

21 世纪建筑装饰系列规划教材

建筑物理

主编 李井永
主审 孙玉红

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪建筑装饰系列规划教材

建 筑 物 理

主 编	李井永	
副主编	张立柱	乔志远
参 编	冯美宇	王若辉
主 审	孙玉红	



机 械 工 业 出 版 社

本书是依据高等职业教育建筑设计、建筑装饰专业建筑物理课程的教学要求编写的。内容包括建筑热工学、建筑光学和建筑声学三大部分。其中,建筑热工学部分包括建筑热工学基本知识、建筑保温与防湿、建筑防热和建筑日照;建筑光学部分包括建筑光学基本知识、天然采光和建筑照明;建筑声学部分包括建筑声学基本知识、建筑材料及结构的吸声与隔声、噪声控制与建筑隔振和室内音质设计。全书均按国家最新标准、规范编写。

本书可作为高等职业院校建筑设计专业、建筑装饰专业的教材,也可作为相关专业普通专科、电大、职大、函大、培训或自学用书,还可作为相关专业工程技术人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑物理/李井永主编. —北京:机械工业出版社, 2005.1

(21世纪建筑装饰系列规划教材)

ISBN 7-111-15464-9

I. 建... II. 李... III. 建筑学:物理学—高等学校—教材 IV. TU11

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第138152号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李俊玲 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:石冉

保定市印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年2月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·14.75印张·363千字

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

为了满足培养建筑设计、建筑装饰及相关专业高级实用性人才的需要，我们以李井永老师多年教学使用的讲义为基础，经过重新组织，参照各种最新相关标准、规范（如GB50034—2004《建筑照明设计标准》、GB/T 50033—2001《建筑采光设计标准》）编写了这本教材。

本书在编写中参考了现代建筑物理新技术、新方法和新标准，补充了很多建筑物理新知识，具有较强的教学适用性和较宽的专业适应面；内容组织上以必需、实用和够用为原则，力求体现职业教育特点；知识讲解深入浅出，淡化理论推导，注重实用性。本书每章后均附有思考题与习题，供学生复习使用。

本书由李井永（沈阳建筑大学职业技术学院）任主编并负责统稿，张立柱（沈阳建筑大学职业技术学院）和乔志远（内蒙古建筑职业技术学院）任副主编，冯美宇（山西建筑职业技术学院）和王若辉（沈阳建筑大学职业技术学院）参编。具体的编写分工是：李井永编写第一、二、三、五、六、七、八、十、十一章；张立柱编写附录；乔志远编写第九章；冯美宇编写第四章；王若辉编写绪论并进行图稿的整理工作。本书由沈阳建筑大学职业技术学院孙玉红主审。

在本书编写的过程中，得到了编者所在院校、机械工业出版社领导的大力支持，同时，沈阳建筑大学职业技术学院原教学副院长李文田对本书的编写提出了很多宝贵意见，编者表示深切的谢意。本书编写中参阅了一些院校编写的教材，在参考文献中一并列出。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请同行和读者及时指正，以便再版时修正。

编者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 建筑热工学

第一章 建筑热工学基本知识	3	思考题与习题	37
第一节 围护结构传热的基本方式	3	第三章 建筑防热	38
第二节 围护结构的稳定传热过程	7	第一节 建筑防热途径与防热标准	38
第三节 周期性不稳定传热的基本规律	12	第二节 围护结构的隔热	40
第四节 描述湿空气性质的物理量	13	第三节 建筑遮阳	43
第五节 室内外热环境	15	第四节 自然通风	46
思考题与习题	20	第五节 空调节能与利用自然能源降温	49
第二章 建筑保温与防湿	21	思考题与习题	50
第一节 围护结构的保温设计	21	第四章 建筑日照	52
第二节 外门窗、地面及特殊部位的保温 设计	26	第一节 概述	52
第三节 太阳能在建筑采暖中的应用	29	第二节 棒影日照图的原理及应用	55
第四节 建筑防湿	30	思考题与习题	59

第二篇 建筑光学

第五章 建筑光学基本知识	60	第三节 采光设计	86
第一节 人眼构造及其视觉特性	60	第四节 采光计算简介	91
第二节 基本光度单位及其相互关系	63	思考题与习题	96
第三节 视度	66	第七章 建筑照明	98
第四节 颜色的基本知识	68	第一节 照明光源	98
第五节 材料的光学性质	69	第二节 灯具	105
思考题与习题	72	第三节 工作照明设计	110
第六章 天然采光	73	第四节 环境照明设计	130
第一节 光气候和采光标准	73	第五节 绿色照明简介	137
第二节 采光口的基本形式	81	思考题与习题	138

第三篇 建筑声学

第八章 建筑声学基本知识	139	第三节 室内混响设计	188
第一节 声音的产生与传播	139	第四节 室内音响设备基本知识	190
第二节 声音计量与人耳的听觉特性	141	第五节 各类厅堂音质设计要点	192
第三节 室内声场的变化过程	149	思考题与习题	195
第四节 混响时间和室内声压级的计算	150	附录	196
第五节 房间的共振和共振频率	153	附录 A 常用建筑材料的热工指标	196
思考题与习题	154	附录 B 标准大气压下不同温度时的饱和 水蒸气分压力 p_s	199
第九章 建筑材料及结构的吸声与 隔声	155	附录 C 北纬 40°和北纬 23°地区的夏至、 冬至, 春、秋分的棒影日照图	201
第一节 吸声材料与吸声结构	155	附录 D 灯具光度数据示例	203
第二节 构件隔声特性	161	附录 E 灯具利用系数 C_u	206
思考题与习题	166	附录 F 灯具的概算图表	213
第十章 噪声控制与建筑隔振	167	附录 G 常用建筑材料及结构的吸声 系数 α	219
第一节 噪声的评价和噪声允许标准	167	附录 H 墙板空气声隔声量及空气声隔声 指数 I_a	223
第二节 噪声控制方法	171	附录 I 楼板撞击声声压级及撞击声隔声 指数 I_l	226
第三节 建筑中的吸声降噪	175	参考文献	230
第四节 建筑隔声与隔振	175		
思考题与习题	181		
第十一章 室内音质设计	182		
第一节 室内音质评价标准	182		
第二节 厅堂的容积和体型设计	183		

绪 论

一、人与物理环境概述

物理环境对人的刺激有热觉刺激,视觉刺激,听觉刺激及振动、冲击的刺激等,这些刺激的量如果太小,不能引起人的感觉,但刺激量过大,又使人无法忍受,只有适当调整、控制物理环境的刺激量,使环境的刺激处于最佳范围,人才感到舒适。

随着人类社会的发展,人对居住环境的要求越来越高,人类也总在不停地研究和探索提高室内外环境质量的有效措施。但据世界卫生组织估计,当今至少有 10 亿人居住在不健康的室内环境中。在不良的室内环境中居住与工作,不仅影响身心健康和生活质量,降低工作与学习的效率,也会对室内的仪器、设备造成损害,并可能浪费大量的能源或严重影响产品质量。正因为如此,如何利用建筑中的物理规律,改善人类的居住环境和工作环境,是人们面临的一个重大课题。

随着生产力的发展,高精密产品的生产对建筑环境又提出了更高的要求。如在电子、航空航天、生物化工、医药制品、纺织和食品等工业生产中,生产厂房中的一粒尘埃就可能使产品质量严重下降或产生大量的废品。因此,在这些生产厂房中除了要求严格控制常规的环境因素外,对空气的洁净度等方面也提出了更高的要求。

由上述可知,建筑物理的主要思想是“以人为本”,体现建筑的功能要求和建筑的人文理念。为了达到这一目的,就不可避免地要向自然环境索取更多的能源,并向环境排放更多的废弃物和有序能量,这就可能带来严重的环境问题,破坏人与环境的和谐关系。人类对环境的影响取决于人口数量、人均使用资源量及资源的有效利用率。

当前,发展中国家经济的快速增长,意味着经济活动从以农业为主向需消耗大量矿物燃料的工业和交通运输业为主转变,并相应出现人口往城市和城镇聚居的情况。因人类在城镇集聚生活及其从事的经济活动需消耗大量矿物燃料,人工地表对自然植被造成严重破坏,使城市区域的物理环境出现了恶化的趋势。现代城市环境中令人担忧的问题非常多,如城区的热环境恶化;城区浮悬微粒和烟尘的增加导致日照时数减少;城区的高层建筑对周围建筑的日照和采光影响很大;高反光建筑饰面引起城区的光环境污染;城区的噪声、电磁波辐射及眩光、烟雾、灰尘等的污染都在日益严重。

如何在建筑规划和建筑设计中体现“环境保护”观念并充分利用无污染的绿色能源,已成为建筑物理的重要研究方向。在建筑规划和建筑设计中,如果采用一个方案需要消耗大量的不可再生资源,即使它有很多方面的优越性,也必须放弃这个方案。人类在满足自身需要的同时,不能剥夺后代满足他们需求的权力,这就是“可持续发展”战略的主要思想。“可持续发展”是关系人类命运的重大问题。

为了保护环境,必需树立和增强环境意识,在城市规划和建筑设计中,尽量利用自然条件改善建筑物理环境,采取先进的科学技术措施,创建出环保型节能建筑物和构筑物。

二、建筑物理的研究内容

建筑物理是研究建筑环境中声、光、热等物理现象及其规律,论述如何利用建筑规划和

建筑设计中的合理措施,使建筑满足使用功能的要求,为人们的生活和工作创造适宜的物理环境的科学。建筑物理的主要内容可概括为建筑热工学、建筑光学和建筑声学三大部分。

建筑热工学着重介绍建筑热工学基本原理,论述如何通过建筑规划和设计上的相应措施,有效地防护或利用室内外热湿作用,合理地解决房屋的保温、隔热、防潮、节能等问题,以创造良好的室内热环境并提高围护结构的耐久性。建筑热环境研究人在建筑空间中的热舒适问题,以便采取有效措施满足人们的热舒适要求。建筑热环境分为室内热环境和室外热环境。属于室外的环境因素有太阳辐射、空气温度、空气湿度、风、雨、雪等,一般统称为“室外热湿作用”。属于室内的环境因素如室内空气温度、湿度、生产和生活散发的热量与水分等,则称为“室内热湿作用”。只有充分发挥各种建筑措施的作用,再配备一些必不可少的设备,才能做出技术上和经济上都合理的热工设计。

建筑光学主要研究光的基本特性、各种采光窗的采光性能、采光设计、人工光源和灯具的光学特性、照明设计的基本方法和计算方法等。人类有80%的信息是由视觉器官获得的,良好的光环境是保证人们正常工作、学习和生活的必要条件,它对劳动生产率的提高和视力健康都有直接影响。

建筑声学研究如何控制、处理室内外声环境,主要解决噪声控制和室内音质设计两方面问题。人们总是生活在一定的声环境中,对需要听的声音,对其音质有多方面的要求,对不需要听的声音,则希望尽可能低,以减少其干扰。

第一篇 建筑热工学

第一章 建筑热工学基本知识

第一节 围护结构传热的基本方式

一、建筑中的传热现象及热工对策

建筑围护结构的作用之一就是防热御寒，使室内形成舒适的热环境。冬夏两季，热量通过围护结构的传递方式不同；冬季，热量由室内流向室外；夏季，白天热量由室外流向室内，夜间热量由室内流向室外。因此，围护结构冬季的热工对策与夏季不同，在冬季，要求围护结构具有较好的保温性能，而夏季不仅要求围护结构隔热好，还要求夜间散热快。

建筑围护结构的热工设计应根据建筑物室内外的热量传递情况、传热部位以及建筑结构形式，结合当地室外气候特征，采取不同的措施和处理方法。

二、热量传递的基本方式

自然界中，只要有温差，就会有热量的传递。热量总是从高温物体传至低温物体，或从物体的高温部位传至低温部位。热量的传递方式有导热、对流和辐射三种。

（一）导热

导热是指由于同一物体内部各部分温度不同、或温度不同的物体直接接触时，材料内部发生的热量转移过程。单纯的导热过程只有在密实的固体中才会发生。通过围护结构实体材料的热量传递过程，可作为导热过程来考虑。

物体内部或空间中各点的温度是空间和时间的函数，各点在某一时刻的温度分布叫做该物体或该空间的温度场。如果温度场不随时间变化，则叫做稳定温度场，由此产生的导热叫做稳定导热；如果温度随时间的变化而变化，则叫不稳定温度场，由此产生的导热叫不稳定导热。

在温度场中，连接温度相同的点便形成了等温面。只有在不同等温面上的点之间才有热量传递。

在建筑热工学中，遇到最多的是平壁的导热。如图 1-1 所示的单层匀质平壁，其宽度与高度的尺寸比厚度大得多，假设平壁内外表面的温度分别为 θ_i 和 θ_e ，均不随时间变化，而且假定 $\theta_i > \theta_e$ 。实践证明，此时通过壁体的热量与壁面之间的温度差、传热面积和传热时间成正比，与壁体的厚度成反比，即

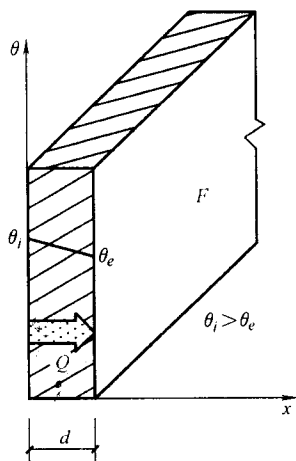


图 1-1 单层匀质平壁的导热

$$Q = \frac{\lambda}{d}(\theta_i - \theta_e)F\tau \quad (1-1)$$

式中 Q ——总导热量 kJ 或 (W·h);
 λ ——热导率 [W/(m·K)], 是由材料性质决定的比例系数;
 θ_i ——平壁内表面的温度 (°C);
 θ_e ——平壁外表面的温度 (°C), 对温度差, 1°C = 1K;
 d ——平壁厚度 (m);
 F ——垂直于热量传递方向的平壁表面积 (m²);
 τ ——导热进行的时间 (h)。

热导率 λ 反映了材料的导热能力, 其数值为在稳定传热的情况下, 当材料层单位厚度内的温差为 1°C 时, 在 1h 内通过 1m² 表面积的热量。不同状态物质的热导率值相差很大。气体的热导率最小, 其数值约在 0.006 ~ 0.6W/(m·K) 之间, 空气在常温、常压下的热导率为 0.029W/(m·K), 所以静止不流动的空气具有很好的保温能力; 液体的热导率次之, 约为 0.07 ~ 0.7W/(m·K), 水在常温下, 热导率为 0.58W/(m·K), 约为空气的 20 倍; 金属的热导率最大, 约为 2.2 ~ 420W/(m·K); 非金属材料, 如绝大多数建筑材料的热导率介于 0.03 ~ 3W/(m·K) 之间。工程上常把热导率 λ 值小于 0.25W/(m·K) 的材料称为绝热材料, 如矿棉、泡沫塑料、珍珠岩、蛭石等。常用建筑材料的热导率见附录 A。

如果用 q 表示单位时间内通过单位面积的热量 (称为面积热流量), 则由式 (1-1) 有

$$q = \frac{\lambda}{d}(\theta_i - \theta_e) \quad (1-2)$$

也可写作

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{\frac{d}{\lambda}} = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R} \quad (1-3)$$

式中 q ——平壁的面积热流量 (W/m²);

R ——热阻[⊖] (m²·K/W), $R = d/\lambda$ 。

热阻 R 反映了热量通过平壁时遇到的阻力, 是平壁抵抗热量通过的能力。在同样的温差条件下, 热阻越大, 通过材料层的热量就越少。要想增加热阻, 可以加大平壁的厚度, 或选用热导率 λ 值小的材料。

(二) 对流

对流是指依靠流体的宏观流动, 把热量由一处传递到另一处的现象。工程上大量遇到的是流体流过一个固体壁面时发生的热量交换过程, 称为表面换热或对流换热。

对流按产生原因可分为自然对流和受迫对流两种。自然对流是指本来温度相同的流体或流体与相邻的固体表面, 因其中某一部分受热或遇冷产生温差, 形成对流运动而传递热能; 受迫对流是指因外力作用, 如风力、水泵、风机等的扰动, 迫使流体产生对流。自然对流的面积热流量主要取决于流体局部受热或受冷时所产生的温差, 而受迫对流主要取决于外界扰动的大小。

⊖ 在热学中, 这个量称为热绝缘系数, 符号为 M 。

流体与固体表面的对流传热过程可用牛顿公式进行计算：

$$q_c = \alpha_c (t - \theta) \quad (1-4)$$

式中 q_c ——对流传热的面积热流量 (W/m^2)；

α_c ——表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]，即当固体壁面与流体主体部分的温差为 1°C (即 K) 时，单位时间通过单位面积的传热量；

t ——流体主体部分温度 ($^\circ\text{C}$)；

θ ——固体壁面温度 ($^\circ\text{C}$)。

计算对流传热的面积热流量，也就是如何确定表面传热系数 α_c 的问题。式 (1-4) 实际上把一切影响对流传热面积热流量的因素都归结到 α_c 中去了。由于各种因素的影响，表面传热系数常用如下的经验公式进行计算。

1. 自然对流 (围护结构内表面)

垂直表面 $\alpha_c = 2.0 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-5)$

水平表面 (热量流动方向由下而上) $\alpha_c = 2.5 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-6)$

水平表面 (热量流动方向由上而下) $\alpha_c = 1.3 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-7)$

式中 Δt ——壁面与室内空气的温度差 ($^\circ\text{C}$)。

2. 受迫对流

内表面 $\alpha_c = 2 + 3.6v \quad (1-8)$

外表面 $\alpha_c = 2 + 3.6v$ (冬天) $(1-9)$

$\alpha_c = 5 + 3.6v$ (夏天) $(1-10)$

式中 v ——气流速度 (m/s)。

(三) 辐射

任何物体只要热力学温度高于 0K ，表面就会不停地向四周发射电磁波，同时又不断地吸收其他物体投射来的电磁波。如果这种辐射的波长范围为 $0.4 \sim 40\mu\text{m}$ ，就会有明显的热效应。这种辐射与吸收的过程就造成了以辐射形式进行的物体间的能量转移——辐射传热。

辐射传热不需要物质间相互接触，也不需要任何中间媒介。

当物体表面受到辐射强度为 I_0 的辐射时，如反射的辐射强度为 I_ρ ，被吸收的辐射强度为 I_a ，透过物体从另一侧传出去的辐射强度为 I_τ (如透过玻璃)。据能量守恒定律有

$$I_0 = I_\rho + I_a + I_\tau$$

若等式两端同时除以 I_0 ，则

$$\frac{I_\rho}{I_0} + \frac{I_a}{I_0} + \frac{I_\tau}{I_0} = \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1-11)$$

式中 ρ ——物体对辐射热的光谱反射比， $\rho = I_\rho/I_0$ ；

α ——物体对辐射热的光谱吸收比， $\alpha = I_a/I_0$ ；

τ ——物体对辐射热的光谱透射比， $\tau = I_\tau/I_0$ 。

物体对不同波长的外来辐射的吸收、反射及透射的性能是不同的。凡能将外来辐射全部反射 ($\rho = 1$) 的物体称为绝对白体，能全部吸收 ($\alpha = 1$) 的称为全辐射体 (也可称为黑体)，能全部透过 ($\tau = 1$) 的则称为绝对透明体或透热体。在自然界中没有绝对全辐射体、

绝对白体和绝对透明体。

物体对外辐射热能的能力用辐射照度来表示。单位时间内在单位面积上物体辐射的波长从 $0 \sim \infty$ 范围的总能量，称作物体的全辐射照度，用符号 E 表示，单位为 W/m^2 。

全辐射体不但能吸收所有的外来辐射能，也能向外发射各种波长的热辐射，其辐射能力最强。全辐射体辐射遵守斯蒂芬-波尔兹曼定律：

$$E_b = C_b \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \quad (1-12)$$

式中 T_b ——全辐射体的热力学温度 (K)；

C_b ——全辐射体的辐射系数， $C_b = 5.68 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

普通建筑材料的辐射能力都小于全辐射体，但它们发射的辐射光谱与同温度全辐射体发射的相似，只是强度小一些，所以在工程上统称为灰体。灰体的全辐射照度 E 也可按斯蒂芬-波尔兹曼定律来计算，即

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-13)$$

式中 T ——灰体的热力学温度 (K)；

C ——灰体的辐射系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]。

物体的辐射系数表征物体向外发射辐射能的能力，它决定于物体表层的化学性质、光洁度及温度等因素，其数值为 $0 \sim 5.68 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。把灰体的全辐射照度与同温度下全辐射体的全辐射照度相比得到的数值叫做黑度，用 ϵ 来表示，即

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{C}{C_b} \quad (1-14)$$

黑度 ϵ 表明灰体的辐射照度接近全辐射体的程度。根据希荷夫定律，在一定温度下，物体对辐射热的光谱吸收比 α 在数值上与其黑度 ϵ 是相等的。因而材料辐射能力愈大，它对外来辐射的吸收能力亦愈大；反之，辐射能力愈小，则吸收能力亦愈小。物体表面的黑度 ϵ 并不等于它对太阳辐射热的光谱吸收比 α_s ，因为太阳的表面温度比普通物体的表面温度高得多。

物体对不同波长外来辐射的反射能力也是不同的，白色表面对可见光的反射能力最强，对于长波热辐射，其反射能力则与黑色表面相差极小。至于磨光的表面，则不论其颜色如何，对长波辐射的反射能力都很强。图 1-2 为不同表面对辐射热的光谱反射比图线。

玻璃与一般建筑材料不同，对于可见光，它是透明体，但对于红外线，却几乎是不透明体。因此，用普通玻璃制作的温室，能引进大量的太阳辐射热而阻止室内的长波辐射向外透射，产生所谓的“温室效应”。建筑设计中可利用“温室效应”应用无污染的太阳能。

表 1-1 列出了一些材料的辐射系数 C 、黑度 ϵ 和

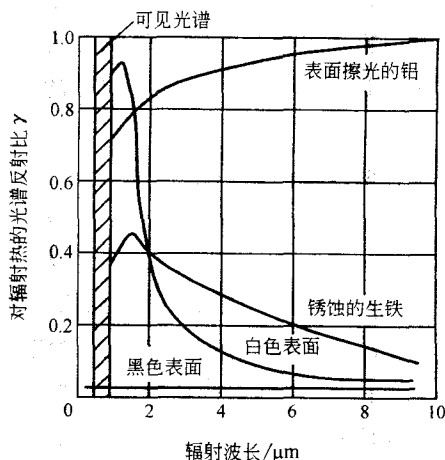


图 1-2 表面对辐射热的光谱反射比

对太阳辐射热的光谱吸收比 α_s 值。

表 1-1 一些材料的 C 、 ϵ 及 α_s 值

序号	材 料	ϵ (10 ~ 40°C)	$C = \epsilon C_b$	α_s
1	全辐射体	1.00	5.68	1.00
2	开在大空腔上的小孔	0.97 ~ 0.99	5.50 ~ 5.62	0.97 ~ 0.99
3	黑色非金属表面(如沥青、纸等)	0.90 ~ 0.98	5.11 ~ 5.50	0.85 ~ 0.98
4	红砖、红瓦、混凝土、深色油漆	0.85 ~ 0.95	4.83 ~ 5.40	0.65 ~ 0.80
5	黄色的砖、石、耐火砖等	0.85 ~ 0.95	4.83 ~ 5.40	0.50 ~ 0.70
6	白色或淡奶油色砖、油漆、粉刷涂料	0.85 ~ 0.95	4.83 ~ 5.40	0.30 ~ 0.50
7	窗玻璃	0.90 ~ 0.95	5.11 ~ 5.40	大部分透过
8	光亮的铝粉漆	0.40 ~ 0.60	2.27 ~ 3.40	0.30 ~ 0.50
9	铜、铝、镀锌铁皮、研磨铁板	0.20 ~ 0.30	1.14 ~ 1.70	0.40 ~ 0.65
10	研磨的黄铜、纯铜	0.02 ~ 0.05	0.11 ~ 0.28	0.30 ~ 0.50
11	磨光的铝、镀锡铁皮、镍铬板	0.02 ~ 0.04	0.11 ~ 0.23	0.10 ~ 0.40

实际上,建筑物的传热大多是辐射、对流和导热三种方式综合作用的结果。图 1-3 为屋顶被太阳照射时的传热情况,图 1-4 为供暖室的热交换过程。

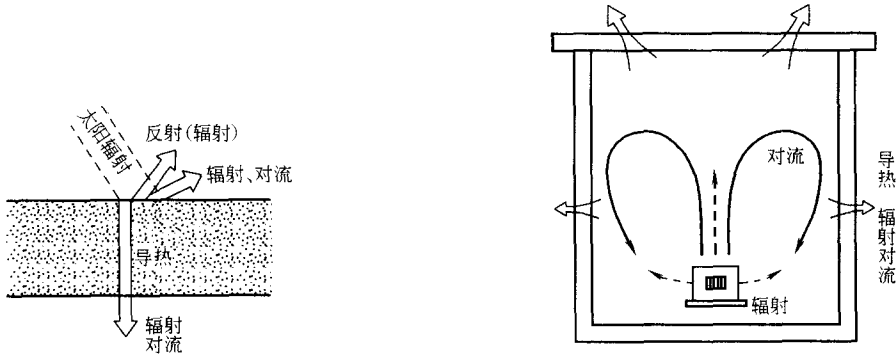


图 1-3 屋顶被太阳照射时的情况

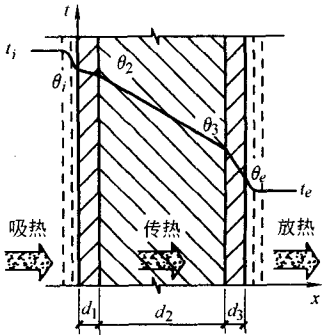
图 1-4 供暖室的热交换过程

第二节 围护结构的稳定传热过程

围护结构传热的计算模型可分为稳定传热和周期性不稳定传热两种。本节重点讲述建筑围护结构主体部分的一维稳定传热。

一、围护结构一维稳定传热的基本规律

稳定传热是最简单和最基本的传热过程,由于计算方便,建筑热工设计中常采用此种模型进行估算。如果围护结构的宽度与高度的尺寸比厚度大得多,则通过平壁的热量流动可认为只有沿厚度一个方向,这就是一维稳定传热。一维稳定传热具有两个主要特征;一是通过平壁的面积热流量 q 处处相同;二是同一材质的平壁内部各界面间温度分布呈直线关系,即温度随距离的变化规律为直线。



建筑围护结构通常可简化为多层平壁。图 1-5 为三层平壁 图 1-5 多层平壁的稳定传热过程

的稳定传热过程。

1. 内表面吸热

壁体内表面和室内空气表面传热(对流传热)的面积热流量为

$$q_i = \alpha_i(t_i - \theta_i) \quad (1-15)$$

式中 q_i ——内表面传热的面积热流量(W/m^2);

α_i ——内表面的表面传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 。

2. 多层平壁内材料层的导热过程

由式(1-3)可知,由内向外,平壁内各层的面积热流量分别为

$$\text{第一层内:} \quad q_1 = \frac{\theta_i - \theta_2}{\frac{d_1}{\lambda_1}} = \frac{\theta_i - \theta_2}{R_1} \quad (1-16)$$

$$\text{第二层内:} \quad q_2 = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\frac{d_2}{\lambda_2}} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} \quad (1-17)$$

$$\text{第三层内:} \quad q_3 = \frac{\theta_3 - \theta_e}{\frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\theta_3 - \theta_e}{R_3} \quad (1-18)$$

3. 外表面散热

$$q_e = \alpha_e(\theta_e - t_e) \quad (1-19)$$

式中 q_e ——外表面传热的面积热流量(W/m^2);

α_e ——外表面的表面传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 。

因为所讨论的问题属于一维稳定传热过程,传热量 q 应满足

$$q = q_i = q_1 = q_2 = q_3 = q_e \quad (1-20)$$

联立式(1-15)~(1-20),可得

$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (1-21)$$

由式(1-21),推广到多层平壁的稳定传热过程,有

$$q = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{t_i - t_e}{R_i + \sum \frac{d}{\lambda} + R_e} = \frac{t_i - t_e}{R_0} = K_0(t_i - t_e) \quad (1-22)$$

式中 q ——通过平壁的面积热流量(W/m^2);

R_i ——平壁内表面的热阻($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R_i = 1/\alpha_i$,一般按表 1-2 取值;

$\sum d/\lambda$ ——平壁各材料层导热阻之和($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$);

R_e ——平壁外表面的热阻($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R_e = 1/\alpha_e$,一般按表 1-3 取值;

R_0 ——平壁的总热阻($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), $R_0 = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e} = R_i + \sum \frac{d}{\lambda} + R_e$,它表示热量从一侧空间传到另一侧空间时所受到的总阻力;

K_0 ——平壁的总传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,是总热阻 R_0 的倒数,其物理意义是:当 $t_i - t_e = 1\text{K}$ 时,在单位时间内通过平壁单位面积的传热量。

表 1-2 内表面的表面传热系数和热阻

内表面特征	$\alpha_i/[W/(m^2 \cdot K)]$	$R_i/(m^2 \cdot K/W)$
墙、地面、表面平整的顶棚、屋盖或楼板以及带肋的顶棚($h/s \leq 0.3$)	8.72	0.115
有井形突出物的顶棚、屋盖或楼板($h/s > 0.3$)	7.56	0.132

注:表中的 h 为肋高; s 为肋间净距。

表 1-3 外表面的表面传热系数和热阻

外表面状况	$\alpha_e/[W/(m^2 \cdot K)]$	$R_e/(m^2 \cdot K/W)$
与室外空气直接接触的表面	23.26	0.043
不与室外空气直接接触的表面		
阁楼楼板上表面	8.14	0.123
不采暖地下室顶棚下表面	5.82	0.172

在建筑热工设计中,除特殊需要外,围护结构的表面传热系数或热阻一般都直接采用经验数据。由式(1-22)可知,多层平壁的热阻等于各层平壁热阻之和。在室内外温差相同的条件下,热阻 R_0 越大,通过平壁所传递的热量就越少。

二、组合材料层的稳定传热热阻

如图 1-6 所示的组合材料层,平均热阻按下式计算:

$$\overline{R} = \phi \left[\frac{F_0}{\frac{F_1}{R_{0.1}} + \frac{F_2}{R_{0.2}} + \frac{F_3}{R_{0.3}} + \cdots + \frac{F_n}{R_{0.n}}} - (R_i + R_e) \right]$$

(1-23)

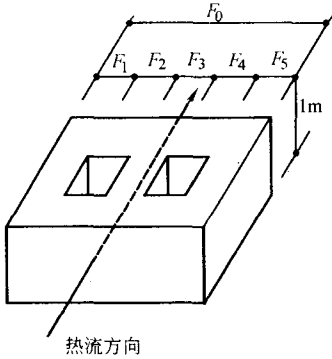


图 1-6 组合材料层

式中 F_0 ——与热量流动方向垂直的总传热面积(m^2);
 $F_1, F_2, \cdots, F_n$ ——按平行于热量流动方向划分的各个传热面积 (m^2);
 $R_{0.1}, R_{0.2}, \cdots, R_{0.n}$ ——各个传热面部位的热阻 [$(m^2 \cdot K) / W$];
 R_i ——内表面热阻, 取 $0.11 (m^2 \cdot K) / W$;
 R_e ——外表面热阻, 取 $0.04 (m^2 \cdot K) / W$;
 ϕ ——修正系数, 按表 1-4 采用。

表 1-4 修正系数 ϕ 值

λ_2/λ_1 或 $(\lambda_2 + \lambda_3) / 2\lambda_1$	0.09 ~ 0.19	0.20 ~ 0.39	0.40 ~ 0.69	0.70 ~ 0.99
ϕ	0.86	0.93	0.96	0.98

三、封闭空气间层的热阻

利用封闭空气间层,可大大增加围护结构的绝热性能。空气间层内的传热过程是一个有限空间内的两个表面之间的热转移过程, 传热强度主要取决于对流及辐射的强度。

1. 封闭空气间层自然对流情况

图 1-7a、b 是竖直的空气间层, 当间层两界面存在温差时, 热表面附近的空气将上升, 冷表面附近的空气则下降, 形成一股上升和下降的气流。图 1-7a 为间层厚度较大的竖向空气间层, 上升气流和下降气流互不干扰, 与开敞空间中沿垂直壁面所产生的自然对流状况相似; 图 1-7b 间层厚度较小, 上升气流和下降气流相互干扰, 形成局部环流, 加强了传热。

图 1-7c、d 为水平空气间层，图 1-7c 中，高温面在上方，间层内可视为不存在气体对流；而图 1-7d 中，高温面在下方，形成强烈的自然对流。

2. 封闭空气间层的辐射传热

间层表面材料的辐射系数大小和间层平均温度的高低直接影响间层的辐射传热量。对于普通的竖直空气间层，在单位温差下，辐射传热量占总传热量的 70% 以上，因此，要提高空气间层的热阻，首先要设法减少辐射传热量。将空气间层布置在围护结构的低温一侧，降低间层的平均温度，可减少辐射传热量，但效果不显著。最有效的措施是在间层壁面涂贴辐射系数小的反射材料，目前在建筑中采用的主要是铝箔。根据铝箔的成

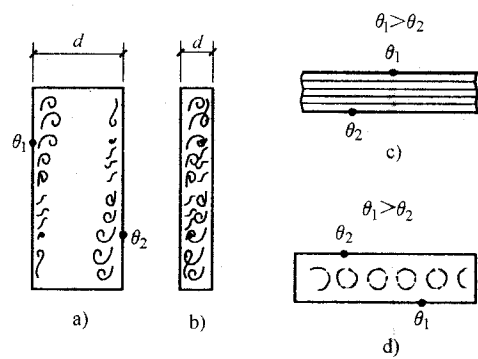


图 1-7 不同封闭空气间层中的自然对流情况
a)、b) 垂直空气间层 c)、d) 水平空气间层

分和加工质量的不同，它的辐射系数介于 $0.29 \sim 1.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 之间，而一般建筑材料的辐射系数是 $4.65 \sim 5.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。铝箔应设在高温一侧，否则，可能由于低温一侧的温度进一步降低而造成间层内部结露，使铝箔和围护结构的强度遭到破坏。

表 1-5 为工程设计中所采用的空气间层热阻 R_{ag} 值。

表 1-5 空气间层的热阻 R_{ag} [单位: $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$]

位置、热量流动 状况及材料特性		冬季							夏季						
		间层厚度/mm							间层厚度/mm						
		5	10	20	30	40	50	> 60	5	10	20	30	40	50	> 60
一般 空气 间层	热量向下流动 (水平、倾斜)	0.10	0.14	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.09	0.12	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15
	热量向上流动 (水平、倾斜)	0.10	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.09	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	垂直空气间层	0.10	0.14	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18	0.09	0.12	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15
单面 铝箔 空气 间层	热量向下流动 (水平、倾斜)	0.16	0.28	0.43	0.51	0.57	0.60	0.64	0.15	0.25	0.37	0.44	0.48	0.52	0.54
	热量向上流动 (水平、倾斜)	0.16	0.26	0.35	0.40	0.42	0.42	0.43	0.14	0.20	0.28	0.29	0.30	0.30	0.28
	垂直空气间层	0.16	0.26	0.39	0.44	0.47	0.49	0.50	0.15	0.22	0.31	0.34	0.36	0.37	0.37
双面 铝箔 空气 间层	热量向下流动 (水平、倾斜)	0.18	0.34	0.56	0.71	0.84	0.94	1.01	0.16	0.30	0.49	0.63	0.73	0.81	0.86
	热量向上流动 (水平、倾斜)	0.17	0.29	0.45	0.52	0.55	0.56	0.57	0.15	0.25	0.34	0.37	0.38	0.38	0.35
	垂直空气间层	0.18	0.31	0.49	0.59	0.65	0.69	0.71	0.15	0.27	0.39	0.46	0.49	0.50	0.50

四、一维稳定传热时平壁内部的温度分布

仍以图 1-5 的三层平壁为例，通过平壁内表面的面积热流量与通过平壁各部分的热流量相等。由 $q = q_i$ 有

$$\frac{t_i - t_e}{R_0} = \frac{t_i - \theta_i}{R_i}$$

所以壁体的内表面的温度为

$$\theta_i = t_i - \frac{R_i}{R_0}(t_i - t_e) \quad (1-24)$$

由 $q = q_1 = q_2$, 有

$$\frac{t_i - t_e}{R_0} = \frac{\theta_i - \theta_2}{R_1}$$

$$\frac{t_i - t_e}{R_0} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2}$$

将式 (1-24) 中的 θ_i 代入以上二式可得

$$\theta_2 = t_i - \frac{R_i + R_1}{R_0}(t_i - t_e)$$

$$\theta_3 = t_i - \frac{R_i + R_1 + R_2}{R_0}(t_i - t_e)$$

依此类推, 多层平壁内任一层的内表面温度 θ_m 为

$$\theta_m = t_i - \frac{R_i + \sum_{j=1}^{m-1} R_j}{R_0}(t_i - t_e) \quad (1-25)$$

式中, $m = 1, 2, 3, \dots, n$; $\sum R_j$ 是从第 1 层到第 $m-1$ 层的热阻之和, 层次编号是顺着热量流动的方向。

由 $q = q_e$, 有

$$\frac{t_i - t_e}{R_0} = \frac{\theta_e - t_e}{R_e}$$

得出外表面的温度为

$$\theta_e = t_e + \frac{R_e}{R_0}(t_i - t_e) \quad (1-26)$$

可见, 在稳定传热的条件下, 每一材料层内的温度分布是一直线, 在多层平壁中成一条连续的折线, 如图 1-5 所示。材料层内的温度降落程度与各层的热阻成正比, 材料层的热阻愈大, 在该层内的温度降落愈大。

【例 1-1】 已知室内气温为 15°C , 室外气温为 -10°C , 试计算通过图 1-8 所示的钢筋混凝土预制板屋顶和砖墙的面积热流量和内部温度分布。 $R_i = 0.11\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $R_e = 0.04\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

【解】 已知 $t_i = 15^\circ\text{C}$, $t_e = -10^\circ\text{C}$, $R_i = 0.11\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $R_e = 0.04\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。由附录 A 查得; 砖砌体的 $\lambda = 0.81\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 石灰粉刷的 $\lambda = 0.81\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 钢筋混凝土的 $\lambda = 1.74\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 水泥砂浆的 $\lambda = 0.93\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 油毡屋面的 $\lambda = 0.17\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

钢筋混凝土屋顶的热阻为

$$R_0 = \left(0.11 + \frac{0.03}{1.74} + \frac{0.02}{0.93} + \frac{0.01}{0.17} + 0.04 \right) \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} = 0.248\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

砖墙的传热阻为

$$R_0 = \left(0.11 + \frac{0.02}{0.81} + \frac{0.24}{0.81} + 0.04 \right) \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} = 0.471\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$