

Chuanre Chuanzhi Fenxi

# 传热传质分析

胡小平 吴海燕 鄢昌渝 周进 编著

国防科技大学出版社

# 传热传质分析

胡小平 吴海燕 鄱昌渝 周进 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

## 内容简介

本书介绍了热传导、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器的基本概念和基本计算方法、质量交换的基本概念/基本规律、传热问题的数值方法、飞行器传热传质专题、传热传质学的最新研究动态,适合于作为相关专业的研究生教材,也可以作为本科生、自学考试生和其他相关工程技术人员学习传热传质学的辅导用书和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传热传质分析/胡小平等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2011. 12  
ISBN 978 - 7 - 81099 - 971 - 7

I. ①传… II. ①胡… III. ①传热传质学 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 261510 号

国防科技大学出版社出版发行  
电话:(0731)84572640 邮政编码:410073  
<http://www.gfkdcbs.com>  
责任编辑:石少平 责任校对:王 嘉  
国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:787 × 1092 1/16 印张:22.75 字数:539 千  
2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1 - 1000 册  
ISBN 978 - 7 - 81099 - 971 - 7

定价:49.00 元

# 序

传热是最普遍的自然现象之一。几乎所有的工程领域都会遇到传热过程和传热问题,包括有传质同时发生的复杂传热问题。近年来,随着工业经济的兴起和能源消耗的发展,环境问题日益严重。整治环境,保障人民的身体健康已成为实现我国经济可持续发展的重大战略。在2050年以前我国能源结构仍将以煤和石油等化石燃料为主。传热学的研究对促进生产力、提高能源利用效率、节约能源、减少二氧化碳和各种废料的排放量、最大限度地减少现代工业文明对自然生态系统的破坏所起的作用是显而易见的。

现代科学技术突飞猛进,传热学的工程应用研究也已跨越传统的能源动力、工艺过程节能的范畴,在材料的制备和加工、航天技术的发展、信息器件的温控、生物技术、医学、环境净化与生态维护以及农业工程化、军事现代化等众多领域都有所涉及。特别是高技术的迅猛发展,正面临着温度场、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热量传递和温度控制过程,从而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相应技术的重要基础学科。

传热学是一门跨行业的基础性交叉学科,它是在数学物理方程、热力学、流体力学和量子力学等的基础上发展起来的,同时它又必须建立在实验的基础上。因此传热学的发展一方面依赖于数学、热力学、流体力学和量子力学理论的进展,另一方面还需不断发展的先进测量技术来配合。高精度设备、先进的测量技术和控制方法的采用,使研究手段逐步高新技术化。激光、光纤、超声、质谱、色谱、电子等技术的发展为传热学的研究提供了先进的测试手段和分析方法,这使得深化传热学的研究成为可能。大容量、超高速计算机的出现和计算技术的不断提高,为传热学的发展提供了新的机遇。

传热学的研究应从宏观到微观、从平均到瞬时、从现象分析到机理来进行。信息科学、生命科学、材料科学等的飞速发展,为传热学的研究提出了许多新的课题,促进了许多新的传热分支如分子传热学、微重力/微尺度传热学、

生物传热学的产生和发展,传热学的研究内容也由传统的单一性向多样化转变。近年来迅猛发展的非线性科学,如耗散结构理论、协同学理论、突变理论、分形理论和混沌理论等都被广泛地运用到传热学的研究中来。因此传热学的研究在方法上应由传统理论向多学科交叉开拓,这需要较宽阔的知识面和创造性的理论思维。

胡小平等编著的《传热传质分析》一书,吸取了上个世纪八十年代埃克特经典著作“Heat and mass transfer”(《传热与传质分析》)的精华,融入了近年来国内外传热和传质领域的有关新进展。既深入浅出地介绍了传热传质学的基础知识,又简要介绍了传热过程数值分析的基础理论、经典的 SIMPLE 系列算法和几种流行的常用仿真软件,还结合科研实际增加了“飞行器的传热传质”专题,介绍了航天器热控系统、烧蚀冷却技术及再入飞行器的热防护、再入飞行器的气动热分析、飞行器热控制等内容,突出了航天特色;最后还介绍了传热传质学的最新研究动态。本书内容新颖,信息量丰富,注重数学知识和计算方法的运用,注重理论联系实际,是相关工程领域研究人员的一本很好的专业参考书,也可以作为相关专业的研究生教材使用。本书的出版,丰富了高等传热学的内容,不失为一次有益的尝试。

中国科学院院士

庄逢辰

2011年12月

# 前 言

热量传递是自然界最基本的现象,而研究温差所引起的热量传递规律的科学——传热学,是工程技术领域的基础学科。传热学主要研究热量传递的基本规律及控制和优化热量传递过程的基本方法,主要内容包括热传导、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器的基本概念和基本计算方法、质量交换的基本概念/基本规律、传热问题的数值方法等。

热能的转换和利用是人类有效利用能源的主要方式。目前,我国的能源战略形势不容乐观,一方面人均能源资源量少;另一方面,能源利用效率低,环境污染严重——这极大地制约了国民经济的发展和人民生活水平的提高。传热学知识在能源、电力、冶金、动力机械、石油化工、低温工程、环境与建筑等工业领域以及在许多高科技领域如电子信息、航空航天、医学和生命科学等领域都发挥着极其重要的作用,所以传热学是现代工程技术人才必备的技术基础知识,是面向 21 世纪工科各类专业人才工程素质教育的重要组成部分。

本书适合于作为相关专业的研究生教材,也可以作为本科生、自学考试生和其他相关工程技术人员学习传热传质学的辅导用书和参考书。本书侧重于传热和传质问题的分析,要求具有一定的数学基础。本书注意吸收了近年来传热传质领域的一些新的研究成果,并结合作者们的科研实际介绍了与航天领域相关的一些热分析、热防护和热控制问题。在章节体系方面,采取了按照“传热学基础知识、热传导过程分析、对流换热理论、辐射换热分析、传质理论、传热过程数值分析、飞行器传热传质专题和传热传质学最新研究动态”的编排方式,循序渐进,条理清晰。每章还附有若干例题,便于读者巩固知识。

本书第一、二、三、四、五章由胡小平编写,第六章由鄢昌渝编写,第七章由吴海燕编写,第八章由周进编写,全书由胡小平负责统稿。编著过程中参考了国内外一些参考文献资料,并得到了几届研究生的反馈意见,在此一并致谢。

由于作者们水平有限,书中难免存在许多疏漏和错误,恳请读者批评指正。作者的电子邮箱:huxiaopingnudt@163.com

胡小平,吴海燕,鄢昌渝,周进  
于国防科技大学航天与材料工程学院  
2011年12月

# 目 录

第 1 章 传热学基础知识 .....	( 1 )
§ 1.1 绪 论 .....	( 1 )
§ 1.1.1 传热和传质在日常生活中的和工程实际中的意义 .....	( 1 )
§ 1.1.2 本书研究的主要手段——分析 .....	( 2 )
§ 1.1.3 传热学的发展简史 .....	( 2 )
§ 1.2 热传导的基本定律——傅立叶导热定律 .....	( 6 )
§ 1.2.1 傅立叶定律 .....	( 6 )
§ 1.2.2 热流通量 .....	( 7 )
§ 1.2.3 导热系数 .....	( 8 )
§ 1.3 热传导方程 .....	( 8 )
§ 1.3.1 微分形式的热传导方程 .....	( 8 )
§ 1.3.2 积分形式的热传导方程 .....	( 14 )
§ 1.3.3 双曲型的热传导方程 .....	( 16 )
§ 1.4 边界表面的对流换热 .....	( 16 )
§ 1.5 导热系数 .....	( 17 )
§ 1.5.1 导热机理和导热系数的性质 .....	( 18 )
§ 1.5.2 导热系数随温度的变化 .....	( 24 )
§ 1.5.3 导热系数随压力的变化 .....	( 29 )
§ 1.6 传热过程 .....	( 29 )
§ 1.7 本章例题 .....	( 31 )
思考题 .....	( 35 )
第 2 章 热传导过程分析 .....	( 36 )
§ 2.1 稳定条件下简单热传导方程的解 .....	( 36 )
§ 2.1.1 无限大平板的一维稳态导热 .....	( 36 )



§ 2.1.2	复合平板的一维稳态导热	( 37 )
§ 2.1.3	圆管的一维稳态导热	( 38 )
§ 2.1.4	圆球的一维稳态导热	( 39 )
§ 2.1.5	绝缘层的临界厚度问题	( 40 )
§ 2.1.6	变对流换热系数的问题	( 40 )
§ 2.2	细杆的一维稳态导热问题	( 41 )
§ 2.3	肋片的一维稳态导热问题	( 44 )
§ 2.3.1	矩形肋	( 44 )
§ 2.3.2	肋片的优化	( 48 )
§ 2.3.3	圆周肋	( 53 )
§ 2.4	渗透性平板中的热传导	( 54 )
§ 2.4.1	无热源渗透性平板的稳态导热	( 54 )
§ 2.4.2	具有热源的渗透性平板的稳态导热	( 57 )
§ 2.5	二维和三维稳态热传导问题的解	( 58 )
§ 2.5.1	方程形式	( 58 )
§ 2.5.2	方程解法	( 59 )
§ 2.5.3	举例:分离变量法	( 59 )
§ 2.6	导热系数无限大物体中的不稳定热传导(零维不稳定热传导)	( 59 )
§ 2.6.1	金属颗粒的加热问题	( 60 )
§ 2.6.2	边界条件(环境温度)变化时颗粒的加热	( 61 )
§ 2.6.3	有相变的液滴加热问题	( 62 )
§ 2.7	一维不稳定热传导	( 64 )
§ 2.8	二维和三维不稳定热传导	( 67 )
§ 2.9	具有不均匀初始温度分布的不稳定热传导	( 68 )
§ 2.9.1	无限大物体	( 69 )
§ 2.9.2	半无限大固体	( 70 )
§ 2.9.3	表面热流为常数的半无限大固体	( 71 )
§ 2.10	周期性热传导	( 72 )
§ 2.11	不稳定导热的近似解法	( 73 )
§ 2.12	本章例题	( 75 )
<b>第 3 章</b>	<b>对流换热理论</b>	<b>( 97 )</b>
§ 3.1	对流换热基本概念	( 97 )
§ 3.2	对流换热基本方程	( 99 )

§ 3.2.1	基本方程	(99)
§ 3.2.2	边界层方程	(101)
§ 3.3	层流边界层速度场的解	(102)
§ 3.3.1	层流边界层方程	(102)
§ 3.3.2	层流边界层的相似解	(103)
§ 3.4	边界层动量积分方程及其解	(107)
§ 3.5	层流边界层能量方程	(110)
§ 3.6	温度为常数的平板的换热	(111)
§ 3.7	楔型流的换热	(115)
§ 3.8	边界层能量方程的近似解	(118)
§ 3.8.1	边界层能量积分方程	(118)
§ 3.8.2	壁温阶梯式变化的平板对流换热	(119)
§ 3.8.3	壁面温度任意变化的平板换热	(123)
§ 3.9	管道中的对流换热	(124)
§ 3.9.1	管内速度场	(124)
§ 3.9.2	管内温度场及对流换热	(127)
§ 3.10	湍流剪切层中的动量方程和速度型	(130)
§ 3.10.1	动量方程	(131)
§ 3.10.2	剪切层速度型	(135)
§ 3.11	湍流剪切流中的能量方程和对流换热	(139)
§ 3.12	高速流动下的换热	(142)
§ 3.12.1	常物性流体的边界层流动	(143)
§ 3.12.2	变物性流体的边界层流动	(147)
§ 3.12.3	平面和轴对称边界层中的变物性问题	(149)
§ 3.13	自然对流换热及其实验关联式	(152)
§ 3.13.1	大空间自然对流的流动和换热特征	(153)
§ 3.13.2	竖板自然对流换热的微分方程组	(154)
§ 3.13.3	大空间自然对流换热计算	(156)
§ 3.13.4	受限空间自然对流换热计算	(156)
§ 3.14	凝结和沸腾换热	(157)
§ 3.14.1	相变换热与单相换热的对比	(158)
§ 3.14.2	膜状凝结	(158)
§ 3.14.3	影响膜状凝结的因素	(160)
§ 3.14.4	沸腾换热现象	(161)

§ 3. 14. 5  沸腾换热计算式 .....	( 163 )
§ 3. 14. 6  影响沸腾换热的因素 .....	( 163 )
§ 3. 15  本章例题 .....	( 165 )
<b>第 4 章  辐射换热分析</b> .....	( 176 )
§ 4. 1  引  言 .....	( 176 )
§ 4. 2  热辐射的基本概念 .....	( 176 )
§ 4. 3  辐射场 .....	( 178 )
§ 4. 4  基尔霍夫定律 .....	( 179 )
§ 4. 5  辐射密度与辐射压力 .....	( 183 )
§ 4. 6  黑体辐射 .....	( 188 )
§ 4. 6  强吸收性介质的辐射 .....	( 190 )
§ 4. 6. 1  基本概念 .....	( 190 )
§ 4. 6. 2  强吸收性介质(固体和液体)的辐射性质 .....	( 192 )
§ 4. 7  形状因子 .....	( 197 )
§ 4. 8  包壳内的辐射换热 .....	( 199 )
§ 4. 8. 1  由黑体表面构成的包壳 .....	( 199 )
§ 4. 8. 2  具有扩散反射壁面的包壳 .....	( 199 )
§ 4. 8. 3  具有镜面反射壁的包壳 .....	( 202 )
§ 4. 8. 4  几个概念的归纳小结 .....	( 203 )
§ 4. 9  弱吸收性介质的辐射性质 .....	( 203 )
§ 4. 9. 1  弱吸收性介质(气体)的辐射性质 .....	( 203 )
§ 4. 9. 2  气体的辐射性质 .....	( 206 )
§ 4. 9. 3  当量射线长度 .....	( 207 )
§ 4. 9. 4  具有吸收和放射性介质的包壳 .....	( 210 )
§ 4. 9. 5  具有非均匀温度的介质内的辐射能交换 .....	( 212 )
§ 4. 9. 6  火焰辐射 .....	( 216 )
§ 4. 10  本章例题 .....	( 218 )
<b>第 5 章  传质理论</b> .....	( 226 )
§ 5. 1  描述混合物的参数 .....	( 226 )
§ 5. 2  多组分流体的守恒定律 .....	( 228 )
§ 5. 3  菲克扩散定律 .....	( 229 )
§ 5. 3. 1  通量和势 .....	( 229 )

§ 5.3.2 等温扩散——不考虑“交叉输运现象” .....	(229)
§ 5.3.3 非等温流动中的扩散(“交叉输运”现象) .....	(230)
§ 5.4 传热传质边界层方程及边界条件 .....	(231)
§ 5.4.1 直角坐标下的边界层方程 .....	(231)
§ 5.4.2 边界条件 .....	(232)
§ 5.5 强迫对流的传热与传质 .....	(234)
§ 5.5.1 层流、常物性流体 .....	(234)
§ 5.5.2 湍流、常物性流体 .....	(237)
§ 5.5.3 变物性流体 .....	(238)
§ 5.6 本章例题 .....	(238)
<b>第 6 章 传热过程数值分析 .....</b>	<b>(242)</b>
§ 6.1 控制方程及单值性条件 .....	(242)
§ 6.1.1 传热问题控制方程组 .....	(242)
§ 6.1.2 控制方程组的通用形式 .....	(243)
§ 6.1.3 单值性条件 .....	(243)
§ 6.2 计算区域与控制方程离散化 .....	(244)
§ 6.2.1 空间区域离散化 .....	(244)
§ 6.2.2 建立离散方程的方法 .....	(245)
§ 6.3 扩散方程的数值解 .....	(246)
§ 6.3.1 一维导热问题的离散化 .....	(246)
§ 6.3.2 多维非稳态导热 .....	(249)
§ 6.3.3 源项及边界条件的处理 .....	(249)
§ 6.3.4 离散方程的求解 .....	(250)
§ 6.4 SIMPLE 系列算法简介 .....	(250)
§ 6.4.1 交错网格 .....	(251)
§ 6.4.2 SIMPLE 算法 .....	(255)
§ 6.4.3 SIMPLER 算法 .....	(258)
§ 6.4.4 SIMPLEC 算法 .....	(260)
§ 6.4.5 PISO 算法 .....	(262)
§ 6.4.6 SIMPLE 系列算法的比较 .....	(264)
§ 6.5 常用商业软件介绍 .....	(266)
§ 6.5.1 FLUENT 简介 .....	(266)
§ 6.5.2 其他常用商业软件简介 .....	(270)

§ 6.6 本章例题	(273)
<b>第 7 章 飞行器传热传质专题</b>	<b>(279)</b>
§ 7.1 航天器热控系统需求分析	(279)
§ 7.1.1 航天器定义	(279)
§ 7.1.2 航天器分类	(279)
§ 7.1.3 航天器的系统组成	(279)
§ 7.1.4 航天器热控系统需求分析	(280)
§ 7.1.5 航天器热控分系统的任务	(281)
§ 7.1.6 航天器热控分系统研制过程	(282)
§ 7.2 烧蚀冷却技术及再入飞行器的热防护	(283)
§ 7.2.1 再入飞行器的气动热分析	(283)
§ 7.2.2 飞行器热防护	(285)
§ 7.3 飞行器热控制	(292)
§ 7.3.1 热平衡方程	(292)
§ 7.3.2 飞行器热控系统	(294)
§ 7.3.3 被动热控方法	(300)
§ 7.3.4 主动热控方法	(306)
思考题	(309)
<b>第 8 章 传热传质学的最新研究动态</b>	<b>(311)</b>
§ 8.1 微细尺度传热传质学	(311)
§ 8.1.1 微尺度传热传质特点	(313)
§ 8.1.2 微尺度传热研究的主要方法	(314)
§ 8.1.3 微尺度传质过程研究(多孔介质内部超常传质的非菲克效应)	(315)
§ 8.1.4 微尺度相变传热传质	(316)
§ 8.2 多相流的传热传质	(318)
§ 8.2.1 超临界流体的传热	(318)
§ 8.2.2 多孔介质传热传质的研究	(319)
§ 8.2.3 微重力条件下的沸腾传热	(321)
§ 8.2.4 吸热型碳氢燃料的传热传质	(322)
§ 8.3 场协同理论	(322)
§ 8.3.1 对流比拟	(323)
§ 8.3.2 速度场和热流场的配合和协同	(324)

---

§ 8.3.3	对流换热物理机理的新认识·····	(325)
§ 8.3.4	由层流向湍流的推广·····	(326)
§ 8.4	强化传热技术进展·····	(327)
§ 8.4.1	强化传热的原则·····	(328)
§ 8.4.2	单向介质管内对流换热的强化·····	(330)
§ 8.4.3	单向介质管束外对流换热的强化·····	(332)
§ 8.4.4	单相介质对流换热的耗功强化技术·····	(334)
§ 8.4.5	沸腾换热的强化·····	(336)
§ 8.4.6	凝结换热的强化·····	(337)
§ 8.5	传热学研究的新领域·····	(338)
§ 8.5.1	生物医学传热·····	(338)
§ 8.5.2	现代电子器件冷却方法·····	(339)
§ 8.5.3	微尺度热输运·····	(340)
§ 8.5.4	先进的传热传质测量技术·····	(341)
§ 8.5.5	无机热传导技术·····	(344)
§ 8.5.6	电场强化对流换热·····	(345)
§ 8.5.7	热传导的反问题·····	(346)
§ 8.5.8	其他传热传质学前沿问题·····	(348)
参考文献	·····	(349)

# 第 1 章 传热学基础知识

内容:传热的三种基本方式;热传导方程及其边界条件;导热机理;导热系数;传热过程

## § 1.1 绪 论

热量传递是自然界最普遍的现象。研究热量传递规律的科学——传热学,是日常生活和工程技术领域中最普遍的重要基础科学。

### § 1.1.1 传热和传质在日常生活中的工程实际中的意义

凡物质运动,无论是宏观运动还是微观运动,必定有物质和能量的迁移和传递。按照质量守恒定律和能量守恒定律这两大基本自然规律,物质和能量都可能发生迁移和形式的变化,从空间的某处迁移到另一处,从一种形式转换成另外一种形式。但是,不管其位置和形式如何变化,质量总是守恒的,能量也总是守恒的——这就是自然界最基本的规律,即质量守恒定律和能量守恒定律。

传热——与温差有关的能量传递。

传质——与浓度差有关的质量传递。

温度是物质内能的度量。与分子、原子或其他微观粒子或微团的运动引起的内能交换有关(包括湍流热交换及相变)。

传热有三种重要的形式:热传导(Conduction)、热对流(Convection)、热辐射(Radiation)。这三种形式往往不是单独存在的,而是组合在一起的。

传热是通过分子或微团的运动来传递能量的。

传质的几种重要形式:扩散(分子扩散、湍流扩散)(Diffusion)、对流传质(Convection)、相变(Phase Change)。

传热与传质的关系:

- ① 相似性:两者所遵循的规律具有相似性;
- ② 相伴性:两者基本上同时相伴发生的过程。

纯粹的热传导只能存在于不透明的固体之中。也就是说,在不透明的固体中,热量只能通过传导的方式来传递。在透明或半透明的固体中,热量还可能通过辐射来传递。而

在液体和气体这两种流体中,除传导、辐射外,还可能会有热对流存在。

为分析问题的方便起见,下面首先讨论固体中的热传导。因为纯热传导的内容对整个课程的学习都是非常重要的,这主要体现在:

- ① 所建立起的有关传热的概念,对于对流换热和辐射换热的研究都是基本的和重要的;
- ② 在对流换热和辐射换热问题中往往都包含热传导问题,因此热传导分析对于认识和处理这些问题是必不可少的;
- ③ 热传导分析的一些方法对于分析其他传热问题及传质问题都是可用的,或者是可借鉴的。

### § 1.1.2 本书研究的主要手段——分析

本书以传热为主,简介传质。侧重点在于分析,因此要求具有一定的数学基础,最好学过《数学物理方程》等课程。

热传导部分:以基本概念和分析为主;

热对流部分:以工程应用为主;

热辐射部分:注重概念、分析和应用。

### § 1.1.3 传热学的发展简史

18世纪30年代开始于英国的第一次工业革命,以1765-1790年间瓦特(J. Watt)对纽科门(Thomas Newcomen)蒸汽机所进行的一系列改良(如分离式冷凝器、汽缸绝热层等),从而发明了现代意义上的蒸汽机为标志,促进了生产力的空前发展。生产力的发展为自然科学的发展和成长开辟了广阔的道路。传热学这门学科就是在这种大背景下发展成长起来的。

三种传热方式基本理论的确立过程,经历了各自独特的历程。

17世纪末,在当时的科学界流行一种朴素的唯物主义的观点,认为物质之所以能够燃烧,是因为其中包含一种“燃素”,含燃素越多的物质,越易于燃烧——这就是“燃素说”。这种燃素学说以德国的斯塔尔(G. E. Stahl)和英国的波意尔(J. P. Boyer)为代表。与古希腊“普罗米修斯盗天火”的神话和中国古代“燧人氏钻木取火”的传说相比较,它具有一定的唯物主义的成分,但并不是科学的。直到1774年普里斯特莱(J. Priestley)发现了氧元素,启发了拉瓦锡(A. L. Lavoisier)重新思考由于燃烧而引起的质量增加问题,人们才真正地从科学的角度认识到,燃烧是一种氧化反应,而不是某一种物质,比如燃素。

同样,对于热的本质的认识,当时也是一种机械唯物主义的观点,即认为热是由一种叫“热素”的物质所反映的——比较热的物体,包含的热素就越多。在批判“热素说”,确认热是一种运动的过程中,科学史上两个著名的实验起了关键的作用。其一是1798年伦福德(B. T. Rumford)钻炮筒大量发热的实验,其二是1799年戴维(H. Davy)用两块冰块摩擦生热化为水的实验。对于钻炮筒而言,由于钻头的旋转和切削,铁棒被掏空成为炮



筒。刚开始的时候,这个棒料是处于室温下的,温度较低,按理说包含的热素应该比较少。而切削使得它的质量减小了,热素应该更少了,然而炮筒却越来越热,甚至可能烫手——这就与热素说相矛盾。戴维用两块冰冷的冰块相互摩擦,结果冰块会熔化变成了水。若按照热素说,应该冰块所含的热素少,而水所含的热素多一些,这个实验也跟热素说相悖。因此,人们开始怀疑热素说的科学性,确认热来源于物体本身内部的运动而不是某一种物质,从而开辟了科学地探求导热规律的途径。

19世纪初,兰贝特(J. H. Lambert)、毕渥(J. B. Biot)和傅立叶(J. B. J. Fourier)都从固体一维导热的实验入手开展了研究。1804年,毕渥根据实验提出了一个公式,认为每单位时间通过每单位面积的导热热量正比于两侧表面温差、反比于壁厚,比例系数是材料的物理性质。这个公式提高了对导热规律的认识,只是稍显粗糙了一点。傅立叶在进行实验研究的同时,十分重视数学工具的运用,很有特色。他从理论解与实验的对比中不断完善他的理论公式,取得的进展令人瞩目。1807年,他提出了求解偏微分方程的分离变量法和可以将解表示成一系列任意函数的级数的概念,受到学术界的重视。1812年,法国科学院以“热量传递定律的数学理论及理论结果与精确实验的比较”为题设项竞赛。经过努力,傅立叶于1822年发表了他的著名论著“热的解析理论”,成功地完成了创建导热理论的任务。他提出的导热定律(现称为傅立叶导热定律)正确地概括了导热实验的结果,奠定了导热理论的基础。他以傅立叶定律和能量守恒定律为基础而推导出的导热微分方程是导热问题正确的数学描述,成为求解大多数工程导热问题的出发点。他所提出的采用无穷级数表示理论解的方法开辟了数学求解的新途径。傅立叶被公认为导热理论的奠基人。

在傅立叶之后,导热理论求解的领域不断扩大,许多学者作出了贡献。其中,雷曼(G. F. B. Remann)、卡斯劳(H. S. Carslaw)、耶格尔(J. C. Jaeger)和雅各布(M. Jakob)等人的工作最值得重视。

流体流动的理论是对流换热理论的必要前提。1823年纳维埃(M. Navier)提出的流动方程可适用于不可压缩性流体。此方程在1845年经斯托克斯(G. G. Stokes)改进,成为纳维尔-斯托克斯方程(即NS方程),完成了建立流体流动基本方程的任务。然而,由于该方程组是一个耦合的非线性偏微分方程组,非常复杂,只有很少数的简单流动问题能够进行解析求解,流体力学理论的发展遇到了困难。这种局面一直等到1880年,雷诺(O. Reynolds)提出了一个对流动有决定性影响的无量纲物理量,即雷诺数之后才开始有所改观。在1880至1883年间,雷诺进行了大量实验研究,发现管内流动从层流向湍流的转变发生在雷诺数的数值为1800-2600,澄清了实验结果之间的混乱,对指导实验研究作出了重大贡献。长期以来,比单纯流动更为复杂的对流换热问题的理论求解进展不大。1881年洛仑兹(L. Lorentz)自然对流的理论解,1885年格雷茨(L. Graetz)和1910年努赛尔(W. Nusselt)管内换热的理论解及1916年努赛尔凝结换热理论解分别对于解析求解作出了贡献。只是这些解析解为数不多,具有突破意义的进展要属1909年和1915年努赛尔两篇论文的贡献。他对强制对流和自然对流的基本微分方程及边界条件进行量纲分析,获得了有关无量纲数之间的原则关系,开辟了无量纲数原则关系正确指导下,通过实验研究求解对流换热问题的一种基本途径,有力地促进了对流换热研究的发展。由于