

● 肖红飞 等著

MEIYAN DONGLIZAIHAI LIDIANOUHE

煤岩动力灾害力电耦合

地质出版社

TD32
X-377

学术著作出版基金
科学基金项目
科技发展计划项目

资助

湖南自然科学基金项目
湖南省科技攻关项目
湖南省教育厅青年项目

煤岩动力灾害力电耦合

肖红飞 何学秋 冯 涛 王恩元 著

地质出版社

· 北 京 ·

第一作者简介

肖红飞，男，博士，汉族，湖南科技大学副教授。1971 年 10 月生于湖南省新邵县，1995 年毕业于中南大学（原中南工业大学），获得热能工程硕士学位；同年在原湘潭工学院任教，从事通风安全、建筑环境与设备工程专业的教学与科研工作。2003 年毕业于中国矿业大学，获安全技术及工程博士学位。现工作于湖南科技大学能源与安全工程学院，负责湖南自然科学基金、国家安全生产科技计划项目、湖南省教育厅以及湖南科技大学博士基金等科研项目的工作，作为主要人员参加了国家杰出青年基金、国家自然科学基金、湖南省科技攻关项目以及多项横向科研项目的工作；至今在国内外各类学术期刊杂志和国际学术会议上发表论文近 30 篇。主要从事矿山安全、动力灾害预测与防治、安全系统工程以及安全评价的研究。

前言

我国的矿产资源十分丰富，在地下资源开采过程中经常发生重大的动力灾害事故，有煤与瓦斯突出、冲击矿压（岩爆、矿震）等，而且这些问题随着采掘深度的不断延伸和开采规模的不断扩大日益严重，造成了大量的人员伤亡和财产损失，严重威胁着矿井安全生产。对于预测预报煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩动力灾害现象，监测矿山顶板活动状况来说，消除或减弱外界干扰，实现定位监测和定量预报，是目前急需解决的世界性难题。

各主要产煤国家对突出和冲击矿压的预防都十分重视，进行了大量的研究工作，并形成了较为完备的预测技术和装备。现行常规的突出预防方法主要为接触式点预测，其准确性受测试时间、操作熟练程度、选顶测点的代表性等影响较大，预测准确率低，并且操作较为复杂，一般需要施工钻孔，占用大量的作业时间，增加了防突费用和吨煤成本。煤与瓦斯突出的非接触连续预测是近年来的发展重点。

煤岩电磁辐射是煤岩体受载变形破裂过程中向外辐射电磁能量的一种现象，与煤岩体的变形破裂过程密切相关。电磁辐射信息综合反映了煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩灾害动力现象的主要影响因素，电磁辐射强度主要反映了煤岩体的受载程度及变形破裂强度，脉冲数主要反映了煤岩体变形及微破裂的频次。

多年来，中国矿业大学在国家自然科学基金、煤炭行业重点项目和国家“九五”重点科技攻关计划等的资助下，对含瓦斯煤岩的物理力学特性、含瓦斯煤岩流变破坏特性、煤与瓦斯突出的流变机理、单轴受载含瓦斯煤岩流变破坏电磁辐射特性、电磁辐射法预测煤与瓦斯突出等煤岩瓦斯动力灾害技术及装备方面进行了大量的研究工作：提出了煤与瓦斯突出的“流变假说”；提出了用电磁辐射强度和脉冲数变化预测预报煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象的技术原理和方法；提出临界值法和趋势法两种灾害危险性识别方法；研制成功了具有非接触、定向、连续、区域性检测及预报功能的 KBD-5 矿用本安型煤与瓦斯突出（冲击矿压）电磁辐射监测仪，并进行了成功的应用。实现了非接触、定向及区域性（空间上）预测预报煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩瓦斯动力灾害。

二

发生在煤岩、混凝土等多孔介质中的动力灾害现象主要有煤与瓦斯突出、冲击矿压、冒顶、滑坡、隧道及坝基失稳等。动力灾害现象主要是煤岩体在受载过程中内部应力不均匀导致变形破裂直至失稳而形成的，其共同本质是煤岩等多孔介质在外力作用下的流变破坏，在宏观上表现为动力失稳，在微观上表现为能量的突然释放。在机理方面一般认为煤岩动力灾害现象的发生主要是煤岩体在其内外物理化学及应力综合作用下快速变形破裂的结果，是一种典型的不可逆能量耗散过程。其中能量形式包括有：固体弹性能、热能、气

体容积功、声能和电磁能等。其变形破裂的程度和快慢与能量释放的强度是密切相关的，也就是说能量信号与应力场是有联系的。

全书共分8章。第1章介绍煤岩动力灾害现象及其预测预报技术，并从宏观和微观两个方面阐述煤岩变形破裂电磁辐射的产生机理。第2章实验研究煤岩受载变形破裂过程电磁辐射信号的变化规律以及其与应力之间的耦合关系，从实验研究方面揭示煤岩变形破裂过程力电效应机理。第3章结合电磁辐射理论简要分析煤岩变形破裂电磁辐射场的数学模型与电磁辐射信号接收与传播特性。第4章在电磁辐射理论与煤岩矿物电学性质分析的基础上，分析煤岩电性参数对电磁场传播的影响，并进行了现场试验。第5章结合岩石损伤力学、量子力学、电磁动力学的理论研究，阐述煤岩动力灾害现象发生过程中产生的电磁辐射信号与应力场之间的力电耦合机理，建立煤岩力电耦合损伤力学模型。第6章在简要介绍如ANSYS、FLAC等岩土力学数值模拟工程软件的基础上，根据提出的煤岩变形破裂三维力电耦合模型，对单轴压缩煤岩样品的力电耦合场进行了数值模拟。第7章根据提出的煤岩变形破裂三维力电耦合模型，对矿山巷道掘进过程的力电耦合场进行了数值模拟。第8章介绍了受载煤岩变形破裂力电耦合及其数值模拟方法在电磁辐射方法预测煤岩动力灾害危险性、隧道稳定性以及工作面前方应力状态评价中的应用，初步研究了煤岩灾害动力现象的定向定位监测，并对煤岩灾害动力现象的电磁辐射预测研究前景进行了展望。

三

本著作的意义在于：

第一，本书对于完善煤岩变形破裂电磁辐射监测和检测理论，为现场应用电磁辐射方法和技术准确预测预报灾害动力现象提供可靠的理论基础。

第二，本书对于进一步揭示煤岩灾害动力过程及灾害发生机理，对于岩石混凝土结构稳定性评估以及对促进相关学科的发展都具有重要的理论和现实意义。

第三，本书对于从事煤岩、混凝土动力灾害现象（煤与瓦斯突出、冲击矿压、滑坡、地震、坝基及隧道失稳等）、岩土工程等领域的科技工作者、高等院校研究生、本科生等均具有借鉴意义。

第四，本书所提出的理论、技术和方法可以推广到其他相关的煤岩、混凝土介质中的动力灾害研究及应用领域。

在课题研究和成书过程中得到王卫军博士、朱川曲博士、刘贞堂老师、窦林名博士等帮助和支持；撒占友博士、王云海博士、聂百胜博士、杨艺博士、谢文兵博士、郑百生硕士在实验室实验、现场实验、数值模拟以及部分理论分析方面给予了帮助。本书出版得到湖南科技大学著作出版基金、湖南省自然科学基金、国家安全生产科技发展计划项目基金、湖南省科技攻关项目，以及湖南省教育厅青年基金的资助，湖南科技大学能源与安全工程学院、中国矿业大学、河南理工大学（原焦作工学院）、淮南矿业集团等单位给予了大力支持。这里一并表示感谢。

煤岩动力灾害力电耦合还需要进行更深入细致的研究，书中不当之处，竭诚欢迎读者不吝指正。

作者 谨识

2004年6月于湘潭

目 录

前 言

第 1 章 煤岩动力灾害及其预测技术	(1)
1.1 煤岩动力灾害现象简介	(1)
1.2 矿山煤岩动力灾害预测预报技术	(8)
1.3 煤岩变形破裂电磁辐射产生机理	(10)
第 2 章 煤岩变形破裂电磁辐射实验研究	(16)
2.1 电磁辐射实验系统与实验方案	(16)
2.2 电磁辐射实验结果与分析	(19)
第 3 章 煤岩变形破裂电磁辐射场	(24)
3.1 电磁辐射场理论	(24)
3.2 煤岩变形破裂电磁辐射场数学模型	(26)
3.3 煤岩变形破裂电磁辐射信号接收与传播特性	(33)
第 4 章 煤岩电性参数对电磁辐射的影响	(37)
4.1 煤岩变形破裂电磁辐射信号传播影响因素研究进展	(37)
4.2 煤岩矿物电学性质	(39)
4.3 煤岩电性参数对电磁场传播的影响	(43)
4.4 电磁波传播现场实验	(46)
第 5 章 煤岩变形破裂三维力电耦合	(50)
5.1 理论基础	(50)
5.2 煤岩变形破裂力电耦合机理	(52)
5.3 煤岩变形破裂力电耦合理论模型	(54)
5.4 煤岩变形破裂力电耦合实验研究模型	(59)
5.5 煤岩变形破裂电磁辐射的围压效应	(61)
第 6 章 单轴压缩煤岩变形破裂力电耦合	(63)
6.1 应力场数值模拟方法	(63)
6.2 单轴压缩煤岩变形破裂应力场的数值模拟	(69)
6.3 单轴压缩煤岩变形破裂力电耦合	(76)
6.4 煤岩变形破裂电磁辐射场与应力场的能量耦合	(82)
第 7 章 矿山巷道掘进煤岩变形破裂力电耦合	(85)
7.1 矿山巷道掘进时煤岩体变形破裂应力场的研究	(85)
7.2 巷道掘进时围岩三维应力场的数值模拟	(88)
7.3 巷道掘进围岩二维应力场的数值模拟	(97)

7.4 巷道掘进煤岩变形破裂力电耦合	(99)
第8章 煤岩动力灾害力电耦合方法的应用	(111)
8.1 基于力电耦合的定向定位技术	(111)
8.2 电磁辐射监测技术在煤岩动力灾害预测中的应用	(115)
8.3 煤岩动力灾害电磁辐射预测技术前景展望	(121)
参考文献	(124)

第1章 煤岩动力灾害及其预测技术

煤岩动力灾害现象是煤岩体在受力情况下因内部应力场的突然变化在短时间内发生的一种动力效应和灾害现象。煤岩动力灾害现象的主要形式有煤与瓦斯突出、冲击矿压、地震、坝基和隧道失稳等，在动力灾害发生过程中，将伴随有能量的释放，其能量形式包括：弹性变形能、热能、电磁辐射能以及化学能等。能量的变化反映了煤岩体变形破裂的程度和速率，因此，通过研究动力灾害发生过程中某种能量形式的变化规律，对于有效揭示灾害的产生机理和预测防治具有极其重要的理论和实践意义。电磁辐射预测技术是一种有效的能够实现非接触的煤岩动力灾害现象预测预报技术。

1.1 煤岩动力灾害现象简介

1.1.1 煤岩动力灾害现象

煤岩动力灾害现象是煤岩体在外力作用下发生的具有动力效应和灾害后果的一种灾害现象。它具有范围广、形式多样的特点，如地震、火山爆发、隧道失稳、山体滑坡、煤与瓦斯突出、冲击矿压、顶板事故等均属于煤岩动力灾害现象。煤岩动力灾害现象危害巨大，对人们的生命和财产均会造成巨大的伤亡与损失。

面对飓风、旱灾、洪灾、地震、山体滑坡和雪崩等频发的自然灾害，印度建立了颇具特色的灾害管理体制。在国家、邦、县和区一级均有统一的灾害管理机构。印度还制定了一系列灾前备灾和部门发展计划，以及飓风地震等灾后重建计划^[1]。

(1) 地震^[2~8]

众所周知，地球时时刻刻都处在运动变化之中。地球的运动变化会产生巨大的力，使地下的岩层发生变形。起初，变形很缓慢；但当受到的力太大，岩层不能承受时，就会突然破裂；岩层破裂所产生的振动传到地表就会引起地表的振动，这就是地震。一般情况下，变形区域越长、越宽，释放的能量就越多，构造地震的震级也将越大。如图 1.1 为一卫星图片，可以清晰地看到地震产生的断层，图 1.2 所示为 1906 年旧金山地震遗址照片，可以看到地震造成的破裂错断了一排原本连在一起的篱笆。

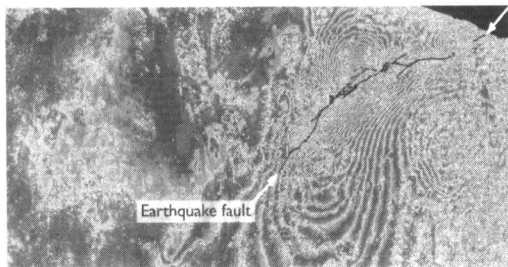


图 1.1 地震断层卫星图片

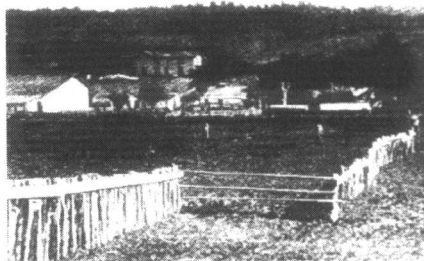


图 1.2 1906 年旧金山地震遗址照片

地震灾害是群灾之首，它具有突发性和不可预测性，以及频度较高，并产生严重次生灾害，对社会也会产生很大影响等特点。强烈地震发生时会造成建筑物破坏，同时引起山崩、滑坡、泥石流、地裂、地裂缝、喷砂、冒水等地表的破坏和海啸。因地震的破坏而引起的一系列其他灾害，包括火灾、水灾和煤气、有毒气体泄漏，细菌、放射物扩散、瘟疫等对生命财产造成的灾害。

《竹书纪年》是迄今世界上对地震进行文字记载的最早书籍，书中将地震称为“泰山震”，记录的是公元前 1830 年发生的一次地震现象。全球每年发生地震 500 多万次！但只有不足 2% 的地震能被人们感觉到，其中每年 100 多个破坏性地震，给人类造成了巨大经济损失和人员伤亡。根据美国地震调查局国家地震信息中心（USGS NEIC）的互联网数据，2001 年全世界因为地震死亡人数达到 2.1 万多人，其中死亡人数最多的一次地震是 1 月 26 日发生在印度古吉拉特邦的里氏 7.7 级大地震，导致 2 万人死亡。强烈地震往往以其猝不及防的突发性和巨大的破坏力给社会经济发展、人类生存安全和社会稳定、社会功能带来严重的危害。在各种自然灾害造成的损失中，地震损失占 52%，是名副其实的“群害之首”。

中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，地震断裂带十分发育，主要地震带有 23 条。在刚刚过去的 20 世纪里，中国共发生 6 级以上地震近 800 次，遍布除贵州、浙江两省和香港特别行政区以外所有的省、自治区、直辖市，是世界上蒙受地震灾害最为严重的国家之一。在当前全球城市化进程急剧发展，尤其是我国城市数量剧增的情况下，更为明显。就我国国内的各种自然灾害而言，在地震灾害、气象灾害、海洋灾害、地质灾害、农作物生物灾害、林业灾害等各大灾种中，据新中国成立以来 50 多年来的资料统计，以各种灾害所造成的经济损失比例来看，气象灾害为 57%，居灾害之首，但就各种自然灾害的人口死亡的统计来看，地震灾害占 54%，为群害之首。

世界上地震的频繁发生以及造成的巨大损失给地震预测预报提出了严峻的研究课题，但从世界范围来看，目前地震预报仍然处于探索阶段，主要是根据多年积累的地震观测资料进行经验性的预测预报，在地震孕育机理发生发展规律上尚未完全清楚。因此，当今的地震预测预报具有很大的局限性。地震学家们对不同区域进行地震危险性分析，并对该地区未来一定时间内发生地震的可能性进行预测，划分危险区，对发生地震后可能造成的损失进行预测。在地震孕育过程和前兆机理方面的研究，自 20 世纪 70 年代以来有了很大进展，如美国和前苏联提出了膨胀—扩张模式和雪崩—不稳定模式，我国提出过震源组合模式和膨胀蠕动模式等。吴立新等^[6~7]以构造地震孕震机制之二即断层粘滑发震为模拟对象，利用双轴加载实验系统和红外热像仪，对 4 类断层组合条件下双剪粘滑过程中的红外辐射温度场的时空演变特征进行了模拟实验研究。研究表明：断层表面温度场的时空演变不仅与应力水平有关，还与组成摩擦面的两侧岩性及其粗糙度有关。具体表现在：①应力集中和摩擦作用强的区域，其红外辐射较强；而应力松弛和摩擦作用弱的区域其红外辐射较弱。②当两断层岩性及摩擦面条件对称时，红外热像呈双蝶翼形；当摩擦面粗糙，红外热像呈非对称、非均衡时空演变特征，如串珠状、针状、倒针状、条带状、单蝶翼形或其依次变化。卫星热红外遥感与差分干涉雷达（D-INSAR）技术相结合，并以活动断层预滑及其后续粘滑为监测重点，可望成为构造地震遥感监测和地震短临时—空—强预报的新

途径。这些研究虽然在一定程度上解释了地震孕育和前兆机理，但是由于地震的极其复杂性，各种理论仍不能圆满解释各种前兆现象的特征。

在防震减灾的实践中，人们逐渐认识到防震减灾涉及社会经济生活的各个方面和广大民众的生活，是一项复杂的社会系统工程。要有效地减轻地震灾害，一方面必须在政府领导下，普及地震科学知识、提高全民的防震减灾意识，依靠法制、依靠科技，动员、组织各方面的力量进行协调一致的努力；另一方面科研工作者要致力于地震预测预报的机理研究和综合预报的研究，从经验性预报向物理性预报方法转变，提高地震预报的准确性。

(2) 火山喷发^[8~9]

地壳之下 100 ~ 150 km 处，有一个“液态区”，区内存在着高温、高压下含气体挥发分的熔融状硅酸盐物质，即岩浆。岩浆从地壳薄弱的地段冲出地表，就形成了火山。火山爆发是地球最具威力的自然现象之一，释放出的能量有时比核爆炸还要大数千倍。

在火山喷出的物质中，既有固体物质如碎的岩石块、碎屑和火山灰粉，也有液体物质如熔融岩流、水以及各种泥流等，还夹杂有水蒸气和 C、H、N、F、S 的氧化物等气态物质，有时能喷射出可见或不可见的光、电、磁、声和放射性物质等，因而会致人死亡、使得电器仪表失灵、导致飞机轮船失事等事故。在过去的 500 年里，大约有几百万人死于火山之灾。人类历史上伤亡最大的一次火山发生于公元前 1470 年欧洲爱琴海的希腊桑托林岛，该火山喷发时喷出多达 625 亿立方米的物质，毁灭了一个名叫米诺斯的人类文明。

火山喷发虽然是突发的，但是也有其内在规律性，前兆比地震还要明显，人们可以预先得知而加以逃避。为了更加及时、准确地预测预报火山爆发，科学家们对此进行了不懈的努力，并成功地预报了一些火山爆发。如 1979 年美国在圣海伦斯山周围设置了观测站，从而成功地对圣海伦斯山火山爆发进行了预报。

(3) 山崩、滑坡^[10~11]

山崩通常是指土石或岩石在重力作用或因水的润滑而发生的快速下滑移动或坠落，是一种典型的块体快速运动形式。山崩会造成边坡失稳，产生的落石常会摧毁道路两旁的建筑，掩埋房屋、阻塞交通等事故，严重时还会击中过往车辆造成人员伤亡。

滑坡则是仅仅次于地震和洪水的一种严重地质灾害，不仅其出现的频率和广度远远大于地震事件，而且造成的损失也很巨大，并且会危及人们的生命财产安全。如表 1.1 为部分国家和地区的年平均滑坡灾害死亡人数。

表 1.1 滑坡造成的平均死亡人数及年概率（20 世纪末）

国家及地区	每年平均死亡人数	人口	人员死亡年概率
日本	150	150000000	1/1000000
韩国	56	70000000	小于 1/1000000
美国	25 ~ 50	250000000	1/1000000 ~ 2/1000000
澳大利亚	小于 11	7000000	小于 1/17000000
加拿大	5	30000000	1/6000000
中国香港	1.5	800000	1/6000000

在我国，由于 70% 的地方属于山区，因此，滑坡的发生密度大，频率高，从而成为世界上受滑坡危害最严重的国家之一。迄今为止，有滑坡灾害报道的省市包括：南京、西

安、宝鸡、延安、重庆、兰州、台湾以及香港等，随着经济的迅速发展，由于不合理的开发利用土地资源，危及人类安全的滑坡问题将更加突出和严重。因此，尽量减少对地质环境的破坏，治理边坡，预防边坡滑坡事故，对减少滑坡灾害造成的人们生命财产损失具有重要的实际意义。

(4) 煤与瓦斯突出^[12]

煤与瓦斯突出是矿井含瓦斯煤岩体在压力作用下从煤岩体中向采掘空间急剧运动并伴随着大量瓦斯气体喷出的一种煤岩动力灾害现象。煤岩动力灾害现象也是本书要研究的主要对象。

按动力现象力学特征可分为突出、压出和倾出，其主要作用力包括：地应力、瓦斯压力和重力。

按照动力现象的强度分类：

- 1) 小型突出：强度小于 50 t/次（突出后，经过几十分钟后瓦斯浓度可以恢复正常）；
- 2) 中型突出：强度 50 ~ 99 t/次（突出后，经过一个班后瓦斯浓度可以恢复正常）；
- 3) 次大型突出：强度 100 ~ 499 t/次（突出后，经过一天以上瓦斯浓度逐步恢复正常）；
- 4) 大型突出：强度 500 ~ 999 t/次（突出后，经过几天后瓦斯浓度可以恢复正常）；
- 5) 特大型突出：强度大于 1000 t/次（突出后，经过长时间瓦斯浓度才恢复正常）。

这种强大的动力灾害现象，给煤矿安全特别是井下工作人员的生命财产造成了极其严重的威胁。世界上最大的突出发生在 1969 年 7 月 13 日苏联顿巴斯加加林矿井 - 710 m 水平石门揭煤过程中，突出煤量为 14000 t，突出瓦斯量大于 250 万 m³。

我国的煤与瓦斯突出主要是煤与甲烷突出，有 4 处矿井也曾发生过 30 多次煤、岩与二氧化碳突出，并且不同地区突出现象具有不同的特点。发生在我国最大的突出是 1975 年 8 月 8 日在四川天府矿务局三汇坝一矿井主平硐在用震动性放炮揭穿 6 号煤层时发生的，共突出煤岩 12780 t，瓦斯 140 万 m³。

(5) 冲击矿压^[13~17]

和煤与瓦斯突出相类似，冲击矿压（又称冲击地压、岩爆或矿震），也是一种强烈的动力灾害现象，只是没有瓦斯气体参与，其发生通常是由于煤、岩体内部应力达到一定程度后，聚集在其中的能量以急速、猛烈的形式释放，造成煤、岩体的破坏以及支架、设备、井巷的破坏，严重时会造成人员伤亡事故发生。

有记载的冲击矿压发生在 1738 年的英国南史塔福煤田。其后，德国、波兰、加拿大、前苏联、日本、法国以及我国相继发生了多起冲击矿压事故。我国冲击矿压事故产生的灾害十分严重。目前，我国有近 50 对矿井累计发生过冲击矿压 4000 多次，造成数以百计的人员伤亡，巷道破坏达 30 多公里。

冲击矿压具有突发性、瞬时震动性以及巨大的破坏性等三个明显的显现特征。根据煤岩体内部的应力状态不同，冲击矿压可以分为：重力型冲击矿压、构造应力型冲击矿压以及中间型或重力 - 构造型冲击矿压。根据冲击强度，冲击矿压可以分为：弹射、矿震、弱冲击和强冲击。根据震级的强度和煤岩体内部抛出的煤岩量，冲击矿压可以分为三级：轻微冲击（1 级，指抛出煤岩量在 10 吨以下，震级也在 1 级以下）、中等冲击（2 级，指抛出煤岩量在 10 ~ 50 t，震级也在 1 ~ 2 级）、强烈冲击（3 级，指抛出煤岩量在 50 t 以上，震级也在 2 级以上）冲击矿压。若根据冲击矿压发生的地点和位置又可以分为煤体冲击

和围岩冲击两种。

冲击矿压的产生机理非常复杂,国内外学者基于现场实际调查和实验室研究结果,从不同角度对此进行了研究,提出了以下理论来解释冲击矿压产生的机理:强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向理论、三准则理论和变形系统理论等。

1.1.2 煤岩动力灾害产生机理

煤岩动力灾害现象的机理非常复杂,众多学者对其产生机理与预测预报进行了诸多工作。因本书主要是对煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩动力灾害过程力电耦合进行研究,因此,下面主要对煤与瓦斯突出、冲击矿压的产生机理进行阐述。

(1) 煤与瓦斯突出机理^[18~24]

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的含瓦斯煤岩动力灾害现象,是矿井生产中重大自然灾害之一。对于煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害现象,各国的研究者为了认识突出机理付出了艰辛的努力,取得了很大的进步。然而突出的不断发生说明,人类对突出的认识远没有达到尽善尽美的地步。在前苏联学者斯柯钦斯基和霍多特提出典型的突出综合假说之前,已有100余种突出假说,但概括起来主要有以瓦斯为主的假说、以地压为主的假说和化学本质假说等单因素假说。到目前为止,化学本质假说在现场观察和实验室实验两个方面都没有得到支持,已为绝大多数研究者所抛弃。而以瓦斯为主和以地压为主的突出假说只是从一个侧面来说明突出的内在机制,还有许多不能解释的现象。

要在单因素假说阶段与综合假说之间划出一条时间界线是很困难的。苏联学者聂克拉索夫在20世纪50年代提出地压和瓦斯综合作用假说的前后,又有各式各样的单因素假说出现,而且聂克拉索夫的综合假说也不是经典的综合假说。实际上,综合假说应以20世纪50年代中期苏联学者斯柯钦斯基根据突出煤层的经验和当时的科研成果提出的综合假说为标志。该假说认为,突出是地压、包含在煤体中的瓦斯、煤的物理力学性质、煤的微观结构、宏观结构、煤层构造及煤的自重等因素综合作用的结果。此后,著名学者霍多特提出了综合假说的能量假说,使突出的综合假说更加完善。前苏联斯柯钦斯基矿业研究所的霍多特等人在实验室中对煤的孔隙结构、吸附性能、渗透性能和力学性质进行了大量的测定研究,并且在压力实验机上做了煤与瓦斯突出的模拟实验。在此基础上,阐述了煤与瓦斯突出的能量来源,从能量的观点出发,用数学方法计算了煤层的变形潜能、围岩的动能、瓦斯的膨胀功和造成突出所需的功,提出了能量假说。能量假说自问世以来对突出研究起了很大的促进作用,其中的大部分观点至今仍有指导意义。然而以霍多特为代表的综合作用假说的主要缺点是:没有说明含瓦斯煤的详细破坏过程及破坏条件,没有考虑时间因素在突出中所起的作用,因而也就无法解释石门的自行揭开和延期突出等现象。虽然在能量假说的前后提出了各式各样的综合假说,如前苏联马凯耶夫安全研究所的包布罗夫的应力分布不均匀假说,英国学者 Pooley^[19] 和 Farmer^[20] 等提出的动力效应假说,但都大同小异,且其共同点是承认突出是瓦斯、地应力和煤的物理力学性质三个因素综合作用的结果,其分歧点是哪种因素起主要作用。和霍多特的综合假说一样,他们都无一例外地忽略了时间因素对突出的影响,没有说明含瓦斯煤体的破坏过程和具体条件。他们也无法解释石门的自行揭开和延时突出等自然突出的现象。中国矿业大学的蒋承林等^[21] 对石门揭煤时的煤与瓦斯突出进行了实验研究,提出了煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说。张许良等^[22] 研究了利用三维地震探测瓦斯突出危险带的技术,并在淮南潘三矿进行了应用和验

证。研究表明：高分辨率三维地震可以探测落差大于3 m的小断层和相应幅度的小褶皱，断层和褶皱可以造成构造应力集中、煤体破坏、瓦斯聚集和突出，通过对断层破坏和褶皱变形程度的定量评定可以划分瓦斯突出危险带。应用三维地震技术探测瓦斯突出危险带具有广泛的应用前景。

在煤与瓦斯突出过程及其机理的研究过程中，采取了各种各样的方法，但归纳起来主要有观察统计法、逻辑演绎法、实验法、数值分析法和数值模拟法。早期对突出机理的认识主要是建立在观察统计的基础上，辅之以逻辑演绎，或这些方法的综合。对突出机理的认识程度取决于观察的深度和广度。突出的复杂性和不可重复性使观察统计十分困难，因此，基于个人观察统计基础上的突出机理不免带有某种片面性。随着观察统计数据的积累，实验室实验的开展，人们逐渐弄清了突出的大致轮廓。再加之相关学科（如岩石力学、岩石断裂力学、流变力学）的进展和高新技术（如SEM，计算机技术等）的应用，研究者在前人大量突出实例观察和实验基础上，综合数值模拟技术，加上新的实验室成果，提出了更为完善的突出机理，突出流变机理就是其中之一。

但是，上述假说大多数是以力学为基础从宏观方面建立的，很少考虑含瓦斯煤岩材料的详细变形及破裂过程，这是目前煤与瓦斯突出研究无法取得进一步发展的主要原因。含瓦斯煤岩是一种由空间分布不均匀的煤岩颗粒组成的多孔固体骨架-孔隙中的自由瓦斯气体-孔隙表面的准液态吸附层组成的典型的非均匀多相介质。这种介质的性态和行为不能用任何单一的理论来进行较全面和符合实际的描述。例如，固体力学或岩石力学一般是用纯力学理论来研究煤岩等固体孔隙介质的性态和行为，在考虑孔隙流体的作用时主要采用纯力学作用的有效应力原理；流体力学或渗流力学主要研究流体在管孔或裂隙中的运移规律，而对固体的作用没有加以考虑。

大量的实际现象和实验结果已经表明，含瓦斯煤岩这种特殊三相介质的性态变化和运动过程是力学（岩石力学和岩石断裂力学）、物理学、表面物理化学、电动力学、声学、热力学与传热学和渗流力学等的综合作用，它与单相或两相介质的性态变化和运动过程有本质上的不同。因此，必须采用宏观和微观相结合，将上述学科或理论相交叉的观点及方法，来描述和揭示含瓦斯煤岩这种特殊介质的性态及其动力灾害过程。

从普遍意义的角度来说，自然条件下的煤岩及各种混凝土建筑物都属于含孔隙流体的介质，只是在通常的条件下人们忽略了孔隙流体的作用，而将其简化为单相或两相介质。而且，这种简化是允许的，且偏差不大。但是，这种简化后的物质与实际情况是有偏差的，特别是在孔隙流体的性质比较活泼，压力较高的情况下，简化处理会导致错误的认识结果。因此，研究含瓦斯煤岩动力灾害过程不但对人们认识煤（岩）和瓦斯突出灾害机理、冲击矿压发生机理等有重要作用，而且对认识和揭示地震、滑坡机理、对大型混凝土坝基和高层建筑物的稳定性与寿命评价等具有重要的指导意义。

防治突出灾害的理论基础是突出机理，煤与瓦斯突出的综合假说得到了广泛的承认，该假说认为突出是地应力、瓦斯和煤的物理力学性质综合作用的结果。但是，由于突出的复杂性以及研究方法和研究手段的限制，突出的实验室模拟和现场实际观测都存在着无法克服的困难，我们尚未完全弄清其机理，还无法准确地预测和监测突出，也无法从根本上阐述突出所带来的危害。因此，迫切需要采用新的方法和手段研究煤与瓦斯突出等动力灾害现象。

(2) 冲击矿压产生机理^[25]

长期以来,冲击矿压作为岩石力学的重大难题之一,一直是国内外学术界和工程界所关注的问题。冲击矿压的发生机理也十分复杂,国内外学者在现场实际调查和实验室研究的基础上对此进行了一系列的研究。其产生机理可以归纳为以下几个理论。

强度理论

强度理论认为:当采场周围产生应力集中且应力达到煤(岩)强度的极限时,煤(岩)体突然破坏,从而形成冲击矿压。如20世纪30年代末被提出的拱顶理论和悬臂梁理论等近代强度理论均以“矿体-围岩”系统为研究对象,认为煤(岩)体的承载能力应是“煤体-围岩”系统的强度,导致煤(岩)体破坏的决定因素是:①应力值大小;②它与岩体强度的比值。70年代Brauner提出了煤(岩)体夹持理论,并导出煤体极限压应力的计算公式。

能量理论

能量理论是从能量转化的角度来对冲击矿压的产生机理进行解释。该理论认为“矿体-围岩”系统在其力学平衡状态遭破坏时释放能量大于消耗能量就发生冲击矿压。各国学者对此进行了不懈的努力,下面对一些主要成果进行介绍。

从能量的来源角度分析,Petukhov认为冲击矿压产生的能量由被破坏的煤(岩)积聚能与和邻接于煤柱或煤(岩)层边缘部分的弹性变形能组成。剩余能量理论于20世纪70年代有美国人提出,该理论认为剩余能量的存在是围岩动力失稳的力学原因。

从能量的判据角度分析,20世纪70年代Brauner提出了冲击矿压的能量判据,该判据考虑了冲击矿压发生时能量释放与时间的相关性,但没有考虑能量释放的空间效应。

尽管如此,对于能量理论的研究,还需要开展进一步的研究工作。

刚度理论

刚度理论最初由Cook等人根据刚性压力机理论得到。该理论认为:矿山结构的刚度大于矿山负载系统的刚度是发生冲击矿压的必要条件。近年来Petukhov则进一步将矿山结构的刚度明确为:达到峰值强度后其应力-应变曲线下降的刚度。

冲击倾向性理论

冲击倾向理论是由波兰和前苏联学者提出。冲击倾向性是指煤岩产生冲击破坏的固有属性,是产生冲击矿压的必要条件。我国学者对此通过大量研究,提出了用弹性能量指数、冲击能量指数以及煤岩动态破坏时间等三项指标来综合判断煤岩冲击倾向性的实验方法。反映冲击倾向性理论的还有顶板冲击倾向性的研究,包括顶板弯曲能指标和长壁开采方式下顶板断裂引起的煤层冲击等方面的研究。

此外,在试验方法、数据处理及综合评判等研究方面也取得了一定的进展。

稳定性理论

20世纪60年代中期NevilleCook首先应用稳定性理论来研究煤岩冲击矿压。其后,Lippmann提出了“初等理论”,章梦涛提出冲击矿压的失稳理论,并在实际中得到了初步的应用。

Bazant等分析了近壁裂纹扩展引起的能量耗散及尺度效应,使对冲击矿压的能量估算成为可能。张晓春等探讨了煤矿巷道附近围岩层裂区的形成和破坏机理,通过理论分析和试验模拟,建立了煤矿片帮型冲击矿压发生的层裂板结构失稳模型。

此外,材料破坏的分叉理论与近年来发展很快的突变理论均在冲击矿压发生机理研究中取得了一定的进展。

总的来说,冲击矿压是裂纹扩展及变形局部化导致的失稳现象,与具有裂纹的各向异性煤岩介质的力学性质和围岩在载荷作用下应力场和应变场的演化和失稳有密切的关系。

1.2 矿山煤岩动力灾害预测预报技术

1.2.1 预测预报技术概述

我国的矿产资源十分丰富,在地下资源开采过程中经常发生重大的动力灾害事故,有煤与瓦斯突出冲击矿压(岩爆、矿震)等,而且该问题随着采掘深度的不断延伸和开采规模的不断扩大日益严重,造成了大量的人员伤亡和财产损失,严重威胁着矿井安全生产。由于煤与瓦斯突出或冲击矿压能在一瞬间向采掘工作面空间喷出巨量煤与瓦斯流,不仅严重地摧毁巷道设施,毁坏通风系统,而且使附近区域的井巷全部充满瓦斯与煤粉,造成瓦斯窒息以至煤流埋人,甚至还会造成煤尘与瓦斯爆炸等严重后果,因此,致力于煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象产生的机制、预测预报以及预处理的理论和方法的研究(特别是预测预报的研究)就十分重要了。

据统计,在全国595处国有重点煤矿中,有高瓦斯突出矿井347处,冲击矿压矿井120余处。针对我国严重的含瓦斯煤岩动力灾害,我们应该结合前人研究成果和其他动力灾害预测的新理论、新方法深入研究煤岩动力灾害的预测预报新技术和方法。

煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害预测的目的和意义在于:为采取合理有效的防突措施提供科学依据,减少防突工程量与时间,保证采掘生产的正常进行,保障井下生命和财产安全。煤与瓦斯突出预测的基础是人们对突出过程及其影响因素的认识。在对煤与瓦斯突出进行研究的一个多世纪中,各国的研究者经过不懈的努力,提出了各种各样的突出预测方法。从突出预测的范围与时间上来分,大致可分为两类:区域预测和局部预测。区域预测又称为长期预测,任务是确定矿井、煤层以及煤层区域的危险性;后者的任务是在前者的基础上,及时预测局部地点即采掘工作面的突出危险性,这种预测又可称为日常预测或工作面预测。根据突出预测过程及其连续性日常预测又可分为钻孔指标法和连续动态两类预测方法。

下面主要对煤与瓦斯突出、冲击矿压等矿山煤岩动力灾害预测预报技术进行介绍。

(1) 指标(静态)预测法^[26~27]

指标预测是通过钻孔获得一些反映工作面前方瓦斯突出危险性的量化指标来预测突出的危险性。预测时主要考察其中的单个或多个指标是否超过临界值。目前较多采用的指标有钻屑量 S ,钻孔瓦斯涌出初速度 q ,钻屑瓦斯解吸指标 K_1 和 Δh_2 ,或这些指标的组合。通常,它们是通过钻孔获得的,具有分散和不连续的特点。

钻屑量是反应地应力大小的一个有效指标,首先由德国学者Noack等(1983)提出并得到了广泛的应用。在采掘工作面打预测钻孔,每钻进1m测量钻屑量,其最大值超过临界值时具有突出危险性。煤炭科学研究总院重庆分院在南桐和梅田对煤巷进行了试验,认为钻粉量为正常量的3倍时最易倾出或压出,如果瓦斯压力大就会发生较大的突出。

钻孔瓦斯涌出初速度法是前苏联运用最广泛的日常预测法,已被列入前苏联的相关著作《煤、岩石和瓦斯有突出倾向煤层安全采掘规程》中。钻孔瓦斯涌出初速度被认为是

一个反映煤体物理力学性质、煤层瓦斯和煤层应力状态的综合指标，已被列入我国防治煤与瓦斯突出细则。

当前所采用的钻孔（指标）预测方法都是通过钻孔来实现的，是目前我国采用的主要预测方法，对煤与瓦斯突出预测做出了重要的贡献。但是，该方法存在以下缺点：①打钻以及参数测定操作时间长；②工程量通常很大；③预测时间长；④对生产会造成一定影响；⑤费用高；⑥在钻孔附近取得的预测结果仅仅是局部的，并不能完全代表整个预测步长范围内的突出危险性，在预测时刻取得的结果也只是分散的、不连续的，并不能完全代表煤体稳定前整个时期的突出危险性，因为煤体处于动态变化之中，延期突出就是例证。

（2）动态（连续）预测法^[28~38]

由于指标（静态）方法的一系列缺点，因此，动态连续预测的研究正日益引起人们的重视。目前，突出的连续预测有以下几种方法：①声发射监测技术；②利用环境监测系统连续监测工作面的瓦斯涌出变化特征，通过分析涌出与突出的关系来预测突出；③目前正在广泛开展的电磁辐射预测方法。

根据瓦斯涌出量预测突出的指标有德国学者提出的 V_{30} 指标。 V_{30} 是掘进工作面放炮后 30 min 内瓦斯涌出量与落煤量的比值。苏文叔根据国内外的研究，综合分析认为， V_{30} 与瓦斯涌出变动系数 K_v 两指标分别反映了工作面单位落煤量、瓦斯涌出量的上升幅值和工作面瓦斯涌出量增大、减小的变化幅度，它们与工作面前方的突出危险性密切相关，可作为瓦斯涌出动态预测法的两项主要指标，用 K_v 预测延期突出将是一个有希望的技术途径。刘明举则根据工作面瓦斯涌出特征，利用模式识别技术对基于环境监测系统的突出预测系统进行了初步研究，认为，在现有环境监测系统的基础上考虑工作面瓦斯涌出特征，利用计算模式识别技术研究非接触式煤与瓦斯突出预测系统是可行的。

煤岩变形破坏就是煤岩内部裂隙的产生、发展以及汇合贯通的结果。因此，从煤岩受力破坏的物理力学过程出发，研究煤岩变形破坏这一不可逆的能量耗散过程，以便进一步认识动力灾害发生机理，从而出现了可以表征煤岩动态破坏的综合指标方法——地球物理方法，如声发射和电磁辐射方法就是两种有效的地球物理方法。

在国外，利用声发射对前苏联顿巴斯煤田、英国的南威尔士煤矿以及德国、日本和波兰等国家的煤与瓦斯突出预测进行了许多研究。前苏联用记录声噪脉冲数的方法预报煤与瓦斯突出并在顿巴斯煤田进行了推广应用。研究表明，裂隙的产生和扩展都将以弹性波的形式产生能量辐射——声发射。早在 20 世纪 40 年代初，美国就利用声发射技术监测金属矿井的岩爆。加拿大研究人员研究了多种声发射监测系统，用于岩爆预测。

在我国，此方面的研究起步较晚。王建军就岩石声发射活动 kaiser 效应的影响因素及其在地应力测量中的应用进行了研究，以及张宝生就煤岩破裂声发射的特性进行了研究。万志军及周楚良将岩石裂纹产生时的声发射源简化为振弦的振动，得到了声发射频率与裂纹长度、声发射振幅与裂纹宽度之间的关系。我国平顶山矿务局从俄罗斯引进了声发射监测系统，并用于煤与瓦斯突出预报试验研究。声发射方法虽然能够较连续有效地评估煤层边缘的突出危险性，但也存在以下问题：一是仪器结构复杂，信号接收和转换也较复杂；二是压电传感器必须与煤岩壁面良好耦合，这在实际操作过程中是很难控制的。随着突出机理的深入研究，大容量、高速度计算机系统的引入和声接收技术的发展，用声发射技术进行突出预测可望获得突破。

此外,利用神经网络技术以及动力灾害过程中的热效应来进行预测等方面的研究也取得了一定的进展。

1.2.2 煤岩动力灾害电磁辐射预测技术^[39~53]

与声发射法相比,利用煤岩变形及破裂过程中产生的电磁辐射预测煤与瓦斯突出等动力灾害现象的电磁辐射法有许多优点:可实现真正的无接触,有效信息的接收、传输等比较简单,且易于实现定向接收;信息较声发射丰富,即使在煤体流变过程(缓慢变形过程)中也有信号产生;大大减少了工作量,不受人工等外界干扰(对于井下机电设备等电磁干扰,则可采取屏蔽或定向接收来排除),可实现连续监测及预报,又能检验防突措施的效果。

目前国内外用电磁辐射方法预测预报矿山煤岩动力灾害现象的研究掀起了高潮。Airuni等研究了煤在外力作用下会伴随有电磁辐射产生。Poturayev等描述了岩石受压下电磁辐射和声发射的研究,它们的联合使用提供了煤岩应力状态的定量测定,使研究地球力学过程和提高岩石监测成为可能;测定和记录了煤、粘土岩、砂岩、花岗岩、石英岩和石灰岩等岩石变形和裂隙扩展形成的电磁辐射和声发射,结果显示利用声发射和电磁辐射的联合特征来监测邻近工作面易突出煤层的应力状态是可能的。Afanasenکو等测定了盐矿开采期间天然和工业产生的电磁场,结果表明,从盐层产生的电磁辐射可以用来评价冲击灾害现象。Frid等则在现场研究了煤的物理力学状态(水分含量、孔结构等)、瓦斯对工作面电磁辐射强度的影响,还用谐振频率为100 kHz的天线测定了例如在各种采煤工作面条件下的天然电磁辐射,并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。中国矿业大学利用电磁辐射监测技术对煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩动力灾害现象进行预测预报研究已步入国际先进行列。何学秋等分析了煤与瓦斯突出过程中的能量耗散,提出了电磁辐射是很有前途的非接触预测方法,还研究了煤岩破裂过程中电磁辐射信号的时间序列符合赫斯特统计规律,说明受载煤岩在变形破裂过程中,电磁辐射信号基本呈现逐渐增加的趋势,这对于预测预报煤岩动力灾害现象具有重要意义。何学秋、王恩元等还分析了煤岩体破裂过程中电磁辐射的特征,并列举分析了电磁辐射方法预测预报煤岩动力灾害现象的原理和技术。何学秋、王恩元、窦林名、聂百胜等利用电磁辐射技术对巷道稳定性进行了监测和评价,显示了电磁辐射监测技术在隧道稳定性监测方面的应用前景。

电磁辐射技术还可以对混凝土、岩石材料的变形破裂过程进行识别和监测,对于研究材料的断裂机理具有重要意义。电磁辐射监测技术是一种真正的非接触方法,随着电磁辐射动力灾害的判别方法及技术的日益完善和发展,必将显示出巨大的科学价值和应用前景。

但是,非接触连续预测煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害现象的研究还是很初步的,试验数据还不多,需要做更进一步的研究。

1.3 煤岩变形破裂电磁辐射产生机理

1.3.1 煤岩体分离电荷产生机理^[54~64]

电磁辐射的前提和基础是电荷的分离,也就是在宏观上表现出正负电荷,而这分离电荷的最终恢复,使煤岩体在宏观上表现为电中性的过程就是电磁辐射。电磁辐射机理要回答的问题是:①电荷是如何分离的;②分离电荷是如何消失并产生电磁辐射的。所以研究煤岩受载变形破裂过程中的电磁辐射机理就必须从这两个方面入手。