

文章编号: 1673-3363-(2012)05-0625-06

采动条件下厚煤层底板破坏规律动态监测 及数值模拟研究

张蕊¹, 姜振泉¹, 岳尊彩², 赵连涛², 于旭磊²

(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兴隆庄煤矿, 山东 兖州 272102)

摘要 以某矿综放工作面的开采实际为背景, 采用现场应变测试和数值模拟相互验证的方法, 对采动条件下厚煤层底板破坏深度进行综合对比研究。现场实测表明, 某矿综放工作面煤层底板岩体破坏深度介于13~16 m之间, 采动矿压对底板的影响具有较远距离的“超前”显现和“滞后”延续的特点, (超前、滞后距) 表现有由浅及深相应减小的总体特征; 数值模拟研究表明, 工作面底板下0~16 m为底板破坏影响带, 即底板最大破坏深度为16 m, 16~36 m岩层受煤层开采影响较小, 再往下有接近原岩应力的趋势; 综合分析得出该面采动底板变形破坏深度为16 m, 研究结果为我国类似条件下煤炭资源安全开采及矿井水害防治提供参考依据。

关键词 应变测试; 数值模拟; 破坏深度; 采动矿压

中图分类号 TD 353

文献标识码 A

In-Situ Dynamic Observation and Numerical Analysis of Thick Coal Seam Floor's Failure Law Under the Mining

ZHANG Rui¹, JIANG Zheng-quan¹, YUE Zun-cai², ZHAO Lian-tao², YU Xu-lei²

(1. School of Resources and Earth Science, China university of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Xinglongzhuang Mine, Yanzhou Coal Industry Co. Ltd., Yanzhou, Shandong 272102, China)

Abstract Based on the condition of fully-mechanized working face in one mine, by using the field strain measurement and numerical simulation as a mutual authentication method, a comprehensive comparative study of the thick seam floor's failure depth under the mining was carried out in this paper. Field measurement studies show that the failure depth of the coal seam floor is about 13~16m. The influence of the mining pressure on the floor presents the feature of "advance" appearance and "lag" continuity, while the advance and lag distances are manifested as the feature of decreasing gradually from shallow to deep. The numerical simulations indicate that floor failure zone affected by mining is between 0~16 m under the coal seam, which means the greatest failure depth of floor is 16 m, the zone of 16~36 m under the coal seam is slightly affected by coal mining, and the mining pressure tends to in situ pressure along with the increase of depth. By the comprehensive analysis, the failure depth of coal seam floor is 16 m, and the research results can make reference for safety mining of coal resources and mine water disaster control under the similar conditions.

Key words strain test; numerical simulation; damage depth; mining pressure

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102201); 江苏省研究生培养创新项目(CXZZ12-0948)

作者简介: 张蕊(1987-), 男, 云南省宣威市人, 博士, 从事煤矿水文地质与工程地质方面的研究。

E-mail: zhangruian5566@163.com

Tel: 15996994641

煤层回采诱发的底板破坏是一个普遍性的工程灾害问题,与采动矿压具有复杂的关联性,即底板采动变形和矿压显现是一个复杂的时空动态过程^[1-2]。底板采动破坏后不但易出现底鼓变形,而且因其承载强度急剧降低而易发生支架下陷、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,正确认识底板采动变形破坏规律及力学机制具有重要的理论意义和实际应用价值。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^[3]。

目前,煤层底板采动破坏深度的探测方法很多,主要有水文地质探测孔观测法^[4]、钻孔注水试验法^[5]、现场原位应变(感应)法^[6-7]、声波探测法等^[8-9]。其中,水文地质探测孔观测法、钻孔注水试验法和声波法须对测点采动前后进行对比测试,采后数据多是在回采临近测点时进行测试取得,由于底板变形相对于工作面推进具有一定的滞后性,即底板的变形在工作面推进过后才能达到充分的程度,因此,获取采后数据技术难度相对较大,且很难实现底板变形和矿压的动态过程。相对而言,利用现场原位应变(感应)法对煤层底板采动破坏研究,可获得煤层底板采前、采后的变形动态规律及矿压超前及滞后显现情况,其对比性好,准确性高。为此,本文以某矿综放工作面开采实际为背景,采用应变(感应)法对煤层底板下不同深度的岩层变形程度进行监测,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底板的整体破坏程度,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,为矿井安全生产及矿井水害防治提供更为科学的技术依据。

1 工作面概况

实测综放工作面地面标高平均为+47.6 m,煤层底板标高平均为-419.5 m,工作面长 1 985 m,宽度约 221 m,面积 438 806 m²。煤层总体上为一单斜构造,倾向为 SW~NE,倾角平均为 7°,煤厚 6.20~10.40 m,平均 8.91 m,煤层普氏系数一般约为 2.3,为软~中等硬度煤层。在距煤顶 2.8 m 左右、底板下 3.0~3.2 m 位置分别发育有厚约 0.03 m 和 0~1.78 m 的炭质泥岩夹矸。井田范围三灰上距 3 煤

40.11~52.10 m,平均 45.73 m,且三灰厚度为 1.27~6.64 m,平均约 5.18 m,层位稳定,全区发育,三灰为溶隙裂隙承压含水层,以静储量为主,也通过其露头部位接受第四系下组水补给。根据井田精查阶段的钻孔抽水试验资料,三灰单位涌水量为 0.0149~0.242 L/s m,矿化度为 0.387~0.694 g/L,水质类型为 HCO₃⁻-Na⁺、HCO₃⁻-Na⁺ Ca²⁺型水。

2 现场应变实测

2.1 测试原理

应变(感应)法测试是一种根据所测工作面采动过程中煤层底板下不同深度应变传感器所处位置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。该方法可以将围岩的变形程度通过探头测试数据予以显现。在工作面距离探头位置较远,采动矿压尚未波及到测点时,探头测试数据相对稳定,当采动矿压波及到测点时,探头测试数据会随波及程度呈同步变化;在工作面临近测点时,探头连续读数变化急剧增大,甚至超出应变传感器的接收量程;待工作面推过测点一定距离后,测试数据明显下降并趋于稳定,由此可反映出采动应力集中的影响范围。此外,在底板岩层未破坏情况下,探头外侧受力相对均匀,三组测试数据呈相近的规律,随围岩变形大小而同步变化;如果测点所处位置围岩遭受破坏后,会导致钻孔发生变形,在测试钻孔产生错断变形情况下,探头会因钻孔变形的挤压或拉张而受损,由此导致三组测试数据高度离散,或呈无序波动。因此,可根据采动底板下不同深度探头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 为应变探头内部结构示意图,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。

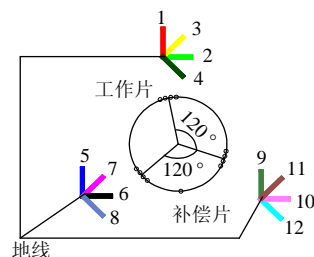


图 1 应变探头内部结构示意图

Fig.1 The schemes of the internal structure on the strain probe

2.2 观测孔及探头布设

根据实测综放工作面的实际开采情况及测试条件，在工作面底板下距煤层底板 42 m（垂深）位置处的四横轨道巷上部沿煤层底板方向斜向上布置一个应变观测孔（图 2），倾角为 70°；在观测孔不同深度位置分别设置 4 个应变探头，自上而下依次为测点 1、测点 2、测点 3 及测点 4，对应深度（垂深）依次为 8.8，13.0，16.3，20.0 m，探头所在位置对应层位分别为中砂岩、泥岩及细砂岩。在安装完探头后用水泥浆将钻孔封堵，使钻孔和岩层成为一体。本次测试起始位置为工作面迎头距观测孔 120 m，终止位置为工作面迎头推过测孔约 50 m 位置，观测孔结构设计技术参数见表 1。

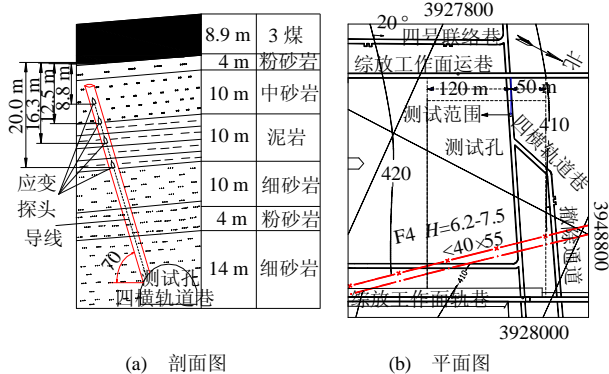


图 2 工作面监测钻孔示意图

Fig.2 The monitoring drilling diagram of the 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	测试孔	技术参数	测试孔
开孔直径(mm)/长度(m)	127/6.0	终孔直径/mm	89
与巷道轴向夹角/(°)	90	钻孔方位/(°)	152
煤岩层真倾角/(°)	4	钻孔仰角/(°)	70
钻孔与煤岩层走向线/(°)	90	孔深/m	38
煤岩层视倾角/(°)	4		

由于测试钻孔呈 70°仰角成孔，且孔内各测点位置不同，由此使各测点距离回采迎头的水平距离存在差异。根据测试孔应变探头的实际布设位置换算结果，测试孔测点 1~4 分别相对于孔口位置超前了 9.9，8.6，7.1，5.8 m。在应变感应测试数据处理中，对于工作面推进过程中的各测点对采动影响的超前（滞后）感应距均按工作面迎头距离测点的实际位置进行了校正。

2.3 测试结果分析

1) 矿压“超前”及“滞后”显现分析

综合分析工作面迎头推进过程中各测点应变感应的动态变化（图 3）可知，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，之后在工作面较长距离推进过程中，这种感应变化相对较稳定；而当工作面迎头临近测点位置时，各测点均显现剧烈的应变感应，不但纵向和径向应变出现分异现象，而且不同通道应变增量幅度和频次均出现差异性，表明测点位置已处于采动矿压的集中分布区范围，并且这种集中影响一直延续到工作面推过测点后一定距离才逐渐消散。工作面推进过程中矿压对煤层底板下不同深度位置探头的影响情况见表 2。

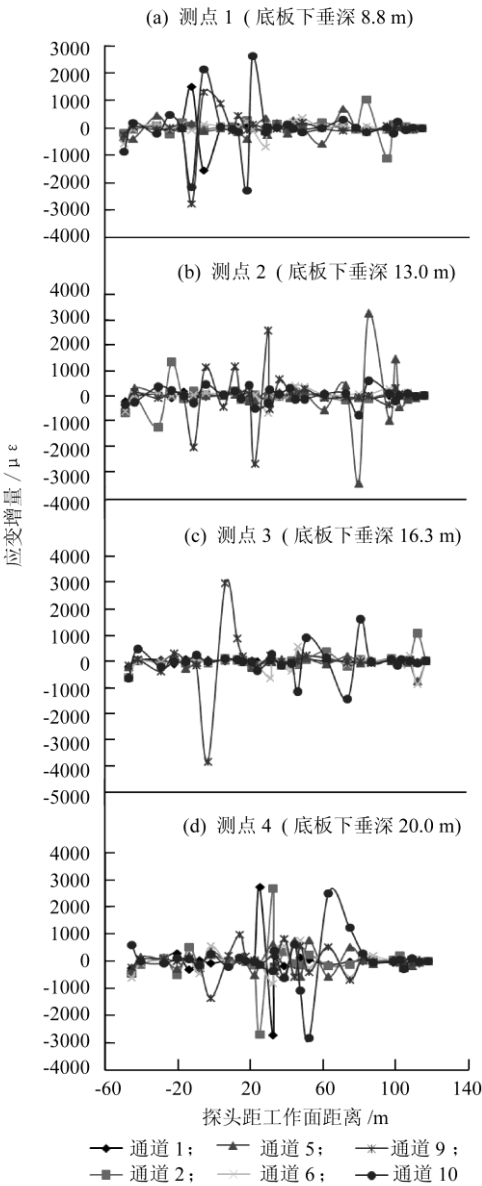


图 3 工作面推进过程中测试孔各测点应变感应曲线

Fig.3 The curves of all the strains under the mining at working face

表 2 工作面采动矿压在底板下不同深度位置的影响范围
Table 2 The influenced range of the face mining pressure under different depth of the coal floor

测点	垂深/m	矿压超前显现距离/m	矿压剧烈影响范围	
			超前距/m	滞后距/m
1	8.8	98	31	20
2	13.0	97	30	16
3	16.3	86	22	12
4	20.0	82	18	8

由表 2 可知, 测点受采动矿压超前显现影响范围具有底板浅部较大、深部相对较小的特点; 矿压剧烈显现具有“超前”和“滞后”特点, 且采动过程中应变感应强烈、有明显剧烈波动范围, 即在工作面临近测点时测点开始显现剧烈的应变感应, 直至工作面推过测点一定距离后剧烈应变感应现象才消失。通过对矿压在底板中不同深度位置的显现情况回归分析 (图 4) 可知, 煤层底板处矿压超前显现的距离为 113 m, 矿压剧烈影响超前显现距为 43 m, 矿压剧烈影响滞后显现距为 29 m, 且各测点受矿压影响应变感应的超前距离多大于滞后距离。其中, y_A 为矿压超前影响距离, y_B 为矿压剧烈影响超前显现距离, y_C 为矿压剧烈影响滞后显现距离。

$$y_A = -1.5636x + 113 \quad (1)$$

$$y_B = -1.2582x + 43 \quad (2)$$

$$y_C = -1.0695x + 29 \quad (3)$$

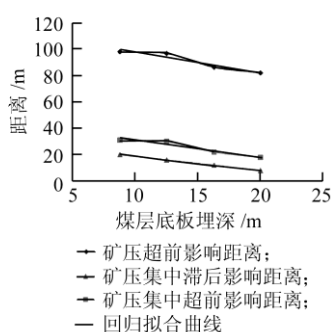


图 4 矿压影响距离随深度变化图

Fig.4 The variation of influence distance of mine pressure with depth

2) 煤层底板采动破坏规律分析

由图 3 可知, 测点 1 在距工作面 98 m 时开始显现应变感应 (图 3a), 但应变感应幅度相对平稳, 当测点 1 距工作面约 31 m 时, 探头开始显现出剧烈的变化, 且直至工作面推过测点 20 m 左右, 测点应变感应才趋于稳定; 测点 2 应变感应信号显现

具有较大的离散性, 波动幅度较大、分异现象明显, 但在整个采动过程所有信号通道都显示正常工作状态 (图 3b)。根据探头结构特征, 结合其他矿井已有的实测经验^[6], 分析认为这种情况主要是测点 2 处探头因受强烈的采动扰动而导致了部分应变感应片受损所致; 与测点 1, 2 相比, 整个采动观测过程中测点 3 (图 3c) 探头的应变感应规律性明显, 不但应变波动幅度相对较小, 且分异现象不明显, 分析认为, 这种情况反映出测点 3 所处位置围岩所受采动扰动以弹性波及为主, 围岩没有产生较大幅度的塑性变形。考虑到测点 3 的埋置深度为煤底垂深 16.3 m, 其应变感应反映的弹性特征明显, 与其上测点的应变感应异常分异现象形成鲜明的对比。因此, 分析认为这个测点位置没有受到采动矿压的扰动破坏。

另一方面, 在工作面推进距离测点较远 (80 m 左右) 位置时, 测点 4 出现了明显的应变异常感应现象 (图 3d), 尤以径向应变 (通道 2, 10) 超前感应异常比较明显。结合其他测点的应变感应幅度分析, 工作面迎头距离测点较远时测点位置的采动矿压波及强度应该还是比较微弱的, 并且从测点 4 显现的是弹性应变感应情况看, 可以排除采动矿压波及导致测点 4 位置出现剧烈的扰动变形。分析认为, 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。

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 13.0~16 m 之间。

3 数值模拟研究

3.1 研究区模型建立

数值模拟是工程地质分析的重要而有效的方法之一, 数值模拟在地质工程中的应用主要难点之一就是难以建立符合实际地质条件的模型^[10-12]。根据工作面的开采实际, 通过对相关地质资料的综合分析, 将研究区内岩层按岩性和完整性划分为灰岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、泥岩、砂质泥岩 7 个类型, 自上而下共划分出 18 个工程地质岩组。其中, 沿倾向方向采动底板主要影响因素的工程地质模型见图 5。

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和各煤层资料, 在 FLAC^{3D} 软件平台下, 通过 fish 语言对研究区的单元体层位进行识别, 构建地质体几何模型 (图 6)。

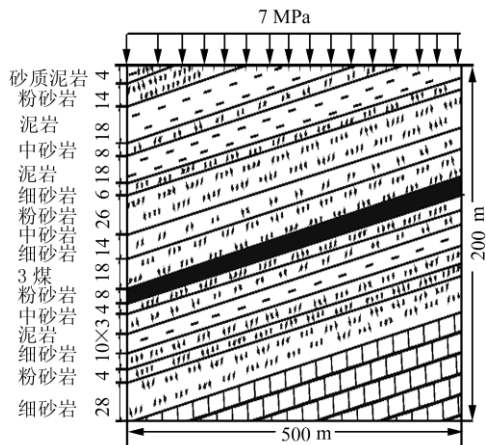


图 5 采动底板主要影响因素的工程地质模型

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

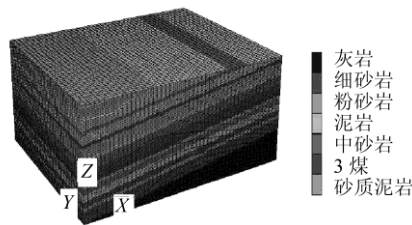


图 6 地质体几何模型

Fig.6 The geological geometric model

模型的空间范围取包含测试孔在内的 500 m×400 m 的地块，高取 200 m，共划分出 250 000 个单元，262 701 个节点，模型左右预留 140 m 保护煤柱、前后预留 100 m 保护煤柱，煤厚取 8 m。其中，倾向方向为 x 方向，走向方向为 y 方向，垂直方向为 z 方向。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，模型前后、左右侧面及底面采用滚轴约束，垂直方向自由，上部按 300 m 的补偿荷载施加，约为 7 MPa（煤岩层倾角按 7° 进行计算），各岩层具体地质力学参数见表 3。

表 3 地质模型各岩层物理力学参数

Table 3 The 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	1800	1.50	0.69	2.2	22	1.6
粉砂岩	2400	3.04	1.65	9.8	28	2.2
中砂岩	2600	4.53	2.72	10.7	32	3.6
3 煤	1900	1.30	0.53	1	20	0.7
细砂岩	2500	3.75	2.14	10.5	30	2.4
灰岩	2800	10.7	7.38	16.6	36	5.6
砂质泥岩	1900	1.52	0.78	2.2	24	1.8

3.2 结果分析讨论

本次数值模拟过程采用分步开挖实现，一次采全厚，研究重点是煤层底板随工作面推进的破坏过程。由于本工作面煤层底板基岩多为泥岩和砂岩组合，在发生剪切或拉张破坏后，即使受到压应力呈弹性状态，裂隙也很难闭合，一般可将这种塑性区作为确定底板破坏深度的依据。故笔者通过模拟煤层底板塑性区的发育情况来判断煤层底板下不同深度的底板的破坏程度。模拟结果如图 7 所示。

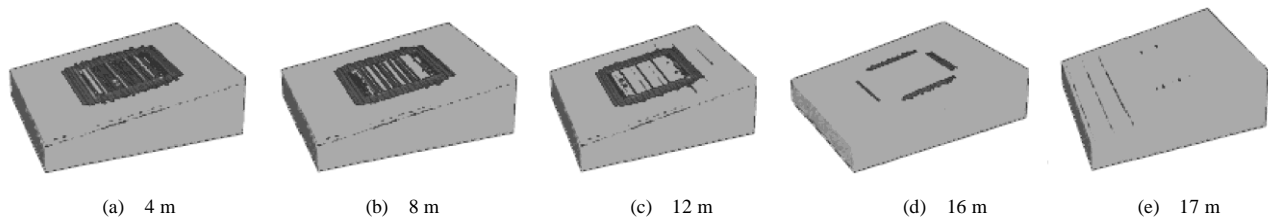


图 7 煤层底板下不同深度塑性区发育图

Fig.7 The figure of plastic zone under different depth of the coal floor

由底板下 4 m 塑性区发育情况可以看出（图 7a），随工作面的推进，在煤层底板下 4 m 处呈面状破坏，采空区四周主要为剪切破坏，中间为拉张破坏，且破坏较严重；随着煤层底板深度的增加（图 7b），在煤层底板下 8 m 处煤壁前后方整体呈“O”型破坏，破坏形状与和采空区周围支撑压力的发育形状类似，主要为剪切破坏及拉张破坏，且采空区内底板受拉张破坏程度相对较弱；至煤层底板下 12 m

时（图 7c），采空区四周主要为剪切破坏，中部只有局部发生破坏拉张破坏，受采动矿山压力的影响相对较小；到煤层底板下 16 m 时（图 7d），只有采空区四周发生剪切破坏，而采空区中部未发生破坏；而在煤层底板下 17 m 时（图 7e），煤层底板未受到采动矿山压力的破坏，只有局部受到微弱影响。因此可根据塑性区的发育规律大致判断煤层底板的破坏深度为 16 m。

从煤壁及前后方 25 m 范围内垂直应力随深度变化关系曲线可以看出(见图 8),随着深度的增加,垂直应力一开始在煤层与底板接触面上最大,然后减小,到一定深度后有接近原岩应力的趋势,且这种变化趋势在煤壁前后方 25 m 范围内更为明显。从工作面推进距离对垂直应力的影响关系来看,随着工作面的推进,在底板一定深度内,煤壁前后底板岩层应力变化较大,在煤壁前方形成一个低于原岩应力的减压区;后方形成一个增压区,最大压应力为 23 MPa。通过综合分析可知,该工作面底板下 0~16 m 左右应力影响较大,16~36 m 内影响微弱,再往下有接近原岩应力的趋势。

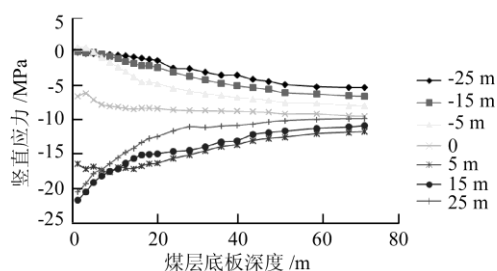


图 8 走向剖面煤柱前后 25 m 范围内煤层底板垂直应力随深度变化关系曲线

Fig.8 The curves of the vertical stress with depth at the 25 m from the pillar to pre and post along the strike profile

4 结 论

通过对某矿综放工作面底板采动变形现场实测及 FLAC^{3D} 数值模拟研究,主要研究结论如下:

1) 煤层开采的结果必然引起底板的变形,根据工作面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,得出煤层底板岩体破坏深度介于 13~16 m 之间;采动矿压对底板的影响具有较远距离的“超前”显现和“滞后”延续特点,且煤层底板处矿压超前影响距约为 113 m,矿压剧烈影响超前显现距为 43 m,矿压剧烈影响滞后显现距为 29 m,表现有由浅及深相应减小的总体特征。

2) 数值模拟研究表明,工作面底板下 0~16 m 为底板破坏影响带,即底板最大破坏深度为 16 m,16~36 m 岩层受煤层开采影响较小,再往下有接近原岩应力的趋势

3) 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对比研究,综合分析得出该面采动底板变形破坏深度为 16 m。研究结果为我国类似条件下煤炭资源安全开采及矿井水害防治提供参考依据。

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.
- [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.
- [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.
- [4] 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 Ji-wen, 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.
- [5] 张红日, 张文泉, 温兴林, 等. 矿井底板采动破坏特征连续观测的工程设计与实践[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(4): 1-4.
ZHANG Hong-ri, ZHANG Wen-quan, WEN Xing-lin, et al. Design of continuous observation work on mining failure feature in the floor of mine and its practice[J]. Mining Research and Development, 2000, 20(4):1-4.
- [6] 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: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2007.
- [7] 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 Shu-yun, JU Yuan-jiang, ZHAO Zhen-zhong, 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.
- [8] 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 Ping-song, WU Ji-wen, LIU Sheng-dong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3009-3013.
- [9] 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 Xue-feng, LIU Sheng-dong, LIU Deng-xian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 153-155.
- [10] 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 Ying-bin, LI Hai-mei, LU Jun-chen. 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.
- [11] 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.
- [12] 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.