

唐东旭,赵文光,张俊文,等. 深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷窄煤柱合理宽度及控制技术[J]. 矿业科学学报,2024,9(6):921-931. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024901

TANG Dongxu, ZHAO Wenguang, ZHANG Junwen, et al. Reasonable width and control technology of narrow coal pillar in gob-side entry driving in deep-buried bump-prone coal seam [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(6): 921-931. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024901

深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷窄煤柱 合理宽度及控制技术

唐东旭¹, 赵文光², 张俊文³, 班定成⁴

- 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017200;
- 国能神东煤炭乌兰木伦煤矿, 内蒙古鄂尔多斯 017205;
- 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083;
- 盘州市能源数据中心, 贵州六盘水 553500

摘要:针对深埋煤层沿空掘巷围岩变形大、难控制问题,以某矿深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷窄煤柱留设为工程背景,采用理论分析、数值模拟和现场试验相结合的方法,基于极限平衡理论解算窄煤柱留设合理范围,构建不同窄煤柱宽度及巷道掘进宽度数值模型,分析窄煤柱及实体煤内垂直应力及弹性能密度的分布演化规律。理论计算得出,窄煤柱留设最小宽度为5.04 m、巷道掘进宽度为5.4、6.0 m时,煤柱最大宽度分别为6.8、6.2 m,表明窄煤柱宽度减小仍具有良好的承载能力且处于低应力、低能量水平,可有效避免巷道大变形,降低冲击危险性。

关键词:深埋煤层;沿空掘巷;窄煤柱;合理宽度;控制技术

中图分类号:TD 411

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)06-0921-11

Reasonable width and control technology of narrow coal pillar in gob-side entry driving in deep-buried bump-prone coal seam

TANG Dongxu¹, ZHAO Wenguang², ZHANG Junwen³, BAN Dingcheng⁴

- Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017200, China;
- Wulanmulun Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group, Ordos Inner Mongolia 017205, China;
- School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
- Panzhou Energy Bureau Data Center, Liupanshui Guizhou 553500, China

Abstract: Aiming at the problem of large deformation of surrounding rock and difficulty of control gob-side entry driving in deep coal seam, taking the setting of narrow coal pillar in gob-side entry driving in deep-buried bump-prone coal seam as the engineering background, the reasonable range of narrow coal pillar width is calculated by combining theoretical analysis, numerical simulation and field test based on the limit equilibrium theory. The distribution and evolution of vertical stress and elastic energy density in narrow coal pillar and solid coal are analyzed by constructing numerical models of different narrow coal pillar widths and roadway driving widths. The results show that when the minimum width with narrow coal pillar is 5.04m and the width of roadway is 5.4m and 6.0m, the maximum width of coal pillar is 6.8m and 6.2m, respectively. The narrow coal pillar with reduced width still has a good bearing capacity and is subjected to low stress and low energy level, can effectively avoid large deformation of

收稿日期:2023-12-11 修回日期:2024-01-19

基金项目:国家自然科学基金(52034009);国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U23B2093)

作者简介:唐东旭(1986—),男,辽宁朝阳人,硕士,工程师,主要从事巷道支护等方面的研究工作。E-mail:tdx19861025@163.com

通信作者:张俊文(1977—),男,内蒙古凉城人,博士,教授,主要从事冲击地压、巷道支护等方面的研究工作。Email:zhangjw@cumt.edu.cn;Tel:13681359725

roadway and reduce the bump risk.

Key words: deep buried coal seam; gob-side entry driving; narrow coal pillar; reasonable width; control technology

近年来,随着煤炭浅部资源的逐渐枯竭,煤炭开采向深部转移已成为必然趋势。何满潮等^[1]指出,深部开采时处于“三高一扰动”的复杂力学环境。谢和平等^[2]指出,进入深部的临界特征为煤岩体受采动影响易发生片帮、冲击和塑性大变形。因此,深部煤层采场开挖及巷道掘进更加困难,巷道围岩的控制难度也显著加大。窄煤柱沿空掘巷是在上一区段采空区边缘留设较小宽度的煤柱,并掘进下一区段巷道的采掘布置方式,影响其稳定性的因素众多^[3-4],主要与煤层埋深、煤层厚度、煤体及顶板强度、巷道位置、煤柱宽度、采掘速度、支护技术等有关。

合理布置窄煤柱位置对提高窄煤柱稳定性具有事半功倍的效果。众多学者基于覆岩运动形成的拱结构及应力场分布特征,确定合理的窄煤柱位置并给出窄煤柱留设的最大宽度的表达式^[5-7]。

沿空掘巷煤柱宽度是影响其稳定性的关键因素,合理的窄煤柱宽度既可保障承载能力又减少煤炭损失,对此国内外众多学者也进行了研究并取得丰富成果。武超等^[8]定性分析了窄煤柱破坏特征及损伤程度演化规律,进一步分析了区段窄煤柱失稳机理及其尺寸效应影响规律。孙利辉等^[9]研究沿空掘巷内外应力场传递演化规律及内应力场分布范围,得到最优护巷煤柱宽度为 8 m。彭林军等^[10]在原巷道留设 35 m 护巷煤柱全断面锚索支护已无法维护采掘巷道断面条件下进行窄煤柱研究。赵鹏祥等^[11]开展倾斜煤层沿空掘巷窄煤柱力学特征及尺寸效应分析,确定倾斜煤层沿空掘巷合理煤柱宽度。姜耀东等^[12]探索了一种确定构造应力区沿空巷道窄煤柱合理宽度的方法,得到该构造应力区窄煤柱宽度为 6.5 m。冯吉成等^[13]研究了深井大采高工作面不同煤柱宽度下,煤柱两侧塑性区分布和采掘扰动对巷道变形的影响,得到窄煤柱的合理尺寸。张科学等^[14]综合应力场、位移场、巷道围岩变形及极限平衡理论等,确定窄煤柱合理宽度为 5 m。祁方坤等^[15]基于采空侧煤体倾向支承压力分布及护巷煤柱极限平衡理论,确定了窄煤柱合理宽度为 5 m。王德超等^[16]首次提出一种新型侧向支承压力监测方法,并结合数值模拟确定区段煤柱合理留设宽度。柏建彪等^[17]通过数值模拟研究窄煤柱作用及其合理宽度,得出软煤窄煤柱宽度

为 4~5 m,中硬煤窄煤柱宽度为 3~4 m。

沿空掘巷窄煤柱稳定性控制技术是现场工作的重中之重,国内外众多学者对其进行了大量研究。程利兴等^[18]提出口孜东矿沿空掘巷以“高预应力主动支护、注浆改性加固、强帮护顶”为核心的沿空掘巷支护技术。王恩等^[19]提出了留小煤柱掘巷围岩锚梁网支护+槽钢锚索加固+注浆改性等分区域联合支护技术。孟祥军^[20]提出了根据钻进煤粉量的变化来判断基本顶断裂线位置及确定深部沿空巷道巷帮锚索支护长度的方法。张元超等^[21]基于对实体煤帮变形破坏机制的分析,提出高强让压长锚索联合锚网的实体煤帮控制技术。另外,还有诸多学者也对沿空掘巷窄煤柱留设宽度、控制技术等相关研究^[22-26]。

以上研究成果厘清了沿空掘巷窄煤柱稳定性影响因素,确定了沿空掘巷布置位置及合理煤柱宽度,提出了煤柱控制技术。但对深埋且具有冲击危险性煤层沿空掘巷窄煤柱合理宽度及控制技术的研究较少。针对深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷围岩变形大、鼓帮、片帮严重等问题,通过理论计算、数值模拟及现场试验方法,确定沿空掘巷窄煤柱合理宽度,提出巷道围岩控制方案,评估围岩控制效果。

1 工程概况

以某矿 1 盘区 3-1 煤层某小煤柱沿空掘进工作面为工程背景,煤层埋深 600 m,地层倾角 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$,煤层平均厚度 4.5 m,较稳定,直接顶平均厚度 3.5 m,基本顶平均厚度 11 m。工作面回风巷布置在 3-1 煤层中,北侧为工作面带式输送机巷,南侧为上一工作面采空区,其相对位置关系如图 1 所示。3-1 煤层顶底板岩层岩性及厚度如图 2 所示。

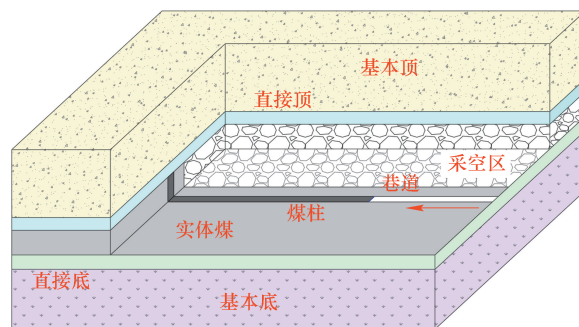


图 1 沿空掘巷示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gob-side entry driving

5.4 m,巷道掘进宽度由5.4 m改为6 m。

3 沿空掘巷围岩应力能量演化规律

设计原方案为巷道宽度5.4 m,煤柱宽度6 m。新方案为巷道宽度6.0 m,煤柱宽度5.4 m。建立数值模型,分析窄煤柱内及实体煤侧应力演化规律,解算窄煤柱内及实体煤侧弹性能积聚差异。

3.1 数值模型构建

根据某矿1盘区3-1煤沿空掘巷构建FLAC^{3D}模型,模型长×宽×高为40 m×40 m×33 m,共划分网格422 400个,如图4所示。固定模型x方向左右边界,y方向前后边界,z方向下边界的位移。模型上表面施加垂直应力15.0 MPa,对模型施加梯度应力,应力变化量2.5 MPa/100 m,设置模型重力加速度为9.8 m/s²,采用摩尔-库仑本构模型计算。

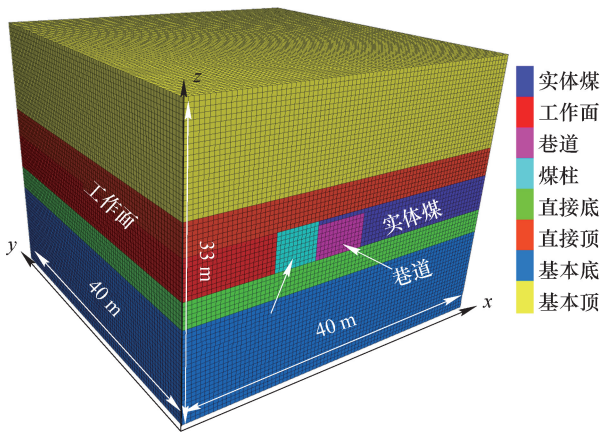


图4 沿空掘巷数值模型

Fig. 4 Numerical model of gob-side entry driving

通过室内岩石力学实验方法测试得出部分煤岩物理力学参数(表1),并在实际赋参时对其进行适当折减。实际开挖顺序与现场一致。

表1 煤岩体部分物理力学参数

Table 1 Some physical and mechanical parameters of coal and rock mass

岩层	岩性	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
基本顶	细粒砂岩	3.55	1.78	0.28	5.93	32.00
直接顶	粉砂岩	2.65	1.49	0.25	3.58	28.60
煤层	煤	1.40	1.24	0.21	2.31	23.70
直接底	粉砂岩	2.65	1.34	0.25	3.58	28.60
基本底	砂质泥岩	3.15	1.58	0.26	4.93	30.60

深埋煤层数值模型初始平衡如图5所示。由图5可知,模型初始平衡状态良好,垂直应力的分布基本与现场实测一致,能够较准确反映深埋煤层下沿空掘巷围岩应力及能量位移等演化规律。

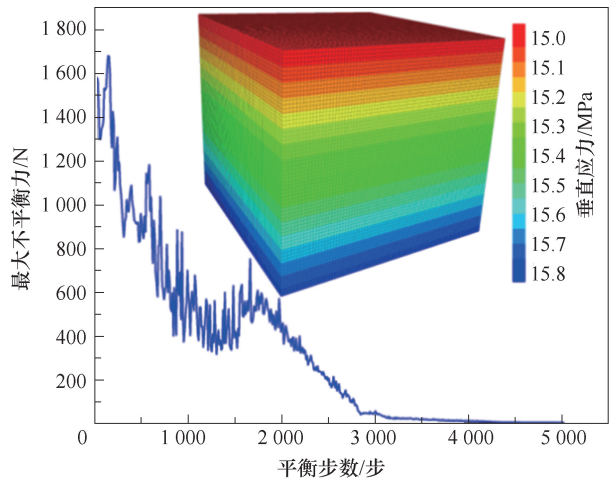


图5 应力初始平衡

Fig. 5 Initial stress equilibrium

3.2 沿空掘巷围岩应力演化规律

图6和图7分别为沿空掘巷围岩垂直应力分布特征及应力演化曲线。

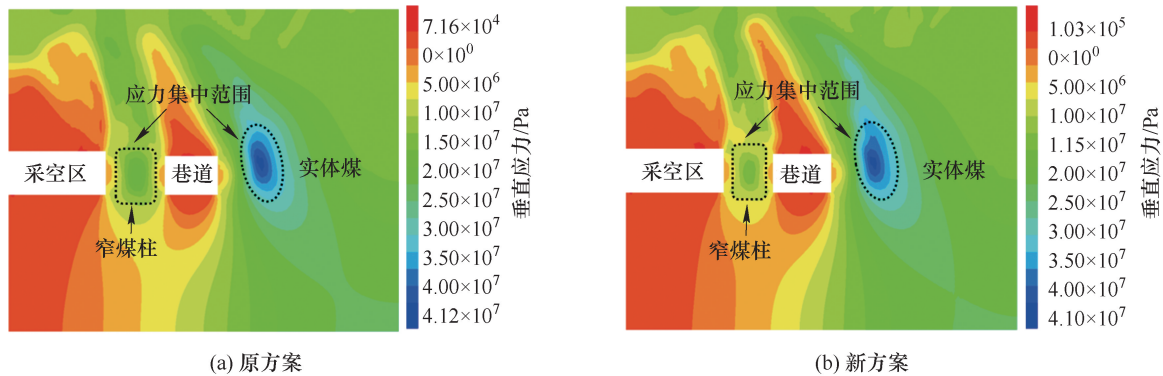


图6 沿空掘巷不同窄煤柱垂直应力分布规律

Fig. 6 Vertical stress distribution law of different narrow coal pillars in gob-side entry driving

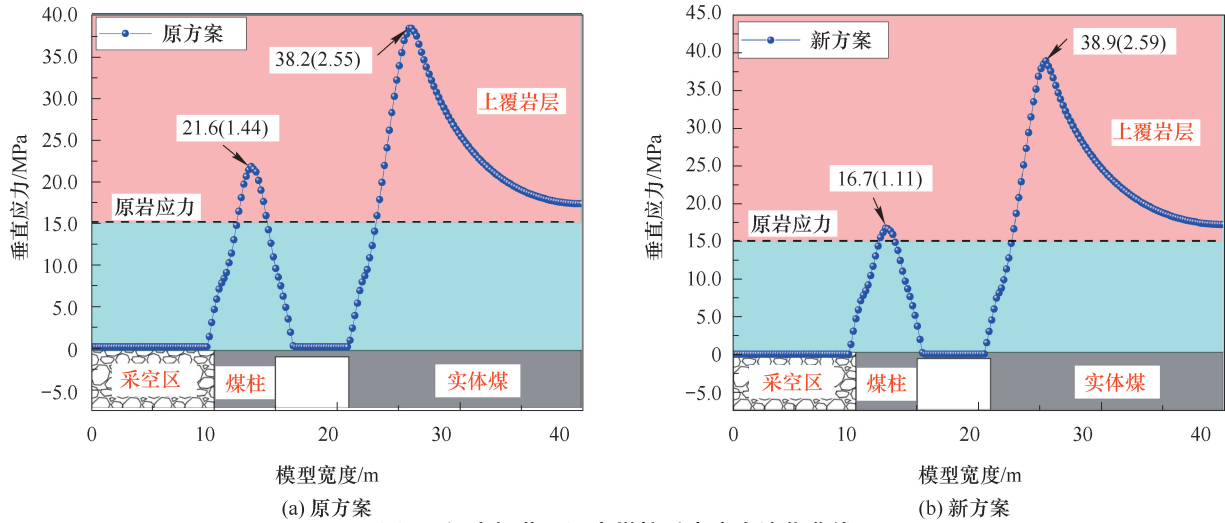


图7 沿空掘巷不同窄煤柱垂直应力演化曲线

Fig. 7 Vertical stress evolution curve of different narrow coal pillars in gob-side entry driving

煤柱内应力呈“单峰”形态,原方案煤柱内应力集中范围较新方案大且应力值高。原方案煤柱内应力峰值为 21.6 MPa,应力集中系数为 1.44,新方案煤柱内应力峰值为 16.7 MPa,应力集中系数为 1.11,较原方案降低 22.7%。这表明新方案煤柱内仍有较好承载能力且应力水平降低,避免高应力集中导致巷道大变形,降低了冲击危险性,同时减少了煤炭损失。

原方案实体煤侧应力值为 38.2 MPa,应力集中系数为 2.55,新方案实体煤侧应力值为 38.9 MPa,应力集中系数为 2.59,比原方案略高,均远大于煤柱内应力水平。结合覆岩破断形成内外应力

场可知,沿空掘巷覆岩荷载主要由实体煤承载,煤柱仅承载已破断覆岩自重,煤柱处于卸压区。

3.3 沿空掘巷围岩弹性能演化规律

矿井开采时应力重新分布,煤岩体中应力集中的区域存在弹性能积聚,采掘扰动下应力重新分布后形成的煤岩体弹性能可表示为^[27]

$$e = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (5)$$

式中, e 为采掘扰动下应力重新分布后形成的弹性能总能量, J ; σ_1 为煤岩体所受垂直应力; σ_2 、 σ_3 为煤岩体所受水平应力。

通过对煤岩体中应力与能量关系之间的推导换算,得到煤岩体弹性能表达式^[27]:

$$e = \int_0^{\frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]} \frac{\sigma_1}{E} d\epsilon_1 + \int_0^{\frac{1}{E}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]} \frac{\sigma_2}{E} d\epsilon_2 + \int_0^{\frac{1}{E}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]} \frac{\sigma_3}{E} d\epsilon_3 \quad (6)$$

由此可知,煤岩体内积聚的弹性能为

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (7)$$

式中, E 为弹性模量, GPa ; μ 为泊松比; U_e 为煤岩

体内积聚的弹性能, $J \cdot m^{-3}$ 。

通过对 FLAC 中的 Fish 语言进行二次开发,将煤岩体应力场换算为能量场,得到煤岩体内弹性能分布规律。图 8 和图 9 分别为沿空掘巷围岩弹性能分布特征及弹性能演化曲线。

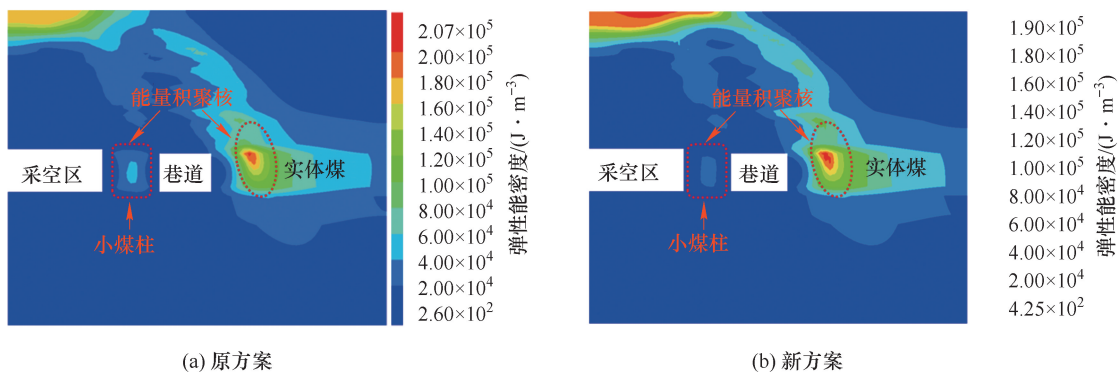


图8 沿空掘巷不同窄煤柱弹性能分布规律

Fig. 8 Elastic energy distribution law of different narrow coal pillars in gob-side entry driving

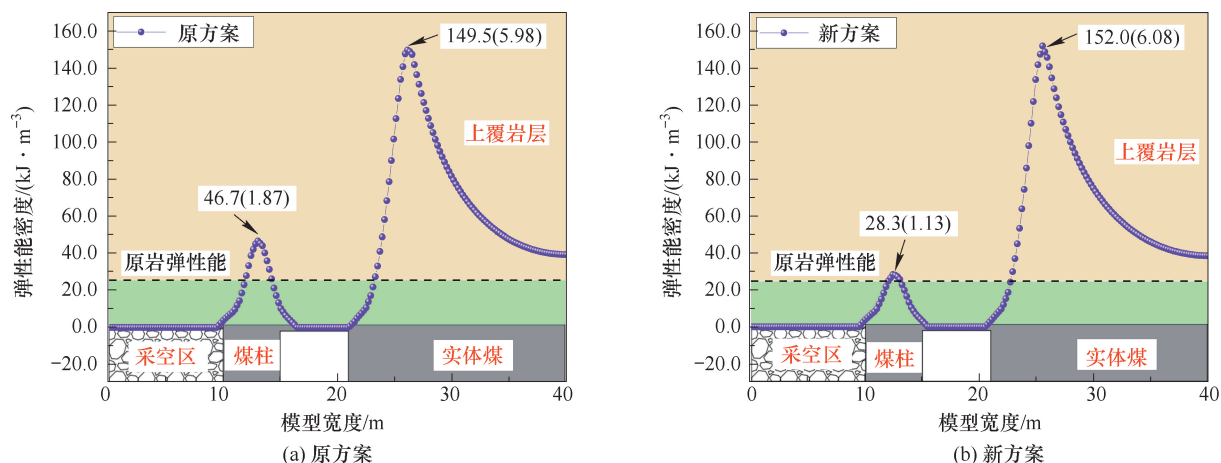


图9 沿空掘巷不同窄煤柱弹性能演化曲线

Fig. 9 Elastic energy evolution curve of different narrow coal pillars in gob-side entry driving

由图8、图9可得,煤柱内弹性能积聚呈现“单峰”形态,原方案煤柱内能量积聚范围较新方案下大且弹性能密度高。原方案煤柱内弹性能密度为 46.7 kJ/m^3 ,弹性能积聚系数为1.87,新方案煤柱内弹性能密度为 28.3 kJ/m^3 ,弹性能积聚系数为1.13,较原方案降低39.4%。这表明新方案窄煤柱内仍然有稳定的弹性核(良好的承载能力),且较原方案能量降低,避免高能量积聚使巷道变形,降低了因弹性能迅速释放而形成冲击地压的危险性,同时煤炭损失减小。原方案实体煤侧弹性能密

度为 149.5 kJ/m^3 ,弹性能积聚系数为5.98,新方案实体煤侧弹性能密度为 152.0 kJ/m^3 ,弹性能积聚系数为6.08,新方案实体煤能量水平略高于原方案。同样,可知沿空掘巷覆岩载荷主要由实体煤承载,因此形成高能量积聚,煤柱仅承载已破断覆岩自重,能量积聚较小。

3.4 沿空掘巷合理煤柱宽度确定

深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷主要难度在于窄煤柱留设宽度。图10为沿空掘巷合理煤柱宽度。

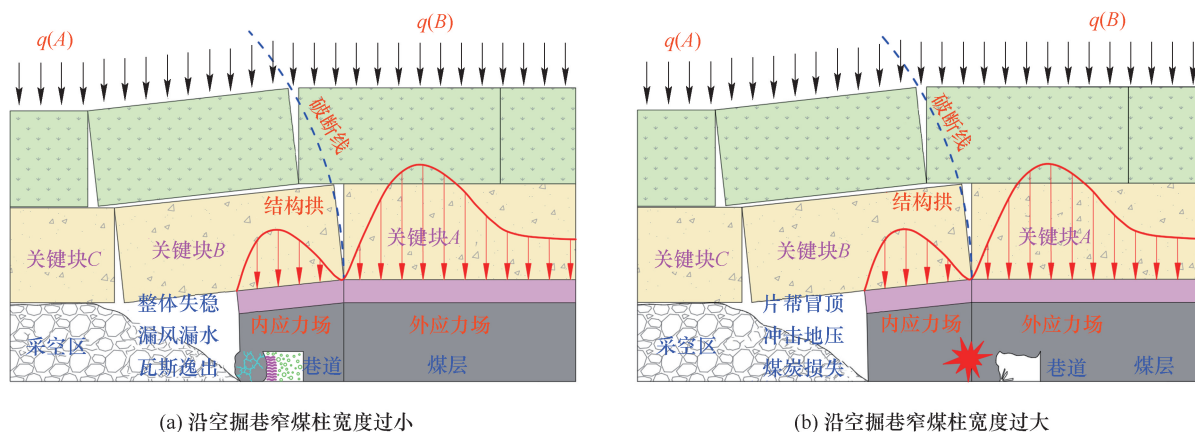


图10 沿空掘巷合理煤柱宽度

Fig. 10 Reasonable coal pillar width in gob-side entry driving

窄煤柱宽度过小,不具有稳定的弹性核,使得承载能力降低,容易造成窄煤柱整体塌陷、漏风、透水、煤层自然发火以及含瓦斯煤层瓦斯逸出等灾害。窄煤柱宽度过大,煤柱部分进入外应力场,煤柱不仅承载已破断岩层重量,同时也承载上覆未破断岩层重量,煤柱内形成高应力、高能量积聚,易发生大变形、煤壁片帮、鼓帮、顶板垮落及钻孔塌孔等,甚至可能发

生冲击地压灾害,同时也增加了煤炭损失。

4 沿空掘巷巷道围岩控制技术

4.1 沿空掘巷巷道支护方案

新方案沿空掘巷下窄煤柱有较好的承载能力,为了进一步加强煤柱承载能力,控制巷道围岩变形,采取加强支护措施,具体支护方案如图11所示。

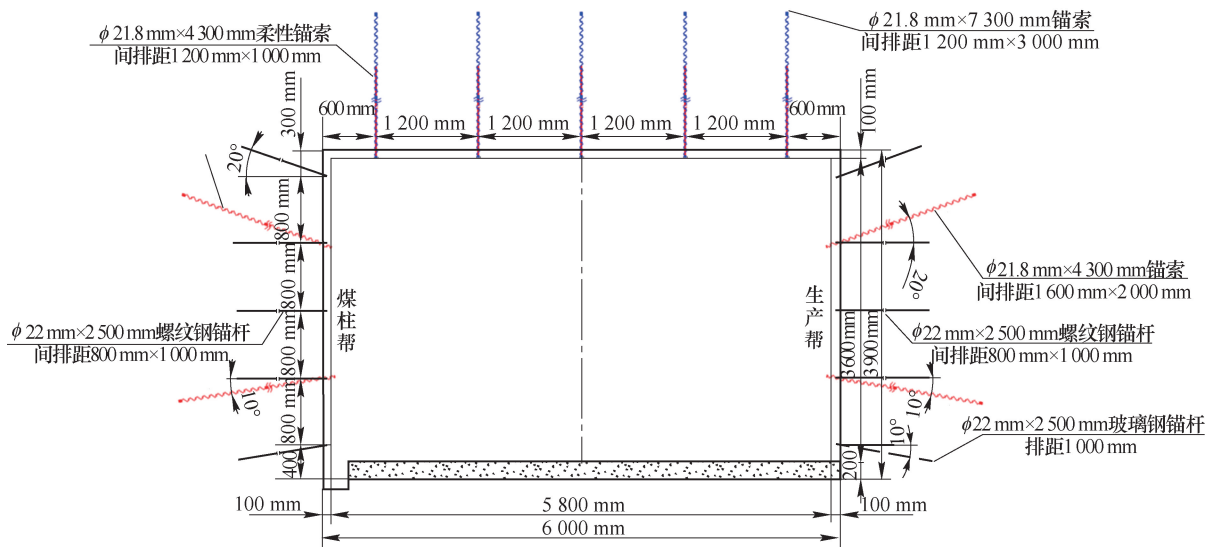


图 11 深埋煤层沿空掘巷支护优化设计方案

Fig. 11 Optimization design scheme of gob-side entry driving in deep coal seam

顶板采用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 4\ 300/7\ 300 \text{ mm}$ 柔性锚杆(索)加装钢带并配合钢筋编织焊接网进行支护,其中锚杆间距 $1\ 200 \text{ mm}$,排距 $1\ 000(2\ 000) \text{ mm}$,锚索间距 $1\ 200 \text{ mm}$,排距 $3\ 000 \text{ mm}$ 。

煤柱帮,采用 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\ 500 \text{ mm}$ 螺纹钢锚杆,每排 5 根,间排距 $800 \text{ mm} \times 1\ 000 \text{ mm}$,锚杆扭矩不小于 $200 \text{ N} \cdot \text{m}$,锚杆施工间排距超过设计要求 100 mm 以上时,现场采取补打“五花”锚杆进行补强支护。锚索间距为 $1\ 600 \text{ mm}$,排距为 $2\ 200 \text{ mm}$,每排 2 根,锚索预紧力不小于 $75 \text{ kN}(15 \text{ MPa})$ 。

实体煤帮,采用 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\ 500 \text{ mm}$ 螺纹钢锚杆,每排 5 根,间排距 $800 \text{ mm} \times 1\ 000 \text{ mm}$ 。采用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 4\ 300 \text{ mm}$ 锚索配合钢筋编织焊接网进行支护,排距为 $2\ 000 \text{ mm}$,每排 1 根,锚索预紧力不小于 150 kN ,锚杆施工间排距超过设计要求 100 mm 以上时,现场采取补打“五花”锚杆进行补强支护。

4.2 沿空掘巷巷道支护数值模型构建

根据新支护方案构建数值模型,如图 12 所示。

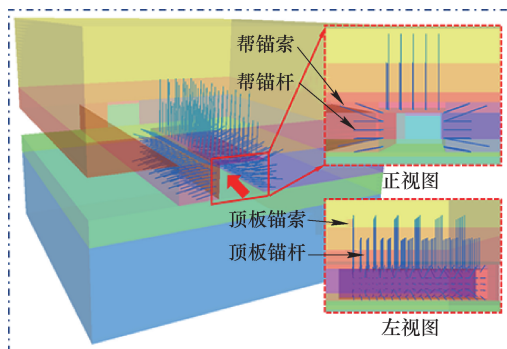
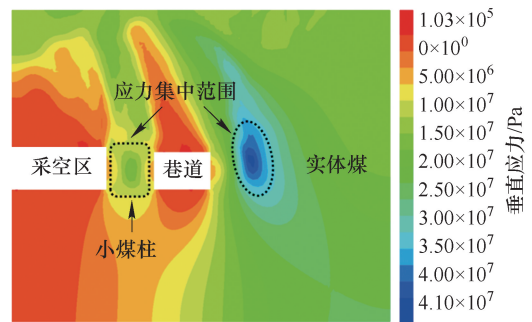


图 12 巷道支护数值模型

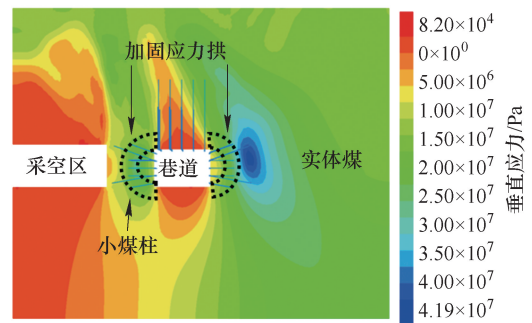
Fig. 12 Numerical model of roadway support

4.3 沿空掘巷巷道支护围岩应力演化规律

图 14 和图 15 分别为沿空掘巷围岩无支护和有支护围岩应力分布特征及演化曲线。无支护煤柱内应力集中处于煤柱中部,有支护煤柱内应力集中范围扩大到巷道帮部且应力值升高,应力曲线峰值向巷道帮部移动,在锚杆(索)支护范围内形成加固应力拱,应力达到 25.5 MPa ,应力集中系数



(a) 无支护



(b) 有支护

图 13 沿空掘巷窄煤柱支护下垂垂直应力分布规律

Fig. 13 Vertical stress distribution law for narrow coal pillar support in gob-side entry driving

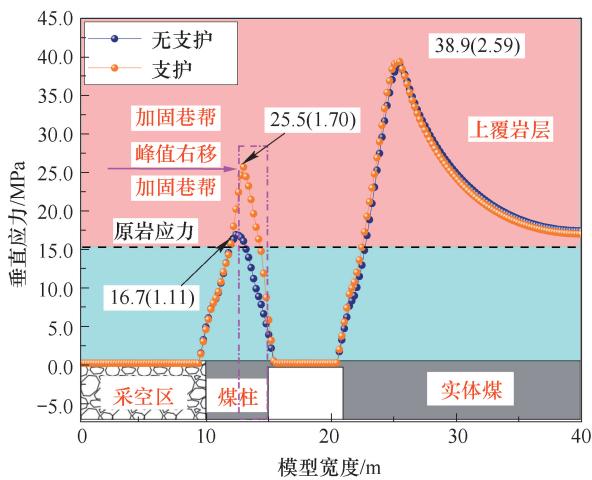


图 14 沿空掘巷窄煤柱支护下垂垂直应力演化曲线

Fig. 14 Vertical stress evolution curve for narrow coal pillar support in gob-side entry driving

1.70。这表明该支护对巷道围岩控制效果良好,窄煤柱帮围岩完整性提高,整体强度及承载能力均增强。实体煤一侧应力集中基本不变,同样巷道实体

煤帮浅部围岩在锚杆(索)支护范围内形成应力加固拱,其应力略有升高。这表明巷道实体煤帮浅部围岩完整性提高,可以控制围岩变形,达到一定支护效果。

4.4 沿空掘巷巷道支护围岩弹性能演化规律分析

图 15 和图 16 分别为沿空掘巷围岩无支护和有支护围岩弹性能密度分布特征及演化曲线。无支护煤柱内能量积聚核处于煤柱中部区域,有支护煤柱内能量积聚核范围扩大到巷道帮部且弹性能密度升高,弹性能密度曲线峰值向巷道帮部移动,形成加固能量拱,其弹性能密度达到 64.7 kJ/m^3 ,能量积聚系数 2.59。这同样表明巷道窄煤柱帮部围岩完整性提高,窄煤柱内形成范围更大更稳定的弹性核区,整体承载能力增强,可避免片帮、鼓帮等灾害发生。实体煤一侧能量积聚核基本不变,巷道实体煤帮浅部围岩形成能量加固拱,围岩弹性能略有升高,可控制巷道实体煤帮浅部围岩变形。

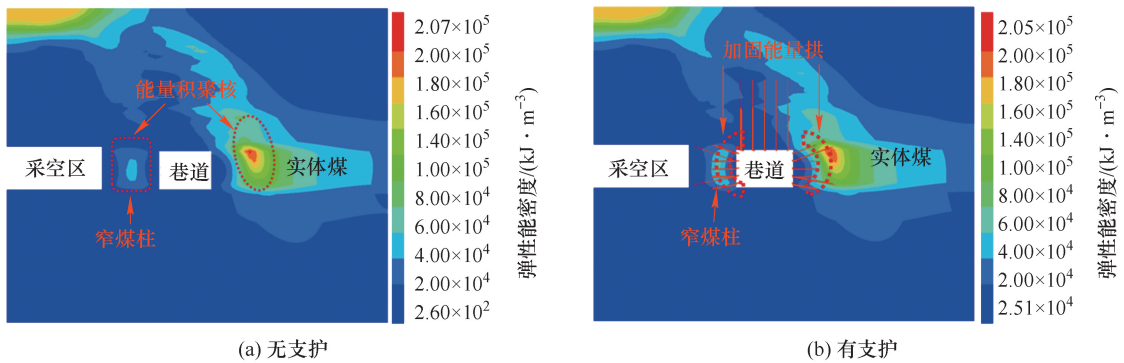


图 15 沿空掘巷窄煤柱支护下弹性能分布规律

Fig. 15 Elastic energy distribution law for narrow coal pillar support in gob-side entry driving

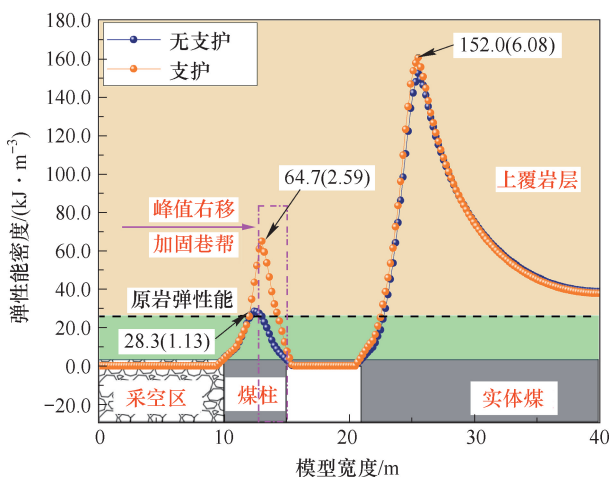
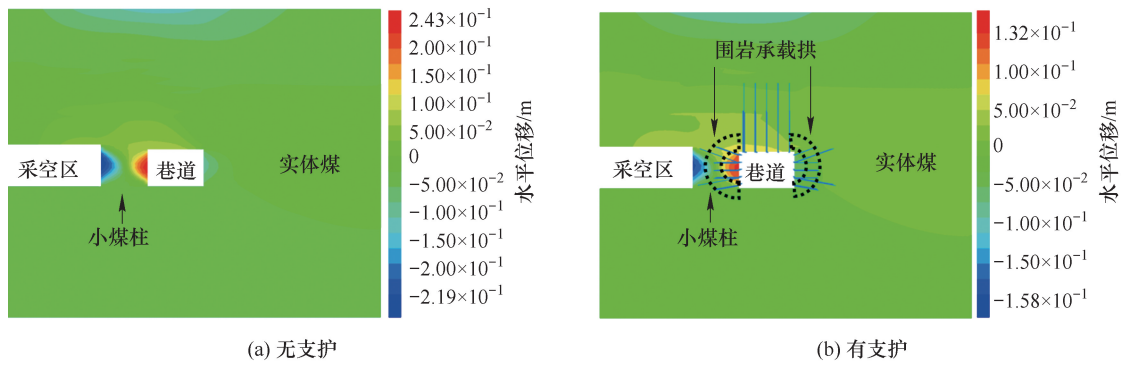


图 16 沿空掘巷窄煤柱支护下弹性能演化曲线

Fig. 16 Elastic energy evolution curve of narrow coal pillar support in gob-side entry driving

4.5 沿空掘巷巷道支护围岩水平位移演化规律

图 17 和图 18 分别为沿空掘巷围岩无支护和有支护下围岩水平位移分布特征及演化曲线。无支护时,窄煤柱采空区侧最大位移 0.21 cm,巷道侧最大位移 0.24 cm。有支护时,窄煤柱采空区侧最大位移 0.15,窄煤柱巷道侧最大位移 0.12,较无支护时分别减小 28.6% 和 50.0%。由此可知,有支护下窄煤柱两侧水平位移均较无支护时减小,在巷道窄煤柱帮形成加固承载拱,窄煤柱完整性提高,可有效控制窄煤柱帮部变形、鼓起等。巷道实体煤一侧无支护时最大水平位移 0.06,有支护时最大水平位移 0.04,减小 33.3%,同样表明该支护实体煤帮浅部围岩完整性提高,可有效控制实体煤帮变形。



(a) 无支护 (b) 有支护

图 17 沿空掘巷窄煤柱支护下水平位移分布

Fig. 17 Horizontal displacement distribution for narrow coal pillar support in gob-side entry driving

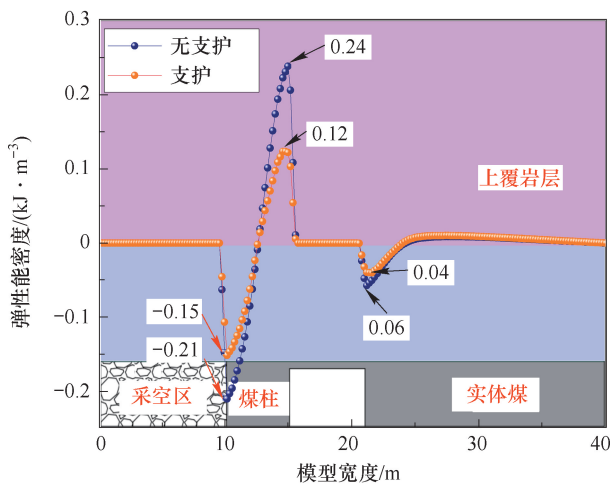


图 18 沿空掘巷窄煤柱支护下水平位移演化曲线

Fig. 18 Horizontal displacement evolution curve for narrow coal pillar support in gob-side entry driving

4.6 现场治理效果分析

为验证模拟的有效性,现场使用优化后的方案。治理前,巷道非煤柱帮底角鼓出明显,煤柱帮鼓帮更明显。治理后,煤柱帮变形不明显,巷道断面其他区域也没有发生明显变形,表明治理措施有效、巷道结构稳定。

5 结论

(1) 基于极限平衡理论及顶板断裂线与煤柱宽度关系,解算了深埋冲击倾向性煤层沿空掘巷窄煤柱留设合理范围,窄煤柱留设最小宽度为 5.04 m。当巷道掘进宽度 5.4 m 时,煤柱宽度最大为 6.8 m;当巷道掘进宽度 6 m 时,煤柱宽度最大为 6.2 m。

(2) 构建沿空掘巷不同煤柱宽度数值模型。结果表明,实体煤应力集中及能量积聚远高于窄煤柱内,沿空掘巷后覆岩载荷主要由实体煤承载,煤

柱仅承载已破断覆岩荷载,处于卸压区。窄煤柱宽度减小,其应力集中降低 22.7%,能量积聚降低 39.4%,但均仍高于原岩应力及原岩弹性能,有稳定的弹性核。这表明新方案窄煤柱仍然具有良好的承载能力且处于低应力、低能量水平,可有效避免巷道大变形,降低冲击危险性。

(3) 构建沿空掘巷围岩支护数值模拟。结果表明,支护后巷道两帮应力、能量水平均升高,水平位移均减小,且窄煤柱内变化更明显。在锚杆(索)支护范围内形成应力、能量加固承载拱。该支护能有效提高窄煤柱完整性及强度,提升窄煤柱承载能力,控制巷道围岩变形,保障矿井后续安全高效采掘。经现场工程验证,应用效果良好。

参考文献

[1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

[2] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,2015,40(1): 1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.

[3] 李学华,鞠明和,贾尚昆,等. 沿空掘巷窄煤柱稳定性影响因素及工程应用研究[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(5): 761-769.
LI Xuehua, JU Minghe, JIA Shangkun, et al. Study of influential factors on the stability of narrow coal pillar in gob-side entry driving and its engineering application

- [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(5): 761-769.
- [4] 徐斌,李永亮,路彬,等. 胶结充填采场顶板承载特性及煤柱稳定性分析[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2): 200-209.
XU Bin, LI Yongliang, LU Bin, et al. Analysis of roof bearing characteristics and coal pillar stability of cemented backfill field[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2): 200-209.
- [5] 陆银龙,韩磊,吴开智,等. 特厚煤层沿空掘巷力源结构特征与围岩协同控制策略[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(2): 238-249.
LU Yinlong, HAN Lei, WU Kaizhi, et al. Characteristics of stress sources and comprehensive control strategies for surrounding rocks of gob-side driving entry in extra thick coal seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(2): 238-249.
- [6] 陈正拜,李永亮,杨仁树,等. 窄煤柱巷道非均匀变形机理及支护技术[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(7): 1847-1857.
CHEN Zhengbai, LI Yongliang, YANG Renshu, et al. Non-uniform deformation mechanism and support technology of narrow coal pillar roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1847-1857.
- [7] 张杰,刘清洲,孙遥,等. 浅埋薄基岩沿空掘巷围岩结构稳定性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(4): 647-654.
ZHANG Jie, LIU Qingzhou, SUN Yao, et al. Structural stability of surrounding rock in shallow and thin bedrock gob-side entry driving[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(4): 647-654.
- [8] 武超,王志强,刘耀儒,等. 特厚煤层垂直分层区段窄煤柱围岩稳定性及控制技术研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(9): 3728-3744.
WU Chao, WANG Zhiqiang, LIU Yaoru, et al. Study on stability and control of surrounding rock of narrow coal pillar in vertical stratification of extra-thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(9): 3728-3744.
- [9] 孙利辉,丁斌,李旺军,等. 芦子沟矿厚煤层沿空掘巷窄煤柱宽度优化及应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1151-1160.
SUN Lihui, DING Bin, LI Wangjun, et al. Width optimization and application of narrow coal pillar in gob-side entry driven in thick coal seam in Luzigou Mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1151-1160.
- [10] 彭林军,宋振骥,周光华,等. 大采高综放动压巷道窄煤柱沿空掘巷围岩控制[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(10): 34-43.
PENG Linjun, SONG Zhenqi, ZHOU Guanghua, et al. Surrounding rock control on narrow coal pillar along gob in dynamic pressure roadway with large mining height top coal caving[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 34-43.
- [11] 赵鹏翔,李刚,李树刚,等. 倾斜厚煤层沿空掘巷煤柱力学特征的尺寸效应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1120-1127.
ZHAO Pengxiang, LI Gang, LI Shugang, et al. Analysis of size effect of mechanical characteristics of coal pillars gob-side entry in inclined thick coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1120-1127.
- [12] 姜耀东,宋红华,马振乾,等. 基于地应力反演的构造应力区沿空巷道窄煤柱宽度优化研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 319-326.
JIANG Yaodong, SONG Honghua, MA Zhenqian, et al. Optimization research on the width of narrow coal pillar along goaf tunnel in tectonic stress zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 319-326.
- [13] 冯吉成,马念杰,赵志强,等. 深井大采高工作面沿空掘巷窄煤柱宽度研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 580-586.
FENG Jicheng, MA Nianjie, ZHAO Zhiqiang, et al. Width of narrow coal pillar of roadway driving along goaf at large height mining face in deep mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(4): 580-586.
- [14] 张科学,张永杰,马振乾,等. 沿空掘巷窄煤柱宽度确定[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(3): 446-452.
ZHANG Kexue, ZHANG Yongjie, MA Zhenqian, et al. Determination of the narrow pillar width of gob-side entry driving[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(3): 446-452.
- [15] 祁方坤,周跃进,曹正正,等. 综放沿空掘巷护巷窄煤柱留设宽度优化设计研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(3): 475-480.
QI Fangkun, ZHOU Yuejin, CAO Zhengzheng, et al. Width optimization of narrow coal pillar of roadway driving along goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(3): 475-480.
- [16] 王德超,李术才,王琦,等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 539-548.
WANG Dechao, LI Shucan, WANG Qi, et al. Experimental study of reasonable coal pillar width in fully

- mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 539-548.
- [17] 柏建彪,侯朝炯,黄汉富. 沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3475-3479.
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong, HUANG Hanfu. Numerical simulation study on stability of narrow coal pillar of roadway driving along goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3475-3479.
- [18] 程利兴,康红普,姜鹏飞,等. 深井沿空掘巷围岩变形破坏特征及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 227-236.
CHENG Lixing, KANG Hongpu, JIANG Pengfei, et al. Deformation and failure characteristics and control technology of surrounding rocks in deeply gob-side entry driving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 227-236.
- [19] 王恩,谢生荣,陈冬冬,等. 深部孤岛工作面留小煤柱掘巷围岩破坏机制与控制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 41-50.
WANG En, XIE Shengrong, CHEN Dongdong, et al. Failure mechanism and its control of surrounding rock for gob-side entry driving with narrow coal pillar in the working face with goaf on both sides[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 41-50.
- [20] 孟祥军. 基于基本顶断裂位置的综放沿空掘巷煤帮支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 61-68.
MENG Xiangjun. Solid coal rib support technology of fully-mechanized mining along gob-side entry driving based on main roof fracture location[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 61-68.
- [21] 张元超,杨圣奇,陈森,等. 深井综放沿空掘巷实体煤帮变形破坏机制及控制技术[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1103-1113.
ZHANG Yuanchao, YANG Shengqi, CHEN Miao, et al. Deformation and failure mechanism of entity coal side and its control technology for roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face of deep mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1103-1113.
- [22] WU S K, ZHANG J W, SONG Z X, et al. Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(11): 3763-3789.
- [23] 李臣,李鹏,鲁时雨,等. 断层保护煤柱下采煤工作面保留巷道破坏分析及其控制[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 519-527.
LI Chen, LI Peng, LU Shiyu, et al. Failure analysis and control of retained roadway at working face under protection coal pillar of the faults[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(5): 519-527.
- [24] 吴少康,张俊文,徐佑林,等. 煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 24-37.
WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 24-37.
- [25] 王炯,刘鹏,刘帅,等. 煤矿动压巷道围岩稳定性协同卸压控制技术研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 323-332.
WANG Jiong, LIU Peng, LIU Shuai, et al. Study on collaborative pressure relief control technology for surrounding rock stability of dynamic pressure roadway in coal mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(3): 323-332.
- [26] 王军,吕顺章,杨光,等. 胀锁型锚索双向加固窄煤柱试验研究与工程应用[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 258-269.
WANG Jun, LÜ Shunzhang, YANG Guang, et al. Bidirectional reinforcement of narrow pillar with inflatable lock-type anchor experimental investigation and its application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 258-269.
- [27] 郭重托,李杰,柏建彪,等. 特厚煤层综放开采沿空掘巷煤柱合理宽度研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(2): 19-24.
GUO Zhongtuo, LI Jie, BAI Jianbiao, et al. Reasonable coal pillar width of gob-side entry driving in fully mechanized top-coal caving of extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(2): 19-24.

(责任编辑:陈骏)