

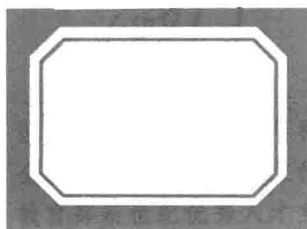
国家自然科学基金青年科学基金项目(40904028)资助
全国百篇博士学位论文作者专项资金项目(201055)资助
教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0768)资助
国家科技支撑计划(2012BAK04B07、2012BAK09B01)资助
江苏省“333高层次人才培养工程”项目资助
江苏省“青蓝工程”项目资助

煤岩破坏表面电位效应 理论与机制研究

李忠辉 王恩元 何学秋 著



中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press



科学基金项目(40904028)资助

作者专项资金项目(201055)资助

支持计划(NCET-10-0768)资助

国家科技支撑计划(2012BAK04B07、2012BAK09B01)资助

江苏省“333 高层次人才培养工程”项目资助

江苏省“青蓝工程”项目资助

煤岩破坏表面电位效应理论 与机制研究

李忠辉 王恩元 何学秋 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

煤岩动力灾害是煤岩体在应力作用下失稳破坏的一种灾害现象,在该过程中会伴随有多种地球物理信号产生。本书主要研究煤岩受载破坏的表面电位效应、规律、影响因素、产生机理及采动影响下现场煤体表面电位分布规律。建立了煤岩受载破坏表面电位实验系统,研究了煤岩单轴压缩、拉伸、三点弯曲、摩擦、胀裂等不同加载方式下的表面电位特征规律及非线性特征,深入研究了不同因素对煤岩表面电位的影响规律及机理,研究了煤岩破坏应变局部化与表面电位分布特征,研究了煤岩变形破裂过程和表面电位产生机理,建立了有限边界煤岩表面电位的统计损伤计算模型、煤岩破坏自由电荷累积与煤岩本构关系之间的联系。研究了采动应力下煤层表面电位的时空分布规律及其影响因素。对于煤岩破坏表面电位信号的深入研究,在矿山煤岩动力灾害危险监测、煤岩体应力状态及其稳定性评估、隧道稳定性测试、混凝土构筑物安全性监测等应用方面具有重要的理论意义和实际应用价值。

本书可供从事煤岩动力灾害研究、煤岩物理力学性质、采矿地球物理、岩土工程等领域的科技工作者、研究生、本科生及矿山安全工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤岩破坏表面电位效应理论与机制研究/李忠辉,

王恩元,何学秋著. —徐州:中国矿业大学出版社,

2013. 1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1766 - 0

I. ①煤… II. ①李… ②王… ③何… III. ①煤岩—
岩石破裂—表面物理学—电位—研究 IV. ①P618. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 320433 号

书 名 煤岩破坏表面电位效应理论与机制研究

著 者 李忠辉 王恩元 何学秋

责任编辑 黄本斌

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 206 千字

版次印次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤岩动力灾害是矿山岩体在地应力和采动应力共同作用下发生快速失稳破坏的动力过程,其主要表现形式包括煤与瓦斯突出和冲击地压等,这类煤岩动力灾害的发生往往会造成大量的人员伤亡和财产损失,严重威胁着矿井安全生产。在煤岩动力灾害过程中,煤岩体中的能量以弹性能、声能、热能、电磁能等形式释放出来,由此产生了多种用于煤岩动力灾害探测的地球物理方法,如声发射法、微震法、电磁辐射法和红外法,并应用于煤岩动力灾害的监测和预报。我国煤矿开采深度以平均每年10~20 m的速度增加,导致地应力和瓦斯压力越来越高。随着煤矿开采深度逐步加大,煤与瓦斯突出、冲击地压等灾害的危险性也逐渐增加,部分原来无危险的煤矿开始出现动力现象,严重影响煤矿安全生产和煤炭工业的可持续发展。对于煤岩动力灾害的准确监测预报是进行灾害防治的前提,相比现行的钻孔法动力灾害预测方法,地球物理方法具有非接触、便捷、连续测试等优点,是一种具有发展前途的煤岩动力灾害预测技术。煤岩破坏表面带电现象的研究起源于地震、火山工作者发现孕震活动或火山喷发前大地电场的异常变化。国内外学者对大理岩、花岗岩等孕震岩石变形破裂过程的带电现象及其特征规律进行了大量的研究,发现岩石破坏过程产生的电信号与其破坏过程密切相关;通过测试大地电信号的异常变化已经在地震预报、火山喷发、山体滑坡、堤坝稳定性等大尺度岩体动力灾害监测方面进行了成功应用。因此,研究煤岩破坏表面电位理论及其机制,对于深入理解煤岩受载破坏机理、煤岩物理力学特性、煤岩动力灾害演化机理,揭示煤矿这一中、小尺度范围的煤岩动力灾害活动规律,评估现场煤体应力状态及其稳定性、监测预报矿山煤岩动力灾害危险方面具有重要的理论意义和实用价值。

在国家自然科学基金青年科学基金项目(40904028)、全国百篇

博士学位论文作者专项资金项目(201055)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0768)、国家科技支撑计划(2012BAK04B07、2012BAK09B01)、江苏省“333 高层次人才培养工程”、江苏省“青蓝工程”、国家重点基础研究发展计划(“973”计划,2005CB221505)、中国矿业大学青年科研基金、“启航计划”项目、中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金(2011JQP06)等项目资助下,经过作者多年的研究,在煤岩破坏表面电位特征规律、影响因素、产生机理、理论模型及现场煤体表面电位的时空分布规律与采动应力的关系等方面取得了一些创新性成果。本书对以上方面进行了比较详尽的论述,希望对从事这方面及相关领域研究的科技工作者能有所启示。

本书采用实验室实验、理论分析以及现场实验相结合的研究方法。研究了煤岩受载变形破裂过程中表面电位信号特征规律、表面电位与载荷的相关性、表面电位的分形特征,研究了煤岩变形破裂过程煤岩应变局部化与表面电位分布集中化的关系,研究了不同因素对煤岩变形破裂表面电位的影响及规律性,从微观角度分析了煤岩体中的裂纹、孔隙、缺陷的表现特征以及在应力作用下煤岩破裂的微观过程,研究了煤样破裂自由电荷产生机理及煤岩表面电位的理论计算模型,研究了自由电荷累积与煤力学本构关系之间的联系,在煤矿现场测试了煤体表面电位信号,结合矿山采动压力分布规律研究了工作面煤体表面电位的时空变化规律。

全书共分8章。第1章介绍了煤岩破坏地球物理信息及其研究现状,煤岩电磁辐射现象、岩石破坏电位信号及其研究现状,提出了本书的研究内容及研究方法。第2章介绍了煤岩破坏表面电位实验系统、实验方案及实现过程。第3章介绍了煤岩在不同破坏条件下的表面电位时间序列特征规律,表面电位与载荷及载荷变化率之间的相关性。第4章介绍了煤岩破坏表面电位的分形特征,表面电位分形维和多重分型谱反映了表面电位信号的发展趋势。第5章叙述了煤样破坏应变局部化与表面电位分布特征的关系。第6章介绍了煤岩表面电位的影响因素及其规律性。第7章研究了煤岩破坏微观过程及表面电位产生机理,建立了煤岩表面电位的统计损伤计算模型及煤岩破坏自由电荷累积与煤样本构关系(煤岩损伤程

度)之间的联系。第8章研究了现场煤体采动影响下表面电位的时空分布规律及影响因素。

作者衷心感谢林柏泉教授、刘明举教授、王兆峰教授、蒋军成教授等的关心和指点,衷心感谢刘贞堂教授长期以来给予的帮助和指导。感谢贾慧霖博士、邓洪波硕士、宋晓艳博士、李艳娜硕士等在实验方面做出的大力支持和帮助。感谢宋大钊博士、欧建春博士、马衍坤博士、刘杰博士、丁学龙硕士、谢绍东硕士、刘大庆硕士、杨玉龙硕士等参与的部分研究工作。感谢王云刚博士、赵恩来博士、刘晓斐博士、沈荣喜博士、中科院地质与地球物理所安志国博士在研究工作中的有益探讨和交流。感谢何淼硕士、刘永杰硕士、蔡冠楠硕士、康俊亮硕士对书稿的校对。作者感谢徐州矿业集团三河尖煤矿吴兴荣总工程师、何岗科长、张立高副科长以及相关工作人员在现场测试方面提供的大力支持和帮助。感谢大同煤业集团、鹤岗矿业集团公司、瓦屋山泄洪洞工程部等单位和相关领导在取样中的支持和帮助。在样品的制备中得到中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室马文顶老师的大力支持,在此表示感谢。感谢中国矿业大学材料科学与工程学院可靠性工程实验室王庆良博士、姜志民主任在电镜分析中给予的帮助。本书的撰写,参阅了大量国内外相关专业文献,他们的研究成果给了作者很大的启发,在此谨向文献的作者表示诚挚的感谢。最后,感谢中国矿业大学出版社黄本斌编辑及相关工作人员为本书的出版所付出的辛勤劳动。

在煤岩表面电位效应研究方面虽然取得了一些成果,但很多内容还有待于今后进一步的深入研究和完善。由于作者水平有限,书中疏漏谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作者

2012年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 煤岩电磁辐射研究现状	3
1.2.1 电磁辐射现象研究	3
1.2.2 电磁辐射机理研究	5
1.3 岩石破裂表面电位研究进展	7
1.3.1 岩石破裂表面带电现象	7
1.3.2 岩石破裂电位信号研究	7
1.3.3 地电场活动研究	8
1.4 岩石表面电位产生机理	9
1.5 煤岩表面电位研究中存在的不足	10
1.6 研究方法及其研究内容	11
1.6.1 研究方法	11
1.6.2 研究内容	11
2 煤岩破坏表面电位实验系统与实验方案	12
2.1 煤岩表面电位实验系统及试样	12
2.1.1 煤岩表面电位实验系统	12
2.1.2 试样及其制备方法	15
2.2 煤岩表面电位实验内容及方案	16
2.2.1 煤体表面电位实验内容	16
2.2.2 煤体表面电位实验步骤	16
2.2.3 煤岩表面电位实验方案	16
3 煤岩破坏表面电位特征及规律性	22
3.1 煤岩表面电位实验	22
3.1.1 煤岩单轴压缩表面电位实验结果	22

3.1.2	煤岩拉伸表面电位实验结果	24
3.1.3	煤岩三点弯曲破坏表面电位实验结果	27
3.1.4	煤岩摩擦表面电位实验结果	29
3.1.5	煤样破坏内部电位变化规律	33
3.2	煤岩表面电位与载荷及其变化率的相关性分析	38
3.2.1	相关性分析理论	38
3.2.2	表面电位相关性分析结果	39
4	煤岩破坏表面电位的分形特征	42
4.1	表面电位的 R-S 分析	42
4.1.1	R-S 分析	42
4.1.2	R-S 分析结果	43
4.2	煤岩表面电位分形特征	46
4.2.1	分形概述	46
4.2.2	煤岩表面电位信号的分形特征	47
4.3	表面电位的多重分形	48
4.3.1	多重分形理论	49
4.3.2	表面电位多重分形谱	50
5	煤样破坏应变局部化与表面电位分布特征	54
5.1	煤样破坏表面应变场分布研究	54
5.1.1	煤样受载表面应变场	54
5.1.2	煤样破坏应变场分布实验研究	56
5.2	煤样表面电位分布规律	57
5.2.1	表面电位空间插值理论	57
5.2.2	煤样表面电位云图	62
5.3	煤样应变局部化与表面电位集中化	71
5.3.1	煤样破坏应变局部化	71
5.3.2	煤样表面电位分布集中化特征	73
6	煤岩表面电位的影响因素	75
6.1	电性参数对煤样表面电位的影响	75
6.1.1	受载煤样电阻率的实验研究	75

6.1.2	电阻率对煤样表面电位的影响分析	79
6.2	加载方式对煤样表面电位的影响	79
6.3	加载速率对表面电位的影响	84
6.4	煤岩缺陷对表面电位的影响	85
6.5	水分对煤岩表面电位的影响	87
6.5.1	水分对煤岩力学性质的影响	87
6.5.2	水对煤样表面电位影响的分析及实验	89
6.6	煤样充放瓦斯的表面电位	95
6.6.1	实验系统及实验方案	95
6.6.2	实验结果分析及探讨	96
6.7	煤岩胀裂表面电位研究	100
6.7.1	实验研究	100
6.7.2	实验结果及分析	102
7	煤岩破坏微观过程及表面电位产生机理	109
7.1	煤岩变形破裂微观机理分析	109
7.1.1	煤中的裂纹与缺陷	109
7.1.2	裂纹扩展理论	112
7.1.3	裂纹的扩展途径	116
7.1.4	断裂前破坏带形成的微观分析	117
7.1.5	煤岩变形破裂微观机理总结	120
7.2	煤岩破裂表面电位机理	121
7.2.1	煤岩破裂自由电荷产生机理	121
7.2.2	受载煤岩的表面电位	129
7.2.3	煤岩表面电位的统计损伤计算模型	136
8	采动煤体表面电位的时空分布规律	143
8.1	地震、火山灾害地电异常测试	143
8.2	煤矿现场煤岩表面电位测试研究	144
8.2.1	表面电位测试装置	144
8.2.2	测试场地概况	144
8.2.3	测试方式	146
8.3	采掘空间周围煤体表面电位的时空变化规律	148

8.3.1	煤体表面电位的时间变化规律	148
8.3.2	煤体表面电位的空间变化规律	150
8.4	煤体表面电位的影响因素研究	154
8.4.1	机电设备对表面电位的影响	154
8.4.2	煤层注水对表面电位的影响	155
8.4.3	注水孔两侧煤体表面电位的分布	155
8.5	意义与展望	158
参考文献		159

1 绪 论

1.1 引 言

我国是世界上最大的产煤国,同时也是发生煤矿灾害事故最严重的国家。自 1834 年 3 月 22 日法国鲁阿雷煤田依萨克煤矿在急倾斜厚煤层平巷掘进时发生世界上第一次煤与瓦斯突出以来^[1,2],煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害便伴随在煤矿开采过程中。我国煤炭储量十分丰富,据勘测,目前已探明的煤炭储量超过 1 万亿 t,可采储量在 1 100 亿 t 以上。煤炭资源储量约占全国矿产资源储备的 90%,占化石能源的 95%,具有巨大的资源潜力。煤炭在未来几十年内仍将是我国的主要可利用能源,在国家能源可持续发展战略中的主体地位不可替代。统计表明,2010 年我国自产煤炭 35.2 亿 t,净进口 1.7 亿 t,消耗了 37 亿 t,煤炭消费几乎占全球的一半,预计 2015 年全国煤炭产量将达到 39 亿 t^[3]。因此,煤炭产业在今后相当长的时期内将有着广阔的前景。但我国煤炭赋存条件复杂,自然灾害较为严重,生产技术条件和装备总体比较落后,煤矿安全问题仍是制约煤炭工业发展的突出问题。近年来,随矿井开采深度和强度的加大,煤与瓦斯突出、冲击地压等灾害的危险性也逐渐增加,部分原来无危险的煤矿开始出现动力现象,严重影响煤矿正常生产和煤炭工业的可持续发展。以煤与瓦斯突出为例,2010 年 1~12 月,全国共发生 42 起煤与瓦斯突出、顶板事故等煤岩动力灾害,死亡 215 人,其中死亡人数在 10 人以上的重、特大事故 4 起^[4],严重影响了煤矿企业的社会经济效益。

煤岩动力灾害是矿山岩体在地应力和采动应力共同作用下发生快速失稳破坏的动力过程。煤岩动力灾害现象主要包括煤与瓦斯突出、冲击地压等。煤与瓦斯突出是矿井含瓦斯煤岩体呈粉碎状态从煤岩层中向采掘空间急剧(数秒钟到数分钟)运动,并伴随着大量瓦斯喷出的一种强烈的动力过程^[1]。冲击矿压是指煤岩力学系统达到强度极限时,聚积在煤体中的弹性能以急速、猛烈的形式释放,造成煤岩体震动和破坏,同时发生强烈声响,造成支架、设备、井巷的破坏以及人员伤亡的煤岩动力现象^[5]。在这些动力过程中,煤岩体中的能量以弹性能、

声能、热能、电磁能等形式释放出来,由此产生了多种用于煤岩动力灾害探测的地球物理方法,如声发射法、微震法、电磁辐射法和红外法等^[6-14]。声发射技术较早应用于矿山动力灾害监测,20 世纪上半叶到 70 年代,美国、加拿大、苏联等学者对利用声发射技术监测金属矿岩爆、煤与瓦斯突出等方面进行了大量的研究工作,并应用于矿井煤岩动力灾害预测和煤岩体稳定性监测^[7,8]。微震技术在金属矿山岩爆和煤矿冲击地压监测方面应用较为广泛,在煤与瓦斯突出、采场围岩稳定性监测方面也开展了相关研究^[9,10]。近十几年来有学者研究表明煤岩破坏过程中会产生红外辐射温度,现场煤体发生的动力现象越大,煤体温度上升得越高^[11,12]。从 20 世纪 90 年代开始,中国矿业大学对煤岩变形破坏电磁辐射特征、规律进行了深入研究,何学秋、王恩元、刘明举等^[13-15]对含瓦斯煤、混凝土等强度较低的岩石变形破裂电磁辐射特征及机理进行了研究,对煤岩电磁辐射的产生机理、特征、规律及传播特性等进行了深入的研究^[15-19],提出了电磁辐射预测煤与瓦斯突出^[20]、冲击地压的原理及预报方法^[24],研制出 KBD5 型煤与瓦斯突出(冲击地压)电磁辐射监测仪和 KBD7 型煤岩动力灾害非接触电磁辐射监测仪^[21-24]。电磁辐射方法具有非接触、探测范围广、无需打钻等优点,在我国多个矿井进行了成功的实际应用。目前,电磁辐射虽然可以从宏观上预测煤岩动力灾害,但仍有很多问题需要解决,如电磁辐射测量的是中长尺度范围的煤岩动力灾害,较为适用于煤岩动力危险的区域预测,对于近距离、局部或小尺度范围的精确定位测试及抗干扰能力方面还存在一定的困难。

地电测量也是一种常用的大地探测方法,在许多地球物理领域内,诸如采矿、水文地质、矿床勘探、考古、山体滑坡、堤坝稳定性探测等方面都有应用。如希腊、日本等国家通过测试大地电信号的异常变化在地震预报和火山喷发等动态监测方面进行了成功应用^[25-28]。

岩石破坏表面带电现象的研究起源于地震、火山工作者发现孕震活动或火山喷发前大地电场的异常变化。国内外学者对于岩石破裂带电现象进行了大量的研究,研究对象大多限于大理岩、花岗岩等孕震岩石,并且研究方向主要针对地震、火山的活动监测等方面。煤作为一种特殊的软岩,在结构特征、组成成分及物理力学性质方面与岩石有显著的差异。前人的研究表明大理岩、花岗岩等岩石破裂时能够产生表面带电异常。那么,煤岩材料在受载破裂时能否产生表面电位的变化?其规律又如何?基于此,本书将系统研究煤岩在不同实验条件(单轴压缩、拉伸、三点弯曲等)下变形破裂的表面电位特征规律,研究表面电位信号的分形特征及其与载荷的相关性;研究煤样应变局部化与表面电位分布的关系;研究不同因素对煤岩表面电位的影响规律;研究分析煤岩表面电位机理及

其统计损伤模型;测试研究采掘工作面煤体表面电位的时空分布规律及其与采动应力的关系。研究煤岩破坏表面电位理论及其机制,对进一步深入了解煤体破裂的微观过程、煤岩物理力学特性、煤岩动力灾害演化机理,促进煤岩动力灾害地球物理方法探测技术的发展和具有深远的现实意义,对于揭示煤矿尺度范围煤岩动力灾害活动规律、评估现场煤体应力状态及其稳定性、监测预报矿山煤岩动力灾害危险方面具有深远的理论意义和实际意义。

1.2 煤岩电磁辐射研究现状

1.2.1 电磁辐射现象研究

岩石电磁辐射的研究是从地震工作者发现震前电磁异常变化后开始的。前苏联和我国是开展岩石电磁辐射研究较早的国家^[29],随后美国、日本、希腊、瑞典、德国等许多国家也开展了这方面的研究。前苏联学者米哈尔科夫和切尔尼亚夫斯基^[30]在1924年库尔沙勃地震(M6.4, M6.2)前3~4 h记录到了天然电场的扰动。20世纪50年代,М. И. Воларович 和 Э. И. Пархоменко^[31]用实验方法记录和研究了花岗岩、片麻岩和脉石英试样的压电现象,并记录到了光发射。1972~1974年,乌兹别克科学院地震研究所和托木斯克工学院的研究人员,在塔什干地区的恰尔瓦克水平坑道中进行了地球脉动电磁场变化的观测,证明地壳发射电磁脉冲,而且在震前发射强度急剧上升^[32]。1978年,М. А. 萨多夫斯基^[29]用仪器测量到了天然电磁辐射的异常畸变。美国学者 Nitsan^[33]、我国学者徐为民^[34]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,会产生无线电频段的电磁波。我国学者李均之^[35]在实验中发现不含石英的岩石也能产生电磁辐射。

早于1966年河北宁晋大地震(1966, M7.2)前,我国地震科技工作者就注意到震前电磁异常现象。在后来的海通地震(1970, M7.7)、海城地震(1975, M7.3)、内蒙古和林格尔地震(1976, M6.0)、宁夏地震(1976, M6.2)、天津宁河地震(1976, M6.5)、唐山大地震(1976, M7.8)等均发现了震前电磁异常现象,如震前收音机、闹钟和电传打字机等电气设备突然受到强烈干扰、工作异常,地震观测台仪表观测到的大地自然电位与自然电流异常,以及监测雷达、射电望远镜、卫星地面站和超长波接收站等装置接收到的震前电磁波异常现象等。另外,在两次工业爆破(1980年150 t TNT、1981年500 t TNT)、两次核爆炸作业中以及煤矿顶板塌陷中均记录到了伴随岩石挤压破裂产生的电磁辐射现象^[29,36]。

我国的地震电磁辐射研究是在 1976 年唐山大地震(M7.8)后开始的。国家地震局地球物理研究所、北京工业大学、河北电磁辐射台网、江苏省地震局、北京大学和北京第 31 中学等单位进行了地震电磁的现场监测并在现场爆破实验和室内模拟实验等方面进行了研究^[29]。钱书清等^[37,38]在地下爆破实验中观测到电磁波脉冲信号。李均之^[39]、徐为民^[40,41]、孙正江等^[42]的实验室研究结果表明,岩石受力发生破裂时发射电磁波并发光。郭自强等^[43-46]进行了岩石破裂的光声效应、电子发射、电声效应的实验研究,并用电四极子模型计算了近区电磁场的频率特性,提出了电子发射的压缩原子模型,认为当岩石受到压缩时,在相邻原子的泡利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“泡利势墙”的约束而电离成自由电子,形成电子发射。郭子祺^[47]就岩石单轴受载和剪切条件下声发射和电磁辐射的特征进行了研究。朱元清等^[48]对电磁辐射的机理进行了研究,并建立了电磁辐射的数学模型,认为岩石破裂电磁辐射是裂纹尖端电荷随着裂纹加速扩展运动产生的。

V. I. Frid 等^[49-51]结合现场研究了煤的物理力学性质、受力状态及瓦斯状况对采掘工作面电磁辐射强度的影响,采用谐振频率为 100 kHz 的天线测定了多种采矿条件下的电磁辐射,并用电磁辐射脉冲数指标确定了工作面前方煤岩突出的危险程度,认为煤岩破裂电磁辐射方法可以进行煤岩与瓦斯突出预测。A. T. Airuni 等^[52]经研究认为煤在外力作用下有电磁辐射产生,利用电磁辐射可以确定煤体燃烧、瓦斯抽放及采掘工作面附近的应力转移情况。H. Г. Хамишвили^[53]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,在实验室测定了不同岩石及复合岩层(煤层在砂岩层之间)破坏时的电磁辐射。王恩元^[16]通过煤岩破裂电磁辐射实验证明,煤岩断裂破坏电磁辐射是频带很宽的信号,电磁辐射频谱并不是一成不变的,随着载荷的增加而发生规律性的变化,基本呈现“M”形变化。聂百胜等^[54,55]对煤样在充气、含不同水分等情况下进行了不同加载过程的实验,通过滤波后的频谱分析得出在不同的加载过程中不同煤样的电磁辐射频率有一定的阶段特征,充气和含水分不同都对电磁辐射信号有一定的影响,虽然可以监测到高于 1 MHz 的电磁辐射信号,但主频段基本在 1 MHz 以下。王先义^[56]研究了煤岩在蠕变、松弛、快速卸载过程中的电磁辐射特征,以及煤岩在不同的受载条件下(包括单轴压缩、摩擦、冲击等)和不同变形破裂阶段的电磁辐射特征,利用模糊数学的方法研究了电磁辐射预测突出指标临界值确定方法,并在煤矿井下进行了验证。王云海^[57]在实验基础上研究了冲击煤和非冲击煤的电磁辐射阶段特征,提出了应用煤岩破坏电磁辐射指数评价煤岩的冲击破坏。撒占友^[58]研究了煤岩电磁辐射的记忆效应,根据

监测的煤与瓦斯突出工作面电磁辐射强度和脉冲数,结合常规预测指标和采掘工作面的地质资料、突出征兆等,建立了神经网络判识模型,对瓦斯突出危险性进行预测。魏建平^[59]研究了煤岩电磁辐射的多重分形和尖点突变特征,并对电磁辐射力—电耦合模型进行了修正,提出了基于流变—损伤机理和多重分形、尖点突变特征的电磁辐射预警技术。经过多年的研究,王恩元等^[60]基于煤岩动力灾害电磁辐射特征及规律,研制了煤岩电磁辐射连续监测仪和配套软件,建立了在线式煤岩动力灾害电磁辐射监测系统,并应用于煤与瓦斯突出和冲击地压的预警。

1.2.2 电磁辐射机理研究

对于煤岩电磁辐射的机理,国内外众多学者提出了不同的观点。U. Nitsan^[33]在实验室研究了岩石破坏过程中电磁辐射现象,最先提出压电效应是产生电磁辐射的原因。而李均之、徐为民、孙正江等^[34,35,42]的实验结果表明,含压电材料和不含压电材料的岩石都能产生电磁辐射。M. B. Гохберг 等^[61]认为,岩石的力电效应(包括压电效应、斯捷潘诺夫效应、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。T. Ogawa 等^[62]认为,岩石破裂时产生新生表面,其裂缝的两侧壁面带有相反的电荷,它相当于一个偶极子充电和放电,向外辐射电磁信号。G. O. Cress 等^[63]认为,岩石破裂时有新生的碎石片,其表面有静电荷分布。这种带电碎片的转动、振动和直线运动是产生低频电磁辐射的主要原因,而在断裂面上电荷分离产生的强电场使空气击穿产生高频电磁信号。P. M. Гольд 等^[64]认为岩石变形及破裂时产生电磁辐射是形成的带电裂隙壁面间的气体被击穿而放电的结果。M. И. Мирошниченко 等^[65]通过实验排除了这种击穿放电观点,认为不含压电材料的玻璃破裂时也能产生电磁辐射且裂隙壁面上自由电荷的变速运动会产生电磁辐射。日本的 Yuji Enomoto 等^[66]在室温下通过对花岗岩、大理岩等岩石进行单轴压缩实验,发现不论岩石是否含石英等压电材料,其破裂前均优先产生瞬态电信号,且在迅速变形直至破坏过程中瞬态电信号非常明显,可以用于预测地震。美国的 B. T. Brady, Glen A. Rowell^[67]实验研究了岩石断裂的力电效应,通过产生的光谱和电磁辐射现象分析,认为岩石断裂光辐射产生机制是外围电子高速运动,相互撞击而形成的。

M. E. 佩列利曼和 H. Г. 哈季阿什维利^[68]认为产生电磁辐射主要有五种机制: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生器;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 双电层压缩和扩张时,古伊层的容量发生变化并辐射剩余能量。郭自强^[43-46]认为一些类型的岩石在外力达到一定阈值直至破裂的全过程中都可能存在电子发射,但在破裂时电子数剧增,电子能级分布较宽,多数为 1 eV 及几十 eV 量级,少数电子高达 0.05 MeV 以上。朱元清^[69]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。郑联达^[70]对石英岩、花岗岩、水晶等材料进行了电磁辐射实验,发现这些离子晶体在迅速破坏时均能辐射电磁波,频率一般在 1~500 kHz 之间;水晶辐射的强度最大,石英岩次之,花岗岩最小;提出震前电磁辐射的机制可能是岩层突然破裂和断层两侧岩石剧烈摩擦时所辐射出来的,波源就是震源部位岩层中所含的石英晶体因破碎而形成的高速荷电离子或电偶极子群。王炽仑等^[71]利用超导量子干涉仪测得了长石砂岩和石英岩破裂电磁辐射的磁场强度数量级为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ nT,认为岩石受压破裂成碎块飞散时,在断面会有电荷分离、聚集或震荡,电荷的运动产生电磁场。

何学秋和刘明举^[13,14]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;压电效应、摩擦起电效应、带电缺陷(如空位、线性位错、刃形位错等)的非平衡应力扩散、共价键断裂、EDA 键断裂和分子间力的消涨等原因导致电荷分离,对于某一种确定的岩石,可能只有某一种或数种机理起作用。王恩元^[15,16]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),另一种是由带电粒子作变速运动而产生的电磁辐射,是脉冲波。在非均匀应力作用下非均质煤岩体各部分产生的非均匀形变,由此引起电荷迁移,来自自由的和逃逸出来的电子由高应力区向低应力区迁移,同时在试样表面也积累了大量的电荷,由此形成了库仑场,电荷的迁移也会产生低频电磁辐射。裂纹扩展前,在裂纹尖端煤体内积累了大量的自由电荷(主要为电子),由此形成了很强的库仑场。裂纹扩展时,向外发射带电粒子(主要为电子),带电粒子在裂纹尖端库仑场的作用下加速运动,运动的带电粒子碰撞周围介质分子或原子,发生减速运动,形成阻尼发射。裂纹扩展时带电粒子的变速运动是形成高频电磁辐射的主要原因。

Ohtsuki 等^[72]提出等离子激元衰减模型解释地震中心产生的电磁辐射,认为岩石高应力的增加,电子会被激发并发射,从而产生体积激元和表面激元,这些激元传播到地球表面形成电磁波。Kamogawa 等^[73]同时提出了强地震产生

电磁波的偶极映像理论,认为岩石高应力的增加,外电子会被激发,出现瞬时偶极矩,电磁波就会辐射出来。该模型能够解释许多观察到的电磁波特征。钱书清等^[74,75]研究了岩样在双轴压力作用下变形破裂过程的电信号和磁信号,结果表明,不同方位、不同频率天线接收的信号有时不同步,信号幅度也有差异,位于裂缝处的天线信号幅度最大。电信号和磁信号不同步出现,电信号早于磁信号,且电信号出现的次数多、幅度大。认为电信号和磁信号的产生机理不同,前者是由于岩石晶体的压电效应和破裂的新生表面的自由电荷产生的,磁信号是岩石带电碎片高速运动和岩石破碎时向外发射电子,激励周围空气电离产生的。

1.3 岩石破裂表面电位研究进展

1.3.1 岩石破裂表面带电现象

国内外学者对于岩石材料破裂表面带电现象的实验研究早在 20 世纪初就开始了。1933 年 Stepanov 对碱卤化物(KCl 等)晶体样品破裂过程的电现象进行了研究,发现在试样和裂隙表面的非均匀形变处出现电荷,去掉载荷电荷将在十分之几秒内衰减。Г. И. Шевцов 等^[76]研究发现长石变形时在试件和裂隙新表面伴随有电荷出现,并且有电导率增加的现象,在速度为 0.2 mm/s 的单轴压缩情况下,试样表面出现密度为 $10^{-5} \sim 10^{-9} \text{ C/m}^2$ 的电荷,试样破坏前的电流密度达 $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ A/m}^2$ 。吴小平等^[77]在单轴压力下用测量微电流方法对花岗岩标本表面的电荷性质进行了实验研究,并对产生这种表面电荷的可能原因进行了分析,认为压电效应并不是表面电荷产生的唯一原因。

1.3.2 岩石破裂电位信号研究

Akihiro Takeuchi^[78]等对 30 cm×30 cm×1 cm 的花岗岩板和辉长岩板的中心施加瞬时载荷,测试到 40 mV 左右的瞬间电位和约 35 MPa 的电流信号,电位和电流信号在达到峰值的瞬间立即降低。之后对试样的 4 次循环加载(间隔为 2 min 的正弦载荷,加载步距从 50 MPa 加载至 60 MPa 然后再降至 50 MPa)中测试到的电位和电流信号幅值逐次降低。A. B. 波诺马廖夫^[79]在单轴循环加载条件下记录到岩石样品(花岗岩、云英岩、叶蜡石、水泥等)破裂时电阻和带电的变化,发现了与岩石内部破裂发展有关的局部带电状态异常,提出非弹性电效应。郝锦绮等^[80]对双轴压力下岩石弹性变形阶段和破坏过程中的应变及自电位进行了实验研究,发现在突然加卸载、黏滑和岩样破裂情况下,自电位和应变