



移动阅读

孙刘伟,鞠文君,潘俊峰,等. 基于震波 CT 探测的宽煤柱冲击地压防控技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 377-383. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1251

SUN Liuwei, JU Wenjun, PAN Junfeng, et al. Rock burst prevention technology based on seismic CT detection in wide section coal pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 377-383. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1251

基于震波 CT 探测的宽煤柱冲击地压防控技术

孙刘伟^{1,2}, 鞠文君^{1,2}, 潘俊峰^{1,2}, 赵忠显³, 夏永学^{1,2}, 冯美华^{1,2}, 付玉凯^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 山东龙郓煤业有限公司, 山东 菏泽 274700)

摘 要:针对深井区段煤柱冲击地压易发、多发、难防治的难题,以某矿 1301 工作面 80 m 区段宽煤柱冲击地压为例,利用数值模拟及微震数据分析,研究了宽煤柱冲击地压致灾机制,采用震波 CT 原位探测技术评估了宽煤柱区域内冲击危险性,并提出针对性防治方案。结果表明:3 号煤层具有弱冲击倾向性,顶板岩层具有强冲击倾向性,已具备发生冲击地压的内在条件,高自重应力、强构造应力提供了基础静载荷,采空区侧向支承压力提供了增量静载荷,当两者叠加导致垂直应力超过冲击临界支承压力时,为宽煤柱静载荷冲击地压的发生提供了力源条件;震波 CT 原位探测技术以穿透煤岩体的实际震动波射线进行波速反演,反映煤岩体静载荷分布特征及结构特性,建立了以波速异常系数 C_A 和波速梯度系数 C_G 为主要因子的冲击地压危险性评估模型;鉴于宽煤柱冲击区域采掘空间实际条件,设计布置近完全观测系统观测方式,采用震波 CT 原位探测技术反演评估得到宽煤柱测区内冲击危险指数 $C=0.5 \sim 0.7$,表明冲击发生后,宽煤柱仍然存在静载荷集中区域,具有中等冲击危险,并且运输巷侧冲击危险指数较采空区侧高,表明煤柱应力由采空区侧向运输巷侧转移,局部区域煤体破碎易冒顶片帮;制定了基于静载荷疏导的多层次防冲技术:大直径钻孔预卸压转移巷帮集中应力,耗散弹性应变能,确定合理日进尺为 2.4 m,降低开采扰动,巷道全断面补强支护,提高围岩抗冲击能力;通过上述措施,现场监测宽煤柱煤体应力未发生突增,微震能量及频次变化平缓,1301 工作面已安全回采宽煤柱区,防治效果显著。

关键词:区段煤柱;冲击地压;震波 CT;静载荷;防治

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)02-0377-07

Rock burst prevention technology based on seismic CT detection in wide section coal pillar

SUN Liuwei^{1,2}, JU Wenjun^{1,2}, PAN Junfeng^{1,2}, ZHAO Zhongxian³, XIA Yongxue^{1,2}, FENG Meihua^{1,2}, FU Yukai^{1,2}

(1. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Shandong Longyun Coal Co., Ltd., Heze 274700, China)

Abstract: To overcome the problems of easy occurrence, frequent occurrence and difficult prevention of coal pillar rock burst in deep mine, taking the rock burst in 1301 roadway with 80 m wide coal pillar as an example, based on numerical simulation and microseism data analysis, the mechanism of rock burst in wide coal pillar was studied. The seismic CT in-situ detection technology was used to evaluate the risk of rock burst, and the corresponding prevention and control scheme was put forward. The results show that the weak burst tendency of No. 3 coal seam and the strong burst

收稿日期:2018-09-19 修回日期:2019-01-07 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804204, 2017YFC0804202);国家自然科学基金资助项目(51804159)

作者简介:孙刘伟(1988—),男,山东邹城人,博士研究生。E-mail:sunliuwei1204@163.com

tendency of roof rock stratum were the intrinsic condition of rock burst, the high gravity stress and strong tectonic stress were basic static loads, and the lateral abutment pressure of goaf was incremental static loads. When the vertical stress exceeded the critical abutment pressure, it provided the force source condition for the occurrence of static load type rock burst in wide coal pillar. By inversing the wave velocity from the actual seismic wave rays, the seismic CT in-situ detection technology can reflect the distribution and structural characteristics of the static load, and establish a risk assessment model of rock burst with the abnormal coefficient of wave velocity C_A and the gradient coefficient of wave velocity C_G as the main factors. In terms of the actual mining conditions in the impact area of wide coal pillar, a near-complete observation system was designed and arranged. The seismic CT detection showed that after the occurrence, the burst hazard indices were $C=0.5-0.7$ and had moderate degree burst hazard, the burst hazard index of the side of transport channel was higher than that of goaf, which indicated that the stress of coal pillar had transferred from the side of goaf to the side of transport channel. The local fractured zone had high risk of roof caving or rib spalling accident. The multi-level prevention and control technologies based on static load transformation were formulated including a large-diameter borehole pre-relief technology was used to transfer concentrated stress and dissipate elastic strain energy of roadway side; the 2.4 m/d advancing speed of working face was determined to reduce mining disturbance; and the support reinforcement of full roadway section was designed to improve the anti-impact ability. Through the above measures, the monitoring stress did not occur sudden increase, and the microseism energy and frequency was gentle. In 1301 working face, the wide coal pillar area had safely been recovered, and the control effect was obvious.

Key words: section coal pillar; rock burst; seismic CT; static load; prevention

近年来,伴随着矿井开采深度与开采强度的增加,我国冲击地压灾害日益严重,冲击发生强度和频度显著增加,冲击地压矿井数量明显上升,已成为制约深部矿井安全开采的重大动力灾害之一^[1-2]。深井区段煤柱是冲击地压易发、多发、难防治区域,其冲击危险性与周围应力场^[3]分布密切相关。姜福兴等^[4]建立了采场“载荷三带”覆岩结构模型,可用于区段煤柱冲击危险性评价;王书文^[5]通过应力监测系统实测得到采空区侧向宽煤柱分阶段、分区域受力特征,指出临空煤柱帮内弹性区不断增长的垂直应力是主导冲击载荷源;潘立友等^[6]提出软弱冲击层在上部力源层和下部稳定层夹持下产生应力集中和能量积聚,外界采掘活动诱发积聚的能量释放,是两软煤层区段小煤柱沿空巷道发生冲击地压的主要原因;杨伟利等^[7]指出当煤柱冲击力大于阻力时,具有发生冲击的危险性;成云海等^[8]研究了“应力场特征-减冲”关系,提出了巷道外错合理位态减冲设计方法;李学华等^[9]基于应力控制和支护系统设计2个方面,提出了沿空掘巷的防冲机理。上述研究多以理论分析、数值模拟为主,具有重要的理论指导意义;而实测研究更贴近现场实际,更具有工程实用价值。

本文以某矿 80 m 区段宽煤柱冲击地压为例,分析了冲击地压致灾机制及类型,鉴于静载荷在冲击地压启动过程中的主导作用,采用震波 CT 原位探测技术反演冲击区域静载荷分布特征,评估其冲击危险性,并在此基础上提出针对性防治方法。

1 工程背景

1301 工作面为一采区南翼西侧第 2 个工作面,埋深约 865 ~ 970 m,平均煤厚 6.8 m,综放开采,走向长度 2 265.8 m,倾向长度 223.4 m,工作面西侧前部与八里庄支四断层($H=5 \sim 110$ m)相邻、后部隔 80 m 煤柱与 1300 工作面采空区相邻,东、南两侧为实体煤,北邻采区轨道大巷。直接顶为厚 1.2 m 的砂质泥岩,基本顶为厚 12.9 m 的中砂岩,底板为厚 1.8 m 的泥质砂岩。采用钻孔应力解除法对一采区进行地应力测量,地应力场以水平应力为主,最大水平主应力为垂直应力的 1.40 ~ 2.20 倍。1301 工作面运输巷位于一采区背斜构造翼部,初始作为 1300 工作面泄水巷使用,先于 1300 工作面回采已施工掘进。

当 1300 工作面回采 496 m 时,80 m 宽煤柱内发生 2.1×10^5 J 大能量事件,经微震定位,震源距 1301 运输巷为 13 m,距 1300 回采工作面煤壁为 310 m。经现场排查,2 号联络巷以北 125 ~ 280 m 范围内的 1301 工作面运输巷具有不同程度的冲击破坏现象,破坏严重段 10 m 范围顶板冒落达 2.5 ~ 3.0 m,两帮内挤,巷道断面由 $4.8 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 缩减为 $1.1 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$;靠近冒顶区 30 m 范围巷道顶板下沉 0.5 m;巷道顶板隔爆棚被冲击脱落,局部两帮双抗网开裂,管路、电缆被冲到巷道中部,工作面及冲击显现位置如图 1 所示,巷道破坏状况如图 2 所示。

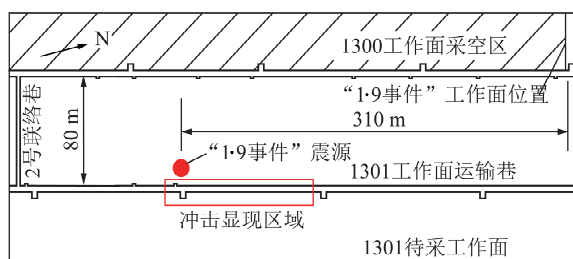


图1 工作面冲击显现位置

Fig. 1 Position of rockburst



(a) 两帮内敛



(b) 顶板下沉

图2 巷道冲击破坏情况

Fig. 2 Impact failure of roadway

2 宽煤柱冲击地压致灾机制分析

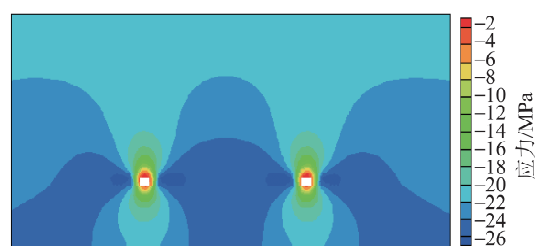
2.1 宽煤柱静载荷分布特征

采用 FLAC^{3D} 数值软件,根据工作面开采条件及实验室测定煤岩体参数,基于摩尔-库伦本构模型,模拟 1300 工作面开挖前、后宽煤柱静载荷分布特征,并提取宽煤柱煤体垂直应力,如图 3 所示。

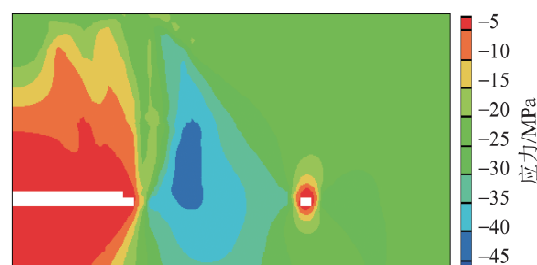
两巷开挖形成后,宽煤柱内静载荷变化不明显,此时高自重应力与强构造应力叠加作用,构成宽煤柱冲击地压发生的基础静载荷。1300 工作面开采后,侧向支承压力影响范围约为 120 m,宽煤柱震源位置煤体应力 $\sigma = 34 \text{ MPa} > 2\sigma_c$,已具备冲击地压发生的冲击临界支承压力条件^[10]。当 1301 工作面回采后,宽煤柱受到两侧支承压力叠加影响,静载荷水平将明显提高,应力峰值向煤柱深处转移,冲击危险性进一步增大。采空区侧向支承压力为宽煤柱冲击地压发生的增量静载荷。

2.2 宽煤柱静载荷演化规律

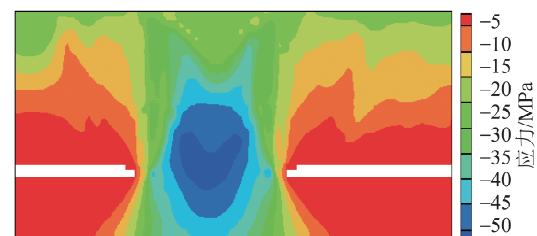
当应力集中超过极限后煤岩体突然破坏释放能



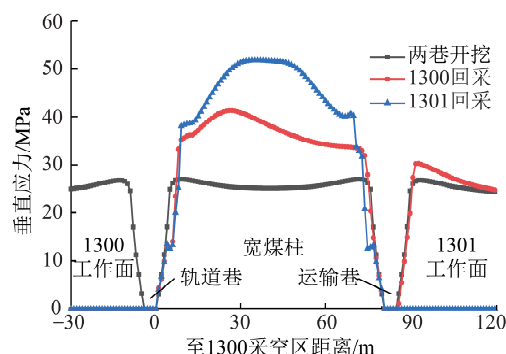
(a) 两巷开挖



(b) 1300工作面回采



(c) 1301工作面回采



(d) 宽煤柱垂直应力曲线

图3 宽煤柱垂直应力分布

Fig. 3 Vertical stress distribution in wide coal pillar

量产生微震事件,可通过其时空分布特征反映宽煤柱静载荷演化规律^[11]。基于“最佳 D 值”设计准则,除 1300 回采工作面前方布置 ARAMIS M/E 微震系统探头外,1301 工作面运输巷补充布置了拾震器,使得宽煤柱区域处在探头-拾震器包络的区域内,保证了定位精度,实时记录了本次冲击区域微震活动全过程。微震事件 ($\geq 10^2 \text{ J}$) 平面投影如图 4 所示。

当 1300 工作面回采至冲击区域时(图 4(a)),微震事件分布靠近宽煤柱内侧(采空区侧 44 m 范围),3 次方微震事件较多,主要为 1300 工作面采空区低位顶板回转下沉导致应力升高;伴随着工作面逐渐远离(图 4(b)),微震事件分布向宽煤柱外侧(1301 工作面侧)转移,表明采空区侧向支承压力向外侧转

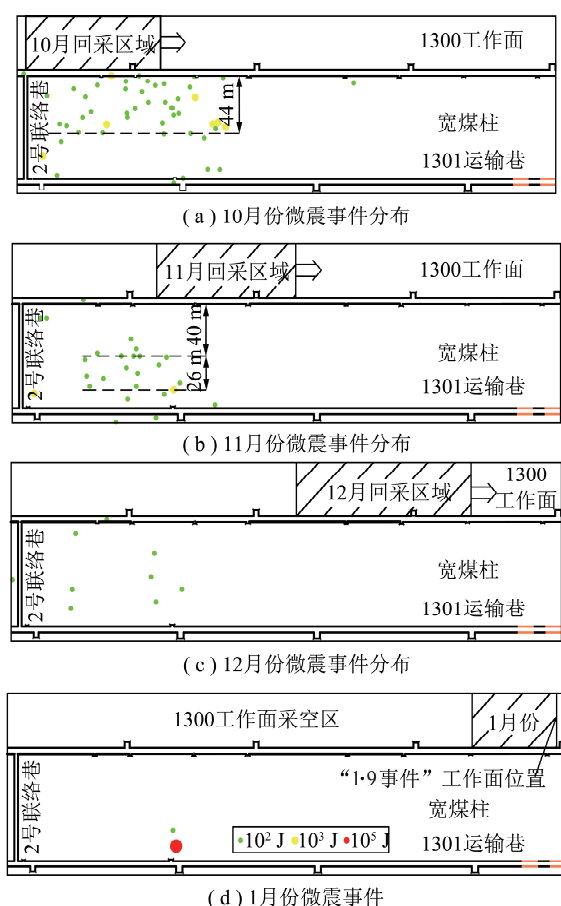


图 4 微震演化平面投影

Fig. 4 Plane of microseismic events

移;此后,该区域仍有微震活动(图 4(c)),表明 1300 工作面采空区侧向高位覆岩仍在回转下沉加载煤岩体^[5],造成宽煤柱内煤岩体应力持续升高,弹性应变能不断积聚;直至宽煤柱内弹性变性能超过煤岩体动力破坏的最小能量时,发生冲击破坏(图 4(d))。

2.3 宽煤柱冲击地压致灾机制

经鉴定,3 号煤层具有弱冲击倾向性,顶板岩层具有强冲击倾向性,已具备发生冲击地压的内在条件;高自重应力、强构造应力提供基础静载荷,采空区后方持续增长的侧向支承压力提供了增量静载荷,当两者叠加导致宽煤柱垂直应力超过冲击临界支承压力时,为冲击地压的发生提供了力源条件。并且,冲击震源距 1300 工作面煤壁 310 m,已不再受到 1300 工作面采动影响,因此该冲击地压属于静载荷型,防治应以调控静载荷为主。

3 主导冲击启动的宽煤柱静载荷震波 CT 原位探测

基于静载荷在宽煤柱冲击地压启动过程中的主导作用^[12],并且空间赋存状态较为明确,因此采用震波 CT 原位探测技术实际揭示宽煤柱静载荷分布是

评估其冲击危险性、制定针对性防冲方案的基础。

3.1 震波 CT 原位探测理论基础

震波 CT(震波层析成像)原位探测技术采用波兰 PASAT-M 型便携式微震系统,通过检波器接收人为爆破激发的穿越工作面煤岩体的纵波走时信号。纵波在走时成像的情况下以射线形式在探测区域介质内传播,将“激发点-检波器”包裹的探测区域划分为一系列小矩形网格,通过高频近似反演,走时成像公式可表示为

$$t_i = \sum_{j=1}^N s_j d_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

式中, t_i 为纵波走时, ms; d_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个网格中的射线路径长度; M 为射线总数; N 为网格数量。

表示为矩阵方程形式为

$$\mathbf{T} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{S} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{T}$ 为纵波走时列向量; $\mathbf{S}$ 为慢度向量; $\mathbf{D}$ 为射线长度矩阵。

通过联合迭代重建算法(SIRT)进行速度场图像重建,可获得煤岩体内部波速分布情况。

研究表明,冲击地压多发生在高应力区及应力异常区,对应速度场图像中纵波波速区及波速梯度区,因此,建立以波速异常系数 C_A 和波速梯度系数 C_G 为主要因子的冲击地压危险性评估模型^[13]:

$$C = 0.5C_A + 0.5C_G = 0.5 \frac{V_p - V_p^0}{V_p^c - V_p^0} + 0.5 \frac{G_p}{G_p^c} \quad (3)$$

式中, C 为冲击地压危险性指数; V_p 为测区内某点纵波波速; V_p^0 为测区内平均波速; V_p^c 为测区内极限纵波波速; G_p 为测区内某点纵波波速梯度; G_p^c 为测区内极限波速梯度。

利用 PASAT-SSA 震波 CT 后处理软件进行反演计算,最终形成冲击危险性指数 C 值分布云图, C 值与冲击危险等级对应标准^[13]见表 1。当 $C < 0.25$ 时,无需处理,当 $C \geq 0.25$ 时,需根据不同危险等级进行相应的卸压及解危处理。震波 CT 原位探测技术以穿透煤岩体的实际震动波射线进行波速反演,可有效反映实际条件下煤岩体内静载荷分布特征及结构特性,实现大范围静载荷探测,较常规解析和数值方法更真实、全面,但该技术观测系统的布置受到井下采掘空间、炸药激发震动波能量等客观条件限制^[12]。

3.2 震波 CT 原位探测方案

为掌握 80 m 宽煤柱的静载荷实际分布状态,考虑 1301 工作面运输巷冲击地压显现区域分布情况、工作面条件及设备探测能力,采用近完全观测系统观测方式(两边布置激发震源、一边布置接收探头)可

提高数据覆盖率,能有效提高探测精度。因此,冲击发生后,在煤柱内钻取 65 m 深孔,孔内按炮间距 5 m 布置激发震源炮至孔口,并在 1301 运输巷按炮间距 10 m、孔深 2 m 补充设计激发炮,每炮装药量为 200 g,一炮一放,短断触发;采集端检波器布置在 80 m 宽煤柱内原有 2 号联络巷,道间距为 7 m,观测系统布置如图 5 所示。设定检波器采样频率为 2 000 Hz,增益 20 dB,采样长度 0.5 s,每次激发有 11 通道检波器同时接收信号。

表 1 冲击危险等级分类

Table 1 Classification of rockburst hazard level

C 值	<0.25	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1.00
等级	无	弱	中	强

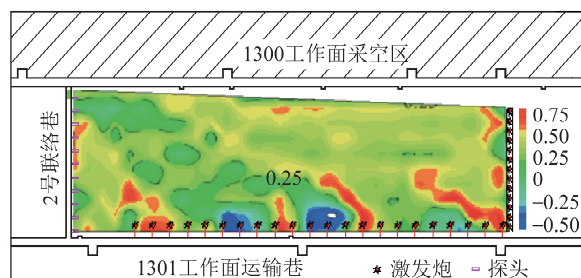


图 5 宽煤柱冲击危险指数分布

Fig. 5 Distribution of burst hazard indices in wide coal pillar

3.3 宽煤柱冲击危险性评估

图 5 为 80 m 宽煤柱探测区域冲击危险性指数 C 分布图,图中以蓝色到红色从小到大来代表探测区域内冲击危险性指数,区域内 C 最大值为 0.7,最小值为 -0.5。可以看出:

(1) 宽煤柱测区内约 2/3 区域冲击危险指数 $C = 0.5 \sim 0.7$,对照表 1,表明 80 m 宽煤柱仍然存在静载荷集中区域,整体具有中等冲击危险。

(2) 宽煤柱运输巷侧冲击危险指数较采空区侧高,表明采空区侧煤柱已塑性破坏,承载能力低,导致应力向运输巷侧转移,静载荷集中程度高。

(3) 在冲击震源区域, $-0.50 < C < -0.25$,表明冲击能量释放后,该区域煤岩体处于卸压状态,煤岩体较为破碎,应采取加固措施,防止发生冒顶及片帮。

4 基于静载荷疏导的多层次防控技术

基于震波 CT 探测反演结果,为阻止宽煤柱静载荷型冲击地压发生启动,关键在于避免畸高静载荷的产生,削弱宽煤柱弹性能积聚水平,实现的主要技术途径有以下 3 种:

(1) 大直径钻孔预卸压。

在 1301 运输巷两帮超前工作面 350 m 范围内实施大直径钻孔卸压,钻孔直径 125 mm,间距 1 m,工作面侧钻孔深度 25 m,煤柱侧钻孔深度为 50 m,使得应力集中区向深部转移,耗散弹性核区积聚的弹性变性能^[14]。

(2) 降低开采扰动。

统计对比分析 1301 工作面微震活动规律与推进度的关系如图 6 所示,日进尺为 2.4 m 时微震频次和能量较为平稳,日进尺为 3.2 m 时微震活动较为剧烈,因此,确定合理日进尺为 2.4 m,均匀推进。

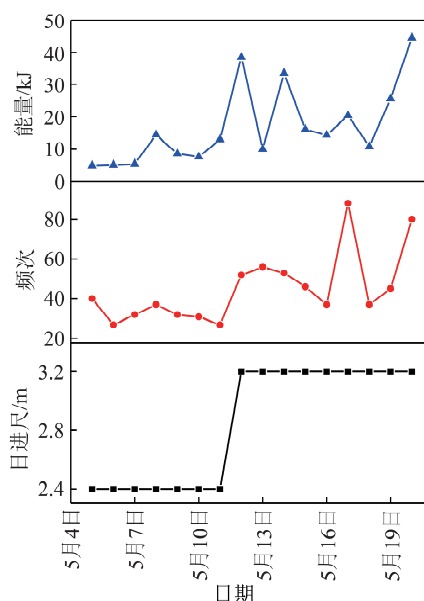


图 6 微震活动与推进度关系

Fig. 6 Relationship of microseismic activities and advancement

(3) 巷道全断面补强支护。

对 1301 运输巷冲击地压显现及巷道破碎、变形严重的区域进行返修处理,巷道断面扩刷至设计尺寸,支护布置如图 7 所示,顶板采用 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,500 \text{ mm}$ 高强左旋螺纹钢锚杆,间排距 $900 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$;采用 $\phi 21.6 \text{ mm} \times 7\,300 \text{ mm}$ 锚索配合 $L4.0 \text{ m}$ T 型钢带加强支护,锚索间排距 $1\,800 \text{ mm} \times 1\,300 \text{ mm}$,钢带顺巷道方向布置,间距 1.3 m。两帮采用 $\phi 20 \times 2\,500 \text{ mm}$ 等强右旋螺纹钢锚杆,间排距 $700 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$;采用 $\phi 21.6 \text{ mm} \times 4\,300 \text{ mm}$ 锚索加强支护,间排距 $1\,200 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$;锚杆索均配合 $L1.6 \text{ m}$ W 型钢带支护,改良围岩应力状态,提高围岩抗冲击能力^[15-17],降低冲击地压显现程度。

由于大直径钻孔预卸压造成宽煤柱深部煤体松散破碎,施工的 65 m 爆破激发孔塌孔严重无法布置激发震源,未能实现卸压后的震波 CT 探测检验。在宽煤柱布置了应力及微震监测系统,回采过程中监测应力未发生突增,微震能量及频次变化平缓,目前,

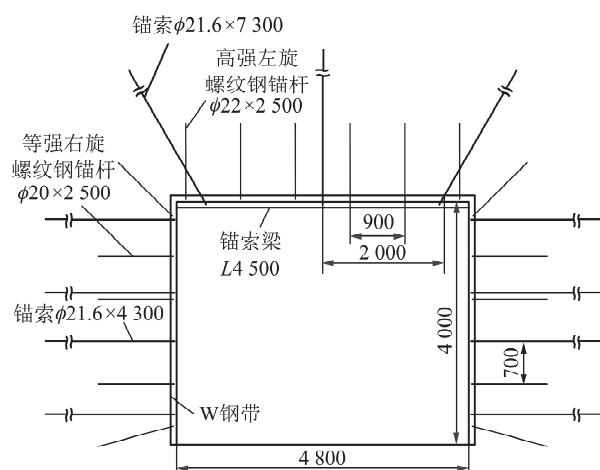


图7 巷道补强支护设计

Fig. 7 Support reinforcement design

1301工作面已安全回采宽煤柱区。

需要指出的是,上述防冲方案只是针对已经出现冲击危险的区段煤柱采取的补救性措施。要根本上避免或消除区段煤柱冲击地压,应以静载荷区域疏导为防治理念^[18],避免煤柱内形成高应力集中为原则,在工作面开采设计阶段超前防范,采用小煤柱或无煤柱护巷技术是解决煤柱冲击地压的有效路径。

5 结 论

(1)高自重应力、强构造应力为冲击启动提供基础静载荷,采空区后方持续增长的侧向支承压力提供了增量静载荷,当两者叠加导致宽煤柱垂直应力超过冲击临界支承压力时,为静载荷型冲击地压的发生提供了力源条件,因此,防治应以调控静载荷为主。

(2)基于静载荷是冲击地压启动的基础,采用震波CT原位探测技术反演得到宽煤柱冲击危险指数 $C=0.5\sim0.7$,表明冲击发生后,宽煤柱仍然存在静载荷集中区域,具有中等冲击危险。

(3)为阻止宽煤柱静载荷型冲击地压发生启动,制定了“大直径钻孔预卸压-降低开采扰动-巷道全断面补强支护”的多层次防冲技术,现场监测应力未发生突增,微震能量及频次变化平缓。

(4)以静载荷区域疏导为理念,探索采用小煤柱或无煤柱护巷技术是防治煤柱冲击地压的有效路径。

参考文献(References):

- [1] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [2] 翟明华,姜福兴,齐庆新,等.冲击地压分类防治体系与应用

[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.
- [3] 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.
- [4] 姜福兴,刘懿,张益超,等.采场覆岩的“载荷三带”结构模型及其在防冲领域的应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12):2398-2409.
JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, et al. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rockburst prevention[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2016, 35(12): 2398-2409.
- [5] 王书文,鞠文君,潘俊锋.临空留巷底板冲击地压启动区判定与分步防治技术[J].煤炭学报,2017,42(11):2799-2807.
WANG Shuwen, JU Wenjun, PAN Junfeng. Determination on start-up area for floor rockburst at retained entry and its stepwise control technology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2799-2807.
- [6] 潘立友,陈理强,张若祥.深部两软煤层沿空巷道冲击地压成因与防治研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1484-1489.
PAN Liyou, CHEN Liqiang, ZHANG Ruoxiang. Cause for rockburst and control of gob side entry in deep two soft coal seams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1484-1489.
- [7] 杨伟利,姜福兴,温经林,等.遗留煤柱诱发冲击地压机理及其防治技术研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):876-880.
YANG Weili, JIANG Fuxing, WEN Jinglin, et al. Study on mechanisms of rock burst induced by a left coal pillar and prevention technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 876-880.
- [8] 成云海,马衍坤,胡兆锋,等.综放采场外错布置区段巷道减冲机理与关键技术[J].煤炭学报,2016,41(3):564-570.
CHENG Yunhai, MA Yankun, HU Zhao Feng, et al. Mechanism and key technologies of preventing rock burst by outward staggered entries arrangement in full-mechanized caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 564-570.
- [9] 李学华,梁顺,姚强岭,等.冲击倾向性围岩沿空掘巷防冲控制原理及应用[J].采矿与安全工程学报,2012,29(6):751-756.
LI Xuehua, LIANG Shun, YAO Qiangling, et al. Control principle and its application of rock burst in roadway driving along goaf with outburst-proneness surrounding rocks[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(6): 751-756.
- [10] 姜福兴,舒涛先,王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2428-2435.
JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2015, 34(12): 2428-2435.

- [11] 夏永学,潘俊锋,王元杰,等. 基于高精度微震监测的煤岩破裂与应力分布特征研究[J]. 煤炭学报,2011,36(2):239-243.
XIA Yongxue,PAN Junfeng,WANG Yuanjie,et al. Study of rule of surrounding rock failure and stress distribution based on high-precision microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(2):239-243.
- [12] 潘俊锋,毛德兵. 冲击地压启动理论与成套技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2016:18-38.
- [13] 王书文,毛德兵,杜涛涛,等. 基于地震CT技术的冲击地压危险性评价模型[J]. 煤炭学报,2012,37(S1):1-6.
WANG Shuwen,MAO Debing,DU Taotao,et al. Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(S1):1-6.
- [14] 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.
LIU Jinhai,JIANG Fuxing,SUN Guangjing,et al. Mechanism of intensive venting pulverized coal to prevent coal burst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering,2014,33(4):747-754.
- [15] 鞠文君. 急倾斜特厚煤层水平分层开采巷道冲击地压成因与防治技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
JU Wenjun. Study on reasons of rock burst in roadway and prevention technology of steeply inclined and extremely thick coal seam with horizontally slicing way[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2009.
- [16] 鞠文君. 冲击矿压巷道锚杆支护原理分析[J]. 煤矿开采,2009,14(3):59-61.
JU Wenjun. Analysis of supporting principles of anchored-bolt in roadway with burst danger[J]. Coal Mining Technology,2009,14(3):59-61.
- [17] 康红普,吴拥政,何杰,等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J]. 煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
KANG Hongpu,WU Yongzheng,HE Jie,et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(10):2225-2233.
- [18] 潘俊锋,宁宇,杜涛涛,等. 区域大范围防范冲击地压的理论与体系[J]. 煤炭学报,2012,37(11):1803-1809.
PAN Junfeng,NING Yu,DU Taotao,et al. The theory and system for preventing rock burst in large-scale areas[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(11):1803-1809.