

有色 ETFE 薄膜光热性能试验研究

代玖枚¹ 周竞航¹ 胡建辉¹ 赵兵¹ 陈务军¹ 任思杰²

(1. 上海交通大学空间结构研究中心, 上海 200240; 2. 上海海勃膜结构有限公司, 上海 200200)

摘要 为满足建筑设计要求, 有色 ETFE 薄膜被研制并应用于现代大型公共建筑。然而, 作为一种新材料, 有色 ETFE 薄膜的性能研究相对有限, 特别是 ETFE 薄膜典型的光热性能特征。从实际工程应用出发, 代表性以成都农博园所采用的 9 种有色 ETFE 薄膜和 1 种无色透明 ETFE 薄膜为试验对象, 对其透光性能和热工性能进行试验测试。首先使用紫外-可见-近红外分光光度计测量试验薄膜在太阳辐射波段内的透射率和反射率, 通过对比有色 ETFE 薄膜与无色透明 ETFE 薄膜太阳辐射曲线的走势和波动, 分析了有色 ETFE 薄膜与无色透明 ETFE 薄膜的透光性能和热辐射性能在太阳光波段内的变化, 计算并获得了试验薄膜的可见光透过率和太阳辐射系数。采用激光散射法测试试验薄膜的热传导性能, 计算得到室温条件下试验薄膜的导热系数和热阻。总结不同颜色 ETFE 薄膜的光热性能参数变化规律, 并与无色透明 ETFE 薄膜进行比较, 结果发现: 1) 在紫外光区, 有色 ETFE 薄膜的透射率和反射率均处于较低水平(合计不超过 30%), 有色 ETFE 薄膜对紫外线的吸收能力强, 实际使用中应注意有色 ETFE 薄膜的老化问题。2) 有色 ETFE 薄膜的可见光透过率和太阳辐射透射系数均低于无色透明 ETFE 薄膜, 导热系数略低于无色透明 ETFE 薄膜, 太阳辐射吸收系数及相同厚度下的薄膜热阻均大于无色透明 ETFE 薄膜。3) 影响有色 ETFE 薄膜可见光透过率、太阳辐射系数的主要因素是薄膜颜色的深浅, 薄膜颜色越浅, 其可见光透过率越大, 太阳辐射透射系数越大, 吸收系数越小; 随着薄膜颜色加深, 薄膜对太阳光的吸收能力逐渐增加, 透射系数和反射系数相对处于较低水平。4) 影响有色 ETFE 薄膜热阻的主要因素是薄膜厚度; 相同厚度下, 有色 ETFE 薄膜热阻高出无色透明 ETFE 薄膜 7%~14%。研究表明, 使用有色 ETFE 薄膜作为建筑围护结构, 能增加围护结构对太阳辐射的反射和吸收作用, 并在一定程度上阻挡热量传导, 减少室内光照过度及夏季过热问题。

关键词 有色 ETFE 薄膜; 透光性能; 热工性能

0 引言

普通无色透明 ETFE(Ethylene tetrafluoroethylene, 乙烯-四氟乙烯共聚物)薄膜的透光率可达 95%, 紫外线透射高^[1]。以 ETFE 薄膜构成的围护结构^[2-7], 具有质轻、透光性能良好、安装简便、抗腐、耐候、耐火等优点, 同时具有一定的保温隔热性能、良好的自洁性能、较好的力学性能和一定的艺术气息。长期以来, 工程中使用的 ETFE 薄膜几乎都呈无色透明状态。然而最近几年, 国内如北京奶汤剧场、大连梭鱼湾足球场、成都天府农博园(图 1), 国外如墨西哥 Kuchtmok 体育场等大型公共建筑中出现了大规模有色 ETFE 薄膜围护结构。相关数据显示, 国内项目采用的有色 ETFE 薄膜均从国外进口, 而这些有色 ETFE 薄膜则是根据彩色颜料的物理特性, 向乙烯-四氟乙烯共聚物中添加色母开发出来的。

大型公共建筑对于室内光热环境有着较高的要求, 掌握有色 ETFE 薄膜的光热性能对有色 ETFE 薄膜的大规模应用具有重要意义。李博^[8]测试了无色和浅蓝色两种透明 ETFE 薄膜的太阳辐射系数, 发现浅蓝色 ETFE 薄膜的透射系数比无色薄膜低 0.1, 而反射系数和吸收系数总和比无色



图 1 天府农博园实景

Fig. 1 Realistic view of Chengdu Agricultural Expo Park

薄膜高 0.1。林琦等^[9]利用稳态法, 测得国家游泳中心所采用的淡蓝色 ETFE 薄膜的导热系数为 0.1 W/(m·°C), 小于绝热材料导热系数上限值 0.23 W/(m·°C), 可作为建筑领域理想的绝热材料。Cremers 等^[10]测试了一种新型红外吸收蓝灰色 ETFE 薄膜的热辐射特性, 并对这种薄膜及其

第一作者: 代玖枚, 硕士研究生, 主要从事 ETFE 薄膜及 ETFE 气枕热性能的研究。

通信作者: 陈务军, 博士, 教授, 主要从事膜结构设计与膜材性能的研究, cwj@sjtu.edu.cn。

收稿日期: 2023-05-18

构成的气枕进行了环境模拟, 发现该薄膜具有较高的吸收系数, 能吸收长波辐射, 从而改善夏季室内过热环境, 减轻夏季室内制冷负荷。

可以看出, 国内外对有色 ETFE 薄膜的研究对象及内容相对单一, 缺乏同时对有色 ETFE 薄膜透光性能和传热性能的研究。鉴于此, 选取 9 种有代表性的有色 ETFE 薄膜, 对其透光性能、热辐射性能和热传导性能进行研究, 测试薄膜的太阳辐射透射率和反射率, 计算薄膜的可见光透过率、太阳辐射系数及常温下薄膜的导热系数和热阻, 分析影响有色 ETFE 薄膜上述性能的因素。相关研究结果可为有色 ETFE 薄膜在未来建筑中的应用提供参考, 丰富国内外有色 ETFE 薄膜光热性能的研究。

1 有色 ETFE 薄膜透光性能及热辐射性能试验研究

1.1 试验方法

到达地球表面的太阳光波段分布在 280~2 500 nm 之间, 可按波长范围划分为中波紫外线、长波紫外线、可见光、近红外线波段^[1], 如图 2 所示。

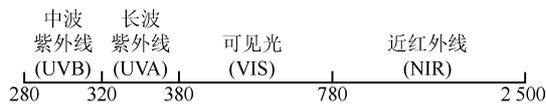


图 2 地表处太阳辐射波段范围 nm
Fig. 2 Solar radiation band range at the surface

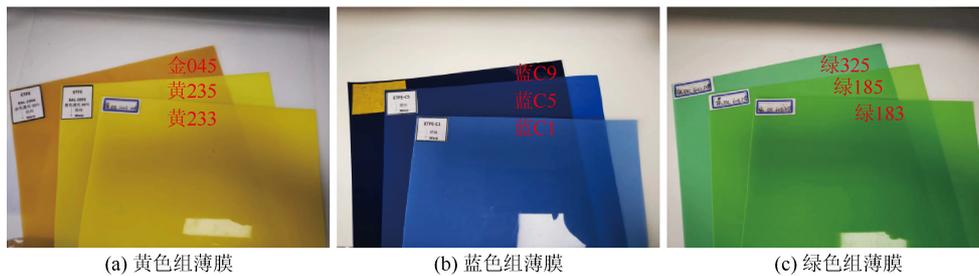


图 3 薄膜光热性能试验分组
Fig. 3 Photothermal performance test group of foils

表 1 试验对象分组
Table 1 Test object grouping

组别	薄膜试样	厚度 $t/\mu\text{m}$
黄色组	黄 233、黄 235、金 045	250
蓝色组	蓝 C1、蓝 C5、蓝 C9	300
绿色组	绿 183、绿 185、绿 325	250
无色透明组	无色透明	300

1.2 试验结果分析

1.2.1 光谱透射率与反射率曲线

所有试样在太阳光波段内的太阳辐射透射率曲线和反射率曲线见图 4。图中两条光标分别位于紫外与可见光区分界线 380 nm 和可见与近红外光区分界线 780 nm 处。在波长 2 250 nm 之后, 由于仪器原因导致所有曲线

太阳辐射会对建筑表面产生明显的温度效应, 而建筑会对到达其表面的太阳辐射产生透射、反射和吸收 3 种作用。这对应 3 种太阳辐射系数: 即太阳辐射透射系数 τ_e 、太阳辐射反射系数 ρ_e 和太阳辐射吸收系数 α_e , 它们是分析建筑在太阳辐射作用下温度效应的重要参数。根据 ISO 9050-2003^[12]和 GB/T 2680-2021《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》^[13], 使用紫外-可见-近红外分光光度计 Lamda 950 配合 150 mm 积分球附件测量有色 ETFE 薄膜在太阳辐射波段内(300~2 500 nm)的透射率和反射率, 可计算有色 ETFE 薄膜的太阳辐射系数和可见光透过率。

本次试验对象为天府农博园主展馆所使用的 9 种有色 ETFE 薄膜和 1 种无色透明 ETFE 薄膜, 按照不同色系分为黄色组、蓝色组、绿色组和无色透明对照组, 如图 3 所示。根据薄膜标识, 试验对象分组及每组薄膜的厚度见表 1。黄色组和绿色组 ETFE 薄膜名称中的第一个汉字代表颜色, 汉字后的前两个数字代表型号, 最后一个数字代表透光率, 例如黄 233 代表黄色薄膜 1023, 透光率为 30%; 绿 183 代表绿色薄膜 1018, 透光率为 30%。蓝色组薄膜是颜色相对较深的一组薄膜, 且该组薄膜并未标明具体透光率, 因此试验中可根据薄膜在可见光波段的透射率计算薄膜的可见光透过率。

均出现剧烈波动, 故分析中略去这部分曲线。

有色 ETFE 薄膜在整个太阳波段的透射率均低于无色透明 ETFE 薄膜, 表明相比于无色透明薄膜, 有色薄膜的透光性能降低。除蓝 C5 和蓝 C9 薄膜外, 有色 ETFE 薄膜在可见光区和近红外光区的反射率大于无色透明薄膜, 表明有色薄膜对太阳辐射能量最强的可见光波段和近红外波段的反射能力高于无色薄膜。在紫外光区, 有色薄膜的透射率和反射率都处于较低水平(合计不超过 30%), 根据能量守恒定律可知, 此时薄膜吸收了大部分紫外光, 因此在实际使用过程中应注意薄膜老化问题。下面将分别对 3 个不同色系组与无色透明组进行对照分析, 并对透光率相近的不同颜色组进行比较分析。

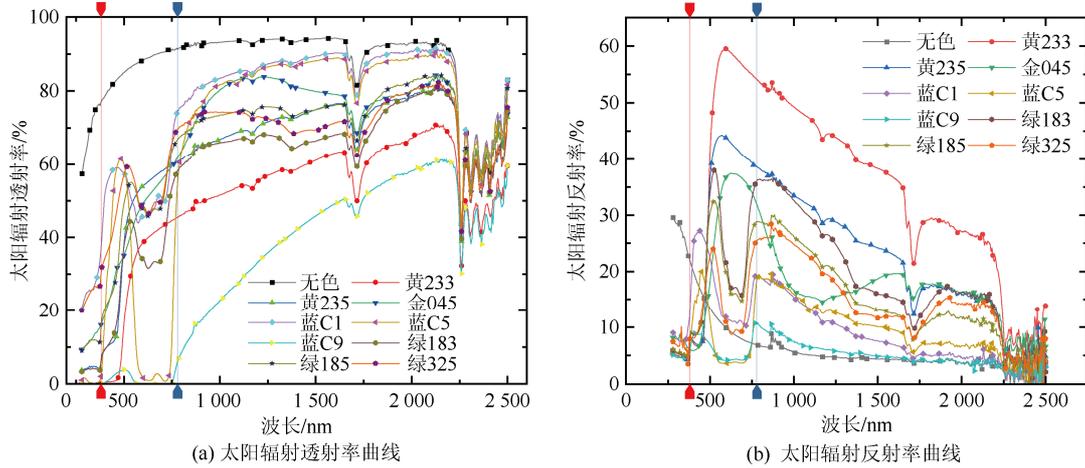


图 4 太阳光波段内薄膜的光谱透射率曲线和反射率曲线
Fig. 4 Spectral transmittance curves and reflectance curves of thin foil in solar light band

1)黄色组薄膜的太阳辐射透射率曲线和反射率曲线见图 5。可见：在太阳光波段内，黄 233 和黄 235 两种薄膜的透射率曲线和反射率曲线呈现同一走势，表明相同类型不同透光率的薄膜具有相似的太阳辐射水平；且薄膜透光率越高，对太阳光的透射率越高，反射率越低；从可见光区到近红外光区，三种薄膜的透射率均随波长的增加而升高，反射率在可见光区达到最大值后降低。

表明黄色组薄膜能透过大部分近红外光，对可见光的透射能力和反射能力相当。

可见光区可划分为 6 种不同颜色的波段：380~455 nm 为紫色，455~492 nm 为蓝靛色，492~577 nm 为绿色，577~597 nm 为黄色，597~622 nm 为橙色，622~780 nm 为红色。观察黄色组薄膜透射率和反射率曲线的可见光波段可以发现，黄色组薄膜对黄橙光的透射率和反射率远大于吸收率。

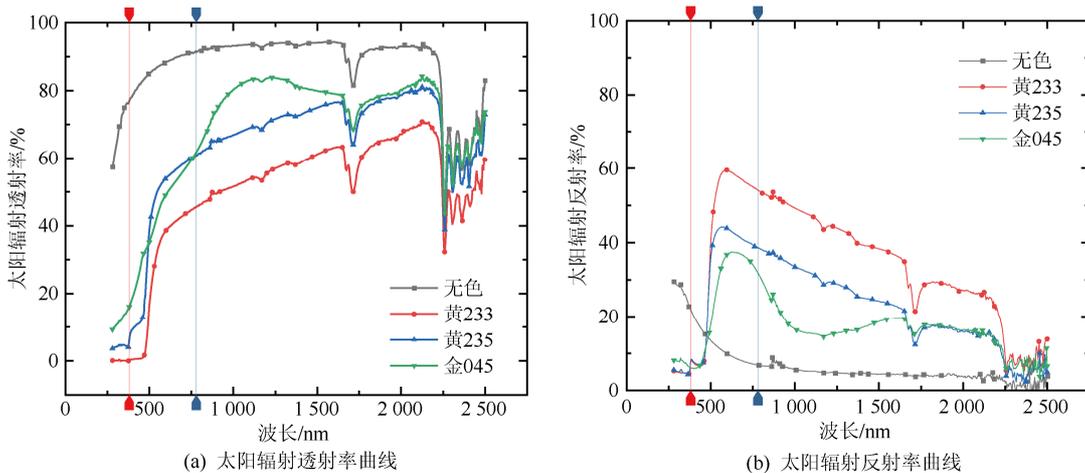


图 5 黄色组薄膜
Fig. 5 Yellow group foil

2)蓝色组薄膜的太阳辐射透射率曲线和反射率曲线见图 6。可见：在整个太阳波段范围内，薄膜的透射率遵循颜色越浅，透射率越高。对于薄膜的反射率，蓝 C1 与蓝 C5 相差不大；而蓝 C9 薄膜的透射率和反射率在整个太阳光波段内都处于较低水平，这是因为蓝 C9 薄膜的颜色是所有薄膜中最深的，其对太阳光的作用以吸收为主；蓝 C1、C5 薄膜的透射率曲线在近红外光区具有相同的走势，3 种蓝色薄膜的反射率曲线在整个太阳光波段范围内都具有相同的走势。

在可见光区，3 种蓝色薄膜的透射率和反射率曲线均出现明显极值点，且极值点所处波段刚好位于蓝靛~绿色光波段(455~577 nm)范围内。在 380 nm 处和 780 nm 处，蓝色组薄膜的透射率和反射率曲线均出现明显的跃升。

3)绿色组薄膜的太阳辐射透射率曲线和反射率曲线见图 7。可见：3 种绿色薄膜在整个太阳波段内的透射率和反射率均呈现相同的走势，且薄膜颜色越浅，对太阳光的透射率越高，反射率越低；在近红外光区，3 种

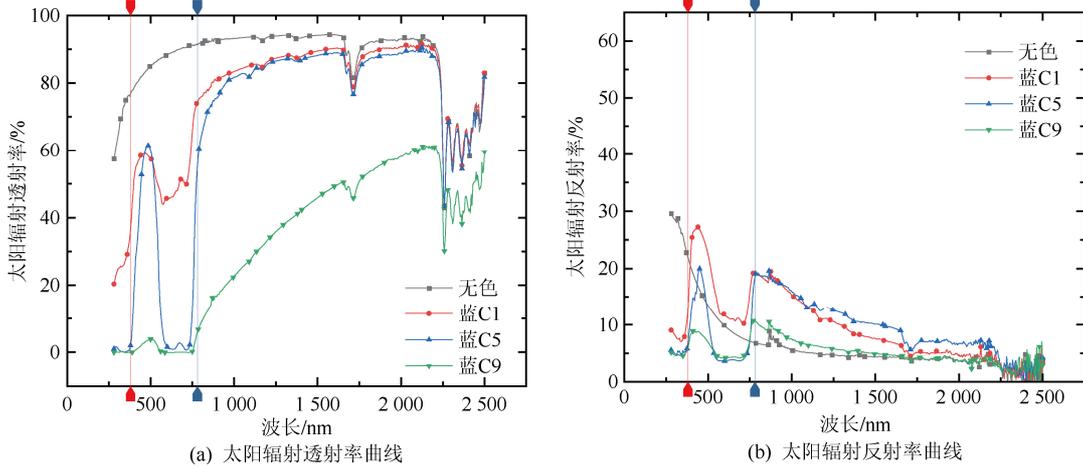


图6 蓝色组薄膜
Fig. 6 Blue group foil

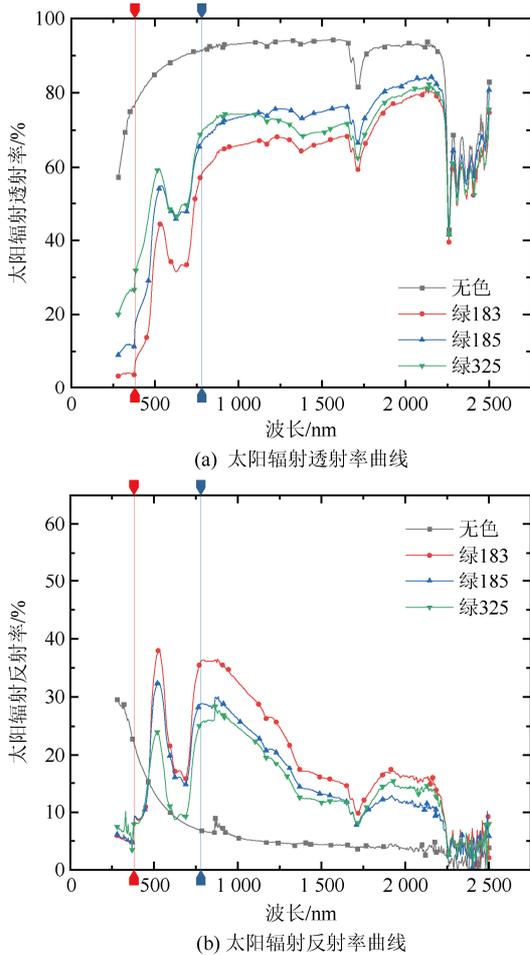


图7 绿色组薄膜
Fig. 7 Green group foil

薄膜的透射率曲线走势与无色透明薄膜一致，而反射率曲线随着波长的增加出现明显的下降。

在可见光波段两侧边界处，薄膜透射率和反射率曲线均出现跃升。在可见光区中部，3种绿色薄膜的透射

率和反射率曲线均出现极大值，且极值点都位于绿色波段内(492~577 nm)。

4)带有 20%误差线的不同颜色但透光率相近的薄膜(此处分别取金 045、蓝 C1、绿 185 薄膜)的透射率曲线与反射率曲线如图 8 所示。可见：透光率相近的薄膜，

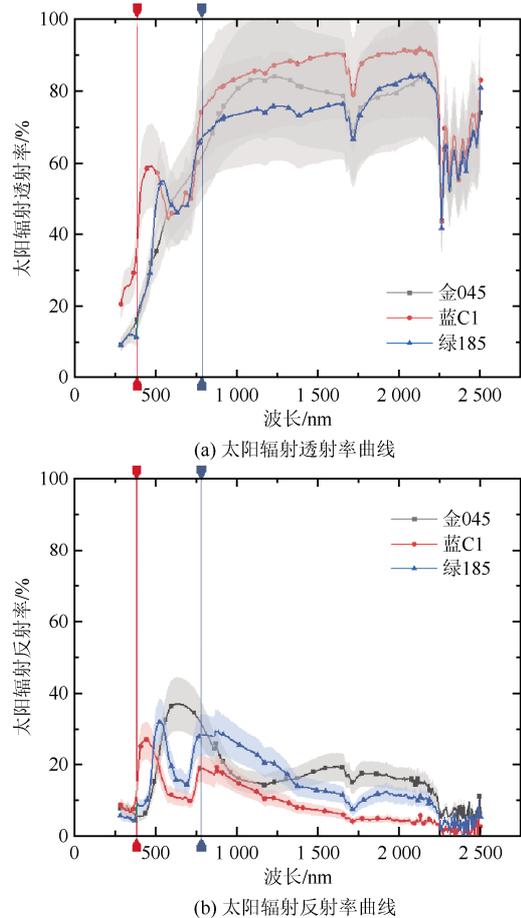


图8 透光率相同的不同颜色对照组薄膜
Fig. 8 Different color control foils with the same light transmittance

其透射率曲线与反射率曲线都相对集中, 3 种不同颜色薄膜在同一波长下的透射率和反射率差值约为 20%。

1.2.2 可见光透过率和太阳辐射系数

10 种薄膜的可见光透过率及考虑薄膜厚度后归一化的可见光透过率见表 2。可见: 所有有色 ETFE 薄膜的可见光透过率均小于无色透明 ETFE 薄膜; 黄色组和绿色组薄膜的实际可见光透过率与薄膜参数中标记的透光率略有出入, 但差值较小; 相同透光率下, 不同色系的薄膜可见光透过率存在不同, 绿色组薄膜的可见光透过率略高于黄色组薄膜, 其原因是绿光波段在可见光波段中占比最大(约为 21.25%); 蓝色组薄膜除颜色较浅的蓝 C1 外, 蓝 C5 和蓝 C9 薄膜的可见光透过率均低于黄色组和绿色组薄膜。可见有色薄膜的透光率不仅与薄膜颜色的深浅有关, 还与薄膜颜色类型有关。

表 2 有色 ETFE 薄膜的太阳辐射系数
Table 2 Solar radiation coefficient of colored ETFE foil

薄膜	厚度 t/ μm	可见光透 过率/%	归一化的可见光 透过率/(%· μm^{-1})	透射系 数 τ_d /%	反射系 数 ρ_d /%	吸收系 数 α_d /%
无色透明	300	87.00	0.29	88.58	9.38	2.04
黄 233	250	31.16	0.12	37.80	42.66	19.54
黄 235	250	48.58	0.19	52.52	30.98	16.50
金 045	250	43.57	0.17	56.63	22.89	20.48
蓝 C1	300	49.57	0.17	65.00	14.91	20.09
蓝 C5	300	24.05	0.08	46.86	10.63	42.51
蓝 C9	300	1.32	0.00	12.98	6.41	80.61
绿 183	250	38.33	0.15	45.98	24.15	29.87
绿 185	250	50.45	0.20	56.17	20.56	23.27
绿 325	250	53.60	0.21	59.41	17.02	23.57

10 种薄膜的太阳辐射系数见表 2。可以看出: 有色薄膜的透射系数均低于无色透明薄膜, 吸收系数均大于无色透明薄膜; 对比同一色系不同透光率薄膜的太阳辐射系数, 可以发现影响太阳辐射透射系数的因素是薄膜颜色的深浅; 随着薄膜颜色的加深, 薄膜太阳辐射透射系数减小, 吸收系数增大; 薄膜的反射系数在黄绿组薄膜和蓝色组薄膜中出现不同趋势, 随着薄膜颜色加深, 黄绿组薄膜的反射系数增大, 而蓝色组薄膜的反射系数减小; 但蓝色组薄膜的反射系数始终处于较低水平, 其吸收系数随着薄膜颜色的加深显著增大; 对比不同色系相同透光率有色 ETFE 薄膜, 其在太阳光波段内的透射系数、反射系数和吸收系数差异较小。可以看出, 影响薄膜太阳辐射系数大小的因素是薄膜的透光率, 即薄膜颜色的深浅, 而非薄膜的颜色。

2 有色 ETFE 薄膜热传导性能试验研究

2.1 试验方法

导热系数和热阻是衡量物体热量传输能力的参数。导

热系数 λ 又称热导率, 代表了在一定的温度梯度下材料内部传热量能力, 是材料的内禀属性, 与几何形状和尺寸大小无关, 常用单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。而热阻 R 除与材料本身的导热能力有关外, 还与材料的尺寸有关, 常用单位为 $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$ 。热阻和导热系数的转换公式如式(1)所示。

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \tag{1}$$

式中: δ 为材料的厚度^[14], m。

由于物质存在不同的导热机理, 所以测量材料导热系数的技术和手段也具有多样性, 通常分为稳态法和瞬态法两类。考虑到试验设备的局限性, 本次试验采用瞬态法中的激光闪射法测量有色 ETFE 薄膜热传导性能。

激光闪射法测量薄膜导热系数的原理如式(2)所示:

$$\lambda = \alpha c_p \rho \tag{2}$$

式中: α 为热扩散系数, 代表在热能分布不均匀的体系内, 热量扩散并趋于均匀的能力, mm^2/s ; ρ 为密度, g/cm^3 ; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 。

根据式(2), 采用激光导热仪 LFA467 测量薄膜的热扩散系数, 采用差示扫描量热仪 DSC8500 测量薄膜的定压比热容。通过查阅农博园 ETFE 膜结构设计公司网站获悉, 成都农博园主展馆采用的无色透明 ETFE 薄膜和有色 ETFE 薄膜的密度均为 $1.75 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

有色 ETFE 薄膜热传导性能试验的试样与热辐射性能试验相同, 分黄色组、蓝色组、绿色组以及无色透明对照组共 10 个试样。

2.2 试验结果分析

由差示扫描量热仪可获得薄膜试样的温度-定压比热容数据, 其中无色透明 ETFE 薄膜的温度-定压比热容曲线如图 9 所示。

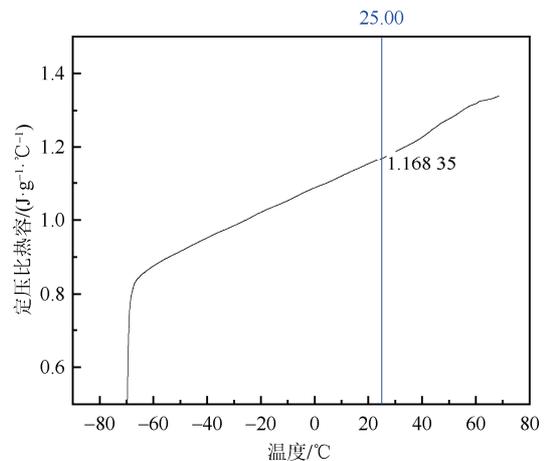


图 9 无色透明 ETFE 薄膜的温度-定压比热容曲线
Fig. 9 Temperature-fixed pressure specific heat capacity curve of colorless transparent ETFE foil

试验中所有 ETFE 薄膜在 $-50\sim 50^\circ\text{C}$ 范围内均未出现玻璃化转变, 可从试验曲线中直接获得室温条件下薄膜的定压比热容, 见表 3。

表 3 25 °C 下有色 ETFE 薄膜的定压比热容 c_p 、热扩散系数 α 、导热系数 λ 和热阻 R Table 3 Fixed pressure specific heat capacity c_p , thermal diffusion coefficient α , thermal conductivity λ and thermal resistance R of colored ETFE foil at 25 °C

薄膜	厚度/ μm	定压比热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$	热扩散系数 $\alpha/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$	热阻 $R/(\text{10}^3\text{m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1})$
无色透明	300	1.168 4	0.096	0.196 3	1.528 3
黄 233	250	1.109 0	0.087	0.168 8	1.481 0
黄 235	250	1.155 3	0.090	0.182 0	1.373 6
金 045	250	1.163 2	0.085	0.173 0	1.445 1
蓝 C1	300	1.133 8	0.087	0.172 6	1.738 1
蓝 C5	300	1.173 1	0.089	0.182 7	1.642 0
蓝 C9	300	1.100 8	0.091	0.175 3	1.711 4
绿 183	250	1.148 8	0.088	0.176 9	1.413 2
绿 185	250	1.153 7	0.088	0.177 7	1.406 9
绿 325	250	1.147 4	0.085	0.170 7	1.464 6

由激光导热仪可直接获得所需温度条件下薄膜的热扩散系数, 汇总后将 10 种薄膜的热扩散系数列于表 3。

由式(2)计算出每种薄膜的导热系数; 根据式(1), 计算得到每种薄膜的热阻见表 3。

由表 3 可知, 9 种有色 ETFE 薄膜的导热系数之间相差不超过 10%, 可见薄膜颜色及颜色的深浅对有色 ETFE 薄膜的导热系数影响不大。对比无色透明薄膜, 有色薄膜的导热系数比无色透明薄膜略低 7%~14%; 可见向 ETFE 中加入色母后, 其导热系数会有所降低, 但降幅并不大。

对比相同厚度的 ETFE 薄膜, 蓝色组薄膜的热阻比无色透明薄膜略高 7%~14%; 黄色组和绿色组薄膜的热阻均在 $0.0014\text{ m}^2\cdot\text{C}/\text{W}$ 左右, 差异较小。由于厚度小于蓝色组薄膜和无色透明薄膜, 黄色组和绿色组薄膜的热阻均小于后者, 可见影响有色 ETFE 薄膜热阻的主要因素是薄膜厚度; 相同厚度下, 有色薄膜的热阻略大于无色薄膜。

3 结论

对有色 ETFE 薄膜光热性能进行研究, 通过分析测试数据, 计算得出有色 ETFE 薄膜的可见光透过率、太阳辐射系数、导热系数和热阻, 总结了不同颜色薄膜的光热参数变化规律, 并与无色透明 ETFE 薄膜光热参数进行比较, 得出以下结论:

1) 9 种有色 ETFE 薄膜的可见光透过率、透射系数和导热系数均低于无色透明 ETFE 薄膜, 吸收系数及相同厚度下的薄膜热阻均大于无色透明 ETFE 薄膜。表明使用有色 ETFE 薄膜作为建筑围护结构能减少室内过度光照, 增加围护结构对太阳辐射的反射和吸收作用, 并在一定程度上阻挡热量的传导, 减少夏季室内过热问题。

2) 影响有色 ETFE 薄膜可见光透过率和太阳辐射系数的主要因素是薄膜颜色的深浅; 薄膜颜色越浅, 薄膜的

可见光透过率越大, 太阳辐射透射系数越大, 吸收系数越小。随着薄膜颜色加深, 薄膜对太阳光的吸收逐渐占据主导地位, 透射系数和反射系数处于较低水平。从浅色的蓝 C1 薄膜到颜色最深的蓝 C9 薄膜, 薄膜的可见光透过率降低 48.25%, 透射系数降低 52.02%, 反射系数降低 8.5%, 吸收系数增加 60.52%。

3) 有色薄膜的颜色类型和深浅对薄膜的导热系数影响不大, 不同颜色的薄膜, 其导热系数差异在 10% 左右。厚度是影响有色 ETFE 薄膜热阻大小的主要因素。相同厚度下, 有色 ETFE 薄膜的热阻比无色透明 ETFE 薄膜高出 7%~14%。

基于有色 ETFE 薄膜特殊的光热性能, ETFE 膜结构在建筑物理设计上应充分利用这些特点, 并与建筑艺术效果完美结合, 从而发挥有色 ETFE 薄膜的色彩优势, 促进其应用发展。

参考文献

- [1] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 2013, 166(6): 343-357.
- [3] 梁飞, 李斯特. “心之和, 技之和” 2010 年上海世博会日本馆设计[J]. 时代建筑, 2010, 113(3): 118-123.
- [4] 刘海峰, 曹正罡, 张建亮, 等. 大连体育中心体育场罩棚结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(1): 20-25.
- [5] 黄波. ETFE 膜结构在广州南站的应用[J]. 城市建筑, 2013, 116(12): 56-57.
- [6] 李博, 陈志华, 刘红波, 等. 天津于家堡交通枢纽 ETFE 膜结构穹顶[C]//第十五届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 开封: 2015: 480-485.
- [7] 郑方, 张欣. 水立方: 国家游泳中心[J]. 建筑学报, 2008(6): 36-47.
- [8] 李博. 膜屋面下大跨钢结构太阳辐射非均匀温度效应研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [9] 林琦, 曹立翔, 周威. 水立方薄膜(ETFE 膜)导热系数的测定[J].

- 实验科学与技术, 2011, 9(5): 60–61, 64.
- [10] Cremers J, Marx H. Comparative study of a new ir-absorbing film to improve solar shading and thermal comfort for etfe structures[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 155: 113–120.
- [11] Rohsenow W M, Hartnett J P, Cho Y I. *Handbook of heat transfer*[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [12] International Organization for Standardization. *Glass in building-determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors: ISO 9050–2003*[S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2003.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 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—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] 丁天成. 考虑膜材热工性能的气膜结构内部热环境研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

Experimental Study on Photothermal Properties of Colored ETFE Foil

Jiumei Dai¹ Jinghang Zhou¹ Jianhui Hu¹ Bing Zhao¹ Wujun Chen¹ Sijie Ren²

(1. *Space Structure Research Center of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*; 2. *Shanghai Haibo Membrane Structure Co., Ltd., Shanghai 200200, China*)

Abstract:

To meet the requirements of architectural design, colored ETFE foils have been developed and applied to modern large public buildings. However, as a new material, research on the properties of colored ETFE foils is relatively limited, especially the typical photothermal properties of ETFE foils. Starting from practical engineering applications, nine kinds of colored ETFE foils and one kind of colorless transparent ETFE foil, which were used in the Chengdu Agricultural Expo Park as representative samples, were selected for experimental testing of their light transmittance and thermal properties. Firstly, a UV visible near-infrared spectrophotometer was used to measure the transmittance and reflectance of the test foil in the solar radiation band. By comparing the trend and fluctuation of the solar radiation curves between colored ETFE foils and colorless transparent ETFE foil, the changes in the light transmittance and thermal radiation property of colored ETFE foils and colorless transparent ETFE foil in the solar radiation band were analyze. The visible light transmittance and solar radiation coefficient of the test foil were calculated and obtained. The thermal conductivity property of the test foil was measured using laser scattering method, and the thermal conductivity coefficient and thermal resistance of the test foil at room temperature were calculated. The changes in photothermal property parameters of ETFE foils with different colors are summarized and compared them with colorless transparent ETFE foil. The results show that: 1) in the ultraviolet region, both the transmittance and reflectance of colored ETFE foils are at a low level (not exceeding 30% in total), and colored ETFE foils have strong absorption capacity for ultraviolet rays. In practical use, attention should be paid to the aging problem of colored ETFE foils. 2) The visible light transmittance and solar radiation transmission coefficient of colored ETFE foil are lower than those of colorless transparent ETFE foil, and the thermal conductivity is slightly lower than that of colorless transparent ETFE foil. The solar radiation absorption coefficient and thermal resistance of the colored ETFE foil at the same thickness are both higher than those of colorless transparent ETFE foil. 3) The main factor affecting the visible light transmittance and solar radiation coefficient of colored ETFE foils is the depth of the foil color. The lighter the foil color, the greater the visible light transmittance, the greater the solar radiation transmission coefficient, and the smaller the absorption coefficient. As the color of the foil deepens, the absorption ability of the foil to sunlight gradually increases, and the transmission and reflection coefficients are relatively low. 4) The main factor affecting the thermal resistance of colored ETFE foils is the foil thickness. Under the same thickness, the thermal resistance of colored ETFE foils is 7%–14% higher than that of colorless transparent ETFE foil. The research results indicate that using colored ETFE foil as a building enclosure structure can increase the reflection and absorption of solar radiation by the enclosure structure, and to some extent block heat conduction, reducing the problem of excessive indoor lighting and summer overheating.

Key words: colored ETFE foil; light transmittance; thermal performance