

# 高台阶抛掷爆破速度规律的数值模拟\*

黄永辉<sup>1</sup>, 刘殿书<sup>2</sup>, 李胜林<sup>2</sup>, 李祥龙<sup>3</sup>, 王家磊<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 为了获得高台阶抛掷爆破作用下岩石的抛掷速度变化规律, 结合现场实验, 采用理论分析、高速摄影技术、数值计算方法开展研究。研究表明, 炮孔内炸药起爆后, 坡面岩石抛掷初速度达到最大值的时间在 93~105 ms 之间, 最大抛掷初速度在 18~28 m/s 之间; 坡面岩石的最大抛掷初速度在延炮孔内传爆方向呈增长、稳定、下降的趋势; 岩石抛掷运动过程的最后阶段呈自由落体运动, 个别岩块的运动速度存在增减现象, 主要是由于岩体破碎后岩块间存在的相互碰撞作用; 高速摄影实验结果验证了数值计算结果的正确性、RHT 材料本构模型及参数在高台阶抛掷爆破数值计算过程中的可用性。

**关键词:** 爆炸力学; 速度场; RHT 材料本构模型; 高台阶抛掷爆破; 高速摄影

**中图分类号:** O389; TU313

**国标学科代码:** 1303599

**文献标志码:** A

高台阶抛掷爆破技术主要应用在大型露天矿生产中, 能大幅度降低剥离成本, 提高露天矿的生产水平。对高台阶抛掷爆破技术有了大量研究, 在爆堆形态预测方面应用较成熟的理论为弹道理论模型和 WEIBULL 模型<sup>[1-2]</sup>, 然而高台阶抛掷爆破技术成功与否的关键在于岩石抛掷过程中的最大起始速度。由于爆破过程的复杂性, 对爆破现象进行详细的观测比较困难, 利用数值模拟技术, 可以再现爆破过程。软件 AUTODYN 在求解碰撞冲击、爆炸、冲压成型等瞬态问题方面有独到的优势, 在相关领域已经得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。本文中, 选用软件 AUTODYN, 算法上采用光滑粒子流体动力学方法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)和有限元法(finite element method, FEM), 对高台阶抛掷爆破进行模拟, 同时通过现场高速摄影设备及其技术方法, 分析爆炸作用下的台阶坡面岩石速度场分布特征, 并对数值计算过程中所采用的 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)材料本构模型的实用性及其参数的可靠性进行验证。

## 1 计算模型及材料参数

### 1.1 模型构建

以哈尔乌素露天矿高台阶抛掷爆破工程为背景, 构建二分之一等比例的三维高台阶抛掷爆破模型。模型中高台阶坡面及地表面部分定义为自由边界, 其他与岩层接触部位定义为无反射边界; 模型的主体部分采用粒子单元进行网格划分, 考虑粒子单元无法定义边界条件, 在需要定义无反射边界条件的区域构建有限元单元, 采用 SPH-FEM 耦合的方法进行边界约束, 再对有限元边界定义无反射边界条件。台阶高度 35 m, 坡面延伸方向长 20 m, 坡面倾角 65°, 坡面背侧方向上坡顶及坡底长度分别为 17.00 和 33.29 m; 炮孔布置方面, 模型中构建一个半炮孔, 炮孔采用与台阶坡面平行的倾斜炮孔, 直径 310 mm, 孔距 11 m, 炮孔至坡面的水平距离为 9 m; 炮孔填塞长度 7 m; 起爆方式采用孔底起爆。在与对称面交叉部位的台阶坡面上, 由上向下依次在距离台阶顶端 7、22、30 m 处选定 3 个高斯记录点。有限元及其他部分布置情况、采用软件 AUTODYN 构建的二分之一三维模型见图 1。

\* 收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304087); 云南省级人培项目(KKSY201404056, KKSA201121083)

作者简介: 黄永辉(1981—), 男, 博士, 讲师。

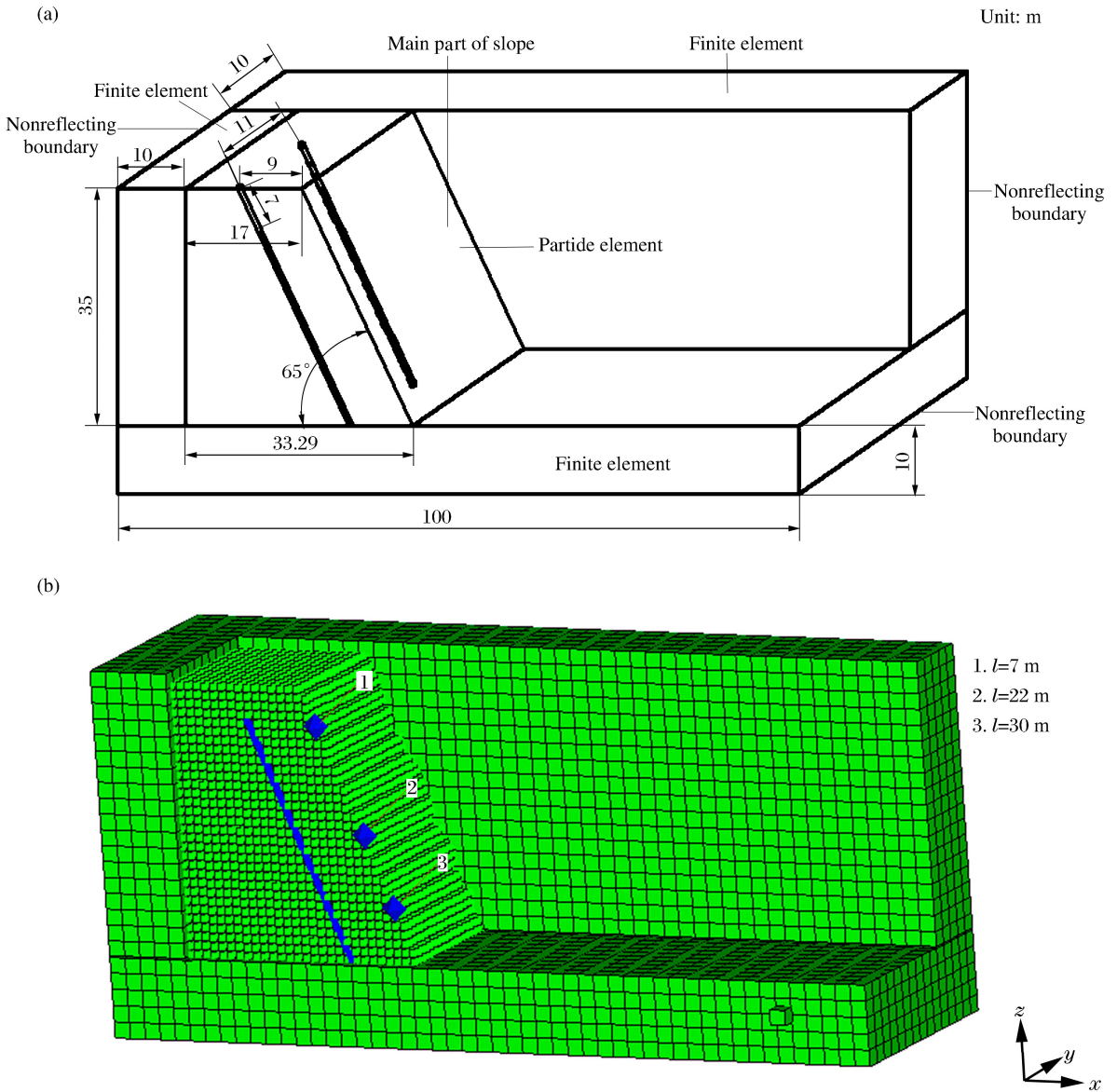


图 1 高台阶抛掷爆破的三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of high bench cast blasting

### 1.2 本构模型及参数

RHT 材料本构模型综合考虑了在材料破坏过程中所具有的应变硬化、应变率敏感性、压力依赖性和压缩损伤软化等特性,考虑了压静水和拉静水区应变速率敏感性的差异性,引入了偏应力张量第三不变量对破坏面形状的影响,采用了不同的动力放大系数。另外,RHT 模型还引入了拉伸损伤,拉伸和压缩损伤均取决于等效塑性应变,与材料塑性体积变化无关。RHT 模型可应用到弹体贯穿、侵彻、爆炸等数值模拟研究中。该模型引入了最大失效面、弹性极限面和残余失效面 3 个控制破坏面<sup>[5-7]</sup>。失效方程为:

$$\sigma_{eq}^*(p, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_{TXC}^*(p) R_3(\theta) F_{rate}(\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

式中:  $Y_{TXC}^*(p)$  表示压缩子午线上的等效应力强度,  $F_{rate}(\dot{\epsilon})$  为应变率强化因子, 分别为:

$$Y_{TXC}^*(p) = A (p^* - p_{spall}^* F_{rate}(\dot{\epsilon}))^N \quad (2)$$

$$F_{rate}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\alpha & p > \frac{f_c}{3}, \quad \dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \\ \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\alpha & p > \frac{f_t}{3}, \quad \dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

$R_3(\theta)$ 是相似角  $\theta$  以及偏平面上失效曲线在拉、压子午线处的偏应力的比  $Q_2$  的函数,可以描述失效强度与偏应力张量第二不变量  $J_2$ 、第三不变量  $J_3$  及净水压力有关的实验结果:

$$R_3(\theta) = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2 - 1)(4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta + 5Q_2^2 - 4Q_2)^{\frac{1}{2}}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta + (1 - Q_2^2)^2} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{\frac{1}{2}}}\right) \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$$

$$Q_2 = \frac{r_t}{r_c} = Q_0 + B_Q P^* \quad 0.51 \leq Q_2 \leq 1.00$$

式中:量纲一层裂强度  $p_{spall}^* = p_{spall}/f_c$ ,  $p_{spall}$  为层裂强度;  $r_t$  是拉子午线处的偏应力,  $r_c$  是压子午线处的偏应力,  $B_Q$  是压力影响系数,  $A$ 、 $N$ 、 $\alpha$ 、 $\delta$  和  $Q_0$  是材料常数。

计算中采用的岩石 RHT 本构模型失效强度参数分别为:  $A = 1.78$ ,  $N = 0.60$ ,  $p_{spall}^* = 0.1$ ,  $Q_0 = 0.69$ ,  $B_Q = 0.01$ , 其他参数采用文献[5]中的低强度混凝土参数。

炸药采用铵油炸药,结合 JWL 状态方程,模拟炸药爆炸过程中的压力与体积的关系:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{\frac{R_1}{\gamma}} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{\frac{R_2}{\gamma}} + \omega\rho e \quad (5)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为实验拟合参数;  $e$  为比内能;  $\eta = \rho/\rho_0$ ,  $\rho_0$  为初始密度。采用的炸药材料参数见文献[8]。

## 2 数值计算结果

运用软件 AUTODYN,按上述模型尺寸及本构参数构建模型并进行计算,获得了高台阶坡面体中岩石在抛掷过程中的形态和速度变化规律。在模型的对称面部位进行切片处理,提取坡面上设置的 3 个高斯点的速度时程曲线,如图 2 所示;提取 6 个时间点的岩石抛掷形态及速度云图,如图 3 所示。

对计算结果进行分析研究后得到如下结论:

(1)起爆点设置在孔底部位,起爆方式采用反向起爆,整个炮孔内的炸药由起爆点开始起爆至爆轰波传递完成耗时约 10 ms,和装药长度与炸药爆轰速度的比保持一致。

(2)起爆后,台阶坡面岩石由静止到产生明显位移时历时约 50 ms,大约在 100 ms 时抛掷速度达到最大,最大初速度在 22~30 m/s 之间,3 个高斯点的最大初速度为 22.5、29.6、24.1 m/s。

(3)台阶坡面岩石运动初期,各个测点的运动速度差别不大,随着时间的推移,在速度增大过程中,台阶中部岩石移动速度逐渐高出上下两端,致使岩体整体运动状态呈现中间鼓起、两端略低的形态。

(4)台阶坡面岩石最大水平抛掷距离约 60 m,整个抛掷过程历时约 3.95 s。

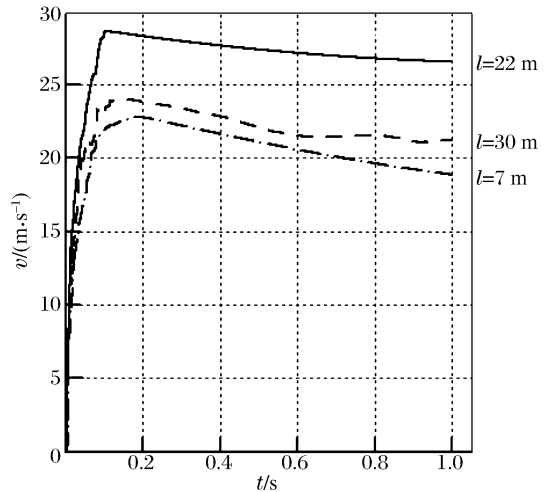


图 2 高斯点速度

Fig. 2 The velocity curves of Gauss points

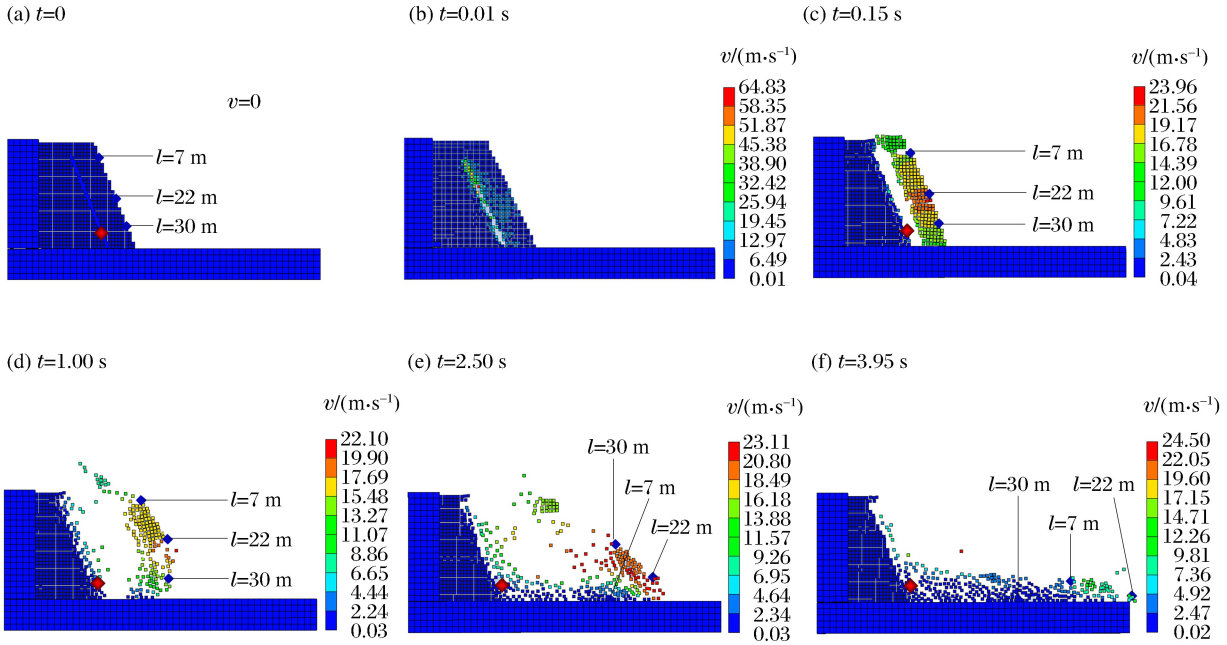


图 3 起爆后不同时间岩石运动形态

Fig. 3 Variety of damage and deformation of rock when different sequence

### 3 高速摄影实验

#### 3.1 实验

哈尔乌素露天矿爆破破区范围  $80 \text{ m} \times 670 \text{ m}$ , 高台阶抛掷爆破现场实验所用的高速摄影设备为 Mega Speed Corp 公司 MS 系列 CCD 和 CMOS 高速摄影机。为保证人员和仪器的安全, 高速摄影机架设点布置在东观礼台附近(见图 4(a)), 采用手持式 GPS 获取测点和摄影设备布设点的三维坐标, 确定观测距离为  $1\ 073 \text{ m}$ , 摄影主光轴倾角和斜角分别为  $7.01^\circ$  和  $17.37^\circ$ 。地面标志点作为高速摄影实验的主要参照物, 为保证在爆破过程中不产生大地位移, 在高速摄影设备一侧距爆区边界  $50 \text{ m}$  处, 在地面树立旗子, 旗子大小  $120 \text{ cm} \times 180 \text{ cm}$ (见图 4(b))。

(a) High-speed camera

(b) Ground mark



图 4 摄影机架设及地面标志点

Fig. 4 Erect high-speed cameras and ground mark

### 3.2 结果

通过现场高速摄影实验,采用图像分析软件 AVI Player,通过 Grid Setings 功能在图像上设置网格,图像分析中采用框标坐标系,以左右两边的中点连线为  $x$  轴,上下两边的中点连线为  $y$  轴,以两联系交点为原点。读取观测点的坐标,每个观测点及其坐标测试结果见表 1。

表 1 观测点坐标  
Table 1 Imagecoordinates of observation points

$t/\text{ms}$	$l=7\text{ m}$		$l=22\text{ m}$		$l=30\text{ m}$	
	$x/\text{m}$	$y/\text{m}$	$x/\text{m}$	$y/\text{m}$	$x/\text{m}$	$y/\text{m}$
42	37.65	17.57	37.82	13.40	39.36	10.92
95	37.95	17.85	38.15	13.87	39.65	11.25
203	38.25	18.09	38.37	14.05	39.88	11.46
310	38.60	18.37	38.80	14.20	40.01	11.67
428	38.92	18.60	39.12	14.50	40.50	11.91
541	39.21	18.75	39.38	14.73	40.75	12.20
655	39.39	19.05	39.63	15.05	41.17	12.35
778	39.90	19.37	39.95	15.31	41.60	12.55
889	40.55	19.65	40.38	15.43	41.79	12.75
1 009	40.90	19.87	40.80	15.62	42.25	12.93

运用高速摄影分析原理及方法<sup>[9]</sup>,对高速摄影录像分析后得出如下结论:

(1)根据高速摄影过程,将台阶坡面岩石抛掷运动过程分为静止、加速运动和自由落体运动 3 个阶段。

(2)根据测点、地面标志点及拍摄点的空间坐标及记录时间的关系,获得了台阶坡面上 3 个记录点的位移及速度变化规律,如图 5 所示。台阶坡面岩石抛掷过程中,由静止到产生明显移动所需时间在 33~42 ms 之间,达到最大抛掷速度的时间在 93~105 ms 之间,最大初速度在 18~28 m/s 之间。

(3)岩石抛掷速度达到最大值后,呈现带有起伏波动的下降趋势,这主要由岩体破碎后岩块间的相互碰撞作用引起的。

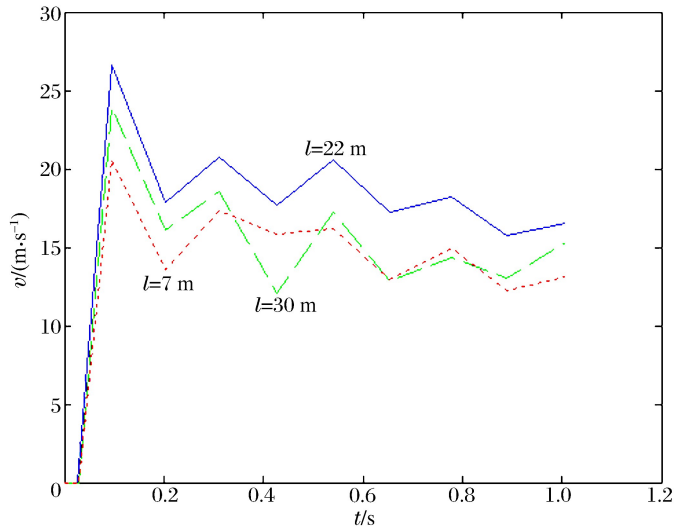


图 5 高速摄影速度曲线

Fig. 5 The velocity curves from high-speed photography

### 4 结论

(1)构建了高台阶抛掷爆破的三维数值计算模型,运用软件 AUTODYN 对岩石抛掷过程进行了数值模拟,模拟结果与高速摄影实验结果非常接近,成功获得了高台阶抛掷爆破岩石抛掷速度变化规律。

(2)采用高速摄影技术,对哈尔乌素露天矿高台阶抛掷爆破工程进行现场高速摄影实验,得到了爆炸瞬间完整的岩石鼓包过程,将台阶坡面岩石抛掷运动过程分为静止、加速运动和自由落体运动 3 个阶段。岩石抛掷过程中,台阶中部岩石移动速度逐渐高出上下两端,使岩体整体运动状态呈现中间鼓起、两端略低的形态。

(3)通过对标记点的研究分析,获得了岩石鼓包过程中的最大抛掷速度,与数值计算结果一致,验证了数值计算结果的正确性。说明 RHT 本构模型在高台阶抛掷爆破数值模拟中具有实用性。

## 参考文献:

- [1] 李祥龙,何丽华,栾龙发,等.露天煤矿高台阶抛掷爆破爆堆形态模拟[J].煤炭学报,2011,36(9):1457-1462.  
Li Xiang-long, He Li-hua, Ruan Long-fa, et al. Simulation model for muckpile shape of high bench cast blasting in surface coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(9):1457-1462.
- [2] 尤浩生.台阶爆破的计算机模拟[D].北京:北京科技大学,1997.
- [3] AUTODYN Theory Manual[Z]. Horsham, UK: Century Dynamics Ltd, 2003.
- [4] 杨秀敏.爆炸冲击现象数值模拟[M].合肥:中国科技大学出版社,2010.
- [5] Hansson H, Skoglund P. Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT material model[R]. Tumba, Sweden: Swedish Defence Research Agency, 2002.
- [6] Lu Yong, Wang Zhong-qi, Chong K. A comparative study of buried structure in soil subjected to blast loads using 2D and 3D numerical simulations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005,25(4):275-288.
- [7] Brara A, Klepaczko J R. Fracture energy of concrete at high loading rates in tension[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(3):424-435.
- [8] 佟强.中深孔掏槽爆破与矸石块度控制模拟试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [9] 于起峰.摄像测量学原理与应用研究[M].北京:科学出版社,2009.

Numerical simulation on pin-point blasting of sloping surface<sup>\*</sup>

Huang Yong-hui<sup>1</sup>, Liu Dian-shu<sup>2</sup>, Li Sheng-lin<sup>2</sup>, Li Xiang-long<sup>3</sup>, Wang Jia-lei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to obtain the casting speed of rock in pin-point blasting of sloping surface, a research was carried out by the field test, theoretical analysis, the high-speed photography and numerical simulation. The results of research show that maximum casting speed of rock was in the range of 18–28 m/s which was reached in 93–105 ms after detonation; along the direction of detonation propagating, maximum casting speed of rock increased to a platform firstly, then declined with the same motion resistance; in the end of pin-point blasting, the rock fall as free-faller, and the casting speed of rock vibrated due to the collision of rock; the process of pin-point blasting of sloping surface was simulated with the RHT constitutive model and parameters assorted. The result of numerical simulation was proved by the measurement of high-speed photography

**Key words:** mechanics of explosion; velocity field; RHT material constitutive model; pin-point blasting of sloping surface; high-speed photography

\* Received 22 November 2012; Revised 5 June 2014

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51304087)

Corresponding author: Huang Yong-hui, 8176309@qq.com