

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.02.030.

综采工作面无煤柱开采技术研究

崔豪桐

(晋能控股装备制造集团有限公司, 山西 晋城 048000)

摘要:针对亿欣煤业 15 号煤综采工作面采用传统采煤工艺留设煤柱造成资源浪费严重、煤炭回收率低、巷道掘进及返修工程量等问题,以 15 号煤 XV1213 巷道为背景开展无煤柱开采技术研究,通过数值模拟分析了巷道顶板无切缝和有切缝模型的应力和位移情况,验证了顶板切缝对巷道围岩应力和变形的改善作用,并根据工作面现场条件设计了巷恒阻大变形锚索关键参数、顶板定向预裂切缝关键参数和无煤柱自成巷支护方案。现场应用表明,无煤柱成巷区巷道顶板整体下沉量较小,碎石巷帮无明显侧鼓现象,实体煤帮无明显片帮现象,满足留巷安全使用要求。经计算,切顶卸压无煤柱开采每米可创造经济效益 8763.28 元,经济效益显著。

关键词:15 号煤;切顶卸压;无煤柱;自动成巷

中图分类号:TD823.4⁺⁸ **文献标志码:**A **文章编号:**1009-0797(2025)02-0155-06

Research on Pillarless Mining Technology of Fully Mechanized Mining Face

CUI Haotong

(Jinneng Holding Equipment Manufacturing Group Co., Ltd, Jincheng Shanxi 048000)

Abstract: In response to the problems of serious resource waste, low coal recovery rate, and large amount of tunnel excavation and repair work caused by the traditional coal mining technology used in the No.15 coal fully mechanized mining face of Yixin Coal Industry, a study on pillar free mining technology was conducted against the background of the No.15 coal XV1213 roadway. Through numerical simulation, the stress and displacement of the models with and without cutting seams on the roof of the roadway were analyzed, Verified the improvement effect of roof seam cutting on the stress and deformation of the surrounding rock of the roadway, and designed key parameters of constant resistance and large deformation anchor cables, directional pre cracking seam cutting key parameters of the roof, and self formed roadway support scheme without coal pillars for roadway based on the on-site conditions of the working face. The on-site application shows that the overall subsidence of the roadway roof in the non coal pillar formed roadway area is relatively small, there is no obvious lateral bulge phenomenon in the gravel roadway side, and there is no obvious fragmentation phenomenon in the solid coal side, meeting the requirements for safe use of the retained roadway. After calculation, top cutting and pressure relief without coal pillar mining can create an economic benefit of 8 763.28 yuan per meter, with significant economic benefits.

Key words: No.15 coal; roof cutting and pressure relief; without coal pillar; automatic forming roadway

0 引言

亿欣煤业 15 号煤综采工作面采用传统的开采工艺需要留设一个煤柱以维持回采巷道的稳定,留设的煤柱造成了煤炭资源的浪费和损失,回采巷道的掘进工作也需要消耗大量的人力、物力,而亿欣煤业煤炭资源十分有限,采掘接替也较为紧张^[1]。近些年发展起来的无煤柱开采技术取消了工作面煤柱的留设,避免了因煤柱留设而产生的各类支护问题,并大大提高了煤炭回收率,提高了矿井安全生产效率,综合效益显著^[2]。亿欣煤业为了提高经济效益,提高煤炭回收率、减少煤柱维护和巷道掘进成本,开展了该矿的 15 号煤综采工作面无煤柱开采技术研究。

1 工程概况

亿欣煤业 XV1306 工作面位于 15 号煤一盘区^[3],工作面盖山厚度 182~356 m,工作面煤层厚度 2.0~2.6 m,煤层平均厚度 2.3 m,中部含夹矸厚 0.3 m,煤层平均倾角 3°,工作面倾向长度为 461 m,走向长度为 200 m,基本顶为 K2 灰岩,直接赋存在煤层上方,厚 8.9~16.36 m,直接底为泥岩,厚 1.8 m,采用全部垮落法管理顶板。

根据亿欣煤业采掘衔接计划,在 XV1306 工作面 XV1213 巷道距工作面切眼 0~461 m 范围内开展切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术试验,留巷段将作为 XV1307 工作面的顺槽巷道二次使用。工作面及巷道布置如图 1 所示。

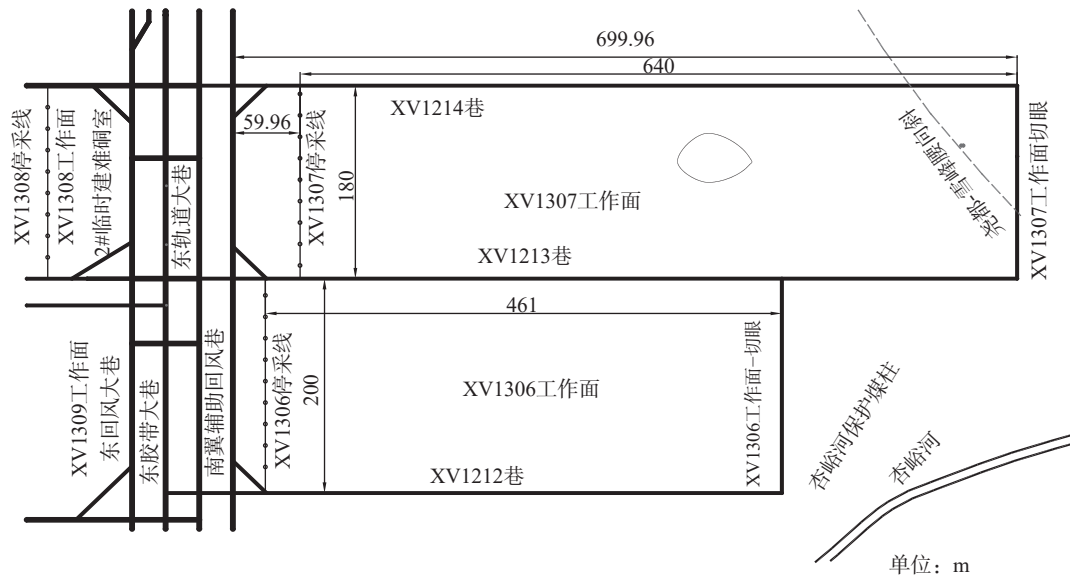


图 1 XV1213 巷道布置示意图

2 切顶卸压数值模拟分析

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对 XV1213 巷道进行数值计算，建立了巷道顶板无切缝和有切缝的数值模型，分析顶板切缝对巷围岩应力和变形的改善作用。

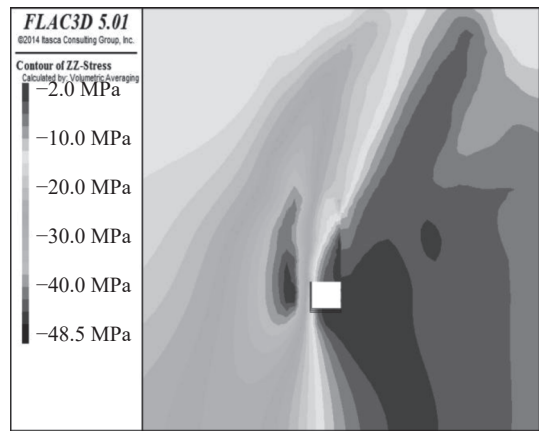
FLAC^{3D} 数值模型的长 (X 轴) × 宽 (Y 轴) × 高 (Z 轴) = 200 m × 200 m × 104 m，模型总计划分 322 500 个单元和 340 595 个结点。模型上部施加垂直荷载，荷载大小为 $P = \gamma H$ ，其中 γ 为模型上覆岩层平均体积力，取 0.025 MN/m³， H 为模型上部至地表的距离，取 150 m，模型岩层力学参数见表 1。

表 1 模型岩层力学参数

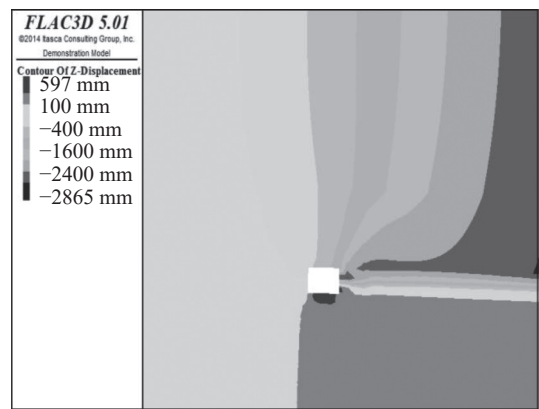
岩层名称	分层厚度/m	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/°	容重/kg·m ⁻³
K3灰岩	20	2.60	2.13	0.12	4.35	15.81	2450
K2灰岩	8.9	2.58	1.87	0.18	4.25	20.00	2560
15号煤	2.5	1.60	1.29	0.38	2.40	21.90	1290
细砂岩	4.9	2.12	4.34	0.15	4.00	15.42	2500
泥岩	1.54	1.8	1.35	0.22	2.80	21.90	1290
铝土质泥岩	10	1.89	1.35	0.22	2.80	14.00	2120

数值模拟计算结果如图 2 和图 3 所示。

根据图 2 中无切缝时 XV1213 巷道垂直应力分布情况可知，巷道开挖后，工作面实体煤侧靠近巷道处存在较大的垂直应力集中区，应力最大值可达 48.5 MPa；顶板上方 15 m 范围内垂直应力值较高，



(a) 垂直应力分布

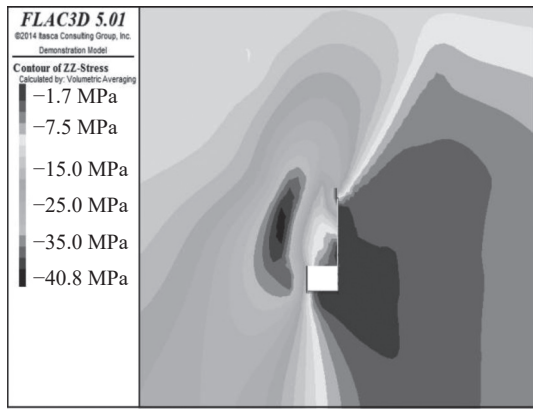


(b) 垂直位移分布

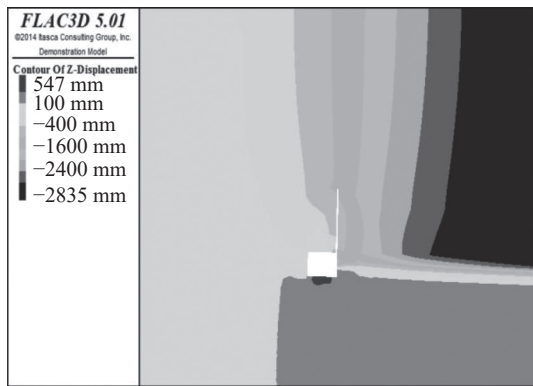
图 2 无切缝时 XV1213 巷道数值模拟云图

最大值约 23 MPa，顶板上方较大的垂直应力集中不利于无煤柱巷道的稳定。

根据图 2 中无切缝时巷道垂直位移分布情况可知，随着工作面回采时顶板岩层的不断跨落，在无



(a) 垂直应力分布



(b) 垂直位移分布

图3 有切缝时XV1213巷道数值模拟云图

切缝状态下采空区顶板围岩应力搭接传递至巷道顶板,导致采空区侧的巷道顶板发生较大垂直变形,最大垂直位移量约1210 mm,且采空区侧的顶板垂直位移量明显大于实体煤侧。

根据图3中有切缝时巷道垂直应力分布情况可知,巷道开挖后,工作面实体煤靠近巷道处的垂直应力集中区较未切缝时明显减小,应力最大值由未切缝时的48.5 MPa减小至40.8 MPa;顶板上方15 m范围内的垂直应力值也由未切缝时的最大23 MPa减小至18 MPa,顶板范围内的垂直应力值降低对维持巷道的顶板稳定具有积极作用。

根据图3中有切缝时巷道垂直位移分布情况可知,通过顶板切缝作用切断了采空区顶板岩层和巷道顶板之间的应力传递,巷道顶板垂直位移值由未切缝时的1210 mm减小至320 mm,切缝对控制巷道顶板沉降起到了显著的效果,有利于提高无煤柱巷道留设的成功率。

通过对XV1213巷道顶板有切缝和无切缝时的应力集中程度和顶板沉降值对比分析可知,通过切缝作用,使工作面实体煤靠近巷道处的垂直应力集中区域和最大垂直应力值明显减小,巷道顶板15 m

范围内的垂直应力值显著降低,顶板沉降量减小至未切缝时的26%,顶板切缝对XV1213巷道的稳定性起到了显著效果,是巷道能够成功留设的重要技术保障。

3 切顶卸压自动成巷无煤柱方案设计

3.1 恒阻大变形锚索关键支护技术设计

亿欣煤业恒阻锚索应锚固在顶板K3灰岩中不小于1 m,因此,设计恒阻大变形锚索长度为12.3 m。恒阻大变形锚索共布置有3列,均垂直于巷道顶板打设,第1列恒阻锚索距离巷道采空区侧巷帮600 mm,第2列恒阻锚索距离第1列间距为1000 mm,第3列恒阻锚索距离第2列间距为1700 mm,第1列恒阻锚索排距为1000 mm,第2列和第3列恒阻锚索排距均为2000 mm。恒阻锚索托盘选用300 mm×300 mm×20 mm的平托盘,托盘中间加工直径100 mm的圆孔,相邻锚索之间用W钢带连接,W钢带选用2600 mm×300 mm×5 mm的钢板制作,根据间距加工200 mm×100 mm的长孔,巷道恒阻大变形锚索支护见图4。

3.2 定向预裂切缝关键参数设计

3.2.1 切顶高度

预裂切缝深度(H_f)临界设计公式如下^[4]:

$$H_f = (H_m - \Delta H_1 - \Delta H_2) / (K - 1)$$

式中: ΔH_1 :顶板下沉量,m; ΔH_2 :底鼓量,m; K :碎胀系数,1.3~1.5。

根据亿欣煤业围岩地质条件, K 取1.3,最大采高为3 m,理论计算得到切顶高度为10.0 m。

运用FLAC^{3D}建立切顶高度为5、7、10 m的数值模型,分析其围岩的应力、位移分布特征,对理论计算所得切顶高度进行验证。

通过数值模拟分析可得,XV1213巷道切顶高度为5、7、10 m时,实体煤帮内部应力集中峰值分别为44.2、40.8、38.4 MPa,从以上数据可以看出,随着切顶高度的增加,巷道实体煤帮内应力集中峰值逐渐减小。巷道切顶高度为5、7、10 m时,巷道顶板垂直位移最大值分别为460、320、240 mm,从以上数据可以看出,随着切顶高度的增加,巷道顶板垂直位移最大值也逐渐减小。通过对三个数值模型的综合对比可知,当巷道切顶高度为10 m时,实体煤帮内部应力集中峰值为38.4 MPa、巷道顶板垂直位移最大值为240 mm,巷道应力集中程度和顶板垂直位移均不大,满足留巷巷道围岩稳定要求。

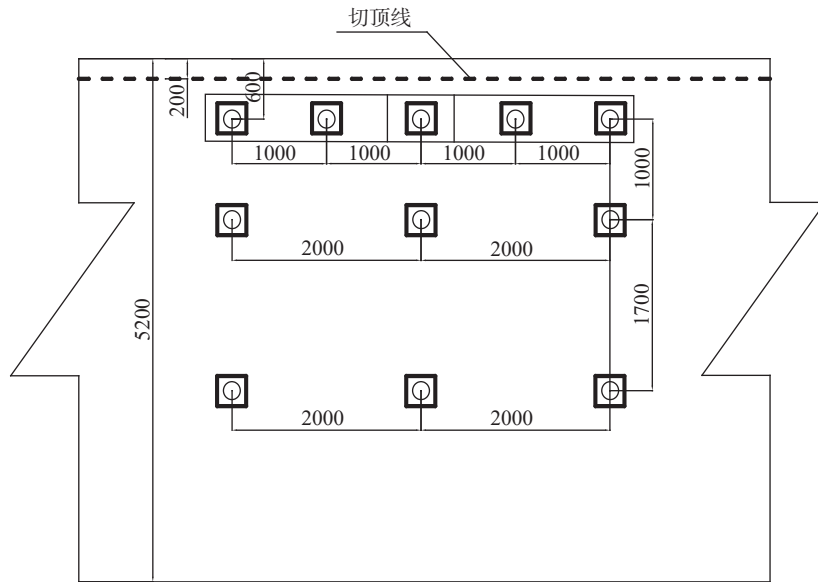


图4 XV1213巷恒阻大变形锚索支护图

因此,通过理论计算和数值模拟的综合分析,巷道切顶高度设计为10.0 m。

3.2.2 切缝角度

根据相似顶板条件切顶卸压研究^[5]可知:

1) 切缝无偏转角,采空区悬空区范围较大,巷道右帮处竖向应力较大,顶板跨落不彻底,顶板跨落缓慢;工作面前方超前应力影响范围较大,留巷侧侧应力集中区距离顺槽距离最远。

2) 10°偏转角切缝,采空区悬空范围较小,顶板跨落速度较快;超前应力区域形状规则,范围较小;留巷侧侧应力集中距顺槽较远;

3) 15°偏转角切缝,采空区悬空范围较小,顶板跨落速度较快;超前应力区域形状规则,范围较小;左侧应力集中距顺槽最近且应力集中程度较小;

通过对相似开采条件的矿井实际效果分析可知:切缝存在明显角度效应,不但能够影响采空区顶板跨落,还能够影响应力集中区分布;适宜的切缝偏转角有利于采空区顶板跨落,有助于使采场应力分布更加合理。因此确定本次最佳切缝角度为15°。

3.2.3 切缝孔间距

现阶段,爆破原理及定向爆破均处于探索阶段,只能定性的分析还不能定量计算。因此对于定向爆破切缝这种新技术,本课题组只能通过现场工程实验判断,来确定合适的单孔装药量及爆破孔孔间距。根据以往爆破经验,对于一般坚硬顶板取500 mm孔间距,爆破和留巷能得到比较好的效果^[6]。

3.3 切顶卸压无煤柱自成巷支护设计方案

随着回采时顶板的不断跨落,采空区矸石将会

涌入留巷,因此需要在留巷采空区侧进行巷帮挡矸支护,同时也要对留巷巷道内部进行加强支护,具体支护设计方案如下:

3.3.1 巷旁支护

设计采用可缩性U型钢进行巷旁支护,考虑到影响钢强度的主要因素为钢型号、U型钢搭接长度和钢卡缆位置等,在对25号可缩U型钢挡矸支护结构进行优化时决定从增大钢型号、增加钢搭接长度和增加钢卡缆数量3个方面考虑。项目在W1-106运顺留巷选择29U型钢,施加扭矩为100 Nm,增加3 m长U型钢的使用,保证现场安装U型钢时可钢搭接长度不得小于2 m,同时,将钢卡缆增加到3个,现场应用后,29号可缩U型钢挡矸支护很少发生弯曲变形,整体护帮效果良好。因此,工作面架后设计采用可缩性29U型钢+钢筋网进行支护,钢筋网与U型钢通过铁丝捆扎,U型钢间距500 mm。

3.3.2 巷内支护

随着工作面不断推进,巷道不同位置受工作面采动影响程度发生变化,支护方案也发生改变,具体支护如下:

煤壁前方0~30 m:与传统工作面正常回采时的超前支护相同,采用液压单体柱支护,单体柱排距1000 mm,每排2根。

工作面架后0~200 m:巷道内部支护采用“单体柱+π型梁”的支护方式,1根π型梁下部支设4根单体液压支柱,单体柱间距为1000 mm,排距1000 mm。在巷道采空区侧,为了防止顶板冒落的矸石进入巷道,需进行挡矸支护,挡矸支护采用单体液压

支柱+U型钢可缩支架联合支护，在巷道采空区侧沿顶板切缝线布置，单体液压支柱和U型钢可缩支架

的间距均为500 mm，单体液压支柱和U型钢可缩支架呈交错布置，支护平面如图5所示。

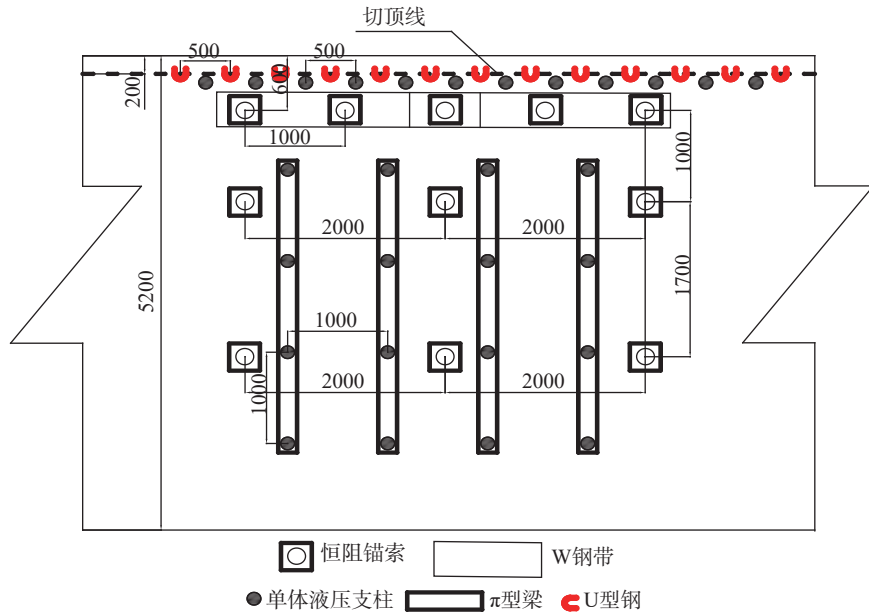


图5 临时与挡杆支护平面图

架后200 m之后：此段巷道距离回采工作面较远，随着工作面不断远离，此处顶板逐渐回转下沉并压实采空区，采空区顶板对巷道的应力作用逐渐趋于稳定，因此可根据现场矿压监测情况逐步撤回单体液压支柱，将每排单体液压支柱数量逐步由4根变为3根、2根，最后全部撤回。

4 切顶卸压自动成巷试验效果分析

4.1 矿压监测分析

4.1.1 顶板离层变化规律分析

在XV1213巷道共布设10个顶板离层监测点，对测点离层量进行分析可知：切眼处顶板深基点（12 m顶板，即锚索锚固范围内）最大离层值为160 mm，浅基点（5 m顶板）最大离层值为80~160 mm。当监测点滞后工作面200 m后，顶板离层值逐渐趋于稳定。对距离切眼116 m（4号）、166 m（5号）处离层分析，工作面推过该位置后，顶板开始离层。当工作面推过40 m之后，顶板已经开始垮落运动，离层仪深基点出现失效的情况。分析深基点位置，即顶板12 m处附近可能为泥岩/石灰岩交界处，深基点锚固端在不稳定的泥岩/石灰岩交界中，顶板折断和下沉运动过程中，深基点处岩层破坏导致基点失效。对距离切眼位置316 m（8号）离层仪分析，在超前工作面30 m位置，2条离层监测

曲线同步异常升高，分析原因为离层仪表面固定点受到超前临时单体棚和架后临时单体棚的干扰，架棚距离离层仪位置较近导致顶板表面的金属网受到架棚影响变形，从而影响离层仪表面固定位置，导致离层监测曲线的异常。

针对上述情况，需根据顶板岩性结构和恒阻锚索的施工情况确定基点的锚定位置，使基点固定在稳定坚硬的岩层中，在恒阻锚索锚固端上方1~2 m位置较佳。巷内支护π梁时需要注意远离离层仪所在位置，适当调整π梁架设间距，尽量使离层仪在2架π梁中间。

4.1.2 单体液压支柱变化规律分析

在锚索应力计和顶板离层仪同断面的位置建立巷内临时支护单体压力和缩量测点，每个测点选择3个单体进行对比监测。通过分析得到单体缩量变化的具体情况：在同一排单体液压支柱中，单体支柱的位置不同，下缩量大小差异明显，表现为挡矸侧单体支柱缩量>巷中单体支柱缩量>实体煤侧单体支柱缩量，这种变化特点符合切顶短臂梁的挠曲特性。随着工作面向前推进，挡矸侧单体支柱缩量距离工作面214 m后趋于稳定，巷中单体支柱缩量距离工作面192 m后趋于稳定，实体煤侧单体支柱缩量距离工作面226 m后趋于稳定，表明距离工作面至少200 m后，巷道内的顶板下沉趋于稳定。由

于留巷后底板留有厚度不小于 300 mm 的泥岩，现场观测发现，随着滞后工作面距离的增大，巷道底鼓明显，单体“钻底”现象明显，“钻底”深度大于 300 mm，这是单体缩量与顶板下沉量不一致的主要原因。

4.1.3 巷道围岩变形规律分析

为观测巷道的围岩移近量及移近规律，在巷道内部布设十字位移监测点，每 20 m 布置一组测点。经统计，巷道顶板变形规律如下：顶底板移近平均量为 264 mm，顶板下沉量平均 118 mm，底鼓 136 mm；工作面后 70 m 范围内，巷道变形大，围岩压力明显；滞后工作面 90 m 范围内，巷道变形速度减小；滞后工作面 180 m 范围内，顶板和底板以小于 1 mm/d 的速度靠近，巷道逐渐稳定。当滞后工作面后距离超过 200 m 时，巷道两帮移近量 0~140 mm，平均移近量 89 mm；两帮变形主要是由于副帮，即煤壁侧的变形导致，挡矸侧的 U 型钢基本没有移近和变形，留巷内两帮移近量变化不大；滞后工作面 40~80 m 范围内，帮鼓速率较大，滞后工作面 150 m 以后，巷道帮鼓速率变小，巷道变形趋于稳定。

4.2 现场留巷效果

通过切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术对 XV1306 工作面 XV1213 巷道进行沿空自动成巷试验，经过 4 个多月时间，工作面已回采并成功留巷 461 m。通过 XV1213 巷留巷表面位移监测结果表明，XV1213 巷留巷期间，回采期间顶板完好，顶板下沉量平均 118 mm，下沉量占巷道高度 4.7%（巷道平均高度为 2.5 m）；两帮移近量平均 89 mm，两帮移近量占巷道宽度的 1.7%（巷道平均宽度为 5.2 m），顶板离层最大为 160 mm，满足下一工作面回采空间要求。通过矿压监测分析，得出架后 50 m 左右为第一关键动压区，巷道矿压显现剧烈，架后 90 m 左右为第二关键动压区，巷道逐渐开始稳定，架后 200 m 之后为成巷稳定区。成巷区巷道顶板整体下沉量较小，碎石巷帮无明显侧鼓现象，实体煤帮无明显片帮现象，取得了较好的应用效果，成巷效果如图 6 所示。

5 结论

以亿欣煤业 XV1213 巷为背景，通过数值模拟



图 6 现场留巷照片

分析了巷道顶板无切缝和有切缝模型的应力和位移情况，表明顶板切缝对巷道的稳定性起到了显著效果。根据工作面现场条件设计了切顶卸压自动成巷恒阻大变形锚索关键参数、顶板定向预裂切缝关键参数和无煤柱自成巷支护设计方案，现场应用表明，切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术形成的留巷巷道顶板整体下沉量较小，碎石巷帮无明显侧鼓现象，巷道成型效果理想，满足了无煤柱巷道的使用要求。经计算，切顶卸压无煤柱开采每米可创造经济效益 8763.28 元，为提高煤炭资源回收率、缓解采掘衔接紧张、降低巷道掘进和支护成本等方面起到了重要作用，经济和社会效益显著。

参考文献:

- [1] 李彪.110 工法在中厚煤层开采中的应用 [J]. 煤, 2022, 31(12): 13-16.
- [2] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制技术及应用 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16-41.
- [3] 王朋卫. 切顶卸压沿空留巷预裂切缝技术参数在亿欣煤矿的应用 [J]. 山西煤炭, 2019, 39(4): 52-55.
- [4] 曹泽峰. 密集钻孔技术在东瑞煤矿切顶卸压的应用 [J]. 山东煤炭科技, 2022(2): 72-74.
- [5] 杨红运, 李勇, 等. 坚硬顶板切顶成巷结构演化与稳定控制机理 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 766-773.
- [6] 张广云. 亿欣矿坚硬顶板切顶卸压无煤柱开采技术应用试验研究 [J]. 煤炭科技, 2019(6): 31-35.

作者简介:

崔豪桐 (1992-), 男, 工程师, 中国矿业大学采矿工程专业毕业, 研究方向: 煤矿开采。E-mail: luss198@163.com

(收稿日期: 2024-4-26)