

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.12.005

煤层倾角变化对采动覆岩变形规律影响的相似模拟试验研究

施峰,王宏图,舒才

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆400044)

摘要:为研究工作面开采后顶板变形破坏随煤层倾角变化的规律,以南桐矿区不同倾角的同一煤层开采为工程研究背景,分别选取缓倾斜、倾斜、急倾斜三种煤层倾角进行煤层开采顶板变形破坏规律的相似模拟试验。对相似模型开挖前后图像进行数字散斑相关法处理,得到相似模型煤层开采后顶板覆岩位移及平面总应变等值线云图。通过综合分析顶板位移及平面总应变可知:上覆岩层变形的破坏程度总体上是随煤层倾角的增加呈减小趋势,其下沉剧烈区域和膨胀变形破坏剧烈区域呈逐渐向工作面上山方向发展的趋势;根据顶板位移云图和平面总应变云图中的等值线极值区域特征,确定了缓倾斜、倾斜煤层开采垮落带、裂隙带高度和偏心程度等参数,并根据“压力拱”理论确定了急倾斜煤层开采裂隙带范围;随煤层倾角增大“两带”高度总体上呈减小趋势,且“两带”偏心方向呈向上山方向增加的趋势。

关键词:煤层倾角;煤层开采;顶板变形破坏;相似模拟试验;数字散斑相关法

中图分类号:TD 713

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)12-036-10

Similar simulation study on the influence of seam angle change on deformation law of overburden strata in coal seam mining

SHI Feng, WANG Hongtu, SHU Cai

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster dynamic and Control,
Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: To get insight into the swelling and displacement law with seam dip angles change, similar simulation studies of gentle dip, dip and steep dip angles were conducted. The experiment angles and geometrical properties were chosen from a particular coal seam of various dip angles in Nantong Mining District. Digital speckle correlation method was used in the result analysis to quantitate the overburden strata deformation for the displacement and the total plane strain contour maps. Further analysis of the plane strain and displacement distribution gives the following major findings: generally the swelling and displacement condition will be relieved and the corresponding intense regions will rise to the upper

收稿日期:2018-07-01

基金项目:煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室项目(DA201404);国家自然科学基金(51104155);南桐矿业有限责任公司科研项目(2014-01)。

Supported by Projects of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University (DA201404), National Natural Science Foundation of China (51104155) and Research Project of Nantong Mining Co. Ltd.(2014-01).

作者简介:施峰(1987—),男,重庆大学博士研究生,从事矿井灾害控制技术方面的研究工作,(E-mail) jsshifeng@cqu.edu.cn。
王宏图(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)htwang@cqu.edu.cn。

boundary with the increase of seam angle; Based on the morphology in both contours, the interfaces of "Three Zones" were determined in the position of maximum value of contour, as well as height of caving zone and fractured zone and the eccentric degree in seam angle of gentle dip and dip; In the dip angle condition, stress arch-shell theory is used to determine height of fractured zone. Quantitative characteristic parameters show the distributions of caving zone and fractured zone are biased toward upper boundary while both heights exhibit a decrease trend.

Keywords: coal seam angle; coal mining; roof damage; similar simulation; digital speckle correlation method

煤层开采后顶板的变形破坏规律一直是煤矿开采顶板控制研究的热点问题^[1-5]。影响采场上覆岩层变形破坏形态的因素众多,其中煤层倾角是主要影响因素之一^[2,4]。随着煤层倾角从平缓向急倾斜发展,煤层开采后顶板的变形破坏特征将变化,呈现出不同的变形破坏形态和特征。由于各矿煤层赋存条件的差异大,现场考察结果离散度较大,较难对比分析不同煤层倾角条件的采场上覆岩层采动变形破坏规律;同时,基于数值模拟的采场上覆岩层变形破坏规律研究大多基于各向同性连续介质假设^[2],数值计算结果与现场实际存在一定差距。基于相似理论的相似模型试验参数可控、结果直观,在顶板移动变形的研究中广泛使用^[6]。但相似模拟过程中利用传统方法^[3,6]采集得到的数据一般离散度较大,连续性较差,限制了模型试验中开挖区域上部剧烈变形区域的定量描述。

数字散斑相关方法是一种重要的非接触测量方法,通过将物体变形前后的两幅数字散斑图划分为小块图像,作为样本子区和目标子区;对子区的灰度值信息进行相关算法处理,得到物体变形前后各个子区间对应关系,即可实现变形量的提取。具有全场测量、非接触、环境不敏感、操作简单等突出的优点^[7-9]。

因此,笔者拟采用相似模型试验,结合数字散斑测量技术的方法,以南桐矿区不同赋存条件煤层开采为工程背景,针对同一矿区同一煤层相同埋深煤层开采,系统地开展不同倾角煤层条件下采场覆岩变形破坏规律研究,对南桐矿区和其他相似矿区的采场顶板控制具有指导意义。

1 试验方案

1.1 研究对象概况

南桐矿区煤层赋存条件复杂,受地质构造影响煤层倾角变化明显,煤层倾角变化范围一般 $25^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。矿区主采煤层为K4、K6煤层,矿区内各矿井均选择K6作为首采煤层保护主采煤层K4开采。K6煤层平均厚度为1.5 m、埋深平均约为650 m。本次试验研究选取有代表性的三种不同煤层倾角:缓倾斜煤层倾角 25° 、倾斜煤层倾角 45° 和急倾斜煤层倾角 65° ,开展不同煤层倾角条件K6煤层开采过程中顶板变形破坏规律研究,为保护层K6煤层开采的顶板控制提供科学依据,同时也为被保护层K4煤层开采顶板控制提供借鉴。

1.2 相似模型设计与试验

1.2.1 试验装置及测试系统

试验装置采用可旋转物理相似模拟试验台。有效尺寸为 $2\ 000\ \text{mm}\times 2\ 000\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$;倾角可调节模拟 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 范围内煤层倾角变化;顶部采用杠杆加砝码方式补偿地应力以模拟开采深度。为减小边界效应,将工作面开挖区域尽量布置在模型架对角线附近,并结合原型开采区域几何形状确定几何相似比 $1:100$ 。

数据采集装置为高精度数码相机摄像系统。为提高后期数字散斑处理的精度,测量前调整相机光轴垂直于研究区域表面的中心位置以减小图像畸变对研究区域测量精度影响;调整镜头使有效像素充分覆盖研究区域以提高像素级测量精度^[7-10];并提高模型表面光照以减小模型表面图像噪声、提高模型表面可识别度。相机、模型及光源的相对位置关系,如图1所示。

对开挖前后的模型照片进行数字散斑相关方法处理,获得模型位移及应变信息。数字散斑相关方法相关性系数计算采用经典归一化协方差相关函数^[7];对模型表面照片灰度化处理得到天然散斑,并划分为 20×20 像素的搜索子区,邻近域搜索区域设为 40×40 像素;采用基于相关系数插值(拟合)达到亚像素级变形测量精度;采用一阶有限元法对位移场求解得到模型表面应变场(有限元计算网格大小 20×20 像素)。

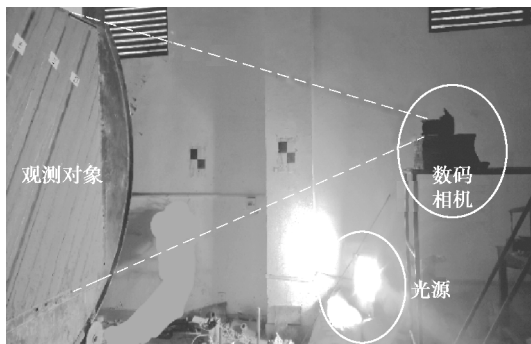


图 1 数字散斑法测量光路图

Fig.1 Schematic diagram of optical path of digital speckle correlation method

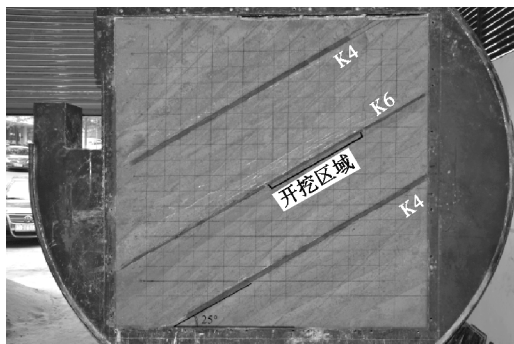


图 2 养护完成后的相似模型

Fig.2 Similar model after curing

1.2.2 试验材料及相似模型制作

为同时满足变形相似和动力相似,在计算模型几何相似比之后,确定相似材料的力学参数及相应的材料配比^[6]。通过制作不同配比的标准试件并进行单轴压缩试验,最终确定相似材料配比和力学参数以及在相似模型相应层位,如表 1 所示。

表 1 模型相似材料配比及物理力学参数

Table 1 Similar material proportion and physical mechanical parameters for all stratum

岩层	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	配比
					沙 : 膏 : 灰
石灰岩	—	16.56	178.61	0.63	6 : 0.9 : 0.1
铝土页岩	0.02	16.37	162.31	0.63	6 : 0.6 : 0.4
K6 煤层	0.015	15.13	10.19	0.04	9 : 0.5 : 0.5
钙质页岩	0.04	16.56	174.87	0.68	6 : 0.8 : 0.2
粉砂质页岩	0.03	16.37	154.35	0.72	6 : 0.5 : 0.5
石灰岩	0.03	16.56	178.61	0.63	6 : 0.9 : 0.1
粉砂质页岩	0.08	15.89	179.01	0.58	5 : 0.5 : 0.5
硅质石灰岩	0.12	15.9	193.54	1.02	5 : 0.7 : 0.3
粉砂质页岩	0.08	15.29	125.44	0.67	7 : 0.8 : 0.2
K4 煤层	0.02	15.13	10.09	0.04	9 : 0.5 : 0.5
粉砂岩	0.025	15.39	110.81	0.54	7 : 0.6 : 0.4
石灰岩	—	16.56	178.61	0.63	6 : 0.9 : 0.1

对不同煤层倾角情况分别建立相似模型。相似模型铺设采用分层压制法,每次上架厚度不超过 2 cm,充分压实,以云母粉作为分层弱面。在铺设煤层前后撒少量石灰粉与围岩区分;模型铺设完成后在模型上方挂载砝码施加预定压力,模拟设计开采深度。图 2 所示为养护完成后的 25°煤层倾角相似模型。

1.2.3 试验过程

在模型养护达到预定时间(20~30 d 左右)和模型强度达到设计要求时即进行模型开挖。开挖位置为模型中 K6 煤层中部,从上至下顺序开挖。模型开挖过程中每隔 5 分钟相机拍照采样,记录模型的变形情况,直至工作面开挖完成上覆岩层变形稳定,并保存试验过程的所有数据和照片。

2 试验结果及分析

2.1 缓倾斜煤层(25°)开采上覆岩层变形破坏特征

缓倾斜煤层(25°)开采后,顶板上覆岩层变形破坏如图 3 所示。通过数字散斑相关法对变形前后模型表面照片处理分别得到顶板位移(图 4)及应变(图 5)。

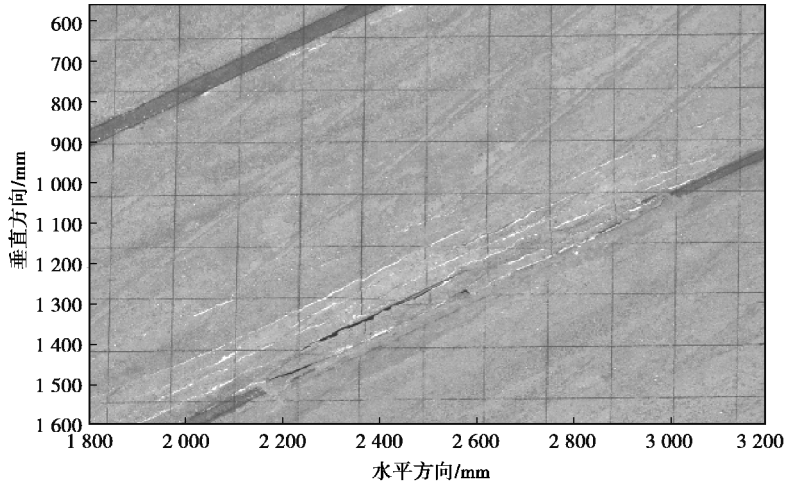


图 3 倾角 25°顶板变形破坏图

Fig.3 Diagram of roof damage of 25° dip angle

图 4 为竖向位移等值线图。模型开挖过程中,上覆各岩层由下至上分别经历了层间离层扩张和垮落充填过程,在靠近开挖区域的顶板表面变形较剧烈,模型表面出现脱落及较大的分层离层。该变形剧烈区域数字散斑算法不能识别,使用空白区域表示。

从图 4 中可以看出,覆岩下沉位移在接近开挖区域较大,采空区顶板向上及采空区两侧逐渐减小。在开挖区域上方可识别的较大位移位置形成了不完整的位移极值等值线。由于顶板已破断关键层在垮落带与裂隙带分界面上形成铰接结构导致该分界面以上位移不断减小,并且破断关键层所在分界面位置块体较大数字散斑算法可识别而破断关键层以下破碎严重的岩块数字散斑算法不可识别,因此根据亚关键层与“三带”关系将可识别位移极值区域中心确定为裂隙带与垮落带的分界点^[11,12],可识别位移极值区域中心以下由于变形过大不能识别的区域即为垮落带区域。

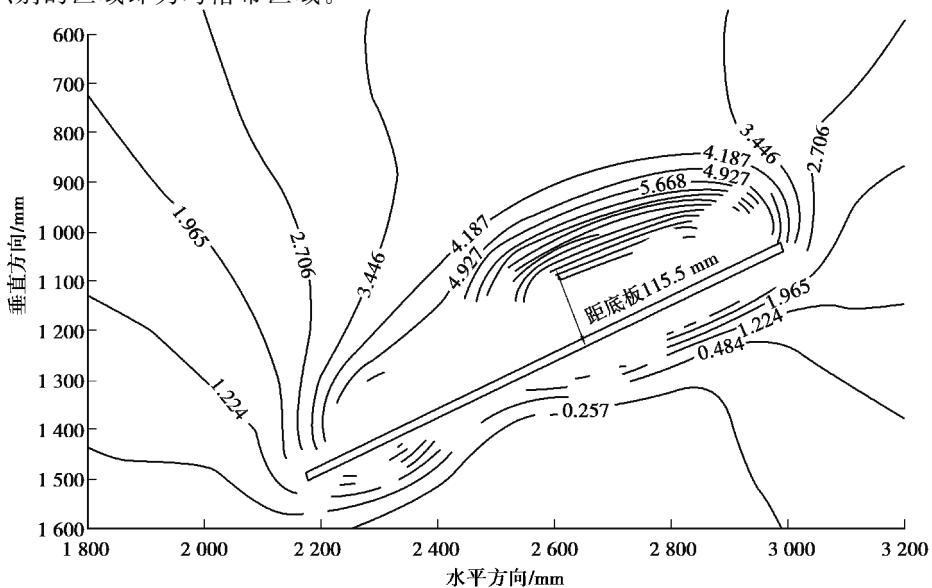


图 4 倾角 25°顶板位移图

Fig.4 Displacement distribution of 25° dip angle

根据图4可识别出最大顶板下沉位置位于倾向中部偏向上山方向距开挖区域中心点110.5 mm、距底板垂直高度115.5 mm、下沉量(Δy)13.3 mm。

图5为平面总应变($\epsilon_x + \epsilon_y$)图。由于利用位移量求解应变需要更高一阶的连续性,造成了图中开挖区域附近应变云图未识别区域相比图3的位移等值线云图更大。

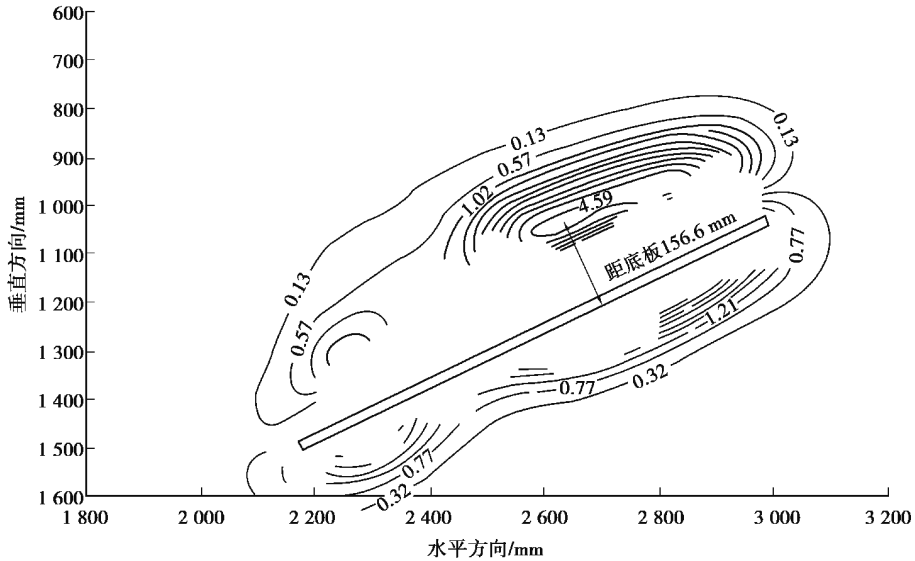


图5 倾角25°顶板平面总应变图

Fig.5 Distribution of swelling of 25° dip angle

在开挖区域上方可识别的较大平面总应变位置形成了不完整的应变极值等值线。顶板未破断关键层以上弯曲下沉带由于关键层的存在变形协调,关键层以下裂隙带与关键层变形失调,导致“两带”分界面为顶板应变的极值位置^[11-12],这就是弯曲下沉带与裂隙带的分界点。图5中,可识别出最大应变位置位于倾向中部偏向上山方向距开挖区域中心点112.5 mm、距底板垂直高度156.6 mm,平面总应变变为4.6%。

根据图4和图5,确定出原型工作面上方15.66 m以内是裂隙带及垮落带范围,小于文献[13]中经验公式的计算结果(30.1~47.9 m);11.55 m以内为垮落带范围,与文献[13]中经验公式的计算结果(5.19~10.19 m)接近。同时,可确定出缓倾斜煤层(25°)开采后顶板上覆岩层裂隙带及垮落带最大高度位置层面方向距采场上下边界距离之比($L_{上}/L_{下}$),即顶板变形偏心度为1.57。

2.2 倾斜煤层(45°)开采上覆岩层变形破坏特征

倾斜煤层(45°)开采后,顶板上覆岩层变形破坏如图6所示。

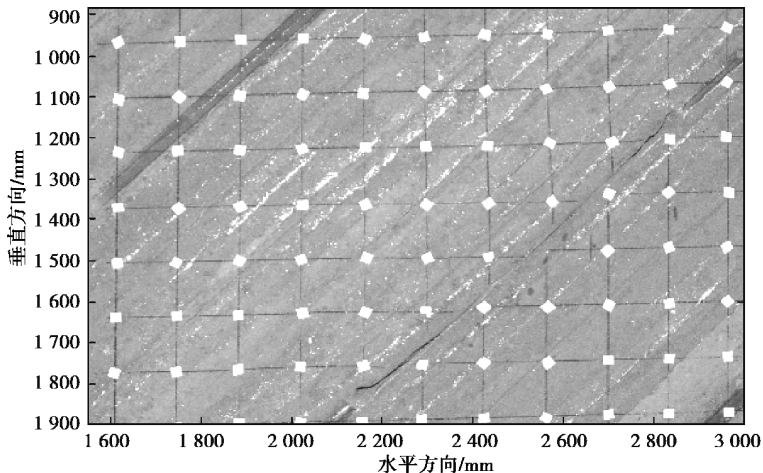


图6 倾角45°顶板变形破坏图

Fig.6 Diagram of roof damage of 45° dip angle

图 7 是上覆岩层位移图。从图 7 中可以看出,开挖区域上方可识别的较大位移位置形成了较完整的位移极值等值线,在位移极值区域的上方及两侧距离越远覆岩下沉量越小。

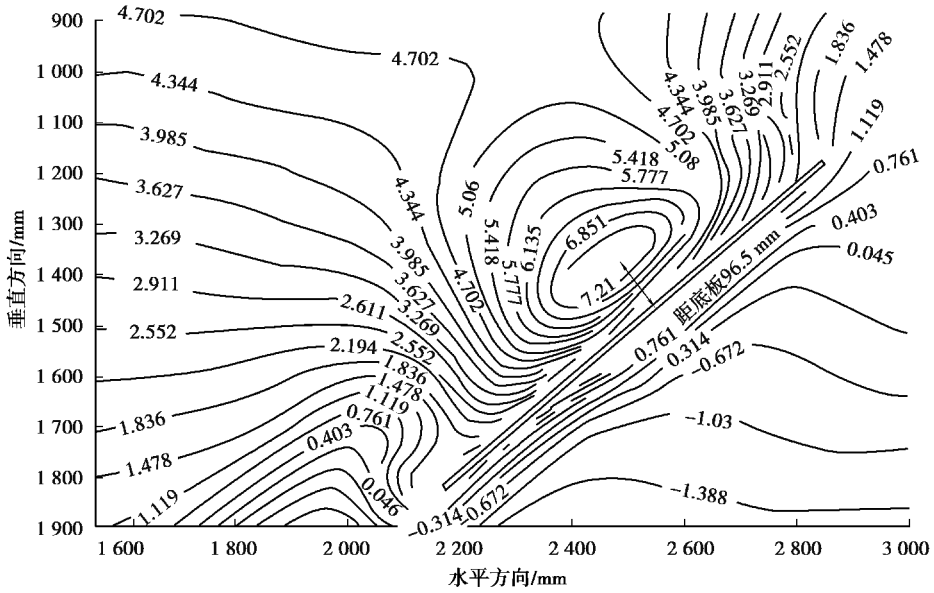


图 7 45°倾角顶板位移图

Fig.7 Displacement distribution of 45° dip angle

对比图 4 及图 7,倾斜煤层(45°)与缓倾斜煤层(25°)具有类似的位移等值线特征。在顶板位移等值线图中,可识别出最大顶板下沉位置位于倾向中部偏向上山方向,层面方向距开挖区域中心点 75.4 mm、距底板垂直高度 96.5 mm、下沉量 7.0 mm。

在图 8 中,开挖区域上方可识别的较大平面总应变位置形成了较完整的应变等值线。对比图 5 及图 8,倾斜煤层(45°)具有与缓倾斜煤层(25°)顶板变形类似的平面总应变等值线分布特征。可识别出最大应变位置位于倾向中部偏向上山方向,层面方向距开挖区域中心点 101.0 mm、距底板垂直高度 132.5 mm,平面总应变为 2.4%。由图 7 和图 8,确定出原型工作面上方 13.25 m 以内是裂隙带及垮落带范围,小于经验公式的计算结果(30.1~47.9 m);9.65 m 以内为垮落带范围与经验公式的计算结果(5.19~10.19 m)接近。顶板变形偏心度为 0.117。

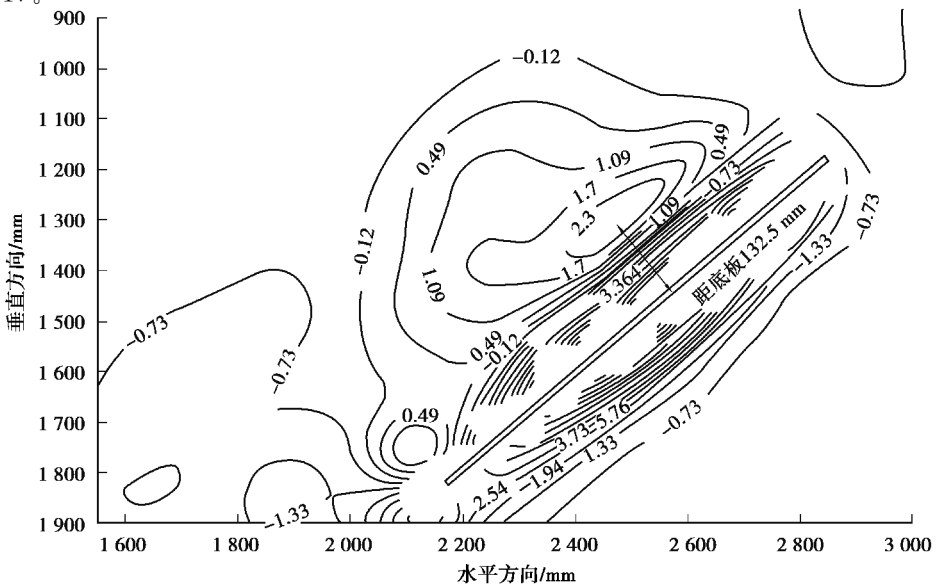


图 8 45°倾角顶板平面总应变图

Fig.8 Distribution of swelling of 45° dip angle

2.3 急倾斜煤层(65°)开采上覆岩层变形破坏特征

倾斜煤层(65°)开采后,顶板上覆岩层变形破坏如图 9 所示。

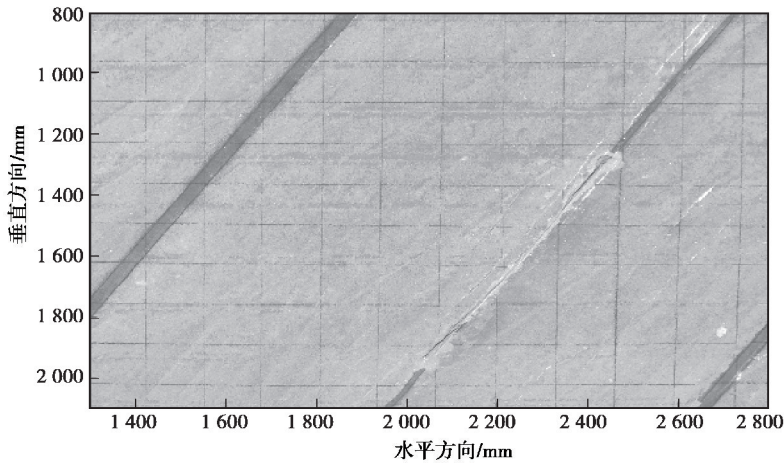


图 9 倾角 65°顶板变形破坏图

Fig.9 Diagram of roof damage of 65° dip angle

图 10 是上覆岩层顶板位移图。图中覆岩位移等值线在垂直层面方向呈敞开向上展开形态,在沿层面方向最大下沉量偏向上边界方向,且位移变化梯度较小,未形成缓倾斜(25°)和倾斜(45°)条件下的顶板位移极值区域。其原因是煤层倾角较大,垂直于层面方向应力分量较小,造成覆岩移动变形破坏程度整体上相对较小、覆岩层之间及同一分层沿层面方向下沉差异较小。

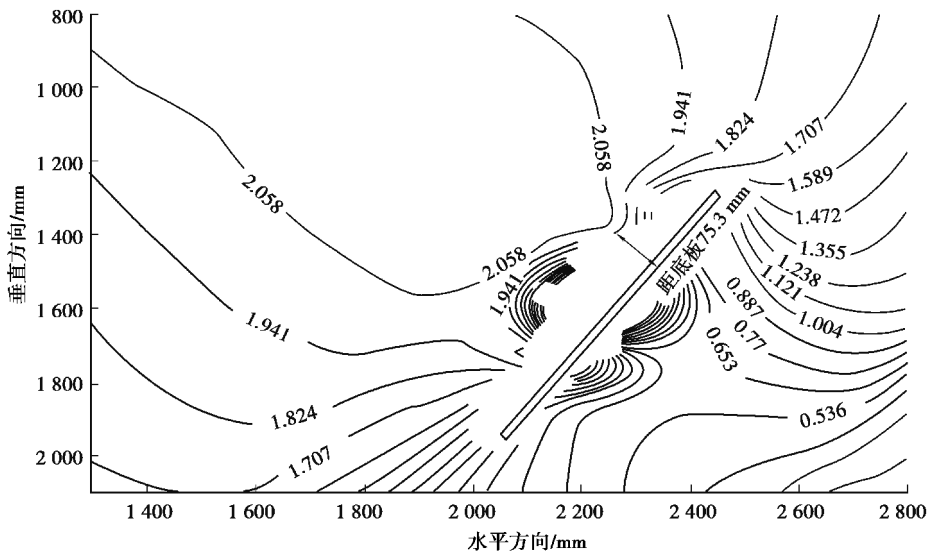


图 10 65°倾角顶板位移图

Fig.10 Displacement distribution of 65° dip angle

由图 10 得到可识别最大顶板下沉位置偏向倾向上部距底板 75.3 mm,下沉量为 2.1 mm。

同时,在平面总应变图(图 7)中可以看出,顶板中未形成缓倾斜(25°)和倾斜(45°)条件下的顶板平面总应变极值区域。开挖区域顶板可识别区域内平面总应变较小,下边界以下顶板压缩应变明显,中下部顶板以膨胀变形为主,而上部顶板以压缩变形为主。开挖区域上边界顶板出现压缩变形区域是因为此处形成压力拱结构。根据急倾角煤层开采压力拱理论^[2,14,15],判定裂隙带与垮落带范围最大高度在压力拱以下。因此,距底板 112.6 mm 的平面总应变为 0 位置为裂隙带与弯曲下沉带分界面。

由于急倾斜煤层(65°)开采上覆岩层变形位移特征不明显,难以通过数字散斑法直接得到垮落带与裂隙带的分界面位移。根据平面总应变图,得到 65°煤层倾角原型裂隙带最高位置距底板 11.26 m,与经验

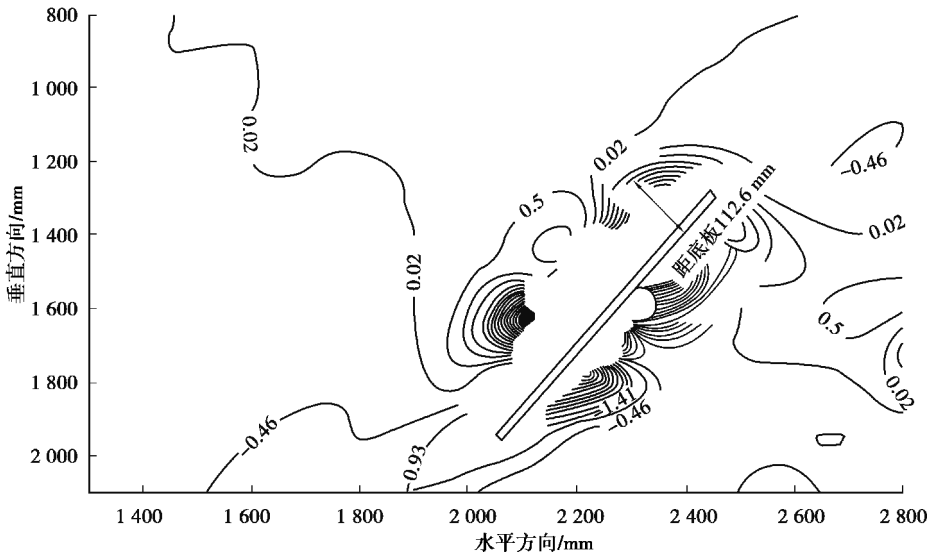


图 11 65°倾角顶板平面总应变图

Fig.11 Distribution of swelling of 65° dip angle

公式的计算结果(12.3~27.5 m)接近。该位置与层面方向距开挖区域中心点 18.61 m,顶板变形偏心度为 5.07。

2.4 不同倾角煤层开采上覆岩层变形破坏规律

2.4.1 上覆岩层变形破坏程度变化规律

在煤层上覆岩层变形破坏程度方面,开挖完成后覆岩变形由下向上发展,覆岩各分层分别经历了离层扩张和闭合过程。缓倾斜条件下开挖区域基本被完全充填,开挖区域上方存在明显的离层;倾斜条件下开挖区域充填较充分,开挖区域未见较大离层;急倾斜条件下覆岩各分层的离层扩张和闭合过程并不明显。因此,随开采煤层倾角的变大,上覆岩层变形破坏程度逐渐减弱。

2.4.2 上覆岩层变形破坏形态变化规律

缓倾斜和倾斜条件下覆岩位移和平面总应变云图均有等值线极值区域出现;缓倾斜条件下开挖区域顶板变形等值线极值区域不够完整;倾斜条件下由于角度增大,顶板中垂直于层面方向的应力分量相对减小,顶板变形程度相对减弱,变形较为均匀,等值线极值区域的形态更加完整;急倾斜条件下由于角度的进一步增大顶板变形大幅减弱及开挖区域下部充填充分,导致顶板变形在垂直于层面及平行于层面方向均较平缓,顶板断裂顶板离层不明显,缺少了形成等值线极值区域的条件。对比不同角度的顶板位移等值线云图,以大于 3 mm 及顶板未识别区作为显著下沉指标,显著下沉区域随倾角增大而减小;在 65°急倾斜条件下覆岩中大部分区域下沉量均小于 3 mm,即无显著下沉情况。对比不同角度下的平面总应变云图,以应变大于 0.1% 及顶板未识别区作为显著膨胀指标,则煤层倾角 45°条件时显著膨胀区域比 25°倾角条件大,但显著膨胀区域内未识别区域及可识别平面总应变峰值比煤层倾角 25°条件时小,说明缓倾斜条件膨胀区域更集中,膨胀变形更剧烈;在 65°条件下显著膨胀区域仅发生在开挖区域上部顶板很小区域,说明在急倾斜条件下开挖区域覆岩基本没有大的膨胀变形。因此,随开采煤层倾角的变大,膨胀变形破坏强度减弱,膨胀变形破坏范围呈逐渐向工作面上山方向发展的趋势形态。

2.4.3 上覆岩层变形破坏特征参数变化规律

通过对 25°、45°、65°煤层倾角的相似模拟结果的分析,得到不同倾角煤层开采时上覆岩层变形破坏的垮落带高度、裂隙带高度、偏心程度随煤层倾角变化曲线,如图 12 所示(图中已将模型“两带”高度还原至原型尺寸)。从图 12 中可以看出通过相似模拟结合数字散斑方法得到的垮落带高度与裂隙带高度曲线均随煤层倾角增大而减小;从偏心程度曲线可知三种煤层倾角情况偏心程度均大于 1 且随倾角变大偏心程度越严重,说明“两带”高度位置均偏向工作面上山方向且倾角越大“两带”越偏向上山方向。

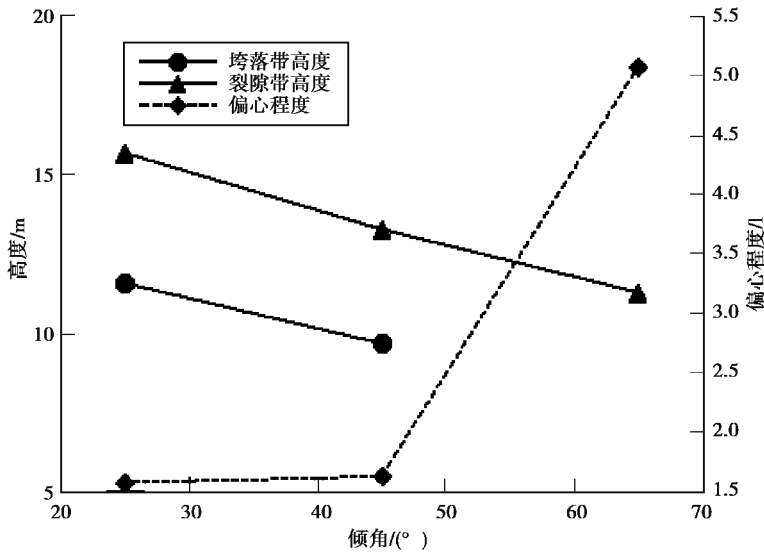


图 12 “两带”高度及相应考察位置变化趋势图

Fig.12 Trend of height of Two Zones and their corresponding investigation locations with seam angle

3 结 论

利用相似模型试验结合数字散斑相关方法研究三种代表性倾角煤层开采条件下上覆岩层变形破坏规律,研究得到以下主要结论:

1)不同倾角煤层开采条件下,上覆岩层变形破坏程度呈随开采煤层倾角的增大逐渐减弱的趋势,上覆岩层剧烈下沉区域和剧烈膨胀变形破坏区域呈逐渐呈向工作面上山方向发展的趋势形态。

2)根据顶板位移云图和平面总应变云图中的等值线极值区域特征,确定了缓倾斜、倾斜煤层开采垮落带高度、裂隙带高度和偏心程度等特征参数;并根据“压力拱”理论确定了急倾斜煤层开采裂隙带范围。

3)不同倾角煤层开采条件下,上覆岩层变形破坏的垮落带高度与裂隙带高度特征参数均随煤层倾角增大而减小,“两带”高度分布的偏心程度随倾角增大而增大。

参考文献:

- [1] 施峰,王宏图,范晓刚,等.俯伪斜采煤法基本顶破断的力学分析[J].煤炭学报,2013,38(6):1001-1005.
SHI Feng, WANG Hongtu, FAN Xiaogang, et al. Mechanical analysis of main roof breakage with dip oblique coal mining method[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1001-1005. (in Chinese)
- [2] 杨帆.急倾斜煤层采动覆岩移动模式及机理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
YANG Fan. Study on overburden strata's movement pattern and mechanism of mining steeply inclined seams[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006. (in Chinese)
- [3] Liu F F, Lin B Q, Cheng Z, et al. Research of real-time effects of horizontal protecting stratum mining based on similar simulation experiment[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 431-440.
- [4] Li X M, Wang Z H, Zhang J W. Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(2):359-364.
- [5] Rezaei M, Hossaini M F, Majidi A. A time-independent energy model to determine the height of distressed zone above the mined panel in longwall coal mining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 81-92.
- [6] 屠世浩.岩层控制的实验方法与实测技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010:10-16,25-46.
TU Shihao. Experimental methods and measurement technology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Science Press, 2010: 10-16, 25-46. (in Chinese)
- [7] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3): 232-244.

- [8] Mudassar A A, Butt S. Improved digital image correlation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 156-167.
- [9] Pu H, Miao X X, Yao B H, et al. Structural motion of water-resisting key strata lying on overburden[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(3): 353-357.
- [10] 王志国, 周宏伟, 谢和平, 等. 深部开采对覆岩破坏移动规律的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(6): 503-509.
WANG Zhiguo, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Experimental study of the rule of overlying strata movement and breakage in deep mining[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(6): 503-509. (in Chinese)
- [11] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230. (in Chinese)
- [12] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769. (in Chinese)
- [13] 杜计平, 汪理全. 煤矿特殊开采方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 6-9.
DU Jiping, WANG Liquan. Special mining method of coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 6-9. (in Chinese)
- [14] 尹光志, 李小双, 郭文兵. 大倾角煤层工作面采场围岩矿压分布规律光弹性模量拟模型试验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(suppl1): 3336-3343.
YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, GUO Wenbing. Photo-elastic experimental and field measurement study of ground pressure of surrounding rock of large dip angle working coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(suppl1): 3336-3343. (in Chinese)
- [15] 伍永平, 王红伟, 解盘石. 大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 559-564.
WU Yongping, WANG Hongwei, XIE Panshi. Analysis of surrounding rock macro stress arch-shell of longwall face in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 559-564. (in Chinese)

(编辑 郑 洁)