

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2020.02.002

# 凉水井煤矿浅埋薄煤层坚硬顶板 沿空留巷关键技术实践

王磊, 李饶荣, 种德雨\*, 杜江, 任小明

(神木汇森凉水井矿业有限责任公司, 陕西 榆林 719319)

**摘要:**以凉水井煤矿 431301 工作面沿空留巷为工程背景, 分析了凉水井煤矿浅埋薄煤层坚硬顶板沿空留巷可行性, 提出了凉水井煤矿浅埋薄煤层坚硬顶板沿空留巷关键技术: 采空区侧向端部坚硬顶板结构承载技术, 高水材料快速构筑沿空留巷巷旁支护技术和锚网索联合单体液压支柱或门式支架形成沿空留巷巷内支护技术。矿压监测结果表明: 431301 工作面胶运巷沿空留巷围岩变形小, 达到了预期效果。研究成果可为类似生产地质条件下的沿空留巷无煤柱开采提供技术参考。

**关键词:**沿空留巷; 薄煤层; 坚硬顶板; 浅埋深

**中图分类号:**TD322      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2020)02-0008-07

## Gob-side Entry Retained with Hard Roof of Shallow and Thin Coal Seam: A Case Study of Liangshuijing Coal Mine

Wang Lei, Li Raorong, Zhong Deyu, Du Jiang, Ren Xiaoming

(Shenmu Huisen Liangshuijing Coal Industry Co., Ltd., Yulin 719319, China)

**Abstract:** Based on the gob-side entry retained tests of the 431301 working face in Liangshuijing Coal Mine as the engineering background, the feasibility of gob-side entry retained in shallow and thin coal seam with hard roof is analyzed, and the key technology of gob-side entry retained in shallow and thin coal seam with hard roof is proposed. The key technology includes the bearing technology of the face-end hard roof structure along the gob, the roadside support technology of high-water quick-setting materials building the roadside backfill body, and the road-in support technology combining the anchor cable-net-rockbolt support with single prop or monomer hydraulic support. The monitoring results of mine pressure show that the surrounding rock deformation of the retained haulage roadway is small, and the expected effect is achieved. The research results can provide a technical reference for non-pillar mining with gob-side entry retained under similar mining geological conditions.

**Keywords:** gob-side entry retained; thin coal seam; hard roof; shallow buried depth

发展薄煤层沿空留巷无煤柱开采技术, 是提高煤炭资源回收率、实现不同层厚煤层协调开采和可持续发展的关键技术途径, 尤其有助于缓解高产高效薄煤层综采工作面采掘接替紧张<sup>[1-5]</sup>。本文以陕西汇森煤业凉水井煤矿 431301 薄煤层工作面(设计产能 90 万 t/a)为研究对象, 开展浅埋薄煤层坚硬顶板沿空留巷工程实践, 研究结果为类似条件下的沿空留巷提供参考。

### 1 工程概况

431301 工作面为 4<sup>-3</sup> 煤层薄煤层沿空留巷试验和首采工作面, 其倾斜长 180 m 左右, 走向长度 1 900 m。试

收稿日期: 2020-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574117); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5194)

\* 通信作者, E-mail: 378582879@qq.com

验煤层为 $4^{-3}$ 煤层,煤层厚度0.50~1.36 m,平均1.02 m;煤层埋深80~175 m,平均130 m,西北部较深,东南较浅,属于单斜构造,倾角小于 $2^{\circ}$ ,为近水平煤层。 $4^{-3}$ 煤层较坚硬,普氏硬度系数达到2.9,煤层顶板岩性以细粒砂岩为主,局部为中粒砂岩和粉砂岩,厚度0.60~20.11 m。煤层底板岩性以粉砂岩为主,局部为细粒砂岩或泥岩,厚度0.66~14.25 m,东部偶见泥岩底板。431301工作面范围内布置有L8钻孔柱状信息,见表1所示。

表1 L8钻孔柱状信息

序号	岩性	厚度/m	埋深/m	岩性描述
1	$4^{-2}$ 煤	3.12	100.34	褐黑色,沥青光泽,阶梯状-参差状断口,条带状结构,块状构造,属半亮-半暗型煤
2	粉粒砂岩	3.16	103.50	灰色、深灰色,具水平层理,较硬,含植物化石及碎片,夹砂岩条带
3	煤	0.25	103.75	黑色,块状,沥青光泽,阶梯状-参差状断口,条带状结构,属半亮-半暗型煤
4	细粒砂岩	20.75	124.50	灰色、浅灰色、灰白色,以石英、长石为主,分选性好,次圆-次棱角状,泥钙质胶结,较硬,具水平层理、波状层理及小型交错节理,含植物化石及碎片,夹有薄层中粒砂岩
5	$4^{-3}$ 煤	1.07	125.57	褐黑色,沥青光泽,阶梯状-参差状断口,条带状结构,块状构造,属半亮-半暗型煤
6	粉粒砂岩	12.25	137.82	灰色、深灰色,具水平层理及波状层理,具滑面,夹薄层细粒砂岩及砂岩条带,含植物化石碎片
7	$4^{-4}$ 煤	1.02	138.84	褐黑色,沥青光泽,阶梯状-参差状断口,条带状结构,属半亮-半暗型煤
8	粉粒砂岩	8.1	146.94	灰色、深灰色、浅灰色,具水平层理,具滑面,含黄铁矿薄膜及植物化石碎片,夹薄层细粒砂岩及薄层泥岩

431301胶运巷沿空留巷作为431302工作面回风巷。431301胶运巷为矩形断面,巷道净宽5.7 m,净高2.8 m,沿 $4^{-3}$ 煤层顶板破底掘进。431301工作面胶运巷断面形状为矩形,掘进断面高度为3.0 m,底板铺设200 mm厚、标号为C30的混凝土。

## 2 凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷可行性分析

1) 浅埋薄煤层开采为沿空留巷提供了有利的应力环境。 $4^{-3}$ 煤层埋深较浅,平均约为130 m,铅垂应力约为3.25 MPa,为沿空留巷提供了较小的原岩应力环境。薄煤层开采后的采空区高度较小,采空区上方顶板冒落后容易充满采空区,有效支撑上部顶板,采空区侧向端部坚硬顶板承载结构的旋转下沉量显著小于同类条件下厚煤层开采时的旋转下沉量,沿空留巷位于采空区侧向端部坚硬顶板承载结构的下方,处于应力降低区,支承应力向深部煤岩体转移<sup>[6-8]</sup>。因此,凉水井煤矿浅埋薄煤层开采地质条件为沿空留巷提供了有利的应力环境。

2) “硬煤硬底”为沿空留巷提供了有利的围岩条件。凉水井煤矿 $4^{-3}$ 煤层普氏硬度系数达到2.9,较为坚硬,赋存较稳定。直接顶板赋存超过10 m厚的细砂岩,属于坚硬岩层;距离 $4^{-3}$ 煤层上方25 m左右赋存约34.6 m厚的砂岩组,亦属于坚硬岩层;直接底为9.4 m厚的粉砂岩,较为坚硬;距煤层底板约19.9 m处存在一层约11.9 m厚的中砂岩,属于坚硬岩层。整体上呈现“三硬岩层”条件,即顶板坚硬、煤层坚硬、底板坚硬。同类条件下,坚硬岩层的承载能力和抗变形能力显著高于软弱岩层的承载能力和抗变形能力。如果砂岩顶板不能及时垮落,采用强制放顶后,沿空留巷维护条件较好,因此凉水井煤矿浅埋薄煤层的“三硬岩层”条件为沿空留巷提供了有利的围岩条件<sup>[8]</sup>。

3) 高水材料为快速构筑沿空留巷巷旁充填墙体提供了技术保障。国内外对巷旁支护机理及方法进行较多的研究和实践。20世纪50年代以来巷旁支护长期采用矸石带、木垛、密集支柱和混凝土砌块,上述巷旁支护普遍存在增阻速度慢、支承能力小、压缩变形量大、密闭性能差、机械化程度低、劳动强度大以及力学性能与沿空留巷围岩变形不相适应等缺点,不利于沿空留巷维护和防止采空区漏风、煤层自燃。高水充填材料因具有增阻速度快、支护阻力大、适量可缩,可机械化整体构筑巷旁充填体、密闭采空区效果好、劳动强度小等优点<sup>[1,3,5,7]</sup>,为凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷巷旁支护提供了可靠的材料支撑。

4) 巷内支护为强化沿空留巷围岩强度和刚度提供了技术保障。沿空留巷在服务周期内将经历实体煤掘巷阶段、工作面采动应力扰动阶段、工作面后方应力稳定阶段、相邻下区段工作面采动应力扰动阶段,工

程上将经历相邻2个工作面的采动影响,巷内支护的强度、刚度影响支承应力演化过程中围岩抵抗变形的能力,因此合理的巷内支护技术和参数为沿空留巷稳定性提供了技术保障。

5)沿空留巷辅助切顶卸压技术为及时破断坚硬顶板提供了技术保障。当煤层顶板为坚硬稳定顶板,工作面回采后顶板不易垮落甚至大面积悬顶,会造成巷旁充填体、巷道围岩的变形破坏。因此在巷旁充填体构筑起来之前必须采取有效的采空区顶板辅助切顶措施,确保充填体能够及时切落采空区侧足够高的顶板岩层,避免顶板坚硬岩层久而不落,充填体及巷道围岩受顶板来压影响而造成破坏<sup>[6,7]</sup>。

基于以上分析,浅埋薄煤层开采条件、三硬岩层围岩条件、高水材料充填墙体、巷内支护技术、沿空留巷辅助切顶卸压技术为凉水井煤矿浅埋薄煤层工作面沿空留巷提供了有利的应力环境、围岩条件和支护技术,此类条件下的沿空留巷具有较强的可行性。

### 3 凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷关键技术及参数

#### 3.1 凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷关键技术

##### 3.1.1 采空区侧向端部坚硬顶板结构承载技术

凉水井煤矿 $4^{-3}$ 煤层直接顶板为厚层砂岩顶板,破断后在采空区端部能形成稳定承载结构,该结构一侧由巷旁支护体和采空区冒落矸石支撑,另一侧由煤体支撑,处于平衡状态,沿空留巷位于该承载结构的下方,处于应力降低区,有利于沿空留巷的稳定。

##### 3.1.2 高水材料快速构筑沿空留巷巷旁支护技术

高水充填材料具有增阻速度快、支护阻力大、适量可缩,可机械化整体构筑巷旁充填体、密闭采空区效果好、劳动强度小等优点。高水材料配比和充填体宽度决定了沿空留巷巷旁充填体的承载特性和稳定性,针对凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷的工程地质条件,需要确定经济技术效益显著的高水材料配比和充填体宽度,以支撑沿空留巷顶板,维护沿空留巷整体的稳定性。高水材料巷旁充填系统分为充填泵站、输送管路、充填点3个环节,可实现超3000m长距离的泵送管路运输,快速构筑充填墙体。

##### 3.1.3 锚网索联合单体液压支柱或门式支架形成沿空留巷巷内支护技术

锚杆支护属于主动支护,具有强化围岩强度的能力,合理的巷内锚杆支护参数可使浅部围岩形成整体承载的锚固体,显著提高沿空留巷围岩的承载能力和抗变形能力。相较于锚杆支护,锚索支护属于高强支护技术,可将浅部围岩与锚杆形成的锚固体固结在较深部稳定的岩层当中,提高浅部锚固体的承载和抗变形能力。留巷段单体液压支柱或门式支架可提高所留巷的支护强度,提高整个支护系统的可靠性,减少采动对留巷顶板结构的扰动影响。

#### 3.2 凉水井煤矿浅埋薄煤层沿空留巷巷旁充填体关键参数确定

根据沿空留巷顶板与巷旁充填体相互作用关系,建立图1所示的巷旁充填体与顶板相互作用的力学模型。对该模型作简化:(1)在巷旁充填体切断顶板岩层前,矸石对块体AC的支撑力为0;(2)基本顶之上软弱岩层与更上位岩层之间的剪力为0;(3)基本顶之上的软弱岩层,均匀地加到基本顶上;(4)基本顶以煤体弹塑性交界处为旋转轴向采空区侧旋转倾斜;(5)沿空留巷下侧煤体支承压力 $\sigma_y$ 和应力极限平衡区宽度 $x_0$ 根据极限平衡理论计算。

求解得巷旁充填体支护阻力为

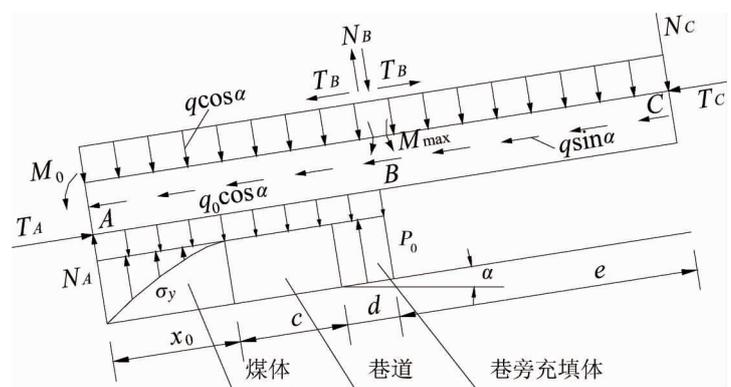


图1 沿空留巷力学模型

$$P_0 = [M_{\max} + (N_c + eq\cos\alpha)(x_0 + c + d) + \frac{1}{2}(q + q_0)\cos\alpha(x_0 + c + d)^2 - \int_0^{x_0} \sigma_y(x_0 - x) dx - (T_c + eq\sin\alpha)(h - \Delta S_B) - M_0 - q\sin\alpha(x_0 + c + d)(\frac{h}{2} - \Delta S_B)] / (x_0 + c + \frac{d}{2}). \quad (1)$$

式中: $M_{\max}$ 为基本顶岩层的极限弯矩; $N_c$ 为采空区侧受到的剪力; $e$ 为BC岩块的长度; $q$ 为基本顶及其上部软弱岩层单位长度的自重; $\alpha$ 为煤层倾角; $c$ 为巷道宽度; $d$ 为巷旁充填体宽度; $q_0$ 为直接顶单位长度自重; $T_c$ 为沿岩层方向的推力; $h$ 为基本顶岩层厚度; $M_0$ 为A端基本顶的残余弯矩; $\Delta S_B$ 为基本顶垮落前B端的下沉量.且

$$e = \frac{2b^2}{17L_m} \sqrt{100 + 102\left(\frac{L_m}{b}\right)^2} - x_0 - c - d. \quad (2)$$

式中: $b$ 为基本顶来压步距; $L_m$ 为工作面长度.

基本顶垮落前C端的下沉量为

$$\Delta S_c = \frac{x_0 + c + d + e}{x_0 + c + d} \Delta S_B. \quad (3)$$

沿岩层方向的推力 $T_c$ 为

$$T_c = \frac{(x_0 + c + d + e)q\cos\alpha}{2(h - \Delta S_c)}. \quad (4)$$

根据凉水井煤矿431301工作面生产地质条件、岩性和以往的岩层力学参数考虑,具体地质力学参数初步取值如下:工作面回采厚度为1.07 m,工作面长度180 m,周期来压步距15 m,巷道最大埋深175 m,基本顶分层厚度按6.0 m考虑,留巷后巷道宽度4.9 m,充填体宽度1.6 m,上覆岩层容重为25 kN/m<sup>3</sup>,应力集中系数为2.0,基本顶岩层抗拉强度6.0 MPa,侧压系数为0.4,煤层粘聚力为3 MPa,内摩擦角30°,煤帮采用锚杆支护,其支护阻力为0.1 MPa,煤层倾角1°,将上述参数代入式(1),得到431301胶运巷充填体的切顶阻力为12.2 MN/m.

431301工作面为4<sup>-3</sup>煤层沿空留巷试验工作面,高水材料沿空留巷工艺为首次使用,为保证充填体的切顶效果,提高其整体稳定性并保证采空区隔离效果,确保沿空留巷的成功,根据431301胶运巷顶板岩层情况、公式计算和以往的工程实践,考虑安全系数1.3,当高水材料水灰比为1.5:1时(巷旁充填体强度10 MPa),则所需的充填体宽度理论计算值为1.59 m,实际取1.6 m.

## 4 工程实践

### 4.1 巷内支护

基于以上研究,确定431301胶运巷沿空留巷巷内支护技术为掘巷时期的锚杆支护技术、锚索加固技术以及留巷时期的支架护顶技术.其中锚杆支护和锚索加固技术见图2所示.

#### 4.1.1 锚杆支护技术

顶板锚杆采用 $\Phi 20$  mm $\times$ 2 000 mm的BHRB335螺纹钢锚杆,间排距900 mm $\times$ 1 000 mm,每排布置7根锚杆,每根锚杆使用1支MSCK2335型、1支Z2360型树脂药卷,尾部配套承载钢垫圈、减摩垫圈、调心垫圈,规格为120 mm $\times$ 120 mm $\times$ 10 mm的碟形钢托盘.钢筋网采用 $\Phi 6$  mm的Q235钢筋,尺寸为5 700 mm $\times$ 1 100 mm,网格为100 mm $\times$ 100 mm,搭接长度100 mm,采用14<sup>#</sup>铁丝连接.托梁长度为5 600 mm,宽度为60 mm,托梁上单个长方孔的尺寸为50 mm $\times$ 60 mm,采用 $\Phi 14$  mm圆钢加工.

帮部锚杆采用 $\Phi 18$  mm $\times$ 2 000 mm的BHRB335螺纹钢锚杆对称布置在两帮,间排距1 000 mm $\times$ 1 000 mm,每排布置3根锚杆,每根锚杆使用1支MSCK2335型、1支Z2360型树脂药卷,尾部配套承载钢垫圈、减摩垫圈、调心垫圈,规格为120 mm $\times$ 120 mm $\times$ 10 mm的碟形钢托盘.铺设8<sup>#</sup>铁丝编织的菱形金属网,尺寸为2 500 mm $\times$ 1 100 mm,网格为50 mm $\times$ 50 mm,搭接长度100 mm,采用14<sup>#</sup>铁丝每2孔连接一道,

托梁长度为 2 200 mm,宽度为 60 mm,托梁上单个长方孔的尺寸为 50 mm×60 mm,采用  $\Phi 14$  mm 圆钢加工.

#### 4.1.2 锚索加强支护技术

顶锚索采用  $\Phi 18.9$  mm×6 300 mm 的钢绞线锚索加强支护,间排距为 2 000 mm×2 000 mm,每排铅垂向上布置 2 根锚索,锚索与锚杆布置在同一排.每根锚索使用 1 支 MSCK2335 型、2 支 Z2360 型树脂药卷,尾部配套锁具、调心垫圈、规格为 300 mm×300 mm×16 mm 的碟形钢托盘.

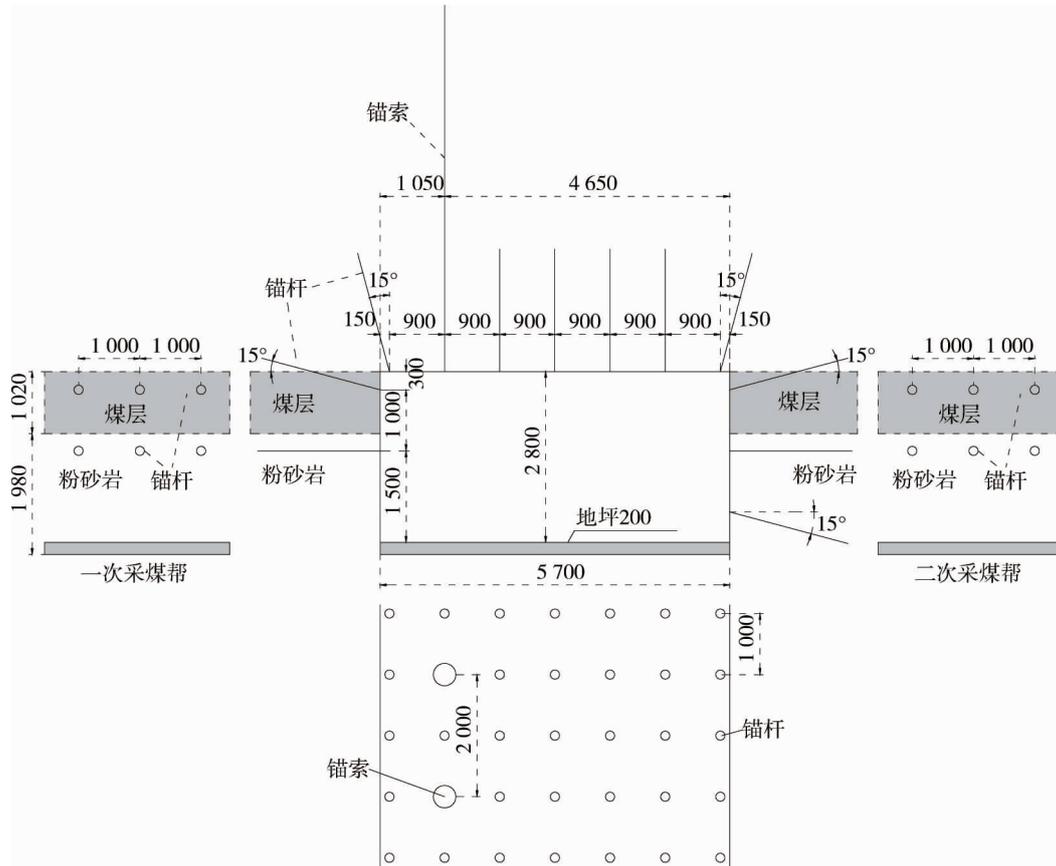


图 2 431301 胶运巷初始支护(单位:mm)

结合已有的沿空留巷工程试验,考虑留巷期间采动顶板活动对留巷空间的扰动作用,应在工作面后方顶板破断期间及剧烈变形段内布置单体液压支柱加强顶板支护,滞后加强支护距离一般为 100 m.

#### 4.2 巷旁支护

充填体采用水灰比 1.5 : 1 的高水充填构筑而成,一天充填 2 次,每次充填长度 6 m.充填体分上下两部分充填、一次吊挂充填袋.先充填下部,其长×宽×高为 6.0 m×0.8 m×1.2 m,后充填上部,其长×宽×高为 6.0 m×1.6 m×1.6 m;加强支护上部充填体,在充填体内布置对拉锚杆加固充填体,对拉锚杆两排,间排距 900 mm×800 mm,对拉锚杆采用  $\Phi 22$  mm×1 800 mm 的螺纹钢材料制作,采用  $\Phi 14$  mm 圆钢焊制规格为 2 300 mm×60 mm,1 000 mm×60 mm 钢筋梯子梁相连,碟形托盘规格为 120 mm×120 mm×10 mm.钢筋网要求使用  $\Phi 4$  mm 的钢筋加工,下部充填体凝固后进行锚梁网支护,锚杆间排距 900 mm×800 mm,充填完成 24 h 后打锚杆.使用 14<sup>#</sup> 铁丝双股联网,钢筋网搭接部分不小于 100 mm.充填体加强支护见图 3 所示.

#### 4.3 431301 胶运巷沿空留巷辅助切顶卸压技术

在 431301 胶运巷采煤帮侧向顶板内进行聚能爆破,优化裂隙发育情况,弱化顶板强度和完整性,提高顶板冒落效果,从而实现煤矿的安全高产高效开采.为确保切顶高度范围内顶板岩层顺利垮落,通常将切顶高度选择在计算高度附近岩层分界面,对比 431301 工作面钻孔柱状图,煤层上方 7.05 和 3.68 m 为两层细砂岩,故增加切顶高度至 10.73 m.顶板钻孔仰角为 70°,钻孔长度为 11.5 m,炮孔直径取 38 mm,炮孔间

距取 600 mm,封孔长度为 4 m,装药长度为 7.5 m;采用煤矿许用乳化炸药进行顶板预爆破处理,炸药参数为直径 35 mm,长度 200 mm,每卷重量 200 g,单孔装药量 3.0 kg.炮孔布置如图 4 所示.

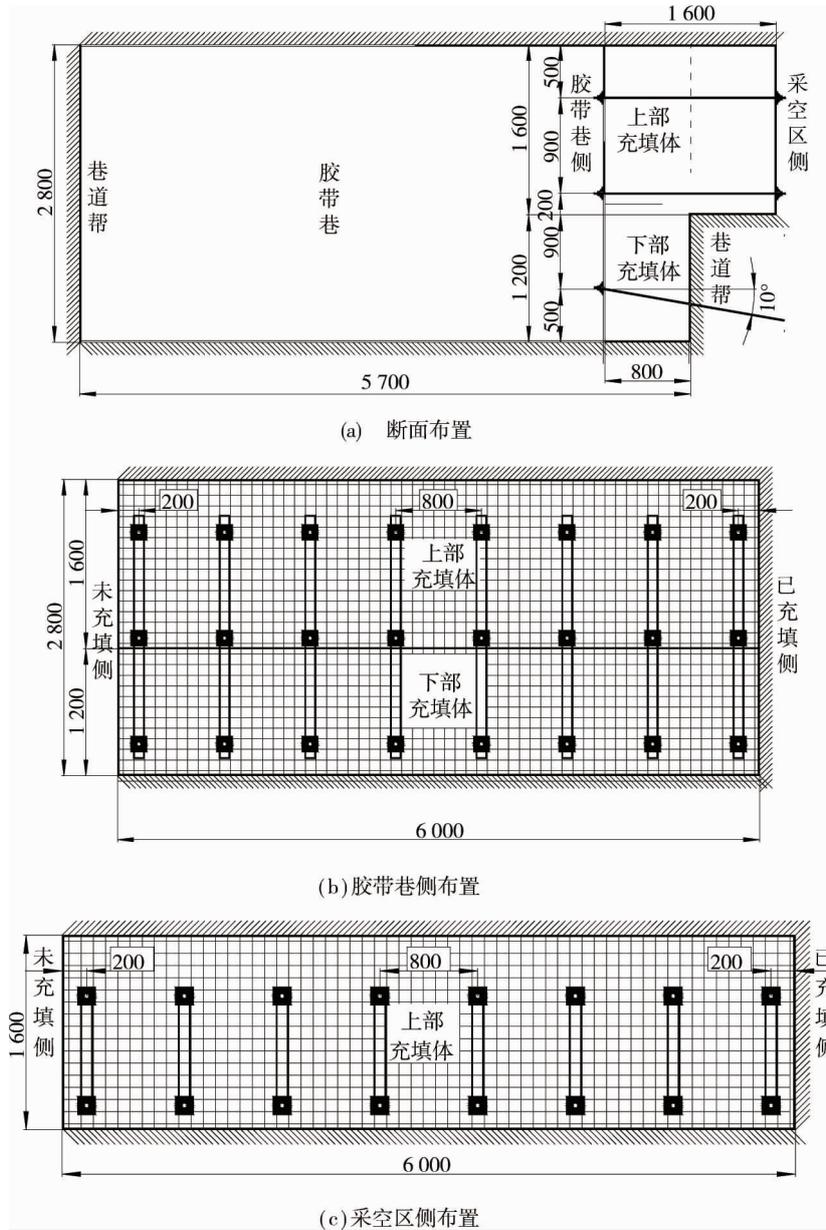


图 3 充填体加强支护(单位:mm)

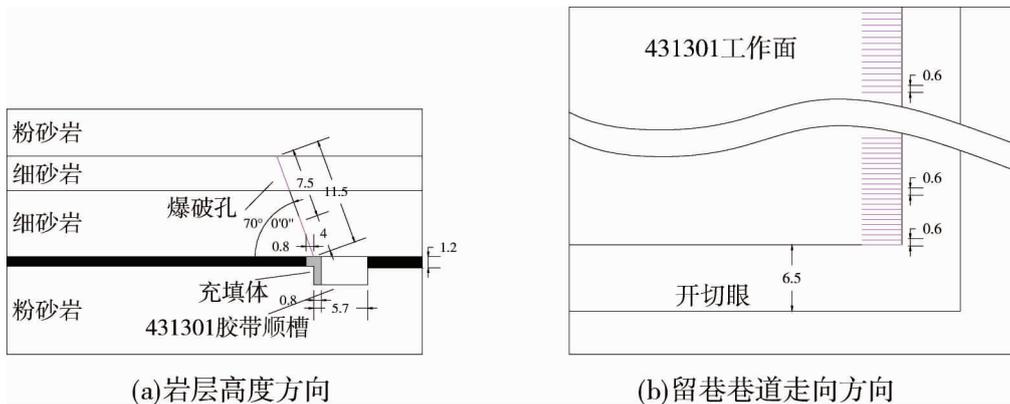


图 4 炮孔布置(单位:m)

#### 4.4 实施效果

沿空留巷顶板深部位移监测结果见图5.沿空留巷现场实施效果见图6.

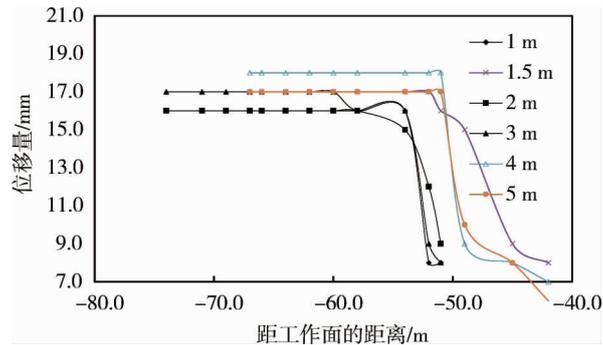


图5 沿空留巷顶板深部位移监测结果

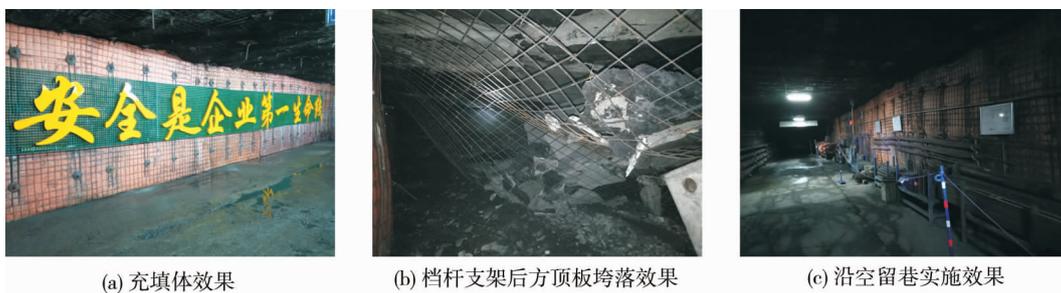


图6 沿空留巷整体效果

截至2020年4月,431301工作面沿空留巷长度已经超过750 m.现阶段沿空留巷前宽度4.9 m,巷道净高2.8 m.在工作面后方留巷巷道宽度仍超过4.85 m,高度超过2.75 m,留巷巷道围岩稳定.图5表明顶板最大离层量均未超过锚索最大延伸量,顶板处于稳定状态.沿空留巷顶底板移近量和两帮移近量均小于50 mm(图6a所示),达到了预期指标(顶底板移近量不超过200 mm,两帮移近量不超过250 mm),支架后方顶板及时垮落(图6b所示),沿空留巷围岩控制效果较好(图6c所示).

## 5 结论

1)合理的巷内支护技术,巷旁充填体构筑技术和坚硬顶板辅助卸压技术是浅埋薄煤层坚硬顶板沿空留巷围岩稳定的关键.

2)高水材料快速构筑沿空留巷巷旁充填体,锚网索联合单体液压支柱形成沿空留巷巷内支护技术,聚能爆破超前预裂坚硬顶板的辅助卸压技术能够有效控制浅埋薄煤层坚硬顶板沿空留巷围岩变形.

### 参考文献:

- [1] 张自政,柏建彪,王卫军,等.沿空留巷充填区域锚索锚固区内外顶板离层力学分析与工程应用[J].采矿与安全工程学报.2018,35(5):893-901.
- [2] 康红普,牛多龙,张镇,等.深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报.2010,29(10):1977-1987.
- [3] 张自政,王卫军,于宪阳.深部沿空留巷实体煤帮变形影响因素及规律[J].矿业工程研究.2017,32(3):39-44.
- [4] 华心祝.我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J].煤炭科学技术,2006,34(12):78-81.
- [5] 张自政,柏建彪,王卫军,等.沿空留巷充填区域直接顶受力状态探讨与应用[J].煤炭学报.2017,42(8):1960-1970.
- [6] 张自政,柏建彪,陈勇,等.浅孔爆破机制及其在厚层坚硬顶板沿空留巷中的应用[J].岩石力学与工程学报.2016,35(s1):3008-3017.
- [7] 郭统一,张自政,冯平海,等.厚煤层坚硬顶板工作面沿空留巷技术[J].煤矿安全.2014,45(9):72-74.
- [8] 柏建彪,王襄禹,闫帅,等.基于应力场干预的巷道围岩控制技术[J].矿业工程研究.2019,34(2):1-7.