

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0525-07

煤矿采场围岩微震事件与支承压力分布关系

孔令海

(煤炭科学研究总院矿山安全技术研究分院, 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

摘要 采用高密度微震检波器近距离布置方法和台网近场定位原则, 结合采矿理论, 分析了煤矿采场上覆岩层运动与围岩破裂、上覆岩层运动与支承压力分布、微震事件数量与支承压力分布等之间的关系, 并进行了现场实测研究。研究表明, 开采扰动造成上覆岩层运动和支承压力转移调整, 是围岩破坏的根本原因; 通过对采场围岩破裂和微震事件分布的分析, 推断得到超前高应力分布范围为 75 m 和侧向高应力分布范围为 35 m。采动围岩破裂范围和支承压力高应力分布范围取决于开采对岩层的扰动程度。采场围岩变形的现场实测表明, 微震事件数量极值区与矿山压力显现明显范围相差 19 m 左右, 综合考虑煤矿地层的层状特性和高应力作用下岩体破坏后变形显现的滞后性, 现场实测证明了结果的合理性。研究结果为微震监测技术在采煤工程的应用提供了重要参考依据。

关键词 煤矿长壁采场; 微震监测技术; 上覆岩层运动; 支承压力; 围岩变形

中图分类号 TU 452

文献标志码 A

Relationship between microseismic events and abutment pressure distribution in coal mining

KONG Linghai

(Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract In this paper, based on the close spacing layout method of high-density geophones and near-field location principle of microseismic network, combined with mining theory, we analyzed the relationships between overburden strata movement and strata fracture, overburden strata movement and abutment pressure distribution, microseismic events and abutment pressure distribution, et al, and conducted the field survey study. The results show that mining disturbance can cause overburden strata movement and abutment pressure adjustment, which is the root cause of surrounding rock fracturing. Through analysis of strata fracturing and microseismic event distribution, it is concluded that the high stress distribution range ahead of workplace is 75 m and the lateral high stress distribution range is 35 m. Ranges of fractured strata and high stress distribution of abutment pressure are all depend on the degree of mining disturbance on stope strata. Measured results of strata deformation show that the distribution difference between the extreme zone of microseismic events and obvious scope of strata pressure is about 19 m. The test results have proved the rationality of research conclusion by considering the layered strata characteristics and hysteresis properties of deformation after strata failure under high stress.

收稿日期: 2013-08-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51304117); 国家“十二五”科技重大专项项目(2011ZX05040-002-004); 国家国际科技合作专项项目(2011DFA61790)

作者简介: 孔令海(1979—), 男, 博士, 助理研究员, 从事矿山压力和岩层控制等方面的研究。

E-mail: konglh01@163.com

Tel: 15810732758

The study can provide reference to the microseismic monitoring in coal mining.

Key words longwall face in coal mine; microseismic monitoring technology; overburden strata movement; abutment pressure; strata deformation

在煤矿地层中, 由于成矿时间、地层组分和开采深度等的差异, 在开采扰动下, 工作面上覆岩层厚度、力学特性和运动规律等方面存在不同程度的差别。在采动影响下, 工作面顶板岩层自下而上产生下沉运动, 一些弹性模量较大、强度较高的坚硬厚岩层运动过程中, 以某种结构形式承载着其上岩层载荷, 形成采场矿压显现的主要力源。

随着工作面推进, 综放采场顶板上位岩层稳定性结构在纵向易于向上位转移的特点^[1], 同时伴随煤体内支承压力“压缩反弹”和“波动”2种类型的动态调整^[2]。上覆岩层的破断与下沉是工作面矿压显现的根源, 断裂下沉过程中的岩层以力的方式相互咬合组成工作面的顶板结构, 即基本顶梁式结构^[3-4]。工作面基本顶岩梁形成过程中的超前破断及其运动状态可看作是损伤基础梁的支承体损伤的充分发展, 而内应力区支承体损伤的充分发展是内应力区收缩和外应力区扩展的主要原因^[5]。在综放工作面两侧端头, 综放采场放煤高度影响着顶板上“弧三角形悬板”尺寸大小^[6], 侧向煤体中的支承压力峰值与煤壁之间的距离不同; 非充分采动阶段长壁工作面的开采尺寸达到 1.27 倍采深时支承压力达到极大值^[7]。

长期以来, 人们对岩层随开采过程的破裂下沉过程和支承压力动态变化的认识, 主要是通过采用相似模拟实验、解析理论分析和数值模拟等直接和间接的手段实现^[8]。

在确定采场上覆岩层运动及支承压力分布状态的研究方法中, 吴健等^[9]通过三维相似材料模拟结合离散元模拟方法对成庄煤矿煤厚为 6 m 的综放面围岩应力场进行了研究; 司荣军等^[10]采用三维有限差分数值模拟方法对济三煤矿采厚为 2, 4 和 6 m 煤层开采过程中采场支承压力的动态变化, 拟合了支承压力集中系数与工作面推进距离的关系曲线; 浦海等^[11]采用基于有限元理论的 RFPA 数值模拟方法对兴隆庄煤矿采厚 8 m 的综放采场采动覆岩冒落过程, 得到了沿工作面推进方向采动覆岩的破断规律和围岩支承压力分布规律; 王同旭等^[12]采用三维有限差分数值模拟方法得到了孤岛工作面侧向支承压力分布规律, 并结合雷达探测结果综合分析对

比, 得到了支承压力高峰位置及应力降低区范围; 靳钟铭等^[13]通过理论分析、相似材料模拟和现场应力实测研究得到了放顶煤采场支承压力表达式。文献^[14]采用损伤力学理论对综放采场支承压力分布规律进行了研究。

微震监测技术源于地震学领域, 该技术可对岩体破裂产生的微震波进行探测, 近年在石油、矿山和隧道等多个领域得到了应用^[15-17]。在煤矿开采方面, 该技术在岩层运动的动态发展规律^[18-22]、冲击地压^[21]和矿震^[22]等方面也取得了有价值的成果。虽然如此, 但作为一种地球物理手段, 与采矿学科的紧密结合应是该技术在煤矿开采领域得以推广的必要前提。

基于此, 本文基于高密度微震检波器布置及台网近场定位方法, 结合计算机数值模拟, 对工作面围岩破裂特征与应力分布关系进行了对比研究, 并结合现场矿压监测进行了工程验证。

1 覆岩运动与支承压力分布规律

1.1 采动覆岩破裂的力学机制

岩体在受力破坏过程中, 可分成 4 个阶段: 孔隙压缩阶段、弹性变形阶段、体积膨胀阶段和临震阶段。当岩体所受应力临近或超过其极限强度时, 岩体破裂进入体积膨胀阶段和临震阶段, 表现出非弹性体积应变, 并在主破裂形成前急剧增大, 与微破裂累积总数二者存在着同步的变化^[23]。岩体介质的非均匀性对岩样宏观强度和宏观变形非线性行为有显著的影响, 而且也显著地影响试样破裂模式。岩石工程中的许多破坏, 如顶板冒落、矿柱破坏、岩爆、冲击地压和矿震等等, 都是岩体受载状态下的失稳破坏过程, 岩体的破裂过程具有不可逆性^[24-25]。在煤矿开采过程中, 开采扰动影响下, 上覆岩层的断裂下沉破坏规律不但遵循岩体破坏的一般规律, 而且有其自身的规律。随直接顶和基本顶的垮落, 最大水平主应力向顶板和底板岩层传递, 在厚硬岩层中出现水平应力集中, 岩板变形下沉, 其中央弯矩增长, 当达到强度极限后形成裂缝, 岩板中央弯矩和支承压力达最大值, 支承压力影响范围也达最大。采场四周围岩支承压力“拱脚”向

四周传递，形成采动影响下的支承压力影响区/应力场覆盖范围。

采场围岩支承压力是上覆岩层运动作用的结果，对围岩的影响只有当压力超过煤岩支撑体强度才会显现出来^[17]。当覆岩离层超过极限强度后，采动支承压力峰值和水平主应力发生突变调整，基本顶上的覆岩离层断裂诱发基本顶岩层和直接顶局部发生突变失稳，造成坚硬基本顶岩层断裂或基本顶岩梁平衡结构的失稳，形成剧烈矿压显现。

微震事件则是采场上覆岩层运动和支承压力共同作用的结果。从能量释放角度来看，基本顶初次断裂后，随工作面推进，高位基本顶覆岩层暴露面积增大，岩层内部应力集中程度和能量积聚增大。受岩层自重及其内部应力集中程度增大的影响，坚硬厚岩层因变形而积累的能量增加，工作面围岩变形破裂增多，能量释放增大，影响范围增大。

根据上述分析可知，基于围岩破裂场的推断可反演分析围岩所处的应力状态。即，根据微震事件数量分布特征可以判断围岩破裂场的范围，得到受采动影响下的工作面围岩体矿山压力分布情况。

1.2 微震监测揭示的沿走向覆岩运动过程

随着开采的进行，在工作面前方形成的支承压力峰值是逐渐增加的，并且极值点位置不断前移，工作面围岩出现支承压力集中区，煤层上的支承压力是动态变化的。由图 1 可知：在工作面超前方向，基本顶或高位岩层发生超前断裂，支承压力发生转移并达到极大值，采场及围岩出现近场和远场大范围来压显现。

以某矿特厚煤层综放工作面为研究对象，煤层平均厚度 15 m，煤层倾角为 0°~6°，埋深 450 m 左右。通过微震监测发现，根据微震事件显现高度可知，上覆岩层的运动可据此划分为 6 个阶段^[21]，如表 1 所示。

表 1 11 月 2 日—11 月 29 日微震事件显现规律
Table 1 Display regulation of microseismic events from Nov. 2nd to Nov. 29th

时间 阶段	低位岩层		高位岩层	工作面 进尺/m	断裂 步距/m
	0~50 m 层位	50~75 m 层位	75~150 m 层位		
第 1 阶段	2, 3 日	4, 6 日	6 日	21.40	21.40
第 2 阶段	8, 9 日	10~12 日	12 日	39.25	39.25
第 3 阶段	13~15 日	16, 17 日	17 日	37.40	37.40
第 4 阶段	19 日	18, 20, 21 日	21 日	26.15	26.15
第 5 阶段	22, 23 日	—	24 日	23.58	23.58
第 6 阶段	27 日	25, 26, 28 日	29 日	33.40	33.40

由综放开采矿压理论可知，随顶煤放出，工作面坚硬顶板岩层呈现周期性断裂与下沉运动。因此，根据工作面高位岩层破裂分布的阶段特点，结合矿压理论，对照表 1 工作面进尺可知，工作面坚硬顶板岩层的平均断裂步距为 30.2 m。

基于上述分析，工作面顶板岩层的运参数为：下位基本顶周期断裂步距平均为 10.7 m，厚度为 25 m；上位基本顶周期性断裂步距为(30±10) m，厚度为 75 m。下位基本顶的来压受上位基本顶周期运动的影响，来压步距 15~25 m，1 个上位基本顶的运动周期之内包含 2~3 个下位基本顶的运动周期。上位基本顶来压后，下位基本顶来压一般持续 1~2 d。

1.3 沿倾向微震监测揭示的覆岩运动

受工作面开采的影响，由采空区向煤柱方向，微震事件发生的动态演化过程可以划分为以下 3 个阶段。

1) 低位直接顶破裂阶段。受开采影响的小范围破裂区，此过程中岩体破裂主要集中在高度 40 m、倾向 10 m 的范围内，称为“低位直接顶破裂区”。

2) 低位基本顶破裂阶段。随工作面的推进，距离工作面较远的低位岩层持续破裂并逐渐压实，区段煤柱支承压力逐渐向煤柱深部转移，微震事件持续密集发生。此过程中岩体破裂主要集中在高度 75 m、倾向 40 m 的范围内，称为“低位基本顶破裂区”。

3) 高位岩层破裂阶段。低位岩层沉降趋于稳定，支承压力继续向深部转移，高位岩层发生沉降，微震事件主要分布在高度 75 m 以上、倾向 85 m 的范围，称为“高位岩层破裂区”。

2 采场围岩破裂特征分析

煤矿采场不断推进，矿山压力及其显现总是在不断的变化和发展中，搞清矿山压力及其显现的规律和条件的重点不在于某一时刻压力的大小，而在于其发展变化和上覆岩层的活动间的关系。因而，本部分对围岩破裂分布特征进行分析。

2.1 沿走向围岩破裂与支承压力分布关系

为说明沿走向方向特厚煤层综放工作面超前支承压力分布规律，选取了 2007 年 11 月 2 日至 11 月 29 日的微震监测结果进行研究。岩层破裂产生的微震事件数量曲线峰值与支承压力曲线峰值存在一定间距 Δd ，如图 1 所示。

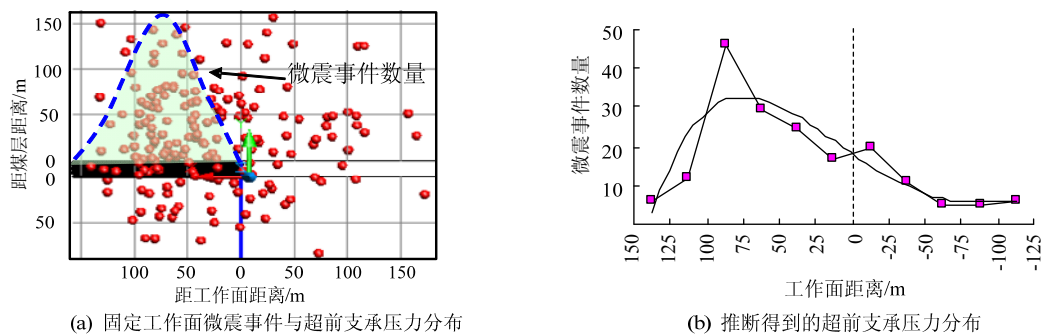


图 1 沿走向微震事件数量分布及推断的超前支承压力分布

Fig.1 MS distribution and inferred support pressure distribution of the fixed face along the direction of face advance

2.2 沿倾向围岩破裂与支承压力分布关系

为说明正常推进阶段特厚煤层综放开采侧向煤体岩层破裂及采动应力场,选取 2007 年 11 月 18 日至 11 月 29 日的监测数据进行研究,如图 2 所示,期间工作面共推进了 83.08 m。

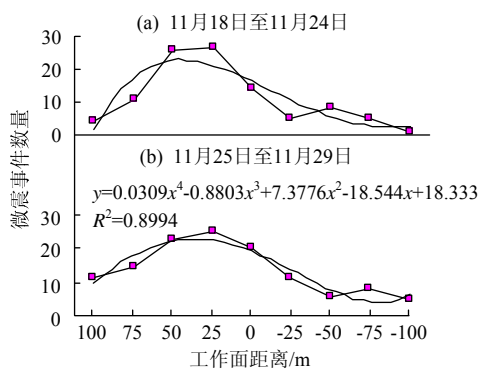


图 2 推断的侧向支承压力沿倾向分布

Fig.2 MS events distribution and the lateral abutment pressure distribution along the dip direction

将 2007 年 11 月 18 日至 11 月 24 日期间的微震事件分布投影至沿倾向的剖面,见图 2a,可得到沿倾向侧向煤柱覆岩层微震事件数量曲线,根据微震事件分布数量与岩层受压破裂的关系可以推断,侧向煤柱支承压力曲线见图 2a,应力峰值距离巷帮约 34 m。同理,根据 2007 年 11 月 25 日至 11 月 29 日期间(工作面推进了 33.35 m)的微震事件分布数量曲线,可推断侧向煤柱支承压力曲线见图 2b。

根据图 2 的分析,结合矿山压力理论,可以推断特厚煤层四周实体煤综放工作面侧向煤柱支承压力峰值距离巷帮约 35 m。

3 支承压力分布的综合对比分析

3.1 数值模拟得到的支承压力分布

图 3a 为数值计算得到的煤体侧向压力分布倾向剖面图,图中绿色云图为原岩应力区域,数值计

算得到的原岩应力约为 12.5 MPa;两图中玫瑰红色亮点区域(即应力峰值区域)应力约为 20 MPa,应力集中系数为 1.6。从图 3 中可看出,受工作面采动影响,侧向煤体压力分布可分为 4 个区域:距离巷帮约 18 m 的塑性区、距离巷帮约 36 m 的应力极限平衡区、距离巷帮约 56 m 的高应力区和距离巷帮约 97 m 的采动影响区。综合考虑数值模型与实际存在的差异,推断得到的侧向煤体支承压力峰值距离巷帮约 35 m。

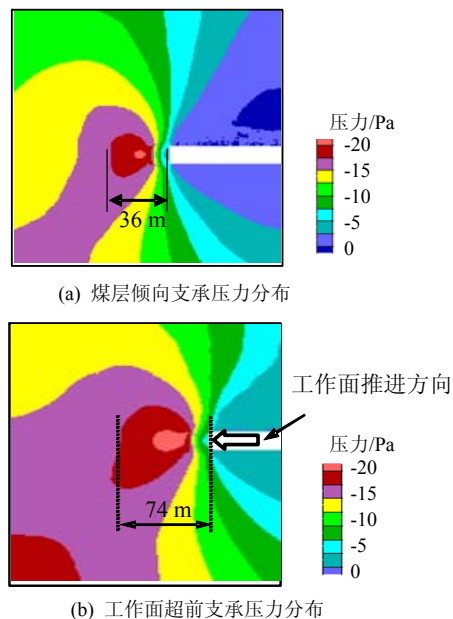


图 3 模拟得到的支承压力分布

Fig.3 Abutment pressure distribution from numerical simulation

图 3b 为数值计算得到的工作面超前压力分布走向剖面图,图中黄色云图为原岩应力区域,数值计算得到的原岩应力约为 12.5 MPa;紫色区域的应力约为 15 MPa,应力集中系数为 1.2;红色区域的应力约为 17.5 MPa,应力集中系数为 1.4;玫瑰红色亮点区域(即应力峰值区域)应力约为 20 MPa,应

力集中系数为 1.6。受工作面采动影响,煤体超前压力分布可以分为 4 个区域、距离工作面约 25 m 的超前煤体大变形区、距离工作面煤壁约 47 m 的超前影响剧烈区域;距离工作面平巷约 74 m 的明显影响区域和距离工作面平巷约 100 m 的超前应力影响不明显区域。在走向方向,考虑到数值模型与实际存在的差异,推断得到支承压力高压区为超前煤壁 75 m 范围。

3.2 微震监测结果推断与数值模拟结果对比

结合上述分析,由采空区上方的应力突变区可推断高位顶板距离煤层约 150 m,基本顶岩层的厚度为 100 m 左右,蓝色区域位于采空区上方,为零应力区,可以推断直接顶距离煤层约 50 m。距离巷帮约 36 m 范围的应力峰值区,压力为 20 MPa,应力集中系数为 1.6;距离巷帮约 56 m 范围的低应力区,压力为 17.5 MPa,应力集中系数为 1.4;距离工作面平巷约 97 m 范围的支承压力影响区,压力为 15 MPa,应力集中系数为 1.2。其中原岩应力为 12.5 MPa。因此可确定煤柱支承压力峰值区距离巷帮约 36 m,靠近采空区一侧的低应力区距离巷帮约 18 m,远离采空区一侧的低应力区距离巷帮约 56 m,采动影响范围约 97 m。数值计算结果表明,二者所得区段煤柱支承压力分布规律基本上是一致的,区段煤柱应力峰值区距离巷帮约 35 m(微震监测结果)和 36 m(数值计算结果)。微震监测结果与数值计算结果的对比见表 2。

表 2 微震监测结果与数值计算结果对比

Table 2 Comparison between MS and numerical simulation

项目	岩层破坏高度/m		高压区/m		塑性区范围/m	
	直接顶	高位岩层	超前煤壁	侧向距巷帮	超前方向	侧向方向
微震监测结果	50	100	75	35	—	—
数值计算结果	53	103	74	36	25	20

对于超前应力峰值,微震监测得到的是煤岩体运动的综合监测结果(涵盖了实际煤岩层中的多种地质构造等条件),而数值计算得到的煤岩体应力则是基于弹塑性理论的结果。对比研究表明,微震监测结果与数值计算结果基本一致。

4 工程验证

为检验基于微震监测分析结果的可靠性,通过在工程现场柔性锚杆端部安装变头与测力仪作为测站,对采动影响下围岩应力变化进行现场实测验证。钻孔高度距离底板 1.2~1.5 m,锚杆长度为 2 200

mm。通过对数据进行多次指数平滑处理,将观测的数据输入计算机,采用最小二乘法通过分析可得到动态仪距工作面距离与顶板下沉速度的曲线如图 4 所示。根据压力分布范围拟合曲线可看出,在工程现场矿山压力显现剧烈区为 56 m 左右,与围岩破裂诱发微震事件的数量分布极值区相差 19 m 左右。考虑煤矿地层分层性和岩体由受力到破坏显现的滞后性等情况,基于微震监测的支承压力高应力区分布范围综合分析结果基本符合现场实际情况,研究结果是可靠的。

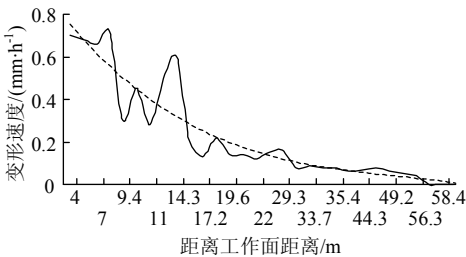


图 4 测站距工作面距离与围岩变形速度关系曲线

Fig.4 Curve of relationship of station distance away from the face and surrounding rock deformation velocity

此外,在四周实体煤工作面,采场微震事件数量分布极值区与工作面煤壁距离 75 m(支承压力分布高应力区)与现场矿山压力显现剧烈区 56 m 相差 19 m,即可初步给出微震事件分布与支承压力分布关系经验公式: $Y(n)=M(n)+\Delta d$ 。式中 Y 为支承压力高应力区距离工作面煤壁距离, m; M 为微震事件数量极值区距离工作面煤壁距离; n 为微震事件数量; Δd 为差值,依据煤层厚度不同,取值范围为 10~30 m(基本顶岩梁的一次断裂步距),此处为 19 m。受工作面上覆坚硬岩层的影响,工作面存在多层坚硬岩层时, Δd 值根据现场周期来压步距确定。

5 结 论

1) 微震监测结果表明,围岩破裂分布特征为:沿走向,超前工作面高支承压力区距离煤壁约 37~75 m 和 75~125 m(取平均时峰值区为 56~112 m 左右),采空区支承压力分布范围距离煤壁约 0~160 m;沿倾向,工作面侧向高支承压力区距离巷道帮壁约 12~62 m(取平均时峰值区为 36 m 左右)。

2) 计算机模拟结果表明,支承压力分布规律为:沿走向,超前工作面高支承压力区距离煤壁约 15~74 m;沿倾向,工作面侧向高支承压力区距离巷道帮壁约 12~56 m(取平均时峰值区为 34 m 左右)。

3) 综合考虑煤矿地层分层性和岩体由受力到破坏显现的滞后性等情况, 结合现场实际矿压观测结果, 经对比研究表明, 基于微震监测的支承压力高应力区分布范围综合分析结果基本符合现场实际情况, 研究结果是可靠的。

4) 开采扰动造成上覆岩层运动破坏和支承压力调整转移, 是围岩发生规律性破坏的根本原因, 通过对采场围岩破裂分布特征的研究, 可以评价支承压力的动态分布特征, 二者统一于开采对岩层的扰动程度。

5) 微震事件分布与支承压力分布关系可表述为: 微震事件数量分布极值区与工作面煤壁的距离 = 支承压力高应力区距离工作面煤壁距离 + 基本顶岩梁的一次断裂步距。

6) 受工作面上覆坚硬岩层的影响, 工作面存在多层坚硬岩层时, Δd 值可根据现场周期来压情况确定。

参考文献:

- [1] 闫少宏, 贾光胜, 刘贤龙. 放顶煤开采上覆岩层结构向高位转移机理分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1996, 13(3): 3-5.
YAN Shaohong, JIA Guangsheng, LIU Xianlong. Analysis of mechanism of overlying strata structure transmitting toward upper position in top coal caving[J]. Chinese Journal of Ground Pressure and Strata Control, 1996, 13(3): 3-5.
- [2] 蒋金泉, 谭云亮, 宋扬. 支承压力显现的动态规律与来压预报方法[J]. 工程地质学报, 1994, 2(3): 275-283.
JIANG Jinquan, TAN Yunliang, SONG Yang. The dynamic law of abutment pressure manifestation and the forecasting method of roof weighting[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(3): 275-283.
- [3] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 97-106.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 97-106.
- [4] 高峰, 钱鸣高, 缪协兴. 采场支架工作阻力与顶板下沉量类双曲线关系的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 658-662.
GAO Feng, QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Discussion on the hyperbolic relation between support resistance and immediate roof subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 658-662.
- [5] 马庆云, 赵晓东, 宋振骥. 采场基本顶岩梁的超前破坏与矿山压力[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 473-477.
MA Qingyun, ZHAO Xiaodong, SONG Zhenqi. Break of main roof ahead of workface and ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 473-477.
- [6] 代进, 李洪, 蒋金泉. 放顶煤工作面端头“弧三角形悬板”的弹性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4757-4760.
DAI Jin, LI Hong, JIANG Jinquan. Elastic analysis of suspended triangle roof plate with curve side on the end of sub-level caving mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Sup 2): 4757-4760.
- [7] 姜福兴, 马其华. 深部长壁工作面动态支承压力极值的求解[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 273-275.
JIANG Fuxing, MA Qihua. Mechanical solution of the maximum point of dynamic abutment pressure under deep long wall working face[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 273-275.
- [8] 唐春安, 徐曾和, 徐小荷. 岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统在采场上覆岩层移动规律研究中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 1999, 18(5): 456-458.
TANG Chun'an, XU Zenghe, XU Xiaohe. Application of analysis system RFPA^{2D} of rock fracture process in researching moving rules of covering workface[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 1999, 18(5): 456-458.
- [9] 吴健, 陆明心, 张勇, 等. 综放工作面围岩应力分布的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 2): 2356-2359.
WU Jian, LU Mingxin, ZHANG Yong, et al. Simulation research on stress distribution of surrounding rocks of LTCC workface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Sup 2): 2356-2359.
- [10] 司荣军, 王春秋, 谭云亮. 采场支承压力分布规律的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 351-354.
SI Rongjun, WANG Chunqiu, TAN Yunliang. Numerical simulation of abutment pressure distribution laws of working faces[J]. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 351-354.
- [11] 浦海, 缪协兴. 综放采场覆岩冒落与围岩支承压力动态分布规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1122-1126.
PU Hai, MIAO Xiexing. Numerical simulation of dynamic falling of overlying rocks and abutment pressure in surrounding rocks for fully-mechanized top-coal caving stope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1122-1126.
- [12] 王同旭, 刘传孝, 王小平. 孤岛煤柱侧向支承压力分布的数值模拟与雷达探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 2): 2484-2487.

- WANG Tongxu, LIU Chuanxiao, WANG Xiaoping. Numerical simulation and radar detection of lateral abutment pressure distribution of isolated coal pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Sup 2): 2484-2487.
- [13] 靳钟铭, 魏锦平, 靳文学. 放顶煤采场前支承压力分布特征[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(3): 216-218. JIN Zhongming, WEI Jinping, JIN Wenxue. Distributive characteristic of front abutment pressure in top-coal caving face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(3): 216-218.
- [14] 陈忠辉, 谢和平. 综放采场支承压力分布的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 436-439. CHEN Zhonghui, XIE Heping. Damage mechanics analysis on the distribution of abutment pressure around a coal face[J]. Journal of Rock and Soil Mechanics, 2000, 19(4): 436-439.
- [15] 赵玉武, 曲瑛新, 熊文平. 微震监测技术在低渗透油田裂缝研究中的应用: 以大庆西部外围低渗透油田为例[J]. 中国工程科学, 2012, 14(4): 34-39. ZHAO Yuwu, QU Yingxin, XIONG Wenping. Application of microseismic mapping in the study of low permeable oilfield fracturing: taking the low permeability oilfield at Daqing oilfield western periphery for example[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(4): 34-39.
- [16] 李铁, 蔡美峰, 纪洪广, 等. 强矿震预测的研究[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 260-263. LI Tie, CAI Meifeng, JI Hongguang, et al. Study on forecasting strong mining-induced earthquake[J]. Chinese Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 260-263.
- [17] 蒋海昆, 宋金, 吴琼, 等. 基于 ETAS 模型对三峡库区流体触发微震活动的定量检测[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2341-2352. JIANG Haikun, SONG Jin, WU Qiong, et al. Quantitative investigation of fluid triggering on seismicity in the Three Gorge Reservoir area based on ETAS model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2341-2352.
- [18] 成云海, 姜福兴, 张兴民, 等. 微震监测揭示的 C 型采场空间结构及应力场[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 102-107. CHENG Yunhai, JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin, et al. C-shaped strata spatial structure and stress field in longwall face monitored by microseismic monitoring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 102-107.
- [19] 孔令海, 姜福兴, 杨淑华. 基于高精度微震监测的特厚煤层综放工作面顶板运动规律研究[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(5): 552-558. KONG Linghai, JIANG Fuxing, YANG Shuhua, et al. Roof strata movement in extra-thick coal seam in fully mechanized sublevel caving mining based on high precision microseismic monitoring system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(5): 552-558.
- [20] CAI M, KAISER P K. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(8): 1135-1145.
- [21] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511-1516. JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [22] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1002-1011. PAN Yishan, ZHAO Yangfeng, GUAN Fuhai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1002-1011.
- [23] 焦明若. 细观非均匀性对岩石破裂过程和微震序列类型影响的数值试验研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 659-666. JIAO Mingruo. Numerical test of influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure and seismic sequence types[J]. Chinese Journal Geophysics, 2003, 46(5): 659-666.
- [24] 陈颢. 单轴压力下岩石破裂的初步研究[J]. 地球物理学报, 1976, 19(4): 306-316. CHEN Yong. A preliminary study on the fracture of rocks under uniaxial compression[J]. Chinese Journal Geophysics, 1976, 19(4): 306-316.
- [25] 唐春安, 徐小荷. 岩石破裂全过程与孕震全序列[J]. 地震学报, 1991, 13(4): 517-521. TANG Chun'an, XU Xiaohe. Complete process of rock failure and the complete course of seismogeny[J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(4): 517-521.