

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0109-07

基于实测地应力的综放工作面采动应力分布及演化特征研究

刘钦节¹, 杨科¹, 陈贵², 成荣发², 史厚桃²

(1. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001;

2. 淮北矿业有限责任公司朱仙庄煤矿, 安徽 宿州 234111)

摘要 基于地应力对综放工作面煤岩体变形破坏、动力灾害防治、采动应力场演化等的重要影响, 在朱仙庄煤矿南翼地应力实测的基础上, 开展了基于多目标约束的矿井应力场最优化反分析, 获得了矿区最优边界荷载和地应力分布规律。利用 FLAC^{3D} 建立数值模型, 探讨了最大主应力与工作面推进方向夹角 α 、侧压系数 λ 及水平应力非均匀系数 ζ 等因素对综放工作面采动应力场的影响规律。结果表明: 不同地应力对综放采场内各采动应力场分布及演化特征具有显著影响。针对该矿井某一实际工作面的地应力分布特征、煤岩物理力学参数及开采技术条件, 分析了综放面采动应力场的分布规律及其随工作面推进的演化特征。研究结果可为综放工作面的顶底板管理、巷道支护等提供重要借鉴。

关键词 地应力; 优化反分析; 采动应力场; 综放工作面

中图分类号 TD 324 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.017

Mining-induced stress distribution and its evolution in fully mechanized top-coal caving face based on in-situ stress

LIU Qinjie¹, YANG Ke¹, CHEN Gui², CHENG Rongfa², SHI Houtao²

(1. Key Laboratory of Safety and High-Efficiency Coal Mining, Ministry of Education, School of Mining and Safety, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Zhuxianzhuang Coal Mine, Huaibei Mining Co Ltd, Suzhou, Anhui 234111, China)

Abstract Value and orientation of in-situ stress play an important role in surrounding rock deformation, dynamic disaster and mining-induced stress field around the fully mechanized top-coal caving (FMTC) face, which was always little considered in the past related research work. The hollow inclusion strain gauge method was used to measure the in-situ stress in the south limb of Zhuxianzhuang(ZXZ) coal mine, and the original ground stress field has been feedback analyzed based on multi-objective constraints optimization method, while the results illustrate the optimum boundary loads and in-situ stress distribution. In addition, numerical models with FLAC^{3D} have been established to investigate the influence law of mining-induced stress redistribution characteristics in FMTC mining face by the factors of the intersection angle between the longwall panel advancing direction and the maximum stress direction, the non-uniform coefficients of horizontal stress, and the lateral pressure coefficient.

收稿日期: 2014-05-10

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374011); 中国博士后基金项目(2013M531494); 安徽理工大学博士、硕士基金项目(11176)

作者简介: 刘钦节(1980—), 男, 山东省临沂市人, 讲师, 博士, 从事岩石力学与采矿工程等方面的研究。

E-mail: liuqinjie@126.com

Tel: 0554-6633285

cients, and so on. The results indicate that in-situ stress states has remarkable effect on mining-induced stress distribution and evolution characteristics of FMTC mining face. Finally, based on the real in-situ stress state, physical and mechanical parameters of coal-rock mass, and mining conditions of a coal face in ZXZ coal mine, the mine-induced stress distribution rules and its evolution process were further analyzed. Research results show that superposition and interaction of mining-induced stress and in-situ stress are important for strata management and roadway support in similar FMTC mining face.

Keywords: in-situ stress; optimum back analysis; mining-induced stress; fully mechanized top-coal caving mining face

综采放顶煤技术具有单面产量高、巷道掘进率低、搬家倒面次数少、综合效益好等优势,常被用来开采 6~12 m 左右的厚煤层。与综采工作面相比,综放工作面的采动应力场演化特征、围岩应力分布、矿压显现规律以及顶底板管理等都有其特有的属性^[1-3]。因此,在厚煤层的综放生产过程中,结合煤层赋存条件和生产工艺特点,深入开展基于实测地应力的综放采场围岩应力分布、采动应力场演化特征方面的研究,并有针对性地制定开采技术方案和管理措施,具有重要意义^[4-5]。多年来,围绕综采放顶煤技术的发展,国内外众多学者已在采场围岩压力分布及岩层控制方面开展了大量研究工作,并取得大量成果^[6-11]。然而,大量文献资料表明,以往相关方面的研究工作较少地考虑矿井原岩应力影响,未能从矿井实际地应力分布特征出发,真实可靠地研究分析综采放顶煤开采过程对原有煤系地层平衡状态的影响情况,不能很好地预测分析综放工作面附近围岩高应力分布规律、演化特征及其影响范围和影响程度。基于此,本文针对淮北朱仙庄煤矿南翼地质构造特征和实际生产条件,在现场地应力实测和矿井应力场优化反分析的基础上,深入开展基于实测地应力分布的综放工作面采动应力场的分布规律及其演化特征研究,对类似工作面的顶底板管理及巷道支护设计等提供重要参考。

朱仙庄煤矿位于安徽省宿州市东南 13 km 处,南以补 13 勘探线为界,北、东、西均以 10 煤层露头线为界,南北走向长 9 km,东西倾向宽 1.5 km 至 5.8 km,面积 21.55 km²,是一座改扩建后设计生产能力为 2.45 Mt/a 的矿井,主采煤层 8 煤,占可采储量的 78%,平均厚度 9.98 m,采用轻型支架放顶煤开采^[11]。该矿地质构造为一位于宿东向斜北段,徐宿弧形构造南端,西寺坡逆断层和东三铺逆断层所夹持的断块之间的轴向 N25°—50°W 的不对称向斜。研究范围内构造较平缓,一般倾角 15°~25°,

具次一级平缓褶曲。由于多期构造运动叠加的结果,煤层条件复杂,地应力高,区内东西向大断裂和北北东向大断裂纵横交错,形成了许多近网状的断块构造,以高倾斜度斜切正断层为主,采区内中小断层和小褶曲发育。

1 朱仙庄煤矿地应力现场测试

1.1 地应力现场测试

目前,矿井地应力的测试方法很多,其中空心包体法作为应力解除法中较为成熟且最为常用的方法之一,在各大研究院所、矿区现场及岩土工程等领域研究最多^[12-13]。因此,本研究过程中在充分考虑矿井地质特征、巷道布置特点及生产技术条件的基础上,选择了空心包体法进行现场地应力测试分析。2013 年 8 月至 10 月,安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室研究人员协同朱仙庄煤矿技术、掘进及采煤等相关工程人员分别在朱仙庄煤矿南翼 II 水平实施了 3 个点的地应力现场测试实验,其施工特征参数如表 1 所列。

表 1 地应力现场实验测钻孔技术特征表
Table 1 Spot testing parameters of in-situ stress

测点号	深度/m	位置	钻 孔		
			孔深/cm	方位角/(°)	倾角/(°)
ZXZ-1	568.5	II855 岩机巷	1 280	57	3
ZXZ-2	701.3	二水平底大巷	1 250	58	5
ZXZ-3	702.6	二水平轨道大巷	1 130	59	5

为了合理选择测试位置,确保测试结果的可靠性,首先,利用 YTJ-20 型岩层探测记录仪研究了测孔内部岩层的产状、裂隙发育情况、工程围岩松动影响范围等内容;然后,选用由中国地质科学院地质力学研究所研制的空心包体应变计、配套安装工具、定位仪器和均匀围压率定实验仪等进行煤矿现场实测和后续室内率定试验测试。现场应力解除并测试结束后,可利用高精度、多通道应变仪

配套软件绘制出应力解除曲线，即空心包体应变计各应变片实测应变值与应力解除深度之间的关系曲线。从应力解除实验测试过程及解除曲线来看，该矿 3 个测试孔的应变值都呈现出有规律且可预测的形状(如图 1 所示)，实验表明，现场测试过程控制科学合理、实测数据质量比较可靠。

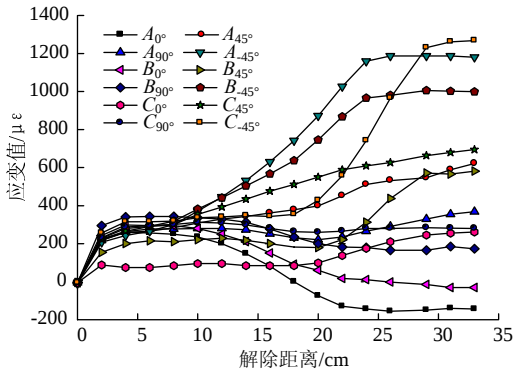


图 1 朱仙庄煤矿某测点应力解除过程曲线
Fig.1 Variation relationship of strains vs stress relief distance of ZXZ coal mine

1.2 朱仙庄矿南翼 II 水平地应力实测结果

综合分析测试过程中的应力解除数据、套取岩芯的室内率定试验及该矿测点附近取芯孔标准试件的实验结果，利用理论公式进行计算分析，可获得朱仙庄煤矿南翼 II 水平各测点地应力的_{大小、方位及其倾角}，如表 2 和图 2(图中的 N 表示正北方向)所示。由此可以看出，朱仙庄矿垂向主应力近似等于上覆岩层重量产生的压力，最大水平主应力、最小水平主应力和垂向主应力三者之间的相对关系为： $\sigma_{Hmax}>\sigma_V>\sigma_{Hmin}$ ，且侧压系数最大可达 1.44，表明该矿井以水平构造应力为主，其方位大致为 N60.9°E—N70.4°E。该矿井水平地应力的非均匀系数 ζ 要分布在 1.68~1.77 范围内，说明该矿地应力具有较强的方向性，对矿井工作面布置、巷道掘进与支护等均产生明显影响。

表 2 朱仙庄矿南翼 II 水平各测点实测地应力大小及其方位
Table 2 Magnitudes and orientations of the measured in-situ stresses in ZXZ coal mine

测点号	σ_{Hmax}		σ_{Hmin}		σ_{Hmax}	$\zeta = \frac{\sigma_{Hmax}}{\sigma_{Hmin}}$	$\frac{\sigma_{Hmax}}{\sigma_V}$
	大小/ MPa	方位/ (°)	大小/ MPa	方位/ (°)			
ZXZ-1	17.8	N70E	10.6	N157E	13.5	1.68	1.32
ZXZ-2	21.6	N68E	12.4	N176E	15.1	1.73	1.44
ZXZ-3	20.9	N60E	11.8	N145E	15.9	1.77	1.31

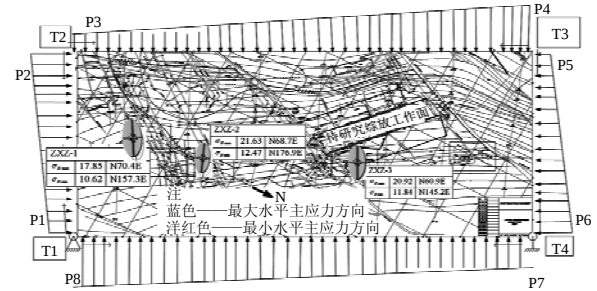


图 2 朱仙庄煤矿地应力优化反分析模型示意图
Fig.2 The numerical simulation model of in-situ stress of ZXZ coal mine

2 朱仙庄矿南翼 II 水平应力场最优化反分析

由于煤炭矿井地应力分布具有异常复杂性，计算分析时煤系地层物性参数和边界条件都难以准确设定，因此，矿井应力场的分析计算与数值模拟实际上是一个正、反分析多次迭代的复杂过程。在实际研究中，需制定一系列符合实际地质情况的演算标准，并参照有限个已知测点的实测应力信息进行多种方案的测算，以达到研究区域地应力场最优化分析的目的。

2.1 模型建立及其优化反分析

借鉴参考文献[14-15]中的理论方法和模型，并改善了文献中模型边界所受载荷均匀的假定，进一步修改完善了计算模型，对淮北朱仙庄煤矿南翼 II 水平应力场进行最优化反分析，取得了较好的模拟效果。以朱仙庄煤矿南翼 II 水平地质构造体为研究对象，建立最优化反分析的数值分析模型，如图 2 所示。其中，模拟区域选为 2746 m×1233 m，模型中包含矿区勘探过程中所揭示的主要断层、褶曲等地质构造。以岩石力学实验测试数据为依据，并考虑矿井实际岩层分布情况，给模型赋予合理的物理力学参数，断层构造连同其附近一定范围内的岩石视为断裂带，并视其规模大小，适当降低岩石力学参数。

将表 2 各实测点地应力大小及方位作为约束条件，并通过设定式(1)所示最优化反分析的目标函数：

$$Q(X, q) = \frac{F_1(X, q)}{F_0} + \sum_{i=1}^m P_x(x_i) + q \left(\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) \right)$$

(1)

式中： Q 为无因次的优化反分析目标函数，通常为各实测点地应力大小及方位模拟值的某种组合； X 为最优化过程中的设计变量矩阵，此处设定为模型

边界荷载; F_1 为最优化过程中的状态变量, 可由实测点地应力大小和方位模拟值来表示; P_x , P_g 和 P_h 分别为约束设计变量和状态变量的惩罚系数; F_0 为统一单位而引入的参考目标函数值; q 为惩罚因子。

根据上述模型并利用 Visual Basic 和 Fortran 语言工具开发了相关程序, 以大型通用有限元分析软件 ANSYS 为计算工具, 通过设定合理的计算条件, 经过几十万次的正、反分析, 最终可反演得出朱仙庄煤矿南翼 II 水平地应力的最优边界荷载, 如表 3 所列。

2.2 朱仙庄煤矿南翼 II 水平地应力场分布规律

将表 3 中的最优化边界荷载施加到前述有限元数值模型中进行再次计算分析, 即可得到朱仙庄矿南翼 II 水平地应力场的分布规律, 进而获得研究区

域内不同位置的最大、最小主应力大小和方位、剪切应力、水平应力及垂直应力的分布情况。现以水平向最大主应力分布为例进行分析说明, 图 3 所示为朱仙庄煤矿南翼 II 水平最大水平主应力大小及方位分布图。由图 3 可以看出, 该矿南翼 II 水平最大主应力主要表现为压应力状态, 主要变化范围从 20 MPa 增大到 25 MPa, 其方位则主要分布在 N60°E 和 N75°E 之间, 与该矿井附近其他矿区显示的远场地应力类似。从图 3 中还可以看出, 最大主应力的数值与埋深具有一定相关性但并不呈正比例关系。断层、褶曲等地质构造对矿井地应力场的分布具有明显影响, 主要表现为应力变化梯度增大, 局部范围内应力方位发生偏转或散乱无章。同样, 可研究分析其他类型应力的分布情况。

表 3 朱仙庄煤矿南翼 II 水平地应力最优化边界荷载
Table 3 Optimum boundary loads for the ground stress inversion of ZXZ coal mine

边界荷载	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	T_1	T_2	T_3	T_4
数值/MPa	11.09	10.26	26.33	22.40	17.18	10.25	15.74	19.88	-0.85	1.48	-0.26	1.45

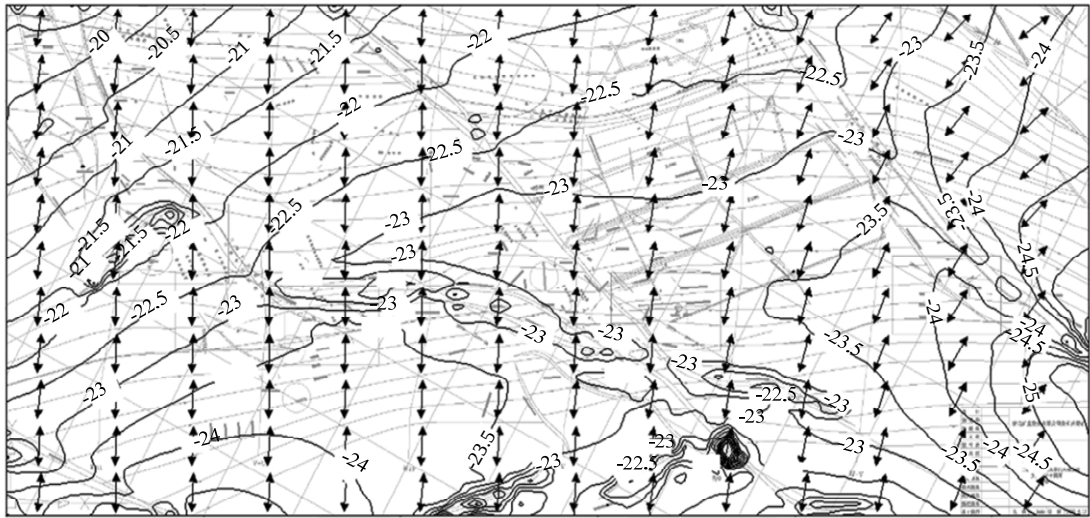


图 3 朱仙庄煤矿南翼 II 水平最大主应力大小及方位分布图 (MPa)
Fig.3 Contour and azimuth map of the horizontal maximum stress of ZXZ coal mine

3 不同地应力对综放工作面采动应力场分布的影响

为了研究分析地应力分布状态对综放工作面采动应力场分布及演化特征的影响规律, 现利用 FLAC^{3D} 软件建立不同数值模型, 分别在保持其他因素不变的条件下, 研究分析最大主应力与工作面推进方向夹角 α 、不同侧压系数 λ 及不同构造应力非均匀系数 ζ ($\zeta = \sigma_{Hmax} / \sigma_{Hmin}$) 对综放工作面采动

应力场演化特征的影响规律, 进而确定综放工作面采动应力场研究过程中考虑实际地应力分布特征的必要性。

在保持其他条件不变的前提下, 通过不断改变最大主应力方向与工作面推进方向的夹角 α , 经过多次数值模拟分析, 可得到图 4 所示的综放工作面前方及运输机巷道外侧实体煤内采动应力随最大主应力方位与工作面推进方向夹角 α 变化的关系曲线。由图中可以看出, 无论是工作面前方煤壁内

还是工作面平巷外侧煤柱内的各应力值(仅以几个典型应力为例,如垂直应力、最大水平主应力及 Mises 屈服应力)都随二者夹角的不同而变化。虽然垂直应力(即支承压力)变化不是很明显,但水平应力和 Mises 屈服应力均受其影响较大,同样对采煤工作面设备选型及巷道支护等具有十分重要的影响。随着最大主应力与工作面推进方向夹角 α 的不断增大,超前水平应力逐渐增大,而平巷外侧的最大水平主应力则逐渐降低,这说明不同夹角对不同采动应力的影响规律是不同的。

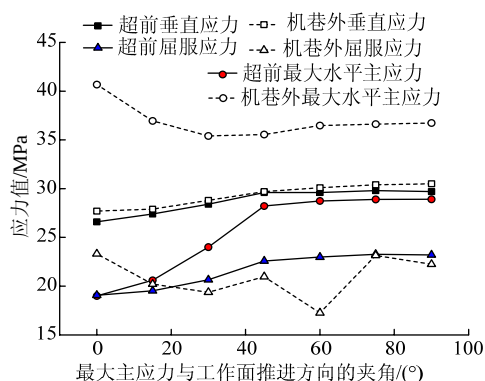


图 4 最大主应力方位对综放工作面采动应力的影响规律

Fig.4 Variation relationship of mining-induced stress with the maximum principal stress direction

图 5 为相同煤岩体物性参数、相同上覆岩层压力作用下,综放工作面附近各采动应力随不同侧压系数变化而变化的关系曲线。由图 5 可以看出,不同侧压系数对综放工作面的采动应力场也具有明显的影响。特别是侧压系数对平巷外侧煤体的各种应力值影响较大,尤其是机巷外侧的最大水平主应力由 15 MPa 迅速升高至 50 MPa。

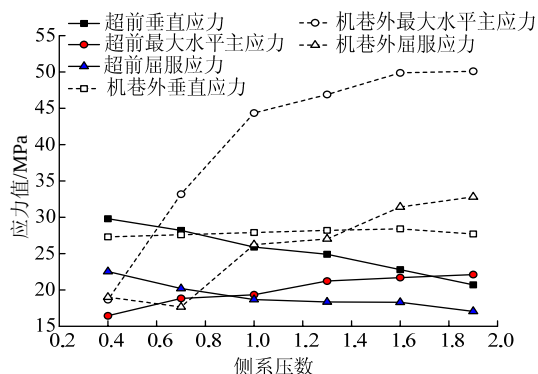


图 5 侧压系数对综放工作面采动应力的影响规律

Fig.5 Variation relationship of mining-induced stress with the lateral pressure coefficient

图 6 则给出了相同上覆岩层压力条件下,不同

水平应力非均匀系数对综放工作面各采动应力值的影响情况。同样可以看出,随着非均匀系数的不断增大,综放工作面采场内各应力值均发生较大范围的变化,尤其是平巷外侧的各应力值变化更为明显,表明不同的地应力非均匀系数对工作面两侧巷道的支护具有重要影响。

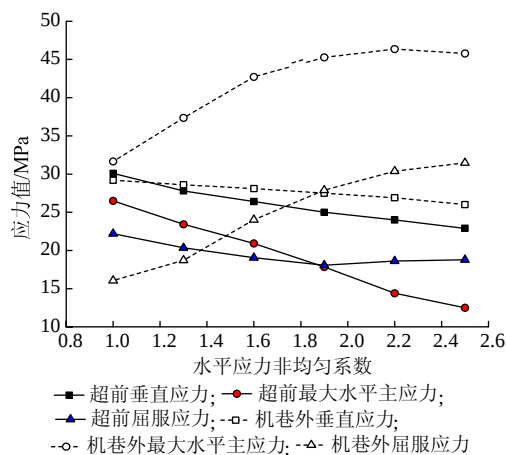


图 6 综放工作面采动应力随水平非均匀系数的变化曲线

Fig.6 Variation relationship of mining-induced stress with the non-uniform coefficient of horizontal stress

由此可以得出,不同的地应力分布特征,对综放工作面采场内各采动应力场分布及其演化特征都具有显著影响。因此,只有在充分掌握了现场地应力分布规律的基础上,才能够更为准确地把握综放工作面采动应力场的分布规律及演化特征,进而为特定条件下的厚煤层综放工作面的设备选型、巷道维护等提供重要理论指导。

4 基于实测地应力信息的综放采场采动应力场演化规律分析

在朱仙庄矿南翼 II 水平地应力实测及最优化地应力场反演分析的基础上,根据实验工作面所在区域(图 2 所示)的实际地应力分布特征和煤层开采技术条件,利用 FLAC^{3D} 建立综放工作面采场的三维数值模型,探讨分析了基于实测地应力信息的综放工作面采动应力场分布特征及演化规律。

图 7 为基于实测地应力的综放工作面前方煤壁采动应力随工作面推进距离变化的关系曲线。由图 7 可看出,综放工作面前方煤体各应力值均随工作面的推进而不断变化。其中,最大垂向应力和垂直面上的最大剪切应力均因煤体的采出而大幅度升高,前者从 18.96 MPa 升高至 31.38 MPa(应力增高系数约为 1.65),而后者则从 3.85 MPa 升至 10.03

MPa(应力增高系数约为 2.65);与此同时,水平应力则由原来的 26.5 MPa 迅速降至 10.03 MPa。从图中还可看出,综放工作面附近煤体内的各采动应力值均在工作面推进的前 40~60 m 的范围内变化较为剧烈,而在其后的 60~100 m 左右的范围内各应力值受推进距离的影响相对较小;随后当采空区近似成为方形后,各种应力值的大小基本不再变化,只是随着综放工作面的继续推进而不断向前移动。

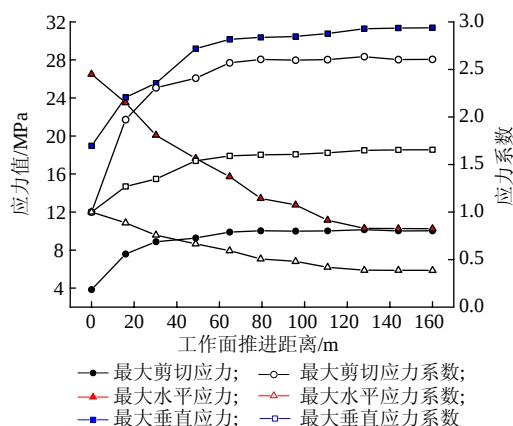


图 7 基于实测地应力的综放面煤壁前方采动应力随推进距离的变化曲线

Fig.7 Variation curves of mining-induced stress vs advancing distance, based on in-situ stress

图 8 为基于实测地应力的综放工作面垂直应力等值线分布图。

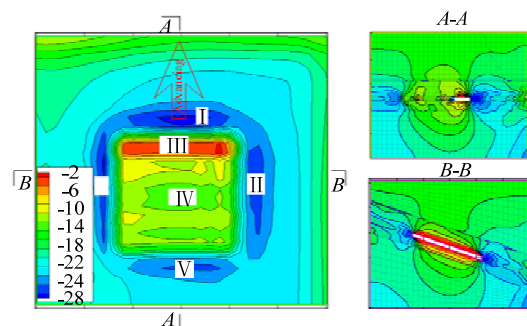


图 8 综放工作面垂直应力等值线分布图 (MPa)

Fig.8 Contour of vertical stress in the roof and floor rocks around FMTC working face

从图 8 中可看出,采煤工作面附近煤体内的顶、底板附近分别形成应力拱(或应力壳),四周煤壁顶、底板内部呈现出应力增高区,采空区内部则出现应力释放区,而且随着推进距离的不断增大,所形成的应力拱越来越大,煤体内应力集中系数也越来越大,直到直接顶板的初次垮落和后续基本顶的反复垮落,才使采空区矸石重新受到上覆岩层的压缩,导致采空区应力值得到一定程度恢复。总体上看,

综放工作面采后支承压力同样存在 5 个明显的应力分区:工作面前方高应力区、工作面后方低应力区、工作面平巷外侧高应力区、采空区应力恢复区和切眼后方高应力区。一般情况下,工作面前方的垂直应力峰值距离煤壁 5~10 m 左右,平巷外侧垂直应力峰值大约出现在煤壁 7~12 m,应力增高系数大约在 1.5~2.6 之间。当然,综放工作面采动应力场的具体分布特征和演化规律,除了与地应力分布特征有关外,还会受到煤系地层组合特征、工作面尺寸及综放工艺等因素的影响。

5 工程实例验证与分析

根据研究结论并综合考虑矿井实际生产技术条件,对本综放工作面掘进、支护及开采进行方案设计并投入了实际生产。为验证文中研究结论的准确性,在工作面实际回采期间,进行了现场相关实验测试。由于煤炭开采过程中的采动应力测量比位移测量要困难得多,而巷道围岩变形是采煤工作面周围煤岩体内各应力释放和重新分布综合作用的结果;因此,可以通过综放工作面回采过程中的实测位移值与相同条件下数值模拟分析得出的相应位移值之间的吻合情况,间接地反映基于实测地应力信息的综放工作面采动应力模拟分析的可靠程度。为此,研究过程中通过在运输机巷道里分别沿煤层顶板和工作面侧帮部煤体内安设深部位移计的方式,测定距离巷道 9 m 深处的位移值,并与相同支护技术条件下的数值模拟数据进行对比分析,结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,无论机巷顶板下沉量,还是巷道帮部侧移量的实测值与模拟值都比较吻合,表明前述研究结论较为可靠。

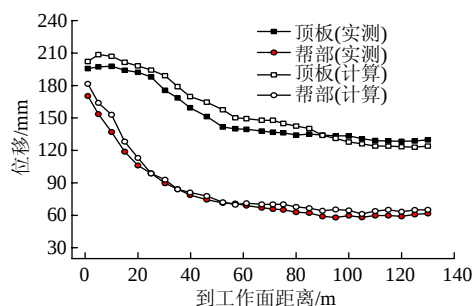


图 9 综放工作面回采过程中机巷位移变化曲线

Fig.9 Displacement curves of conveyor roadway during the mining process of FMTC face

6 结 论

1) 在淮北朱仙庄煤矿南翼 II 水平进行了地应

力现场测试,并开展了基于多目标约束的矿井应力场最优化反分析,获得了该矿区目标层位的最优化边界荷载和地应力分布规律,即:最大主应力主要表现为压应力状态,主要变化范围从 20 MPa 增大到 25 MPa,其方位则主要分布在 N60°E 和 N75°E 之间。

2) 利用 FLAC^{3D} 数值分析软件,建立了不同原岩应力分布特征条件下的数值模型,研究分析了最大主应力与工作面推进方向的夹角 α 、不同侧压系数 λ 和不同水平应力非均匀系数 ζ 等对综放工作面采动应力场的影响情况,得出了不同地应力分布特征对综放工作面内各采动应力场分布及其演化特征具有显著影响的结论。因此,只有在充分掌握了现场地应力分布规律的基础上,才能够更为准确地把握综放工作面采动应力场的分布规律及演化特征。

3) 针对该矿区某一具体综放工作面的实际地应力分布特征、煤岩物理力学参数及开采技术条件,建立数值分析模型,研究分析了综放工作面采动应力场的分布特征及其随工作面推进距离而变化的规律,为该矿类似条件下的厚煤层综放工作面的顶底板管理、设备选型、巷道维护等提供重要参考。

参考文献:

- [1] 黄庆国,孔令海. 特厚煤层综放开采实践与矿压规律研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2011: 75-97.
- [2] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010: 271-280.
- [3] 陈炎光,陆士梁. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994: 77-82.
- [4] 孟召平,李国富,雷志勇,等. 不同岩性顶板回采工作面矿压分布规律[J]. 煤田地质与勘探,2006, 34(6): 19-21.
MENG Zhaoping, LI Guofu, LEI Zhiyong, et al. Distribution of underground pressure for working face under different lithological characters of coal roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(6): 19-21.
- [5] 吕梦蛟,李先章,李玉申. 三软厚煤层综采工作面采动应力分布规律研究[J]. 煤炭科学技术,2011, 39(7): 21-24.
LYU Mengjiao, LI Xianzhang, LI Yushen. Study on mining stress distribution law of fully mechanized coal mining face in thick seam with soft roof, soft coal and soft floor[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(7): 21-24.
- [6] XIE G X, CHANG J C, YANG K. Investigations into stress shell characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 172-181.
- [7] XIE G X, CHANG J C, YANG K. In situ testing on mechanical characteristics of surrounding rock in the gates of fully mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 94-98.
- [8] YASITLI N E, UNVER B. 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42: 29-35.
- [9] LI S G, PAN H Y, KONG T T, et al. Numerical simulation and analysis of underground pressure in the 101 fully-mechanized top coal caving face of the Tingnan coalmine[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2009, 15(1): 28-32.
- [10] XIE H, CHEN Z H, WANG J C. Three-dimensional numerical analysis of deformation and failure during top coal caving[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, 36: 651-658.
- [11] 常聚才,谢广祥,陈贵. 综放采场围岩压力分布及矿压显现规律[J]. 采矿与安全工程学报,2007, 24(4): 457-460.
CHANG Jucai, XIE Guangxiang, CHEN Gui. Distribution of surrounding rock stress and strata behaviors of light-supported fully mechanized top-coal caving face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 457-460.
- [12] CAI M F, HUA P. Advance of in-situ stress measurement in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011: 3(4), 373-384.
- [13] 侯明勋. 深部地应力测量新方法新原理及其相关问题研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004.
- [14] LIU Q J, HUA X Z, YANG K. Numerical research on coal mine ground stress field based on multi-objective optimization method[C]//YIN Z X. Proceedings of the Eighth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013: 793-800.
- [15] 闫相祯,刘钦节,杨秀娟. 位错模型在低渗透储层裂缝预测中的应用[J]. 石油学报,2009, 30(2): 252-258.
YAN Xiangzhen, LIU Qinjie, YANG Xiujuan. Application of dislocation model in fracture prediction of low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 252-258.