

文章编号: 0253-9993(2013)01-0067-06

大采深厚煤层底板采动破坏深度

张蕊¹ 姜振泉¹ 李秀晗² 晁海德² 孙强¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221116; 2. 兖州煤业股份有限公司 赵楼煤矿 山东 菏泽 274705)

摘 要: 针对我国承压水上开采底板突水灾害随开采深度不断增大而逐年增多的趋势,以某矿综放工作面的深部开采实际为背景,根据现场煤层底板钻孔内不同深度传感器应变测试值随工作面的变化规律,确定出煤层底板岩体破坏深度介于 18~20 m;以研究区实际地层资料为基础建立工程地质模型,通过反复试算、逐步修正模型边界条件,对煤层底板破坏特征进行分析,弥补了现场实测结果不能反映出煤层回采过程中底板应力场的不足;采用现场应变实测和数值模拟相结合的方法,确定了大采深厚煤层底板破坏深度为 20 m,揭示了矿山压力在采动煤层底板中的传播规律。

关键词: 底板突水;带压开采;破坏深度;现场应变法;数值模拟

中图分类号: TD322

文献标志码: A

Study on the failure depth of thick seam floor in deep mining

ZHANG Rui¹ JIANG Zhen-quan¹ LI Xiu-han² CHAO Hai-de² SUN Qiang¹

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Zhaolou Mine Heze Energy Chemical Company Ltd., Yanzhou Coal Mining Group, Heze 274705, China)

Abstract: Aimed at the trend of water inrush disasters increasing annually with the mining depth above confined aquifers, based on the conditions of the fully mechanized workplace in the deep mine and according to the in-situ strain value of the mining face at different depth under the coal seam bed, it was determined the coal seam floor failure depth was between 18–20 m. This study analyzed the characteristics of coal seam floor failure through repeated calculations and gradual correction to model boundary conditions, based on the actual formation material in the study area to establish the geological model, which makes up for the disadvantages of coal seam mining stress that the field measurement result could not reflect. The coal seam floor failure depth was 20 m and it revealed the characteristics of the mine pressure in mining coal floor when combining the in-situ strain measurement method with the numerical simulation method.

Key words: water inrush from floor; mining pressure; damage depth; in-situ strain test; numerical simulation

随着我国煤炭开采深度的增大,煤层回采后工作面底板破断、突水灾害正呈逐年递增的趋势。煤层底板采动破坏后不但易出现底板变形,而且因其承载强度急剧降低而易发生机架下陷,增加了移架难度。此外,底板带(水)压开采条件下,底板采动破坏减小了煤层底板的隔水层厚度,导致底板阻水能力降低,由此增大了底板充水的危险性。因此,正确地认识煤层底板开采破坏深度和应力分布规律对于研究煤层底板阻水能力发挥着重要的作用。现场原位探测煤层采动底板变形规律和破坏深度是这一问题研究的重

要技术手段,尤其对于强冲击地压矿井和底板带压开采矿井,底板采动变形破坏实测数据是底板变形防护和制定防治水对策的重要依据^[1-2]。我国自 20 世纪 80 年代以来,已经对几十个工作面进行了底板采动破坏深度的观测工作,取得了大量的数据,为我国煤矿安全生产做出了巨大贡献^[3]。朱术云等^[4-5]通过应变法测试得出了超化“三软”煤底板采动影响深度;程学丰^[6]、张平松^[7]等利用 CT 技术获得煤层采动过程中底板破坏的动态发育规律和变形破坏特征;吴基文等^[8]通过注水试验得出了朱庄煤矿 6 煤底板

收稿日期: 2011-12-19 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102201); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12-0948)

作者简介: 张蕊(1987—),男,云南宣威人,博士研究生。E-mail: zhangruian5566@163.com

采动影响深度;关英斌等^[9]通过数值模拟研究了显德汪煤矿 9 煤层底板岩体应力分布变化规律。

以上大多数实测结果和试验研究都是针对煤层埋深较浅的情况,而大采深条件下的煤层底板破坏深度的测试研究较少。随着煤矿资源开采深度的不断增加,采煤工作面空间尺度的不断增大,上述所测煤层底板破坏深度参考值已不能满足深部开采矿井水害防治的要求。为此,本文以某矿综放工作面深部开采实际为背景,采用应变(感应)法对煤层底板下不同深度的岩体变形程度进行监测,从而判断煤层底板的破坏情况,再结合 FLAC^{3D} 数值模拟来确定工作面的整体破坏程度,并通过综合对比分析,探讨了采动煤层底板变形破坏的基本规律。

1 工作面概况

某矿综放工作面位于矿井东南部,采用长壁综合机械化放顶煤开采方法,回采煤层为山西组 3 煤,煤层厚 0~8.1 m,平均 4.0 m,煤层走向以 NW 向为主,平均倾角 3°,运输坡度 3°~5°,总体趋势东北高、西南低,宽缓褶曲发育。煤层底板标高-963.3~-918.2 m,埋深 962.5~1 006.5 m,呈“刀把”式,第 1 部分面长 285.0 m,面宽 152.6 m,第 2 部分面长 1 016.0 m,面宽 205.0 m。总面长 1 301.0 m。3 煤直接底为泥岩,基本底以砂岩为主,砂岩累厚 3.05~13.24 m,中夹粉砂岩、泥岩。井田范围内三灰是 3 煤开采底板的直接充水含水层,厚 6.30~8.00 m,平均 7.17 m,距 3 煤底板 49.62~71.05 m,平均 58.73 m,裂隙较发育,单位涌水量 0.123 L/(s·m),最高水压 6.7 MPa,正常涌水量为 121 m³/h。由于三灰在井田范围具有埋藏深、水压大的特点,因此 3 煤开采过程中的三灰底臌水害威胁不容忽视。

2 现场实测

2.1 测试原理简介

现场应变(感应)法测试是一种根据煤层底板岩层变形程度来确定底板受采动影响程度和深度范围的方法。该方法通过应变传感器对工作面采动过程中煤层底板下不同深度岩层的变形程度进行测试,并以此来判断煤层底板的采动影响程度和深度范围。在工作面距离传感器位置较远、采动矿压尚未波及到测点时,传感器读数变化相对稳定;当采动矿压波及到测点时,传感器测试数据会随波及程度呈同步变化;在工作面临近测点,传感器读数变化受采动矿压的激烈扰动而急剧增大,甚至出现收集不到数据的情况(应变传感器因钻孔变形的挤压或拉张而受损),

说明测点所处位置围岩受到了破坏。此外,在煤层回采过程中,当煤层底板岩层未遭受破坏时,传感器外侧受力相对均匀,3 组测试数据变化较稳定,随围岩变形大小而同步变化;当煤层底板岩层受到采动矿压扰动发生破坏后,应变传感器读数会急剧增大或收集不到数据(传感器受损)。因此,可根据采动底板下不同深度传感器测试数据的变化情况来确定煤层底板采动破坏的深度范围。图 1 为应变传感器内部结构示意图,应变传感器由 3 组工作片(轴向及径向应变感应片)和地线、补偿片组成,通过 12 个工作通道将传感器应变感应信号输送到接收装置(KBJ-12 型应变记录仪)予以存储,经转换、处理后输出。

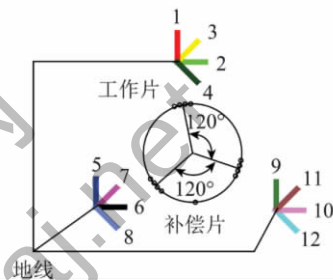


图 1 应变传感器内部结构示意图

Fig. 1 Scheme of internal structure on strain probe

2.2 监测孔及传感器布设

根据综放工作面的实际开采情况及测试条件的需要,在轨道巷中布置 2 个观测孔,分别距切眼 588 m 和 675 m。第 1 个孔布设 4 个传感器,分别位于煤层底板下 10.7、18.0、22.6 和 25.4 m,安装编号自下而上依次为 1-1、1-2、1-3 及 1-4 号;第 2 个钻孔布设 3 个传感器,分别位于煤层底板下 13.0、15.0 和 20.0 m,安装编号自下而上依次为 2-1、2-2 和 2-3 号。在安装完传感器后将钻孔用水泥浆将其封堵,使之和岩层成为一体。测试起始位置为掘进工作面距观测孔 110 m,终止位置为掘进工作面推过测孔约 20 m 位置,观测孔平面示意图如图 2 所示,结构设计技术参数见表 1。

2.3 测试结果分析

根据 2 个监测孔不同深度测点的应变变化特点及信号通道的工作状态可知,监测孔 1 中的 1-3、1-4 号传感器及监测孔 2 中的 2-2、2-3 号传感器由于受到采动矿压的剧烈扰动,在采前就已经发生了损坏;而监测孔 1 中的 1-1、1-2 号传感器及监测孔 2 中的 2-1 号传感器则在采前及采后应变变化都相对较为稳定。为此,取监测孔 1 中的 1-2 号、1-3 号传感器及监测孔 2 中的 2-1、2-2 号传感器进行分析,以相邻传感器之间的距离作为确定煤层底板破坏深度范围的依据,测试结果如图 3、4 所示。现场监测所

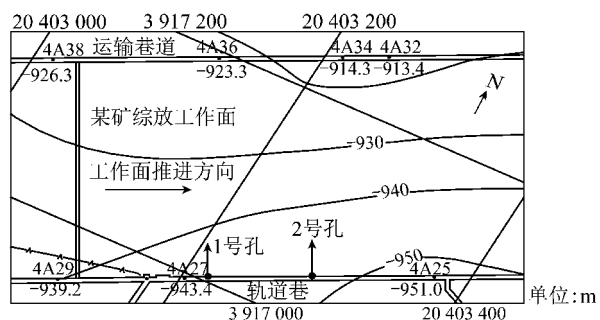


图 2 工作面监测钻孔平面示意

Fig. 2 Monitoring drilling plane diagram of working face

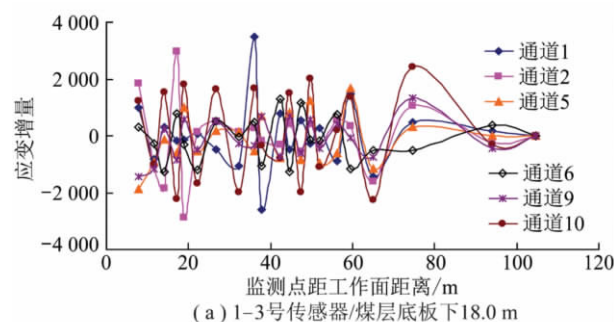
表 1 工作面底板破坏深度观测孔设计技术参数

Table 1 Design parameters of borehole monitoring failure depth of seam floor

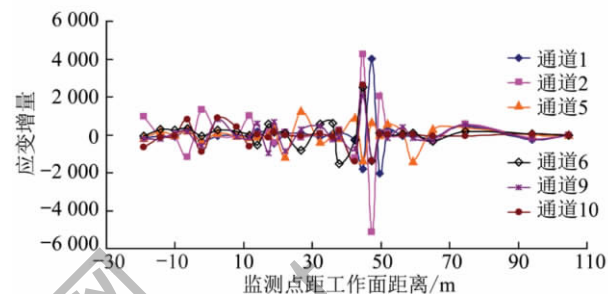
技术参数	1 号测孔	2 号测孔
开孔直径 (mm) / 深度 (m)	127 / 6.0	127 / 6.0
孔口管直径 (mm) / 长度 (m)	110 / 6.0	110 / 6.0
终孔直径 / mm	89	89
钻孔方位 / (°)	332	332
钻孔倾角 / (°)	-50	-50
与巷道夹角 / (°)	90	90
孔深 / m	44	40
伸进工作面水平距离 / m	33	31
控制底板最大真厚度 / m	28	26

获取的数据是在采动条件下一定深度范围内的每个探头的 12 通道 (方向) 的应变值 ($\mu\epsilon$)。其中通道 1、5 及 9 为垂直方向应变, 通道 2、6 及 10 为水平方向应变。在数据处理时, 只针对传感器的水平方向和竖直方向的变化情况来判断岩层的破坏情况, 因而对数据进行了矢量叠加, 将通道 3、4 的应变叠加到通道 1、2 上; 通道 7、8 的应变叠加到通道 5、6 上; 通道 11、12 应变叠加到通道 9、10 上。

综合分析掘进工作面推进过程中各测点应变感应的动态变化 (图 3(a)) 可以发现, 当工作面推进至一定距离后, 各测点开始受矿压的影响出现不同程度的应变感应, 但幅度均相对较小, 之后在工作面推进过程中, 这种感应变化相对稳定。当掘进工作面临近测点位置时, 监测孔 1 中的 1-3 号传感器 (图 3(a)) 和监测孔 2 中的 2-2 号传感器 (图 4(a)) 出现了激烈波动, 应变感应信号显现具有较大的离散性, 波动幅度较大。在距离监测孔分别约为 7 m 和 2 m 时, 传感器没有采集到数据, 表明该测点位置岩层由于受到矿山压力的激烈扰动而发生破坏; 与 1-3 号传感器和 2-2 号传感器相比, 整个采动观测过程中 1-2 号传感器 (图 3(b)) 和 2-1 号传感器 (图 4(b)) 的应变感应规律性明显, 应变波动幅度相对较小, 分析认为,



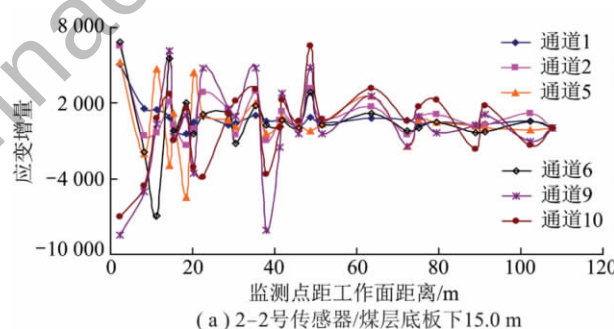
(a) 1-3号传感器/煤层底板下18.0 m



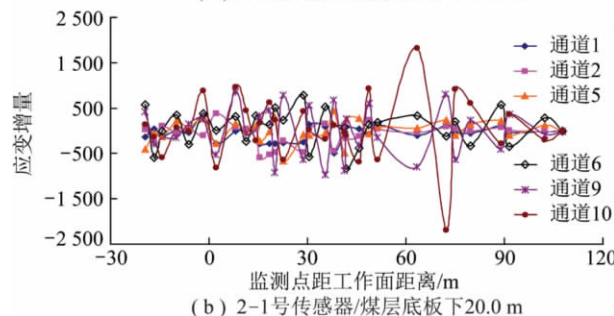
(b) 1-2号传感器/煤层底板下22.6 m

图 3 监测孔 1 中 1-2、1-3 号传感器应变值增量随开采距离的变化曲线

Fig. 3 Curves on the strain increment of No. 1-2 and No. 1-3 with the distance in No. 1 monitoring borehole



(a) 2-2号传感器/煤层底板下15.0 m



(b) 2-1号传感器/煤层底板下20.0 m

图 4 监测孔 2 中 2-1、2-2 号传感器应变值增量随开采距离的变化曲线

Fig. 4 Curves on the strain increment of No. 2-1 and No. 2-2 with the distance in No. 2 monitoring borehole

这种情况反映出测点所处位置围岩所受采动扰动以弹性波为主, 围岩没有产生较大幅度的塑性变形。此外, 在工作面向测点推进过程中, 1-2 号传感器的通道 1、2 (距测点约 48 m) 及 2-1 号传感器的通道 10 (距测点约 74 m) 出现了明显的应变异常感应现象,

结合其他通道的应变感应变化情况可知,掘进工作面距离测点较远时测点位置的采动矿压波及强度应该是相对微弱的,并且从测点显现的弹性应变感应情况看,可以排除采动矿压波及导致测点位置出现剧烈的扰动变形,故可认为出现这种应变感应异常现象的原因可能是探头局部应变感应片触及岩块,导致其集中受力所致。考虑到 1-2 号传感器和 2-1 号传感器的埋置深度分别为煤底下 22.6 m 及 20.0 m,其应变感应反映的弹性特征明显,与其他测点的应变感应激烈显现现象形成鲜明的对比。因此,可认为这 2 个测点位置没有受到采动矿压的扰动破坏。

综合以上分析结果可知,该工作面煤层底板采动破坏深度介于 18.0 ~ 20.0 m。

3 数值模拟

3.1 模型建立

综合考虑本次数值模拟的目的,结合工作面的开采实际情况,将研究区内岩层按岩性和完整性划分为灰岩、粉砂岩、泥岩、中砂岩、细砂岩、煤层 6 个工程地质岩组^[10-13]。模型空间范围取包含测试孔在内的 400 m×300 m 的地块,高取 150 m,煤厚取 4 m,煤层顶板取 56 m,底板取 90 m,倾向方向为 Y 方向,走向方向为 X 方向,垂直方向为 Z 方向。模型前后、左右侧面采用水平方向固定垂直方向自由边界;底面采用垂直方向固定水平方向自由边界;模型顶部按 920 m 的补偿荷载施加,约为 23 MPa,沿走向方向采动底板主要影响因素的工程地质模型如图 5 所示。

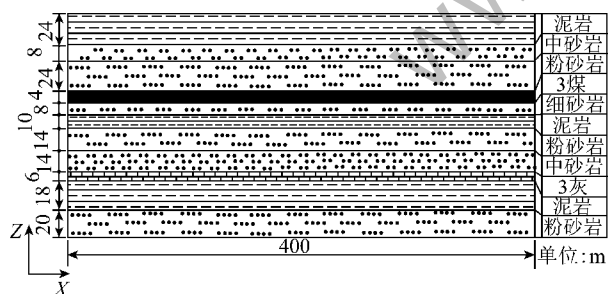


图 5 采动底板主要影响因素工程地质模型

Fig. 5 Engineering geology model of influential factors on mining coal floor

为了更好的和实测研究结合,模拟出不同岩组的三维形态及煤层底板的破坏深度,根据研究区的地质测绘成果,在 FLAC^{3D} 软件平台下构建地质体数值模型如图 6 所示。模型共划分出 90 000 个单元,96 596 个节点。在数值模拟过程中,采用 Mohr-Coulomb 塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 破坏准则对煤层底板采动破坏特征进行计算,研究区各岩层具体地质力学

参数见表 2。

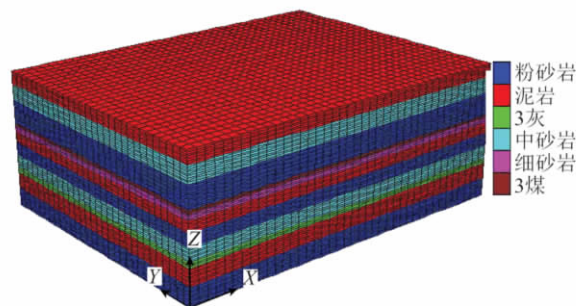


图 6 地质体数值模型

Fig. 6 Geological numerical model

表 2 地质模型各岩层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock with geological model

岩石名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内聚力/ MPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强 度/MPa
泥岩	1 900	1.50	0.69	1.8	22	1.6
粉砂岩	2 400	3.04	1.65	3.8	28	2.2
中细砂岩	2 600	4.53	2.72	5.7	32	3.6
煤	1 600	1.30	0.53	0.8	20	0.7
细砂岩	2 500	3.75	2.14	4.5	30	2.4
灰岩	2 700	10.70	7.38	8.6	36	5.6

3.2 结果分析与讨论

从煤层底板下 2 m 水平剖面垂直应力等值线可以看出(图 7(a)),煤层开采后,在工作面煤壁前方 0 ~ 10 m 的垂直应力逐渐增大并出现峰值,最大值约为 50 MPa,在 10 ~ 28 m 垂直应力逐渐减小至 30 MPa,至煤壁前方 80 m 左右时垂直应力逐渐恢复至接近原岩应力值;在工作面煤壁前方出现应力集中是由于煤层开采过程中煤壁来不及释放煤体中储存的应变能而造成应变能积累所致;同时,在工作面切眼后方也有类似的应力集中现象,但在切眼后方出现应力集中是由于在开采过程中煤壁释放煤体中储存的应变能的速率较缓慢而造成应变能积累所致。

通过对煤层开采过程中垂直剖面方向的垂直应力分析可知(图 7(b) (c)),煤层底板岩层中垂直应力集中区和卸压区基本与支撑压力集中区和卸压区相对应,随着距煤层底板深度的增加,煤壁下方岩体的应力集中与采空区的卸压程度降低,煤壁下方岩体的垂直应力由 58 MPa 逐渐减小至 22 MPa,采空区底板下岩体的垂直应力由 0 逐渐增大至 18 MPa,垂直应力分布逐渐趋向缓和;工作面上、下两侧的垂直应力等值线呈“马鞍形”分布,而工作面上、下两侧煤壁上、下方垂直应力等值线则呈“泡形”分布,工作面上、下两侧垂直应力峰值从支承压力峰值位置处沿着

与法线呈一定角度向煤壁下方传播,采空区底板岩体中则高度卸压。

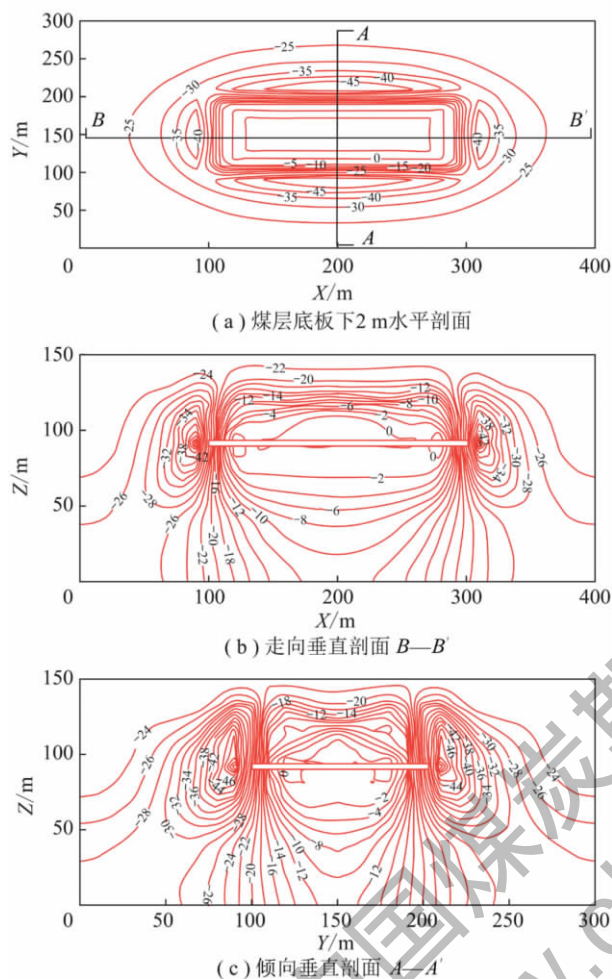


图7 煤层开采垂直应力分布(单位: MPa)

Fig. 7 Distributions of vertical stress in coal seam mining(Unit: MPa)

图8(a)为煤层底板下2 m水平剖面剪应力分布等值线,可知,由于采空区以下底板的应力释放与煤壁下方的应力集中,在采空区周围就会形成一个剪切带,剪切应力为1~15 MPa,这个剪切带是煤层底板岩层受破坏最严重的部位。在初次来压时,采后应力与采前应力对比明显,底板岩层也出现较强破坏特征,周期来压时,底板的采动破坏特征进一步增强,采动应力重新调整,但与初次来压时相比变化较小。因此研究初次来压阶段的底板应力调整情况就显得尤为重要。

由采空区中部剪应力等值线变化情况可以看出(图8(b)、(c)),剪应力的分布基本关于工作面的中垂线对称,在开切眼和终采线附近出现剪应力集中现象,集中出现在开切眼的斜上方、斜下方和终采线的斜上方、斜下方,大致呈“蝶状”分布,且开切眼与终采线附近的最大剪应力值基本相等,斜上方最大剪应

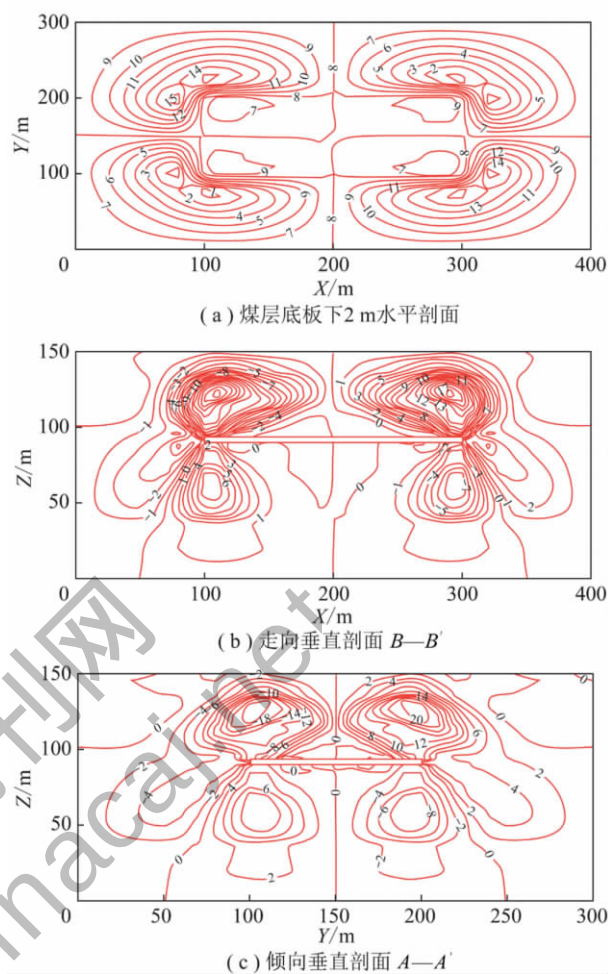


图8 煤层开采剪应力分布(单位: MPa)

Fig. 8 Distributions of shearing stress in coal seam mining(Unit: MPa)

力为20 MPa,斜下方最大剪应力为12 MPa。煤层底板中剪应力的集中部位是较易发生剪切屈服的部位,并会导致剪切裂隙的发育,形成导水通道,在煤矿生产过程中要注意剪应力集中部位的水位状态变化。

对比煤层底板下不同深度塑性区发育情况可以看出(图9),随工作面的推进,在煤层底板下2 m(图9(a)),煤层底板呈面状破坏,采空区四周为剪切破坏,中间为拉张破坏;在煤层底板下10 m(图9(b)),煤层底板呈“O”形破坏,主要以采空区四周剪切破坏为主,采空区中部局部为拉张破坏;煤层底板下20 m时(图9(c)),只有采空区四周局部发生剪切破坏,且破坏程度也随着距煤层底板深度的增加而减弱,至距煤层底板22 m时(图9(d)),影响已较为微弱。

综合分析煤层采动过程中应力及塑性区发育特征,结合煤层底板岩层组合情况,可以大致判断底板破坏深度约为20 m。

4 结 论

(1) 煤层开采的结果必然引起应力的重新分布,

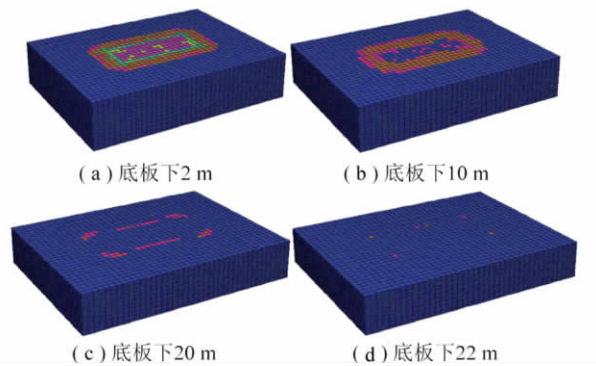


图9 煤层底板下不同深度塑性区发育

Fig. 9 Figures of plastic zone under different depth of coal floor
根据现场煤层底板钻孔内不同深度传感器应变测试值随工作面的变化情况,确定出煤层底板岩体破坏深度介于18~20 m。

(2) 采用现场应变实测和数值模拟相互验证的方法,对大采深厚煤层底板破坏深度进行综合研究,得出该面采动底板变形破坏深度为20 m。

(3) 数值模拟计算结果的合理性受模型边界、参数等多方面的制约,通过逐步修正模型边界条件、反复调整力学参数等,结合现场实测的结果对煤层底板破坏特征进行分析,弥补了现场实测结果不能反映出煤层回采应力场的不足,能更好地揭示出煤层开采过程中底板的三维破坏特征,发挥其优势作用。

参考文献:

- [1] 张金才,张玉卓,刘天泉.岩体渗流与煤层底板突水[M].北京:地质出版社,1997.
Zhang Jincai, Zhang Yuzhuo, Liu Tianquan. Rock mass seepage and water inrush of coal seam floor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [2] 王作宇,刘鸿泉.承压水上采煤[M].北京:煤炭工业出版社,1993:130.
Wang Zuoyu, Liu Hongquan. Mining in confined aquifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993:130.
- [3] 宋振骥,蒋宇静,杨增夫,等.煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础研究[M].北京:煤炭工业出版社,2003.
Song Zhenqi, Jiang Yujing, Yang Zengfu, et al. Forecast and control of major accident in collieries and its dynamic information system[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003.
- [4] 朱术云.“三软”厚煤层底板采动变形特征及其机理研究——以郑州矿区为例[D].徐州:中国矿业大学,2007.
Zhu Shuyun. Study on characteristics of mining deformation and mechanism for the “three-soft” thick coal seam floor: example of Zhengzhou mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.
- [5] 朱术云,鞠远江,赵振中,等.超化煤矿“三软”煤层采动底板变

形破坏的实测研究[J].岩土工程学报,2009,31(4):639-642.

- Zhu Shuyun, Ju Yuanjiang, Zhao Zhenzhong, et al. Field measurement study on deformation and destruction of “three-soft” coal seam floor of Chaohua Coal Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 639-642.
- [6] 程学丰,刘盛东,刘登宪.煤层采后围岩破坏规律的声波CT探测[J].煤炭学报,2001,26(2):153-155.
Cheng Xuefeng, Liu Shengdong, Liu Dengxian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 153-155.
- [7] 张平松,吴基文,刘盛东.煤层采动底板破坏规律动态观测研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3009-3013.
Zhang Pingsong, Wu Jiwen, Liu Shengdong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3009-3013.
- [8] 吴基文,樊成.煤层底板岩体阻水能力原位测试研究[J].岩土工程学报,2003,25(1):67-70.
Wu Jiwen, Fan Cheng. Study on in-situ measurement of water-resisting ability of coal seam floor rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 67-70.
- [9] 关英斌,李海梅,路军臣.显德汪煤矿9号煤层底板破坏规律的研究[J].煤炭学报,2003,28(2):121-125.
Guan Yingbin, Li Haimei, Lu Junchen. Research of No. 9 coal seam floor's fracture regularity in Xiandewang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 121-125.
- [10] 郭文兵,李楠,王有凯.软岩巷道围岩应力分布规律光弹性模拟实验研究[J].煤炭学报,2002,27(6):596-600.
Guo Wenbing, Li Nan, Wang Youkai. The photo elastic experiment simulating study on the law of stress distribution of the surrounding rock of soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 596-600.
- [11] 张晓君.矿柱及围岩对采空区破坏影响的数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):123-126.
Zhang Xiaojun. Simulation study on effect of pillar and surrounding rock on failure process of mined out area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 123-126.
- [12] 谢文兵,陈晓祥,郑百生.采矿工程问题数值模拟研究与分析[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.
Xie Wenbing, Chen Xiaoxiang, Zheng Baisheng. The numerical simulation research and analysis of mining engineering problems[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.
- [13] 隋旺华,于震平.工程地质计算[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999.
Sui Wanghua, Yu Zhenping. Engineering geology calculation[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [14] 康红普,王金华,李玉梅,等.掘进工作面围岩应力分布特征及其与支护的关系[J].煤炭学报,2009,23(7):145-150.
Kang Hongpu, Wang Jinhua, Li Yumei, et al. Stress distribution characteristics in rock surrounding heading face and its relationship with supporting[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 23(7): 145-150.