

文章编号: 1672-8785(2010)03-0015-06

近红外波段无烟煤表面的偏振反射与双向性反射研究

孙仲秋 赵云升 阎国倩 卢泰男

(东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘 要: 偏振反射是伴随目标双向反射产生的。为了确定无烟煤表面的偏振反射与双向反射之间的定量关系, 对无烟煤表面进行了多角度偏振反射测量, 并利用偏振度对偏振反射与双向反射进行了分析。研究表明, 光线入射天顶角对偏振度的影响受粗糙程度与碳含量的控制; 随着光线入射天顶角的增大, 偏振度会在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内增加; 随着无烟煤中碳含量的增加, 偏振度也会变大; 表面光滑的无烟煤的偏振度大于表面粗糙的无烟煤的偏振度; 偏振度可以定量地将反射光中的镜面反射与漫反射分量的比例关系反映出来。通过计算偏振度可以反映出无烟煤自身的性质, 也可以更详细地将偏振反射与双向反射之间的关系定量化。

关键词: 双向性反射; 无烟煤; 碳含量; 偏振度

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.03.004

Research on Polarized Reflectance and Bi-directional Reflectance on Anthracite Surface in Near-infrared Band

SUN Zhong-qiu, ZHAO Yun-sheng, YAN Guo-qian, LU Tai-nan

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The polarized reflection light from a target is accompanied by its bi-directional reflection light. To determine the quantitative relation between the polarized reflectance and the bi-directional reflectance on the surface of anthracite, the polarized reflectance on the surface of anthracite is measured at multi-angles and the polarized reflectance and bi-directional reflectance are analyzed according to the degree of polarization. The result shows that the influence of an incident angle on the degree of polarization is determined by the surface roughness and carbon content of anthracite. With the increase of the incident angle, the degree of polarization can be increased in the range of $0^\circ \sim 60^\circ$. With the increase of carbon content, the degree of polarization can be increased too. The degree of polarization of the anthracite with a smooth surface is greater than that of the anthracite with a rough surface. The degree of polarization can indicate the proportional relation between the specular reflection component and the diffuse-reflection component in the reflected light. The calculated degree of polarization can show the inherent nature of anthracite and quantify the relation between the polarized reflectance and the bi-directional reflectance more minutely.

Key words: bi-directional reflection; anthracite; carbon content; polarization

收稿日期: 2009-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2009CB426305); 国家自然科学基金 (40771153) 和 (40971190); 东北师范大学科技创新平台培育项目 (106111065202)

作者简介: 孙仲秋 (1986-), 男, 吉林磐石人, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振光遥感与定量遥感。E-mail: shilengzhi00@163.com

1 引言

煤是日常生活当中常见的一种重要能源,也是冶金、化学工业的重要原料。煤中的有机质是复杂的高分子有机化合物,碳是煤中最重要的组分,其含量随煤化程度的加深而增高。据统计,中国无烟煤中的含碳量(Cdaf)为90%~98%。因而,碳元素含量的高低不仅是评价无烟煤质量的主要指标,而且还影响到碳燃烧后排放出的二氧化碳,以及对大气产生的温室效应^[1]。与其它煤相比,无烟煤固定碳含量高,挥发分产率低,密度大,硬度大,燃点高,燃烧时不冒烟,黑色坚硬,有金属光泽而发亮。

以往对矿物及其它地物的研究结果表明,多角度偏振反射与双向性反射之间具有定量关系^[2,3]。由于无烟煤表面是非郎伯体,自然光照射到其表面后,漫反射与镜面反射会同时发生,所以反射光为部分偏振光。无烟煤表面在这里起起偏器的作用,而被测目标会表现出由它们自身性质决定的偏振特性,因此偏振探测技术已经成为一种重要的探测手段^[4]。基于以上原因,测量无烟煤表面的偏振反射与双向性反射不但可以将其碳含量利用偏振度定性地表示出来,而且对于利用近红外技术区分无烟煤煤化程度有实际意义,同时也为利用遥感技术监测露天煤矿提供了一种思路。

2 偏振反射与双向性反射的关系

多角度偏振反射测量把目标物在反射电磁辐射过程中产生的特征偏振信息作为目标信息源,其理论依据是定量描述偏振信息的斯托克斯矢量法^[5,6]。当光源的出射光为自然光时,经无烟煤表面一次反射后,根据菲涅尔公式,其反射存在偏振现象,且反射光的主要振动方向一定与入射面垂直。

当反射光为部分偏振光时,根据马吕斯定律,强度为 I_0 的线偏振光经过检偏器后,透过的光强(在不考虑吸收的情况下)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。即当检偏器以入射光为轴转动时,透射的光强度将有变化。

马吕斯定律是针对无吸收的偏振光的,对于非偏振光(自然光)并不成立。当自然光经过偏振片时,其光强变为原来的一半。设部分偏振光的总强度为 I ,其中线偏振光的强度为 I_l ,非偏振光的强度为 I_n ,则有

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

检偏器与透光轴方向平行的光强为 I_{90° ,与透光轴垂直的光强为 I_{0° ,则

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

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

由式(3)和式(4)得到

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

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

当光以布儒斯特角入射时,反射光全为线偏振光,即 $I_n = 0$, $I_l = I$,仍然满足式(5)和式(6)。而偏振度的定义为线偏振光占全部光的比例:

$$p = \frac{I_l}{I} \quad (7)$$

将式(2)、式(5)和式(6)代入式(7),得到

$$p = \frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{I_{90^\circ} + I_{0^\circ}} \quad (8)$$

由式(8)可以得到

$$\frac{I_{0^\circ}}{I_{90^\circ}} = \frac{1-p}{1+p} \quad (9)$$

通过式(5)、式(6)与(9)得到

$$\frac{I_l}{I_n} = \frac{p}{1-p} \quad (10)$$

在实际测量中,只需要测量偏振角为 90° 和 0° 的反射能量就可以求出偏振度,其优点是不受光强变化的影响。由于漫反射不能产生偏振

现象, 所以反射光中的偏振光是由镜面反射产生的, 非偏振光是由漫反射产生的, 而双向性镜面反射与漫反射分量可以通过反射光中的偏振光与非偏振光的强度来获得^[7,8]。求得偏振度后, 可以将双向性镜面反射与漫反射的比例关系表示出来, 这为用遥感技术判断地物目标的非朗伯特特性提供了科学、可靠的依据。

3 实验材料与方法

3.1 实验仪器

实验中采用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的双向反射光度计^[9]测量无烟煤表面的偏振度。双向反射光度计以镍钨灯作为光源, 并且带有 A(630nm ~ 690nm) 和 B(760nm ~ 1100nm) 两个波段; 在 0° ~ 70° 范围内每隔 10° 为一个光源入射天顶角; 在探测架上从 0° ~ 60° 设有 7 个探测头, 其间隔为 10°; 光源与探测器之间从 40° ~ 360° 每隔 10° 为一个探测方位 (180° 是镜面反射方向); 该设备还配有偏振镜头, 能够旋转任意角度。样本在其 2 π 空间内被测定的每一个值都是光度计对该点进行 30 次测量所获得的数据的平均值。

3.2 实验材料

实验所用的无烟煤为山西晋城矿区所产, 固定碳计算公式为

$$FCdaf = 100 - Vdaf \quad (9)$$

Vdaf 为干燥无灰基挥发份, 按照干燥无灰基碳 (Fcdaf) 含量划分, 94% ~ 97% 属于高阶无烟煤, 90.5% ~ 93.5% 为中阶无烟煤, 86% ~ 91% 为低阶无烟煤。在晋城区, 无烟煤碳含量与其固定碳含量成正比例关系, 且误差在 1% 左右^[1]。实验中所用无烟煤分别为高阶无烟煤 (煤 1)、中阶无烟煤 (煤 2) 和低阶无烟煤 (煤 3)。

3.3 实验方法

利用双向反射光度计在 2 π 空间内对无烟煤进行测定, 每次测量完目标偏振角为 0° 的数据后, 紧接着测偏振角为 90° 的数据, 把二者的比值作为结果存入数据库。以同样的方式变换入射角和偏振角, 并逐个测量样本。

无烟煤表面粗糙度的划分标准如下:

$$\text{光滑表面 } h < \frac{\lambda}{25 \cos \theta} \quad (11)$$

$$\text{中等粗糙表面 } \frac{\lambda}{25 \cos \theta} < h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (12)$$

$$\text{粗糙表面 } h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (13)$$

式中, h 为表面两点的相对高度, λ 为入射光波长, θ 为入射角度。对于用表面高度标准离差 σ 来表征的随机表面, 则可用 σ 代替 h , 得到的新标准^[10] 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n f_i^2 - n(u)^2}{n-1}} \quad (14)$$

式中, n 为测量次数, f_i 为表面粗糙度平均参数的第 i 次测量结果, u 为测量的平均值。利用针描法测量表面粗糙度, 并将测量结果代入式 (12)。依据划分标准, 在 780nm、900nm、1000nm 三个波段中, 无烟煤被分为两个粗糙程度: 光滑表面和粗糙表面。实验中所用 B 波段的波长范围是 760nm ~ 1100nm。

4 结果与分析

利用双向反射光度计在 2 π 空间内测量具有不同碳含量与不同粗糙度的无烟煤的偏振度, 图 1 至图 6 中的横坐标为方位角, 纵坐标为偏振度值, 以不同探测天顶角测得的偏振度用不同的曲线表示。

图 1 至图 3 为入射天顶角为 40° 时, 不同碳含量且表面光滑的无烟煤的偏振度。通过比较三图可以发现, 不同含碳量的光滑无烟煤的偏振度不同。由于无烟煤表面光滑, 所以在方位角 180° 处会发生镜面反射, 在其它方位角处的反射比值很小, 且当探测天顶角等于入射天顶角时存在峰值。

图 4 至图 6 为入射角为 40° 时, 不同碳含量且表面粗糙的无烟煤的偏振度。比较三图可以发现, 不同含碳量的粗糙无烟煤的偏振度不同。在方位角 180° 处, 探测天顶角等于入射天顶角时存在一峰值, 在其它探测天顶角处也有明显值存在。这说明粗糙的无烟煤表面的镜面反射

程度相对较小, 其非朗伯体特性的表现角度范围是 $120^\circ \sim 240^\circ$ 之间的方位角。

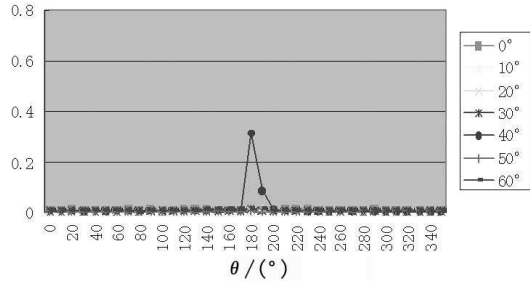


图 1 煤 1 光滑表面在入射角为 40° 时的偏振度

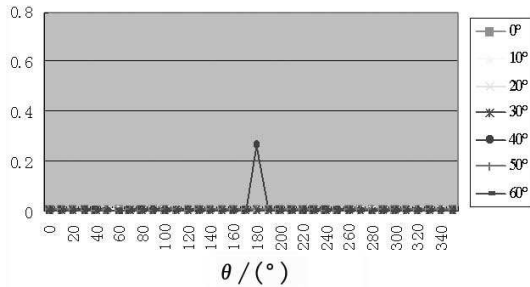


图 2 煤 2 光滑表面在入射角为 40° 时的偏振度

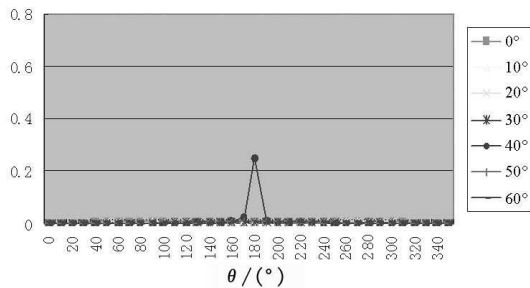


图 3 煤 3 光滑表面在入射角为 40° 时的偏振度

根据菲涅耳反射折射公式可知, 当光线从光疏介质射入光密介质时, 反射光中平行于入射面的振幅会随入射角度的增加而减小, 而垂直于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的偏振光增强, 从而导致双向性镜面反射分量增加, 双向性漫反射分量减小。

无烟煤表面的漫反射分量是由反射光中平行于入射面的分量的光强 (I_{90°) 决定的, 当入射角处于 $10^\circ \sim 60^\circ$ 范围内时, I_{90° 所占反射光总能量的比例随角度的增加而减小, 当达到布儒斯特角时, I_{90° 的值为零, 即反射光为完全线偏振光。由于无烟煤属于吸收性矿物, I_{90° 是极小值, 但不为零^[11]。而镜面反射分量是由反射光

中垂直于入射面的分量的光强 I_{90° 与 I_{0° 之间的差决定的, 所以随着角度的增加, 两者之间的差也在增大。

偏振反射是由镜面反射产生的, 而不同的被测目标会表现出由自身性质决定的偏振特性。偏振度越大, 说明发生的镜面反射越强烈, 反之亦然。根据在方位角为 180° 、探测天顶角等于入射天顶角时所得到的与透光轴方向平行的光强 I_{90° 以及透光轴垂直的光强 I_{0° , 由式 (8) 计算出了不同粗糙程度的无烟煤的偏振度, 结果如表 1、表 2 所示。对两个表中的数据进行分析后可以发现, 随着无烟煤碳含量的增加, 偏振度变大; 而粗糙表面的偏振度小于光滑表面的偏振度。

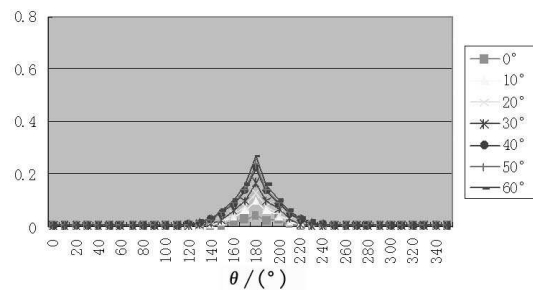


图 4 煤 1 粗糙表面在入射角为 40° 时的偏振度

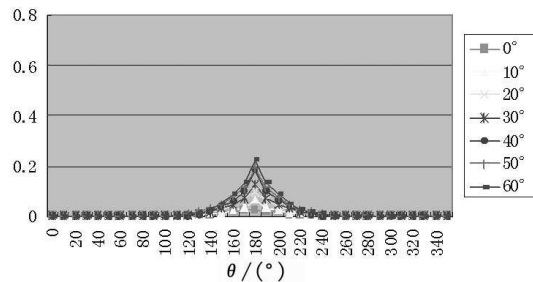


图 5 煤 2 粗糙表面在入射角为 40° 时的偏振度

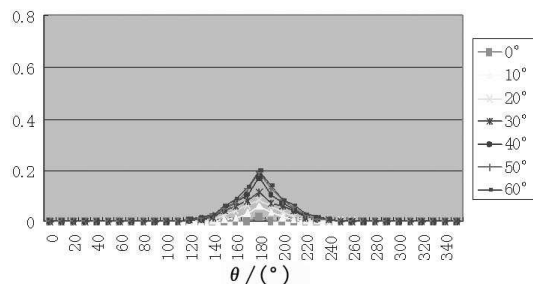


图 6 煤 3 粗糙表面在入射角为 40° 时的偏振度

根据偏振度可以将漫反射与镜面反射之间的比例关系表示出来。表 3、表 4 分别为当探测天顶角等于入射天顶角时, 不同含碳量且表面

光滑与表面粗糙的无烟煤在不同入射天顶角时双向镜面反射与漫反射的比值, 这些都是由式(10)计算出来的。通过两表中的数据可以发现, 当表面粗糙程度不变时, 在入射角 $10^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, 碳含量对无烟煤表面镜面反射变化的影响大于对漫反射变化的影响。

表 1 光滑表面无烟煤的偏振度对比表

入射角	煤 1 光滑	煤 2 光滑	煤 3 光滑
10°	0.098	0.056	0.053
20°	0.136	0.132	0.127
30°	0.202	0.164	0.141
40°	0.313	0.269	0.252
50°	0.558	0.513	0.502
60°	0.842	0.752	0.722

表 2 粗糙表面无烟煤的偏振度对比表

入射角	煤 1 粗糙	煤 2 粗糙	煤 3 粗糙
10°	0.028	0.004	0.008
20°	0.072	0.067	0.042
30°	0.173	0.124	0.112
40°	0.221	0.182	0.173
50°	0.35	0.276	0.225
60°	0.63	0.589	0.503

通过对比表 3 和表 4 可以看出, 粗糙程度对无烟煤的偏振度影响比较大。当碳含量一定时, 在入射角 $10^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, 可确定双向镜面反射与漫反射的比值变化率为

$$\varphi = \frac{t_{60^\circ} - t_{10^\circ}}{t_{60^\circ} + t_{10^\circ}} \quad (15)$$

式中, t_{60° 为入射角为 60° 时镜面反射与漫反射

表 3 光滑表面无烟煤的双向性镜面反射与漫反射的比值

入射角	煤 1 光滑	煤 2 光滑	煤 3 光滑
10°	0.1086	0.0593	0.0559
20°	0.1574	0.1521	0.1455
30°	0.2253	0.1962	0.1641
40°	0.4556	0.368	0.3369
50°	1.2624	1.0534	1.008
60°	5.3291	3.0322	2.5971

表 4 粗糙表面无烟煤的双向性镜面反射与漫反射的比值

入射角	煤 1 粗糙	煤 2 粗糙	煤 3 粗糙
10°	0.029	0.005	0.0081
20°	0.0776	0.0718	0.0438
30°	0.2092	0.1416	0.1261
40°	0.2837	0.2225	0.2092
50°	0.5385	0.3812	0.2903
60°	1.7027	1.4331	1.0121

的比值, t_{10° 为入射角为 10° 时镜面反射与漫反射的比值。以煤 3 为例, 粗糙表面的变化率为 0.98, 光滑表面的变化率为 0.95。粗糙的无烟煤表面对其双向漫反射与双向镜面反射比值的变化的影响大于光滑表面对双向漫反射与双向镜面反射比值的变化的影响。

5 结论

通过对无烟煤偏振度的测量得出以下基本结论:

(1) 光线入射天顶角对无烟煤的偏振度有一定的影响: 随着光线入射天顶角的增大, 偏振度在入射角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内增加, 但是对无烟煤表面的双向镜面反射分量的影响大于对双向漫反射的影响。

(2) 随着无烟煤碳含量的增加, 其偏振度也增加, 而碳含量对镜面反射变化的影响大于对漫反射变化的影响。

(3) 粗糙度对无烟煤表面的双向反射与偏振反射的影响较大。当入射角一定时, 表面越光滑, 偏振度越大; 伴随着入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内增加, 镜面反射越明显, 偏振度也越大; 而表面粗糙度对双向漫反射的影响是由于表面粗糙时入射到微观表面上的光被截止和散射光被截住所造成的^[12]。

(4) 通过偏振度可以将反射光中的镜面反射与漫反射分量的比例关系反映出来; 当粗糙度与入射角一定时, 无烟煤的偏振度越大, 说明碳含量越多, 煤化程度越高。

综合以上结论, 无烟煤表面的偏振反射是伴随着双向反射产生的, 光线入射天顶角越大, 表

面越光滑, 偏振度就越大, 也就越容易区分不同含碳量的无烟煤。因此, 在利用偏振光技术检测无烟煤的碳含量时, 如果粗糙程度已确定, 建议使用较大的入射天顶角。

参考文献

- [1] 涂华, 陈亚飞, 陈文敏. 利用固定碳计算我国无烟煤的含碳量 [J]. *煤炭科学技术*, 2003, **31**(12): 98-100.
- [2] 赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(6): 441-444.
- [3] WU Tai-Xia, ZHAO Yun-Sheng. The bidirectional polarized reflectance model of soil [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(12): 2854-2859.
- [4] 刘必盛, 时家明, 赵大鹏, 等. 偏振探测的机理及应用 [J]. *红外*, 2008, **29**(5): 5-9.
- [5] Berry H G, Livingston A E. Measurement of Stokes parameters of light [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 172-178.
- [6] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1997: 1-98.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 金锡峰, 乔德林, 周素香. 二向性偏振反射测量装置 [P]: 96239489.0 专利授权公告日, 1998-03-04.
- [10] 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.
- [11] 王曙. *不透明矿物晶体光学* [M]. 北京: 地质出版社, 1987, 26-38.
- [12] 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.

新闻动态 News

法国研制成用于远距离监视的双视场热成像组件

据 www.selectscience.net 网站报道, 法国 Cedip 红外系统公司已经为指望开发和建立自己的远距离监视系统的研究人员及集成厂商研制成 PROTON 中波红外双视场热成像组件 (见图 1)。

PROTON 热成像组件将一个高灵敏度的碲镉汞焦平面阵列传感器 ($3.6\mu\text{m} \sim 4.9\mu\text{m}$)、最先进的 14 位数字电子系统以及电动光具装在一个紧凑坚固的外罩内。它完全符合军用规格, 并且是海陆空作战中热红外测量的极好选择。

该组件在一种双焦光学系统设计的基础上采用了电动镜头, 并可通过单指令对其进行切换以使其在 $5\text{km} \sim 25\text{km}$ 的距离内提供最佳的探测和识别能力。PROTON 热成像组件能够通过一条通信线路来进行遥控操作, 它所提供的视频

图像采用的是 RS422 格式的模拟 / 数字信号。

Cedip 红外系统公司为工业、研究、监测以及安全机构开发、设计、制造和销售高性能的红外摄像机、红外系统和 OEM 模块。该公司高素质的技术专家与工程师队伍将电子学、光学、精密机械学和软件设计的专有工艺技术极好地结合起来, 并得到了世界上各大知名经销商的支持, 由此维持了一个涵盖五十多个国家的日益成长的客户群。



图 1 PROTON 中波红外双视场热成像组件外形图

□ 岳桢干