

高等学校试用教材

农产品加工机械

江苏工学院 沈林生 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

农产品加工机械

江苏工学院 沈林生 主编



机械工业出版社

本书主要介绍常用农产品加工机械的工作原理、一般构造和工作部件的设计计算方法。全书共分十一章，内容包括：热交换基础、气力系统、湿空气和热源、干燥设备、洗涤机械、杀菌设备、分选分离机械、粮油、种子和淀粉加工机械以及果蔬贮藏和榨汁设备等。

本书可作为高等院校农业机械和农产品加工工程专业试用教材，也可供有关专业师生以及从事这方面工作的工程技术人员参考。

农产品加工机械

江苏工学院 沈林生 主编

*

责任编辑：王世刚

封面设计：田淑文

责任印制：郭 炜

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $1/16$ ·印张 12 $1/4$ ·字数 296 千字

1988年11月北京第一版·1988年11月北京第一次印刷

印数 0,001—2,700·定价：2.50元

*

ISBN 7-111-00857-X/S·9（课）

前 言

本书是根据 1984 年 4 月在江苏镇江召开的全国高等院校农业机械专业教材会议上拟定的《农产品加工机械》教学大纲编写的。

本书主要介绍农产品加工工艺过程、农产品加工机械的工作原理、一般构造和工作部件的设计计算方法。农产品加工机械类型多种多样,为贯彻“少而精”的原则,在取材上以剖析典型机具掌握全貌为准;在内容上力求反映本领域的先进技术;在文字上力求简明扼要,条理清楚。对农产品加工机械具有共性的基础理论“热交换基础”、“气力系统”和“湿空气和热源”等均单独成章,以期论题集中,突出重点。本书涉及的有关量的名称、符号和单位均按国标 GB3101—82 中规定的标准。

本书可作为高等院校农业机械和农产品加工工程专业试用教材,也可供有关专业师生以及从事这方面工作的工程技术人员参考。

本书由江苏工学院沈林生主编,吉林工业大学胡树荣副主编,其中第一、十章由吉林工业大学胡树荣编写;第二章由江苏工学院李国文编写;第三、四、五章由吉林工业大学李慧珍编写;第六、十一章由江苏工学院沈林生编写;第七、九章由江苏工学院方如明编写;第八章由吉林工业大学卢贤继编写。全书由北京农业工程大学曹崇文教授主审。

1987 年 3 月在镇江市召开了审稿会议,参加会议的有机械工业委员会教材编辑室、北京农业工程大学、洛阳工学院、安徽工学院、浙江农业大学、吉林工业大学以及江苏工学院等单位的代表。与会代表对本教材原稿进行了深入细致的审阅和讨论,提出了不少宝贵意见。在此,谨致谢意。

编者虽对全书反复进行了讨论和修改,但由于水平所限,本书难免会有错误和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

1988 年 2 月

目 录

第一章 绪言	1	§ 4-2 空气湿度图及其应用	49
第二章 热交换基础	3	一、空气湿度图	49
§ 2-1 导热	3	二、空气湿度图的应用	49
一、导热的基本定律	3	§ 4-3 燃料和燃烧设备	53
二、通过平壁的一维稳态导热	3	一、概述	53
三、通过圆筒壁的稳态导热	5	二、常用燃烧设备	54
四、非稳态导热	6	三、固体燃料的燃烧计算	58
§ 2-2 对流换热	11	第五章 干燥设备	60
一、牛顿公式和对流换热系数	11	§ 5-1 干燥原理和方法	60
二、流体受迫流动时的对流换热	13	一、物料的水分及其测定方法	60
三、自然对流换热	14	二、干燥过程	62
§ 2-3 辐射换热	16	三、干燥方法	63
一、热辐射的基本概念	16	§ 5-2 对流干燥	64
二、物体表面间的辐射换热	17	一、物料固定床式	64
§ 2-4 换热器	20	二、物料移动床式	64
一、传热过程	21	三、物料流化床式	65
二、换热器的类型	23	四、物料循环式	66
三、间壁式换热器的热计算	24	五、喷雾干燥法	66
第三章 气力系统	29	六、瞬间干燥法	67
§ 3-1 风机的运行和选用	29	§ 5-3 干燥机械	67
一、风机的类型和性能	29	一、仓式干燥机	67
二、通风机的运行	31	二、竖筒式干燥机	68
三、通风机的选用	34	三、塔式干燥机	68
§ 3-2 气力系统的阻力	35	四、滚筒式干燥机	68
一、气流通过工作部件的阻力	36	五、隧道式干燥机	69
二、沿程阻力损失	37	六、远红外干燥机	70
三、局部阻力损失	37	§ 5-4 对流干燥设备的衡算和热效率	71
四、节点阻力平衡计算	37	一、物料干燥过程的衡算	71
§ 3-3 物料的气力输送	38	二、干燥机的热效率	73
一、气力输送系统的基本类型	39	第六章 洗涤机械和杀菌设备	74
二、管道中颗粒群的运动	40	§ 6-1 洗涤的作用原理	74
三、气体流量的确定	41	一、洗涤的意义	74
四、气力输送阻力计算	42	二、洗涤的作用原理	74
§ 3-4 气力输送系统的附属装置	43	§ 6-2 洗涤方法和洗涤机械	76
一、吸嘴	43	一、洗涤方法	76
二、供料装置	44	二、洗涤机械	77
第四章 湿空气和热源	46	§ 6-3 洗涤机主要工作部件的工作分析	80
§ 4-1 湿空气的性质	46	一、栅条滚筒主要参数的决定	80
一、概述	46	二、螺旋洗涤器主要参数的决定	81
二、绝对湿度和相对湿度	46	§ 6-4 杀菌的意义和方法	82
三、湿空气的状态参数	47	一、杀菌的意义	82
四、干球温度和湿球温度	48	二、杀菌的方法	82

§ 6-5 杀菌设备	85	三、典型的种子加工工艺流程	141
一、杀菌锅	85	§ 9-3 种子加工设备	145
二、管式杀菌器	85	一、初清机	145
三、锥形滚筒杀菌器	86	二、精选分级机	147
四、静水压杀菌设备	87	§ 9-4 精选分级部件的工作质量	142
五、水封式杀菌设备	87	一、平面筛的工作质量	152
第七章 分选分离机械	89	二、窝眼筒的工作质量	154
§ 7-1 农产品的分选原理与方法	89	§ 9-5 其它种子加工的特点	148
一、按农产品的基本物理性质分选	89	一、蔬菜种子加工工艺	158
二、按农产品的空气动力特性分选	98	二、牧草种子加工工艺	149
三、按农产品的力学特性分选	100	第十章 淀粉加工机械	150
四、按农产品的光学特性分选	101	§ 10-1 概述	160
五、按农产品的电特性分选	101	§ 10-2 淀粉生产的基本方法	160
§ 7-2 混合流的分离原理与方法	108	一、清选、洗涤、浸泡和粉碎	161
一、颗粒在流体介质中的相对运动	108	二、分离胚芽	162
二、斯托克公式在乳脂分离中的应用	110	三、分离纤维和蛋白质	162
三、旋风分离器	111	四、洗涤、干燥和成品整理	162
§ 7-3 农产品的分选质量	112	§ 10-3 淀粉加工机械	163
第八章 粮油加工机械	115	一、曲筛	163
§ 8-1 制米机械	115	二、锥筛	164
一、概述	115	三、离心过滤机	164
二、砻谷机	116	四、螺旋式离心分离机	164
三、谷糙分离设备	119	五、碟片式离心分离机	166
四、碾米机	120	六、旋液分离器	166
五、联合米机	124	七、真空吸滤机	167
§ 8-2 物料粉碎机械	125	§ 10-4 分离机分离质量的分析	168
一、粉碎方法及理论	125	一、柱形离心分离机	168
二、粉碎机械	126	二、旋液分离器	170
三、物料的粒度分布和测定	129	第十一章 果蔬贮藏和榨汁设备	172
§ 8-3 磨粉机	130	§ 11-1 果蔬贮藏的意义和方法	172
一、概述	130	一、果蔬贮藏的意义	172
二、辊式磨粉机	130	二、果蔬贮藏期间生理生化的变化	172
三、圆盘式磨粉机	134	三、果蔬的贮藏方法	174
四、锥式磨粉机	134	§ 11-2 蒸气压缩式机械制冷设备	175
§ 8-4 榨油机	135	一、蒸气压缩制冷原理	175
一、概述	135	二、常用制冷剂的性质	177
二、榨油的工艺流程	136	三、制冷设备	179
三、螺旋榨油机的构造和工作过程	136	§ 11-3 气调贮藏装置	183
四、螺旋榨油机的榨油工作部件	137	一、普通气调法	184
五、螺旋榨油机主要参数的确定	138	二、机械式气调法	184
第九章 种子加工机械	139	三、综合气调法	184
§ 9-1 种子加工机械化的意义	139	§ 11-4 榨汁设备	184
§ 9-2 种子加工工艺	139	一、果汁制取的工艺过程	184
一、种子加工的基本内容	139	二、压榨机	185
二、种子加工工艺流程的设计原则	141	参考文献	190

第一章 绪 言

农产品加工工业是我国国民经済的一个重要组成部分。农业物料加工后，经济价值显著提高，有的提高几倍甚至几十倍。例如，我国盛产玉米和薯类作物，而在玉米中含有65~80%的淀粉，在薯类作物的块茎中含有8~29%的淀粉。若将这类作物进行淀粉的深度加工和综合利用，经济效益将显著提高。农产品大部分是易腐品，我国每年农产品因不能及时有效地加工贮藏，所造成的经济损失是非常惊人的。例如每年损耗于运输和贮藏过程中的果品，超过总产量的10%。因而，农产品收获后如能及时加工贮藏，就能大大减少原料损耗，增加食品供应量，改善食品结构，延长供应季节，丰富人民生活。农产品加工是农村中开展多种经营、发展乡镇企业、广开门路、致富人民、积累资金的有效途径，同时还可促使我国农业生产由自然经济向商品经济发展，加速实现农业机械化和现代化。可以预料，我国农产品加工工业也将发展成国民经济的重要支柱之一。

农产品加工过程中，除机械加工方法外，还经常应用物理、化学和生物学等方法对农业物料进行处理，如冷冻、酿造等。不论用什么方法加工农业物料，都需要一定数量的机械和设备，农产品加工机械是这些机械和设备的总称。

农产品加工机械按加工对象，可分为粮油加工机械、种子加工机械、饲料加工机械、淀粉加工机械、果蔬贮藏和加工机械、养殖业产品加工机械、工业原料（如棉、毛）加工机械和设备等。按加工原理和方法可分为洗涤、清选和分级机械；脱壳、切碎和粉碎机械；蒸煮、灭菌和浓缩机械；干燥和冷冻设备；贮藏和保鲜装置以及物料输送机械等等。

农产品加工过程都是由一系列单元操作合理地组合而成，因而农产品加工机械类型虽多，加工工艺的差别虽大，但从单元操作来看，其中不少机械的加工原理和方法有其共性。例如粉碎方法和原理广泛应用于粮食、饲料和淀粉加工；分离原理和方法不仅用于谷物分离和清选，还适用于牛奶和淀粉的分离。因而，本教材按单元操作分章进行论述，重点论述各单元操作所用的典型农产品加工机械的工作原理、工作过程、主要工作部件的参数确定和选用等内容，并努力反映各领域的最新成就，以达到举一反三，开拓思路的目的。同时，在一些章节中如种子加工机械、淀粉加工机械等，还较系统地介绍了种子和淀粉的加工工艺过程和机器系统，使读者对农产品加工过程有一个较全面的了解。通过学习，使学生具有选用农产品加工机器系统及其设备的能力，掌握农产品加工机械的一般设计方法，并能了解一些最新科技成果和发展趋势。

农产品加工机械应满足下列要求：

1) 应符合农产品加工工艺要求 农产品加工对象如种子、果蔬等，多数是有生命的物料，优良的农产品加工机械，首先要符合物料的这种特性，如种子加工机械要适应按种子生命活动规律所拟定的加工工艺要求。

2) 适应农业物料的生物、物理机械特性 农业物料的生物、物理机械特性差异很大，它是研究、设计农产品加工机械的重要依据之一，如果品的外形、力学、光学特性等，是研制果蔬分级机械的依据。

3) 要因地制宜 我国土地辽阔,农业生产的地区性很强,如东北盛产大豆,南方盛产水稻,农业物料就地加工、销售,可避免大量物资倒流,减少运费,减少损失,提高产品质量。如内蒙古的牛、羊因不能就地屠宰、加工,每年掉膘损失近亿元,因此农产品加工机械如何适应地区需要,也是它的一个重要特点。

4) 适应季节性需要,努力提高机器的利用率 农业物料生产的季节性很强,如东北麦收时正值雨季,收获的谷物如不及时干燥,就会引起霉烂变质,造成严重损失(据法国资料每年全世界因含水量过高而造成的谷物损失达几亿吨),因而配备大量谷物干燥机械和设备是非常必要的,但是如何提高其利用率,也是一个值得注意的问题。

5) 有利于农产品的综合利用 一般农业物料含有多种营养成分,如玉米中含有淀粉、蛋白质、脂肪、纤维素等。生产玉米淀粉时,如能综合利用,可同时获得蛋白质粉、玉米油、饲料等副产品,可以显著提高企业的经济效益,研制农产品加工机械时,应充分注意这一点。

6) 注意防止对产品的污染 农业物料加工的最终成品有不少是食品,在加工过程中如何保持或提高其营养价值,防止污染,对保证人民的身体健康有重要意义,如生产淀粉和奶制品的过程中,应采用密闭生产和不锈钢零部件等。

第二章 热交换基础

世界上的一切物体，不论是固体、液体或气体，由于自然和人为的原因，普遍地存在着温度差。根据热力学第二定律，作为能量形式之一的热，总是自发地从高温处传向低温处。热量的这种传递过程是一种极其普遍的现象。在农产品加工工程领域中，热量的传递和交换是重要的单元操作。例如谷物的干燥、果蔬的冷却和贮藏、牛乳和果汁的杀菌消毒、食品的冷冻等，都包含着热量的传递过程，或者是由热源加热的介质将热量传递给待加热的物料（如果汁、乳品等）并使其温度升高至所要求的规范；或者用相应的技术措施使待处理的物料释放出热量而降低温度，以达到贮藏和运输的目的。

将两种温度不同的流体进行热量交换或传递的装备统称为换热器，例如锅炉、蒸气管道、杀菌锅、制冷设备中的蒸发器和冷凝器等。

热传递有三种基本方式：即导热、对流和辐射。在实际的工程技术领域中的热传递现象，往往是由几种基本传热方式共同作用的结果。

§ 2-1 导 热

导热，又称热传导，是指热量从物体温度较高的部分传递到温度较低的部分，或者是从温度较高的物体传递到与之紧密接触的温度较低的物体的过程。在单纯的导热过程中，物体各部分之间不发生相对位移，也没有能量转换。

一、导热的基本定律

大量实践和经验证明，由导热所传递的热量是与所在导热系统的温度梯度和垂直于导热方向的面积成正比，其数学表达式为

$$Q = -\lambda A \partial t / \partial n \quad (2-1)$$

式中 Q ——单位时间内导热传递的热量，也称为热流量；

A ——垂直于导热方向的截面积；

λ ——物体的导热系数；

$\partial t / \partial n$ ——在导热方向即等温面法线方向上的温度梯度。

式（2-1）就是傅里叶导热基本定律的一般数学表达式，式中的负号表示传热方向正好与温度梯度方向相反，即热量是由高温处传向低温处。根据这一基本定律，可以对工程中最广泛的平壁式和圆管式换热器等的导热过程进行具体分析。

二、通过平壁的一维稳态导热

所谓稳态导热，是指传热系统内各点温度均不随时间而变化的导热过程；反之，温度随时间变化的导热过程称为非稳态导热过程。

一块厚度均匀和平壁，如果其长度和宽度均比厚度 δ 大得多，以致沿长度和宽度方向的端面导进或导出的热量与由厚度方向二表面所传递的热量相比可以忽略不计（通常把这种平壁称为无限大平壁），该平壁二侧面的温度分别为 t_1 和 t_2 ，且 $t_1 > t_2$ ，平壁的导热系数 λ 是不随

温度而变化的定值。这样一个系统就是最简单的平壁一维稳态导热系统（图 2-1）。此时，傅里叶导热定律可以表达为

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

将上式在 x 轴向的定积分区间 $[0, \delta]$ 积分，便可求出通过平壁的导热热流量

$$Q = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{\Delta t}{\delta / (\lambda A)} \quad (2-2)$$

式中 δ —— 平壁厚度；

Δt —— 平壁两侧面的温度差。

如果将导热热流量公式与电学中的欧姆定律公式 $I = U/R$ 相比较，不难发现二者在形式上有十分相似之处：象在导电系统中一定要有电位差才能形成电流一样，在导热系统中，只有存在温度差，才能产生热流量；而且也象电流的大小与电阻成反比那样，热流量的大小恰好与 $\delta / (\lambda A)$ 成反比。这样，就可把 $\delta / (\lambda A)$ 称为导热热阻，其单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

必须指出，在上述解析过程中，除了应用傅里叶导热基本定律外，同时还完全借助于能量守恒的原理，即假定在导热过程中，热流量 Q 始终保持不变，仅仅从一个地方传递到了另一个地方。在后面的所有解析过程中都离不开这一重要概念。

在实际工程领域中，如锅炉的炉壁、冷藏库的库墙等均不是单层的，而是由多层不同材料做成的复合平壁。由于各层材料不同，它们的导热系数是有差别的，显然这样的问题要比单层平壁复杂得多，但是，其导热过程的实质仍然是相同的，因此，同样可以根据傅里叶定律和能量守恒定律来进行分析。

图 2-2 所示是一个由三层导热系数不同的材料构成的平壁，各层厚度分别为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ，导热系数分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ，平壁的面积为 A ，两外侧面的温度均匀一致，且分别为 t_1 和 t_4 ， $t_1 > t_4$ 。在这样的导热系统中，热流量依次传过各层平壁，其值为

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 A}}$$

同理，对于紧密接触的 n 层复合平壁组成的导热系统，其导热流量为

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i A}} \quad (2-3)$$

一些常用材料的导热系数列于表 2-1 中。从表中可知，金属材料的导热系数远大于非金属材料，特别是导电性能良好的铜、铝等材料，其导热性能尤为良好。许多非金属材料的导热系数都较小，故可用于隔热保温，其中 $\lambda < 0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 的材料称为保温材料。

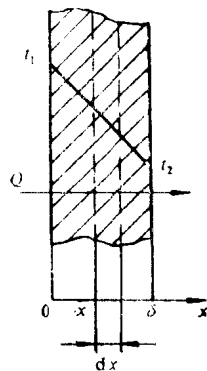


图2-1 单层平壁的一维稳态导热

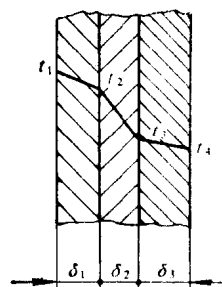


图2-2 多层平壁的一维稳态导热

表2-1 材料的导热系数

材 料	$t / ^\circ\text{C}$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	材 料	$t / ^\circ\text{C}$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
石棉	0~200	576.7	0.151~0.208	粘土	20	1457	1.279
软木板	30	160	0.043	水泥砂浆	20	1900	0.85
多孔软木屑	20	80	0.036	轻质水泥砖	20	1200	0.488
硅藻土	38	320.4	0.062	混凝土	20	2000	0.93
玻璃纤维	20	200.2	0.040	熟铁	20	7849	60
聚苯乙烯	30	20	0.034	钢	20	7833	54
木材刨花	30	140	0.059	铸铁	20	7272	52
棉花	20	80	0.059	铝	20	2707	204
红砖	20	1560	0.489	纯铜	20	8954	386

例2-1 一冷藏室的外墙长5m、高3m，从里到外由2cm厚的水泥砂浆、10cm厚的软木板和15cm厚的混凝土建成。求当室外温度为32℃，室内温度为-18℃时稳定状态下通过该墙的热流量，并求混凝土与软木板交界面上的温度。

解 由表2-1查得混凝土、软木板和水泥砂浆的导热系数分别为0.93、0.043和0.85W/(m·℃)，由题意可知传热面积为 $A = 5 \times 3 \text{ m}^2 = 15 \text{ m}^2$ 。根据式(2-3)有

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 A}} = \frac{[32 - (-18)] \times 15}{\frac{0.15}{0.93} + \frac{0.10}{0.043} + \frac{0.02}{0.85}} \text{ W} = 298.75 \text{ W}$$

混凝土与软木板交界面上的温度为

$$t_2 = t_1 - \frac{Q \times \delta_1}{\lambda_1 \times A} = \left(32 - \frac{298.76 \times 0.15}{0.93 \times 15} \right) ^\circ\text{C} = 28.8^\circ\text{C}$$

三、通过圆筒壁的稳态导热

设圆筒的内直径为 d_1 ，外直径为 d_2 ，长为 L ，内、外表面温度均匀，分别为 t_1 和 t_2 ，导热过程仅沿圆筒的径向进行。在这种情况下，只要将式(2-1)改写成圆柱坐标的形式，便不难导出圆筒壁的导热公式

$$Q = \frac{2\pi\lambda L(t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2-4)$$

由上式可以看出，通过圆筒壁的导热热阻取决于圆筒直径之比的对数值，而不是简单地取决于筒壁的厚度，这是与平壁导热明显不同的地方。此外，圆筒壁内的温度分布呈对数曲线状，而不象平壁那样是一直线。究其原因，是由于圆筒壁内各等温面面积不相等的缘故。但是，如果圆筒壁的内、外直径相差不大，就可近似地将其看作平壁，并可得到与平壁相同形式的导热公式

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda A_m}}$$

其中， $\delta = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$ ，即圆筒壁的厚度，而 $A_m = \frac{1}{2}\pi(d_1 + d_2)L$ 系圆筒壁内、外表面积的平均值。在 $d_2/d_1 < 2$ 的情况下，由上式计算所得结果的误差不超过4%，这足以满足工程

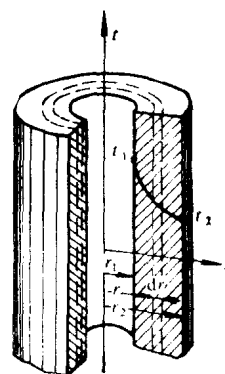


图2-3 单层圆筒壁的导热

上的要求。

对于多层圆筒壁的稳态导热，同样可以根据热阻串联的形式，求出其总热阻，并据此得到该导热系统的导热流量为

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (2-5)$$

例2-2 蒸气管的内直径和外直径分别为 180mm 和 200mm，管子材料的导热系数 $\lambda_1 = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。管子外表敷有两层保温材料，第一层厚度为 $\delta_2 = 15 \text{ mm}$ ， $\lambda_2 = 0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，第二层厚度为 $\delta_3 = 25 \text{ mm}$ ， $\lambda_3 = 0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。蒸气管道内表面温度为 $t_1 = 300^\circ\text{C}$ ，第二层保温层材料外表面温度为 $t_4 = 45^\circ\text{C}$ 。试求每米管长的热损失以及各交界面上的温度。

解 根据式 (2-5)，每米管长的热损失为

$$\begin{aligned} Q_L = \frac{Q}{L} &= \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right) L} \\ &= \frac{2\pi(300 - 45)}{\frac{1}{50} \ln \frac{0.20}{0.18} + \frac{1}{0.15} \ln \frac{0.23}{0.20} + \frac{1}{0.08} \ln \frac{0.28}{0.23}} \text{ W/m} = 472.3 \text{ W/m} \end{aligned}$$

蒸气管外表面与第一层保温材料交界面上的温度为

$$t_2 = t_1 - \frac{Q}{2\pi L \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = \left(300 - \frac{472.3}{2\pi \times 50} \ln \frac{200}{180} \right) ^\circ\text{C} = 299.8^\circ\text{C}$$

用同样的方法可以求得两层保温材料交界面上的温度为 $t_3 = 229.8^\circ\text{C}$ 。

必须指出，在以上的导热分析中，都是假定材料的导热系数 λ 是常数，即不随温度而变化。实际上，导热系数是随温度不同而有所变化的，对于温度不是很高的情况，导热系数与温度有下列线性关系： $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$ ，其中， λ_0 为 0°C 时的导热系数， b 为温度系数，可由实验确定。

四、非稳态导热

非稳态导热又称瞬态导热。在这样的导热过程中，物体内部的温度场是随着时间而变化的。如图 2-4 所示，当将一初始温度为 t_0 的无限大平壁置于温度为 t_f 的高温介质中加热，温度场将随着时间的变化而变化。在工程上，这样的例子是很多的，如肉类及果蔬的冷藏、罐装食品的加热处理等，都包含着非稳态导热过程。

由于非稳态导热过程中有热量的贮存现象，因此，处理这样的导热过程要比稳态导热过程复杂得多。根据导热物体的导热特性与表面对流换热特性的不同，可将非稳态导热过程分成两种情况加以研究。

1. 导热系数远大于对流换热系数

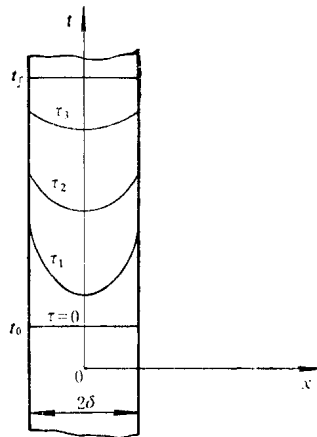


图2-4 非稳态导热过程

如果一物体的导热性能良好,即其内部导热热阻比其表面的对流换热热阻小得很多,当将该物体突然置于另一温度环境中,由对流换热引起的物体内部各点温度变化速率可以看作是相同的,即平均温度与表面温度没有明显的差别。这时所要求解的温度仅是时间 τ 的一元函数,而与坐标无关,好象该物体原来连续分布的质量与热容量汇总到了一点,因而也具有一个温度数值一样。这种忽略物体内部导热热阻的分析方法称为集总参数法。使用集总参数法的条件是导热物体的内热阻与对流换热热阻的比值——毕渥数 $Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} < 0.1$ 。这里, α 为对流换热系数,其单位为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。有关对流换热系数将在对流换热一节中详加说明。

如图2-5所示,一导热物体和介质相接触的瞬间,体内各点的温度均为 t ,经过 $d\tau$ 时间间隔后,物体温度的增量为 dt 。根据能量守恒定律,物体吸收或放出的能量等于本身能量的变化,即

$$\alpha A(t - t_f) = -c\rho V \frac{dt}{d\tau}$$

式中 c ——物体的比热容;

ρ ——物体的密度;

V ——物体的体积;

A ——物体参与对流换热的表面积;

α ——平均对流换热系数;

t_f ——周围介质温度。

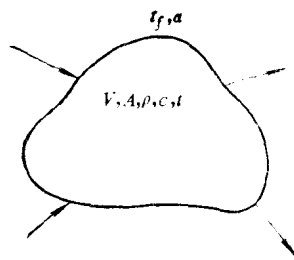


图2-5 集总参数法

如果导热物体的热特性不随时间而变,周围的介质温度为一常数时,上式是很容易求解的。为了简洁,令 $\theta = t - t_f$,并称为过余温度,则解的结果为

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{\alpha A}{c\rho V} \tau} = \theta_0 e^{-Bi Fo} \quad (2-6)$$

式中 $\theta_0 = t_0 - t_f$, t_0 为物体的初始温度;

$Bi = \frac{\alpha V/A}{\lambda}$ ——毕渥准则(即毕渥数), V/A 为物体的线性尺寸;

$Fo = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{A}{V}\right)^2 \tau = \frac{a\tau}{(V/A)^2}$, Fo 为傅里叶准则, $a = \lambda/(c\rho)$ 。 a 为热扩散率,也称为导温系数。

例2-3 为了贮运和延长销售期限,收获后的葡萄需经迅速冷藏处理。葡萄可视为球形水果,设其直径为2cm。采收后的葡萄温度若为 $25^\circ C$,将其迅速置于温度为 $-30^\circ C$ 的冷藏环境中,冷藏介质为空气。设在此条件下的平均对流换热系数为 $\alpha = 10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$,试求将此类葡萄冷却至 $0^\circ C$ 所需要的时间。

解 由有关手册可以查得葡萄的密度为 $\rho = 1000 kg/m^3$,比热容为 $c = 3700 J/(kg \cdot ^\circ C)$,导热系数 $\lambda = 0.5 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

先计算 Bi 准则,对于葡萄一类的球形物体有

$$Bi = \frac{\alpha V/A}{\lambda} = \frac{\alpha \times \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 / (4 \times \pi \times r^2)}{\lambda} = \frac{\alpha r}{3\lambda} = \frac{10 \times 0.01}{3 \times 0.5} = 0.067 < 0.1$$

计算结果满足应用集总参数法的条件,故可利用式(2-6),即

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_f}{t_0 - t_f} = e^{-\frac{\alpha A}{c\rho V}\tau}$$

把已知值代入上式, 便可求得所需时间 τ

$$\frac{0 - (-30)}{25 - (-30)} = e^{-\frac{10 \times 3}{3700 \times 1000 \times 0.01}\tau}$$

$$\tau = 747.6 \text{ s}$$

2. 毕渥准则 $Bi > 0.1$

当毕渥准则 $Bi > 0.1$ 时, 说明物体表面的对流换热强度较为强烈, 这样, 物体表面的温度变化将比内部为快, 如果仍然用式 (2-6) 进行计算, 将会导致较大的误差。此时, 必须考虑由温度梯度引起的局部温度随时间变化的因素, 显然问题就更为复杂。但是, 根据热力学第一定律和导热过程普遍适用的傅里叶定律, 对于物理性质恒定的导热物体, 即其 c 、 ρ 、 λ 为常数时, 最终可导出下述微分方程^①

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

在许多工程问题中, 往往对无限大平壁中心平面层的温度变化情况尤为关注, 例如, 对于大块的冰冻板状蔬菜和肉类, 准确预测板状体中心平面层的温度随时间而变化的情况, 对于食品的贮藏和加工是很重要的。这样一类问题可以看作一维的非稳态导热, 其导热微分方程可简化为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (2-7)$$

给定了初始条件和边界条件, 运用一般的数学解析方法, 上述偏微分方程固然可以求解, 它的解也可以写成形如

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_f}{t_0 - t_f} = f(Fo, Bi, x/\delta)$$

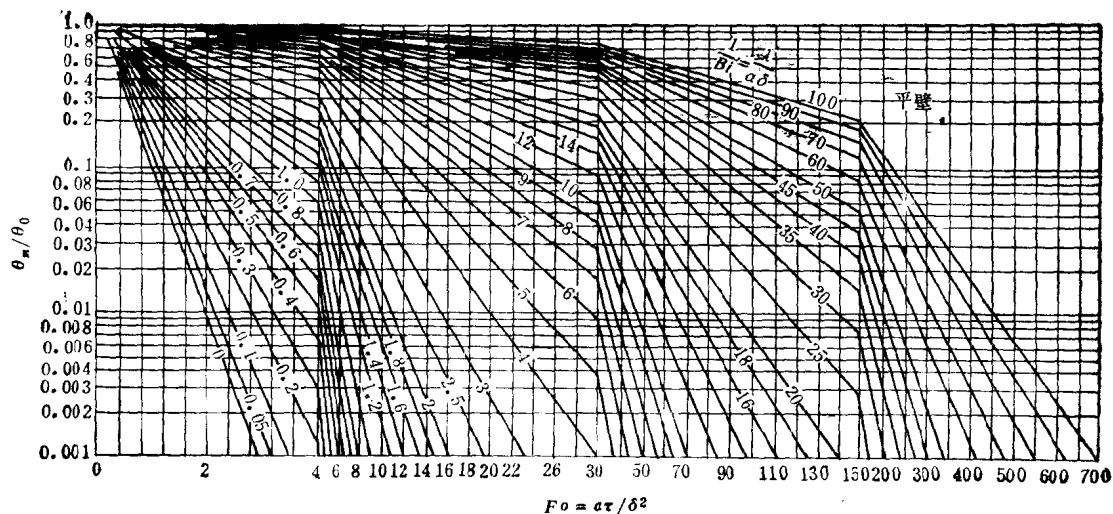


图2-6 无限大平壁中心面温度的诺模图

① 由于篇幅所限, 公式的一般推导过程从略。如有需要, 读者可参阅有关专著。下同。

但是,具体的函数关系 f 比较复杂,对于所有工程问题都要通过计算求解,那是很不方便的。实际上,许多工程问题都采用前人根据上述解析关系作出的诺模图线来解决。图2-6所示为计算厚度为 2δ 的无限大平壁中心平面上的无量纲过余温度 θ_m/θ_0 的诺模图。图中以傅里叶准则 Fo (即 $a\tau/\delta^2$)为横坐标,毕渥准则的倒数 $1/Bi = \lambda/(\alpha\delta)$ 为参变量,只要根据已知条件求出了这两个准则数即可由图上查得相应的 θ_m/θ_0 值。因为

$$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{t_m - t_f}{t_0 - t_f}$$

这样,中心平面层的温度 t_m 也就不难求得了。

如果要求距离中心平面 x 处的温度,则可在图2-6上查得 θ_m/θ_0 的值以后,再从图2-7上根据相应的毕渥准则 Bi 的大小,从无限大平壁的无因次温度曲线查得 θ/θ_m 的值,由这两个无量纲过余温度的乘积

$$\theta/\theta_0 = (\theta_m/\theta_0) \cdot (\theta/\theta_m)$$

便可求出所需截面处的温度了。

对于无限长圆柱体在非稳态导热过程中的温度分布也有类似的情况,同样可采用诺模图线法求解。图2-8是求解无限长圆柱体中心温度的诺模线图,而图2-9则为求距圆柱轴线 r 处的温度用的修正系数 θ/θ_m 的诺模图线。

至于工程上经常应用的矩形截面长柱体和短圆柱体这一类导热体,前者可视为由不同厚度的两块无限大平板垂直相交所构成(图2-10a),而后者则由长圆柱体和大平板垂直相交而

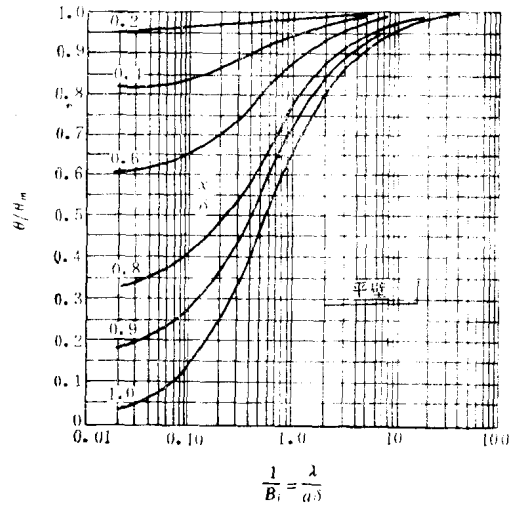


图2-7 无限大平壁的 θ/θ_m 图线

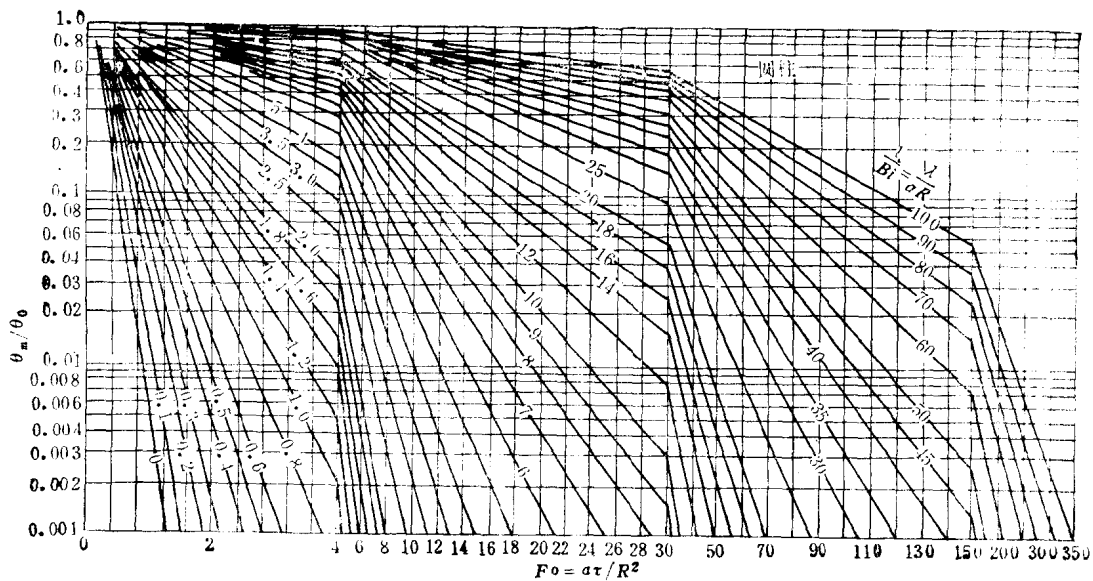


图2-8 无限长圆柱体的 θ_m/θ_0 图线

成(图2-10b)。这样,矩形截面长柱体内任一点的无量纲过余温度可以看作两块厚度分别为 $2\delta_1$ 和 $2\delta_2$ 的无限大平壁的无量纲过余温度之积,即

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)_{\delta_1} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)_{\delta_2}$$

式中 δ_1 、 δ_2 ——分别为二无限大平板厚度的一半。

同理,短圆柱体截面上任意一点的无量纲过余温度为

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)_{\delta} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)_R$$

例2-4 一个直径为8cm、长度为10.5cm的罐头,内装560g固形食品,其水分含量为80%,密度为 $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ 。罐头及其内容物的初始温度为 80°C ,将其迅速放入一蒸锅中,并用蒸气加热至表面温度达 115°C 。求30min后中心温度为多少?已知蒸气和罐头表面间的对流换热系数为 $5600 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

解 由有关食品加工手册查得该种罐头的比热容 $c = 3500 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$,导热系数 $\lambda = 0.43 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。由此可计算得导热系数为

$$\begin{aligned} a &= \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0.43}{3500 \times 1100} \text{ m}^2/\text{s} \\ &= 1.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

显然,此罐头可看成由一半径为 $R = 0.04 \text{ m}$ 的无限长圆柱体与一厚度为 $2\delta = 0.105 \text{ m}$ 的无限大平板垂直相交所构成。其中,无限长圆柱体中心的过余温度,由

$$\frac{1}{Bi} = \frac{\lambda}{\alpha R} = \frac{0.43}{5600 \times 0.04} = 0.002$$

和

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2} = \frac{1.12 \times 10^{-7} \times 30 \times 60}{0.04^2} = 0.126$$

查图2-8得

$$\left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)_R = 0.8$$

对于无限大平板,由

$$\frac{1}{Bi} = \frac{\lambda}{\alpha \delta} = \frac{0.43}{5600 \times 0.0525} = 1.46 \times 10^{-3}$$

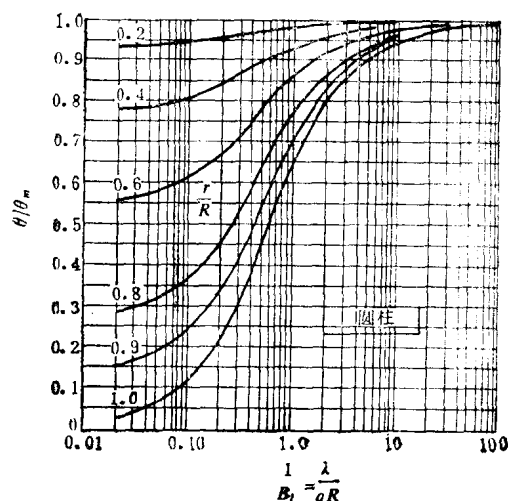


图2-9 无限长圆柱体的 $\frac{\theta}{\theta_0}$ 图线

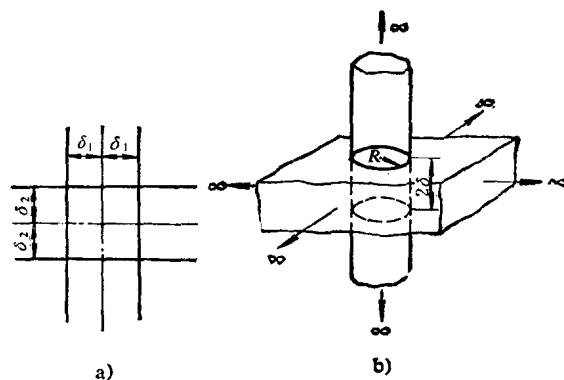


图2-10 矩形长柱体和短圆柱体

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{1.12 \times 10^{-7} \times 30 \times 60}{0.0525^2} = 0.073$$

查图 2-6 得平板中心过余温度为

$$\left(\frac{\theta_m}{\theta_0} \right)_\delta = 0.95$$

由上可知, 该罐头中心的无量纲过余温度为

$$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{t_m - t_f}{t_0 - t_f} = \frac{t_m - 115}{80 - 115} = 0.8 \times 0.95 = 0.76$$

$$t_m = 0.76 \times (80 - 115) + 115^\circ\text{C} = 88.4^\circ\text{C}$$

§ 2-2 对 流 换 热

一、牛顿公式和对流换热系数

在工程上, 如果仅仅依靠导热来达到换热的要求, 无论在传热的数量上或者距离上, 都受到很大的限制。为此, 常常设法利用流体的流动以实现热量的传递, 这样的过程称为热对流。而流体在流动过程中又总时时和不同温度的流体或固体相接触, 这样就一定伴随以导热过程。这种伴随有导热的热对流过程, 称为对流换热。

对流换热可分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由于冷、热流体密度不同而产生的浮升力所引起的流动; 强制对流是由于受到各种不同外力作用所造成的流动。根据流体力学, 流体在流道内受迫流动时, 其流动状态又可按雷诺数分成层流和紊流两种。流体的流动状态不同, 对流换热过程中的热对流作用也不同。

正如在流体力学中分析的那样, 流体流经平壁时, 由于流体的粘性阻力, 总会在壁面形成厚度很薄而速度变化强烈的速度边界层, 而当流体与平壁有热交换时, 便会形成厚度极薄的热边界层(图2-11)。流体与平壁之间发生的热交换一定要通过上述热边界层, 而且大量的实验和经验证明, 在热边界层中存在着显著的温度梯度, 说明对流换热热阻主要存在于该热边界层中。在速度边界层中, 由于引起流动的原因及其它各项参数不同, 可以分成层流边界层和紊流边界层。在层流边界层中, 由于各层流体之间没有宏观的流体微团在壁面法向上的运动和混杂, 而只有微观分子的扩散, 因此, 热交换是以导热机理为基础的; 随着层流边界层的

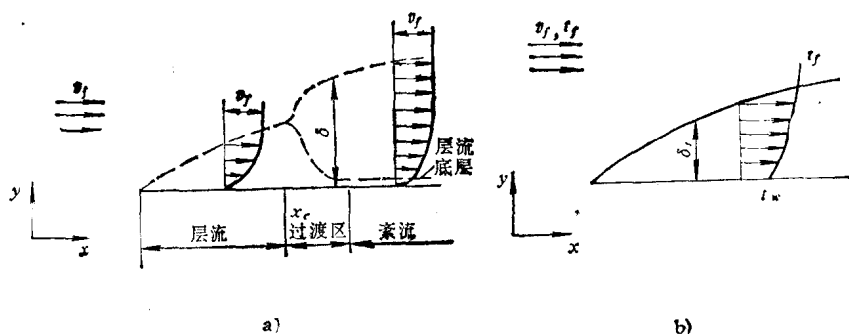


图2-11 速度边界层与热边界层

a) 速度边界层 b) 热边界层