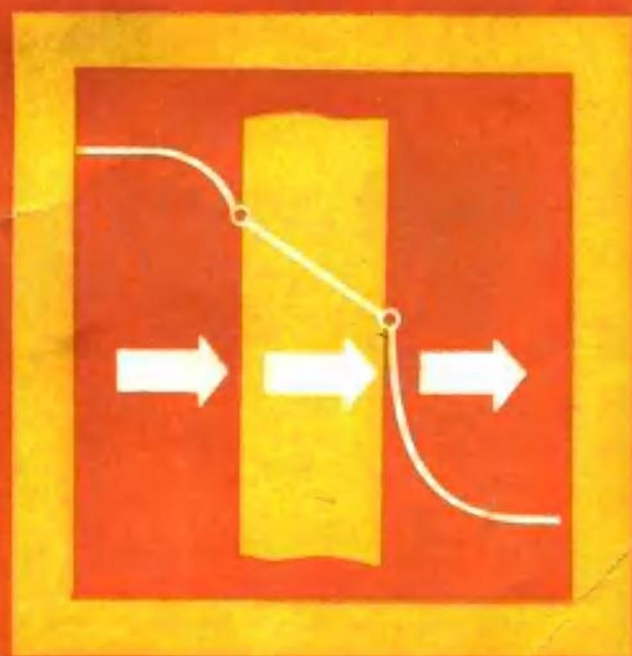


高等学校试用教材

传热学

戴锅生 编



高等教育出版社

30543302

TK124
34

高等学校试用教材

传 热 学

戴锅生 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是参照高等工业学校《传热学课程教学基本要求》(55~70学时)编写的。

本书在讲授传热学理论知识的同时,注意理论联系实际,十分重视工程应用和学生解决实际传热问题能力的培养,在内容的取材,例题、复习思考题和习题的配备上尽量结合日常生活和工程实际,并对热阻的应用和工程传热计算中常用的试算法给予了较多的注意。为更好地配合理论教学,书中有丰富的例题、复习思考题和习题。习题有难有易,便于选择,并附有答案供参考。本书每章末有小结,概述相应章节的主要内容并提出学习要求,以便学生复习时掌握教学基本要求和抓住重点。

本书经热工课程教学指导委员会传热学课程小组召开的审稿会审订,可作为55学时左右的热工类各专业和机械类动力机械、内燃机等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

传 热 学

戴炳生 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

民族印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张12 字数310 000

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数0001—1,650

ISBN7-04-002707-0/TH·265

定价 4.35 元

前 言

本书是参照高等工业学校《传热学课程教学基本要求》(55~70学时)编写的。随着教学改革的深入开展,要求在传授知识的同时提高学生分析问题、解决问题的能力 and 自学能力。本书在这方面进行了探索,以适应教学改革的需要。

本书十分注重工程应用和学生解决实际传热问题能力的培养,在内容的取材,例题、思考题及习题的配备上尽量结合日常生活和工程实际,并对热阻的应用和工程传热计算中常用的试算法给予了较多的注意。此外,为加强学生应用计算机求解传热问题能力的培养,本书对计算机在传热学中的应用也给予了足够的重视,除在第四章介绍导热问题的数值解外,还在附录C中给出了求解导热问题的简单计算机程序,供参考。

书中有例题71道。部分例题为分析、讨论性例题,用以加深学生对教材中相应内容的理解和开扩视野;计算性例题除有一定代表性和实用性外,特别注意解题思路和解题技巧;部分例题后有“说明”,给出解题注意事项和由例题得出的规律性结论,或将有关内容深化。

全书每章末均有小结、思考题和习题。小结概述相应章节的主要内容并给出学习要求,以便学生复习时抓住重点。思考题比较丰富(共92题),可帮助学生复习有关教学内容,检查教学效果。习题较多(共147题),有难有易,耗时较多的习题在题号上角以“▲”表示,以便选择;习题答案、部分习题提示在附录D中给出,供参考。

本书适用面较宽,可作为55学时左右的热工类各专业和机械类动力机械专业的教材(与俞佐平编《传热学》同类)。由于各专业的要求不尽相同,任课教师可根据本专业的要求选择所需内容。书中打“*”的内容已超出“课程教学基本要求”的范围,

省略此部分内容不会影响教材内容的连贯性。

本书由华中理工大学钱壬章教授主审，北京航空航天大学王丰教授复审，并经热工课程教学指导委员会传热学课程小组于1989年10月在合肥召开的审稿会审订，参加审稿会的有清华大学、天津大学、西安交通大学、华中理工大学、上海交通大学、同济大学、哈尔滨工业大学、湖南大学等兄弟院校的代表。审稿者对书稿提出了许多有益的意见和建议。此外，在编写过程中还得到安徽工学院、武汉工学院、江苏工学院、长沙铁道学院、湖南大学、西安公路学院和我校教师与同学的支持和帮助，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1989.11于南京

主要符号表

一、物 理 量

A 横截面积, m^2	m 质流量, kg/s
a 热扩散率 (导温系数), m^2/s	$\dot{m}$ 质流密度, $kg/(m^2 \cdot s)$
B, b 宽度, m	N 功率, W
c 辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$; 热容, $J/^\circ C$	p 压力(压强), Pa
c 比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$	Q 热流量, W
D, d 直径, m	q 热流密度, W/m^2
E 辐射力, W/m^2	R 热阻, $^\circ C/W$; 半径, m
F 表面积, m^2 ; 力, N	r 单位面积热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$; 半径, m ; 汽化潜热, J/kg
f 摩擦系数; 纵截面积, 可见面积, m^2	s 距离, m
G 投射辐射, W/m^2	S 导热形状因子, m ; 平均射线行程, m
g 重力加速度, m/s^2	T 绝对温度, K
H, h 高度, m	t 摄氏温度, $^\circ C$
I 定向辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$	U 周长或湿周, m
J 有效辐射, W/m^2	u, v, w 速度, m/s
k 传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 辐射减弱系数, m^{-1}	V 容积, m^3
L 长度, m	x, y, z 直角坐标
l 定型尺寸或厚度之半, m	α 对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 吸收率
M 质量, kg	β 体膨胀系数, K^{-1} ; 肋化系数
	δ 厚度, m ; 相对误差, $\%$

Δ 差值	ν 运动粘度, m^2/s
ε 黑度 (发射率); 修正系数, 效能	ρ 密度, kg/m^3 ; 反射率
η 效率	σ 表面张力, N/m ; 辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Θ 无量纲过余温度	τ 时间, s 或 h ; 穿透率; 切应力, N/m^2
θ 过余温度或端差, $^{\circ}\text{C}$; 润湿角, rad 或 $(^{\circ})$	φ 角度, rad 或 $(^{\circ})$
λ 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; 波长, μm	ψ 温差修正系数; 角度, rad 或 $(^{\circ})$
μ 动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	ω 立体角, sr

二、相似准则

$$Bi = \frac{al}{\lambda} \text{ —— 毕渥 (Biot) 准则}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \text{ —— 欧拉 (Euler) 准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{ —— 傅里叶 (Fourier) 准则}$$

$$Gr = \frac{g\beta l^3 \Delta t}{\nu^2} \text{ —— 格拉晓夫 (Grashof) 准则}$$

$$Nu = \frac{al}{\lambda} \text{ —— 努谢尔特 (Nusselt) 准则}$$

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{ul}{a} \text{ —— 贝克来 (Peclet) 准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \text{ —— 普朗特 (Prandtl) 准则}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta \rho^2 l^3 c_p \Delta t}{\mu \lambda} \text{ —— 瑞利 (Rayleigh) 准则}$$

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{ —— 雷诺 (Reynolds) 准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{\alpha}{\rho u c_p} \text{ —— 斯坦顿 (Stanton) 准则}$$

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
§ 1-1 传热学的研究对象和任务	1
§ 1-2 热量传递的三种基本方式	3
§ 1-3 传热过程和传热系数	9
§ 1-4 热阻	12
第二章 导热基本定律和稳态导热	19
§ 2-1 导热基本定律	19
§ 2-2 导热微分方程和单值性条件	25
§ 2-3 一维稳态导热	32
§ 2-4 延伸体的稳态导热	48
* § 2-5 二维和三维稳态导热	53
§ 2-6 接触热阻简介	54
第三章 非稳态导热	64
§ 3-1 概述	64
§ 3-2 第三类边界条件下的非稳态导热和诺谟图	66
§ 3-3 集总参数法	79
第四章 导热问题数值解基础	90
§ 4-1 离散化和差商	90
§ 4-2 稳态导热问题的数值计算	93
§ 4-3 非稳态导热问题的数值计算	101
第五章 对流换热原理	112
§ 5-1 对流换热概述	112
§ 5-2 流动边界层和热边界层	115
§ 5-3 边界层对流换热微分方程组	119
§ 5-4 相似原理简介	125
§ 5-5 相似准则实验关联式的确定和选用	132
第六章 单相流体对流换热准则关联式	143

§ 6-1	管内强迫对流换热	143
§ 6-2	外掠物体时的强迫对流换热	156
§ 6-3	自然对流换热	171
第七章	凝结和沸腾换热	186
§ 7-1	凝结换热	186
§ 7-2	沸腾换热	193
第八章	辐射换热	202
§ 8-1	热辐射的基本概念	202
§ 8-2	黑体辐射的基本定律	206
§ 8-3	实际物体和灰体的辐射	214
§ 8-4	黑体间的辐射换热和角系数	223
§ 8-5	封闭系统中灰体表面间的辐射换热	236
§ 8-6	气体辐射及其与包壁的辐射换热	249
§ 8-7	总换热系数	262
第九章	传热过程和换热器	275
§ 9-1	传热过程的分析和计算	275
§ 9-2	换热器的分类和平均传热温差	289
§ 9-3	换热器的热计算	301
§ 9-4	传热的增强和削弱	309
* § 9-5	几个传热问题的分析	313
附录A	数据表	331
A-1	常用单位换算表	331
A-2	金属材料的密度、比热容和导热系数	332
A-3	耐火材料、保温材料和其它材料的密度、最高使用温度和 导热系数	334
A-4	干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	336
A-5	大气压力 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	337
A-6	大气压力 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下过热水蒸气的热物理 性质	337
A-7	饱和水的热物理性质	338
A-8	干饱和水蒸气的热物理性质	340

A-9	几种液体的热物理性质	342
A-10	双曲函数值	344
A-11	导热形状因子	345
A-12	常用材料的表面黑度	346
附录B	一些计算式的推导	348
B-1	第三类边界条件下无限大平壁的分析解	348
B-2	无限长长方柱体二维非稳态导热乘积解的证明	352
B-3	相似变换	355
B-4	竖壁层流膜状凝结换热系数的分析解	357
附录C	计算机程序和打印结果	360
C-1	二维稳态导热 (例题4-1)	360
C-2	一维非稳态导热 (例题4-2)	363
附录D	习题答案和提示	365

第一章 绪 论

§ 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，是研究热量传递规律的一门学科。

热力学第二定律指出，热量只能自发地由高温物体传到低温物体。因此，哪里有温度差，哪里就有热量传递。自然界和工程中普遍存在温度差，所以传热是一种非常普遍的现象，无论在能源、动力机械、化工、制冷、冶金、建筑、机械制造及电子技术部门，还是在农业、生物、医学、气象等部门，都存在传热问题，都需要应用传热学的知识。有些部门，热力设备的投资占其全部投资的30~50%，甚至高达70%左右。近几十年来，传热学得到迅速发展，并正在向更多的技术领域渗透，在现代技术科学中的地位不断提高。传热学对于热工类各专业和机械类动力机械专业尤其重要，是这些专业的一门主干技术基础课程。

内燃机气缸中的燃气温度可高达1700℃。与燃气接触的气缸壁、活塞顶和气缸盖在这样的条件下工作，必须用空气或水等冷却。因此，研究、设计大功率和高效率的内燃机，在很大程度上决定于气缸和活塞冷却问题的解决。此外，内燃机部件因热疲劳而破坏，与这些部件中的温度分布密切相关；内燃机润滑油的冷却和冷却水的冷却问题，压缩机出口空气的冷却，内燃机排气的余热利用等都涉及传热问题。

燃气轮机动力装置中叶片和轮盘的有效冷却，可以提高燃气轮机的进气温度，从而增加了装置的热效率。而回热器和空气冷却器的应用可进一步提高装置的热效率。

蒸汽轮机是将水蒸气热能转换成机械能的动力设备，水蒸气

冷凝器的设计和运行情况直接影响蒸汽轮机的热效率。此外，蒸汽轮机的保温、启动和停机，抽气冷却器运行情况等也都与传热有密切关系。

蒸汽锅炉是将燃料化学能转变成水蒸气热能的动力设备，其中水冷壁、省煤器、过热器、空气预热器等是完成传热过程的换热器。锅炉和热力管道的保温也是与传热有关的问题。

制冷和空调工程中，压缩后气体工质的冷却和管道设备的保冷与传热有关。

工程中的传热问题可分为两种类型。一类是计算传递的热流量，并且有时要力求增强传热，有时则力求削弱传热。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，必须增强传热；为了使热力设备减少散热损失，必须外加保温层以削弱传热。另一类是确定物体内部各点的温度，以便进行温度控制和其它计算（如热应力计算），例如确定内燃机活塞、燃气轮机叶片和锅炉汽包壁内的温度分布即属于这一类。要解决这些传热问题，必须具备热量传递规律的基础知识和分析工程传热问题的基本能力，掌握计算工程传热问题的基本方法，并具有相应的计算能力及一定的实验技能。这就是学习本课程的目的和要求。

热量传递过程分为稳态过程与非稳态过程两大类。凡物体中各点温度不随时间而改变的热量传递过程称为稳态热传递过程，反之则称为非稳态热传递过程。各种设备在持续稳定运行时的热传递过程属于稳态过程，而在启动、停机和工况改变时的热传递过程则属于非稳态过程。大多数设备都在稳定运行的条件下工作，而有些设备虽在非稳态条件下运行，但也能近似地作为稳态热传递过程处理（如内燃机气缸壁，详见§9-5）。本书主要讨论稳态热传递过程，只在第三、四章讨论非稳态导热。一般情况下，在不加说明时都指稳态热传递过程。

§ 1-2 热量传递的三种基本方式

图 1-1 表示水冷式内燃机气缸壁的冷却过程（右图为局部放大图，并用箭头标明热量传递过程）。为了简化分析，下面将这一过程视为稳态热量传递过程。

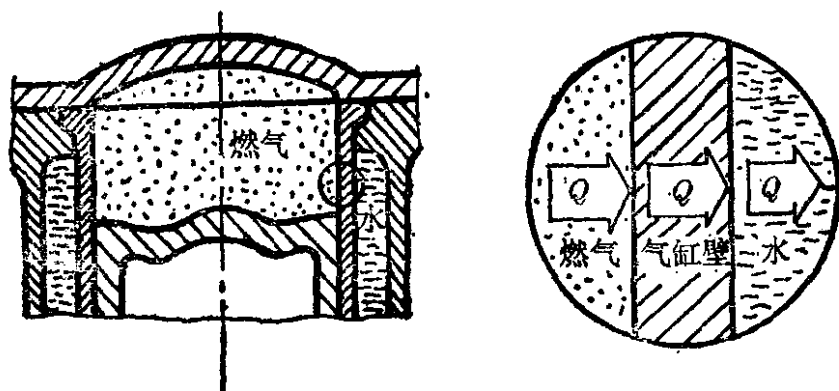


图1-1 内燃机气缸壁的热量传递过程

在热量传递过程中，热量先由高温燃气传给气缸壁内侧表面，再由气缸壁的内侧表面传给气缸壁外侧表面，最后由气缸壁外侧表面传给水，而达到冷却目的。还可以列举许多例子，但仔细分析各种热量传递过程可以看出，热量传递有三种基本方式：热传导、热对流和热辐射。实际的热量传递过程往往是由两种或三种基本方式组成的。

一、热传导

物体内有温度差或两个不同温度的物体接触时，在物体各部分之间不发生相对位移的情况下，依靠物质微粒（分子、原子或自由电子）的热运动传递热量的现象称为热传导，简称导热。例如在内燃机中，气缸壁的内表面温度高于外表面温度，依靠导热，热量将不断从壁的内表面传到外表面。

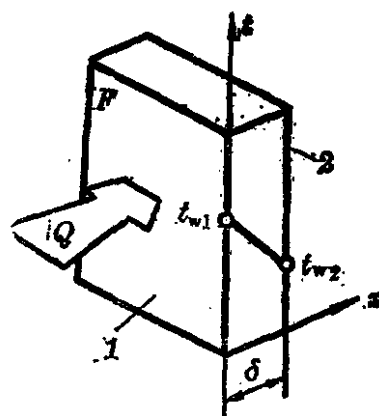


图1-2 通过平壁的导热

设有图 1-2 所示的一块平壁，壁厚为 δ ，表面面积为 F ，两侧表面分别维持均匀温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。实践表明，单位时间内从表面 1 传导到表面 2 的热量（热流量） Q ，与面积 F 、温度差（ $t_{w1} - t_{w2}$ ）成正比，与厚度 δ 成反比。写成等式为

$$Q = \lambda F \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad \text{W}$$

或
$$Q = \lambda F \frac{\Delta t}{\delta} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中， λ 是比例系数，称为导热系数或热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

导热系数反映材料导热能力的大小。各种材料的导热系数相差很大，例如铝的导热系数比瓷的导热系数大 100 倍左右。所以同样形状、大小和厚度的铝碗和瓷碗，盛同样温度的热水时，手捧着铝碗比捧着瓷碗烫手。碗的导热可近似视为稳态导热，在上述情况下，水通过铝碗传给手的热流量比水通过瓷碗传给手的热流量大得多。常温下，纯铜的导热系数为 $398 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，普通钢材为 $30 \sim 50 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，水为 $0.599 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，空气为 $0.0259 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，耐火材料为 $1 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 左右，而保温材料的导热系数小于 $0.14 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ①。

二、热对流

流体中，温度不同的各部分之间发生相对位移时所引起的热量传递过程叫做热对流。例如：人体附近的空气温度较高，密度较小，浮升力使它上升并把热量带走；电风扇使人体附近的空气流动，空气也带走了热量。流体各部分之间由于密度差而引起的相对运动称为自然对流；而由于机械（泵或风机等）的作用或其它压差而引起的相对运动称为强迫对流。

实际上，热对流同时伴随着导热，构成了复杂的热量传递过程。工程上经常遇到的流体流过固体壁时的热量传递过程，就是热对流和导热联合作用的热量传递过程，称为对流换热（又称对流放热）。

① 《设备及管道保温技术通则》GB 4272—84 规定：在平均温度不高于 350°C 时，导热系数不大于 $0.14 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的材料称为保温材料。

当温度为 t_{∞} 的流体流过温度为 t_w ($t_w \neq t_{\infty}$)、面积为 F 的固体壁面时 (见图 1-3), 对流换热的热流量 Q_c 常写成与面积 F 、流体和壁面的温差 Δt 成正比的形式, 即

$$Q_c = \alpha_c F \Delta t \quad \text{W} \quad (1-2)$$

这就是牛顿冷却公式。流体被加热时, $t_w > t_{\infty}$, 对流换热温差 $\Delta t = t_w - t_{\infty}$; 流体被冷却时, $t_w < t_{\infty}$, $\Delta t = t_{\infty} - t_w$ 。式中 α_c 是比例系数, 称为对流换热系数 (或对流放热系数), 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

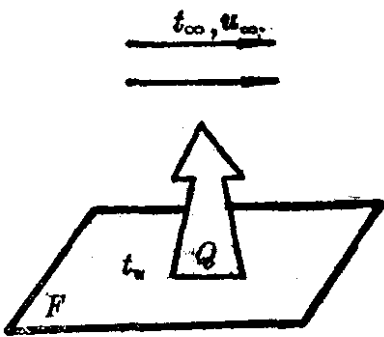


图1-3 流体与固体壁面的
对流换热

对流换热系数表示对流换热能力的大小。例如, 开电风扇比不开电风扇凉快。这是因为, 此时对流换热面积和温度差虽然没有改变, 但开电风扇吹风时的对流换热系数比不开电风扇时大很多, 对流换热量也大很多, 所以身体感到凉快。不同情况下的对流换热系数 α_c 相差很大。对流换热系数的大致范围列于表1-1。

表1-1 对流换热系数的大致范围⁽¹⁾

对流换热种类	$\alpha_c, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
空气自然对流	3 ~ 10
气体强迫对流	20 ~ 100
水自然对流	200 ~ 1000
水强迫对流	1000 ~ 15000
水沸腾	2500 ~ 25000
高压水蒸气强迫对流	500 ~ 3500
水蒸气凝结	5000 ~ 15000
有机蒸气凝结	500 ~ 2000

三、热辐射

物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。物体会因各种原因发射辐射能。由于热的原因, 物体的内能转化成电磁波的能量

而进行的辐射过程称为热辐射。在太阳与地球之间是几乎没有任何物质的真空，太阳既不能通过热传导的方式也不能通过热对流的方式将热量传给地球，而是通过热辐射来传递热量的。

任何物体，只要温度高于 0K，就会不停地向周围空间发出热辐射。热传导和热对流在物体直接接触时才能进行，而热辐射的电磁波可以在真空中传播。热辐射在能量传递的过程中伴随有能量形式的转换，这是热辐射区别于热传导和热对流的另一个特点。

同一物体，温度不同时的辐射能力不一样；温度相同的不同物体的辐射能力也不一样。同一温度下黑体的辐射能力最强。黑体表面辐射的热流量为

$$Q_r = \sigma_b F T^4 \quad \text{W} \quad (1-3)$$

式中： T ——黑体的表面温度，K；

F ——黑体的表面面积， m^2 ；

σ_b ——黑体辐射常数， $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一般物体表面的辐射热流量可表示为

$$Q_r = \varepsilon \sigma_b F T^4 \quad \text{W} \quad (1-4)$$

式中， ε 是物体表面的黑度（也称发射率）。物体表面的黑度为该物体的辐射能力与同温度下黑体辐射能力的比值。一般物体的辐射能力都比同温度下黑体的辐射能力小，所以 $\varepsilon < 1$ 。一般说来，光亮金属表面的黑度较小，非金属表面的黑度较大。各种物体表面的黑度值见附录 A-12。

物体不断向周围空间发出热辐射能，并被周围物体吸收。同时，物体亦不断吸收周围物体投射到它上面的热辐射能。这样，物体辐射和吸收过程的综合结果产生了物体间的热量传递，称为辐射换热。图1-4所示为二无限大

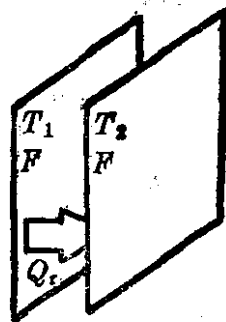


图1-4 二无限大平行平壁间的辐射换热

平行黑体平壁，表面温度分别为 T_1 和 T_2 ，侧表面面积为 F ，则它们之间的辐射换热热流量 Q_r 为

$$Q_r = \sigma_b F (T_1^4 - T_2^4) = C_b F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad \text{W} \quad (1-5)$$

式中， C_b 是黑体辐射系数， $C_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一般物体间辐射换热热流量的计算将在第八章讨论。

辐射物体表面常与温度为 t_∞ 的空气接触，并与空气对流换热。为了同时考虑辐射换热和对流换热，常将辐射换热量的计算式写成对流换热计算式的形式，即把辐射换热热流量 Q_r 写为

$$Q_r = \alpha_r F (T_1 - T_2) = \alpha_r F (t_1 - t_2) \quad (1-6 a)$$

式中： T_1 和 t_1 ——辐射物体的表面温度，单位分别为 K 和 $^{\circ}\text{C}$ ；

T_2 和 t_2 ——周围物体的表面温度，单位分别为 K 和 $^{\circ}\text{C}$ ；

F ——辐射换热面积， m^2 ；

Q_r ——辐射换热热流量（按第八章有关计算式计算），W；

α_r ——辐射换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

当周围物体温度 t_2 与空气温度 t_∞ 相等或相近时，式 (1-6 a) 可以写成

$$Q_r = \alpha_r F (t_1 - t_\infty) \quad (1-6 b)$$

例题1-1 用直径为 0.18 m 、厚 δ_1 的水壶烧开水，热流量为 1000 W ，与水接触的壶底温度为 107.6°C 。因长期使用，壶底结了一层厚 $\delta_2 = 3 \text{ mm}$ 的水垢，水垢的导热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，如图1-5所示。此时，与水接触的水垢表面温度仍为 107.6°C ，壶底热流量亦不变，求水垢与壶底接触面的温度增加了多少？

解 由平壁导热计算式 (1-1) 得水垢与壶底接触面的温度为

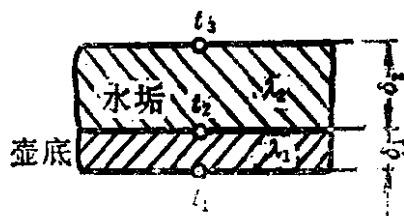


图1-5 例题1-1附图