

文章编号: 1671-251X(2022)11-0101-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022060003

厚煤层软底沿空留巷围岩变形特征分析及顶帮强化支护技术

康志鹏^{1,2}, 段昌瑞^{1,2}, 余国锋^{1,2}, 赵靖^{1,2}

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232001;

2. 煤炭开采国家工程技术研究院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 长时高叠加应力条件下的围岩变形破坏机制及控制措施是厚煤层软底沿空留巷支护技术的关键。现有对厚煤层沿空留巷围岩变形破坏机制及支护控制的研究主要针对坚硬岩底沿空巷道顶帮变形、充填体本身强度及材料配比, 对厚煤层软底留巷研究较少, 对沿空留巷的力学分析不全面, 支护方案单一。针对上述问题, 以山西潞安化工集团有限公司古城煤矿 N1303 工作面为工程背景, 建立了顶板、煤帮、底板破坏力学模型, 分析了巷道围岩变形破坏特征: 顶板处于混合应力环境, 易发生拉伸破坏; 实体煤帮在高应力作用下发生压剪式破坏, 锚杆破坏失效; 充填体受压侵入底板, 造成底板倾斜失稳, 易发生软煤碎胀底鼓。针对围岩变形破坏特征, 提出了“三位一体”的围岩支护控制方案, 即控制顶板、限制煤帮、让压底板。为保证顶板在沿空留巷上方能够平衡应力分布, 采取锚索+充填体切顶方式, 使顶板在巷道上方不形成悬臂梁结构, 只发生下沉, 而没有回转变形; 考虑到留巷后顶板的稳定性, 采取注浆锚索方式对巷道破碎顶板进行注浆, 形成一个整体, 更好地控制顶板。为提高实体煤帮支护强度, 补打短锚索, 将极限平衡区煤层与深部弹性承载层连接, 降低巷旁充填体支护阻力。对底板进行适当的让压有利于巷道整体实现柔性支护, 在充填体墙体下通过挖槽、浇筑条形基础进行底板加固。利用“三位一体”的围岩支护控制方案优化了原沿空留巷支护方案, 现场试验结果表明: 采用优化支护方案后, 顶板位移由 337 mm 减小至 142 mm, 煤帮位移由 305 mm 减小至 70 mm, 底板位移由 675 mm 减小至 162 mm, 巷道收敛率由 34.1% 减小至 10.73%, 锚杆(索)工作阻力稳定, 充填体无破损倾斜, 支护效果较好。

关键词: 厚煤层软底沿空留巷; 巷道支护; 围岩控制; 锚索; 切顶; 煤帮限制; 底板让压; 应力匹配

中图分类号: TD32/353

文献标志码: A

Analysis on deformation characteristics of surrounding rock of gob-side entry retaining with soft bottom in thick coal seam and strengthening support technology of roof and side

KANG Zhipeng^{1,2}, DUAN Changrui^{1,2}, YU Guofeng^{1,2}, ZHAO Jing^{1,2}

(1. Huainan Mining Group Co., Ltd., Huainan 232001, China;

2. Coal Mining National Engineering Technology Research Institute, Huainan 232001, China)

Abstract: The deformation and failure mechanism of surrounding rock and the control measures under the condition of long-time high superimposed stress are the keys to gob-side entry retaining support technology in thick coal seam with soft bottom. The existing research on the deformation and failure mechanism of surrounding rock and support control of gob-side entry retaining in thick coal seam is mainly aimed at deformation of roof and

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-11-03; 责任编辑: 张强。

基金项目: 安徽省重点研究和开发计划项目(201904a07020011)。

作者简介: 康志鹏(1994—), 男, 河北张家口人, 硕士, 主要研究方向为采矿围岩控制、绿色开采、智能开采, E-mail: 1457511552@qq.com。

引用格式: 康志鹏, 段昌瑞, 余国锋, 等. 厚煤层软底沿空留巷围岩变形特征分析及顶帮强化支护技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 101-109.

KANG Zhipeng, DUAN Changrui, YU Guofeng, et al. Analysis on deformation characteristics of surrounding rock of gob-side entry retaining with soft bottom in thick coal seam and strengthening support technology of roof and side[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 101-109.



扫码移动阅读

side of gob-side entry with hard rock bottom, and the strength of filling body and material proportion. There are few research on retaining roadway with soft bottom in thick coal seam. The mechanical analysis of gob-side entry retaining is incomplete, and the support scheme is single. In order to solve the above problems, taking N1303 working face of Gucheng Coal Mine of Shanxi Lu'an Chemical Industry Group Co., Ltd. as the engineering background, the failure mechanics models of roof, coal wall and floor are established. The deformation and failure characteristics of the roadway surrounding rock are analyzed. The roof is in a mixed stress environment, which is prone to tensile failure. Under the action of high stress, the solid coal side suffers compression shear failure, and the anchor rod fails. The filling body intrudes into the floor under pressure, causing the floor to tilt and lose stability, which is prone to soft coal broken and swelling. According to the deformation and failure characteristics of surrounding rock, the trinity surrounding rock support control scheme is proposed, namely, controlling the roof, restricting the coal side and yielding floor. In order to ensure that the roof can balance the stress distribution above the gob-side entry retaining, the method of anchor cable + filling body top cutting is adopted. Thus the roof does not form a cantilever beam structure above the roadway, only sinking occurs, and there is no rotary deformation. Considering the roof stability of gob-side entry retaining, the way of grouting anchor cable is adopted to grout the broken roof of the roadway to form a whole for better controlling the roof. In order to improve the support strength of the solid coal side, short anchor cables are added to connect the coal seam in the limit equilibrium area with the deep elastic bearing layer, and reduce the support resistance of the filling body beside the roadway. The proper yielding of the floor is beneficial to the flexible support of the whole roadway. The floor is reinforced by digging grooves and pouring strip foundations under the filling body wall. The original gob-side entry retaining support scheme is optimized by using the trinity surrounding rock support control scheme. The field test results show that after using the optimized support scheme, the roof movement subsidence is reduced from 337 mm to 142 mm, and the coal side movement is reduced from 305 mm to 70 mm. The floor movement is reduced from 675 mm to 162 mm, and the roadway convergence rate is reduced from 34.1% to 10.73%. The working resistance of the anchor rod (cable) is stable, the filling body is free of damage and inclination, and the support effect is good.

Key words: gob-side entry retaining with soft bottom in thick coal seam; roadway support; surrounding rock control; anchor cable; roof cutting; coal side restriction; yielding floor; stress matching

0 引言

煤炭作为我国重要的一次能源,保证煤炭产量的稳定、提高采出率、减少煤矿安全事故是煤炭工业可持续发展的必要基础^[1]。沿空留巷可以实现 Y 型通风,彻底解决上隅角瓦斯超限问题,并且能够实现无煤柱回采,可给矿井带来巨大的经济效益^[2]。沿空留巷服务周期长,受多次采动影响而长期处于高叠加应力状态,对于硬顶软底巷道,软底为非线性受力变形,而顶板硬岩仍为线弹性工作状态,导致沿空巷道的变形呈现出非稳态、非线性、大变形的特征,巷道维护困难^[3]。厚煤层软底沿空留巷由于顶硬底软,顶板不易随采随落,易形成大面积控顶,切顶阻力增大,巷旁加强支护的充填体加剧了留巷底鼓^[4]。由于充填体强度大,可缩性差,在来压过程中还会发生倾斜或者钻底,造成巷道变形。因此,对厚煤层软底条件下的沿空留巷支护技术进行进一步研究很有必要^[5]。

特殊的围岩环境,复杂的地质构造,支护形式与围岩受力不匹配,非对称变形等都给厚煤层软底沿空留巷的形成和维护带来一系列问题,专家学者们对此进行了大量的研究。沙旋等^[6]采用数值模拟方式对厚煤层沿空留巷围岩综合控制技术进行了研究。冯国瑞等^[7]研究了厚煤层综放沿空留巷巷旁充填体应力分布和变形特征,得出其与工作面来压的数学关系。张智强等^[8]针对特厚煤层分层开采瓦斯超限问题,给出了双柔模墙沿空留巷设计方案,实测验证效果良好。陈上元等^[9]对切顶沿空成巷关键参数进行了系统研究,提出了无煤柱切顶沿空成巷技术。郑赞等^[10]通过相似模拟实验研究了强帮强角支护技术对于沿空留巷的应用有效性,通过增强帮部与角部支护强度,充分提高围岩承载能力。王方田等^[11]通过构建未切顶卸压与切顶卸压沿空留巷顶板力学结构模型,采用锚索强化技术实现了切顶卸压。邓雪杰等^[12]研究了深部沿空留巷围岩应力演化与移动破坏特征。谢生荣等^[13]针对强采动条

件沿空留巷顶板非对称变形与控制难题,研究了非对称锚固深梁承载结构的形成机制与承载特性。崔景昆等^[14]研究了可以适应顶板变形的可缩充填体,通过实验室实验研究了不同配比的可缩充填体压缩过程,得出了效果最好的级配系数。于光远等^[15]研究了砌块充填沿空留巷底鼓大变形机理及综合控制技术。

现有研究主要是针对坚硬岩底沿空巷道顶帮变形、充填体本身强度及材料配比的研究,对厚煤层软底沿空留巷研究较少,对沿空留巷的力学分析不全面,支护方案单一。针对上述问题,本文以山西潞安化工集团有限公司古城煤矿 N1303 工作面为工程背景,建立了顶板、煤帮、底板破坏力学模型,分析了巷道围岩变形破坏特征,针对性地提出了控制顶板、限制煤帮、让压底板的“三位一体”沿空留巷整体围岩变形控制方案,优化了沿空留巷支护方案,并进行了现场工程实践及效果观测。

1 工程背景

1.1 工程概况

N1303 工作面长为 2 350 m, 宽为 357 m, 埋深为 503.8~581.4 m。开采对象为山西组中下部 3 号煤层, 煤层赋存稳定, 平均厚度为 6.32 m, 采高为 3.2 m, 煤层倾角为 6°, 属于近水平煤层。煤层顶板为砂质泥岩, 平均厚度为 4.03 m, 结构松散, 强度较低; 基本顶为中-细粒砂岩互层, 平均厚度为 5.86 m, 存在小型交错层理。直接底为砂质泥岩、泥岩互层, 强度低, 平均厚度为 0.70 m; 基本底为细粒砂岩, 平均厚度为 5.36 m, 为半坚硬-坚硬岩石, 无较大地质异常及陷落柱。矿井为高瓦斯矿井, 无煤与瓦斯突出危险性。N1303 工作面巷道布置如图 1 所示。

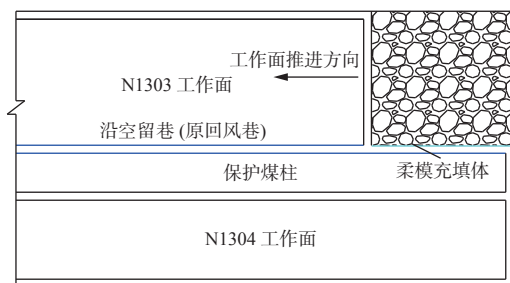


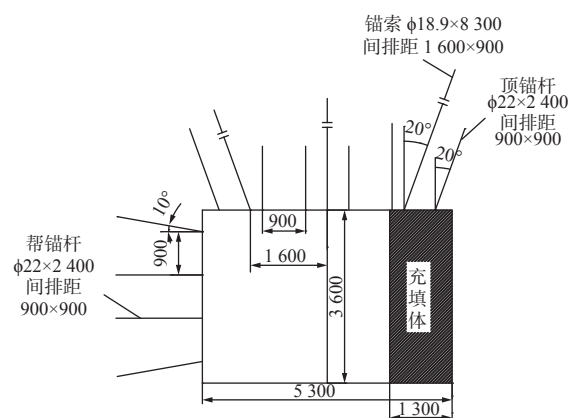
图 1 N1303 工作面巷道布置

Fig. 1 Roadway layout of N1303 working face

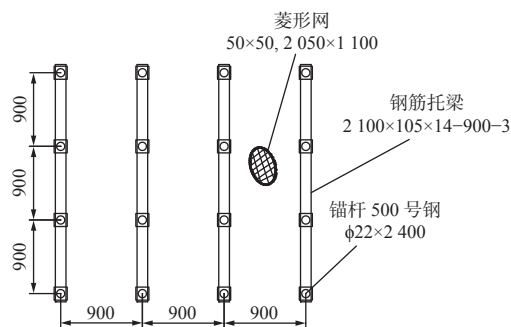
1.2 巷道原留巷支护方案

N1303 沿空留巷全长 2 305 m, 沿煤层顶板布置, 在距切眼 180 m 处落至底板掘进, 巷道宽为 5.3 m, 高为 3.6 m。通过沿空留巷可以实现 Y 型通风, 并且可以回收 50 m 保护煤柱。

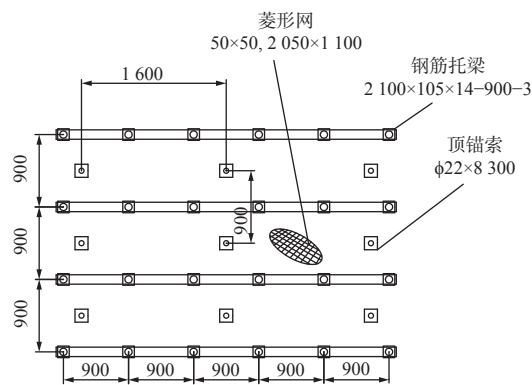
顶板每排布置 6 根锚杆, 肩角锚杆外斜 20° 布置, 锚杆间排距为 900 mm×900 mm, 其余锚杆全部垂直顶板布置。锚索每排布置 3 根, 肩角锚索外斜 20° 布置, 间排距为 1 600 mm×900 mm。煤帮水平布置 4 根锚杆, 肩角锚杆外斜 10° 布置, 间排距为 900 mm×900 mm。充填体宽为 1.5 m, 采用柔模混凝土支护。顶、帮搭配菱形网与钢筋托梁进行整体支护。具体支护情况如图 2 所示。



(a) 巷道支护断面



(b) 巷道顶板支护



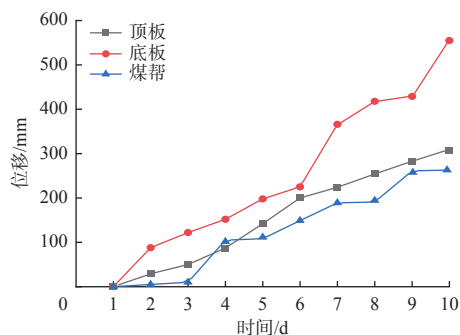
(c) 巷道煤帮支护

图 2 N1303 工作面沿空留巷原始支护

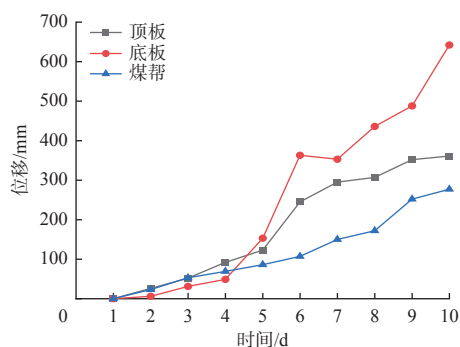
Fig. 2 Original support of gob-side entry retaining in N1303 working face

1.3 巷道围岩变形破坏分析

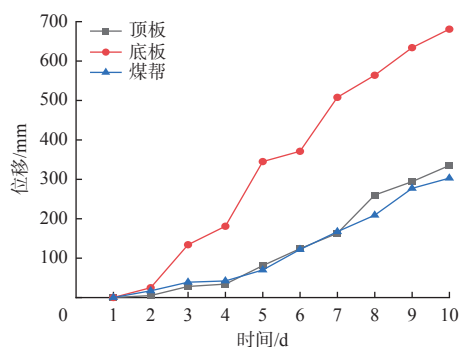
N1303 工作面沿空留巷共布置 3 个测站, 分别布置在距离切眼 163, 169, 295 m 处, 工作面回采后, 沿空留巷围岩变形情况如图 3 所示。



(a) 163 m 处巷道表面位移



(b) 169 m 处巷道表面位移



(c) 295 m 处巷道表面位移

图 3 沿空留巷围岩变形情况

Fig. 3 Surrounding rock deformation of gob-side entry retaining

从图 3 可看出,随着工作面的推进,巷道变形量呈现逐渐增大趋势,主要表现为底板变形突出,最大位移为 675 mm;煤帮偶有片帮及鼓出,最大位移为 305 mm;顶板变形破坏相对不显著,最大位移为 337 mm,巷道最大收敛率为 34.1%。目前 N1303 沿空留巷收敛位移较大,为保证通风,需进行扩帮拉底作业,严重制约了安全高效回采,因此原留巷支护方案亟待优化。

2 厚煤层软底沿空留巷围岩变形力学分析

沿空留巷的围岩控制主要包括巷道围岩控制和巷旁充填体稳定性控制。对于综放工作面厚煤层软底沿空留巷,其巷道围岩变形破坏应当分别考虑顶板、煤帮、充填体与底板各自受力变形情况。

2.1 沿空留巷顶板破断特征

工作面回采时,基本顶由于初次来压,会形成

“X”型破断(图 4),顶板产生剪切变形,由于顶板岩石具有不耐剪的特性,会形成更小的块体 a 、 b_0 ,因为周期来压作用,继续传递破坏应力,形成连续的弧形三角块破坏,沿空留巷顶板即为连续的弧形三角块组,块体 b 的变形和运移规律直接影响沿空留巷顶板的稳定性,因此,充填体应当提供足够的支护阻力。其中顶板破断按照时间顺序分别为直接顶破断及基本顶破断,锚网索支护和已经跨落岩层残留边界构成直接顶及上覆岩层的支护阻力。直接顶与基本顶破断力学模型如图 5 所示,留巷后顶板可简化为简支梁与悬臂梁组合结构。

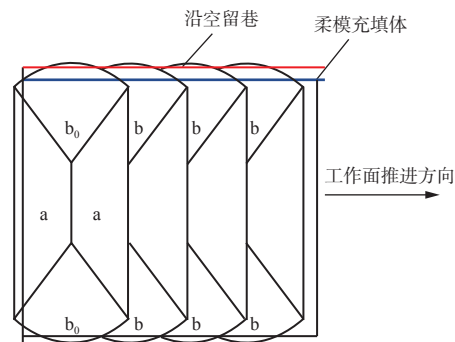
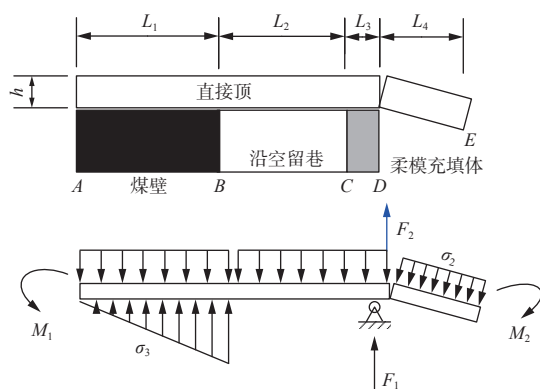
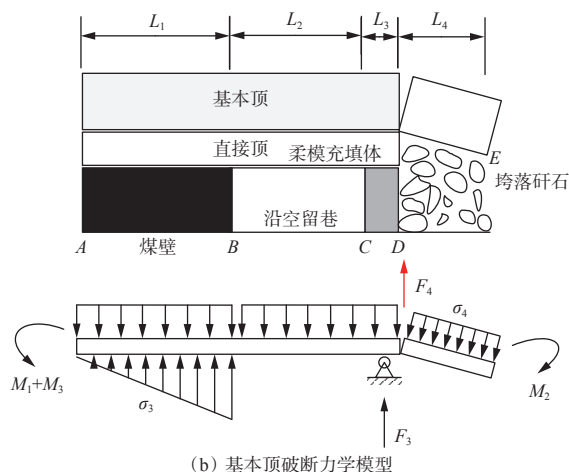


图 4 “X”型破断

Fig. 4 "X" type breaking



(a) 直接顶破断力学模型



(b) 基本顶破断力学模型

图 5 沿空留巷顶板破断力学模型

Fig. 5 Roof breaking mechanical model of gob-side entry retaining

根据图 5, 对于 DE 段, 依据力学平衡法, 有

$$\sum F_y = F_2 - \sigma_2 L_4 = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = F_4 - \sigma_4 L_4 = 0 \quad (2)$$

式中: F_y 为 y 方向的合力, N; F_2, F_4 为 D 点在顶板不同破断时期的支护阻力, N; σ_2 为直接顶悬臂均布载荷, N/m; L_4 为块体 b 在充填体侧切顶后的长度, m; σ_4 为基本顶悬臂均布载荷, N/m。

对于 AD 段, 根据力学平衡法, 总弯矩 M 为 0, $\sum M=0$, 即

$$M_1 = \frac{\sigma_3 h^2}{6} \quad (3)$$

$$M_2 = \frac{\gamma h(L_1 + L_2 + L_3)^2}{2} \quad (4)$$

$$M_1 + F_1 \left(L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} \right) + \int_0^{L_1} \sigma_3 (x - x_0) dx - M_2 - F_2 (L_1 + L_2 + L_3) = 0 \quad (5)$$

式中: M_1 为单位长度直接顶抗弯弯矩, N·m; σ_3 为煤帮支承应力, Pa; h 为直接顶的岩层厚度, m; M_2 为单位长度直接顶破断极限弯矩, N·m; γ 为直接顶岩体的容重, N/m³; L_1 为基本顶断裂长度, m; L_2 为巷道宽度, m; L_3 为充填体宽度, m; F_1 为直接顶切顶破断时巷旁充填体支护阻力, N; x 为积分常量, m; x_0 为积分变量, m; F_2 为 D 点直接顶发生剪切破断的剪力, N。

其中直接顶破断所需的单位巷旁充填体支护阻力为

$$F_1 = \frac{\sigma_3 h^2 + 6F_2 L_4 + 3\gamma h [L_4^2 - (L_1 + L_2 + L_3)^2]}{6(L_1 + L_2) + 3L_3} \quad (6)$$

同理, 基本顶破断所需的单位巷旁充填体支护阻力为

$$F_3 = \frac{\sigma_3 h^2 + 3(\gamma_1 h_1 - \gamma h)(L_1 + L_2 + L_3)^2 + 6L_4(F_2 + F_4)}{6(L_1 + L_2) + 3L_3} \quad (7)$$

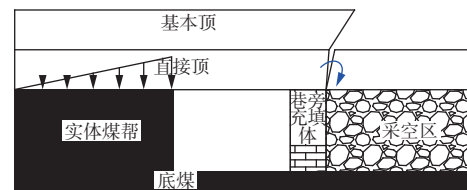
式中: γ_1 为基本顶岩体的容重, N/m³; h_1 为基本顶的岩层厚度, m。

结合古城煤矿 N1303 工作面实际条件, 取 $L_1=5$ m, $L_2=4$ m, $L_3=1.5$ m, $L_4=3.2$ m, $\sigma_2=2.4$ MPa, $\gamma=2.6 \times 10^{-2}$ kN/m³, $h=3.43$ m, $\sigma_4=4.6$ MPa, $\gamma_1=2.7 \times 10^{-2}$ kN/m³, $h_1=6.1$ m。分别代入式(6)、式(7)进行计算。由式(6)得当充填体支护阻力达到 1.26 kN/m² 时, 直接顶发生主动破断; 由式(7)得当充填体支护阻力达到 9.485 kN/m² 时, 基本顶发生被动破断。可见直接顶较基本顶更易破断且所需支护阻力小。

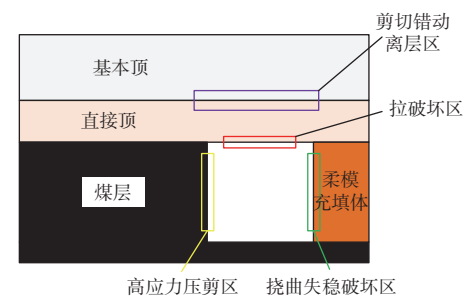
2.2 沿空留巷帮底变形特征

沿空留巷顶板压力主要由煤壁支承应力和留巷充填体最大支护阻力共同承担, 由于煤体强度低, 实体煤帮在高应力作用下易发生压剪式破坏, 帮部锚杆容易破坏失效, 因此, 通过补偿实体煤帮强度, 降低侧向约束力, 将浅部破碎煤体与深部稳定煤体相结合, 能有效控制煤壁变形。充填体强度高于煤层, 因此会侵入煤底, 形成底煤高应力环境, 造成巷角应力集中; 另外充填体在采空区侧起到切顶作用, 在留巷内部会造成顶板处于压剪混合应力环境, 不利于顶板维护。

沿空留巷帮底变形及破坏分区如图 6 所示。对于煤底沿空留巷, 底鼓变形尤为突出, 并且表现出明显的时空特性。底鼓初现于掘巷时期, 在工作面回采时表现明显, 其原因是巷道开挖后原岩应力释放导致软弱底煤应力集中破坏, 由于煤帮和充填体受压侵入底板, 形成底煤的高应力环境, 煤体碎胀, 发生底鼓。随着时间推移, 进一步发生直接底压曲破坏和基本底挠曲失稳。沿空留巷变形可按照破坏原因分为顶板剪切错动离层区、顶煤拉破坏区、煤壁高应力压剪区及充填体-底板挠曲失稳破坏区。



(a) 沿空留巷帮底变形



(b) 沿空留巷变形破坏分区

图 6 沿空留巷帮底变形及破坏分区

Fig. 6 Deformation and failure zone of floor and roadway sides of gob-side entry retaining

3 厚煤层软底沿空留巷围岩控制原理及方案

3.1 厚煤层软底沿空留巷围岩控制原理

巷道在动压影响下发生应力释放和变形回弹, 造成非对称破坏。针对沿空留巷帮底变形特征, 提出了“三位一体”的围岩控制原则, 即控制顶板、限制帮部、让压底板, 其控制流程如图 7 所示。

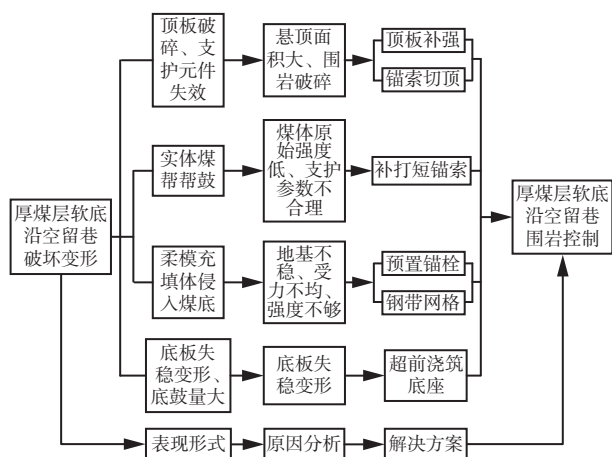


图 7 “三位一体”沿空留巷围岩控制流程

Fig. 7 Trinity gob-side entry retaining surrounding rock control flow

3.2 厚煤层软底沿空留巷围岩控制方案

3.2.1 顶板控制方案

沿空留巷通过在采空区侧超前构筑充填体，与煤壁共同承载上覆顶板。由于煤帮与充填体强度不同，采空区侧顶板会发生回转下沉，充填体一侧所受的顶板压力远大于煤帮一侧。由于受力不平衡，会导致应力水平分量增大并作用于充填体上，导致充填体发生倾斜，顶板进一步破碎。为保证顶板在沿空留巷上方能够平衡应力分布，采取锚索+充填体切顶方式，使顶板在巷道上方不形成悬臂梁结构，只发生下沉，而没有回转变形。考虑到留巷后顶板的稳定性，采取注浆锚索方式对巷道破碎顶板进行注浆，形成一个整体，更好地控制顶板，且在工作面超前支护压力影响范围内布置“一梁三柱”的超前支护，确保工作面顺利回采。顶板控制方案如图 8 所示。

3.2.2 帮部联合控制方案

巷道初次支护后，由于受到多次采动影响，煤帮应力集中明显，巷道变形剧烈。一次支护不能够适应煤巷大变形的特点，难以达到长久稳定的支护效果。另外，巷道顶板压力是由煤帮和充填体共同构成的，充填体材料为混凝土，强度远高于煤帮，在顶板压力过大的情况下，可能会发生顶板提前在实体煤帮上方破断、巷道失稳的情况。因此提高实体煤帮支护强度，补打短锚索，将极限平衡区煤层与深部弹性承载层连接，此时实体煤帮中应力升高，所需要的巷旁充填体支护阻力降低。

充填体内部预置锚栓，外部用钢带连接可以从内部加强充填体的承载能力，从外部串联形成整体，实现点（锚栓）—线（钢带）—面（充填体）的充填体加强支护，提高了充填体的稳定性。因此，在充填体内部

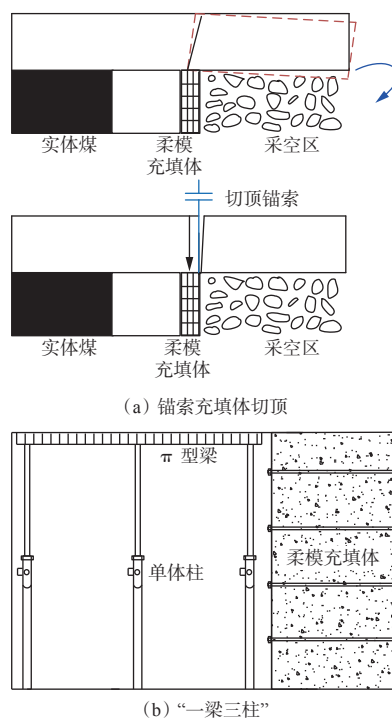


图 8 顶板控制方案

Fig. 8 Roof control scheme

预置锚栓，外部用水平和垂直方向的钢带预紧，对相邻两充填体钢带进行连接，保证充填体的平整性。考虑到顶板压力易造成充填体与顶板接触位置出现柔模破损，将上部和中部的锚栓托盘换成锚索托盘，增加锚栓的强度，防止锚杆托盘被撕裂失效，确保充填体的完整性。沿空留巷顶帮围岩控制如图 9 所示。

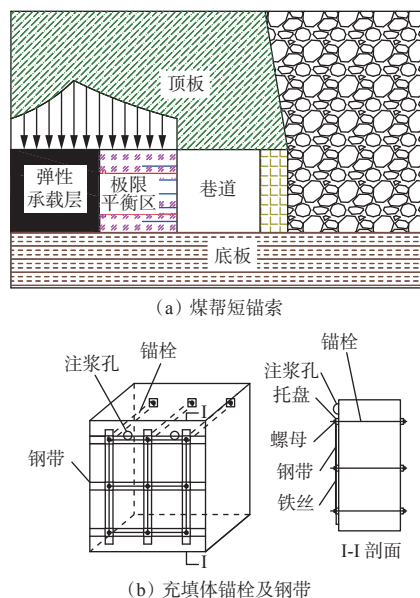


图 9 沿空留巷顶帮围岩控制

Fig. 9 Surrounding rock control of roof and roadway sides of gob-side entry retaining

3.2.3 底鼓原因及解决办法

厚煤层软底沿空留巷在加强顶板及两帮支护后，由于沿顶掘进，底板为软弱松散的煤层，巷道应

力释放大部分从底板进行, 因此底鼓破坏明显, 底鼓量大。另外, 由于强度不均, 充填体会压入底板, 底板煤体产生塑性流变并向巷道移动。如果将底板进行加固补强, 会形成刚性支护, 整个巷道将处于高应力区域, 支护成本高且支护效果较差。进行适当的让压有利于巷道整体实现柔性支护。考虑到留巷效果及后期拉底时充填体底部为虚软底煤而造成的墙体倾斜, 在充填体墙体下通过挖槽、浇筑条形基础进行底板加固。厚煤层软底巷道底鼓原理及措施如图 10 所示。

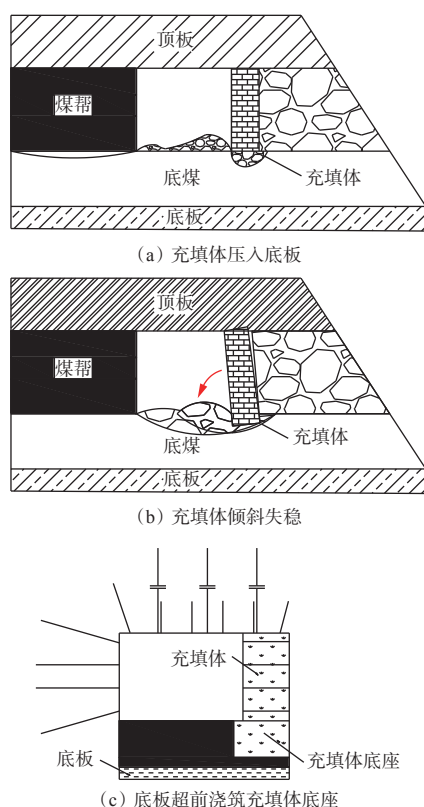


图 10 厚煤层软底巷道底鼓原理及措施

Fig. 10 Floor heave principle of soft bottom roadway in thick coal seam and its countermeasures

4 现场试验

4.1 “三位一体”留巷支护方案

针对厚煤层软底沿空留巷存在的问题, 通过力学分析, 针对性地提出了控制顶板、限制煤帮、让压底板的围岩控制原理, 给出了优化后的巷道支护布置, 如图 11 所示。

4.2 现场监测结果及分析

优化支护后效果监测如图 12 所示。可看出优化留巷支护方案后, 巷道围岩变形总体上呈先增大后逐渐稳定的趋势, 顶板最大位移为 140 mm, 底板最大位移为 162 mm, 充填体位移不超过 50 mm, 煤帮最大位移为 70 mm, 巷道收敛率为 10.73%, 留巷变形

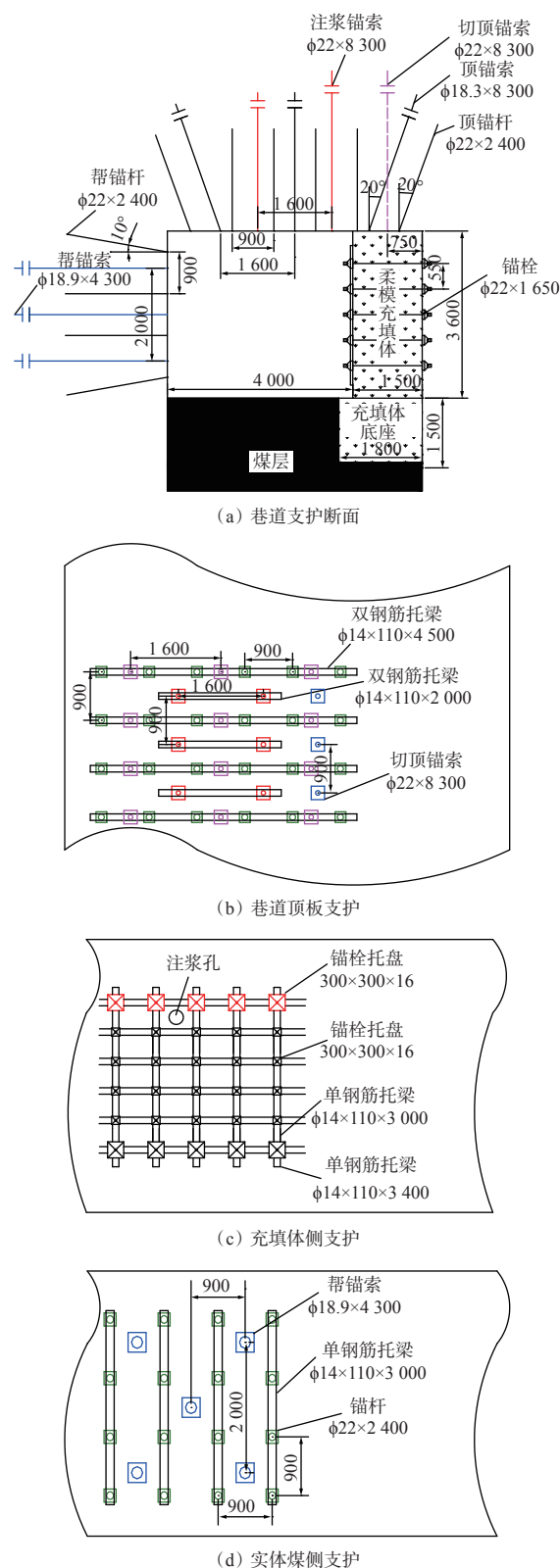
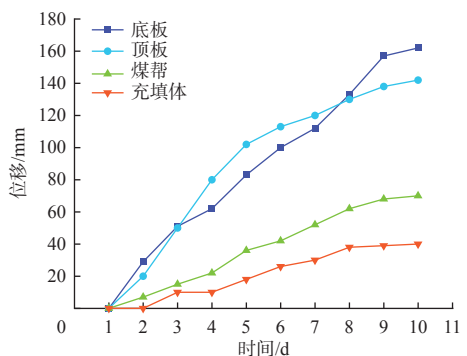


图 11 优化后沿空留巷支护布置

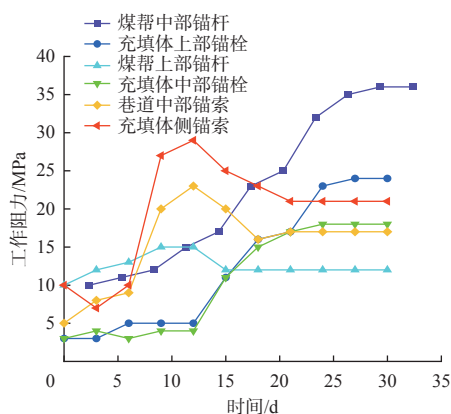
Fig. 11 Optimized support layout of gob-side entry retaining

较原支护方案大大减小。煤帮上部锚杆工作阻力随着工作面回采逐渐增加到 15 MPa, 之后受动压影响逐渐减小, 稳定在 10 MPa; 中部锚杆最大工作阻力为 35 MPa, 远大于上部锚杆, 即实体煤帮中部属于高叠加应力区, 易发生帮鼓; 充填体上部、中部锚栓工

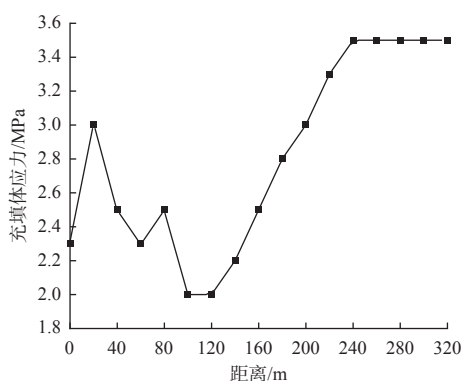
作阻力分别稳定在 20 MPa 和 25 MPa, 无大幅变化。充填体侧锚索工作阻力在工作面回采前较稳定; 回采时波动明显, 有增大趋势, 最大值为 28 MPa; 回采后逐渐稳定至 23 MPa; 巷道整体矿压显现不明显。充填体应力受顶板周期来压影响呈现波动趋势, 距工作面 100 m 内, 压力稳定上升, 200 m 时基本稳定, 充填体无破损。



(a) 巷道表面位移



(b) 巷道锚杆(索)阻力



(c) 充填体应力变化

图 12 优化支护后效果监测

Fig. 12 Effect monitoring after optimized support

5 结论

(1) 厚煤层沿顶留巷垂向变形明显, 主要变形为底鼓, 分析其原因为底板煤层软弱易碎, 巷道支护形式与围岩受力不匹配, 巷道长时处于叠加高应力状

态, 从而形成巷道非稳态、非线性变形。

(2) 建立了顶板、煤帮、底板力学模型, 对沿空留巷的围岩进行了力学分析, 提出了长锚索切顶、注浆锚索护顶、短锚索强帮、充填体连接钢带与预置锚栓、超前浇筑充填体底座的控制顶板、限制煤帮、让压底板的“三位一体”厚煤层软底沿空留巷围岩支护控制方案。

(3) 现场试验结果表明: 优化支护方案后, 顶板位移由 337 mm 减小至 142 mm, 煤帮位移由 305 mm 减小至 70 mm, 底板位移由 675 mm 减小至 162 mm, 巷道收敛率由 34.1% 减小至 10.73%, 锚杆(索)工作阻力稳定, 充填体无破损倾斜, 支护效果较好。

参考文献(References):

- [1] 薛卫峰, 王苏健, 黄克军, 等. 承压水矿区切顶沿空留巷底板破坏理论与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊2): 581-588.
XUE Weifeng, WANG Sujian, HUANG Kejun, et al. Theory and application of floor failure of gob-side entry retaining in confined water mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 581-588.
- [2] 康红普, 张晓, 王东攀, 等. 无煤柱开采围岩控制及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 16-44.
KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Surrounding rock control technology and application of coal pillarless mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16-44.
- [3] 李志华, 华心祝, 李迎富. 不同顶底板强度下深部沿空留巷围岩变形特征[J]. 煤炭工程, 2016, 48(5): 91-93, 97.
LI Zhihua, HUA Xinzhu, LI Yingfu. Deformation characteristics of deep gob-side entry retaining under different roof and floor strengths[J]. Coal Engineering, 2016, 48(5): 91-93, 97.
- [4] 满慎刚. 软底硬顶薄煤层沿空留巷支护技术[J]. 煤炭技术, 2015, 34(2): 50-52.
MAN Shengang. Technology of gob-side roadway remaining in thin seam with hard roof and soft floor[J]. Coal Technology, 2015, 34(2): 50-52.
- [5] 马庆, 谭云亮, 赵增辉, 等. 软底石灰岩顶板沿空留巷综合支护技术[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 155-158.
MA Qing, TAN Yunliang, ZHAO Zenghui, et al. Comprehensive support technology of gob-side entry retaining in soft limestone floor[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(11): 155-158.
- [6] 沙旋, 褚晓威. 厚煤层沿空留巷围岩综合控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 76-83.
SHA Xuan, CHU Xiaowei. Comprehensive control technology of surrounding rock for gob-side entry retaining in thick coal seam[J]. Coal Science and

- Technology, 2019, 47(11): 76-83.
- [7] 冯国瑞, 任玉琦, 王鹏飞, 等. 厚煤层综放沿空留巷巷旁充填体应力分布及变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1109-1119.
- FENG Guorui, REN Yuqi, WANG Pengfei, et al. Stress distribution and deformation characteristics of roadside backfill body for gob-side entry of fully-mechanized caving in thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1109-1119.
- [8] 张智强, 赵浩亮, 曹新云, 等. 特厚煤层小煤柱加固及双柔模墙留巷支护设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(6): 46-51.
- ZHANG Zhiqiang, ZHAO Haoliang, CAO Xinyun, et al. Design of small coal pillar reinforcement and double flexible-formwork wall support for retained entry in extra thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(6): 46-51.
- [9] 陈上元, 赵菲, 王洪建, 等. 深部切顶沿空成巷关键参数研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 332-342, 350.
- CHEN Shangyuan, ZHAO Fei, WANG Hongjian, et al. Determination of key parameters of gob-side entry retaining by cutting roof and its application to a deep mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 332-342, 350.
- [10] 郑赟, 单仁亮, 黄博, 等. 强帮强角应用于沿空留巷支护的相似模型试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 94-102.
- ZHENG Yun, SHAN Renliang, HUANG Bo, et al. Similar model tests on strong sidewall and corner support of gob side entry retaining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 94-102.
- [11] 王方田, 尚俊剑, 赵宾, 等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构特征及锚索强化支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2296-2305.
- WANG Fangtian, SHANG Junjian, ZHAO Bin, et al. Surrounding rock structural characteristics and anchor-cable strengthened support technology of the gob-side entry retaining with roof cutting and pressure releasing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2296-2305.
- [12] 邓雪杰, 董超伟, 袁宗萱, 等. 深部充填沿空留巷巷旁支护体变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 62-72.
- DENG Xuejie, DONG Chaowei, YUAN Zongxuan, et al. Deformation behavior of gob-side filling body of gob-side retaining entry in the deep backfilling workplace[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 62-72.
- [13] 谢生荣, 张晴, 陈冬冬, 等. 沿空留巷顶板非对称锚固深梁承载结构模型研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 298-310.
- XIE Shengrong, ZHANG Qing, CHEN Dongdong, et al. Research and application of asymmetric anchorage deep beam bearing structure model in gob-side entry retaining roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 298-310.
- [14] 崔景昆, 郭利军, 孙守新, 等. 可缩柱自适应墩柱充填石料连续级配压缩性能试验研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(5): 59-62.
- CUI Jingkun, GUO Lijun, SUN Shouxin, et al. Test study on compression performance of continuously graded filling rock of reducible self-adaptive pier column[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(5): 59-62.
- [15] 于光远, 王炯, 孙晗, 等. 砌块充填沿空留巷底鼓大变形机理及综合控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 335-346.
- YU Guangyuan, WANG Jiong, SUN Han, et al. Mechanism and comprehensive control techniques for large deformation of floor heave in block filling gob-side entry retaining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 335-346.
- [36] WANG Zheng, ZHENG Xu, LI Dongyan, et al. A VGGNet-like approach for classifying and segmenting coal dust particles with overlapping regions[J]. Computers in Industry, 2021, 132. DOI: 10.1016/J.COMPIND.2021.103506.
- [37] 宋敬海. 基于嵌入式系统和机器视觉的火灾检测系统研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2008.
- SONG Jinghai. Research on fire detection system based on embedded system and machine vision[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2008.
- [38] CUI Haoyang, XU Yongpeng, ZENG Jundong, et al. The methods in infrared thermal imaging diagnosis technology of power equipment[C]. IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing, 2013: 246-251.
- [39] JADIN M S, GHAZALI K H. Gas leakage detection using thermal imaging technique[C]. The 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge, 2014: 302-306.
- [40] NARKHEDE P, WALAMBE R, MANDAOKAR S, et al. Gas detection and identification using multimodal artificial intelligence based sensor fusion[J]. Applied System Innovation, 2021, 4(1): 1-14.

(上接第 53 页)