

# 崩落法上覆厚大岩层崩落及破裂特性综合研究

李庶林<sup>1</sup>, 胡静云<sup>2</sup>, 周爱民<sup>2</sup>, 林峰<sup>2</sup>, 余正方<sup>3</sup>

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;  
3. 玉溪大红山矿业有限公司, 云南 玉溪 653100)

**摘要:** 大红山铁矿采用无底柱分段崩落法开采, 形成了规模巨大的采动区域, 上覆岩层厚度达 627~750 m。为了掌握上覆岩层中崩落、开裂与高应力集中区的范围及发展趋势, 防止突发性的规模动力地压灾害的发生, 矿山采取多通道微震监测技术、巷道观测和钻孔探测相结合的方法, 对上覆岩层进行全面监测和研究。通过多通道微震监测技术对上覆岩体中高应力集中区破裂源进行高精度定位, 确定高应力集中区及其变化过程, 并据此推断开裂带的外边界; 同时基于双力偶点源理论, 分析得到震源破裂类型为以体积增加的张拉型为主、压剪切破坏与混合破坏为辅。在专门的巷道中, 通过人工直接观察, 确定崩落边界、开裂带的内、外边界; 地表深钻孔探测作为辅助性手段, 用来确定(验证)开裂带的外边界。将这 3 种技术手段结合起来对 2011~2013 年间上覆岩层不同时期的崩落带、开裂带与高应力集中区进行综合监测, 得到不同时期高应力区、开裂带和崩落带的发展过程。研究表明, 上覆岩层中崩落与开裂发展过程是一个缓慢渐进的过程, 不会产生大规模的突变型崩塌冲击地压灾害。本文研究成果对矿山的安全生产具有重要的指导作用。

**关键词:** 采矿工程; 上覆岩层; 微震监测; 钻孔探测; 巷道观测; 崩落带; 高应力集中区

**中图分类号:** TD 87

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2016)09 - 1729 - 11

## Comprehensive research on character of collapse and fracture of thick and large overburden rock in cave mining

LI Shulin<sup>1</sup>, HU Jingyun<sup>2</sup>, ZHOU Aimin<sup>2</sup>, LIN Feng<sup>2</sup>, YU Zhengfang<sup>3</sup>

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., National Metal Mining Engineering and Technology Research Center, Changsha, Hunan 410012, China;  
3. Yuxi Dahongshan Mining Co., Ltd., Yuxi, Yunnan 653100, China)

**Abstract:** A bulky mining-out area was formed at Dahongshan iron mine with sublevel caving method. The thickness of overburden is 627 to 750 meter. In order to understand the development of collapse area, fractured zone and high stress concentration zone in overburden so as to prevent the sudden large-scale and dynamic ground pressure disasters, micro-seismic monitoring, tunnel observation and borehole detection methods were used to carry out the comprehensive monitoring and research. Base on the precise location of fracture source with multi-channel micro-seismic monitoring technology, high-stress concentration zone and its developing trend were determined, and then the outer boundary was deduced. At same time, the analysis on fracture types of fracture source with double couples model showed that the tension fracture with volume-increasing accounted for majority of all sources, while the shear failure and mixed failure accounted for minority. The boundary of collapse area,

**收稿日期:** 2015 - 12 - 08; **修回日期:** 2016 - 03 - 16

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2013BAB02B06); 国家科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2013EG21024)

Supported by the National Science and Technology Project(Grant No. 2013BAB02B06) and National Ministry of Science and Technology Special Fund Project (Grant No. 2013EG21024)

**作者简介:** 李庶林(1963 - ), 男, 2000 年于东北大学工程力学专业获博士学位, 现任教授, 主要从事岩土工程与地压监测方面的教学与研究工作。  
E-mail: shulin.li@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1686

external and internal boundaries of fractured area were determined directly through the artificial observation in special tunnels. The borehole detection as the auxiliary method was used to determine and validate the external boundary of fractured zone. A comprehensive monitoring and analysis were carried out to obtain the caving zone, cracking zone and high stress concentration area in overburden in different periods from 2011 to 2013. The development of high stress zone, cracking zone and caving zone in different periods were also obtained. The studies showed that the caving and cracking processes in overburden were slow and gradual. The sudden and dynamic large-scale collapse disaster would not occur. The conclusion of this paper played an important role in guiding the safe production of the mine.

**Key words:** mining engineering; overburden; micro-seismic monitoring; borehole detection; tunnel observation; collapse area; high stress concentration zone

## 1 引言

大红山铁矿位于云南省玉溪市境内,是国内采用无底柱分段崩落法开采中段高度、分段高度与进路间距最大的矿山。该矿上覆岩层厚度大、岩体完整性较好、可崩性较差。经过几年的大规模开采,可能在上覆岩层中形成规模较大的空区与悬顶,上覆岩层的崩落与破裂动态演化过程和井下采场是否受冲击损害,是矿山生产面临的严重安全隐患。

采用崩落法开采的金属矿山面临的首要地压问题是上覆岩层的崩落特性的确定问题,也就是常说的上覆岩层在崩落过程中的“三带”问题<sup>[1]</sup>。相比煤矿,由于金属矿山在矿体赋存条件、上覆岩层地质条件、采矿方法等方面的复杂性,以煤矿为研究来源的“三带”理论并不完全适合于金属矿山,金属矿山的“三带”问题一直是一个没有得到很好解决的难题。在金属矿山的“三带”研究中,实际应用中较可靠的方法仍然是现场直接探测和观测方法,数值计算法、室内模型试验法仅仅是作为理论上的参考依据。但仅仅依靠现场钻探了解崩落范围,其成本很高,且现场观测还很不安全。为了节约成本、提高安全性,国外有将钻探与微震监测相结合的方法来确定崩落法开采矿山上覆岩层崩落特性的研究案例。S. N. Glazer 和 N. Hepworth<sup>[2]</sup>在南非的帕拉波拉矿业公司铜矿,采用多通道微震监测技术与钻孔探测相结合的方法,该铜矿是露采转地采,地采采用无底柱分段崩落法,通过在露采边坡向下施工的 8 个垂直钻孔证实了微震定位事件集聚区(高应力集中区)的内边界为开裂带的外边界,得到了高应力集中区内边界与崩落带边界的距离(即开裂带的厚度)为 55~83 m。美国的 M. S. Oudenhoven 等<sup>[3]</sup>在科罗拉多州的分段崩落法的 Climax 钼矿,研究了崩落回采时微震事件的空间聚集,探索了崩落

采空区上覆岩层中的微震分布情况。P. J. Joubert<sup>[4]</sup>在英国 Ridgeway 深井崩落法矿山,采用水压致裂法预先处理上覆岩层,通过微震监测,对水压致裂法产生的裂缝区域的产状、长度与时间进行监测分析。J. M. Reyes-Montes 等<sup>[5]</sup>对采用崩落法开采的深井矿山采用微震监测解释了上覆岩层诱发裂隙网络的性质与几何结构,并且微震监测结果与采用人工合成岩体的数值模拟测试结果一致。

在国内金属矿山,对上覆岩层“三带”研究的现场监测方法基本上是采用专门巷道观测、钻孔探测等方法,如杜翠凤等<sup>[6]</sup>采用地表钻孔导电回路法,对程潮铁矿无底柱分段崩落法采空区上覆岩层的崩落进行过实测研究。张同康<sup>[7]</sup>在大冶尖林山铁矿,采用了地震监测方法对无底柱分段崩落法采空区上覆岩层的岩体破裂活动进行了监测,并结合地表岩移沉降观测,探讨了上覆岩层的微地震破裂特性和地表沉降之间的关系。迄今为止,国内金属矿山还没有将钻孔探测与多通道微震监测方法相结合来分析上覆岩层的崩落、开裂和变形范围,及其发展趋势的案例报道。国内煤矿有对煤层上覆岩层的“三带”采用微震监测方面的研究,如孔令海等<sup>[8]</sup>针对煤矿长壁工作面上覆岩层断裂造成工作面来压进行了微震监测,研究了长壁工作面见方期间微震事件动态信息与岩层运动及矿压显现间的关系,揭示了大量微震事件发生和工作面围岩异常矿压的物理力学机制。何江等<sup>[9]</sup>利用微震监测技术对煤矿综放面覆岩运动的矿震效应进行了监测。但这些研究不适合于金属矿山。

本研究针对大红山铁矿上覆岩层厚大、难以自然崩落的特点,将多通道微震监测、地表深钻孔探测和巷道观测相结合,探测上覆岩层的崩落、开裂与高应力集中区的范围,以及它们的发展趋势,为上覆岩层的地压管理、防止突发性的地压灾害的发生提供技术保障。

## 2 崩落法上覆岩层地压问题

### 2.1 矿体开采工程技术条件

无底柱分段崩落法的开采对象为深部铁矿 II<sub>1</sub> 矿体(组)。矿体东西长 1 969 m, 南北宽 440~640 m, 埋深 362~988 m, 矿体呈一轴向近乎东西向延伸的断块向斜产出, 南以 F1 断层为界, 北至 F2 断层。受大红山向斜的夹持, 总体东高西低、中部厚边部薄、南北翘起, 似船型, 产状与围岩基本一致, 倾伏方向南西, 向斜轴部产状平缓, 南翼倾角 40°, 北翼倾角 15°左右, 南北两翼平均 18°, 矿体厚度 2.6~222.0 m, 平均 73 m。

II<sub>1</sub> 矿组产于红山组浅色变钠质熔岩中, 顶板主要为浅色块状含磁铁变钠质熔岩、底板主要为绿泥石化变钠质熔岩。矿体顶底板围岩除少量绿泥片岩、角闪黑云片岩和接触带部位的蚀变辉长辉绿岩稳固性较差外, 一般稳固性好。从矿岩物理力学性质测定结果看, 岩石多属坚硬、半坚硬岩类, 矿石多属半坚硬类型, 矿岩抗压强度较高, 稳固性较好, 工程地质条件的复杂程度属于中等类型。

矿区处于曼岗河与肥味河之间的三角区, 区内地势陡峻, 当地最低侵蚀基准面为两河汇合处。地面海拔标高 670~1 800 m, 相对高差较大, 地形利于地表水排泄, 不利于地下水的补给。大红山群裂隙含水层富水性弱, 矿区水文地质条件属以裂隙含水层充水为主的简单类型。

### 2.2 崩落法开采形成的特大采动区

设计规模为 400 万 t/a, 于 2006 年底投产。一期工程回采 400~705 m 标高范围的 II<sub>1</sub> 矿体(组), 采用胶带斜井-辅助斜坡道及盲竖井开拓, 采用阶段高度 100 m、结构参数为 20 m×20 m(分段高×进路间距)、部分组合分段高度为 30 m 的高阶段大间距无底柱分段崩落法开采, 首采分段采用强制落顶形成覆盖层。一期工程划分为主采区、中 I 采区、中 II 采区与南翼采区进行开采, 主采区设计开采范围为+400~+510 m, 中 I 采区设计开采范围为+500~+705 m, 中 II 采区设计开采范围为+500~+620 m, 上述采区的空间相互关系如图 1 所示。由于地表标高范围为+1 137~+1 261 m, 主采区上覆岩层厚度为 627~750 m, 为典型的厚大覆盖岩层。

截止到 2013 年底, 地下 400 万 t/a 一期工程崩落法共崩落矿岩约 3 574 万 t, 采出矿量约 2 674 万 t, 形成了规模巨大的深部主采动区、中 I 采动区与中 II 采动区, 主采区采动体积约为 579 万 m<sup>3</sup>、采高为

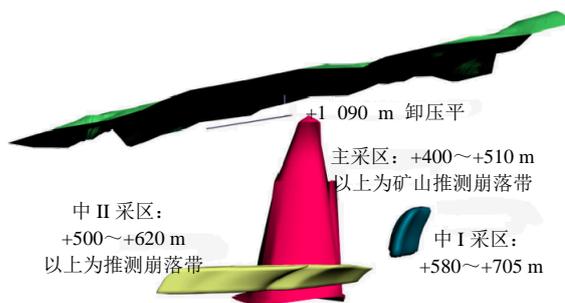
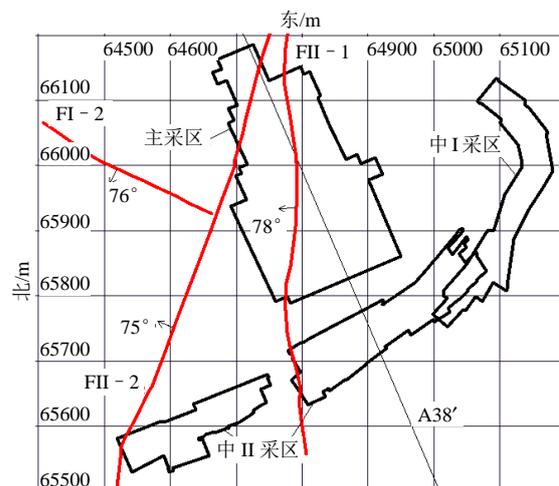


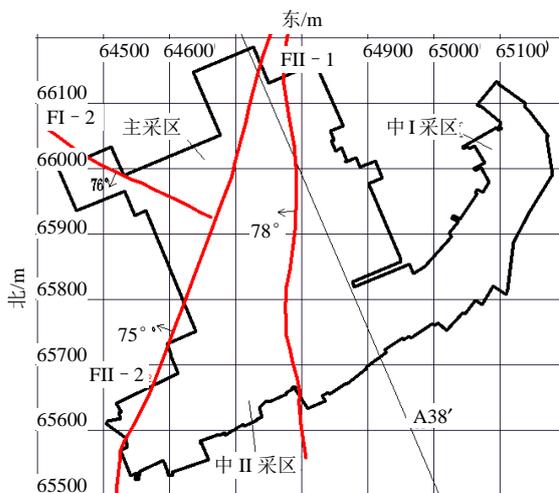
图 1 三大采区空间关系图(2011 年底)

Fig.1 Spatial relationship of three gobs(front view, at the end of 2011)

110 m, 中 II 采区(包括南翼采区)采动体积约为 298 万 m<sup>3</sup>、采高为 160 m, 中 I 采区采动体积约为 144 万 m<sup>3</sup>、采高为 205 m, 三大采动区域连通后最大水平采动面积约为 12.6 万 m<sup>2</sup>。2011 年底未连通前 3 个采动区域的空间关系见图 1, 2009~2013 年崩落法采动区域的扩展过程如图 2 所示。



(a) 2009 年底



(b) 2013 年底

图 2 崩落法特大采动区域的扩展过程

Fig.2 Expansion process of mining area of 4 million tons a year project

### 2.3 上覆厚大岩层地压问题

按照无底柱分段崩落法顶板管理方法，需要上覆岩层及时地自然冒落充填采空区，使覆盖层的厚度满足安全生产的需要，同时上覆岩层也能释放集聚的能量，降低上覆岩层由于集聚过多能量而发生大规模猛烈垮塌、对井下产生强烈冲击危害的概率。

上覆岩层中有规模较大的 F1 与 F2 断层，2 个断层是 II<sub>1</sub> 矿体(组)南北方向的自然分界线，其中 F1 断层位于大红山向斜南侧，走向 NWW 或近 EW，倾向 S 或 SWW，倾角 60°~85°，断距大于 500 m，区内控制长 1.2 km；F2 断层位于大红山向斜北侧，走向近 EW，倾向 S，倾角 80°左右，延长 1.1 km 以上，该断层为浅部铁矿与深部铁矿的自然分界，如图 3 所示。另外，在采区内还发育有 2 条规模较大的次级断层 F<sub>II-1</sub> 与 F<sub>II-2</sub>，其产状、空间分布及与 II<sub>1</sub> 矿体的空间关系如图 2 和 3 所示。

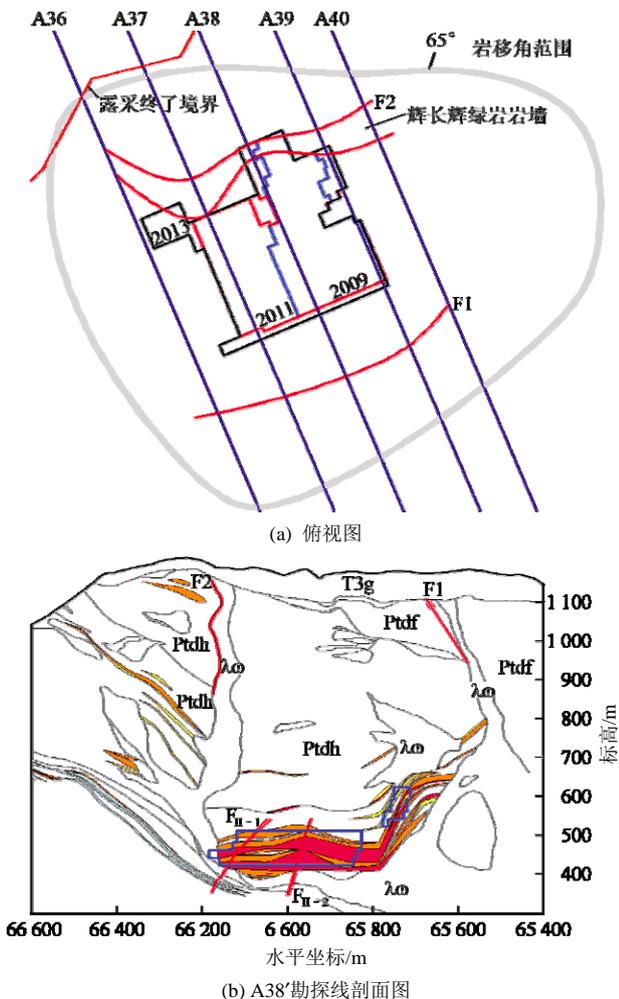


图 3 上覆岩层分布及断层构造

Fig.3 Rock stratum and fault in overburden

上覆岩层岩性以变钠质熔岩和辉长辉绿岩为主，岩块单轴抗压强度分别为 121 与 91 MPa，其中辉长辉绿岩以岩墙的形式沿 F1 与 F2 断层贯入，变

钠质熔岩岩层整体呈块状。地质勘探钻孔钻取的岩芯的平均 RQD 值见表 1，可知上覆岩层 RQD 值在 62.4~94.2，节理、裂隙不太发育，岩体完整性较好，可崩性指标为 8~10，可崩性较差。

表 1 上覆岩层岩体 RQD 值

Table 1 RQD values of rock mass in overburden

勘探线编号	勘探钻孔平均 RQD 值
A36	84.6
A37	94.2
A38	69.0
A39	73.0
A40	62.4

由上述可见，上覆岩层厚大、岩体质量较好、崩落法开采水平面积大，这些特点导致了大红山铁矿崩落法开采的影响范围大，多年来上覆厚大岩层是否及时自然冒落、是否形成了未知高度的巨大悬顶和空区以及上覆岩层中崩落带的动态发展趋势，一直是矿山的重大安全隐患。

## 3 监(观)测方法简介

### 3.1 多通道微震监测方法简介

2012 年 3 月，大红山铁矿建立了 60 通道全数字型微震监测系统，其中依托上覆岩层+1 090 m 地压观测巷道布置了 18 个通道，在主采区与中部采区内布置了 42 个通道。上覆岩层传感器布置在+998~+1 115 m 高程范围内，限于现场工程条件，微震传感器仅布置在上覆岩层西北区域的 1 090 m 巷道周围，包括在 1 090 m 巷道内和该巷道内向下施工的 102 m 垂直深孔内布置传感器。18 个通道包括 15 个单轴加速度型传感器和一个三轴加速度型传感器，上覆岩层中 18 个通道布置见图 4 所示。微震监测系统的详细介绍见徐 炜等<sup>[10-11]</sup>的研究。

上覆岩层中高应力集中区内的岩体承受的应力超过岩石的抗剪或抗拉强度时，就会发生微破裂，微破裂源可由微震监测系统监测并高精度空间定位，因此微震定位事件空间集聚区域表征了上覆岩层高应力集中区域。微震监测将充分利用其对岩体破裂源的空间定位功能，确定上覆岩层中高应力区的范围，并分析岩体的破裂类型，分析上覆岩层的受力特征。

### 3.2 钻孔探测简介

为了探测上覆岩层裂隙带发展的高度与范围，先后 2 次在地表与+1 070 m 水平观测巷道内共施工

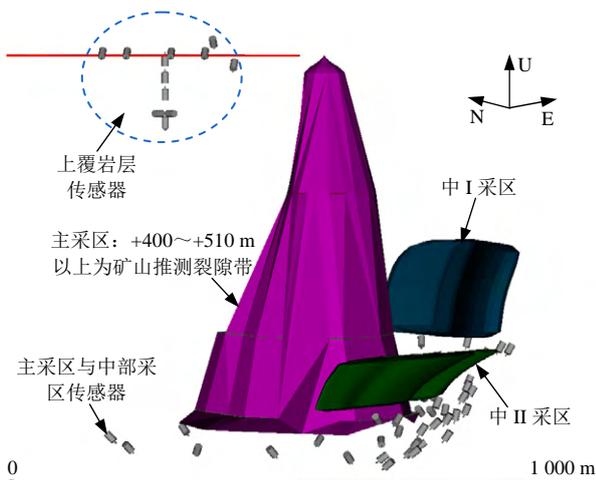


图 4 60 通道传感器布置图

Fig.4 Layout of sixty sensors for micro-seismic monitoring

了 6 条钻孔，即从 2009 年 11 月开始至 2010 年 4 月底，在地表施工了 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>共 4 个垂直钻孔，2011 年 12 月在地表与 +1 070 m 水平观测巷道内施工了 5<sup>#</sup>垂直深孔与 6<sup>#</sup>倾斜孔。6 个钻孔的相关信息如表 2 和图 5 所示。

表 2 探测钻孔参数表

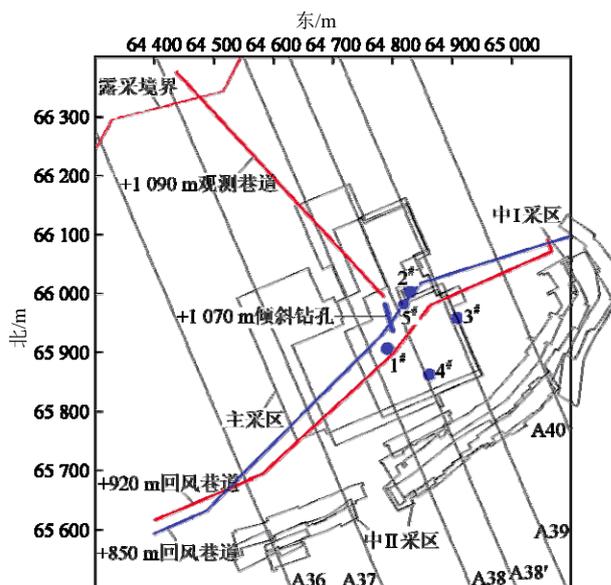
Table 2 Parameters of boreholes for detection

钻孔编号	竣工时间	孔深/m	孔底标高/m	孔径/mm	备注
1 <sup>#</sup>	201001	230	+940		
2 <sup>#</sup>	201003	233	+952		
3 <sup>#</sup>	201001	240	+930	130	垂直深孔
4 <sup>#</sup>	201003	260	+916		
5 <sup>#</sup>	201201	150	+1 032		
6 <sup>#</sup>	201201	50	+1 050	110	倾斜孔

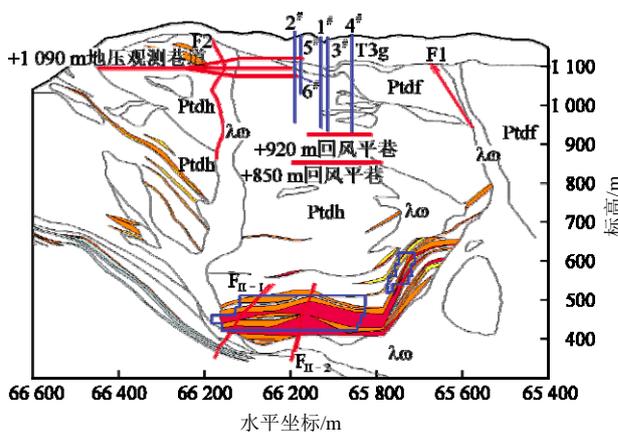
钻孔探测采用了卡钻、回风法和导电回路法，对裂隙带的范围和发展趋势进行探测。回风和卡钻法是根据钻孔的卡钻与冒热气状况人工确定可能的裂隙发展高度，当钻孔施工遇到裂隙带外边界时，会出现卡钻等现象，导致继续钻进困难，或出现冒热气现象；导电回路法是根据导电回路的断电高度确定裂隙发展的高度，当导电回路电线所在岩体产生新节理、裂隙等较大的变形、开裂或错动时，就会导致导电电线被折断。钻探法监测的是裂隙带的外边界。

### 3.3 巷道观测简介

+850 m 与 +920 m 水平回风巷道位于主采区的正上方，近似平行地从主采区的西南方向布置到东北方向，它们的空间关系如图 5 所示。+1 090 m 地压观测兼泄压巷道位于主采区上覆岩层的西北区域，近似西北向布置，其空间布置位置见图 5。在



(a) 俯视图



(b) A38 勘探线剖面图

图 5 上覆岩层观测巷道与探测钻孔位置图

Fig.5 Layout of tunnels and boreholes in overburden

+1 090 m 巷道中部位置分别向上与向下掘进了 +1 115 m 分层巷道与 +1 070 m 分层巷道，其空间布置位置见图 5，其中 1 090 m 分层巷道水平长度为 516 m，1 115 m 分层巷道水平长度为 351 m，1 070 m 分层巷道水平长度为 331 m。

上述 5 条巷道是进行人工勘察的重要巷道，主要观察上覆岩层的崩落边界、开裂区范围和高应力冒顶片帮区，以及它们的发展趋势，是掌握上覆岩层“三带”特性的最有效和最可靠的观测方法。

## 4 监测结果分析

### 4.1 分析方法

在上述监(观)测与探测方法中，微震监测用来确定高应力集中区的内外边界；钻孔用来探测确定

裂隙带的外边界；水平巷道用来观测崩落边界、裂隙带内、外边界与高应力集中区内外边界。

### 4.2 巷道观测结果分析

2009年5月发现+850 m回风巷道发生垮塌，4个月之后又于+920 m回风巷道发现垮塌，巷道垮塌的照片见图6。据此推测2009年5月上覆岩层裂隙带最大标高发展到+880 m，2009年9月裂隙带最大标高发展到+920 m，2个时期裂隙带范围如图7所示。



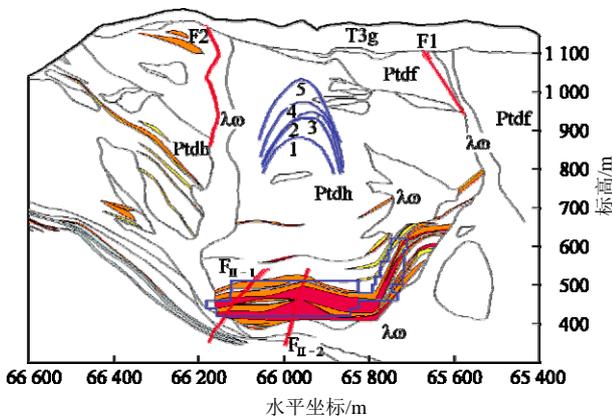
(a) +920 m 回风巷道垮塌



(b) +1090 m 巷道开裂错动

图6 观测巷道中地压显现照片

Fig.6 Appearances of ground pressure in tunnels



1—200905；2—200909；3—201001；4—201009；5—201112

图7 巷道与钻孔探测的裂隙带的扩展过程

Fig.7 Expansion process of fractured zone using tunnel observation and borehole detection

从2012年9月份开始，+1090 m平巷内距离巷道口约370 m处首次观察到巷道开裂错动的地压显现现象。该巷道开裂错动处位于辉长辉绿岩岩墙(F2断层)与变钠质熔岩的交界处，属于构造弱面。从2012年9月至2013年底，该处巷道开裂错动的沉降量越来越大，从0 mm发展到1500 mm，巷道开裂错动的照片见图6。同时，+1090 m巷道内从距巷道口约180 m的地方到约370 m的这一段内，从里到外先后观测到了数十条开裂缝与大量片帮和冒落点，裂缝的走向基本上与巷道走向垂直，并倾向于塌陷区内。

### 4.3 钻孔探测结果分析

在钻孔探测中，3#钻孔钻进到孔底+930 m标高附近时，由于岩芯破碎导致卡钻而无法继续钻进；1#钻孔钻进到+940 m标高附近时，在孔口有热气流涌出，且已钻通；4#钻孔钻进到+916 m标高附近时，同样由于岩芯破碎导致卡钻而无法继续钻进；2#孔钻进到+952 m标高附近时，也是由于岩芯破碎导致卡钻而无法继续钻进，后于2010年9月22日在2#孔口观察到热气流涌出。1#~4#钻孔施工结束后，在1#、3#与4#钻孔内安装了导电回路监测装置，开展了导电回路监测上覆岩层裂隙带与冒落带的研究工作。

5#钻孔钻进到+1032 m标高时，在所取岩芯中，靠近孔底段较破碎、裂隙较发育，卡钻明显，钻进很困难。2011年12月在+1070 m分层巷道的正前方末端施工了一个向下的6#倾斜孔，该孔掘进到+1050 m标高时，因岩体破碎无法继续向前施工，且在孔口观察到有热气流涌出。

根据1#与3#钻孔在2010年1月份的探测结果可知，裂隙带发展到了+940 m标高；到2010年9月份，2#钻孔孔口有热气流涌出，同时，结合1#与3#钻孔的导电回路监测结果可知，其裂隙带标高发展到+950 m水平附近；到2011年底，根据5#与6#钻孔的探测情况，上覆岩层裂隙带已经发展到+1032~+1050 m标高。

将各个时期钻孔探测的结果与+850，+920 m巷道的地压观测结果进行综合分析，得到了2010年1月、2010年9月与2011年12月3个时期上覆岩层裂隙带的高度与范围，如图7所示。

### 4.4 微震监测结果分析

截止到2013年12月底，在辨识与排除爆破等噪音事件后，上覆岩层中共监测到微震定位事件369个，不同时期内微震定位事件的空间分布如图8所示。总的来看，微震定位事件空间聚集区域不断

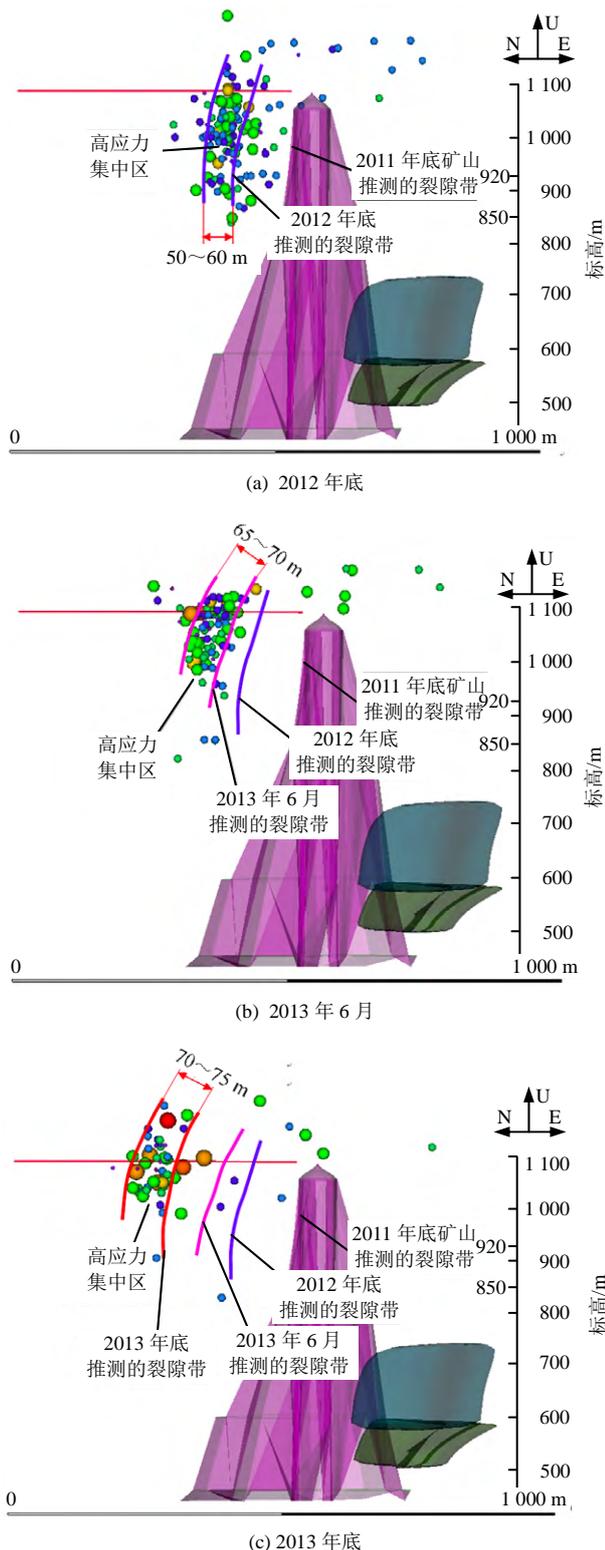


图 8 上覆岩层中高应力集中区的扩展过程

Fig.8 Expansion process of high stress concentration zone using micro-seismic monitoring in overburden

向上覆岩层的上部与外部区域移动。

(1) 三维定位结果分析

基于微震监测事件的震源空间定位结果，对不同时期高应力集中区的内外边界与裂隙带的外边界

进行了确定：从 2011 年底至 2013 年底，随着井下崩落法采动区域的扩大，裂隙带范围随着扩大，高应力集中区也随之扩大，高应力集中区的宽度从 55~60 m 增加到 70~75 m，表明高应力集中区的范围随裂隙带的扩大而增加。微震定位事件聚集区域与在 1 090 m 地压观测巷道内观测到的岩体开裂范围与发展趋势是吻合的。

(2) 岩体破裂机制分析

为了深入分析上覆岩层的破裂特征，揭示岩体破裂机制，基于双力偶点源模型理论，运用基于 P 波初动的震源机制求解法，对上覆岩层从 2012 年 3 月至 2013 年底不同时期微震定位事件，计算其震源矩张量特征、分析岩体破裂类型。

现以 2012 年 8 月 11 日 10: 24: 00.721 时刻的一个微震定位事件为例，该微震事件波形共被 7 个微震传感器有效拾取，其矩震级大小为 -1.8 级，近震震级为 -3.8 级，波形见图 9 所示。

采用网格尝试 P 波初动法，在整个解的可能空间按 5°×5°×5° 步长进行全面搜索尝试，该微震定位事件求解的震源解及矩张量结果见表 3。

在矿山微震与岩石声发射研究中广泛使用的矩张量分解法由 L. Knopoff 和 M. J. Randall<sup>[12]</sup>提出，该法将矩张量分解为各向同性部分、补偿线性矢量偶极子部分与双力偶部分，分别对应震源的膨胀作用、张拉位错作用与剪切位错作用。根据 M. Ohstu<sup>[13]</sup>分解类型，微震事件矩张量可视为各向同性分量、补偿性矢量偶极分量与双力偶分量三分量相互作用的结果，各项主应力为对应方向上三分量的代数和，3 个应力主向上的各分量组成情况如图 10 所示。

根据 M. Ohstu<sup>[13]</sup>提出的优势判别原则，按照剪切分量所占的矩张量的比重来进行破裂类型判断，各向同性分量可以表征震源在该矩张量作用下的体积变化，即震源前后体积变化情况，其判别准则具体如下：

$$DC\% = \frac{|M^{DC}|}{|M^{DC}| + |M^{CLVD}| + |M^{ISO}|} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} DC\% \geq 60\% & \text{ (剪切破裂)} \\ DC\% \leq 60\% & \text{ (张拉破裂)} \\ 40\% < DC\% < 60\% & \text{ (混合破裂)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M^{ISO} > 0 & \text{ (体积变大)} \\ M^{ISO} = 0 & \text{ (体积不变)} \\ M^{ISO} < 0 & \text{ (体积变小)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $M^{ISO}$ ， $M^{CLVD}$  和  $M^{DC}$  分别为体积变化分量、补偿分量和剪切分量； $DC\%$  为剪切分量比重。

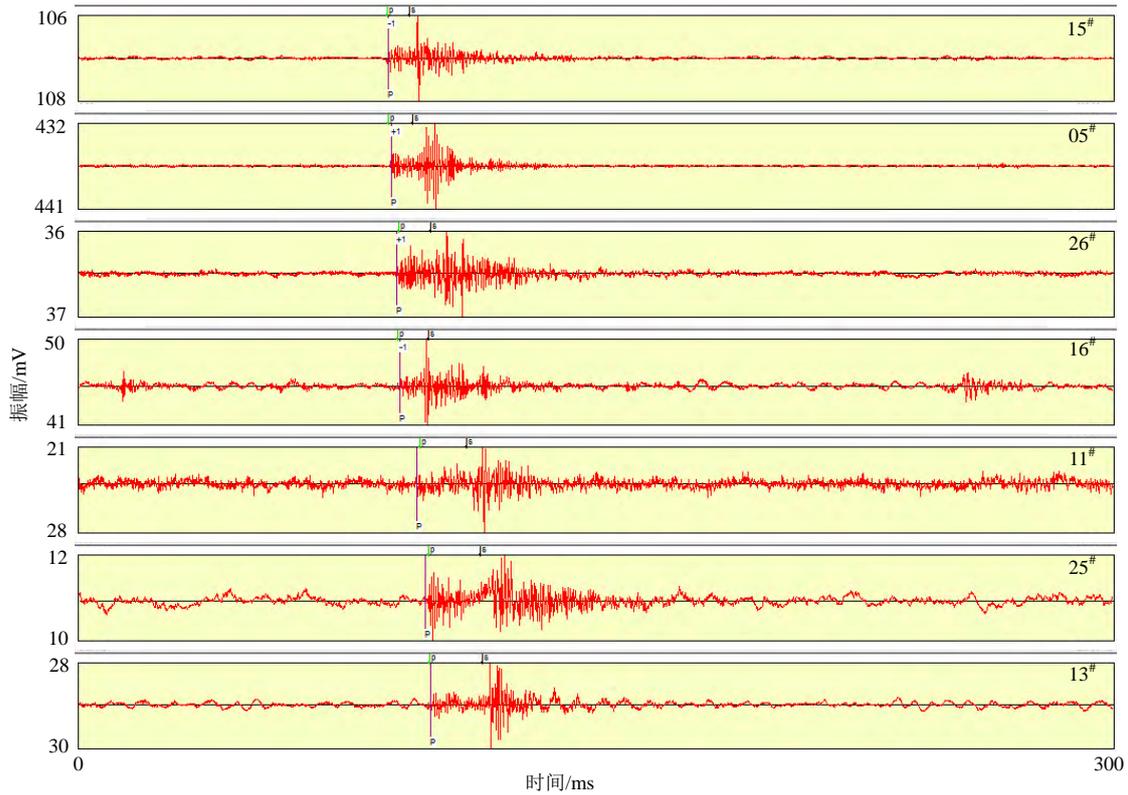


图9 上覆岩层中岩体破裂的典型微震监测波形  
Fig.9 Waveform of fracture of rock mass in overburden

表3 典型微震事件的震源机制解  
Table 3 Focal mechanism solution of microseismic event

时刻	一个节面震源机制解			矩张量分量/ $10^9$	沙滩球示意图
	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$		
10: 24: 00.721	28	65	59	0.618 0	
				0.611 2	
				2.242 4	

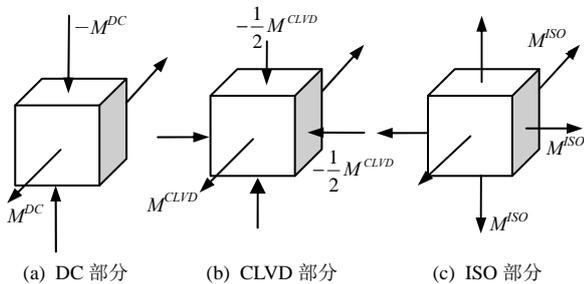


图10 基于相同主轴方向原理的矩张量分解  
Fig.10 Moment tensor decomposition based on the same axis direction principle

根据偏张量计算分析式(1), 计算 2012 年 8 月 11 日 10: 24: 00.721 微震事件的  $M^{ISO}$ ,  $M^{CLVD}$  和  $M^{DC}$  为

$$M = M^{ISO} + M^{CLVD} + M^{DC} = 0.386 + 0.476 + 0.138 \quad (4)$$

计算该事件  $M^{DC}$  所占比重为

$$DC = \frac{|M^{DC}|}{|M^{DC}| + |M^{CLVD}| + |M^{ISO}|} = 13.8\% \quad (5)$$

$$M^{ISO} > 0 \quad (6)$$

根据式(2)中破坏类型判别准则与式(3)中体积变化准则, 该微震事件对应的岩体破裂类型为典型的张拉破裂、体积扩张类型。

对 2013 年 7 月~2013 年年底监测到的 42 个微震定位事件进行分析, 得到偏张量分解拓扑图如图 11 所示。其结果表明张拉破坏类型共有 32 个, 剪切破坏类型共 5 个, 混合破坏类型共 5 个, 即说明体积扩展增加事件共 32 个, 体积压缩减小事件共计 10 个。可见, 2013 年 7 月至年底上覆岩层高应力集中区内岩体破裂以张拉开裂为主。

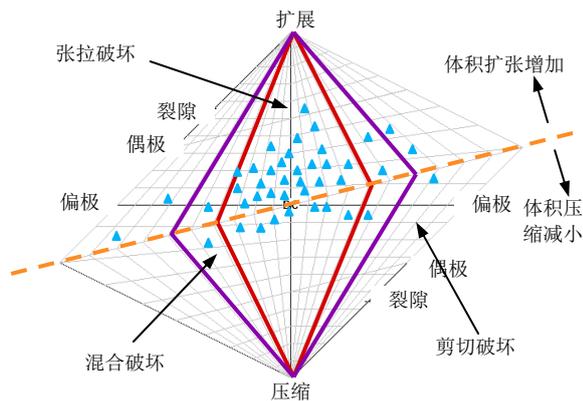


图 11 2013 年 7 月至该年底 42 个微震事件偏张量拓扑统计图  
Fig.11 Statistical topology of partial tensor of 42 microseismic event from July to December in 2013

针对上覆岩层 2012 年 3 月~年底、2013 年 1~6 月、2013 年 7 月~年底 3 个时期内监测到的 369 个微震定位事件，逐一分析了每个事件的偏张量特征，获得了上覆岩层不同时期的破裂类型及其机制，如表 4 所示。

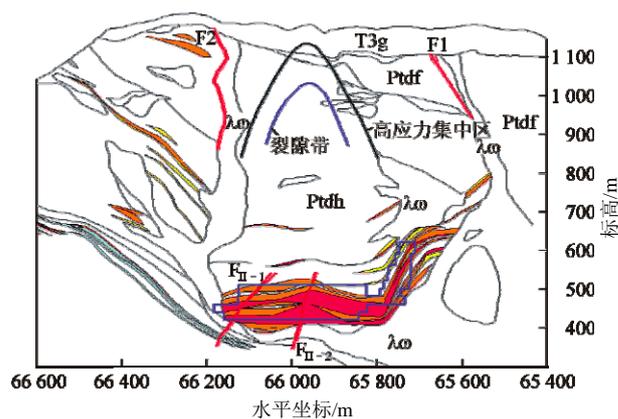
表 4 上覆岩层高应力集中区微震破裂类型统计表  
Table 4 Statistical results of fracture types of micro-seismic events in high stress concentration zone

时期	破裂类型比重/%			体积变化/%	
	张拉破坏	剪切破坏	混合破坏	增加	减小
2012 年年底	78.5	10.6	10.9	81.8	18.2
2013 年 6 月	80.2	8.6	11.2	79.5	20.5
2013 年年底	76.2	11.9	11.9	76.2	23.8

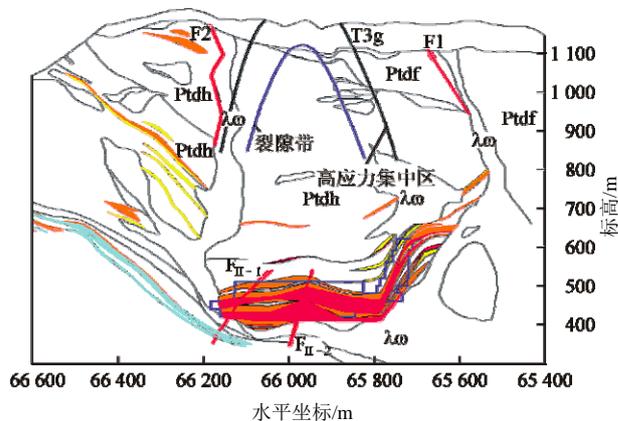
上覆岩层 3 个时期高应力集中区岩体破裂类型统计结果显示，该区域岩体以张拉破裂类型为主，3 个时期张拉破裂类型事件分别占各时期内所有事件的比重分别为 78.5%，80.2%和 76.2%；同时大部分事件为体积扩张增加，其比重均在 80%左右。上述结果表明上覆岩层破裂类型以体积增加的张拉破坏为主，压剪切破坏与混合破坏为辅。

4.5 综合分析结果

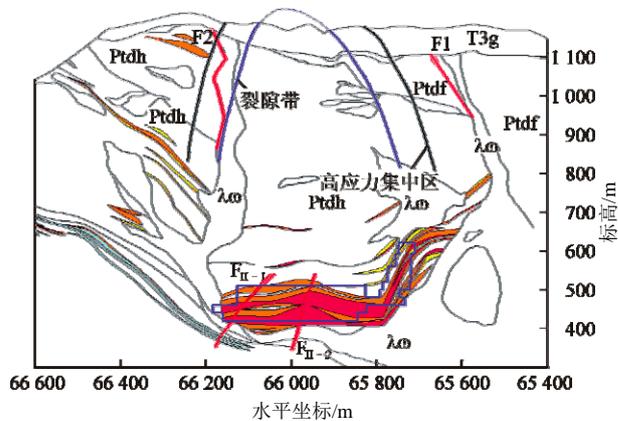
从 2011 年年底至 2013 年年底，继续对上覆岩层各种地压观测巷道与钻孔探测工程进行了仪器监测和人工勘察地压观测。根据上述综合方法与监测数据，2011 年年底、2012 年年底与 2013 年年底 3 个不同时期上覆岩层整个裂隙带与高应力集中区的范围见图 12。对 2011 年~2013 年不同时期内上覆岩层整个裂隙带范围的推测结果分析，裂隙带发展情况为：裂隙带最大标高从 2011 年年底的+1 032~+1 050 m，逐步上升到 2012 年年底的+1 110~+1 115 m，2013 年年底的+1 210~+1 215 m。



(a) 2011 年年底



(b) 2012 年年底



(c) 2013 年年底

图 12 上覆岩层整体裂隙带与高应力集中区的扩展过程  
Fig.12 Expansion process of fractured zone and high stress concentration zone in all overburden

对 2011~2013 年不同时期内上覆岩层整个高应力集中区的推测结果进行分析，高应力集中区宽度的发展情况为：从 2011 年年底的 54~58 m，增加到 2012 年年底的 55~60 m，2013 年年底的 70~75 m。

与上述裂隙带扩展情况相关的井下回采情况是：2012 年与 2013 年 2 个年度，主采区主力回采分段转移到 400 m 分段，采高由 90 m 增加到 110 m。

同时南翼采区的回采,使主采区与中Ⅱ采区连通,采动区域最大采动面积从 9.55 万 m<sup>2</sup> 扩大到 12.6 万 m<sup>2</sup>,采动区域最大长度从 375 m 增加到 500 m,最大跨度在南翼采区扩大到 493 m、在主采区扩大到 422 m。

2009~2013 年,地表形成的典型大面积台阶状开裂沉降缝与陷落坑如图 13 所示,不同时期上覆岩层裂隙带范围与地表开裂沉降区域的扩展趋势之间的相互关系如图 14 所示,根据大红山铁矿的观测资料,地表开裂沉降的扩展在时间上一般会迟滞于井下开采 1~2 a。



(b) 地表开裂沉降

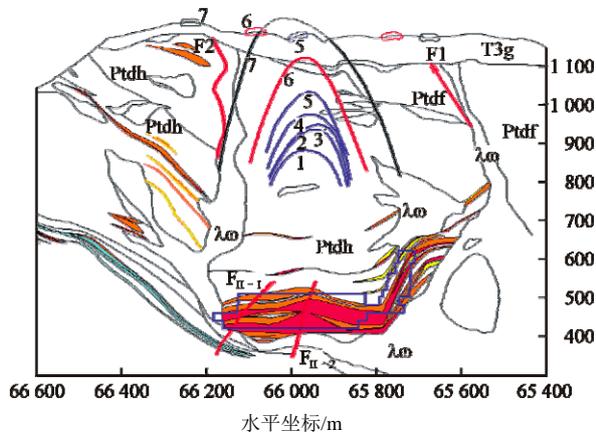


(a) 地表塌陷坑

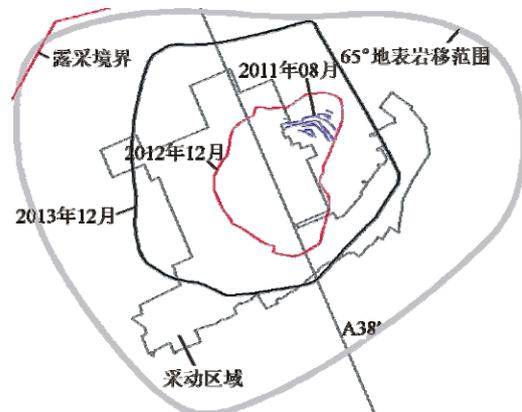
图 13 地表的地质显现照片

Fig.13 Illustration of ground pressure at ground surface

不同时期井下采动区规模与上覆岩层和地表崩落变形之间的发展关系见表 5。裂隙带加崩落带高度从 2011 年年底的 522~540 m 增加到 2013 年年底的 702 m 左右,2013 年年底裂隙带高度(加崩落带高度)与采区跨度之比为 1.26~1.93,裂隙带高度(加崩落带高度)与采高之比约为 5.7,由于地表标高范围为 +1 137~+1 261 m,平均标高在 1 180~1 190 m 范围,总体上是东北高、西南低,上覆岩层裂隙带



(a) 裂隙带与地表开裂沉降范围的关系



(b) 地表开裂沉降范围的扩展过程

图 14 上覆岩层裂隙带与地表开裂沉降范围的关系

Fig.14 Relationship between fractured zone in overburden and sedimentation area in the earth's surface

表 5 不同时期上覆岩层与地表变形随采动区规模的发展关系  
Table 5 Deformation in overburden and the surface in different stages

日期	采动区规模				开裂带		高应力集中区宽度/m	地表开裂沉降面积/(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )
	采动体积/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	采高/m	跨度/m	分段最大采动面积/(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	最大标高/m	高度(包括崩落带)/m		
2009 年底	520	90	207	5.30	930~940	425	-	0.0
2010 年底	645	90	274	6.90	970~980	465	-	0.0
2011 年底	770	90	326	9.55	1 032~1 050	530	50~55	0.0
2012 年底	896	110	422	11.00	1 110~1 120	605	55~60	7.6
2013 年底	1 021	110	493	12.60	1 210~1 215	702	70~75	29.0

最大标高为+1 210~+1 215 m, 因此部分区域裂隙带已经发展到地表。

上述分析结果表明:

(1) 崩落带、裂隙带与高应力集中区的范围不断地向上方扩展, 确保了采场覆盖岩层的厚度满足安全生产的需要, 冒落岩层对采空区进行了充填, 限制了冒落带下方空隙体积的规模; 另外, 上覆岩层及时地冒落, 显著地降低了矿山遭遇大面积冲击地压危害的可能性。

(2) 截至到 2013 年年底, 裂隙带已经扩展到地表, 地表部分区域已经进入充分采动阶段。崩落法矿山进入充分采动阶段, 则表明矿山进入了其整个生命周期的第二阶段, 因上覆岩层与地表突发大规模垮塌对井下采场产生巨大冲击破坏作用的可能性将明显降低。

## 5 结 论

(1) 在国内首次将钻孔探测、巷道观测和多通道微震监测方法相结合, 对崩落法特大采动区上覆厚大岩层的崩落、开裂特性与高应力集中区等做了详细研究。通过该研究较可靠地掌握了大红山铁矿上覆岩层的崩落、开裂和高应力集中区范围, 及其发展趋势。

(2) 微震监测分析了高应力区的岩体破裂机制, 得到上覆岩层中的大多数微震定位事件的破裂是张性破裂, 提高了对上覆岩层破裂机制的认识; 微震监测确定了高应力集中区的宽度在 54~75 m 范围, 随裂隙带的扩大而逐步增加。

(3) 通过对上覆岩层的长期监测和观测, 掌握了上覆岩层的崩落过程是一个逐步、缓慢发展的过程, 不会对矿山井下开采造成灾害性的冲击作用, 这个结论对于矿山的地质管理和安全生产起到了重要的指导作用。

(4) 钻孔探测、巷道观测和多通道微震监测三者之间的结合, 可以很好地发挥各自的优势、消除了各自的弊端, 最重要的是起到了很好的相互验证的作用, 使得所得分析结果可靠。本研究采用的方法、所得结果等, 可以作为类似矿山的相似问题参考。

## 参考文献(References):

[1] H. 克拉茨. 采动损害及其防护[M]. 马伟明, 王金庄, 王绍林, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 29 - 44.(KRATZSCH H. Mining damage and its protection[M]. Translated by MA Weiming, WANG Jinzhuang, WANG Shaolin. Beijing: Coal Industry Press, 1984: 29 -

44.(in Chinese))

[2] GLAZER S N, HEPWORTH N. Seismicity induced by cave mining palabora experience[C]// RaSiM6. Perth: [s. n.], 2005: 281 - 289.

[3] OUDENHOVEN M S, TIPTON R E. Microseismic source locations around block caving at the climax molybdenum mine[C]// XBMA6. [S. l.]: [s. n.], 1973: 114 - 126.

[4] JOUBERT P J. Microseismic monitoring of hydraulic fractures in block cave mines[J]. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 2010, 119(3): 193 - 197.

[5] REYES-MONTES J M, PETTITT W S, PIERCE M E, et al. Microseismic validation of jointed rock models in cave mining[C]// 44th US Rock Mechanics Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2010: 63 - 74.

[6] 杜翠凤, 杜建华, 郭廖武, 等. 无底柱分段崩落法开采顶板围岩崩落机制[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 667 - 673.(DU Cuifeng, DU Jianhua, GUO Liaowu, et al. Mechanism of capping rock collapse by no-pillar sublevel caving[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(6): 667 - 673.(in Chinese))

[7] 张同康. 用地震仪监视空区顶板岩体活动规律[C]// 第一届全国矿山岩体力学会议文集. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 272 - 281.(ZHANG Tongkang. Monitoring activity rule of roof strata using seismograph [C]// Proceedings of the 1th China Rock Mass Mechanics in Mining Symposium. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 272 - 281.(in Chinese))

[8] 孔令海, 齐庆新, 姜福兴, 等. 长壁工作面采空区见方形成异常来压的微震监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 3 889 - 3 896.(KONG Linghai, QI Qingxin, JIANG Fuxing, et al. Abnormal strata stress resulted from goaf square of longwall face based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 3 889 - 3 896.(in Chinese))

[9] 何江, 窦林名, 贺虎, 等. 综放面覆岩运动诱发冲击矿压机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3 920 - 3 927.(HE Jiang, DOU Linming, HE Hu, et al. Mechanism study of overlying strata movement inducing rockburst on top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 3 920 - 3 927.(in Chinese))

[10] 徐炜, 蔺朝晖, 李金恩, 等. 大红山铁矿地压微震监测技术的探讨[J]. 现代矿业, 2012, 9(9): 146 - 147.(XU Wei, LIN Zhaohui, LI Jinnen, et al. Discussion on microseismic monitoring technology of underground pressure in Dahongshan iron mine[J]. Modern Mining, 2012, 9(9): 146 - 147.(in Chinese))

[11] 胡静云, 李庶林, 林峰, 等. 特大采空区上覆岩层地压与地表塌陷灾害监测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1 117 - 1 122.(HU Jingyun, LI Shulin, LIN Feng, et al. Research on disaster monitoring of overburden ground pressure and surface subsidence in extra-large mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1 117 - 1 122.(in Chinese))

[12] KNOPOFF L, RANDALL M J. The compensated linear-vector dipole: a possible mechanism for deep earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(26): 1 957 - 1 963.

[13] OHSTU M. Acoustic emission theory of moment tensor analysis[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1995, 6(3): 169 - 184.