

275

高等学校 **建筑学** 专业系列教材  
          **城市规划**

# 建 筑 物 理

(第三版)

西安建筑科技大学	华南理工大学	编 著
重庆建筑大学	清 华 大 学	
西安建筑科技大学	刘加平	主 编

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑物理/刘加平主编. —3版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2000

高等学校建筑学城市规划专业系列教材

ISBN 7-112-04229-1

I. 建… II. 刘… 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 (2000) 第 20821 号

本书是根据在建筑领域兴起的绿色建筑研究和实践, 并考虑到全国注册建筑师的考核要求, 对第二版修订而成。与第二版相比, 更加注重与现行相关建筑设计规范的衔接, 同时强调了建筑与生态环境的关系。书中改写和补充了部分章节的内容, 引入了建筑技术科学发展的前沿成果, 进一步提高了内容的科学性和先进性, 并更加符合建筑学专业学生的接受能力和从事环境设计的需要。全书仍包括建筑热工学、建筑光学和建筑声学三大部分。

本书为建筑学、城市规划专业的教材, 也适用于与建筑业有关的设计、施工等技术人员参考。

高等学校 **建筑学** 专业系列教材  
城市规划

**建筑物理**

(第三版)

西安建筑科技大学 华南理工大学 编著  
重庆建筑大学 清华大学  
西安建筑科技大学 刘加平 主编

\*

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

北京市彩桥印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25½ 插页: 1 字数: 618 千字

2000 年 12 月第三版 2000 年 12 月第九次印刷

印数: 78,081—82,080 册 定价: 33.60 元

ISBN 7-112-04229-1

TU·3331 (9704)

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)

## 第三版前言

《建筑物理》第三版是在原西安冶金建筑学院、华南工学院、重庆建筑工程学院和清华大学等四院校合编的《建筑物理》统编教材第二版基础上编写而成的。

新版教材基本保持了原书的风格和框架体系，全书仍然分为建筑热工学、建筑光学和建筑声学三个相对独立的组成部分。为贯彻全国建筑学专业指导委员会倡导的建筑教育中应重视“厚基础、宽口径”的基本精神，在修编中除进一步完善基本的概念和原理，对部分章节的内容和图例进行了调整外，还增加了建筑中太阳能利用和绿色照明的内容，更新了城市噪声控制部分内容，参考了全国一级注册建筑师考试大纲，注重了与现行相关建筑设计规范的衔接。其目的在于，通过建筑物理课程学习，不但能熟练地掌握建筑物理学的基本原理，而且能够运用建筑设计、构造设计、合理选材等“被动式”手段，创造出适宜的热环境、光环境和声环境，并能够节约能源和材料。这是因为，在建筑学科领域兴起的绿色建筑的研究与实践，要求人们在逐步提高居住环境质量的同时，应当节约能源和自然资源，保护自然生态环境，而建筑物理学中所提倡的物理环境设计方法，正是符合可持续发展原理的“绿色”方法。

国内建筑院校开设建筑物理课程已近 50 个春秋，经过几代人的努力，建筑物理环境的教学、研究和应用已发展成为较完整的学科体系。早在 60 年代初，中国建筑工业出版社就组织原西安冶金建筑学院、清华大学、原重庆建筑工程学院和原华南工学院的部分教师，编写了我国第一本《建筑物理》统编教材；1979 年，原书的编者重新编写了新版《建筑物理》，1987 年又对其修订出版了第二版。先后参加过原书编写和审稿的人员包括我国在建筑热工学、建筑光学和建筑声学领域的众多前辈，其中有西安建筑科技大学王景云教授，原西安冶金建筑学院王建瑚教授，华南理工大学林其标教授，清华大学车世光教授、张昌龄教授、李晋奎教授、谭恩慈教授、黄祥村教授，重庆建筑大学杨光璿教授、罗茂羲教授，东南大学柳孝图教授、甘怪教授、何凤飞教授等。如此众多著名学者的共同贡献，作为建筑物理发展史上的里程碑，将对我国建筑学教育的发展产生深远影响。

在本书第三版初稿完成之际，征得中国建筑工业出版社同意，本书主编聘请重庆建筑大学陈启高教授、天津大学沈天行教授和同济大学钟祥璋教授分别对建筑热工学、建筑光学和建筑声学进行了审阅。审阅人提出的许多建设性意见对提高本书的编写质量起到了重要的作用。

本书第三版由刘加平主编。其中建筑热工篇编者为刘加平、钟珂（西安建筑科技大学）、王建瑚（青岛建筑工程学院）和黎明（华南理工大学）；建筑光学篇编者为陈仲林、杨光璿（重庆建筑大学）；建筑声学篇编者为李晋奎（清华大学）和刘铮（内蒙古工业大学）。

刘加平

1999 年国庆于西安建筑科技大学

## 第二版前言

本书第二版是根据1985年4月在南京工学院召开的建筑学专业教材编委会的决定，结合实际使用的经验，在第一版的基础上编写的。

本版在体系上除第四、七章有局部变更外，整体上没有大的变动。编写工作的重点在于内容的改进，主要是：第一篇中修改了室内气候评价方法的内容，介绍了ET\*和PMV等评价指标；删去了不稳定传热部分的导热微分方程、谐量分析以及半无限大物体在谐热波作用下的传热特征，对周期性传热计算方法的讲述，也作了改进。建筑保温一章变化较大，不仅增加了外保温和USD构造方法等新技术，并更新了大部分构造图例。为使学生对围护结构湿状况有较全面的认识，增加了一些有关材料吸湿和湿迁移的物理概念的叙述。第六章改进了日地运行规律的论述，精简了内容，删去了太阳高度角和方位角的图解法。

第二篇第七章改变了体系和内容，先讲眼睛与视觉，使光学的后续内容有了顺理成章的基础。天然采光部分，除增加了一些新资料外，主要是删减了等采光系数法，突出了我国标准所规定的方法。照明部分除精简了计算方法的内容以外，还丰富了人工光源及室内环境照明设计等的图表和资料。

第三篇改进最大的是噪声允许标准部分，其中不仅增加了对我国和ISO有关标准的介绍，还补充了非稳态噪声的等效声级的计算方法，累计分布声级的概念等新内容。此外，还删去了设备减振、简谐系统的振动方程、考虑吸声分布不均匀时的混响计算公式等，并改进了房间共振问题的论述。

除上述内容上的精简、更新、充实之外，本版还按近年来我国先后颁布的有关规程和标准，进行了修改和协调，以便使学生在学习时就受到工程应用的训练。此外，还全面实现了从工程单位向国际制单位的转变。为了实现这一转变，不仅更改了大量的物理量及常用数据的数值，还重新改绘了一些曲线图，希望教师备课时加以注意。

本版仍由西安冶金建筑学院、华南工学院、重庆建筑工程学院、清华大学等四院校有关教师合编，由南京工学院主审，主审人是柳孝图、甘桢二位同志。

由于工作变动等原因，一部分原编者未能参加第二版的编写工作。

本书由王景云同志主编。各部分的编者是：王景云（第一、三章），王建瑚（第二、四章），林其标（第五、六章），杨光璿（第二篇），车世光（第三篇）。

编者

1986.9.

## 前 言

建筑物理是建筑环境科学的基本组成部分。本书内容包括建筑热工学、建筑光学和建筑声学。这些内容可概括为：研究建筑中的热、光、声等物理现象和材料的热物理、光学及声学性能；论述为获得良好的热、光、声环境的设计原理和方法。

建筑物理是培养高级建筑设计人材不可缺少的专业基础课程。建筑设计人员必须掌握一定的建筑物理知识，否则就不可能完满地解决有关热、光、声环境的设计问题，也就不可能保证现代建筑应有的设计质量。

必须认识到，从建筑规划、设计到局部的构造设计，甚至施工管理，自始至终都涉及建筑物理的有关知识和技能。例如，在建筑规划中，如不考虑噪声的危害而将有强烈噪声的工厂布置在居民区内，必将严重影响居民的生活与休息。房屋的朝向、间距不合理，则在炎热地区必将加重室内过热现象，而在寒冷地区又会得不到应有的日照而影响室内卫生。

在单体建筑设计中，由于大多数建筑物都有其对热、光、声方面的具体要求，且在许多情况下，这些要求对房屋的使用质量具有重大甚至是决定性意义，当然就更离不开建筑物理技术。例如，就室内气候而言，如果大量性工业与民用建筑的保温、防热处理不好，势必影响亿万人民的正常生活与工作。而一座冷库的绝热防潮处理不合要求，一到炎热季节，库温上升，货物变质，将造成经济上的巨大损失。在光环境设计方面，仅从中小学教室因采光、照明条件不好，使青少年视力普遍下降的严重情况，就可看到其重要性。对室内音质要求高的房间，如影剧院、音乐厅等，则建筑设计中的声学处理具有决定性的意义。噪声干扰，特别是住宅楼板隔声性能低劣，已是建筑设计中必须认真解决的突出问题。

由此可见，建筑物理知识对提高建筑设计质量，促进建筑工业现代化具有多么重大的意义。因此，在专业教育中，必须加强建筑物理的教学工作；在设计工作中，必须充分应用建筑物理技术。

通过本课程的讲授和习题、实验的训练，将使学生掌握建筑物理的基本原理，具备相应的设计能力。在学习本课时，首先应力求从物理概念上弄清热、光、声等物理现象在建筑中的传播规律。在此基础上，一方面注意掌握设计原则，另一方面也要重视材料的有关性能和构造设计技能，此外，还应了解计算公式的物理意义并能较熟练地进行计算。

本书是根据1978年制订的编写大纲，由西安冶金建筑学院、华南工学院、重庆建筑工程学院、清华大学等四院校有关教师共同编写，由南京工学院柳孝图、甘桢、何凤飞三同志主审定稿的。

本书由王景云同志主编。各部分的编者是：王景云（第一、三章），王建瑚（第二、四章），林其标（第五、六章），杨光曙、罗茂羲（第七、八、九章），谭恩慈、黄祥村（第十章），李晋奎（第十一、十三章），黄祥村（第十二章），车世光、张昌龄（第十四章），车世光（第十五章）。

编 者

1979. 9.

# 第一篇 建筑热工学

建筑物外围护结构将人们的生活与工作空间分为室内和室外两部分，因而，建筑热环境也就分为室内热环境和室外热环境。建筑物常年经受室内外各种热环境因子的作用，属于室外的因素如太阳辐射、空气的温湿度、风、雨雪等，一般统称为“室外热湿作用”；属于室内的如空气温湿度、生产和生活散发的热量与水分等，则称为“室内热湿作用”。

建筑热力学的任务是介绍建筑热工学原理，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、防热、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。当然，在大多数情况下，单靠建筑措施是不能完全满足对室内热环境的要求的。为了获得合乎标准的室内热环境，往往需要配备适当的设备，进行人工调节。如在寒冷地区设置采暖设备，在炎热地区采用空调设备等等。但应注意，只有首先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设计。

围护结构传热、传湿的基本原理和计算方法是建筑热工学的基本内容。同时还必须了解材料的热物理性能，重视构造处理的技能，才能正确解决实际的设计任务。

本篇内容着重介绍一般工业与民用建筑的热工设计，包括建筑保温设计、防潮设计、防热设计和建筑节能设计等。期望通过本篇的学习，除了掌握必须的基础知识和理论外，能够在建筑设计中灵活运用相关的国家标准和规范，如《民用建筑热工设计规范》(GB50176—93)、《建筑气候区划标准》(GB50178—93)、《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》(GBJ24—95)等。

对于某些特殊用途的房间(如高湿、恒温恒湿房间等)的热工设计，除须应用本篇所述的内容以外，还得参阅有关的专著和文献。

## 第一章 建筑热工学基础知识

### 第一节 建筑中的传热现象

只从室内冷热角度出发，外围护结构的作用就是为了防热御寒，使室内形成舒适的热环境。

冬夏两季，通过围护结构传递热量的方向特征不同。冬天，不论供暖房间还是非供暖房间，室内气温一般情况下均高于室外气温，热流必然由室内流向室外。在夏季，热流方向则不像冬季那样单一，对于自然通风房间，白天和晚上的热流方向恰恰相反，白天在较高气温和太阳辐射的共同作用下，热量由室外流向室内，到了夜间，室外气温下降，热流

转为由室内到室外，这时应尽量使白天室内所积蓄的热量尽快地排向室外，以利于室内降温；对于空调房间，室温较低，白天由室外进入室内的热量就会增加，夜间，热流方向是否变化，取决于室外气温。由于夏季热量传递特征不同于冬季，围护结构的热工对策应与冬季不同。

对于冬季情况，围护结构保温性能越好，通过房间的热量损失减少，在降低采暖能耗的同时，又使室内环境变得舒适；然而，在夏季，围护结构不仅要隔热好，更重要的是夜间散热快，尤其是由于因受强烈日射而室温升得很高的房间，即使是白天也要考虑热量排放问题，这时房间的保温性能愈好，反而会使室内变得更热。

因此围护结构的热工设计不仅仅是简单地增厚墙体或提高保温性能，而是要根据建筑物室内外的热量传递状况、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。

热量的传递称传热。在自然界中，只要存在着温差，就会有传热现象，而且热能是由温度较高的部位传至温度较低的部位，其方式有辐射、对流和导热三种。

辐射传热，是指热量以电磁波的形式把热量由一个物体传向另一个物体的现象。

对流传热，是指流体与流体之间、流体与固体之间发生相对位移时所产生的热量交换现象。

导热是指同一物体内部或相接触的两物体之间由于分子热运动，热量由高温处向低温处转换的现象。

建筑物的传热并非以某一种传热方式单独进行，而大多是辐射、对流、导热三种方式综合作用的结果。

图 1-1 为当屋顶上被太阳照射时的受热情况。太阳的照射为辐射热，当阳光通过辐射方式传到屋顶时，其中约有 20%~30% 的热量被反射，剩余被屋顶接受的辐射热，一部分经屋顶材料内部以导热方式传向室内，另一部分则由屋顶表面向大气层辐射，并通过对流换热的方式将热量传递给周围空气。

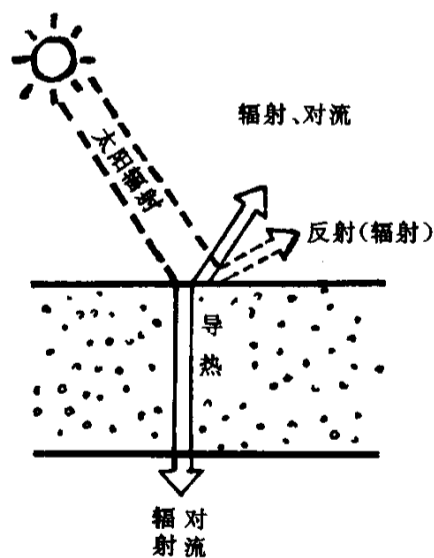


图 1-1 屋顶被太阳照射时的受热情况

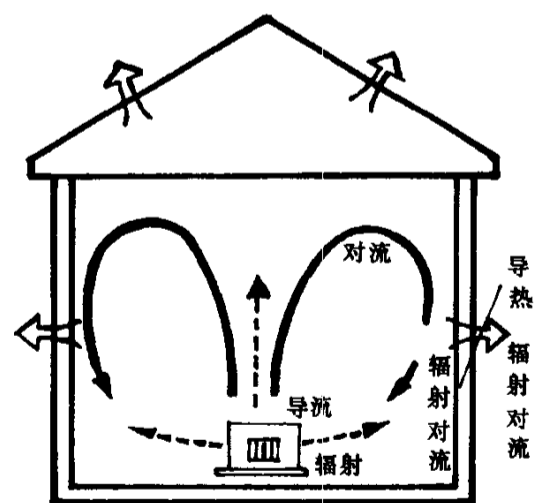


图 1-2 室内供暖设备在室内的热交换

图 1-2 为室内供暖设备与室内空气的热交换情况，供暖时暖气片向四周辐射热，并通过对流与空气的接触进行导热，同时，被加热的空气变轻，产生对流，通过对流方式将热量传向室内各处，使房间内表面温度和室内气温升高，同时热量由室内向低温的室外传递，如果

墙体中间设有空气间层，则在空气间层中也以辐射、导热和对流三种方式，同时进行着传热。

正常情况下的人体温度约为  $36.5^{\circ}\text{C}$ ，为了保持体温，人体不间断地向周围环境散发热量。人体与室内环境的换热也是同时以三种方式进行，室内空气温度、风速和围护结构内表面温度共同决定着人体的散热量。这正是在相同室内空气温度下，夏季与冬季人体热感觉完全不同的原因。

## 第二节 围护结构传热基础知识

热量传递有三种基本方式，即导热、对流和辐射。自然界中的传热过程无论多么复杂和多种多样，都是这三种方式的不同组合。因此为了有的放矢地解决建筑中的热工问题，必须首先分别研究这三种方式各自的传热机理和规律，再考虑它们的一些典型组合过程。

### 一、导热

导热是指物体中有温差时由于直接接触的物质质点作热运动而引起的热能传递过程。在固体、液体和气体中都存在导热现象，但在不同的物质中导热的机理是有区别的。在气体中是通过分子作无规则运动时互相碰撞而导热，在液体中是通过平衡位置间歇移动着的分子振动引起的；在固体中，除金属外，都是由平衡位置不变的质点振动引起的，在金属中，主要是通过自由电子的转移而导热。

纯粹的导热现象仅发生在理想的密实固体中，但绝大多数的建筑材料或多或少总是有孔隙的，并非是密实的固体。在固体的孔隙内将会同时产生其他方式的传热，但因对流和辐射方式传递的热能，在这种情况下所占比例甚微，故在热工计算中，可以认为在固体建筑材料中的热传递仅仅是导热过程。

#### 1. 温度场、温度梯度和热流密度

在物体中，热量传递与物体内部温度的分布情况密切相关。物体中任何一点都有一个温度值，一般情况下，温度  $t$  是空间坐标  $x, y, z$  和时间  $\tau$  的函数，即

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1-1)$$

在某一时刻物体内部各点的温度分布，称为温度场，上式就是温度场的数学表达式。

上述的温度分布是随时间而变的，故称为不稳定温度场。如果温度分布不随时间而变化，就称为稳定温度场，用  $t = f(x, y, z)$  表示。温度只沿  $x$  一个坐标轴发生变化的，称为一维稳定温度场，用  $t = f(x)$  表示。

温度场中同一时刻由相同温度各点相连成的面叫做“等温面”。等温面图就是温度场的形象表示。因为同一点上不可能同时具有多于一个的温度值，所以不同温度的等温面绝不会相交，参见图 1-3。沿与等温面相交的任何方向上温度都有变化，但只有在等温面的法线方向上变化最显著。温度差  $\Delta t$  与沿法线方向两等温面之间距离  $\Delta n$  的比值的极限，叫做温度梯度，表示为：

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

显然，导热不能沿等温面进行，而必须穿过等温面。在单

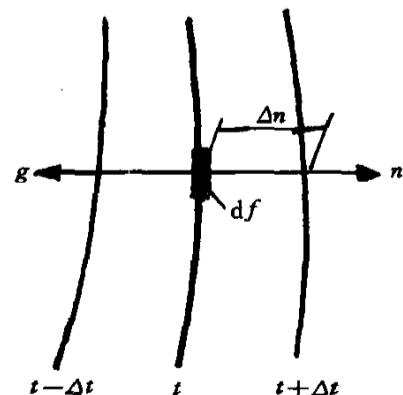


图 1-3 等温面示意图



位时间内，通过等温面上单位面积的热量称为热流密度。设单位时间内通过等温面上微元面积  $dF$  [ $m^2$ ] 的热量为  $dQ$  [W] 则热流密度可表示为

$$q = \frac{dQ}{dF} \quad W/m^2 \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 得

$$dQ = qdF$$

或

$$Q = \int_F qdF \quad (1-4)$$

因此，如果已知物体内的热流密度的分布，就可按式 (1-4) 计算出单位时间内通过导热面积  $F$  传导的热量  $Q$  (称为热流量)。如果热流密度在面积  $F$  上均匀分布，则热流量为

$$Q = qF \quad (1-5)$$

## 2. 傅立叶定律

由导热的机理我们知道，导热是一种微观运动现象。但在宏观上它将表现出一定的规律性来，人们把这一规律称作傅立叶定律，因为它是由法国数学物理学家傅立叶 (Fourier) 于 1822 年最先发现并提出的。

物体内导热的热流密度的分布与温度分布有密切的关系。傅立叶定律指出：匀质材料物体各点的热流密度与温度梯度的大小成正比，即

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-6)$$

式中  $\lambda$  是个比例常数，恒为正值，叫做材料的导热系数。负号是为了表示热量传递只能沿着温度降低的方向而进行的。沿着  $n$  的方向温度增加， $\frac{\partial t}{\partial n}$  为正，则  $q$  为负值，表示热流沿  $n$  的反方向。

## 3. 导热系数

由式 (1-6) 得

$$\lambda = \frac{|q|}{\left| \frac{\partial t}{\partial n} \right|} \quad W/(m \cdot K) \quad (1-7)$$

可见，导热系数是指当温度梯度为  $1^\circ C/m$  时，在单位时间内通过单位面积的导热量。导热系数大，表明材料的导热能力强。

各种物质的导热系数，均由实验确定。影响导热系数数值的因素很多，如物质的种类、结构成分、密度、湿度、压力、温度等等。所以，即使是同一种物质，其导热系数差别可能很大。一般说来，导热系数  $\lambda$  值以金属的最大，非金属和液体次之，而气体的最小。工程上通常把导热系数小于 0.25 的材料，作为隔热材料 (绝热材料)，如石棉制品、泡沫混凝土、泡沫塑料、膨胀珍珠岩制品等。各种材料的  $\lambda$  值大致范围是：气体为 0.006~0.6；液体为 0.07~0.7；建筑材料和绝热材料为 0.025~3；金属为 2.2~420。

值得说明的是，空气的导热系数很小。因此不流动的空气就是一种很好的绝热材料。也正是这个原因，如果材料中含有气隙或气孔，就会大大降低其  $\lambda$  值。所以绝热材料都制成多孔性的或松散性的。应当指出，若材料含水率高 (即湿度大)，材料导热系数会显著提高，保温性能将降低 (如湿砖的  $\lambda$  值要比干砖的高 1 倍到几倍)。

物质的导热系数还与温度有关,实验证明,大多数材料的 $\lambda$ 值与温度的关系近似直线关系,即

$$\lambda = \lambda_0 + bt$$

式中  $\lambda_0$ —— $0^\circ\text{C}$ 时的导热系数;

$b$ ——实验测定的常数。

工程计算中,导热系数常取使用温度范围内的算术平均值,并把它作为常数看待。

## 二、对流

对流传热只发生在流体之中,它是因温度不同的各部分流体之间发生相对运动,互相掺合而传递热能的。促使流体产生对流的原因有二:一是本来温度相同的流体,因其中某一部分受热(或冷却)而产生温度差,形成对流运动,这种对流叫“自然对流”;二是因为受外力作用(如风吹、泵压等),迫使流体产生对流,这叫做“受迫对流”。自然对流的程度主要决定于流体各部分之间的温度差,温差愈大则对流愈强,受迫对流取决于外力的大小,外力愈大,则对流愈强。

在建筑热工中所涉及的主要是空气沿围护结构表面流动时,与壁面之间所产生的热交换过程。这种过程,既包括由空气流动所引起的对流传热过程,同时也包括空气分子间和相接触的空气分子与壁面分子之间的导热过程。这种对流与导热的综合过程,称为表面的“对流换热”,以便与单纯的对流传热相区别。

由流体实验得知,当流体沿壁面流动时,一般情况下在壁面附近也就是在边界层内,存在着层流区、过渡区和紊流区三种流动情况,如图 1-4 所示。

为确定表面对流换热量,可利用牛顿公式:

$$q_c = \alpha_c(t - \theta) \quad (1-8)$$

式中  $q_c$ ——对流换热强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$t$ ——流体的温度, $^\circ\text{C}$ ;

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

$\theta$ ——固体表面温度, $^\circ\text{C}$ 。

$\alpha_c$ 值取决于很多因素,是一个十分复杂的物理量。为简化起见,在建筑热工学中,根据空气流动状况(自然对流或受迫对流),结构所在的位置(是垂直的、水平的还是倾斜的),壁面状况(是有利于空气流动还是不利于流动)以及热流方向等因素,采用一定的实用计算公式。

### 1. 自然对流 (指围护结构内表面)

$$\text{垂直表面} \quad \alpha_c = 2.0 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-9)$$

$$\text{水平表面(热流由下而上)} \quad \alpha_c = 2.5 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-10)$$

$$\text{水平表面(热流由上而下)} \quad \alpha_c = 1.3 \sqrt[4]{\Delta t} \quad (1-11)$$

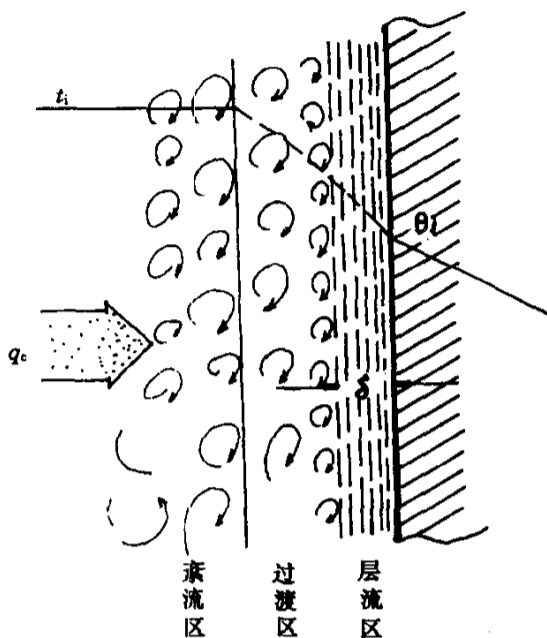


图 1-4 表面对流换热

式中  $\Delta t$  是壁面与室内空气的温度差;  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2. 受迫对流

内表面  $\alpha_c = 2 + 3.6v$  (1-12)

外表面  $\alpha_c = \begin{cases} 2 + 3.6v & (\text{冬}) \\ 5 + 3.6v & (\text{夏}) \end{cases}$  (1-13)

式中  $v$  是气流速度,  $\text{m/s}$ 。

## 三、辐射

辐射传热与导热和对流在机理上有本质的区别, 它是以电磁波传递热能的。凡温度高于绝对零度 ( $0\text{K}$ ) 的物体都能发射辐射热。辐射传热的特点是发射体的热能变为电磁波辐射能, 被辐射体又将所接收的辐射能转换成热能。温度越高, 热辐射越强烈。由于电磁波能在真空中传播, 所以, 物体依靠辐射传递热量时, 不需要和其他物体直接接触, 也不需要任何中间媒介。

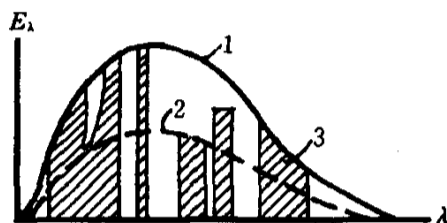


图 1-5 在同温条件下, 黑体、灰体和非灰体单色辐射的对比

1—黑体; 2—灰体; 3—非灰体

辐射能力最大。

灰体: 其辐射光谱具有与黑体辐射光谱相似的形状, 且对应每一波长的单色辐射力  $E_{\lambda}$ , 与同温同波长的黑体的  $E_{\lambda,b}$  的比值  $\epsilon$  为一常数, 即:

$$\frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,b}} = \epsilon = \text{常数} \quad (1-14)$$

比值  $\epsilon$  称为“发射率”或“黑度”。

非灰体 (或选择性辐射体): 其辐射光谱与黑体光谱截然不同, 甚至有的只能发射某些波长的辐射线。

一般建筑材料都可看作灰体。

根据斯蒂芬—波尔兹曼定律, 黑体和灰体的全辐射能力与其表面的绝对温度的四次幂成正比, 即:

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-15)$$

式中  $C$ ——物体的辐射系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;

$T$ ——物体表面的绝对温度,  $\text{K}$ 。

由实验和理论计算得黑体的辐射系数  $C_b = 5.68$ , 根据 (1-14) 式可得知, 灰体的辐射系数  $C$  与黑体辐射系数  $C_b$  之比值即是发射率或黑度  $\epsilon$ , 即:

$$\frac{C}{C_b} = \epsilon \quad \text{或} \quad C = \epsilon C_b \quad (1-16)$$

同一物体, 当其温度不同时, 其光谱中的波长特性也不同, 随着温度的增加, 短波成分增强, 如图 1-6 所示。物体表面在不同温度下发射的辐射线的波长特性, 一般可用对

### 1. 物体的辐射特性

按物体的辐射光谱特性, 可分为黑体、灰体和选择性辐射体 (或称非灰体) 三大类, 如图 1-5 所示。

黑体: 能发射全波段的热辐射, 在相同的温度条件下, 辐射能力最大。

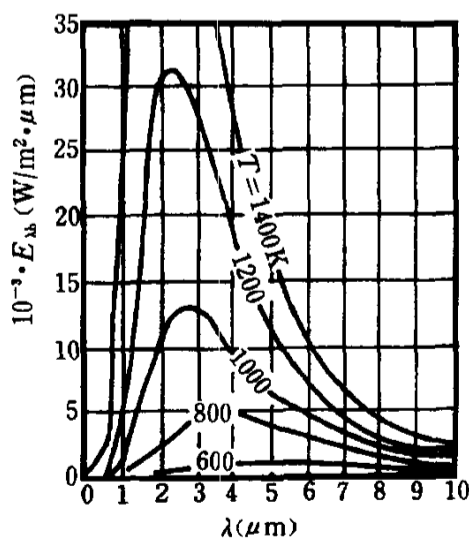


图 1-6 同一物体在不同温度下的辐射光谱

应于出现最大单色辐射力的波长来表征，此波长以  $\lambda^*$  表示。

按 Wien 定律：

$$\lambda^* = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad (1-17)$$

式中  $T$  为物体表面的绝对温度，K。

在一定温度下，物体表面发射的辐射能绝大部分集中在  $\lambda = (0.4 \sim 7)\lambda^*$  的波段范围内。建筑热工中把  $\lambda > 3\mu\text{m}$  的辐射线称为长波辐射， $\lambda < 3\mu\text{m}$  的辐射线称为短波辐射。

例如太阳表面温度约为 6000K，按 (1-17) 式可得  $\lambda^* = 0.483\mu\text{m}$ ，辐射能量主要集中在  $\lambda = 0.2 \sim 3.0\mu\text{m}$  的波段内，故属于短波辐射；一般围护结构表面温度约在 300K 左右， $\lambda^* \approx 10\mu\text{m}$ ，属于长波辐射。

## 2. 物体表面对外来辐射的吸收与反射特性

任何物体不仅具有本身向外发射热辐射的能力，而且对外来的辐射具有吸收性和反射性，某些材料（玻璃、塑料膜等）还具有透射性。绝大多数建筑材料对热射线是不透明的，如图 1-7 所示。投射至不透明

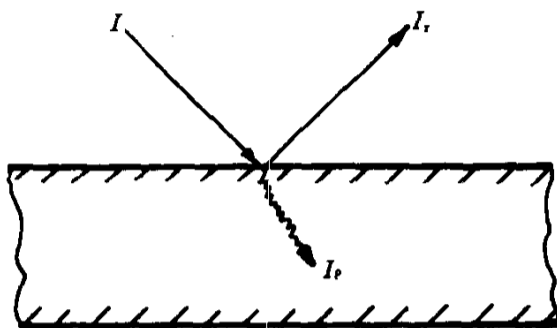


图 1-7 不透明表面的反射和吸收

材料表面的辐射能，一部分被吸收，一部分则被反射。被吸收的辐射能  $I_p$  与入射能  $I$  之比值称为吸收系数  $\rho$ ；被反射的辐射能  $I_r$  与入射能之比称为反射系数  $r$ ，显然：

$$r + \rho = 1 \quad (1-18)$$

对于任一特定的波长，材料表面对外来辐射的吸收系数与其自身的发射率或黑度在数值上是相等的，即  $\rho = \epsilon$ ，所以材料辐射能力愈大，它对外来辐射的吸收能力也愈大。

反之，若辐射能力愈小，则吸收能力也愈小。如果入射辐射的波长与发射辐射的波长不同，则两者在数值上可能不等，因吸收系数或反射系数与入射辐射的波长有关。图 1-8 所示的是几种表面对不同波长的热辐射的反射系数。由图中可看出，白色表面对可见光的反射能力最强，对于长波辐射，其反射能力则与黑色表面相差极小。而抛光的金属表面，不论对于短波辐射或是长波辐射，反射能力都很高，亦即吸收率很低。材料对热辐射的吸收和反射性能，主要取决于表面的颜色、材性和光滑平整程度。对于短波辐射，颜色起主导作用；对于长波辐射，则是材性起主导作用，所谓材性是指导体还是非导体。所以围护结构外表面刷白在夏季反射太阳辐射热是非常有效的，但在墙体或屋顶中的空气间层内，刷白则不起作用。

窗玻璃与一般围护结构不同，太阳辐射热的绝大部分都能透过普通玻璃，而长波辐射则很少能透过。因此，用普通窗玻璃的温室，白天能引进大量的太阳辐射，而夜间则能阻止室内的长波辐射向外透射。当然，改变玻璃的化学成分（例如掺入含铁的化合物）也会使玻璃对太阳辐射热的吸收系数变大，透射系数降低，这就是所谓吸热玻璃。

## 3. 物体之间的辐射换热

由于任何物体都具有发射辐射和对外来辐射吸收反射的能力，所以在空间任意两个相互分离的物体，彼此间就会产生辐射换热，如图 1-9 所示。如果两物体的温度不同，则较热的物体向外辐射而失去的热量比吸收外来辐射而得到的热量多，较冷的物体则相反，这样，在两个物体之间就形成了辐射换热。应注意的是，即使两个物体温度相同，它们也在进行

着辐射换热，只是处于动态平衡状态。

两表面间的辐射换热量主要取决于表面的温度，表面发射和吸收辐射的能力，以及它们之间的相互位置。

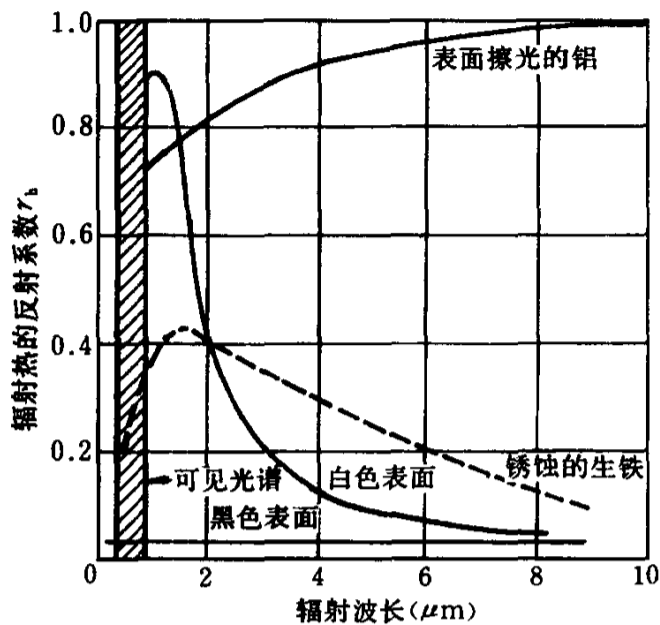


图 1-8 表面对辐射热的反射系数

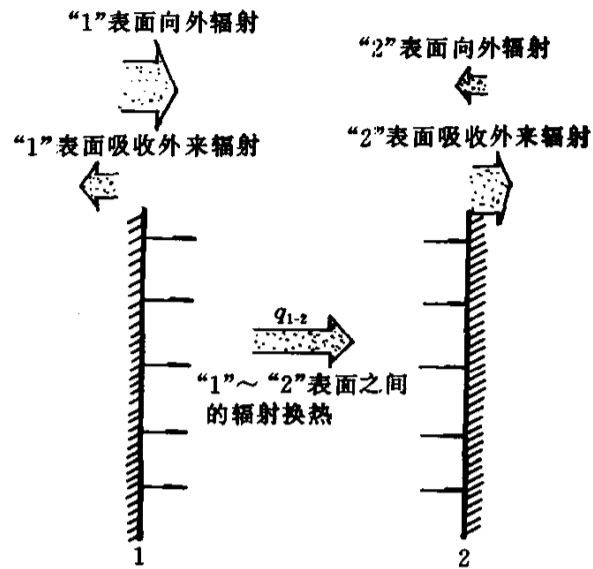


图 1-9 表面的辐射换热

“1”表面辐射散热 “2”表面辐射得热

任意相对位置的二表面，若不计两表面之间的多次反射，仅考虑第一次吸收，则表面辐射换热量的通式为

$$\left. \begin{aligned} Q_{1,2} &= \alpha_r(\theta_1 - \theta_2) \cdot F \\ \text{或 } q_{1,2} &= \alpha_r(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

式中  $\alpha_r$ ——辐射换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ 。

在建筑中有时需要了解某一围护结构的表面 ( $F_1$ ) 与所处环境中的其他表面，如壁面、家具表面之间的辐射换热，这些表面中往往包括了多种不同的不固定的物体表面，很难具体做详细计算，在工程中也可采用 (1-19) 式进行计算。

#### 四、围护结构的传热过程

房屋围护结构时刻受到室内外的热作用，不断有热量通过围护结构传进或传出。在冬季，室内温度高于室外温度，热量由室内传向室外；在夏季则正好相反，热量主要由室外传向室内。通过围护结构的传热要经过三个过程 (图 1-10)：

表面吸热——内表面从室内吸热 (冬季)，或外表面从室外空间吸热 (夏季)；

结构本身传热——热量由高温表面传向低温表面；

表面放热——外表面向室外空间散发热量 (冬季)，或内表面向室内散热 (夏季)。

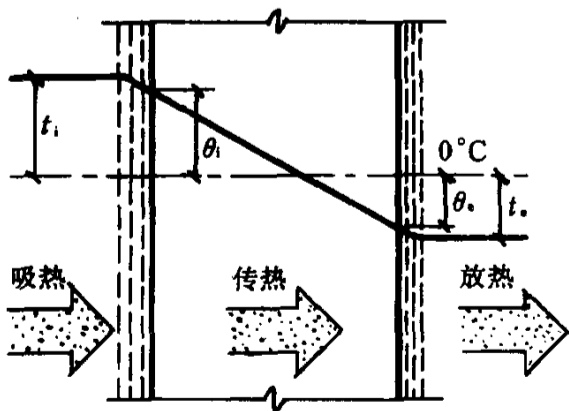


图 1-10 围护结构传热过程

严格地说，每一传热过程都是三种基本传热方式的综合过程。

表面吸热和放热的机理是相同的，故一般总称为“表面换热”。在表面换热过程中，既有表面与周围空气之间的对流与导热，又有表面与其他表面之间的辐射传热。

在结构本身的传热过程中，实体材料层以导热

为主，空气层一般以辐射传热为主。当然，即使是实体结构，也因大多数建筑材料都含有或多或少的孔隙，而孔隙中的传热则又包括三种基本传热方式，特别是那些孔隙很多的轻质材料，孔隙传热的影响是很大的。

### 1. 表面换热

根据前述式 (1-8) 和或 (1-19)，表面总换热量乃是对流换热量与辐射换热量之和，即

$$q = q_c + q_r = \alpha_c(\theta - t) + \alpha_r(\theta - t) = (\alpha_c + \alpha_r)(\theta - t) = \alpha(\theta - t) \quad (1-20)$$

式中  $q$ ——表面换热量， $W/m^2$ ；

$\alpha$ ——表面换热系数， $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ ， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

$\theta$ ——壁面温度， $^{\circ}C$ ；

$t$ ——室内或室外气温， $^{\circ}C$ 。

在实际设计计算当中，除某些特殊情况（如超高层建筑顶部外表面）外， $\alpha$  值均按《民用建筑热工设计规范》的规定取值（参见表 2-2 及表 2-3），而不必由设计人员去一一计算。

### 2. 结构传热

严格地说，结构本身的传热过程并非单纯是导热，其详细情况将在以后有关部分介绍，作为传热基础知识，这里仅就平壁导热作简要叙述。

在建筑热工学中，“平壁”不仅包括平直的墙壁、屋盖、地板，也包括曲率半径较大的墙、穹顶等结构。虽然实际上这些结构很少是由单纯材料制成的匀质体，但为便于说明传热规律，这里仅对“单层匀质平整”作简单介绍。

设图 1-11 所示为单层匀质平壁，仅在  $x$  方向有热流传递，即一维传热或单向传热，认为平壁内仅以导热方式传热。壁内外表面温度分别为  $\theta_i$  和  $\theta_e$ ，且  $\theta_i > \theta_e$ ，由式 (1-6) 得在单位时间内，通过单位截面积的热流——热流强度（或谓比热流） $q_x$  为

$$q_x = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad W/m^2 \quad (1-21)$$

式中  $\lambda$ ——材料的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ；

$\frac{d\theta}{dx}$ ——温度梯度， $K/m$ 。

当平壁两侧的温度  $\theta_i$  和  $\theta_e$  不随时间变化时，此种传热称为“稳定传热”。

严格地说，建筑中是不存在真正的稳定传热的，实际上都是“不稳定传热”。但在有些情况下当作稳定传热来处理，不仅误差不大，而且可大大减轻计算工作量，提高工作效率。

不稳定传热时，平壁的各截面温度和通过各截面的热流都随时间而变化，而不再是恒定不变的。在不稳定传热过程中，除导热系数仍有重大影响外，材料的比热  $c$  和容重  $\gamma$  对传热过程有着更大的影响，这与稳定传热时不同。若令  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ ，则这三种材性的综合影响可用所谓“导温系数  $a$ ”来表示， $a$  亦称热扩散系数。当平壁一个表面温度（如图 1-11 中的  $\theta_i$ ）作升或降的变化时， $a$  表征这种变化向壁内传播的快慢程度。 $a$  越大，则传播得越快； $a$  越小，则越慢。对于

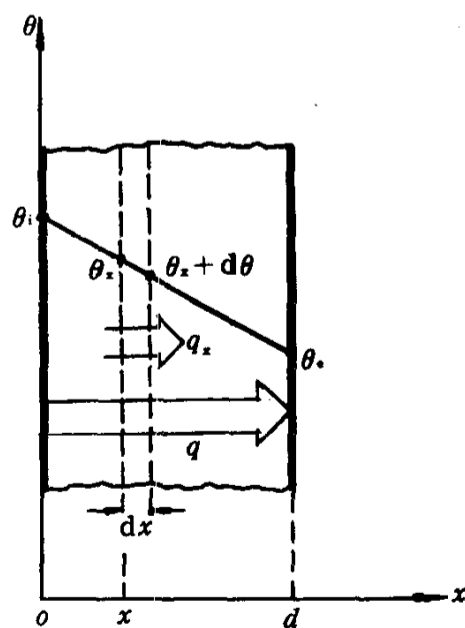


图 1-11 平壁一维导热模型

建筑热工设计而言，一般地说导温系数大是不好的。近年来，国内外都大力开发轻质材料，用于保温隔热工程，收到了巨大的经济效益，特别是节约了大量能源。但是，轻质材料的导温系数一般都比较大，所以用轻质材料做的结构，抵抗温度变动的能力较差，即热稳定性较低。

### 第三节 湿空气的物理性质

#### 一、水蒸汽分压力

湿空气指的是干空气与水蒸汽的混合物，室内外空气都是含有一定水分的湿空气。如图 1-12 所示，一个容积为  $V$  立方米的封闭房间，开始时只有干空气，后来掺入了水蒸汽，混合成为湿空气。

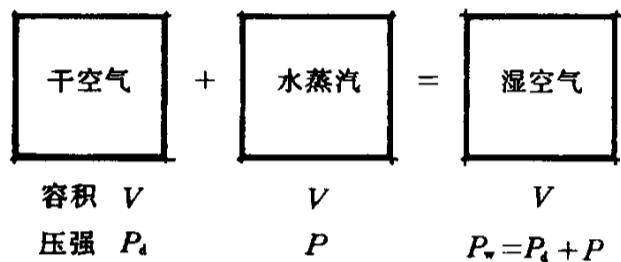


图 1-12 湿空气的构成

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，是有一定限度的。当水蒸汽的含量尚未达到这一限度时，该湿空气叫作“未饱和”的，当达到限度时就叫作“饱和”的。

若某房间的湿空气已达饱和，再继续向其供给水蒸汽，也不会再增加水蒸汽的含量，超额的水蒸汽将凝结成液态水而析出。淋浴室内的雾，顶棚和墙面上的水珠，都是饱和之后的“超额”水蒸汽凝结而成的。

未饱和的湿空气，可以引用理想气体的有关定律。根据道尔顿分压定律，图 1-12 所示湿空气的压强（全压），等于干空气的分压力和水蒸汽分压力之和，即

$$P_w = P_d + P \quad (1-22)$$

式中  $P_w$ ——湿空气的总压力，Pa；

$P_d$ ——干空气的分压力，Pa；

$P$ ——水蒸汽的分压力，Pa。

处于饱和状态的湿空气中的水蒸汽所呈现的压力，叫作“饱和蒸汽压”或“最大水蒸汽分压力”。在建筑热工学中，气（汽）体压力（实际是压强，因已习惯，故仍沿用）的单位为 Pa（帕）。饱和蒸汽压力用  $P_s$  表示，未饱和的水蒸汽分压力则用  $P$  表示。

标准大气压力下，不同温度时的  $P_s$  值载于附录 2。 $P_s$  值随温度升高而变大，这是因为在一定的压力下，湿空气的温度越高，其一定容积中所能容纳的水蒸汽越多，因而水蒸汽所呈现的压力越大。

#### 二、空气湿度

描述湿空气的另一重要物理量是“湿度”。湿度表示空气的干湿程度，它有不同的表示方法，使用范围各异。

绝对湿度——单位体积空气中所含水蒸汽的重量，叫空气的绝对湿度。绝对湿度一般用  $f$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) 表示，饱和状态下的绝对湿度则用饱和蒸汽量  $f_{\max}$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) 表示。

绝对湿度虽然能具体指明单位体积空气中所含水蒸汽的真实数量，但从室内热环境的要求来看，这种表示方法并不能恰当地说明问题，这是因为绝对湿度相同而温度不同的空气环境，对人体热感觉的影响是不同的。

相对湿度——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蒸汽量  $f_{\max}$  的百分比，称为该空气的“相对湿度”。相对湿度一般用  $\varphi$  (%) 表示，即

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}} \times 100\% \quad (1-23)$$

水蒸汽的实际分压力  $P$  主要取决于空气的绝对湿度  $f$ ，同时也与空气的绝对温度有关，一般用下列近似式表示：

$$P = 0.461Tf \quad \text{Pa} \quad (1-24)$$

式中  $f$ ——与  $P$  对应的绝对湿度， $\text{g}/\text{m}^3$ ；

$T$ ——空气绝对温度，K。

由上式可见，当气温一定时 ( $T$  一定)，水蒸汽分压力随绝对湿度成正比例变化；当绝对湿度一定时 ( $f$  一定)，水蒸汽分压力随绝对温度成正比例变化。由于不同状况下的  $T$  值往往不同， $P$  与  $f$  也就不成正比例 (参见表 1-1)。

但是，在建筑热工设计中，涉及的气温变化范围不大，变成绝对温度后，其相对变化就更小。为方便起见，近似地认为  $P$  与  $f$  成正比例；同样，也认为  $P_s$  与  $f_{\max}$  成正比例，这样，就可以用下式表示相对湿度：

$$\varphi = \frac{P}{P_s} \times 100\% \quad (1-25)$$

式中  $P$ ——空气的实际水蒸汽分压力，Pa；

$P_s$ ——同温度下的饱和蒸汽压，Pa。

由于我们有不同温度下的  $P_s$  值的现成资料 (附录 2)，而且有好几种能直接快速测定空气相对湿度  $\varphi$  的仪器 (如干湿球温度计)，所以用式 (1-25) 就可方便地进行各种计算。

绝对湿度是空气调节工程设计的重要参数，它能清楚地表示单位体积湿空气中所含的水蒸汽数量。但在建筑热工设计中则广泛应用相对湿度。这是因为相对湿度能直接说明湿空气对人体热舒适感、房间及围护结构湿状况的影响。表 1-1 所示为绝对湿度相同，而相对湿度不同的两个居室的室内热环境参数的比较。表中  $t$ 、 $f$  值是设定的， $P_s$  分别按两室气温从附录 2 查取， $P$  按式 (1-25) 计算。

$f$  相同  $\varphi$  不同的居室

表 1-1

参数名称	A 室	B 室	参数名称	A 室	B 室
室内气温 $t$ °C	18	10	实际蒸汽压 $P$ Pa	1261.0	1226.4
绝对湿度 $f$ $\text{g}/\text{m}^3$	9.4	9.4	相对湿度 $\varphi$ %	61.1	99.9
饱和蒸汽压 $P_s$ Pa	2062.5	1227.9			

由表可见，虽然两室绝对湿度完全相同，但 A 室相对湿度只有 61%，而 B 室则接近 100%，根据卫生工作者的研究，对室内热环境而言，正常的湿度范围大致是 30%~60%。A 室的湿度是正常的，而 B 室则已达饱和，极为潮湿。

### 三、露点温度

在一定温度和压力的条件下，绝对湿度一定的空气中所含的水蒸汽量是一定的，因而其实际水蒸汽分压力  $P$  也是一定的。其所能容纳的最大水蒸汽含量以及与之对应的最大水蒸汽分压力  $P_s$ ，也都是有一定的。既然一定状态的湿空气的  $P$  和  $P_s$  都一定，当然，其相对湿度  $\varphi$  也就是一定的了。



根据这种道理，设有一房间，如不改变室内空气中的水蒸汽含量，只是用干法加热空气（如用电炉加热）使其升温，则  $P_s$  相应变大，亦即所能容纳的最大水蒸汽含量随温度的升高而变大，但因为是用干法加热升温，在加热过程中既不增加也不减少空气中水蒸汽的含量，也就是保持  $P$  值不变，使相对湿度随之变小。

相反，如保持室内水蒸汽分压力  $P$  不变，而只是使气温降低，则因  $P_s$  相应变小，相对湿度变大。温度下降越多， $P_s$  就越小（参见附录 2），相对湿度越大。当温度降到某一特定值时， $P_s$  小到与  $P$  值相等，则相对湿度  $\varphi=100\%$ ，本来是不饱和的空气，终于因室温下降而达到饱和状态，这一特定温度称为该空气的“露点温度”。

露点温度通常用  $t_d$  表示，其物理意义就是空气中的水蒸汽开始出现结露的温度。如果从露点温度往下继续降温，空气中就容纳不了原有的水蒸汽，而迫使其一部分凝结成水珠（露水）析出。

冬天在寒冷地区的建筑物中，常常看到窗玻璃内表面上有很多露水，有的则结成很厚的霜，原因就在玻璃保温性能太低，其内表面温度远低于室内空气的露点温度。当室内较热的空气接触到冷的玻璃面被冷却时，就在表面上结成露水或冰霜。

**【例 1-1】** 用干湿球温度计测得某采暖居室气温  $t_i=18^\circ\text{C}$ ，相对湿度  $\varphi=61.1\%$ ，试求该居室空气的露点温度  $t_d$ 。

**【解】** 首先要求出该居室的实际水蒸汽分压力  $P$ 。查附录 2，知当  $t=18^\circ\text{C}$  时，饱和蒸汽压  $P_s=2062.5\text{Pa}$ ，从式 (1-25) 可反求出  $P$  为

$$P = P_s \varphi = 2062.5 \times 0.611 = 1260\text{Pa}$$

其次，按露点温度的定义，当该室气温降到  $P_s=1260\text{Pa}$  时所对应的温度，即为该室空气露点温度。从附录 2 中，查得  $P_s=1260\text{Pa}$  对应的露点温度为

$$t_d = 10.4^\circ\text{C}$$

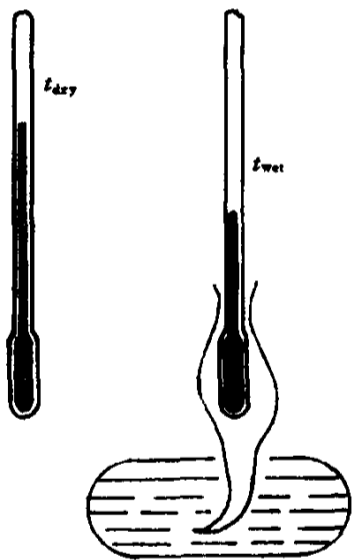


图 1-13 干湿球温度计

#### 四、湿球温度

用两支相同的水银温度计，一支的水银球用浸在水中的湿纱布包起来，称为湿球温度计；另一支不包湿纱布，称为干球温度计。如图 1-13 所示，就是干湿球温度计，其相应的读数分别称为湿球温度  $t_{wet}$  和干球温度  $t_{dry}$ ，而后者显然就是空气的温度。

如果空气是未饱和的，纱布上的水将向空气蒸发而使水温度降低，形成水与空气间的温差，导致空气向水传热，从而阻止水温和湿球温度的下降。当达到平衡时，水分蒸发所需热量等于从周围空气所获得的热量。湿球上温度不再下降，而保持一定值。此时湿球表面形成很薄的饱和空气层，湿球温度计的读数，即湿球温度，也可以认为是这一饱和空气薄层的温度。

从湿球温度的形成可看出，湿纱布上水分的蒸发能力主要与空气的相对湿度有关。如果空气是饱和的，其  $\varphi=100\%$ ，那么纱布上的水不会蒸发，这样干湿球温度将相等；空气的相对湿度越小，纱布上的水分蒸发越多，湿球温度越低。显然可用干、湿球温度来确定相对湿度。但由于  $\varphi$  与  $t_{wet}$  和  $t_{dry}$  的关系无法用一简单公式表明，一般用图表来表示。即可通过  $t_{wet}$  和  $t_{dry}$ ，在图表中查出  $\varphi$  值，这是确定  $\varphi$  值的常用方法之一。