

文章编号:1001-9014(2007)04-0284-05

花岗岩表面二向性镜面反射分量和漫反射分量的比较研究

赵乃卓¹, 赵云升¹, 晏磊², 吴太夏², 相云²

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024;

2. 北京大学空间信息集成与3S工程应用中心北京市重点实验室, 北京 100871)

摘要: 偏振反射与二向性反射之间存在着一定的定量关系. 通过对不同粗糙程度花岗岩表面偏振反射的测量, 计算出它们表面二向性镜面反射分量与二向性漫反射分量的大小, 从而定量分析了花岗岩表面粗糙程度对热点与非热点区域两种分量的影响情况. 同时通过分析还发现, 光线入射天顶角也会对两种分量的大小起到一定的影响, 而这种影响的强弱是受到花岗岩表面粗糙程度的控制.

关键词: 花岗岩; 偏振反射; 二向性镜面反射分量; 二向性漫反射分量; 粗糙度

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A

STUDY ON COMPARISON OF BIDIRECTIONAL SPECULAR REFLECTION COMPONENT AND BIDIRECTIONAL DIFFUSE REFLECTION COMPONENT FROM GRANITE SURFACES

ZHAO Nai-Zhuo¹, ZHAO Yun-Sheng¹, YAN Lei², WU Tai-Xia², XIANG Yun²

(1. College of Urban and Environmental science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Beijing Key Lab of Spatial Information Integration and 3S Application, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: There is some quantitative relationship between polarized reflection and bidirectional reflection. In this study, the specular reflection and diffuse reflection components were computed by measuring the polarized reflection of granite surfaces that were different in roughness, And then it was quantitatively analysed how the roughness of granite surface influenced the two kinds of components in hotspot and non-hotspot. Meanwhile, through the analysis, it was found that incidence angle would influence the components, and this kind of influence was controlled by the roughness of the granite surface.

Key words: granite; polarized reflection; bidirectional specular reflection component; bidirectional diffuse reflection component; roughness

引言

花岗岩作为典型的建筑装饰材料, 对其表面二向性反射和多角度偏振反射的研究不但可以为城市建筑物红外辐射特性、红外成像研究以及建立辐射特性数据库打下基础, 而且对于未来分析城市红外指纹更有实际意义^[1]. 以往研究表明, 多角度偏振反射与二向性反射之间具有一定的定量关系^[2,3].

但是, 对于这种定量关系的研究仅仅停留在多角度偏振反射与二向性反射之间整体定量关系的研究阶段上. 由于花岗岩表面是非朗伯体, 自然光照射到其表面后镜面反射和漫反射会同时发生, 从而使反射光成为包含自然光与偏振光的部分偏振光(当光以花岗岩的布儒斯特角入射时除外)^[4]. 通过分别建立花岗岩偏振反射与其二向性镜面反射分量、漫反射分量的定量对应关系, 再利用偏振反

收稿日期: 2006-08-21, 修回日期: 2007-01-08

Received date: 2006-08-21, revised date: 2007-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(40572167)和中国科学院知识创新工程重要方向(KZCX-3-SW-338-1)资助项目

作者简介: 赵乃卓(1981-), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要从事偏振光遥感研究.

射将这两种分量从整体的反射能量中分离出来,进而研究花岗岩自身性质以及入射、观测角度对这两种分量的分别影响,从而使花岗岩二向性反射的研究更加深入。

1 偏振反射反算二向性镜面反射分量与漫反射分量机理

当光源的出射光为自然光(非偏振光)时,经花岗岩一次反射后,根据菲涅耳公式,其反射存在偏振现象。这时花岗岩实际上是起偏器,这里面存在两种情况:一种是到达传感器的光是非偏振光与线偏振光的混合,为部分偏振光;另一种是当光以花岗岩的布儒斯特角入射时,反射光为完全线偏振光。

首先讨论反射光为部分偏振光的情况。根据马吕斯定律,强度为 I_0 的线偏振光,通过检偏器后,透射光的强度(不考虑偏振片的吸收作用)为

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

式中, α 为检偏器的偏振化方向与入射偏振光的偏振化方向之间的夹角。

马吕斯定律对自然光(非偏振光)并不成立。当自然光经过偏振片后,它的光强是原来的一半。

设部分偏振光的总强度为 I , 其中非偏振光成分的强度为 I_n , 线偏振光成分的强度为 I_l , 则有

$$I = I_n + I_l \quad (2)$$

设检偏器与透光轴方向平行(透光方向)的光强为 I_{90° 、与透光轴方向垂直(消光方向)光强为 I_{0° , 显然有

$$I_{90^\circ} = I_l + \frac{I_n}{2} \quad (3)$$

$$I_{0^\circ} = \frac{I_n}{2} \quad (4)$$

由式(4)和式(5)得

$$I_n = 2 I_{0^\circ} \quad (5)$$

$$I_l = I_{90^\circ} - I_{0^\circ} \quad (6)$$

当光以花岗岩的布儒斯特角入射时,反射光为完全线偏振光,即 $I_n = 0, I = I_l$ 。则

$$I_{90^\circ} = I_l \quad (7)$$

$$I_{0^\circ} = 0 \quad (8)$$

那么依然满足 $I_n = 2I_{0^\circ}, I_l = I_{90^\circ} - I_{0^\circ}$ 。

由于反射光中偏振光是由镜面反射生成,而非偏振光是由漫反射生成,所以花岗岩表面二向性镜面反射分量、漫反射分量可以通过分别计算反射光中偏振光与非偏振光的强度来获得^[5,6]。

2 花岗岩表面二向性镜面反射和漫反射分

量的数据采集与比较分析

2.1 实验仪器及实验样品的介绍

利用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的二向反射光度计,测量花岗岩多角度偏振反射值及二向性反射值^[7]。二向反射光度计由光源、二向反射光度计系统和控制系统组成。光度计的方位角为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 有 A (630 ~ 690nm)、B (760 ~ 1100nm) 2 个波段,本实验中以 B 波段对花岗岩进行测量;以镍钨灯作为光源,在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 范围内每隔 10° 为一个光源入射天顶角;探测架上设有 7 个探测头,探测头的间隔为 10° , 其范围是 $0^\circ \sim 60^\circ$;同时该设备还配有偏振镜头,能够任意角度旋转,测量时不配偏振镜头所测数据就是地物的二向性反射值。待测样本在其 2π 空间内被测定的每一个值都是光度计对该点 30 次测量所获得数据的平均值。每次测量完地物数据后紧接着测白板数据,把二者的比值作为结果存入数据库。以同样的方式变更入射角、偏振角逐个测量样本。

由于采用了与白板的比值作为最终的数据采集结果,从而消除了因为部分光被偏振材料自身吸收而对实验所造成的影响^[3]。但是,由于进行二向性反射白板测量时没有加偏振镜头,故测得的二向性反射白板值是偏振反射白板值的 2 倍,所以有

$$I' = \frac{I'_n + I'_l}{2} \quad (9)$$

其中 I' 为二向性反射比值, I'_n 为二向性漫反射分量比值, I'_l 为二向性镜面反射分量比值。以下为了便于比较,将二向性反射比值扩大了 2 倍。

实验所选用的样品为国产普通的建筑装修用花岗岩,按表面光滑程度可分为 3 种:样品 1,表面被打磨平并抛光;样品 2,表面被打磨平但未被抛光;样品 3,表面未被打磨平,比较粗糙。3 个样品的表面光滑程度差异目视明显可辨。

2.2 实验数据的获取与初步分析

图 1 ~ 图 3 为在 50° 入射角情况下,二向反射光度计在 2π 空间内所获得的二向性反射比值。图中横坐标为观测方向相对于入射方向的方位角,纵坐标为二向性反射比值,不同的曲线图案代表不同的探测天顶角。比较 3 图可以发现,花岗岩表面粗糙程度不同,所获得的二向性反射比值也明显不同。从图 1 可以看出,在相对方位角为 180° , 探测天顶角等于入射天顶角区域存在明显的峰值,这说明在样品 1 表面发生了明显的镜面反射。从图 2 中可见,在相对方位角为 180° , 探测天顶角等于入射天顶角区域有

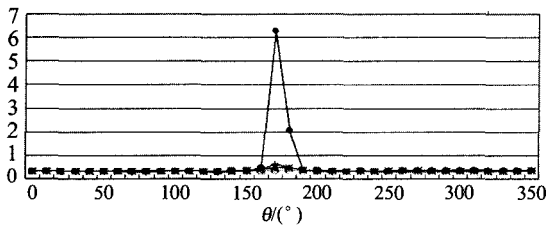


图1 样品1在50°入射角情况下所获得的内二向性反射比值曲线图

Fig.1 Bidirectional reflectance spectrum curve of sample 1, with 50° incidence angle

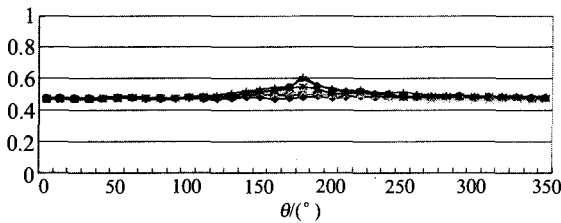


图2 样品2在50°入射角情况下所获得的二向性反射比值曲线图

Fig.2 Bidirectional reflectance spectrum curve of sample 2, with 50° incidence angle

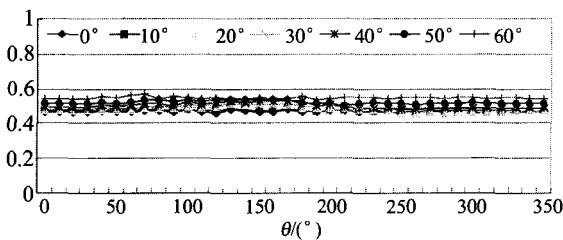


图3 样品3在50°入射角情况下所获得的二向性反射比值曲线图

Fig.3 Bidirectional reflectance spectrum curve of sample 3, with 50° incidence angle

一较小峰值,这说明在样品2表面发生了一定的镜面反射.在图3中,由反射比值组成的曲线较平,没有峰值存在,这说明样品3表面可近似为郎伯体表面,基本没有镜面反射发生^[8].

选择相对方位角为180°,探测天顶角等于入射天顶角处所获得的二向性反射比值与偏振反射比值作为热点区域的代表值^[9],并由式(5)和式(6)计算得到热点区域二向性镜面反射分量与二向性漫反射分量的大小,如表1~表3所列.

再选择相对方位角为90°,探测天顶角等于入射天顶角处所获得的二向性反射比值与偏振反射比值作为非热点区域的代表值,并由公式(5)和式(6)计算得到非热点区域二向性镜面反射分量与二向性

表1 不同粗糙程度花岗岩表面热点区域二向性反射比值对照表

Table 1 Bidirectional reflectance of granite surfaces with different roughness at hotspot

入射角度	样品1	样品2	样品3
10°	8.650	1.024	0.940
20°	9.866	0.960	0.944
30°	10.564	1.030	0.944
40°	11.082	1.108	0.986
50°	11.504	1.196	1.032
60°	12.988	1.396	1.040

表2 不同粗糙程度花岗岩表面热点区域二向性镜面反射分量比值对照表

Table 2 Bidirectional specular reflection component of granite surfaces with different roughness at hotspot

入射角度	样品1	样品2	样品3
10°	0.154	0.000	0.000
20°	1.002	0.005	0.006
30°	1.955	0.010	0.009
40°	2.260	0.084	0.008
50°	2.401	0.101	0.007
60°	2.517	0.213	0.018

表3 不同粗糙程度花岗岩表面热点区域二向性漫反射分量比值对照表

Table 3 Bidirectional diffuse reflection component of granite surfaces with different roughness at hotspot

入射角度	样品1	样品2	样品3
10°	8.504	0.976	0.941
20°	8.604	0.982	0.942
30°	8.662	1.012	0.946
40°	8.710	1.022	0.992
50°	9.302	1.140	0.998
60°	10.694	1.220	1.024

表4 不同粗糙程度花岗岩表面非热点区域二向性反射比值对照表

Table 4 Bidirectional reflectance of granite surfaces with different roughness at non-hotspot

入射角度	样品1	样品2	样品3
10°	0.856	0.968	0.975
20°	0.740	0.942	0.990
30°	0.722	0.925	0.989
40°	0.666	0.924	0.970
50°	0.610	0.904	1.006
60°	0.602	0.921	1.090

漫反射分量的大小,如表4~表6所列.

通过初步比较表1、表2和表3数据可以发现花岗岩表面的粗糙程度不但会对2π空间内热点区域的二向性镜面反射分量造成较大的影响,而且对热点区域的二向性漫反射分量也会造成比较大的影响.表现为花岗岩表面越光滑,其二向性镜面反射分量和二向性漫反射分量的值越大.同时,二向性镜面反射分量和二向性漫反射分量的值也受入射角度的

表 5 不同粗糙程度花岗岩表面非热点区域二向性镜面反射分量比值对照表

Table 5 Bidirectional specular reflection component of granite surfaces with different roughness at non-hotspot

入射角度	样品 1	样品 2	样品 3
10°	0.000	0.000	0.000
20°	0.002	0.000	0.000
30°	0.000	0.000	0.000
40°	0.001	0.000	0.002
50°	0.003	0.000	0.000
60°	0.000	0.004	0.003

表 6 不同粗糙程度花岗岩表面非热点区域二向性漫反射分量比值对照表

Table 6 Bidirectional diffuse reflection component of granite surfaces with different roughness at non-hotspot

入射角度	样品 1	样品 2	样品 3
10°	0.850	0.976	0.980
20°	0.762	0.956	0.988
30°	0.716	0.934	1.004
40°	0.660	0.934	0.964
50°	0.616	0.906	1.020
60°	0.608	0.908	1.080

影响,它们会随入射角度的增大而增大。

再对表 4、表 5 和表 6 的数据进行初步分析后可以发现,花岗岩表面的粗糙程度会对 2π 空间内非热点区域的二向性漫反射分量值造成一定的影响,但对二向性镜面反射分量值几乎不会造成影响。其表现为花岗岩表面越光滑,它的二向性漫反射分量值越小,而不管花岗岩表面粗糙程度如何变化,它的二向性镜面反射分量值始终很小,几乎为 0。同时,二向性漫反射分量的值会随入射角度的增大而减小。

2.3 实验数据的处理与深入分析

为了进一步比较花岗岩表面光滑程度对它的二向性镜面反射分量和二向性漫反射分量的影响大小,在这里又对不同样品间的数据做进一步的处理。由于样品 1 与样品 3 的表面粗糙程度相差最大,且在入射角为 60° 时这种差异最大,故选用样品 1 与样品 3 在入射角为 60° 时的数据进行处理比较,计算出变化度 a , a 的具体计算公式如下

$$a = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (10)$$

其中 I 为二向性反射比值。通过计算后得到热点区域二向性镜面反射分量变化度为 0.986,二向性漫反射分量变化度为 0.825。非热点区域二向性漫反射分量变化度为 0.280,由于非热点区域二向性镜

面反射分量值极小,故不予以计算。

再按式(10),计算光线入射角度对二向性镜面反射分量和二向性漫反射分量的影响大小。在热点区域,样品 1、样品 3 的二向性镜面反射分量变化度分别为 0.885,0.500;二向性漫反射分量变化度分别为 0.114,0.042。在非热点区域,由于在不同入射角情况下,二向性镜面反射分量值都极小,故不予以计算;样品 1 和样品 3 的二向性漫反射分量变化度分别为 0.166 和 0.049。

通过以上对实验所得数据的计算处理可以发现:

(1) 花岗岩表面粗糙程度会对它的热点区域二向性镜面反射分量、二向性漫反射分量起到极大的影响,在非热点区域也会对二向性漫反射分量起到一定的影响,但这种影响是远小于热点区域的。这种表面粗糙程度对二向性漫反射分量的影响可以理解为,当表面粗糙时,入射到微观表面上的光被截止,散射光被截住^[10]。

(2) 在热点区域,光的入射天顶角也会对花岗岩表面二向性镜面反射分量、二向性漫反射分量起到一定的影响,但对二向性镜面反射分量的影响显著大于对二向性漫反射分量的影响,且岩石表面越光滑,这种入射角度的影响越大。在非热点区域,光的入射角度只会对花岗岩表面二向性漫反射分量造成影响,且这种影响也是在花岗岩表面光滑的情况下,表现得更为明显。根据菲涅耳反射折射公式可知,在外反射时(即光从光疏介质射入光密介质时),反射光中平行入射面的振幅会随入射角度的增加而减小,而垂直入射面的振幅会随入射角度的增加而增大。这样就会使反射光中偏振光增强,从而导致二向性镜面反射分量增加。当入射角度增加到花岗岩的布儒斯特角时,反射光为完全线偏振光。当入射角度继续增加时,反射光中平行入射面的振幅会随入射角度的增加而增大,而垂直入射面的振幅会随入射角度的增加继续增大。

(3) 在热点区域,花岗岩表面越光滑,它的二向性漫反射分量值越大;而在非热点区域,花岗岩表面越光滑,它的二向性漫反射分量值越小。这是因为表面越光滑,反射光的能量就越要向热点区域集中,从而导致了非热点区域能量的减少。

3 结语

本文利用二向性反射与偏振反射之间的关系,通过对不同粗糙程度花岗岩表面偏振反射光的测量,从

而计算得到不同粗糙度情况下其二向性镜面反射分量与二向性漫反射分量的大小. 对这些数据进一步分析后可以发现, 花岗岩表面粗糙程度对其热点区域二向性镜面反射分量与二向性漫反射分量值的影响大于非热点区域. 在热点区域, 花岗岩表面粗糙程度对其二向性镜面反射分量的影响大于对二向性漫反射分量的影响; 而在非热点区域, 粗糙程度对其二向性镜面反射分量的影响小于对二向性漫反射分量的影响. 同时还发现光的入射角度也会对二向性镜面反射分量和二向性漫反射分量造成影响, 而这种影响的大小又受花岗岩表面粗糙程度的影响.

REFERENCES

- [1] XIE Ming, XU Hui, ZOU Yong, *et al.* Experimental methodology of moorstone's surface BRDF[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*(谢鸣, 徐辉, 邹勇, 等. 花岗岩表面双向反射分布函数实验研究. *工程热物理学报*), 2005, **26**(4): 683—685.
- [2] WU Tai-Xia, ZHAO Yun-Sheng. The bidirectional polarized reflectance model of soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(12): 2854—2859.
- [3] ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(赵云升, 吴太夏, 胡新礼. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6): 441—444.
- [4] ZHAO Hu, YAN Lei, ZHAO Yun-Sheng. Study on multi-angle polarized reflectance spectrum of granite[J]. *Journal of Mineral Petrol*(赵虎, 晏磊, 赵云升. 花岗岩的多角度偏振反射光谱研究. *矿物岩石*), 2004, **24**(2): 9—13.
- [5] Laurent Bousquet, Sophie Lacherad, Stephane Jacquemoud. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **98**: 201—211.
- [6] Vanderbilt V C, Sparrow E M. Polarization photometer to measure bidirectional reflectance factor $R(55^\circ, 0^\circ; 55^\circ, 180^\circ)$ of leaves[J]. *Optical Engineering*, 1986, **25**(2): 1105—1114.
- [7] JIN Xi-Feng, QIAO De-Lin, ZHOU Su-Xiang. The measuring device for bidirectional polarized reflectance[P]. CAS Changchun Precision Optical Machine Institute Patent No. 96239489.0, Mar. 4, 1998. (专利人: 金锡峰, 乔德林, 周素香. 二向性偏振反射测量装置. 中国科学院长春光学精密机械研究所, 专利号: 96239489.0, 专利授权公告日: 1998-03-04.
- [8] ZHAO Yun-Sheng, HUANG Fang, JIN Lun. Study on polarizing reflectance characteristics of plant simple leaf[J]. *Journal of Remote Sensing*(赵云升, 黄芳, 金伦. 植物单叶偏振反射特征研究. *遥感学报*), 2004, **4**(2): 131—135.
- [9] LI Xia-Wen, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **24**(6): 906—911.
- [10] Xiao D H, Kenneth E T, Francois X S, *et al.* A Comprehensive physical model for light reflection[J]. *ACM Computer Graphics*, 1991, **25**(4): 175—186.