

高等学校试用教材

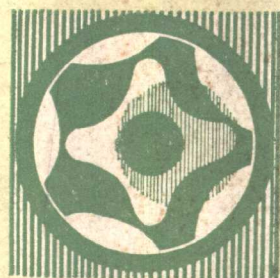
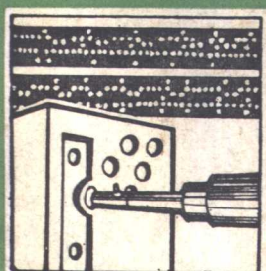
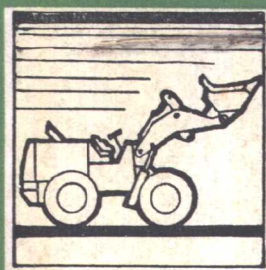
2875.28226

TK122



热工及热应力基础

东北重型机械学院温崇哲 编



机械工业出版社

高等学校试用教材

热工及热应力基础

东北重型机械学院温崇哲 编



机械工业出版社

热工及热应力基础
东北重型机械学院温崇哲 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)

重庆印制一厂印刷

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15 1/4·字数373千字
1982年9月北京第一版·1982年9月重庆第一次印刷
印数 0,001—5,000·定价1.60元

*

统一书号: 15033·5133

前 言

本书是根据一九七八年四月高等学校一机部对口专业教材座谈会确定的计划编写的。

编写时注意了, 冶炼设备专业的需要, “燃料及燃烧计算”和“筑炉材料”两部分内容没有编入本书, 而主要编写了“传热学基础”、“热应力理论基础”和“热工检测仪表与自动调节”三方面内容; 其次在传热学基础和热弹性理论中主要讲述了分析解法, 而更着重介绍了数值解法及辐射传热的网络解法等较新内容。

全书分三篇共十二章。第一篇为传热学基础, 包括传导传热、对流传热、辐射传热及综合传热的基本原理和应用; 第二篇为热应力理论基础, 包括热弹性理论基本方程、定常与非定常温度场的热应力、壳体的轴对称热应力以及热应力问题的数值解法; 第三篇为热工检测仪表与自动调节, 包括温度、压力、流量等热工参数的检测仪表及其自动调节的基本原理和应用。

全书由东北重型机械学院温崇哲编写。本书承主审人东北工学院任世铮同志, 详细审阅了第一、五、六、七、八章, 提出了许多宝贵的修改意见。鞍山冶金矿山公司矿山设计院祁大维同志热心仔细地审阅了本书的其它部分, 并提出了宝贵意见和建议。西北工业大学叶天祺同志提供了有关热应力的部分资料, 对本书的编写帮助很大。本书责任编辑是一机部教材编辑室高文龙同志。编者在此一并表示衷心的感谢!

本书可作为高等工业院校冶炼设备专业的教材, 也可供冶金机械类和冶金工艺类有关专业学生和工程技术人员参考。

由于编者水平所限, 时间仓促, 参阅文献不多, 书中难免有缺点和错误, 请读者批评指正。

目 录

绪 论

第一篇 传热学基础

第一章 传导传热 5

- § 1-1 传导传热的基本概念与基本定律 5
- § 1-2 一维稳定传导传热 7
- § 1-3 二维稳定传导传热 13
- § 1-4 二维稳定导热的分析解法 16
- § 1-5 二维稳定导热的数值解法 20
- § 1-6 不稳定导热 27
- § 1-7 二维不稳定导热的数值解法 31

第二章 对流传热 35

- § 2-1 对流传热的基本概念 35
- § 2-2 相似理论简述 36
- § 2-3 相似理论在对流传热中的应用 40
- § 2-4 自然对流传热的计算 45
- § 2-5 管槽内紊流强制对流传热 49
- § 2-6 流体横向流过管束的传热 51

第三章 辐射传热 59

- § 3-1 辐射传热的基本概念 59
- § 3-2 热辐射的基本定律 61
- § 3-3 角度系数 66
- § 3-4 两个表面组成封闭体系时的辐射热交换 68
- § 3-5 有隔热板时的辐射热交换 76
- § 3-6 气体与火焰辐射 79

第四章 稳定综合传热 85

- § 4-1 对流和辐射同时存在时的综合传热 85
- § 4-2 一气体通过平壁传给另一气体的热流量 86
- § 4-3 流体通过圆筒壁对另一流体的综合传热 88

第二篇 热应力理论基础

第五章 热弹性理论基本方程

- 与定常热应力 90
- § 5-1 热应力的概念 90

§ 5-2 两侧表面有温差周边固

定板中的热应力 92

§ 5-3 一维定常温度场产生的热应力 93

§ 5-4 热弹性基本方程 95

§ 5-5 热弹性理论的位移方程与热弹性位移势 99

§ 5-6 平面变形问题 101

§ 5-7 平面应力问题 103

§ 5-8 平面问题的极坐标表达式 108

§ 5-9 圆板在轴对称温度分布时的热应力 113

§ 5-10 长厚壁圆筒在轴对称温度分布时的热应力 114

§ 5-11 长厚壁圆筒在定常的非对称温度分布时的热应力 117

§ 5-12 不产生热应力的平面温度场 121

§ 5-13 表面上有热耗损的板的定常热应力 124

§ 5-14 表面上有热耗散的无限长带状板的定常热应力 125

第六章 非定常热应力 127

§ 6-1 热传导问题的柱坐标级数解法 127

§ 6-2 实心圆柱非定常热应力 130

§ 6-3 温度分布为轴对称 133

§ 6-4 平面问题的非定常热弹性位移势 135

§ 6-5 热应力理论应用实例 137

第七章 热应力问题的数值解法 140

§ 7-1 有限差分法 140

§ 7-2 计算热应力的有限单元法 143

第八章 壳体的轴对称热应力 152

§ 8-1 不受载荷的旋转壳的热应力的基本方程 152

§ 8-2 几种典型壳体 155

§ 8-3 已知两表面温度分布的圆筒壳 157

§ 8-4 具有特殊温度分布的圆筒壳 159

第三篇 热工检测仪表与自动调节

第九节 温度测量仪表.....163

§ 9-1 热电高温计.....164

§ 9-2 电阻温度计.....179

§ 9-3 辐射高温计.....182

第十章 压力测量仪表.....188

§ 10-1 弹簧管压力计.....189

§ 10-2 电测压力表——霍尔压力变送器.....190

第十一章 流量测量仪表.....192

§ 11-1 节流装置.....192

§ 11-2 涡轮流量计.....196

第十二章 自动调节.....198

§ 12-1 电动单元组合仪表概述.....198

§ 12-2 自动调节系统的概念.....201

§ 12-3 自动调节系统及其组成环节的特性.....203

§ 12-4 调节器的调节规律.....207

§ 12-5 高炉生产热工过程的自动调节系统.....212

§ 12-6 纯氧顶吹转炉的自动调节系统.....215

附 录.....221

参考文献.....239

绪 论

一、《热工及热应力基础》的研究对象及其工程实用意义

传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。

凡是有温度差的地方，就有热量自发地由高温物体传到低温物体，由于自然界和生产过程中，温度差是到处存在的，因此，传热就成为自然界和生产领域中非常普遍的现象。

传热学在各个工业技术部门应用十分广泛。诸如，动力、冶金、建筑、制冷、电工、化工、航空及机械制造业中测算和控制冷加工或热加工的机件温度场，以及原子能、火箭等尖端技术的研究和应用，无一不需要到传热学的知识。近几十年来，传热学研究的成果，对技术的进步曾起了很大推动作用，而传热学在各技术领域的渗透又促进了学科本身的迅速发展。

此外，热传导理论又是高温机械中温度场计算的基础，热应力分析与计算的前提。

热应力理论发展到现在，时间不太长，虽然在各种关于弹性理论的书籍中或多或少讨论热应力问题，但对这方面的理论综合阐述的不多，目前还远不能满足解决实际问题的需要。

热应力现象普遍地发生在机械制造、航空、冶金、建筑工业和其它许多国防及民用工业部门，由于热应力与各种工程结构，特别是高温结构材料寿命密切相关，已越来越为人们所关注。随着原子核动力的发展，火箭技术、宇宙航行高速飞机的实现，电子计算机的出现以及所有机械、构件性能的提高，高温强度问题及与材料寿命有关的热应力分析在设计中已经占据十分重要的位置。因此，在学完材料力学与弹性力学的基础上，进一步研究热应力的基础理论，用以分析和解决冶炼设备中的热应力问题是非常必要的，而且是十分重要的。

工业生产过程的自动化是现代工业生产发展的重要方向之一。自动化程度，是当前科学技术发展的一个重要的综合技术指标。随着当代科学技术的发展，热工检测仪表及其自动调节，越来越显示它的重要性，这是因为工业自动化的实现，不但可以改善工人的劳动条件，降低劳动强度，保证安全生产，而且可以大幅度的增加产量、提高质量、降低成本、减少原料和动力消耗，把复杂的生产过程控制在最优的条件下进行。

解放后，我国的仪表工业从无到有，已形成了独立的完整的仪表工业体系，为我国自动化事业提供了大量的优质仪表，使自动化事业得以迅速发展。

二、课程的任务及性质

《热工及热应力基础》是冶炼设备专业的一门专业基础课程。其任务是使学生掌握传热学及热应力的基本理论知识和计算技能，并熟悉热工检测仪表的工作原理、用途及自动调节方法，为学习有关专业课程和进行冶炼设备设计奠定必要的基础。

例如在热风炉的热风阀、高炉冷却部件、转炉炉壳及托圈强度的设计，转炉炉膛内热交换的分析与计算，氧枪的换热计算，连铸机结晶器和拉辊、夹辊等热应力的分析与计算等，无一不需要这方面有关的知识。因此，学习本课程的目的，就是要掌握它们的客观规律，为进行实际设计及科学研究打下牢固的基础。

三、课程的研究方法

本课程讨论的内容属于冶炼设备专业的技术基础课，其研究问题的方法主要有以下三种基本方法：

1. 分析解法

已知边界条件和起始条件下，求解微分方程组，除少数简单情况外，一般求解方程组比较困难，但这种方法结果较精确。

2. 数值解法

数值解法又分为有限差分法和有限单元法两种。

(1) 有限差分法

这种方法是将基本方程组和边界条件、起始条件（一般是微分方程）近似地化为差分方程（线性代数方程）来表示，把求解微分方程的问题变为求解代数方程的问题。随着大型电子数字计算机的广泛应用，这一方法得到迅速发展，有很大实用价值。

(2) 有限单元法

这种方法近二、三十年来在国内外发展很快，结合电子计算机不仅可以用于平面问题的计算，而且对于三维的空间问题，也可以得到满意的解决。

3. 在相似理论指导下的实验研究方法

一般来讲，用实验方法研究问题的缺点在于不能把一项实验结果推广应用于与所研究的现象有所不同的其它现象中去；而分析解法的缺点是在复杂情况下常常不能求得解答。相似理论将这两种方法结合在一起而成为一种指导实验的理论。

以上三种方法是相辅相成的，可以根据实际的具体条件采用不同的研究方法，在某些情况下，对同一个问题，也可以同时采用两种以上的方法来解决。

四、单位制

本书采用国际单位制(SI)，它的基本单位是：

长度——米，m；

质量——公斤，kg；

时间——秒，s；

温度——开尔文，K

在传热和热应力计算中，为方便起见，有时本书也采用摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ ，作为温度的单位。

在国际单位制中，力是导出单位，根据牛顿第二定律各导出单位是：

力——牛顿， $\text{N}(\text{m}\cdot\text{kg}/\text{s}^2)$ ；

压力、应力——帕斯卡， $\text{pa}(\text{N}/\text{m}^2\text{或}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ；

能量、热量、功量——焦耳(牛顿·米)， $\text{J}(\text{m}^2\cdot\text{kg}/\text{s}^2)$ ，或千焦耳，kJ；

功率——瓦(或千瓦)，W (或 kW)

$$1\text{W}=1\text{J/s}$$

由于目前工程计算中采用工程单位制还很普遍，因此还必须熟悉两者的换算关系。工程单位制的基本单位是：

长度——米，m；

重量——公斤力，kgf；

时间——秒，s；

温度——摄氏度, $^{\circ}\text{C}$

工程单位制中质量是导出单位, 根据牛顿第二定律各导出单位是:

质量——公斤力·秒²/米, $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$;

压力、应力——公斤力/米², kgf/m^2 ;

热量——千卡, kcal ;

能量——公斤力·米, $\text{kgf}\cdot\text{m}$ ($1\text{kcal}=427\text{kgf}\cdot\text{m}$);

功率——千瓦, kW ;

功量——千瓦·时, $\text{kW}\cdot\text{h}$ ($1\text{kW}\cdot\text{h}=860\text{kcal}$)。

国际单位制和工程单位制的基本换算关系为

$$1\text{N}=\frac{1}{9.81}\text{kgf}=0.102\text{kgf}$$

或

$$9.81\text{N}=1\text{kgf}$$

$$1\text{kJ}=\frac{1\times 1000}{9.81\times 427}\text{kcal}=0.239\text{kcal}$$

或

$$4.187\text{kJ}=1\text{kcal}$$

$$1\text{J/s}=\frac{1\times 3600}{9.81\times 427}\text{kcal/h}=0.86\text{kcal/h}$$

或

$$1.163\text{J/s}=1\text{kcal/h}$$

读者要熟记上述几个常用的基本换算关系, 在热工及热应力的计算经常用到它。

第一篇 传热学基础

传热学是一门研究热的传播过程的科学。凡是有温度差的地方，就有热量自发地由高温物体传到低温物体，由于自然界和生产过程中，温度差是到处存在的，因此，传热过程出现在各种不同的技术领域内，而且起着很大的作用。钢铁冶炼设备及工艺中有着各种极其复杂的传热过程，例如高炉、转炉与平炉炉内传热过程；浇注时连铸机结晶器的传热；各种冶炼机械部件以及连铸机本身机件的温度场的测算等等，都要求具备一定的传热学理论知识，因此掌握传热的基本规律，对于冶炼机械设计工作者而言是极为重要的。

传热过程是一种复杂的物理现象，按其物理本质的不同，通常都把传热划分为三种基本方式——传导、对流和辐射。

传导传热现象是指通过固体或静止的流体的热扩散过程。热量直接由物体的一部分传至另一部分，或由一物体直接传至与其相邻的另一物体，传导传热在固体、液体和气体中都可能发生。在一般固体中是依靠分子振动，在金属内主要依靠自由电子的扩散，在气体中则依靠原子或分子的扩散来进行传递。

对流传热现象只能在气体或液体中出现，它是借温度不同的各部分流体发生扰动和混合而引起的热量转移。必须指出，在对流传热的同时，流体各部分之间还存在着传导传热。

辐射传热是一种由电磁波来传播热量的过程，它与传导和对流有着本质的区别。热能转化成辐射能，被物体吸收的辐射能又转化为热能，因此这种传热方式不仅进行能量的转移，而且还伴随着能量形式的转化。

实际中很难存在某种单一的传热方式，常是一种方式伴随着另一种方式同时出现。从某种物体将热量传递至另一物体的全部现象称为综合热交换。不同的传热现象可能是由不同基本传热方式所组成，然而一切传热方式还有它们的共同性；并服从一般的计算公式。其共性是：只有存在温度差时才可能发生传热过程。一般说来，温度差越大，传热过程也越强烈。但这只是问题的一个方面，除了温度差这一推动因素外，还存在各种阻碍传热的因素，如传热两方的距离、物体的导热能力等，这些因素的综合称为“热阻”。传热方式不同，热阻的内容和表现形式也不同，热阻越大，传热量越小。温度差与热阻对传热量来说是互为矛盾又互相联系的两方面因素。它们的对比关系决定传热量的大小，类比于电学中欧姆定律的形式，即

$$\text{电流 } I = \frac{\text{电位差 } \Delta E}{\text{电阻 } R} \quad (\text{安培})$$

单位时间的传热量称为热流，热流与温度差及热阻之间也呈现着同样的规律

$$\text{热流 } Q = \frac{\text{温度差 } \Delta t}{\text{热阻 } R_t} \quad (\text{瓦特})$$

与欧姆定律相对照, 可以看出热流 Q 相当于电流 I , 温度差 Δt 相当于电位差 ΔE , 而热阻 R , 相当于电阻 R 。这样, 得到一个在传热学中非常有用的概念——热阻。

传热学的任务, 就是研究不同条件下热量和热阻的具体内容和数值, 从而能计算出传热量大小, 或更合理地控制和改善传热过程。

实际传热过程往往是两种或三种传热方式同时存在的综合, 故热阻也将是几种传热方式综合在一起的热阻。我们将首先分别研究各种传热方式单独存在时的传热规律和热阻, 然后再扩大到研究一般的实际传热过程。

第一章 传导传热

传导传热是物体各部分或不同物体之间直接接触而发生的热传播现象, 此时, 热量的传递是依靠物质的分子、原子以及自由电子等微观粒子的热运动而进行的。只要物体内有温差, 就会有传导传热产生, 所以传导传热过程与物体内部温度的分布状况密切相关。按照物体内部温度分布情况的不同, 分为一维、二维和三维传导传热; 同时根据温度分布是否随时间而改变, 又可分为稳定传导传热和不稳定传导传热。本章讨论导热过程的基本规律与有关计算。

§ 1-1 传导传热的基本概念与基本定律

一、温度场及温度梯度

温度场就是某一瞬间空间所有各点的温度分布, 它与热的传递过程密切相关。在一般情况下, 温度 T 是坐标 x, y, z 和时间 τ 的函数, 其数学表达式是:

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (1-1)$$

温度场可以是三个坐标、两个坐标或一个坐标的函数, 所以温度场又可分为三维、二维或一维温度场。一维稳定温度场的数学式具有最简单的形式, 即

$$T = f(x)$$

在物体或空间内总有一些点具有同一温度, 具有相同温度的各点所组成的面称为等温面。从任意一点 o 沿等温面移动没有温度的变化, 只有在穿过等温面的方向(如图 1-1)才能观察到物体内部温度的改变。最显著的温度变化是在等温面的法线 n 方向, 相邻两等温面的温度差 ΔT 与沿法线方向两等温面之间距离 Δn 的比值的极限叫做温度梯度, 即

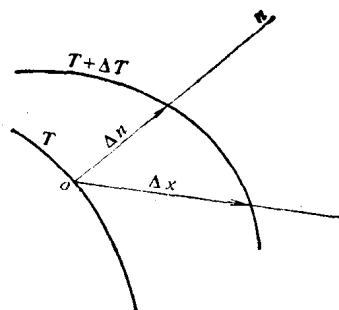


图 1-1 关于温度梯度的定义

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n} \quad (^\circ\text{C}/\text{米}) \quad (1-2)$$

温度梯度的数值等于在和等温面垂直的单位距离上温度改变的数量，它表示温度变化的强度。

温度梯度是一种沿等温面法线方向的向量，正向朝着温度增加的一方，温度梯度的负值称为温度降度，它的数值与温度梯度相等而方向相反。在稳定传导传热中物体内部各点的温度，以及温度梯度都不随时间而变化。

二、傅里叶定律

当固体内部有温度梯度存在时，热量就会从高温处传向低温处，法国数学家傅里叶研究了固体的导热现象后，确定了通过垂直于热量传播方向的 A 米² 截面积的单位时间的传热量与温度梯度成正比。即

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} A \quad (\text{瓦特}) \quad (1-3)$$

对于单位面积而言

$$q_A = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{瓦特/米}^2) \quad (1-4)$$

式中 Q ——沿 x 方向单位时间的传热量(瓦特)；

A ——与热流相垂直的传热面(米²)；

q_A ——单位时间内通过单位面积所传递的热量，称热流密度，(瓦特/米²)；

$\frac{\partial T}{\partial x}$ ——沿 x 方向的温度梯度(℃/米)；

λ ——与物体的物理性质有关的比例系数，称为导热系数(瓦特/米·℃)。

式(1-3)称为傅里叶定律，它已为后来的大量实验所证实。式中的负号是由于热流 $q(Q)$ 与温度梯度方向相反。

三、导热系数

导热系数是衡量物质导热能力的一个指标。从式(1-3)来看，当 $A=1$ 米²， $T_1-T_2=1$ ℃时， $\delta=1$ 米时， λ 在数值上就和 Q 相等，也就是说，导热系数在数值上等于一个厚度为 1 米、表面积为 1 米² 的平壁两侧维持 1℃ 温差时，每小时通过该平壁的热量。显然，这个数值越大意味着物质的导热性能越好。

不同物质的导热系数相差很大。一般说金属的导热系数最大，其次是非金属材料 and 液体，气体的导热系数最小。

常用的金属中，紫铜的导热系数最大，为 380 瓦/米·℃，其次是铝，为 217 瓦/米·℃，钢铁为 46 瓦/米·℃；非金属材料的导热系数比金属材料低得多，例如混凝土为 1.28 瓦/米·℃，玻璃为 0.7~1.0 瓦/米·℃；液体的导热系数也较小，如水为 0.6 瓦/米·℃，油类约为 0.12~0.15 瓦/米·℃；至于气体就更低，如空气仅为 0.026 瓦/米·℃，氢气为 0.15 瓦/米·℃。锅炉水垢的导热系数约为 1.28~3.13 瓦/米·℃，烟灰的导热系数在

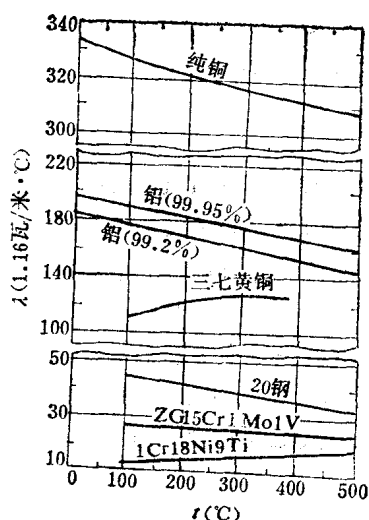


图 1-2 金属的导热系数

0.16瓦/米·℃左右。

导热系数的大小还和温度有关，上面列举的数值都是常温下的数值。大部分纯金属的导热系数随温度的升高而下降，如图1-2所示。合金的导热系数远低于其各个金属组分的导热系数，且常随温度升高而增大。这是因为金属的导热是靠自由电子的迁移和晶格的振动作用，而且以前者为主。当金属温度升高时，晶格的振动加强，干扰了自由电子的运动，而使 λ 下降。金属中如混有极微量的杂质，都会因杂质干扰自由电子的运动而使 λ 减小。例如，纯铁 $\lambda=73$ 瓦/米·℃，当含有3%的碳时， λ 下降为64~47。液体的导热系数一般说随温度升高而下降，但水却是一个例外，如图1-3所示；气体的导热系数随温度的升高而增加，如图1-4所示，但水蒸汽又是例外。

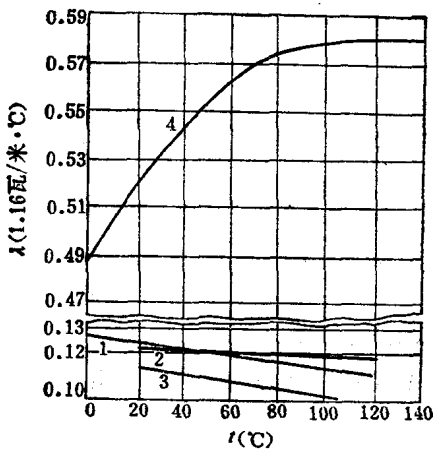


图1-3 液体的导热系数

1—润滑油 2—锭子油 3—变压器油
4—1个大气压的水

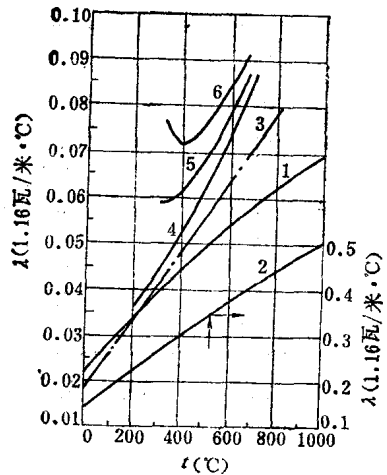


图1-4 气体的导热系数

1—干空气 2—氢气 3—平均成分的燃气 4—40个绝对大气压水蒸汽
5—100个绝对大气压水蒸汽 6—150个绝对大气压水蒸汽

大多数工程材料的导热系数值可以近似地认为与温度呈线性关系，即

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta T) \quad (1-5)$$

式中 λ_0 ——0℃时的导热系数；

β ——由实验确定的常数。

β 可以是正值，也可以是负值，意即物质的导热系数可以随温度上升而增大（例如气体、建筑材料和绝热材料），也可以随温度上升而减小（例如除水外的大多数液体和金属）。在工程计算中，导热系数常取材料实际所处的温度范围内的算术平均值，并把它当作常数。

各种材料的导热系数差别很大，现选择一些主要材料，列于表1-1。

§1-2 一维稳定传导传热

傅里叶方程式必须经过积分才能用于计算。为此， λ 如何随 T 而变以及 A 如何随 x 而变，一定要事先明确。

傅里叶方程式可以写作

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

表 1-1 各种材料的导热系数

材 料 名 称	λ [焦耳/米·时·℃]	材 料 名 称	λ [焦耳/米·时·℃]
(气体)		(建筑材料)	
蒸 汽	41.86~334.8	耐 火 砖	2093~5023
空 气	83.72~280	红 砖	2930~3760
氢 气	586~2093	混 凝 土	2930~5023
(液体)		玻 璃	2510~3760
酒 精	628~670	石 灰 泥	2510~4186
水	1962~2470	木 柴	418.6~628
(金属)		(绝缘材料)	
银	1650000	石 棉	544~754
纯 铜	1420000	砂 土	209.3~418.6
普 通 铜	1256000~1340000	锯 屑	251
黄 铜	334800~418600	软木塞、毛毡	167~334
青 铜	125600~167400	泥 炭	
铁、铸铁		(其它材料)	
碳 素 钢	167400~209300	锅 炉 水 垢	837~1674
合 金 钢	62800~125600	烟	418.6~837
镍钢含 Ni 3~4%	4186	烟 渣	209.3~418.6

当 $x=x_1$ 时, $T=T_1$; 当 $x=x_2$ 时, $T=T_2$; 温度只沿 x 方向变化, 因此温度场是一维的, 积分上式

$$-\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT = Q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A}$$

或

$$(T_1 - T_2) \frac{\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT}{T_2 - T_1} = Q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A} \quad (1-6)$$

式中 $\frac{\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT}{T_2 - T_1}$ 就是在 T_1 和 T_2 之间导热系数的平均值 $\bar{\lambda}$ 。只要代入 λ 与 T 之间适当的关系式, 就可以算得 $\bar{\lambda}$ 。

如果 λ 与 T 成直线关系, 或 $\lambda = \lambda_0(1 + \beta T)$, 则

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= \frac{\int_{T_1}^{T_2} \lambda_0(1 + \beta T) dT}{T_2 - T_1} = \frac{\lambda_0[(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2)]}{T_2 - T_1} \\ &= \lambda_0 \left[1 + \beta \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \right] = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 λ_1 与 λ_2 各为 T_1 和 T_2 时的 λ 。亦即, 如果 λ 与 T 成直线关系, 我们应当采用 λ_1 与 λ_2 的算术平均值。

只要知道 λ 与 T 的关系, 就可求出 λ 。至于 A 与 x 的关系我们将在后边再讨论。

一、平壁的稳定导热

平壁就其组成材料的不同, 可分为单层平壁和多层平壁。现分别研究它们的传热量计算及壁内温度的分布情况。

1. 单层平壁导热

设厚度为 S 的单层平壁 (图 1-5) 的面积远大于其厚度, 因此可以不计周边的影响, 而认为平壁的温度只沿着垂直于壁面的 x 轴向发生变化。在这种情况下温度场是一维的, A 为定值。又设 T_1 和 T_2 各为平壁两侧表面高温面与低温面的温度, 且 T_1 和 T_2 各保持均匀稳定。则由式 (1-6) 得

$$\lambda(T_1 - T_2) = \frac{Q(x_2 - x_1)}{A}$$

或

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\lambda(T_1 - T_2)A}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda A}{\Delta x} (T_1 - T_2) \\ &= \frac{\lambda A}{S} (T_1 - T_2) \quad (\text{瓦}) \end{aligned} \quad (1-8)$$

如果 $\lambda = \lambda_0(1 + \beta T)$, 则

$$Q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{S} A \quad (\text{瓦}) \quad (1-9)$$

式中 $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta \frac{T_1 + T_2}{2} \right)$

因为是稳定导热, 壁内温度分布不随时间改变, 所以 Q 和 q 也都是常量。

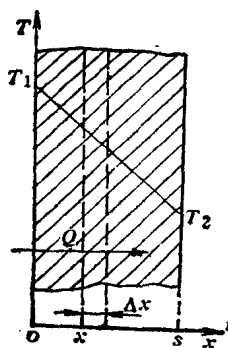


图 1-5 单层平壁的导热

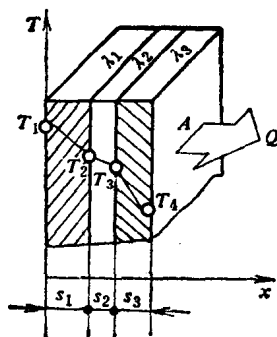


图 1-6 多层平壁的导热

在壁内 x 处取一与壁表面平行的平面, 设其温度为 T_x 。根据式 (1-8) 可得

$$q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{S} = \frac{\lambda(T_1 - T_x)}{x}$$

于是

$$T_x = T_1 - q \frac{x}{\lambda} = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{S} x \quad (1-10)$$

式 (1-10) 即单层平壁温度场的表达式。它表明当 λ 为常数时, 壁内温度按直线规律分布。

2. 多层平壁导热

如图 1-6 所示的三层壁, 各层的导热系数分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 厚度为 S_1 、 S_2 和 S_3 , 平壁面积为 A 。已知多层壁一侧的温度为 T_1 , 另一侧的温度为 T_4 , 为使问题简化, 假定壁与壁为紧密接触, 且接触面两边温度相同, 导热过程是稳定的, 现在确定通过这三层壁的传热量。

对第一层平壁, 由式 (1-8) 得

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{S_1}{\lambda_1 A}}$$

即

$$T_1 - T_2 = Q \frac{S_1}{\lambda_1 A} \quad (1)$$

同样对第二层有

$$T_2 - T_3 = Q \frac{S_2}{\lambda_2 A} \quad (2)$$

对第三层有

$$T_3 - T_4 = Q \frac{S_3}{\lambda_3 A} \quad (3)$$

在稳定导热情况下通过各层平壁的传热量 Q 都相等, 将 (1)、(2)、(3) 三式相加, 得

$$T_1 - T_4 = Q \left(\frac{S_1}{\lambda_1 A} + \frac{S_2}{\lambda_2 A} + \frac{S_3}{\lambda_3 A} \right)$$

于是, 通过多层平壁的传热量为

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{S_1}{\lambda_1 A} + \frac{S_2}{\lambda_2 A} + \frac{S_3}{\lambda_3 A}} \quad (1-11)$$

这个公式等号右边的分子是多层壁两侧的温度差, 分母相当于多层壁的总热阻, 显然它就是各层热阻之和。

所以

$$Q = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\sum \Delta T}{\sum R_{\lambda i}} \quad (1-12)$$

此式表明, 当热流通过多层壁时, 热阻越大, 温度降落也越大。正如电阻越大, 电位降落也越大一样。

应该注意: 在推导多层平壁公式时, 曾假定各层紧密接触, 而接触的两表面温度相同。实际中往往由于表面不平滑, 两相邻面很难紧密贴在一起, 由于空气隙的存在, 将使多层壁热阻增加。这种附加热阻称为接触热阻, 其数值与空隙大小、填充物种类、温度、压力、材料的硬度及其周围介质的性质有关, 很难精确估计, 计算中往往忽略这一影响, 但应注意到因此而产生的误差。

另外, 利用式 (1-12) 时, 要确定各层的平均导热系数, 因而要求知道各接触面的温度, 而实际中往往难于测定这些温度。为解决这一问题, 一般采用试算逼近法, 即先假定接触面温度为两极端温度的某中间值, 依此算出 q 值后, 再验算中间温度, 若相差太多则以验算结果为第二次假定温度, 再计算一次, 直至两个数值相近为止。实际上由于中间温度对导热系数的影响不大, 对 q 值的影响范围更小, 一般假定 1~2 次就能达到要求。

二、圆筒壁的稳定导热

如果圆筒的长度 L 远较其直径为大, 因此端头的影响可以略去不计。设 r_1 和 r_2 各为单层圆筒壁的内外半径, T_1 和 T_2 各为圆筒壁内外表面的温度。温度只沿径向改变, 因此, 仍然是一维温度场, 假定温度沿表面分布均匀, 而且等温面都与表面平行 (图 1-7)。

按傅里叶定律式 (1-3)

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r L \quad (\text{瓦})$$

以 λ 表示平均导热系数, 分离变量后积分得

$$\lambda(T_1 - T_2) = Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r L}$$

即

$$\lambda(T_1 - T_2) = \frac{Q}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

或

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} A \quad (1-13)$$

式中 $A = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}}$

式 (1-13) 亦可写成

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{r_2 - r_1}{\lambda A}} \quad (\text{瓦}) \quad (1-14)$$

与公式 (1-8) 比较可见, 圆筒壁导热公式与平壁导热公式形式完全相同, 只是取内外面积的对数平均值 ($\bar{A}$) 代替平壁的传热面 A 就可以。

对多层圆筒壁, 可按串联热阻叠加原则推导出下式

$$Q = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3}{\frac{\Delta r_1}{\lambda_1 A_1} + \frac{\Delta r_2}{\lambda_2 A_2} + \frac{\Delta r_3}{\lambda_3 A_3}} = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (1-15)$$

例 1-1 已知铝镁砖的平炉炉顶面积 $A=90$ 米², 厚度 $S=0.46$ 米, 炉顶内表面温度 $T_1=1700^\circ\text{C}$, 外表面温度 $T_2=150^\circ\text{C}$, 求 1 秒/钟内炉顶散失的热量 (铝镁砖的导热系数 $\lambda=3.04$ 瓦/米 $^\circ\text{C}$)。

解 因是单层平壁稳定导热, 根据式 (1-8) 炉顶散失热量为

$$Q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)A}{S} = 3.04 \times \frac{1700 - 150}{0.46} \times 90 = 922000 \quad (\text{瓦})$$

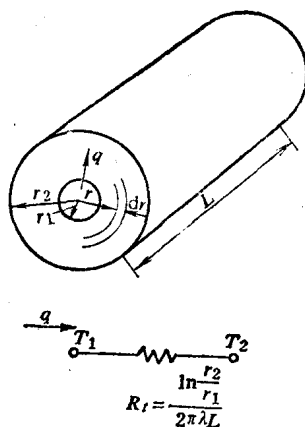


图 1-7 圆筒壁的导热及一维稳定热流的网络图