

DOI: 10.11779/CJGE201407006

基于集中静载荷探测的冲击地压危险性预评价

潘俊峰, 王书文, 刘少虹, 冯美华

(1. 天地科技股份有限公司开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究院开采设计研究分院, 北京 100013)

摘要: 为了解工作面冲击危险状态, 提前采取防冲措施, 降低后期防治强度, 理论分析了集中静载荷与冲击地压发生的相关性, 建立了基于集中静载荷探测的冲击危险性预评价模型, 并开展了实践验证。结果表明: 集中静载荷在冲击地压启动过程中起主导作用, 并可在工作面开采前探测并卸载; 区域性集中静载荷可通过地震波法探测得出, 基于地震波参数建立的冲击危险性预评价模型能够对工作面危险性做出评价, 并且能够指导预卸压工作实施和检验解危效果。

关键词: 采矿工程; 冲击地压; 冲击启动理论; 集中静载荷; 冲击危险性预评价; 地震 CT

中图分类号: TD31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)07-1227-08

作者简介: 潘俊峰(1979-), 男, 副研究员, 主要从事冲击地压、岩层控制、矿井安全高效开采等方面的研究工作。

E-mail: panjunfeng@yeah.net。

Pre-evaluation of burst hazards based on concentrated static load detection

PAN Jun-feng, WANG Shu-wen, LIU Shao-hong, FENG Mei-hua

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

Abstract: In order to understand dangerous situations of work face, to take prevention measures in advance and to reduce late treatment intensity, the correlation between centralized static load and rock burst is analyzed. A model for burst hazard assessment is established based on the detection of centralized static load, and it is put into practice. The results show that the centralized static load plays a dominant role in the initiation of rock bursts, and it can be surveyed and unloaded before the mining of work face. The regional centralized static load can be surveyed by using the seismic CT. The proposed model for burst hazard assessment based on seismic wave parameters can be employed to evaluate the dangerous situations of work face and to guide the implementation and check of the control effect of prevention and cure work.

Key words: mining engineering; rock burst; theory of burst start-up; centralized static load; burst hazard assessment; seismic CT

0 引言

冲击地压是威胁煤矿井下安全生产的典型动力灾害之一, 由于其影响因素的复杂多变, 加之受目前研究、防治手段的限制, 冲击地压灾害一直是岩石力学界的疑难问题。为了提高冲击地压防治的效率, 人们试图通过多个环节, 步步为营开展冲击地压防治, 其中在工作面回采之前就开展冲击地压危险性预评价便是一个非常重要的环节, 如此, 不但预先了解了该工作面发生冲击地压的可能性, 又为实时监测预警设备布置提供依据。在冲击地压危险性预评价方面, 国内外学者研究的脚步一直没有停止^[1-3], 目前最为广泛应用的综合指数法, 是在冲击地压案例的基础上, 分析开采、地质因素对冲击地压发生的影响, 确定各种因

素的影响权重, 然后将其综合起来, 得到评价结果。为了克服综合指数法依靠经验人为打分的缺陷, 数量化理论考虑到冲击地压发生众多影响因素为定性描述, 专门处理定性数据, 以0和1标记反应值, 运用多元分析的原理和方法揭示事件的内在规律。地质动力区划法通过对地形地貌的分析, 查明区域断裂的形成与发展, 依据断裂的构造形式和活动性、最大主应力等综合因素完成冲击地压多因素模式识别概率预测工作。在众多评价因素中, 当其中1, 2个评价指标为特别危险时, 无论采用何种算子, 都有可能被其他危

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204097, 51104086); 国家重点基础研究发展计划(973)计划(2010CB226806)

收稿日期: 2013-09-20

险性较小的指标中和，使评价系统的危险度降低，失去评价的客观公正性。

实际上，上述冲击危险性预评价方法，基本都依据的是开采、地质因素^[1]，而无论哪种因素，从冲击地压发生机理来说，都是外围因素，这些因素经过复杂的互馈、耦合作用，最终无非是为冲击地压启动提供载荷源，数值模拟技术正是将所有开采、地质条件赋予计算模型，从而得到采掘区域围岩载荷分布状态，但是建模参数与破坏准则仍然与实际存在较大差距。钻屑法、钻孔应力计虽为实测，但是“点”观测难以实现区域性探测，为此，本文提出冲击地压启动载荷源井下区域性直接探测的方法，基于工作面开采前集中静载荷与冲击地压发生的关系，采用地震波法现场实际探测工作面开采前的集中静载荷，从而实际评价工作面危险状态，在吉山煤矿进行了实践验证。

1 基于集中静载荷探测的回采工作面冲击危险性预评价原理

1.1 集中静载荷及其与冲击地压发生的相关性

冲击地压发生一般经历 3 个过程，即冲击启动—冲击能量传递—冲击地压显现，历时仅十几秒的过程中，人们具备能力、能够采取措施的自然是冲击启动阶段。根据冲击地压启动理论^[4]，采动围岩近场系统内集中静载荷的积聚是冲击启动的内因，采动围岩远场系统外集中动载荷对静载荷的扰动、加载是冲击启动的外因。进一步解析为促成冲击地压启动的载荷源可以是系统内集中静载荷，也可以是系统外集中动载荷，但是从根本上讲，都是系统内集中静载荷必须达到临界条件。也就是说系统外集中动载荷如果参与，那就是帮助系统内集中静载荷达到临界条件，如果系统内集中静载荷不够大，来自于系统外的动载荷传递到静载荷集中区将被消耗，因此难以完成冲击启动。

由此可见，对于冲击地压的防治尤其是工作面未开采之前的危险性预评价，集中静载荷一定是需要关注的。实际上，在各种外围影响因素耦合作用下形成的集中静载荷，主要是采动应力场形成后，以采动围岩中的集中压缩弹性能、顶底板（岩层）弯曲断裂前产生的集中弯曲弹性能为主，因此集中静载荷始终寄生在开采煤层中，方位比较明确，而集中动载荷在工作面没有推进，岩层没有活动时其来源具有不确定性。

鉴于集中静载荷是冲击地压启动的内因，必不可少的条件，并且具有较为明确的空间赋存状态，因此对于集中静载荷的探测将是工作面开采之前进行冲击危险性预评价的基础。

1.2 基于集中静载荷的冲击危险性预评价模型

（1）基于地震波的集中静载荷的探测原理

根据以上分析，在采场、巷道围岩近场中，静载荷分布局部化、集中化程度越高，冲击危险程度越高。从而指导研究冲击地压防治，必须实际探测采掘空间哪个区域集中静载荷可能最先容易达到临界条件。实验室及现场测试结果表明，煤岩层中地震波纵波传播波速大小与该区域应力大小为正相关关系^[5-7]，因此，可以认为在工作面开采之前，煤层中高的地震波波速表明高的应力集中程度，进而预示高的冲击危险程度。

此外，大量的工程实践表明，对于探测范围内的煤岩体，波速相对较高的区域一般分布在致密完整的煤岩体处、应力集中区以及煤层变薄区；波速较低区域主要分布在疏松破碎的煤岩体处、应力松弛带。对整个探测煤岩体范围而言，若内部无异常区域，地震波的穿透速度应是相对均匀的，当有应力异常或地质结构存在时，该区域将在反演结果中表现为波速异常。利用震动波的运动学和动力学参数，结合相关地质资料和开采条件进行一定的地质学与力学分析，可准确得到煤岩体结构特征及应力状态的时空变化信息^[8]。

同时，因地质及开采技术因素的影响，采动围岩中不同区域的应力值具有较大的差别，应力梯度处的煤体在某一方向上的受约束能力相对较弱，在总载荷一致的情况下将比均匀受载的煤体更易发生失稳破坏，应力梯度是煤岩体稳定性评价的重要因素。依据煤体中应力与地震波波速的对应关系，高应力梯度区域对应了高波速梯度区域。矿震及地震领域实测研究表明，强震不仅发生在高波速区域，也发生在高波速向低波速过度的区域，即高波速梯度区。因此，利用地震波波速进行冲击危险性评价时，应考量地震波波速梯度的影响^[9-13]。

（2）波速异常系数

为了通过煤体中震动波波速来反映其应力状态及冲击危险性，引入震动波波速异常系数的概念：

$$A_C = \frac{V_p - V_p^0}{V_p^c - V_p^0} \quad (1)$$

式中 V_p 为探测区域内某点纵波波速值 (m/ms)； V_p^0 为探测区域内纵波波速平均值 (m/ms)； V_p^c 为探测区域煤岩体极限纵波波速值 (煤岩体临界破坏时，m/ms)。

波速异常系数为波速异常值与波速最大异常值的比值，从震波波速角度表征煤岩体潜在破坏的可能性，其值可为正值，亦可为负值。若 A_C 为正值，则表明该处煤岩体可能处于应力集中状态，该值越大，冲击破坏的可能性越大；若 A_C 为负值，可视为无冲击危险，

解释为应力释放区或地质破碎带等。

(3) 波速梯度系数

为了通过可以探测到的震动波波速梯度来反映煤体的冲击危险性, 引入波速梯度系数的概念:

$$G_C = \frac{G_p}{G_p^c} , \quad (2)$$

式中, G_p 为探测区域某点的纵波波速梯度 (m/s), G_p^c 为现场条件下探测区域煤岩体极限纵波波速梯度 (煤岩体临界破坏时, m/s)。波速梯度系数 G_C 主要从地震波波速梯度角度表征煤岩体潜在破坏的可能性。

速度场中的梯度 G_p 为波速变化率最大的方向上的波速变化率。在离散数据中, 一般先对周围 8 个节点求取一阶方向导数, 最后取其中最大值, 如图 1 所示, 中心网格 (m, n) 的波速梯度可表示为

$$G_p(m, n) = \max \frac{V_p(m, n) - V_p(x, y)}{d \sqrt{(m-x)^2 + (n-y)^2}} , \quad (3)$$

式中, d 为网格边长, x, y 分别为周围每一个网格的纵、横向编号。

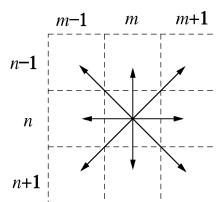


图 1 离散数据梯度计算示意图

Fig. 1 Gradient of discrete data

(4) 综合评价模型

为了通过可以探测到的震动波波速和波速梯度来综合反映煤体中冲击危险性, 建立冲击地压危险性预评价模型为

$$\Pi = aA_C + bG_C = a \frac{V_p - V_p^0}{V_p^c - V_p^0} + b \frac{G_p}{G_p^c} . \quad (4)$$

式中 Π 为冲击地压危险性指数; a, b 分别为两因子的权重系数, 由煤层赋存稳定性及工程探测验证确定。 V_p 可通过地震 CT 技术反演获取; G_p 则通过式(3)计算得出。其中, V_p^c, G_p^c 可通过测区的地震 CT 反演结果估算: 对于无明显动力现象煤层, V_p^c, G_p^c 分别取 $1.2\max V_p, 1.2\max G_p$, 对于有弱动力现象 (未造成采掘空间明显破坏) 煤层分别取 $1.1\max V_p, 1.1\max G_p$ 。对于有强烈动力现象煤层分别取 $\max V_p, \max G_p$, 其中 $\max V_p$ 为反演出的波速 CT 图像中最大波速值, $\max G_p$ 为依据波速 CT 图像计算得出的最大波速梯度。

该模型 Π 值最大为 1, 最小值则取决于实测数据。若 Π 为负值, 表明该区域处于卸压状态, 且 Π 值

越小, 卸压程度越大。 Π 值与冲击危险等级对应标准如表 1 所示。对于不同的危险等级, 应采取相应的防治措施。

表 1 冲击地压危险性分类

Table 1 Classification of rockburst hazard

类别	I	II	III	IV
等级	无	弱	中	强
Π 值	< 0.25	$0.25 \leq C < 0.5$	$0.5 \leq C < 0.75$	$0.75 \leq C \leq 1$
表征图例	无			

当探测区域处于 I 类时, 无需处理; 当探测区域处于 II 类时, 若危险区将受采掘扰动影响, 则需立即进行预卸压。当探测区域处于 III 类时, 需停止工作面生产, 立即采取针对性局部解危措施, 验证解危有效后重新生产; 当探测区域处于 IV 类时, 需立即停止生产, 并撤离工作面所有人员, 可利用爆破诱发冲击的方式降低或消除冲击危险性。

区域整体评价时, 以区域内呈现出的最高冲击危险等级区域面积占测区总面积的比值是否大于 $1/5$ 为准。

巷道冲击危险性等级的划分主要考虑两方面因素: 巷道周边煤岩层冲击危险等级和危险区域至巷道的距离 r 。如图 2 所示, $r_{\text{弱}}$ 为巷道至弱冲击危险区域的距离; $r_{\text{中}}$ 为巷道至中等冲击危险区域的距离; $r_{\text{强}}$ 为巷道至强冲击危险区域的距离。设巷道宽度为 b , 巷道冲击危险等级具体分类标准如表 2 所示

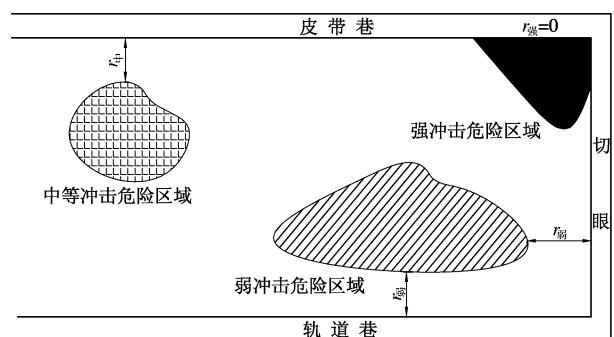


图 2 冲击危险等级划分示意图

Fig. 2 Classification of burst hazards

表 2 冲击危险等级分类

Table 2 Classification of burst hazard levels

类别	I	II	III	IV
等级	无	弱	中	强
r 值	$r_{\text{弱}} < 3b$ 或 $3b$	$r_{\text{中}} < 3b$ 或 $3b$	$r_{\text{强}} < 3b$	
	$< r_{\text{中}} < 5b$	$< r_{\text{强}} < 5b$		
表征图例				

2 基于集中静载荷探测的冲击危险性预评价实践

2.1 工程背景

古山煤矿一井主要可采煤层为 6-2 煤层, 煤层平均厚度为 14.95 m。十采区东翼的 069-2 是目前准备回采的综放工作面, 工作面走向长 393 m, 倾斜长 59 m, 倾角 26°, 直接顶为厚度约 232 m 的坚硬辉绿岩, 底板为 60 m 左右的砂岩, 工作面埋深约为 355 m。该工作面西与西翼 069-2 工作面相邻, 东至一、三井井田边界并与三井西 066-1 工作面(2012 年 6 月采终)相邻, 浅部自八采区+254 采空区(2011 年 12 月采终), 深部至+218 水平。

2012 年 7 月 30 日, 古山矿一井十区东 069-2 工作面在运输顺槽掘进至切眼位置时, 巷道距石门 170~270 m 段发生冲击地压显现, 地面有震感。

2012 年 10 月 17 日, 该工作面再次出现强烈冲击地压显现, 上下两巷瞬间出现底鼓、两帮收缩, 运输顺槽在距离石门 220~300 m 段 70 多米巷道严重变形, 多处巷道仅余皮带架下 0.3~0.5 m 高度的空间, 部分巷道已经闭合。回风顺槽在 210~240 m 段 30 多米巷道冒落, 工字钢支架全部损坏。此次冲击造成地面有强烈震感, 13 人受伤, 工作面停产 3 个月。图 3 为 069-2 工作面位置及两次冲击地压显现位置图。

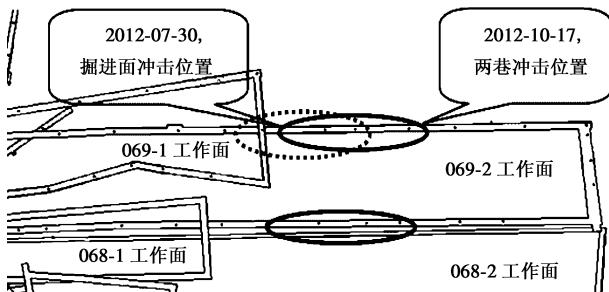


图 3 工作面及冲击地压显现位置图

Fig. 3 Location of 069-2 face and rock burst

2012 年 11 月起, 课题组承担该工作面冲击地压防治研究, 在工作面安装与回采之前, 先基于集中静载荷探测, 对 069-2 工作面前的冲击危险状态进行了全面评价。

2.2 工作面冲击危险性预评价

(1) 探测设备与方案

探测工作采用的设备为课题组由波兰 EMAG 自动化创新研究院最新引进的 PASAT-M 型便携式微震探测系统。

探测方案如图 4 所示。激发端位于回风巷侧, 检

波器采集端位于运输巷侧。激发孔内每孔装 200 g 炸药, 每次激发有 12 通道检波器同时进行接收, 第一轮实际激发 25 炮, 其中 23 炮有效, 第二轮实际激发 25 炮, 其中 24 炮有效, 试验共接收有效数据 564 道。实际炮孔最大间距 13 m, 最小间距 5 m, 平均间距 6.9 m。实际检波器最大间距 17 m, 最小间距 9 m, 平均间距 11.8 m。运输巷探测范围 272 m, 回风巷探测范围 316 m, 平均 294 m。

(2) 评价结果数据分析

图 5 为工作面探测区域冲击危险性指数 Π 分布图, 图中以浅到深从小到大来代表探测区域内冲击危险性指数, 区域内 Π 最大值为 0.85, 最小值为 -0.35。

总体来看, 测区内大部分区域冲击危险性指数 < 0.75 , 但存在近 1/5 测区面积的煤层冲击危险性指数处于 $0.5 \leq \Pi < 0.75$, 依据表 1 的分类标准, 以上区域处于中等冲击危险等级。另外, 还零散分布较大面积弱冲击危险区域。综合判断, 在探测期间, 测区内的煤岩层总体处于中等冲击危险等级。

如图 6 所示, 依据冲击危险性指数大小, 用阴影线将 I, II, III, IV, V 处具有冲击危险的区域进行圈出, 并标出了相关尺寸, 其中区域 V 是弱冲击危险等级, 其余为中等冲击危险等级。

a) I 区域。该区域巷道自掘出后, 变形速度较快, 变形量大, “10.17”冲击事件中受强烈动载影响, 巷道断面急剧缩小, 但没有大面积垮塌, 表明该段巷道积聚的弹性能并没有在冲击地压发生过程中充分释放, 围岩及支护体仍具备较高的承载能力, 应力水平处于高位, 具有较高的冲击危险性。

b) II 区域。该区域冲击危险形成条件与 I 区域类似, 巷道围岩变形量显著大于周边区域。

c) III 区域。该区域走向范围基本对应了“10.17”冲击地压破坏区域, “10.17”冲击地压发生后, 垮塌区域巷道围岩破坏严重, 积聚的能量得到充分释放, 因此, 两顺槽浅部围岩并没有形成载荷集中。而巷帮深部煤岩积聚的能量在冲击过程中未充分释放, 剩余能量仍存在一定程度的积聚。

d) IV 区域。该区域集中静载荷的形成与上分层 069-1 和 068-1 工作面之间的残留煤柱有关, 上分层两工作面回采完毕后, 煤柱两侧都将形成辉绿岩悬顶现象, 进而在煤柱内部形成双侧支承压力。由于煤柱至回风巷距离小于至运输巷距离, 因此, 煤柱对回风巷冲击危险性的影响更为显著。

2.3 评价结果验证

为了验证地震 CT 探测技术评价煤岩层冲击危险性结论, 统计了近 1 个多月以来 069-2 工作面走向 200

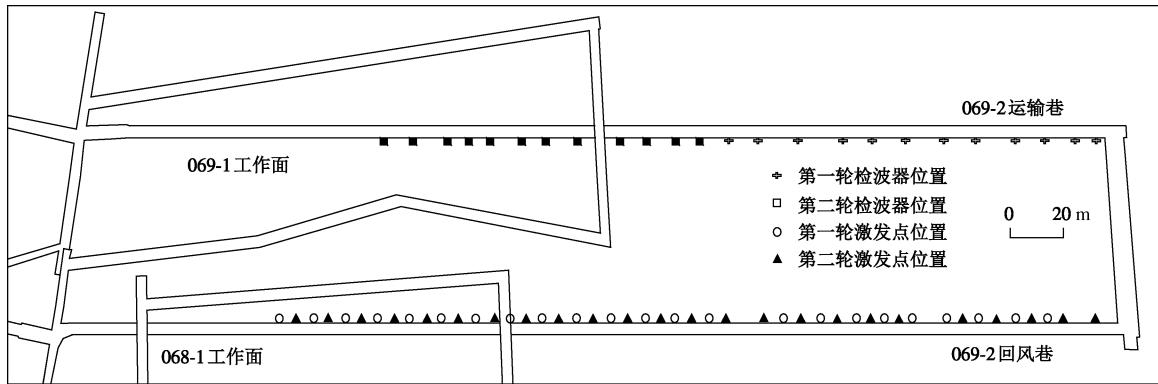


图 4 069-2 工作面探测方案图
Fig. 4 Detection scheme of 069-2 face

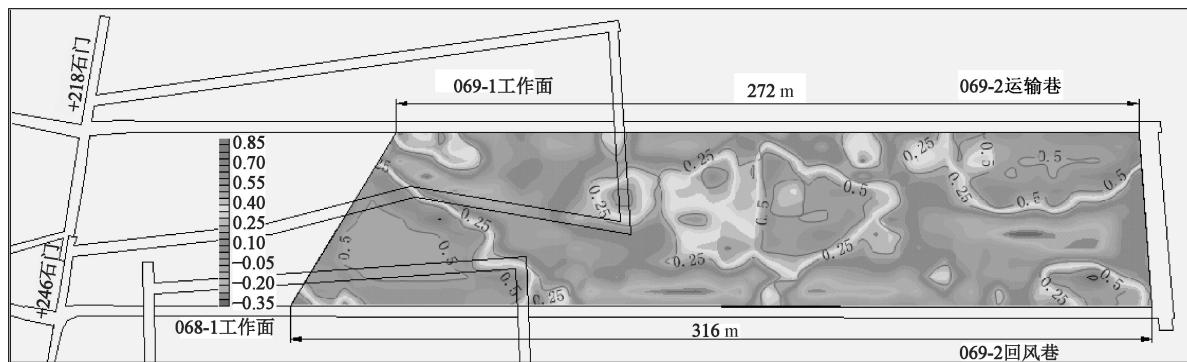


图 5 工作面探测区域冲击危险性指数分布图
Fig. 5 Distribution of burst hazard indices of detection zone in work face

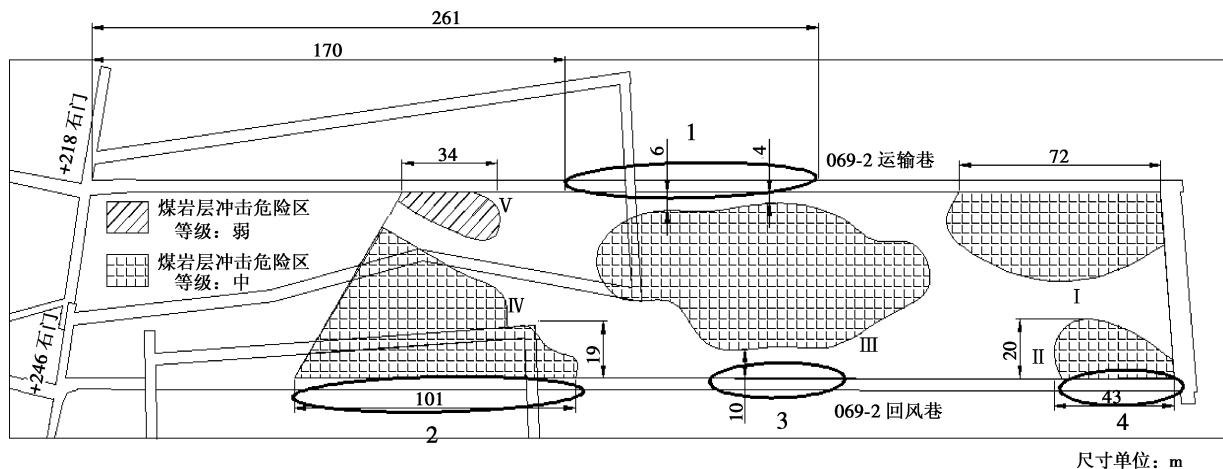


图 6 工作面探测区域煤层冲击危险区范围
Fig. 6 Range of burst hazard zone of coal seam detection

m 范围内钻屑法检测冲击危险性的实测数据, 并标注在图 7 中。设计钻屑孔最大深度 15 m, 如遇钻屑量超标或出现动力现象, 则停止继续钻进。即在图 7 中钻屑孔深度越小, 表明该处应力越大, 危险性越高。

对比图 6、7, 可知, 在钻屑法已经检测的范围内, 钻屑量超标或出现动力现象的区域与地震 CT 技术探测出的冲击危险区域分布位置基本一致, 验证了该评价方法的可靠性。

3 对工作面潜在冲击危险解除的指导

3.1 爆破卸压

爆破解危工程进度依据预评价结果进行轻重缓急编排。卸压顺序按照: “1 区” → “2 区” → “3 区” → “4 区”。由 CT 试验结果发现下巷距离石门 170~260 m 位置 (即图 6 中的“1 区”), 应力集中区与煤壁的最小距离只有 4 m, 为需要卸压的冲击危险区域;

与 11 月上旬进行的钻屑法监测比较发现, 应力集中区与煤壁的最小距离由 7 m 减少到 4 m, 可见应力集中区在大约 25 d 内不断向煤壁靠近。下巷切眼前 72 m 的应力集中区为未扩修区域, 目前正在扩修, 暂无法进行卸压。图 6 中下巷 V 区域, 巷道长度为 34 m, 为弱冲击危险区域, 由井下实际观测巷道变形较小。考虑到本次爆破范围、工程量较大, 暂不列为卸压区域。

上巷的冲击危险区域由地震 CT 检测结果可知, 由 3 部分组成, 即图 6 中的“2 区”(距离石门 85~185 m)、“3 区”(距离石门 230~280 m)、“4 区”(切眼向外 45 m)。“2 区”应力集中的原因为上幅采空区间煤柱的存在, 要达到较好的卸压效果需要炮孔打到煤柱下方, 即大于 19 m。“4 区”的应力集中区的距离煤壁同样达到 20 m。所以, 将上巷的卸压爆破的炮孔深度设计为 20 m。

3.2 爆破卸压效果检验(工作面冲击危险性复评)

此次爆破卸压效果检验同样采用 PASAT-M 型便携式微震探测系统。与前次探测方案类似, 同样在本工作面采用两轮交差激发的方式进行探测。探测区域涵盖动力显现区、上部采空影响区、残留煤柱影响区。激发端位于回风巷侧, 采集端位于运输巷侧。

图 8 为 069-2 工作面爆破卸压后冲击危险性指数

Π 分布图, 区域内 Π 最大值为 0.75, 最小值为 -0.3。

测区内煤岩层冲击危险性指数处于 $0.5 \leq \Pi < 0.75$ 的区域零散分布, 且区域较广, 依据表 1 所示的分类标准, 该范围内煤岩层处于中等冲击危险等级。但其总面积约占测区总面积的 1/8 左右。综合判断, 在探测期间, 测区内的煤岩层总体处于弱冲击危险等级, 局部处于中等冲击危险等级。与初评相比, 危险状态有所改善。

如图 9 所示, 依据冲击危险性指数大小, 用阴影线将 VI, VII, VIII, IX, X, XI 处具有冲击危险的区域进行圈出, 并标出了相关尺寸, 其中区域 VI, VII, X 是弱冲击危险等级, 其余为中等冲击危险等级。

3.3 前后两次危险性探测结果对比

(1) 工作面运输巷冲击危险性变化

为解除图 6 中 I, II 两处中等冲击危险区域的威胁, 对该处巷道围岩进行了为期一个月的爆破卸压工程, 同时对因“10.17”冲击损坏的巷道进行扩修。爆破卸压和巷道扩修工程均能够促进围岩弹性能的释放, 由图 9 可知, 运输巷侧里段 200 m 范围煤岩层冲击危险等级大多由“中等”降低为“弱”, 且分布区域显著向工作面内部迁移, 这充分表明爆破卸压工程起到了降低冲击危险的作用。

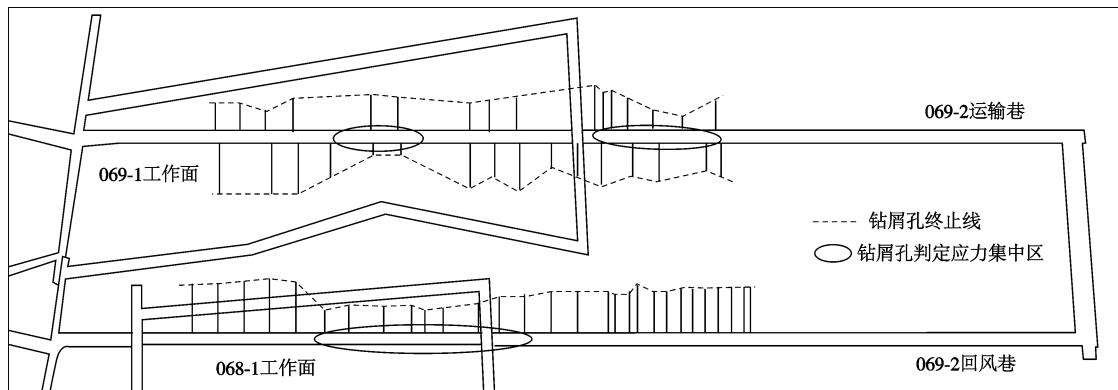


图 7 069-2 工作面钻屑孔布置图

Fig. 7 Layout of drill holes of 069-2 face

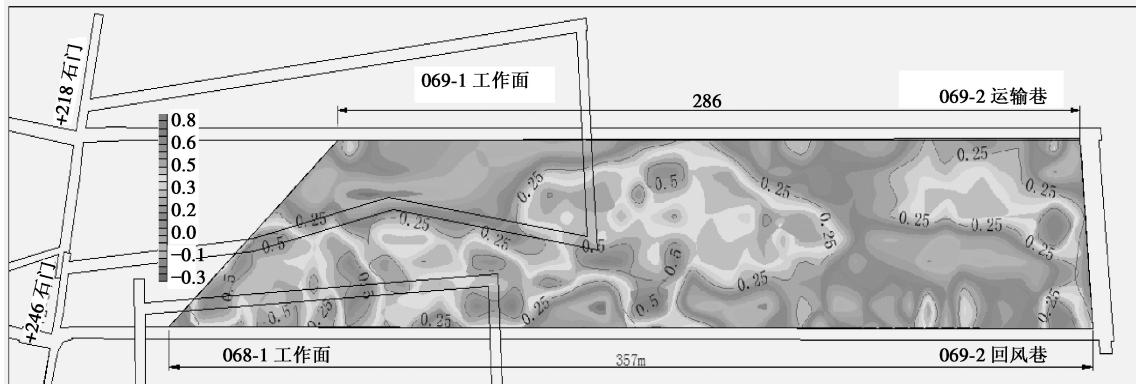


图 8 工作面爆破卸压后冲击危险指数分布图

Fig. 8 Distribution of burst hazard indices of work face after blasting

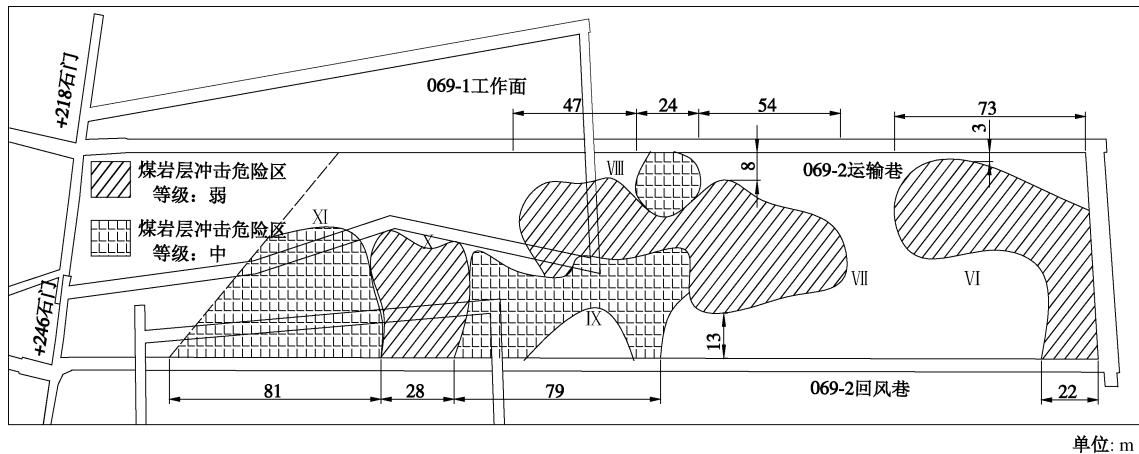


图9 工作面爆破卸压后冲击危险区范围

Fig. 9 Range of burst hazard zone of work face after blasting

(2) 切眼处冲击危险性变化

图6可知, 第一次探测时, 切眼围岩冲击危险区域主要分布在靠近两顺槽侧, 这主要是因为两侧尚未完成扩巷, 原冲击导致的能量积聚没有充分释放。而图9中显示, 切眼中段围岩危险等级有所增高, 为两侧应力内移所致。

虽然在切眼围岩有两处冲击危险性指数 >0.5 的区域, 但考虑到工作面将要从切眼开始推采, 积聚的应力及能量将很快得到释放, 且分布范围不大, 因此, 未将其列为中等危险区域。

(3) 工作面中部及残留煤柱下应力变化

对比两次CT探测结果, 可知工作面中部整体危险水平有所降低, 但影响范围有所扩大, 对回风巷影响程度有所增加。上分层残留煤柱导致的应力集中依然显著, 且与中部危险区域联通。

4 结 论

(1) 采掘活动空间内局部防治冲击地压的效果是有限的, 在工作面回采之前, 开展冲击危险状态预评价, 并依据评价结果预先采取卸压措施, 将降低回采期间冲击地压防治强度。

(2) 基于集中静载荷对冲击地压启动的显著影响作用, 对工作面回采前、回采中集中静载荷的探测, 并依此作出危险性评价是冲击地压灾害实时监测、防治方案制订的基础。

(3) 实践证明, 通过震动波波速的异常系数、波速梯度等参数探测, 能够反映工作面集中静载荷的分布状态, 从而评价出冲击地压危险状态。

(4) 工作面推动前, 通过爆破前后冲击危险状态对比分析, 该评价方法能够对解危效果进行科学检验, 现场应用效果良好。

参考文献:

- [1] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 32 - 38. (QI Qing-xin, DOU Lin-ming. Theory and technology of rock burst[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 32 - 38. (in Chinese))
- [2] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511 - 1516. (JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua, CHENG Yun-hai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal Geophysics, 2006, 49(5): 1511 - 1516. (in Chinese))
- [3] 夏永学, 康立军, 齐庆新, 等. 基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2011 - 2016. (XIA Yong-xue, KANG Li-jun, QI Qing-xin, et al. Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecastion[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011 - 2016. (in Chinese))
- [4] 潘俊峰, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 586 - 596. (PAN Jun-feng, NING Yu, MAO De-bing, et al. Theory of rock burst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586 - 596. (in Chinese))
- [5] 巩思园, 窦林名, 何江, 等. 深部冲击倾向煤岩循环加载的纵波波速与应力关系试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 42 - 49. (GONG Si-yuan, DOU Lin-ming, HE Jiang, et al. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment[J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 42 - 49. (in Chinese))
- [6] 方 华, 伍向阳, 杨 伟. 岩石中裂纹对弹性波速度的影响[J]. 地球物理学进展, 1998, **13**(3): 79 - 83. (FANG Hua, WU Xiang-yang, YANG Wei. The influences of cracks in compressional wave velocity[J]. Progress in Geophysics, 1998, **13**(3): 79 - 83. (in Chinese))
- [7] 郑贵平, 赵兴东, 刘建坡, 等. 岩石加载过程声波波速变化规律实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, **30**(8): 1197 - 1200. (ZHENG Gui-ping, ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, et al. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2009, **30**(8): 1197 - 1200. (in Chinese))
- [8] 王书文, 徐圣集, 蓝 航, 等. 地震 CT 技术在采煤工作面的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, **40**(7): 24 - 27, 84. (WANG Shu-wen, XU Sheng-ji, LAN Hang, et al. Study on seismic CT technology applied to coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2012, **40**(7): 24 - 27, 84. (in Chinese))
- [9] 张宏伟. 地质动力区划在煤与瓦斯突出区域预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(4): 621 - 624. (ZHANG Hong-wei. Application of geo-dynamic division method in prediction of coal and gas outburst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 621 - 624. (in Chinese))
- [10] 陆菜平, 刘海顺, 刘 彪, 等. 深部高应力异常集中区冲击矿压动态防治实践[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(12): 1985 - 1988. (LU Cai-ping, LIU Hai-shun, LIU Biao, et al. Practice of rockburst dynamic prevention in deep high stress concentration district[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(12): 1985 - 1988. (in Chinese))
- [11] LURKA A. Bent ray tomographic imaging of seismic velocity and seismic velocity gradient in Zabrze Bielszowice coal mine for seismic hazard assessment[C]// 4th Internaional Symposium on Green Mining. Luoyang, 2011: 1 - 8.
- [12] 齐 诚, 赵大鹏, 陈 颖, 等. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 805 - 815. (QI Chen, ZHAO Da-pen, CHEN Yong, et al. 3-D P and S wave velocity structures and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region[J]. Chinese Journal Geophysics, 2006, **49**(3): 805 - 815. (in Chinese))
- [13] 孙安辉, 赵大鹏, 池田伦治, 等. 西南日本地区地壳 P、S 波速度结构与地震活动的关系[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(4): 1013 - 1022. (SUN An-hui, ZHAO Da-peng, IKEDA Michiharu, et al. 3-D P and S wave velocity structure and its relationship to seismic and volcanic activity in Southwest Japan[J]. Progress in Geophysics, 2008, **23**(4): 1013 - 1022. (in Chinese))