

DOI: 10.11779/CJGE201910021

特厚煤层掘进工作面冲击地压综合监测预警技术研究

杨光宇¹, 姜福兴², 曲效成³, 李琳⁴, 魏全德³, 李乃录⁴

(1. 天地科技股份有限公司开设计事业部, 北京 100013; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 北京安科兴业科技股份有限公司, 北京 102299; 4. 彬县水帘洞煤炭有限责任公司, 陕西 彬县 713500)

摘要: 以近年来特厚煤层掘进工作面冲击地压事故为工程背景, 通过事故现场勘查对其发生冲击地压的机理进行研究, 提出了基于围岩动态结构演化的掘进工作面冲击地压事故分区: 即迎头区、塑性圈动态演化区、塑性圈稳定区。通过研究各区域冲击地压发生机理和可监测特征, 提出了采用“围岩震动、围岩应力动态、锚杆锚索支护力和煤体钻屑量”进行四位一体的监测预警特厚煤层掘进面冲击地压实时危险性的学术思想, 并通过现场实践得出了工程上监测预警特厚煤层掘进工作面冲击危险性的方法和指标。将研究成果分别应用于陕西、河南等矿区特厚煤层工作面掘进期间的冲击地压监测预警, 有效预警了掘进期间的冲击危险并及时采取了卸压解危措施, 保证了工作面的安全开采。

关键词: 特厚煤层; 掘进工作面; 冲击地压; 综合监测预警

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1949-10

作者简介: 杨光宇(1990—), 男, 陕西宜君人, 博士, 主要从事冲击地压监测与治理方面的研究。E-mail: ustb_guangyu@163.com。

Comprehensive monitoring and early warning technology for rock burst of tunneling face with thick coal seams

YANG Guang-yu¹, JIANG Fu-xing², QU Xiao-cheng³, LI Lin⁴, WEI Quan-de³, LI Nai-lu⁴

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Civil & Resources Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing Anke Xingye Science and Technology Co., Ltd., Beijing 102299, China; 4. Binxian County Shuilidong Coal Co., Ltd., Binxian 713500, China)

Abstract: Through site investigations on thick coal seam rock burst accidents in recent years and studies on their mechanisms, the division method for rock burst of tunneling face is proposed based on the dynamic structure evolution of surrounding rock, that is, head zone, dynamic evolution zone and stable zone. By studying the mechanism and monitoring characteristics of rock burst in those zones, an academic thought of four-in-one monitoring of “vibration of surrounding rock, stress dynamics of surrounding rock, supporting force of rock anchor bolts and amount of coal drillings” is put forward to give real time warning of rock burst risks in tunneling of extra-thick coal seams, and the relevant methods and indices are obtained. The research results are applied to the monitoring of rock burst in the extra-thick coal seams in the mines in Henan and Shaanxi provinces, and effective warnings are given during excavation, together with timely measures to release the pressure so as to ensure safe mining of working faces.

Key words: thick coal seam; tunneling face; rock burst; monitoring and early warning

0 引言

近年来, 掘进工作面冲击地压事故逐步上升, 冲击范围有些达到 150 m 以上, 致使巷道设备损毁, 人员伤亡, 对煤矿造成了巨大损失。对于掘进工作面冲击地压灾害的监测预警, 目前国内外已经提出了以单指标为主的微震监测^[1-3]、地音监测^[4]、应力监测^[5-7]、电磁辐射法^[8-10]、声发射监测^[11]、地震 CT^[12-13]等多种方法, 用于监测掘进面前方的 3 个区域, 即卸压区、应力集中区和原始应力区, 这些预测、预警方法多是

单套系统进行监测预测或预警, 效果均不理想, 掘进工作面多参量综合预测或预警方法现场实践较少。迄今为止, 特厚煤层掘进工作面冲击地压机理研究较少, 未见系统性的研究成果, 且无可靠、科学的冲击危险性实时监测预警方法。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804204); 国家自然科学基金项目(51574149); 中央高校基本科研业务费项目(FRF-AT-18-013, FRF-AT-18-016)

收稿日期: 2018-07-23

为此，以近年来发生的特厚煤层掘进工作面冲击地压事故为工程背景，分析了其掘进期间冲击地压发生区域及冲击地压预警机制，提出了对特厚煤层掘进工作面“围岩震动、围岩应力、锚杆锚索支护力和煤体钻屑量”进行四位一体的监测，用于评估掘进面冲击地压实时危险性的学术思想。其中，“围岩震动、围岩应力、锚杆锚索支护力”三参数可以实现实时在线监测，煤体钻屑量可以用于检验监测预警结果的可靠性，属于检验性指标。

陕西某矿即将开采的3803工作面为孤岛工作面，煤层厚度9~11 m，根据冲击危险性评价结果其掘进期间面临冲击地压灾害。通过将掘进工作面冲击地压综合监测预警技术应用于该工作面掘进期间，对其掘进过程中巷道的“围岩震动、围岩应力、锚杆锚索支护力”实现实时在线监测，根据监测到的巷道围岩破裂活动、煤岩体应力和支护结构应力变化，对其掘进过程中的冲击危险性进行了实时监测预警，有效保证了3803工作面的安全掘进。

1 特厚煤层掘进工作面冲击地压事故

1.1 案例1

2013年1月30日15时50分，硫磺沟煤矿(4-5)04工作面皮带顺槽掘进迎头发生冲击地压灾害，皮带顺槽掘进迎头顶板冒落形态见图1所示。顶板冒落尺寸为：长×宽×高=5 m×4.2 m×3 m，冒落体积约21 m³。

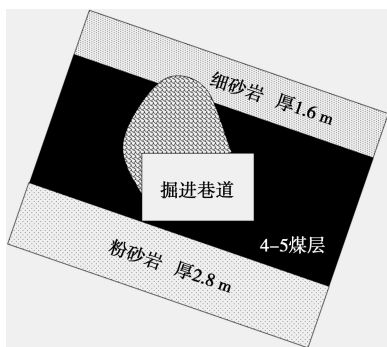


图1 硫磺沟煤矿“1·30”冲击地压事故断面素描示意图

Fig. 1 Section of “1·30” rock burst accident of Liuhuanggou Mine

现场勘查表明，这是一起典型的发生在掘进巷道迎头区的冲击地压事故，该掘进巷道由于巨厚煤层组的影响，在煤层中存在夹矸，迎头掘进至夹矸区域时，造成了迎头区域局部应力集中，当集中应力大于围岩强度时产生冲击。

1.2 案例2

2014年3月27日11时18分28秒，千秋煤矿21032工作面回风上山巷道在掘进过程中发生冲击地压，造

成6人死亡。冲击地压发生时，掘进迎头后方5~70 m发生了不同程度的破坏，事故现场照片见图2所示。

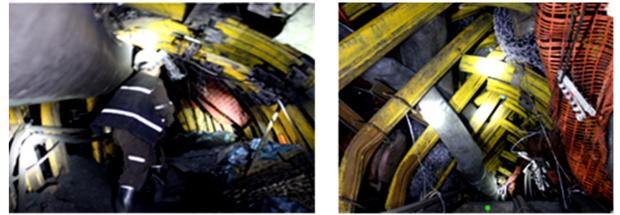


图2 千秋煤矿21032工作面“3·27”事故现场照片

Fig. 2 Photos of “3·27” rock burst accident of 21032 working face of Qianqiu Mine

现场勘查表明，这是一起发生在掘进工作面后方动压区的典型冲击地压事故，该区域围岩产生塑性变形，围岩结构处于不断演化状态，围岩结构的演化导致巷道产生应力集中，当应力大于围岩强度导致其破坏产生的冲击力大于支护阻力时巷道发生冲击。

1.3 案例3

2013年8月5日，星村煤矿3302工作面上平巷掘进头后方的已成型巷道内发生了一次严重的冲击事故，损坏巷道达150 m。3302工作面为首采工作面，周围无采动，冲击位置距掘进头约200 m，已超出掘进扰动的范围，事故现场照片及冲击位置如图3所示。

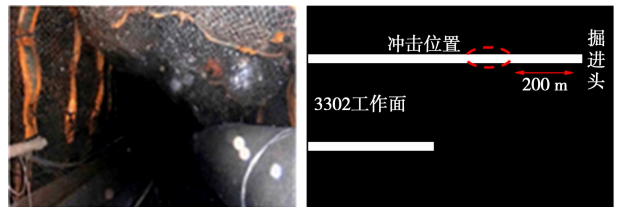


图3 星村煤矿事故现场照片及冲击位置

Fig. 3 Photo and position of rock burst accident of Xingcun Mine

现场资料显示：冲击位置埋深达1260 m，煤层厚度约9 m，处于煤层倾角突变带和三维地震勘探异常带，属于巷道围岩的薄弱区域。现场勘查表明，这是一起典型的掘进工作面动压区后方的蠕变区^[14]冲击地压事故。巷道围岩塑性区煤体在高应力下蠕变导致其强度降低直至残余强度，塑性圈区域不断扩大导致部分区域支护失效，煤体强度退化形成的伪自由面在巷道支护薄弱区域的峰值应力作用下发生动力失稳。

上述事故表明：对于特厚煤层掘进工作面而言，其冲击地压不仅发生在围岩活动的区域，在其后方围岩稳定区域仍存在蠕变型冲击的危险，对于蠕变型冲击应采取相应的监测预警手段。综上，目前急需一种综合实时监测特厚煤层掘进工作面冲击危险性的技术及监测预警设备，对工作面掘进期间冲击危险性进行监测预警，从而保证工作面的安全开采。

2 特厚煤层掘进工作面冲击地压监测预警机制研究

巷道开掘后原岩应力重新分布, 巷道围岩内出现应力集中, 如围岩应力大于围岩强度, 巷道围岩会产生塑性变形, 从巷道周边向围岩深处扩展到一定范围, 巷道围岩结构处于不断演化状态。基于掘进巷道围岩结构演化状态, 将掘进迎头前方受超前支承压力影响且尚未掘进形成巷道的区域称为迎头区; 将掘进迎头后方巷道围岩塑性圈尚未稳定部分称为塑性圈动态演化区; 将掘进头后方巷道围岩塑性圈达到稳定的区段称为塑性圈稳定区, 如图 4 所示。随着掘进面向前掘进, 掘进工作面各区也不断向前推移。

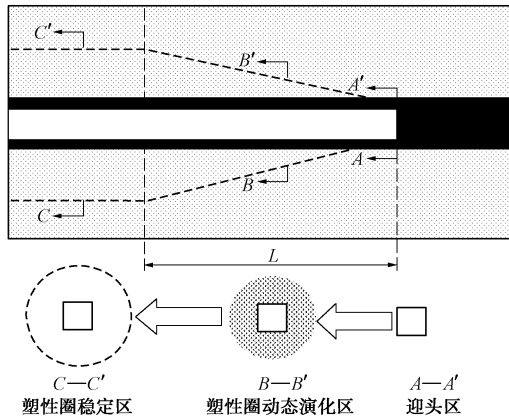


图 4 基于掘进巷道围岩结构演化状态的掘进工作面分区
Fig. 4 Zone division of tunneling face based on structural evolution status of surrounding rock

以掘进工作面围岩结构演化特征为基础, 分别研究特厚煤层掘进工作面迎头区、塑性圈动态演化区及塑性圈稳定区的冲击地压监测预警机制。

2.1 迎头区

掘进迎头区域巷道还未形成, 该区域主要受掘进头超前支承压力的影响。在掘进过程中, 若遇到断层、相变带和褶曲等构造, 则构造应力将与采动应力叠加, 当叠加应力大于煤体抗压强度时, 该区域具有发生冲击地压的危险, 主要为高应力诱发的冲击。

基于该区域冲击地压发生机理, 从其冲击地压的可监测特征及监测的经济性出发, 可采取超前钻屑法对掘进工作面迎头区域进行冲击危险性预警。即在掘进工作面正头施工钻屑法检测孔^[15]。若钻屑法检测不超标则为无冲击危险, 可以进行掘进。钻屑法检测的孔深一般约为掘进推进度的 1.5~2.0 倍, 即检测 15~20 m, 可推进 10 m, 依次往复循环。

2.2 塑性圈动态演化区

掘进工作面迎头后方范围 L 区域为动态演化区, 见图 4 所示。该区域巷道围岩出现塑性变形, 且塑性

圈处于动态演化状态, 塑性圈断面范围不断扩大, 围岩应力处于持续调整阶段, 见图 4 中 $B-B'$ 剖面。从开挖后的应力 σ_1 不断演化为 σ_2 , 见图 5 所示。该区域主要受巷道开挖扰动影响, 原岩应力平衡状态被打破, 围岩发生破裂, 支护结构与煤岩体处于失衡一再平衡阶段, 巷道围岩塑性圈发生动态演化, 此时极易诱发冲击地压。

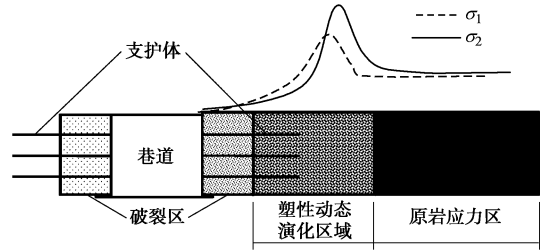


图 5 巷道围岩塑性圈动态演化区巷帮侧向支承压力分布
Fig. 5 Supporting forces of abutment chart in dynamic evolution zone of tunnel plastic rum

该区域发生冲击地压的机理为巷道围岩动态演化时产生的扰动应力与巷帮侧向支承压力叠加作用于围岩, 当叠加应力大于围岩强度时产生破坏, 破坏产生的冲击力大于支护阻力时, 巷道发生冲击。

基于该区域冲击地压发生机理及巷道围岩结构, 其巷道冲击危险性主要与围岩结构动态演化程度、巷帮侧向支承压力、围岩强度和支护阻力有关, 其中围岩扰动程度、巷帮侧向支承压力和支护阻力属于可监测指标, 可以采用地音、钻孔应力和锚杆索应力进行实时在线监测, 在巷道安装地音、钻孔应力和锚杆索应力测点, 对该区域掘进期间实时冲击危险性进行综合监测预警, 见图 6 所示。

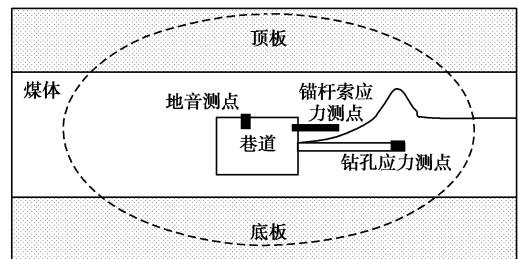


图 6 巷道塑性圈动态演化区冲击危险性监测示意图
Fig. 6 Monitoring of rock burst risk in dynamic evolution zone of tunnel plastic rum

根据该区域监测到的巷道地音、钻孔应力和锚杆锚索应力变化, 采用多参量耦合分析的方法得出掘进期间该区域巷道冲击危险指数 I_0 :

$$I_0 = K_1 I_d + K_2 I_Y + K_3 I_{mD} \quad (1)$$

式中, I_d 为地音指标冲击危险指数, K_1 为地音指标权重系数, I_Y 为钻孔应力指标冲击危险指数, K_2 为钻孔应力指标权重系数, I_{mD} 为锚杆(索)应力指标冲击危

险指数, K_3 为锚杆(索)应力指标权重系数, 其中 $K_1+K_2+K_3=1$ 。

(1) 地音指标冲击危险指数确定方法

特厚煤层巷道围岩塑性圈断面范围不断扩大, 围岩持续产生破裂, 从而使围岩应力处于持续调整的阶段, 当围岩应力突变到超过冲击临界应力时易诱发冲击。通过地音监测该区段范围内围岩一定时间内破裂的事件数量和能量总和, 可以反映出该区段内围岩的破裂状态。围岩运动频繁, 产生的事件数量和能量多, 说明围岩的应力变化大, 易诱发冲击; 反之, 不易诱发冲击。

采用地音指标冲击危险指数 I_d 表征监测区域巷道冲击危险性:

$$I_d = aI_{dE} + bI_{dN} \quad (2)$$

式中 I_d 为地音指标冲击危险性指数; I_{dE} 为地音事件能量异常指数, 见式(3); I_{dN} 为地音事件频次异常指数, 见式(4); a 地音能量异常指数影响地音冲击危险指数权重系数; b 地音事件频次异常指数影响地音冲击危险指数权重系数; 其中 $a+b=1$, 通常取 $a=b=0.5$ 。

地音能量异常指数 I_{dE} 表达式为

$$I_{dE} = \begin{cases} 0 & (E' \leq E) \\ \frac{E' - E}{E} & (E < E' < 2E) \\ 1 & (E' \geq 2E) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, E 为前 7 d、相同班次的平均能量, E' 为当前班次的能量。

地音事件频次异常指数 I_{dN} 表达式为

$$I_{dN} = \begin{cases} 0 & (N' \leq N) \\ \frac{N' - N}{N} & (N < N' < 2N) \\ 1 & (N' \geq 2N) \end{cases}, \quad (4)$$

式中, N 为前 7 d、相同班次的有效事件平均数, N' 当前班次有效事件数。

地音指标冲击危险性指数 I_d 与监测区域巷道冲击危险性关系见表 1。

表 1 地音指标冲击危险性指数与冲击地压危险等级关系

Table 1 Relation between geophone risk index and danger level of rock burst

地音指标冲击危险指数 I_d	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1
冲击地压危险等级	无	弱	中等	强

(2) 钻孔应力指标冲击危险指数确定方法

冲击地压发生之前应力存在逐步增加的过程, 当应力达到煤体破坏极限时, 才有可能发生冲击地压, 采用单点钻孔应力指标冲击危险指数 I_Y 表征监测区域巷道冲击危险性:

$$I_Y = \begin{cases} \frac{3Y}{10Y_1} & (Y \leq Y_1) \\ 0.3 + \frac{2(Y - Y_1)}{10(Y_2 - Y_1)} & (Y_1 < Y \leq Y_2) \\ 0.5 + \frac{3(Y - Y_2)}{10(Y_3 - Y_2)} & (Y_2 < Y \leq Y_3) \\ 0.4 + \frac{2Y}{5Y_3} & (Y_3 < Y \leq 1.5Y_3) \\ 1 & (Y > 1.5Y_3) \end{cases} \quad (5)$$

式中 Y 为钻孔应力测点实测应力值; Y_1 为无冲击与弱冲击的临界应力值; Y_2 为弱冲击与中等冲击的临界应力值; Y_3 为中等冲击与强冲击的临界应力值。

钻孔应力指标冲击危险性指数 I_Y 与监测区域巷道冲击危险性关系见表 2。

表 2 钻孔应力冲击危险性指数与冲击地压危险性关系

Table 2 Relation between drilling stress risk index and danger level of rock burst

钻孔应力指标冲击危险性指数 I_Y	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1
冲击地压危险等级	无	弱	中等	强

(3) 锚杆(索)应力指标冲击危险指数确定方法

特厚煤层掘进巷道塑性圈动态演化区围岩在锚杆(索)支护作用下处于“平衡—破裂—再平衡”状态, 随着巷道围岩的不断破裂, 锚杆(索)应力值不断增加。监测支护应力的变化可以有效预警该区域的冲击危险, 锚杆(索)应力监测装置见图 7。

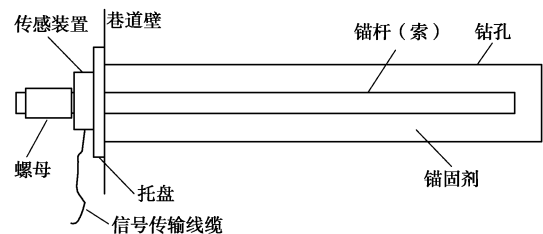


图 7 锚杆(索)应力监测示意图

Fig. 7 Stress monitoring of anchor bolts

以监测到的锚杆(索)应力基准值 P_0 作为预警特厚煤层掘进巷道塑性圈动态演化区弱冲击危险性的应力值; 以监测到锚杆(索)破断应力值 P_2 的 80% 作为预警强冲击危险性的应力值。采用特厚煤层掘进巷道塑性圈动态演化区锚杆(索)应力指标冲击危险指数 I_{mD} 表征监测区域巷道冲击危险性:

$$I_{mD} = \begin{cases} 0.3 \times \frac{P - P_1}{P_0 - P_1} & (P_1 \leq P \leq P_0) \\ 0.3 + \frac{5 \times (P - P_0)}{8P_2 - 10P_0} & (P_0 < P \leq 0.8P_2) \\ \frac{P}{P_2} & (0.8P_2 < P \leq P_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中 P 为掘进巷道塑性圈动态演化区锚杆(索)应力实测值; P_0 为监测到的锚杆(索)应力监测基准值; P_1 为锚杆(索)应力监测安装后的初始值; P_2 监测到的锚杆(索)应力破断值。

特厚煤层掘进巷道塑性圈动态演化区锚杆(索)应力冲击危险指数 I_{mD} 与监测区域巷道冲击危险性关系见表 3。

表 3 塑性圈动态演化区锚杆(索)应力冲击危险指数与冲击地压危险性关系

Table 3 Relation between stress risk index of anchor bolt in dynamic zone of plastic rum and danger level of rock burst

锚杆(索)应力指标冲击危险指数 I_{mD}	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~
冲击地压危险等级	无	弱	中等	强

2.3 塑性圈稳定区

迎头后方 L 区域范围之外为塑性圈稳定区, 距离掘进迎头一定范围(各矿不同)之外巷道塑性圈断面趋于稳定, 巷道围岩处于平衡状态, 如图 4 中 $C-C'$ 剖面, 该区域距开挖时间较长, 支护结构与煤岩体已基本平衡, 开挖引起的周围岩体变形已经稳定, 塑性圈处于平衡阶段, 如图 8 所示。

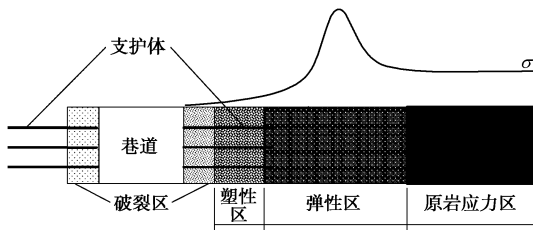


图 8 巷道塑性圈稳定区巷帮侧向支承压力分布示意图

Fig. 8 Supporting forces of abutment in stable zone of tunnel plastic rum

巷道处于塑性圈稳定区后, 巷道围岩所处的应力低于其围岩抗压强度则巷道稳定, 掘进期间不会发生冲击地压灾害; 如巷道处于塑性圈稳定区后, 巷道围岩所处应力仍大于其围岩抗压强度, 则巷道围岩可能出现蠕变现象。高应力下围岩发生蠕变, 从而造成巷道塑性区不断扩大, 当塑性区大于支护体区域时造成支护体失效, 在巷道围岩部分区域造成弱面, 在震动和高应力的诱发下具有冲击危险。

该区域发生的冲击地压机理主要为高静应力造成的巷道围岩蠕变导致塑性区扩张, 从而导致支护失效发生冲击, 其主要表现为煤体应力的缓慢升高和支护应力逐渐失效。其巷道冲击危险性主要与围岩强度和支护阻力有关, 该区域对支护阻力的变化比较敏感, 从该区域冲击地压的可监测特征出发, 可以采用锚杆(索)应力实时在线监测预警其冲击危险。巷道处于

塑性圈稳定区后, 锚杆(索)应力值趋于稳定, 以此为判别锚杆索支护是否失效的基准值, 当锚杆索应力值相对于基准值降低时, 表明巷帮煤体在高应力的作用下逐渐产生蠕变下的塑性区扩张, 可能导致支护逐渐失效诱发冲击, 锚杆索的应力监测预警指标应根据现场实测的应力值来具体确定。

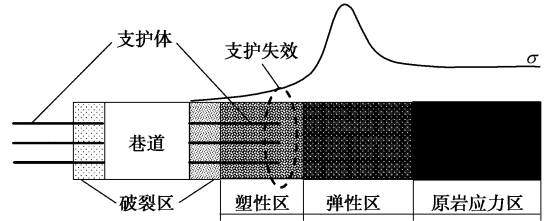


图 9 巷道塑性圈稳定区在高应力下塑性区不断扩大导致支护失效示意图

Fig. 9 Invalid support with expanding plastic rum under high stress in tunnel stable zone

以锚杆(索)应力稳定值 P_0 降低 10%, 20%和 30%分别作为预警特厚煤层掘进巷道塑性圈稳定区弱冲击危险性、中等冲击危险性和强冲击危险性的应力值, 引入特厚煤层掘进巷道塑性圈稳定区锚杆(索)应力指标冲击危险指数 I_{mw} 表征特厚煤层巷道冲击危险性:

$$I_{mw} = \begin{cases} 3 - \frac{3P}{P_0} & (0.9P_0 < P \leq P_0) \\ 2.1 - \frac{2P}{P_0} & (0.8P_0 < P \leq 0.9P_0) \\ 2.9 - \frac{3P}{P_0} & (0.7P_0 < P \leq 0.8P_0) \\ 1.5 - \frac{P}{P_0} & (0.5P_0 < P \leq 0.7P_0) \\ 1 & (P \leq 0.5P_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中 P 为掘进巷道塑性圈稳定区锚杆(索)应力实测值; P_0 为掘进巷道塑性圈稳定区锚杆(索)应力监测基准值。

特厚煤层掘进巷道塑性圈稳定区锚杆(索)应力指标冲击危险指数 I_{mw} 与监测区域巷道冲击危险性关系见表 4。

表 4 塑性圈稳定区锚杆(索)应力冲击危险指数与冲击地压危险性关系

Table 4 Relation between risk index of anchor bolt stress in stable zone of plastic rum and danger level of rock burst

锚杆(索)应力指标冲击危险指数 I_{mw}	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~
冲击地压危险等级	无	弱	中等	强

2.4 基于特厚煤层掘进工作面分区的冲击危险性监测预警方法

基于以上研究，提出了采用“地音监测围岩破裂信息表征巷道围岩结构状态、钻孔应力监测表征围岩应力、锚杆（索）应力监测表征巷道支护阻力”的掘进工作面冲击地压综合监测预警技术，并采用钻屑法对监测预警结果进行检验。依据围岩结构演化、围岩应力及支护结构受力的耦合信息，可将特厚煤层掘进工作面划分3个重点监测区域：

(1) 第一监测区：迎头区

监测参量：掘进迎头应力场；监测方法：迎头钻屑法；监测目标：掘进迎头前方支承压力变化趋势及危险程度。

(2) 第二监测区：塑性圈动态演化区

监测参量：围岩破裂场（震动）、围岩应力场、支护力；监测系统：地音监测、钻孔应力监测及支护阻力监测系统；监测目标：掘进扰动后围岩塑性变形对围岩结构的破坏程度，侧向支承压力变化趋势及危险程度，支护的有效性及其稳定性。

(3) 第三监测区：塑性圈稳定区域

监测参量：支护力；监测系统：支护力监测系统；监测目标：围岩结构与支护结构耦合作用后，在高应力环境下是否发生围岩蠕变而影响巷道支护力的有效性及其稳定性。

根据特厚煤层掘进工作面分区监测预警机制，其掘进迎头后方冲击危险区域综合监测方案见图10。

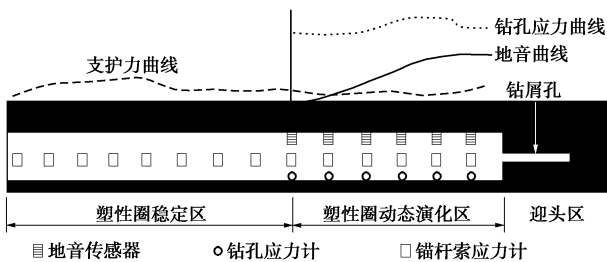


图10 掘进工作面分区冲击危险性综合监测方案效果图

Fig. 10 Comprehensive monitoring effects of rock burst risk area of tunneling face

3 现场应用实测

3.1 工作面概况及冲击危险性评价

陕西彬长矿区水帘洞煤矿主采煤层4煤平均厚度9.58 m，属特厚煤层。煤层平均倾角7°，平均硬度3.5，根据北京煤科院的鉴定结果煤层具有弱冲击倾向性。其三采区遗留下来的3803为孤岛工作面，走向长约2110 m，倾向长约210 m。工作面平均采深约350 m，最深处距地表约560 m，煤层厚度约为9~11 m，见

图11。

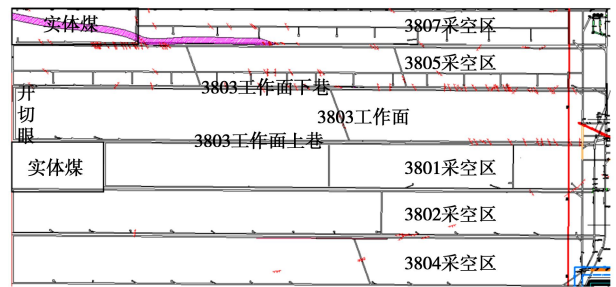


图11 陕西水帘洞煤矿3803孤岛工作面示意图

Fig. 11 3803 isolated working face in Shaanxi mine

根据综合指数法评价的工作面冲击地压危险性指数为0.73，具有中等冲击危险性；可能性指数法评价工作面发生冲击地压的可能性指数为0.78，可能发生冲击地压。综上，该工作面在掘进期间面临冲击地压灾害，需采用掘进工作面冲击危险性综合监测系统对其掘进期间的冲击危险性进行实时监测预警。

3.2 3803工作面掘进期间冲击危险性综合监测方案

3803工作面掘进期间上、下巷均留有6 m的小煤柱，同时留有1.0~1.5 m底煤进行掘进。根据巷道冲击地压发生机理研究，其冲击地压灾害主要表现为掘进迎头、掘进巷道实体煤侧巷帮冲击。

(1) 地音监测布置方案

综合考虑监测范围及传感器移组的便捷性，3803掘进工作面共布置6个地音传感器，地音探头安装在靠近实体煤一侧的顶板锚杆处，地音测点间距为30 m，距掘进迎头最近的测点与迎头间距不超过10 m(图12)。

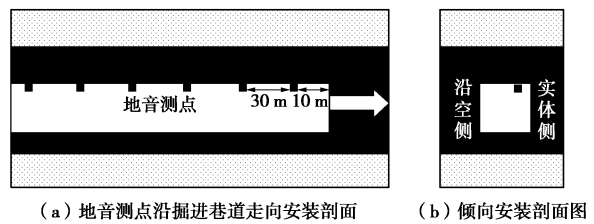


图12 3803掘进工作面地音测点布置示意图

Fig. 12 Arrangement of geophone monitoring points of 3803 tunnel working face

(2) 钻孔应力监测布置方案

在3803掘进巷道实体煤一侧巷帮布置钻孔应力测点，测点孔深8 m，高度距离巷道底板1.0~1.5 m，测点沿巷道走向间距30 m，距掘进迎头最近的测点与迎头间距不超过10 m，如图13所示。

(3) 锚索应力监测布置方案

在3803掘进巷道实体煤一侧巷帮锚索(长4.3 m)端部安装锚索应力测点，测点沿巷道走向间距30 m，

距掘进迎头最近的测点与迎头间距不超过 10 m, 如图 14 所示。

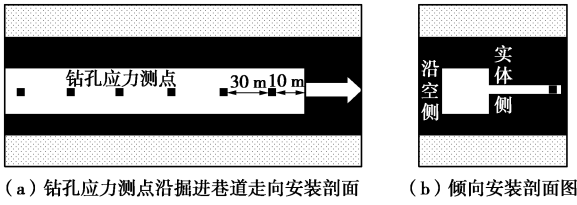


图 13 3803 掘进工作面钻孔应力测点布置示意图

Fig. 13 Arrangement of monitoring points of face drilling stress of 3803 tunnel working

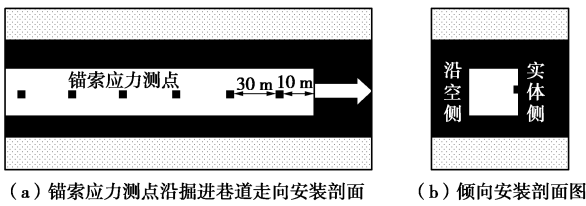


图 14 3803 掘进工作面锚索应力测点布置示意图

Fig. 14 Anchor bolt stress monitoring point arrangement diagram of 3803 tunnel working face

3.3 基于地音监测结果的 3803 工作面掘进巷道分区

3803 工作面每天掘进约 5 m 左右, 统计分析了一个月时间内掘进迎头后方测点 1 (安装时掘进迎头 10 m)、测点 2 (安装时掘进迎头 40 m) 随迎头掘进地音监测数据, 得到了地音测点 1、测点 2 距迎头距离、地音事件个数及地音事件总幅值的关系, 如图 15, 16 所示。

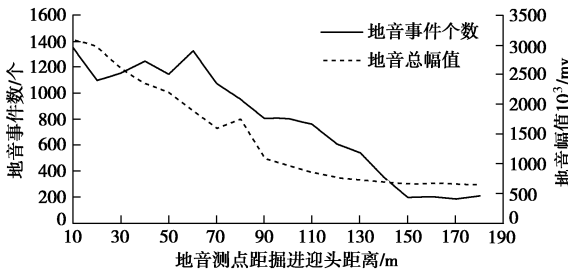


图 15 地音测点 1 距迎头距离与测得地音事件个数、幅值关系

Fig. 15 Relation chart between distance of geophone point 1 to heading zone and geophone accident numbers and range value

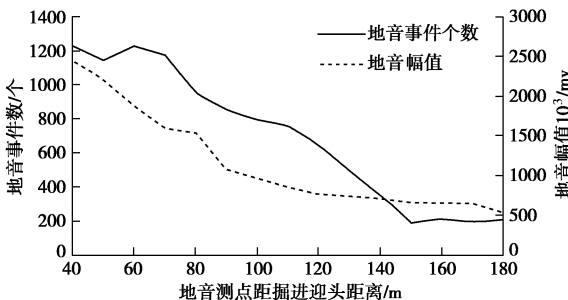


图 16 地音测点 2 距迎头距离与测得地音事件个数、幅值关系

Fig. 16 Numbers and ranges of relation between distance of geophone point 2 to heading zone and geophone accident

由图 15, 16 可知 3803 掘进工作面迎头后方 0~150 m 范围内地音事件和幅值随着测点距迎头距离增大而不断减少, 围岩结构处于破裂调整状态; 迎头后方 150 m 之外地音事件和幅值显著减小, 表明围岩破裂较少, 围岩结构趋于稳定。根据地音监测结果将掘进迎头后方 0~150 m 范围确定为塑性圈动态演化区, 150 m 范围之外为塑性圈稳定区。

3.4 3803 工作面掘进巷道分区监测预警指标实测

(1) 迎头区预警指标

为了工程上应用方便, 在掘进巷道迎头区仅采用钻屑量指标对其进行冲击危险性预警, 钻屑量不超标则无冲击危险, 可以继续掘进; 如钻屑量超标则预警有冲击危险, 需要采取相应卸压措施, 卸压后再次检测钻屑量不超标方可继续掘进。具体实施方案如下:

掘进期间, 在 3803 工作面掘进巷道迎头正前方施工孔径 42 mm、孔深 20 m 的钻屑法检测孔, 钻屑量预警指标见表 5。

表 5 3803 掘进工作面迎头区钻屑法预警指标

Table 5 Pre-warning indices of scrap method for heading zone of 3803 working face

钻孔深度范围/m	2~4	5~8	9~12	13~16	17~20
孔径 42 mm					
钻屑量指标/(kg·m ⁻¹)	2.8	3.7	5.6	7.5	9.4

(2) 塑性圈动态演化区预警指标 (0~150 m)

a) 地音监测预警指标方法

根据该区域安装的地音监测设备, 采用每天监测到的地音事件总频次和总幅值来预警冲击地压危险性, 根据式 (2) 所示采用地音总幅值代替总能量, 取地音事件频次和地音幅值影响地音指标冲击危险性指数的权重系数均为 0.5, 可得 3803 掘进工作面塑性圈动态演化区地音指标冲击地压危险指数 I_d :

$$I_d = 0.5I_{dF} + 0.5I_{dN} \quad (8)$$

式中 I_d 为地音指标冲击地压危险指数; I_{dN} 为地音事件频次异常指数, 见式 (4) 所示; I_{dF} 为地音总幅值异常指数:

$$I_{dF} = \begin{cases} 0 & (F' \leq F) \\ \frac{F' - F}{F} & (F < F' < 2F) \\ 1 & (F' \geq 2F) \end{cases} \quad (9)$$

式中, F 为测点前 7 d 的平均幅值, F' 为测点当天的总幅值。

b) 钻孔应力监测预警指标方法

3803 掘进工作面实体煤一侧巷帮 8 m 孔深钻孔应力计的初始安装应力值为 6 MPa, 安装应力测点后在实体煤一侧巷帮施工了孔径 133 mm, 孔深 20 m, 孔

间距 3 m 的巷帮大直径卸压钻孔，分析了钻孔应力测点距掘进迎头距离与测点应力值变化的关系，现场实测数据见图 17。

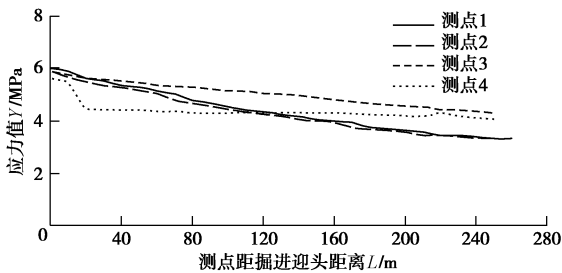


图 17 钻孔应力测点距迎头距离与应力值变化现场实测
Fig. 17 Change of based on distance of heading zone to monitoring points of drilling stress

现场数据监测分析表明，在实体煤侧巷帮施工卸压措施后钻孔应力测点应力值降低，表明了现场卸压有效，故将应力初始值 6 MPa 作为钻孔应力监测无冲击与弱冲击的临界应力值；将 8 MPa 作为弱冲击与中等冲击的临界应力值；将 10 MPa 作为中等冲击与强冲击的临界应力值；根据现场应力实测值，结合式(5)可求得 3803 工作面巷道掘进期间塑性圈动态演化区钻孔应力指标冲击危险指数。

c) 锚索应力监测预警指标方法

3803 掘进工作面实体煤一侧安装了锚索（长 4.3 m）测点，分析了锚索应力测点距掘进迎头距离与测点应力值变化的关系，现场实测数据见图 18 所示。各巷帮锚索应力测点安装后的初始应力值 P_1 及稳定基准值 P_0 ，见表 6。

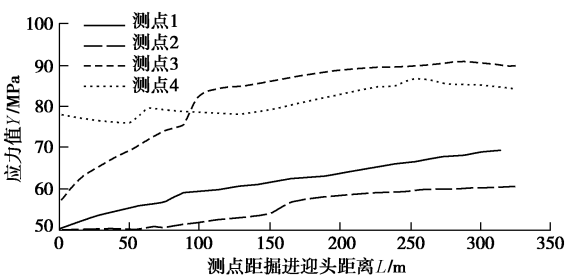


图 18 锚索应力测点距迎头距离与应力值变化现场实测
Fig. 18 Change of stress based on distance of heading zone to monitoring points of anchor bolts

表 6 巷帮锚索应力实测数据分析

Table 6 Data of actual stress of anchor bolts

测点编号	测点安装后的应力值 P_1 /kN	测点监测到的稳定应力值 P_0 /kN
1	50	68
2	46	65
3	57	90
4	77	85

根据现场实测及工程经验，以 90 kN 作为 3803 工作面掘进巷道实体煤侧巷帮锚索应力监测的基准值 P_0 。由于现场实测未监测到锚索的应力破断值 P_3 ，故将 1.5 倍的 P_0 即 135 kN 初步预测为锚索的应力破断值。结合式(6)可求得 3803 工作面巷道掘进期间塑性圈动态演化区锚索应力指标冲击危险指数。

d) 3803 掘进工作面综合监测预警方法现场实测

根据 3803 工作面掘进巷道塑性圈动态演化区冲击地压发生机理，以钻孔应力指标为预警该区域冲击地压危险性的主要指标，取权重系数为 0.4；地音指标和锚索应力指标取权重系数为 0.3。结合式(1)，可得 3803 工作面掘进巷道塑性圈动态演化区的冲击危险指数 I_0 ：

$$I_0 = 0.3I_d + 0.4I_Y + 0.3I_{mD} \quad (10)$$

式中 I_d 为地音冲击危险指数，见式(8)； I_Y 为钻孔应力冲击危险指数，根据现场钻孔应力实测值结合式(5)可得； I_{mD} 为锚（索）应力冲击危险指数，根据现场锚索应力实测值结合式(6)可得。

综上，3803 掘进工作面巷道塑性圈动态演化区冲击危险指数 I_0 与冲击危险关系见表 7。

表 7 冲击危险指数 I_0 与冲击地压危险性关系

Table 7 Relation between rock burst risk index I_0 and danger level

冲击危险指数 I_0	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1
冲击地压危险等级	无	弱	中等	强

以 3803 工作面掘进巷道某日地音、钻孔应力以及锚索应力实测数据进行塑性圈动态演化区预警分析，地音、钻孔应力及锚索应力实测数据及预警分析见表 8。根据监测数据综合分析 3803 工作面某日掘进巷道塑性圈动态演化区无冲击危险，可以正常进行掘进。现场掘进期间无煤炮等冲击显现，证明综合监测预警方法可行，结果准确。

(3) 塑性圈稳定区域预警指标（150 m 以外）

根据塑性圈稳定区域发生冲击地压的机理，在巷道围岩所处的应力环境低于其围岩抗压强度的区域没有发生冲击地压的危险，无需进行监测预警；巷道围岩所处的应力环境大于其围岩抗压强度的区域，存在高应力下巷道围岩蠕变导致塑性区扩张造成支护体失效诱发冲击地压的可能，在该区域需要安装锚杆（索）应力监测。

经过基于应力叠加的计算^[17]，3803 工作面掘进期间的巷道应力低于其巷道围岩抗压强度，故其在塑性圈稳定区域无冲击危险性。但由于掘进过程中部分区域存在断层，在该区域由于应力叠加可能造成巷道应力大于其巷道围岩抗压强度。针对该工作面的具体情况，掘进期间在遇到断层的塑性圈稳定区安装了锚杆

表 8 3803 掘进工作面冲击地压监测数据实测及冲击危险性预警分析

Table 8 Monitoring data and rock burst risk pre-warning analysis of rock burst of 3803 working face

测点距 迎头距 离 L/m	地音监测					应力监测		锚索监测		综合监测预警	
	事件数 N	事件平 均数 N	总幅值 F'	平均幅 值 F	冲击危险 指数 I_d	应力值 Y/MPa	冲击危险 指数 I_Y	应力值 P/kN	冲击危险 指数 I_{mD}	冲击危险 指数 I_0	冲击 危险性
13	1235	1198	1064890	1158457	0.02	3.18	0.16	60	0.08	0.09	无
43	997	1098	876203	1030875	0.00	3.54	0.18	73	0.15	0.12	无
73	628	586	508385	610462	0.04	3.29	0.17	72	0.18	0.13	无
103	461	426	331421	378631	0.04	3.40	0.17	92	0.36	0.19	无
133	108	128	332551	200875	0.33	3.98	0.20	63	0.12	0.22	无
163	140	107	194118	210873	0.16	3.76	0.19	85	0.26	0.20	无

索应力监测装置, 分别以锚杆索初始基准应力值降低 5, 8, 10 kN 作为冲击危险性的弱、中等及强冲击判别线。

综上, 通过将特厚煤层掘进工作面冲击地压综合监测预警技术应用于 3803 孤岛工作面掘进期间的冲击危险性监测, 有效预警了工作面掘进期间的冲击危险, 对于预警区域及时采取了如下卸压解危措施:

a) 预警弱冲击地压危险性, 对预警区域重点关注;

b) 预警中等冲击地压危险性, 在预警区域施工钻屑法检测, 若钻屑量不超标则继续掘进, 若钻屑量超标则在预警区域施工孔径 133 mm, 孔深 20 m, 孔间距 3 m 的卸压钻孔, 直至中等冲击地压危险性预警解除;

c) 预警强冲击地压危险性, 在预警区域施工钻屑法检测, 若钻屑量不超标则继续掘进, 若钻屑量超标则在预警区域施工孔径 133 mm, 孔深 20 m, 孔间距 1.5 m 的卸压钻孔, 直至强冲击地压危险性预警解除。

通过对 3803 掘进工作面综合监测预警并及时采取卸压解危措施, 最终保证了工作面的安全掘进。

4 结 论

本文在研究特厚煤层掘进工作面冲击地压预警机制的基础上, 提出了对掘进工作面“围岩震动、围岩应力动态、锚杆锚索支护力和煤体钻屑量”进行四位一体的监测, 并用于评估掘进工作面冲击地压实时危险性的方法, 通过在陕西某矿特厚煤层孤岛工作面掘进期间的现场实践验证了该方法的有效性。主要得出以下结论:

(1) 提出了以围岩结构演化特征为基础的特厚煤层掘进工作面分区(迎头区、塑性圈动态演化区及塑性圈稳定区)监测预警方法, 建立了掘进工作面冲击地压综合监测预警指标体系(围岩震动、围岩应力动态、锚杆锚索支护力和煤体钻屑量)和危险性判别方法。

(2) 提出了特厚煤层掘进工作面“地音监测系统、

钻孔应力监测系统、锚杆(索)应力监测系统、钻屑法检测”四位一体的综合监测技术, 实现了掘进工作面冲击地压危险性的综合监测预警。

(3) 探索得到了陕西某矿 3803 掘进工作面冲击危险监测预警的关键数据, 提出了该工作面掘进期间的冲击危险性预警模式及指标。通过在预警区域及时采取卸压解危措施, 保证了工作面的安全掘进。

参考文献:

- [1] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 450 - 456. (LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WANG Yao-feng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hard roof[J]. Chinese J Geophys, 2010, **53**(2): 450 - 456. (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 J Geophys, 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 - 2015. (XIA Yong-xue, KANG Li-jun, QIN Qing-xin, et al. Five index of microseismic and their application in rock burst forecastion[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(12): 2011 - 2015. (in Chinese))
- [4] 齐庆新, 李首滨, 王淑坤. 地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J]. 煤炭学报, 1994, **19**(3): 221 - 232. (QI Qing-xin, LI Shou-bin, WANG Shu-kun. Application of AE technique in monitoring ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 1994, **19**(3): 221 - 232. (in Chinese))
- [5] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(11): 2346 - 2351. (QU Xiao-cheng, JIANG Fu-xing, YU

- Zheng-xing, et al. Rock burst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(11): 2346 - 2351. (in Chinese))
- [6] 王平, 姜福兴, 王存文, 等. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(增刊): 5 - 9. (WANG Ping, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, et al. The stress incremental forecasting method of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(S0): 5 - 9. (in Chinese))
- [7] GU S T, WANG C Q, JIANG B Y, et al. Field test of rock burst danger based on drilling pulverized coal parameters[J]. Disaster Adv, 2012, **5**(4): 237 - 240.
- [8] 王恩元, 刘忠辉, 刘贞堂, 等. 受载煤体表面电位效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 2009, **52**(5): 1318 - 1325. (WANG En-yuan, LIU Zhong-hui, LIU Zhen-tang, et al. Experimental study on surface potential effect of coal under load[J]. Chinese J Geophys, 2009, **52**(5): 1318 - 1325. (in Chinese))
- [9] HE X Q, CHEN W X, NIE B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2011, **48**(8): 1352 - 1358.
- [10] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. 煤炭学报, 2004, **29**(4): 396 - 399. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu, WANG En-yuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(4): 396 - 399. (in Chinese))
- [11] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1262 - 1268. (HE Hu, DOU Li-ming, GONG Si-yuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1262 - 1268. (in Chinese))
- [12] 王书文, 毛德兵, 杜涛涛, 等. 基于地震CT技术的冲击危险性评价模型[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(增刊 1): 1 - 6. (WANG Shu-wen, MAO De-bing, DU Tao-tao, et al. Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(S1): 1 - 6. (in Chinese))
- [13] 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动CT技术研究[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 238 - 244. (DOU Li-ming, CAI Wu, GONG Si-yuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 238 - 244. (in Chinese))
- [14] 姜福兴, 冯宇, KOUAME K J A, 等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1762 - 1768. (JIANG Fu-xing, FENG Yu, KOUAME K J A, et al. Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1762 - 1768. (in Chinese))
- [15] 李京达, 魏全德, 贾明魁. 大直径钻孔钻屑检验方法及现场应用[J]. 煤矿安全, 2016, **47**(1): 126 - 129. (LI Jing-da, WEI Quan-de, JIA Ming-kui. Method of large diameter drilling cuttings inspection and its application[J]. Coal Mining Technology, 2016, **47**(1): 126 - 129. (in Chinese))
- [16] 姜福兴, 曲效成, 王颜亮, 等. 基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, **46**(1): 199 - 206. (JIANG Fu-xing, QU Xiao-cheng, WANG Yan-liang, et al. Study on monitoring & control and early warning technology of mine pressure bump based on cloud computing[J]. Coal Science and Technology, 2018, **46**(1): 199 - 206. (in Chinese))
- [17] 姜福兴, 舒湊先, 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 Fu-xing, SHU Cou-xian, WANG Cun-wen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(12): 2428 - 2435. (in Chinese))