

文章编号:0253-9993(2011)03-0357-09

低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体

袁 亮¹, 郭 华², 沈宝堂², 屈庆栋², 薛俊华¹

(1. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Queensland 4069, Australia)

摘 要:以顾桥煤矿 1115(1)工作面为试验点,运用国际先进的岩层应力、位移、孔隙流压等实时监测手段,围岩变形与水、气耦合的 COSFLOW 数值模拟技术以及研究采动区流场特征的 CFD 模拟技术,系统研究并基本掌握了 11 号煤层深部煤层开采过程中的围岩应力场、裂隙场以及瓦斯流动场之间的动态变化规律。研究表明,采动支承压力影响范围可达 300 m,覆岩运动和采动裂隙发育范围在工作面后方 170 m 以内,170 m 以后采动裂隙基本压实,采动裂隙发育高度以及孔隙流压明显降低的高度可达 145 m。在此基础上判別了 1115(1)工作面上覆煤层群瓦斯高效抽采范围,并初步建立了低透气性煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体及其判別方法,为煤与瓦斯共采理论发展以及工程实践提供了一套新的科学研究方法和工程设计手段。

关键词:煤层群;煤与瓦斯共采;裂隙体;深井**中图分类号:**TD712.6 **文献标志码:**A

Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of mutiple coal seams with low permeability

YUAN Liang¹, GUO Hua², SHEN Bao-tang², QU Qing-dong², XUE Jun-hua¹

(1. National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Huainan 232001, China; 2. The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Queensland 4069, Australia)

Abstract: Presented key results from a recent comprehensive research programme based on integrated field monitoring of mining induced overburden displacement, stress and pore pressure changes at the longwall panel 1115 (1) of the Guqiao Coal Mine, and coupled modelling of strata and fluid behaviours using COSFLOW software, and gas flow simulations at the longwall panel with CFD software. Studied and got the complex dynamics of the interaction between mining induced strata stress changes, fractures, gas flow patterns. The results show that effective range of abutment pressure by mining can reach near 300 m, the range of overburden strata movement and mining-induced fractures area is within 170 m after working face, and beyond the range the fractures are generally compacted, development height for mining-induced fractures of overburden rock and the height of crack zone with flowing pressure dropping remarkably both can reach 145 m. Based on these, methane drainage scope with high efficiency in overlying coal seam group of working face 1115(1) were obtained, and a new concept that a circular overlying zone existed at the longwall panel for efficient methane capture, and a practical method that helped define the geometry and boundary of this zone. The outputs of the research programme provide a unique methodology and a set of engineering principles of planning for optimal co-extraction of coal and methane.

Key words: multiple coal seams; co-extraction of coal and methane; overlying zone; deep mining

煤与瓦斯共采是将煤炭开采与瓦斯抽采综合为一体的资源开发模式,是采煤与采气两个系统的有机

结合^[1-3]。煤炭开采促使了瓦斯的解吸与流动,为瓦斯抽采创造了有利条件,同时煤炭的采掘、通风系统为瓦斯抽采提供了操作空间。反过来,高效的瓦斯抽采降低了采场瓦斯浓度和煤层瓦斯含量,可有效防治瓦斯爆炸和消除煤与瓦斯突出危险,保障和促进煤炭的安全高效开采^[1-10]。

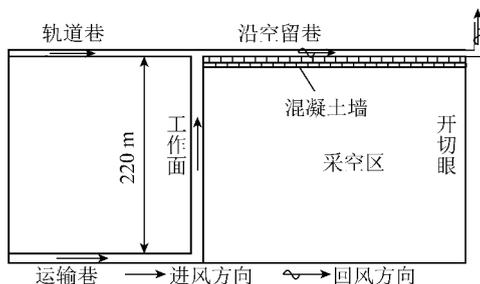
理论和实践表明,煤与瓦斯共采是高瓦斯低透气性煤炭资源高效安全开采的有效模式,近年来在中国、澳大利亚及其它国家都得到了很快的发展^[1,3,10-18]。但煤与瓦斯共采作为一个系统工程来讲,它的理论关键也即采动应力场、裂隙场、瓦斯流动场之间动态变化规律的认识还不够透彻,还缺乏翔实的现场实测数据提供强有力的理论研究支撑^[1,3,14-15]。

鉴于此,淮南矿业集团与澳大利亚联邦科学与工业研究院(CSIRO)以顾桥煤矿 1115(1)深部开采工作面为试验点,开展了系统的深井煤与瓦斯共采基础理论方面的现场实测和理论研究。

1 1115(1)工作面开采条件

顾桥煤矿位于淮南潘谢矿区中西部,东距凤台县城约 20 km,是年设计生产能力 1 000 万 t 的特大型现代化矿井。顾桥井田具有新生界松散层厚、煤层埋藏深、可采煤层多以及瓦斯较大、地温较高等多种复杂地质特征。井田二叠系含煤层段总厚 734 m,含煤 33 层,可采煤层 9 层,平均可采总厚 24.11 m。主采煤层 5 层,分别为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6-2 煤、1 煤。矿井目前主要开采 11-2 和 13-1 煤层,瓦斯含量分别处于 1.96~13.20 m³/t 和 2.7~12.9 m³/t,均为低透气性煤层。

1115(1)工作面开采 11-2 煤层,平均煤厚 3.0 m,倾角 3~8°,平均 5°,煤层埋深为 -640~-760 m,其中地表厚度为 400~450 m,基岩厚度 240~300 m,为典型的厚表土层、薄基岩地层特征。工作面走向长 2 600 m,倾斜宽 220 m,走向长壁后退式综采工艺,一次采全高,全部冒落法管理顶板。工作面采用两进一回的“Y”型通风方式,轨道巷、运输巷均为进风巷,其中轨道巷保留为沿空留巷,巷旁充填。工作面两侧 200 m 范围内以及上下煤层均未开采。邻近含瓦斯煤层主要为上覆 75 m 的 13-1 煤和 179 m 的 17-2 煤,平均厚度分别为 3.5 m 和 1.4 m。1115(1)工作面开采布置方式以及地层结构如图 1 所示。



| 煤、岩层 | 厚度/m | 底板深度/m | 距开采层高度/m |
|-------|-------|--------|----------|
| 土层 | 453.2 | 453.2 | |
| 岩层 | 102.0 | 555.3 | |
| 17-2煤 | 1.4 | 556.6 | 178.9 |
| 岩层 | 100.8 | 657.4 | |
| 13-1煤 | 3.5 | 660.9 | 74.6 |
| 岩层 | 74.6 | 735.5 | |
| 11-2煤 | 3.0 | 738.5 | |

图 1 1115(1)工作面开采布置方式及地层结构

Fig. 1 Layout system and strata structure of workface 1115(1)

2 1115(1)工作面围岩运动、应力、流体压力综合监测

2.1 总体监测方案

为对围岩应力场、裂隙场和瓦斯流场之间的动态规律进行深入研究,针对淮南地质条件,应用国际先进的监测手段,有针对性地设计了一体化的同步实时监测系统,对 1115(1)工作面开采进行了全面、系统的监测,总体监测方案如图 2 所示。监测点集中在距切眼 1 300 m 左右的工作面走向长度中间位置。

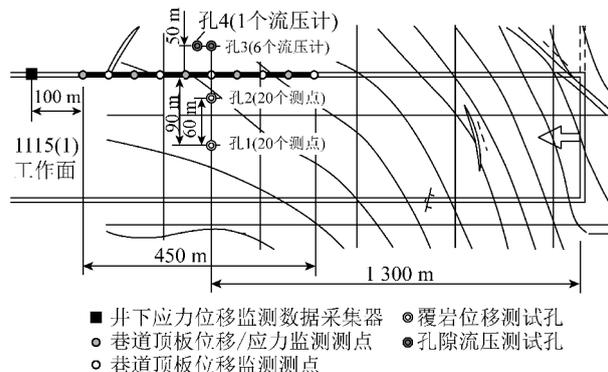


图 2 1115(1)工作面总体监测方案

Fig. 2 General arrangement of monitoring schematic in workface 1115(1)

监测内容主要包括:

(1) 巷道顶板应力和位移。在距切眼 1 100~1 550 m 之间的轨道巷内布置了 10 个测站。每个测站布置 1 个顶板相对位移监测孔,每孔安装 5 个位移计,分别监测巷道顶板 8、6、4、2、1 m 之间的相对位移。每

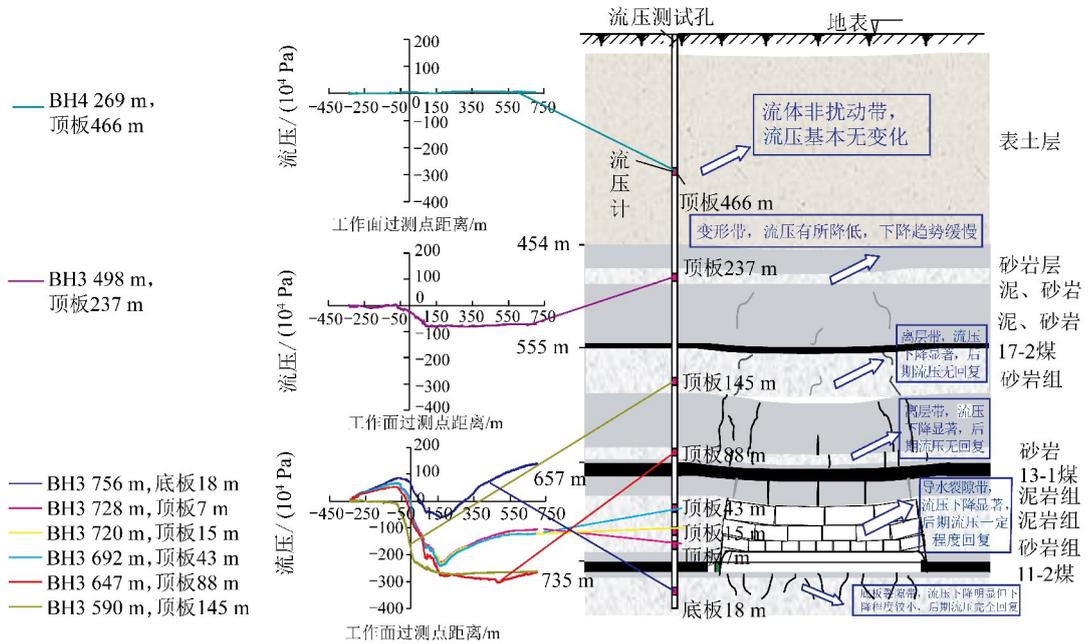


图6 围岩孔隙流压变化监测结果及与裂隙分布之间的对应关系

Fig. 6 Corresponding relation between crack distribution and flowing pressure in surrounding rock

力和裂隙影响。

(3)工作面前方300 m始孔隙流压便开始增加,表明超前支承压力影响范围可达300 m;工作面后方170 m内孔隙流压持续显著下降,表明采动裂隙的发育范围在工作面后方170 m内;170 m后孔隙流压或上升或处于稳定,表明此后采动裂隙基本压实。

3 围岩采动影响和瓦斯运移的三维数值模拟

为由点到面到体地去研究1115(1)工作面应力场、裂隙场和瓦斯流场的动态变化规律,在现场监测数据的基础上,应用CSIRO和日本NEDO、JCOAL共同研发的COSFLOW模拟软件以及CFD数值模拟商业软件,开展了系统的三维数值模拟研究。

3.1 COSFLOW 三维数值模型

COSFLOW是一个集固、气、液三相耦合的、可并行运算的三维有限元数值模拟软件,其节理模型建立在Cosserat理论上,特别适用于层状岩体的应力、位移及其它相关规律的数值分析。

为对COSFLOW模拟提供切实可靠的地质模型,基于顾桥煤矿136个钻孔岩芯柱状,利用Minescape、Gocad等地质软件,建立了顾桥井田三维地质模型。除此之外,对1115(1)开采区域钻孔岩芯进行了力学测试,掌握了不同岩性围岩的基本力学参数。COSFLOW数值计算模型便是在三维地质模型和围岩基本力学参数基础上,依据1115(1)工作面的实际开采尺寸建立的,如图7所示。模型计算范围为10 000 m×9 000 m×1 200 m(长×宽×高),总计

1 245 951个计算单元。

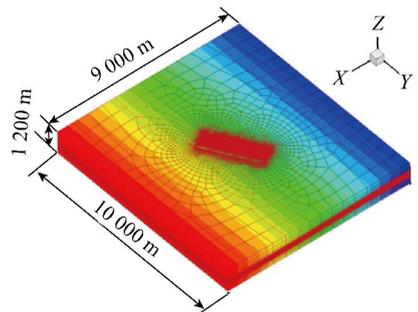


图7 COSFLOW 三维计算模型及网格划分

Fig. 7 3-D calculation model of COSFLOW and mesh generation

3.2 采动应力的动态变化

图8为1115(1)工作面顶板竖向应力在走向和倾向上的变化规律,可见:

(1)在工作面推进方向上,竖向应力呈现增加、降低、回复和稳定4个变化过程。其中超前支承压力的影响范围达300 m;卸压范围在工作面后方150~200 m以内,之后应力回复稳定。应力变化规律与覆岩运动、孔隙流压、巷道顶板运动的实测结果一致,表明了模拟结果的可信性。

(2)在工作面倾向上,工作面外侧支承压力影响范围同样可达300 m。采动区中部应力随工作面推过距离的增加而逐渐回复,但两侧保持一定宽度的卸压区域。

在瓦斯吸附-解吸动态平衡过程中,如瓦斯处于饱和吸附状态,吸附瓦斯将随着煤体卸压而解吸;如

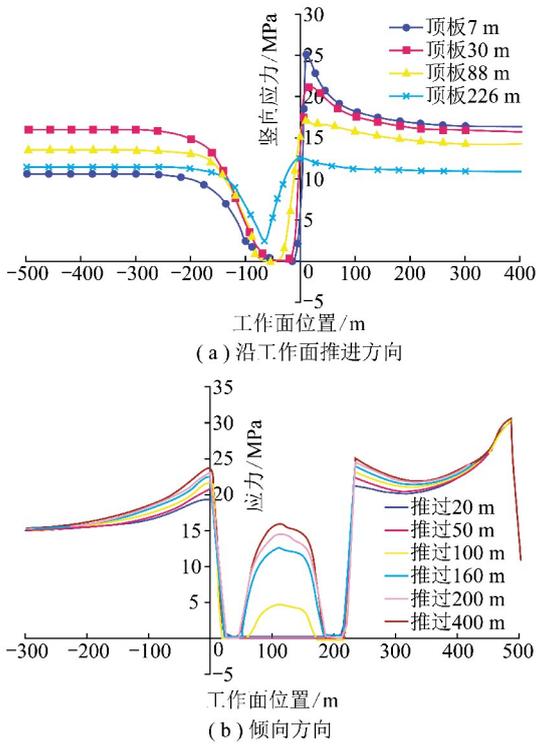


图8 覆岩竖向应力变化的模拟结果

Fig. 8 Simulation results of vertical stress in overlying strata

瓦斯处于非饱和吸附状态,则需要煤体达到一定的卸压程度使得孔隙气体压力降低至瓦斯临界解吸压力时方能使瓦斯解吸,这个卸压程度针对瓦斯解吸和抽采来讲可称为有效卸压。瓦斯吸附饱和度越低,瓦斯大量解吸需要的卸压程度越高。为便于分析煤体卸压程度的变化规律,定义卸压系数 r 来反映,即

$$r = 1 - \frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}} \quad (1)$$

其中, σ_z 为煤岩某点采动后的竖向压力; σ_{z0} 为该点的原始压力。根据 COSFLOW 三维数值模拟结果,可建立如图9所示的1115(1)工作面采动区覆岩卸压系数的基本模型。

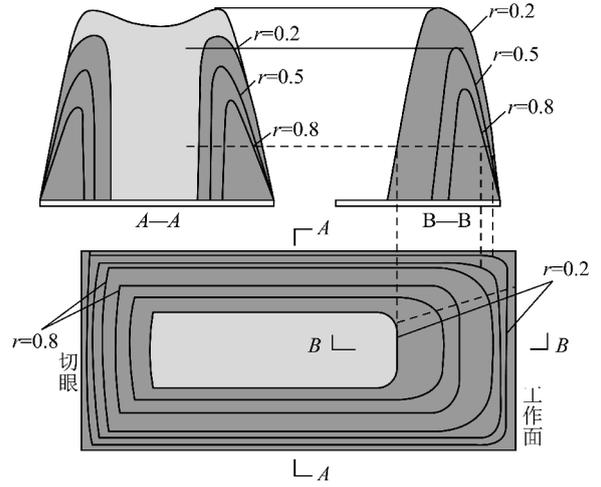
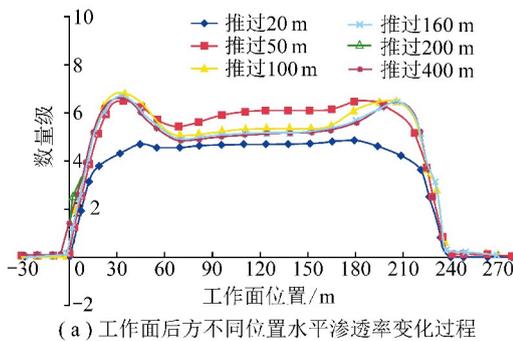


图9 采动区覆岩卸压系数分布的基本模型

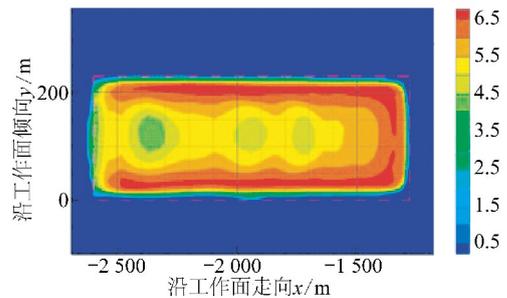
Fig. 9 Basic model of destressing coefficient distribution of overburden rock in mining subsidence area

3.3 围岩渗透率的动态变化

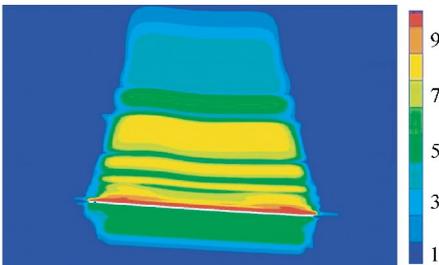
实现瓦斯的高效抽采,除具有较高的瓦斯解吸程度外,还需大范围内较高且连续的煤岩渗透率。图10为COSFLOW模拟的1115(1)工作面覆岩水平渗透率变化特征。可得,渗透率的明显增加,主要发生



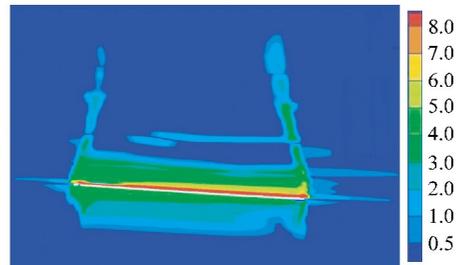
(a) 工作面后方不同位置水平渗透率变化过程



(b) 顶板水平渗透率分布



(c) 倾向剖面上水平渗透率分布



(d) 倾向剖面上竖向渗透率分布

图10 覆岩渗透率分布的模拟结果

Fig. 10 Simulation results of permeability distribution in overlying strata

在工作面卸压区域内;倾向方向上的渗透率分布具有明显的马鞍形特征;中部覆岩渗透率随工作面推进出现增加、降低和稳定的变化过程,但侧部一定范围内保持较高的渗透率;平面上看,采动区周边渗透率高于采动区中部,高渗透率的分布呈现“环形”分布特征。

渗透率的变化与采动应力、裂隙存在着相互对应的关系。COSFLOW 结果表明:随覆岩压力的降低和回复,采动裂隙相应的张开和闭合,渗透率也即相应的出现增加和减弱的变化趋势;覆岩渗透率增加区域的边界角与采动卸压角也是一致的。

煤层渗透率存在着大小和方向之分,它们对瓦斯流动和抽采十分重要。从渗透率的变化特征可见,覆岩裂隙发育范围内具有贯通渗透和水平渗透两个区域特征。其中贯通渗透区内穿层裂隙与离层裂隙并存,水平和竖向渗透率均较高,表明气体在水平和竖向上可贯通流动;水平渗透区主要发育离层裂隙,穿层裂隙较弱,水平渗透率远远高于竖向渗透率,表明气体主要在水平方向上流动。

根据覆岩渗透率的分布规律及其与覆岩卸压、采动裂隙之间的关联关系,建立如图 11 所示的 1115(1)工作面覆岩渗透率分布的基本模型。

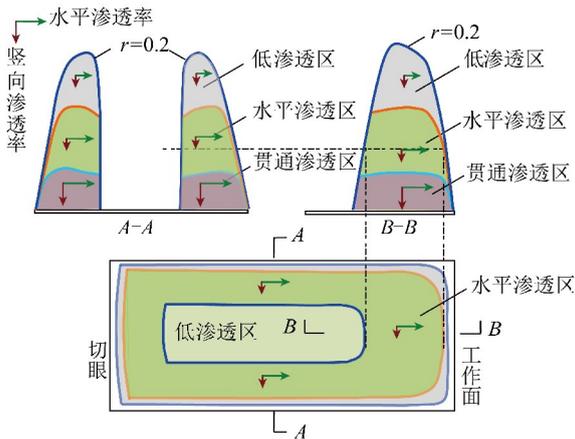


图 11 覆岩裂隙发育区渗透率分布基本模型
Fig. 11 Basic model of permeability distribution in fractured area in overlying strata

3.4 瓦斯动态运移的 CFD 数值模拟

采动卸压瓦斯运移是在瓦斯涌出压力、矿井通风以及瓦斯抽采共同作用下的瓦斯动态流动。为掌握采动卸压瓦斯运移规律,在 1115(1)工作面瓦斯涌出监测及 COSFLOW 模拟结果的基础上,利用计算流体力学(CFD)技术,对抽采条件下的瓦斯动态运移规律进行了三维数值模拟研究。

3.4.1 CFD 计算模型

CFD 计算模型完全按照 1115(1)工作面实际尺

寸进行设计,图 12 为建立的计算模型及其网格划分。模型顶板的梯形体结构是按照 COSFLOW 模拟的覆岩走向和倾向上渗透率变化的边界角为 80° 进行设计的。

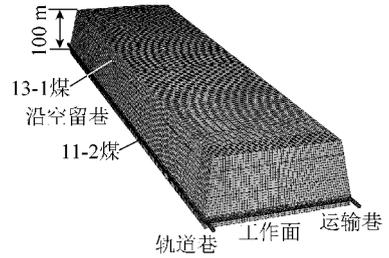


图 12 CFD 计算模型及网格划分

Fig. 12 Calculation model of CFD and mesh generation

CFD 模型瓦斯来源以及流场参数按照 1115(1)工作面瓦斯涌出量的实测结果以及淮南矿区实际经验^[3]进行设置。模型瓦斯释放总量为 $25 \text{ m}^3/\text{min}$,其中工作面煤壁和落煤占 25%,采空区遗煤占 5%,上邻近煤层 13-1 占 70%。模型总供风量 $2\,720 \text{ m}^3/\text{min}$,其中运输巷 $2\,200 \text{ m}^3/\text{min}$,轨道巷 $520 \text{ m}^3/\text{min}$ 。模型渗透率分布则参考 COSFLOW 数值模拟结果以及 CSIRO 多年的研究经验^[5]进行函数设计。

模拟的瓦斯流场与 1115(1)工作面开展的采动区瓦斯运移规律的束管监测以及气体示踪实验结果进行了校核,以提高模型结论的可靠性。

3.4.2 采动区瓦斯浓度分布特征

1115(1)工作面采动区瓦斯浓度分布呈现的一般特征:瓦斯浓度随采动区高度、在工作面后方距离和距采动区倾向边界距离的增加而增加;低浓度($< 30\%$)瓦斯分布在采动区前方和两侧边缘部位,最大高度一般在贯通渗透区中部位置,深入采动区走向长度在“Y”型通风下可至切眼远处。“Y”型通风采动区瓦斯浓度分布的模拟结果如图 13 所示。

3.4.3 抽采下的瓦斯运移特征

图 14 为采动区切眼附近一垂直钻孔抽采下的瓦斯运移模拟结果,抽采下的瓦斯运移特征有:①瓦斯在采动区周边流动明显,流动范围很大,形成一“环形”流动通道;②采动区一定高度的煤层,其瓦斯流动的途径为先水平流动至采动区周边,再沿采动区周边流动。

4 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体

4.1 煤层群瓦斯高效抽采范围的判别原则

高效瓦斯抽采应具备持续稳定的高流量和高瓦斯浓度两个基本条件。实现高效瓦斯抽采,抽采钻孔

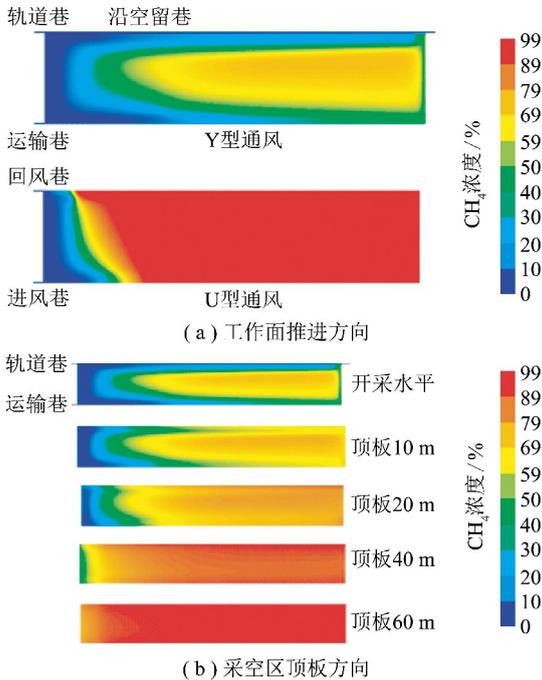


图13 采动区瓦斯浓度分布的模拟结果

Fig. 13 Simulation results of methane concentration distribution in mining subsidence area

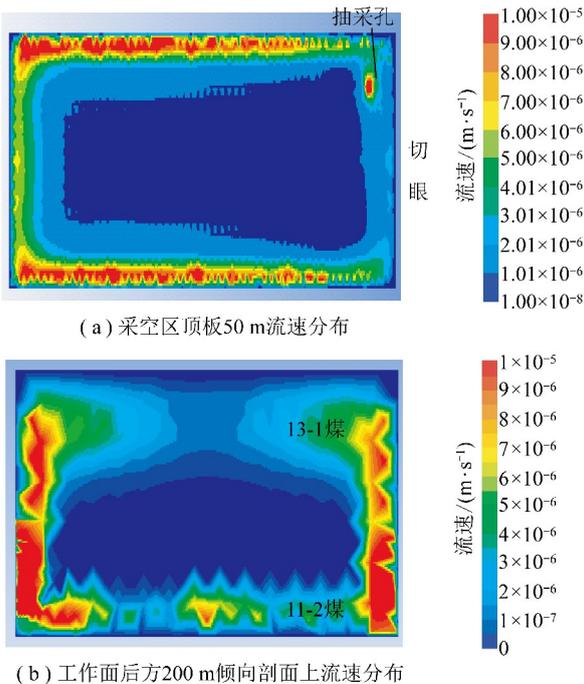


图14 抽采下的瓦斯运移规律

Fig. 14 Gas migration regularity under extraction

应布置在高瓦斯解吸程度、高渗透率、高抽采瓦斯浓度的区域中。根据对覆岩卸压、渗透率分布、抽采瓦斯动态运移规律的研究和认识,可建立如下煤层群高效瓦斯抽采范围的基本判别原则。

(1)高瓦斯解吸程度:基于煤层具体条件,确定煤层瓦斯达到显著解吸时的有效卸压系数,根据覆岩

卸压基本模型,判定高瓦斯解吸程度的范围。

(2)高渗透率:确定采动裂隙发育和开始压实的区域,根据覆岩渗透率分布基本模型,判定贯通渗透区和水平渗透区的范围;高效瓦斯抽采范围的上边界高度不超过水平渗透区上界。

(3)高瓦斯抽采浓度:确定抽采瓦斯浓度的最低要求,根据抽采瓦斯动态运移规律,判定高抽采瓦斯浓度的范围。

基于上述判别结果,可综合判定煤层群瓦斯高效抽采范围。

4.2 1115(1)工作面上覆煤层群瓦斯高效抽采范围的判别

4.2.1 有效卸压系数和裂隙压实时时的卸压系数判别

1115(1)工作面上覆13-1煤层瓦斯含量为 $5.7 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯压力为 $1.4 \sim 5.9 \text{ MPa}$ 。根据该煤层瓦斯等温吸附曲线,13-1煤层孔隙气体压力降至 0.7 MPa 以下时方能达到瓦斯解吸条件。这表明,要实现13-1煤层瓦斯高效抽采,需具有很大的煤岩卸压程度。根据淮南现场实践经验^[3]和COSFLOW模拟结果,初步确定11-2上覆煤层的有效卸压系数为0.8。

1115(1)工作面后方170 m以后采动裂隙基本压实,根据COSFLOW模拟结果,该位置时的煤体卸压系数约为0.2,由此初步判定采动裂隙压实时时的卸压系数为0.2。

4.2.2 瓦斯高效抽采范围上边界的判别

现场实测表明1115(1)工作面覆岩裂隙发育高度可达145 m,COSFLOW模拟的1115(1)工作面覆岩卸压系数达到0.8的高度为139~160 m,水平渗透区高度在150 m左右。综合现场实测以及COSFLOW模拟结果,初步判定瓦斯高效抽采范围的上边界高度为145 m。

4.2.3 瓦斯高效抽采范围下边界的判别

CFD模拟的抽采下采动区低浓度瓦斯($<30\%$)分布的高度可达30 m。COSFLOW模拟的覆岩贯通渗透区高度可达54 m。综合判断瓦斯高效抽采范围的下边界高度为30 m。

4.2.4 瓦斯高效抽采范围四周边界的判别

根据有效卸压系数0.8和裂隙压实的卸压系数0.2,基于COSFLOW模拟结果及覆岩卸压基本模型,可得瓦斯高效抽采范围的有效卸压角在走向上为 75° ,倾向上为 78° 。裂隙压实边界的延展角在走向上为 79° ,倾向上为 91° 。高效抽采范围在采空区水平上的走向投影长度为170 m,倾向一侧投影宽度为75 m。

4.3 采动煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体

基于 4.2 节各参数的判别,建立如图 15 所示的 1115(1)工作面上覆煤层群瓦斯高效抽采范围。从其结构特征上看,它在形状上表现为采空区一定高度之上、具有一定宽度、按一定角度往上延展的一个“环形裂隙体”结构,因而可称之为瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体。

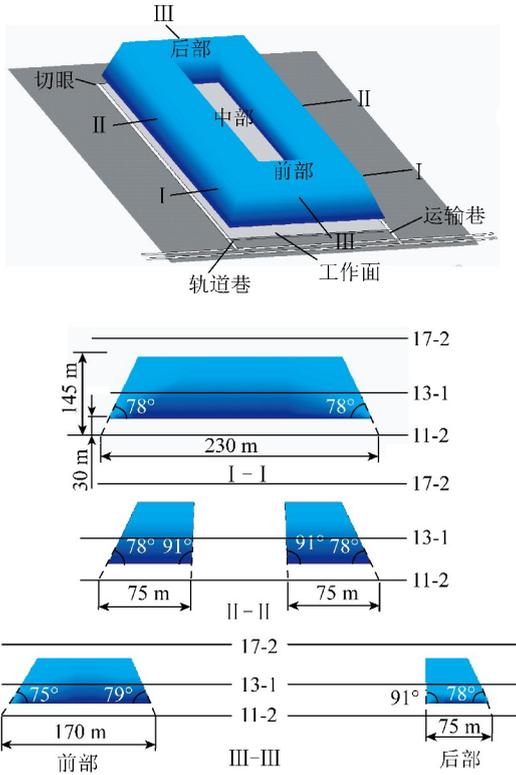


图 15 1115(1)工作面上覆煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体

Fig. 15 Circular overlying zone for gas extraction with high efficiency in overburden coal seams of working face 1115(1)

采动煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体在结构上具有如下特征:

(1)走向上可分为前、中、后 3 个部分。前部紧邻工作面,贯穿采动区倾向宽度,为煤层瓦斯解吸涌出的主要区域;中部沿采动区两侧与前部、后部连通,形成可以使瓦斯大范围内流动的前后通道;后部位于切眼附近,范围小于前部,结构特点更加趋近于中部倾向结构。

(2)倾向剖面上,高位环形裂隙体沿一定角度往上延展,外边界延展角与内边界延展角不同。

(3)走向剖面上,高位环形裂隙体保持在采空区一定高度之上,沿一定角度往上延展,前部范围大于后部范围。

高位环形裂隙体全面、形象、明确的界定了上覆煤层群瓦斯高效抽采的范围,对于顾桥煤矿 1115(1)

工作面及类似开采条件下煤层群煤与瓦斯共采工程设计具有指导意义。

4.4 煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体的基本参数

笔者提倡通过现场测试、实验室实验、严密的数值模拟等多种方法,根据具体现场条件,确定如下几个高位环形裂隙体参数。

(1)下界高度:通过抽采瓦斯浓度来确定。经验上可判定在贯通渗透区中部位置。

(2)上界高度:根据有效卸压高度和水平渗透区高度综合判定。

(3)走向和倾向上的外侧边界延展角:通过判定煤层瓦斯解吸的有效卸压系数来确定。

(4)高位环形裂隙体在采空区水平上的走向投影长度、倾向投影宽度、以及走向和倾向内侧边界延展角:通过判定采动裂隙压实所对应的卸压系数来确定。

5 结 语

(1)较为全面地获得了采动应力、围岩运动、孔隙流体压力以及瓦斯运移的同步实测数据,为淮南 11-2 煤层开采煤与瓦斯的基础理论研究提供了可靠基础。主要成果有:①采动支承压力影响范围可达 300 m,覆岩运动和采动裂隙发育范围在工作面后方 170 m 以内,170 m 以后采动裂隙基本压实;②采动裂隙发育高度以及孔隙流压明显降低的高度可达 145 m。

(2)系统研究了采动应力场、裂隙场和瓦斯流动场之间的动态变化规律。主要成果有:①掌握了覆岩卸压动态变化规律,建立了覆岩卸压基本模型;②划分了采动裂隙发育范围内水平渗透和贯通渗透两个区域特征;③采动区周边构成“环形”流动通道,瓦斯流动明显,其中高浓度瓦斯主要分布在贯通渗透区的中部以上。

(3)确定了覆岩卸压特征、渗透率分布、抽采瓦斯动态运移规律三个决定瓦斯高效抽采的关键因素,具体判别了 1115(1)工作面上覆煤层群瓦斯高效抽采范围,提出了采动煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体,并初步建立了高位环形裂隙体的判别原则和方法。

(4)采动煤层群瓦斯高效抽采的高位环形裂隙体是在顾桥煤矿 11-2 煤层特定开采条件下初步提出的。笔者正在进一步对包括淮南其它开采条件以及澳大利亚开采条件下的煤层群高效瓦斯抽采理论进行研究,以期建立具有普遍意义的煤与瓦斯共采的

工程设计手段。

参考文献:

- [1] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
Yuan Liang. Theory and technology of gas drainage and capture in soft multiple coal seams of low permeability[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2004.
- [2] 袁亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(8):898-902.
Yuan Liang. The technique of coal mining and gas extraction by roadway retaining and borehole drilling[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(8):898-902.
- [3] 袁亮. 低透气性煤层群无煤柱煤气共采理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.
Yuan Liang. Theory and practice of integrated pillarless coal production and methane extraction in multiseams of low permeability[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2008.
- [4] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报,2009,34(1):1-18.
Yuan Liang. Theory of pressure relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(1):1-18.
- [5] 卢平,袁亮,程桦,等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. 煤炭学报,2010,35(4):580-585.
Lu Ping, Yuan Liang, Cheng Hua, et al. Theory and experimental studies of enhanced gas drainage in the high-gas face of low permeability coal multi-seams[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):580-585.
- [6] 袁亮. 高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J]. 煤炭学报,2006,31(2):174-178.
Yuan Liang. Key technique to high efficiency and safe mining in highly gassy mining area with complex geologic condition[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(2):174-178.
- [7] 袁亮. 淮南矿区现代采矿关键技术[J]. 煤炭学报,2007,32(1):8-12.
Yuan Liang. Key technology for modern mining in Huainan coal area[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(1):8-12.
- [8] 袁亮. 低透气煤层群首采关键层卸压开采采空侧瓦斯分布特征与抽采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1362-1367.
Yuan Liang. Gas distribution of the mined-out side and extraction technology of first mined key seam relief-mining in gassy multi-seams of low permeability[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(12):1362-1367.
- [9] 袁亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(8):898-902.
Yuan Liang. The technique of coal mining and gas extraction by roadway retaining and borehole drilling[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(8):898-902.
- [10] Guo H, Ishihara N, Fujioka M, et al. Integrated simulation of deep coal seam mining-optimisation of mining and gas management[A]. Australia-Japan Technology Exchange Workshop in Coal Mining 2001[C]. Hunter Valley, Australia,2001.
- [11] Guo H, Balusu R, Adhikary D P. Coal mine gas drainage and recent developments in Australia[A]. China International Conference on Coal Mine Gas Control and Utilisation[C]. Huainan,2008.
- [12] Guo H, Mallett C, Xue S, et al. Predevelopment studies for mine methane management and utilisation[R]. Brisbane, Australia,2000.
- [13] Guo H, Adhikary D P, Craig M S. Simulation of mine water inflow and gas emission during longwall mining[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2009,42(1):25-51.
- [14] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,2003.
- [15] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1997.
Zhou Shining, Lin Baiquan. Theory of gas storage and flow[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,1997.
- [16] Romeo M Flores. Coalbed methane:from hazard to resource[J]. International Journal of Coal Geology,1998,35:3-26.
- [17] Carol J Bibler, James S Marshall, Raymond C Pilcher. Status of worldwide coal mine methane emissions and use[J]. International Journal of Coal Geology,1998,35:283-310.
- [18] Ren T X, Balusu R. CFD modelling of goaf gas migration for control of spontaneous combustion in longwalls[J]. Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2005,6:55-58.