

DOI: 10.11779/CJGE201510004

上覆高位岩浆岩下离层空间的演化规律及其预测

蒋金泉, 王 普, 武泉林, 张培鹏

(山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘 要: 针对工作面上覆高位硬厚岩浆岩条件, 采用相似材料模拟试验研究了主关键层下离层空间的演化过程与形态特征, 分析了离层空间的层位演化与横向扩展规律、覆岩与主关键层的运移规律; 通过理论分析揭示了离层空间形成的机理与条件, 提出了离层空间演化特征的确定方法, 建立了主关键层底部最大离层空间的分析模型与预测方法。研究表明: 岩层组合失稳运移形成“月牙”形离层空间, 以间歇式跳跃上升至岩浆岩底部, 岩浆岩底部存在较大的离层空间, 并由“月牙”形逐渐转变为“一字”形, 岩浆岩破裂运移导致离层闭合。离层空间在亚关键层及主关键层底部自下而上动态发育与闭合, 层位高度及发育范围与推进距离呈正相关性, 可采用“多梯形”方法确定其演化过程。覆岩运移经历下位关键层沉降、运移向主关键层底部发展、底部盆地沉降、岩浆岩运移及整体稳定等 5 个状态, 覆岩下沉形态先后呈“V”型、“√”型及“U”型。岩浆岩运移过程分为下部支撑、底部离层扩展、破裂随动、失稳运移及离层闭合稳定等 5 个阶段。建立了最大离层空间的覆岩结构及弹性基础梁模型, 得到其断面积和体积的预测计算式, 为高位岩浆岩下安全开采提供了理论依据。

关键词: 硬厚岩浆岩; 高位主关键层; 模拟试验; 离层空间演化; 覆岩运移; 最大离层空间

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1769-11

作者简介: 蒋金泉(1961-), 男, 江苏如东人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制等方面的教学和科研。E-mail: jjqsd@163.com。

Evolution laws and prediction of separated stratum space under overlying high-position magmatic rocks

JIANG Jin-quan, WANG Pu, WU Quan-lin, ZHANG Pei-peng

(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: According to the thick hard conditions of separated stratum space under overlying high-position magmatic rocks in working surface, the evolution rules and morphological characteristics of separated stratum space under the main key strata are studied by similar material simulation test. The horizon evolution and horizontal scaling law of separated stratum space and the migration law of overlying strata and the main key strata are analyzed. Through theoretical analysis, the formation mechanism and conditions of separated stratum space are revealed. A method to determine the evolution characteristics of separated strata space is put forward, and the analysis model and prediction method of the maximum separated stratum space at the bottom of main key strata are proposed. Researches show that the instability migration of combined strata forms a "crescent moon" shaped separated stratum space which intermittently jumps up to the bottom of the magmatic rocks. When the separated stratum space densely exists at the bottom of the magmatic rocks, and is gradually transformed from the "crescent" form into the "straight line" one, the burst migration of magmatic rocks contributes to the closure of separated strata. The separated stratum space lies at the bottom of the inferior key stratum and the main key stratum dynamically develops and closes from bottom to top. There is a positive correlation between the layer heights together with the development scope and the advancing distance. The "multi-trapezium" method can be used to determine its evolution process. The migration of overlying strata experiences five-state subsidence of the inferior key stratum, development migration to the bottom of main key stratum, migration of the magmatic rocks and the overall stability. The subsidence form of the overlying strata is successively presented as shapes of "V", "√" and "U". The migration of magmatic rocks can also be divided into five steps which are named lower support, extension of the bottom separated stratum space, rupture of

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374139); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEM018); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目
收稿日期: 2014-09-26

the follow-up, instability migration and stable closing of separated stratum space. The overlying strata structure of the maximum separated stratum space and the elastic foundation beam model are established, and the forecast formula for its area and volume is derived so as to provide theoretical basis for the safety mining under high magmatic rocks.

Key words: hard thick magmatic rock; high-position main key stratum; simulation test; spatial evolution of separated stratum; migration of overlying stratum; space of maximum separated stratum

0 引言

一些煤矿上覆岩层中赋存着坚硬巨厚的岩浆岩,如淮北海孜煤矿、杨柳煤矿,兖州济三煤矿,临沂王楼煤矿等,岩浆岩厚度几十米至一百多米,强度高、厚度大,整体性较好;一部分煤矿上覆赋存着强度较高的巨厚石英砂岩或砾岩^[1-2]。在煤层开采中,高位坚硬巨厚岩层呈现大面积失稳运移,可能产生强烈的动力现象,如诱发瓦斯异常及突出、支架动载及压架、矿震及冲击地压、离层瓦斯-水喷出等,给煤矿生产带来了安全隐患^[3-4]。

工作面覆岩具有分层性及岩性差异性,以弯曲刚度相对较高的岩层为依托发生组合沉降,在不同步弯曲沉降的层间产生离层。当存在高位坚硬巨厚主关键层时^[5-6],硬厚主关键层失稳运移前的沉降变形很小,下部岩层运移过程中不仅产生离层裂隙,而且必然会形成较大的离层空间,导致硬厚主关键层大面积悬空,为失稳运移及动力灾害创造了条件。因此,硬厚主关键层下部离层空间的发育具有相应的特点,其研究对坚硬巨厚岩层条件下动力灾害的预测及防治具有重要的理论意义及应用价值。

工作面推进过程中,不同地层结构与开采条件的离层发育过程与分布特征也不同。宁掌玄等^[7]通过相似模拟和数值模拟研究了覆岩离层过程与离层注浆时机的选择;王金山等^[8]采用三维数值模拟研究了覆岩破坏、移动变形及离层发展的时空规律,确定了可充填的离层区域范围;苏仲杰等^[9]采用 RFPA 岩石破裂分析系统研究了覆岩离层的受力状态及其发生机理;蒋金泉等^[10]采用建立弹性薄板力学模型的理论分析方法研究了高位硬厚岩层的破断失稳规律;章伟等^[11]利用莫尔-库仑破坏准则,建立了覆岩离层形成的力学判据;李小琴^[12]采用理论分析和数值模拟分析了海孜矿巨厚火成岩下离层发育的动态变化特征;胡青峰^[13]基于关键层理论建立了覆岩运移变形预测模型,研究了覆岩关键层下地表移动及离层发育规律;王亮等^[14]采用板应力拱平衡理论研究了采动离层裂隙的发育规律,揭示了厚硬火成岩下突出灾害的致因。

覆岩离层发生于地下,具有不可视性及不可触性,且坚硬巨厚岩层条件下离层发育特征不同于一般覆

岩。为此,针对上覆高位硬厚岩浆岩的地层结构,采用相似材料模拟试验,直观模拟离层空间发育的时空演化过程,分析揭示离层空间的演化规律、形态特征、层位与范围的扩展规律,研究硬厚主关键层及覆岩的运移规律;采用理论分析方法,分析离层空间的形成机理及条件,提出离层空间演化过程的确定方法,建立硬厚岩层主关键层下最大离层空间的分析模型及其预测方法。研究结果可对类似赋存条件下离层空间的预测提供科学的理论指导和有效的计算方法,同时可为岩浆岩下煤层开采的灾害预测及离层注浆等控制技术提供参考。

1 相似材料模拟试验设计

1.1 相似材料模型设计

针对工作面上覆岩层中赋存着高位硬厚岩浆岩的地层特点,按照相似理论构建相似材料试验模型,模拟研究工作面开采过程中高位硬厚岩浆岩下覆岩离层空间的发育过程、形态特征及其演化规律,并提出离层空间演化过程的确定方法。

相似材料模拟试验遵循相似三定理理论,应满足几何相似、运动相似、边界相似及对应物理量成比例的要求^[15-16]。由于覆岩离层的隐蔽性与不可见性,为直观再现覆岩离层空间的发育状态,模型试验采用平面相似模拟试验系统,试验台长×宽×高的有效尺寸为 $3\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 。模型设计采用的几何相似比为 $C_l = 1/200$,重度相似比 $C_\gamma = 1/1.5$,弹性模量相似比 $C_E = 1/300$,强度相似比 $C_\sigma = 1/300$ 。相似模型的覆岩组成及主要参数见表 1,模拟地层原型的主要特征为:开采煤层厚度 8 m ,上覆岩层主要由细砂岩、粉砂岩、泥岩、煤层及岩浆岩等岩性组成,上覆高位岩浆岩厚度为 60 m ,距开采煤层的层间距为 80 m 。对应原型的岩层单向抗压强度以淮北矿业集团杨柳煤矿地层岩石力学参数为依据,根据相似理论及相似条件计算得到模型中各岩层的单向抗压强度,选取相应的相似材料配比。模拟试验选取河砂作为填充材料,石膏配合碳酸钙作为胶结材料,模型各岩层的单向抗压强度及其相似材料配比号见表 1。模型制作过程中在各岩层之间采用云母粉进行分层,反映相邻岩层之间

表 1 模型岩层参数及配比
Table 1 Rock parameters and matching of model

岩层名称	厚度/mm	累计厚度/mm	弹性模量/MPa	抗压强度/kPa	配比号	密度/(kg·m ⁻³)	备注
粉砂岩	60	1627	15.2	92	755	1600	
泥岩	60	1567	9.8	57.4	864	1500	
细砂岩	60	1507	16.8	105	782	1600	
粉砂岩	52	1447	15.2	92	755	1600	
泥岩	52	1395	9.8	57.4	864	1500	
粉砂岩	50	1343	15.2	92	755	1600	
泥岩	120	1293	9.8	57.4	864	1500	
细砂岩	70	1173	16.8	105	782	1600	
砂质泥岩	44	1103	9.8	70.3	864	1500	
细砂岩	48	1059	16.8	105	782	1600	
泥岩	46	1011	9.8	57.4	864	1500	
粉砂岩	54	965	15.2	92	755	1600	
泥岩	36	911	9.8	57.4	864	1500	
岩浆岩	300	875	46.67	265	737	1500	主关键层
泥岩	15	575	9.8	57.4	864	1500	
细砂岩	28	560	16.8	105	782	1600	
砂质泥岩	30	532	9.8	70.3	864	1500	
粉砂岩	32	502	15.2	92	755	1600	亚关键层
#8 煤	16	470	7.8	53.3	864	1500	
粉砂岩	15	454	15.2	92	755	1500	
泥岩	32	439	9.8	57.4	864	1500	
粉砂岩	32	407	15.2	92	755	1600	亚关键层
砂质泥岩	40	375	9.8	57.4	864	1500	
粉砂岩	30	335	15.2	92	755	1600	亚关键层
泥岩	28	305	9.8	57.4	864	1500	
粉砂岩	30	277	15.2	92	755	1600	关键层
花斑泥岩	30	247	9.8	22.2	864	1500	
粉砂岩	30	217	15.2	92	755	1600	
细砂岩	12	187	16.8	105	782	1600	
开采煤层	40	175	7.8	53.3	864	1500	工作面
粗砂岩	135	135	16.2	120	773	1600	

的层面效应。

模型中上覆岩层总厚度 1452 mm, 通过施加铁块模拟上部均布载荷, 所加载铁块的总质量为 500 kg, 根据模型相似比, 原型的开采深度为 340.4 m。为消除边界效应的影响, 模型开采时左右两侧各留设 250 mm 煤柱, 模型开采长度为 2.5 m, 工作面从右端向左端推进, 根据几何相似比, 模拟原型的工作面推进距离为 500 m。

1.2 覆岩位移观测方法

在试验模型表面布置宽×高为 100 mm×100 mm 的平面网格, 用以观察模型开采过程中上覆岩层的运移状态。采用照相方法记录覆岩破裂结构与离层空间的发育特征。

根据关键层判别方法及判别软件^[17], 上覆硬厚岩浆岩为主关键层。为此, 覆岩位移测线和测点布置如图 1 所示, 在煤层上覆岩层的不同层位布置 5 排位移测线, 由下而上依次标记为#1~#5 测线, 每条测线沿模型走向从右端依次布置 29 个测点, 编号分别为#1~#29。其中, #1 测线布置断裂带底部附近, 距离煤层的

高度为 125 mm; #2、#3 测线布置在岩浆岩下部附近的岩层中, 距离煤层的高度分别为 325 mm 和 375 mm; #4 测线布置在岩浆岩的底部层位上, 距离煤层的高度为 425 mm; #5 测线布置在岩浆岩的上部岩层中, 距离煤层的高度为 1125 mm, 与岩浆岩的层间距为 425 mm。模型表面布置了 145 个位移测点, 每个测点用大头针固定 20 mm×20 mm 的十字反光片作为位移监测点, 模型开采过程中采用尼康 Nivo 2.M 免棱镜全站仪配合三脚架对监测点进行位移测量。由于模型尺寸较大, 标记的位移监测点较多, 试验中只对采动影响范围内的测点进行位移测量采集。

2 高位硬厚岩浆岩下离层空间的演化规律

2.1 高位岩浆岩下离层空间的发育过程与形态特征

模型开采过程中, 在上覆高位硬厚岩浆岩初次破裂运移前后, 典型覆岩结构条件下离层空间的发育状态如图 2 所示。随着工作面的不断推进, 采空区上方顶板岩层发生垮落, 垮落带上覆岩层首先处于悬空及

弯曲下沉状态,再发生离层、破裂运动,覆岩离层空间自下而上逐步发展。

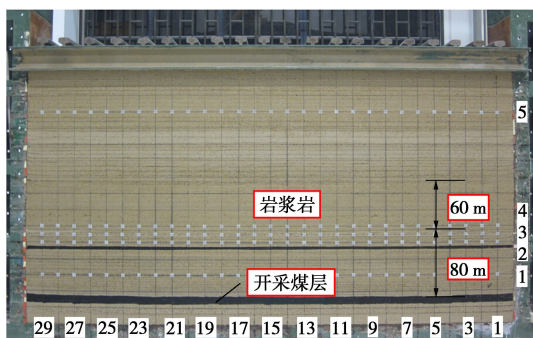


图1 测线和测点布置

Fig. 1 Arrangement of measuring points and lines

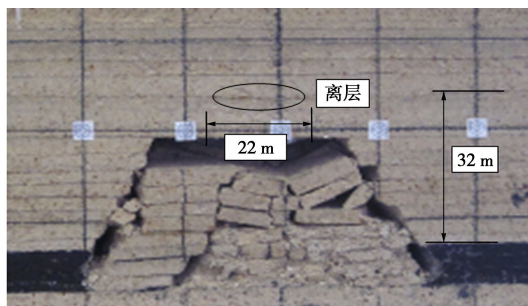
如图2(a)所示,工作面推进70 m时,采空区上方关键层处于悬空状态,与下部规则垮落带之间存在着较大的运动空间,关键层发生弯曲下沉,并与上部岩层之间出现了微小的离层裂隙,离层裂隙距煤层高度32 m。如图2(b)所示,工作面推进100 m时,关键层及其随动岩层在两端及中部发生破断,呈现组合运动,并与上部岩层之间出现了显著的“月牙”形离层空间,离层空间的长度达到40 m,中部最大高度达到3 m,距煤层高度40 m。上覆岩层之间的厚度和强度存在差异性,覆岩破断角的存在使下位岩层与上位岩层之间的实际悬跨度也有一定的差异,致使覆岩发生分组破断运动,组合岩层之间出现了不同步破断运动,从而形成破断运动岩层与上部未破断岩层之间的离层空间。

如图2(c)~(e)所示,在工作面推进至120, 140, 160 m过程中,硬厚岩浆岩下部的覆岩组合运动不断向上发展,组合运动后原有的下部离层空间基本闭合,新的“月牙”形离层空间随之转移到上部层位。随着工作面推进,在覆岩组合运动向上发展过程中,离层空间的层位由距离煤层高度40 m逐步上升到46.4, 62.2, 80 m,随着垮落岩层的逐步压缩,“月牙”形离层空间的高度和长度有所扩展。当工作面推进160 m时,“月牙”形离层空间初次发育至硬厚岩浆岩的底部层位,其高度达到4.6 m,长度为66 m。在离层空间由下部亚关键层发育至高位岩浆岩底部过程中,“月牙”形离层空间在推进方向上基本上处于采空区中部,但稍偏于开切眼一侧。

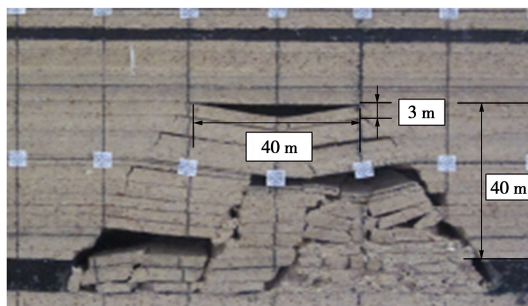
如图2(f)、(g)所示,当工作面推进200, 240 m时,岩浆岩底部离层空间的长度分别达到104, 116 m,随着垮落带的逐渐压实及下部离层裂隙的闭合,离层空间的高度基本不再发生变化,最大高度稳定在5 m

左右。因此,在离层空间发展到岩浆岩底部以后,硬厚岩浆岩作为覆岩主关键层,对覆岩离层空间的发展起到阻隔作用,在硬厚岩浆岩破裂运移前,随着推进距离的增加,离层空间的层位被止于岩浆岩底部,推进方向上的发育范围继续扩展,离层高度趋于稳定,且岩浆岩底部离层空间的形态由“月牙”形逐渐转变为“一字”形。

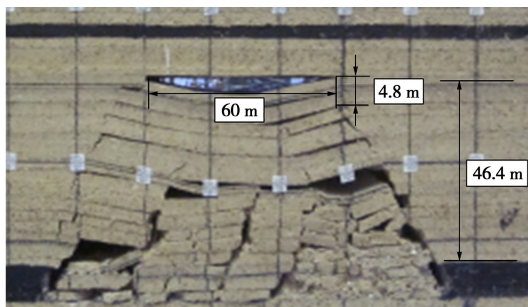
如图2(h)所示,当工作面推进至380 m时,岩浆岩的悬空跨度达到极限跨距272 m,发生了初次全厚破裂运移,岩浆岩上部大范围岩层以岩浆岩为依托产生同步协调的破裂沉降,岩浆岩及其随动岩层发生了破裂与运移,从而导致岩浆岩底部大面积离层空间的闭合。在距岩浆岩较高的层位上,覆岩处于弯曲变形沉降状态,最终表现为模型顶端岩层的沉降。由于岩层之间抗弯刚度的差异,岩浆岩上部的高位岩层可能存在着一定的离层裂隙,距岩浆岩顶部116 m的层位暂时残留长度80 m、高度3.6 m的离层空间,将随着顶部覆岩的沉降而逐渐闭合。



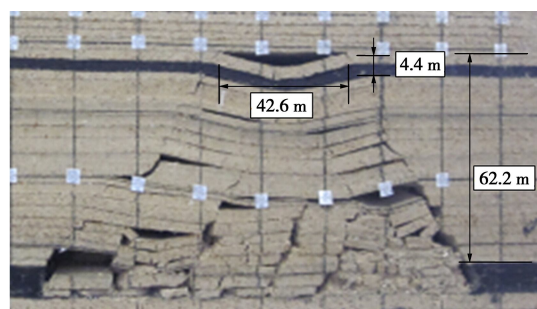
(a) 推进70 m关键层出现微小离层裂隙



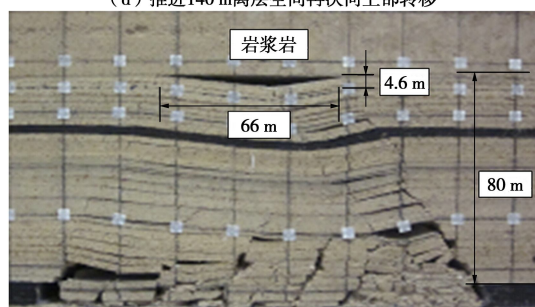
(b) 推进100 m关键层破断运动后形成“月牙”形离层空间



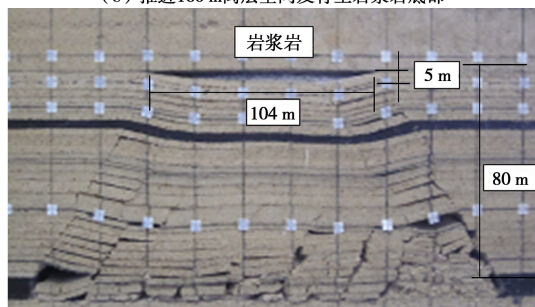
(c) 推进120 m离层空间向上部转移



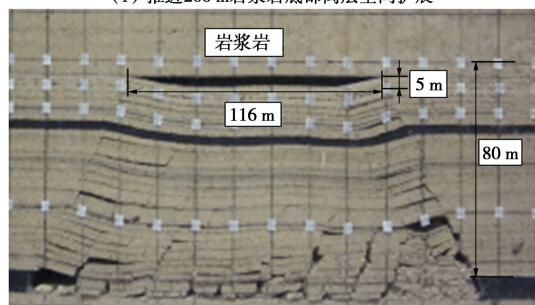
(d) 推进140 m离层空间再次向上部转移



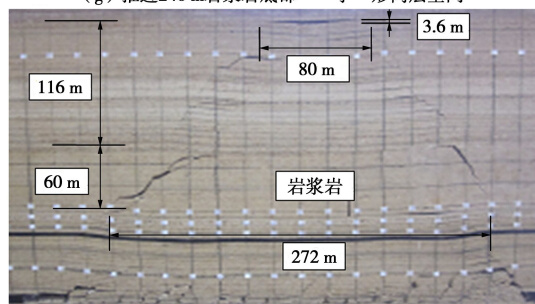
(e) 推进160 m离层空间发育至岩浆岩底部



(f) 推进200 m岩浆岩底部离层空间扩展



(g) 推进240 m岩浆岩底部“一字”形离层空间



(h) 推进380 m岩浆岩破裂运移后离层空间闭合

图2 岩浆岩破裂前后覆岩离层空间的演化过程

Fig. 2 Evolution process of separated stratum space in overlying strata before and after break of magmatic rocks

2.2 高位岩浆岩下离层空间的层位演化规律

覆岩离层空间的层位高度与工作面推进距离的关系如图3所示。由图3及图2可知,当工作面推进70,

100, 120, 140, 160 m时,离层空间的层位高度分别为32, 40, 46.4, 62.6, 80 m,之后层位保持不变。可见,硬厚岩浆岩破裂运移之前,下部岩层的离层空间在纵向上发育的层位与工作面推进距离的有关,随工作面推进距离的增大,覆岩组合运动的高度不断上升,离层空间的层位随着组合运动发展而相应地上升。层位高度与工作面推进距离基本呈线性正相关关系,且一般是推进距离的0.39~0.5倍。

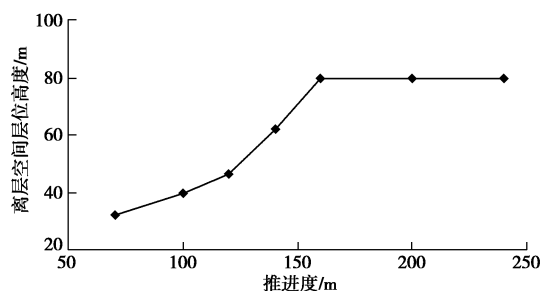


图3 离层空间的层位与工作面推进距离的关系

Fig. 3 Relationship between position of separated stratum space and advancing distance of working face

上覆高位硬厚岩浆岩的强度高、整体性较好,开采过程中能够大面积悬空,形成大跨距破裂运移,成为控制覆岩运移与结构状态的主关键层,在初次破裂运移前对覆岩离层空间的发育起到了屏蔽作用,阻碍着离层空间向上发展,离层空间止于岩浆岩底部。一旦岩浆岩主关键层发生破裂运移,其上方岩层甚至直到地表的所有岩层将发生同步或近乎同步下沉,较大的离层空间几乎全部闭合。

因此,在高位硬厚岩浆岩主关键层下,离层空间的层位总是处于关键层、亚关键层或者主关键层的底部,并自下而上的发育形成与压缩闭合,离层空间按照各关键层的层位跳跃式上升。

2.3 高位岩浆岩下离层空间的横向扩展规律

覆岩离层空间随工作面采动而发生动态变化,它不仅是离层空间的纵向层位变化,还有推进方向横向长度的变化。

如图2所示,上覆岩层破断线倾向煤壁后方,未破断的部分呈悬臂外伸状态,随着纵向层间距的增加,覆岩破断位置不断向采空区一侧偏移,这些破断位置的连线为覆岩破断线,它基本上是一条倾向采空区的直线,破断线与煤层走向的夹角即为覆岩破断角。破断角在不同推进度时的变化不大,约为 $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。切眼一侧的破断角稍大于工作面煤壁一侧,两者的差异不大。

由图2可知,在岩浆岩破裂前,岩浆岩下方离层空间的层位随开采尺寸的增大而逐渐上升,其长度随开采尺寸的增大基本上是逐渐扩展的。当离层空间发

育至岩浆岩底部后, 离层空间层位在纵向上不再继续上升, 但横向长度则随着下部岩层的沉降而持续扩展, 直至达到岩浆岩破裂的极限跨距为止。高位硬厚岩浆岩下部的“月牙”形或“一字”形离层空间, 在推进方向上的发育范围基本上与覆岩破断角划定的范围一致。

2.4 高位岩浆岩下离层空间的确定方法

高位岩浆岩下覆岩离层空间的长度与破断线有关, 可以通过覆岩破断角来圈定其范围及长度; 离层空间的层位可以按照各关键层的层位来确定, 由此提出离层空间演化过程的“多梯形”确定方法, 如图 4 所示。各个离层空间的层位高度和长度采用上窄下宽的梯形来确定, 梯形的倾斜边为覆岩破断线, 梯形的顶部为关键层、亚关键层及主关键层等各关键层的底边界, 最大高度至岩浆岩主关键层的底部层位为止。该确定方法可勾画出离层空间及其演化过程, 既简单又符合工程要求。

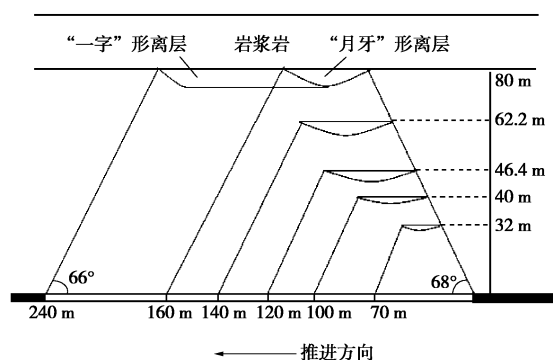


图 4 岩浆岩下离层空间的梯形确定方法

Fig. 4 Trapezoidal determining method for separated stratum space under magmatic rocks

3 高位硬厚岩浆岩下离层空间的形成机理及条件

3.1 高位岩浆岩下离层空间形成的机理

根据相似材料模拟试验, 结合压力拱假说, 在采空区上方, 上覆岩层将形成压力拱及免压区。当工作面推进距离较小时, 顶板以岩梁或岩板的形式承受着覆岩压力及自身重力, 保持着上覆岩层力学结构的平衡。如图 2 (b) 所示, 由于岩性、厚度的不同及层间弱面效应, 顶板岩层达到其极限跨度时, 将发生弯曲变形及组合破断失稳, 顶板压力向两侧转移。上部岩层继而又呈现新的悬空岩梁或岩板, 以单层或成组的形式发生破断运动, 不断向上发展至岩浆岩底部。随着距离煤层高度的增加, 覆岩破断线总是较下部破断边界向采空侧偏移, 其上部岩层荷载转移到两侧煤体上, 形成压力拱。

压力拱的上部荷载不再由拱内岩层承担, 直接通过平衡拱传递至两侧拱脚, 压力拱内的岩层处于免压状态, 其荷载由垮落带支撑或由自身承担。如图 2 (g) 所示, 在上覆高位岩浆岩条件下, 覆岩破断运移发展到岩浆岩底部以后, 随着工作面继续推进, 岩浆岩大面积悬空, 将形成“岩桥”结构, “岩桥”内的覆岩处于免压区。

如图 2 (c) 所示, 压力拱内的岩层在自身重力作用下发生弯曲下沉, 当层间拉应力或剪应力超过其极限强度时, 将在层面产生离层变形, 并形成单层或组合破断失稳, 在失稳运移结构与上部稳定岩层之间将形成“月牙”形离层空间。随着岩层组合运动由下而上发展, 采出空间将随之以组合运动的形式向上传递, 离层空间的层位不断向上跳跃, 处于间歇式张开与闭合过程中。如图 2 (g) 所示, 当离层空间达到岩浆岩底部以后, 随着工作面推进及下部岩层沉降变形的继续前移, 岩浆岩悬空面积不断扩大, 岩浆岩底部的离层范围不断扩展。

3.2 离层空间形成的力学条件

由离层空间形成的机理可知, 离层空间的形成力学条件即是关键层及其组合运动的力学条件。由于压力拱内的岩层不承担上覆岩层荷载, 在自重作用下发生弯曲变形, 当上位岩层抗弯刚度 $(EI)_s$ 小于下位岩层抗弯刚度 $(EI)_x$ 时, 上下岩层将组合运动, 一同发生破裂失稳、运移沉降, 层间不会形成离层空间。反之, 当上位岩层抗弯刚度 $(EI)_s$ 大于下位岩层抗弯刚度 $(EI)_x$ 时, 上下岩层将分组运动, 下位岩层将先行弯曲沉降、破裂运移, 上位岩层成为关键层或亚关键层, 暂时处于稳定状态, 在其底部形成离层空间。因此, 应满足以下力学条件:

$$(EI)_s > (EI)_x, \quad (1)$$

取单位宽度, 则力学条件可进一步表示为

$$\left(E \cdot \frac{h^3}{12}\right)_s > \left(E \cdot \frac{h^3}{12}\right)_x, \quad (2)$$

式中, E 为岩层弹性模量, h 为岩层厚度。

覆岩离层空间的形成与闭合是一个动态转移过程, 根据力学条件自下而上发展。当识别出各关键层, 即可确定离层空间的层位。

根据相似材料模拟试验理论和相似比, 对表 1 中标注出的各关键层及其下部岩层的岩性及物理力学参数分析计算, 均满足式 (1) 和式 (2), 具有较好的适用性。

4 覆岩与高位硬厚岩浆岩的运移规律

根据相似材料模拟试验监测的覆岩运移资料, 分析覆岩运移特征及其高位岩浆岩的运移过程。

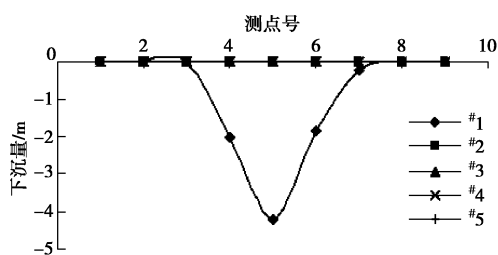
4.1 高位硬厚岩浆岩下覆岩运移规律

模型开采过程中, 5 条测线的覆岩运移沉降曲线如图 5 所示。如图 5 (a) 及图 2 (b), 当工作面推进至 100 m, 关键层破断失稳形成两端铰接结构, 在采空区中部得到垮落带的支撑, 关键层底部的#1 测线呈现“V”型下沉形态, 下沉曲线对称, 采空区中部的最大沉降量为 4.2 m, 离层空间的高度只有 3 m, 而位于高位的#2~#5 测线基本无下沉变化, 表明关键层运动后处于扩容状态, 上部亚关键层处于稳定状态, 岩浆岩附近没有明显沉降变形, 此阶段处于下位关键层沉降状态。

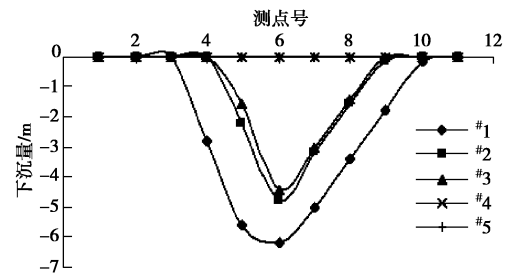
如图 5 (b) 及图 2 (e), 当工作面推进至 160 m, 关键层经过两次周期破断运动, 覆岩组合运动发展到岩浆岩底部, 关键层底部的#1 测线因周期运动及垮落带逐渐压缩而进一步沉降, 岩浆岩底部附近的#2 和#3 测线发生了明显下沉运移, 两者的最大沉降值达到 4.8 m 左右, 岩浆岩没有明显下沉变形, 岩浆岩底部离层空间的高度为 4.6 m。可见, 覆岩运动发展到岩浆岩底部时, 岩浆岩下部岩层下沉曲线呈现不对称的“√”型形态, 垮落带有一定的碎胀效应, 断裂带存在部分层间裂隙, 离层空间基本转移到岩浆岩底部层位, 处于亚关键层运移沉降后的岩浆岩底部离层状态。

如图 5 (c) 及图 2 (g), 当工作面推进至 240 m, 高位岩浆岩破裂运移之前下部岩层经过多次破裂运移, #1~#3 测线采空区中部盆地沉降较为充分, 下沉量曲线从“√”型转化为“U”型形态, 岩浆岩及其上部测线均未明显沉降, 处于底部盆地沉降状态。岩浆岩大面积的悬空阻止了离层在纵向上的发育, 使岩浆岩底部离层空间的横向范围不断扩大, 最大离层高度稳定在 5 m 左右, 是煤层开采高度的 62.5%, 为高位岩浆岩的破裂运移提供了充分的空间。

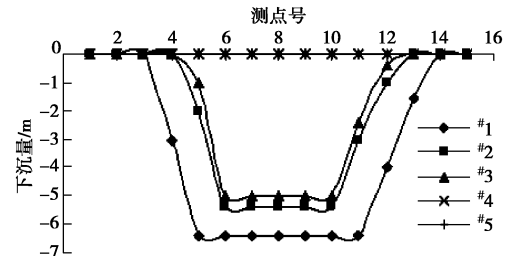
如图 5 (d) 及图 2 (h), 当工作面推进至 380 m, 高位岩浆岩发生了大面积运移, 所控制的上覆岩层一同整体运动, 岩浆岩下位的#4 测线也沉降为“U”型形态, 最大沉降值 5.2 m, 岩浆岩上方 85 m 的#5 测线产生了显著沉降, 最大沉降值达到 4.1 m, 模型顶部下沉值为 3.6 m, 模型顶部下沉系数为 0.45。表明高位硬厚岩浆岩运移稳定后, 煤层开采厚度并没有完全转化成顶端沉降, 其中 45%转化为开采沉降, 55%转化为垮落带碎胀及离层裂隙。



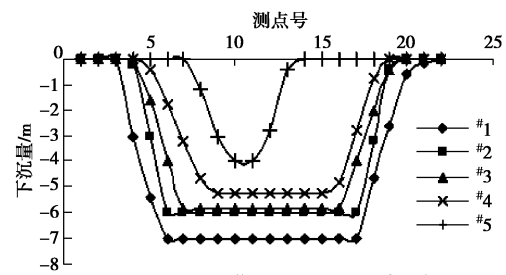
(a) 推进100 m关键层底部沉降形态



(b) 推进160 m岩浆岩下部岩层初步沉降形态



(c) 推进240 m岩浆岩下部岩层充分沉降形态



(d) 推进380 m岩浆岩运移后覆岩沉降形态

图 5 工作面推进过程中各测线的沉降曲线

Fig. 5 Settling curves of measuring lines during advancing of working face

由此可见, 上覆高位岩浆岩条件下的覆岩运移经历下位关键层沉降、岩层运移向主关键层底部发展、底部盆地沉降、岩浆岩运移及整体稳定等 5 个状态。

另外, 覆岩弯曲变形、破断运移是自下而上逐步发展的, 与煤层间距越大, 破断运移所需的工作面推进尺寸越大; 因垮落带碎胀性及离层带残余裂隙的影响, 覆岩运移沉降量由下向上逐渐减小; 采空区中部区域离层一般逐渐闭合, 开切眼附近覆岩存在离层残余裂隙, 工作面后部产生新的离层裂隙, 开切眼与工作面两侧的覆岩运移存在一定的不对称性; 高位岩浆岩对覆岩离层及运移沉降起着控制作用, 破裂运移前后覆岩离层、覆岩结构、沉降变形有着显著的差异。

4.2 高位硬厚岩浆岩的运移规律

为分析高位岩浆岩运移及底部离层空间的演化过程, 取#4 测线及#3 测线 10 测点的监测资料, 得到开采过程中岩浆岩的沉降及底部离层曲线如图 6 所示。

工作面推进至 190 m 之前, 开采活动没有影响到 10 号测点位置, 岩浆岩没有发生沉降, 其底部没有离层, 处于下部岩层支撑的稳定状态; 从 200 m 推进至 240 m, 由于覆岩主关键层的阻隔作用, 且随着垮落带的逐渐压实及下部离层裂隙的闭合, 岩浆岩底部离

层空间迅速形成,高度不断扩展,推进至 240 m 时达到最大高度,岩浆岩基本未发生沉降,处于底部离层扩展的悬空状态;从 250 m 推进至 280 m,岩浆岩底部离层范围达到最大,下方悬跨长度达到其极限跨度,岩浆岩在中部和两端所受拉应力先后达到极限抗拉强度,并产生微小破断裂隙,致使岩浆岩发生微量沉降,底部离层空间也随之微量减小,处于破裂过程的随动状态;从 290 m 推进至 340 m,岩浆岩下方有较大的离层空间,岩浆岩发生显著的失稳运移,沉降速度快,底部离层高度随之急剧减小,处于破裂失稳的运移状态;推进至 350 m 时岩浆岩初次运移稳定,底部离层闭合,处于离层空间闭合的稳定状态。由此可见,高位主关键层的运移过程可分为下部支撑、底部离层扩展、破裂随动、失稳运移及离层闭合稳定等 5 个阶段。

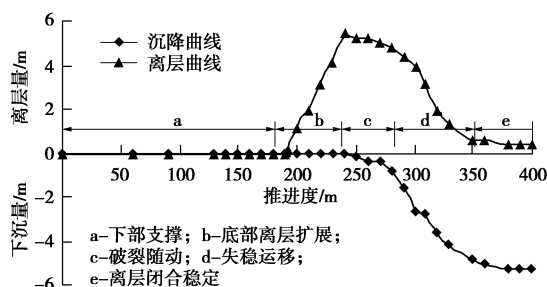


图 6 岩浆岩 10 号测点沉降曲线

Fig. 6 Settling curves of measuring point No. 10 in magmatic rocks

5 高位硬厚主关键层底部离层空间的预测

在岩浆岩主关键层破断运移前,底部大范围的离层空间达到最大。岩浆岩下部岩层存在着破断裂隙及离层裂隙,附近岩层(煤层)的瓦斯、水可能通过裂隙与离层空间贯通,从而在岩浆岩底部离层空间内积聚大量的离层水和解吸瓦斯。当岩浆岩发生大面积失稳运移时聚集的弹性能释放,离层空间闭合,可能导致离层空间的水-气突涌等动力现象或灾害。因此,岩浆岩底部离层空间体积的计算预测,可为岩浆岩下煤层开采的灾害预测及离层注浆等控制技术提供依据。

硬厚岩浆岩抗弯刚度大,弯曲变形小,根据模拟试验分析,岩浆岩破裂运移前未产生明显沉降,其底部最大离层高度即为下部岩层最大下沉值,可以依据岩浆岩下位岩层的沉降变形来计算离层空间的体积。根据模拟试验,岩浆岩底部形成平底式下沉盆地,下位岩层运移得到下部岩层的支承,且支承体的刚度较低,易发生弯曲沉降,将该岩层或岩组简化为 Winkler 基础梁。硬厚主关键层之下的覆岩沉降分布特征与一

般覆岩条件的地表沉降规律基本相似,仅在沉降位移和采动影响范围上存在一定的差距^[17]。因此,根据对称性原理建立岩浆岩下最大离层空间的覆岩结构及弹性基础梁模型,如图 7(a)所示。

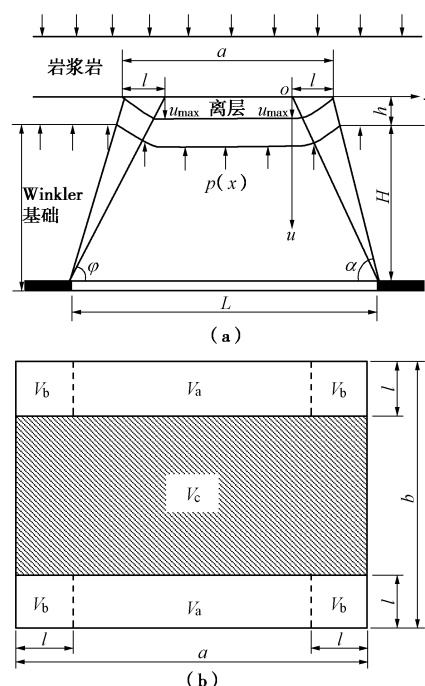


图 7 最大离层空间的覆岩结构及弹性基础梁模型

Fig. 7 Overlying stratum structure of maximum separated stratum space and elastic foundation beam model

硬厚主关键层的下位岩层形成类似超充分采动下沉盆地,最大离层空间为中部长方体体积及四周曲面围成的体积之和。据此,主关键层底部最大离层空间在推进方向上的断面积 S 为

$$S = S_p + 2S_q, \quad (3)$$

式中, S_p 为中部平底沉降的断面积, S_q 为一侧弯曲沉降的断面积。

由概率积分法可知,当开采厚度为 m 时,岩浆岩下位岩层的最大下沉量为 $m\eta$, 其中 η 为覆岩下沉系数,一般为 60%~78%^[18],模拟试验为 62.5%。由此,最大离层高度 $u_{\max} = m\eta$ 。

以下位岩层一侧弯曲变形部分为研究对象,建立以垂向为纵轴、以主关键层底界面为横轴的坐标系,如图 7 所示。基于 Winkler 弹性基础梁理论,在自身重力作用下的挠度方程为

$$EIu^{(4)}(x) = \gamma h - p(x), \quad p(x) = ku(x) \quad (0 \leq x \leq l), \quad (4)$$

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}, \quad k_i = \frac{E_i}{(1-\mu_i^2)h_i}. \quad (5)$$

式中 EI 为下位岩层的抗弯刚度; γ , h 为下位岩层重度和厚度; k 为基础刚度; E_i , μ_i , h_i 为基础中第 i 岩层的弹性模量、泊松比、厚度。

令特征参数 $\beta = \sqrt[3]{k/(4EI)}$, 由弹性地基梁^[19]知识可知, 当梁长 l 与 β 满足 $l\beta \geq 3$ 时, 载荷在梁端的影响就基本消失, 可视为半无限长弹性基础梁, 即可将 $x \rightarrow l$ 视为 $x \rightarrow \infty$, 此时梁的下沉值趋向于 $\gamma h/k$, 这是上覆均布载荷作用下岩梁的整体位移, 而不是弯曲产生的挠度值, 所以计算结果中应去掉该值。当 $x \rightarrow \infty$ 时, 存在以下关系:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} u(x) \rightarrow 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} e^{\beta x} \rightarrow \infty, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} e^{-\beta x} \rightarrow 0。$$

对于 $\cos \beta x$ 和 $\sin \beta x$ 在无限远处不总为零, 可得出弹性基础梁挠度表达式为

$$u(x) = e^{-\beta x} (A_1 \cos \beta x + A_2 \sin \beta x), \quad (6)$$

式中, β 为弹性基础梁的特征参数, 反映基础刚度和岩层弯曲刚度之间的关系 (m^{-1})。

由边界条件知, 当 $x=0$ 时, 有 $u = m\eta$, $u' = 0$ 。代入式 (6) 得到 $A_1 = A_2 = m\eta$ 。由此, 下位岩层的挠度表达式为

$$u(x) = m\eta e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (0 \leq x \leq l)。 \quad (7)$$

认为倾向上破断角和充分采动角与推进方向上相等, 则下位岩层倾向曲线段挠度表达式为

$$u(y) = m\eta e^{-\beta y} (\cos \beta y + \sin \beta y)。 \quad (8)$$

对式 (7) 中 x 进行积分, 代入式 (3) 得到离层空间走向的最大断面面积 S 为

$$S = 2m\eta \left[\frac{a}{2} - l + \frac{1 - e^{-\beta l} \cos \beta l}{\beta} \right], \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} l &= (H + h)(\cot \varphi - \cot \alpha), \\ a &= L - 2(H + h)\cot \alpha。 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 l 为岩层弯曲部分的长度; φ , α 分别为充分采动角和破断角; a 为硬厚岩层极限跨距; L 为工作面推进距离。

则离层空间走向的最大断面面积 S 为

$$S = 2m\eta \left[\frac{L}{2} - (H + h)\cot \varphi + \frac{1 - e^{-\beta(H+h)(\cot \varphi - \cot \alpha)} \cos \beta(H+h)(\cot \varphi - \cot \alpha)}{\beta} \right]。 \quad (11)$$

如图 7 (b) 所示, 将离层空间分为 V_a , V_b , V_c 等若干区域, 则最大离层空间的体积为

$$V = 2V_a + 4V_b + V_c。 \quad (12)$$

由于 V_b 为不规则形状, 对其进行简化计算, 对各个区域进行积分, 得

$$V = S(b - 2l) + 2(a - 2l) \int_0^l u(y) dy + 4 \left(\int_0^l l \frac{u^2(x)}{2u_{\max}} dx + \int_0^l l \frac{u^2(y)}{2u_{\max}} dy \right), \quad (13)$$

$$b = b_0 - 2(H + h)\cot \alpha, \quad (14)$$

式中, b 为倾向悬跨度, b_0 为工作面长度。

对式 (13) 进行积分计算, 得到最大离层空间的体积计算式:

$$V = \frac{m\eta}{\beta} \left[3l + 2\beta(a - 2l)(b - 2l) + 2(a + b - 4l) \cdot (1 - e^{-\beta l} \cos \beta l) - le^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l + 2) \right]。 \quad (15)$$

以上分析得到高位主关键层下最大离层空间的断面面积与体积计算式。由式 (15) 可见, 离层空间大小与煤层厚度 m 和岩浆岩下位岩层下沉系数 η 成线性正相关关系, 而 η 主要取决于岩浆岩与煤层的层间距。还与岩浆岩走向极限跨距 a , 倾向悬跨度 b 、基础特征参数 β , 充分采动角 φ 和破断角 α 有关。

相似模型试验中, 岩浆岩破裂运移前 L 为 240 m, 覆岩破断角 α 和充分采动角 φ 分别为 68° 和 47° 。结合表 1 弹性基础岩层参数, 由式 (5) 计算得到 β 为 0.071 m^{-1} 。将上述参数代入式 (9) 计算出岩浆岩底部离层的最大断面面积 S 为 601.79 m^2 。二维模型工作面长度为 80 m, 根据图 7 (b) V_a , V_b 均为 0, 离层空间体积 $V = V_c = 48143.2 \text{ m}^3$ 。

6 结 论

(1) 在高位硬厚岩浆岩下方, 关键层及随动层发生组合破裂运动形成“月牙”形离层空间, 并随着组合运动向上发展随之转移到上部, 直至“月牙”形离层空间发育到硬厚岩浆岩底部后, 岩浆岩底部“月牙”形离层空间逐渐转变为“一字”形, 其范围长度在岩浆岩破裂运移前达到最大, 岩浆岩破裂运移导致底部大面积离层空间闭合。

(2) 在高位硬主关键层下, 离层空间的层位处于关键层、亚关键层、主关键层的底部, 按照各关键层层位自下而上的发育闭合、动态转移。层位高度与推进距离呈线性正相关性, 推进距离的 0.39~0.5 倍。离层空间的发育层位被主关键层所阻隔, 止于岩浆岩底部。

(3) 岩浆岩下部“月牙”形或“一字”形离层空间的长度随开采尺寸增大而扩展, 岩浆岩破裂前底部离层高度 5 m 左右, 是采高的 62.5%, 为岩浆岩破裂运移提供了充分的空间。提出了离层空间层位与范围的“多梯形”确定方法, 梯形顶部为各个关键层的底边界, 倾斜边为覆岩破断线, 其范围和长度由覆岩破断线来圈定, 由此勾画出离层空间及其演化过程。

(4) 在压力拱或“岩桥”结构内的免压区, 各组岩层先后发生失稳运移形成上部离层空间, 采出空间随之以失稳运移形式向上传递, 并间歇式向上跳跃。

岩浆岩的抗弯刚度和大面积悬空导致了“一字”形离层空间。离层空间形成的力学条件是上位岩层抗弯刚度大于下位岩层。

(5) 高位岩浆岩下覆岩运移经历下位关键层沉降、岩层运移向主关键层底部发展、底部盆地沉降、岩浆岩运移及整体稳定等 5 个状态, 覆岩沉降曲线分别呈“V”型、“√”型及“U”型。岩浆岩的运移过程可分为下部支撑、底部离层扩展、破裂随动、失稳运移及离层闭合稳定等 5 个阶段。

(6) 建立了高位岩浆岩底部离层空间的覆岩结构及弹性基础梁模型, 求解出主关键层下位岩层的挠度方程, 得到最大离层空间的断面积和体积计算式, 分析了采高及下沉系数或层间距等主要影响因素, 为高位岩浆岩下安全开采提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 王金安, 刘红, 纪洪广. 地下开采上覆巨厚岩层断裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2815 - 2823. (WANG Jin-an, LIU Hong, JI Hong-guang. Study on fracture mechanism of overlying super-thick rock stratum in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2815 - 2823. (in Chinese))
- [2] 杨培举, 何焱, 郭卫彬. 采场上覆巨厚坚硬岩浆岩致灾机理与防控措施[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(12): 2106 - 2112. (YANG Pei-ju, HE Ye, GUO Wei-bin. Disaster-causing mechanism and control measures of extremely thick and hard magmatic rock above working face[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(12): 2106 - 2112. (in Chinese))
- [3] 王平, 姜福兴, 冯增强, 等. 高位厚硬顶板断裂与矿震预测的关系探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 618 - 623. (WANG Ping, JIANG Fu-xing, FENG Zeng-qiang, et al. Relationship between fracture of high-position thick and hard roof and mine quake forecast[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 618 - 623. (in Chinese))
- [4] 汪华君, 姜福兴, 温良霞, 等. 孤岛顶煤综放采场冲击矿压形成机制及控制技术[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2615 - 2628. (WANG Hua-jun, JIANG Fu-xing, WEN Liang-xia, et al. Formation mechanism and control technology of impacting pressure in sublevel caving mining face under isolated top coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2615 - 2628. (in Chinese))
- [5] 朱卫兵. 浅埋近距离煤层重复采动关键层结构失稳机理研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(6): 1065 - 1066. (ZHU Wei-bing. Study on the instability mechanism of key strata structure in repeating mining of shallow close distance seams[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(6): 1065 - 1066. (in Chinese))
- [6] 王志强, 郭晓菲, 高运, 等. 华丰煤矿覆岩离层注浆减沉技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3249 - 3255. (WANG Zhi-qiang, GUO Xiao-fei, GAO Yun, et al. Study of grouting technology of overburden separation to reduce ground subsidence in Huafe-ng coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3249 - 3255. (in Chinese))
- [7] 宁掌玄, 张红珠, 冯美生. 采动覆岩离层注浆的相似材料及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, **29**(3): 369 - 372. (NING Zhang-xuan, ZHANG Hong-zhu, FENG Mei-sheng. Similar materials and numerical simulation on grouting in overlying strata[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, **29**(3): 369 - 372. (in Chinese))
- [8] 王金山, 王忠昶. 采动覆岩破坏及离层发育特征的三维数值模拟[J]. 煤矿开采, 2011, **16**(6): 22 - 26. (WANG Jin-shan, WANG Zhong-chang. 3D numerical simulation of overlying strata broken and separation induced by mining[J]. Coal mining Technology, 2011, **16**(6): 22 - 26. (in Chinese))
- [9] 苏仲杰, 于广明, 杨伦. 覆岩离层变形力学机理数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1287 - 1291. (SU Zhong-jie, YU Guang-ming, YANG Lun. Numerical simulation on mechanism of deformation of separated strata in overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1287 - 1291. (in Chinese))
- [10] 蒋金泉, 张培鹏, 聂礼生, 等. 高位厚硬岩层破断规律及其动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1366 - 1374. (JIANG Jin-quan, ZHANG Pei-peng, NIE Li-sheng, et al. Fracture laws and dynamic response analysis of high-position hard thick strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1366 - 1374. (in Chinese))
- [11] 章伟, 郑进凤, 于广明, 等. 覆岩离层形成的力学判据研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(增刊): 275 - 278. (ZHANG Wei, ZHENG Jin-feng, YU Guang-ming, et al. Research on mechanical criterion of formation of separation layer in cover rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S0): 275 - 278. (in Chinese))
- [12] 李小琴. 坚硬覆岩下重复采动离层水涌突机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011. (LI Xiao-qin. Study on the inrush mechanism of the water in bed separation due to

- repeated coal mining under hard rock[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2011. (in Chinese))
- [13] 胡青峰. 特厚煤层高效开采覆岩与地表移动规律及预测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011. (HU Qing-feng. Overburden and surface movement due to high efficient mining extra-thick coal seam and prediction method[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2011.(in Chinese))
- [14] 王 亮, 程远平, 翟清伟. 厚硬火成岩下突出煤层动力灾害致因研究[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(8): 1368 - 1375. (WANG Liang, CHENG Yuan-ping, ZHAI Qing-wei, et al. Factors analysis on dynamic disasters of outburst coal seams under thick-hard igneous rock in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(8): 1368 - 1375. (in Chinese))
- [15] 李为腾, 李术才, 王 琦. 深部厚顶煤巷道围岩变形破坏机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2847 - 2856. (LI Wei-teng, LI Shu-cai, WANG Qi. Model test study of surrounding rock deformation and failure mechanism of deep roadway with thick top coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2847 - 2856. (in Chinese))
- [16] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟实验[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(8): 1256 - 1262. (WANG Jia-chen, YANG Sheng-li, YANG Bao-gui, et al. Simulation experiment of overlying strata movement features of long wall with gangue backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(8): 1256 - 1262. (in Chinese))
- [17] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 基于薄板理论的采场覆岩关键层的判别方法[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(10): 1081 - 1085. (LIN Hai-fei, LI Shu-gang, CHENG Lian-hua, et al. Key layer distinguishing method of overlying strata based on the thin slab theory[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(10): 1081 - 1085. (in Chinese))
- [18] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 地表下沉系数计算的人工神经网络方法研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 212 - 215. (GUO Wen-bing, DENG Ka-zhong, ZOU You-feng. Study on artificial neural network method for calculation of subsidence coefficient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 212 - 215. (in Chinese))
- [19] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981. (LONG Yu-qiu. Calculation of elastic foundation beam[M]. Beijing: Higher Education Press, 1981. (in Chinese))

第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会第一号通知

“第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”由中国力学学会岩土力学专业委员会主办, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国地震局兰州地震研究所、兰州大学、兰州交通大学、兰州理工大学、西北民族大学等单位共同承办, 将于 2016 年 8 月 12 日~18 日在甘肃兰州召开。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿、参加会议。

主办单位: 中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室; 中国地震局兰州地震研究所 黄土地震工程重点实验室; 兰州大学; 兰州交通大学; 中铁西北科学研究院有限公司; 青海省交通科学研究院。

会议专题: 岩土力学数值分析与解析新方法。

会议的主题: ①岩土本构模型与参数研究; ②岩土工程重大工程实例; ③岩土试验与测试技术; ④环境岩土工程; ⑤土动力学与土工抗震; ⑥特殊土的力学特性与工程问题; ⑦寒旱区重大工程问题。

会议论文与出版: 第十二届全国岩土力学数值分析与解析

方法研讨会会议论文征稿截止日为 2016 年 1 月 31 日。2016 年 4 月 30 日通知审稿专家修改意见和退稿意见; 2016 年 5 月 31 日前通知录用结果等事宜。论文格式与要求见《岩土力学》征稿启事。投稿范例模板请登录“<http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/column/column108.shtml>”下载。所有投稿稿件请按要求排好版后发至会议秘书处, 邮箱: guoyuli@lzb.ac.cn 或 27178345@qq.com, 投稿时麻烦注明“第十二届全国岩土力学研讨会”。经严格审稿后, 挑选部分优秀论文推荐到《岩土力学》、《冰川冻土》、《地震工程学报》、《防灾减灾工程学报》期刊上发表, 其余将以增刊或会议论文集形式出版。

秘书处地址: 甘肃省兰州市东岗西路 320 号, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 邮编: 730000。

联系人: 牛富俊: 13893627904; E-mail: niufujun@lzb.ac.cn; 李国玉: 13893691316; E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn; QQ: 27178345。

会议期间将组织工程地质考察和展览: 热忱欢迎从事岩土工程领域新材料、新技术、新设备的开发、生产和运用的相关公司及单位踊跃报名参加工程勘察和技术展览。

(中国力学学会岩土力学专业委员会 供稿)