

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-885-07

# 公路隧道通风竖井岩爆机制颗粒流模拟研究

徐士良<sup>1,2,3</sup>, 朱合华<sup>2,3</sup>

(1. 安徽建筑工业学院 岩土工程系, 合肥 230022;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学 地下建筑与工程系 上海 200092)

**摘 要:** 根据工程地质资料分析, 岩爆是秦岭公路隧道 2 号通风竖井施工过程中的主要难题。岩爆机制是指岩爆发生的物理过程, 与岩石的颗粒大小、颗粒胶结和粒间孔隙等结构特征密切相关。根据颗粒流基本理论和竖井混合片麻岩的基本力学特性, 进行混合片麻岩细观颗粒参数标定研究。颗粒大小不是一个自由参数, 通过颗粒流模拟的相似比分析, 采用强度折减方法进行竖井岩爆机制的颗粒流模拟。研究表明, 岩爆孕育的细观机制为平行于开挖面的微裂纹萌生—微裂纹扩展、聚合—宏观裂纹的形成, 为压致张剪断裂破坏, 主要是由张拉裂纹扩展、聚合引起的, 是一个渐进破坏过程。研究成果为竖井岩爆稳定性分析提供初步依据。

**关 键 词:** 岩爆机制; 颗粒流; 离散元; 隧道工程; 通风竖井

中图分类号: TU452

文献标识码: A

## Particle flow simulation of rock burst mechanism for highway tunnel ventilation shaft

XU Shi-liang<sup>1,2,3</sup>, ZHU He-hua<sup>2,3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Anhui University of Architecture, Heifei 230022, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Rock burst is a serious problem during the excavation process of the ventilation shaft No.2 of Qinling highway tunnel according to the analysis of in-situ engineering geological condition. Rock burst mechanism is a physical process related to the rock microstructure including particle diameter, particle cement and particle void, etc. The microscopic parameters of mixed gneiss are calibrated based on the theory of particle flow and basic macroscopic mechanic properties of mixed gneiss. The analysis of similarity criteria about particle flow simulation is conducted because particle diameters are not free parameters and then the rock burst mechanism is simulated using particle mechanics approach and strength reduction method. The results show that the rock burst mechanism is a progressive failure process including crack initiation, crack propagation, crack coalescence and formation of macroscopic fracture. The failure type is compression-induced tensile-shear failure; and it is dominantly tensile cracking. The results provide preliminarily references for stability analysis of rock burst of ventilation shaft.

**Key words:** rock burst mechanism; particle simulation; discrete element method; tunnel engineering; ventilation shaft

## 1 引 言

自 1738 年在英国锡矿坑道中首次报道岩爆现象以来, 世界上包括前苏联、美国、加拿大、南非、中国、德国、法国、日本等都有岩爆发生。岩爆已经成为高地应力硬岩地下工程的重要地质灾害, 国内外对于岩爆还没有统一的定义, 通常把岩爆分为应变型、断层型和矿柱型 3 类。岩爆研究内容大致可以分为岩爆实录、岩爆机制、超前预报和防治技

术等内容, 岩爆问题至今仍是岩石力学世界性难题之一<sup>[1]</sup>。

岩爆机制是岩爆发生的物理力学过程, 是对其发生过程的揭示和认识。目前, 岩爆机制的刚度理论、强度理论、能量理论、失稳理论、冲击倾向理论、突变理论、断裂损伤理论、分形理论、分叉理论和混沌动力理论等研究, 有的在岩爆工程中起到了重要指导作用, 有的还处于发展阶段。近年来, 随着矿山、水利水电、交通隧道、核废料存储等工

程向深部发展,岩爆发生越来越频繁,多为应变型岩爆。国内外学者对岩爆机制进行了大量的研究工作,潘一山等<sup>[2]</sup>利用相似材料物理模型试验,在双向加载条件下探讨了岩爆的发生过程;李广平<sup>[3]</sup>分析了岩爆的压剪损伤机制;何满潮等<sup>[4]</sup>利用自行设计的深部岩爆过程试验系统,对花岗岩岩爆发生机制进行初步探讨;陈陆望等<sup>[5]</sup>在岩土工程大型真三轴物理模型试验机上探讨了马蹄形地下洞室围岩岩爆破坏过程与机制;SUN等<sup>[6]</sup>采用 RFPA 和 DDA 相结合方法进行圆形隧道的岩爆机制模拟;Dyskin等<sup>[7]</sup>提出了岩爆的断裂力学机制;Ortlepp等<sup>[8]</sup>探讨了隧道和竖井的岩爆机制;Prochazka等<sup>[9]</sup>采用离散元方法进行了岩爆的断裂力学分析。

由于影响岩爆的因素很多,对岩爆的发生和破坏机制还没有很清楚地认识<sup>[4]</sup>,而利用岩样或模型试验进行岩爆机制模拟多以演示性为主。岩石物理特性与岩石微结构有密切关系,谭以安<sup>[10]</sup>和谢勇谋等<sup>[11]</sup>认为,岩石矿物颗粒的排列、颗粒间的联接及粒间的孔隙特征等结构因素影响岩爆的发生。由于受岩石非均质性和试验条件等限制,在具体工程中进行岩爆破坏过程的细观分析比较困难。

秦岭公路隧道2号通风竖井是国内乃至世界公路隧道行业规模最大的竖井工程,竖井井深为661.1m,净直径为11.20m。2号竖井的主要地层为混合片麻岩,部分地段夹黑云母斜长角闪片岩残留体,岩体受构造影响轻微,岩体完整,以大块状砌体结构为主,属于II级围岩。2号通风竖井示意图如图1所示。根据工程资料分析和临近工程施工经验,竖井在开挖过程中会有岩爆发生<sup>[12]</sup>。由于竖井垂直向下,工作面空间有限,施工人员和机械设备密集,一旦发生岩爆,危害性较大,所以必须进行岩爆预测和防治研究。

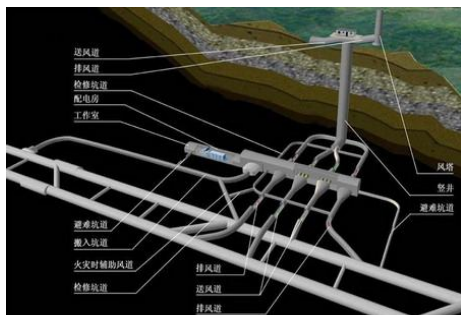


图1 2号通风竖井示意图

Fig.1 Layout of the ventilation shaft No.2

从岩爆机制研究着手,才是解决岩爆预测与防治的根本,本文利用颗粒流数值模拟方法,结合竖

井围岩的基本力学特性,进行应变型岩爆机制颗粒流模拟,从岩石颗粒角度弄清楚岩爆的形成和孕育机制是非常有必要和有意义的。

## 2 混合片麻岩颗粒流参数标定研究

PFC 是基于离散单元法和岩石细观颗粒出发的数值模拟软件,它利用刚性颗粒来模拟岩石中形状各异的矿物颗粒。Potyondy 和 Cundall<sup>[13]</sup>认为,PFC 在描述岩体介质特性方面具有不可比拟的优势,非常适合岩石破坏机制的研究。在岩体工程稳定性分析中已有许多成功的应用<sup>[14-15]</sup>。采用 PFC 软件进行岩石力学分析时,需要解决3个问题<sup>[16]</sup>:一是颗粒的大小;二是如何确定不能通过力学试验获得的细观参数;三是如何选取模型大小,以获得可靠的模拟结果。

PFC<sup>2D</sup> 中颗粒之间的相互联系是通过颗粒接触本构模型来模拟的,分别为刚度模型、滑动模型、接触黏结模型和平行黏结模型,并遵循颗粒力-位移定律和颗粒运动规律。平行黏结模型比较适合模拟岩石材料,因为它可以模拟岩石黏结断裂产生局部损伤,导致刚度退化的特性<sup>[17]</sup>。颗粒平行黏结模型的细观参数有:①颗粒接触细观参数 $\{E_c, (k_n/k_s), \mu\}$ , ②黏结细观参数 $\{\bar{\lambda}, \bar{E}_c, (\bar{k}_n/\bar{k}_s), \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c\}$ 。PFC<sup>2D</sup> 颗粒和黏结的接触刚度<sup>[13]</sup>计算公式:

$$\left. \begin{aligned} k_n &= 2E_c t, \quad t=1 \\ k_s &= \frac{k_n}{(k_n/k_s)} \\ \bar{k}_n &= \frac{\bar{E}_c}{R^{(A)} + R^{(B)}} \\ \bar{k}_s &= \frac{\bar{k}_n}{(\bar{k}_n/\bar{k}_s)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $k_n$ 为颗粒接触法向刚度; $k_s$ 为颗粒接触切向刚度; $\bar{k}_n$ 为黏结法向刚度; $\bar{k}_s$ 为黏结切向刚度; $R$ 为颗粒半径; $t$ 为颗粒厚度; $E_c$ 和 $\bar{E}_c$ 分别为颗粒和黏结的弹性模量; $k_n/k_s$ 和 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 分别为颗粒和黏结法向-切向刚度比; $\bar{\lambda}$ 为黏结半径系数; $\mu$ 为颗粒摩擦系数; $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{\tau}_c$ 分别为黏结法向和切向强度。

颗粒流模型的细观参数选用混合片麻岩室内单轴压缩试验得到的弹性模量、泊松比和单轴抗压强度作为标定参考指标,并采用试错法标定,即先假设一组细观参数,如果模拟的宏观力学参数不符合要求,再进行另一组参数模拟,直到满足所期望的结果。

混合片麻岩由长石、石英和云母等矿物组成,它们的颗粒直径分别为1~3.7、0.7~1.8、0.6~

0.9 mm。本文取颗粒最大直径为 2 mm，最小直径为 1 mm，平均直径为 1.5 mm，与混合片麻岩矿物颗粒平均直径大小相近，处于同一个数量级。岩样的直径为 50.0 mm，高度为 100.4 mm。混合片麻岩单轴压缩试验颗粒流模型如图 2 所示。

为了减少自由参数的数目，需要进行参数假设<sup>[13]</sup>，取颗粒形状为单位厚度的圆盘，颗粒细观参数初始值为： $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ， $E_c = \bar{E}_c$ ， $k_n/k_s = 2$ ， $\bar{k}_n/\bar{k}_s = 2$ ， $\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c$ ， $\nu = 0.5$ ，混合片麻岩细观参数标定流程如图 3 所示。

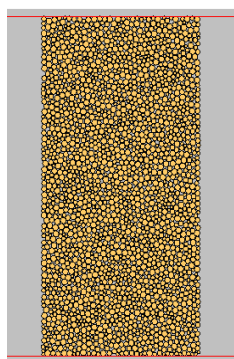


图 2 混合片麻岩单轴压缩试验颗粒流模型  
Fig.2 PFC model of uniaxial compression test of mixed gneiss

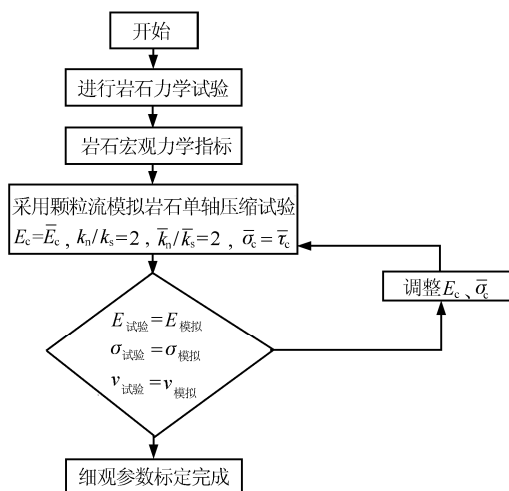


图 3 混合片麻岩细观参数标定流程  
Fig.3 Flow chart of microscopic parameters calibration of mixed gneiss

根据细观参数标定流程，混合片麻岩模拟和试验应力-应变曲线对比见图 4，可见两者的宏观力学参数基本吻合。由于颗粒流模型中颗粒是刚性的和没有合适的变形参数标定方法<sup>[16]</sup>，模拟曲线不能很好地反映裂纹闭合引起的非线性变形和变形较大。经过标定得到混合片麻岩颗粒流细观参数如表 1 所示。

### 3 颗粒流模拟相似比分析

颗粒流模型的大小和颗粒的大小是密切相关的，颗粒大小不是一个自由参数，颗粒大小必须和矿物颗粒大小处于同一个量级<sup>[13]</sup>，盲目选择颗粒直径和模型大小会导致计算结果的不确定性和应用上的困难<sup>[16]</sup>。

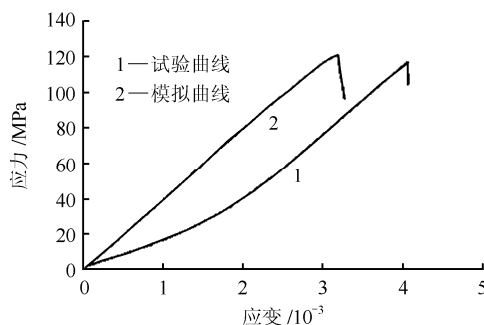


图 4 模拟和试验应力-应变曲线  
Fig.4 Stress-strain curves of PFC simulation and experiment

表 1 混合片麻岩颗粒流细观参数

Table 1 Microscopic parameters of mixed gneiss

| 接触模量/GPa | 接触刚度比 | 黏结半径系数 | 黏结模量/GPa | 黏结刚度比 | 黏结法向强度/MPa | 黏结切向强度/MPa |
|----------|-------|--------|----------|-------|------------|------------|
| 32       | 2     | 1.0    | 32       | 2     | 105        | 105        |

本文在其他参数相同的条件下，分别选择颗粒最小半径为 1、3、5、7 mm 进行颗粒大小敏感性分析，不同颗粒大小计算模型如图 5 所示。

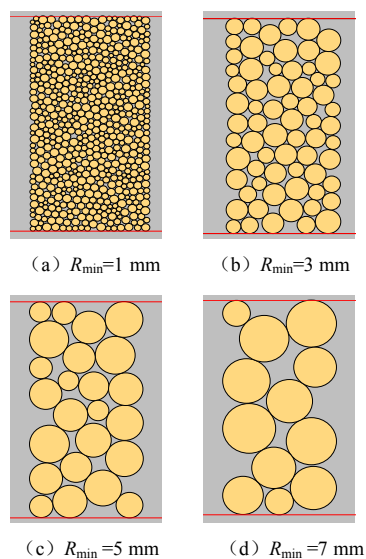


图 5 不同颗粒大小计算模型  
Fig.5 Calculation model of particle with different diameters

从图 6、7 可以看出，颗粒大小对岩石弹性模量

和单轴抗压强度影响很大。随机生成不同大小的颗粒组合在一起表现出复杂的宏观岩石力学特性,除了单轴抗压强度随颗粒增大有减小的趋势外,弹性模量没有明显地变化趋势。

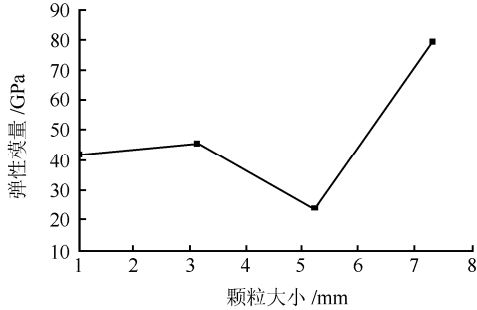


图6 颗粒大小对弹性模量的影响  
Fig.6 Effect of particle size on elastic modulus of mixed gneiss

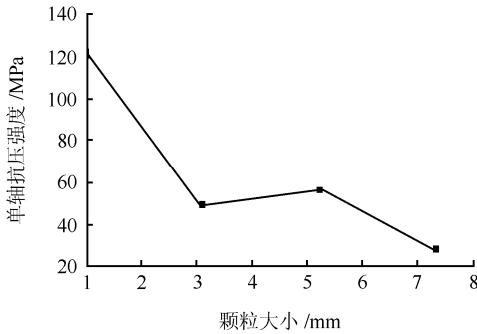


图7 颗粒大小对单轴抗压强度影响  
Fig.7 Effect of particle size on uniaxial compressive strength of mixed gneiss

为了使大尺度岩土工程 PFC 模型参数和通过小尺度岩样获得细观参数具有一致性, Zhao 和 Hobbs 等<sup>[18]</sup>提出用相似理论来反映不同尺度模型参数之间的内在本质联系, 并成功模拟了地壳褶皱的产生过程。

根据相似理论和颗粒流基本理论, 设  $p$  和  $m$  分别表示原型和模型的物理量, 基于平行黏结接触本构模型的不同尺度颗粒流模型相似准则如下。

(1) 几何相似比为

$$\frac{l_m}{l_p} = \frac{R_m}{R_p} = C_L \quad (2)$$

式中:  $l_m$  和  $l_p$  分别为模型和原型尺寸;  $R_m$  和  $R_p$  分别为模型和原型颗粒半径;  $C_L$  为几何相似比。

(2) 位移相似比为

$$\frac{U_m}{U_p} = \frac{R_m}{R_p} = C_L \quad (3)$$

式中:  $U_m$  和  $U_p$  分别为模型和原型的位移。

(3) 刚度相似比为

$$\frac{k_{nm}}{k_{np}} = \frac{2E_C}{2E_C} = 1 \quad (4)$$

$$\frac{\bar{k}_{nm}}{\bar{k}_{np}} = \frac{\bar{E}_C / l_m}{\bar{E}_C / l_p} = \frac{1}{C_L} \quad (5)$$

式中:  $k_{nm}$  和  $k_{np}$  分别为模型和原型颗粒接触法向刚度;  $\bar{k}_{nm}$  和  $\bar{k}_{np}$  分别为模型和原型黏结法向刚度。

(4) 接触力相似比为

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{A_m \bar{k}_{nm} U_{nm}}{A_p \bar{k}_{np} U_{np}} = \frac{2\bar{R}_m \bar{E}_C U_{nm}}{2\bar{R}_p \bar{E}_C U_{np}} = C_L \quad (6)$$

式中:  $F_m$  和  $F_p$  分别为模型和原型法向接触力;  $A_m$  和  $A_p$  分别为模型和原型黏结横截面积,  $\bar{R}_m$  和  $\bar{R}_p$  分别为模型和原型黏结半径;  $U_{nm}$  和  $U_{np}$  分别为模型和原型颗粒黏结接触位移。

(5) 重力相似比<sup>[18]</sup>为

$$\frac{G_m}{G_p} = \frac{m_m g_m}{m_p g_p} = \frac{\pi R_{m2} \rho_m g_m}{\pi R_{p2} \rho_p g_p} \quad (7)$$

$$\text{设 } \frac{\rho_m}{\rho_p} = 1, \frac{g_m}{g_p} = \frac{R_p}{R_m} = \frac{1}{C_L}, \text{ 则 } \frac{G_m}{G_p} = C_L$$

式中:  $G_m$  和  $G_p$  分别为模型和原型颗粒重力;  $m_m$  和  $m_p$  分别为模型和原型质量;  $\rho_m$  和  $\rho_p$  分别为模型和原型颗粒密度;  $g_m$  和  $g_p$  分别为模型和原型重力加速度。

(6) 时间相似比<sup>[18]</sup>为

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_p} = \frac{\sqrt{m_m / K_m}}{\sqrt{m_p / K_p}} = \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p} \frac{R_m}{R_p}} = C_L \quad (8)$$

式中:  $\Delta t_m$  和  $\Delta t_p$  分别为模型和原型求解时间;  $K_m$  和  $K_p$  分别为模型和原型颗粒求解刚度。

位移相似比、接触力相似比、重力相似比和时间相似比等于几何相似比, 而平行黏结刚度相似比和重力相似比为几何相似比的倒数, 其他相似比自动满足。通过以上相似比分析, 为竖井岩爆机制颗粒流模拟提供了初步依据。

## 4 竖井岩爆机制的颗粒流模拟

### 4.1 竖井岩爆机制计算模型和参数

取竖井地应力集中区—300 m 处的横断面为模拟对象, 开挖半径为 6.0 m, 并处于平面应变状态。

考虑到计算机速度和软件颗粒数量等方面的限制,取 1/2 对称面进行研究,建立的数值模型见图 8。

模型长度为 60 m, 高度为 30 m, 其中黄色颗粒部分为竖井开挖对象, 四周蓝线为墙体。模型最大水平主应力为 28.7 MPa, 最小水平主应力为 17.6 MPa。底部墙保持不动, 通过上部和左右墙的速度加载达到给定的应力状态。根据颗粒流的颗粒生成算法, 模型的颗粒半径为 0.3~0.4 m, 颗粒平均半径相似比为 467, 利用颗粒流相似准则, 模型中的计算参数要通过混合片麻岩细观标定参数进行换算而得到。根据 Cundall 提出的强度折减办法<sup>[13]</sup>,

细观强度折减系数为 0.8~0.6, 由于竖井围岩完整性较好, 本研究采用的强度折减系数为 0.8。根据相似准则和强度折减方法, 岩爆数值模型围岩计算参数见表 2。

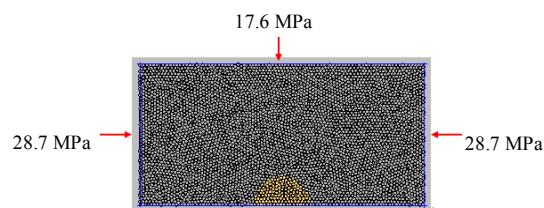


图 8 竖井岩爆颗粒流计算模型

Fig.8 Calculation model of rock burst with PFC

表 2 岩爆数值模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of PFC model of rock burst

| 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 颗粒<br>半径/m | 接触法向刚<br>度/(GPa·m) | 接触切向<br>刚度/(GPa·m) | 黏结半<br>径系数 | 黏结法向刚<br>度/(GPa/m) | 黏结切向<br>刚度/(GPa/m) | 黏结法向<br>强度/MPa | 黏结切向<br>强度/MPa | 摩擦<br>系数 |
|----------------------------|------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------|
| 2.65                       | 0.3~0.4    | 64                 | 32                 | 1.0        | 91.2               | 45.7               | 84             | 84             | 0.5      |

#### 4.2 岩爆机制颗粒流模拟分析

根据建立的岩爆计算模型(图 8)和参数(表 2), 进行颗粒流模拟运算, 加载到给定应力状态以后, 进行颗粒速度和位移清零处理, 然后进行竖井开挖, 岩爆颗粒流模拟结果见图 9 和图 10。

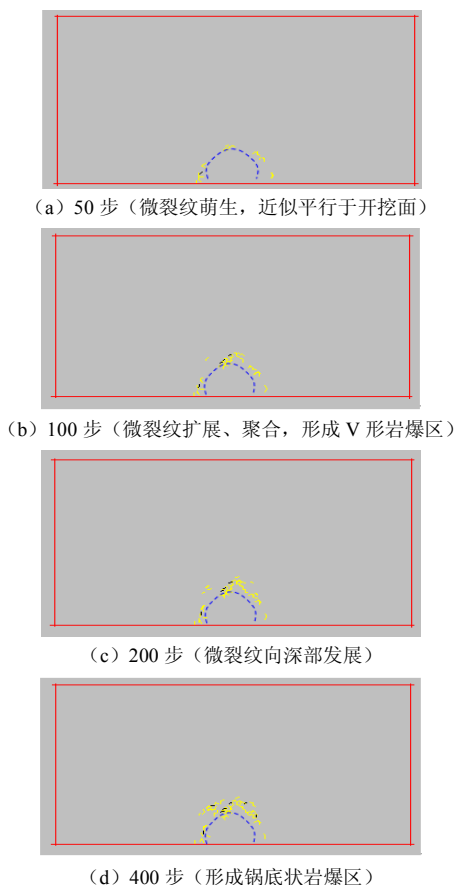


图 9 岩爆机制的裂纹发展过程

Fig.9 Crack development of rock burst mechanism

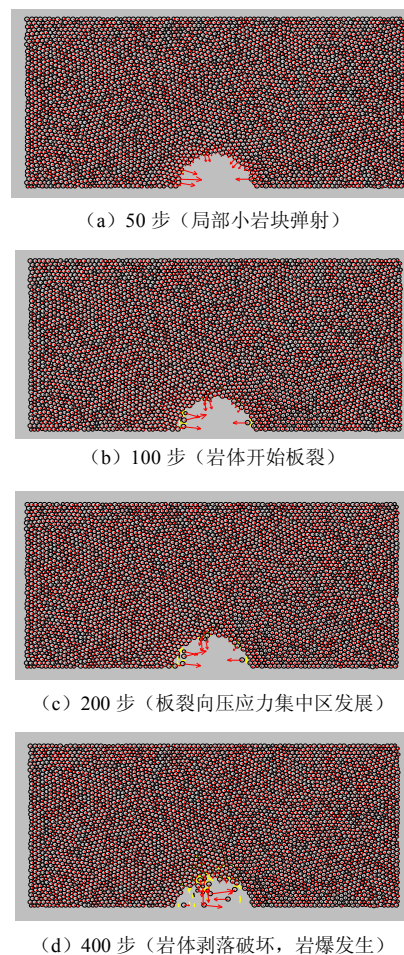


图 10 岩爆破坏的不同阶段

Fig.10 Different stages of rock burst failure

图 9 为不同阶段围岩岩爆裂纹发展情况, 图 10 为围岩岩爆破坏的不同阶段。在高地应力条件下, 竖井开挖后围岩应力重新分布, 围压降低, 环向应力增

加, 并出现最大压应力集中区。当局部拉应力超过颗粒黏结法向强度, 黏结断裂出现拉裂纹, 图中拉裂纹近似平行开挖面; 当局部剪应力超过颗粒黏结切向强度, 黏结断裂出现剪裂纹, 图中剪裂纹近似为  $45^\circ$ 。岩爆先是从微裂纹萌生开始的, 大多数为拉裂纹, 剪裂纹较少, 微裂纹方向近似平行于开挖面。它对应的破坏现象为局部小岩块或岩片出现弹射。随着微裂纹扩展和数目的增多, 在最大压应力集中区, 微裂纹开始聚合成雁列式宏观裂纹。V 形破坏区逐渐形成, 这时剪裂纹数目增加, 表明岩体开始板裂并有轻微滑动现象。随着 V 形岩爆区形成, 微裂纹逐步向深部发展、聚合, 板裂也随着发展, 最后岩体出现剥落破坏, 发生较大规模的岩爆, 并形成锅底状的岩爆破坏区。

根据以上分析, 采用颗粒流模拟可以掌握岩爆的孕育和破坏过程, 更好地从细观角度到宏观尺度理解岩爆形成的机制。岩爆孕育的细观机制为平行于开挖面的微裂纹萌生—微裂纹扩展、聚合—宏观裂纹的形成, 为压致张剪断裂破坏, 主要由张拉裂纹扩展、聚合引起的; 岩爆的宏观动力破坏过程为小岩块或岩片弹射—岩体板裂—剥落破坏, 表明岩爆的发生是一个渐进破坏过程, 与谭以安<sup>[10]</sup>结合现场观测和扫描电镜试验提出的岩爆破坏机制是基本一致的。

## 5 结 语

结合秦岭公路隧道 2 号通风竖井工程, 采用试错法和细观参数标定流程, 使颗粒流模拟和室内试验的岩石宏观力学参数基本吻合, 掌握了混合片麻岩的细观参数。通过颗粒流模拟, 初步形象地反映了应变型岩爆的细观机制, 展现了岩爆发生的物理过程, 表明岩石裂纹的发展对岩爆影响很大。岩爆的发生是一个渐进破坏过程, 岩爆孕育的细观机制为平行于开挖面的微裂纹萌生—微裂纹扩展、聚合—宏观裂纹的形成; 岩爆的宏观动力破坏过程为小岩块或岩片弹射—岩体板裂—剥落破坏。由于细观力学和颗粒流软件仍处在不断发展之中, 对于岩爆机制的量化描述仍需要进一步分析。

**致谢:** 感谢秦岭公路隧道 2 号竖井项目部和同济大学地下建筑与工程系提供的科研支持!

## 参 考 文 献

- [1] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300—303.  
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong-lin. Study on

mechanism and judgement of rockbursts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 300—303.

- [2] 潘一山, 章孟涛, 王来贵, 等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 49—56.  
PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao, WANG Lai-gui, et al. Study on rockburst by equivalent material simulation tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(4): 49—56.
- [3] 李广平. 岩体的压剪损伤机理及其在岩爆分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 49—55.  
LI Guang-ping. The mechanism of compression-shear damage for rock mass with its application to rockburst[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(6): 49—55.
- [4] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865—876.  
HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experiment study on rockburst process of granite specimen at great depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 865—876.
- [5] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1520—1526.  
CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei, YIN Xiao-xi, et al. Plane-strain model tests on rock burst of horseshoe section caverns in hard and brittle rockmass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(10): 1520—1526.
- [6] SUN Jin-shan, ZHU Qi-hu, LU Wen-bo. Numerical simulation of rock burst in circular tunnels under unloading conditions[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 17(4): 552—556.
- [7] DYSKIN A V, GERMENOVICH L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface[C]// Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: Balkema A A, 1993: 169—174.
- [8] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1994, (1): 181—190.
- [9] PROCHAZKA P P. Application of discrete element methods to fracture mechanics of rock bursts[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2004 (71): 601—618.

- [10] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989(1): 33—38.  
TAN Yi-an. The mechanism research of rockburst[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1989(1): 33—38.
- [11] 谢勇谋, 巨能攀. 浅析隧洞围岩宏微观结构与岩爆[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 58—61.  
XIE Yong-mou, JU Neng-pan. Preliminary analysis on relationship between macroscopic-microscopic structures of tunnel surrounding rockmass and rockburst[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2005, 16(4): 58—61.
- [12] 徐士良, 朱合华, 丁文其, 等. 秦岭公路隧道通风竖井岩爆预测和防治措施[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1759—1763.  
XU Shi-liang, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Rock burst prediction for ventilation shaft of Qinling highway tunnel and its countermeasures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1759—1763.
- [13] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004 (41): 1329—1364.
- [14] 汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 450—456.  
WANG Cheng-bing, ZHU He-hua. Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 450—456.
- [15] 周健, 王家全, 曾远, 等. 土坡稳定分析的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 86—90.  
ZHOU Jian, WANG Jia-quan, ZENG Yuan, et al. Simulation of slope stability analysis by particle flow code[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 86—90.
- [16] TOMOFUMI KOYAMA, LANRU JING. Effects of model scale and particle size on micromechanical properties and failure processes of rocks—A particle mechanics approach[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2007, 31: 458—472.
- [17] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007 (44): 997—1010.
- [18] ZHAO CHONGBIN, HOBBS E, ORD A, et al. An upscale theory of particle simulation for two-dimensional quasi-static problems[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2007, 72: 397—421.