

不同含水岩石蠕变试验电磁辐射频谱分析

荣 耀¹, 许锡宾², 靖洪文¹, 赵明阶²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 重庆交通学院, 重庆 400074)

摘要: 通过研究饱水、自然、干燥状态的岩石在荷载作用下与电磁辐射强度频谱之间的关系、加载环境下岩石蠕变变形破坏孕育、发生、发展过程中的电磁辐射效应及规律, 获得岩石蠕变断裂的电磁辐射信息特征, 确定不同含水状态及应力变化与电磁辐射强度频谱间的关系。可有效预测岩体的状态, 对预测预报岩体的动力灾害提供有效的预测手段。

关键词: 岩石力学; 岩石蠕变; 电磁辐射; 频谱分析

中图分类号: TU 458^{+.3}

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5090 - 06

SPECTRUM ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION FOR CREEP TEST OF ROCK WITH DIFFERENT WATER CONTENTS

RONG Yao¹, XU Xi-bin², JING Hong-wen¹, ZHAO Ming-jie²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: On the basis of studying the relation of the load applied on the rocks with different water contents and electromagnetic radiation spectrum, and the relation of the rock electromagnetic radiation effect and regularity during the procedures from the beginning of rock creep distortion to failure, the electromagnetic radiation message characteristics of rock creep break are obtained. The monitoring electromagnetic radiation strength by test system is performed, which includes servo-added load system, receiving antenna and sonic emission sensor, A-ER acousto-electric data collecting systems, and shield system and etc.. The relations between the load applied on the rock with different water contents and electromagnetic radiation strength, and the curves of electromagnetic radiation strength with time of electromagnetic radiation strength spectrum curves, are obtained. Thus, the relationship of different water contents and different stress levels of the electromagnetic radiation spectrum are achieved. The study shows that, with different stresses, the frequency domains of electromagnetic radiation are clear with the main range of 0.0 - 0.2 kHz, and the frequency electromagnetic radiations of rock dry-nature-saturation are exhibited from low to high. Different water contents have different effects on the physical mechanical quality of rock, and the water on the rock surface can lower the total energy with rock strength and deteriorated elastic modulus, which drive the electromagnetic radiation low. Thereafter, the method discussed is useful to predict the stability of rock mass and it proves to be feasible to forecast the rock dynamic disasters.

Key words: rock mechanics; rock creep; electromagnetic radiation; spectrum analysis

1 引 言

电磁辐射是煤炭等固体材料在变形、破裂时向

外辐射电磁波的一种现象。经过大量理论、试验、现场观测和研究, 目前电磁辐射技术已成为我国区域性地震监测的短临预报手段, 并用于冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的预测预报^[1~11], 如

收稿日期: 2004 - 10 - 20; **修回日期:** 2004 - 12 - 06

作者简介: 荣 耀(1979 -), 男, 2001 年毕业于重庆交通学院, 现为博士研究生, 主要从事地下结构工程方面的研究工作。E-mail: kaianry@hotmail.com。

文[6]开展了在矿山开挖中岩爆和气爆的电磁辐射预报研究。文[7, 8]在试验研究具有冲击倾向煤样变形、破坏电磁辐射特征的基础上, 对回采工作面冲击矿压的电磁辐射前兆进行了现场测定, 探讨冲击矿压电磁辐射前兆与老顶岩层断裂、运动的关系, 对冲击矿压电磁辐射前兆规律做了研究。

但是目前进行的岩石试验, 大都为单轴自然状态下岩石变形破裂过程及其电磁辐射特性规律。国内主要对矿山开挖下的冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的研究比较多^[7~12], 但对于不同含水岩石在蠕变变形破坏过程中, 受载大小与电磁辐射强度之间的关系、断裂程度与电磁辐射脉冲之间的关系以及不同含水状态对其影响的研究很少, 而这对于监测持续反复充、泄水岩石工程的长期稳定性至关重要。

2 岩石双轴剪切流变电磁辐射试验

2.1 试验系统

试验系统如图 1 所示, 伺服加载系统由 GSS 双轴直剪流变液电伺服岩石力学试验系统、接收天线和声发射传感器、A-ER 声电数据采集系统、高速数据采集系统、载荷-位移记录系统和屏蔽系统等组成。

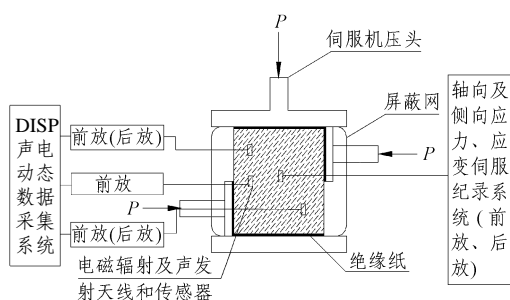


图 1 双轴直剪流变电磁辐射试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of double axes direct shear electromagnetic radiation for test system

2.2 试验方案

对不同含水状态下的岩石试样进行双轴剪切流变试验, 考察不同含水状态下试样破坏时电磁辐射特征及其规律; 研究水对声发射和电磁辐射的影响。

(1) 岩石试样制备方法

本试验中, 岩石试样为闪云斜长花岗岩, 微风

化、块状结构, 单轴抗压强度 100 MPa(对中风化上限或弱风化下限的相应试验值), 属脆性硬岩, 见表 1。试件端面平整和侧面平整度均控制在 ± 0.0003 cm 范围之内。流变试验前, 首先按常规试验方法测得岩石的瞬时破坏强度和破坏时相对应的应变值, 以此作为蠕变和松弛试验的参考值。

表 1 试样基本情况

Table 1 Conditions of the examples

序次	岩石名称	试件尺寸(长×宽×高)	试样状态
1	闪云斜长花岗岩	101.44×101.06×101.95	干燥
2	闪云斜长花岗岩	101.00×99.40×101.63	自然
3	闪云斜长花岗岩	102.10×101.80×101.75	自然
4	闪云斜长花岗岩	101.19×101.30×101.09	饱和
5	闪云斜长花岗岩	101.10×101.10×101.06	饱和

注: 试件长、宽、高的尺寸以 mm 计。

干燥、自然、饱水岩样的制备: ① 干燥岩样: 加载前在 60 °C 烘箱内烘干 24 h; ② 自然岩样: 加载前试样在自然干燥环境中放置 30~45 d, 试验环境的温度一般控制在(20±3) °C; ③ 饱水岩样: 加载前试样放入养护箱中, 抽成真空, 放置 2 d 以上, 让岩石充分吸水饱和。

(2) 试验步骤

① 按图 1 连接好电磁辐射天线传感器, 启动 DISP 型电磁辐射信号数据采集系统和 GSS 双轴直剪流变液电伺服岩石力学试验系统, 检查各测试系统的工作状态是否正常。

② 量测并纪录岩样的尺寸, 将其放置在压力机底座上, 并将电磁辐射接收天线布置在试样周围, 距离试样 0.5~2 cm, 平面铜板天线直接用胶带固定在岩样上。

③ 罩好屏蔽网, 并使其良好接地。

④ 设置并调试 DISP 型电磁辐射信号数据采集系统参数和门槛值, 设置 GSS 双轴直剪流变液电伺服岩石力学试验系统的加载参数。

⑤ 待以上步骤完成后, 启动 DISP 型电磁辐射信号数据采集系统和 GSS 双轴直剪流变液电伺服岩石力学试验系统, 开始试验。由于流变试验时间较长, 电磁辐射信号数据采集不可能做到全程采集, 只能在特定的时间段进行采集, 一般选在加载过程

和荷载稳定过程中。

3 不同含水量的岩石在荷载作用下电磁辐射强度的频谱分析

3.1 干燥状态下岩石在不同应力状态下电磁辐射的频谱分析

通过以上试验得到干燥状态下岩石在不同应力状态下电磁辐射强度 - 时间关系曲线；通过傅里叶变换得到电磁辐射强度的频谱曲线，如图 2~4。

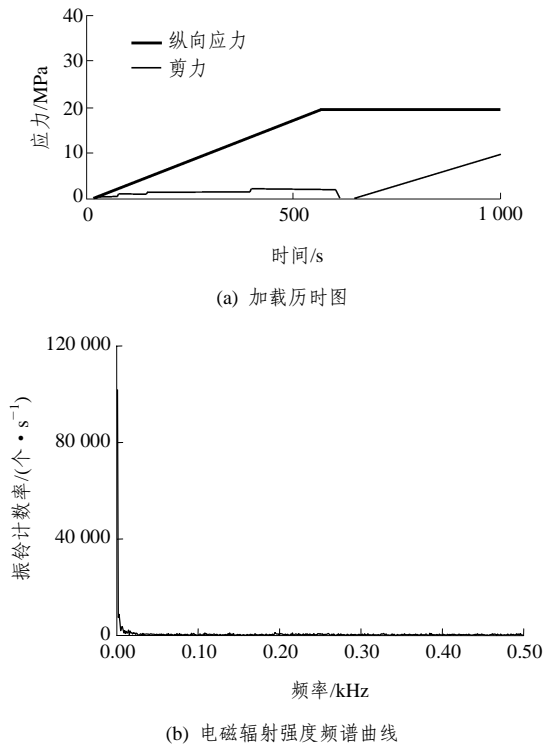


图 2 干燥状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线
Fig.2 Spectrum curve of electromagnetic radiation for dry rock

在不同应力作用下，电磁辐射强度频率峰值均较为明显，主要集中在 0~0.1 kHz，干燥岩石在不同应力作用下，剪力对电磁辐射强度的频率谱中的振幅值影响较大，从图 3(a)和图 4(a)比较，在纵向应力同为 20 MPa 时，剪应力分别为 15, 25 MPa，频谱曲线图中的振铃计数由 28 000 个/s 上升到 150 000 个/s。剪应力升高了，相应频谱曲线中的振幅值也提高了，剪力对电磁辐射强度频率谱中的振幅值影响较大；保持纵向应力不变的情况下，剪应力增加，频谱曲线图中的振幅值将急剧增加。

3.2 自然状态岩石在不同应力状态下电磁辐射的频谱分析

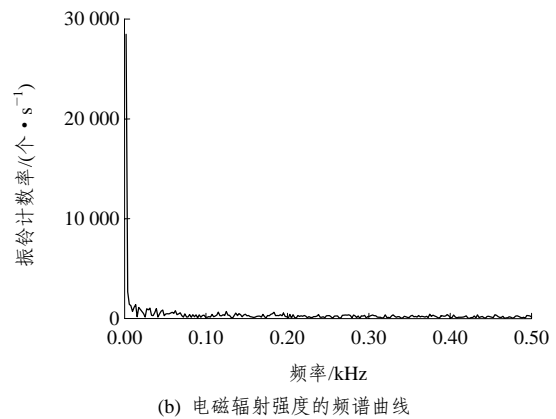
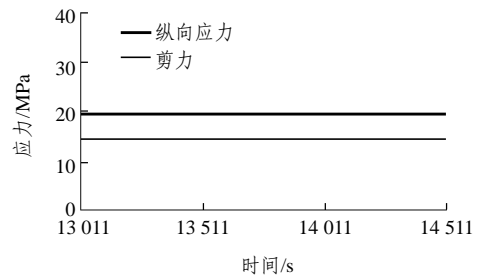


图 3 干燥状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线(剪应力为 15 MPa)

Fig.3 Spectrum curve of electromagnetic radiation for dry rock(with shear stress of 15 MPa)

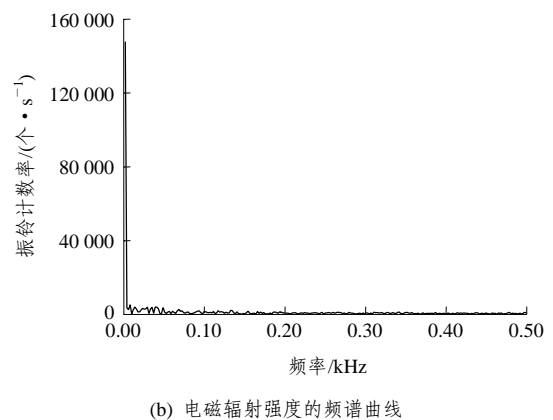
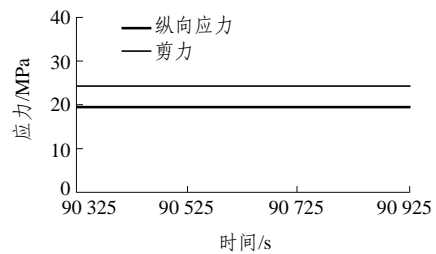


图 4 干燥状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线(剪应力为 25 MPa)

Fig.4 Spectrum curve of electromagnetic radiation for dry rock(with shear stress of 25 MPa)

通过上述试验得到自然状态岩石在不同应力状态下电磁辐射强度 - 时间关系曲线; 通过傅里叶变换得到电磁辐射强度的频谱曲线, 如图 5~7

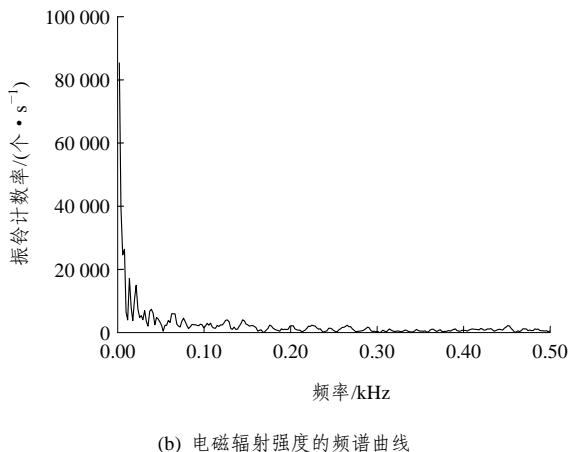
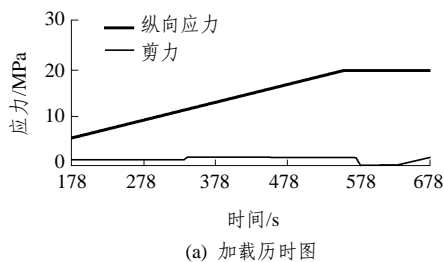


图 5 自然状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线
Fig.5 Spectrum curve of electromagnetic radiation for nature rock

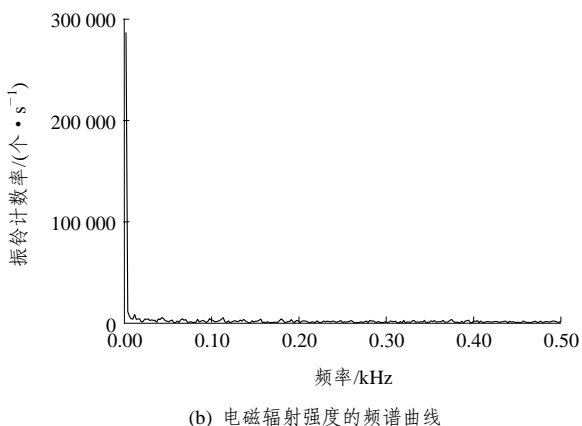
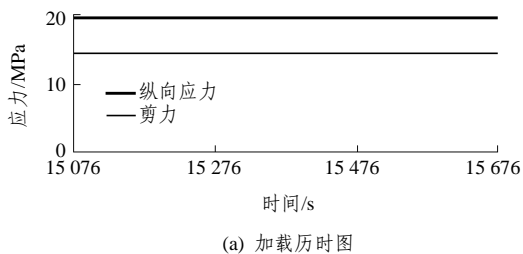


图 6 自然状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线(剪应力为 15 MPa)
Fig.6 Spectrum curve of electromagnetic radiation for nature rock(with shear stress of 15 MPa)

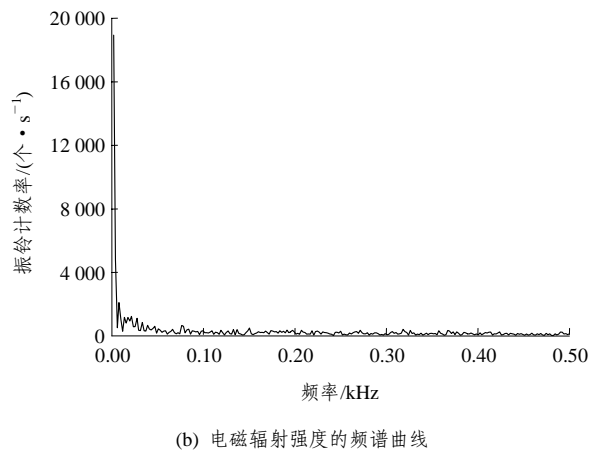
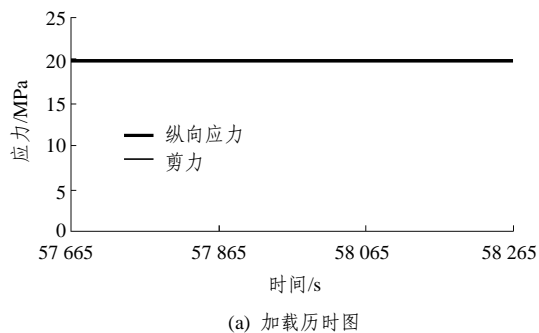


图 7 自然状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线(剪应力为 25 MPa)
Fig.7 Spectrum curve of electromagnetic radiation for nature rock(with shear stress of 25 MPa)

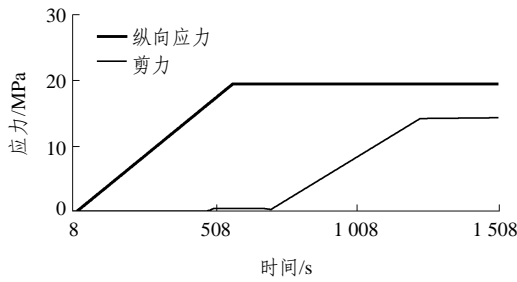
所示。

在不同应力作用下, 电磁辐射强度频率峰值均较为明显, 主要集中为 0~0.2 kHz, 比干燥情况下的主频范围要宽。自然状态岩石在不同应力作用下, 剪力对电磁辐射强度的频率谱中振幅值影响较大。将图 6(a)和图 7(a)相比较, 在纵向应力同为 20 MPa 时, 剪应力分别为 15, 20 MPa, 频谱曲线图中的振铃计数由 16 000 个/s 上升到 90 000 个/s。剪应力升高了, 相应频谱曲线中的振幅值也提高了, 剪力对电磁辐射强度的频率谱中的振幅值的影响较大, 保持纵向应力不变的情况下, 剪应力增加, 频谱曲线图中的振幅值将急剧增加。

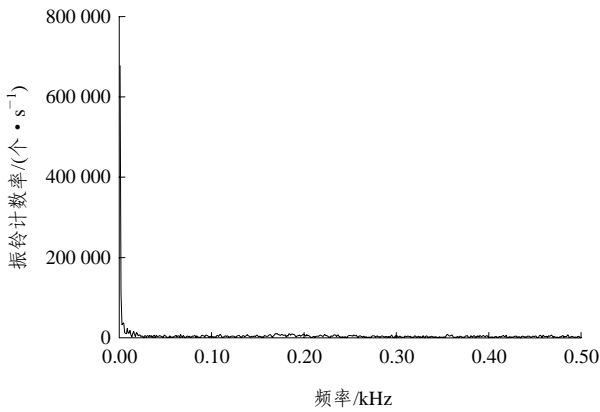
3.3 饱和状态岩石在不同应力状态下电磁辐射频谱分析

通过以上试验得到饱和岩石在不同应力状态下电磁辐射强度 - 时间关系曲线; 通过傅里叶变换得到电磁辐射强度的频谱曲线, 如图 8~10 所示。

在不同应力作用下, 电磁辐射强度频率峰值较为明显, 主要集中在 0~0.15 kHz, 比干燥情况下的主频范围要宽, 比自然状态岩石低一些。同样, 饱



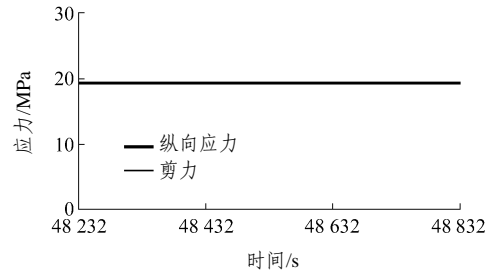
(a) 加载历时图



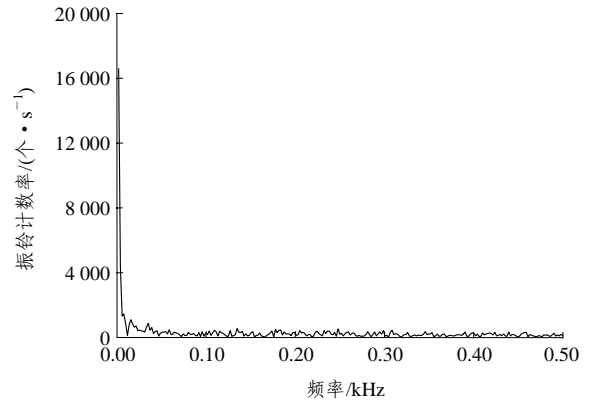
(b) 电磁辐射强度的频谱曲线

图 8 饱和状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线

Fig.8 Spectrum curve of electromagnetic radiation for saturated rock



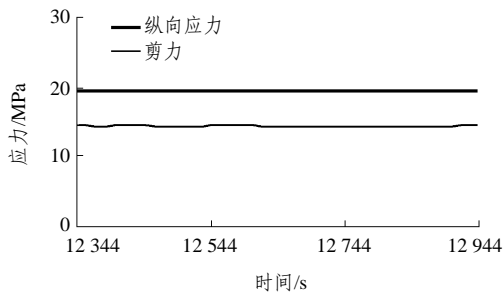
(a) 加载历时图



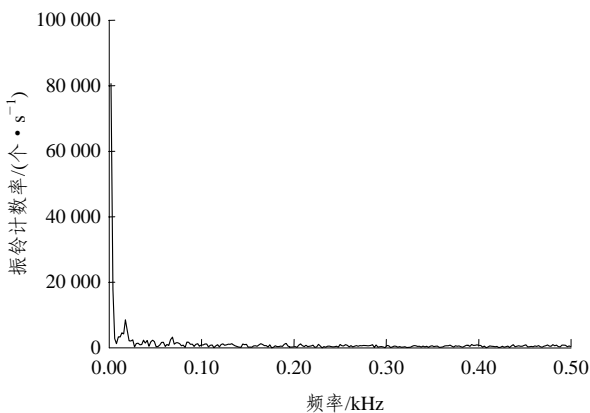
(b) 电磁辐射强度频谱曲线

图 10 饱和状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线

Fig.10 Spectrum curve of electromagnetic radiation for saturated rock



(a) 加载历时图



(b) 电磁辐射强度的频谱曲线

图 9 饱和状态下岩石电磁辐射强度频谱曲线

Fig.9 Spectrum curve of electromagnetic radiation for saturated rock

和状态岩石在不同应力作用下，剪力对电磁辐射强度的频率谱中振幅值影响较大，从图 9(a)和图 10(a)比较，在纵向应力同为 20 MPa 时，剪应力分别为 15 和 20 MPa，频谱曲线图中的振幅值由 45 000 个/s 上升到 210 000 个/s。当剪力增加 5 MPa 时，振幅值增加 165 000 个/s。

不同状态下的岩石在不同应力作用下，电磁辐射强度的频率具有一定规律性，岩石从干燥 - 自然 - 饱和电磁辐射强度频率峰值是由小向大变化的。干燥状态岩石电磁辐射强度频率峰值上限为 0.1 kHz，饱和状态岩石电磁辐射强度频率峰值上限为 0.15 kHz，自然状态岩石电磁辐射强度频率峰值上限为 0.2 kHz。不同含水量的岩石由于水分的存在改变了岩石材料的物理力学性质，岩石材料的电性参数发生变化，减弱了剪切面间的摩擦强度，从而影响岩石材料的电磁辐射产生，削弱电磁辐射的强度。

4 结 论

(1) 在不同应力作用下，电磁辐射强度频率范围比较明显，主要集中在 0~0.2 kHz。不同状态下的岩石在不同应力作用下，电磁辐射强度的频率具

有一定规律性, 岩石从干燥 - 饱和 - 自然电磁辐射强度频率峰值范围是由小向大变化的。

(2) 不同含水量的岩石由于水分的存在改变了岩石材料的物理力学性质。水对岩石材料的物理力学性质影响极大, 它使破坏岩石体单位面积结合键消耗的总能降低, 从而使岩石强度和弹性模量降低, 塑性加大, 最终使得受荷岩石体产生的电磁辐射强度减小。

(3) 剪力对电磁辐射强度的频率谱中振幅值影响较大。保持纵向应力不变的情况下, 剪应力增加, 频谱曲线图中的振幅值会急剧增加。

参考文献(References):

- [1] Dou Linming, He Xueqiu. Electromagnetic emissions in rock and coal burst failures[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(12): 86 - 88.
- [2] Alekseev D V, Egorov P V, Ivanov V V. Mechanisms of crack electrization and electromagnetic precursors of rock failure[J]. Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, 1992, (6): 27 - 32.
- [3] Ivanov V V, Pimonov A G. Statistical model of electromagnetic emission from a fracture in a rock[J]. Soviet Mining Science(English Translation of Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh), 1991, 26(2): 148 - 151.
- [4] Rabinovitch A, Bahat D, Frid V. Similarity and dissimilarity of electromagnetic radiation from carbonate rocks under compression drilling and blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(1): 125 - 129.
- [5] Bahat D, Avinoam R, Vladimir F. Fracture characterization of chalk in uniaxial and triaxial tests by rock mechanics, fractographic and electromagnetic radiation methods[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23: 1 531 - 1 547.
- [6] Frid V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast[J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38: 97 - 104.
- [7] 王云海, 撒占友. 冲击矿压电磁辐射前兆规律的初步研究[J]. 煤矿安全, 2003, 34(4): 14 - 17.(Wang Yunhai, Sa Zhanyou. Preliminary study on indications law of rock burst electromagnetic radiation[J]. Safe of Coalmine, 2003, 34(4): 14 - 17.(in Chinese))
- [8] 王云海, 何学秋, 窦林名. 回采工作面顶板运动的电磁辐射监测研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(2): 6 - 8.(Wang Yunhai, He Xueqiu, Dou Linming. The electromagnetic radiation monitoring of roof motion in return mine face[J]. Mining Industry Safe and Environmental Protection, 2003, 30(2): 6 - 8.(in Chinese))
- [9] 聂百胜, 何学秋, 王恩元. 煤体变形破裂电磁辐射的初步试验研究[J]. 煤矿安全, 2000, (4): 38 - 41.(Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. Preliminary experimental study of electromagnetic emission phenomena during the deforming and fracturing of coal body[J]. Safe of Coalmine, 2000, (4): 38 - 41.(in Chinese))
- [10] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤体剪切破坏过程电磁辐射与声发射研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 609 - 611.(Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. The electromagnetic emission and sonic emission during the destruction procedure of coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(6): 609 - 611.(in Chinese))
- [11] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 煤岩动力灾害电磁辐射仪及其应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366 - 369.(Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang. The coal dynamical disaster electromagnetic emission machine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366 - 369.(in Chinese))
- [12] 肖红飞, 何学秋, 王恩元. 煤岩破裂电磁辐射预测临界值的选取及应用[J]. 煤矿安全, 2003, 34(5): 8 - 11.(Xiao Hongfei, He Xueqiu, Wang Enyuan. The selection of electromagnetic radiation critical prediction and its application[J]. Safe of Coalmine, 2003, 34(5): 8 - 11.(in Chinese))