

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202209020



# 台阶爆破模型试验下破碎岩石 抛掷速度规律分析

陈春超<sup>1</sup>, 陈士海<sup>1</sup>, 张智宇<sup>2</sup>, 曾凡福<sup>3</sup>, 苏松<sup>4</sup>

1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710000;
4. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250000

**摘要:** 为了研究台阶爆破破碎岩石抛掷速度的主要影响因素与变化规律, 采用量纲分析法确定破碎岩石抛掷速度的主要影响因素, 并借助高速摄影系统与台阶爆破模型试验研究不同影响因素下破碎岩石抛掷速度的变化规律. 结果表明: 破碎岩石抛掷速度的主要影响因素为炸药单耗、最小抵抗线与炸药量的关系( $W^3/Q$ )和不耦合系数, 抛掷速度对炸药单耗最为敏感,  $W^3/Q$  与不耦合系数次之; 高速摄影图像显示, 当爆破作用时间为 0.5 ms 时, 台阶自由面岩石出现位移, 当爆破作用时间为 2.0 ms 时, 在爆炸应力波作用下, 台阶自由面出现裂缝, 破碎岩石的运动形态可分为鼓包运动阶段与抛掷运动阶段, 二者之间存在明显的过渡阶段; 炸药单耗、 $W^3/Q$ 、不耦合系数与抛掷速度间存在明显的非线性关系, 抛掷速度随炸药单耗的增加呈指数函数递增, 且存在临界炸药单耗使破碎岩石的抛掷速度出现激增, 抛掷速度随  $W^3/Q$ 、不耦合系数的增大呈幂函数递减.

**关键词:** 破碎岩石; 台阶爆破; 量纲分析; 抛掷速度; 高速摄影系统; 模型试验

中图分类号: TD 235.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)02-0157-09

## Analysis of Throwing Velocity Law of Broken Rocks in Bench Blasting Model Experiment

CHEN Chunchao<sup>1</sup>, CHEN Shihai<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyu<sup>2</sup>,  
ZENG Fanfu<sup>3</sup>, SU Song<sup>4</sup>

1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. China Railway First Group Limited Company, Xi'an 710000, China;
4. China Railway 14th Bureau Group Limited Company, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In order to study the main influencing factors and variation law of the throwing velocity of broken rocks in bench blasting, the dimensional analysis method is used to determine the main influencing factors of the throwing velocity of broken rocks. The high-speed photography system and bench blasting model experiment are used to study the variation law of the throwing velocity of broken rocks under different influencing factors. The results show that the main influencing factors of the throwing velocity of broken rocks are unit explosive consumption, the relation between minimum resistance line and explosive quantity ( $W^3/Q$ ), and un-

收稿日期: 2022-09-29

通信作者: 陈士海(1964-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾的研究. E-mail: cshblast@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672112, 52064025)

coupling coefficient, the most sensitive factor of the throwing velocity is unit explosive consumption, the second factors are  $W^3/Q$  and uncoupling coefficient. The high-speed photography images show that when the blasting action time is 0.5 ms, the rock displacement appears on the bench free surface; when the blasting action time is 2.0 ms, under the action of the explosive stress wave, the crack appears on the bench free surface, and the movement form of the broken rocks can be divided into the bulging movement stage and the throwing movement stage, there is an obvious transition stage between the two movement stage. There is an obvious nonlinear relationship among unit explosive consumption,  $W^3/Q$ , uncoupling coefficient and throwing velocity, the throwing velocity increases in exponential function with the increase of unit explosive consumption, and there is a critical unit explosive consumption to increase sharply the throwing velocity of broken rocks, the throwing velocity decreases in power function with the increase of  $W^3/Q$  and the decoupling coefficient.

**Keywords:** broken rock; bench blasting; dimensional analysis; throwing velocity; high-speed photography system; model experiment

在工程爆破领域,破碎岩石的抛掷运动直接影响抛掷爆破的生产效率与生产安全.爆破参数作为破碎岩石抛掷运动的主要影响因素,合理的爆破参数能够获得理想的爆堆形态,缩短铲装时间,提高铲装效率,而不合理的爆破参数易影响铲装效率,严重时将出现爆破飞石,造成爆破安全事故.

有关破碎岩石运动规律的研究,最早可追溯至40多年前.1980年,梁润<sup>[1]</sup>将流体运动比拟破碎岩石的推移运动,并结合能量守恒定律提出破碎岩石抛掷速度的预测公式.随后,不少学者开始研究破碎岩石的运动形态<sup>[2-7]</sup>.近年来,随着数值模拟技术的发展,鼓包运动机理有了进一步的发展<sup>[8-18]</sup>.许多学者借助新手段对破碎岩石的抛掷运动进行研究.崔新男等<sup>[19]</sup>基于图像数字方法建立破碎岩石抛掷观测系统,提供破碎岩石抛掷距离的有效预测手段.周伟等<sup>[20]</sup>通过数学手段建立破碎岩石抛掷速度的反演模型,并通过流场抛掷速度理论验证模型的正确性.目前,现有的研究多集中于鼓包运动规律与抛掷速度预测,且抛掷速度预测的计算十分繁琐.基于此,本文对台阶爆破模型试验下破碎岩石抛掷速度的规律进行分析.

## 1 抛掷速度影响因素分析

采用量纲分析法对破碎岩石的抛掷运动进行分析,进一步确定破碎岩石运动规律的主要影响因素.选取力量纲 $[F]$ 、长度量纲 $[L]$ 、时间量纲 $[T]$ 作为基本量纲系统,台阶模型试验的相似系统可描述为

$$v = \varphi(W, L_b, d_b, h, L_d, d_d, s, \rho_b, \sigma, E, Z, t, g, \rho_d, D, Q, q, n). \quad (1)$$

式(1)中: $v$ 为破碎岩石的抛掷速度; $W$ 为最小抵抗线; $L_b$ 为炮孔深度; $d_b$ 为炮孔直径; $h$ 为台阶高度; $L_d$ 为药柱的长; $d_d$ 为药柱直径; $s$ 为破碎岩石的抛距; $\rho_b$ 为岩体密度; $\sigma$ 为岩体强度; $E$ 为岩体弹性模量; $Z$ 为岩体波阻抗; $t$ 为爆破作用时间; $g$ 为重力加速度; $\rho_d$ 为炸药密度; $D$ 为炸药的爆速; $Q$ 为炸药量; $q$ 为炸药单耗; $n$ 为不耦合系数; $\varphi$ 为相关函数.

选取  $Q(FL^{-1}T^2)$ ,  $D(LT^{-1})$ ,  $d_b(L)$  为基本量纲,根据  $\pi$  定理,有

$$\pi = \frac{v}{Q^\alpha D^\beta d_b^\gamma}. \quad (2)$$

式(2)中: $\alpha, \beta, \gamma$ 为待定系数.

根据量纲的齐次定理,可得

$$v = LT^{-1} = (FL^{-1}T^2)^\alpha (LT^{-1})^\beta L^\gamma. \quad (3)$$

由此可得  $\alpha=0, \beta=1, \gamma=0$ , 则

$$\pi_1 = \frac{v}{D}. \quad (4)$$

同理可得  $\pi_2 = \frac{W}{d_b}$ ;  $\pi_3 = \frac{L_b}{d_b}$ ;  $\pi_4 = \frac{h}{d_b}$ ;  $\pi_5 = \frac{L_d}{d_b}$ ;  $\pi_6 = \frac{d_d}{d_b}$ ;  $\pi_7 = \frac{s}{d_b}$ ;  $\pi_8 = \frac{\rho_b}{Qd_b^{-3}}$ ;  $\pi_9 = \frac{\sigma_c}{QD^2 d_b^{-3}}$ ;  $\pi_{10} =$

$$\frac{\sigma_t}{QD^2 d_b^{-3}}; \pi_{11} = \frac{\sigma_\tau}{QD^2 d_b^{-3}}; \pi_{12} = \frac{E}{QD^2 d_b^{-3}}; \pi_{13} = \frac{Z}{QD^2 d_b^{-3}}; \pi_{14} = \frac{t}{Dd_b^{-1}}; \pi_{15} = \frac{g}{D^2 d_b^{-3}}; \pi_{16} = \frac{\rho_d}{Qd_b^{-3}}; \pi_{17} =$$

$$\frac{q}{QD^4 d_b^{-7}}; \pi_{18} = \frac{n}{Q^0 D^0 d_b^0}; \sigma_c, \sigma_t, \sigma_\tau \text{ 分别为岩石的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度.}$$

将  $\pi_2 \sim \pi_{18}$  带入式(1), 有

$$\frac{v}{D} = \left[ \frac{W}{d_b}, \frac{L_b}{d_b}, \frac{h}{d_b}, \frac{L_d}{d_b}, \frac{d_d}{d_b}, \frac{S}{d_b}, \frac{\rho_b}{Qd_b^{-3}}, \frac{\sigma_c}{QD^2 d_b^{-3}}, \frac{\sigma_t}{QD^2 d_b^{-3}}, \frac{\sigma_\tau}{QD^2 d_b^{-3}}, \frac{E}{QD^2 d_b^{-3}}, \frac{Z}{QD^2 d_b^{-3}}, \frac{t}{Dd_b^{-1}}, \frac{g}{D^2 d_b^{-3}}, \frac{\rho_d}{Qd_b^{-3}}, \frac{q}{QD^4 d_b^{-7}}, \frac{n}{Q^0 D^0 d_b^0} \right] \quad (5)$$

由于不同无量纲项的乘积仍为无量纲<sup>[21-22]</sup>, 对  $\pi_2, \pi_5, \pi_8$  和  $\pi_{18}$  做乘积运算, 可得新的无量纲  $\pi_{19}$  为

$$\pi_{19} = \pi_2^3 \pi_5 \pi_8 \pi_{18} = \left(\frac{W}{d_b}\right)^3 \left(\frac{L_d}{d_b}\right) \left(\frac{\rho_b}{Qd_b^{-3}}\right) \left(\frac{n}{Q^0 D^0 d_b^0}\right) = \frac{W^3 \rho_b L_d n}{Qd_b} \quad (6)$$

则认为  $v$  与  $W^3 \rho_b L_d n / Qd_b$  存在函数关系, 可将函数关系式写为

$$v = D\varphi\left(\rho_b, n, \frac{W^3}{Q}, \frac{L_d}{d_b}\right) \quad (7)$$

当采用耦合装药时, 可将  $L_d/d_b$  视为长径比. 结合工程实际可知, 炮孔直径通常是确定的, 无法随意改变, 若要改变装药结构的长径比, 则通过调整装药长度实现. 在耦合装药和炮孔直径不变的条件下, 装药量也随装药长度的变化而变化. 因此, 可将长径比问题转化为炸药单耗问题. 综上所述, 破碎岩石的抛掷运动与炸药单耗、最小抵抗线与炸药量间的关系( $W^3/Q$ )和不耦合系数有着密切的关系.

## 2 模型试验设计

### 2.1 模型的制作

为了研究破碎岩石的运动规律, 根据量纲分析的结果, 将  $q, W^3/Q, n$  等 3 个参数作为试验的控制变量. 台阶原型高度为 10.00 m, 炮孔直径为 0.15 m, 模型高度为 0.65 m, 当装药结构的长径比大于 10 时, 炮孔的几何相似对试验结果影响不大<sup>[23]</sup>. 因此, 模型试验几何相似比为 15.4 : 1.0. 试验分两次进行, 试验 1 为炸药单耗台阶爆破模型试验与  $W^3/Q$  台阶爆破模型试验, 试验 2 为不耦合装药台阶爆破模型试验. 试验 1 的模型尺寸(长×宽×高)为 0.60 m×0.60 m×0.65 m, 采用对角布孔. 在试验 1 开展过程中, 第 1 个炮孔爆破后形成的裂纹过长, 改变了后续试验炮孔的最小抵抗线. 因此, 在试验 1 的基础上, 对试验 2 的模型尺寸进行调整, 增大模型尺寸, 避免台阶模型的最小抵抗线发生改变. 试验 2 的台阶模型尺寸(长×宽×高)为 1.00 m×1.00 m×0.65 m, 采用混凝土材料(各材料的质量比为  $m(\text{水泥}) : m(\text{砂}) : m(\text{水}) = 1 : 5 : 1$ )进行浇筑. 台阶模型与炮孔示意图, 如图 1 所示.

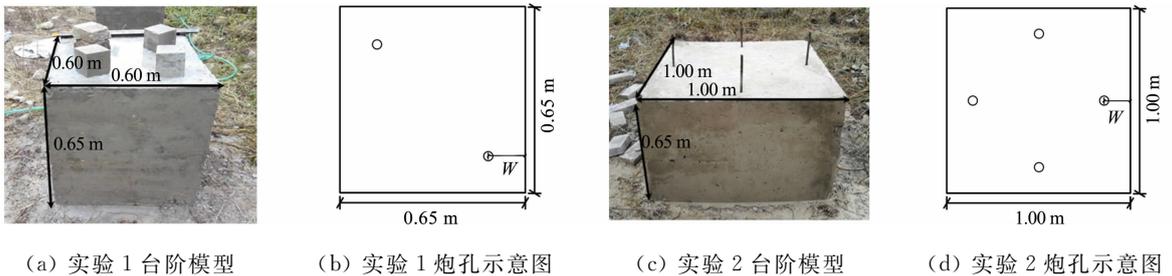


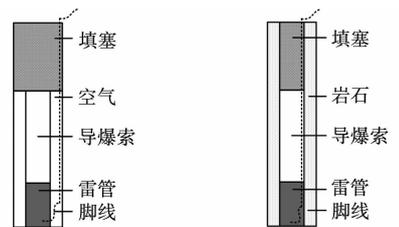
图 1 台阶模型与炮孔示意图

Fig. 1 Bench model and schematic diagram of blasthole

对台阶模型进行 28 d 养护, 通过力学性能测试确定台阶模型的岩体密度为  $1\ 850\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 纵波波速为  $2\ 326\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 泊松比为 0.235, 抗压强度为 8.38 MPa, 弹性模量为 10.02 GPa.

### 2.2 爆破方案的设计

采用高能导爆索作为起爆药包, 其爆力值为 480 mL, 爆速为  $8\ 300\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 密度为  $25\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 药芯为黑索金; 采用电雷管起爆(0.60 g 泰安炸药)导爆索, 其爆力值为 500 mL, 根据爆力值换算系数计算模型试验的总装药量. 为了提高填塞质量, 采用石膏填塞炮孔. 装药结构示意图, 如图 2 所示. 炸药单耗台阶爆破模型试验、



(a) 径向不耦合装药 (b) 耦合装药

图 2 装药结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of charge structure

$W^3/Q$  台阶爆破模型试验和不耦合装药台阶爆破模型试验的爆破参数,分别如表 1~3 所示. 表 1~3 中: $L_t$  为填塞长度, $L_t=L_b-L_d$ .

表 1 炸药单耗台阶爆破模型试验的爆破参数

Tab. 1 Blasting parameters of unit explosive consumption bench blasting model experiment

模型编号	$W/cm$	$L_t/cm$	$Q/g$	$q/kg \cdot m^{-3}$	$L_b/cm$	$L_d/cm$
1-1	14	14	1.20	0.27	22.9	2.4
1-2	14	14	1.65	0.34	24.7	4.2
1-3	14	14	2.10	0.40	26.5	6.0
1-4	14	14	2.55	0.46	28.3	7.8
1-5	14	14	3.00	0.51	30.1	9.6

表 2  $W^3/Q$  台阶爆破模型试验的爆破参数Tab. 2 Blasting parameters of  $W^3/Q$  bench blasting model experiment

模型编号	$W/cm$	$Q/g$	$W^3/Q$	$L_t/cm$	$d_b/cm$	$L_b/cm$	$L_d/cm$
2-1	12	1.58	1.09	12	1.0	22.5	4.0
2-2	14	1.58	1.74	14	1.0	24.5	4.0
2-3	16	1.58	2.59	16	1.0	26.5	4.0
2-4	18	1.58	3.69	18	1.0	28.5	4.0
2-5	20	1.58	5.06	20	1.0	30.5	4.0

表 3 不耦合装药台阶爆破模型试验的爆破参数

Tab. 3 Blasting parameters of uncoupling charge bench blasting model experiment

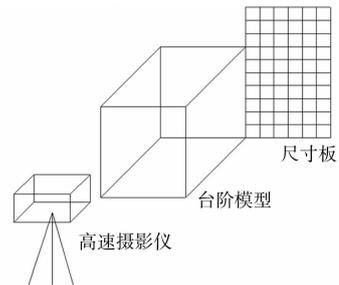
模型编号	$n$	$W/cm$	$L_t/cm$	$Q/g$	$d_b/cm$	$L_b/cm$	$L_d/cm$
3-1	1.250	10	14.5	3.08	1.0	31.0	10.0
3-2	1.500	10	14.5	3.08	1.2	31.0	10.0
3-3	2.000	10	14.5	3.08	1.6	31.0	10.0
3-4	2.500	10	14.5	3.08	2.0	31.0	10.0
3-5	3.000	10	14.5	3.08	2.4	31.0	10.0
3-6	3.375	10	14.5	3.08	2.7	31.0	10.0

## 2.3 高速摄影系统的设置

采用 MotionProY7 型高速摄影仪记录自由面破碎岩石的运动过程,该系统由高速摄影仪与外接计算机组成. 高速摄影系统,如图 3 所示. 为了获得清晰的运动图像,将拍摄频率设置为  $2\ 000\ F \cdot s^{-1}$ ,触发前预记录. 待高速摄影仪架设好后,与发炮器同步触发.



(a) 高速摄影仪与外接计算机



(b) 高速摄影仪架设示意图

图 3 高速摄影系统

Fig. 3 High-speed photography system

## 3 试验结果与分析

### 3.1 破碎岩石运动概况

试验过程借助高速摄影系统对自由面岩石的“断裂—破碎—鼓包—抛掷”进行拍摄,得到不同时刻的破碎岩石运动形态. 对高速摄影仪记录的图像进行逐帧播放,拾取部分运动图像,整个运动过程持续  $1\ 040\ ms$  左右.

模型 3-2 的破碎岩石的鼓包运动图,如图 4 所示.由图 4 可知:当  $t=0$  ms 时,整个爆破系统处于静止状态;当  $t=0.5$  ms 时,自由面的中心质点出现初始位移,此时,爆炸冲击波与爆轰产物开始作用于周围岩体;当  $t=2.0$  ms 时,台阶自由面开始出现微小裂隙,并伴有爆生气体泄露,根据爆破“应力波-爆生气体”共同作用理论,可以推测炸药爆炸后 2.0 ms,岩石开始受爆炸应力波作用,整个过程中,强大的气体压力使裂纹开始扩张;当  $t=4.0$  ms 时,在爆生气体压力作用下,自由面裂隙进一步发育,并开始出现明显的鼓包运动,由于上部岩体裂隙贯通水平自由面,部分气体从裂隙中溢出;当  $t=6.0$  ms 时,随着爆生气体的膨胀作用,岩石表面不断出现新生裂纹,既有裂纹在爆生气体的“气楔作用”下进一步延伸,逐步贯通并形成新生表面;当  $t$  为 8.0~14.0 ms 时,自由面出现明显的鼓包,呈上、下端较短,中间突出的形态,破碎岩石除了受爆生气体压力作用外,还受到相邻破碎岩石的碰撞作用,此后,自由面的裂缝进一步扩大,破碎岩石基本与台阶脱离,表明爆炸应力波对于岩石的作用已经消失,此时的岩石仅受爆生气体压力作用与相邻破碎岩石的碰撞作用;当  $t=16.0$  ms 时,自由面无新生裂纹产生,岩石已有裂缝已完全贯通,并形成一定尺寸的岩块,表明爆生气体对岩石的破碎作用已经结束,与此同时,碎石已经脱离台阶,膨胀气压难以继续对碎石产生推力,其对碎石的推动作用基本结束,破碎岩石此后将不受爆生气体的作用,达到初始抛掷速度.

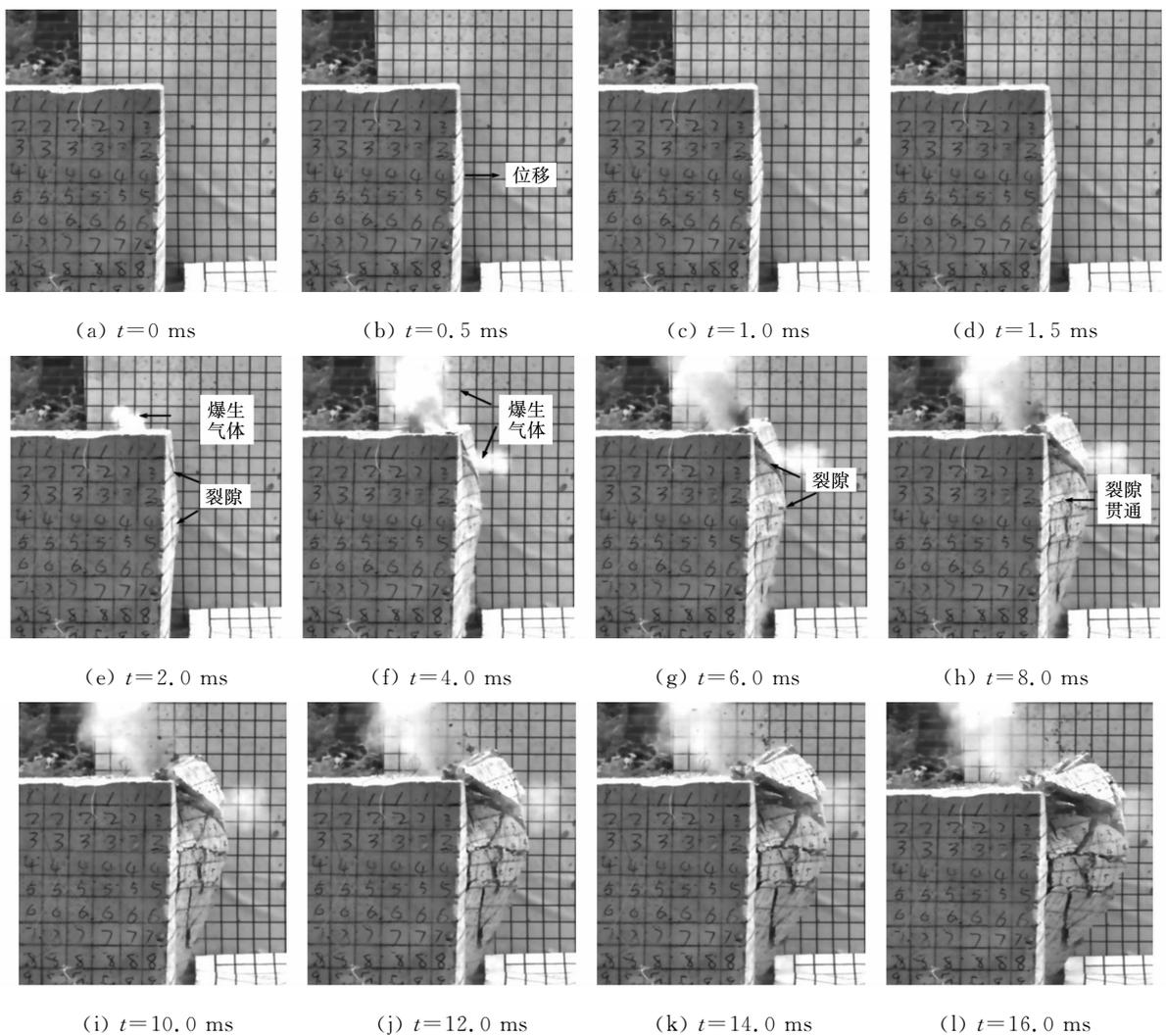


图 4 破碎岩石鼓包运动图(模型 3-2)

Fig. 4 Broken rocks bulging movement (model 3-2)

模型 3-2 的破碎岩石的抛掷运动图,如图 5 所示.由图 5 可知:鼓包运动与抛掷运动之间存在明显的过渡阶段,即破碎岩石不再维持鼓包形态,开始沿各自的运动方向进行抛掷;在抛掷运动前期,破碎岩石的运动形态呈扇形分布,随后破碎岩石开始沿各自的运动方向进行抛掷,并形成扇形堆积区.

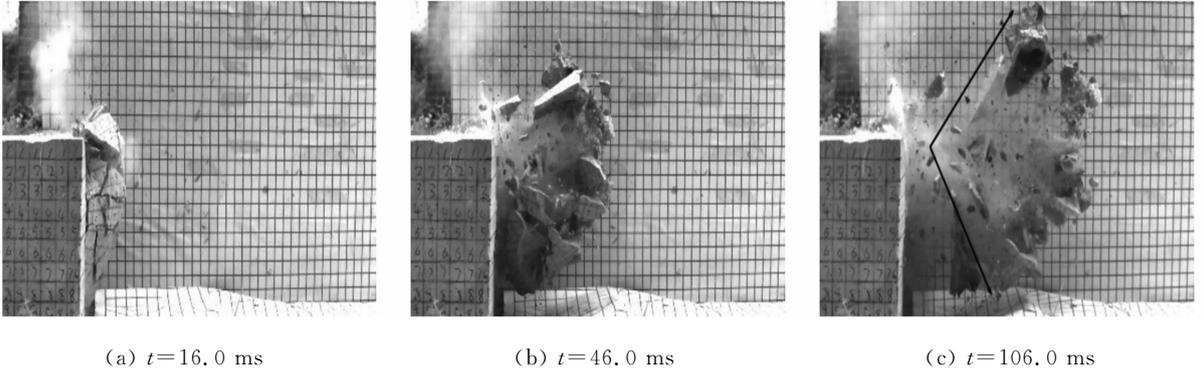


图5 破碎岩石抛掷运动图(模型3-2)

Fig. 5 Broken rocks throwing movement (model 3-2)

破碎岩石堆积图,如图6所示。由图6可知:破碎岩石的堆积区域成扇形分布,且部分岩石已偏离堆积区域,这是因为在破碎岩石抛掷运动的前期,破碎形态基本呈扇形分布,抛掷速度由中间向两侧递减,部分岩石在该过程中易与相邻碎石发生碰撞而偏离抛掷轨道,这也解释了扇形堆积区形成的主要原因。

### 3.2 爆破参数对抛掷速度的影响分析

#### 3.2.1 炸药单耗对破碎岩石抛掷速度的影响

炸药单耗-抛掷速度( $q-v$ )曲线及函数拟合曲线,如图7所示。由图7可知:当 $q$ 为 $0.27\sim 0.46\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,抛掷速度与炸药单耗呈指数函数递增关系,且存在明显的临界值( $0.46\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),当 $q$ 超过该临界值后,抛掷速度将出现明显的激增;炸药单耗与抛掷速度的关系很好地反映了各阶段的能量耗散,当 $q$ 为 $0.27\sim 0.46\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,由于作用于岩土的压力波峰值较小,岩石无法充分破碎,更多的爆生气体能量将参与岩石的破碎,而爆生气体在破碎岩石抛掷运动过程中的耗能相应地减小,且破碎岩石间的相互作用对岩石抛掷速度的影响较大,当 $q$ 超过临界值后,爆炸冲击波与应力波使岩体裂隙充分发育,更多的爆生气体能量将参与破碎岩石的抛掷运动,此时,破碎岩石间的相互作用也将大为减弱,当 $q$ 为 $0.51\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,破碎岩石的抛掷速度达到最大值。

当 $q$ 为 $0.27\sim 0.51\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,破碎岩石的抛掷速度与 $q$ 的关系为

$$\left. \begin{aligned} v &= 6.06 + 3.99e^{-32.75q}, \\ R^2 &= 0.99. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

#### 3.2.2 $W^3/Q$ 对破碎岩石抛掷速度的影响

$W^3/Q$ -抛掷速度( $W^3/q-v$ )曲线及函数拟合曲线,如图8所示。由图8可知: $W^3/Q$ 与抛掷速度存在明显的非线性关系,且抛掷速度的变化速率较为平稳;由于最小



图6 破碎岩石堆积图

Fig. 6 Broken rocks accumulation

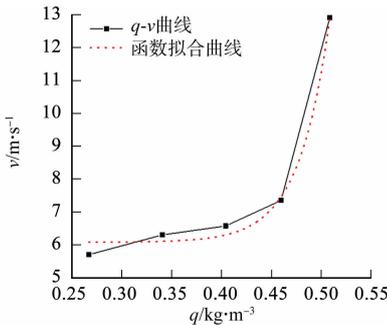


图7 炸药单耗-抛掷速度曲线及函数拟合曲线  
Fig. 7 Unit explosive consumption-throwing velocity curve and function fitting curve

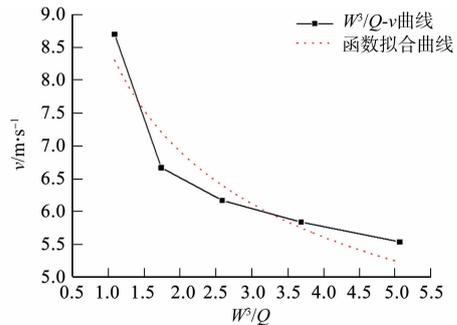


图8  $W^3/Q$ -抛掷速度曲线及函数拟合曲线  
Fig. 8  $W^3/Q$ -throwing velocity curve and function fitting curve

抵抗线方向受到的爆炸作用最为强烈,当 $W^3/Q$ 为 $1.09$ 时, $W$ 较小,爆炸冲击波能够使岩体的裂隙充

分发育, 而爆生气体能量在岩石破碎过程中的能耗较小, 大量的气体能量将参与到岩石的抛掷中, 在该过程中, 破碎岩石间的相互作用对抛掷速度的影响较小; 当  $W^3/Q$  进一步增大时, 爆炸能量扩散路径与分布区域发生变化, 爆生气体的作用时间得到延长, 破碎岩石获得的抛掷能减小, 而破碎岩石间的相互作用对抛掷速度的影响显著增强. 整个过程中,  $W^3/Q$  与抛掷速度的关系满足

$$\left. \begin{aligned} v &= 8.53(W^3/Q)^{-0.35}, \\ R^2 &= 0.90. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

### 3.2.3 不耦合系数对破碎岩石抛掷速度的影响 不耦合系数-抛掷速度( $n-v$ )曲线及函数拟合曲线, 如图 9 所示.

由图 9 可知: 当  $n$  为 1.250~3.375 时, 可根据抛掷速度的变化速率将  $n$  划分为 1.250~1.750, 1.750~3.375 两个区间; 当  $n$  为 1.250~1.750 时, 抛掷速度的整体变化速率较大, 抛掷速度对不耦合系数的变化较为敏感, 表明空气层的减能作用明显; 当  $n$  为 1.250 时, 炮孔内的空气对冲击波的缓冲作用有限, 作用于岩体的应力峰值较大, 岩体裂隙充分发育, 破碎岩石将获得更多的抛掷能, 破碎岩石间的相互作用也相应减小; 当  $n$  增大至 1.750 时, 炮孔内的空气体积相应增大, 减能作用显著增强, 此时的抛掷速度约为  $n=1.250$  时的 59%, 在该过程中, 爆生气体在岩石破碎阶段的能耗增强, 在一定程度上提高了炸药能量的利用率, 避免了岩石的过度破碎; 当  $n$  为 1.750~3.375 时, 空气层对抛掷速度的影响明显下降, 最终稳定于一个范围内, 该现象表明, 不耦合系数的增大虽然能够延长爆生气体的作用时间, 但盲目增大不耦合系数极不利于岩石的破碎和抛掷堆积; 试验过程中,  $n$  为 2.000 时的破碎岩石抛掷速度明显小于其他试验组, 这是由于该组试验出现了冲孔现象, 导致大量的爆生气体能量过早溢出, 这也进一步验证了爆生气体能量对破碎岩石抛掷速度的影响作用, 由此可知, 存在一个合理的不耦合系数使破碎岩石的块度与抛掷速度处于一个合适范围.

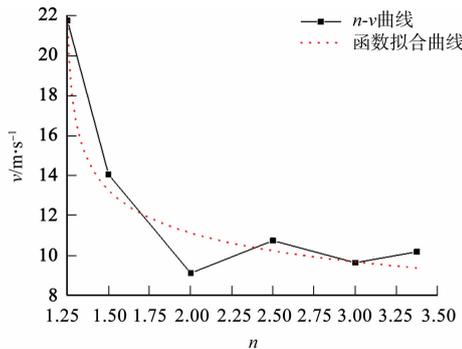


图 9 不耦合系数-抛掷速度曲线及函数拟合曲线  
Fig. 9 Uncoupling coefficient-throwing velocity curve and function fitting curve

合适的不耦合系数不但能够使炸药能量得到充分的利用, 还能避免爆破飞石. 因此, 对不耦合系数与抛掷速度的关系进行研究具有重要的工程意义. 当  $n$  为 1.250~3.375 时, 破碎岩石的抛掷速度服从幂函数分布, 即

$$\left. \begin{aligned} v &= 10.64(n-1.23)^{-0.16}, \\ R^2 &= 0.95. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 3.3 抛掷速度影响因素灰度关联分析

灰度关联分析能够有效了解各爆破参数变化对破碎岩石抛掷速度的影响, 减少抛掷速度影响因素的复杂性和模糊性, 定量地判断出破碎岩石抛掷速度的主要影响因素, 为爆破参数优化提供合理、可靠的参考依据.

通过试验获得不同的炸药单耗、 $W^3/Q$  和不耦合系数下的破碎岩石抛掷速度, 如表 4 所示.

表 4 不同爆破参数下的破碎岩石抛掷速度

Tab. 4 Throwing velocity of broken rocks under different blasting parameters

$q/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$W^3/Q$	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$n$	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
0.27	5.70	1.09	8.70	1.500	14.06
0.34	6.30	1.74	6.67	2.000	9.12
0.40	6.57	2.59	6.17	2.500	10.75
0.46	7.35	3.69	5.84	3.000	9.64
0.51	12.91	5.06	5.54	3.375	10.19

由表 4 可得比较数列  $X$  与对应特性的参考数列  $Y$ , 即

$$X = \begin{bmatrix} 0.27 & 0.34 & 0.40 \\ 1.09 & 1.74 & 2.59 \\ 1.500 & 2.000 & 2.500 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 5.70 & 6.30 & 6.57 \\ 8.70 & 6.67 & 6.17 \\ 14.06 & 9.12 & 10.75 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由于比较数列与参考数列的量纲存在较大差异,将比较数列  $\mathbf{X}$  与参考数列  $\mathbf{Y}$  进行无量纲化,可得

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} 0 & 0.29 & 0.54 & 0.79 & 1 \\ 0 & 0.16 & 0.38 & 0.65 & 1 \\ 0 & 0.27 & 0.53 & 0.8 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}' = \begin{bmatrix} 0 & 0.08 & 0.12 & 0.23 & 1 \\ 1 & 0.36 & 0.20 & 0.09 & 0 \\ 1 & 0 & 0.33 & 0.11 & 0.22 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

通过计算可得灰色关联系数矩阵为

$$\gamma' = \begin{bmatrix} 1 & 0.70 & 0.54 & 0.47 & 1 \\ 0.33 & 0.72 & 0.74 & 0.47 & 0.33 \\ 0.33 & 0.65 & 0.71 & 0.42 & 0.39 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由于关联信息较多,易造成信息的分散,因此,采用平均关联度进行关联度分析,则对应的关联度矩阵  $\gamma'_{\text{ave}}$  为

$$\gamma'_{\text{ave}} = [0.74 \quad 0.52 \quad 0.50]^T. \quad (16)$$

通过关联程度分析可知,在爆破碎石抛掷速度的 3 个影响参数中,抛掷速度对炸药单耗最为敏感,  $W^3/Q$  与不耦合系数次之;如果对爆破抛掷速度进行参数优化控制,首先需从炸药单耗的设计着手。

## 4 结论

基于台阶爆破模型试验开展台阶爆破破碎岩石运动规律研究,可得以下 4 个结论。

1) 通过量纲分析法确定台阶爆破破碎岩石抛掷速度的 3 个主要影响因素,即炸药单耗、 $W^3/Q$ 、不耦合系数。

2) 借助高速摄影系统对台阶自由面岩石的“断裂—破碎—鼓包—抛掷”过程进行观测,结果表明,当爆破作用时间为 0.5 ms 时,台阶自由面出现位移;当爆破作用时间为 2.0 ms 时,爆炸应力波已传递至台阶自由面,使自由面岩石出现裂缝,在爆炸应力波、爆生气体和破碎岩石的相互作用下,可将破碎岩石的运动划分为鼓包运动阶段与抛掷运动阶段。

3) 炸药单耗、 $W^3/Q$  和不耦合系数与破碎岩石抛掷速度的关系充分反映了炸药能量在各阶段的参与程度,炸药单耗、 $W^3/Q$  和不耦合系数与破碎岩石的抛掷速度存在明显的非线性关系,当  $q$  为 0.27~0.51  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,破碎岩石抛掷速度随炸药单耗的增加呈指数函数递增;当  $W^3/Q$  为 1.09~5.06 时,抛掷速度随最小抵抗线的增加满足  $v = 8.53(W^3/Q)^{-0.35}$ ; 当  $n$  为 1.250~3.375 时,抛掷速度随不耦合系数的增加满足  $v = 10.64(n - 1.23)^{-0.16}$ 。

4) 由爆破抛掷速度的灰色关联度分析可知,破碎岩石抛掷速度对炸药单耗最为敏感,  $W^3/Q$  与不耦合系数次之。在实际工程中,可根据关联度分析结果、破碎岩石抛掷速度与各参数间的关系对爆破参数进行快速调整,实现安全生产,提升生产效率。

## 参考文献:

- [1] 梁润. 抛掷爆破的岩石抛掷速度[J]. 武汉水利电力学院学报, 1980(3): 39-46.
- [2] 刘殿中, 王中黔. 鼓包运动和抛掷堆积[J]. 爆炸与冲击, 1983, 3(3): 1-9.
- [3] 许连坡, 金辉, 章培德. 土中爆破鼓包运动过程的 X 光摄影研究[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(2): 31-38.
- [4] 黄苹苹. 露天台阶深孔爆破鼓包发展过程的摄影观测[J]. 长沙矿山研究院季刊, 1989, 9(4): 95-98. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.1989.04.018.
- [5] 陈叶青, 翟欢. 直列装药土中爆炸外部效应的研究[J]. 爆破, 1994, 11(1): 69-74.
- [6] 李世海, 许连坡, 徐小鸿. 淤泥、岩土中爆炸鼓包运动规律的研究[J]. 爆破, 1997, 14(1): 12-17.

- [7] 王清洁,顾文彬,夏卫国,等. 多层介质中爆炸破坏效应的实验研究[J]. 工程爆破,2003,9(2):7-11.
- [8] 时党勇,张庆明,付跃升,等. 内爆炸条件下钢筋混凝土表面鼓包的试验观测和数值分析[J]. 兵工学报,2010,31(4):510-515.
- [9] 黄永辉,刘殿书,李胜林,等. 高台阶抛掷爆破速度规律的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2014,34(4):495-500. DOI:10.11883/1001-1455(2014)04-0495-06.
- [10] 梁瑞,周文海,余建平,等. 冲击载荷作用下岩体拉-压损伤破坏的边坡抛掷爆破模拟[J]. 高压物理学报,2019,33(1):82-91. DOI:10.11858/gywlxb.20180535.
- [11] 李祥龙,张松涛,李明扬,等. 基于 AUTODYN 的岩石中爆炸鼓包运动模拟[J]. 煤炭学报,2016,41(增刊2):419-424. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0131.
- [12] 肖建光,郑元枫,余庆波,等. 抛掷爆破混凝土介质飞散行为研究[J]. 北京理工大学学报,2016,36(10):1015-1018. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2016.10.006.
- [13] 黄小武,谢先启,贾永胜,等. 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究[J]. 爆破,2020,37(1):13-18. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.002.
- [14] HUANG Yonghui, MAO Zeling, ZHANG Zhiyu, *et al.* Building the intelligent transportation systems based on the computation of driving velocity law of blasting fly-rock[J]. Cluster Comput, 2019, 22: 759-768. DOI: 10.1007/s10586-017-1240-6.
- [15] 李祥龙,张松涛,徐有志,等. 炸药单耗对台阶抛掷爆破效果的影响研究[J]. 北京理工大学学报,2016,36(12):1233-1236. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2016.12.005.
- [16] 左进京,杨仁树,肖成龙,等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J]. 矿业科学学报,2018,3(4):335-341. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2018.04.003.
- [17] 杜镀. 柱状药包爆破漏斗影响因素研究[J]. 工程爆破,2022,28(3):32-38.
- [18] 吴立辉,李洪伟,杨赛群,等. 软弱夹层对岩石爆破裂纹扩展影响的实验研究[J]. 爆破,2022,39(3):16-24. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.003.
- [19] 崔新男,汪旭光,王尹军,等. 基于立体视觉的数字图像相关方法在爆破抛掷作用研究中的应用[J]. 工程科学与技术,2020,52(1):102-109. DOI:10.15961/j.jsuese.201900448.
- [20] 周伟,才庆祥,李克民. 露天煤矿抛掷爆破有效抛掷率预测模型[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):614-617.
- [21] 唐海,李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):820-824. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2011.03.030.
- [22] 周文海,梁瑞,余建平,等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析[J]. 爆炸与冲击,2019,39(5):76-83. DOI:10.11883/bzycj-2017-0373.
- [23] 袁文华,马芹永,黄伟,等. 楔形掏槽微差爆破模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增刊1):3352-3356.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)