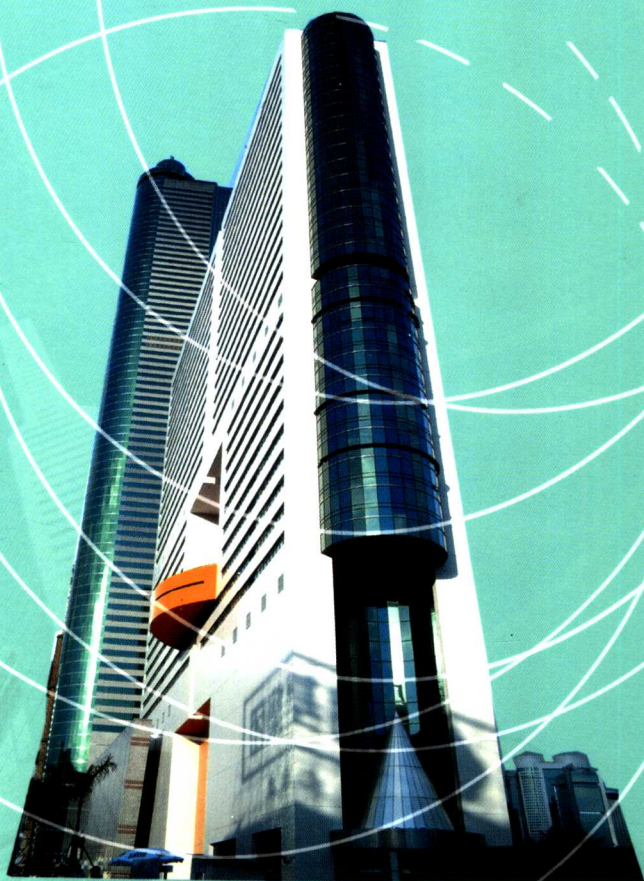


高等学校教材

建筑物理

华南理工大学 重庆大学
大连理工大学 华侨大学 编著
广东工业大学 广州大学
华南理工大学 主编



华南理工大学出版社

高等学校教材

建筑物理

ARCHITECTURAL PHYSICS

华南理工大学 重庆大学
大连理工大学 华侨大学 编著
广东工业大学 广州大学
华南理工大学 主编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书主要包括建筑热工学、建筑光学和建筑声学三部分,综合介绍了建筑物和城市环境中的热、声、光等物理现象和材料的热学、声学和光学性能,论述了获得良好的建筑物理环境的设计原理和方法。

本书内容反映了新成果、新技术和新标准。书末附有“规范目录”和“名词索引”,故本书除可作为建筑类高等学校建筑学专业、城市规划专业及室内设计专业的教学用书外,也可作为全国建筑师、规划师注册资格考试与继续教育,以及建筑技术科学专业研究生学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑物理/华南理工大学主编. —广州:华南理工大学出版社, 2002.8

ISBN 7-5623-1853-0

I. 建… II. 华… III. 建筑学:物理学 IV. TU11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 039749 号

总 发 行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

发行部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn <http://www2.scut.edu.cn/press>

责任编辑: 赖淑华

印 刷 者: 中山市新华印刷厂有限公司

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29.125 字数: 727 千

版 次: 2002 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1~3000 册

定 价: 45.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

本书是为建筑类高等院校建筑学专业、城市规划专业及室内设计专业本科教学而编写的。书中内容包括建筑热工学、建筑光学和建筑声学三部分,综合介绍了建筑物和城市环境中的热、声、光等物理现象和材料的热学、光学和声学性能,论述了获得良好的热、声、光环境的设计原理和方法。

建筑物理是建筑技术科学的基本组成部分,是一门培养建筑设计、室内设计、城市规划与建设管理高级人才不可缺少的专业基础课程,掌握了这门课程的内容,就具备了解决和预测实际工作中涉及的环境、节能、生态等诸多问题的基本能力。

近年来建筑技术科学发展很快,出现了很多新技术、新成果和新的规范、标准,与发达国家相比,国内相关的教材和参考书目相对偏少,国内受出版物滞后等客观因素的影响,大部分的同类教材无法及时反映这些成果,给教学工作带来了一定的影响。

我国地域辽阔,气候类型复杂多样,建筑适用技术有限大的差别,加上人对自然现象的认知水平在不断提高,新的发现和应用技术层出不穷,所以全国统一制订这门课程的教材编写大纲也不现实。但是,现行的统编教材^[1-4]陆续经历了二十多年的试用,成功地奠定了国内建筑物理的教学模式,客观上起到了大纲的指导作用,因此它们是编写本书的重要参考依据。

本书编写时尽可能地考虑了上述因素,并在内容编写和编排上体现出自己的特点。内容编写上的特点主要有:(1)建筑热工学部分:考虑到气候对建筑热工影响的重要性而增加了建筑气候内容,对新标准《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》内容有所反映;(2)建筑光学部分:编入了新标准《建筑采光设计标准》有关内容,更新了部分照明案例;(3)建筑声学部分:调整了厅堂音质设计的内容,编入了典型厅堂的案例。内容编排上的特点有:(1)各篇按照基础理论章、专题章、实验章的次序编排,其中各专题章基本按照由室外环境到室内环境的顺序编排,以便于读者系统地掌握这方面的知识;(2)各篇安排了相关的实验章,各章均适当增加了习题数量,全书共列习题 151 道,以强化训练学生对所学知识的理解消化能力,也便于建筑师和规划师注册资格考试时复习;(3)书末的“规范目录”和“名词索引”,共收录了近 600 条名词术语和 30 多部相关规范、标准的目录,读者可据此快速阅读本书内容或查阅相关标准。书中的实验章(目录中带*者)建议在实验课中

讲授,但考虑到课程教学和实验教学不可分割,为了便于在教学中让学生初步认识实验过程,故将实验编入书内。

本书的编写计划和编写大纲于1997年10月由华南理工大学提出,经与参编的兄弟院校共同推敲后于当年11月定稿,并同时成立了编写组。本书的初稿完成后,部分编者还在各自的教学中进行了试用,在总结经验的同时也使本书得到了充实和完善,此次出版希望能够进一步得到国内同行的批评指正,以期对我国建筑技术的发展发挥作用。编写组由华南理工大学、重庆大学、大连理工大学、华侨大学、广东工业大学、广州大学六校的任课教师组成,华南理工大学为主编单位。编写工作的分工如下:

建筑热工学篇主编:孟庆林

前言、第一、三章、名词索引、规范目录:孟庆林(华南理工大学)

第二章:汪志舞 李建成(华南理工大学)

第四章:李 英(大连理工大学)

第五章:冉茂宇(华侨大学)

第六章:李建成 汪志舞(华南理工大学)

第七章:唐鸣放(重庆大学)

建筑光学篇主编:陈仲林

第八~十一章:陈仲林 杨光璜(重庆大学)

建筑声学篇主编:吴硕贤

第十二、十三章:谢 浩(广东工业大学)

第十四章:沈 粤(广州大学)

第十五、十六章:刘岳超(华南理工大学)

第十七章:吴硕贤(华南理工大学)

第十八章:汤国华(广州大学)

全书由孟庆林统稿。

本书出版过程中,各篇主编承担了本篇稿件的校订工作。此外李建成还参加了第一篇的订正。博士研究生刘炜、硕士研究生何正军参加了第二篇的订正。刘亚及硕士研究生张磊、王珍吾、高云飞参加了名词索引的校核工作。华南理工大学出版社第二编辑室的同志也为本书的出版提供了许多帮助。在此表示感谢。

限于编者的水平,书中错误和纰漏在所难免,恳切希望使用本书的读者批评指正。

编 者

2002年2月

目 录

第一篇 建筑热工学

第一章 建筑热工学基本知识	(1)
第一节 围护结构传热与热物性的基本概念	(1)
第二节 围护结构稳定传热原理与计算	(21)
第三节 围护结构周期性不稳定传热原理与计算	(30)
第二章 建筑室内热环境	(42)
第一节 室内热环境与人体的热平衡	(42)
第二节 室内热环境的舒适性	(44)
第三节 室内热环境的评价指标	(46)
第三章 建筑气候	(50)
第一节 建筑日照与太阳辐射	(50)
第二节 气温	(59)
第三节 风、降水与湿度	(64)
第四节 城市气候	(70)
第五节 建筑气候区划和建筑热工设计分区	(72)
第六节 中国建筑气候特征和建筑基本要求	(77)
第四章 建筑保温节能设计	(86)
第一节 建筑保温节能设计综合处理的基本原则	(86)
第二节 围护结构的保温节能设计准则	(90)
第三节 围护结构保温计算和构造设计	(93)
第五章 建筑防潮设计	(108)
第一节 围护结构受潮原因	(108)
第二节 围护结构内部的湿迁移	(110)
第三节 围护结构受潮的防止和控制措施	(115)
第六章 建筑防热设计	(124)
第一节 建筑防热设计途径	(124)
第二节 围护结构隔热设计	(125)
第三节 自然通风降温设计	(141)
第四节 窗口遮阳设计	(149)
第七章 建筑热工学实验	(157)
第一节 气候参数的测定	(157)

第二节	材料导热系数和围护结构热阻的测定·····	(162)
第三节	室内气候参数和热舒适指标 PMV 等值的测定·····	(165)
第四节	建筑日照模型实验·····	(169)

第二篇 建筑光学

第八章	建筑光学基本知识·····	(171)
第一节	眼睛与视觉·····	(171)
第二节	基本光度单位及应用·····	(174)
第三节	材料的光学性质·····	(179)
第四节	视度及其影响因素·····	(184)
第五节	颜色·····	(188)
第九章	天然采光·····	(202)
第一节	光气候和采光标准·····	(202)
第二节	采光口·····	(210)
第三节	采光设计·····	(223)
第四节	采光计算·····	(236)
第十章	建筑照明·····	(245)
第一节	人工光源·····	(245)
第二节	灯具·····	(254)
第三节	室内工作照明·····	(260)
第四节	环境照明设计·····	(285)
第五节	绿色照明工程·····	(304)
第十一章	建筑光学实验·····	(307)
第一节	检验侧窗采光房间的实际采光效果·····	(307)
第二节	检验房间照明实际效果·····	(307)
第三节	检验室内亮度分布状况·····	(308)
第四节	采光模型实验·····	(309)
第五节	照明模型实验·····	(310)
第六节	用照度计测量表面光反射比·····	(311)
第七节	用照度计测量窗玻璃的光透射比·····	(311)

第三篇 建筑声学

第十二章	声音的基本知识·····	(312)
第一节	声波的概念·····	(312)
第二节	声音的计量与听觉·····	(318)
第十三章	室内声学原理·····	(331)
第一节	几何声学·····	(331)
第二节	统计声学·····	(332)
第三节	室内声压级计算·····	(337)

第四节	房间的声共振	(338)
第十四章	材料、构造与吸声	(342)
第一节	概述	(342)
第二节	多孔吸声材料	(343)
第三节	空腔共振吸声结构	(345)
第四节	薄膜、薄板吸声结构	(349)
第五节	其他类型的吸声结构	(351)
第十五章	建筑隔声	(354)
第一节	隔绝空气声	(354)
第二节	隔绝固体声(撞击声)	(360)
第十六章	噪声控制	(363)
第一节	噪声的危害和控制噪声的标准	(363)
第二节	城市噪声控制	(365)
第三节	噪声控制原则与建筑设计	(367)
第四节	室内吸声减噪	(369)
第五节	消声与噪声控制	(370)
第十七章	厅堂音质设计	(373)
第一节	音质设计的目的、内容和步骤	(373)
第二节	厅堂音质评价	(374)
第三节	容积的确定	(380)
第四节	体型设计	(381)
第五节	混响设计	(389)
第六节	电声系统	(391)
第七节	典型厅堂的音质设计	(395)
第十八章	建筑声学实验	(407)
第一节	对声音的认识及声级计的使用	(407)
第二节	厅堂音质的测量	(408)
第三节	吸声系数的测量	(411)
第四节	城市交通噪声的测量及评价	(412)
附录		(414)
附录 1	建筑材料热物理性能计算参数	(414)
附录 2	导热系数 λ 及蓄热系数 s 的修正系数 a 值	(419)
附录 3	标准大气压下不同温度时的饱和水蒸气分压力(Pa)	(420)
附录 4	饱和水、干空气、干饱和水蒸气的热物理性质	(422)
附录 5	全国主要城市主要气候参数	(424)
附录 6	全国主要城市夏季太阳辐照度(W/m^2)	(427)
附录 7	几个地区围护结构的室外计算参数	(429)
附录 8	严寒和寒冷地区采暖居住建筑各部分围护结构传热系数限值 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	(430)

附录 9 夏热冬冷地区居住建筑各部分围护结构传热系数限值	(431)
附录 10 灯具光度数据示例	(432)
附录 11 灯具利用系数	(434)
附录 12 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值	(442)
附录 13 常用材料的吸声系数和吸声单位	(443)
附录 14 常用建筑围护结构的隔声指标	(445)
参考文献	(447)
规范目录	(449)
名词索引	(450)

第一篇 建筑热工学

建筑物和它所处的城市环境常年受到各种气候因素的作用，诸如风、霜、雨、雪、太阳辐射等，一般统称为建筑气候的热湿作用。人们为了营造所需要的建筑和城市热环境，必须从建筑气候的变化规律出发考虑相应的对策。因此，建筑气候的热湿作用是建筑工程设计和城市规划设计的重要依据，它不仅直接影响工程设计的热环境质量，也在很大程度上影响建筑和城市的可持续发展。

建筑热力学的任务，是介绍建筑热工原理，论述如何通过建筑和规划设计上的相应措施，有效地防护和利用建筑气候的热湿作用，合理解决建筑和城市设计中的防热、防潮、保温、节能、生态等问题，以创造可持续发展的人居环境。

建筑气候的基本特征、围护结构传热传湿的基本原理和计算方法是建筑热力学的中心内容。但仅仅掌握这些还不够，还必须建立建筑环境可持续发展的概念，了解材料的热物理性能，重视构造处理技能，才能正确解决实际的工程设计任务。

第一章 建筑热工学基本知识

第一节 围护结构传热与热物性的基本概念

一、传热的基本概念

无论是传统建筑还是现代建筑，就建筑物本身而言，都是要依靠自身的围护结构（墙体、门窗、屋顶等）去防御各种气候因素的不利影响。围护结构所具备的保温、隔热、防潮等一系列的防护性能，保证了建筑物能够形成一个良好的室内环境。如图 1-1，建筑物的室内与室外环境之间的热量交换是通过围护结构完成的。这种室内空气通过围护结构与室外空气进行热量传递的过程，称为围护结构的传热过程。如图 1-2，整个传热过程又可以分成三个阶段，即

- (1) 吸热阶段：室内空气以对流和热辐射方式向墙体内表面传热；
- (2) 导热阶段：在墙体内部以固体导热方式由墙体内表面向外表面传热；
- (3) 放热阶段：以对流和热辐射方式由墙体外表面向室外空气放热。

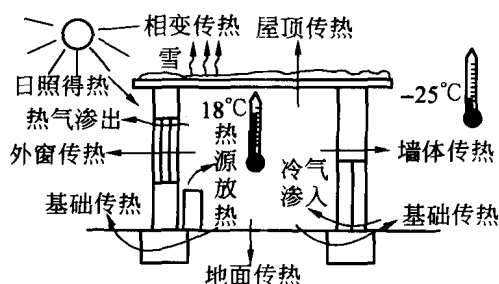


图 1-1 建筑围护结构传热的概念

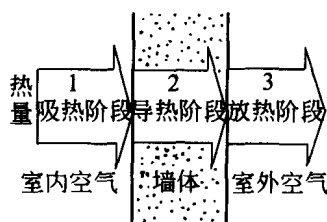


图 1-2 围护结构传热的三个阶段

可见，围护结构传热过程是通过导热、对流和热辐射三种方式进行的。因此可以概括为，传热是包括各种方式热能传递现象的总称，传热的三种基本方式为导热、对流和热辐射。

传热的动力是温差。建筑热工中，经常以围护结构及其两侧空气环境为传热的研究对象。一般情况下，构造与两侧空间上各点的温度是不同的，它是时间和空间的函数，某一时刻所有各点的温度分布叫做温度场。温度场也是时间和空间的函数。如果温度场不随时间变化，则称为稳定温度场，在稳定温度场中发生的传热过程称为稳定传热过程；同理，温度场随时间变化时，称为不稳定温度场，在不稳定温度场中发生的传热过程称为不稳定传热过程。

二、传热的三种基本方式

（一）导热

1. 导热的概念

当物体各部分之间不发生相对位移或不同的物体直接接触时，依靠物质的分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热（或热传导），所以理论上讲导热可以在固体、液体和气体中发生。但在地球引力场的作用范围内，液体和气体有可能发生对流现象，因此，单纯的导热只能发生在密实的固体之中。如图 1-2 所示的墙体内部的导热，还有像屋顶内部、窗玻璃的内部、地面以下的土壤等部位的传热也都是以导热方式进行的。在建筑热工学中，研究材料的导热问题是十分重要的基础性工作。

2. 导热的简单计算

（1）单层平壁的导热计算 考察如图 1-3 所示的单层平壁的导热，平壁的两个表面的温度 θ_i 和 θ_e 均不随时间变化，且 $\theta_i > \theta_e$ ，属稳定导热过程。此时通过平壁的导热量为

$$Q_\lambda = (\lambda/d)(\theta_i - \theta_e)F\tau \quad (1-1)$$

式中 Q_λ ——导热热量，J；

d ——材料厚度，m；

θ_i 、 θ_e ——平壁内、外表面温度，℃；

F ——平壁的面积，m²；

τ ——导热经过的时间，s；

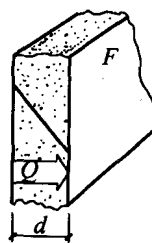


图 1-3 单层平壁的导热

λ ——材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 它是反映材料导热能力大小的一个重要的热物理量, 将在本节后面专门讲述, 各种建筑材料的导热系数载于附录 1 中。

实际热工计算时, 为了讨论问题的方便, 经常使用热流密度的概念, 热流密度即单位时间内通过单位面积传递的热量。导热的热流密度用 q_λ 表示, 即

$$q_\lambda = Q/(F\tau) = (\lambda/d)(\theta_i - \theta_e) = (\theta_i - \theta_e)/R \quad (1-2)$$

式中 q_λ ——导热热流密度, W/m^2 ;

R ——导热热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, 导热热阻的定义式为 $R = d/\lambda$ 。

所谓热阻是热流通过平壁时所受到的阻力, 即平壁抵抗热流通过的能力。在同样温差下, 导热热阻越大, 通过平壁的导热热流密度就越小, 反之, 导热热阻越小, 通过平壁的热流也就越大。由定义式可知, 增大平壁层导热热阻的方法有两个, 一个是加大平壁层的厚度, 另外也可以选择导热系数较小的材料。

(2) 多层平壁导热计算 实际围护结构的构造形式, 往往是由多种材料组合而成的, 在研究单层平壁导热问题的基础上, 下面再介绍多层平壁和组合壁两种典型构造的导热计算。

如图 1-4 所示以三层为例的多层平壁, 平壁两个表面的温度分别为 θ_i 、 θ_e , 且 $\theta_i > \theta_e$, 平壁内部各材料层界面上的温度由内向外依次是 θ_2 、 θ_3 , 由内向外, 材料层的厚度依次是 d_1 、 d_2 、 d_3 , 导热系数依次是 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 。显然, 各层材料的热阻按定义式可写成 $R_1 = d_1/\lambda_1$ 、 $R_2 = d_2/\lambda_2$ 、 $R_3 = d_3/\lambda_3$, 于是, 各层导热热流按单层平壁情况可写成

$$q_1 = (\theta_i - \theta_2)/R_1 \quad (1-3)$$

$$q_2 = (\theta_2 - \theta_3)/R_2 \quad (1-4)$$

$$q_3 = (\theta_3 - \theta_e)/R_3 \quad (1-5)$$

在稳定导热情况下, 可以认为各层材料本身既不发热也不蓄热, 平壁内部既无热源也无热汇。这样一来, 由内表面进入平壁的热流密度会毫无损耗地通过各个材料层, 最后由外表面流出。这一关系可写成如下形式:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_\lambda \quad (1-6)$$

将式 (1-3) ~ (1-5) 代入式 (1-6) 可得

$$q_\lambda = (\theta_i - \theta_e)/(R_1 + R_2 + R_3) \quad (1-7)$$

依此类推, 对于 n 层材料的多层平壁, 必然有

$$q_\lambda = (\theta_i - \theta_e)/(R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n) = \frac{\theta_i - \theta_e}{\sum R} \quad (1-8)$$

于是, 可以得出一个结论: 多层平壁的总热阻是各层材料热阻之和。

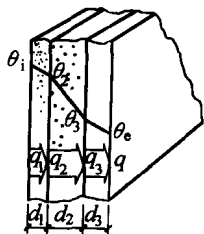


图 1-4 多层平壁导热

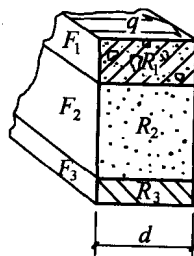


图 1-5 组合壁单元

(3) 组合壁导热计算 一个材料层由几种材料搭接组合而成的构造形式也是工程中常见的,如图 1-5 所示。在组合壁内,热流密度是不均匀的,经过热阻小的部位的导热量要大于其他部位^①。精确的计算过程十分复杂,通常建筑热工中采用面积加权平均的方法求组合壁单元的热阻。计算时,首先要确定组合壁的单元,然后再把它按平行与热流传递的方向沿着单元内部不同材料的搭接面分成若干部分,如图中 1、2、3 部分,各部分在热流方向上的热阻分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 ,各部分导热面积分别是 F_1 、 F_2 、 F_3 。于是组合壁的平均热阻为

$$\bar{R} = (F_1 + F_2 + F_3 + \cdots) / (F_1/R_1 + F_2/R_2 + F_3/R_3 + \cdots) \quad (1-9)$$

如果组合壁中出现圆孔,应该首先将圆孔折算成相等面积的方孔,其他尺寸不变,再按上述方法计算。

【例 1-1】 若采用加气混凝土(导热系数为 $0.22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)替代传统的 240 mm 砖墙(导热系数为 $0.81 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),要达到同样的热阻,加气混凝土墙需要多厚(不考虑墙体内抹灰等因素)?

【解】 砖墙的热阻:

$$R = d/\lambda = 0.24/0.81 = 0.296 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$$

加气混凝土墙厚度:

$$d' = R\lambda' = 0.296 \times 0.22 = 0.065 \text{ m} = 65 \text{ mm}$$

(二) 对流

1. 对流和对流换热的概念

对流是指流体各部分之间发生相对位移,依靠冷热流体互相掺混和移动所引起的热量传递方式。对流只能发生在流体中,但实际工程上,往往更多的是涉及到流体和围护结构表面直接接触式的换热,这种情况下,热量传递过程就不再是单纯的对流作用,而且还必然伴随着导热作用。壁面和流体之间在对流和导热同时作用下进行的热量传递称之为对流换热。

从引起流体流动的原因上看,对流可分为自然对流和强制对流两大类。自然对流是由于流体冷、热各部分的密度不同而引起的,如散热器表面空气受热向上流动,城市中心区域空气受建筑物和城市非绿地表面的加热升温后上升,形成城市热岛环流等都属于自然对流现象。如果流体的流动是在水泵或风机等的驱动下造成的,则称之为强制对流。

壁面和流体主流区之间的换热过程,是在边界层中进行的。

一般认为,当流体和壁面之间有相对位移,即流体在壁面上流动时,流体一侧就会形成两个区域,即边界层区和主流区,如图 1-6 所示。由于壁面摩擦力和流体粘滞力的作用,在壁面上会形成一个流态平稳、体积很薄的流动层,称之为层流区或层流边界层。层流区以外,则是一个流态紊乱、体积较薄的流动层,称之为紊流区或称之为紊流边界层,层流边界层与紊流边界层就构成了壁面与流体对流换热的边界层或边界层区。边界层区以外就是流体主流区。尽管对流体对流时所表现出的形态按区来划分,但实际上,相对于壁面或主流区的空间尺度来说,边界层的厚度是相当薄的,例如 20°C 的空气沿着壁面流

^① 实际上在组合壁内部的热流传递方向已不是单向传热,而是两向甚至三向传热(即所谓三维传热),其精确计算的过程比较复杂,通常要借助于计算机来完成。

动,当主流区的流速为 0.5 m/s 时边界层厚度约为 30 mm,1 m/s 时约为 20 mm,4 m/s 时约为 10 mm,16 m/s 时则只有约 5 mm,而层流边界层就更薄了。但是,对流换热主要是在这一很薄的边界层中进行的,当壁面一边界层一流体主流区处在稳定传热条件下,温度分布只在边界层中发生变化,如图1-6 所示,其中,在层流区,热量传递主要是靠导热进行,因而温度分布是一条斜直线;而在紊流区,热量传递主要是靠对流进行,温度分布可以近似看作是抛物线;边界层以外的主流区的温度可以认为是相同的,温度分布是一条直线。

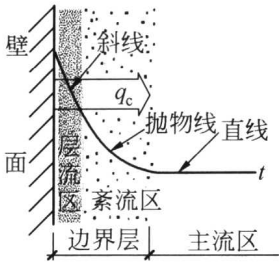


图 1-6 壁面上的对流换热

2. 对流换热的简单计算

表 1-1 壁面对流换热系数 α_c 的确定

空气对流情况	壁面位置	表面状况	热流方向	$\alpha_c =$	
自然对流	垂直壁面			a 式	$2.0 (\theta - t)^{1/4}$
	水平壁面		↑	b 式	$2.5 (\theta - t)^{1/4}$
			↓	c 式	$1.3 (\theta - t)^{1/4}$
强制对流	内表面	中等粗糙度		d 式	2.5 (或 a~c 式) $+ 4.2 V$
	外表面	中等粗糙度		e 式	$(2.5 \sim 6.0)$ (或 a~c 式) $+ 4.2 V$

注: ①表中 V 是强制对流情况的空气流速, m/s, 是指室内因自然通风、换气扇或空调送风造成的围护结构壁面附近的风速, 或指建筑物外表面附近的自然风速等。当 $V = 0$ 时, α_c 值是一个介于 2.5~6.0 之间的常数, 它反映了强制对流中自然对流部分的换热强度。因此应注意: 确定强制对流情况的 α_c 时, 当表面与空气温差大时常系数值取大, 反之取小; 如温差是已知的则建议使用表中 a~c 式计算后 $+ 4.2 V$ 。
②由于室内散热器造成的空气温差流动、或围护结构外墙面因蓄热升温造成的空气流动等则按自然对流情况确定 α_c 。
③ θ 、 t 分别是壁面温度和空气主流区域的温度。

尽管对流换热的机理十分复杂, 但墙体表面和环境空气之间的对流换热量, 可以总结为与壁面温度和主流区温度之差成正比, 可表示为

$$q_c = \alpha_c (\theta - t) \tag{1-10}$$

或

$$q_c = (\theta - t) / R_c \tag{1-11}$$

式中 q_c ——对流换热热流密度, W/m^2 ;
 θ 、 t ——分别是壁面温度和主流区空气温度, $^{\circ}C$;
 R_c ——对流换热热阻, $m^2 \cdot K/W$, 它是热流通过壁面边界层时所受到的阻力, 即边界层抵抗热流通过的能力, 显然, 在同样的壁面与空气温差下, 热阻越大, 壁面和空气的对流换热量越小, 反之亦然, 其定义式是 $R_c = 1/\alpha_c$;
 α_c ——对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, 它是一个用来概括边界层对流换热能力大小的系数, 具体的物理意义可以表述为: 当壁面和流体主流区之间的温差为 $1^{\circ}C$ 时, 单位时间通过单位面积的换热量。可见, 确定该系数的具体数值

是计算对流换热量的前提, α_c 通常是通过实验方法来测定的, 建筑热工中经常遇到的对流换热情况, 都可以概括为壁面和流动空气的对流换热, 对应于具体情况的对流换热系数可以按表 1-1 确定。

【例 1-2】某地夏季测得室外平均风速为 3 m/s, 水泥屋面的温度为 47℃, 空气温度为 26℃, 试计算此时水泥屋面的对流换热热流密度。

【解】(1) 求对流换热系数: 因已知壁面与空气的温差, 故使用表 1-1 中 e 式和 b 式计算 α_c 。

$$\begin{aligned}\alpha_c &= 2.5 \times (\theta - t)^{1/4} + 4.2V \\ &= 2.5 \times (47 - 26)^{1/4} + 4.4 \times 3 \\ &= 2.69(\text{自然对流部分}) + 13.2(\text{强制对流部分}) \\ &= 15.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\end{aligned}$$

(2) 求对流换热热流密度: 按式 (1-10)

$$\begin{aligned}q_c &= \alpha_c(\theta - t) \\ &= 15.89 \times (47 - 26) = 333.69 \text{ W}/\text{m}^2\end{aligned}$$

(三) 热辐射

1. 热辐射与辐射换热的概念

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体会因为各种原因发出辐射能, 其中因为自身温度的原因发出辐射能的现象称之为热辐射, 建筑热工学中所提到的辐射一般都指热辐射。显然, 通过热辐射方式传递的热量称为辐射热。自然界中的各个物体都在不停地向空间散发出辐射热, 同时又在不停地吸收其他物体散发出的辐射热, 这种在物体表面之间由辐射与吸收综合作用下完成的热量传递就是辐射换热。

热辐射与导热、对流有三点区别, 这也是辐射换热的三个特点:

(1) 热辐射可以在真空中传播, 而导热、对流却不能, 例如地球和太阳之间不会发生导热和对流, 只能进行辐射换热;

(2) 热辐射不仅产生热量传递, 而且在传递过程中还伴随着能量形式的转换, 即发射时是从热能转化为电磁波能, 吸收时是把电磁波能转换成热能;

(3) 一切物体, 不论温度高低都在不停地发射辐射热。

因此, 辐射换热是两个物体互相辐射的结果。在两个物体温度不同的情况下, 高温物体辐射给低温物体的辐射热, 大于低温物体辐射给高温物体的辐射热, 其结果就是高温物体把热能传递给了低温物体。

如图 1-7 和图 1-8, 物体发射的电磁波一般以波长来识别, 波长的不同决定了电磁波的作用不同。有实际意义的热辐射的波长范围在 $0.38 \sim 1000 \mu\text{m}$ ^① 之间。常温物体 (包括固体、液体和气体) 发射的热辐射能量绝大部分是集中在红外线区段的长波范围内; 而太阳辐射则是一种高温物体的热辐射, 它的辐射能主要集中在短波范围内, 且其中位于 $0.39 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 这一狭窄的可见光区段的辐射能约占总辐射能的 52%。因此, 建筑热工

① $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ 。

中,习惯把太阳辐射称为短波辐射,而把常温物体的辐射称为长波辐射^①。

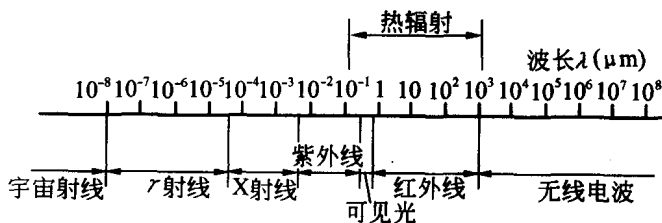


图 1-7 电磁波谱^[9]

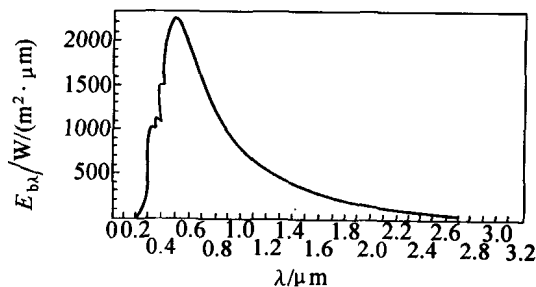


图 1-8 大气层外太阳辐射光谱^[4]

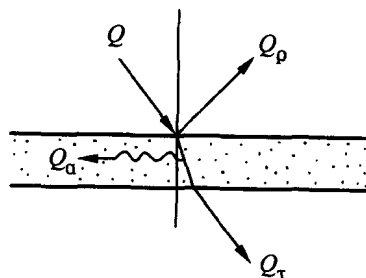


图 1-9 物体对辐射热的吸收、反射和透射示意

2. 物体对辐射热吸收、反射和透射的一般概念

物体接受外来的辐射热 Q 时,一部分 Q_a 被物体吸收,另一部分 Q_p 被物体反射,其余部分 Q_r 穿透物体,如图 1-9 所示。根据能量守恒原理有

$$Q_a/Q + Q_p/Q + Q_r/Q = 1 \quad (1-12)$$

或

$$\alpha + \rho + \tau = 1^{②} \quad (1-13)$$

式中 α ——物体的吸收率, $\alpha = Q_a/Q$;

ρ ——物体的反射率, $\rho = Q_p/Q$;

τ ——物体的透射率, $\tau = Q_r/Q$ 。

在红外辐射范围内,固体和液体的 $\tau=0$,即 $\alpha+\rho=1$,显然,对固体和液体而言,吸收能力大的物体反射能力就小,反之,吸收能力小的反射能力就大;气体对于辐射能来说,几乎没有反射能力,可认为 $\rho=0$,即 $\alpha+\tau=1$,吸收能力大的气体其穿透性就差。自然界中物体的吸收率 α 、反射率 ρ 和透射率 τ 因条件的不同而不同,为了研究问题方便,我们定义三个理想的物体作参照,即:把吸收率 $\alpha=1$ 的物体称为绝对黑体(简称黑体);把反射率 $\rho=1$ 的物体称为绝对白体(简称白体);把透射率 $\tau=1$ 的物体称为绝对透明体(简称透明体)。实际上,绝

① 建筑热工学中,并没有对长波辐射和短波辐射的波长作出严格的界定,大气物理学则认为:大气发射的能量主要集中在 $3\sim 120\mu\text{m}$ 波长范围内的辐射称为长波辐射;太阳发射及传播的能量主要集中在短于 $3\mu\text{m}$ 波长范围内,故称之为短波辐射,而把波长大于 $3\mu\text{m}$ 的热辐射称为长波辐射或远红外辐射。

② 传统教材中分别使用 ρ 、 γ 、 τ 表示吸收率、反射率和透射率,本书采用的符号是为了与传热学的经典称谓及表示符号相一致。

对的黑体、白体、透明体是不存在的，只有它们的近似物体，如油烟熏黑的表面近似于黑体，抛光的金属表面近似于白体，玻璃近似于透明体等。

3. 物体向外发射辐射热的一般概念

为了表示物体向外界发射辐射热的数量，需要引出一个称为辐射力的物理量，用 E 表示。辐射力 E 是指物体在单位时间内单位表面积向半球空间所有方向发射的全部波长的辐射能的总量，它的常用单位是 W/m^2 。针对某一特定波长的辐射力叫单色辐射力，通常用 E_λ 表示，单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

应该指出，物体的辐射力是随波长变化的，其数量等于单色辐射力（即特定波长的辐射力）在全波长（ $0 \sim \infty$ ）范围内的积分值。

黑体的单色辐射力 $E_{b\lambda}$ 随波长 λ 和温度 T 的变化情况，能从经典的黑体发射光谱^① 上得到认识，如图 1-10 所示。当黑体温度升高时，黑体单色辐射力的最大值也升高并且向短波方向移动。

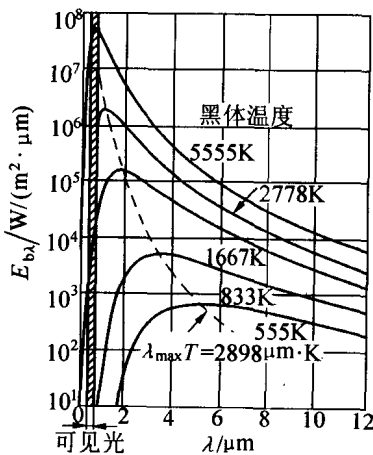


图 1-10 黑体单色辐射的变化^[9]

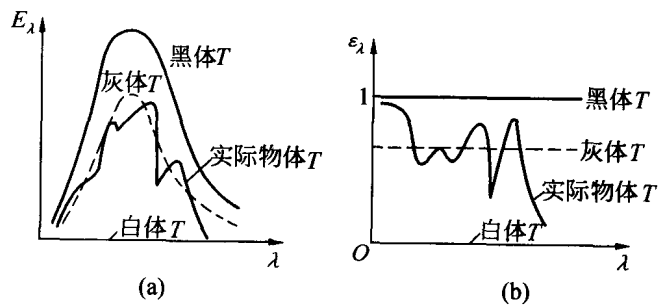


图 1-11 同温物体的辐射频谱^[8]

黑体的辐射力随波长的分布形状是规则的，而实际物体的辐射力随波长的分布形状是不规则的，并且还要比黑体的辐射力小。因此，为了方便研究实际物体辐射问题，理论上又把相同温度条件下辐射力分布形状和黑体的辐射力分布形状相似，并且两者辐射力之比是一个常数的物体，称为灰体。从特征上看，灰体是一种有规则地介于黑体和白体之间的假想物体，很大程度上，它概括了实际物体的辐射性质。在相同温度条件下，实际物体与黑体、灰体、白体的辐射力分布表现如图 1-11 所示，可见，同温度的一切物体中，黑体的辐射力最大。黑体的辐射力用 E_b 表示，它与黑体的绝对温度 T 的四次方成正比，其关系为

$$E_b = C_b (T/100)^4 \quad (1-14)^{\text{②}}$$

式中 E_b ——黑体的辐射力， W/m^2 ；

C_b ——黑体的辐射系数，是用来表征黑体向外发射辐射能力的热物理常数， $C_b =$

① 黑体的单色辐射力与波长和温度的关系称为普朗克定律。

② 该式为斯蒂芬-玻尔兹曼定律，或称四次方定律的表达式。