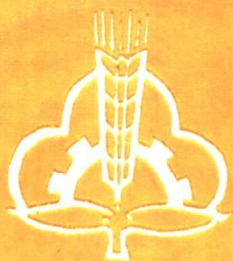


中等粮食学校试用教材

粮食干燥



中国财政经济出版社

中等粮食学校试用教材

粮 食 干 燥

《粮食干燥》编写组

中国财政经济出版社

中等粮食学校试用教材

粮 食 干 燥

《粮食干燥》编写组

*

中国财政经济出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县西定安印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 12.625印张 300,000字

1983年7月第1版 1987年2月北京第2次印刷

印数：10,004—18,000

统一书号：15166·114 定价：1.80元

编 审 说 明

本书是根据中等粮食学校《粮食干燥》课程的教学要求而编写的，主要供中等粮食学校师生教学用，也可供粮食仓库的工人和技术人员学习参考。

参加本书编写的教师有：南京粮食经济学院王立、张仁灿，辽宁省粮食学校方有成；由王立同志主编。全书经郑州粮食学院赵思孟同志审校。粮食部储运局的有关同志也参与了本书的审稿工作。在编写过程中，得到有关部门的大力支持，提供许多宝贵资料，特致谢意。

本书经我们审定，可作为中等粮食学校试用教材。

中华人民共和国粮食部教材编审委员会

一九八二年二月

目 录

第一章 传热学基本知识	(1)
第一节 导热	(2)
第二节 对流换热	(9)
第三节 热辐射	(10)
第二章 湿气体的基本性质和 I-d 图	(17)
第一节 湿气体的基本性质	(18)
第二节 湿空气的 I-d 图	(42)
第三节 I-d 图的应用	(47)
第四节 烟道气和空气的混合气体特性	(53)
第三章 粮食干燥的基本原理	(64)
第一节 粮食的热容量、导热性和导温性	(64)
第二节 粮食干燥的机理	(69)
第三节 粮食的干燥曲线及干燥速度曲线	(90)
第四节 粮食热力干燥的条件	(97)
第四章 有关粮食干燥的基本计算	(119)
第一节 干燥室的物料衡算及水分蒸发量计算	(120)
第二节 干燥介质消耗量的计算	(127)
第三节 热量消耗量的计算	(131)
第四节 干燥过程的图解计算	(138)
第五节 冷却过程的计算	(146)

第五章 粮食干燥设备基础	(152)
第一节 粮食干燥方法的分类	(152)
第二节 炉气的制备和输送	(158)
第六章 塔式烘干机	(201)
第一节 概述	(201)
第二节 结构	(206)
第三节 类型	(217)
第四节 塔式烘干机的计算	(237)
第五节 操作管理	(261)
第七章 圆筒烘干机	(277)
第一节 概述	(277)
第二节 类型	(281)
第三节 圆筒烘干机的计算	(297)
第四节 操作与管理	(309)
第八章 流化烘干机	(311)
第一节 概述	(311)
第二节 类型	(316)
第三节 操作管理	(347)
第四节 冷却设备	(351)
第九章 机械通风干燥仓	(359)
第一节 概述	(359)
第二节 类型	(362)
第三节 堆放式农用烘干床	(379)
第四节 主要参数的确定和计算	(386)
第五节 操作管理和注意事项	(395)

第一章 传热学基本知识

热量总是由高温物质传到低温物质,凡有温度差的地方,就有热量转移现象发生。在自然界和生产过程中温度差是普遍存在的,因此,传热就成为自然界和生产领域中非常普遍的现象。传热学就是研究热量传递规律的一门科学,是学习《粮食干燥》课程的基础。由于篇幅有限,这里只介绍一些传热学方面的基本知识。

传热过程是由导热、对流和辐射三种基本传热方式组成的。例如,冬季由粮仓内部通过墙壁向仓外传热,整个传热过程可分为三个阶段,如图 1-1 所示。第一阶段,仓内热量以空气对流换热和辐射的方式传给墙的内表面;第二阶段,由墙的内表面以固体导热方式传给墙的外表面;第三阶段,由墙的外表面以空气对流换热和辐射的方式传给仓外环境;这三个阶段完成了由仓内到仓外的传热。显然,传热的动力是仓内外温度差,即仓内温度高于墙内表面温度,墙内表面温度高于墙外表面温度,而墙外表面温度又高于仓外环境温

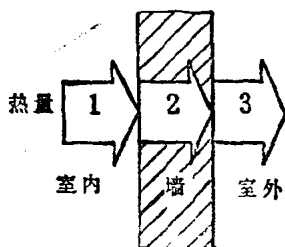


图1-1 由仓内向仓外的传热过程

度。因此，要了解整个传热过程的规律，必须首先掌握三种基本传热方式的规律。

第一节 导 热

导热是指物质各部分没有相对位移、只通过各部分的直接接触而发生的能量传递现象。导热是由物质分子、原子及自由电子等粒子的不断碰撞而引起的。导热可以在固体、液体及气体中发生，但单纯的导热只能发生在密实的固体中。因为对于液体和气体，当有温差时就会出现对流现象，难以维持单纯的导热。

一、单层平壁导热

首先讨论单层平壁导热问题（见图1-2），设此单层平壁是由一种匀质材料构成（例如红砖砌成的墙），它的长和宽都远远大于它的厚度 δ ，即所谓大平壁，故可忽略沿其长和宽两方向的温度变化，认为温度只沿其厚度方向有变化。并且，在导热过程中温度不随时间而变化，即所谓稳定导热。设壁的一侧表面温度为 t_1 ，另一侧表面温度为 t_2 ，且 $t_1 > t_2$ ，则导热热量与壁两侧表面的温度差（ $t_1 - t_2 = \Delta t$ ）成正比，与壁的厚度 δ 成反比，并与墙体材料的性质有关，用数学表达式即为：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \cdot F \text{ 千卡/时}$$

$$\text{或 } q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-1)$$

式中： λ ——导热系数（它反映材料导热性能的好坏，单位是千卡/米·时 $^{\circ}\text{C}$ 。一些常用材料在常温下的导热系数值见表1-1）。

F ——壁面积，米 2

δ ——壁厚，米

Δt ——壁两侧表面温度差， $^{\circ}\text{C}$

在稳定导热情况下， t_1 及 t_2 保持不变，故导热量 q 亦保持稳定不变。

为了求出壁内的温度分布，可在壁内取一平面，它离 t_1 温度表面距离为 x 米，温度是 t_x ，则通过厚为 x 的这一层的热量等于 q ，根据上式：

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_x}{x}$$

于是可求出：

表1-1 一些常用材料在常温下的导热系数（千卡/米·时， $^{\circ}\text{C}$ ）

材料名称	λ 值	材料名称	λ 值
耐火砖	0.9~1.2	石灰泥	0.6~0.9
红 砖	0.5~0.7	松木(垂直木纹)	0.15
混凝土	0.7~1.1	松木(顺木纹)	0.30
黄 铜	80~100	玻璃纤维	0.03~0.04
钢、生铁	40~50	泡沫塑料	0.02~0.04
玻 璃	0.6~0.9	石 棉	0.06~0.1
水	0.51	软木板	0.04~0.08
空 气	0.02	矿渣棉	0.04~0.05

$$t_x = t_1 - q \frac{x}{\lambda} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 表明壁内温度分布 $t_x = f(x)$ 是直线规律, 如图1-2所表示。

二、多层平壁导热

图1-3所示是一个三层不同材料组成的多层平壁, 设壁面积很大, 每层厚度各为 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 ; 导热系数各为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 并且是常数; 已知内外表面的温度分别为 t_1 和 t_4 , $t_1 > t_4$; 若层与层之间接触良好, 则相邻两层接触面的温度相等, 第一层与第二层的接触面温度为 t_2 , 第二层与第三层接触面温度为 t_3 。这样, 在稳定导热的情况下, 通过每一层的热流量应是相等的, 根据式 (1-1) 可分别写出各层热流量的计算式:

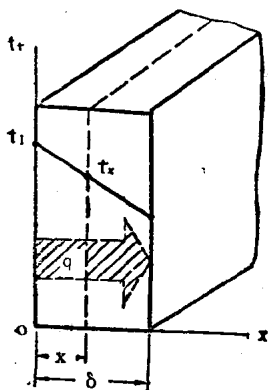


图1-2 单层平壁导热

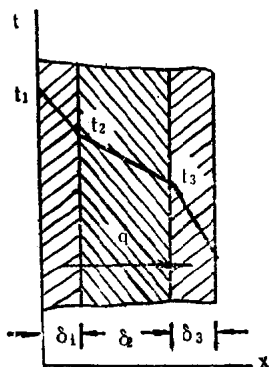


图1-3 多层平壁导热

$$\left. \begin{aligned} q &= \lambda_1 \frac{t_1 - t_2}{\delta_1} \\ q &= \lambda_2 \frac{t_2 - t_3}{\delta_2} \\ q &= \lambda_3 \frac{t_3 - t_4}{\delta_3} \end{aligned} \right\} (1)$$

将(1)式移项, 得出各层的温度差:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \frac{\delta_1}{\lambda_1} \\ t_2 - t_3 &= q \frac{\delta_2}{\lambda_2} \\ t_3 - t_4 &= q \frac{\delta_3}{\lambda_3} \end{aligned} \right\} (2)$$

将(2)式叠加, 消去未知量 t_2 和 t_3 , 整理得:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-3)$$

已知各层的厚度、材料的 λ 以及壁两侧温度, 就可以求出热量 q ; 再由式(2)可求得相邻两层接触面的温度 t_2 和 t_3 。

式(1-3)右侧的分母是各层厚度 δ 与导热系数 λ 的比值之总和。那么 $\frac{\delta}{\lambda}$ 这一项有什么意义呢? 它的意义可从导热基本计算式(1-1)的分析中认识。

把式(1-1)改写为 $q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda}$, 并和电学中的欧姆定律

电流 $I = \frac{\text{电位差 } \Delta E}{\text{电阻 } R}$ 相比较，可以看出：热流量 q 相当于电流 I ；温度差 Δt 相当于电位差 ΔE ，而 δ/λ 的作用与电阻 R 相当，是一个对热流起阻力作用的量，故称热阻，也用符号 R 表示，所以热阻

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C} / \text{千卡} \quad (1-4)$$

可见，平壁导热热阻 R 与厚度成正比，与导热系数成反比。利用热阻的概念，单层平壁的导热公式可写为：

$$q = \frac{\Delta t}{R}$$

即在一定的温差下，热阻 R 愈大，则热流量愈小。热阻的概念对传热问题的分析和计算有很重要的意义。

利用热阻 R 代入式 (1-3) 得：

$$q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta t}{R} \text{千卡} / \text{米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-5)$$

式中： $R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}$ 第一层导热热阻

$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}$ 第二层导热热阻

$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}$ 第三层导热热阻

式 (1-5) 中， $R = R_1 + R_2 + R_3$ 。 R 是三层平壁的总热阻，这和电阻串联的原理是一致的。热流量 q 通过三层平壁所遇到的阻力是三层热阻之总和。可见，热阻和电阻一样可

以叠加，这就是热阻叠加原理。

三、薄壁圆筒壁导热

图1-4是内半径 r_1 (内径为 d_1)，外半径为 r_2 (外径为 d_2) 的单层圆筒壁，材料导热系数 λ 是常数，圆筒内外表面各维持一定温度 t_1 和 t_2 ，且 $t_1 > t_2$ 。

通常在工程上遇到的圆筒壁长度 l 都较大，温度沿轴向的变化很小，可认为只沿径向 (r 方向) 有变化，故沿轴向的导热可略去不计，所以壁内的等温面是一系列同心圆柱面。

薄壁圆筒壁导热的简化计算：所谓简化计算，就是把圆筒壁的导热计算按平壁导热来处理。现以单层圆筒壁为例，

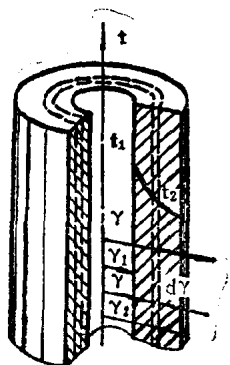


图1-4 薄壁圆筒壁导热

分析这种简化计算的方法及其使用条件，然后推广应用到多层圆筒壁。

图1-4所示的单层圆筒壁的内表面积为：

$$F_1 = \pi d_1 l \text{ 米}^2$$

外表面积为：

$$F_2 = \pi d_2 l \text{ 米}^2$$

内外表面平均面积为：

$$F_{\text{平}} = \frac{1}{2} (F_1 + F_2) = \frac{\pi}{2} (d_1 + d_2) l$$

$$= \pi d_{\pi} l \text{ 米}^2$$

将此圆筒壁沿轴向割开展平成为一块平壁时，这个平壁的面积应是 $F_{\pi} = \pi d_{\pi} l$ ，厚度应是： $\delta = \frac{1}{2} (d_2 - d_1)$ 。按式

(1-1)，此平壁导热量为：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t F_{\pi} = \frac{\lambda}{\delta} \pi d_{\pi} l (t_1 - t_2)$$

$$= \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\pi d_{\pi} \lambda}} l \text{ 千卡/时}$$

每米长圆筒壁的热流量为：

$$q = \frac{Q}{l} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\pi d_{\pi} \lambda}} \text{ 千卡/米} \cdot \text{时} \quad (1-6)$$

式中： $d_{\pi} = \frac{1}{2} (d_1 + d_2)$ ——圆筒壁平均直径 米

$\delta = \frac{1}{2} (d_2 - d_1)$ ——圆筒壁的厚度 米

l ——圆筒壁的长度 米

$\frac{\delta}{\pi d_{\pi} \lambda}$ ——圆筒壁简化计算时，每米长度上的导热热阻米·时·°C/千卡

按式 (1-6) 计算结果表明，对薄壁圆筒，即 $\frac{d_2}{d_1} < 2$ 的圆筒，误差不超过 4%。这在一般工程计算中是允许的。因

此， $\frac{d_2}{d_1} < 2$ 是判断能否把圆筒壁导热按平壁方法计算的条
件。

对于多层圆筒壁，当各层直径之比小于 2 时，亦可按筒
化方法计算。根据热阻叠加原理，多层圆筒壁每米长度上的
导热量为：

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\pi d_{\mp i} \lambda_i}} \text{千卡/米} \cdot \text{时} \quad (1-7)$$

第二节 对 流 换 热

依靠流体的运动，把热量由一处传递到另一处的现象，
称为对流。但工程上所处理的传热问题往往涉及到流体与固
体壁之间的换热，这种流体与固体壁之间的换热过程，称为
对流换热，简称放热。它既包括流体的对流作用，也包括流
体的导热作用，因此它是一个受许多因素影响的复杂过程。
对流换热的基本计算式（亦称牛顿冷却公式）为：

$$q = \alpha (t_1 - t_s) \text{千卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (1-8)$$

$$\text{或 } Q = \alpha F (t_1 - t_s) \text{千卡/时} \quad (1-9)$$

式中： t_1 ——流体温度 $^{\circ}\text{C}$

t_s ——壁表面温度 $^{\circ}\text{C}$

F ——壁面面积 米^2

α ——放热系数（其意义是指一平方米的壁表面积上，
当流体同壁面之间的温度差为 1°C 时，每小时

所能传递的热量) 千卡/米²·时·°C

由 α 值的大小可以反映出对流换热过程的强弱。若将式 (1-8) 改写为

$$q = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha}$$

则式中 $\frac{1}{\alpha}$ 即为对流换热热阻, 单位为米²·时·°C/千卡。

对流换热热阻与放热系数成倒数关系。利用热阻的概念来分析对流换热过程的强弱是传热学中的一个基本方法。

从本质上看, 对流换热过程的热量转移, 既靠流体的流动作用, 也有流体分子间的导热作用。因此对流换热的强弱将与这两种作用的强弱密切相关。显然, 所有影响这两种作用的因素都会影响对流换热过程, 而放热系数则反映了各种影响因素的综合效果。

放热系数 α 数值可由实验求得。加热和冷却空气时, 其 α 值一般在 1~50。加热和冷却水时, 其 α 值一般在 200~10000。

第三节 热 辐 射

依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线在空间传递能量的现象, 称为辐射。例如, 太阳能向地球的辐射; 室内人体和墙壁之间的辐射换热等。

一、热辐射的本质和特点

物体由带电粒子所组成，当带电粒子振动或激动时都能辐射出电磁波向空间传播。电磁波的波长可从万分之一微米（1微米 = 10^{-6} 米，符号为 μ ）到数公里。不同波长的电磁波落到物体上可产生各种不同的效应，人们根据这些不同的效应，将电磁波分成许多波段，如图1-5。其中波长在 $0.4 \sim 0.76\mu$ 范围的电磁波，对人引起光的感觉，这一部分电磁波叫做可见光。波长比 0.4μ 短的电磁波是紫外线、伦琴射线等，它有显著的化学效应、光电效应等。波长在 $0.76 \sim 600\mu$ 之间的电磁波称为红外线，照射物体能产生热效应。波长大于 40μ 的电磁波是无线电波。通常把波长在 $0.4 \sim 40\mu$ 范围内的电磁波（包括可见光和红外线的短波部分）称为热射线，因为它的热效应特别显著。热射线的传播过程称为热辐射。当然，波长与各种效应是不能截然划分的。

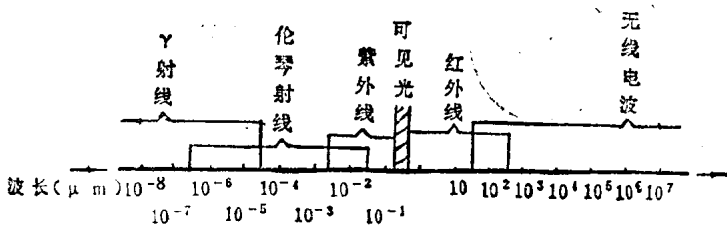


图1-5 电磁波谱

热射线的本质决定了辐射换热的如下特点：

（一）在辐射换热过程中伴随着能量形式的转化，即物体的内能首先转化为电磁能发射出去，当此电磁能落在另一