

建筑材料表面红外双向反射分布函数实验分析

谢 鸣¹, 黄 勇², 王晓春¹, 赵欢欢¹, 谈和平¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150001 哈尔滨, xieming@hope.hit.edu.cn;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 100191 北京)

摘 要: 为了深入研究建筑物表面红外反射分布特性和散射分布特性, 选择建筑外饰面常用的 3 种典型材料(如花岗岩、铝板和镀膜玻璃), 通过自行搭建双向反射分布函数(BRDF)实验台, 利用聚四氟乙烯粉压制标准白板(近似朗伯体)为单一参考试样, 分别用 0.632 8、1.340 0 和 3.390 0 μm 波段 3 种激光器, 在不同的入射角度下, 对各材料表面的 BRDF 分布进行了测量. 结合其表面粗糙度并通过实验数据探讨了其表面反射特性与散射特性, 指出了镀膜玻璃表面在近中红外区(入射波长为 3.390 0 μm)其表现上反射存在多峰值的现象, 同时其 BRDF 分布值较 0.632 8 和 1.340 0 μm 的有明显提高. 该研究结果表明: 不同入射波长时镀膜玻璃表面反射具有较大的差异性.

关键词: 双向反射分布函数; 表面粗糙度; 光散射; 偏镜峰

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)03-0049-05

Experimental analysis of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of exterior finishing surface for typical building

XIE Ming¹, HUANG Yong², WANG Xiao-chun¹, ZHAO Huan-huan¹, TAN He-ping¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, xieming@hope.hit.edu.cn;

2. School of Avigation Science and Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China)

Abstract: Since the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) could show well the infrared reflecting and scattering characteristics of exterior surface of buildings, three typical materials, granite, aluminum sheet and coated glass, which are often used on the exterior finishing surface of high-rise buildings, were chosen to be investigated. The BRDF distributions of these surfaces were measured by laser waves of 0.632 8 μm , 1.340 0 μm and 3.390 0 μm respectively at different incidence angles, using the white standard plate (approximate Lambert Body) as a single sample, and the reflecting and scattering characteristics of these surfaces were analyzed. When the length of laser wave is 3.390 0 μm , there is a phenomenon of more peaks on the reflecting of coated glass's surface and the values of these peaks are higher than that of 0.632 8 μm and 1.340 0 μm at the same time. It is shown that there is large diversity in the reflecting of coated glass's surface with different incidence waves.

Key words: bidirectional reflectance distribution function (BRDF); surface roughness; light scattering; partial mirror peak

双向反射分布函数(BRDF)^[1]是描述材料表面空间反射分布特性和散射分布特性的物理量,

可以用来评估各类材料表面在可见光到中远红外波段的反射、吸收和散射特性, 所以在地面目标红外成像或隐身等技术应用方面具有重要的意义^[2-4]. 目前, 国内外高层建筑外墙饰面多采用花岗岩石材幕墙、单层铝板金属幕墙和镀膜玻璃幕墙. 在这类建筑表面红外热辐射特性与红外成像模拟的研究中需要了解上述外饰面材料的表面反

收稿日期: 2010-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50606003).

作者简介: 谢 鸣(1958—), 男, 教授, 博士生导师;

黄 勇(1978—), 男, 副教授, 博士生导师;

谈和平(1952—), 男, 教授, 博士生导师.

射和散射分布特性,国外在这方面文献很少,国内开展的研究也不多,其实验研究则更少.

本文将花岗岩、铝板和镀膜玻璃作为待测样品,通过自行搭建 BRDF 实验台,利用聚四氟乙烯粉压制的标准白板(近似朗伯体并已知反射比)为单一参考试样,分别在 0.632 8、1.340 0 和 3.390 0 μm 波段(只在镀膜玻璃进行),在不同的人射角度下,对待测样品表面的 BRDF 分布进行了测量,结合其表面粗糙度和实验数据分析各材料表面反射特性与散射特性.

1 BRDF 实验装置与测量方法

根据 BRDF 概念(图 1)并结合粗糙面电磁散射理论,一般将其定义为^[5-6]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}.$$

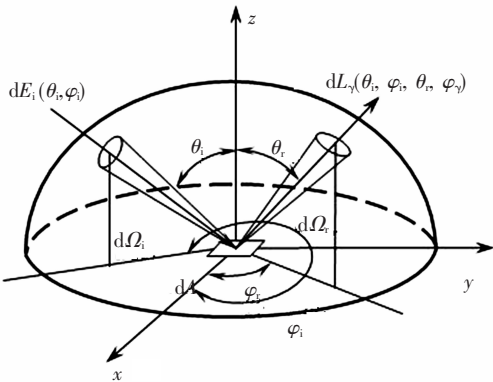


图 1 双向反射分布函数示意图

式中, θ, φ 分别是球坐标下的天顶角和方位角,下标 i、r 分别代表入射量和反射量, $L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$

为 (θ_r, φ_r) 方向的反射亮度, $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射照度. f_r 可在 $0 \sim \infty$ 之间变化,其量纲为 sr^{-1} .

令入射、接受条件相同,待测样品的反射亮度可通过接受探测器的电压输出得到:

$$V_s = \tau_s \mathcal{R}_s L_s A_s \cos \theta_s A_d \cos \theta_d / d_s^2. \tag{1}$$

待测样品的入射照度与标准板的入射照度相同,标准板的入射照度可通过接受探测器的输出电压得到:

$$V_B = \tau_B \mathcal{R}_B f_B E_B A_B \cos \theta_B A_d \cos \theta_d / d_B^2. \tag{2}$$

式中, S、B 分别表示待测样品及标准样, τ 为光透射率, $\mathcal{R}$ 为探测器响应率, A_s, A_B 为试样、标准板被照的面积, A_d 为探测器面积, θ_s, θ_B 分别为待测样品、标准白板反射天顶角, θ_d 为入射天顶角, d 为探测器到试样距离, f_B 为标准试样的 BRDF 值, 则有

$$f_s = f_B \frac{V_B}{V_s} \cdot \frac{\tau_B \mathcal{R}_B E_B A_B \cos \theta_B A_d \cos \theta_d / d_B^2}{\tau_s \mathcal{R}_s E_s A_s \cos \theta_s A_d \cos \theta_d / d_s^2}.$$

其中, $f_B = L_B / E_B$, 合理选择式中参数, $\tau, \mathcal{R}, A, E, A_d \cos \theta_d / d_r^2$ 均为常量, 则待测样品的 f_s 由输出电压表示的表达式为

$$f_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = f_B \frac{V_s \cos \theta_B}{V_B \cos \theta_s}. \tag{3}$$

2 实 验

2.1 测量系统组成

测量系统由光学调试系统、机械转动系统、加热系统(本文涉及的实验没有启用)和电路接收系统 4 部分组成. 图 2 为测量装置系统图.

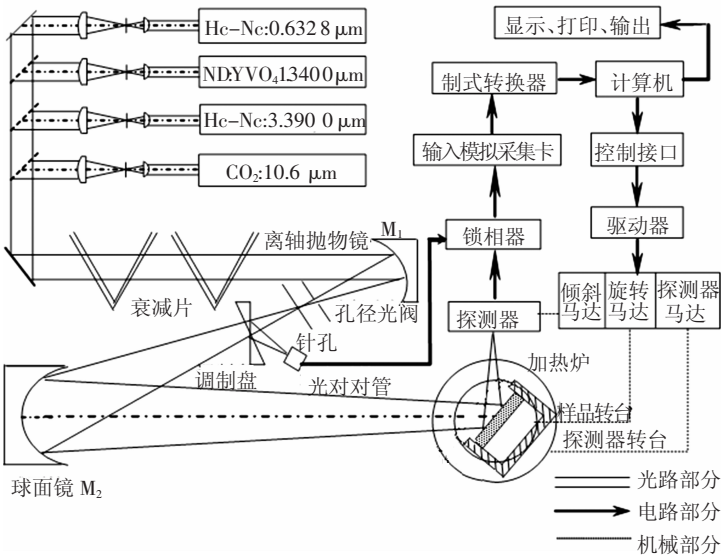


图 2 BRDF 测量装置原理图

测试系统光源的激光波长包括可见光的 0.632 8 μm , 近红外的 1.340 0 μm , 中红外的 3.390 0 μm 及中远红外 10.60 0 μm 的波段, 完成了多波段的测量^[7-8].

2.2 测量方法

测量双向反射分布函数可分为绝对测量和相对测量^[9]. 绝对测量是在不使用任何参考标准的情况下进行的测量; 而相对测量则是利用已知反射比的参考标准与待测样品做比较的测量. 相对测量又可分为比对测试法和单一参考法. 本实验采用单一参考法, 即先按公式(1)测量样品表面的电压值 V_s ; 再按公式(3)测量相同几何条件下标准白板表面的电压值 V_B , 由公式(3) 获得样品BRDF 值.

2.3 误差分析

通过3块已知反射比标准白板在BRDF实验台上互为比较的测量方法来标定该实验台的误差, 测量误差能够控制在20%以内^[10].

3 材料表面特点

3.1 花岗岩

花岗岩是一种深层酸性火成岩, 成分为 SiO_2 (质量分数多在70%以上)、石英、长石和少量黑云母且分布不均匀. 表面颜色多样, 多呈斑块状, 经过水磨抛光处理粗糙均匀.

3.2 铝板

建筑用铝板为防锈铝(代号LF21), 板厚度为2.5 mm. 其表面处理可分为2种方法, 一种是阳极氧化, 另一种是静电喷涂. 本文采用的铝板样片为阳极氧化, 氧化膜厚度在12 μm 以上, 颜色为白色. 因铝板材质均匀且表面形成氧化膜, 所以可认为是微粗糙.

3.2 镀膜玻璃

镀膜玻璃按产品的不同特性分为: 热反射玻璃、低辐射玻璃(Low-E)、导电膜玻璃等. 本文采用样片为热反射玻璃. 该镀膜玻璃是在玻璃表面镀一层或多层诸如铬、钛或不锈钢等金属或其化合物组成的薄膜, 使产品呈丰富的色彩, 对于可见光波段(0.38 ~ 0.76 μm) 透射率较高(约0.8), 对红外线(0.76 ~ 2.50 μm) 有较高的反射率(约0.7)^[11]. 镀膜玻璃表面光滑, 对波长有明显的选择性且影响因素复杂, 所以本文给出3个波段的BRDF实验曲线.

4 BRDF 的数据采集结果

分别在0.632 8、1.340 0和3.390 0 μm 波段对花岗岩、铝板和镀膜玻璃表面, 以0°、30°、45°、

60°等入射天顶角进行了测量, 因篇幅所限, 仅给出代表性角度时各材料表面BRDF实验曲线.

4.1 花岗岩

图3为0.632 8 μm 波段下, 入射天顶角度30°和45°时, 花岗岩表面BRDF分布情况. 由图3可知, 30°时在镜反射方向有明显峰值, 同时还存在偏镜峰现象. 但45°时镜反射方向峰值明显小于30°的峰值, 偏镜峰现象几乎消失. 这是因为花岗岩表面虽然经过水磨抛光处理, 但还是存在粗糙不均匀情况, 所以随入射角增大, 其镜反射份额会减少, 使面散射份额增大, 偏镜峰现象减少, 其表面粗糙程度对镜反射的影响就越明显.

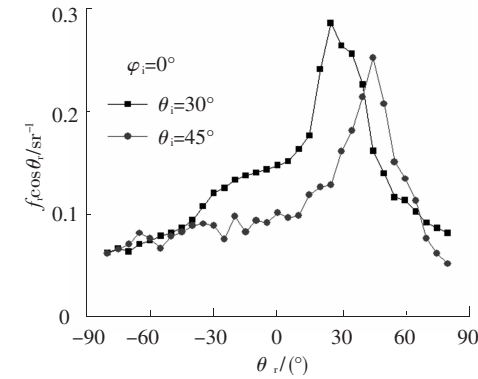


图3 0.632 8 μm 波段, 入射天顶角 30°和 45°时花岗岩 BRDF 分布

在1.340 0 μm 波段时, 仍在这2个入射天顶角度下(如图4), 花岗岩表面的反射均存在一定的偏镜峰现象; 因其表面粗糙度与分布没有变化, 所以BRDF分布与0.632 8 μm 波段基本相同, 但峰值都比0.632 8 μm 波段的高. 通过在该波段下对标准白板表面比照, 初步分析认为是该表面对1.340 0 μm 具有较强的反射趋势, 其原因是表面形貌分布相对于波长来说更趋于光滑.

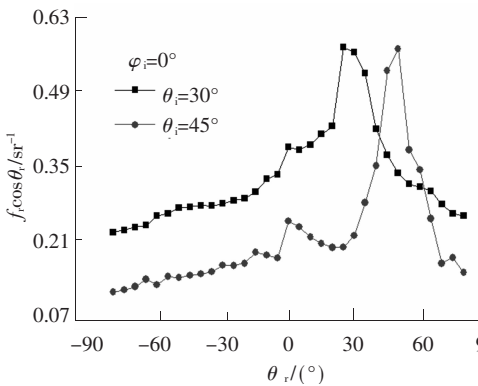


图4 1.340 0 μm 波段, 入射天顶角 30°和 45°时花岗岩 BRDF 分布

4.2 铝板

0.632 8 和 1.340 0 μm 波段铝板对入射光反射的实验结果如图 5 和图 6 所示. 对于非镜反射方向, 铝板的 BRDF 值小于花岗岩的. 对于镜反射 (或接近镜反射方向), 铝板的 BRDF 值明显大于花岗岩的. 在 0.632 8 μm 波段, 随着入射角的增加, BRDF 的峰值也增加; 在 1.340 0 μm 波段, 随着入射角的增加, BRDF 的峰值变化不大. 另外, 铝板的反射偏镜峰现象不太明显.

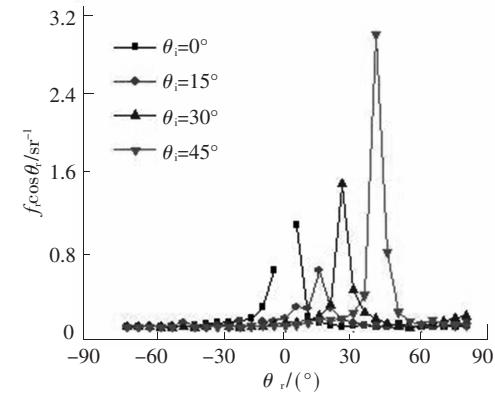


图 5 0.632 8 μm 波段,不同入射角时的 BRDF 分布

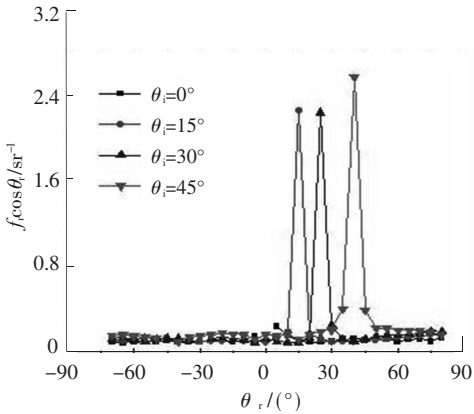


图 6 1.340 0 μm 波段,不同入射角时的 BRDF 分布

4.3 镀膜玻璃

图 7 ~ 12 为镀膜玻璃的实验结果. 可以看出,镀膜玻璃的表面反射情况更为复杂,这是因为花岗岩和铝板的反射基本可以认为是由材料表面的特性所决定. 而镀膜玻璃表面的镀层是半透明的,它所表现出的反射特性是由镀层表面的反射、光线在镀层中的衰减传递、光线在镀层/玻璃界面的反射/折射等多个过程所体现的综合效果. 从实验结果可以看出,随着入射波长的增大,反射的双峰值和多峰值的情况非常明显,同时 BRDF 数值也随入射波长的增大而增大.

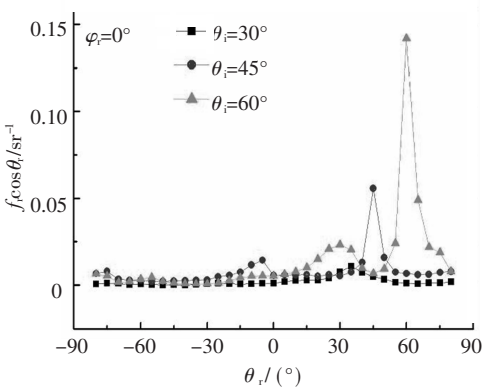


图 7 反射方位角 0°,不同入射天顶角下 BRDF 分布(0.632 8 μm)

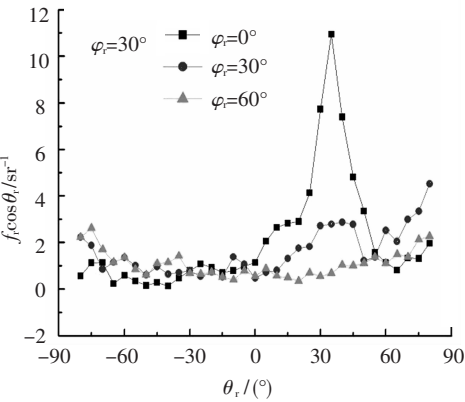


图 8 入射天顶角 30°,不同反射方位角下 BRDF 分布(0.632 8 μm)

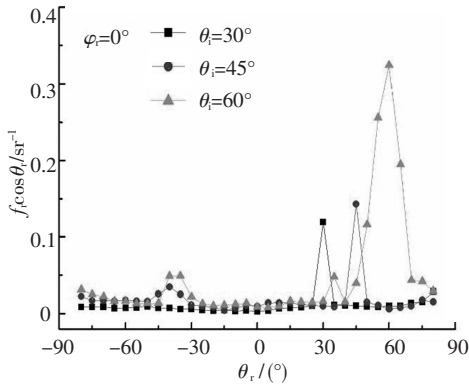


图 9 反射方位角 0°,不同入射天顶角下 BRDF 分布(1.340 0 μm)

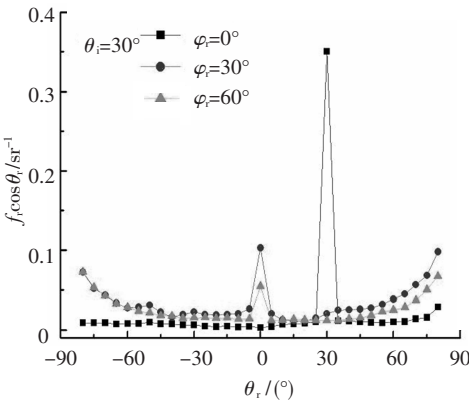


图 10 入射天顶角 30°,不同反射方位角下 BRDF 分布(1.340 0 μm)

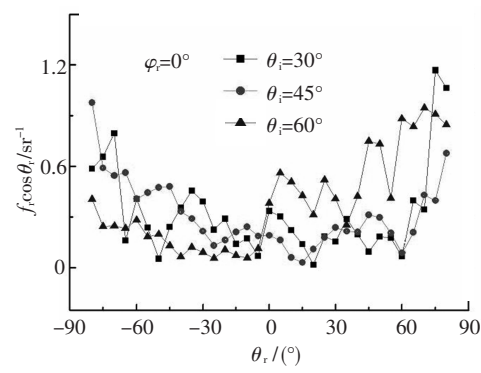


图 11 反射方位角 0°,不同入射天顶角下 BRDF 分布(3.390 0 μm)

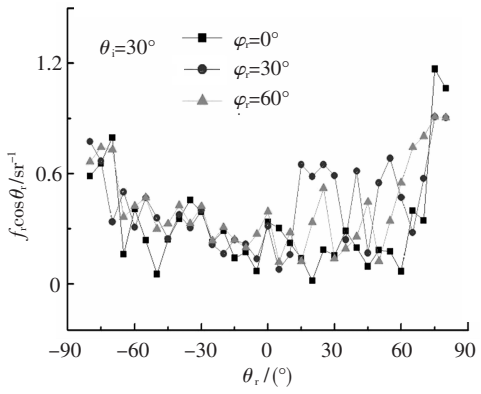


图 12 入射天顶角 30°,不同反射方位角下 BRDF 分布(3.390 0 μm)

5 结 论

1) 由于不同材料的表面粗糙程度、入射波长、参与性介质(如玻璃镀膜)和入射角度等因素影响,各表面的反射或散射特性差异很大。

2) 对于可视为不透明的材料,它的反射存在着较为明显的偏镜峰现象。对多介质构成和对入射波长有选择性的材料(如镀膜玻璃),因其入射光波在材料表面与内部存在反射、折射和投射等情况,使表面反射特性变得复杂,所以随着入射波长的增大,特别是到了近中红外区(入射波长为 3.390 0 μm),其表观上反射存在多峰值的现象,

同时其 BRDF 分布值较 0.632 8 和 1.340 0 μm 明显分布值提高。

3) 在考虑建筑表面红外热辐射特性与红外成像模拟的研究时,必须考虑到其材料表面反射或散射特性的差异性。

参考文献:

[1] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970,9(6):1474-1475.

[2] 姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京:宇航出版社,1995:274-275.

[3] 韩玉阁,宣益民,汤瑞峰. 丛林随机生成模型及其红外特征模拟[J]. 红外与毫米波学报,1999,18(1):299-304.

[4] 张建奇,方小平,张海兴. 自然环境下地表红外辐射特性对比研究[J]. 红外与毫米波学报,1994,13(6):418-424.

[5] HE X D, TORRANCE K E, SILLION F X, et al. A Comprehensive physical model for light reflection[J]. ACM Computer Graphics,1991,25(4):175-186.

[6] 谢东辉. 目标与地物背景光散射特性建模[D]. 西安:西安电子科技大学,2002.

[7] 齐超,杨茂华,孙晓刚,等. 双向反射分布函数的测试方法分析和实验研究[J]. 中国激光,2003,30(增刊):146-148

[8] 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):683-685.

[9] 魏庆农. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. 光学学报,1996,16(10):145-1430.

[10] XIE Ming, REN Hu, ZOU Yong, et al. The check and error analysis of the BRDF experiment bench[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,14(6):784-787.

[11] 张波,张建新,蔡伟. 低辐射镀膜玻璃的研究开发进展[J]. 建筑结构学报,2007,28(4):34-40.

(编辑 杨 波)