



“十二五” 江苏省高等学校重点教材

传热学

(第二版)

张靖周 常海萍 编著



科学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材

传 热 学

(第二版)

张靖周 常海萍 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“十二五”江苏省高等学校重点教材,是在第一版的基础上,根据教育部制定的“高等学校工科本科传热学课程教学基本要求”,并结合近年来教学改革成果修订而成。本书第一版是江苏省高等学校立项精品教材。

本书在内容上力争既体现航空航天科学技术特色,又兼顾专业面向,注重学生能力的培养,以适应传热学课程研究性教学理念转变和创新型人才培养的需要。全书内容共9章。第1~8章主要介绍传热学的基本理论,包括绪论、导热基本定律及稳态导热、非稳态导热、对流换热的理论分析、单相流体对流换热的准则关联式、有相变的对流换热、热辐射的理论基础和辐射换热的计算等内容;第9章遴选了导热问题的数值计算、换热器热计算、对流换热强化技术、传质学简介和红外抑制器简介五个专题。全书采用国际单位制,各章都附有思考题和练习题。

本书可作为高等学校航空航天类、能源动力类等专业的教材或参考书,也可供其他专业选用和有关科技人员参考。

图书在版编目 CIP 数据

传热学 / 张靖周,常海萍编著. —2版. —北京:科学出版社,2015.2

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2014-1-017)

ISBN 978-7-03-043342-8

I. ①传… II. ①张…②常… 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 026433 号

责任编辑:余 江 张丽花/ 责任校对:桂伟利

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年2月第 二 版 印张:19 3/4

2015年2月第二次印刷 字数:468 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

传热学是一门研究热量传递规律的科学,传热学课程几乎是具有工科类专业高等学校必开的专业基础课程之一。由于传热学课程教学面向的学科专业背景具有不同的特点,因此传热学教材的编著也具有不同的特色,本书是“十二五”江苏省高等学校重点教材,是在第一版的基础上,根据教育部制定的“高等学校工科本科传热学课程教学基本要求”,并结合近年来教学改革成果修订而成。

本书第一版是江苏省高等学校立项精品教材,在传热学(第一版)编著过程中,注重从以下几个方面把握教材的特点:

(1) 教材内容既体现航空航天科学技术特色,又兼顾专业面向。全书内容分为基础部分及拓展部分。在基础部分中,着重介绍传热学的基本理论,即导热、对流换热和辐射换热理论;在拓展部分,遴选了有针对性的若干专题,可供教师根据不同的专业背景进行选择。为了体现航空航天科学技术特色,本书在绪论中扼要介绍了传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用背景,在第9章对流换热强化技术中则对扰流柱、射流冲击和气膜冷却等航空宇航动力装置广泛采用的强化传热措施的原理和基本特征进行了简要叙述。

(2) 不拘泥传热学教材经典的编排体系,注重教学内容的取舍,尽可能使教学内容突出厚基础、宽口径、重能力的教学需求。与现有的传热学教材对比,本书将“传热过程分析”安排在导热章节中,“气体辐射特性”安排在热辐射的理论基础章节中,“导热问题的数值解法”和“换热器热计算”则安排在传热专题中。同时,在基础部分增加了“等截面肋片一维修正导热方程及近似解”、“对流换热的量纲分析法”、“高速气流对流换热”和“气膜冷却的相似准则推导”等内容;在拓展部分充实了对流换热强化内容,特别是结合作者的科研成果,包括冲击射流冷却、气膜冷却和扰流柱强化传热等。

(3) 注重吸取国内外教材的精华,启迪学生研究性学习能力。本书精选了大量的思考题,在例题和习题上也仔细筛选,力图深化学生对基本概念和物理过程本质的认识,培养学生的创新思维能力。

本版教材在修订中,作了以下几个方面的改进:

(1) 在原教材编著体系和改革创新的基础上,进一步结合专业航空航天科学技术的发展和特点,挖掘传热学基础问题应用的素材。例如,我国大飞机工程和民用航空发动机技术中,飞行器机翼前缘、发动机进气道的结冰和防冰技术涉及相变对流换热和强化传热基础问题;低污染、低耗油的间冷回热发动机中的关键部件(间冷器、回热器)涉及换热器设计的基础理论。上述内容在本版教材中得到体现。

(2) 结合传热学理论和强化传热技术的发展,适当补充或完善了相关的教学内容。例如,在非稳态导热中,增加了“非傅里叶效应概述”一节;在“单相流体对流换热的准则关联式”中,补充了“二维狭缝气膜冷却的经验关联式”内容,同时增加了“射流冲击的对流换热准则”和“肋壁通道的对流换热准则”等内容;在“辐射换热的计算”中,增加了“被非透明介质隔开的两表面间辐射换热”内容。

(3) 在本版教材中,融入了传热学理论中的关键专业英文词汇。为学生更好地理解传热

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传热的三种基本方式	2
1.2 综合的传热方式	6
1.3 控制体的能量守恒	8
1.4 传热学的研究方法	8
1.5 传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用	9
思考题	17
练习题	17
参考文献	18
第 2 章 导热基本定律及稳态导热	20
2.1 导热基本定律	20
2.2 导热微分方程及单值性条件	25
2.3 一维稳态导热	28
2.4 临界绝热直径	38
2.5 通过肋壁的导热	40
2.6 等截面肋片的肋化判据	47
2.7 接触热阻	49
2.8 二维稳态导热	50
2.9 等截面直肋一维修正导热方程及近似解	52
思考题	55
练习题	56
参考文献	59
第 3 章 非稳态导热	60
3.1 非稳态导热的基本概念	60
3.2 集总参数法	62
3.3 表面对流换热热阻忽略的一维非稳态导热	67
3.4 正规状况阶段	68
3.5 一维非稳态导热的实用计算方法	69
3.6 非傅里叶效应概述	76
思考题	77
练习题	78
参考文献	79
第 4 章 对流换热的理论分析	81
4.1 对流换热概述	81

4.2	对流换热过程的数学描写	84
4.3	对流换热的边界层微分方程组	87
4.4	外掠平板的边界层积分方程组及其求解	91
4.5	湍流的影响	96
4.6	边界层类比	97
4.7	管内层流充分发展对流换热理论解	98
	思考题	104
	练习题	105
	参考文献	106
第5章	单相流体对流换热的准则关联式	107
5.1	相似理论概述	107
5.2	管内强迫对流换热	120
5.3	外掠强迫对流换热	125
5.4	自然对流换热	135
5.5	混合对流换热	141
5.6	气膜冷却的相似准则	142
5.7	射流冲击的对流换热准则	147
5.8	肋壁通道的对流换热准则	150
	思考题	152
	练习题	153
	参考文献	155
第6章	有相变的对流换热	156
6.1	凝结换热	156
6.2	沸腾换热	164
6.3	热管的概念	173
	思考题	175
	练习题	176
	参考文献	177
第7章	热辐射的理论基础	178
7.1	热辐射的基本概念	178
7.2	黑体辐射基本定律	183
7.3	实际固体和液体的辐射特性	188
7.4	气体辐射特性	194
	思考题	203
	练习题	204
	参考文献	205
第8章	辐射换热的计算	206
8.1	被透明介质隔开的两表面间辐射换热	206
8.2	被透明介质隔开的封闭系统表面间辐射换热	216
8.3	遮热板	222

8.4	气体与包壳间的辐射换热	226
8.5	被非透明介质隔开的两表面间辐射换热	227
8.6	辐射换热与对流换热的耦合	229
	思考题	231
	练习题	232
	参考文献	234
第9章	几个专题	235
9.1	导热问题的数值计算	235
9.2	换热器热计算	248
9.3	对流换热强化技术	258
9.4	传质学简介	274
9.5	红外抑制器简介	283
	思考题	287
	练习题	287
	参考文献	289
附录		291
附录1	常用单位换算表	291
附录2	金属材料的密度、比热容和导热系数	292
附录3	保温、非金属材料的密度和导热系数	293
附录4	大气压力下几种气体的热物理性质	295
附录5	空气在不同压力和温度下的热物理性质	298
附录6	干饱和水蒸气的热物理性质	299
附录7	大气压力下标准烟气的热物理性质	300
附录8	大气压力下过热水蒸气的热物理性质	301
附录9	饱和水的热物理性质	301
附录10	几种饱和液体的热物理性质	302
附录11	液态金属的热物理性质	304
附录12	材料发射率	306

第 1 章 绪 论

传热学是研究由温度差引起的热量传递规律的一门科学(Heat transfer is the science that deals with the determination of the energy transfer rate as a result of a temperature difference)。

能量以不同的形式存在于自然界中。基于热力学的定义,热(heat)是一种传递中的能量。传递中的能量不外乎是处于无序状态的热和有序状态的功,它们的传递过程常常发生在能量系统处于不平衡的状态下,而系统的状态是可以其状态参数来确定的。对于一个不可压缩的热力学系统而言,温度的高低就反映了系统能量状态的高低和单位质量系统内热能(或称热力学能,简称内能)的多少。热力学第二定律告诉我们,能量总是自发地从高能级状态向低能级状态传递和迁移。因此,热的传递和迁移就会发生在热力学系统的高内能区域和低内能区域之间,也就是高温区域和低温区域之间。对于自然界的物体和系统,将其视为热力学系统时,它们往往是处于能量不平衡的状态之下,各部位存在着压力差和温度差,因而功和热的传递是一种非常普遍的自然现象。

传热学的应用十分广泛。几乎所有的工程领域都会遇到一些在特定条件下的传热(heat transfer)问题,甚至有伴随相变(phase change)和传质(mass transfer)过程的复杂传热问题。例如,在评价锅炉、制冷机、换热器和反应器等各类动力装置的设备大小、能力和技术经济指标时,就必须进行详细的传热分析;一些工作在高温环境中的部件,如燃气轮机的透平叶片和燃烧室能否在设计工况下正常、长期地运行,将取决于保护金属材料的冷却措施是否可靠合适,同时还必须重视热应力和由此引起的形变等问题;许多新兴技术装备,如原子反应堆的堆芯、大功率火箭的喷管、集成的电子器件和要求重返地面的航天飞行器等,成功的设计都必须严密控制传热情况,维持合理的预期工作温度;在机械制造工艺方面,不仅热加工过程牵涉温度分布及其随时间变化速率的控制问题,精密机床的切削速度也会引起刀具和工件的发热,影响加工精度和刀具寿命;在电子技术领域,随着大规模集成电路的集成密度不断提高,电子器件每平方厘米的功率已由 20 世纪 70 年代的 10W 左右提高到 21 世纪初的百瓦量级以上,电子器件的冷却问题已成为影响其寿命和可靠性以及向更高程度集成的关键技术之一;在航空动力领域,提高涡轮前燃气温度是增加航空发动机推重比、减少燃油消耗的重要措施,随之带来的发动机热端部件强化冷却以及发动机排气系统红外辐射抑制等关键技术需要不断突破;当飞行器穿过含过冷水滴的云层或者在有冻雾的气象条件下飞行时,机翼和发动机进气道前部容易形成结冰,必须采取有效的防冰/除冰技术来保障飞行的安全性。所有这些列举的传热问题,归纳起来有两种类型:一类是着眼于传热速率及其控制问题,或者增强传热、缩小设备尺寸或提高生产能力,或者削弱传热、避免散热损失或保持设备正常运行的温度控制;另一类则着眼于温度分布及其控制问题。要解决这些问题,都需要以传热学理论为支撑。

近些年来,能源技术、环境技术、材料技术、信息技术和空间技术等现代科学技术的进步给传热学学科提出了许多新的研究课题:涉及太阳能、地热能等新能源开发利用中的产热、蓄热和放热等问题;涉及空间技术中的微重力场下的传热问题;涉及材料技术中的微尺度传热问题。这些现代科学技术的发展同时也推动了传热学学科的不断发展,促进传热学的理论体系

日趋完善,内容不断充实,研究手段也更加完备。可以说传热学是现代技术科学中充满活力的主要基础学科之一。

传热学也是一门涉及能量利用的科学。与热力学的差异和相关性体现在,热力学讨论的是系统的平衡过程,即系统内热能与其他形式能量之间的转换规律,关注的是当系统经历从一个平衡状态到达另一个平衡状态的过程时热量传递的“量(amount)”;传热学则主要分析系统内或系统间发生的热量传递“速率(rate)”,即热能传递的不平衡过程。在以热能作为研究对象时,系统内或系统间的传热过程总是受热力学的基本定律所支配:热力学第一定律要求在传热过程中能量必须守恒,也就是说,一系统失去的热量必等于另一系统(或环境)得到的热量;热力学第二定律要求热量自发地从高温部分传给低温部分,显示了热量传递的方向性。在传热学文献中经常使用“能量平衡”或“热平衡”(energy or heat balance)这一术语作为热力学第一定律的简单称谓。

利用工程热力学的方法可以从理论上分析热力系统的状态、能量传递和迁移的多少以及系统的发展方向与性能的优劣。但是,能量以何种方式传递和迁移?传递和迁移的速率以及能量状态随时间和空间的分布如何?热力学都没有给予回答。处理和解决诸如此类的问题就是传热学的根本任务所在。例如,对于一个物体的加热过程,我们可以将其视为一个热力学过程,因此,热力学可以根据能量守恒的原则(conservation of energy principle),研究这一系统最终达到的平衡温度,以及初态与终态之间的系统内能变化;而传热学则是基于热传递现象的机理,研究该物体在达到平衡以前的任何时刻、任意位置的温度变化,以及加热过程中热量随时间的变化关系。

以热形式传递的能量难以直接测量,但它总是与可测量的物理量“温度(temperature)”有关系。因此,在传热研究中,知悉系统内的温度分布,具有十分重要的意义。一旦知道了温度分布,就可以根据有关定律求出热量的传递速率。

表征热量传递速率的物理参数:

(1) 热流量(heat transfer rate) Φ 。单位时间内通过某一给定面积传递的热量,单位为瓦(W)。

(2) 热流密度(heat flux) q 。单位时间内通过单位面积传递的热量,单位为瓦/米²(W/m²)。

热量传递按其不同机理可归纳为三种基本方式:热传导、热对流和热辐射。在大多数实际传热过程中,系统内的温度分布,常常是两种或三种传热基本方式综合作用的结果。要想从这种综合作用中,单独考察某一种传热方式作用的效果,往往是十分困难的。但是,为了分析上的方便,常常在某些场合,忽略次要的传热方式,只考虑某一种主要的传热方式。本章首先简单介绍传热的三种基本方式,然后讨论综合的传热过程。

1.1 传热的三种基本方式

热量传递按其不同机理可归纳为三种基本方式:热传导、热对流和热辐射。

1.1.1 热传导(Thermal conduction)

热传导也称导热。导热是指物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子以及自由电子等微观粒子的热运动而引起的热量传递现象。具体而言:气体中,导热是由于气体分子热运动时相互碰撞的结果;在非导电固体中,导热是通过晶格结构中原子、分子在其平衡位置附

近的振动所形成的弹性波作用的结果；在导电固体中，导热是大量自由电子在晶格间运动的结果；至于液体中的导热机理，有一种观点认为定性上类似于气体，也有观点认为类似于非导电固体。对于液体和气体来说，由于流体内部温度差异往往造成流体的自由浮升运动，故导热常常伴随有对流现象。一般说来，固体和静止流体中热量传递依靠导热，但在严格意义上，纯粹的导热只能在不透热射线、热膨胀系数极小的密实固体内进行。

导热的基本定律建立在实验获得的导热系数与温度变化率的本构关系基础之上，由法国物理学家傅里叶(Fourier)于1822年通过对实践经验的提炼、运用数学方法演绎得出，也称傅里叶定律(Fourier's law of heat conduction)。考察图1-1所示的两个表面均维持均匀温度的平板一维稳态导热，傅里叶定律的一维表达式可以表述为

$$\Phi = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

式中， Φ 为导热热流量(W)，单位时间内通过某一给定面积的热量； A 为与热流方向垂直的面积(m^2)； dT/dx 表示该截面上沿热流方向的温度增量，简称为温度梯度(temperature gradient)(K/m)； λ 是比例系数，称为导热系数或热导率(thermal conductivity)[(W/(m·K))，它是物体的热物性参数。其值的大小反映了物体导热能力的强弱；公式右边的“ $-$ ”号表征热流方向与温度梯度方向相反。

若将式(1-1)改写为

$$\Phi = \lambda A \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\left(\frac{\delta}{\lambda A}\right)}$$

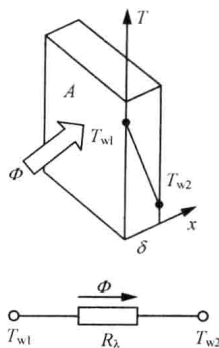


图1-1 通过平壁的导热

并与电学中的欧姆定律相比较，不难看出， $\delta/(\lambda A)$ 具有类似于电阻的作用。因此 $\delta/(\lambda A)$ 称为导热热阻(thermal resistance for conductive heat transfer)，记作 R_λ 。

物体的导热可以依据内部温度随时间和空间坐标的变化情况，分为稳态、非稳态和一维、多维等导热类型。更具普遍意义的傅里叶定律矢量表达式将在第2章叙述。

例题 1-1 为了测量某材料的导热系数，用该材料制成一块厚5mm的平板试件，平板的长和宽远大于厚度，在平板的一侧采用电热膜加热，并保证所有的加热热量均通过该侧传至平板的另一侧。在稳定状态下，测得平板两侧表面的温度差为40℃，单位面积的热流量为9500 W/m²，试确定该材料的导热系数。

解 根据式(1-1)，有

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{T_{w2} - T_{w1}}{x_2 - x_1} = \lambda \frac{T_{w1} - T_{w2}}{x_2 - x_1}$$

$$9500 = \frac{40\lambda}{5 \times 10^{-3}}$$

$$\lambda = 1.187 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

讨论：利用平板测试材料的导热系数，要保证所有的加热热量均通过该侧传至平板的另一侧，需要在平板的边缘和加热膜的另一侧采取绝热措施。

1.1.2 热对流(Thermal convection)

热对流是指由于流体的宏观运动，流体各部分之间发生相对位移、冷热流体相互掺混所引

起的热量传递过程,热对流仅发生在流体中。由于流体微团的宏观运动不是孤立的,与周围流体微团也存在相互碰撞和相互作用,因此对流过程必然伴随有导热现象。流体既充当载热体,又充当导热体。

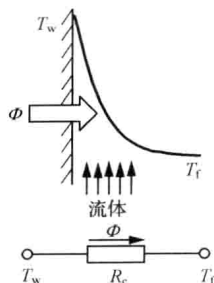


图 1-2 对流换热

对流换热(convective heat transfer)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所发生的热量传递现象。对流换热概念在本质上有别于热对流,在实际工程应用中,普遍关心的是流体与固体壁面之间的热量传递,因此本书重点讨论对流换热问题。

当流体流过某一固体表面时,流体在壁面法线方向上的温度分布按一定的规律变化着(见图 1-2),除了流体各部分之间产生冷热流体相互掺混所引起热量传递过程之外,相邻流体接触也发生导热行为。因此对流换热是对流与导热共同作用的热量传递过程。

1701 年,英国科学家牛顿(Newton)提出,当高温物体受到温度为 T_f 的流体冷却时,物体表面温度随时间的变化符合式(1-2)所示的规律

$$\frac{dT_w}{d\tau} \propto (T_w - T_f) \quad (1-2)$$

很显然,物体表面的温度变化与壁面和流体之间的换热量密切相关。后人在式(1-2)的基础上发展了对流换热的基本计算式,称之为牛顿冷却定律(Newton's law of cooling):

流体被加热时

$$\Phi = hA(T_w - T_f) \quad (1-3a)$$

流体被冷却时

$$\Phi = hA(T_f - T_w) \quad (1-3b)$$

式中, Φ 为对流换热热流量(W); T_w 和 T_f 分别表示壁面温度和流体温度($^{\circ}\text{C}$)或(K); A 为固体壁面对流换热表面积(m^2); h 为表面传热系数,也称对流换热系数(convective heat transfer coefficient) [$\text{W}(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].

式(1-3a)和式(1-3b)的差异体现在热量传递的方向性上。前者定义为热量由壁面向流体传递,后者则定义为热量由流体向壁面传递。

必须注意, h 不是物性参数,其值反映了对流换热能力的大小,与换热过程中的许多因素有关。

若将式(1-3a)改写为

$$\Phi = \frac{T_w - T_f}{\frac{1}{hA}}$$

不难看出, $1/(hA)$ 具有类似于电阻的作用。因此 $1/(hA)$ 称为对流换热热阻(thermal resistance for convective heat transfer),记作 R_c 。

牛顿冷却定律虽形式简单,但把影响对流换热的众多复杂的因素都集中在对流换热系数 h 上了。因此牛顿冷却定律并没有揭示种种复杂因素对于对流换热过程的影响,它仅仅给出了对流换热系数的定义。运用理论和实验方法确定对流换热系数的数值,是对流换热研究的

主要内容。

例题 1-2 一根外径为 0.3m,壁厚为 3mm,长为 10m 的圆管,入口温度为 80℃的水以 0.1m/s 的平均速度在管内流动,管道外部横向流过温度为 20℃的空气,实验测得管道外壁面的平均温度为 75℃,水的出口温度为 78℃。已知水的定压比热为 4187J/(kg·K),密度为 980kg/m³,试确定空气与管道之间的对流换热系数。

解 根据热量传递过程中能量守恒的定理,管内水的散热量必然等于管道外壁与空气之间的对流换热热量。

(1) 管内水的散热量为

$$\Phi = \rho u A_c c_p (T_{in} - T_{out})$$

式中 A_c 为管道流通截面积。

$$A_c = \frac{\pi}{4} d_i^2 = \frac{\pi}{4} (d_o - 2\delta)^2 = \frac{\pi}{4} (0.3 - 2 \times 0.003)^2 = 0.0679(\text{m}^2)$$

$$\Phi = 980 \times 0.1 \times 0.0679 \times 4187 \times (80 - 78) = 55722.27(\text{W})$$

(2) 管道外壁与空气之间的对流换热量为

$$\Phi = hA(T_w - T_f) = \pi d_o l (T_w - T_f) h = \pi \times 0.3 \times 10 \times (75 - 20) h = 518.1h(\text{W})$$

(3) 管内水的散热量等于管道外壁与空气之间的对流换热热量

$$518.1h = 55722.27$$

$$h = 107.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

1.1.3 热辐射(Thermal radiation)

物体通过电磁波或光子(electromagnetic waves or photons)来传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能,其中因受热而向外发射辐射能的现象称为热辐射。

在热量传递方式上,热辐射与热传导和热对流相比具有诸多固有的特点。热传导和热对流均需要有媒介物质才能实现,而热辐射则无需物体直接接触,可以在无中间介质的真空中传递,并且真空度越高,热辐射传递效果越好。热辐射的另一个特点是在传递过程中伴随着能量形式的转换,即发射时将热能转换为辐射能,而被吸收时又将辐射能转换为热能。

热辐射的第三个特点是任何热力学温度大于零的物体都能不停地向空间发出热辐射。辐射与吸收过程的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递,即辐射换热(radiation heat transfer)。尽管当物体与周围环境处于热平衡时,辐射换热量等于零,但这只是动态平衡,辐射与吸收过程仍在不停地进行,只不过物体辐射出去的能量和物体从环境中吸收的能量相等而已。

物体表面发出的热辐射能量,取决于热力学温度和表面性质。在探索热辐射规律的研究过程中,黑体的概念具有重要意义。所谓黑体(black body),是指能将投射到其表面上的所有热辐射能全部吸收的物体。黑体的吸收能力和辐射能力在同温度的物体中是最大的。

黑体表面在单位时间内所发出的热辐射能量,可按照奥地利科学家斯特藩(Stefan)于 1879 年通过实验发现,而后于 1884 年由玻耳兹曼(Boltzmann)从理论上证明的斯特藩-玻耳兹曼定律(Stefan-Boltzmann law)来计算:

$$\Phi = \sigma A T^4 \quad (1-4)$$

式中, Φ 为辐射热流量(W); T 为热力学温度(K); A 为辐射表面积(m²); σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数,也称为黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算可以采用

斯特藩-玻耳兹曼定律的经验修正形式:

$$\Phi = \epsilon \sigma A T^4 \quad (1-5)$$

式中, ϵ 称为该物体的发射率(emissivity), 也称黑度。其值总小于 1, 与物体的种类及表面状态有关。

应当指出, 式(1-4)和式(1-5)都是物体自身向外辐射的热流量, 是不随环境条件变化的。但是, 要计算它与周围有温差的物体之间发生的辐射换热量, 还必须考虑投射到该物体上的辐射热量的吸收过程。这种净热量交换是辐射换热研究的主要内容。

通常, 两个表面之间的辐射换热量可以表示为

$$\Phi = F \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-6)$$

式中, 修正因子 F 是一个小于 1 的数值, 它主要考虑辐射表面相对几何关系、表面辐射特性等因素。

在许多工程问题中, 例如燃烧室中高温燃气与壁面的热量传递, 辐射换热往往与对流换热过程联系在一起, 这种对流换热和辐射换热同时存在的换热过程属于复合换热(combined heat transfer)。对于复合换热, 工程上为计算分析方便, 采用把辐射换热量折合成对流换热量的处理方法, 即

$$\Phi = A h_r (T_1 - T_2) = F \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-7)$$

式中, h_r 称为辐射换热系数(radiation heat transfer coefficient)。显然辐射换热系数与温度有很强的函数关系。

$$h_r = \frac{F \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$

这样就可以对照对流换热热阻的概念来确定辐射换热热阻。

例题 1-3 一块发射率为 0.8 的钢板, 面积为 1m^2 , 表面温度为 30°C , 试确定单位时间内钢板所发出的辐射能。

解 根据式(1-5), 得

$$\Phi = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 1 \times (273 + 30)^4 = 382.33(\text{W})$$

讨论 本例题计算的是钢板对外辐射出去的能量, 并不是辐射换热量。试想如果钢板所处的环境温度也是 30°C , 那么钢板与环境之间的辐射换热量是多少呢?

1.2 综合的传热方式

在 1.1 节中分别讨论了热传导、热对流和热辐射三种热量传递的基本方式。在实际问题中, 这些基本方式往往不是单独出现的, 可能有两种或三种传热基本方式同时存在。

对于一个复杂的实际热量传递过程, 应该明确这一过程是由哪些换热环节组成, 以及在每一环节中有哪些热量传递方式起作用或主要作用, 这是分析实际热量传递问题并采取针对性强化或减少传热措施的基本功。

在传热学中, 传热过程(overall heat transfer process)这一术语有着明确的含义, 它与一般性论述中把热量传递过程统称为传热过程不同, 是针对热量由固体壁面一侧的热流体通过固体壁传到另一侧冷流体中去的特定过程。

下面来考察在燃烧室中的一个典型的传热过程,燃烧室壁内侧存在高温燃气的流动,燃烧产物中包含能发射和吸收辐射的气体;燃烧室壁外侧用相对较冷的空气加以冷却。这一过程可以模化为冷、热流体通过一块大平壁交换热量的传热过程[见图 1-3(a)]。

一般来说,这个传热过程包括串联着的三个环节:

(1) 从高温燃气到燃烧室内壁的热量传递,这一环节通常耦合作用对流换热和辐射换热两种传热方式。

(2) 从燃烧室内壁(高温侧)到外壁(低温侧)的热量传递,即通过固体壁的导热。

(3) 从燃烧室外壁到冷却流体的热量传递,主要通过对流换热进行热量传递。

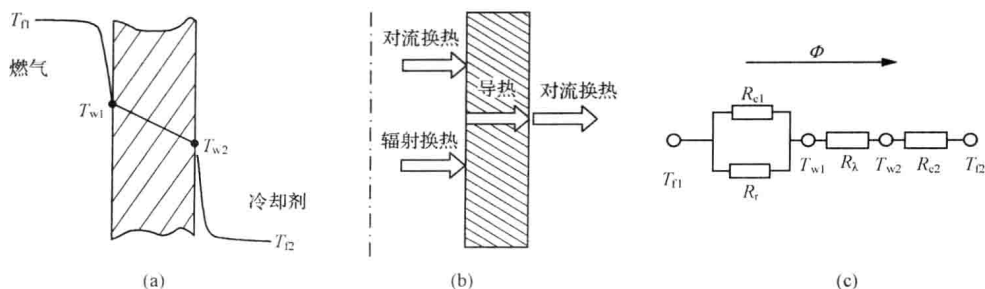


图 1-3 传热过程剖析

对于稳态过程,通过串联着的每个环节的热流量 Φ 应该是相同的。这一热量传递过程是由于燃烧室内高温燃气与燃烧室外冷却流体的温度差引起的,工程中通常可以用下面的传热方程式加以计算:

$$\Phi = AK(T_f - T_c) \quad (1-8)$$

式中, T_f 和 T_c 分别表示高温燃气和冷却流体的温度; K 称为传热系数(overall heat transfer coefficient) [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], 是表征传热过程强烈程度的标尺。

最后应当指出,若将式(1-8)改写成如下的形式:

$$\Phi = \frac{T_f - T_c}{\frac{1}{AK}} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (1-9)$$

并与电学中的欧姆定律相比较,不难看出, $1/(AK)$ 具有类似于电阻的作用。因此 $1/(AK)$ 称为传热过程热阻(thermal resistance for overall heat transfer), 它是由各换热环节的热阻(导热热阻、对流换热热阻、辐射换热热阻)构成的。图 1-3(c)是对应于传热过程[见图 1-3(b)]的热阻网络图,热阻叠加原则与电学中电阻叠加原则相对应。热阻分析的方法在工程上很有用,本书在以后还要进一步介绍。

例题 1-4 在换热器设计中,管道金属壁的最高温度不得超过 800K。已知热流体温度为 1300K,热流体与壁面的对流换热系数为 $h_1 = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;冷流体温度为 300K,对流换热系数为 $h_2 = 400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,试确定满足设计要求的金属壁单位面积导热热阻。

解 参考图 1-3 中的热阻图,金属壁的最高温度出现在热流体接触的管道壁面处。由于传热过程是稳定的,且不计辐射换热热阻,则传热过程的热流为

$$\Phi = \frac{T_f - T_c}{R_{ci} + R_k + R_{co}} = \frac{T_f - T_{w1}}{R_{ci}}$$

取面积 $A=1\text{m}^2$, 所以

$$\frac{1300-300}{1/200+R_{\lambda}+1/400}=\frac{1300-800}{1/200}$$

由此求得金属壁单位面积导热热阻为

$$R_{\lambda}=0.0026(\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W})$$

按照题意, 设计中管道的金属壁单位面积导热热阻应小于 $0.0026\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。

1.3 控制体的能量守恒

在流体力学的学习过程中, 我们已经接触到了运用控制体的概念来建立质量和动量守恒关系式的基本方法, 传热问题的数学模型建立也依赖于控制体的概念。控制体是一个质量、动量和能量都能通过其表面的空间区域, 该控制体可以是微元控制体, 也可以是有限控制体。对于这样的控制体, 能量守恒定律可以叙述为

进入控制体的所有形式的能量	+	控制体内本身所产生的能量	=	流出控制体的所有形式的能量	+	控制体内储存能量的变化
---------------	---	--------------	---	---------------	---	-------------

用简化的形式表达为

$$Q_{\text{in}}+Q_{\text{generate}}=Q_{\text{out}}+Q_{\text{change}} \quad (1-10)$$

式(1-10)除了控制体内本身所产生的能量项之外, 其他各项的物理意义都不难理解。 Q_{generate} 是控制体内自身释放或吸收的能量, 譬如控制体内有一个通电的电阻器或物质进行化学反应。控制体内本身所产生的能量项称为内热源(internal heat generation)。

式(1-10)中 Q 的单位为焦耳。针对单位时间内控制体的能量平衡, 则

$$\Phi_{\text{in}}+\Phi_{\text{generate}}=\Phi_{\text{out}}+\Phi_{\text{change}} \quad (1-11)$$

在分析传热过程时, 所选控制体的大小或形状取决于实际问题, 如微元控制体、有限控制体、单方向微小而其他方向有限的控制体。式(1-11)应用于不同的控制体得到的是不同类型的方程式(偏微分方程式、积分方程式、常微分方程式或代数方程式)。运用控制体的概念来进行数学建模在以后的学习中应进一步领会。

例题 1-5 一台输出功率为 750W 用于水中工作的电阻加热器, 总的暴露面积为 0.1m^2 , 在水中的表面对流换热系数为 $h=200\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 水温为 37°C 。试确定: (1) 在设计工况下加热器的表面温度; (2) 如果放置在 37°C 的空气中, 表面对流换热系数变为 $h=80\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 此时的稳态表面温度如何变化?

解 取整个加热器作为控制体, 由于处于稳定状态, 故控制体内储存能量的变化为零。根据式(1-11), 有

$$0+750=hA(T_{\text{w}}-T_{\text{f}})$$

$$(1) T_{\text{w}}=74.5^\circ\text{C};$$

$$(2) T_{\text{w}}=130.75^\circ\text{C}。$$

讨论 本例题得到的是一个代数方程式。运用控制体的概念来进行数学建模在以后的学习中可以进一步领会。

1.4 传热学的研究方法

1.4.1 实验研究方法

所谓实验研究方法是在实验里重复产生所研究的现象。在实验中设法控制影响该现象的

种种因素,往往撇开某些次要因素,而着重研究对该现象有影响的几个主要因素。

实验研究是发现客观规律最基本、最重要的方法。通过实验可提出合理的假设,进而建立理论分析模型,同时又通过实验来检验理论的正确性。

实际热工设备往往庞大复杂。若用真实物体进行实验,则需花费大量的人力、物力和时间,况且有些设备也无法进行实物实验。最有效的实验研究方法是以相似理论为指导的模型实验,它不仅可节省人力、物力和时间,而且还可扩大实验结果应用范围,达到事半功倍之效果。传热学实验研究不仅需要读者掌握基本的传热学理论知识,而且需要具备必要的实验研究能力。

1.4.2 理论研究方法

所谓理论研究方法就是在科学分析的基础上提出一些合理假设,并由此建立该现象的物理模型,结合自然界中的普遍定律并运用数学方法,从而转换为数学模型。最后在给定的单值性条件下求解。

在传热学的发展过程中,理论分析解法对解决很多工程问题发挥了极其重要的作用,在目前仍不失为解决传热问题的一个有效手段。分析解法(又称精确解法)是以数学分析为基础,通过求解微分方程获得用函数形式表示的温度分布,进而确定热量传递规律。但是,分析解局限于求解比较简单的传热问题,对于几何形状复杂、变物性或复杂边界条件等问题,分析解往往很繁琐甚至难以获得。因此,针对实际的物理模型进行合理的假设,使描述传热现象的控制方程得以简化,从而得到近似分析解,在传热学研究中也曾发挥了重要作用。

1.4.3 数值研究方法

随着人们对传热过程物理本质的深入了解,特别是计算机的迅速发展,用数值计算的方法对传热问题进行分析研究取得了重大进展,在 20 世纪 70 年代已经形成一个新兴分支——数值传热学。近年来,数值传热学得到了蓬勃发展,一些成熟的流动和传热计算软件,如目前广泛应用的 Fluent-CFD 软件,在解决传热实际问题中显示出它的巨大活力。

1.5 传热研究在航空宇航科学技术中的典型应用

1.5.1 燃气涡轮发动机热端部件强化冷却

燃气涡轮发动机的经典理论是建立在热力学和气动力学这些基础科学原理的基础之上。随着燃气涡轮发动机循环参数的提高和采用先进的冷却系统,传热研究对促进航空宇航推进理论与工程学科的进步与发展发挥了日益巨大的作用。

提高循环的最高温度是改善各种热动力机械性能最基本的技术途径。以燃气涡轮发动机为例,其理想循环为布莱顿循环,即由两个绝热过程和两个等压过程构成(见图 1-4)。

0→2 为绝热压缩过程,其中 0→1 为气流在进气道中的扩压,1→2 为气流在压气机中的增压过程;

2→3 为气流在燃烧室中的等压加热过程;

3→5 为绝热膨胀过程,其中 3→4 为气流在涡轮中的膨胀过程,4→5 为气流在尾喷管中的膨胀过程。

根据工程热力学理论,单位质量气体的理想循环功为

$$\omega_0 = c_p [(T_3^* - T_2^*) - (T_5^* - T_0^*)] \quad (1-12)$$

其理想循环热效率为

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\pi_c^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1-13)$$

式中, $\pi_c^* = p_2^* / p_0^*$, 为发动机的总增压比, k 为绝热比, 上标表示气流的总参数。

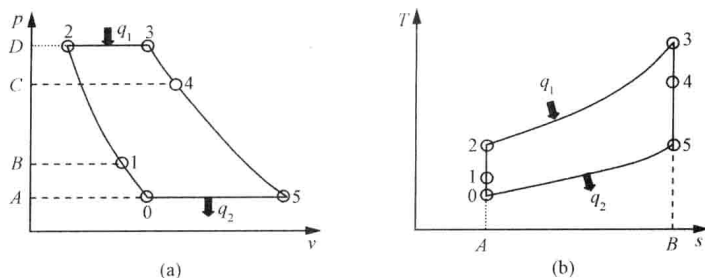


图 1-4 燃气涡轮发动机的理想循环

可见, 提高单位质量气体理想循环功的有效措施就是提高涡轮前温度 T_3^* 。理想循环热效率随增压比 π_c^* 的提高而增加。

从表面上看, 单位质量气体理想循环功似乎与总增压比 π_c^* 无关, 但要注意, 气流在压气机中进行的是绝热压缩, 提高增压比的同时, 压气机出口温度 T_2^* 也必然提高。

$$\frac{T_2^*}{T_0^*} = \left(\frac{p_2^*}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-14)$$

可见, 增压比的提高引起压气机出口温度的提高, 必然带来气流在燃烧室中的等压加热过程 (2→3) 加热量的下降, 从而引起循环功的下降。因此在提高循环热效率的同时, 要保持做功能力不下降, 必须相应提高涡轮前温度 T_3^* 。

以航空燃气涡轮动力装置为例, 涡轮前温度逐年在提高, 20 世纪 60 年代以后大约以每年 20K 的速度在增长, 现代的燃气涡轮中燃气温度已高达 1900K 左右, 下一代的燃气涡轮还会要求更高的温度, 美国高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划中提出在 2020 年实现涡轮前温度达到 2273~2473K (见图 1-5)。

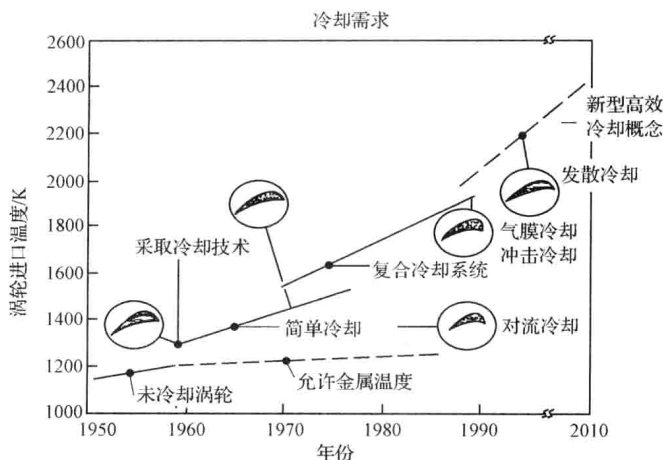


图 1-5 燃气涡轮发动机涡轮前温度变化趋势