

矿山地震、瓦斯突出、煤岩体破裂* ——煤矿安全中的科学问题

李世愚^{1,†} 和雪松¹ 潘科² 张天中¹ 王林瑛¹ 许忠淮¹ 蒋秀琴² 张连成³

(1 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

(2 辽宁省地震局 沈阳 110031)

(3 北京门头沟煤矿)¹⁾

摘要 文章介绍了矿山地震和瓦斯突出等煤矿灾害及成因,并通过若干煤矿瓦斯突出和矿山地震的同震现象,论述了这些灾害在动力过程中的内在关系.这些震例表明,在高瓦斯煤矿,矿山地震与瓦斯突出存在密切的相关.认为较大矿震加上瓦斯的低值延时响应可能是瓦斯突出的预警信号.建立矿震(冲击地压)与瓦斯突出联合监测和预警系统,是维护矿山安全,减轻矿山灾害的重要途径.从矿震定位、震源机制、矿震成因、瓦斯突出条件分析了矿震与瓦斯突出相关的机理.为矿震和瓦斯的联合监测和灾害预警提供了科学依据.进一步介绍了瓦斯流体对矿震的触发作用,尤其超临界流体的特殊性质在矿震发生中的重要作用.

关键词 矿山安全, 矿山地震, 冲击地压, 瓦斯突出

Relationship between mining seismicity and gas outburst in coal mine——Some scientific questions of mining safety

LI Shi-Yu^{1,†} HE Xue-Song¹ PAN Ke² ZHANG Tian-Zhong¹ WANG Lin-Ying¹

JIANG Xiu-Qin² ZHANG Lian-Cheng³

(1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(2 Earthquake Administration Bureau, Liaoning Province, Shenyang 110031, China)

(3 Mentougou Coal Mine, Beijing, China)

Abstract The phenomena in which mining shocks and gas outburst occur simultaneously are enumerated. These examples reveal the close relationship between mining seismicity and gas outburst or gas overflow in coal mines that are rich in gas. It is suggested that the strong mining shocks plus the low delay time response ??are early warning signals. Thus, the joint observation of mining seismicity and gas for early warning of disasters is necessary for maintaining safety and mitigating disasters. The mechanism of the relationship between mining seismicity and gas outburst is analyzed based on the shock location, source ??focus mechanism, cause of the shocks, and gas outburst conditions. The trigger effect of gas fluid, especially the important effects of special characteristics of ultra-critical fluid on the eruption of mining shocks are discussed.

Keywords mine safety, mining seismicity, impact ground pressure, gas outburst

1 引言

我国煤矿灾害事故主要表现在以下5种:瓦斯灾害、矿震(或冲击地压)、透水、地面塌陷、煤体自

* 科技部社会公益研究专项奖金(批准号 2001DIB)和国定自然科学基金(批准号 #0474018)的联合资助项目
2006-08-20 收到初稿 2006-10-14 收到修改稿

† 通讯联系人. Email geolisyen@yahoo.com.cn

1) 北京门头沟煤矿已于1999年关闭

燃。这些灾害事故随着开采深度增加日益严重。

煤矿灾害的治理,除加强管理,强化制度以外,还需要认识灾害成因和物理机制,强化技术层面支持。煤矿灾害从根本上来讲是矿山动力过程失去控制的表现。而研究这些灾害的内在关系,是研究灾害机理,找出预测预警方法的重要突破点。本文从矿震和瓦斯突出谈起。

2 矿山地震

2.1 矿山地震的基本知识

矿山诱发地震简称矿震,在矿区常称为“煤爆”、“煤炮”、“岩爆”或“冲击地压”。矿震是煤岩体破裂过程辐射的弹性波。由于矿震震源浅,频度高,较小级别就能给地面造成较大的破坏。矿震的强度和频度随着开采深度和掘进的不断增加而日益严重。全球统计结果表明,开采深度大于500m的矿山就有发生3级以上矿震的可能。

地下采矿引发的矿震活动在遍布世界的许多矿区都可观测到。迄今为止,人们观测到的最大矿震发生在德国南部 Werra 河岸的 Potash 矿区,震级为 $M_L = 5.6$,南非最大的矿震发生在1977年4月7日的 Klerksdrop 的金矿区,震级是 $M_L = 5.2$ 。我国矿震记录到的最大一次是辽宁北票台吉煤矿在1977年4月28日发生的 $M_L = 4.3$ 级矿震。其次是1994年5月19日在北京门头沟煤矿发生的 $M_L = 4.2$ 级矿震。

矿山地震分为两大类型^[1]。第一种往往靠近开采工作面,和开采面的破裂变形相联系,震级较小,但对工作面冲击较大,我国和前苏联、东欧称之为冲击地压,其他国际文献则称之为第一类矿震。第二种距离工作面较远,和大的地质断面(断层)的运动相联系,震级较大,地面震感较严重。这两种矿震还可以再细分为6种类型^[2]。矿震类型的划分具有很大的人为性,实际上没有明确界限,而且都和矿山开采有关。

外界人士多以为矿震就是矿塌。其实,矿塌仅是矿山地震的一种,属于重力作用的类型,其余大部分是开采引起的新的应力集中和诱发的浅部构造运动,其中震源的剪切破裂占据很大成分。矿震(冲击地压)在工作面的显现也不单纯是冒顶,还包括地鼓、片帮、煤与瓦斯突出等现象。矿山地震更确切的定义是:发生在矿区范围内,在一定地质背景和地质构造条件下,既与区域应力场有某种相关,又与矿区

构造运动相关联的各种矿山动力现象,并受矿山开采规模和开采方式影响而发生的地震^[3]。图1显示了北京门头沟煤矿的矿震(冲击地压)对工作面造成的破坏。

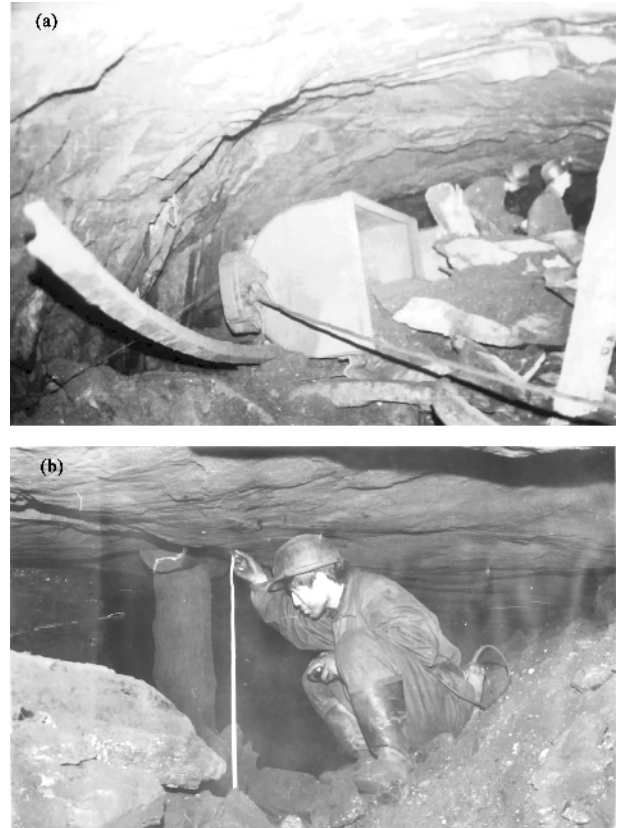


图1 (a) 1984年8月30日,门头沟矿山诱发地震 $M_L = 3.1$, 九龙断东-340m二槽西巷20队装车台内侧,重车翻倒;(b) 1984年8月,门头沟矿山诱发地震 $M_L = 2.6$, -340m五槽南巷龙门采区掘进工作面受冲击,巷道原高2.6m,冲击后仅0.7m

世界上最早的矿山地震监测始于1908年,明德罗普(Mintrop)在德国鲁尔煤田的博卡(bocheum)地区建立了第一个用于矿山观测的台站。最早的矿震台网建于20世纪20年代,迈因卡(Mainka)在德国的上西里西亚(后划归波兰)建立。到了60年代,才在南非金矿出现由地面和地下现代地震台组成的遥测台。国内最早于1959年在北京门头沟矿开始监测冲击地压活动。近年来,国内若干煤矿建立了新一代数字化小孔径矿震监测台网,取得了宝贵的资料。

2.1 矿山地震定位

精确定位是研究矿震的首要步骤。由于开采,造成矿山介质情况极其复杂多变,各向异性也十分强烈,所以矿震定位的难度也比其他类型地震更大。

我们采用多方法、多步骤修订的办法. 首先做初定位(事件接收台数较少的情况用交切法,台数较多的情况用P波残差法),然后用偏振分析和相对定位的方法进行一次修订,最后用波形相关分析的方法进行二次重新定位. 定位结果的精确程度用走时残差来表示.

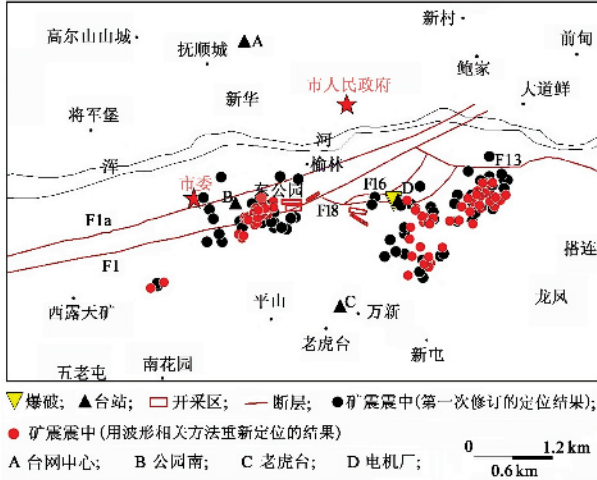


图2 利用波形相关分析重新定位后的矿震震中分布图

图2显示的是用抚顺老虎台煤矿小孔径台网记录的资料对2003年6月至2004年6月的矿震定位结果. 这是国内首次得到的精度较好的矿震定位结果图. 重新定位后,矿震分布走向十分清晰,平均残差为0.001—0.002s. 以P波平均速度为 5.5×10^3 m/s折合成尺度残差,平均残差分别为7—10m. 为了说明矿震分布在城市行政区域的位置,图2采用的是行政区划图,由于断层走向描绘比较粗糙,似乎西区矿震主要分布在近东西走向的浑河断裂F1上,容易使人得出一个推论,好像矿山开采使浑河主断裂活化了. 但是,如果采用老虎台煤矿底板等高线图来更精确地标记矿震震中和断层分布位置(图3)就不难看出,图2的标示不够精确,抚顺矿震实际上主要是分布在老虎台矿东西两端与龙凤矿和胜利矿交界处和中心偏东的3个向斜轴部. 西边的矿震实际上主要发生在F1断层南向斜轴部内的小断层F30上. 主断层F1上发生的矿震并不多^[4-10]. 这样,从图2上得到的矿山开采使浑河主断裂活化了的推论在图3上就得不出来了. 由此可见,当我们研究矿震成因的时候,精确的定位和精确的地质构造描绘都是十分重要的. 不精确的描绘往往导致不可靠的结论.

2.2 矿震分布与构造的关系

根据传统的地震发生的断层成因说,似乎矿震的发生应该主要和大型或中型活动断裂相关. 但是在现场和采矿系统的有关报告中我们发现,并不是所有大中型构造都是矿震的发生地. 矿震(冲击地压)主要发生在一些向斜构造的轴部附近,而矿区的大型断裂并不一定是发生矿震的首要条件. 有些煤矿(例如山东济宁三号煤矿)的矿震(冲击地压)确实主要发生在一些向斜构造的轴部附近,而矿区分布的几条大型断裂上似乎并没有矿震发生的迹象. 由于国内缺少精确的矿震定位结果,各方的意见都没有找到充分依据. 抚顺矿震的精确定位结果(见图3和2.1节的说明)表明,那里的矿震确实首先与向斜轴部有关,特别是和向斜轴部附近的一些断裂(即使是小的断裂)有关,而其他大型的(浑河)断裂的关系反而是不确定的. 这些向斜是由煤层等高线来标示,表明这个区域的煤层经历了成煤后的近代构造变形,形成了高应力区. 我们在山东兖州鲍店煤矿利用小孔径台网的观测资料进行矿震定位时,发现那里的矿震主要分布在两个活动带上,其中一个活动带位于兖州向斜轴部附近的断裂带上,另一个活动带则位于大马厂断裂带上. 这些结果初步表明,矿震的发生虽然与断层有关,但不是简单的关系.

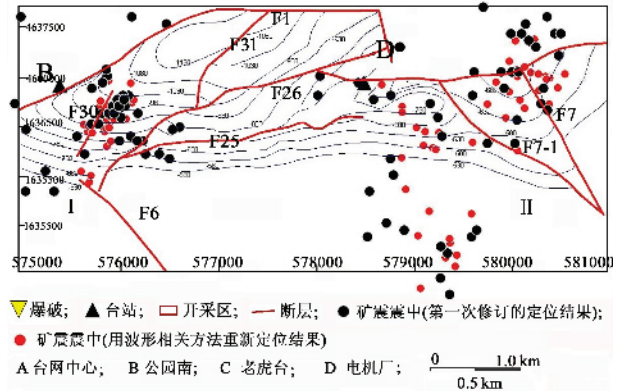


图3 抚顺老虎台煤矿一层煤底板等高线分布与矿震定位的关系(I为胜利煤矿;II为龙凤煤矿;黑色圆点为用偏振分析第一次修订定位的结果,红色圆点为用波形相关方法重新定位的结果)

值得注意的是矿震活动与和小构造或微构造的关系. 在开采过程中,陆续发现在工作面内有一些小断层,一般称为小构造或微构造. 姜福兴教授最近的观测和研究表明:在开采过程中,工作面与附近的小断层等微构造相互作用,引起微震活动乃至发生冲击地压,而在微构造释放应变能之后,又进一步诱发较远处的矿震.

2.3 矿震活动性

在地震活动性研究中,最常用的参数是 b 值,它来自古登堡-里克特(G-R)定律.古登堡(Gutenberg)和里克特(Richter)^[9]在统计全球地震频度与震级时,发现二者有对数关系.

$$\lg N = a - bM, \quad (1)$$

其中 N 为对应某震级 $M + \Delta M$ 区间的地震数量.上式被称作古登堡-里克特定律.其中系数 b 是地震 $\lg N - M$ 统计图的线性拟合的直线斜率.许多震例显示出,在大震前的中小地震 b 值的规律性有异常变化.大震发生前 b 值下降(较大事件的比例增多),大震发生后 b 值又上升(较小事件的比例增多).因此 b 值的物理机制和变化规律受到重视.室内岩石破裂声发射模拟实验的结果表明,多数实验中主破裂前确实出现了 b 值的类似变化,但影响 b 值及其变化的因素很多,主要是应力状态、介质的不均匀程度和破裂方式^[10,12].在近代分形理论中,断层、节理的分布被认为总体上是满足分形的,因此 b 值被赋予了分形意义,有的学者认为地球介质处于临界自组织状态,因而 b 值和断层空间分布的分维值 D 线性相关^[13].

统计结果说明,矿山地震也满足古登堡-里克特定律.图4为抚顺老虎台煤矿0级以上矿震震级分布的 $\lg N - M$ 图,通过相关分析,得到该图中 b 值为1.19.由图4可见,1.0级以上不同震级档次的矿震分布记录基本完整, b 值的线性拟合误差很小.1.0级以下的拟合误差较大,主要是台网记录能力有限,这部分记录不够完整.综合各种统计的结果显示,矿震活动性与天然地震活动性没有本质区别,因此可以采用地震活动性的分析方法来分析矿震活动性.

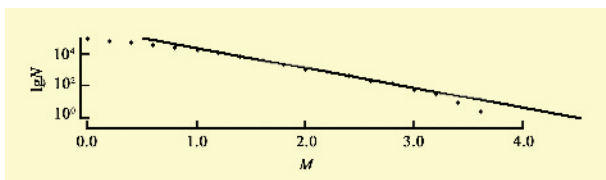


图4 抚顺矿0级以上矿震震级分布的 b 值图($\lg N - M$ 曲线拟合的结果,截距 $a = 5.63$,斜率 $b = 1.24$,相关系数 $R = -0.999$)

在一些震级较大的矿震发生之前, b 值出现了类似天然地震前的变化,另外一些活动性异常现象(例如震前平静、低频振动事件出现、加卸载响应比变化等)也有明显的表现.从效果来看,地震活动性分析方法不仅能用于矿震,而且运用效果比天然地

震分析打分更高一些.原因似乎和矿震孕育周期短、原地重复性强、活动边界清楚有关.

2.4 矿震与开采进程的关系

长期以来,占据统治地位的理论是,矿震是开采累积的效果,和开采进程没有直接关系.这个理论的流行往往和某种行业利益保护有关.

在山东兖州鲍店煤矿的矿震观测和研究中,我们发现了矿震和开采进程相关的证据,否定了传统的理论.研究结果表明:矿震与开采进程的相关性分隐性与显性不同阶段.在开采工作面接近特征构造(向斜轴部或活动断层)并推进到接近一些小断层时,表现为显性.在这个显性阶段,矿震的发生有两个规律:

(1) 矿震发生与开采进程的不稳定程度相关

例如,将山东兖州鲍店煤矿工作面某阶段每日进尺做差分,就发现工作面附近3级以上矿震多发生在每日进尺差分值出现正负值变动剧烈的情况下(图5),而且恰好发生在差分值出现正的高值.

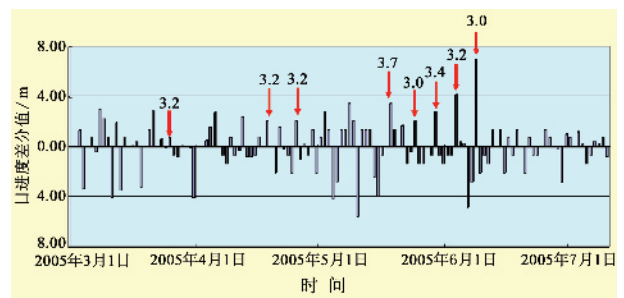


图5 山东兖州鲍店煤矿3级以上矿震与每日开采进尺差分的相关性(图中红色箭头为矿震标记,箭尾数字为矿震体波震级)

(2) 矿震发生时间间隔与开采进程的某种周期相关

统计每段强矿震时间间隔内工作面开采进尺累积数 ΔL ,就可以发现 ΔL 是某个数 ΔL_0 的整数倍(多在1—4倍)(图6),统计结果表明,

$$\Delta L \approx n \cdot \Delta L_0 \quad (n = 1-4) \quad (2)$$

而 ΔL_0 又和工作面冲击地压发生的周期相近.这种周期的大小和开采后顶板不完全冒落状态下悬空状态有关,因此 ΔL_0 还取决于工作面的尺度和顶板、煤体和围岩的性质.图6显示鲍店煤矿某工作面的某时间段 $\Delta L_0 \approx 23.5\text{m}$.在其他时间段, ΔL_0 会有所变化.明显阶段矿震发生的这种韵律性,也叫做可公度性.

以上规律只适用于明显阶段.反之,在开采工

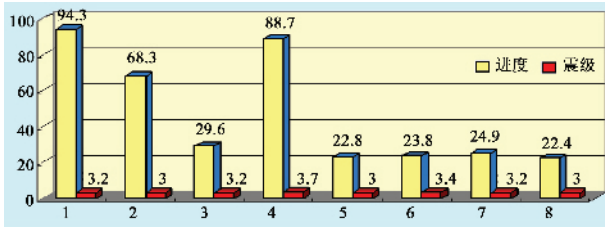


图6 山东兖州鲍店煤矿某工作面开采进尺与矿震关系图(黄色直方图上方数字为开采累积进尺值,红色直方图上方数字为震级,横轴下方数字为矿震序号)

工作面远离特征构造(向斜轴部或活动断层),或在有隔离带的情况下,此时为矿震时间序列与开采的相关性不明显,矿震活动短期规律性变得不明显,但在空间分布上和开采工作面以及特征构造的位置仍然有关。

3 瓦斯突出

瓦斯灾害在工作面主要表现为煤与瓦斯突出(以下简称突出),即煤体内高压赋存瓦斯(甲烷)夹带煤体突然运动,造成动力型灾害、人员窒息,在遇到明火的条件下爆炸。瓦斯爆炸的三要素是:瓦斯浓度(5%—15%)、氧浓度(如向瓦斯与空气的混合气体中混入气 N_2 ,则最低可爆氧浓度为9.47%,如混入 CO_2 ,则最低可爆氧浓度为12.32%),火源点(与人为、地下温度、压力有关)。比瓦斯突出剧烈程度低的过程又称之为瓦斯溢出或渗出。瓦斯突出也往往夹带岩体,在一些煤矿,突出气体是二氧化碳。

瓦斯的主要成分是甲烷,是成煤过程的产物,在自然的煤层压力状态下,大多处于被煤体吸附状态。在煤层顶部封闭较差的地方,往往逐渐解吸扩散到大气中,因此不同煤矿瓦斯含量有很大区别。在开采卸压过程中,瓦斯逐渐解吸,并渗透到巷道中。特别在煤岩体突然破裂时,煤体内部赋存的高压瓦斯会携带煤岩体突出造成灾害^[14]。在发达国家,要求在开采前必须充分预抽放瓦斯,凡瓦斯灾害隐患严重的矿井均不允许开采。而国内煤矿瓦斯抽放率很低,多数煤矿不到10%,且无论低瓦斯还是高瓦斯矿都在超量开采,不仅造成物理失衡,而且造成瓦斯能源损失(据统计,全国煤矿每年损失的瓦斯量相当于进口的天然气总量)。

瓦斯突出灾害的规模可能随开采深度增加而加大。瓦斯灾害加大则和瓦斯压力的增大有关。各国一般规定,当瓦斯压力达到1.0MPa时,煤层会发生

危险,我国规定煤层瓦斯达到0.8MPa时,即为突出危险煤层^[9]。

研究发现,具备瓦斯突出危险的介质有以下特征^[14]:

- (1) 瓦斯压力较大,瓦斯含量较高;
- (2) 煤层坚固程度差;
- (3) 煤层孔隙度较大,有利于瓦斯解吸;
- (4) 煤层透气性较低,不利于瓦斯的移动和扩散;

研究还发现,煤层破坏程度越严重,就越符合上述4个条件。在瓦斯突出区域预测中,煤层所在构造活动越强,煤层变质程度就越大,煤层的变形与破坏程度也就越强^[14]。

4 矿震与瓦斯突出的相关性

4.1 传统的说法正在逐渐被事实打破

在高瓦斯煤矿的工作面,冲击地压(即第一类矿震)往往和煤与瓦斯突出同时发生,因此二者的关系历来有不少研究。然而,对第二类矿震与瓦斯突出的关系却仍然没有足够的重视。占支配地位的说法是:多数瓦斯突出前后没有矿震。最近,这种说法正在逐渐被观测事实打破。越来越多的观测事实证明,国内多数大型矿难都与全矿区尺度的地质灾害相关,其中多伴随有矿震。

4.2 抚顺老虎台煤矿的证据

利用区域地震台网和小孔径流动台网地震记录和煤矿瓦斯浓度记录,我们获得了抚顺老虎台煤矿一些矿震与瓦斯溢出相关的证据^[4-10]。

我们分析了2002—2003年老虎台矿近十次瓦斯(甲烷)百分浓度异常记录曲线,瓦斯浓度采样间隔为5分钟。图7给出了其中2002年10月7日 $M_1 3.2$ 矿震事件前后瓦斯浓度曲线。可以看出,矿震发生后,瓦斯浓度先下降(低值突降),1个小时左右后急剧上升。在约2个小时后甲烷浓度上升到约7.6%,大大超出了爆炸危险值。甲烷浓度高值持续8—16小时后恢复平稳。据该矿工程师们回忆,在2002年每次发生的2级以上矿震之后1—2天之内,都有类似的瓦斯浓度突然升高的现象。

图8给出了伴随瓦斯溢出的部分抚顺矿震定位。从图中可以看出,这些矿震多发生在开采区外围,主要分布在采空区附近。在抚顺老虎台煤矿提供的10张图中,仅有一次矿震后没有瓦斯响应,该次矿震震中位于西露天矿东部(图8下部),距离新

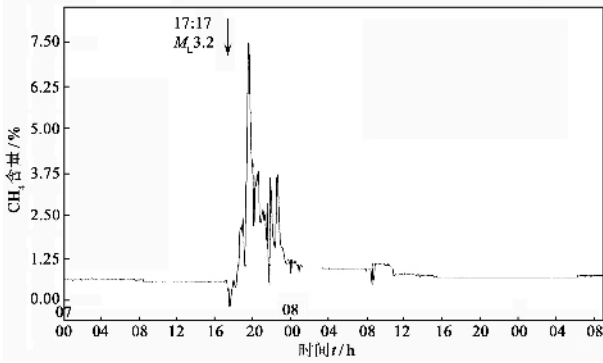


图7 抚顺2002年10月7日 M_L 3.2矿震前后瓦斯浓度记录曲线(矿震时间为2002年10月7日17时17分,震级 $M_L=3.2$,震中位置为 $N41.90^\circ, E123.92^\circ$;在本图所圈定时间内,甲烷百分浓度记录的平均值为1.116)

开采面积约1.8km,但是位置不在开采区域.这些对比表明,远处地震波引起瓦斯压力瞬间增加未必直接导致瓦斯溢出,而是通过当地破裂才能导致瓦斯溢出.多数矿震离老开采区边缘很近,有可能引起老开采区的新破裂.

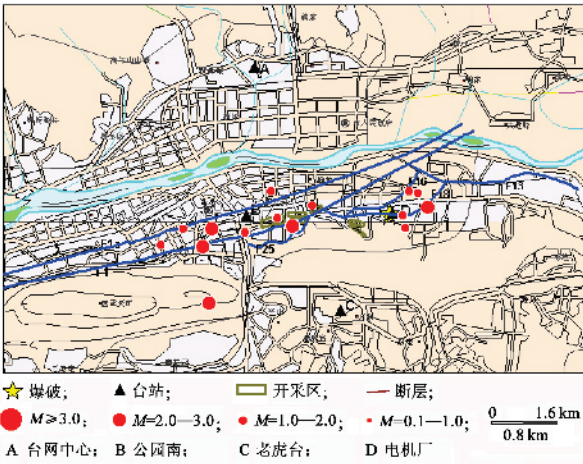


图8 伴随瓦斯溢出的部分抚顺矿震定位

与图8显示类似的情况有将近9次的资料曲线,都显示出在瓦斯突出或溢出之前0.5—1个小时之前,有 M_L 1.5级以上矿震发生,而瓦斯浓度曲线都不同程度地出现低值延时,经过10—30分钟后才出现突然上升.

4.3 阜新孙家湾煤矿的证据

据辽宁省地震局地震台网的记录,在2005年2月14日发生在阜新孙家湾煤矿的瓦斯爆炸事故前14分钟,在孙家湾煤矿发生了 M_L 2.0矿震.

图9给出了2005年2月14日阜新煤矿地震台DD-1微震仪的N-S(北-南)向模拟记录图,该

台距离孙家湾煤矿12.8km,位于孙家湾煤矿东南方向.图中可见 M_L 2.0矿震和瓦斯爆炸的波形,并分别标出了P波(纵波)到时,矿震在前,瓦斯爆炸在后,两者相差14分钟.

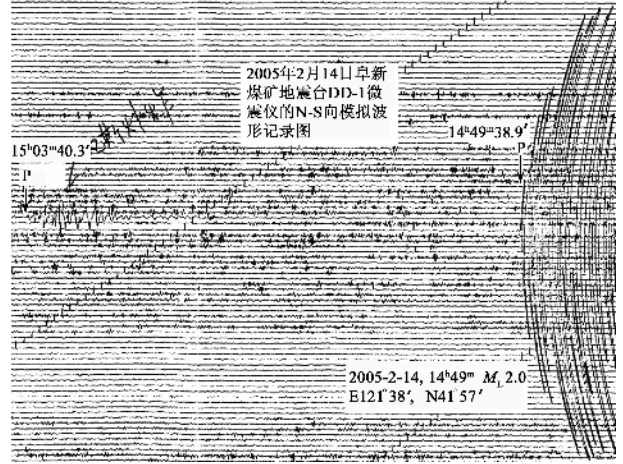


图9 2005年2月14日阜新煤矿地震台DD-1微震仪的N-S向模拟波形记录图(图中瓦斯爆炸振幅远小于矿震,原因是瓦斯在空气中爆炸,辐射波进入煤岩体为弱耦合)

进一步分析孙家湾煤矿7号点和53号点瓦斯浓度记录曲线(图10).2005年2月14日 M_L 2.0矿震发生后,53号点的甲烷浓度在上升背景下立即出现低值突降,经约3分钟后再次急剧上升至4%.15时零3分,因人为操作原因(电工合闸)引起瓦斯爆炸后记录通讯中断.停电排风不畅虽然可以部分解释瓦斯浓度上升,但不足以解释瓦斯浓度何以上升如此剧烈,尤其是53号点的甲烷浓度低值响应和抚顺煤矿资料相似,明显是矿震破裂的同震效应.

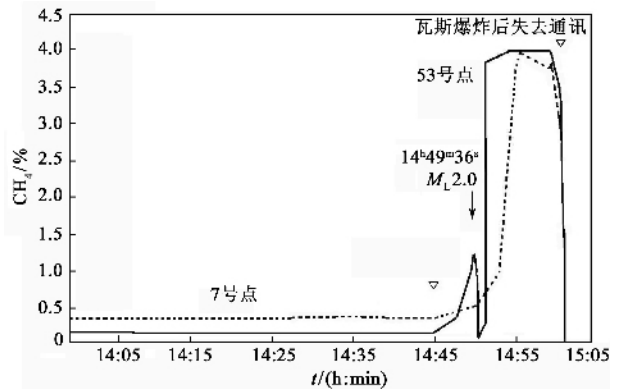


图10 阜新孙家湾煤矿2005年2月14日部分风口瓦斯浓度记录

据该矿报告,在发生 M_L 2.0矿震时,井下强烈有感,在3316工作面出现冒顶、片帮、地鼓等剧烈变形现象,和地震台网定位结果基本相符,由此断定, M_L 2.0矿震的震中位于3316工作面附近,震中处于

一个典型构造(向斜轴部)附近。另据国务院调查组的现场调查报告,

(1) 孙家湾煤矿曾发生过冲击地压 10 余次,冲击地压后皆有瓦斯异常涌出。

(2) 事后 2005 年 2 月 19 日 16 时,3316 外风道巷帮裂缝中瓦斯浓度最高达 3.4%;该处的积水不断有气泡,表明仍有大量瓦斯涌出,位置与 $M_12.0$ 矿震的宏观震中基本相同。

总之,矿震发生后瓦斯浓度的低值延时响应表现出与地震引发的海啸发生前海平面响应类似。从响应机理上看,二者有所不同,前者为流体扩散过程,而后者为流体重力波,但本质上都是流体对固体破裂的响应。当破裂发生时,煤体内部的瓦斯首先需要填充新产生的破裂空隙,这样,原来渗出的瓦斯流量产生暂时断流,造成回风部位瓦斯浓度记录的暂时低值现象,直到新的空隙填充完毕以后,高压瓦斯才从突出部位涌出。由此得出,该类型瓦斯溢出为矿震同震现象,而瓦斯的高压赋存和煤岩体破裂是导致瓦斯溢出的根本原因。上述研究结果在煤矿安全预警中当然有重大意义,下面着重讨论它的物理含义。

5 矿震与瓦斯突出相关的机理分析

5.1 瓦斯突出与冲击地压关系的已有研究

瓦斯突出与矿震(冲击地压)关系的研究最早可以追溯到上世纪 60 年代中期,南非的库克和苏联的霍多特分别提出了冲击地压和突出的能量理论,认为两者都是由于煤岩体破坏而导致^[15]。近年来,国内外在矿山煤与瓦斯突出机理问题取得了一系列研究成果:

(1) 证明了在开采深度的压力条件下,瓦斯(甲烷)在煤体中的赋存呈化学吸附、物理吸附(固态)和自由态^[16-18]。景耀光^[19]在现场利用电子顺磁共振光谱方法观测了瓦斯涌出初速度与顺磁中心浓度的关系。他发现,在正常的情况下,钻孔过程中顺磁中心的浓度升高应与钻孔瓦斯涌出初速度的平稳增大相吻合,但是在发生煤与瓦斯突出时,这种关系被打破,随着瓦斯涌出初速度的成倍增加,电子顺磁共振谱线宽度变窄,表明顺磁中心浓度降低。由此证明,在煤与瓦斯突出时,存在其他瓦斯涌出源,即存在吸附状态的固态烃转化为气态烃的过程。

(2) 矿山地震和瓦斯突出,多发生在应力集中部位,而在开采卸压过程中,甲烷解吸和相变,引起

孔隙压增高,也是煤与瓦斯突出的重要触发条件^[20]。

(3) 煤与瓦斯突出煤层中,瓦斯内能要比煤体的弹性潜能大 1—3 个数量级^[21]。

这些成果表明,煤矿瓦斯突出和矿震(冲击地压)不仅在动力学意义上具有内在的统一性,而且在发生的过程上也有密切关系。

下面我们将说明,矿震的成因与冲击地压没有本质区别,因此上述研究结果不难用来说明矿震与瓦斯溢出(或突出)的相关性。

5.4 煤岩体的破坏准则

根据 Mohr - Kulun 准则^[22],岩石材料的破坏条件为

$$\tau^f = \tau_0 + f \cdot (\sigma_N - p_0), \quad (3)$$

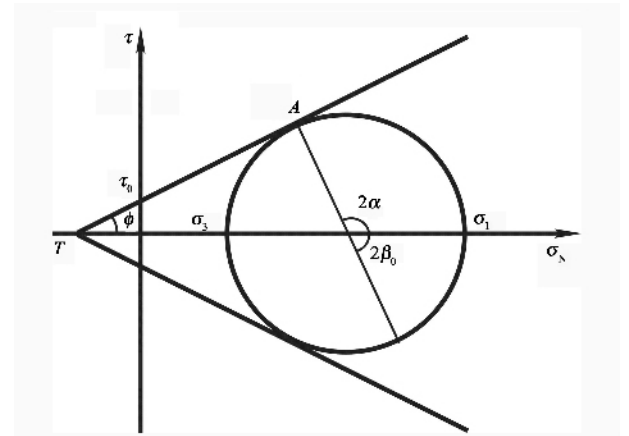


图 11 Mohr - Kulun 破坏准则

其中 f 为摩擦系数, σ_N 为作用于剪切面上的正应力, p_0 为孔隙压力, τ^f 为材料的抗剪切强度。图 11 中以压应力为正。(2)式表现为图 11 中的破裂线。当 Mohr 圆与破裂线相切时,材料发生破坏。我们称 $\sigma_N - p_0$ 为有效正应力。冲击地压和矿震都是应力集中条件下的煤岩体破裂,因此可以统一用 Mohr - Kulun 准则来判断。例如,由于煤矿开采造成局部质量亏损,作用在断层面上的 σ_N 减小,从而诱发断层的剪切破坏,在采空区形成的被称作是矿震,在工作面附近微断层的错动就被称作冲击地压,两者仅仅在发生地点上有区别,其实本质是一样的。

5.5 损伤理论的分析

回采面为新开挖区域,卸载应力调整速度快,微破裂发育时间较短,因此过程区微破裂密度低,发生的矿震震级较低(但对工作面有直接威胁)。而采空

区和煤柱,应力调整时间较长,微破裂发育比较充分,特别是断层构造区,应力调整时间长,微破裂密度高,甚至形成断层泥,而且发育空间尺度大,因此应变能释放量就大,相应的震级也大。这里需要从理论上解释,为什么微破裂发育密度与发育演化时间有关。

根据显微观察和损伤理论,岩石的破坏不是一下子从原始状态就突然发生的,它要经历微裂纹的萌生、发育、成核等一系列演化过程。引入似化学平衡法,将晶体中有序-无序转化过程和缺陷的生成过程模拟为一个似化学反应^[23]。根据阿累尼乌斯方程和过渡理论,这种似化学反应基本过程的速度常数为

$$k_{N^*} = A \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right), \quad (4)$$

其中 U_0 为活化能, T 为物体绝对温度, k 为玻尔兹曼常数, γ 为材料力学特征参数, A 为指数前因子或频率因子。当材料受到外力 F 时,原子之间的结合能降低为 $U_0 - \gamma F$ 。此时的缺陷或微裂纹的生长速度为

$$k_{N^*} = A \exp\left(\frac{U_0 - \gamma F}{kT}\right). \quad (5)$$

由此得到材料的寿命为

$$t = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma F}{kT}\right). \quad (6)$$

上式是由 Zhurkov 于 1965 年导出的^[24]导出。其中 t_0 为固体内原子自激振动的周期, $t_0 \approx 10^{-13}$ s。其后的一系列实验遍及各种材料。实验结果表明,该公式对各种材料(包括岩石)都可以满足^[25]。

上述理论表明,微裂纹的发育程度与应力状态和时间进程有关。在应力分布不均匀的介质中,不同部位微裂纹的生长速度不一致,应力的大小与微裂纹生长速度呈指数关系。在应力集中部位,缺陷和微裂纹的生长速度较快,形成过程区。

在工作面附近,由于卸载速率较快,这种应力差异迅速拉大,会使局部过程区微裂纹过早归并、达到成核尺度,并失稳形成剪切破坏,而其他部位裂纹生长密度不足。这样,剪切破裂失稳的长度受到限制,失稳变形范围小,发生的矿震震级较低(也就是第一类矿震)。

第二类矿震往往发生在较大的发震构造(特别是活动断层)上,另一部分发生在采空区,这些地方损伤发育的时间长,因而微破裂发育广泛且充分,坚固程度降低,孔隙度增加,这些情况不仅有利于矿

震发生,也有利于瓦斯解吸和突出。采空区面积远大于新开采的工作面(尤其是具有几十年甚至上百年的老煤矿),因此容易发生较大的矿震(也就是第二类矿震)。当第二类矿震的震源接近工作面或巷道时,就会直接引起破坏和人员伤亡。

5.6 震源机制分析

我们根据垂直向 P 波初动定性判断了矿震震源机制。对抚顺煤矿 2000 年 6 月至 2002 年 8 月震相清晰的 27 个较大级别矿震的分析结果,大多数为剪切破裂源,只有 7 个矿震 P 波初动方向全部向下,一个矿震 P 波初动方向为两象限分布,是一种剪切型矿震,占总数的 29.6%。井下调查表明,即使是这些初动全部向下的事件,也并没有找到明显对应的坍塌迹象,证明这些初动只是震源位移的方向。现有监测资料证实了理论的预想,即矿震与瓦斯突出可能同属采矿诱发构造活动,引起煤岩体破裂,造成矿体内部赋存的高压状态的瓦斯突出。

阜新孙家湾煤矿 2005 年 2 月 14 日 $M_L 2.0$ 矿震的震源机制为正断层,该矿震震源以倾滑为主,并含有剪切型破裂成分。这种倾滑带有张性破裂的性质,有助于瓦斯突出。

6 矿山地震成因与流体有关

矿震与瓦斯溢出相关的重要意义是它表明了部分矿山地震成因可能与流体有关。这种情况和工作面观察到的煤与瓦斯突出在本质上没有区别。流体对矿震的发生主要有以下作用:

(1) 孔隙压力增加触发矿震,相当于(3)式中的 p_0 增加。在开采卸压过程中,甲烷从吸附状态解吸,变为自由态进入孔隙,增加孔隙压力 p_0 。

(2) 应力腐蚀,使煤体强度降低,相当于(3)式中的 $|T|$ 和 τ_0 减小。

何学秋等^[26]研究了瓦斯孔隙气体对煤体变形及应力腐蚀作用机理,指出,煤吸附瓦斯会使煤表面自由能降低,从而使煤体强度降低。

在流体的作用中,我们需要特别关注超临界流体,因为超临界流体具有一系列特殊性质和作用。这些特性与岩石破坏、断层活动及各种地质运动的动力学过程密切相关。

超临界流体的定义为:温度和压力分别在临界温度和临界压力以上的非凝聚性高密度流体^[27,28]。例如水的临界温度为 374 °C,临界压力为 22.06

MPa, 甲烷的临界温度为 $-82.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 临界压力为 4.64 Mpa . 二氧化碳的临界温度为 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, 临界压力为 7.38 Mpa . 超临界流体具有以下一系列极为特殊的性质:

(1) 超临界流体的密度介于气体与液体之间, 因而许多物理性质, 例如扩散系数、粘度值等也介于气体和液体之间.

(2) 超临界流体作为溶剂的最大特点是: 通过压力的微小变化可得到溶剂密度很大的变化. 一般说来, 溶解度与密度有关. 通过增大压力来增大超临界流体的密度, 从而使溶解度加大.

(3) 超临界流体的渗透性远远超出常温常压状态, 因此深部的连通性并不因为孔隙度减少而减弱^[28].

因此, 当超临界流体的密度与液体相近时, 其扩散率比液体高, 黏度比液体小, 因而超临界流体作为溶剂时表现出许多优于一般液体的特性.

这些性质为我们研究矿震与瓦斯等气体突出的关系提供了新思路. 何学秋等^[26]的研究结果表明, 当瓦斯压力较高, 瓦斯的能量高于煤分子(或原子)间的键能时, 瓦斯分子能够楔开并进入到与瓦斯气体分子直径相当的煤物质大分子(或芳香层)之间. 瓦斯分子进入到微裂隙以后以固溶体的形式停留下来且不易脱附. 何学秋等^[26]认为, 由于煤体吸附瓦斯后表面能降低, 使得煤体膨胀. 煤的宏观膨胀随瓦斯压力增大呈指数规律. 特别是对于具有 d^{002} (缩合碳单元内芳环层间间距, 即面网间距)的初始值大于 4 \AA 的煤, 会出现第三种类型变形, 最引人注目的是在瓦斯压力为 $2.2\text{—}6.1\text{ MPa}$ 区间时, 参数 d^{002} 有一个急剧增加的过程, 其中在压力为 4.5 MPa 上下, 增加速率为最大. 我们注意到, 这个压力正好处于甲烷的临界压力上. 由于实验的温度一般在室温下, 此时的甲烷正好成为超临界流体. 因此何学秋等^[26]的实验结果表明, 超临界甲烷确实表现出了对溶质(煤)的溶解度加大的性质.

可以看出, 在 -500 m 深度, 一些煤矿已经开采到甲烷和二氧化碳在局部处于超临界状态的深度, 例如抚顺老虎台煤矿 -730 m 实测瓦斯压力平均达 4.5 Mpa ^[29]. 因此, 部分矿震的成因除与应力增大有关外, 还可能与超临界甲烷(可能还包括二氧化碳)在开采卸载过程中的解吸作用有关. 上述理论可以解释国内外许多煤矿一个共同规律, 即在开采到 -500 m 深度左右, 煤矿的矿震(或冲击地压)的震级和频度都急剧增加.

由于地震观测在各种物理量观测中分辨率最高, 因此将瓦斯浓度监测与矿震监测联合是重要的方法. 而利用矿震的位置等特征提取瓦斯突出前兆信息, 作为瓦斯突出危险性的预警信号是减轻突发性瓦斯灾害的重要方法. 其中第一类矿震(冲击地压)需要百米级尺度极微震(地声)台网, 而第二类矿震的监测需要公里级微震台网, 有关研究也亟待加强.

国际上最近十年来, 科技发达国家已经认识到煤矿地质灾害实际上是统一的矿山动力过程, 提出了矿山综合地质灾害的概念, 在许多国家(包括波兰等)已经制定了一系列统一监测、综合分析的方法, 并研制了相应的监测系统硬件和分析软件. 但是在国内, 这个问题刚刚被提出来.

以上分析对构造地震的成因认识也带来了新的启示.

本文的观点仅依据了现有的观测资料, 进一步的研究有待于积累更多矿山的监测资料.

致谢 抚顺矿务局孙学会等提供了瓦斯浓度资料, 辽宁省地震局佟晓辉、宋绪友, 抚顺市地震局李铁等对老虎台煤矿的矿震监测给与了大力协助, 本文在完成过程中曾得到姜福兴教授的重要启示, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] Gibowitz S J, Kijko A. An Introduction to Mining Seismicity. Academic Press, Inc., 1994
- [2] Horner R B, Hasegawa H S. Can. J. Earth Sci., 1978, 15: 1341
- [3] 吴淑才, 覃子建. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1994, 12(1): 49 [Wu S C, Tan Z J. Journal of Guizhou Teachers University (Natural Science Edition), 1994, 12(1): 49 (in Chinese)]
- [4] 李世愚, 和雪松, 张少泉等. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 853 [Li S L, He X S, Zhang S Q et al. 2004, Progress in Geophysics, 2004, 19(4): 853 (in Chinese)]
- [5] 李世愚, 和雪松, 张天中等. 矿山压力与顶板管理, 2005, (S3): 39 [Li S Y, He X S, Zhang T Z et al. Mining Pressure and Roof Administration, 2005 (S3): 39 (in Chinese)]
- [6] 李世愚, 和雪松, 许忠淮等. 矿山压力与顶板管理, 2005, (S3): 26 [Li S Y, He X S, Xu Z H et al. Mining Pressure and Roof Administration, 2005, (S3): 26 (in Chinese)]
- [7] 李世愚, 和雪松, 张天中. 科学研究月刊, 2006(10): 57 [Li S Y, He X S, Zhang T Z. Science Research Monthly, 2006 (10): 57 (in Chinese)]
- [8] 李世愚, 和雪松, 潘科. 煤炭学报, 2006(增刊): 11 [Li S Y, He X S, Pan K. Journal of China Coal Society, 2006 (sup): 11 (in Chinese)]

- [9] 张天中,武巴特尔 和雪松等. 矿山压力与顶板管理,2005,(S3) 69[Zhang T Z, Wubater, He X S *et al.* Mining Pressure and Roof Administration, 2005 (S3) 69(in Chinese)]
- [10] 李世愚 和雪松 张天中等. 国际地震动态,2006(4):[Li S Y, He X S, Zhang T Z *et al.* Recent Developments in World Seismology 2006 (4) :1(in Chinese)]
- [11] Gutenberg B C F. Richter. Geol. Soc. Am. Spec. Papers, 1941 (34) :131
- [12] Mogi K Bull. Earthq. ResInst. ,1962 40 831
- [13] Scholz C H. Bull. Seismol. Soc. Am. ,1978 ,58 399
- [14] 耿乃光. 地震学报,1986,8(3) 330[Geng N G. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(3) 330(in Chinese)]
- [15] 陈颢等编著. 分形与混沌在地球科学中的应用. 北京: 学术期刊出版社,1989[Ed. Chen Y *et al.* 1989. The application of fractal and chaos to Geosciences. Beijing : Academic Journal Press ,1989(in Chinese)]
- [16] 程五一 张序明 吴福昌. 煤与瓦斯突出区域预测理论及技术. 北京: 煤炭工业出版社,2005. 204[Cheng W Y, Zhang X M, Wu f C. Regional Prediction of Coal and Gas Burst Out , Theory and Technology. Beijing , Coal Industry Press ,2005. 204(in Chinese)]
- [17] G 布霍依诺,李玉生译. 矿山压力与冲击地压,北京: 煤炭工业出版社,1985[Buhoyino G. Li Y S(Translate). Mining Pressure and Coal Burst out. Beijing :Coal Industry Press ,1985 (in Chinese)]
- [18] 俞善炳,谈庆明,丁雁生等,力学学报,1998,30(2):145. [Yu S B, Tan Q M, Ding Y S *et al.* Journal of Mechanics , 1998, 30(2) :145(in Chinese)]
- [19] 张子敏,林又玲,吕绍林. 中国煤层瓦斯分布特征. 北京: 煤炭工业出版社,1998[Zhang Z M, Lin Y L, Lu S L. The Contribution Characteristic of Coal Seam Gas in China. Beijing :Coal Industry Press ,1998(in Chinese)]
- [20] 张建博,王红岩,赵庆波,中国煤层气地质. 北京: 地质出版社,2000[Zhang J B, Wang H Y, Zhao Q B. Geology Press ,2000(in Chinese)]
- [21] 景耀光. 矿业安全与环保,2001,28(增刊):143[Jing Y G. Safety of Mining and Environment Protection. 2001 28(sup) : 143(in Chinese)]
- [22] 蒋承林,俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术. 北京: 中国矿业大学出版社,1998[Jiang C L, Yu Q X. The Mechanism of Sphere Shell Unsteady of Coal and Gas Burst out and Prevention Techniques. Beijing : China University of Mining and Technology Press ,1998(in Chinese)]
- [23] 郑哲敏,从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出的机理. 见郑哲敏文集. 北京: 科学出版社,2004. 380-392[Zheng Z M. Collective Works of Zheng Zhe-Min. Beijing : Science Press ,2004. 380—392(in Chinese)]
- [24] Jaeger J C, Cook G W. Fundamentals of Rock Mechanics Third edition. London : Chapman and Hall, 1979(中译本: J C 耶格, N G W 库克著,中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础. 北京: 科学出版社,1981. 690)
- [25] 唐有祺. 统计力学及其在物理化学中的应用. 北京: 科学出版社,1979. 592[Tang Y Q. Statistical Mechanics and its application in physical Chemistry Beijing : Science Press. 1979. 592(in Chinese)]
- [26] Zhurkov S N, Int. J. Fracture. Mech. ,1965, 1 311
- [27] Kuksenko V S. Model for the transition from micro-to Macrofracture. In : Rossmanith(ed.), Mechanics of Jointed Rock , Proceedings of the Second International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock-MJFR-2 Vienna/Austria/10—14 April 1995
- [28] 何学秋,王恩元,林海燕. 中国矿业大学学报,1996,25(1):6[He X Q. Wang E Y. Lin H Y. Journal of China University of Mining and Technology , 1996, 25(1) :6(in Chinese)]
- [29] Yasuhilo A, Takeshi F. The Japan Society of High Pressure Science and Technology ,1993, 2(4) 262
- [30] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论. 北京: 科学出版社,1997 [Xie H S. Introduction of Science of Deep Mater in the Earth. Beijing : Science Press ,1997(in Chinese)]
- [31] 孙峰. 煤矿安全,2001,3(2):30[Sun F. Safety of Coal Mine ,2001, 3(2) 30(in Chinese)]