

文章编号:1671-251X(2021)02-0109-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020080010

张双楼煤矿应力集中区冲击地压灾害防控实践

张雷^{1,2}



扫码移动阅读

(1. 江苏徐矿能源股份有限公司 张双楼煤矿, 江苏 徐州 221616;
2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:目前的爆破卸压防治措施仅针对煤层顶板,对顶板-煤体-底板三协同爆破卸压治理研究较少,特别对坚硬厚层砂岩顶板覆层区域的冲击灾害防治研究更少。针对上述问题,以江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿 74101 工作面为工程背景,从开采布局、煤岩冲击倾向性、砂岩覆层区应力集中程度方面分析了其冲击灾害诱发因素,揭示了煤岩体突然失稳破坏诱发冲击灾害的原因,认为顶板砂岩覆层异常、断层地质构造、底板坚硬细砂岩等地质条件造成局部高应力集中是诱发冲击灾害的主要原因。采用矿震震动波 CT 反演技术精准探测得到 74101 工作面强冲击危险区:运输巷侧沿巷道 75 m,延伸工作面 60 m 椭圆形区域;轨道巷侧沿巷道 60 m,延伸工作面 80 m 椭圆形区域。针对划分的高应力集中区,提出了精准的“顶板-煤体-底板”一体化爆破卸压技术,对 74101 工作面冲击危险区域进行卸压防冲,并采用微震监测手段及现场观测对卸压防冲效果进行评价。结果表明:爆破卸压后,74101 工作面厚硬砂岩覆层区矿震日累计能量由 1.57×10^4 J 降低至 10^4 J 以下,震动频次降低 50%,矿震活动呈现低能量、低频次的特征,冲击危险性显著降低,验证了一体化爆破卸压技术适用于张双楼煤矿厚硬砂岩覆层区冲击动力灾害防治。

关键词:煤炭开采;综采工作面;冲击地压;“顶板-煤体-底板”一体化爆破卸压;砂岩覆层区应力异常区;CT 反演;矿震能量;震动频次

中图分类号:TD353 文献标志码:A

The practice of rock burst disaster prevention and control in the stress concentration area of Zhangshuanglou Coal Mine

ZHANG Lei^{1,2}

(1. Zhangshuanglou Coal Mine, Jiangsu Xukuang Energy Co., Ltd., Xuzhou 221616, China;
2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The current pressure relief blasting methods are only for the coal seam roof, and there are few researches on the roof-coal-floor synergistic pressure relief blasting management, especially for the rock burst disaster prevention and control in the hard and thick sandstone roof overburden area. In order to solve the above problems, taking the 74101 working face of Zhangshuanglou Coal Mine of Jiangsu Xukuang Energy Co., Ltd. as the engineering background, this study analyzes the rock burst disaster inducing factors from the aspects of mining layout, coal rock burst tendency and sandstone overburden area stress concentration degree. This study reveals the reasons for the rock burst disaster induced by the sudden instability of coal rock mass. It is proposed that the local high stress concentration, caused by the geological conditions such as abnormal sandstone overburden area of roof, fault geological structure and hard fine sandstone of floor, is the main cause of rock burst disaster. The CT inversion technology of mine rock burst vibration wave is used to accurately detect the high rock burst risk area of 74101 working face:

收稿日期:2020-08-04;**修回日期:**2020-12-10;**责任编辑:**张强。
作者简介:张雷(1980—),男,山东微山人,教授级高级工程师,博士研究生,长期从事冲击地压灾害防治及煤炭企业安全生产管理方面的研究工作,E-mail:492880672@qq.com。
引用格式:张雷.张双楼煤矿应力集中区冲击地压灾害防控实践[J].工矿自动化,2021,47(2):109-115.
ZHANG Lei. The practice of rock burst disaster prevention and control in the stress concentration area of Zhangshuanglou Coal Mine [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 109-115.

the transportation lane side is 75 m along the roadway and the extended working face is 60 m elliptical area; the track lane side is 60 m along the roadway and the extended working face is 80 m elliptical area. Aiming at the targeted high stress concentration areas, a precise "roof-coal-floor" synergistic pressure relief blasting technology is proposed to relieve pressure in the rock burst risk area of 74101 working face and adopt micro-seismic monitoring methods and on-site observation methods to evaluate the effect of pressure relief and rock burst prevention. The results show that after pressure relief blasting, the daily cumulative energy of mine rock burst in the hard and thick sandstone overburden area of 74101 working face is reduced from 1.57×10^4 J to below 10^4 J and the vibration frequency is reduced by 50%. Moreover, the characteristics of mine rock burst are low energy and low frequency, and rock burst risk is significantly reduced. Therefore, it is verified that the synergistic pressure relief blasting technology is applicable to the prevention and control of rock burst disasters in the hard and thick sandstone overburden area of Zhangshuanglou Coal Mine.

Key words: coal mining; fully mechanized working face; rock burst; "roof-coal-floor" synergistic pressure relief blasting; abnormal stress area in sandstone overburden area; CT inversion technology; mine rock burst energy; vibration frequency

0 引言

由于冲击地压矿井开拓开采设计不合理,同时缺乏“区域先行、局部跟进、分区管理、分类防治”的治灾思路^[1-2],导致在采掘强冲击倾向性煤层过程中极易诱发冲击地压灾害^[3-5]。冲击地压发生时,聚积在煤岩体中的弹性能量以突然、急剧、猛烈的形式释放,造成煤岩体振动和破坏,动力将煤岩抛向井巷,同时发出强烈声响,造成支架与设备、井巷的破坏及人员的伤亡等^[6-9]。尤其是当回采区域内煤层上方存在坚硬厚层砂岩顶板时,工作面回采过程中顶板突然破断产生的强矿震诱发冲击灾害的概率较大,严重威胁矿井的安全生产。

针对坚硬顶板突然破断诱发冲击灾害监测预警,文献[10]通过微震监测系统获取强矿震发生的具体位置,构建微震多维信息识别指标体系,包括优选的频次指标和新提出的震源集中程度、最大应力和总应力当量指标。文献[11]根据矿震事件分析矿压显现剧烈程度、冲击危险程度,并根据能量、频次等变化规律,提前预警分析冲击灾害发生的概率。上述针对冲击灾害的监测预警对冲击地压的防控起到了很好的预测指导作用,但针对工作面局部区域坚硬厚层顶板诱发的冲击灾害监测预警还需要精准探测研究。

深井坚硬厚层砂岩顶板是诱发冲击地压灾害的主控因素之一。针对坚硬厚层顶板诱发冲击地压灾害防治,文献[12]建立了分时、分区、分级断顶爆破防治冲击地压技术体系,并通过理论计算、钻屑监测和微震监测手段检验断顶爆破的效果。文献[13-14]从坚硬顶板作用在煤体上产生的应力、能

量、动载荷角度揭示了坚硬顶板诱发冲击地压机理及冲击灾害发生的判别准则。文献[15]认为综放开采特厚煤层条件下坚硬厚层砂岩极易滑移失稳,为冲击地压的发生提供了远场动载荷。文献[16]分析了综放工作面坚硬厚层顶板诱发冲击地压的主控因素为高静载应力、高能量矿震载荷和柔性支护。针对坚硬厚层顶板诱发冲击灾害的防治难题,国内外研发了爆破切顶和水压致裂顶板技术^[17]。文献[18]探讨了深孔断顶爆破防冲机制。文献[19]研究了防治冲击地压的多级爆破卸压技术。以上研究针对坚硬顶板爆破卸压防治冲击地压灾害取得了丰硕成果,但现有的爆破卸压防治措施仅针对煤层顶板,对顶板-煤体-底板三协同爆破卸压治理研究较少,特别对坚硬厚层砂岩顶板覆层区域的冲击灾害防治研究更少。

本文以江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿 74101 综采工作面为工程背景,分析了砂岩覆层应力异常区冲击灾害发生原因,并利用矿震震动波 CT(Computerized Tomography,计算机层析成像)反演技术探测砂岩覆层区应力集中程度,进而实施精准的“顶板-煤体-底板”一体化爆破卸压技术,优化爆破工艺参数,通过分析工作面微震能量、频次变化规律,验证卸压防冲效果。本文研究成果可为与张双楼煤矿相似生产、地质条件下工作面冲击灾害的监测防治提供参考。

1 工程概况

江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿 74101 工作面位于-1 000 m 水平东翼采区,东至 f30 断层,西至工业广场保护煤柱,南临 7123 采空区,北部

为实体煤未采区。地面标高为+38.0~+38.5 m,煤层底板标高为-956.7~-980.5 m,工作面宽约180 m,走向长约1 336 m,工作面布置如图1所示。74101工作面切眼附近发育f30断层($\angle 55^\circ$,断层落差 H 为0~12.5 m),工作面轨道巷靠近顶板砂岩增厚区发育f10($\angle 65^\circ$, $H=0\sim 4.5$ m)正断层,工作面内延展影响范围沿走向达50 m,沿倾向达35 m。

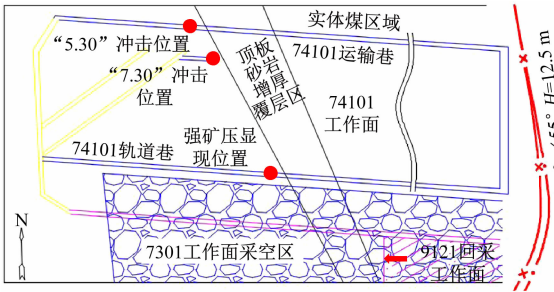


图1 74101工作面布置
Fig.1 Layout of 74101 working face

张双楼煤矿7煤层和砂岩覆层区坚硬顶板冲击倾向性鉴定结果均为强冲击倾向性,煤岩易失稳,诱发冲击灾害。74101工作面局部砂岩覆层增厚区结构如图2所示。74101工作面主采7煤层,平均煤厚为3.5 m,近水平煤层,煤层坚固性系数为1.74,综采放顶煤开采,垮落法管理采空区。工作面伪顶为6.2 m厚泥岩,坚固性系数为3.5;直接顶为5.1 m的厚细砂岩,坚固性系数为5.3~6.5;基本顶为中细砂岩,顶板覆层异常区域基本顶平均厚度由6.8 m增大为12.7 m,坚固性系数为7.6~8,增厚区在工作面内延伸达65 m左右;直接底为4.7 m厚泥岩,坚固性系数为3.5;基本底为24.4 m厚的细砂岩,坚固性系数为6.6~7.5。

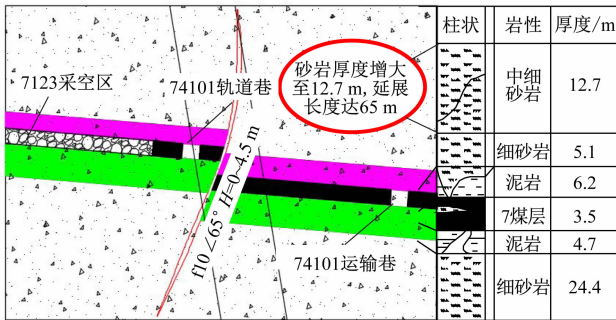


图2 74101工作面局部砂岩覆层增厚区结构
Fig.2 Structure of the local thick sandstone overburden area on 74101 working face

2 冲击灾害概况及诱因分析

2.1 工作面冲击灾害概况

74101工作面临近7301工作面采空区,7301工作面下伏9121工作面正在回采9煤层(与7煤层间

距约为26 m)。74101工作面轨道巷曾经发生过强矿压显现现象,现场底鼓为1~2 m,轨道及盖板被弹起并抛到巷道另一侧,底板出现小裂缝,帮部变形不明显。2015-05-30,74101运输巷在综掘机割煤掘进时曾发生“5.30”大矿震事件,能量为 5.29×10^4 J,掘进工作面上帮向后第1—5排锚杆出现大位移,第1—2排锚杆最大位移量为0.8 m,掘进工作面向后8~12 m内向巷道中间鼓出0.2 m。2010-07-30,该区域—1 200 m东一采区7煤层运输上山在掘进过程中发生“7.30”冲击地压灾害,矿震最大能量震级为2.7级,破坏通风设施7处,损坏刮板输送机、带式输送机各1部,破坏巷道178 m,造成6人死亡。对该区域发生的3次较严重的冲击灾害进行总结分析,找出致灾主控因素及发生原因。

2.2 冲击灾害诱因分析

2.2.1 开采布局不合理

冲击地压防治应坚持“区域先行、局部跟进”的原则,从采掘布局、开采设计等方面避免或降低采掘区域高应力集中现象。张双楼煤矿3次冲击灾害发生的原因是采掘布局不合理,开采扰动剧烈,致使局部应力集中程度高,诱发冲击灾害。张双楼煤矿采掘工作面发生冲击地压之前,对冲击地压灾害认识不足,未从开采保护层、不留孤岛工作面等方面提高防范意识。采掘工作面参数设计、矿压控制等均采用浅部开采经验与理论,尤其是终采线位置、大巷保护煤柱宽度、区段煤柱宽度等设计不合理,导致工作面开采过程中形成高应力集中区。“5.30”冲击与“7.30”冲击区域,巷道间的煤柱高达26.5 m,形成孤岛煤柱高应力集中区,诱发冲击灾害。74101工作面轨道巷和运输巷掘进过程中,临近7301工作面采空区下覆9121工作面正在回采,74101工作面运输巷掘进工作面距9121回采工作面走向距离约为230 m,最远距离约为330 m,9121工作面综放开采覆岩运移对74101工作面两巷掘进扰动较大,采掘距离远小于《煤矿安全规程》规定的最小安全距离,近距离采掘扰动,形成局部高应力集中,是导致3次冲击灾害发生的重要原因。

2.2.2 煤岩冲击倾向性强

对张双楼煤矿7煤层进行冲击倾向性测定,测定结果如下:平均动态破坏时间为47 ms,冲击能量指数为4.13,弹性能量指数为9.2;单轴抗压强度为17.4 MPa,7煤层上覆顶板的弯曲能量指数为23.9 kJ,综合判定7煤层具有强冲击倾向性,7煤层上覆顶板具有弱冲击倾向性,即7煤层及其顶板在采动应力集中条件下易发生失稳破坏,诱发冲击地压灾害。

2.2.3 砂岩覆层区应力集中程度高

张双楼煤矿为典型的千米深井,深井高应力集中,极易诱发冲击灾害。统计表明^[3],每开采百万吨煤炭,冲击地压发生指数随开采深度的增加明显升高,74101 工作面平均开采深度约为 1 000 m,开采百万吨煤炭其冲击地压发生指数为 0.8,工作面可采煤炭储量为 137 万 t。工作面可能发生冲击地压的次数为 1.09 次,即 74101 工作面采掘过程中,冲击地压发生的可能性接近 100%。

煤体在应力异常区内冲击失稳主要有近场静载应力为主的冲击和远场动载震动为辅的冲击 2 种,如图 3 所示。静载应力冲击是由于煤体受力超过了其最大承载能力而发生的突然失稳,而动载震动冲击则是由于煤体上方存在厚层和坚硬的岩层,其破碎时产生强烈动载,震动波传播到达煤体时,促使煤体内的应力急剧增加,产生猛烈的冲击破坏。

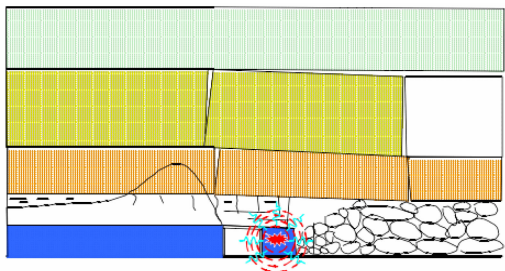


图 3 煤体冲击破坏

Fig. 3 The schematic diagram of coal rock burst

“7.30”冲击灾害事故地点、74101 轨道巷强矿压发生区域、“5.30”运输巷掘进头冲击位置均位于 74101 工作面的顶板砂岩增厚区域,同时 74101 工作面轨道巷靠近顶板砂岩增厚区发育 f10 断层,7 煤层底板发育坚硬厚层细砂岩,3 次冲击灾害发生地点位于顶板、煤层、底板“三硬”区域。顶板砂岩覆层异常、断层地质构造、底板坚硬细砂岩等地质条件造成局部高应力集中,诱发了 3 次冲击灾害。

3 震动波 CT 反演监测预警技术

利用 74101 工作面回采过程中的矿震事件,进行 CT 技术反演,精准探测砂岩覆层增厚区域的高应力集中分布区。冲击地压预测预报的基础是确定煤层中的应力状态和应力集中程度。由张双楼煤矿煤岩物理力学性质试验与煤岩样应力对应关系可知,其异常值 A 为

$$A = \frac{V_p - V_p^a}{V_p^a} \quad (1)$$

式中: V_p 为反演区域一点的纵波波速值; V_p^a 为模型波速的平均值^[20]。

采动应力场大小及其动态迁移可以通过震动波

波速的大小来反映。应力高且集中程度大的区域,相对其他区域将出现纵波波速的高值异常,即纵波波速越高的区域,应力越高,应力集中程度越大。CT 反演探测结果如图 4 所示,砂岩覆层增厚高应力集中区:运输巷侧沿巷道 75 m,延伸工作面 60 m 椭圆形区域;轨道巷侧沿巷道 60 m,延伸工作面 80 m 椭圆形区域。探测到的高应力异常集中区域在掘进过程中已发生 2 次冲击灾害,说明反演结果可靠。

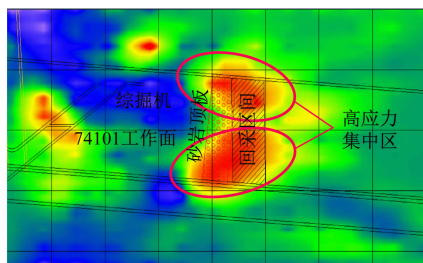


图 4 震动波 CT 探测应力异常区分布

Fig. 4 Distribution of abnormal stress area detected by shock wave CT

4 冲击地压灾害防治实践

针对划分的 74101 工作面砂岩覆层增厚高应力集中区,研究精准的防治解危措施及工艺技术参数,卸荷降冲,实现安全回采。针对张双楼煤矿 7 煤层砂岩覆层异常区域采取“顶板-煤体-底板”一体化爆破卸压技术,该技术包括砂岩覆层区异常区沿工作面倾向断顶爆破、临空侧煤柱走向断顶爆破、工作面内断顶爆破、临空侧煤体爆破、实体煤侧煤体爆破、沿工作面倾向断底爆破、临空侧走向断底爆破,形成时分分区分级的“顶板-煤体-底板”三协同爆破防治冲击地压技术体系。

4.1 “顶板-煤体-底板”一体化爆破卸压技术

4.1.1 深孔爆破切顶技术

在 74101 工作面轨道巷和运输巷接近应力集中异常区域 100 m 范围内实施爆破切顶解危措施。在运输巷布置 1 号钻孔,孔径为 90 mm,爆破切割工作面内部的厚层砂岩顶板。在轨道巷布置扇形钻孔 4 个,孔径为 90 mm,其中 2 号、3 号钻孔孔底间距为 10 m,5 号孔与 4 号孔间距为 20 m,解决了采空区侧向形成的弧形三角板动载荷来源区的悬顶问题。每组设置 1—5 号钻孔,间隔 20 m 施工一组钻孔,对工作面沿走向 100 m 范围内爆破切顶,爆破孔布置如图 5 所示。爆破切顶钻孔设计参数见表 1。

4.1.2 煤体爆破卸压技术

74101 工作面回采过砂岩覆层异常区域,对煤

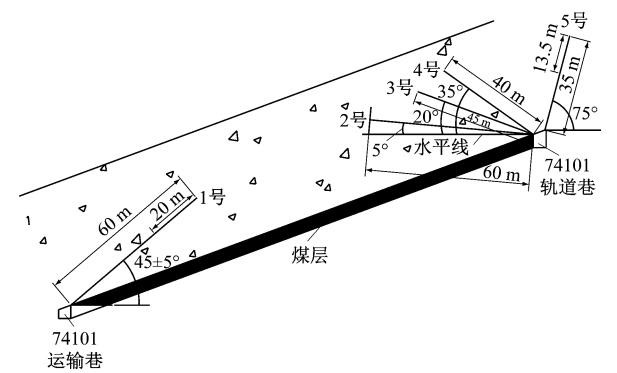


图 5 74101 工作面扇形爆破孔剖面图

Fig. 5 Sectional view of fan-shaped blast hole on 74101 working face

表 1 顶板爆破钻孔设计参数

Table 1 Design parameters of roof blast hole

孔号	方位/(°)	倾角/(°)	孔深/m	装药深度/m	封孔深度/m
1 号	90	40±5	60	20	20
2 号	90	5	60	20	20
3 号	90	20	45	20	20
4 号	90	35	40	20	20
5 号	90	75	35	13.5	20

体采取短孔卸压爆破技术。爆破参数:孔径为 42 mm,孔深为 10 m,装药长度为 5 m,封孔长度为 5 m,爆破孔间距为 5 m,爆破钻孔布置如图 6 所示。

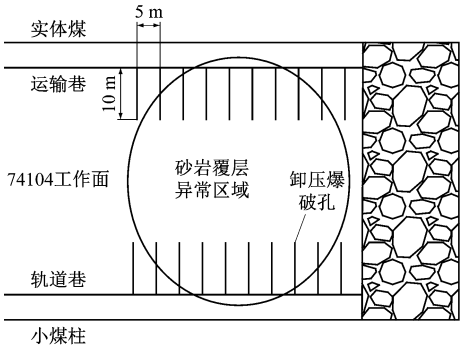


图 6 煤体卸压爆破孔布置

Fig. 6 Layout of coal pressure relief blasting borehole

4.1.3 底板爆破卸压

74101 工作面底板覆层坚硬厚层细砂岩,工作面回采通过顶板砂岩覆层异常区域时,极易产生大量弹性能,诱发冲击灾害。底板爆破钻孔布置在巷道两帮距底板 0.1~0.3 m 处,按 60~70°俯角施工,钻孔深度为 10 m,钻孔间距为 5 m,每孔装药 2 kg,封满炮泥,每次起爆钻孔数量为 5 个,躲炮距离大于 300 m。

4.2 治理效果评价

74101 工作面煤体和顶底板爆破卸压后,工作面回采通过砂岩覆层异常区过程中,工作面轨道巷围岩变形得到有效控制,如图 7 所示,未出现巷道底

板大面积底鼓影响安全生产现象。



(a) 爆破切顶前



(b) 爆破切顶后

图 7 爆破切顶前后巷道变形对比

Fig. 7 Comparison of roadway deformation before and after blasting cutting

卸压爆破前后矿震日累计能量、频次如图 8 所示。从图 8 可看出,74101 工作面砂岩覆层异常区域采取煤体及顶底板卸压爆破前,强矿压显现强烈,日累计最大能量高达 1.57×10^4 J,日累计频次高达 62 次,高能量矿震发生次数多。采取针对性爆破卸压防治措施后,矿压显现缓和,日累计最大能量均在 10^4 J 以下,且日累计频次均在 30 次以下,消除了高应力集中现象,卸压效果明显。

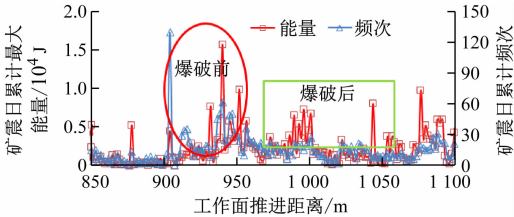


图 8 卸压爆破前后矿震日累计能量、频次对比

Fig. 8 Comparison of daily accumulative energy and vibration frequency of rock bursts before and after pressure relief blasting

爆破卸压后工作面回采期间矿震分布如图 9 所示。74101 工作面回采通过砂岩覆层应力集中区过程中,采取“顶板-煤体-底板”爆破卸压前单次释放能量大于 10^4 J 的矿震(图中红色圆点)主要位于工作面靠近砂岩覆层异常区域一侧。采取爆破卸压措施后,工作面通过砂岩覆层异常区域过程中,没有出现高能量矿震,能量均小于 10^4 J,且矿震分布均匀,表明对煤体及顶底板采取爆破卸压措施后,煤岩体弹性有序释放,矿震活动呈现低能量、低频次的特征,冲击危险性显著降低。

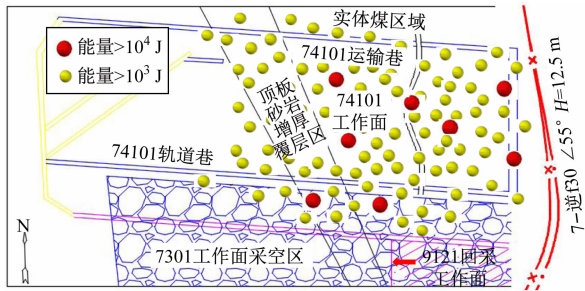


图 9 爆破卸压后工作面回采期间矿震分布
Fig. 9 Distribution of rock bursts on working face after pressure relief blasting

5 结论

(1) 张双楼煤矿 74101 工作面周边开采布局不合理、煤岩冲击倾向性强、砂岩覆层区应力集中程度高、防冲监测预警临界值界定不清是诱发 3 次冲击灾害的主控因素。

(2) 采用矿震震动波 CT 反演技术获取了 74101 工作面砂岩覆层区冲击危险性,揭示了煤岩体突然失稳破坏诱发冲击灾害的原因。

(3) 针对 74101 工作面砂岩覆层区采取“顶板-煤体-底板”卸压爆破技术措施后,其矿震日累计能量由 1.57×10^4 J 降低至 10^4 J 以下,震动频次由 60 次降低至 30 次以下,煤岩体弹性能有序释放,矿震活动呈现低能量、低频次的特征,应力异常区域冲击危险性显著降低。

参考文献 (References):

[1] 齐庆新,潘一山,李海涛,等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报,2020,45(5):1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(5):1567-1584.

[2] 齐庆新,李晓璐,赵善坤. 煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J]. 煤炭科学技术,2013,41(6):1-5.
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2013,41(6):1-5.

[3] 王浩,易恩兵,焦振华,等. 邻逆断层不规则综放工作面冲击危险性分析[J]. 煤炭科学技术,2017,45(4):33-38.
WANG Hao, YI Enbing, JIAO Zhenhua, et al. Analysis on bumping danger of irregular fully-mechanized top coal caving mining face in adjacent reverse fault[J]. Coal Science and Technology,2017,45(4):33-38.

[4] 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.

[5] 欧阳振华. 煤矿冲击地压区域应力控制技术[J]. 煤炭科学技术,2016,44(7):146-152.
OUYANG Zhenhua. Technology of mine pressure bump regional stress control [J]. Coal Science and Technology,2016,44 (7):146-152.

[6] 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,2001:2-6.
DOU Linming, HE Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 2-6.

[7] 蓝航,齐庆新,潘俊锋,等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J]. 煤炭科学技术,2011,39(1):11-15.
LAN Hang, QI Qingxin, PAN Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39 (1): 11-15.

[8] 齐庆新,欧阳振华,赵善坤,等. 我国冲击地压矿井类型及防治方法研究 [J]. 煤炭科学技术,2014,42(10):1-5.
QI Qingxin, OUYANG Zhenhua, ZHAO Shankun, et al. Study on types of rock burst mine and prevention methods in China [J]. Coal Science and Technology,2014,42(10):1-5.

[9] 窦林名,李振雷,张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster [J]. Coal Science and Technology,2016,44(7):41-46.

[10] 蔡武,窦林名,李振雷,等. 微震多维信息识别与冲击矿压时空预测:以河南义马跃进煤矿为例[J]. 地球物理学报,2014,57(8):2687-2700.
CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Microseismic multidimensional information identification and spatio-temporal forecasting of rock burst;a case study of Yima Yuejin Coal Mine, Henan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014,57(8):2687-2700.

[11] 窦林名,巩思园,刘鹏,等. 矿震冲击灾害远程在线预警平台[J]. 煤炭科学技术,2015,43(6):48-53.

DOU Linming, GONG Siyuan, LIU Peng, et al. Remote online early warning platform of mine seismic and bump disaster [J]. Coal Science and Technology, 2015,43(6):48-53.

[12] 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.

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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 吕进国, 姜耀东, 李守国, 等. 巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[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.

[16] 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 Chuanjiu, 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.

[17] 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(增刊2): 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.

[18] 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(增刊1):3522-3527.

QI Qingxin, LEI Yi, LI Hongyan, 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.

[19] 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.

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.

[20] 巩思园. 矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.

GONG Siyuan. Research and application of using mine tremor velocity tomography to forecast rockburst danger in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.