



移动扫码阅读

窦林名,阚吉亮,李许伟,等.断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):24-32.doi:10.13199/j.cnki.est.2020.01.003

DOU Linming, KAN Jiliang, LI Xuwei, et al. Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 24-32.doi:10.13199/j.cnki.est.2020.01.003

断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究

窦林名^{1,2},阚吉亮^{1,2},李许伟^{1,2},齐燕军^{2,3},白金正^{1,2},刘明洪⁴

(1.中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;

3.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;4.托克逊县雨田煤业有限责任公司,新疆 吐鲁番 838000)

摘要:断顶爆破在坚硬顶板条件下的冲击矿压灾害防治中应用广泛。基于动静载叠加原理,理论分析了断顶爆破防治冲击矿压的作用机制,在对冲击危险预评估和冲击危险动态演化特点分析的基础上,揭示了冲击危险具有分时、分区和分级的“三分”特征,建立了分时、分区、分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系,应用于坚硬顶板型冲击矿压防治工程实践,并通过采取理论计算、钻屑监测和微震监测手段进行断顶爆破效果评价。结果表明:爆破后形成的裂隙区贯通为连续的弱面是控制冲击矿压最重要的区域,断顶爆破能够减弱由于顶板瞬间破断或垮落释放的动载强度,降低上覆悬顶施加在煤体内的静载强度并促使煤体峰值应力向工作面前方转移,达到降低冲击矿压危险的目的;依据揭示的冲击危险分时、分区、分级的“三分”特征,建立了“开切眼倾向断顶爆破、临空煤柱侧走向断顶爆破、工作面内超前预裂爆破和及时解危断顶爆破”的分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系,相应进行了断顶效果评价,其中开切眼倾向断顶爆破后工作面初次来压和周期来压阶段顶板聚集的能量分别降低72%和76%;临空煤柱侧断顶爆破后煤柱内钻屑值下降0.55 kg/m;工作面内预裂爆破区域在回采期间出现微震总能量、单日最大能量均明显降低,微震频次显著增加的整体规律,验证了分时分区分级断顶爆破技术体系对防治冲击矿压的有效性。

关键词:冲击矿压;动静载;断顶爆破;效果评价

中图分类号:TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)01-0024-09

Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation

DOU Linming^{1,2}, KAN Jiliang^{1,2}, LI Xuwei^{1,2}, QI Yanjun^{2,3}, BAI Jinzheng^{1,2}, LIU Minghong⁴

(1.Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;2.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;3.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;4.Toksun County Yutian Coal Industry Co., Ltd., Turpan 838000, China)

Abstract:Break-tip blasting is widely used in the prevention and control of rock burst under the condition of hard roof. Based on the mechanism of rock burst induced by static and dynamic loading, the mechanism of break-tip blasting to prevent rock burst is analyzed. Based on the analysis of the pre-assessment and dynamic evolution characteristics of the rock burst, the time-space-level division characteristics of rock burst is revealed, a technology system of time-space-level division break-tip blasting to prevent rock burst is proposed, which is applied to the engineering practice of rock burst prevention with hard roof, and it through theoretical calculation, drilling cuttings monitoring and microseismic monitoring to evaluation of break-tip blasting effect. The results show that the continuous weak surface consisted of fracture zone is the most important area to control the rock burst, the break-tip blasting can reduce the dynamic load strength released by the instantaneous breaking or collapsing of the roof, reduce the static load level imposed by suspended roof in coal, and promote the peak stress

收稿日期:2019-11-12;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874292、51804303);江苏省重点研发计划资助项目(BK20180643);江苏省自然科学基金资助项目(BK20180643)

作者简介:窦林名(1963—),男,青海平安人,教授,博士生导师。E-mail:lmdou@126.com

通讯作者:阚吉亮(1995—),男,山东临沂人,博士研究生。E-mail:jlkan0823@126.com

of the coal to transfer to the front of the working face, which can reduce the risk of rock burst. Based on the characteristics of "three parts" of time-space-level division of rock burst, a time-space-level division technology system for prevention and control of rock burst is established, which includes inclined break-tip blasting in cutting hole, strike break-tip blasting in coal pillar, pre-splitting blasting in working face and breaking-tip blasting in time. The system is applied to engineering practice and the effect of breaking-tip is evaluated, in which the flexural elasticity of roof decreases by 72% and 76% respectively in the initial weighting and periodic weighting after inclined break-tip blasting in cutting hole; the average amount of drilling cuttings decreases by 0.55 kg/m after strike break-tip blasting in coal pillar; the total energy and the maximum energy per day of microseisms in the presplitting blasting area of the working face are obviously reduced and the frequency of microseisms is significantly increased during the mining period. The effectiveness of time-space-level division break-tip blasting technology system to prevent rock burst is verified.

Key words: rock burst; dynamic and static load; break-tip blasting; effectiveness estimation

0 引言

随着我国煤炭资源开采强度的增大和开采深度的增加,煤矿冲击矿压发生频率和破坏强度明显增加,灾害造成人员伤亡和经济损失也日益严重,冲击矿压已经严重制约着煤矿的安全高效开采^[1]。无论是在深部开采还是浅部开采条件下,坚硬顶板均是诱发冲击矿压的主控因素之一。冲击矿压的发生机理是指导冲击矿压防治的理论基础,国内外学者对坚硬顶板诱发冲击矿压的致灾机理进行深入的研究。谭云亮等^[2]分析了坚硬顶板对煤体内部应力和能量的影响,并基于能量及应力判据给出坚硬顶板型冲击矿压发生的判别准则;何江等^[3]通过研究坚硬顶板作用下采掘围岩应力分布特征及动载作用下围岩动力响应规律,揭示了坚硬顶板型冲击矿压机理;吕进国等^[4]认为巨厚坚硬顶板易造成大面积运动,为冲击矿压的发生提供动载条件;张传玖等^[5]研究了坚硬顶板综放工作面冲击矿压的主控因素为高静载、强矿震和低支护。基于以上对坚硬顶板诱发冲击矿压致灾机理的研究,国内外发展了断顶爆破技术和水压致裂技术^[6-7]等防治手段。由于断顶爆破技术工艺简单,适用性强,煤矿现场应用较为广泛。齐庆新等^[8]探讨了深孔断顶爆破的作用机制并采用数值模拟方法分析了深孔断顶爆破防治冲击矿压的基本原理;任艳芳等^[9]采用数值模拟方法研究了深孔断顶爆破合理步距;欧阳振华等^[10]通过理论分析和数值模拟手段分析了多级爆破卸压技术的防治冲击矿压机理;上述研究在断顶爆破技术防治冲击矿压的应用取得一定的成果,但是以上成果未基于冲击矿压危险的分时分区分级特征对断顶爆破防治技术体系进行研究。

笔者针对坚硬顶板冲击矿压频发的问题,基于冲击矿压动静载叠加原理,分析了断顶爆破防治冲击矿压的作用机制。基于冲击危险具有分时

分区分级的特征,提出分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系。同时开展了断顶爆破防治坚硬顶板型冲击矿压的实践,并采用三种方法对断顶爆破效果进行评价,防治效果显著,可以为类似地质条件下冲击矿压防治提供参考。

1 断顶爆破防治冲击矿压作用机制

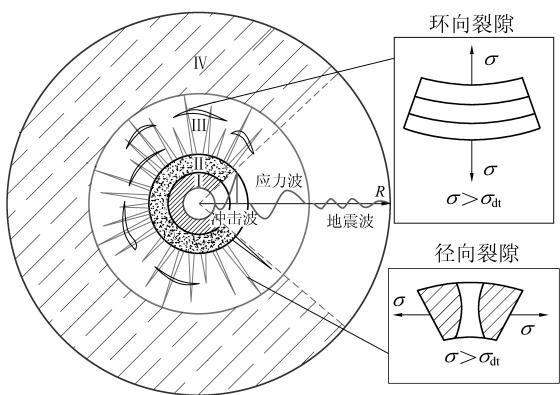
1.1 爆破作用分区

当炸药在煤岩体中爆炸时,径向以爆破孔为中心,煤岩体顺次向外遭受不同的破坏,在爆破孔周围会形成爆破孔扩大空腔、粉碎区、裂隙区及震动区^[11-13]。

岩体内部爆破作用分区如图1所示。在爆炸瞬间,爆破孔周围会产生扩孔现象,形成一定的扩大空腔。爆破孔外的煤岩介质受到爆炸冲击波强烈压缩作用而破碎并产生较大的塑性变形,结构完全破坏,形成粉碎区。形成粉碎区之后,爆炸冲击波会衰减成应力波,冲击波压力小于煤岩体动抗压强度 σ_{dc} ,径向方向产生压应力和压缩形变,切向方向产生拉应力和拉伸形变。当切向拉应力 σ 大于其动抗拉强度 σ_{dt} 时,煤岩体被拉断,形成径向裂隙。爆生气体以较高的速度楔入煤岩介质的裂隙中引起煤岩二次损伤断裂,使煤岩体原生和爆生初始裂隙发生扩展。当切向应力小于煤岩体动抗拉强度 σ_{dt} 时,会向炮孔方向产生反向拉伸应力,当反向拉应力超过煤岩体的动抗拉强度 σ_{dt} 时,形成环向裂隙,环向裂隙和径向裂隙与原煤岩体中原生裂隙纵横交错,形成裂隙区。在裂隙区域以外,应力波衰减为地震波,地震波只能引起质点产生振动而不破坏煤岩体结构,该区域即为弹性振动区。在岩体中实施断顶爆破后,每个爆破孔产生的裂隙区相互贯通形成连续弱面,岩体中的连续弱面是控制冲击矿压防治中最重要的区域。

1.2 断顶爆破前后煤岩体静载和矿震动载变化规律

冲击矿压动静载叠加原理^[14-15]认为采掘围岩



I—扩大空腔; II—粉碎区; III—裂隙区; IV—弹性振动区

图1 岩体内部爆破作用分区示意

Fig.1 Division of blasting in rock mass

静载荷与矿震诱发的动载荷叠加,超过了煤岩体冲击破坏的临界载荷时,动力破坏煤岩体,造成冲击矿压动力灾害显现。因此冲击矿压的防治要从降低采掘围岩静载荷水平和矿震诱发的动载荷强度的角度出发^[16-18]。断顶爆破前后岩层结构及煤体应力分布变化如图2所示,断顶爆破后顶板垮落诱发的动载强度降低,煤体内静载应力峰值和动静载叠加应力

峰值降低,煤体内峰值应力位置向工作面前方转移。坚硬顶板具有强度高和节理裂隙不发育等特点,在未实施断顶爆破前容易在采空区形成悬顶。悬顶岩层中储存大量的弯曲弹性能,同时造成工作面周围煤体的静载应力集中,岩层储存的弯曲弹性能和煤体的静载应力集中程度均随悬顶长度的增大而增加。在顶板岩层中实施断顶爆破后,岩体中形成的粉碎区和裂隙区一方面能够破坏顶板完整性,改变岩体的力学特性,使其不具备储存高弯曲弹性能的能力,从而降低顶板岩层破断垮落时诱发的动载强度。粉碎区和裂隙区的存在会加快矿震动载的衰减,从而减弱矿震动载对工作面煤体的影响。另一方面,断顶爆破可以促使采空区顶板岩层及时垮落,减少采空区悬顶长度和削弱与前方煤体上覆岩层的连续性结构,从而降低工作面周围煤体的静载强度,促使煤体内峰值应力位置向工作面前方转移。综上分析,断顶爆破主要通过改变岩体破坏时的动载强度和煤体内静载强度两方面来防止冲击矿压灾害的发生。

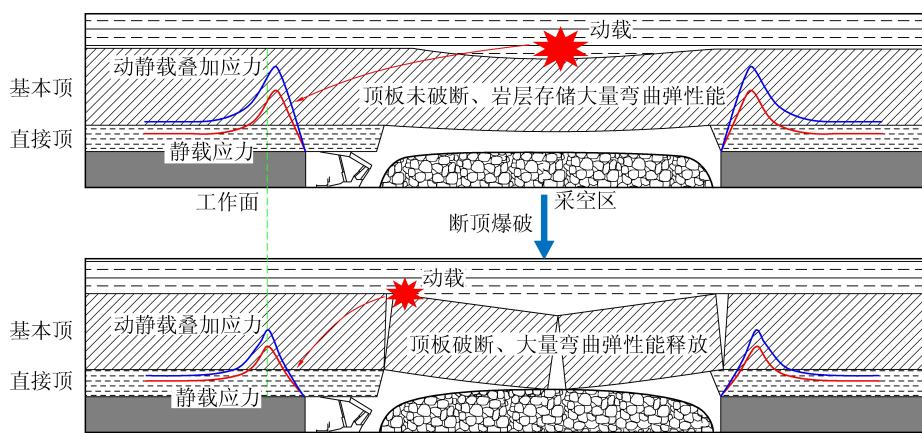


图2 断顶爆破前后岩层结构及煤体应力分布

Fig.2 Rock structure and load distribution of coal before and after break-tip blasting

2 分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系

工作面回采前后冲击危险演化示意如图3所示,在工作面回采前,根据地质条件和开采技术条件对工作面所有区域的冲击危险性进行预评估,将工作面不同区域划分弱、中等、强冲击危险。在工作回采期间,受工作面回采活动影响,在不同的时间段内冲击危险的空间和强度特征会发生变化,比如工作面回采前评估的弱冲击危险区域在工作面回采期间受采掘活动影响演化为中等冲击危险或强冲击危险,或者预评估的中等或强冲击危险区域范围发生

变化。因此在工作面回采期间需要根据冲击危险监测预警信息重新识别冲击危险区域和评价冲击危险等级。工作面的不同区域在不同时间段具有不同的冲击危险等级,工作面的冲击危险性具有分时间、分区域和分等级的特征。

由于冲击危险的演化具有分时分区分级的特征,断顶爆破防治技术体系的建立应基于冲击危险的分时分区分级特征进行。在时间上,可以先根据冲击危险预评价结果对工作面提前进行断顶爆破预处理,但冲击危险受采掘活动等影响是时刻变化的,需要根据冲击危险实时监测预警结果对预警区域进行及时解危处理。因此断顶爆破在时间上可以分为

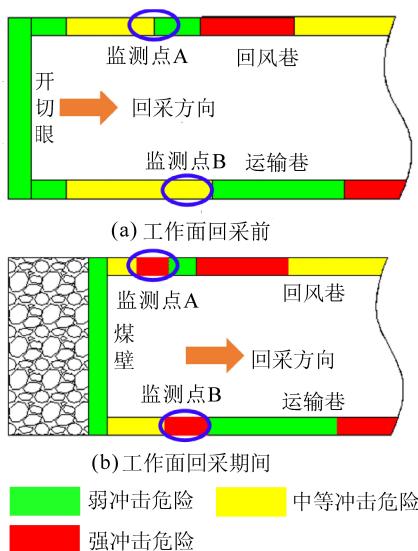


图3 工面回采前后冲击危险演化示意

Fig.3 Evolution of rock burst before and after mining

回采前超前预裂爆破和回采期间及时解危爆破;在冲击矿压发生区域上,不同区域的冲击矿压发生机制是不同的,因此首先要分析不同区域冲击矿压发生的机制,然后确定断顶爆破方案,工作面可划分为开切眼区域、临空煤柱区域和工作面内区域,笔者将分别分析3个区域的冲击矿压发生机制,研究3个区域的合理断顶爆破技术方案;在等级上,冲击危险等级分为弱、中等、强冲击危险等级,不同的冲击危险等级需要进行不同程度的断顶处理,因此,冲击危险等级主要影响断顶爆破参数的选择,包括钻孔间距、爆破装药量等参数。

2.1 开切眼倾向断顶爆破

在坚硬顶板地质条件下,工作面在初采阶段,采空区顶板走向由两侧支撑,一侧由后方实体煤支撑,一侧由前方工作面实体煤支撑。坚硬顶板岩层在自重应力下难以垮落而形成悬顶,悬顶面积随工作面回采逐渐增大,当悬顶面积足够大至发生初次破断垮落时,破断诱发矿震的动载叠加煤体内的高静载极易超过煤体破坏的临界载荷而诱发冲击矿压。因此,在工作面开切眼区域沿倾向方向实施断顶爆破,使顶板在短距离回采形成第一次垮落,顶板由两侧支撑转变为一侧支撑,减少悬顶施加在煤体的静载强度和降低顶板初次破断产生的动载强度。

开切眼倾向断顶爆破示意如图4所示。沿开切眼倾向布置一排爆破钻孔,进行开切眼断顶爆破,在工作面继续回采一定距离后,坚硬顶板初次垮落。爆破钻孔深度的设计与顶板岩层结构有关,钻孔深

度应至坚硬顶板的上接触面,钻孔深度一般在20~40 m范围内,保证钻孔装药爆破段在坚硬顶板区域内,封孔长度不小于钻孔长度的1/3,爆破钻孔直径一般在100~150 mm范围内。钻孔间距设计可以通过计算单孔爆破致裂半径进行设计,与炸药的参数和岩石强度有关,钻孔间距一般在10~20 m范围内。要尽可能保证爆破区域能够沿开切眼倾斜方向形成连续的破坏面,达到最佳断顶效果。

2.2 临空煤柱侧走向断顶爆破

留设护巷煤柱是我国煤矿采取的主要护巷方法,在坚硬顶板条件下,临空侧采空区顶板岩层无法充分垮落时,临空煤柱会在悬顶作用下产生应力集中,临空煤柱内部应力分布^[19]如图5所示,在采空区侧和工作面巷道侧分别形成塑形区 X_1 和 X_0 ,在中间部分形成弹性区 X_3 。弹性区 X_3 会积聚弹性性能,随着工作面开采,采空区范围进一步加大,在煤柱巷道侧或采空区侧的坚硬顶板断裂瞬间,悬顶施加在煤柱上的应力条件改变,煤柱中积聚弹性性能瞬间释放,诱发冲击矿压。

针对临空侧煤柱冲击问题,需要对临空侧悬顶进行断顶爆破处理,沿工作面走向在临空煤柱上方顶板岩层中施工倾斜的爆破孔。爆破处理区域为煤柱内弹性区 X_3 ,因此爆破钻孔应布置在煤柱内弹性区域内。煤柱两侧塑性区宽度 X_1 和 X_0 可以通过理论计算或者现场实测获得,假设坚硬顶板高度为 H ,煤柱宽度为 B ,则钻孔长度 L 和钻孔倾角 θ 分别按照下式计算为:

$$L = \sqrt{H^2 + (B - X_1)^2} \quad (1)$$

$$\sin \theta = H/L \quad (2)$$

临空煤柱侧爆破钻孔间距与单孔爆破致裂半径和煤柱冲击危险等级有关,一般在5~10 m范围内,强冲击危险区域内一般取下限值5 m,中等或弱冲击危险区域取上限值10 m。封孔长度不小于钻孔长度的1/3,爆破钻孔直径一般在100~150 mm范围内。为减少爆破震动对工作面的影响,临空煤柱断顶爆破要超前工作面煤壁一段距离提前施工,一般超前距离至少大于150 m。通过断顶爆破对临空侧悬顶进行强制断顶,破坏煤柱上方的顶板的连续性,降低临空侧悬顶对煤柱造成的静载强度和顶板破断时诱发的动载强度,达到防治临空煤柱侧冲击矿压灾害的目的。

2.3 工作面内超前预裂爆破

当工作面回采形成第一次垮落时,采空区顶板岩层进入周期性垮落阶段。采空区岩层走向由两侧支撑转变为单侧支撑,工作面煤体在顶板悬露弯沉

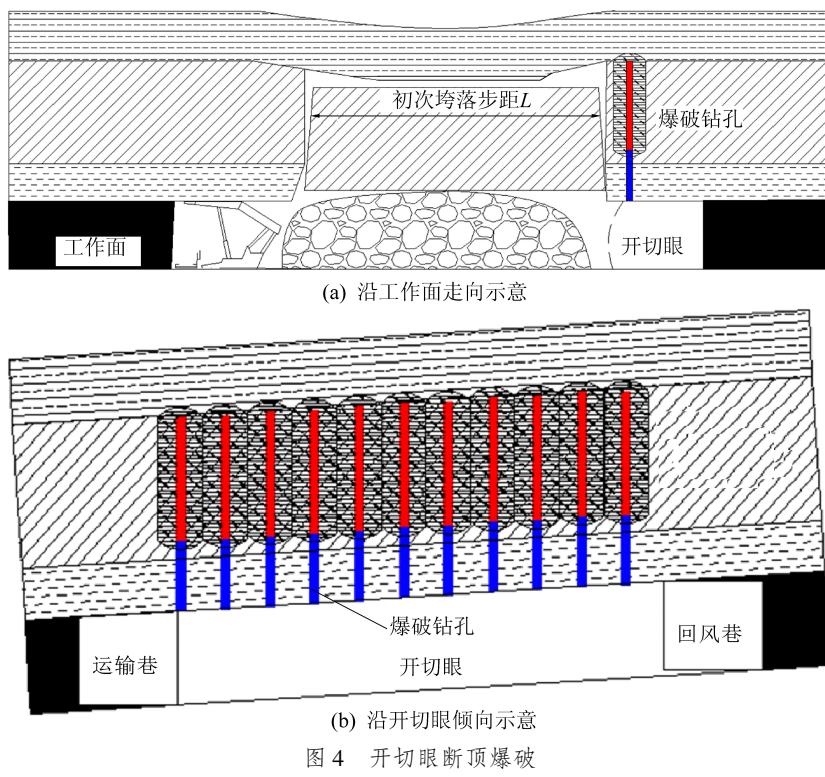


图4 开切眼断顶爆破

Fig.4 Cut-off blasting

的挤压夹持作用下产生应力集中和能量集聚。当应力达到煤体强度极限时,煤体发生破裂和能量释放,能量释放所引起的震动会使悬露弯沉的顶板发生振动和反弹,致使顶板破断,从而诱发冲击矿压。随着工作面的推进,悬顶面积逐步增大,顶板拉应力不断增大,当达到顶板强度极限时,坚硬顶板自行发生破断垮落。在坚硬顶板破断的瞬间,坚硬顶板振动压缩产生较大的动载,并以较高的加载速率对工作面煤体进行冲击加载,较大的垂直压力和侧向驱动力使煤体迅速发生破坏、扩容,产生向外的侧向运动。

为降低坚硬顶板对工作面冲击危险的影响,可以在工作面回采前对顶板岩层采用超前预裂爆破措施(图6)。在工作面两巷道向工作面内各布置一组

扇形孔,每组扇形孔3个孔,对巷道周围30~40 m范围内的坚硬顶板岩层进行预裂爆破。爆破钻孔深度和角度主要依据为处理坚硬岩层的高度H,一组扇形孔中单孔孔底水平距离应该在10~15 m范围内。爆破钻孔组间距L主要与工作面的周期来压步距大小和冲击危险等级有关,组间距一般在10~20 m,在强冲击危险区域可以取下限值10 m,中等或弱冲击危险区域可以取上限值20 m,尽量保持预裂爆破区域与周期来压位置相一致。超前预裂爆破选择超前工作面一定距离 L_1 ($L_1 > 150$ m)进行,远离工作面采掘活动区域,减少爆破震动对工作面煤体和采空区顶板的扰动。

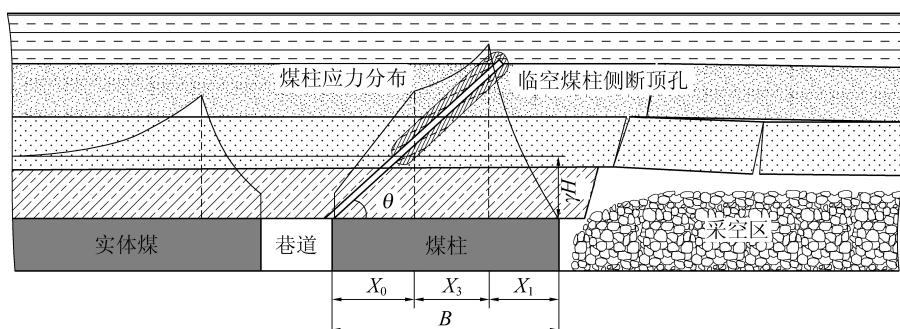


图5 临空煤柱内应力分布及断顶爆破方案

Fig.5 Stress distribution of coal pillar and break-tip blasting

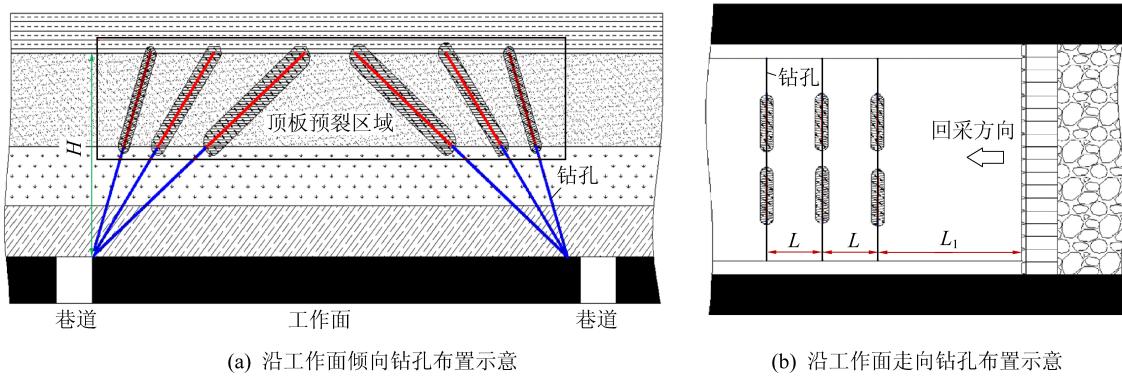


图 6 顶板超前预裂爆破
Fig.6 Advanced pre-splitting blasting

2.4 及时解危断顶爆破

上述3种针对工作面不同区域的断顶爆破措施均是依据前期冲击危险评估结果提前进行的,然而冲击危险在时间、空间和强度上是随着采掘活动不断转移和变化的。在采掘活动过程中,当监测工作面某区域具有冲击危险时,应根据冲击危险预警的位置和等级及时对冲击危险预警区域进行断顶爆破,直至解除预警区域的冲击危险。及时解危断顶爆破方案和参数设计原则可参考上述3种断顶爆破方案。

2.5 分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系

基于揭示的冲击危险演化的分时、分区和分级特征,建立了分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系,如图7所示。在时间上将断顶爆破分为工作面回采前的超前预裂爆破和工作面回采期间的及时解危爆破;在区域上,工作面回采前分为开切眼区域、临空煤柱侧区域和工作面内区域,工作面回采期间需要根据冲击危险监测信息重新识别冲击危险区域,并分别实施开切眼倾向断顶爆破、临空煤柱侧走向断顶爆破和工作面内超前预裂爆破;在等级上,冲击危险分为弱、中等和强冲击危险,不同的冲击危险等级设计不同的爆破参数;并对断顶爆破效果进行评估,实现工作面安全回采。

3 断顶爆破防治冲击矿压实践

3.1 工程概况

某矿W1103工作面北部为W1101采空区(图8),中间留设宽度36 m区段煤柱,南部为实体煤,东侧临近采区辅助运输大巷,西侧靠近矿井边界。开采煤层煤厚平均为4 m,煤层埋深400~600 m,煤层上方直接顶为5.7 m粉砂岩,单轴抗压强度为40 MPa,基本顶为25 m砂砾岩,单轴抗压强度达到122 MPa,底

板为4 m粉砂岩。经冲击倾向性鉴定,开采煤层、顶板和底板均具有强冲击倾向性。坚硬顶板是W1103工作面冲击矿压危险的重要影响因素之一。

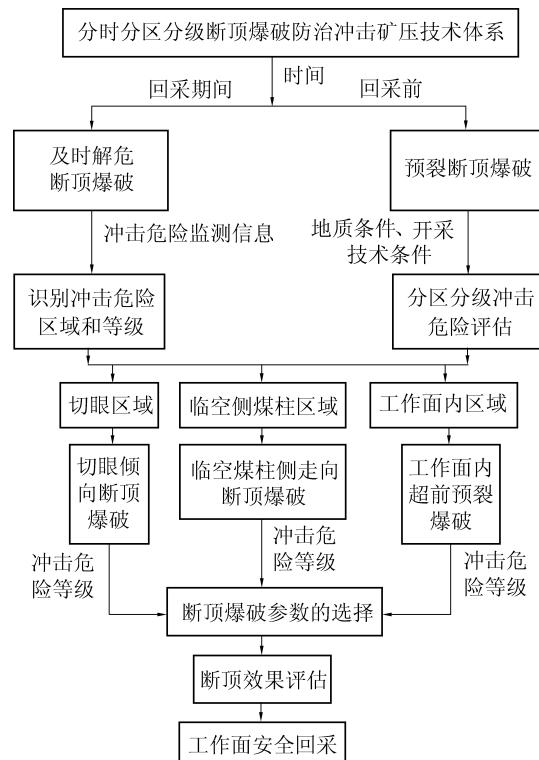


图 7 分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系
Fig.7 Technical system of controlling rock burst by time-space-level division break-tip blasting

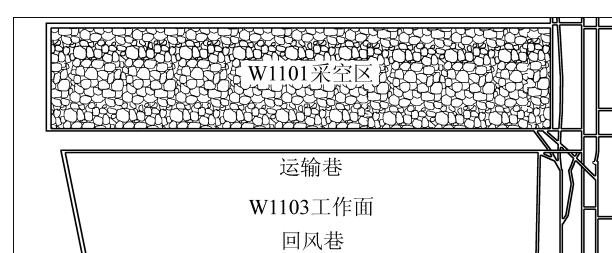


图 8 W1103 工作面布置
Fig.8 Layout of No. W1103 working face

3.2 断顶爆破措施实施方案

针对坚硬顶板和相邻采空区对W1103工作面造成的冲击危险的问题,通过采取分时分区分级断顶爆破技术体系对顶板进行处理,包括对开切眼区域断顶爆破、临空煤柱侧断顶爆破和工作面内超前预裂爆破三种措施,以此达到降低工作面的冲击危险性的目的。W1103工作面开切眼断顶爆破方案与参数选择如图9所示,W1103工作面倾向长200 m,开切眼爆破钻孔布置间距为10 m,钻孔长度为35 m,钻孔倾角75°,开切眼布置爆破钻孔共计20个。煤柱临空侧和工作面超前预裂爆破方案和参数如图10所示。工作面超前预裂爆破钻孔每组3个钻孔,孔组间距根据冲击危险等级分区域设计,强冲击危险区域组间距10 m,中等冲击危险区域孔组间距20 m。煤柱临空侧爆破钻孔每组1个,

孔间距5 m。断顶爆破钻孔参数和爆破参数见表1。

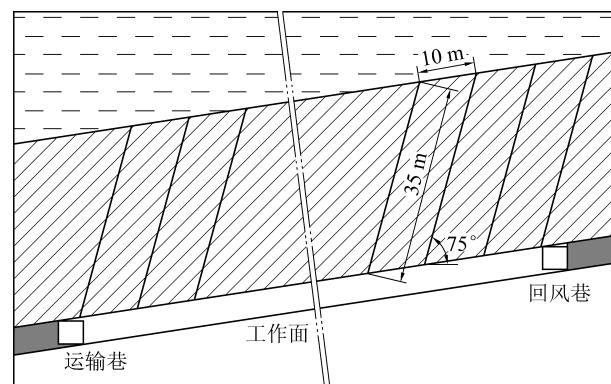
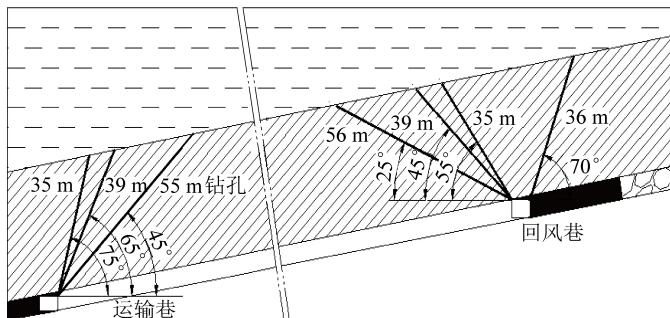
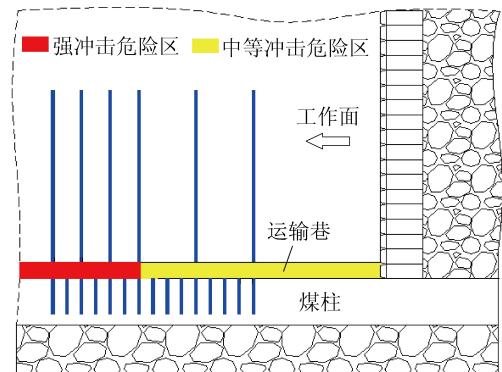


图9 W1103工作面开切眼断顶爆破钻孔布置

Fig.9 Borehole layout of cut-off breaking blasting in No.W1103 working face



(a) 爆破钻孔倾向布置



(b) 爆破钻孔走向布置

图10 W1103工作面超前预裂爆破和临空煤柱侧爆破钻孔布置

Fig.10 Borehole layout of cut-off breaking blasting and side-breaking blasting of goaf pillar in No.W1103 working face

表1 各断顶爆破钻孔装药参数和封孔长度参数

Tabal 1 The parameters of charging and sealing length of drilling hole for break-tip blasting

位置	孔间距/m	仰角/(°)	炮孔长/m	封孔长/m	装药量/kg
开切眼倾向断顶爆破	10	75	35	≥12	85
临空煤柱侧走向断顶爆破	5	70	36	≥12	85
		55	35	≥12	85
工作面回风巷内超前预裂爆破	10/20	45	39	≥13	95
		25	56	≥19	135
		75	35	≥12	85
工作面运输巷内超前预裂爆破	10/20	65	39	≥13	95
		45	55	≥19	135

3.3 断顶爆破效果评价

1)开切眼断顶爆破效果分析。顶板弯曲弹性能 U_w 与岩层悬伸长度的五次方成正比,即顶板跨

距(悬顶) L 值越大,顶板岩层积聚的能量越多,冲击危险越高。开采煤层未采取开切眼断顶爆破措施的工作面初次来压步距为90 m左右,周期来压步距为40 m左右。W1103工作面采取断顶爆破措施后,工作面初次来压步距为70 m,周期来压步距平均为30 m左右,顶板岩层弯曲弹性能可以根据下式计算:

$$U_0 = \frac{q^2}{576EJ} L_0^5 \quad (3)$$

$$\Delta U_w = \frac{q^2}{576EJ} (L_0^5 - L_b^5) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta U_w}{U_0} = \frac{(L_0^5 - L_b^5)}{L_0^5} \times 100\% \quad (5)$$

式中: U_0 为爆破前顶板岩层弯曲能,J;q为顶板及上覆岩层附加载荷的单位长度载荷,MPa;E为顶板岩层弹性模量,MPa;J为顶板端面惯性矩; L_0 为爆破前顶板悬顶长度,m; L_b 为爆破后顶板悬顶长度,m;。

通过计算,开切眼顶板爆破处理后,在初次来压和周期来压期间,顶板中聚集的弯曲弹性能分别减少了72%和76%。表明开切眼断顶爆破能够大幅度降低顶板聚集的能量,能够降低工作面的冲击危险,爆破效果良好。

2)钻屑法检验。钻屑法是通过在煤体内施工直径为42~45 mm的钻孔,根据钻孔排出的煤粉量及钻孔过程中出现的动力现象评估煤体的应力状态^[20]。W1103工作面在运输巷煤柱侧518 m位置处出现冲击危险预警,实施临空侧断顶爆破措施及时解危,在实施临空侧断顶爆破前后在518 m位置的煤柱区域煤体进行钻屑量检测,爆破前后钻屑检测变化量如图11所示。实施爆破断顶措施后,煤体钻屑量较爆破前平均下降0.55 kg/m,表明此区域的冲击危险性明显降低。

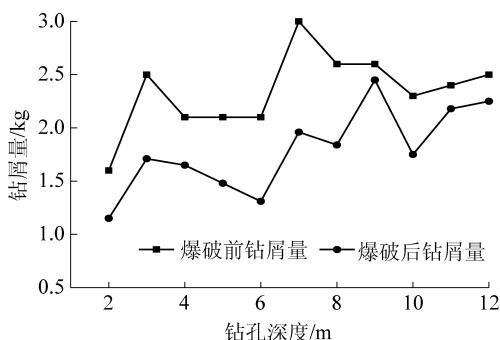


图11 断顶爆破前后煤体钻屑量变化

Fig.11 Variation of coal cuttings before and after break-tip blasting

3)微震监测。W1103工作面在2018年4月25日—5月25日期间回采位置里程为790~850 m。统计此期间每天微震总能量和频次的变化情况(图12)和爆破预裂区域回采前后的微震最大能量和频次变化(表2)。

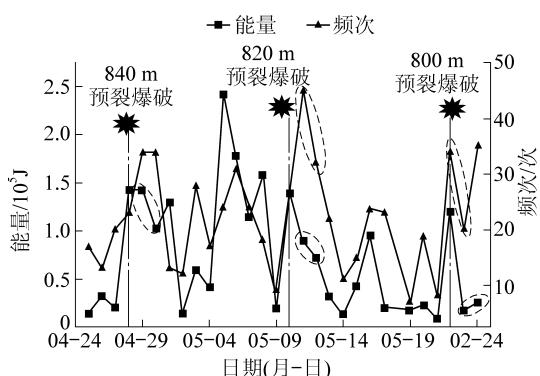


图12 爆破预裂区域前后微震活动规律

Fig.12 Microseismic activity before and after blasting pre-splitting zone

表2 爆破预裂区域回采前后能量频次变化

Tabal 2 The energy frequency changes before and after blasting pre-splitting zone

预裂位置距开	预裂爆破位置回采前		预裂爆破位置回采后	
	切眼距离/m	最大能量/kJ	频次/次	最大能量/kJ
840	79.0	23	53.0	34
820	48.0	27	6.0	45
800	62.0	34	8.0	35

发现工作面顶板预裂爆破区域回采后出现微震总能量明显降低,微震频次显著增加的整体规律。840、820 m 和 800 m 预裂爆破位置回采前3天内微震最大能量分别为79.0、48.0、62.0 kJ,单日微震最大频次分别为23次、27次和34次;回采后3天内微震最大能量分别为53.0、6.0、8.0 kJ,单日微震最大频次分别为34次、45次和35次。分析表明当预裂爆破区域回采后,预裂区域的顶板岩层处于悬露状态,具有活动空间,微震频次的增加说明岩体破裂持续进行,微震总能量和最大能量的降低说明爆破能够降低顶板岩层破断产生的动载强度,预裂爆破对防治顶板型冲击矿压具有良好的效果。

4 结 论

1)从冲击矿压动静载叠加原理的角度出发,研究了断顶爆破防治冲击矿压的作用机制。从控制静载角度,断顶爆破通过减少悬顶长度和破坏采空区顶板与煤层上方顶板的连续性来降低煤体内部静载强度;从控制动载角度,断顶爆破破坏岩体,改变其力学特性,释放岩体储存的弯曲弹性能,从而降低顶板破断时动载强度。

2)基于对冲击危险预评估和冲击危险动态演化的规律分析,揭示了冲击危险的分时、分区和分级特征,建立了包括开切眼倾向断顶爆破、临空侧煤柱走向断顶爆破、工作面内断顶爆破和危险区域及时解危断顶爆破组成的分时分区分级断顶爆破防治冲击矿压技术体系。

3)以某矿受坚硬顶板影响的W1103冲击危险工作面为例,采用分时分区分级断顶爆破技术体系进行冲击矿压的防治,并采取了三种爆破效果检验方法,结果表明断顶爆破措施效果良好,有效降低了工作面的冲击危险性。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,牟宗龙,曹安业,等.煤矿冲击矿压防治[M].北京:科学出版社,2017.
- [2] 谭云亮,张明,徐强,等.坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):166-172.

- TAN Yunliang, ZHANG Ming, XU Qiang, *et al.* Study on occurrence mechanism and monitoring and early warning of rock burst caused by hard roof [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1):166-172.
- [3] 何江,窦林名,王崧玮,等.坚硬顶板诱发冲击矿压机理及类型研究[J].*采矿与安全工程学报*,2017,34(6):1122-1127.
- HE Jiang, DOU Linming, WANG Songwei, *et al.* Study on mechanism and types of hard roof inducing rock burst [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(6):1122-1127.
- [4] 吕进国,姜耀东,李守国,等.巨厚坚硬顶板条件下断层诱发特征及机制[J].*煤炭学报*,2014,39(10):1961-1969.
- LYU Jinguo, JIANG Yaodong, LI Shouguo, *et al.* Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(10):1961-1969.
- [5] 张传玖,杜涛涛,李红平,等.坚硬顶板工作面高静载型冲击地压防治研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(3):112-119.
- ZHANG Chuangjiu, DU Taotao, LI Hongping, *et al.* Research on rock burst prevention of high static coal seam in hard roof working face [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3):112-119.
- [6] 欧阳振华,齐庆新,张寅,等.水压致裂预防冲击地压的机理与试验[J].*煤炭学报*,2011,36(S2):321-325.
- OUYANG Zhenhua, QI Qingxin, ZHANG Yin, *et al.* Mechanism and experiment of hydraulic fracturing in rock burst prevention [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(S2):321-325.
- [7] 范晋伟.冲击煤层的水压致裂防治研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [8] 齐庆新,雷毅,李宏艳,等.深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J].*岩石力学与工程学报*,2007,26(S1):3522-3527.
- QI Qingxin, LEI Yi, LI Hongyan, JI, *et al.* Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1):3522-3527.
- [9] 任艳芳,刘全明,徐刚,等.冲击矿压解危深孔断顶爆破步距数值模拟研究[J].*煤矿开采*,2009,14(4):18-20.
- REN Yanfang, LIU Quanming, XU Gang, *et al.* Numerical Simulation for Pace of Roof-broken Deep-hole Blasting for Releasing Rock-burst Danger [J]. *Coal mining Technology*, 2009, 14(4):18-20.
- [10] 欧阳振华.多级爆破卸压技术防治冲击地压机理及其应用[J].*煤炭科学技术*,2014,42(10):32-36,74.
- OUYANG Zhenhua. Application and mechanism of mine strata pressure pumping prevention with multi stage blasting pressure releasing technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 32-36, 74.
- [11] 杨仁树,丁晨曦,王雁冰,等.爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J].*岩石力学与工程学报*,2016,35(S2):3501-3506.
- YANG Renshou, DING Chenxi, WANG Yanbing, *et al.* Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2):3501-3506.
- [12] 何满潮,郭鹏飞,张晓虎,等.基于双向聚能拉张爆破理论的巷道顶板定向预裂[J].*爆炸与冲击*,2018,38(4):795-803.
- HE Manchao, GUO Pengfei, ZHANG Xiaohu, *et al.* Directional pre-splitting of roadway roof based on two-way energy-gathering tension blasting theory [J]. *Explosion and shock waves*, 2018, 38(4):795-803.
- [13] 刘志刚.呼吉尔特深部矿区坚硬顶板宽煤柱采场爆破减压降冲原理与实践[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [14] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].*煤炭学报*,2015,40(7):1469-1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, *et al.* Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7):1469-1476.
- [15] 窦林名,白金正,李许伟,等.基于动静载叠加原理的冲击矿压灾害防治技术研究[J].*煤炭科学技术*,2018,46(10):1-8.
- DOU Linming, BAI Jinzheng, LI Xuwei, *et al.* Study on prevention and control technology of rockburst disaster based on theory of dynamic and static combined load [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10):1-8.
- [16] 韩泽鹏,窦林名,王正义,等.动静载影响下大倾角工作面巷道两帮应力分布规律研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(9):183-188.
- HAN Zepeng, DOU Linming, WANG Zhengyi, *et al.* Research on stress distribution law of two gangs in large dip angle working face under the influence of dynamic and static loads. [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9):183-188.
- [17] 翟明华,姜福兴,齐庆新,等.冲击地压分类防治体系研究与应用[J].*煤炭学报*,2017,42(12):3116-3124.
- ZHAI Minghua, JIANG Fuxing, QI Qingxin, *et al.* Research and practice of rock burst classified control system [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12):3116-3124.
- [18] 窦林名,姜耀东,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(4):803-811.
- DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, *et al.* Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(4):803-811.
- [19] 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):54-59,66.
- 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, 66.
- [20] 陈峰,潘一山,李忠华,等.利用钻屑法对卸压钻孔措施效果的分析评价[J].*岩土工程学报*,2013,35(S2):266-270.
- CHEN Feng, PAN Yishan, LI Zhonghua, *et al.* Analysis and evaluation of effects of borehole pressure relief measures by drilling cutting method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S2):266-270.