

# 深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理与应用

段宝福<sup>1,2</sup>, 陈佳华<sup>1,2</sup>, 柴明星<sup>1,2</sup>, 魏玉冠<sup>1,2</sup>, 荆哲<sup>1,2</sup>, 杨云倩<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为解决悬顶导致的煤柱及邻近巷道高应力和大变形问题,结合工作面顶板地质条件,提出深孔聚能预裂爆破切顶卸压专项方案,采用数值模拟及现场试验对卸压效果开展综合研究。研究表明,煤层顶板在切顶后垂直应力减幅为 21.62%,预裂切顶措施可显著降低煤柱及邻近巷道围岩应力水平。试验发现,炮孔内轴向贯穿裂缝明显,可实现采空区顶板及时垮落。顶底板在切顶后累计位移量减幅达 59.27%,巷道两帮及顶底板移近变形得到有效控制,煤柱垂直应力增量显著降低。实践证明,采用深孔聚能预裂爆破切顶卸压效果显著,可大幅提高作业效率,为类似矿压防治工程提供借鉴。

**关键词:**深孔聚能爆破;切顶卸压;预裂切缝;现场试验;矿压防治

中图分类号:TD235

文献标志码:A

## Mechanism and application of roof cutting and pressure relief in deep-hole shaped charge presplit blasting

DUAN Baofu<sup>1,2</sup>, CHEN Jiahua<sup>1,2</sup>, CHAI Mingxing<sup>1,2</sup>,  
WEI Yuguan<sup>1,2</sup>, JING Zhe<sup>1,2</sup>, YANG Yunqian<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** To solve the problem of high stress and large deformation of the coal pillar and adjacent roadway caused by the suspended roof, this paper, combined with the geological conditions of the roof in the mining face, proposed a specific scheme of roof cutting and pressure relief in deep-hole shaped charge presplit blasting, and used numerical simulation and field test to conduct a comprehensive study on the effect of pressure relief. The results show that the vertical stress reduction of the coal seam roof after roof cutting is 21.62%, and the roof cutting measures can significantly reduce the stress level of the coal pillar and the surrounding rock in the adjacent roadway. The tests find that the axial penetrating cracks in the borehole are obvious, which can realize the timely collapse of the roof of the goaf. The cumulative displacement of the roof and floor is reduced by 59.27% after cutting the roof, the deformation of the two sides and the roof and floor in the roadway can be effectively controlled, and the increase of vertical stress in the coal pillar is obviously reduced. The practice has proved that the pressure relief effect of roof cutting by deep-hole shaped charge presplit blasting is remarkable, which can greatly improve the operational

收稿日期:2023-10-13

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020ME096);爆破工程湖北省重点实验室开放基金项目(BL2021-24)

作者简介:段宝福(1972—),男,甘肃武威人,教授,博士,主要从事矿压防治、工程爆破方面的研究。

E-mail:duanbaofu@sdust.edu.cn

柴明星(1998—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事矿压防治、工程爆破方面的研究,本文通信作者。

E-mail:979711182@qq.com

efficiency and provide some reference for similar mining pressure prevention and control projects.

**Key words:** deep-hole shaped charge blasting; roof cutting and pressure relief; presplit and cut seams; field test; mining pressure prevention and control

在我国普遍采用的长壁体系开采条件下,随着煤矿开采强度及深度的增加,地应力增大,采动应力影响范围扩大,应力集中系数增大,加之巷道围岩力学性质的恶化,巷道变形愈发剧烈<sup>[1]</sup>。巷道在邻近工作面动压影响期间,容易出现两帮强烈挤压、顶板下沉和底鼓的全断面变形,锚杆锚索经常发生破断<sup>[2-3]</sup>。动压影响下巷道的维护已成为制约矿井安全高效开采的瓶颈。坚硬悬顶引起的侧向支承压压力是巷道矿压显现的根本原因<sup>[4]</sup>。目前虽然已有长钻孔水力压裂侧向切顶卸压措施<sup>[5]</sup>,但往往由于现场顶板岩层含泥量高且裂隙发育,导致钻孔及分段水力压裂等过程施工困难<sup>[6-7]</sup>。对此,诸多学者对坚硬悬顶难题进行了相关研究。苏超等<sup>[8]</sup>通过分析巷道覆岩结构及运移规律,采用人工切顶方式减弱悬顶叠加效应,进而改善煤柱受力状态,减小巷道变形。王涛等<sup>[9]</sup>分析了坚硬悬顶下煤柱受力状态,开展断顶卸压爆破,有效切断了悬板对煤柱的应力传递。

部分学者对不同工况下的切顶技术进行了研究。吴学松等<sup>[10]</sup>构建了侧向悬顶临空煤柱受力模型,提出分批次卸压顶板预裂爆破方案。王福奇等<sup>[11]</sup>通过优化钻孔参数及数值模拟分析,提出适用于大采高强矿压工作面的静态胀裂切顶技术。张军辉等<sup>[12]</sup>提出适用于急倾斜工作面坚硬顶板的超深孔预裂爆破方案。薛成春等<sup>[13]</sup>建立了倾斜悬顶结构力学模型,确定工作面下部端头、中上部为能量峰值点区域,制定了定向深孔爆破释能方案。

上述切顶方案对于控制悬顶引起的巷道变形起到了重要的指导作用,但顶板深孔预裂爆破与聚能爆破相结合的切顶技术方案尚待完善,爆破参数的确定及卸压效果有待研究。本研究以山西省王坡煤矿为工程背景,结合 3 号主采煤层顶板地质条件,分析巷道变形原理及切顶卸压机理,提出深孔聚能预裂爆破切顶卸压专项方案,采用数值模拟及 3308 工作面现场试验分析卸压效果,为类似切顶工程提供借鉴。

### 1 深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理

#### 1.1 巷道变形原理

王坡煤矿 3 号主采煤层埋深为 500~700 m,发育有断层及陷落柱构造。工作面最高标高为+501 m,采用长壁放顶煤开采工艺,但由于采空区顶板没有及时垮落,回柱后形成空顶区域。同时受工作面采动影响,运输巷顶板下沉明显,两帮变形,底鼓严重,鼓起最高处距瓦斯管路不足 1.0 m,影响行人及车辆正常通行,巷道存在严重安全隐患。如图 1 巷道变形原理所示,在垂直剖面上,岩层较完整的块体 1 与未断裂块体 2 构成了悬臂结构,在煤柱处形成较大弯矩。在侧向支承压压力作用下,横向裂隙闭合,顶板下沉,支承压压力向工作面传递。此时,纵向裂隙开裂扩展,横向上形成扩容效应,围岩自软弱底板挤出,巷道出现“底鼓”现象。强采动应力同时使运输巷道矿压显现,巷道维护困难。

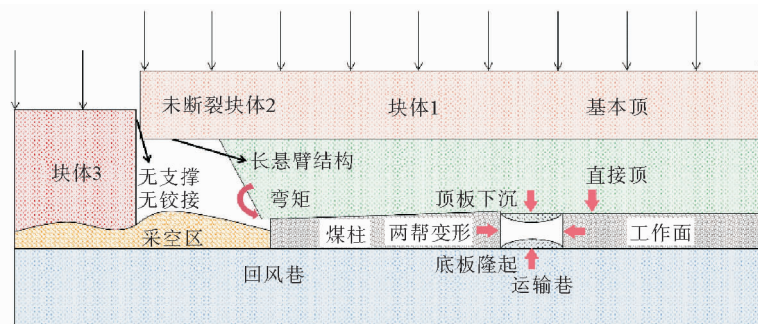


图 1 切顶前巷道变形原理

Fig. 1 Principle of roadway deformation before roof cutting

### 1.2 切顶卸压机理

由于端头悬顶处于3号煤层上方基本顶范围内,采用切顶卸压方式使顶板及时垮落。切缝需贯穿直接顶和基本顶的完整坚硬岩层,考虑采用深孔爆破技术。同时,鉴于聚能爆破可定向引导裂隙扩展,减少装药量,提高爆破效率。因此,本研究采用深孔聚能预裂爆破技术进行切顶卸压。

基于巷道变形特征及原理分析,深孔聚能预裂爆破可使顶板相邻炮孔间形成定向贯通裂隙<sup>[14]</sup>。如图2机理图所示,块体1、2沿预裂切顶面断开,同时通过钻孔角度控制切缝倾角,消除块体1、2之间的铰接作用,降低荷载传导。此时,顶板垮落在采空区,煤柱侧向支承压力减小,大幅降低纵向压缩和横向扩容,减轻了运输巷道的矿压显现程度。

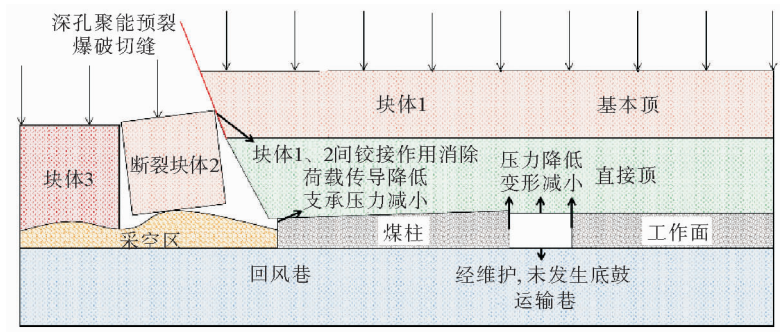


图2 切顶卸压围岩控制技术机理

Fig. 2 Principle of surrounding rock control by the roof cutting and pressure relief technique

## 2 聚能爆破切顶卸压方案

### 2.1 切顶高度

依据王坡煤矿的3号主采煤层顶板实际揭露岩性,确定钻孔切缝设计参数如图3所示。钻孔位置距煤柱侧巷帮为1.5 m,钻孔与垂直方向的夹角为15°,与巷道轴向夹角为90°。

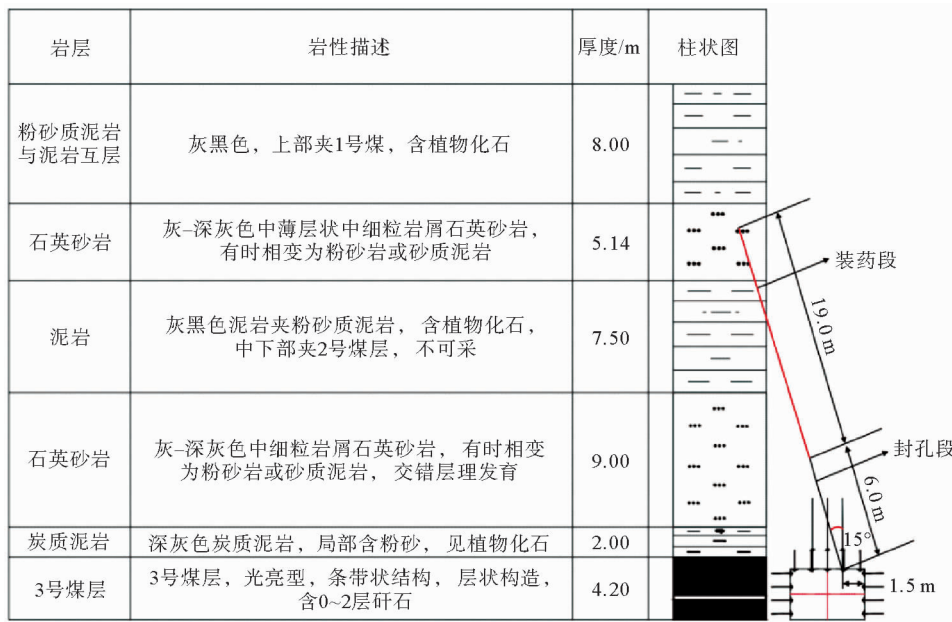


图3 顶板岩层及钻孔切缝设计图

Fig. 3 Rock layers of roof and design of drilling holes and cutting seams

结合地质条件,工作面切顶高度计算公式为:

$$H = \frac{M}{K_p - 1} \quad (1)$$

其中: $M$ 为煤层厚度,取4.20 m; $K_p$ 为顶板岩层碎胀系数,通常取1.25~1.35; $H$ 为切顶高度,m。由式(1)可得切顶高度为12.0~16.8 m。而切缝需贯穿至煤层上方第4层5.14 m厚的石英砂岩层(见图3),加上下部的2 m炭质泥岩、9 m石英砂岩及7.5 m粉砂质泥岩,总切顶高度 $H$ 确定为23.64 m。

## 2.2 钻孔深度

钻孔深度可根据切顶高度和钻孔方位角计算,如式(2)所示。

$$L = \frac{H}{\cos\theta \cdot \sin\delta} \quad (2)$$

其中: $L$ 为钻孔深度,m; $\theta$ 为钻孔与竖直方向夹角,取 $15^\circ$ ; $\delta$ 为钻孔与巷道轴向夹角,取 $90^\circ$ 。由式(2)可得 $L$ 为24.473 m。为使顶板完全垮落采空区,本方案确定钻孔深度为25 m。选用直径为58 mm的钻头及履带式全液压坑道钻机,炮孔直径确定为60 mm。

## 2.3 炮孔间距

钻孔间距受炮孔半径、压碎圈及裂隙圈半径的影响。在不耦合装药情况下,压碎圈和裂隙圈半径<sup>[15]</sup>由式(3)~(6)求得:

$$R_c = \left( \frac{\rho_0 D_v^2 B}{8 \sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r, \quad (3)$$

$$R_p = \left( \frac{\sigma_R B}{\sqrt{2} \sigma_t} \right)^{\frac{1}{\beta}} R_c = \left( \frac{\sigma_R B}{\sqrt{2} \sigma_t} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left( \frac{\rho_0 D_v^2 B}{8 \sqrt{2} \sigma_c} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r, \quad (4)$$

$$B = [(1+b)^2 - 2\mu_d(1-b)^2(1-\mu_d) + (1+b)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$\alpha = 2 + \frac{\mu_d}{1-\mu_d}. \quad (6)$$

其中: $R_c$ 、 $R_p$ 分别为压碎圈、裂隙圈半径,m; $\rho_0$ 为炸药密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $D_v$ 为炸药爆速, $\text{m}/\text{s}$ ; $\sigma_{cd}$ 为岩石的动态抗压强度,MPa; $r$ 为炮孔半径,m; $\sigma_R$ 、 $\sigma_t$ 和 $\sigma_c$ 分别为两区域间的径向应力、岩石的动态抗拉强度和抗压强度,MPa; $\alpha$ 为压碎区中冲击波的衰减系数; $\beta$ 为应力波载荷传播衰减指数; $\mu_d$ 为岩石动态泊松比; $b$ 为切向应力系数。

本方案采用乳化炸药进行爆破,炸药密度为 $1\,120\text{ kg}/\text{m}^3$ ,爆速为 $4\,400\text{ m}/\text{s}$ 。根据煤矿岩石物理性能,计算求得压碎圈和裂隙圈半径分别为0.21和1.12 m。炮孔单排布置,采用双向聚能爆破,钻孔间距为 $2 \times 1.12 = 2.24\text{ m}$ ,现场选取2 m作为炮孔间距。

根据爆破试验,导向孔可引导裂隙扩展,提高爆破效率。因此,在2 m的炮孔间距中,增设1个不装药导向孔,形成1 m间隔布置的形式。其中,切缝总长为320 m(85#至91#回采点为构造段,共60 m,未爆破),实际装药的爆破孔共79个,导向孔共35个。与钻孔全装药方案相比,导向孔间隔爆破方案能够节省大量的爆破器材,大幅提高作业效率。

## 2.4 装药方案

装药时,采用带有双向聚能槽的聚氯乙烯聚能管,如图4所示。该聚能管外径50 mm,内径45 mm,长度2 m。现场选用三级煤矿许用胶状乳化炸药,直径35 mm,药卷长270 mm,药卷重量0.2 kg。采用不耦合间隔装药,单孔装入药卷50个,装药段长度为19.0 m。采用双雷管、单导爆索引爆,炮孔间采用串联方式连接爆破网路。

## 3 切顶卸压数值模拟

### 3.1 模型尺寸及网格划分

采用FLAC<sup>3D</sup>软件进行数值模拟,考虑模型边界效应,确定模型的长×宽×高为 $160\text{ m} \times 150\text{ m} \times 69.16\text{ m}$ 。

依据切顶卸压方案,钻孔切顶面距煤柱侧巷帮 1.5 m,向采空区方向倾斜 25.0 m,与垂直面夹角 15°。两条巷道的长×高均为 5 m×4 m,煤柱的长×高为 35 m×4.2 m。共划分网格 408 905 个,两条巷道、煤柱及切顶区域网格适当加密,靠近模型边界网格尺寸逐渐增大。数值模型如图 5 所示。

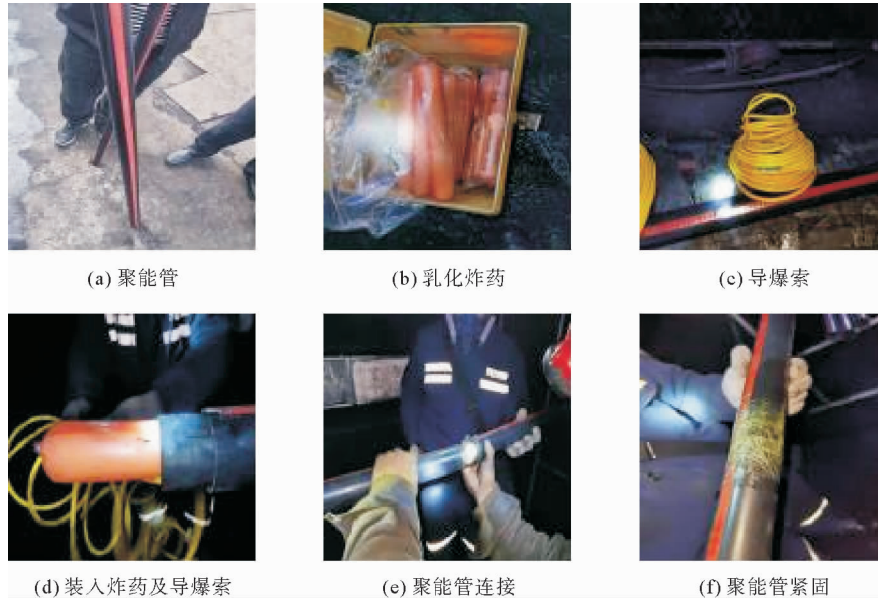


图 4 聚能装药方案

Fig. 4 Program of shaped charge

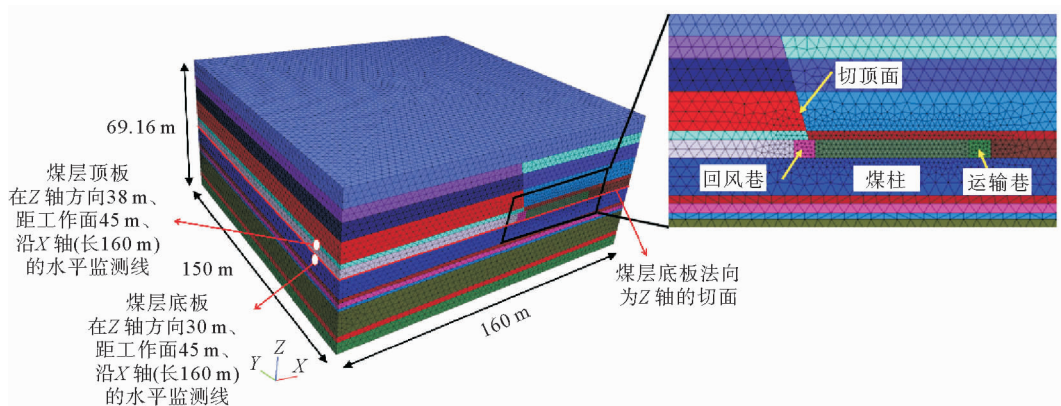


图 5 三维数值计算模型

Fig. 5 Three-dimensional numerical calculation model

### 3.2 边界条件及材料参数

模拟按照平均埋深 600 m 计算,模型顶面施加 15 MPa 的垂直压力,底面固定 Z 轴方向位移,左右两面固定 X 轴方向位移,前后两面固定 Y 轴方向位移。为模拟岩层间的离层及错动,岩层间设置层理面,层理面切向和法向刚度均设为 2.0 GPa;切顶面两侧岩层间设置接触面,切向和法向刚度均设为 2.0 GPa。自模型底部至顶部共划分 13 个岩层,均采用“摩尔-库伦”模型,各岩层厚度及力学参数如表 1 所示。

### 3.3 模拟结果分析

#### 3.3.1 煤层底板垂直应力对比

截取煤层底板法向为 Z 轴的切面(见图 5),导出图 6 所示煤层底板垂直应力分布云图。切顶前煤层底板处垂直应力分布如图 6(a)所示,在靠近回风巷道转角处出现应力集中,与实际生产中端头位置矿压显现

相一致。煤柱沿煤层倾向方向受到采动应力的影响,垂直应力普遍达到 20 MPa 以上,为应力增高区。该区域在滞后工作面的位置扩展到整个煤柱范围,加上围岩高应力状态下随时间的蠕变效应,造成运输巷道在采动后矿压显现强烈。而采取切顶措施后,煤层底板垂直应力分布如图 6(b)所示,煤柱内垂直应力增高区范围及峰值均减小,工作面端头与巷道交叉处的应力叠加现象减弱。对比分析发现,预裂切顶措施可显著减小煤柱应力,并减弱应力叠加。

表 1 岩层厚度及力学参数

Table1 Rock thickness and mechanical parameters

序号	岩性	厚度 /m	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	抗拉强度 /MPa	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1	泥岩	5.50	3.95	4.02	3.08	33	2.0	2 600
2	灰岩	2.62	3.70	3.51	3.41	34	2.3	2 650
3	粉砂岩-粉砂质泥岩-泥岩	11.33	10.50	2.25	1.60	32	1.0	2 200
4	石灰岩	1.40	3.70	3.51	3.40	34	2.3	2 650
5	泥岩	2.17	3.95	4.02	3.08	33	2.0	2 600
6	石英砂岩	1.80	3.29	3.11	3.71	35	2.6	2 600
7	泥-粉砂岩	8.50	10.50	2.25	1.60	32	1.0	2 200
8	3 号煤	4.20	1.22	0.41	1.18	27	0.6	1 400
9	碳质泥岩	2.00	3.95	4.02	3.39	33	2.2	2 600
10	石英砂岩	9.00	3.29	3.11	3.71	35	2.6	2 600
11	泥岩	7.50	3.95	4.02	3.08	33	2.0	2 600
12	石英砂岩	5.14	3.29	3.11	3.71	35	2.6	2 600
13	粉砂质泥岩与泥岩互层	8.00	10.50	2.25	1.60	32	1.0	2 200

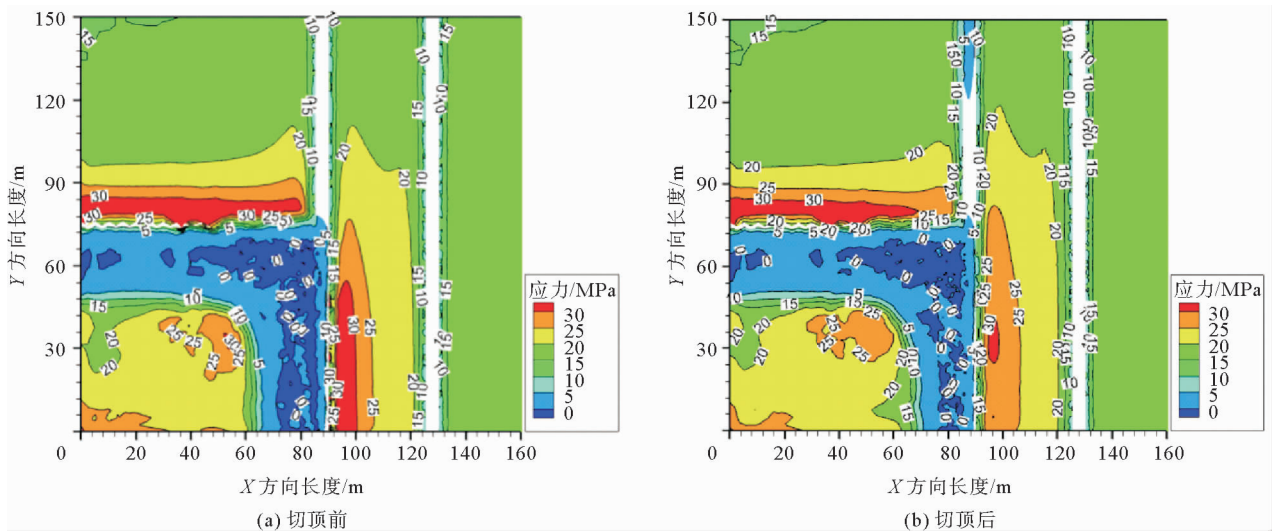


图 6 煤层底板垂直应力分布

Fig. 6 Vertical stress distribution on coal seam floor

3.3.2 侧向支承压力对比

在煤层底板(Z 轴方向长度为 30 m)和煤层顶板(Z 轴方向长度为 38 m)的水平面内,沿煤层倾向分别设置距工作面 45 m、长度为 160 m 的水平监测线(见图 5),垂直应力分布曲线如图 7 所示。在煤柱区域,垂直应力分布均呈现“左高右低”的单峰值特征;在底板岩层中,煤柱左侧切顶前后的垂直应力峰值分别为 30 和 24 MPa,减幅为 20%。在顶板岩层中,煤柱左侧垂直应力峰值分别为 37 和 29 MPa,减幅为 21.62%。巷

道两帮垂直应力逐渐升高,呈现“左高右低”的特点,这是采动应力作用下煤柱应力集中与巷道开挖引起的应力重分布叠加导致。可见预裂切顶措施可明显降低煤柱及邻近巷道围岩应力水平。

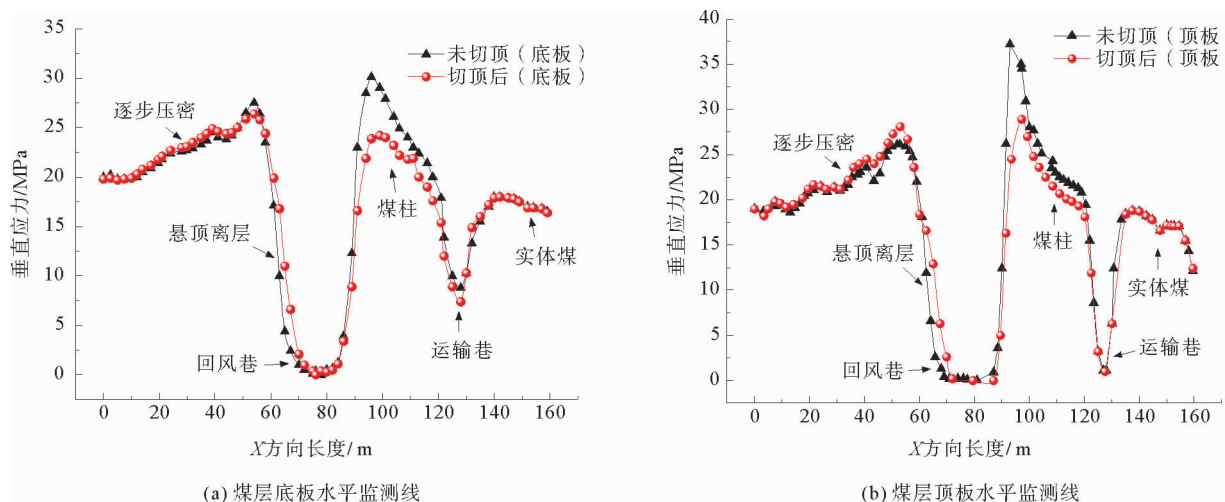


图 7 切顶前后水平监测线垂直应力分布

Fig. 7 Vertical stress distribution on horizontal monitoring line before and after roof cutting

## 4 现场试验及卸压效果分析

### 4.1 钻孔窥视结果分析

在爆破施工后,采用钻孔成像仪对导向孔进行探测,截取 100# 导向孔的 11.8~12.5 m 段及 21.3~22.0 m 段。如图 8 所示,孔壁存在两条轴向延伸的平行裂隙,说明实施聚能爆破切顶后,孔内轴向贯穿裂缝明显,能够在顶板岩层中形成切顶面,实现采空区顶板及时垮落。

爆破后,施工人员发现导向孔内冒出少量青烟且出现“哨声”,分析其原因为爆破孔内的炮烟由贯通裂隙进入导向孔,从而冒出青烟,同时气流经过狭小裂隙出现“哨声”。通过钻孔窥视及现场观察分析,进一步验证了切顶卸压方案的有效性。

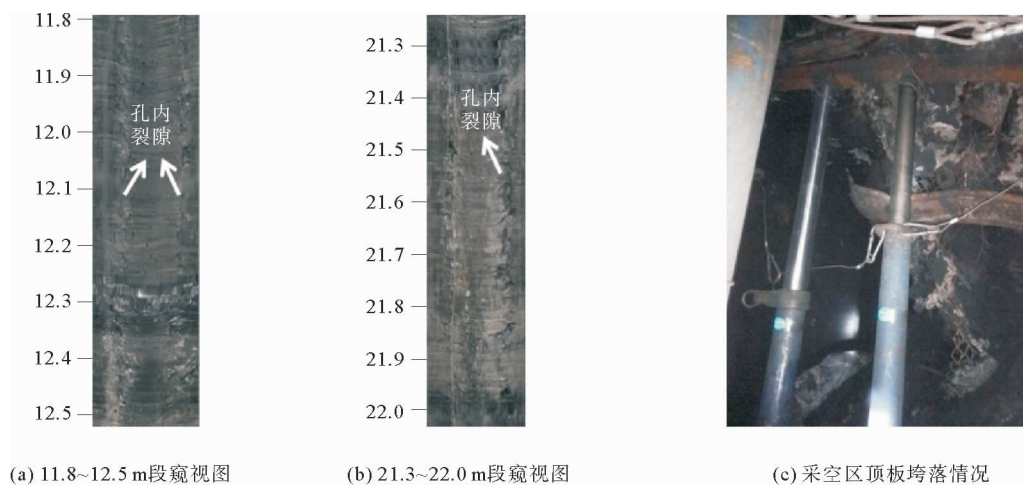


图 8 钻孔及采空区顶板探测

Fig. 8 Exploration of drilled holes and roof in the goaf

### 4.2 巷道表面位移分析

试验选取运输巷道上切顶前后的两个表面位移监测站,监测起止时间为 2022 年 7 月至 10 月,测点布置

采用十字布点法<sup>[16]</sup>,分别采用钢卷尺测量两帮及顶底板移近量。如图 9 对比结果所示,随着工作面的推进,巷道两帮及顶底板变形曲线表现为初始快速增长,之后累计变形增速逐步变缓,最后切顶前后巷道累计变形均呈现渐近稳定的趋势。其中,顶底板累计位移量最大,经现场勘查,主要以底鼓为主。预裂切顶后累计位移量减幅最大可达到 59.27%,说明实施深孔聚能爆破切顶后,巷道两帮及顶底板移近变形可得到有效控制。

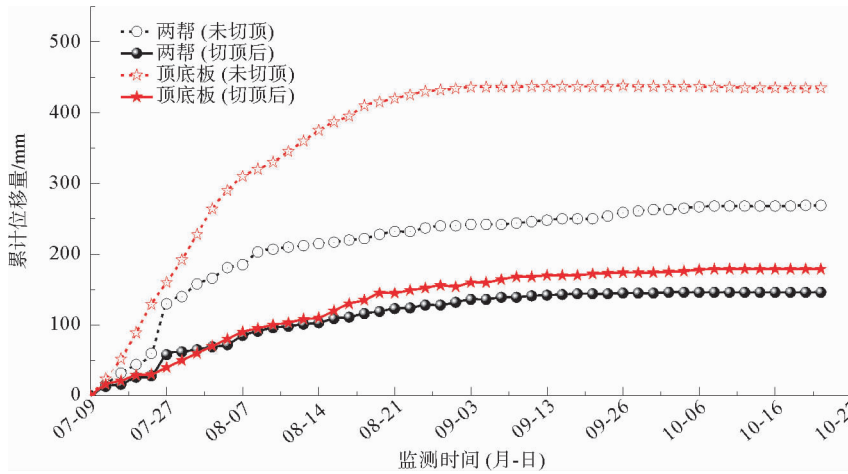


图 9 切顶前后巷道累计位移对比

Fig. 9 Comparison of cumulative displacement of the roadway before and after roof cutting

### 4.3 垂直应力增量分析

试验选取运输巷道上切顶前后的两个垂直应力监测站,每 2 m 布置一个钻孔应力计测点,安装深度 2~14 m 共 7 个。将垂直应力相对于初始应力的增量按照监测时间绘图,监测起止时间为 2022 年 7 月至 10 月。如图 10 切顶前后煤柱垂直应力增量对比所示:随着工作面的推进,未切顶区垂直应力增量呈初始剧烈增大,之后趋于平缓的趋势。当工作面距监测站 12 m 时,垂直应力增量最大,说明距工作面越近,对煤柱的应力扰动越大。而在钻孔 6 和 10 m 深度时,切顶前后垂直应力增量的减幅最为明显,其他深度处均有下降。说明预裂爆破切顶技术可显著降低煤柱垂直应力变化,减小应力扰动。

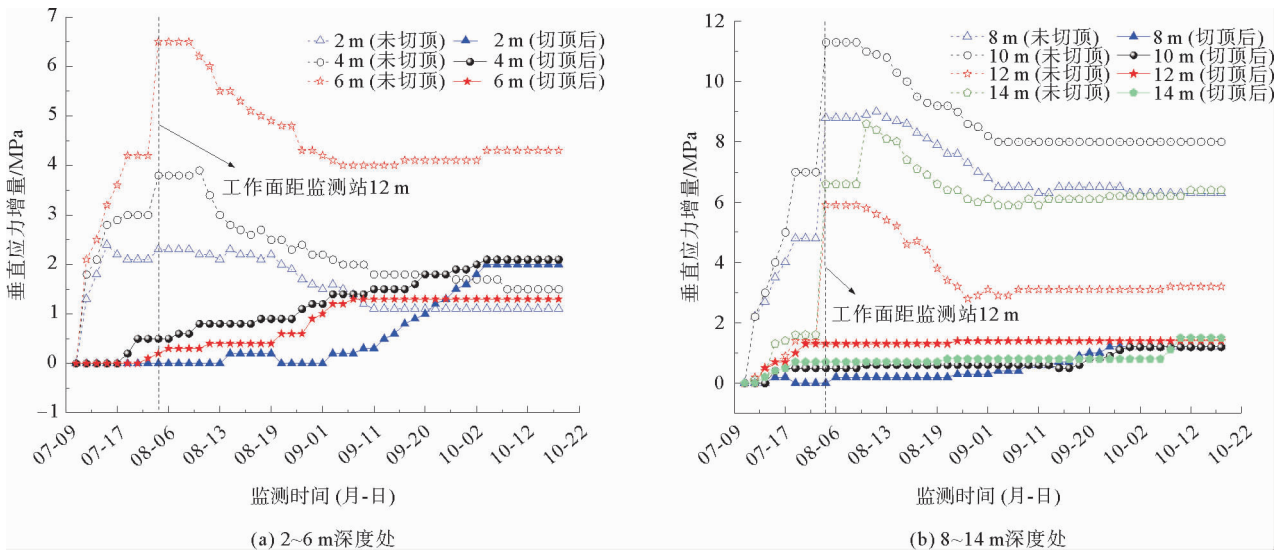


图 10 切顶前后煤柱垂直应力增量对比

Fig. 10 Comparison of vertical stress increment of coal pillar before and after roof cutting



## 5 结论

以山西省王坡煤矿为工程背景,提出深孔聚能预裂爆破切顶卸压方案,采用数值模拟及现场试验分析卸压效果,主要结论如下。

1) 煤柱区域垂直应力呈现“左高右低”的单峰值分布,煤层顶板在切顶后垂直应力峰值减幅为 21.62%,预裂切顶措施可明显降低煤柱及邻近巷道围岩应力水平。

2) 通过钻孔窥视、巷道变形和应力变化监测分析可知,炮孔内轴向贯穿裂缝明显,可使采空区顶板及时垮落。顶底板在切顶后累计位移量减幅达 59.27%,巷道两帮及顶底板移近变形得到有效控制,煤柱垂直应力增量显著降低。

3) 现场试验及监测结果表明,采取 1 m 间隔布置导向孔的深孔聚能预裂爆破切顶方案,卸压效果显著,证明了切顶高度、钻孔间距等参数的合理性,可大幅提高作业效率。

## 参考文献:

- [1] 魏明尧,张守文. 动力灾害过程中锚杆支护的极限承载能力数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):37-45.  
WEI Mingyao,ZHANG Shouwen. Simulation study of maximum bolt supporting capacity during dynamic disaster[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(4):37-45.
- [2] 高玉兵,王琦,杨军,等. 特厚煤层综放开采邻空动压巷道围岩变形机理及卸压控制[J]. 煤炭科学技术,2023,51(2):83-94.  
GAO Yubing,WANG Qi,YANG Jun,et al. Mechanism of deformation and pressure relief control of dynamic gob-side entry surroundings in fully-mechanized caving mining for extra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology,2023,51(2):83-94.
- [3] 朱影,张宜海,蒋绍军. 采动巷道围岩非均匀变形特征及稳定性控制技术研究[J]. 煤炭工程,2022,54(4):39-44.  
ZHU Ying,ZHANG Yihai,JIANG Shaojun. Non-uniform deformation characteristics and stability control of mining roadway surrounding rock[J]. Coal Engineering,2022,54(4):39-44.
- [4] 张荣俊,吴文达. 多方位立体化水力压裂切顶技术研究与应[J]. 煤炭技术,2022,41(7):138-142.  
ZHANG Rongjun,WU Wenda. Research and application on multi-dimensional and stereoscopic technology of hard roof hydraulic fracturing[J]. Coal Technology,2022,41(7):138-142.
- [5] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(12):2954-2970.  
HUANG Bingxiang,ZHAO Xinglong,CHEN Shuliang,et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(12):2954-2970.
- [6] 王帅,赵国贞,刘超. 坚硬顶板下近距离煤层群切顶卸压技术研究[J]. 煤炭工程,2022,54(9):75-80.  
WANG Shuai,ZHAO Guozhen,LIU Chao. Roof cutting technology for pressure relief and hanging roof caving in contiguous coal seams under hard roof[J]. Coal Engineering,2022,54(9):75-80.
- [7] 孙珍平. 切顶卸压预裂技术在特厚煤层综放工作面的应用[J]. 煤矿安全,2020,51(8):169-173.  
SUN Zhenping. Application of cutting roof pressure relief pre-fracturing technology in fully mechanized caving face in extra thick coal seam[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(8):169-173.
- [8] 苏超,弓培林,康红普,等. 深井临空高应力巷道切顶卸压机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(6):1104-1113.  
SU Chao,GONG Peilin,KANG Hongpu,et al. Mechanism of roof cutting and pressure relief in gob-side and high-stress roadway in deep coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(6):1104-1113.
- [9] 王涛,由爽,裴峰,等. 坚硬顶板条件下临空煤柱失稳机制与防治技术[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(1):54-59.  
WANG Tao,YOU Shuang,PEI Feng,et al. Instability mechanism and control technology of coal pillar bumps under hard roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(1):54-59.
- [10] 吴学松,曹安业,买巧利,等. 倾斜煤层含矸煤柱区应力状态及防冲技术研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(2):44-52.

- WU Xuesong, CAO Anye, MAI Qiaoli, et al. Research on stress state and rock burst prevention technology in gangue-bearing pillar area of inclined coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(2): 44-52.
- [11] 王福奇, 李治祥, 吴军, 等. 大采高工作面端头静态胀裂切顶技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 95-99.  
WANG Fuqi, LI Zhixiang, WU Jun, et al. Study on static expansion and roof cutting technology at end of large mining height working face[J]. Coal Technology, 2023, 42(8): 95-99.
- [12] 张军辉, 刘洪林, 管伟明. 急倾斜坚硬顶板工作面超深孔预裂爆破技术研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 60-63.  
ZHANG Junhui, LIU Honglin, GUAN Weiming. Research on super-deep hole pre-splitting blasting technology in steep working face with hard roof[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 60-63.
- [13] 薛成春, 曹安业, 郭文豪, 等. 深部大倾角厚煤层开采能量演化规律与冲击地压发生机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 876-885.  
XUE Chengchun, CAO Anye, GUO Wenhao, et al. Energy evolution law and rock burst mechanism of deep thick seams with large inclination[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 876-885.
- [14] 郭德勇, 赵杰超, 朱同功, 等. 双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1613-1623.  
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHU Tonggong, et al. Crack propagation and coalescence mechanism of double-hole cumulative blasting in coal seam[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1613-1623.
- [15] 刘小伟, 刁鹏飞, 周蒙, 等. 研山铁矿阶梯孔边坡控制爆破参数研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(11): 77-79.  
LIU Xiaowei, DIAO Pengfei, ZHOU Meng, et al. Study on the parameters of controlled blasting for stepped-hole slopes in the Yanshan iron ore mine[J]. Modern Mining, 2021, 37(11): 77-79.
- [16] 郝登云, 崔千里, 何杰, 等. 锚杆锚索支护巷道层状顶板变形特征及离层监测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增1): 43-50.  
HAO Dengyun, CUI Qianli, HE Jie, et al. Deformation characteristics and separation monitoring of layered roof roadway supported with bolts and cables[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 43-50.

(责任编辑: 吕海亮)