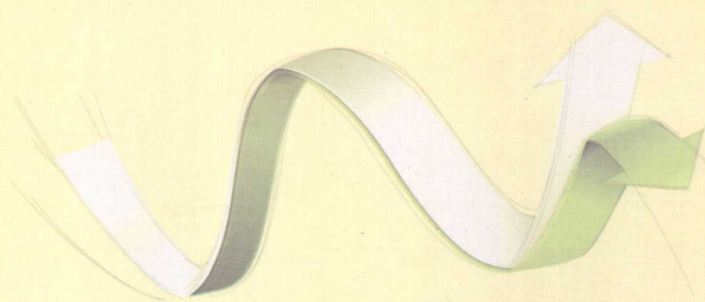


史红 著

煤矿岩层破裂的微震 监测与力学机理

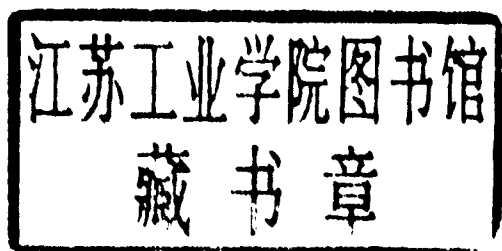


中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

Microseismic Monitoring And Mechanics
Mechanism of Strata Rupture in Coal Mine

煤矿岩层破裂的微震
监测与力学机理

史 红 著



中国海洋大学出版社

· 青岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

煤矿岩层破裂的微震监测与力学机理/史红著. —青岛:
中国海洋大学出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-81067-432-4

I. 煤… II. 史… III. 煤矿—岩层移动—监测系统—研究 IV. TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116087 号

出版发行 中国海洋大学出版社

社 址 青岛市香港东路 23 号

邮政编码 266071

网 址 <http://www.ouc-press.com>

电子信箱 whs0532@126.com

订购电话 0532—82032573(传真)

责任编辑 施薇

电 话 0532—85901040

印 制 日照报业印刷有限公司

版 次 2009 年 6 月第 1 版

印 次 2009 年 6 月第 1 次印刷

开 本 960 mm×720 mm 1/16

印 张 10

字 数 164 千字

定 价 20.00 元

前 言

矿业是工业化和经济发展的基础,矿业企业是推动我国经济发展和工业化建设的重要力量。其中,能源矿产是矿产资源的重要组成部分,煤炭又排在能源矿产之首。我国是煤炭开发和利用的大国。最近几年,随着我国国民经济进入新一轮快速发展时期,能源需求大幅度上升,煤炭产量出现了空前的增长趋势,据不完全统计,仅2004年全国煤炭产量就超过了16亿吨。随着我国人口的持续增长,国民经济的高速发展,人们对矿产资源的需求量也日益增加,开发规模和开采程度将不断扩大,易于开采的浅部矿产资源将逐渐枯竭,向深部开拓开采成为矿山开发的历史必然。新汶、开滦、北票、沈阳、抚顺、长广、鸡西、平顶山、淮南和徐州等老矿区的相当一部分矿井,采深已超过1 000 m,复杂难采和深部开采诱发的安全问题日益突出。按照目前的开采强度,矿井采深正以每年10~20 m的进度增大,预计2010~2020年,我国东部现有生产矿井中的绝大部分都将进入深井开采的范畴,深部开采围岩失稳诱发的冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出及矿井突水等重大工程地质灾害将日益严重,严重影响矿井安全生产和社会经济效益。

前苏联、德国、波兰和南非等国家的矿井开采实践表明,矿山深部工程灾害的发生与采动围岩结构稳定性、应力环境及岩体在高应力下的力学行为有关。我国矿山大量工程灾害事故调查分析结果也表明,开采后围岩移动,围岩应力重新分布,动态支承压力作用于围岩,是诱发围岩结构失稳灾变从而发生一系列工程灾害的根本原因,而采动应力场分布规律研究是解决上述矿山动力灾害问题的理论基础。对大量深部矿山重大工程灾害调研的结果表

明,深部采场与矿山动力灾害相关的岩层运动范围在厚度和层面方向上均超出了一般概念下“老顶”的范围,由于没有有效的监测手段对深部采场岩层三维破裂进行监测,不能合理地确定岩层运动范围。因此,关于岩层运动范围扩展后的深部采场采动应力场分布规律的研究尚未成熟。直到目前,尚未见有将微地震定位技术应用于岩层三维破裂监测并基于监测结果对采动应力场分布规律进行力学分析的专著。因此,无论从科研还是从工程应用的角度,本专著出版都是必要的。

本书重点阐述笔者在博士论文和博士后研究期间进行的基于微地震定位监测和力学分析的深部采场岩层运动及其稳定性研究成果。在攻读博士学位和在北京科技大学从事博士后研究期间,承蒙姜福兴教授指导开始从事岩层运动与控制及微地震定位监测方面的研究,姜老师在百忙之中多次对本书稿的撰写进行指导,在此表示感谢。本书得到国家自然科学基金(40674017)、山东省中青年科学家奖励基金(2008BS08003)、山东交通学院博士基金和科研基金(Z200817)的资助,在此一并表示感谢。此外,书中参考大量文献资料,难以一一列出,在此向原作者表示感谢。

煤矿岩层破裂的微地震监测和采动应力场力学机理研究是地球物理和矿山安全领域的前沿课题,研究有待于进一步深入,书中难免存在不足和错误,在此敬请同行专家、读者批评指正。

作者

2008年12月

目 次

1	绪论	(1)
1.1	问题的提出	(1)
1.2	基于微地震定位监测的深部采场岩层运动及其稳定性 研究现状	(2)
1.3	基于微地震定位监测和力学分析的深部采场岩层运动 及其稳定性研究主要内容	(5)
2	微地震揭示的深部采场覆岩空间结构范围及运动规律 ...	(6)
2.1	微地震定位原理及其在岩层破裂监测中的应用 ...	(6)
2.2	微地震定位监测揭示的深部采场覆岩空间结构及其矿 压分布	(12)
2.3	本章小节	(26)
3	采场覆岩空间结构内厚层坚硬岩层的运动形式及控制	(27)
3.1	采场覆岩空间结构内厚层坚硬岩层运动的力学模型和 力学分析	(27)
3.2	厚层坚硬岩层的运动和破坏形式的力学判断准则	(29)
3.3	厚层坚硬岩层运动方式的判断方法和应用	(35)
3.4	影响综放采场上覆厚层坚硬岩层运动方式的因素	(44)
3.5	本章小节	(46)
4	深部采场覆岩空间结构厚层坚硬岩层动态稳定性力学分析 ...	(48)
4.1	结构稳定理论及分析方法	(49)
4.2	初次来压阶段综放采场上覆厚层坚硬顶板结构的动态	

稳定性判断准则	(50)
4.3 周期来压阶段综放采场上覆厚层坚硬顶板结构的动态 稳定性判断准则	(56)
4.4 本章小节	(73)
5 深部采场覆岩空间结构厚层坚硬岩层动态稳定性判据的应用 方法	(75)
5.1 综放采场需控岩层的范围	(75)
5.2 综放采场顶板结构的动态稳定性判据的应用方法	(77)
5.3 顶板结构动态稳定性的影响因素	(84)
5.4 工程实例分析——巨厚砾岩下孤岛综放面顶板结构的 动态稳定性分析	(89)
5.5 本章小节	(96)
6 基于微地震定位监测的深部采场覆岩空间结构动态支承压力 研究	(100)
6.1 基于微地震监测的深部采场覆岩多层空间结构走向动 态支承压力	(100)
6.2 基于微地震监测的深部采场覆岩多层空间结构倾向动 态支承压力	(110)
6.3 工程实例分析——华丰矿 1410 工作面动态支承压力分 析及冲击地压防治	(122)
6.4 本章小节	(144)
7 主要研究成果及结论	(145)
7.1 采场覆岩空间结构的范围、组成及其内部岩层的运动规律	(145)
7.2 采场覆岩空间结构内厚层坚硬岩层的稳定性	(146)
7.3 采场覆岩空间结构破裂边缘动态支承压力分布规律	(148)
参考文献	(149)

1 绪论

煤矿许多重大灾害的根源是采场周围岩层的破裂与运动。因此,监测和研究岩层破裂机理是预报和控制灾害的基础。本书重点阐述作者在博士论文和博士后研究期间进行的基于微地震定位监测和力学分析的深部采场岩层运动及其稳定性研究成果。

1.1 问题的提出

随着我国国民经济的高速发展,人们对矿产资源的需求量也日益增加,复杂难采和深部开采诱发的安全问题日益突出,在矿山开采与地下工程活动中诱发的冲击地压、岩爆、煤与瓦斯突出、突水等矿山灾害频繁发生。多年来,尽管我国已经开展了大量的矿山动力灾害机理和防治技术的研究,然而,随着采深的增加,岩层运动与矿山压力灾害以更为严酷的面貌呈现在我们面前,至今没有得到很好的认识和控制。

采动岩体运动导致矿山压力重新分布,动态矿山压力作用于围岩并使其状态发生灾变是引起矿山重大工程灾害的根本原因。对大量深部矿山重大工程灾害调研的结果表明,与事故相关的岩层运动与采动应力场的范围,在厚度方向上超出了一般概念下“老顶”(6~8 倍采高)的范围,在层面方向上超出了本工作面上下顺槽附近的范围,而采深和采场周围采动影响区内岩层空间结构的组成和运动是控制采动应力变化的两个主要原因。尽管采动应力场由岩层运动引起,但引起事故的主要根源是应力的突变,即采场顶

板结构的失稳,因此,采场内部顶板的控制应该着眼于岩层的运动,而采场周围灾害的控制应该着眼于采动应力的变化。对深部采场矿压有明显影响的岩层运动范围扩展后,用传统的平面岩层运动理论已难以解释工程灾害事故发生的机理,因此,在工程上用微地震定位监测技术监测岩体在三维空间破裂并利用矿山动力灾害前兆信息对灾害进行控制,在理论上用覆岩空间结构的观点来表述采场内部顶板运动规律和采场周围采动应力场分布,已成为深部矿压研究的新课题。

采场覆岩空间结构包含采场周围岩体的破裂边缘和破裂区内部岩层形成的运动结构两个部分。采场周围岩层的破裂是采场内结构形成的基础,而岩层结构的运动形成了采场岩体破裂边缘附近的采动应力场。根据岩石的应力应变特性,采场周围岩体的破裂边缘必然与岩体的高应力和高应力差区域接近,这是基于覆岩空间结构观点评价深部采场动力灾害发生可能性的理论基础。

微地震是岩石材料变形、裂纹开裂及扩展过程的伴生现象,它与围岩结构的力学行为有着密切的相关性,因而信号中包含了大量的关于围岩受力破坏以及地质缺陷活化过程的有用信息。通过在采动区顶板和底板内布置多组检波器并实时采集微震数据,经过数据处理后,采用震动定位原理,可确定破裂发生的位置,并在三维空间上显示出来,以此推断岩石材料的力学行为,估测岩体结构是否发生破坏。与传统技术相比,微震定位监测具有远距离、动态、三维、实时监测的特点。这种技术是在近几年来计算机和数据采集技术快速发展的基础上产生的,它为研究覆岩空间破裂形态和采动应力场分布提供了新的手段。

1.2 基于微地震定位监测的深部采场岩层运动及其稳定性研究现状

近 10 年来,随着地球物理学的进展,特别是数字化地震监测

技术的应用,为小范围内的、信号较微弱的微地震研究提供了必要的技术基础。

加拿大、澳大利亚、南非、波兰等国家的一些学者采用微地震监测方法,研究采动岩(煤)体的三维破裂和失稳,取得了一定成果。南非约翰内斯堡地区的深井金矿区、加拿大安大略省萨德伯里盆地的金属矿区、美国爱达荷州北部的科达伦多金属矿区和澳大利亚西部的金矿开采区的深井矿山和高应力矿山都普遍采用了微震监测技术来监测深部矿床开采地压问题;澳大利亚联邦科学与工业研究院 CSIRO 从 1992 年开始对采矿诱发的微地震现象进行研究。在对昆士兰州的高登斯通矿以及其他几个矿区的微地震活动进行研究后发现,在采煤面连续推进过程中,其周围岩层的微地震活动表现出一种规律化的模式,表明在采矿过程中,其周围岩层的地质缺陷及其断层等会受到采动的影响而被激活,产生相应的运动,这种结构性的运动会影响到整体响应,以至于在远离工作面几百米的地方也会发生微地震活动。1999 年 8 月至 2000 年 6 月,在 APPIN 地区,对采矿引发的微地震进行了布网监测,步证明微地震可在现场附近进行观测并能对其进行比较精确的定量研究。到目前为止,澳大利亚联邦科学与工业研究院 CISRO 已完成 15 个矿的微震监测试验,积累了大量的现场经验,为微地震监测工作的广泛开展和进一步研究打下了良好基础。微地震监测技术在国外的深井矿山和高地应力矿山的地压安全监测中得到了广泛的应用,已成为深部地压研究和管理的一个基本手段。

李庶林利用微震监测技术对凡口铅锌矿深部矿床地压灾害进行了监测,通过对传感器布置优化分析,绘出传感器布置的一个优化分析结果的震源定位等值线实例图,并采用人工放炮产生的震源对微震监测系统的震源定位性能进行测试,绘出测试结果和系统监测定位图,通过对实际测量和系统监测分析结果的比较,表明监测系统对震源具有较高的定位精度,该套系统还可以对深部采区的大爆破余震进行监测,判断目前采区围岩的稳定程度;唐绍辉提出了以岩体声发射参数为基本评价指标的采场顶板安全分级方

法,从原理和实际测试结果上论述了这些方法的合理性、可靠性与实用性,为金属矿山采场顶板安全管理提出了一种科学简便的新方法;李庶林根据竖井围岩声发射事件率和声传播速度的监测结果,采用分形理论与岩体完整性系数法评价了凡口铅锌矿新副井围岩的稳定性;为了岩体局部预报冒落事故,李俊平在武山铜矿南矿开展了声发射现场试验,并在块体分析的基础上布置了声发射监测孔,结果保证了采矿安全,提高了预报准确率;逢焕东通过对微地震现象的定位和一些参数如频率、能量、分维数等的分析,说明了它们在灾害预报中的作用。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)与我国的兴隆庄煤矿进行了微地震方面的研究与合作(2001年),试验结果证明MS技术可以有效地确定煤矿生产中断裂带与垮落带的区域,它能够揭示采煤工作面周期来压、断裂带与垮落带的边坡角、地下应力场的分布特征等生产规律;北京科技大学姜福兴教授领导的课题组(2005年)在国家自然科学基金国际重大合作项目“煤矿覆岩破裂灾变的机理、监测与控制研究”的支持下,研究了相互关联的岩层运动与灾变理论、微地震监测与岩层控制三个方面的内容。借助于课题组研发的、具有自主知识产权的井下微地震定位监测设备,系统地监测了不同边界条件的采场覆岩运动规律,初步提出了较为系统的覆岩空间结构理论;监测了山东华丰煤矿冲击地压煤层及其解放层开采过程中的岩层破裂过程和二次应力场分布变化的过程,研究了煤矿冲击地压与岩层在三维空间破裂之间的关系,提出了预测冲击地压的新方法,较好地解决了冲击煤层的解放层开采参数确定和高应力区域动态定位预测难题;采用微地震定位监测准确地确定了华丰煤矿和鲁西煤矿两个工作面的导水裂隙带的高度和形状,为防止突水淹井、优化开采设计和提高开采上限提供了可靠的依据,较好地解决了矿井突水通道预测和开采上限确定的难题。

1.3 基于微地震定位监测和力学分析的深部采场岩层运动及其稳定性研究主要内容

本书论述了基于微地震定位监测和力学分析的深部采场岩层运动及其稳定性研究成果,主要内容如下:

1.3.1 确定采场周围岩体的破裂边缘及其采动应力场分布规律

基于微地震定位监测圈定岩层运动范围扩展后的深部采场覆岩多层空间结构的运动范围,确定采场周围岩体的破裂边缘;利用覆岩多层空间结构理论思想,分析覆岩空间结构破裂区内部岩层形成的运动结构的运动规律和采场岩体破裂边缘附近的采动应力场分布规律;建立采场覆岩空间结构内厚层坚硬岩层运动的力学模型并进行力学分析,研究覆岩空间结构内厚层坚硬岩层运动方式的判断准则。

1.3.2 动态稳定性判断准则

利用结构稳定理论,对覆岩空间结构内厚层坚硬岩层动态稳定性进行力学分析,研究初次来压阶段和周期来压阶段覆岩空间结构内厚层坚硬岩层结构的动态稳定性判断准则及其在工程中的应用方法。

1.3.3 为矿山动力灾害的预测预报提供依据和方法

基于微地震定位监测,建立采场覆岩多层空间结构走向和倾向支承压力模型并进行力学分析,研究采场覆岩空间结构破裂边缘由于其内部岩层运动形成的动态支承压力及其控制方法,探讨岩层破裂场和采动应力场的内在规律性,为矿山动力灾害(如冲击地压、矿井突水等)的预测预报提供依据和方法。

2 微地震揭示的深部采场覆岩空间结构范围及运动规律

围岩结构在破坏过程中总是伴随着声发射现象,微地震信号中包含了大量的关于围岩受力破坏以及地质缺陷活化过程的有用信息,可以此推断岩石材料的力学行为,预测围岩结构是否发生破坏。因此,以微地震监测为基础,结合其他学科最新科技成果,对岩土工程灾害进行充分的认识、了解,特别是定量监测和预测,是一个重要的研究趋势。对于岩土工程,由于围岩破裂的分布区域相对于大地地震区域而言很小,大地地震定位的方法不满足岩土工程小尺度条件的定位精度要求,因此应采用适合于岩土工程小尺度条件的岩石破裂定位方法。本章利用高精度微地震定位技术监测采场上覆岩层的三维破裂,确定采场覆岩空间结构的范围、组成,建立研究覆岩空间结构内岩层的运动规律和覆岩空间结构周围采动应力场分布规律的空间模型

2.1 微地震定位原理及其在岩层破裂监测中的应用

微地震(Microseismic)现象的发生与岩体破裂有着密切的关系。通常情况下,微地震越活跃的区域,岩体发生破裂的可能性也越大。研究微地震,目的是以此为手段,来判断介质的内在状况,如微地震源的位置、性质和发生规模。微地震源或声发射的定位方法有很多,对于煤矿开采中的微地震定位,主要应用二维、三维

的时差定位。时差定位是经过对各个 MS 信号到达时间差、波速和检波器间距等参数的测量及一定的算法运算,来确定 MS 源定位。在时差定位过程中,确定到达波的物理性质的方法是到达时差的理论极限。即所检测到的波的到达时差如果超过了 d/v_s (d 、 v_s 分别是检波器距离和横波波速)且并非外来干扰波,那么初至波一定是纵波,后至波一定是横波。由于在岩体中 P 波的传播速度较 S 波快,其初至时间易于识别,所以常采用 P 波进行微地震定位。

在岩体发生微震现象时,我们所知道的是各个传感器的坐标和它所接收到信号的时刻(各个检波器接受信号的到时),不知道的是微震发生的位置和时刻。设微地震的震源位置的空间坐标为 (x, y, z) ,微地震发生时间为 t , (a_i, b_i, c_i) 为各微震监测站(检波器)的空间坐标, t_i 为传感器监测到微震信号的 P 波到达时间,由于 P 波的传播速度很快,考虑到煤矿长壁工作面一般的尺寸为走向长 1 000~2 000 m,倾向长 150~250 m,采高 2~8 m,采动引起的应力重新分布的范围在采动边界附近 50~150 m,煤矿开采所监测的区域为方圆几百米的小区域,认为岩体破裂产生的弹性波传播过程中受岩层层面、密度等的影响较小,因此可假定 P 波以常速度 V 传播,则 MS 源与 m 个检波器的走时关系为:

$$\sqrt{(a_i-x)^2+(b_i-y)^2+(c_i-z)^2}-v(t_i-t)=0 \quad (2.1)$$

在上述方程组中只有四个未知量 x, y, z, t , 因此只需取其中的四个方程组成一个方程组即可求解未知量。在微地震监测系统中,只要有四个检波器接受到有效微地震信号,输入各检波器的空间坐标和微震波的到时,对上述走时方程求解,就可以解出微震源的空间坐标和微震发生的时间如图 2.1 所示。其中,各检波器的空间坐标值已在检波器布置时确定,微震波的到时可由检波器量测到,并通过一定方法读取。

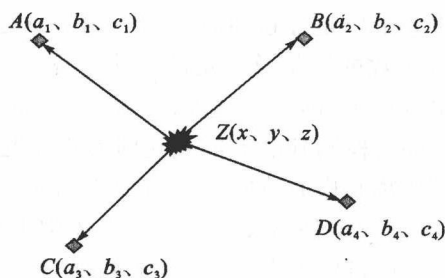


图 2.1 MS 定位示意图

图中 A、B、C、D 为接受到有效信号的检波器, (a_1, b_1, c_1) 、 (a_2, b_2, c_2) 、 (a_3, b_3, c_3) 、 (a_4, b_4, c_4) 分别 A、B、C、D 四个检波器的空间位置, t_1, t_2, t_3, t_4 分别为微震波经过岩层到达各检波器的时间(到时), Z 为震源, t 为破裂发生的时间, v 为微震波在岩层中的传播速度。

其走时方程为:

$$\begin{cases} f_1(x) = (a_1 - x_1)^2 + (b_1 - x_2)^2 + (c_1 - x_3)^2 - v^2(t_1 - x_4)^2 = 0, \\ f_2(x) = (a_2 - x_1)^2 + (b_2 - x_2)^2 + (c_2 - x_3)^2 - v^2(t_2 - x_4)^2 = 0, \\ f_3(x) = (a_3 - x_1)^2 + (b_3 - x_2)^2 + (c_3 - x_3)^2 - v^2(t_3 - x_4)^2 = 0, \\ f_4(x) = (a_4 - x_1)^2 + (b_4 - x_2)^2 + (c_4 - x_3)^2 - v^2(t_4 - x_4)^2 = 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

走时方程为非线性方程组, 可利用 Matlab 优化工具箱中的命令 Fsolve 进行求解, 并可基于 Matlab 编制定位软件。例如, 图 2.2 为华丰矿 2005 年 01 月 20 日 12 点 39 分 49 秒 A21 微地震事件的定位结果, 对照采区平面图、剖面图, 定位结果在 $x=3\ 200 \sim 3\ 230$, $y=4\ 970 \sim 5\ 100$ 之间此时四层煤工作面的位置在走向 $y=4\ 845$ 附近, 破裂区域离工作面的距离较远, 且破裂区域内有不同走向的多条断层通过, 可以断定破裂的起因应为断层的活化。

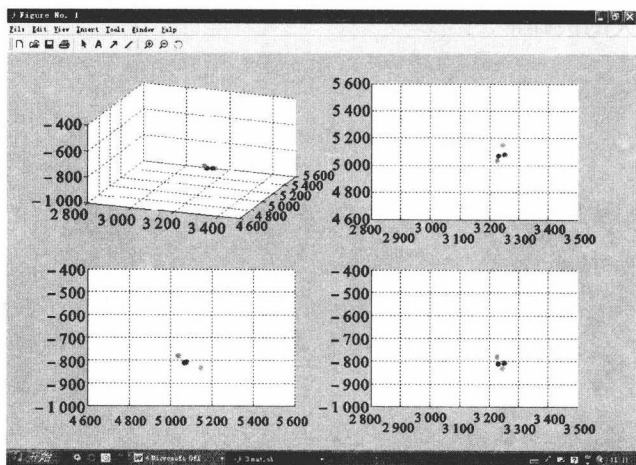


图 2.2 微地震定位结果图示

岩层的破裂是一渐进的过程,微地震信号中包含着岩层破裂运动的信息,微地震定位结果揭示的岩层破裂应是一个破裂区域。将一定时间段内的定位结果展绘在采区平面图和剖面图上,可以显示在一定时间段内随工作面的推进岩层的破裂情况。图 2.3 为华丰矿 2005 年 1 月 20 日的微地震定位结果,四层煤工作面在 $y=4850$ 附近,岩层的破裂总体上分为三个区域,一个区域是工作面后方的破裂点,在 $y=4800$ 到 $y=4900$ 之间,在 1 月 20 日全天,此区域内破裂点无变化,说明此区域内岩层的破裂趋于稳定;一个区域约在 $y=4930$ 到 $y=4970$ 之间,此区域的破裂距工作面的距离为 $80\sim 100$ m,应为工作面前方的岩层断裂产生的,随工作面的推进,此区域内的岩层破裂点的数量增加,说明岩层的破裂程度加剧;其余的破裂点为第三区域,此区域内的破裂点集中在断层破碎带附近,主要集中在

$y=5000$ 至 $y=5100$ 之间,

断层带活化的距离在工作面前方近 300 m,断层带活化引起的岩层破裂,开始发生在断层破碎带之间的较完整的岩层范围内,随后,随着破裂的加剧,岩层的破裂发展到断层破碎带范围内,形成

范围更大的破碎带。

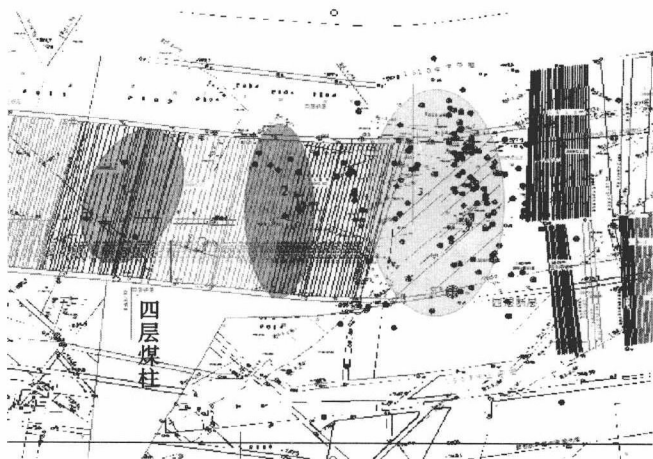


图 2.3 华丰矿 2005 年 1 月 20 日微地震定位结果

图 2.4 为区域 2 华丰矿 2005 年 1 月 20 日工作面前方岩层断裂破裂点的平面图和剖面图。由图可见,破裂主要发生在四层煤工作面上方的 9.7 m 厚中砂岩中和靠近四层煤底板的 4.2 m 厚中砂岩中,煤层上方的 9.7 m 厚中砂岩在其老顶的范围内,因此,可以推断岩层的运动是由于煤层的开采,引起老顶坚硬岩层的断裂,老顶坚硬岩层断裂的同时引起煤层底板内坚硬岩层的断裂;随着煤层的开采,煤层顶、地板坚硬岩层的运动加剧,发生在四层煤工作面上方的 9.5 m 厚粉砂岩中的破裂是由于老顶岩梁断裂回转下沉,引起其上部的 9.5 m 厚粉砂岩随之一起运动。

综上所述,此次岩层运动的起因是由于煤层开采后顶底板中坚硬岩层的断裂,工作面上方岩层的运动范围为 35 m 左右,工作面下方的岩层运动范围为 8 m 左右。由上述对岩层运动过程的分析可知,根据微地震定位结果可以推断随开采的推进所引起的岩体运动发生的位置、时间、规模及发展方向,从而展示在一段时间内岩层的破裂序列。