

2017



【建筑光学】公众号

原创文章汇编

主编：许海凤

撰稿：苑静 吴筱 侯佳音 等

顾问：张喆民



北京奥博泰科技有限公司



● 专注光学 ● 量化品质 ● 尽显精彩

北京奥博泰科技有限公司为国家高新技术企业，专业从事光电技术、物理光学、建筑光学方面的技术研究与产品研发，就有近百人的专业技术、制造与服务团队。在建筑节能方面，致力于建筑节能检测仪器设备研发生产与服务。

北京奥博泰科技有限公司

地址：北京丰台科技园区外环西路 26 号院 19 号楼

邮编：100070

电话：010-51122666

序 言

首先，感谢广大读者的支持与关注。

公众号“建筑光学”于 2017 年 4 月 14 日与大家见面，截止到 2017 年底，已发表原创文章 32 篇，最新资讯 9 篇，合计 41 篇，其中最高访问量高达 5337 次。

建立“建筑光学”的目的为普及光学基础知识，探讨和交流光学在建筑领域的应用技术，希望用光学基础理论更好的指导建筑采光设计、建筑节能设计以及新型建筑材料的研发与应用，以达到合理、科学、最大化利用太阳能光照资源的目的，实现太阳能资源与绿色建筑完美、有机结合。希望利用该平台，促进跨专业、多学科深入技术交流。

此次整理成册，希望这些经典文章能够更好的帮助行业好友查找和阅读。编辑时间较为仓促，有不妥之处，请各位读者批评指正。

最后，希望大家持续关注“建筑光学”，也欢迎广大技术专家投稿，将您的知识无私分享给大家。

原创文章 不得翻印

如需转载请联系：wechat@aoptek.com

“建筑光学” 开篇

很高兴“建筑光学”公众号终于与大家见面了，建立本公众号的目的为普及光学基础知识，探讨和交流光学在建筑领域的应用技术，希望用光学基础理论更好的指导建筑采光设计、建筑节能设计以及新型建筑材料的研发与应用，以达到合理、科学、最大化利用太阳能光照资源的目的，实现太阳能资源与绿色建筑的完美、有机结合。

此外，利用该平台，促进跨专业、多学科深入技术交流，必要时，“建筑光学”工作组会组织面对面技术交流会。

后续会围绕“光学在建筑上的应用”这一主题展开交流，具体方向及关键词如下：

- 建筑节能
- 建筑保温
- 建筑遮阳
- 建筑采光
- 建筑照明
- 建筑材料 建筑的光学环境友好性
- 建筑色彩
- 太阳能利用，光伏建筑一体化应用技术

目 录

【基础知识】

光是什么？	(1)
眼睛与光 Q&A. (一)	(3)
眼睛与光 Q&A (二)	(6)

【建筑与光】

光在玻璃中的传播.....	(11)
谈谈建筑玻璃的颜色.....	(15)
说说建筑玻璃的颜色测量.....	(21)
“积分式”和“分光光谱”测量仪器哪一种更好？	(28)
“绿色”建筑与绿叶.....	(30)
绿色建材涂料与“绿叶”.....	(38)
当一缕阳光照进被动房.....	(43)
“对讲机”大厦为何把轿车烤变形.....	(47)

【节能玻璃】

节能玻璃的关键性节能指标是什么？	(53)
带你认识单银、双银和三银.....	(54)
低辐射玻璃的“辐射”到底几个意思？	(60)
夏季建筑节能与 Low-E 玻璃.....	(63)
节能玻璃的太阳能直接透射比和总透射比有何意义？ 为什么一定要给出 总透射比？	(66)
什么是太阳红外热能总透射比 g_{IR} ？ 和 g 值有何关系？	(67)
什么是建筑玻璃热工参数分布图 (K-LSG 图)， 其有何作用？	(69)
建筑采光顶玻璃光学和热工性能分析.....	(71)
到底是 K 值还是 U 值？ 还在纠结吗？	(74)

【玻璃检测】

门窗幕墙玻璃质量提升的催化剂：热工参数现场检验技术.....	(83)
低耗能建筑用节能玻璃选型及现场检测方法.....	(94)
低能耗建筑窗玻璃光学参数整体直接检测技术.....	(104)

【资料收藏】

不同类型玻璃的 K 值（收藏版） （114）

各种类型玻璃的 K 值、g 值等光热参数汇总表（收藏版） （115）

【标准篇】

我国建筑节能类规范对玻璃特性参数有哪些规定？ （123）

【玻璃安全】

浅谈平板玻璃原片的残余应力..... （128）

【采光照明】

浅谈室内采光..... （132）

采光照明中有哪些光度学基本量？ （142）

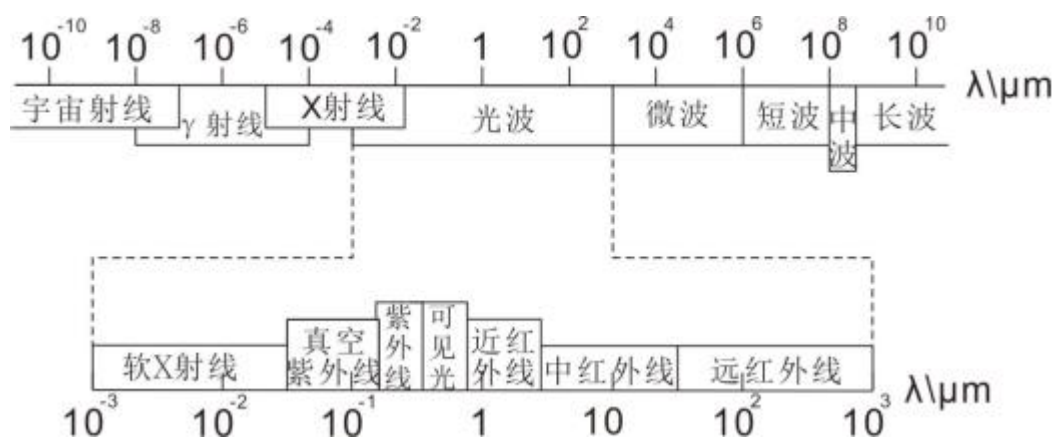
光是什么？

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.4.19 已发布



光是我们体验这个世界的基础，我们之所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象，是因为眼睛接受物体发射、反射或散射的光。光与人类生活与社会实践有着密切的关系。

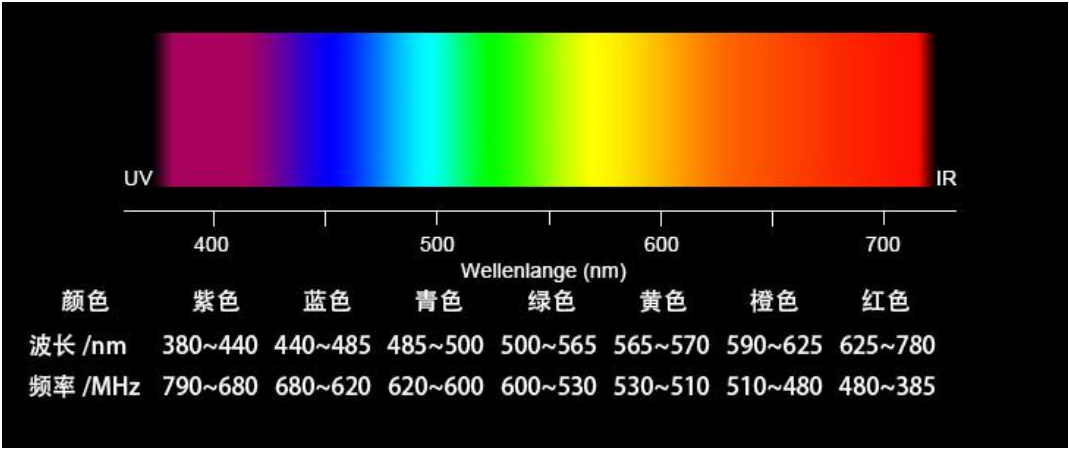
从狭义上来讲，我们平时所说的光是可见光，指能被人眼感觉到的光。而广义上的光指光波，是电磁波的一种。光波的频率比普通无线电波的频率要高，波长比普通无线电波的波长短。把电磁波按波长或频率顺序排列起来，形成电磁波谱。



电磁波谱图

从图中可以看出，光波是一定波长范围内的电磁波，而可见光仅占光波中很小的一部分。故狭义上的光只是广义上的光中很小的一部分。

可见光的波长在 380nm~780nm 之间，随波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉，可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种颜色的光。可见光谱与颜色的关系如图所示。具有单一波长的光称为单色光，几种单色光混合而成的光为复色光。



光波的波长大致在 1nm~106nm 之间，光波不仅仅包括可见光，还包括紫外线、红外线等等。其中波长小于 380nm 的光称为紫外线（UV），它具有较高能量，主要用作化学作用，例如灭菌消毒、设计防伪措施等。适量的紫外线对人体健康有益，但是接触过量的紫外线会对人体机能产生危害；波长大于 780nm 的光称为红外线（IR），其主要作用是热作用，可以利用红外线来加热物体和进行红外遥感，但较强的红外线可造成皮肤伤害。太阳光是指近紫外线、可见光和近红外线组成的辐射光，波长在 300~2500nm 之间。

在清楚了狭义上的光-可见光和广义上的光-光波的概念及区别之后，对于同样容易混淆的辐射量和光学量的概念及区别也就更容易理解了。

辐射量是指描述电磁辐射的物理量，因为光辐射本质上是一种电磁辐射，所以辐射量也可以用来描述可见光。但是由于辐射量没有考虑人眼的视觉特性，而许多照明光源的照明效果又与人眼的视觉特性密切相关，因此用光学量来进行相应的描述就变得非常有意义。光学量是以人眼的视觉感受来度量可见光的物理量。下表列出了几种常见的辐射量及其单位，以及对应常见的光学量及其单位。

辐射量	单位	光学量	单位
辐通量	瓦特（W）	光通量	流明（lm）
辐出射度	瓦每平方米（W/m ² ）	光出射度	勒克斯（lx）
辐照度	瓦每平方米（W/m ² ）	光照度	勒克斯（lx）
辐强度	瓦每球面度（W/sr）	光强度	坎德拉（cd）
辐亮度	瓦每球面度平方米 （W/(sr•m ² ））	光亮度	坎德拉每平方米 （cd/m ² ）

眼睛与光 Q&A

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.8.10 已发布

今天我们针对眼睛与光的相关常见问题以问答的形式来给大家解惑。除此之外，你还有什么想知道的呢？欢迎留言给我们！

Q1、人眼的结构是什么样子的呢？

人的眼睛可看做是一个天然的光学仪器，而且相当精密。人眼的结构如下图 1 所示，人眼是由角膜和巩膜等围成的直径约为 24mm 的球体。光通过透明的角膜、房水、晶状体和玻璃体折射，在视网膜上成像，构成人眼的光学成像系统。

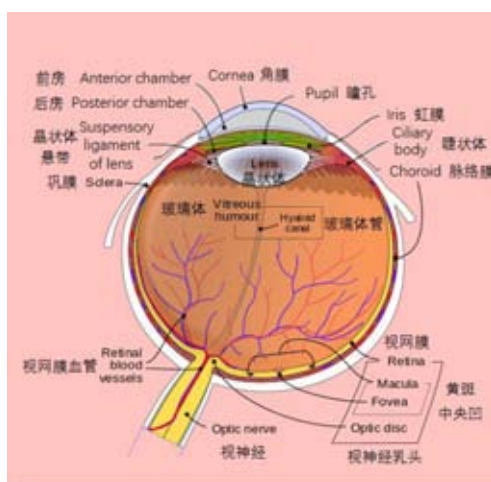


图 1 人眼结构图

角膜：角膜是最先接受光信息的部分，为眼睛提供大部分屈光力。

晶状体：晶状体是具有一定弹性的物质，也为眼睛提供屈光力。晶状体是一个凭生理机能具有调节能力的成像物镜，通过睫状肌的收缩或松弛，可以改变屈光度，相当于照相机的镜头。

瞳孔：虹膜当中的圆孔叫瞳孔，它由缩瞳肌和扩瞳肌控制，随入射光强、感情等变化，其直径可以改变（扩瞳或缩瞳），瞳孔有限制入射光量的作用，相当于照相机的光圈。

玻璃体：玻璃体是具有一定弹性和流动性的物质。它使晶状体和视网膜保持了一定的距离占据了眼轴长的大部分空间。

视网膜：视网膜是人体所有组织中最活跃、新陈代谢最旺盛的组织之一，专门负责感光成像。视网膜分布在近似球形的眼球内壁的大部分，从而使眼睛具有很宽的视野，相当于照相机的底片。

Q2、人眼对光信息是怎样接收的？

视网膜可以看成是人眼光学系统的成像面，或者是光信息的接收器。视网膜

接收光信息，是由感光细胞——视锥细胞和视杆细胞——承担的。

视杆细胞分布在视网膜四周，它的功能是在低照度下给出单色视觉。这个微光视觉形式也称：“暗视觉”。刺激源的亮度有时低于几百分之一 cd/m^2 （坎德拉每平方米），如在黑夜的星光或月光下，这时，视杆细胞不能分辨颜色。其时间灵敏度曲线为 $V'(\lambda)$ ，又称为暗视觉光谱光效率函数。

视锥细胞集中分布在中心凹，它的功能是在正常照度下给出色觉。在明亮照明条件下，如刺激源的亮度为几个 cd/m^2 或更多，视锥细胞能够分辨物体的颜色和它的细节。其时间灵敏度曲线为 $V(\lambda)$ ，又称为明视觉光谱光效率函数。我们对颜色的感知就是因为我们有三类锥体细胞对不同波长光产生感应的结果，导致产生不同颜色的刺激具有不同的视锥信号。

Q3、信号灯为什么选择红色和绿色？

从红绿灯颜色的选择来说，首先选择的是色相对比很大的两种颜色。色相是区别各种不同色彩的标准，色相对比越大，越容易被区分。色相图如下图所示，两种颜色的色相角越大，色相对比越大。从下图我们看出，红色和绿色基本处在圆环对称的位置，其色相角约为 180° ，是一组不易被看错的颜色。那么为什么不选择其他对比强烈的颜色呢，像蓝色和黄色？

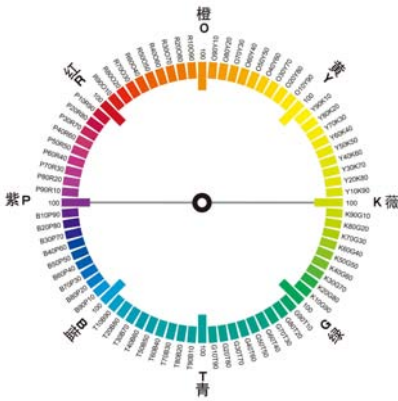


图 2 色相图

这是因为生理学实验表明，在中心凹中心很小的视觉区域内，对红色的感受最灵敏，而对蓝色和黄色却失去了敏感而不能辨别，是蓝、黄色盲区，可也说是蓝黄色弱去，只能辨别红和绿。进而对远距离的颜色信号，因为视角小，往往要看错，尤其对蓝、黄色不能分辨。如果亮度较低，而蓝和黄色容易与其他颜色混淆。根据人眼的这种色觉特点，人们在确定交通信号灯时，首先选择了红色和绿色。

Q4、眼睛是怎样调节的？

眼睛的成像系统对任意距离的物体自动聚焦的过程叫做眼睛的调节。眼睛之所以具有上述能力是眼球同睫状肌、晶状体悬韧带等共同作用，使晶状体的曲率半径改变，因此其焦距也随之变化。眼睛的调节能力用能清晰聚焦的极限距离表示，即远点距离 l_r 和近点距离 l_p ，眼睛能看清的最远距离称为远点距离 l_r ，能看清的最近距离称为近点距离 l_p 。眼睛的调节能力是以远点距离和近点距离的倒数之差来度量的，即：

$$\frac{1}{l_r} - \frac{1}{l_p} = \bar{A}$$

调节范围随着人的年龄而变化，如表 1 所示。

表 1 不同年龄的人眼调节范围（平均值）

年龄	10	20	30	40	50	60	70	80
l_p/cm	-7	-10	-14	-22	-40	-200	100	40
l_r/cm	∞	∞	∞	∞	∞	200	80	40
$\bar{A}$	14	10	7	4.5	2.5	1	0.25	0

我们在看近处的物体时，眼睛需要动用的肌肉较多，肌肉震颤大，若时间过长，容易使眼睛疲劳；而在看远处的物体时，眼睛需要动用的肌肉较少，肌肉震颤小，眼睛基本处于放松的状态。所以，我们常说看书看电视不要太久，要多出去走走。

Q5、为什么不能直视激光？

激光多发出平行光，当平行光照射到眼睛上时，会汇聚到视网膜上，也就是说把激光的能量全部集中到视网膜上，其功率将会有成千上万倍的增长，会对眼睛产生很大的伤害。因此，切忌用眼窥测激光光束，并且一定要提醒小孩子，千万不要拿着激光笔到处玩耍！

Q6. 为什么说晚上玩手机要开灯？

这是因为瞳孔的大小是由总光通量决定的。晚上熄灯后，即使手机屏幕较亮，但是环境光较暗，所以总光通量很小，瞳孔扩大，那么进入到人眼的光能量较多，会对眼睛造成伤害。如果开灯之后，环境光较亮，总光通量变大，瞳孔缩小，进入到人眼的光能量较少。用眼科上的形觉剥夺可以更好地做出解释：形觉剥夺是指黄斑中心凹附近，成像清晰明亮，而视网膜周围的区域几乎是全暗的，这种情况下只有中心视场成像，会对眼睛造成很大的伤害。所以无论是晚上玩手机，还是看电视、玩电脑，一定要开灯保护眼睛！

眼睛与光 Q&A（二）

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.8.23 已发布

大上期我们针对眼睛与光的一些问题给大家做出了解答。今天我们主要针对眼睛的折射能力错误导致的缺陷——近视眼、远视眼和散光的相关问题来和大家探讨。

Q1、正常眼是怎样成像的？

正常眼的远点在无限远处，即远处物体发出的平行光线先经过角膜折射，再经过晶状体折射，最后正好聚焦成像到视网膜上，并且可以通过眼睛的调节作用对任意距离的物体进行自动聚焦。

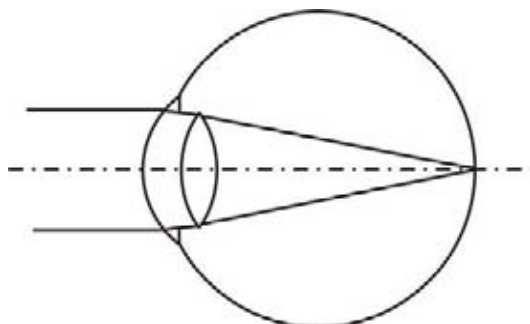


图 1 正常眼

Q2、近视眼是怎么回事？怎么校正？

近视眼的远点在有限远处，即无穷远处物体发出的平行光线经过眼睛光学系统后成像到视网膜前方。也就是说，近视眼即使在放松状态下，对无穷远处的物体依然有着较强的屈光力，使得物体成像在视网膜前方，不能清晰成像，所以近视眼看不清远处物体。但是在看近处物体时，由于近视眼的屈光力较强，可以把近处物体发出的光线折射到视网膜上，所以近视眼能看清近处的物体。

产生近视眼的原因大致有三种：

1、眼轴过长

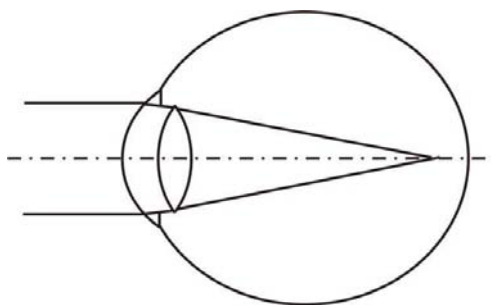


图 2 眼轴过长

2、角膜曲率半径过大

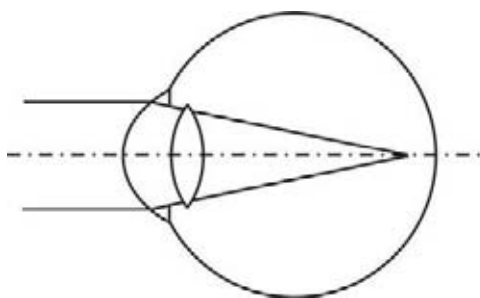


图 3 角膜曲率半径过大

3、晶状体焦距过短

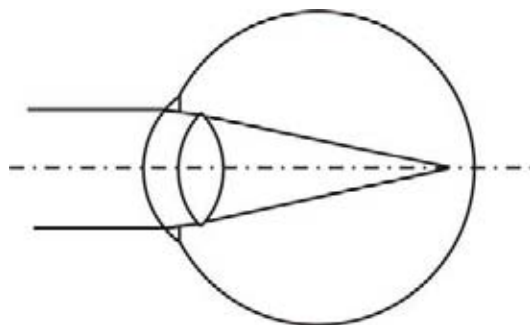


图 4 晶状体焦距过短

若使用眼镜矫正近视眼，需要在眼睛前面加负透镜，使光线发散。

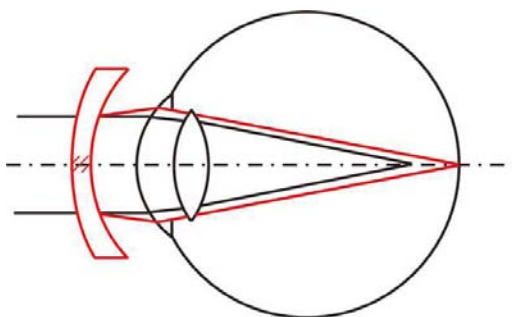


图 5 近视眼及眼镜矫正

Q3、远视眼是怎么回事？怎么校正？

无穷远处物体发出的平行光线经过眼睛光学系统后成像到视网膜后方称为远视眼。也就是说，远视眼在放松状态下，对无穷远处的物体有着较弱的屈光力，使得物体成像在视网膜后方，不能清晰成像，但是，大多数人的眼睛是可以调节的，可以弥补这种折射错误，此时可以通过眼睛调节，增加屈光力，把焦点前移到视网膜上，就能看清远处的物体。在看近处的物体时，光线会汇聚到视网膜更后方，若想看清此物体，就需要更大的屈光力，必须动用更多的调节，若远视程度较重，眼睛不能过多调节，则看不清近处物体。也就是说远视眼在看近处和远处都需要调节，并且看近处时，需要动用的调节更多，所以远视眼常常表现为视疲劳。而且看近处物体过久时，可能会出现模糊、头晕、恶心等症状。

产生远视眼的原因大致有三种：

- 1、眼轴过短

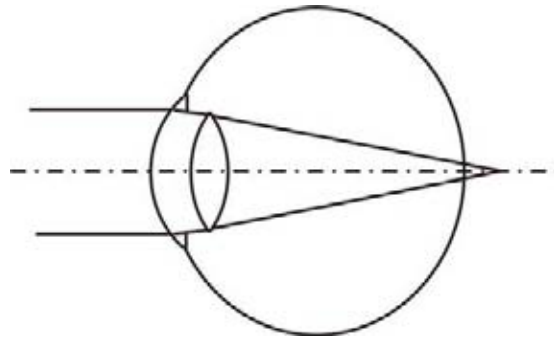


图 6 眼轴过短

2、角膜曲率半径过小

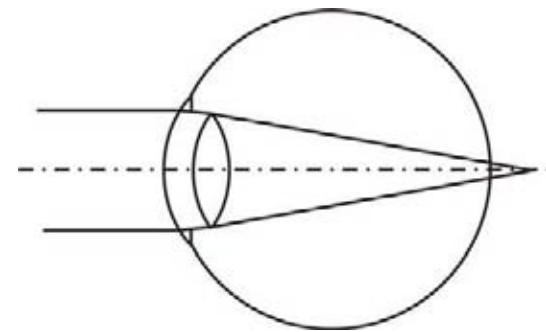


图 7 角膜曲率半径过小

3、晶状体焦距过长

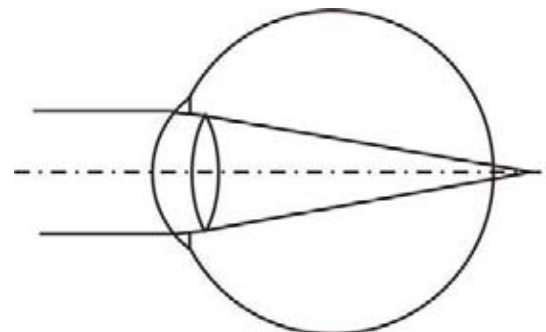


图 8 晶状体焦距过长

若使用用眼镜矫正远视眼，需要在眼睛前面加正透镜，使光线会聚，如下图 9。

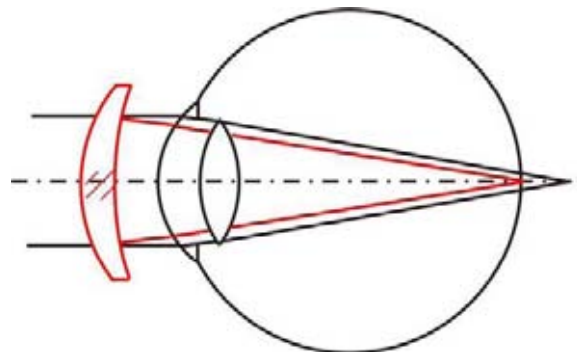


图 9 远视眼及眼镜矫正

Q4、远视眼只是看不清近处，那么把物体放远是否就能解决问题？

不一定。

如下图 10 所示，当物体 AB 在近处时（图中为蓝色 AB），在视网膜上成的像为 $A'B'$ ，当把物体 AB 移到远处时（图中为红色 AB），通过晶状体的调节，在视网膜上成的像为 A^*B^* ，可见 A^*B^* 大小小于 $A'B'$ ，也就是说物体远离后，人眼看到的像变小，若此时像的大小大于人眼分辨率，还能看清此物体，若此时像的大小小于人眼分辨率，则看不清此物体。所以，在看书或者其他近处的物体的时候（物距小于近点距），此时看不清是由于人眼的调节能力缺陷，但是把此物体拿远后（物距大于近点距）仍然看不清，是由于人眼的分辨率限制。

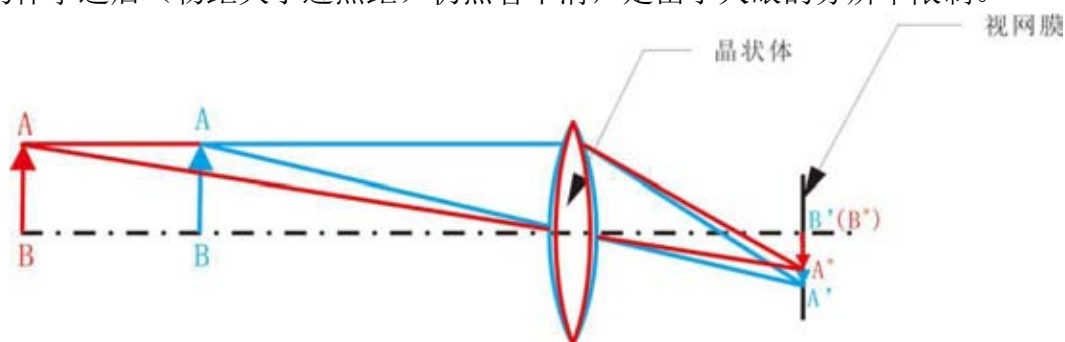


图 10 不同远近物体在视网膜上成像

Q5、散光是怎么回事？怎么校正？

散光最主要的原因是由于角膜非轴对称，当物体成像到视网膜上时，眼睛光学系统的子午面（通过物点和光轴的截面，图 11 中为蓝色阴影区域）和弧矢面（垂直与子午面的平面，图 11 中为红色阴影区域）的聚焦点不在一个点上，而是产生了两个聚焦点，进而导致观察物体时扭曲或模糊，如下图 11。为矫正散光，使光线聚焦为一个点，需使用柱面镜。如下图 12 所示。柱面镜可使沿其轴面方向的入射光线不发生折射，而使沿垂轴平面入射的光线发生折射。

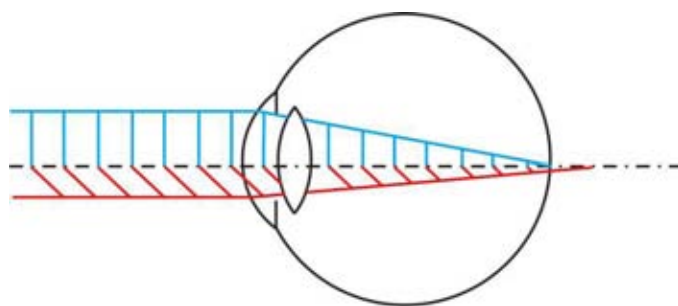


图 11 散光眼

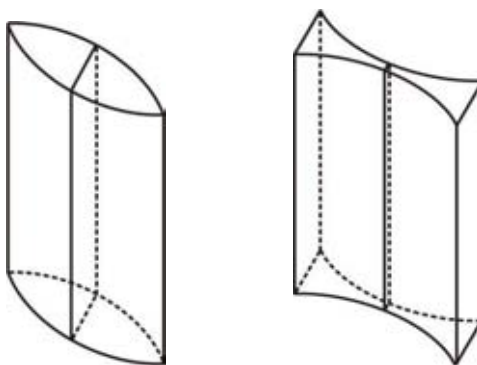


图 12 两种形式的柱面镜

为了能更好地理解散光现象，我们用一个右眼有散光，左眼无散光的远视镜做了如下实验：光源透过眼镜成像到墙壁上，观察散光镜的成像光斑情况。在某一位位置处，我们可以观察到图 13 的现象，左镜片（无散光）在墙壁上大致呈一圆形光斑，而右镜片（有散光）在墙壁上大致呈一近似圆角矩形弥散斑，此时右镜片（有散光）未清晰成像。拉远镜片，使右镜片清晰成像，此时可以观察到图 14 的现象，右镜片（有散光）呈一长条状光斑，光斑的长度方向即为散光矫正方向，亦为垂直于柱面镜的轴面方向，如图 15 所示。



图 13



图 14

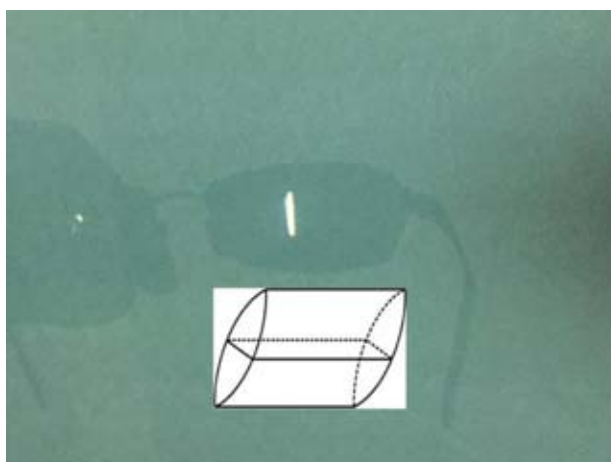


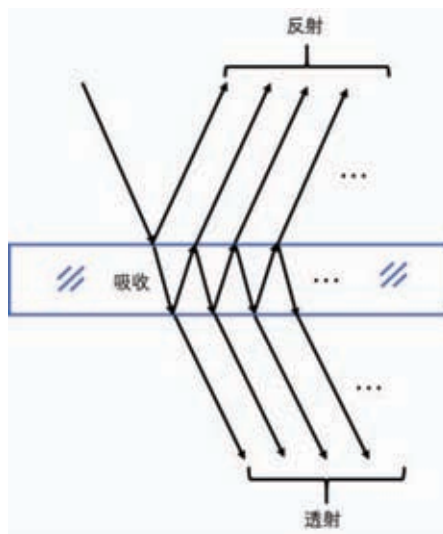
图 15

光在玻璃中的传播

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.6.23 已发布

光在玻璃中传播时，会发生什么现象呢？你真的了解吗？

当光线入射到玻璃上时，入射光经介质表面反射回原介质中的现象称为**反射**；入射光被介质吸收的现象称为**吸收**；而入射光经过折射穿过介质后出射的现象称为**透射**。玻璃有上下两个表面，在两个表面之间会发生多次反射现象，如图所示。

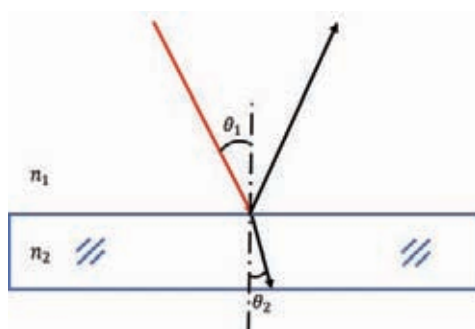


一、反射

首先，我们从反射说起，反射包括规则反射（Regular Reflection）和漫反射（Diffuse Reflection）。从微观上来说，无论是规则反射还是漫反射，都满足反射定律。

1.1 规则反射

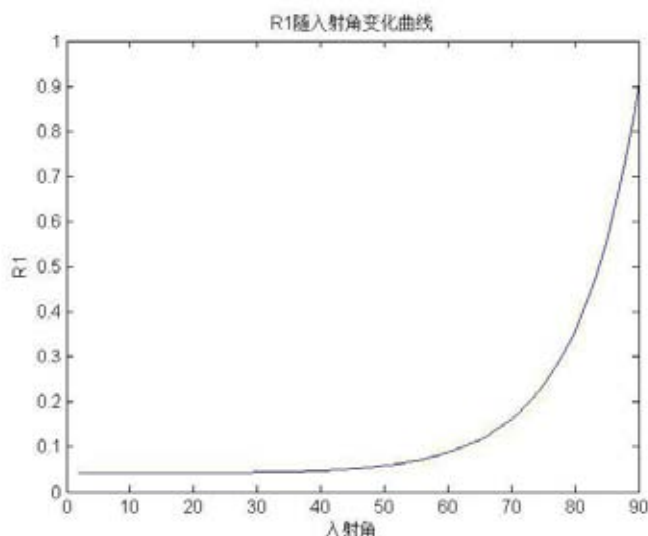
规则反射是我们通常说的镜面反射，如在平整的平板玻璃的反射中看到自己像的现象属于规则反射。



R_1 是玻璃第一个表面的分界面处的反射光通量与入射光通量之比即第一个表面分界面处的反射比，与入射角 θ_1 、折射角 θ_2 、入射光线所在介质折射率 n_1 和玻璃折射率 n_2 有关。入射角 θ_1 和折射角 θ_2 满足折射定律 $n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$ 。 R_1 可由菲涅尔 (Fresnel) 公式算出：

$$R_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right]$$

可见， R_1 是随着入射角变化而变化的。我们选择折射率为 1.52 的玻璃材料，画出光线从空气入射到玻璃上时， R_1 随入射角 θ_1 的变化曲线。



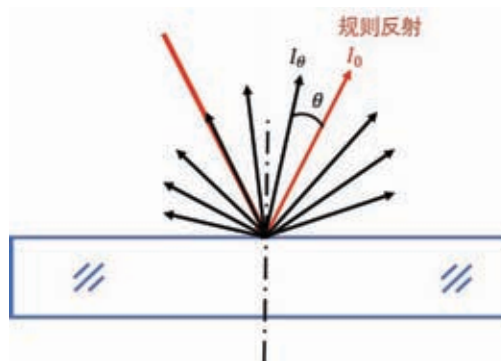
从图中可以发现，当入射光在入射角小于 45° 的区域内 R_1 变化很小，约等于垂直入射时的 R_1 ，根据 GB T 2680-1994 中照明和探测的几何条件可知，在光谱反射比测定中，照明光束的光轴与试样表面法线夹角不超过 10° ，照明光束中任一光线与与光轴的夹角不超过 5° 。因此只考虑第一个表面时的反射比可以近似地等于垂直入射的 R_1 ，根据菲涅尔公式，垂直入射时的 R_1 可以化简为：

$R_1 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$ 。当 $n=1.52$ 时， $R_1 = 4.3\%$ 。对于玻璃的第二个面，也会发生反射现象，并且，两个表面之间还存在多次反射现象。玻璃的反射比为玻璃两面反射比及多次反射比的总和。

1.2 漫反射

规则反射仅仅是玻璃表面非常平滑时发生的现象，有的时候，玻璃表面是粗糙的，比如磨砂玻璃、压花玻璃，这时候发生的反射是漫反射，也称背向散射。漫反射使得光线在许多角度上反射，而不像规则反射中仅以一个角度反射。其中，完全漫反射的光强分布满足朗伯余弦定律（Lambert's Cosine Law）：

$I_\theta = I_0 \cdot \cos\theta$ 。 I_0 是规则反射中反射光的光强度， θ 是某一方向上的漫反射光与规则反射光的夹角。可见，完全漫反射时，各个方向上的漫反射光强度呈余弦分布，当漫反射角度等于规则反射角度时，光强最大。一般具有漫反射特性的玻璃都不属于完全漫反射。



二、吸收

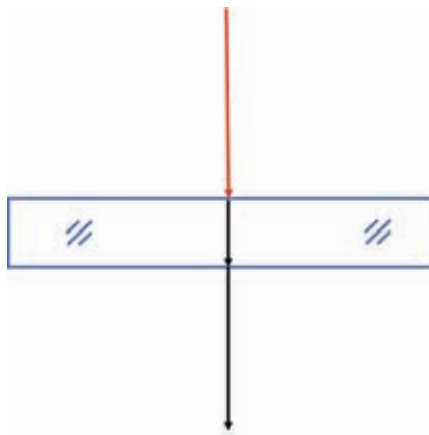
我们再来说光在玻璃中的吸收。当光线通过玻璃时，玻璃将吸收一部分光能量。符合比尔-朗伯定律（Beer - Lambert Law）： $A=e^{-at}$ 。其中，A 为吸收比（吸收光通量和入射光通量之比），a 为吸收系数，t 为玻璃厚度。通过公式可以看出，当玻璃材料一定时，玻璃越厚，吸收比越大。

三、透射

最后，我们来说光在玻璃中的透射。和上述光在玻璃中的反射现象类似，此时的透射也分为两种，分别是规则透射（Regular Transmission）和前向散射（Forward Scatter）。

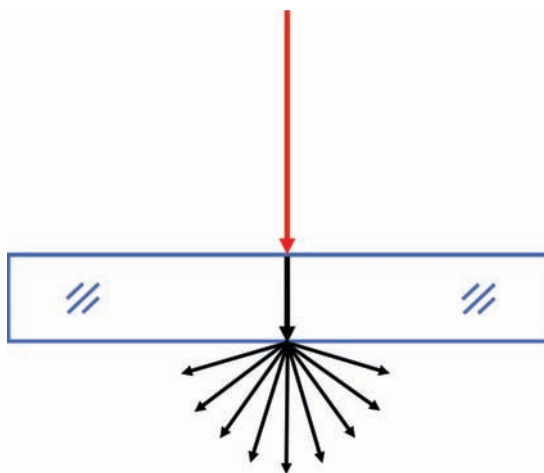
3.1 规则透射

规则透射是在玻璃表面非常平滑时发生的现象，是我们通常所说的“直透射”，即光线入射到玻璃上时，仅以一个角度透射的现象。和玻璃的反射比相似，玻璃的透射比为玻璃的多次透射比的总和。



3.2 前向散射

前向散射也称作散射透射，是由于玻璃一个或两个表面微观凹凸不平引起的不定向折射，使得光线以多角度透射，而不像规则透射中仅以一个角度透射。



四、总结

不同的玻璃种类，透反射形式也不尽相同。如平板玻璃，Low-E 玻璃等玻璃属于规则透反射，散射很小，一般也称为“透明玻璃”；磨砂玻璃、彩釉玻璃、压花玻璃等玻璃属于散射透反射，一般也称为“透光不透明玻璃”；而有的调光玻璃或变色玻璃可以控制在透明和散射之间转换。

对于大部分玻璃来说，都属于规则透反射，其透反射比必须使用相应的规则透反射仪器才能准确测量，若使用其他仪器会带来误差；对于具有散射特性的玻璃，若要测量散射透反射比，必须使用相应的漫反射仪器才能准确测量。

玻璃透反射看似简单，实际却较为复杂，所以，若要测量不同种类玻璃的透反射比，应明确需求，并选择合适的测量仪器。

5、典型普通白玻和超白玻璃的透反射比

典型普通白玻和超白玻璃的可见光透反射比可参照下表：

厚度/mm	白玻		超白玻璃	
	反射比/%	透射比/%	反射比/%	透射比/%
3	8.0	90.3	8.2	91.6
5	8.0	89.4	8.1	91.5
6	7.9	88.9	8.1	91.3
8	7.8	87.9	8.1	91.3
10	7.8	87.0	8.1	91.1
12	7.7	86.0	8.1	91.0
15	7.6	84.6	8.1	90.8
19	7.4	82.8	8.1	90.5

谈谈建筑玻璃的颜色

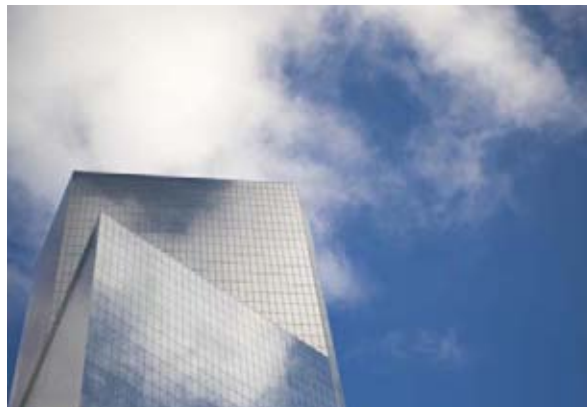
作者：吴筱 “建筑光学” 公众号 2017.7.5 已发布

一、引言

我们每天都能看到各种各样的玻璃幕墙建筑，有没有想过建筑玻璃到底是什么颜色呢？



是阳光的颜色？



是云彩的颜色？



是天空的颜色？是周围建筑物的颜色？

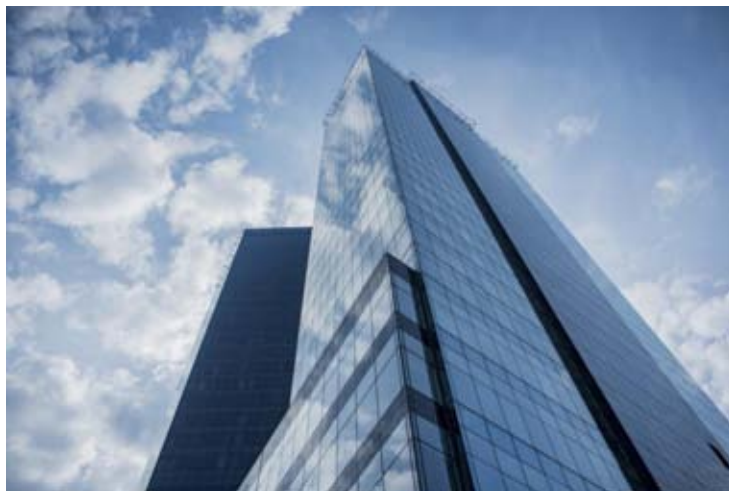


还是玻璃本身的颜色？

二、建筑玻璃到底是啥颜色？

光照射到玻璃表面，主要会发生规则反射（镜面反射）和规则透射（直透射）这两种光学现象，所以建筑玻璃的颜色其实是由反射颜色和透射颜色共同构成的。

由于幕墙、门窗表面的规则反射特性，从室外看，我们会看到玻璃映出的周边景象，如蓝天、白云、树木及建筑物的反射像。此时玻璃的颜色主要体现为这些景物经玻璃反射后的颜色。



正是因为光在玻璃表面发生规则反射，幕墙上才能映照出蓝天白云
(图片来源: pexels.com)

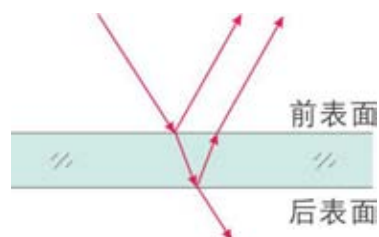
由于幕墙玻璃表面的规则透射特性，从室内向外看，我们能清晰地看见窗外的白云、植物及建筑物。此时玻璃的颜色主要体现为这些景物反射的光经玻璃透射后的颜色。



正是因为光在玻璃表面发生规则透射，我们才能清晰地看见玻璃另一侧的景物
(图片来源: negativespace.co)

三、玻璃的反射颜色

光在玻璃的两个表面均发生典型的菲涅尔反射，前表面几乎为无选择性反射；后表面的反射光两次透过玻璃，所以反射光色受玻璃本体透射颜色的影响。所以普通白玻的反射色很浅，着色玻璃的反射色呈现相应的颜色。



光在玻璃两表面均发生菲涅尔反射

通过玻璃表面镀膜能使玻璃表面对可见光选择性反射和吸收，从而改变玻璃的反射颜色。在保证可见光透射比的条件下，对膜层进行优化设计可使某波段的可见光被选择性反射或吸收，从而达到建筑色彩设计的目的。

目前，Low-e 玻璃的反射颜色一般以膜层的干涉色为主。



香港的中港城是全球最大的金色玻璃幕墙建筑物 (图片来源: 中港城官网)

四、玻璃的透射颜色

玻璃的透射颜色决定于白光透过它之后的光的颜色。当我们对着白光看一块红色的玻璃，之所以看起来呈红色是由于它对红光的吸收较少而对其他色光吸收较多。

普通白玻在白光照射下通常呈很浅的绿色，这是由于白玻中的铁元素对可见

光波段中绿光的吸收较少而对其他色光吸收较多造成的。

超白玻璃通过严格控制铁含量，达到对可见光全波段的光吸收均较低的效果，所以看起来无色、高透明。



白玻的侧面呈现浅浅的绿色

着色玻璃的原材料中加入了含有不同金属氧化物或单质的着色剂，这些着色剂对可见光不同波段的光进行选择吸收，使着色玻璃看起来色彩缤纷。



着色玻璃拼成绚丽多彩的建筑天窗，光透进来是不是很美（图片来源：
pixabay.com）

五、我们看到的建筑玻璃颜色到底是反射颜色还是透射颜色？

这取决于玻璃两侧光强的相对关系。

由于建筑玻璃两侧环境光强的相对关系在白天和夜间有较大差异，所以建筑玻璃在白天和夜间会呈现不同的颜色。

白天，从室外观察时，室外光强大于室内光强，我们看到的玻璃颜色主要是其反射颜色，由于室内相对较暗，由室内透过玻璃的光强远小于室外的反射光强，所以对室外反射颜色影响很小；从室内向外看时，透射光强远大于室内反射光强，所以从室内看到的主要是透射颜色。



图中红色箭头表示室外光及其透反射光，黄色箭头表示室内光及其透反射光



白天的建筑玻璃颜色主要是反射颜色（图片来源：unsplash.com）

夜间，从室外观察时，室外光强小于室内光强，我们看到的玻璃颜色主要是从室内透过玻璃的颜色，由于室外相对较暗，经玻璃反射的室外光强远小于透过玻璃的室内光强，所以对室内透射颜色影响较小；从室内向外看时，室内反射光强远大于室外透射光强，所以从室内看到的主要是室内光的反射颜色。



图中红色箭头表示室外光及其透反射光，黄色箭头表示室内光及其透反射光



夜晚的建筑玻璃颜色主要是室内透射颜色（图片来源：iziretail.com）

六、量化建筑玻璃颜色的条件

由第 5 部分可知，玻璃所处环境中的光照条件对玻璃颜色的影响很大。

所谓的“玻璃颜色”一般指白光照明于玻璃产生的颜色。严格意义上讲，必须规定“白光”的标准照明条件和“人眼”的标准条件。建筑玻璃的颜色可以采用国家标准 GB/T 3979《物体色的测量方法》规定的方法进行测量，照明条件一般采用 D65 标准照明体条件，观察条件一般采用 CIE1964 标准观察者的“人眼”条件。同时，不论是反射颜色还是透射颜色，也都应在规定的照明条件和观察条件下测量。

七、划重点

- ① 建筑玻璃的颜色由反射颜色和透射颜色共同构成；
- ② 当我们观察建筑玻璃时，在光强侧看到的主要是玻璃的反射颜色，在光弱侧看到的主要是透射颜色；
- ③ 建筑玻璃的颜色与照明条件和观察条件密不可分。

看到这里，你明白了吗？

说说建筑玻璃的颜色测量

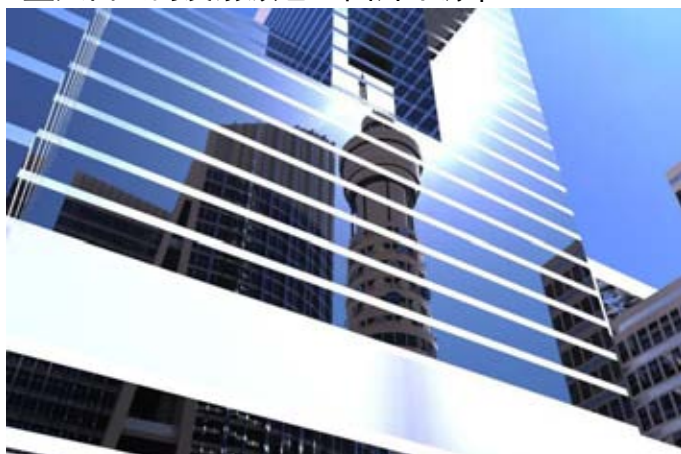
作者：吴筱 “建筑光学” 公众号 2017.6.23 已发布

一、引言

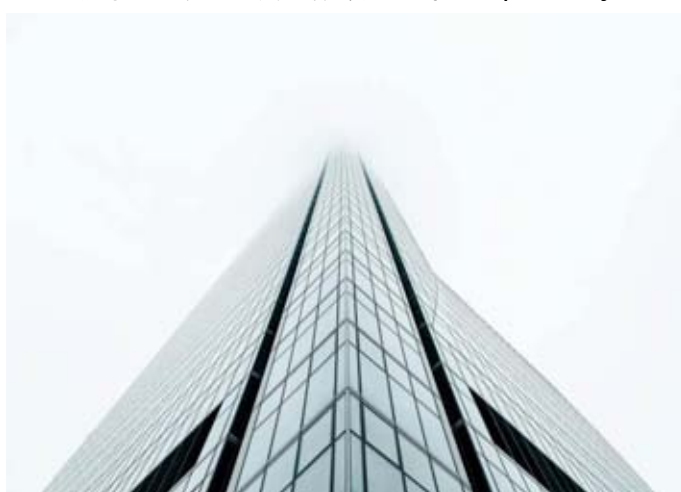
上次我们探讨建筑玻璃颜色，知道了建筑玻璃对光的规则透射和规则反射特性给我们造成的视觉感受——透射颜色与反射颜色。



蓝天白云的反射颜色（图片来源 pexels.com）



蓝天和周围建筑物的反射颜色（图片 pixabay.com）



雾霾天的反射颜色（图片 unsplash.com）



室内环境的透射颜色（图片来源 pexels.com）

看看上面的照片，有没有发现在不同的环境和光照条件下，我们所看到的玻璃颜色也不同呢？

二、建筑玻璃颜色测量条件

由于玻璃的颜色受所处环境中的光照条件影响，也和不同观察角度有关，而且不同的人在同一条件下的颜色心理感受也不同。那么怎样科学地定量测量玻璃的颜色呢？



为了科学地定量测量玻璃的颜色，应规定统一测量条件，包括照明光源条件、观察者条件和测量几何条件。早在 1931 年国际照明委员会 CIE 就已经对物体色的测量制订了相关标准，规定了标准照明体、标准色度观察者和测量几何条件。

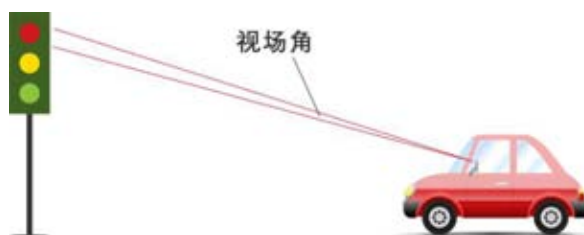
2.1 CIE 标准照明体

根据 GB/T 3978《标准照明体和几何条件》的定义，CIE 标准照明体是 CIE 依据相对光谱功率分布定义的照明体 A、照明体 D65 和其他照明体，并推荐通常的色度计算优先采用标准照明体 A 和 D65。

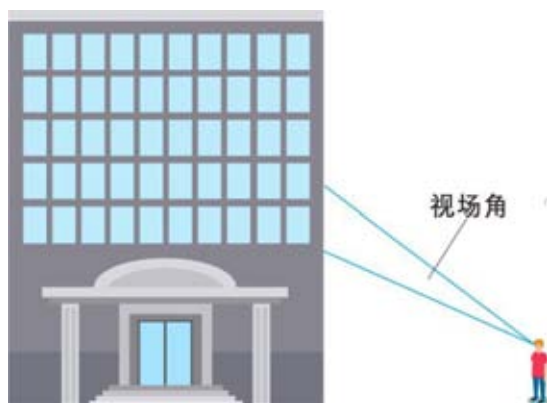
由于标准照明体 D65 代表相关色温大约为 6500K 的昼光，测量建筑玻璃颜色时一般采用 D65 标准照明体条件。GB/T 2680《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》也采用了 D65 标准照明体条件。

2.2 CIE 标准色度观察者

现代色度学在明视觉条件下测量物体颜色时采用 CIE 标准色度系统，其中“CIE1931 标准色度系统”代表了人眼 2° 视场的色觉平均特性，适用于视场角 1° ~ 4° 的颜色测量；“CIE1964 标准色度系统”代表了人眼 10° 视场的色觉平均特性，适用于视场角大于 4° 的颜色测量。

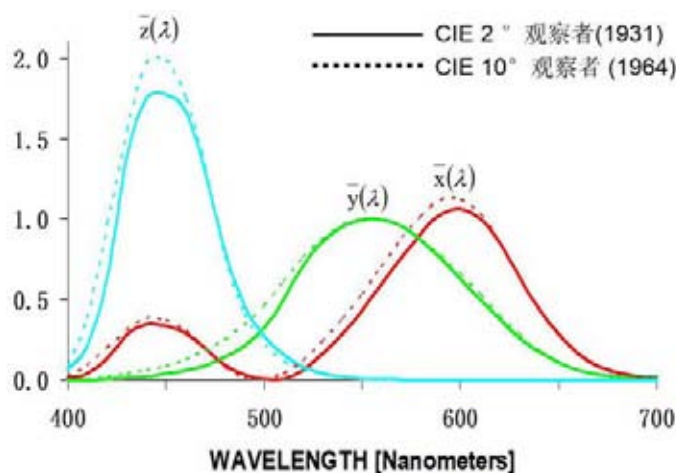


CIE1931 标准色度观察者条件适用于测量点光源等面积较小的物体



CIE1964 标准色度观察者条件适用于测量建筑玻璃等面积较大的物体

由于建筑玻璃通常面积较大，相对于人眼的视场角也较大，故测量建筑玻璃颜色时一般采用 CIE1964 标准色度观察者条件。



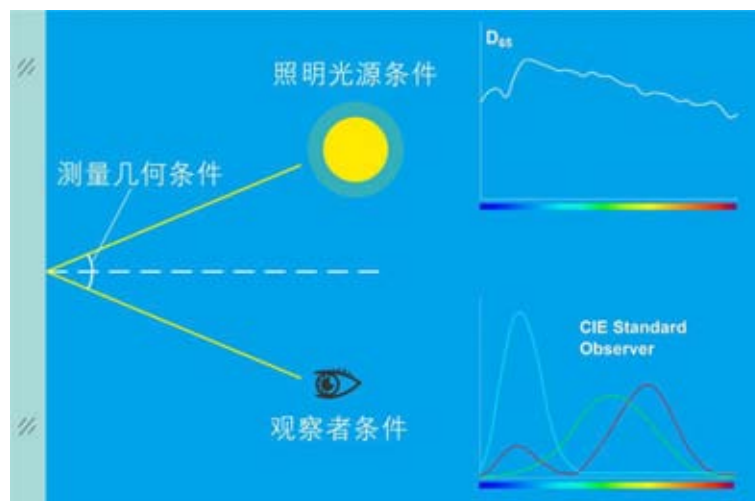
CIE 标准色度观察者色匹配函数

2.3 测量几何条件

根据 GB/T 3978《标准照明体和几何条件》的定义，几何条件是颜色测量仪器的照明光源和探测器与物体色样品之间的几何关系。

GB/T 2680《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》规定，在建筑玻璃的光谱透射比测定中，照明光束的光轴与试样表面法线的夹角不超过 10° ，照明光束中任一光线与光轴的夹角不超过 5° ；光谱反射比测定中，照明光束的光轴与试样表面法线的夹角不超过 10° ，照明光束中任一光线与光轴的夹角不超过 5° 。

注意：CIE 标准色度观察者的 2° 和 10° 指的是被观察物体相对于人眼的视场角，而测量几何条件的 5° 、 10° 指的是照明光束的入射角度，二者是完全不同的概念。

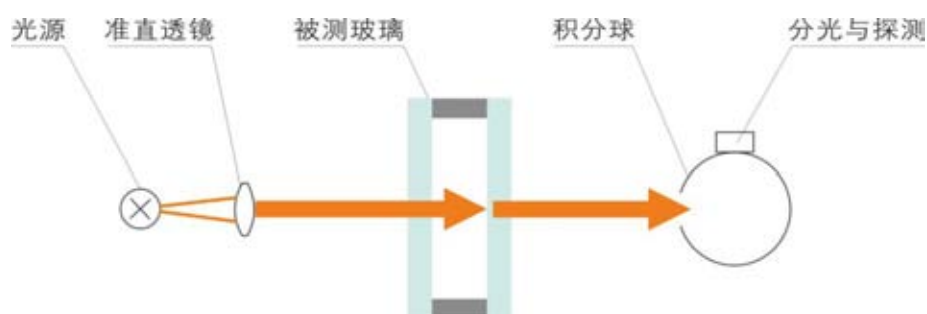


三、建筑玻璃颜色测量方法与仪器

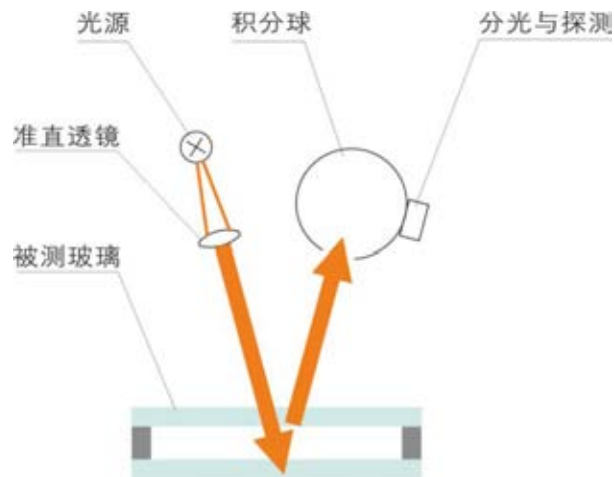
3.1 颜色测量方法

目前，测量建筑玻璃颜色的方法按原理主要分为两类：光谱光度测色法和光电积分测色法。二者相比，光谱光度测色法的测量结果精度更高、一致性更好，且光源不影响测量结果，所以目前主要采用光谱光度测色法测量建筑玻璃的颜色。

光谱光度测色法是直接测量物体在每个波长下的光谱透反射比，选用 CIE 推荐的标准照明体和标准观察者条件，计算得到相对色刺激函数，再计算得到透反射颜色。下面两图分别是光谱光度测色法透射测量装置和反射测量装置的示意图。



光谱光度测色法透射测量装置示意图



光谱光度测色法反射测量装置示意图

3.2 建筑玻璃颜色测量仪器

要特别注意测量仪器的测量几何条件，某些漫反射测量仪器并不完全适用于建筑玻璃的颜色测量。由于建筑玻璃主要为中空结构，且通常尺寸较大，所以一般测色仪器难以进行整体测量。

这里就要介绍一款专用于测量建筑玻璃规则透反射颜色的仪器——GlassQ 3000 手持式宽光谱测色仪，不仅适用于测量大尺寸中空玻璃成品，也能轻轻松松带去现场测已安装建筑玻璃，灵活多变的结构完全 hold 住各种情况。



反射测量



大板透射测量



边部透射测量

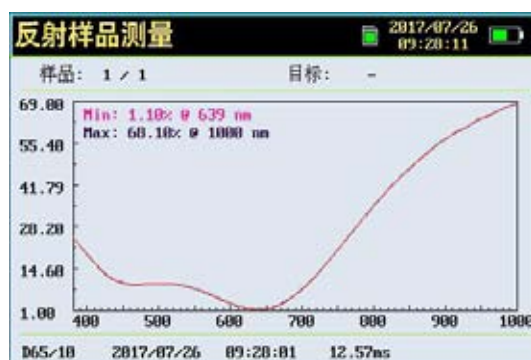


已安装玻璃现场测量

GlassQ 3000 手持式宽光谱测色仪采用 $8^\circ/8^\circ$ 测量几何条件, 符合标准 GB/T 3977、GB/T 3978、GB/T 2680。能够快速测量并直读色坐标 Y_{xy} 、 $L^*a^*b^*$ 、色差、光谱曲线等颜色参数。



色坐标 Y_{xy} 、 $L^*a^*b^*$



光谱曲线

分割线

此外，建筑玻璃常常采用镀膜玻璃制成，而镀膜玻璃的颜色主要由干涉形成，从不同的观察角度所看到的颜色不同。针对这种情况，应有不同测量几何条件的颜色测量仪器。

建筑玻璃的颜色比较重要，但一直没有专门的玻璃颜色测量方法标准，好消息是全国建筑用玻璃标准化技术委员会（SAC/TC 255）已经完成了相关国家标准的编制，即将发布。有机会我们将会说说建筑玻璃颜色及色差的测量方法标准。

关注建筑光学公众号，下期更精彩哦~



参考文献：

[1]GB/T 3978-2008 标准照明体和几何条件[S].

[2]GB/T 2680 建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定[S].

“积分式”和“分光光谱式”测量仪器哪一种更好？

作者：吴筱 “建筑光学”公众号 2017.5.26 已发布

对于建筑玻璃来说，可见光透反射比和太阳光透反射比是评价其光学性能的重要指标。科学地测量建筑玻璃的透反射比是产品质量控制的先决条件。

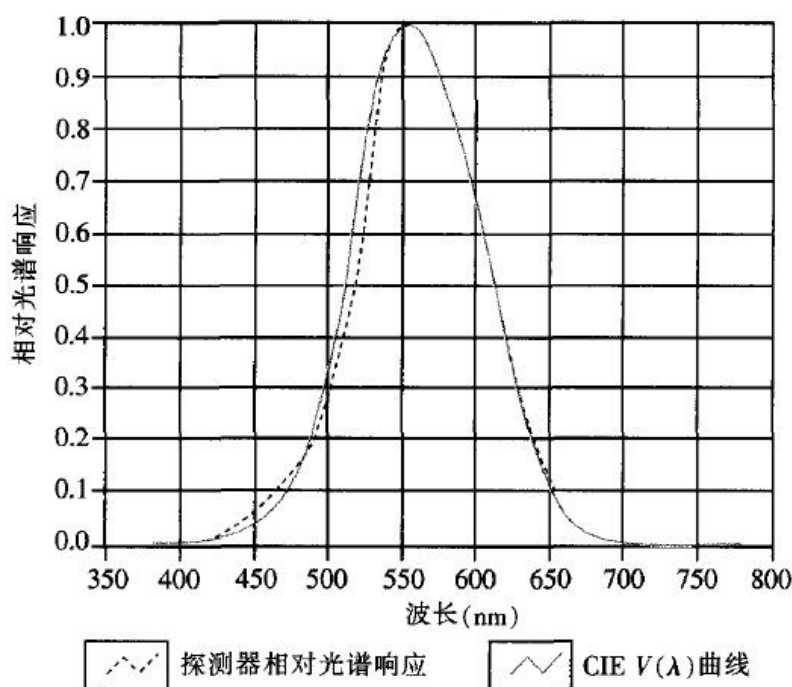
测量可见光透反射比的仪器有积分式和分光光谱式两种，可是选择哪一种仪器更好呢？

首先，什么是积分式和分光光谱式仪器呢？

积分式仪器通过使用滤光片，对光源的光谱分布和探测器的光谱响应曲线进行修正，使其与 CIE 规定的标准光源和人眼一致。通过测量样品、参比标准板的透射反射的光度积分响应值来进一步计算透反射比。

分光光谱式仪器是直接测量物体在每个波长下的光谱透反射比，选用 CIE 推荐的标准照明体和标准观察者，通过数值积分的方式计算得到透反射比。

积分式仪器测量可见光透反射比时，仪器的光源和探测器需要分别模拟标准光源的光谱分布和人眼的视觉响应曲线。但实际情况下，仪器的光源和探测器的光谱曲线修正很难与标准规定的完全一致。即使修正后光谱曲线与 CIE 标准曲线总体很接近，在不同波段的响应值也不会完全相同。这样当测量颜色玻璃或带有颜色膜层时，会导致测量结果产生严重误差。从下图不难看出修正后探测器光谱响应曲线与 CIE 标准曲线的差异。



分光光谱式仪器不需要模拟标准光源和人眼，只要仪器光源、探测器的光谱范围满足测量波段即可。从原理上避免了实际光学系统与标准光源及人眼的差异所带来的误差，由于依据理论曲线的数值积分几乎不存在误差，使得测量结果精度比积分式仪器高很多。

同样，在测量太阳光直接透反射比时，如果是积分式仪器，光源要准确模拟

AM1.5 太阳光谱分布，同时探测器的光谱响应须为中性特性，这些修正难度更高，测量误差也更难保证。而分光光谱式仪器测出太阳光谱范围的透反射光谱曲线后，按相应标准做数值积分计算即可得到高精度测量结果。

积分式仪器和分光光谱式仪器的区别有以下几点：

	积分式	分光光谱式
测量精度	低	高
测量结果一致性	差	好
仪器成本	低	高
可维护性	更换光源后，精度难以保证	更换光源不影响测量结果
稳定性	光源不同的使用期， 测量结果发生变化	光源不影响测量稳定性
测量速度	快	较快（非机械扫描）

综上所述，分光光谱式仪器能够更好地测量玻璃的可见光透反射比。

“绿色”建筑与绿叶

作者：侯佳音、苑静 “建筑光学” 公众号 2017. 10. 13 已发布
一、“绿色”建筑？



图 1 新加坡“森林城市”
图片来源：百度



图 2 意大利米兰“摩天森林”
图片来源：视觉中国



图3 日本“空中森林广场”

图片来源：百度图片

近几年新加坡“森林城市”、意大利米兰“摩天森林”、日本“空中森林广场”等相关概念不断涌出，这些在建筑物旁边种植绿植的作用除了净化空气、美化环境，还有什么呢？

二、绿植能降低环境温度，减少城市热岛效应

树木上的叶片能够遮挡直射的太阳辐射，使得被遮挡的建筑外墙和外窗显著降低了阳光得热，有效降低室内温度。

当树木能够有效遮挡硬化路面的条件下，会显著降低路面温度，也就降低了路面二次辐射热。树木越茂密、树林面积越大地表温度越低，降温效果越好。

城市进行科学合理地绿化可以减少城市热岛效应。

大家都知道，人在树荫下感觉到凉爽是因为树叶遮住了阳光辐射。那为什么在石棉瓦、鱼鳞铁等建筑材料做的遮阳蓬下仍会感觉到很热呢？甚至有的楼房的顶层房间已经完全遮挡了阳光但是还是感觉非常热呢？且听慢慢讲来。

三、太阳辐射和叶片的光谱特性

我们先从太阳光谱说起，在 AM1.5 条件下的太阳光辐射分布如下图 4 所示，可以看出，太阳辐射峰值大致在 550nm 左右。

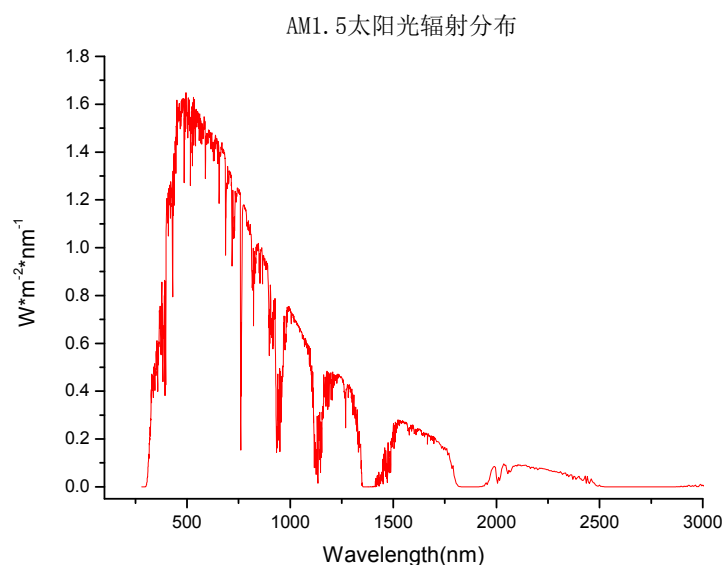


图 4 AM1.5 太阳光辐射分布图

在可见光波段，植物中的叶绿素吸收光产生光合作用，主要发生在短波蓝光区和长波红光区。我们观察绿叶的光谱反射比曲线，如下图 5 所示，可以发现，在 550nm 区域有较高的反射区，这个波段的光是绿色的，同时太阳辐射的峰值也是在 550nm 附近，可是大部分植物并不需要这样强的绿光，所以绿光被反射掉。这就是叶子看起来是绿色的原因。

占太阳辐射约 50% 的近红外辐射具有显著的热效应，在此波段内，叶片具有较高的反射比，将大部分红外热反射掉，从而可以防止其叶片被阳光灼伤。

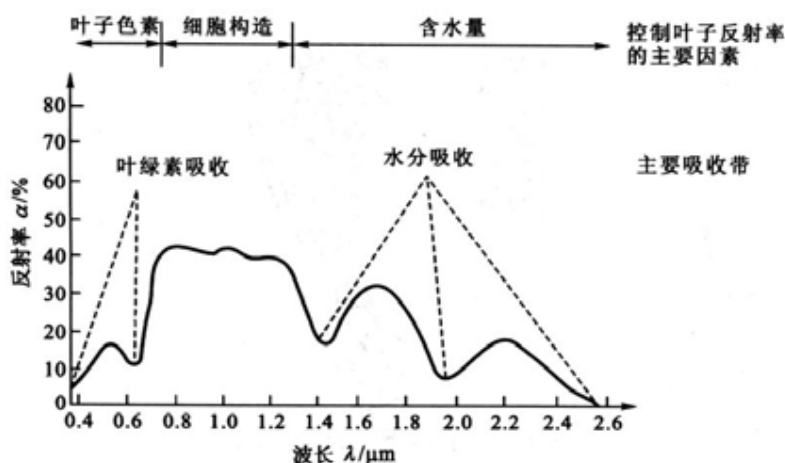


图 5 绿叶的光谱反射比曲线图

图片来源于网络

四、人眼光谱特性

从太阳光谱看，辐射峰值大致为 550nm，人眼明视觉光谱光效率函数曲线如下图 6 所示，其峰值也在 550nm 处，而大部分的绿叶植物的反射峰值也是 550nm，难道这仅仅是巧合吗？这不正是人与自然和谐共生的反映吗？

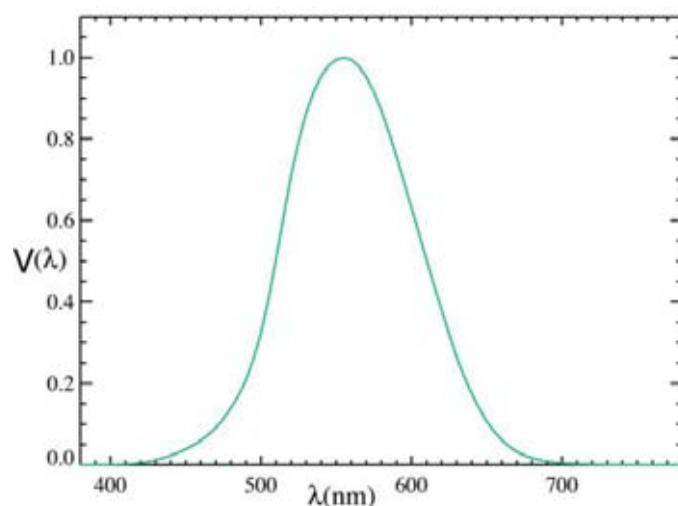


图 6 明视觉光谱光效率函数曲线图

五、叶片光学特性测量

为了研究植物为什么能降低周围环境温度，减少城市热岛效应，建筑光学工作组对不同植物的叶片做了光谱透反射比和表面辐射率两方面的测试工作。

我们选择了几片不同种类的叶片，如下图 7 所示：



图 7 叶片种类介绍

1、光谱透反射比测试

首先我们使用了奥博泰公司的分光光度计 GlasSpec1000 对这些不同的叶片进行了光谱透反射比测试。



图 8 使用 GlasSpec1000 进行光谱透反射比测试
测试结果如下图 9、图 10 所示：

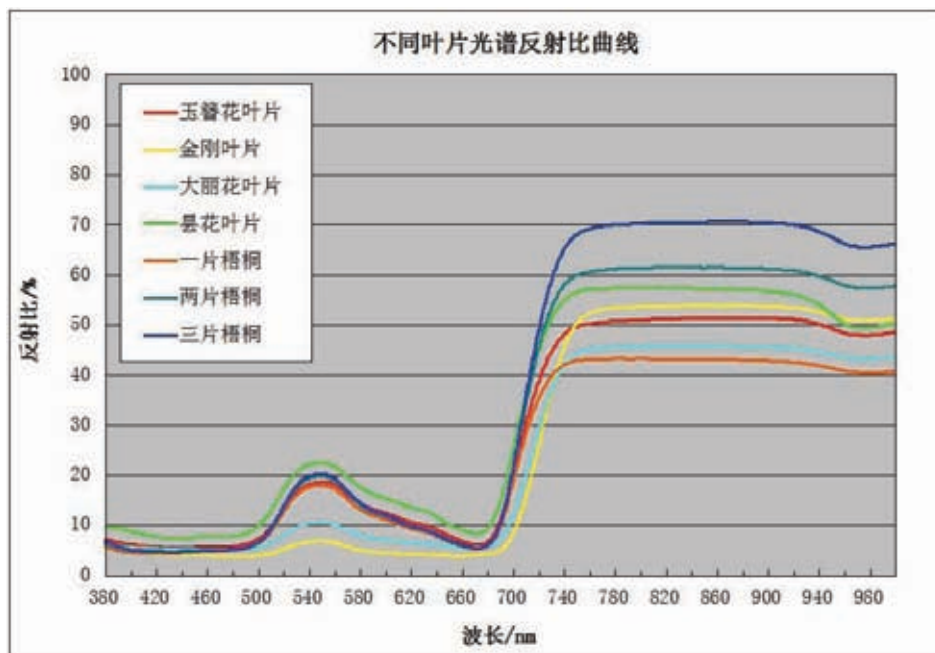


图 9 叶片光谱反射比曲线

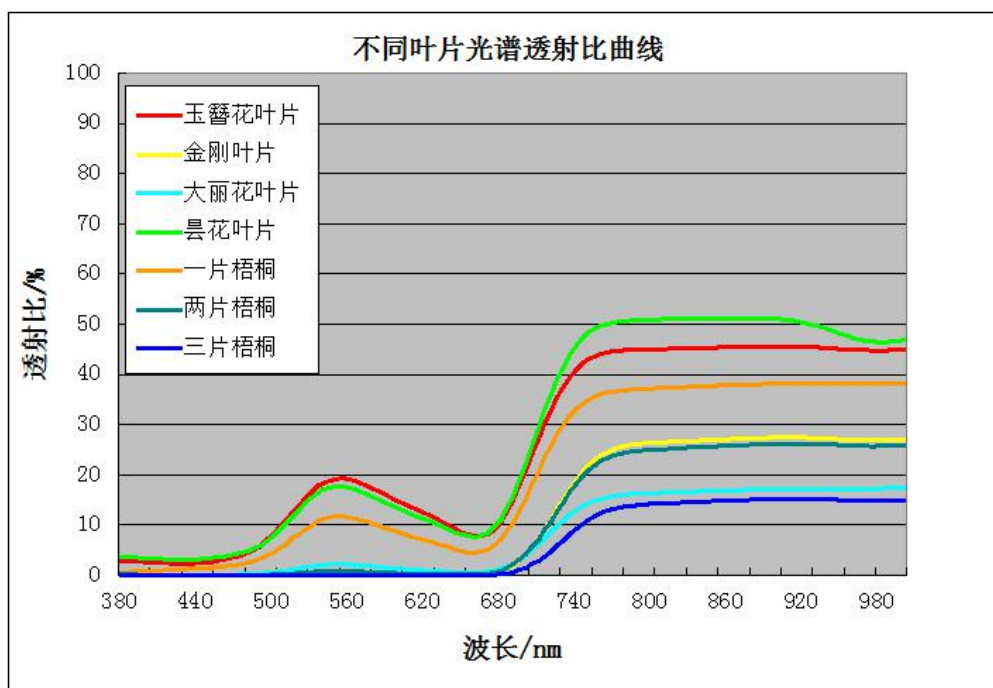


图 10 叶片光谱透射比曲线

观察上图 9 可以发现，在可见光波段，叶片的反射率较低；在近红外波段，叶片的反射比突然增加且趋于平稳，均达 40%以上。其中，一片梧桐叶片近红外波段的反射比约为 40%，若叠加两片梧桐叶片，近红外波段的反射比增高，可达约 60%，若叠加三片梧桐叶片，近红外波段的反射比增高至 70%，由此可推知：叠加叶片数量越多，近红外波段的反射比越高。

我们都知道，太阳辐射中的红外线是产生热量的主要原因，近红外波段的反射比越高，反射的热量就越多。进而可得出：叶片数量越多，反射太阳光热的能力越强。

以一片梧桐为例，绘制其光谱透射、反射、吸收面积图，如下图 11 所示。观察吸收区域，发现吸收最多的区域发生在蓝光和红光区，此时主要用于植物的光合作用；而近红外波段吸收较少，进而说明了在太阳下叶片为什么不热的原因。

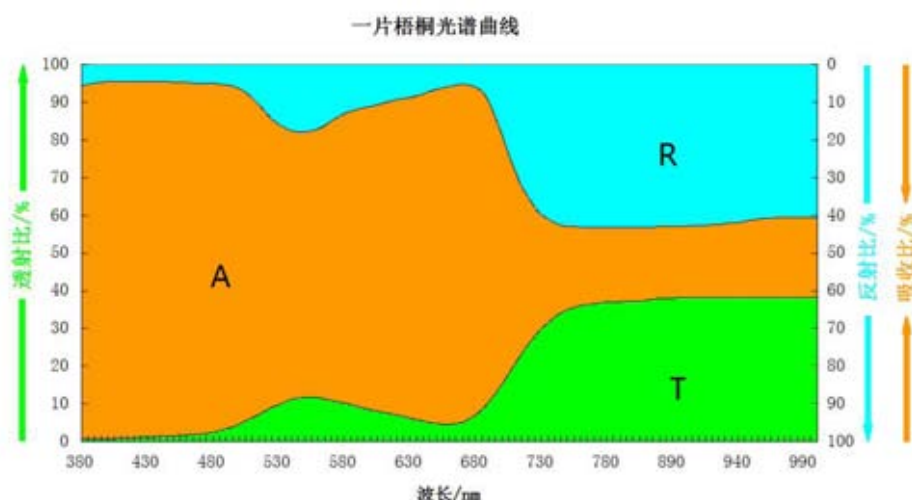


图 11 一片梧桐光谱曲线

2、 表面辐射率测试

接着,我们使用了奥博泰公司的便携式辐射率测量仪 AE2 对这些叶片进行了表面辐射率测试。



图 12 使用 AE2 进行表面辐射率测试

测试结果如下表格所示:

编号	名称	辐射率
1.	玉簪花叶片	0.69
2.	金刚叶片	0.48
3.	大丽花叶片	0.63
4.	昙花叶片	0.82
5.	梧桐叶片	0.62

常用建筑涂料辐射率可参考如下:

材料名称	材料表面状况	温度	辐射系数
砖	表面	20	0.93
碳	蜡烛烟尘	20	0.95
碳	石墨粗糙表面	20	0.98
混凝土	表面	20	0.92

玻璃	抛光平面	20	0.84
墙粉	粗刷	20	0.91
沙土	表面	20	0.90
泥土	干燥	20	0.92
泥土	饱和水	20	0.95
石膏	一般	20	0.91
木材	一般	20	0.78
石头	一般	20	0.92

对比叶片和常用建筑材料表面辐射率可以看出，叶片的辐射率相对较小，辐射率越低说明材料吸收并反射回的热量越少，也就是说叶片二次辐射的热量比一般的建筑材料要少。但叶片又具有一定的辐射率表明，叶片也需要将吸收的热量发射出去，以降低自身的温度。

六、结论

从上述两个实验可以得出：叶片反射太阳光红外辐射的能力较强，并且叶片越多，反射能力越强；同时，叶片二次辐射的热量比一般的建筑材料少。从而可以说明，植物有降低周围环境温度的作用，能够有效的减少城市热岛效应。因此，“绿色”建筑也属于绿色建筑！

那么很多建材做的人工遮阳棚，太阳红外反射比低、吸收大，吸收辐射转成热量后，又具有较高的辐射率，强烈的二次辐射使得人感觉到很热，虽然看似遮住了阳光，但其实只是阻挡了太阳的直接辐射热，并没有阻挡二次辐射传热。

那么，建筑外墙涂料更应考虑到建筑节能。若其光热性能能够像绿叶一样，做到近红外高反射，这样不仅能够使人感觉更舒适，而且更节能！若想了解更多，敬请关注【建筑光学】公众号的后续文章《“绿色”建材与绿叶》。

绿色建材涂料与“绿叶”

作者：侯佳音、许海凤 “建筑光学”公众号 2017.10.27 已发布
之前本公众号发表了“绿色建筑与绿叶”的一篇小文，今天再聊聊绿叶能给我们的绿色建材-涂料行业带来哪些启发。

大自然动、植物的存在，是经过残酷的物竞天择、相互适应、相互包容的结果。其中存在很多奥秘值得我们去研究，更有很多道理可以去学习。

绿色植物是人类赖以生存的一个重要条件，绿色植被在自身良好生存的条件下，为我们人类提供新鲜的空气，在炎热的夏季，也为我们降低了环境温度、带来了丝丝清凉。我们生存的城市中，随着绿地面积的减少、建筑以及其它各种热源的散热，致使城市的热岛效应越来越严重（图 1）。时至今日，我们已经不得不去思考和解决各种环境的问题，希望大家能够从小绿色植物中得到一切启发。

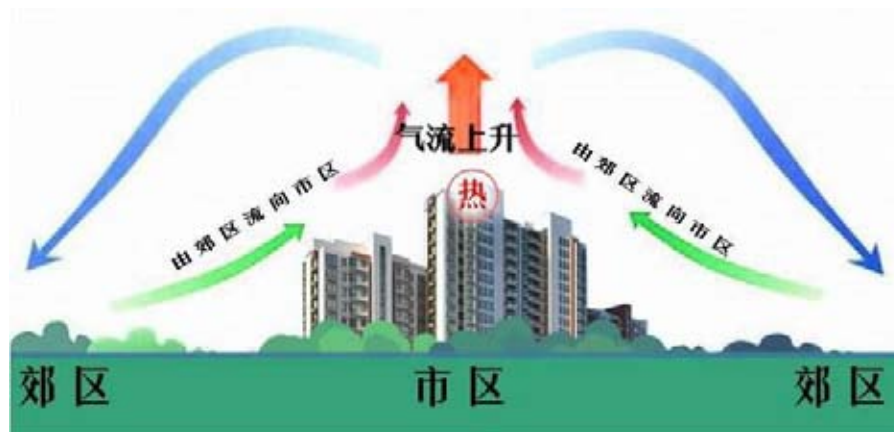


图 1 热岛效应示意图
(图片来源：科技世界网)

一、绿叶有什么特征呢？

由图 2 和图 3，再结合前期本公众号发表的文章以及生活常识，我们可以得出如下绿叶的特性：

- 绿叶通过吸收可见光中的蓝紫光 and 红光进行光合作用（图 2 中叶绿素吸收区域）；
- 在 550nm (0.55 μm) 绿光区域有将近 20% 的反射（图 2 曲线左数第一个峰值）；所以大部分成长期的叶片都是绿色的；
- 对波长 700nm (0.7 μm) 以上的近红外光有较高的反射率；
- 由前期文章中的辐射率实测得知，与各种建材相比，绿叶具有中等水平的中远红外辐射率。
- 具有水的蒸腾作用，吸收太阳光的热能，通过蒸腾作用降低叶片的温度。

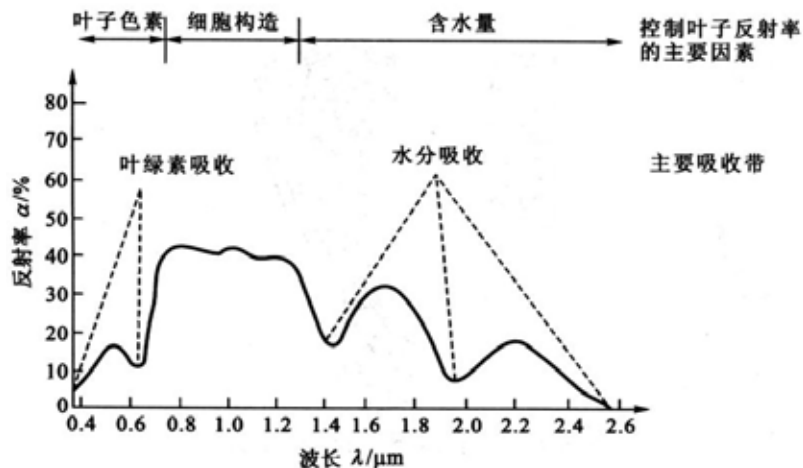


图2 绿叶的光谱反射比曲线图
(图片来源: www.51wendang.com)

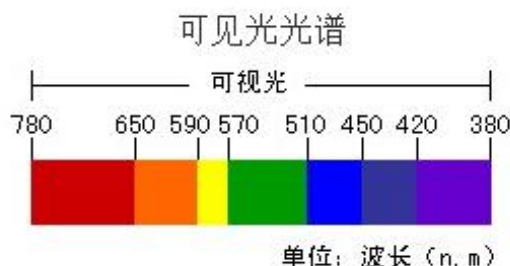


图3 可见光光谱

总之,在可见光区,绿叶在光合作用的同时体现了自身的颜色,在近红外区,尽可能多的反射热量,在中远红外区,具有中等水平的低辐射功能。通过多层叶片的作用以及叶片间流动的空气,使得树木自身减少热量积蓄,又给树下带来凉爽。

二、从绿叶特性得到的启示

➤ 光谱特性的启示

众多的绿色建材中,建筑节能涂料是研究的一个热点。节能涂料一般在可见光区调节颜色,近红外区尽量高的反射,太阳全波段为高反射低吸收,在中远红外波段,其涂料表面最好具有低辐射特性。通过上面的分析大家想到了什么,这是不是很像绿叶的特性呢?其实这并不是巧合,大自然赋予了我们生命,多观察大自然,向大自然学习,我们就能更好地与环境和谐相处,也定会看到大自然对我们的回报。

➤ 板间透气空隙

树木上长着茂盛的叶片,不是孤立的一个叶片就能够又利用阳光又能抵抗阳光的。由于叶片都有一定的透射,下层叶片也能获得一定的阳光,同时,多重叶片能更多的反射掉太阳的热量,叶片间的空隙能让空气流动带走热量。从中我们又能够得到一些启示,建筑遮阳材料或者结构设计,如有可能,可以设计出一定

的通气间隙，让流动的空气带走遮阳材料及空气腔积聚的热量，从而降低向室内侧的传热导。

三、建筑涂料要测什么？

本文且不分析和评价各种涂料技术，这也不是我们的专长，本文仅从光学、节能的角度，分析一下我们从绿叶得到哪些启示，除了传统的特性之外，还应该关注和测量涂料的哪些特性？详细如下：

➤ 可见光反射光谱曲线

应测量可见光波段的漫反射光谱曲线，然后可以计算出涂料的反射颜色。对于透明材料还应该测量透射光谱，计算吸收比。

➤ 太阳光波段反射比光谱曲线

应测量太阳光波段的反射光谱，进而计算太阳能反射比、太阳能直接吸收比、太阳**红外热能**直接吸收比等。对于透明材料还应测量透射光谱，然后计算吸收比。总之，应全面评估透明材料的透射、反射和吸收。

➤ 辐射率

应测量涂料的表面辐射率。对于有涂层的节能玻璃，已知涂层面的表面辐射率、玻璃结构、透反射和吸收光谱、涂层材料的导热系数及环境条件，就能够计算材料的传热系数和遮阳系数等热工参数。

四、答疑解惑

上面的描述可能忽略了一些细节，很多朋友可能会有些疑问，例如：大部分叶片是绿色的，为什么有的叶片就黄一点，甚至有的还是红色的呢？

Q1：叶片为什么有黄绿红？

细心的朋友看叶片的光谱曲线会发现在红光处（约 $0.68\ \mu\text{m}$ ）有一吸收谷（图 1），这是光合作用的吸收谷。不同的植物、不同的生长期，吸收谷大小不同，有的叶片发黄或发红，就是因为在黄光区或红光区吸收小、反射高的原因。

Q2：为什么叶片在近红外波段有几个吸收峰？不会吸热吗？

通过之前分析，我们知道太阳辐射的热能被叶片反射掉了。然而我们仔细观察图 2，在近红外波段， $1.45\ \mu\text{m}$ 和 $1.95\ \mu\text{m}$ 存在反射低谷，即**吸收峰**，这是什么原因呢？由于叶片中水、氮、碳的化合物存在，形成很多吸收区。图 2 中 $1.45\ \mu\text{m}$ 和 $1.95\ \mu\text{m}$ 就是叶片中水的强吸收区，但对应太阳大气光谱（图 4），这两个波长处太阳辐射也同样被大气中的水份所吸收（图 4 中箭头所示），因此，辐射到绿叶和地面上的总的能量也很小，所以即使有吸收峰的存在，最终的吸热并不会很大。

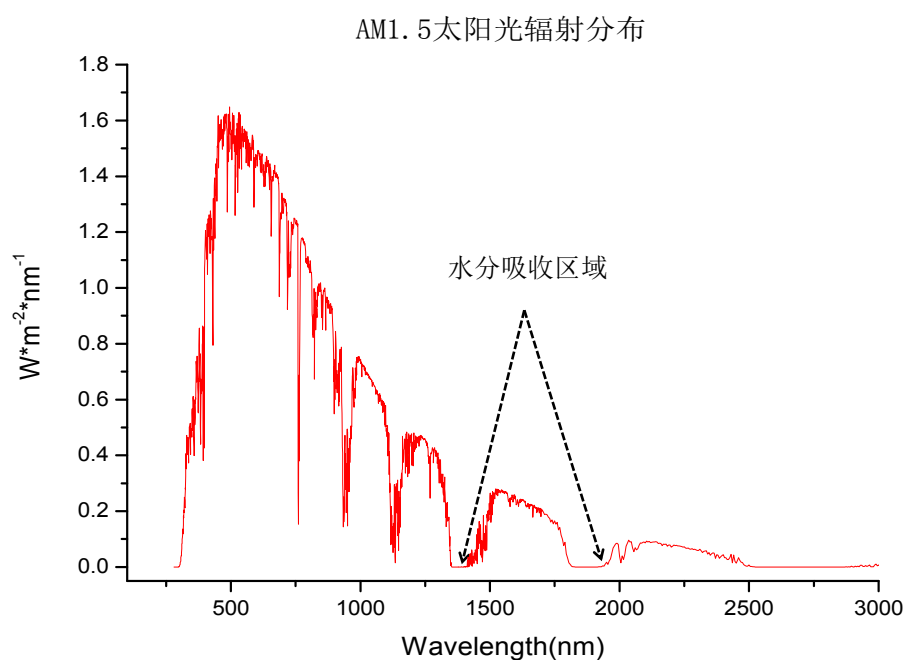


图 4 AM1.5 太阳光辐射分布图
(图片来源：奥博泰公司，根据标准 ASTM G173 绘制)

Q3: 太阳辐射峰值、绿叶的可见光反射峰值和人眼灵敏峰值波长都是 550nm 左右，是巧合吗？

图 4 中，太阳辐射的峰值是在 550nm 附近，从图 5 可以看到，植物中普遍存在的叶绿素，吸收发生在蓝紫光区和红光区，而反射峰值是在绿光区(约 550nm)，可能是植物的光合作用并不需要这样强的这个波段的绿光，所以才反射掉，也可能是大自然想把最舒适的颜色展现给我们。大胆的设想一下，假如在绿光这个波段没有反射，我们看到的大部分植物叶子将是黑灰色的了，那将是怎么样一个灰暗和晦涩的世界？无法想象。

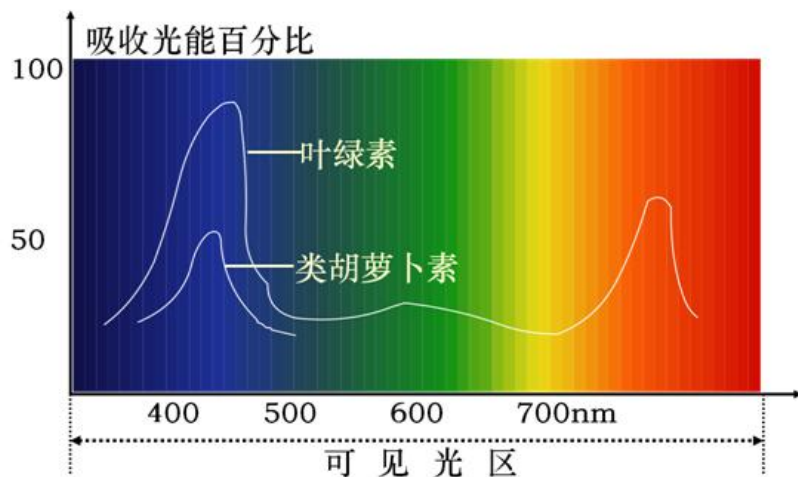


图 5 叶绿素和类胡萝卜素的吸收光谱图
(图片来源: 新浪微博)

更奇妙的是我们人眼的感光灵敏度的峰值也是 550nm, 因为是太阳带给我们光明, 人充分利用这一有利自然条件, 在进化过程中, 自然也就极尽适应和接受阳光, 所以人眼对 550nm 绿光是最敏感的。

太阳辐射峰值、植物绿叶反射峰值和人眼灵敏峰相重合的, 也说明了人与自然相互适应和赖以生存的关系, 大自然永远是人类最忠实的朋友。作为建筑节能道路上的同行, 让我们一起多多走向大自然、多观察、多学习、多总结, 同时, 我们也要保护好大自然—这位带给我们阳光和雨露的伙伴。感谢百忙之中阅读。

声明: 建筑光学编写组成员并非植物学专业, 如对绿叶的分析有不妥之处, 请相关专家提出和指导!

当一缕阳光照进被动房

作者：许海凤 “建筑光学” 公众号 2017. 11. 22 已发布

关于被动房，相信大家已经不再陌生。今天，我们从“建筑光学”的角度，来聊聊被动房与太阳光的密切关系。

一、什么是被动房？

关于被动房的定义，让我们来看看专业的网站和专家是怎么解释的。（来源：中国被动房网 www.passivehouse.org.cn）

被动式房屋指采用各种节能技术构造最佳的建筑围护结构和室内环境，最大限度地提高建筑保温隔热性能和气密性，使建筑物对采暖和制冷需求降到最低。在此基础上，通过各种被动式建筑手段，如自然通风、自然采光、太阳能辐射和室内非供暖热源得热等来实现室内舒适的热湿环境和采光环境，最大限度降低对主动式机械采暖和制冷系统的依赖或完全取消这类设施。

二、太阳光和被动房有什么关系？

被动房的设计指标、在中国的发展现状，本文不再赘述，大家可以在专业的网站找到你想要的答案。

被动房的各项技术指标中，和太阳光相关的有哪些呢？从上述定义中，我们不难看出两个关键词“自然采光”和“太阳能辐射”。说到这里，读者自然能够想到这两个关键词一定是指透明部分来说的。透明部分就像建筑物的双眼，透过它，我们才能够从室内看到大自然的美好；也是透过它，阳光才可以走进室内，在严寒的冬日，感受阳光的温暖。

具体到被动房透明部分的技术指标中，有三个关键指标，分别为可见光透射比 τ_v 、太阳能总透射比 g 以及光热比 LSG（也称“玻璃选择性系数 S ”）。下面我们深入来聊聊这几项技术指标。

1. 可见光透射比 τ_v

生活常识告诉我们， τ_v 当然越大越好，一是人的视觉感观比较好，二是能够节约室内的照明能耗。但“越大越好”是一种理想的情况，但现实中，为了提高玻璃热阻、降低热导和减少红外热量的进入，不得不使用各种镀膜玻璃，多了一个膜层之后，玻璃可见光透射比 τ_v 会有所下降，但这也是不得已而为之，是比较纠结的一件事情。

举个例子来说，单片白玻的可见光透射比约为 90%，镀低辐射膜之后， τ_v 可能为 80% 或者 70% 或者更低。被动房玻璃通常采用三玻两腔的结构，三玻中的两片一般为低辐射镀膜玻璃（Low-E 玻璃），此时，整体的 τ_v 可能会下降到 60% 或者 50% 甚至更低（当然也有极少的产品可达到 70%）。

一般来说，低辐射镀膜玻璃分为高透型和低透遮阳型，高透型的 τ_v 比较高，低透遮阳型的 τ_v 相对较低。有的时候又想遮阳遮热，又想可见光高透，此时，

也许三银 Low-E 能够满足您的需求，有兴趣的朋友可以阅读“建筑光学”前几期的文章“带您认识单银、双银和三银”。

对于建筑设计师和用户来说，按常理来看，会选择 τ_v 尽量高的玻璃。但玻璃有其固有的特性，不可以违背科学。例如有些项目要求超高的可见光透射比 τ_v 、超低的太阳能总透射比 g 、超低的传热系数 K 值。显然，玻璃企业费了九牛二虎之力，也难以达到要求。因此，在这里倡议用户朋友在提技术指标时，一定要根据行业的技术水平、结合实际量产的成熟产品，来提出合理的要求。下面表 1 和表 2 给出了典型被动房玻璃结构的可见光透射比 τ_v ，供大家参考。

表 1 三玻两腔双 Low-E 中空玻璃可见光透射比 τ_v

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ϵ	可见光透射比 τ_v
三玻两腔双 Low-E 中空 6Low-E (2#) +12Ar+ 6+16Ar+6Low-E (5#)	单银+单银	0.072, 0.072	0.73
		0.13, 0.13	0.58
	双银+单银	0.055, 0.072	0.55
		0.055, 0.13	0.50
	三银+单银	0.021, 0.072	0.61
		0.021, 0.13	0.55

表 2 真空复合中空玻璃可见光透射比 τ_v

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ϵ	可见光透射比 τ_v
真空复合中空单 Low-E 6+12A+6Low-E (4#) +0.15V+6	在线	0.18	0.65
	单银	0.13	0.65
		0.103	0.59
		0.072	0.73
	双银	0.055	0.56
	三银	0.021	0.62
		0.023	0.60
真空复合中空双 Low-E 6Low-E (2#) +12A +6Low-E (4#) +0.15V+6	在线+在线	0.18, 0.18	0.57
	单银+单银	0.072, 0.072	0.73
	双银+单银	0.055, 0.072	0.55
	三银+单银	0.072, 0.021	0.61

2. 太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR}

接下来再来说说太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR} 。

不同的地区的被动房,应根据气候特点,选择合理的太阳能总透射比 g 和 g_{IR} 。通过研究《民用建筑热工设计规范》(GB 50176)和《公共建筑节能设计标准》(GB 50189)等国家标准,结合玻璃主要热工参数,给出如下基本原则,供大家参考。

(1) 严寒地区(例如哈尔滨): 主要考虑冬季保温,宜选择高 g 值和 g_{IR} 值的玻璃。

(2) 寒冷地区(例如北京): 主要考虑冬季保温,部分地区和建筑部位兼顾夏季隔热,宜选择适中 g 值和 g_{IR} 值的玻璃。

(3) 夏热冬冷地区(例如上海): 主要考虑夏季隔热,兼顾冬季保温,宜选择低 g 值和 g_{IR} 值的玻璃。

(4) 夏热冬暖地区(例如广州): 北区可参考夏热冬冷地区,南区主要考虑夏季隔热,宜选择低 g 值和 g_{IR} 值的玻璃。

(5) 温和地区(例如云南): 温和地带分为北区、中区和南区,可根据具体情况参考夏热冬冷和夏热冬暖地区。

根据如上原则,结合玻璃行业产品现状,表 3 给出了典型被动房用玻璃的 g 值、 g_{IR} 值及使用建议。

表 3 典型被动房用玻璃 g 值、 g_{IR} 值及使用建议

玻璃类型	Low-E	太阳能总透射比 g	太阳红外热能总透射比 g_{IR}	建议使用地区
三玻两腔双 Low-E 中空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar+6Low-E	单银+单银	0.51	0.26	建议寒冷地区被动房选用
	双银+双银	0.35	0.06	建议夏热冬冷、夏热冬暖和温和地区被动房
	三银+单银	0.30	0.02	建议夏热冬冷、夏热冬暖和温和地带被动房
真空复合中空单 Low-E 玻璃 6+12A+5Low-E+V+5	单银	0.53	0.32	建议严寒,寒冷地区被动房选用
	双银	0.38	0.11	建议夏热冬冷地区被动房选用
	三银	0.30	0.03	建议夏热冬冷、夏热冬暖和温和地带被动房
真空复合双 Low-E	单银+单银	0.48	0.22	建议严寒和寒冷地区被动房选用

中空玻璃 6Low-E+12A+5Low-E +V+5	双银+单 银	0.34	0.08	建议夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地带被动 房选用
	三银+单 银	0.29	0.02	建议夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地带被动 房选用

3. 光热比 LSG（选择性系数 S）

如果你还处在“要光不要热”的矛盾中，光热比 LSG 这项技术指标会帮助你解决这个问题。光热比 LSG 为可见光透射比 τ_v 和太阳能总透射比 g 的比值，图 1 为各种玻璃的 LSG-K 的散点图。

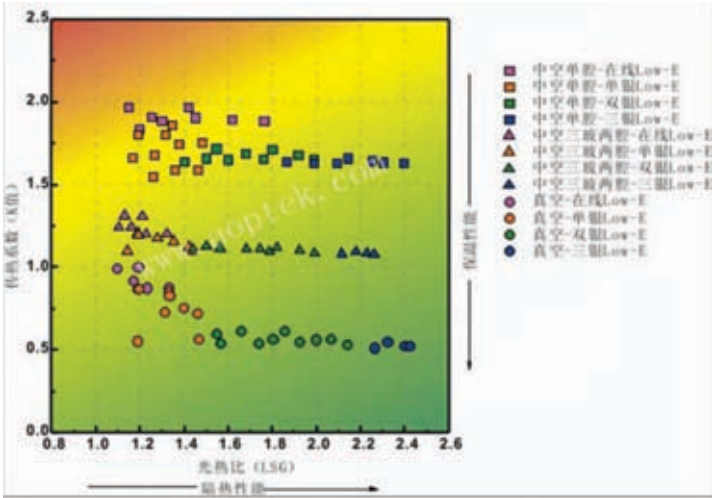


图 1 光热比 LSG-K 散点图

由图 1 可见，在线和离线单银 Low-E 光热比约在 1.1~1.4，双银离线 Low-E 系列的光热比约 1.4~2.0，三银 Low-E 系列的光热比基本在 2.0 以上。

光热比越高，代表了在相同的热量进入室内时，可见光透过越高；或者说，在可见光透过相同的情况下，进入到室内的热量越少。似乎有点拗口，通俗的理解，对光热比提出较高的要求，能够有效避免“不透热也不透光”或者“透热不透光”的现象发生。

三、结论

总之，被动房与太阳光密不可分，较高的可见光透过率，有助于被动房室内照明能耗的降低。合理的太阳能总透射比和光热比的设计，再结合各种遮阳装置，有助于被动房在夏季和炎热地区，实现“透光不透热”，在严寒和寒冷地区冬季实现“透热又透光”，最大限度的降低空调等主动设施的能耗。

其实太阳光的作用还不止于此，利用屋顶分布式太阳能光伏发电系统，能够有效帮助被动房变为主动房，也叫产能房。主动房在满足建筑自身能耗的基础上，还可以输出电能，多余的电能可并入公共电网，将清洁能源太阳能在建筑上得以充分利用。这是未来建筑发展的方向。

“对讲机”大厦为何把轿车烤变形

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.7.18 已发布

位于英国伦敦芬乔奇街 20 号，有一栋花 2 亿英镑重金打造的 37 层的摩天大楼，竟然把周边的轿车烤变形了！



究竟是怎么回事呢？一起来看看吧！

一、事件还原

据报道，在 2013 年 8 月 29 日，在伦敦芬乔奇街区，一栋标志性的摩天大楼把周边街道上停放的轿车烤变形：



自行车坐垫烤焦：



店家门口地毯烧焦：



究竟是什么样的大厦竟有如此威力呢？我们来看看大厦长什么样子。
白天的大厦在周围的建筑中鹤立鸡群：



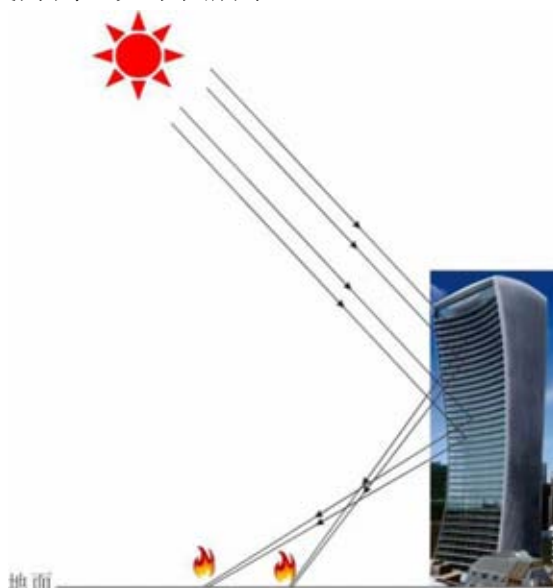
夜间的大厦在灯光的点缀下，更是美得不像话：



这座大厦造型奇特，设计感十足。因为“长”得像个对讲机，就被大家戏称为“walkie talkie tower”，翻译过来就是“对讲机大厦”。如此壮观的建筑究竟有什么问题呢？

二、原因剖析

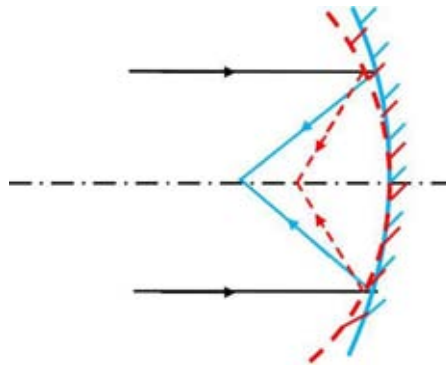
仔细观察发现，这座大厦的外形是向内凹陷的，并且大部分外立面为玻璃，整座大厦近似形成了一个巨大的凹面镜。凹面镜对入射光线起汇聚作用，当太阳光照射到大厦凹面上时，照射到大厦玻璃上的光被反射并且汇聚到地面上不同位置，形成不同大小的光斑，相当于把太阳直射到大厦玻璃上的能量汇聚到这些光斑处，故引发该处温度升高。如下图所示：



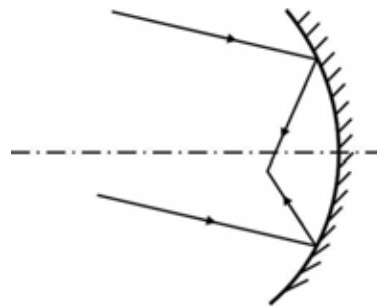
下面我们来分析凹面镜反射成像规律。

1、球面镜

当凹面镜为球面镜（各点的曲率半径相同）时，可以把入射的平行光汇聚到一点上。并且根据反射定律可知，此时汇聚点位置与凹面镜的曲率半径有关，从下图可以看出：当光线平行于光轴入射时，曲率半径越大，汇聚点距凹面镜顶点距离越远。

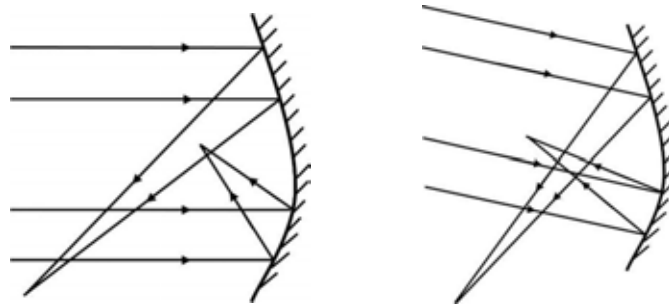


汇聚点位置还与入射光线角度有关，从下图可以看到：当入射光线与光轴呈一定角度入射时，汇聚点不在光轴上，位置与入射光线角度及凹面镜的曲率半径有关。



2、非球面镜

当凹面镜为非球面镜（各点的曲率半径发生变化）时，入射的平行光就可能汇聚到不同的位置处，产生多个汇聚点。同球面镜反射相似，汇聚点的位置与入射光线角度及凹面镜的曲率半径有关，如下两图所示。



三、仿真分析

我们进一步对该现象进行仿真分析。

已知，事件发生在 2013 年 8 月 29 日，且伦敦的纬度为北纬 51.5° 。根据太阳高度角计算公式：

$$\alpha_s = \arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)$$

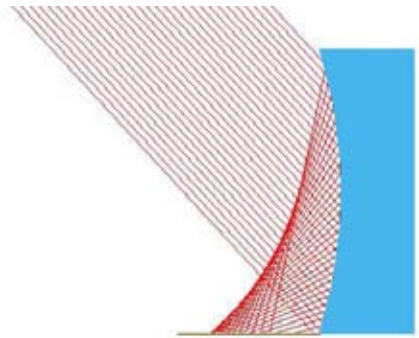
其中， α_s 为太阳高度角， ϕ 为地理纬度， δ 为太阳赤纬， ω 为时角。

通过公式可以计算出，伦敦当天正午时的太阳高度角约为 47° ，且已知太阳的发散角为 0.54° 。

假设，太阳直接照射到大厦的辐照度约为 $500\text{W}/\text{m}^2$ ，大厦凹面近似为半径为 200m 的球面，大厦高约 110m。因球面不同宽度方向上反射的光能量相同，在此

取 10m 宽为代表。

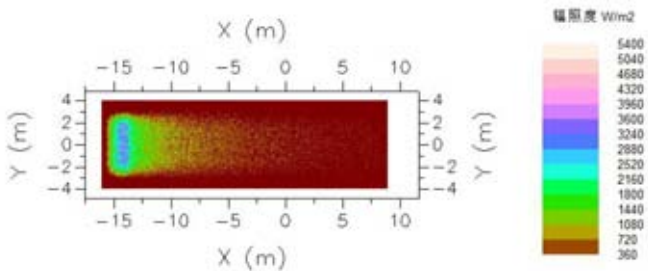
在光学设计软件中的仿真光路图如下图所示：



由仿真可得，经过大厦玻璃幕墙反射到地面上形成的光斑，光斑中心距离大厦约 23m, 光斑整体大小约为 140m², 光斑总能量的 80% 均集中在光斑中心处约 46m² 的位置处。

若玻璃幕墙采用白玻中空玻璃，且太阳光直接反射比约为 13% 时，大厦前方 25m×8m 地面上的辐照度分布如下图所示，其中最大辐照度约为 5300W/m²，此时的辐照度仅为大厦凹面反射到地面上的最大辐照度，若考虑到太阳直射到地面上的辐照度 500W/m²，那么地面上的最大辐照度为二者之和 5800W/m²。

地面上的辐照度分布



若其他条件不变，玻璃幕墙采用 Low-E 中空玻璃，且太阳光直接反射比约为 30% 时，地面上的最大辐照度约为 11600W/m²。

上述仿真结果可以总结为下表：

玻璃类型	太阳光直接反射比	太阳光直射到大厦上的辐照度	地面上的最大辐照度	地面上的最大辐照度与太阳光直射到大厦上的辐照度之比
白玻中空玻璃	13%	约 500 W/m ²	约 5800W/m ²	约 12
Low-E 中空玻璃	30%	约 500 W/m ²	约 11600W/m ²	约 23

由此可见，由于大厦可以近似为凹面镜，可以把太阳光直射到凹面玻璃上的能量反射集中到地面汇聚点上，引发汇聚点温度升高。

在本次仿真中，仅仅把大厦的凹面考虑为凹球面，在实际中，由于大厦的面

形可能为复杂的双曲面面形，由某些局部位置的玻璃反射后在地面上可能会形成多个较小的汇聚点，这些汇聚点处的辐照度可能会呈更大的增长。并且，在相同的条件下，太阳光直接反射比越高的玻璃，地面上的辐照度越大。

注：以上仿真计算为假设的大厦南朝向凹面面形，仿真计算所得数据仅供参考。

四、光污染

“对讲机”大厦带来光污染问题也不容小觑：



强烈的反射光会对人眼产生眩光问题，人眼会产生强烈的不适感，并对人眼的角膜和虹膜造成伤害。所以，在设计建筑玻璃幕墙的同时，应充分考虑到眩光问题。

为了限制玻璃幕墙有害光反射，我国特别颁布了《GB/T 18091-2015 玻璃幕墙光热性能》标准，对玻璃幕墙的设计与建设提出了一系列要求，如：“玻璃幕墙在满足采光、隔热、保温要求的同时，不应对外环境产生有害反射光的影响”、“道路两侧玻璃幕墙设计成凹形弧面时应避免反射光进入行人与驾驶员的视场中，凹形弧面玻璃幕墙设计与设置应控制反射光汇聚点的位置”等等。

五、总结

“对讲机”大厦最终被评选为 2013 年度英国最糟糕的建筑之一，并获得了 2013 年度“红宝石杯”（又称“痛杯”）建筑奖，这个奖项是颁发给英国年度最差建筑奖。该楼的历史虽短，却屡遭恶评。而大楼的后续是：楼建好了角度没法调整了，只好对外墙的玻璃进行了一部分的调整，但是聚光问题并没有得到彻底的解决。

这座大厦的大部分设计工作，都是在计算机上完成的，但是百密一疏，在设计时为了追求外形的独特，却忽略了凹面镜反射的光学问题，产生了不可挽回的负面后果。

所以，建筑和光学之间的关系是密不可分的，在建筑的设计阶段，就要充分考虑到其光学特点，进行严格的质量把控，必要时应做太阳危害仿真计算

节能玻璃的关键性节能指标是什么？

作者：苑静 “建筑光学” 公众号 2017. 4. 27 已发布

建筑用门窗的主要功能是采光和保暖，随着人们生活水平的提高，住宅用户更倾向于采用大面积玻璃门窗，使得室内在白天可以获得充分的自然采光及室外开阔的视野。但是，门窗相对墙体、屋面和地面这四大围护结构来说绝热性能最差，门窗的能耗约占建筑围护结构总能耗的 40%~50%。为了保持室内舒适的温度，只能通过消耗大量能源，如夏季使用的空调和冬季使用的暖气。

为了解决玻璃能量损失这一难题，行业内开发了低辐射镀膜玻璃 (Low Emissivity Glass)，成为如今玻璃行业主要发展的产品之一。如果中空玻璃中选用辐射率为 $e = 0.04$ 的双银 Low-E 玻璃，充入惰性气体后其传热系数可达 $1.3 \sim 1.1$ ，相当于 370mm 厚砖墙的保温隔热性能，如此不仅可以增大采光面积，还能降低能源消耗。我们把这种具有优良隔热、保温和采光等性能，并有效降低能耗的玻璃叫做节能玻璃，那么哪些指标是节能玻璃的关键性节能指标呢？

一、可见光透射比 t_v

对于玻璃窗最基本的功能“采光”来说，也就是玻璃对可见光的透过能力，以可见光透射比 t_v 来衡量。行业标准 JGJ151-2008 对可见光透射比定义为，采用人眼视觉函数进行加权，标准光源透过玻璃、门窗或玻璃幕墙成为室内的可见光通量与投射到玻璃、门窗或玻璃幕墙上的可见光通量的比值。可见光透射比越大，室内采光效果越好。

二、传热系数 K 值（或 U 值）

对于玻璃窗第二大功能“保温”来说，也就是阻隔温差传热的能力，以传热系数 K 值衡量。行业标准 JGJ151-2008 对传热系数定义为，两侧环境温度差为 $1K(^{\circ}C)$ 时，在单位时间内通过单位面积门窗或玻璃幕墙的热量。传热系数越小，保温性能越好。

三、太阳红外热能总透射比 g_{IR}

玻璃窗的第三大功能“隔热”，也就是玻璃阻挡太阳辐射热的能力，以太阳红外热能总透射比 g_{IR} 衡量。在最新会标 HB002—2014 中对 g_{IR} 的定义为，在 780nm~2500nm 波长范围内的太阳能总透射比。 g_{IR} 值越小，玻璃阻挡太阳辐射热的能力越强。

那么太阳能总透射比（简称为 g 值，又名阳光得热系数 SHGC）又是什么呢？行业标准 JGJ151-2008 中叫“太阳光总透射比”，定义为：通过玻璃门窗或玻璃幕墙成为室内得热量的太阳辐射部分与投射到玻璃、门窗或玻璃幕墙构件上的太阳辐射照度的比值。成为室内得热量的太阳辐射部分包括：太阳辐射通过辐射透射的得热量；太阳辐射被构件吸收再传入室内的得热量。g 值表征的是玻璃的得热能力，g 值越大，得热能力越强。

以上介绍了节能玻璃及其关键性能指标，想必您在看到最后的时候该疑问了，太阳能总透射比 g 值和太阳红外热能总透射比又有什么区别呢，为什么玻璃业内专家们最近提出了 g_{IR} 的概念呢？下期继续为您介绍。

带您认识单银、双银和三银

作者：耿平、许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.9.12 已发布

之前本公众号介绍了夏季建筑节能与 Low-E 玻璃，简单介绍了 Low-E 玻璃的发展历程，今天我们来详细聊聊单银、双银、三银 Low-E。

首先，啥叫单银？顾名思义，膜层中包含一层银层！



图 1 一层银层---典型单银 Low-E 膜层结构示意图

那啥叫双银呢？自然是有两层银层！

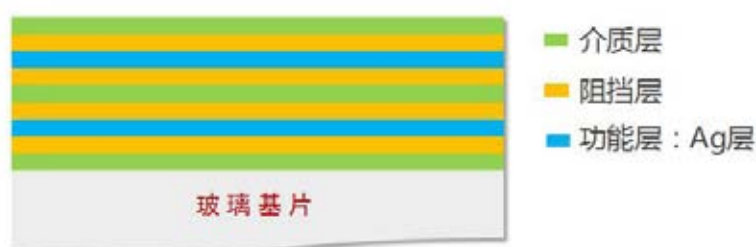


图 2 两层银层---典型双银 Low-E 膜层结构示意图

那三银呢？以此类推，是三层银层！



图 3 三层银层---典型三银 Low-E 膜层结构示意图

这么多层，膜层似乎应该很厚吧？答案是 no，膜层的厚度仅仅有几十到几百纳米。

一、结构清楚了，再来看看从具体性能吧！

下面以列表的形式比较一下单、双、三银 Low-E 中空玻璃光热参数，如表 1，表 1 中最下面一行 3mm 玻璃的光热参数作为参考。

表 1 典型单、双、三银 Low-E 中空玻璃光热参数

结构配置	可见光透射比 %	可见光反射比 %		传热系数 K 值	太阳能总透射比 g	遮阳系数 SC	红外热能总透射比 g_{IR}	光热比 LSG
		室外	室内					
6 单银 (2#) +12Air+6	64	15	11	1.83	0.50	0.57	0.36	1.28
6 双银 (2#) +12Air+6	66	11	14	1.63	0.40	0.45	0.15	1.65
6 三银 (2#) +12Air+6	64	11	11	1.63	0.34	0.39	0.05	1.88
3mm 白玻	89	8	8	5.44	0.87	1.00	0.86	1.02

注:1. 代号说明: 2#代表膜面位置为从室外侧数第二个表面, Air-空气, 6-玻璃的厚度为 6mm;

2. 环境边界条件依据中国标准 JGJ/T 151-2008

由上表可见, 由单、双、三银 Low-E 分别组成的中空玻璃, 传热系数 K 值相差不大。此外, 在可见光透射比相差不大的情况下, 随着银层的增加, g 值、SC 和 g_{IR} 依次递减, 尤其是红外热能总透射比 g_{IR} (表中黄色突出显示部分), 差异非常显著, 而光热比 LSG 依次增加。

为了进一步比较几种玻璃的 g 和 g_{IR} , 奥博泰公司统计了多种玻璃的数据, 并绘制了散点图, 详见图 4。由图 4 可见, 单银中空的 g 值和 g_{IR} 值均较高 (图中黑色方框■), 明显高于双银中空 (图中红色圆点●) 和三银中空 (图中蓝色三角▲), 这意味着通过单银中空玻璃进入室内的太阳辐射传热较多。

再比较双银中空和三银中空的 g 和 g_{IR} , 显而易见, 双银和三银在 g 值方面并没有拉开差距, 而 g_{IR} 明显拉开了距离, 三银中空的 g_{IR} 可降低至 0.06 以下, 即只有不到 6% 的红外热能透过玻璃进入室内。

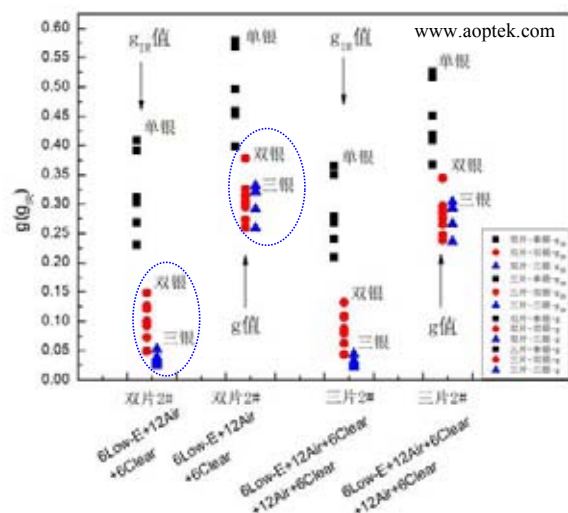


图 4 单、双、三银中空玻璃 g 和 g_{IR} 散点图
(图片来源：奥博泰)

二、三银，建筑玻璃的宠儿

根据上面的分析，炎热地区的低能耗建筑或者夏季需遮阳的建筑部位，不差钱儿的话，建议优先选择三银 Low-E，三银的光热比最大，即在可见光透射相同同时，透热可以降到最小，真正实现“透光不透热”。

三银在欧美发达国家使用已经很普遍了，无论是公共办公楼还是私人住宅，都优先使用三银玻璃，甚至超市都能买到标准化的三银整窗。这得益于他们的法律、技术、经济和市场等方面标准化程度的优势。三银在我国也是发展迅速，且产品越来越丰富多样，如表 2。

表 2 三银产品参数表

配置	基片	外观色	Visible light 可见光 %			Solar 太阳光 %		国标SC	国标K值	国标 g_{IR}
			透射比	反射比		透射比	室外反射比			
6三银(2#)+12Air+6	透明	自然色	69	13	13	28	39	0.40	1.60	0.05
6三银(2#)+12Air+6	透明	自然色	64	11	11	27	35	0.39	1.63	0.06
6三银(2#)+12Air+6	透明	蓝灰	49	14	14	19	38	0.29	1.64	0.05
6三银(2#)+12Air+6	透明	银灰	48	26	21	19	45	0.29	1.64	0.04
6三银(2#)+12Air+6	透明	中性灰	46	19	19	18	41	0.27	1.64	0.04

注：数据来源于天津耀皮。

安装了三银 Low-E 中空后，人体的舒适感得以提升。由于人体的灼热感是太阳辐射近红外引起的， g_{IR} 越高，说明红外透过越高， g_{IR} 越低，红外透过越低，三银的红外透射 g_{IR} 可以做到 0.06 以下，即反射掉了绝大部分热量，灼热感得以明显改善，非常适合在炎热地区使用，舒适度大幅提升。

那么寒冷和严寒地区呢？三银的红外热能透射比 g_{IR} 这么低，我冬天想晒太阳怎么办？的确，固定方式安装了三银后就真的晒不了太阳了，所以要根据不同的地区和气候特点，合理选择 Low-E 玻璃，应综合考虑 K 值和 g_{IR} 。同时，建筑是个综合体，不能靠单一的产品解决所有的问题。不过三银已在夏季的暴晒中为您

节省了很多的制冷电费，想到省了钱，又想到夏天的清爽舒适，你会心的笑了，笑得比冬天晒太阳还开心……

三、通过分析透反射光谱曲线，来鉴别单、双、三银

为什么单、双、三银的光热参数差距如此之大呢？让小编进一步带您分析。图 5 为不同单片玻璃的全光谱透射曲线，由曲线可见，在可见光 380-780nm 波段，三种 Low-E 相差无几，而在红外波段 780-2500nm 范围内，透过率排序为单银 > 双银 > 三银，正因为如此，上一小节分析的结论为单银 g_{IR} > 双银 g_{IR} > 三银 g_{IR} 。

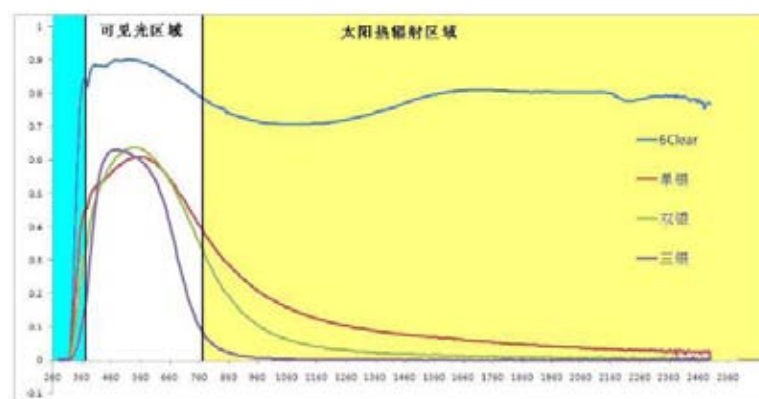


图 5 不同玻璃的透过率曲线

四、已上墙的玻璃，还可以分辨单、双、三银吗？

薄薄的膜层，难以用肉眼或者简易的方式来识别和评价。尤其是已上墙的玻璃，由于玻璃不宜拆卸，且钢化后无法切割成小片，用传统的实验室检验方法几乎不太可能。下面我们来介绍一种方法，来识别单、双、三银 Low-E。

需要特别强调的是，该方法不是用来绝对判定 Low-E 玻璃有几个银层，而是用来判断 Low-E 中空玻璃对于太阳光的透射和反射，用来评价 Low-E 中空玻璃的节能效果。但根据目前的 Low-E 玻璃技术，综合玻璃数据库的产品参数，一般可以识别出单、双、三银。

第一步，用中空玻璃辐射率计测试玻璃结构、Low-E 位置和辐射率



图 6 中空玻璃辐射率计



图 7 为中空玻璃辐射率计测试的三种玻璃,其中红色线代表 Low-E 膜层位置,图 7 (a) 中 $E=0.094$ 指 Low-E 玻璃的辐射率为 0.094,图 7 (b) 和 (c) 同理。可以通过检测 Low-E 玻璃的辐射率,根据经验大概判断是单、双、三银,但此时还不能下结论是单、双、三银。

第二步,测试光谱透反射曲线

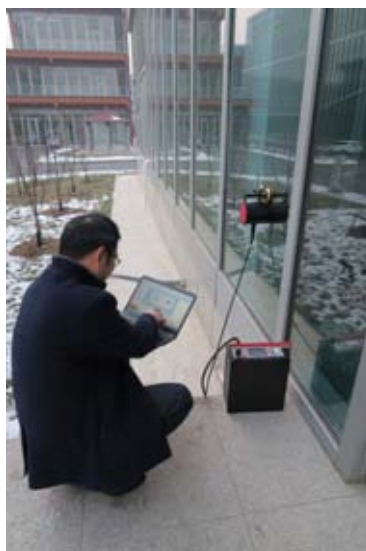


图 8 某项目测试现场
(图中仪器为奥博泰公司开发的慧眼 1000)

测试结果揭晓!

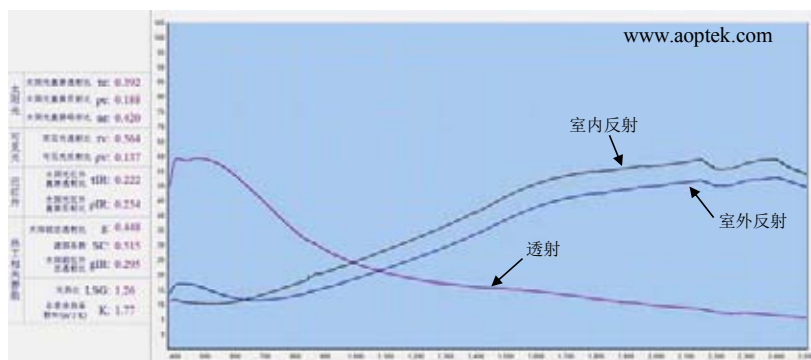


图 9 典型单银 Low-E 中空玻璃的实测光谱曲线

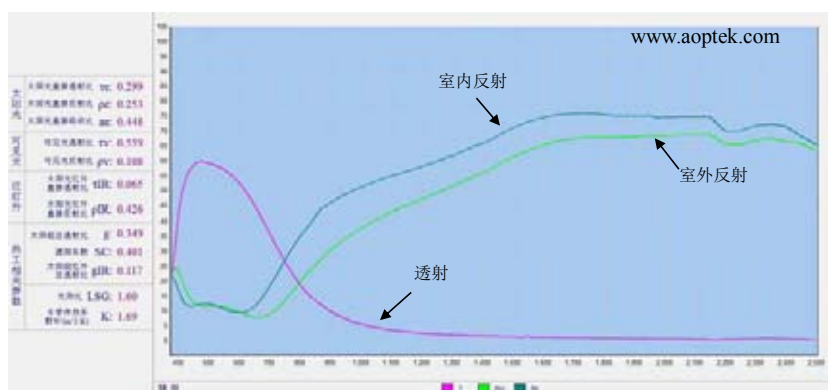


图 10 典型双银 Low-E 中空玻璃的实测光谱曲线

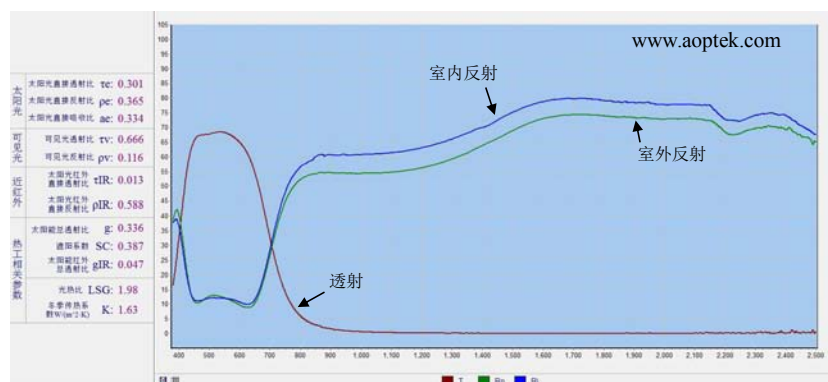


图 11 典型三银 Low-E 中空玻璃的实测光谱曲线

由图 9~图 11 可见，该仪器给出了玻璃完整的节能指标（见图片最左侧），从曲线可以看出，单、双、三银 Low-E 中空的不同波段范围的透过和反射明显不同，从曲线的形状一般可以识别出单、双、三银。当然，分辨出单、双、三银并不是最终目的，该仪器主要用来准确测量和评价玻璃的节能效果。

本期就到这里了，如果你觉得意犹未尽，欢迎给我们留言探讨！

作者介绍：耿平，男，毕业于武汉工业大学硅酸盐材料专业，主攻玻璃加工。熟悉各种玻璃深加工的工艺、产品及其应用，对幕墙用节能玻璃有专业的研究，尤其对其在工程项目中的应用有多年的丰富经验。

低辐射玻璃的“辐射”到底几个意思？

作者：吴筱、许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.11.10 已发布

一、什么是低辐射玻璃？

低辐射玻璃，全称为低辐射镀膜玻璃，也可以称为 Low-E 玻璃（Low Emissivity Coated Glass 的简写），因其所镀膜层具有极低的表面辐射率而得名。

低辐射玻璃对波长范围为 380~780nm 的可见光具有较高的透射比，有利于室内采光；对波长 780~2500nm 的太阳近红外辐射具有较高的反射比，对于中远红外辐射也有较高反射比。通俗的讲，低辐射玻璃在保证较高可见光透射比的前提下，既能反射大部分来自太阳的红外辐射，也能降低室内外热辐射能量的传递，具有优异的隔热、保温性能。

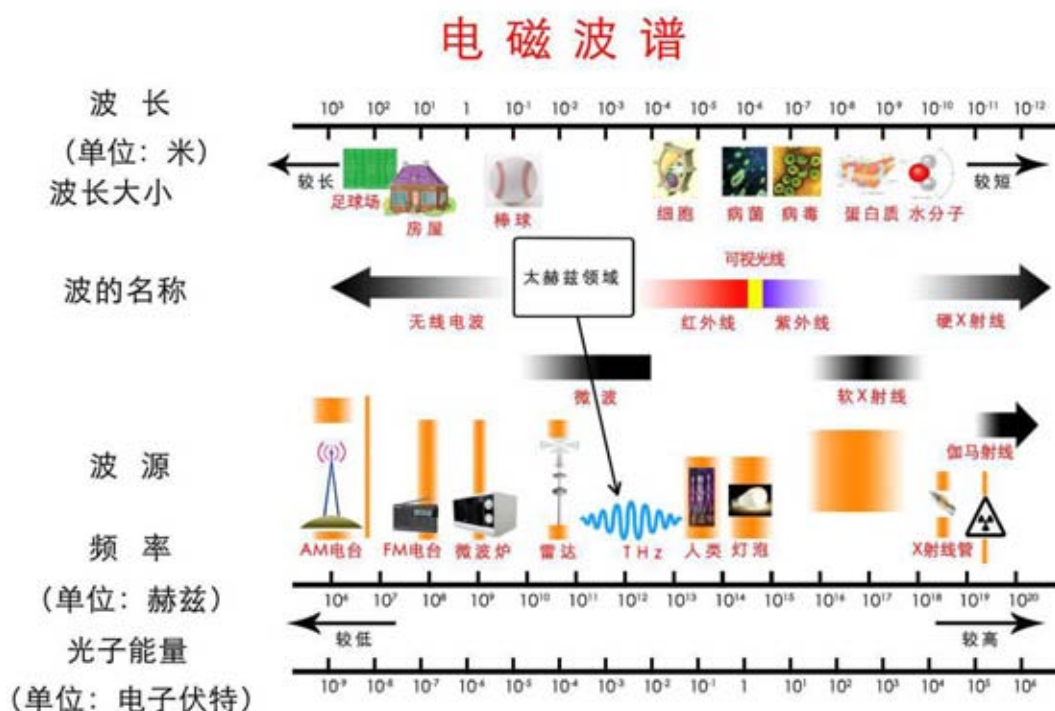


图 1 电磁波谱图

(图片来源: terahertzpower.com)

二、低辐射玻璃到底有没有“辐射”？

如果您理解的“辐射”是类似手机、电脑发出的电磁辐射，答案是没有，低辐射节能玻璃只有对人体无害的红外热辐射。

当然严格科学意义上的红外热辐射也属于电磁波，只是与我们日常所说影响健康的“电磁辐射”是不同的波长而已。事实上，一切温度高于绝对零度的物体都产生红外热辐射。无论是太阳星辰，还是山川海洋，都在无时无刻地产生热辐射。人类、飞禽走兽、建筑物，甚至一杯水，都是热辐射源。显然，低辐射节能玻璃是有热辐射的。

低辐射玻璃的“低辐射”是指同样的温度条件下低辐射膜面比普通玻璃面向外辐射的热量更低。其实和我们一般概念的电磁辐射是没有关系的。

三、辐射率是什么？

评价低辐射玻璃的性能时，我们常常提到膜面辐射率，这到底是什么东西呢？

国家标准 GB/T 18915.2《镀膜玻璃 第2部分：低辐射镀膜玻璃》将辐射率定义为热辐射体的辐射出射度与处在相同温度的普朗克辐射体的辐射出射度之比。

听起来似乎有点拗口，下面我们来慢慢解释。

在物理学中，用发射率这一物理量来表征实际物体的辐射接近于黑体辐射的程度。所谓发射率，也就是我们常说的辐射率（以下统一称为“辐射率”），是指该物体在指定温度时的辐射量与同温度黑体的相应辐射量的比值。

低辐射玻璃的膜面辐射率用来表征低辐射膜对红外波段的发射性能。由维恩位移定律可知，建筑玻璃表面在可达到的温度范围内辐射出的峰值波长范围属于中远红外，所以低辐射玻璃的膜面辐射率指的是中远红外波段的辐射率。

根据基尔霍夫定律——物体的辐射出射度=物体的吸收比 $\times$ 物体上的辐射照度，可知物体吸收辐射的本领越大，发射辐射的本领也越大，即物体的吸收比越高，辐射率也就越高。对一般物体来说，反射比+透射比+吸收比=1。所以低辐射玻璃的膜面辐射率越低，说明对红外波段的吸收比越低，反射比越高，节能效果越好。

低辐射玻璃的膜面辐射率远远低于普通玻璃，普通玻璃的表面辐射率高达0.84，而低辐射玻璃的膜面辐射率通常不超过0.15，其中三银低辐射玻璃的辐射率可低至0.02左右。打个比方，两块材质完全相同的玻璃，一块镀有低辐射膜，另一块没有镀膜，放置在相同环境中，在表面温度相同的情况下，根据斯特藩-玻尔兹曼定律可知未镀膜玻璃辐射出的能量约为低辐射镀膜玻璃辐射出能量的5倍以上。

四、低辐射镀膜中空玻璃是怎样节能的？

低辐射镀膜中空玻璃是指采用至少一片低辐射玻璃构成的中空玻璃。

众所周知，红外线具有热效应。为了达到节能的目的，夏季应尽量减少红外辐射进入室内，冬季应尽可能减少室内向室外的热辐射。低辐射镀膜中空玻璃既能反射太阳辐射中的大部分红外辐射，也能降低室内外热辐射能量的传播。

下面简单分析一下低辐射膜在中空玻璃第二面时，安装普通白玻中空玻璃和低辐射镀膜中空玻璃的建筑在不同季节的室内温度变化情况（不考虑玻璃表面对太阳辐射的反射）。



1) 夏季

普通白玻中空玻璃：太阳辐射照射在第一片玻璃的第一面上，一部分透射到室内；一部分被第一片玻璃吸收并通过两个表面辐射中远红外，其中一部分中远红外辐射经第二片玻璃吸收并向室内辐射，使大量热量进入室内。

低辐射镀膜中空玻璃：太阳辐射照射在第一片玻璃的第一面上，太阳辐射中小部分可见光和大部分近红外辐射被反射回室外，大部分可见光和少部分近红外透射到室内；一部分太阳辐射经第一片玻璃吸收并通过两个表面辐射中远红外，由于第一面为玻璃表面，辐射率高，第二面为低辐射膜，辐射率低，中远红外大部分由第一面向室外辐射，只有很少一部分热量传递给第二片玻璃，再由第二片玻璃室内传导和辐射。

2) 冬季

普通白玻中空玻璃：第二片玻璃吸收室内热辐射和传导产生的热量，以传导和热辐射的形式将热量传递给第一片玻璃，再经第一片玻璃传向室外，导致室内热量流失；

低辐射镀膜中空玻璃：第二片玻璃吸收室内热辐射和传导产生的热量，被第一片的第二面低辐射膜反射回来，小部分被膜层吸收并向外辐射，经第一片玻璃吸收并辐射向室外。由于向室外传播的热辐射总量很低，室内热量损失很少。

当然冬季低辐射玻璃的阳光得热也明显降低，但冬季日照时间短黑夜漫长，还是高性能的保温更重要。

不难看出，使用低辐射镀膜中空玻璃能有效避免夏季室温增加，冬季室内热量流失，从而在很大程度上降低空调、暖气的能耗。

据相关计算，以山东省一户 120 平方米的住宅建筑为例，其门窗面积为 30 平方米，将现有门窗换成低辐射镀膜中空玻璃后，每年采暖可节约 497 千克标准煤，节能 70%，制冷可节约 423 度电，节能 31%，可减少二氧化碳排放 1364 千克，相当于种树 13 棵。可见低辐射玻璃对节能减排具有巨大的潜力和意义。

夏季建筑节能与 Low-E 玻璃

作者：耿平、许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.9.8 已发布

夏季酷暑刚刚消退，“秋老虎”即将登场，在这秋夏交替、阳光普照的季节，让我们来一起聊聊夏季建筑节能和 Low-E 玻璃。

随着我国对建筑节能要求的提高，由原来的四步节能冬季取暖为主，逐步提升到“夏季遮阳”与“冬季保温”并重的全面节能新阶段。

夏季节能和遮阳的产品和方式有很多，本文从门窗幕墙用 Low-E 中空玻璃的角度，来研究一下夏季建筑节能。

一、夏季建筑能耗的主要来源

那么，夏季建筑的能耗主要来源到底有哪些呢？有太阳辐射、环境热辐射、温差传热、照明及电器发热、人体热、厨卫热及其它来源的热量。

为了在烈日当头、滚滚热浪中享受到清凉宜人的惬意，目前我们应对的主要方法就是空调制冷，为此消耗了大量宝贵的电能和社会资源。当然，目前我国也正在推广以被动式建筑为代表的超低能耗建筑，超低能耗建筑一般采用新风系统，大大降低了电能的消耗。

二、夏季通过玻璃的传热有哪些？

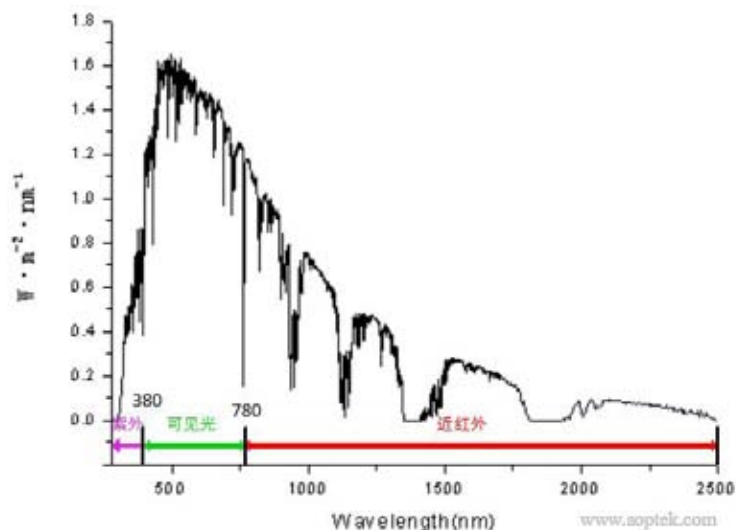
通过玻璃传递到室内的热量有两种方式，分别为太阳辐射传热和温差传热。

按照现行建筑节能设计规范和评价体系，对不同地区以及不同的建筑类型，限定了透明围护结构门窗和幕墙的遮阳系数 SC 和传热系数 K 值这两个重要参数，其中遮阳系数 SC 用于评价太阳辐射传热，传热系数 K 值用于评价温差传热。

由于夏季室内外温差较小，温差传热较少，因此，夏季通过玻璃传到室内的热量，以太阳辐射传热为主。这就像人在烈日下与树荫下的对比一样明显，也符合日常生活经验。

三、太阳辐射（太阳光）中各波段的功能

既然夏季建筑节能应更加关注太阳光，那么首先我们来解剖一下太阳光。到达地面的太阳光按照其波长及功能通常被划分为紫外线、可见光和红外线三类：



太阳辐射光谱图（图片来源：奥博泰）

紫外线波长范围小于 380nm，它的功能主要是生物功能、官能团老化等，常见的有皮肤晒伤、有机物老化变色及部分植物生长等。紫外线在阳光能量中约占 4%，眼睛不可见，皮肤无热感，且其比例过小，不是建筑节能的主要关注目标，自然也不是我们这次讨论的重点。

可见光指波长在 380~780nm 范围的光，这是人的眼睛可以直接看到的波段范围，在建筑中表现为自然采光。可见光波段的能量在太阳光中占比约为 43%，对建筑极其重要，适度明亮的自然采光是建筑追求的，也是玻璃区别于其它材料的显著特点。

红外线是指波长 780~2500nm 波段的太阳辐射的总称，红外线能量占地面太阳辐射约 53%，红外线对建筑的作用就是使建筑的温度升高。人的眼睛看不见红外线，但皮肤有热感。红外线是夏季建筑温度升高的直接原因，也是最主要的原因。

可见光主要作用是采光照明，而红外线不具有照明的功能，只有热效应。建筑夏季节能的主要问题就是在满足采光的前提下，尽量减少建筑的温度上升，也就是减少红外线进入室内。

为达到上述“透光不透热”的目的，玻璃行业一直未停止探索和进步，众多的产品中，Low-E 玻璃产品以其优异的性能，深受建筑行业的青睐！

四、Low-E 玻璃发展历程简述

国内生产 Low-E 是从单银 Low-E 开始，经历了双银，再到三银逐渐发展而来的，Low-E 玻璃也一步步更好地解决了采光与遮阳的矛盾。由最初的高透单银 Low-E 发展到遮阳型 Low-E，Low-E 膜的位置也从中空玻璃的 3#面转移到 2#面，在增加了遮阳效果的同时，也更具有外立面的装饰效果。

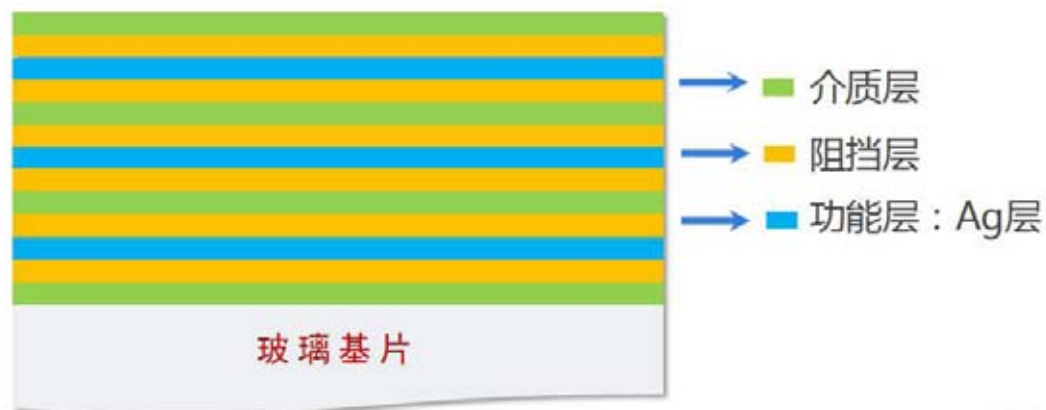
由于夏季阳光过分强烈，遮阳的需求不断提升，单银如果要进一步提升遮阳效果，即降低遮阳系数 SC，则其透光也会同时降低，单银 Low-E 面临的难题就是高透光时遮阳不好，遮阳降时透光也降。单银无法同时满足高采光和低遮阳系数的双重需求。

这一需求，催生了双银 Low-E 膜的诞生。双银膜通过合理巧妙的膜层设计，实现了综合性能的 20% 提升。与单银膜相比，若采光相当，在遮阳方面提升 15~20%，如果遮阳相当，则双银膜的采光高 15~20%，这是一次通过 Low-E 镀膜技术来提高建筑玻璃综合性能的产品升级，其直接的感受就是你站在单银中空玻璃的室内玻璃前，有明显的灼热感，双银没有灼热的感觉，人就舒服很多。某图书大厦内读者打着遮阳伞在阅读的图片，就是高透型单银中空遮阳严重不足的真实写照。

双银比单银的综合性能有了提升，但仍然没有做到极致。三银才是建筑节能中的顶级产品。三银顾名思义就是 Low-E 膜中包含有三层独立的银膜，通过精准的设计，三银实现了阻隔 95% 以上太阳光中红外线热能，如果采用超白玻璃，最好可以阻挡 97% 的太阳红外热能，可以说实现了透光而不透热的神奇效果。所以，三银也称为“红外阻隔”玻璃。

三银 Low-E 膜层结构示意图（图片来源：天津耀皮）

看到这里，是不是脑洞大开，同时也有点累了？关于 Low-E 玻璃单、双、三银的具体性能、性价比、以及节能多少等问题，尤其是最高大上的三银玻璃神秘之处，且听下回分解吧！



节能玻璃的太阳能直接透射比和总透射比有何意义？ 为什么一定要给出总透射比？

作者：苑静 “建筑光学” 公众号 2017.5.19 已发布

太阳能直接透射比 T_s 为 300~2500nm 波长范围内玻璃透射率光谱与标准太阳辐射光谱的加权平均值。它反应的是在一定的太阳辐射下，只通过辐射透射的得热量的情况。

太阳能总透射比 g 值为 300~2500nm 波长范围内太阳能直接透射比与二次传热的加和，它反应的是室内得热情况。 g 值越大，室内得热量越多； g 值越小，室内得热量越少，其在评价全年室内玻璃能耗方面，具有重要意义。太阳能直接透射比与太阳能总透射比的区别在于后者增加了二次传热项。二次传热为窗玻璃吸收部分入射太阳光后，又进一步以热的形式向室内传热。二次传热反应的是在一定的太阳辐射下，太阳辐射被窗玻璃系统吸收后，又再传入室内的得热量的情况。

南方地区夏季炎热应尽量减少室内得热，北方冬季寒冷应尽量增多室内得热。所以，各地区对太阳能总透射比 g 值的要求不同。会标 HB002-2014 中给出了不同地区被动式低能耗建筑透明部分用玻璃光热参数表，如下表中所示，其中对于严寒地区 g 值 ≥ 0.45 ，夏热冬暖地区 g 值 ≤ 0.35 。此参数表综合考虑了各地区四季环境条件，在保证合理可见光透射率及室内温度的前提条件下，合理控制传热系数，尽量降低玻璃能耗。

奥博泰的节能玻璃光学检测仪器——便携式节能玻璃现场综合测试系统 GlasSmart1000，可对已安装上墙的中空玻璃、节能玻璃进行无损测量，快速得出太阳能直接透射比，反射比，总透射比等光热参数。

表 1 不同地区被动式低能耗建筑透明部分用玻璃光热参数表

气候带		传热系数 K $W/m^2 \cdot K$	可见光透射比 τ_v	太阳红外热能总透射比 g_{IR}	太阳能总透射比 g	光热比 LSG
严寒地区	(A)	≤ 0.70	≥ 0.65	≥ 0.20	≥ 0.45	≥ 1.30
	(B)	≤ 0.70	≥ 0.63	≥ 0.20	≥ 0.45	≥ 1.30
	(C)	≤ 0.70	≥ 0.60	≥ 0.20	≥ 0.45	≥ 1.30
寒冷	(A)	≤ 0.80	≥ 0.60	≥ 0.20	≥ 0.35	≥ 1.40
	(B)	≤ 0.80	≥ 0.55	≥ 0.20	≥ 0.35	≥ 1.40
夏热冬冷		≤ 1.00	≥ 0.55	≤ 0.35	≤ 0.40	≥ 1.40
夏热冬暖	北区	≤ 1.50	≥ 0.50	≤ 0.20	≤ 0.35	≥ 1.40
	南区	≤ 1.80	≥ 0.50	≤ 0.20	≤ 0.35	≥ 1.40
温和地带		≤ 2.0	≥ 0.50	≤ 0.30	≤ 0.40	≥ 1.25
注 1：所述 K 值与国家标准或行业标准中所述的 U 值是同一概念，测试与计算边界条件均按照中国标准。						
注 2：表中分区参照 JGJ26-2010、JGJ75-2003、JGJ134-2010 标准。						

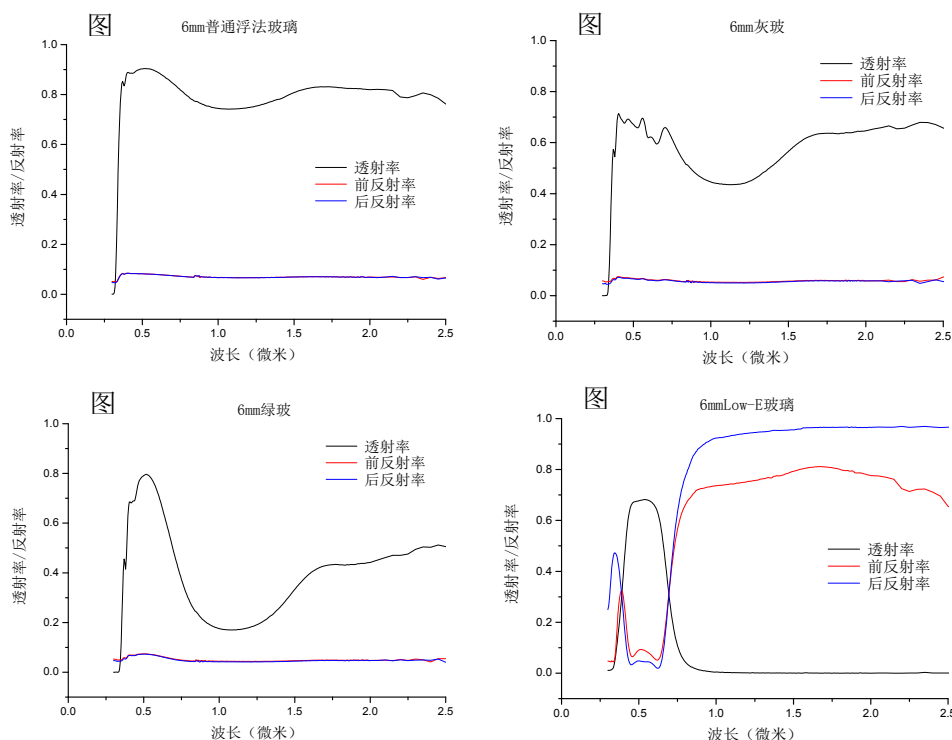
什么是太阳红外热能总透射比 g_{IR} ？和 g 值有何关系？

作者：苑静 “建筑光学” 公众号 2017.5.5 已发布

上期介绍了 g 值和 g_{IR} 的定义，简单来说， g 值为 300~2500nm 波长范围内太阳光直接透射比与二次传热的加和。 g_{IR} 值为 780~2500nm 波长范围内的太阳光直接透射比与二次传热的加和。他们的主要区别在于，涉及到光谱计算时， g 值的光谱计算范围为 300~2500nm， g_{IR} 值的光谱计算范围为 780~2500nm，也就是 g_{IR} 不考虑可见光范围的透射及吸收情况，去掉了可见光对 g 值的影响。

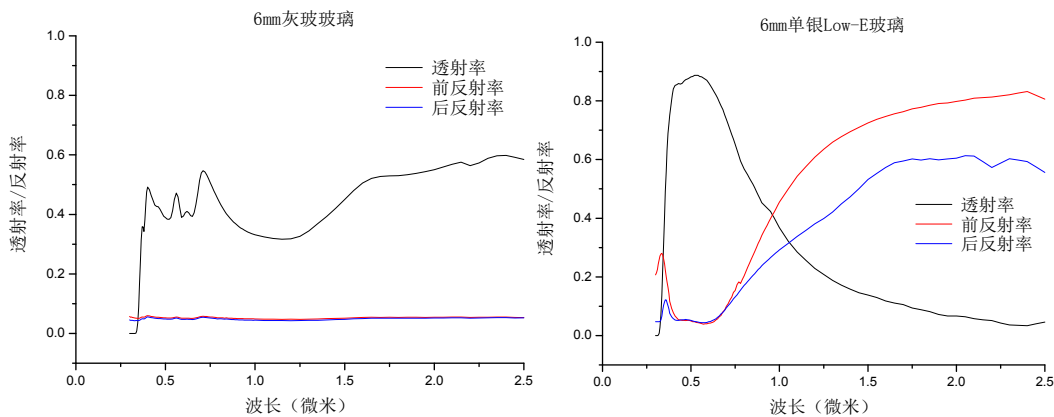
那为什么先前已经有了 g 值，而最近专家们又提出了 g_{IR} 的概念呢， g_{IR} 相对 g 值的在评价玻璃节能特性方面有何优点所在？

在 Low-E 玻璃发展之前，玻璃并不具有明显的光谱选择特性（如图 1、2、3 所示），也就是说，玻璃在不同波长条件下的透射率和反射率变化不明显， g 值的大小可以近乎完整的表征玻璃的得热能力。随着 Low-E 玻璃的发展，人们可以通过在玻璃表面镀制银膜（或其他金属薄膜）来控制太阳光透过及反射的波长范围，Low-E 玻璃的透反射光谱曲线如图 4 中所示。Low-E 玻璃在可见光 380~780nm 波段范围内，具有较高的透射率及较低的反射率；在红外 780~2500nm 波段范围内，具有极低的透射率及较高的反射率，这样既可以保证较好的采光效果，又可以达到隔热保温的目的。



然而，继续通过 g 值来作为建筑玻璃的节能指标已不再合理，因为在红外波

段透射及吸收能力较强的玻璃，有可能由于具有较低的可见光透射率，使得计算所得 g 值较低；而具有较高 g 值的玻璃，又有可能在红外波段具有较低的透射率及较低的二次传热，同时在可见光范围内具有较高的透射率，从而使得计算所得 g 值较高。下图中给出了两种玻璃光谱数据，单银 Low-E 玻璃的 g 值大于灰玻，但是灰玻在红外波段相比 Low-E 玻璃具有较高的透射率，这样使得室内温度会更高。所以，基于 Low-E 玻璃对光谱的选择特性，准确表征节能玻璃隔热（或得热，与隔热相反）能力，玻璃行业专家们提出了 g_{IR} 的概念，它更直接准确的反应了玻璃阻挡太阳辐射热的能力。在玻璃节能指标中， g_{IR} 应与可见光透射比 t_v 同时存在，在满足 g 值要求的前提下，可见光透射比 t_v 应该尽量高， g_{IR} 应尽量低，这样可以兼顾采光、一定程度上的室内得热及保温（传热系数 K 值）的目的，这也正是单银、双银和三银玻璃的发展趋势。



	g 值	g_{IR} 值
6mm 灰玻	0.563	0.553
	<	>
6mm 单银 Low-E 玻璃	0.617	0.354

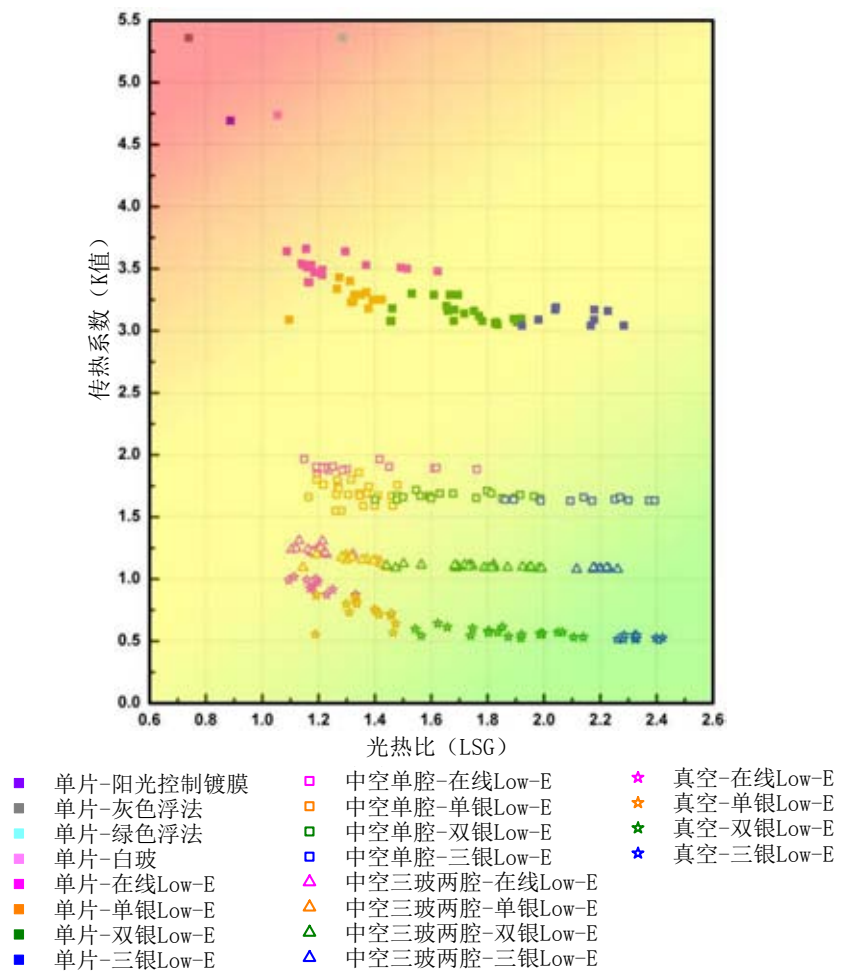
什么是建筑玻璃热工参数分布图（K-LSG 图），其有何作用？

作者：苑静 “建筑光学” 公众号 2017.5.12 已发布

Low-E 玻璃从单银到双银，甚至到三银的发展过程中，人们都是为了解决更低的传热系数与尽可能高的采光性能的矛盾需求。Low-E 玻璃的热工性能参数中，传热系数 U 值反映玻璃的保温能力；光热比 LSG (Light to Solar Gain Ratio) 为可见光透射比与阳光得系数 SHGC (g 值) 的比值，其反应了 Low-E 玻璃室内采光性能的优良。这两个值都直接影响了 Low-E 玻璃的性能，镀膜技术的发展也是围绕如何优化这些指标来进行的。

更低的 U 值和更高 LSG 值为人们所追求的更优良的建筑节能玻璃，通过统计玻璃数据库中数据，我们得到了建筑玻璃热工参数分布图，为传热系数 (K 值) 与光热比 (LSG) 的数据关系分布图，如下图所示。横坐标为光热比 (LSG)，纵坐标为传热系数 (K 值)。图中给出了四种典型玻璃组合结构的玻璃数据，分别为单片、双玻单腔中空玻璃、三玻两腔中空玻璃、双玻真空玻璃，具体条件见表 1。在保证玻璃保温要求的同时，越靠近绿色区域的玻璃，采光性能越优良；越靠近红色区域的玻璃，采光性能越差。

通过热工参数分布图可直观地表示出玻璃节能特性，方便节能玻璃选型。同



时对于玻璃厂家和检测单位来说，将检测数据放于此热工参数分布图上，可以直

观的定位出所测玻璃的热工参数处于何种节能等级范围。根据这种思路，大家可以根据自己的需要，通过配置不同标准计算条件，不同计算软件，不同国家玻璃厂商所具有的玻璃数据，绘制属于自己的建筑热工参数分布图，对于分析玻璃热工参数具有方便快捷的指导作用。

通过使用北京奥博泰科技有限公司的便携式节能玻璃现场综合测试系统，可现场检测节能玻璃的热工参数，软件中的参数计算有两种标准可供选择。

表 1 玻璃组合结构

玻璃种类	组合结构	膜面位置	基片
单片	6Low-E	2#	6mmClear
双玻单腔中空玻璃	6Low-E+12Air+6Clear	2#	6mmClear
三玻两腔中空玻璃	6Low-E+12Air+6Clear+12Air+6Clear	2#	6mmClear
双玻真空玻璃	6Low-E+0.2V+6Clear	2#	6mmClear

建筑采光顶玻璃光学和热工性能分析

作者：许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.6.28 已发布

据统计，以北京地区为例，透明围护结构能量损失占整个建筑围护结构的约40-45%，而围护结构占整个建筑能耗的约55%。采光顶是建筑围护结构中较为特殊的一个部位，从太阳辐射方面来看，水平屋顶接受的日太阳辐射是西墙接受辐射量的2倍^[1]，如果是透明的玻璃采光顶，强烈的阳光热辐射通过大面积玻璃采光顶，会导致明显的“温室效应”。因此，作为建筑围护结构的特殊部位，采光顶玻璃的设计，除了需考虑透光、隔热等性能外，还需考虑保温、隔音、安全等多项性能。

一、采光顶玻璃的结构及尺寸

由于采光顶的特殊位置，与立面幕墙玻璃相比，采光顶玻璃安全性要求更高。常见结构如图1(a)中空+夹胶玻璃和(b)中空+真空+夹胶玻璃两种，两种结构的共同点是在最下方均有夹胶玻璃，主要是为防止玻璃破损时脱落，确保屋内人员的安全。图1(a)中的中空玻璃起到保温隔热的作用，图1(b)中的真空玻璃能够起到更好的保温作用，最外侧上方的钢化单片玻璃，主要为了提高整体结构的承载力。

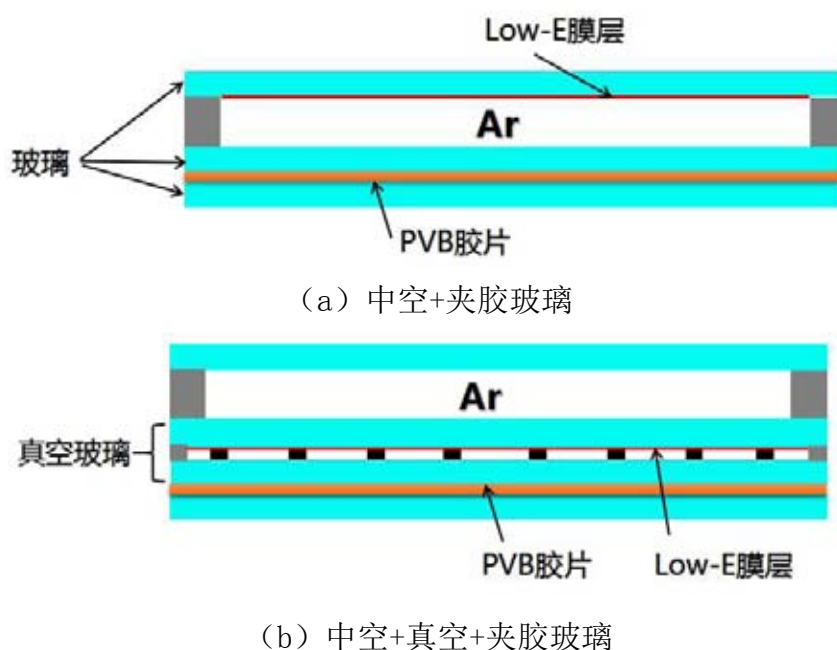


图1 采光顶玻璃结构

采光顶玻璃的尺寸不宜做的太大，根据行业标准 JGJ 225 的规定，采光顶玻璃面板面积不宜大于 2.5m^2 ，长边边长不宜大于 2m 。

二、采光顶玻璃光学和热工参数

表 1 不同结构采光顶玻璃光学和热工参数

玻璃类型	Low-E	K 值 $W/(m^2 \cdot K)$	可见 光透 射比 t_v	太阳 能总 透射 比 g	太阳红外 热能总透 射比 g_{IR}	光热 比 LSG
中空+夹胶 6Low-E+12Ar+5+1. 14PVB+5	单银	1.50	0.49	0.36	0.23	1.37
	双银	1.41	0.6	0.37	0.12	1.62
	三银	1.34	0.66	0.32	0.03	2.06
中空+真空+夹胶 6+12Ar+6Low-E+V+ 5+ 1.14PVB+5	单银	0.58	0.45	0.36	0.22	1.25
	双银	0.47	0.54	0.34	0.11	1.58
	三银	0.36	0.60	0.30	0.03	2.00

注 1: A-空气, Ar-氩气, V-真空, 如上数据为 WINDOW 7.3 软件计算所得, 下同。

由表 1 我们可以得出如下规律:

1. 玻璃结构发生变化时, 传热系数 K 值发生显著变化, 中空+夹胶玻璃的传热系数 K 值为 1.3~1.5, 中空+真空+夹胶玻璃的传热系数 K 值可降至 0.36~0.58。

2. 无论哪种结构, 随着 Low-E 的不同, 可见光透射比 t_v 和光热比 LSG 会发生明显变化, 其中值得注意的是当使用三银 Low-E 时, 可见光透射比 t_v 和光热比 LSG 最高。由于光热比 $LSG=t_v/g$, 因此, 光热比 LSG 高意味着在太阳能总透射比 g 相同的情况下 t_v 更高, 室内采光更好。

3. Low-E 为单银、双银和三银时, 太阳能总透射比 g 变化不大, 而太阳红外热能总透射比 g_{IR} 变化非常大, 由此可见, 用 g_{IR} 来评价玻璃的隔热能力, 更为直接和客观。使用三银 Low-E, 能够得到很低的 g_{IR} 值, 使真正引起室内热量上升的太阳红外热能 (波长范围 780~2500nm) 得到有效隔绝。

三、不同倾斜角度下采光顶玻璃的传热系数 K 值变化

与垂直放置的玻璃相比, 水平放置或者其它角度放置时, 由于中空腔体内对流传热增加, 因此传热系数 K 值发生较大的变化。

图 2 为两种结构中空+夹胶 (6 单银 Low-E+12Ar+5+1.14PVB+5) 和中空+真空+夹胶 (6+12Ar+6 单银 Low-E+V+5+1.14PVB+5) 玻璃的传热系数 K 值随玻璃与水平面夹角的变化。其中中空+夹胶玻璃, 垂直放置时 K 值为 1.5, 随着玻璃与水平面夹角的减小, 玻璃水平放置时 K 值增加到 2.0 以上, 而中空+真空+夹胶玻璃 K 值几乎不随角度的变化而变化, 保持在 0.5~0.6 之间。

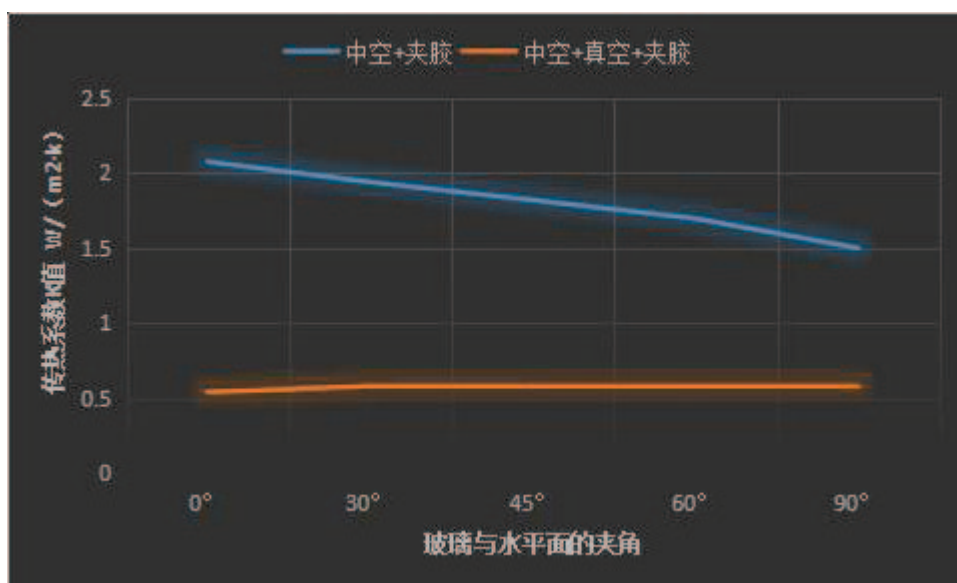


图 2 不同类型玻璃传热系数随倾斜角度的变化

四、结论与建议

1. 建筑采光顶玻璃设计的关键在于保温、采光不采热，从具体参数来说，应选择传热系数 K 值尽可能小、可见光透射比 t_v 和光热比 LSG 尽量大、太阳红外热能总透射比 g_{IR} 尽量小（有特殊用途的，例如严寒和寒冷地区阳光房除外）。三银 Low-E 原片的选择，有利于整体玻璃获得较高的 LSG 和较低的 g_{IR} ，能够分别节约室内采光和空调的能耗。

2. 从玻璃结构方面来看，中空+夹胶是目前应用最为普遍的结构，中空+真空+夹胶玻璃传热系数 K 值更低，同时 K 值不随角度的变化而变化，对于被动房、主动房等超低能耗建筑来说，是更为理想一种采光顶玻璃结构。

参考文献：

[1] 闫华生、张竹慧，玻璃采光顶传热特性分析及节能优化，硅谷[J]，2012 (06).

到底是 K 值还是 U 值？还在纠结吗？

作者：许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.7.12 已发布

一、传热系数是 K 值还是 U 值？

说到建筑节能，不得不提到一个重要的概念“传热系数”，关于传热系数的符号表示，有的叫 K 值，有的叫 U 值，有时大家因为这个问题争得面红耳赤，那么到底是 U 值还是 K 值呢？



(图片来源: www.cnidea.net)

首先，我们来看一下不同标准中 K 值和 U 值的定义：

序号	标准号及名称	定义	U or K?
1	《中空玻璃稳态 U 值（传热系数）的计算与测定》GB/T 22476	中空玻璃 U 值（传热系数）：在稳态条件下，中空玻璃中央区域，不考虑边缘效应，玻璃两外表面在单位时间、单位温差，通过单位面积的热量，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$	U
2	《建筑外门窗保温性能分级及检测方法》GB/T 8484	门窗传热系数：表征门窗保温性能的指标。表示稳定传热条件下，外门窗两侧空气温差为 1K，单位时间内，通过单位面积的传热量。	K
3	《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》JGJ/T 151	门窗传热系数：两侧环境温度差为 1K ($^{\circ}C$) 时，在单位时间内通过单位面积门窗或玻璃幕墙的热量。	U
4	《建筑物围护结构传热系数及采暖供热量检测方法》GB/T 23483	围护结构传热系数 K：围护结构两侧空气温度差为 1K，在单位时间内通过单位面积围护结构的传热量，单位： $W/(m^2 \cdot K)$	K
5	《Glass in building-Determinat	U value: parameter of glazing which characterizes the heat transfer	U

	ion of thermal transmittance(U value)-Calculation method》EN 673	through the central part of the glazing, i.e. without edge effects, and states the steady-state density of heat transfer rate per temperature difference between the environmental tempratures on each side. The U value is given in watts per square metre Kelvin[W/(m ² • K)]	
6	《Procedure of Determining Fenestration Product U-factor》NFRC 100	The U-factor is the heat transmission in a unit time though a unit area of a test specimen and its boundary air films, induced by a unit temperature difference between the environment on each side.	U

不难看出，U 值和 K 值的定义是一样的，单位也是一模一样，不要纠结啦！
用哪个表示都可以，只要标明依据的标准和计算条件就 OK！
原来我们是双胞胎！！



（图片源自网络，经改编）

二、中国的 K 值和外国的 K 值一样吗？

不同的国家对边界条件规定不同，因此，中国的 K 值不能等同于外国的 K 值。

不同标准体系边界条件对比

边界条件参数	标准体系	ISO (EN) 标准体系	美国标准体系
	中国标准体系 JGJ/T 151	系 ISO 15099	NFRC

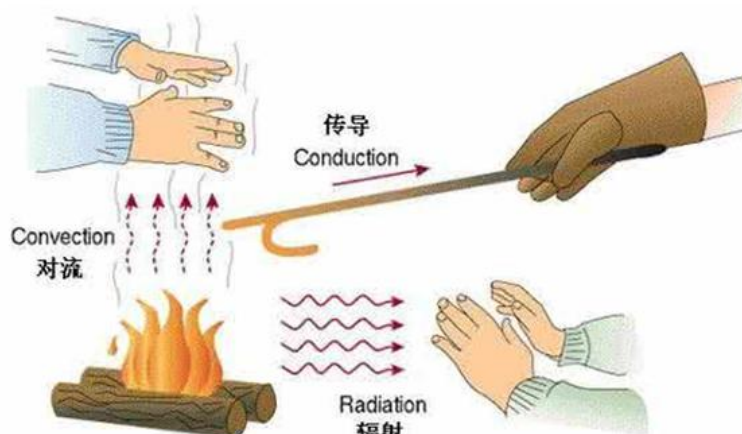
冬季	室外温度℃	-20	0	-18
	室内温度℃	20	20	21
	室内对流换热系数 W/(m ² ℃)	3.6	3.6	ASHRAE/NRRC
	室外对流换热系数 W/(m ² ℃)	16	20	26
	太阳辐射照度 W/m ²	300	300	0
夏季	室外温度℃	30	30	32
	室内温度℃	25	25	24
	室内对流换热系数 W/(m ² ℃)	2.5	2.5	ASHRAE/NRRC
	室外对流换热系数 W/(m ² ℃)	16	8	15
	太阳辐射照度 W/m ²	500	500	783

不同标准条件下节能玻璃的 K 值

序号	结构	Low-E	依据 JGJ/T 151	依据 ISO 15099	依据 NFRC
1	6Low-E+12Ar+	单银	1.475	1.411	1.463
2	6	双银	1.438	1.362	1.424
3	6Low-E+16Ar+	单银	0.765	0.674	0.753
4	6+16Ar+6Low-E	双银	0.737	0.641	0.725

三、K 值高与低，谁说了算？

热量的传递包括热辐射、热传导和气体对流传热。



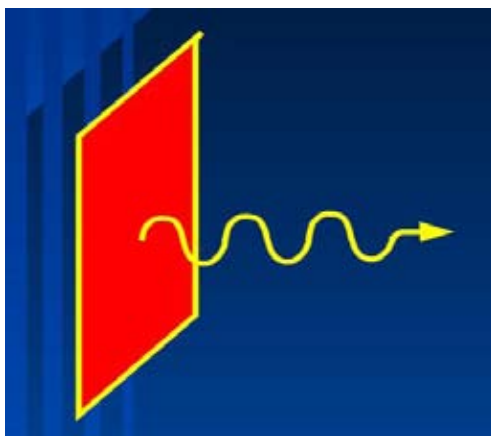
(图片来源: www.ijiaotong.com.cn)

具体到中空玻璃呢？热量是怎么传递的？



我们一一来解释一下吧，其实，三种传热方式在生活中无处不在：

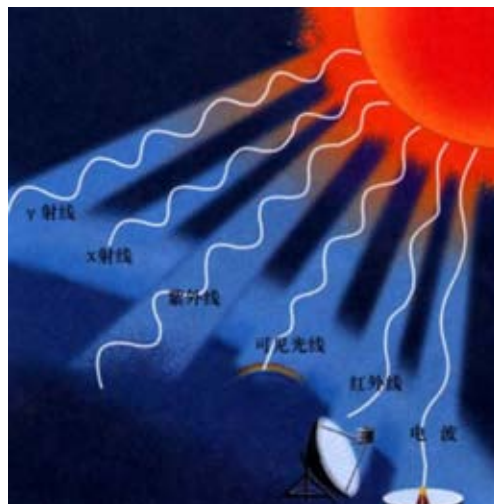
首先，说一下热辐射



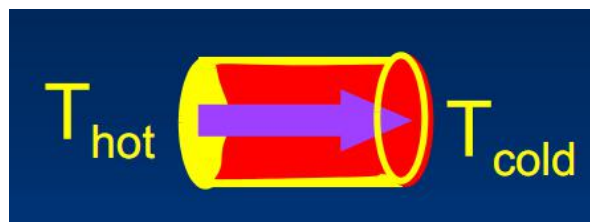
例如灯泡的辐射



再比如太阳辐射



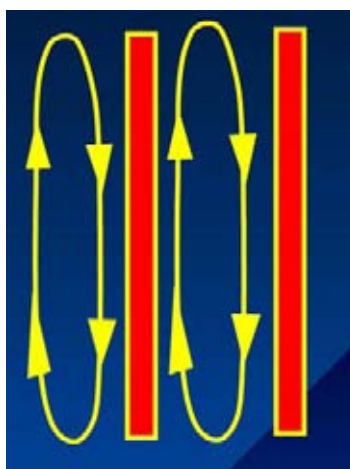
再来说一下热传导，热量从热端传到冷端！



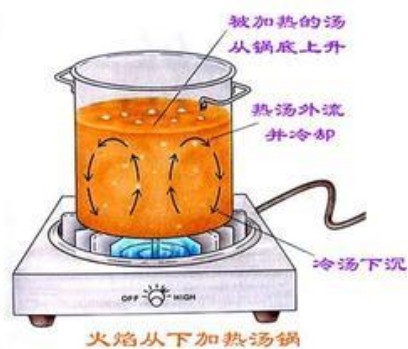
比如金属的热传导，金属钎子，小心烫手哦



最后说一下对流传热，这个很容易理解



比如煮饺子，水开啦



(图片来自网络)

四、那么，有什么办法能降低玻璃的 K 值呢？

Low-E 来啦！这个冬季不再寒冷！



(图片来源: www.quanjing.com)

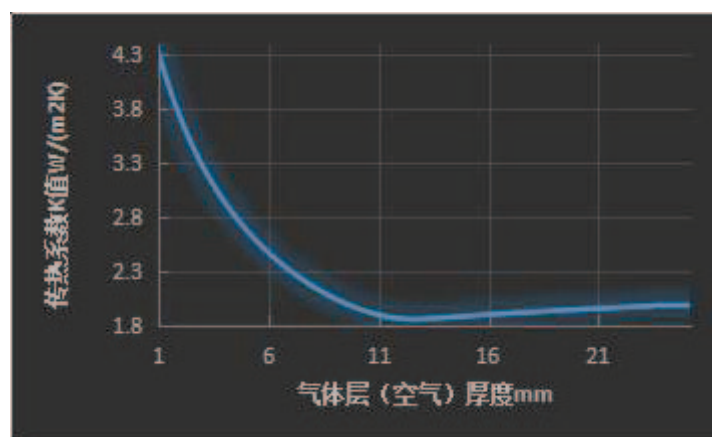
Low-E 是 Low Emmissivity 的缩写, 中文为“低辐射”的意思。Low-E 中空玻璃为什么能够降低 K 值, 起到保温作用呢? 这得从根儿上分析, Low-E 玻璃的辐射率比普通玻璃要低, 尤其是三银 Low-E。辐射率低, 就能够大大降低辐射传热, 看一下公式就明白了:

中空玻璃气体间隙层内两片玻璃之间辐射热导 h_r 应按下式计算:

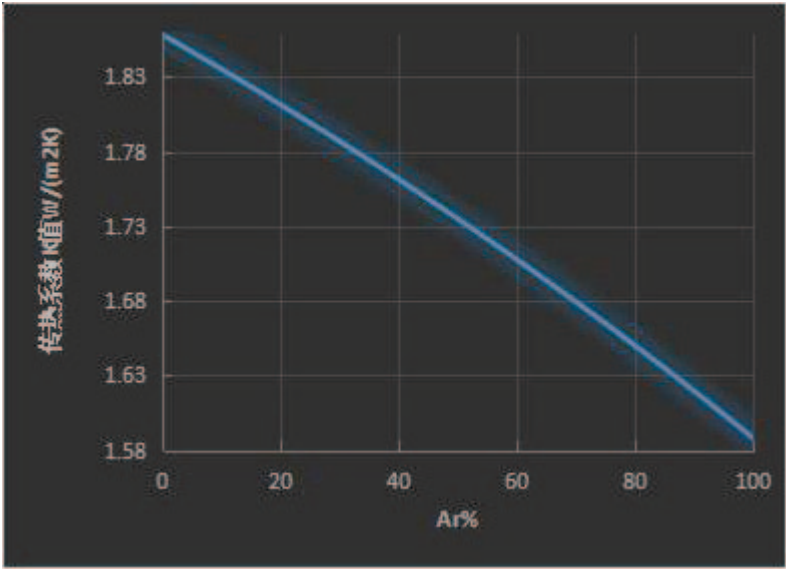
$$h_r = 4 \sigma (\epsilon_1^{-1} + \epsilon_2^{-1} - 1)^{-1} T_m^3$$

ϵ_1 和 ϵ_2 是间隙层两片玻璃内表面在平均绝对温度 T_m 下的校正辐射率, 三银 Low-E 的校正辐射率能够降至约 0.02, 而普通玻璃的校正辐射率为 0.84, 相差很大哦!

此外, 气体层厚了, 传热也少了!



氩气来了, 把空气赶跑了! 氩气可是惰性气体, 又胖又懒, 不像空气那么活泼!



我胖我自豪



五、我知道你也很懒，所有玻璃的 K 值，统统告诉你！

玻璃类型	Low-E	K 值 $W/(m^2 \cdot K)$
6mm 白玻	无	5.36
6mm 单银 Low-E	辐射率 0.096	3.43
6mm 双银 Low-E	辐射率 0.042	3.12
6mm 三银 Low-E	辐射率 0.021	3.05
6+12A+6	无	2.67
6+12Ar+6	无	2.52
双玻单 Low-E 中空玻	单银	1.48

璃 6Low-E+12Ar+6	双银	1.44
	三银	1.36
三玻两腔单 Low-E 中 空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar +6	单银	1.11
	双银	1.10
	三银	1.0
三玻两腔双 Low-E 中 空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar +6Low-E	单银+单银	0.76
	双银+双银	0.76
	三银+单银	0.77
真空复合中空单 Low-E 玻璃 6+12A+5Low-E+V+5	单银	0.56
	双银	0.56
	三银	0.41
真空复合双 Low-E 中 空玻璃 6Low-E+12A+5Low-E+ V+5	单银+单银	0.50
	双银+单银	0.50
	三银+单银	0.49

(Note: 依据中国标准条件, 选择典型的 Low-E 玻璃计算, 本数据仅供参考。

门窗幕墙玻璃质量提升的催化剂：热工参数现场检验技术

许海凤，张喆民，黄达泉，苑静

北京奥博泰科技有限公司 北京 100070

“建筑光学”公众号 2017.6.9 已发布

摘要：本文分析了节能玻璃质量评价关键参数及其影响因素，详细介绍了幕墙及门窗用玻璃热工参数的现场检测技术。

关键词：节能玻璃，中空玻璃，真空玻璃，检测方法

Key words: Energy-saving glass, Insulating glass unit, Vacuum glazing, Field testing method

门窗幕墙用玻璃是建筑的窗口，兼具采光、保温、隔热、隔声等多项功能。同时玻璃又是建筑围护结构中，保温性能最薄弱的环节，是能量流失的主要部位。因此，玻璃的质量控制及科学的检测方法，对于整个建筑节能来说至关重要。

已有技术中，已安装的玻璃无法现场直接检验，需要现场取样后，送到相应的检验机构检验。但对于大尺寸，尤其是钢化后的玻璃，受到检验装置的限制，试验室不易检验。因此出现了“实验室只对来样负责（小样片，单片），已安装成品玻璃性能无从得知”的局面。

基于行业的需求和检测技术上的空白，建筑用玻璃标准化技术委员会(TC255)组织编制了《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（以下简称“现场检测技术规范”），相应的检测仪器也已经诞生，下文会详述。

一、节能玻璃质量评价关键参数

首先，简要介绍一下玻璃的传热机理，如图 1 所示。通过透明部分玻璃的传热包括两种方式，分别为温差传热和太阳辐射传热。由于传热方式不同，要提升玻璃质量和性能，采取的相应技术手段也有所不同。

温差传热主要通过降低玻璃的传热系数 K 来控制，太阳辐射传热主要通过调节太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR} 来加以控制。下面分别就传热系数 K 和 g 值 (g_{IR}) 来详细介绍。

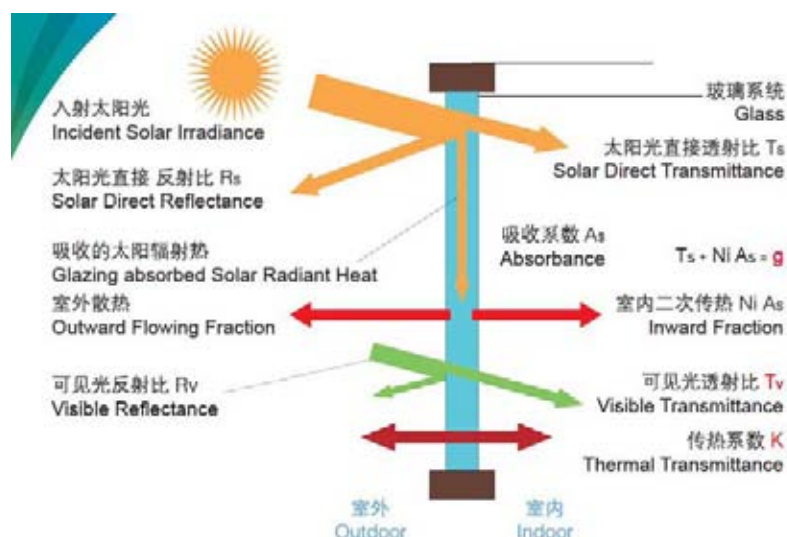


图 1 热量传递基本原理图

1、控制温差传热关键参数—传热系数 K

1) 中空传热系数 K 影响因素



图 2 中空玻璃温差传热机理示意图

如图 2 所示，要降低中空玻璃的传热系数，需减少热辐射、对流传热以及热传导，通常采取的手段为采用单片或多片 Low-E 玻璃（单银、双银或三银）、充入惰性气体、增加腔体的数量或者腔体的厚度。

采用不同的种类和数量的 Low-E 玻璃，玻璃整体的传热系数 K 对比见表 1（选择玻璃数据库中典型 Low-E 玻璃，仅供参考）。

表 1 不同类型 Low-E 中空玻璃的传热系数 K

玻璃类型	Low-E	K 值 W/(m ² ·k)
双玻单 Low-E 中空玻璃 6Low-E+12Ar+6	单银	1.48
	双银	1.44
	三银	1.36

三玻两腔单 Low-E 中空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar+6	单银	1.11
	双银	1.10
	三银	1.0
三玻两腔双 Low-E 中空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar+6Low-E	单银+单银	0.77
	双银+双银	0.76
	三银+单银	0.76

充入不同比例惰性气体，中空玻璃（结构为 6Low-E+12Ar+6）传热系数 K 变化曲线见图 3-5。中空玻璃结构为 6Low-E+12Ar+6，随着氩气所占浓度的增加，传热系数 K 显著减小，氩气含量从 0-100%，K 值变化约为 $0.3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。

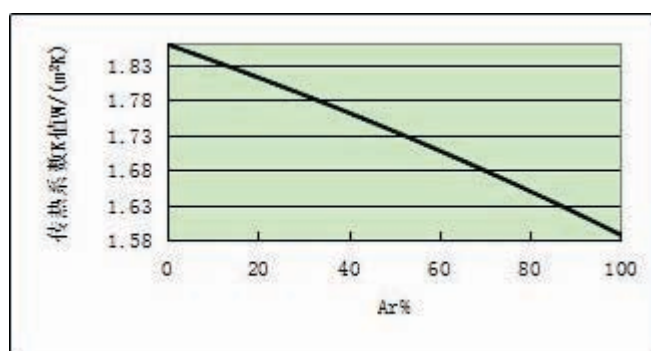


图 3 单银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随氩气含量的变化

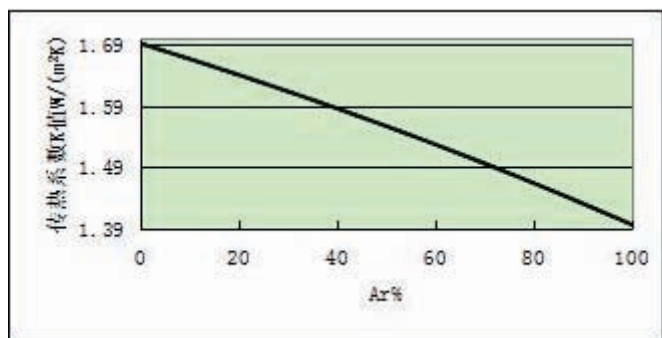


图 4 双银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随氩气含量的变化

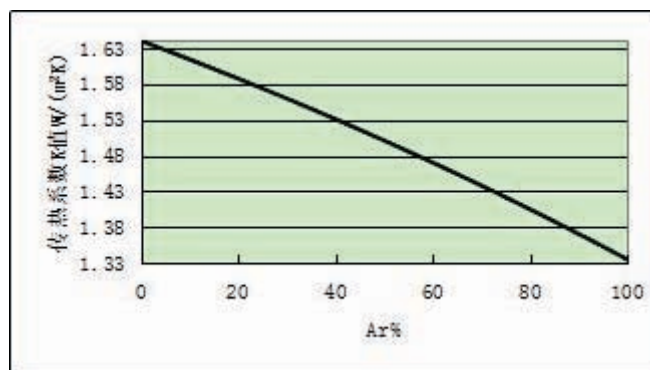


图 5 三银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随氩气含量的变化

增加腔体厚度，中空玻璃（充空气层）传热系数 K 变化曲线见图 6-8。由 3 个图可见，在充空气的情况下，中空腔体厚度约为 12mm 时，传热系数达到最低值，随着腔体厚度的增加，传热系数 K 又有增大的趋势。

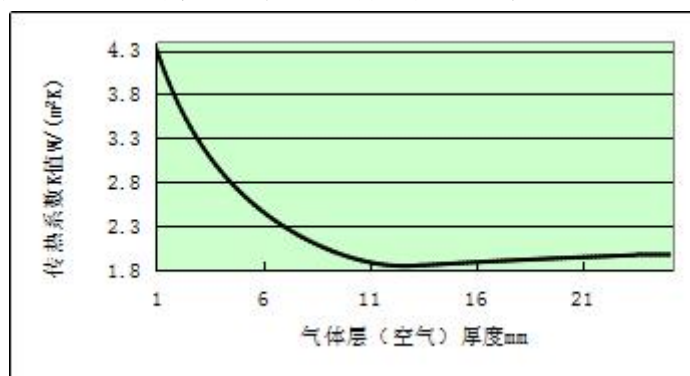


图 6 单银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随气体层厚度的变化

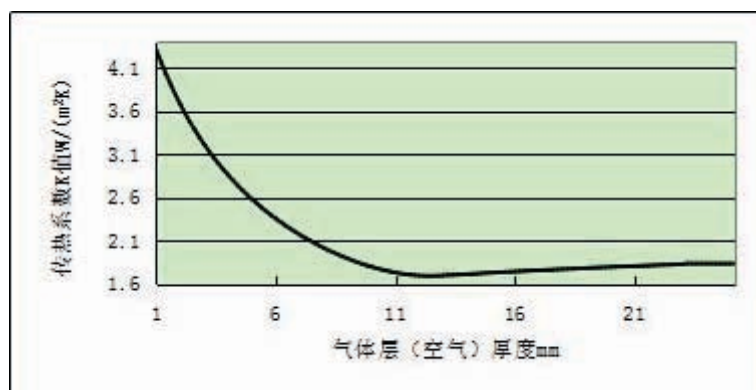


图 7 双银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随气体层厚度的变化

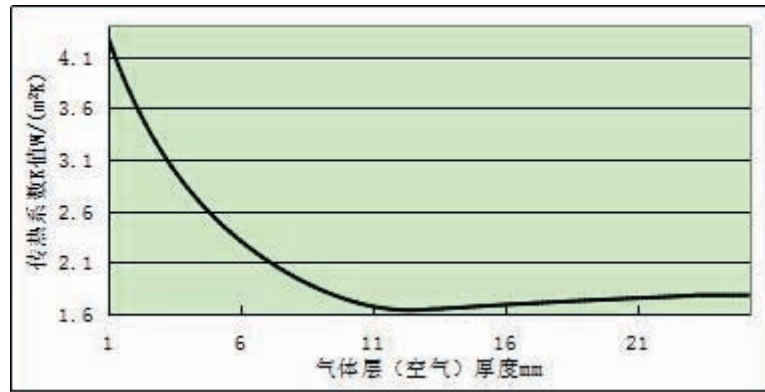


图 8 双银 Low-E+白玻中空玻璃 K 值随气体层厚度的变化

由上述结果可见，Low-E 玻璃的种类及数量、是否含有惰性气体以及含量、气体间隔层厚度，都会影响到整体玻璃的传热系数 K 值。这些要素，都是可以通过无损检测手段来检验出来，进而可以确定中空玻璃的传热系数 K，后续会详细介绍。

2) 真空玻璃传热系数 K 影响因素

真空玻璃传热系数 K 影响因素包括真空度、Low-E 玻璃的辐射率、支撑物的间距、支撑物本身的传热系数、支撑物与玻璃的有效接触面积。详细计算公式可参考 JGJ 113 附录 A。需要特别指出如下几点：

- A) 与中空玻璃相比，Low-E 玻璃辐射率的降低对于真空玻璃来说更加关键，变化规律如图 9 所示。同时由于真空层的存在，对 Low-E 膜尤其是离线 Low-E 膜是一个很好的保护，可延长 Low-E 膜的使用寿命；
- B) 真空度一般要求在 0.1Pa 以下，气体导热才可以忽略不计；
- C) 支撑物尽量采用传热系数较低的不锈钢、玻璃釉料等材料；
- D) 支撑物摆放间距，一般根据支撑物表面光滑度及其与玻璃的有效接触面积来决定，真空玻璃传热系数随支撑物间距的变化如图 10 所示。
- E) 为了延长真空玻璃的使用寿命，必须放置有效的，足够的吸气剂。

由于真空玻璃的传热系数非常小，热量传递很有限，因此给检验工作带来了极大的挑战，真空玻璃传热系数的快速检验，尤其是真空度的直接检验，目前还是行业内的难题。

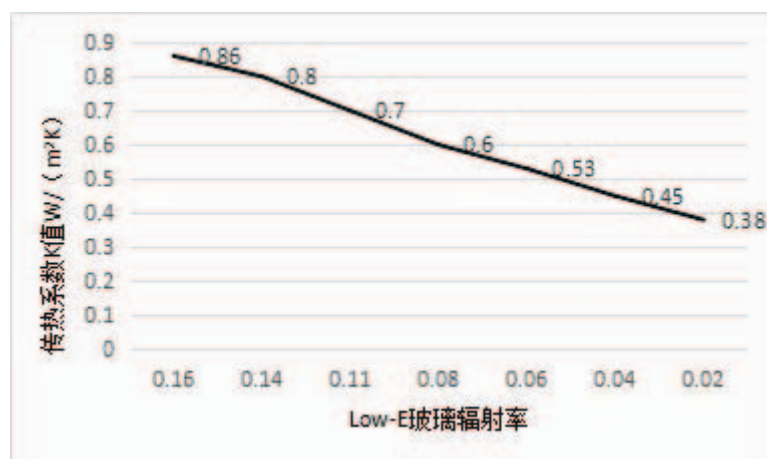


图9 真空玻璃传热系数K随Low-E玻璃辐射率的变化

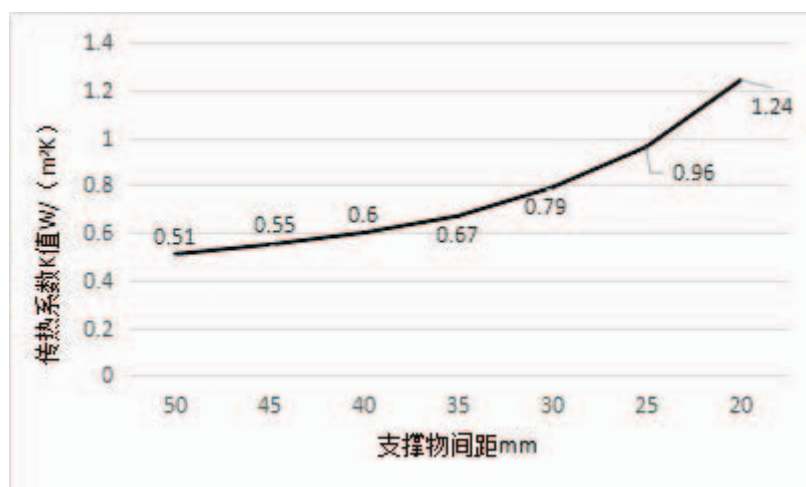


图10 真空玻璃传热系数K随支撑物间距的变化

2、太阳辐射传热关键参数—太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR}

衡量通过玻璃的太阳辐射传热，2个非常关键的参数为太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR} ， g 值行业内人员已比较清楚，对于 g_{IR} 的理解，需要重点说明一下，如下：

简单的说， g 值为 300~2500nm 波长范围内太阳光直接透射比与二次传热的加和。 g_{IR} 值为 780~2500nm 波长范围内的太阳光直接透射比与二次传热的加和。他们的主要区别在于，涉及到光谱计算时， g 值的光谱计算范围为 300~2500nm， g_{IR} 值的光谱计算范围为 780~2500nm，也就是 g_{IR} 不考虑可见光范围(300~780nm)的透射及吸收情况，去掉了可见光 τ_v 对 g 值的影响。

继续单纯通过 g 值来作为建筑玻璃太阳辐射隔热（或得热）已不再合理，因为在红外波段透射及吸收能力较强的玻璃，有可能由于具有较低的可见光透射率，使得计算所得 g 值较低；而具有较高 g 值的玻璃，又有可能在红外波段具有较低的透射率及较低的二次传热，同时在可见光范围内具有较高的透射率，从而使得计算所得 g 值较高。

为了便于大家了解不同类型玻璃的 g_{IR} 值和 g 值，图 11 给出了不同类型玻璃

的 g_{IR} 值和 g 值的散点图，供大家参考（横坐标轴的 2# 指 Low-E 膜层的位置，从室外向室内看第 2# 面）。值得注意的是，双银产品和三银产品的 g 值接近，但 g_{IR} 值相差很大，也就是说， g_{IR} 值更能够体现出双银和三银产品的差别所在。

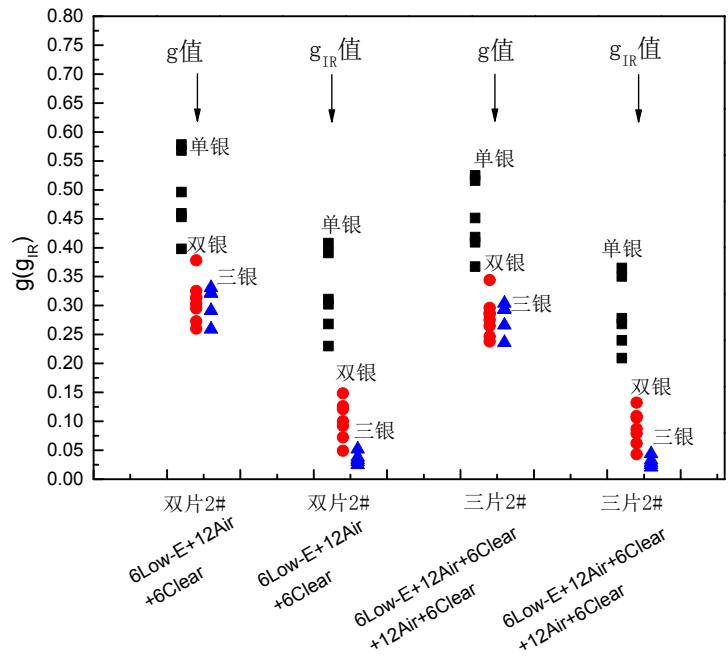


图 11 不同类型玻璃的 g_{IR} 值和 g 值散点分布图

节能玻璃的 g_{IR} 值和 g 值，主要取决于玻璃原片的情况，尤其是采用不同的 Low-E 玻璃原片，对结果影响很大。因此，要评价已安装的中空玻璃和真空玻璃的 g_{IR} 值和 g 值，需要在不拆解的情况下，检测玻璃的整体的光谱透反射以及解析每片玻璃（Low-E 玻璃和白玻）的光谱透射和反射。

二、热工参数现场检测方法

为了解决已安装门窗和幕墙检测的问题，建筑用玻璃标准化技术委员会 (TC255) 组织编制了《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》。该技术规范包含的主要内容：测试分类、测量原理、光热计算用基础参数测量要求、参数计算等。

现场检测方法基本原理见图 12。基本原理为先用专用检测装置获得基础参数，再根据 GB/T 2680 和 JGJ/T 151 计算光热参数。所说的基础参数包括：玻璃及气体间隔层厚度、膜层位置、校正辐射率、光谱透射比、光谱反射比、中空腔惰性气体体积浓度。所说的光学参数一般指可见光透射比 τ_v 、可见光反射比 ρ_v 、太阳光直接透射比 τ_e 、太阳光直接反射比 ρ_e 、太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR} ；热工参数一般指太阳能总透射比 g 、太阳光红外热能总透射比 g_{IR} 、遮阳系数 Sc 、传热系数 K 、光热比 LSG 。

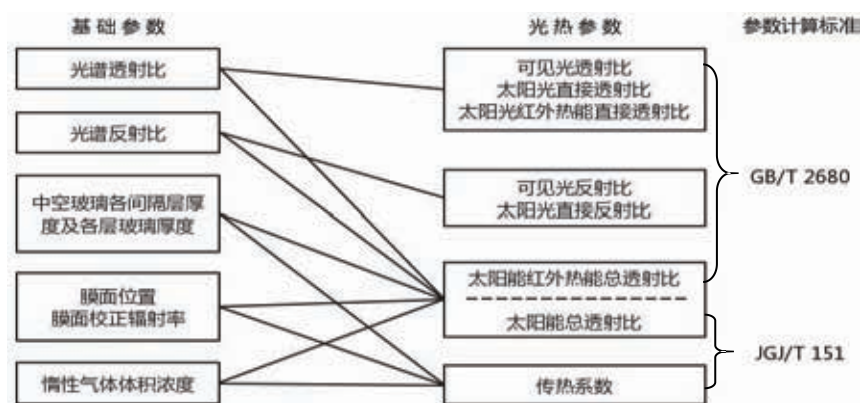


图 12 现场检测方法基本原理图

该现场检测技术规范适用玻璃类型如表 2。对于单片玻璃、夹层玻璃、未镀膜中空玻璃以及镀膜中空玻璃和真空玻璃（其中镀膜玻璃为 1 片或者 2 片），可以检测所有的光热参数；对于镀膜中空玻璃（其中镀膜玻璃为三片及以上），可以检测可见光透射比 τ_v 、可见光反射比 ρ_v 、太阳光直接透射比 τ_e 、太阳光直接反射比 ρ_e 、太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR} 。

表 2 现场检测技术规范适用的常见建筑玻璃类型

玻璃产品类型		光热参数								测量分类
		可见光透射比 τ_v	可见光反射比 ρ_v	太阳光直接透射比 τ_e	太阳光直接反射比 ρ_e	太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR}	太阳能总透射比 g	传热系数 K	太阳能红外热能总透射比 g_{IR}	
单片玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
夹层玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
未镀膜中空玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
镀膜单腔中空玻璃	两面及以下镀膜	√	√	√	√	√	√	√	√	一类
	两面以上镀膜	√	√	√	√	√	×	×	×	二类

镀膜 多腔 中空 玻璃	两面及 以下镀 膜	√	√	√	√	√	√	√	√	一类
	两面以 上镀膜	√	√	√	√	√	×	×	×	二类
真空玻璃		√	√	√	√	√	×	×	×	二类
注1: √——代表适用; ×——代表不适用。 注2: 光学参数测试不适用于表面为散射特性的玻璃, 如压花玻璃、磨砂玻璃、彩釉玻璃等。										

三、便携式现场检测系列仪器

根据市场需求, 为大家介绍几款成熟的便携式现场检测仪器。

图 13 为中空玻璃辐射率测试仪, 该仪器可深度剖析中空玻璃的结构, 可测试中空玻璃中每片玻璃的厚度以及腔体的厚度, 可识别 Low-E 膜层的数量和位置, 并检测出 Low-E 玻璃的校正辐射率。

图 14 为便携式智能应力分析仪, 该仪器采用动态激光偏振散射法, 通过偏振激光技术、高速图像采集技术和数字化偏光器技术对玻璃的应力状态进行测量。不仅能够测量表面应力, 也可以测量玻璃在厚度方向上的应力分布, 对钢化真空玻璃的研究、钢化玻璃应力、减缓自爆等技术研究提供了有效的手段。该仪器具有小巧便携、测量速度快等优点, 连接笔记本或者平板电脑即可现场测量, 获得应力曲线。

图 15 为 Sparklike 公司的新型气体分析仪, 可检测双玻一腔或者三玻两腔充气中空玻璃内的惰性气体含量, 无需破坏或在间隔层中搁置附件, 可穿透镀膜和夹胶片。可用于生产线上检测, 也可用于工程现场检测。

图 16 为便携式节能玻璃现场综合测试系统, 该系统可测试玻璃的基础参数, 例如玻璃及气体间隔层厚度、Low-E 膜层位置、Low-E 膜校正辐射率、光谱透射比、光谱反射比。可根据基础参数计算玻璃整体的热工参数 (例如 K 值、可见光透射比 τ_v 、太阳能总透射比 g 、遮阳系数 Sc 、太阳光红外热能总透射比 g_{IR} 和光热比 LSG 等), 可测试玻璃种类见表 2。图 17 为该系统的软件界面, 可以测得波长 380~2500nm 范围内, 整体玻璃的透射光谱和室内外反射光谱, 全方位、深度剖析玻璃是否真正节能。图 18 为用该仪器对某项目进行现场测试, 对已安装玻璃的质量性能进行现场验证。



图 13 中空玻璃辐射率测量仪

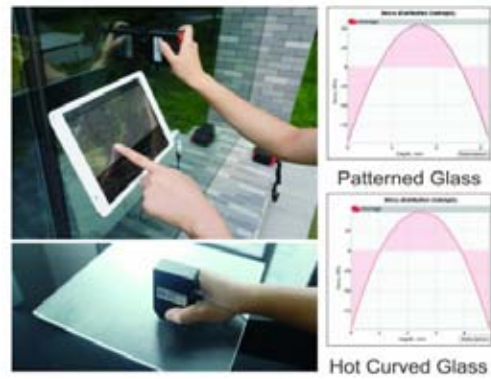


图 14 便携式应力分析仪



图 15 新型气体分析仪

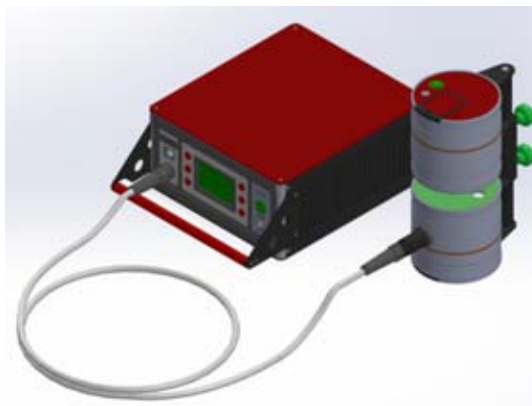


图 16 便携式节能玻璃现场综合测试系统

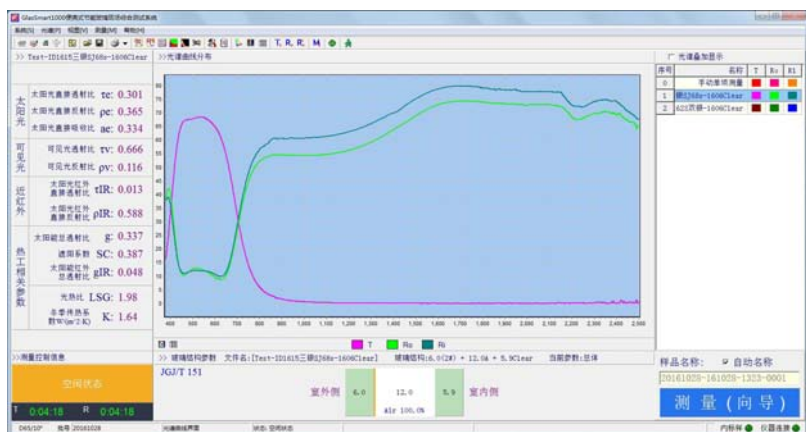


图 17 便携式节能玻璃现场综合测试系统软件界面

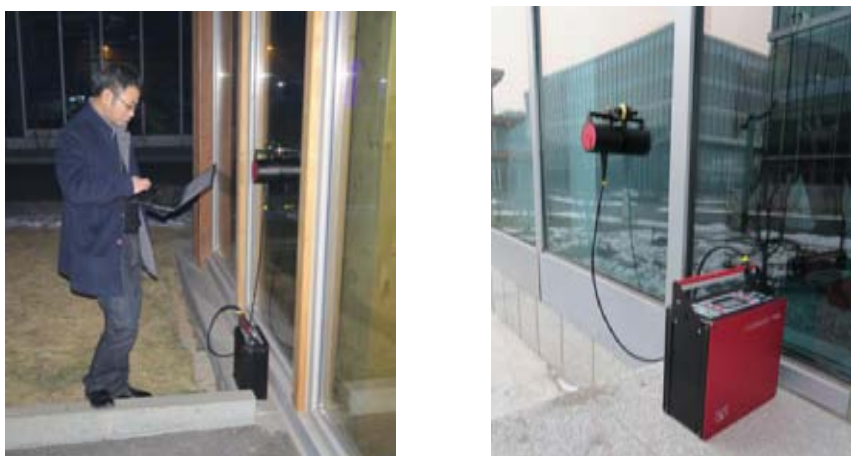


图 18 现场测试

四、结论

综上所述，现场检测技术规范的编制及各种便携式检测仪器的开发，能够满足现有市场需求，并填补了技术上的空白，使已安装后的玻璃质量检验不再是行业的难题。

现场检测技术规范的实施和普及，使第三方检验机构、质量监督检验部门有据可依。便携式系列检测仪器的研制，使检验规范能够得以具体实施，为玻璃行业的质量检验提供了有效的手段，为被动式建筑、低能耗绿色建筑验收提供了技术依据，对于玻璃产品质量的提升、行业的规范化发展，可以起到很好的推动作用。

说明：本文转自 2017 年塑窗年会论文集

低能耗建筑用节能玻璃选型及现场检测方法

The Selection and Field-testing Method of Energy-saving Glass for Low-energy Consumption Buildings

许海凤, 张喆民, 黄达泉, 苑静

北京奥博泰科技有限公司 北京 100070

“建筑光学”公众号 2017.6.2 已发布

摘要: 本文介绍了我国不同气候区低能耗建筑用节能玻璃的选用原则, 详细计算了不同类型的典型节能玻璃主要性能参数, 对其适用范围给出了合理的建议。最后详细介绍了已安装幕墙及门窗用玻璃的现场检测方法。

Abstract: In this paper, we introduce the principles of selection of energy-saving glass for low-energy consumption buildings in different climate zones of China, calculate the performance parameters of different types of typical energy-saving glass and gave some reasonable suggestions in the scope of application. Finally the field testing method of installed glass used in the curtain wall and window is introduced in detail.

关键词: 低能耗建筑, 节能玻璃, 中空玻璃, 真空玻璃, 现场检测方法

Key words: Low-energy buildings, Energy-saving glass, Insulating glass unit, Vacuum glazing, Field testing method

全球居住建筑和公共建筑能耗约占全球总能耗的 36%^[1]。在能源日益短缺以及环境污染愈来愈严重的今天, 如何降低建筑能耗已经成为建筑行业乃至整个社会的焦点问题。为了降低建筑的能耗, 国内外都做出了大量的努力, 技术标准和法规在逐渐完善和提高。

2010 年 6 月 18 日, 欧盟出台了《建筑能效 2010 指令》(EPBD2010), 该指令规定, 2018 年 12 月 31 日起, 政府使用或拥有的新建建筑均为零能耗建筑, 成员国从 2020 年 12 月 31 日起, 所有的新建建筑都是近零能耗建筑^[2]。

我国建筑节能规范也在逐渐的完善和提高。国务院于 2016 年 12 月印发《“十三五”节能减排综合工作方案》的通知, 通知中指出, 实施建筑节能先进标准领跑行动, 开展超低能耗及近零能耗建筑建设试点。到 2020 年, 城镇绿色建筑面积占新建建筑面积比重提高到 50%。强化既有居住建筑节能改造, 实施改造面积 5 亿平方米以上, 2020 年前基本完成北方采暖地区有改造价值城镇居住建筑的节能改造。完成公共建筑节能改造面积 1 亿平方米以上。2016 年 10 月 9 日, 北京市印发了《北京市推动超低能耗建筑发展行动计划(2016-2018 年)》, 该计划中提出了“三年内建设不少于 30 万平方米的超低能耗示范建筑”的目标, 对于社会投资的项目由市级财政给予每平米 600~800 元不等的奖励资金。

建筑行业中通常所说的“绿色建筑”、“被动房”(Passive house)、“主动房”(active house)、“近零能耗建筑”、“零能耗建筑”等均是低能耗建筑或者超低能耗建筑的不同形式,分别代表不同的建筑节能程度。发展低能耗和超低能耗建筑,是未来中国发展的必然趋势。

作为建筑不可或缺的部件—玻璃,是建筑的窗口,兼具采光、保温、隔热、隔声等多项功能。玻璃是建筑围护结构中,保温性能最薄弱的环节,是能量流失的主要部位。因此,如何合理的设计和选用节能玻璃,对于新建建筑以及改造的建筑,都是极其重要的一项课题。

设计和选用节能玻璃,首先应关注我国的建筑节能设计规范和玻璃相关标准。我国幅员辽阔,不同的地区气候特点不同,对玻璃性能要求不尽相同。不同气候区可参考各个气候区的建筑节能设计规范,其中北京市地方标准《居住建筑节能设计标准》(DB11/891—2012,节能75%),根据窗墙比、朝向和楼层的不同,对整窗传热系数K值的最高限值介于 $1.5\sim 2.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 之间。被动式超低能耗建筑(节能90%以上)是我国新兴的一种建筑形式,相关标准正在逐步建立,其中寒冷地区,目前可参考河北省地方标准《被动式低能耗居住建筑节能设计标准》(DB13(J)/T177-2015),其中要求整窗传热系数K值 $\leq 1.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$,玻璃传热系数K值 $\leq 0.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 。具体到玻璃相关标准,目前可参考《建筑用保温隔热玻璃技术条件》(JC/T 2304-2015)和中国建筑玻璃与工业玻璃协会会标《被动房透明部分用玻璃》(HB 002-2014)。

一、不同气候区节能玻璃选用基本原则

通过研究《民用建筑热工设计规范》(GB 50176)和《公共建筑节能设计标准》(GB 50189)等国家标准,结合玻璃主要热工参数,给出如下基本原则,供大家参考。

(1)严寒地区(例如哈尔滨):主要考虑冬季保温,宜选择低传热系数、高太阳能总透射比和红外热能总透射比的玻璃。

(2)寒冷地区(例如北京):主要考虑冬季保温,部分地区和建筑部位兼顾夏季隔热,宜选择低传热系数、适中太阳能总透射比和红外热能总透射比的玻璃。

(3)夏热冬冷地区(例如上海):主要考虑夏季隔热,兼顾冬季保温,宜选择低传热系数、低太阳能总透射比和红外热能总透射比的玻璃。

(4)夏热冬暖地区(例如广州):北区可参考夏热冬冷地区,南区主要考虑夏季隔热,宜选择低太阳能总透射比和红外热能总透射比、适中传热系数的玻璃。

(5)温和地区(例如云南):温和地带分为北区、中区和南区,可根据具体情况参考夏热冬冷和夏热冬暖地区。

二、节能玻璃的主要类型及选用要点

1. 节能玻璃主要类型及性能参数

根据节能玻璃产品现状,玻璃结构选择双玻、三玻两腔以及真空复合中空玻璃三种结构,结合Low-E玻璃数量及类型(单银、双银、三银),共分析了15种玻璃产品,计算结果详见表2。其中Low-E玻璃为从玻璃数据库中选择

较典型的产品，计算数据仅代表个别的产品，由于各个生产厂家的单银、双银和三银 Low-E 玻璃差别较大。因此，在设计和选择节能玻璃时，应另行计算或测试。

表 2 典型节能玻璃类型、主要性能参数及使用建议

玻璃类型	Low-E	K 值 $W/m^2 \cdot K$	太阳能 总透射 比 g	太阳红外 热能总透 射比 g_{IR}	建议使用地区及建 筑类型
双玻单 Low-E 中空玻 璃 6Low-E+12Ar+6	单银	1.48	0.60	0.37	适合寒冷地区一般 绿色建筑
	双银	1.44	0.37	0.12	适合夏热冬冷和夏 热冬暖地区一般绿 色建筑
	三银	1.36	0.33	0.03	适合夏热冬冷和夏 热冬暖地区一般绿 色建筑
三玻两腔单 Low-E 中 空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar +6	单银	1.11	0.55	0.34	适合寒冷和严寒地 区一般绿色建筑
	双银	1.10	0.37	0.12	适合温和地区超低 能耗建筑
	三银	1.0	0.30	0.03	适合夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地区超 低能耗建筑
三玻两腔双 Low-E 中 空玻璃 6Low-E+16Ar+6+16Ar +6Low-E	单银+单 银	0.76	0.51	0.26	适合寒冷地区超低 能耗建筑
	双银+双 银	0.76	0.35	0.06	适合夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地区超 低能耗建筑
	三银+单 银	0.77	0.30	0.02	适合夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地带超 低能耗建筑
真空复合中空单 Low-E 玻璃 6+12A+5Low-E+V+5	单银	0.56	0.53	0.32	适合严寒，寒冷地区 超低能耗建筑
	双银	0.56	0.38	0.11	适合夏热冬冷地区 超低能耗建筑
	三银	0.41	0.30	0.03	适合夏热冬冷、夏热 冬暖和温和地带超 低能耗建筑

真空复合双 Low-E 中空玻璃 6Low-E+12A+5Low-E+V+5	单银+单银	0.50	0.48	0.22	适合严寒, 寒冷地区超低能耗建筑
	双银+单银	0.50	0.34	0.08	适合夏热冬冷、夏热冬暖和温和地带超低能耗建筑
	三银+单银	0.49	0.29	0.02	适合夏热冬冷、夏热冬暖和温和地带超低能耗建筑

注 1: A-空气, Ar-氩气, V-真空, 如上数据为 WINDOW 7.3 软件计算所得, 下同。

注 2: 真空玻璃内部支撑物有效半径设定为 0.25mm, 支撑物间距设定 40mm, 真空度 0.01Pa, 不同真空玻璃产品, 应根据各自的产品情况另行计算。

由表 2 可以得出如下结论:

- (1) 双玻 Low-E 中空玻璃适用于一般绿色建筑。
- (2) 对于以被动房为代表的超低能耗建筑, 宜选用三玻两腔 Low-E 中空玻璃或者真空复合中空玻璃。
- (3) 真空玻璃性能优越, K 值显著低于普通中空玻璃, 适用地区也更加广泛。

2. 节能玻璃设计要点

(1) 设计要点之一: 典型节能玻璃在不同标准条件下 K 值比较

有些超低能耗建筑例如被动房的概念和技术源于欧洲, 有些数据不能够盲目的引用和参考, 涉及到玻璃的性能参数方面, 值得特别注意的是, 不同的标准体系在边界条件的定义方面有所不同^[3], 因此, 对于引进的技术指标, 需加以辨别和转化。在本文中, 以中国标准 JGJ/T 151 和基于欧洲标准体系建立的 ISO 15099 来加以说明, 两个标准规定的边界条件见表 3。

Low-E 玻璃原片选择典型的单银和双银 Low-E 产品, 玻璃结构选择双玻中空、三玻两腔中空和真空复合中空玻璃, 在不同的标准条件下, K 值及差异值如表 4 所示。

表 3 中国、欧洲标准条件对比

标准体系		中国标准体系 JGJ/T 151	ISO (EN) 标准体系 ISO 15099
冬季	室外温度℃	-20	0
	室内温度℃	20	20
	室内对流换热系数 W/(m ² ℃)	3.6	3.6
	室外对流换热系数 W/(m ² ℃)	16	20
	太阳辐射照度 W/m ²	300	300
夏季	室外温度℃	30	30

	室内温度℃	25	25
	室内对流换热系数 W/(m ² ℃)	2.5	2.5
	室外对流换热系数 W/(m ² ℃)	16	8
	太阳辐射照度 W/m ²	500	500

表 4 不同标准条件下节能玻璃的 K 值

序号	结构	Low-E	K 值 (依据 JGJ/T 151)	K 值 (依据 ISO15099)	差异值
1	6Low-E+12	单银	1.475	1.411	0.064
2	Ar+6	双银	1.438	1.362	0.076
3	6Low-E+16	单银	0.765	0.674	0.109
4	Ar+6+16Ar +6Low-E	双银	0.737	0.641	0.096
5	6+12A+6Lo	单银	0.519	0.551	0.032
6	w-E+V+6	双银	0.467	0.494	0.027

由表 4 可见，列举的几种结构的节能玻璃产品，依据不同的标准规定的边界条件计算，其传热系数 K 值的差异值最大可达 0.109，如此大的差异不容忽视。因此，选用节能玻璃产品时，应明确产品参数计算依据和标准。

(3) 设计要点之二：太阳能总透射比 g 和红外热能总透射比 g_{IR}

传统的资料和行业习惯，一般用太阳能总透射比 g 值表征太阳辐射传热，随着镀膜技术的发展和节能玻璃技术的进步，为了更加准确的表征节能玻璃隔热（或得热）能力，玻璃行业专家们提出了 g_{IR} 的概念。国标 GB/T 2680（报批稿）中关于 g 值和 g_{IR} 的定义如下：

g 值的定义：太阳光直接透射比与被玻璃组件吸收的太阳辐射向室内的二次热传递系数之和，也称为太阳得热系数。

g_{IR} 值的定义：在太阳光谱的近红外波段 780nm~2500nm 范围内，直接透过玻璃的太阳辐射强度和玻璃吸收太阳能经二次传热透过的部分之和与该波长范围入射太阳辐射强度的比值。

简单的说，g 值为 300~2500nm 波长范围内太阳光直接透射比与二次传热的加和。 g_{IR} 值为 780~2500nm 波长范围内的太阳光直接透射比与二次传热的加和。他们的主要区别在于，涉及到光谱计算时，g 值的光谱计算范围为 300~2500nm， g_{IR} 值的光谱计算范围为 780~2500nm，也就是 g_{IR} 不考虑可见光范围(300~780nm)

的透射及吸收情况，去掉了可见光 τ_v 对 g 值的影响。

继续单纯通过 g 值来作为建筑玻璃太阳辐射隔热（或得热）已不再合理，因为在红外波段透射及吸收能力较强的玻璃，有可能由于具有较低的可见光透射率，使得计算所得 g 值较低；而具有较高 g 值的玻璃，又有可能在红外波段具有较低的透射率及较低的二次传热，同时在可见光范围内具有较高的透射率，从而使得计算所得 g 值较高。下面举例加以说明：

图 1 给出了灰玻和单银 Low-E 玻璃的光谱曲线，表 5 给出了这两种玻璃 g 值和 g_{IR} 比较数据，由表 5 可见，灰玻 g 值小于单银 Low-E 玻璃，但 g_{IR} 值大于单银 Low-E 玻璃。究其原因，由图 1 不难看出，灰玻在红外波段相比 Low-E 玻璃具有较高的透射率，因此 g_{IR} 值较大。

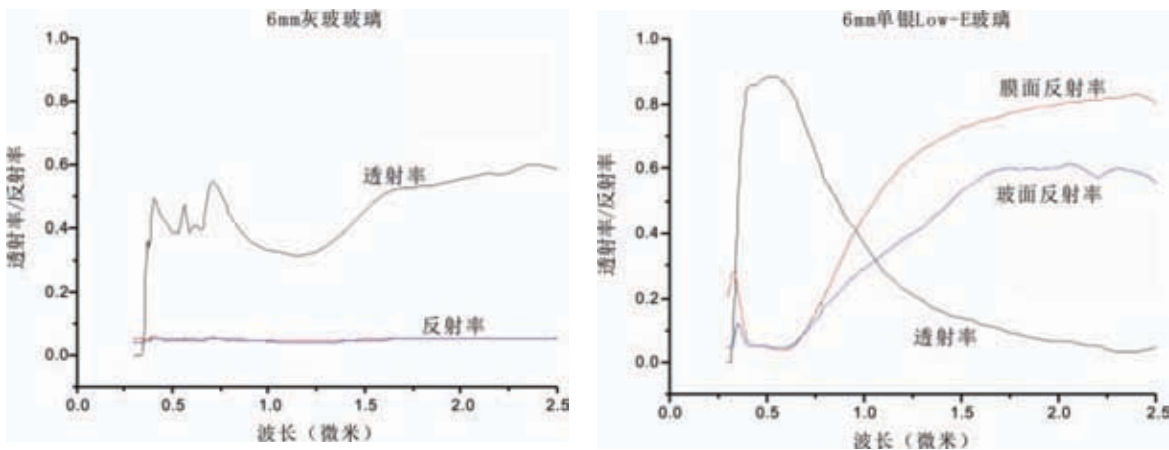


图 1 6mm 灰玻和单银 Low-E 玻璃光谱曲线比较

表 5 两种玻璃 g 值和 g_{IR} 值比较

玻璃种类	g 值	g_{IR} 值
6mm 灰玻	0.563	0.553
6mm 单银 Low-E 玻璃	< 0.617	> 0.354

为了便于大家了解不同类型玻璃的 g_{IR} 值和 g 值，图 2 给出了不同类型玻璃的 g_{IR} 值和 g 值的散点图，供大家参考（横坐标轴的 2#指 Low-E 膜层的位置，从室外向室内看第 2#面）。值得注意的是，双银产品和三银产品的 g 值接近，但 g_{IR} 值相差很大，也就是说， g_{IR} 值更能够体现出双银和三银产品的差别所在。

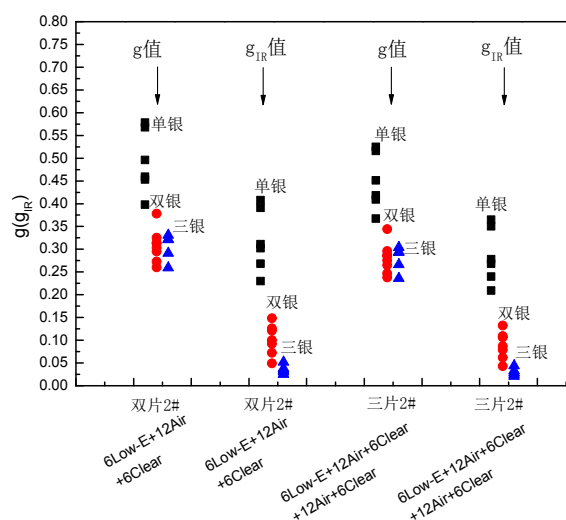


图 2 不同类型玻璃的 g_{IR} 值和 g 值散点分布图

综上所述，节能玻璃选型时，应根据使用的地区及建筑特点，对隔热及采光要求应分别用 g_{IR} 和可见光透射比 τ_v 表征，对保温性能，用传热系数 K 值加以表征。

三、节能玻璃检测方法

1. 传统的实验室检测方法简介

传统的光热性能检测方法只能在实验室内进行，需要将中空玻璃拆成单片，分片检测玻璃的厚度、校正辐射率、光谱数据，再根据 GB/T2680 和 JGJ151 中的理论公式计算多片玻璃整体的各项光热参数。整个操作过程复杂，需要多次测量数据，容易产生测量误差，导致最终结果的偏差。尤其是该方法是不能直接对已安装在建筑上的各类节能玻璃进行检测，导致相关方对成品玻璃质量无从掌控，无法监管和评估。若大量的以次充好的产品安装到低能耗建筑上，最终影响整体建筑能耗的测试结果，给建筑节能带来较大的隐患。

2. 现场检测方法介绍

为了解决已安装门窗和幕墙检测的问题，建筑用玻璃标准化技术委员会 (TC255) 组织编制了《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（以下简称“现场检测技术规范”）。该技术规范包含的主要内容有：测试分类、测量原理、光热计算用基础参数测量要求、参数计算等。

现场检测方法基本原理见图 3。基本原理为先用专用检测装置获得基础参数，再根据 GB/T 2680 和 JGJ/T 151 计算光热参数。所说的基础参数包括：玻璃及气体间隔层厚度、膜层位置、校正辐射率、光谱透射比、光谱反射比、中空腔惰性气体体积浓度。所说的光学参数一般指可见光透射比 τ_v 、可见光反射比 ρ_v 、太阳光直接透射比 τ_e 、太阳光直接反射比 ρ_e 、太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR} ；热工参数一般指太阳能总透射比 g 、太阳光红外热能总透射比 g_{IR} 、遮阳系数 Sc 、传热系数 K 、光热比 LSG 。

该现场检测技术规范适用玻璃类型如表 6。对于单片玻璃、夹层玻璃、未镀膜中空玻璃以及镀膜中空玻璃（其中镀膜玻璃为 1 片或者 2 片），可以检测所有的光热参数；对于镀膜中空玻璃（其中镀膜玻璃为三片及以上）和真空玻璃，可以检测可见光透射比 τ_v 、可见光反射比 ρ_v 、太阳光直接透射比 τ_e 、太阳光直接反射比 ρ_e 、太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR} 。

表 6 现场检测技术规范适用的常见建筑玻璃类型

玻璃产品类型		光热参数							测量分类	
		可见光透射比 τ_v	可见光反射比 ρ_v	太阳光直接透射比 τ_e	太阳光直接反射比 ρ_e	太阳光红外热能直接透射比 τ_{IR}	太阳能总透射比 g	传热系数 K		太阳能红外热能总透射比 g_{IR}
单片玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
夹层玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
未镀膜中空玻璃		√	√	√	√	√	√	√	√	一类
镀膜单腔中空玻璃	两面及以下镀膜	√	√	√	√	√	√	√	√	一类
	两面以上镀膜	√	√	√	√	√	×	×	×	二类
镀膜多腔中空玻璃	两面及以下镀膜	√	√	√	√	√	√	√	√	一类
	两面以上镀膜	√	√	√	√	√	×	×	×	二类
真空玻璃		√	√	√	√	√	×	×	×	二类
注3：√——代表适用；×——代表不适用。										
注4：光学参数测试不适用于表面为散射特性的玻璃，如压花玻璃、磨砂玻璃、彩釉玻璃等。										

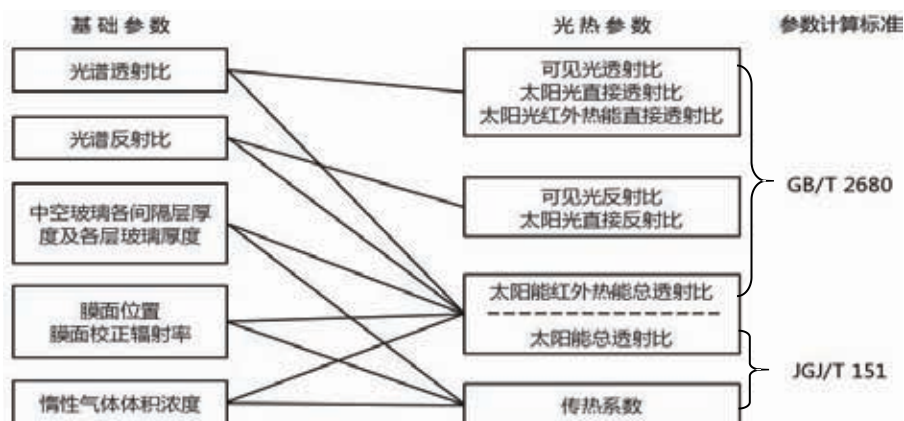


图 3 现场检测方法基本原理图

3. 为什么要全面检测玻璃的光谱曲线及各项光热参数

为了降低通过玻璃传递的热量，各种节能玻璃的技术和产品层出不穷，尤其是各种膜层技术，由于膜层性质的差异，对于太阳光的透射、反射、吸收特性差别迥异。图 4 列出了单银中空、双银中空、三银中空和阳光控制膜中空玻璃的透射、反射光谱曲线。

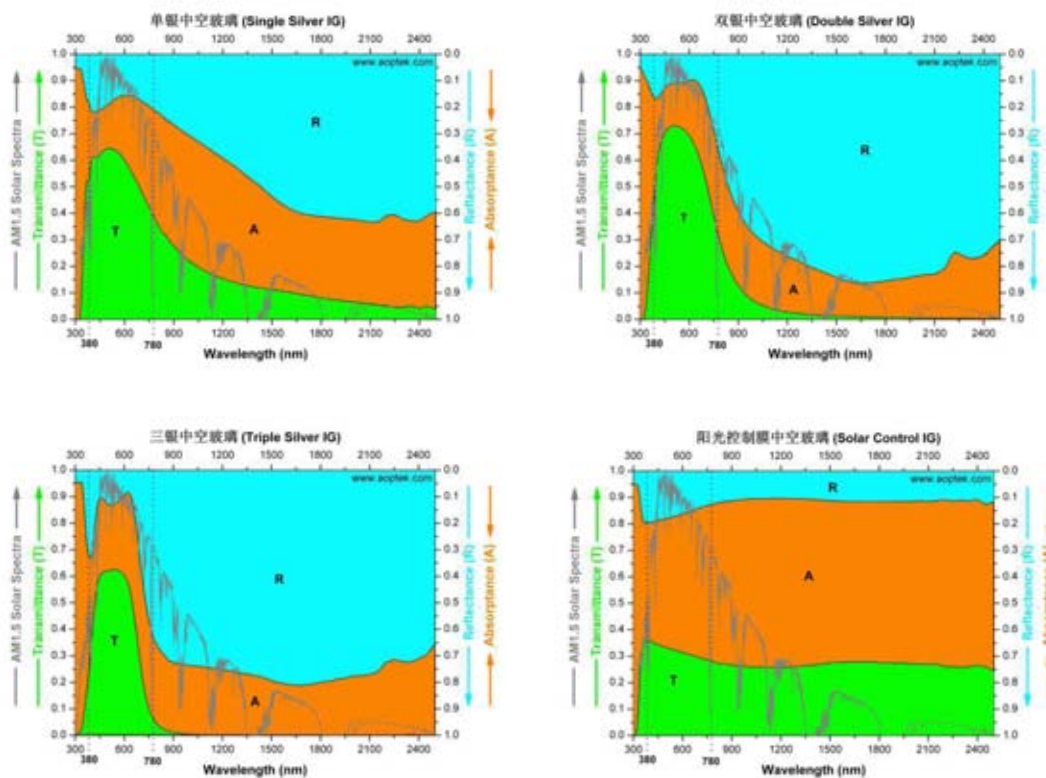


图 4 典型中空玻璃的光谱曲线 (T-透过, A-吸收, R-反射)

不经过全面而又严格的测试、计算，同时又对热工参数的概念含混不清，容易造成混淆和误解。下面以太阳能总透射比 g 为例加以说明。太阳能总透射比

g 为太阳光直接透射比与被玻璃吸收的太阳辐射向室内的二次热传递系数之和（为便于理解，以下简称直接透射+二次传热）。如果单纯的强调直接透射，而忽略二次传热，会影响整窗的热工性能评价和整个建筑的能耗计算，尤其是对于具有热吸收特性的隔热玻璃来说，影响会更大。典型热吸收型膜层玻璃的光谱曲线见图 5，显而易见，单纯从直接透射来看，该产品可见光波段透射比较高，近红外波段透射比较低，似乎是理想的节能玻璃产品。但由于近红外波段反射比很小，吸收比很大，吸收的热量会以热辐射的形式进一步传向室内，即二次传热。因此，在分析玻璃阻隔太阳辐射传热的特性时，我们应严格尊重与使用太阳能总透射比这一参数，不能用太阳能直接透射比或“太阳能阻隔系数”等概念代替太阳能总透射比。

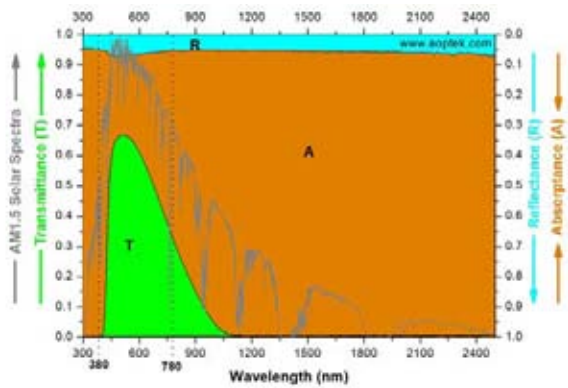


图 5 热吸收型膜层中空玻璃光谱曲线（T-透过，A-吸收，R-反射）

基于上述分析，评价节能玻璃产品时，必须同时检测透射光谱和反射光谱，然后按标准计算出可见光透射比、可见光反射比，太阳能总透射比、红外热能总透射比、传热系数等参数，进行综合分析、全面而科学的评价。

四、结论

低能耗建筑，尤其是以被动房为代表的超低能耗建筑，在中国正处于推广阶段，示范项目的技术质量至关重要，能够为将来的技术升级和成本降低提供大量的基础数据，因此，建筑相关的各项技术一定要把好质量关。

具体到节能玻璃的设计和选型，应根据各地的气候特点以及整个建筑的能耗指标，合理进行选择。本文给出了典型节能玻璃的性能参数及适用范围建议，建议是否合理，欢迎广大读者、行业专家等批评指正。

合理的设计至关重要，科学的检验同样必不可少，在原有实验室检验方法的基础上，现场便捷的检验方法的标准与仪器均已问世，该方法和检测仪器的推广和普及，为成品玻璃及已安装幕墙和门窗玻璃检测，为被动式建筑、低能耗绿色建筑验收提供了技术依据，这将对量化和科学评价玻璃产品性能，提升产品质量，规范行业行为，引导行业健康快速发展，具有重要意义。

说明：本文转自 2017 年玻璃行业年会论文集

低能耗建筑窗玻璃光学参数整体直接检测技术

Direct-measuring technique of spectra transmittance and reflectance for multiple glazing of low energy consumption building

苑静 黄达泉

北京奥博泰科技有限公司 北京 100070

“建筑光学”公众号 2017.6.16 已发布

摘要 本文讨论了用于中空玻璃整体直接光谱透反射测量的方法，并将整体直接测量法与传统分片测量法所得数据进行对比分析，结果显示，这两种方法的测量结果具有很好的一致性。整体直接测量法可以代替传统分片测量法进行建筑中空玻璃光学特性检测，解决了对于已安装中空玻璃成品无法免拆无损检测的技术问题。对于同材料送检样品，可以采用整体直接测量法进行同一性验证。同时提出，利用整体直接测量法，对组成中空玻璃的镀膜单片玻璃间接进行光学特性检测的方法，解决了目前玻璃幕墙维修补片的一大难题。

Abstract In this paper, the direct test method of spectral transmittance and reflectance for multiple glazing was discussed. We compared the test spectra curves from direct test method and traditional single pane test method. It is shown that the test spectra curves have a good agreement. So, for optical properties testing of multiple glazing in building, the direct test method can replace traditional single pane test method. It solved the problem of can't test the installed multiple glazing. For the same material submitting sample for test, the direct test method can be for identity verification. At the same time, we present another application of direct test method, which solved the single pane matching problem when repairing the curtain wall.

关键词 中空玻璃；透射比；反射比；直接测量；低能耗

Key Words multiple glazing; transmittance; reflectance; direct-measuring; low energy consumption

一、引言

窗户是建筑物的重要组成部分，透过窗户消耗的能量在整个建筑能耗中占有很大的比例。而随着人们生活水平的提高，住宅用户更倾向于采用大面积玻璃门窗，使得室内在白天可以获得充分的自然采光及室外开阔的视野。为了兼顾建筑用门窗采光和保暖的主要功能，行业内广泛应用了低辐射镀膜玻璃（简称 Low-E 玻璃），应用 Low-E 玻璃合成中空玻璃、真空玻璃、真空复合中空玻璃等，可显著降低玻璃组件的传热系数（K 值），灵活调整太阳能总透射比及可见光透射比，提高建筑玻璃的保温、隔热性能^[1-2]。

玻璃可见光透反射比、太阳光直接透反射比、太阳能总透射比 g 值、色差等参数是质量检验的主要参数^[3]，都需对玻璃系统光谱透反射比进行测量。但是目前已有的检测标准及检测手段由于以下几种原因，不适用于中空玻璃成品检测或现场检测。首先，传统的中空玻璃组合系统的整体透射比、反射比测定方法，都

是需要对中空玻璃成品进行拆片，分片检测玻璃的光学特性，然后将测试数据带入理论公式进行计算，从而得到中空玻璃组合系统的整体光学特性。此方法，操作过程复杂，需要多次测量，容易人为产生测量误差。同时，对于已经安装上墙的中空玻璃，或者中空玻璃成品来说，不能进行现场、免拆片无损检测，由此会导致对于假冒伪劣产品无证可查。其次，多数分光光度计仪器对玻璃尺寸有限制要求，工程使用的均为钢化玻璃，无法切割为仪器可使用的样品尺寸，工程检测只能使用玻璃生产商另外制作的样品，这就导致无法实现工程现场见证取样送检。GB50411 规定幕墙节能工程使用的幕墙玻璃进场时，应对其可见光透射比、传热系数、遮阳系数进行复验，复验应为见证取样送检。所以，为了避免以上问题，需要开发直接测量中空玻璃整体透反射光谱特性的方法、中空玻璃结构现场测试技术和无损测试中空玻璃膜面辐射率技术，对于控制监督建筑工程选用玻璃的质量具有重要意义。

本文中着重介绍了用于直接测量中空玻璃整体透、反射光谱特性的方法，并将整体直接测量法与传统分片测量法所得测量数据进行对比分析，同时，提出整体直接测量法应用于玻璃幕墙中空玻璃补片和同材料送检的同一性验证的方法。

二、中空节能玻璃整体透、反射光谱测量原理

2.1 测量原理

中空玻璃整体透、反射光学特性测试系统，由光源、反射光谱校准板、分光及光电探测模块等部分构成。图 1 中给出透、反射测量光路图，入射光束以小角度（小于 8° 角）投射到被测试样中空玻璃上，经过中空玻璃系统表面及内部多次反射、折射后，以小角度出射，由分光及光电探测模块 1 接收反射光，分光及光电探测模块 2 接收透射光。

光谱透射比以空气层做 100%测量校准，光谱反射比以反射光谱校准板进行测量校准。

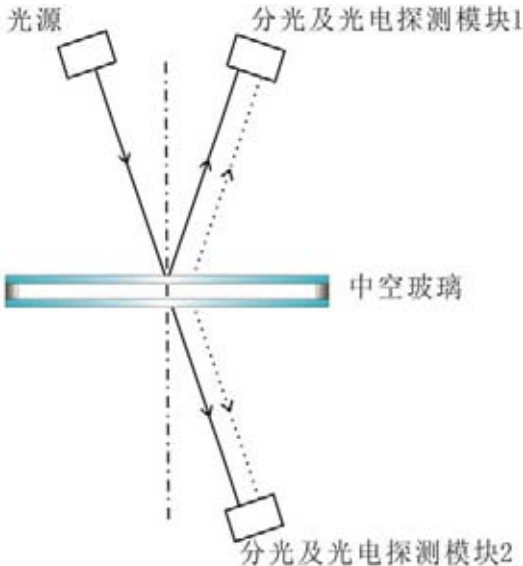


图 1 中空玻璃透射、反射测试光路示意图

2.2 测试数据对比

为了直观对比中空玻璃透反射的整体直接测量法与传统分片测量法的一致

性，我们采用北京奥博泰科技有限公司的 GlasSpec2500 就这两种方法进行了实验验证，被测中空玻璃组合结构为单银单腔双玻和双银三腔两玻：6mmLow-E(2#)+10Air+6mmClear 和 6mmLow-E(2#)+10Air+6mmClear+10Air+6mmClear。GlasSpec2500 可以对单片玻璃进行透反射测试，也可以对中空玻璃系统进行整体直接透反射测量，玻璃构件的最大测量厚度为 60mm。

表 1 不同测试方法测得透射比、反射比数值比对差值						
玻璃组成结构	可见光			太阳光		
	ΔT_v	ΔR_v	$\Delta R_v'$	$\Delta \tau_e$	$\Delta \rho_e$	$\Delta \rho_e'$
Low-E2#(单银)+10Air+6Clear	0.11%	0%	0.01%	0.01%	-0.01%	-0.08%
Low-E2#(双银)+10Air+6Clear+10Air+6Clear	0.19%	0.06%	0.20%	-0.05%	0%	0.18%

我们将传统分片测量获得透、反射比光谱数据与直接整体测量透、反射比光谱数据进行了对比，如图 2 所示，图 2（a）为单银双玻单腔中空玻璃透反射比光谱曲线对比图，图 2（b）为双银三玻两腔中空玻璃透反射比光谱曲线对比图，其中 ΔT_v 为可见光透射比差值， ΔR_v 为可见光前反射比差值， $\Delta R_v'$ 为可见光后反射比差值， $\Delta \tau_e$ 为太阳光直接透射比差值， $\Delta \rho_e$ 为太阳光前直接反射比差值， $\Delta \rho_e'$ 为太阳光后直接反射比差值。分片测量方法的计算公式依据国家标准 GB/T 2680^[4]，其中透射比、反射比计算公式等同于国际标准 ISO 9050^[5]。从图 2 中可见，两种方法获得中空玻璃整体透、反射比光谱曲线一致性非常好，基本完全重合。表 1 中给出了两种方法得到透射比与反射比数值比对差值，两种方法的偏差值小于 0.2%，这说明整体直接测量透反射方法完全可以替代传统的分片测量算法。

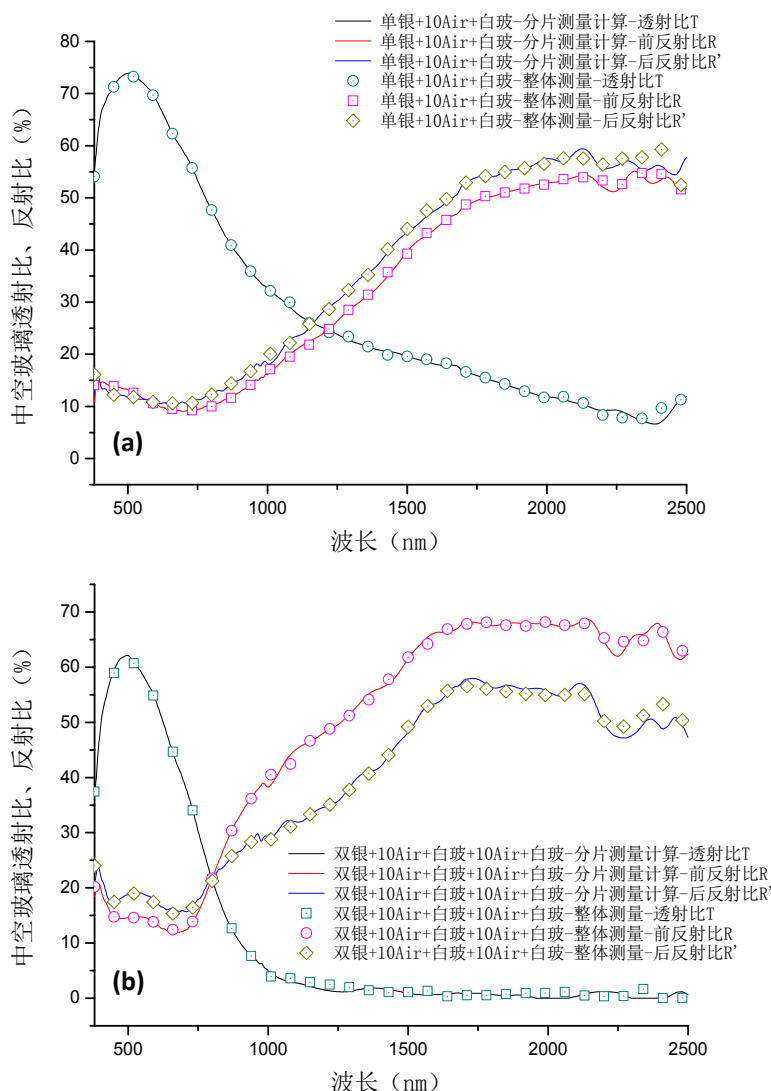


图2 不同测量法获得中空玻璃系统光谱反射比、光谱透射比曲线对比图

在采用中空玻璃整体直接测量方法时，应注意如下测量要求：

1) 测量透射比时，在允许测量误差范围内，需尽可能多的包含中空玻璃内部经多次反射而出射的透射光。测量反射比时，在允许测量误差范围内，需尽可能多的包含中空玻璃内部经多次反射而出射的反射光。

2) 对组成中空玻璃的普通白玻、低辐射(Low-E)玻璃试样，先进行分片光谱测量并计算合中空后的整体透射比、反射比数值。再将各单片玻璃按分片测量的相同中空结构构成中空玻璃，进行直接整体测量。将两种方法测定结果进行比对，分片测定与直接整体测定结果应在允许测量偏差以内。

2.3 算法精度控制

入射光束投射到中空玻璃试样后，在其入射表面发生单次反射，在玻璃系统内部发生无穷多次反射，光束经过多次反射后出射，被接收端探测器模块收集。根据测试精度要求的不同，可以有选择的控制接收光束条件，接收到的光束经历反射次数越多，测试获得数据越接近理想情况^[6-7]。但对于建筑中空玻璃来说，过高的测量精度并没有意义，不仅给仪器设计制造带来困难，而且增加不必要的测试成本。表2中以双玻单腔中空玻璃组合结构为例，给出了不同反射次数的透

射比、反射比计算公式，中空组合结构示意图见图 3。定义外侧反射比为实际使用时室外侧反射比，同样，内侧反射比为中空玻璃实际使用时室内侧的反射比。

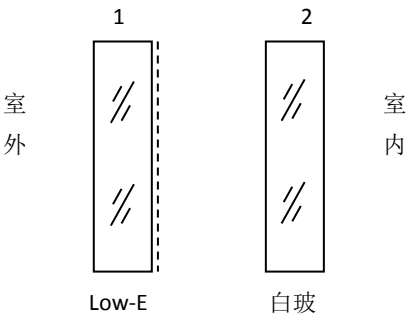


图 3 双玻单腔中空玻璃组合结构示意图

表 2 不同反射次数条件下的透、反射比公式

反射次数	透射比	反射比（外侧）	反射比（内侧）
1	$\tau_1 \tau_2$	ρ_1	ρ_2'
2	$\tau_1 \tau_2 \rho_2 \rho_1'$	$\tau_1^2 \rho_2$	$\tau_2^2 \rho_1'$
3	$\tau_1 \tau_2 \rho_2^2 \rho_1'^2$	$\tau_1^2 \rho_2^2 \rho_1'$	$\tau_2^2 \rho_1'^2 \rho_2$
4	$\tau_1 \tau_2 \rho_2^3 \rho_1'^3$	$\tau_1^2 \rho_2^3 \rho_1'^2$	$\tau_2^2 \rho_1'^3 \rho_2^2$
5	$\tau_1 \tau_2 \rho_2^4 \rho_1'^4$	$\tau_1^2 \rho_2^4 \rho_1'^3$	$\tau_2^2 \rho_1'^4 \rho_2^3$
.....			
N	$\tau_1 \tau_2 \rho_2^{N-1} \rho_1'^{N-1}$	$\tau_1^2 \rho_2^{N-1} \rho_1'^{N-2}$	$\tau_2^2 \rho_1'^{N-1} \rho_2^{N-2}$

理想条件下中空玻璃整体透射比：

$$\begin{aligned}
 \tau &= \tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \rho_2 \rho_1' + \tau_1 \tau_2 \rho_2^2 \rho_1'^2 + \tau_1 \tau_2 \rho_2^3 \rho_1'^3 + \tau_1 \tau_2 \rho_2^4 \rho_1'^4 + \cdots + \tau_1 \tau_2 \rho_2^{N-1} \rho_1'^{N-1} \\
 &= \tau_1 \tau_2 \cdot (1 + \rho_2 \rho_1' + \rho_2^2 \rho_1'^2 + \rho_2^3 \rho_1'^3 + \rho_2^4 \rho_1'^4 + \cdots + \rho_2^{N-1} \rho_1'^{N-1}) \\
 &= \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1' \rho_2}
 \end{aligned}$$

理想条件下中空玻璃整体外侧反射比：

$$\begin{aligned}
\rho &= \rho_1 + \tau_1^2 \rho_2 + \tau_1^2 \rho_2^2 \rho_1' + \tau_1^2 \rho_2^3 \rho_1'^2 + \tau_1^2 \rho_2^4 \rho_1'^3 + \cdots + \tau_1^2 \rho_2^{N-1} \rho_1'^{N-2} \\
&= \rho_1 + \tau_1^2 \rho_2 \cdot (1 + \rho_2 \rho_1' + \rho_2^2 \rho_1'^2 + \rho_2^3 \rho_1'^3 + \cdots + \rho_2^{N-2} \rho_1'^{N-2}) \\
&= \rho_1 + \frac{\tau_1^2 \rho_2}{1 - \rho_1' \rho_2}
\end{aligned}$$

理想条件下中空玻璃整体内侧反射比：

$$\begin{aligned}
\rho' &= \rho_2' + \tau_2^2 \rho_1' + \tau_2^2 \rho_1'^2 \rho_2 + \tau_2^2 \rho_1'^3 \rho_2^2 + \tau_2^2 \rho_1'^4 \rho_2^3 + \cdots + \tau_2^2 \rho_1'^{N-1} \rho_2^{N-2} \\
&= \rho_2' + \tau_2^2 \rho_1' \cdot (1 + \rho_1' \rho_2 + \rho_1'^2 \rho_2^2 + \rho_1'^3 \rho_2^3 + \cdots + \rho_1'^{N-2} \rho_2^{N-2}) \\
&= \rho_2' + \frac{\tau_2^2 \rho_1'}{1 - \rho_1' \rho_2}
\end{aligned}$$

其中，符号表示说明如下：

τ 为中空玻璃光谱透射比；

ρ 为中空玻璃室外侧光谱反射比；

ρ' 为中空玻璃室内侧光谱反射比；

τ_1 为第一片（外侧）玻璃的光谱透射比；

τ_2 为第二片（内侧）玻璃的光谱透射比；

ρ_1 为第一片（外侧）玻璃在光入射方向的光谱反射比；

ρ_1' 为第一片（外侧）玻璃在光入射反方向的光谱反射比；

ρ_2 为第二片（内侧）玻璃在光入射方向的光谱反射比；

ρ_2' 为第二片（内侧）玻璃在光入射反方向的光谱反射比。

当反射次数 N 趋向于无穷大时 ($N \rightarrow \infty$)，透射比和反射比测试为理想情况，透射比、反射比计算公式与国家标准 GB/T 2680 及国际标准 ISO 9050 中给出的计算公式完全一致^[4-5]。

我们将不同反射次数计算条件下获得的反射比光谱曲线进行了对比，光谱波段范围为 300nm~2500nm。如图 4 中所示。同时，在表 3 中给出了不同反射次数条件下，中空玻璃室内侧太阳光直接反射比数值，及与理想情况下太阳光直接反射比数值的偏差。

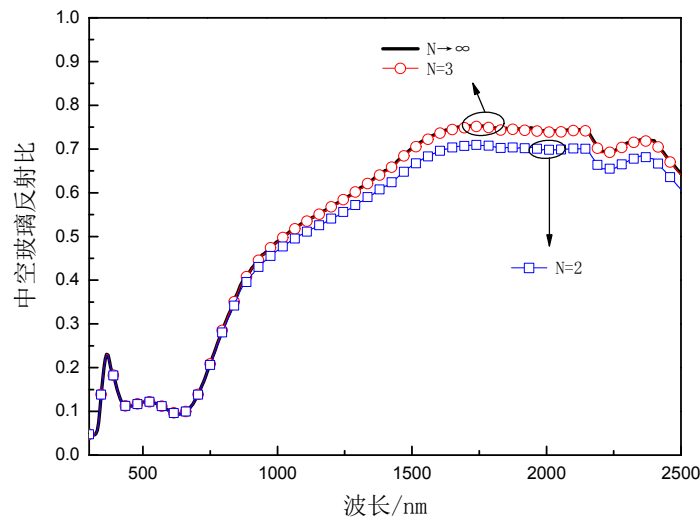


图 4 不同测量方法获得中空玻璃反射比光谱对比曲线

由图 4 及表 3 中数值可见，对于中空玻璃室内侧反射比 ρ' 来说，两次反射（ $N=2$ ）计算结果偏差较大，至少应考虑三次以上（ $N \geq 3$ ）反射次数才能获得一致性较高的光谱测量结果，计算公式中反射项必须至少三项相加才不会产生过大的偏差。

$$\text{即： } \rho' = \rho_2' + \tau_2^2 \rho_1' + \tau_2^2 \rho_1'^2 \rho_2 + \dots$$

表 3 中空玻璃室内侧太阳光直接反射比数值

反射次数 N	太阳光直接反射比	与理想情况下反射比偏差
2	28.3%	1.1%
3	29.3%	0.1%
$\rightarrow \infty$	29.4%	0

3 应用

3.1 中空玻璃成品可见光透反射比、太阳光直接透反射比、颜色、色差测量

直接整体测量中空玻璃透射光谱和反射光谱，可以用于计算中空玻璃整体可见光透反射比、太阳光直接透反射比，进而可以计算获得颜色及色差等参数。直接整体测量法，解决了目前中空玻璃成品不能免拆无损测量的技术问题，而且简化了测量步骤。

3.2 玻璃幕墙补片

当玻璃幕墙中已安装的玻璃出现质量问题时，需要对玻璃进行更换，这就需要所更换的玻璃构件与其他已安装玻璃构件之间不能产生色差，需具有相同光学特性和热工特性。采用直接整体测量法获得中空玻璃整体光学参数，再根据光学原理，利用程序编程反推计算获得组成中空玻璃的单片镀膜玻璃光学特性，这样可以方便准确配片、补片，使得更换的中空玻璃组合构件具有与其他已安装玻璃相同的光学特性。

3.3 样品的同一性验证

对于已安装的中空玻璃，或者不可拆卸的中空玻璃样品又不能切割的样品，

一般会选用同种材料替代样品作为试样进行检测。为了防止送检的替代样品与实际被测样品特性不一致,可以采用整体直接测量法进行同一性验证。将实际被测中空玻璃样品和替代样品的各片玻璃用间隔条组成的相同结构试样放入仪器中,进行太阳光波段范围内中空玻璃整体的光谱透射比及光谱反射比测量,如果测得两种样品的光谱特性一致,则可认为替代试样与被测中空玻璃的其他特性也一致,即可对替代样品进行其他参数的测量。如:中空玻璃内层镀膜表面辐射率,太阳能总透射比 g 值,传热系数 K 值,等参数的测定。这种方法,可以防止工程验收时,实际被测产品与送检试样特性不一致的现象。

4 总结

本文介绍了低能耗建筑中空玻璃光学特性的直接整体测量方法,并对测量精度控制进行了分析,结果显示直接整体测量法与传统分片测量法的测量结果具有很好的一致性,直接整体测量法可以代替传统分片测量法进行建筑中空玻璃光学特性检测。直接整体测量方法,适用于中空玻璃组件的可见光透射比、可见光反射比、太阳光直接透射比、太阳光直接反射比、太阳光直接吸收比和紫外透射比的测定。用同材质的替代样品测量辐射率及太阳能总透射比,传热系数,等参数时,可对替代样品与实际中空玻璃制成品的同一性进行验证。直接整体测量法解决了对于已安装中空玻璃成品无法免拆无损检测的技术问题,可以用于工程现场检测验收,对绿色建筑玻璃行业健康发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 黄硕. 严寒地区低能耗建筑热工特性及供暖系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [2] 温艳芳, 宁连旺. Low-E 中空玻璃性能与市场研究[J]. 建材技术与应用, 2010, 10:10-13.
- [3] 毕卫红, 贾春荣. 建筑玻璃光学特性检测技术的现状与发展[J]. 玻璃, 2002, 03: 32-36.
- [4] GB/T 2680-1994. 建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定[S].
- [5] ISO 9050-2003. Glass in building-Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors[S].
- [6] 江亿, 李元哲, 狄洪发. 关于透过体系透过率计算方法的探讨[J]. 太阳能学报, 1980, 01(02):166-175.
- [7] Papamichael K, Winkelmann F. Solar-optical properties of multilayer fenestration systems[C]. 1986 International Daylighting Conference Proceedings. 1986, 01.

各种类型玻璃的 K 值汇总表（收藏版）

作者：许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.7.13 已发布

前一篇文章介绍了关于传热系数 K 值的一些知识，应广大读者的要求，小编又系统整理了各种玻璃的传热系数 K 值，有兴趣的朋友仔细研究一下吧，表里有很多规律等待你来发现哦！

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ϵ	传热系数 K 值 W/ (m ² ·k)
6mm 白玻	-	-	5.36
6mm 单银 Low-E	单银	0.13	3.40
		0.103	3.31
		0.072	3.21
6mm 双银 Low-E	双银	0.055	3.16
6mm 三银 Low-E	三银	0.021	3.05
双白中空（空气） 6+9A+6	-	-	2.78
双白中空（空气） 6+12A+6	-	-	2.67
双白中空（空气） 6+16A+6	-	-	2.66
双白中空（氩气） 6+9Ar+6	-	-	2.61（氩气 90%） 2.62（氩气 85%） 2.63（氩气 80%）
双白中空（氩气） 6+12Ar+6	-	-	2.52（氩气 90%） 2.53（氩气 85%） 2.54（氩气 80%）
双白中空（氩气） 6+16Ar+6	-	-	2.54（氩气 90%） 2.54（氩气 85%） 2.55（氩气 80%）
双玻单 Low-E 中空玻璃 （空气） 6Low-E+9A+6	单银	0.13	2.0
		0.103	1.98
		0.072	1.93
	双银	0.055	1.90
	三银	0.021	1.84
双玻单 Low-E 中空玻璃 （氩气）	单银	0.13	1.71（氩气 90%）
		0.103	1.65（氩气 90%）

6Low-E+9Ar+6		0.072	1.60 (氬气 90%)
	双银	0.055	1.55 (氬气 90%)
			1.57 (氬气 85%)
			1.59 (氬气 80%)
双玻单 Low-E 中空玻璃 (空气) 6Low-E+12A+6	单银	0.13	1.84
		0.103	1.79
		0.072	1.74
	双银	0.055	1.70
	三银	0.021	1.64
双玻单 Low-E 中空玻璃 (氬气) 6Low-E+12Ar+6	单银	0.13	1.60 (氬气 90%)
		0.103	1.54 (氬气 90%)
		0.072	1.48 (氬气 90%)
	双银	0.055	1.44 (氬气 90%)
			1.45 (氬气 85%)
			1.47 (氬气 80%)
三玻两腔单 Low-E 中空 玻璃 (氬气) 6Low-E+12Ar+6+12Ar+6	单银	0.13	1.17 (氬气 90%)
		0.103	1.14 (氬气 90%)
		0.072	1.10 (氬气 90%)
	双银	0.055	1.08 (氬气 90%)
			1.09 (氬气 85%)
			1.10 (氬气 80%)
三玻两腔单 Low-E 中空 玻璃 (氬气) 6Low-E+16Ar+6+16Ar+6	单银	0.13	1.17 (氬气 90%)
		0.103	1.14 (氬气 90%)
		0.072	1.11 (氬气 90%)
	双银	0.055	1.09 (氬气 90%)
			1.10 (氬气 85%)
			1.11 (氬气 80%)
三玻两腔双 Low-E 中空 玻璃 (氬气) 6Low-E+12Ar+6+12Ar+6	单银+单银	0.072, 0.072	0.87 (氬气 90%)
	双银+双银	0.055, 0.055	0.84 (氬气 90%)

Low-E	三银+单银	0.021, 0.072	0.81 (氩气 90%)
三玻两腔双 Low-E 中空玻璃 (氩气) 6Low-E+16Ar+6+16Ar+6 Low-E	单银+单银	0.072, 0.072	0.76 (氩气 90%)
	双银+双银	0.055, 0.055	0.74 (氩气 90%)
	三银+单银	0.021, 0.072	0.72 (氩气 90%)
真空复合中空单 Low-E 玻璃 6+12A+5Low-E+V+5	单银	0.13	0.72
		0.103	0.65
		0.072	0.56
	双银	0.055	0.52
	三银	0.021	0.41

Note: 1. 该表格数据为 WINDOW7.3 和 GlasSmart1000 3.3 计算所得, 边界条件依据中国标准 JGJ/T 151;
2. 符号说明: A-空气, Ar-氩气。

各种类型玻璃的 K 值、g 值等光热参数汇总表（收藏版）

作者：许海凤 “建筑光学” 公众号 2017.8.3 已发布

之前本公众号发布了传热系数 K 值的汇总表，应广大读者的要求，在原有表格的基础上，扩充了玻璃类型，增加了更多光热参数的参考值，请大家参阅并提出宝贵意见。

版本说明

1. 增加了在线 Low-E 系列产品的性能参数；
2. 增加了太阳能总透射比 g、可见光透射比 T_v 的参考值，由于不同的 Low-E 对这 2 个参数值影响很大，本表格提供的数据仅供参考，实际产品应另行计算；
3. 若计算遮阳系数 SC，用 g 值除以 0.87 即可；
4. 多种单银、双银和三银 Low-E 玻璃参数的举例比较，详见结构：单片玻璃、双玻单 Low-E 中空玻璃（氩气）6Low-E(2#)+12Ar+6、三玻两腔单 Low-E（氩气）Low-E(2#)+12Ar+6+12Ar+6、真空复合中空 6+12A+6Low-E(4#)+V+6；
5. 不同气体含量时 K 值的举例比较，详见结构：双白中空、三玻两腔单 Low-E 中空。未特别指出氩气含量的，按氩气含量 90% 计算；
6. 在表格末尾，增加了一些规律性的总结；
7. 计算方法及依据标准：表格数据为 WINDOW7.3 和 GlasSmart1000 3.3 计算所得，边界条件依据中国标准 JGJ/T 151；
8. 符号说明：A-空气，Ar-氩气，V-真空。

单片玻璃

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ε	传热系数 K W/($m^2 \cdot k$)	太阳能 总透射比 g	可见光 透射比 T_v
6mm 白玻	—	—	5.36	0.85	0.90
6mm 在线 Low-E(2#)	在线	0.18	3.55	0.70	0.79
6mm 单银 Low-E(2#)	单银	0.13	3.40	0.63	0.80
		0.103	3.31	0.55	0.73
		0.072	3.21	0.65	0.89
6mm 双银 Low-E(2#)	双银	0.055	3.16	0.43	0.68
		0.054	3.15	0.34	0.53
		0.065	3.19	0.36	0.59
6mm 三银 Low-E(2#)	三银	0.021	3.05	0.37	0.75
		0.023	3.05	0.37	0.74
		0.024	3.06	0.29	0.58

双玻中空玻璃

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ε	传热系数 K W/ (m ² · k)	太阳能总透射比 g	可见光透射比 T _v
双白中空 (空气) 6+9A+6	—	—	2.78	0.76	0.81
双白中空 (空气) 6+12A+6	—	—	2.67	0.76	0.81
双白中空 (空气) 6+16A+6	—	—	2.66	0.76	0.81
双白中空 (氩气) 6+9Ar+6	—	—	2.61 (氩气 90%) 2.62 (氩气 85%) 2.63 (氩气 80%)	0.76	0.81
双白中空 (氩气) 6+12Ar+6	—	—	2.52 (氩气 90%) 2.53 (氩气 85%) 2.54 (氩气 80%)	0.76	0.81
双白中空 (氩气) 6+16Ar+6	—	—	2.54 (氩气 90%) 2.54 (氩气 85%) 2.55 (氩气 80%)	0.76	0.81
双玻单 Low-E 中空 玻璃 (空气) 6Low-E (2#)+9A+6	在线	0.18	2.1	0.63	0.71
	单银	0.103	1.98	0.50	0.65
	双银	0.055	1.90	0.38	0.62
	三银	0.021	1.84	0.33	0.68
双玻单 Low-E 中空 玻璃 (空气)	在线	0.18	1.92	0.63	0.71
	单银	0.103	1.79	0.50	0.65
	双银	0.055	1.70	0.37	0.62

6Low-E(2#)+12A+6	三银	0.021	1.64	0.33	0.68
双玻单 Low-E 中空 玻璃 (氩气) 6Low-E(2#)+9Ar+6	在线	0.18	1.8	0.63	0.71
	单银	0.103	1.65	0.50	0.65
	双银	0.055	1.55 (氩气 90%)	0.37	0.62
			1.57 (氩气 85%)		
			1.59 (氩气 80%)		
	三银	0.021	1.5	0.33	0.68
双玻单 Low-E 中空 玻璃 (氩气) 6Low-E (2#) +12Ar+6	在线	0.18	1.69	0.62	0.71
	单银	0.13	1.60	0.57	0.72
		0.103	1.54	0.50	0.65
		0.072	1.48	0.59	0.81
	双银	0.055	1.44 (氩气 90%)	0.37	0.62
			1.45 (氩气 85%)		
			1.47 (氩气 80%)		
		0.054	1.44	0.30	0.48
		0.065	1.46	0.31	0.53
		0.021	1.36	0.33	0.68
	三银	0.023	1.37	0.32	0.67
		0.024	1.37	0.25	0.53
双玻单 Low-E 中空 玻璃 (氩气) 6Low-E (2#) +16Ar+6	在线	0.18	1.74	0.62	0.71
	单银	0.103	1.59	0.50	0.65
	双银	0.055	1.49	0.37	0.62
	三银	0.021	1.42	0.33	0.68

Tips: 1. 改变腔体厚度或充惰性气体, 会对传热系数 K 值有一定影响, 但对太阳能总透射比 g 和可见光透射比 Tv 这两个参数影响非常小 (下同)。

2. 太阳能总透射比 g 值和可见光透射比 Tv 的大小主要取决于 Low-E 的种类 (下同)。

三玻两腔单 Low-E 中空玻璃

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ε	传热系数 K W/ (m ² · k)	太阳能总透射比 g	可见光透射比 T _v
三玻两腔单 Low-E 中空 (空气) 6Low-E (2#) +6A+6+9A+6	在线	0.18	1.76	0.56	0.65
	单银	0.103	1.72	0.45	0.59
	双银	0.055	1.69	0.35	0.56
	三银	0.021	1.67	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (空气) 6Low-E (2#) +9A+6+9A+6	在线	0.18	1.55	0.57	0.65
	单银	0.103	1.49	0.45	0.59
	双银	0.055	1.44	0.35	0.56
	三银	0.021	1.40	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (空气) 6Low-E (2#) +9A+6+12A+6	在线	0.18	1.51	0.57	0.65
	单银	0.103	1.44	0.45	0.59
	双银	0.055	1.40	0.35	0.56
	三银	0.021	1.37	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (空气) 6Low-E (2#) +12A+6+12A+6	在线	0.18	1.39	0.57	0.65
	单银	0.103	1.32	0.45	0.59
	双银	0.055	1.27	0.35	0.56
	三银	0.021	1.23	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) +6Ar+6+9Ar+6	在线	0.18	1.52	0.57	0.65
	单银	0.103	1.47	0.45	0.59
	双银	0.055	1.42	0.35	0.56
	三银	0.021	1.40	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) +9Ar+6+9Ar+6	在线	0.18	1.34	0.57	0.65
	单银	0.103	1.25	0.45	0.59
	双银	0.055	1.20	0.35	0.56
	三银	0.021	1.15	0.30	0.62

三玻两腔单 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) +9Ar+6+12Ar+6	在线	0.18	1.31	0.57	0.65
	单银	0.103	1.23	0.45	0.59
	双银	0.055	1.17	0.35	0.56
	三银	0.021	1.13	0.30	0.62
三玻两腔单 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) +12Ar +6+12Ar+6	在线	0.18	1.22	0.57	0.65
	单银	0.13	1.17	0.51	0.65
		0.103	1.14	0.45	0.59
		0.072	1.10	0.55	0.73
	双银	0.055	1.08(氩气 90%) 1.09(氩气 85%) 1.10(氩气 80%)	0.34	0.56
			1.08(氩气 90%) 1.09(氩气 85%) 1.10(氩气 80%)		
			1.08(氩气 90%) 1.09(氩气 85%) 1.10(氩气 80%)		
		0.065	1.09(氩气 90%) 1.10(氩气 85%) 1.12(氩气 80%)	0.29	0.48
			1.09(氩气 90%) 1.10(氩气 85%) 1.12(氩气 80%)		
			1.09(氩气 90%) 1.10(氩气 85%) 1.12(氩气 80%)		
	三银	0.021	1.03	0.30	0.62
		0.023	1.04	0.30	0.60
		0.024	1.04	0.23	0.48
三玻两腔单 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) +16Ar +6+16Ar+6	在线	0.18	1.22	0.57	0.65
	单银	0.103	1.14	0.45	0.59
	双银	0.055	1.09	0.34	0.56
	三银	0.021	1.05	0.30	0.62
Tips: 1. 三玻两腔单 Low-E 中空玻璃的 K 值基本在 1.0 以上。					

三玻两腔双 Low-E 中空玻璃

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ε	传热系数 K W/ (m ² · k)	太阳能总透射比 g	可见光透射比 T _v
三玻两腔双 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) + 9Ar + 6 + 9Ar + 6Low-E (5#)	在线+在线	0.18, 0.18	1.07	0.54	0.57
	单银+单银	0.103, 0.103	0.97	0.42	0.48
		0.072, 0.072	0.92	0.51	0.73
	双银+双银	0.055, 0.055	0.89	0.32	0.42
	三银+单银	0.021, 0.072	0.88	0.30	0.61
三玻两腔双 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) + 9Ar + 6 + 12Ar + 6Low-E (5#)	在线+在线	0.18, 0.18	1.0	0.53	0.57
	单银+单银	0.103, 0.103	0.89	0.42	0.48
		0.072, 0.072	0.84	0.50	0.73
	双银+双银	0.055, 0.055	0.81	0.32	0.42
	三银+单银	0.021, 0.072	0.81	0.30	0.61
三玻两腔双 Low-E 中空 (氩气) 6Low-E (2#) + 12Ar + 6 + 12Ar + 6Low-E (5#)	在线+在线	0.18, 0.18	0.94	0.54	0.57
	单银+单银	0.103, 0.103	0.83	0.42	0.48
		0.072, 0.072	0.78	0.51	0.73
	双银+双银	0.055, 0.055	0.75	0.32	0.42
	三银+单银	0.021, 0.072	0.74	0.30	0.61
三玻两腔双 Low-E	在线+在线	0.18, 0.18	0.92	0.54	0.57

中空 (氩气) 6Low-E(2#)+16Ar+ 6+16Ar+6Low-E(5#)	线				
	单银+单 银	0.103, 0.103	0.81	0.42	0.48
		0.072, 0.072	0.76	0.51	0.73
	双银+双 银	0.055, 0.055	0.74	0.32	0.42
	三银+单 银	0.021, 0.072	0.72	0.30	0.61
Tips: 1. 三玻两腔双 Low-E 中空玻璃的 K 值绝大多数在 1.0 以下。					

真空复合中空玻璃

玻璃结构	Low-E 类型	Low-E 辐射率 ε	传热系数 K W/(m ² ·k)	太阳能 总透射 比 g	可见光 透射比 T _v
真空复合中空 6+12A+6+0.15V+6	—	—	1.54	0.67	0.74
真空复合中空单 Low-E 6+12A+6Low-E(4#) +0.15V+6	在线	0.18	0.83	0.56	0.65
	单银	0.13	0.72	0.51	0.65
		0.103	0.65	0.45	0.59
		0.072	0.56	0.53	0.73
	双银	0.055	0.52	0.35	0.56
		0.054	0.52	0.28	0.43
		0.065	0.55	0.30	0.48
	三银	0.021	0.42	0.30	0.62
		0.023	0.42	0.30	0.60
		0.024	0.43	0.23	0.48
真空复合中空双 Low-E 6Low-E(2#)+12A	在线+在线	0.18, 0.18	0.733	0.49	0.57
	单银+单银	0.103,	0.577	0.34	0.48

+6Low-E (4#) +0.15V+6		0.103			
	双银+双银	0.055, 0.055	0.46	0.24	0.42
	三银+单银	0.072, 0.021	0.38	0.30	0.61
真空复合中空单 Low-E 6+12Ar+6Low-E (4#) +0.15V+6	在线	0.18	0.81	0.57	0.65
	单银	0.103	0.64	0.45	0.59
	双银	0.055	0.52	0.35	0.56
	三银	0.021	0.41	0.30	0.62
真空复合中空单 Low-E 6+16Ar+6Low-E (4#) +0.15V+6	在线	0.18	0.80	0.57	0.65
	单银	0.103	0.64	0.45	0.59
	双银	0.055	0.51	0.35	0.56
	三银	0.021	0.41	0.30	0.62

Tips: 1. 真空复合中空玻璃, 在没有 Low-E 玻璃时, K 值较大, 因此, 建议至少采用一片 Low-E 玻璃; 2. 真空复合中空玻璃, 增加中空腔体厚度, 对 K 值改善不大。

[标准篇]建筑节能规范对玻璃特性参数有哪些规定？

作者：许海凤 “建筑光学”公众号 2018.1.12 已发布

很高兴本文作为 2018 年第一期原创文章与广大读者见面，本期主要从标准的角度来汇总了我国的建筑节能规范中对玻璃特性参数提出了哪些要求？本文所讨论的玻璃特性参数，主要指可以通过光学检测技术来表征的玻璃特性参数。

一、相关标准

主要相关标准如下：

(1) 已发布和实施的标准：

GB 15763.2-2005《建筑用安全玻璃 第 2 部分：钢化玻璃》
GB 50176-2016 民用建筑热工设计规范
GB 50189-2005 公共建筑节能设计标准
GB/T 2680 建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定
GB/T 11976-2015 建筑外窗采光性能分级及检测方法
GB/T 18091-2015 玻璃幕墙光热性能
GB/T 18915.1-2013 镀膜玻璃 第 1 部分：阳光控制镀膜玻璃
GB/T 21086-2007 建筑幕墙
JC/T 2304-2015 建筑用保温隔热玻璃技术条件
JGJ 26-2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准
JGJ 75-2012 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准
JGJ 113-2015 建筑玻璃应用技术规程
JGJ 134-2010 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准
JGJ/T 324-2014 建筑幕墙工程检测方法标准
JG/T454-2014 建筑门窗、幕墙中空玻璃性能现场检测方法标准
JG/T 455-2014 建筑门窗幕墙用钢化玻璃

(2) 已报批尚未发布实施的新标准：

《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（报批稿）
《建筑玻璃颜色及色差的测量方法》（报批稿）
《平板玻璃应力检测方法》（报批稿）
《被动房透明部分用玻璃》（报批稿）

二、标准中对玻璃特性参数的具体要求

(1) 传热系数 K

表 1 传热系数 K

标准名称及标准号	章节号	传热系数 K
《玻璃幕墙光热性能》	附录 A	表 A.1 常见幕墙玻璃的性能参数，表

GB/T 18091-2015		格略
《公共建筑节能设计标准》GB-50189-2005	3.3.1	气候区不同，体型系数不同，窗墙比面积不同，传热系数 K 要求不同，详见该标准。
《民用建筑热工设计规范》GB 50176-2016	5.3.1	气候区不同，传热系数 K 要求不同。
《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26-2010	4.2	楼层数不同，围护结构位置不同，传热系数 K 要求不同。
《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 134-2010	4.0.5	体型系数不同，窗墙比面积不同，传热系数 K 要求不同。
《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ 75-2012	4.0.8	窗墙比不同，要求不同。
《建筑用保温隔热玻璃技术条件》JC/T 2304-2015	5.2 表 1	气候区不同，传热系数 K 要求不同。
《被动房透明部分用玻璃》（报批稿）	4.2.5	严寒地区：K 小于等于 0.7； 寒冷地区：K 小于等于 0.8； 夏热冬冷地区：K 小于等于 1.0； 夏热冬暖地区：K 小于等于 1.2； 温和地区：K 小于等于 1.5。

(2) 太阳能总透射比 g 或遮阳系数 SC

表 2 太阳能总透射比 g 或遮阳系数 SC

标准名称及标准号	章节号	太阳能总透射比 g 或遮阳系数 SC
《玻璃幕墙光热性能》GB/T 18091-2015	5.2.1	g 值要求如下：严寒地区 ≤ 0.75 ，寒冷地区 ≤ 0.45 ，夏热冬冷地区 ≤ 0.40 ，温和地带 ≤ 0.35 ，夏热冬暖地区 ≤ 0.30 。
	附录 A	表 A.1 常见幕墙玻璃的性能参数，表格略
《公共建筑节能设计标准》GB-50189-2005	3.3.1	见该标准中表 2。
《民用建筑热工设计规范》GB 50176-2016	5.3.1	严寒地区、寒冷 A 区、温和地区门窗、透光幕墙、采光顶的冬季综合遮阳系数不宜小于 0.37。
	6.3.1	不同地区，不同朝向，要求不同，详见该

		标准表 6.3.1。
《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》 JGJ 26-2010	4.2	窗墙比不同，楼层不同，朝向不同，SC 值要求不同。
《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》 JGJ 134-2010	4.0.5	体型系数不同，窗墙比不同，朝向不同，SC 值要求不同。
《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》 JGJ 75-2012	4.0.8	窗墙比不同，综合遮阳系数要求不同。
《被动房透明部分用玻璃》（报批稿）	4.2.5	不同气候区，g 值要求不同。

(3) 太阳红外热能总透射比 g_{IR}

表 3 太阳红外热能总透射比 g_{IR}

标准名称及标准号	章节号	太阳红外热能总透射比 g_{IR}
《被动房透明部分用玻璃》 （报批稿）	4.2.5	气候区不同，要求不同。
《建筑用保温隔热玻璃技术条件》JC/T 2304-2015	5.2 表 1	隔热型 GR： GR1: g_{IR} 小于等于 0.4； GR2: g_{IR} 小于等于 0.2； GR3: g_{IR} 小于等于 0.05。 隔热保温型 GB： GB1: g_{IR} 小于等于 0.4； GB2: g_{IR} 小于等于 0.2； GB3: g_{IR} 小于等于 0.05。

(4) 可见光反射比

表 4 可见光反射比

标准名称及标准号	章节号	可见光反射比
《玻璃幕墙光热性能》 GB/T 18091-2015	4.3	玻璃幕墙应采用可见光反射比不大于 0.30 的玻璃。
	4.4	在城市快速路、主干道、立交桥、高架桥两侧的建筑物 20m 以下及一般路段 10m 以下的玻璃幕墙，应采用可见光反射比不大于 0.16 的玻璃。
	4.5	在 T 形路口正对直线路段处设置玻璃幕墙时，应采用可见光反射比不

		大于 0.16 的玻璃。
《建筑幕墙》 GB/T 21086-2007	6.2.1	幕墙玻璃的反射比不应大于 0.3。

(5) 颜色相关

表 5 颜色相关

标准名称及标准号	章节号	颜色相关参数
《玻璃幕墙光热性能》 GB/T 18091-2015	5.2.2	同一玻璃产品的反射色差 ΔE 应不大于 3CIELAB 的色差单位。
	5.2.3	颜色透射指数应按表 3 进行分级，有辨色要求的幕墙的颜色透射指数 R_a^T 应不低于 80。
《建筑外窗采光性能分级及检测方法》 GB/T 11976-2015	4.3	建筑外窗的颜色透射指数（ R_a ）应按表 2 进行分级，详细内容略。
《建筑幕墙》 GB/T 21086-2007	5.1.8.1	有辨色要求的幕墙，其颜色透射指数不宜低于 R_a80 。
《镀膜玻璃 第 2 部分：低辐射镀膜玻璃》 GB/T18915.2-2013	5.5	低辐射镀膜玻璃的颜色均匀性，以 CIELAB 均匀色空间的色差 ΔE_{ab}^* 来表示。其色差应不大于 2.5。

(6) 钢化玻璃表面应力及碎片数

表 6 钢化玻璃表面应力及碎片数

标准名称及标准号	章节号	表面应力或碎片数
《建筑用安全玻璃 第 2 部分：钢化玻璃》 GB 15763.2-2005	5.8	钢化玻璃的表面应力不应小于 90MPa。
	5.6	厚度不同，碎片数要求不同其中 4-12mm 平板玻璃，最少碎片数 40/片。
《建筑门窗幕墙用钢化玻璃》JG/T 455-2014	4.10	钢化玻璃的表面应力不应小于 90MPa，且表面应力最大值和表面应力最小值之差不应超过 15MPa。
	4.8.1	4~12mm 的平面钢化玻璃，最少碎片数 40/片，4~19mm 的平面钢化玻璃，最多碎片数 90/片。

三、玻璃特性参数的检测方法标准

本小节简要介绍建筑玻璃主要特性参数的检测方法标准。

表 7 玻璃性能参数检测或计算方法标准列表

性能参数	检测或计算方法标准	备注
传热系数 K	《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（报批稿）	适用于节能玻璃现场检测
	《中空玻璃稳态 U 值(传热系数)的计算及测定》GB/T 22476	适用于实验室检测
	《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》JGJ 151-2008	计算方法
	《建筑玻璃应用技术规程》JGJ 113-2015	计算方法
可见光透射比、反射比	《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》GB/T 2680	
	《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（报批稿）	适用于节能玻璃现场检测
太阳能总透射比、遮阳系数、太阳红外热能总透射比	《建筑玻璃 可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定》GB/T 2680	
	《建筑用节能玻璃光学及热工参数现场检测技术规范》（报批稿）	适用于节能玻璃现场检测
颜色相关	《彩色建筑材料色度测量方法》GB/T 11942	
	《镀膜玻璃 第 1 部分：阳光控制镀膜玻璃》GB/T18915.1-2013	
	《建筑玻璃颜色及色差的测量方法》（报批稿）	
钢化玻璃表面应力	《玻璃应力测试方法》GB 18144-2008	钢化玻璃适用
原片平板玻璃应力	《平板玻璃应力检测方法》（报批稿）	原片平板玻璃适用
惰性气体含量	《建筑门窗、幕墙中空玻璃性能现场检测方法标准》JG/T 454-2014	适用于建筑门窗、幕墙用中空玻璃，无损检测
	《建筑幕墙工程检测方法标准》JGJ/ T 324-2014	适用于建筑幕墙用中空玻璃，无损检测

浅谈平板玻璃原片的残余应力

作者：吴筱 “建筑光学” 公众号 2017.8.16 已发布

提前划重点

- 平板玻璃原片的残余应力分为两类：板面应力和板厚应力
- 表面应力 $\neq$ 板面应力
- 经预应力处理的玻璃比退火玻璃强度更高

一、引言

众所周知，玻璃导热性差，且有一定的热膨胀系数。在退火过程中，不论是板厚方向还是板面方向，只要玻璃中有温度梯度存在，就会产生残余应力。残余应力分布是衡量平板玻璃原片质量的重要指标之一。今天我们就来聊聊平板玻璃原片的残余应力。

二、残余应力的危害

- 1) 玻璃带边部发生翘曲（荷叶边）或横向弯曲，或纵向扭偏，甚至造成破裂、断板，会严重影响玻璃质量。



玻璃板破裂（视频）

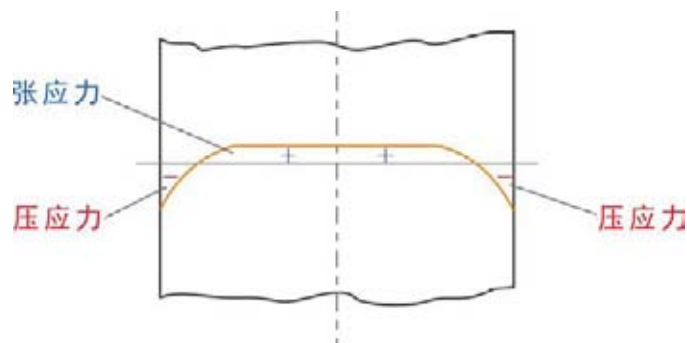
- 2) 残余应力分布不均会引起玻璃横切、纵切困难，玻璃掰断、掰边不直等问题。
- 3) 在后续深加工过程中，会出现玻璃不沿刀口掰断、裁切口坡口、钢化炉内炸裂等问题。

三、残余应力浅析

平板玻璃原片的残余应力按产生原因分为板面应力和板厚应力。

1) 板面应力

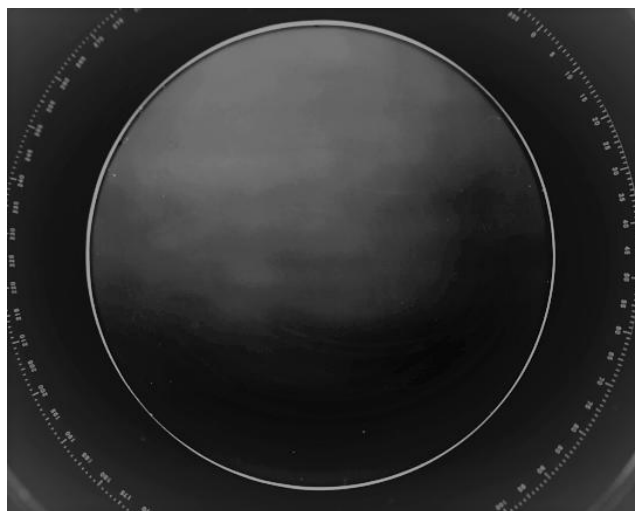
板面应力也称为平面应力，是在玻璃板面不同区域之间存在的永久张应力或压应力，是由退火窑横向温度不均引起的，应力方向与玻璃拉引方向一致。



玻璃板面应力分布示意图

玻璃带掰断去边之后，板面应力大部分被释放，对玻璃进一步加工影响很小。

板面应力一般通过光学原理测量，通过检测规定板面范围内的应力双折射光程差从而计算出应力值和应力分布。可以用基于数字图像处理技术的旋转偏光法对板面应力进行测试，测试图像如下。



板面应力测试图像

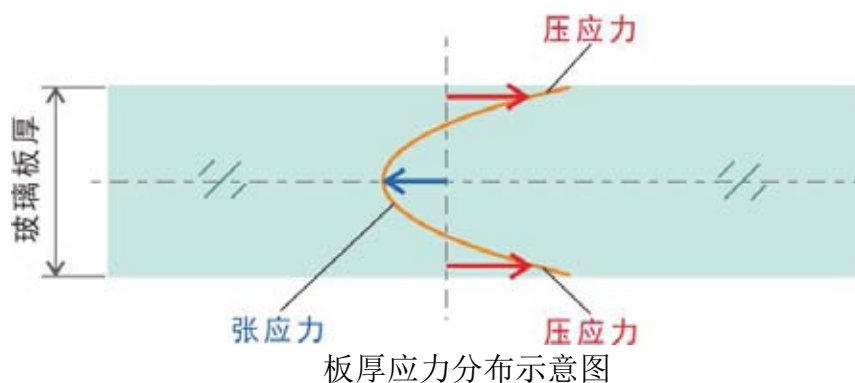
Tips: 板面应力与表面应力一样吗？

我们通常很关注钢化玻璃的表面应力，国家标准也对钢化玻璃、半钢化玻璃的表面应力作了详细规定。表面应力是指钢化后玻璃表面形成的压应力。

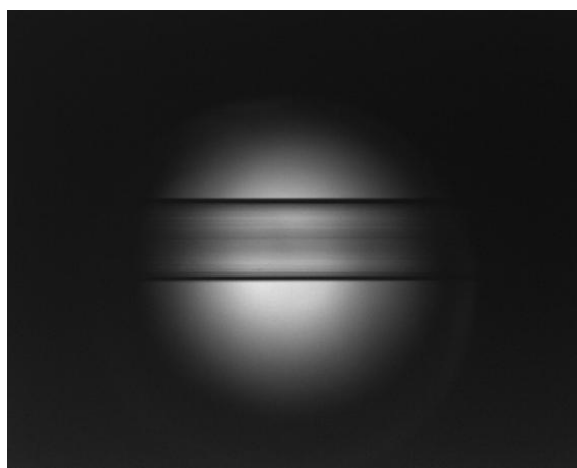
板面应力是玻璃板不同区域间的张应力或压应力，是将玻璃当作二维平面时存在的应力，并非只存在于玻璃表面。

2) 板厚应力

板厚应力也称为端面应力，是由玻璃表面与板芯在冷却时所产生的温差引起的，是在玻璃板厚方向分布的永久应力，靠近玻璃两表面处为近似相等的压应力，在板芯区域为张应力。



与板面应力相同，板厚应力的检测原理也是通过测量应力双折射来衡量应力的。测量玻璃沿板厚方向上多点的双折射光程差，从而计算出对应的应力值和板厚方向的应力分布。可以采用基于数字图像处理技术的简式偏光法测试玻璃的板厚应力，目前只能裁切成玻璃条进行测试，测试图像如下。



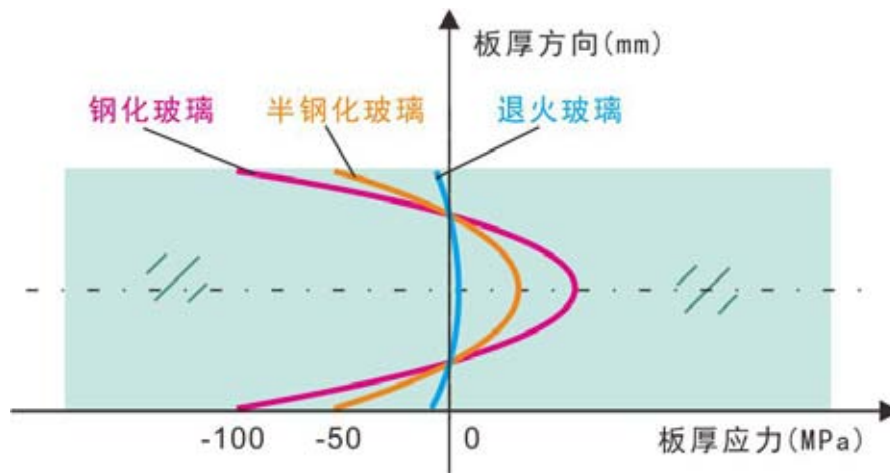
板厚应力测试图像

四、玻璃为什么要钢化？

虽说平板玻璃的残余应力有一定危害，但科学地运用应力可以制造出强度远高于普通平板玻璃的产品，如对玻璃进行热增强处理后产生预应力的钢化玻璃。

玻璃是抗压强而抗拉弱的脆性材料，当受到超过其抗张强度的张应力作用时就会破碎，而在实际应用中玻璃经常受到弯曲、拉伸和冲击。玻璃经预应力处理后，表面会产生一定的压应力。当外力作用于预应力玻璃时，在玻璃表面产生的张应力需要先克服玻璃自身的表面压应力，再超出玻璃的抗张强度才能够造成破坏。所以对玻璃进行预应力处理大大提高了玻璃的抗张强度和抗冲击能力。

钢化玻璃的抗冲击能力是退火玻璃的 3~5 倍，半钢化玻璃的抗冲击能力是退火玻璃的 2~3 倍。



钢化玻璃与退火玻璃的板厚应力分布示意图

残余应力分布是衡量平板玻璃原片质量的重要指标之一，平板玻璃原片中的残余应力不均会降低成品率，影响玻璃进行深加工。

通过科学的方法控制残余应力将提高平板玻璃原片质量、化解过剩产能，是十分必要和迫切的。

参考文献：

[1]陈正树. 浮法玻璃[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 1997:261, 267.

浅谈室内采光

作者：侯佳音 “建筑光学” 公众号 2017.12.7 已发布

在现代社会中，人们对室内环境品质要求越来越高，提高室内空间环境的技术性和艺术性，是衡量现代生活质量的重要标志。光环境对人的生理和心理会产生极其深远的影响，它是影响人类行为的关键因素。

现代室内设计中光环境分为自然采光和人工照明两种。本期我们主要介绍自然采光。

一、自然采光

人类在长期进化过程中，眼睛早已习惯于自然光，人眼在自然光下比在人工光下具有更高的视觉功效。并且自然光对人的心理也有很大影响，当阳光充足、天气晴朗的时候，人们会感觉心情舒畅，精神愉悦。反之，如果人们长期处于一个没有自然光的室内环境中，则会有郁闷、压抑之感。

最大限度地利用自然采光，不仅对人们的健康有着重大意义，还可以节约照明用电，降低能耗，对我国实现可持续发展战略具有重要意义，同时具有巨大的经济效益、环境效益和社会效益。

室内常用的自然采光方式按照采光位置可分为侧窗采光和顶部采光。

① 侧窗采光：在房间的一侧或两侧墙上开的窗洞口，是最常见的采光方式。侧窗由于构造简单，施工、清洁、维护方便，造价低廉，光线具有强烈的方向性，利于通风，可向外眺望，扩大视野，故使用很普遍。但缺点是受窗外状况的影响，有时不能充分获得光线，且由于室内位置关系的影响导致光线分布不均匀。



侧窗采光

② 顶部采光：在建筑顶部设置采光口的形式。顶部采光的优势在于可以最大限度地利用不同高度、不同方位的太阳光，有利于获得较为充足与均匀的室外光线，几乎不受周边环境的影响。顶部采光也存在一定的缺点，直射光线会产生强烈的眩光和辐射热，影响室内环境，且施工、清洁、维护困难，通风不利。采光天井是很好亲近阳光的方案，但对于楼房来说有条件做顶部采光的房间很少。



顶部采光



武汉汉街万达广场采光顶

以上采光方式均为门窗直接采光，目前新兴了几种以光学形式传输太阳直射光的自然采光技术：

① 光导管采光：导光管采光系统（Tubular Daylighting System），是用导光管将太阳集光器收集的光线传送到室内需要采光的地方。由采光系统、导光系统和漫射系统组成。通过采光罩将自然光进行收集捕捉，由导光管进行自然光传输，通过漫射器将自然光洒向室内。导光装置通常采用铝材制作而成，具有较强反射作用；漫射装置采用菲涅尔透镜技术，使光线均匀、柔和地漫射到室内。这种方式同样也受条件限制，若传输距离过长，光能损失变大，因此楼房的地下部位很难实施。



光导管结构示意图



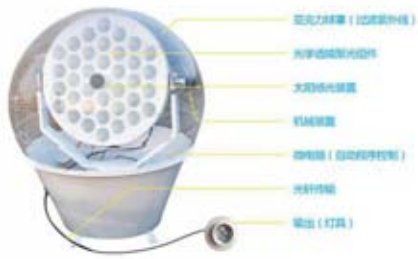
广州南站光导照明室外集光器



广州南站光导照明室内效果

② 光导纤维采光：光导纤维（简称光纤）是利用光的全反射特性，使光在闭合的纤维中传导。通过室外的集光器采集光线，然后由光导纤维传送到室内，最后由室内的发光体将光线均匀地照射在室内的各个角落。与光导管类似，光导纤维由聚光装置、导光装置和散射装置组成，但是光导纤维的导光装置为光纤。

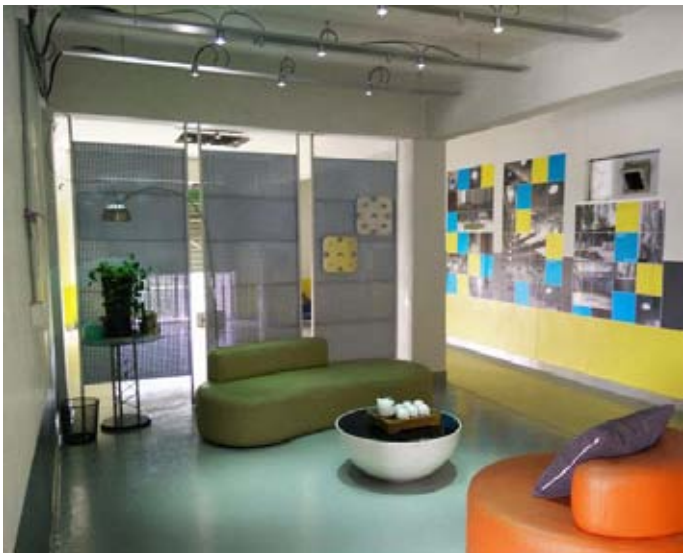
优质的光导纤维能将光线传输数十米的距离，但这项技术问世二十多年以来在工程上应用较少。



光导纤维结构示意图



光导纤维集光器安装示意



光导纤维采光室内效果

二、人工照明

由于自然采光受季节、昼夜地理位置和气候变化的影响很大，很多情况下，仅靠自然光不能达到应有的照明标准，并且夜间无法利用自然光。因此，需要人

工照明进行补充。人工照明是夜间的主要光源，同时又是白天室内光线不足时的重要补充。自从 19 世纪爱迪生发明白炽灯后，使建筑采光和照明技术的理论和实践由原始的火光照明时代进入到电光源时代。

常见的照明光源有白炽灯、荧光灯和发光二极管等。

① 白炽灯

白炽灯是最早出现的热辐射光源，是利用电流加热金属（钨丝）至白炽状态而发光。白炽灯的寿命很短，平均寿命约为 1000h，并且平均光效较低，仅有百分之十几的电能转化成光能，其他都以热辐射的形式损失掉。在工作过程中，钨丝渐渐蒸发，并在灯泡的内表面上沉积，引起较大的光衰。



白炽灯

我们可以通过向白炽灯的填充气中添加卤素（碘和溴）来降低钨丝的蒸发率，从而提高白炽灯的发光效率和寿命。卤素与蒸发的钨结合形成卤化钨，扩散到灯丝，从而减少蒸发的作用，并且提供了更高的工作温度，这种灯称作卤钨灯，也叫卤素灯。卤钨灯与白炽灯相比，具有显色性好、寿命长、光效高的优点。但与 LED 相比差距还很大。



卤钨灯灯泡



卤钨灯射灯



卤钨灯装在传统白炽灯玻壳内

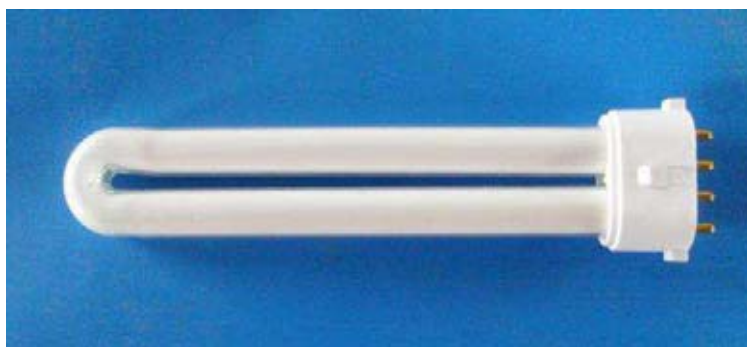
② 荧光灯

荧光灯俗称日光灯，属于气体放电灯，利用电流通过离化气体而发光。荧光灯的灯管内壁涂有荧光物质，管内充有稀薄的氩气和少量的汞蒸气。灯管两端各有两个电极，通电后加热灯丝，达到一定温度就发射电子，电子在电场作用下逐渐达到高速轰击汞原子，使其电离而产生紫外线。紫外线射到壁管上的荧光物质，激发出可见光。



荧光灯

因荧光灯的灯管长度越长，发光效率越高；且管径越小，发光效率越高。所以细管荧光灯不能做太长，常常做成 U 形、H 形、螺旋形等，以便增加荧光灯的光效和寿命。这些类型的荧光灯统称为紧凑型荧光灯，又名节能灯（但目前更节能的已经是 LED 灯了）。



U 形荧光灯



H 形荧光灯



螺旋形荧光灯

Tips:

我们常常见到荧光灯的包装上面写着 T8，T5 等是什么意思呢？

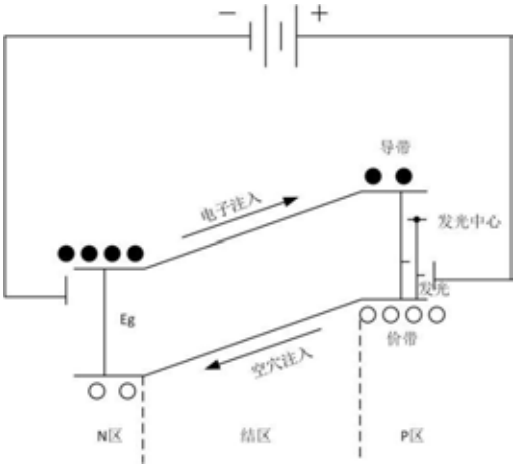
T 是 Tube（管子）的简写，代表荧光灯的灯管直径。1T=1/8 英寸=3.175mm。

T12 是几十年前使用的最古老的日光灯管，外径 38mm，T8 是几十年前说的

“细管日光灯”，直径为 25mm，而 T4 和 T5 分别是近年来 13mm 和 16mm 的细管节能灯，目前市场还有供应。T10、T12 已经具有文物价值了，手里有的要注意收藏啊。

③ 发光二极管（LED）

发光二极管（Light Emitting Diode，简称 LED）是固体发光光源。利用固体半导体芯片作为发光材料，在正向电压下，电子由 N 区注入 P 区，空穴由 P 区注入 N 区。进入对方区域的少数载流子与一部分多数载流子复合而发光，如下图所示。



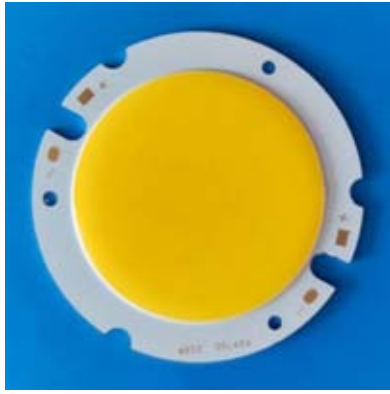
LED 发光原理示意图

LED 以其节能环保、寿命长、体积小、光效高等特点，在户外显示和照明领域得到了迅速发展和普及。目前已有 LED 产品发光效率高达 300lm/W，是卤素灯的十倍，显色指数也在逐年改善。



LED 发光效率的发展曲线

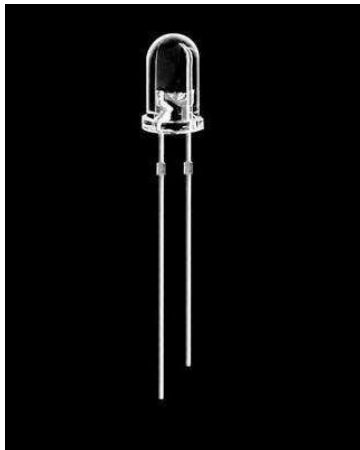
常见的 LED 按封装型式分类有 COB (Chip on Board 板上芯片封装式)、SMD (Surface Mounted Devices 贴片式)、LAMP (引脚式)、食人鱼式等。



COB 式



SMD 式



LAMP 式



食人鱼式

由这些 LED 灯珠构成的照明灯饰多种多样，如平板灯、射灯、吸顶灯等等。



LED 平板灯



LED 射灯

大家可能会觉得，LED 太现代了，没有了传统灯的感觉了，所以制造商为了照顾习惯于传统光源外观的人群提供了一些使用 LED 作光源，但是外观和传统光源一致的产品如球泡灯、LED 仿日光灯管灯、灯丝灯等等。并且在以怀旧主题风格的餐厅、咖啡厅等场所，使用灯丝灯能够营造室内的怀旧气氛。



LED 球泡



LED 仿日光灯管灯



LED 灯丝灯



LED 灯丝灯应用

除了上述介绍的光源外，还有主要用在室外的照明光源，如高压汞灯、高压钠灯、金卤灯、无极灯、氙灯等等，但随着 LED 照明光源的技术发展和广泛使用，其他照明光源的应用面越来越窄，LED 现已成为照明光源的主角，除特殊的应用和场合外，LED 即将全面取代传统照明光源。

注：文中图片均来源于网络

参考文献：

- [1] 焦杨, 孙勇. 光环境技术与实例[M]. 北京：化学工业出版社
- [2] 房海明. LED 照明设计与案例精选[M]. 北京：北京航空航天大学出版社

采光照明中有哪些光度学基本量？

作者：吴筱 “建筑光学”公众号 2017.12.29 已发布

在采光照明中大家经常提到亮度、照度和流明等用语，那么它们的准确定义是什么呢？使用这些基本量要注意哪些常犯的错误呢？请细读本文，很多内容在书上和网上是没有的，有些内容在网上的解释也是不准确的，甚至是错误的。

一、光度学中的基本量

1.1 辐射通量

辐射通量是指辐射体在单位时间内辐射出的总能量，单位是瓦（W），可以简称为“辐通量”。

实际上，辐射通量就是辐射体的辐射功率。例如一个功率 60W 的灯泡，其辐射通量就是 60W。

1.2 光通量

光通量是表示可见光对人眼的视觉刺激程度的量，单位是流明（lm）。

光通量实际上是辐通量的一部分，是辐射能中能引起人眼光刺激的那一部分辐通量。公式表示为

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_e V(\lambda) d\lambda$$

式中，

Φ_e ——辐射通量；

K_m ——最大光视效能， $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。

对于灯来说，光通量是其向四周发出的对人眼视觉刺激程度的总量，是对其发光能力的描述。

1.3 发光效率

光源发出的总光通量与总辐射能通量之比，单位为流明/瓦（ $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ），简称光效。

白炽灯的发光效率约为 $14 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ，石英卤钨灯的发光效率约为 $30 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ，荧光灯的发光效率约为 $50 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。LED 的发光效率达到 $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 以上。

1.4 发光强度

发光强度是光度学中最基本的一个量。发光强度用来描述光源在某一指定方向上发出光通量能力的大小。用某一方向上单位立体角内所辐射的光通量的大小表示，单位是坎德拉（cd）。公式表示为

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

式中， $d\Omega$ 是立体角元。

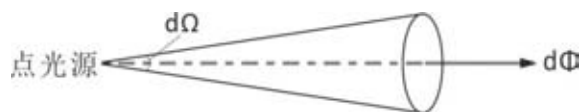


图 1

对于灯来说，其向四周发出的光通量一般不是均匀的，所以不能简单地根据光通量判断灯的亮暗。例如，手电筒的光通量并不很大，但其在特定方向上具有很强的照明能力。

1.5 光出射度

光出射度表示发光表面单位面积发出的光通量，单位是勒克斯（lx）。发光体上任意一点的光出射度表示为

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

式中， dS 是发光表面的单位面积。

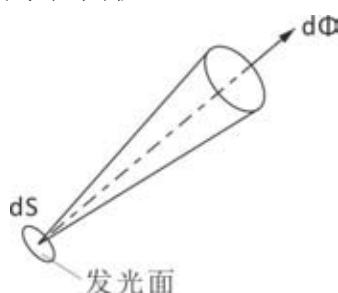


图 2

在发光表面均匀发光的情况下，公式表示为

$$M = \frac{\Phi}{S}$$

光出射度一般用来描述光源的，也可以描述被照明材料又反射出射的情况。

1.6 光照度

光照度表示被照明的表面单位面积上所接收的光通量，单位是勒克斯（lx），简称照度。被照明表面上任意一点的照度表示为

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

式中， dS 是受照面的单位面积。

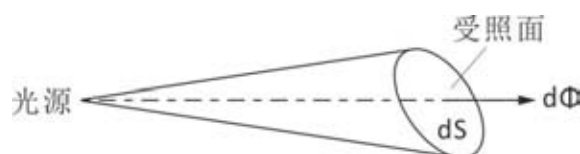


图 3

在均匀照明情况下，公式表示为

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

当用灯对地面照明时，地面每单位面积受到的光通量即该处的照度，与地面黑或白没有关系。

1.7 光亮度

光亮度表示单位面积上的发光强度，单位为坎德拉每平方米（cd/m²），简称亮度。体现为投影到某一方向的单位面积、单位立体角内的光通量的大小，公式表示为

$$L = \frac{I}{dS_n} = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha}$$

式中， dS_n 是垂直于该方向的投影面积， dS 是发光面任意一点周围的微小面积， I 是某一方向的发光强度， α 是发光面与发光方向的夹角。

根据发光强度与光通量的关系，可将光亮度公式变形如下

$$L = \frac{I}{dS_n} = \frac{d\Phi}{dS \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega}$$

可见，光亮度表示了发光面上单位投影面积在单位立体角内所发出的光通量。

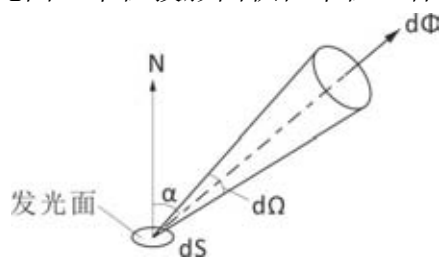


图 4

我们观察灯时，是否感觉刺眼就是灯的光亮度在起作用。有些灯功率不大、发光面较小，但亮度较高。有些灯功率很大、面积也较大，亮度可能会较低，但照明效果可能会很好。亮度也可以用于对被照面的描述，感觉房间亮堂，实际房间内墙壁、家具等被照后反射的亮度高，既与被照面的照度有关，又与被照材料的反射比有关。

二、使用光度学基本量时应该注意的问题

2.1 “光”和“可见光”的明确意思是什么？

“光”的广义含义是指电磁辐射中的一部分，包括紫外辐射、可见光辐射和红外辐射。“光”的狭义含义是指人眼可见的电磁辐射，即“可见光”。所以根据语境，光指的就是可见光。

2.2 “光照度”和“照度”有什么区别？

“照度”一般即指光照度，也就是可见光照度，但术语里不用可见光照度，严谨的说法为“光照度”，可简化为“照度”。

当指紫外辐射、红外辐射等人眼看不见的“照度”时，应采用“辐照度”这一术语，并且要说明波段，例如紫外辐照度、近红外辐照度等等。

同样，“光亮度”简称为“亮度”。但“光强度”通常简称为“光强”，而“光通量”一般不简化为“通量”。

2.3 要用对场合和量纲

光度学中的基本量不是经常使用，不能靠字面意思去想象，一定要理解其物理含义，并合理使用合适的基本量 and 对应量纲。

三、用什么参数来科学地描述照明灯具？

大家在描述照明灯具的时候经常会说这个灯“多少瓦”、“很亮”、“灯光

很强”、“是多少照度的”等等，那么这些说法科学吗？下面会一一解释。

3.1 照明灯具不能只用功率来衡量

照明灯具都标有额定功率，一般指的是“消耗功率”。对于早期的白炽灯，用功率来衡量灯的发光能力没有问题，在发光效率一定的情况下，功率越大发出的光通量就越大。

如今，照明灯 LED 已经代替白炽灯成为了主流，不同的灯芯光效不同，不同的灯具结构也有不同的灯具效率。所以，应该用“光通量”来描述一个灯具的总发光能力。

3.2 光通量都是 2000lm 的球泡和射灯，为什么照明效果不同？

灯具的照明效果不仅要考虑总光通量，还要考虑这些光通量“照”到了哪个方向。

球泡发出的光“照”向除了灯尾外的各个方向。射灯则按设计要求集中“照”向了聚光方向，在特定方向所辐射的光通量很大，也就是说在聚光方向的光强度较大，所照之处的光照度就大，照到服装、墙画等展示物品上能产生较高的亮度，从而起到突出展示重点、渲染主题的作用。

“光强度”或光强度分布（业内称配光曲线）是灯具的一个重要指标。

3.3 光通量都是 2000lm 平板灯和球泡，亮度相同吗？

亮度（光亮度）表示发光面单位面积上的发光强度。

平板灯的发光面积大，球泡的发光面积小，并且都属于漫射照明。根据亮度的定义，自然是面积大的平板灯亮度低而球泡的亮度高。

但是把房间照“亮”并不完全由灯的亮度决定，而是主要取决于灯具的光通量。如果想得到房间被均匀照“亮”的舒适照明效果，应采用亮度低、光通量大、光强分布均匀的灯具。灯的亮度过高会刺眼，所以比较小的灯具一般都要加遮光结构，防止人眼直射产生眩光。

3.4 这个房间很亮，是什么准确含义？

当我们说一个房间很亮，通常是说房间得到较好的照明，是视野内的环境较亮，而不是说灯具很亮，但由于效果主要是灯带来的，所以不严格的说法是这个灯很亮，但并不是说灯的实际亮度很高。

3.5 相同的灯照明同样面积时，照度和亮度相同吗？

同样的灯照明一定面积，忽略环境条件的影响，不管受照面是白色还是黑色，照度都是相同的，但是被照面的亮度相差很大。照度是单位被照面积得到的光通量，而亮度是和灯发出的光通量多少有关系的，黑色的受照面发出的光通量少，自然亮度就会低。所以灯光照明效果不仅要求所照明位置的照度要满足要求，顶棚、墙体、地面和家具等也要有合适的颜色和反射特性。

3.6 为什么不用照度作为灯具参数？

光照度不仅与灯的光通量和受照面的面积有关，还与光通量的入射角及灯到被照面的距离等多种因素有关，所以不能简单地用照度来描述灯具特性。

但由于大家对照度比较熟悉，为了方便大家选择灯具，有的厂家会标出在距离灯多远的地方产生多大的照度。例如，台灯在距离桌面 0.5m 处有 300lx 的照度，距离地面 2.5m 的吊灯在灯下地面上能形成 200lx 的照度，但这并不完全科学，实际照度还与受照环境的空间大小、顶棚墙体地面反光等因素有关。

3.6 怎样完整地描述灯具的特性呢？

灯具合理的描述应该包括消耗功率、总光通量、光强度分布、色温、显色指数等参数。消耗功率和总光通量一方面体现了发光能力，但不能表明灯的光效率；光强度分布是满足照明光分布效果或照明效率的参数；而色温和显色指数与心理状态和心理舒适度相关的参数，显色指数也是对颜色辨识与正确复现的一个重要参数。对于特殊应用场合，如卧室、医院、体育场馆还应对灯具的亮度和眩光提出要求。

最后，灯不能仅仅用瓦数来衡量发光能力，否则效率低耗电大的灯反而占便宜；房间亮度低也要看看房间的装饰是否太暗了；“这个灯是多少照度的？”这句话应该是“这个灯是多少流明的？”才更科学；合理表述灯的亮度，大部分情况下灯具的亮度低、光通量大才能达到舒适的照明效果。

希望本文能帮助您进一步了解照明相关概念，色温与显色指数请关注后续的建筑光学文章。

说明：本文为了简练通俗，文中的一些描述做了一定简化，忽略了照明中的一些次要因素，请专业人士包含，也欢迎提供修改意见。



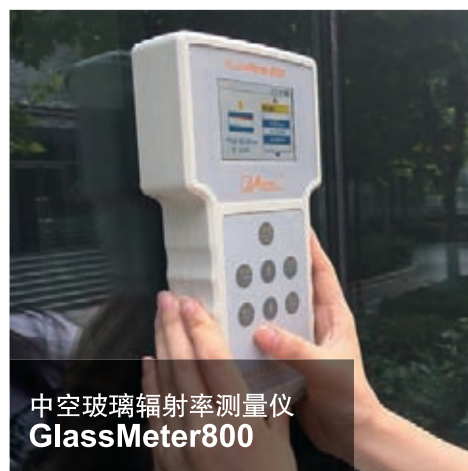
便携式节能玻璃现场综合测试系统
GlasSmart1000



便携式智能应力分析仪
GlasStress SCALP



手持宽光谱测色仪
GlassQ



中空玻璃辐射率测量仪
GlassMeter800

量化品质 尽显精彩

- 建筑节能玻璃生产过程光学性能检测与质量控制
- 建筑节能玻璃的成品光热性能检测技术与仪器
- 幕墙与门窗玻璃的现场光热参数检验技术与仪器
- 绿色建筑舒适度、节能性能检测与网络监测

近期参加展会排期

China Glass中国国际玻璃展	4.19-22	上海	W2-555
SNEC国际太阳能光伏展	5.28-30	上海	W2-901
德国杜塞尔多夫玻璃展	10.23-26	德国	
第十六届国际门窗幕墙展	10.31-11.3	北京	E2-415



关注奥博泰公众微信平台
获取最新优惠信息

北京奥博泰科技有限公司
Beijing Aoptek Scientific Co.,Ltd

地址：北京丰台科技园区外环西路26号院19号楼

电话：010-51122588 邮编：100070

邮箱：sales@aoptek.com 网址：www.aoptek.com



关注奥博泰公众微信平台, 获取最新资讯。



010-51122588

地址: 北京丰台科技园区外环西路 26 号院 19 号楼

邮编: 100070

邮箱: sales@aoptek.com

网址: www.aoptek.com