

张鑫, 乔伟, 雷利剑, 等. 综放开采覆岩离层形成机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 342-349. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1992
Zhang Xin, Qiao Wei, Lei Lijian, et al. Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 342-349. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1992

综放开采覆岩离层形成机理

张鑫^{1,2}, 乔伟¹, 雷利剑¹, 曾凡盛³, 张辉^{1,2}, 王扬州²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 兖矿东华建设有限公司 地矿建设分公司, 山东 邹城 273500; 3. 兖州煤业股份有限公司 济宁二号井, 山东 济宁 272069)

摘 要: 以济宁二号煤矿采空区疏放水异常为例, 基于组合梁原理得到离层发育层位判别公式对工作面离层发育位置进行预计, 利用离散元软件 UDEC 对工作面离层动态发育过程及分布规律进行模拟, 通过三维地震对离层发育层位及分布范围进行探测。结果表明, 工作面达到充分采动后, 最大离层约发育于顶板 60 m 的泥岩与上部厚层中细砂岩之间。依据薄板弹性理论, 通过计算离层上下位岩层板的挠度差来预计离层体积, 可作为采场顶板可发育离层最大总体积。

关键词: 综放开采; 覆岩离层; 组合梁理论; 离散元; 三维地震

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)S2-0342-08

Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving

ZHANG Xin^{1,2}, QIAO Wei¹, LEI Li-jian¹, ZENG Fan-sheng³, ZHANG Hui^{1,2}, WANG Yang-zhou²

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Geology and Mine Construction Branch, Donghua Construction Company Limited, Yankuang Group, Zoucheng 273500; 3. Jininghao Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Jining 272069, China)

Abstract: Taking the anomaly of dredging and draining water in the Jining No.2 coalmine as an example, this study predicts the development position of bed separation in the discriminant formula based on the composed rock beam theory, simulates the dynamic development process and distribution regularity of bed separation using discrete element software UDEC, and probe the position and spread of bed separation through 3D seismic. The result shows that the maximum bed separation developed in the larger gap between mudstone and middle-fine sandstone after the working face completed, the distance between the gap and coal seam is 60 m approximately. Based on the elastic thin plate theory, the study predicts the volume of bed separation by calculating the difference of deflection between upper and down rock plate. The predictive value can be used as the maximum total volume of bed separation developed in seam roof.

Key words: fully mechanized top-coal caving; overburden bed separation; composed rock beam theory; UDEC; 3D seismic

随着浅部资源的日益枯竭, 煤矿开采逐渐向深部地层推进, 综采放顶煤技术的推广也增大了对岩层扰动的程度, 不少矿区出现以前尚未遇到的离层水害, 离层水因其瞬时水量大、突水征兆不明显等特点对矿

井安全生产造成重大威胁。针对覆岩离层问题, 高延安^[1]采用位移反分析法, 通过模型识别和理论研究, 提出了岩移“四带”模型, 将采后覆岩结构力学模型分为破裂带、离层带、弯曲带和松散层带。岩层控制

收稿日期: 2015-12-31 修回日期: 2016-05-03 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2015CB251601); 国家自然科学基金资助项目(41302248); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 张鑫(1983—), 男, 四川江油人, 博士研究生。E-mail: teasta@163.com。通讯作者: 乔伟(1984—), 男, 副教授, 博士。E-mail: qweiqm@163.com

关键层理论^[2]认为覆岩离层主要出现在各关键层下,覆岩离层最大高度止于覆岩主关键层。S. LIN^[3]通过物理模型试验和解析模型分析,研究了长臂开采工作面覆岩离层的应力-位移关系和离层发育位置在工作面推进中的变化规律。滕永海等^[4-7]通过理论分析和数值模拟对覆岩离层进行了相关研究,认为覆岩离层发育是一个动态过程。郭惟嘉等^[8]提出理想条件下离层高度的预计公式。赵德深等^[9]基于薄板小挠曲理论得到水平及缓倾斜煤层开采条件下离层位置和大小理论计算公式。朱卫兵等^[10]基于关键层理论,认为离层区积水荷载传递给下部关键层导致其复合破断是海孜煤矿异常突水的原因。乔伟等^[11-13]对离层水静水压涌突水和动力突水机制进行了相关研究,通过分析巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制,提出适合西部特殊地层的离层水防治方法。李小琴^[14]对坚硬覆岩下重复采动离层水形成和涌突机理进行了相关研究。

覆岩离层动态发育过程和离层水突水机制方面成果较丰富,但离层发育位置判别和体积量化的研究则相对较少。本文以济宁二号煤矿采空区水探放异常为例,拟通过理论分析、数值模拟和三维地震探讨综放开采覆岩离层形成机理,并预计离层发育层位及分布,提出离层体积的理论计算方法,为煤层开采覆岩离层灾害问题提供参考依据。

1 矿井涌突水特征

济宁二号煤矿 11305 工作面为十一采区先期开采工作面(采区平面布置见图 1),走向长 1 100 m,倾向宽 150 m,煤层厚度 4.5~5.5 m,断层构造简单,采用长壁式综采放顶煤全部垮落采煤法。11305 工作面回采期间的平均涌水量为 10.5 m³/h,未曾发生顶板淋水、突水现象。与 11305 相邻 11306 工作面切眼及轨道巷施工期间对 11305 采空区积水进行超前疏放,疏放水 9.6 万 m³,与预计积水量相符。11306 工作面开采期间,切眼及轨道巷煤壁有片帮现象,已停产 135 d 的 11305 工作面采空区顶板岩层开始再次变形破裂,时常伴有岩层断裂声音,随后采空区积水发生多次补给量突增过程,采空区积水水位不断上升。最大积水量达 16.3 万 m³。11305 工作面采空区积水历经 171 d 共疏放水量 46.6 万 m³,较采空区全积满水加上期间的动补给水量,还多出约 11.2 万 m³水。由此推断,应有新的水源加入。在 11307 工作面开切眼和轨道巷对 11306 采空区进行疏放水时,实际疏放量比 11305 和 11306 总积水量

和期间动态补给量之和超出 8.2 万 m³。



图 1 十一采区平面布置

Fig. 1 Layout of eleventh mining area

11306 和 11307 工作面附近的 15-7 水文孔岩性柱状显示,3_下煤层顶板上 55.02 m 发育有一段厚 4.59 m 的泥岩,其上发育 24.06 m 厚的中细砂岩。井田内 3 煤顶板砂岩,钻孔单位涌水量 $q = 0.000\ 61 \sim 0.019\ 5\ L/(s \cdot m)$,属极弱至弱富水,工作面正常开采观测的涌水量也较小。11305 工作面平均煤厚 4.92 m,导水裂隙带高度为 55.29 m ($3_{下}$ 煤厚 4.92 m, $H = 100M/(0.52M + 6.34)$),实测裂采比 11.12,与预测结果相差不大,因此上述泥岩段在导水裂隙带高度范围内。初步判断,煤层开采上方 24.06 m 厚的中细砂岩形成离层并积水,因为先期的采空区积水疏放作用,导致破碎岩石压密和水头压差增大,使得离层水在短时间内导入采空区,造成补给量增加。济宁二号煤矿 11305 和 11306 工作面老空区积水疏放异常表明其具备离层水体涌水的条件特征,如处理不当,将发生灾难性后果。

2 离层发育层位预计

2.1 离层发育层位理论预计

“空腔型”离层力学机理认为^[15-17]:上覆岩层由相对错动引起的张拉或剪应力超过岩层面间的强度,且上下岩层的刚度相差较大时易发生不协调变形($W_s < W_x$,下角 s 和 x 分别代表上和下),即上位岩层控制的荷载不对下位岩层形成加载,有

$$q_{n,l} > q_{n+1,l} \quad (1)$$

式中 $q_{n,l}$ 为第 n 层岩层对第 l 层岩层形成的荷载; $q_{n+1,l}$ 为第 n+1 层岩层对第 l 层岩层形成的荷载。

若将采场上覆岩层看成由若干组岩层叠加组合而成,且各岩层上的荷载呈均匀分布,根据组合梁原理可得式(1)等价于:

$$\sum_{i=1}^{n+1} E_i h_i^3 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i > \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \sum_{i=1}^{n+1} \gamma_i h_i \quad (2)$$

式(2)简化得

$$E_{n+1} h_{n+1}^2 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i > \gamma_{n+1} \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \quad (3)$$

式中 E_i 为第 i 层岩层的弹性模量; h_i 为第 i 层岩层的厚度; γ_i 为第 i 层岩层的重度。

其次,由于“空腔型”离层量及离层空间较大,且呈“空腔型”,而离层空间则需煤层采空区提供;即煤层开采后,采空区未能完全被导水裂隙带岩石完全充填,即有

$$M - \sum (K_i - 1) h_i > 0 \quad (4)$$

式中 M 为开采煤层总厚度; h_i 为煤层开采后导水裂隙带内第 i 层岩层的原始厚度; K_i 为煤层开采后导水裂隙带内第 i 层岩层的碎胀系数。

只有满足式(4)时,煤层上覆岩层中才具有发育“空腔型”离层所需的离层空间,而且式(4)左边数值的大小也决定了覆岩中的最大离层量;因而煤层采厚越大,则越易于发育“空腔型”离层。另由岩石的碎胀

性和压实性可知,煤层采动后,顶板冒落岩石发生破碎,此时垮落带顶板岩石碎胀系数较大,达 1.2~1.6;而随着上覆岩层的继续下移跨落,垮落带岩石在自重和上覆荷载作用下逐渐压实,体积随之减小,碎胀系数也逐渐趋近于 1.0;即厚煤层开采后,即使最初不满足式(4)的要求,但随着工作面的推进,垮落带岩石逐渐压密,相应的“空腔型”离层也将逐渐发育。仅当煤层上覆相邻两岩层同时满足式(3)和(4)时,两岩层间才可发育“空腔型”离层。

基于以上分析得到的离层发育层位判别依据,通过计算得到 11305 工作面离层发育位置判别结果见表 1。表中“计算结果”为式(3)左边减去右边的值,即当该栏数值大于 0 时,即对应该岩层下部可发育离层。

表 1 11305 工作面顶板离层发育位置判别结果

Table 1 Calculated results of bed separation location of working face 11305

| 编号 | 岩层组合 | 平均厚度/m | 密度/(g·cm ⁻³) | 弹性模量/GPa | 计算结果 | 能否形成“空腔型”离层 |
|----|------|--------|--------------------------|----------|-----------|-------------|
| 13 | 泥岩 | 2.5 | 2.54 | 1.10 | -504 706 | 否 |
| 12 | 中细砂岩 | 16.5 | 2.56 | 10.8 | -173 550 | 否 |
| 11 | 泥岩 | 4.10 | 2.54 | 1.10 | -380 932 | 否 |
| 10 | 中细砂岩 | 24.06 | 2.56 | 10.8 | 178 926.3 | 是 |
| 9 | 泥岩 | 4.59 | 2.54 | 1.10 | -203 814 | 否 |
| 8 | 中砂岩 | 19.55 | 2.56 | 10.8 | 319 734.4 | 是 |
| 7 | 粉砂岩 | 0.7 | 2.55 | 1.16 | -28 920.2 | 否 |
| 6 | 泥岩 | 1.6 | 2.54 | 1.10 | -28 620.6 | 否 |
| 5 | 细砂岩 | 4.27 | 2.52 | 2.71 | -24 728.6 | 否 |
| 4 | 中砂岩 | 6.75 | 2.45 | 4.16 | -14 434.4 | 否 |
| 3 | 粉砂岩 | 7.65 | 2.55 | 1.62 | -20 286.2 | 否 |
| 2 | 中砂岩 | 13.0 | 2.45 | 4.16 | 2 669.487 | 是 |
| 1 | 炭质泥岩 | 1.5 | 2.54 | 1.10 | | |
| | 煤 | 4.92 | | | | |

由表 1 可知,在 11305 工作面上覆岩层中第 2、8 和 10 分层分别与其下相邻岩层具备发育“空腔型”离层的力学结构,而位于 3_下煤导水裂隙带之上的仅有第 10 分层的 24.06 m 厚中细砂岩。另结合 11305 工作面回采期间的矿压观测成果可知,该工作面 3_下煤回采后,直接顶冒落较为充分,采空区内大部分均已接实顶板,不满足式(4);即 11305 工作面回采初期“空腔型”离层将得不到充分发育,仅在采空区垮落带岩石得到进一步压密时,满足式(4),即采空区未能完全被导水裂隙带岩石完全充填,在煤层顶板以上 60 m 左右的中细砂岩与下伏泥岩之间将满足“空腔型”离层发育条件,离层得到充分发育。

十一采区正常情况下对 3_下煤层开采充水影响较大的含水层为:3_下煤顶底板砂岩含水层和上侏罗统

红层砂岩含水层。其中 3_下煤顶底板砂岩含水层为煤层开采的直接充水含水层,上侏罗统红层含水层为间接充水含水层,为主要补给水源。顶板以上 60 m 左右的厚层中细砂岩与下伏薄层泥岩之间充分发育的“空腔型”离层,具有离层空间大、持续时间长、富水性和透水性强等特点。根据矿区导水裂隙带预计结果,导水裂隙带预计高度为 55.29 m,发育于第 9 分层 4.59 m 厚的泥岩中(泥岩底界面距 3_下煤层顶部 55.02 m),因此发育于中细砂岩和泥岩层面的离层位于导水裂隙带上方,位于整体移动带中,且离层空间下部仍有 4.32 m 的泥岩未受导水裂隙带波及,具备形成离层积水所需的封闭离层条件。同时第 10 分层的厚层砂岩本身为弱富水含水层,能对离层进行充水补给,即 3_下煤导水裂隙带上方砂岩水为其下离层

的补给水源。由此可知, 11305 工作面顶板覆岩具备形成离层水的基本条件。

2.2 离层发育层位数值模拟

基于 11305 工作面 3_下煤顶板地层结构及相应岩石力学指标测试成果, 结合该工作面实际回采情况,

采用离散元数值计算软件 UDEC 对 11305 工作面顶板离层动态发育过程及分布规律进行模拟计算。

根据工程地质条件分析结果, 结合 11305 工作面综合柱状图, 对部分地层进行适当合并, 最终确定 11305 工作面计算模型中地层及其厚度见表 2。

表 2 11305 工作面 3_下煤层顶板结构及基本模型参数

Table 2 Roof structure and basic model parameters of 3 lower coal of working face 11305

| 岩组 | 岩性 | 比重 | 容重 | 泊松比 | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | $\varphi/(\circ)$ | c/MPa | 弹性模量/GPa | 平均厚度/m | 计算模型中各分层厚度/m |
|------------------|------------------|------|-------|------|----------|----------|-------------------|---------|----------|--------|--------------|
| | 松散层 | | | | | | | | | 192.51 | 荷载 |
| | 红层/砂岩 | 2.71 | 2.34 | 0.19 | 62.77 | 2.47 | 29.67 | 5.37 | | 399.31 | |
| ④中细砂岩组 | 泥岩 | 2.61 | 2.54 | 0.23 | 32.7 | 1.6 | 32 | 3.6 | 1.1 | 2.5 | 2.5 |
| | 中细砂岩 | 2.71 | 2.64 | 0.18 | 81.07 | 4.2 | 32.27 | 6.56 | 10.8 | 16.5 | 16.5 |
| | 泥岩 | 2.61 | 2.54 | 0.23 | 32.7 | 1.6 | 32 | 3.6 | 1.1 | 4.1 | 4 |
| | 中细砂岩 | 2.71 | 2.64 | 0.18 | 81.07 | 4.2 | 32.27 | 6.56 | 10.8 | 24.06 | 24 |
| ③泥岩组 | 泥岩 | 2.61 | 2.54 | 0.23 | 32.7 | 1.6 | 32 | 3.6 | 1.1 | 4.59 | 4.6 |
| ②中细砂岩组 | 中粗砂岩 | 2.66 | 2.56 | 0.17 | 109.85 | 2.5 | 35.55 | 4.3 | 10.8 | 19.55 | 20 |
| | 泥岩及粉砂岩 | 2.62 | 2.545 | 0.22 | 39.18 | 1.785 | 34.62 | 4.97 | 1.13 | 2.3 | 2.5 |
| | 细砂岩 | 2.61 | 2.52 | 0.19 | 63.12 | 2.48 | 38.96 | 9.5 | 2.71 | 4.27 | 4 |
| | 中砂岩 | 2.67 | 2.45 | 0.18 | 77.54 | 3.04 | 40.37 | 7.96 | 4.16 | 6.75 | 6.5 |
| | 粉砂岩 | 2.63 | 2.55 | 0.21 | 45.66 | 1.97 | 37.24 | 6.34 | 1.62 | 7.65 | 7 |
| ①泥岩组 | 中砂岩 | 2.67 | 2.45 | 0.18 | 77.54 | 3.04 | 40.37 | 7.96 | 4.16 | 13 | 13 |
| 3 _下 煤 | 泥岩 | 2.61 | 2.54 | 0.23 | 32.7 | 1.6 | 32 | 3.6 | 1.1 | 1.5 | 1.5 |
| 3 _下 煤 | 3 _下 煤 | | | | | | | | | 4.92 | 5 |
| 煤层底板 | 粉砂岩 | 2.64 | 2.54 | 0.2 | 46.22 | 1.99 | 37.3 | 6.38 | | 2 | 2 |
| | 中细砂岩 | 2.66 | 2.485 | 0.17 | 106.3 | 3.735 | 43.19 | 13.905 | | 6.2 | 6 |

在确定数值计算区域的水平尺寸时, 需要根据岩层移动边界角将研究边界确定在采动影响带以外。根据开采沉陷学相关公式及其数值模型试算, 确定模型水平尺寸 330 m, 确定模型数值尺寸时, 考

虑到节省计算机内存占用率及提高运算速度, 取模型底部为 3 煤底板以下 20 m, 模型顶部至红层底界面。因此, 最终确定计算模型范围为 330 m × 106 m(图 2)。

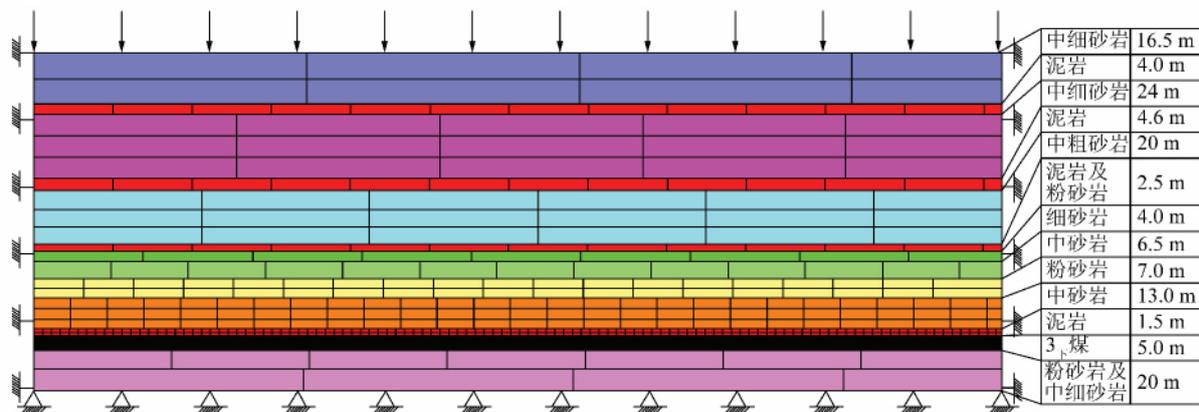


图 2 离散元计算模型及其边界条件

Fig. 2 Model of discrete element and boundary conditions

离散单元的划分尽可能与实际情况相吻合, 以不同岩组的层面作为单元划分的界面, 在每个岩组中设置不同密度的节理或缝隙, 将所有的岩组离散化。整

个计算范围内的岩层按照工程地质岩组进行划分, 模型下部边界及左右边界位移约束为零, 上部边界施加 13.83 MPa 的荷载模拟上覆岩层和表土层的作用。

工作面开采初期,直接顶垮落,基本顶砂岩开始垮落触矸,后方采空区出现压实现象,基本顶上覆粉砂岩出现离层和竖向裂缝。

工作面开采 90 m 时(图 3),直接顶和基本顶持续垮落,基本顶上覆岩层发现明显变形,基本顶上覆粉砂岩与基本顶之间的横向裂隙带被压密;在距煤层顶板约 35 m 的中粗砂岩与下伏泥岩岩层界面开始产生离层,随着工作面继续推进,离层规模逐渐增大,并沿竖向和工作面推进方向发展。

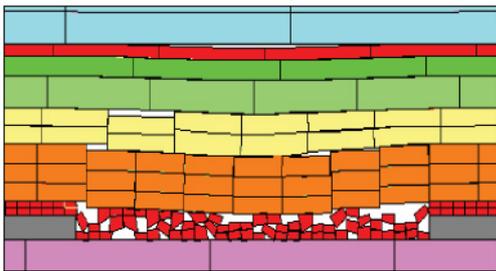


图 3 工作面开采 90 m 时离层发育情况^[18]

Fig. 3 Development of bed separation at a face advance of 90 m^[18]

工作面推进到 130 m 时(图 4),上覆岩层总体表现出了明显的变形下沉趋势,岩层裂隙带继续向上发展,底界面距煤层顶板约 55 m 的中粗砂岩岩层内开始出现竖向裂缝和横向裂隙带,其上的距煤层顶板约 59 m 的中细砂岩与下伏泥岩岩层界面也开始产生离层;同时,距煤层顶板约 35 m 的中粗砂岩与泥岩之间的离层虽然表现出沿工作面推进方向发展的现象,但其在竖向上规模明显减小,总体呈现出压密闭合的趋势。

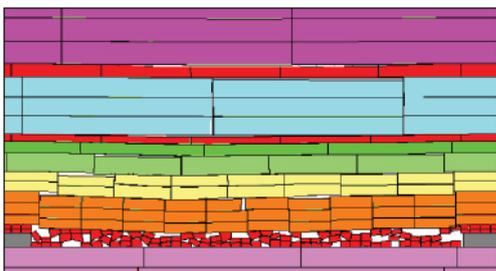


图 4 工作面开采 130 m 时离层发育情况^[18]

Fig. 4 Development of bed separation at a face advance of 130 m^[18]

随着工作面的继续推进,底界面距煤层顶板约 59 m 的中细砂岩与下伏泥岩之间的离层规模进一步扩大,而距煤层顶板约 35 m 的中粗砂岩与泥岩之间的离层则基本上闭合。

工作面推进到 170 m 时(图 5),底界面距煤层顶板约 59 m 的中细砂岩层内的离层进一步发育,离层数量和规模都有进一步扩大;同时,其上距煤层顶板

约 87 m 的中细砂岩与下伏泥岩之间也有小规模离层出现;岩层总体表现出了下沉压密趋势。

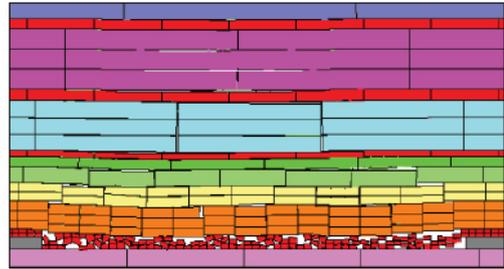


图 5 工作面开采 170 m 时离层发育^[18]

Fig. 5 Development of bed separation at a face advance of 170 m^[18]

由 11305 工作面数值模拟结果可知,随着煤层开采、工作面推进,采场顶板离层在横向上和竖向上动态发育;在工作面回采初期,离层发育宽度、发育层数及离层量均随着工作面的推进逐渐增大,而当工作面推进至一定距离时,下部离层发育宽度达到极值,趋于闭合;总体表现为最大离层量位置在横向上不断向前移动,而在竖向上则不断抬高,呈现上部离层逐渐发育而下部离层则逐渐闭合特点。

另外,11305 工作面顶板离层形成数值模拟结果还表明,至工作面推进 130 m 时,3_下煤采动裂隙带已发育至上距煤层顶约 55 m 的中粗砂岩岩层中(与矿区 3 煤导水裂隙带公式预计结果基本一致);且在 3_下煤回采过程中,顶板岩层中仅有距煤层顶约 35 m 和 59 m 的中细砂岩底界面处发育的离层持续时间较长,而只有 59 m 的中细砂岩底界面处所发育的离层位于 3_下煤导水裂隙带上方,与前文“空腔型”离层发育位置理论判别结果相一致,进一步证实了距煤层 59 m 的中细砂岩底界面处可发育持久的“空腔型”离层。

2.3 离层发育层位物探预计

通过对济宁二号煤矿十一采区地震数据进行常规振幅强度属性、常规梯度属性、振幅斜度属性和频率畸变特征分析,结果表明地震数据在斜度属性和频率畸变特征上具有较好的相应,可以表征覆岩离层的发育层位^[16]。11307 工作面在测区中的位置如图 6 所示。

Inline33 线、Crossline158 线在测区的位置如图 7 所示,由剖面可见 Crossline158 浅部向东出现下陷现象,已开采和未开采区别明显,在非采空区砂、泥岩分界面反射强度均匀,已开采地段上部由于出现离层,砂泥岩分界面反射振幅增大,形成强反射亮点渐变现象。Inline33 线上,煤开采后,北部呈现明显的振幅减弱,说明北部煤已采出。

由顶板上方 75 m 斜度分布(图 8)可看出:采空

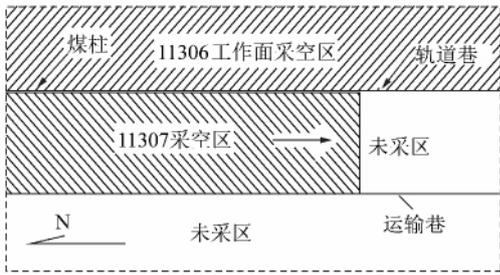


图 6 11307 工作面在测区中的位置

Fig. 6 Location of working face 11307 in survey area

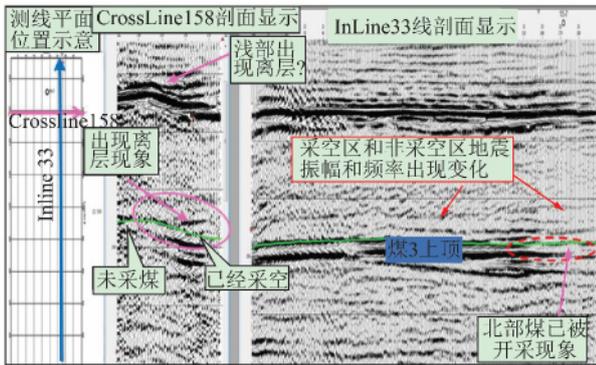


图 7 Inline33 和 Crossline158 剖面^[19]

Fig. 7 Profiles of Inline33 and Crossline158^[19]

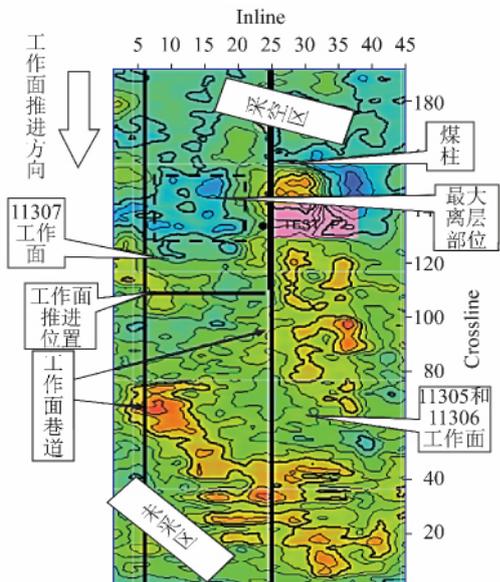


图 8 3_下煤顶板 75 m 反射强度的斜度分布^[19]

Fig. 8 Amplitude steepness distribution map in 75 m strata at the 3 lower coal seam roof^[19]

区反射强度的斜度出现低值异常, 异常区于采掘位置以北 50~70 m 出现, 向北延伸 160~180 m, 横向影响宽度约 150 m。工作面后方 230 m 仍可见异常, 但幅度较小, 原因可能是上覆岩层已开始垮塌, 离层很小或接近封闭, 利用地震信号难以探出离层信息。

由顶板上方 80 m 地震数据频率参数特征(图 9) 可看出, 采掘位置以北 50~70 m, 高频增多, 而在未采

区, 频率基本没有变化。可以认为, 该现象是由于离层出现后, 众多小型层理干扰了原来岩层的反射, 造成形式上的薄层增多现象。图 8 和 9 异常范围基本一致, 表明该地段为离层发育的有利地段。

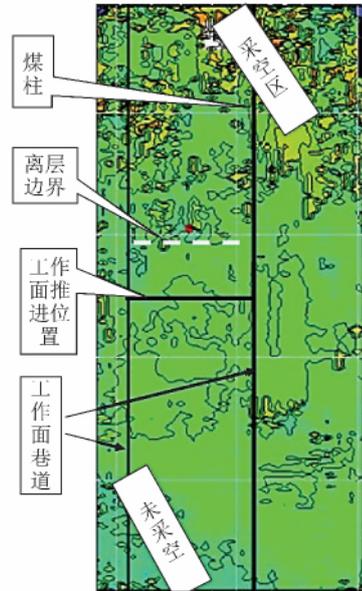


图 9 3_下煤顶板 80 m 地震数据频率参数特征^[19]

Fig. 9 Frequency parameter characteristics of seismic data in 80 m strata at the 3 lower coal seam roof^[19]

顶板上方 80~120 m 的反射强度和瞬时频率数据中, 采空区和未采区相比, 无异常显示, 表明离层在 80 m 以上出现的可能性较小。这说明离层发育于 80 m 左右, 即煤层上方第 10 层的中细砂岩。11307 工作面和 11305 工作面岩层组合、采煤方法等基本相似, 因此使用 11307 工作面地震数据对 11305 工作面离层发育的理论分析和数值模拟结果进行验证是合理的。

3 离层发育空间体积计算

依据薄板弹性力学理论, 结合工作面尺寸, 可知工作面推进长度远大于煤层及其上覆各岩层的分层厚度, 由此可将煤层上覆各岩层看成薄板叠加组合而成, 即将工作面煤层及其上覆各岩层看成薄板(图 10)。因而, 采场顶板中发育的各离层间隙量即为离层上下位岩层板的挠度差:

$$\Delta W = W_x - W_s \quad (5)$$

而根据弹性薄板理论, 应用 Ritz 法可求得受均布横向载荷四边固定弹性薄板的一级近似解^[20] 为

$$W = \frac{qa^4}{4D\pi^4 \left[3 + 3 \left(\frac{a}{b} \right)^4 + 2 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (6)$$

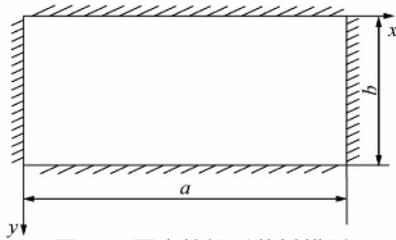


图10 固支的矩形薄板模型

Fig. 10 Rectangular thin plate model with clamped support

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (7)$$

即两板间的间隙量为

$$\Delta W = \frac{a^4}{4\pi^4 \left[3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 \right]} \left(\frac{q_x}{D_x} - \frac{q_s}{D_s} \right) \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (8)$$

当 $x = \frac{a}{2}$ $y = \frac{b}{2}$ 时, 岩层板中央离层间隙量取得

最大值, 为

$$\Delta W_{\max} = \frac{a^4}{\pi^4 \left[3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 \right]} \left(\frac{q_x}{D_x} - \frac{q_s}{D_s} \right) \quad (9)$$

则有某一离层空间的体积为

$$V_i = \iint_{\Omega} \Delta W dx dy = \frac{a^4}{4\pi^4 \left[3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 \right]} \times \left(\frac{q_x}{D_x} - \frac{q_s}{D_s} \right) \int_0^a \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) dx dy = \frac{a^4}{4\pi^4 \left[3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 \right]} \left(\frac{q_x}{D_x} - \frac{q_s}{D_s} \right) ab = \frac{1}{4} \Delta W_{\max} ab \quad (10)$$

若有多个离层时, 则离层总体积即为各离层体积之和, 即为

$$V = \sum V_i \quad (11)$$

式中 q D E 分别为板的横向均布载荷、抗弯刚度和弹性模量; q_s D_x 对应上位岩层和下位岩层的横向均布载荷和板的抗弯刚度; a b t S 分别为板的几何尺寸(长、宽)、厚度和面积 $S=ab$ 。

由理论公式预计采场顶板离层的体积关键是确定采场顶板离层的最大离层量及离层空间尺寸; 其中, 采场某一离层的最大离层量可依据数值模拟计算求得, 而若该离层上位岩层厚度较大, 对其上覆岩层下沉起主要控制作用时, 离层的最大离层量也可近似

取离层发育位置处岩层的最大下沉量, 即有 $\Delta W_{\max} \approx \eta m$ (其中 η 和 m 分别为下沉系数和采厚)。基于济宁二号煤矿 11301, 11306 工作面采动地表移动观测资料可知, 3 煤采动影响到地表的岩层移动角为 71° 左右, 边界角为 60° 左右, 下沉系数为 $0.5 \sim 0.6$ 。

由此结合 11305, 11306 工作面尺寸, 假设采场覆岩中离层主要发育弯曲带下部, 且暂时未发生闭合, 依据理论计算式(10)可分别近似计算得 11305, 11306 工作面采后其覆岩可中可发育的最大离层总体积为 $1.07 \times 10^5 \text{ m}^3$ (11305 工作面) 和 $1.21 \times 10^5 \text{ m}^3$ (11306 工作面)。

据上式计算假设可知, 由于忽略了顶板离层在采场覆岩中沿垂向(多层位)和横向(周期破断)动态发育, 即煤层采后离层可发育于整个弯曲带中, 且越远离煤层发育的“相对封闭”离层越多; 另外, 覆岩离层注浆减沉等相关文献表明^[21], 可注浆离层仅为开采空间的 $15\% \sim 20\%$, 波兰的离层注浆减沉效果也仅为 $20\% \sim 30\%$, 即仅弯曲带底部的离层体积将远远小于煤层采出体积的 $15\% \sim 20\%$ 。因此由薄板理论推导的离层体积计算式(10)预计结果偏大, 可作为采场顶板可发育离层的最大总体积。

4 结 论

(1) 基于组合梁原理得到离层发育层位的判别公式, 并计算 11305 工作面离层发育位置, 认为离层发育于顶板 59 m 的泥岩与上部厚层中细砂岩之间。

(2) 利用离散元软件 UDEC 对 11305 工作面离层动态发育过程及分布规律进行模拟, 模拟结果表明充分采动后, 最大离层出现于顶板以上 59 m 处的中细砂岩底界面。

(3) 通过三维地震对 11307 工作面离层发育层位及分布范围进行探测, 结果表明顶板以上 60 m 处砂泥岩分界面由于出现离层, 反射振幅增大, 形成强反射亮点渐变现象。离层自采掘位置以北 50~70 m 出现, 向北延伸 160~180 m, 横向影响宽度约 150 m。

(4) 依据薄板弹性理论, 将煤层上覆岩层看作薄板叠加组合, 通过计算离层上下位岩层板的挠度差来预计离层体积, 预计结果偏大, 可作为采场顶板可发育离层最大总体积。

参考文献:

- [1] 高延法. 岩移“四带”模型与动态位移反分析[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 51-55.
Gao Yanfa. “Four-zone” model of rock mass movement and back analysis of dynamic displacement[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 51-55.

- [2] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 岩层移动离层演化规律及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 24(5): 632-636.
Xu Jialin, Qian Minggao, Jin Hongwei. Study and application of bed separation distribution and development in the process of strata movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 24(5): 632-636.
- [3] Lin S. Displacement discontinuities and stress changes between roof strata and their influence on longwall mining under aquifers [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1993, 11(1): 37-50.
- [4] 滕永海, 阎振斌. 采动过程中覆岩离层发育规律的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 25-28.
Teng Yonghai, Yan Zhenbin. Study on law of overburden split developing in mining process [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 25-28.
- [5] 张健全, 廖国华, 黄在文, 等. 综放开采条件下覆岩离层动态发育规律[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(6): 492-494.
Zhang Jianquan, Liao Guohua, Huang Zaiwen, et al. Dynamic principles of development of Strata (bed) separation by fully mechanized top coal caving [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(6): 492-494.
- [6] 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): 1287-1290.
Su Zhongjie, Yu Guangming, Yang Lun. Numerical simulation on mechanism of deformation of separated strata in overburden [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1287-1290.
- [7] 赵德深, 陈雄, 覃丽坤, 等. 采动覆岩离层的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 5164-5167.
Zhao Deshen, Chen Xiong, Qin Likun, et al. Numerical simulation on mining induced bed separation of overlying strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5164-5167.
- [8] 郭惟嘉, 刘立民, 沈光寒, 等. 采动覆岩离层性确定方法及离层规律的研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 39-44.
Guo Weijia, Liu Limin, Shen Guanghan, et al. Determination of overburden separation and their rules after coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 39-44.
- [9] 赵德深, 徐涛, 刘文生, 等. 水平及缓倾斜煤层开采条件下离层值的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5767-5772.
Zhao Deshen, Xu Tao, Liu Wensheng, et al. Calculation of bed separation under horizontally and generally inclined coal seam mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5767-5772.
- [10] 朱卫兵, 王晓振, 孔翔, 等. 覆岩离层区积水引发的采场突水机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 306-311.
Zhu Weibing, Wang Xiaozhen, Kong Xiang, et al. Study of mechanism of stope water inrush caused by water accumulation in overburden separation areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 306-311.
- [11] 乔伟, 李文平, 李小琴. 采场顶板离层水“静水压涌突水”机制及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 96-104.
Qiao Wei, Li Wenping, Li Xiaoqin. Mechanism of “Hydrostatic Water-Inrush” and countermeasures for water inrush in roof bed separation of a mining face [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 96-104.
- [12] 乔伟, 李文平, 孙如华, 等. 煤矿特大动力突水动力冲破带形成机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1726-1733.
Qiao Wei, Li Wenping, Sun Ruhua, et al. Formation mechanism of dynamic impact failure zone of super dynamic water inrush in coal mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1726-1733.
- [13] 乔伟, 黄阳, 袁中帮, 等. 巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制及防治方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2076-2084.
Qiao Wei, Huang Yang, Yuan Zhongbang, et al. Formation and prevention of water inrush from roof bed separation with full-mechanized caving mining of ultra thick coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2076-2084.
- [14] 李小琴. 坚硬覆岩下重复采动离层水涌突机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
Li Xiaoqin. 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 and Technology, 2011.
- [15] 杨伦, 于广明, 王旭春, 等. 煤矿覆岩采动离层位置的计算[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 477-480.
Yang Lun, Yu Guangming, Wang Xuchun, et al. Calculation of position of separated strata due to mining in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 477-480.
- [16] 王长俊, 郝延锦. 关于岩层移动过程中的离层位置判别[J]. 煤炭技术, 2008, 27(5): 140-141.
Wang Changjun, Hao Yanjin. Study on separated strata mechanism in coal mine [J]. Coal Technology, 2008, 27(5): 140-141.
- [17] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 18-20.
- [18] 李文平, 乔伟, 乐建, 等. 采场顶板离层水涌水机理与防治技术研究[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 39-49.
Li Wenping, Qiao Wei, Le Jian, et al. Study on the inrush mechanism and prevention of the water in bed separation due to coal mining [R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008: 39-49.
- [19] 刘心广, 周玉华, 周广华, 等. 矿井深部开采煤层顶板覆岩离层量化技术研究报告[R]. 北京: 北京派特森科技发展有限公司, 2013: 41-47.
Liu Xinguang, Zhou Yuhua, Zhou Guanghua, et al. Quantitative study of roof bed separation in coal deep mining [R]. Beijing: Beijing Petrosound Geoservices Limited, 2013: 41-47.
- [20] 韩强, 黄小清, 宁建国. 高等板壳理论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] 杨伦. 对采动覆岩离层注浆减沉技术的再认识[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 352-356.
Yang Lun. Re-understand the technology of reducing the subsidence due to mining by injecting grouts into separated beds in overlying disrupted strata by extraction [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 352-356.