

全国高等院校建筑环境与设备工程专业统编教材

State-compiled Textbooks for Building Environment and Facilities Engineering Profession

# Heat Transfer

# 传热学

主编 苏亚欣 主审 范晓伟

 华中科技大学出版社  
[www.hustpas.com](http://www.hustpas.com)



TK124/62

2009

全国高等院校建筑环境与设备工程专业统编教材

# 传 热 学

Heat Transfer

## 丛书审定委员会

付祥钊 张 旭 李永安 李安桂  
李德英 沈恒根 陈振乾 周孝清  
徐向荣

本书主审 范晓伟

本书主编 苏亚欣

## 本书编写委员会

苏亚欣 杨洪海

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 图书在版编目(CIP)数据

传热学/苏亚欣 主编.

—武汉:华中科技大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5609-5703-6

I. 传… II. 苏… III. 传热学—高等学校—教材 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169441 号

传热学

苏亚欣 主编

责任编辑:彭 娜

封面设计:张 璐

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 武昌喻家山 邮编:430074

销售电话:(022)60266190 60266199(兼传真)

网 址:www.hustpas.com

录 排:河北香泉技术开发有限公司

印 刷:河北昌黎第一印刷厂

开本:850 mm×1065 mm 1/16

印张:18.5

字数:416 千字

版次:2009 年 12 月第 1 版

印次:2009 年 12 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

ISBN 978-7-5609-5703-6/TK·50

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

# 全国高等院校建筑环境与设备工程专业统编教材 丛书审定委员会

## 主任委员：

付祥钊 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会副主任委员

## 副主任委员：

李安桂 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

## 委 员：(按姓氏笔画排序)

付祥钊 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会副主任委员

张 旭 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

李永安 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

李安桂 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

李德英 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

沈恒根 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

陈振乾 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

周孝清 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

徐向荣 教授 建筑环境与设备工程专业指导委员会委员

## 总 序

地球上本没有建筑,人类创造了建筑;地球上本没有城市,人类构建了城市。建筑扩大了人类的生存地域,延长了人类的个体寿命;城市增强了人类的交流合作,加快了人类社会的发展。建筑和城市是人类最伟大的工程创造,彰显着人类文明进步的历史。建筑和城市的出现,将原来单纯统一的地球环境分割为三个不同的层次。第一层次为自然环境,其性状和变化由自然力量决定;第二层次为城市环境,其性状和变化由自然力量和人类行为共同决定;第三层次为建筑环境,其性状和变化由人为决定。自然力量恪守着自然的规律,人类行为充满着人类的欲望。工程师必须协调好二者之间的关系。

由于城市物质文化活动的高效益,人们越来越多地聚集于城市。发达国家的城市人口已达全国人口的70%左右;中国正在加快城市化进程,实际上的城市人口很快就将超过50%。现代社会,人类大多数活动在建筑内开展。城市居民一生中约有90%的时间在建筑环境中度过。为了提高生产水平,保护生态环境,包括农业在内的现代生产过程也越来越多地从自然环境转移进建筑环境。建筑环境已成为现代人类社会生存发展的主要空间。

建筑环境必须与自然环境保持良好的空气、水、能源等生态循环,才能支撑人类的生存发展。但是,随着城市规模越来越大,几百万、上千万人口的城市不断形成,城市面积由几十平方公里扩展到几百平方公里、上千平方公里,一些庞大的城市正在积聚成群,笼罩一方,建筑环境已被城市环境包围,远离自然。建筑自身规模的膨胀更加猛烈,几十万、上百万平方米的单体建筑已不鲜见,内外空间网络关联异常复杂。目前建筑环境有两方面问题亟待解决:一方面,通过城市环境,建立和保持建筑环境与自然环境的良性生态循环是人类的一个难题;另一方面,建筑环境在为人类生存发展提供条件的同时,消耗了大量能源,能耗已占社会总能耗的1/3左右,在全球能源紧缺、地球温室效应日渐显著的严峻形势下,提高建筑能源利用效率是人类的又一个重大课题。

满足社会需求,解决上述课题,必须依靠工程。工程是人类改造物质世界活动的总称,建筑环境与设备工程是其中之一。工程的出发点是为了人类更好地生存发展。工程的基本问题是能否改变世界和怎样改变世界。工程以价值定向,以使用价值作为基本的评价标准。建筑环境与设备工程的根本任务是:遵循自然规律,调控建筑环境,满足当代人生活与生产的需求;同时节约能源,善待自然,维护后代生存发展的条件。

进行工程活动的基本社会角色是工程师。工程师需要通过专业教育奠定基础。建筑环境与设备工程专业人才培养的基本类型是建筑环境与设备工程师。工程创造自然界原本没有的事物,其本质特点是创造性的。工程过程包括策划、实施和使用三个阶段,其核心是创造或建造。策划、运筹、决策、操作、运行与管理等工程活动,离不开科学技术,更需要工程创造能力。从事工程活动与科学活动所需要的智能是不一样的。科学活动主要通过概念、理论和论证等实现从具体到一般的理论抽象,需要发现规律的智能;工程活动则更强调实践性,通过策划决策、计划实施、运行使用实现从一般到具体的实践综合,需要的是制定、执行标准规范的运作智能。这就决定了建筑环境与设备工程专业的人才培养模式和教学方法不同于培养科学家的理科专业,教材也不同于理科教材。

建筑环境与设备工程专业的前身——供热、供燃气及通风工程专业,源于前苏联(1928年创建于俄罗斯大学),我国创建于1952年。到1958年,仅有8所高校设立该本科专业。该专业创建之初没有教材。1963年,在当时的“建工部”领导下,成立了“全国高等学校供热、供燃气及通风专业教材编审委员会”,组织编审全国统编教材。“文革”后这套统编教材得到完善,在专业技术与体系构成上呈现出强烈的共性特征,满足了我国计划经济时代、专业大一统的教学需求。在我国供热、供燃气及通风空调工程界,现在的专业技术骨干绝大多数是学这套教材毕业的。该套教材的历史作用不可磨灭。

进入21世纪,建筑环境与设备工程专业教育出现了以下重大变化。

1. 20世纪末,人类社会发展和面临的能源环境形势,将建筑环境与设备工程这个原本鲜为人知的小小配套专业,推向了社会舞台的中心地带,建筑环境与设备工程专业的社会服务面空前扩大。

2. 新旧世纪之交,我国转入市场经济体制,毕业生由统一分配转为自谋职业,就业类型越来越多样化。地区和行业的需求差异增大,用人单位对毕业生的知识能力与素质要求各不相同。该专业教育的社会需求特征发生了本质性的改变。

3. 该专业的科学基础不断加深和拓展,技术日益丰富和多样,工程活动的内涵和形式发生了显著变化。

4. 强烈的社会需求,使该专业显示出良好的发展前景,广阔的就业领域,刺激了该专业教育的快速扩展。目前全国已有150多所高校设立该本科专业,每年招生人数已达1万以上,而且还在继续增加。这1万多名入学新生,分属“985”“211”和一般本科院校等多个层次和学校,在认知特性、学习方法、读书习惯上都有较大差异。

在这样的背景下,对于该工程专业教育而言,特色比统一更重要。各校都在努力办出自己的特色,培养学生的个性,以满足不同的社会需求。学校的特色不同,自然对教材有不同的要求。若不是为了应试,即使同一学校的学生,也会选择不同的教材。多样性的人才培养,呼唤多样性的教材。时代已经变化,全国继续使用同一套统编教材,已经不适宜了,该专业教材建设必须创新、必须开拓。结合1998年的专业调

整并总结跨世纪的教育教学改革成果,高校建筑环境与设备工程专业教学指导委员会组织编写了一套推荐教材,由中国建筑工业出版社出版;同时,重庆大学出版社组织编写了一套系列教材;随后机械工业出版社等也先后组织成套编写该专业教材。

在国家“十五”“十一五”教材建设规划的推动下,各出版社出版教材的理念开放,境界明显提升。华中科技大学出版社在市场调研的基础上,组织编写的这套针对二、三类本科院校的系列教材,力求突出实用性、适用性和前沿性。教材竞争力的核心是质量与特色,教材竞争的结果必然是优胜劣汰,这对广大师生而言,是件大好事。希望该专业的教材建设由此呈现和保持百家争鸣的局面。

教材不是给教师作讲稿的,而是给学生学习的,企望编写者能面向学生编写教材,深入研究学生的认知特点。我们的学生从小就开始学科学,现在才开始学工程,其学习和思维的方式适应理科,而把握工程的内在联系和外部制约,建立工程概念则较为困难。在学习该专业时,往往形成专业内容不系统、欠理论、具体技术和工程方法只能死记硬背的印象。编写该专业教材,在完善教材自身的知识体系的同时,更要引导学生转换这种思维方法,学会综合应用;掌握工程原理,考虑全局。对现代工程教学的深入思考,对该专业教学体系的整体把握,丰富的教学经验和工程实践经验,是实现这一目标的基本条件。这样编写出来的教材一定会有特色,必将受到学生的欢迎。期盼华中科技大学出版社组织编写的这套教材,能使学生们说,“这是让我茅塞顿开的教材!”

借此机会,谨向教材的编审和编辑们表示敬意。

付祥钊

2009.6.30 于重大园

## 内 容 提 要

本书以导热、对流和辐射三种换热方式进行内容的编排,引导读者通过不同内容的学习深刻掌握能量守恒的分析方法。全书共分 10 章,第 1 章绪论简要介绍传热学与其所属学科的关系、传热学与现代工业间的广泛联系,以及三种基本传热方式的特点和简单计算。第 2~4 章详细介绍了稳态和非稳态导热的解析解和数值解的基本方法。第 5~6 章介绍了对流换热的基本原理和工程计算方法。第 7~8 章介绍了沸腾与凝结换热的基本原理和工程计算方法。第 8~9 章介绍了热辐射的基本原理和辐射传热的计算方法。第 10 章介绍了换热过程和换热器设计的计算方法。书中例题和习题的选择注重知识性、趣味性,以及与工程实用性的结合,同时部分内容也涉及了传热学的研究前沿。

本书适用于建筑环境与设备工程、热能与动力工程、航天、化工、冶金、交通等相关专业的本科教学,也可供工程技术人员参考。

## 前 言

传热学是很多工科专业的一门基础理论课,为后续的多门专业课程提供理论支持。它的特点是理论性很强,对数学要求比较高。当初学者打开教材翻阅的时候,第一眼的印象就是书中的微分方程太多了,因而可能会产生一种畏惧的心理。因此,对这门课程要以方法论的学习为主,即把主要的精力首先用于清楚地理解传热的物理过程,在学习和掌握了最基本的传热理论,如傅里叶导热定律、不同传热过程的能量守恒的基本表达式等基本概念后,培养一种基于能量守恒的分析来建立传热微分方程的方法,而不要过于关注复杂的方程和公式本身,尤其不要花时间和精力去死记复杂的公式,无论是解析解、微分方程还是实验关联式。在本书的编写过程中,作者试图帮助读者逐步掌握这样的一种方法。

传热学又是一门与工业应用有着广泛联系的实用性很强的课程。传统的大多数工业领域都涉及大量的、各种形式的能量利用、转换过程和热相关的问题,在高技术领域和新兴的交叉学科领域,也存在很多与传热有关的问题。因此,本书在一些例题和习题的选择上介绍了一些有实际应用背景的传热过程的计算,一方面是为了增加读者对传热学的兴趣,同时也为了把传热学的基础理论的实用性稍加介绍,以及训练求解传热问题的基本计算技巧。例题给读者的启示在于如何分析传热过程,以及进一步加强对基础理论的理解并熟悉基本理论的应用,帮助读者培养有效的方法论,而不仅仅在于讲授解题技巧或培养套用公式的简单计算能力。

本书按照导热、对流和辐射三种换热方式进行内容的编排。各部分内容基本是相互独立的,但以能量守恒贯穿其中。对于不同的换热方式,其能量守恒的方式和特点不同,因此通过不同内容的学习要深刻掌握能量守恒的分析方法。如在稳态导热部分的论述中,首先通过分析研究对象的能量守恒导出通用微分方程,然后分别讨论了在不同边界条件下和导热系数为常数、变数,以及有、无内热源情况下的大平板的求解方法,详尽地介绍了不同形式的微分方程的求解方法。对非稳态导热,介绍了一般的非稳态导热的分离变量法的方法、 $Fo > 0.2$  后的计算方法和集总分析法,舍去了半无限大物体和周期性非稳态导热。除主要参考文献统一列于书末外,部分章节内容中涉及的参考文献或前沿性研究论文则以脚注的形式给出,以便读者进一步详细查阅参考。

本书所提供的习题虽数量不多,但覆盖了传热学的基本原理的各个方面,能够有效帮助读者进一步熟练掌握基本计算技巧和对传热学基本概念的融会贯通。完成一定数量的习题是必要的,但大量地重复同一类型的题目或直接套用公式进行计算对于加深对基本原理的深刻理解并没有多少帮助。因此,建议读者有选择地完成不同

类型和内容的部分习题。

本书针对 64 学时的教学需要而编写,根据需要选择有关章节内容也完全可以满足 32 或 48 学时的教学需要。本书虽然作为建筑环境与设备工程专业统编教材之一,但在内容的选取上并没有刻意限定或偏向这个专业,而是尽可能完整地介绍传热学的基础理论。因此,本书也适用于热能与动力工程、航天、化工、冶金、交通等相关专业的本科教学。

本书由东华大学苏亚欣主编,并编写第 1、2、3、4、8、9 章及 6.4 节,东华大学杨洪海编写第 5、6、7、10 章。

在本书的编写过程中,作者参考了很多前辈专家学者和同行的有关著作,在此深表感谢!限于作者水平,本书难免有疏漏之处,敬请使用本书的老师、同学和工程技术人员批评指正。

**编者**

2009.4.10

# 目 录

|     |                      |       |
|-----|----------------------|-------|
| 1   | 绪 论 .....            | (1)   |
| 1.1 | 传热学概述 .....          | (1)   |
| 1.2 | 传热的三种基本方式 .....      | (3)   |
| 1.3 | 传热过程 .....           | (11)  |
|     | 习题 .....             | (13)  |
| 2   | 稳态导热 .....           | (16)  |
| 2.1 | 导热的基本概念 .....        | (16)  |
| 2.2 | 导热微分方程的建立 .....      | (20)  |
| 2.3 | 一维平壁稳态导热的解析解 .....   | (25)  |
| 2.4 | 一维圆柱和圆球的稳态导热 .....   | (34)  |
| 2.5 | 肋片的导热 .....          | (42)  |
| 2.6 | 多维稳态导热问题的形状因子法 ..... | (51)  |
|     | 习题 .....             | (53)  |
| 3   | 非稳态导热 .....          | (57)  |
| 3.1 | 一维非稳态导热的解析解 .....    | (58)  |
| 3.2 | 非稳态导热的集总参数法 .....    | (70)  |
|     | 习题 .....             | (74)  |
| 4   | 导热问题的数值解 .....       | (77)  |
| 4.1 | 稳态导热问题的数值解法 .....    | (78)  |
| 4.2 | 代数方程组的求解 .....       | (82)  |
| 4.3 | 非稳态导热问题的数值解法 .....   | (84)  |
|     | 习题 .....             | (89)  |
| 5   | 对流换热的基本原理 .....      | (91)  |
| 5.1 | 概述 .....             | (91)  |
| 5.2 | 对流换热的微分方程组 .....     | (95)  |
| 5.3 | 边界层内的对流换热 .....      | (98)  |
| 5.4 | 相似原理及应用 .....        | (105) |
|     | 习题 .....             | (117) |
| 6   | 单相对流换热的工程计算 .....    | (120) |
| 6.1 | 管内强迫对流换热的特点和计算 ..... | (120) |
| 6.2 | 管外强迫对流换热的特点和计算 ..... | (127) |

|      |                                    |       |
|------|------------------------------------|-------|
| 6.3  | 自然对流换热的特点和计算 .....                 | (134) |
| 6.4  | 对流换热的强化 .....                      | (142) |
|      | 习题 .....                           | (147) |
| 7    | 沸腾和凝结换热 .....                      | (151) |
| 7.1  | 沸腾换热 .....                         | (151) |
| 7.2  | 凝结换热 .....                         | (158) |
| 7.3  | 热管技术简介 .....                       | (167) |
|      | 习题 .....                           | (169) |
| 8    | 辐射换热的基本定律 .....                    | (171) |
| 8.1  | 热辐射的基本概念 .....                     | (171) |
| 8.2  | 黑体辐射的基本定律 .....                    | (177) |
| 8.3  | 实际物体的发射特性与基尔霍夫定律 .....             | (182) |
|      | 习题 .....                           | (188) |
| 9    | 辐射换热的计算 .....                      | (190) |
| 9.1  | 辐射换热的角系数 .....                     | (190) |
| 9.2  | 黑体表面间的辐射换热计算 .....                 | (199) |
| 9.3  | 灰体表面间的辐射换热计算 .....                 | (200) |
| 9.4  | 辐射换热的强化与削弱 .....                   | (207) |
| 9.5  | 气体辐射 .....                         | (211) |
| 9.6  | 太阳辐射简介 .....                       | (219) |
|      | 习题 .....                           | (226) |
| 10   | 传热过程和换热器 .....                     | (230) |
| 10.1 | 传热过程的分析 and 计算 .....               | (230) |
| 10.2 | 换热器的基本类型 .....                     | (243) |
| 10.3 | 换热器的计算 .....                       | (253) |
|      | 习题 .....                           | (261) |
| 附录 A | 附表 .....                           | (264) |
| 附录 B | 在第三类边界条件下无限大平板的一维非稳态导热的分离变量法 ..... | (276) |
| 附录 C | 部分习题答案 .....                       | (279) |
| 参考文献 | .....                              | (282) |

# 1 绪 论

本章简要介绍传热学与其所属学科的关系,以及传热学与现代工业间的广泛联系。然后分别详细介绍三种基本传热方式的特点和简单计算,在此基础上对由基本传热方式组合而成的传热过程进行了初步分析。本章的主要目的是初步了解传热学和这门课程所包含的主要研究领域,为后面系统学习各种传热方式的理论打下基础。

## 1.1 传热学概述

传热学是研究热量的传递规律的一门学科。在日常生活和工业生产中有很多热量的传递现象和过程。例如,人的手中拿着一个燃烧的木棍,在离开火焰一定距离的地方也能感觉到火焰的温度很高,而握着木棍的手却没有感觉到发烫。对温度的感觉实际上就是对获得或失去的热量的一种直接的反应。当人们有热量损失的时候,会感到冷;当得到热量时,就会感到热。如果手里拿着一根一端刚从炉子里取出的烧红的铁棍,人们不但能感觉到来自红热的一端的热量,同时握着铁棍的手也会感觉到铁棍的这一端也逐渐发烫。这是由于火焰和红热的铁都会通过热辐射的方式向外传递热量,同时,铁棍和木棍也在通过它们自身向另一端通过导热的方式传递热量,只不过它们传递热量的能力不同,因此,手的感觉不同。冶金工业中的热处理加热、淬火、空冷等过程,化工过程的很多物料加热和冷却过程,制冷过程的蒸发和凝结过程,电子芯片的冷却散热过程等都涉及热量的传递问题。因此,掌握热量的传递规律和计算,对很多现代工业的生产过程是十分重要的。

传热学属于工程热物理学的一个分支。工程热物理学是研究能量以热和功的形式在转化、传递过程中的基本规律及其利用技术的应用基础科学,它的任务是在有关基本规律的基础上,综合应用近代数学、物理学、计算机及现代工程新技术与新理论,对能量转化、传递和利用的物理过程进行系统分析,为有关新技术和工程应用提供理论依据、设计方法和技术手段。工程热物理学包括工程热力学、传热学、燃烧学、流体力学、热物性测量及新能源等学科分支。其中传热学是研究由于温差而引起的能量传递规律的学科。

热力学第二定律表明,热量可以自发地由高温热源传给低温热源。有温差就会有传热,温差是热量传递的推动力。传热学以热力学第一定律和第二定律为基础,即热量  $Q$  始终是从高温物体向低温物体传递;在热量传递过程中若无能量形式的转换,则热量始终保持守恒。工程热力学在研究热能和机械能之间的转换规律的时候,是以平衡态为研究对象的,传热学则是以非平衡态和过程中的热量传递规律为研究

对象,它们处理问题的出发点不同。比如,如图 1-1 所示,一个质量为  $M_1$  的  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  的铁块投入水中淬火,根据热力学第一定律可以求出在达到热平衡后铁块或水最终的温度,而传热学则可以求出铁块在水中放热过程温度的变化特点(也是它放热的速率变化特点),即求解出铁块内部温度分布及其随时间的变化关系、放热量随时间变化的函数关系: $t=f(x,y,z,\tau)$ ;  $Q=f(\tau)$ 。

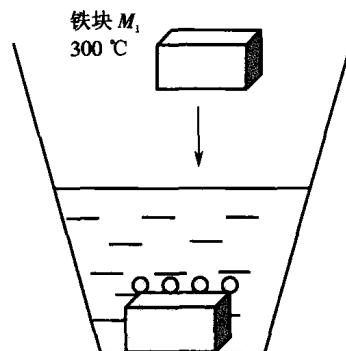


图 1-1 铁块的淬火

传热学的基本特点是理论性较强,对数学基础的要求比较高。在根据能量守恒原理建立传热数学方程的时候涉及偏微分方程(导热)和偏微分方程组(对流)及其求解,以及它们的差分方程(数值解)。同时传热学也是实用性很强的学科,它与工业生产、尖端科技及日常生活都密切相关,因此也有很多适用于工业应用的半经验拟合关联式。因此,在学习传热学的时候,应该以方法的学习为主,要灵活运用能量守恒原理和传热学的基本定律,掌握建立不同类型传热问题的数学方程的方法,然后借助于有关数学知识求解方程,从而得到例如温度分布等的结果。对于大量的从实验测试数据中拟合而来的、用于工业上使用的各种对流换热过程的传热量计算的经验公式,则需要熟悉这些公式的使用方法和适用范围,而不要花太多的时间和精力去死记复杂的公式本身。

传热学是一门技术基础科学,其理论体系形成于 20 世纪 20 年代,半个多世纪以来得到了迅速的发展,并不断与其他学科相互交叉、渗透,它不仅与环境科学、能源、材料、化工、机械、电子、医学等密切相关,同时与工程热物理其他分支学科如工程热力学、燃烧学、气动热力学等紧密相关。传热学几乎渗透到现代工业的所有领域,同时在农业生产、医学、生物学、气象学、信息技术等领域也发挥着重要的作用。

在传统工业领域,例如机械行业,一直存在大量的热量传递、利用的过程,热处理为其中最典型应用。当金属元件被放入热处理炉中进行加热时,通常是元件接受来自炉内壁面的高温的辐射加热。元件接受的热量的多少,以及它需要多长时间能达到预期的温度要求,就是一个辐射传热和元件自身非稳态导热的问题。为减少加热炉通过炉壁的热损失,在炉的内壁需要安装一层或多层隔热材料,隔热材料的厚度也需要通过平壁的导热来计算。当把加热后的元件取出进行淬火、空冷等热处理工艺时,元件自身经历一个非稳态导热过程,它的散热量和温度变化的特点就是一个非稳态导热的过程。在铸造过程中,当钢水连续倒入铸造模具进行大型器件的连铸时,先进入的钢水将逐渐放热凝固,而后续的钢水还是液态,这样将可能造成因温度分布不均匀和相的不同导致的热应力或其他铸造缺陷。这个过程也和传热有关,需要通过传热学的理论来解决。在火力发电厂,燃煤锅炉内火焰释放的热量通过水冷壁传递给水,使之成为过热蒸汽,从而在蒸汽轮机内膨胀做功、发电。这个过程涉及炉内高

温烟气、气固两相流与锅炉内壁面间的对流和热辐射传热过程,然后通过钢管和管内的水或蒸汽的对流、沸腾传热过程。汽轮机乏汽在冷却塔内的冷却也涉及凝结换热问题。这些工业领域所遇到的大量的各种形式的热量传递问题都需要传热学的基础理论的支持。

近年来,随着大规模集成电路的发展,其电路板单位面积上产生的热量越来越大,芯片的发热量已经超过了  $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ,甚至达到  $10^6 \text{ W/m}^2$  量级。这样高的发热量通过常规的散热措施已经很难满足需要,而一旦热量不能及时散发,超过了芯片材料所能容忍的工作温度后将带来严重事故。这个问题促进了微结构换热技术的发展,通过激光微刻技术在基板上加工出微米级的微通道,利用微通道内特殊工质的对流换热来解决这个问题。航空航天设备的热控制技术也大大促进了相关传热问题的发展。而传热学基础理论的扩展和新技术的不断成熟也极大地促进了相关工业的快速发展。

20 世纪 70 年代世界范围的能源危机大大促进了强化传热技术的发展。强化传热技术能提高热量传递的强度,从而提高了能量的利用效率。各种形式的高效换热结构不断出现,同时对其强化传热机理的深入研究和认识又促进了更加高效的换热技术的出现。从紧凑式换热器的开发和在各个领域的迅速推广使用,到今天通过把纳米级的某些固体颗粒物加入到流体中(称为纳米流体)的强化传热技术的出现,都是传热学自身不断深入发展和它与相关学科互相促进的见证。

因此,传热学与现代工业体系和人们的日常生活都密切相关,是一门十分重要的技术基础课,为很多其他学科提供了理论基础和解决相关问题的金钥匙。

## 1.2 传热的三种基本方式

热量的传递有三种基本方式,分别是:热传导、热对流和热辐射。实际的热量传递过程都是以这三种方式进行的,或者只以其中的一种热量传递方式,但很多情况都是以两种或三种热量传递方式同时进行。

### 1.2.1 热传导

热传导通常也称作导热,它是在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。导热现象既可以发生在固体内部,也可发生在静止的液体和气体之中。通常情况下只讨论在固体中的导热。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，导热和材料种类、厚度及温差等因素有关。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 1-2 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，且不随时间变化，它的导热热流量可以用下面的公式计算

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

式中  $A$ ——导热物体的表面积；

$\lambda$ ——反映导热物体材料特性的参数，称为导热系数或热导率；

$\delta$ ——导热物体的厚度；

$t_{w1}, t_{w2}$ ——导热物体两侧的温度。

导热系数  $\lambda$  的单位是  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，其数值大小反映材料的导热能力， $\lambda$  越大则它的导热能力越强。通常，金属材料的导热系数最高，好的导电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 (1-1a) 可以改写为以下形式

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

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

借用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，传热的热阻分析图如图 1-2 所示。

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  $\text{W}/\text{m}^2$ 。由式 (1-1) 可知平壁导热的热流密度可表示为

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

**【例 1-1】** 有三块分别由纯铜 [导热系数为  $\lambda_1 = 398 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]、黄铜 [导热系数为  $\lambda_2 = 109 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] 和碳钢 [导热系数为  $\lambda_3 = 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ] 制成的大平板，厚度都是  $\delta = 10 \text{ mm}$ ，两侧表面的温差都维持在  $t_{w1} - t_{w2} = 50^\circ\text{C}$  不变，比较通过每块

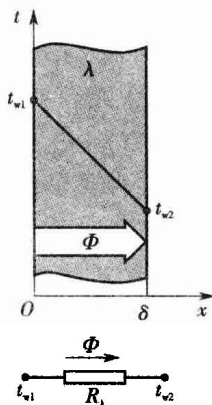


图 1-2 平壁的导热

平板的导热热流密度的大小。

【解】 直接应用式(1-2),可得三块板的热流密度分别为:

$$\text{纯铜} \quad q_1 = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 398 \times \frac{50}{0.010} \text{ W/m}^2 = 1.99 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$\text{黄铜} \quad q_2 = \lambda_2 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 109 \times \frac{50}{0.010} \text{ W/m}^2 = 0.545 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$\text{碳钢} \quad q_3 = \lambda_3 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 40 \times \frac{50}{0.010} \text{ W/m}^2 = 0.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

由此可见,导热系数大的材料在其他条件相同时,导热传热量更多。

【例 1-2】 一扇玻璃窗的宽和高分别为 1 m 和 2 m,厚度为 5 mm,导热系数为 1.4 W/(m·K)。如果在一个寒冷的冬天,玻璃的内外表面分别为 15 °C 和 -20 °C,通过窗户损失的传热量是多少?为减少通过窗户的热损失,习惯上采用双层玻璃的结构,两层玻璃中间为空气层。如果空气层的厚度为 10 mm,且与空气接触的玻璃表面的温度分别为 10 °C 和 -15 °C,此时通过窗户损失的传热量是多少?空气的导热系数为 0.024 W/(m·K)。

【解】 空气层假设是静止的,则通过空气层和玻璃的都是一维稳态导热,传热量为

$$\Phi = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

对单层玻璃

$$\Phi = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 1 \times 2 \times 1.4 \times \frac{15 - (-20)}{0.005} \text{ W} = 19\,600 \text{ W}$$

对双层玻璃,通过玻璃的热损失也就是通过空气层的热损失,即

$$\Phi = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 1 \times 2 \times 0.024 \times \frac{10 - (-15)}{0.01} \text{ W} = 120 \text{ W}$$

结果表明,空气层的导热系数很小(热阻很大),保温效果较好。对固定的室外环境温度,使用双层玻璃窗也会提高室内空气侧的玻璃表面温度。

### 1.2.2 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。对流只能发生于流体中,且一定伴随着流体分子的不规则热运动产生的导热。如图 1-3 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,在离开固体表面的法向上,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

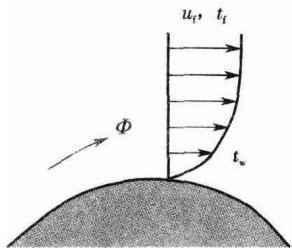


图 1-3 对流换热边界层