

一级注册建筑师考试辅导教材

含 习 题

第三分册

环境控制与建筑设备

北京市注册建筑师管理委员会 编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

一级注册建筑师考试辅导教材. 含习题. 第三分册/
北京市注册建筑师管理委员会编. —北京: 中国建筑工
业出版社, 2001. 6

ISBN 7-112-04621-1

I. 一... II. 北... III. 建筑师—资格考核—教材
IV. TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 20446 号

一级注册建筑师考试辅导教材

含 习 题

第 三 分 册

环境控制与建筑设备

北京市注册建筑师管理委员会 编

中国建筑工业出版社 出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{3}{4}$ 字数: 258 千字

2001 年 6 月第一版 2001 年 6 月第二次印刷

印数: 6,001—10,000 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-112-04621-1

TU · 4138 (10071)

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)

前 言

建设部和人事部决定自1995年起实施注册建筑师执业资格考试制度。

为了帮助建筑师们准备考试，**北京市注册建筑师管理委员会**委托**北京设科技术开发中心**举办一、二级注册建筑师考试辅导班。辅导班的教师分别是来自北京市建筑设计研究院、北京建筑工程学院、北京工业大学、中国人民大学、清华大学建筑设计院和原北京市城市规划管理局的高级工程师和教授。教师们以考试大纲为依据，以现行规范、标准为基础，为学员们编写了考试辅导教材。教材的目的是为了指导复习，因此力求简明扼要，联系实际，着重对规范的理解应用，并注意突出重点概念。

本教材是在**北京市注册建筑师管理委员会**的组织下，严格按考试大纲编写的，在五年教学实践中不断加以改进，自1995年至2000年，北京地区（包括部分外地学员）参加辅导班的考生达七千多人次，深受学员们的欢迎。现在修订后出版，以满足更多应试考生复习的需要。本教材各章编写人员如下：耿长孚第一、二章，张思浩第三章，任朝钧第四章，姜中光第五章，王琪明第六章，翁如璧第七章，钱民刚第八章，曾俊第九、十一、十二章及第七章结构部分，林焕枢第十章，汪琪美第十三章，李德富第十四、十五章，吕鉴第十六章，贾昭凯第十七章及第七章空调部分，冯玲第十八章及第七章电气部分，雷钰燕第十九章，杨金铎第二十章，周惠珍第二十一章，刘民强第二十二章，李魁元第二十三章。

为方便考生复习，本教材分四个分册出版。第一分册包括第一至第七章，内容为前期、场地与建筑设计部分；第二分册包括第八至第十二章，为建筑结构部分；第三分册包括第十三至第十八章，为环境控制与建筑设备部分；第四分册包括第十九至第二十三章，为建筑材料、构造、经济、施工与设计业务管理部分。

考生在复习本教材时，应结合阅读相应的标准、规范。每章后均附有参考习题，可作为考生检验复习效果和准备考试的参考。

北京市注册建筑师管理委员会

2001年5月

第十三章 建筑热工与节能

第一节 热 环 境

一、室外热环境（室外气候）

室外热环境是指由太阳辐射，大气温度，空气湿度，风、降水等因素综合组成的一种热环境。建筑物所在地的室外热环境通过外围护结构将直接影响室内环境，为使所设计的建筑能创造良好的室内热环境，必须了解当地室外热环境的变化规律及特征，以此作为建筑热工设计的依据。与室外热环境密切有关的主要因素如下：

（一）太阳辐射

1. 太阳辐射能是地球上热量的基本来源，是决定室外热环境的主要因素。
2. 太阳辐射的分类。到达地球表面太阳辐射分为两个部分，一部分是直射辐射，另一部分是散射辐射。
3. 影响太阳辐射照度的因素。大气中射程的长短、太阳高度角、海拔高度、大气质量。
4. 太阳光谱。太阳辐射能量主要分布在紫外线、可见光和红外线区域，其中 97.8% 是短波辐射。
5. 日照百分率

$$\text{日照百分率} = \frac{\text{实际日照时数}}{\text{可照时数}} \times 100\%$$

（二）大气温度

1. 气温。指距地面 1.5m 处百叶箱内的空气温度。
2. 变化规律
 - （1）年变化规律。由地球围绕太阳公转引起，形成一年四季气温变化，北半球最高气温出现在 7 月（大陆）或 8 月（沿海、岛屿），最低气温出现在 1 月或 2 月。
 - （2）日变化规律。由地球自转引起。日最低气温出现在 6：00～7：00 左右。日最高气温出现在 14：00 左右。

（三）空气湿度

1. 湿度。空气中水蒸汽的含量。可用绝对湿度或相对湿度表示，通常使用相对湿度表示空气的湿度。
2. 变化规律
 - （1）年变化规律——最热月相对湿度最小，最冷月相对湿度最大，季风区例外。
 - （2）日变化规律——晴天时，日相对湿度最大值出现在 4：00～5：00，日相对湿度最小值出现在 13：00～15：00。

（四）风

1. 风——指由大气压力差所引起的大气水平方向的运动。

2. 风的类型

(1) 季候风(大气环流)——由于太阳辐射热在地球上照射不均匀,使得赤道和两极之间出现温差,从而引起大气在赤道和两极之间产生活动,即为大气环流。

(2) 地方风——局部地区受热不均引起的小范围内的大气流动,如海陆风、山谷风、庭院风等。

3. 风的特性

(1) 风向——风吹来的地平方向为风向,通常用风向风玫瑰图表示。

(2) 风速——单位时间内风前进的距离,单位为 m/s,也可用风玫瑰图表示。

(五) 降水

1. 降水——从大地蒸发出来的水蒸汽进入大气层,经过凝结后又降到地面上的液态或固态的水分。如雨、雪、雹都属降水现象。

2. 降水的性质

(1) 降水量——降落到地面的雨、雪、雹等融化后,未经蒸发或渗透流失而累积在水平面上的水层厚度。单位为 mm。

(2) 降水强度——单位时间(24 小时)内的降水量,单位: mm/d。

根据降水强度,可将降水划分如下:

小雨	<10	中雨	10~25
大雨	25~50	暴雨	50~100

二、中国建筑热工设计分区

我国幅员辽阔,地形复杂,各地由于纬度、地势和地理条件的不同,气候差异悬殊。不同的气候条件对房屋建筑提出的要求不同,为使建筑能够充分地利用和适应本地的气候条件,将我国各地气候作如下划分(表 13-1),在进行设计时,应满足不同的热工设计要求。

中国建筑热工设计分区

表 13-1

气候分区	主要指标		辅助指标		热工设计要求
	最冷月平均温度(℃)	最热月平均温度(℃)	日平均气温 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数(天)	日平均气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数(天)	
严寒地区	≤ -10		≥ 145		必须充分满足冬季保温要求,一般可不考虑夏季防热
寒冷地区	$-10\sim 0$		90~145		应满足冬季保温要求,部分地区兼顾夏季防热
夏热冬冷地区	0~10	25~30	0~90	40~110	必须充分满足夏季防热要求,适当兼顾冬季保温
夏热冬暖地区	> 10	25~29		100~200	必须满足夏季防热要求,一般可不考虑冬季保温
温和地区	0~13	18~25			部分地区应注意冬季保温,一般可不考虑夏季防热

热工设计分区的地理划分可从《民用建筑热工设计规范》和《建筑设计资料集Ⅰ》中得到更加明确的了解。

三、室内热环境（室内气候）

室内热环境是指由室内空气温度、空气湿度、室内风速及环境平均辐射温度（室内各壁面温度的当量温度）等因素综合组成的一种室内热环境。

（一）决定室内热环境的物理客观因素

决定室内热环境的物理客观因素有室内的空气温度、空气湿度、室内风速及壁面的平均辐射温度。室内热环境的好坏通常受到室外热环境、室内热环境设备（如空调器、加热器等）、室内其他设备（如灯具、家用电器）和人体活动的影响。

（二）对室内热环境的要求

房间的使用性质不同，对其内部的热环境要求也不相同。以满足人体生理卫生需要为主的房间（如居住建筑、公共建筑和一般生产房间）其室内热环境是要保证人的正常生活和工作，以维护人体的健康。

1. 人体的热感觉

室内热环境对人体的影响主要表现在人的冷热感。人体的冷热感取决于人体新陈代谢产生的热量和人体向周围环境散热量之间的平衡关系，人体热平衡方程表示如下：

$$\Delta q = q_m - q_w \pm q_c \pm q_r \quad (13-1)$$

式中 q_m ——人体产热量，主要取决于人体的新陈代谢率及对外作机械功的效率；

q_c ——人体与周围空气的对流换热量；

q_r ——人体与环境间的辐射换热量；

q_w ——人体蒸发散热量。

当 $\Delta q = 0$ ，体温恒定不变； $\Delta q > 0$ ，体温上升； $\Delta q < 0$ ，体温下降。

2. 热舒适

热舒适是指人对环境的冷热程度感觉满意，不因冷或热感到不舒适。满足热舒适的条件是：

（1）必要条件。 $\Delta q = 0$ ；

（2）充分条件。皮肤温度处于舒适的温度范围内，汗液蒸发率处于舒适的蒸发范围内。

室内热气候可分为舒适、可以忍受和不能忍受三种情况，只有采用充分空调设备的房间才能实现舒适的要求，对大多数建筑而言，应以保证人体健康不受损害为准，确定对室内热环境的要求，在可能的条件下，尽可能改善室内热环境。

（三）室内热环境的综合评价

由于影响室内热环境的因素较多，很难使用单一指标作为评价的依据。目前比较通用的方法有三种：

1. 有效温度

有效温度 ET (Effective Temperature) 是依据半裸的人与穿夏季薄衫的人在一定条件的环境中所反映的瞬时热感觉作为决定各项因素综合作用的评价标准，是室内气温，相对湿度和空气速度在一定组合下的综合指标。由于该指标使用简单，在对不同的环境和空调方案进行比较时得到了广泛的应用。它的缺陷是没有考虑热辐射变化的影响，在评价环境时有时难免出现一定的偏差，因此后来又出现了新有效温度等指标。

2. 热应力指数

热应力指数 HSI (Heat Strees Index) 是在已知室内气温, 相对湿度, 空气速度, 平均辐射温度和人体新陈代谢产热率的前提下, 根据人体热平衡条件, 先计算在给定环境中人体所需要的蒸发散热量, 然后再计算出在该环境中的最大允许蒸发散热量, 以二者的百分比作为热应力指数。热应力指数全面考虑了热环境四个因素的影响, 比有效温度更为科学。

3. 预测热感指数 PMV

预测热感指数 PMV (Predicted Mean Vote) 是能全面反映室内各气候要素对人体热感觉影响的综合评价方法。

预测热感指数是在丹麦工业大学微气候实验室和美国堪萨斯州立大学环境实验室做了大量试验工作后, 由丹麦学者房格尔教授 (P. O. Fanger) 提出的, 是迄今为止考虑人体热舒适感诸多有关因素最全面的评价指标, 于 20 世纪 80 年代初得到国际标准化组织 ISO 的承认, PMV 指标与评价方法包括预测热感指数 PMV 与预测不满意百分率两方面的内容。它是以房格尔教授的热舒适方程为基础, 导出 PMV 值与影响人体热舒适的 6 个要素之间的定量关系, 即:

$$PMV = f(t_i, \varphi, t_p, u, m, R_{cl}) \quad (13-2)$$

式中 t_i ——室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_p ——平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$;

m ——与人体活动强度有关的新陈代谢率, W/m^2 或 met;

φ ——室内空气相对湿度;

u ——室内空气速度, m/s ;

R_{cl} ——人体衣服热阻, clo。

因此, 在已知室内气温、相对湿度、空气速度、平均辐射温度、人体活动强度与衣着条件下, 可以通过计算 PMV 值预测出多数人对某一热环境的舒适程度的反映, 同时建立起 PMV 指标系统, 将人体的热感觉划分为 7 个等级如下:

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
热	稍暖	暖	舒适	稍凉	凉	冷

由此可根据 PMV 值定量评价室内热环境质量的优劣。

第二节 传热的基本知识

一、传热的基本概念

(一) 温度

温度是表征物体冷热程度的物理量, 温度使用的单位为 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。

(二) 温度场

某一瞬间, 物体内所有各点温度的总计为温度场。温度场是空间与时间的函数, 公式表达为:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (13-3)$$

式中 x, y, z ——某点在温度场的坐标;

τ ——该点温度对应的时间。

温度场可分为以下类型：

1. 稳定温度场。温度场内各点温度不随时间变化。
2. 不稳定温度场。温度场内各点温度随时间发生变化。

在热工设计中，主要涉及的是一维稳定温度场 $t=f(x)$ 和一维不稳定温度场 $t=f(x, \tau)$ 的问题。

二、传热的基本方式

根据传热机理的不同，传热的基本方式分为导热、对流和辐射。

(一) 导热（热传导）

导热指温度不同的物体直接接触且没有相对宏观运动时，仅依靠物质的微观粒子（分子、原子、自由电子等）的热运动进行热传递的现象。

(二) 对流

对流指由流体（液体、气体）中温度不同的各部分相互混合的宏观运动而引起的热传递现象。

由于引起流体流动的动力不同，对流的类型可分为：

1. 自由对流。由温度差形成的对流。
2. 受迫对流。由外力作用形成的对流。受迫对流在传递热量的强度方面要大于自由对流。

(三) 辐射

辐射指物体表面对外发射热射线在空间传递能量的现象。

1. 物体对外来辐射的反射、吸收和透射

(1) 反射系数 r_h 。被反射的辐射能与入射辐射能的比值。

(2) 吸收系数 ρ_h 。被吸收的辐射能与入射辐射能的比值。

(3) 透射系数 τ_h 。被透射的辐射能与入射辐射能的比值。

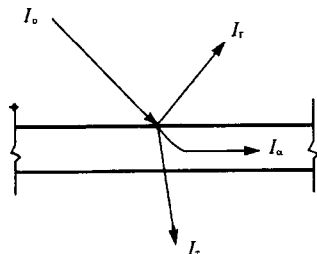


图 13-1 物体对外来辐射的反射、吸收和透射

$$r_h = \frac{I_r}{I_0} \quad (13-4a)$$

$$\rho_h = \frac{I_a}{I_0} \quad (13-4b)$$

$$\tau_h = \frac{I_\tau}{I_0} \quad (13-4c)$$

$$r_h + \rho_h + \tau_h = 1 \quad (13-5)$$

式中 I_0 ——入射的辐射能；

I_a ——被吸收的辐射能；

I_r ——被反射的辐射能；

I_τ ——被透射的辐射能。

2. 白体、黑体和完全透热体

(1) 白体 (绝对白体): 能将外来辐射全部反射的物体, $r_h = 1$ 。

(2) 黑体 (绝对黑体): 能将外来辐射全部吸收的物体, $\rho_h = 1$ 。

(3) 完全透热体: 能将外来辐射全部透过的物体, $\tau_h = 1$ 。

3. 物体表面的辐射本领

(1) 全辐射本领 E (辐射本领, 全辐射力)。在单位时间内、从单位面积上以波长 $0 \sim \infty$ 的全波段向半球空间辐射的总能量, 单位: W/m^2 。

(2) 单色辐射本领 E_λ (单色辐射力)。在单位时间内、从单位面积向半球空间辐射出的某一波长的能量, 单位 $W/(m^2 \cdot \mu m)$ 。

(3) 灰体: 如果一个物体在每一波长下的单色辐射本领与同温度、同波长下黑体的单色辐射本领的比值为一常数, 这个物体称为灰体。

(4) 黑度 ϵ (辐射率)。灰体的辐射本领与同温度下黑体的辐射本领的比值。

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (13-6)$$

4. 辐射本领的计算 (斯蒂芬—波尔兹曼定律)

(1) 黑体的辐射能力 E_b 。

$$E_b = \sigma_b \cdot T_b^4 = C_b \cdot \left(\frac{T_b}{100}\right)^4 \quad (13-7)$$

式中 T_b ——黑体的绝对温度, K。

σ_b ——黑体辐射常数, $5.68 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

C_b ——黑体辐射系数, $5.68 W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

(2) 灰体的辐射能力 E

$$E = \epsilon \cdot \sigma_b \cdot T^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (13-8)$$

式中 T ——灰体的绝对温度, K;

ϵ ——灰体的黑度;

C ——灰体辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

注意, 材料表面对外来辐射的反射、吸收和透射能力与外来辐射的波长有密切的关系。在给定表面温度下, 表面的辐射率 (黑度) 与该表面对来自同温度的投射辐射的吸收系数在数值上相等。

常温下, 一般材料对辐射的吸收系数可取其黑度值, 对来自太阳的辐射, 材料的吸收系数 ρ_s 并不等于物体表面的黑度。

物体对不同波长的外来辐射的反射能力不同, 例如, 对短波辐射, 黑色物体与白色物体的反射能力相差很大, 白色反射能力强, 但对长波辐射, 黑、白物体的反射能力相差极小。

三、通过单层平壁的稳定导热

(一) 热流强度

热流强度: 指在单位时间内通过单位截面积的热流量, 单位为 W/m^2 。定义式为:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \tau} \quad (13-9)$$

式中 Q ——通过的总热流量, J;

τ ——热流通过的时间, s;

F ——热流通过的总截面积, m^2 。

(二) 通过单层平壁的热流强度

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{R} = \frac{\lambda}{d} (\theta_i - \theta_e) \quad (13-10)$$

式中 θ_i ——单层平壁内表面的温度, $^{\circ}\text{C}$;

θ_e ——单层平壁外表面的温度, $^{\circ}\text{C}$;

R ——单层平壁的导热热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

(三) 单层平壁的热阻

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (13-11)$$

式中 d ——单层平壁的厚度, 单位: m。

λ ——材料的导热系数, 单位: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(四) 材料的导热系数

导热系数是表征材料导热能力大小的物理量, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。它的物理意义是, 当材料层厚度为 1m, 材料层两表面的温差为 1K 时, 在 1 秒钟内通过 1m^2 截面积的导热量。

材料的导热系数可查阅有关的建筑材料热工指标表获得, 应该熟悉经常使用的建筑材料的导热系数。

四、表面换热 (表面热转移)

(一) 表面换热

热量在围护结构的内表面和室内空间或在外表面和室外空间进行传递的现象称为表面换热。

表面换热由对流换热和辐射换热两部分组成。

(二) 对流换热

对流换热是指流体与固体壁面在有温差时产生的热传递现象。它是对流和导热综合作用的结果, 如墙体表面与空气间的热交换。

对流换热热流强度 q_c 的计算

$$q_c = \alpha_c (\theta - t) \quad (13-12)$$

式中 α_c ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

t ——流体主体部分温度, K;

θ ——固体壁面温度, K。

在建筑热工中, 对流换热系数主要与气流的情况、结构所处的部位、壁面状况和热流方向有关。

(三) 辐射换热

1. 两灰体表面间的辐射换热量的计算

$$Q_{1-2} = C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \overline{\psi}_{12} \cdot F_1 \quad (13-13a)$$

或

$$Q_{2-1} = C_{21} \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \overline{\psi}_{21} \cdot F_2 \quad (13-13b)$$

式中 Q_{1-2} ——表面 1 传给表面 2 的净辐射换热量, W;

Q_{2-1} ——表面 2 传给表面 1 的净辐射换热量, W;

T_1 、 T_2 ——表面 1、表面 2 的绝对温度, K;

F_1 、 F_2 ——表面 1、表面 2 的表面积, m^2 ;

C_{12} 、 C_{21} ——相当辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

ψ_{12} ——表面 1 对表面 2 的平均角系数;

ψ_{21} ——表面 2 对表面 1 的平均角系数。

2. 辐射换热系数 α_r

$$\alpha_r = C_{12} \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \overline{\psi_{12}} \quad (13-14)$$

(四) 表面换热系数和表面换热阻

1. 表面换热系数

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (13-15)$$

内表面的换热系数使用 α_i 表示, $W/(m^2 \cdot K)$;

外表面的换热系数使用 α_e 表示, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

2. 表面换热阻

$$R = \frac{1}{\alpha} \quad (13-16)$$

内表面的换热阻使用 R_i 表示, $m^2 \cdot K/W$;

外表面的换热阻使用 R_e 表示, $m^2 \cdot K/W$ 。

表面换热系数和表面换热阻可按《民用建筑热工设计规范》中的规定取值。

五、湿空气

(一) 湿空气、未饱和湿空气与饱和湿空气

湿空气是干空气和水蒸汽的混合物。

在温度和压力一定的条件下,一定容积的干空气所能容纳的水蒸汽量是有限度的,湿空气中水蒸汽含量未达到这一限度时叫未饱和湿空气,达到限度时叫饱和湿空气。

(二) 空气湿度

空气湿度是表示空气干湿程度的物理量。在表示空气的湿度时使用以下方式。

1. 绝对湿度 f

绝对湿度是每立方米空气中所含水蒸汽的质量,单位为 g/m^3 。

未饱和湿空气的绝对湿度用 f 表示,饱和湿空气的绝对湿度用 f_{max} 表示,

2. 水蒸汽分压力 p

湿空气中所含水蒸汽所呈现的压力称为水蒸汽分压力,单位为 Pa。

未饱和湿空气的水蒸汽分压力用 P 表示,饱和蒸汽压用 P_s 表示。

标准大气压下,不同温度对应的饱和蒸汽压值可查表取得。

3. 相对湿度 φ

一定温度、一定大气压力下,湿空气的绝对湿度 f 与同温同压下的饱和空气绝对湿度 f_{max} 的百分比称为湿空气的相对湿度。

相对湿度的计算:

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}} \times 100\% \quad (13-17a)$$

$$\varphi = \frac{P}{P_s} \times 100\% \quad (13-17b)$$

式中 f 、 $f_{\max}$ ——湿空气的绝对湿度和同温度下饱和湿空气的绝对湿度, g/m^3 ;

P 、 P_s ——湿空气的水蒸汽分压力和同温度下湿空气的饱和蒸汽压, Pa 。

(三) 露点温度

在不改变水蒸汽含量的前提下, 未饱和湿空气冷却至饱和状态时所对应的温度叫露点温度。露点温度用 t_d 表示。

露点温度可用来判断围护结构内表面是否结露。当围护结构内表面的温度低于露点温度时, 内表面将产生结露。

第三节 建筑围护结构的传热原理及计算

一、平壁的稳定传热

在稳定温度场中所进行的传热过程称为稳定传热。

稳定传热具有以下特点:

1. 温度场内各点温度不随时间改变;
2. 通过平壁内各点的热流强度为常数。

(一) 围护结构的传热过程

通过围护结构的传热要经过表面吸热、结构传热和表面放热三个过程, 表面吸热和表面放热统称为表面换热。

(二) 通过多层平壁稳定传热

稳定传热条件下, 通过多层平壁热流强度的计算:

$$q = \frac{t_i - t_e}{R_0} \quad (13-18)$$

式中 t_i ——室内温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_e ——室外温度, $^{\circ}\text{C}$;

R_0 ——围护结构的总热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

(三) 总热阻与总传热系数的计算

1. 总热阻 R_0

总热阻是热量从平壁一侧空间传至另一侧空间时所受到的总阻力, 它是衡量围护结构在稳定传热条件下的一个重要的热工性能指标, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

$$R_0 = R_i + \sum_{j=1}^n R_j + R_e \quad (13-19)$$

式中 R_j ——围护结构第 j 层材料的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

R_i ——内表面的换热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (可查规范表);

R_e ——外表面的换热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (可查规范表);

n ——多层平壁的材料层数。

2. 总传热系数 K_0 。

总传热系数为当围护结构两侧温差为 1K (1°C) 时, 在单位时间内、通过单位面积的传热量。用总传热系数也能说明围护结构在稳定传热条件下的热工性能, 单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$$K_0 = \frac{1}{R_0} \quad (13-20)$$

(四) 不同构造热阻的计算

1. 多种均质材料层的热阻

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (13-21)$$

式中 d_i ——第 i 层材料层的厚度, m ;

λ_i ——第 i 层材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2. 非均质材料层 (组合壁) 的热阻

(1) 非均质材料层 (组合壁)

由两种以上材料构成的同一材料层称为非均质材料层。

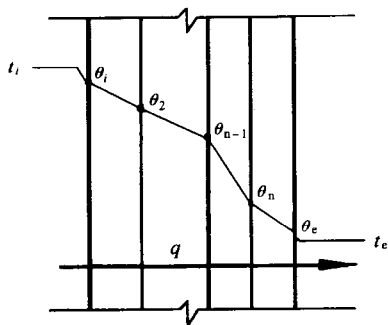


图 13-2 通过多层平壁稳定传热

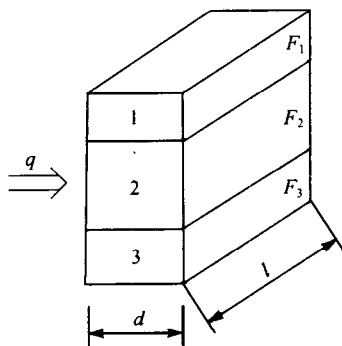


图 13-3 非均质材料层 (组合壁) 的导热

(2) 非均质材料层 (组合壁) 的平均热阻计算

$$\bar{R} = \left[\frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{\frac{F_1}{R_{0.1}} + \frac{F_2}{R_{0.2}} + \dots + \frac{F_n}{R_{0.n}}} - (R_i + R_e) \right] \varphi \quad (13-22)$$

式中 $F_1, F_2, \dots, F_n$ ——组成该材料层各部分垂直于热流方向的截面积, m^2 ;

$R_{0.1}, R_{0.2}, \dots, R_{0.n}$ ——组成该材料层各部分材料的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

d ——组合材料层的厚度, m ;

φ ——修正系数, 可查《民用建筑热工设计规范》确定。

3. 封闭空气间层的热阻

(1) 封闭空气间层的传热机理

封闭空气间层的传热过程与固体材料层内的不同, 它实际上是在一个有限空间内的两

个表面之间的热转移过程，包括对流换热和辐射换热，而非纯导热过程，所以封闭空气间层的热阻与间层厚度之间不存在成比例的增长关系。

(2) 影响封闭空气间层热阻的因素

封闭空气间层的热阻与间层表面温度、间层厚度、间层放置位置、热流方向及间层表面材料的辐射系数有关。

封闭空气间层的热阻值通常可查《民用建筑热工设计规范》确定。

(五) 平壁内、外表面及内部各材料层界面温度的计算

$$\theta_m = t_i - \frac{R_i + \sum_{j=1}^{m-1} R_j}{R_0} \cdot (t_i - t_e) \quad (13-23)$$

式中 θ_m ——围护结构第 m 层材料内表面的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

材料层次的排列从内向外， $m=1, 2, \dots, n-1, n$ 。

二、周期性不稳定传热

(一) 周期性不稳定传热

当外界热作用（气温和太阳辐射）随时间呈现周期性变化时，围护结构进行的传热过程为周期性不稳定传热。

(二) 简谐热作用

简谐热作用指当温度随时间的正弦（或余弦）函数作规则变化时围护结构所受到的热作用。一般用余弦函数表示：

$$t_{\tau} = \bar{t} + A_t \cos\left(\frac{360}{Z}\tau - \phi\right) = \bar{t} + A_t \cos(\omega\tau - \phi) \quad (13-24)$$

式中 t_{τ} ——在 τ 时刻的介质温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{t}$ ——在一个周期内的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

A_t ——温度波的振幅， $^{\circ}\text{C}$ ；

Z ——温度波的周期，h；

ϕ ——温度波的初相位，deg；

τ ——以某一指定时刻起算的计算时间，h；

ω ——温度波的角速度，deg/h。

(三) 相对温度

相对温度指相对于某一基准温度的温度，单位为 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。当基准温度为 $\bar{t}$ 时，相对温度表示为：

$$\Theta_{\tau} = A_t \cos\left(\frac{360}{Z}\tau - \phi\right) = A_t(\omega\tau - \phi) \quad (13-25)$$

(四) 半无限大物体在简谐热作用下的传热特征

1. 半无限大物体（半无限大平壁）

一侧由一个平面所限制，另一侧伸

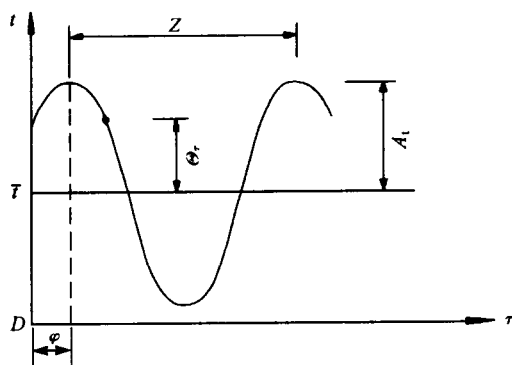


图 13-4 简谐热作用

展到无限的领域，这样的物体称为半无限大物体。如地层、地下室的侧壁等。

2. 半无限大物体在简谐热作用下的三个基本传热特征

- (1) 室外温度、平壁表面温度和内部任一截面处的温度都是同一周期的简谐波动。
- (2) 从室外空间到平壁内部，温度波动的振幅逐渐减小，这种现象叫做温度波的衰减。

即：

$$A_e > A_f > A_x$$

(3) 从室外空间到平壁内部，温度波动的相位逐渐向后推迟，这种现象叫温度波的相位延迟。或者说温度波出现最高温度的时间向后推迟。即：

$$\phi_e > \phi_f > \phi_x$$

(五) 在简谐热作用下有限厚度围护结构的传热

在简谐热作用下，对于有限厚度的围护结构，它的传热特征与半无限大平壁相同。只是围护结构可能在一侧（如室内有空调，可恒温控制）或两侧同时受到周期性热作用，此时，可将综合过程分解成几个单一过程分别进行计算，然后利用叠加原理，把各个单一过程的计算结果叠加起来，即得到最终结果。在热工设计中，主要控制围护结构内表面的温度使它满足夏季热工设计规范的要求。

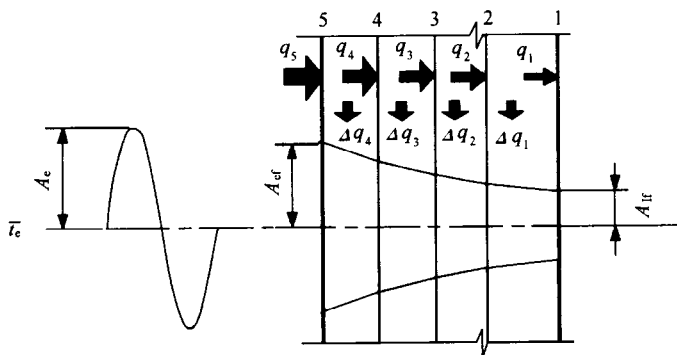


图 13-5 在简谐热作用下围护结构的传热

(六) 简谐热作用下材料和围护结构的热特性指标

1. 材料的蓄热系数 S

材料的蓄热系数是表示当某一匀质半无限大物体一侧受到简谐热作用时，迎波面（受到热作用的一侧表面）上接受的热流振幅与该表面温度波动的振幅比。它是表示半无限大物体在简谐热作用下，直接受到热作用的一侧表面，对谐波热作用敏感程度的一个特性指标。在同样的周期性热作用下，材料的蓄热系数越大，表面温度波动越小，反之波动越大。

$$S = \frac{A_q}{A_\theta} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c \rho_0}{Z}} \quad (13-26)$$

式中 A_q ——表面热流的振幅， W/m^2 ；
 c ——材料的比热， $W \cdot h / (kg \cdot K)$ ；
 Z ——热作用的周期， h ；
 A_θ ——表面温度波的振幅， $^\circ C$ ；

ρ_0 ——材料的干密度, kg/m^3 。

通常建筑材料的 S 值为热作用周期为 24 小时的蓄热系数, 用 S_{24} 表示, 各种材料的蓄热系数可查建筑材料热工指标表得出。

2. 材料层的热惰性指标 D

材料层的热惰性指标是表示具有一定厚度的材料层受到波动热作用后, 背波面上温度波动剧烈程度的一个指标, 它表明了材料层抵抗温度波动的能力。

(1) 均质材料层的热惰性指标

a. 单层结构

$$D = R \cdot S \quad (13-27)$$

式中 R ——各材料层的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

S ——各层材料的蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

b. 多层结构: 由多层材料构成的围护结构的热惰性指标为各层材料热惰性指标之和, 即:

$$D = D_1 + D_2 + \cdots + D_n = R_1 \cdot S_1 + R_2 \cdot S_2 + \cdots + R_n \cdot S_n \quad (13-28)$$

(2) 非均质材料层的热惰性指标

非均质材料层的热惰性指标由平均热阻和平均蓄热系数确定, 即:

$$D = \bar{R} \cdot \bar{S} \quad (13-29)$$

其中, 平均热阻和平均蓄热系数的计算如下:

$$\bar{R} = \frac{d}{\lambda} \quad (13-30)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \cdots + \lambda_n F_n}{F_1 + F_2 + \cdots + F_n} \quad (13-31)$$

$$\bar{S} = \frac{S_1 F_1 + S_2 F_2 + \cdots + S_n F_n}{F_1 + F_2 + \cdots + F_n} \quad (13-32)$$

式中 d ——非均质材料层的厚度, m ;

$\bar{R}$ ——非均质材料层的平均热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

$\bar{S}$ ——非均质材料层的平均蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

3. 材料层表面的蓄热系数

对有限厚度的单层或多层平壁, 当材料层受到周期波动的热作用时, 其表面的温度波动不仅与本层材料的蓄热系数有关, 还与边界条件有关, 即在顺着温度波前进的方向, 其后与该材料层接触的另一种材料的热阻、蓄热系数或表面的热转移系数有关。为此, 对有限厚度的材料层, 使用材料层表面的蓄热系数表示各材料层界面处热流的振幅与表面温度波的振幅比, 从本质上说, 材料层表面的蓄热系数的定义与材料的蓄热系数的定义是相同的。即:

$$Y = \frac{A_q}{A_\theta} \quad (13-33)$$

根据温度波前进的方向, 材料层表面的蓄热系数分为材料层内、外表面的蓄热系数:

$Y_{m,e}$ ——材料层外表面的蓄热系数;

$Y_{m,i}$ ——材料层内表面的蓄热系数。

当某层材料的热惰性指标 $D \geq 1$ 时, 材料层表面的蓄热系数可近似按该层材料的蓄热系数取值, 即 $Y = S$ 。

(七) 温度波的振幅衰减和相位延迟

1. 室外温度谐波传至平壁内表面的总衰减度和总相位延迟

(1) 总衰减度 (总衰减倍数) ν_0

总衰减度: 室外温度谐波的振幅与由其引起的平壁内表面温度谐波的振幅比。

$$\nu_0 = \frac{A_t}{A_{if,e}} \quad (13-34)$$

式中 A_t ——室外空气温度谐波的振幅, $^{\circ}\text{C}$;

$A_{if,e}$ ——在外侧温度谐波的作用下引起的内表面温度谐波的振幅, $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 总相位延迟 ϕ_{e-if}

总相位延迟是在室外温度谐波作用下, 平壁内表面出现最高温度值时的相位与室外温度谐波出现最高温度值时的相位差。

$$\phi_{e-if} = \phi_{if,e} - \phi_e \quad (13-35)$$

式中 ϕ_e ——室外空气温度谐波出现最高温度值时的相位, deg ;

$\phi_{if,e}$ ——在室外温度谐波作用下, 平壁内表面出现最高温度值时的相位, deg 。

(3) 总延迟时间 ξ_0

总延迟时间是在室外温度谐波作用下, 平壁内表面出现最高温度值的时间与室外温度谐波出现最高温度值的时间差。在建筑热工设计中, 更习惯于用总延迟时间评价围护结构的热稳定性。总延迟时间与总相位延迟的关系为:

$$\xi_0 = \frac{1}{15} \phi_{e-if} \quad (13-36)$$

2. 室内温度谐波传至平壁内表面的衰减度和相位延迟:

(1) 室内温度谐波传至平壁内表面的衰减度 ν_i

室内温度谐波传至平壁内表面的衰减度是室内空气温度谐波的振幅与由其引起的平壁内表面温度谐波的振幅比。

$$\nu_i = \frac{A_i}{A_{if,i}} \quad (13-37)$$

式中 A_i ——室内空气温度谐波的振幅, $^{\circ}\text{C}$;

$A_{if,i}$ ——在室内温度谐波的作用下引起的内表面温度波动的振幅, $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 室内温度谐波传至平壁内表面的相位延迟 ϕ_{i-if}

室内温度谐波传至平壁内表面的相位延迟是在室内温度谐波的作用下, 平壁内表面出现最高温度值时的相位与室内温度谐波出现最高温度值时的相位差。

$$\phi_{i-if} = \phi_{if,i} - \phi_i \quad (13-38)$$

式中 ϕ_i ——室内空气温度谐波出现最高温度值时的相位, deg ;

$\phi_{if,i}$ ——在室内温度谐波作用下, 平壁内表面出现最高温度值时的相位, deg 。

(3) 室内温度谐波传至平壁内表面的延迟时间 ξ_i

室内温度谐波传至平壁内表面的延迟时间是在室内温度谐波作用下, 平壁内表面出现最高温度值的时间与室内温度谐波出现最高温度值的时间差。该延迟时间与相位延迟的关系为:

$$\xi_i = \frac{1}{15} \phi_{i-if} \quad (13-39)$$