DOI: 10.11858/gywlxb.20240711

花岗岩板双基火药切槽爆破破坏过程研究

王多良[1], 李洪伟[1], 梁 昊[1], 李世影[2], 吴延梦[1], 赵 静[3], 李纯志[3], 肖忠良[2]

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;
2. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094;
3. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

摘要: 针对目前炸药切槽爆破存在非切槽方向上岩石破坏的问题, 研究了双基火药切槽爆破特性。基于火药燃气释放规律, 计算了双基火药被激发后密闭炮孔内的压力变化情况。结合高速摄影和数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法, 开展了炮孔的火药装填密度分别为 0.84 和 0.96 g/cm^3 的 2 组实验, 探究了火药作用下花岗岩板的动态破坏过程。结果表明: 火药点火后, 2 组实验中花岗岩板均在 100 μs 时沿切槽方向起裂, 200 μs 时裂纹贯穿石板; 当装填密度为 0.96 g/cm^3 时, 试件在断裂后上下石板分离速度较大, 在封堵橡胶的摩擦力和试件惯性的共同作用下, 2 500 μs 时上下石板被横向拉裂, 裂纹沿垂直方向。炮孔预制切槽为火药燃气的气楔作用提供了空间, 很好地引导裂纹的扩展, 孔壁周围没有形成压碎区。双基火药燃烧产生的准静态压力是裂纹起裂、扩展的主要动力。研究结果为双基火药在岩体定向爆破上的应用提供了参考。

关键词: 切槽爆破; 岩石断裂; 双基火药; 动态破坏过程; 数字图像相关法

中图分类号: O346.1; TJ562 **文献标志码:** A

在现代爆破工程中, 光面爆破被广泛应用于石材开采和井巷掘进等爆破场景中[1], 以获得光滑平整的岩石开挖面和井巷轮廓线。现代光面爆破一般采用不耦合装药的方式来减小爆炸冲击波的峰值压力, 以避免对孔壁岩石造成压缩性破坏。然而, 在工程实际中, 由于岩石的性质差异较大, 光面爆破参数往往不能及时调整, 导致光面爆破在形成炮孔间贯通裂纹的同时对围岩造成损伤, 不利于爆后围岩支护和壁面维护[2]。

切槽爆破是一种控制爆破的方法, 通过在炮孔壁上按预期开裂方向切割出一定尺寸的槽口, 使岩体沿槽口断裂成形。与光面爆破相比, 切槽爆破既可以有效降低围岩损伤, 又可以增大炮孔间距, 减少炮孔数量[3−4]。1986 年, 瑞典学者 Holloway 等[5] 率先将切槽爆破用于大块石材的开采和切割, 在装药量减少到未切槽时装药量一半的情况下, 仍能实现良好的光面爆破效果。然而, 炸药爆轰时压力过大(约为几十吉帕), 即使采用不耦合装药等手段, 仍无法避免非切槽方向孔壁周围的损伤破坏[6−7]。

炸药爆炸过程中, 爆生气体在破岩过程中发挥了重要作用, 其灌入炮孔周围的初始裂隙, 形成气楔, 推动裂纹的扩展和延伸[8]。1997 年, Daehnke 等[9] 通过大量实验证明了在爆破中只有 8% 的裂纹是由爆炸应力波的动加载造成的, 剩余的 92% 的裂纹都是由爆生气体的准静态作用引起的。爆生气体可在较长时间内作用于孔壁, 极大地促进了炮孔周围径向裂纹的扩展[10]。此外, 合理利用高能气体破岩, 还可以有效减少炮孔周围的压碎区, 减少围岩损伤[11]。

火药被广泛应用于枪支弹药等武器系统, 火药在无氧状态下可以快速燃烧, 瞬间产生大量燃气, 推动战斗部发射[12−13]。火药燃气的升压速率较低, 在密闭条件下, 火药完全燃烧需要几个毫秒, 远低于爆

* **收稿日期:** 2024-01-16; **修回日期:** 2024-03-13
基金项目: 安徽高校自然科学研究项目(2022yjrc17)
作者简介: 王多良(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从发射药及装药研究. E-mail: wangduoliang0720@163.com
通信作者: 李洪伟(1979—), 男, 硕士, 教授, 主要从事爆炸技术及应用研究. E-mail: lihw@aust.edu.cn

炸时炸药完全燃烧所需的几微秒至几十微秒的时间。薛冰等[14−15]将单基发射药用于岩石爆破，对比分析单基发射药和乳化炸药的岩石破碎效果后发现，与乳化炸药相比，单基发射药爆破后产生的岩石块较大，且产生的振动信号能量更低。目前，火药用于岩石破碎领域的研究仍然较少，现有的研究多停留在岩石爆破效果分析、爆破振动分析、爆破危害效应监测等方面，缺乏火药破岩时炮孔内压力变化过程和岩石破碎机理方面的研究。

本研究以开有切槽炮孔的花岗岩板作为研究对象，利用高速摄影和数字图像相关方法（digital image correlation, DIC）等手段，对双基火药在炮孔内的燃烧释能过程和岩石破坏过程展开研究，以期丰富火药破岩理论，同时将火药用于切槽炮孔爆破，为光面爆破提供一种新的可行手段。

1　火药燃气破岩理论

1.1　炮孔内的燃气压力

对于真实气体，往往采用范德瓦尔的气体状态方程[16]

$$\left(p+\frac{a}{v^2}\right)(v-\alpha)=RT \tag{1}$$

式中：v 为气体比容，即单位质量气体所占有的体积；a 为与气体分子间吸引力有关的常数；α 为余容，是与单位质量气体分子体积有关的修正量；R 为气体常数；p 为压强；T 为温度。

对于密闭炮孔内的高温高压燃气，分子间的吸引力远小于燃气压力，式 (1) 中 a/v^2 项可忽略不计。因此，高温高压燃气的气体状态方程可写成

$$p(v-\alpha)=RT \tag{2}$$

式 (2) 即诺贝尔-阿贝尔（Nobel-Abel）状态方程。

火药在炮孔内燃烧瞬间可视为定容过程，在该过程中，火药气体不做功，如果忽略热量的散失，气体的温度 T 就是火药的燃烧温度 T_1。对于某种特定的火药，T_1 是一个常量，于是，状态方程变为

$$p(v-\alpha)=RT_1 \tag{3}$$

设装填火药的炮孔的初始体积为 V_0，火药的质量为 ω，火药的密度为 ρ，在 t 时刻，火药已燃去的质量为 ω_t。令 $\psi_t=\omega_t/\omega$，ψ_t 为火药已燃去的质量分数，且 $0\leqslant\psi_t\leqslant1$。$t$ 时刻，火药燃气的比容 v_t 可表示为

$$v_t=\frac{V_0-\dfrac{\omega}{\rho}(1-\psi_t)}{\omega\psi_t} \tag{4}$$

将式 (4) 代入式 (3) 中，可得 t 时刻时炮孔内压力 p_t

$$p_t=\frac{\omega\psi_t RT_1}{V_0-\dfrac{\omega}{\rho}(1-\psi_t)-\alpha\omega\psi_t} \tag{5}$$

引入 2 个在内弹道学中常用的物理量 $\Delta=\omega/V_0$ 和 $f=RT_1$，其中：Δ 为装填密度，与装药情况有关；f 为火药力，与火药组分有关。

将装填密度 Δ 和火药力 f 代入式 (5)，得

$$p_t=\frac{f\Delta\psi_t}{1-\dfrac{\Delta}{\rho}-(\alpha-\dfrac{1}{\rho})\Delta\psi_t} \tag{6}$$

式 (6) 为密闭炮孔内火药气体的状态方程。

若炮孔周围介质在燃气压力作用下发生破坏，则燃气从裂隙中逸出，炮孔泄压，火药即中止燃烧。

若炮孔内火药燃完时，介质仍未损坏，即 ψ_t=1，炮孔内的燃气压力达到最大值 p_{m}，此时式 (6) 可以转化为

$$p_{\mathrm{m}}=f\Delta/(1-\alpha\Delta) \tag{7}$$

1.2　应力强度因子和起裂条件

在火药破岩过程中，应力波对裂纹扩展的作用较小，只对裂纹扩展的初始速度有影响，裂纹扩展主要由火药燃气的准静态压力驱动。岩石的破坏类型主要为张拉破坏，形成的裂纹类型主要为张开型（Ⅰ型）裂纹[17]，部分气体挤入张开型裂纹，形成气锲，进一步促进裂纹扩展。

岩石中裂隙的扩展情况不仅与火药与岩石之间的相互作用有关，也与岩石本身的物理特性有关。岩石的断裂韧度 K_{IC} 表征岩体阻止裂隙扩展的能力，是评估岩石韧性强弱的定量指标。在加载率与温度恒定时，同种岩石的断裂韧度是不变的参量。几种常见岩石的断裂韧度列于表 1。应力强度因子用于表征裂纹尖端应力场的强弱。在火药燃气作用下，岩石若同时受到几种不同的载荷，裂纹尖端的应力强度因子可根据叠加原理来计算。

表 1　几种岩石的断裂韧度

Table 1　Fracture toughness for several rock types

Type of rock	K_{IC}/(MPa·m$^{1/2}$)	Type of rock	K_{IC}/(MPa·m$^{1/2}$)
Siltstone	0.35–2.56	Dolostones	1.70–2.57
Limestone	0.95–2.17	Granite	1.12–2.80
Shale	0.42–1.10	Marble	0.82–2.67

当火药燃气作用于炮孔及切槽壁面时，切槽尖端会产生高应力集中区。在断裂力学中，切槽炮孔可近似看作两边有裂纹的承内压圆孔[18]，切槽炮孔尖端的应力强度因子的表达式为

$$K_{\mathrm{I}} = p_{\mathrm{air}} F \sqrt{\pi(r+a)} \tag{8}$$

式中：K_{I} 为应力强度因子；p_{air} 为燃气气体压力；F 为应力强度因子的修正系数，与炮孔半径 r 和裂隙长度 a 有关，更准确地说，F 与 $(r+a)/a$ 呈正相关。图 1 为 F 与 $(r+a)/a$ 的关系曲线。由图 1 可知，相同炮孔半径下，切槽长度越长，F 越大。

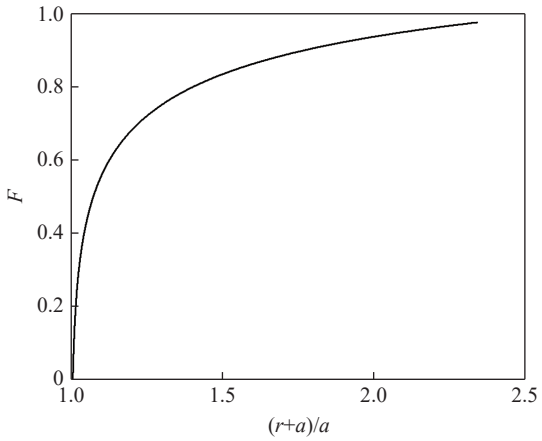


图 1　应力强度因子的修正系数

Fig. 1　Correction factor for stress intensity factor

在传统切槽爆破中，炸药爆轰在炮孔周围形成粉碎区，粉碎区对裂纹的定向扩展会产生不利影响。火药燃气在炮孔壁其他部位不产生损伤的条件为

$$\sigma_\theta < S_{\mathrm{td}} \tag{9}$$

式中：σ_θ 为孔壁上的切向拉应力，S_{td} 为介质的动态抗拉强度。

图 2 显示了切槽爆破的断裂力学模型，其中：p_0 为炮孔内火药燃气压力。火药燃气充满缝隙但未致岩石起裂时，切槽尖端处的应力强度因子为

$$K_{\mathrm{I}} = p_0 F \sqrt{\pi(r+a)} \tag{10}$$

火药燃气使岩石起裂的断裂准则为 $K_{\mathrm{I}} \geqslant K_{\mathrm{IC}}$，则起裂压力 p_0 应满足 $p_0 > \dfrac{K_{\mathrm{IC}}}{F\sqrt{\pi(r+a_0)}}$。

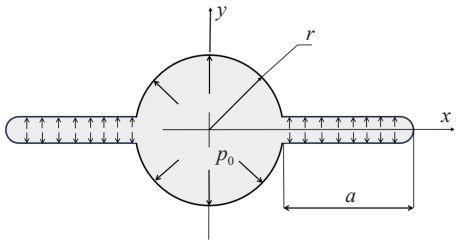


图 2　切槽爆破的断裂力学模型

Fig. 2　Fracture mechanics model of groove blasting

文献 [19] 采用边界元法对类似图 2 的切槽炮孔模型的周围应力状态进行了静态模拟，选取了第一象限不包括切槽尖端的 24 个单元进行计算，结果表明，孔壁上除切槽区外的最大切向拉应力为

$$\sigma_{\theta,\mathrm{m}} = 0.8p_0 \tag{11}$$

即 p_0<1.25S_{td} 时炮孔壁不会产生拉伸破坏。

由此确定的岩体沿切槽方向定向扩展裂纹，并且孔壁其他方向不产生破坏的条件为

$$\frac{K_{\mathrm{IC}}}{F\sqrt{\pi(r+a_0)}} < p_0 < 1.25S_{\mathrm{td}} \tag{12}$$

2　花岗岩板切槽爆破实验

2.1　实验试件

实验所用的花岗岩板尺寸为 300 mm×300 mm×20 mm，产地为山东省邹城市，矿物组成以斜长石为主，以角闪石和黑云母为辅，并掺杂少量石英，具体力学参数见表 2。

表 2　实验用花岗岩板的力学参数

Table 2　Mechanical parameters of experimental granite specimens

Density/(g·cm^{-3})	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Dynamic tensile strength/MPa
2.72	41	0.23	200	20	32

如图 3 所示，炮孔位于试件中央，炮孔直径为 10 mm，圆孔两侧用水射流切割机（佛山市永陶机电设备公司 3020 型）对称开槽，切槽长度为 5 mm，切槽与炮孔均贯穿石板。水射流切割机可将包含石英砂颗粒的磨料水加压到 400 MPa 以上喷出，高速水柱的直径约 1 mm，实际切割精度为 0.1 mm。采用水射流切割法切槽可有效避免在切割过程中过热导致的热损坏和热变形。图 3 显示了加工完成的花岗岩板。

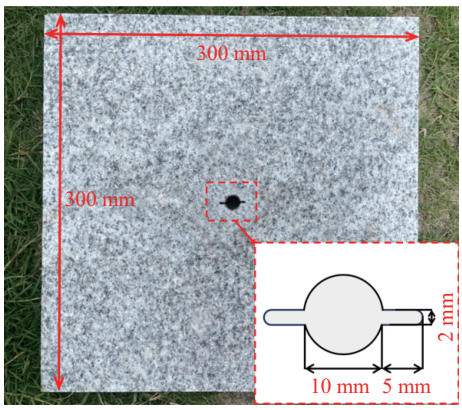


图 3　水射流加工后的花岗岩板

Fig. 3　Granite specimens processed by water jetting

2.2　装药参数

实验采用的双基火药由泸州北方化学工业有限公司提供。火药药粒中，硝化棉中氮的质量分数为 13.15%，硝化甘油的质量分数为 10%，药粒呈扁球形，弧厚 $2e_1$=0.32 mm，火药力 f=1 000 J/g。火药药粒散装于炮孔中，利用电点火药头引燃。试件 1 的火药用量为 1.4 g，装填密度为 0.84 g/cm^3；试件 2 的火药用量为 1.6 g，装填密度为 0.96 g/cm^3。

2.3　实验平台搭建

利用夹具将石板固定，夹具与石板之间采用铁质堵块和橡胶垫片加压密封，以保证火药燃气在试件起裂前不逸出。铁堵块为直径 50 mm、高度 10 mm 的圆柱体。橡胶密封垫的直径和厚度分别为 50 和 5 mm，材质为丁腈。点火药头置于炮孔正中，采用矿宝牌 FCC-3 型起爆器（最大输出冲能为 7.9 A^2·ms，输出电压峰值 1.7 kV）激发起爆。

采用高速摄影系统对花岗岩板的破裂过程进行拍摄。高速摄影系统包括一台 NAC ACS-1 M40E 型高速摄影机、与相机连接的数据记录计算机和补光光源。相机采集帧率设为 5×10^4 s^{-1}，所用 DIC 分析软件为 GOM Correlate。搭建完成的实验平台如图 4 所示。DIC 分析要求试件表面具有高对比度，散斑边界清晰。实验采用的花岗岩板具有清晰的天然散斑，可直接用于 DIC 分析。采用双侧对称无频闪光源对试件表面进行补光，确保拍摄采集的图像斑点清晰。

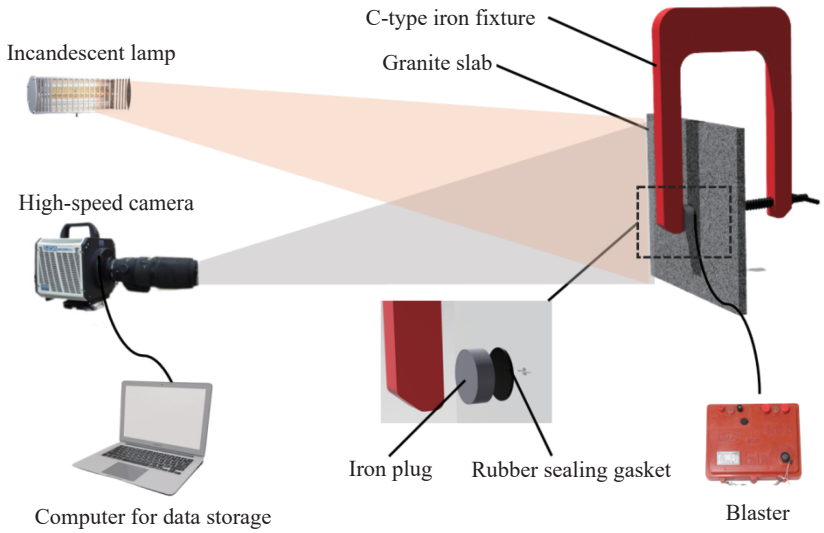


图 4　高速摄影实验平台

Fig. 4　High-speed photography experiment platform

2.4　DIC 方法

传统的电测方法只能实现试件表面有限个位点的测量，而 DIC 方法[20] 可以对试件整个表面进行观测。DIC 方法最早在 20 世纪 80 年代由 Yamaguchi[21] 提出，可以定量描述岩石破裂过程中整个岩石表面裂纹位移场的演化过程。

DIC 方法的原理如图 5 所示：在试件变形前的图像 $I(x, y)$ 中选定一个待测点 $D(x_0, y_0)$，以点 D 为中心，选取一个方形初始参考子区；在火药燃气作用下，试件表面发生变形，散斑也随之发生变化，形成目标图像 $I'(x', y')$，采用相关函数对变形前后的图像进行相关运算，通过相关系数的最大值获得位移分量 u、v；移动初始参考子区，重复以上步骤，直至得到全场位移。DIC 方法可以捕捉肉眼无法观察的微小位移。

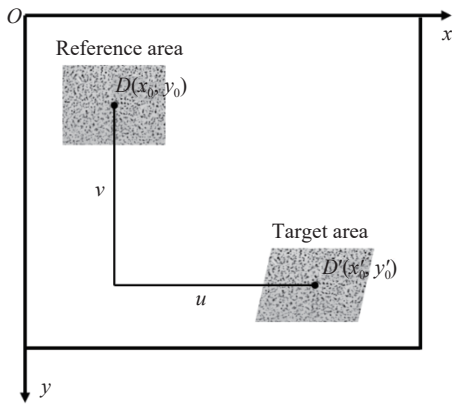


图 5　DIC 原理示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the principle of DIC method

3　结果与讨论

3.1　试件破坏结果

图 6 显示了破坏后的试件。试件 1 出现了一条近乎水平的裂纹，裂纹从切槽尖端起始，分别向左、右两侧扩展至试件边缘；右翼裂纹在距试件边缘 75 mm 处出现小角度偏转（见图 6 中试件 1 右侧的红框），之后，在向右上 30°方向扩展 10 mm，随后，方向又转至水平，直至扩展至试件边缘；左翼裂纹近乎水平地扩展至试件边缘。试件 2 不仅出现了一条水平贯穿的裂纹，还在试件竖直方向上也出现了裂纹，上部裂纹从炮孔右侧切槽上部起裂，竖直扩展至试件上边缘，下部裂纹从炮孔下壁底靠右的位置起裂，竖直扩展至试件下边缘。

花岗岩是一种典型的非均质材料，其裂纹扩展过程受应力波和原生裂隙节理的影响。因此，试件的裂纹在从炮孔向两侧发展过程中都出现弯曲和偏转，并未呈严格的直线型，但偏转程度均不大。

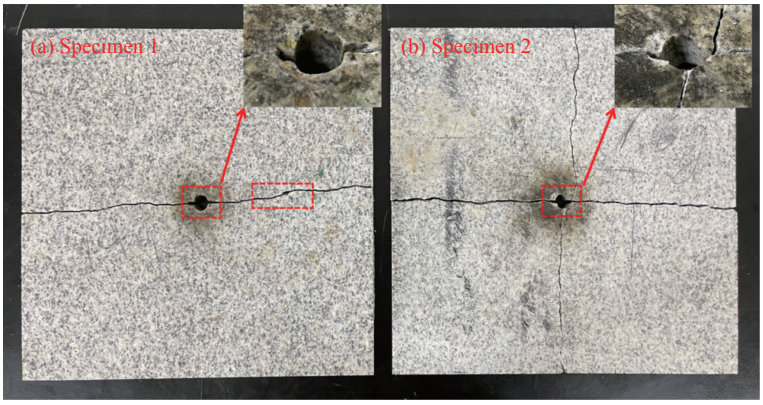


图 6　破坏后的试件

Fig. 6　Specimens after destruction

实验结果显示，试件 1 和试件 2 在断裂后炮孔周围均不存在粉碎区。对于试件 1，除切槽方向外孔壁以外，其余地方无破坏。对于试件 2，除了水平、竖直方向的贯穿裂纹外，其他区域无裂纹。这说明火药并未在炮孔内形成爆轰，其燃烧产生的燃气的准静态压力是破岩的主要动力。通过实验还发现，试件 1 和试件 2 在破裂后，炮孔和裂纹壁都残留了大量未燃完的火药颗粒，这是由火药点火能量不足以及炮孔起裂泄压导致的。

3.2　破坏条件理论计算

为了探究火药的燃烧情况与炮孔压力之间的关系，根据式 (7) 计算并绘制了试件 1 和试件 2 的孔内火药已燃质量分数ψ和孔内压力 p_{m} 的关系曲线，见图 7。根据花岗岩板的力学参数和式 (12) 计算获得的起裂压力点也标记在图 7 中。由图 7 可知，试件 1 在火药燃烧质量分数为 8.15% 时达到起裂压力，试件 2 在火药燃烧质量分数为 1.45% 时达到起裂压力。

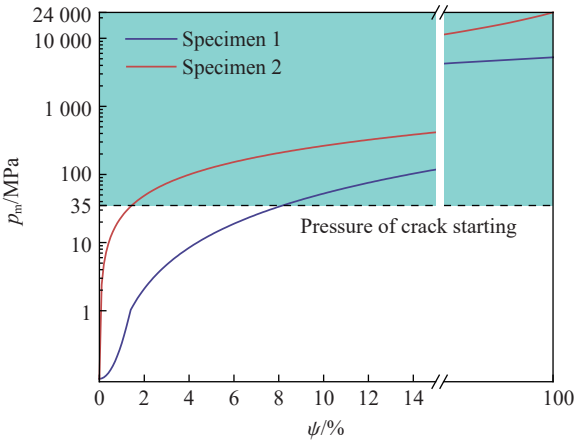
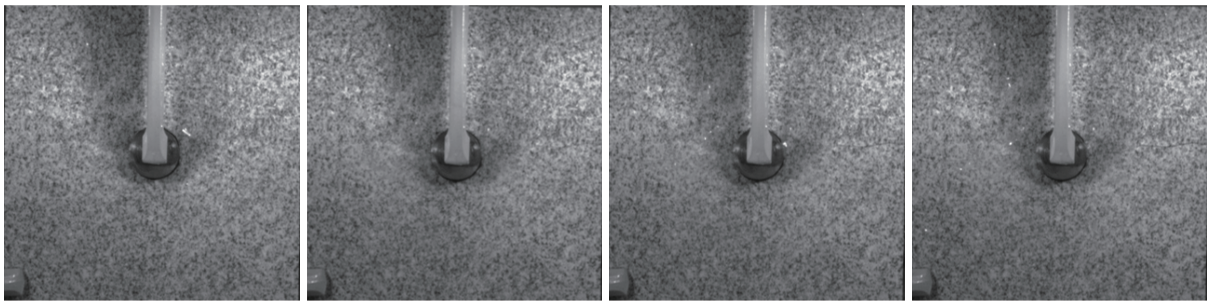


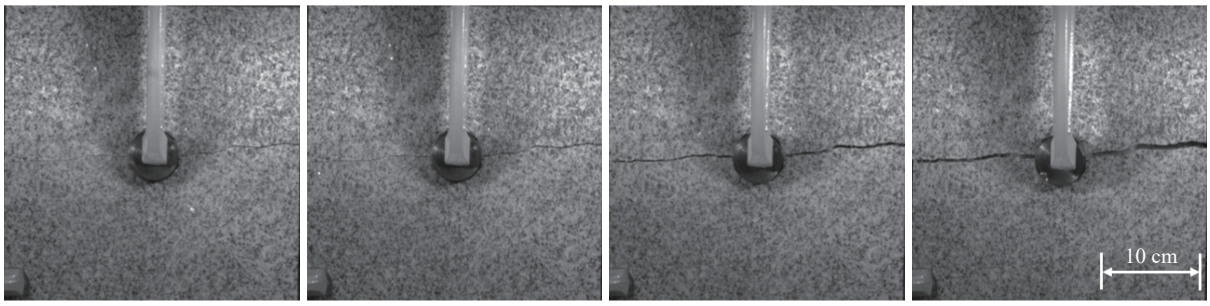
图 7　2 个试件的压力-已燃质量百分比曲线

Fig. 7　Pressure-percentage of burned mass curves of two specimens

结合高速摄影结果（见图 8 和图 9）可知，在裂纹扩展至封堵块边缘后，气体从炮孔中逸出，伴随少量正在燃烧的火药颗粒（图中亮点）也冲出炮孔。此时，由于炮孔泄压，炮孔内已燃的火药将熄火[2]，这被实验结束后炮孔中残留大量未燃火药颗粒所证实。石板上裂纹扩展造成的炮孔泄压和泄压造成的火药颗粒熄火最终导致火药能量利用率低。在工程实际中，炮孔深入岩体，通过设计合理的装药结构并加强炮孔封堵，可以有效地延长燃气的准静态作用时间，大幅提高火药颗粒的利用率。



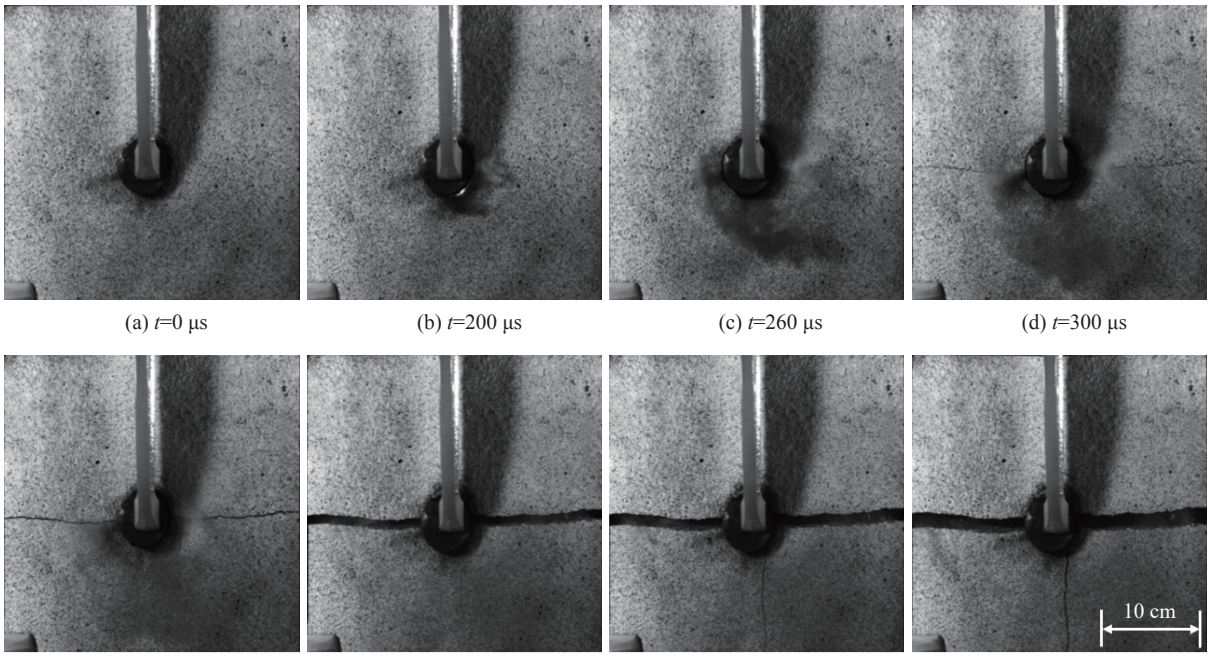
(a) t=0 μs　(b) t=100 μs　(c) t=200 μs　(d) t=500 μs



(e) t=760 μs　(f) t=960 μs　(g) t=2 100 μs　(h) t=3 700 μs

图 8　试件 1 的高速摄影结果

Fig. 8　High-speed photographic results of specimen 1



(a) t=0 μs　(b) t=200 μs　(c) t=260 μs　(d) t=300 μs

(e) t=500 μs　(f) t=2 500 μs　(g) t=3 100 μs　(h) t=4 100 μs

图 9　试件 2 的高速摄影结果

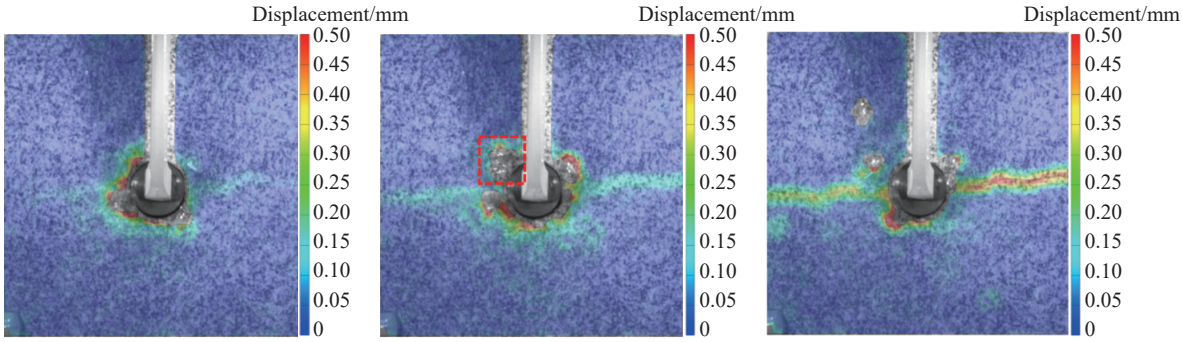
Fig. 9　High-speed photographic results of specimen 2

3.3　动态破坏过程分析

火药点火和起裂时，由于封堵和夹具遮挡，高速摄影无法捕捉。采用 DIC 方法对高速摄影拍摄的图像进行分析。分析前，将图像进行剪裁，以排除夹具和封堵块的干扰。本研究以点火时刻为起始点。

图 10 为试件 1 的 DIC 分析结果。t=100 μs 时，封堵块周围出现位移，表明该区域内岩石已经起裂，同时可以观察到少量燃气从裂隙和封堵块与岩石间逸出，导致部分追踪区域失效，如图 10 中红框所示。随着炮孔内火药的进一步燃烧，燃气被推入微裂隙中，裂纹进一步扩展。在 t=200 μs 时，微裂纹扩展至试件边缘，并在燃气的驱动下迅速扩宽。t=500 μs 时，水平方向上出现一条明显的贯穿裂纹，封堵块左右两侧的裂纹扩宽，大量燃气从封堵块边缘的裂隙逸出，孔内泄压，火药停止燃烧，试件上下两部分已完全分离，后续的裂纹扩宽是试件的惯性所导致。

在试件 1 的表面设置 2 个测点，2 个测点位于炮孔底左右两侧的水平线上，距炮孔底 150 mm（见图 11 中的 A_1、A_2）。测点 A_1、A_2 的位移-时间曲线如图 12 所示。可以看出：100 μs 以前，A_1、A_2 的位移增长缓慢，此时间段内，火药燃气在炮孔和切槽内建压，试件沿切槽方向起裂；在 100～300 μs 区间，火药燃气灌入裂纹，推动裂纹快速扩宽；在 300 μs 以后，由于燃气从裂隙逸出以及炮孔失压，测点 A_1、A_2 的位移增量趋于线性，表明此阶段火药燃气不再对试件做功。



(a) t=100 μs　(b) t=200 μs　(c) t=500 μs

图 10　试件 1 的 DIC 分析结果

Fig. 10　DIC analysis results of specimen 1

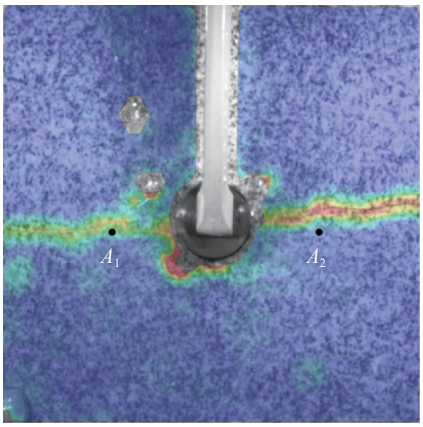


图 11　试件 1 测点的位置

Fig. 11　Measurement points locations of specimen 1

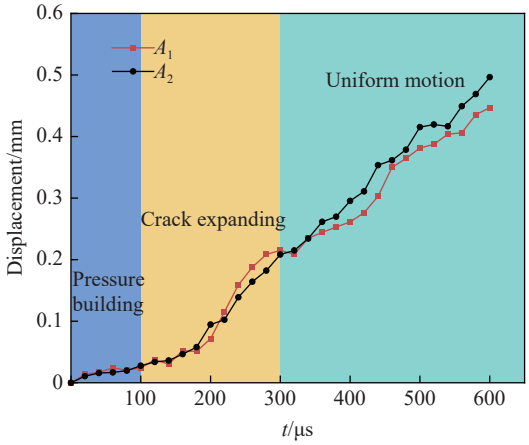
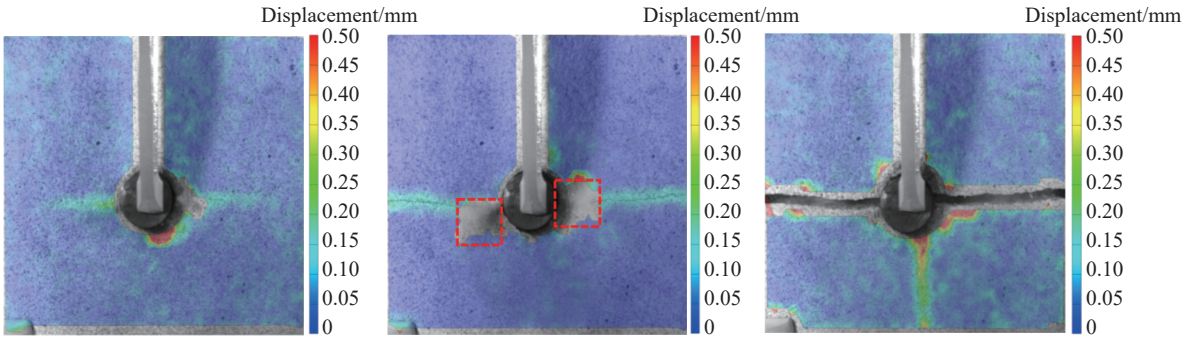


图 12　测点 A_1 和 A_2 的位移-时间曲线

Fig. 12　Displacement-time curves of points A_1 and A_2

图 13 为试件 2 的 DIC 分析结果。在 t=100 μs 时，封堵块两侧出现位移，炮孔内未燃火药继续燃烧，燃气被推入微裂隙中，裂纹进一步扩展。在 t=200 μs 时，石板表面横向裂纹已扩展至试件边缘，封堵块下部有少量燃气逸出，导致部分追踪点失效（如图 13 中红框所示），此时，封堵装置内的燃气推动上下石板加速分离。试件断裂后，由于试件被封堵夹具夹持，在试件中心区域的垂直方向上运动受阻，在同一水平线上，距离边缘越近垂直速度越快。在 t=2 500 μs 时，在封堵橡胶摩擦力和试件惯性的共同作用下，上下石板开始横向开裂，开裂从炮孔中心垂直向下。由于夹具遮挡，无法观察到上石板的横向开裂。



(a) t=100 μs　(b) t=200 μs　(c) t=2 500 μs

图 13　试件 2 的 DIC 分析结果

Fig. 13　DIC analysis results of specimen 2

在试件 2 表面设置测点 B_1、B_2、C_1、C_2，如图 14 所示。测点 B_1、B_2 位于在炮孔底的水平线上，距炮孔 30 mm；测点 C_1 位于炮孔正下方，距试件下边缘 50 mm；测点 C_2 和 C_1 在同一水平线上，C_2 距试件左侧边缘 15 mm。

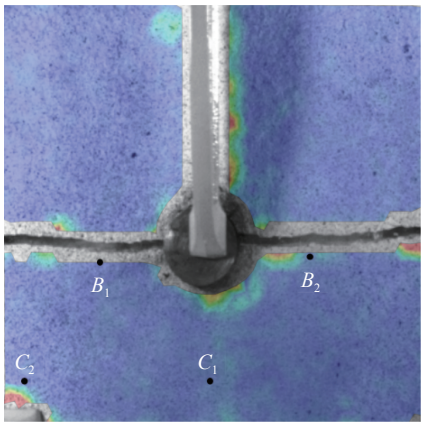


图 14　试件 2 中测点的位置

Fig. 14　Measurement points' locations of specimen 2

测点 B_1 和 B_2 的位移-时间曲线如图 15 所示。在 120 μs 以前，测点 B_1、B_2 的位移几乎无增长，此时间段内，火药燃气在炮孔和切槽内建压，试件在切槽方向起裂；在 120～280 μs 区间，火药燃气灌入裂纹，推动裂纹快速扩宽；280 μs 以后，燃气完全逸出，火药燃气不再对试件做功，测点 B_1、B_2 的位移增量近似为线性，即下石板的运动速度基本不变。

测点 C_1、C_2 的位移-时间曲线如图 16 所示。400 μs 以前，测点 C_1、C_2 的位移在相差不大，但随着位移的增加，夹具对石板的摩擦力导致试件中间部分的向下运动受阻，下石板边缘由于惯性继续向下运动，测点 C_1、C_2 逐渐出现速度差，当位移差达到一定值时，下石板破裂。从图 6 中的破坏结果可以推断，分离后的上石板也经历了类似的过程，但由于夹具遮挡，该过程未能被高速摄影捕捉到。由于石板分离后封堵装置对石板的摩擦力不再左右对称，导致上石板的拉断位置并不在石板的竖直中心线上。

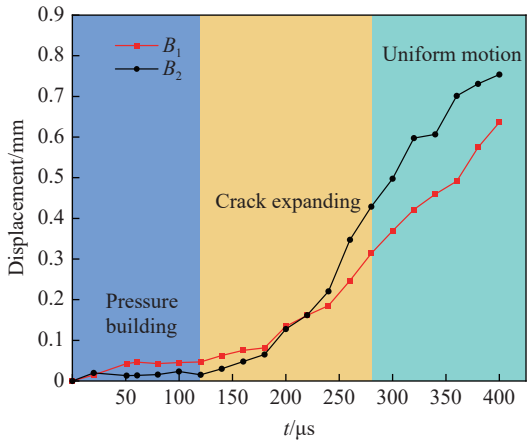


图 15　测点 B_1、B_2 的位移-时间曲线

Fig. 15　Displacement-time curves of points B_1 and B_2

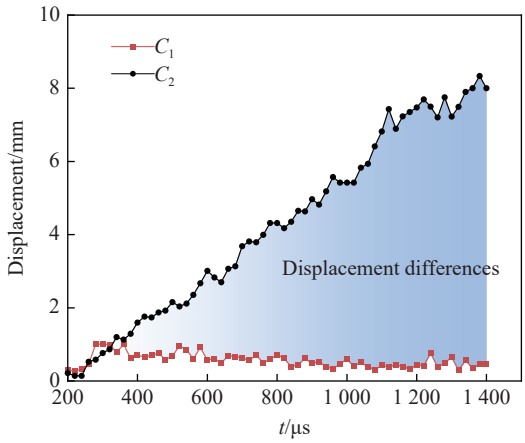


图 16　测点 C_1、C_2 的位移-时间曲线

Fig. 16　Displacement-time curves of points C_1 and C_2

4　结　论

(1) 火药作为一种高能产气药剂，在用于岩石破碎时在炮孔密闭环境内燃烧并迅速产生大量燃气，燃气的准静态压力是裂纹起裂、扩展的主要动力。

(2) 裂纹扩展至堵塞块边缘后，燃气逸出，导致炮孔泄压，已燃的火药熄火。因此，在炮孔周围发现大量未燃完药粒。经理论计算，试件 1 和试件 2 在火药燃烧质量分数分别为 8.15% 和 1.45% 时达到起裂压力，点火不佳和起裂泄压导致火药利用率较低。

(3) 试件 1 的切槽较好地引导了裂纹扩展，在 t=200 μs 时，裂纹沿水平方向贯穿石板。对于试件 2，在 t=200 μs 时裂纹沿水平方向贯穿石板，在 t=2 500 μs 时，上下分离的石板出现了纵向裂纹。

(4) 与试件 1 相比，试件 2 出现纵向裂纹的原因可能有以下 2 点：一是，堵塞装置为手拧螺杆加压，2 次实验所施加的压力有所差异，试件 2 可能被施加了更大的夹持力，导致石板分离后堵塞装置对试件 2 的摩擦力更大，滑动受限更加严重，导致其被拉坏；二是，由于试件 2 的装药量较大，上下石板的分

离速度较大，因此，石板惯性较大，导致石板被拉坏。综上，如改用摩擦系数较小的密封装置夹持，可避免石板被纵向拉坏，后续将针对封堵结构展开进一步的研究。

(5) 与传统炸药相比，由于火药在炮孔中不产生爆轰，因此，孔壁周围不会出现粉碎区。但如果没有初始裂隙，燃气直接作用孔壁，火药的破岩效率较低。炮孔预制切槽可以为火药燃气的气楔作用提供空间，提高破岩效率，同时可很好地引导裂纹的走向。

参考文献：

[1] 汪旭光. 爆破设计与施工 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 28–33.

[2] 范勇, 孙金山, 贾永胜, 等. 高地应力硐室光面爆破孔间应力相互作用与成缝机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1352–1365.
FAN Y, SUN J S, JIA Y S, et al. Stress interaction and crack penetration mechanism between smooth blasting holes for tunnel excavation under high in-situ stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1352–1365.

[3] XU J C, WANG Z L, RUI G R. Tunnel slotting-blasting numerical modeling using rock tension-compression coupling damage algorithm [J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6714.

[4] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.

[5] HOLLOWAY D C, BJARRNHOLT G, WILSON W H. A field study of fracture control techniques for smooth wall blasting [C]// The 27th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Tuscaloosa, Alabama: ARMA, 1986: 456−463.

[6] 宗琦. 岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 30–33.
ZONG Q. Investigations into mechanism of crack formation for grooved hole-well blasting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 30–33.

[7] 岳中文, 郭洋, 王煦. 切槽孔爆炸载荷下裂纹扩展行为的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2018–2026.
YUE Z W, GUO Y, WANG X. Experimental study of crack propagation under blasting load in notched boreholes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2018–2026.

[8] 杨立云, 董鹏翔, 王启睿, 等. 爆生气体驱动双共线Ⅰ型裂纹的扩展行为 [J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 538–547.
YANG L Y, DONG P X, WANG Q R, et al. Propagation behavior of two collinear mode Ⅰ cracks driven by explosive gas [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(4): 538–547.

[9] DAEHNKE A, ROSSMANITH H P, NAPIER J A L. Gas pressurisation of blast-induced conical cracks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 626.

[10] 王树仁, 朱振海, 魏有志. 爆生气体对破岩作用的动光弹研究 [J]. 煤炭学报, 1986(1): 11–22.
WANG S R, ZHU Z H, WEI Y Z. Dynamic photoelastic investigation of rock fragmentation by explosive gas [J]. Journal of China Coal Society, 1986(1): 11–22.

[11] 杨仁树, 苏洪. 爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 482–489.
YANG R S, SU H. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosion load [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 482–489.

[12] 肖川, 宋浦, 张默贺. 含能材料发展的若干思考 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(4): Ⅰ–Ⅳ.

[13] 李世影, 肖忠良, 李宇, 等. 某中小口径武器用梯度硝基发射装药效应 [J]. 含能材料, 2023, 31(11): 1134–1140.
LI S Y, XIAO Z L, LI Y, et al. Study on the effect of nitro gradiently distributed propellant charge for a small and medium caliber weapon [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(11): 1134–1140.

[14] 薛冰, 凌静, 陈华东, 等. 单基发射药与乳化炸药爆破振动特性对比研究 [J]. 爆破, 2022, 39(3): 145–150, 208.
XUE B, LING J, CHEN H D, et al. Comparative study on blasting vibration characteristics of single-base gun propellant and emulsion explosive [J]. Blasting, 2022, 39(3): 145–150, 208.

[15] 薛冰, 唐运彬, 赵静, 等. 单基发射药孤石爆破特性实验研究 [J]. 爆破, 2022, 39(2): 140–146.
XUE B, TANG Y B, ZHAO J, et al. Experimental study on boulder blasting characteristics of single-base gun propellant [J]. Blasting, 2022, 39(2): 140–146.

[16] 张小兵. 枪炮内弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 98–108.

ZHANG X B. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 98–108.

[17] 宗琦. 爆生气体的准静态破岩特性 [J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 73–78.
ZONG Q. Investigation on features of rock quasi-static fragmentation by gaseous explosion product [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 73–78.

[18] 王铎. 断裂力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 52−59.

[19] 秦虎. 边界元法在断裂控制机理研究中的应用 [J]. 矿冶, 1994, 3(4): 13–16, 6.
QIN H. Application of boundary element method to a study of fracture control mechanism [J]. Mining and Metallurgy, 1994, 3(4): 13–16, 6.

[20] LIN Q, YUAN H N, BIOLZI L, et al. Opening and mixed mode fracture processes in a quasi-brittle material via digital imaging [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131: 176–193.

[21] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(11): 1270–1273.

[22] 赵宏立, 刘来东, 靳建伟, 等. 压力下降条件下一种双基发射药的瞬态燃烧特性 [J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 64–68.
ZHAO H L, LIU L D, JIN J W, et al. Transient combustion performance of gun propellant under depressurization condition [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(1): 64–68.

Damage Process of Double Base Propellant Grooved Blasting on Granite Slab

WANG Duoliang[1], LI Hongwei[1], LIANG Hao[1], LI Shiying[2], WU Yanmeng[1], ZHAO Jing[3], LI Chunzhi[3], XIAO Zhongliang[2]

(1. *School of Chemical and Blasting Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
2. *School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*;
3. *Luzhou North Chemical Industries Co.*, *Ltd.*, *Luzhou* 646003, *Sichuan*, *China*)

Abstract: Aiming at the current groove blasting problems of additional damage, the feasibility of double base propellant for groove blasting was explored. Based on the propellant gas release behavior, the pressure change of the double base propellant in the closed hole was calculated. Combined with high-speed photography and digital image correlation (DIC) method, two groups of experiments were carried out with propellant loading density of 0.84 and 0.96 g/cm^3 to investigate the dynmic destruction process of granite slabs under the action of propellant. The results show that the granite slabs in the two groups of experiments were cracked along the groove direction at 100 μs after ignition, and the cracks penetrated through the slabs at 200 μs; the specimen with a charge density of 0.96 g/cm^3 had a larger separation speed between the upper and lower slabs after fracture, and the upper and lower slabs were cracked by the friction of the blocking rubber and the inertia of the specimen, and the cracks were in the vertical direction at 2 500 μs. The grooves around the blast hole provide space for the effect of the propellant gas, and the grooves can effectively guide the direction of crack propagation, no crushing zone formed around the hole wall. The quasi-static pressure generated by the combustion of double-base propellant is the main driving force for crack initiation and propagation. The experimental results have some implications for the use of double base propellant in controlled rock blasting projects.

Keywords: grooved blasting; rock fracture; double base propellant; dynamic destructive process; digital image correlation