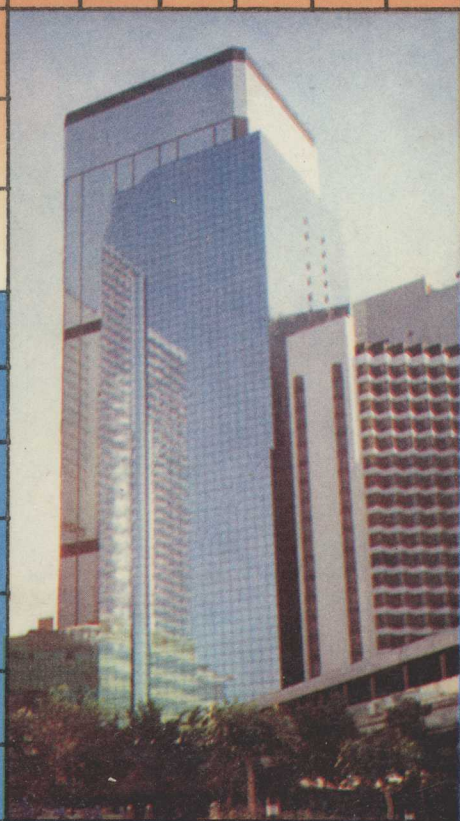


幕墙玻璃真空镀膜技术

杨乃恒 主编



东北大学出版社

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

幕墙玻璃真空镀膜技术/杨乃恒主编.

—沈阳:东北大学出版社,1994.11

ISBN 7-81006-892-X

I. 幕…

II. ①杨…②姜…

III. 玻璃-镀膜-真空

IV. TB·38

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

辽宁省实验印刷厂印刷

1994年11月 第1版

开本:787×1092 1/16

印数:1~4000册

东北大学出版社发行

1994年11月 第1次印刷

印张:14.5 字数:362千字

定价:18元

序 言

80年代初期,香港中区的海傍,耸立起一片直插云端、光彩流金的商业大厦,吸引了不少游人的注目。这种商厦所采用的新兴镀膜玻璃材料,除外表美观外,还有遮阳、节能等功能。

近年来,中国各省落成的商场和酒店,也大量采用进口或国产的镀膜玻璃作为墙体材料。这种工艺,已成为当前国内建筑行业 and 真空界的一个热门课题。提高膜层质量和技术水平,增强竞争能力,已被刻不容缓地提上议程。但是迄今为止尚缺少这方面的参考书籍。

我本人在1994年的中国真空学会常务理事会上提议,希望由学会组织有关方面的教授专家写一本“幕墙玻璃真空镀膜技术”的专著。并以此为教材,通过举办学习班来进一步提高和普及这方面的知识。此事得到中国真空学会理事长华中一教授的赞同。经研究,聘请中国真空学会常务理事、东北大学教授杨乃恒担任主编。中国真空学会副理事长、沈阳真空技术研究所教授级高工姜燮昌担任主审,并组织国内有关方面教授专家参加编写。

本书既介绍了真空技术基础和薄膜技术基础,又系统介绍了各种镀膜工艺和设备,是一本理论和实际相结合的教材,也可供从事玻璃镀膜方面的工程技术人员参考。

我深信本书的出版和发行,对进一步发展和提高中国幕墙玻璃真空镀膜技术,是一项重要的贡献。

中国真空学会常务理事
香港真空有限公司董事
邵公田

一九九四年十二月二十日

前 言

《幕墙玻璃真空镀膜技术》一书是中国真空学会为在国内提高和推广幕墙玻璃真空镀膜这一高新技术而责成有关人员编写的一部专著。

该书是在调查研究的基础上,根据理论联系实际的原则,构思了全书各章节的内容。全书共有十章,分别为概论、真空技术基础、薄膜技术基础、溶胶—凝胶法镀膜(非真空法)、真空蒸发镀膜工艺及设备、真空溅射镀膜工艺及设备、平面磁控溅射镀膜制备工艺、平面磁控溅射镀膜玻璃生产线、镀膜玻璃的质量与检查、幕墙玻璃的应用。

本书由杨乃恒担任主编,王毓民与李云奇担任副主编。第一章由姜燮昌编写,第二、三章由杨乃恒编写,第四、九、十章由鲁文萍与王业西编写,第五、六章由李云奇编写,第七章由信觉俗编写,第八章由王毓民编写。全书由姜燮昌担任主审。

本书可供建筑玻璃行业、真空设备行业以及其他有关行业的工程技术人员、管理人员和大专院校有关专业师生参考使用。

本书的出版得到了中国真空学会的关怀、支持和中国真空学会常务理事邵公田先生设立的真空应用推广基金的资助,同时也得到了东北大学、机械工业部沈阳真空技术研究所、国家玻璃质量监督检测中心、广东真空设备厂股份有限公司、上海曙光机械制造厂、上海真空泵厂、沈阳市真空机械三厂、锦州真空设备厂、兰州真空设备厂及沈阳《真空》杂志社等单位的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,笔者水平和经验有限,书中不妥和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

1994年10月

目 录

第1章 概 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 普通玻璃的光学性能	(1)
1.3 镀膜玻璃的遮阳隔热原理	(2)
1.4 阳光控制膜和低辐射率膜的材料与结构	(4)
1.5 镀膜玻璃的热性能	(6)
第2章 真空技术基础	(11)
2.1 真空物理	(11)
2.2 真空获得	(18)
2.3 真空测量	(31)
2.4 高真空系统的设计与运行	(37)
第3章 薄膜技术基础	(51)
3.1 成膜技术	(51)
3.2 薄膜的形成及其结构	(73)
第4章 溶胶—凝胶法镀膜	(79)
4.1 绪 言	(79)
4.2 溶胶—凝胶法的基本原理	(79)
4.3 溶胶—凝胶法镀膜的特点	(81)
4.4 溶胶—凝胶法镀膜工艺	(82)
4.5 溶胶—凝胶法镀膜的应用	(87)
第5章 真空蒸发镀膜工艺及设备	(90)
5.1 真空蒸镀法制备幕墙玻璃的工艺	(90)
5.2 幕墙玻璃生产线中的设备	(95)

第6章 真空溅射镀膜工艺及设备	(103)
6.1 磁控溅射法制备幕墙玻璃的工艺	(103)
6.2 真空磁控溅射镀膜机	(113)
第7章 平面磁控溅射镀膜玻璃制备工艺	(122)
7.1 概 述	(122)
7.2 薄膜材料	(124)
7.3 镀膜工艺	(129)
7.4 幕墙玻璃颜色的开发	(139)
7.5 遮阳隔热膜系	(141)
第8章 平面磁控溅射镀膜玻璃生产线	(143)
8.1 引 言	(143)
8.2 平面磁控溅射镀膜玻璃生产线的典型构成及其功能	(147)
8.3 平面磁控溅射镀膜生产线的安装和保养	(170)
第9章 镀膜玻璃的质量与检验	(173)
9.1 概 述	(173)
9.2 镀膜玻璃的外观质量	(176)
9.3 膜层牢固度	(181)
9.4 镀膜玻璃的化学稳定性	(184)
9.5 镀膜玻璃耐久性	(187)
9.6 镀膜玻璃光学、色度学性能测试	(191)
第10章 幕墙玻璃的应用	(207)
10.1 幕墙玻璃的一般应用	(207)
10.2 安全幕墙玻璃的使用	(211)
10.3 镀膜中空玻璃的应用	(215)

第1章 概 论

姜燮昌

机械工业部沈阳真空技术研究所 教授级高工
中国真空学会副理事长

1.1 引 言

由于城市土地价格的日益上涨,迫使建筑物向高层发展。从70年代开始,在西方建筑学派中出现一种令人瞩目的派别,叫做“光亮派”建筑。这种建筑物其迎光部位几乎全部用玻璃装饰起来,组成所谓“玻璃幕墙”。由于用玻璃作为墙体材料,可使高层建筑的整体重量大大减轻,同时也提高了建筑物的艺术魅力,改善了人类的居住环境。

然而,随着使用玻璃面积的大幅度增加,新的问题也就接踵而来。在夏季,尤其是低纬度近赤道的热带和亚热带地区,光照时间长,在强烈的太阳光辐射下,就有大量的热量通过玻璃照射到室内,使室温大大升高,人们不得不配置大规格的空调设备;同时,强烈的阳光又眩人眼目。而在冬季,尤其是高纬度的温带和寒冷地区,光照时间短,气温低,室内热量又会通过大面积的玻璃幕墙散逸到室外,使取暖费用显著增加。据国外有关资料报导,从全世界消耗能量的统计来看,在取暖和空调期间,其中40%的能量是用于建筑物内的室温控制。所以,这种传统的单一采光材料——建筑玻璃已无法满足现代建筑发展的需要,逐步被具有节能、控光、调温、改变墙体结构和具有艺术装饰效能的多功能玻璃新产品所替代。这种玻璃新产品中发展最快、应用最广的是着色玻璃(茶色、蓝色、灰色等)、镀膜玻璃以及由着色玻璃、镀膜玻璃和普通浮法玻璃为基材复合而成的中空玻璃。

着色玻璃是在玻璃原料中加入着色剂经熔制成型而成。着色玻璃能起到控光、改善室内环境的作用,但表面无镜面效果,美学性能差,热反射能力低。

镀膜玻璃是用于高层建筑最理想的墙体材料,而且它还具有单向透像的功能,在白天,从室内往外眺望,通览无阻,而从室外向内探视则一无所望,从而起到帷幕的作用。镀膜玻璃用作建筑物的外装饰,能将外界景物映现到玻璃幕墙上,显得富丽堂皇,绚丽多彩。

镀膜玻璃可用真空蒸镀法、溶胶—凝胶法、溅射镀膜法等来制取。特别是磁控溅射技术出现以后,由于它能在大面积玻璃上镀制结合力好、均匀性好、重复性好的高质量膜。因而磁控溅射镀膜玻璃被广泛应用于现代建筑物上。

1.2 普通玻璃的光学性能

太阳光谱按波长分为三部分:紫外光、可见光、红外光。紫外光(占3%)是不可见光,其波长在 $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$;可见光(占48%)波长在 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$;红外光(占49%)也是不可见光,波长在

0.7~2.1 μm 。投射到地球表面上的太阳光能量的 98% 处于波长在 0.3~2.5 μm 范围内 (图 1-1)。而普通玻璃透射率最高的区域恰巧就在这个范围 (图 1-2)。

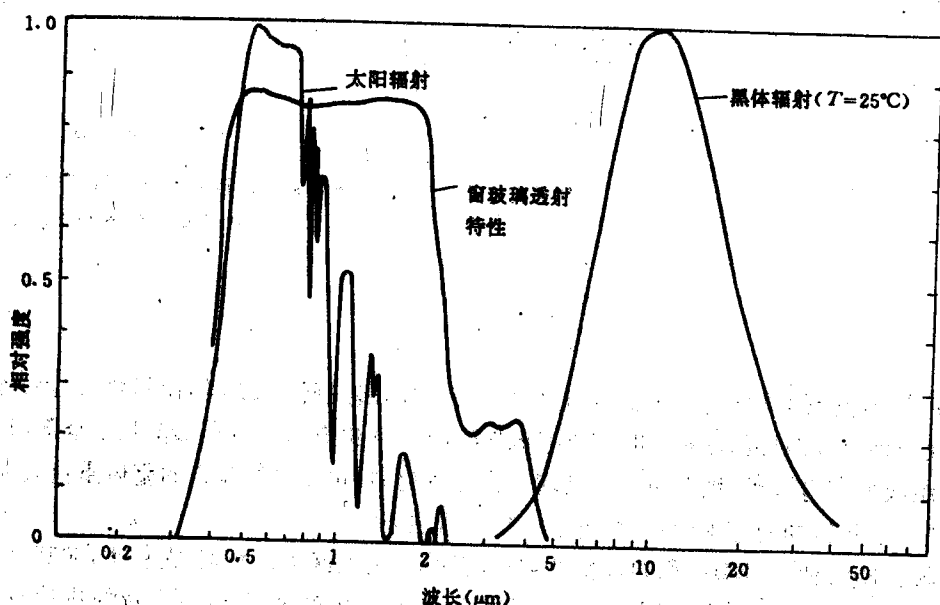


图 1-1 太阳辐射和黑体辐射 ($T=25^{\circ}\text{C}$) 的强度与波长的关系曲线

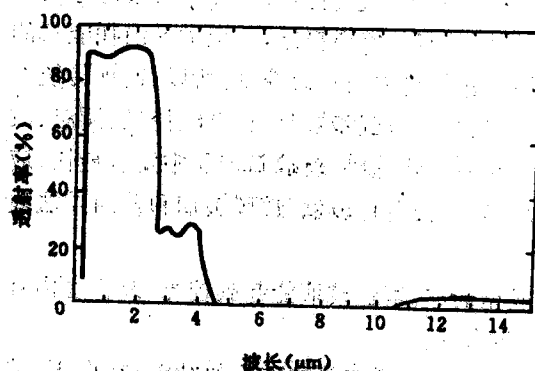


图 1-2 普通窗玻璃的透射特性

假如投射到玻璃上的光辐射以 100% 来表示, 而透射过玻璃的部分为 t_s (%), 在玻璃表面反射的部分为 r_s (%), 被玻璃吸收的部分为 a_s (%), 则有:

$$t_s + r_s + a_s = 100\%$$

玻璃的透射率 t_s 、反射率 r_s 和吸收率 a_s 取决于玻璃的种类、玻璃的厚度以及投射到玻璃上光线的角度。对于不同波长的辐射, 玻璃的 t_s 、 r_s 、 a_s 的值也不同, 即 t_s 、 r_s 、 a_s 值是波长的函数。

对于 3mm 厚的普通玻璃, 在太阳光垂直入射的情况下, 在全部太阳光辐射中:

$$t_s = 87\%; r_s = 8\%; a_s = 5\%。$$

1.3 镀膜玻璃的遮阳隔热原理

1.3.1 阳光控制膜

假如在玻璃上镀上一层光学薄膜材料, 使得玻璃 (幕墙) 对于太阳光中的可见光部分保持有较高的透射率, 而对于太阳光中的红外线部分有较高的反射率, 以及对于太阳光中的紫外部分有很高的吸收率, 则就能达到:

(1)在白天保持建筑物内有足够的亮度;

(2)在夏天,特别是在低纬度地区,不致由于透过玻璃的太阳热辐射过多,而使室内温度过高;

(3)由于减少了紫外线的照射,从而大大减少了室内家具、地毯、墙纸、装饰物等的褪色,延长了它们的使用寿命。

这种光学薄膜被称为阳光控制膜(solar control film),俗称遮阳膜,镀有这种膜的玻璃称为阳光控制玻璃,亦称遮阳玻璃。

图1-3表示了3mm厚的普通玻璃和6mm厚的某种镀有阳光控制膜的玻璃的遮阳性能比较。

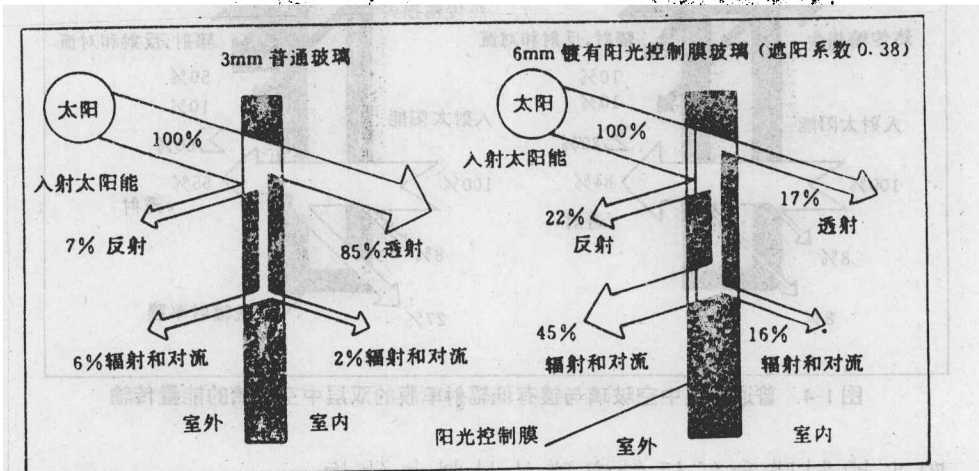


图1-3 未镀膜玻璃与镀有阳光控制膜玻璃能量传输的比较

从图1-3可见,经过3mm厚的普通玻璃进入到室内的太阳辐射占投入到玻璃上全部太阳辐射的87%,而镀有阳光控制膜的6mm厚的这种镀膜玻璃进入到室内的太阳辐射只占投射到它表面上全部太阳辐射的33%。这意味着当室内夏天采用空调降温时,能源的消耗可节省50%以上。

1.3.2 低辐射率膜

从图1-2中可见,普通玻璃对于波长在 $4.5\sim 10\mu\text{m}$ 之间的红外辐射是不透明的。而当室内温度为293K时,红外辐射的能量的98%落在 $3\sim 30\mu\text{m}$ 的范围内。根据维恩定律,辐射力最大值下的波长 λ_{max} 与绝对温度 T 之间的关系如下:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T(\text{K})} \quad (\mu\text{m})$$

代入 $T=293\text{K}$,得 $\lambda_{\text{max}}=9.89\mu\text{m}$ 。测得3mm普通玻璃对于293K的红外辐射来说,为

$$t_r=3\%; r_r=8\%; a_r=89\%$$

即89%的红外辐射能量被玻璃吸收,使玻璃温度升高,然后再通过玻璃的辐射和与周围(玻璃窗面两侧—即室内外)空气的热交换而散发其热量,因而使室内很大一部分热量散逸到了室外。减少这种热量散逸的有效措施之一就是:在玻璃表面镀上一层低辐射系数的薄膜,称为低辐射率膜(Low emissivity film),它对红外线有较高的反射率。这类薄膜俗称隔热膜,镀有这类膜的玻璃称为低辐射率玻璃,亦称隔热玻璃。通常使用方法是将低辐射率玻璃与普通玻璃

组成中空玻璃,主要用于高纬度寒冷地区。图1-4表示通过普通的双层中空玻璃和镀有低辐射率膜的双层中空玻璃的能量传输情况的比较。从图1-4中可以看出,如果采用普通的双层中空玻璃,室内的能量其中80%是通过玻璃传输到室外。如果在双层中空玻璃的内侧一表面镀上一层低辐射率膜(隔热膜),热量传输损失可降低到40%。

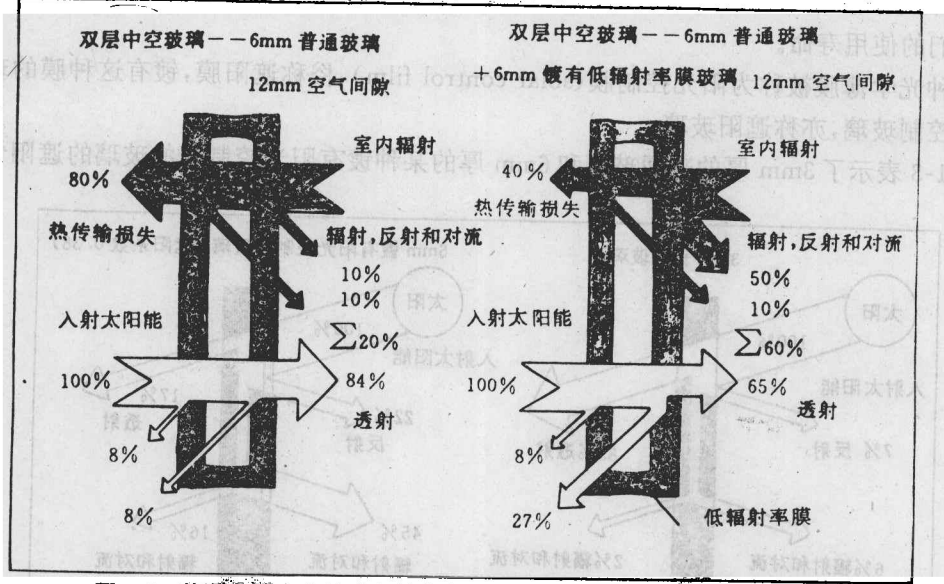


图1-4 普通双层中空玻璃与镀有低辐射率膜的双层中空玻璃的能量传输

1.4 阳光控制膜和低辐射率膜的材料与结构

1.4.1 阳光控制膜

用于在玻璃上镀阳光控制膜的材料有:

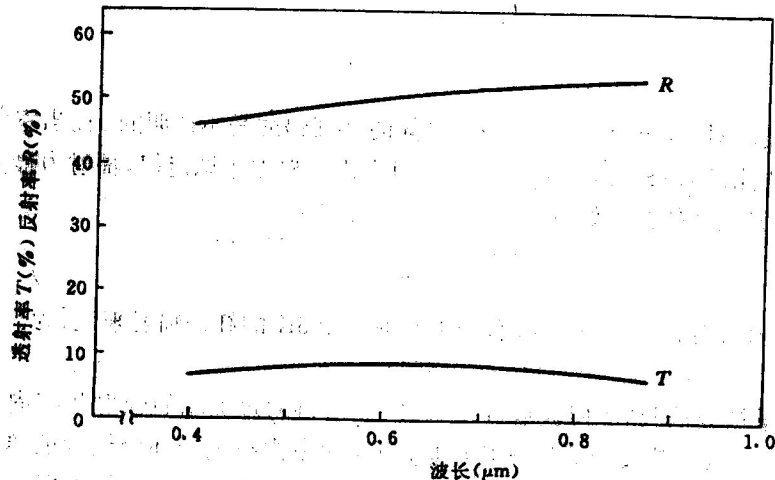


图1-5 单层阳光控制膜的反射与透射特性

(1)纯金属材料,例如铬、钛、镍、铁等及它们的合金(例如不锈钢),大部分属于负电性元素。用这类材料制成的薄膜的反射率和透射率与波长几乎无关。图1-5是这类阳光控制膜的反射与透射特性。通常对于某一种材料的膜,其透射率愈高,则反射率愈低。

(2)金属氧化物,例如氧化钛、氧化锡、氧化

锡锡等。从结构上来说,在玻璃上镀阳光控制膜最好是采用金属薄膜与金属氧化物薄膜的组合,调整组合薄膜的成份和厚度,就可以达到在较宽的范围内调节阳光控制膜的透射率、反射率以及外观色彩特性。图1-6是介质膜/金属膜/介质膜这种三层薄膜组成的阳光控制膜的结构示意图。但是这种多层膜的镀膜玻璃制造成本较高,工艺也很复杂。

镀膜玻璃生产厂通常对阳光控制膜的光学特性只测定其在可见光波段的透射率和反射率。美国 Airco 公司给出的阳光控制膜玻璃在可见光波段的透射率为8~40%,膜面反射率为24~59%。德国 LH 公司给出的阳光控制膜玻璃在可见光波段的透射率为8~30%,膜面反射率为9~39%。

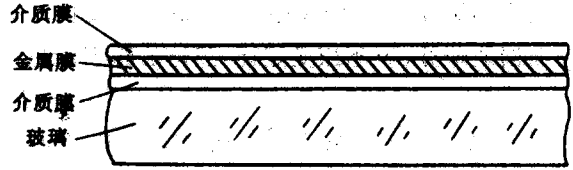


图1-6 镀膜玻璃的三层膜式结构

1.4.2 低辐射率膜

通常采用正电性金属元素,如金、银、铜等作为在玻璃表面镀低辐射率膜的材料。其薄膜结构也常采用如图1-6所示的三层膜或多层膜结构:靠玻璃的一层膜是介质膜,以增加膜层与玻璃的结合力,中间一层是上述金属材料的膜,以求达到低的辐射率;最外面的一层膜也是介质膜,这是一层减反射膜,以求增加可见光和太阳光中近红外辐射的透射率。一般要求低辐射率膜对于从室外照射进室内的太阳光(包括可见光和近红外辐射)的透过率应大于50%,辐射率小于0.1。图1-7表示国外资料给出的镀有 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Cu}/\text{TiO}_2$ 三层膜的低辐射率玻璃的透射与反射特性。

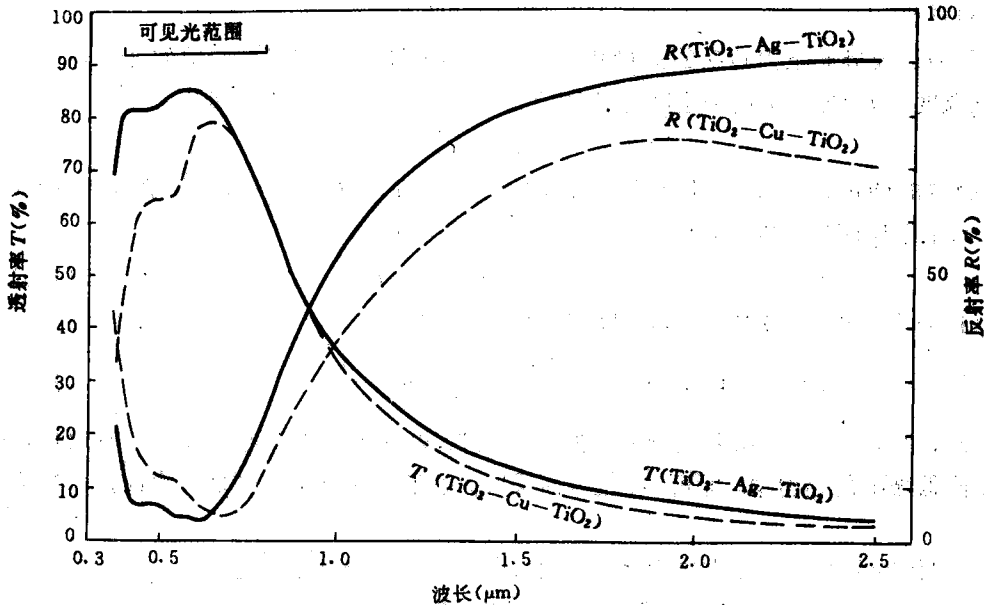


图1-7 涂覆有多层膜的低辐射率膜玻璃的透射与反射特性

1.5 镀膜玻璃的热性能

在太阳辐射最强时,其辐射能量为:

$$S=800 \quad \text{W/m}^2 \quad (1.1)$$

当空间温度 $T=293\text{K}$ 时,辐射最强的波长 $\lambda_{\max}=9.89\mu\text{m}$,正处于红外波段。

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,黑体的辐射能量 S_r 与其绝对温度 T 的四次方成正比。

$$S_r=\sigma T^4 \quad (1.2)$$

用 $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8}\text{W/m}^2\text{K}^4$ 和 $T=293\text{K}$ 代入得出:

$$S_{293}=418\text{W/m}^2 \quad (1.3)$$

根据式(1.1)和式(1.3)比较可以看出:空间辐射能量(红外线)大约只是太阳辐射能量的一半。

玻璃的平均导热系数 λ_R 为:

$$\lambda_R=0.8 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (1.4)$$

作为计算参量的传热系数 α_i 和 α_a 确定如下:

$$\alpha_i=8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (玻璃片内表面至内部空间的传热系数);}$$

$$\alpha_a=23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ (玻璃片外表面至外部空间的传热系数).}$$

1.5.1 遮阳玻璃

1. 遮阳系数

由外部通过玻璃向室内传输的能量 W 是由太阳通过玻璃直接辐射传输的能量($S \cdot t_s$)和由玻璃片(温度为 T_i)散发给内部空间(温度 T_i)的能量 $\alpha_i(T_i - T_i)$ 组成。因此

$$W=S \cdot t_s + \alpha_i(T_i - T_i) \quad (1.5)$$

玻璃吸收的能量($S \cdot \alpha_i$)一部分散发到内部空间: $\alpha_i(T_i - T_i)$ 和一部分散发给外部空间: $\alpha_a(T_i - T_a)$; 单层玻璃片的内外表面温度 T_i 几乎相同。因此

$$S \cdot \alpha_i = \alpha_i(T_i - T_i) + \alpha_a(T_i - T_a) \quad (1.6)$$

将式(1.6)代入式(1.5)中的未知温度 T_i , 这样就得出:

$$W=S \cdot t_s + \alpha_i \frac{S \cdot \alpha_i + \alpha_a(T_a - T_i)}{\alpha_i + \alpha_a} \quad (1.7)$$

从式(1.7)可以看出,如果要改善玻璃的遮阳性能,以减少从外部通过玻璃向室内传输的能量,只要降低玻璃的透射率 t_s 即可。在这方面采取合适的措施就是在玻璃片表面镀一层反射膜。

这种遮阳作用可以通过所谓“遮阳系数”加以说明。它的定义是:

$$b = \frac{\text{遮阳玻璃片的相对能量传输}}{\text{3mm 厚透明玻璃片的相对能量传输 (87\%)}} \quad (1.8)$$

遮阳玻璃片的相对能量传输用 W/S 表示,由式(1.7)得出:

$$\frac{W}{S} = t_r + \alpha_i \left[\frac{a_i + \frac{\alpha_a}{S} (T_a - T_i)}{\alpha_i + \alpha_a} \right]$$

3mm 厚透明玻璃片的相对能量传输为 87%。由式(1.8)得出遮阳系数 b 为:

$$b = \frac{W/S}{0.87} \quad (1.9)$$

2. 镀有反射膜的单层遮阳玻璃

设镀有反射膜的单层遮阳玻璃其技术参数为:

$$\begin{aligned} t_r &= 0.1, \alpha_r = 0.46, r_r = 0.44, \\ S &= 800 \text{ W/m}^2, T_a = 35^\circ\text{C}, T_i = 20^\circ\text{C}, \\ \alpha_a &= 23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}, \alpha_i = 8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

根据式(1.9)其遮阳系数为:

$$b = \frac{1}{0.87} \left[0.1 + 8 \cdot \frac{0.46 + \frac{23}{800} (35 - 20)}{23 + 8} \right] = 0.38$$

由式(1.5)和式(1.7)可以算出在热平衡状态下的玻璃温度:

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{S \cdot \alpha_r + \alpha_i T_i + \alpha_a T_a}{\alpha_i + \alpha_a} \\ &= \frac{800 \times 0.46 + 8 \times 20 + 23 \times 35}{8 + 23} = 43^\circ\text{C} \end{aligned}$$

1.5.2 隔热玻璃

1. 隔热玻璃的平均传热系数

(1) 单层玻璃: 如图 1-8 所示, 玻璃同内部空间和外部空间保持着热平衡。由室内向室外经过玻璃造成的辐射损失:

$$W_r = t_r \cdot \epsilon \cdot \sigma (T_i^4 - T_a^4) \quad (1.10)$$

式中 t_r 为红外辐射的透射率。在 $T_i = 293\text{K}$, $T_a = 273\text{K}$, 空间辐射系数 $\epsilon = 1$ 和 $t_r = 0.03$ 时

$$W_r = 3 \text{ W/m}^2 \quad (1.11)$$

另外, 利用平均传热系数 k 来计算其他功率损失。单层玻璃用下式计算:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (1.12)$$

α_i 和 α_a 为上面已阐明过的传热系数, Δ 为玻璃的传热系数:

$$\Delta = \frac{\lambda_g}{\delta} \quad (1.13)$$

式中 λ_g ——玻璃导热系数; δ ——玻璃片的厚度。

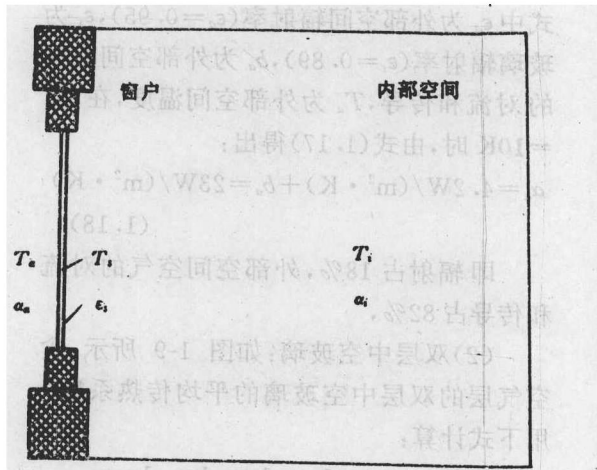


图 1-8 单层玻璃的隔热

T_a —外部空间的温度, T_i —内部空间温度;
 T_g —玻璃温度, ϵ_i —玻璃的辐射率;
 α_a, α_i —传热系数

设 $\delta = 3\text{mm} = 3 \times 10^{-3}\text{m}$, $\lambda_R = 0.8 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$, $\alpha_i = 8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, $\alpha_a = 23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ 。从式(1.12)和式(1.13)得出:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-1}} + \frac{1}{23} = \frac{1}{8} + \frac{1}{267} + \frac{1}{23} = 0.17 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

因此单层玻璃的平均传热系数:

$$k = 5.8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (1.14)$$

传热系数 α_i 和 α_a 是由辐射、对流和传导这三部分叠加起来组成。

玻璃内表面的传热系数为:

$$\alpha_i = \frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_i \cdot \sigma (T_i^4 - T_s^4)}{(\epsilon_s + \epsilon_i - \epsilon_s \cdot \epsilon_i)(T_i - T_s)} + b_i \quad (1.15)$$

式中 ϵ_s 为玻璃的辐射率 ($\epsilon_s = 0.89$), ϵ_i 为内部空间辐射率 ($\epsilon_i = 0.95$), b_i 为内部空间空气的对流和传导, T_i 为内部空间温度, T_s 为玻璃温度。 $\Delta T = T_i - T_s = 10\text{K}$ 时, 由式(1.15)得出:

$$\alpha_i = 4.6 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) + b_i = 8 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.16)$$

由上式可以看出, 辐射占 58%, 内部空间空气的对流和传导占 42%。

玻璃外表面的传热系数 α_a 用下式计算:

算:

$$\alpha_a = \frac{\epsilon_a \cdot \epsilon_s (T_s^4 - T_a^4) \sigma}{(\epsilon_a + \epsilon_s - \epsilon_a \cdot \epsilon_s)(T_s - T_a)} + b_a \quad (1.17)$$

式中 ϵ_a 为外部空间辐射率 ($\epsilon_a = 0.95$), ϵ_s 为玻璃辐射率 ($\epsilon_s = 0.89$), b_a 为外部空间空气的对流和传导, T_a 为外部空间温度, 在 $\Delta T = 10\text{K}$ 时, 由式(1.17)得出:

$$\alpha_a = 4.2 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) + b_a = 23 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.18)$$

即辐射占 18%, 外部空间空气的对流和传导占 82%。

(2) 双层中空玻璃: 如图 1-9 所示, 含空气层的双层中空玻璃的平均传热系数 k 用下式计算:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{a1}} + \frac{1}{\alpha_{i12}} + \frac{1}{\alpha_{i2}} + \frac{1}{\alpha_{a2}} \quad (1.19)$$

α_i 和 α_a 是确定的计算值, 两片玻璃的导热系数 α_{g1} 和 α_{g2} 可按式(1.13)计算。玻璃片 1 和 2 之间的传热系数为:

$$\alpha_{12} = \alpha \frac{T_{i2}^4 - T_{i1}^4}{T_{i2} - T_{i1}} + \alpha_L \quad (1.20)$$

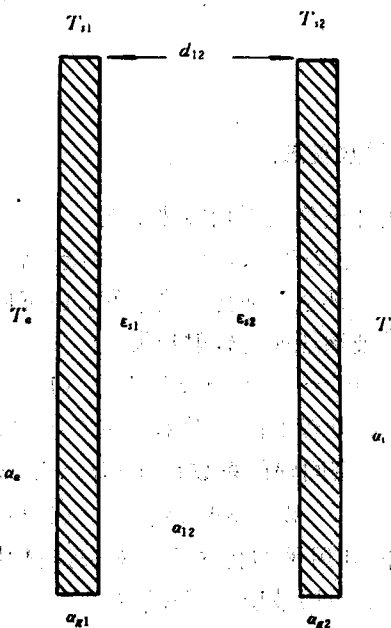


图 1-9 双层中空玻璃的隔热

d_{12} —玻璃片间距, T_a —外部空间温度,

T_{i1} —内部空间温度, T_{i1}, T_{i2} —两块玻璃的温度,

$\alpha_a, \alpha_{12}, \alpha_i$ —传热系数, α_{g1}, α_{g2} —玻璃传热系数,

$\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}$ —两块玻璃的辐射率

$$\alpha = \frac{\epsilon_{e1} \cdot \epsilon_{e2} \cdot \sigma}{\epsilon_{e1} + \epsilon_{e2} - \epsilon_{e1} \cdot \epsilon_{e2}} \quad (1.21)$$

$$\alpha_L = \frac{\lambda_L}{d_{12}} + \alpha_k \quad (1.22)$$

式中 λ_L 为空气的导热系数, d_{12} 为玻璃片间距, α_k 为夹层中空气的对流传热系数。

对于 $d_{12}=16\text{mm}$, $T_{e1}=283\text{K}$, $T_{e2}=293\text{K}$, $\epsilon_{e1}=\epsilon_{e2}=0.89$, $\lambda_L=0.026\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的双层中空玻璃, 由式(1.20)计算出:

$$\alpha_{12} = (4.35 + 1.63) + \alpha_k \quad \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \quad (1.23)$$

式中 α_k 为夹层中空气的对流传热系数。当 $d_{12}=16\text{mm}$ 时, 测得双层中空玻璃的 k 值为

$$k = 3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.24)$$

由式(1.19)可以算出两块玻璃之间的传热系数:

$$\alpha_{12} = 6.3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.25)$$

由式(1.23)得出夹层中空气的对流传热系数

$$\begin{aligned} \alpha_k &= (6.3 - 4.35 - 1.63)\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \\ &= 0.32\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (1.26)$$

两块玻璃之间的热交换, 主要表现在辐射, 约占 70%, 由夹层中空气所产生的传导约占 25%, 而对流仅占 5%。

(3) 镀膜的双层中空玻璃: 为了减少两块玻璃之间的辐射所引起的能量交换, 以改进双层中空玻璃的隔热性能。一般在外层玻璃的内侧镀一层低辐射率膜 $\epsilon_{e1}=0.1$ 。这样辐射部分的传热系数从未镀膜的(见式 1.23) $4.35\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 下降到镀膜的:

$$\alpha_{\text{辐射}} = \frac{\epsilon_{e1} \cdot \epsilon_{e2} \cdot \sigma}{(\epsilon_{e1} + \epsilon_{e2} - \epsilon_{e1} \cdot \epsilon_{e2})} \cdot \frac{T_{e2}^4 - T_{e1}^4}{T_{e2} - T_{e1}} = 0.52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (1.27)$$

$$k = 1.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.28)$$

2. 隔热玻璃的功率平衡(阳光对玻璃面的入射角 30°)

(1) 单层玻璃的功率平衡

k 值(式 1.14) $5.8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

透射 t , 87%;

功率接收 $S \cdot \cos \varphi \cdot t_i = 800\text{W}/\text{m}^2 \cdot \cos 30^\circ \cdot 0.87 = 603\text{W}/\text{m}^2$,

功率损失 $k \cdot \Delta t = 5.8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 20\text{K} = 116\text{W}/\text{m}^2$

功率增益 $487\text{W}/\text{m}^2$ 。

1 小时光照所增益能量相当于 4 个多小时阴暗天气的能量损失。

(2) 双层中空玻璃的功率平衡

k 值(式 1.24) $3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

透射 t , 76%(在一般商用玻璃上测得);

功率接收 $800\text{W}/\text{m}^2 \cdot \cos 30^\circ \cdot 0.76 = 526\text{W}/\text{m}^2$;

功率损失 $3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 20\text{K} = 60\text{W}/\text{m}^2$;

功率增益 $466\text{W}/\text{m}^2$ 。

1 小时光照所增益的能量相当于 7 个多小时阴暗天气的能量损失。

(3) 镀膜的双层中空玻璃的功率平衡

k 值(式 1.28) $1.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

透射 t , 60%(测得);

功率接收 $800\text{W}/\text{m}^2 \cdot \cos 30^\circ \cdot 0.6 = 416\text{W}/\text{m}^2$;

功率损失 $1.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 20\text{K} = 34\text{W}/\text{m}^2$;

功率增益 $382\text{W}/\text{m}^2$ 。

1 小时光照所增益的能量相当于 11 个多小时阴暗天气的能量损失。

第2章 真空技术基础

杨乃恒

东北大学 教授 博士生导师

中国真空学会常务理事

2.1 真空物理

2.1.1 真空和压强的概念

真空物理是研究低压下气体性质的一门学问,也是气体分子运动论的重要篇章。真空物理有如下一些基本假设:①气体是由具有一定速度分布而运动的气体分子组成;②气体分子的运动是各向同性的,气体的温度与分子的平均动能成正比;③气体分子与固体表面相作用时被吸附。

气体压强低于一个大气压的气体状态称为“真空”。当气体压强接近大气压时,真空是用大气压与气体绝对压强之差来定量表示的。当气体的绝对压强比大气压强低两个数量级时,这时上述的压强差实际上已经不变了,因此不能再用压强差来定量表示真空特性。这时可直接用气体的绝对压强来表示真空特性。当绝对压强非常低时,现有的仪器已经不能直接测量压强时,可用气体的分子浓度来评价真空。

气体分子与固体表面相互作用时,气体分子在固体表面的法线方向上的动量变化为 $mv\cos\theta$, 其中 θ 是平面的法线方向与速度矢量的夹角; m 和 v 是气体分子的质量和速度。

表面和气体介质之间处于平衡态,每个吸附的气体分子都伴有一个与其速度方向相反的解吸分子。这样一来,吸附与解吸的气体分子的动量变化的总量为 $\Delta K = 2mv\cos\theta$ 。

根据牛顿第二定律,气体分子对固体表面的压强为

$$P = \frac{\Delta K}{\Delta A \cdot \Delta t} = \frac{2mv\cos\theta}{\Delta A \cdot \Delta t} \quad (2.1)$$

式中 ΔA 为固体表面的面积; Δt 为气体分子与固体表面的作用时间。

在体积元 dv 内指向 ΔA 的气体分子的数目 dN 与 dv 中心指向 ΔA 的立体角 $d\omega$ 成正比。即

$$dN = n \cdot \frac{d\omega}{4\pi} dv \quad (2.2)$$

其中立体角为 $d\omega = \cos\theta \cdot \frac{\Delta A}{r^2}$; r 为表面与体积元的距离(见图 2-1)。

$$dv = r \sin\theta d\varphi d\theta dr \quad (2.3)$$

气体对固体表面的压强,可按半径为 $R = v\Delta t$ 的半球体积分求得。即由式(2.1)得

$$P = \int_v \frac{2mv\cos\theta}{\Delta A \cdot \Delta t} dN \quad (2.4)$$