

文章编号:1006-9941(2023)08-0773-13

# 聚能杆式射流侵彻混凝土和岩石靶体试验与数值模拟

张朝平,张先锋,谈梦婷,侯先苇,熊 玮,刘 闯,顾晓辉

(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:** 为研究聚能杆式射流成型及其对混凝土和岩石靶体的侵彻破坏特性,分别开展了大隔板聚能装药射流成型X光试验及侵彻混凝土和岩石靶试验。同时,利用ANSYS/AUTODYN有限元软件,针对大隔板聚能装药爆轰波演化过程、杆式射流成型及侵彻混凝土和岩石过程进行了数值模拟,结合试验结果分析了聚能杆式射流对混凝土和岩石靶体的侵彻毁伤特性。研究表明:大隔板聚能装药炸药采用Lee-Tarver状态方程能够较为准确的描述爆轰波的传播过程,射流参数(侵彻体长度、射流长度、射流头部速度和射流直径)与试验相比最大误差为12.8%。大隔板聚能装药起爆后可形成长径比的杆式射流,侵彻后的混凝土和岩石靶中均有明显的开坑区,但侵彻混凝土过程中扩孔作用不明显。其中,侵彻试验中混凝土靶形成的侵彻深度和侵彻孔径相较于岩石靶分别提高了46.7%和48.1%,而岩石靶表面破坏程度和开坑区域均大于混凝土靶。与混凝土靶相比,由于射流侵彻岩石靶过程中裂纹的不断扩展,形成的裂纹长度和宽度均大于混凝土靶,因此靶体损伤范围较大,内部破坏严重。

**关键词:** 大隔板;聚能装药;混凝土靶;岩石靶;损伤破坏

**中图分类号:** TJ55; O385

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023071

## 0 引言

混凝土、岩石广泛应用于军事和民用建筑中,其毁伤破坏研究是装备研制、防护工程等领域长期关注的热点。聚能装药具备穿透能力强、作用迅速及携带方便等特点,可利用射流对岩石类靶体进行侵彻开孔,在对付混凝土、岩石等硬目标上具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。混凝土和岩石均为非均质脆性材料,有显著的各向异性特征,与混凝土相比,岩石表现出更显著的动态脆性<sup>[2]</sup>。Resnyansky等<sup>[3]</sup>研究了射流侵彻普通混凝土和高强度混凝土的侵彻威力,以及波形整形器对射流侵彻威力的影响,对比分析靶体表面崩落情况以及侵彻深度、开孔体积等,发现高性能混凝土比普通混凝土具有更好的抗射流侵彻性能,同时得出有波形整形器的射流侵彻威力明显优于未加波形整形器的射流侵彻威力的结论。Xiao等<sup>[4]</sup>利用理论研究了射流侵彻混凝土

开孔过程,建立超声速侵彻模型,研究了射流对不同强度混凝土的侵彻威力,结果表明侵彻半径对目标阻力的敏感性大于侵彻深度。潘绪超等<sup>[5]</sup>利用有限元软件对三种典型装药结构射流侵彻岩石过程进行了数值模拟,发现K装药较适用高强度、大密度岩石的穿孔。吴昊等<sup>[6]</sup>分析了药型罩材料、锥角、壁厚及炸高等参数对射流成型和侵彻混凝土类靶体终点效应的影响,给出了聚能装药侵彻混凝土类靶体优化与试验设计方法。综上所述,射流侵彻岩石类靶体的相关研究目前主要集中在混凝土<sup>[7-8]</sup>、高强混凝土<sup>[9]</sup>、凝灰岩<sup>[10]</sup>等材料上,鲜有关于射流侵彻花岗岩的研究报道。

聚能装药结构直接影响射流性能,研究人员致力于设计一种无杵体、大射流质量的聚能装药。2002年,Funston等<sup>[11]</sup>在专利中设计了一种新型聚能装药——K装药,由隔板和偏心半球药型罩组成,可形成高速连续杆式射流。装药中隔板的存在使得作用在药型罩上的爆轰载荷变得复杂,国内外学者张先锋<sup>[12-15]</sup>、郑元峰<sup>[16]</sup>、李文彬<sup>[17-18]</sup>、Melara<sup>[19]</sup>、Khalid<sup>[20]</sup>等对带隔板聚能装药成型及侵彻靶板方面进行了大量的数值模拟、理论和试验研究,结果表明:与传统聚能装药结构相比,隔板可以调整爆轰波波波形,将点起爆形成的发散

收稿日期:2023-04-04;修回日期:2023-05-08

网络出版日期:2023-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助(12141202,12002170)

作者简介:张朝平(2000-),男,硕士研究生。e-mail:15082781790@163.com

通信联系人:张先锋(1978-),男,博士,教授。e-mail:lynx@njust.edu.cn

引用本文:张朝平,张先锋,谈梦婷,等.聚能杆式射流侵彻混凝土和岩石靶体试验与数值模拟[J].含能材料,2023,31(8):773-785.

ZHANG Chao-ping, ZHANG Xian-feng, TAN Meng-ting, et al. Experimental and Numerical Simulation of Shaped Charge Jet Penetrating Concrete and Rock Targets[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):773-785.

爆轰波转变为环圈阵面的汇聚爆轰波,提高了爆轰波压力,改变了爆轰波波阵面与药型罩面的压垮角,形成杆式射流。聚能杆式射流是一种介于爆炸成型弹丸和聚能射流之间的聚能侵彻体,与聚能射流相比速度梯度小,药型罩利用率高,不易被拉断,对炸高不敏感,可以兼顾聚能射流侵彻深度大以及爆炸成型弹丸侵彻孔径大的优点,广泛用于串联战斗部的前级装药,用于对付多种目标<sup>[1, 21]</sup>。虽然国内外学者对带隔板装药结构有大量的研究,但是在数值模拟中带隔板的高能炸药状态方程方面研究较少,而炸药的状态方程直接影响射流成型结果,进而影响侵彻结果。

基于以上研究背景,本研究设计并开展带隔板聚能装药结构射流成型及侵彻混凝土和花岗岩靶的试验,利用 ANSYS/AUTODYN 有限元软件建立相应的有限元模型,分析带隔板聚能装药的射流成型过程,比较炸药不同状态方程下爆轰波的传播过程,对射流侵彻混凝土和岩石的侵彻过程及靶体损伤情况进行分析。通过本文的研究,可建立大隔板聚能装药射流成型数值模拟方法,获得大隔板聚能装药射流对混凝土靶和岩石靶的侵彻破坏能力,揭示射流对混凝土和岩石靶体的作用特性,为后续岩石类靶体大开孔聚能装药结构设计有重要指导意义。

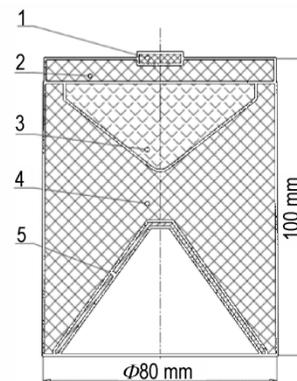
## 1 大隔板聚能装药射流成型及侵彻混凝土/岩石靶试验

### 1.1 聚能装药结构

采用的大隔板聚能装药结构如图1所示,主要由起爆药柱、副药柱、隔板、主药柱和药型罩组成。其中,主装药采用压装的 JH-2(8701)炸药,密度为  $1.71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;隔板采用尼龙材料,密度为  $1.14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;药型罩为紫铜材料,厚度为  $2 \text{ mm}$ ,密度为  $8.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验时,起爆药柱采用中心点起爆方式,初始爆轰波经过隔板后,将改变在炸药中的传播方向和传播形状,形成汇聚形爆轰波,从而改变爆轰波对药型罩的入射角,增大对药型罩的压垮速度、提高射流质量,形成高速杆式射流<sup>[13, 18]</sup>。

### 1.2 试验布局及测试方案

为获取大隔板聚能装药射流成型结果,采用  $300 \text{ kV}$  脉冲 X 光机对射流成型过程进行拍摄,试验布局如图2所示。聚能装药放置在出光口与 X 光底片盒之间,保证 X 光出光口、聚能装药和底片盒中轴线在一个平面内。同时,保证聚能装药高度适中,使成型射流完



a. schematic of the layout of shaped charge



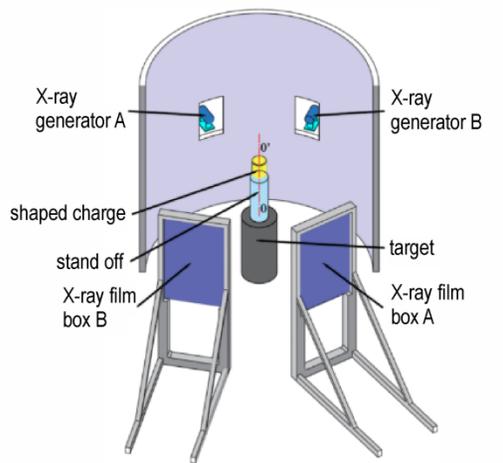
b. photograph of the layout of shaped charge

图1 大隔板聚能装药结构

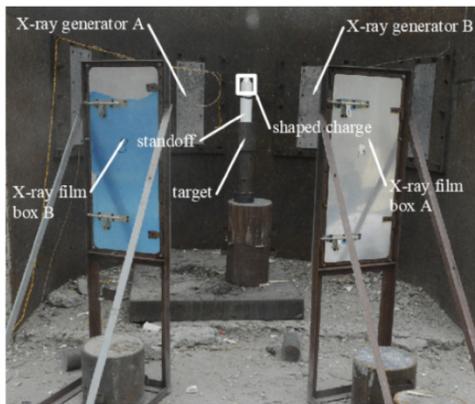
1—起爆药柱,2—副药柱,3—隔板,4—主药柱,5—药型罩  
Fig.1 Structure of the shaped charge with a large barrier  
1—detonator,2—second charge,3—barrier,4—main charge,5—liner

整的投影到底片上。底片盒上粘结有一根长度为  $200 \text{ mm}$  的铁丝,取其在底片上的投影为参考线。炸药起爆时,启动 X 光机的计时系统,通过控制 X 光的出光时间  $t$ ,获取不同时刻的射流形态。结合几何关系,得到实际射流长度、射流半径和射流的平均速度。

进一步,开展大隔板聚能装药射流正侵彻混凝土靶和岩石靶试验,探究聚能装药对混凝土和岩石靶的破坏特性。为减小径向边界对射流侵彻过程的影响,混凝土靶直径为  $\Phi 1200 \text{ mm}$ ,高度为  $1200 \text{ mm}$ ,按照 C40 普通混凝土配合比进行浇筑,并采用混凝土自然养护方法养护  $28 \text{ d}$ ,测量得到混凝土靶平均抗压强度为  $40 \text{ MPa}$ ,密度为  $2.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。岩石靶为整块天然的细粒至中粒花岗岩,取自安徽合肥,是一种材质不均匀的多矿物混合物,含有斜长石、石英、黑云母等多种矿物,呈灰白色。花岗岩尺寸为  $800 \text{ mm}\times 800 \text{ mm}\times 1200 \text{ mm}$ ,密度为  $2.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验前,在岩石靶周围浇筑混凝土,使浇筑之后的岩石靶尺寸与混凝土靶尺寸相同。同时,在两种靶体外侧周向加固一个厚度



a. schematic of the layout of X-ray experiments



b. photograph of the layout of X-ray experiments

图2 X光试验布局图

Fig.2 Layout of X-ray experiment

为3 mm的A3钢箍,用以确保靶体在试验中不崩塌或碎裂。大隔板聚能装药静破甲试验布局如图3所示,靶面和聚能装药口部放置测速靶纸,当形成的金属射流通过时,线路导通产生电信号,利用测速仪记录射流通过两张测速靶纸所用的时间,计算出射流的平均速度,并与X光试验得到的射流头部速度对比。为保证射流侵彻时已经完全成型且不发生断裂,炸高筒高度设置为175 mm(约2.2倍装药口径)。

### 1.3 试验结果

#### 1.3.1 聚能杆式射流成型过程

射流成型试验中,为更好地观察射流的形成和拉伸,X光机射线发生器A的出光时间设置为引爆炸药后20 μs,射线发生器B的出光时间设置为25 μs。由于设备本身的影响,在实际X射线发射时间和预设时间之间存在一定的误差,以实际出光时间为参考值。大隔板聚能装药射流在X光机射线发生器A的实际出



a. experiment of penetrating concrete target



b. experiment of penetrating granite target

图3 侵彻试验布局图

Fig.3 Layout of penetrating experiments

光时间  $t_A=21.11 \mu s$  和射线发生器B的实际出光时间  $t_B=25.99 \mu s$  两个典型时刻的杆式射流形状分别如图4a和4b所示,通过对获得的图像进行数据处理,计算得到射流头部速度为  $6700 m \cdot s^{-1}$ 。

从图4聚能杆式射流成型过程X光照片可以看出:大隔板聚能装药结构形成的射流图像清晰,能够区分外形轮廓及头尾形状。射流较为连续性、拉伸性较好,整体凝聚性良好,形状平直,较为对称,与爆轰轴线具有较好的同轴性。另外,射流头部有不同程度的射流积聚现象,这主要是因为药型罩顶部附近壁面过于靠近锥形药型罩的中心轴线,当药型罩被压垮时,这部分颗粒没有足够的时间加速到最大速度,从而形成积聚,J. Carleone等<sup>[22]</sup>的相关研究证明了这一点。

#### 1.3.2 静破甲试验结果

射流侵彻后靶体的表面毁伤情况如图5所示。从图5a混凝土靶表面破坏情况和图5b岩石靶表面破坏情况中可以看出,大隔板聚能装药结构形成的射流在两种靶体上形成的孔洞均由漏斗坑和隧道区组成。靶体表面在射流侵彻过程中发生崩落,出现多条延展至靶体周向的径向裂纹,具有良好的对称特性,裂缝从侵彻孔洞周向扩展,靶体受到拉伸和压缩作用失效。岩石靶表面的开坑显著大于混凝土靶,靶体表面裂纹缝

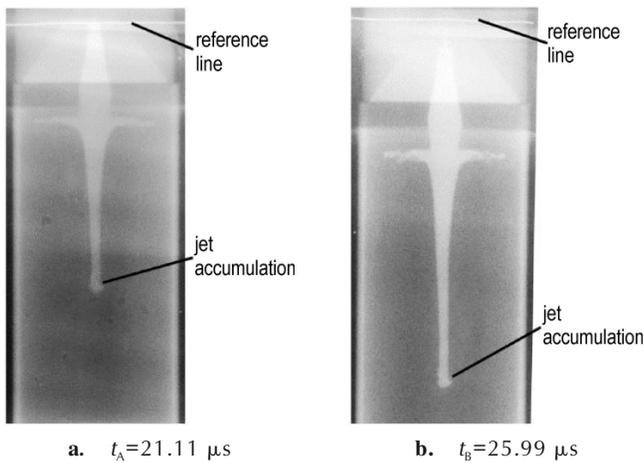


图4 聚能杆式射流X光照片  
Fig.4 X-ray photos of the rod-like jets of shaped charge

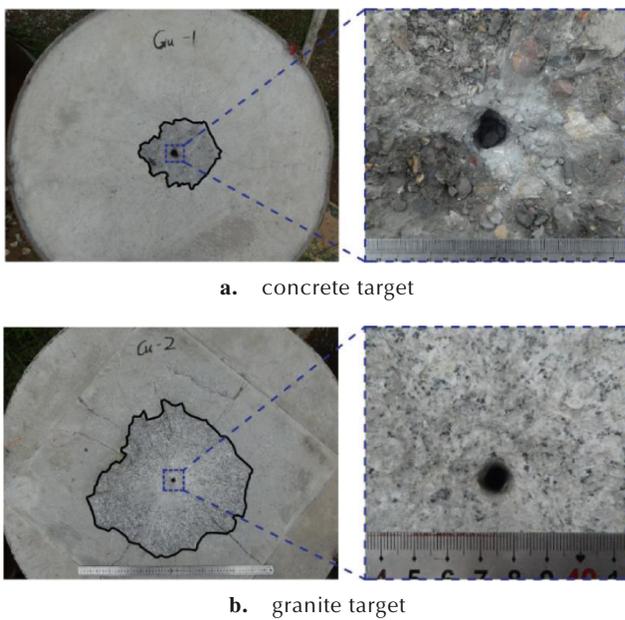
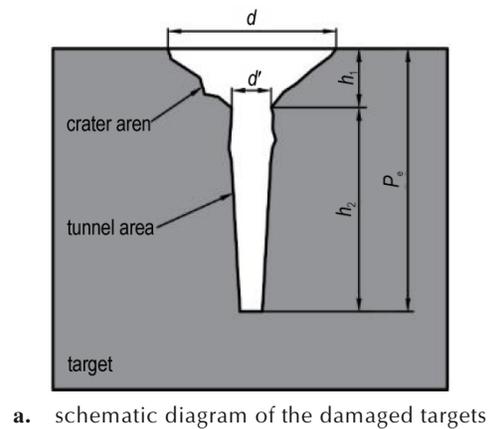


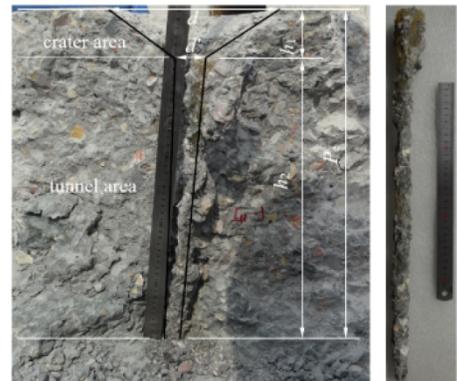
图5 试验后靶体表面毁伤情况  
Fig.5 Damage of the target surface after the test

隙较明显,存在大面积崩落现象,但射流侵入孔直径较小。分析可知,射流撞击靶体瞬间,在撞击点处产生强压缩波,岩石介质开始沿轴向和径向流动,同时压缩波向四周传播并在自由面反射形成拉伸波。由于岩石表面呈正方形,靶体表面中心垂直于靶体侧面距离最短,应力波最先到达靶体侧面,反射、拉伸及叠加作用无序。因此,距离靶体侧面较小处受到应力波的破坏作用会比较明显<sup>[23]</sup>。

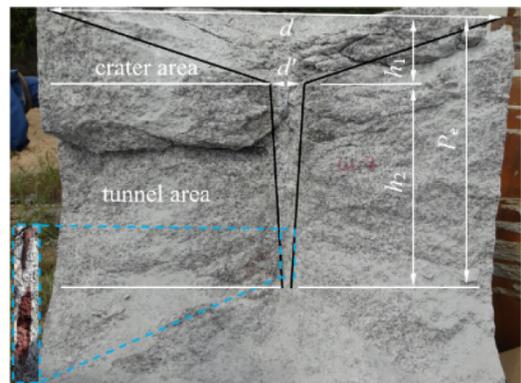
试验后,为采集试验数据,将环氧树脂灌入孔道中,等待其完全凝固后对混凝土和岩石进行剖靶,获取完整的“侵入孔道”。图6为靶体损伤示意图及剖靶后



a. schematic diagram of the damaged targets



b. concrete target and epoxy "penetration trajectory" shape



c. granite target

图6 靶体损伤示意图及剖靶后混凝土和岩石内部破坏情况  
Fig.6 Schematic diagram of the damage of targets and the internal damage of concrete and rock targets after splitting

混凝土和岩石内部形态,表1为相应的试验数据。其中, $d=(4AREA/\pi)^{1/2}$ ,是开坑等效直径,mm;AREA为靶体表面毁伤面积,mm<sup>2</sup>;  $d_{max}$ 为最大开坑直径,mm;  $d_{min}$ 为最小开坑直径,mm;  $d'$ 为隧道口部直径,mm;  $h_1$ 为开坑深度,mm;  $h_2$ 为隧道区长度,mm;  $P_e=h_1+h_2$ 为总侵入深度,mm;  $k=P_e/D$ 为装药直径倍数,  $D$ 为装药直径,mm。大隔板聚能装药侵入混凝土靶开坑等效直径(258.3 mm)显著小于岩石靶(456.7 mm),而混

表 1 射流侵彻靶体试验数据

Table 1 Experimental results of jet penetrating targets

material of target	crater size					tunnel size		penetration trajectory size	
	$d / \text{mm}$	$d_{\text{max}} / \text{mm}$	$d_{\text{min}} / \text{mm}$	$h_1 / \text{mm}$	AREA / $\text{mm}^2$	$d' / \text{mm}$	$h_2 / \text{mm}$	$P_e / \text{mm}$	$k$
concrete	258.3	292	242	86	52400	40	552	638	7.97
granite	456.7	506	439	87	163814	27	348	435	5.44

Note:  $d$  is the equivalent crater diameter;  $d_{\text{max}}$  is the maximum crater diameter;  $d_{\text{min}}$  is the minimum crater diameter;  $h_1$  is the crater depth; AREA is the target surface damage area;  $d'$  is the tunnel diameter;  $h_2$  is the tunnel depth;  $P_e$  is the penetration depth of experiment;  $k$  is the ratio of penetration depth to shaped charge diameter.

混凝土靶的隧道口部直径和侵彻深度(40 mm、638 mm)均大于岩石靶(27 mm、435 mm),可得岩石靶表面毁伤面积为混凝土靶的3.1倍,而射流对混凝土靶的侵彻深度和侵彻孔径相较于岩石靶分别提升了46.7%和48.1%。由于射流对靶体的侵彻作用,造成混凝土处于疏松状态,且环氧树脂本身具有强粘结力,获取的“侵彻孔道”上附有一层混凝土,如图6b所示,但其基本可以表示混凝土在射流侵彻后的孔道轮廓。岩石靶表面损伤较为严重,导致孔洞中可能含有岩石碎渣,同时由于岩石隧道口部直径较小,环氧树脂并未完全流入孔道,因此无法获取完整的岩石靶孔道环氧树脂模型。为了获得更准确的岩石靶的孔道轮廓,剖靶后对不同深度的岩石靶侵彻孔道直径进行了测量。试验结果表明,射流均未穿透混凝土靶和岩石靶,混凝土靶和岩石靶侧面有几条横向裂纹,但未贯穿整个靶体,表明靶体可视为半无限靶。裂纹整体布局近似对称,证明了装药侵彻厚混凝土靶和岩石靶是对称问题<sup>[24]</sup>。此外,岩石靶出现了明显的层裂、杵堵现象,侵彻孔道周围的岩石高度破碎,呈粉末状,表明材料的流动与射流方向一致。这是因为岩石是一种各向异性的非均匀脆性材料,由尺寸、形状和矿物成分各不相同的许多颗粒连接在一起而组成的集合体,颗粒的排列方式不规则并且具有大量的节理裂隙,射流碰到节理裂隙后方向发生改变,大量射流被吸收<sup>[25-26]</sup>。应力波传播过

程中,在节理面上发生反射和透射,引发层裂效应。

## 2 大隔板聚能装药射流成型过程数值模拟研究

### 2.1 有限元模型、材料模型及参数

为研究大隔板聚能装药射流成型,利用ANSYS/AUTODYN<sup>[27]</sup>有限元数值模拟软件建立二维有限元模型。模型如图7所示,图7中蓝色所示为空气域,空气域尺寸为160 mm×400 mm,建立轴对称分析模型。对空气域施加流出边界条件,采用中心点起爆方式,起爆点设在装药对称轴顶点,坐标为原点。由于射流成型为大变形过程,因此空气、药型罩、隔板、装药采用多物质欧拉算法,网格尺寸为0.5 mm。

数值仿真模拟中炸药的状态方程对仿真的结果影响较大,特别是对带隔板聚能装药影响尤为显著<sup>[28]</sup>,因此,分别采用JWL方程 Programmed Burned 化学反应模型和Lee-Tarver 化学反应模型<sup>[29]</sup>,爆轰波传播方式设置为indirect,对大隔板聚能装药爆轰波的传播演化及驱动药型罩的过程进行数值模拟研究。由于Lee-Tarver模型中部分参数是在cm、g、 $\mu\text{s}$ 单位制拟合得到,故有限元计算模型采用cm-g- $\mu\text{s}$ -K单位制。

在Jones和Wilkins工作的基础上, Lee修改了爆轰产物的等熵线方程,炸药爆轰产物采用

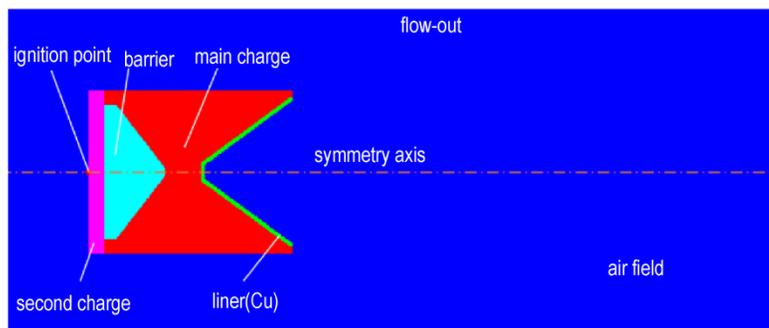


图 7 聚能装药射流有限元模型

Fig.7 Numerical model of shaped charge jet

Jones-Wiikins-Lee (JWL) 状态方程描述,其基本形式为<sup>[30]</sup>:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料常数;  $p$ 、 $E_0$  和  $V$  分别为爆炸产物的压力 (GPa)、单位体积的内能 ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和相对体积 ( $\text{m}^3$ ) (单位体积装药产生的爆轰产物体积), 其中 8701 炸药的 C-J 爆轰性能参数和 JWL 状态方程参数如表 2 所示。

炸药的冲击响应过程采用 Lee-Tarver 三项式点火增长模型模拟, 具体方程如下<sup>[32]</sup>:

$$\partial F / \partial t = I(1 - F)^b (\mu - a)^x + G_1 (1 - F)^c F^d p^\gamma + G_2 (1 - F)^e F^g p^z \quad (2)$$

式中,  $F$  为反应比 (气体炸药的质量与炸药总质量的比

值);  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$  表征材料的可压缩性,  $\rho$  是当前密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_0$  是环境密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $p$  为压力, GPa;  $I$ 、 $b$ 、 $a$ 、 $x$ 、 $G_1$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $\gamma$ 、 $G_2$ 、 $e$ 、 $g$ 、 $z$  为常数, 可以通过拉式分析进行参数拟合求出。

Lee-Tarver 状态方程的部分参数如表 3 所示。

表 2 8701 炸药 JWL 参数<sup>[31]</sup>

Table 2 JWL parameters of 8701 explosive<sup>[31]</sup>

$\rho$	$D$	$p$	$E_0$	$\omega$	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$
$/ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$/ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$/ \text{GPa}$	$/ \text{J} \cdot \text{m}^{-3}$		$/ \text{GPa}$	$/ \text{GPa}$		
1.71	8.315	28.6	8.499	0.34	524.23	7.678	4.2	1.1

Note:  $\rho$  is the density of the explosive;  $D$  is the detonation velocity;  $p$  is the C-J pressure of detonation wave;  $E_0$  is the specific internal energy per unit mass of the explosive;  $\omega$  is the fractional part of the normal Tait equation adiabatic exponent;  $A$  and  $B$  are the pressure coefficients;  $R_1$  and  $R_2$  are the principal and secondary eigenvalues, respectively.

表 3 8701 炸药 Lee-Tarver 参数<sup>[33]</sup>

Table 3 Lee-Tarver parameters of 8701 explosive<sup>[33]</sup>

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$p / \text{GPa}$	unrecrated JWL					product JWL				
			$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.71	7980	29.5	778.09	-5.031	11.3	1.13	0.894	881.45	18	4.8	1.2	0.31
$I / \mu\text{s}$	$b$	$a$	$x$	$G_1$	$c$	$d$	$\gamma$	$G_2$	$e$	$g$	$z$	-
44	0.222	0.01	4	414	0.222	0.667	2	0	0	0	0	

Note:  $\rho$  is the density of the explosive;  $D$  is the detonation velocity;  $p$  is the C-J pressure of detonation wave;  $A$  and  $B$  are the pressure coefficients;  $R_1$  and  $R_2$  are the principal and secondary eigenvalues;  $\omega$  is the fractional part of the normal Tait equation adiabatic exponent;  $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $g$ 、 $x$ 、 $\gamma$ 、 $z$  are parameters of reaction rate equation.

对于金属材料药型罩, 本构方程对其性能特征影响较大。常用的本构方程有 Johnson-Cook (JC) 和 Steinberg 等。其中, Johnson-Cook (JC) 是考虑材料承受大应力、高应变率 and 高温情况下用来描述材料动态响应过程和材料变形行为, Steinberg 方程模型适用于大多数金属材料在高温高压下发生高应变率 ( $>10^5$ ) 时的计算。因此, 数值模拟计算采用 Steinberg 强度模型和 shock 状态方程<sup>[34]</sup>, 相关物理参数如表 4 所示。其中  $\rho$ 、 $C_0$ 、 $G$ 、 $Y$ 、 $T_r$ 、 $T_m$ 、 $\Gamma$ 、 $C_v$ 、 $G_r$  分别为材料的密度、声速、剪切强度、屈服强度、室温、融化温度、Grüneisen 系数、比热容、剪切模量对时间的导数;  $S$  为与材料有关的常数;  $\beta$ 、 $n$  为常数。

空气采用理想气体状态方程:

$$p_A = (\gamma - 1) \rho_A E_A + p_{\text{shifit}} \quad (3)$$

式中,  $p_A$  为压力, Pa;  $\gamma$  为气体常数;  $\rho_A$  为密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $E_A$  为单位质量内能,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $p_{\text{shifit}}$  为初始压力, Pa,  $p_{\text{shifit}} = 0$ 。空气主要参数值见表 5。隔板材料为尼龙, 采用 Von Mises 强度模型和 shock 状态方程, 来自 AUTODYN 中内置的参数, 主要参数如表 6 所示。

表 4 药型罩材料参数<sup>[34]</sup>

Table 4 Material parameters of liner<sup>[34]</sup>

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C_0 / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$S$	$\Gamma$	$T_r / \text{K}$	$C_v / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
8.93	3.94	1.489	2.02	300	383
$G / \text{GPa}$	$Y / \text{GPa}$	$\beta$	$n$	$T_m / \text{K}$	$(-G_r / G) \times 10^3 / \text{K}^{-1}$
47.7	0.12	36	0.45	1790	0.38

Note:  $\rho$  is the density;  $C_0$  is the sound velocity;  $S$  is constant;  $\Gamma$  is the Grüneisen coefficient;  $T_r$  is the room temperature;  $C_v$  is the specific heat capacity at constant volume;  $G$  is the shear modulus;  $Y$  is the yield strength;  $\beta$  and  $n$  are constants;  $T_m$  is the melting temperature;  $G_r$  shear modulus per time derivative.

表 5 空气的材料参数<sup>[35]</sup>

Table 5 Material parameters of air<sup>[35]</sup>

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\gamma$	$E_A / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$p_{\text{shifit}}$
$1.225 \times 10^{-3}$	1.4	$2.068 \times 10^5$	0

Note:  $\rho$  is the density;  $\gamma$  is a constant; and  $\rho$  and  $E_A$  are the density and internal energy per unit mass of air, respectively;  $p_{\text{shifit}}$  is the initial pressure.

## 2.2 大隔板装药爆轰演化过程

大隔板改变了装药内爆轰波的传播方向, 使得药型罩受到的爆轰载荷变得较为复杂。针对主装药, 本

表6 隔板的材料参数

Table 6 Material parameters of barrier

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\Gamma$	$C_0 / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_1$	$G / \text{GPa}$	$Y / \text{GPa}$
1.14	0.87	2.29	1.63	3.68	0.005

Note:  $\rho$  is the density;  $\Gamma$  is the Grüneisen coefficient;  $C_0$  is the sound velocity;  $S_1$  is constant;  $G$  is the shear modulus;  $Y$  is the yield strength.

节分别选取JWL和Lee-Tarver 2种不同状态方程,对大隔板聚能装药爆轰波的传播过程进行数值模拟研究,图8为聚能装药起爆后典型时刻的压力云图,可以看出,采用JWL和Lee-Tarver 2种状态方程模拟得到的爆轰波波形有较大差异且峰值压力不同。基于JWL状态方程所形成的爆轰波如图8a所示, $t=8 \mu\text{s}$ 时,爆轰波绕射隔板,波阵面不连续,存在多段组合式,呈平面波向前传播,峰值压力在主装药与隔板界面处; $t=10 \mu\text{s}$ 时,爆轰波经过隔板绕射后变成汇聚爆轰波,汇聚爆轰波在装药轴线处发生相互碰撞反射,峰值压力增加,在装药轴线上; $t=11 \mu\text{s}$ 时,随着爆轰波的传播,在装药轴线处(波阵面碰撞点)存在一个峰值压力且较集中的区域,容易对药型罩产生穿透,造成炸药能量泄露,进而无法压垮药型罩,这主要是因为JWL模型为程序起爆模式,炸药微元采用预先设定时间起爆,是一个没有化学

反应的状态方程,不能准确描述炸药的激波起爆过程,特别是在描述带隔板装药爆轰时存在局限性<sup>[15, 36]</sup>。基于炸药冲击起爆点火的Lee-Tarver状态方程所形成的爆轰波如图8b所示, $t=8 \mu\text{s}$ 时,爆轰波绕射隔板,爆轰波波形光滑,呈球形向前传播,峰值压力在爆轰波波阵面处; $t=10 \mu\text{s}$ 时,爆轰波经过隔板绕射后在装药轴线处发生相互碰撞反射,由于入射角大于马赫反射临界入射角,在装药上出现马赫波,马赫波压力高于爆轰波压力,峰值压力处于隔板内部; $t=11 \mu\text{s}$ 时,随着爆轰波传播距离的增加,装药轴线附近存在一个压力较大的马赫杆,有利于压垮药型罩。基于以上分析可知,装药起爆后,爆轰波绕过隔板向前传播,并在装药轴线处发生碰撞,产生超压爆轰,隔板可以控制爆轰波在炸药中的传播形状,改变爆轰波对药型罩的入射角和压垮速度,通过对比JWL和Lee-Tarver 2种不同状态方程爆轰波波阵面,发现Lee-Tarver状态方程能够更加真实的描述大隔板聚能装药爆轰波的传播过程。

如图9所示为Stephen Miller<sup>[37]</sup>的半剖面大隔板聚能装药试验布局,典型时刻爆轰波波形试验结果与数值模拟结果对比见图10,其中图10a为爆轰波绕射隔板时刻的波形,图10b为爆轰波汇聚后开始压垮药

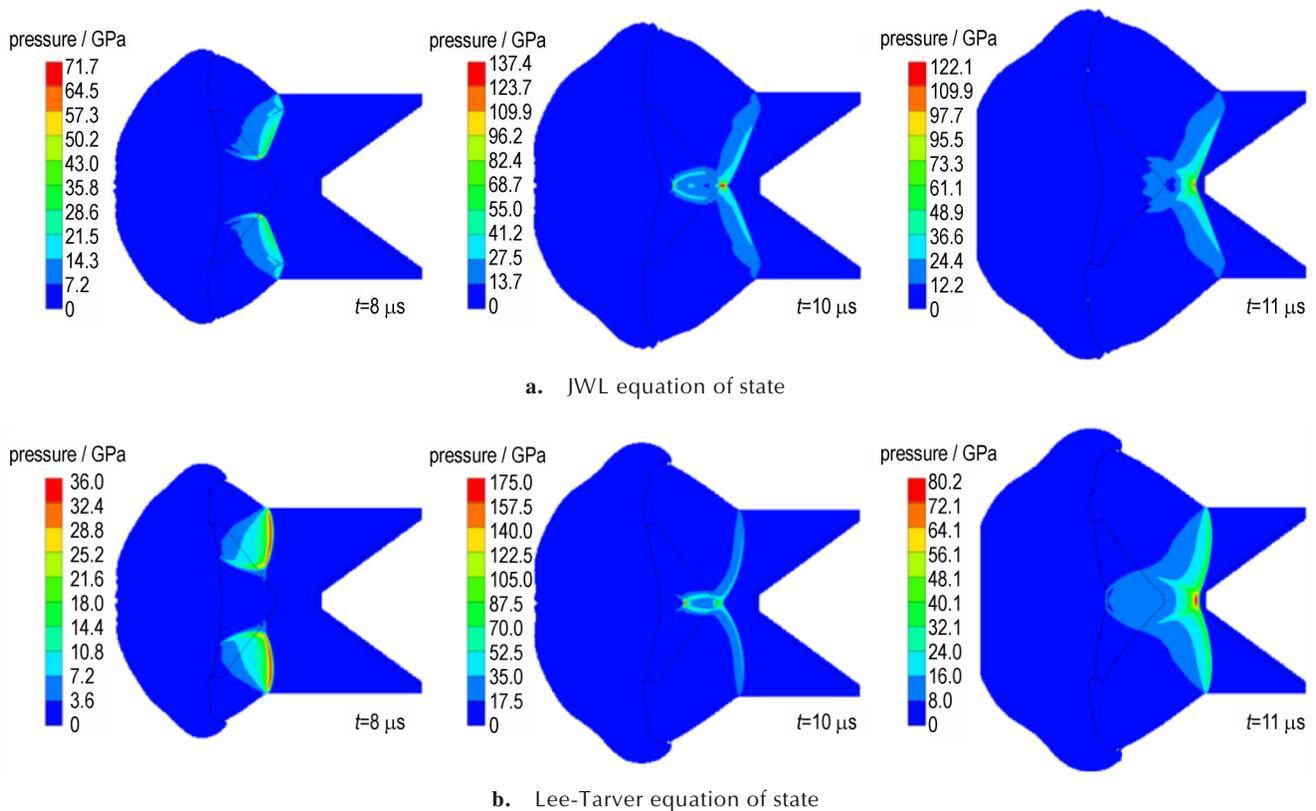


图8 采用不同的炸药状态方程模拟得到的爆轰波压力云图

Fig.8 Pressure contours of detonation waveform of explosive simulation by using different equations of state

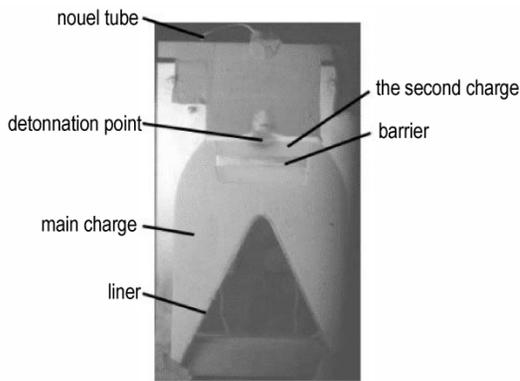
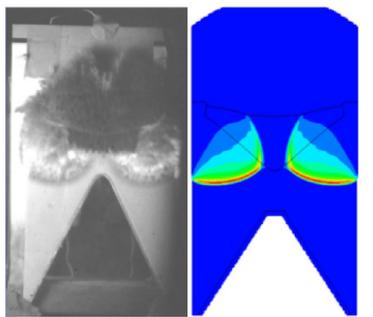
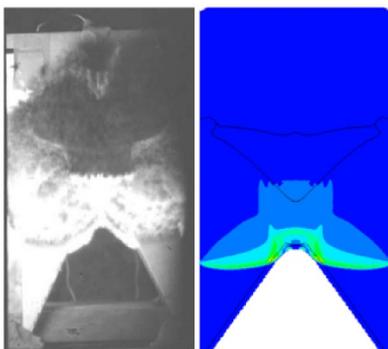


图9 半剖面大隔板聚能装药试验装置<sup>[37]</sup>

Fig.9 Semi-section of shaped charge with a large experimental barrier device<sup>[37]</sup>



a. detonation wave diffraction through the barrier



b. detonation wave crushes the liner

图10 大隔板聚能装药试验与数值模拟结果对比<sup>[37]</sup>

Fig.10 Comparison of experimental and numerical results of large barrier shaped charge<sup>[37]</sup>

型罩的波形。与前文所使用2种状态方程的聚能装药爆轰过程对比,发现采用Lee-Tarver状态方程模拟得到的爆轰波波形与试验相符合,因此数值模拟中炸药应采用Lee-Tarver状态方程。考虑到Lee-Tarver状态方程不能直接应用起爆点起爆,所以副药柱采用JWL状态方程,主药柱采用Lee-Tarver状态方程。

### 2.3 大隔板聚能装药射流成型过程

基于以上讨论,对大隔板聚能装药中的主副装药

分别采用Lee-Tarver和JWL 2种状态方程进行射流成型数值模拟,典型时刻射流成型及拉伸过程如图11所示。可以看出:12  $\mu\text{s}$ 时爆轰波到达药型罩顶部,药型罩开始受压变形;23  $\mu\text{s}$ 时炸药已完全起爆,爆轰波对药型罩的压垮基本完成,药型罩在轴线闭合形成高速侵彻体;33  $\mu\text{s}$ 时射流已经形成,存在明显的速度梯度,射流在运动中逐渐被拉伸;43  $\mu\text{s}$ 时射流头部到达炸高为175 mm处,射流尖端速度( $6833 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )明显高于杵体速度( $924 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),射流形态较好,无拉断情况。

为验证炸药采用Lee-Tarver状态方程数值模拟结果,利用大隔板射流成型X光试验射流参数进行对比。试验中,启动X光机的计时系统与起爆点起爆时刻不同,为了使数值模拟与试验中的射流处于同一时刻,选取数值模拟和试验中的射流头部与靶体距离相同时刻,如图12所示。详细对比如表7所示,误差表示数值模拟结果与试验值的偏差。从图12和表7可以看出,试验与数值模拟结果吻合较好,射流头尾部直径的误差稍大,但最大误差不超过12.8%。此外,数值模拟中射流头部无堆积现象,这是因为数值模拟中聚能装

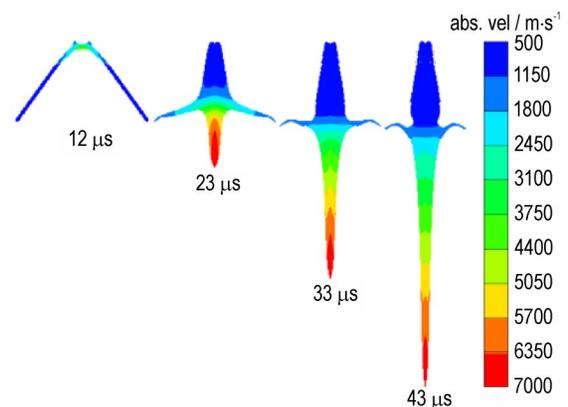


图11 大隔板聚能装药射流成型及拉伸过程

Fig.11 Jet forming and stretching process of large barrier shaped charge

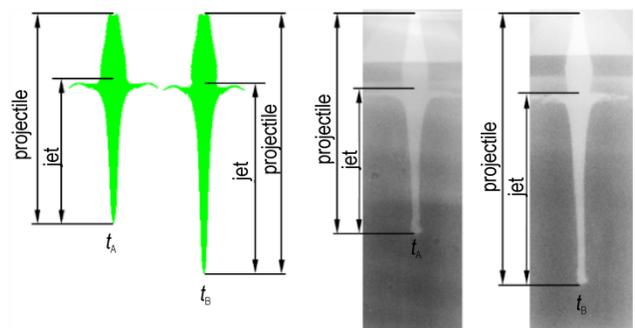


图12 测量位置示意图

Fig.12 Diagram of measurement locations

表7 射流试验与数值模拟结果对比

Table 7 Comparison between the experimental and numerical results of jets

item	projectile length / mm		jet length / mm		jet head diameter / mm		jet tail diameter / mm		head velocity / m·s <sup>-1</sup>
	t <sub>A</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>A</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>A</sub>	t <sub>B</sub>	t <sub>A</sub>	t <sub>B</sub>	
experiment	133.31	164.50	91.61	116.98	4.69	4.28	15.46	13.40	6700
simulation	127.45	157.83	90.62	115.42	4.09	4.17	16.84	14.04	6833
error / %	-4.40	-4.05	-1.08	-1.33	-12.79	-2.57	+8.93	+4.77	+1.98

药爆轰波对药型罩的压垮为理想状态,而试验中很难实现,因此数值模拟与试验存在一定差异。综上, Lee-Tarver 状态方程能够较为准确的模拟聚能装药的射流成型过程。

### 3 聚能装药射流侵彻混凝土及岩石靶数值模拟研究

#### 3.1 混凝土及岩石材料参数

目前,主要使用在全应力空间中构建的三种本构模型模拟爆炸载荷下混凝土和岩石的损伤演化过程: Holomquist-Johnson-Cook (HJC) 模型、Johnson and Holomquist (JH) 模型和 Riedel-Hiermaere-Thoma (RHT) 本构模型。其中, HJC 和 JH 本构模型没有考虑偏应力张量第三不变量的影响<sup>[38]</sup>,对混凝土结构/岩石在冲击爆炸荷载作用下的开裂模式(剥落和开裂)预测较差。相比其他模型, RHT 模型考虑了三维应力空间中的强度特征,其强度与冲击压力、应力应变、温度、应变速率、应变硬化和损伤软化等因素密切相关。由于混凝土和岩石材料的动态力学响应较为复杂, RHT 模型更适用于射流侵彻混凝土和岩石材料的数值模拟研究。本研究混凝土和岩石材料采用多孔隙特征的  $p$ - $\alpha$  (Palpha) 状态方程和 RHT 脆性材料本构模型,具体材料参数见表 8。其中  $\rho_{por}$  为材料多孔密度;  $C_{por}$  为材料多空声速;  $p_{crush}$  为孔隙开始压缩压力;  $p_{lock}$  为材料压实压

力;  $n$  为孔隙度指数;  $G$  为剪切模量;  $f_c$  为抗压强度;  $\epsilon_f^{min}$  为最小失效应变;  $A$ 、 $N$  分别为完整面失效常数、完整面失效指数;  $Q$  为拉伸/压缩子午线比率;  $B$  为罗德角相关系数;  $AF$ 、 $NF$  分别为残余强度面系数、残余强度面指数;  $\delta$  为压缩应变率指数;  $\alpha$  为拉伸应变率指数。

#### 3.2 杆式射流侵彻混凝土及岩石靶作用过程数值模拟

为更好研究靶体损伤,参照试验几何尺寸,建立二维射流侵彻靶体有限元模型,靶体尺寸为 1200 mm×1200 mm,靶体采用拉格朗日算法,考虑拉格朗日网格与欧拉网格的匹配且尽量减少整体网格数量,保证数值模拟计算效率,靶体的网格尺寸取 0.75 mm。金属射流和靶体之间为流固耦合接触。

图 13 为聚能射流侵彻混凝土和岩石靶的损伤演化过程损伤云图,图中  $P$  为射流侵彻深度。损伤是压缩和拉伸破坏的综合效应。损伤程度范围为 0~1,值越大,靶体破坏程度越高。不同的颜色代表不同的破坏程度,红色表示最严重的破坏,相应的损伤程度值为 1,蓝色表示轻微破坏或无破坏,损伤程度值为 0。在数值模拟中,很好地捕捉了靶体损伤演化过程,并合理地再现了试验结果。

从图 13a 和 13b 射流侵彻靶体的损伤演化过程可以看出,聚能装药射流侵彻作用下混凝土和岩石靶体的破坏程度存在一定差异。 $t=60 \mu s$  时,射流头部碰及混凝土和岩石靶,碰撞点的压力、速度等骤变,入射冲

表8 混凝土<sup>[39-40]</sup>和岩石<sup>[41-44]</sup>材料参数

Table 8 Material parameters of concrete and granite

material	$\rho_{por} / g \cdot cm^{-3}$	$C_{por} / km \cdot s^{-1}$	$p_{crush} / MPa$	$p_{lock} / GPa$	$n$	$G / GPa$	$f_c / MPa$	$\epsilon_f^{min}$
concrete	2.40	2.935	26.6	6	3	17.0	40.0	0.010
granite	2.64	2.620	125.0	6	3	21.9	167.8	0.015
material	$A$	$N$	$Q$	$B$	$AF$	$NF$	$\delta$	$\alpha$
concrete	1.60	0.61	0.68	0.0105	1.60	0.61	0.031	0.035
granite	2.44	0.76	0.68	0.0500	0.25	0.62	0.026	0.007

Note:  $\rho_{por}$  is the initial density of porous material;  $C_{por}$  is the initial sound velocity of porous material;  $p_{crush}$  is the crush pressure;  $p_{lock}$  is the compaction pressure;  $n$  is the porosity exponent;  $G$  is the shear modulus;  $f_c$  is the compressive strength;  $\epsilon_f^{min}$  is the minimum damaged residual strain;  $A$  is the intact failure surface constant;  $n$  is the intact failure surface exponent;  $Q$  is the Tens./comp. meridian ratio;  $B$  is the brittle to ductile transition;  $AF$  is the fractured strength constant;  $NF$  is the fractured strength exponent;  $\delta$  is the compressive strain rate dependence exponent;  $\alpha$  is the tensile strain rate dependence exponent.

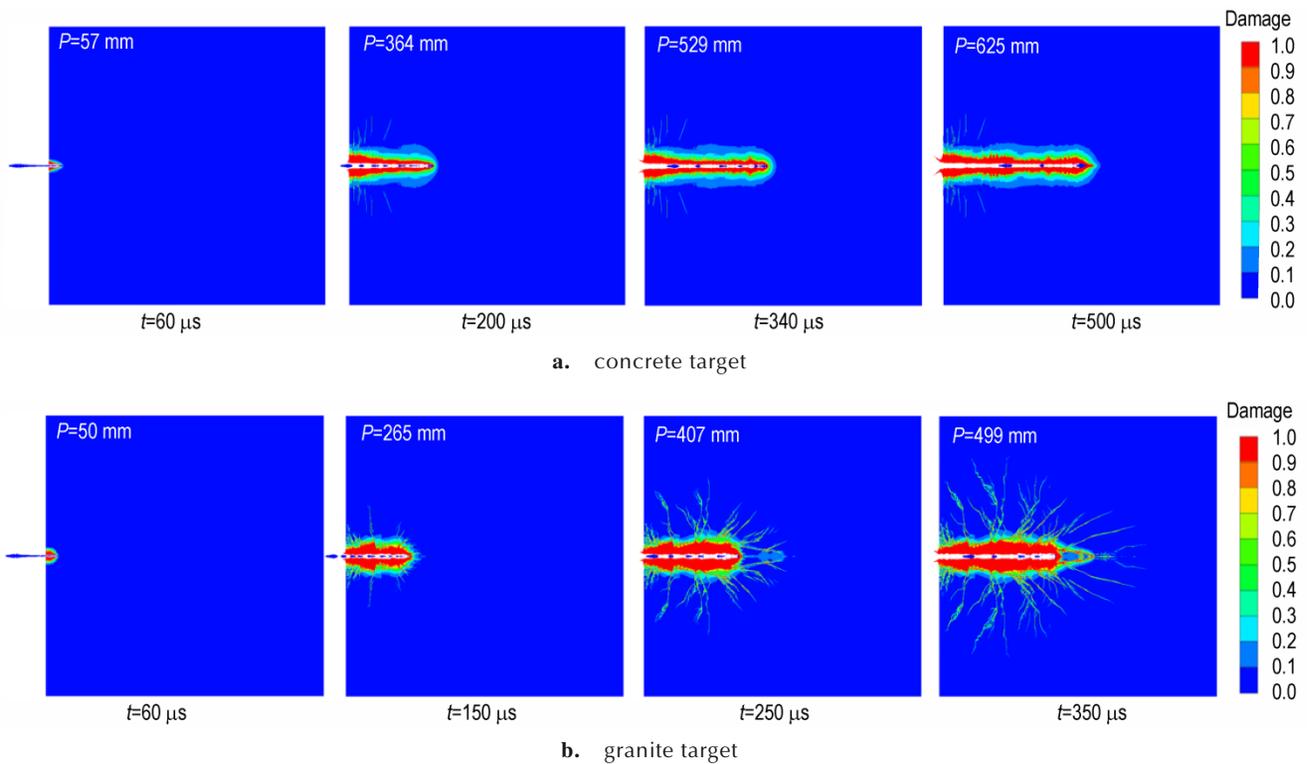


图13 射流侵彻靶体的损伤演化过程

Fig.13 Contours of the development process of damage of jet penetrating targets

击波和对射流的反射冲击波使接触点处的混凝土靶和射流残渣飞溅,在靶体中形成高温、高压、高应变区,靶体的上表面在冲击波和强应力波综合作用下,形成倒锥形开坑,损伤集中在射流头部附近的一个小区域;随着侵彻体的深入,射流侵彻混凝土靶和岩石靶分别在  $t=200\ \mu\text{s}$  和  $t=150\ \mu\text{s}$  时处于准定常侵彻阶段,侵彻破孔深度大部分集中在此阶段,破孔直径变化不大,侵彻孔洞中心区以压应力失效、剪应变失效为主,为粉碎区,侵彻轴向主平面形成拉应力集中区,混凝土和岩石靶在粉碎区漏斗坑处均有形似火山口的部分微微隆起,为侵彻体尾裙外缘脱落造成<sup>[45]</sup>,岩石靶漏斗坑处裂纹明显多于混凝土靶,且裂纹密集,表明岩石靶表面的开坑处破坏比混凝土靶严重;随着侵彻深度的增加,  $t=250\ \mu\text{s}$  时,岩石靶在侵彻孔道周围不断产生新裂纹但未扩展至靶体周围和背面,  $t=340\ \mu\text{s}$  时,混凝土靶在侵彻孔道周围无明显裂纹产生,这是因为冲击波在靶体中传播时,由于岩石中的冲击波强度较高,而岩石的抗拉强度明显低于混凝土的抗拉强度,在径向方向上会发生较大的塑性变形,当变形超过压缩破坏标准时,发生压缩破坏,并在侵彻孔道附近形成压缩破碎区,产生裂纹,消耗冲击波能量,使冲击波衰减为应力波,应力波传播过程中遇到的自由表面将径向压缩波反

射。然后产生拉伸波,拉伸波强度大于岩石的抗拉强度而低于混凝土的抗拉强度,使得岩石靶产生径向裂纹并扩展,直至能量衰减,形成裂隙区,引发层裂效应;射流侵彻混凝土靶和岩石靶分别在  $t=500\ \mu\text{s}$  和  $t=350\ \mu\text{s}$  时结束,表现为射流头部在孔道底部形成堆积附着,射流头部直径变大,后续射流不能接触到孔底。

通过上述分析可知,射流在侵彻混凝土和岩石靶过程中,靶体内部均有裂纹产生,但侵彻岩石靶过程中裂纹发育显著,并在射流侵彻过程中在径向和轴向均不断扩展,在岩石靶体轴向形成预损伤区域,进而影响侵彻深度和孔径,与混凝土靶相比,射流侵彻结束后,岩石靶侵彻孔道周围附近裂纹长度和宽度均大于混凝土靶,岩石靶损伤范围较大,靶体内部破坏严重,射流侵彻混凝土靶的侵彻深度大于岩石靶,但侵彻时间明显长于岩石靶,这与射流侵彻速度、靶体强度以及靶体阻力密切相关。

从图 14 中的靶体终态损伤云图可以看出,数值模拟与试验结果(如图 6 所示)产生的压缩破坏区、拉伸破坏区和最终破坏区的分布特征非常相似。图 14a 为射流侵彻混凝土靶的数值模拟与试验破坏结果,数值模拟获得的混凝土靶的平均开坑直径和侵彻深度分别为 220 mm,625 mm,与试验结果误差分别为 -14.7%

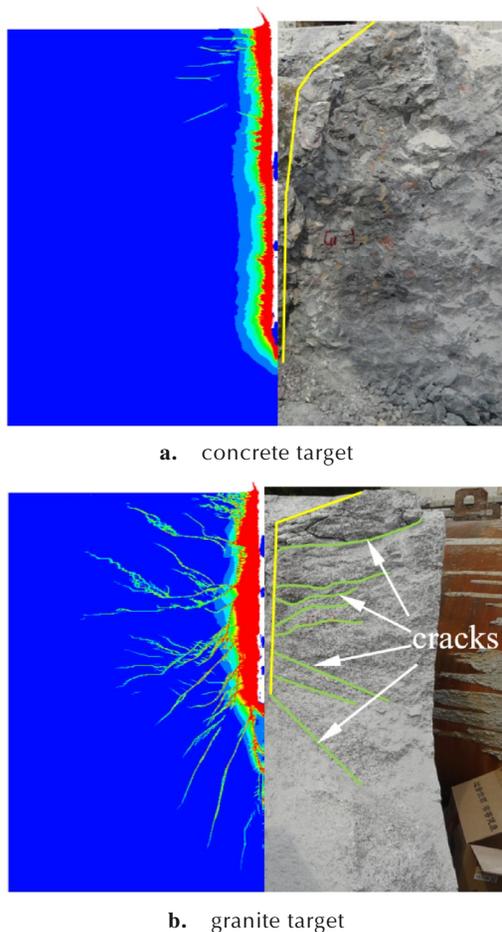


图 14 数值模拟与试验中靶体最终破坏形态对比  
**Fig.14** Comparison of final damage patterns of targets in numerical simulations and experiments

和-2.1%；图 14b 为射流侵彻岩石靶的数值模拟与试验破坏结果，岩石靶的平均开坑直径和侵彻深度分别为 499 mm, 504 mm, 与试验结果误差分别为 14.7% 和 10.3%，模拟结果与实验结果基本一致。因此，本文使用的有限元模型能较好地模拟射流侵彻混凝土靶和岩石靶的损伤和破坏情况，后续可用于更深入的数值模拟研究。但需注意到，靶体开坑与试验结果有一定差距。试验结果显示，靶体上的中央坑是一个边缘极不规则的剥裂区域。这可能是因为试验中靶体表面同时受爆炸冲击波和射流侵彻靶体的反射冲击波作用使靶体表面崩落，而混凝土和岩石是一种非均质材料，内部材质尺寸不一致且随机分布，加上侵彻过程中靶体阻力也不同。而数值模拟基于连续性假设，材料模型为理想化描述，数值模拟中网格会变形但不会断裂且忽略了爆轰产物的影响，由于 RHT 模型的局限性，只能通过数值模拟预测损伤范围和开坑裂纹，无法描述混凝土的坍塌和崩落，使得仿真中漏斗坑不明显，和实

际情况存在误差。

## 4 结论

基于含大隔板的聚能装药结构，开展大隔板聚能装药 X 光射流成型试验及侵彻混凝土和岩石靶试验，获得了射流成型形态和靶体破坏情况。并在此基础上建立了相应的数值模拟模型，对比数值模拟与试验结果，验证了数值模型的可靠性，分析了大隔板聚能装药的爆轰波传播过程及对靶体的毁伤特性，探讨了不同炸药状态方程对装药内爆轰波的影响以及射流对混凝土和岩石靶的损伤情况。主要结论如下：

(1) 对于相同聚能装药结构，侵彻试验中大隔板聚能装药形成的杆式射流对混凝土靶的侵彻深度和侵彻孔径相较于岩石靶分别提升了 46.7% 和 48.1%，但对岩石靶的开坑破坏效果显著，岩石靶表面毁伤面积为混凝土靶的 3.1 倍。

(2) 基于 Lee-Tarver 点火增长模型，大隔板聚能装药爆轰波波形和形成的射流均与相应试验吻合较好，成型射流参数（侵彻体长度、射流长度、射流头部速度和射流直径）最大误差不超过 12.8%。

(3) 运用 RHT 本构模型和  $p$ - $\alpha$  状态方程描述混凝土和岩石在高速冲击下变形损伤特性，不仅得到了破孔形状，而且对靶体表面破坏及侵彻孔道周围裂纹扩展等变形损伤细节得到充分描述，通过数值结果与实验结果破坏特征和开孔尺寸（开坑直径和侵彻深度）的比较，验证了仿真模型的准确性。

(4) 射流侵彻混凝土和岩石靶的仿真结果表明，射流在侵彻混凝土和岩石靶过程中，靶体内部均有裂纹产生，与混凝土靶相比，射流侵彻岩石靶过程中轴向裂纹和径向裂纹不断产生并发育显著，侵彻孔道周围附近裂纹长度和宽度均大于混凝土靶，因此岩石靶损伤范围较大，靶体内部破坏严重。

### 参考文献：

- [1] 肖强强. 聚能装药对典型土壤/混凝土复合介质目标的侵彻研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
XIAO Qiang-qiang. Penetration research of shaped charge into typical soil/concrete target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [2] 翟越. 岩石类材料的动态性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.  
ZHAI Yue. Study on Dynamic Capabilities of Rock Materials [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [3] RESNYANSKY A, WECKERT S. Response of an ultra high performance concrete to shaped charge jet [C]//8th International Conference on shock and impact loads on structures, Adelaide, Australia, 2009: 529-536.

- [4] XIAO Q Q, HUANG Z X, ZHU C S, et al. Calculation of depth and crater diameter for the supersonic penetration of shaped charge jet into concrete [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(2): 224-231.
- [5] 潘绪超,何勇,高群英,等.基于岩石装药孔要求的聚能装药技术研究[J].*矿业研究与开发*, 2011, 31(3): 89-93.  
PAN Xun-chao, HE Yong, GAO Qun-ying, et al. Study on shaped charge technique based on the requirements of rock charge hole[J]. *Mining Research and Development*, 2011, 31(3): 89-93.
- [6] 胡枫,吴昊,方秦,等.聚能射流侵彻混凝土类靶体数值模拟研究[J].*防护工程*, 2017, (02): 23-30.  
HU Feng, WU Hao, FANG Qin, et al. Numerical simulations of shaped charge jet penetration into concrete-like targets[J]. *Protective Engineering*, 2017, (02): 23-30.
- [7] 张利.聚能战斗部对混凝土靶的开坑效应及影响规律研究[J].*兵器装备工程学报*, 2022, 43(4): 134-140.  
ZHANG Li. Study on crater and influence law of shaped charge warhead on concrete target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(4): 134-140.
- [8] HU F, WU H, FANG Q, et al. Impact performance of explosively formed projectile (EFP) into concrete targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 150-166.
- [9] XIAO Q-Q, HUANG Z-X, ZU X, et al. Shaped charge penetration into high- and ultrahigh-strength Steel-Fiber reactive powder concrete targets[J]. *Defence Technology*, 2020, 16(1): 217-224.
- [10] HUERTA M, VIGIL M G. Design, analyses, and field test of a 0.7m conical shaped charge[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(8): 1201-1213.
- [11] FUNSTON R J, MATSSON K V, OUYE N N. K charge-A multipurpose and shock warhead: US6393991B1[P], 2002.
- [12] PAN J, ZHANG X, HE Y, et al. Theoretical and experimental study on detonation wave propagation in cylindrical high explosive charges with a wave-shaper[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(3): 658-676.
- [13] 张先锋,陈惠武.三种典型聚能射流侵彻靶板数值模拟[J].*系统仿真学报*, 2007, (19): 4399-4401+4410.  
ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu. Computational study of three typical shaped charge jets[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, (19): 4399-4401+4410.
- [14] 黄炳瑜,熊玮,张先锋,等.双层含能药型罩K装药射流成型及侵彻性能试验[J].*含能材料*, 2021, 29(2): 149-156.  
HUANG Bing-yu, XIONG Wei, ZHANG Xian-feng, et al. Experimental study on jet formation and penetration performance of double-layered reactive liners with K-charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(2): 149-156.
- [15] 潘建,张先锋,何勇,等.带隔板装药爆轰波马赫反射理论研究和数值模拟[J].*爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 449-456.  
PAN Jian, ZHANG Xian-feng, HE Yong, et al. Theoretical and numerical study on detonation wave Mach reflection in high explosive charge with waveshaper [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 449-456.
- [16] GUO H-G, ZHENG Y-F, TANG L, et al. Effect of wave shaper on reactive materials jet formation and its penetration performance[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(4): 495-505.
- [17] 周欢,李伟兵,李文彬,等.K装药杆式射流形成及侵彻研究[J].*弹道学报*, 2014, 26(3): 72-76+86.  
ZHOU Huan, LI Wei-bing, LI Wen-bin, et al. Study on generation and erosion about K-charged rod-shaped jet[J]. *Journal of Ballistics*, 2014, 26(3): 72-76+86.
- [18] 陈闯,王晓鸣,李文彬,等.爆轰波波形与药型罩结构匹配对杆式射流成形的影响[J].*爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 812-819.  
CHEN Chang, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Effect of matching of detonation waveform with liner configuration on the rod-like jet formation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 812-819.
- [19] PEZZICA G, PAZIENZA G. Calculation of the wave-shaper effects on detonation wave in shaped charges [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1987, 12: 125-129.
- [20] NAEEM K, HUSSAIN A. Numerical and experimental study of wave shaper effects on detonation wave front [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(1): 45-50.
- [21] 黄正祥.聚能杆式侵彻体成型机理研究[D].南京:南京理工大学, 2003.  
HUANG Zheng-xiang. Mechanism Study on Jetting Projectile Charge Formation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [22] CARLEONE J, JAMESON R, CHOU P C. The tip origin of a shaped charge jet [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1977, 2(6): 126-130.
- [23] 徐振洋.爆炸聚能作用下岩石劈裂机理及试验研究[D].北京:北京理工大学, 2014.  
XU Zhen-yang. Mechanism and experimental study on rock splitting under shaped charge jet penetrate [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [24] XU X-Z, MA T-B, NING J-G. The damage and failure mechanism of the concrete subjected to shaped charge loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 741-752.
- [25] 王励自.聚能装药对岩土介质侵彻机理研究与分析[D].成都:西南交通大学, 2002.  
WANG Li-zi. Study and analysis on penetration of shaped charge into rock and soil media [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [26] 李杰,程怡豪,徐天涵,等.岩石类介质侵彻效应的理论研究进展[J].*爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 4-29.  
LI Jie, CHENG Yi-hao, XU Tian-han, et al. Review on theoretical research of penetration effects into rock-like material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 4-29.
- [27] 门建兵,蒋建伟,王树有,等.爆炸冲击数值模拟技术基础[M].北京理工大学出版社, 2015: 75-91.  
MEN Jian-bing, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. Fundamentals of Numerical Simulation for Explosion and Shock Problems[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 75-91.
- [28] 张彦国.带隔板装药爆轰及驱动药型罩形成EFP作用过程研究[D].南京:南京理工大学, 2014.  
ZHANG Yan-guo. Study on the process of detonation with wave-shaper and driving the liner to form EFP [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [29] 潘建.带隔板聚能装药爆轰波传播与应用研究[D].南京:南京理工大学, 2018.  
PAN Jian. Research on Shaped Charge Detonation Wave Propagation and Application with Wave-shaper [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [30] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products[R]. United States, 1968.
- [31] 鄢阿敏,乔禹,戴兰宏.高焓合金药型罩射流成型与稳定性[J].*力学学报*, 2022, 54(8): 2119-2130.  
YAN A'min, QIAO Yu, DAI Lan-hong. Formation and stability

- of shaped charge liner jet of CrMnFeCoNi high-entropy alloy [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2119-2130.
- [32] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *The Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [33] 张忠. 固体炸药冲击起爆的物质点法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
ZHANG Zhong. Study on Material Point Method for Shock Initiation of Solid Explosive[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [34] 刘志跃, 翟俊昭. 铝铜药型罩射流与侵入数值模拟[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 132-139.  
LIU Zhi-yue, ZHAI Jun-zhao. Numerical simulation on the performance of shaped charge with explosively welded aluminum copper liner [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 132-139.
- [35] XU W, WANG C, CHEN D. The jet formation and penetration capability of hypervelocity shaped charges[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132(OCT.): 103337-103331-103337, 103315.
- [36] LIU Y, YIN J, WANG Z. Study on overdriven detonation of double-layer shaped charge[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(11): 1410-1422.
- [37] MILLER S. High Explosives Technology and Applications [DB/OL]. (2020-3-31)[2023-4-3]. <https://dokumen.tips/documents/high-explosives-technology-and-applications-higher-cdn-explosives-technology.html>.
- [38] 匡志平, 袁训康. RHT混凝土本构模型强度参数分析与模拟[J]. 力学季刊, 2012, 33(1): 158-163.  
KUANG Zhi-ping, YUAN Xun-kang. The analysis and simulation for the strength parameters of RHT concrete model [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2012, 33(1): 158-163.
- [39] ELSHENAWY T, LI Q. Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 54: 130-137.
- [40] TU Z, LU Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 132-146.
- [41] XIE L, LU W, ZHANG Q, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19-33.
- [42] 王卫华, 刘洋, 张理维, 等. 基于RHT模型双孔同时爆破均质岩体损伤的数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(3): 414-426.  
WANG Wei-hua, LIU Yang, ZHANG Li-wei, et al. Numerical simulation of homogeneous rock mass damage caused by two-hole simultaneous blasting based on RHT model [J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30(3): 414-426.
- [43] ZHANG Q, BRAITHWAITE C, ZHAO J. Hugoniot equation of state of rock materials under shock compression [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2085): 20160169.
- [44] DEHGHAN BANADAKI M M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40-41: 16-25.
- [45] 赵紫良, 王志军, 徐永杰, 等. 聚能装药侵入混凝土裂纹扩展数值模拟分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(6): 112-118.  
ZHAO Zi-ling, WANG Zhi-jun, XU Yong-jie, et al. Numerical simulation analysis of concrete crack propagation under shaped charge penetration [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2022, 45(6): 112-118.

## Experimental and Numerical Simulation of Shaped Charge Jet Penetrating Concrete and Rock Targets

ZHANG Chao-ping, ZHANG Xian-feng, TAN Meng-ting, HOU Xian-wei, XIONG Wei, LIU Chuang, GU Xiao-hui

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To study the jet formation and failure characteristics of penetrating concrete and rock targets of shaped charge with large barrier, the jet formation by using X-ray cinematography and static armor-piercing into concrete and rock targets were carried out. Meanwhile, the evolution process of detonation wave, the rod jet formation of shaped charge with large barrier and penetration process of concrete and rock targets are simulated by ANSYS/AUTODYN software. Combined with the experimental results, the penetration damage characteristics of the shaped charge rod jet to concrete and rock targets were analyzed. Results show that the Lee-Tarver equation of state can accurately describe the propagation process of the internal detonation wave, and the maximum error of forming jet parameters (projectile length, jet length, jet head velocity and jet diameter) is 12.8% compared with the test. The continuous rod-like jet with large aspect ratio can be formed after detonation of the shaped charge with large barrier. There are obvious craters in the penetrated concrete and rock targets, and the jet has no obvious reaming effect during the penetrating concrete process. The penetration depth and hole diameter of the penetrated concrete target are 46.7% and 48.1% larger than those of rock target in the test. However, the surface of the rock target is seriously damaged and the crater area is larger. Compared with the concrete target, cracks in rock target are continuously generated and developed significantly in the process of jet penetrating and the length and width of cracks formed are larger than those of concrete targets. The damage range around the rock target penetration channel is larger, and the internal damage of the target is serious.

**Key words:** large barrier; shaped charge; concrete target; rock target; damage and failure

**CLC number:** TJ55; O385

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023071

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 12141202, 12002170)

(责编: 姜梅)