

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.020

水下聚能控界爆破方法及机理研究

王劫耘^{1,2}, 王哲³, 许欣³, 姜楠⁴, 丁建⁴

(1. 平陆运河集团有限公司, 南宁 530022; 2. 广西现代运河实验室, 南宁 530022;

3. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032; 4. 南京君缘科爆工程技术有限公司, 南京 211103)

摘要: 为控制水下爆破的开挖边界, 实现开挖边界平面裂纹快速成型, 基于水下多点双向聚能装药开展平面劈裂研究。针对水介质中的爆炸能量传播特性, 设计了水下小药量聚能装药, 药型罩前端设计空气仓用于射流成型, 并通过 2D 和 3D 数值仿真及混凝土劈裂验证试验, 对水下聚能装药的作用时序和平面劈裂机制进行了详细研究。结果表明: 设计工况下水下聚能装药作用时序为爆炸冲击波、头部激波、聚能射流、水楔作用和气泡脉动作用。多重协同作用形成高效作用时序, 结合炮孔表面切槽可在主劈裂面形成拉应力集中区, 使得劈裂裂纹在主劈裂面优先起裂并扩展, 实现对断裂位置的精确控制。现场试验在小装药量(39 g/m)工况下对混凝土目标实现了平面劈裂, 劈裂裂纹与设计主劈裂面高度重合, 且与仿真结果匹配较好, 验证了装药方法的可行性与数值仿真的可靠性。该方法可为水下环境和陆上爆破危害严格控制区域的控界爆破提供参考。

关键词: 水下爆破; 聚能爆破; 定向预裂; 平面劈裂

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0178-12

Study on Method and Mechanism for Controlled Boundary Blasting Using Underwater Shaped Charge

WANG Jie-yun^{1,2}, WANG Zhe³, XU Xin³, JIANG Nan⁴, DING Jian⁴

(1. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530022, China; 2. Guangxi Modern Canal Laboratory, Nanning 530022, China; 3. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 4. Junyuan Kebao Nanjing Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: To achieve precise excavation boundary control and promote planar cracks propagation in underwater blasting operations, this study systematically investigates fracture initiation mechanisms through the deployment of multi-point bidirectional shaped charges submerged in aqueous environments. Based on the unique energy transmission dynamics of underwater explosions, compact-volume shaped charges were engineered with forward-positioned air cavities adjacent to the liners, optimizing jet formation efficiency and directional fracture control. The actuation sequence and planar fracturing mechanism of the underwater shaped charge were comprehensively analyzed through integrated 2D and 3D numerical simulations and concrete splitting experiments. The results demonstrate that the designed actuation sequence proceeds through distinct phases: blast shockwave propagation, head shockwave formation, shaped jet generation, hydraulic wedge action, and bubble pulsation effects. The synergistic interaction of these mech-

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-01

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 王劫耘 (1966-), 男, 高级工程师、硕士学位, 主要从事水运、桥梁工程施工技术研究, (E-mail) plyhkjxxb@163.com。

通信作者: 丁建 (1997-), 男, 助理工程师、硕士学位, 主要从事聚能爆破研究, (E-mail) 1442922890@qq.com。

About the author: WANG Jie-yun (1966-), male, senior engineer, master's degree, mainly engaged in research on construction technology of water transport and bridge engineering, (E-mail) plyhkjxxb@163.com.

Corresponding author: DING Jian (1997-), male, assistant engineer, master degree, mainly engaged in shaped charge blasting research, (E-mail) 1442922890@qq.com.

anisms establishes an optimized chronological sequence that, when coupled with pre-cut borehole grooves, induces a tensile stress concentration zone along the predetermined fracture plane, facilitating preferential crack initiation and controlled propagation. Field validation tests successfully generated planar fractures in concrete targets using a remarkably low linear charge density (39 g/m), with fracture patterns exhibiting exceptional alignment with the designed splitting plane and strong correlation with numerical simulation. These findings confirm both the operational feasibility of the charge configuration and the predictive accuracy of the computational model. The developed methodology offers significant practical value for boundary-controlled blasting applications in underwater environments and in terrestrial settings requiring stringent blast-impact mitigation.

Key words: underwater blasting; shaped charge blasting; directional crack; plane splitting

爆破工程中开挖边界快速成型和精准控制(简称“控界爆破”)是常见的难题,采用聚能爆破的方式是较好的解决方案。聚能爆破的核心原理是通过聚能结构(如药型罩、聚能管等)将爆炸能量定向聚集,形成高速射流,从而实现高效切割、破碎或毁伤目标。该方法具有能量集中、方向性强、穿透力大、能量密度高等显著优点,广泛应用于光面爆破、定向切缝、切割拆除等爆破工程^[1-4]。关于聚能爆破对岩石的裂纹起裂与扩展研究,郭德勇等针对地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透问题^[5],在分析钻孔围岩应力场、爆生裂隙扩展及动态卸载效应的基础上,对不同地应力条件下聚能爆破作用过程及裂隙发育特征进行了数值模拟,并通过在不同埋深下的聚能爆破现场试验,探讨了地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用。王凯飞等为探索地应力影响下的无限岩石爆破中应力波与爆生气体二者对裂纹起裂与扩展的作用机理^[6],采用爆炸力学与断裂力学理论推导了聚能爆破作用阶段的裂纹长度,利用 LS DYNA 软件研究了地应力作用下聚能爆破动、静作用下的岩石内裂纹起裂与扩展过程。

水下爆破是爆破工程中极为重要的一个分支,根据装药形式和水域条件的不同可分为深水爆破、浅水爆破、近水面爆破、水底裸露爆破、水下钻孔爆破等^[7-9]。随着水下工程需求的增加,水下聚能爆破技术受到越来越多的重视。

目前为止,水下聚能装药作用研究主要集中在军事应用方面,王长利等对聚能装药水下爆炸近区压力分布进行了实验和数值计算研究^[10],利用数值计算方法研究了聚能装药水下爆炸冲击波的分布规律、不同装药形式冲击波的传播以及能量的分布。张之凡等基于接触爆炸理论和牛顿第二定律^[11],推导药型罩压垮后加速度和速度公式的基本形式。随后,建立聚能装药空中和水下爆炸数值模型,定量地确定药型罩压垮的加速度和速度公式,并对理论公式的可靠性进行验证。王健等为研究聚能装药水下爆炸冲击波分布规律^[12],建立聚能装药水下爆炸对

圆板靶作用的仿真模型,并开展实验进行验证。通过仿真计算分析了前向冲击波峰值压力的分布规律,并拟合得到了较精确计算前向冲击波峰值压力的拟合公式。王志凯等结合聚能战斗部对水下靶板毁伤试验结果^[13],建立对应的数值仿真模型模拟了金属射流形成和毁伤靶板全过程。通过系列工况设置,研究了小锥角聚能战斗部在近自由液面的爆炸冲击波和射流特点。

而聚能装药在水下爆破工程方面的应用研究较少,对于水下聚能爆破,CAO 等研究了聚能射流在水中的成型理论以及水下混凝土侵彻效应^[14],结果表明:水下射流比空气中的射流快 3% 和长 11%,混凝土在空气和水中渗透后表现出不同的破坏模式。ZHANG 等使用欧拉方法模拟了球形/柱形爆破装药和聚能装药的典型水下爆炸完整物理过程,研究了水下冲击波和气泡以及弹丸的加载特性^[15]。石连松等用数值模拟研究水下聚能爆破破碎珊瑚礁的过程^[16],通过分析聚能罩底部压力和不同位置单元速度的变化,对水下聚能爆破的作用机理进行了分析。张军等以某特定尺度的水下微型聚能装药结构为研究对象^[17],运用正交设计方法和数值模拟对结构参数进行优化设计。利用 AUTODYN 进行数值模拟并分析获得最优装药结构参数组合。

本文为解决水下爆破开挖中边界快速成型和预留岩体的保护问题,基于水介质中爆炸能量传播特性,设计了基于小口径锥型罩聚能装药的双向聚能爆破装置,并开展相关研究。结合数值仿真和现场验证试验,研究水下聚能装药作用时序和平面劈裂机制,实现快速形成平整开挖边界的同时,降低装药量,从而减小预留岩体破坏范围、降低爆破振动和噪声等危害效应的效果。

1 装药设计与仿真

1.1 平面劈裂设计

爆破开挖边界的一次爆破成型,需要根据边界情况设计主劈裂面以及相应的炮孔参数和装药参

数。所采用的多点双向聚能切割装置在陆地岩土爆破中已有一定的研究基础^[18],如图 1 所示,炮孔中心轴线所在的平面即为设计的主劈裂面,装药前在主劈裂面与炮孔壁的交线处设置切槽,切槽从孔口切至孔底。聚能射流沿主劈裂面双向冲击炮孔两侧的切槽并侵入深入,将爆炸能量精准导入主劈裂面,

提高爆炸能量的作用效率,切槽可诱导裂纹扩展方向,以形成平直的主劈裂面。本文在此基础上将多点双向聚能切割装置应用于水下控界爆破,基于水下爆破的能量传播特性和作用机理,对聚能装药和切割装置参数进行优化设计并开展仿真和试验研究。

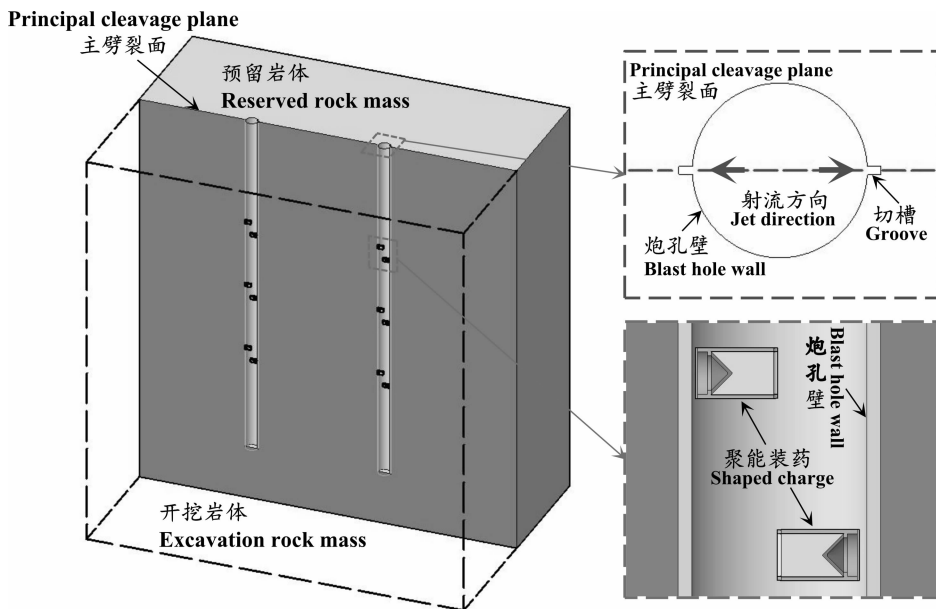


图 1 平面劈裂装药和炮孔设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plane splitting charge and hole setting

1.2 聚能装药参数设计

炸药在空气中爆炸与在水下爆炸的作用特性有着本质的区别。由于水的波阻抗接近于爆轰产物的波阻抗以及水的密度大、可压缩性小的特性,使得水中初始冲击波压力要比空气中大得多。如常用的 TNT 炸药在空气中爆炸时,初始冲击波压力约 70 MPa,而在水中爆炸时,约为 15 GPa。因此,考虑到切割的同时要对预留边坡进行保护,在参考文献[19]的基础上对聚能装药的参数进行调整和优化设计,减小聚能装药的口径和装药量,以减小冲击波对炮孔壁的破坏。由于在水下环境会对聚能射流的成型产生严重的影响,在装药壳体前端设计密闭空气仓以保证射流顺利成型。

如图 2 所示,装药口径 22 mm,装药高度 30 mm,药型罩锥角 90° ,厚 1.5 mm,为使射流能顺利成型,采用前端封闭式外壳在装药前端形成一个空气仓,高度 8 mm。

1.3 仿真模型设计

采用显式有限元分析程序 AOTUDYN 进行计算,该软件适用于流体、固体在高速冲击或动态载荷

条件下的响应和耦合分析。为方便试验验证,选择 C30 混凝土为切割目标进行仿真计算。

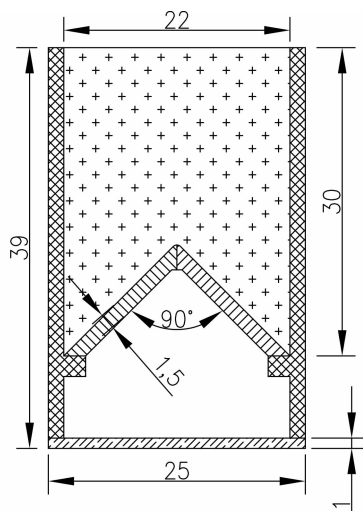


图 2 聚能装药示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of shaped charge(unit:mm)

(1)如图 3,首先采用 2D 二维轴对称模型分别对聚能装药在空气中和水中的工况进行计算,通过分析两个工况下的射流成型过程、射流参数及侵入

作用效果,探究聚能装药在水下环境的作用特性。由于实际工况中无法实现聚能装药前端与炮孔壁的完全贴合,因此装药前端与混凝土靶前设置水层,厚度为 5 mm。

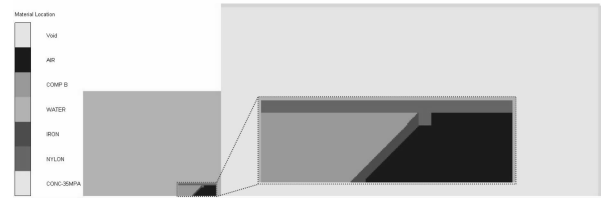


图 3 2D 仿真模型

Fig. 3 2D simulation model

(2)在 2D 仿真模型的基础上,创建 3D 仿真模型,分析水下聚能装药作用下的裂纹开裂及扩展过程,为爆破装药设计提供参考依据。如图 4 所示,仿真模型为 1/2 对称模型,并对射流侵彻区域网格进行细化,实现射流侵彻作用的有效模拟。模型混凝土部分采用 Lagrange 网格,炮孔内的水域采用 Euler 网格,并将 2D 模型射流成型后的金属射流、水和空气重映射至 3D 仿真模型,采用流固耦合算法进行计算。模型自由面的水域设置无反射边界,混凝土除自由面 and 对称面的其他边界面设置无反射边界。

1.4 材料模型和参数

空气采用 Ideal Gas 方程

表 1 B 炸药主要材料参数

Table 1 Main material parameters of explosive B

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$E/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.717	7980	8.5×10^6	29.5	524.23	7.678	4.2	1.1	0.34

水、药型罩(铁)和壳体(塑料)材料均选用 SHOCK 状态方程,冲击波速度和质点速度之间具有如下线性关系

$$u = c_0 + Su_p \quad (3)$$

式中: u 为冲击波速度; u_p 为质点速度; c_0 为截距,近似于材料的绝热声速; S 为斜率,常数。高压冲击状态方程具有如下形式

$$p = p_H + \Gamma \rho(e - e_H) \quad (4)$$

其中

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S - 1)\mu]^2}, e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right), \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$

式中: p 为压力; p_H 为冷压; Γ 为 Grüneisen 系数; ρ 为材料密度; ρ_0 为初始材料密度; e 为内能。具体材料参数如表 2 所示。

$$p_{air} = (\gamma - 1)\rho_{air}e_{air} \quad (1)$$

式中: p_{air} 为空气压力; ρ_{air} 为空气密度,绝热常数 $\gamma = 1.4$,比内能 $e_{air} = 206.8 \text{ J/g}$ 。

主装药选择 B 炸药,采用 JWL 状态方程

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中: p 为爆轰产物压力; E 为单位体积内能; V 为相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为物质常数。具体材料参数如表 1 所示,其中 ρ 为炸药密度, D 为炸药爆速。

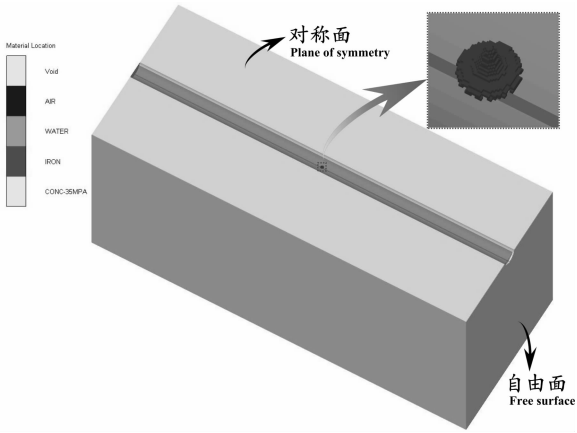


图 4 3D 仿真模型

Fig. 4 3D simulation model

表 2 水、药型罩(铁)和壳体(塑料)主要材料参数

Table 2 Main material parameters of liner(iron) and shell(plastic)

材料 Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Γ	$C_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1
WATER	0.998	0	1647	1.921
IRON	7.86	1.67	4610	1.73
NYLON	1.14	0.87	2290	1.63

混凝土采用典型的 p - α 状态方程,能够很好地反映混凝土在高温、高压、高应变率加载下的热力学性能,同时也能较好的描述混凝土在低静水压力作用下的受力特性。强度模型采用 Riedel、Hiermaier 和 Thoma 提出的 RHT 强度模型,该模型是在 HJC 模型基础上引入弹性极限面、失效面和残余强度面,以描述混凝土等脆性材料在动态加载条件下的力学

行为。典型的几何侵蚀大小设定为 0.5 ~ 2.0, 为混凝土靶板材料赋予 2.0 的几何侵蚀。

低压状态下 p - α 状态方程为

$$\alpha(p) = \begin{cases} \alpha_0 = \frac{\rho_{s0}}{\rho_0} & , p \leq P_{crush} \\ 1 + (\alpha_0 - 1) \left(\frac{P_{lock} - p}{P_{lock} - P_{crush}} \right)^n & , P_{crush} < p < P_{lock} \\ 1 & , p \geq P_{lock} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{crush} 为初始压实压力; P_{lock} 为固态压实压力; n 为材料参数; α_0 为初始孔隙率; ρ_0 和 ρ_{s0} 为多孔

材料和密实材料的初始密度。在卸载时, α 保持不变。

对于混凝土材料, 密实材料的状态方程式一般采用多项式形式

$$p = \begin{cases} A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)E & , \mu \geq 0 \\ T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0E & , \mu < 0 \end{cases}$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 、 T_1 、 T_2 为材料参数; E 为单位初始体积的内能。混凝土具体参数如表 3 所示。

表 3 混凝土主要材料参数

Table 3 Main material parameters of concrete

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	P_{crush}/MPa	P_{lock}/MPa	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa
2.75	23.3	6000	35.27	39.58	9.04	1.22	1.22	35.27	0

全部材料的状态方程和强度模型汇总于表 4。

表 4 材料模型

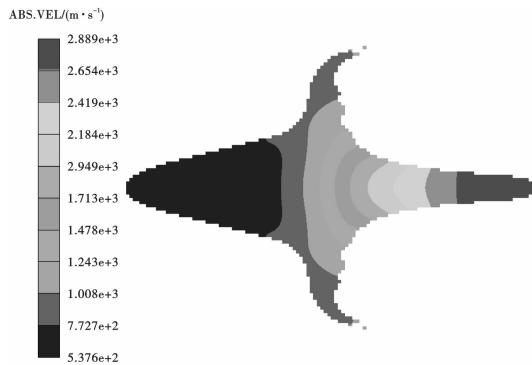
Table 4 Material model

名称 Name	材料 Material	状态方程 EOS	强度模型 Strength model
空气 Air	AIR	Ideal Gas	None
药型罩 Liner	IRON	Shock	Piecewise JC
主装药 Main charge	COMP B	JWL	None
外壳 Shell	NYLON	Shock	von Mises
水 Water	WATER	Shock	None
混凝土 Concrete	CONC	P alpha	RHT Concrete

2 数值仿真结果

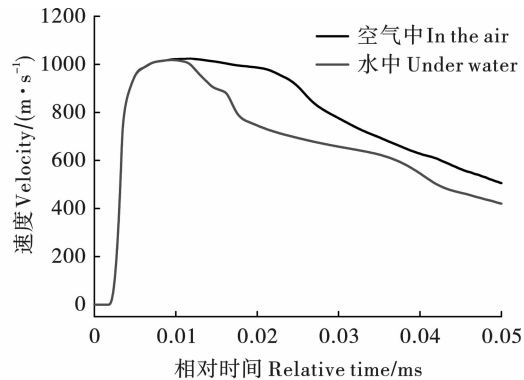
2.1 2D 数值仿真结果

2D 数值仿真计算结果如下图所示。装药起爆



(a) 射流形状和速度分布图
(a) Jet shape and velocity profile

后, 药型罩在爆轰波的作用下向轴线聚拢形成高速金属射流, 射流的形态对于岩石劈裂效果有较大影响, 锥形聚能射流具有优异的岩石劈裂效果^[20]。图 5(a) 为水下聚能射流成型后的速度分布云图, 射流头部速度较高, 达到 2800 m/s; 射流尾部和杵体部分虽然速度较小, 约 500 ~ 1500 m/s, 但由于该部分质量占比较大, 具有不可忽视的动能, 同时也是锥形体的关键部分, 因此射流尾部和杵体在岩石劈裂过程中发挥着重要作用。图 5(b) 为射流整体速度时程曲线, 可见聚能装药在水下与在空气中的成型过程基本一致, 射流均在 0.01 ms 左右成型达到最大速度, 成型后整体最大速度约为 1000 m/s; 但在侵彻过程有较大区别, 在水下时由于射流穿越水层消耗了一定的动能, 因此射流速度下降较快, 侵彻能力有所下降。



(b) 射流整体速度时程曲线
(b) Time-history curve of overall jet velocity

图 5 2D 数值仿真结果

Fig. 5 2D numerical simulation results

图 6 为两种工况下聚能射流侵彻混凝土目标的仿真结果。空气中和水中的射流侵彻深度分别为 54 mm 和 44 mm,但从损伤云图和应力云图来看:图 6(a)和(c)中,空气中混凝土的损伤范围很小,仅侵彻孔周围约 3 cm 的区域有明显的断裂损伤;图 6

(b)和(d)中,水中的侵彻深度虽然较小,但在水压作用下传入混凝土的应力要大得多,故混凝土的损伤面积大,并产生明显的断裂面和延伸裂纹。可见,小口径的装药在空气中难以达到劈裂的效果,但在水压作用下便可形成断裂裂纹和断裂面。

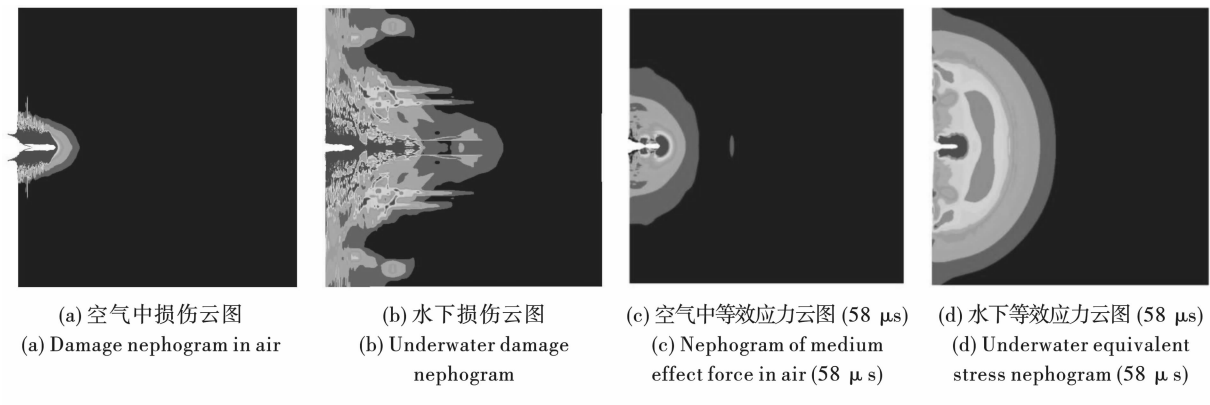


图 6 2D 数值仿真结果云图
Fig. 6 Nephogram of 2D numerical simulation results

2.2 3D 数值仿真结果

图 7 是水下聚能装药作用混凝土损伤云图,图中,装药作用后,在炮孔内壁沿切槽方向形成了平直裂纹,表面裂纹长度约 80 cm。由于水下爆炸冲击波的高强度作用,装药位置的混凝土损伤较严重,严重损伤区域深度约 10 cm,装药两侧炮孔壁损伤较轻,仅表面轻微损伤。

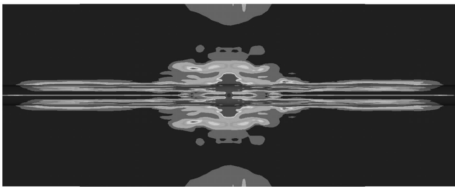
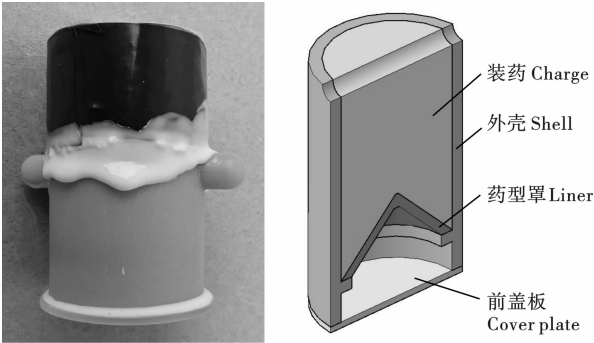


图 7 混凝土损伤云图
Fig. 7 Concrete damage nephogram

两个方向之间沿炮孔轴向错开 10 cm,可错开邻近装药的爆炸作用时序。每个炮孔单向设置 3 个装药,双向共 6 个装药,总装药量 102 g,线装药密度约 39 g/m。



(a) 实物图
(a) Physical drawings

(b) 剖面示意图
(b) Schematic diagram of section

图 8 聚能装药
Fig. 8 Shaped Charge

3 验证试验

3.1 聚能装药制作

聚能装药实物图和示意图如图 8。药型罩材料为铁,厚度 1.5 mm,锥角 90°;外壳为硬质塑料,厚 1.5 mm;前盖板为亚克力板,厚 1 mm,用防水硅胶进行密封;装药为 8701 炸药,装药量 17 g。装药完成后用薄膜和防水硅胶对装药尾部进行防水密封。

3.2 切割器及炮孔参数

如图 9 所示,根据前期仿真结果设置装药间距,将聚能装药固定在连接杆上,并用导爆索将各聚能装药串联连接。同一方向各装药的间距为 50 cm,

炮孔直径 90 mm,炮孔间距 90 cm,炮孔深度 2.6 m。如图 10 所示,钻孔后采用专用切槽钻头沿两炮孔圆心连线方向进行“V”形切槽。切槽宽度为 4 mm,深 7 mm,切至炮孔底部。

由于水下爆破试验场地限制,采用包括灌注清水的方式合理简化试验,模拟水下爆破环境。如图 11 所示,炮孔切槽完成后注满清水,将切割器设置炸高装置后安装于炮孔内,使射流方向对准切槽。将两炮孔的导爆索连接并安装雷管,两炮孔导爆索由雷管同时起爆。

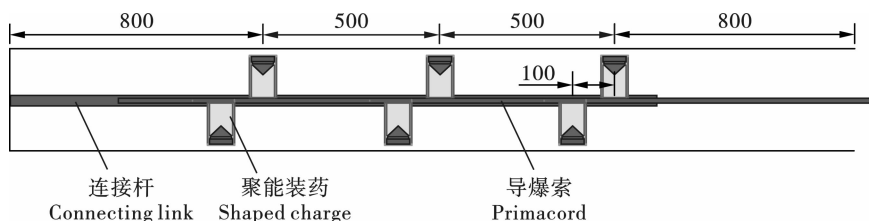


图9 切割器组装示意图(单位:mm)

Fig. 9 Schematic diagram of cutter assembly(unit:mm)

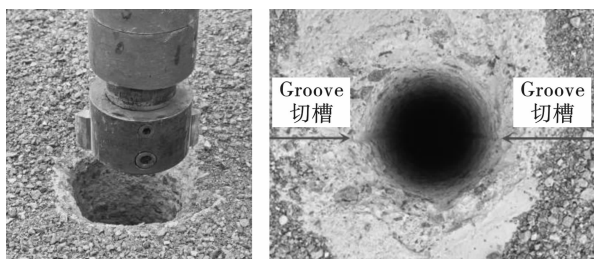


图10 炮孔切槽

Fig. 10 Blast hole grooving



图11 装药现场照片

Fig. 11 Photograph of charging site

3.3 验证试验结果

试验结果如图12所示,试件两炮孔间形成了贯穿的裂纹,裂纹方向基本沿炮孔中心连线方向,无杂散次生裂纹。炮孔外侧同样形成了明显的表面裂纹,但与炮孔间裂纹相比,炮孔外侧的表面裂纹较明显较小。可见,相邻炮孔的应力波作用对裂纹延伸起到了较为关键的作用,使裂纹进一步生长贯穿,同时对裂纹延伸方向的控制也有一定作用。

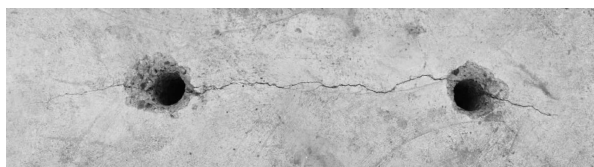


图12 表面裂纹

Fig. 12 Surface cracks

图13为炮孔口部和内部裂纹情况。可见炮孔内部沿切槽方向产生了平直的裂纹,但在孔口附近产生了明显的方向偏离。这是由于末端裂纹扩展能

量较低,裂纹扩展方向的稳定性逐渐失衡,导致裂纹方向逐渐偏离,最终导致表面裂纹轻微偏离主劈裂面。可通过调整装药距离参数改善这一问题,裂纹开始偏离处距离孔口约5 cm,因此,该工况下最近的装药与孔口距离控制在70 cm以内可保证裂纹方向沿主劈裂面形成。

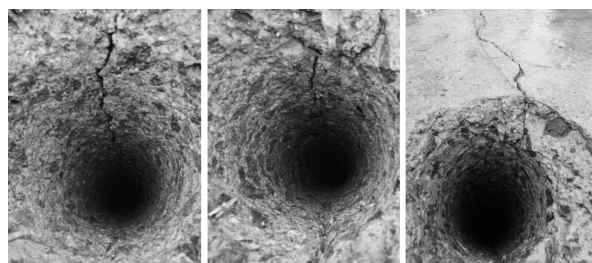


图13 炮孔内部裂纹

Fig. 13 Internal cracks in blastholes

试验结果表明,该装药形式可在小装药量(39 g/m)下对水下混凝土目标实现平面劈裂,试验结果与仿真结果符合度高,验证了仿真的可靠性。

4 作用时序及平面劈裂机制

为在目标中形成平直的平面劈裂裂纹,有足够的劈裂能量是首要的,其次要控制能量的作用效果,使能量集中于主劈裂面的裂纹扩展,同时抑制其他方向的裂纹生长。聚能装药对目标的作用形式主要包括聚能射流、冲击波和爆轰产物,其作用强度和作用过程主要受作用环境和炸高影响,图14和图15分别为同一炸高(15 mm)下聚能装药在水下和在空气中的作用过程仿真结果,下面结合仿真和试验结果对比聚能装药在两种工况下的作用时序以及水下平面劈裂机制进行详细讨论。

(1) 爆炸冲击波

由于水中炸药爆炸的初始冲击波强度比空气中要大得多,且水中的冲击波传播快、衰减慢。因此可以看到12 μ s时爆炸冲击波到达混凝土表面,并迅速形成大范围的面压力作用于混凝土。由于聚能装

药形状的影响,导致冲击波的方向不均匀性,呈现装药径向(侧向)峰值压力较大而轴向较小。射流侵彻方向(轴向)冲击波作用于混凝土的入射强度达到 500 MPa,且水介质与混凝土的能量耦合效率较

高,可在混凝土靶体内形成大范围的应力区,与射流的侵彻叠加作用。基于实际的炮孔形状与冲击波形状更加匹配,爆炸冲击波以正压形式作用于四周炮孔壁,将在目标内部产生强度更高的应力。

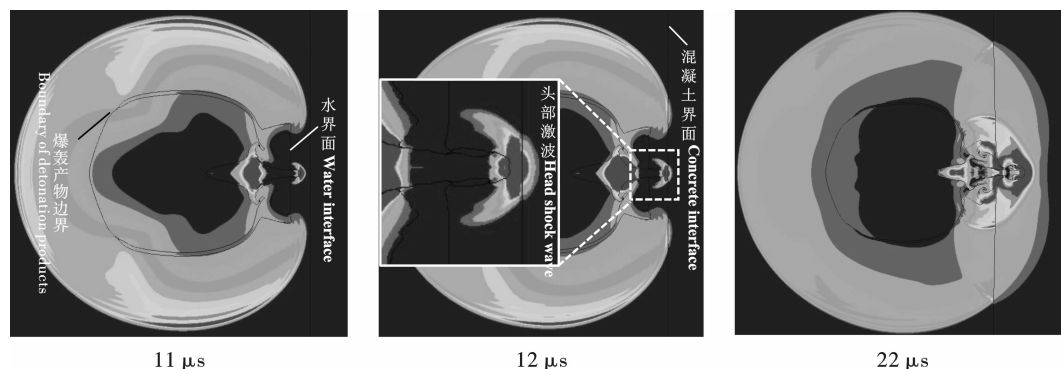


图 14 水下聚能装药作用过程

Fig. 14 Action process of underwater shaped charge

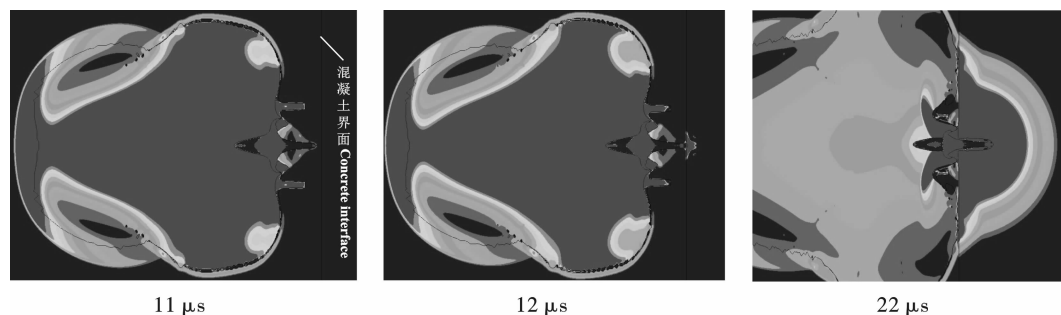


图 15 空气中聚能装药作用过程

Fig. 15 Action process of shaped charge in air

在空气中,装药爆炸产生的初始冲击波小且随距离衰减迅速,相比之下作用于混凝土时入射超压很小,对混凝土的劈裂作用微弱,且时序位于射流侵彻之后。

(2) 射流头部激波

射流头部速度约 2800 m/s,高于水的声速(约 1480 m/s),因此射流头部冲击水层后产生激波,其压力峰值可由 Joukowsky 公式估算

$$P = \rho_w c_w v \quad (8)$$

式中: P 是激波压力, Pa; ρ_w 是水的密度, 1000 kg/m^3 ; c_w 是水中的声速, 1480 m/s ; v 是物体相对水的速度,近似为射流速度 2800 m/s 。估算得到射流头部冲击水层产生的激波压力约为 4.2 GPa 。根据仿真结果,如图 15, $12 \mu\text{s}$ 时头部激波先于射流本体作用于混凝土靶体,激波压力为 3.5 GPa ,与估算结果接近。头部激波在侵彻点周围形成预应力区,使得混凝土表面结构完整性被削弱。

空气中,由于空气密度和声速小得多,因此头部激波压力很小,可以忽略。

(3) 金属聚能射流

射流侵彻是劈裂过程最主要也是最关键的作用形式。射流冲击侵彻混凝土靶,在侵彻点周围产生环向拉应力,并且随着射流的侵彻与楔入,可将能量持续注入混凝土内部,以形成主劈裂面。图 16 为两种工况下混凝土靶射流侵彻点处的压力曲线。在水中,由于头部冲击波的优先作用,侵彻点压力上升缓慢,同时由于穿越水层射流头部速度下降,驻点压力峰值较小,最高为 5.97 GPa ,并且在水压的持续作用下衰减较慢。在空气中,射流头部速度较高,且头部激波几乎无作用,在射流的直接冲击作用下侵彻点压力骤升,达到 9.24 GPa ,随后迅速下降。

混凝土是一种典型的脆性材料,其抗压强度远大于抗拉强度。其破坏主要是由拉伸应力达到其断裂韧性极限而引起的裂纹扩展,在水介质的高效耦合下,爆炸冲击波和射流作用于混凝土的脉冲压力远超过混凝土的材料强度,尤其是射流侵彻部位,局部可看做流体动力区,侵彻空腔体积将迅速膨胀,在空腔内壁产生环向拉应力。同时,爆炸冲击波以更

大的面积作用于侵彻点周围区域,同样在作用区域产生环向拉应力并不断向外传播。当冲击波和射流侵彻产生的拉伸应力强度大于岩石的动态抗拉强度时岩石将破裂并产生径向裂纹。如图 17 所示,由于切槽的存在使得岩石的连续性被破坏,这种不连续性会导致应力在切槽附近区域集中作用,从而改变应力场分布,使得初始裂纹优先在切槽处生成。随着冲击波作用与射流侵彻的持续,混凝土内会形成一个应力梯度场,切槽将对应力场分布产生影响,在切槽作用下沿主劈裂面形成最强的拉应力集中区,使得劈裂裂纹会在主劈裂面优先起裂并扩展。

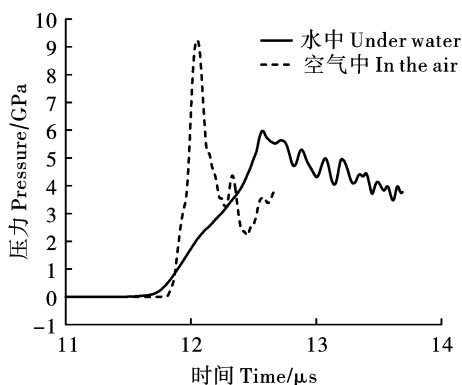


图 16 两种工况下驻点压力曲线

Fig. 16 Stagnation pressure curve under two working conditions

劈裂裂纹起裂后,裂纹尖端得以扩展仍需要应力波保持一定强度。应力波传播随距离增大逐渐衰减,裂纹尖端能够继续扩展的距离取决于岩石内应力波能量与岩石尺寸的大小。随着侵彻的持续,射流质量和速度逐渐减小。根据仿真结果,射流在约 100 μs 时耗散殆尽,而爆炸冲击波的加载作用仅能维持约 20 μs,若后续能量输入不足则裂纹无法扩展贯通。

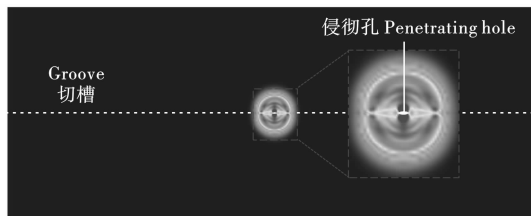


图 17 3D 仿真应力场云图

Fig. 17 Nephogram of 3D simulated stress field

(4) 水楔作用

随着射流侵彻的持续,水下高压爆炸产物迅速膨胀会推动周围的水介质压入射流侵彻孔及产生的初始裂缝中,产生水楔作用,为裂纹的进一步扩展提

供一个持续的能量输入,从内部劈裂混凝土。空气中的情况与水中类似,爆炸产物迅速膨胀并推动周围空气向前运动,最终楔入侵彻孔和裂缝中,产生气楔作用。由于水的弱可压缩性,水楔作用强度要明显大于气楔作用。

(5) 爆炸产物作用

冲击波离开后,爆炸产物在水中以气泡的形式继续高速膨胀,水下气泡的脉动过程受边界面的影响较大,在炮孔的约束下作用过程非常复杂,在此仅做简单分析。首次气泡脉动的最大半径可由下列公式近似计算

$$R_{\max} = k \frac{W^{1/3}}{(D + 9.8)^{1/3}} \quad (9)$$

式中: $R_{\max}$ 为气泡最大半径,m; W 为炸药质量,kg; D 为爆炸深度,m; D 为大气压力水头高度,10.33 m; k 为气泡相关参数, $k = 3.5$ 。计算得到 17 g 装药爆炸后,气泡第一次脉动的最大半径为 40 cm,远大于炮孔直径 9 cm,因此气泡必然会对炮孔壁产生作用。相对前面的作用形式,爆炸产物作用于目标的压力较低但作用时间较长,可进一步扩大整体破坏。

(6) 邻近装药的作用

邻近装药爆炸所产生的爆炸冲击波、应力场以及水楔、产物作用也会相互叠加作用,叠加区域将产生应力增强,促进主劈裂面的裂纹扩展。由于水中的冲击波强度高且衰减慢,邻近装药的冲击波和应力场作用也要比空气中大得多。

如图 18 对水下和空气中的作用形式和时序进行整理,对于水下装药,仅金属射流的侵彻作用略小于空气中装药,而其他作用形式的强度远高于空气中装药。总体来看,水下装药的作用更丰富且强度更高。

从以上分析可以得出,在水介质中,彻底改变了聚能装药爆炸能量的传递形态和顺序,造成空气中和水中劈裂效果的巨大差异,表 5 对比了两种工况下的作用效果。

(1) 能量效率高:水介质将炸药的化学能以数量级更高的压力和高得多的传递效率作用于混凝土。空气冲击波的能量对于混凝土来说几乎可以忽略不计,而水中冲击波的能量本身就足以对混凝土造成破坏,这也是为保护预留岩体而设计小药量聚能装药的最主要原因。

(2) 水楔作用:由于水的弱可压缩性,水楔作用强度要明显大于气楔作用,为裂纹的扩展提供持续的能量输入。

(3) 机理协同:水下装药的作用形式丰富,“冲

击波加载、射流侵彻、水楔劈裂和气泡推拥”四重协同作用,形成一个高效的破坏作用时序。而在空气中几乎只有射流单一的破坏源,在填塞的炮孔中还有气楔作用,但也难以达到水楔和气泡的作用强度。

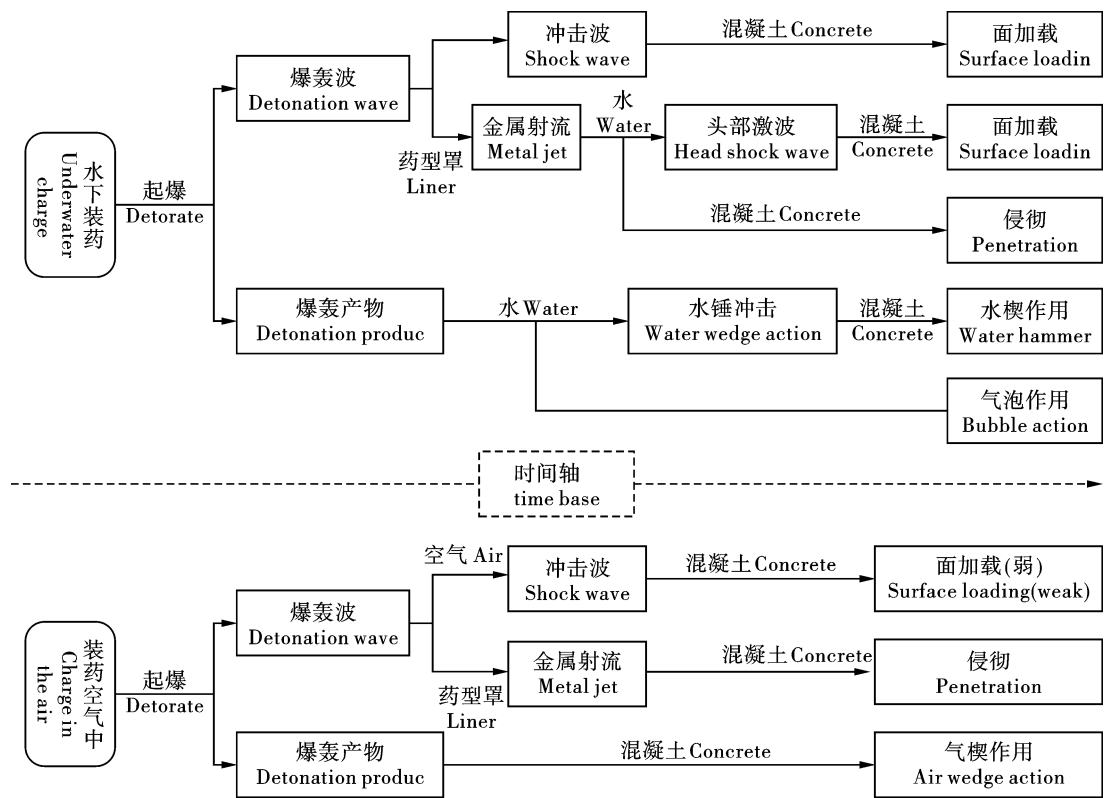


图 18 聚能装药作用时序图
Fig. 18 Timing diagram of shaped charge action

表 5 不同环境下的作用对比
Table 5 Comparison of effects in different environments

作用环境	空气	水
冲击波产生的初始应力波 Initial stress wave generated by shock wave	51 MPa, 数值低且范围小, 几乎无作用。 51 MPa, low value and small range, almost no effect.	533 MPa, 数值高范围大, 是裂纹产生与扩展的重要能量来源。 533 MPa, which has a large numerical range, is an important energy source for crack generation and propagation.
目标状态 Target state	射流直接作用 Jet direct action	射流穿过水层作用于目标 The jet passes through the water layer and acts on the target.
能量耦合效率 Energy coupling efficiency	低。爆炸能量(冲击波/产物)大部分耗散在空气中, 与目标耦合极差。 Low. Most of the explosion energy (shock wave / product) is dissipated in the air, and the coupling with the target is very poor.	高。水作为弱可压缩介质, 将爆炸能量高效地转化为破坏性的冲击波, 与靶体强力耦合。 Tall. Water, as a weakly compressible medium, efficiently converts the explosive energy into destructive shock waves, which are strongly coupled with the target.
裂纹形成机理 Crack formation mechanism	较单一: 射流冲击与气楔的作用。 Simplicity: jet impact and the role of air wedge.	复合作用: 冲击波、射流、水楔和气泡的复合作用。 Compound action: the compound action of shock wave, jet, water wedge and bubble.
最终破坏形态 Final failure mode	裂纹短、浅, 集中在侵彻孔周围。 The cracks are short and shallow, and concentrated around the penetration hole	裂纹长、深、贯穿结构, 伴随一定范围的崩落。 Cracks are long, deep, running through the structure, accompanied by a certain range of caving

在混凝土劈裂的初期,爆炸冲击波加载和射流的高速冲击是初始裂纹形成的主要能源,后续水介质的楔入以及气泡脉动的作用,为裂纹的扩展注入新的能量。因此,尽管射流动能相同,但水中爆炸将整个系统的能量都调动起来,形成多种形式的耦合作用,作用强度大大提升,以实现优异的劈裂效果。

通过对比分析,在水下环境中采用装药量更小的聚能装药就能实现良好的劈裂效果,同时聚能装药间距和炮孔间距可在空气中装药参数基础上适当扩大,进一步降低线装药密度。根据初步试验,单孔线装药密度为 39 g/m,孔间距 90 cm 时,可在两炮孔间形成平直贯穿裂纹。爆破危害效应主要包括振动、飞石、噪音、冲击波等,振动、噪声和冲击波的强度受装药量的直接影响。因此,该水下控界爆破方法明显减小了单孔装药量,可有效降低爆破危害效应,可应用于陆上危害效应严格控制区域的爆破工程。

5 结论

基于多点双向聚能装药平面劈裂设计,对水下混凝土目标开展了数值仿真模拟和现场验证试验。结合试验结果以及 2D 和 3D 仿真模型的分析,对水下聚能作用时序和平面劈裂机制进行了详细的探究,得出以下结论:

(1)小药量聚能装药难以在空气中对混凝土目标形成劈裂裂纹,但在水介质的高效耦合下大大提高了能量的传递和利用效率,可实现断裂裂纹和断裂面的形成。

(2)水下聚能装药的综合作用时序为:爆炸冲击波、射流头部激波、聚能射流、水楔作用和气泡脉动作用。多重协同作用形成了高效的作用时序,与空气中较单一的作用机制有本质区别。

(3)在冲击波和多点射流的作用下,在混凝土内形成应力梯度场,并在切槽作用下在主劈裂面形成最强的拉应力集中区。由于应力场集中作用,劈裂裂纹会在主劈裂面优先起裂并扩展。

(4)试验结果表明,水下多点聚能装药可在线装药密度为 39 g/m,孔间距 90 cm 的工况下对混凝土目标实现平面劈裂,劈裂裂纹与设计主劈裂面高度重合,且与仿真结果匹配较好,验证了装药方法的可行性与数值仿真的可靠性。

(5)实际应用中,针对工程的不同岩石材料以及平整度要求,还需对装药的间隔参数和炮孔参数

开展进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 杨 帅,刘泽功,张健玉,等.柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):129-138.
- [1] YANG Shuai,LIU Ze-gong,ZHANG Jian-yu,et al. Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting[J]. Coal Science and Technology,2024,52(3):129-138. (in Chinese)
- [2] 郭德勇,赵杰超,朱同功,等.双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J].工程科学学报,2020,42(12):1613-1623.
- [2] GUO De-yong,ZHAO Jie-chao,ZHU Tong-gong,et al. Crack propagation and coalescence mechanism of double-hole cumulative blasting in coal seam[J]. Chinese Journal of Engineering,2020,42(12):1613-1623. (in Chinese)
- [3] 吴 波,韦 汉,徐世祥,等.聚能光面爆破光爆层参数优化研究[J].有色金属工程,2020,10(12):113-121.
- [3] WU Bo,WEI Han,XU Shi-xiang,et al. Research on numerical optimization of smooth blasting layer parameters of shaped energy smooth blasting[J]. Nonferrous Metals Engineering,2020,(12):113-121. (in Chinese)
- [4] XU Shi-xiang,WU Bo,ZHANG Hua-lin,et al. Directional crack propagation and optimization strategies for multi-hole shaped charge blasting in tunnel construction[J]. Structures,2025,72:108268.
- [5] 郭德勇,张 超,朱同功.地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用[J].工程科学学报,2022,44(11):1832-1843.
- [5] GUO De-yong,ZHANG Chao,ZHU Tong-gong. Effect of in-situ stress on the cracking and permeability enhancement in coal seams by deep-hole cumulative blasting[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(11):1832-1843. (in Chinese)
- [6] 王凯飞,张昌锁,郝兵元,等.高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J].煤炭科学技术,2023,51(S1):50-64.
- [6] WANG Kai-fei,ZHANG Chang-suo,HAO Bing-yuan,et al. Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress[J]. Coal Science and Technology,2023,51(S1):50-64. (in Chinese)
- [7] 赵 根,黎卫超.水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1):1-12.

- [7] ZHAO Gen, LI Wei-chao. Development of underwater blasting technology[J]. *Blasting*, 2020, 37(1): 1-12. (in Chinese)
- [8] 唐玉成,段卫东,乔泽霖,等. 水下爆破岩石破碎块度的实验研究[J]. *爆破*, 2016, 33(4): 102-106.
- [8] TANG Yu-cheng, DUAN Wei-dong, QIAO Ze-lin, et al. Experimental study on rock fragmentation of underwater blasting[J]. *Blasting*, 2016, 33(4): 102-106. (in Chinese)
- [9] 陈 涛,汪海波,王丽敏,等. 不耦合系数对水下爆破破岩效果影响的数值分析[J]. *工程爆破*, 2022, 28(6): 25-32, 57.
- [9] CHEN Tao, WANG Hai-bo, WANG Li-min, et al. Numerical analysis of decoupling coefficient influence on rock breaking effect of underwater blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 25-32, 57. (in Chinese)
- [10] 王长利,周 刚,马 坤,等. 聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(4): 453-461.
- [10] WANG Chang-Li, ZHOU Gang, MA Kun, et al. Shock-wave characteristics of shaped charge exploded underwater[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(4): 453-461. (in Chinese)
- [11] 张之凡,李海龙,张桂勇,等. 聚能装药水下爆炸冲击波和侵彻体载荷作用时序研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(10): 3-14.
- [11] ZHANG Zhi-fan, LI Hai-long, ZHANG Gui-yong, et al. Action time sequence of underwater explosion shock waves and shaped charge projectiles[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2023, 43(10): 3-14. (in Chinese)
- [12] 王 健,卢 熹,马 阳,等. 聚能装药水下爆炸冲击波峰值压力分布规律[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(16): 8-12.
- [12] WANG Jian, LU Xi, MA Yang, et al. Distribution law of peak pressure of shaped charge underwater explosion[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(16): 8-12. (in Chinese)
- [13] 王志凯,梁永辉,戴伯达,等. 近自由液面聚能战斗部水下爆炸威力场[J]. *现代应用物理*, 2024, 15(2): 176-185, 192. (in Chinese)
- [13] WANG Zhi-kai, LIANG Yong-hui, DAI Bo-da, et al. Underwater explosion power field of near-free surface shaped charge warhead[J]. *Modern Appliedphysics*, 2024, 15(2): 176-185, 192. (in Chinese)
- [14] CAO Chao, WANG Jin-xiang, KONG Ling-quan, et al. Study on the formation characteristics of underwater hemispherical shaped charge jet and its penetration performance into concrete[J]. *Defence Technology*, 2025, 47: 180-196.
- [15] ZHANG Zhi-fan, LI Hai-long, ZHANG Jing-yuan, et al. Characterization of underwater explosive loads of blasting and shaped charges[J]. *Journal of Marine Science and Application*. 2024, 23: 302-315.
- [16] 石连松,高文学,陈寿峰. 水下聚能爆破技术研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(S2): 122-127.
- [16] SHI Lian-song, GAO Wen-xue, CHEN Shou-feng. Research on underwater blasting technology of shaped charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(S2): 122-127. (in Chinese)
- [17] 张 军,李裕春,黄骏逸,等. 水下爆破聚能装药结构正交优化设计[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(2): 52-57.
- [17] ZHANG Jun, LI Yu-chun, HUANG Jun-yi, et al. Orthogonal optimization design of shaped charge structure for underwater blasting[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(2): 52-57. (in Chinese)
- [18] 毛 羽,侯超普,徐士超,等. 抽水蓄能电站主机房底板精确控界切割技术研究[J]. *工程爆破*, 2024, 30(3): 121-127.
- [18] MAO Yu, HOU Chao-pu, XU Shi-choa, et al. Technical study on accurate-boundary cutting in baseboard excavating of main equipment room in pumped storage power station[J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(3): 121-127. (in Chinese)
- [19] 王 静,薛永利,丁 建,等. 岩石控界切割锥形聚能射流的优化设计及试验[J]. *爆破器材*, 2023, 52(3): 52-57.
- [19] WANG Jing, XUE Yong-li, DING Jian, et al. Optimal design and test of conical shaped charge for rock boundary control cutting[J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(3): 52-57. (in Chinese)
- [20] 刘 迪,顾 云,孙 飞,等. 基于聚能射流的岩石定向劈裂机制[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 81-91.
- [20] LIU Di, GU Yun, SUN Fei, et al. Directional splitting mechanism of rock based on shaped charge jet[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2023, 43(8): 81-91. (in Chinese)