



基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究

双海清 辛越强 李树刚 林海飞 周斌 尚英智 刘思博

引用本文：

双海清, 辛越强, 李树刚, 等. 基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 102–113.

SHUANG Haiqing, XIN Yueqiang, LI Shugang. Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 102–113.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1368>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沿空留巷顶板覆岩二次采动裂隙实测分析

Analysis of actual measurement of cracks in overlying rock on roof of gob-side entry retaining during secondary mining
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 78–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/aa8d83ea-3cb6-4ae3-a46f-d5df59970fec>

采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性拓扑关系研究

Research on the evolution mechanism of the topological relationship of the property parameters of the mining overburden rock pressure relief gas migration channel
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 135–149 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1784>

倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究

Study on optimization of key parameters of thick hard roof cutting and retaining roadway in inclined coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 11–24 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1627>

沿空留巷密集钻孔切顶机理及关键参数确定方法

Roof cutting mechanism of dense drilling in gob-side entry retaining and determination method of key parameters
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 23–33 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1760>

水力压裂切顶卸压技术在大采高留巷中的应用研究

Application & research on hydraulic fracturing and cutting top pressure relief technology in large mining height retained roadway
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a2f7ac20-1809-4163-a987-243486b664dc>

复杂顶板条件下切顶留巷关键技术研究

Research on key technology of gob-side entry by roof cutting with complex roof condition
煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/29ef830c-9a75-4a15-adae-6dede1923a87>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

双海清, 辛越强, 李树刚, 等. 基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 102-113.

SHUANG Haiqing, XIN Yueqiang, LI Shugang, et al. Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 102-113.

基于关键层理论的切顶留巷下覆岩裂隙分布特征研究

双海清^{1,2}, 辛越强¹, 李树刚^{1,2}, 林海飞^{1,2}, 周斌^{1,2}, 尚英智³, 刘思博¹

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 陕西双龙煤业开发有限责任公司, 陕西 延安 727306)

摘要: 针对切顶留巷工艺使得切顶侧采空区覆岩裂隙分布改变的问题, 采用物理相似模拟与数值模拟相结合的手段分析了切顶留巷工艺下采空区应力分布、覆岩运移和采动裂隙分布规律。在此基础上, 基于关键层理论与采动覆岩卸荷膨胀累积效应, 探讨了切顶与未切顶侧覆岩裂隙发育高度和离层裂隙区宽度的变化, 分析了不同层位定向卸压瓦斯抽采钻孔抽采效果, 验证和反演了切顶留巷工艺下覆岩裂隙分布规律。研究结果表明: 切顶留巷工艺能有效降低切顶侧顶底板的应力集中, 但应力仍会向煤岩深部传递; 切顶使得垮落岩层厚度与顶板破断形式发生改变, 导致裂隙带发育高度、亚关键层控制范围内离层裂隙区宽度产生变化; 切顶侧端头垮落带高度为未切顶侧的2倍, 裂隙带高度为未切顶侧的0.87倍, 在裂隙带中下部, 切顶侧的离层量和穿层裂隙数量均大于未切顶侧; 切顶侧在煤层顶板8~30 m范围内裂隙发育量随距离增大而增大, 在30~48 m范围内随距离增大而减小, 裂隙主要分布于裂隙带中下部; 不同层位抽采钻孔瓦斯浓度和流量的“错峰”验证了上述研究结论。研究结果对高瓦斯矿井切顶留巷工艺下卸压瓦斯治理具有一定参考价值。

关键词: 瓦斯抽采; 卸压瓦斯; 切顶留巷; 覆岩裂隙; 覆岩累计膨胀

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)05-0102-12

Characterization of fissure distribution of overburden rock under roof cutting and entry retaining based on key strata theory

SHUANG Haiqing^{1,2}, XIN Yueqiang¹, LI Shugang^{1,2}, LIN Haifei^{1,2}, ZHOU Bin^{1,2}, SHANG Yingzhi³, LIU Sibo¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Shuanglong Coal Industry Development Co., Ltd., Yan'an 727306, China)

Abstract: Aiming at the problem of changing the distribution of overburden fissures in the overhead mining area due to the cutting and retaining roadway process, the stress distribution, overburden transport and mining fissure distribution law in the mining zone under the roof cutting and retaining roadway process were analyzed by means of a combination of physical similarity simulation and numerical simulation. On this basis, based on the key strata theory and the cumulative effect of unloading and expansion of mining overburden, the changes in the height of overburden fissure development and the width of fissure zones on the roof cutting and un-cutting sides were investigated, the extraction effect of the directional unloading gas extraction boreholes in different strata was analyzed, and the overburden fissure distribution law under the roof cutting and retaining roadway process was verified and inverted. The results show that, the roof cutting and retaining roadway process can effectively reduce the stress concentration of the top and bottom plates on the roof cutting side, but the stress will still be transferred to the deeper part of coal. Roof cutting caused changes in the thickness of the collapsed rock layer and the form of roof breakage, which led to the changes in the height of the fissure zone development, and the width of the off-strata fissure zones within

收稿日期: 2023-09-23 责任编辑: 宫在萍 DOI: 10.12438/cst.2023-1368

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904238, 52074217)

作者简介: 双海清(1988—), 男, 陕西靖边人, 副教授, 博士。E-mail: shuanghaiqing@163.com

通讯作者: 周斌(1991—), 男, 陕西延安人, 副教授, 博士。E-mail: zhou_bin@xust.edu.cn

the sub-critical strata control range. The height of the collapsed zone on the roof cutting side was twice as much as that on the un-cutting side, and the height of the fissure zone was 0.87 times as much as that on the un-cutting side. In the middle and lower part of the fissure zone, the amount of off-strata and the number of penetrating fissures on the cut top side are larger than those on the uncut top side; the amount of fissure development on the roof cutting side were larger than those on the un-cutting side. The amount of fissure development on the coal seam roof of roof cutting side increased with the increasing distance in the range of 8–30 m, and decreased with the increasing distance in the range of 30–48 m. The fissures were mainly distributed in the middle and lower part of the fissure zone. The “staggered” gas concentration and flow rate of the extraction boreholes in different layers validated the above conclusions. The study results have certain reference value for the decompression gas management in high gas mines under the process of roof cutting and retaining roadway.

Key words: gas extraction; unpressurized gas; roof cutting and entry retaining; overburden fissures; cumulative expansion of overburden

0 引言

近年来,煤炭消费量在一次能源消费量中所占比例虽逐年降低,但煤炭产量和消费总量仍呈上升态势^[1]。因此,提高煤炭产能对我国能源安全具有重要意义。采煤工艺直接影响煤炭的采出率,传统的121长壁采煤法会造成煤炭资源的严重浪费,同时在回采过程中,煤柱应力比较集中,使得巷道围岩产生变形,易于发生冒顶等灾害,采用切顶卸压无煤柱自成巷(即110工法)能有效解决这类问题^[2]。切顶留巷后,顶板破断模式发生改变,采动裂隙发育形态产生变化,直接影响了卸压瓦斯抽采效果。采动裂隙演化规律对辨识卸压瓦斯富集区,实现卸压瓦斯精准抽采具有重要意义。为此,学者们对其展开大量研究,并取得了大量研究成果,如钱鸣高等^[3-4]基于关键层理论,指出随着工作面推进采空区中部裂隙趋于压实,采空区四周形成相互连通的采动裂隙发育区,称之为采动裂隙“O”型圈;袁亮^[5-6]、李树刚等^[7-9]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别方法;李树刚等^[10]提出上覆岩层中穿层裂隙和离层裂隙贯通后在立体空间内呈“椭抛带”分布形态,基于该理论探究了不同采高、不同推进速度以及不同煤层倾角条件下的采动覆岩压实区裂隙演化规律研究,并提出了卸压瓦斯高效抽采区域精准辨识方法和流程;王旭等^[11-13]分析了不同开采条件对覆岩裂隙发育的影响规律。此外,针对切顶留巷条件下覆岩裂隙演化研究,王炯等^[14]通过物理相似模拟试验得出切顶留巷条件下上覆岩层的垮落规律及留巷围岩的变形特征;刘红威等^[15]分析得出切顶留巷使得顶板周期来压发生变化;高建良等^[16-17]认为通风方式对瓦斯流动具有很大影响;郭明杰等^[18]研究了采动覆岩内水平定向长钻孔的位置特征与卸压瓦斯抽采机理。

综上,尽管国内外学者相继开展了切顶留巷关

键技术及采动覆岩裂隙发育方面的研究,但针对切顶留巷工艺下的覆岩裂隙分布、卸压瓦斯抽采的研究仍有待进一步完善。基于此,笔者以黄陵煤田双龙煤矿201工作面为研究对象,结合物理相似模拟和数值模拟2种研究手段,探究了切顶留巷下覆岩运移规律、底板应力分布特征以及采动裂隙分布特征,在此基础上,将所得试验结果在现场应用,验证了相应结论的正确性。研究结果对切顶留巷下卸压瓦斯抽采技术的发展具有一定参考价值。

1 工程概况及试验方案

1.1 试验工程背景

双龙煤矿位于黄陵煤田的中南部,总体构造形态为一开阔而平缓的不对称向斜构造,开采煤层为2号煤层,201采煤工作面是二采区首采工作面,埋深120~460 m,倾向采长235 m,走向长1330 m。201工作面煤均厚2 m,煤层平均倾角3°,煤层结构简单,原始瓦斯压力最高达0.6 MPa,原始瓦斯含量高达3.64 m³/t。201工作面最大瓦斯绝对涌出量为17.45 m³/min,无煤与瓦斯突出危险,煤层直接顶为泥岩,直接底为根土岩,基本顶为细粒砂岩。201工作面地质柱状图如图1所示。

201工作面采用切顶无煤柱自成巷开采工艺,工作面布置如图2所示。超前工作面采用NPR恒阻锚索对预留巷道顶板进行补强支护,之后在巷道超前工作面20 m范围内进行定向爆破预裂切顶,孔径ø48 mm,孔间距为0.5 m,根据201工作面顶板情况以及切顶参数设计原则^[19],预设切顶角度为80°,高度为8 m。工作面回采后,在矿山压力及岩体自重作用下,采空区矸石沿切顶面垮落碎胀,在挡矸支护作用下形成矸石巷帮。在采动影响区内安设临时支护设备控制动压,最终成巷。

1.2 物理相似模拟试验方案

以201工作面为原型,搭建相似比为1:100的

序号	厚度/m	岩性	岩性描述	备注
1	40.89	中粒砂岩	紫红色, 成分以石英, 长石为主, 含片状白云母及少量暗色矿物, 分选中等, 次棱角状, 钙质胶结, 岩心呈短柱状及长柱状	
2	1.30	粗粒砂岩	灰白色, 成分以石英, 长石为主, 含白云母片及少量暗色矿物, 与下伏地层呈假整合接触, 岩心呈长柱状及短柱状	
3	2.35	粉砂岩	紫红色、桃红色, 成分以石英, 长石为主, 含少量白云母星点, 砂质结构, 夹薄层砂质泥岩, 与下伏地层呈整合接触, 岩心呈长柱及短柱状	
4	15.76	细粒砂岩	紫红色, 成分以石英, 长石为主, 含少量白云母碎片及少量暗色矿物, 岩心呈长柱状及短柱状	主关键层
5	3.86	粉砂岩	紫红色, 成分以石英, 长石为主, 含少量白云母星点, 砂质结构, 钙质胶结, 岩心呈长柱及短柱状	
6	3.60	泥岩	浅绿色, 成分以泥质为主, 松软易碎易风化, 遇水膨胀, 局部具滑面, 岩心呈团块状及短柱状	
7	8.62	细粒砂岩	灰白色, 成分以石英, 长石为主, 含白云母片及少量暗色矿物, 与下伏地层呈假整合接触, 岩心呈长柱状及短柱状	
8	13.90	泥岩	浅绿色, 成分以泥质为主, 局部具滑面, 松软易碎易风化, 遇水膨胀, 岩心呈团块状	
9	3.40	细粒砂岩	灰黑色, 成分以石英、长石为主, 含少量白云母碎片及少量暗色矿物, 分选较好, 钙质胶结, 夹薄层粉砂岩, 岩心呈长柱状及短柱状	
10	1.15	粉砂岩	灰黑色, 成分以石英, 长石为主, 含白云母星点, 砂质结构, 泥质胶结, 层面可见大量植物叶片化石, 岩心呈短柱状	
11	4.12	泥岩	灰黑色, 成分以泥质为主, 含黄铁矿结核及植物叶片化石, 岩心呈短柱状	
12	3.45	细粒砂岩	灰白色, 成分以石英、长石为主, 含白云母星点及少量暗色矿物, 分选较好, 钙质胶结, 夹煤屑及黄铁矿结核, 岩心呈长柱状及短柱状	亚关键层
13	1.15	粉砂岩	灰黑色, 成分以石英, 长石为主, 含白云母星点, 砂质结构, 泥质胶结, 层面可见大量植物叶片化石, 岩心呈短柱状	
14	5.12	泥岩	灰黑色, 成分以泥质为主, 含黄铁矿结核及植物叶片化石, 岩心呈短柱状	
15	3.45	细粒砂岩	灰白色, 成分以石英、长石为主, 含白云母星点及少量暗色矿物, 分选较好, 钙质胶结, 夹煤屑及黄铁矿结核, 岩心呈长柱状及短柱状	亚关键层
16	2.60	粉砂岩	灰黑色, 成分以石英, 长石为主, 含少量白云母星点, 砂质结构, 泥质胶结, 夹薄层砂质泥岩, 具滑面, 岩心呈短柱状	
17	1.50	泥岩	灰色, 成分以泥质为主, 夹薄层砂质泥岩, 松软易碎易风化, 具滑面, 岩心呈团块状及短柱状	
18	2.00	2号煤	黑色, 条痕灰褐色, 沥青光泽, 阶梯状断口, 性脆, 硬度中等, 煤岩组分以暗煤为主	
19	1.12	根土岩	浅绿色, 成分以泥质为主, 局部具滑面, 松软易碎易风化, 遇水膨胀, 岩心呈团块状	
20	1.60	泥岩	灰黑色, 成分以泥质为主, 炭质含量高, 层面可见植物叶片化石, 含黄铁矿结核, 岩心呈短柱状及块状	

图 1 煤层底板与覆岩岩性

Fig.1 Coal seam basement and overburden lithology

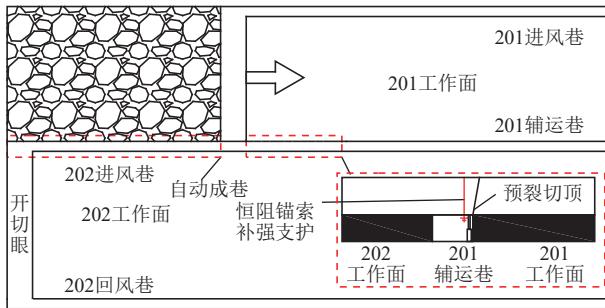


图 2 切顶留巷施工工艺

Fig.2 Roof cutting and entry retaining construction process

倾向物理相似模型, 二维试验结果为采空区三维倾向方向裂隙场分布的剖面, 根据相似三定理^[20], 确定物理相似模拟试验所遵循的4个原则, 即几何相似、物理相似、应力相似、时间相似, 由于本次试验模拟煤层倾向开挖, 因此不考虑时间相似对试验的影响。结合现场工作面实际参数, 分别取物理模型几何相似比、密度相似比和强度相似比为100、1.5、150。

试验模型选取的相似材料以沙子为骨料, 石膏、腻子粉为胶凝剂, 云母片作岩层分层材料。为减少物理相似模拟在搭建过程中的误差, 结合几何相似比将模型精度调整为0.5 cm, 根据铺设岩层的岩性与抗压强度选择配比号, 结合模型的大小, 逐层计算各分层材料的用量, 模型配比见表1^[21], 表中各材料质量为每搭建1 cm模型所需质量。模型左右及底侧为固定边界, 上侧为自由边界, 试验模型如图3所示。

根据201工作面实际情况以及关键层理论, 模型铺设高度为1 m, 模拟上覆岩层100 m, 剩余覆岩通过均匀加载应力实现。模型煤层厚度为2 cm, 模

表 1 模拟试验材料配比

Table 1 Simulated test material ratios

序号	岩性	模型厚/cm	沙子质量/g	石膏质量/g	腻子粉质量/g	煤粉质量/g
1	中粒砂岩	10.0	4 480	580	1 350	0
2	粗粒砂岩	1.5	5 120	510	770	0
3	粉砂岩	2.5	4 480	768	1 150	0
4	细粒砂岩	16.0	5 120	380	900	0
5	粉砂岩	4.0	4 480	390	1 540	0
6	泥岩	3.5	5 120	380	900	0
7	细粒砂岩	8.5	4 480	768	1 150	0
8	泥岩	14.0	5 120	380	900	0
9	细粒砂岩	3.5	4 480	768	1 150	0
10	粉砂岩	1.0	4 480	390	1 540	0
11	泥岩	4.0	5 120	380	900	0
12	细粒砂岩	3.5	4 480	768	1 150	0
13	粉砂岩	1.0	4 480	390	1 540	0
14	泥岩	5.0	5 120	380	900	0
15	细粒砂岩	3.5	4 480	768	1 150	0
16	粉砂岩	2.5	4 480	390	1 540	0
17	泥岩	1.5	5 120	380	900	0
18	2号煤	2.0	2 880	130	510	2 880
19	根土岩	1.0	5 120	510	770	0
20	泥岩	1.5	5 120	380	900	0

型左右边界各预留10 cm保护煤柱, 左端先开挖5 cm充当201回风巷道, 并用金属片在巷道内部进行支护, 当模型开挖结束后, 将金属片抽出。依据现场切

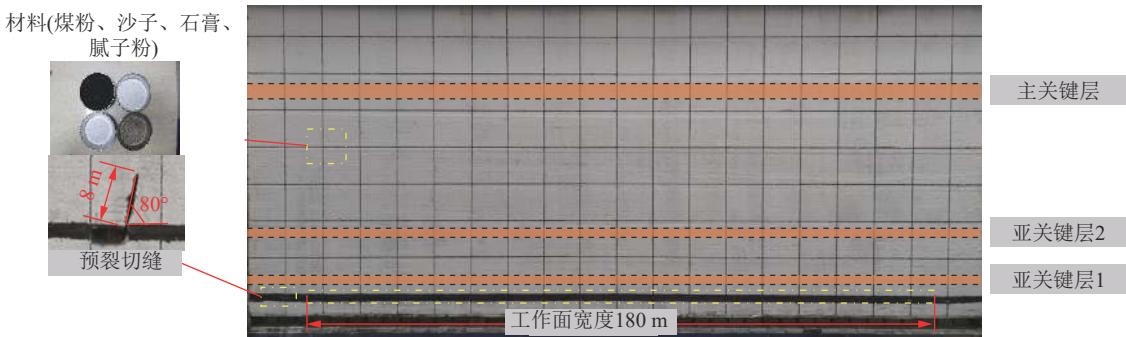


图3 黄陵矿业双龙煤矿 201 工作面回采倾向物理相似模拟

Fig.3 Physical similarity model of mining tendency in Shuanglong Coal Mine of Huangling Mining 201 working face

顶施工参数,回风巷道右边界上端头预设倾角80°,长8 cm的切顶面充当预裂缝,模型采用一步开挖^[14]。

1.3 数值模拟方案

为进一步研究覆岩采动应力、采动裂隙的分布特征,利用3DEC离散元数值模拟软件对201工作面切顶留巷工艺后裂隙分布特征进行研究^[22]。依据上述物理相似模拟试验方案,建立了如图4所示的几何模型。

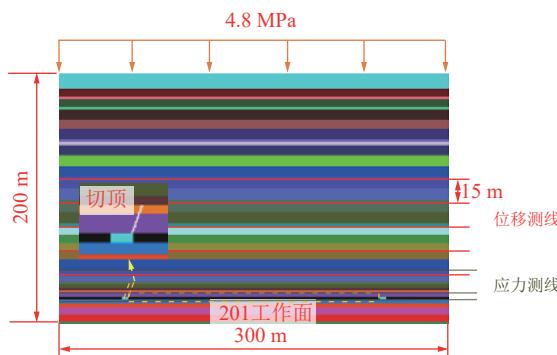


图4 数值计算模型

Fig.4 Numerical calculation model

模型尺寸300 m×1 m×200 m(长×宽×高),共计36层,煤岩层按原始参数进行赋值,左、右边界和底面设置为固定边界,前、后2个面固定y方向位移,顶部设置为自由边界,通过在切缝的位置预先设置节理,将切缝节理的黏聚力与抗拉强度设为零以模拟现场切割顶板效果。通过计算得到在模型上部需施加4.8 MPa应力来替代未模拟岩层。模型煤层采用一步开挖,计算过程中,采用Mohr-Coulomb破坏准则,重力施加于模型整体。

2 试验结果分析

2.1 切顶留巷采空区上覆岩层运移规律

201工作面开挖后覆岩裂隙分布如图5所示,由图5可知,采空区覆岩采动裂隙具有明显的空间分

布差异,从工作面左端到右端依次为煤壁支撑影响区、离层裂隙区、压实区,切顶侧端头垮落带高度为8 m,裂隙带发育高度为48 m,亚关键层1与亚关键层2之间裂隙区宽度约为27 m,亚关键层2与主关键层之间裂隙区宽度约为36 m,垮落角在切顶面上端发生突变,由80°突变为55°;未切顶侧端头垮落带高度为4 m,裂隙带发育高度为55 m,亚关键层1与亚关键层2之间裂隙区宽度约为32 m,亚关键层2与主关键层之间裂隙区宽度约为37 m,垮落角为50°。

为了进一步对比切顶侧与未切顶侧煤层顶板位移量,在相似模型与数值几何模型煤层上方每隔15 m布置一条测线,测线上每隔10 m布置1个测点,得到了如图6所示的不同层位覆岩位移下沉量。由图6可知,相似模拟与数值模拟中0 m测线切顶侧测点下沉量大于未切顶侧,30、45 m测线切顶侧测点下沉量小于未切顶侧。通过以上对比分析,两者裂隙分布特征基本一致,物理相似模拟与数值模拟在一定程度上可以互相补充^[23]。

2.2 切顶留巷下覆岩应力分布规律

采煤工作面在推进过程中,煤层顶板会依次发生下沉、破断及最终垮落。岩层的物理性质不同使得岩层之间破断距存在差异,水平剪切应力使得岩层之间发生错动,最终导致岩层之间与内部产生离层。离层的产生使采场范围内应力发生变化,打破了原岩应力平衡状态,因此通过分析顶底板应力集中系数可以得出离层裂隙区分布特征^[24]。

通过数值模拟得到了工作面底板与上覆岩层中关键层开采前后的应力值,将开采前后应力的比值记作应力集中系数,如图7所示。由图7可知,底板应力集中系数随与巷帮之间距离的增加呈“凹”字型,切顶侧应力集中系数在煤层底板、亚关键层1、亚关键层2分别为未切顶侧的67.7%、56.9%、104.8%,在底板与亚关键层1的应力集中区内,切顶侧应力集中缓慢上升并趋于稳定,未切顶侧先上升后下降最

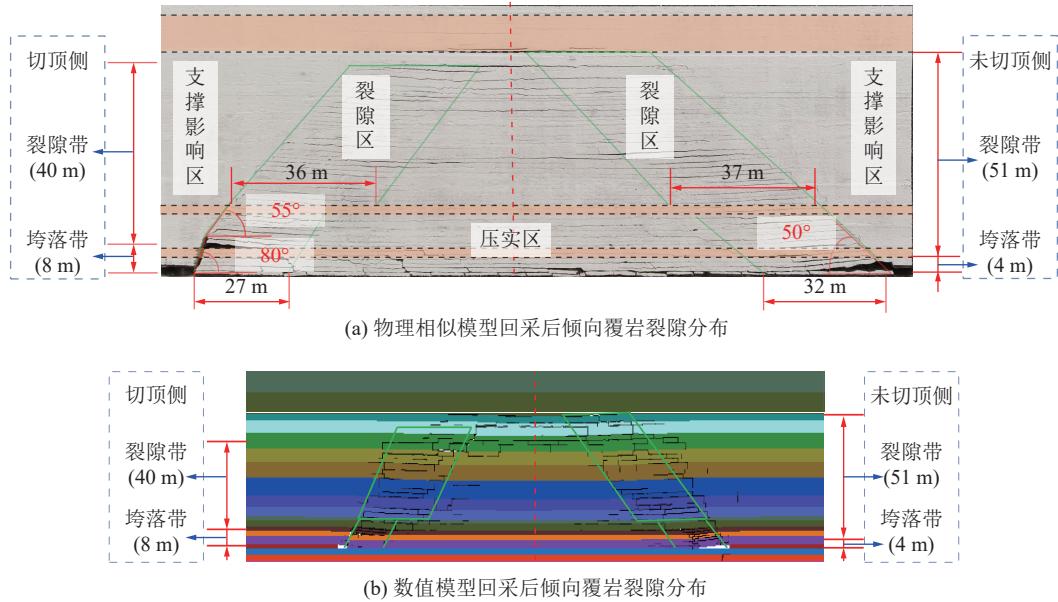


图5 工作面回采后倾向覆岩裂隙分布

Fig.5 Fracture distribution of inclined overburden rock after workface mining back

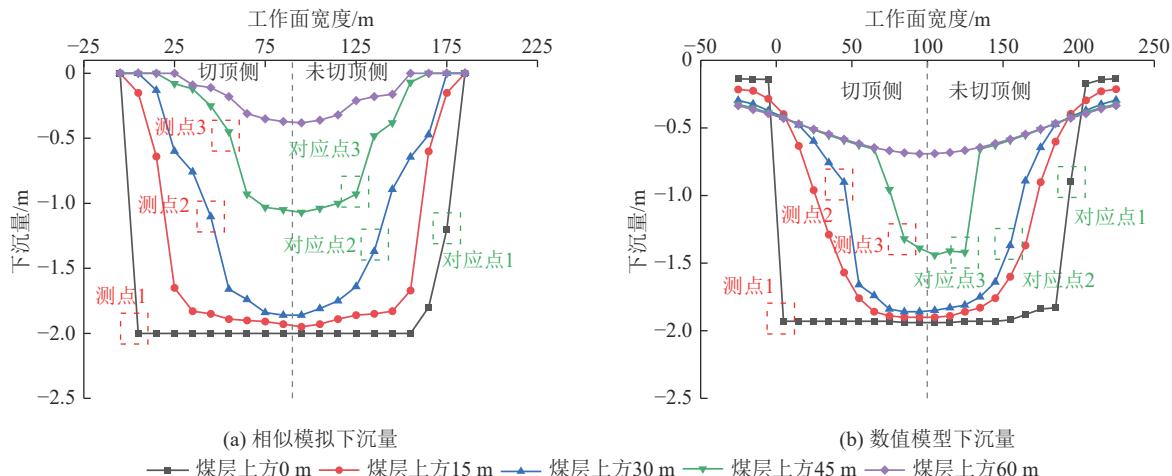


图6 不同层位覆岩位移下沉量

Fig.6 Displacement subsidence of overburden rock in different layers

后趋于稳定。通过应力集中系数分布与数值模拟裂隙分布图比对,将分界阈值设置为0.1,将应力集中系数小于0.1的范围认定为离层裂隙区,由此得出亚关键层1控制范围内,切顶侧离层区宽度为30 m,未切顶侧离层区宽度为35 m,切顶侧离层区宽度小于未切顶侧,在亚关键层2控制范围内两侧离层区宽度相等,均为40 m,与相似试验结果基本吻合。

从模拟结果可以看出,切顶有效降低了切顶侧底板与亚关键层1的应力集中。切顶面切断了巷道顶板与工作面顶板之间的力学结构,巷道顶板形成切顶短臂梁,采空区覆岩应力无法直接传递到切顶侧煤岩,但上部未被切断的煤岩应力仍能传递到煤岩体深部,因此切顶侧应力集中系数在应力集中区缓慢上升,而未切顶侧则急速下降。

2.3 切顶留巷下覆岩裂隙分布规律

裂隙密度是指单位面积内裂隙的数量,可以反映出该区域的裂隙发育程度。根据图5a统计得出穿层裂隙密度分布。为对比切顶侧与未切顶侧之间垮落带与裂隙带内穿层裂隙分布差异^[21],将采空区沿垂直方向划分为距煤层顶板0~15、15~30、30~45、45~50 m 4个区域,水平方向划分为距留巷侧巷帮0~100、100~200 m 2个区域,分别为切顶侧与未切顶侧,覆岩穿层裂隙密度分布如图8所示。

由图8可知,覆岩穿层裂隙密度沿倾向分布呈现“驼峰状”,采空区两侧裂隙密度大于采空区中部,随着岩层与煤层顶板距离的增加,穿层裂隙发育呈下降趋势,在距工作面两侧距巷帮相同的位置,0~15 m与15~30 m范围内切顶侧最大穿层裂隙密

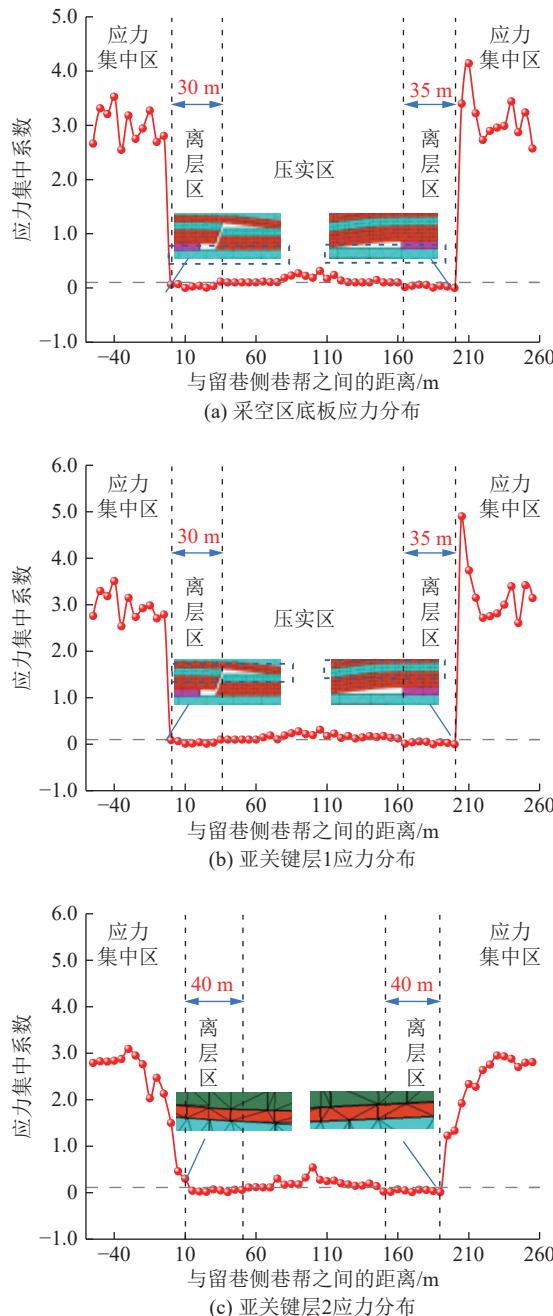


图 7 数值模拟不同层位采动覆岩应力分布特征

Fig.7 Numerical simulation of mining overburden stress distribution characteristics of different layers

度比未切顶侧分别多 23.3%、10.7%，30~50 m 范围内未切顶侧最大穿层裂隙密度比切顶侧多 25.6%，而在 45~60 m 范围内只有未切顶侧存在裂隙。说明相较于未切顶侧，切顶侧穿层裂隙主要分布在 0~30 m 范围内，即垮落带与裂隙带中下部。

离层量可以体现离层裂隙在覆岩一定范围内的空间分布特征，离层量越大，说明离层裂隙在这一区间内越丰富。为定量描述离层裂隙分布情况，计算前文中上下层测线下沉量差值，得出上下层测线间采空区覆岩离层量，如图 9 所示。通过对比切顶与

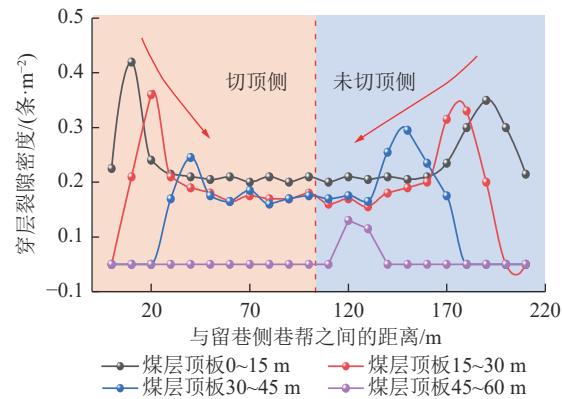


图 8 物理相似模拟采动覆岩穿层裂隙密度分布特征

Fig.8 Physical similarity simulation mining overburden rock penetration fracture density distribution characteristics

未切顶侧覆岩离层量，可以得出从煤层上方 0~30 m 范围内，切顶侧离层量较大，在 0~15、15~30 m 范围内切顶侧离层量比未切顶侧分别多 54.1%、31.3%，而在 30~60 m 范围内未切顶侧离层量较大，说明在采空区覆岩裂隙带中下部，切顶侧离层裂隙发育程度较高，在采空区覆岩裂隙带中上部，未切顶侧离层裂隙发育程度较高。

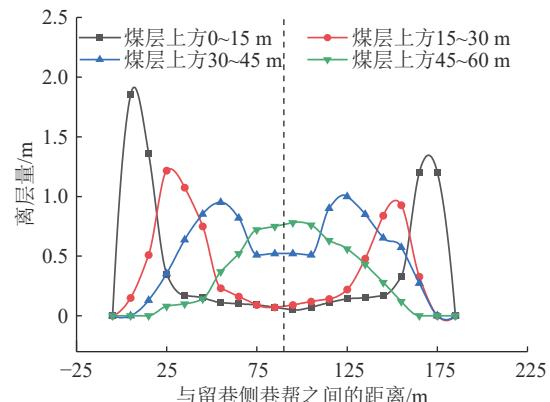


图 9 物理相似模拟采动覆岩裂隙离层量分布特征

Fig.9 Physical similarity simulation of mining overburden rock fissure off-gradient volume distribution characteristics

为了进一步阐明切顶开采后的覆岩裂隙分布特征，将工作面回采后倾向覆岩裂隙分布图 5a 分为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ (长 \times 高) 的区域，将分域好的图片导入分形软件进行二值灰度处理。对处理后的裂纹分布图进行数字化处理，然后采用 MATLAB 开发的盒计数相关分形维数软件计算不连续表面积的分布。采用相应网格尺度的裂纹比例和双对数曲线作为输出，再进行最小二乘法进行线性拟合：

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{-\lg r} \quad (1)$$

计算得到不同区域的分形维数，如图 10 所示。

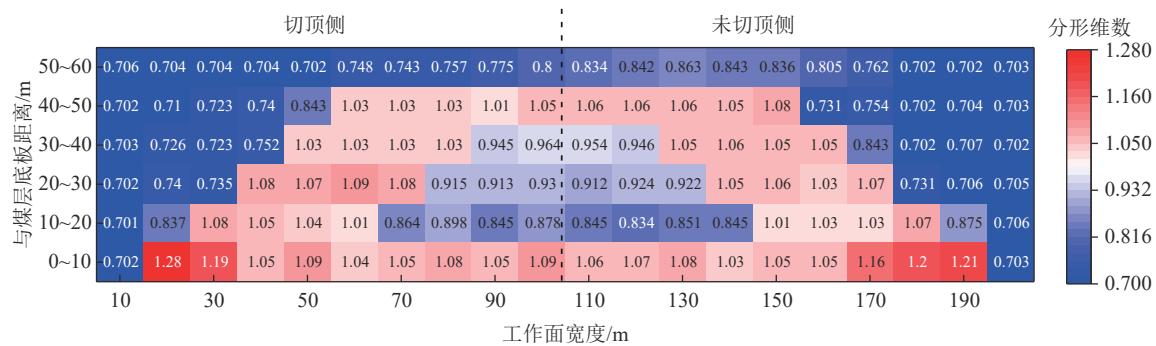


图 10 采动覆岩裂隙区域分形维数

Fig.10 Fractal calorific value map of mining overburden fissure area

分形维数越高,表明区域内覆岩裂隙越多^[25]。从分形维数高低分布可知,随着与煤层顶板的距离增大,采动裂隙向采空区中部靠拢。切顶侧在0~10、10~20、20~30 m分形维数最大值比未切顶侧多5.8%、1.0%、1.9%,在30~40、40~50、50~60 m比未切顶侧少2.8%、4.6%、7.0%。对比两侧离层裂隙区宽度,在0~10 m范围内,切顶侧小于未切顶侧,在20~50 m范围内,两侧大致相等。

3 讨 论

3.1 切顶留巷下采动覆岩裂隙发育高度分析

随着采煤工作面的不断推进,在覆岩关键层结构的控制作用下,上覆岩层由下而上成组破断运动,由于关键层阻断了应力的传递,其下部的煤岩体发生卸荷膨胀。当受开采扰动煤岩体累计的膨胀量可充填开采煤体产生的空间时,其上部的煤岩体将不再受到开采扰动,因此可根据煤岩的累计膨胀量推断出裂隙带的发育高度^[26]。

从上述相似模拟与数值模拟结果可以得出,预裂切顶面切断了巷道顶板与工作面顶板之间的力学结构,因此201工作面切顶侧端头垮落带高度大于未切顶侧^[27-28]。图11给出了切顶留巷下的覆岩膨胀原理, F_1 为未破断岩层对上覆岩层的支撑力, F_2 为垮落碎胀岩块对上覆岩层的支撑力。其中垮落带岩体呈破碎松散堆积状态,使其体积产生一定程度的膨胀,裂隙带煤岩的膨胀量来源于破断岩块卸压后产生的微弱变形(由 l_1 膨胀为 l_2)。

根据文献研究结果^[29],塑性区覆岩膨胀量为

$$H = \sum_{k=1}^n \left[-\frac{E_k(K_k-1)^2}{K_k \gamma_k} \times \ln \left| \frac{K_k R_k + E_k(K_k-1)}{K_k \gamma_k l_k + K_k R_k + E_k(K_k-1)} \right| \right] \quad (2)$$

式中: E_k 为塑性膨胀区第 k 层岩层的初始切线模量, Pa; K_k 为塑性膨胀区第 k 层岩层的初始碎胀系数; R_k 为从塑性膨胀区第 k 层煤岩上界面到卸荷顶界面范

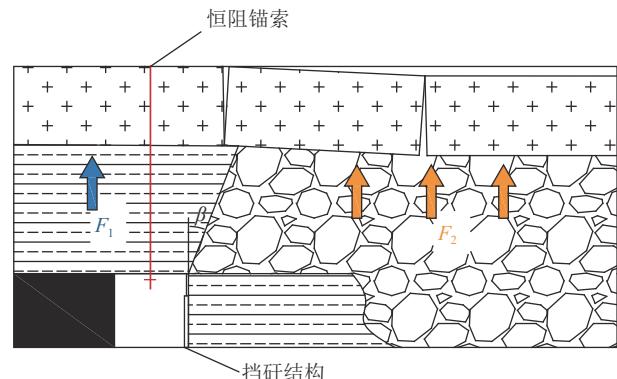


图 11 切顶留巷采空区覆岩膨胀示意

Fig.11 Schematic diagram of overburden expansion in cut-top and leave-alley mining area

围内的煤岩载荷, Pa; γ_k 为塑性膨胀区第 k 层岩层的容重, N/m³。

对于201工作面而言,裂隙带各岩层的碎胀系数根据物理相似模拟开采前后各岩层厚度的比值来进行赋值,且根据前人对采动岩体碎胀规律研究,裂隙带岩石碎胀系数与距煤层高度呈线性关系^[30],随高度的增大而减小,所得出的碎胀系数基本符合这一规律,为了方便计算,岩层的厚度根据煤层柱状图中岩层厚度取整处理,见表2。

将表2中煤岩各项参数代入式(2)中可得上覆煤岩不同高度累计膨胀量,如图12所示。由图可知,当受扰动岩体高度发育到48 m时,切顶侧覆岩累计膨胀量达到2 m,当受扰动岩体高度发育到55 m时,未切顶侧覆岩累计膨胀量达到2 m。切顶侧与未切顶侧的覆岩累计膨胀量差异出现在距煤层顶板7.5 m。垮落煤岩对采空区的填充性能优于裂隙带,切顶使得垮落带高度增加,垮落煤岩对采空区的充填度增加,降低了裂隙带煤岩的竖向位移,最终导致裂隙带发育高度降低。

3.2 不同层位离层裂隙宽度分析

关键层在采场上覆岩层活动中起主要的控制作用

表2 不同层位覆岩力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of different layers of overburden rock formation

岩层	初始切线模量/GPa	初始碎胀系数(切顶侧)	初始碎胀系数(未切顶侧)	容重/(N·m ⁻³)	弹性模量/GPa	厚度/m
泥岩	0.53	1.200	1.200	26 250	5.4	1.5
粉砂岩	1.46	1.200	1.200	23 970	10.2	2.5
细粒砂岩	1.39	1.100	1.060	25 210	10.5	3.5
泥岩	0.53	1.030	1.030	26 250	5.4	5.0
粉砂岩	1.46	1.029	1.029	23 970	10.2	1.0
细粒砂岩	1.39	1.029	1.029	25 210	10.5	3.5
泥岩	0.53	1.028	1.028	26 250	5.4	4.0
粉砂岩	1.46	1.026	1.026	23 970	10.2	1.0
细粒砂岩	1.39	1.026	1.026	25 210	10.5	3.5
泥岩	0.53	1.025	1.025	26 250	5.4	14.0
细粒砂岩	1.39	1.010	1.010	25 210	10.5	8.5
泥岩	0.53	1.018	1.018	26 250	5.4	3.5
粉砂岩	1.46	1.015	1.015	23 970	10.2	4.0
细粒砂岩	1.39	1.000	1.000	25 210	10.5	16.0

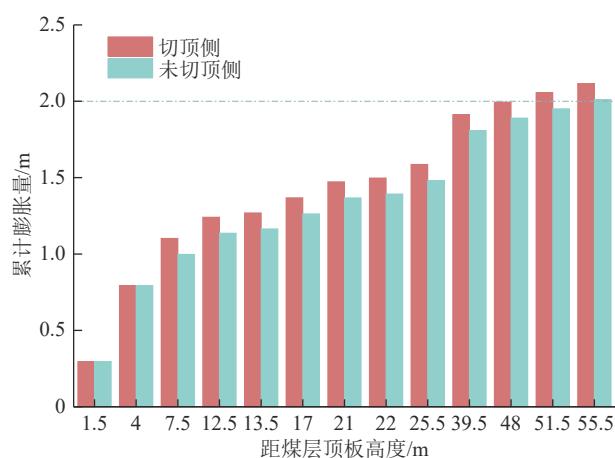


图12 切顶与未切顶采动覆岩累计膨胀量

Fig.12 Cumulative expansion of cut top and uncut top mining overburden

用,裂隙区宽度主要与关键层破断距相关。切顶留巷对煤层顶板实施了超前预裂爆破,采空区基本顶初次来压与周期来压时的破断由原来的“O-X”形转化为近似“矩形”结构,工作面上位覆岩仍然产生“O-X”形破断^[15]。

切顶面切断了巷道顶板与工作面顶板之间的力学结构,切顶侧基本顶可用由双边固支梁变为一边固支简支梁,因此切顶侧基本顶破断距表达式为

$$A_1 = 2h \sqrt{\frac{R}{3q}} \quad (3)$$

未切顶侧基本顶控制裂隙带宽度,与工作面上

方其余关键层控制岩层裂隙带宽度,可用固支梁计算,表达式为

$$A_2 = h \sqrt{\frac{2R}{q}} \quad (4)$$

式中: h 为基本顶的厚度, m; R 为基本顶岩层的极限抗拉强度, MPa; q 为基本顶受到的载荷, MPa。

根据关键层理论,基本顶上方分布的均匀载荷 q 可由下式计算:

$$q = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \gamma_{i+1} h_{i+1} + \dots + \gamma_n h_n)}{E_i h_i^3 + E_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (5)$$

式中: γ_i 为岩层容重, kN/m³; E_i 为岩层的弹性模量, GPa; h_i 为岩层厚度, m。

由前文可知,工作面上覆煤岩有2层亚关键层,分别距煤层顶板4、16 m。将工作面关键层力学参数代入式(4)和式(5)可以得出覆岩离层裂隙区宽度分布,即在亚关键层1(4~16 m)控制范围内,切顶侧离层区宽度小于未切顶侧,当裂隙带发育到亚关键层2上方(16~55 m)时,两边离层区宽度相同,见表3。分析结果与试验结果相差7.4%~9.7%。

表3 覆岩离层区宽度分布

Table 3 Distribution of widths of overburden outcrop zones

岩层	岩性	控制范围/m	切顶侧/m	未切顶侧/m
亚关键层1	细粒砂岩	4~16	25	30
亚关键层2	细粒砂岩	16~55	41	41

4 工程验证

4.1 覆岩采动裂隙演化对抽采效果影响

瓦斯抽采效果主要受到层间离层与其上下穿层裂隙发育形态影响。离层裂隙是由上下两层煤岩在采动作用影响下相互错动而产生, 离层裂隙对卸压瓦斯起临时聚集作用, 上下部穿层裂隙对气体起导流作用, 如图 13 所示。离层下部穿层裂隙 f_1 , 对采空区混合气体向上运移到离层区域产生影响; 离层上部穿层裂隙 f_2 , 对离层区域内混合气体运出离层区产生影响^[29]。离层上下部裂隙的综合变化对离层区卸压瓦斯抽采效果产生影响。

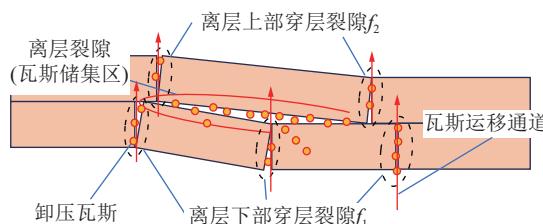


图 13 离层裂隙区域导气裂隙导流示意

Fig.13 Schematic diagram of gas-conducting fissure conduction in the region of the off-layer fissure

覆岩裂隙发育是一个动态的过程, 这一过程对布置在离层间的钻孔抽采效果产生影响, 大致可分为 3 个阶段^[31-32]: ①层间离层产生, 离层上下部穿层裂隙均未发育, 此时布置在离层间的定向钻孔流量、浓度近乎为 0。②离层下部穿层裂隙发育, 上部穿层裂隙未发育, 此时钻孔流量随下部穿层裂隙的发育而逐步增大, 但处于较低值, 瓦斯抽采浓度保持极大值。③离层上部穿层裂隙发育, 此时钻孔流量进一步增大, 瓦斯抽采浓度随上部穿层裂隙发育逐渐降低。因此根据钻孔的抽采流量可分析该区域穿层裂隙发育状态, 根据抽采浓度可分析该区域的离层裂隙发育状态。

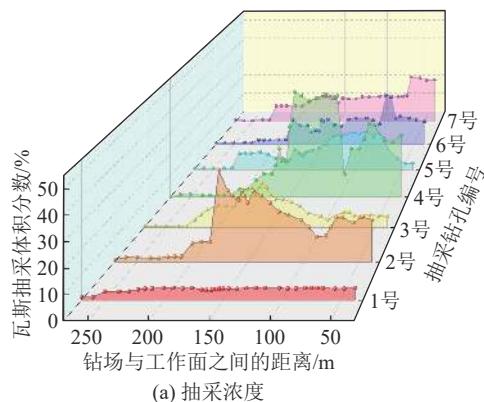


图 15 检验钻孔抽采效果

Fig.15 Examining effectiveness of borehole extraction

隙发育状态。

4.2 钻孔布置及抽采分析

根据前文研究结果可知, 在裂隙带范围内, 切顶侧离层与穿层裂隙大量分布于距煤层顶板 8~30 m 范围内, 30~48 m 范围内存在离层裂隙, 但穿层裂隙分布较少, 导致与其下部覆岩裂隙导通度较低。为验证本文研究结果, 结合 201 工作面实际情况, 于 2022 年 5 月 11 日在 201 工作面回风巷施工, 定向长钻孔终孔层位设计如图 14 所示, 各钻孔参数见表 4, 并开展了为期 30 d 的瓦斯抽采流量、浓度监测, 如图 15 所示。

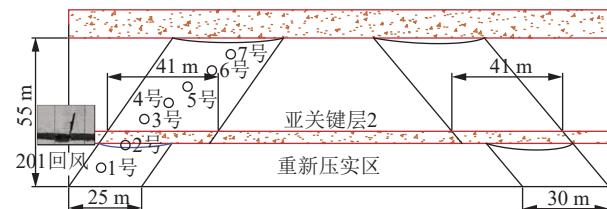


图 14 定向钻孔终孔位置布置示意

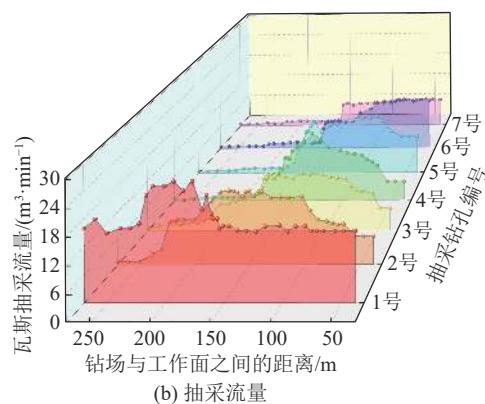
Fig.14 Schematic layout of directional drilling final hole locations

表 4 定向钻孔施工参数

Table 4 Directional drilling construction parameters

钻孔 编号	开孔倾角/ (°)	距帮距离/ m	距顶距离/ m	过渡段 长度/m	钻孔 长度/m
1	10	12	7	97	317
2	15	21	15	109	329
3	18	28	25	118	338
4	18	37	31	127	347
5	18	44	37	157	377
6	20	53	43	172	392
7	20	60	48	184	404

由图 15 可知, 各钻孔抽采浓度、流量均呈现先增大后减小的趋势, 抽采流量随着钻孔层位的增高



而减小,浓度随层位的增高先增大后减小。1号钻孔抽采流量最大,达 $26.1\text{ m}^3/\text{min}$,4号钻孔抽采浓度最大,达48.5%。由于1号钻孔所处层位较低,随着工作面的推进,钻孔周围裂隙发育程度较大,采空区瓦斯随着漏风风流一并进入钻孔中,导致孔内流量较大,浓度较低,且变化较小。2号钻孔位于亚关键层2下部,在穿层裂隙发育到这一高度时,会形成临时瓦斯富集区,出现瓦斯浓度暂时升高的情况,峰值为37.8%,当穿层裂隙继续向上发育时,瓦斯浓度会随之降低。3号钻孔位于软岩之间,钻孔上下位裂隙会迅速发育,因此瓦斯抽采浓度在峰值持续时间不长。4号钻孔抽采浓度、流量都比较大,且能持续较长时间。在4号钻孔之上的5号~7号钻孔最大抽采流量呈现下降趋势,依次为14.8、13.3、7.6 $\text{ m}^3/\text{min}$,说明4号钻孔层位之上的岩层,穿层裂隙发育逐渐变缓。5号钻孔相较4号钻孔抽采效果有所降低,但浓度、流量仍相对较大,因此可判断在5号钻孔(距顶板37 m)以上的覆岩穿层裂隙发育较少。

结合图15中各抽采钻孔流量和浓度,图16统计了各抽采钻孔流量、浓度峰值出现的时间节点,由图16可知,抽采流量、浓度的峰值时间节点随与钻孔层位呈正相关,且各抽采钻孔流量峰值总滞后浓度峰值一段距离,瓦斯抽采浓度峰值比流量峰值在7、15、25、31、37、43、48 m分别滞后4、8、8、15、8、15、10 m,平均滞后距离为9.7 m。

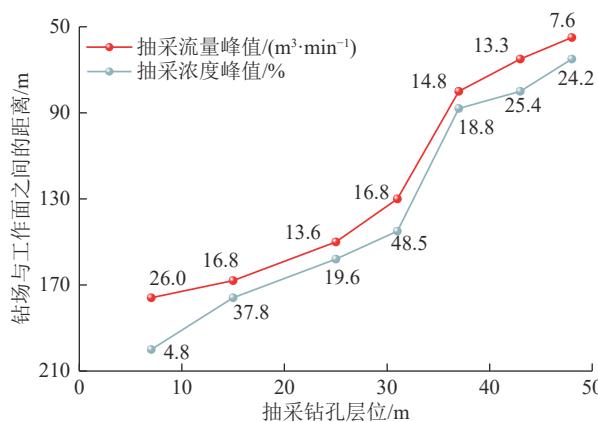


图16 检验钻孔峰值节点
Fig.16 Peak node of borehole extraction

从上述分析可知采空区覆岩裂隙自下而上依次发育,同一层位穿层裂隙相较离层裂隙发育时间有所滞后,与前文中分析的裂隙演化对抽采效果影响一致。切顶侧离层与穿层裂隙发育量在0~30 m范围内随着与煤层顶板距离增加而增大,30~48 m范围内相反,且离层与穿层裂隙主要分布在8~37 m,

37~48 m受开采扰动而产生的裂隙较少,而在未切顶的情况下,离层、穿层裂隙应发育到主关键层(距煤层顶板55 m)。抽采结果表明切顶降低了高位岩层的运移,穿层与离层裂隙主要分布在采空区裂隙带的中下部。

综上所述,若切顶留巷在回风巷侧进行,高位定向钻孔应布置于裂隙带中下部,与常规开采方式相比,钻孔布置的层位更低。

5 结 论

1)切顶留巷工艺能有效降低切顶侧底板与关键层1的应力集中,但覆岩应力仍会向煤岩深部传递,采空区两侧应力集中区变化趋势存在差异,切顶侧应力集中系数最大值在煤层底板、亚关键层1、亚关键层2分别为未切顶侧的67.7%、56.9%、104.8%。

2)工作面切顶开采后,覆岩裂隙在采空区两侧产生差异,切顶侧端头垮落带高度为未切顶侧的2倍,裂隙带发育高度为未切顶侧的0.87倍,切顶侧穿层裂隙、离层裂隙发育量在距煤层顶板0~30 m范围内大于未切顶侧,而在大于30 m范围内,未切顶侧较大。

3)基于关键层理论和采动覆岩卸荷膨胀累积效应,探讨了切顶与未切顶侧覆岩裂隙发育高度和离层裂隙区宽度的变化规律,得出切顶侧裂隙带发育高度为48 m,未切顶侧为55 m,在亚关键层1(4~16 m)控制范围内,切顶侧与未切顶侧离层区宽度分别为27、32 m,理论分析结果与试验结果相差7.4%~9.7%。

4)通过现场工程验证得到抽采流量、浓度的峰值时间节点随与钻孔层位呈正相关,位于距顶板31 m的4号钻孔抽采浓度最大,且在4号钻孔之上的5号~7号钻孔抽采流量及浓度都呈现下降趋势,离层与穿层裂隙主要集中在采空区裂隙带8~37 m,位于裂隙带中下部,进一步验证了试验所得研究结论。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11~22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11~22.
- [2] 何满潮, 陈上元, 郭志飚, 等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 959~969.
HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. Journal

- of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959–969.
- [3] 许家林, 钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 78–81.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on drainage of relieved methane from overlying coal seam far away from the protective seam by surface well [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 78–81.
- [4] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究 [J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 20–23.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 20–23.
- [5] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1370–1379.
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1370–1379.
- [6] 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.
- [7] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭抛带动态演化及煤与甲烷共采 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1455–1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455–1462.
- [8] 丁洋, 朱冰, 李树刚, 等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3565–3577.
DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, et al. Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3565–3577.
- [9] 李树刚, 杨二豪, 林海飞, 等. 深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 1–10.
LI Shugang, YANG Erhao, LIN Haifei, et al. Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 1–10.
- [10] 李树刚, 刘东东, 赵鹏翔, 等. 综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 95–104.
LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95–104.
- [11] MOHAMMAD Rezaei, MOHAMMAD Farouq Hossaini, ABBAS Majdi. A time-independent energy model to determine the height of destressed zone above the mined panel in longwall coal mining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 47: 81–92.
- [12] ABBAS Majdi, FERRI P. Hassani, MEHDI Yousef Nasiri. Prediction of the height of destressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 98: 62–72.
- [13] 王旭, 尹尚先, 徐斌, 等. 综采工作条件下覆岩导水裂隙带高度预测模型优化 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 284–297.
WANG Xu, YIN Shangxian, XU Bin, et al. Study on height optimization prediction model of overburden water-conducting fracture zone under fully mechanized mining [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 284–297.
- [14] 王炯, 朱道勇, 宫伟力, 等. 切顶卸压自动成巷岩层运动规律物理模拟实验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2536–2547.
WANG Jiong, ZHU Daoyong, GONG Weili, et al. Physical simulation experiment on the movement of rock strata upon automatic roadway forming by roof cutting and pressure releasing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2536–2547.
- [15] 刘红威, 赵阳升, 任廷祥, 等. 切顶成巷条件下采空区覆岩破坏与裂隙发育特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 77–89.
LIU Hongwei, ZHAO Yangsheng, REN Tingxiang, et al. Characteristics of overburden failure and fracture development in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 77–89.
- [16] 高建良, 孙望望. J型通风工作面采空区漏风与瓦斯浓度分布规律研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(1): 132–136.
GAO Jianliang, SUN Wangwang. Study on air leakage and gas concentration distribution law in working face goaf with J type ventilation system [J]. Coal Engineering, 2018, 50(1): 132–136.
- [17] 高建良, 李炫烨. 尾巷风量对“J”型通风工作面漏风及瓦斯分布的影响 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(8): 166–169.
GAO Jianliang, LI Xuanye. Effect of air volume in tail gateway on air leakage and gas distribution in “J” type ventilation working face [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(8): 166–169.
- [18] 郭明杰, 郭文兵, 赵高博, 等. 长壁开采覆岩内水平定向长钻孔位置特征与卸压瓦斯抽采机理 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3750–3765.
GUO Mingjie, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Position characteristics of horizontal-directional long boreholes in overlying strata and drainage mechanism of pressure-relief gas in longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3750–3765.
- [19] 孙晓明, 刘鑫, 梁广峰, 等. 薄煤层切顶卸压沿空留巷关键参数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1449–1456.
SUN Xiaoming, LIU Xin, LIANG Guangfeng, et al. Key parameters of gob-side entry retaining formed by roof cut and pressure releasing in thin coal seams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1449–1456.
- [20] 张庆贺, 袁亮, 王汉鹏, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟相似准则建立与分析 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2773–2779.
ZHANG Qinghe, YUAN Liang, WANG Hanpeng, et al. Establish-

- lishment and analysis of similarity criteria for physical simulation of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2773–2779.
- [21] 赵鹏翔, 王超, 李树刚, 等. 巨厚煤层综放开采上覆临近采空区裂隙二次演化特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 13–24.
ZHAO Pengxiang, WANG Chao, LI Shugang, *et al.* Secondary evolution characteristics of fractures in overburden adjacent goafs during fully mechanized caving of extremely thick coal seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1): 13–24.
- [22] 魏江波, 王双明, 宋世杰, 等. 浅埋煤层过沟开采覆岩裂隙与地表裂缝演化规律数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 67–75.
WEI Jiangbo, WANG Shuangming, SONG Shijie, *et al.* Numerical simulation on evolution law of overburden fractures and surface cracks in crossing ditch mining of shallow coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 67–75.
- [23] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1739–1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, *et al.* Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1739–1750.
- [24] 李春元, 张勇, 张国军, 等. 深部开采动力扰动下底板应力演化及裂隙扩展机制[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2031–2040.
LI Chunyuan, ZHANG Yong, ZHANG Guojun, *et al.* Crack propagation mechanisms and stress evolution of floor under dynamic disturbance in deep coal mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2031–2040.
- [25] 徐超, 王凯, 郭琳, 等. 采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2389–2403.
XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, *et al.* Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2389–2403.
- [26] 许家林, 秦伟, 陈晓军, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响因素[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 115–127.
XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, *et al.* Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 115–127.
- [27] 何满潮, 高玉兵, 盖秋凯, 等. 无煤柱自成巷力学原理及其工法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 19–30.
HE Manchao, GAO Yubing, GAI Qiukai, *et al.* Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19–30.
- [28] 黄志安, 童海方, 张英华, 等. 采空区上覆岩层“三带”的界定准则和仿真确定[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(7): 609–612.
HUANG Zhian, TONG Haifang, ZHANG Yinghua, *et al.* Dividing guideline and emulating determination of “three zones” of the depressing zones overlying a goaf[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(7): 609–612.
- [29] 胡国忠, 李康, 许家林, 等. 覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 750–762.
HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, *et al.* Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 750–762.
- [30] 王泓博, 张勇, 庞义辉, 等. 基于地表点下沉阶段特征的覆岩裂隙带高度演化[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 24–34.
WANG Hongbo, ZHANG Yong, PANG Yihui, *et al.* Evolution of the height of overburden fractured zone based on stage characteristics of surface subsidence[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 24–34.
- [31] 赵鹏翔, 张文进, 李树刚, 等. 高瓦斯厚煤层综采工作面推进速度影响下的瓦斯运-储区交叉融合机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3405–3419.
ZHAO Pengxiang, ZHANG Wenjin, LI Shugang, *et al.* Mechanism of cross-fusion in gas transportation-storage area in fully mechanized mining face of high gas thick coal seam under different advancing speeds[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3405–3419.
- [32] 林海飞, 王旭, 徐培耘, 等. 特厚煤层开采卸压瓦斯储集区演化特征分析及工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 173–182.
LIN Haifei, WANG Xu, XU Peiyun, *et al.* Evolution characteristics analysis and engineering application of pressure-relieved gas reservoir in extra-thick coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 173–182.