



全国高等教育自学考试

传热学 自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
朱华 编著

浙江大学出版社

Q · G · G · Y · J · Y · Z · X · K · S

全国高等教育自学考试

传热学自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会组编

朱 华 编著

浙江大学出版社

内容提要

本书是在全国高等学校自学考试电厂热能动力工程专业(专科)《传热学》考试大纲、全国高等教育自学考试指定教材《传热学》的基础上编写的自学辅导书,在内容与选材上比教材有所创新和丰富。

全书共分6章,包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程和换热器等内容。在内容的论述与编排上突出了针对性、适用性、通俗性及自学的特点,从学习目标、学习重点、基本概念和技能、学习内容的要点和难点指导、补充有关背景材料等方面加以阐述,重点突出,密切联系实际,深入浅出,通俗易懂。

本书可作为自学辅导书及教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学自学辅导/朱华编著. —杭州:浙江大学出版社,2001.9
ISBN 7-308-02490-3

I. 传... II. 朱... III. 传热学—高等教育—自学考试—自学参考资料 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 058687 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 徐宝澍

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 德清第二印刷厂

经 销 浙江省新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 7.75

字 数 198 千字

版 印 次 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印 数 0001—3070

书 号 ISBN 7-308-02490-3/TK·013

定 价 12.80 元

出版前言

为了完善高等教育自学考试教育形式,促进高等教育自学考试的发展,我们组织编写了全国高等教育自学考试自学辅导书。

自学辅导书以全国考委公布的课程自学考试大纲为依据,以全国统编自考教材为蓝本,旨在帮助自学者达到学习目标,顺利通过国家考试。

自学辅导书是高等教育自学考试教育媒体的重要组成部分,我们将根据专业的开考情况和考生的实际需要,陆续组织编写、出版文字、音像等多种自学媒体,由此构成与大纲、教材相配套的、完整的自学媒体系统。

全国高等教育自学考试指导委员会
1999年10月

目 录

第 1 章 概 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 基本概念和技能	(2)
1.3 内容要点及指导	(2)
1.3.1 热传递的三种基本方式	(3)
1.3.2 热传递的基本定律及传热过程	(4)
1.4 总结与思考	(8)
1.5 补充材料:传热学发展简史	(9)
第 2 章 导 热	(12)
2.1 概 述	(12)
2.2 基本概念和技能	(13)
2.3 内容要点及指导	(13)
2.3.1 基本概念	(13)
2.3.2 导热基本定律	(14)
2.3.3 导热微分方程	(15)
2.3.4 通过平壁和圆筒壁的导热(一维稳态导热)	(17)
2.3.5 肋片导热	(20)
2.3.6 非稳态导热的概念	(27)
2.4 总结与思考	(30)
2.5 补充材料:求解导热问题的形状因子法	(30)
第 3 章 对流换热	(33)
3.1 概 述	(33)
3.2 基本概念和技能	(34)
3.3 内容要点及指导	(34)
3.3.1 对流换热概述	(34)
3.3.2 边界层概述	(40)
3.3.3 相似准则及准则方程式	(45)
3.3.4 内部流动强制对流换热实验关联式	(49)
3.3.5 外部流动强制对流换热实验关联式	(54)
3.3.6 自然对流换热	(59)
3.3.7 凝结与沸腾换热	(63)
3.4 总结与思考	(69)

3.5 补充材料:对流换热系数求解方法简介	(70)
第4章 辐射换热	(72)
4.1 概 述	(72)
4.2 基本概念和技能	(73)
4.3 内容要点及指导	(73)
4.3.1 热辐射的特点和基本概念	(73)
4.3.2 黑体表面辐射的基本定律	(77)
4.3.3 真实表面的辐射	(78)
4.3.4 灰体及灰表面的辐射	(82)
4.3.5 角系数及黑体表面之间的辐射换热	(83)
4.3.6 灰体表面之间的辐射换热	(87)
4.3.7 气体辐射和火焰辐射简介	(93)
4.4 总结与思考	(96)
4.5 补充材料:三个灰体表面间的辐射换热	(96)
第5章 传热过程与换热器	(99)
5.1 概 述	(99)
5.2 基本概念和技能	(100)
5.3 内容要点及指导	(100)
5.3.1 传热过程	(100)
5.3.2 换热器的型式及平均温差	(103)
5.3.3 换热器的热工计算	(107)
5.3.4 传热强化和隔热保温技术	(110)
5.4 总结与思考	(112)
5.5 补充材料:威尔逊图解法	(113)
主要符号表	(115)
参考文献	(118)

第 1 章 概 论

这一章的学习时间建议: 阅读理解 10 小时, 习题 5~6 小时。

1.1 概 述

同学们, 你们好!

现在, 我们开始学习“传热学”(英文: Heat Transfer)。

传热学是研究热量传递规律的工程技术学科, 是本专业的一门重要技术基础课程, 它不仅为学习者学习有关的专业课程提供基本的理论知识和技能, 而且也以后从事热能的合理利用、热工设备效能的提高及换热器的设计等方面工作打下必要的基础。

传热学是一门集科学性与实用性于一体的学科。传热现象大量存在于我们的日常生活与工作中, 因此, 在学习中我们要理论联系实际, 在注意学习有关热量传递规律的同时, 应当及时将所学内容应用到我们的实际工作与日常生活中, 做到“学以致用”, 这样, 才会有更大的收获。

传热学一般可分为导热(又称热传导)、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器这几大部分, 各部分既自成一体又相互关联, 构成了“传热学”这门学科的坚实基础。

在本章中, 我们首先对传热学的研究内容、传热学的构成、传热学的分析方法及传热学的发展史等有一个初步的、概貌性的认识, 为后续章节作一个较为完整的铺垫。有关导热、对流换热、辐射换热、复合换热、传热过程与换热器各部分的详细内容将在后面各章中进一步讨论。

通过这一章的学习, 我们主要了解:

- 什么是传热学? 它研究什么问题?
- 传热学的应用范围有多大?
- 传热有哪些基本方式?
- 如何将传热知识用于分析生产和生活中碰到的实际问题? 能否用它来指导我们的实际工作和生活呢?

1.2 基本概念和技能

基本概念:热流量、热流密度、热阻、稳态传热、导热、对流换热、辐射换热、复合换热、传热过程、对流换热系数、辐射换热系数、复合换热系数、传热系数。

基本技能:(1)三种基本热传递方式的区分及其在实际传热问题分析中的运用。

(2)对一些简单的导热、对流换热、辐射换热、复合换热、传热过程问题的计算。

1.3 内容要点及指导

在本章的学习中,我们应当注意掌握以下三个部分:

- (1)有关的基本概念、各个量的单位和物理意义;
- (2)导热、对流换热、辐射换热、复合换热、传热过程的基本计算式;
- (3)热阻的概念及其在传热问题分析中的作用。

在开始学习传热学时,我们首先应注意以下两点:

1. 传热学是研究热量传递规律的科学

(1)温差 Δt 是传热的动力。

只要存在温差,热量就会自发地从高温物体(部分)向低温物体(部分)传递。当温差一定时,热量的传递并不是定值,而是可多、可少,这取决于物体本身的传热特性及周围环境对它的不同影响。

(2)在一定的传热温差下,热量传递可多、可少。

所谓温差 Δt 一定,热量传递却可多、可少,还可以从以下两方面来理解:

1)当温差 Δt 一定时,有时需要增强传热(又叫“强化传热”)。

例如电厂锅炉中的过热器或再热器,当管内蒸汽的平均温度一定、管外侧烟气温度也一定时,如果管道某些部位传热不良,就会发生局部管壁超温,严重时可能发生“爆管”现象。

生活中也存在需要强化传热的情况,例如在炎热的夏季,人体的体温恒定,外界气温较高,这时我们常常采取开电风扇等各种措施强化传热,使我们能凉快一些。

2)当温差 Δt 一定时,有时又需要削弱传热(习惯上称为“保温、隔热”)。

例如对于电厂主蒸汽管道,我们都会采取各种保温措施,以削弱它们向环境的散热。生活中,夏季沿街卖冰棍、冷饮的小贩依据前辈所传的经验,采取一些隔热保温措施,削弱冷饮与外界的传热,使他们的冷饮、冰棍等在炎热的环境中能保持较长时间内不会融化。

上述这些常见的实例也使我们看到,传热学是一门十分实用的科学。通过对这门学科的学习,我们对于各种工作和生活中遇到的传热问题,不但能够“知其然”,而且能够“知其所以

然”，不断提高我们的工作和生活水平。

2. 传热学的应用范围十分广泛

人体及我们的日常生活中存在大量的传热现象,通过本章学习,同学们自己可以举出很多的实例,比如我们平时的穿衣戴帽、喝水吃饭、睡觉、出行等都与传热有着很大的关系。

在工程技术领域中,传热存在于以下各领域:

能源(锅炉,发电机组的冷却,核能、太阳能、地热能等的利用等)、化工、冶金、机械制造、电气电子(大规模集成电路、微型机械等)、建筑(隔热保温、空调等)、农业(温室栽培、养殖等)、生物、环保、气象(风起云涌、下雨降雪等)、航天(仪器恒温、舱内人工环境等)……

1.3.1 热传递的三种基本方式

所有传热现象都可以归纳为三种最基本的热量传递方式:

导热(英文:Conduction);

对流(英文:Convection);

辐射(英文:Radiation)。

1.3.1.1 导热

导热又称“热传导”。

定义:由于微观粒子热运动而产生的热量传递方式。

发生热传导时,物体各部分不发生相对位移。导热可发生在固体、液体、气体中。

所谓微观粒子热运动,是指:

- (1)晶格结构振动(弹性波)——发生于非导体导热、液体导热中;
- (2)自由电子的运动——发生于导体(固体、液态金属)导热中;
- (3)分子相互碰撞——发生于气体、液体导热中。

1.3.1.2 对流

对流又称“热对流”或“对流换热”。

定义:由于流体(气体或液体)的宏观运动,冷、热流体相互掺混引起的热量传递方式。在工程上,如流体流过一个物体表面时发生的热量传递过程。

具体可作如下分类:

- (1)强制对流——风机、水泵或其他压差作用(如烟囱)下发生的流动;
- (2)自然对流——温差造成密度差,由此导致的流动;
- (3)有相变对流——伴随相变的对流换热,如沸腾换热、凝结换热;
- (4)无相变对流——单相流体的对流换热,如流体的被加热或被冷却。

1.3.1.3 热辐射

热辐射又称“辐射换热”。

定义:物体因温度(热)原因而发出电磁波,由此导致能量传递的方式。

热辐射有以下特点:

- (1) 只要温度高于 0K 即可发出热辐射,例如电炉、人体都能发出热辐射;
- (2) 在不断发射的同时,也不断吸收(既是发射体,也是吸收体);
- (3) 可以穿过真空,不需要介质,如太阳将辐射能传给地球;
- (4) 伴随能量的转移,能量发生形式上的改变,热能转变为辐射能,辐射能又转变为热能。

1.3.2 热传递的基本定律及传热过程

1.3.2.1 热流量与热流密度

传热学与工程热力学的区别在于:

工程热力学注重各平衡态及其相互转换时所产生的(或消耗)的热量及功。

传热学研究强调“时间”,重视热量传递的过程与方式。

1. 热流量 Φ

定义:单位时间上的传热量,单位:W,即 J/s。

2. 热流密度 q

定义:单位时间、单位面积上的传热量,单位:W/m²。

热流量与热流密度的关系:

$$q = \Phi / F$$

3. 稳态热传递过程(稳态传热)

某点的 Φ 或 q 不随时间而变,即 $\Phi = \text{常数}$,或 $q = \text{常数}$ 。

1.3.2.2 导热

(1) 导热基本定律——傅里叶定律(Fourier's law)。

以平板为例(一维导热)。

如图 1-1 所示,该平板的导热可看作一维导热,平板的厚度为 δ ,两侧表面维持恒定的壁温,分别为 t_{w1} 、 t_{w2} ,在稳态热传递条件下,由表面 1 传递到表面 2 的热流量 Φ 与温差 $(t_{w1} - t_{w2})$ 、表面积 F 成正比,与厚度成反比,数学上表示为:

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

$$q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-2)$$

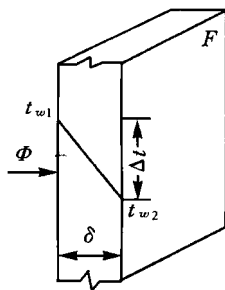


图 1-1 通过平板的导热

(2) λ ——比例系数,又称材料的导热系数或热导率,单位:W/(m·K)。这是表征材料导热性能优劣的物理量,是一个物性系数,与 ρ 、 μ 、 c_p 相类似。

(3) 导热热阻。与电工学中的欧姆定律相似, $I = \Delta U / R$ (即电流等于电压(压差)与电阻

之比)。

在传热学中,我们设定热流等于温压(温差)与热阻之比。

$$q = \frac{\Delta t}{r_t} \quad \text{或} \quad \Phi = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-3)$$

式中: r_t 为单位面积热阻,单位: $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;

R_t 为总面积热阻,单位: K/W 。

对于导热,导热热阻:

$$r_t = \delta/\lambda \quad \text{和} \quad R_t = \delta/(\lambda F) \quad (1-4)$$

1.3.2.3 对流换热

(1)对流换热的基本定律——牛顿冷却公式(Newton's law of cooling)。

以流体强迫对流过大平板为例(如图 1-2 所示)。

$$1) \text{ 流体被加热: } t_w > t_f, q = \alpha_c(t_w - t_f) \quad (1-5)$$

$$2) \text{ 流体被冷却: } t_w < t_f, q = \alpha_c(t_f - t_w) \quad (1-6)$$

也可表示为

$$q = \alpha_c \Delta t \quad \text{或} \quad \Phi = \alpha_c F \Delta t \quad (1-7)$$

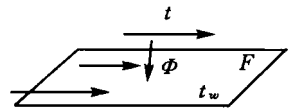


图 1-2 流体流过大平板

(2) α_c ——对流换热系数,单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

对于对流换热系数 α_c ,我们应注意以下几点:

1) α_c 不是物性参数,它反映了对流换热的强弱;

2) α_c 与多种因素有关,如流体的物性(λ, μ, c_p, ρ),换热表面的形状,大小、布置,流体的流速等;

3) α_c 中包括了对流和导热两个因素;

4) 求解 α_c 是求解对流换热问题的关键。

(3)对流换热热阻

$$r_t = \frac{1}{\alpha_c} \quad \text{或} \quad R_t = \frac{1}{\alpha_c F} \quad (1-8)$$

$$q = \frac{\Delta t}{r_t} \quad \text{或} \quad \Phi = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-9)$$

α_c 数值范围见表 1-1。

表 1-1 对流换热系数的大致数值范围

对流换热形式	$\alpha_c [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
自然对流:	
空气	3~10
水	200~1000
油	10~60
强迫对流:	
气体	20~100
高压水蒸气	500~3500
水	1000~15000

续表

油	50~2000
相变换热:	
水沸腾	2500~25000
水蒸气凝结	5000~15000
有机物蒸气凝结	500~2000

一般来说,对 α_r 在不同情况时的数量级范围有一个大致的了解,有助于工程设计与应用。

对于表 1-1 中的内容不需要背出来,但是应该记住的是:空气自然对流换热系数的数量级是 $1\sim 10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,水的数量级是“成千上万”。

1.3.2.4 热辐射

1. 辐射换热的基本定律

辐射换热的基本定律——斯蒂芬-波尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann's law),又称为四次方定律。

对于辐射的理想体(黑体),若温度为 T ,它向其半球空间发射的总能量(如图 1-3 所示)为

$$E_b = \sigma_0 T^4 \quad (1-10)$$

其中: $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,称为黑体辐射常数; T 为热力学温度(又称开尔文温度),单位是 K,数值上 $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$ 。

2. 净辐射换热量

由斯蒂芬-波尔兹曼定律计算得到的辐射热量 Φ 并不是辐射换热量。对于两块面积很大且距离很近的平行平板,温度为 T_1, T_2 ,均为黑体,如图 1-4 所示,其净辐射换热量为

$$\Phi_{\text{净}} = F\sigma_0(T_1^4 - T_2^4) \quad (1-11)$$

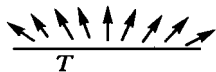


图 1-3 黑体辐射

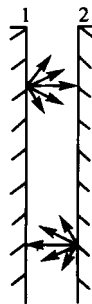


图 1-4 平行平板之间的辐射换热

3. 按对流折算

$$\alpha_r = \frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (1-12)$$

$$\Phi_{\text{净}} = \alpha_r F(T_1 - T_2) \quad (1-13)$$

其中: α_r 为辐射按对流换热折算的辐射换热系数,单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3.2.5 复合换热

在实际换热过程中,有时既有对流换热,又有辐射换热,两者共同作用,其影响都不可忽略,称为复合换热,其换热热流量是两部分之和:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r = (\alpha_c + \alpha_r)F(t_w - t_f) = \alpha F(t_w - t_f) \quad (1-14)$$

其中: α 为复合换热系数, $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ 。

1.3.2.6 传热过程

1. 定义

热量从壁面一侧的高温流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程,称为传热过程。

2. 计算

如图 1-5 所示,温度为 t_{f1} 、换热系数为 α_1 的热流体通过壁厚为 δ 、导热系数为 λ 的大平壁,将热量传给温度为 t_{f2} 的冷流体,冷流体与壁面的换热系数为 α_2 ,平板两侧的壁温分别为 t_{w1} 、 t_{w2} ,这时有下式成立:

$$\Phi = \alpha_1 F(t_{f1} - t_{w1}) = \frac{\lambda F}{\delta}(t_{w1} - t_{w2}) = \alpha_2 F(t_{w2} - t_{f2})$$

将上式整理,消去 t_{w1} 、 t_{w2} ,得

$$\Phi = \frac{F(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = kF(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-15)$$

$$q = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-16)$$

3. 传热系数 k

传热系数表征传热过程的强烈程度。 k 值越大,传热过程越强烈,单位是 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \sum r_i \quad (1-17)$$

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = \frac{1}{\sum r_i} \quad (1-18)$$

从表 1-2 可以看出,不同介质之间的传热过程具有不同的传热系数范围。

对于表 1-2 不需要背出来,但该表有助于我们定性地了解各种传热过程传热的强弱,如从水到水的传热性能优于从气体到气体的传热性能。

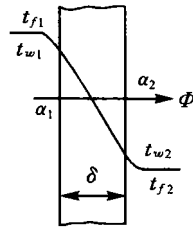


图 1-5 通过大平壁的传热过程

表 1-2 传热系数的大致数值范围

传热过程的形式	$k[W/(m^2 \cdot K)]$
气体——气体传热(常压)	10~30
气体——高压水蒸气或水传热	10~100
油——水传热	100~600
有机物蒸气凝结——水传热	500~1000
水——水传热	1000~2500
水蒸气凝结——水传热	2000~6000

4. 热阻分析

上述传热过程可看作热阻的一个串联环节,如图 1-6 所示。

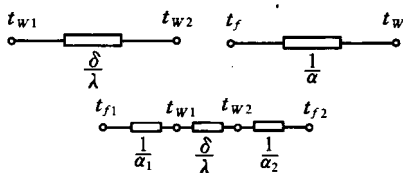


图 1-6 传热过程的热阻分析图

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\sum r_i} = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-19)$$

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{F\alpha_1} + \frac{\delta}{F\lambda} + \frac{1}{F\alpha_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\sum R_i} = kF(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-20)$$

在一个稳态的热传递过程中,每个串联环节上的温度降同该环节上的热阻成正比,即在传递一定的热量时,热阻越小,温差越小;反之,热阻越大,温差越大。

$$q = \frac{\Delta t}{\sum r_{ii}} = \frac{\Delta t_1}{r_{i1}} = \frac{\Delta t_2}{r_{i2}} = \frac{\Delta t_3}{r_{i3}} = \dots \quad (1-21)$$

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\sum R_{ii}} = \frac{\Delta t_1}{R_{i1}} = \frac{\Delta t_2}{R_{i2}} = \frac{\Delta t_3}{R_{i3}} \quad (1-22)$$

在工程中,有时我们希望削弱传热,即保温,这可以通过提高系统的总热阻来实现;反之,有时我们希望强化传热,即散热,这可以通过降低系统的总热阻来实现。这种情况在实际工程中有很多,处理时要注意抓住主要矛盾,着眼于最大热阻环节,如在锅炉中,水垢和灰垢具有较大的热阻,清除这些水垢、灰垢,就可以大大提高传热面的换热能力。

1.4 总结与思考

通过这一章的学习,同学们对传热学有了一个初步的了解。对于传热的三种基本方式,可以结合本专业,举出几个关于导热、对流、辐射换热的实例,以进一步巩固所学的知识,并且逐步学会分析热量传递过程中各个环节的换热方式,如:

省煤器:烟气 $\xrightarrow{\text{对流}}$ 管外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 管内壁 $\xrightarrow{\text{对流}}$ 管内的水;

管式空气预热器:烟气 $\xrightarrow{\text{对流}}$ 管内壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 管外壁 $\xrightarrow{\text{对流}}$ 管外的空气;

过热器:高温烟气 $\xrightarrow{\text{对流、辐射}}$ 管外壁 $\xrightarrow{\text{导热}}$ 管内壁 $\xrightarrow{\text{对流}}$ 过热蒸汽。

1.5 补充材料:传热学发展简史

1. 兴起和发展

18世纪30年代,英国的工业革命促进了生产力的发展,也促进了“传热学”的产生和发展。

两个著名实验:

(1)1798年,伦伏特(B. T. Rumford)进行了“钻炮筒发热”的实验;

(2)1799年,戴维(H. Davy)进行了“两块冰摩擦生热化为水”的实验。

上述两个实验现在看来虽都很简单,但在当时却揭示了热与物体本身的内部运动之间的关系,批判了传统的“热素说”,奠定了导热研究的基础。

2. 导热

19世纪初,兰贝特(J. H. Lambert)、毕渥(J. B. Biot)、傅里叶(J. B. J. Fourier, 1786—1830年)都从固体一维导热实验入手开始了导热的研究。

1804年,法国物理学家傅里叶根据实验提出了导热基本定律——后人称为“傅里叶定律”,创建了导热理论,成为热学中导热部分的奠基人。

1807年,傅里叶提出了求解温度场微分方程的分离变量法和求解导热微分方程的无穷级数——傅里叶级数。

1822年,傅里叶发表了著名论著“热的解析理论”,成功地创建了导热基础理论——提出导热基本定律,导出导热微分方程,提出求解导热微分方程的无穷级数(傅里叶级数),得到导热问题的理论解。

此后,雷曼(G. F. B. Riemann)、卡斯劳(H. S. Carslaw)、耶格尔(J. C. Jaeger)、雅哥布(M. Jakob)等人也在导热领域作出了较大的贡献。

3. 流动及对流换热

1823年,法国科学家纳维埃(M. Navier)提出了不可压缩流体的流动方程。

1845年,英国科学家斯托克司(G. G. Stokes)改进了纳维埃的流动方程,提出了纳维埃-斯托克司方程(Navier-Stokes方程),成功地建立了完整的流体流动方程。但该方程求解十分困难,仅有极少数简单流动问题可以求解。

1880年,英国科学家雷诺(O. Reynolds, 1842—1912年)提出了后来被称为雷诺数的无量纲物理量群—— Re ,认为该无量纲量对流体流动起决定性影响。接着,又通过实验发现了管内流动从层流向紊流转变的临界雷诺数 Re_{cr} 值,这个发现解释并澄清了实验数据上的混乱,对以后的实验研究和流体力学的发展有重大的指导意义。

1881年,洛伦兹(L. Lorentz)得到了自然对流换热的理论解。

1885年,格雷兹(L. Gratz)得到了圆管内热起始段的换热理论解。

1904年,德国科学家普朗特(L. Prandtl, 1875—1953年)提出流动边界层概念,使微分方程得到了合理的简化,为后续的理论求解铺平了道路。

1908年,普朗特的学生白拉修斯用边界层方程求得了纵掠平板的理论解,并得到实验的证实,使普朗特的边界层理论得到公认和接受。

1910年,德国科学家努谢尔特(W. Nusselt, 1882—1957年)得到管内换热理论解。

1909年和1915年,努谢尔特发表了两篇论文,对强制对流换热和自然对流换热的微分方程和边界条件进行量纲分析,获得了有关无量纲量之间的原则关系,开创了用量纲分析法研究对流换热问题的先河。

1914年,白金汉(E. Buckingham)提出量纲分析法。

1916年,努谢尔特得到凝结换热理论解,此后这成为凝结换热领域的经典作品。

1921年,波尔豪森(E. Pohlhausen)在流动边界层概念的启发下,提出热边界层概念。

1925年,普朗特提出求解紊流换热问题的二层紊流模型和普朗特比拟。

1930年,波尔豪森和施密特(E. Schmidt)、贝克曼(W. Beckmann)一起得到了竖壁附近空气自然对流的理论解。

1931年,基尔皮切夫(M. B. Kirpicheff)提出求解对流换热问题的相似理论。

1939年,冯·卡门(Th. von Karman)提出求解紊流换热问题的三层紊流模型和卡门比拟。

此后,马丁纳利(R. C. Martinelli)、麦克亚当(W. H. McAdams)、勃耶尔特(L. M. K. Boelter)、埃克特(E. R. G. Eckert)等人在对流换热领域也作出了许多重要的贡献。

4. 热辐射

1803年,发现红外线,确认了热辐射的存在。

1859年和1860年,德国物理学家基尔霍夫(G. Kirchhoff, 1824—1887年)发表的两篇论文,揭示了实际物体的发射率与吸收率之间的关系。

1879年,斯蒂芬(J. Stefan)根据实验发现了黑体辐射力与绝对温度之间的四次方规律。

1894年,玻耳兹曼(L. E. Boltzmann)从理论上证明了黑体辐射基本定律之一的四次方定律,后人称该定律为斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

1896年,维恩(Wien)推导出一个黑体辐射的光谱能量分布的半经验公式——维恩位移定律,在短波段与实验结果符合较好,而在长波段与实验不符。

此后,瑞利(L. Rayleigh)又从理论上推出一个黑体辐射的光谱能量分布公式,并得到金斯(J. H. Jeans)的改进,后人称此为瑞利-金斯公式。该公式在长波段与实验结果比较符合,而在短波段却与实验结果有很大的差距,人称“紫外灾难”。

1900年,普朗克(M. Planck)提出了“能量子假说”,否定了经典物理学的连续性概念,认为物体发出或吸收辐射时,能量不是连续变化的,而是以“量子”的形式发射或吸收的,后来的实验证明了该公式(人称普朗克公式)在整个光谱段都适用。

1904年,爱因斯坦(A. Einstein)提出的光量子理论得到了社会的公认,普朗克公式也被人们所承认。

1935年,俄国科学家波略克借鉴了商务结算中的算法,提出计算物体间辐射换热的“净辐射法”。

1954年,霍特耳(H. C. Hottel)提出“交换因子法”,用于计算辐射换热问题;1967年,他又对此加以改进。

1956年,奥本海姆(A. K. Oppenheim)提出用“模拟网络法”来计算辐射换热问题。

5. 传热学的发展

激光、计算机及其他新的测量技术的发展,促进了实验传热学的进步,对传热学的发展起到了十分重要的作用。

20世纪70年代起,计算机的发展与普及又促进了传热学研究的一个新的分支——数值计算传热学的产生和迅速发展。

新科学、新技术、新的交叉学科的兴起,为传热学的进一步发展开辟了更为广阔的天地。