



移动扫码阅读

李见波,尹尚先.近奥灰薄隔水层底板岩体变形破坏机制研究[J].煤炭科学技术,2021,49(12):173-179. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.12.021

LI Jianbo, YIN Shangxian. Study on deformation and rock failure mechanism of floor rock mass with thin aquifuge near Ordovician limestone [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (12): 173 - 179. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.12.021

近奥灰薄隔水层底板岩体变形破坏机制研究

李见波¹, 尹尚先^{1,2}

(1.华北科技学院 安全工程学院,河北 三河 065201;2.华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室,河北 三河 065201)

摘要:近奥灰承压含水层和薄隔水层条件给矿井的安全生产造成很大威胁,为研究奥灰影响下薄隔水层底板岩层变形破坏机制,基于岩层地质结构特征,构建了风化带影响下底板岩体变形破坏模型,进行理论分析并验证。以垂向底板岩层变形的差异性为基础,计算得到了特厚煤层开采时底板破坏区深度,分析了弹塑性条件下风化带上方完整岩层的扰动变形特征和基于I型应力强度因子的裂纹型岩层拉伸破坏机制。最后,基于井田构造和煤层赋存特征建立数值模型,模拟分析近奥灰承压含水层和薄隔水层条件下特厚煤层开采底板岩体的变形值和破坏规律。计算结果表明:岩层两端受压、中间受拉,形成类似薄板结构,岩层受到向上的垂向应力,加快了岩层的破坏;奥灰顶部风化带由于岩性较弱受扰动容易破坏,而且破坏区会向上发育;岩层破坏通过底板破坏区和风化带破坏区向中间不断发育贯通。特厚煤层开采时,破坏区能够贯穿风化岩层上方的整个底板岩层。监测点瞬态位移变化表明:监测点位移曲线垂向存在2个明显的拐点,将监测点位移曲线分为3段,分别对应着风化段上方岩层、风化段和奥灰层,奥灰风化带对底板岩层变形影响明显,需要采取相应加固措施。监测点全程位移曲线与瞬态变化曲线规律一致,数值计算结果与理论分析相符。

关键词:矿井突水;裂纹扩展;底板变形;奥灰水;隔水层破坏

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)12-0173-07

Study on deformation and rock failure mechanism of floor rock mass with thin aquifuge near Ordovician limestone

LI Jianbo¹, YIN Shangxian^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Sanhe 065201, China;

2. Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: In order to study the deformation and failure mechanism of thin aquifuge floor rock under the influence of Ordovician limestone, the influence of weathering zone was constructed based on the geological structure characteristics of the rock. The deformation and failure model of the lower floor rock mass was theoretically analyzed and verified. Based on the difference in vertical floor rock deformation, the depth of floor failure zone during ultra-thick coal seam mining was calculated and the disturbance deformation characteristics of the intact strata above the weathering zone under the elastic-plastic conditions and the tensile failure mechanism of the rock formation based on the type I stress intensity factor were analyzed. Finally, based on the mine strata structure and coal seam characteristics, a numerical model was established to simulate and analyze the deformation value and failure law of the floor rock mass under the conditions of near Ordovician limestone confined aquifer and thin aquifuge. The results show that the two ends of the rock stratum are compressed and the middle is tensioned, forming a similar thin plate structure, and the rock stratum is subject to upward vertical stress, which accelerates the destruction of the rock layer. The top weathering zone of Ordovician limestone is easily damaged due to weak lithology and is easily damaged by disturbance, and the damage area will develop upward; the failure of the rock stratum will continue to develop through the floor damage

收稿日期:2021-04-28;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804108);中央高校基本科研业务费资助项目(3142018021,3142015082);国家自然科学基金资助项目(51504095)

作者简介:李见波(1985—),男,山东临沂人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail:lijbo@126.com

通讯作者:尹尚先(1964—),男,山西朔州人,教授,博士生导师,博士。E-mail:yinshx03@126.com

area and the weathering zone damage area to the middle. When mining extra-thick coal seams, the failure zone can penetrate the entire floor rock above the weathered rock. The transient displacement change of monitoring points shows that there are two obvious inflection points in the vertical direction of the displacement curve of monitoring points. The displacement curve of monitoring points is divided into 3 sections, which correspond to the rock strata above the weathered section, the weathering section and the Ordovician limestone section respectively. The Ordovician limestone weathering zone has obvious influence on the deformation of the floor rock, so corresponding reinforcement measures need to be taken. The whole displacement curve of the monitoring point is consistent with the transient curve, and the numerical results are consistent with the theoretical analysis.

Key words: mine water inrush; crack propagation; floor deformation; Ordovician water; deformation of aquifuge

0 引言

近奥灰承压水和薄隔水层条件给矿井的安全生产造成威胁,为更好地开展矿井防治水工作,开展该地质条件下的底板岩体变形破坏机制研究。在我国,受到奥灰水威胁的矿井有很多,有的矿区煤层距奥灰较远,隔水层厚,但中间夹有薄层灰岩含水层,深部开采时突水灾害威胁很大^[1],如邯邢、开滦、焦作、山东甚至两淮矿区的深部带压开采都属于此类情形;有的隔水层薄,距奥灰近,如龙王沟矿属于此类情形,而且煤层厚度巨大(20 m以上),底板破坏剧烈、中间薄隔水层、底部奥灰极容易导通,而且在遇到破碎带及断层时,危险性增加,这给矿井安全生产带来很大威胁,需对底板岩体变形破坏机制进行研究,为防治水工作提供支撑。在底板岩体破坏方面,相关研究成果很多。如文献[2-3]提出了最早的“下三带”理论;黎良杰等^[4]建立了采场底板突水的KS理论;文献[5-7]分析裂隙变形与突水的关系,研究了采动对岩体孔隙-裂隙类型升降变化的影响;王作宇等^[8]提出原位张裂与零位破坏理论等。即使如此,受到复杂地质条件的影响,具体问题还应具体分析,理论应用时需要考虑具体边界条件。因此,以近奥灰、厚煤层和薄隔水层为背景开展底板岩体变形破坏机制研究。分析岩层结构特点,构建近奥灰薄隔水层底板岩层变形薄板模型,分析岩层在弹塑性条件下动变形特征和变形机制;分析地质力学环境确定应力边界条件,对底板岩体位移进行数值求解,得到了基于底板岩层变形的全程位移曲线、岩板受力分布和变形破坏形态,为矿井防治水工作提供支持。

1 地质概况

龙王沟矿内煤层距离奥灰近,开采时受到突水威胁,需要研究底板破坏规律,为防治水工作提供依据。该矿位于准格尔煤田水文地质单元中部,是我国大型煤炭基地。主采煤层厚度在20 m以上,寒武奥陶系岩溶裂隙水至主采6号煤的平均距离为

48 m,减去底板破坏深度后中间隔水层非常薄,底板岩层层位如图1所示。中间岩层以砂岩和砂质泥岩为主,煤层距马家沟组灰岩近。而且,在岩溶水发育区,岩溶水可通过封闭不良钻孔、断层构造破碎带、底板扰动裂隙带、岩溶陷落柱进入矿坑,是矿井最危险的充水水源,具有水量巨大、不易疏干的特点。而且煤层开采厚度大,底板破坏剧烈,隔水层薄、距奥灰近,给开采带来很大的困难,需要进行底板岩层移动破坏研究。

组	岩性	柱状	厚度/m		
太原组 C ₃ t	煤		30.60~110.14 66.81		
	砂岩 泥岩				
本溪组 C ₂ b	砂质泥岩 砂岩泥岩		4.20~34.20 23.75		
马家沟组 O ₂ m	马家沟组 含水岩组		0~49.30 15.20		

图1 矿井地层结构

Fig.1 Mine stratum structure

2 近奥灰薄隔水层底板岩体变形破坏特征与机制

2.1 底板岩层变形破坏形态

煤层开采导致底板岩层发生移动破坏,奥灰顶部风化条件下底板岩层变形破坏形态如图2所示。以风化带和底板破坏区为分界层,底板岩层从上而

下可分为底板破坏区、中间岩层、奥灰顶部风化岩层和奥灰含水层。

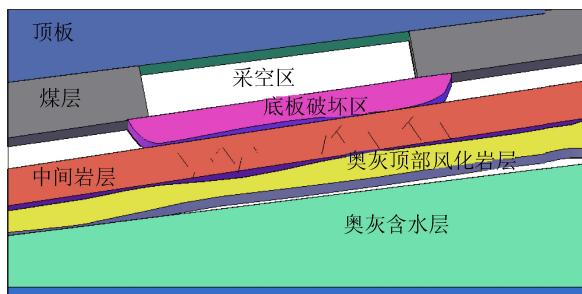


图 2 近奥灰薄隔水层底板破坏形态

Fig.2 Floor failure pattern with thin aquifuge near Ordovician limestone

底板破坏区是支承压力作用下压剪破坏区,其下方是中间较完整岩层,在煤层开采后,底板上方垂向应力解除,导致底板岩体状态的应力状态转换,由三向应力状态转换为两向应力状态或者单向应力状态。中间岩层受到扰动时间滞后煤炭开采。奥灰顶界面风化岩层是在成岩过程中形成的,风化岩层原是奥灰岩层,约从晚奥陶纪至中石炭纪,长期遭受风化剥蚀。奥灰含水层,岩性坚硬,强度大,裂隙发育不均,具有导水性。

2.2 底板破坏区

龙王沟矿地面标高+1 200.5~+1 274.8 m,开采工作面埋深352~395 m。经典矿山压力理论^[9~10]中,支承压力作用下,根据地基破坏机理形成的底板破坏深度 D_{\max} 为

$$D_{\max} = \frac{L \cos \varphi}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi} \quad (1)$$

式中: L 为极限平衡区宽度,m; φ 为岩体内摩擦角,(°)。

极限平衡区理论计算值偏小,采用数值解,参考工作面推进到工作面长度1/2(120 m)时,支承压力核区距煤壁约20 m,如图3所示。代入式(1)计算得到最大底板破坏深度 $D_{\max} = 33$ m。

2.3 中间层变形与破坏机制

2.3.1 中间层薄板变形机制

通过现场钻孔的岩心特征分析得到肥城煤田距奥灰顶界面10 m的深度范围内,奥灰裂隙发育,岩心破碎,取心率低^[11],奥灰顶界面风化岩层强度较低。龙王沟奥灰顶界面风化带按照5 m计算,薄板厚度约为10 m。工作面斜长250 m,当工作面推进到120 m时,中间岩层在几何尺寸上符合薄板特征,按照薄板理论进行分析。而且当薄板的最大挠度小于薄板厚度的1/5时,属于薄板小挠度弯曲问题。

设有矩形薄板,长为 $2a$,宽为 $2b$,假设四端为固

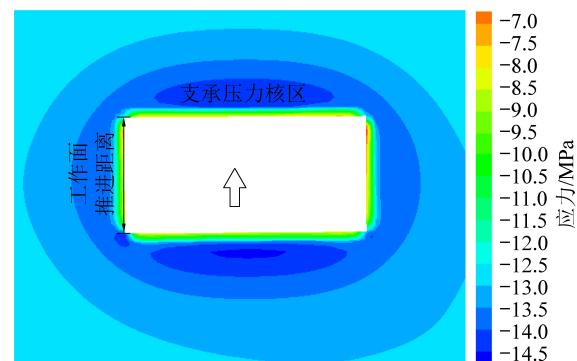
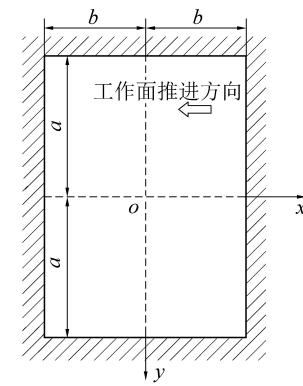


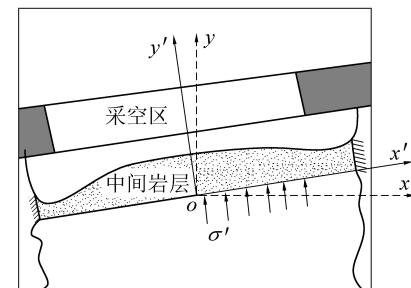
图 3 工作面开挖 120 m 支承压力

Fig.3 Abutment pressure with working face excavation length of 120 m

定端约束,底部为分布力约束。忽略中间岩层上方的破坏岩体重力影响,中间岩层的简化模型符合薄板弯曲模型,如图4所示。开采后,压剪破坏区下方的完整底板岩体为四边固定的薄板,受到均布载荷作用(水平地应力的分量 σ')。



(a) 俯视图



(b) 剖面图

图 4 工作面推进 120 m 岩层变形实例

Fig.4 Calculation example of rock deformation with mining 120 m advance in working face

弹性薄板的基本微分方程: $D \nabla^2 \nabla^2 w = q$,其中,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}; w \text{ 为挠度}; q \text{ 为单位面积横向载荷};$$

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 为薄板的弯曲刚度, h 为板厚, E 和 μ 分别为材料的弹性模量和泊松比。

薄板的固定边条件是 $(w)_{x=\pm a} = 0$, $(\partial w / \partial x)_{x=\pm a} =$

$0; (w)_{y=\pm b}=0, (\partial w / \partial y)_{y=\pm b}=0$ 。取挠度表达式为

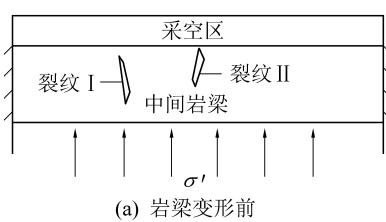
$$w = \sum_m C_m w_m = (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 \times (C_1 + C_2 x^2 + C_3 y^2 + \dots) \quad (2)$$

式中: C_m 为互不依赖的待定系数; w_m 为满足全部边界条件的函数; m 取 $1, 2, \dots$ 。

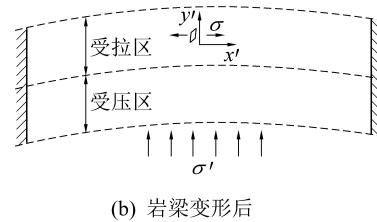
假设式(2)中只取一个系数 C_1 , 该式满足薄板四周固定的位移边界条件, 用伽辽金法求解得到薄板的挠度方程为

$$w = \frac{7q}{128(a^4 + b^4 + 4/7a^2b^2)D} (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 \quad (3)$$

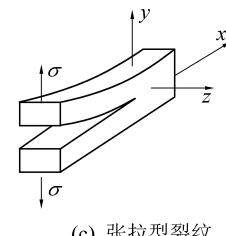
取 $a = 125$ m, $b = 60$ m, 满足薄板的特征。 $h = 10$ m, 弹性模量 $E = 30$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。煤层开采后, 不考虑岩层自身重力时, 在坐标系 $x'y'z'$ 中, 采空区下方岩层仅受水平应力的分量 σ' 的作用时, 按照煤层倾角为 5° , 计算得到应力分量为 0.69 MPa,



(a) 岩梁变形前



(b) 岩梁变形后



(c) 张拉型裂纹

图 5 张拉型裂纹薄板岩层剖面

Fig.5 Tensile cracks and rock beam model

基于薄板结构剖面模型, 垂向上, 受到底板垂向应力作用的过渡区分为受拉区和受压区, 以梁的中性面为界, 上方为拉应力区, 下方为压应力区, 如图 5b 所示。各区域中的裂纹受力不同, 受拉区内, 岩体中的裂纹满足 I 型张开型裂纹条件, 当应力达到阈值, 裂纹扩展。

I 型应力强度因子 $K_I = Y\sigma \sqrt{\pi t}$, 其中裂纹长度为 $2t$; Y 为修正系数; σ 为作用在裂纹顶端处应力, 即梁的正应力。当围岩应力达到裂纹的贯通强度时, 岩体中的裂隙开始扩展贯通, 裂隙继续发育。理论上, 当岩体中存在裂纹时, 裂纹附近的集中应力可以趋于无穷大 ($\sigma \rightarrow \infty$), 裂纹一旦扩展, 便持续增加, 直至断裂。尽管实际情况并非如此(因此裂纹尖端存在塑性区), 但是裂纹的存在增加了突水的危险性。

3 近奥灰薄隔水层工作面开采数值模拟

3.1 应力边界与参数

龙王沟井田位于准格尔煤田中北部, 地层走向近 SN, 倾向 W, 倾角多在 5° 以下, 在井田局部区域

为计算方便暂视为弹性薄板基本微分方程中的均匀分布载荷 q 。

将以上数值代入 $w_{\max} = w_{(x=0, y=0)} = \frac{7q}{128(a^4 + b^4 + 4/7a^2b^2)D} a^4 b^4$, 计算得到中间岩层的最大变形为 0.15 m。

2.3.2 裂纹型中间岩层破坏机制分析

一般条件下, 地层岩体中有裂纹存在, 或多或少, 既与岩层的形成过程有关, 又或是受到后期地应力的作用影响。裂纹的存在大幅增加了突水的危险性, 若在底板岩层中存在裂纹, 如图 5a 所示。在局部坐标系 $x'y'z'$ 中, 在地应力分量 σ' 作用下, 按照横力弯曲梁的正应力计算公式 $\sigma = (M/I_z)y'$, M 为岩层承受弯矩, I_z 为横截面对中性轴的惯性矩, y' 为至中性轴的距离。当拉应力区内应力达到岩层强度时, 岩层发生破坏。当底板岩层存在裂纹时, 则更加危险。

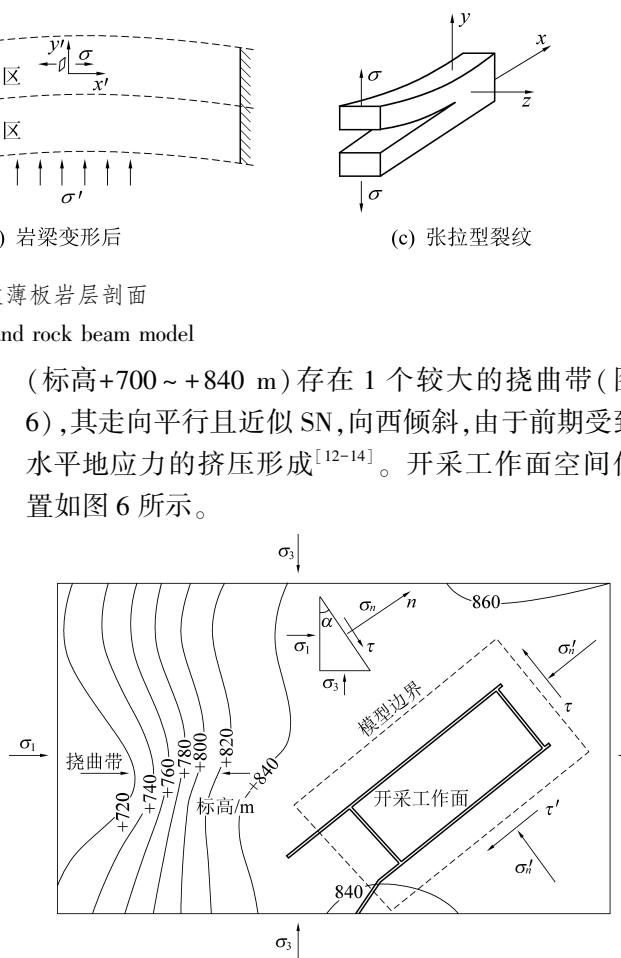


图 6 应力边界与工作面位置

Fig.6 Stress boundary and working face position

矿井酸刺沟(准格尔煤田南部)煤矿地应力测试表明^[15]存在一种 σ_{hv} 型 ($\sigma_h > \sigma_v > \sigma_{hv}$) 地应力场, $\sigma_h, \sigma_v, \sigma_{hv}$ 分别为最大水平主应力, 垂直主应力, 最

小水平主应力。设以开采方向为法线的斜截面的外法线 n 与主应力方向夹角为 α , 参考酸刺沟最大水平主应力, 最大主应力 σ_1 取 7.94 MPa, 最小主应力 σ_3 取 6.70 MPa, 则该斜截面上的正应力 σ_n 和切应力 τ 分别为

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (5)$$

工作面开采方向为法线的斜截面的外法线 n 与主应力方向夹角为 α 取 38° 。计算得到 $\sigma_n = 7.47$ MPa; $\tau = 0.6$ MPa。同理, 可计算与外法线为 n 的斜截面相垂直面的正应力 σ'_n 和切应力 τ' 。

地面标高 +1 200.5~+1 274.8 m, 开采工作面埋深 352~395 m。模型中选用的顶底板岩层力学参数见表 1^[16]。模型长度 600 m, 宽度 500 m, 数值模型如图 7 所示。

表 1 顶底板岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of roof and floor rock mass

岩性	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
煤层	0.14	3.9	15	1.5	0.7
奥灰顶部风化岩层	0.20	3.8	20	1.0	0.5
泥岩	0.24	6.0	12	2.7	0.9
奥灰岩层	0.30	50.0	40	7.1	5.3
砂质泥岩	0.28	31.0	36	3.4	1.2
中粗砂岩	0.31	28.5	35	6.0	1.5
砂岩	0.22	22.0	33	6.2	1.6
粗砂岩	0.33	23.0	35	6.4	1.5
底板岩层	0.30	50.0	40	7.1	5.3

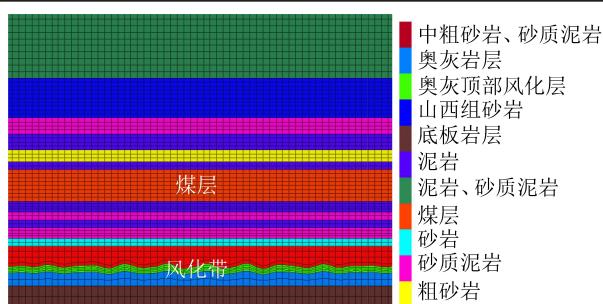


图 7 底板破坏数值模型

Fig.7 Numerical model for floor failure

3.2 模拟结果分析

1) 岩层的受力状态。煤层开采造成底板破坏, 包括剪切破坏和拉破坏。设定底板变形 0.5 m 时, 得到采空区下方直接底板岩层受力大小及状态, 如

图 8 所示。两端受压中间受拉, 形成类似薄板结构(图 8b), 岩层受到向上的最大垂向应力 1.18 MPa, 加快了岩层的破坏。

2) 塑性破坏区特征。近奥灰特厚煤层开采的底板破坏形态(图 9)显示, 底板岩层破坏包括 2 部分: 底板破坏区和风化带为中心的破坏区。风化带受扰动容易破坏, 而且破坏区会向上方发育。工作面开挖 250 m×250 m 时, 底板岩层或发生拉破坏或剪破坏, 破坏区贯穿风化岩层上方的整个底板岩层。

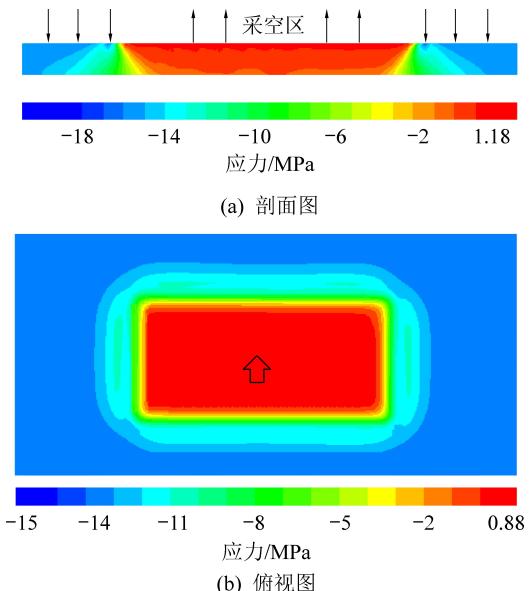


图 8 岩层受力状态

Fig.8 Stress state of rock stratum

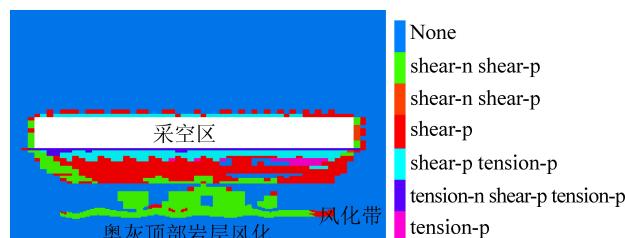


图 9 塑性破坏区形态

Fig.9 Shape of plastic failure zone of surrounding rock masses

3) 监测点位移分析。测点布置, 沿着工作面推进方向布置 10 条纵向测线, 其中 5 号测线距离开切眼 100 m, 每条测线在垂直方向布置 12 个测点, 其中, 57、58 号测点布置在风化岩层中, 风化带上方布置 51~56 号测点, 下方布置 59~512 号测点。监测点位移曲线如图 10 所示。

工作面回采 250 m 时, 5 号测线 12 个监测点瞬态位移变化如图 10a 所示, 垂向上, 监测点位移曲线存在 2 个明显的拐点, 将 12 个监测点位移分为 3 段: [51, 56]、[57, 58] 和 [59, 512], 3 段曲线分别对

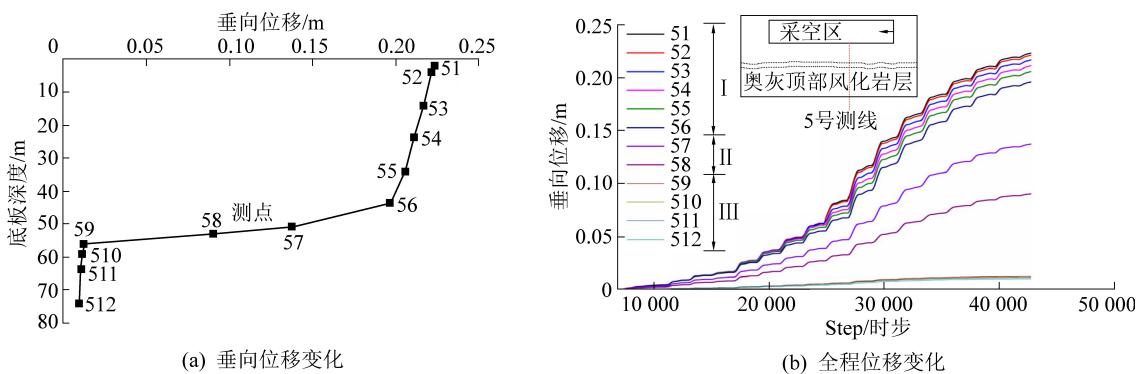


图 10 监测点位移变化曲线

Fig.10 Displacement curve of monitoring points

应着风化段上方岩层、风化段和奥灰层。56号位移0.196 m, 57号位移0.137 m, 58号位移0.09 m, 59号位移0.012 m。奥灰顶部风化段对底板岩层变形影响明显。

监测点开采前、开采中和开采后的全程位移曲线如图10b所示。全程位移曲线与各点的位移曲线变化规律一致。根据监测点位移大小,12个测点的位移曲线可分为3类。12个测点的监测位移曲线以风化带为界分为3类:[51,56]、[57,58]和[59,512](图10b),亦分别对应3种底板岩层:风化段上方岩层、风化段和奥灰岩层。

4 结 论

1) 构建了风化带影响下底板岩体变形破坏模型,以垂向上底板岩层变形的差异性为基础,计算得到了特厚煤层开采时底板破坏区深度,从理论上分析弹塑性条件下风化带上方完整岩层的扰动变形特征和基于I型应力强度因子的裂纹型岩层拉伸破坏机制。

2) 计算结果表明岩层两端受压中间受拉,形成类似薄板结构,岩层受到向上的垂向应力,加快了岩层的破坏;岩层破坏通过底板破坏区和风化带破坏区向中间不断发育贯通。特厚煤层开采时,破坏区能够贯穿风化岩层上方的整个底板岩层。

3) 监测点瞬态位移变化表明监测点位移曲线垂向上存在2个明显的拐点,将12个监测点位移曲线分为3段,分别对应着风化段上方岩层、风化段和奥灰层,奥灰风化带对底板岩层变形影响明显,需要采取相应加固措施。

参考文献(References):

[1] 尹尚先,王屹,尹慧超,等.深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1855-1864.

YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and

full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5):1855-1864.

- [2] 荆自刚,李白英.煤层底板突水机理的初步探讨[J].煤田地质与勘探,1980,8(2):51-56.
JING Zigang, LI Baiying. Preliminary study of water-inrush from floor[J]. Coal Geology and Exploration, 1980, 8(2):51-56.
- [3] 李白英.预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J].山东矿业学院学报(自然科学版),1999,18(4):11-18.
LI Baiying. “Down Three Zones” in the prediction of the water inrush from coalbed floor aquifer - theory, development and application[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology(Natural Science), 1999, 18(4):11-18.
- [4] 黎良杰,钱鸣高,李树刚,等.断层突水机理分析[J].煤炭学报,1996,21(2):119-123.
LI Liangjie, QIAN Minggao, LI Shugang, et al. Mechanism of water inrush through fault[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2):119-123.
- [5] 许延春,李见波.注浆加固工作面底板突水“孔隙-裂隙升降型”力学模型[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):49-55.
XU Yanchun, LI Jianbo. “Pore-fractured lifting type” mechanical model for floor water inrush of the grouting enforcement working face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1):49-55.
- [6] 许延春,李见波.注浆加固防治底板突水机理与应用[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [7] LI Jianbo. Water inrush from pregrouting fractures induced by mining activities and its engineering control method optimization[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(5):1-10.
- [8] 王作宇,刘鸿泉.承压水上采煤[M].北京:煤炭工业出版社,1993,14-17.
- [9] 郑大同.地基极限承载力计算[M].北京:建筑工业出版社,1979:73-77.
- [10] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:61.
- [11] 施龙青,邱梅,牛超,等.肥城煤田奥灰顶部注浆加固可行性分析[J].采矿与安全工程学报,2015,32(3):356-362.
SHI Longqing, QIU Mei, NIU Chao, et al. Feasibility analysis of grouting reinforcement of Ordovician top in Feicheng coalfield [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3):356

-362.

- [12] 巨江鹏.龙王沟矿特厚煤层综放面矿压规律研究[D].西安:西安科技大学,2015.

JU Jiangpeng. Research on strata behavior regularity of fully mechanized face with extra-thick coal seam of Long Wang Gou Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.

- [13] 折智.龙王沟矿6上煤采空区下特厚煤层综放面矿压规律研究[D].西安:西安科技大学,2015.

ZHE Zhi. Research on strata behavior regularity of fully mechanized face under on 6 coal mining goaf of Long Wang Gou Coal Mine[D]. Xi'an : Xi'an University of Science and Technology, 2015.

- [14] 马海军.准格尔煤田龙王沟井田成煤环境及煤层厚度变化规律的分析[J].内蒙古石油化工,2006(5):38-40.

MA Dengjun. Analysis of coal forming environment and coal seam thickness change rule in longwanggou mine field of Zhungeer Coal Field[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006(5):38-40.

- [15] 张新荣.酸刺沟煤矿地质力学测试及其应用[J].煤矿开采,2012,17(1):30-33,99.

ZHANG Xinrong. Geomechanical parameters test and its application in Suancigou Colliery[J]. Coal Mining Technology, 2012,17(1):30-33,99.

- [16] 杨浩.大采高综放工作面覆岩结构与支架载荷研究[D].西安:西安科技大学,2017.

YANG Hao. Study on strata structure & the load on support in large mining height top coal caving workface[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.