



## 汽车隔热玻璃设计浅析

### 概述

本文根据汽车隔热玻璃特点，参照 GB/T 5137.4-2001《汽车安全玻璃太阳能透射比测定方法》，采用与建筑节能静态设计不同的运动（50 公里时速）表面换热系数，以铁锚/亚鼎 ACP 隔热玻璃对比在线 Low-E 和三银 Low-E 计算各项隔热参数。ACP 夹层玻璃与三银 Low-E 的太阳能总透射率基本一致，隔热性能相同，但生产成本、工艺难度大大降低，且没有多层镀膜粘接力对产品质量的潜在风险。同时以某卡车玻璃（总尺寸 3.54 平方米）为例，采用 ACP 隔热玻璃，太阳能总透射比 SHGC 从 0.89 降到 0.48，降低了 0.41，太阳辐照热功率降低： $3.54 \times 0.415 \times 1000 = 1451\text{W}$ ，在降低能耗的同时增加了舒适性。

### 1. 汽车玻璃隔热的基本原理

#### 1.1 设计原则：

汽车隔热玻璃的作用是阻隔车外热源进入车内和提高乘坐舒适性。热源包括太阳辐照和车外高气温，隔热设计要最大程度的隔离这两个热源，为此应考虑以下三个原则：

- a. 最大程度减少太阳光直接透射；
- b. 最大程度减少车内外的热交换；
- c. 优先考虑驾车/乘车舒适性；



汽车玻璃的隔热与建筑玻璃的节能降耗有很大不同，很多从事汽车玻璃生产的工程技术人员来自建筑玻璃行业，并没有真正了解汽车玻璃隔热的技术特点，单纯从建筑节能角度提出汽车玻璃的节能解决方案，并因此得出一些错误结论，影响到汽车隔热玻璃行业的技术进步和升级，也迟滞了汽车隔热玻璃产业的发展，本文重点探讨汽车玻璃隔热的特点，以及与建筑节能玻璃的区别，希望能引起行业重视。

## 1.2 汽车隔热玻璃的特点：

汽车隔热玻璃的主要特点：

- a. 行驶时，车窗对流换热系数是变化的，与建筑玻璃不同，因此必须要考虑汽车行驶状态的工况；
- b. 人靠车窗乘坐，太阳光直接透射对舒适性的影响最大；
- c. 降低玻璃传热系数  $K$  值对汽车节能贡献很小；
- d. 太阳光直接透射率  $T_{Ds}$  和近红外透射率  $T_{ir}$ ，比  $g$  值 (  $SHGC$  )、 $K$  值和遮阳系数  $Sc$  更适用汽车隔热设计。

一些问题我们还会在其他章节详述，先概述一下汽车玻璃隔热设计的特点：

### 1.2.1 汽车行驶状态下的玻璃工况：

汽车行驶时，由于车外空气快速流过玻璃，对流换热系数也随车速加快而变大，是一个变化的参数，这与设计建筑玻璃隔热时，采用固定的对流换热系数非常不同。因为不同的对流换热系数对遮阳系数的计算结果有很大影响，因此设计隔热玻璃时，必须把汽车行驶状态考虑进来。

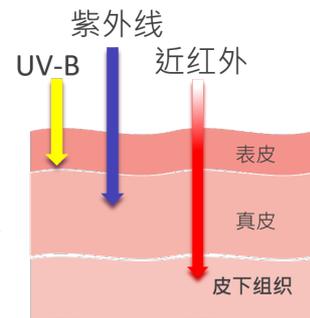
### 1.2.2 乘坐舒适性的考虑：

与建筑不同，由于驾/乘车紧靠窗边，承受太阳直晒。由于皮肤对直晒非常敏感，

而且太阳中的红外线对皮肤和眼睛有伤害作用，因此降低太阳光直接透射，应是提高舒适性的最优先考虑。由于大部分研究汽车玻璃隔热的资料都忽略了“靠窗坐”的特点，忽略红外线对舒适性的影响和对身体的伤害，本文也因此做些深入探讨。

夏天，当我们把车开出地库到强烈的阳光下，就会立即感觉到“晒”，而这时车内温度并还没有变化。同样的是在阳光下与在遮阳伞下气温相同，为什么感觉不同？原因就是**我们皮肤对红外线辐射比对温度的变化要敏感的多**。从医学角度来讲，太阳红外线照射所产生的反应是由于分子振动和温度升高所引起的，红外线引起的热辐射对皮肤的穿透力超过紫外线，其辐射量的 25%~65% 能到达表皮和真皮，8%~17% 能到达皮下组织，红外线通过其热辐射效应使皮肤温度升高，毛细血管扩张充血，使我们立即感觉到热。而我们身体对温度变化并不敏感，

红外线还能够增强紫外线对皮肤的损害作用，加速皮肤衰老过程。使用同样的防晒产品和同样能量的紫外线强度下，在户外自然阳光下所测到的 SPF 值明显低于在实验室人



工光源下所测得的防晒效能，这是由于在自然阳光下，皮肤受到紫外线和红外线的双重作用而引起的。红外线和紫外线在加速组织变性中的作用是一样的，红外线也能促进紫外线引起的皮肤癌的发展。

由于太阳辐照直接穿透汽车玻璃进入车内，出于舒适性和健康考虑，汽车隔热设计必须优先考虑降低太阳光直接透射率，特别是降低太阳辐照中的红外线透射。

### 1.2.3 汽车隔热玻璃无需考虑传热系数 K 值：

建筑玻璃节能设计最重要的指标就是传热系数 K 值，而汽车玻璃则完全不同，考



虑传热系数的惯性思维误导了很多厂家的隔热设计。实际上降低隔热系数实际对汽车节能几乎没有影响。这是因为汽车无法像建筑玻璃一样采用双层 Low-E 结构，即使车窗采用在线 Low-E 玻璃，将传热系数从  $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  降到  $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，在车内外温度相差  $12^\circ\text{C}$  情况下，从车外经由玻璃传递到车内的热量（功率）也仅相差  $24\text{W/m}^2$  对节能降耗的影响很小，因此完全无需考虑 K 值的影响。

#### 1.2.4 太阳光直接透射率 $T_{Ds}$ 和近红外透射率 $T_{ir}$ ，更适用汽车隔热玻璃设计：

建筑玻璃节能设计采用参数 g 值（太阳能总透射比 SHGC）和遮阳系数  $Sc$ ，而汽车玻璃隔热设计则应采用太阳光直接透射率  $T_{Ds}$ ，和红外线透射率  $T_{ir}$ 。这是因为 g 值包括太阳光直接透射比+玻璃吸热后再向车内传热  $Q_i$  值，而  $Q_i$  值与玻璃外表面换热系数成反比关系。如前所述，汽车在行驶中换热系数是随车速变化的，其值可达内表面换热系数的 10 倍以上，在这种情况下，绝大部分的二次传热是玻璃外侧散失掉的，传向车内的很小。而在建筑玻璃设计标准中，外表面换热系数仅为内表面的 2 倍多一点，在 g 值计算中占比较大，不能忽略。因此，汽车玻璃隔热设计参数更应采用太阳光直接透射率  $T_{Ds}$  和红外线透射率  $T_{ir}$  参数，而非 g 值或遮阳系数。

### 1.3 太阳辐照传热

如前所述，车外热源有两个：其一是来自太阳的辐照，占车外热源的绝大部分（90%以上）；另一个是来自车内外温差，车外高温经由车窗换热进入车内，对行驶的车辆这部分热源占比较低。

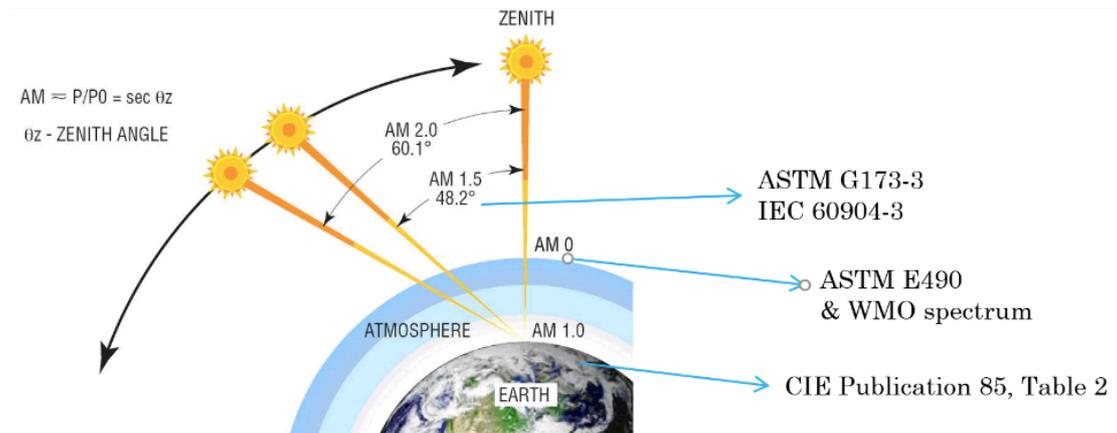
#### 1.3.1 太阳辐照度与大气质量

太阳辐照是车外热源的最主要部分，约占车外热源的 90%以上，是汽车隔热玻璃

设计最重要的部分。因此我们首先有必要了解太阳辐照的基本特点和玻璃对太阳辐照的光热特性。

到达地球大气层表面的辐射能量约为  $1366\text{kW/m}^2$ 。辐射能量会因大气吸收而减弱，经过不同大气层路径（距离），相关的强弱也不同。定义大气层外的太阳光谱为 AM0，其中大气质量 AM（Air Mass）是用来表示大气层吸收，导致太阳光谱与辐射能量减弱的表征。 $\theta$  角为入射太阳光角度与头顶垂直入射的夹角，则大气质量的计算  $\text{Air Mass} = 1/\cos \theta$ 。

注\*：大气质量与大气空气质量无关



AM0、AM1、AM1.5、AM2.0 路径示意图

AM0：定义太阳光在大气层外的平均辐照度，也称为太阳常数。世界气象组织 WMO 于 1981 年公布的太阳常数的辐照度为  $1366\text{W/m}^2$ 。AM1：定义太阳光垂直入射，穿过大气层到达地表的平均辐照度。AM1.5：定义太阳光以夹角  $\theta=48.2$  度穿过 1.5 倍大气层，到达地表的平均辐照度。AM2：定义太阳光以夹角  $\theta=60.1$  度穿过 2 倍大气层，到达地表的平均辐照度。

AM1.5 分为 AM1.5G（Global Irradiance）包括直射、散射、吸收，总辐照度为

963.75W/m<sup>2</sup>，和 AM1.5D ( Direct irradiance ) 只包括直射部分，总辐照度为 768.31W/m<sup>2</sup>。

因 AM1.5G 符合地球大部分地区的实际情况，因此被做为大多数相关行业的基准数据。为方便计算和表达，国际标准化组织 ASTM ( G173 ) 和 IEC ( 60904-3 ) 将 AM1.5G 总辐照度值定义为 1000W/m<sup>2</sup>。

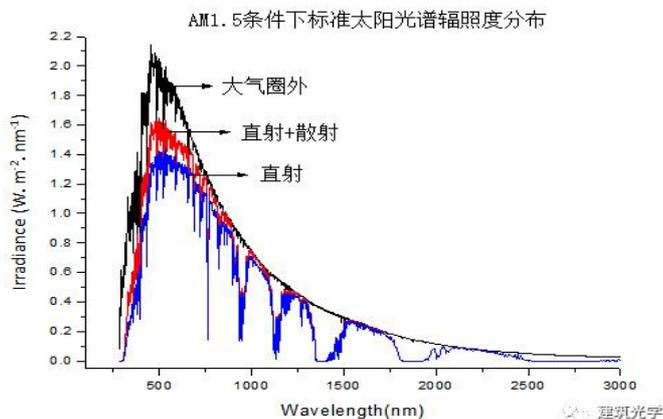
**注：本文采用太阳总辐照度 1000W/m<sup>2</sup> 标准值。**

太阳辐射是接近 6000 K 的黑体辐射，其辐射光谱等同于该温度下的黑体辐射。

由普朗克黑体辐射定律可知能量密度频谱：

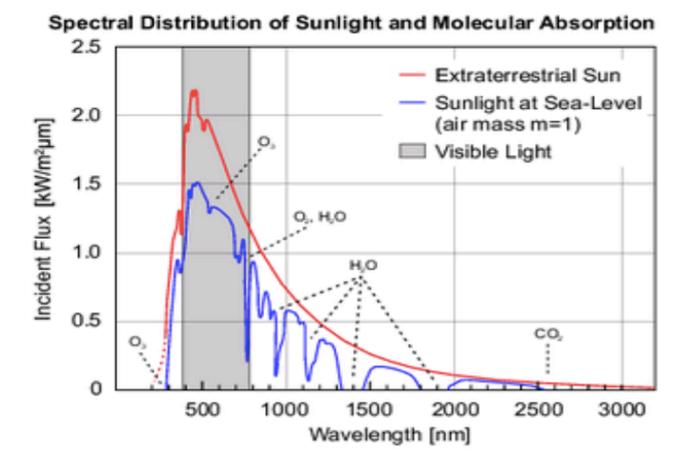
$$\mu(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

该太阳能量密度频谱可用如下图形表示，图形包括 AM0、AM1.5G 和 AM1.5D 三种大气质量：



### 1.3.2 太阳光谱各波段的能量分布

太阳光经过大气层中的臭氧、氧气、水气、二氧化碳等的吸收，除了辐射强度的衰减外，光谱分布也因此改变。



按国标GB/T 5137.4-2001 ( 标准附录B ) , 当空气质为1.5时 , 被修正后的相关光谱分布太阳能E ( λ ) 与波长区间「 Δλ 」的乘积值表 :

紫外波段		可见光波段		近红外线波段	
波长	5nm 能比	波长	10nm 能比	波长	50nm 能比
3003	0.000000	410	0.011712	790*	0.011201
305	0.000048	420	0.011973	800*	0.032812
310	0.000214	430	0.010839	850	0.049016
315	0.000545	440	0.013166	900	0.039872
320	0.000915	450	0.015431	950	0.016652
325	0.001248	460	0.016175	1000	0.037501
330	0.001999	470	0.015988	1050	0.034127
335	0.001973	480	0.016466	1100	0.020859
340	0.002201	490	0.015565	1150	0.012512
345	0.002219	500	0.015661	1200	0.021415
350	0.002446	510	0.016043	1250	0.023934
355	0.002538	520	0.015016	1300	0.018651
360	0.002630	530	0.015900	1350	0.001642
365	0.002999	540	0.015681	1400	0.000136
370	0.003369	550	0.015790	1450	0.003746
375	0.003506	560	0.015539	1500	0.009548
380	0.003603	570	0.015184	1550	0.013934
385	0.003506	580	0.014646	1600	0.012093
390	0.003408	590	0.014112	1650	0.011636
395	0.004265	600	0.014568	1700	0.010440
400	0.007684	610	0.015020	1750	0.008111



	<b>0.051316</b>	620	0.014760	1800	0.001553
		630	0.014502	1850	0.000231
		640	0.014525	1900	0.000000
		650	0.014547	1950	0.000682
		660	0.014333	2000	0.001878
		670	0.014079	2050	0.004040
		680	0.012749	2100	0.004507
		690	0.011426	2150	0.004134
		700	0.012375	2200	0.003604
		710	0.013315	2250	0.003583
		720	0.010313	2300	0.003468
		730	0.011094	2350	0.003242
		740	0.012248	2400	0.002251
		750	0.012119	2450	0.001070
		760	0.009197	2500	0.000433
		770	0.010675		<b>0.424514</b>
		780	0.011438		
			<b>0.524170</b>		

- 300-400nm 紫外线波段：波段积分比=0.05；辐照能值= 50 W/m<sup>2</sup>
- 410-780nm 可见光波段：波段积分比=0.52；辐照能值=520 W/m<sup>2</sup>
- 790-2500nm 近红外线波段：波段积分比=0.43；辐照能值=430 W/m<sup>2</sup>

## 1.4 车外高温传热

### 1.4.1 车玻璃的对流换热

当车外气温高于车内时，热量经玻璃以对流换热方式传入车内，是车外的另一个热源。

对流换热的机理是：当车外气温高于车内时，玻璃内外两个表面分别与车内外空气产生热交换（包括辐射和对流），热交换量与流经玻璃表面的空气流速和温差成正比，流速越高，温差越大，热交换量越大。汽车玻璃的内外表面分别有不同的换热系



数，其表达式为：

$$Q=h\times\Delta T$$

Q：热交换量；

h：换热系数；

$\Delta T$ ：玻璃表面温度与空气温度差；

#### 1.4.2 车外高温对车内的增热量

汽车在行驶时，汽车玻璃温度与车外气温非常接近。如车玻璃 40℃，车内温度 28℃ 时，每平方米玻璃与车内空气的换热量为  $8\times 12=96\text{W}$ ，也就是说即使在气温 40℃ 的情况下，每平方米玻璃仅向车内传入 96W 的热量，不足太阳辐照当 10%。

### 1.5 隔热玻璃对节能降耗的影响

#### 1.5.1 隔热玻璃对空调热负荷的影响

夏季汽车空调热负荷主要来源于车身外部的太阳辐照和车身内部发动机、人体、电子设备等其它热量。计算方法有图表算法、简易理论算法、稳态算法等。目前多采用简易理论算法，计算公式如下：

$$Q_e = Q_B + Q_C + Q_G + Q_P + Q_V + Q_E + Q_o$$

其中， $Q_e$ 为总热量； $Q_B$ 为车体传入热量； $Q_C$ 为地板、行李舱传热热量； $Q_G$ 为通过玻璃窗传入热量； $Q_P$ 为人体散发的热量； $Q_V$ 为室外空气渗入热量； $Q_E$ 为发动机传热热量； $Q_o$ 为其它传入热量。

汽车隔热玻璃减少了通过玻璃进入到车内的太阳辐射热，而对车身及车内其它部位的热量传递没有影响。而且水平面和东西南北各个朝向的太阳总辐照强度存在差别，



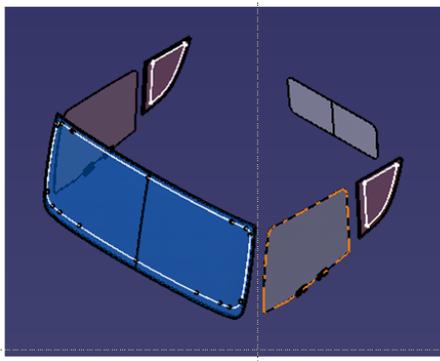
而且汽车玻璃各个朝向的玻璃面积也不尽相同，因此需要考虑汽车玻璃的朝向和倾角。

本文以某卡车为例，借用3M发表在《汽车与配件》2015 No33 “汽车玻璃贴膜对空调热负荷和发动机功率的影响”文中一些结果和数据，以简化各项参数的复杂计算。

卡车玻璃结构和尺寸如下图：

玻璃总尺寸：3.54平米

采用亚鼎隔热玻璃（侧后窗涂布及前风挡夹层玻璃），SHGC值可从0.89降到0.48，降低41%，辐照热功率降低值为： $3.54 \times 0.41 \times 1000 = 1451\text{W}$ 。



货车玻璃结构



亚鼎隔热玻璃降低辐照热41.5%

存货名称	规格型号	面积
前挡风玻璃	2256*886.5*6.76	1.97m <sup>2</sup>
左前门玻璃总成	924.5*758*3.5	0.63m <sup>2</sup>
右前门玻璃总成	924.5*758*3.5	0.63m <sup>2</sup>
后风窗玻璃	985.5*352*3.5	0.34m <sup>2</sup>

汽车隔热玻璃大幅降低了空调的热负荷，同时也降低了空调压缩机的工作负荷，从而减少对汽车总输出功率的占用。汽车空调COP值按2.2计，隔热玻璃可降低空调热负荷1451w，即可以降低空调压缩机输入功率：

$$\Delta PA = 1451 / 2.2 = 659\text{W}$$



该车空调功率5.2kw，采用隔热玻璃后，可降低空调输出功率12.7%，对节能降耗和提升舒适性具有较大意义。

## 2. 汽车玻璃隔热设计

### 2.1 参数设定

- 太阳光直接透射率  $T_{Ds}$
- 近红外线透射率  $T_{ir}$
- 太阳能总透射率  $T_{Ts}$
- 车外高温对车内增热量  $Q_t$

\*注：为方便理解和避免混淆，本文在此透射用词采用透射率，而不是透射比，这是为区别建筑玻璃透射比通常是相对 3mm 玻璃参数的比值，透射率简单定义为对单位面积汽车玻璃的透射量。

为方便隔热玻璃计算，需要设定一些参数值，与设定值偏差较近时可采用计算结果，较大时需做修正：

#### 2.1.1 设定可见光透射率 73%

由于可见光透射比需遵从汽车安全玻璃规定，一般在选用原片时可根据安全标准对透射比和客户对颜色的要求（也包括近红外线的吸收性能），选择不同的本体着色玻璃。因此为突出重点，隔热设计中假定可见光透射率固定为 73%，可见光反射率 7%，可见光吸收率 20%，且后续加工不改变可见光透射、反射和吸收数值。

#### 2.1.2 设定时速为 50 公里

固定时速 50 公里，玻璃外侧对流换热系数为  $61 \text{ m}^2 \text{ K}$ ，由于吸收后的二次传热



(指玻璃吸收可见光及近红外线热量后,以长波形式向玻璃两侧散热)与玻璃外侧换热系数成反比,因此汽车时速大于 50 公里设定值时,隔热性能好于本设计结果,小于 50 公里变差。

### 2.1.3 设定车外气温 40°C, 车内温度 28°C

设定车外气温 40°C, 车内温度 28°C, 车内外温差为 12°C。同时设定汽车停车状态时, 风速为 4m/s。

## 2.2 隔热设计方案 1 (亚鼎-M)

### 2.2.1 太阳光直接透射率

太阳光的直接透射率与车速无关。根据前节太阳辐照能值表: 紫外线占比 5%, 可见光占比 52%, 红外线占比 43%。按红外线透射率 10%, 紫外线吸收率 100%和 2.1 节参数设定, 计算太阳光直接透射率:

$$\begin{aligned} T_{Ds} &= \text{紫外线透射率} + \text{可见光透射率} + \text{红外线透射率} \\ &= 0 + 0.73 \times 0.52 + 0.1 \times 0.43 = 0.42 \end{aligned}$$

### 2.2.2 汽车的运动状态下的换热系数和二次传热

二次传热是指玻璃在吸收太阳辐照的短波能量后,以长波形式再向车内散热,会导致车内温度增加或增大空调负荷。二次传热是玻璃吸收的太阳辐照量与内外表面换热系数的函数,其值与内表面换热系数成正比,与外表面换热系数成反比,其公式为:

$$Q_i = \alpha_i \times h_i / (h_e + h_i)$$

$h_i$ : 玻璃内表面换热系数

$h_e$ : 玻璃外表面换热系数



$\alpha_i$  : 玻璃的太阳能吸收率 =  $1 - T_{Ds} - R_{Ds}$

$T_{Ds}$ 、 $R_{Ds}$  分别为太阳光直接透射率和反射率

太阳光的直接透射率与车速无关，但车内外温差换热却与车速有密切的关系。车外高温通过玻璃外表面换热加热玻璃，再通过玻璃内表面换热把热量传入车内。因此车外高温对车内的增热量取决于玻璃内外两侧的换热系数。一般情况下，由于车内出于封闭状态，气流相对稳定，与车速无关，内表面换热系数采用固定值  $8 \text{ m}^2 \text{ K}$ 。

汽车玻璃外表面空气流速与汽车行驶速度成正比，因此汽车在不同的运动状态下（车速不同）换热系数是不同的。GB/T 5137.4-2001《汽车安全玻璃太阳能透射比测定方法》定义了静止和时速 50 公里、100 公里、150 公里四种不同状态下的外表面玻璃换热系数，由于车内空气流速不变，因此内表面换热系数固定取值为  $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 。

时速	风速	车窗外侧换热系数( $\text{m}^2 \text{ K}$ )	车窗内侧换热系数( $\text{m}^2 \text{ K}$ )
0	4m/s	21	8
50 公里		61	8
100 公里		106	8
150 公里		146	8

• 对车外来说，表达式为： $Q_e = h_e \times \Delta T_e$ ；

$Q_e$  : 玻璃外表面的热交换量；

$h_e$  : 玻璃外表面热交换系数

$\Delta T_e$  : 玻璃外表面与外面空气温度差；



- 对车内来说，表达式为： $Q_i = h_i \times \Delta T_i$ ；

$Q_i$ ：玻璃内表面热交换量；

$h_i$ ：玻璃内表面热交换系数

$\Delta T_i$ ：玻璃内表面与车内空气温度差；

### 2.2.3 计算二次传热量

根据 2.1 相同条件，按红外线反射率 7%、透射 10%；紫外线吸收 100%，计算太阳能吸收率  $\alpha_i$  和二次传热量：

$$Q_i = \alpha_i \times h_i / (h_e + h_i)$$

$h_i$ ：玻璃内表面换热系数=8

$h_e$ ：玻璃外表面换热系数=61

$\alpha_i$ ：玻璃的太阳能吸收率=1- $T_{Ds}$ - $R_{Ds}$

$\alpha_i$ =紫外线吸收率+可见光吸收率+红外线吸收率

$$= 1 \times 0.05 + 0.20 \times 0.52 + 0.83 \times 0.43 = 0.51$$

$$q_i = 0.51 \times 8 / (61 + 8) = 0.059$$

即使在上述太阳能吸收率较高的情况下，二次传热也仅占太阳辐照的 6%，约为 60W/m，对汽车能耗影响微乎其微。

### 2.2.4 计算太阳能总透射率

太阳能总透射率  $T_{Ts}$ =太阳光直接透射率  $T_{Ds}$ +二次传热率  $Q_i$

$$T_{Ts} = 0.42 + 0.059 = 0.48$$



## 2.2.5 计算玻璃温度

玻璃吸热后，会引起玻璃升温  $\Delta T$ ，玻璃吸热同时也会散热，达到热平衡时吸热量与散热量相等，按车内外温度相同计算玻璃温升  $\Delta T$ ：

$$\alpha_i = h_i (\Delta T) + h_e (\Delta T) = 8 (\Delta T) + 61 (\Delta T)$$

$$\Delta T = 510 / 69 = 7.39^\circ\text{C}$$

## 2.3 在线 Low-E 玻璃隔热设计

### 2.3.1 在线 Low-E 玻璃 (FTO 玻璃)

国内在线 Low-E 玻璃生产基本采用化学沉积 (CVD) 工艺，在浮法玻璃生产线上同步镀膜。膜层以 F 掺杂  $\text{SiNO}_2$  做为功能层 (FTO 膜)，以提升 FTO 膜层的电导率。由于  $\text{SiNO}_2$  为绝缘体，掺入 F 后电导率大幅提升，使之成为半导体薄膜，接近金属，但其载流子浓度相对金属较低，对应的等离子频率较小，这就决定了在线 Low-E 玻璃的分界点波长更大 (分界点波长是指透射率与反射率相等时所对应的波长)。

根据国内在线 Low-E 玻璃的主要生产企业公布资料，分界点波长基本在  $1.8\mu\text{m}$  以上，而太阳辐照在  $1.8\mu\text{m}$  以上的热量值仅为 3.3%，在线 Low-E 玻璃反射的太阳辐照仅为 10%~12%，红外线反射率约 14%。

表 1、国内主要在线 Low-E 玻璃产品参数

	可见光透射比	可见光反射比	太阳光直接透射比	太阳光反射比	红外线透射比	红外线反射比	太阳能总透射比 g	遮阳系数	紫外线透射比	光红比	光热比
旭硝子	0.82	0.12	0.69	0.11	0.55	0.13	0.72	0.83	0.5	1.49	1.14
耀皮	0.82	0.10	0.68	0.10	0.53	0.12	0.71	0.82	0.5	1.55	1.15



金晶	0.83	0.09	0.72	0.12	0.61	0.17	0.75	0.86	0.5	1.36	1.10
中玻	0.80	0.08	0.67	0.12	0.61	0.18	0.71	0.81	0.5	1.31	1.13
亚鼎	0.70	0.07	0.41	0.07	0.10	0.07	0.49	0.56	0.01	7.00	1.43

注：标黄色的部分是生产厂家给出的参数，其他参数为拟合参考值

国内主要生产企业在线 Low-E 玻璃的技术参数非常接近，以下在线 Low-E 玻璃参考值可供隔热设计参考（采用外表面换热系数： $61\text{m}^2\text{K}$ ，所有数据可以自洽）：

可见光透射率：0.82；

可见光反射率：0.10；

太阳光直接透射率：0.69；

太阳光反射率：0.11；

近红外线透射率：0.55；

近红外线反射率：0.14；

太阳能总透射率（ $\text{SHGC} \cdot g \cdot T_t$ ）：0.70；

遮阳系数：0.81；

紫外线透射率：0.5；

辐射率：0.16；

光热比：1.17；

K 值：3.7；



- 计算总吸收率： $\alpha_i = \text{紫外线吸收率} + \text{可见光吸收率} + \text{红外线吸收率}$

$$= (1-0.5) \times 0.05 + (1-0.82-0.1) \times 0.52 + (1-0.55-0.14) \times 0.43 = 0.2$$

计算玻璃温度（车内外温度相同）：

$$\alpha_i = h_i (\Delta T) + h_e (\Delta T) = 4.4 (\Delta T) + 61 (\Delta T)$$

- $\Delta T = 200 / 65.4 = 3.06^\circ\text{C}$

### 3. 设计方案比较和常见误区

#### 3.1 设计方案比较

下表对 2.2、2.3 节两种设计方案进行比较：

表 2、亚鼎-M 方案与在线 Low-E 玻璃的参数比较（时速 50 公里）

参数	亚鼎-M	在线 Low-E	比较 (M-E) / E
可见光透射率	0.73	0.82	
可见光反射率	0.07	0.10	
太阳光直接透射率	0.42	0.69	-39%
太阳能总透射率	0.48	0.70	-33%
遮阳系数	0.55	0.81	
太阳光反射率	0.07	0.11	
近红外透射率	0.10	0.55	-82%
近红外反射率	0.07	0.14	
总吸收率	0.51	0.20	
紫外线透射率	0.01	0.55	-98%



光热比	1.51	1.17	+33%
光红比	7.30	1.49	4.7 倍
玻璃温升	7.39	3.1°C	

从上表数值看，在线 Low-E 玻璃太阳光反射率仅为 0.11，吸收率 20%，紫外线透射率 50%，红外线透射率高达 55%，是亚鼎-M 方案的 5.5 倍，远达不到可见光透射率/近红外线透射率（光红比）>4 的基本隔热要求，因此不能用做汽车隔热玻璃。

### 3.2 设计误区

做为业界较为普遍的认识误区，就是所谓吸收型与反射型隔热玻璃，一般认为以 Low-E 玻璃为代表的反射型玻璃要好于吸收型解决方案。持这种观点一方面为宣传推广 Low-E 玻璃用于汽车隔热，另一方面是站在建筑玻璃角度看待汽车隔热玻璃。

Low-E 玻璃分为在线和离线，这是从工艺角度来看，在线是指在玻璃浮法线上，玻璃高温状态下透过化学气相沉积（CVD）同步完成镀膜；而离线则是采用低温磁控溅射工艺镀膜。从材料和光学角度看，离线镀膜以导电性能最好的金属银（Ag）做为功能层材料，且可以多层溅射，等离子角频率非常低，分界点波长接近可见光边沿，三银镀膜近红外线反射率可达 70%以上。而在线 Low-E 玻璃则采用 FTO 材料做为功能层，分界点波长超过 1.8um，对近红外线的反射率小于 15%，隔热效果很差。

如不考虑 Ag 膜用于汽车玻璃的可靠性，先仅从光热学角度来比较三银的隔热效果，以三银玻璃半球辐射率为 0.01，近红外线反射率 75%，红外透射率 15%和下表为设定值，得出相关参数：

表 3、亚鼎隔热防辐射玻璃与三银 Low-E 参数比较（时速 50 公里）

参数	亚鼎-M	3 银 Low-E	亚鼎 Vs.三银
----	------	-----------	----------



可见光透射率	0.70	0.70	
可见光反射率	0.07	0.10	-0.03
太阳光直接透射率	0.42	0.45	-0.03
太阳能总透射率	0.49	0.46	0.03
遮阳系数	0.56	0.53	0.03
可见光反射率	0.07	0.12	-0.05
近红外直接透射率	0.10	0.20	低 1 倍
紫外线透射率	0.01	0.50	低 50 倍
光红比	7.0	3.5	高 1 倍

亚鼎-M 方案与三银 Low-E 隔热防辐射效能几乎相同，三银 Low-E 玻璃温升仅比亚鼎-M 低 4.7 度。目前有厂家将三银玻璃用做前风窗夹层玻璃内层，或在 PVB 中间膜内层夹磁控溅射膜（三明治型），利用三银 Low-E 对近红外线较高的反射特性达到隔热目的，但这种解决方案不仅力学特性尚有存疑，而且从以上参数来看，完全可以由吸收性能良好的隔热中间膜取代。

因此可以得出结论，在线 Low-E 玻璃由于隔热性能太差，不适合用于汽车隔热玻璃，Low-E 三银玻璃用于汽车前挡夹层玻璃，光热学性能良好，但相较亚鼎隔热中间膜基本不具优势。

#### 4. 隔热玻璃技术与前景

目前汽车隔热玻璃后加工技术已比较成熟，以纳米隔热材料为功能膜层不仅抗老化可达 10 年以上，膜层硬度达 6H 以上（铅笔硬度），抗磨性能也都符合相关国际标准和行业标准。



对汽车前风窗，同样含有纳米隔热粒子的 PVB 隔热胶片已非常成熟，被广泛应用于各类汽车前风窗，其力学、光热学特性也已为汽车整机厂和客户所接受。

因此，从国内外研发趋势上看，大多数相关研发企业在进一步提升后加工产品技术性能和降低成本的同时，都开始着重开发用于汽车隔热原片玻璃，以便下游的汽车玻璃加工企业可采用与原来相同的工艺和方法生产高性能的隔热玻璃。这些原片要达到与后加工产品更高的技术性能，例如美国亚鼎开发的基于铯化钨的原片玻璃，采用国际最先进的磁控溅射与高温气氛还原技术，镀层为硬膜，可热弯/可钢化，分界点波长可做到 1.1um，近红外反射率大于 35%，近红外透射率 <10%，表 4 是与 Low-E 三银玻璃的对比参数：

表 4、亚鼎 ACP-C 原片玻璃与三银 Low-E 的参数比较

参数	亚鼎 ACP-C	Low-E 三银	亚鼎 Vs.三银
可见光透射率	0.70	0.70	
可见光反射率	0.10	0.10	
近红外透射率	0.10	0.15	-0.05
近红外反射率	0.35	0.75	
太阳光直接透射率	0.43	0.45	-0.02
太阳能总透射率	0.46	0.46	0.00
遮阳系数	0.53	0.53	0.00
太阳光反射率	0.20	0.38	
总吸收率	0.38	0.17	
紫外线透射率	0.50	0.50	0.00
光热比	1.52	1.51	0.01



玻璃温升	5.55	2.66	2.89C
------	------	------	-------

从上表可以看出，亚鼎 ACP-C 隔热参数已达到或超过 Low-E 三银指标。

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](http://www.aetina.cn)

引用本文，请注明出处。