

特厚煤层综放采动底板变形破坏规律的综合实测

朱术云¹, 曹丁涛², 岳尊彩³, 姜振泉¹, 赵连涛³, 于旭磊³

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 兖矿集团兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500;

3. 兖州煤业股份有限公司兴隆庄煤矿, 山东 兖州 272100)

摘要: 为了探究兖州煤田兴隆庄煤矿特厚煤层综放开采对底板岩层的变形破坏规律, 应用钻孔应变感应法和超声成像技术对该矿某综放工作面进行了综合实测, 获得了底板下不同深度应变增量随工作面推进的变化曲线和工作面推进过程中不同深度钻孔超声成像图片资料。通过 5 个应变传感器监测数据和大量钻孔超声成像图片的关联对比分析, 基本确定了该工作面采动底板扰动深度和矿压作用下支撑压力的影响范围。研究结果表明: ①该工作面底板采动扰动深度约为 19 m, 具有较明显分带性, 即可分为采动扰动破坏带和采动扰动变形带, 带厚分别约为 16 m 和 3 m; ②采动扰动破坏带属于整体塑性变形, 其强度条件已基本丧失, 但采动扰动变形带仍以弹性变形为主, 具有良好的承载条件和较强的抗渗强度; ③采动矿压超前和滞后显现明显, 其对底板影响程度具有由浅及深而减小的特征。该综合实测方法的成功应用不但为综放开采巷道支护、老空水防治等提供重要信息, 而且对深部即将开采的下组煤能否安全带压采掘研究也将具有重要参考价值。

关键词: 综放开采; 采动底板; 变形破坏深度; 综合实测

中图分类号: TD323

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)10-1931-08

作者简介: 朱术云(1975-), 男, 安徽灵璧人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事煤矿工程地质和水文地质方面的教学和科研工作。E-mail: shyzhuqiao@163.com。

Comprehensive measurement of characteristics of deformation and failure of extra-thick coal seam floor induced by fully mechanized top-coal mining

ZHU Shu-yun¹, CAO Ding-tao², YUE Zun-cai³, JIANG Zhen-quan¹, ZHAO Lian-tao³, YU Xu-lei³

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Yanzhou Coal Mining

Co., Ltd., Yanzhou Coal Mining Company, Zoucheng 273500, China; 3. Xinglongzhuang Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Co., Ltd.,

Yanzhou 272100, China)

Abstract: In order to study the characteristics of deformation and failure of fully mechanized top-coal seam floor under mining in Xinglongzhuang Coal Mine in Yanzhou Coal Field, comprehensive measurements are performed by means of the strain testing system and ultrasonic imaging technology in the fully mechanized top-coal working face, and the variation curves of strain increment and the ultrasonic imaging pictures at different depths are obtained in the monitoring boreholes with extending of the working face. Through the comprehensive comparison of monitoring data of five strain transducers and many hole wall pictures, the disturbance depth and underground pressure influence range are approximately ascertained. The results show that: (1) the disturbance depth of the coal seam floor is about 19 meters, and there are obvious belts, namely, the belt of mining disturbance failure and the belt of mining disturbance deformation, which are 16 meters and 3 meters in thickness respectively; (2) the belt of mining disturbance failure belongs to the whole plastic deformation, and the rock mass in the belt fails, but the belt of mining disturbance deformation still belongs to elastic deformation and has a good bearing capacity and strong anti-permeability strength; (3) the underground pressure of mining obviously emerges ahead and behind, which has the weakening characteristics to the coal seam floor from shallow to deep. The successful applications of the comprehensive measurements provide important information for roadway support for fully mechanized top-coal mining and for controlling of goaf water, and important reference value for safely mining lower coal seam in coal fields in North China above the confined aquifers.

Key words: fully mechanized top-coal mining; mining floor; depth of deformation and failure;

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家青年科学基金项目(41102201); 中国矿业大学青年科研基金资助项目(2009A029)

收稿日期: 2011-11-14

comprehensive measurement

0 引言

煤层开采导致底板变形破坏规律既是一个专业理论问题,也与煤矿安全生产密切相关。一方面,对于底板带(水)压开采,发生底板充水可能性与否实际取决于底板充水因素与底板阻水能力的关系对比^[1-2],因此必须要查清采动底板变形破坏深度及其对底板阻水能力的影响。另一方面,由于底板采动变形破坏特点与矿井地应力场、开采条件及工艺、煤层力学性质、顶底板岩层结构及性质等多种因素相关^[3-7],因此可以通过采动底板变形破坏特点了解其它重要技术问题。如对于冲击地压强烈矿井,底板采动变形特点可以反馈采动地压显现规律、强度等重要信息,是预测采动冲击地压显现规律的技术依据;对于采动底板扰动强烈矿井,底板变形破坏直接影响采煤机与支架的支护稳定性、巷道围岩支护结构及支护方式选择;对近距离开采煤层,上层开采底板变形程度对于下层开采时的顶板水预防是一个必须考虑的重要因素,了解上层开采的底板破坏深度对于下层开采老塘水预防至关重要。由此可见,掌握采动底板变形规律和破坏深度对于矿井安全、高效生产具有重要意义。

国内外关于采动底板变形破坏规律的研究目前主要可归纳为3种方法:现场试验监测^[8-14]、室内试验模拟(物理模拟^[15-16]和数值模拟^[17-18])和解析计算(经验公式^[19]和理论计算^[20])。但由于底板采动变形特征及破坏程度与多种因素有关,如开采深度、工作面尺寸、开采方法、煤层倾角、开采厚度及顶底板岩性及结构等,为此,相对其它方法而言,现场试验监测法是揭示底板采动变形破坏情况最可靠和最有效方法。目前采用较多的现场试验监测方法主要有钻孔注水法^[8]、钻孔声波法^[10]、钻孔无线电透视法^[11]、应力反分析法^[12]及钻孔应变法^[13-14]等。考虑到矿井瓦斯煤尘性质及测试方法在井下应用的技术可靠性,并为取得兴隆庄煤矿3煤某综放工作面底板采动过程变形规律和破坏深度的实测数据,本次测试采用了底板应变感应法和钻孔超声成像窥视法进行综合探测,以较准确获得煤层开采过程底板岩体扰动特点及破坏深度的可靠资料,从而为煤矿安全开采提供可靠依据。

1 兴隆庄某工作面概况

该工作面位于-350水平十采区,东侧为10301(上)综放工作面采空区,西侧为10303预采综放工作面,南侧切眼以井田边界与东滩矿相邻,北方回采至运顺与大岗头村保护煤柱相交处。地面标高+46.5~+48.8

m,平均为+47.6 m;工作面标高-291.0~-548.0 m,平均为-419.5 m。工作面长3050~3090 m,宽度约200 m,面积614000 m²,煤厚6.20~10.40 m,平均8.91 m,煤层普氏系数一般在2.3左右,为软—中等硬度煤层。工作面范围内煤层结构复杂,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和0~1.78 m的炭质泥岩夹矸。

该面地质条件较简单,煤层总体上为一单斜构造,煤层总体倾向为SW—NE,倾角1°~18°,平均7°。在工作面中部发育有大庙背斜和大施村向斜,背、向斜构造轴向均为北东—南西,倾伏角较小,两翼倾向平缓;工作面切眼至停采线间共揭露有11条断层,分布密度约为16条/km²,其中落差5 m以上的断层3条,其余落差在1.2至4.0 m范围。

2 测试钻孔相关设计

2.1 应变感应法测试原理简介

工作面采动变形观测采用与中国地质科学院工程地质力学研究所专门合作研制的应变传感器探头及KBJ-12型应变记录仪。该应变传感器探头在结构上具有测试到读数且读数变化不大时表示正常工作,而测试不到读数或者读数变化很大时就表示被破坏的功能。对布置于正常回采工作面底板钻孔不同深度的应变传感器探头来看,随着工作面的推进,各个应变传感器探头应变增量将出现一定程度的变化,其中最接近底板的探头变化最明显,幅度也最大,然后随着探头距离底板深度的增加而递减。正常情况下当工作面距离钻孔较远时各个探头的应变增量变化不大,但当工作面距离钻孔较近时若钻孔中某个探头的应变增量明显变大,甚至个别通道超过量程或没有读数则表明该处探头因围岩破坏而导致该探头已破坏。

2.2 测试钻孔布置

为不影响生产,并考虑到超声成像技术具有钻孔内有水成像效果不佳而没水则效果清晰的特点,结合该矿某面所在位置的实际情况,确定在该面下部距离开采煤层底板约40 m的十采四横轨道巷中向上进行测试钻孔的布置(图1)。

根据相关计算公式,并结合该工作面开采条件和地质条件,因十采四横轨道巷基本沿着煤岩层走向布置,两个测孔之间没有揭露到断层构造,所以应变测孔和成像测孔的钻孔设计主要参数是一致的,具体数据见表1。

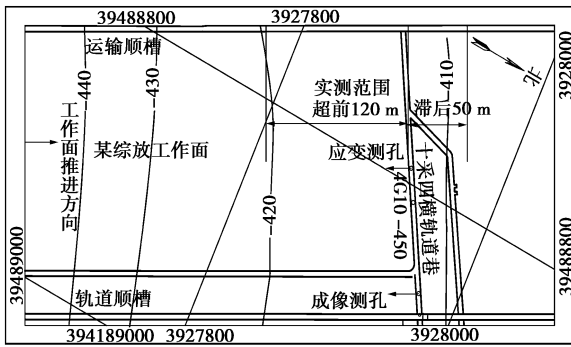


图 1 某综放工作面监测钻孔布置平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring boreholes on working face

表 1 工作面底板破坏深度监测钻孔设计参数

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

技术参数	应变测孔	成像测孔
开孔直径/mm/深度/m	127/5.0	127/5.0
孔口管直径/mm/长度/m	108/5.0	108/5.0
终孔直径/mm	89	89
钻孔方位/(°)	152	152
钻孔倾角/(°)	70	70
与巷道夹角/(°)	90	90
煤岩层真倾角/(°)	4	4
钻孔方向与煤岩层走向线夹角/(°)	90	90
煤岩层视倾角/(°)	4	4
伸进工作面水平距离/m	13.0	13.0
控制底板最大真厚度/m	20.0	20.0
孔深/m	38.0	38.0

2.3 测孔探头布置

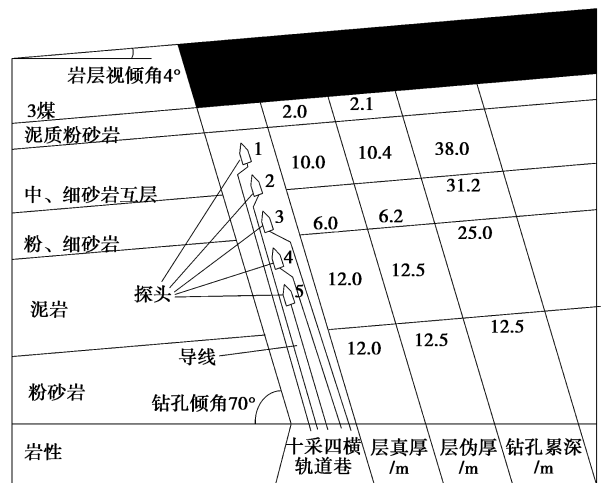
因十采四横轨道巷基本沿煤岩层走向布置,这两个测孔所穿过的岩层基本一致。根据本次测试设计的深度范围,测试钻孔以揭露至 3 煤底板中细砂岩互层顶部为限,如图 2 (a) 所示,应变测试钻孔内设置了 5 个应变传感器探头,自上至下探头位置对应层位分别为中细砂岩互层(中部)、粉-细砂岩上、下部及泥岩。其中,5 个测点自上至下依次编号为测点 1、测点 2、测点 3、测点 4 及测点 5 (图 2 (b)),位置分别为 3 煤底下垂深 6.9, 10.6, 12.5, 16.2 和 19.1 m。

由于测试钻孔呈 70° 仰角成孔,且孔内各测点位置(应变探头设置位置)不同,由此使各测点距离回采迎头的水平距离存在差异。根据测孔应变探头的实际布设位置换算结果,5 个测点 1~测点 5 分别相对于孔口位置超前了 10.6, 9.2, 8.6, 7.2 和 6.2 m。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(探头位置)进行了校正。

平均层厚/m	柱状	岩性	测点位置
2.0	粉砂岩	○ 测点1 (6.9 m) ○ 测点2 (10.6 m) ○ 测点3 (12.5 m) ○ 测点4 (16.2 m) ○ 测点5 (19.1 m)
8.9	— — — — — ▲	3煤	
2.0	泥质粉砂岩	
10.0	中细砂岩互层	
6.0	细、粉砂岩	
12.0	— — — — — — — — — — — — — — —	泥岩	

(a) 底板岩性组合及探头位置示意图



(b) 监测探头位置示意图

图 2 监测钻孔内各应变感应探头主要布置层位示意图

Fig. 2 Layout of strain transducers in a monitoring borehole

超声成像孔内预置有超声成像探头,探头与滑移杆连接,可在观测孔内全孔移动。观测时通过滑移杆伸、缩上下移动探头取得全孔孔壁岩层结构变化实录图像。

3 测试结果与分析

3.1 测试结果

(1) 应变感应法测试结果

由于应变传感器探头具有 3 组应变花,每组应变

花有4个应变片,共有12个应变通道,数据处理时,根据应变片方位和钻孔方位及仰角等进行了数据矢量叠加和处理,即通道3,4的应变值叠加到通道1,2上;通道7,8的应变值叠加到通道5,6上;通道11,12的应变值叠加到通道9,10上(其中,通道1,5,9为轴向感应应变;通道2,6,10为径向感应应变)。

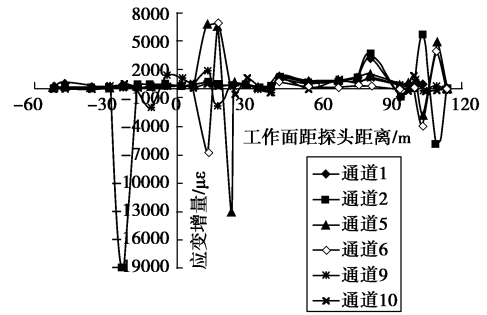
图3是应变监测钻孔各探头所测试的应变值增量随工作面推进的变化曲线。从图3可明显看出工作面推进过程中,采动底板下垂深6.9到19.1m深度范围内5个应变传感器均显示了明显的超前、滞后感应,即工作面迎头与测孔位置距离(水平距离,下同)较远时,各测点探头相继显现出明显的应变感应,且这种应变感应直至工作面推过测点一定距离后才逐渐消失,说明采动过程底板所受矿压波及范围较大,且波及范围表现有浅部明显大于深部的特点。

从工作面推进过程测点的应变感应情况看,所有测点的应变感应均显现轴向应变明显而径向应变微弱的特点(图3)。分析认为,由于测孔以大仰角布置,探头轴向与底板岩层层面法向相近,探头感应的采动压力径向分量较小,从而导致相应的感应应变微弱,由此表明探头感应受力以轴向受压及轴向伸展为主,径向受力微弱的基本特点,对应的底板变形则表现为与层面法向近于一致的挤压(工作面前方)或拉张(采空区底板)。

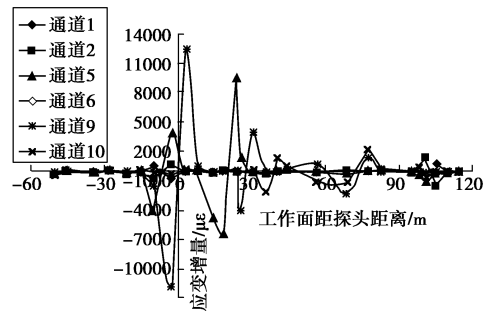
另外,从采动底板变形特点与应变传感器探头工作片组合结构的对应关系角度,在底板未破坏情况下,由于岩层变形的弹塑性特点,探头侧壁受力是相对均匀的,对应于3组工作片的应变感应而言,合理的现象应显示有同步特点。而图3中,均有个别通道与其余5个通道表现出波动的相反性,分析认为,这种现象与岩层变形特点无关,最可能原因是探头侧壁与周边围岩的接触程度存在局部异常(如孔壁岩块局部突出),由此会导致个别工作片对围岩感应出现失真。

(2) 超声成像测试结果

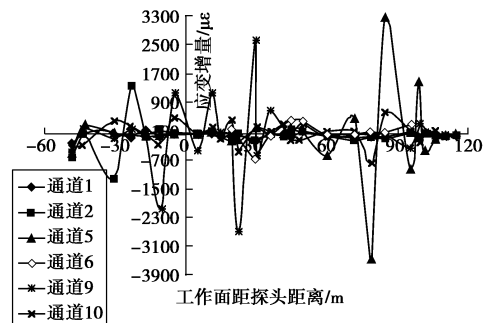
图4是工作面在推进过程中底板不同深度孔壁岩体变形破坏的部分超声成像截图。课题组在工作面推进过程中进行了多次钻孔的超声图像实测,获得了大量的关于孔壁在不同深度的录像资料,这里由于篇幅所限,只给出与变形破坏深度相关的4次不同深度的孔壁成像截图。4次深度分别为底板垂深11.5~12.0m(图4(a))、底板垂深14.5~15.0m(图4(b))、底板垂深16.1~16.6m(图4(c))和底板垂深19.0~19.5m(图4(d)),与此相对应的工作面距测孔的距离分别为116,68,27,17,-4,-8,-17和-46m,其中负号表示工作面推过测孔的距离。



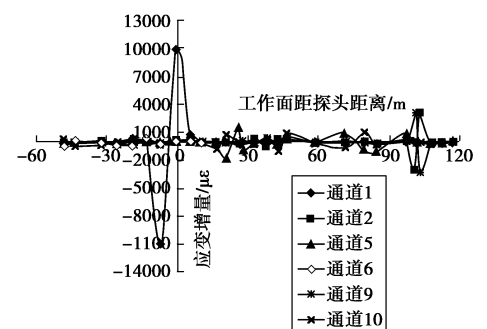
(a) 应变传感器探头1(底板下垂深6.9 m)



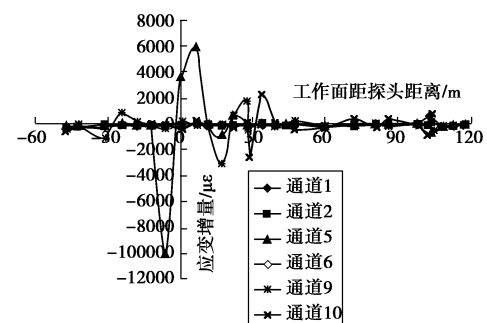
(b) 应变传感器探头2(底板下垂深10.6 m)



(c) 应变传感器探头3(底板下垂深12.5 m)

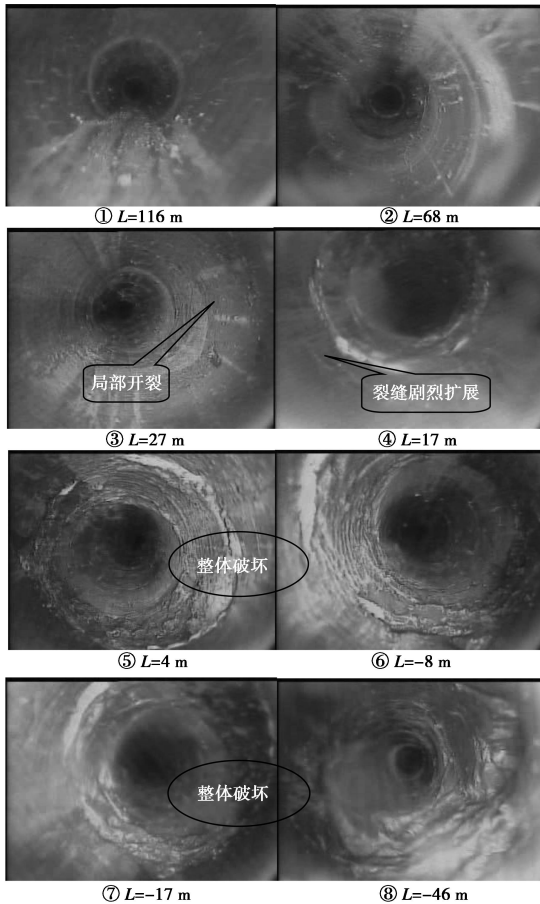


(d) 应变传感器探头4(底板下垂深16.2 m)

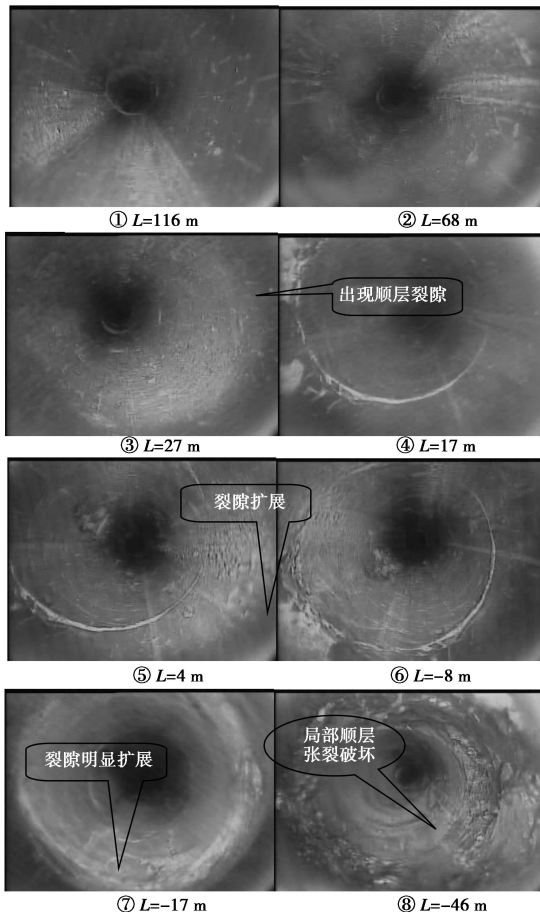


(e) 应变传感器探头5(底板下垂深19.1 m)

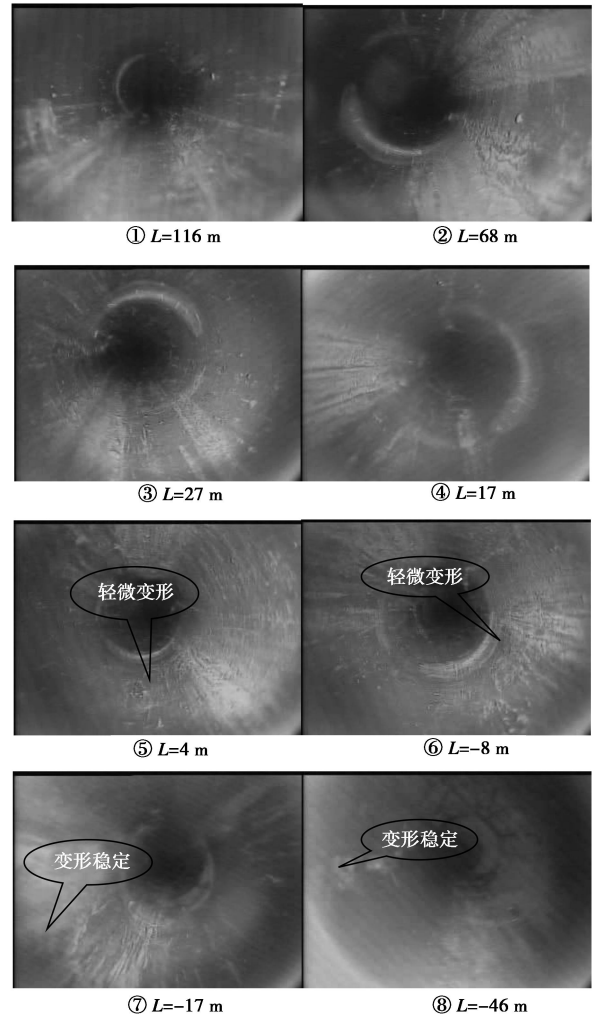
图3 监测钻孔各应变传感器探头实测应变增量曲线
Fig. 3 Curves of measured strains of strain transducers of monitoring borehole



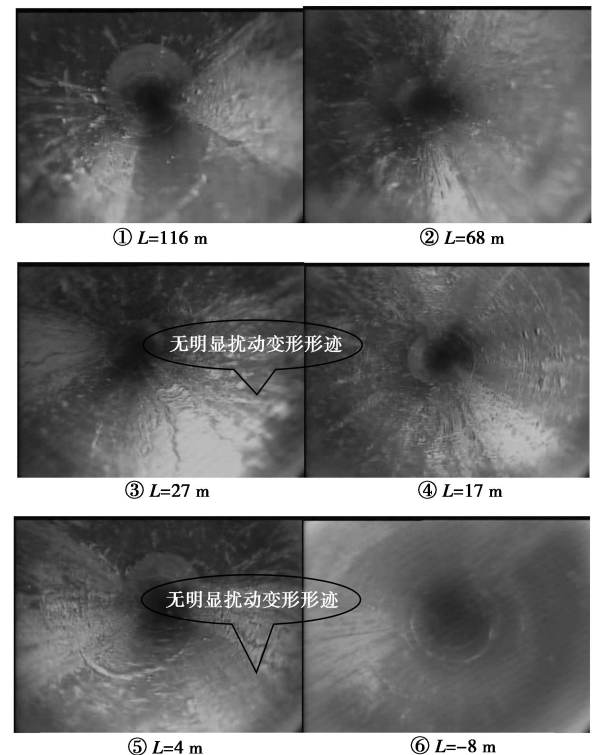
(a) 工作面推进过程底板垂深11.5~12.0 m部位变形超声图像 (L为工作面迎头距测孔距离, 负值为推过测孔距离)



(b) 工作面推进过程底板垂深14.5~15.0 m部位变形超声图像 (L为工作面迎头距测孔距离, 负值为推过测孔距离)



(c) 工作面推进过程底板垂深16.1~16.6 m部位变形超声图像 (L为工作面迎头距测孔距离, 负值为推过测孔距离)



(d) 工作面推进过程底板垂深16.1~16.6 m部位变形超声图像 (L为工作面迎头距测孔距离, 负值为推过测孔距离)

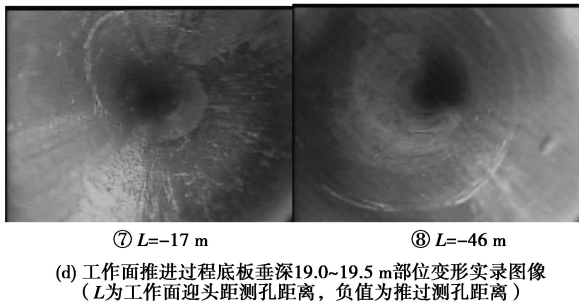


图4 工作面推进过程中底板不同深度孔壁岩体变形破坏形实录图像

Fig. 4 Images of deformation and failure of hole rock mass at different depths by pickup cameras with extending of working face

3.2 测试结果分析

(1) 底板破坏深度的确定

根据已有的实测经验^[14, 21], 采动破坏一般会导致测试钻孔产生错断或严重挤压变形, 由此造成探头外壁塑胶包层严重受损或探头损毁, 其结果是信号通道输出的数据高度离散或探头失灵(通道无应变感应信号)。从本次工作面采动底板应变观测结果看, 浅部测点(应变测孔的测点1、测点2和测点3)虽然应变感应信号显现高度离散特点, 而且波动幅度大、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。根据探头结构特征, 结合其他矿井已有的实测经验, 分析认为这种情况主要是底板浅部探头外壁塑胶包层因受强烈的采动扰动而导致了部分应变感应片受损所致。与浅部测点相比, 整个采动观测过程中深部测点(应变测孔的测点4和测点5)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, 这种情况反映出深部测点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4的埋置深度为煤底垂深16.2 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对比, 因此, 分析认为这两个测点位置没有受到采动矿压的扰动破坏, 但在工作面位于其上方时已影响到该深度, 这在图3(d)的通道1和图3(e)的通道5均有较明显的显现。

如对比分析底板采动过程测孔不同深度位置的孔壁变形情况(图4)。从图4综合对比分析可以明显看出, 在工作面逐渐推进过程中底板不同深度的岩体受到变形破坏的程度是随着深度呈递减的; 同一深度随着工作面逐渐推进直至推过后一定距离变形破坏是呈增加的趋势。不难发现, 测孔围岩的采动变形程度大致以底板垂深16 m左右为界显现实质性变化。垂深

16 m以上2个不同垂深部位的孔壁变形截图反映为采动破坏(图4(a)和图4(b)), 其中图4(a)的扰动破坏程度明显大于图4(b); 而垂深16 m以下孔壁变形较轻微, 只是在垂深16.1~16.6 m范围(图4(c))产生有轻微顺层变形, 其下(图4(d))没有明显的扰动变形形迹。

基于底板采动过程的应变监测结果和超声图像的关联分析, 大致可以将工作面底板的采动扰动深度确定为19 m左右。其中, 扰动破坏深度大约为16 m, 此范围岩层受剧烈采动破坏, 塑性位移幅度较大, 其强度条件基本丧失; 破坏带以下3 m左右为采动扰动变形范围, 该范围岩层虽显现采动影响, 但其扰动变形以弹性为主, 塑性扰动变形的幅度较小, 且未伤及其整体结构的完整性, 仍具有良好的承载能力和较强的抗渗强度。

(2) 采动影响范围分析

由图3和图4综合分析能够明显得看出采动影响范围与距底板垂深具有如下规律, 即随着距底板垂深的增加, 采动影响范围的长度逐渐减小。

综合分析工作面推进过程测点应变感应的动态变化(图3)可以发现, 距离工作面迎头较远时各测点即显现应变感应, 表明测点位置开始受到了采动影响。然而只是工作面在测点上方一定范围推进过程(工作面临近测点和推过测点), 各测点才显现出剧烈的应变感应, 工作面临近测点前较大范围测点的应变感应相对平稳, 波动幅度较小。如测孔的上部较浅位置测点(测点1、测点2), 虽然工作面迎头分别距测点113.3和109.7 m开始测点即显现应变感应, 但至迎头临近测点前较大范围, 测点位置的应变感应幅度相对平稳, 自工作面逼近测点约距30 m左右, 探头才开始显现剧烈的采动影响, 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。

底板应变感应程度和特点与采动矿压显现强度具有内在联系, 测点剧烈的应变感应反映出该位置岩层受到的矿压波及强烈。采前应力集中导致底板岩体受压明显增大, 部分岩体发生剪切破坏, 而采后卸压又导致底板部分岩体发生膨胀变形, 这样一压一松的强大反差将引起底板一定深度岩体变形破坏程度达到最大, 因此, 可将测点显现剧烈应变感应所对应的工作面推进距离界定为采动矿压集中影响范围。实测结果反映出, 该工作面总体反映的采动矿压集中影响范围具有底板浅部较大、深部相对较小的基本特点, 采动过程探头应变感应强烈并伴随有明显的剧烈波动现象, 集中超前和滞后影响的范围如表2所列。

表 2 采动矿压在底板不同深度位置的集中影响范围

Table 2 Concentrated influence range of underground pressure at different depths

测点(垂深/m)	应变测孔	
	超前距/m	滞后距/m
1(6.9)	27	25
2(10.6)	26	21
3(12.5)	29	17
4(16.2)	13	11
5(19.1)	21	12

4 结 论

通过对兖矿集团兴隆庄煤矿某综放工作面现场综合实测结果的综合分析和关联对比, 主要可得出如下结论:

(1) 采用现场应变感应法对采动底板破坏深度进行了探测, 通过 5 个监测探头监测数据的综合比较, 确定出底板破坏深度介于 12.5~16.2 m 之间, 但采动影响范围已达 19.0 m。

(2) 采用现场超声成像技术对采动底板破坏深度进行了探测, 随着工作面推进通过底板不同深度大量孔壁围岩变形破坏监测图像的综合对比, 确定出底板破坏深度介于 15.0~16.1 m 之间。

(3) 通过应变感应监测结果和超声图像的关联分析, 可将工作面煤层底板采动扰动深度分为扰动破坏带和扰动变形带, 其中, 扰动破坏带厚度大约为 16 m, 扰动变形带厚度大约为 3 m。此种方法的综合运用, 丰富了对煤层底板采动破坏深度研究的手段。

(4) 通过各传感器探头应变增量曲线和不同位置处钻孔超声成像图像, 可以明显看出煤壁前方超前支承压力的影响范围和超前与滞后的影响程度, 并随着底板深度的增加, 影响范围呈减小的趋势。此种方法的提出为煤矿开采矿山压力超前和滞后的集中影响范围的确定提供了新的思路。

参考文献:

[1] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. (WANG Zuo-yu, LIU Hong-quan. Mining in confined aquifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993. (in Chinese))

[2] 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 Jin-cai, ZHANG Yu-zhuo, LIU Tian-quan. Rock mass seepage and water inrush of coal seam floor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese))

[3] 李春意, 崔希民, 郎 博, 等. 霍宝干河矿含隔水层特性及对下组煤开采的影响分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010,

27(3): 438 - 442. (LI Chun-yi, CUI Xi-min, LANG Bo, et al. Characteristics of aquifer and water-resisting stratum and its influence on lower coal seam mining in Huobaoganhe Colliery[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 438 - 442. (in Chinese))

[4] 尹会永, 魏久传, 刘同彬. 基于多源信息复合的煤层底板突水评价[J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2008, 27(2): 6 - 9. (YIN Hui-yong, WEI Jiu-chuan, LIU Tong-bin. Evaluation of water inrush in seam floor based on multi-originated information complex[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 27(2): 6 - 9. (in Chinese))

[5] 藏思茂, 张德辉, 李 刚. 煤层开采对底板的破坏规律及其水害防治技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 341 - 344. (ZANG Si-mao, ZHANG De-hui, LI Gang. Failure characteristics of floor result from mine and preventive treatment technology of mine water disaster[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(3): 341 - 344. (in Chinese))

[6] 吴基文. 煤层底板采动效应与阻水性能的岩体结构控制作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007. (WU Ji-wen. Study on the mining effect and water-resisting characteristics of coal seam floor controlled by rock mass structure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007. (in Chinese))

[7] 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.

[8] 卫 伟. 矿压对肥城矿区底板破坏深度的实测研究[J]. 中国煤炭, 2005, 31(9): 55 - 57. (WEI Wei. Study on in-situ measurement of coal seams floor destroyed depth under underground[J]. China Coal, 2005. 31(9): 55 - 57. (in Chinese))

[9] 施龙青, 朱 鲁, 韩 进, 等. 矿山压力对底板破坏深度监测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 20 - 23. (SHI Long-qing, ZHU Lu, HAN Jin, et al. Monitor study on broken floor depth caused by underground pressure[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(6): 20 - 23. (in Chinese))

[10] 刘传武, 张 明, 赵武升. 用声波测试技术确定煤层开采后底板破坏深度[J]. 煤炭科技, 2003, 4: 4 - 5. (LIU Chuan-wu, ZHANG Ming, ZHAO Wu-sheng. Use sound waves testing technology to ensure failure depth of mining coal seam floor[J]. Coal Science and Technology Magazine,

- 2003, 4: 4 - 5. (in Chinese))
- [11] 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(增刊 1): 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. (in Chinese))
- [12] 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. 19 coal seam floor's fracture regularity in Xiandewang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 121 - 125. (in Chinese))
- [13] 徐玉增. 葛泉矿带压开采下组煤底板破坏深度探测研究[J]. 中国煤炭, 2010, 36(4): 48 - 51. (XU Yu-zeng. A study on the depth of floor damage in lower coal seam mining with water pressure in Gequan Coal Mine[J]. China Coal, 2010, 36(4): 48 - 51. (in Chinese))
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 王吉松, 关英斌, 鲍尚信, 等. 相似材料模拟在研究煤层底板采动破坏规律中的应用[J]. 世界地质, 2006, 25(1): 86 - 90. (WANG Ji-song, GUAN Ying-bin, BAO Shang-xin, et al. Application of similar material simulation in research of coal seam floor failure regularity[J]. Global Geology, 2006, 25(1): 86 - 90. (in Chinese))
- [16] 弓培林, 胡耀青, 赵阳升, 等. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4396 - 4402. (GONG Pei-lin, HU Yao-qing, ZHAO Yang-sheng, et al. Three-dimensional simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4396 - 4402. (in Chinese))
- [17] JAISWAL A, SHRIVASTVA B K. Numerical simulation of coal pillar strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 779 - 788.
- [18] ISLAM R M, HAYASHI D, KAMRUZZAMAN A. Finite element modeling of stress distributions and problems for multi-slice longwall mining in bangladesh, with special reference to the barapukuria coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78: 91 - 109.
- [19] 宋振骐, 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 Zhen-qi, JIANG Yu-jing, YANG Zeng-fu, et al. Forecast and control of major accident in collieries and its dynamic information system[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [20] 蔡东红, 董昌伟, 彭龙超, 等. 煤层覆岩圆拱结构下底板破坏深度的解析估算[J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2005, 24(2): 13 - 16. (CAI Dong-hong, DONG Chang-wei, PENG Long-chao, et al. The analytic estimation of floor failure depth under the arch structure of overlying strata of coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 24(2): 13 - 16. (in Chinese))
- [21] 段宏飞, 姜振泉, 张蕊, 等. 杨村煤矿综采条件下薄煤层底板破坏深度的实测与模拟研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 1): 13 - 17. (DUAN Hong-fei, JIANG Zhen-quan, ZHANG Rui, et al. Field measurement and simulation research on failure depth of fully mechanized thin coal seam floor in Yangcun Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 13 - 17. (in Chinese))