

煤岩电磁辐射特性及其应用研究进展*

王恩元 何学秋 刘贞堂

中国矿业大学能源与安全工程学院, 徐州 221008

摘要 综述了煤岩电磁辐射特性及其应用的研究现状, 包括煤岩的力电效应、频谱特征、电磁辐射的影响因素、电磁辐射的产生机理等研究, 以及电磁辐射在预测煤与瓦斯突出、冲击地压及评定煤岩体应力状态方面的应用现状, 并对电磁辐射的研究及应用前景进行了展望。

关键词 煤岩 电磁辐射 煤岩动力灾害 预测

岩石电磁辐射的研究是从地震工作者发现震前电磁异常后开始的。我国和前苏联是开展地震电磁辐射研究较早的国家, 日本、希腊、美国、瑞典、德国等也开展了这方面的研究^[1,2]。

1953年 Воларович 和 Пархоменко^[3]用实验方法记录和研究了花岗岩、片麻岩和脉石英的压电现象, 并记录到了光发射, 这是最早关于岩石电磁辐射的报道。Nitsan^[4]、徐为民^[5]也报道了实验室岩石压电效应的研究结果。他们的实验证明, 伴随着含石英和其他硬压电材料的破裂, 会产生无线电频段(RF)的电磁辐射。一系列不含压电材料的物质(NaCl, KCl, MgO 和长石等)受载产生电荷是由前苏联学者 Stepanov 发现的, 认为在试样和裂隙表面的非均匀形变处出现电荷, 去掉载荷, 将使电荷在十分之几秒内衰减。Шевцов 等研究了长石的 Stepanov 效应^[6]。另外, 我国学者在两次工业爆破(1980年 500 t TNT)、两次核爆炸作业以及煤矿顶板塌陷中观测到了伴随岩石挤压破裂产生的电磁辐射^[2]。

近二十多年来, 在石英岩、花岗岩和大理岩等坚硬岩石的电磁辐射效应、频谱特征及其产生机理等方面的研究取得了较大发展, 并用于预报地

震^[1,2]。

对煤和强度较弱岩石的电磁辐射研究开展较晚, 俄罗斯和我国率先开展了这方面的研究工作, 并在预测预报煤与瓦斯突出和冲击地压等煤岩动力灾害及评定隧道稳定性方面进行了应用。

本文综述了煤岩电磁辐射特性、技术及其在煤矿中应用等方面的研究成果, 并对煤岩混凝土电磁辐射研究和发展趋势进行了展望。

1 研究对象

在地震电磁辐射研究方面, 主要是针对石英岩、花岗岩和大理岩等坚硬岩石的电磁辐射效应、频谱特征及其产生机理方面进行研究。

煤、泥岩和砂岩等强度较低岩石的电磁辐射特性及其应用研究是从 20 世纪 80 年代末、90 年代初开始的, 俄罗斯和中国在这方面做了大量的研究工作^[7,8]。中国矿业大学研究了含瓦斯煤岩的电磁辐射特性研究, 研究结果表明, 煤、泥岩、砂岩等强度较低岩石在变形破裂时均有电磁辐射产生^{[8]1)}。中国矿业大学和中国地震局对混凝土的电磁辐射特性及其规律进行了初步研究^[8,9]。

在煤矿现场方面, Frid 等^[7,10,11]在现场研究了煤

2005-07-25 收稿, 2005-09-20 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 50204010, 50427401, 50134040, 59925411)、国家“十五”科技攻关计划(批准号: 2004BA803B0105)和江苏省自然科学基金(批准号: BK2001075)资助项目

E-mail: weytop@263.net

1) 王恩元. 含瓦斯煤破裂的电磁辐射和声发射效应及其应用研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 1997

的物理力学状态、受力状态、瓦斯对工作面电磁辐射强度的影响,并用谐振频率为100 kHz的天线测定了不同采煤工作面的天然电磁辐射,用电磁辐射脉冲数指标确定了工作面前方岩石突出的危险程度,认为岩石和瓦斯突出危险程度的增加改变了采矿工作面附近岩石的不同地球物理参数,可以依靠岩石破裂产生的电磁辐射方法进行岩石与瓦斯突出预测。Хатишвили测定了矿井采煤过程中由爆破引起的矿山冲击及塌陷时的电磁辐射谱^[12]。中国矿业大学测试并研究了矿井采掘空间周围煤岩体的电磁辐射特征^{[8,13-18]1)}。中国矿业大学还测试到了混凝土支护的岩石隧道的电磁辐射^[20]。

2 研究内容

在煤岩体的受载方式上,初期主要是研究单轴压缩状态下煤岩变形破裂时的电磁辐射效应及其特征,后期扩展到了摩擦、拉伸、剪切、蠕变、应力松弛及冲击时的电磁辐射效应及特征研究^[3-6,8,13-21]。钱书清等^[23]和郭子祺²⁾等研究了大理岩、花岗岩等摩擦和滑移时的电磁辐射效应。中国矿业大学^[8,13-23]对煤岩在单轴拉伸(劈裂)、剪切、摩擦、蠕变、应力松弛、冲击时的电磁辐射效应及特征进行的初步研究表明,单轴拉伸、剪切时的电磁辐射主要集中在断裂时期,摩擦和应力松弛时电磁辐射信号随过程的进行呈减弱趋势,蠕变时电磁辐射主要集中在变形破裂过程较为强烈的加速蠕变阶段,冲击时电磁辐射呈现单脉冲型。

在研究内容上,初期主要是针对煤岩(或含瓦斯煤岩,或含水煤岩)能否产生电磁辐射进行了定性研究,回答了煤岩破裂时能否产生电磁辐射的问题,得到了煤岩受载变形破裂时均能够产生3 kHz—6.9 MHz不同频段电磁辐射的结论^{[24]3)}。同时对电磁辐射与声发射的同步性、电磁辐射的宏观特征进行了定性研究^[23]。其他学者的研究还表明,岩石除能产生无线电频段的电磁辐射外,还观

测到了电子、红外、可见光和紫外光等辐射,并从断裂力学、电磁动力学角度理论分析了电磁辐射的频谱特征^[23-27]。

中国矿业大学对煤岩电磁辐射的频谱及阶段性特征进行了实验研究和理论分析,研究发现,煤岩变形破裂过程中电磁辐射的频谱不是一成不变的,而是随受载程度和变形破裂强度而发生变化,但基本上是应力越大,变形破裂越强,电磁辐射越强,其主频段越高^{[24]3)}。中国矿业大学对煤岩电磁辐射进行了统计分析^{[13]2)},表明煤岩体受载变形破裂过程中电磁辐射具有分形特征,符合赫斯特(R/S)统计规律,从统计力学的角度提出了电磁辐射的力电耦合模型,并进行了初步的数值模拟⁴⁻⁶⁾。

中国矿业大学对电磁辐射的记忆效应及其机理进行了研究,发现电磁辐射如同声发射一样具有记忆效应^[8,19,25]。

在电磁辐射的影响因素方面,除考虑了加载方式外,还考虑了孔隙气体、水分等的影响^[8]。

3 电磁辐射机理

Nitsan^[4]最先提出,压电效应是产生电磁辐射的原因。但另外一些实验结果,如Stepanov, Шевцов^[6]等的实验研究表明,含压电材料和不含压电材料的岩石都有电磁辐射产生。Гохберг等^[27]认为,岩石的力电效应(包括压电效应、Stepanov效应、摩擦起电、双电层的破坏和断裂)和动电效应均可能是电磁辐射源。

Перельман等^[27]认为产生电磁辐射主要有5种机制:(1)离子晶体发生断裂时,裂缝表面形成电荷不均匀镶嵌,当裂缝突张,这种不均匀镶嵌导致电磁辐射;(2)由于这类裂缝类似电容器,因此,裂缝宽度的振动就使其成为电磁辐射发射器;(3)晶体中电荷位错的振动产生电磁辐射;(4)掺入微量金属产生浮动电荷,浮动电荷的振动导致电磁辐射,辐射频率为超声波频率;(5)双电层压缩

- 1) 王先义. 煤岩电磁辐射特性及其应用研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2003
- 2) 郭子祺. 岩石破裂中电磁辐射的实验研究. 北京: 中国科技大学北京研究生院硕士学位论文, 1997
- 3) 见第532页脚注1)
- 4) 聂百胜. 含瓦斯煤岩力电效应及机理的研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2001
- 5) 撒占友. 煤岩流变破坏电磁辐射效应与异常判识技术的研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2003
- 6) 肖红飞. 煤岩变形破裂电磁辐射与应力场的耦合及其传播特性研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2003

和扩展时, Гуй 层的容量发生变化并辐射剩余能量.

Мирошниченко 等^[28]通过实验证实不含压电材料的玻璃破裂时也能产生电磁辐射, 裂隙壁上自由电荷的变速运动会产生电磁辐射.

郭自强^[28]提出了电子发射的压缩原子模型, 认为当岩石受到压缩时, 在相邻原子的 Pauli 斥力下原子动能将剧增. 电子将最终克服原子核的库仑引力和近邻原子“Pauli 势墙”的约束而电离成自由电子, 形成电子发射. 郭自强等还用电四极子模型计算了近区电磁场的频率特性. 朱元清等^[31]提出了岩石破裂时的电磁辐射是裂纹尖端电荷随着裂纹加速扩展运动所产生的假说, 并建立了电磁辐射的数学模型. 该假说与郭自强等的偶极辐射模型基本一致.

何学秋等^[8]认为诱导电偶极子的瞬变、裂隙边缘分离电荷随裂隙扩展的变速运动以及裂隙壁面分离电荷的弛豫等的综合作用产生煤岩变形破裂过程中的电磁辐射.

王恩元等^[24]认为煤岩等材料变形及破裂时产生电磁辐射有两种形式: 一种是由电荷特别是试样表面积累电荷引起的库仑场(或静电场); 另一种是由电偶极子瞬变或带电粒子作变速运动而产生的电磁辐射, 是脉冲波. 应力诱导煤岩体发生非均匀变速形变是产生表面电荷和极化形成电偶极子的主要原因.

4 电磁辐射技术应用

俄罗斯开发了 ЕГ-9 和 ВОЛНА 电磁辐射监测仪, 并在顿巴斯煤田试验应用于预测预报煤与瓦斯突出、冲击地压^[7,10,11]. 中国矿业大学矿业安全工程研究所开发了 KBD5 矿用本安型煤与瓦斯突出(冲击地压)电磁辐射监测仪, 并在预测煤与瓦斯突出、冲击地压和评估隧道稳定性方面进行了试验及推广应用^[8,13-19].

4.1 KBD5 矿用本安型煤与瓦斯突出(冲击地压)电磁辐射监测仪

电磁辐射监测仪由宽频带高灵敏度定向接收天线、主机和远程通讯接口(MODEM)组成, 防爆型式为本质安全型, 通过了国家电气防爆检验及安全标志认证, 实物像见图 1. 其功能主要有定向接收、数据处理、数据存储、数据显示、数据查询、通讯、报警等.

4.2 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出^[8,16,18]

中国矿业大学在焦作矿业集团、沈阳红菱煤矿和



图 1 KBD5 监测仪实物图

淮南矿业集团等运用 KBD5 电磁辐射监测仪进行了电磁辐射预测煤与瓦斯突出的试验与应用. 结果表明, 有突出危险煤层的电磁辐射水平远高于无突出危险煤层, 对于有潜在突出危险的煤层, 无突出危险时, 电磁辐射水平较低, 有突出危险时, 电磁辐射水平会提高一倍以上. 有突出危险时, 采取卸压措施后, 电磁辐射水平下降. 电磁辐射强度 E 或脉冲数 N 与常规预测指标钻屑量、钻孔瓦斯解吸指标 Δh_2 和钻孔瓦斯涌出初始流量 q 等的变化基本一致(见图 2 和图 3). 因此电磁辐射监测仪既可用于预报煤与瓦斯突出, 也可进行突出防治措施效果检验.

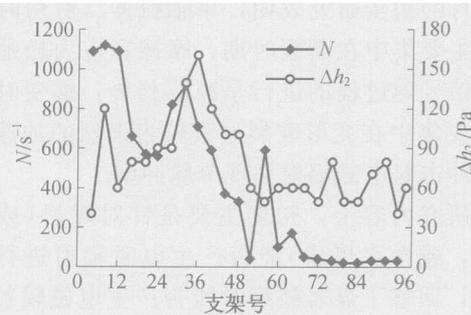


图 2 张集矿回采工作面不同支架处测试结果

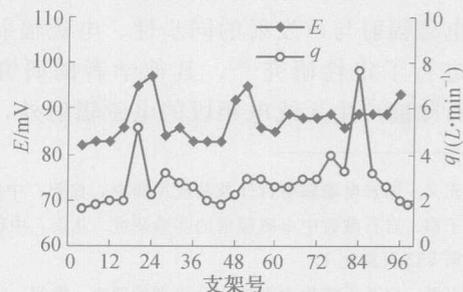


图 3 张集矿回采工作面不同支架处测试结果

4.3 预测冲击地压^{[14,17,18] 1,2)}

中国矿业大学在徐州三河尖煤矿、山东华丰煤矿、抚顺老虎台煤矿等运用 KBD5 电磁辐射监测仪进行了电磁辐射预测冲击地压的试验与应用。应用结果表明,电磁辐射与矿压显现对应较为明显,矿压大的地方,电磁辐射较强;有冲击危险区域的电磁辐射异常,表现为电磁辐射水平明显增强或变化剧烈,很多没有采取措施或措施不力的情况下已得到现场验证。预报有冲击危险时,采取卸压爆破措施后,电磁辐射水平明显下降。因此电磁辐射监测仪既可用于预报冲击地压,也可进行冲击地压防治措施效果检验。初步研究结果表明,电磁辐射可反映回采工作面顶板的初次或周期来压规律²⁾。

4.4 电磁辐射技术在评估隧道稳定性中的应用

中国矿业大学运用电磁辐射法对重庆朝天门隧道的稳定性进行了测试评估。通过测试隧道内纵向和横向各点的电磁辐射,确定了隧道上覆载荷集中部位及变形破裂活动区域;通过打钻孔测定隧道衬砌及围岩内不同深度处的电磁辐射,确定了隧道衬砌及围岩间存在应力异常区,表现为电磁辐射异常降低,推断可能为支护不密实区,并已得到了超声波测试及地质雷达探测结果的证实。对隧道重要部位的动态监测表明,隧道仍处于间断性的活动状态。用电磁辐射的记忆效应确定了隧道衬砌及围岩的历史最大应力,测试结果与声发射法基本一致^[20]。电磁辐射法为煤岩混凝土结构稳定性及应力状态评估提供了一种全新的手段。

中国矿业大学对煤矿采掘工作面前方媒体内的电磁辐射进行了测试研究,测试结果表明^[19],采掘工作面前方媒体内不同深度处的电磁辐射是不同的,其变化趋势与应力变化趋势基本相同(如图4所示),在松弛区,应力得到释放,电磁辐射弱,在应力集中区,电磁辐射信号较强。因此,电磁辐射法可用于测试围岩松动圈的大小。

5 煤岩混凝土电磁辐射技术的研究及应用展望

尽管煤岩混凝土电磁辐射的研究方面已经取得

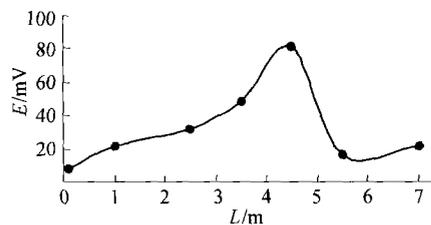


图4 工作面前方媒体内电磁辐射 E 与深度 L 的关系

了较多的理论、技术及应用成果,但电磁辐射的基础理论及应用研究总体上处于起步或初步应用阶段,仍有许多问题需要得到解决。

(1) 电磁辐射的主要产生机制及其影响因素

在煤岩混凝土电磁辐射的基础理论研究方面,电磁辐射的主要产生机制及其影响因素是未来一段时间内的主要攻关内容。

(2) 电磁辐射与材料的相关性研究

不同材料的电磁辐射特征(如频谱等)可能是不同的,研究确定不同材料的电磁辐射特征,对于复合材料的无损检测等具有非常重要的意义。

(3) 电磁辐射与煤岩动力灾害的相关性

现场应用技术方面,需要攻关的主要内容是现场复杂条件下煤岩层中电磁辐射的产生过程、频谱特征、传播特性、动态演变规律及其与不同煤岩动力灾害的相关性。

(4) 电磁辐射检测仪表

目前煤岩混凝土的电磁辐射效应已被揭示,其大体特征及规律方面也有一定的认识和突破。目前还没有成熟的完全适合于检测电磁辐射的仪表。而实验室的宏、微观观测实验及现场试验都需要多功能、专业化、智能化的电磁辐射检测仪表。煤岩电磁辐射会是未来一个很主要的研究方向,其技术及装备甚至也会成为一个产业。

(5) 电磁辐射技术应用研究

电磁辐射的研究及应用领域会不断扩大,电磁辐射技术具有广泛的应用前景,除可应用于监测预报矿山煤岩动力灾害、顶板来压及顶板事故、露天矿边坡滑移、地表沉陷、超前探测地质构造外,在无损检测、监测地质滑坡、评估大坝、隧道、建筑

1) 王恩元. 电磁辐射法监测煤与瓦斯突出危险性技术及其应用研究. 徐州: 中国矿业大学能源学院博士后研究报告, 1999

2) 王云海. 煤岩冲击破坏的电磁辐射前兆及预测研究. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2003

等岩石混凝土结构稳定性方面也有非常广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 毛桐恩, 钱书清, 刘小伟. 震前电磁波观测与实验研究文集. 北京: 地震出版社, 1989, 1—4, 100—104, 120—167
- 2 陈智勇, 杜晓泉, 陶如谦, 等. 电磁辐射与地震. 北京: 地震出版社, 1998, 1—10, 91—100
- 3 Волярович М И, Пархоменко Э И. Пьезоэлектрический эффект горных пород. ДАН СССР, 1954, 99(2): 239
- 4 Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. Geophysical Research Letters, 1977, 4 (8): 333—336
- 5 徐为民, 童芜生, 吴培雅. 岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究. 地球物理学报, 1985, 28(2): 181—189
- 6 Шевцов Т И, Мигунов Н И. Электризация олевых штапов при деформации и разрушении. ДАН СССР, 1975, 225(2): 313—315
- 7 Фрид В И, Шабаров А Н. Формирование электромагнитного излучения угольного пласта. ФТПРПИ, 1992, (2): 40—47
- 8 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩电磁动力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995, 5—56
- 9 钱书清, 郝锦琦, 邓明德, 等. 混凝土样品受压破裂过程中的电磁信号. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 797—800
- 10 Frid V. Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(4): 229—236
- 11 Frid V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38(2): 97—104
- 12 Хатишвили Н Г. 论碱卤互素晶体和岩石中裂隙形成时的电磁效应. 见: 钱家栋, 陈有发, 译. 地震地电学译文集. 北京: 地震出版社, 1989, 149—158
- 13 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 煤岩变形及破裂电磁辐射信号的R/S统计规律. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 349—351
- 14 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 由煤岩变形冲击破坏所产生的电磁辐射. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12): 86—88
- 15 He X Q, Wang E Y, Liu Z T. The general characteristics of electromagnetic radiation during coal fracture and its application in outburst prediction. In: Jerry C Tien. Proceedings of 8th U S Mine Ventilation Symposium. Rolla, 1999. Rolla: University of Missouri-Rolla Press, 1999, 81—84
- 16 Wang E Y, He X Q, Nie B S. Forecasting coal and gas outburst by using EME method. In: Li S C, Jing G X, Qian X M. Progress in Safety Science and Technology. Beijing, 2000. Beijing: Chemical Industry Press, 2000, 223—228
- 17 Wang E Y, He X Q, Dou L M. Forecasting rock burst with the non-contact method of electromagnetic radiation. In: Huang P, Wang Y J, Li S C, et al. Progress in Safety Science and Technology (Vol. III). Tai'an, 2002. Beijing: Science Press, 2002, 111—116
- 18 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. 10
- 19 王恩元, 何学秋, 窦林名, 等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用. 地球物理学报, 2005, 48(1): 216—221
- 20 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1473—1477
- 21 He X Q, Wang E Y, Liu Z T. Experimental study on the electromagnetic radiation (EMR) during the fracture of coal or rock. In: Xie H P. Mining Science and Technology' 99. Xuzhou, 1999. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999, 133—136
- 22 何学秋, 王恩元, 刘贞堂. 煤岩等材料安全性的电磁遥感实验研究. 见: 白春华, 何学秋, 吴宗之等主编. 21世纪安全科学与技术的发展趋势. 北京: 科学出版社, 2000, 66—72
- 23 钱书清, 任克新, 吕智, 等. 伴随岩石破裂的VLF、MF、HF和VHF电磁辐射特性的实验研究. 地震学报, 1996, 18(3): 346—351
- 24 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131—137
- 25 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 受载煤体电磁辐射的频谱特征. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 487—490
- 26 郭自强, 周大庄, 施行觉, 等. 岩石破裂中的光声效应. 地理物理学报, 1988, 31(1): 37—41
- 27 耿乃光, 崔承禹, 邓明德, 等. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端. 地震学报, 1992(增刊): 645—652
- 28 郭自强, 刘斌. 岩石破裂电磁辐射的频率特性. 地球物理学报, 1995, 38: 221—226
- 29 Liu Z T, He X Q, Wang E Y. Kaiser effect EME during deformation and fracture of coal and rock. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 10(2): 135—138
- 30 Гохберг М Б, Гуфельд И Л. Электромагнитные эффекты при разрушении земли коры. Физика Земли, 1985(1): 71—87
- 31 Перельман М Е, Хатишвили Н Г. 破裂电磁辐射理论研究. 见: 萨多夫斯基 М А主编. 张肇成, 何世海, 张伟, 等译. 苏联地震预报研究文集. 北京: 地震出版社, 1993, 35—39
- 32 Мирошниченко М П, Куяксенко В С. Излучение электромагнитных импульсов при зарождении в твердых диэлектриках. Физ Тв Тела, 1980(22): 1531
- 33 郭自强, 尤峻汉, 李高, 等. 破裂岩石的电子发射与原子压缩模型. 地球物理学报, 1989, 32(2): 173—177
- 34 朱元清, 罗祥麟, 郭自强, 等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究. 地球物理学报, 1991, 34(5): 594—601