

李群航,朱永建,王希之,等.极近距离薄煤层下分层巷道的合理错距[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):1-9.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.001

LI Q H, ZHU Y J, WANG X Z, et al. On Reasonable Misspacing of Mining Roadway in Extremely Short Distance Thin Coal Seam[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(2): 1-9. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.001

极近距离薄煤层下分层巷道的合理错距

李群航¹, 朱永建^{1,2*}, 王希之¹, 任恒¹, 李鹏¹, 廖洪波³, 赵俊³, 杨林³

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.四川川煤华荣能源有限责任公司小河嘴煤矿,四川 达州 635000)

摘要:针对极近距离薄煤层巷道在集中应力的影响下回采巷道难以布置的问题,以四川川煤华荣能源有限责任公司小河嘴煤矿1216工作面为背景,采用现有的极限平衡理论,并结合现场实测数据以及数值模拟数据进行分析,得到小河嘴煤矿工作面下分层巷道合理错距的选取方法.通过极限平衡理论以及相关计算初步确定工作面的外错式错距,根据数值模拟结果分析巷道的应力分布特征并对错距进行修正,结合现场实测数据确定最终的合理错距.结果表明:随着错距的增加,下分层巷道受到的集中应力逐渐减小,达到合理错距之后,集中应力降至最低,继续增加错距对巷道围岩变形的影响很小;在合理错距下进行采掘可以有效避免集中应力并能控制围岩变形.所得结果可为南方极近距离薄煤层的开采提供参考.

关键词:极近距离;薄煤层;数值模拟;合理错距;外错

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)02-0001-09

On Reasonable Misspacing of Mining Roadway in Extremely Short Distance Thin Coal Seam

LI Qunhang¹, ZHU Yongjian^{1,2}, WANG Xizhi¹, REN Heng¹,
LI Peng¹, LIAO Hongbo³, ZHAO Jun³, YANG Lin³

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Xiaohouzui Coal Mine, Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd., Dazhou 635000, China)

Abstract: Aimed at a very close range of thin coal seam roadway under the influence of stress concentration, extraction roadway layout problem of 1216 working face of Xiaohouzui Coal Mine, Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd. as the background, the existing limit equilibrium theory is applied, and the field measured data and numerical simulation data are combined for analysis. The selection method of reasonable fault distance of stratified roadway under the working face of Xiaohouzui Coal Mine is obtained. The results show that with the increase of the fault distance, the concentrated stress of the lower stratified roadway decreases gradually. After the reasonable fault distance is reached, the concentrated stress decreases to the lowest size. The continuous increase

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274119)

*通信作者, E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

of the fault distance had little influence on the deformation of the surrounding rock. The mining under reasonable alternate distance can effectively avoid the concentrated stress and control the deformation of surrounding rock, which provides relevant experiences for the mining of ultra-close thin coal seam in the southern part of China.

Keywords: ultra-close; thin coal seam; numerical simulation; reasonable alternate distance; outward location

随着我国煤矿开采深度的增加以及开采强度的增强,国内越来越多南方矿井中赋存条件较好、较厚的煤层采掘殆尽,薄煤层的开采也逐渐受到重视.由于大多数薄煤层通常是以群赋存状态存在,相邻的煤层间距很小,很容易产生极近距离煤层^[1-3],而极近距离薄煤层非常容易受采动的影响.煤矿开采会破坏巷道围岩的原岩应力状态,导致应力重分布,形成极其复杂的应力场,且由于预留煤柱的存在,上部煤层顶板的支承压力会通过预留煤柱在下部顶板位置产生应力集中^[4-6],使下煤层巷道围岩发生变形和破坏,给下部煤层的围岩控制带来了很大困难.

很多学者对极近距离煤层进行了深入研究,张百胜等^[7]考虑上覆煤层采空区及区段煤柱的影响,煤柱底板的应力分布具有明显的不均匀特征,其应力的非均匀分布特征可以通过应力改变率来衡量;赵洪宝等^[8]结合弹性力学半无限平面理论以及数值模拟,研究煤柱应力集中情况下产生非对称性破坏的机理与演化规律,确定产生非对称性破坏的原因是煤柱应力集中影响的区域巷道处于拉-压偏应力场中.在考虑应力分布不均衡的同时,还要考虑工作面的错距布置形式,合理的错距布置可以减小上下煤层间开采的影响和回采巷道受到的集中应力^[9-11].郝嘉伟等^[12]根据煤柱底板载荷传递公式,确定巷道围岩破坏的 4 个主要因素,并通过正交试验确定除层间距外,煤柱错距是巷道围岩破坏的最主要因素;严国超等^[13]基于极限平衡理论,研究上煤层工作面稳压区以及减压区的范围,将错距布置划分成常规错距布置和非常规错距布置,并确定常规错距布置的可行性;孙春东等^[14]等基于岩层移动理论,研究上煤层工作面稳压区以及减压区的范围,确定极近距离煤层联合开采时的最佳走向错距范围;张宝优^[15]基于极限平衡理论,研究外错式布置的可行性,确定外错式布置能够充分发挥联合支护技术的优点.

以上研究表明对极近距离煤层巷道围岩的应力分布以及巷道布置的研究已取得了一系列的成果,然而对极近距离薄煤层下分层巷道的合理留设研究依然存在一定的问题和不足.因此,本文基于前人的研究,通过现场调研、理论分析和数值模拟等方法探究极近距离薄煤层下分层巷道在不同错距下的应力分布以及围岩变形规律,确定最符合小河嘴煤矿 1216 工作面下分层巷道的合理错距,为极近距离煤层的巷道支护以及围岩控制提供一定的参考.

1 工程地质条件

我国南方煤炭资源赋存条件较差,存在大量的薄煤层群,小河嘴煤矿就是典型的极近距离薄煤层:

1) K21 煤层:厚度为 0.75~1.09 m,平均厚度为 0.89 m.煤层顶板以深灰色粉砂质泥岩为主,其次为泥岩、炭质泥岩、泥质粉砂岩及粉砂岩.底板以粉砂质泥岩为主,其次是泥岩、炭质泥岩,夹薄煤线数层,岩石普氏系数为 2.96.

2) K22 煤层:厚度为 0.4~0.6 m,平均厚度为 0.54 m.煤层底板以粉砂质泥岩为主,其次为炭质泥岩和泥岩,岩石普氏系数为 6.28.

煤层赋存岩石力学参数如表 1 所示,岩层岩性如图 1 所示.小河嘴煤矿煤线数复杂,K21 煤层和 K22 煤层的层间距极小,K21 煤层的顶板即 K22 煤层的底板,属极近距离薄煤层.由于煤层的层间距极小,回采巷道容易受到相邻煤巷开采和煤柱应力集中的影响,巷道会出现顶板下沉、两帮收缩和底鼓等变形破坏,严重影响煤层的开采以及支护.因此,结合小河嘴煤矿的地质条件,通过极限平衡理论公式建立相关数值模拟模型来分析巷道围岩的应力分布特征.

表 1 岩石力学参数

岩性	密度/(kg/m ³)	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	体积模量/GPa	内聚力/MPa
细-中粒砂岩	2 620	5.82	42	1.00	11.02	2.60
泥质粉砂岩	2 360	2.10	38	1.84	6.27	2.40
粉砂质泥岩	2 600	4.34	40	0.23	7.48	2.40
煤	1 450	1.10	25	0.15	3.38	1.00
细粒砂岩	2 680	3.38	42	6.12	11.00	6.51

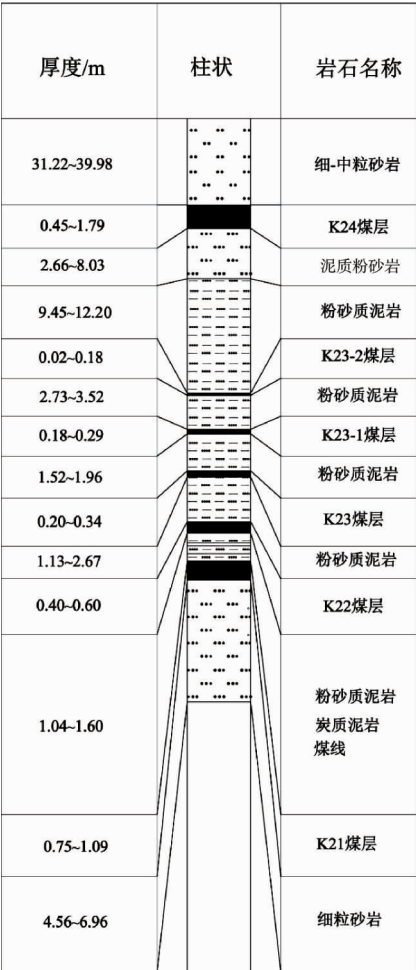


图 1 岩层岩性

2 错层位巷道布置及错距的初步确定

2.1 错层位巷道布置

错层位采煤法按其接续工作面巷道的搭接方式可分为内错式、外切式和外错式 3 种,下区段巷道的主要布置方式为内错式和外错式.根据目前的错距理论,现场开采基本采用内错式和外错式 2 种.

1)内错式:将下错层区段平巷放置于上错层巷道内侧的采空区下方,这样巷道便处于上区段工作面开挖形成的低应力区,巷道受压小,更易于维护,且下分层区段平巷可沿上分层人工顶板掘进,易于控制掘进的方向,在保证采掘效率的同时还可以有效地防治冲击地压等地质灾害.

2)外错式:将下分层区段平巷布置于上分层巷道的外侧,上区段沿顶巷道与下区段沿底巷道在水平方向上有一定的水平错距,巷道通常会处于高应力区段,当上煤层和下煤层回采巷道间距合适时,煤层回采时相邻煤层巷道的动压影响小.

如果 1216 工作面巷道布置选择内错式,将巷道布置在采空区下方,虽然处于低应力区,但需要待采空区覆岩运动稳定后才能送巷,工作面间需要跳采,回采工艺烦琐.下层煤的区段煤柱尺寸大,下层煤的回采

率低,资源浪费严重.由于该煤层是极近距离薄煤层,采动影响使得下分层巷道的顶板受损,顶板上层岩层采空,锚索没有稳定的受力点,支护主要以棚架支护为主,严重影响成巷速度,且在上层煤回采期间会受到上煤层采动的影响,巷道维护困难.

如果 1216 工作面巷道布置选择外错式,可以在一定程度上简化回采和支护工艺,下区段工作面不需要跳采,可以提高采掘接替效率和煤炭资源的回收效率.通过合理的错距选择,同样可以使煤层布置在相应的低应力区,受采动的影响较小.

综上所述,1216 工作面巷道采用外错式布置,而极近距离薄煤层下分层巷道的外错布置需要首先确定其合理错距.

2.2 错距的初步确定

错层位工作面回采后,下分层巷道所受上部煤层的侧向支承压力分布如图 2 所示.由图 2 可知:从上错层巷道左帮往左依次可划分为应力增高区(I)、应力降低区(II)和原岩应力区(III).通过极限平衡理论将下区段巷道的顶煤进行分区,可以得到应力峰值处于 X_0 处(X_0 为极限平衡宽度).将下分层巷道布置在原岩应力区,远离应力集中区(应力增高区与应力降低区),有利于对下分层巷道顶板的围岩控制.

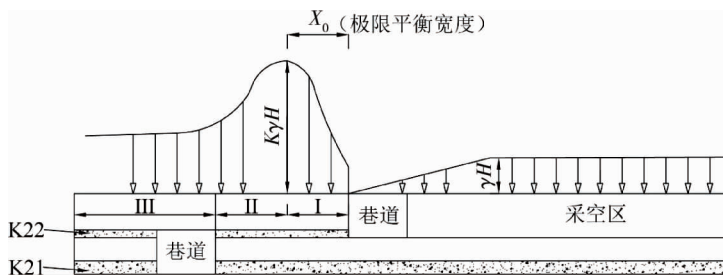


图 2 错层位巷道侧向支承压力分布

若巷道错距 $L < 2X_0$,则下分层巷道布置在应力集中区,当上部煤层回采后,由于采动应力的影响,使下分层巷道围岩的应力重分布,受集中应力的影响,顶板围岩产生塑性变形和破坏,严重损害下分层巷道顶板的完整性,使下分层巷道的围岩控制以及维护难度大大增加.

若巷道错距 $L \geq 2X_0$,则下分层巷道布置在原岩应力区,因为宽度的增大,留设煤柱的中央会形成弹性核,向下部煤层传递的应力出现非均匀性,煤柱两侧的支承压力会产生应力集中的现象,而残留煤柱中的能量集中将向深部煤岩体传递,不会直接影响一旁的下分层巷道.将下分层巷道布置在原岩应力区,下分层沿底巷道整体处于应力较低的环境中,能保证下部煤层工作面开采时顶板的稳定性和回采工作面的通风等.因此,采用外错式布置方式将下分层巷道布置在原岩应力区是合理的^[16-18].

极限平衡理论参数如表 2 表示.根据极限平衡理论公式,可得极限平衡宽度 X_0 为^[19]

$$X_0 = \frac{m}{2\varepsilon f} \ln \frac{K\gamma H + C \cot \varphi}{\varepsilon C \cot \varphi}.$$

式中: m 为工作面采高, m; ε 为三轴应力系数, $\varepsilon = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$; φ 为内摩擦角; f 为层面间的摩擦系数; K 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重, kN/m^3 ; H 为煤层埋深, m; C 为内聚力, MPa.

表 2 极限平衡理论参数

参数名称	符号	取值
工作面采高	m	1.8 m
应力集中系数	K	2
上覆岩层的平均容重	γ	25 kN/m^3
煤层埋深	H	500 m
内聚力	C	1.5 MPa
内摩擦角	φ	35°
三轴应力系数	ε	$\varepsilon = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$
摩擦系数	f	$f = \tan \varphi$

2.3 极限平衡理论因素分析

根据已有的极限平衡理论公式,探究煤层埋深 H 和工作面采高 m 对 X_0 的影响,结果分别如图 3 和图 4 所示.

由图3可知:随着埋深从500 m增加至1 000 m,极限平衡宽度 X_0 从3.52 m增加至3.76 m,增长幅度非常小,证明煤层埋深 H 对极限平衡宽度 X_0 的影响较小,不会扩大应力集中区的覆盖范围,对深部开采的围岩控制有利.由图4可知:随着采高 m 从1.5 m增加至2.5 m,极限平衡宽度 X_0 从2.7 m增加至4.7 m;受采高的影响,极限平衡宽度呈线性增长的趋势.因此,可以通过采高 m 对 X_0 进行控制,以此来控制集中应力作用下所产生的围岩损伤和破坏.

因此,在进行极近距离下分层巷道的留设时,可以通过先控制工作面采高调整极限平衡宽度来满足现场合理错距的留设条件,达到工作面更为安全、高效生产的目的.

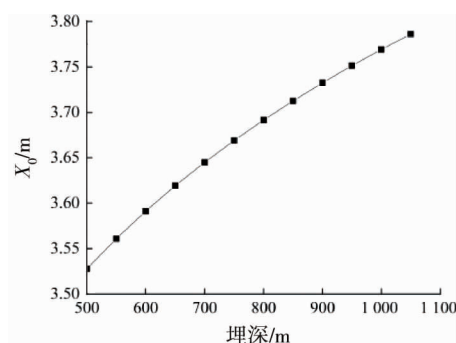


图3 煤层埋深 H 对 X_0 的影响

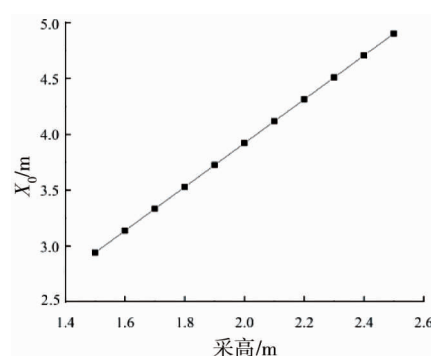


图4 采高 m 对 X_0 的影响

3 数值模拟结果分析与错距修正

3.1 数值模型的建立

模型整体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,底部固定垂直位移,四周固定水平位移,小河嘴煤矿 K21 煤层的埋深约为 500 m,通过施加 12.5 MPa 的等效载荷来模拟上覆岩层应力,1218 采区回采压实后的采空区采用双线性应变软化-硬化本构模型.模型长×宽×高=100 m×100 m×50 m,共计 71 万单元体,12 万节点.数值模型如图 5 所示.

通过 FLAC^{3D} 探究极近距离薄煤层下分层巷道在外错式布置下,巷道错距为 3, 4, 5, 6, 7 m 这 5 种条件下的巷道围岩稳定性和应力分布,根据其影响情况对合理错距进行修正.

3.2 不同巷道错距下巷道围岩的垂直应力分布特征

巷道外错式布置时的围岩垂直应力演化如图 6 所示.图 6(a)~图 6(e) 为巷道外错式布置时不同巷道错距下的围岩垂直应力分布云图,图 6(f) 为巷道围岩垂直应力随巷道外错距离的变化趋势.由图 6 可知:当巷道错距为 3, 4, 5, 6, 7 m 时,受到同样的集中应力影响,围岩峰值应力分别为 27.8, 26.4, 21.5, 20.7, 20.5 MPa;上、下分层巷道两帮受到较强的集中应力,向四周逐渐形成类似椭圆的减压区.巷道错距为 3 m 时,巷道之间以及两侧同时出现应力集中区,向巷道上下两侧传递的集中应力减弱,整体逐渐形成一个类似“0”形的环形减压区,其中,巷道间的集中应力值最大,最大值为 27.8 MPa;巷道错距为 4 m 时,巷道围岩的应力分布和巷道错距为 3 m 时几乎一样,巷道之间以及两侧的集中应力值降低,其中,最大垂直应力降低至 26.4 MPa;巷道错距为 5 m 时,巷道围岩的应力分布逐渐变化,在巷道两帮形成明显且相互独立的应力核,整体呈现类似“U”形的减压区,巷道围岩的集中应力明显降低,其中,最大垂直应力降低至 21.5 MPa;巷道错距为 6 m 时,集中应力只有较小的变化,应力分布的变化趋势也越来越弱;巷道错距为 7 m 时,应力的大小与巷道错距为 6 m 时的区别不大,应力分布也不再随着巷道错距的变化而产生明显的变化.

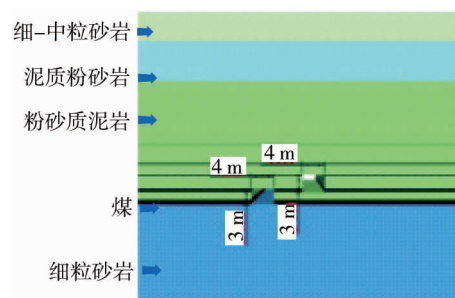


图5 数值模型

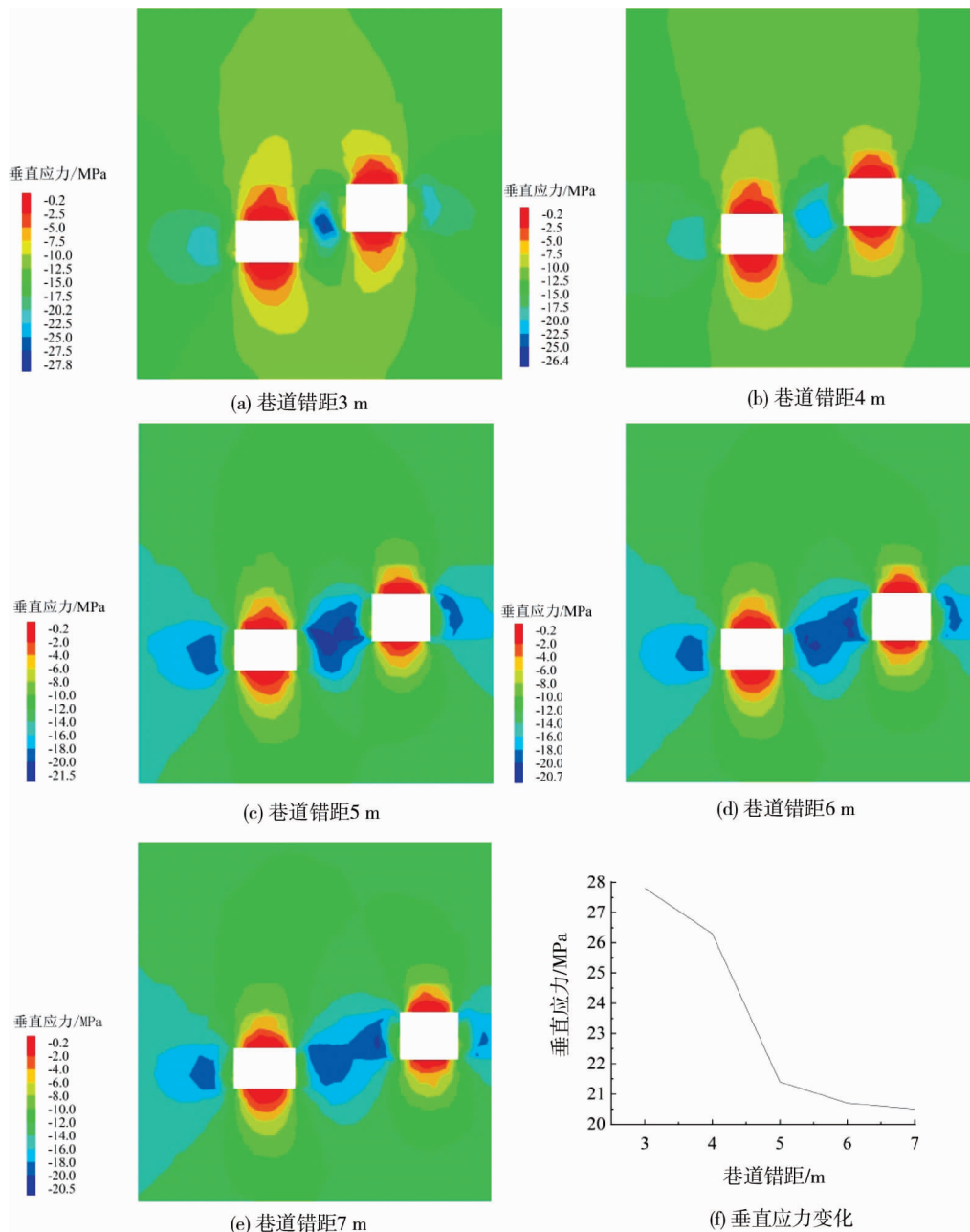


图6 巷道外错布置时的围岩垂直应力演化

3.3 不同巷道错距下巷道围岩的垂直移近量

巷道外错式布置时围岩的垂直位移演化如图7所示.图7(a)~图7(e)为不同巷道错距下的巷道围岩垂直位移云图,图7(f)为巷道围岩垂直位移随巷道外错距离的变化趋势.由图7可知:当巷道错距为3, 4, 5, 6, 7 m时,下分层巷道的顶板下沉量分别为17.5, 15.0, 13.8, 9.0, 7.9 cm,下分层巷道的底鼓量分别为11.0, 9.6, 3.4, 3.0, 2.8 cm;上分层巷道的顶板下沉量分别为26.0, 22.0, 13.8, 9.0, 7.9 cm,上分层巷道的底鼓量分别为11.0, 9.6, 3.4, 3.0, 2.8 cm.可见,随着巷道错距的增大,下分层巷道围岩的顶底板移近量逐渐减小;当巷道错距为3, 4 m时,围岩的顶底板移近量偏大,下分层巷道的顶板移近量明显小于上分层巷道,而下分层巷道的底板移近量与上分层巷道相同;当巷道错距从4 m增加至5 m时,下分层巷道顶底板围岩的移近量明显降低,减少了6.2 cm,变化幅度非常明显;当巷道错距从5 m继续增大时,巷道围岩底鼓量的变化幅度明显减小;当巷道错距增大至6 m时,继续增加巷道错距,顶板下沉量的变化幅度也明显减小,说明再继续增大巷道错距对巷道垂直位移变化的影响不大.

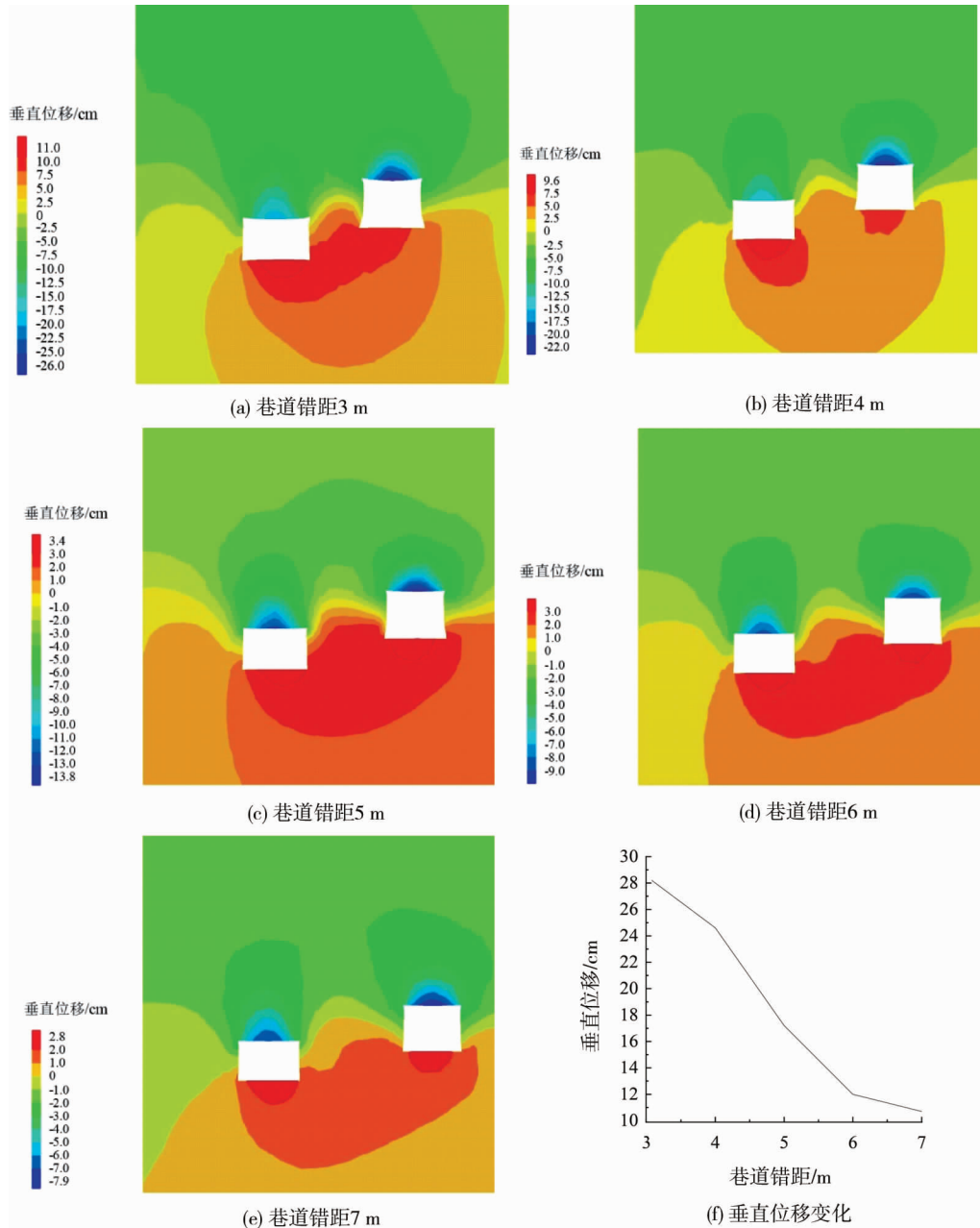


图7 巷道外错布置时围岩的垂直位移演化

3.4 不同巷道错距下巷道围岩的水平移近量

巷道外错式布置时围岩的水平位移演化如图8所示.图8(a)~图8(e)为不同巷道错距下巷道围岩的水平位移云图,图8(f)为巷道围岩水平位移随巷道外错距离的变化趋势.由图8可知:当巷道错距为3, 4, 5, 6, 7 m时,下分层巷道左侧的水平位移分别为10.0, 7.5, 5.0, 4.0, 3.0 cm,右侧的水平位移分别为10.0, 7.5, 5.0, 3.0, 2.0 cm;上分层巷道左侧的水平位移分别为25.1, 15.2, 11.6, 7.8, 6.3 cm,右侧的水平位移分别为26.5, 18.4, 15.1, 9.7, 7.8 cm.可见,随着巷道错距的增大,巷道围岩的水平移近量随之减小,下分层巷道围岩的水平移近量远小于上分层巷道,下分层巷道围岩的左侧移近量与右侧移近量的变化幅度几乎相同,且巷道错距从6 m继续增大时,巷道围岩水平位移的变化明显变小,证明继续增大巷道错距对巷道水平位移变化的影响不大.

综上所述,上分层和下分层巷道的应力分布虽然相同,但却产生了不同的围岩变形.当巷道集中应力产生在巷道两帮时,下分层巷道围岩的水平移近量仍然小于垂直移近量,说明巷道仍受到较为强烈的层间应力以及集中应力的影响.随着巷道错距的增大,巷道集中应力逐渐减弱,围岩变形也逐渐变小,当巷道错距增至6 m后,继续增大巷道错距,巷道围岩的应力以及变形都几乎不再变化.因此,改变巷道错距能够减

小巷道围岩的集中应力以及层间应力的影响,还能使巷道围岩产生的变形更小.结合理论分析以及数值模拟计算结果,确定该地质条件下分层巷道外错式布置的合理巷道错距应为 6 m.

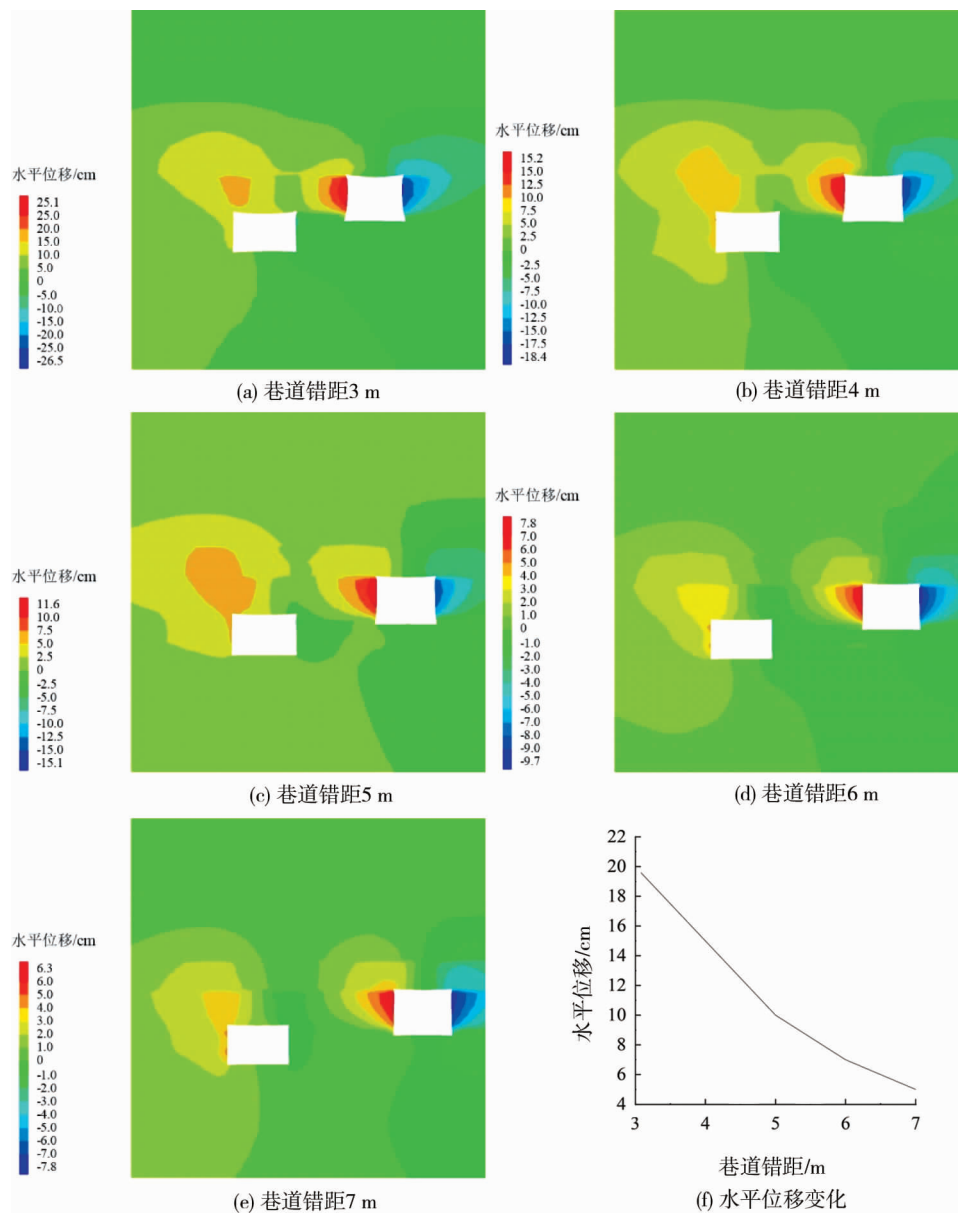


图 8 巷道外错布置时围岩的水平位移演化

4 工业性试验

结合理论以及数值模拟的结果,1216 工作面采取外错式布置,巷道错距为 6 m.回采巷道现场如图 9 所示.下分层巷道在锚杆-锚索-金属网联合支护下,巷道两帮没有大面积片帮,且顶板也较为完整,但存在部分区段巷道帮部的金属网破裂,部分区段巷道后期还需要棚架支护进行维护,说明在下煤层采掘的过程中,仍然受到采动应力的影响,只是上煤层工作面的采动应力对下分层巷道产生的

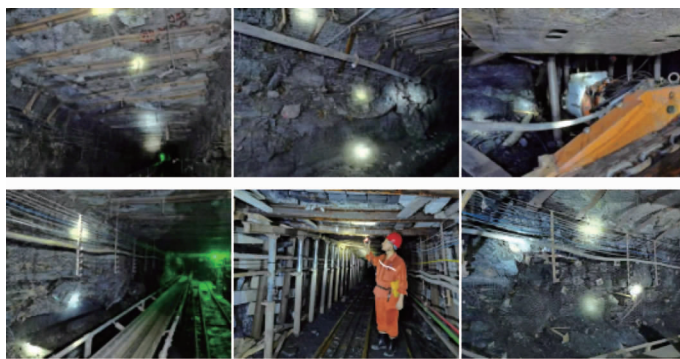


图 9 回采巷道现场

叠加影响区域较小,只对部分区段的巷道产生严重的破坏,且采动应力破坏了巷道围岩的原始应力状态,

使得应力重新分布,致使部分区段巷道的后期养护存在一定的困难。

通过改变巷道错距,可以使下分层巷道避开相应的集中应力区以及应力叠加影响区。从整体来看,在合理的巷道错距条件下实行开采,可以减小层间应力以及采动应力的影响,保证下煤层工作面顶板的完整性以及两帮的稳定性,虽然巷道会受到一定的采动影响,但通过支护手段可以维持巷道围岩的稳定性。因此,将巷道布置在合理的巷道错距下,可以使工作面内的设备稳定运行,促进工作面的高效生产。

5 结论

1) 采用极限平衡理论计算公式对外错式合理错距进行初步判定,并通过数值模拟结果进行修正,得出极限平衡宽度 X_0 与数值模拟求解的巷道围岩应力峰值一致,合理错距 L 与数值模拟求解的合理错距一致,确定该地质条件下错层位外错式巷道的合理错距 L 应为 6 m。

2) 改变巷道错距能够改变下分层巷道的应力分布情况,当巷道错距 $L < 2X_0$,随着巷道错距的增加,巷道的集中应力减小,围岩的变形减小;当巷道错距 $L \geq 2X_0$,围岩的变形量逐渐趋于稳定,继续增加巷道错距对巷道的围岩应力和变形的影响不大。

3) 通过数值模拟和现场实际相结合得到极近距离薄煤层在巷道外错式布置下的应力分布情况,在合理错距的情况下,能够有效避免极近距离薄煤层采掘导致的应力集中问题。

4) 在巷道合理的错距布置以及锚杆-锚索-金属网联合支护的条件下,能够保证极近距离薄煤层巷道的安全高效生产,为南方极近距离薄煤层开采提供参考。

参考文献:

- [1] 徐永圻.煤矿开采学[M].2版.徐州:中国矿业大学出版社,1999.
- [2] 康健,孙广义,董长吉.极近距离薄煤层同采工作面覆岩移动规律研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(1):51-56.
- [3] 张百胜.极近距离煤层开采围岩控制理论及技术研究[D].太原:太原理工大学,2008.
- [4] 黄万朋,邢文彬,郑永胜,等.近距离煤层上行开采巷道合理布局研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):3028-3039.
- [5] 戴文祥,潘卫东,李猛,等.近距离煤层强扰动巷道布置与支护技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):61-67.
- [6] 何富连,康庆涛,殷帅峰,等.近距离煤层顶板煤柱集中应力影响机制[J].采矿与安全工程学报,2020,37(6):1077-1083.
- [7] 张百胜,杨双锁,康立勋,等.极近距离煤层回采巷道合理位置确定方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):97-101.
- [8] 赵洪宝,程辉,吉东亮,等.近距离煤层回采巷道非对称性破坏机理与演化规律研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(6):1029-1040.
- [9] 杨伟,刘长友,杨宇.层间应力影响下近距离煤层工作面合理错距留设问题研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊1):2965-2972.
- [10] 张炜,张东升,陈建本,等.极近距离煤层回采巷道合理位置确定[J].中国矿业大学学报,2012,41(2):182-188.
- [11] 索永录,商铁林,郑勇,等.极近距离煤层群下层煤工作面巷道合理布置位置数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(增刊2):277-282.
- [12] 郝嘉伟,宁建国.高家梁煤矿2-2中煤层巷道围岩破坏因素敏感性分析研究[J].煤炭工程,2020,52(12):113-117.
- [13] 严国超,胡耀青,宋选民,等.极近距离薄煤层群联合开采常规错距理论与物理模拟[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):591-597.
- [14] 孙春东,杨本生,刘超.1.0 m 极近距离煤层联合开采矿压规律[J].煤炭学报,2011,36(9):1423-1428.
- [15] 张宝优.极近距离煤层错层位巷道布置方式及围岩控制技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(8):88-95.
- [16] 李宏星,丁国利,张小强,等.极近距离煤层回采巷道外错布置方式的合理错距[J].煤矿安全,2014,45(7):41-44.
- [17] 鲁岩,高杰,刘长友,等.近距煤层同采巷道优化布置研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(6):797-801.
- [18] 王志强,苏越,石磊,等.错层位外错式沿空掘巷机理及相邻巷道的立体化联合支护技术[J].煤炭学报,2018,43(增刊1):12-20.
- [19] 杨天鸿,唐春安,许涛,等.岩石破裂过程的渗流特性:理论、模型与应用[M].北京:科学出版社,2004.