

基于应力场干预的巷道围岩控制技术

柏建彪^{1,2*}, 王襄禹², 闫帅², 吴文达^{1,2}

(1.煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:高应力巷道围岩破坏严重变形剧烈, 在服务期间难以满足回采的要求, 已经成为煤矿安全开采研究的重点和难点. 本文从应力转移、应力阻隔和应变能释放3个角度, 归纳总结了应力场干预的巷道围岩控制技术. 针对坚硬顶板提出水力压裂断顶, 高应力底鼓聚能爆破断底, 大变形巷道钻孔卸压技术, 分别探讨了每种手段的技术原理. 水力压裂使岩层的承载层向高位移动, 同时应力向煤体深部转移; 聚能爆破在底板岩层中形成连续的结构面, 阻断水平应力的传播途径和改变其传播方向; 钻孔卸压可以释放高应力岩体的应变能为围岩变形提供补偿空间. 工程实践表明, 提出的应力场干预技术能够有效地控制围岩稳定, 为高应力巷道维护提供技术保障.

关键词:高应力巷道; 应力场; 水力压裂; 聚能爆破; 钻孔卸压; 围岩控制

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2019)02-0001-07

Technology of Roadway Ground Control Based on Stress Field Intervention

Bai Jianbiao^{1,2}, Wang Xiangyu², Yan Shuai², Wu Wenda^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China;

2.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The surrounding rock of high stress roadway is seriously damaged and severely deformed, and it is difficult to meet the mining requirements during the service period, which has become the focus and difficulty of research in coal mine safety mining. In this paper, the surrounding rock control technology of roadway intervention by stress field is summarized from the three perspectives of stress transfer, stress barrier and strain energy release. Hydraulic fracturing roof breaking, high stress floor heave blasting floor breaking and large deformation roadway borehole pressure relief technology are proposed for hard roof, and the technical principles of each method are discussed respectively. Hydraulic fracturing makes the bearing stratum of strata move to a high displacement and the stress transfer to the deep part of the coal body. Energy-accumulating blasting forms a continuous structural plane in the floor strata, blocking the propagation path of horizontal stress and changing its propagation direction. Borehole pressure relief can release strain energy of high stress rock mass to provide compensation space for surrounding rock deformation. Engineering practice shows that the proposed stress field intervention technology can effectively control the stability of surrounding rock and provide technical support for the maintenance of high stress roadway.

Keywords: high stress roadway; stress field; hydraulic fracturing; energy-accumulating blasting; borehole pressure relief; ground control

近年来,随着煤矿采掘强度的提升和采深的增加,井下形成高自重应力、构造应力和采动应力叠加的

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574227)

*通信作者, E-mail: bjb@163.com

复杂应力场,致使越来越多的巷道处于高应力环境中^[1-3].在高应力的影响下,围岩的应力集中超过自身强度和支护体强度时就会发生大变形,产生严重的底鼓和围岩持续蠕变,甚至出现片帮和冒顶等失稳事故^[4,5].破坏巷道需要多次的翻修和加强支护,不仅增加成本而且威胁安全高效生产.

大量的高应力巷道为采矿学者提供了科学研究目标,在巷道围岩应力环境改善方面取得了可喜的成果.根据影响巷道稳定性的因素,提出控制围岩变形的多种基本途径:巷道底板掘巷应力转移、上行开采应力转移、巷道迎头超前钻孔、围岩注浆、高强度支护系统和合理的巷道支架等围岩控制技术^[6-8];针对千米深井强流变特征的巷道,提出将锚杆支护、注浆改性与卸压技术有机结合的“三位一体”巷道围岩控制技术^[9];针对深部巷道底鼓现象,提出底鼓“两点三区”的变形规律,采用底板锚杆(索)、增加底梁(底拱)、底板开槽卸压、底板注浆和底板松动爆破等方法进行控制^[10,11].在巷内支护方面,研发了高强、高预紧力、高延伸率锚杆(索)支护系统、可接长锚杆、恒阻大变形锚索等支护技术来控制围岩稳定^[12-14].每项技术单独或者联合使用,使巷道围岩控制效果得到明显的改善.但对于受高应力影响的巷道而言,由于采掘活动造成巷道周边整体的应力环境都比较高,仅从围岩改性和支护技术方面采取措施,控制围岩稳定依然是非常困难.从合理布置巷道的角度,为避开高采动应力的影响提出了沿空掘巷和沿空留巷布置方式^[15,16],将巷道布置在煤体边缘的卸压区利于巷道支护,但当顶板为坚硬岩层有较长的侧向悬臂时,临空巷道依然会出现高应力大变形.

基于此,本文从改善巷道围岩应力场的角度出发,系统的介绍水力切顶卸压、聚能爆破和钻孔卸压3种途径的技术原理及其在高应力巷道围岩控制中的应用,对高应力巷道围岩控制具有重要意义.

1 切顶卸压应力转移

1.1 临空巷道应用

回采含有坚硬顶板的煤层时,上区段工作面回采结束后未垮落的厚层老顶残留的悬臂长度较长,形成的侧向支撑应力集中程度高、影响范围大,导致下区段工作面的临空巷道在整个服务期间都处于高应力环境中,如图1a所示.水力压裂作为一种可实现围岩弱化和应力转移的技术,在赋存坚硬顶板的矿区得到了广泛的应用^[17].为减小侧向支承应力的影响,采用定向水力压裂技术切断采空区上方的悬顶,减小临空巷道所承受的高应力静载作用.具体方法是:在临空巷道内向采空区上方坚硬的悬顶位置施工钻孔,然后在孔底采用定向裂缝切割刀具进行开槽,用封孔器封孔并向孔底注入高压水,通过人工诱导裂缝的扩展使压裂面沿厚度方向贯穿坚硬顶板,进而达到切断悬顶的目的,如图1b所示.通过水力切顶主动的干预了侧向支承应力场分布,下位坚硬顶板被切断后应力降低,实现应力承载层向高位坚硬岩层移动,侧向支承应力向煤体深部转移,优化了临空巷道应力环境,确保工作面安全开采.

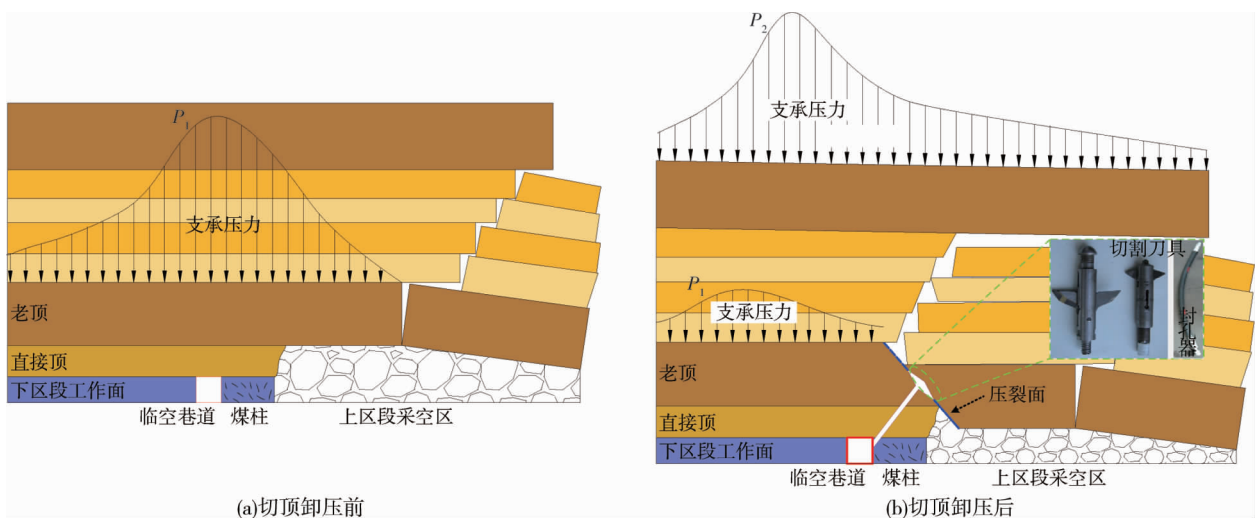


图1 临空巷道高应力大变形切顶卸压

麻家梁矿14202工作面辅运顺槽采用留设19.5 m护巷煤柱的布置方式,受到14201采空区侧向悬顶

的影响巷道变形严重.巷道最大顶板下沉量为 480 mm,两帮移近量 886 mm,底鼓量达到 2 500 mm.采用水力压裂切顶技术在 14202 辅运顺槽内向 14201 采空区侧坚硬顶板位置打孔进行切顶卸压,致裂孔布置如图 2 所示.卸压后巷道顶板下沉量,两帮移近量和底鼓量分别减小为 220,400,1 000 mm,分别减小了 58.33%, 54.85%, 60.00%^[18].卸压后的巷道能够满足回采的要求.

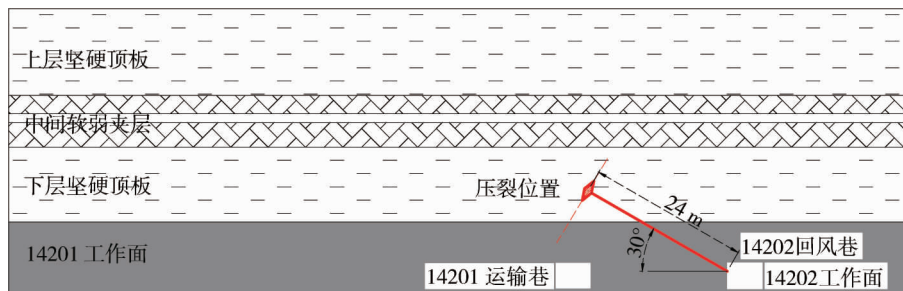


图2 麻家梁矿水压致裂布置

1.2 沿空留巷应用

坚硬顶板煤层沿空留巷,随着工作面的推进和巷旁充填体的构筑,坚硬难垮顶板的悬露面积也不断增加,覆岩的载荷完全由巷旁充填体和顶板自身承载.采空区边缘顶板出现弯曲下沉直到悬露顶板内部的拉应力大于顶板的抗拉强度才发生破断,在此过程中,巷旁充填体和沿空留巷围岩均产生较大的变形甚至失稳^[19].沿空留巷大面积悬顶如图 3 所示.

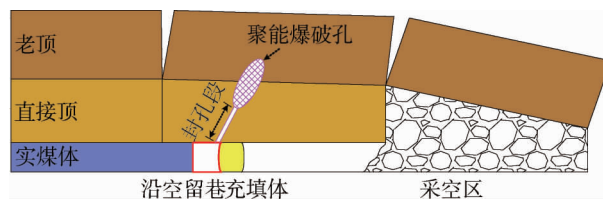


图3 沿空留巷大面积悬顶

大面积悬顶一旦垮落将会引发动力灾害事故,因此必须对顶板采取控制措施,常用的是聚能爆破.聚能爆破是通过在爆破孔内布置装有炸药的聚能管来实现定向预裂爆破^[20].聚能管上面设置有定向的聚能槽,对炸药产生的瞬时爆轰波具有抑制和导向作用,使其作用在设定的方向上,典型的 D 型聚能管如图 4 所示.聚能部位为薄弱面,爆轰波在聚能方向形成高能流,驱动裂缝在顶板岩体中设定的方向上扩展,实现岩体产生定向张拉裂缝.聚能爆破切顶过程中,采用隔孔装药爆破的方式,中间留有导向孔不装药,有利于爆破孔裂缝相互扩展贯通,增强定向切缝破裂面的形成,如图 5 所示.同时,可利用该孔进行钻孔窥视,检测爆破效果.聚能爆破适用于低瓦斯矿井,在沿空留巷采空侧临时支护区域进行钻孔爆破.将聚能爆破孔布置在充填体采空区侧上方的坚硬顶板中,沿着巷道走向爆破孔和导向孔交替布置,封孔从装药位置到巷道顶板,如图 3 所示.聚能爆破后在顶板中形成一个连续的弱化面(图 6),能够切落充填体侧一定高度的顶板,使高应力向实煤体内部转移,保证了留巷的稳定性.

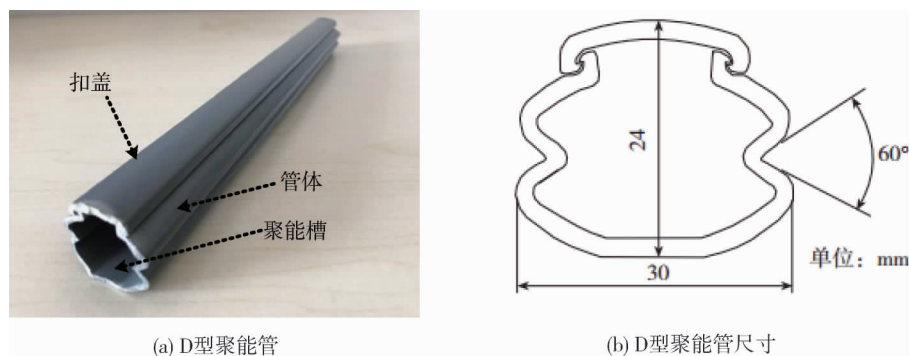


图4 D型聚能管

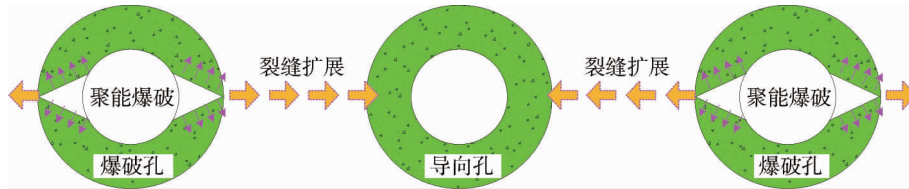


图5 导向孔布置



图6 聚能爆破形成的连续弱面

沁水煤田新超煤矿 90101 工作面回风巷采用沿空留巷,煤层上方直接顶为 3.5 m 的石灰岩,老顶为 4.5 m 的粉砂岩.采用聚能爆破后工作面后方的影响范围减小到 75 m,工作面后方留巷的两帮移近量最大为 292 mm,顶底板移近量最大为 357 mm,保证了巷旁充填体的稳定,围岩控制效果良好,如图 7 所示.

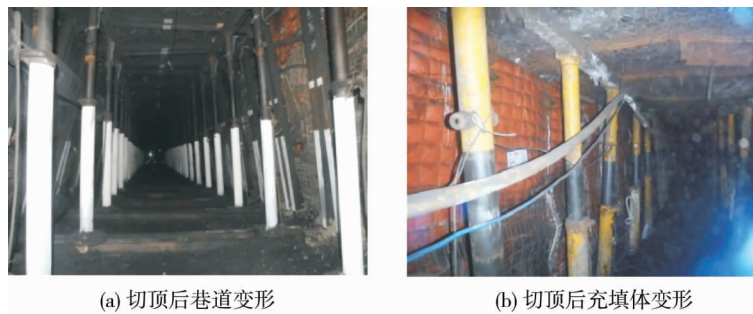


图7 沿空留巷切顶卸压效果

2 底板聚能爆破应力阻断

巷道开挖后在岩体中形成自由空间,为底板岩石的变形提供了空间.巷道底鼓的根本原因:顶板受到的垂直应力传递到两帮造成两帮下沉,两帮下沉引起两个底角破坏,导致底板受到二次水平应力的挤压作用,巷道底板岩层向巷道内压曲、扩容、膨胀,最终表现为底鼓变形.高应力环境下巷道的底鼓问题变得尤为突出.高应力导致煤层顶底板压力增大,对煤层的夹持作用更加明显,煤体的流动性(延展性)增加,两帮下沉引发底鼓将更加严重^[7, 21].此外,当水平应力与巷道方向的夹角近垂直时,也会使巷道受到巨大的水平应力作用而产生底鼓.

针对上述的底鼓问题,提出采用聚能爆破的方法来阻隔底板中水平应力的传递,如图 8 所示.传统的爆破方法形成的爆生裂隙是按照球体向四周扩展,并不能控制产生裂隙的扩展方向,起到卸压作用的同时对底板岩层产生破坏.而聚能爆破通过聚能管的导向作用,使爆生裂缝朝着设定方向发展,能够控制爆轰波的传播方向,多个爆破孔可以在底板的岩层中形成一个连续的弱结构面.结构面的存在可以改变水平应力的传递方向,使原来垂直于巷道轴向的水平应力遇到弱面时改变为平行于巷道轴向传播,同时阻隔水平应力的传递,减小地板岩石受到的水平挤压力作用,从而控制巷道底鼓.爆破孔的终孔位置确定在底板应力峰值处,装药量以不破坏底板自由面完整性为宜,炮孔的间距根据爆破裂隙区半径来计算.

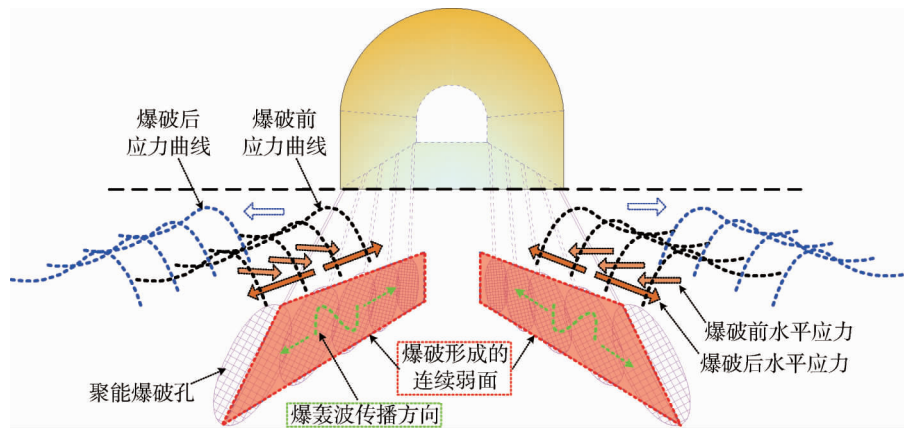


图 8 底板聚能爆破阻隔应力传递

3 钻孔卸压应变能释放

巷道开挖后在围岩内形成破碎区、弹性区和原岩应力区,高应力巷道围岩的弹性区内积聚了大量的应变能,应变能的缓慢释放是造成巷道长期变形的重要原因^[22].钻孔卸压的本质是人为的干预巷道局部结构的完整性及承载能力,为巷帮煤岩体膨胀释放变形能提供补偿空间.在巷道周边施工大直径的钻孔后,每一个钻孔周围将产生一定范围的破碎区,当多个钻孔形成的破碎区相互叠加时,将在巷道卸压部位形成一条连续的卸压带,降低卸压位置围岩的承载能力释放应变能,使应力峰值向围岩深部转移,如图 9 所示.

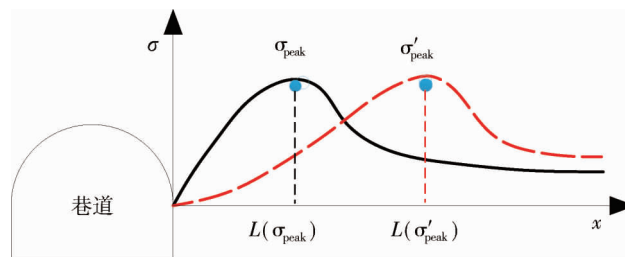


图 9 钻孔卸压机理

采用巷道围岩变形差量对卸压效果进行评价,分为非充分卸压、充分卸压和过度卸压 3 类^[23].非充分卸压是指卸压钻孔参数不足以转移巷道周边高应力,或在应力转移效果不明显的情况下,同时增加了巷道围岩变形量;充分卸压是指卸压钻孔参数在有效转移巷道周边高应力的同时,又对围岩变形起到一定的控制效果;过度卸压是指卸压钻孔参数的改变对巷道周边应力的转移效果不再明显,且由于卸压程度过高,导致巷道围岩变形量急剧增加,围岩已不能保持自稳状态.

卸压钻孔的关键参数包括钻孔方位、卸压时机、钻孔直径、钻孔深度及孔间距等.钻孔方位应结合巷道所处的应力环境来确定,应该垂直于巷道最大主应力方向,有助于钻孔破坏围岩释放应变能(图 10a).卸压钻孔紧随掘进工作面施工,能够较早的参与围岩应力的调整过程,对控制变形越有利,反之,钻孔会对已经稳定的浅部围岩产生新的扰动.减小钻孔直径,卸压程度由充分卸压向非充分卸压过渡,增加钻孔直径,卸压程度逐渐变为过度卸压(图 10b).钻孔深度小则无法转移高应力,且破坏了浅部围岩结构稳定性,钻孔太深时围岩的不稳定性增加,卸压效果降低(图 10c).钻孔间排距越小卸压效果越好,反之变形量随着间排距的增加而增大(图 10d).

徐矿集团张双楼煤矿-1 000 m 西大巷在岩层中布置,埋深 1 030 m,揭露的围岩为砂质泥岩,巷道变形以两帮收敛为主,两帮移近量是顶底板收缩量的 2 倍.采用钻孔卸压的方法释放应变能,钻孔紧跟迎头布置,垂直于巷帮施工水平钻孔(垂直于实测最大主应力),孔径 $\Phi 115$ mm,长度 10 m,间排距 1 m \times 0.8 m.

钻孔卸压后的围岩变形如图 11 所示,伴随围岩变形能的释放及高应力的转移,巷道变形得到有效控制,观测 100 d 后顶底板及两帮移近量分别约为 200 mm 和 130 mm,巷帮移近量与未卸压时同期相比减小了 60%左右,围岩维护情况良好.

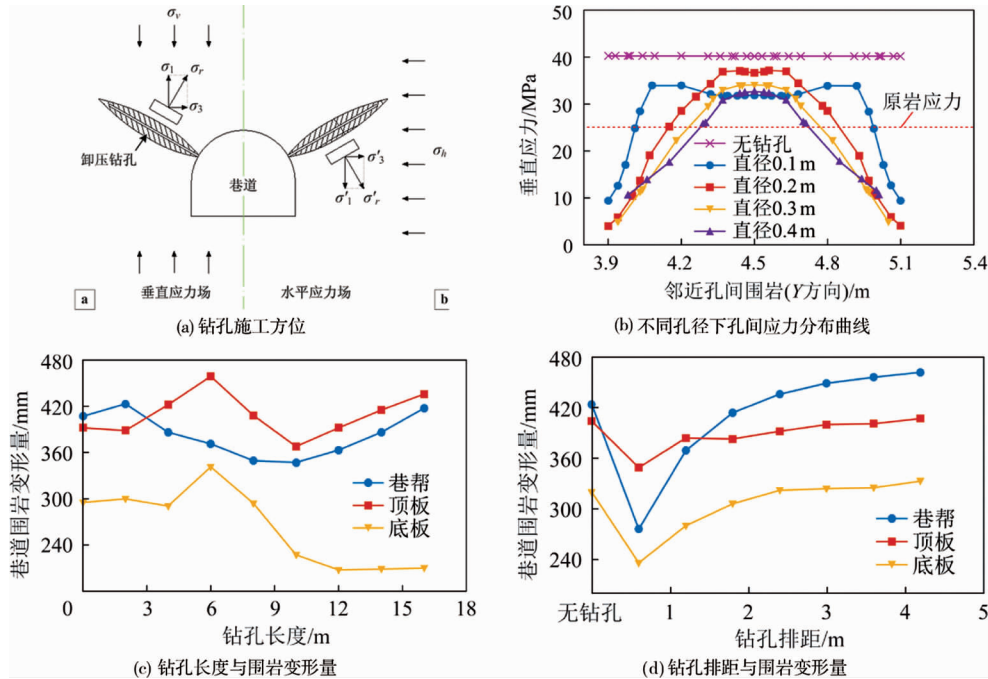


图 10 卸压钻孔的关键参数

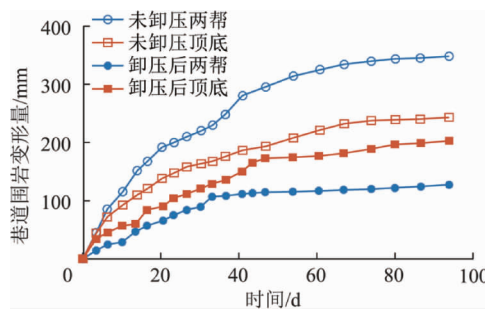


图 11 钻孔卸压后的围岩变形量

4 结论

1) 水力压裂技术来切断临空巷道采空区侧坚硬顶板,可以优化围岩应力环境.切顶后巷道顶板下沉量,两帮移近量和底鼓量分别减小了 58.33%,54.85%和 60.00%.

2) 聚能爆破用于沿空留巷切顶和底鼓控制中,能够改善留巷的充填体受力,切断底板中水平应力的传递,并在现场实践中取得良好效果.

3) 卸压效果分为 3 类:非充分卸压、充分卸压和过度卸压.钻孔卸压后巷帮移近量与未卸压时同期相比减小了 60%左右.

参考文献:

[1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
 [2] 康红普.深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):12-17.

- [3] 王襄禹,柏建彪,李磊,等.近断层采动巷道变形破坏机制与控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(5):674-680.
- [4] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J].煤炭学报,2016,41(12):2921-2931.
- [5] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等.大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制[J].煤炭学报,2016,41(12):2932-2939.
- [6] 柏建彪,侯朝炯.深部巷道围岩控制原理与应用研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(2):145-148.
- [7] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):970-978.
- [8] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的有效途径[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):467-473.
- [9] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
- [10] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等.采动巷道底鼓机理与控制技术[J].采矿与安全工程学报,2011(1):1-5.
- [11] 王卫军,侯朝炯.回采巷道底鼓力学原理及控制研究新进展[J].湘潭矿业学院学报,2003(1):1-6.
- [12] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.
- [13] 刘洪涛,王飞,王广辉,等.大变形巷道顶板可接长锚杆支护系统性能研究[J].煤炭学报,2014,39(4):600-607.
- [14] 何满潮,吕谦,陶志刚,等.静力拉伸下恒阻大变形锚索应变特征实验研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(2):213-220.
- [15] 柏建彪,侯朝炯,黄汉富.沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004(20):3475-3479.
- [16] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004(2):59-62.
- [17] 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.
- [18] Shen W L, Bai J B, Wang X Y, et al. Response and control technology for entry loaded by mining abutment stress of a thick hard roof[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016,100(90):26-34.
- [19] 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(s1):3008-3017.
- [20] 何满潮,曹伍富,单仁亮,等.双向聚能拉伸爆破新技术[J].岩石力学与工程学报,2003(12):2047-2051.
- [21] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等.采动巷道底鼓机理与控制技术[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):1-5.
- [22] 王猛,司英涛,胡景宝,等.深部巷道围岩卸压协调控制技术[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(5):9-16.
- [23] 王猛,王襄禹,肖同强.深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J].煤炭学报,2017,42(5):1138-1145.