

深部巷道围岩分区破裂与冲击地压关系初探

李春睿^{1,3}, 康立军^{2,3}, 齐庆新^{2,3}, 毛德兵¹, 刘全明¹, 李宏艳^{1,3}, 彭永伟^{1,3}

(1. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 3. 中国煤炭学会 岩石力学与支护专业委员会, 北京 100013)

摘要: 提出了深部巷道分区破裂化的机制及其失稳准则, 并用数值模拟软件再现了分区破裂化现象, 发现分区破裂并非完全是连续的圆环形, 而是存在孤立的破裂区域, 并由此逐渐发展并合的产物。提出了分区破裂化与冲击地压发生的关系, 并从分区破裂现象解释了冲击地压从孕育到发生的过程, 对冲击地压的产生机理提供了新的思路。

关键词: 深部巷道; 分区破裂; 冲击地压

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A

Probe into relationship between zonal fracturing and rock burst in deep tunnel

LI Chun-rui^{1,3}, KANG Li-jun^{2,3}, QI Qing-xin^{2,3}, MAO De-bing¹, LIU Quan-ming¹, LI Hong-yan^{1,3}, PENG Yong-wei^{1,3}

(1. Coal Mining & Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Rock Mechanics and Support Professional Committee, China Coal Society, Beijing 100013, China)

Abstract: The zonal fracturing mechanism and its failure criteria in deep tunnel were put forward, and the phenomenon of zonal fracture was reproduced using numerical simulation. Found that zonal fracture is not completely continuous circular ring, but the breakdown of isolated regions, and from this merge into zonal product. The relationship between zonal fracture and rock burst was put forward, and rock burst breeding process to its occurrence were explained from the zonal fracture phenomenon, and provided a new way of thinking for rock burst generating mechanism.

Key words: deep tunnel; zonal fracture; rock burst

煤矿冲击地压的发生,通常是在工作面前方支承压力影响范围内,由应力集中和采动影响下导致的,其表现形式为表面煤岩体劈啪的飞出、抛射。而在深部巷道,高地应力作用下的冲击地压常表现为围岩大面积失稳、破坏或整体移出^[1]。冲击地压的发生伴随着巷道的破坏过程。通常情况下,巷道的破坏都是在巷道壁处产生破碎区、塑性区等,这能够运用现有的岩石力学理论解释,并已经在现场和试验验证,而关于某些深部巷道的围岩中产生分区破裂的现象引起了众多学者的关注。

俄罗斯学者 E. I. Shemyakin 最先通过现场测量发现在深部矿井开采工作面附近围岩中存在间隔分

布的“环带状碎裂”现象^[2];钱七虎院士也通过研究深部岩体工程响应特征,界定了“深部”岩体的范围^[3];潘一山、李英杰等对现场观测和相似材料模拟试验中的岩石环带状碎裂的时间效应进行了总结^[4];唐鑫从岩石蠕变角度分析了深部巷道围岩区域交替破碎现象的演化过程,认为破碎圈的出现是岩石的蠕变使应变发展到极限值后裂纹交汇贯通产生的^[5];顾金才教授提出“环带状碎裂”现象是在较大轴向压力作用下产生的,并用模型试验做了验证,提出了“硐周围岩分层断裂机制”,认为当地应力载荷水平方向较大,且最大载荷方向与硐室轴线平行时,硐室围岩就有可能产生环带状分层断裂现象^[6];唐

春安教授及其课题组运用 RFPA 软件成功的对间隔破裂现象进行了三维数值模拟^[7]。

1 巷道围岩分区破裂化机理与围岩失稳

对于某些深部巷道围岩内产生分区破裂现象的机理,近年来很多学者进行了探索,并取得了进展。如周小平等^[8]通过理论及数值分析认为,分区破裂与开挖速度及岩石强度有关;李英杰等^[9]认为分区破裂现象不仅与深度有关,而且也取决于岩石力学参数,并提出支撑压力区的劈裂破坏是岩石分区破裂的必要条件。虽然众多文献对分区破裂的机理进行了探索,但其产生的根源仍有待进一步研究。笔者认为分区破裂化的产生与岩体变形局部化是分不开的。

设煤岩体结构受载荷 P 作用,产生的应力向量为 σ ,应变向量为 ε ,由于原生节理及软弱部分的存在,使岩体内某些区域由于应力集中而产生应变软化性质,该部分的区域设为 V_s ,而其它区域仍为弹性变形区,体积设为 V_i ,如图 1 所示。

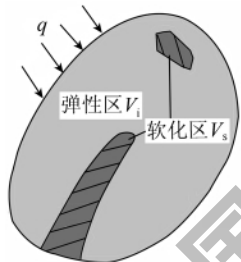


图 1 变形局部化结构

Fig. 1 Schematic of partial deformation

模型内的弹性区和软化区煤岩体本构关系为

$$\Delta\sigma = D^i \Delta\varepsilon \quad (\text{弹性区}) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = D^s \Delta\varepsilon \quad (\text{软化区}) \quad (2)$$

式中, D^i 和 D^s 分别为弹性矩阵和弹塑性矩阵。

在该状态下假设煤岩体受外载荷扰动增量 ΔP , 其产生的应力增量 $\Delta\sigma$, 应变增量 $\Delta\varepsilon$, 位移增量 Δu , 则

$$\int_{V_s+V_i} A^T \Delta\sigma dv = \Delta P \quad (3)$$

式中, A 为应变矩阵, 满足 $\Delta\varepsilon = A \Delta u$ 。

将式(1)、(2)带入式(3)有

$$\Delta P = K \Delta U \quad (4)$$

式中, K 为刚度矩阵, $K = \int_{V_i} A^T D^i A dv + \int_{V_s} A^T D^s A dv$;

ΔU 为总体位移矩阵。

根据变形局部化定义,假如在同一增量 ΔP 作用下,还存在另外一组与 ΔU 不同的位移增量分布,则该点即为变形局部化的开始。

在集中应力作用下,由于岩体的非均质性及内部颗粒影响,使多个变形局部化(变形指广义变形,包括裂隙扩展)区域并合,最终在某种地应力作用下形成分区破裂现象,如图 2 所示。而对于此时的应力状态,顾金才教授指出“环带状碎裂”现象是在较大轴向压力作用下产生的,并用模型试验做了验证,认为当地应力载荷水平方向较大、且最大载荷方向与硐室轴线平行时,围岩就有可能产生环带状分层断裂现象^[6]。

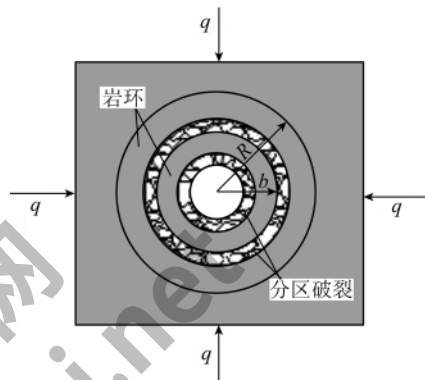


图 2 巷道围岩分区破裂化

Fig. 2 Zonal breakdown in roadway surrounding rock

某些深部巷道在围岩内形成了间隔性的环状破裂,为岩环的完整部分和破碎部分交替组成。根据折叠突变模型^[1],“岩环”的平衡方程为

$$\frac{F(\sigma_i)}{k} \frac{dF}{dv_i^p} + F(\sigma_i) - J = 0 \quad (5)$$

式中, k 为岩环完好部分的刚度; dv_i^p 为形变增量, $dv_i^p = l(\xi) d\varepsilon_i^p = l(\xi) \bar{\eta} d\varepsilon_i$, 其中 $l(\xi)$ 为塑形成形影响区统计长度, $\bar{\eta}$ 为与岩体性质有关的系数。

根据突变理论得出:当 $k < 1$ 时,在软化区半径 R 将有突然的有限改变量,平衡位置发生跳跃,即 b 以内范围发生冲击地压;当 $k = 1$ 时,岩环或巷道围岩体以持续渐进的方式破裂;当 $k > 1$ 时,岩环以渐进方式破裂。

2 围岩分区破裂与冲击地压关系的初探

虽然很多文献提到现场观测的分区破裂现象为连续的圆环状,但其仅是通过有限个钻孔数据人工拟合出未观测区域,并不一定反映间隔破裂的真实情况。因为岩体破裂及扩展受到各种因素的影响是复杂的,为此笔者通过 FLAC^{3D} 数值模拟再现了间隔破裂现象,并分析其与冲击地压的关系。

2.1 冲击地压的孕育——分区破裂

岩石作为一种典型的地质材料,在一定载荷下会

出现局部变形,并且会引起损伤及微裂纹的局部化集中发展,其特征是大量的剪切变形集中在相对狭窄的带状域内,即局部化剪切带。

潘一山通过对冲击地压发生的机理分析指出,煤岩体变形局部化开始条件和煤岩体冲击地压发生后条件是一样的,即冲击地压启动后的变形破坏过程就是煤岩体变形局部化的过程^[10]。蒋承林通过对煤与瓦斯突出试验及现场观测后指出,煤体是以球冠壳体形式突出的,各层之间有明显的层裂界面^[11]。潘岳通过研究指出,对于圆形硐室的岩爆及其模拟试验,在载荷作用下其前兆阶段硐室岩体也会形成圆环形岩层^[1]。张晓春、缪协兴通过研究认为,冲击地压与煤壁层裂板结构的形成有关^[12]。

从上述文献中发现冲击地压发生时的球冠破碎岩体及层裂结构与分区破裂的形态有惊人的相似之处。笔者根据文献^[6]论述的边界条件,通过数值模拟得到了如图3所示的深部巷道分区破裂状态及应力云图。

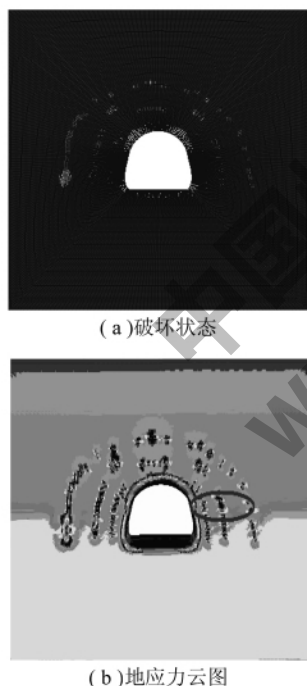


图3 深部巷道分区破裂化

Fig. 3 Zonal fracturing of the deep tunnel

从图3(b)中可见,椭圆圈定的岩体在破坏喷出后,恰恰符合上述的层裂状态及球冠特征。据此推断,分区破裂可能是孕育冲击地压的围岩破坏状态。

为了验证此推论,经过整理在冲击危险的巷道测得的钻屑量数据^[13-14],得到了如图4所示的钻屑量与钻孔深度的关系。

钻屑法的原理是通过在煤层中打直径为42~50 mm的钻孔,根据排出的煤粉量及其变化规律和有

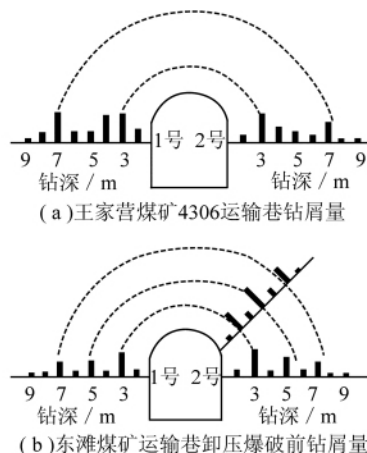


图4 钻孔深度与钻屑量的关系

Fig. 4 The relationship between drilling depth and amount of drilling cuttings

关动力效应,鉴别冲击危险的一种方法,其理论基础是钻出煤粉量与煤体应力状态具有定量的关系,即其他条件相同的煤体,当应力状态不同时,其钻孔的煤粉量也不同。根据图4中的钻屑量分布状态可见,巷道围岩存在明显的分区破裂趋势。

2.2 冲击地压的激发——应力扰动

冲击地压的发生伴随着巨大能量的释放,而此能量的来源与较高的围岩应力有着不可分割的关系,应力对围岩的作用分“静载作用”和“动载作用”2种。近年来,随着煤矿采深加大,冲击地压现象有所增多^[1],主要是由于随着采深的增加,静载增大造成的,因为高地应力下产生的应力集中及围岩变形所储存的能量更大。可见静载(重力)对冲击地压有重要的影响。

对于深部巷道,在高度应力集中的情况下,处于临界稳定情况下的巷道围岩体,扰动应力更容易诱发冲击地压^[15]。如图5所示的煤矿开采过程,其中工作面推进产生的超前支撑压力即可视为扰动应力,在其扰动作用下,前方巷道围岩会在一定程度上产生变形、破坏。

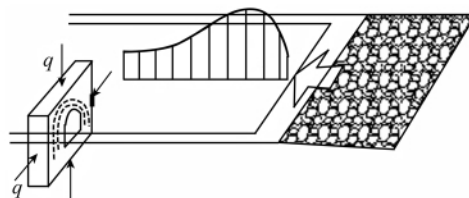


图5 采动影响下的巷道围岩

Fig. 5 Roadway surrounding rock under mining influence

对于深部某些处于分区破裂状态下的巷道,间隔破裂的形态使围岩径向应力得以释放,环向应力极大增高,由于“岩环”完整部分承担了较高的集中应力,

一个岩环破坏便会引起其临近岩环的“多米诺效应”式的破坏,因此在临界稳定时更容易受到扰动应力的影响^[6],进而使整个巷道围岩结构失稳,引发冲击地压。

2.3 冲击地压的发生——结构失稳

岩体介质的破坏分 2 类:①由于强度不够而发生破坏;②由于稳定性不够而发生破坏。对于浅部巷道,在巷道开挖后,围岩由于应力重新分布而产生应变。由于围岩中存在弱结构体以及巷道的形状特别是尖角处的影响,部分围岩中存在应力集中,导致该区域内的岩体进入破坏状态。

对于深部巷道,除了具有上述特征外,围岩在三轴压缩下存储了远高于单轴破坏所需要的临界能量。当发生分区破裂后,形成了分区破裂区域与岩环完整部分共存的结构。由于破裂区域提供了新的自由面,从而引发了围岩弹性势能从三轴状态到单轴状态的流动,增加了围岩失稳的危险程度,当承受一定程度的扰动应力后,便很容易发生结构失稳。

对于围岩中含有分区破裂的巷道,由于节理、裂隙及破裂空洞的存在,使围岩径向应力得以释放,环向应力极大增高,造成了某些巷道顶板中水平应力大于垂直应力的现象。对于此种应力场下的巷道,在集中应力作用下,“岩环”很容易产生剪切错动,造成结构失稳。

同时,由于破裂围岩的剪胀力较大,会使支护构件的作用力减弱,且由于剪胀力的不断释放,松动圈内破裂围岩的自承能力会逐渐降低。如果采动影响剧烈,处于破裂状态的巷道围岩将很快失稳,甚至产生突然崩解。图 6(a) 为巷道右帮在采动应力影响下,“岩环”结构失稳产生大范围破坏的情形,根据式(5),当岩环完好部分刚度小于 1 时,则存储在围岩中的能量将以冲击形式释放,即破坏区域以冲击形式崩出,产生冲击地压。

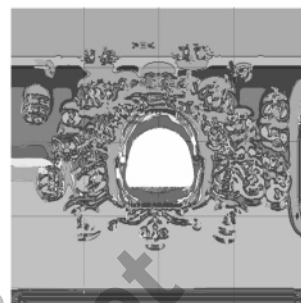
值得注意的是,具有分区破裂的巷道,其破裂区域根据围岩的性质可分布在巷道周围任意处,包括巷道的底板。因此当底板“岩环”结构相对脆弱时,冲击地压便会以底臌现象释放能量。

3 结 论

冲击地压与巷道围岩分区破裂、扰动应力下弹性能的释放及“岩环”中完好部分岩体结构的破坏 3 个因素有关。这与冲击地压发生的机理“3 因素理论”准则^[7]:即冲击地压的发生与岩体的内在因素(岩体性质)、力源因素(高度应力集中或较高的能量贮存与动态扰动)、煤岩体结构因素(具有弱面和容易引



(a) 破坏状态图



(b) 地应力云图

图 6 采场扰动应力下围岩分区破裂结构失稳

Fig. 6 The rock zonal breakdown and structural instability under slope stress disturbance

起突变滑动的层状介面) 也相互对应。

(1) 通过数值模拟,发现巷道围岩的分区破裂并非完全是连续的圆形,而是存在孤立的破裂区域,并由此逐渐发展并合的产物。

(2) 提出了分区破裂化与冲击地压发生的关系,在全新的角度上提出了冲击地压的产生机理,这对冲击地压的防治具有积极作用。

参考文献:

- [1] 齐庆新, 龚林名. 冲击地压理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [2] Shemyakin E I, Fisenko G L, Kurlenya M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings (part 1): data of in-situ observations [J]. Journal of Mining Science, 1986, 22(3): 157 - 168.
- [3] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定 [J]. 华东理工大学学报, 2004, 27(1): 1 - 5.
Qian Qihu. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1 - 5.
- [4] 李英杰, 潘一山, 李忠华. 岩体产生分区碎裂化现象机制分析 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1 124 - 1 128.
Li Yingjie, Pan Yishan, Li Zhonghua. Analysis of mechanism of zonal disintegration of rocks [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1 124 - 1 128.
- [5] 唐 鑫, 潘一山, 章梦涛. 深部巷道区域化交替破碎现象的机制分析 [J]. 地质灾害与环境, 2006, 17(4): 80 - 84.
Tang Xin, Pan Yishan, Zhang Mengtao. Mechanism analysis of zonal

- disintegration in deep level tunnel [J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2006, 17(4): 80–84.
- [6] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖硐室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433–438.
- Gu Jincai, Gu Leiyu, Chen Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433–438.
- [7] 唐春安, 张永彬. 岩体间隔破裂机制及演化规律初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1362–1369.
- Tang Chun'an, Zhang Yongbin. Discussion on mechanism and evolution laws of fracture spacing in rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1362–1369.
- [8] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 877–885.
- Zhou Xiaoping, Qian Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877–885.
- [9] 潘岳, 王志强. 圆形硐室岩爆的折迭突变模型 [J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 175–181.
- Pan Yue, Wang Zhiqiang. Fold catastrophe model of circular tunnel rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 175–181.
- [10] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [11] 蒋承林. 煤壁突出孔洞的形成机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 225–228.
- Jiang Chenglin. Study of forming mechanism of outburst hole chinese [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 225–228.
- [12] 张晓春, 缪协兴, 杨挺青. 冲击矿压的层裂板模型及试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497–502.
- Zhang Xiaochun, Miao Xiexing, Yang Tingqing. The layer-crack-plate model and testing study on the rockburst in mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497–502.
- [13] 潘一山, 李英杰, 唐鑫, 等. 岩石分区碎裂化现象研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3335–3341.
- Pan Yishan, Li Yingjie, Tang Xin, et al. Study on zonal desintegration of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3335–3341.
- [14] 邓小林. 东滩煤矿钻屑法检测冲击地压危险的认识 [J]. 煤矿现代化, 2006(1): 27–29.
- [15] 李春睿, 齐庆新, 李宏艳, 等. 动静载共同作用下煤岩裂隙扩展导致冲击地压的研究 [A]. 煤矿高效开采与冲击地压新技术 [C]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- Li Chunrui, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. The study of joint action of dynamic and static stress of coal and rock crack propagation lead to rockburst [A]. Efficient coal mining and the impact of ground pressure, new technologies [C]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.
- [16] Li Chunrui, Peng Yongwei, Pan Junfeng, et al. Probe into relationship between crack expand and rock burst [A]. Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines [C]. New York: Rinton Press, 2009: 327–332.
- [17] 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1996.

亚洲最大的煤焦油焦化加热炉竣工

日前,由中国化学工程集团所属十三公司承建的陕西煤业神木天元化工有限公司 50 万 t/a 中温煤焦油轻质化项目二期工程——25 万 t/a 煤焦油预处理装置工程竣工。该装置中的核心装置——焦化加热炉长 20 m、宽 10 m、高 20 m,由 2 个对流室、辐射室组成,是目前亚洲最大的双室焦化加热炉。

摘自“中国煤炭工业网”