

镀膜玻璃的节能技术与应用

天津南玻工程玻璃有限公司 陈大伟 童帅

1 引言

建筑能耗是一个国家社会总能耗的重要组成部分,对于整幢建筑来说,降低门窗、外墙的能量消耗,提高建筑门窗、外墙的隔热性、保温性是建筑节能工作的重点。采用镀膜玻璃和与镀膜玻璃复合加工而成的中空玻璃是降低建筑使用能耗最经济、最有效的途径之一。为此人们开始对玻璃表面进行加工处理,并根据不同的地区和客户需要,加工成各种类型的玻璃产品,这就促成了镀膜玻璃的产生和发展。

2 镀膜玻璃

2.1 普通透明玻璃的特性

普通透明玻璃(钠钙硅玻璃)的光透射范围在300~5000nm之间,其中在可见光和近红外波段的透射率超过80%。在中红外波段的透射率也有近10%,见图1。这个透射范围正好与太阳辐射光谱区域相重合,因此透过玻璃的太阳辐射非常强,人位于玻璃之后面对阳光会有强烈的太阳光照射热感。

对于波长为5000nm以上的远红外辐射,普通玻璃不能直接透过,而是近乎完全吸收,并以辐射传热的形式向两侧散发其红外辐射的综合吸收率达84%,即辐射率E(等于吸收率)为0.84。

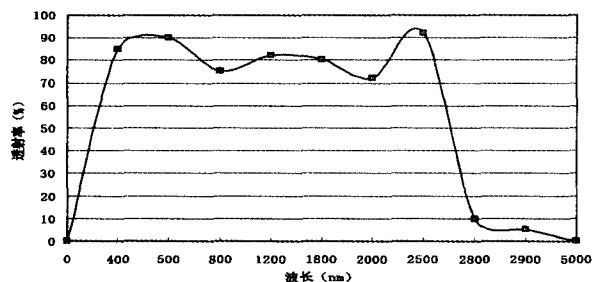


图1 6mm普通玻璃的透射曲线

2.2 玻璃传热的定量表达

两种形式的热能透过玻璃的传热可归结为两个途径:太阳辐射直接透过传热、对流传导传热。其中

对流传导所传递的热能中,既包括来自远红外热辐射的热能,也包括来自太阳辐射中的部分红外热能,因此它体现的是温差传热部分。透过每平方米玻璃传递的总热功率Q可由下式表示:

$$Q = \underbrace{I_0 \times 0.899 \times Sc}_{\text{太阳辐射部分}} + \underbrace{U \times (T_o - T_i)}_{\text{温差传热部分}} \quad (\text{式1})$$

式中:

Q——透过单位面积的总传热功率,单位为瓦特每平方米(W/m²);

U——传热系数,单位为瓦特每平方米(W/m²·℃);

Sc——遮阳系数,无量纲(数值范围0~1);

I₀——太阳辐射度,单位为瓦特每平方米(W/m²);

T_o-T_i——玻璃两侧环境的温度差,即室内、室外温度差,单位为度(℃)。

由式1可知,除环境的参数外,与玻璃有关的参数仅为U和Sc,即U和Sc是玻璃或玻璃构件的固有参数。换句话说,玻璃节能性的优劣由这两个参数就可以判定。

遮阳系数Sc直接反映玻璃对阳光的遮蔽效果,它体现的是玻璃的隔热性能。Sc高意味着透过玻璃进入室内的太阳辐射热多,玻璃的隔热性能差。

传热系数U值反映玻璃的温差传热特性,它体现的是玻璃的保温性能,在相同的室内外条件下,U值低意味着玻璃因温差传热而传递的热能少,玻璃的保温性能好。实际使用中可通过特殊仪器测出玻璃的U值。

镀膜玻璃的节能性是通过改变玻璃表面的热反射特性而实现的,由于选择了不同的膜层材料和膜系结构而形成了两大系列产品,即热反射镀膜玻璃(或称阳光控制膜玻璃)和低辐射镀膜玻璃(或称Low-E玻璃)。

2.3 热反射镀膜玻璃和低辐射镀膜玻璃

2.3.1 热反射镀膜玻璃光学特性

热反射镀膜玻璃是在玻璃表面镀覆金属或金属化合物膜,使玻璃呈现丰富多彩并具有新的光、热性能。作用是限制太阳辐射直接进入室内,它除具有亮丽的外观装饰效果外,可明显降低冷气的运行费用。其主要作用就是降低玻璃的遮阳系数 S_c ,限制太阳辐射的直接透过。图 2 表示热反射膜层对远红外线没有明显的反射作用,故对改善 U 值没有大的贡献。

在夏季光照强的地区,热反射玻璃的隔热作用十分明显,可有效衰减进入室内的太阳辐射。如果要进一步提高对太阳辐射的遮挡能力、减小辐射得热,必须进一步提高反射率,这就意味着透过的可见光进一步减小,将影响采光效果。

在无阳光的环境,如夜晚和阴雨天气,其隔热作用与白(透明无色)玻璃无异。从节能的角度来看它不适用于寒冷地区,因为这些地区需要阳光进入室内采暖。北方寒冷地区采用这种玻璃的唯一目的就是追求装饰效果。

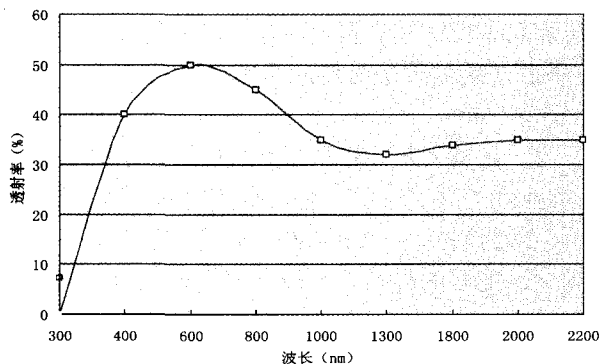


图 2 热反射镀膜玻璃的透射率

2.3.2 低辐射镀膜玻璃的光学特性

低辐射镀膜玻璃——Low-E 玻璃是在玻璃表面镀低辐射材料银及金属氧化物膜,使玻璃的辐射率由 0.84 降到 0.15 以下,从而降低玻璃的 U 值。Low-E 玻璃红外反射率高,可直接反射远红外辐射;图 3 中,表面辐射率 E 低,吸收外来能量的能力小,从而再辐射的热量少;遮阳系数 S_c 范围广,可根据太阳能的透射量,以适应不同地区的需要。

有选择的降低 S_c ,可全面改善玻璃的节能性能:

(1) 高透型 Low-E 玻璃,遮阳系数 $S_c \geq 0.5$,对透过的太阳能衰减较少。这对以采暖为主的北方地区极为适用,冬季太阳波段的辐射可透过这种 Low-E 玻璃进入室内,经室内物体吸收后变为 Low-E 玻璃不能

透过的远红外辐射,并与室内暖气发出的热辐射共同被限制在室内,从而节省暖气的费用。(2) 遮阳型 Low-E 玻璃,遮阳系数 $S_c \leq 0.5$,对透过的太阳能衰减较多。这对以空调制冷能的南方地区极为适用,夏季可最大限度的限制太阳能进入室内并阻挡来自室外的远红外辐射,从而节省空调的使用费用。

不同的 Low-E 玻璃适用于不同的气候地区,就节能性而言,其功能已覆盖了热反射镀膜玻璃。

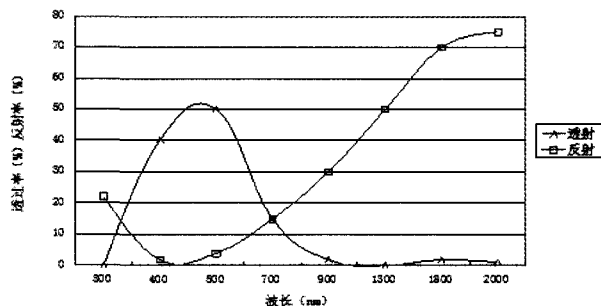


图 3 Low-E 玻璃的透射率和反射率

2.4 镀膜玻璃的生产工艺

镀膜玻璃的生产方法很多,主要的有真空磁控阴极溅射法、真空蒸发法、化学气相沉积法以及溶胶-凝胶法等。

2.4.1 真空磁控阴极溅射镀膜工艺

磁控溅射镀膜玻璃利用磁控溅射技术,可以设计制造多层复杂膜系,可在白色(透明无色)的玻璃基片上镀制出多种颜色,膜层的耐腐蚀和耐磨性能较好,是产品使用最多的方式之一。它是将玻璃置于真空室中,并通入工作气体(氩气、氮气、氧气),当在溅射阴极、阳极间通电时,由于高压电场的作用使气体(氩气)分子电离,带正电的氩离子将在电场的加速下,高速向阴极靶材撞击,将靶材表面的金属离子击出,并逐渐沉积在玻璃表面形成薄膜。

2.4.2 真空磁控溅射镀膜的生产设备及工艺流程

镀膜生产线由装片、清洗机、原片检测、真空镀膜室、成品检测、卸片等几个部分组成。

(1) 自动装片机

通常采用吊机——真空吸盘组合装置及自动装片机组成,为生产线的配套设备,主要用于玻璃的装片工作。

(2) 前清洗机

用来清洗玻璃基片,分为三个部分,在预清洗部分,基本都使用毛比较粗的盘刷进行清洗,盘刷本身转动,利用毛刷的弹力松动玻璃表面的杂质,同时连接轴承左右平动,保证清洁到玻璃的每个部位。在此

部分里,使用自来水。在清洗部分,大部分使用辊刷,也使用一组或者两组盘刷,辊刷清洁已经松动的杂质或者和玻璃表面结合不牢固的杂质,盘刷进一步松动结合牢固的杂质,然后利用辊刷清洁干净。清洗段使用纯净水。最后的部分就是风干,利用压缩空气经过风刀狭缝喷嘴吹到湿玻璃表面上,将玻璃基片表面的水膜分离开,并使其雾化,最后随着空气一起排出去。玻璃表面严格要求洁净干燥。

(3) 前观察室

用来人工观察玻璃基片的清洗效果及干燥情况,并可以在此处将特殊的玻璃基片装入生产线。也可以将清洗质量不过关的玻璃基片及时退出生产线,重新进行清洗。

(4) 进口室

用来输送玻璃基片进入溅射室,防止输送玻璃时空气进入溅射室,该设备中包含真空系统、放气系统及管道和各种线路连接。进口室的真空由罗茨泵及旋片泵的组合泵组抽取,真空室可达 10^{-2} mbar。相同的,对进口室的空气也应保持一定的空气洁净度。防止第二次污染。

(5) 进口缓冲室

是玻璃基片等待进入溅射生产工序的真空室。结构与进口室相同,两侧有观察法兰。缓冲室的真空度比进口室高,一般为 10^{-4} mbar。该室一般都配置有低温泵,在这里可以将水分子抽走,不影响真空室的溅射。为增加空气洁净度和室内真空度也可在进口室与进口缓冲室之间加装进口过渡室。

(6) 溅射室

溅射室是对玻璃基片进行磁控溅射镀膜的真空室——镀膜工作区,它需要有高精度的气密性及严格的控制气流的功能。阴极除了需要具有稳定溅射各种膜层的功能外,对设备其它部件还需要具有绝缘及冷却的密封性能。

溅射室内有输送辊道机构,室壁设有各种孔口,分别与真空系统、配气系统、水冷却系统的管道及各种线路相连并设有观察孔。溅射室的真空是由旋片泵、罗茨泵、分子泵和低温泵组合获得的,背景真空度一般为 10^{-6} mbar。

(7) 出口缓冲室

出口缓冲室与最后一个溅射室相连,结构与进口缓冲室相同。

(8) 出口室

出口室与出口缓冲室相连,结构与进口室相同。

(9) 出口过渡平台

由输送辊道机构组成,在尾端设有光度计,在线对镀膜玻璃产品的膜层进行各种光学指标的检测,参照标准光学曲线,检验产品是否合格。

(10) 检验室

由设在镀膜玻璃传输辊上方的封闭房间构成,传送辊上部装有灯箱组,用于观测镀膜玻璃是否有针眼及检测膜层附着力。

(11) 卸片台与卸片机

与装片台和装片机设备相同。

(12) 溅射阴极及阴极电源

溅射阴极是镀膜设备最重要的部件,溅射靶材装配在阴极上,在真空状态和电场、磁场作用下,靶材粒子溅射到玻璃表面,形成镀膜玻璃,溅射阴极就是为靶材提供稳定电场和磁场的部件。根据靶材形状和磁场状态,分为平面阴极和旋转阴极两种。

阴极溅射用电源有:直流电源(DC)、中频交流电源(AC)、射频电源等。

另外,现代磁控溅射技术对电源单元的要求,除了为气体放电选择不同的激励方式外,还包括:电流、电压和功率模式及成熟的电弧放电管理等。

2.5 镀膜玻璃的膜层材料及结构

2.5.1 膜层材料

由于用途不同,用于镀膜的材料也不同,一般来说,商业性的溅射镀膜工艺中所使用的材料包括:

金属材料: Ag、Au、NiCr、Al 等,其中 Ag、Au、Al 等导电性能好的材料具有较好的辐射率,是良好的辐射材料。

半导体材料: InSnO_x 等,主要用于镀导电膜,偶尔也在其中掺杂。

介质材料: 主要有 SnO_x、ZnO_x、TiO_x 等介质材料,有良好的吸收,反射率。

使用这些材料进行组合,可以得到形形色色的各种膜系,根据实际需要,选择不同的材料。由于材料种类多,可代替性大,在商业运作中可以使用价格低而性能好的材料,可降低生产成本以达到使用目的。在实际生产运行过程中,选择材料要根据实际需要实现的功能,材料价格,生产可行性等多方面去进行综合比较。

2.5.2 热反射玻璃膜结构

(1) 单层膜系列 膜结构为 玻璃 / 氧化钛

(2) 两层膜系列 膜结构为 玻璃 / 氮化不锈钢 / 氧化钛

(3) 三层膜系列 膜结构为 玻璃 / 氧化锡 / 氮化铬 / 氧化锡

2.5.3 低辐射玻璃膜结构

(1) 单银系列膜结构 玻璃 / 氧化钛 / 镍铬 / 银 / 镍铬 / 氮化硅

(2) 双银系列膜结构 玻璃 / 氧化锡 / 镍铬 / 银 / 镍铬 / 氧化锡 / 镍铬 / 银 / 镍铬 / 氧化锡

3 常见玻璃的节能特征及使用建议

3.1 常见玻璃的节能特性

不同的玻璃品种和结构具有相差甚远的节能系数,评价某种玻璃是否节能以及适用于什么地区何类建筑只有相对的意义,除需对比各种玻璃的遮阳系数 S_c 和传热系数 U 值外,还应考虑保温性和隔热性在不同地区对不同建筑节能总量的节能量大小,即两者在总能耗中所占比例的大小。表 1 列出了几种常见玻璃的传热系数和遮阳系数的实际测量值,以下按照上述原则进行对比并提出使用的参考性建议。考虑到玻璃节能性仅是需要选择的特性之一,玻璃的其它特性也在后面简述列出,以供参考。

表 1 几种常用玻璃的主要光热参数

| 玻璃名称 | 玻璃的种类、结构 | 透光率 (%) | 遮阳系数 (S_c) | 传热系数(U) ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) |
|------------|-----------------|---------|----------------|--|
| 单片透明玻璃 | 6c | 89 | 0.99 | 5.58 |
| 单片绿着色玻璃 | 6F-Green | 73 | 0.65 | 5.57 |
| 单片灰着色玻璃 | 6Grey | 43 | 0.69 | 5.58 |
| 彩釉玻璃 (全覆盖) | 6mm 白色 | - | 0.32 | 5.76 |
| 透明中空玻璃 | 6c+12A+6c | 81 | 0.87 | 2.72 |
| 绿着色中空玻璃 | 6F-Green+12A+6c | 66 | 0.52 | 2.71 |
| 单片热反射镀膜玻璃 | 6CTS140 | 40 | 0.55 | 5.06 |
| 热反射镀膜中空玻璃 | 6CTS140+12A+6c | 37 | 0.44 | 2.54 |
| Low-E 中空玻璃 | 6CEF11+12A+6c | 35 | 0.31 | 1.66 |

说明:6c表示6mm透明玻璃,CTS140是热反射镀膜玻璃型号,CEF11是Low-E玻璃型号。 U 值是按ISO 10292标准测得的, S_c 是按ISO 15099标准测得的。

3.1.1 单片透明玻璃

单片透明玻璃的遮阳系数 $S_c=0.99$,这意味着它对阳光辐射阻挡能力很差,绝大部分的太阳辐射热能透过玻璃进入室内,夏季白天进入室内的太阳辐射热

能远大于玻璃向外辐射散发的热能,因此使室内温度升高。

其传热系数 $U=5.58 W/m^2 \cdot ^\circ C$,室内外温差为 $25^\circ C$ 则因对流传导而透过每平方米玻璃的热能就达 140 瓦。冬季夜间和阴雨天气,由于没有阳光,玻璃吸收室内热辐射后向外散热成为主流,因此使室内温度降低。即使在冬季的阳光天气,虽然阳光辐射的透过率相当高,但由于室内外温差大,对流传导散热仍是主流,室内大量的热辐射会透过玻璃泄向室外。

3.1.2 单片着色玻璃

着色玻璃的遮阳系数 S_c 低于透明无色玻璃,它通过吸收太阳能而减弱其进入室内,它的隔热性优于透明玻璃而劣于大多数热反射镀膜玻璃。这种玻璃属于吸热玻璃,其吸收率偏高因而在阳光的照射下极易吸热升温,夏季用手触摸玻璃会感觉到非常烫手。尽管它降低了遮阳系数 S_c 并限制了阳光的直射透过,但它向室内的温差传热量也因此而升高,所以它是以部分损失温差传热特性为代价来降低太阳能直接透过的。

着色玻璃主要有绿色、灰色、蓝色、茶色等品种,就其采光和隔热性来说,绿色优于灰色的,绿玻的透光率为 73% 时,其遮阳系数仅为 0.65,而灰色玻璃透光率低至 43% 时,遮阳系数却高达 0.69,因此,选灰玻要考虑到这一点。

3.1.3 单片热反射镀膜玻璃

热反射镀膜玻璃的作用是限制太阳辐射直接进入室内,它除具有亮丽的外观装饰效果外,可明显降低冷气的运行费用。单片热反射镀膜玻璃的保温性与单片透明玻璃相差无几,因此它只适用于夏热冬暖和夏热冬冷地区,热反射玻璃的隔热性、保温性均优于着色玻璃。

需注意的是,这种玻璃在限制阳光辐射的同时,也限制了进入室内的可见光,影响室内自然采光。此外,在温差大的地区使用低透光率的热反射玻璃时,也要考虑到避免热应力破裂的问题。再有,热反射镀膜玻璃若使用不当易产生“光污染”。

3.1.4 Low-E 镀膜玻璃

Low-E 膜层的作用首先是反射远红外辐射,有效降低玻璃的传热系数 U 值;其次是反射太阳中的热辐射,有选择的降低遮阳系数 S_c 。Low-E 中空玻璃则具有更低的传热系数 U 值,更大的遮阳系数 S_c 选择范围(0.2 ~ 0.7),因此,其功能已经覆盖了热反射镀膜玻璃。

与热反射镀膜玻璃相比,Low-E玻璃阻挡同样数量的太阳热能并不过多地限制可见光透过,即把太阳光滤成了“冷光源”,这对建筑物的采光极为重要。

使用中应注意,不同气候地区应采用不同的Low-E玻璃品种以达到最佳的节能效果。传统型Low-E玻璃具有较高的透过率($T > 60\%$)和遮阳系数($Sc > 0.5$),它更适用于以采暖能耗为主流的我国极北地区使用,冬季可使更多的阳光热能进入室内有利于采暖,但夏季也必然有更多的阳光热能进入室内而影响制冷,考虑到制冷能耗所占比例小,综合节能效果仍然明显。

遮阳型Low-E玻璃具有较低的遮阳系数($Sc < 0.5$)和透光率($T < 60\%$),它适用于我国绝大部分地区,冬季可有效的阻止室内暖气泄向室外,夏季可有效的阻挡太阳热能及其他热辐射进入室内。对于只用空调而不用暖气的极热地区的建筑,选择更低遮阳系数的Low-E玻璃是最合适的。

3.2 建筑玻璃的选择

建筑玻璃的选择有多种因素考虑,但基本可归结为外观颜色选择、节能性选择、舒适性选择、结构强度选择这四个方面。本文仅对其节能性进行讨论。

3.2.1 保温性(U值)

玻璃的U值越低,玻璃阻隔温差传热的特性越好,即保温性能越好。因此应尽量选择U值低的玻璃产品。保温性能最好的产品是Low-E中空玻璃,当对玻璃的保温性能有进一步要求时,可选择充装氩气的Low-E中空玻璃。

对夏热冬暖的地区来说,温差传热能耗仅占全年能耗的约15%~20%,尽管保温性能好的玻璃可以降低这部分能耗,但这部分能耗全部节省下来也仅占15%~20%的量,而玻璃要达到这种保温性能所花费的代价太高,即性价比太差。因此,这类地区不宜单独追求低的U值,例如仅选择透明中空玻璃。如在选择玻璃获取隔热性、隔音性的同时附带也降低了U值是非常值得的,例如选择热反射镀膜中空玻璃或遮阳型Low-E中空玻璃时的情形。

3.2.2 隔热性(Sc值)

玻璃的Sc值的选择与建筑物所处的地理气候有关,不同地区应选择不同的Sc值的产品或中空的结构方式:

北方寒冷地区冬季时间长达5个月以上,夏季使用空调的时间在2个月以内或根本就不需使用空调。在这一区域,室内采暖能耗成为主要因素,选择

$Sc > 0.6$ 的玻璃是合适的。它可以使更多的太阳能进入室内有利于取暖,尽管这会影响到夏季室内的制冷,但夏季的时间短,综合全年的能耗后仍然是合算的。

南方炎热地区夏季时间长达5个月以上,冬季几乎不使用暖气。在这一区域,室内空调制冷能耗为主要因素,选择 $Sc < 0.3$ 的玻璃可最大限度地控制进入室内的太阳能,从而节省空调的能耗。

以上是两个极端的气候区域,对于我国的大多数地区而言,冬季寒冷需要暖气采暖,夏季炎热需要空调制冷,选择玻璃需要充分考虑冬、夏两季的要求,Sc值在0.3~0.6之间较为合适。考虑到夏季的能耗为电耗,其成本偏高,而冬季的能耗多为煤耗或气耗,其成本相对较低,因此选择Sc值略低一些更合适。过于追求冬季阳光采暖而选择玻璃,夏季将为此付出更大的代价,因为玻璃参数是不变的,冬季进入室内的阳光多夏季也必然多而且更强。因此选择玻璃的遮阳系数Sc宁低勿高。

实际上对于确定地区的建筑物,可根据模型计算分析Sc值对全年能耗的影响,若采用可调控的外遮阳板,则玻璃的遮阳系数偏高为好。对具有确定围护结构的建筑物应进行具体的分析得出结论。

4 结论

随着经济的发展,能源的紧张越发的突出,各国对节能环保型产品的推广使用也愈来愈重视,在此建筑能耗占据了社会总能耗的35%~40%,而建筑门窗、外墙的总能耗又占建筑总能耗的50%,采用环保节能的镀膜玻璃及中空玻璃,从而降低建筑门窗、外墙的能耗是降低建筑能耗、社会能耗的最经济、最有效的途径之一。

镀膜玻璃及其复合而成中空玻璃主要的节能贡献就是保温性能及隔热性能,Low-E玻璃及其复合而成的中空玻璃由于膜层中银的贡献,反射了远红外辐射有效地降低了玻璃的传热,反射了太阳的热辐射,而其遮阳系数大范围又使可见光具有了可选择性的透过,使玻璃最大限度的节能。

随着真空磁控阴极溅射技术的广泛应用和玻璃深加工技术的发展,具有节能特性玻璃的使用必将成为建筑领域进步的主流,节能玻璃对社会能源消耗将产生良好的经济效益。

参考文献

- [1] 周家斌,任毅,付志强,王成彪.低辐射镀膜玻璃的研究开发进展[J].建筑结构报,2007,04:104~108

新型涂膜隔热玻璃

上海耀江实业有限公司 翁永平

地球的热量来自太阳,太阳的表面温度高达6000℃,它不间断地向宇宙辐射能量。由于太阳表面的温度高,地球接收到的太阳辐射主要为可见光,系短波辐射,其最大波长为600nm(0.6μm),同时地球表面也向宇宙发出热辐射,这种辐射为红外线,系长波辐射,其最大波长在16000nm(16μm)左右。

太阳能向地球辐射的光和热,大约有63%被云层、大气层和地面反射出去,其余37%被地球表面吸收。地球表面获得的太阳能因太阳的入射角和地区的不同而异,最大的辐射能可达1000W/m²。比如,北京为600W/m²,而这部分能量中可见光的能量仅占1/3,其余的2/3主要是热辐射能量(见图1)。这部分热能对建筑物的影响是非常显著的,生活在北半球的居民在西晒面时的感受尤其明显。自然界里另一种热能形式是远红外热辐射能(图1中的虚线),即由太阳照射到物体上被物体吸收后再辐射出来的,在夏季成为来自室外的主要热源之一。需要强调的是通常情况下来自室内、室外的热辐射可同时存在,只是夏季来自室外的热辐射远大于来自室内的,而冬季来自室内热辐射又远大于来自室外的。因此,如何让建筑物上的玻璃有保温、隔热的功效是我们这些年来努力追求的方向。

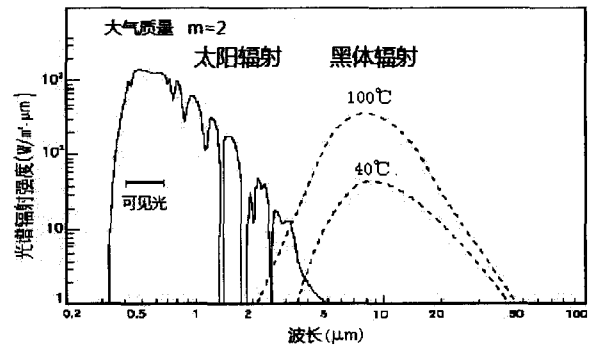


图1 太阳辐射光谱曲线和黑体辐射光谱曲线

几种常用玻璃的传热分析:

1. 普通透明平板玻璃(钠钙玻璃)的透射范围在0.3~5μm之间,其中在可见光和近红外波的透射率超过80%,紫外光透过率80%(见图2透射率曲线),因此透过玻璃的太阳热辐射非常强,人处于玻璃之后会有强烈的太阳照射的感觉。对于波长5μm以上的远红外热辐射,普通玻璃不能直接透过,而是近乎完全吸收,并以辐射传热的形式向两侧散发,一般红外辐射的综合吸收率达84%。玻璃吸热能力的强弱用玻璃的吸收率表示,它直接关系到玻璃对远红外热能的阻挡效果,即辐射率低的玻璃不易吸收外来的热辐

[2] 徐美君. 中国建筑镀膜玻璃的生产发展与市场 [J]. 建材发展导向, 2006, 02: 17~22

[3] 徐美君. 低辐射镀膜玻璃的发展现状与市场(上) [J]. 玻璃, 2011, 09: 39~51

[4] 周建民. 低辐射镀膜玻璃的加工及应用 [J]. 国外建材科技, 2008, 06: 43~45+48

[5] 辛崇飞, 刘军. 低辐射镀膜玻璃的节能优势及选用原则 [J]. 门窗, 2010, 07: 19~25

[6] 王倩, 张映伟. 低辐射镀膜玻璃的节能原理及应用 [J]. 节能技术, 2003, 05: 21~22

[7] 王春华. 镀膜玻璃的生产工艺和膜层性能的研究 [D]. 大连海事大学, 2011

[8] 邵景楚, 鞠淑丽, 慈红英. 新型节能镀膜玻璃 [J]. 新型建筑材料, 2011, 08: 88~90

[9] 唐承桥. 镀膜玻璃在居住建筑中的节能应用浅析 [J]. 玻璃, 2012, 12: 30~36

[10] 李伟, 王琰. 离线镀膜玻璃的色差分析及检测 [J]. 玻璃, 2005, 02: 51~53+59

[11] 蓝莉, 王静. 镀膜玻璃技术在建筑中的应用 [J]. 室内设计与装修, 2007, 02: 117~119