



具有隔热功能的

夹层玻璃中间膜的研究与使用

南京亚鼎光学有限公司



摘要 3

1. 三种 PVB 组合成型方法	3
2. 认识太阳辐照能量	6
3. 几种双白玻的夹层玻璃组合的计算和结果	8
3.1 白玻+吸热型中间膜+白玻	8
3.2 白玻+反射型中间膜+白玻	10
3.3 白玻+普通 PVB+在线 Low-E 白玻	11
3.4 白玻+吸热型中间膜+白玻与 Low-E 中空玻璃的组合	13
.....	14
4. 研究结果：纳米陶瓷夹层玻璃	15
5. 结论与展望	16
版权所有©南京亚鼎光学有限公司 WWW.AETINA.CN 引用本文，请注明出处。	17



摘要

随着材料与工艺技术的进步，以及对提高舒适性和节能减碳的追求，夹层玻璃制造企业越发关注具有阻隔太阳辐射热作用的中间膜，并且很多产品已悄然进入市场，行业的应用包括汽车前挡风玻璃、建筑夹层玻璃及中空（安全）玻璃等。本文就隔热 PVB 中间膜的光学性能进行分析和讨论，以推动隔热夹层玻璃的广泛使用、技术进步和产品升级。

前言：近年来，由于纳米分散技术、磁控溅镀技术的快速发展，通过对 PVB 夹层玻璃中间膜的生产过程中进行添加、加工和处理，使中间膜具有了光谱选择性，特别是对太阳近红外光谱段有较好的吸收或反射性能，使近红外透射比大幅降低，因此降低了太阳能总透射比 SHGC。

1. 三种 PVB 组合成型方法

第一种 是在聚乙烯醇缩丁醛增塑剂-plasticizer 中添加纳米金属氧化物吸热材料，通过调整纳米粒径和添加比例，使中间膜可吸收近红外谱热能，如图 1。

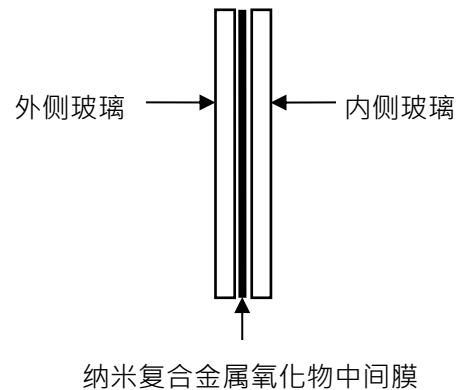


图 1、纳米陶瓷中间膜夹层玻璃

第二种（如图 2）是在两层 PVB 胶中夹有一片隔热膜，隔热膜是采用磁控溅镀工艺的金属反射膜，膜层对近红外线有较高的反射，优点是可以



反射大部分红外线热能，减少了膜层吸热后再向室内的传热，降低了太阳能总透射比 SHGC。该种 PVB 中间膜的主要缺点是可见光透射比低、反射比高，近红外线直接透射比高于吸收型膜，且价格高昂，其夹层玻璃的力学特性也为业界所存疑。

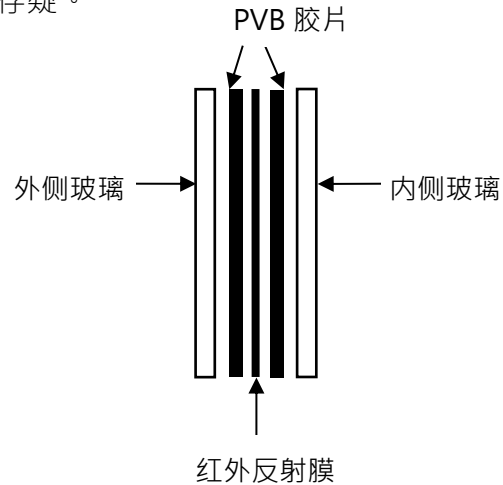


图 2、反射隔热中间膜夹层玻璃

第三种是采用遮阳型 Low-E 玻璃代替其中的一片白玻（图 3），用普通 PVB 胶片进行热压粘合（膜层在中间），利用遮阳型 Low-E 膜层对近红外线的反射特性实现对近红外的阻隔。

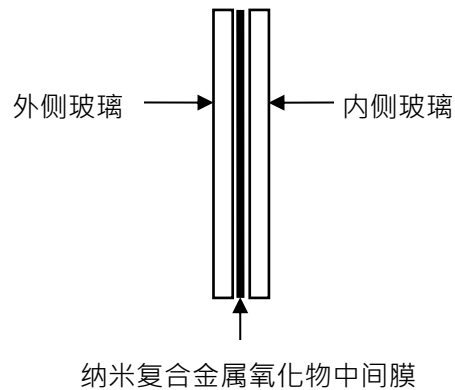


图 3、遮阳型 Low-E 中间膜夹层玻璃



由于近红外光谱紧邻可见光区，为保证较高的可见光透光率，在光谱交界波长的 780nm 处的带阻滤波斜率需尽可能陡峭（接近 90 度），该种 PVB 中间膜就需要离线溅镀双银或三银多层反射膜。由于这些膜层容易受到水汽侵蚀氧化，必须使用在干燥气体环境中，如制成中空或真空玻璃。单独用做夹层玻璃时，需将 Low-E 膜层与中间膜粘合。但这种组合同时带来三个问题，一是由于和中间膜粘结后，给热/换热系数远大于 Low-E 膜层的辐射换热，相当于 Low-E 膜层被短路，失去对传热系数 U 值的贡献。其二是多银 Low-E 膜层的力学特性（抗拉力和剪切力等）较差，降低了夹层玻璃的牢固性，其三是水汽侵入更容易使 Low-E 膜层氧化，并进一步降低夹层玻璃的力学和光学性能。

对第一种方案来说，在 PVB 中掺入纳米级复合金属氧化物多以对近红外热能的吸收为主，吸收的热能一部分又会经内侧玻璃传递到室内。

因此三种方案各有优缺点。本文希望就不同技术方案的光热计算给选择方案时做参考。

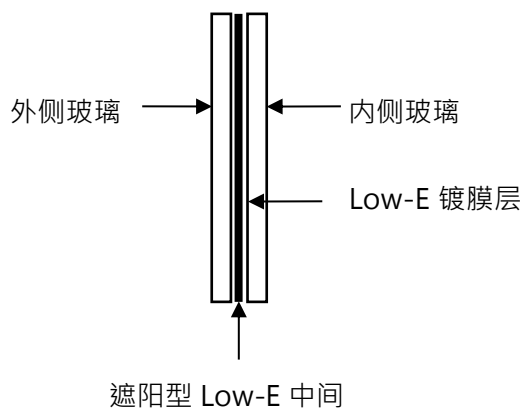


图 3、遮阳型 Low-E 中间膜夹层玻璃

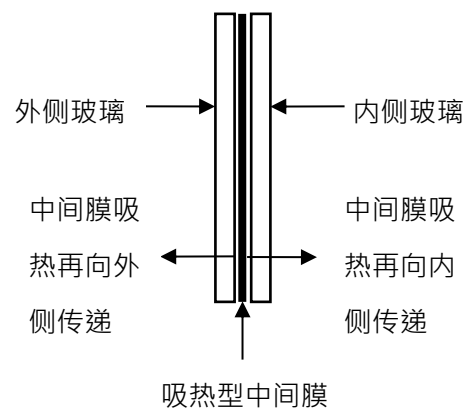


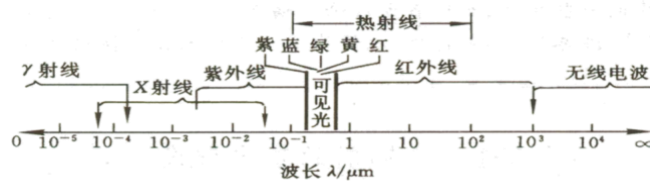
图 4、中间膜吸收太阳辐射热能再向两侧传递



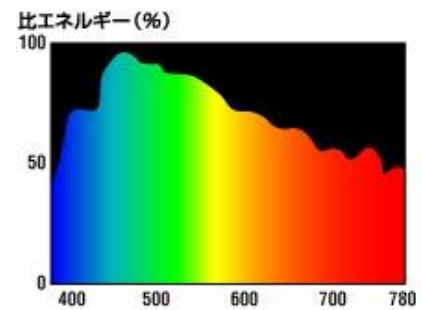
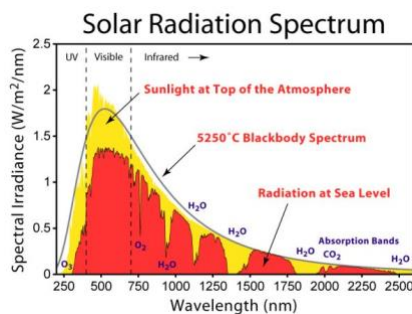
2. 认识太阳辐照能量

了解太阳辐射按的光谱能量分布，对通过的光谱滤波实现光学节能十分重要，例如红色谱的辐照度超过蓝色的两倍多，显然阻隔红色谱比阻隔蓝色谱对减少进入室内的总辐射量贡献要大得多。

大气层外界太阳辐射能量主要分布在波长为 $0.38\mu\text{m}\sim 0.78\mu\text{m}$ 的可见光区，和 $0.78\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ 的红外区，前者约占 50%，后者约 44%，紫外区的太阳辐射能很少，只占总量的 6%。在全部辐射能中，波长在 $0.15\sim 4\mu\text{m}$ 之间的占 99%以上。



太阳辐射通过大气后，其强度和光谱能量分布都发生变化到达地面的太阳辐射能量比大气上界小得多，在太阳光谱上能量分布在紫外光谱区很小，大约在 4%，在可见光谱区为 48%，红外光谱区为 48%。

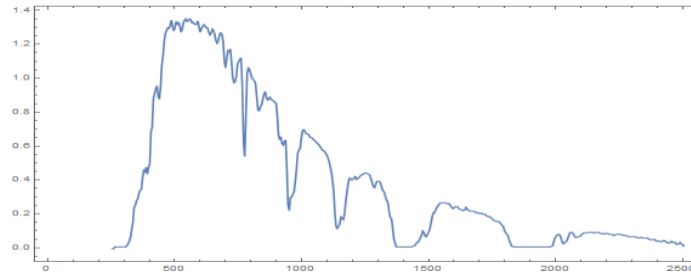


科学计算常用太阳照射角度偏离头顶 46.8° 的 AM1.5G 表示在地面上太阳光谱能量，其辐照度为 963.75 瓦/米^2 。室内的热受自然环境影响，包



括在 $0.295 \sim 2.5\mu\text{m}$ 波长区间的太阳直接辐照，以及在 $10\mu\text{m}$ 左右物体吸热再辐射的部分。

太阳辐射能量分布图



各波长辐照度

总辐照度	紫外	紫色	蓝色	绿色	黄色	橙色	红色	红外
1370.97	79.151	119.316	60.74	132.8	91.59	68.18	170.88	648.315

从太阳辐照能量分布看，太阳能量集中在可见光区和近红外区，而且在波长 $1.8\mu\text{m}$ 以上的部分太阳热能很少，大约仅占总能量 5%。因此针对太阳辐照热能设计的隔热产品基本阻隔区间的波长为 $0.78\text{-}2\mu\text{m}$ 。

因各地太阳辐射强度不同，为方便热工计算和制定产品标准，在计算由室内、外温差和太阳辐射引入的传热之和 RHG (Relative Heat Gain—相对增热) 时，一般会采用统一的太阳辐射得热因子 SHGF (Solar Heat Gain Factor)，其含义是当时当地、单位时间内透过 3mm 厚普通玻璃的太阳辐射能量，单位是 W/m^2 ，并用 S_c 和 SHGF 的乘积表示单位时间太阳辐射透过单位面积玻璃的热量及被玻璃吸收后向室内二次辐射的热量的总和，如在 ASHRAE 夏季标准条件下，SHGF 取值 $630\text{W}/\text{m}^2$ ；相对增热表达式为：



$$\text{RHG} = 14^{\circ}\text{F} \times \text{U}(\text{夏}) + 200 \times \text{Sc} \text{ (BTU/h-ft}^2\text{)} =$$

$$7.78^{\circ}\text{C} \times \text{U}(\text{夏}) + 630 \times \text{Sc} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

3. 几种双白玻的夹层玻璃组合的计算和结果

以下对各种组合的夹层玻璃吸热温升值、节能效果、遮阳比等给出一些计算和结果，特别是针对一些夹层玻璃制造企业和用户，对吸热型中间膜产品由于吸热导致玻璃温升过高，以至引起爆裂的认识误区和顾虑做澄清。采用的设定值取自一些典型产品的技术参数，并不针对所有产品。

3.1 白玻+吸热型中间膜+白玻

产品技术参数设置如下：

可见光直接透射比：	0.78
近红外直接透射比：	0.08
太阳光直接反射比 (300nm~2500nm)：	0.08
其它参数分别设定：	
室内侧换热系数 α_i ：	8.7W/m ² K
室外侧换热系数 α_e ：	23 W/m ² K
太阳总辐射量：	630 x 0.87 = 548W/m ²
太阳可见光、近红外各占 50%，紫外忽略	

可见光直接透射比 0.78，占太阳总辐射量的（简称占比）39%；近红外直接透射比为 0.08，占比 4%；太阳光直接反射比为 0.08，合计为：51%，其余为中间膜及玻璃吸收部分为 49%，为 268.5W/m²。



中间膜吸收的太阳辐射热向玻璃两侧传递（如图 4）。由于玻璃两侧面的温差相对于玻璃因吸热升温较小，因此在计算玻璃升温时忽略不计，设稳态下的玻璃二侧表面温度均为 T ，与室内侧温差为 ΔT_i ，与室外侧温差为 ΔT_e ，由于换热系数与温差不同，中间膜吸热再传递到两侧的热流密度也不同，向换热较大的室外侧面传递热量比换热较小的室内侧面要多。在热稳态下：

$$\alpha_i \Delta T_i + \alpha_e \Delta T_e = 268.5 \text{ W/m}^2$$

$$\Delta T_i = T - T_i ; \Delta T_e = T - T_e$$

其中： T_i 、 T_e 分别为室内、外温度

α_i 、 α_e 分别为室、内外换热系数

a. 当 $T_i = T_e$ ； $\Delta T_i = \Delta T_e = \Delta T$

$$\Delta T (8.7 + 23) = 268.5$$

$$\Delta T = 268.5 / 31.7 = 8.47^\circ\text{C}$$

b. 内侧环境温度 24°C ，外侧环境温度 32°C

$$\alpha_i \Delta T_i + \alpha_e \Delta T_e = 268.5 \text{ W/m}^2$$

$$8.7 (T - 24) + 23 (T - 32) = 268.5$$

$$T = 38.3^\circ\text{C}$$

- ◆ 当两侧环境温度相等时，稳态下玻璃吸热再传入内侧的热量为 74W/m^2 ，占总辐射能量的 13.5%：

玻璃升温. : 8.5°C

近红外透射比 : 0.35

SHGC : 0.56

$Sc (SHGC / 0.87)$: 0.65

光热比 : 1.38



- ◆ 当室内温度小于室外，如室内 24℃，室外 32℃时，玻璃与室内环境温度差变大，玻璃吸热再传热到内侧增大为 124W/m²，占总辐射能量：22.4%

玻璃表面温度：38.3℃

近红外透射比：52.8%

SHGC. : 0.65

Sc (SHGC/0.87) : 0.75

光热比. : 1.1

结论：采用双白玻组合的夹层玻璃对降低 U 值没有贡献。就吸热型夹层玻璃温度来看，内外侧环境温度相等时，玻璃表面温升为 8.5℃，在室内 24℃、室外 32℃情况下，玻璃表面温度为 38.3℃。

3.2 白玻+反射型中间膜+白玻

产品技术参数设置如下:	
可见光直接透射比：	0.60
近红外直接透射比：	0.10
可见光直接反射比:	0.20
近红外直接反射比：	0.75
其他参数按前述设定值	

反射型中间膜夹层玻璃可见光透射比 0.60；近红外透射比 0.10；近红外反射比为 0.75；可见光直接反射比 0.20；合计占比 82.5%。其余为中间膜及玻璃吸收部分 17.5%，为 96W/m²。内侧 24℃、外侧 32℃：

$$8.7 (T-24) + 23 (T-32) = 96$$

$$T = 1041 / 31.7 = 32.8℃$$



结论：采用双白玻组合的反射型夹层玻璃对降低 U 值没有贡献。以上计算得出，稳态时中间膜吸热再传入室内的热量为 $8.7 (32.8-24) = 77\text{W/m}^2$ ，占总辐射能量的 14%。

玻璃温度： 32.8°C

近红外透射比 0.38

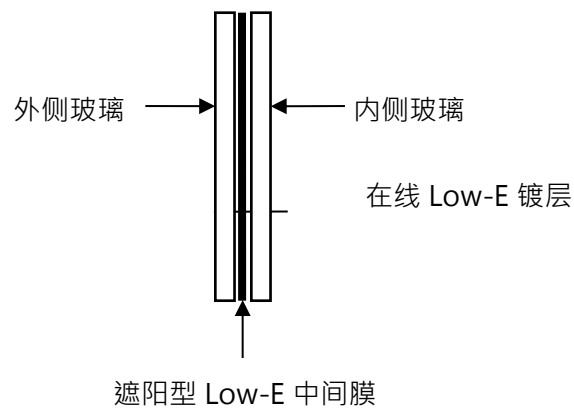
SHGC： 0.49

$Sc (SHGC/0.87) : 0.56$

光热比： 1.1

3.3 白玻+普通 PVB+在线 Low-E 白玻

该组合为一面玻璃采用普通白玻，另一面采用在线 Low-E 玻璃的夹层玻璃（图 5），在线 Low-E 膜面朝外，不与中间膜粘合。利用在线 Low-E 低辐射，以及膜层坚硬、牢固、可清洗、不发生氧化反应、可直接面对室内使用环境等稳定特性，进一步降低太阳辐射和室内外温差对室内的增温。图 5、采用遮阳型 Low-E 中间膜夹层玻璃



产品技术参数设置如下：

可见光直接透射比：	0.70
近红外直接透射比：	0.05
太阳光直接反射比（300nm~2500nm）：	0.08



采用在线 Low-E 玻璃旨在减小玻璃内侧换热系数，从而减少进入室内的太阳辐射与室内外温差对室内的增温。换热系数采用如下简化计算公式：

$$\alpha_i = 6.12 \times \varepsilon_i + 3.6$$

$$\alpha_e = 6.12 \times \varepsilon_e + 17.9$$

ε_i - 室内侧玻璃辐射率：在线 Low-E 取 0.2

ε_e - 室外侧玻璃辐射率：普通白玻取 0.84

按上式计算出：

室内侧玻璃给热/换热系数 $\alpha_i=4.8$

室外侧玻璃给热/换热系数 $\alpha_e=23$

按以上参数，太阳光直接透射及反射合计为 47%，其余 53%为中间膜及玻璃吸收部分，吸收太阳辐射 $299\text{W}/\text{m}^2$ 。

$$\alpha_i \Delta T_i + \alpha_e \Delta T_e = 299\text{W}/\text{m}^2$$

$$4.8 \Delta T_i + 23 \Delta T_e = 299\text{W}/\text{m}^2$$

$$\Delta T_i = T - T_i ;$$

$$\Delta T_e = T - T_e ;$$

其中： T_i 、 T_e 分别为室内、外温度

α_i 、 α_e 分别为室内、外换热系数

a. 当 $T_i = T_e$; $\Delta T_i = \Delta T_e = \Delta T$

$$\Delta T (4.8 + 23) = 290 ;$$

$$\Delta T = 10.7^\circ\text{C} ;$$

b. 内侧环境温度 24°C ，外侧环境温度 32°C

$$\alpha_i \Delta T_i + \alpha_e \Delta T_e = 290\text{W}/\text{m}^2 ;$$

$$4.8 (T - 24) + 23 (T - 32) = 290 ;$$

$$T = 41.4^\circ\text{C} ;$$

当两侧环境温度相等时，稳态下因中间膜吸热导致的玻璃温升为 10.7°C 。吸热再传入室内的热量为 $51.6\text{W}/\text{m}^2$ ，占总辐射能量的 9%：

玻璃升温： 10.7°C



近红外透射比：0.24；
SHGC：0.47；
Sc (SHGC/0.87)：0.54；
光热比：1.5
U (夏)：2.8W/m²K
U (冬)：3.3 W/m²K

当室内温度小于室外时，室内侧温差变大，玻璃吸收再传热到室内比例增大。室内 24℃，室外 32℃时，向内侧传热为 83.4W，占总辐射能量的 15%。

玻璃表面温度：41.4℃；
近红外透射比：0.35；
SHGC：0.53；
Sc (SHGC/0.87)：0.60；
光热比：1.16；
U (夏)：2.8W/m²K
U (冬)：3.3 W/m²K

从以上计算结果及实际测试结果看，对吸热型中间膜采用白玻与 Low-E 玻璃的组合会降低 SHGC 值，这是因为中间膜吸收近红外热能后转为长波向两面传递，在达到玻璃外侧的 Low-E 膜层时，由于膜层的低辐射特性，使玻璃表面换热系数大幅降低。例如在本例中的换热系数由 8.7W/m²降低到 4.8W/m²，降幅接近一半，因此吸收再传递到室内侧的热量大幅减少。而根据能量守恒定律，室内侧换热减少必然增加室外侧换热量，玻璃温度也将增加，如在本例中玻璃温度提高 2℃。

3.4 白玻+吸热型中间膜+白玻与 Low-E 中空玻璃的组合

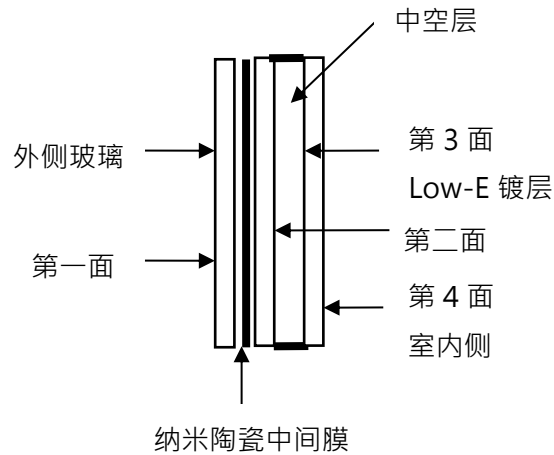


图 6、遮阳中间膜夹层中空玻璃

将双白玻夹层玻璃视为一块外玻璃，与 Low-E 中空玻璃进行组合（图 6），也可以视为 Low-E 中空玻璃的一侧玻璃透过中间膜与外侧玻璃粘合。中间膜吸热后通过接触换热传递到中空玻璃，与中空玻璃先吸收长波再降低热量传递的原理相同，利用中空玻璃低传热系数的保温特性，将中间膜吸收的热量降到最低。

设在单位面积中间膜吸收热量为 Q ，根据下式可计算在不同的室内外温度下，中间膜吸热后在稳态平衡下的玻璃温度：

$$Q = U \Delta t_i + \alpha e \Delta e = U (T - T_i) + 23 (T - T_e)$$

中间膜将太阳辐射热能吸收，并转换为长波向两侧玻璃传递，中空玻璃的 Low-E 面在第二面或第三面对降低室内传热没有区别。采用较低传热系数的中空玻璃对保温与隔热十分重要，因此需采用辐射率较低的高透型离线 Low-E 玻璃，例如采用辐射率为 0.03 的 low-E 玻璃，充惰性气体可以将 U 值降到 $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以下，在可见光透射比达到 60% 时，仍可将 SHGC 值降到 0.4。



吸收型中间膜可以实现最高的可见光透射比，以及最低的近红外线（直接）透射比，而中空玻璃可将 U 值控制在 $1.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下也已经不是难题，而这种夹层中空玻璃又是安全玻璃的最好选择，因此相信定会在业界获得大范围推广。

4. 研究结果：纳米陶瓷夹层玻璃

本文主要讨论隔热型夹层玻璃，最重要的指标包括 3 项：

1. 可见光透射比 T_{vis}
2. 太阳能总透射比 SHGC
3. 光热比 $T_{vis}/SHGC$

采用哪种解决方案主要是看能否在保证可见光透射比满足要求的前提下，选用能提供最高光热比的组合。

从理论、实测结果和实际使用上看，**纳米陶瓷夹层玻璃可以提供最高的可见光透射比及光热比。**

吸热型夹层玻璃会在吸收太阳辐照时会产生温升，但温升的幅度并不大。计算与实际测试证明，即使在室内温度 26°C ，室外温度 40°C 的情况下，在普通大气环境中，玻璃温度不会超过 45°C 。即使室内外温度同为 40°C 室内的情况下，玻璃温度仍小于 48.5°C ，这个温度离中间膜软化温度很远，更不会引起爆裂。

从以上计算也可以得出，玻璃温度每增加 1°C ，内外表面散热约增加 $30\text{W}/\text{m}^2$ ，扣除玻璃透射及反射，中间膜吸收的最大热量为太阳最大辐照的 60%，即使在某些极端环境下，玻璃温升也不会大于 20°C 。



而在采用白玻+Low-E 组合时，吸热型玻璃表现出明显的优势，SHGC 低于反射型夹层玻璃，而且室内外温差增加对 SHGC 影响也很小。

吸热型夹层玻璃之所以具有较高的可见光透射比和光热比，是因为其滤波特性曲线比较陡峭，因此可保留更多的可见光。而且反射率较低，不会产生光污染，而反射型中间膜如在可见光区反射过高，会造成光污染和透光率下降。

表 1 各种中间膜组合的夹层玻璃主要性能比较：

	可见光透射比	可见光反射比	Sc	光热比	U 值	玻璃温升	适用领域	综合比较
白玻+普通 PVB 中间膜+白玻	高	低	高	低	高	低	建玻 汽玻	差
白玻+纳米陶瓷中间膜+白玻	高	低	低	高	高	小于 10°C	建玻 汽玻	优
白玻+纳米陶瓷中间膜+在线 Low-E	高	低	低	高	低	小于 10°C	建玻 汽玻	优
白玻+反射型中间膜+白玻	中	高	低	高	低	低	建玻、 汽玻	良
白玻+普通 PVB+离线 Low-E	低	高	低	中	高	低	建玻、 汽玻	中
白玻+纳米陶瓷中间膜+白玻+Low-E 中空	高	低	低	高	低	低	建玻	优+

5. 结论与展望

在强调绿色节能和舒适性的时代大背景下，兼顾节能与舒适性的夹层玻璃有着巨大的市场前景。综合表 1 的比较结果，纳米陶瓷中间膜可以提供最高的可见光透射比、最低的遮阳比和最高光热比，因此能够使夹层



玻璃大幅提升其节能与舒适性，在和 Low-E 中空玻璃组合后，还能提供最优异的保温性能。

纳米陶瓷中间膜为夹层玻璃带来节能与舒适性的大幅提升，相信不仅必会带动汽车前挡玻璃，以及新能源汽车玻璃的整体升级，而且对强调更安全、更节能的夹层中空玻璃具有重大意义，将带动中空玻璃的产业进步。

参考资料：

陈启高 《建筑热物理基础》. 西安交通大学出版社. 1991

王 耶 《低辐射玻璃的概念及其研究与应用问题的讨论》 中国玻璃 2007 年第一期

董子忠、许永光、陈启高、温永玲-重庆大学建筑技术科学研究所《 窗户传热系数的简化计算方法》 保温材料与建筑节能

声明：本研究文件所述部分是基于特定条件下的实验或计算结果，无法涵盖所有实践中的不确定因素，本文件仅供参考，公司仍有可能不经通知即修改本文件内容，且不对任何个人或企业基于本文件内容所做的其它行为承担责任。

版权所有©南京亚鼎光学有限公司

www.aetina.cn

引用本文，请注明出处。