

# 传热学

# 理论及应用研究

C HUANREXUE LILUN JI YINGYONG YANJIU

秦臻 著

# 传热学

## 理论及应用研究



秦臻 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书以导热、辐射和对流三种换热方式进行内容的编排。全书共分7章,内容有:绪论、导热基础理论及稳态导热过程分析、非稳态导热过程分析、热辐射及辐射换热的计算、对流换热过程及其相关计算、传热过程与换热器、传热应用。书中例题的选择注重突出性、知识性,以及与工程实用性的结合,同时传热学的研究前沿也有所涉及。

本书可供从事传热学相关领域的科研工程技术人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

传热学理论及应用研究 / 秦臻著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 8  
ISBN 978-7-5170-3496-4

I. ①传… II. ①秦… III. ①传热学—研究 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第185892号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈 洁 封面设计:马静静

书 名	传热学理论及应用研究
作 者	秦 臻 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 14.25印张 255千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

传热是自然界最普遍的现象之一,在工农业生产和日常生活中都有着广泛的应用。认识传热的规律、掌握优化与控制热量传递的方法和技术是高等工程技术人才必备的基本知识与技能。传热学是研究热量传递规律的一门学科,传热学与其他学科领域,如机械工程、材料、石油化工、环境控制工程、电子技术、信息工程、航天、生物技术、医学和生命科学等科学技术的发展关系密切,不断深入到这些学科领域,形成边缘学科、交叉学科。传热工程技术是根据现代工业生产和科学实践的需要而蓬勃发展起来的先进科学技术,在能源、电力、冶金、动力机械、石油、化工、低温、建筑以及航空航天等许多工业领域发挥着极其重要的作用。

作者是从事传热学教学的一线教师,本书是作者在总结多年教学经验,以及参考国内外先进传热学理论及研究的基础上完成的。本书可供从事传热学相关领域的科研工程技术人员阅读参考。

撰写过程中,作者力求较为全面、准确地介绍传热学的理论、研究现状,并在此基础上介绍了一些新思想、新技术,使得内容更加充实,充分反映了传热学近些年来研究成果和学术思想的发展脉络,使我国在传热学的新面貌和发展趋势得以反映出来。

全书共分7章,内容有:绪论,导热基础理论及稳态导热过程分析,非稳态导热过程分析,热辐射及辐射换热的计算,对流换热过程及其相关计算,传热过程与换热器,传热应用。

撰写过程中,参考了国内外相关的研究成果,同时也参考了国内外出版的相关专业研究文献,在此对有关作者和出版单位表示衷心的感谢。

由于作者水平和时间关系,书中如有疏漏和不妥之处,敬请广大研究人员、专家学者、高校教师和各方面人士不吝赐教,深表感谢!

作者

2015年6月

# 目 录

前言

第1章 绪 论	1
1.1 热量传递的基本方式	1
1.2 传热学的研究内容、方法、进展与展望	6
1.3 传热研究在工程中的应用	11
1.4 太阳能的热利用	13
第2章 导热基础理论及稳态导热过程分析	20
2.1 导热基本定律与导热特性	20
2.2 导热微分方程式及定解条件	28
2.3 典型一维稳态导热分析	33
2.4 多维稳态导热分析	46
2.5 导热形状因子	51
第3章 非稳态导热过程分析	53
3.1 非稳态导热过程概述	53
3.2 集总参数法	56
3.3 典型一维非稳态导热分析	61
3.4 半无限大物体的非稳态导热分析	68
3.5 多维非稳态导热分析	70
第4章 热辐射及辐射换热的计算	76
4.1 热辐射概述	76
4.2 黑体辐射基本定律	80
4.3 实际物体的辐射和吸收特性	84
4.4 角系数	91
4.5 两表面间的辐射换热计算	97
4.6 遮热板及其应用	103
第5章 对流换热过程及其相关计算	106
5.1 对流换热概述	106

5.2	对流换热过程微分方程组 .....	111
5.3	边界层理论 .....	115
5.4	对流换热过程的相似理论及应用 .....	122
5.5	对流换热的工程计算 .....	132
第6章	传热过程与换热器 .....	156
6.1	传热过程分析计算 .....	156
6.2	传热的增强和削弱 .....	166
6.3	换热器的类型 .....	172
6.4	对数平均温差 .....	177
6.5	换热器的传热计算 .....	184
第7章	传热应用 .....	195
7.1	新型空冷传热技术 .....	195
7.2	高温燃气与涡轮叶片的换热 .....	198
7.3	航空发动机热端部件典型强化冷却方式 .....	203
7.4	强化传热技术在锅炉设备中的应用 .....	220
	参考文献 .....	221

# 第 1 章 绪 论

本章将重点介绍以下问题:热量传递的基本方式,传热学的研究内容、方法、进展与展望,传热研究在工程中的应用,太阳能的热利用。

## 1.1 热量传递的基本方式

热传导、热对流和热辐射为热量传递的基本方式。实际的热量传递过程都是以这三种方式进行的,或者只有其中的一种热量传递方式,但很多情况都是有两种或三种热量传递方式同时进行。

### 1.1.1 热传导

通常情况下,热传导存在于物体内部或相互接触的物体表面之间,由于分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递现象。导热依赖于两个基本条件:一是必须有温差,二是必须直接接触(不同物体)或是在物体内部传递。无论是在固体内部还是在静止的液体和气体之中均可发生导热现象。固体中的导热是讨论比较多的。液体或气体只有在静止的时候(没有了液体或气体分子的宏观运动)才有导热发生,比如当流体流过固体表面时形成的附着于固体表面的静止的边界层底层中,流体的热量传递方式才是导热。在气体中,导热的机理是气体分子不规则热运动时的相互碰撞而传递能量。在导电的固体中,自由电子的运动是主要的导热方式;在非导电固体中,热量的传递则主要是通过晶格的振动(也称作弹性波)进行。液体的导热机理则比较复杂。

在实验和生活中,材料种类、厚度及温差等因素共同决定了导热。比如,一块金属板和一块木板,在相同厚度的前提下,一侧置于同样温度的热源中,则木板的另一侧的温度较金属板的要低,也就是木板的隔热性能要好。同样的木板,如果越厚,则它的隔热效果越好。

在传热学中,把单位时间传递的热量称为热流量,用  $\Phi$  表示,单位为 W。对于一个平壁,如图 1-1 所示,当它两侧都维持均匀的温度  $t_{w1}$  和  $t_{w2}$  时,平壁的导热为一维稳态导热,即温度只沿厚度方向变化,且这个过程跟时间没有任何关系,它的导热热流量可以用下面的公式计算

$$\Phi = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-1)$$

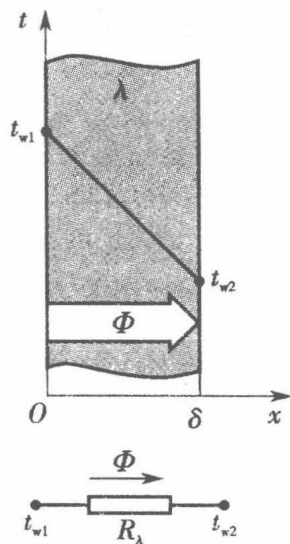


图 1-1 平壁的导热

上式中,  $A$  为导热物体的表面积;  $\lambda$  为反映导热物体材料特性的参数, 称为导热系数或热导率;  $\delta$  为导热物体的厚度;  $t_{w1}$ 、 $t_{w2}$  为导热物体两侧的温度。

导热系数  $\lambda$  的单位是  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 材料的导热能力跟其数值成正比,  $\lambda$  越大则它的导热能力越强。通常, 金属材料的导热系数最高, 好的导体同时也是好的导热体; 液体的导热系数次之; 气体的导热系数最小。例如常温 ( $20^\circ\text{C}$ ) 下, 纯铜的导热系数为  $398\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 而干空气的导热系数只有  $0.0259\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。材料的导热系数一般由实验来测定。式 (1-1) 可以改写为以下形式

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_\lambda} \quad (1-2)$$

式中,  $R_\lambda = \frac{\delta}{A\lambda}$ , 称为导热过程的导热热阻,  $\text{K}/\text{W}$ 。

类似于电学中电流等于电压除以电阻的概念, 传热热流量等于传热的温差除以传热的热阻。

单位时间通过单位面积的热流量称为热流密度, 用  $q$  来表示, 单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。平壁导热的热流密度通过式 (1-1)、式 (1-2) 可表示为

$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-3)$$



### 1.1.2 热对流

热对流是指由于流体的宏观运动,致使不同温度的流体相对位移而产生的热量传递现象。只有在流体中才会发生对流的情况,且一定伴随着流体分子的不规则热运动产生的导热。如图 1-2 所示,当流体流过一个固体表面时,由于流体具有黏性,因此附着于固体表面的很薄的一层流体为静止的,在离开固体表面的会向上,流体的速度逐渐增加到来流速度,这一层厚度很薄、速度很小的流体称为边界层。在边界层内,流体与固体表面之间的热量传递是边界层外层的热对流和附着于固体表面的静止的边界层底层的流体导热两种基本传热方式共同作用的结果,这种传热现象在传热学中称为对流换热。对流换热按流动起因的不同(流动的驱动力的不同)分为自然对流和强迫对流两种。自然对流是由于温差引起的流体不同部分的密度不同而自然产生上下运动的对流换热。因此,有温差不一定能发生自然对流,还应考虑表面的相对位置是否能形成因温差导致的密度差引起的流体运动。如图 1-3 所示,当固体表面的温度高于环境的空气温度时,该表面上方的空气受热后密度变小,自由上升,从而发生自然对流换热。在表面下方,紧挨表面的空气受热后密度变小,由于受到阻挡积聚在表面底下,空气的自由运动是无法正常产生的,从而没有自然对流换热的发生。如果该表面的温度低于环境空气的温度,则上方的空气受冷,密度变大,积聚在上表面,阻碍了空气的自由运动,没有自然对流。而表面的下方,空气受冷后自由下沉,则可以发生自然对流换热。

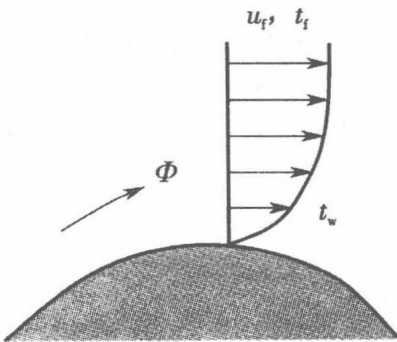


图 1-2 对流换热边界层

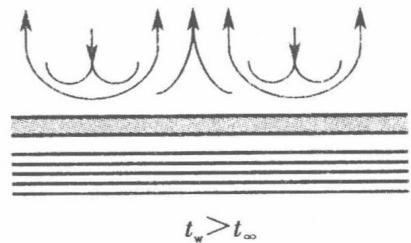


图 1-3 自然对流

强迫对流则是流体在外力的推动作用下流动所引起的对流换热。强迫对流换热程度比自然对流换热剧烈得多,在工业应用上接触的比较更多的是强迫对流换热。当流体发生相变的时候,对流换热则分别称为沸腾换热和

凝结换热。沸腾和凝结换热的程度因涉及汽化或凝结潜热的释放而很剧烈,通常液体的对流换热比气体的对流换热强烈。典型的几类对流换热的表面传热系数数值范围如表 1-1<sup>①</sup> 所示。

表 1-1 典型对流换热的表面传热系数数值范围

对流换热类型		对流换热系数 $h/[W/(m^2 \cdot K)]$
自然对流换热	空气	1~10
	水	200~1000
强迫对流换热	空气	10~100
	水	100~15000
相变换热	水沸腾	2500~35000
	水蒸气凝结	5000~25000

对流换热的基本计算可用下面的公式

$$\Phi = Ah(t_w - t_f) \quad (1-4)$$

$$q = h(t_w - t_f) \quad (1-5)$$

在以上两式中,  $A$  为换热表面积,  $m^2$ ;  $h$  表示对流换热大小的比例系数, 称为表面传热系数或对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $t_w$ 、 $t_f$  分别为固体壁面温度和流体温度,  $^{\circ}C$ 。

式(1-4)和式(1-5)通常称为牛顿冷却公式。对流换热系数  $h$  是对流换热问题的核心, 多种因素均会对其造成影响, 包括流体的物理性质、换热表面的形状、大小和布置方式、流速等。当知道了对流换热系数  $h$  以后, 就可以由式(1-4)或式(1-5)很容易计算出对流换热量了。对流换热系数的求解包括理论解、数值解, 以及便于工程应用计算的大量经验公式等, 这些将在后面几章做相应介绍。式(1-4)可以改写为以下形式

$$q = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{Ah}} = \frac{t_w - t_f}{R_h} \quad (1-6)$$

式中,  $R_h = \frac{1}{Ah}$ , 称为对流换热热阻, 单位为  $K/W$ 。

### 1.1.3 热辐射

热辐射是由于物体内部微观粒子的热运动(或者说由于物体自身的温

<sup>①</sup> 苏亚欣. 传热学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 6

度)而使物体向外发射辐射能的现象。可以由电磁理论和量子理论来对热辐射现象进行解释。电磁理论认为辐射能是由电磁波进行传输的能量,量子理论认为辐射能是由不连续的微观粒子(光子)所携带的能量,光子与电磁波都以光速进行传播。在日常生活和工业上常见的温度范围内,热辐射的波长主要在  $0.1\mu\text{m}$  至  $100\mu\text{m}$  之间,包括部分紫外线、可见光和部分红外线三个波段。与导热和热对流相比,以下三个特点是热辐射所具备的。

①热辐射总是伴随着物体的内能与辐射能这两种能量形式之间的相互转化。当物体发射辐射能时,它的内能转化为辐射能,当物体吸收辐射能时,被吸收的辐射能又转化为物体的内能。即使当物体和周围的环境处于热平衡时,辐射和吸收的正常进行是不会受到任何影响的,只是达到了一个动态的平衡,辐射换热量为零。

②即使在真空中热辐射也可以正常传播。而导热必须依靠两个直接接触的物体或一个物体内部在温差的推动下进行传递,热对流必须依靠流体介质。

③物体间以热辐射的方式进行的热量传递是双向的。只要物体的绝对温度高于  $0\text{K}$ ,它对外发送热辐射都不会受到任何影响。温度高的物体对外发送的热辐射较温度低的物体发送的热辐射更多,同一温度下具有不同表面辐射特性(如表面吸收率和发射率)的物体发射的辐射能和吸收的辐射能差别非常明显,但它们相互之间均向对方发送辐射能和吸收来自对方的辐射能。

物体之间的表面特性、温度、相互位置(决定辐射换热的角系数)等因素决定了其辐射换热量。

可以借助于斯忒藩—玻耳兹曼定律来实现热辐射的基本计算,它给出了黑体在单位时间单位面积对外发射的辐射热量的计算公式

$$E_b = \sigma_b T^4 \quad (1-7)$$

式中,  $E_b$  为黑体表面单位时间、单位面积对外发射的辐射热量,又称为黑体的辐射力,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\sigma_b$  为黑体的辐射常数,也称为斯忒藩—玻耳兹曼常量,它等于  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T$  为黑体的绝对温度,  $\text{K}$ 。

式(1-7)形式简单,很好地体现了物体的辐射力与物体温度的 4 次方的关系,因此又称为四次方定律。所谓黑体是指吸收率为 1 的物体,也就是能够百分之百地吸收投入到其上的热辐射的物体。黑体是一种理想的物体,它的吸收和发射辐射的能力都最大。实际物体的吸收和辐射能力都比黑体小,为了对式(1-7)进行修正,特引入了一个反映实际物体发射特性的参数

$$E = \epsilon \sigma_b T^4 \quad (1-8)$$

式中,  $\epsilon$  为实际物体的发射率, 是个小于 1 的数, 习惯上又称之为黑度, 反映实际物体的辐射能力接近黑体的程度, 它与多种因素有关。

由于辐射换热是相互的, 在计算物体表面的辐射换热时, 其自身对外发射辐射和吸收外来的投入辐射的总和也是需要考虑在内的。在有空调的房间内, 夏天和冬天的室温均控制在  $20^{\circ}\text{C}$ , 夏天只需穿衬衫, 但冬天穿衬衫会感到冷, 这是由于人体和周围的墙体之间进行辐射换热的换热量不同造成的。

## 1.2 传热学的研究内容、方法、进展与展望

### 1.2.1 传热学的研究内容

热能是自然界最普遍的一种能量存在形式。宇宙中一切物质, 无论是像人、树木一样的生物体, 还是像尘土、冰川一样的非生物体, 都具有一定的热能。物质温度的高低可以说是其具有热能多少的宏观表现。根据热力学第二定律, 凡是有温差的地方, 就有热能自发地从高温物体传向低温物体, 或从物体的高温部分传向低温部分。在不会引起歧义的情况下, 通常也将热能传递称为热量传递。

传热学就是研究在温差作用下热量传递规律及其应用的一门科学。传热学和热力学都属于物理学中热学的分支。传热学的研究历史最早可追溯到 1701 年, 英国科学家牛顿(I. Newton)在估算烧红铁棒的温度时, 被后人称为牛顿冷却定律的数学表达式即在此时得以提出。1804~1822 年, 法国物理学家毕渥(J. B. Biot)、傅里叶(J. B. J. Fourier)等开始了导热问题的系统研究。1800 年, 英国天文学家赫歇尔(F. W. Herschel)在观察太阳光谱的热效应时发现了红外线, 随后众多的物理学家对热辐射进行了理论和实验研究。到 20 世纪 30 年代, 传热学逐渐成为一门独立的学科。

虽然热量传递的三种基本机理(热传导、热对流和热辐射)是大家所熟知的, 但是一个具体问题究竟包含哪一种或哪几种热量传递方式, 这些热量传递方式之间是怎样的关系, 想要对其进行判断的话就需要利用传热学知识了, 这也是研究传热问题的基础。温差是传热的条件, 确定物体内部的温度分布就成为传热问题研究的核心。在很多的工程问题中, 我们还必须定量计算热量传递的速率, 以便对换热设备进行设计或者优化。以上这些内容就构成了传热学的主要研究内容。

传热学中, 热量传递速率大小可借助于热流量和热流密度表示出来。热流量表示单位时间内通过某一给定面积的热量, 用符号  $\Phi$  表示, 其国际

单位是 W;热流密度则是单位时间内通过单位面积的热量,用  $q$  表示,国际单位为  $W/m^2$ 。

### 1.2.2 传热学的研究方法

热力学第一定律和第二定律为传热学和工程热力学的基础,但两者的研究内容有所不同。工程热力学着重研究平衡状态下机械能和热能之间相互转换的规律,而传热学则研究由于存在温差而引起的不可逆的热量传递的规律。以将一个钢锭从  $1000^{\circ}\text{C}$  在油槽中冷却到  $100^{\circ}\text{C}$  为例,从热力学可以了解每千克钢锭在这一冷却过程中散失的热量。假定钢锭的比热容为  $450\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,则每千克钢锭损失的热力学能为  $405\text{kJ}$ 。但是,从热力学不能确定达到这一温度需要的时间。这一时间取决于油槽的温度、油的运动情况、油的物理性质等,这正是传热学的研究内容。

立足于物体温度与时间的依变关系的角度来看,热量传递过程可区分为稳态过程(又称定常过程)与非稳态过程(又称非定常过程)两大类。凡是物体中各点温度不随时间而改变的热传递过程均称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。

工程中的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。这些传热问题得到很好解决的前提条件为,必须具备热量传递规律的基础知识和分析工程传热问题的基本能力,掌握计算工程传热问题的基本方法,并具有相应的计算能力及一定的实验技能。

与其他学科一样,在传热学的研究中,一些对现象进行科学简化的假设也得以引入进来。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导热系数总是随温度而变的,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。在处理工程传热问题时,还必须熟悉和掌握传热机理、有关定律、测试技能和分析计算方法。

无论是理论分析还是实验研究均可使用热传递的研究方法,两者是相辅相成的。理论的基础是实践,并在不断实践中发展。所以,科学技术的进步和生产实践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. 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,其求解可以借助于解析的方法来实现。但是,由于实际问题的复杂性,获得分析解的仅有少数传热问题,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,数学分析方法在传热学研究中的地位仍然是不容忽视的。

### 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地点上的温度及其他所需的物理量。它在能够求出导热问题的同时,还可以求解对流传热、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。

### 3. 传热问题的实验研究方法

由于工程实际问题的复杂性,实验研究方法仍是目前传热学的基本研究方法。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试验需花费较多的人力、物力,故实现起来难度比较大有时可以说是无法实现的。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。

## 1.2.3 传热学研究的进展与展望

### 1. 传热学的开拓是经济和社会发展的需要

温度差异和物质多样性与不均匀分布在自然界中随处可见,这是地球

生物圈内大气环流和能量自发传递的根本动力。传热学所研究的是由温度差异引起的能量传递过程,包括有相变、物理或化学反应以及因组分浓度差异伴随发生物质迁移时的传热过程。随着生产的发展,现代工程设计和工艺过程中,有关加热、冷却、蒸发、凝结、熔化、凝固、隔热保温等各种各样的实际问题时有发生,使传热学迅速发展为当今技术科学中了解各种热物理现象和创新技术的主要基础学科,高温部件保护性冷却和干燥的技术进展充实了有传质耦合的传热学内涵。物质存在是千姿百态的,物质世界是多样的,而热只是物质运动形态之一,归属于物质分子无序运动的低位能量,其特征量为宏观统计性的“温度”高低。在改造客观世界的生产斗争中,势必会遇到热量传递的同时出现能的形式之间转化的复杂过程。于是,广义的传热学科被看作“能量传递学”。这与能源、动力开发和节约利用有很大关系。传热学还和材料的冶炼、熔铸与加工,核能利用与航天动力及热控制,信息器件的温控,生物技术与生物医学工程,环境净化与生态维护、农业工程化以及军事现代化等不同领域都有所关联。特别是当今高科技的迅猛发展,面临着温度场、速度场、浓度场、电磁场、光场、声场、化学势场等各种场相互耦合下的传热过程和温度控制问题。而计算机的逐渐普及,计算方法和激光、红外等测试技术的持续改进,丰富了传热传质的研究手段,使研究进程相比之前有了很大的飞跃。

研究传热传质的基本规律及其具体应用,计算给定条件下的传热传质的速率及其控制,寻求传热强化和削弱的技术途径,是传热学研究的主要任务。要求传热分析细微化和传热计算精确化,包括发现新的影响因素及其作用机理,使学科体系得到不断完善,则是发展方向。日新月异的高科技开拓,使科学与技术的传统界线逐渐模糊,学科的人为分割和分化局面受到挑战,不同学科之间的交叉和趋于新的组合与重整也因此得以有效促进,进而形成了新的学科前沿。传热学必须迎接挑战,抓住机遇,为改造自然环境、造福人类社会和促进我国经济发展与建设做出应有的贡献。

## 2. 能源动力是推动传热学进取的传统领域

现代文明的三大支柱为能源、材料和信息。材料包括信息材料的制备与加工,需要能源供应的支撑,而材料与信息技术的发展又在改变着资源开发与利用的面貌。能源为现代生产活动提供“粮食”。随着工农业规模的发展,传热学只是在20世纪初才从物理学的热学部分独立出来而形成专门的学科,开始自成体系地开拓与发展,以适应扩大能源供应量、提高能源利用效率和节约能源消耗的需要。

能源是我国经济和社会发展的战略重点。20世纪50年代初我国就把

电力和交通列为两大先行官。20世纪80年代以来的20多年间,在动力设备的大型化、核动力开发与安全性研究、飞行器的发射与回收以及热设备的节能等多方面积极开展了导热、对流、辐射和复杂几何形状及复杂边界条件耦合的传热过程的基础和应用研究,开拓了诸如流动沸腾、热流体学、强化传热、热管、气膜冷却等的研究。但在粗放型经济增长方式下我国能源利用效率只是从1980年的28%提高到1995年的32%,仍然低于发达国家。强化传热传质和降低散热损失,可望在更高起点上考虑新材料、新工艺等高科技的已有进展,开发出高超紧凑式的多流体换热器,为中、低位工业余热利用、实施能源综合利用的“总能”系统以及多能互补的“泛能”系统开创新局面。

高温电离气体传热与流动特性的研究,对热等离子体的诊断、磁流体发电、电弧技术以及超细粉材料等离子体加工过程等的当今和未来发展意义重大。核聚变在工业上的实现,有待于解决超高温等离子体在磁场或其他有效约束下脱离与壁面直接接触的特殊防护及其定量的控制。能源利用方式的任何更新,都会对传热分析带来新的具体问题。

### 3. 环境和生态领域呼唤传热传质研究的渗透

资源、人口与环境是当前国际社会的三大问题。近年来,环境污染、生态平衡由于工业的兴起、城市的扩大、人口的增长而变得更加糟糕。我国正在执行社会可持续发展的战略,环境和生态领域已经为传热传质研究的应用渗透提供了广阔的新天地。

多孔介质中物质和能量输运是地球生物圈普遍存在的现象。除了致密的金属、岩石和一些塑料之外,几乎孔隙性会存在于所有的固体和类固体材料中。地下表层中的石油、天然气和水构成复杂的多元体系,是能源资源勘测和开发的“地热储工程”对象。土壤表层季节性的冻融过程将直接制约着土壤中的水、热迁移的规律,不仅给农业生产,而且给工程建设造成影响。多孔介质传热传质的基础研究是形成交叉和边缘学科的一个潜在出发点。

### 4. 生命系统中的能量与物质传输的研究亟待开拓

生命系统是典型的开放系统,跟赖以生存的环境进行物质和能量的交换有很大关系。生命活动实际反映出生物体,特别是人体的温度,在中枢神经控制下通过增减组织间血液流量以及汗腺的发汗、寒颤等生理反应而具有自适应的调控本能。和无生命“活力”相比,生命体的热现象复杂度更高。对外界的感受和刺激还会造成心理因素的随机多样性,决定了活体输运过程本质的不确定性,使生化反应和迁移热物性数据测定的不确定性增大,只



能具有概率统计性的意义。生物传热的基本方程所描述的是在体组织内的热传播,跟相变问题没有任何关系。生物传热的分析必须面对的难题将是合理估计血流影响的物理数学模型问题。

进展中的低温生物医学技术正在实现生物,包括人体器官和活体细胞与胚胎的长期存活。无论降温还是复温,耐变的适应问题都是这些组织无法逃脱的。近年来,国际上也掀起了对食品原料的冷藏保鲜和生物制品的储备与储存问题的深化研究。

### 5. 微尺度传热的研究是高技术发展中又一个新兴前沿热点

微米、纳米技术的研究因计算机的小型化和微型化得以兴起。由于半导体材料以及未来的光、声计算机和生物智能型计算机等所使用的材料对温度的高度敏感性,芯片层叠技术发展又加剧了散热的“热障”问题,促使高兆位计算机、超高集成电路和微电子与光电子器件、微机械系统和微电子机械系统的开发亟需空间微尺度管槽中的流动与传热特性的研究,以提供技术储备的可靠数据。计算机的高速化还使芯片受超高频率的冲击,大功率短脉冲激光加工技术同样遇到了时间尺度以纳秒、皮秒,甚至飞秒的超快速过程,并引起所传输光子流能束与物质之间的相互作用问题。在这超短促的高频下,芯片、薄膜材料中会出现波动导热,强化传播中的热量在固体内部的穿透深度。除了空间和时间的微尺度外,在航天技术中将遇到重力微尺度化而使自然对流严重削弱,以至消失的影响。

微尺度下的流动与传热现象与常规的现象存在本质的区别。譬如黏性的影响在空间微尺度下将发生显著的改变。关于这方面的研究工作需要更多的实验和理论做支撑。

## 1.3 传热研究在工程中的应用

传热不仅是常见的自然现象,而且广泛存在于工程技术的各个领域。在能源动力、建筑环境、材料冶金、石油化工、机械制造、航空航天等工业中,传热学发挥着极其重要的作用;生物医学、电气电子、食品加工、轻工纺织、农业生产等领域也都在不同程度上依赖传热研究的最新成果。虽然在各行业中遇到的传热问题千差万别,但从传热研究的角度这些问题大致可分为两种:一种主要是为了确定物体内部或空间区域中的温度分布,以便对其温度进行控制,使设备能安全地运行;另一种则主要是为了计算传热过程中热量传递的速率,以及确定在一定条件下强化传热或削弱传热的技术途径。

下面对一些技术领域或工程中的传热现象及其应用情况进行简单介绍。