

文章编号: 0253-2239(2010)02-0480-05

一种建筑节能涂料反射特性的实验研究

邹捷书 朱群志 李永光 司磊磊 穆丽娟

(上海电力学院能源与环境工程学院, 上海 200090)

摘要 太阳热反射涂料用在建筑物上可以节约空调制冷耗能,提高室内环境热舒适性。其作用效果与节能涂料的反射率密切相关。在太阳光谱范围内,反射率越大,效果越明显。通过实验研究波长、入射角及涂料厚度对反射率的影响。测量涂料在可见光区域内波长为 635 nm 及近红外区域内波长为 980 nm 的双向反射分布函数(BRDF),根据双向反射分布函数得到法向半球反射率,比较涂层厚度对半球反射率的影响。测试表明,涂料在镜反射方向出现明显的峰值,且随着入射角和波长的增大,前向散射峰值变大。涂层厚度对半球反射率的影响很小,入射波长为 635 nm 和 980 nm 时,半球反射率分别为 83%和 75%。

关键词 散射;太阳热反射涂料;半球反射率;双向反射

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0480

Experimental Study of the Reflectance for Architectural Energy Saving Coatings

Zou Jieshu Zhu Qunzhi Li Yongguang Si Leilei Mu Lijuan

(School of Energy Sources and Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract The use of solar reflective coatings on the building envelope can reduce the energy consumed by the air conditioner and provide a thermally comfortable indoor environment. Performance of the energy saving coating is closely related to its reflectance. The higher reflectance in the solar spectrum, the more energy could be saved. The effects of wavelength, incident angle and thickness of the coatings on reflectance are investigated based on the measurement results. The bidirectional reflectance distribution functions (BRDF) at visible wavelength 635 nm and near-infrared wavelength 980 nm are measured and the effects of coating thickness on the normal-hemispherical reflectance which is calculated from the measured BRDFs are discussed. The results show that there is a remarkable peak at the specular direction in the BRDFs. The peak value becomes high as the incident angle and wavelength increase. The thickness has insignificant influence on the normal-hemispherical reflectance, which is 83% at 635 nm and 75% at 980 nm, respectively.

Key words scattering; solar reflective coatings; normal-hemispherical reflectance; bidirectional reflectance

1 引 言

太阳热反射涂料因其对太阳光的高反射率成为一种建筑节能涂料,用在外墙和屋顶可以显著地降低夏日室内温度,节约空调耗电,提高室内环境热舒适性^[1~3]。研究表明涂料的节能程度与其在太阳光

谱波段的反射率成正比^[4]。太阳辐射的能量主要集中在波长为 0.2~2.5 μm 的范围内,其中紫外区(0.2~0.4 μm)占总能量的 5%,可见光区(0.4~0.72 μm)占 45%,近红外区(0.72~2.5 μm)占 50%^[5]。研究节能涂料在太阳辐射能量集中区域的

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(50606022)、上海市科委重点项目(08DZ1203600,08160512400)和上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划资助课题。

作者简介: 邹捷书(1985—),女,硕士研究生,主要从事辐射换热方面的研究。E-mail: zoujieshu@126.com

导师简介: 朱群志(1972—),男,博士,教授,主要从事材料热物性、辐射换热等方面的研究。

E-mail: zhuqunzhi@shiep.edu.cn

反射特性是很有必要的。

表征涂料反射性能的重要参数之一是反射比,其定义是给定表面的反射辐射与入射辐射能量之比。目前国内大多采用青岛海洋化工研究院设计的简易装置来测定涂料的太阳光反射比^[5,6]。应用该装置测试反射比虽然简单,但存在一些弊端^[6]。例如,测试装置采用碘钨灯来模拟太阳热辐射,但碘钨灯发射光谱中能量对波长的分布与太阳辐射光谱不一致,并且不同碘钨灯的发射光谱也不同。

国外一般采用带积分球的紫外/可见/近红外分光光度计测量涂料的反射比^[6,7],样品的入射角在 $6^\circ\sim 10^\circ$ 左右,因此只能得到近法向入射的反射比。然而一天中太阳的高度是不断变化的,太阳光对屋顶及外墙表面的入射角也在变化,因此研究涂料在不同入射角度的反射特性对建筑墙体的传热分析具有重要意义。

双向反射分布函数(BRDF)是描述表面反射特性的基本参数,已广泛应用于材料表面性质的研究^[8~10]。张伟等^[11]测量了锡箔和陶瓷在不同入射角及不同波长谱段的双向反射分布函数,材料显示出比较明显的镜向反射特性。谢鸣等^[12]测量了花岗岩表面的双向反射分布函数,分析了入射角度和波长对双向反射分布函数的影响。本文测量了太阳热反射涂料的双向反射分布函数,分析入射角、入射波长和涂层厚度对反射率的影响。

2 双向反射分布函数与半球反射率

2.1 双向反射分布函数

双向反射分布函数(BRDF)是某一方向的光谱辐射强度与入射能量之比,其定义式为^[13]

$$f_{\text{BRDF}-\lambda}(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r) = \frac{I'_\lambda(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r)}{I_\lambda(\theta_i, \beta_i) \cos \theta_i d\Omega_i}, \quad (1)$$

式中 θ_i 和 β_i 分别为入射光线的极角和方位角, θ_r 和 β_r 是反射光线的极角和方位角,其定义如图1所示。

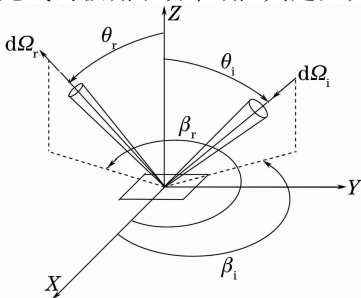


图1 入射光线和反射光线的几何坐标

Fig. 1 Geometry of incident and reflected beams

$I_\lambda(\theta_i, \beta_i) \cos \theta_i d\Omega_i$ 是立体角 $d\Omega_i$ 内、单位时间、单位面积的入射能量, $I'_\lambda(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r)$ 是由入射光引起的 (θ_r, β_r) 方向的光谱辐射强度。BRDF 是一个描述表面反射特性的基本参数,如果已知半球空间内所有方向的 $f_{\text{BRDF}-\lambda}(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r)$, 则可求出表面所有的反射特性参数^[13]。

2.2 半球反射率

光谱方向-半球反射率 $\rho_\lambda(\theta_i, \beta_i, 2\pi)$ 表示整个半球内反射的能量占入射能量的比例,其定义为^[13]

$$\rho_\lambda(\theta_i, \beta_i, 2\pi) = \frac{\int_{2\pi} I'_\lambda(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r) \cos \theta_r d\Omega_r}{I_\lambda(\theta_i, \beta_i) \cos \theta_i d\Omega_i}, \quad (2)$$

它与 BRDF 的关系是^[13]

$$\rho_\lambda(\theta_i, \beta_i, 2\pi) = \int_{2\pi} f_{\text{BRDF}-\lambda}(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r) \cos \theta_r d\Omega_r, \quad (3)$$

入射方位角 β_i 不变时,若 BRDF 与反射方位角 β_r 无关,则(3)式可简化成

$$\rho_\lambda(\theta_i, \beta_i, 2\pi) = 2\pi \int_{\theta_r=0}^{\theta_r=\frac{\pi}{2}} f_{\text{BRDF}-\lambda}(\theta_i; \theta_r) \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r, \quad (4)$$

3 实验测量

3.1 样品制作

实验所用涂料以丙烯酸乳液加入空心玻璃微珠和金属微粒制备而成。测试样品的准备过程是先将玻璃用去离子水清洗后晾干,然后再抹上涂料自然干燥。样品分成3组,每组4块样品的涂层厚度基本相同,第1组平均厚度为0.24 mm,第2组为0.31 mm,第3组为0.42 mm。以下论述中,样品标号第1个数字表示组别,第2个数字表示该组中样品序号。目测样品表面均匀,无明显凸起和凹坑,用高精度表面粗糙度测量仪测得样品#2-3的粗糙度 R_a 为 $0.735 \mu\text{m}$ 。

3.2 实验系统

BRDF 的测量分为直接测量和间接测量,本次实验采用的是直接测量,其测量方程如下^[14,15]

$$f_{\text{BRDF}-\lambda}(\theta_i, \beta_i; \theta_r, \beta_r) = \frac{S_r}{S_i} \frac{1}{\cos \theta_r d\Omega_r}, \quad (5)$$

式中 S_i 和 S_r 是探测器接收的入射辐射和反射辐射的信号值。 $d\Omega_r$ 是反射立体角, $d\Omega_r = A_r/D^2$, 式中 A_r 是探测器的接收面积, D 是探测器和样品之间的距离。

实验装置由光源系统、自动测角仪和探测器组

成。激光光源带有驱动器和温控仪,输出功率稳定,波长漂移小。激光发出的单色光通过光阑、透镜、扩束镜、斩光器和起偏器后,被分束镜分成两束,一束光作为参比信号,另一束投射到样品,其反射信号被

在半球面上移动的探测器接收。参比信号和反射信号经过前置放大器和锁相放大器后输出。计算机通过高精度转台改变样品和探测器的角度。实验系统的原理如图 2 所示。

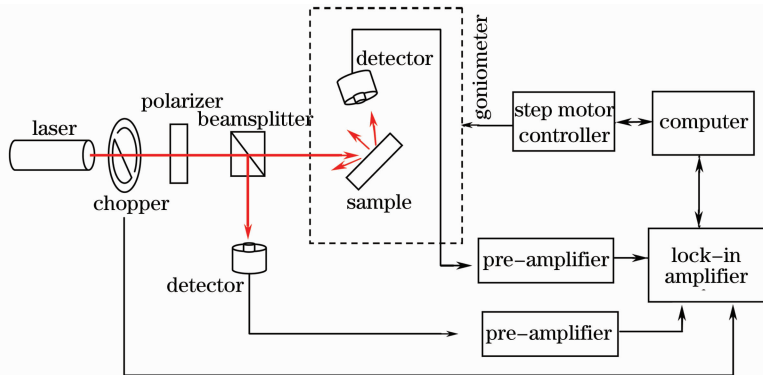


图 2 BRDF 测量系统的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of BRDF measurement system

4 测量结果及分析

4.1 BRDF 特性分析

从实验结果来看,当入射角、入射波长和偏振状态相同时,不同样品的 BRDF 变化规律基本一致,图 3 给出了 12 块样品 BRDF 的平均值及样品标准方差,图中曲线表示的是 BRDF 的平均值,误差线给出了样品标准方差。从图中可以看出,只有在反射极角较大的情况下方差比较大。为方便讨论,图 4~7 均以涂刷两次的样品的测量值来描述。

图 3(a)的测试条件是 p 偏振入射。当入射角为 0 时,BRDF 曲线关于法向基本对称。入射角为 45° 时,BRDF 随反射角变化比较平缓;但在反射角为 ±45° 位置上 BRDF 曲线出现微弱的双峰。入射角为 15° 和 30° 时 BRDF 的变化情况与 45° 的类似,图 3(a)

中未显示。与入射角为 45° 相比,入射角为 60° 时,镜反射方向上的峰值明显增大,而在反射角为 -60° 的峰值也有所增大。

图 3(b)的测试条件是入射为 s 偏振。入射角为 0 时 BRDF 曲线关于法向基本对称。当入射角为 45° 和 60° 时,BRDF 在镜反射方向附近出现峰值,且随着入射角的增大,峰值也增大,入射角为 60° 时 BRDF 的峰值是 45° 的 4 倍。比较图 3(a), (b), 涂料在 s 偏振下的 BRDF 值大于 p 偏振的 BRDF。原因可能是:粗糙表面可以看成由很多微表面组成,入射光在微表面的反射为镜向反射。如果入射角和反射角都相同, BRDF 与微表面的镜向反射率成正比^[16]。材料 s 偏振的反射率比 p 偏振的大。因此, BRDF 的特点是 s 偏振比 p 偏振大。

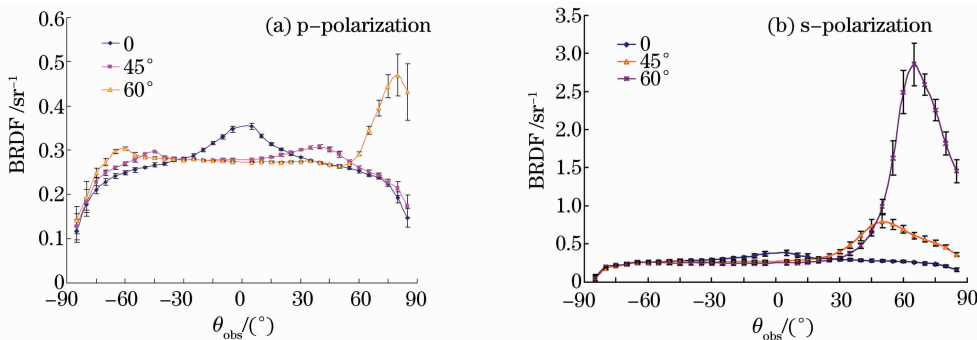


图 3 不同偏振状态入射光的 BRDF

Fig. 3 BRDF of different polarization

大多数情况下热辐射都是非偏振的,因此研究非偏振入射光的 BRDF 更有实际意义。图 4 给出了波

长为 635 nm 无偏振入射光的 BRDF,图中可见 BRDF 的变化趋势基本和 s 偏振入射相同,变化规律也是

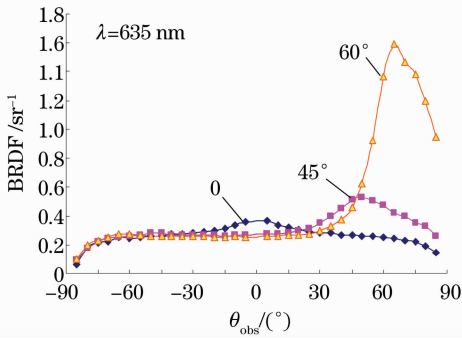


图 4 入射波长为 635 nm 的 BRDF

Fig. 4 BRDF at wavelength of 635 nm

BRDF 随着入射角的增大,前向散射峰值变大,镜向反射特性更明显。这与表面粗糙度的影响有关,一种划分表面粗糙度的标准是^[12]:光滑表面 ($h < \lambda/25\cos \theta_i$);中等粗糙面($\lambda/25\cos \theta_i < h < \lambda/8\cos \theta_i$);粗糙表面($h > \lambda/8\cos \theta_i$)(h 表示表面上两点的相对高度)。因此对于同一样品,当入射波长 λ 不变时,随着 θ 的增大,表面表现得更为光滑,镜向反射特性更为突出。

图 5 比较了不同波长的 BRDF。入射波长为 980 nm 的 BRDF 比 635 nm 镜向反射特性更为突出,即前向散射峰值增大。这是由于波长越大,同一样品对入射光变得更为光滑。

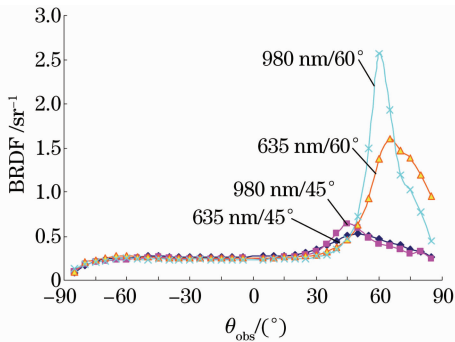


图 5 不同波长的 BRDF

Fig. 5 BRDF at different wavelength

图 6 给出了样品 # 2-2 在法向入射时,不同反射方位角的 BRDF。可以看出:除了反射极角很大的情况,方位角不同引起的 BRDF 的差别较小。反射极角为大角度时不同方位角的 BRDF 的差别较大,原因可能是这些位置上测量值的不确定度较大。总体上看,法向入射时反射方位角对 BRDF 的影响较小,涂料表现为各向同性。

4.2 法向半球反射率

根据(4)式,如果 BRDF 和反射方位角无关,只要测量入射平面的 BRDF,就可以计算法向半球反射率。尽管涂料测量结果显示反射极角为大角度

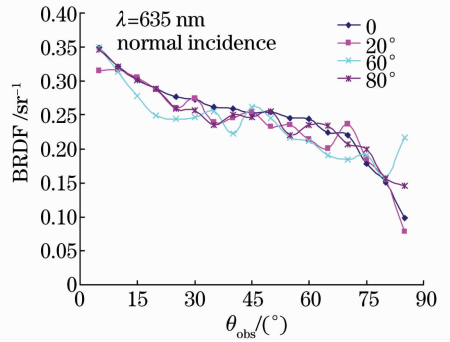


图 6 不同反射方位角的 BRDF

Fig. 6 BRDF of different reflection azimuth angle

时不同方位角的 BRDF 存在一定差别,然而由于乘积中存在 $\cos \theta_r$ 项,其对计算结果的影响可以忽略。法向入射时入射平面的 BRDF 如图 7 所示,波长为 635 nm 的 BRDF 基本比 980 nm 的要大。虽然 3 组样品的厚度不同,但计算得到的法向半球反射率基本相同。涂料厚度在 0.24 mm 到 0.42 mm 之间时,涂层厚度对半球反射率的影响很小。入射波长为 635 nm 时半球反射率是 83%,波长为 980 nm 时半球反射率是 75%。

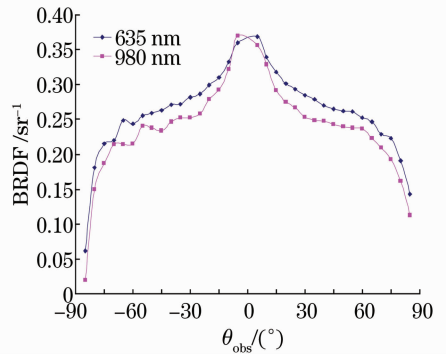


图 7 法向入射时入射平面的 BRDF

Fig. 7 In-plane BRDF at normal incidence

5 结 论

通过实验研究了多种因素对太阳热反射涂料双向反射分布函数的影响。法向入射时,BRDF 曲线关于法向基本对称。斜向入射时,BRDF 曲线在镜反射方向出现峰值。入射光为 p 偏振时,在后向散射方向,也会出现微弱的峰值。非偏振入射光的 BRDF 曲线与 s 偏振时的 BRDF 基本类似,随着入射角度和波长的增大,镜向反射特性表现得越来越明显,即前向散射峰值增大。通过入射平面内 BRDF 的测量值计算了涂料的法向-半球反射率,结果表明涂层厚度对法向-半球反射率的影响很小。涂料厚度在 0.24 mm 到 0.42 mm 之间时,波长为 635 nm 时的半球反射率

是 83%，波长为 980 nm 时的半球反射率是 75%。

参 考 文 献

- 1 H. Akbari. Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings [J]. *Energy*, 2003, **28**(9): 953~967
- 2 Chen Zhonghua, Jiang Jiang, Zhang Guijun *et al.*. Preparation of thermal insulation architectural coating with compound mechanism[J]. *Acta Energize Solaris Sinica*, 2008, **29**(3): 257~262
陈中华,姜 疆,张贵军等. 复合型建筑隔热涂料的研制[J]. *太阳能学报*, 2008, **29**(3): 257~262
- 3 A. Synnefa, M. Santamouris, K. Apostolakis. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment[J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(4): 488~497
- 4 X. Wang, C. Kendrick, R. Ogden *et al.*. Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(8-9): 1066~1073
- 5 Guo Nianhua, Chen Xian, Chen Shaoping *et al.*. Solar heat reflective coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*, 1999, **29**(4): 73~75
郭年华,陈 先,陈绍平等. 太阳热反射涂料[J]. *涂料工业*, 1999, **29**(4): 73~75
- 6 Lu Hongbin, Chen Jianhua, Feng Chunxia *et al.*. Determination and calculation for the heat reflectance of solar reflective coatings [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2008, **38**(7): 46~49
陆洪彬,陈建华,冯春霞等. 太阳热反射涂料反射比的测定与计算[J]. *涂料工业*, 2008, **38**(7): 46~49
- 7 P. A. van Nijnatten. An automated directional reflectance/transmittance analyser for coating analysis[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **442**(1-2): 74~79
- 8 Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo *et al.*. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1001~1004
张雷洪,杨 艳,臧华国等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1001~1004
- 9 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
曹运华,吴振森,张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 10 Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. Study of polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 290~294
冯巍巍,魏庆农,汪世美等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 290~294
- 11 Wei Zhang, Hongyuan Wang, Zhile Wang. Measurement of bidirectional reflection distribution function on material surface [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(1): 88~91
- 12 Xie Ming, Xu Hui, Zou Yong *et al.*. Experiment methodology of moorstone's supface BRDF [J]. *Engineering Thermophysics*, 2005, **26**(4): 283~285
谢 鸣,徐 辉,邹 勇等. 花岗岩表面双向反射分布函数实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, **26**(4): 283~285
- 13 Yu Qizheng. Heat Transfer of Thermal Radiation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. 18~21
余其铮. 辐射换热原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 18~21
- 14 Y. J. Shen, Z. M. Zhang, B. K. Tsai *et al.*. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. *International J. Thermophysics*, 2001, **22**(4): 1311~1326
- 15 P. Yvonne Barnes, Edward A. Early, Albert C. Parr. NIST measurement services: spectral reflectance [C]. *National Institute of Standards and Technology Special Publication*, 1998, 4~10
- 16 Qunzhi Z. Zhu, Zhuomin M. Zhang. Correlation of angle-resolved light scattering with the microfacet orientation of rough silicon surfaces [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(7): 073601-1~073601-12