



跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理及控制技术研究

郭志飏 赵元欣 杨东山 高敬威 尹松阳 蒯孝辉

引用本文:

郭志飏, 赵元欣, 杨东山, 等. 跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 14–28.
GUO Zhibiao, ZHAO Yuanxin, YANG Dongshan. Study on roof deformation mechanism and control technology of cross-fault roof cutting and pressure relief self-forming roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 14–28.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0751>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究

Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 117–123 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/741f9847-1745-4338-aa7a-fe7d9e8ab757>

深井高应力切顶卸压沿空掘巷围岩控制技术

Surrounding rock control technology of gob-side entry driving in deep shaft with high stress roof cutting and pressure relief
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 173–179 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f1c5bc1-b5b6-4d42-a6c1-9d46a6abe1aa>

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>

密集钻孔切顶卸压关键参数影响因素研究及应用

Research and application of influencing factors of key parameters of roof cutting and pressure relief by dense drilling
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 243–253 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0095>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭志飏, 赵元欣, 杨东山, 等. 跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 14–28.

GUO Zhibiao, ZHAO Yuanxin, YANG Dongshan, *et al.* Study on roof deformation mechanism and control technology of cross-fault roof cutting and pressure relief self-forming roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 14–28.

跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理及控制技术研究

郭志飏^{1,2}, 赵元欣^{1,2}, 杨东山^{1,2}, 高敬威^{1,2}, 尹松阳^{1,2}, 蒯孝辉^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对跨断层切顶卸压自成巷顶板变形大不易支护的问题, 以棋盘井煤矿东区 11101 工作面运输巷为工程背景, 探究跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理, 研究“切顶卸压+恒阻锚索”支护对跨断层切顶卸压自成巷顶板变形的控制效果。建立力学分析模型研究断层及切顶卸压自成巷顶板各相关参数对巷道直接顶应力的影响, 将切顶卸压自成巷顶板变形过程划分为 4 个阶段, 研究巷道顶板各阶段及总垂直位移量计算方法并给出计算公式, 并将相关参数代入公式求解跨断层切顶卸压自成巷顶板垂直位移量; 利用 3DEC 数值模拟软件建立跨断层切顶卸压自成巷数值计算模型, 研究断层附近巷道顶板应力应变演化规律及恒阻锚索控制效果, 研究结果表明: 数值模拟上下盘巷道顶板变形数据与理论分析所得数据结果误差分别为 1.14%、4.04%; 恒阻锚索能够有效减小巷道顶板变形, 与未使用恒阻锚索模型相比, 上盘巷道切缝侧顶板垂直位移量减小至 16.8%, 下盘巷道切缝侧顶板垂直位移量减小至 50.7%; 上下盘巷道顶板在工作面回采过巷道测点断面过程中出现不同程度的应力集中, 其中上盘巷道顶板的垂直应力集中值大于下盘巷道, 分别为 5.72 MPa 和 4.48 MPa; 恒阻锚索通过减缓断层附近巷道顶板变形速率, 待巷旁碎石帮充填完成后与碎石帮共同对巷道顶板变形进行控制; 将 11101 工作面运输巷围岩位移监测数据与理论模型计算结果相比较, 误差均在 10% 以内, 证明“切顶卸压+恒阻锚索”支护方式对跨断层巷道顶板变形具有良好的控制效果。

关键词: 切顶卸压; 跨断层开采; 3DEC; 顶板变形; 应力应变演化; 恒阻锚索

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)06-0014-15

Study on roof deformation mechanism and control technology of cross-fault roof cutting and pressure relief self-forming roadway

GUO Zhibiao^{1,2}, ZHAO Yuanxin^{1,2}, YANG Dongshan^{1,2}, GAO Jingwei^{1,2}, YIN Songyang^{1,2}, KUAI Xiaohui^{1,2}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem that roof deformation of cross fault roof cutting and pressure relief self-formed roadway is large and difficult to support, the mechanism of roof deformation of self-formed roadway in cross fault roof cutting and pressure-relieving roadway is studied based on the engineering background of the transport channeling of No. 11101 face in the eastern district of Qipanjin Coal Mine, and the effect of the support method of “roof cutting and pressure relief + constant resistance anchor cable” on roof deformation control of self-formed roadway in cross-fault roof cutting and pressure relieving roadway is studied. A mechanical analysis model was established to study the influence of the relevant parameters of the roof on the direct roof stress of the roadway, and the deformation process of the roof of the roadway was divided into four stages. The calculation method of each stage and the total vertical displacement of the roof of the roadway were studied and the calculation formula was given, and the relevant parameters were substituted into the formula to solve the vertical displacement of the roof of the roadway across the fault. 3DEC numerical simulation software was used to establish the numerical

收稿日期: 2023-07-17

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-0751

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41941018); 北京中国矿业大学教育基金资助项目(XD2022004); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室创新基金资助项目(XDJJ2020001-003)

作者简介: 郭志飏(1976—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: guozhibiaoobj@126.com

calculation model of self-formed roadway with cross fault roof cutting and pressure relief, and the stress-strain evolution law of roadway roof near the fault and the control effect of constant resistance anchor cable were studied. The research results show that the error between the numerical simulation and theoretical analysis data of roadway roof deformation is 1.14% and 4.04%, respectively. The constant resistance anchor cable can effectively reduce the deformation of roadway roof. Compared with the non-constant resistance anchor cable model, the vertical displacement of roof on slit side of upper wall roadway is reduced to 16.8%, and the vertical displacement of roof on slit side of lower wall roadway is reduced to 50.7%. The roof of upper and lower wall roadway will have different degree of stress concentration in the process of mining through the measurement section of roadway, and the vertical stress concentration value of upper wall roadway roof is larger than that of lower wall roadway, which is 5.72 MPa and 4.48 MPa respectively. The constant resistance anchor cable can reduce the deformation rate of roadway roof near the fault, and control the deformation of roadway roof jointly with the gravel wall after the filling is completed. By comparing the displacement monitoring data of surrounding rock along the channel of No. 11101 face transport with the calculation results of the theoretical model, the error is less than 10%, which proves that the support method of “roof cutting and pressure relief + constant resistance anchor cable” has a good control effect on the roof deformation of cross fault roadway.

Key words: roof cutting and pressure relief; cross fault mining; 3DEC; roof deformation; stress and strain evolutions; constant resistance anchor cable

0 引 言

随着我国煤炭资源开采逐渐向复杂地质构造推进,何满潮院士在研究工程岩体大变形灾害致灾机理及控制理论时提出了“切顶短壁梁”理论,并基于该理论形成切顶卸压无煤柱自成巷技术^[1-2]。该技术无需保留区段煤柱,提高了矿井资源采出率,并且缓解采掘接续紧张,解决隅角瓦斯积聚等灾害问题,这一技术的成功应用为我国由矿业大国向矿业强国的发展奠定了理论和技术基础^[3-4]。

切顶卸压无煤柱自成巷主要通过顶板定向切割、恒阻锚索支护和矸石封堵支护技术,利用采空区地压和岩石碎胀特性,通过采空区顶板的破碎矸石对采空区进行充填,使巷道得到恢复^[5]。石占山等^[6]建立了压实应力调整阶段底板应力变化量定性分析模型,丰富了自成巷理论。HE Manchao等^[7-8]通过开发无煤柱自成巷等系列关键技术,形成了110和N00工法,研究表明切顶卸压开采方法不仅有效消除了掘巷引起的应力集中,也减小了应力峰值与巷道间距离。经过数年的探索与积累,我国已经形成了一套较为完善的沿空留巷技术支持体系^[9]。

我国煤矿地质条件差别较大,为了实现切顶卸压自成巷在全国范围内的推广,不可避免要遇到多种地质构造。断层是我国煤矿开采过程中常见的地质构造,断层的存在会切割破坏岩层的整体性,影响采动应力的传播^[10]。早在1918年,LLOYD^[11]就发现煤层开采造成断层活化会导致地表非均匀沉降。KOWALCZYK^[12]指出地表台阶下沉量是可通过计算得到的。SAINOKI等^[13]分析得出断层受采动引起的最大剪切位移与断层倾角、采深等因素有关。LIU^[14]将巷道直接顶假设为弹性体分析采空区顶板

切割后直接顶应力特征。SUN Xiaoming等^[15]利用FLAC^{3D}探讨了非对称底鼓变形巷道破坏机理和耦合控制。龙军等^[16]通过FLAC^{3D}建立断层模型验证断层能够阻隔应力波传递。高玉兵^[17]通过现场工程试验证明,断层构造带附近工作面超前支承压力较常规地质条件增大。于秋鸽^[18]通过数值模拟加相似实验研究开采位置对断层稳定性的影响。赵毅鑫等^[19]研究岩石力学试验及数值模拟结果表明沿断层面岩层高位点先于低位点受到采动影响。颜永斌等^[20]利用数值模拟和室内模型试验的方法对埋深、断层带宽度和倾角度数与跨断层带隧道变形受力的关系进行研究。离散元3DEC数值模拟软件能够对采场顶板断裂垮落过程及切顶卸压自成巷围岩的非连续变形特征进行模拟。PENG等^[21]利用3DEC数值模拟软件模拟危险岩体运动。SUN等^[22]建立3DEC模型,获取了巷道变形、应力和裂缝特征。

以棋盘井煤矿东区11101工作面为工程背景,该工作面运输巷跨断层段在工作面回采之前便出现较大变形,为解决该问题并保障留巷稳定,采用“切顶卸压+恒阻锚索”支护设计,并对跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理及控制技术进行研究,分析工作面回采前后切顶卸压自成巷顶板垂直应力变化特征,推导出巷道顶板垂直位移量计算公式;通过3DEC数值模拟软件,分析研究“切顶卸压+恒阻锚索”支护方式下的顶板应力应变演化规律,并通过数值模拟结果与现场监测数据对理论研究结果进行论证。希望通过研究能为跨断层切顶卸压自成巷顶板支护参数提供借鉴,丰富切顶卸压自成巷支护理论体系,研究成果可为切顶卸压自成巷技术在断层地质条件下的推广做出理论与经验的帮助。

1 工程概况

11101工作面为棋盘井煤矿东区首采面,该工作面布置在9-1号煤层中,煤层埋藏深度450~570 m,工作面长度225 m,工作面走向长度1 760 m,平均厚度3.05 m。运输巷为沿空留巷,顶板岩性以细粒砂岩为主,基本顶为砂质泥岩,底板岩性以砂质泥岩为主,工作面在开采过程中遇到一个高差为4.4 m,倾向角为74°,走向角为344°的正断层ZF32,运输巷与ZF32断层空间关系如图1所示。

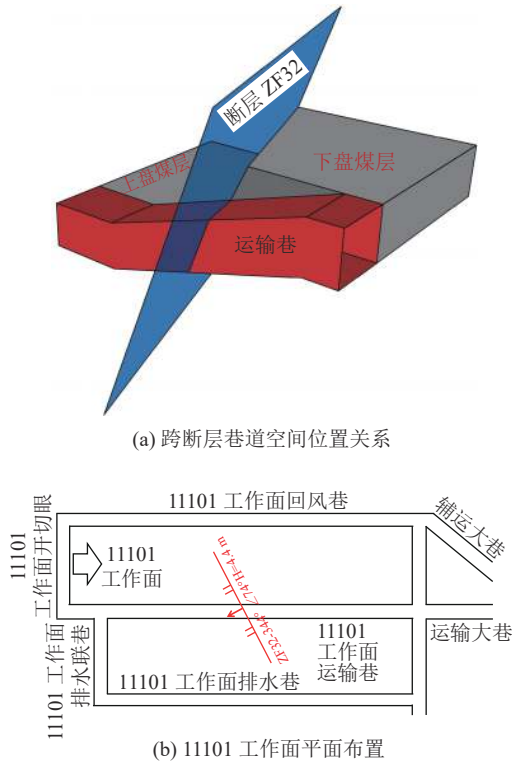


图1 跨断层巷道工作面及断层关系

Fig.1 Cross fault roadway working face and fault relation

巷道断面设计为矩形断面,巷道净宽5 200 mm,净高3 250 mm。锚杆采用 $\phi 20 \text{ mm} \times 2\,200 \text{ mm}$ 螺纹钢锚杆,锚杆间排距900 mm \times 900 mm;锚索采用 $\phi 21.6 \text{ mm} \times 7\,200 \text{ mm}$ 的钢绞线制作,间排距2 000 mm \times 2 700 mm,每排2根。巷道原支护断面锚杆索布置如图2所示。

在掘巷并完成顶板支护,工作面还未回采之前运输巷跨断层段顶板便出现明显的变形,严重影响工作面回采及巷道后续留巷过程,为保障该区段平巷在留巷过程中的安全与留巷后的巷道完整,采用“切顶卸压+恒阻锚索”为主体的支护设计思路,对自成巷顶板变形进行控制。

通过确定合理的切顶高度,使切顶高度内岩层垮落后能充满整个采空区,对更上位的岩层起到支

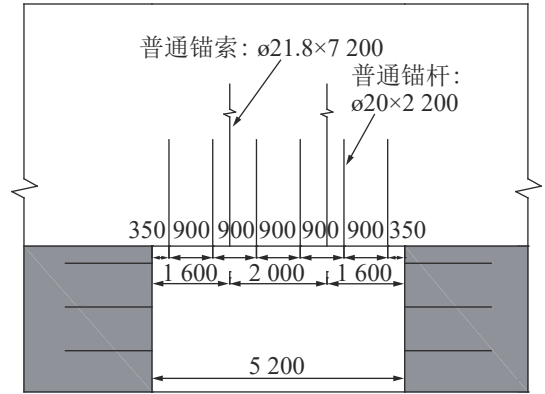


图2 巷道原支护断面锚杆索布置

Fig.2 Bolt cable layout of original roadway supporting section

撑作用,降低顶板岩层回转下沉对留巷的扰动,有效改善沿空留巷围岩应力,提高其稳定性。根据岩体碎胀理论,并考虑到顶板下沉量和底鼓量^[23]。

$$H_F = \frac{M - \Delta H_1 - \Delta H_2}{K_s - 1} \quad (1)$$

式中: H_F 为切缝高度,m; M 为采高,m; ΔH_1 为顶板下沉量,m; ΔH_2 为底鼓量,m; K_s 为顶板岩体碎胀系数。

恒阻锚索长度应高于预裂切缝高度,使恒阻锚索在留巷的过程中发挥较好的悬吊作用,从而保证恒阻锚索对巷道顶板进行变形控制,即恒阻锚索长度 $L_H > H_F$ 。

2 跨断层巷道顶板变形机制分析

2.1 跨断层切顶卸压自成巷直接顶所受应力

以正断层上盘开采为例,分析跨断层切顶卸压自成巷工作面回采前后巷道直接顶垂直应力的变化特征,跨断层切顶卸压自成巷工作面回采过程如图3所示。

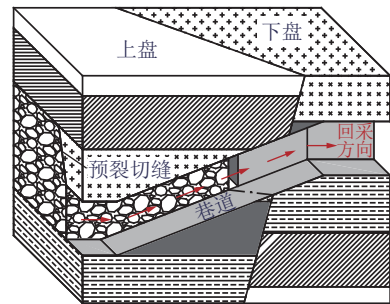


图3 跨断层切顶卸压自成巷工作面回采过程

Fig.3 Cross-fault cutting roof relief mining process of self-formed roadway face

切顶卸压自成巷跨断层是一个复杂的力学过程,为了初步得到巷道直接顶应力的表达式,将力学分析模型简化为均质弹性条件进行研究,并假设关键

块破断位置即为图中断面位置,且上下盘同种岩层的各项性质均相同。

2.1.1 巷道走向方向断层对直接顶应力影响

为了研究工作面回采过程中跨断层切顶卸压自成巷直接顶所受应力的演变情况,建立跨断层切顶卸压自成巷顶板力学分析模型,对上下盘巷道直接顶应力进行分析,跨断层巷道走向方向直接顶应力如图4所示。

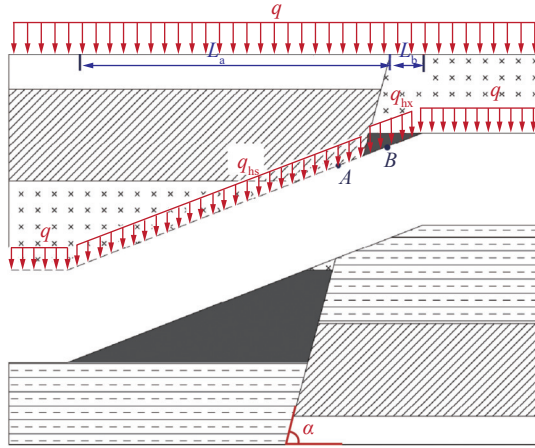


图4 跨断层巷道走向方向直接顶应力示意

Fig.4 Diagram of direct roof stress across strike direction of fault roadway

图4中点A、点B分别为断层上下盘的直接顶应力分析点,分析得:

$$q_{hs} = k_1 q(1 - K) = k_1 \gamma H(1 - K) \quad (2)$$

$$q_{hx} = k_1 q(1 + K) = k_1 \gamma H(1 + K) \quad (3)$$

式中: k_1 为沿巷道走向方向的巷道顶板支撑应力系数, $0 < k_1$, 该系数会随工作面的回采而变化; q 为上覆岩层应力, $q = \gamma H$, γ 为上覆岩层平均重度, H 为上覆岩层厚度, MPa; q_{hs} 为上盘巷道走向方向的直接顶应力, MPa; q_{hx} 为下盘巷道走向方向的直接顶应力, MPa; K 为断层上盘向下盘的应力传递系数, $0 < K < 1$ 。

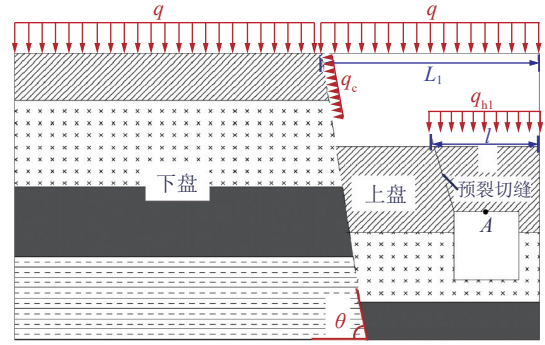
2.1.2 工作面倾向方向断层对直接顶应力影响

如图5为在点A工作面倾向方向进行直接顶应力分析,研究工作面回采通过点A前后的巷道直接顶应力变化情况,图中 q_c 为上盘传递给下盘的应力, q_{sl}' 为碎石帮承载的应力, q_{hl} 、 q_{hl}' 分别为工作面回采前及工作面回采后的巷道直接顶应力。

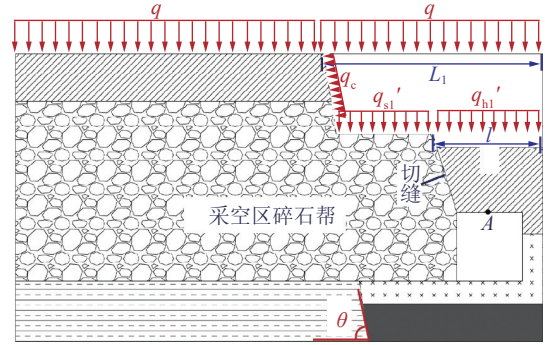
图5中角 θ 为工作面与断层在工作面倾向方向的夹角,该角可通过几何关系求得。工作面与断层各角度几何关系如图6所示。

根据几何关系可得

$$\cos \varepsilon = \cos \beta \cos \theta \quad (4)$$



(a) 工作面回采前



(b) 工作面回采后

图5 工作面回采经过点A前后巷道直接顶应力变化情况

Fig.5 Changes of direct roof stress in roadway before and after stopping point A

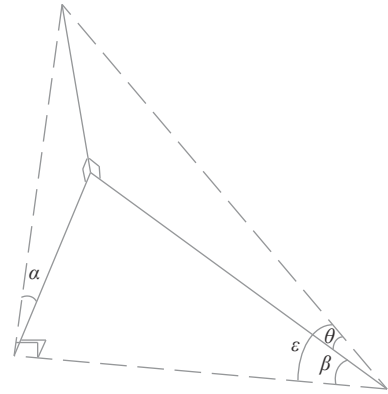


图6 工作面与断层各角度几何关系示意

Fig.6 Schematic of geometric relationship between working face and fault at various angles

式中: ε 为断层与工作面交线和断层与水平面交线的夹角, ($^\circ$); β 为断层走向与工作面的夹角, ($^\circ$); θ 为断层与工作面倾向的夹角, ($^\circ$).

同理, 根据几何关系可得

$$\sin \varepsilon = \cos(90^\circ - \alpha) \cos(90^\circ - \theta) = \sin \alpha \sin \theta \quad (5)$$

式中: α 为断层倾向角, ($^\circ$);

联立式(4)、式(5)得

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{1 - (\cos \beta)^2}{(\sin \alpha)^2}} \quad (6)$$

根据上式可知点 A 处上覆岩层应力

$$q = \frac{1}{2L_1} \gamma H \left(2L_1 + \frac{H}{\cos \theta} \right) \quad (7)$$

式中: q 为上覆岩层应力, MPa; γ 为上覆岩层平均重度, kN/m; H 为上覆岩层厚度, m; L_1 为点 A 处上覆基本顶宽度, m。

工作面回采前, 由于断层的影响, 上盘上覆岩层应力会向下盘传递, 剩余应力则由巷道直接顶和工作面共同承担。假设断层上盘向下盘的应力传递系数为 K , 由此可得回采前点 A 巷道直接顶应力 q_{h1} 为:

$$q_{h1} = k_2 q (1 - K) \quad (8)$$

式中: k_2 为沿工作面倾向方向的巷道顶板支撑应力系数, $0 < k_2$, 该系数会随工作面的回采而变化; q_{h1} 为点 A 处工作面回采前巷道直接顶应力, MPa。

联立式 (6)—式 (8), 得工作面回采之前点 A 处巷道直接顶应力 q_{h1} 为:

$$q_{h1} = k_2 \frac{1}{2L_1} \gamma H \left[2L_1 + H \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right)^2} \right] (1 - K) \quad (9)$$

工作面回采过后, 采空区顶板垮落形成碎石帮。此时, 除传递给下盘的应力, 剩余上覆岩层压力由巷道直接顶及巷旁碎石帮承担, 假设巷旁碎石帮及巷道直接顶各承受一半压力, 即

$$q_{h1}' = k_2 \frac{1}{4l} \gamma H \left[2L_1 + H \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right)^2} \right] (1 - K) \quad (10)$$

式中: q_{h1}' 为点 A 处工作面回采后巷道直接顶应力, MPa; l 为巷道直接顶上部宽度, m。

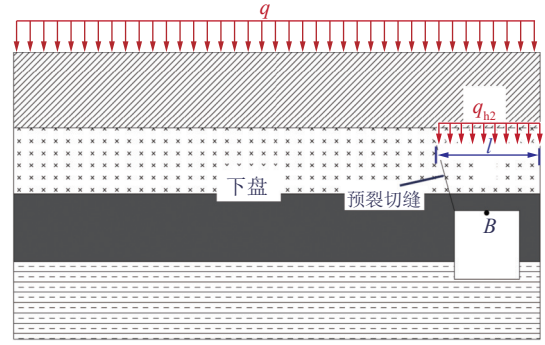
通过分析比较 q_{h1} 与 q_{h1}' , 发现当 $L_1 > 2l$ 时, $q_{h1} < q_{h1}'$; 当 $L_1 < 2l$ 时, $q_{h1} > q_{h1}'$ 。且点 A 处工作面回采前后巷道直接顶应力 q_{h1} 与 q_{h1}' 与断层倾向角成反比, 与断层走向与工作面的夹角成正比。

图 7 为在点 B 工作面倾向方向直接顶应力分析模型, 研究工作面回采通过点 B 前后的巷道直接顶应力变化情况, 并与点 A 进行对比, 进一步研究断层对上下盘切顶卸压自成巷巷道直接顶应力的影响。

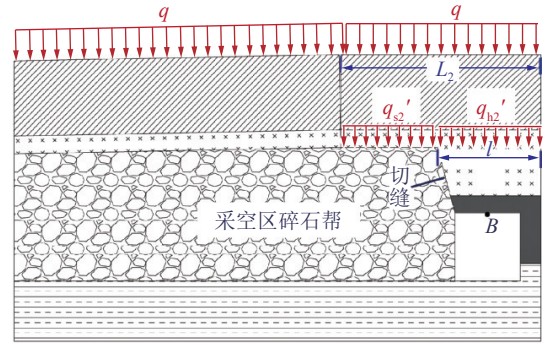
点 B 巷道直接顶应力表达式为

$$q_{h2} = k_2 q = k_2 \gamma H \quad (11)$$

$$q_s = \begin{cases} q_{h1} + q_{hs} = \frac{1}{4L_1} \gamma H (1 - K) \left[2k_1 L_1 + k_2 (1 + H) \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right)^2} \right], & \text{工作面回采前} \\ q_{h1}' + q_{hs} = \frac{1}{2} k_1 \gamma H (1 + K) + \frac{1}{2} k_2 \gamma H \left[2L_1 + H \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \right)^2} \right] (1 - K), & \text{工作面回采后} \end{cases} \quad (13)$$



(a) 工作面回采前



(b) 工作面回采后

图 7 工作面回采经过点 B 前后巷道直接顶应力变化情况
Fig. 7 Changes of direct roof stress in roadway before and after stoping point B

式中: q 为上覆岩层应力, MPa; q_{h2} 为点 B 处工作面回采前巷道直接顶应力, MPa;

工作面回采过后, 点 B 处巷旁采空区顶板垮落形成碎石帮, 与巷道顶板共同支撑上覆岩层, 假设巷旁碎石帮及巷道直接顶各承受一半的剩余上覆岩层压力, 即

$$q_{h2}' = k_2 \frac{L_2}{2l} \gamma H \quad (12)$$

式中: L_2 为破断基本顶宽度, m; l 为巷道直接顶上部宽度, m; q_{h2}' 为点 B 处工作面回采后巷道直接顶应力, MPa。

通过分析比较 q_{h2} 与 q_{h2}' , 发现当 $L_2 > 2l$ 时, $q_{h2} < q_{h2}'$; 当 $L_2 < 2l$ 时, $q_{h2} > q_{h2}'$ 。

2.1.3 跨断层巷道上下盘直接顶应力

设 q_s 为上盘巷道直接顶应力, q_x 为下盘巷道直接顶应力, 结合上述分析可知上下盘巷道直接顶应力在工作面回采前后的表达式为

$$q_x = \begin{cases} q_{h2} + q_{hx} = \frac{1}{2} \gamma H [k_1 (1 + K) + k_2], & \text{工作面回采前} \\ q_{h2} + q_{hx} = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{k_2 L_2}{2l} + k_1 (1 + K) \right], & \text{工作面回采后} \end{cases} \quad (14)$$

根据上述分析可知,上盘巷道直接顶应力 q_s 的大小与断层倾向角成反比,与断层走向与工作面的夹角成正比;上盘巷道直接顶应力 q_s 、下盘巷道直接顶应力 q_x 的大小都受基本顶宽度 L 和直接顶上部宽度 l 影响,当 $L > 2l$ 时,工作面回采前直接顶应力小于工作面回采后直接顶应力;当 $L < 2l$ 时,工作面回采前直接顶应力大于工作面回采后直接顶应力。

2.2 巷道顶板垂直位移求解

切顶卸压自成巷顶板变形过程根据顶板受力的变化可分为4个阶段,通过能量守恒定律可以实现对各阶段垂直位移的求解^[24],将上下盘巷道顶板应力分别代入垂直位移计算公式,即可对受断层影响的上下盘巷道顶板垂直位移进行计算,各阶段变形示意图中红线代表该阶段结束时的顶板位置。

2.2.1 切顶卸压自成巷顶板变形过程

第1阶段,对巷道顶板进行预裂切缝,由于切缝的产生直接顶会发生少量旋转变形直至再次进入平衡状态,第1阶段切顶卸压巷道顶板变形如图8所示。

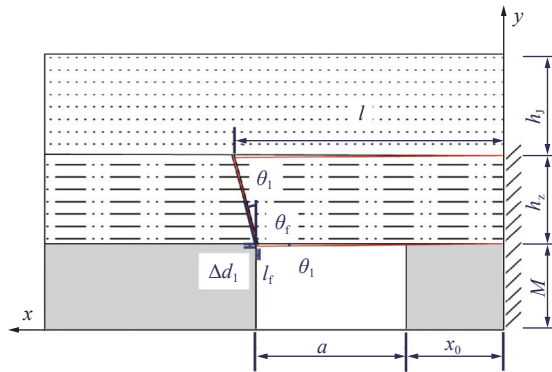


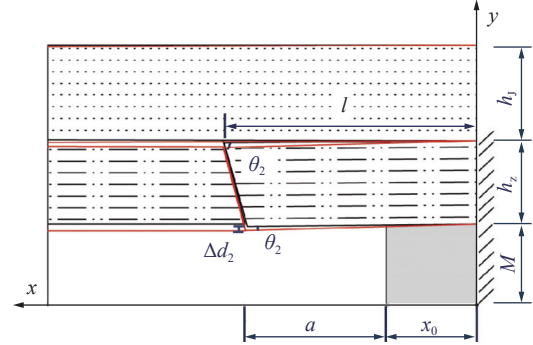
图8 第1阶段切顶卸压巷道顶板变形示意

Fig.8 Schematic of roof deformation of roadway in the first stage

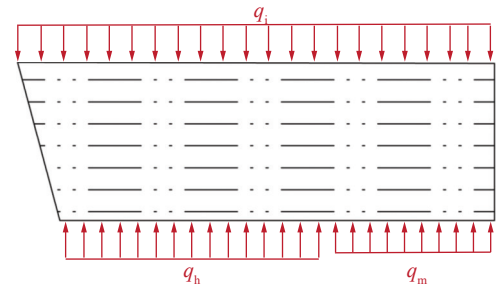
第2阶段,工作面采过后在巷旁形成采空区,巷道直接顶在上覆岩层压力与重力的作用下发生变形,从采空区形成到安装好巷旁挡矸及巷内高强度支架这段时间内巷道顶板的变形记为顶板变形的第2阶段,如图9所示。

第3阶段,在巷内采用高强度支架对巷道顶板进行支撑,采空区顶板岩体在上覆岩层压力及重力作用下,逐渐垮落成碎石落入采空区,由于碎石并未对采空区完全充填,巷内支架无法对顶板上部应力完全补偿,巷道顶板在上覆岩层压力及重力的作用

下继续变形,这段时间内巷道顶板的变形,如图10



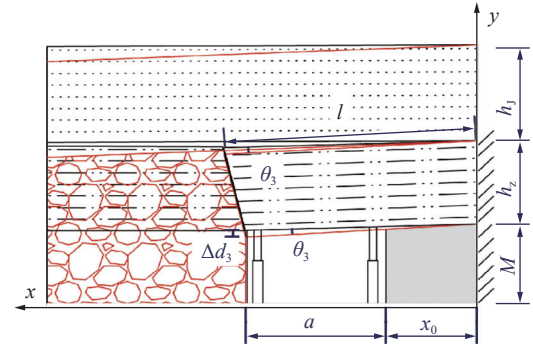
(a) 第2阶段巷道顶板变形示意



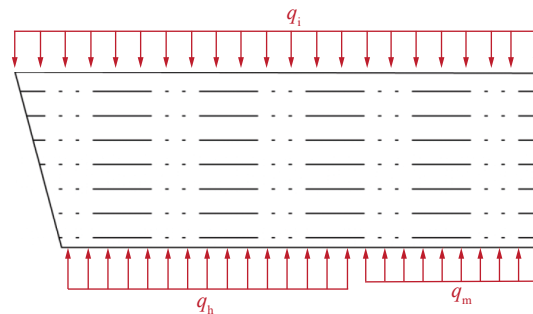
(b) 第2阶段巷道直接顶受力示意

图9 第2阶段切顶卸压巷道顶板力学模型

Fig.9 Mechanical model of roadway roof in the second stage



(a) 第3阶段巷道顶板变形示意



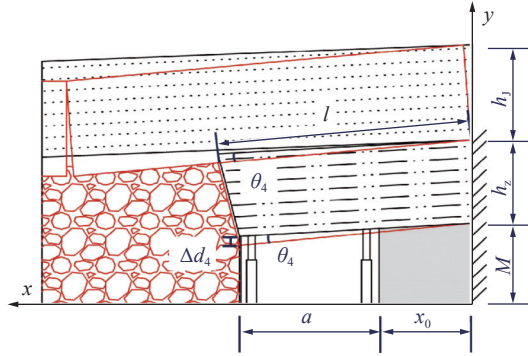
(b) 第3阶段巷道直接顶受力示意

图10 第3阶段切顶卸压巷道顶板力学模型

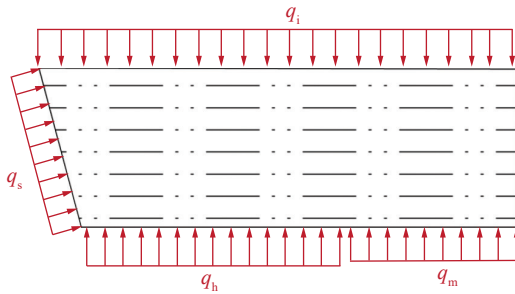
Fig.10 Mechanical model of roadway roof in third stage

所示。

第4阶段,采空区顶板岩体垮落矸石对采空区完全充填形成碎石帮,此时,基本顶传递的上覆岩层荷载由碎石帮和巷道直接顶承受,碎石帮经过一段时间被压实,巷道直接顶在压实过程中仍会产生变形,第4阶段巷道顶板变形如图11所示。



(a) 第4阶段巷道顶板变形示意



(b) 第4阶段巷道直接顶受力示意

图11 第4阶段切顶卸压巷道顶板力学模型

Fig.11 Mechanical model of roadway roof in the fourth stage

经过上述4个阶段后,巷道顶板整体变形趋于稳定,撤离巷内高强度支架后变形量基本不再增加。

2.2.2 切顶卸压自成巷顶板垂直位移量计算

根据已有的岩体极限平衡理论研究,右边界在实体煤塑性区和弹性区交界处为固定边界^[25]。巷道直接顶视为刚体,其上部受破断基本顶岩块的挤压,下部在不同阶段分别受到巷内液压支架、顶板 NPR 锚杆索、巷旁煤帮和采空区碎石帮等的支撑作用,左边界自由。

第1阶段巷道顶板的垂直位移量可根据几何关系进行计算:

$$\Delta d_1 = \frac{l_f}{\tan \theta_f} \quad (15)$$

式中: Δd_1 为第一阶段巷道顶板的垂直位移量, m; l_f 为预裂切缝宽度, m; θ_f 为预裂切缝与竖直方向的夹角, (°)。

第*i*阶段上覆岩层对巷道直接顶的压力所做的

功 W_{ia} 为

$$W_i = \int_0^l q_i x \tan \theta_i dx = \frac{1}{2} q_i l^2 \theta_i \quad (16)$$

式中: q_i 为巷道直接顶上部所受的压应力,其数值为上一节所求 q_s 、 q_x , MPa; θ_i 为第*i*阶段巷道直接顶旋转角度, (°)。

认为巷道直接顶在每个阶段的旋转下移都是直角梯形以下部与煤帮连接的直角点为旋转中心发生的旋转,梯形巷道直接顶变形示意如图12所示。

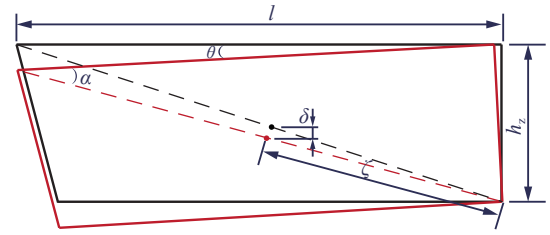


图12 梯形巷道直接顶变形示意

Fig.12 Schematic of direct roof deformation of trapezoidal roadway

根据几何关系可知

$$\zeta = \frac{(x_0 + a + 2l) \sqrt{h_z^2 + l^2}}{3(x_0 + a + l)} \quad (17)$$

式中: a 为巷道宽度, m; x_0 为关键块破断距离, m; h_z 为巷道直接顶高度; ζ 为巷道直接顶重心到旋转中心的距离, m。

巷道直接顶重心竖直方向的位移距离为

$$\delta = \frac{h_z(a + x_0 + 2l)}{3(a + x_0 + l)} - \zeta \frac{h_z - \tan \theta}{\sqrt{h_z^2 + l^2}} = \frac{\tan \theta l(x_0 + a + 2l)}{3(x_0 + a + l)} \quad (18)$$

式中: δ 为巷道直接顶重心竖直方向的位移, m; a 为巷道直接顶对角线与上边界的夹角, (°); θ 为变形至该位置时巷道直接顶旋转角度, (°)。

因此,第*i*阶段巷道直接顶重心竖直方向的位移距离为

$$\delta_i = \frac{l(x_0 + a + 2l)}{3(x_0 + a + l)} \tan \theta_i \quad (19)$$

式中: δ_i 为第*i*阶段巷道直接顶重心竖直方向的位移, m。

根据得出的巷道直接顶重心竖直方向的位移距离可知巷道直接顶重力势能所做的功 W_{ib} 为

$$W_{ib} = \frac{\gamma_z h_z l(x_0 + a + 2l)}{6} \tan \theta_i \quad (20)$$

式中: γ_z 为巷道直接顶容重, N/m; h_z 为巷道直接顶层厚度, m。

巷道直接顶顶板 NPR 锚索对顶板的支护力所做的功 W_{ic} 为

$$W_{ic} = \int_{x_0}^{x_0+a} q_h x \tan \theta_i dx = \frac{1}{2} q_h (a^2 + 2ax_0) \tan \theta_i \quad (21)$$

式中： q_h 为巷道直接顶顶板 NPR 锚索及巷内支护体提供的支撑应力，MPa。

巷旁煤帮的支撑力所做的功 W_{id} 为

$$W_{id} = \int_0^{x_0} q_m x \tan \theta_i dx = \frac{1}{2} q_m x_0^2 \tan \theta_i \quad (22)$$

式中： q_m 为巷旁煤帮的支撑应力，MPa。

巷旁煤帮的应变能 W_{ie} 为

$$W_{ie} = \frac{x_0^4 \tan^3 \theta_i E_m}{8M^2} \quad (23)$$

式中： E_m 为煤帮的弹性模量，MPa； M 为巷道高度，m。

根据能量守恒定律可知：

$$W_{ia} + W_{ib} - W_{ic} - W_{id} = W_{ie} \quad (24)$$

根据几何关系：

$$\tan \theta_i = \frac{\Delta d_i}{a + x_0} \quad (25)$$

联立式 (16)、式 (20)—式 (25)，可得第 2 第 3 阶段巷道顶板垂直位移 Δd_2 、 Δd_3 计算方程为

$$\Delta d_i = \left\{ [3q_i l^2 + \gamma_z h_z l(x_0 + a + 2l) - 3q_h(a^2 + 2ax_0) - 3q_m x_0^2] \frac{4M^2}{3x_0^4 E_m} (a + x_0)^2 \right\}^{-2} \quad (26)$$

式中： Δd_i 为第 i 阶段巷道顶板的垂直位移量，m

由于第 4 阶段中还需碎石帮对巷道直接顶的支撑力所做的功 W_{4f} 为

$$W_{4f} = \int_0^{q_s} y \int_{x_0+a}^l x \tan \theta_4 dy dx = \frac{1}{4} q_s^2 [l^2 - (x_0 + a)^2] \tan \theta_4 \quad (27)$$

式中： q_s 为巷旁碎石帮对顶板的支撑应力，MPa。

因此第 4 阶段巷道顶板垂直位移量 Δd_4 计算方程为

$$\Delta d_4 = \left\{ [3q_i l^2 + \gamma_z h_z l(x_0 + a + 2l) - 3q_h(a^2 + 2ax_0) - 3q_m x_0^2 - \frac{3}{2} q_s^2 + \frac{3}{2} q_s^2 (x_0 + a)^2] \frac{4M^2}{3x_0^4 E_m} (a + x_0)^2 \right\}^{-2} \quad (28)$$

将 4 个阶段计算出的巷道顶板垂直位移量进行求和即可得出总的巷道顶板垂直位移。

$$\Delta d = \Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \Delta d_4 \quad (29)$$

式中： Δd 为巷道顶板的总垂直位移，m。

分别将所得到的断层上下盘巷道直接顶应力 q_s 、 q_x 和其余相关参数代入，即可分别求解出断层上下盘顶板的垂直位移量。

以棋盘井煤矿东区为例，将各参数代入，应力传递系数 $K=0.5$ ；基本顶宽度 $L_1=L_2=10$ m；断层走向与

工作面夹角 $\beta=16^\circ$ ；断层倾向角 $\alpha=74^\circ$ ；直接顶上部宽度 $l=7$ m；预裂切缝宽度 $l_f=0.01$ m；预裂切缝与垂直方向夹角 $\theta_f=15^\circ$ ；巷道宽度 $a=5$ m；关键块破断位置 $x_0=3$ m；煤帮支撑应力 $q_m=3$ MPa；第 1 阶段巷内支撑应力 $q_h=1$ MPa；第 2 第 3 第 4 阶段巷内支撑应力 $q_h=2$ MPa；第 4 阶段巷旁碎石帮对顶板支撑应力 $q_s=5$ MPa。将上述各参数代入所求巷道顶板垂直位移量计算公式中，得出上盘巷道顶板各阶段垂直位移量 $\Delta d_1=37$ mm， $\Delta d_2=131$ mm， $\Delta d_3=131$ mm， $\Delta d_4=138$ mm， $\Delta d=437$ mm；下盘巷道顶板各阶段垂直位移量 $\Delta d_1=37$ mm， $\Delta d_2=126$ mm， $\Delta d_3=125$ mm， $\Delta d_4=133$ mm， $\Delta d=421$ mm。

3 跨断层切顶卸压自成巷数值分析

3.1 数值计算模型建立

为研究跨断层切顶卸压自成巷顶板应力应变演化规律，基于棋盘井煤矿 11101 工作面运输巷建立 3DEC 三维数值计算模型，工作面综合柱状图如图 13 所示，模型中岩层各项力学参数见表 1，节理力学参数见表 2，锚杆锚索力学参数见表 3，节理各项力学参数参考 Hoek-Brown 强度折减准则，各岩层 Hoek-Brown 参数 m 、 s 参考文献 [26-27]。

柱状	岩层	厚度/m
	砂质泥岩 2	16.4
	中砂岩	8
	砂质泥岩	9
	细粒砂岩	4.8
	砂质泥岩 2	12
	细粒砂岩	14.4
	砂质泥岩	8
	9-1 煤	3.2
	砂质泥岩	3.2
	砂质泥岩 2	1.6
	砂质泥岩	6
	粗砂岩	2.4
	砂质泥岩 2	11
	中砂岩	20

图 13 11101 工作面综合柱状

Fig.13 Comprehensive bar chart of No.11101 working face

数值模拟计算模型如图 14 所示，模型模拟 11101 工作面运输巷侧采空区顶板垮落过程，本构模型选用莫尔-库仑模型，所做数值模拟模型尺寸为 100 m×100 m×120 m，沿工作面倾向方向巷道距边界 15 m，上边界施加 10 MPa 的垂直应力模拟上覆岩层的荷载，水平方向固定模型边界，将左右与前后方

表1 岩层力学参数

Table 1 Rock mechanical parameter

岩性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
砂质泥岩	2 580	21.8	0.18	36	2.1	3.60
细粒砂岩	2 621	33.4	0.17	32	2.5	4.84
砂质泥岩	2 562	20.7	0.19	31	2.2	3.61
9-1号煤	1 710	4.5	0.23	22	0.92	0.43
粗砂岩	2 536	37.3	0.15	35	3.2	4.32
中砂岩	2 600	32.9	0.16	33	2.4	4.10

表2 节理力学参数

Table 2 Joint mechanics parameters

岩性	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
砂质泥岩	16	1.3	1.60
细粒砂岩	12	1.8	1.70
砂质泥岩	16	1.3	1.60
9-1号煤	10	0.6	0.13
粗砂岩	18	2.8	2.90
中砂岩	17	2.5	2.70

表3 锚杆锚索力学参数

Table 3 Mechanical parameters of anchor bolt and cable

材料	长度/m	预紧力/ kN	半径/ mm	抗拉载荷/ kN	屈服载荷/ kN
普通锚杆	2.2	70	20.0	156	108
普通锚索	7.2	180	21.6	504	350
恒阻锚索	10.3	280	21.6	504	350

向的水平位移设置为0,用以模拟正断层的边界条件^[28]。模型中含巷道、开挖工作面及顶板碎石块体共16 850个块体,含381 107个结构面单元。

模型中断层高差为4.4 m,倾向角为74°,走向角为344°,该模型中工作面倾向长度为83 m,模型中巷道为5.2 m×3.2 m的矩形,巷道于靠近工作面方向进行顶板切缝,切缝角为15°,切缝深度为8 m,先对模型进行巷道开挖与顶板切缝,计算平衡后工作面由

上盘开采,向断层靠近,每步开采5 m,过断层后继续于下盘开采,每步开采后均等待相同时间后再进行下一步开采。模型中断层及切缝均采用3DEC软件内置节理命令实现,在对模型内断层参数进行设定时,为对断层破碎带进行模拟,其黏聚力、摩擦角等参数均参考工程现场断层内破碎岩石相关参数,切缝参数则是将黏聚力与抗拉强度设为0模拟现场切割顶板效果,其余参数都与切缝所在岩层保持一致。

3.2 跨断层切顶卸压自成巷顶板变形规律分析

分别在模型上下盘距离断层5 m巷道顶板处设置顶板垂直位移量监测点,模型计算结束后在所设测点处切片观察的最终变形效果如图15所示,工作面回采10、30、70、100 m时,分别在上下盘测点处进行切片观察的垂直位移分布如图16、图17所示。

如图16a、图16b与图17a、图17b所示,随着工作面的开采,断层上盘高位岩层最早开始变形,巷道切缝侧顶板随着模型的计算也会发生少量变形;如图16c与图17c所示,在工作面回采经过切片断面后,采空区顶板垮落并对采空区进行充填,巷道顶板向切缝侧旋转变形,巷道上覆岩层出现明显离层现象;如图16d与图17d所示,模型计算完成后,采空区垮落矸石被压实,上覆岩层中部分离层也被挤压闭合。对比断层上下盘两处测点的岩层垂直位移分布图可以看出,在回采过程中,断层上盘高位岩层最先发生变形;相比于同一水平上盘岩层,下盘岩层最终垂直位移量较小,说明下盘巷旁碎石帮充填效果较好;上盘巷旁碎石帮相较于下盘呈现出更好的压实效果,下盘的巷道顶板岩层变形则受断层影响较大。

如图18为在上下盘垂直位移测点处测得的顶板垂直位移监测曲线,通过对比可以看出上下盘巷道顶板都是在初始阶段以及工作面回采过测点断面时发生较大的变形。在数值模拟模型计算结束时,上盘测点处,切缝侧至煤帮侧顶板垂直位移分别为432、194、54 mm;下盘测点处,切缝侧至煤帮侧顶板垂直位移量分别为438、197、55 mm。将数值模拟

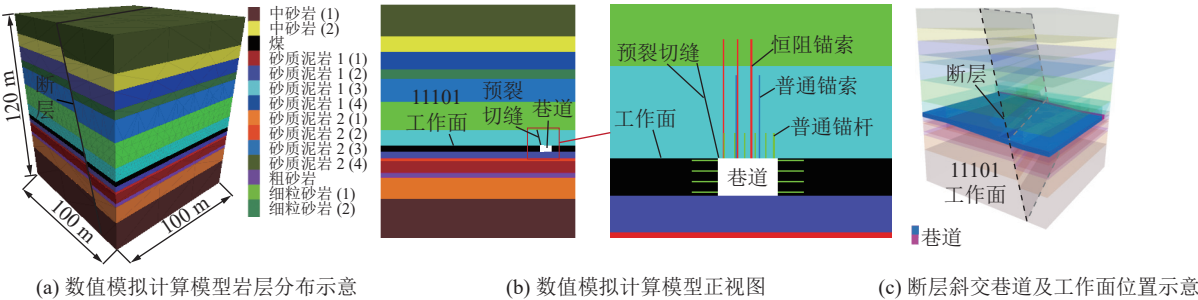


图14 数值模拟计算模型

Fig.14 Numerical simulation model

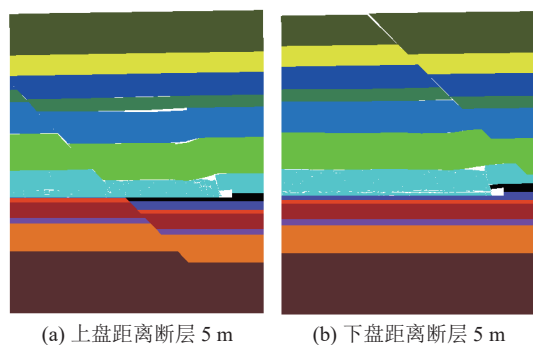


图 15 断层上下盘各测点计算结束后岩层变形示意

Fig.15 Schematic of strata deformation after calculation of each measuring point on the upper footwall of fault

所得的巷道顶板垂直位移与理论分析所得结果进行对比,数值模拟模型上盘巷道顶板垂直位移与理论分析所得结果误差为 1.14%,下盘巷道顶板垂直位移误差为 4.04%。

对于跨断层上下盘巷道顶板的变形特征,将结合随工作面开采的巷道顶板应力演化规律进行研究。

3.3 跨断层切顶卸压自成巷顶板应力演化规律

如图 19 为断层上下盘顶板中部测点垂直应力监测曲线。通过观察两条曲线的变化规律可知,工作面在上盘开采过程中,上盘巷道顶板测点垂直应力的变化频率较快且变化幅度较大,下盘巷道顶板测点垂直应力则呈现出逐级递增的趋势;在工作面

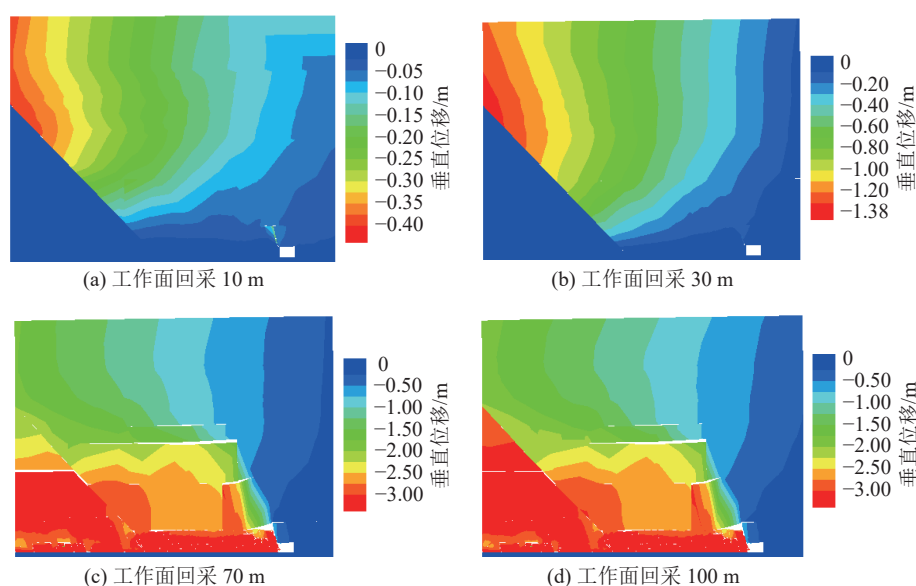


图 16 断层上盘测点随工作面回采垂直位移分布

Fig.16 Vertical displacement distribution of fault hanging wall measuring point with mining face

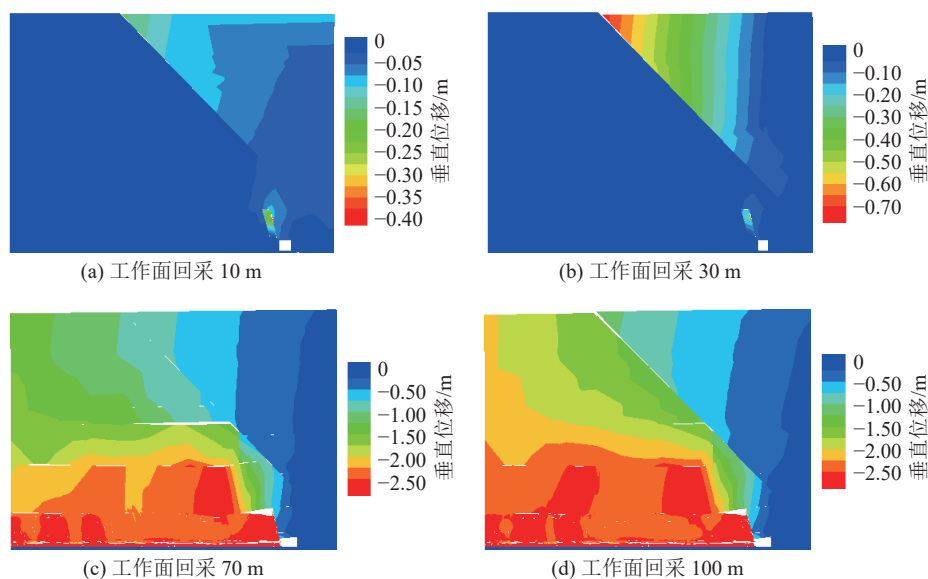


图 17 断层下盘测点随工作面回采垂直位移分布

Fig.17 Vertical displacement distribution of fault foot wall measuring point with mining face

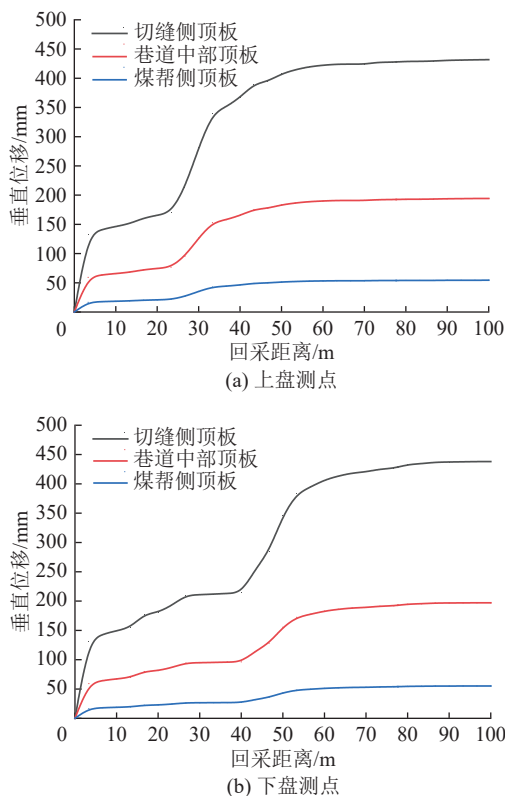


图18 断层上下盘测点顶板垂直位移监测曲线

Fig.18 Roof vertical displacement monitoring curve of fault hanging wall and footwall measuring point

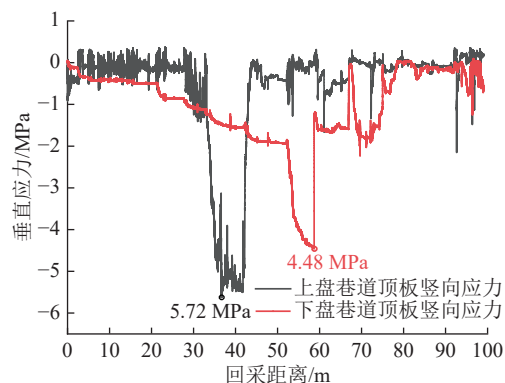


图19 断层上下盘巷道顶板中部测点垂直应力监测曲线

Fig.19 Vertical stress monitoring curve of roadway roof at hanging wall and footwall of fault

通过巷道测点断面时,巷道顶板都出现了不同程度的应力集中现象,上盘巷道顶板的垂直应力集中值较大为 5.72 MPa,下盘巷道顶板的垂直应力集中值较小为 4.48 MPa;工作面在下盘回采时,随着工作面的推进,上盘巷道顶板垂直应力逐渐稳定,下盘巷道顶板垂直应力变化幅度较大,在工作面回采至 80~90 m 时,上盘与下盘巷道测点顶板垂直应力都趋于稳定;将各测点的垂直应力演化规律与垂直位移曲线变化规律进行对比可以发现,巷道垂直位移

量增长较快的阶段与巷道顶板出现应力集中的时间相对应。

3.4 非恒阻锚索支护对比模型

为了研究恒阻锚索对跨断层切顶卸压自成巷顶板变形控制机理并对其支护效果进行评价,本文利用 3DEC 数值模拟软件对未使用恒阻锚索支护模型进行模拟计算,该模型除支护方式外其余参数均与恒阻锚索支护模型相同。

如图 20 所示为非恒阻锚索支护模型巷道断面图。在上下盘中距离断层 5 m 处设置垂直位移测点,并在模型中工作面回采 10、30、70、100 m 时对位移云图进行切片观察,所得垂直位移分布如图 21、图 22 所示。

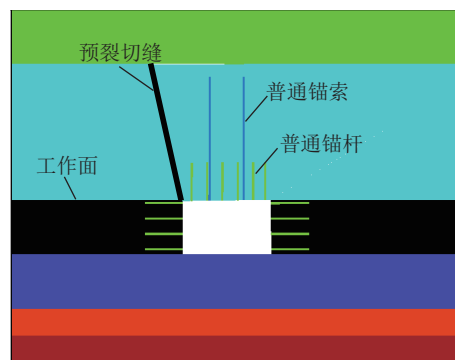


图20 非恒阻锚索支护模型巷道断面

Fig.20 Cross-section view of roadway supporting model with non-constant resistance anchor cable

与恒阻锚索支护模型垂直位移分布图进行对比,无恒阻锚索支护的上盘巷道垂直位移量非常大,顶板向切缝侧倾斜变形严重,留巷效果不佳;失去恒阻锚索支护的下盘巷道巷旁碎石帮充填效果良好,与上盘巷道相比碎石帮对下盘巷道顶板也显现出较好的支撑效果,但顶板也向切缝侧发生了较大的倾斜变形。上盘巷道测点处切缝侧至煤帮侧顶板垂直位移量分别为 2 568、1 345、834 mm;下盘巷道测点处切缝侧至煤帮侧顶板垂直位移量分别为 863、576、178 mm。将两组模型顶板垂直位移量数据进行对比,上盘巷道切缝侧至煤帮侧顶板位移量分别减小至 16.8%、10.7%、6.5%;下盘巷道切缝侧至煤帮侧顶板位移量分别减小至 50.7%、34.2%、30.9%,证明恒阻锚索支护能够有效减小顶板垂直位移。对此情况进行分析研究,得到如下结论:恒阻锚索能够有效减慢巷道顶板的变形速度,给予采空区顶板充分垮落的时间,在巷旁碎石帮充填完成后即可对巷道顶板进行支撑,通过碎石帮的支撑实现巷道顶板应力平衡,限制巷道顶板的变形,实现了对巷道顶板变形的控制。

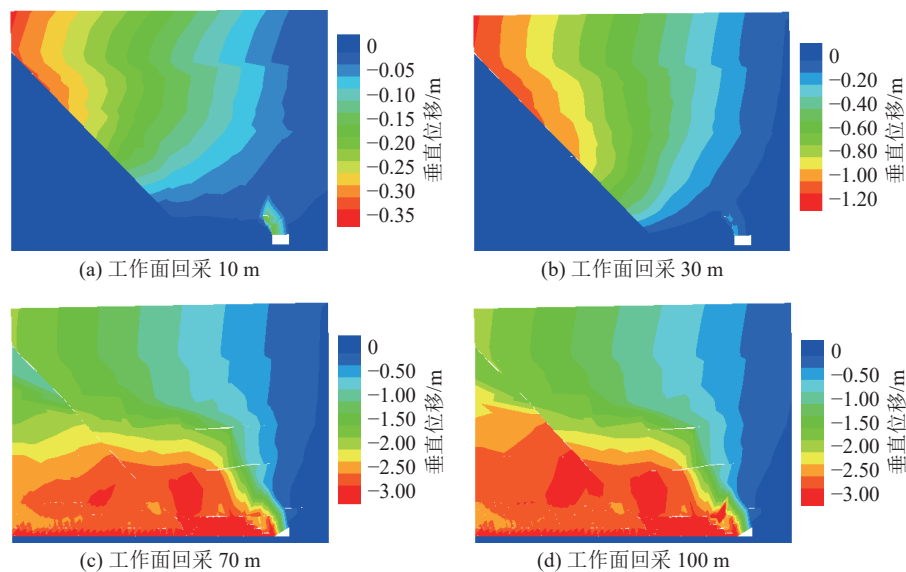


图 21 非恒阻锚索支护模型断层上盘测点随工作面回采垂直位移分布

Fig.21 Vertical displacement distribution diagram of fault hanging wall measuring point with stopping face in non-constant resistance anchor cable support model

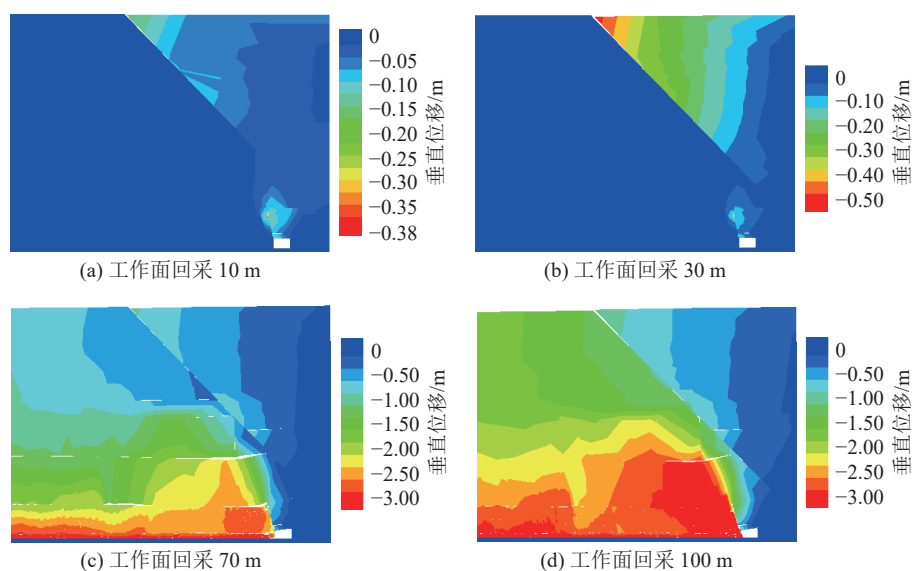


图 22 非恒阻锚索支护模型断层下盘测点随工作面回采垂直位移分布

Fig.22 Vertical displacement distribution of fault footwall measuring point with stopping face in non-constant resistance anchor cable support model

4 现场工程实践

理论研究及数值模拟模型建模过程均参考棋盘井煤矿东区 11101 工作面项目现场切顶卸压巷道的补强支护布置方式,并通过项目现场运输巷部分顶板的垂直位移量数据进行验证。

4.1 巷道补强支护布置

11101 工作面运输巷顶板预裂切缝孔深度按照 $H_F = (M - \Delta H_1 - \Delta H_2) / (k_s - 1)$ 确定 $H_F = 8$ m,与铅垂线夹角为 15° ,距回采帮 200 mm,巷道顶板共布设 3 列 NPR 恒阻锚索,恒阻锚索长度 $L_H = 10.3$ m。结合巷道

原有支护形式和参数,恒阻锚索垂直于顶板方向布置,共布置 3 列恒阻锚索,第一列距回采帮 500 mm,排距 1 000 mm, W 钢带连接;第二列排距为 2 000 mm;第三列排距为 4 000 mm,并在跨断层部位进行二次补充,补充后第三列排距为 1 000 mm,恒阻值为 33 ± 2 t,锚索与巷道顶板垂直,预紧力不小于 28 t。巷道断面补强锚杆索及“单体液压支柱+ π 型钢梁”临时支护布置如图 23 所示。

4.2 围岩变形规律

图 24 为 11101 工作面测点布置,选取巷道内运输巷测点 14、15、16、17 号对巷道顶板变形进行分

析, 14号测点的里程数为780 m, 15号测点的里程数为800 m, 16号测点的里程数为820 m, 17号测点的里程数为840 m, 上述各处测点为距离断层较近的测点, 各测点巷道顶板变形量如图25所示。

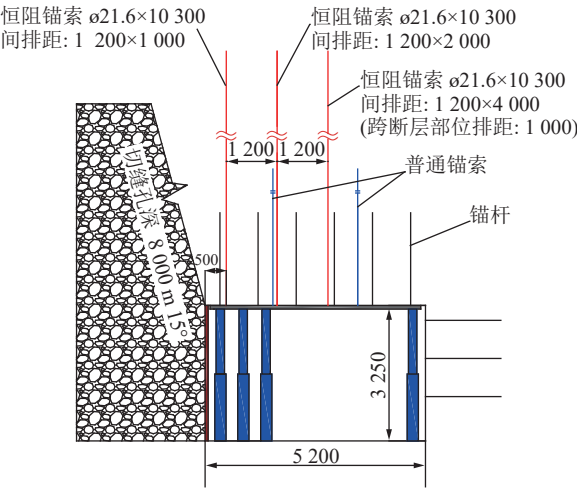
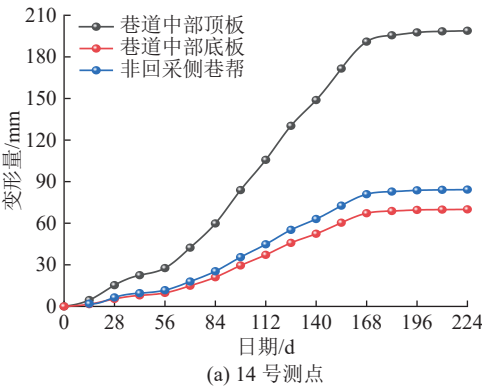


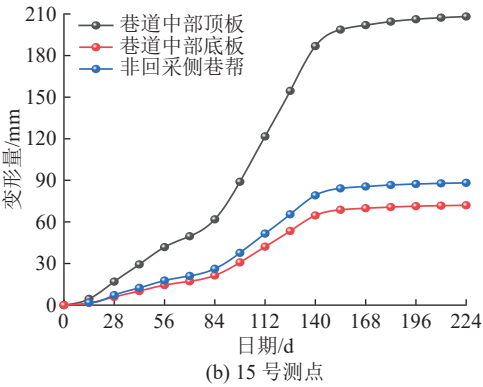
图23 巷道补强支护布置断面

Fig.23 Section view of roadway reinforcement support layout

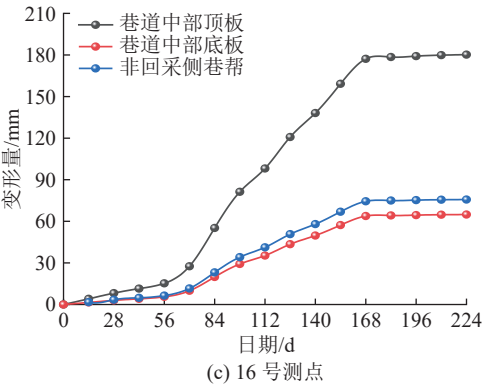
通过现场监测数据可知, 跨断层切顶卸压自成巷巷道顶板测点距离断层越近所测变形量越大; 与下盘巷道相比, 上盘巷道顶板变形更早进入稳定状态; 距离断层相同距离处的上盘巷道顶板的变形量普遍大于下盘巷道顶板的变形量。



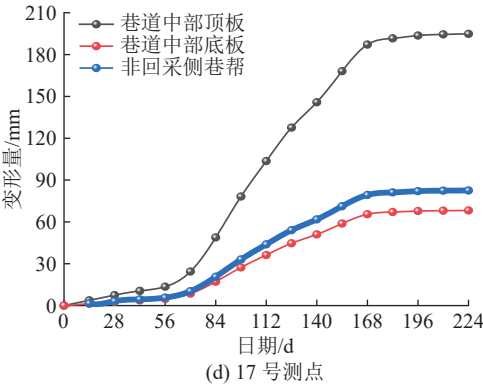
(a) 14号测点



(b) 15号测点



(c) 16号测点



(d) 17号测点

图25 11101工作面运输巷巷道围岩变形量监测曲线

Fig.25 Monitoring curve of deformation of surrounding rock of No.11101 face transport channelling roadway

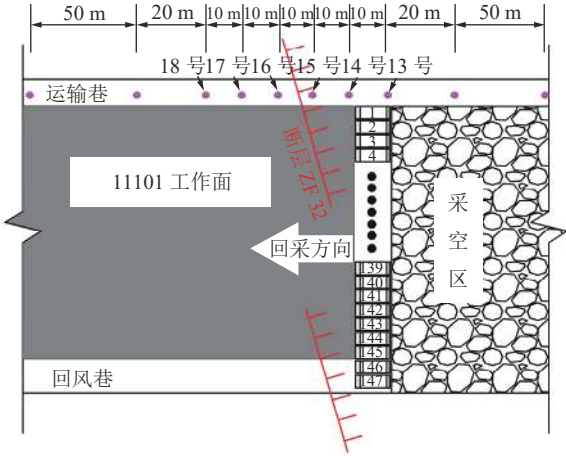


图24 11101工作面测点布置

Fig.24 No. 11101 working face measuring point layout

现场监测数据与理论模型计算结果曲线对比如图26所示, 15号测点处巷道中部顶板变形量为208 mm与理论模型计算结果误差为0.96%, 16号测点处巷道中部顶板变形量为198 mm与理论模型计算结果误差为9.6%, 现场巷道顶板变形量监测结果与理论模型计算得出的顶板位移变化趋势基本吻合。通过现场观测, 运输巷跨断层部位巷道顶板靠近采空区侧存在变形, 顶板锚杆索支护未失效。证明“切顶卸压+恒阻锚索”支护设计能够很好的解决跨断层部分巷道留巷变形大的问题, 现场留巷效果良好。

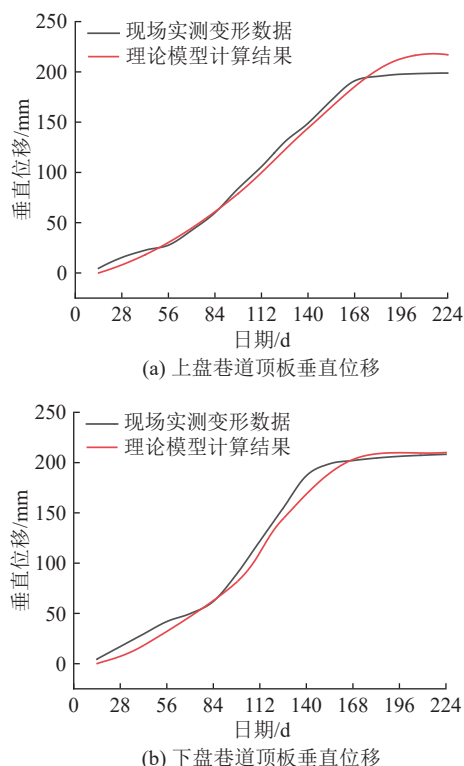


图26 现场监测数据与理论模型计算结果曲线对比

Fig.26 Curve comparison between field monitoring data and theoretical model calculation results

5 结 论

1) 建立跨断层切顶卸压自成巷顶板力学模型研究发现,上盘巷道直接顶应力大小与断层倾向角成反比,与断层走向与工作面的夹角成正比,上盘巷道直接顶应力、下盘巷道直接顶应力都受基本顶宽度和直接顶上部宽度影响。

2) 根据直接顶受力情况将切顶卸压自成巷顶板变形过程分为4个阶段,研究各阶段及总垂直位移量计算方法并给出计算公式,将相关参数代入公式,解得上盘巷道顶板垂直位移量为437 mm,下盘巷道顶板垂直位移量为421 mm。

3) 利用3DEC数值模拟软件对跨断层切顶卸压自成巷顶板变形机理进行研究,研究结果表明:下盘巷旁碎石帮充填效果较好,上盘巷旁碎石帮相较于下盘呈现出更好的压实效果。

4) 通过分析研究数值模型巷道顶板垂直位移监测曲线,发现当工作面回采过测点断面过程中,巷道顶板出现不同程度的应力集中,上盘巷道顶板垂直应力集中值为5.72 MPa,下盘巷道顶板垂直应力集中值为4.48 MPa;数值模拟上下盘巷道顶板变形数据与理论分析所得数据结果误差分别为1.14%、4.04%。

5) 通过建立非恒阻锚索支护模型与恒阻锚索支

护模型进行对比,证明恒阻锚索能够有效减小巷道顶板变形;恒阻锚索是通过减慢巷道顶板变形速度,给予采空区顶板充分垮落的时间,最终通过巷旁碎石帮的支撑及恒阻锚索的支护控制巷道顶板变形。

6) 根据研究结果,对巷道跨断层部位进行补充设计;现场巷道顶板变形量监测数据表明,距离断层越近顶板变形量越大,与理论模型计算结果相比较误差均在10%以内;通过“切顶卸压+恒阻锚索”支护能够很好的解决跨断层部分留巷顶板变形大的问题,现场留巷效果良好。

参考文献(References):

- [1] HE Manchao, ZHU Guolong, GUO Zhibiao. Long wall mining “cutting cantilever beam theory” and 110 mining method in China: The third miningscience innovation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015(7): 483–492.
- [2] 何满潮,朱国龙. “十三五”矿业工程发展战略研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(1): 1–6.
HE Manchao, ZHU Guolong. Research on development strategy of mining engineering in the Thirteenth Five-Year Plan[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(1): 1–6.
- [3] 何满潮,宋振骐,王安,等.长壁开采切顶短壁梁理论及其110工法:第三次矿业科学技术变革[J]. *煤炭科技*, 2017(1): 1–9.
HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, *et al.* Theory of long-wall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method the third mining science and technology reform[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2017(1): 1–9.
- [4] 朱珍,张科学,杨军,等.无煤柱无掘巷开采自成巷道围岩结构控制及工程应用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 52–60.
ZHU Zhen, ZHANG Kexue, YANG Jun, *et al.* Surrounding rocks control technology and application of automatically formed roadway in mining without coal pillar and gateroad excavation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 52–60.
- [5] WANG Qi, HE Manchao, YANG Jun, *et al.* Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for lo-ngwall mining in coal mines[J]. *International Journal of Rock Mech-anics and Mining Sciences*, 2018(110): 1–8.
- [6] 石占山,梁冰,孙维吉.采空区压实应力调整阶段底板卸压演化规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 51–58.
SHI Zhanshan, LIANG Bing, SUN Weiji. Study on floor pressure relief evolution characteristics at goaf stress adjustment stage[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 51–58.
- [7] HE Manchao, WANG Qi, WU Qunying. Innovation and future of mini-ng rock mechanics[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(1): 1–21.
- [8] 何满潮,王亚军,杨军,等.切顶卸压无煤柱自成巷开采与常规开采应力场分布特征对比分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 626–637.
HE Manchao, WANG Yajun, YANG Jun, *et al.* Comparative analysis on stress field distributions in roof cutting non-pillar mining method and conventional mining method[J]. *Journal of China CoalSociety*, 2018, 43(3): 626–637.
- [9] 华心祝,李琛,刘啸,等.再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 128–145.

- HUA Xinzhui, LI Chen, LIU Xiao, *et al.* Current situation of gob-side entry retaining and suggestions for its improvement in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 128–145.
- [10] 丁楠, 李小裕, 蒋力帅. 不同采高条件下正断层下盘开采支承应力演化与断层活化规律研究[J]. *中国煤炭*, 2017, 43(8): 71–75.
- DING Nan, LI Xiaoyu, JIANG Lishuai. Research on laws of abutment pressure evolution and fault activation in normal fault foot wall mining with different mining height[J]. *China Coal*, 2017, 43(8): 71–75.
- [11] LLOYD W. D. The effect of coal mining on the overlying rocks and on the surface[J]. *Trans. Instn min, Engrs*, LVII, 1918, 74–93.
- [12] KOWALCZYK Z. The influence of tectonic faults on ground deformation in regions with mining exploitation[J]. *DasMark-scheidewese*, 1982(3): 89.
- [13] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 66(1): 19–29.
- [14] LIU Xiao, HUA Xinzhui, YANG Peng, *et al.* A study of the mechanical structure of the direct roof during the whole process of non-pillar gob-side entry retaining by roof cutting[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2020, 38(5): 1706–1724.
- [15] SUN Xiaoming, WANG Dong, FENG Jili, *et al.* Deformation control of asymmetric floor heave in a deep rock roadway: a case study[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(6): 799–804.
- [16] 龙军, 于秋鸽. 基于应力波理论的断层对覆岩移动变形和应力传递阻隔效应研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(3): 105–111.
- LONG Jun, YU Qiuge. Blocking effect of fault on overburden deformation and stress transfer based on stress wave theory[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(3): 105–111.
- [17] 高玉兵, 王炯, 高海南, 等. 断层构造影响下切顶卸压自动成巷矿压规律及围岩控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2182–2193.
- GAO Yubing, WANG Jiong, GAO Hainan, *et al.* Mine pressure distribution and surrounding rock control of gob-side entry formed by roof cutting and pressure release under the influence of faults[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2182–2193.
- [18] 于秋鸽. 上下盘开采断层滑移失稳诱发地表异常沉降机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 41–50.
- YU Qiuge. Mechanism of abnormal subsidence induced by fault slipping instability during mining on hanging-wall and foot-wall[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(1): 41–50.
- [19] 赵毅鑫, 王浩, 卢志国, 等. 开采扰动下断层面库仑应力及诱发矿震时空演化特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 340–347.
- ZHAO Yixin, WANG Hao, LU Zhiguo, *et al.* Characteristics of tremor time-space evolution and Coulomb stress distribution along the fault during workface excavation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 340–347.
- [20] 颜永斌, 董建华. 断层破碎带内隧道纵向受荷特征和变形分析[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(11): 212–224.
- XIE Yongbin, DONG Jianhua. Analysis of longitudinal deformation and stress characteristics of tunnel crossing fault fracture zone[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(11): 212–224.
- [21] PENG Taixin, HUANG Ling, LUO Xin. Risk analysis of the mabian tonggu dangerous rock belt in sichuan province by using semi-quantitative method finite difference method flac and discrete element method 3DEC[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(S2): 362–363.
- [22] SUN Xiaoming, ZHAO Chengwei, ZHANG Yong, *et al.* Physical model test and numerical simulation on the failure mechanism of the road-way in layered soft rocks[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(2): 291–302.
- [23] 何满潮, 高玉兵, 杨军, 等. 厚煤层快速回采切顶卸压无煤柱自成巷工程试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1): 254–264.
- HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, *et al.* Engineering experimentation of gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure release in a thick-seam fast-extracted mining face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 254–264.
- [24] 杨军, 魏庆龙, 王亚军, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷顶板变形机制及控制对策研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 989–998.
- YANG Jun, WEI Qinglong, WANG Yajun. Roof deformation mechanism and control measures of pillarless mining with gob-side entry re-taining by roof cutting and pressure relief[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 989–998.
- [25] 单辉祖. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- SHAN Huizu. *Mechanics of Materials*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [26] 杨军, 付强, 高玉兵, 等. 断层影响下无煤柱自成巷围岩运动及矿压规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(6): 1238–1247.
- YANG Jun, FU Qiang, GAO Yubing, *et al.* Surrounding rock movement and pressure distribution laws of non-pillar mining with entry automatically retained by roof cutting influenced by faults[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1238–1247.
- [27] 何江达, 张建海, 范景伟. 霍克-布朗强度准则中 m, s 参数的断裂分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001(4): 432–435.
- HE Jiangda, ZHANG Jianhai, FAN Jingwei. Fracture Analysis on the parameters m, s in Hoek-Brown strength criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001(4): 432–435.
- [28] 王学滨, 郭长升, 邓超群. 三种应力的断层阻隔效应的数值模拟研究: 以正断层下盘开采为例[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(4): 1605–1611.
- WANG Xuebin, GUO Changsheng, DENG Chaoqun. Numerical modeling of fault barrier effects on three kinds of stresses: a case of foot-wall mining on the normal fault[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2020, 35(4): 1605–1611.