

刘金海,孙浩,田昭军,等.巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的力学机制[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):14-20.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.003

Liu J H, Sun H, Tian Z J, et al. Mechanical Mechanism of Floor Bursting Instability Induced by Deep-hole Destressing in the Roadways [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 14-20. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.003

# 巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的力学机制

刘金海<sup>1\*</sup>, 孙浩<sup>1</sup>, 田昭军<sup>2</sup>, 王永<sup>2</sup>, 高林生<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院 安全工程学院, 北京 065201; 2. 山东省郓城煤矿, 山东 菏泽 274918)

**摘要:**为揭示巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的力学机制,分析了巷帮深孔卸压前后底板力学模型及其差异.结果表明,巷帮深孔卸压解除了卸压区域内巷帮煤体对底板煤体的约束作用,导致底板力学模型由“柱”变为“长柱”或大柔度压杆,失稳临界应力降低;通过提前对巷道底板进行破断,主动改变巷道底板的力学模型,可提高其失稳临界应力,进而有效防治巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳.研究结果为岩体冲击失稳防治提供了理论基础.

**关键词:**冲击失稳;深孔卸压;大柔度压杆;临界应力

**中图分类号:**TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)01-0014-07

## Mechanical Mechanism of Floor Bursting Instability Induced by Deep-hole Destressing in the Roadways

Liu Jinhai<sup>1</sup>, Sun Hao<sup>1</sup>, Tian Zhaojun<sup>2</sup>, Wang Yong<sup>2</sup>, Gao Linsheng<sup>1</sup>

(1. College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 065201, China;

2. Shandong Yuncheng Coal Mine, Heze 274918, China)

**Abstract:** In order to study mechanical mechanism of floor bursting instability induced by deep-hole destressing in the roadway, the change of roadway floor model before and after deep-hole destressing in roadways was analyzed. The results show that the roadway coal in the destressing area has no constraint on the floor coal after deep-hole destressing in roadways, then the mechanics model of roadway floor is changed into a long column or a compressive bar with large flexibility from a column as the critical stress of roadway floor decreases. Breaking the roadway floor in advance can change its mechanical model and improve its critical stress. Then the floor bursting instability induced by deep-hole destressing in the roadway is avoided. The result provides a certain theoretical basis for the prevention of rock bursting instability.

**Keywords:** bursting instability; deep-hole destressing; compressive bar with large flexibility; critical stress

冲击失稳是我国深部开采矿井面临的最为典型的煤岩破坏模式之一<sup>[1-3]</sup>,随着开采深度的不断增加,这种破坏模式越来越突出.围绕煤岩冲击失稳机制,我国学者开展了大量的研究工作,获得了一些有益的

收稿日期:2017-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874113;51604115);安全生产重大事故防治关键技术科技项目(shandong-0002-2016AQ)

\*通信作者,Email:jh\_liu1982@163.com

认识<sup>[4-10]</sup>.但这些认识仅仅从冲击失稳发生的某一条件或基于某一种诱发因素分析其机制,具有一定的局限性.巷帮深孔卸压是指通过在巷帮施工长钻孔或布置在其中的炸药爆炸产生的冲击波与高压气体弱化巷帮煤体,从而实现对巷帮煤体的卸压作用.实践表明,巷帮深孔卸压能够有效防止巷帮冲击失稳,但也可能导致巷道底板结构改变,进而诱发底板冲击失稳.本文以某矿掘进巷道帮部深孔爆破诱发底板冲击失稳为背景,讨论巷帮深孔卸压前后底板力学模型及其差异,并引入压杆模型分析巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的力学机制.

## 1 工程背景

某矿回风上山位于水平大巷北侧,西邻回风立井,东邻倾角 $60^\circ$ ,落差4 m的断层,南侧为大巷保护煤柱,平均埋深497.4 m,设计长度为120 m,断面为直墙半圆拱,宽5.5 m,高3.7 m,采用锚网索+钢棚支护方式.该巷道位于厚度为8 m的煤层中,其下部、上部煤体厚度分别为1.5,2.8 m.煤层单轴抗压强度为18 MPa,弹性模量为3.0 GPa,具有弱冲击倾向.巷道掘进过程中对两帮实施深孔爆破卸压,孔深20 m,孔间距5 m,单孔装药量为10 kg.测试显示该区域最大水平主应力为17 MPa,方向与断层延伸方向垂直.该巷道掘进至联络巷北侧85 m时发生底板冲击失稳(见图1),造成6人死亡,65 m巷道受损,大量U型钢棚变形、破坏(见图2),迎头后方35 m处断面高度仅剩1.2 m,宽度仅剩0.8 m.

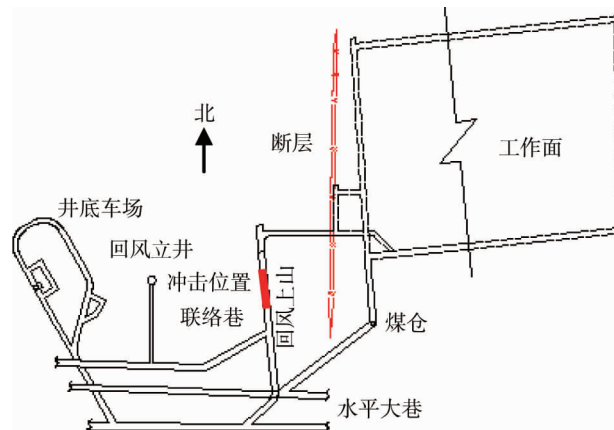


图1 工作面平面图及冲击位置

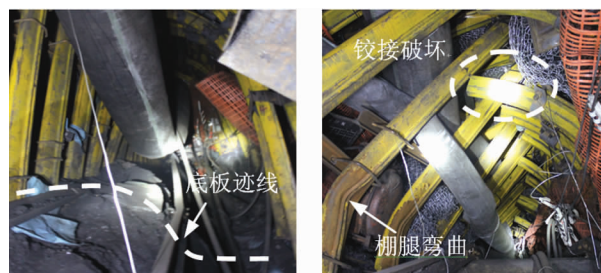


图2 冲击失稳现场照片

## 2 巷帮深孔卸压范围及其防冲机理

### 2.1 巷帮深孔卸压防冲机理

巷帮钻孔与深孔爆破都能起到深孔卸压作用.对于深孔爆破,炸药爆炸能量作用于钻孔周围岩体,导致近孔区域岩体被压碎,远孔区域岩体出现径向裂隙和环向裂隙,外部区域岩体质点震动,由近及远依次形成压碎区、破裂区和震动区,如图3a所示.岩体碎裂后,其力学参数弱化,积聚应变能的能力降低.对于钻孔,一方面能

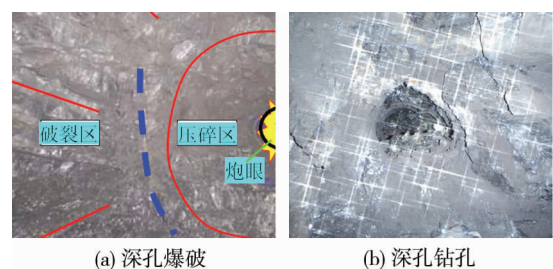


图3 巷帮深孔卸压形式

够耗散高应力岩体中的弹性应变能,另一方面能够为受载岩体提供内部变形空间,如图3b所示.高应力岩体弹性应变能的释放或受载岩体内部变形后,岩体力学参数也会被弱化.

由煤体冲击失稳的能量机理“冲击倾向性煤体在低储能极限条件下具有较高的储能水平”可知,巷帮深孔卸压防冲机理主要体现在:(1)弱化煤体冲击倾向.卸压后,煤体由完整岩体变为裂隙岩体,其弹性模量与脆性降低,塑性增大,冲击倾向被弱化,发生冲击失稳的可能性减少.(2)提高煤体储能极限.煤体储能极限是指煤体积聚弹性变形能的能力.煤体储能极限越大,越不易受到能量驱动而破坏失稳<sup>[11]</sup>.煤体储能极限与峰值应力对应的应变相关,与煤体塑性呈正相关关系,塑性越大,其储能极限越大.完整煤体变为裂隙煤体,其塑性增大,储能极限升高.(3)降低煤体储能水平.煤体储能水平是指煤体积聚的弹性应变能,即指煤体的应变能状态.煤体储能水平越高,越易发生冲击失稳.煤体碎裂后,弹性应变能得到释放,储能水平降低.

## 2.2 巷帮深孔卸压范围

巷帮深孔爆破卸压范围是指巷帮深孔装药爆炸作用下煤体碎裂区尺寸,它是评价巷帮深孔爆破卸压防冲效果的依据.某矿曾试验观测巷帮深孔爆破卸压范围,试验条件:煤层厚8 m,巷高3 m,巷道底板煤体厚2 m;钻孔深10 m,孔间距9 m;装药长度约5 m,封孔长度约5 m;钻孔直径分别为42,75 mm;相应药卷直径分别为32,65 mm.观测巷帮深孔爆破卸压范围如图4所示.从图中可以看出,采用直径为32,65 mm的药卷进行深孔爆破时,钻孔周边裂隙圈直径分别为2.2,2.7 m,裂隙向孔底延伸长度分别为0.8,1.0 m,向孔口延伸长度分别为1.7,2.3 m.可见,巷帮深孔爆破促使巷帮中部形成一个较大破裂区,造成该区域煤体冲击倾向弱化,储能水平降低,储能极限升高,发生冲击失稳的可能性降低;巷帮煤体碎裂后,其对底板煤体的约束作用消失,导致巷道有效宽度和底板煤体暴露长度增大,从而改变底板煤体力学模型.巷帮钻孔也能够起到类似于巷帮深孔爆破的卸压作用<sup>[12]</sup>.对于在积聚弹性应变能的巷帮煤体中施工钻孔或钻孔后巷帮煤体受载变形,其沿钻孔轴向的卸压范围约等于钻孔深度.

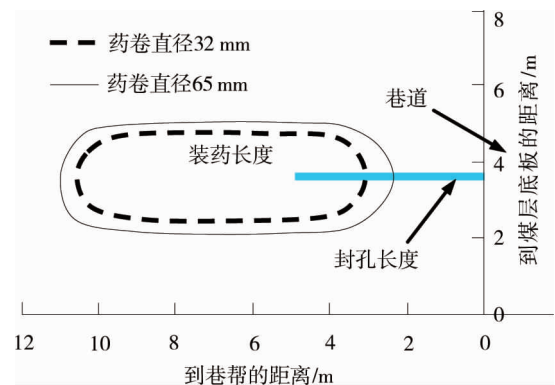


图4 巷帮深孔爆破卸压范围

可见,巷帮深孔爆破促使巷帮中部形成一个较大破裂区,造成该区域煤体冲击倾向弱化,储能水平降低,储能极限升高,发生冲击失稳的可能性降低;巷帮煤体碎裂后,其对底板煤体的约束作用消失,导致巷道有效宽度和底板煤体暴露长度增大,从而改变底板煤体力学模型.巷帮钻孔也能够起到类似于巷帮深孔爆破的卸压作用<sup>[12]</sup>.对于在积聚弹性应变能的巷帮煤体中施工钻孔或钻孔后巷帮煤体受载变形,其沿钻孔轴向的卸压范围约等于钻孔深度.

## 3 巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的机制

### 3.1 巷道底板力学模型及失稳条件

巷帮深孔卸压前,巷道底板暴露长度较小,约等于巷道宽度 $a$ ,此时底板力学模型可视为水平方向上受压的“柱”(见图5);巷帮深孔卸压后,巷道底板暴露长度增大,其长度取 $2l+a$ (其中 $l$ 为巷帮深孔卸压造成的破裂区沿钻孔轴向的长度,等于钻孔长度 $l_1$ 与裂隙孔底延伸长度 $l_2$ 之和),此时底板力学模型可视为水平方向上受压的“长柱”,甚至是“杆”.

将此时巷道底板受载视为平面应变问题,其破坏失稳可视为岩石试件单轴压缩破坏问题.根据国际岩石力学学会(ISRM)建议的岩石单轴抗压强度试验方法,实际岩石单轴抗压强度 $\sigma_c$ 与测试试件的尺寸存在以下关系<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_c' = \sigma_c(0.778 + 0.222D/L). \quad (1)$$

式中: $\sigma_c'$ 为试验测定的岩石单轴抗压强度; $D$ 为圆柱形试件直径; $L$ 为试件高度.对于图5所示的巷道底板煤体,有 $L=2l+a$ , $D \approx h$ (巷道底板煤体厚度).

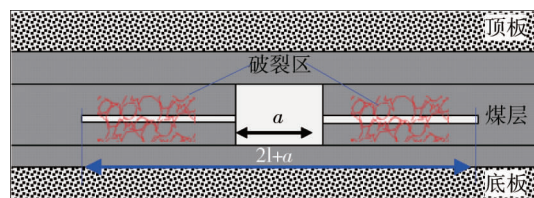


图5 巷帮深孔卸压底板力学模型

由式(1)可知:巷道底板破坏失稳可能性与其“长厚比”正相关,即“长厚比”越大,其破坏时的水平应力值越小,且小于巷道底板煤体的单轴抗压强度,当“长厚比”趋于 $\infty$ 时,“长柱”变为“杆”,得到其破坏时的最小水平应力为 $0.778\sigma_c$ 。可见,巷道底板煤体由水平方向受压的“柱”变为“长柱”或“杆”时,其破坏失稳可能性增大。

另外,当巷道底板煤体柔度 $\lambda$ 大于极限值 $\lambda'$ 时,其又可简化为大柔度压杆。对于大柔度压杆,随着水平压缩载荷 $\sigma_h$ 的增大,其逐渐挠曲而失稳,如图6所示,图中A、B点为挠曲线的拐点。大柔度压杆失稳的原因是稳定性不足,而非强度偏小。大柔度压杆失稳时的水平应力称为临界应力 $\sigma_k$ ,其计算公式<sup>[14]</sup>为



图6 大柔度压杆挠曲模型

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 i^2 E}{\mu^2 L^2} \quad (2)$$

式中: $i$ 为横截面惯性半径; $E$ 为材料弹性模量; $\mu$ 为长度因数,与压杆两端的约束条件有关。

将 $\lambda = \mu L / i$ 代入式(2),得

$$\sigma_k = \pi^2 E / \lambda^2 \quad (3)$$

由式(3)可知, $\lambda$ 越大, $\sigma_k$ 越小,大柔度压杆越易失稳。因此,柔度 $\lambda$ 能够集中反映压杆尺寸、形状等方面的因素对临界应力 $\sigma_k$ 的影响。

由大柔度压杆失稳理论可知<sup>[15]</sup>:(1)该类压杆失稳时,水平应力并不一定很大,甚至会低于材料的单轴抗压强度;(2)当 $\sigma_h < \sigma_k$ 时,压杆保持直线形状的平衡,即使受到侧向微小扰动也只能发生轻微弯曲,扰动消失后,其仍能恢复直线形状,此时压杆是稳定的;(3)当 $\sigma_h = \sigma_k$ 时,压杆处于稳定的临界状态,受到轻微扰动时,压杆将由直线形变为曲线形,发生失稳;(4)当 $\sigma_h > \sigma_k$ 时,压杆丧失其直线形平衡而过渡为曲线平衡,处于失稳状态,此时压杆挠曲变形显著增大,趋向破坏。可见,巷道底板煤层变为大柔度压杆时,其冲击失稳可能性增大。

### 3.2 力学模型适用性判别及临界应力计算

大柔度压杆模型是否适用于描述巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳机制,需判断巷道底板柔度是否满足 $\lambda > \lambda'$ ,其中 $\lambda'$ 的确定方法为

$$\lambda' = \pi \sqrt{E / \sigma_p} \quad (4)$$

式中: $\sigma_p$ 为巷道底板比例极限,即水平应力低于 $\sigma_p$ 时,巷道底板水平方向上压缩变形服从胡克定律,工程上可认为 $\sigma_p = k\sigma_c$ , $k$ 为小于1的系数。

而 $\lambda$ 可由式(5)确定:

$$\lambda = \mu L \sqrt{A / I} \quad (5)$$

式中: $A$ 为巷道底板横截面积; $I$ 为巷道底板横截面惯性矩,对于高度为 $h$ ,宽度为 $b$ 的矩形截面杆, $I = bh^3 / 12$ 。

由于巷道底板为层状岩体,水平压杆的横截面为矩形,其面积为 $A = bh$ 。将 $A = bh$ 代入式(5),得

$$\lambda = \sqrt{12} \mu L / h \quad (6)$$

对于工程背景描述的巷道,实施巷帮深孔爆破卸压后,巷道底板长度 $L = 2(l_1 + l_2) + a$ ,厚度 $h = 1.5$  m。根据试验结果,取 $l_2 = 1.0$  m。同时取 $l_1 = 20$  m, $a = 5.5$  m,则 $L = 47.5$  m。由于巷道底板两端没有被切断,可认为压杆的约束条件为两端固定。将 $E = 3.0$  GPa, $\sigma_c = 18$  MPa, $k = 0.8$ , $\mu = 0.5$ 及上述参数代入式(4)和式(6),可得 $\lambda' = 45.3$ , $\lambda = 54.8$ 。可见,该巷道实施巷帮深孔爆破卸压后,底板柔度 $\lambda$ 大于极限值 $\lambda'$ ,其力学模型可视为大柔度压杆。巷道底板力学模型由“柱”变为“杆”,其发生失稳的可能性增大。

将 $\lambda = 54.8$ , $E = 3.0$  GPa代入式(3),可得该巷道底板失稳临界应力 $\sigma_k = 9.8$  MPa。实测该区域最大水平主应力约17 MPa,超过了临界应力。因此,巷帮深孔爆破卸压后底板力学模型由“柱”变为大柔度压杆是其发生冲击失稳的主要原因。

### 3.3 数值模拟验证

为验证巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的机制,利用数值模拟软件 FLAC<sup>2D</sup>分析巷帮深孔卸压前后底板变形特征.建立的数值计算模型如图 7 所示,宽×高=85 m×48 m,两侧水平方向固定,底部垂直方向固定,顶部施加均布载荷 12.5 MPa,水平方向中部 25 m 范围内网格尺寸为 0.2 m×0.2 m,两侧 30 m 范围内网格尺寸为 1.0 m×0.2 m.材料本构模型采用 Mohr-Coulomb,顶板、煤层、底板的物理力学参数如表 1 所示.通过弱化巷帮钻孔周围煤层参数来模拟深孔卸压对巷帮煤层的影响,钻孔长度为 20 m,直径为 0.2 mm.

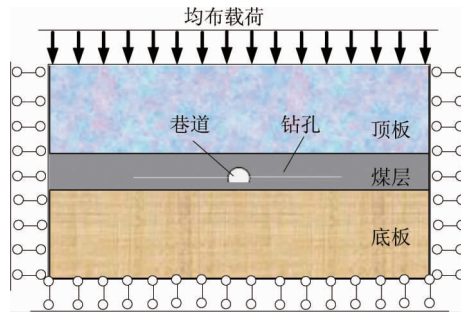


图 7 数值计算模型

表 1 顶板、煤层、底板的物理力学参数

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
顶板	8.0	6.0	2 500	6.0	48	6.0
煤层	6.0	4.0	1 400	2.0	40	2.0
底板	9.6	7.8	2 500	6.4	50	6.4

图 8 所示为巷帮深孔卸压前后巷道断面.根据观测,巷帮深孔卸压前底鼓量为 15 mm,卸压后底鼓量为 446~841 mm.可见,巷帮深孔卸压对底板变形有很大影响,一定程度上验证了巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的机制.

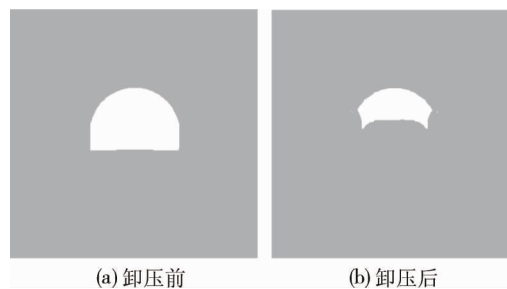


图 8 巷帮深孔卸压前后巷道断面

## 4 巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的防治

### 4.1 防治对策

巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳的力学机制在于,巷帮深孔卸压造成 2 帮大范围煤体失去对底板煤体的约束作用,导致巷道底板力学模型由“柱”变成大柔度压杆.因此,可通过改变底板力学模型等防治巷帮深孔卸压诱发的底板冲击失稳.

分析可知,将巷道底板力学模型由“杆”变为“柱”,其失稳可能性降低.因此,实施巷帮深孔卸压前,对巷道底板煤体进行破断,可提高其临界应力,从而防治巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳.断底原则是使临界应力  $\sigma_k$  大于水平应力  $\sigma_h$ .基于该原则,可由式(7)确定巷道底板极限长度:

$$\pi^2 E / \lambda^2 > \sigma_h. \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),可得

$$L < \frac{\pi h}{2\mu} \sqrt{\frac{E}{3\sigma_h}} \quad (8)$$

对于上述巷道,将  $h=1.5\text{ m}$ ,  $E=3.0\text{ GPa}$ ,  $\mu=0.5$ ,  $\sigma_h=17\text{ MPa}$  代入式(8),可得  $L<36\text{ m}$ .为提高断底防治冲击失稳的可靠性,通常对巷道底板实施2排钻孔进行断底,如图9所示.

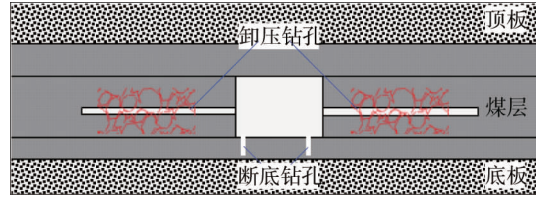


图9 断底钻孔布置

## 4.2 工程验证

山东某矿2303S工作面位于-950边界下山北侧,埋深为900~965 m,西侧为2302S采空区,回采煤层厚9.0 m,倾角 $4^\circ\sim 13^\circ$ ,具有弱冲击倾向,采用综放回采工艺.综合考虑采深、相变、采动等影响,圈定下平巷侧距当前采场105~155 m范围为易冲击失稳区(见图10),需对巷道2帮实施深孔卸压,钻孔直径为150 mm,间距为1.0 m,长度为25 m.经探测,该区域底板煤体厚1.2~2.5 m,巷道宽4.8 m.

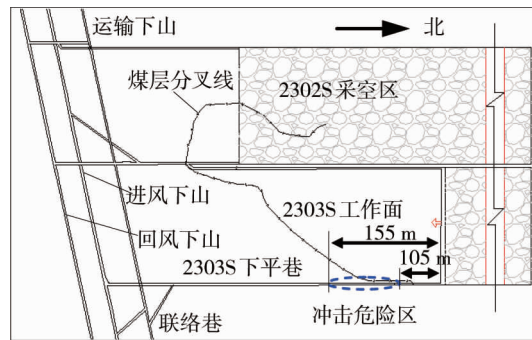


图10 2303S工作面平面图

通过取样和对煤样进行岩石力学测试,得到煤体单轴抗压强度为17.4 MPa,弹性模量为6.0 GPa,同时取  $L=54.8\text{ m}$ ,  $k=0.8$ ,  $\mu=0.5$ ,将上述参数带入式(4)和式(6),可得  $\lambda'=58.3$ ,  $\lambda=38.0\sim 79.4$ .可见,在该区域对两帮实施深孔卸压后,部分区段底板煤体柔度大于极限值  $\lambda'$ ,存在冲击失稳的可能.

为防治巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳,在实施巷帮深孔卸压措施前,对巷道底板施工断底钻孔,钻孔直径为89 mm,孔间距1.0 m,在两帮距底板0.2 m处以倾斜 $45^\circ$ 施工(见图11a),终孔落在巷道底板岩层,并及时安装直径为75 mm的套管,外漏20 mm,套管顶部加盖专用塑料盖,如图11b所示.采取上述措施后,2303S工作面安全推采至停采线位置,避免了巷道两帮与底板冲击失稳.

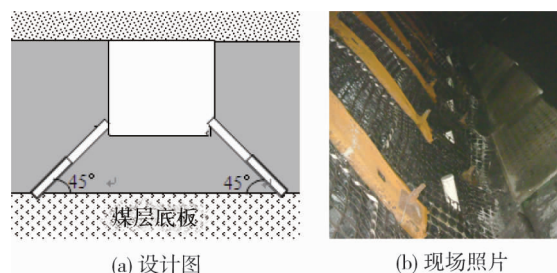


图11 断底钻孔设计图及现场照片

## 5 结论

1) 巷帮深孔卸压诱发巷道底板冲击失稳的机制在于,巷帮深孔卸压解除或弱化了卸压区域内巷帮煤体对底板煤体的约束作用,使底板力学模型由“柱”变为“长柱”或大柔度压杆,降低了巷道底板失稳临界

应力.

2) 提前对巷道底板实施破断措施,改变底板煤体的力学模型,可提高巷道底板临界应力,从而防治巷帮深孔卸压诱发底板冲击失稳.

#### 参考文献:

- [1] Li Z, Dou L, Cai W, et al. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014,70:192-200.
- [2] Dehghan S, Shahriar K, Maarefvand P, et al. 3-D modeling of rock burst in pillar No.19 of Fetr6 chromite mine [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013,23:231-236.
- [3] 章梦涛. 我国冲击地压预测和防治[J]. 辽宁工程技术大学学报,2001,20(4):434-435.
- [4] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [5] 潘立友,杨慧珠. 冲击地压前兆信息识别的扩容理论[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(s1):4528-4530.
- [6] 姜福兴,王平,冯增强,等. 复合型厚煤层震-冲型动力灾害机制、预测与控制[J]. 煤炭学报,2009,34(12):1605-1609.
- [7] 潘一山,李忠华,章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
- [8] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [9] 潘俊锋,宁宇,毛德兵,等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(3):586-596.
- [10] 刘金海,翟明华,郭信山,等. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J]. 煤炭学报,2014,39(2):353-363.
- [11] 张志镇,高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(1):1-11.
- [12] 刘金海,姜福兴,孙广京,等. 强排煤粉防治冲击地压的机制与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):747-754.
- [13] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [14] 黄开志,陈小亮. 考虑轴向均布载荷时压杆的稳定性计算[J]. 力学与实践,2015,37(6):744-749.
- [15] 王廷伟,黄丽华,刘明,等. 细长压杆的失稳点及临界压力的确定方法研究[J]. 力学与实践,2014,36(3):345-347.