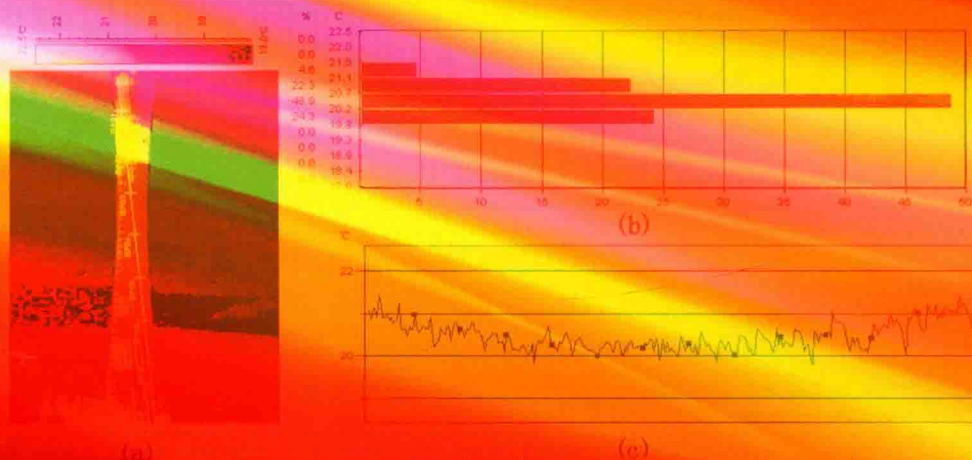


热 工 理 论 与 技 术 丛 书
普通高等教育“十二五”规划教材

传热学

CHUANREXUE

何 燕 张晓光 孟祥文 编著



化学工业出版社

热 工 理 论 与 技 术 丛 书
普通高等教育“十二五”规划教材

传热学

CHUANREXUE

何 燕 张晓光 孟祥文 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

《传热学》是以教育部制定的“高等学校工科本科传热学课程教学基本要求”为指导，在总结青岛科技大学能源与动力工程专业多年来教学改革成果的基础上编写而成的。

《传热学》的内容，密切结合国家对节能与环保的日益重视，注意吸收最新进展，系统阐述了热量传递的规律、机理以及传热计算的方法。共分9章，包括热传导、对流传热、辐射传热、总传热过程和换热器等，每章后还附有小结、思考题与习题。本书系统性好，文字简练，特色明显，有利于读者掌握所学知识。

《传热学》可以作为高等学校能源与动力工程、新能源科学与工程、制冷与低温技术、安全工程、油气储运工程、机械工程等机械类或近机类专业的教材或者教学参考书，也可供有关科技工作者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学 / 何燕, 张晓光, 孟祥文编著. —北京: 化学工业出版社, 2015.12

热工理论与技术丛书

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-24284-6



I. ①传… II. ①何… ②张… ③孟… III. ①传热学—高等学校-教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 128692 号

责任编辑: 刘俊之 王清颖

文字编辑: 向东

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

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 装: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 428 千字 2015 年 9 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: 33.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

传热学是能源工程、机械工程、航空航天工程、材料工程、化学工程、生物工程等领域的重要技术基础，是培养涉及能源特别是与热能相关的各领域创新人才的基础，也是培养 21 世纪工科学生科学素质的基本内容之一。

本教材是在编者多年传热学讲义的基础上，增加新近研究进展，系统整理而成。内容阐述上着重以原理为基础，注意了突出重点，精简内容，减少篇幅，突出对问题的分析，方便读者自学。编写中增加了与传热学有关的科研进展，做到与时俱进，以适应我国教育和科技的飞速发展。

本教材主要内容分三大部分，对热量传递的基本方式进行逐一介绍：热传导、热对流和热辐射。热传导部分介绍热传导基础理论、稳态热传导、非稳态热传导，并对材料热导率的实验测量和材料导热性能 ANSYS 有限元数值模拟研究进行了简要介绍。热对流部分包括对流传热分析、单相对流传热以及凝结与沸腾传热。辐射部分包括热辐射的基本定律、辐射换热计算。最后对传热强化与削弱以及换热器进行介绍。

全书由何燕、张晓光、孟祥文、张斌和周艳合编。何燕编写第 1、2、4 章，并负责全书的统稿工作；张晓光编写第 3、5 章及附录；孟祥文编写第 6、7 章；张斌编写第 8 章；周艳编写第 9 章。硕士研究生李少龙、李霄、张宝库、刘志刚等协助查阅资料、编辑插图及校对等，为本教材编写提供了不少帮助。

本书的出版得到青岛科技大学教务处的大力支持，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 3 月

目录

CONTENTS

[1 绪论 1

1.1 传热学的研究内容	1
1.1.1 传热学的研究对象和任务	1
1.1.2 传热学在科学技术和工程中的应用	2
1.2 热量传递的三种基本方式	3
1.2.1 热传导	3
1.2.2 热对流	4
1.2.3 热辐射	5
1.2.4 传热过程	7
1.2.5 传热热阻	9
1.3 传热学的研究方法和学习方法	10
1.3.1 研究传热问题的一般方法	10
1.3.2 学习传热学的一般方法	11
本章小结	12
习 题	13
参考文献	14

[2 稳态热传导 16

2.1 概述	16
2.1.1 热传导的物理机理	16
2.1.2 热传导的基本定律	17
2.1.3 热导率	19
2.2 导热微分方程	21
2.2.1 导热微分方程的推导	21
2.2.2 导热微分方程适用的范围	24
2.2.3 边界条件和初始条件	24
2.3 一维稳态导热问题	26
2.3.1 平壁	26
2.3.2 圆筒壁	30
2.3.3 球壳	33
2.3.4 其他变面积或变热导率问题	34

2.4 有内热源的热传导	35
2.4.1 有内热源的平壁导热	35
2.4.2 有内热源的圆柱体导热	36
2.5 肋片导热问题	37
2.5.1 肋片的传热	37
2.5.2 通过等截面直肋的导热	38
2.5.3 肋片效率	41
本章小结	43
习 题	43
参考文献	44

[3 非稳态导热 45

3.1 非稳态导热概述	45
3.1.1 两类非稳态导热	45
3.1.2 非稳态导热的数学描述	46
3.2 零维非稳态导热——集中参数法	48
3.2.1 集中参数法	48
3.2.2 集中参数法的判别条件	50
3.2.3 毕渥数 Bi_V 与傅里叶数 $ Fo_V$ 的物理意义	50
3.3 典型一维非稳态导热	51
3.3.1 无限大平板的分析解	52
3.3.2 分析解的讨论	53
3.3.3 诺谟图	54
3.3.4 分析解应用范围的推广及讨论	56
3.4 半无限大物体的非稳态导热	57
3.4.1 半无限大物体的概念	57
3.4.2 半无限大物体定性温度分布	57
3.4.3 第一类边界条件下半无限大物体非稳态导热温度场的分析解	57
3.4.4 半无限大物体概念的适用范围	59

3.5	热导率的实验测量方法	59
3.5.1	稳态热流法	59
3.5.2	非稳态热探针法	60
3.6	热导率的数值模拟方法	62
3.6.1	概述	62
3.6.2	导热性能数值模拟理论 基础	63
3.6.3	ANSYS 热分析基础	63
3.6.4	分析结果讨论	64
	本章小结	68
	习题	68
	参考文献	69

4 对流传热的理论基础 70

4.1	对流传热概述	70
4.1.1	局部和平均表面传热系数	70
4.1.2	换热微分方程式	71
4.1.3	对流传热的影响因素	71
4.1.4	对流传热现象的分类	73
4.1.5	对流传热的研究方法	73
4.2	对流传热微分方程组及定解条件	74
4.2.1	连续性方程	74
4.2.2	动量微分方程	74
4.2.3	能量微分方程	75
4.2.4	对流传热问题完整的数学 描述	76
4.3	边界层与边界层换热微分方程组	77
4.3.1	流动边界层	77
4.3.2	热边界层	78
4.3.3	普朗特数	79
4.3.4	边界层换热微分方程组	79
4.4	对流传热的实验研究	81
4.4.1	相似原理	81
4.4.2	相似分析法获取特征数	82
4.4.3	特征数方程 (实验关联 式)	84
	本章小结	88
	习题	88
	参考文献	90

5 单相对流传热的实验关联式 91

5.1	管内强制对流传热的实验关联式	91
5.1.1	管槽内强制对流流动和换热的 特征	91
5.1.2	管内湍流换热实验关联式	94
5.1.3	管槽内层流强制对流传热 关联式	98
5.1.4	过渡区对流传热关联式	99
5.2	流体外掠平板对流传热	102
5.2.1	流动和传热特点	102
5.2.2	流体外掠等温平板传热的 层流分析解	102
5.2.3	比拟理论求解湍流对流换热 方法	103
5.3	外部强制对流传热实验关联式	107
5.3.1	流体横掠单管的实验 关联式	107
5.3.2	流体外掠球体的实验 关联式	110
5.3.3	流体横掠管束的实验 关联式	110
5.4	大空间与有限空间内自然对流传热的 实验关联式	114
5.4.1	大空间自然对流流动和传热 特点	114
5.4.2	大空间自然对流传热的实验 关联式	115
5.4.3	有限空间自然对流传热的 实验关联式	118
5.4.4	混合对流传热	119
5.5	冲击射流传热的实验关联式	122
5.5.1	单孔冲击射流的流场分布	123
5.5.2	单孔射流平均传热特性的 实验关联式	125
5.5.3	单个狭缝喷嘴射流平均传热 特性的实验关联式	125
5.5.4	多孔冲击射流简介	125
5.6	微尺度传热与纳米流体传热	126
5.6.1	微尺度传热	126
5.6.2	纳米流体传热	130

5.6.3 微米/纳米尺度传热学中的基本分析方法	132
5.6.4 微尺度流动与传热举例	133
本章小结	136
习题	136
参考文献	138

[6 相变对流传热 140]

6.1 凝结传热	140
6.1.1 基本概念	140
6.1.2 竖壁层流膜状凝结理论解	141
6.1.3 水平管的膜状凝结传热	144
6.1.4 湍流膜状凝结	144
6.1.5 膜状凝结的影响因素	145
6.2 沸腾传热	148
6.2.1 气泡动力学简介	148
6.2.2 大容器沸腾	149
6.2.3 大容器沸腾传热的实验关联式	152
6.2.4 管内沸腾	154
6.2.5 沸腾传热的影响因素	155
6.3 相变传热的强化	159
6.3.1 凝结传热的强化	159
6.3.2 沸腾传热的强化	162
6.4 热管技术	165
6.4.1 热管的工作原理	165
6.4.2 热管壳体材料与工质之间的相容性及寿命	167
6.4.3 热管的应用	168
本章小结	171
习题	172
参考文献	173

[7 热辐射基础理论 175]

7.1 概述	175
7.1.1 热辐射的基本概念	175
7.1.2 热辐射的基本特性	176

7.1.3 几种热辐射的理想物体	177
7.1.4 两个重要的辐射参数	178
7.2 黑体辐射基本定律	179
7.2.1 普朗克定律	179
7.2.2 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	180
7.2.3 兰贝特定律	182
7.3 实际物体的辐射特性	183
7.3.1 辐射力	183
7.3.2 定向辐射强度	184
7.4 实际物体的吸收特性	186
7.4.1 吸收比	186
7.4.2 灰体	187
7.4.3 基尔霍夫定律	188
7.5 太阳和环境辐射	189
7.6 太阳辐射的工程应用	191
7.6.1 太阳能热气流电站	191
7.6.2 太阳房	192
7.6.3 建筑结构的日照温度效应	194
本章小结	195
思考题	196
习题	196
参考文献	197

[8 辐射换热计算 199]

8.1 角系数	199
8.1.1 角系数的定义	199
8.1.2 角系数的性质	199
8.1.3 角系数的计算方法	200
8.2 两表面封闭系统的辐射换热	205
8.2.1 两黑体表面间的辐射换热	205
8.2.2 有效辐射	205
8.2.3 表面辐射热阻与空间辐射热阻	206
8.2.4 两个灰体表面组成的封闭系统的辐射换热	207
8.2.5 遮热板	209
8.3 多个灰体表面组成的封闭系统的辐射换热	211
8.4 气体的辐射和吸收特性	214
8.4.1 气体辐射的基本特征	215

8.4.2 气体的发射率和吸收比	215
8.4.3 气体与包壳间的辐射换热	219
本章小结	220
思考题	220
习 题	220
参考文献	222

9 换热器的传热计算 224

9.1 换热器简介	224
9.1.1 换热器的定义	224
9.1.2 换热器的发展史	224
9.1.3 换热器的分类	224
9.1.4 间壁式换热器的主要形式	225
9.2 换热器传热过程分析及计算	229
9.2.1 传热系数的确定	229
9.2.2 传热平均温差的计算	233
9.3 间壁式换热器的热设计	236
9.3.1 两种类型的设计	236
9.3.2 两种设计方法	237
9.4 换热器的污垢热阻	239
9.5 换热器强化传热技术	242
9.5.1 强化传热的目的及意义	242
9.5.2 强化传热的任务	242

9.5.3 换热器中强化传热的途径	242
9.5.4 强化传热问题所使用的方法	244
本章小结	246
习 题	246
参考文献	247

附 录 248

附录1 金属材料的密度、比热容和热导率	248
附录2 部分非金属材料的密度和热导率	248
附录3 大气压力 ($p = 1.0125 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下干空气的热物理性质	249
附录4 饱和水的热物理性质	249
附录5 误差函数选摘	250
附录6 三角形肋片的效率曲线	251
附录7 环肋片的效率曲线	251
附录8 长圆柱中心温度诺谟图、 $\frac{\theta}{\theta_m}$ 曲线、 $\frac{Q}{Q_0}$ 曲线	252
附录9 球中心温度诺谟图、 $\frac{\theta}{\theta_m}$ 曲线、 $\frac{Q}{Q_0}$ 曲线	254

[1] 绪论

本章将论述传热学的研究内容,介绍其在科学技术和工程领域中的应用,重点介绍热量传递的三种基本方式,以及由这些方式组合而成的传热过程,并给出通过三种基本传热方式及传热过程所传递热量的计算公式,最后介绍传热学的研究方法和学习方法。本章教学的目的在于使读者对传热学这门学科的研究内容有一个初步的了解,并领会传热学的研究方法和学习方法,为后面深入学习传热学打下基础。

1.1 传热学的研究内容

1.1.1 传热学的研究对象和任务

传热学是工程热物理的一个分支,是研究由温差引起的热量传递规律及其应用的一门科学,大约在 20 世纪 30 年代,传热学形成了独立的学科。传热学和热力学都是研究热现象的理论基础,其中传热学是利用可以预测能量传递速率的一些定律去补充热力学分析,因为热力学只讨论在平衡状态下的系统。

热力学第二定律指出:凡是有温差存在的地方,就有热能自发地从高温物体向低温物体传递(传递过程中的热能常称为热量)。自然界和工程中普遍存在温差,所以传热是日常生活和工程中一种非常普遍的物理现象。例如,提高锅炉的蒸汽产量、防止燃气轮机燃烧室过热、减小内燃机气缸和曲轴的热应力、确定换热器的传热面积和控制热加工时零件的变形等,都是典型的传热学问题。

热量传递有热传导、热对流和热辐射三种基本方式。热量传递规律就是以这三种传热方式为基础展开研究的。所谓热量传递规律主要是指单位时间内所传递的热量与物体中相应的温度差之间的关系,反映这种规律的第一层次的关系式称为热量传递的速率方程。传热学要研究的就是在特定场合热量是以哪种或哪几种方式进行传递的,传递速率是多少,要达到希望的温度需要多久才能完成,在热量传递过程中物体内的温度分布状态等等。

工程上常遇到的传热问题主要有两类:第一类以求出局部或者平均传热速率为目的。这类问题往往涉及对热量传递速率的计算和控制,即与增强或削弱传热有关的各种技术和设备的专用设计。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,必须研制新型的空冷传热元件以增强传热;为了使热力设备和管道减少散热损失,必须外加保温隔热层以削弱传热。第二类以求得研究对象内部温度分布为目的,以便进行某些现象的判断、温度控制和其他热力学计算。这类问题常涉及各种热力发动机、机械热

加工过程（如焊接、铸造、热处理、切削）。要解决这些传热问题，必须具备扎实的热量传递规律基本知识，具备分析工程传热问题的能力，掌握计算工程传热问题的基本方法，具有相应的计算能力，掌握热工参数的测量方法，并具有一定的实验技能。这就是传热学学习过程中要达到的目标和要求。

1.1.2 传热学在科学技术和工程中的应用

热量传递现象无时无刻不在，因此传热学在科学技术和工程应用的各个领域都有十分广泛的应用，不仅涉及能源动力、化工、冶金、交通、机械等传统工业领域，而且也广泛应用于诸如航空航天、微电子、核能、新能源、生物医学以及农业工程等很多高新技术领域。总结起来，传热学在科学技术和工程中的应用可以分为以下三种：强化传热、削弱传热（也称热绝缘）以及温度控制。

（1）强化传热

强化传热就是在一定的条件下增加热量的传递，目的是提高设备的利用率、节约能源或满足特殊的工艺要求。强化传热技术是利用各种形式的翅片管、多孔表面管、表面粗糙化管、管内插件等换热器件在流动介质中附加电场、磁场、超声波、机械振动、添加剂等辅助设施，促使流过换热器件的介质产生湍流，减薄边界热阻，强化换热面的作用，从而达到有效传递热量的目的。强化传热技术在换热器上的应用主要体现在以最经济（体积小、质量小、成本低）的设备来满足热量要求，或是采用有效方式来冷却高温部件，使其在安全可靠的工况下运行。

例如，由光管滚轧制成的内外表面螺旋槽管是促使流体形成边界层分离流和螺旋流、具有双边强化传热作用、提高对流传热效率的管型之一。它适用于工业锅炉、废气锅炉及其他管式热交换器。在泵功率不变的情况下，其传热系数可提高 50%~60%，传热面积可节省 30% 左右。工业燃油或燃煤烟管锅炉采用这种螺旋槽管，炉效率可提高 2%，一台 4t/h 的小型锅炉每年就可节煤 30t。

（2）削弱传热

削弱传热发生在高温设备上，其目的是减少散热损失；在低温设备上，其目的则是减少冷量的损失，或称减少漏热。例如保存液氮、液氧的低温容器（称为杜瓦瓶），采取减少热量传递的措施可以使得在垂直于杜瓦瓶壁面方向的热量传递减少到采取措施前的千分之一，甚至更少，从而有效防止了瓶中低温液体的蒸发，减少了能量损失。

（3）温度控制

传热学在温度控制方面的问题主要体现在电子器件冷却和航天器的防护等方面。当今世界，电子设备正朝着高性能高集成的方向发展，电子设备的功能越来越强大，体积却变得越来越小，超高的热流密度已经成为电子设备进一步发展的阻碍。从芯片制造工艺的角度，线宽从微米级别发展到纳米级别，2005—2013 年经历了 65nm、45nm、32nm、22nm、14nm 工艺，英特尔（Intel）将在未来推出更小的纳米工艺，芯片的频率也越来越高，功耗越来越大，目前市场上芯片的功率可高达 150W，封装在很小的空间内，对如此高的热流密度电子芯片进行有效的温度控制是至关重要的。据统计，当前电子器件损坏的主要原因是热损坏，即工作温度超过允许的数值。随着芯片工艺进入纳米级时代，高热流密度已经成为微电子发展的一个瓶颈，如何对高集成度芯片进行温度控制的问题变得越来越紧迫。传热学已经形成了以解决微米-纳米尺度范围的传热与流动问题的微米-纳米研究方向，各国专家和学者研制开发出了新的温度控制方法，有相变温控技术、射流冲击强化换热技术、液态金属散热技

术、热管技术、静电冷却技术、热电冷却技术以及微通道冷却技术等。

人类征服天空和宇宙空间的不懈努力以及所取得的巨大成果，是当今世界上各领域高技术、新材料研究最集中的体现，其中传热学功不可没。据美国国家航空航天局所作的技术分析，美国航天飞机的技术关键只有一个半，这半个是大推力的液氢-液氧火箭发动机（其中自燃与传热有密切的关系），而那一个关键则是所谓“热防护系统”，即指以航天飞机外表面的隔热瓦为主的整个热防护结构。它被视为可反复使用的航天飞机成败的最大关键。之所以把热防护系统提到如此重要的地位，是由于航天飞机极端复杂的气动热环境以及要求该隔热系统必须能够重复使用。要知道，在航天飞机重返大气层的时候，其表面所受的高温达 1650°C ！在这样严酷的情况下要能够保证飞行安全，使内部的人员、设备不受任何干扰，可见有效的热防护措施多么重要！

我们的生活中就有很多传热学的例子，而且就是我们每天都会碰见的。当我们了解了传热学以后，我们就可以用传热学的知识来解释这些现象。许多人都喜欢在冬天有暖暖阳光时晒被子，我们都会深有体会，在白天太阳底下晒过的棉被，晚上盖起来会觉得很暖和，并且经过拍打以后，效果更加明显。这就可以用传热学的知识来解释，棉被经过晾晒以后，棉花的空隙里进入更多的空气。而空气在狭小的棉絮空间里的热量传递方式主要是热传导，由于空气的热导率较小，因此具有良好的保温性能。而经过拍打的棉被可以让更多的空气进入，因而效果更明显。

再比如夏季在维持 20°C 的室内工作，穿单衣感到舒适，而冬季在保持 22°C 的室内工作时，为什么必须穿绒衣才觉得舒服？首先，冬季和夏季的最大区别是室外温度不同。夏季室外温度比室内温度高，因此通过墙壁的热量传递方向是由室外传向室内。而冬季室外气温比室内气温低，通过墙壁的热量传递方向是由室内传向室外。冬季和夏季墙壁内表面温度不同，夏季高而冬季低。因此，尽管冬季室内温度 22°C 比夏季 20°C 略高，但人体在冬季通过辐射与墙壁的散热比夏季高很多。

传热学在科学技术领域中的应用非常广泛，无论是军用、民用工业领域还是人们日常生活中，都存在大量的热量传递现象，而且在很多行业中如何让热量有效地传递成为解决问题的关键所在，它已成为许多工科专业的一门基础技术课程。关于传热学在多种工程领域中应用的介绍可以参阅文献[4~6, 11~15]。而结合实际问题进行传热方面的分析，是学习传热学后应掌握的基本功。

1.2 热量传递的三种基本方式

只要一个介质中或两个介质之间存在温差，就必然会发生传热，根据传热模式的不同，可将传热过程分为热传导、热对流和热辐射三种基本形式。这里需要指出的是，在本书的研究范围内始终把研究对象（固体或流体）看作是连续介质，即假定所研究的物体中温度、密度、速度、压力等各项物性参数都是空间位置的连续函数。对于微尺度（尺寸在 $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ ）流动与传热问题就不能采用连续介质假定，在本书有关章节将予简单介绍。

1.2.1 热传导

热传导（heat conduction）是由于物体各部分之间不发生位移时，仅依靠分子、原子或自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能传递，是建立在组成物质的基本微观粒子随机运动基础上的扩散行为。当存在温差时，气体、固体和液体都具有一定的导热能力。当两物体之间发生热传导时，它们必须紧密接触，所以导热是一种依赖直接接触的传热方式。

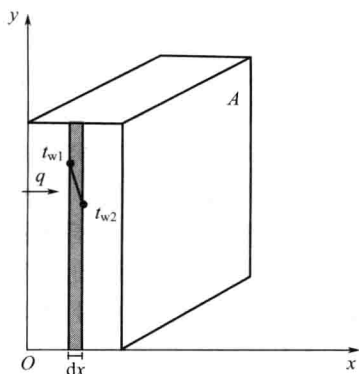


图 1-1 通过大平板的一维导热

导热规律可以用傅里叶定律来描述。以图 1-1 所示的通过大平板的一维导热问题为例, 即温度仅在 x 方向上发生变化。对于 x 方向上任意一个厚度为 dx 的微元层来说, 根据傅里叶定律, 单位时间内通过单位面积的导热热量 (热流密度) 与该方向上的温度梯度成正比, 即

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1-1a)$$

式中, q 为热流密度, 是单位时间内通过单位面积的热量, W/m^2 ; 因热量是向温度降低的方向传输, 故方程中有负号; λ 为热导率, 也称导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 反映材料导热能力。一般而言, 金属材料的热导率最高, 液体次之, 气体最小。单位时间内通过给定面积为 A 的平壁热流量 Φ (单位为 W) 为热流密度与面积的乘

积, 即

$$\Phi = qA = -\lambda A \frac{dx}{dt} \quad (1-1b)$$

特别地, 对于一维稳态大平板导热问题, 温度只在 x 一个方向上发生变化, 通过对傅里叶定律表达式进行积分可得

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

【例 1-1】一玻璃窗, 宽 1.1m , 高 1.2m , 厚 $\delta=5\text{mm}$, 室内、外空气温度分别为 $t_{w1}=25^\circ\text{C}$ 、 $t_{w2}=-10^\circ\text{C}$, 玻璃的热导率为 $0.85\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 试求通过玻璃的散热损失。

解 已知: 玻璃窗玻璃的厚度、面积、热导率和两侧表面的温度。

求: 通过该玻璃的总散热损失。

假设: ①玻璃导热为一维稳态导热问题; ②物性参数为常数。

分析与计算: 在上述假设条件下, 可以利用一维单层平壁稳态导热的计算公式 (1-2) 来求解通过平板玻璃的热流密度, 即

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{0.85\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{0.005\text{m}} \times [25 - (-10)]^\circ\text{C} = 5950\text{W}/\text{m}^2$$

于是, 通过整块玻璃的散热功率为

$$\Phi = qA = 5950\text{W}/\text{m}^2 \times 1.1\text{m} \times 1.2\text{m} = 7854\text{W}$$

讨论: 在 35°C 的温差下, 通过面积为 1.32m^2 的玻璃窗的散热功率达到 7.854kW 。这意味着, 要想保持室内温度, 就必须补充同等数量的热量。当然除了玻璃窗外墙体也要散热, 但是墙体比玻璃厚得多且热导率更低, 因此散热的热流密度将大大下降。实际上, 室内、外的热量传递过程除了导热还有对流和辐射两种方式共同参与, 玻璃窗表面的温度应视为各种换热方式联合作用的总效果。

1.2.2 热对流

热对流是指存在温差时, 流体宏观流动引起的冷、热流体相互掺混所导致的热量迁移。显然热对流是指流体内部相互间的热量传递方式。工程上感兴趣的大部分问题发生在具有不同温度的流体与固体表面之间的热量传递过程, 称为对流传热 (convective heat transfer)。流体宏观流动时, 流体中的分子也在进行着不规则的热运动, 因而热对流必然伴随有热传导

现象，也就是说对流传热是热传导和热对流两种传热机理共同作用的结果。只要流体内部存在温度差，即流体内部温度分布不均匀，导热方式就以傅里叶定律规定的数量关系起作用。

对流传热机理与紧靠壁面的薄膜层的热传递有关，还与具体的换热过程密切相关。根据引起流动的原因不同，将对流传热区分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由流体受热（或受冷）产生密度变化而引起的流动，如电力变压器中油的流动。强制对流是指流体的运动是由水泵、风机等外界强迫驱动力所造成的，例如冷油器、冷凝器等管内冷却水的流动都由水泵驱动。

无论气体或液体，若不发生相态变化就属于单相流体的对流换热。如果流体在被加热或被冷却的过程中出现了相态变化，即由液态转变成气态，或由气态转变为液态，那么流体与固体壁面间交换的热量就包括潜热，它们分别是沸腾和凝结。沸腾传热和凝结传热在工程上经常遇到，例如燃煤发电和核电、空调制冷等等。

对流传热的基本计算式是牛顿冷却公式（Newton's law of cooling）：

$$q = h \Delta t \tag{1-3a}$$

$$\Phi = hA \Delta t \tag{1-3b}$$

为使用方面，规定温差 Δt 永远取正值，以保证热流密度也总是正值。当壁面温度高于流体温度时， $\Delta t = t_w - t_f$ ；当壁面温度低于流体温度时， $\Delta t = t_f - t_w$ 。式中， t_w 、 t_f 分别为壁面温度和流体温度，℃； h 为表面传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ 。牛顿冷却公式表明对流换热时单位面积的换热量正比于壁面和流体之间的温度差。

表 1-1 对流传热过程表面传热系数数值的一般范围

介质		$h/[W/(m^2 \cdot K)]$
水	自然对流	200~1000
	强制对流	1000~1500
	沸腾	2500~35000
	蒸汽凝结	5000~25000
高压水蒸气	强制对流	500~35000
气体	自然对流	1~10
	强制对流	20~100

可以看出，牛顿冷却公式（1-3a）并没有给出流体温度场与热流密度间的内在关系，而仅仅给出了表面传热系数的定义。实际上表面传热系数的大小与对流传热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的流动状态、流动的起因、流体的物性以及换热表面的形状、大小与空间布置，而且还与流速有密切关系。因此，研究对流传热的基本目的可以归结为利用理论分析或实验方法给出不同情况下表面传热系数 h 的具体计算关系式。将得出的 h 值代入牛顿冷却公式就可以求出热流量。表 1-1 给出了几种对流传热过程表面传热系数数值的一般范围。在传热学的学习过程中，掌握经典条件下表面传热系数的数量级是很有必要的。

1.2.3 热辐射

热辐射是物体由于具有温度而辐射电磁波的现象。一切温度高于绝对零度的物体都能产生热辐射，温度越高，辐射出的总能量就越大，短波成分也越多。热辐射的光谱是连续谱，波长覆盖范围理论上可从 $0 \sim \infty$ ，一般的热辐射主要靠波长较长的可见光和红外线传播。由于电磁波的传播无需任何介质，所以热辐射是在真空中唯一的传热方式。

物体在向外发射辐射能的同时，也会不断地吸收周围其他物体发射的辐射能，并将其重新转变为热能，这种物体间相互发射辐射能和吸收辐射能的传热过程称为辐射传热。若辐射传热是在两个温度不同的物体之间进行，则传热的结果是高温物体将热量传给了低温物体，若两个物体温度相同，则物体间的辐射传热量等于零，但物体间辐射和吸收过程仍在进行，处于热的动平衡状态。

理论推导与实验均表明，物体发生热辐射的能力与它的热力学温度以及表面性质有关。有一种称为绝对黑体，或简称黑体（black body）的理想化模型在研究辐射换热问题时具有重大意义。黑体是指能吸收投入到其表面上的所有热辐射能量的物体。黑体的吸收本领和辐射本领在同温度的物体中是最大的。黑体在单位时间内发出的热辐射热量由斯蒂芬-玻尔兹曼（Stefan-Boltzmann）定律给出：

$$\Phi = A\sigma T^4 \tag{1-4}$$

式中， T 为黑体热力学温度，K； $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为黑体辐射常数； A 为辐射表面积， m^2 。

所有实际物体的辐射能力都低于相同温度的黑体，一般用发射率（也称黑度） ϵ 来修正斯蒂芬-玻尔兹曼定律表达式：

$$\Phi = \epsilon A\sigma T^4 \tag{1-5}$$

发射率 ϵ 是物体发射的辐射功率与同温度下黑体发射的辐射功率之比，其值总小于 1，与物体的种类及表面状态有关。发射率有法向发射率和半球发射率的区分，但在工程应用情况下，一般可用法向发射率近似代替半球发射率。表 1-2 给出了几种常用材料表面的法向发射率 ϵ 。

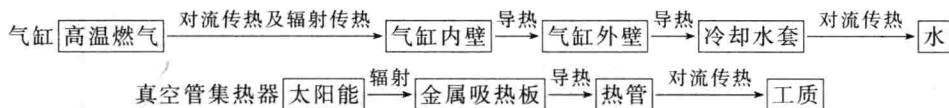
表 1-2 常用材料表面的法向发射率 ϵ

材料名称及表面状态	ϵ	材料名称及表面状态	ϵ
金：高度抛光的纯金	0.02	钢：抛光的钢	0.07
铜：高度抛光的电解铜	0.02	轧制的钢板	0.65
轻微抛光的铜	0.12	严重氧化的钢板	0.80
氧化变黑的铜	0.76	各种油漆	0.90~0.96
铝：高度抛光的纯铝	0.04	平板玻璃	0.94
工业用铝板	0.09	硬质橡胶	0.94
严重氧化的铝	0.20~0.31	碳：灯黑	0.95~0.97

除了发射辐射能以外，物体表面还会吸收外来的辐射。而式（1-4）与式（1-5）都是计算物体自身向外辐射的热流量。因此要计算辐射传热量就必须同时考虑投射到物体上的辐射热量的吸收过程。工程上要研究的多是两个或两个以上的物体间的辐射热交换，其中最常见的一种情形是某个物体表面与包围它的大环境间的辐射换热。如果一个表面积为 A_1 、表面温度为 T_1 、发射率为 ϵ 的物体被包容在一个很大的表面温度为 T_2 的空腔内，则此时该物体与空腔表面间的辐射换热量为

$$\Phi = \epsilon A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \tag{1-6}$$

以上分别讨论了三种热量传递的基本方式，即热传导、热对流和热辐射。实际上，热传导、热对流和热辐射这三种传热方式是经常同时发生的，只是在特定的条件下，以某种方式为主。例如，内燃机气缸壁水冷系统、太阳能热管式真空管集热器热量传递过程中各个环节的换热方式如下：



【例 1-2】一炉墙厚 $\delta = 0.25\text{m}$ ，平均热导率 $\lambda = 0.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，墙外壁壁温为 $t_{w2} = 50^\circ\text{C}$ ，墙外辐射环境温度为 $t_f = 20^\circ\text{C}$ 。墙外壁的发射率 $\epsilon = 0.75$ ，对流换热的表面传热系数 $h = 12\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。求单位面积炉墙的总散热量。

解 已知：炉墙外壁温度、物性以及外部换热环境的有关数据。

求：单位面积炉墙总散热量。

假设：①沿炉墙上各给定参数都保持不变；②稳态过程；③墙外辐射换热环境温度与周围空气温度相同。

分析与计算：稳态条件下，通过炉墙外壁的热量必将以自然对流和辐射传热两种方式散出。自然对流传热量可按式 (1-5) 计算，炉墙外壁与周围环境的辐射传热可按式 (1-6) 计算。

把炉墙单位面积上的散热量记为 q ，根据式 (1-5)，单位面积上的自然对流散热量 q_c 和辐射散热量 q_r 分别为

$$q_c = h(t_{w2} - t_f) = 12\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) \times (323 - 293)\text{K} = 360.0\text{W}/\text{m}^2$$

$$q_r = \epsilon\sigma(T_{w2}^4 - T_f^4) = 0.75 \times 5.67 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4) \times (323^4 - 293^4)\text{K}^4 = 149.5\text{W}/\text{m}^2$$

于是单位面积炉墙的总散热量为

$$q = q_c + q_r = 360.0\text{W}/\text{m}^2 + 149.5\text{W}/\text{m}^2 = 509.5\text{W}/\text{m}^2$$

讨论：在本问题给定的参数下，自然对流散热量占总量的 70.66%，辐射散热量占总量的 29.34%。这个比例是随着表面发射率、表面传热系数以及炉墙外壁温度与周围换热环境温度的差别大小变化的。温度越高、温差越大，辐射部分的比例将越大。计算结果表明，对于表面温度为几十摄氏度的一类表面散热问题，自然对流散热量与辐射散热量具有相同的数量级，必须同时予以考虑。此外，需要注意的是一旦对流项与辐射项同时出现在一个方程式中，必须把温度统一写成热力学温度的形式，否则容易犯错。

【例 1-3】一航天器在太空中飞行，其外表面平均温度为 250K，表面发射率为 0.4，试计算航天器单位面积上的换热量（宇宙空间可近似看成为 0K 的真空空间）。

解 已知：航天器外表面温度、发射率及外部换热环境的有关数据。

求：航天器单位面积换热量。

假设：航天器表面温度均匀；表面发射率均匀。

分析与计算：宇宙空间可近似为 0K 的真空空间，其辐射能为 $0\text{W}/\text{m}^2$ 。故航天器单位表面上的换热量就是其自身单位面积的辐射能，即

$$q = \epsilon\sigma T^4 = 0.4 \times 5.67 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4) \times 250^4\text{K}^4 = 88.6\text{W}/\text{m}^2$$

讨论：为减少航天器的能源消耗，其表面应采用发射率较低的材料。

1.2.4 传热过程

在实际的传热问题中，进行热量交换的冷、热流体常分别处于固体壁面的两侧，即热量交换要通过固体壁面进行，例如锅炉省煤器及冰箱冷凝器中的热量交换过程。这种热量由壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程称为传热过程（overall heat transfer process）。需要指出的是这里的传热过程有明确的含义，与一般论述中把热量传递过程统称为传热过程不同。

下面以冷、热流体通过一块大平壁交换热量的稳态传热过程为例，导出传热过程的计算

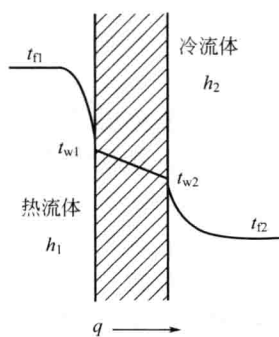


图 1-2 流体通过间壁的传热

公式。冷、热流体间通过间壁传热一般包括三个串联环节（见图 1-2）：①热量靠对流传热从热流体传递到壁面高温侧；②热量自壁面高温侧靠热传导传递至壁面低温侧；③热量靠对流传热自壁面低温侧传给冷流体。由于是稳态过程，通过串联着的各个环节的热流量必定是相等的。设平壁表面积为 A ，可以分别写出上述三个环节的热流量表达式：

$$\Phi = Ah_1(t_{f1} - t_{w1}) \tag{a}$$

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

$$\Phi = Ah_2(t_{w2} - t_{f2}) \tag{c}$$

将式 (a)、式 (b)、式 (c) 写成温差的形式：

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{\Phi}{Ah_1} \tag{d}$$

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

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{\Phi}{Ah_2} \tag{f}$$

将式 (d)、式 (e)、式 (f) 相加可得

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \tag{1-7}$$

也可写成

$$\Phi = Ak(t_{f1} - t_{f2}) \tag{1-8}$$

式中， k 为传热系数 (overall heat transfer coefficient)， $W/(m^2 \cdot K)$ 。数值上，它等于稳定传热条件下，冷、热流体间温差 $\Delta t = 1K$ 、传热面积 $A = 1m^2$ 时的热流量的值，反映了传热过程的强烈程度。传热过程越强烈，传热系数越大，反之越小。传热系数的大小不仅取决于参与传热过程的冷、热流体的种类，而且还与传热过程本身有关（如流速、相变等）。如果需要计及流体与壁面间的辐射传热，则式 (1-7) 中的传热系数 h_1 、 h_2 可取为复合换热表面传热系数，它包括由辐射传热折算出来的表面传热系数在内。首先定义辐射传热系数 h_r ，即将根据辐射换热公式计算得到的辐射传热量写成牛顿冷却公式的形式，即

$$\Phi_r = h_r A \Delta t \tag{1-9a}$$

于是同时存在辐射和对流的复合传热的总换热量可以表示成：

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r = h_c A \Delta t + h_r A \Delta t = A(h_c + h_r) \Delta t = Ah_t \Delta t \tag{1-9b}$$

式中，下角标 c 表示对流传热； h_t 为包含对流传热与辐射传热在内的总表面传热系数，也称复合传热表面传热系数。在室外建筑物的围护结构、工业炉的炉墙和暖气片等的散热量计算，以及各种气体介质的自然对流或强制对流换热计算中，复合传热表面传热系数都是一个十分重要并经常用到的概念。表 1-3 列出了通常情况下传热系数的大致数值范围。

表 1-3 传热系数的大致数值范围

过程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$	过程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$
从气体到气体(常压)	10~30	从气体到高压水蒸气或水	10~100

续表

过程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$	过程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$
从油到水	100~600	从凝结有机物蒸气到水	500~1000
从水到水	1000~2500	从凝结水蒸气到水	2000~6000

式 (1-8) 称为传热方程式, 是换热器热工计算的基本公式。由于传热过程中包含两个对流传热的环节, 在本书中凡容易引起混淆的, 把方程式 (1-8) 中的 k 称为总传热系数, 以区别于其他两个组成环节的表面传热系数。由于实际换热器横纵壁温的测量有时是几乎不可能的, 而流体温度 t_{f1} 、 t_{f2} 容易测定, 因而用对数平均温差表示的传热方程式是换热器热工计算的基本公式。

1.2.5 传热热阻

由式 (1-7)、式 (1-8) 可得到传热系数 k 的表达式, 即

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明传热系数等于组成传热过程各串联环节的 $1/h_1$ 、 δ/λ 及 $1/h_2$ 之和的倒数。如果继续对式 (1-10) 取倒数, 即

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (1-11)$$

或者

$$\frac{1}{Ak} = \frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2} \quad (1-12)$$

将式 (1-8) 写成 $\Phi = \frac{\Delta t}{1/(Ak)}$ 的形式并与电学中的欧姆定律 $I = \frac{\Delta U}{R}$ 相对比, 可以看出 $1/(Ak)$ 具有类似于电阻的作用。把 $1/(Ak)$ 称为传热过程热阻 (overall thermal resistance)。同样, $1/(Ah_1)$ 、 $1/(A\lambda)$ 及 $1/(Ah_2)$ 就是构成各个串联环节的热阻。在电路中, 电势差 ΔU 是电流的驱动力, 同样在热路中, 温差 (也称温压) Δt 是热流的驱动力。

电学中电阻的串并联理论同样适用于热学之中。图 1-3 为传热过程热阻分析图。串联热阻叠加原则与电学串联电阻叠加原则相对应, 即在一个串联的热量传递过程中, 如果通过各个环节的热流量相同, 则各串联环节的总热阻等于各串联环节热阻之和。应用热阻的概念, 在确认构成传热过程的各环节后, 可以写出式 (1-11)、式 (1-12), 而不需要进行前面的推导。

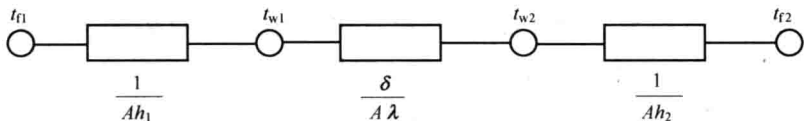


图 1-3 传热过程热阻分析图

式 (1-12) 虽然是由通过平壁的传热过程导出的 (其特点是各个环节的热量传递面积都相等), 但对于各个环节的热量传递面积不相等的情形, 如通过圆筒壁的传热过程, 式 (1-