

开挖扰动下高应力岩体的能量演化与 应力重分布规律研究

邹洋^{1,2}, 李夕兵^{1,2}, 周子龙^{1,2}, 尹土兵^{1,2}, 殷志强³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083;
3. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为揭示深部灾害发生机理, 探讨各因素对开挖扰动效应的影响机制, 利用离散元 PFC 软件建立不同原岩应力状态及不同开挖断面下的开挖模型。通过显式计算得到不同情形下高应力岩体在开挖扰动中的动能释放曲线, 并以曲线峰值及最终稳定值, 分别作为评判开挖扰动程度及开挖系统稳定性的能量指标, 利用该组指标分析表明在原岩应力接近静水压力状态、采用圆形断面开挖时扰动效应最小; 通过进一步分析, 得到不同开挖断面及不同原岩应力状态下高应力岩体应力重分布的一般规律, 并以开挖卸载的角度重视应力重分布这一过程, 最终揭示了原岩应力状态及开挖断面几何形态对应力重分布的影响机制。

关键词: 深部开挖; 能量演化; 应力重分布

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)09-1677-08

作者简介: 邹洋(1986-), 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 从事采矿与岩石动力学研究。E-mail: zouyang_csu@163.com。

Energy evolution and stress redistribution of high-stress rock mass under excavation distribution

ZOU Yang^{1,2}, LI Xi-bing^{1,2}, ZHOU Zi-long^{1,2}, YIN Tu-bing^{1,2}, YIN Zhi-qiang³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China; 3. School of Mineral and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of the occurrence of deep engineering catastrophe and the influence of various factors on excavation perturbing effect, the models with different original stress states and different excavation sections are established by using the distinct element numerical simulation software PFC. Through explicit calculation, the kinetic release curves of high-stress rock mass under various circumstances are gained, and the peak and final stable values of the obtained curves are regarded as energy indices, which are used for representing the disturbance intensity and the stability degree of the excavation system respectively. The analysis based on these indices shows that the excavation with a circular cross section will induce the minimum disturbance effect under a nearly hydrostatic pressure stress state. The stress redistribution characteristics of high original stress rock mass excavated by different sections are also studied. Through the inspection of stress redistribution course which is regarded as an unloading process, the influence mechanisms of the original rock mass stress state and the geometry of excavation section on the stress redistribution are revealed ultimately.

Key words: deep excavation; energy evolution; stress redistribution

0 引言

由于高地应力、高地热等众多不利因素的存在, 深部开挖常导致严重的灾害事故。开挖空间周围岩体的破坏也体现出与浅部不同的规律, 大规模板裂、岩爆频次随深度急剧增加^[1], 这些现象引起了国内外学者的共同关注, 并利用室内试验^[2-4]、现场监测^[5-6]及

数值模拟^[7-9]等手段展开了大量研究。通过这些研究使人们对深部高应力岩体在开挖扰动下的稳定、破坏规律有了更深的认识。综合现有研究可以看出, 开挖周

基金项目: 国家自然科学基金项目(50934006); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB732004)

收稿日期: 2011-07-22

围岩体能量释放及应力重分布规律是深部开挖研究的两个主题。

对常发生于深部的板裂、岩爆等特殊形式的岩体破坏,利用传统应力、应变等指标已很难对其严重程度做出判断^[10],而这类破坏在本质上是能量的急剧释放,因此有必要从能量角度分析深部开挖系统的稳定性。目前,对开挖边界周围岩体能量释放规律的研究大多集中于开挖后岩体的声发射现象上,即通过监测分析声发射信号实现对岩体裂隙发育程度的判断及岩爆的预测^[11-12],而对开挖瞬时系统能量的演化过程研究较少。事实上,这一过程中动能的释放演变直接体现着开挖的扰动强度及岩体的自稳特性。

深部高地应力岩体力学性质具有明显的应力路径相关性^[13-15],在由开挖瞬时原岩应力平衡被打破到应力重分布实现最终稳定这一过程中,各区域加卸载状况将影响到其最终的破坏形式,因此,对深部开挖问题的合理探讨需建立在对应力重分布这一过程具体研究的基础上。但目前的理论分析及现场监测大都注重于对应力重分布结果的把握^[16-17],而对应力重分布过程却缺少相应研究,这也使得多数研究只是直接得到各因素对应力重分布的影响结果,而对相关影响机制的探讨却较少。

本文借助离散元 PFC 软件建立不同侧压系数及不同开挖断面的实体模型,通过显式计算得到开挖系统的动能释放时程曲线,以此分析开挖扰动下系统的能量演化规律;并以开挖卸载的角度重视应力重分布这一过程,最终揭示原岩应力状态及开挖断面几何形态对应力重分布的影响机制。

1 颗粒流基本原理

PFC2D 模型一般为离散圆形颗粒的集合体,其中颗粒为刚性体,且在很小的区域里(例如点)允许存在接触。程序依据离散单元法采用显式时步循环运算规则,对模型颗粒进行循环计算^[18-19]。颗粒介质的运动遵循牛顿第二定律;颗粒间的相互作用则遵循力-位移定律。力-位移固有关系取决于所采用的接触模型,对于脆性岩石材料的模拟连接模型一般采用接触连接模型。主要微观参数为:①微观变形参数,即接触的法向刚度与切向刚度,控制着模型的宏观变形参数(弹性模量和泊松比);②微观强度参数,即接触连接的法向强度与切向强度,与微观变形参数一起控制着模型的宏观强度特性及破坏模式。另外,颗粒之间可存在一定的摩擦系数,其影响着被模拟岩体峰值破坏后的力学行为。岩石的宏观力学行为可通过调整 PFC2D 模型的这些微观参数得以再现。

2 模型建立

以新疆喀拉通克铜镍矿地质条件为背景,利用 PFC 软件建立 10 m×10 m 的二维模型,如图 1 所示,且竖直方向 y 方向,水平方向为 x 方向。共生成颗粒 70028 个,粒径为 0.01~0.03 m,服从均匀分布,颗粒集合孔隙率为 0.12,颗粒密度为 2785 kg/m³。颗粒微观参数如表 1 所示。

表 1 颗粒微观参数

变形参数		强度参数			
切向刚度 (/10 ⁹ N m ⁻¹)	法向刚度 (/10 ⁹ N m ⁻¹)	切向连结强 度/10 ⁵ N	法向连结强 度/10 ⁵ N	切向连结强 度/10 ⁵ N	法向连结强 度/10 ⁵ N
30.8	17.1	1.8	1.8	1.8	1.8

为模拟开挖卸载过程,开挖前,具体边界条件如图 1 所示,底面及右侧面固定,通过 servo 程序控制顶面及左侧面墙体位移实现加压,根据采深 200 m 矿区地应力情况,铅垂方向地应力 σ_y 最终维持在 10.67 MPa,水平地应力 σ_x 根据不同侧压系数 k (0.4~1.8) 确定。加压完成后赋予重力加速度,运行至平均不平衡力足够小(10⁻²数量级)达到初始平衡状态。

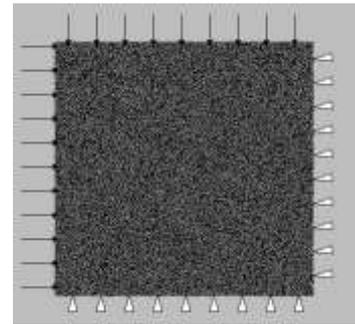


图 1 开挖前初始模型边界条件

Fig. 1 Boundary conditions of initial model before excavation

通过 del 命令对初始模型实行瞬态一次开挖,开挖断面分别采用矩形、圆形及三心拱 3 种几何形态,如图 2 所示。为尽量减小边界效应对计算的影响并便于对比分析,开挖面积均控制在初始模型总面积的 1%。其中,矩形开挖长宽均为 1 m;圆形开挖直径为 1 m;三心拱开挖墙高 0.75 m,拱高 0.25 m,宽 1 m。分析中以 σ_1 , σ_3 分别表示最大及最小原岩主应力。

3 结果分析

3.1 开挖扰动能量演化规律

初始模型在加压后形成原岩应力场,能量以应变能形式储存,开挖后,周围岩体具有填补新生空间的运动趋势,从而应变能以动能形式释放。同时考虑颗粒的平动与转动,则开挖系统的动能可由各颗粒动能叠加得到,计算式为

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{N_p} \sum_{i=1}^3 M_{(i)} v_{(i)}^2, \quad (1)$$

式中, N_p 为颗粒总数, $M_{(i)}$ 及 $v_{(i)}$ 分别为颗粒的广义质量及广义速度。可分别按下式计算:

$$M_{(i)} = \begin{cases} m & (i=1, 2) \\ I & (i=3) \end{cases}, \quad (2)$$

$$v_{(i)} = \begin{cases} \dot{x}_{(i)} & (i=1, 2) \\ \omega_{(i)} & (i=3) \end{cases}, \quad (3)$$

其中, m 及 I 分别为颗粒的质量和转动惯量, $\dot{x}_{(i)}$ 及 $\omega_{(i)}$ 分别为颗粒的平动速度和转动速度。

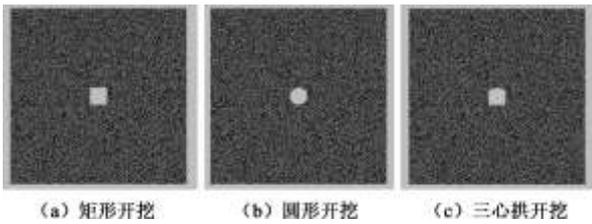
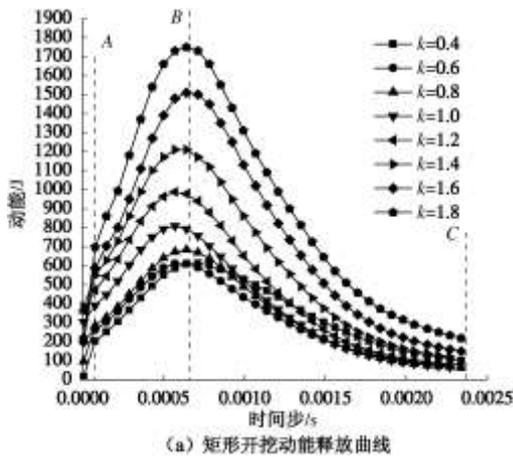


图2 3种断面开挖模型

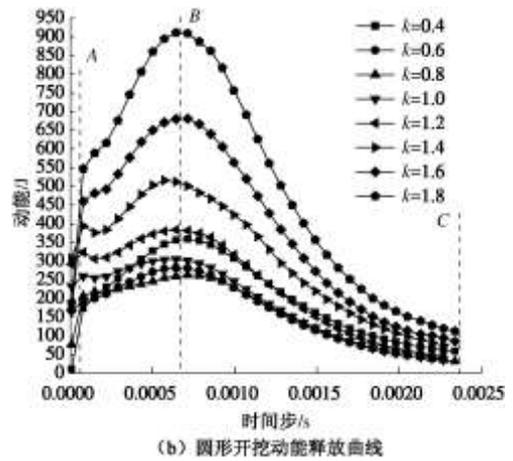
Fig. 2 Models of three kinds of excavation sections

在不同侧压系数下分别采用矩形、圆形及三心拱开挖, 开挖后系统动能变化如图3所示。由图3可看出, 虽然围压及开挖断面有所不同, 但动能释放曲线的基本形态一致, 均会经历一个从突然增加到缓慢增加再到缓慢减少的过程, 为此将动能的释放过程分为3个阶段:

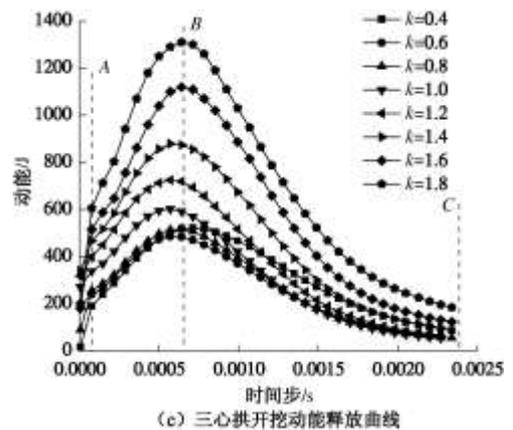
(1) 能量急剧释放阶段: OA 段, 深部开挖导致边界颗粒突然受很大的不平衡力, 产生极大加速度, 速度突跃, 从而周边颗粒间应变能急剧转变为动能释放。图4为侧压系数为0.4时, 开挖瞬时开挖区周边速



(a) 矩形开挖动能释放曲线



(b) 圆形开挖动能释放曲线



(c) 三心拱开挖动能释放曲线

图3 不同断面开挖动能释放曲线

Fig. 3 Kinetic energy release curves with different excavation cross-sections

度场, 其中箭头指向表示速度方向, 长度表示速度大小。可见开挖后, 边界颗粒速度主导方向与边界法向方向一致, 速度大小与平行边界法向方向原岩应力成正比, 这一点可作为开挖后边界颗粒卸载运动的规律。

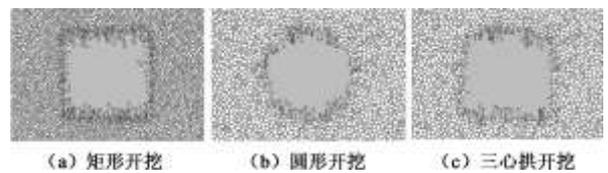


图4 开挖瞬时开挖区周边速度场

Fig. 4 Instantaneous velocity fields around excavation area

(2) 能量平稳释放阶段: AB 段, 一方面, 卸载波向内传播, 致使深部应变能继续转变为动能释放; 另一方面, 岩体发挥其自稳特性, 部分已释放动能重新转化为应变能。整体上仍呈动能释放状态, 所释放动能逐步增加, 但增长率越来越小, 直至 B 点释放动能达到最大值 E_B , 其后进入下一阶段。

(3) 能量储存阶段: BC 段, 该阶段系统动能逐渐减小, 岩体充分展现其自稳特性, 整体上所释放动能向应变能转化, 系统动能越来越小直至 C 点最终稳定。

另外, 根据图 3 可看出, 图中动能释放曲线虽形态相同, 但峰值在不同侧压及不同开挖断面下存在差异, 现将曲线顶点 B 值 E_B 定义为最大释放动能, 用以表征开挖扰动的强烈程度。图 3 中 C 点在强度足够大的情况下, 最终将趋于零; 而当强度偏小, 由开挖扰动造成出现部分岩体脱离系统的破坏时, 可以预见此时 C 点值将大于零, 其即为未通过岩体自稳特性重新转变为应变能, 而由破坏部分携带的能量。现将该点动能值定义为残余动能 E_r , 用以表征开挖扰动导致破坏的严重程度。对这两个值详细讨论如下:

a) 最大释放动能

由图 3 可见, 在开挖断面一定的情况下, 最大释放动能 E_B , 随侧压系数增大而增大; 在相同侧压系数下, 采用不同断面开挖, 则矩形开挖最大释放动能 E_B 最大, 三心拱开挖次之, 圆形开挖时 E_B 最小。

为进一步分析开挖后, 周围岩体的能量释放是否与开挖部分所储存的应变能 E_{se} 存在一定比率关系及各因素对该比率的影响规律, 对不同侧压系数及不同开挖断面下周围岩体所释放的最大动能值与开挖部分储存应变能之比 (最大动能释放率 k_r) 进行计算:

$$k_r = E_B / E_{se} \quad (4)$$

为便于对比分析, 改变原模型开挖尺寸, 使 3 种断面开挖下所开挖面积均为 1 m^2 , 则不同侧压系数及不同开挖断面下的 k_r 值如图 5 所示。其中, 标识 rec、cir 及 arc 分别表示矩形开挖圆形开挖及三心拱开挖。由图可见: ①对于某一固定形式的开挖, 最大动能释放率与应力水平 k 不呈现固定的相关规律, 而与最大主应力与最小主应力之比 σ_1/σ_3 却呈现正比关系, 即原岩应力越接近静水压力状态, 则开挖对系统产生的扰动效应越小, 反之越大; ②在相同原岩应力状态下, 采用不同开挖断面时, 最大动能释放率差异较大, 由大到小分别为: 矩形开挖、三心拱开挖, 圆形开挖。这表明开挖扰动效应与开挖断面几何形态相关, 开挖相同体积岩体时, 采用圆形断面开挖产生的扰动效应最小, 三心拱开挖次之, 矩形开挖最大。

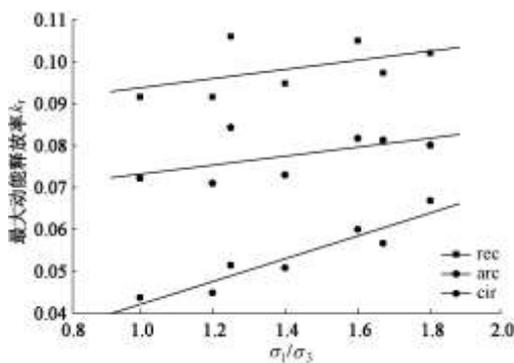


图 5 最大动能释放率

Fig. 5 Maximum kinetic energy release rate

b) 残余释放动能

残余释放动能直观反映开挖系统在应变能 - 动能 - 应变能的转化中, 是否会出现部分岩体脱离原系统的破坏。对于深部开挖, 由于岩体的流变性, 常出现开挖周围岩体实际强度远小于其初始强度的情况, 为对系统的长期稳定程度做出判断, 借用强度折减法的思想, 以侧压系数 0.4 的矩形开挖为例, 对其强度按不同系数折减, 得到的释放曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 强度的折减对最大释放动能的影响较小, 而对残余动能的影响明显。在强度折减至 50% 时动能释放曲线尚无变化; 但强度折减至 40% 时曲线 BC 段出现差异, C 点残余动能值 E_r 不趋于零, 即所释放的动能有部分未重新转化为应变能存储, 开挖已导致周围岩体出现破坏。按传统强度折减法观念, 此开挖系统的安全系数为 2.5。随着强度的进一步折减, 残余动能 E_r 越来越大, 表明破坏部分脱离系统所携带的总动能越来越大, 导致的后果越来越严重。

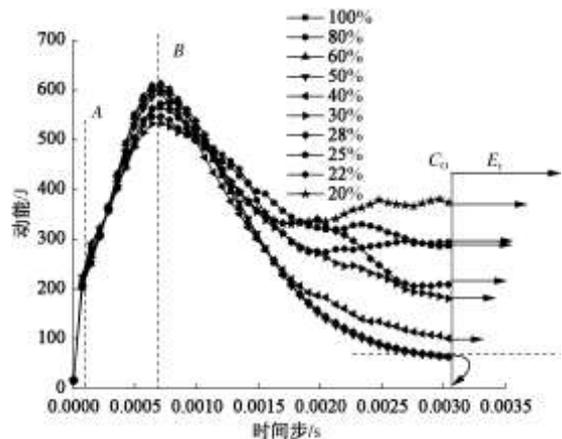


图 6 强度折减后动能释放曲线

Fig. 6 Kinetic energy release curves after strength reduction

传统数值模拟中一般以应力、应变及位移作为判断开挖系统稳定与否的指标, 并利用强度折减法, 通过安全系数反映该系统的稳定程度, 但当系统出现如板裂、岩爆等部分岩体脱离原系统的破坏时, 利用这些指标却难以实现对这种破坏后果严重程度的判断。通过以上对 E_r 的讨论可以看出, 若以残余动能 E_r 作为开挖系统的稳定性指标, 其不仅可以如传统指标一样, 通过强度折减法利用安全系数反映某一系统的稳定程度; 对于某一不稳定开挖系统, 也可以很直观的反映其发生岩爆的倾向及岩爆烈度。

3.2 开挖扰动应力重分布规律

现有连续介质力学理论^[16]、现场监测试验^[5]及数值模拟^[20]已对各种不同断面开挖的应力重分布最终结果做出大量分析。本文以卸载扰动的角度重视应力重分布这一过程, 一方面, 从中提炼出关于开挖对周围岩体各向应力扰动更为一般的规律; 另一方面, 将

所得到的扰动规律及应力重分布结果与前人有限元结果相比较, 从而实现对模型有效性的验证。以侧压系数 0.4 的矩形开挖为例, 为对开挖系统应力重分布过程进行全面监测, 在模型顶底板及两帮中线上布置速度监测点及应力测量球, 如图 7 所示。其中速度测量点以小写字母表示, 间隔 0.5 m 布置; 应力测量球以大写字母表示, 圆心间隔 0.25 m 布置, 半径均为 0.25 m。

因开挖后顶底板及两帮卸载情况与开挖边界的方位相关, 为讨论方便, 规定顶底板以 y 方向为垂直边界方向, 以 x 方向为平行边界方向; 而两帮则以 x 方向为垂直边界方向, 以 y 方向为平行边界方向。测量

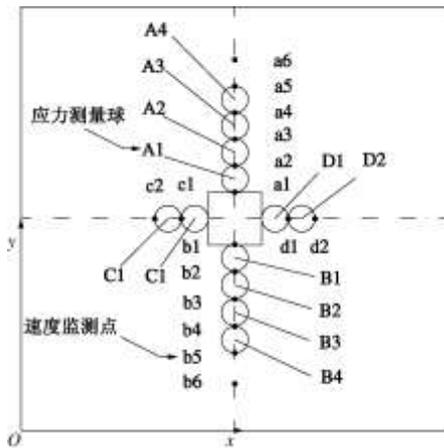


图 7 模型速度测量点及应力测量球

Fig. 7 Velocity monitoring points and stress measuring balls

得到开挖后顶底板各测点速度随时间变化曲线如图 8 所示, 其中实线表示垂直边界方向速度, 而虚线表示平行边界方向速度; 通过测量球监测得到的顶底板垂直边界方向的正应力值随时间变化曲线图 9 所示, 其中以 σ_{\perp} 表示垂直边界方向的正应力, $\sigma_{//}$ 表示平行边界方向的正应力。

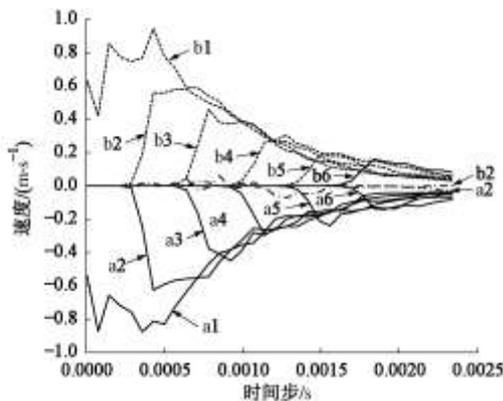


图 8 顶底板监测点速度随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of velocity versus time at roof and floor monitoring points

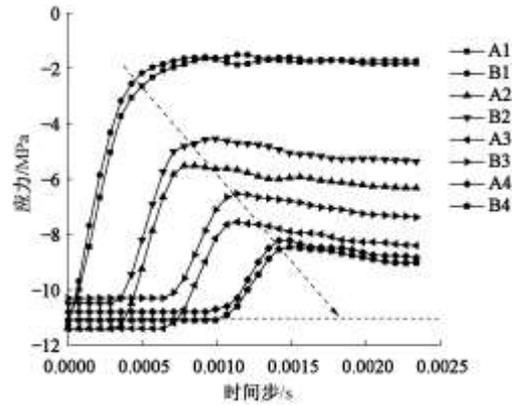


图 9 顶底板 σ_{\perp} 随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of σ_{\perp} versus time at floor and bottom monitoring points

由图 8 及图 9 可知: ①开挖后顶底板中轴线上颗粒主要沿垂直边界方向运动, 而沿平行边界方向的速度较小, 且随扰动向深部传播, 顶底板 σ_{\perp} 也依次卸载变小; ②颗粒垂直边界方向运动速度的峰值由边界向内越来越小, 表明开挖扰动对岩体的影响随深度的增加而减小, 相应的应力卸载幅度也越来越小, 直至到达一定深度, 开挖对原岩应力基本不形成扰动。另外, 图 10 为两帮及顶底板 σ_{\perp} 随时间变化对比图, 由图 10 可知, 两者符合相同卸载规律。

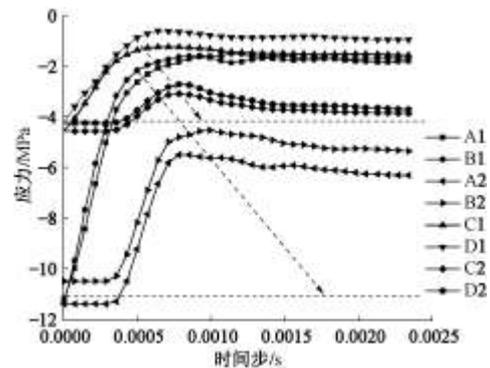


图 10 两帮及顶底板 σ_{\perp} 随时间变化对比

Fig. 10 Comparison of σ_{\perp} at two sides and roof/floor

为探讨顶底板及两帮平行边界方向应力扰动规律, 通过相应测量球监测得到其变化曲线分别如图 11 及 12 所示。由图可知, 顶底板开挖 $\sigma_{//}$ 在开挖后先变小后增大, 最终稳定在小于原岩应力水平, 整体上属卸载变化; 而两帮 $\sigma_{//}$ 在略微变小后持续增大, 并最终稳定在大于原岩应力的水平, 整体上属加载变化。

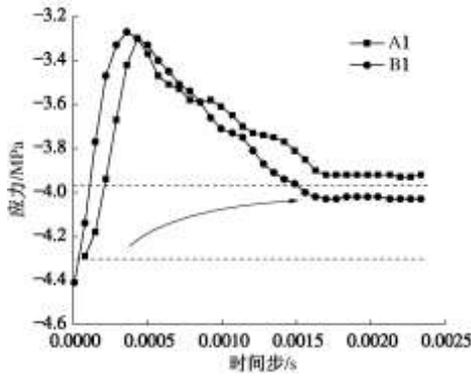


图 11 顶底板 $\sigma_{//}$ 时间变化曲线

Fig. 11 Curves of $\sigma_{//}$ versus time at roof and floor monitoring points

利用以上关于开挖后系统 σ_{\perp} 及 $\sigma_{//}$ 变化趋势的结论，并结合扰动效应随深度增加越来越小这一原则，可得到与基于连续介质的矩形巷道应力解^[21]一致的应力重分布，可见上述扰动规律是准确的。

为进一步讨论原岩应力状态及开挖断面对应力重分布的影响规律，下面对在侧压系数分别为 0.4、1.0 及 1.8 下 3 种断面开挖的应力重分布状况进行对比分析。开挖扰动稳定后，颗粒间接触力分布如图 13 所示，图中黑色线条表示颗粒间法向接触压力，红色线条表示颗粒间接触拉力，力的大小以线条的粗细表征。

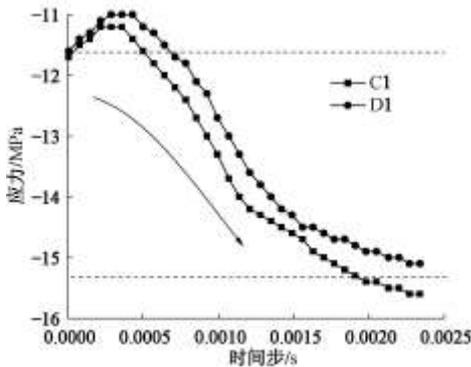


图 12 两帮 $\sigma_{//}$ 时间变化曲线

Fig. 12 Curves of $\sigma_{//}$ versus time at two sides of monitoring points

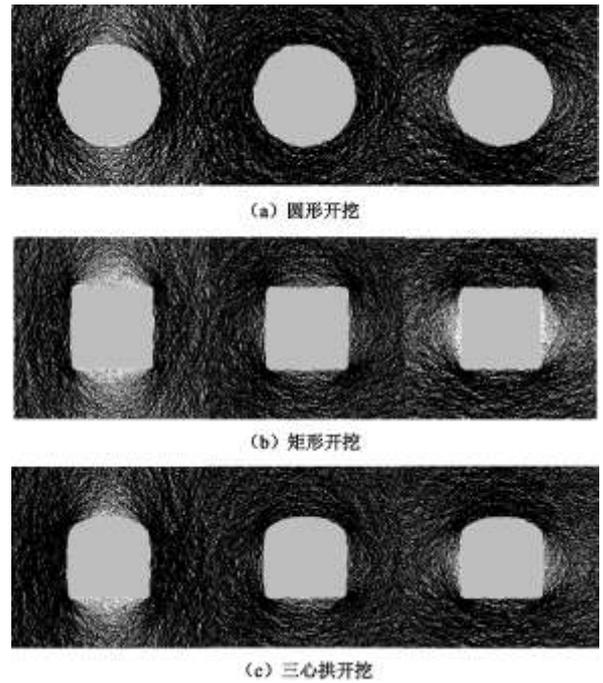


图 13 开挖边界周围颗粒接触力分布 (由左至右 k 依次取为 0.4、1.0 及 1.8)

Fig. 13 Distribution of particle contact forces around excavation

图中颗粒间接触力虽不能直接反映某点具体应力值，但某区域应力水平可通过该区域内平均接触力的大小（图中可直观的通过颜色的深度判断）反映；根据连结接触本构关系，当颗粒间接触拉力超过法向连结强度时连结破坏，颗粒间出现裂隙，因此接触拉力的分布，可反映某一区域具有发生破坏趋势，及破坏发生后裂隙发育的方位及裂隙分布整体形态。

由图 13 可知：①在侧压系数为 0.4 时，3 种断面开挖下，两帮开挖边界周边均出现压力集中区，且出现呈 v 形分布的接触拉力，即表明该区域具有呈 v 形分布的裂隙发育趋势，文献[22]在现场实验中观察到这种破坏状态，并将其称为 v 形破坏；另外，在顶底板开挖边界周边出现应力松弛区，该区域也分布有接触拉力，呈开口方向背离开挖边界的 v 形分布。②在侧压系数为 1.8 时，3 种断面开挖下，也出现如 $k=0.4$ 时的压力集中区及应力松弛区，但压力集中区出现在顶底板周边，而应力松弛区出现在两帮周边。③在侧压系数为 1.0（即原岩应力为静水压力状态）时，3 种断面开挖下，接触力分布呈现出不同的规律：圆形开挖下，开挖边界周边接触力分布均匀，在一定环状区域内呈现压力集中；矩形开挖下，开挖边界周边接触力分布不均，边界转角处均呈现明显的压力集中，边界直线部分周边接触力与深部差异不明显；三心拱开挖下，弧顶边界与圆形开挖下边界周边接触力分布相似，而直线边界周边及边界转角处与矩形开挖下边界周边接触力分布相似。

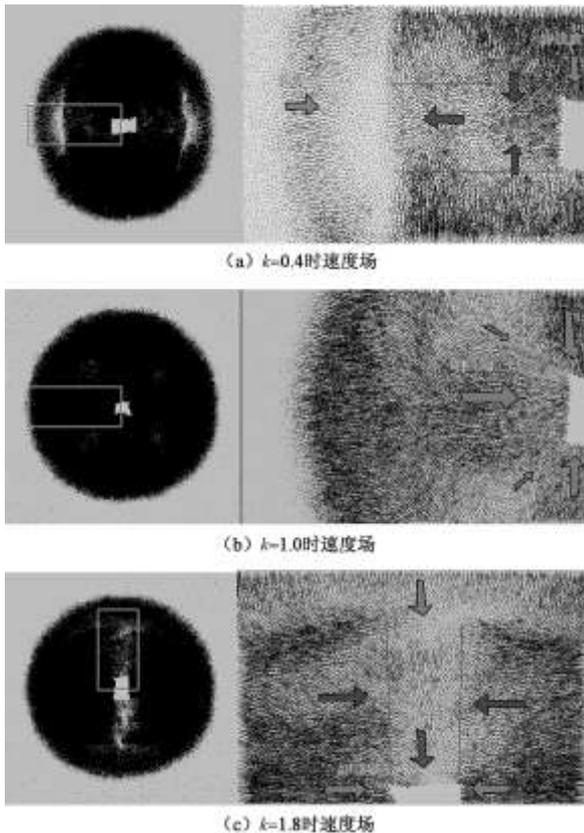


图 14 不同侧压系数下矩形开挖后的速度场

Fig. 14 Velocity fields of rectangular excavation under different horizontal pressures

通过以上分析, 得到了不同侧压系数及开挖断面下开挖后周围岩体应力重分布的特点。但关于两者对应力重分布的影响机制还需做进一步讨论。为此, 以矩形开挖为例, 对不同侧压系数下, 开挖扰动到达一定阶段时周围岩体的速度场进行分析, 如图 14 所示, 其中右边图形为左边图形黄色方框内的局部放大图。由图可知: ①在侧压系数为 0.4 时, 两帮由于在平行开挖边界方向受到上下区域的挤压加载作用, 导致在垂直边界方向卸载波 (图中以红色箭头表示) 之后会出现另一个波的传播 (图中以紫色箭头表示, 以下简称二次波), 且颗粒向着远离开挖边界方向运动, 图 15 速度监测点速度时程曲线印证了这一点; ②在侧压系数为 1.8 时, 顶底板也出类似的挤压加载现象, 但二次波到达区域颗粒仍向着边界方向运动; ③在侧压系数为 1.0 时, 颗粒运动方向均指向开挖边界, 不形成明显加载区。

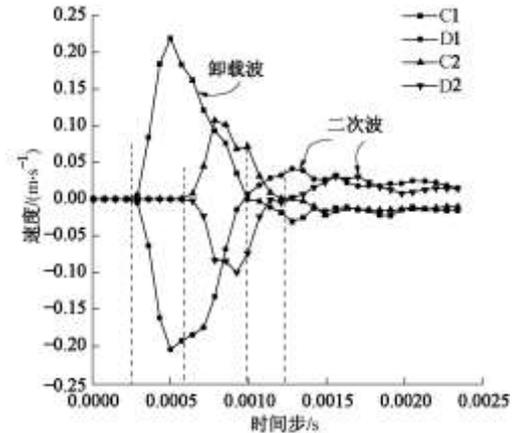


图 15 $k=0.4$ 两帮速度监测点速度时程曲线

Fig. 15 Curves of velocity versus time at two sides of monitoring points for $k=0.4$

综合以上分析可得, 在非静水压力状态下, 压力集中区的出现是由受平行边界方向挤压加载作用所致, 而应力松弛区的出现是由垂直边界方向卸载作用所致; 侧压系数为 0.4 时, 最大主应力平行两帮边界, 而侧压系数为 1.8 时, 最大主应力方向平行顶底板边界, 可见压力集中区及应力松弛区与最大主应力方向相关, 即在与最大主应力方向平行的边界周边出现压力集中区, 而在与最大主应力垂直的边界周边出现应力松弛区。文献[17]中对圆形巷道周边压力区及张拉区也有同样的划分如图 16 所示。且通过以上分析可知在非静水压力状态下以不同断面开挖, 周围岩体具有一致的分区特性, 说明此时原岩应力状态是应力重分布的主控因素, 而开挖断面形状对应力重分布影响不大。

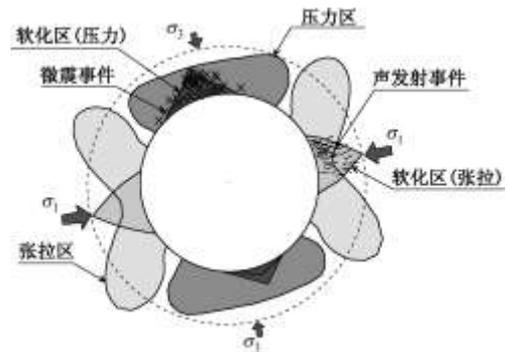


图 16 圆形开挖周边破坏区分布^[17]

Fig. 16 Distribution of damaged area around circular excavation^[17]

在原岩应力为静水压力状态时, 由图 13 可知, 3 种断面开挖下, 周边岩体会呈现不同的应力重分布特性, 说明此时开挖断面的几何特性已成为应力重分布的主控因素。借用颗粒流的思想, 建立圆形开挖及矩形开挖下边界颗粒卸载运动的简易模型如图 17 所示。由图可知: ①对于圆形开挖断面, 假定初始边界为半径为 R 的圆弧, 则根据 3.1 中关于边界颗粒卸载运动规律的讨论, 在静水压力状态下, 开挖后周边颗粒将

以相同径向速度运动,并最终稳定形成新的半径为 r 的圆弧边界,由颗粒间接触面积的变化可看出,此时颗粒间切向接触压力增大,但不出现局部压力集中。
②对于矩形开挖,类似的以边长为 D 的方形为初始边界,按边界卸载运动规律最终形成新的边长为 d 的方形边界,则直线部分颗粒间平行边界方向的接触压力基本不变,而在转角处会出现压力集中。利用以上机制,可对图13中原岩应力为静水压力状态时,3种断面开挖所呈现的不同应力重分布特征做出合理解释。

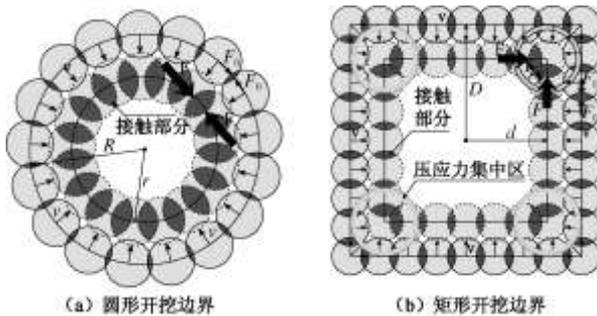


图 17 开挖边界颗粒卸载运动简易模型

Fig. 17 Simple model of unloading movement of particles at excavation boundary

4 结 论

(1) 利用数值模拟软件建立不同断面、不同原岩应力场的开挖模型,得到开挖扰动下系统的动能释放曲线。将该曲线峰值及最终稳定值分别定义为最大释放动能及残余释放动能,并提出以最大释放动能作为表征开挖扰动强烈程度的指标,而以残余释放动能作为表征开挖扰动造成破坏严重程度的指标。分析表明该组能量指标,与传统应力、应变指标相比更具全局性,并可利用其对发生岩爆的倾向及烈度做出直观评判。

(2) 通过对最大动能释放率的讨论,得到了原岩应力状况及开挖断面几何形状对开挖扰动效应的影响规律,即原岩应力越接近静水压力则开挖扰动效应越小;不同断面下开挖相同体积的空间时,扰动效应由大到小分别为:矩形开挖、三心拱开挖及圆形开挖。

(3) 通过对开挖扰动一定阶段时系统速度场的观测,得到了原岩应力状态对应力重分布分区特性的影响机制,即在原岩应力为非静水压力状态时,由于受平行边界方向挤压加载作用,在与最大主应力方向平行的边界周边会出现压力集中区;而由于垂直边界方向的卸载作用,在与最大主应力垂直的边界周边出现应力松弛区。

(4) 对于原岩应力为静水压力状态的情况,通过对所建立的开挖边界颗粒卸载运动简易模型进行分析,得到了开挖断面几何形态对应力重分布的影响机制,即弧线形边界一般不出现局部压应力集中,而直线型边界

的转角处往往会出现局部压应力集中现象。

参考文献:

- [1] LI T, CAI M F, CAI M. A review of mining-induced seismicity in China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(8): 1149 - 1171.
- [2] HE M C, NIE W, HAN L Q, et al. Microcrack analysis of Sanya granite fragments from rockburst tests[J]. Mining Science and Technology (China), 2010, **20**(2): 238 - 243.
- [3] CHEN Z H, TANG C A, HUANG R Q. A double rock sample model for rockbursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**(6): 991 - 1000.
- [4] ZHAO Yi-xin, JIANG Y D, ZHU J, et al. Investigation on the precursors of bump-prone coal failure[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, **1**(1): 530 - 535.
- [5] BÅKBLOM G, MARTIN C D. Recent experiments in hard rocks to study the excavation response: Implications for the performance of a nuclear waste geological repository[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, **14**(3): 377 - 394.
- [6] MARTIN C D, KAISER P K, CHRISTIANSSON R. Stress, instability and design of underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(7/8): 1027 - 1047.
- [7] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(4): 507 - 515.
- [8] ZHU W C, LIU J, TANG C A, et al. Simulation of progressive fracturing processes around underground excavations under biaxial compression[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**(3): 231 - 247.
- [9] GOLSHANI A, ODA M, OKUI Y, et al. Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(6): 835 - 845.
- [10] WANG J A, PARK H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(1): 49 - 57.
- [11] ZHAO Y X, JIANG Y D. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, **83**(1): 11 - 20.
- [12] SHIOTANI T. Evaluation of long-term stability for rock slope by means of acoustic emission technique[J]. NDT & E

- International, 2007, **39**(3): 217 - 228.
- [13] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, **18**(1): 35 - 48.
- [14] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response-numerical tool selection and modeling strategy[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(6): 618 - 628.
- [15] GABET T, MALÉOT Y, DAUDEVILLE L. Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states[J]. Cement and Concrete Research, 2008, **38**(3): 403 - 412.
- [16] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (XU Zhi-lun. Elastic mechanics brief tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [17] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL'S underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1251 - 1275.
- [18] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1329 - 1364.
- [19] 周健, 张刚, 曾庆有. 主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 650 - 656. (ZHOU Jian, ZHANG Gang, ZENG Qing-you. Model tests and PFC2D numerical analysis of active laterally loaded piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 650 - 656. (in Chinese))
- [20] REN G, SMITH J V, TANGET J W, et al. Underground excavation shape optimization using an evolutionary procedure[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(2): 122 - 132.
- [21] 王文星. 岩体力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004. (WANG Wen-xing. Rock mechanics[M]. Changsha: Central South University Press, 2004. (in Chinese))
- [22] MARTIN C D, READ R S, MARTINO J B, et al. Observations of brittle failure around a circular test tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**(7): 1065 - 1073.