

文章编号: 1671-251X(2025)07-0164-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025040071

基于极光优化算法的沿空掘巷煤柱宽度优化及应用

赵宝福^{1,2}

- (1. 中煤天津设计工程有限责任公司, 天津 300120;
2. 中煤(天津)地下工程智能研究院有限公司, 天津 300120)

摘要: 针对现有沿空掘巷煤柱宽度优化研究流程复杂、耗时冗长等问题, 引入极光优化(PLO)算法对沿空掘巷煤柱宽度进行自动寻优。采用理论分析、智能寻优和现场试验的方法, 研究了基本顶沿空掘巷侧方断入煤体深度, 确定了沿空掘巷内应力场分布范围和沿空掘巷的合理布置区域; 根据巷道布置原则, 基于极限平衡理论, 得到煤柱留设宽度范围为 1.5~7.0 m。提出了基于 PLO 算法的煤柱宽度优化方法, 建立了以沿空掘巷围岩变形为评价指标的适应度函数, 经过迭代寻优后, 得到最佳煤柱宽度为 7.0 m。基于最佳煤柱宽度, 设计了沿空掘巷锚杆索网联合支护方案。现场实践结果表明, 7.0 m 煤柱及综合控制技术在掘采过程中有效地控制了沿空掘巷围岩变形量, 能够维持巷道整体稳定, 提高了煤炭资源采出率, 实现了经济效益的最大化。

关键词: 沿空掘巷; 围岩变形控制; 煤柱宽度; 极光优化算法; 应力场分布; 基本顶破断位置

中图分类号: TD353

文献标志码: A

Optimization and application of coal pillar width for gob-side roadway based on Polar Lights Optimizer algorithm

ZHAO Baofu^{1,2}

- (1. China Coal Tianjin Design & Engineering Co., Ltd., Tianjin 300120, China;
2. China Coal (Tianjin) Underground Engineering Intelligent Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300120, China)

Abstract: To address the complexity and time-consuming nature of current optimization studies on coal pillar width for gob-side roadway driving, the Polar Lights Optimizer (PLO) algorithm is introduced to automatically optimize the coal pillar width. The study employed theoretical analysis, intelligent optimization, and field tests to investigate the depth of lateral breakage of the basic roof into the coal seam along the gob-side roadway, determined the stress field distribution range within gob-side roadway and identified the reasonable layout area for the roadway. Based on roadway layout principles and limit equilibrium theory, the range of coal pillar widths to be retained was determined to be 1.5 to 7.0 m. A coal pillar width optimization method based on the PLO algorithm was proposed, establishing a fitness function using surrounding rock deformation of the gob-side roadway as the evaluation index. After iterative optimization, the optimal coal pillar width was determined to be 7.0 m. Based on the optimal coal pillar width, a combined support scheme of anchor rods and cable nets for the gob-side roadway was designed. Field practice results showed that the 7.0 m coal pillar and integrated control technology effectively controlled the surrounding rock deformation of the gob-side roadway during excavation and mining, maintained the overall stability of the roadway, improved coal resource recovery, and maximized economic benefits.

Key words: gob-side roadway; surrounding rock deformation control; coal pillar width; Polar Lights Optimizer algorithm; stress field distribution; basic roof fracture position

收稿日期: 2025-04-23; 修回日期: 2025-07-20; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174132); 中煤天津设计工程有限责任公司青年创新基金资助项目(QN2025-07)。

作者简介: 赵宝福(1993—), 男, 山西平遥人, 工程师, 硕士, 主要从事智能掘进、围岩控制及灾害防治工作, E-mail: 1953431256@qq.com。

引用格式: 赵宝福. 基于极光优化算法的沿空掘巷煤柱宽度优化及应用[J]. 工矿自动化, 2025, 51(7): 164-170.

ZHAO Baofu. Optimization and application of coal pillar width for gob-side roadway based on Polar Lights Optimizer algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(7): 164-170.



扫码移动阅读

0 引言

沿空掘巷是沿相邻工作面采空区边缘留设小煤柱掘进本工作面回采巷道的开采方式^[1-2]。沿空掘巷具有无需充填体、巷道处于侧向支承压力降低区、容易维护等优点,被我国煤矿广泛使用^[3]。若护巷煤柱留设宽度过窄,在采动应力影响下容易出现顶板严重下沉、煤柱塑性破坏、丧失承载能力等现象^[4-6]。若留设宽度过大,会带来区段煤柱的浪费,影响矿井经济效益^[7]。因此,合理留设煤柱宽度是沿空掘巷技术的关键问题,对实现矿井绿色可持续发展具有重要意义。

近年来,国内外学者针对沿空掘巷护巷煤柱宽度留设问题展开了丰富的研究。蒋威等^[8]针对护巷煤柱宽度留设问题,研究了巷道围岩变形和基本顶断裂线特征。霍丙杰等^[9]针对坚硬顶板特厚煤层开采小煤柱留设问题,建立了双关键层采场内外应力场叠加的力学模型,推导了沿空掘巷小煤柱合理尺寸的计算式。孟巧荣等^[10]针对大埋深倾斜特厚煤层窄煤柱沿空掘巷技术难题,分析了 3 m 窄煤柱条件下巷道围岩变形和煤柱破坏情况,总结了巷道非对称变形规律。陆银龙等^[11]针对特厚煤层小煤柱沿空掘巷围岩控制问题,建立了特厚煤层沿空掘巷“双力源”结构模型,确定了 19 m 特厚煤层沿空掘巷煤柱宽度为 8 m。Shi Xinshuai 等^[12]通过相似物理模型试验和数值模拟,探究了厚煤层采空区侧入口的上覆地层运动规律、破坏机理和裂隙演化。赵世军等^[13]基于非局部近场动力学方法,分析了不同煤柱宽度条件下巷道围岩变形、破坏规律及煤柱破损特征。Ma Zhenqian 等^[14]、张百胜等^[15]采用数值模拟方法确定了小煤柱的合理宽度。上述研究取得了丰硕的成果,但研究流程较复杂,需要耗费大量人力物力。

人工智能的兴起与发展为煤柱留设宽度研究提供了新的思路,针对现有研究流程复杂、耗时冗长等问题,本文引入极光优化(Polar Lights Optimization, PLO)算法对沿空掘巷煤柱宽度进行自动寻优。根据某矿 8105 工作面沿空掘巷工程地质条件,采用理论分析、智能寻优和现场试验的方法,研究基本顶沿空掘巷侧方断入媒体深度,确定沿空掘巷内应力场分布范围和沿空掘巷合理的布置区域,揭示沿空掘巷护巷煤柱变形特征。

1 工程概况

某矿 8105 工作面主采 8 号煤层,煤层平均厚度为 4.5 m,密度为 1.45 t/m³,工作面埋深为 330~400 m。煤层层理和节理发育,自然发火期为 90 d,相对瓦斯

涌出量为 0.12 m³/t,绝对瓦斯涌出量为 3.15 m³/min。通过现场取样、实验室加工与测试,获得 8 号煤层单轴抗压强度为 16 MPa,抗拉强度为 3.2 MPa。8 号煤层顶底板柱状图如图 1 所示。



图 1 煤层顶底板柱状图

Fig. 1 Histogram of coal seam roof and floor

8105 工作面东侧为未开采实体煤,西侧为已回采完毕的 8103 工作面采空区。依照前期工作方案,工作面长度为 150 m,区段间煤柱宽度为 35 m 左右,会造成遗留煤柱资源浪费严重、矿井采出率较低的问题。同时,在遗留煤柱的影响下,后期接续工作面矿山压力与岩层控制难度增大。

2 沿空掘巷煤柱宽度留设理论分析

沿空掘巷确定的煤柱宽度要保证沿空掘巷围岩稳定。因此,沿空掘巷通常布置在受上一回采工作面采空区侧向支承应力影响较小和巷道顶板结构较稳定或较完整的区域。基本顶的破断位置直接影响沿空掘巷围岩应力环境,也是确定煤柱留设宽度的重要依据。

2.1 基本顶破断位置

基本顶破断位置受基本顶厚度及强度、回采高度、工作面埋深和巷道围岩力学性能等多因素影响。依据上区段工作面回采后煤壁帮呈现的应力场分布情况,给出了沿空掘巷上方基本顶破断情况,如图 2 所示,其中 b 为掘巷宽度, P 为煤柱宽度。基本顶在采空区上方断裂时,工作面应力集中于煤壁帮的边缘位置,煤层整体处于弹性压缩状态。基本顶在实体煤帮上方断裂时,以破断处为界,形成内外 2 个应力场。

依据 8 号煤层实际情况和 8105 工作面地质条件,沿空掘巷基本顶与煤层和直接顶相比较为坚硬,回采过程中基本顶在上部载荷作用下发生破断,形成弧形三角块,一端在实体煤内出现破断,另一端回转后在采空区触矸。基本顶断裂时上覆岩层压力传递到实体煤上,实体煤内应力场支承压力为^[16]

$$F = \frac{G_0 \gamma_0 l_1}{6} \tag{1}$$

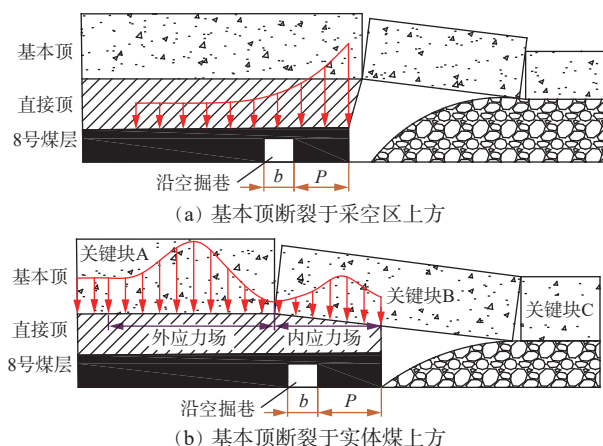


图 2 沿空掘巷上方基本顶破断情况

Fig. 2 The fracture condition of the basic roof above the gob-side entry

式中: G_0 为内应力场范围内塑性煤体刚度^[17]; y_0 为内应力场范围内实体煤变形量; l_1 为内应力场宽度。

$$G_0 = \frac{E}{2(1+\mu)\xi} \quad (2)$$

式中: E 为煤体弹性模量; μ 为泊松比; ξ 为煤壁完整性系数。

根据“内外应力场”理论^[4]可得

$$\frac{G_0 y_0 l_1}{6} = L c_0 h_m \gamma \quad (3)$$

式中: L 为工作面长度; c_0 为工作面基本顶初次来压步距; h_m 为基本顶厚度; γ 为基本顶岩层平均容重。

工作面回采后基本顶岩块发生结构性调整, 沿空掘巷掘进时基本顶关键块体发生回转。块体回转后, 根据几何关系可求得实体煤变形量与内应力场宽度比值:

$$\frac{y_0}{l_1} = \frac{h_c - h_z(n-1)}{L_B} \quad (4)$$

式中: h_c 为煤层厚度; h_z 为直接顶厚度; n 为直接顶碎胀系数; L_B 为关键块 B 的长度, 约等于周期来压步距。

基本顶在实体煤侧的断裂位置(即内应力场宽度)为

$$l_1 = \sqrt{\frac{12 L c_0 h_m \gamma L_B \xi}{E [h_c - h_z(n-1)]}} \quad (5)$$

沿空掘巷基本顶侧向破断位置受煤层厚度、基本顶厚度、初次来压步距和周期来压步距等因素的影响, 关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可知: 煤层越厚, 基本顶破断位置距实体煤边缘处越近; 基本顶越厚, 基本顶破断位置距实体煤边缘处越远。当生产地质条件确定时, 可采取人工切顶等措施改变来压步距, 减小基本顶破断处与实体煤采空区侧的距离, 减小煤柱承担的上覆岩层

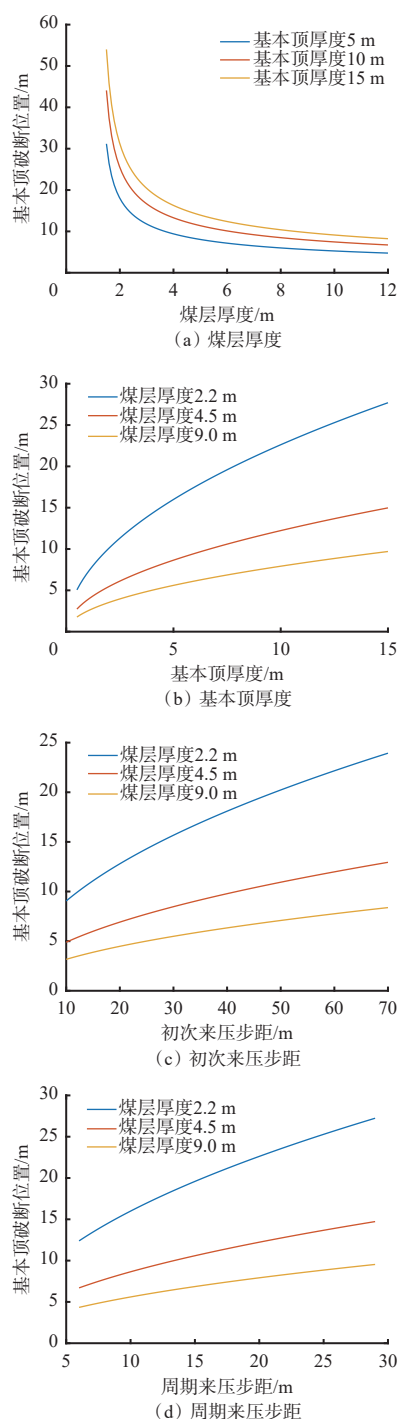


图 3 基本顶断裂位置与其影响因素的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the location of the basic roof fracture and its influencing factors

重力, 达到提高巷道稳定性的目的。

由 8105 工作面地质条件可知: 工作面长度 $L = 150$ m, 工作面基本顶初次来压步距 $c_0 = 50$ m, 基本顶厚度 $h_m = 8$ m, 基本顶岩层容重 $\gamma = 25$ kN/m³, 煤层弹性模量 $E = 8.0$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.35$, 煤壁完整性系数 $\xi = 0.88$, 煤层厚度 $h_c = 4.5$ m, 直接顶厚度 $h_z = 5.0$ m, 直接顶碎胀系数 $n = 1.25$, 关键块 B 的长度 $L_B = 18$ m。将上述参数代入式(5), 得出内应力场宽

度 $l_1=12.2$ m。

2.2 煤柱留设宽度分析

沿空掘巷宽度和窄煤柱宽度之和应小于内应力场的宽度,以使巷道处于低应力区,除了考虑支撑压力因素外,还应保证煤柱内部有稳定的区域。煤柱在上覆载荷作用下,采空区侧和巷道侧形成塑性区、弹性核区^[18]。若沿空掘巷护巷煤柱在采空区侧和巷道侧形成的塑性变形区宽度之和大于留设的煤柱宽度,则两侧塑性变形区贯通,煤柱失稳。为保证煤柱的稳定性,煤柱宽度 P 需满足以下关系:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (6)$$

$$l_1 = P_{\max} + b \quad (7)$$

式中: P_1 为煤柱在采空区侧的塑性区宽度; P_2 为煤柱在巷道侧的塑性区宽度; P_3 为煤柱中部的弹性核区宽度; $P_{\max}$ 为煤柱留设宽度最大值。

忽略实体煤侧向约束力,则 $P_1=P_2$ 。根据极限平衡理论^[19-20], P_1 和 P_2 的计算式为^[21]

$$P_1 = P_2 = \frac{d}{2 \tan \varphi} \ln \left(\frac{K \gamma H + C / \tan \varphi}{C / \tan \varphi} \right) \quad (8)$$

式中: d 为采高; φ 为内摩擦角; K 为工作面应力集中系数; H 为埋深; C 为黏聚力。

由上述分析可知,要保证巷道布置在低应力环境,同时煤柱不发生失稳,8105 工作面沿空掘巷煤柱留设宽度的最大值 $P_{\max}$ 和最小值 $P_{\min}$ 应满足条件:

$$\begin{cases} P_{\max} = l_1 - b \\ P_{\min} = \frac{h}{\tan \varphi} \ln \left(\frac{K \gamma H + C / \tan \varphi}{C / \tan \varphi} \right) \end{cases} \quad (9)$$

根据 8105 工作面沿空掘巷生产地质条件可知,基本顶岩层平均容重为 25 kN/m^3 ,黏聚力为 1.2 MPa ,内摩擦角为 23° 。将上述数据代入式(9),可得煤柱留设宽度的最大值 $P_{\max}=7.0$ m,最小值 $P_{\min}=1.5$ m。

3 基于 PLO 算法的煤柱宽度优化

3.1 PLO 寻优流程

PLO 算法主要模拟带电粒子在地球磁场中的运动,包括旋转运动、极光椭圆步行和粒子碰撞等^[22]。该算法的基本公式为

$$\begin{aligned} X &= I_b + R(U_b - I_b) = \\ &\begin{bmatrix} X(1,1) & X(1,2) & \cdots & X(1,D) \\ X(2,1) & X(2,2) & \cdots & X(2,D) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X(N,1) & X(N,2) & \cdots & X(N,D) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: X 为 PLO 种群; I_b , U_b 为解空间的边界; R 为 $[0, 1]$ 的随机数序列; $X(i, j)$ 为粒子位置, $i=1, 2, \dots, N$,

$j=1, 2, \dots, D$; N 为种群数量; D 为解空间的可伸缩维度。

$$v(t) = g \exp \left(\frac{qB-a}{m} t \right) \quad (11)$$

式中: v 为粒子速度; t 为当前迭代次数; g 为积分常数,取值为 1; q 为带电粒子所携带的电荷; B 为地磁场强度; a 为阻尼因子,取 $[1, 1.5]$ 的随机数; m 为粒子质量。

$$A_0 = \text{Levy}(X_{\text{avg}}(j) - X(i, j)) + I_b + r_1(U_b - I_b)/2 \quad (12)$$

$$X_{\text{avg}}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i, j) \quad (13)$$

$$X_{\text{new}}(i, j) = X(i, j) + r_2(W_1 v(t) + W_2 A_0) \quad (14)$$

式中: A_0 为运动的高能粒子; Levy 为莱维飞行策略; $X_{\text{avg}}(j)$ 为高能粒子群的质心位置; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数序列; $X_{\text{new}}(i, j)$ 为完成旋转运动和极光椭圆步行后高能粒子的位置; W_1, W_2 为控制回转运动和极光椭圆行走的权重。

$$\begin{aligned} X'_{\text{new}}(i, j) &= X(i, j) + \sin(r_3 \pi)(X(i, j) - X(a, j)) \\ r_4 &< Y \text{ 且 } r_5 < 0.05 \end{aligned} \quad (15)$$

$$M = \sqrt{t/T} \quad (16)$$

式中: $X'_{\text{new}}(i, j)$ 为完成粒子碰撞后高能粒子的位置; r_3-r_5 为 $[0, 1]$ 的随机数序列; Y 为碰撞概率; M 为控制碰撞概率的因子; T 为最大迭代次数。

基于 PLO 算法的煤柱宽度寻优流程如图 4 所示。

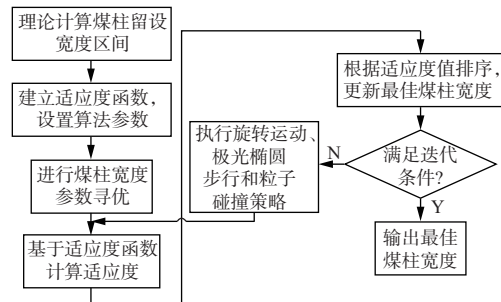


图 4 基于 PLO 算法的煤柱宽度寻优流程

Fig. 4 Optimization process of coal pillar width based on PLO algorithm

沿空掘巷煤柱宽度寻优步骤如下:

- 1) 根据工作面地质条件计算基本顶在实体煤内破断的位置,得到煤柱留设的宽度区间。
- 2) 在 Matlab 中初始化各项参数,设置合理的适应度函数。
- 3) 基于 PLO 算法进行初始化、初始适应度评价计算和迭代寻优。
- 4) 当寻优结果满足迭代条件时,输出最佳煤柱宽度及迭代曲线。

3.2 优化结果

合理的煤柱留设宽度设计及巷道布置位置要保证巷道围岩变形能满足工作面运输、通风及行人的需求。因此,建立以沿空掘巷围岩变形为评价指标的适应度函数来评价煤柱留设宽度的适用性。沿空掘巷布置在基本顶关键块下,位于“内应力场”中,设基本顶破断位置距采空区边缘距离为 x_0 ,侧向断裂跨度为 k_B ,沿空掘巷处的顶板下沉量为 s 。根据三角函数关系可知,煤柱留设宽度适应度函数为

$$Q = \frac{s[x_0 - (P + b/2)]}{\sqrt{k_B^2 - s_a^2}} \quad (17)$$

$$x_0 = \frac{Js}{2 \tan \varphi} \ln \left(\frac{K\gamma H + C/\tan \varphi}{C/\tan \varphi + p/J} \right) \quad (18)$$

式中: s_a 为触矸处的顶板下沉量; J 为水平侧压系数; p 为煤帮的支护阻力。

在煤柱宽度搜索域空间内,适应度函数越小,说明巷道围岩变形越小,煤柱留设宽度越合理。基于煤柱宽度寻优流程和建立的适应度函数,对沿空掘巷煤柱留设宽度 P 进行迭代优化,迭代曲线如图5所示。可看出经PLO算法优化后,迭代3次即达到收敛状态,此时适应度函数达到最小值0.243,寻优参数 P 的最优解为7.0 m,用时0.021 266 s。基于PLO算法对沿空掘巷煤柱宽度参数寻优具有收敛速度快、稳定性强的特点。

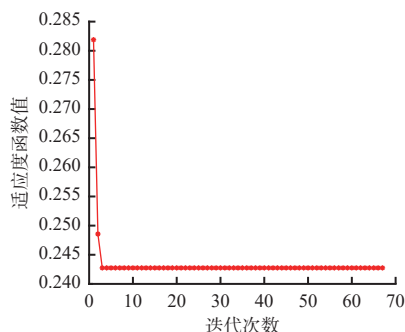


图5 PLO算法参数寻优迭代曲线

Fig. 5 Optimization iteration curve of PLO algorithm parameters

4 工程应用实例

结合8105工作面实际条件,确定沿空掘巷煤柱留设宽度为7.0 m,巷道净宽5.2 m,净高3.5 m。为保证巷道围岩稳定,对沿空掘巷进行锚杆索网联合支护,支护方案如图6所示。顶板采用锚杆锚索支护,顶板锚杆间排距为800 mm×1 000 mm,锚索间排距为1 800 mm×2 000 mm。两帮采用锚杆支护,间排距为800 mm×8 000 mm。锚杆直径为20 mm,长度为2 400 mm;锚索直径为21.8 mm,长度为7 300 mm。顶板两侧靠近帮部的锚杆与竖直方向夹角为15°,两

帮帮顶和帮底锚杆与水平方向夹角为15°,其余锚杆均与巷道围岩表面垂直。顶板和两帮均采用网孔规格为50 mm×50 mm的菱形金属网联合W钢带护表。锚索使用配套锁具、调心垫圈、规格为300 mm×300 mm×16 mm的碟形钢托盘。锚杆采用三明治垫圈、螺母、拱形托盘,托盘规格为150 mm×150 mm×8 mm。

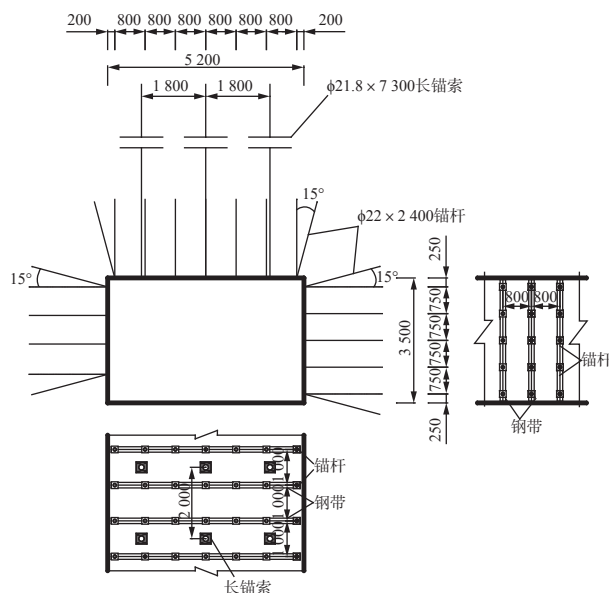


图6 沿空掘巷支护方案

Fig. 6 Support scheme for gob-side entry

现场应用时,对沿空掘巷采用十字布点法进行围岩变形监测。对监测到的围岩变形数据进行整理统计,得到沿空掘巷掘进与回采期间的围岩变形曲线,分别如图7、图8所示。

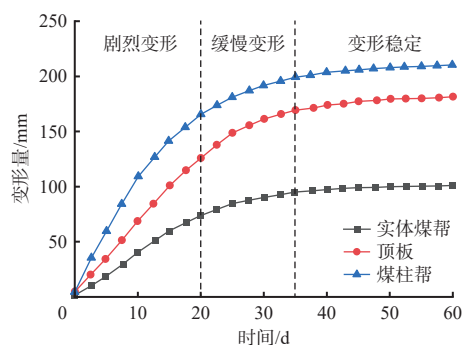


图7 巷道掘进时围岩变形曲线

Fig. 7 Surrounding rock deformation during roadway excavation

由图7可知,巷道掘进期间,围岩变形可分为剧烈变形、缓慢变形和变形稳定3个阶段。剧烈变形阶段围岩变形速率较大,成巷后持续20 d左右;剧烈变形阶段结束后进入持续时间为15 d左右的缓慢变形阶段,该阶段巷道围岩变形速率大幅降低;随后巷道围岩变形趋于稳定,进入变形稳定阶段。巷道掘进期间,巷道顶板、煤柱帮和实体煤帮的最大变形量

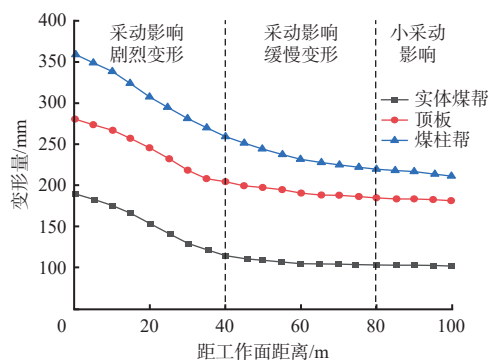


图 8 工作面回采时巷道围岩变形曲线

Fig. 8 Deformation of roadway surrounding rock during working face mining

分别为 181.5, 210.4, 100.9 mm。

由图 8 可知, 工作面回采期间, 围岩变形分为采动影响剧烈变形区、采动影响缓慢变形区和小采动影响区 3 个区间。采动影响剧烈变形区在超前工作面 40 m 范围内, 巷道受采动影响变形较大。采动影响缓慢变形区为超前工作面 40~80 m, 巷道围岩变形缓慢。超前工作面 80 m 以外的区域受采动影响较小, 属于小采动影响区, 围岩变形可忽略不计。工作面回采期间, 沿空掘巷顶板、煤柱帮和实体煤帮的最大变形量分别为 280.5, 358.9, 189.3 mm, 巷道围岩控制效果明显。

5 结论

1) 分析了沿空掘巷基本顶破断位置、实体煤内外应力场分布规律及内应力场分布范围; 根据巷道布置原则, 基于极限平衡理论, 得到煤柱留设宽度范围为 1.5~7.0 m。

2) 提出了基于 PLO 算法的煤柱宽度优化方法, 建立了以沿空掘巷围岩变形为评价指标的适应度函数, 经过迭代寻优后, 得到最佳煤柱宽度为 7.0 m。

3) 基于最佳煤柱宽度设计了巷道锚网索联合支护方案, 并展开现场工程应用实践, 结果表明, 留设煤柱能保证 8105 工作面沿空掘巷围岩变形控制在合理范围, 满足工作面巷道运输行人的要求, 同时实现经济效益的最大化。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 何富连, 陈建余, 邹喜正, 等. 综放沿空巷道围岩卸压

控制研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 589-592.

- HE Fulian, CHEN Jianyu, ZOU Xizheng, et al. Study on depressurizing control of the surrounding rock of a roadway along gob area in sub-level caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 589-592.
- [3] 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.
- [4] 李磊, 柏建彪, 王襄禹. 综放沿空掘巷合理位置及控制技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1564-1569.
LI Lei, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu. Rational position and control technique of roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1564-1569.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘鑫鑫, 高明仕, 贺永亮, 等. 倾斜特厚煤层综放沿空掘巷围岩稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1051-1059.
LIU Yaoxin, GAO Mingshi, HE Yongliang, et al. Study of control technology about gob-side entry driving with top-coal caving in inclined extra-thick coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1051-1059.
- [8] 蒋威, 鞠文君, 汪占领, 等. 厚硬基本顶综放沿空巷道受载变形机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 319-326.
JIANG Wei, JU Wenjun, WANG Zhanling, et al. Study on loading and deformation mechanism of gob-side roadway with thick and hard basic roof in fully mechanized top coal caving workface[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 319-326.
- [9] 霍丙杰, 孟繁禄, 李天航, 等. 多层坚硬顶板特厚煤层综放工作面小煤柱护巷技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 46(12): 1-6.

- 2024, 52(3): 13-23.
- HUO Bingjie, MENG Fanlu, LI Tianhang, et al. Small coal pillar technology in fully-mechanized top-coal caving face of multi layer hard roof and extra thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 13-23.
- [10] 孟巧荣, 王慧娴, 王朋飞, 等. 深埋倾斜特厚煤层窄煤柱护巷机理与围岩控制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 38-52.
- MENG Qiaorong, WANG Huixian, WANG Pengfei, et al. Gateroad protection mechanism and surrounding rock control for gob-side entry with slender pillar in deep and inclined extra-thick coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 38-52.
- [11] 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.
- [12] SHI Xinshuai, JING Hongwen, ZHAO Zhenlong, et al. Physical experiment and numerical modeling on the failure mechanism of gob-side entry driven in thick coal seam[J]. Energies, 2020, 13(20). DOI: [10.3390/en13205425](https://doi.org/10.3390/en13205425).
- [13] 赵世军, 章青, 张惟昭, 等. 基于近场动力学的窄煤柱宽度优化研究[J]. 固体力学学报, 2024, 45(3): 363-378.
- ZHAO Shijun, ZHANG Qing, ZHANG Weizhao, et al. Optimization study on the width of narrow coal pillar along the goaf tunnel with peridynamics[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2024, 45(3): 363-378.
- [14] MA Zhenqian, CHEN Chuan, LIANG Xuchao, et al. Field and numerical investigation on the stability of coal pillars of gob-side entry driving with top coal[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(22). DOI: [10.1007/s12517-020-06234-5](https://doi.org/10.1007/s12517-020-06234-5).
- [15] 张百胜, 王朋飞, 崔守清, 等. 大采高小煤柱沿空掘巷切顶卸压围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2254-2267.
- ZHANG Baisheng, WANG Pengfei, CUI Shouqing, et al. Mechanism and surrounding rock control of roadway driving along gob in shallow-buried, large mining height and small coal pillars by roof cutting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2254-2267.
- [16] 郭金刚, 李耀晖, 何富连, 等. 特厚煤层综放沿空煤巷煤柱宽度及控制研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(10): 190-195, 202.
- GUO Jingang, LI Yaohui, HE Fulian, et al. Research on coal pillar width and control of gob side entry with fully-mechanized caving mining in extra thick coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(10): 190-195, 202.
- [17] 勾攀峰, 张书军, 范杰, 等. 复合基本顶沿空留巷顶板结构稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 735-746.
- GOU Panfeng, ZHANG Shujun, FAN Jie, et al. Analysis on roof structure stability of gob-side entry retaining under composite basic roof conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(4): 735-746.
- [18] 孔繁龙, 刘敬东, 田灵涛, 等. 水岩作用下区段煤柱合理宽度研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 144-150.
- KONG Fanlong, LIU Jingdong, TIAN Lingtao, et al. Study on reasonable width of coal pillar under water-rock interaction[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 144-150.
- [19] 王书文, 毛德兵, 潘俊锋, 等. 采空区侧向支承压力演化及微震活动全过程实测研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2772-2779.
- WANG Shuwen, MAO Debing, PAN Junfeng, et al. Measurement on the whole process of abutment pressure evolution and microseismic activities at the lateral strata of goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2772-2779.
- [20] 陈云. 坚硬顶板下沿空掘巷煤柱宽度及稳定控制研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(5): 23-31, 40.
- CHEN Yun. Research on coal pillar width and stability control for driving along goaf under hard roofs[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(5): 23-31, 40.
- [21] 赵腾飞, 种阳, 马国伟. 特厚煤层沿空掘巷煤柱塑性区宽度研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(1): 107-111.
- ZHAO Tengfei, CHONG Yang, MA Guowei. Study on the width of plastic zone of coal pillar along goaf in extra-thick coal seam[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(1): 107-111.
- [22] YUAN Chong, ZHAO Dong, HEIDARI A A, et al. Polar lights optimizer: algorithm and applications in image segmentation and feature selection[J]. Neurocomputing, 2024, 607. DOI: [10.1016/j.neucom.2024.128427](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128427).