吕栋男,李峰.中深度煤层采动影响下围岩应力运移规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(4):19-27.doi:10. 13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.003

LYU D N, LI F. On the Stress Transport Law of Surrounding Rock Under the Influence of Mining in Mid-depth Coal Seam [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,39(4):19-27.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.003

# 中深度煤层采动影响下围岩应力运移规律

### 吕栋男1,2\*,李峰1

(1.中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京100083;2.冀中能源股份有限公司,河北邢台054000)

摘 要:通过对中深度煤层采动影响下的上覆岩层裂隙发育规律的研究,指导矿井顶板和瓦斯防治方案的制定.以大淑村 矿174302 工作面为工程背景,在工作面不同推进距离的条件下,采用 FLAC<sup>3D</sup>模拟工作面倾向应力和走向应力的变化,对采 动后煤体的支撑应力变化规律和采动影响的顶板应力、顶板位移变化规律进行分析,得出中深度煤层采动影响下围岩的应 力运移规律,结果表明:工作面倾向应力、走向应力和底板应力均在100m后趋于稳定,回采后上覆岩层 7~13m内岩层的 离层裂隙发育较大,距顶板高度10~12m时的下沉量最大.研究结果可为大淑村矿顶板和瓦斯防治提供科学依据. 关键词:采动影响;应力分布;裂隙演化;顶板位移;卸压时机

中图分类号:X936 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)04-0019-09

## On the Stress Transport Law of Surrounding Rock Under the Influence of Mining in Mid-depth Coal Seam

LYU Dongnan<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>1</sup>

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. Jizhong Energy Resources Co., Ltd., Xingtai 054000, China)

Abstract: To guide the development of gas extraction plans, the development law of overlying rock fractures under the influence of mining is studied. Taking the 174302 working face of Dashucun Mine as the specific engineering background,  $FLAC^{3D}$  numerical simulation is used to analyze the variation law of inclined stress and vertical stress of the working face at different advancing distances. The variation law of supporting stress of the coal body after mining and the variation law of roof stress and displacement under the influence of mining are analyzed. The stress migration law of the surrounding rock under the influence of mining in medium depth coal seams is obtained. Results show that the inclined stress, strike stress, and floor stress of the working face tend to stabilize after 100 m. After mining, the development of rock separation fractures in the overlying rock layer within the range of  $7 \sim 13$  m is relatively large. The maximum subsidence occurs at a height of  $10 \sim 12$  m from the top plate. The research results can provide scientific basis for the roof and gas prevention and control of Dashucun Mine.

Keywords: mining influence; stress distribution; fracture evolution; roof displacement; pressure relief opportunity

随着煤炭资源的持续开采,煤炭仍然占据着世界能源结构的重要位置<sup>[1-2]</sup>.然而,随着煤炭行业对深 部资源的不断挖掘,如何安全高效地开采近距离煤层成为学者们研究的重点.煤层开采不仅会引起上覆岩

收稿日期:2024-07-10

<sup>\*</sup> 通信作者,E-mail:805qz@163.com

层的移动和变形,还会导致裂隙的产生和发展,从而影响上覆岩层的应力分布及其运移规律<sup>[3-6]</sup>,并直接 影响瓦斯的迁移和积累,对煤矿的通风安全和瓦斯抽采效果产生深远影响<sup>[7]</sup>.

目前,国内已有很多学者通过各类模拟软件对不同条件下的煤层覆岩运移规律开展研究.张奎奎等<sup>[8]</sup> 采用数值模拟和理论计算的方法研究鄂尔多斯转龙湾煤矿浅埋厚煤层连续采动下覆岩的运移规律及矿压显现特征;周存柳等<sup>[9]</sup>根据贵州某矿的岩溶地区近距离煤层开采情况,利用 UDEC 模拟分析岩溶洞对覆 岩运移和采动裂隙发育的影响;毛丰<sup>[10]</sup>以三元煤矿厚煤层综放面为实际工程背景,对综放工作面顶板覆 岩的运移和应力分布进行模拟研究;FANG 等<sup>[11]</sup>的研究发现平顶山矿区八矿下部煤组的超前开采会对上 部煤层组的应力分布产生积极或消极的影响;ZHANG 等<sup>[12]</sup>通过模拟得出采场上部煤层工作面的应力演 化和变形规律;MA 等<sup>[13]</sup>通过相似模拟试验研究刘庄煤矿特定工作面开采过程中覆岩的移动规律;LI 等<sup>[14]</sup>采用物理相似模拟和现场观测的方法,研究极近距离煤层下行开采覆岩的破坏和运移规律;CHENG 等<sup>[15]</sup>研究近距离煤层开采过程中顶板的运动和采动应力的演化规律.总体来看,还缺乏对中深度埋藏区 煤层覆岩运移规律的研究.

本文以中深度埋藏区域的大淑村矿 174302 工作面为研究对象,运用数值模拟方法和理论分析对上覆 岩层的应力变化与位移规律进行深入研究.研究成果有助于实现对煤层开采影响下上覆岩层变化规律的 有效控制,可为大淑村矿顶板和瓦斯防治提供科学依据.

1 工程背景

以大淑村矿 174302 回采工作面为背景,工作面南起 F9 断层,北至三采区下山大巷保护煤柱及 SF11 断层,东部为未采掘区域,同层西侧为 174104 工作面采空区,该工作面上覆、下伏各煤层均未开采.地面标高为 175.1~180.26 m,工作面标高为-495~-545 m,平均埋深为 700 m 左右,属中深度埋藏煤层工作面.工作面走向长为 383 m,倾向长为 190 m,煤层厚度为 1.3 m.

#### 2 数值模拟

数值模拟的主要研究内容是运用开挖空模型来替代 回采工作面的推进,研究近距离煤层开采上覆岩层应力 的运移规律.通过 FLAC<sup>3D</sup>软件建立回采工作面数值模型, 每次开挖空模型单元 20 m,不平衡力比值约定比率为 1× 10<sup>-5</sup>.工作面模型的几何尺寸设计为 500 m×350 m× 150 m,共模拟 37 层不同相邻岩性的岩层.设置水平应力 为 12 MPa,垂直应力为 15 MPa,模拟开挖区域上覆岩层 的应力以及位移变化.建立的数值模拟模型如图 1 所示.





煤岩层主要包括细粒砂岩、泥岩、粉砂岩、砂质泥岩、中粒砂岩和煤,不同岩石的物理学参数如表1所示.

表1 不同岩石的物理学参数

名称	内聚力/MPa	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
细粒砂岩	5.00	623.000	5.908	2 670	1.03	38
泥岩	3.51	1.260	1.612	2 400	0.80	34
粉砂岩	1.00	1.709	2.020	2 640	0.86	33
砂质泥岩	2.10	1.260	1.612	2 500	0.60	36
中粒砂岩	5.02	375.000	5.843	2 610	0.97	38
煤	2.00	0.368	1.189	1 400	0.03	34

模型的底面和侧面限制水平移动和垂直移动,模型的上部施加上覆岩层的自重应力与水平方向上的构造应力.采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则进行计算,在建立模型初期,采用快速应力边界法(S-B法)来模拟构造应力和自身重力叠加出来的初始应力场,再通过对模型的底面和侧面进行条件限制,模型的计算采用与此对应的莫尔-库仑屈服准则.模型的原岩应力分布如图2所示.



图 2 模型原岩应力分布

3 计算结果及分析

#### 3.1 应力变化分析

工作面推进后,模拟工作面推进20,40,80,100,140,300m时沿倾向和走向方向剖面的应力分布.

3.1.1 倾向应力剖面云图

倾向应力剖面随工作面不同推进距离的变化如图 3 所示.由图 3 可知:当工作面推进距离为 20 m 时, 倾向应力的分布范围最小,随着工作面向前推进,应力分布的范围逐渐增大.当工作面推进距离为 100 m 时,应力的增加趋势逐渐趋于平稳.采空区顶底板的垂直应力减小形成卸压区,在采空区中部位置的卸压 效果最佳.在倾向方向上,采空区上覆、下伏岩层出现应力降低现象,两侧煤壁内部均出现应力集中现象.







(d) 工作面推进100 m



图 3 倾向应力剖面随不同工作面推进距离的变化

#### 3.1.2 走向应力剖面云图

走向剖面应力随不同工作面推进距离的变化如图 4 所示.由图 4 可知:174302 工作面开采后,在回采 工作面的上覆岩层中出现不同程度的应力降低,应力降低区域主要分布在工作面后方,其中卸压最充分的 位置靠近采空区中部,应力降低区域随着工作面的推进开始增大.受采动的持续影响,煤岩的应力重新分 布,卸压范围随之增大,但增加趋势明显减弱.当工作面推进距离为 100 m 时,采空区上覆岩层的卸压范围 基本保持不变,仅随着工作面的推进朝走向方向延伸.在工作面的前方煤壁和开切眼后方煤壁内部均出现 应力集中现象,该区域内部应力最高升至 40 MPa 左右.





#### 3.2 煤体支承应力分析

3.2.1 采空区两侧煤体支承应力

通过沿倾向方向布置应力监测点,得到采空区两侧煤壁顶板应力的变化曲线如图 5 所示.由图 5 可知:采空区方向的支承应力急剧下降.在距煤壁距离为 3.5 m时,采空区顶板应力已低于原岩应力,说明此时上覆岩层发生离层现象;当距煤壁距离为 12.7 m时,采空区顶板应力已低于 1 MPa,距煤壁距离达到 20 m后采空区顶板应力降为 0 MPa,说明采空区中央区域的顶板冒落压实.煤壁内侧方向的支承应力表现为先增加后下降的趋势.在距煤壁距离为 0~7 m时,支承应力由 24 MPa 增大到 26.5 MPa,在距煤壁距离为7~14 m时,支承应力急速衰减至 19 MPa,随后支承应力随着距煤壁距离的增加缓慢降低至原岩应力.因此,可以初步判断其极限平衡区(塑性区)的宽度为 7 m.

#### 3.2.2 采场前方煤体支承应力

通过沿走向方向布置应力监测点,得到工作面前方煤体支承应力的变化曲线如图6所示.由图6可

知:工作面后方的支承应力表现为急剧下降的趋势.当距工作面距离为2.5 m时,采空区顶板应力已低于 原岩应力,说明上覆岩层发生离层现象;当距工作面距离为8.5 m时,采空区顶板应力已低于1 MPa;距工 作面距离为10 m时的支承应力降为0 MPa,更深范围内的应力反向,说明工作面后方约10 m处已发生顶 板垮落或离层现象.在距工作面距离为0~5 m时,工作面前方煤体的支承应力由26 MPa增大到27.7 MPa; 在距工作面距离为5~12 m时,支承应力急速衰减至17.5 MPa,随后支承应力随着距离的增加缓慢下降, 直至降低至原岩应力.因此,可以初步判断其极限平衡区(塑性区)宽度为5 m.



#### 3.3 采动影响下顶板应力分析

为研究工作面推进期间顶板在不同高度下岩体的应力变化规律,将应力监测点布置在预挖煤体区域 平面的中心位置处,并在垂直方向以2m为步距布置20个测点,模型每500步记录一组数据,得到上覆岩 层应力变化曲线如图7所示.由图7可知:当顶板高度一致时,随着回采工作面不断地向前推进,顶板应力 呈下降趋势;随着顶板高度的逐渐增加,顶板应力呈上升趋势.

为研究采空区中部顶板的受力情况,取回采 300 m 时的数据作为分析目标,并对数据进行处理,得到 回采过程中上覆岩层整体的应力变化曲线如图 8 所示.由图 8 可知:采空区上覆岩层的应力分布随着顶板 高度的增加呈上升趋势,但都低于对应高度的原岩应力.距顶板高度为 0~7 m 时,应力的变化范围很小; 距顶板高度大于 7 m 后,应力逐渐增加;距顶板高度大于 13 m 后,应力的升高趋势变大且基本处于线性增 大趋势.由此得出:顶板高度为 7 m 时,顶板岩层基本没有承压作用,处于垮落状态;顶板高度为 7~13 m 时,岩层承压虽然依旧很小,但基本稳定且有缓慢变大,说明此处岩层虽破坏严重,离层裂隙发育比较大, 但未垮落.



#### 3.4 位移变化分析

工作面的推进会直接引起卸压作用,使上覆岩层及其周围的岩体发生位移.模拟工作面推进 20, 40,

80, 100, 140, 300 m 时沿倾向和走向方向剖面的位移分布.

3.4.1 倾向位移剖面云图

174302 工作面开采后,倾向位移剖面随不同工作面推进距离的变化如图 9 所示.由图 9 可知:工作面 开采后,随着推进距离的增加,煤层底板底鼓高度不断增加.当工作面推进距离为 20 m 时,煤层底板底鼓 高度约为 5.86 cm;当工作面推进距离为 80 m 时,煤层底板底鼓高度升至约 11.75 cm;在工作面推进距离 超过 100 m 时,煤层底板底鼓高度始终在 14.00 cm 上下浮动.从位移云图来看,煤层底板底鼓的水平影响 范围要高于顶板垮落的影响范围,而垂直影响范围和大小略小于上覆岩层.



图9 倾向位移剖面随不同工作面推进距离的变化

图 10 为倾向上覆岩层最大位移与推进距离的关系.由图 10 可知:工作面开采后,随着推进距离的增加, 煤层顶板下沉量不断增加.工作面推进 300 m 时,煤层顶板下沉量最大,约为工作面推进 20 m 时的6倍.





图 10 倾向上覆岩层最大位移与推进距离的关系

#### 3.4.2 走向位移剖面云图

图 11 为走向位移剖面随不同工作面推进距离的变化.由图 11 可知:随着工作面的推进,上覆岩层的 形变位移不断扩大,采空区中心形变位移的变化量最大,靠近煤壁的形变位移较小.从倾向剖面云图来看, 上覆岩层的最大位移处于倾向中心位置,开挖 300 m 时,垮落带的影响范围约为 35 m×10 m;从走向剖面 云图来看,开挖 300 m 时,上覆岩层最大位移的区域中心稍稍靠近开切眼位置约 20 m,而不是处于采空区 的中央位置.



图 12 为走向上覆岩层最大位移与推进距离的关系.由图 12 可知:工作面开采后,随着推进距离的增加,煤层顶板下沉量不断增加,工作面推进 300 m 时的煤层顶板下沉量最大,约为工作面推进 20 m 时的 6 倍.



#### 3.5 采动影响下的顶板位移分析

为研究工作面推进期间顶板在不同高度下岩体的位移变化规律,将位移监测点布置在预挖煤体区域 平面的中心位置处,并在垂直方向以2m为步距布置20个测点,模型每500步记录一组数据,得到上覆岩 层位移变化曲线如图13所示.由图13可知:当顶板高度一致时,随着回采工作面不断地向前推进,顶板位 移呈上升趋势;随着顶板高度的逐渐增加,顶板位移呈下降趋势.

为研究采空区中部顶板的位移情况,取回采 300 m 时的数据作为分析目标,并对数据进行处理,得出 回采过程中上覆岩层整体的应力变化曲线如图 14 所示.由图 14 可知:采空区上覆岩层的位移随着顶板高 度的增加呈下降趋势.距顶板高度为 0~10 m 时,上覆岩层顶板的下沉量较小;距顶板高度为 10~12 m 时, 下沉量最大;距顶板高度为 12 m 以后的下沉量逐渐降低.



### 4 结论

1)工作面倾向应力在工作面推进 20 m 时开始增加,工作面推进距离为 100 m 时,增加趋势趋于平缓; 工作面走向应力随着推进距离的增加逐步增加,卸压范围随之增大,当工作面推进距离为 100 m 时,采空 区上覆岩层的卸压范围基本保持不变,仅随着工作面的推进朝着走向方向延伸.

2) 采空区两侧煤壁支承应力极限平衡区的宽度为 7 m, 采场前方煤壁支承应力极限平衡区的宽度为 5 m.

3) 采空区上覆岩层的应力分布随着顶板高度的增加呈上升趋势, 顶板高度为 7~13 m 时岩层的离层

裂隙发育较大,但未垮落,顶板高度为13m以后岩石趋于稳定.

4)工作面开采后,随着推进距离的增加,煤层底板底鼓高度不断增加,工作面推进距离超过 100 m 后,煤层底板底鼓高度趋于稳定.

5)回采过程中上覆岩层整体的应力变化在距顶板高度 10~12 m 的下沉量最大.

#### 参考文献:

- [1] SHANG Y Q, ZHANG L, KONG D Z, et al. Overlying strata failure mechanism and gas migration law in close distance outburst coal seams: a case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 148: 107214.
- [2] ZHAO Y, LIN B Q, LIU T, et al. Mechanism of multifield coupling-induced outburst in mining-disturbed coal seam [J]. Fuel, 2020, 272: 117716.
- [3] LYU W Y, WU Y P, MING L, et al. Migration law of the roof of a composited backfilling longwall face in a steeply dipping coal seam[J]. Minerals, 2019, 9(3): 188.
- [4] LI S Z, WANG Z F. Study on the coupling effect of stress field and gas field in surrounding rock of stope and gas migration law[J]. Energies, 2023, 16(18): 6672.
- [5] PENG G Y, GAO M Z, XIE J, et al. Field test research on gas migration law of mining coal and rock[J]. Thermal Science, 2019, 23(3): 1591-1597.
- [6] WEN X L, GE Z C, ZHANG F Y. Study on the migration law of overlying rock in the upward layered continuous mining face of thick coal seam with paste backfill mining [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 7297477.
- [7] ZHANG H, CHENG Y P, DENG C B, et al. Stress-unloading and gas migration improvement mechanism in the soft and hard interbedded coal seam using directional hydraulic flushing technology [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(9): 1165-1179.
- [8] 张奎奎,周辉,张树光,等.浅埋厚煤层连续采动下多关键层结构覆岩运移规律研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1): 34-41.
- [9] 周存柳,康向涛,胡锦国.岩溶影响下近距离煤层采动覆岩运移及裂隙演化规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43 (12):86-93.
- [10] 毛丰.浅埋煤层开采上覆岩层的运移及三带规律研究[J].山东煤炭科技,2017(7): 59-60.
- [11] FANG S J, LIANG B, SUN W J, et al. Study on stress evolution law of upper coal seam in long-distance advance mining of lower coal seam[J]. Energy Science & Engineering, 2023, 11(5): 1753-1769.
- [12] ZHANG H T, WEN Z H, YAO B H, et al. Numerical simulation on stress evolution and deformation of overlying coal seam in lower protective layer mining[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(5): 3623-3633.
- [13] MA S L, ZHANG M W, MA L, et al. Experimental investigation on stress distribution and migration of the overburden during the mining process in deep coal seam mining[J]. Geoenvironmental Disasters, 2023, 10(1): 1-10.
- [14] LI X B, HE W R, XU Z H. Study on law of overlying strata breakage and migration in downward mining of extremely close coal seams by physical similarity simulation [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 2898971.
- [15] CHENG Z H, MA H F, SANG C, et al. Experimental research on dynamic evolution characteristics of roof movement and mining-induced stress of superimposed mining in a close distance coal seam group [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(1): 13-24.