

综采工作面爆破切顶技术及应用效果

——以王坡煤矿 3307 工作面为例

杨 洋

(中煤科工能源科技发展有限公司, 北京 100000)

摘要:为解决采空区坚硬顶板难垮落及邻近巷道两帮大变形问题,结合综采面煤层地质,优化设计爆破切顶参数,提出深孔预裂爆破切顶专项方案,采用现场试验对切顶卸压效果进行分析。分析结果表明,采用聚能爆破切顶技术后,巷道表面位移变形量减幅为 30%,顶板深部围岩位移减幅为 37%。实践表明,采用“爆破孔间设置导向孔”的钻孔布置方式,卸压效果显著,巷道围岩稳定性得到良好的控制,巷道情况得到改善,同时,聚能爆破切顶卸压技术可大幅度提高作业效率,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;爆破方案;现场试验;矿压防治

中图分类号:TD235.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2024)24-0354-05

在煤炭开采过程中,采空区顶板的坚硬岩层难以垮落问题一直是矿井增长开采中的一个难题^[1]。这种坚硬顶板的存在不仅增加了临近巷道的变形量,而且在邻近巷道工作面推进过程中,巷道往往会出现包括巷道两帮靠近、顶板中部向下沉和底板发生底鼓等现象,这些都使得巷道的维护成本显著增加^[2-3]。因此,解决这一问题对于提高矿井的安全性和经济效益至关重要。

在我国,处理坚硬顶板问题常采用切顶卸压方法。该方法通过事先处理顶板,降低其整体性以实现卸压效果。通常的切顶方式包括水力压裂和爆破切顶卸压两种^[4]。虽然水力压裂技术较为成熟,但仍需符合一系列高标准条件,如专用设备、维持井下水压力和操作复杂性^[5]。爆破切顶卸压适应各种地质条件,能应用于不同岩性和不同完整度的岩体,卸压效果显著。刘光饶等^[6]分析强采动巷道变形破坏原因及围岩大变形机理并进行工业性试验,结果表明,切顶卸压能够有效减少端头巷道变形以及超前底鼓发育长度和高度。李柠奇^[7]研究工作面煤柱的合理宽度,提出了超前深孔预裂爆破切顶方法,通过现场实践,巷道整体变形得到有效控制,实现了工作面安全高效开采。王云刚等^[8]为应对软岩巷道围岩在开挖时遇到的顶板显著下沉和两侧壁严重收缩等难题,设计了三种方案,并利用数值模

拟技术对巷道围岩的横向位移、纵向位移及塑性区域分布进行了分析,随后在实际环境中进行了验证。实践证明,采用“锚索结合 W 型钢带与 U 型钢支撑及注浆处理”的支护方法成效显著,大幅提升了围岩的支撑力。

本文在山西省王坡煤矿针对 3 号主采煤层的顶板地质条件,深入分析切顶卸压的机理,并提出深孔聚能预裂爆破的切顶卸压专项方案。通过在 3307 工作面实施现场试验,全面评估卸压效果,为同类切顶工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 巷道变形事故

王坡煤矿的 3 号主采煤层位于地下 500~700 m 的深处,采用爆破切顶煤炭开采技术,在此过程中,开采出的煤炭使得其上方的岩层失去支撑而发生坍塌,这一过程填充了采空区,形成砌体梁结构。随着开采工作的进行,伪顶和直接顶会发生破碎和坍塌,但无法完全填充整个采空区。在采空区上方的岩层中,基本顶岩块会因运动而产生破断结构。同时,采空区的侧向也会形成侧向三角块,将支承压力传递给相邻的工作面。由于采动应力的影响,相邻工作面的矿压表现强烈,维护起来非常困难,主要问题包括运输通道两侧壁的鼓胀和顶板的下陷^[9]。

收稿日期:2024-07-20

基金项目:甘肃省科技重点研发计划项目(23YFFA0029)

作者简介:杨洋(1985—),男,山东泰安人,硕士,高级工程师,研究方向为安全生产。

1.2 切顶卸压技术原理

在进行综采工作面的回采活动之前,通过在回风巷道中实施深孔钻探并运用聚能爆破技术进行爆破作业,工作面上方形成一个沿其走向的连续预裂缝。这一过程有效地减少块体1的悬空长度,从而降低煤柱及周边巷道所面临的支撑压力^[10]。当综采工作面完成回采后,这些由深孔预裂爆破产生的裂缝进一步使块体1与块体2在裂缝处分离,这不仅缩短了悬臂梁的悬臂长度,还减少载荷的传递,进而降低支承压力,并显著减轻相邻工作面的矿山压力表现。如图1所示。

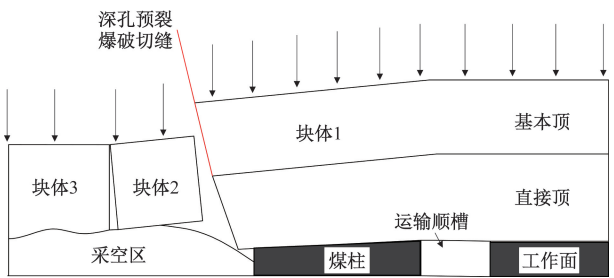


图1 切顶卸压技术原理

2 切顶卸压爆破技术

2.1 切顶高度

切顶过程中,钻孔深度需要穿过采空区上部的较完整岩层。3号煤层顶板各岩层岩性和钻孔切缝设计参数如图2所示。

爆破切顶高度 H_0 可根据式(1)计算:

$$H_0 = \frac{M}{K_0 - 1} \tag{1}$$

式中: M 为煤层厚度,值为 5.74 m; K_0 为采空区上

覆岩石碎胀系数,通常取值为 1.25~1.35。计算得 H_0 为 16.4~22.96 m。

结合顶板岩性,确定爆破切顶高度 H_0 需要覆盖到 3307 工作面煤层上方的泥质岩层。因此,爆破切顶高度 H_0 确定为 18.33 m。

2.2 钻孔深度

钻孔长度可根据切顶垂高和钻孔的倾角进行计算。

$$L = \frac{H_0}{\sin\delta\cos\theta} \tag{2}$$

式中: L 为炮孔钻孔深度,m; δ 为钻孔方向与巷道轴向夹角,取 90° ; θ 为钻孔方向与巷道两帮竖直方向夹角,取 10° 。可得 L 为 18.61 m。本方案确定钻孔深度为 19 m。根据《天地王坡补充勘探地质报告》,炮孔直径确定为 60 mm。

2.3 炮孔开孔间距

压碎圈和裂隙圈半径由式(3)~式(6)求得。

$$R_c = \frac{\rho_0 D^2 K^{-2\gamma} l_e B}{8\sqrt{2}\sigma_c} \tag{3}$$

$$R_p = \left[\frac{\sigma_R R_B}{\sqrt{2}\sigma_t} \right]^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{\rho_0 D^2 K^{-2\gamma} l_e B}{8\sqrt{2}\sigma_c} \right]^{\frac{1}{\alpha}} r \tag{4}$$

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

$$\alpha = 2 + \frac{\mu_d}{1-\mu_d} \tag{6}$$

式中: K 为装药径向不耦合系数,即钻孔直径与炸药直径之比, l_e 为装药轴向系数; γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数,一般取值为 3; R_c 、 R_p 分别为压碎圈、

岩层	岩性描述	厚度/m	柱状图
泥岩	黑色,含少量碳质,岩心呈碎块状	0.56	
细砂岩	灰色,矿物成分以石英为主,长石次之,少量岩心	1.97	
泥岩	灰黑色,底部含少量碳质,岩心呈碎块状	0.39	
粉砂质岩层	灰黑色,中间夹细砂质条带,含植物叶碎片化石,裂隙不发育,岩心呈短柱状	0.27	
泥岩	灰色,含少量植物叶化石,岩心呈短柱状	0.77	
粉砂质岩层	灰黑色,中间砂质条带,含植物叶碎片化石,裂隙不发育,岩心呈长柱状,少量短柱状	4.94	
泥质粉砂岩	灰色,局部夹细砂纸条带,上部裂隙发育,岩心呈碎块状	2.44	
泥岩	灰黑色,岩心呈短柱状	0.64	
直接顶及老顶细砂岩、粉砂岩	细砂岩:灰色,矿物成分以石英为主,长石次之,少量岩屑,局部可见泥质条带,岩心长柱状为主 粉砂岩:灰黑色,可见云母碎片,局部夹泥质条带,岩心成短柱状,裂隙不发育	6.35	
伪顶泥岩	灰黑色,岩心呈碎块状	0.07	
煤	黑色,条带状结构,光亮型,镜煤为主,亮煤次之,研石成分为泥岩	5.74	

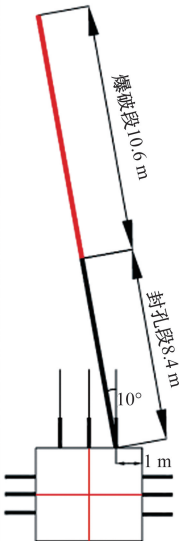


图2 3号煤层顶板钻孔设计参数

裂隙圈半径, m ; ρ_0 为炸药密度, kg/m^3 ; D 为炸药爆速, m/s ; r 为炮孔半径, m ; σ_R 、 σ_t 和 σ_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 ; α 为压碎区中冲击波的衰减系数; β 为应力波载荷传播衰减指数; μ_d 为岩石动态泊松比; b 为切向应力系数。

经过计算,当岩层进行爆破作业时,其产生的粉碎圈和裂隙圈的半径分别达到 0.21 m 和 1.12 m。采用双向聚能劈裂爆破方法,因此,现场施工中将钻孔的开孔间距取 2 m。

为了有效增加裂隙扩展范围,适应智能化工作面推进速度快的特点,保证爆破切顶施工速度与之匹配,采用“爆破孔间设置导向孔”的钻孔布置方式。具体过程为,各装药炮孔之间增设一个导向孔(不装药),形成爆破孔和导向孔间隔布置的方式,各孔间距为 1 m。

2.4 装药方式

在 3307 回风顺槽顶板的爆破预裂钻孔中,使用钻孔直径为 60 mm,并选用三级煤矿许用的胶状非粉状乳化炸药,在装药过程中,现场采用了聚能管辅助进行正向连续装药,单根聚能管长度为 2 m,以便于施工操作。所选炸药直径为 35 mm,不耦合系数为 1.71。装药长度设定为 10.6 m,采用双电子雷管和单导爆索引爆方式,其中两个雷管通过并联连接。封孔工作由黄泥完成,封孔长度为 8.4 m。装药结构如图 3 所示。

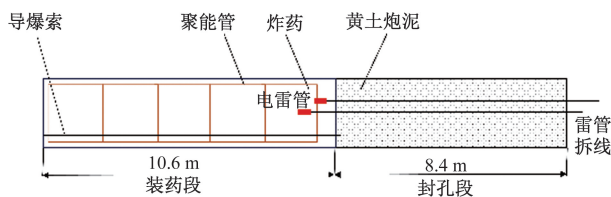


图3 装药结构示意图

3 现场试验及监测站布置

3.1 表面位移测站布置

共布置表面位移测站 6 个,其中 3 个位于未切顶矿压观测区,3 个位于切顶后矿压观测区,相邻测站间距 10 m。每一测站内,测点布置采用十字断面法。测量时,两帮拉线,自顶板挂上铅锤,形成十字断面^[11]。

3.2 深部围岩位移测站布置

采用多点位移计对巷道顶板(帮)深部围岩位移进行观测。巷道顶板(帮)深部围岩位移测站布置位置与巷道表面位移测站布置位置相同。顶

(帮)位移共布置测站 6 个,其中 3 个位于未切顶矿压观测区,3 个位于切顶后矿压观测区,相邻测站间距 10 m。如图 4 所示。每个测站安装 1 套六测点多点位移计^[12],安装于巷道顶板中央,表面位移顶板测点前后 1 m 范围内,6 个测点深度分别为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 m,如图 5 所示。在钢丝无法送到预定位置或超过预定位置时,准确记录该测点的实际深度。数据搜集采用人工采集的方式进行,多点位移计安装完成时,应记录各测点初始数据值。

3.3 爆破效果窥孔

通过采用窥视仪^[13]对爆破前后爆破孔内裂隙发育情况进行观测,采用钻孔成像仪,如图 6 所示,窥视孔布置如图 7 所示。不装药窥视孔与装药爆破孔同步施工,施工完成后,立即对窥视孔进行窥视,详细记录钻孔孔壁的影像。爆破施工完成后,对不装药窥视孔进行窥视,详细记录孔壁影像。通过对比爆破施工前后的影像,判断爆破切顶裂缝的扩展情况。



图4 测点多点位移计

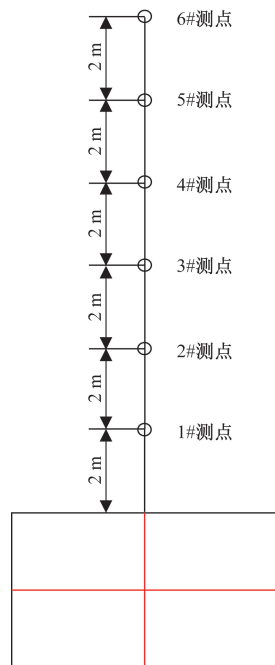


图5 多点位移计测点布置

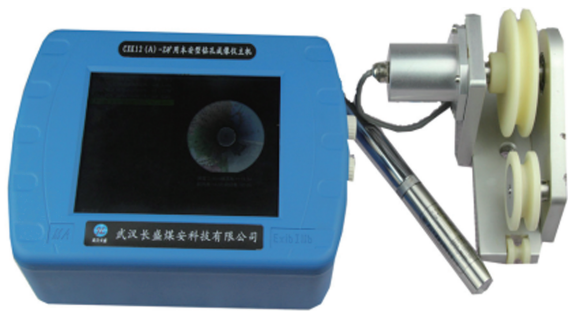


图6 CXK12(A)钻孔成像仪

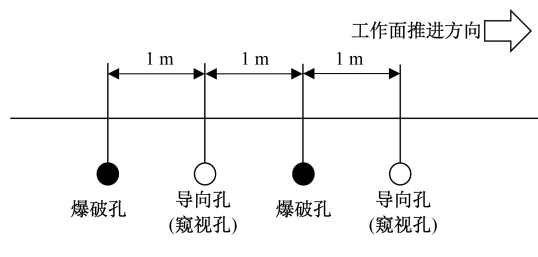


图7 窥视孔布置

4 切顶卸压效果分析

4.1 巷道表面位移分析

监测切顶前后工作面推进时两帮和顶底板的累计位移量如图8所示。对比结果显示,巷道表面位移变化呈现3个阶段:在超前工作面区域,属于未受到或受到弱采动影响阶段,巷道变形量小,随着工作面推进缓慢变形;从超前工作面20 m至滞后工作面60 m区域,属于采动影响显著阶段,巷道变形量快速增加,巷道的变形量主要发生在这个阶段;工作面继续推进,进入采动影响稳定阶段,该阶段内巷道变形缓慢并且逐渐趋于稳定。采用聚能爆破切顶卸压技术前后,巷道两帮和顶底板表面变形都得到了良好的改善,变形量减少量超过30%,巷道变形得到了控制,巷道更稳定。

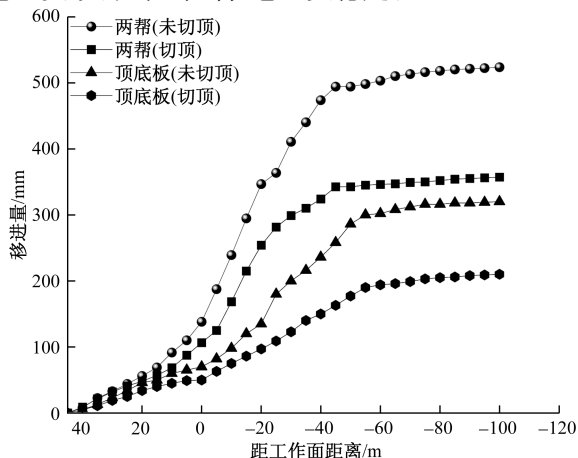


图8 切顶前后巷道累计变形量对比

4.2 深部围岩位移分析

监测切顶前后工作面推进时顶板各个基点的位移量对比,如图9和图10所示。结果显示,在0~2 m位移量最大,随着2~4 m、4~6 m、6~8 m、8~10 m、10~12 m各个范围位移量逐渐变小,观测期间总位移量为0~12 m的位移量。巷道采用聚能爆破切顶卸压技术前后,巷道顶板深部围岩变形量得到了良好的改善,变形量减少量约为37%,巷道变形得到了控制,巷道更稳定。

4.3 钻孔窥视结果分析

在完成爆破作业之后,利用钻孔窥视技术对导向孔进行了探测,并选取了导向孔为11.6~12.6 m和14.1~15.1 m的两段。如图11所示,孔壁上均出现了纵向延伸的裂缝以及横向裂缝,且这些裂缝的开口较大。这一结果表明,在进行聚能爆破以实现切顶操作的过程中,导向孔受震动和聚能气体的影响,导致了纵向裂缝的产生以及一些横向裂缝的形成,孔内纵向贯穿裂缝明显。同时,观察到导向孔内部有气体逸出的情况,这进一步证实了孔间纵向裂隙的连通性;这种裂隙连通性有助于在顶板岩

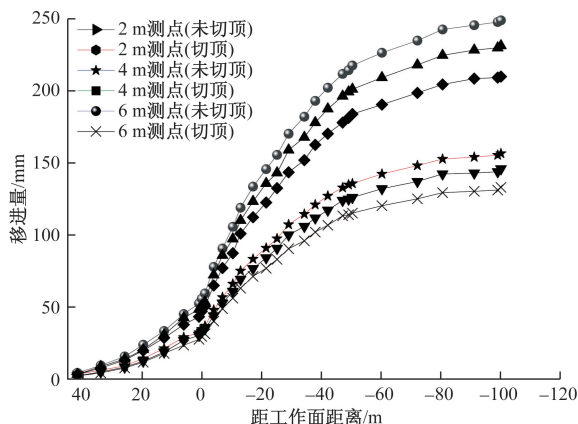


图9 工作面2、4、6 m测点位移量对比

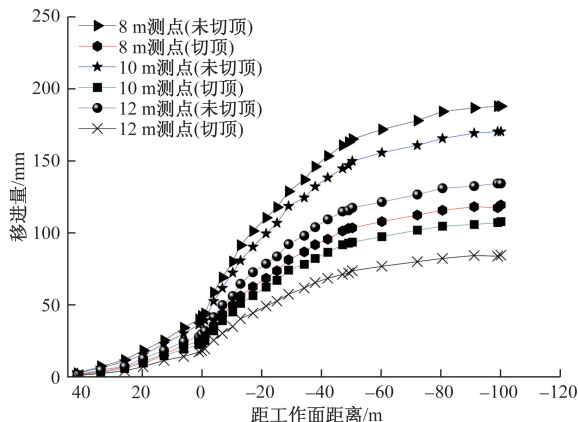


图10 工作面8、10、12 m测点位移量对比

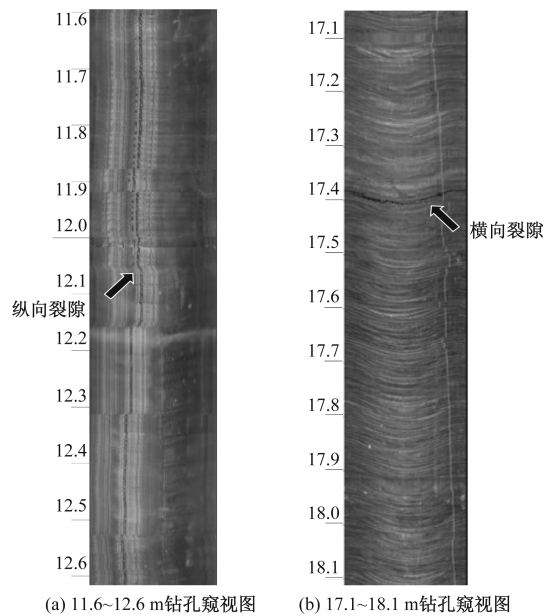


图11 钻孔窥视图

层中形成一个有效的切顶面,促进采空区顶板的及时坍塌垮落。

5 结论

(1)针对3307采区的顶板压力大、矿压显现强烈、巷道变形大等问题,通过理论和试验分析,确定切顶爆破的关键参数:确定切顶高度为18.33 m,炮孔深度为19 m,炮孔直径为60 mm,采用“爆破孔间设置导向孔”的钻孔布置方式,各孔间距为1 m。

(2)通过对巷道表面位移、巷道顶板(帮)深部围岩位移、锚杆(索)受力监测以及爆破切顶后现场效果图,采用聚能爆破切顶卸压技术后,巷道表面位移变形量减幅为30%,顶板深部围岩位移减幅为37%。

(3)采用“在爆破孔之间设置导向孔”的钻孔布置方式,有效提升了作业效率。

参考文献

- [1] 龚涛,张继,夏彬伟.地面压裂坚硬顶板对矿山压力显现影响的实验研究[J].科学技术与工程,2023,23(36):15427-15439.
- [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.
- [3] 李琛,华心祝,常贯峰,等.近距离煤层内错式开切眼合理错距的研究[J].科学技术与工程,2022,22(22):9537-9542.
- [4] 周航,周福建.水力压裂切割煤层顶板力学机理及参数优化[J].科学技术与工程,2022,22(19):8253-8261.
- [5] 王子升,杨永亮,王文.高强度开采条件下巷道切顶护巷技术研究[J].能源与环保,2022,44(3):298-302.
- [6] 刘光饶,齐振敏,杨位良,等.强采动巷道断顶卸压稳定性控制机理及应用[J].科学技术与工程,2024,24(17):7090-7098.
- [7] 李柠奇.李家楼煤业煤柱合理宽度确定及切顶卸压方法研究[J].煤矿现代化,2024,33(2):73-76.
- [8] 王云刚,康军保,杜炳成,等.金能煤矿软岩掘进巷道变形破坏特征及控制技术研究[J].科学技术与工程,2023,23(12):5340-5347.
- [9] 段宝福,陈佳华,柴明星,等.深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理与应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(1):1-10.
- [10] 申志鑫.深部强采动大巷硐室修修补强技术——以万家庄煤矿为例[J].科技和产业,2024,24(11):218-223.
- [11] 杨旭.深孔预裂爆破技术在顶板卸压中的有效性研究[J].能源与环保,2023,45(11):304-311.
- [12] 徐剑波,姜平,朱颂阳,等.基于现场监测和数值模拟的隧道初期支护效果分析[J].科学技术与工程,2020,20(5):2061-2069.
- [13] 王云刚,康军保,杜炳成,等.金能煤矿软岩掘进巷道变形破坏特征及控制技术研究[J].科学技术与工程,2023,23(12):5340-5347.

Blasting Roof Cutting Technique and Its Application Effects in Comprehensive Mining Work Faces: Taking the 3307 Work Face of Wangpo Coal Mine as a Case

YANG Yang

(CCTEG Energy Technology Development Co. Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: To address the difficulties in the collapse of the hard roof in goaf areas and the significant deformation of the surrounding roadways, an optimized design for blasting parameters was developed based on the geological conditions of the coal seam in the fully mechanized mining face. A specialized deep hole pre-splitting blasting method for roof cutting was proposed, and on-site experiments were conducted to analyze the effects of roof cutting and pressure relief. The analysis results indicate that after implementing the energy accumulation blasting technology for roof cutting, the surface displacement deformation of the roadway decreased by 30%, the deep surrounding rock displacement of the roof decreased by 37%. Practical application has shown that the arrangement of drilling holes with “guiding holes set between blasting holes” significantly improves the pressure relief effect, enhances the stability of the roadway surrounding rock, improves the roadway conditions, and substantially increases operational efficiency. This technology of energy accumulation blasting for roof cutting and pressure relief can serve as a valuable reference for similar mine pressure control projects.

Keywords: deep-hole shaped charge blasting; roof cutting and pressure relief; explosion plan; field test; mining pressure prevention and control