

基于 PFC3D 的露天矿边坡爆破过程 模拟及稳定性研究*

崔铁军^{1,2}, 马云东², 王来贵³

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 大连交通大学 辽宁省隧道与地下结构工程技术研究中心, 辽宁 大连 116028;

3. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究爆破在露天矿边坡内发展的过程,基于能量守恒理论,假设爆破释放的化学能全部由爆点周边一定范围内的岩体承受,并部分转化为动能,进而能量在碎裂的岩块中传递、吸收,最终达到平衡,爆炸过程结束.论文使用基于颗粒流理论的 PFC3D 模拟了在露天矿边坡内,不同高度、埋深和装药量的单孔爆破过程,并对爆破后边坡稳定性做了探讨.研究表明:爆炸过程可以分为3个阶段,第1阶段爆炸冲击起主导作用,有速度矢量回荡出现;第2阶段是重力占优势的上覆岩层塌落过程;第3阶段最后颗粒下滑、局部调整至平衡.在经历时间上,前一个阶段与后一个阶段相差一个数量级.总体上说,各种爆破后上层砂岩是稳定的,即坡顶是稳定的,下层砂岩和砂质泥岩会受到一定程度的破坏,但在可控范围内的.

关键词: 露天矿边坡; 爆破; 颗粒流理论; PFC3D; 稳定性

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.07.005

引 言

岩体在爆破作用下将会产生破碎和损伤,其作用原理被普遍认为是爆炸冲击波与应力波和爆生气体共同作用的结果^[1-4].首先爆炸产生的压应力将岩石压碎,随后环向拉应力与应变波的应力使岩石破裂,最后爆生气体的膨胀使岩石裂纹扩展,由此产生对应的爆破区域划分为压碎区、破裂区、振动区.压碎区半径一般为 $3R \sim 7R$,而破裂区半径一般为 $8R \sim 150R$,其中 R 为炮孔半径.所以破裂区是工程岩体在爆破时产生破坏的主要部分,在这个区域中的岩体虽然没有完全粉碎,但由于裂纹的出现已使其承载能力下降.在破裂区外围的振动区在动应力作用下虽然没有产生明显宏观裂缝,但其岩石力学性质已经产生一定的劣化.

目前对爆破过程的研究尚不充分,陈朝玉等^[5]研究了爆破对柔弱夹层顺层边坡的稳定性影响;王建国等^[6]做了爆破震动对高陡边坡稳定影响的数值模拟研究;钟冬望等^[7]进行了爆

* 收稿日期: 2013-10-28; 修订日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51274110;50434020;10972096)

作者简介: 崔铁军(1983—),男,沈阳人,工程师,博士生(通讯作者. E-mail: ctj.159@163.com);
马云东(1964—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士生导师(E-mail: yundongm@126.com);
王来贵(1962—),男,教授,博士,博士生导师(E-mail: wangyande2421@163.com).

炸荷载下岩质边坡动力特性试验及数值分析研究;刘磊^[8]做了岩质高边坡爆破动力响应规律数值模拟研究;谢冰^[9]实现了岩体动态损伤特性分析及其在基础爆破安全控制中的应用.但这些研究一般基于连续介质理论,其模拟研究难以实现爆破岩体的碎裂过程,也无法根据实际情况控制各破碎岩块的状态,更无法就宏观层面上的爆破过程进行模拟.

就上述问题,根据作者对工程问题的模拟经验^[10-14],尝试使用基于颗粒流的 PFC3D (particle flow code in 3 dimensions) 作为爆破过程的模拟平台,以海州矿某边坡作为模拟对象,对不同高度、埋深和装药量的起爆点进行了模拟.模拟了爆炸稳定后边坡形态并分析了其稳定性.

1 颗粒流与 PFC3D

PFC3D 是 Itasca 公司 2008 年发布的一款高端产品,特别适合于复杂机理性问题研究^[15].它是利用显式差分算法和离散元理论开发的微/细观力学程序,从介质的基本粒子结构角度考虑介质的基本力学特性,并认为给定介质在不同应力条件下的基本特性主要取决于粒子之间接触状态的变化,适用研究粒状集合体的破裂和破裂发展问题,以及颗粒的流动等大位移问题.在岩土体工程中可以用来研究结构开裂、堆石材料特性和稳定性、矿山崩落开采、边坡解体、爆破冲击等一系列传统数值方法难以解决的问题.

2 工程实例及边坡模型构建

海州露天煤矿,位于阜新车站东南 3 km 处,在阜新市区南部太平区境内.全矿占地 26.82 km²,其中,采场 6 km²,排土场及排矸场 14.8 km²,工业广场 3.84 km²,住宅及生活设施 2.18 km².露天煤田的最大范围:西端最大边界为 W9+50 m,东端最大边界为 E29+50 m,东西长 3.9 km;南端最大边界为 S5+00 m,北端最大边界为 N13+00 m,南北宽 1.8 km.地表海拔标高为+165~+200 m,平均+175 m.地势东南高,西北低.露天矿设计开采深度为 350 m.

某边坡水平 (x 方向) 长 271 m,高 (z 方向) 157 m,地质条件复杂,从上到下斜向分布着砂岩、砂质泥岩、砂岩、煤层、泥岩和砂质页岩,倾角约为 -15° .由于 PFC3D 建模的特殊性,结合实际观测边坡(砂岩、砂质泥岩、砂岩)自由面裂缝间隔一般在 0.8 m 到 1.2 m 之间,故将颗粒 (ball) 半径设为 0.8~1.2 m 的正态分布.根据实际调查的煤层节理裂隙等特点将颗粒半径设为 0.5~1 m 的正态分布.考虑到泥岩和砂质页岩在矿场地平面以下,且在煤层以下,爆破对这两层岩体的影响较小,所以模型的下边界定为煤层与泥岩的交界面.在模拟过程中,可以清晰地看到波在颗粒之间的传播过程.当波传播到煤岩层时已经很小,即使在不同介质接触面会有一些反射,但相比于爆破影响范围内颗粒的运动是可以忽略不计的,所以将下边界以及水平方向的边界设置为固定且无反射面.相关参数如表 1 所示.

表 1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

No.	composition	thickness	density	Poisson's	elastic modulus	cohesion	friction coefficient	damping
		H/m	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ratio ν	E_c / GPa	σ_c / MPa	μ	λ
4	sandstone	90	2 600	0.22	39.25	29.32	0.72	0.30
3	sandy mudstone	40	2 500	0.25	29.73	0.43	0.57	0.19
2	sandstone	40	2 570	0.22	23.25	19.32	0.72	0.15
1	coal	20	1 200	0.40	1.43	10.00	0.36	0.20

边坡的模型建立使用通常的 PFC3D 的建模步骤,根据 PFC3D 用户手册 PROBLEM SOLV-

ING WITH PFC^{3D}中的介绍,岩土问题数值分析的一般步骤见该文献。

对于任意建模过程,具体来说包括:颗粒的生成、边界条件和初始条件的设置、选择接触模型和材料属性、加载、解算和模型修改、结果分析。国内对于 PFC3D 建模研究不多,文献[16]给出了建立尾矿库模型的颗粒流实际模型步骤:

- 1) 生成模型边界墙、边坡墙和土层间的分界墙,设置墙的刚度值;
- 2) 指定各土层的颗粒粒径范围和颗粒刚度,生成指定孔隙率的颗粒集合体;
- 3) 指定模型的初始应力值,使各土层的初始应力分布均匀;
- 4) 消除漂浮颗粒,使每个颗粒与周围颗粒或墙的接触至少有 3 个接触点;
- 5) 对各个土层的颗粒之间粘结强度和摩擦因数进行赋值;
- 6) 删除边坡墙和土层间的分界墙,增加重力加速度,使模型自运行到平衡状态;
- 7) 平衡后对模型中所有颗粒的速度、位移等进行清 0,为后面的稳定性计算做准备。

整个模型长(x 方向)337 m、高(z 方向)207 m,考虑到主要研究的是边坡剖面,且只在竖直方向(z 方向)受重力作用及颗粒直径等因素,确定模型宽(y 方向)为 2.5 m。模型示意如图 1 所示。图 1 中虚线框表示图 2 的对应区域。

爆破点的设置如图 2 所示。由于 PFC3D 中颗粒生成的随机性,爆破点的位置只能选择距预定位置最近的一个球,作为炸药位置。爆点 A_1, A_2, A_3 在下层砂岩内, B_1, B_2, B_3 在砂质泥岩内, C_1, C_2, C_3 在上层砂岩内,它们分别距所在层下构造面 10 m 左右。 A_1, B_1, C_1 距边坡自由面 5 m 左右, A_2, B_2, C_2 距边坡自由面 10 m 左右, A_3, B_3, C_3 距边坡自由面 20 m 左右。上述 9 个爆点都作 3 次爆破模拟,3 次的装药量(TNT)分别是 1 kg, 10 kg, 100 kg, TNT 当量为 4 230~4 836 kJ/kg,一般爆破取平均值 4 500 kJ/kg,论文中也取该值作为 TNT 当量。

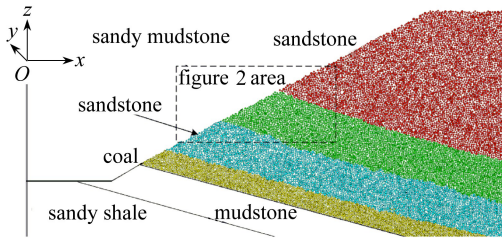


图 1 模型示意图

Fig.1 The model

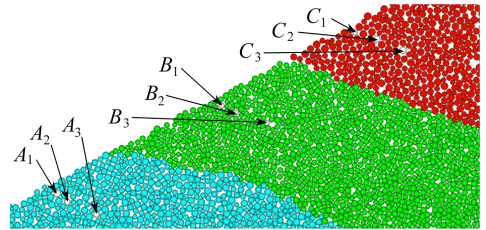


图 2 爆破点的设置

Fig.2 The setting of the blast point

3 爆破模型构建

为使读者了解应用 PFC3D 实现爆破模拟的全过程,先给出论文基于 PFC3D 进行爆破计算步骤的具体框架,如图 3 所示。

根据爆破区域划分:爆破压碎区、破裂区、振动区。压碎区半径 R_1 一般为 $3R \sim 7R$,而破裂区半径 R_2 一般为 $8R \sim 150R$,其中 R 为炮孔半径。从两个方面对 PFC3D 构造的边坡模型中颗粒进行爆破初始瞬间状态的设置,一是考虑炸药的能量转化为颗粒动能如何设置;二是考虑爆炸瞬间释放的气体等冲击波对岩体造成的碎裂和劣化作用。

假设炸药的能量转化为颗粒动能。设 $R = 0.07$ m,考虑到爆炸区域的划分,压碎区范围较小,为 $[0.21$ m, 0.59 m];振动区主要吸收残余能量起阻尼作用,不发生断裂;破裂区主要承受爆炸能量,碎裂并飞溅,炸药化学能转化为动能。故设压碎区、破裂区、振动区能量分配为 10%, 80%, 10%,如式(1)所示。由于爆炸位置颗粒直径在 0.8 m 到 1.2 m,所以可认为压碎区集中在

炸点的颗粒内,振动区不发生破碎所以所吸收的能量不转化为动能.综上,动能的分配主要集中在破裂区,在 PFC3D 中对颗粒施加速度是方便的,通过炸药的化学能转化为动能,根据动能公式,将每个颗粒得到的动能转化为颗粒的爆炸初始瞬间速度,即可以实现对爆炸的模拟.对于颗粒的动能分配,见图 4 及式(2),对颗粒速度的确定见图 4 及式(3).

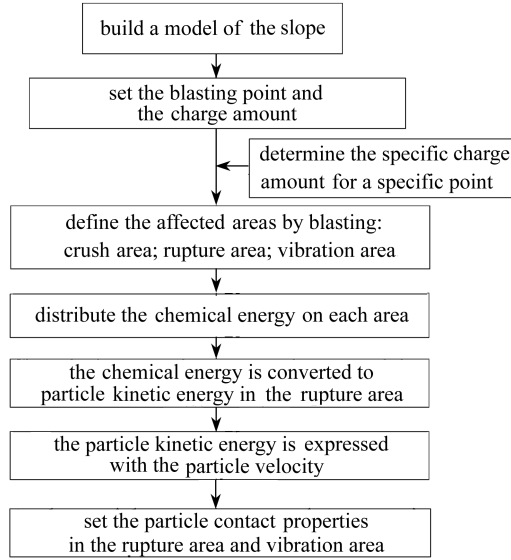


图3 爆破计算步骤的具体框架

Fig.3 The flowchart for blasting simulation

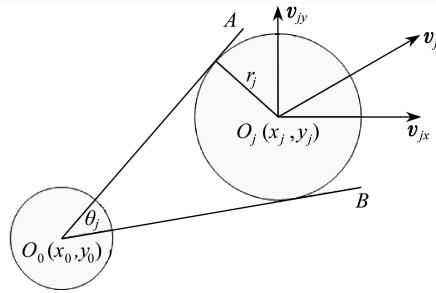


图4 颗粒与速度示意图

Fig.4 Schematic of the particle velocity

$$\begin{cases} J = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2, \\ J_k = J \times \alpha_k, \quad k = 1, 2, 3, \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J_j = J_k \times \beta_j, \\ \beta_j = \frac{\theta_j}{360}, \\ \theta_j = 2 \arctan \frac{r_j}{\sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} J_j = \frac{1}{2} m_j v_j^2, \\ v_j^2 = v_{jx}^2 + v_{jy}^2, \\ \begin{cases} v_{jx} = \frac{x_j - x_0}{r_j}; \\ v_{jy} = \frac{y_j - y_0}{r_j}; \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中, J 为爆炸总能量, J ; m_i, m_j 分别表示颗粒 i, j 的质量, kg ; v_i 表示颗粒 i 的速度, m/s ; J_k 表示 3 个区域分配的能量, $J, k = 1, 2, 3$ 分别表示压碎区、破裂区、振动区; α_k 表示 3 区域分配能量的系数, α_{1-3} 分别为 10%, 80%, 10%; J_j 表示某区域其中一个颗粒 O_j 分配的能量, J ; β_j 表示 O_j 分配能量的系数; θ_j 表示 O_j 对爆炸点的圆心角, ($^\circ$); r_j 表示 O_j 的半径, m ; (x_0, y_0) 表示爆炸点坐标; (x_j, y_j) 表示 O_j 的坐标; v_{jx}, v_{jy} 分别表示 v_j 在 x 和 y 方向上的分量, m/s 。

另一方面考虑爆炸瞬间释放的气体等冲击波对岩体造成的碎裂和劣化作用, 对破裂区范围内的颗粒之间链接力设为 0, 并调整颗粒的接触连接 (contact-bond) 和平行连接 (parallel-bond) 使其只承受压力, 不承受拉力和剪力. 对振动区只产生劣化作用, 分配其 10% 的能量对岩石结构的破坏通过设置表征岩石抗碎裂能力的链接属性进行模拟. 故根据颗粒位置到破裂区距离线性改变颗粒的链接属性, 靠近破裂区的颗粒链接属性减小且接近破裂区内颗粒属性, 远离破裂区的颗粒属性接近正常, 这里规定超过 $300R$ 的颗粒不受爆破影响. 对于压碎区由于其集中于一个颗粒所以分配其 10% 的能量未在模拟中设置, 即不参加爆破过程.

4 模拟结果分析

就上述爆炸模型进行模拟, 使用 A_3 爆炸点 (见图 5) 进行说明, A_3 点 100 kg TNT 爆炸过程较完整, 如图 6 所示.

图 6 中动力计算 1 步约等于 1 ms. 0 步时是对边坡内颗粒作初始速度矢量分配, 也可见图 5. 从爆炸点 A_3 向外辐射速度矢量, 接近爆破点的颗粒速度大, 外围颗粒的速度小. 这次爆炸当量较大, 使用 1 kg TNT 起爆后的效果截然不同, 速度矢量在模拟过程中会向外扩散, 然后向内, 经过几次震荡后平衡. 200 步时, 靠近边坡自由面的颗粒向外飞出, 速度矢量只受重力影响减小不明显; 其余部分方向的颗粒速度矢量减小明显, 颗粒向四周移动与外围颗粒挤压, 同时向外围颗粒传递能量. 500 步时坡面附近颗粒继续向外移动, 其余方向颗粒连续向四周运动, 将动能转化为弹性势能 (PFC3D 中颗粒不能破碎). 图 6 中显示起爆后一

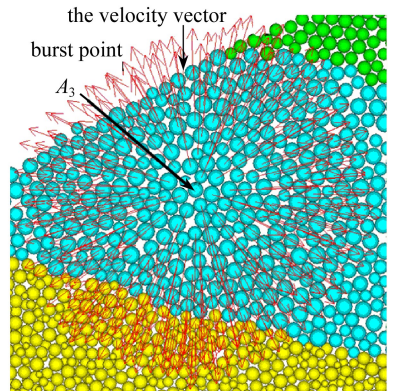


图 5 A_3 的爆炸初始速度矢量

Fig.5 The particles' initial velocity vectors for burst point A_3

定时间段内边坡内部爆炸空腔边缘颗粒速度矢量与起爆时的初速度矢量反向, 这是由于压缩到达极限后, 弹性势能释放转化为动能造成的, 这也是这个爆炸过程中的唯一一次速度矢量的震荡. 从 720 步到 1 340 步保持了颗粒的返回震荡特征, 颗粒向爆炸中心移动. 前 1 340 步主要是由于爆炸产生的能量促使颗粒移动产生的破坏, 这个过程中爆炸是主导能量, 由于时间较短, 重力几乎不起作用. 从 1 340 步开始, 爆炸能量逐渐消散, 爆点上方没有飞散出去的颗粒开始由于重力作用塌方. 由于爆炸冲击波在破裂区、振动区的震动, 使原有岩体结构发生破坏 (通

过模型进行调整),颗粒间的链接强度下降,所以颗粒的塌落不是整体性的,而是分层下落的,见图6中1340步~8090步.到14090步大范围的颗粒塌落已经结束,颗粒开始进行局部调整,主要是模拟滚石颗粒.图20590步上的3个明显下降颗粒是爆炸时,边坡附近飞散出去的颗粒掉落回来的(其他飞散颗粒有些掉落到模型的其他位置,有些飞出研究区域).图中26590步显示了最后的滚石颗粒的模拟,为显示清晰进行了放大,一些颗粒仍在滚落,砂岩坡脚部分已经坍塌,并有滚石出现.计算达到平衡,边坡自由面重新变得平缓,可以看出下层砂岩缺失了相当一部分颗粒,这些颗粒就是被炸除的.

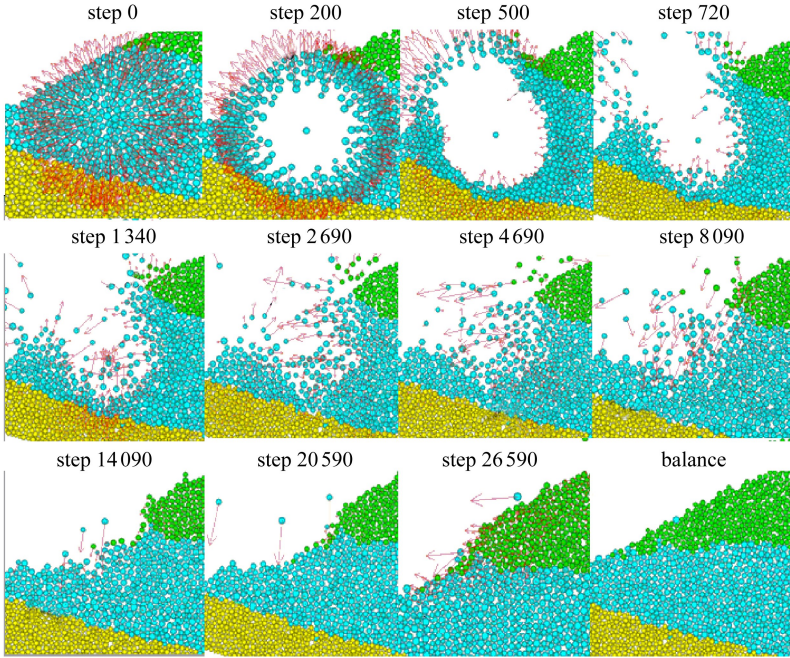


图6 爆破过程速度矢量图

Fig.6 The velocity vectors in a blasting process

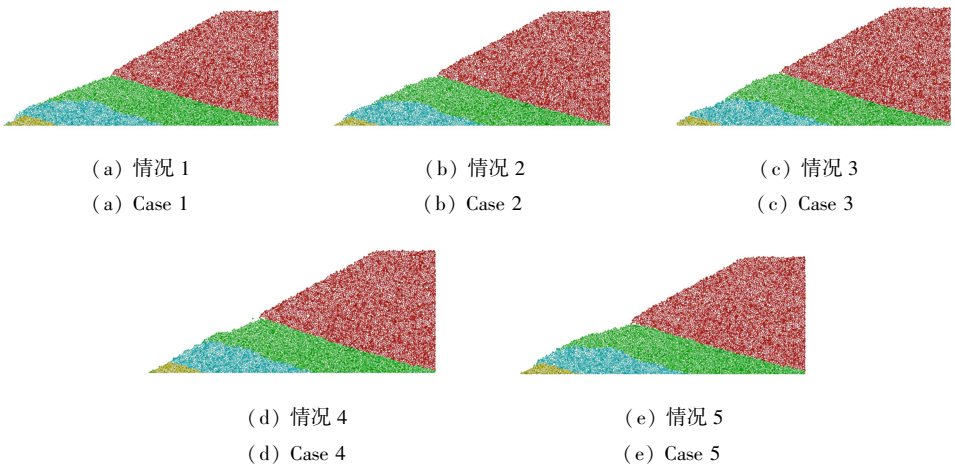


图7 不同情况下爆破后边坡形态总结

Fig.7 The summary of slope shapes after blasting under different conditions

综上所述,这个爆炸过程可以分为3个阶段,1340步前,主要是爆炸冲击起主导作用,有速度

矢量的回荡现象;1 340 步至 14 090 步是重力占优势的上覆岩层塌落过程;最后是颗粒下滑局部调整过程,趋于平衡。

使用上述模拟过程,分别对不同位置、埋深和装药量的爆破进行模拟,由于篇幅,将 27 种(9 个爆破点 \times 3 种装药量)爆破结果总结为如下 5 种情况,如图 7 所示。

图 7 中,各情况的描述如下:

(a) 下层砂岩滑落坍塌,砂质泥岩滑落坍塌,上层砂岩稳定,下层砂岩和砂质泥岩形成的稳定边坡较原边坡斜率减小。原因:爆炸破坏了原岩体内颗粒的链接强度,导致新形成的边坡斜率减小,出现条件: $A_{1-1}, A_{2-1}, A_{3-1}, A_{3-10}, C_{3-100}$,其中: A_{1-1} 表示爆炸点 A_1 炸药量为 1 kg TNT 的情况下,爆破计算稳定后边坡形态,下同。

(b) 下层砂岩滑落和砂质泥岩滑落坍塌不明显,但形成边坡表面凹凸,边坡斜率不变,上层砂岩稳定。原因:爆炸使原本排列整齐的砂岩和砂质泥岩颗粒重新排列,造成体积变大。出现条件: A_{1-10}, A_{2-10} 。

(c) 下层砂岩有凹陷,砂质泥岩滑落坍塌,上层砂岩稳定。原因:炸药过多使较多颗粒被炸飞散,导致体积减小。出现条件: $A_{1-100}, A_{2-100}, A_{3-100}$ 。

(d) 砂质泥岩凹陷,下层砂岩基本不变形,上层砂岩稳定。原因:炸药过多使较多颗粒被炸飞散,导致体积减小,上层砂岩轻度较高不发生坍塌。出现条件: $B_{1-100}, B_{2-100}, B_{3-100}, C_{1-100}$ 。

(e) 下层砂岩和砂质泥岩坍塌不明显,最终形成的边坡为圆弧形,上层砂岩稳定。原因:炸药爆炸产生能量多数被岩体吸收,颗粒飞出较少,颗粒重分布使体积增加。出现条件:其余爆破条件。

总体上说,上述各种爆破后上层砂岩是稳定的,即坡顶是稳定的。下层砂岩和砂质泥岩会受到一定程度的破坏,但是没有发生大面积的滑坡,在可控范围内。

5 结 论

论文尝试使用 PFC3D,基于能量守恒原理,将炸药的化学能转化为动能,对炸点附近颗粒施加初始速度,模拟爆炸过程,并使用该方法模拟了 27 种爆破,得到的主要结论如下:

1) 使用 PFC3D 结合爆炸区划理论的爆炸模拟是合理的。一是考虑炸药的化学能转化为颗粒动能的设置构建了模型,即式(1)~(3);二是考虑爆炸瞬间释放的气体等冲击波对岩体造成的碎裂和劣化作用,调整不同区域内的颗粒之间链接力、接触连接和平行连接。

2) 模拟了爆炸的详细过程。爆炸过程可以分为 3 个阶段:第 1 阶段主要是爆炸冲击起主导作用,有速度矢量的回荡现象;第 2 阶段是重力占优势的上覆岩层塌落过程;第 3 阶段颗粒下滑局部调整,最后平衡。在经历时间上,后一个阶段比前一个阶段大一个数量级。

3) 整个爆破过程中边坡整体是稳定的。对 27 种边坡爆破情况进行了模拟,总体上说,各种爆破后上层砂岩是稳定的,即坡顶是稳定的。下层砂岩和砂质泥岩会受到一定程度的破坏,但是没有发生大面积的滑坡,在可控范围内。

致谢 作者感谢辽宁工程技术大学研究生科研立项基金(5B2014016-01)的资助。

参考文献(References):

- [1] Donze F V, Bouehez J, Magnier S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1153-1163.
- [2] 高金石, 张继春. 爆破破岩机理动力分析[J]. 金属矿山, 1989, 9: 7-12. (GAO Jin-shi, ZHANG

- Ji-chun. The blasting mechanism of rock dynamic analysis[J]. *Metal Mine*, 1989, **9**: 7-12. (in Chinese))
- [3] Bhandari S. On the role of stress waves and quasi-static gas pressure in rock fragmentation by blasting[J]. *Acta Astronautica*, 1979, **6**(3/4): 365-383.
- [4] Paine A S, Please C P. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting — some analytical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, **31**(6): 699-706.
- [5] 陈朝玉, 黄文辉, 陈国勇. 爆破模拟对柔弱夹层顺层边坡的稳定性诊断[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010, **25**(3): 55-58. (CHEN Chao-yu, HUANG Wen-hui, CHEN Guo-yong. Blasting simulation of weak interlayer bedding slope stability diagnosis[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **25**(3): 55-58. (in Chinese))
- [6] 王建国, 栾龙发, 张智宇, 李祥龙, 凡春礼. 爆破震动对高陡边坡稳定影响的数值模拟研究[J]. 爆破, 2012, **29**(3): 119-122. (WANG Jian-guo, LUAN Long-fa, ZHANG Zhi-yu, LI Xiang-long, FAN Chun-li. Numerical simulation of blasting vibration effect on stability of high-steep slope [J]. *Blasting*, 2012, **29**(3): 119-122. (in Chinese))
- [7] 钟冬望, 吴亮, 陈浩. 爆炸荷载下岩质边坡动力特性试验及数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增1): 2964-2971. (ZHONG Dong-wang, WU Liang, CHEN Hao. Model test and numerical simulation study of dynamic characteristics of rock slope under blast loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(supp 1): 2964-2971. (in Chinese))
- [8] 刘磊. 岩质高边坡爆破动力响应规律数值模拟研究[D]. 硕士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2007. (LIU Lei. Numerical simulation research on dynamic response rules of high rock slope under explosion[D]. Master Thesis. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [9] 谢冰. 岩体动态损伤特性分析及其在基础爆破安全控制中的应用[D]. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010. (XIE Bing. Analysis of characteristics of rock dynamic damage and application of safty control in foundation pit excavation by blasting[D]. PhD Thesis. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Seiences, 2010. (in Chinese))
- [10] 王洪德, 马云东, 崔铁军. 地铁施工过程数值仿真及安全性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. (WANG Hong-de, MA Yun-dong, CUI Tie-jun. *The Subway Construction Process of Numerical Simulation and Safety Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [11] 崔铁军, 马云东. 基于泛函网络的周期来压预测方法研究[J]. 计算机科学, 2013, **40**(6A): 242-246. (CUI Tie-jun, MA Yun-dong. Prediction of periodic weighting based on optimized functional networks[J]. *Computer Science*, 2013, **40**(6A): 242-246. (in Chinese))
- [12] 崔铁军, 马云东. 基于差异进化支持向量机的坑外土体沉降预测[J]. 中国安全科学学报, 2013, **23**(1): 83-89. (CUI Tei-jun, MA Yun-dong. Prediction of soil settlement outside pit based on DE and SVM[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, **23**(1): 83-89. (in Chinese))
- [13] 崔铁军, 马云东, 白润才. 基于 ANN 耦合遗传算法的爆破方案选择方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, **23**(2): 64-68. (CUI Tei-jun, MA Yun-dong, BAI Run-cai. Selection of blast scheme based on coupling of genetic algorithm and artificial neural network[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, **23**(2): 64-68. (in Chinese))

- [14] 王洪德, 崔铁军, 马云东. 基于差异进化算法的爆破震速参数识别与优化[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(5): 17-23. (WANG Hong-de, CUI Tie-jun, MA Yun-dong. Blasting vibration velocity parameters recognition and optimization based on differential evolution algorithm[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(5): 17-23. (in Chinese))
- [15] Itasca. PFC 概况[EB/OL]. <http://itasca.cn/ruanjian.jsp?sclassid=106&classid=18>, 2010.
- [16] 陈宜楷. 基于颗粒流离散元的尾矿库坝体稳定性分析[D]. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学, 2012. (CHEN Yi-kai. The tailings dam stability analysis based on the discrete element particle flow[D]. Master Thesis. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese))

Blasting Process Simulation and Stability Study of an Open Mine Slope Based on PFC3D

CUI Tie-jun^{1,2}, MA Yun-dong², WANG Lai-gui³

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P.R.China;

2. Tunnel & Underground Structure Engineering Center of Liaoning Province, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, P.R.China;

3. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P.R.China)

Abstract: To study the blasting process in an open mine slope, based on the theory of energy conservation, it was assumed that all the chemical energy released during explosion was transmitted to the surrounding rock body within a certain range and partially converted to kinetic energy, then the explosion energy was transferred and absorbed in the fractured and damping rock until the ultimate balance at the end of this dynamic process. The PFC3D simulation platform was employed to calculate the single-hole blasting processes with different heights, buried depths and charge amounts in the open mine slope, and the slope stability after blasting was discussed. The simulation results show that: the blasting process can be divided into 3 phases. In the first phase, the explosion impact plays a leading role, accompanied by the reverberation of the velocity vectors. In the second phase, gravity is the dominant factor for the collapse of the overburden rock. In the third phase, some particles roll or slip down and end in balance. The time length of the following phase is bigger than that of the preceding one by almost 1 order of magnitude. In general, the upper sandstone is stable after all sorts of blasting, i.e. the slope top is stable. The lower sandstone and sandy mudstone are subject to a certain degree of damage but still in control.

Key words: open mine slope; blasting; particle flow theory; PFC3D; stability

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (51274110; 50434020; 10972096)