



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

传热学 (第五版)

章熙民 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟頔 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

传 热 学

(第五版)

章熙民 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟頔 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

传热学/章熙民等编著.—5版.—北京:中国建筑工业出版社,2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材.

ISBN 978-7-112-09183-6

I.传… II.章… III.传热学—高等学校—教材
IV.TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第052756号

本版教材是在总结前几版教材使用情况的基础上修订而成。全书共11章,包括:导热理论基础、稳态导热、非稳态导热、导热数值解法基础、对流换热分析、单相流体对流换热、凝结与沸腾换热、热辐射的基本定律、辐射换热计算、传热和换热器、质交换,每章后均附有小结、思考题与习题。

本书可供高校建筑环境与设备工程等专业使用,也可供相关专业技术人员参考。

* * *

责任编辑:齐庆梅 姚荣华

责任设计:董建平

责任校对:孟楠 安东

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

传 热 学

(第五版)

章熙民 任泽霈 梅飞鸣 编著

陈钟硕 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京密云红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:22 字数:533千字

2007年7月第五版 2007年7月第二十二次印刷

印数:150501—153500册 定价:30.00元

ISBN 978-7-112-09183-6

(15847)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

本书 1980 年发行第一版，历经 27 年，如今已是第五版。紧随教育事业的发展步伐，力求不断满足建筑环境与设备专业对“传热学”教学的基本要求，一直是编著者的基本目的。

经过近一个世纪，传热学在理论、计算和应用等方面都获得了巨大的发展，她已经成为一门重要的技术基础学科，由于很多新兴学科和技术的发展都离不开传热学，促进了这些学科和技术的相互渗透和结合，新成果不断涌现，传热学学科呈现出生机勃勃的景象。但对于一个初学传热学的读者来说，通过学习努力掌握传热学的基本概念、基本理论和基本计算方法，仍然是最为重要的目的，只有这样才能为今后应用传热学解决科学研究和实际工程问题打下坚实的基础。

在第五版中，我们仍然坚持把对基本概念、基本理论和基本计算的教学作为第一的任务。对全书的一些重要概念和计算，在前一版的基础上，进一步进行了深入的探讨，力图精益求精，准确地阐述最基本的内容；按“传热学”的基本要求，在紧密地联系建筑环境与设备工程专业实际的同时，也适当扩大知识面，兼顾一些非能源专业的需要。

特别值得指出的是，“节能”是我国的重要国策，在这方面传热学将发挥十分重要的作用。近年，我国在建筑领域为“建筑节能”建立了一些强制性标准，为此，在第五版中，把“节能”作为一个重要的问题予以关注。

书中每个例题都附有讨论，对扩展解题思路、引导读者解题、消化各章内容、判断计算结果等能够起到很好的作用。本版把这一方法进一步深化，意图通过例题，使读者能结合实际理解并扩大对基本内容的掌握，能够判断计算的准确性。本版与前版一样仍然没有在习题后附注答案，作者认为只要在掌握基本概念的基础上，理解了各章例题的解题思路和方法，求解习题就无困难。解答习题，不仅能检验理解教材内容的程度，也是培养判断计算是否准确的能力的一个重要环节，是工程技术人员解决工程计算最基本的训练；独立判断计算结果是否准确更是各类考试所必须的。

这次改版，同济大学朱彤和天津大学汪健生积极地参与了改版的部分工作；清华大学姜培学、哈尔滨工业大学谭羽非、重庆大学王厚华以及天津理工大学王泽生为改版提出了宝贵意见，在此对他们表示衷心的感谢。

在新版发行时，我们希望继续得到读者的支持和帮助，给予批评指正。

基本符号表

符 号	物 理 量	常 用 单 位
A	温度振幅	开 (K)
A	表面积	米 ² (m ²)
a	热扩散率(导温系数)	米 ² /秒 (m ² /s)
B	大气压强	牛顿/米 ² (N/m ²); 帕(Pa); 千克/(米·秒 ²)[kg/(m·s ²)]
C	辐射系数	瓦/(米 ² ·开 ⁴)[W/(m ² ·K ⁴)]; [J/(m ² ·s·K ⁴)]
C_i	组分 i 的质量浓度	摩尔/米 ³ (mol/m ³); 千摩尔/米 ³ (kmol/m ³)
c	比 热 容	焦耳/(千克·开) [J/(kg·K)]
c'	体积比热容	焦耳/(标米 ³ ·开)[J/(N m ³ ·K)]
D	质扩散率	米 ² /秒(m ² /s)
d	直 径	米(m); 毫米(mm)
E	辐 射 力	瓦/米 ² (W/m ²)
f	摩擦系数	
G	投射辐射	瓦/米 ² (W/m ²)
g	重力加速度	米/秒 ² (m/s ²)
H	焓	焦耳/千克 (J/kg)
H	高 度	米(m); 毫米 (mm)
h	表面传热系数	瓦/(米 ² ·开) [W/(m ² ·K)]
h_D	表面传质系数	米/秒(m/s)
I	辐射强度	瓦/(米 ² ·球面度)[W/(m ² ·sr)]
J	有效辐射	瓦/米 ² (W/m ²)
k	传热系数	瓦/(米 ² ·开) [W/(m ² ·K)]
l	长度、定型尺寸	米(m)
M	质 流 量	千克/秒(kg/s)
M	质 量	千克(kg)
m	质流密度	千克/(米 ² ·秒)[kg/(m ² ·s)]
NTU	传热单元数	
P	功 率	瓦(W); 焦耳/秒(J/s)
p	压 强	帕(Pa); 牛顿/米 ² (N/m ²); 千克/(米·秒 ²)[kg/(m·s ²)]
Q	热 量	焦耳(J)
q	热流密度	瓦/米 ² (W/m ²)
R	热 阻	米 ² ·开/瓦(m ² ·K/W)
r	半 径	米(m); 毫米(mm)
r	气化潜热	焦耳/千克(J/kg)
S	距 离	米(m)

续表

符 号	物 理 量	常 用 单 位
T	热力学温度	开尔文(K)
t	摄氏温度	度(℃)
U	周边长度	米(m)
u	速 度	米/秒(m/s)
V	容 积	米 ³ (kg/m ³)
v	速 度	米/秒(m/s)
w	速 度	米/秒(m/s)
X	角 系 数	
Z	周 期	秒(s); 时(h)
α	吸 收 比	
α	体积膨胀系数	1/开(1/K)
β	肋化系数	
δ	厚 度	米(m)
Δ	差 值	
ϵ	发 射 率	
ϵ	换热器效能	
η	效 率	
Θ	无量纲过余温度	
θ	过余温度	开(K)
λ	导热系数	瓦/(米·开) [W/(m·K)]
μ	分 子 量	
μ	动力黏度	牛顿·秒/米 ² (N·s/m ²); 千克/(秒·米)[kg/(s·m)]
ν	运动黏度	米 ² /秒(m ² /s)
ν	温度波振幅衰减度	
ξ	温度波延迟	
ρ	密 度	千克/米 ³ (kg/m ³)
ρ	质量浓度	千克/米 ³ (kg/m ³)
ρ	反 射 比	
τ	穿 透 比	
τ	时 间	秒(s); 时(h)
τ	剪 应 力	牛顿/米 ² (N/m ²)
Φ	热 流 量	焦耳/秒(J/s); 瓦(W)
ω	角 速 度	弧度/秒(rad/s)

相似准则名称:

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \text{——毕渥(Biot)准则} (\lambda \text{ 为固体的导热系数})$$

$$Co = h \left[\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right]^{-1/3} \text{——凝结(Condensation)准则}$$

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

$$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{——伽利略(Galileo)准则}$$

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

$$Le = \frac{a}{D} \text{——刘伊斯(Lewis)准则}$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \text{——努谢尔特(Nusselt)准则} (\lambda \text{ 为流体的导热系数})$$

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

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

$$Ra = Gr \cdot Pr \text{——瑞利(Rayleigh)准则}$$

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

$$Sc = \frac{\nu}{D} \text{——施米特(Schmidt)准则}$$

$$Sh = \frac{h_D l}{D} \text{——宣乌特(Sherwood)准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Pe \cdot Pr} = \frac{h}{uc_p \rho} \text{——斯坦登(Stanton)准则}$$

$$St_c = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{h_D}{u} \text{——质交换斯坦登准则}$$

主要注角符号:

f ——流体 (Fluid)

w ——壁面 (Wall)

c ——临界 (Critical)

e ——当量, 等效 (Equivalent)

s ——饱和 (Saturation)

m ——平均 (Mean)

min ——最小 (Minimum)

max ——最大 (Maximum)

此外本书还使用基本符号作注角, 如对流换热热阻 R_h 等。

目 录

基本符号表

绪论	1
小结	7
思考题与习题	8
第一章 导热理论基础	10
第一节 基本概念及傅里叶定律	10
第二节 导热系数	13
第三节 导热微分方程式	17
第四节 导热过程的单值性条件	19
小结	23
思考题与习题	24
参考文献	25
第二章 稳态导热	26
第一节 通过平壁的导热	26
第二节 通过复合平壁的导热	32
第三节 通过圆筒壁的导热	34
第四节 具有内热源的平壁导热	40
第五节 通过肋壁的导热	40
第六节 通过接触面的导热	47
第七节 二维稳态导热	48
小结	50
思考题与习题	51
参考文献	53
第三章 非稳态导热	55
第一节 非稳态导热的基本概念	55
第二节 无限大平壁的瞬态导热	56
第三节 半无限大物体的瞬态导热	67
第四节 其他形状物体的瞬态导热	70
第五节 周期性非稳态导热	75
小结	81
思考题与习题	82

参考文献	84
第四章 导热数值解法基础	85
第一节 建立离散方程的方法	85
第二节 稳态导热的数值计算	88
第三节 非稳态导热的数值计算	94
小结	101
思考题与习题	102
参考文献	103
第五章 对流换热分析	104
第一节 对流换热概述	104
第二节 对流换热微分方程组	107
第三节 边界层换热微分方程组	112
第四节 边界层换热积分方程	121
第五节 动量传递和热量传递的类比	129
第六节 相似理论基础	135
小结	144
思考题与习题	145
参考文献	148
第六章 单相流体对流换热	149
第一节 管内受迫对流换热	149
第二节 外掠圆管对流换热	162
第三节 自然对流换热	168
小结	178
思考题与习题	180
参考文献	185
第七章 凝结与沸腾换热	186
第一节 凝结换热	186
第二节 沸腾换热	196
第三节 热管	203
小结	204
思考题与习题	205
参考文献	206
第八章 热辐射的基本定律	207
第一节 基本概念	207
第二节 热辐射的基本定律	211
小结	222
思考题与习题	223

参考文献	225
第九章 辐射换热计算	226
第一节 黑表面间的辐射换热	226
第二节 灰表面间的辐射换热	230
第三节 角系数的确定方法	241
第四节 气体辐射	247
第五节 太阳辐射	256
小结	261
思考题与习题	262
参考文献	267
第十章 传热和换热器	268
第一节 通过肋壁的传热	268
第二节 复合换热时的传热计算	270
第三节 传热的增强和削弱	277
第四节 换热器的形式和基本构造	282
第五节 平均温度差	285
第六节 换热器计算	291
第七节 换热器性能评价简述	300
小结	301
思考题与习题	301
参考文献	304
第十一章 质交换	305
第一节 质交换及其基本定律	306
第二节 动量、热量、质量传递的类比	312
第三节 对流质交换的准则关联式	315
第四节 液体蒸发时的热质交换	318
小结	321
思考题与习题	322
参考文献	323
附录	324
附录 1 单位换算表	324
附录 2 干空气的热物理性质	325
附录 3 饱和水的热物理性质	326
附录 4 干饱和水蒸气的热物理性质	327
附录 5 几种饱和液体的热物理性质	328
附录 6 几种油的热物理性质	329
附录 7 各种材料的热物理性质	330

附录 8	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	332
附录 9	常用材料表面的法向发射率 ϵ_n	333
附录 10	不同材料表面的绝对粗糙度 K_s	333
附录 11	换热设备的 h 及 k 概略值	334
附录 12	污垢系数的参考值	334
附录 13	双曲函数表	335
附录 14	高斯误差补函数的一次积分值	336
附录 15	层流换热边界层方程的精确解	337

绪 论

传热学是研究热量传递过程规律的科学。

自然界和生产过程中，到处存在温度差，热量将自发地由高温物体传递到低温物体，热传递就成为一种极为普遍的物理现象。因此，传热学有着十分广泛的应用领域。就各类工业领域而言，诸如，锅炉和换热设备的设计以及为强化换热和节能而改进锅炉及其他换热设备的结构；化学工业生产中，为维持工艺流程的温度，要求研究特定的加热、冷却以及余热的回收技术；电子工业中解决集成电路或电子仪器的散热方法；机械制造工业测算和控制冷加工或热加工中机件的温度场；交通运输业在冻土地带修建铁路、公路；核能、航天等尖端技术中也都存在大量传热问题需要解决；太阳能、地热能、工业余热利用及其他可再生能源工程中高效能换热器的开发和设计等；应用传热学知识指导强化传热或削弱传热达到节能目的；其他如农业、生物、医学、地质、气象、环境保护等部门，无一不需要传热学。因此，传热学已是现代技术科学的主要技术基础学科之一。近几十年来，传热学的成果对各部门技术进步起了很大的促进作用，而传热规律的深入研究，又推动了学科的迅速发展。

在建筑领域，我国建筑消耗的能源与社会全部能源之比，已经接近 $1/3$ ，而建筑供热能耗占到其中的 $1/2$ ，现有的 400 多亿平方米（2006 年）建筑中 95% 左右是高能耗，单位建筑面积采暖能耗相当于相同气候地区发达国家的 2~3 倍。即使是新建的，也有 50% 是高能耗。这种现状，使“建筑节能”已经成为十分紧迫的问题。因此，从 2005 年开始，国内所有新建建筑工程，都被强制要求在以往的能源消耗水平上节约 65%。几百亿平方米的旧建筑，也要逐步进行改造，达到节能的要求，这是新时代的巨大工程，为实现节能所采取的技术措施必然涉及传热学知识。例如各种建筑围护结构材料、门窗、供热设备管道的保温材料等的研制、生产、施工及其热物理性质的测试、热损失的分析计算；热源和冷源设备的选择、配套和合理有效利用；供热通风空调及燃气产品的开发、设计和实验研究；各类采暖散热器和换热器的设计、选择和性能评价；建筑物的热工计算和环境保护等等。传热学成为本专业的重要技术基础课程。

热传递过程有时还伴随着由于物质浓度差引起的质量传递过程，即传质过程。如空调系统中，冷的喷淋水与空气的热质交换过程；湿空气参数的测量；蒸发式冷凝器中冷却水蒸发时的传热和传质；建筑围护结构中水分的转移过程；水果蔬菜等农产品的气调保鲜等等，都与传质密切相关。为此，本书在着重阐述传热问题之后，还以专门的一章，讨论由浓度差引起的质传递问题的基本规律和计算。

一、热传递的基本方式

为了由浅入深地认识和掌握热传递规律，先来分析一些常见的热传递现象。例如密实的房屋砖墙或混凝土墙在冬季的散热，整个过程如图 0-1 所示可分为三段，首先热由室

内空气以对流换热和墙与室内物体间的辐射方式传给墙内表面；再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；最后由墙外表面以空气对流换热和墙与周围物体间的辐射方式把热传递到室外环境。显然在其他条件不变时，室内外温度差越大，传递的热量也越大。又如，热水采暖散热器的热传递过程，热水的热量先以对流换热方式传给散热器壁内侧，再由导热方式通过壁，然后散热器壁外侧以空气对流换热和壁与周围物体间的辐射换热方式将热量传给室内。从实例不难了解，热量传递过程是由导热、热对流、热辐射三种基本热传递方式组合形成的。要了解传热过程的规律，就必须首先分别分析三种基本热传递方式。绪论将对这三种基本热传递方式作扼要解释，并给出它们的最基本的表达式，使读者对传热学的全貌和学习目的有一梗概认识。

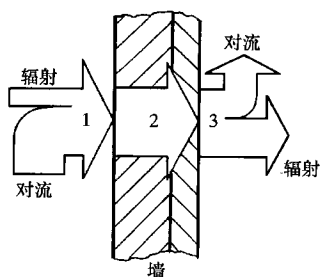


图 0-1 墙壁的散热

1. 导热

导热又称热传导，是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象，导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为，在有温差时，液体和气体中可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

大平壁导热是导热的典型问题之一，参见图 0-2。由前述墙壁的导热过程看出，平壁导热热量与壁两侧表面的温度差和平壁面积成正比；与壁厚成反比；并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量的计算式是：

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A \quad (\text{W}) \quad (0-1a)$$

或热流密度（每平方米的热量）

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-1b)$$

式中 A ——壁面积， m^2 ；

δ ——壁厚， m ；

Δt ——壁两侧表面的温差， $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ， $^{\circ}\text{C}$ ；

λ ——比例系数，称为导热系数或热导率，其意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时，在它的单位面积上每单位时间的导热热量，它的国际单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定，例如，普通混凝土 $\lambda = 0.75 \sim 0.8 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，纯铜的 λ 将近 $400 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

在传热学中，常用电学欧姆定律的形式（电流 = 电位差/电阻）来分析热量传递过程中热量与温度差的关系。即把热流密度的计算式改写为欧姆定律的形式。

热流密度： $q = \text{温度差 } \Delta t / \text{热阻 } R_t \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-2)$

与欧姆定律对照，可以看出热流相当于电流；温度差相当于电位差；而热阻相当于电阻。于是，得到一个在传热学中非常重要而且实用的概念——热阻。对不同的热传递方式，热阻 R_{t_i} 的具体表达式将不一样。以平壁为例改写式 (0-1b)，得

$$q = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda} = \frac{\Delta t}{R_{\lambda}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-1c)$$

用 R_λ 表示导热热阻, 则平壁导热热阻为 $R_\lambda = \delta/\lambda$, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。可见平壁导热热阻与壁厚成正比, 而与导热系数成反比。 R_λ 大, 则 q 小。利用式(0-1a), 对于面积为 $A \text{ m}^2$ 的平壁, 则热阻为 $\delta/(\lambda \cdot A)$, K/W 。热阻的倒数称为热导, 它相当于电导。不同情况下的导热过程, 导热的表达式亦不同。本书将就几种典型情况下导热的宏观规律及其计算方法分章论述。

2. 热对流

只依靠流体的宏观运动传递热量的现象称为热对流, 是热传递的另一种基本方式。设热对流过程中, 质流密度 $m[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 保持恒定的流体由温度 t_1 的地方流至 t_2 处, 其比热容为 $c_p[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, 则此热对流传热的热流密度应为:

$$q = mc_p(t_2 - t_1) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-3)$$

但是, 工程上经常涉及到的传热现象往往是流体在与它温度不同的壁面上流动时, 两者间产生的热量交换, 传热学把这一热量传递过程称为“对流换热(也称放热)”过程。因为对流换热过程的热量传递涉及到诸多影响因素, 是一个复杂的换热过程, 因此它已不再属于热传递的基本方式, 这种情况下可采用对流换热计算式^① 计算热流密度——通称“牛顿冷却公式”, 即:

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-4a)$$

$$\text{或面积 } A \text{ m}^2 \text{ 上的热流量: } \Phi = h(t_w - t_f)A = h\Delta t A \quad (\text{W}) \quad (0-4b)$$

式中 t_w ——壁表面温度, $^\circ\text{C}$;

t_f ——流体温度, $^\circ\text{C}$;

Δt ——壁表面与流体间温度差, $^\circ\text{C}$;

h ——表面传热系数, 其意义是指单位面积上, 流体与壁之间在单位温差下及单位时间内所能传递的热量。常用的表面传热系数单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 h 的大小表达了对流换热过程的强弱程度。例如采暖热水散热器外壁和空气间的表面传热系数约为 $1 - 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 而它的内壁和热水之间的 h 则可达数千 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。附录 11 列有一些典型条件下 h 的概略范围, 供读者参考。由于 h 受制于多项影响因素, 故研究对流换热问题的关键是如何确定表面传热系数。本书将对一些工程中常见的典型对流换热过程进行分析, 并提供理论解或实验解。

按式(0-2)式提出的热阻概念改写式(0-4a)得

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (0-4c)$$

式中, $R_h = 1/h$ 即为单位壁表面积上的对流换热热阻 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), 利用式(0-4b), 则表面积为 $A \text{ m}^2$ 的壁面上的对流换热热阻为 $1/(h \cdot A)$, 单位是 K/W 。

3. 热辐射

导热或对流都是以冷、热物体的直接接触来传递热量, 热辐射则不同, 它依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线(电磁波, 或者说光子)传递热量。物体表面每单位时

^① 1701 年牛顿在分析热物体被流经其表面的冷流体冷却的现象时, 认为换热量将与两者的温度差成正比, 提出了 $q \propto (t_w - t_f)$ 表达式, 后人把它改写为式(0-4), 并称为牛顿冷却公式。

间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力，用 E 表示，它的常用单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或 W/m^2 ，其大小与物体表面性质及温度有关。对于黑体（一种理想的热辐射表面），理论和实验证实，它的辐射力 E_b 与表面热力学温度的 4 次方成比例，即斯蒂芬—玻尔茨曼定律：

$$\begin{aligned} E_b &= \sigma_b T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ \Phi &= \sigma_b T^4 A \quad (\text{W}) \end{aligned} \quad (0-5a)$$

上式亦可写作：

$$\begin{aligned} E_b &= C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ \Phi &= C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 A \quad (\text{W}) \end{aligned} \quad (0-5b)$$

式中 E_b ——黑体辐射力， W/m^2 ；

σ_b ——斯蒂芬—玻尔茨曼常量，亦称黑体辐射常数， $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

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

T ——黑体表面的热力学温度， K 。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下黑体的辐射力，等于

$$\begin{aligned} E &= \epsilon \sigma_b T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ E &= \epsilon C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \end{aligned} \quad (0-5c)$$

式中 ϵ ——实际物体表面的发射率，也称黑度，其值处于 $0 \sim 1$ 之间。

物体间靠热辐射进行的热量传递称为辐射换热，它的特点是：在热辐射过程中伴随着能量形式的转换（物体内能→电磁波能→物体内能）；不需要冷热物体直接接触；不论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量。高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热由高温传到低温。

两个无限大的平行平面间的热辐射是最简单的辐射换热问题，设它的两表面热力学温度分别为 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，则单位面积高温表面在单位时间内以辐射方式传递给低温表面的辐射换热热流密度的计算式是：

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-5d)$$

$$\text{或 } A \text{m}^2 \text{ 上的辐射热流量 } \Phi = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A \quad (\text{W}) \quad (0-5e)$$

式中 $C_{1,2}$ 称为 1 和 2 两表面间的系统辐射系数，它取决于辐射表面材料性质及状态，其值在 $0 \sim 5.67$ 之间。关于辐射换热热阻的表述，将在第九章讨论。本书的辐射换热部分将论述热辐射的宏观规律及若干典型条件下的辐射换热计算方法。

二、传热过程

工程中经常遇到冷热两种流体隔着固体壁面的换热，即热量从壁一侧的高温流体通过壁传给另一侧的低温流体的过程，称为传热过程。在初步了解前述基本热传递方式后，即可导出传热过程的基本计算式。设有一大平壁，面积为 A ；它的一侧为温度 t_n 的热流体，另一侧为温度 t_2 的冷流体；两侧表面传热系数分别为 h_1 及 h_2 ；壁面温度则分别为 t_{w1} 和

t_{w2} ；壁的材料导热系数为 λ ；厚度为 δ ，如图 0-2 所示。又设传热工况不随时间变化，即各处温度及传热量不随时间改变，传热过程处于稳态；壁的长和宽均远大于它的厚度，可认为热流方向与壁面垂直。若将该传热过程中各处的温度描绘在 $t-x$ 坐标图上，将如图中的曲线所示，即该传热过程的温度分布线。按图 0-1 的分析方法，整个传热过程分三段分别用下列三式表达。

热量由热流体以对流换热方式传给壁左侧，按式 (0-4)，其热流密度为：

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1})$$

该热量又以导热方式通过壁，按式 (0-1)

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2})$$

它再由壁右侧以对流换热方式传给冷流体，即

$$q = h_2 (t_{w2} - t_{f2})$$

在稳态情况下，以上三式的热流密度 q 相等，把它们改写为：

$$\left. \begin{aligned} t_{f1} - t_{w1} &= q/h_1 \\ t_{w1} - t_{w2} &= q/\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \\ t_{w2} - t_{f2} &= q/h_2 \end{aligned} \right\}$$

三式相加，消去 t_{w1} 及 t_{w2} ，整理后得该壁传热热流密度

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} (t_{f1} - t_{f2}) \\ &= k (t_{f1} - t_{f2}) \quad (\text{W/m}^2) \end{aligned} \quad (0-6a)$$

对 $A\text{m}^2$ 的平壁，传热热流量 Φ 则为：

$$\Phi = qA = k(t_{f1} - t_{f2})A \quad (\text{W}) \quad (0-6b)$$

式中

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (0-7)$$

k 称为传热系数，它表明单位时间、单位壁面积上，冷热流体间温差为 1°C 时所传递的热量， k 的单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，故 k 值的大小反映了传热过程的强弱。为理解它的意义，按热阻形式改写式(0-6a)，得

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{k}} = \frac{\Delta t}{R_k} \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-6c)$$

R_k 即为平壁单位面积传热热阻：

$$R_k = \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K/W}) \quad (0-8)$$

可见传热过程的热阻等于冷、热流体与壁之间的对流换热热阻及壁的导热热阻之和，相当

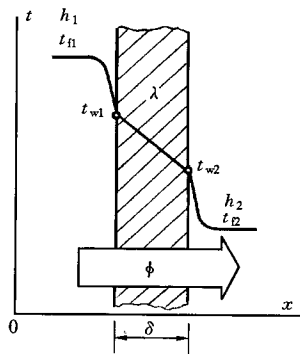


图 0-2 两流体间的热传递过程

于串联电阻的计算方法，掌握这一点对于分析和计算传热过程十分方便。由传热热阻的组成不难认识，传热阻力的大小与流体的性质、流动情况、壁的材料以及形状等许多因素有关，所以它的数值变化范围很大。例如，建筑物室内空气和物体通过 240mm 厚砖墙向周围环境的散热过程的 k 值约为 $2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，如果墙外贴上几厘米厚的高效保温层则可使它降到 $0.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；建筑物围护结构和热力管道的保温层的作用是减少热损失，保温材料的导热系数越小， k 值越小，保温性能越好；而在蒸汽热水器中， k 值可达 $5000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，其值越大，传热越好。书末附录 11 列有各类情况下 k 值的概略范围，可供参考。

综上所述，学习传热学的目的概括起来就是：认识传热规律；计算各种情况下的传热量或热传过程中的温度及其分布；掌握增强或削弱传热过程的措施以及对传热现象进行实验研究的方法。

本书采用国际单位制，为方便起见，附录 1 列出传热计算中常用的国际单位制与工程单位制的换算表。

本书各章均有小结，它将指出该章的中心内容，学习思路及对学习该章的基本要求，对复习会有一定的指导作用。

本书各章的例题，将力求与该章的主要概念密切结合，例题附有分析讨论，用数据来加强对概念的理解和掌握，并有助于与实际工程问题的联系。

【例 0-1】 某住宅砖墙壁厚 $\delta_1 = 240\text{mm}$ ，其导热系数 $\lambda_1 = 0.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，墙壁内外两侧的表面传热系数分别为： $h_1 = 7.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ， $h_2 = 10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，冬季内外两侧空气温度分别为 $t_{f1} = 20^\circ\text{C}$ 和 $t_{f2} = -5^\circ\text{C}$ ，试计算墙壁的各项热阻、传热系数以及热流密度？为减少墙壁的散热损失，节约能源，特在墙的一侧加装厚度 $\delta_2 = 50\text{mm}$ 的聚苯乙烯硬质泡沫塑料保温层，其导热系数 $\lambda_2 = 0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，试问改造后墙壁的传热会发生什么变化？

【解】 无保温层时单位壁面积各项热阻

$$R_{h1} = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{7.5} = 0.133\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

$$R_\lambda = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0.24}{0.6} = 0.4\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

$$R_{h2} = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{10} = 0.1\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

∴ 传热热阻（单位面积）

$$R_k = R_{h1} + R_\lambda + R_{h2} = 0.133 + 0.4 + 0.1 = 0.633\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

如是无保温层时砖墙壁的传热系数

$$k = \frac{1}{R_k} = \frac{1}{0.633} = 1.58\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

热流密度为：

$$q = k\Delta t = 1.58 \times (20 + 5) = 39.5\text{W}/\text{m}^2$$

加装保温层后墙体的导热热阻等于砖层与保温层两者之和：

$$R_\lambda = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0.24}{0.6} + \frac{0.05}{0.03} = 2.07\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$