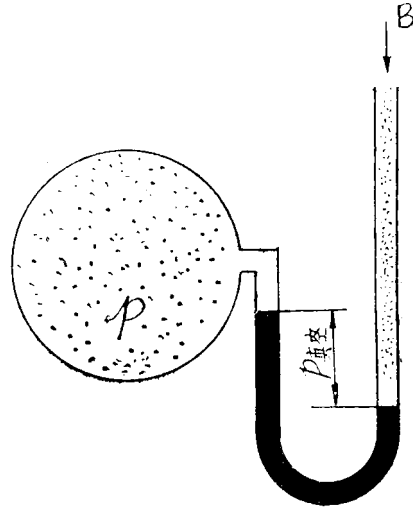


图 2-3

知道表压力 $p_{\text{表}}$ 或真空度 $p_{\text{真空}}$ 后, 可据公式(2-4)或(2-5)求得容器内气体的绝对压力 p :

$$p = B + p_{\text{表}} \quad (2-6)$$

$$\text{或 } p = B - p_{\text{真空}} \quad (2-7)$$

必须指出: 只有绝对压力 p 才是状态参数, 而表压力 $p_{\text{表}}$ 及真空度 $p_{\text{真空}}$ 都不是状态参数。这是因为, 在 p 不变的情况下, $p_{\text{表}}$ 或 $p_{\text{真空}}$ 随 B 的大小而变化, 即 $p_{\text{表}}$ 或 $p_{\text{真空}}$ 不是由状态唯一地确定, 因而不是状态参数。

(三) 比 容

单位重量气体所占的容积称比容, 以 v 表示:

$$v = \frac{V}{G} \text{米}^3/\text{公斤} \quad (2-8)$$

式中: V —总容积, 米³,

G —总重量, 公斤,

反之, 单位容积气体所具有的重量称重度, 以 γ 表示:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{公斤/米}^3 \quad (2-9)$$

由公式(2-8)及(2-9)可见, 比容与重度正好互为倒数: