



普通高等教育“十二五”规划教材

传热学

刘彦丰 高正阳 梁秀俊 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

传热学

编著 刘彦丰 高正阳 梁秀俊

主审 王秋旺 杜小泽



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TK124-43
25

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书分基础传热学、传热学分析和传热学专题三篇,共13章。基础传热学篇由第1~6章组成,主要介绍了导热、对流传热、辐射传热的基本概念与基本应用;如何利用能量守恒的思想分析复杂的传热问题;工业上重要的传热设备——换热器的热设计等。传热学分析篇由第7~12章组成,主要介绍了导热问题的数学描写、分析求解与数值求解导热问题的基本方法;对流传热问题的数学描写、部分典型对流传热问题的分析解、相变传热;辐射传热中角系数的计算、多表面间辐射传热的计算及气体辐射等。第13章为传热学专题篇,对部分有关传热的研究方法及应用专题做了简单介绍。

本书的编写是对传热学教材进行改革的一次较为大胆的尝试,在强调培养学生分析、解决实际传热问题能力的同时,充分考虑学生学习与理解新知识的特点,教学内容分层次编排,部分内容相对独立,便于取舍。本书可作为能源动力类、机械类、建筑与环境类专业“传热学”课程的教材,适用于40~72学时的教学安排,也可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学/刘彦丰,高正阳,梁秀俊编著. —北京:中国电力出版社,2015.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-7125-5

I. ①传… II. ①刘…②高…③梁… 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014549号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年2月第一版 2015年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.5印张 452千字

定价 45.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

传热学是研究由温差引起的热量传递规律的一门学科。由于传热学在科学技术领域的广泛应用,它已成为许多工科专业的一门重要技术基础课程。一门课程的学习,不仅应使学生掌握相关的知识,还应该能够使学生的综合能力得到锻炼和提高。这就需要教师能够真正理解学生的学习过程,以提高学生的学习效果为目标开展教学。本书的作者近年来围绕这一教学理念不断开展教学改革的实践和探索,并且为了适应教学改革的需要编写了《传热学》内部讲义,在中国电力出版社的鼓励和支持下,经过不断地修改和补充,现予出版。

本书的主要特点体现在以下几个方面:

(1) 教学内容分层次。本书将传统传热学内容整理成了两个层次,分别为基础传热学篇和传热学分析篇。将传热学中最基本的概念、理论和应用等提炼出来,形成传热学的基础知识,称之为基础传热学篇。这一部分内容没有过多的理论推导,学生学习相对容易,同时也是学生学习该课程必须掌握的内容。将以理论分析为主的内容、导热问题的数值解法和相变传热等整理成了传热学分析篇。学生在学习基础传热学之后,再进行该部分的学习,困难会降低,同时也可进一步加深对原有内容的理解。

(2) 注重对综合性传热问题的分析。我们日常生活及实际工程中的传热问题多是综合的,在这些问题中往往是多种传热模式共存。能够正确分析问题中存在哪些传热模式,并利用能量守恒定律分析它们之间的相互关系,是解决问题的关键。因此,本书第1章和第5章都是强调对学生该方面能力的培养。本书还在例题和习题的设计上,尝试采用典型问题贯穿的形式。如本书多处对高温金属件自然冷却问题进行分析,在第1章例题中对其涉及的传热模式和能量守恒关系进行分析,在第3章习题中计算其对流传热表面传热系数,在第5章习题中利用集总参数模型分析金属件温度的变化,在第8章和第9章习题中又进一步采用分析解法和数值解法求解该问题。类似的问题还有对多层玻璃窗、平板式太阳能集热器、等截面直肋片、换热器等的传热分析和计算。这种方法有利于提高学生的学习兴趣,加深学生对重要知识的掌握程度,培养学生分析和解决综合问题的能力。

(3) 采用了传热模式的概念。从机理上,热量的传递有导热、热对流、热辐射三种基本方式,但工程上更关注的则是纯导热、对流传热和辐射传热三种热量传递的现象。因此,本书将导热、对流传热、辐射传热定义为热量传递的三种基

本模式。对具体传热问题进行分析时,分析清楚传热模式即可,而不必分析其机理。

本书第 1、2、4、5、6、12 章和第 13 章的 13.1~13.3 节由刘彦丰编写,第 3、10、11 章和第 13 章的 13.5 节由高正阳编写,第 7、8、9 章和第 13 章的 13.4 节由梁秀俊编写,全书由刘彦丰统稿。

本书由王秋旺教授和杜小泽教授审稿。两位对本书的初稿进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此向他们表示衷心感谢。在前期的试用中,华北电力大学(保定)李斌、高建强、方立军、高鹏、刘璐和董静兰也都提出过有益的建议,编者在此一并致谢。

限于编者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2014 年 12 月

目 录

前言

第一篇 基础传热学

第1章 概述	3
1.1 传热学的研究内容及其应用	3
1.2 热量传递的机理和模式	6
1.3 能量守恒定律在分析传热现象中的应用	12
思考题	15
习题	16
第2章 导热	18
2.1 导热问题的分类和导热基本定律	18
2.2 导热系数与导热问题的研究方法	20
2.3 无内热源的一维稳态导热	22
2.4 非稳态导热的集总参数模型	29
思考题	33
习题	33
第3章 对流传热	35
3.1 影响对流传热的因素及分类	35
3.2 边界层概念及对流传热的研究方法	38
3.3 相似原理及其在传热学中的应用	42
3.4 管、槽内强制对流传热	51
3.5 外部流动强制对流传热	62
3.6 自然对流传热	70
思考题	78
习题	78
第4章 辐射传热	81
4.1 热辐射的基本概念	81
4.2 黑体辐射的基本定律	85

4.3 实际物体的辐射特性与基尔霍夫定律	90
4.4 角系数及两表面封闭系统的辐射传热	94
思考题	96
习题	97
第5章 综合传热及传热过程	99
5.1 综合传热问题的分析	99
5.2 传热过程的分析和计算	104
思考题	112
习题	112
第6章 换热器	115
6.1 换热器的形式	115
6.2 间壁式换热器的传热分析	119
6.3 换热器的平均传热温差	120
6.4 换热器的污垢热阻	125
6.5 换热器的热计算——平均温差法	127
6.6 换热器的热计算——效能与传热单元数法	131
思考题	135
习题	135

第二篇 传热学分析

第7章 稳态导热	139
7.1 导热问题的数学描写	139
7.2 具有内热源的一维稳态导热	146
7.3 等截面直肋的导热	148
7.4 多维稳态导热	153
思考题	156
习题	156
第8章 非稳态导热	159
8.1 对流边界下的一维非稳态导热	159
8.2 半无限大物体的非稳态导热	165
8.3 特定几何形状物体的多维非稳态导热	167
思考题	170
习题	171

第 9 章 导热问题的数值解法	173
9.1 有限差分法的基本原理	173
9.2 导热数值解法的实例分析	179
思考题	185
习题	185
第 10 章 单相流体对流传热理论解	188
10.1 对流传热的数学描写	188
10.2 边界层对流传热微分方程组	191
10.3 外掠平板层流的流动与换热分析解	192
10.4 湍流流动换热与比拟理论	196
10.5 管内层流充分发展段对流传热分析解	199
10.6 竖壁自然对流层流流动与换热分析解	202
思考题	204
习题	204
第 11 章 相变对流传热	206
11.1 凝结传热	206
11.2 沸腾传热	212
思考题	218
习题	218
第 12 章 辐射传热的计算	220
12.1 角系数的计算方法	220
12.2 两表面间的辐射传热	226
12.3 多表面间的辐射传热	229
12.4 辐射传热的强化与削弱	235
12.5 气体辐射	236
思考题	242
习题	243

第三篇 传热学专题

第 13 章 传热学专题	247
13.1 温度测量方法简介	247
13.2 隔热材料简介	249
13.3 传热问题数值计算商用软件简介	251

13.4 热管技术简介	253
13.5 传质学基础	255
附录	262
附录1 常用单位换算表	262
附录2 金属材料的密度、比热容和导热系数	263
附录3 保温材料、耐火材料、建筑材料及其他材料的密度和导热系数 ...	265
附录4 几种材料的导热系数与温度间的拟合关系	267
附录5 1标准大气压下干空气的热物理性质	268
附录6 1标准大气压下标准烟气的热物理性质	270
附录7 1标准大气压下过热水蒸气的热物理性质	271
附录8 饱和水的热物理性质	272
附录9 干饱和水蒸气的热物理性质	274
附录10 1标准大气压下一些气体的热物理性质	276
附录11 一些液体的热物理性质	278
附录12 液态金属的热物理性质	281
附录13 无限大平板非稳态导热线算图	282
附录14 长圆柱非稳态导热线算图	283
附录15 球体非稳态导热线算图	284
附录16 部分毕渥数下对应特征方程(8-17)的前6个根 μ_n	285
附录17 部分毕渥数下对应特征方程(8-21)的前6个根 μ_n	286
附录18 误差函数表	287
参考文献	288

第一篇
基础传热学

第1章 概述

本章将介绍如下几个问题：传热学的研究内容；传热学在一些典型工程技术领域的应用；热量传递的机理和基本模式；如何确定实际问题中的传热模式；如何利用能量守恒定律分析传热问题。掌握这些传热学的基础知识和基本分析方法至关重要。

1.1 传热学的研究内容及其应用

1.1.1 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。物质具有热能多少的宏观表现就是其温度的高低。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力学的分支。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，就提出了被后人称为牛顿冷却定律的数学表达式。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，还需要利用传热学知识去判断，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。

传热学中常用热流量和热流密度表示热量传递速率的大小。热流量表示单位时间内通过某一给定面积的热量，用符号 Φ 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 。

1.1.2 传热学的工程应用

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,以帮助读者对传热学的应用背景和研究对象有一个初步的认识。

(1) 火力发电厂。火力发电厂是利用煤、石油、天然气等燃料生产电能的工厂。图 1-1 所示为火力发电厂生产过程示意图,燃料在锅炉中燃烧加热水使之成为蒸汽,将燃料的化学能转变成热能;蒸汽推动汽轮机旋转,热能转换成机械能;然后汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。整个过程在实现能量转换的同时也存在着大量的热量传递过程。

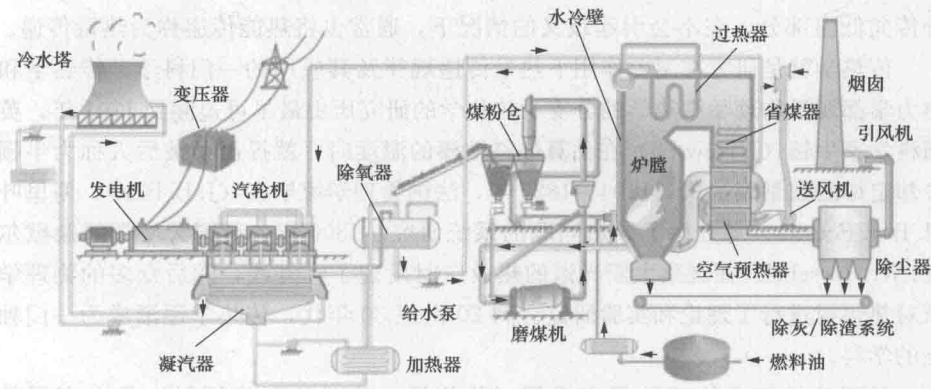


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

锅炉的水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器及凝汽器等都是两种流体进行热交换的设备,这些设备的热力性能设计及其运行都直接影响机组的技术经济指标。机组中一些厚壁设备,如汽包、汽轮机的汽缸壁等,在启动、停机或变工况运行中其内部的温度控制对机组的安全性有重要的影响。发电机转子、定子及铁芯冷却技术的提高也是大机组发展中的一项关键技术。

(2) 建筑环境工程。为人们提供舒适的居住场所,同时最大化地节约能源消耗,是现代建筑设计的重要指标之一。在我国,目前建筑能耗约占全社会总能耗的 1/3,其中最大的是采暖和制冷,与气候条件相近的发达国家相比,我国建筑

采暖能耗要高很多。因此,建筑物围护结构(墙体、门窗、屋顶等)的保温、隔热性能设计,将太阳能利用与建筑设计相结合,提高建筑物内暖通空调设备的能源利用效率都极为重要。

如图 1-2 所示,平板式太阳能集热器是收集太阳辐射能量进行热利用的一种装置,其中涉及多种形式的传热问题。近年来,随着技术的不断成熟,该装置也越来越多地用在节能建筑上得到使用。

随着人民生活水平的提高,空调得到越来越普遍的应用。图 1-3 所示为蒸汽压缩式空调制冷系统原理及蒸发器。系统中冷凝器和蒸发器传热性能的改进,对缩小空调体积、提高能效起着关键的作用,目前高效空调的制冷能效比(额定制冷量与额定功耗的比值)已达到 6.0。

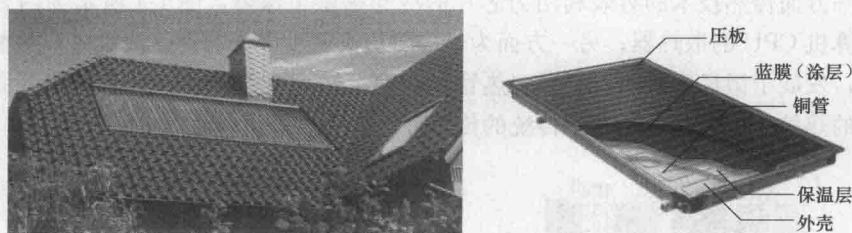


图 1-2 平板式太阳能集热器及其在建筑上的应用

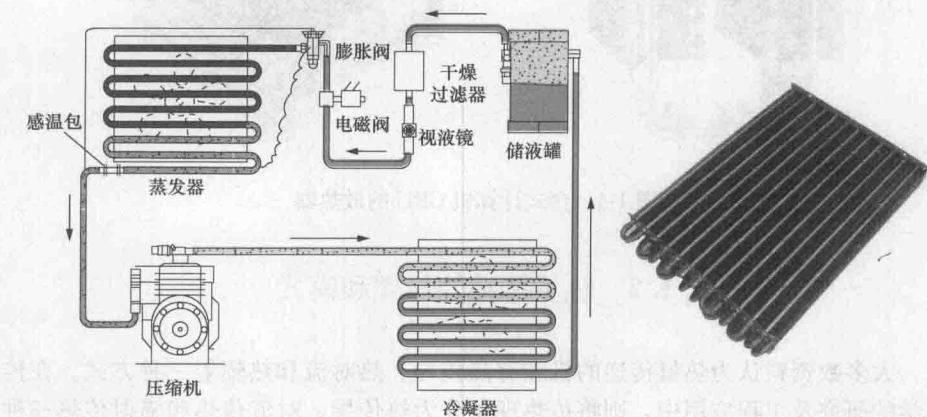


图 1-3 蒸汽压缩式空调制冷原理及蒸发器

(3) 航空航天。太空中飞行的航天器,向阳面和背阴面有很大的温差,如何阻挡太阳的高温热辐射和本身向低温(3K)太空的热辐射,确保座舱内宇航员的正常生活、工作,以及仪器设备的安全运行,在重返大气层时如何抵挡与大气摩擦产生的上千摄氏度高温,都是重要的工程传热问题。

(4) 金属热处理。在机械制造行业中,也存在着大量的传热问题,金属热处理

理是其中最为典型的情况。金属热处理是将金属工件放在一定的介质中加热到适宜的温度,并在该温度下保持一定时间后,在不同的介质(空气、水、油)中冷却,通过改变金属材料表面或内部的显微组织结构来控制其性能的一种工艺。对热处理过程中不同工作条件、不同材质及几何形状下工件的温度场进行预测和控制,均需用到传热学的知识。

(5) 电子芯片的冷却。随着微电子制造技术的不断进步,蚀刻尺寸(在一个硅晶圆上所能蚀刻的一个最小尺寸)已从早期的 $3\mu\text{m}$ 发展到现在的 $20\sim 60\text{nm}$ 。虽然器件尺寸的缩小使得芯片上每个器件的功耗有所降低,但是电路的集成度增加了几个数量级,整个电子芯片单位面积上产生的热量急剧上升。如果不能及时将该热量散出,电子芯片温度就会上升,当温度超过一定极限就会发生故障或失效。一方面传热技术的有效利用为芯片的冷却提供了保障,图 1-4 所示为两款台式计算机 CPU 的散热器;另一方面为了应对更高密度电子芯片(或设备)的散热问题,发展了微尺度换热器、微型热管、微型记忆合金百叶窗、纳米流体等微细尺度的热控技术,这也拓展了传统的传热理论。

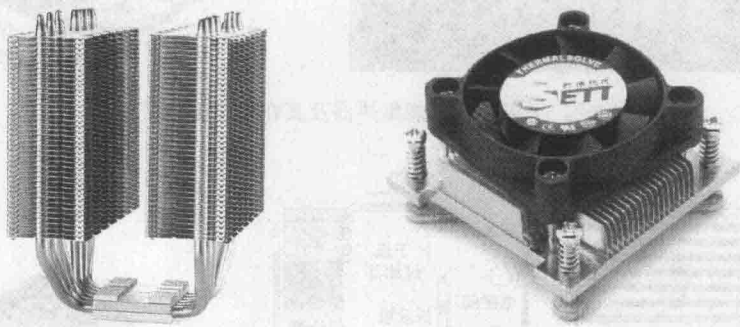


图 1-4 台式计算机 CPU 的散热器

1.2 热量传递的机理和模式

大多数资料认为热量传递的机理有热传导、热对流和热辐射三种方式。在传热学的研究及工程应用中,则将传热现象分为热传导、对流传热和辐射传热三种基本模式。

1.2.1 热传导

热传导也称为导热,是指依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的随机热运动(热扩散)而引起的热量传递现象。通常导热发生在相互接触且温度不同的物体之间,或一个物体内部温度不同的各部分之间。如图 1-5 所示,手握金属棒的一端,将另一端伸进灼热的火焰,就会有热量通过金属棒传到手掌,这种热量传递现象就是由导热而引起的。典型的热传导问题还有:通过建筑物墙体的热量传

递、热力管道由内向外的散热、金属热处理过程中其内部的热量传递等。

导热是物体的固有属性，固体、液体和气体中都可能发生导热。从微观的角度来看，气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是不同的。在气体中，导热是由分子的热运动和分子间的相互碰撞所引起的热量传递。图 1-6 所示为气体中热量传递的示意图，气体的温度越高，其分子的平均动能越大，不同能量水平的分子相互碰撞，使热量由高温处向低温处传递。在非导电固体

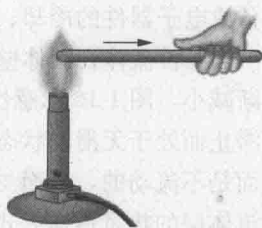


图 1-5 导热的示意图

体中，导热是通过晶格的振动，即分子、原子在其平衡位置附近的振动来实现的，图 1-7 所示为非导电固体通过晶格振动导热的示意图。在导电固体中有相当多的自由电子，如图 1-8 所示，它们在晶格之间像气体分子那样运动，自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。对于液体的导热

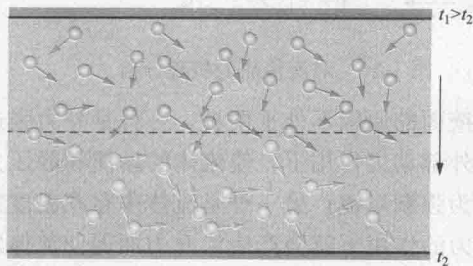


图 1-6 气体中热量传递的示意图

机理，至今还存在两种不同的观点。一种观点认为定性上类似于气体，只是分子间的距离更小、分子的相互作用更强；另一种则认为液体的导热机理类似于非导电固体，主要靠晶格的振动。微观机理的进一步论述已超出本书的范围，本书只讨论导热现象的宏观规律。

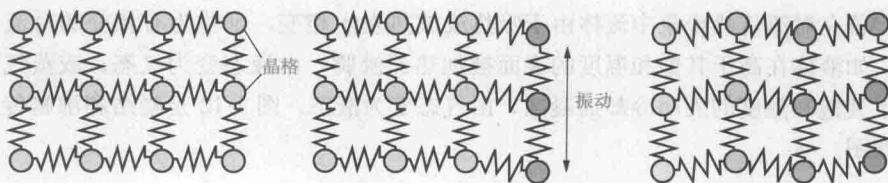


图 1-7 非导电固体中热量传递的示意图

1.2.2 热对流与对流传热

热对流是指流体发生宏观运动，由于流体迁移携带引起的热量传递。但是，当流体内存在温差时，也必将产生导热现象，因此，热对流往往和流体的导热同时发生。

传热学中一般不讨论单独的热对流问题，而是研究与之相关的对流传热（也称为对流

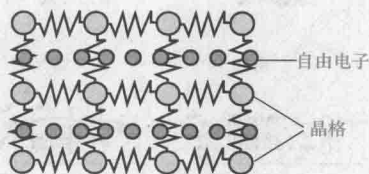


图 1-8 导电固体中
热量传递的示意图

换热），它是指流体与固体壁面之间有相对运动，且两者之间存在温度差时发生的热量传递现象。图 1-9 所示为对流传热的示意图，比较典型的对流传热问题有：

房间内空气与墙壁的换热、淬火过程中金属表面与周围流体的换热、冷风对电器设备或电子器件的冷却、工业换热器中冷、热流体与壁面的换热等。

当黏性流体在固体壁面上流动时,由于黏性的作用,在靠近壁面的地方流速逐渐减小,图 1-10 示意性地表示了这种近壁面处流速的变化,而在贴壁处流体将被滞止而处于无滑动状态。换句话说,贴壁处总会存在一个极薄的流体层相对于壁面是不流动的,壁面与流体间的热量传递必须穿过这个流体层,而穿过不流动的流体层的热量传递方式只能是导热。因此,从机理上来分析,对流传热包含了紧贴固体壁面处的纯导热和流体当中的热对流及导热。对流传热属于热量传递的一种模式。



图 1-9 对流传热示意

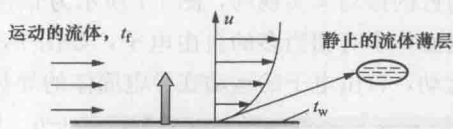


图 1-10 对流传热的机理分析

在对流传热现象中,驱使流体流过壁面的原因不外乎两种。一种是外力强迫流体流动,如在风机、泵或其他压差等外部动力作用下,使流体的动能和静压力提高,从而获得宏观速度,这种流动称为强制对流;另一种是流体中存在温度差异,导致流体中产生密度差异,在体积力的作用下就会产生浮升力而促使流体发生流动,这种流动称为自然对流。图 1-11 所示为强制对流和自然对流传热对比的示意图。

若在对流传热现象中流体由于吸热或放热发生相变,则称为有相变的对流传热。如液体在高于其饱和温度的表面被加热而沸腾,由液态变为气态;或蒸气被低于其饱和温度的表面冷却而凝结,由气态变为液态。图 1-12 是凝结和沸腾传热示意图。

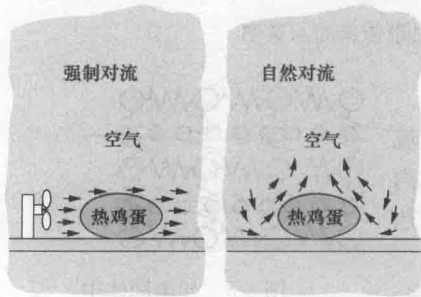


图 1-11 强制对流与自然对流的示意图

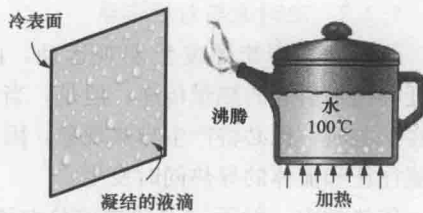


图 1-12 凝结与沸腾的示意图

无论是哪一类对流传热,其热流量目前仍使用牛顿冷却公式计算,即

$$\Phi = hA\Delta t \quad (1-1)$$