

王恩元,王云刚,李忠辉等. 受载煤体变形破裂微波辐射前兆规律的实验研究. 地球物理学报, 2011, **54**(9):2429~2436, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.027

Wang E Y, Wang Y G, Li Z H, et al. Experimental study on the microwave radiation precursor laws of loading coal in deformation and fracture process. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(9):2429~2436, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.027

受载煤体变形破裂微波辐射前兆规律的实验研究

王恩元^{1,3}, 王云刚^{2,1}, 李忠辉³, 刘晓斐³, 赵恩来³

1 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116

2 河南理工大学 瓦斯地质与瓦斯治理省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003

3 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116

摘 要 对煤体在单轴压缩条件下的微波辐射效应和规律进行了实验研究. 实验结果表明, 受载煤体具有微波辐射效应, 在煤体的变形破裂过程中伴随有 6.6 GHz 微波辐射信号产生, 其前兆规律具有 3 种类型. 基于电介质物理学对实验现象进行了解释. 在单轴压缩实验中, 煤体的亮温最大变化值为 1.9~2.7 K, 这表明煤体的微波辐射特性明显优于红外辐射特性. 运用微波遥感基本原理的理论知识, 分析了受载煤体变形破裂过程中微波辐射特性的影响因素. 利用受载煤体变形破坏过程中的微波辐射前兆特性预报煤岩动力灾害具有广泛的应用前景.

关键词 煤体, 煤岩动力灾害, 微波辐射, 微波遥感

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.027

中图分类号 P631

收稿日期 2010-10-25, 2011-08-05 收修定稿

Experimental study on the microwave radiation precursor laws of loading coal in deformation and fracture process

WANG En-Yuan^{1,3}, WANG Yun-Gang^{2,1}, LI Zhong-Hui³, LIU Xiao-Fei³, ZHAO En-Lai³

1 State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, Xuzhou Jiangsu 221116, China

2 Key Laboratory Cultivation Base of Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China

3 Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China

Abstract The effect and laws of microwave radiation of coal samples under uniaxial compression are experimentally studied and theoretically analyzed. Experiment results show that loading coal samples have the microwave radiation effect under the condition of uniaxial compression and accordingly in the frequency band of 6.6 GHz, and the microwave radiation precursors indicating the failure of loading coal have 3 types. Based on the dielectric physics the phenomena in the experiment are explained scientifically and rationally. The brightness temperature vary maximum value of the coal under the uniaxial compression condition is 1.9 to 2.7 K, which shows that the microwave radiation effect is superior to the infrared radiation effect. With principles of microwave remote sensing, the influent factors on the microwave emission effects of the loading coal samples are analyzed. Study results show that the microwave radiation precursor laws of loading coal make the microwave remote technology have a more widespread application prospect to predict the dynamic catastrophe of coal.

基金项目 国家自然科学基金项目(40874070 和 50904024); 江苏省“333 高层次人才培养工程”计划; 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0477); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(SKLCRSM09X01 和 10KF02)资助.

作者简介 王恩元, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 从事矿山安全及煤岩动力灾害电磁辐射监测方面的研究. E-mail: weytop@cumt.edu.cn

Keywords Coal, Dynamic catastrophe of coal and rock, Microwave radiation, Microwave remote sense

1 引言

煤岩动力灾害是煤岩体在外界应力作用下短时间内发生的一种具有动力效应和灾害后果的现象^[1],在煤矿井下主要有煤与瓦斯突出、冲击地压、顶板塌陷等。

随着煤矿开采深度的增加,因采动诱发的煤岩动力灾害事故频繁发生.国有大中型煤矿发生动力灾害事故所占的比重明显加大,其他非煤矿山动力灾害事故也有日益严重的趋势.对煤岩动力灾害现象预测方法和指标的研究既是保障安全生产和提高经济效益的重要技术手段,又是国内外矿山安全生产亟待解决的重大技术难题。

大量研究资料表明,受载煤岩体在变形破坏过程中能产生声发射、微震信号和电磁辐射^[1,2],因此,可以利用岩体声发射、微震和电磁辐射信号的这一特点揭示煤岩体破坏机理,对煤岩体的稳定性进行监测,从而对煤岩动力灾害的发生做出预报。

1985年,Luong M P 首先利用热成像技术研究了岩石及混凝土在破裂过程中的热红外辐射现象^[3,4];此后,他又多次对岩石及混凝土在疲劳和破坏过程中的热红外辐射进行了研究^[5,6]。

20世纪90年代,国家地震局、中国科学院遥感应用研究所和国家航天局第二研究院在国家科委、地震科学联合基金资助下,从基础理论、模拟实验研究入手,在实验室对不同岩性、不同结构的岩石,先后进行了近100次快速加载至岩石破裂实验,在岩石加载直到破裂的过程中使用各种波段的遥感前兆和适用的波段,对岩石样品的红外辐射和微波辐射现象进行了观测研究.实验结果表明^[7~12],(1)岩石的红外辐射温度随应力的增加而增加,岩石的红外辐射波谱的幅值也随应力的增加而增加,岩石内部的温度随岩石应力状态变化而发生变化,某些岩石试件在破裂前还会出现明显的破坏前兆;(2)岩石的微波辐射能量随压力变化而变化,不同的波段变化的幅度不同、同一波段不同极化方式的波随应力的变化量也不同;岩石试件临破裂前出现明显的微波辐射异常.研究还发现,快速加载在岩样内部产生热量积累,导致岩样温度升高,升温达3~6 K。

吴立新、刘善军等^[13~18]对辉长岩、片麻岩、花岗闪长岩、大理岩及石灰岩及煤岩在单轴压缩下的红

外辐射效应进行了定性和定量规律研究,得出了较为有益的结果。

伯明翰大学的研究表明^[19],由于微波辐射增加了矿物晶体间破裂而不是穿晶破裂,是一种改善矿石粉碎效果的有效方法. Ge Wang 等研究了微波能量辅助破碎矿石提高采矿回采率的技术,结果表明^[20],微波能量可以引起沿矿石晶界发展的微破裂,微波能量密度对矿石的热力破坏具有重要的影响;通过增加能量密度以及黄铁矿/方解石混合物的配比可以获得较高的矿石磨碎效率. D. A. Jones 等通过两相矿物有限差分准静态热力学2-D模型来模拟在高电场强度微波能量作用下岩石微粒受到的热应力及诱发的热损伤,结果表明^[21],受热矿物微粒内部应力为压缩性质的,同时在外边界处为剪切和张拉应力占主导地位,剪切应力在晶界外是最高的,压缩应力在受热矿物微粒内部是最大的,岩石材料的弱化是由于边界的剪切应力超过了材料的强度极限。

有关受载大理岩、花岗岩等坚硬致密且相对均质岩石的微波辐射效应实验研究成果较为丰富.属于沉积岩的煤岩,由于其组分和结构有别于这些坚硬岩石,煤岩层理、节理、孔隙、裂隙等缺陷复杂多变,组分也千差万别,因此其强度更低,离散性更大.有关煤岩等强度较弱岩石受载过程中的微波辐射特性尚未研究过.岩石的单轴抗压强度是岩石最重要的物理力学性能之一,岩石单轴压缩实验是最简单的岩石力学强度实验.大量实验结果表明,煤体在单轴压缩条件下,其破裂形式多为剪破裂,这与在一定围压作用下煤体的破裂形式是一致的。

基于此,本文从进一步揭示煤岩体变形破裂过程和机理、电磁辐射产生机理,无损检测煤岩体和预测煤岩动力灾害等目的出发,研究煤岩体在单轴压缩变形破裂过程的微波辐射效应和规律是非常必要的。

2 受载煤体破裂过程微波辐射规律实验研究

2.1 试验样品

大同煤田含煤地层为侏罗系中统大同组、石炭系上统太原组及二叠系下统山西组,共含煤35层,煤层总厚45 m.其中侏罗系煤田煤层沉积特征为:上部主要为中厚煤层段,即2号、3号、4号、5号煤组;中部为薄煤层段,即7号、8号、9号、10号煤组;

下部为厚煤层段, 即 11 号、12 号、14 号、15 号煤组。大同煤田侏罗系煤层的煤质为烟煤, 宏观上呈沥青光泽和弱玻璃光泽, 致密坚硬, 内生裂隙不太发育。宏观煤岩成分为镜煤、亮煤、暗煤和丝炭; 宏观煤岩类型以半亮型煤和半暗型煤居多。

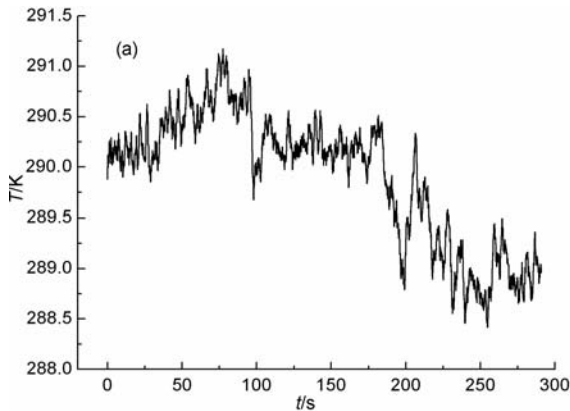
煤峪口矿 8907 工作面、忻州窑矿 8506 工作面、同家梁 307 盘区分别开采的是 9 号、11 号、14 号煤层。目前, 这三个煤矿均属于“两硬开采”, 受到冲击地压的严重威胁。根据弹性能指数理论, 经实验室测试结果表明, 该煤系煤层属中等以上冲击倾向煤层^[22]。

实验所用试样取自大同煤田的忻州窑矿、同家梁矿、煤峪口矿侏罗系煤层。由井下取出的大块煤体在垂直方向上均属同一分层, 在水平方向上均在同一位置附近, 运抵实验室后用岩芯管取样, 加工制成 $\Phi 50 \text{ m} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱形试样, 或将原煤切割成 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 100 \text{ mm}$ 的棱柱形试样, 加工后煤样的高度、直径、平整度、光洁度、平行度均能达到岩石试验规范标准。

2.2 煤体单轴压缩微波辐射规律实验系统

研究表明^[10~12], 无论是垂直极化波还是水平极化波, 绝大多数岩石在厘米波段的亮温变化量比毫米波段效果显著; 厘米波段辐射计的温度分辨率一般可做到 0.1 K, 毫米波段则要差一个数量级。而 6.6 GHz 微波辐射计(其参数分别为带宽 200 MHz, 线性度 0.999032)正好属于厘米波段, 对应于 4.54 cm 的波长。因此, 选用这种微波辐射计作为实验使用。

煤体单轴压缩产生微波辐射实验在电磁屏蔽室内进行。实验仪器采用 WAWP 型电液比例万能试验机控制系统、6.6 GHz 微波辐射计和数据采集微机。实验室对 27 块煤样进行了单轴压缩破坏过程中微波辐射效应的测试实验。



2.3 煤体单轴压缩微波辐射实验方法

在压力机下, 沿试样长轴方向单轴加载, 匀速加载至试样破裂。微波辐射计距离试样约 3 cm。对试样施加载荷前, 测量试样的固有(未受力状态)微波辐射, 以此值为基准, 然后开始施加载荷。在加载过程中, 测量试样变形破裂的微波辐射, 直至试样破裂。测试系统示意图如图 1 所示。

2.4 煤体单轴压缩微波辐射规律实验结果

在单轴压缩条件下, 实验室对 27 块煤样的微波辐射效应和规律分别进行了测试和分析。结果表明, 在 6.6 GHz 测试条件下, 受载煤体在变形破裂过程中其破坏前兆类型可归结为 3 种典型类型。

第 1 种类型: 实验试样参数见表 1, 典型的实验结果见图 2。由图可知, 受载煤体破坏前亮温曲线呈不对称的“凸”型。

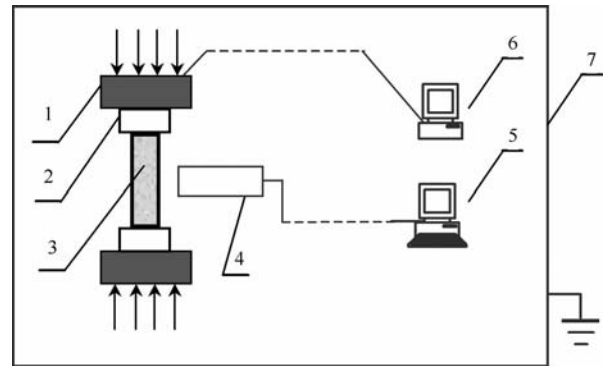


图 1 受载煤体微波辐射测试系统示意图
1—试验机; 2—绝缘垫块; 3—试样; 4—微波辐射计; 5—微波辐射采集系统; 6—载荷控制系统; 7—电磁屏蔽室。

Fig. 1 Microwave radiation experiment system diagrammatic sketch of loading coal

1—Testing machine; 2—Insulating plate; 3—Coal sample; 4—Microwave radiometer; 5—Microwave radiation data acquisition system; 6—Load control system; 7—Electromagnet shield room.

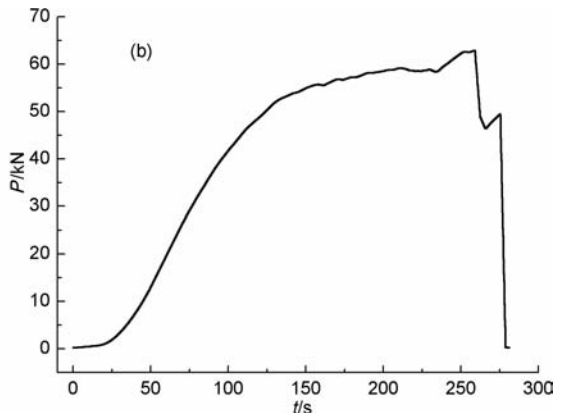


图 2 8907 工作面煤样单压过程的微波辐射前兆规律

(a) 受载煤体亮温随时间变化; (b) 煤体受载压力随时间变化。

Fig. 2 Microwave radiation precursor law on loading coal from 8907 Face in Meiyukou

(a) Bright temperature variation trend of loading coal sample; (b) Pressure variation trend of loading coal sample.

表 1 单轴压缩实验参数

Table 1 Experiment parameters of uniaxial compression

煤样地点	实验方式	试件尺寸	频段	加载速率
大同煤峪口矿 8907 工作面	单轴压缩	$\Phi 50 \text{ m} \times$ 100 mm	6.6 GHz	1.5 mm/min

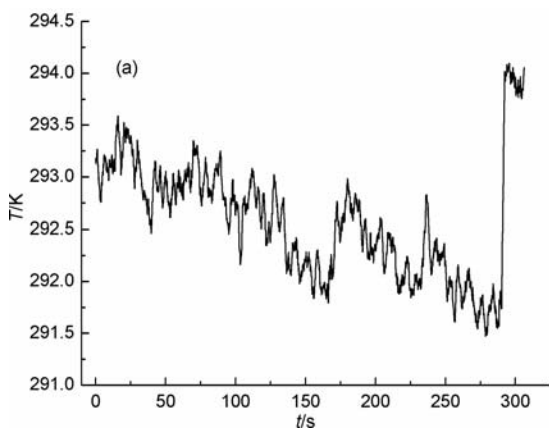
在加载初期,亮温以较小的波动形式增加,在 30 s 左右有一个小幅度的降低;随后就以波动形式开始上升,在 77 s 达到亮温最大值 291.2 K,在此期间,受载煤体发出轻微的破裂声;之后亮温就开始下降,微破裂声不断,但煤体表面没有碎块崩出;在 95 s 左右亮温值有一个突降,由压力-时间图(图 2b)上可知,此时是弹性阶段与裂纹稳定扩展阶段的过渡阶段;在 105~180 s 之间,压力在不断增加,但是亮温值保持在 290 K 左右波动;在 180 s 后,煤体的中部一小区域不断崩出碎块,同时亮温有了 2.1 K 的突降,紧接着突升后又突降,在 254 s 时亮温达到了最低值 288.4 K 的;在 259 s 时发生了一个应力跌落,煤体侧面由于“压杆失稳”有一块煤条折断,完全失去承载能力,亮温值也升到 289.4 K. 随着压力继续增加,煤体失稳破坏,亮温值有一个 0.8 K 的降幅.

第 2 种类型:实验试样参数见表 2,典型的实验结果见图 3. 在煤样加载变形破坏过程中,亮温曲线

表 2 单轴压缩实验参数

Table 2 Experiment parameters of uniaxial compression

煤样地点	实验方式	试件尺寸	频段	加载速率
大同忻州窑 8506 工作面	单轴压缩	$\Phi 50 \text{ m} \times$ 100 mm	6.6 GHz	2 mm/min



呈现下降趋势.

在加载初期,煤体内主要以压密和弹性阶段为主,但也有轻微的破裂声,亮温以较为缓和的波动形式不断下降.当达到破坏压力的 86% 时(在 167 s 以后),受载煤体发出了不间断的劈裂声,并有碎煤块崩出,亮温也有了较大的波动幅度,亮温变化值达到了 1 K,而总的趋势依然是下降;发生破坏时压力突降,煤体最终炸裂,亮温则发生突升,突升幅度达到了 2.5 K.

第 3 种类型:实验试样参数见表 3,典型的实验结果见图 4. 在煤样加载变形破坏过程中,亮温曲线呈现上升趋势.

表 3 单轴压缩实验参数

Table 3 Experiment parameters of uniaxial compression

煤样地点	实验方式	试件尺寸	频段	加载速率
大同同家梁 307 盘区	单轴压缩	$\Phi 50 \text{ m} \times$ 100 mm	6.6 GHz	2 mm/min

在加载初期,亮温呈增长趋势,在 17~31 s 之间有 0.4 K 的波动,随后增长很缓慢,近似倾斜直线;随着压力的增加,在 85~92 s 之间有 0.7 K 的突升,从应力图上看,这一突升预示着压密阶段向弹性阶段的转变.随着压力的增加,亮温曲线继续增长,总的增长趋势也增加,即:亮温曲线的近似直线的斜率变大;在 250 s 以后,亮温曲线的波动幅度较大,随后保持着近似稳定的幅度波动,近似于恒载实验的结果,此时煤体的变形速率很低,类似于声发射和电磁辐射监测煤岩破坏前的相对沉寂,继续加载,煤体发生失稳破坏,亮温值增加了 1.9 K.

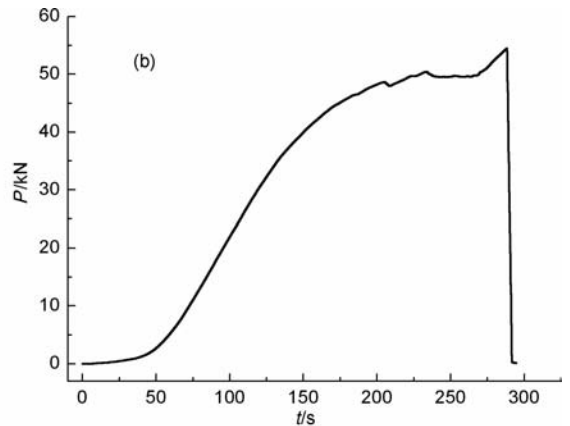


图 3 8506 工作面煤样单压过程的微波辐射前兆规律

(a) 受载煤体亮温随时间变化;(b) 煤体受载压力随时间变化.

Fig. 3 Microwave radiation precursor law on loading coal from 8506 face in Xinzhouyao

(a) Bright temperature variation trend of loading coal sample;(b) Pressure variation trend of loading coal sample.

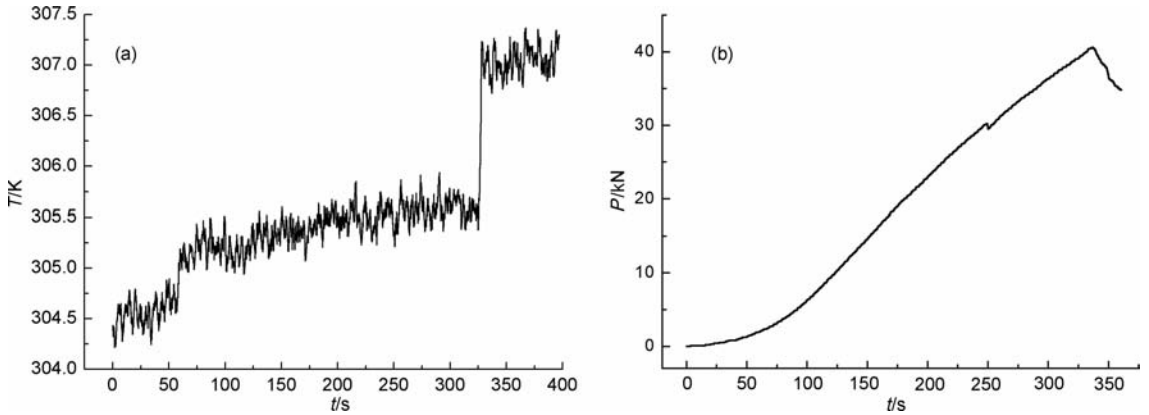


图4 307 盘区煤样单压过程的微波辐射前兆规律

(a) 受载煤体亮温随时间变化; (b) 煤体受载压力随时间变化。

Fig. 4 Microwave radiation precursor law on loading coal from 307 panel in Tongjialiang

(a) Bright temperature variation trend of loading coal sample; (b) Pressure variation trend of loading coal sample.

3 讨论

3.1 实验现象的解释

3.1.1 受载煤体亮温曲线波动性的解释

从受载煤岩微波辐射实验结果的曲线来看,图中曲线都存在着一一定程度的波动性. 作者认为有两方面: 一是由于煤体内含有节理裂隙等不均匀性结构造成的; 二是煤体不断积累能量、释放能量的过程. 当积累能量时亮温曲线就上升, 积累到一定程度, 达到煤体内某些弱结构的强度后就会释放能量, 释放能量时亮温曲线就下降; 而这些能量相对受载煤体的整个能量而言是比较小的. 同时, 这也证实了非均质材料——煤体加载过程中微波辐射特性的复杂性.

另外, 从微观角度来讲, 介质分子吸收机械能而跃迁到较高能级态, 而处于激发态的分子是十分不稳定的, 一般在 10^{-8} s 内就要向基态转化, 或者与其他分子碰撞, 将能量传递给它而不产生电磁辐射, 或者向下跃迁到一个较低的能级, 向外发射微波辐射. 这样, 在介质持续受载的过程中, 其分子将进行“跃迁到激发态—转化基态(或传递能量)”的循环运动. 因此, 这样将导致微波辐射亮温曲线的波动性.

3.1.2 受载煤体亮温曲线下落的解释

按照常规的思路, 受载煤体在变形破坏过程中, 由于压力机对煤体做功并将一部分机械能转化为煤岩内能, 故受载煤岩在变形破裂过程中应该是个升温过程, 向外进行热辐射, 而在实际实验过程中, 包括邓明德、耿乃光和崔承禹等学者的受载岩石的微波辐射和红外辐射规律实验^[12], 吴立新和刘善军等

学者的受载煤岩的红外辐射规律实验^[18]以及笔者等人的受载煤岩的微波辐射规律实验都存在 AIRT 曲线或亮温曲线下落的现象. 邓明德等学者认为这是一种岩石破裂的前兆类型, 对此没有作出解释; 而吴立新等学者认为: 岩石表面的 AIRT 在拉伸条件下呈下降趋势; 另外, 岩石内部孔隙气体突然大量溢出时吸收能量, 也会引起试块温度降低.

针对此反常规现象, 可以从三方面来进行解释. 首先, 从能量的角度出发来研究此问题. 煤体在应力作用下产生耗散热的同时, 还不断向环境中释放热量和从外界吸收热量, 此时煤体温度的变化速率由下式决定^[23]:

$$\dot{T} = (\dot{E}_d + \dot{Q}_a - \dot{Q}_r) / C, \quad (1)$$

式中 \dot{T} 为温度变化率, \dot{E}_d 为耗散热能积累速率, \dot{Q}_a 和 \dot{Q}_r 分别为煤体介质吸热和放热速率, C 为煤体介质的热容量. 当煤体的释热速率 \dot{Q}_r 大于耗散热能积累速率 \dot{E}_d 和吸热速率 \dot{Q}_a 之和时, 煤体的温度不但不会上升, 反而会出现下降现象. 由于实验并不是在绝热情况下进行的, 因此, 当耗散热产生速率小于煤岩向外界的热释放速率时, 煤岩本体温度及其微波辐射会出现下降趋势.

其次, 从斯蒂芬-玻耳兹曼辐射定律和瑞利-金斯公式出发进行解释. 邓明德、吴立新等学者的实验结果表明, 受载岩石表面的 AIRT 也呈现下降趋势. 斯蒂芬-玻耳兹曼辐射定律是红外热像仪温度监测的理论基础, 即物体表面发射的总能量(总辐射出射度)与其温度的 4 次方成正比. 瑞利-金斯公式是无源微波遥感的理论基础, 即物体微波辐射的总能量与其温度的 1 次方成正比. 在不考虑发射率的前提

下, 受载煤岩变形破裂过程中, 压力机的机械能转化为煤岩的变形能和热能(温度是内能的量度), 并且可以认为相当一部分机械能都转化为热能(裂纹尖端扩展过程中的温度可达到 1000 K)^[24], 如果在这样的条件下, 红外热辐射都能监测到物体表面的温度下降, 那么对于微波辐射而言, 就更能监测到物体亮温的下降. 其次, 在考虑发射率(取值范围为 0~1)的情况下, 发射率变化对微波辐射强度的影响要远大于红外辐射强度. 而物体介电常数的大小直接决定了发射率的高低, 从而也决定了亮温的大小. 受载岩石在变形破裂过程中, 促使其介电常数增大, 发射率降低, 这样也会引起微波辐射的降低, 引起亮温下降^[25].

此外, 煤岩破裂产生的电磁辐射受到天然半导体矿物(如大部分金属硫化物)的作用会发生改变, 这一现象称为天然半导体特性^[26]. 在压电场的作用下, 在因矿物中存在的 p-n-p, n-p-n 或其他异性转换类型的闭锁层, 在壁垒上便形成晶体管与可控硅形式的与回路有关的“活性元件”. 由于粒间夹层中形成并不断增长的裂隙而产生的电脉冲可以被大大地放大——晶体管形式的辐射, 或者在其作用下又产生电击穿可控硅形式的辐射(Соболев, 1982). 按照这一观点, 假设煤岩破裂时, 由晶体破裂特性或由压电特性产生的电磁辐射, 如果遇到煤岩中的天然半导体矿物(如黄铁矿、黄铜矿), 便会受到类似晶体管电路或可控硅电路的放大、整流、滤波及开关等作用, 从而使电磁辐射的特征发生改变. 作者认为这一机理也可能引起微波辐射亮温值的下降.

最后, 从微观角度出发进行解释. 由近代物理学知道, 物质的微波辐射是组成物质分子的转动态能级间跃迁辐射出的电磁波, 而辐射电磁波的强度正比于被激发的分子数与跃迁几率的乘积, 这个能级跃迁是由于分子受到热能激发引起的. 当组成物质的分子能量从较低的能级跃迁到较高的能级时, 就吸收外来的辐射能; 当跃迁是从较高能级到较低能级时, 就向外发射辐射能量. 根据房宗缙、邓明德等实验结果——机械能直接激发介质的微波辐射能, 我们认为, 当分子从较低能级跃迁到较高能级时, 介质的微波辐射能就会减少; 当分子从较高能级到较低能级时, 介质的微波辐射能就会增加.

以上解释同时也说明了图 2、图 3 和图 4 中的煤体亮温曲线存在较大差异的原因. 至于控制煤体亮温曲线形态的重要因素有待于进一步研究.

3.2 实验结果分析

实验结果表明, 在单轴压缩条件下, 煤体在破坏过程中及临破坏前都存在着微波辐射前兆. 通过对实验的峰值载荷和从加压开始到破坏前的一段时间内的最大亮温变化值进行总结, 可得到如表 4 所示的结果.

从表 4 中可知, 煤体在单轴压缩实验中其亮温最大变化值为 1.9~2.7 K. 而吴立新等学者研究岩石在单轴压缩条件下的红外辐射特性的结果表明, 岩石在峰值应力前无论是最高辐射温度还是平均红外辐射温度, 其变化都不大, 一般只为 0.1~0.3 °C, 最高辐射温度的突升只发生在岩石的破裂瞬间^[18]. 因此, 受载煤体的微波辐射特性要明显优于红外辐射特性, 这与邓明德、耿乃光等学者的受载岩石微波辐射的实验结果一致. 因此, 利用受载煤体变形破坏过程中的这一微波辐射前兆特性预测预报煤岩动力灾害的发生更具有优越性.

3.3 实验结果成因机理分析

由微波遥感基本原理可知, 在微波波段, 黑体辐射的亮度可用瑞利-金斯公式代替普朗克公式, 即

$$B(\lambda, T) = \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \Omega^{-1}) \quad (2)$$

(2)式表示黑体单位表面积、单位立体角、单位频率范围内所辐射的微波功率.

微波辐射计所接收到的功率可写成

$$P = k\Delta fT, \quad (3)$$

(3)式表明, 微波辐射计接收到的功率和黑体的温度呈线性关系, 于是我们可用温度的高低来表示微波辐射功率的大小. 而一般物体并不是黑体, 它的辐射亮度 B_e 与同温度的黑体亮度 B_b 间的关系为

$$B_e = \epsilon B_b = \epsilon \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (4)$$

式(4)中 ϵ 称为物体的发射率(或比辐射率). 对于岩石矿物等各类地物, 其微波发射率 ϵ 直接决定它的亮度温度的高低, 即 $T_B = \epsilon T$ (T_B 为亮度温度, T 为

表 4 受载煤体峰值载荷与最大亮温变化的关系

Table 4 Relationship between peak strength and maximum brightness temperature variation

序号	取样地点	频段 (GHz)	单轴抗压强度 (MPa)	亮温最大变化值 (K)
1	煤峪口 8907 工作面	6.6	8.0	2.7
2	忻州窑 8506 工作面	6.6	7.0	2.5
3	同家梁 307 盘区	6.6	5.2	1.9

物体的温度)。

因此,微波辐射计接收到一般物体所辐射的微波功率为

$$P = k\Delta f T_B = \epsilon k \Delta f T, \quad (5)$$

在(5)式中, k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23}$ ($J \cdot K^{-1}$); Δf 为微波辐射计的带宽. 由此可以确定,微波辐射计接收到一般物体的辐射功率与其温度和发射率有关,而实际物体的发射率与物体表面状态(表面温度、表面粗糙度以及表面氧化层、表面杂质或涂层的存在)有关,且非金属的发射率一般是随其表面温度的上升而减少的。

因此,受载煤体变形破裂过程中的微波发射率不仅依赖于受载煤体的加载情况,还受煤岩组构成分、导热率和峰值载荷等因素影响. 这一方面的深入研究有待于下一步开展工作。

4 结 论

通过实验结果的分析,可得出如下初步结论:

(1) 受载煤体的微波辐射能量随煤样的应力状态变化而显著变化. 27 块煤样的实验结果表明受载煤体在单轴压缩条件下能产生微波辐射效应。

(2) 受载煤体随应力的变化具有不同的破裂前兆规律. 在单轴压缩条件下,在 6.6 GHz 频段测试条件下,受载煤体预示煤体破坏的微波辐射前兆规律有 3 种类型。

(3) 运用电介质物理学对实验现象进行了较为科学的解释,证实了实验现象的合理性。

(4) 煤体在单轴压缩实验中的亮温最大变化值为 1.9~2.7 K,其微波辐射特性明显优于红外辐射特性;6.6 GHz 的微波辐射计适于监测煤体的变形破坏过程。

(5) 运用微波遥感基本原理的理论知识,分析了受载煤体变形破裂过程中微波辐射特性的影响因素。

受载煤体的微波辐射能量随煤体应力状态变化而变化的物理现象的发现,为微波遥感技术应用于煤岩动力灾害的预报奠定了物理基础,为探索煤岩动力灾害前兆开拓了新手段、新方法和新途径,有可能产生煤岩动力灾害预报的新理论。

致 谢 本论文在理论分析方面得到了中国地震应急搜救中心邓明德研究员、中国航天工业总公司二院二〇七所樊正芳研究员的帮助,在实验设计、操作方面得到了中国科学院东北地理与农业生态研究所

赵凯主任和孙鸿雁博士、中国科学院空间科学与应用研究中心张升伟副主任和张卫国博士的帮助,在此表示感谢!

参考文献(References)

- [1] 何学秋,王恩元,聂百胜等. 煤岩流变电磁动力学. 北京: 科学出版社, 2003
He X Q, Wang E Y, Nie B S, et al. Electromagnetic Dynamics of Coal or Rock Rheology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003
- [2] 窦林名,何学秋. 采矿地球物理学. 北京: 中国科学文化出版社, 2002
Dou L M, He X Q. Mining Geophysics (in Chinese). Beijing: China Science and Culture Press, 2002
- [3] Luong M P. Infrared observation of failure processes in plain concrete. In: Durability of Building Materials and Component, 4DBMC. Singapore: Pergamon, 1987, 2:870~878
- [4] Luong M P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(1-3):291~301
- [5] Luong M P. Infrared thermographic observations of rock failure. In: Hudson J A, ed. Comprehensive Rock Engineering Principles-Practice & Projects. New York: Pergamon, 1993, 4:715~730
- [6] Luong M P, Eytard J C. Infrared thermovision of dissipation in concrete and concrete works. In: Génie Parasismique et Réponse Dynamique des Ouvrages[s. l.]. AFPS, 1999. 471~478
- [7] 崔承禹, 邓明德, 耿乃光. 在不同压力下岩石光谱辐射特性研究. 科学通报, 1993, 38(6): 538~541
Cui C Y, Deng M D, Geng N G. Study on the spectral radiation characteristics of rock under the different stresses. *Science Bulletin* (in Chinses), 1993, 38(6):538~541
- [8] 耿乃光, 邓明德, 崔承禹等. 遥感技术用于固体力学实验研究的新成果. 力学进展, 1997, 27(2):185~192
Geng N G, Deng M D, Cui C Y, et al. The new results of experimental study of solid mechanics by using the remote sensing technology. *Advances in Mechanics* (in Chinese), 1997, 27(2):185~192
- [9] 尹京苑, 房宗绯, 钱家栋等. 红外遥感用于地震预测及其物理机理研究. 中国地震, 2000, 16(2):140~148
Yin J Y, Fang Z F, Qian J D, et al. Research on the application of infrared remote sensing in earthquake prediction and its physical mechanism. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2000, 16(2):140~148
- [10] 邓明德, 樊正芳, 崔承禹等. 无源微波遥感用于地震预报的实验研究. 红外与毫米波学报, 1995, 14(6):401~406
Deng M D, Fan Z F, Cui C Y, et al. The experimental study for earthquake prediction by passive microwave remote sensing. *J. Infrared Millim. Waves* (in Chinese), 1995, 14(6): 401~406

- [11] 耿乃光, 樊正芳, 籍全权等. 微波遥感技术在岩石力学中的应用. 地震学报, 1995, **17**(4):482~486
Geng N G, Fan Z F, Ji Q Q, et al. Microwave remote sensing application in rock mechanics. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(4):482~486
- [12] 樊正芳, 房宗绯, 邓明德. 微波遥感在岩土工程中应用的基础实验研究. 电波科学学报, 2000, **15**(4): 410~414
Fan Z F, Fang Z F, Deng M D. Basic experimental research of the microwave remote sensing applied in rock and soil engineering. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2000, **15**(4):410~414
- [13] 吴立新, 王金庄, 胡东宏. 遥感岩石力学八年探索回顾与展望. 中国矿业, 1999, **8**(增):99~103
Wu L X, Wang J Z, Hu D H. Retrospect and prospect for eight years' exploration of remote sensing rock mechanics. *China Mining Magazine* (in Chinese), 1999, **8**(Suppl.):99~103
- [14] 刘善军, 吴立新, 吴焕萍等. 多暗色矿物类岩石单轴加载过程中红外辐射定量研究. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(11):1585~1589
Liu S J, Wu L X, Wu H P, et al. Quantitative study on the thermal infrared radiation of dark mineral rock in condition of uniaxial loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2002, **21**(11):1585~1589
- [15] 吴立新, 王金庄. 煤岩受压红外热像与辐射温度特征实验. 中国科学(D辑), 1998, **28**(1):41~46
Wu L X, Wang J Z. Experiment on infrared imaging and radiation temperature features of coal and rocks under loading. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 1998, **28**(1): 41~46
- [16] 吴立新. 遥感岩石力学及其新近进展与未来发展. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(2):139~146
Wu L X. Remote sensing rock mechanics and its recent achievements and future development. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2001, **20**(2):139~146
- [17] Wu L X, Liu S J, Wu Y H, et al. Changes in infrared radiation with rock deformation. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2002, **39**(6):825~831
- [18] 刘善军, 吴立新. 岩石受力的红外辐射效应. 北京:冶金工业出版社, 2005.
Liu S J, Wu L X. Infrared Radiation Effect of Loading Rock (in Chinese). Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005
- [19] Fan X, Kelly R M, Rowson N A. Effect of Microwave Radiation on Ilmenite Flotation. School of Chemical Engineering, The University of Birmingham, Birmingham B152TT, U. K
- [20] Wang G, Radziszewski P, Ouellet J. Particle modeling simulation of thermal effects on ore breakage. *Computational Materials Science*, 2008, **43**(4):892~901
- [21] Jones D A, Kingman S W, Whittles D N, et al. Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*, 2005, **18**(7):659~669
- [22] 张绪言, 冯国瑞, 康立勋等. 用剩余能量释放速度判定煤岩冲击倾向性. 煤炭学报, 2009, **34**(9):1165~1168
Zhang X Y, Feng G R, Kang L X, et al. Method to determine burst tendency of coal rock by residual energy emission speed. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 2009, **34**(9):1165~1168
- [23] 王庆良, 王文萍, 梁伟锋等. 应力-耗散热地温前兆机理研究. 地震学报, 1998, **20**(5):529~534
Wang Q L, Wang W P, Lang W F, et al. Study on the ground temperature precursory mechanism of stress & heat of dissipation. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1998, **20**(5):529~534
- [24] Miller P J, Coffey C S, DeVost V F. Heating in cry staline solids due to rapid deformation. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**: 913~916
- [25] 肖金凯, 赖兆生, 冯俊明. 岩石和土壤的微波介电特征及其在微波遥感中的应用研究. 科学通报, 1983, **28**(17):1055~1057
Xiao J K, Lai Z S, Feng J M. The study on microwave dielectric characteristics of rock and soil and its application of microwave remote. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1983, **28**(17):1055~1057
- [26] 刘煜洲, 刘 因, 王寅生等. 岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理. 地震学报, 1997, **19**(4):418~425
Liu Y Z, Liu Y, Wang Y S, et al. The influent factor and mechanism on electromagnetic radiation induced by rock fracture. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1997, **19**(4):418~425

(本文编辑 胡素芳)