

# 第1章 房屋各部位的传热

---

## 1.1 房屋与热流的关系

房屋的屋顶、墙等外围护结构的作用是使室内受到遮护，以不受室外气候变化的影响。如果仅从室内的冷热角度来考虑，则外围护结构的作用就是为了防热御寒，使室内形成温暖、舒适的环境。

日本的气候有四季之别。冬夏两季，房屋内外的热流向截然不同，春秋两季可谓舒适气候<sup>①</sup>。若仅就春秋两季而言，外围护结构的热工性能差一些也是可以的，而冬夏两季，则要求外围护结构具有绝热的性能。

图1-1所示为房屋冬季的热流方向。冬天，一般室内温度高，室外温度低，热流必然由室内流向室外。当室内不供暖时，室温的自然变化受太阳辐射热、与其它建筑物之间的热辐射，以及房间里人体散热等各因素的影响，它不同于室外气温。把这个自然变化的室温称为该房间的自然温度。

自然温度一般比室外气温要高几度。如果认为供暖一停止，室温就立刻同室外气温相等，是不对的。供暖一停止，室温是逐渐趋向于自然温度的。图1-2的曲线表示室内外气温及自然温度等在一天中的变化情况。冬季，房屋的热流方向大多是由室内流向室外的。

---

① 舒适气候指使人们感觉不冷不热的温湿度环境。

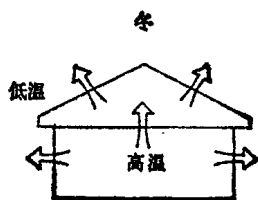


图 1-1 冬季房屋的热流方向

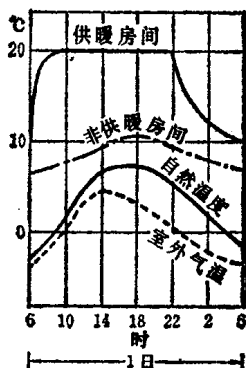


图 1-2 各温度的变化关系

夏季，白天和夜间的热流方向恰恰相反（图1-3）。白天，若房间不供冷，则由室外向室内的热流量相对较少，与该热量相比，房屋接受太阳辐射热却相当大。若对房间供冷，则室温比室外气温低得多，由室外流向室内的热流量就会相应增加。可是，到了夜间，室外气温一下降，热流便由室内流向室外。这时，应使白天室内所积蓄的热量，尽快地排向室外，以利于室内人们的生活。夏季，由于白天与夜间的热流方向不同，故应考虑相应的对策。

对有供暖或供冷的房间，采取绝热措施，使流出或流入

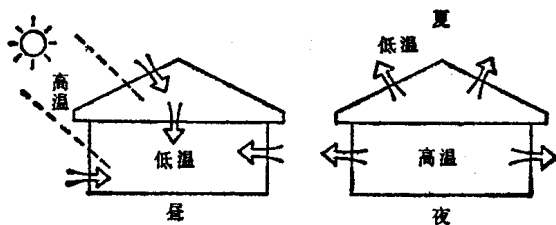


图 1-3 夏季房屋的热流方向

的热量减少，既可以节能，又可以使室内环境变得舒适。然而，夏天，一到夜里必须把白天房间内所蓄积的热量尽快地排向室外，这时，重要的是散热。尤其对于那些因受强烈日射而室温升得很高的房间，即使在白天也要尽量把热排放出去。这时，如果房屋采取了绝热措施，反倒会使房间变得更热。

使用绝热材料的目的在于减少房屋的热流出入，而日本气候又有四季之分，因此，绝热的处理必须与各地区的气候条件相适应。

一般总是认为，只要做绝热处理，就能改善建筑内部的热环境。但是必须进行“正确的绝热”，以免造成错误的或过分的绝热。

房屋内外的热流状况因发热体的种类、受热体的部位以及建筑结构形式等条件的不同而异。把热流的传递称为传热。传热可分为辐射、对流和导热三种方式。

所谓辐射传热，是以电磁波<sup>①</sup>的形式把热由一个物体传向另一个物体的现象。

所谓对流传热，是指具有热能的气体或液体在移动的同时所进行的热交换现象。

所谓导热，是指物体内部的热由高温侧向低温侧转移的现象。

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

现以图1-4的屋顶传热为例，来讨论当屋顶上被太阳照射时的受热情况。太阳的照射是辐射热，当太阳光射到屋顶

---

① 电磁波——物质的分子和原子在不断地运动，直到 $-273.16^{\circ}\text{C}$ 时仍不停止。当其运动时，便向外界放射出能量，这种向空间传播的波动，称为电磁波。

后，其中约有20~30%的热量被反射。屋顶表面所接受的热量，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辐射，并以对流换热的方式将热量传递给周围空气。

又如图1-5所示，当室内升着火炉时，炉体便向四周进行热辐射，并通过炉体表面向周围空气进行导热。同时，被加热的空气变轻，产生对流，转移热量。由于炉体的热辐射和室内空气温度的升高，使外围护结构的墙、地板、顶棚（或屋顶）等的温度随之升高，热便由室内向低温的室外流动。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进行着传热。

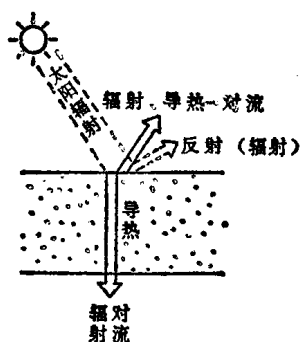


图 1-4 屋顶的传热

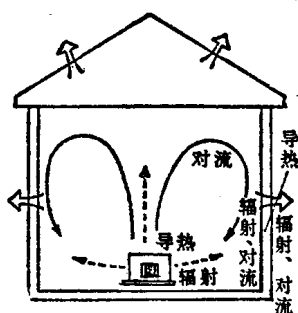


图 1-5 冬季由室内向室外的传热

建筑物的传热，通常是以这三种方式同时进行的。

## 1.2 传热的三种方式

### 1. 辐射

物体因自身具有一定的温度，便由表面发射出电磁波。

这种电磁波的发射,即使在物体温度达到绝对温度<sup>①</sup> 0K,即  $-273.16^{\circ}\text{C}$  时,也不会停止。所谓热辐射就是热由一物体透过真空或空气,以电磁波形式向它物体进行传递的现象。电磁波按照波长分类,如图1-6所示,这些电磁波一达到物体表面,便转换成热。

电磁波的波长取决于物体中分子运动的激烈程度,发射电磁波物体的分子运动越激烈,其波长越短;而分子运动越缓慢,则波长越长。因为物体的温度越高,分子运动越激烈,所以,物体的温度越高,所发射的电磁波就越以短波为主力,如图1-7所示,且相应的发热量也越大。这样,便可利用表面温度与辐射主力波长之间的关系特性<sup>②</sup>,根据物体所发射的电磁波的波长来测定物体的表面温度。

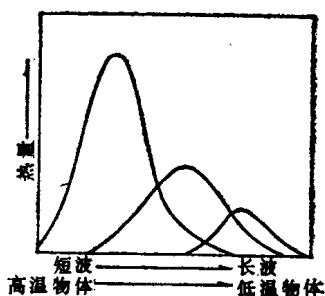
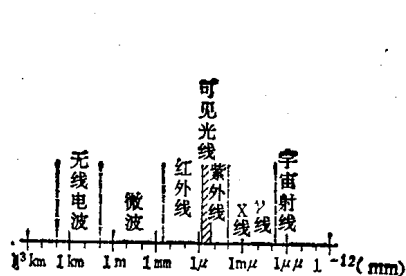


图 1-6 电磁波按波长分类

图 1-7 辐射主力波长与温度关系

太阳是以辐射方式把热送至地球的一个典型物体,其表面温度可达6000K。太阳辐射的波长分布情况如图1-8所示,

- ① 绝对温度 一般常用摄氏温度( $^{\circ}\text{C}$ ), 它是以冰的溶解和水的沸腾为基准而确定的。绝对温度的零度是  $-273^{\circ}\text{C}$  (精确值为  $-273.16^{\circ}\text{C}$ )。
- ② 系指维恩(Wien)位移定律中的温度与携带辐射能最多的单色射线的波长之间关系的特性。——译者注

太阳的主力波长在 $0.4\sim 0.7\mu$ 的可见光区域里。而 $0^{\circ}\text{C}$ 左右的物体的主力波约为 $8\sim 14\mu$ ，为远红外线<sup>①</sup>，但由于没有以光的形式而被人眼感受到的短波辐射，因而物体是暗的，也不能分辨其颜色。不过，这只是不能象光那样被看见而已，它还是在放射着与其温度相应的电磁波，即进行着红外线辐射。

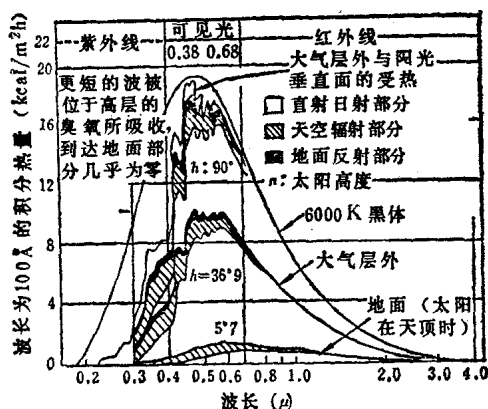


图 1-8 太阳辐射波长分布举例<sup>[3]</sup>

Å: 埃, 即 $10^{-10}\text{m}$ ;  $\mu$ : 微米, 即 $10^{-6}\text{m}$

关于可见光区, 可按主力波长的不同再加以区分, 当物体表面温度达 $700^{\circ}\text{C}$ 左右时呈暗红色;  $900^{\circ}\text{C}$ 左右时呈红色;  $1000^{\circ}\text{C}$ 左右时呈橙色, 温度再高时将接近于白色。在 $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ 的区间里, 是以 $0.64\sim 0.8\mu$ 为主力波, 而 $1000^{\circ}\text{C}$ 左右则以 $0.59\sim 0.64\mu$ 为主力波。

辐射换热是在从高温物体发射出电磁波的同时, 低温物体也发射出电磁波。因此, 高、低温物体之间的换热量, 应

① 远红外线——指红外线中波长较长的部分。而把波长较短, 靠近可见光区的部分称为“近红外线”(参见图1-6)。

为由高温侧物体辐射给低温侧物体的热量与低温侧物体辐射给高温侧物体的热量之差。结果，由于高温物体辐射的热量大，形成了热量由高温物体向低温物体的移动（图1-9）。

当人们靠近反射型石油炉或柴火时，因受到辐射热而感到暖和，而当将手或脸靠近冰块时，就会感到很凉。前者是因为炉子或柴火的辐射热大于人体放出的辐射热，而后者是因为恰恰相反的缘故。

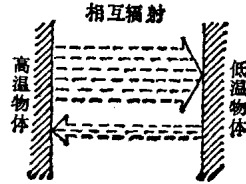


图 1-9 物体间的相互辐射

若将外界向物体表面辐射的热量以  $E$  表示，被物体吸收的热量以  $E'$  表示，则可写出下列公式：

$$\alpha = \frac{E'}{E}$$

$\alpha$  称为吸收率。黑体的吸收率为 1；白体的吸收率为 0。

一般建筑材料，对于可见光同时具有吸收、反射或透过的能力，所以是具有黑体与白体之间性质的非黑体。在非黑体中，凡对一切波长的辐射能的吸收和辐射，与同温度下的黑体的吸收和辐射具有相同比值的物体，称为灰体。有的物体仅对某些特定波长比其它波长能多辐射和多吸收，则称它为选择体。常用的建筑材料大多为灰体，而玻璃等为选择体。

因为热辐射也遵循可见光的规律，所以，光学中的有关定律均可在这里直接引用。例如，当发热体向各方向进行均等的热辐射时，辐射强度与距离平方成反比的关系可用下式表示。设  $J_1$  为热源的辐射强度，则以距离  $R$  为半径的球面上的辐射强度  $J_R$  为：

$$J_R = \frac{J_1}{R^2} \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}]$$

显然，该式与“光的照度”关系式完全相同。

太阳距离地球很远，与该距离相比，地球的受热面是很小的，因此，当太阳向地球表面辐射时，完全可以把这些热射线看成是平行线。这样，与热射线相垂直的表面受热量最大，而倾斜的表面受热量将随其倾斜度的变大而减小。

图1-10表示太阳与地球的北半球之间的关系。在夏天，太阳光近于垂直地投射到地面上；而冬天，太阳光对地面有一定的倾斜度；因此，地面上单位面积的受热量冬天比夏天小。地球上冬夏之分并不是因为太阳离地球的时远、时近，而是因为地轴的倾斜使地面上的辐射受热量发生了变化的缘故。

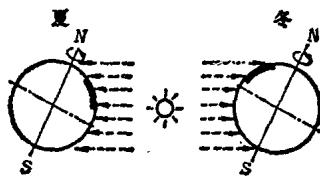


图 1-10 太阳对地球的辐射

地面上的建筑物一般为长方体，且分水平面与垂直面。太阳对地面上某点的直射日射量<sup>①</sup>可用太阳高度角 $h$ <sup>②</sup>和地面上法线面的直射日射量 $J_n$ 来表示，

即：水平屋顶上的日射量  $J_h = J_n \sin h \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}]$

垂直墙面上的日射量  $J_v = J_n \cos h \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}]$

① 直射日射量 就是直射的日光量。从太阳向地球的日射分为直接到达地球上的部分和向天空扩散与被天空吸收的部分。称前者为“直射日射”，后者为“天空日射”，二者之和称为“全日射”。

② 太阳高度角 太阳的直射光与地平面所构成的角度（参见图1-11）。

$$(J_n = J_0 P \cos \alpha)$$

式中  $J_0$ ——大气层外法线面的直射日射量；

$P$ ——大气透过率。

由上式可知，对于水平面，当太阳高度角越接近于 $90^\circ$ 时，受热量就越大，而对于垂直的墙面则恰恰相反。

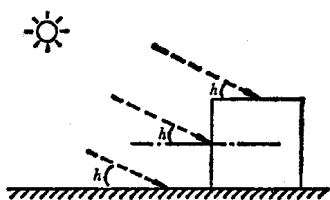


图 1-11 太阳高度角

冬天，我们常常看到在倾斜屋面上的积雪已被融化成冰柱，然而与此同时，地面上或平屋顶上的积雪并未融化，就是这个道理。例如，当太阳高度角为 $30^\circ$ ，屋顶的坡度为 $\frac{1}{2}$ 时

$$\text{水平面 } J_h = J_n \times 0.5$$

$$\text{倾斜度为 } \frac{1}{2} \text{ 的屋顶 } J_h = J_n \times 0.835$$

可见，斜屋面的受热量为水平面的1.67倍。

房屋受日射时，其受热量的大小随着与太阳的相对角度的变化而变化。夏季，当太阳直射头顶，即当太阳高度角接近 $90^\circ$ 时，屋顶的受热量最大；而冬季，太阳高度角变小，南向墙面的受热量最大。图1-12所示为房屋各部位在夏、冬二季晴天时，因日射而受热的情况。

## 2. 辐射换热的基本公式

物体的辐射热与其表面绝对温度的四次方成正比。对于黑体则得：

$$E = \sigma T^4 \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}]$$

$\sigma$ 称为斯蒂芬-波尔兹曼常数<sup>①</sup>，它是绝对黑体的辐射常数。

① 斯蒂芬-波尔兹曼常数为 $4.88 \times 10^{-8} \text{kcal/m}^2\text{hK}^4$ 或者 $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ 。

一般建筑材料均可看成为灰体，它比黑体的辐射能力小。故用下式表示：

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}]$$

在传热计算中可将该式换算成：

$$q = \varepsilon C_b \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}] \quad (1-1)$$

式中  $C_b$ ——绝对黑体的辐射系数，其值一般为  $4.88 \sim 4.9 \text{ kcal/m}^2\text{hK}^4$ ，

$\varepsilon$ ——辐射率，它取决于物体的颜色及表面的粗糙程度，其值为  $0 \sim 1$ 。

由表1-1可知，抛光的铝  $\varepsilon$  值为  $0.02 \sim 0.04$ ，而混凝土的  $\varepsilon$  值为  $0.85 \sim 0.95$ ，其差别很大。象抛光铝之类的物体对于辐射具有良好的反射能力，相反，它对热的放散却较慢。而黑色物体对于辐射吸收得较多，放散也较快。在一定的温度下，一般物体的辐射率  $\varepsilon$  和吸收率  $\alpha$  值可认为相等。但也并不尽然，譬如屋顶的表面，它可将温度较高

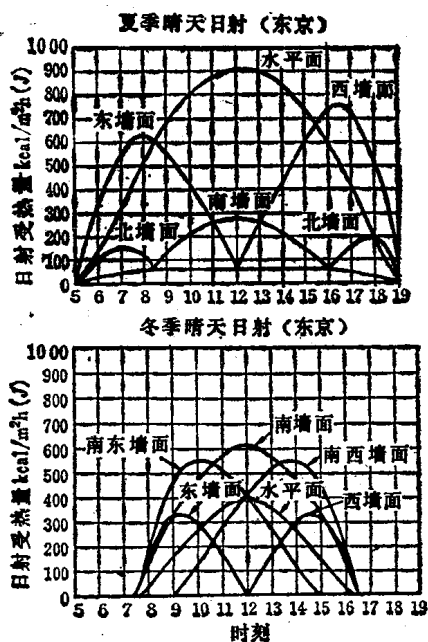


图1-12 夏、冬季晴天的日射  
受热量 [2] [9]

各种材料的辐射率( $\epsilon$ ), 辐射系数( $C$ )  
及日射吸收率( $a_{su}$ )

表 1-1<sup>1)</sup>

| 等级 | 材 料 (表面)                        | $\epsilon$<br>(10~40°C) | $C=\epsilon \times 4.88$ | $a_{su}$  |
|----|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|
| 0  | 绝对黑体                            | 1.00                    | 4.88                     | 1.00      |
| 1  | 大空腔壁上所开的小孔                      | 0.97~0.99               | 4.73~4.83                | 0.97~0.99 |
| 2  | 黑色非金属表面(沥青、石板、油毡、纸)             | 0.90~0.98               | 4.39~4.73                | 0.85~0.98 |
| 3  | 红砖、瓷砖、混凝土、岩石、生锈的钢板、深色油漆(红、褐、绿等) | 0.85~0.95               | 4.15~4.64                | 0.65~0.80 |
| 4  | 黄及纯黄色砖、瓷砖、耐火砖、耐火粘土              | 0.85~0.95               | 4.15~4.64                | 0.50~0.70 |
| 5  | 白色或淡奶油色砖、瓦、油漆、纸、粉刷、涂料           | 0.85~0.95               | 4.15~4.64                | 0.30~0.50 |
| 6  | 窗玻璃                             | 0.90~0.95               | 4.39~4.64                | 大部分透过     |
| 7  | 光亮的铝板、金铜板                       | 0.40~0.60               | 1.95~2.93                | 0.30~0.50 |
| 8  | 纯色黄铜、铜、铝、锌板、遮光铁板                | 0.20~0.30               | 0.98~1.46                | 0.40~0.65 |
| 9  | 研磨的黄铜、铝、蒙内尔合金(镍、铜、铁合金)          | 0.02~0.05               | 0.098~0.244              | 0.30~0.50 |
| 10 | 研磨的铝、白铁皮、镍、铬                    | 0.02~0.04               | 0.098~0.195              | 0.10~0.40 |
| 11 | 石棉板                             | 0.96                    | 4.68                     |           |
| 12 | 玻璃板                             | 0.94                    | 4.59                     |           |
| 13 | 红砖                              | 0.93                    | 4.54                     |           |
| 14 | 粉刷                              | 0.91                    | 4.44                     |           |
| 15 | 橡木材料(刨光的)                       | 0.90                    | 4.39                     |           |
| 16 | 锌板(略带光泽的, 经氧化处理的, 呈灰色)          | 0.23~0.28               | 1.12~1.37                |           |
| 17 | 氧化铝板                            | 0.1~0.2                 | 0.49~0.98                |           |
| 18 | 铝箔                              | 0.06                    | 0.29                     |           |
| 19 | 精磨铝板                            | 0.04                    | 0.195                    |           |
| 20 | 水面                              | 0.95                    | 4.64                     |           |

注: 表中1~10取自ASHVE Guide, 1959, 其它根据McAdams, Heat Transmission.

的可见波设加以吸收，而辐射出低温的红外线，在这种情况下， $\varepsilon$ 和 $\alpha$ 值就不相等。在表1-1中列举了一些材料的 $\varepsilon$ 和 $\alpha_{s,u}$ 值，其中某些材料的 $\varepsilon$ 和 $\alpha_{s,u}$ 值并不相等，便是这个道理。

因为低温侧物体也在不停地热辐射，所以各物体互相间的辐射换热量之差就是由高温侧流至低温侧的辐射换热量。当两物体表面温度分别为 $T_1$ 、 $T_2$ 且 $T_1 > T_2$ 时，二物体的辐射换热量为：

$$q_{12} = \varphi_{12} \varepsilon_1 \varepsilon_2 C_b \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}] \quad (1-2)$$

式中  $\varphi_{12}$ ——形态系数<sup>①</sup>；

$\varepsilon_1$ ——物体1的辐射率；

$\varepsilon_2$ ——相对于物体1之他物体的辐射率。

（应当指出，上式只有在两物体表面都接近于黑体时方可成立，而对于铝箔之类辐射率很小的表面，应利用有效辐射常数进行计算）。

$\varphi_{12}$ 是由两物体之间彼此的相对位置决定的，其值在0~1之间。物体表面之间或者是点对面的关系；或者是面对面的关系；进而还有面的大小以及相互平行、垂直的关系。 $\varphi_{12}$ 就是由这些关系来确定的。即从某点或面所看到对方的比例，从而导致由彼此间所构成的立体角来确定。

当相对二物体的表面辐射率都近于黑体时，利用前式计算辐射换热量是合适的。而当它们之中某一个物体的辐射率较小或者二者是平行平面等情况时，则应采取将二表面的辐射率与黑体的辐射系数 $C_b$ 结合成 $C_{12}$ 的计算方法。把 $C_{12}$ 称为辐射体系的有效辐射常数。此时，辐射换热量为：

① 即角系数。——编者

$$q_{12} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} \cdot A_1 \quad [\text{kcal/h}] \quad (1-3)$$

式中  $A_1$ ——物体 1 的表面积 ( $\text{m}^2$ )。

在下列两种条件下  $C_{12}$  的求法

(1) 对于互为平行的二平面 ( $\varphi = 1$ )

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} C_b \quad (1-4)$$

(2) 当表面 1 被表面 2 完全包围时

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} C_b \quad (1-5)$$

$A_1$ 、 $A_2$  分别为物体 1 及物体 2 的表面积,  $\frac{A_1}{A_2}$  便是形态系数  $\varphi_{12}$ 。

房屋中壁体的空气间层的辐射换热的情況与条件 (1) 相同, 因为空气间层的间距与其表面积相比小得多, 两平面可视为无限大的平行平面, 所以可认为  $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$  (参见 1.4 节 1. 的计算举例)。

而条件 (2) 可用于室内人体与各围护物内表面之间的辐射换热的计算。

例如, 某房间的地板面积为  $3.6 \times 3.6 \text{m}^2$ , 顶棚高 2.4 m, 它们的平均表面温度为  $15^\circ\text{C}$ , 当人体表面平均温度为  $20^\circ\text{C}$  时, 求人体向四周辐射的热量。

设人体表面积  $A_1 = 1.6 \text{m}^2$ ,  $T_1 = 293\text{K}$ , 室内表面积  $A_2 = 60.08 \text{m}^2$ ,  $T_2 = 288\text{K}$ ,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均取 0.9, 则:

$$q_{12} = \frac{4.9}{\frac{1}{0.9} + \frac{1.6}{60.48} \left( \frac{1}{0.9} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{293}{100} \right)^4 - \left( \frac{288}{100} \right)^4 \right] \times 1.6$$

因为

$$\frac{1.6}{60.48} \left( \frac{1}{0.9} - 1 \right) \approx 0$$

故  $q_{12} = 4.9 \times 0.9 \times (73.7 - 68.8) \times 1.6 = 34.6 \text{ kcal/h}$

通常，人体感觉舒适时的放热量为  $70 \sim 80 \text{ kcal/h}$ ，可知上述辐射放热量在人体总放热量中所占比例是相当大的。如果四周围护结构没进行绝热，则房间内表面温度就会更低，人体的辐射放热量还要随之增大，人体就会感到寒冷。

图1-13及1-14分别为二个互为平行和互为垂直的长方形平面之间的 $\varphi_{12}$ 曲线。对于室内的地板、墙、顶棚之间的关系均可利用该图进行计算。

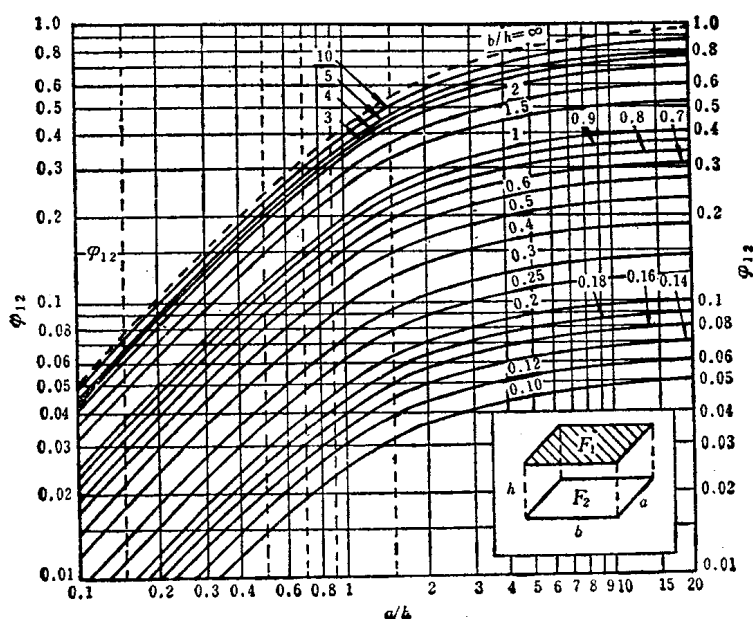


图 1-13 两平面互为平行时的 $\varphi_{12}$  (Mackey et al) [11]

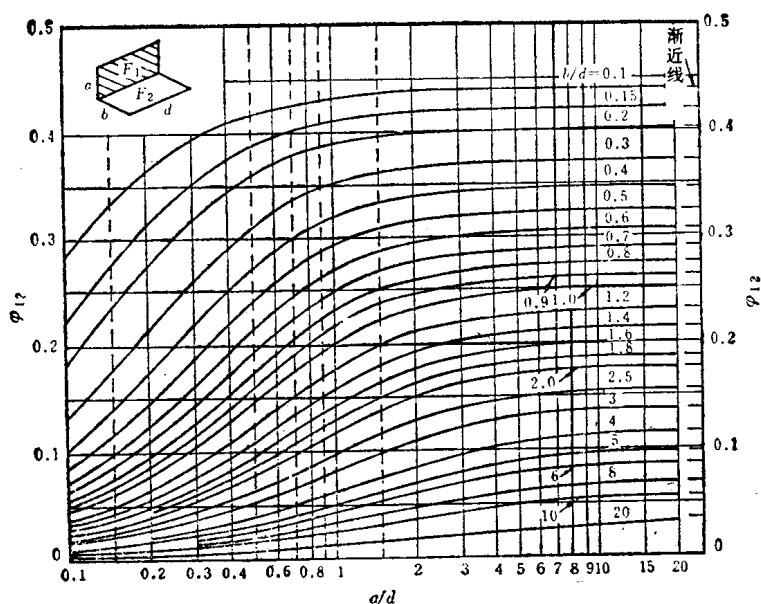


图 1-14 两平面互为垂直时的 $\varphi_{12}$  (Mackey et al) [11]

### 3. 辐射的实例

#### (1) 受日射的屋顶

当采用图1-15所示之外裸型绝热防水的屋顶或采用钢板之类屋顶时, 因为防水层或钢板的热容量都很小, 一受太阳照射, 温度将急剧上升。如果这时所接受的日射量能全部转换成温度的上升, 那么, 表面温度必定高达数百度。

实际上, 屋顶的温度上升得越高, 由屋面向大气所传递和辐射的热量也越多, 其结果, 温度是在射入与放散的能量保持在某种平衡状态的过程中而上升的, 即

$$q_s + q_a = q_r + q_o + q_i$$

上式各项分别为:

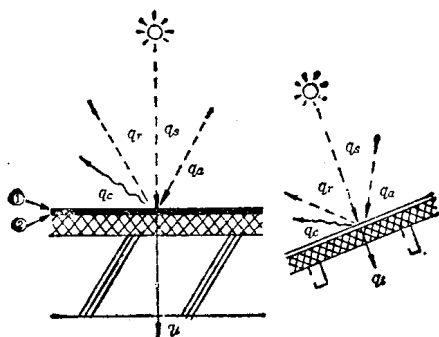


图 1-15 受日射时屋顶的传热

$q_s$ —被外表面吸收的日射量； $q_a$ —被外表面吸收的大气辐射热； $q_r$ —由外表面辐射出的热量； $q_c$ —由外表面向大气的对流换热量； $q_i$ ——由外表面向室内的导热量。（对于墙体、还应加入地物反射的辐射热）

$$q_s = a_{su} I$$

式中， $a_{su}$ 为屋顶的日射吸收率； $I$ 为全天的日射量。

$$q_a = \varepsilon_s \varphi_a \sigma T_a^4 (a + b \sqrt{f}) \quad \text{晴天时}$$

式中， $\varepsilon_s$ 是外表面辐射率； $\varphi_a$ 为外表面对天空的形态系数； $a$ 取0.51； $b$ 取0.076； $f$ 为大气中水蒸汽分压(mmHg)； $T_a$ 为室外气温。

$$q_r = \varepsilon_s \sigma T_s^4$$

式中， $T_s$ 为外表面温度。

$$q_c = \alpha_o (\theta_s - \theta_a)$$

式中， $\alpha_o$ 为对流换热系数； $\theta_s$ 为外表面温度； $\theta_a$ 为室外空气温度。

$$q_i = k (\theta_s - \theta_r)$$

式中， $k$ 为屋顶外表面至室内的传热系数； $\theta_r$ 为室内温度。

故可得出下列热平衡式：

$$a_{su}I + \varepsilon_s \varphi_a \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{f}) = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_c (\theta_s - \theta_a) + k(\theta_s - \theta_r)$$

盛夏，晴天无风时，被太阳照射的屋顶，在一天中达到最高温度的时间约在13点左右。这时，如按图1-15所示，当屋顶的绝热材料表面覆盖着热容量很小且厚度很薄的材料时，屋顶一经受到日射，温度便会立刻上升。

在上述热平衡式中，右边第一项乃是从表面向大气辐射的热量，它与绝对温度的四次方成正比。因此，表面温度一旦升高，由表面向外界辐射的热量也将急剧增大。假定表面温度为80°C，则得：

$$q_r = \varepsilon_s \sigma T_s^4 = \varepsilon_s C_b \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 = 0.9 \times 4.88 \left( \frac{273 + 80}{100} \right)^4 = 682 [\text{kcal/m}^2\text{h}]$$

可见，把接受的太阳辐射热又几乎全部辐射出去了。若设表面温度为100°C，则 $q_r$ 值可达到850kcal/m<sup>2</sup>h，这表明仅由表面辐射就可将大晴天的最大日射量完全放散出去。

对于日本的绝热屋顶，即使在其表面完全没有热容量的条件下，在无风夏天受最大日射时，表面温度达到85°C左右即已平衡，不会再升高。而当有风时，由于 $q_c$ 增大， $\theta_s$ 还会有所降低。

另外，在实测中发现，最高温度并非在外表面处，而是发生在防水层或钢板与绝热材料的交界面上，在该处测得的温度达80°C以上。

图1-16是对屋顶各层所测定的温度曲线。屋顶结构如图1-15，①为屋顶表面；②为绝热材料与表面材料的界面。如图可知，②处的温度远远高于①处的温度。由于屋顶表面的辐射放热量与其温度的四次方成正比，所以，以太阳的热量来