

渗流条件下不同覆岩结构采动破坏数值分析*

王云平¹, 赵德深^{1,2♣}

(1. 大连大学 辽宁省复杂结构体系灾害预测与防治重点实验室, 辽宁 大连 116622;
2. 大连大学 辽宁省高校重点岩土与结构工程与技术研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 运用有限元软件 (ADINA) 建立二维模型, 模拟分析渗流和采动作用下4种不同覆岩结构的破坏场和孔隙水压力分布特征。结果显示: 岩性结构影响覆岩端部破坏规律, 当上硬下软时, 裂缝带范围以最下位岩层断裂线为界向采空区外侧扩展; 当上软下硬时, 以最下位岩层断裂线为界向采空区内侧方向扩展。硬岩交替型结构, 裂隙带的侧边界则是内外交叉发展; 岩性越硬相应导水裂隙带的高度越高。在其他条件相同时, 导水裂隙带的高度由大到小的顺序为: 坚硬—坚硬型、软弱—坚硬型、坚硬—软弱型和硬软交替型。

关键词: 覆岩结构; 破坏场; 孔隙水压力; 岩性结构

中图分类号: TD32

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0085-06

0 引言

我国受地表水体、松散含水层和基岩含水层等水体侵蚀威胁的煤炭量约占受水体侵蚀威胁煤炭总量的二分之一 (张守仁, 陈佩佩, 2009; 李悦, 2011)。对于富水覆岩工作面来说, 煤层开采时将导致覆岩断裂和弯曲, 使岩层产生变形和破坏, 最终形成覆岩裂隙 (张慈增, 2012; 孙玉杰, 2009)。一旦上覆含水层和导水裂隙带沟通, 富水水体则会涌入或溃入井下, 形成矿井水灾害 (袁景, 2005)。因此, 煤层开采形成的覆岩裂隙是否相互连通以及相互连通的裂隙是否波及到水体是水体下采煤主要考虑的问题 (于水, 2012; 牛学军, 2009; 代长青, 杨本水, 2009)。研究渗流作用下不同采动覆岩结构的破坏场和孔隙水压力的变化规律, 有助于研究采场顶板导水通道分布规律, 对采场顶板透水预测以及如何实现在地表水体下安全采煤有着重要意义。

1 工程概况

1.1 覆岩岩性概况

覆岩的岩性结构对于导水裂隙带形态和高度

的发育具有控制作用, 是主导因素。由于煤层的沉积条件、漫长的地质沉积及地质构造运动作用等原因, 煤层的上覆岩性往往是有多种岩性组成的, 比较典型的覆岩岩性结构有坚硬—坚硬型、软弱—坚硬型、坚硬—软弱型、硬软交替型等。对这4种典型覆岩岩性结构进行模拟研究时, 为了减少开采深度、采厚、煤层倾角、地表水深等因素对不同覆岩力学模型的影响, 将上述条件统一为开采深度 $H = 733$ m, 煤层采出厚度 $M = 9$ m, 倾向长度 $L = 120$ m, 走向长度 $D = 1200$ m, 煤层倾角 $\alpha = 7^\circ$, 地表水库水深按最大水深计 5.58 m。

1.2 不同覆岩结构力学参数的选择

依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(国家煤炭工业局, 2000), 按覆岩单向抗压强度 (σ_t , 单位 MPa) 将覆岩岩性划分为4类, 即: $40 \leq \sigma_t \leq 80$ 的岩层为坚硬岩层; $20 \leq \sigma_t \leq 40$ 的岩层为中硬岩层; $10 \leq \sigma_t \leq 20$ 的岩层为软弱岩层; $\sigma_t \leq 10$ 的岩层为极软弱岩层。结合《岩石力学参数手册》(水利水电科学研究院等, 1991) 和《构造地质力学》(谢仁海等, 2007), 挑选不同覆岩的力学参数, 参照全应力应变实验和《地下水文学原理》(余钟波, 黄勇,

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51274051, 51374045) 资助.

♣ 通讯作者: 赵德深 (1957~), 博士, 教授, 主要从事矿山开采沉陷理论与控制技术.

E-mail: WangYunPingJG211@163.com.

2008), 挑选不同覆岩的水力学参数。

2 数值模型的建立

开采深度 $H = 733$ m, 采厚 $M = 9$ m, 工作面走向长度 $D = 795$ m, 煤层倾角 $\alpha = 7^\circ$, 地表水库水深 5.58 m, 为消除边界影响, 左右各取 280 m、底部取 200 m 作为边界影响区。最终不同覆岩结构的数值模型的尺寸统一为: $Y \times Z = 1\,355$ m \times 802 m, Y 为走向, Z 为深度方向。每次推进 15 m, 共模拟 15 组岩层、1 层煤层、1 层地表水、17 个单元组、5 994 单元、6 234 节点。其中力学约束边界: 左右边界施加水平约束, 底部边界固定, 水平和竖直位移均为零。渗流边界: 左右边界和底部边界设置为不透水边界, 水库表面为自由面。图 1 为计算模型示意图。

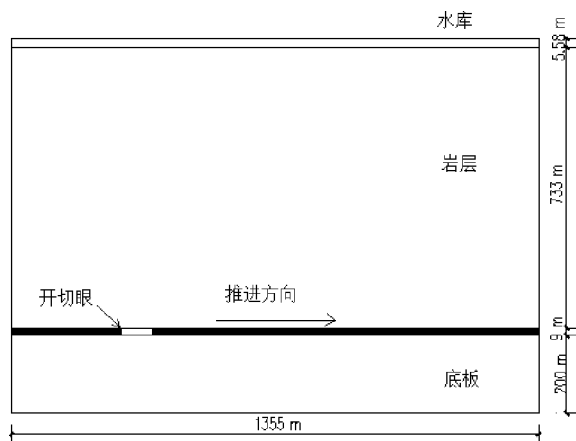


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the calculation model

3 模型分析

3.1 破坏场分析

忽略模型左上角和右上角两侧的第一主拉应力破坏区, 将采空区上方相互贯通的主拉应力破坏区视为导水裂隙带。图 2、图 3 分别表示工作面推进 135 m、405 m 时不同覆岩模型第一主应力场的模拟结果。从中可以看出导水裂隙带的形态随着工作面的不同推进距离在不断变化, 其侧边界纵向发展趋势和最终形态与上覆岩层的岩性有较大的关系。在软弱—坚硬型结构中, 导水裂隙带的侧边界以最下位岩层断裂线为起点向上向采空区外侧 (煤柱侧) 扩展, 而坚硬—软弱型覆岩结

构的导水裂隙带侧边界是以最下位岩层断裂线为起点向上向采空区内侧扩展, 在硬软交替的覆岩结构中, 导水裂隙带的沿纵向发展趋势则是向采空区的内外侧交叉发展。

(1) 当开挖工作面推进 135 m 时, 最大主应力应力场的分布如图 2 所示: 在采空区前后方均出现了“耳朵状”的高主应力区域, 但导水裂隙带的形态和上覆岩层的岩性有很大的关系, 在坚硬—坚硬型结构、软弱—坚硬型结构和坚硬—软弱型结构中出现了两头高, 中间低的“鞍型”破坏形态, 并且导水裂隙带在工作面开切眼一侧的发育高度比推进一侧的发育高度大, 这在坚硬—软弱型结构中尤其明显。在硬软交替覆岩结构中, 覆岩破坏区域出现不连续情况, 在第一硬岩层顶和第二软岩层交界面出现主压力区域, 这是由于第一层的硬岩层跨落后, 第二层的软岩由于失去了支撑随即冒落导致的。导水裂隙带的高度也因上覆岩层岩性的不同而有所不同, 最大为坚硬—坚硬型结构, 其数值为 36 m, 而最小的为硬软交替结构, 其数值为 26 m。

(2) 当开挖工作面推进 405 m 时, 最大主应力应力场的分布如图 3 所示: 导水裂隙带的侧边界向采空区的上方的发展趋势因上覆岩性的不同而有所不同, 软弱—坚硬型覆岩结构和坚硬—坚硬型覆岩结构是以最下位岩层断裂线为起点向上向煤柱侧扩展, 坚硬—软弱型覆岩结构中导水裂隙带的侧边界是以最下位岩层断裂线为起点向上向采空区内侧扩展, 而硬软交替的覆岩结构则是向采空区的内外侧交叉发展。另外, 坚硬—坚硬型的“马鞍形”破坏形态没有其他覆岩结构明显。

(3) 模拟开挖结束后, 导水裂隙带高度因其上覆岩层性不同而存在差异, 覆岩强度越大则导水裂隙带高度越大, 导水裂隙带的高度也因上覆岩层岩性的不同而有所不同, 覆岩强度越大导水裂隙带的高度越大, 导水裂隙带的高度依次为: 坚硬—坚硬型为 196 m、软弱—坚硬型为 180 m、坚硬—软弱型为 176 m、硬软交替型为 136 m。从中可以看出在其他条件相同时, 硬软交替的覆岩结构导水裂隙带的高度最小, 这是由于第一层的硬岩能较快支撑上部的岩层, 另一方面第二层软岩层不易产生裂隙 (即使产生后裂隙也容易闭合), 从而对裂隙的发展起到了抑制作用。

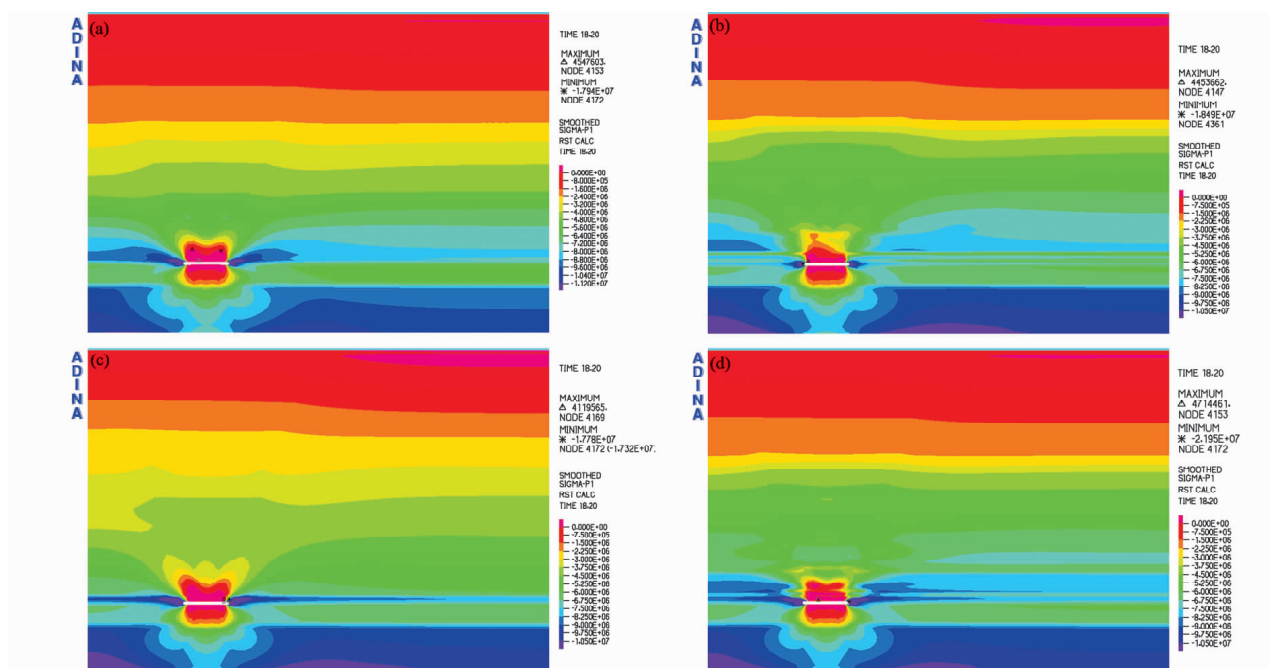


图 2 煤层走向推进 135 m 时不同覆岩模型最大主应力分布图

(a) 坚硬—坚硬型; (b) 软弱—坚硬型 (c) 坚硬—软弱型; (d) 硬软交替型

Fig. 2 Distribution of maximum principal stress field of different overburden models when the excavated surface promoted 135 m along the strike of working face

(a) hard - hard type; (b) soft - hard type; (c) hard - soft type; (d) hard and soft alternating type

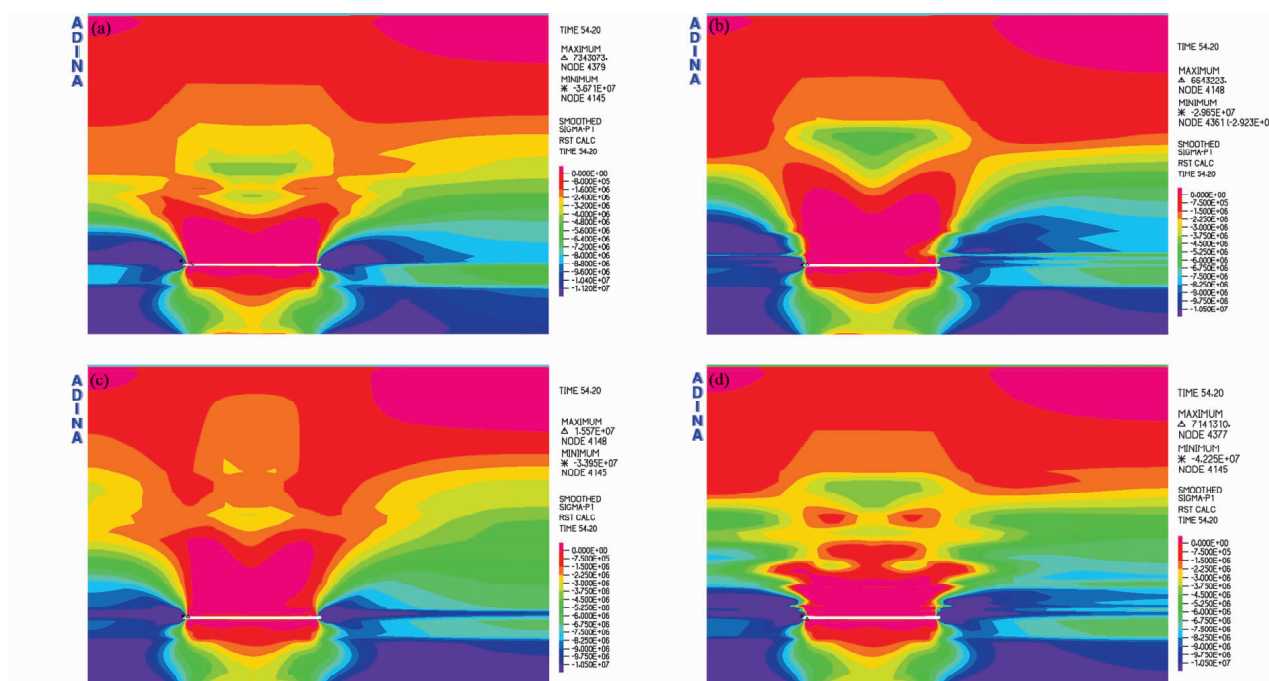


图 3 煤层走向推进 405 m 时不同覆岩模型最大主应力分布图

(a) 坚硬—坚硬型; (b) 软弱—坚硬型; (c) 坚硬—软弱型; (d) 硬软交替型

Fig. 3 Distribution of maximum principal stress field of different overburden models when the excavated surface promoted 405 m along the strike of working face

(a) hard - hard type; (b) soft - hard type; (c) hard - soft type; (d) hard and soft alternating type

通过上述分析可知,在工作面的不同推进过程中导水裂隙带的形态、侧边界的发展趋势和高度都因上覆岩性的不同而有所不同:

(1) 岩性结构影响覆岩端部破坏规律,当为坚硬—软弱型结构时,裂隙带范围就以最下位岩层断裂线为界向采空区外侧扩展;当软弱—坚硬型时,以最下位岩层断裂线为界向采空区内侧方向扩展。

(2) 覆岩岩性越硬,导水裂隙带高度越高。导水裂隙带的高度由大到小的顺序为:坚硬—坚硬型结构、软弱—坚硬型结构、坚硬—软弱型结构、硬软交替型结构。

(3) 导水裂隙带的形态随着工作面的不断推进在不断变化。如坚硬—软弱型结构开始时其形态为两头高中间低的“马鞍型”,最终为梯形。

3.2 孔隙水压力分析

水体下采煤时,回采扰动会导致岩层和土层的隔水性受到不同程度的破坏。受采动影响的程度,与采动引起的岩层变形性质和岩层本身性质有关。如岩层和土层处于拉伸变形状态,同时拉伸变形达到一定数值时,岩层和土层会发生垂直

和水平方向的张开裂缝。如果这些裂缝能够形成一个彼此连接的通道,则岩层和土层的隔水性会遭到破坏。同时在采动影响下,刚性、脆性岩层的隔水性容易遭到破坏。孔隙水压力的存在,改变了裂隙岩体的本构特征,进而影响其变形。岩体应力应变关系与孔隙水压力的大小变化和梯度分布有直接影响。

(1) 当开挖工作面推进 135 m 时,孔隙水压力的分布如图 4 所示:在采空区上方覆岩均出现了孔隙水压力增大区域,根据 Terzaghi 的有效应力定律和饱水岩体库伦强度准则,该区域的孔隙水压力升高越多,其强度降低就越多,越容易形成破坏区。但由于上覆岩层岩性的不同,出现孔隙水压力增大区域的高度是不同的,如坚硬—坚硬型结构孔隙水压力增大区域是在工作面顶板上 31 ~ 70 m 范围内,而软弱—坚硬型孔隙水压力增大区域是在工作面顶板上方的 21 ~ 46 m,这与工作面推进 135 m 时坚硬—坚硬型结构的导水裂隙带高度为 36 m、软弱—软弱型结构的导水裂隙带的高度为 26 m 是相符的。

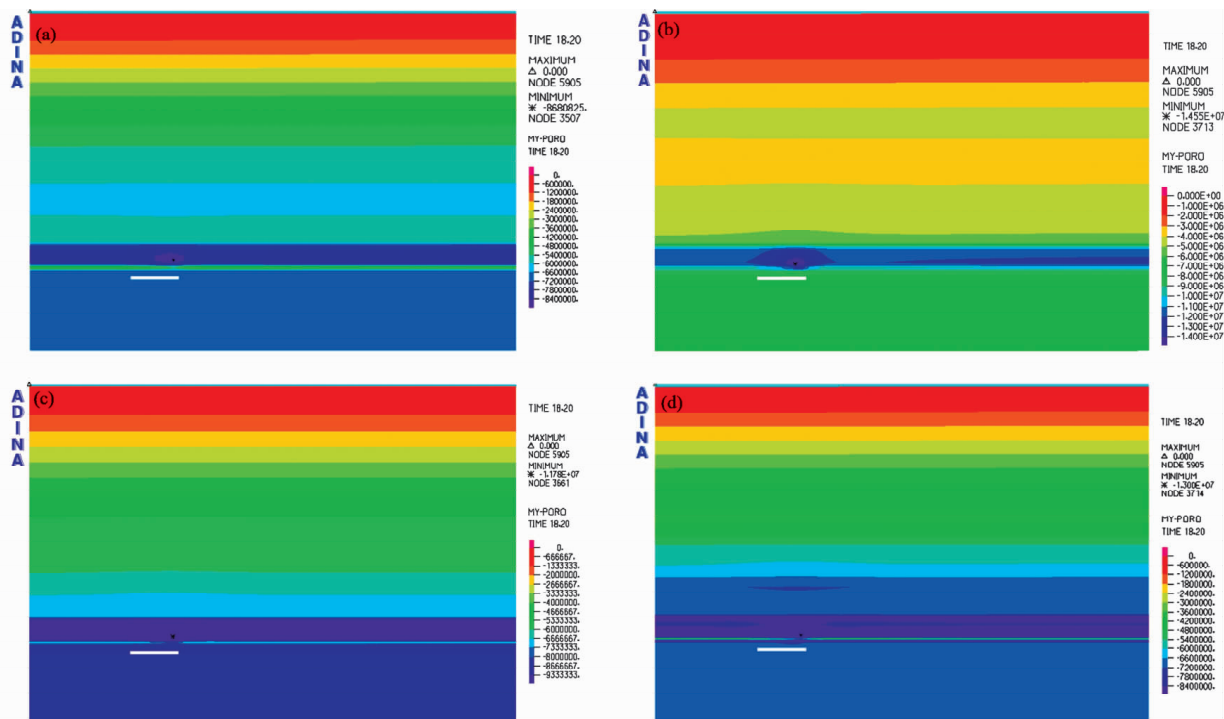


图 4 煤层走向推进 135 m 时不同覆岩模型孔隙水压力分布图

(a) 坚硬—坚硬型; (b) 软弱—坚硬型; (c) 坚硬—软弱型; (d) 硬软交替型

Fig. 4 Distribution of pore water pressure of different overburden models when the excavated surface promoted 135 m along the strike of working face

(a) hard - hard type; (b) soft - hard type; (c) hard - soft type; (d) hard and soft alternating type

(2) 当开挖工作面推进 405 m 时, 孔隙水压力的分布如图 5 所示: 随着煤层向前推进, 回采扰动影响加剧, 采空区上方高孔隙水压力区域的高度相对于工作面推进 135 m 时有所增加, 最大孔隙

水压力因上覆岩层的不同而有所不同, 从大到小依次为: 软弱—坚硬型为 15.83 MPa、硬软交替型为 14.48 MPa、坚硬—软弱型为 13.27 MPa、坚硬—坚硬型为 9.0 MPa。

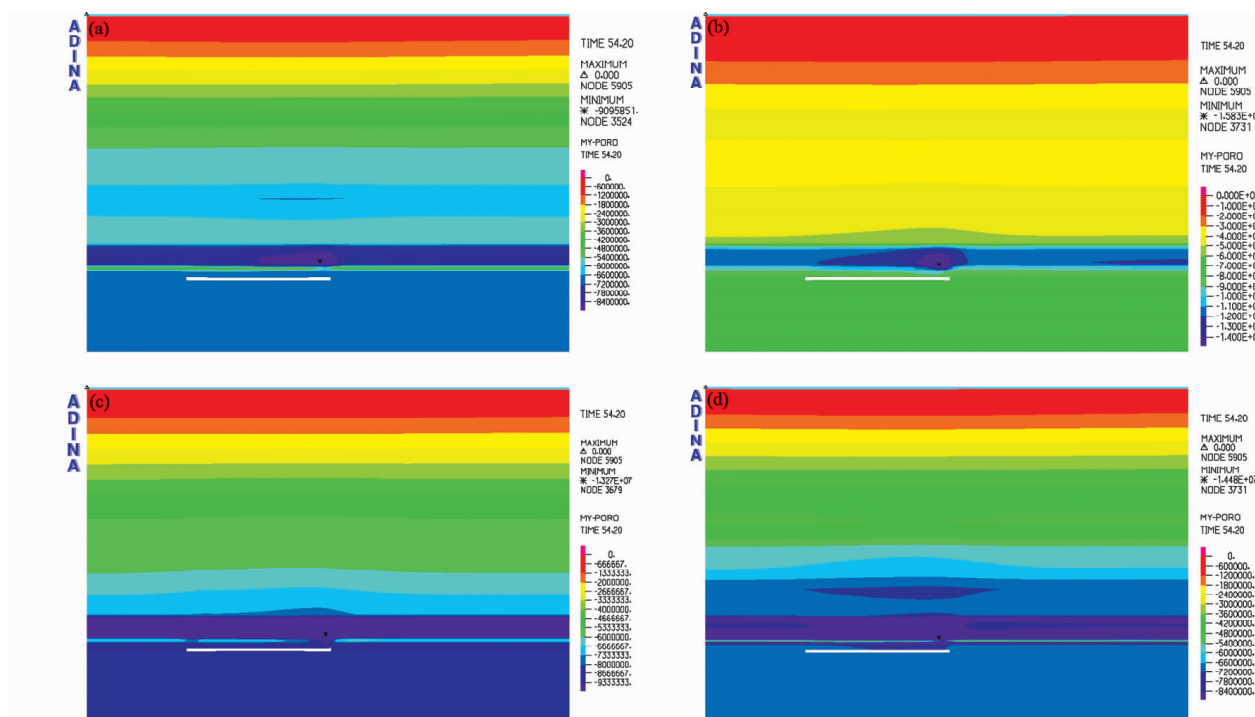


图5 煤层走向推进 405 m 时不同覆岩模型孔隙水压力分布图

(a) 坚硬—坚硬型; (b) 软弱—坚硬型; (c) 坚硬—软弱型; (d) 硬软交替型

Fig. 5 Distribution of pore water pressure of different overburden models when the excavated surface promoted 405 m along strike of working face

(a) hard - hard type; (b) soft - hard type; (c) hard - soft type; (d) hard and soft alternating type

(3) 模拟开挖结束后, 上覆岩层高孔隙水压力区域发生新的变化, 如坚硬—坚硬型结构的高孔隙水压力区域在工作面上方的 208.2 m、软弱—坚硬型结构为 196 m、这与模拟结束时坚硬—坚硬型结构的导水裂隙带高度为 196 m、软弱—坚硬型结构为 180 m 是相符的, 这说明在高孔隙水压力区域容易形成渗透性增加带, 形成覆岩破坏。

通过上述分析可知, 由于采空区的开挖, 工作面 and 开切眼附近出现的高孔隙水压力区导致了该部分区域的有效应力降低, 使得该部分覆岩强度降低, 容易形成渗透性增加带和覆岩破坏区。但在采空区上方出现的高孔隙水压力区域离采空区的高度因上覆岩层岩性的不同而有所不同, 高孔隙水压力区域离采空区的高度从大到小依次为: 坚硬—坚硬型结构、软弱—坚硬型结构、坚硬—软弱型结构、硬软交替型结构, 这与不同覆岩结

构的导水裂隙带的高度是相符的。

4 结论与讨论

本文通过二维模型分析了 4 种不同覆岩结构的破坏场和孔隙水压力分布规律, 得出以下结论:

(1) 岩性结构影响覆岩端部破坏规律。当结构为坚硬—软弱型时, 裂缝带范围以最下位岩层断裂线为界向采空区外侧扩展; 当结构为软弱—坚硬型时, 以最下位岩层断裂线为界向采空区内侧方向扩展; 当为硬软交替型结构时, 裂隙带的侧边界则是内外交叉发展。

(2) 覆岩岩性越硬, 相应的导水裂隙带的高度越高。在其他条件相同时, 导水裂隙带的高度由大到小的顺序为: 坚硬—坚硬型结构、软弱—坚硬型结构、坚硬—软弱型结构、硬软交替型

结构。

(3) 随着回采面向前的推进,高孔隙水压力的区域不断扩大,其数值也逐渐增加,工作面顶板渗透性增强带在不断扩大。不同覆岩结构的高孔隙水压力区域是不同的,其范围与相应覆岩结构的导水裂隙带范围基本相符。

参考文献:

- 代长青,杨本水.2009.含水松散层下煤层开采覆岩破坏规律的数值模拟研究[J].露天采矿技术,(3):32-34,76.
- 国家煤炭工业局.2000.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社.
- 李悦.2011.四川省华蓥山矿区龙滩煤矿岩溶突水特征与预测研究[D].成都:成都理工大学.
- 牛学军.2009.长清矿区开采对黄河水利工程和环境的影响研究[D].青岛:山东科技大学.
- 水利水电科学研究院,水利水电规划设计总院,水利电力情报研究所.1991.岩石力学参数手册[M].北京:水利电力出版社.
- 孙玉杰.2009.裂隙岩体渗流应力耦合机制研究及突水数值模拟[D].武汉:长江科学院.
- 谢仁海,渠天祥,钱光漠.2007.构造地质学[M].徐州:中国矿业出版社.
- 于水.2012.含水层下特厚煤层综放开采覆岩破坏规律研究[D].西安:西安科技大学.
- 余钟波,黄勇.2008.地下水文学原理[M].北京:科学出版社.
- 袁景.2005.谢桥煤矿1201(3)工作面覆岩导水裂缝带高度预测[D].阜新:辽宁工程技术大学.
- 张慈增.2012.影响采煤工作面矿山压力的因素分析[J].内蒙古煤炭经济,(8):24-25.
- 张守仁,陈佩佩.2009.大型水体下开采安全性评价[J].煤矿开采,(4):43-46,65.

Numerical Analysis of Mining Failure of Different Overburden Structures under Seepage Condition

WANG Yunping¹, ZHAO Deshen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Liaoning Province for Prediction & Control on Complicated Structure System, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

(2. Key Geotechnical & Structural Engineering Research Center of University in Liaoning Province, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract

Taking the working face of a coal mine as the research object, we established the two-dimensional model by using the finite element software ADINA, and simulated and analyzed the damage field and pore-water pressure distribution characteristics of four kinds of different overburden structures under the action of seepage and mining. The results show that the lithological structure affects the failure law of the end of overburden rock. When the upper stratum is hard and type of rock is hard-soft the lower stratum is soft, the fracture zone extends to the outside of the mined out area, which takes the limit of fault line of the lowest stratum. When the upper stratum is soft and the lower stratum is hard, the fracture zone extends to the inside of the mined out area, which takes the limit of fault line of the lowest stratum. When the type of rock is alternating hard and soft, the lateral boundary of the fracture zone presents cross-development of internal and external. The higher the lithology is, the higher the hydraulic fracture zone is. When other conditions are the same, the heights of the water flowing fractured zone are in the following descending order: hard-hard type, soft-hard type, hard-soft type, hard and soft alternating type.

Key words: overburden structures; failure field; pore water pressure; lithological structure