

HEAT TRANSFER OF MATERIALS

张胤 金永丽 编著

材料传热学



内蒙古科技大学



化学工业出版社

**HEAT TRANSFER OF
MATERIALS**

张胤 金永丽 编著

材料传热学



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细介绍了传热学基础、热传输方程、稳态导热问题、非稳态导热问题、对流传热、辐射换热以及复合传热的特点和数值计算,同时,对部分传热问题进行了数值模拟计算,并提供了计算程序。

本书适宜稀土和冶金相关专业的技术人员和高校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料传热学/张胤,金永丽编著. —北京:化学工业出版社, 2013.1

ISBN 978-7-122-16063-8

I. ①材… II. ①张…②金… III. ①传热学 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第303386号

责任编辑:邢 涛

装帧设计:韩 飞

责任校对:周梦华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张9 字数190千字 2013年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

前言



本书共 8 章的内容，主要介绍了传热学的概论，即研究对象、目的和研究方法，传热的 3 种基本方式和热阻等基本理论；传输方程。对模型中所涉及的数学问题进行了较为详尽的推导，便于一些初学者对传输问题有所了解，这部分内容涉及的数学知识较多；稳态导热问题，主要介绍了一维稳态导热问题的解析解法，具体包括通过平壁、圆筒壁和球壁的稳态导热，以及包含内热源的一维稳态导热问题；非稳态导热问题，包括薄材、有限厚物体和半无限大物体的非稳态导热过程。简单引入了一些数值计算的知识，并且对所涉及的传热问题进行了求解；导热问题的数值计算其中比较详细地介绍了稳态和非稳态导热问题的数值计算方法及相应的程序设计；介绍对流给热问题，包括涉及的几种情况下的理论分析和数值计算；辐射换热的知识，包括辐射换热的基本概念、基本理论等以及复合传热的一些处理方法。

本书的主要特点是将传热学的知识与实际问题的处理相结合，使得读者能够在学习理论知识的同时，更多地领会如何在工程实际中应用这些理论，以及如何来解决实际问题。尤其是将计算机的应用引入到课程的教学，给出了大量的计算机程序，将学生难以理解的数学公式转化成计算机程序，让学生用这些程序去解决具体的传热问题。

由于本书主要针对材料学科方向的本科生，本书的重点放在了材料内部的导热问题上，而在工程上很重要的换热器基本没有介绍。为此特意将书名定为《材料传热学》，以免引起不必要的麻烦，在此特别说明一下。

本书基于笔者 20 多年教学和科研工作的积累编写而成，很多内容是笔者原创性工作，特别是程序设计方面。所有程序都是作者自己编写完成的。对于书中内容，读者如有疑问，欢迎与笔者交流，笔者

电子信箱为 zhangyin_69@163.com。书中不当之处，敬请读者批评指正。

本书第 2、4、5、6 章由张胤编写完成，其余部分由金永丽编写。书中不足之处，请读者指正。

张胤

2012 年 11 月于包头

1

概 论 1

- 1.1 研究对象和目的 1
- 1.2 热量传输的 3 种方式 2
- 1.3 热阻 6
- 1.4 传热学的研究方法 7

2

热量传输的定解问题 9

- 2.1 热量传输的基本概念 9
- 2.2 傅里叶导热定律 10
- 2.3 连续性方程 11
- 2.4 动量传输微分方程 13
- 2.5 热量传输微分方程 19
- 2.6 定解条件 21

3

稳态导热 25

- 3.1 平壁一维稳态导热 25
- 3.2 圆筒壁的一维稳态导热 32
- 3.3 球壁一维稳态导热 36
- 3.4 具有内热源的一维稳态导热 42

4

非稳态导热 46

- 4.1 非稳态导热过程的基本概念 46
- 4.2 薄材的非稳态导热 49
- 4.3 有限厚物体的非稳态导热 52
- 4.4 半无限大平板的非稳态导热 59

5

导热问题的数值解法

65

- 5.1 有限差分法的基本原理 65
- 5.2 稳态导热问题的数值计算 67
- 5.3 非稳态导热问题的数值计算 75

6

对流给热

84

- 6.1 对流给热的一般分析 84
- 6.2 平板等温层流边界层流动的相似解 87
- 6.3 平板层流给热的相似解 93
- 6.4 楔形体层流给热的相似解 101
- 6.5 等壁温竖壁自然对流层流给热的相似解 109

7

辐射传热

113

- 7.1 热辐射基本概念 113
- 7.2 黑体辐射的基本定律 116
- 7.3 实际物体的辐射和吸收特性 118
- 7.4 角系数 121
- 7.5 两表面间的辐射换热 125
- 7.6 气体辐射的特点和计算 130

8

综合传热

133

- 8.1 辐射和导热综合传热分析 133
- 8.2 辐射和对流综合传热分析 134

参考文献

138



1 概 论



热量的传输即传热，是自然界及许多生产过程中普遍存在的一种极其重要的物理现象。比如自然界中阳光的传播、一年四季人们穿着的变化、现代楼宇的暖通空调、工业生产炉窑的有效冷却等无不与热量的传递密切相关。而在材料制备、热加工等过程中的加热、冷却、熔化和凝固等物理化学过程一般是在高温下进行的，热量传输对其更具有重要意义。

热量传输是研究热量传递规律的一门科学，主要包括热量的传递方式以及在特定条件下热量传递与温度分布的有关规律。如在工件的制造工艺中，温度场的测算和控制，不同工况下不同材质及几何形态对温度场变化的影响，工艺缺陷的分析和预防等无不受热量传输规律的制约。因此，探讨热量传递的本质，研究热量传递的规律，掌握和控制热量传递的速率，是保证工艺实施、提高产品质量和生产率等方面的重要理论依据。

1.1 研究对象和目的

所谓差异就是矛盾，当物体内部或物体之间的温度出现了差异，或两温度不同的物体相互接触时，就有了相对“热”和“冷”的矛盾双方，这时总会发生热量从温度高的区域向温度低的区域转移的过程。通常将这一过程叫传热过程。虽然在此过程中所传递的热量我们无法看到，但其产生的效应则是可被观察或被测量到的。一般而言，体积不变的物体得到或失去热量，都将引起其内能的变化，具体的表现为温度的升高或降低，或者发生相的变化。对于自发的传热，将永远使矛盾的双方向自己的反面转化，原温度较高的物体因传走热量而被冷却；原温度较低的物体因得到热量而被加热，随着温差的降低，最终将建立起温度一致的平衡态。若要保持某一部分的温度高于另一部分，就必须从外界向高温区不断的补充被传走的热量，并从低温区不断取走所得到的热量。热量传输研究的目的在于研究热量的传递规律，并确定热量传递速率，这也是它与热力学的不同之处。

热力学研究平衡体系。应用热力学，可以预计体系由一个平衡态到另一个平衡态需要多少热量，但无法指出这一变化有多快，因为在变化中体系是不平衡的。为了说明这个问题，考虑水中热钢棒的冷却问题，热力学可以预计钢棒-水

这一体系的最终平衡温度，但不能告诉我们需要经过多长时间才能达到这一平衡态，或者到达平衡态的某一时刻，钢棒或水的温度是多少？而应用热量传输就可预计出钢棒和水的温度随时间的变化规律。后者是以经验定律为基础的，故我们说传热学以经验定律（能够确定传热学速率的）补充了热力学第二定律。所谓传热速率即单位时间内传递的热量，即热流量。

工程中的传热问题大致上可以分为两种类型。一类是更有效的增强或减弱传热，例如冶金炉中高温的炉底水管及连铸结晶器的冷却，要增强传热，而在室外的蒸汽管道上敷设隔热材料是利用绝热以减弱传热。另一类着重于确定温度分布。例如，在材料的制备过程中，如果知道了物体内的温度分布后，就可设法采取措施，使温度分布趋于均匀，以减少热应力，或找出高温点，以确定是否超过材料的温度极限。

热量传输的研究方法既可用理论分析，也可用实验研究，此外，还可以用数值解的方法，几种方法是相辅相成的，理论的基础是实践，并在实践中发展。所以，科学技术的进步和生产经验对于加强理论分析，进而更好地解决生产中有关热传递的问题，具有十分重要的意义。

1.2 热量传输的 3 种方式

热量传递有 3 种基本方式：传导、对流和辐射。实际的热量传递过程往往是由 2 种或 3 种基本传热方式组成的。

1.2.1 传导传热（导热）

当物体内部存在温差（也就是物体内部能量分布不均匀），在物体内部没有宏观位移的情况下，热量会从物体的高温部分传到低温部分；此外，不同温度的物体互相接触时，热量也会在相互没有宏观位移的情况下，从高温物体传递到低温物体。这样一种热量传递的方式被称为传导传热，简称导热。因此，导热可以归纳为：借助于物质微观粒子的无序热运动而实现的热量传递过程。导热是物质的本能，或者是物质的固有性质，根据分子运动论，只要物体内部的温度分布不均匀，不同地点的微观粒子的能量就不同，对气体而言就会通过分子或原子间的彼此碰撞，而固体则依靠晶格的振动，在固体金属中除了晶格的振动外，还有由于自由电子的扩散而引起的热量的传递。例如冶金窑炉的炉衬温度高于炉墙外壳，炉衬内侧向炉墙外壳的热量传递；铸件凝固冷却时，铸件内部温度高于外界，由铸件内部向其外侧的热量传递就属于导热。导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为，在有温差时，液体和气体中可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

平板导热是最简单的导热问题。设有如图 1-1 所示的一块大平板，壁厚为 s ，一侧表面面积为 F ，两侧表面分别维持均匀恒定温度。实践表明，单位时间内从

表面 1 传导到表面 2 的热量 Q (热流量) 与导热面积 F 和导热温差 ΔT 成正比, 与厚度 s 成反比。写成等式为:

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{s} F \quad (1-1)$$

或:
$$q = \lambda \frac{\Delta T}{s} \quad (1-2)$$

式中 Q ——单位时间沿 x 方向传递的热量, 称为热流量, W ;

q ——单位时间单位面积沿 x 方向传递的热量, 称为热通量或热流密度, W/m^2 ;

F ——垂直于 x 方向的导热面积, m^2 ;

ΔT ——导热温差, $^{\circ}C$ 。

λ 为热导率, 也叫导热系数, 其物理意义是: 沿热流方向的单位长度上, 温度降低 $1^{\circ}C$ 时通过单位面积的热量, 其数值的大小反映了物质导热能力的大小, 是材料宏观的物理性质, λ 越大, 该物质的导热能力就愈强。

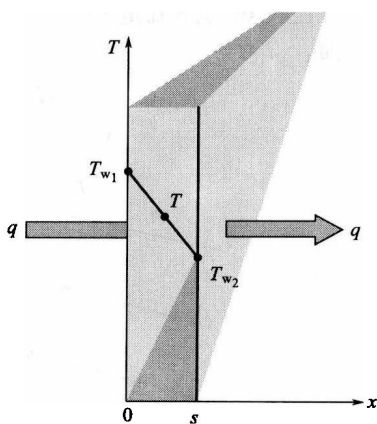


图 1-1 平板导热示意图

1.2.2 对流传热

流体中, 温度不同的各部分之间发生了相对位移时所引起的热量传递过程叫热对流。如果单位时间内通过单位面积的质量为 m 的流体从温度为 T_1 处流到 T_2 处, 其对流传递的热量为:

$$Q = mc_p (T_1 - T_2) \quad (1-3)$$

热量传递中, 流体是能量的携带者或传递者。

实际上, 热对流只发生在运动的流体中。流体流动时, 流体微团运动的同时, 伴随有微观粒子的热运动, 即导热。热对流同时伴随着导热, 两者密不可分。

工程上经常遇到的流体流过固体壁时的热传递过程。就是热对流和导热联合作用的热量传递过程, 称为表面对流传热, 简称对流传热。本书主要讨论对流传热。

对流传热根据引起流体流动的不同原因可分为自然对流和强制对流两大类。流体各部分之间由于密度差而引起的相对运动称为自然对流, 暖气片表面附近热空气向上流动就是一个例子; 由于机械 (泵或风机等) 作用或其他压差而引起的流体相对运动称为强制对流。根据是否发生相变分为有相变的对流传热和无相变的对流传热, 如沸腾及凝结、融化与凝固等都属于带有相变的对流传热现象。

当温度为 T_f 的流体流过温度为 T_w ($T_f \neq T_w$)、面积为 F 的固体壁 (见图 1-2)

时，对流传热的热流量 Q 常写成与面积 F 、流体和壁面的温差 ΔT 成正比的形式，即：

$$Q=\alpha(T_w-T_f)F=\alpha\Delta TF \tag{1-4}$$

或：
$$q=\alpha(T_w-T_f)=\alpha\Delta T \tag{1-5}$$

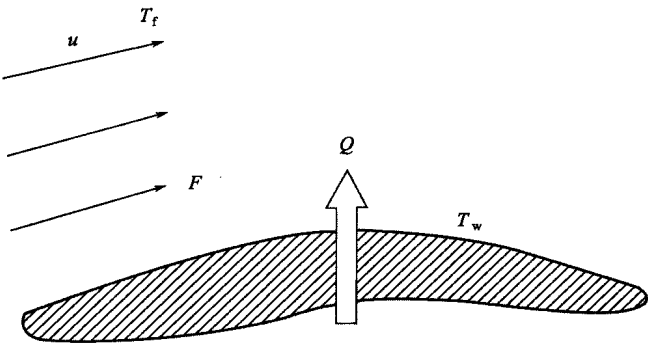


图 1-2 对流传热示意图

表 1-1 对流传热系数的大致范围

对流传热种类	$\alpha/[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$
自然对流传热	
空气	3~10
水	200~1000
强迫对流传热	
气体	20~100
高压水蒸气	500~3500
水	1000~15000
液态金属	3000~110000
气-液相变传热	
水沸腾	2500~25000
水蒸气凝结	5000~15000
有机蒸气凝结	500~2000

这就是牛顿冷却公式。工程上取 Q 或 q 为正值。流体被加热时，取 $\Delta T=T_w-T_f$ ；流体被冷却时，取 $\Delta T=T_f-T_w$ 。式中 α 是比例系数，称为表面对流传热系数，简称对流传热系数，单位为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。对流传热系数表示对流传热能力的大小。不同情况的对流传热系数相差很大。对流传热系数的大致范围列于表 1-1。求解对流传热问题的关键是寻找各种对流传热情况下对流传热系数的计算公式，这是本书对流传热部分的主要内容。

1.2.3 热辐射

物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能。

由于热的原因，物体的内能转化成电磁波的形式进行的辐射过程称为热辐射。

任何物体，只要温度高于 0K，就会不停地向周围空间发出热辐射能。物体发射热辐射能的大小和物体表面温度及表面状况有关。同一物体，温度不同时的热辐射能力不一样，温度相同时其热辐射能力与表面性质密切相关；温度相同的不同物体的热辐射能力也不一样。为了消除表面性质对辐射的影响，传热学中提出理想黑体模型的概念。黑体是一个理想辐射体，在实际物体表面和黑体表面温度相等的情况下，黑体发射的辐射能大于所有实际物体的辐射能。当黑体表面温度为 T ，发射辐射面积为 F ，黑体表面辐射的热流量：

$$Q = \sigma_0 T^4 F \quad (1-6)$$

式中 T ——黑体表面温度，K；

F ——黑体的辐射面积， m^2 ；

σ_0 ——斯蒂芬-玻耳兹曼常数，其值为 $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

式(1-6)称为斯蒂芬-玻耳兹曼定律，表明黑体发射的辐射能大小和辐射面积成正比，和表面热力学温度的四次方成正比，因此也称为黑体辐射四次方定律。

某一实际物体发射的辐射能和同温度黑体所发射的辐射能比值，称为该物体在该温度时的发射率，习惯上又称为黑度，表示实际物体辐射特性接近黑体的程度。对于常见材料的发射率可通过查附录表确定其发射率数值。因此，实际物体所发射的辐射能 Q 为：

$$Q = \epsilon \sigma_b T^4 F \quad (1-7)$$

式中 ϵ ——物体表面的发射率，习惯上称为黑度，表示物体辐射能力接近黑体的程度。

物体不断向周围空间发出热辐射能，并被周围物体吸收。同时，物体也不断接受周围物体辐射给它的热量。这样，物体发射和接受过程的综合结果产生了物体间通过热辐射而进行的热量传递，称为表面辐射传热，简称辐射传热。当物体与周围环境处于热平衡时，辐射换热量为零，但发出和吸收辐射的过程仍在不停地进行，这属于动态平衡。

热辐射与导热及对流传热相比较有以下特点：①热辐射可以在真空中传播，热传导和热对流在物体直接接触时才能进行，而热辐射的电磁波可以在真空中传播，如太阳的热量传给地球就是依靠热辐射方式；②在热辐射传递能量的过程中伴随有能量形式的转换，这是热辐射区别于热传导和热对流的另一个特点。

热量传递的 3 种基本方式由于机理不同，遵循的规律也不同，依次分开论述比较相宜。但要注意，在工程问题中有时也存在两种或三种热量传递方式同时出现的情况。如高温铸坯在厂房内的冷却散热就包含了辐射换热和对流传热两种热

量传递方式, 钢坯总的散热量为两种散热量的加和。对于这些场合, 就不能只顾一种方式而遗漏另一种方式, 这隶属于综合传热部分, 详见第 8 章。

1.3 热阻

热量的传输是自然界中的一种能量转移过程, 与自然界中的转移过程, 如电量的转移、质量的转移过程是类似的。各种转移过程的共同规律可以描述为: 过程中的转移量=过程的动力/过程的阻力。在电学中这种规律就是众所周知的欧姆定律, 即 $I = \frac{\Delta U}{R}$ 。根据欧姆定律表达式的形式(电流=电位差/电阻), 式(1-1)

和式(1-4)可改写成“热流=温度差/热阻”的形式, 即

$$Q = \frac{\Delta T}{s/\lambda F} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \quad (1-8)$$

$$Q = \frac{\Delta T}{1/\alpha F} = \frac{\Delta T}{R_a} \quad (1-9)$$

这种形式有助于我们更清楚的理解式中各项的物理意义: 式中热通流量 Q 为导热过程中热量的转移量; 温差 ΔT 为导热过程的推动力; $s/\lambda F$ 和 $1/\alpha$ 分别表示导热过程和对流传热过程的阻力, 称为导热热阻和对流传热热阻, 用 R_λ 和 R_a 分别表示, 单位为 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。同样可以据此定义单位面积热阻, 由式(1-2)和式(1-5)可得:

$$q = \frac{\Delta T}{s/\lambda} = \frac{\Delta T}{r_\lambda} \quad (1-10)$$

$$q = \frac{\Delta T}{1/\alpha} = \frac{\Delta T}{r_a} \quad (1-11)$$

式中, r_λ 和 r_a 称为单位面积的导热热阻和单位面积的对流传热热阻, 单位为 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

例 1.1 已知灰铸铁、空气及湿型砂的热导率分别为 $50.3\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $0.0321\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 及 $1.13\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 试比较 1mm 厚灰铸铁、空气及湿型砂的热阻。

解: 导热热阻 $r_\lambda = s/\lambda$, 故有:

$$\text{灰铸铁 } r_\lambda = \frac{0.001}{50.3} = 1.98 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\text{空 气 } r_\lambda = \frac{0.001}{0.0321} = 3.12 \times 10^{-2} \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\text{湿型砂 } r_\lambda = \frac{0.001}{1.13} = 8.85 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

由此可见, 1mm 的空气隙的热阻相当于灰铸铁热阻的 1500 倍, 因此在铸铁冷却分析中, 气隙的作用是不可忽略的因素。而湿型砂的热阻是灰铸铁的 45 倍

左右,可见灰铸铁的热阻在整个冷却过程中相对来说是次要的。

与电阻在电学中所起的作用一样,热阻是传热学中的一个重要概念,它表示物体对热量传递的阻力,热阻愈小,传热愈强。对于平壁导热来说,根据热阻的定义式可知,平壁厚度愈大,导热热阻愈大;平壁材料的热导率愈大,导热热阻愈小。而对流传热热阻与对流传热系数密切相关,体系的对流传热系数愈大,传热能力愈强,对流传热热阻愈小。因此,在传热过程中采用热阻的概念来研究热量传输问题,可以转换成相应的模拟电路来分析和求解,在分析模拟电路时,电阻串联和并联的计算原则仍然适用。

1.4 传热学的研究方法

一般传热问题可分为两种类型:一类是计算传递的热流量,并且有时要力求增强传热,有时则力求削弱传热。例如,汽车发动机中循环使用的冷却水在散热器中放出热量,为了使散热器紧凑、效率高,必须增强传热;又如为了使热力设备减少散热损失,必须外加保温层以削弱传热,另一类是确定物体各点的温度,以便进行温度控制和其他计算(如热应力计算),例如确定燃气轮机叶片和锅炉汽包壁内的温度分布即属于这一类。

与其他学科一样,在传热学的研究中,也需引进一些对现象进行科学简化的假设。这些假设一般分为两类。一类属于普遍性的假设,例如在本书所讨论的范围内均假设所研究的物体为连续体,即物体各点的温度等参数为时间和空间坐标的连续函数。若不考虑物质的微观结构,只要所研究的物体的尺寸与分子间相互作用的有效距离相比足够大,这一假设总是成立的。又如,假定所研究的物体是各向同性的,也即在同样的温度、压力下,物体各点的物性与方向无关。另一类假设是针对某一类特定问题引入的,例如反映物体导热能力的热导率总是随温度而变的,但为了简化计算而又不致出现明显的误差,而取为定值或适当的平均值。为了能在实际计算中做出恰当的简化和假设,必须对各种物理现象做详细的观察和分析,这就要求我们应具有丰富的理论知识和实践经验。

热传递的研究方法既可用理论分析,也可用实验研究,两者是相辅相成的。理论研究方法主要有数学分析法、有限元分析、数值计算法等。实验研究主要包括直接实验研究法和模型试验研究法。

1.4.1 传热问题的数学分析方法

在对传热现象充分认识的基础上,通过合理的简化和假设,建立简化的物理模型,再根据其物理模型建立描述该传热现象的数学模型,即微分方程及定解条件,并用解析的方法求解。但是,由于实际问题的复杂性,仅有少数传热问题能够获得分析解,而大多数问题由于数学上的困难尚不能获得分析解。虽然如此,数学方法在传热学研究中的地位仍然是不容忽视的。在本书中,将介绍一些简单

问题分析解的求取方法。如一维稳态导热、非稳态导热中的集总参数法以及一维非稳态导热均用此法求解。流体纵掠平板壁层流时的对流传热也可用数学分析法求解。

1.4.2 传热问题的数值计算方法

采用数值计算方法时,把描述传热现象的微分方程组通过离散化改写成一组代数方程,通过迭代法、消元法等数值计算方法用计算机求解该代数方程组,就可以求得所研究区域中一些代表性位置上的温度及其他所需的物理量。它不仅可求解导热问题,而且可以求解对流传热、辐射传热和整个传热过程的问题,已形成传热学的新分支——数值传热学。在本书中,只介绍导热问题的数值计算方法。

1.4.3 传热问题的实际研究方法

由于工程实践问题的复杂性,实验研究方法仍是目前传热学的基本研究方法。但由于实际传热设备往往比较庞大,要在这种设备上直接进行实验需花费较多的人力、物力,有时甚至是不可能的。其次传热实验影响因素很多,这就使得试验次数多到难以安排,同时在整理数据时也将因变量太多而无法得到一个具有普遍意义的经验公式,为了能有效地进行实验研究,常常采用缩小的模型进行实验。要使模型中的试验结果能应用到实际设备中,需按照相似理论的原则来组织试验、整理数据。



2 热量传输的定解问题



热量传输的定解问题包括热量传输方程和定解条件，其中热量传输方程可以由热力学第一定律得到。由于热量传输方程中涉及到流体流动的速度分布，因此对于求解热量传输问题，除了热量传输方程外，还要包括动量传输的连续性方程和动量传输方程。因此本章将给出这些方程的推导过程。对于热量传输的定解条件，同样包括动量和热量的初始条件和边界条件。

2.1 热量传输的基本概念

2.1.1 温度场

在某一瞬间，空间所有各点的温度分布称为温度场。一般地说，温度场是时间和空间的函数。在直角坐标系中，温度场可表示为：

$$T = T(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

式中 T ——温度；

τ ——时间；

x, y, z ——空间坐标。

在研究热量传输时，通常把所研究的对象看成连续介质，认为温度场是连续的，式(2-1)是连续函数。因此，温度的全微分可表示为：

$$\begin{aligned} dT &= \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy + \frac{\partial T}{\partial z} dz \\ \frac{dT}{d\tau} &= \frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-2)$$

如果温度场随时间变化，即 $\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0$ ，称为非稳态温度场，其传热过程称为非稳态传热。反之若温度场不随时间变化，即 $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$ ，则称为稳态温度场，其传热过程称为稳态传热。

根据温度场随空间的变化情况，温度场又分为一维、二维和三维。

2.1.2 等温面和等温线

温度场除了用函数形式表示外，还可利用几何形式表示，即用等温面和等温线表示。这种方法可以直观地了解物体内的温度分布情况。

同一瞬间，温度场中所有温度相同的点连接所构成的面称为等温面。不同等温面与任一平面相交，则在此平面上构成一组曲线，称为等温线。

在温度场中，同一时刻任何一点不可能具有一个以上的温度，因此，代表不同温度的等温面（或等温线）绝不会彼此相交。在连续温度场中，等温面（或等温线）也是连续的。

因为温度差是热量传输的推动力，而在同一等温面上各点的温度是相同的，所以在同一等温面上不可能发生热量传输，热量只能在穿过等温面方向，由高温等温面传向低温等温面。

2.1.3 温度梯度

温度梯度可以用下述方程给出：

$$\text{grad}T = \nabla T \quad (2-3)$$

温度梯度是一个矢量，通常把温度增加的方向作为它的正方向。 ∇ 称为哈密顿算子，在直角坐标系下，可以写成 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}$ ，因此温度梯度可表示为：

$$\text{grad}T = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\mathbf{k} \quad (2-4)$$

2.1.4 热流量与热通量

热流量是表示热量传输速率的物理量。单位时间内通过某一给定面积 F 所传输的热量称为热流量，用 $Q(W)$ 表示。

单位时间内通过单位面积传输的热量称为热通量，或称热量密度，用 $q[W/m^2]$ 表示。因此，热流量与热通量有如下关系：

$$Q = qF (W) \quad (2-5)$$

2.2 傅里叶导热定律

反映导热规律的基本定律是傅里叶导热定律。傅里叶在实验研究导热过程的基础上总结出，单位时间内通过单位截面积的导热热量与温度梯度成正比，即：