



移动扫码阅读

高永格,张 强,牛 鑫,等.沿空留巷顶板覆岩二次采动裂隙实测分析[J].煤炭科学技术,2022,50(3):78-84.

GAO Yongge,ZHANG Qiang,NIU Chu,*et al.* Analysis of actual measurement of cracks in overlying rock on roof of gob-side entry retaining during secondary mining[J].Coal Science and Technology,2021,50(3):78-84.

沿空留巷顶板覆岩二次采动裂隙实测分析

高永格¹,张 强²,牛 鑫²,张 开³

(1.河北工程大学,河北 邯郸 056038;2.河北工程大学 矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056038;3.吕梁学院 矿业工程系,山西 吕梁 033000)

摘 要:地下煤岩体开挖会引起上覆岩层的断裂、位移进而造成煤层内瓦斯的溢出、裂隙水的流动甚至会造成地表沉陷等矿山灾害。为了研究厚松散层下沿空留巷上覆顶板岩层裂隙破断规律,使用 ZXZ20(A) 型矿用钻孔成像装置对云驾岭煤矿 12307 工作面回风巷与运输巷进行上覆顶板岩层破断状态与裂隙发育的观测。在 12307 工作面回风巷沿走向布置 1、2、3 号测点,运输巷沿走向布置 4、5、6 号测点,6 个测点的钻孔施工时间段相同、观测时间段相同。观测结果表明:1 号测点上方顶板岩层极为破碎,顶板裂隙发育由浅及深不断加剧,在 3~9 m 出现明显离层,在此区间可观察到 6 条离层裂缝;3 号测点顶板岩层 0~3.2 m 存在发育充分的裂隙,3.2~6.6 m 存在横向裂隙,且 6.2 m 处有离层现象;4 号测点顶板岩层 0~2.5 m 岩层受到明显破坏,岩层内裂隙纵横交错,2.5 m 以深裂隙逐渐减少,只存在原生裂隙;6 号测点顶板岩层观测范围内并未发现大的裂隙,岩层整体发育较为完整。上述结果表明回风巷在一次采动后顶板覆岩主要破碎范围在 2 m 内,在留巷期间二次采动造成顶板覆岩破碎程度加剧,深部岩层同样出现破碎与离层,尤其在顶板上方 4 m 内离层较多。

关键词:沿空留巷;二次采动;裂隙发育;顶板覆岩;覆岩破坏

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)03-0078-07

Analysis of actual measurement of cracks in overlying rock on roof of gob-side entry retaining during secondary mining

GAO Yongge¹,ZHANG Qiang²,NIU Chu²,ZHANG Kai³

(1.Hebei University of Engineering,Handan 056038,China;2.School of Mining and Geomatics,Hebei University of Engineering,Handan 056038,China;3.Department of Mining Engineering,Liliang University,Liliang 033000,China)

Abstract: The excavation of underground coal and rock masses will cause the fracture and displacement of the overlying rock layer, which will cause the overflow of gas in the coal seam, the flow of fissure water and even the surface subsidence and other mine disasters. In order to study the fracture breaking law of overlying roof strata in gob-side entry under thick loose layer, the ZXZ20(A) mine drilling imaging device was used to observe the fracture state and fracture development of overlying roof strata in return air lane and headentry of No.12307 working face in Yunjialing Coal Mine. The probe is pushed into the borehole to be measured by the push rod, and the measured position data and the internal structure of the borehole are transmitted to the computer by USB through the display of the imaging device host. In the return airway of the No.12307 working face, the measuring points 1, 2 and 3 are arranged along the strike direction, and the measuring points 4, 5, and 6 are arranged along the strike direction of the transportation lane. The drilling construction time and observation time of the 6 measuring points are the same. The observation results show that the roof strata above the No.1 measuring point is extremely broken, and the development of roof fissures is increasing from shallow to deep, with obvious separation between 3 and 9 m, and 6 separation cracks can be observed in this interval. There are well-developed cracks in the rock layer from 0 to 3.2 m in the roof of the No.3 measuring point, but lateral cracks can be seen from 3.2 m to 6.6 m above it and seam separation occurs at 6.2 m deeper. The roof strata within 0~2.5 m above the No.4 measuring point are obviously damaged, and the cracks in the strata are criss-crossed. The depth of fissures less than 2.5 m

收稿日期:2021-04-18;责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2019-0483

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174112)

作者简介:高永格(1969—),男,河北元氏县人,教授,博士。E-mail:1023593234@qq.com

gradually decreased, and only primary fissures existed; no large cracks were found in the observation range of roof strata above the No. 6 measuring point, and the rock formation were relatively well-developed as a whole. The above results show that the main fracture range of roof overburden is within 2 m after the primary mining in the return air roadway, and the fracture degree of roof overburden is intensified due to the secondary mining during the retaining of the roadway, and the deep-level strata are also fractured and separated, especially within 4 m above the roof, and this phenomenon is gradually weakened beyond 4 m. This conclusion provides a reliable design basis for the support of gob-side entry retaining.

Key words: gob-side entry retaining; secondary mining; crack development; roof and overburden; overlying rock failure

0 引言

沿空留巷技术为我国煤矿开采带来更加有利的技术优势与经济效益,是无煤柱护巷方式的一项重大突破^[1]。我国学者从不同角度和不同方式对其进行大量研究。文献[2-3]对沿空留巷Y型通风提供了新的思路,文献[4-5]通过对沿空留巷顶板覆岩的力学分析,提出了高阻让压支护来应对开采时覆岩的应力变化,李化敏等^[6]确立了巷旁充填体支护阻力的控制与设计原则,文献[7-8]对沿空留巷顶板传递承载机制进行了阐述。由于煤矿地质条件的差异性与复杂性,沿空留巷的顶板覆岩与其所受应力特性也截然不同。文献[9-10]对薄煤层无巷旁充填沿空留巷技术进行了研究,改良并简化了支护方式与施工工艺,文献[11-13]对薄煤层快速沿空留巷技术进行探索,改进了顶底板双软型薄煤层快速沿空留巷的支护方式,何东升等^[14]对中厚煤层沿空留巷无煤柱开采技术与围岩控制技术进行了分析,提出多种支护方式以提高围岩强度,减少顶板下沉,文献[15-16]对厚煤层沿空留巷围岩技术与破坏变形进行研究,采用高水材料与支护相结合的方式减少围岩变形。研究围岩稳定性是探索沿空留巷有效支护的关键因素,在我国现有文献中,系统研究现场监测的较少。

笔者以云驾岭煤矿为背景通过使用ZXZ20(A)型矿用钻孔成像装置,研究开采引起的厚松散层下沿空留巷上方覆岩裂隙分布规律。钻孔窥视仪所输出的图像可精确描述煤岩体上方覆岩破断的状态与裂隙的发育。通过对12307工作面回风巷与运输巷不同位置进行钻孔探测,观察并分析一次采动覆岩裂隙发育和二次采动覆岩裂隙发育,了解了工作面顶板覆岩变化规律,为沿空留巷围岩支护及采场安全开采提供基础数据支撑。

1 测点布设

云驾岭煤矿松散层厚度较大、采高大^[17-20],第四系松散层的平均厚度一般为90~150 m,平均为120 m,其开采煤层为2号煤层,煤层平均厚度为4.2

m,煤层倾角17°,平均开采深度580 m。在12307工作面回风巷和运输巷指定位置采用ZXZ20(A)型矿用钻孔成像装置进行观测。此装置分别由ZXZ20(A)-Z钻孔成像装置主机、ZXZ20(A)-T钻孔成像装置探头($\phi 28$ mm)、ZXZ20-S钻孔成像装置深度编码器及若干附件(电缆绞车、视频电缆、推送杆)组成。

在现场使用时,需操作推杆把探头推至被测钻孔内部,其内部情况可通过成像装置主机的显示器直观监测到,成像中有钻孔所在的深度信息。通过USB数据传输口可将仪器在钻孔内测得的数据传送到电脑上用于下一步的数据观察、讨论总结。

测点布置如图1所示,沿走向在12307工作面回风巷布置1、2、3号测点。方便观察巷道在二次采动影响下,直接顶与基本顶的裂隙场发育特征。沿走向在12307工作面的运输巷布置4、5、6号测点。便于测定巷道受到超前支承压力作用时覆岩裂隙的发育特征。直接顶的平均厚度约为2 m,基本顶的平均厚度约为4 m,根据实际需要,每个孔深约为10 m,孔径为32 mm。

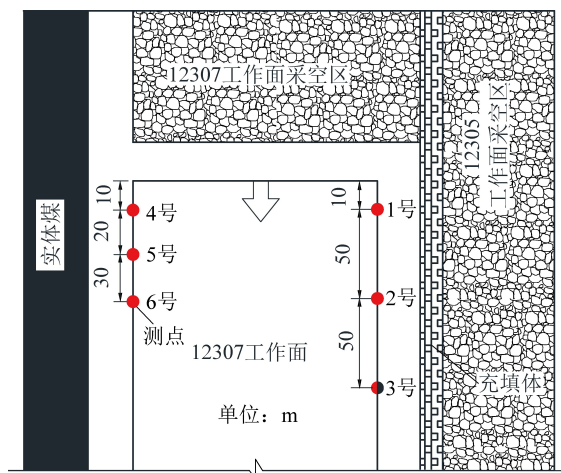


图1 监测钻孔布设

Fig.1 Monitoring borehole layout diagram

2 测试结果分析及钻孔裂隙发育情况

2.1 1号钻孔观察结果及分析

1号测点位于回风巷侧工作面前10 m,监测孔

深为9.04 m。1号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征如图2所示。由图2b—图2e可得,岩层受多次采动影响,监测孔内裂隙发育存在4种形式。由于1号测点位置顶板受到多次采动影响,上覆岩层完整性较差,在顶板上方0~5 m内裂隙充分发育并

且在0~2 m内裂隙交替分布,岩层破碎度极高;在2~5 m内离层分布较多且均匀,并且在3 m处与4.2 m处离层现象明显;在5 m处裂隙依旧存在,8.2 m处出现离层现象。由此可知,二次采动对顶板影响较大,并且会让围岩破碎度增加。

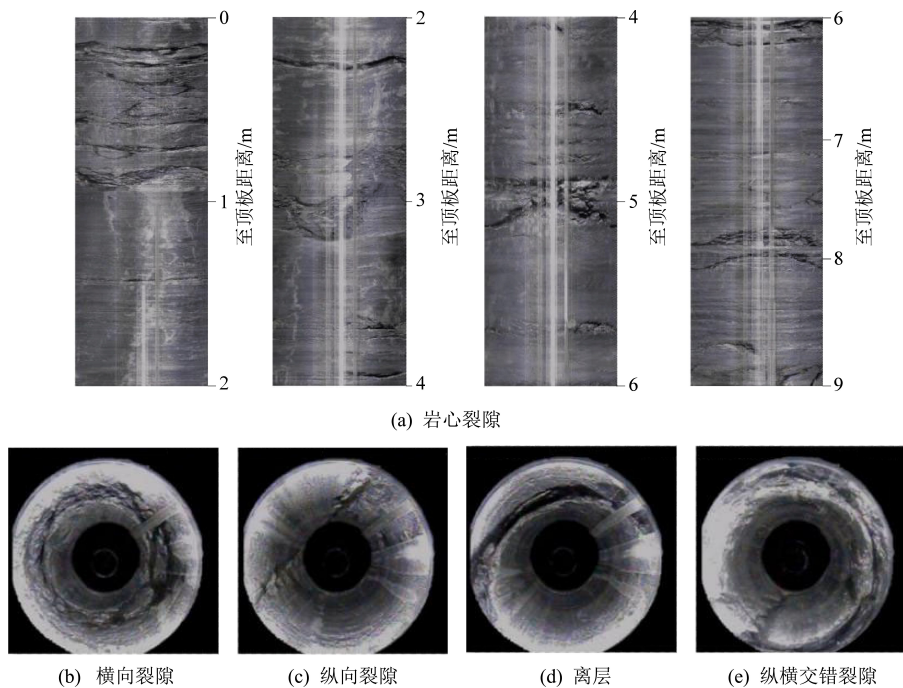


图2 1号钻孔不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.2 Strata fracture characteristics of No.1 drilling in different depth

2.2 2号钻孔观察结果及分析

2号钻孔测点位于回风巷侧工作面前方60 m,

监测孔深为10.05 m。2号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征如图3所示。

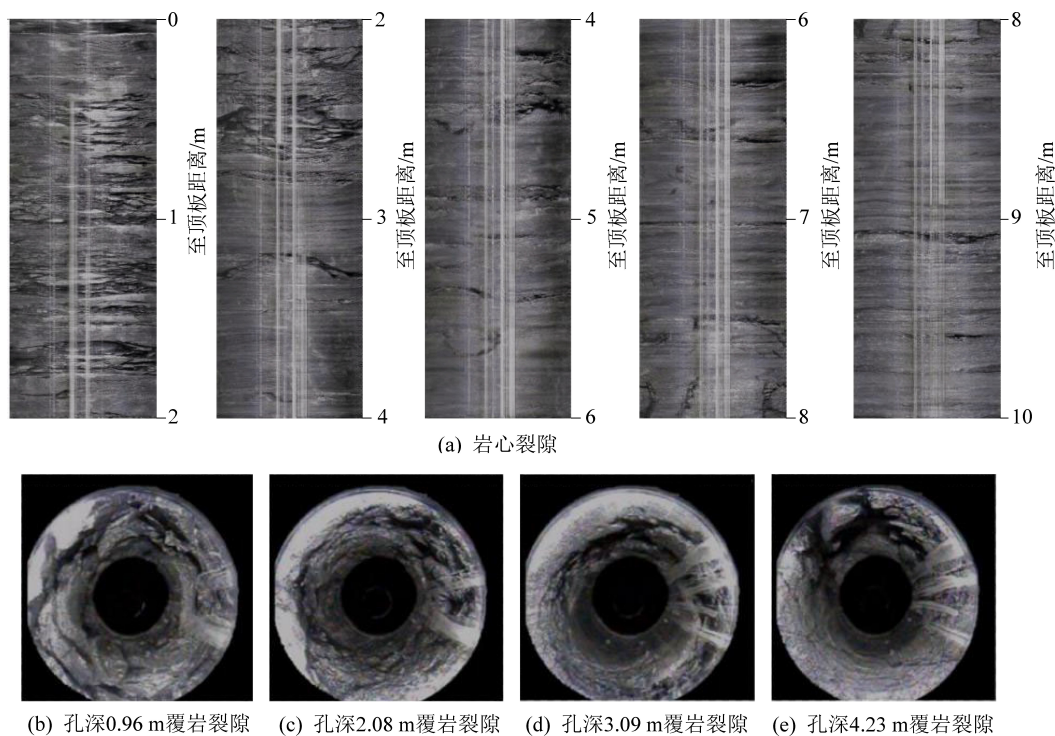


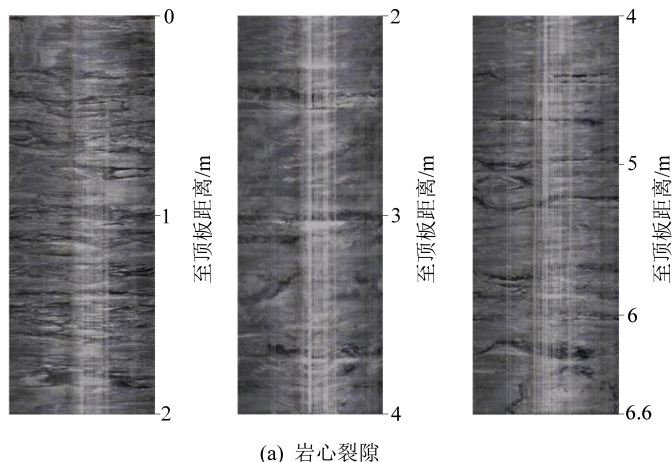
图3 2号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.3 Strata fracture characteristics of No.2 drilling in different depth

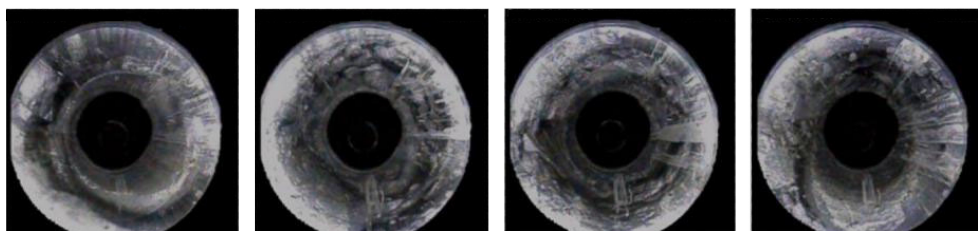
由图3可得,在顶板上方0~5 m内破碎程度较大,裂隙充分发育;在5~9 m内只出现少量裂隙;在9~10 m有明显的离层现象并且该岩层较为完整。由此可知,巷道顶板虽然受到二次采动影响,并且基本顶破坏程度巨大,但是在顶板5 m以上的岩层完整性仍然完好。

2.3 3号钻孔观察结果及分析

3号钻孔测点位于回风巷侧工作面前方110 m



(a) 岩心裂隙



(b) 孔深1.75 m覆岩裂隙 (c) 孔深3.76 m覆岩裂隙 (d) 孔深4.99 m覆岩裂隙 (e) 孔深6.36 m覆岩裂隙

图4 3号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.4 Strata fracture characteristics of No.3 drilling in different depth

极高;3.2~6.6 m 横向裂隙较多,6.2 m 以上虽有离层现象,但岩层离层较少。由此可知,经过12305工作面采动的作用和留巷时的围岩变形这两次影响,巷道顶板岩层在一定的区间内存在着严重的破碎和裂隙发育。

2.4 4号钻孔观察结果及分析

4号钻孔测点位于运输巷侧工作面前方10 m,监测孔深为9.84 m。本测点主要与1号测点的结果进行对比分析。在与1号测点作对比后可知,4号测点主要受到12307工作面的超前支承压力的作用。如图5即钻孔柱状展开图以及钻孔不同深度的横截面。

由图5可得,测点上方岩层的裂隙发育程度很小,在顶板上方0~2.5 m 只可以观察到少量的裂隙,相对于1号钻孔的观察结果,其岩石的结构完整性很好。由此可知,在井下支护时,为了避免所做措施失效,掘进时的锚索长度应大于2.5 m。

处。由于在导杆探测过程中,探头受到破碎岩体的阻滞,为了保护探头以便进行下一步工作,因此3号钻孔监测深度在6.66 m处终止。钻孔所处的巷道顶板岩层经历了12305工作面采动影响及留巷期间围岩变形2个阶段。3号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征如图4所示。

由图4可得,3号钻孔覆岩十分破碎,在0~3.2 m内裂隙发育十分充分,并且岩层的整体破碎程度

2.5 5号钻孔观察结果及分析

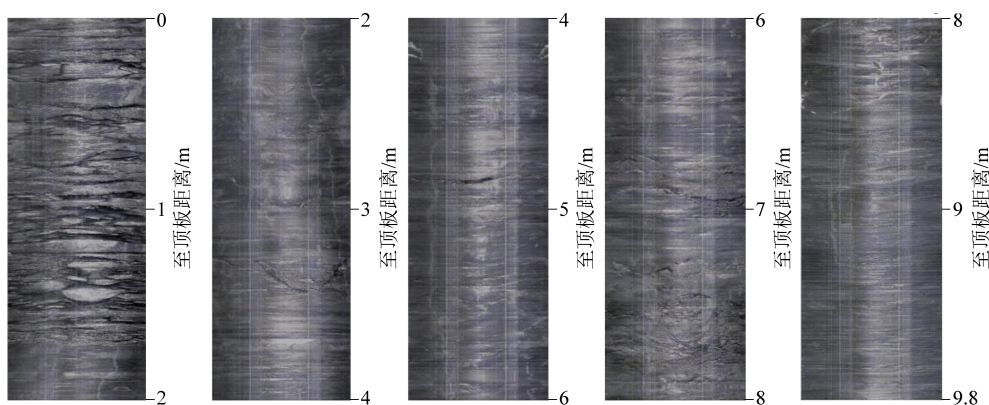
5号钻孔测点位于运输巷侧工作面前方30 m处,监测孔深为13.41 m,巷道上方岩层受一次采动影响较多。5号钻孔不同深度覆岩裂隙发育特征如图6所示。

由图6可得,只有在顶板上方岩层0~2.8 m发育有少量的裂隙,整体来看,岩层的完整性较好。

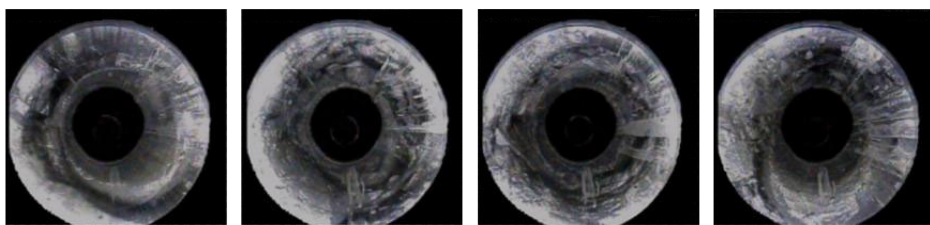
2.6 6号钻孔观察结果及分析

6号钻孔测点位于运输巷侧工作面前方60 m。监测深度12.95 m,此测点上方岩石虽然同样受到一次采动影响,但是影响范围小,只有岩层浅部有轻微破碎,总体完整性好。6号钻孔不同深度覆岩裂隙发育特征如图7所示。

由图7可得,钻孔范围内浅部壁面裂隙较多,深部岩层较为完整。在顶板上方0~0.36 m发育裂隙较多,由于钻孔所在位置岩层有弱结构面,所以在0.64 m处可以清晰地看到1条裂隙,并且在1.74~7.94 m岩石较为粗糙。



(a) 岩心裂隙



(b) 孔深1.75 m覆岩裂隙 (c) 孔深3.76 m覆岩裂隙 (d) 孔深4.99 m覆岩裂隙 (e) 孔深6.36 m覆岩裂隙

图5 4号钻孔监测不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.5 Different strata fracture characteristics of No.4 drilling monitoring depth

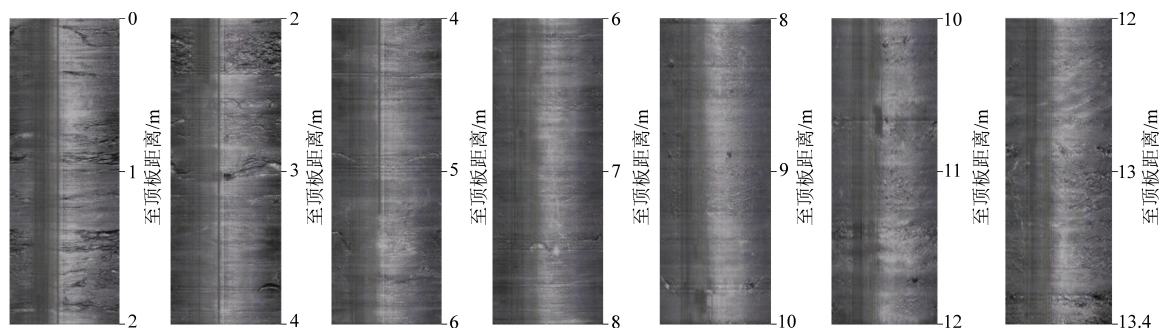


图6 5号钻孔不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.6 Different strata fracture characteristics of No.5 drilling monitoring depth

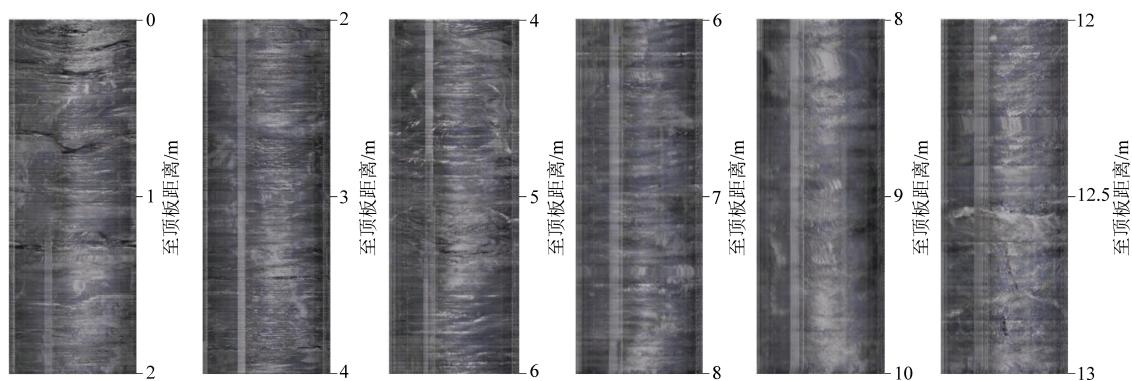


图7 6号钻孔不同深度覆岩裂隙发育特征

Fig.7 Different strata fracture characteristics of No.6 drilling monitoring depth

3 不同测点覆岩移动规律

3.1 4号与6号钻孔覆岩移动分析

4号钻孔位于工作面前方10 m位置,受超前支

承压力峰值的影响,6号钻孔所在位置距离工作面较远,基本未受到采动影响,因此对比分析这2个钻孔裂隙发育情况,便于了解一次采动对巷道不同位置顶板的影响。

4号钻孔在顶板以上0~2.5 m覆岩裂隙发育充分,2.5 m以上岩层完整性较好,仅存在部分层间原生裂隙;6号钻孔壁面整体完整性较好,从观测开始到结束,钻孔壁面并未受到较严重破坏。可见一次采动对巷道不同位置的顶板影响不同,受超前支承压力影响,靠近工作面位置顶板破坏较严重,主要集中在浅部2 m范围以内,对顶板深部基本无影响。

3.2 4号与3号钻孔覆岩移动分析

4号钻孔所在位置顶板主要经历一次采动影响。3号钻孔位于工作面回风巷超前工作面110 m处,钻孔所在位置顶板已经经历上一个工作面采动、留巷期间顶板上覆基本顶断裂回转、顶板下沉等影响。对比分析这2个钻孔裂隙发育情况,便于了解留巷期间上覆岩层一系列活动对巷道顶板的影响。

4号钻孔仅在顶板以上0~2.5 m覆岩裂隙发育充分,2.5 m以上岩层完整性较好,仅存在部分层间原生裂隙。3号钻孔覆岩整体完整性较差,其中,0~3.2 m裂隙发育较充分,岩层整体较为破碎,3.2~6.6 m层间横向裂隙较多,在6.2 m深处存在离层现象。可见受一次采动及留巷后巷道顶板上覆岩层活动的影响,不仅对巷道顶板浅部岩层破坏较大,对巷道顶板深部岩层也有较大影响,浅部裂隙进一步发育贯通,岩层层面进一步破碎,深部岩体裂隙进一步发育。

3.3 1号与3号钻孔覆岩移动分析

1号钻孔位于工作面回风巷超前工作面10 m处,钻孔所在位置顶板经历上一工作面一次采动、留巷期间巷道顶板上覆基本顶断裂回转、顶板整体下沉及受下一个工作面二次采动影响。3号钻孔所在位置顶板已经经历上一个工作面采动、留巷后顶板上覆基本顶断裂回转、顶板整体下沉等影响。对比分析这两个钻孔裂隙发育情况便于了解二次采动对巷道不同位置顶板的影响。

1号钻孔相对于3号钻孔,钻孔壁面裂隙进一步发育,岩层在浅部区域破碎加剧,在3~9 m出现6条明显离层,巷道顶板下沉量增大;3号钻孔覆岩在0~3 m裂隙发育,岩层整体较为破碎,3~6.6 m层间横向裂隙较多,在6.2 m深处出现离层现象,但离层较小。可见二次采动对巷道顶板产生影响,范围主要也集中在顶板浅部岩层,但随着距离工作面位置不同,对顶板岩层的影响程度不同。

3.4 1号与4号钻孔覆岩移动分析

1号钻孔位于工作面回风巷超前工作面10 m处,钻孔所在位置顶板经历采动影响、留巷期间围岩变形及工作面采动超前支承压力影响。4号钻孔位

于运输巷侧工作面前方10处,钻孔所在位置顶板主要经历一次采动影响。2个钻孔虽然位置对应,但顶板所受采动影响经历不同。

1号钻孔上覆岩层完整性差,顶板以上2 m内岩层裂隙发育充分,呈纵横交错或破碎状分布;2 m到5 m间横向裂隙及离层发育较多,5 m以深仍存在少量裂隙;4号钻孔仅在顶板以上0~2.5 m覆岩裂隙发育充分,2.5 m以上岩层完整性较好,仅存在部分层间原生裂隙。可见受多次采动的影响导致顶板的破坏进一步加剧。

4 结 论

1)留巷前,工作面一次采动主要对巷道顶板浅部岩层影响较大,主要影响范围在巷道顶板浅部2 m以内。

2)留巷期间巷道顶板上覆岩层破断回转,基本顶下沉对巷道顶板浅部岩层影响较大,引起巷道围岩发生剧烈变形,使巷道顶板裂隙进一步发育贯通,造成岩层层面进一步破碎,深部岩体裂隙进一步张开与发育,回风巷对应运输巷同一位置顶板更加破碎,顶板变形加大。

3)二次采动加大了对巷道顶板的破坏,浅部岩层破碎加剧,顶板的裂隙发育进一步加大,顶板离层增多下沉量大,主要影响范围为顶板以上4 m范围以内,4 m以外范围影响较小。

参考文献(References):

- [1] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):59-62.
BAI Jianbiao,ZHOU Huaqiang,HOU Zhaojiong,et al.Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J].Journal of China University of Mining& Technology,2004,33(2):59-62.
- [2] 袁 亮.低透气性煤层群无煤柱煤气共采理论与实践[J].中国工程科学,2009,11(5):72-80.
YUAN Liang,Theory and practice of integrated pillarless coal production and methane extraction in multiseams of low permeability[J].Engineering Sciences,2009,11(5):72-80.
- [3] 魏连江,李胜,魏宗康,等.煤与瓦斯突出对矿井通风系统的影响研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2021,49(3):100-105.
WEI Lianjiang, LI Sheng, WEI Zongkang, et al.Research status and prospects of the influence of coal and gas outburst on ventilation system[J].Coal Science and Technology,2021,49(3):100-105.
- [4] 张自政,柏建彪,陈 勇,等.沿空留巷不平衡承载特征探讨与应用分析[J].岩土力学,2015,(9):2665-2673.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. Investigation and application analysis of unbalanced bearing characteristics of

- gob-side entry retaining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, (9): 2665-2673.
- [5] 陈勇, 柏建彪, 朱涛垒, 等. 沿空留巷巷旁支护体作用机制及工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1427-1432.
- CHEN Yong, BAI Jianbiao, ZHU Taolei, *et al.* Mechanisms of road-side support in gob-side entry retaining and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1427-1432.
- [6] 李化敏. 沿空留巷顶板岩层控制设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 651-654.
- LI Huamin. Control design of roof rocks for gob-side entry [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 651-654.
- [7] 张农, 张志义, 吴海, 等. 深井沿空留巷扩刷修复技术及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 468-474.
- ZHANG Nong, ZHANG Zhiyi, WU Hai, *et al.* Technology and application of reparation in deep gob-side entry retaining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 468-474.
- [8] 阚甲广. 典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- KAN Jianguang. Study on rock structural analysis and control technique for gob-side entry retaining under typical roof conditions [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [9] 杨绪鹏, 刘万杰, 毛鹏. 薄煤层厚泥岩顶板自垮成巷技术应用与实践[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 180-183.
- YANG Xupeng, LIU Wanjie, MAO Peng. Application and practice of self collapse roadway forming technology of thin coal seam and thick mudstone roof [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 180-183.
- [10] 李学彬, 曲广龙, 黄万鹏, 等. 高支承压力区沿空留巷充填体强化支护的数值模拟研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(6): 48-50, 95.
- LI Xuebin, QU Guanglong, HUANG Wanpeng, *et al.* Numerical simulation research on reinforcement support of filling body in gob-side entry retaining in high support pressure area [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(6): 48-50, 95.
- [11] 巨峰, 孙强, 黄鹏, 等. 顶底双软型薄煤层快速沿空留巷技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 914-919.
- JU Feng, SUN Qiang, HAUNG Peng, *et al.* Study on technology of gob-side entry retaining in thin seam surrounded by soft roof and floor [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 914-919.
- [12] 赵玉翔, 雷延智, 杨晓龙, 等. “两硬”薄煤层采空区煤柱下沿空留巷技术[J]. 煤矿安全, 2015, 46(12): 88-91.
- ZHAO Yuxiang, LEI Yanzhi, YANG Xiaolong, *et al.* Gob-side entry retaining technology under coal pillar of goaf in "two hard" and thin coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12): 88-91.
- [13] 马启廷, 陈道志, 谢文武. 薄煤层硬顶软底沿空留巷技术研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2018(2): 29-31.
- MA Qiting, CHEN Daozhi, XIE Wenwu. Technology research and application of gob-side roadway in thin coal seam hard roof and soft floor [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018(2): 29-31.
- [14] 何东升, 殷术明. 中厚煤层柔模混凝土沿空留巷矿压规律与围岩控制技术[J]. 煤炭工程, 2018, 50(9): 35-38.
- HE Dongsheng, YIN Shuming. Study on mine pressure law and surrounding rock control of gob-side entry retaining with flexible-formwork concrete in medium-thick coal seam [J]. Coal Engineering, 2018, 50(9): 35-38.
- [15] 郑伟. 厚煤层沿空留巷掘进变形破坏规律研究[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(11): 5-8.
- ZHENG Xi. Study on deformation and failure law of gob-side entry mining in thick coal seam [J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(11): 5-8.
- [16] 张永健. 厚煤层综放沿空留巷围岩控制技术研究[J]. 煤矿现代化, 2019(1): 127-129.
- ZHANG Yongjian. Research on surrounding rock control technology of thick coal seam along caving roadway [J]. Coal Mine Modernization, 2019(1): 127-129.
- [17] 顾伟. 厚松散层下开采覆岩及地表移动规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- GU Wei. Study on laws of overburden and surface movement when mining under thick alluvium [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [18] 丁胡进. 厚松散层下重复开采地表移动变形规律的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- DING Hujin. Research of surface movement regularity of repeated-mining under the thick loose layer Taking Guqiao Coal Mine for example [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [19] 郭龙辉, 程桦, 彭世龙, 等. 厚松散层薄基岩开采覆岩离层裂隙演变与下沉分形特征研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(9): 59-64.
- GUO Longhui, CHENG Hua, PENG Shilong, *et al.* Study on fractal characteristics of overburden separation fracture evolution and subsidence in mining thick loose layer and thin bedrock [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(9): 59-64.
- [20] 吴荣新, 吴茂林, 曹建富, 等. 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 239-245.
- WU Rongxin, WU Maolin, CAO Jianfu, *et al.* Electrical monitoring of overburden failure in working face with thick loose layer, thin bedrock and hard roof [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 239-245.