

急倾斜煤层不同覆岩结构导水裂隙演化规律

李永明^{1,2}, 刘长友², 乔元栋¹, 李建伟²

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003;

2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要:基于龙湖煤矿南二采区急倾斜煤层的赋存和水文地质条件,采用离散元数值计算方法,分析了覆岩结构组合对急倾斜煤层开采导水裂隙演化规律的影响。结果表明:急倾斜煤层采场上覆岩层无关键层及覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,导水裂隙分布呈“耳型”特征;采场上覆岩层存在结构关键层,直接顶为坚硬岩层和软弱的隔水关键层时,导水裂隙以平行于层面的离层裂隙为主;急倾斜煤层开采不同覆岩结构组合,导水裂隙发育高度均随煤层采厚的增加呈增大趋势,裂采比呈降低趋势。现场依据导水裂隙分布特征,设计了合理的防水煤柱尺寸和矸石充填注浆胶结顶板控制技术,确保了水体下急倾斜煤层的安全回采。

关键词:急倾斜煤层;覆岩结构组合;结构关键层;隔水关键层;导水裂隙

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)05-0001-08

Evolution Law of Water Flowing Fractures with Different Structures of Overlying Strata in Steep Seam

LI Yongming^{1,2}, LIU Changyou², QIAO Yuandong¹, LI Jianwei²

(1. School of Mining Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037003, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Based on the occurrence conditions of steep seam and, the hydrological and geological conditions in south No. 2 mining district of Longhu coalmine, the dispersed element numerical calculation method was used in this paper to analyze the influence of structural combination of overlying strata on water flowing fractures in steep seam. The results indicated that water flowing fracture presented “ear style” distribution with the water-resisting structural key bed in structural combination of overlying strata and without key bed in overlying strata of coalface; water flowing fracture mainly produced bed separation fractures parallel to the bedding face while there was key bed in overlying strata with hard immediate roof and soft water-resisting key bed; water flowing fracture height increased and ratio of the fractured zone height to the mining height decreased with the increase of seam mining height in steep seam. According to water flowing fracture distribution characteristics, the reasonable waterproof pillar sizes are determined and the control technology for roof cementing by grouting in gangue stowing mining is designed, ensuring the safe mining under water body in steep seam.

Key words: steep seam; structural combination of overlying strata; structural key bed; water-resisting key bed; water flowing fracture

当煤层上方存在地表水体、含水层等各类水体时,覆岩导水裂隙发育高度是防水煤岩柱尺寸合理留设的

收稿日期:2012-05-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2007CB209400)

作者简介:李永明(1979—),男,山西应县人,讲师,博士,主要从事采矿工程方面的教学与研究工作。

E-mail:liyongming1569@163.com

重要依据^[1-3]。由于急倾斜煤层倾角大,充分采动后上覆岩层破坏扩展至上覆水体时,矿井易发生突水事故^[4]。急倾斜煤层开采导水裂隙分布特征受煤层倾角、采厚、覆岩结构组合和采煤方法等多种因素的影响^[5]。其中,当急倾斜煤层上覆存在厚而坚硬的结构关键层,或含泥及黏土矿物的隔水关键层时,覆岩导水裂隙发育的特征将明显受到影响。通过对我国平顶山煤业有限责任公司十三矿^[6]、铁山南煤矿 112 工作面^[7]、新集三矿西三采区^[8]、王家山煤矿石沟区^[9]等矿急倾斜煤层上覆岩层赋存特征进行分类,可以将急倾斜煤层采场顶板覆岩结构组合方式划分为无关键层、结构关键层、结构-隔水关键层、隔水-结构关键层四类^[10],但目前对覆岩结构组合方式对急倾斜煤层覆岩裂隙演化规律的研究较少。

UDEC(universal distinct element code)是目前采矿工程领域使用最为广泛的离散元模拟软件,适用于煤炭开采等几何和物理高度非线性问题^[11]。本研究基于龙湖煤矿南二采区急倾斜煤层的赋存和水文地质条件,采用离散元 UDEC^{2D} 3.10 数值计算软件,分析覆岩结构组合对急倾斜煤层开采导水裂隙演化规律的影响,为水体下急倾斜煤层的安全回采提供依据。

1 急倾斜煤层赋存条件及数值计算模型

1.1 急倾斜煤层赋存条件

龙湖煤矿南二采区共有八层可采急倾斜薄煤层及中厚煤层。由于上部部分老窑未及时封闭,并与地表水体形成水力联系,导致南二采区水体下急倾斜煤层开采存在安全生产隐患。48 急倾斜煤层为南二采区首采煤层,煤层平均厚度 1.0 m,平均倾角 70°,顶底板均为坚硬岩层,基本顶为厚度 18 m 的结构关键层。48 急倾斜煤层采用仰斜开采,工作面推进距离 80 m。

1.2 数值计算方案

为了研究覆岩结构组合对急倾斜煤层开采导水裂隙演化规律的影响,根据龙湖煤矿南二采区 48 急倾斜煤层的水文地质和开采技术条件,主要分析急倾斜煤层的薄煤层(采厚 1 m)、中厚煤层(采厚 2~3 m)和厚煤层(采厚 4 m),采场上覆岩层结构组合为无关键层、结构关键层、结构-隔水关键层、隔水-结构关键层时,覆岩导水裂隙的分布特征和演化规律。

1.3 数值模型和力学参数

根据 48 急倾斜煤层综合柱状图,建立数值模型范围 120 m × 160 m(长 × 高),覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,力学模型如图 1 所示。

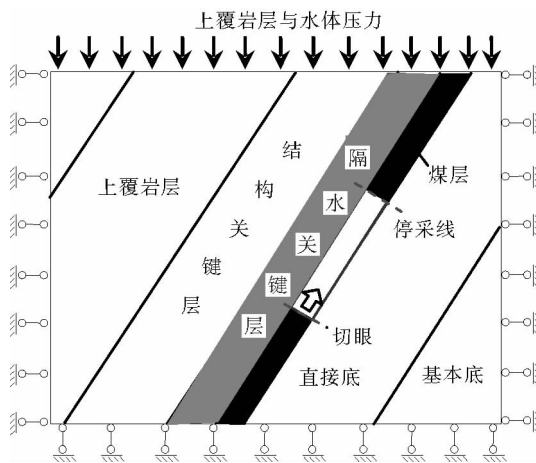


图 1 数值分析力学模型图

Fig. 1 Mechanical model of numerical simulation

数值计算模型中,围岩本构关系为莫尔-库仑准则,采用应力-位移混合边界,上表面均匀施加 6.25 MPa

的垂直压应力和 3 MPa 的水体压力, 两侧施加随深度变化的水平压应力, 模型两侧边界的水平位移和下部边界的垂直位移均固定为 0。48 急倾斜煤层开采数值模型采用的煤岩层块体的力学参数如表 1 所示, 并在建立模型时对煤岩层分别进行赋值。

表 1 48 急倾斜煤岩层块体力学参数表

Tab. 1 Mechanical parameters of 48th steep coal seam and rock strata

岩层性质	厚度/m	密度 d /($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量 K /(10^3 MPa)	剪切模量 G /(10^3 MPa)	粘结力 j_c /MPa	摩擦角 j_i /($^\circ$)	抗拉强度 j_t /MPa
上覆岩层	—	2.80	26	12.5	28.0	30	1.18
隔水关键层	5	1.60	13	8.2	4.5	26	0.80
结构关键层	18	2.60	18	10.0	30.0	32	1.12
直接顶	5	2.50	20	11.0	33.0	28	1.03
48 煤层	1~4	1.40	12	8.0	4.0	20	0.60
粉砂岩	22	2.60	20	11.0	26.0	29	1.15
中砂岩	25	2.75	23	12.0	29.0	31	1.14

2 急倾斜煤层不同覆岩结构组合导水裂隙分布特征

采用离散元 UDEC 数值计算, 分析得出急倾斜煤层不同采厚和覆岩结构组合导水裂隙的分布特征。

2.1 覆岩中无关键层

当急倾斜煤层采场上覆岩层中既无坚硬且厚度较大的结构关键层, 也无有效的隔水关键层时, 急倾斜煤层不同采厚导水裂隙分布特征如图 2 所示。

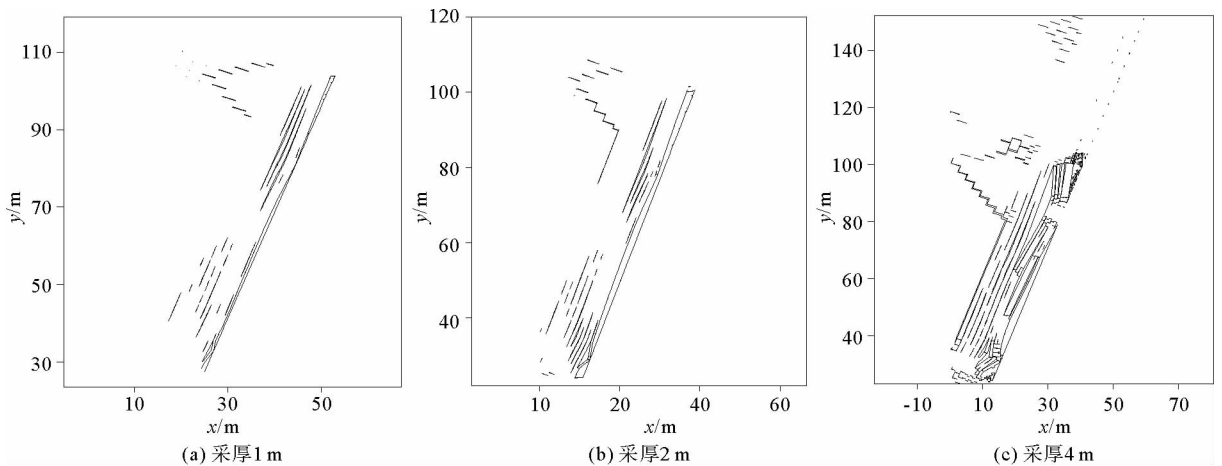


图 2 急倾斜煤层采场覆岩无关键层导水裂隙分布特征图

Fig. 2 Water flowing fracture distribution without key stratum in steep seam

从图中可知, 覆岩导水裂隙分布具有以下特征:

1) 急倾斜煤层不同采厚导水裂隙均呈非对称的“耳型”分布。“耳型”导水裂隙主要由工作面上部沿层面法向的垂直裂隙和工作面中下部位置平行于层面的离层裂隙构成。

2) 急倾斜煤层采空区上部边界的垂直导水裂隙均超过停采线位置, 并随着煤层采厚的增大沿煤层倾斜方向逐渐向采空区上山方向发育。

3) 急倾斜薄煤层和中厚煤层工作面下部平行于层面的离层裂隙均较工作面上部发育。随着急倾斜煤层采厚的增加, 平行于层面的离层裂隙高度和密度均呈增大趋势, 急倾斜厚煤层工作面下部和上部位置离层裂隙高度趋于相等, 并和垂直裂隙趋于贯通。

急倾斜煤层采场上覆岩层中无关键层时, 不同采厚覆岩冒裂带发育高度、冒采比和裂采比如图 3 所示。

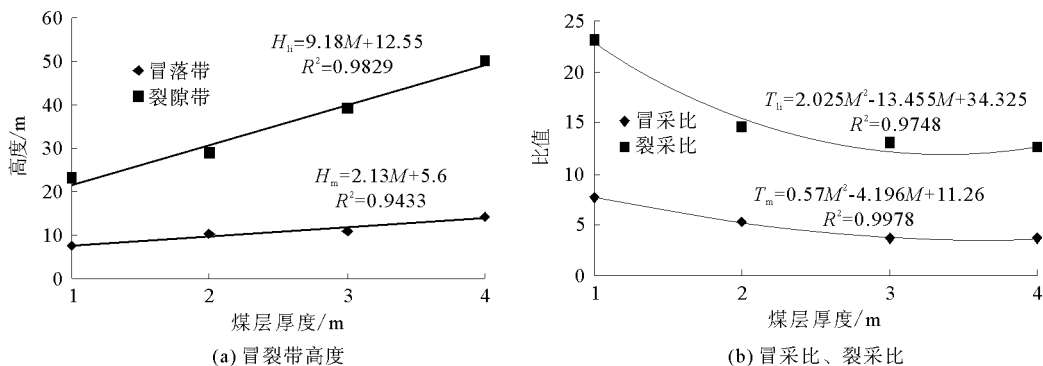


图 3 急倾斜煤层覆岩无关键层导水裂隙高度对比图

Fig. 3 Comparison of water flowing fracture height without key stratum in steep seam

从图 3(a) 可知, 当采场覆岩无关键层时, 急倾斜煤层冒落带和裂隙带高度均随煤层采厚的增加呈近线性增大趋势, 如采厚 2 m 和 4 m 时, 冒落带高度分别比薄煤层增大了 38.2% 和 90.8%, 裂隙带高度分别增大了 25.4% 和 117.2%。从图 3(b) 可知, 当采场上覆岩层中无关键层时, 冒采比、裂采比均随煤层采厚的增加呈抛物线型降低趋势, 如采厚 2 m 和 4 m 时, 冒采比较薄煤层分别降低了 30.9% 和 52.2%, 采厚 2 m 和 3 m 时, 裂采比较薄煤层分别降低了 37.1% 和 57.8%。

2.2 覆岩中存在结构关键层

急倾斜煤层采场上覆岩层存在结构关键层时, 急倾斜煤层不同采厚覆岩导水裂隙分布特征见图 4。

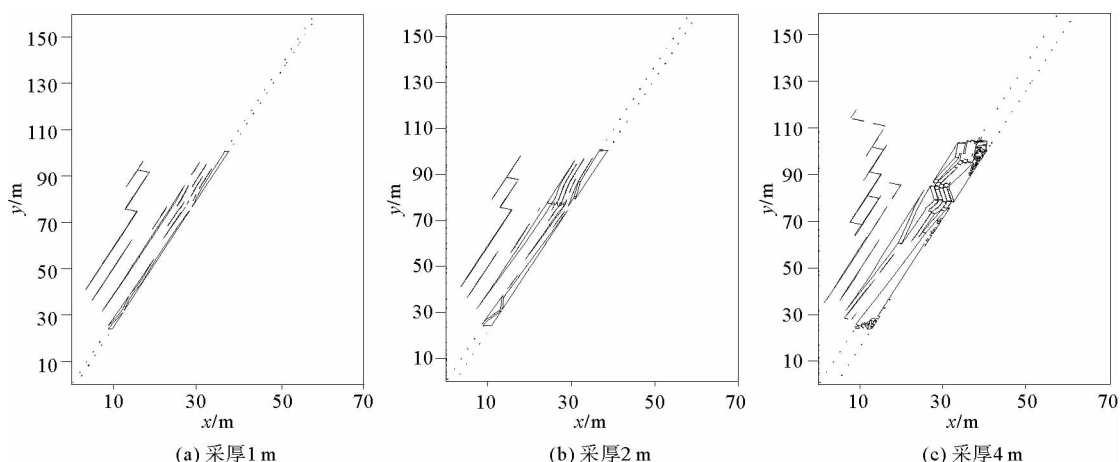


图 4 急倾斜煤层采场覆岩存在结构关键层导水裂隙分布特征图

Fig. 4 Water flowing fracture distribution with structure key stratum in steep seam

从图中可知, 急倾斜煤层开采上覆岩层存在结构关键层, 直接顶为坚硬岩层时, 导水裂隙以平行于层面的离层裂隙为主, 并随着煤层采厚的增加, 离层裂隙逐渐向关键层及其上方岩层发育。同时, 急倾斜厚煤层形成了沿层面法线方向的垂直裂隙, 和平行于层面的离层裂隙沟通, 并逐渐沿煤层法线方向向采空区上山方

向发育。

当采场覆岩存在结构关键层,直接顶为坚硬岩层时,急倾斜煤层不同采厚导水裂隙高度和裂采比如图5所示。

从图5可知,当急倾斜煤层采厚超过2 m时,导水裂隙发育高度迅速增加,采厚3 m比2 m时导水裂隙发育高度增大了46.6%。同时,导水裂隙高度随采厚增加呈抛物线增大趋势,并且符合关系:

$$H_{ii}=1.8615M^2-12.537M+27.369, R^2=0.9597. \quad (1)$$

其中: H_{ii} 为导水裂隙高度,m; M 为煤层厚度,m。

当采场覆岩存在结构关键层,直接顶为坚硬岩层时,裂采比随煤层采厚的增加呈抛物线型降低趋势,如煤层采厚2 m时的裂采比相对于采厚1 m时裂采比降低的幅度最大为49.5%。

2.3 覆岩结构组合为结构-隔水关键层

急倾斜煤层采场覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,不同采厚覆岩导水裂隙带分布特征见图6。

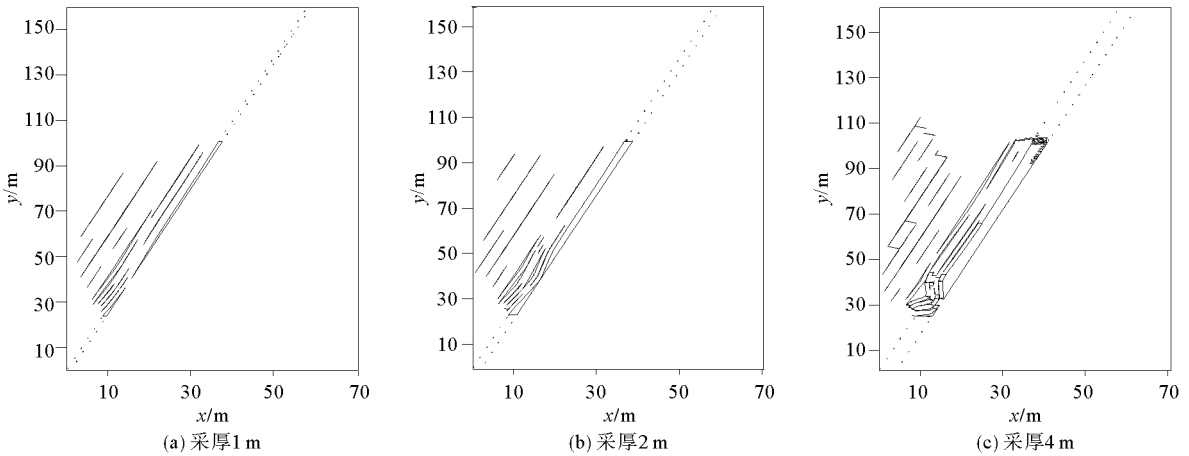


图6 采场覆岩结构为结构-隔水关键层导水裂隙分布特征图

Fig.6 Water flowing fracture characteristic with structure-resisting key stratum

从图中可知,当采场覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,导水裂隙分布也以平行于层面的离层裂隙为主,急倾斜薄煤层和中厚煤层沿层面法线方向的垂直裂隙均不发育,仅急倾斜厚煤层开采时,上覆岩层中平行于层面的离层裂隙局部与垂直裂隙形成贯通。同时,由于采空区下部顶板受压破坏后对其上位顶板的支撑作用,限制了采空区上部顶板岩层的移动,使上部顶板岩层的完整性相对较好。但隔水层位于下部强裂隙冒落带内,因此,隔水层起不到隔水作用。

采场覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,急倾斜煤层不同采厚情况下导水裂隙发育高度和裂采比如图7所示。

从图中可知,当急倾斜煤层采场覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,导水裂隙发育高度随煤层采厚的增加呈冥函数增大趋势,裂采比随煤层采厚的增加呈对数降低趋势,并且符合关系:

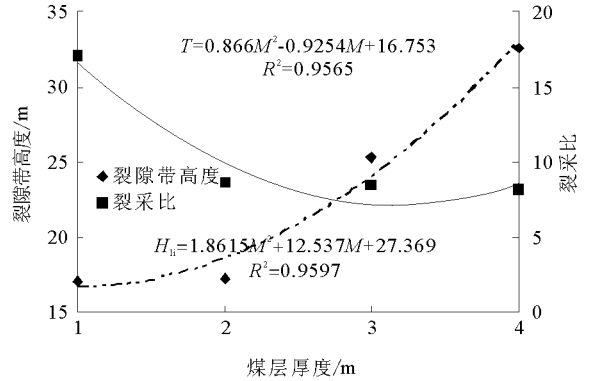


图5 急倾斜煤层覆岩存在结构关键层裂隙高度对比图
Fig.5 Comparison of water flowing fracture height with structure key stratum in steep seam

$$T = -8.3382 \ln M + 18.593, \quad R^2 = 0.9751. \quad (2)$$

其中: T 为裂采比; M 为煤层厚度, m。

2.4 覆岩结构组合为隔水-结构关键层

当急倾斜煤层采场覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,不同采厚覆岩导水裂隙分布特征如图 8 所示。

从图中可知,当急倾斜煤层采场覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,导水裂隙近似呈“耳型”分布。工作面下山方向以平行于层面的离层裂隙为主,采空区上部以垂直于层面的裂隙为主,且随着煤层采厚的增加,垂直裂隙密度逐渐增大,并沿煤层法线方向向上发育。在隔水关键层内也产生了平行于层面的离层裂隙,但多位于隔水关键层和上覆岩层交界处。同时,由于隔水关键层强度较低,塑性和抗变形能力强,且位于微弱裂隙带,可充分抑制导水裂隙的发展,从而起到较好的隔水作用。

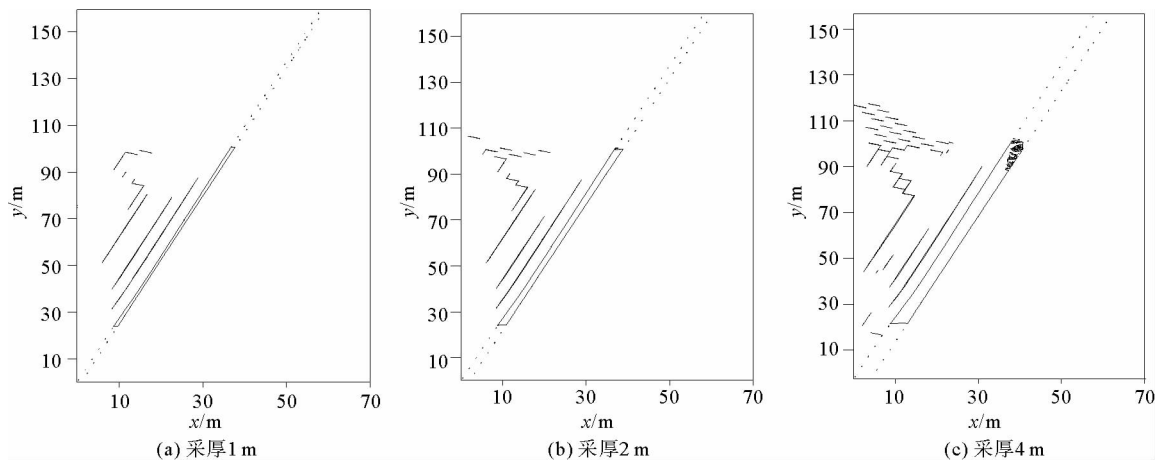


图 8 采场覆岩结构组合隔水-结构关键层导水裂隙分布特征图

Fig. 8 Water flowing fracture characteristic with structure-resisting key stratum

采场上覆岩层结构组合为隔水-结构关键层,急倾斜煤层不同采厚导水裂隙发育高度和裂采比如图 9 所示。

从图中可知,当采场覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,急倾斜煤层开采导水裂隙发育高度随采厚的增加呈抛物线型增大趋势,而裂采比随煤层采厚的增加呈抛物线型降低趋势。

3 现场应用

为了确保龙湖煤矿南二采区水体下急倾斜煤层的安全回采,现场确定留设一定尺寸的防水煤岩柱。根据数值计算分析,急倾斜煤层开采导水裂隙分布

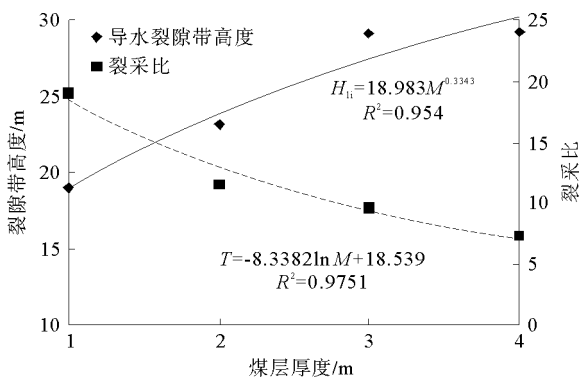


图 7 覆岩结构为结构-隔水关键层裂隙高度对比图

Fig. 7 Comparison of water flowing fracture height with structure-resisting key stratum

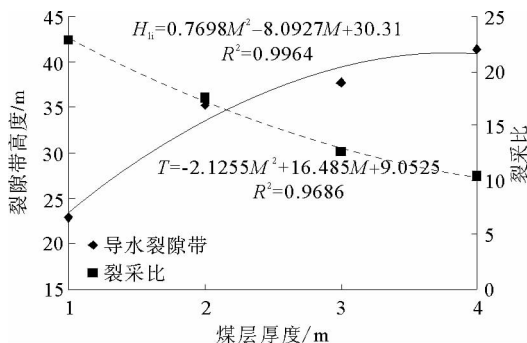


图 9 覆岩结构组合为隔水-结构关键层裂隙高度对比图

Fig. 9 Comparison of water flowing fracture height with resisting-structure key stratum

受覆岩结构组合的影响。因此,在设计防水煤柱尺寸时,必须考虑覆岩结构组合和煤层采厚的影响。48 急倾斜薄煤层为南二采区首采煤层,煤层顶板坚硬,基本顶为厚层坚硬的结构关键层。由数值计算可知,当直接顶较为坚硬,上覆岩层存在结构关键层时,导水裂隙以平行于层面的离层裂隙为主,并且最大裂隙发育高度在 17 m 左右,现场采用钻孔窥视仪对覆岩裂隙的发育情况进行了观测,图 10 为钻孔深度 16.2 m 左右时的离层裂隙的分布情况。因此,现场实测与数值计算结果基本相符。

为了确保水体下急倾斜煤层的安全回采,根据数值计算结果,结合经验公式计算得出的导水裂隙发育高度为 8.95~25.75 m,同时,考虑安全系数和提高煤炭资源回采率等因素,现场留设了 28 m 的防水煤岩柱。此外,由于急倾斜煤层开采的初次来压和周期来压不明显,易发生无预兆的大面积突然冒顶垮落,导致导水裂隙向上扩展发育,现场设计了分带仰斜矸石充填并注浆胶结充填体的顶板控制技术,确保了水体下急倾斜煤层的安全回采,经济效益和社会效益显著。

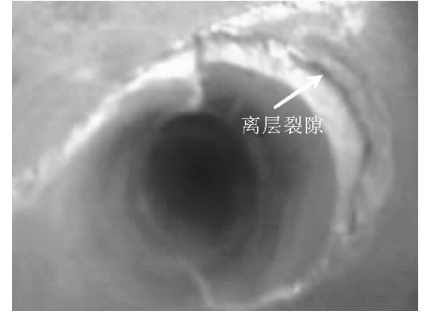


图 10 现场导水裂隙分布特征图

Fig. 10 Water flowing fracture distribution on spot

4 结论

1) 急倾斜煤层开采覆岩结构组合影响导水裂隙的分布形态。当急倾斜煤层采场上覆岩层内无关键层和覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,导水裂隙均呈“耳型”分布形态;当急倾斜煤层采场上覆岩层存在结构关键层,直接顶分别为坚硬岩层和软弱的隔水关键层时,导水裂隙分布均以平行于层面的离层裂隙为主。

2) 急倾斜煤层开采覆岩裂隙发育高度随煤层采厚的增加呈增大趋势。当急倾斜煤层采场覆岩无关键层时,冒高和裂高均呈近线性增大趋势;当覆岩存在结构关键层和结构组合为隔水-结构关键层时,裂高随采厚增加均呈抛物线增大趋势;当结构组合为结构-隔水关键层时,裂高随采厚增大呈幂函数增大趋势。

3) 急倾斜煤层开采不同覆岩结构裂采比随煤层增加呈降低趋势。当覆岩无关键层、存在结构关键层和结构组合为隔水-结构关键层时,裂采比均随煤层采厚的增大呈抛物线降低趋势;覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,裂采比随煤层采厚的增大呈对数降低趋势。

4) 急倾斜煤层开采隔水关键层的位置影响导水裂隙的分布特征和隔水效果。当急倾斜煤层覆岩结构组合为结构-隔水关键层时,由于隔水层位于下部强裂隙冒落带内,隔水层基本起不到隔水作用;而覆岩结构组合为隔水-结构关键层时,由于隔水关键层强度较低,塑性和抗变形能力强,且位于微弱裂隙带,可充分抑制导水裂隙的发展,从而起到较好的隔水作用。

参考文献:

- [1] 刘长友,刘跃俊,黄炳香,等. 急斜煤层防水煤岩柱的失稳及留设[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(3):330-334.
LIU Changyou, LIU Yuejun, HUANG Bingxiang, et al. Instability characteristic and reasonable design of water-preventive coal-rock pillars in mining steep coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 330-334.
- [2] 李永明,刘长友,李西蒙,等. 水体下急斜煤层采空区矸石充填顶板控制研究[J]. 煤炭学报,2010,35(9):1419-1424.
LI Yongming, LIU Changyou, LI Ximeng, et al. Research on roof control effect for gangue backfilling of goaf in thin steeply inclined seam under water body[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1419-1424.
- [3] 史红,姜福兴. 采场上覆岩层结构理论及其新进展[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2005,24(1):21-25.
SHI Hong, JIANG Fuxing. Structural theories of overlying strata in longwall faces and their new development[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 24(1): 21-25.
- [4] 赵苏启,武强,尹尚先. 广东大兴煤矿特大突水事故机理分析[J]. 煤炭学报,2006,31(5):618-622.
ZHAO Suqi, WU Qiang, YIN Shangxian. Mechanism analysis of water inrush in Daxing coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 618-622.
- [5] 郭惟嘉,张新国,史俊伟. 煤矿充填法开采技术研究现状及应用前景[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):24-29.

- GUO Weijia, ZHANG Xinguo, SHI Junwei. Present situation of research on backfilling mining technology in mines and its application prospect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 24-29.
- [6] 汪成兵, 张盛, 勾攀峰, 等. 急倾斜煤层开采上覆岩层运动规律模拟研究[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2001, 22(3): 165-167.
- WANG Chengbing, ZHANG Sheng, GOU Panfeng, et al. Similar material simulation study on the mining overburden movement law in steep seam[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2001, 22(3): 165-167.
- [7] 贾剑青, 王宏图, 胡国忠, 等. 急倾斜工作面防水煤柱留设方法及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 315-320.
- JIA Jianqing, WANG Hongtu, HU Guozhong, et al. Methods of retaining water barrier and its stability analysis of steep working face[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 315-320.
- [8] 高明中. 急倾斜煤层开采岩移基本规律的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 23(3): 441-445.
- GAO Mingzhong. Similarity model test of strata movement with steep seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 23(3): 441-445.
- [9] 冯锦艳, 王金安, 朱建明, 等. 急倾斜长壁工作面开采老顶平衡结构阻水性能[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 156-159.
- FENG Jinyan, WANG Jin'an, ZHU Jianming, et al. The effect of water-block for the bearing structure in main roof rocks due to mining in steep long-wall seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 156-159.
- [10] 李永明. 水体下急倾斜煤层充填开采覆岩稳定性及合理防水煤柱研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [11] 耿养谋. 矿山开采覆岩应力拱演化规律研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 43-48.
- GENG Yangmou. Study on evolution law of stress arch of overlying strata in mines[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(4): 43-48.

“矿山灾害预防与控制”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇ 矿山岩层控制
- ◇ 采动岩体力学
- ◇ 资源规划与绿色开采
- ◇ 矿井瓦斯与火灾治理
- ◇ 矿山震动与冲击地压
- ◇ 煤炭科学开采理论、方法与技术
- ◇ 安全监测监控与信息化
- ◇ 井下充填开采
- ◇ 现代化矿井生产技术
- ◇ 瓦斯的抽采与利用

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“矿山灾害预防与控制”专栏。稿件通过专家评审后优先发表, 并实行优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkchem@sdust.edu.cn; sdustzkb@163.com

联系电话: 0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部