

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0386

水下接触爆炸作用下混凝土拱板的毁伤特性

赵小华¹, 张嘉祺¹, 赵鹏², 王高辉³, 杜雪明¹, 赵浩楠¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州安源工程技术有限公司, 河南 郑州 450016;

3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为探究水下接触爆炸作用下混凝土拱板的毁伤特性, 对三块混凝土拱板开展了水下接触爆炸试验, 并对剥落的拱板碎片进行了质量分区统计。基于耦合欧拉-拉格朗日算法 (Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 建立了“水-混凝土-TNT”三维数值仿真模型, 通过与试验结果的对比, 验证了模型的可靠性。在此基础上, 研究了爆炸荷载下拱板内部应力波的传播过程, 阐明了混凝土拱板的损伤机理, 并进一步探究了爆炸荷载以及拱板跨度对拱板毁伤特性的影响。结果表明: 在水下接触爆炸作用下, 拱板迎爆面形成由辐射状裂纹和环状裂纹组成的环形破碎带; 爆炸荷载增大, 拱板剥落碎片增多且趋于细化; 拱板跨度增加, 结构更易产生大块碎片; 随着 TNT 药量由 0.4 g 增加至 1.6 g, 拱板迎爆面形成的环状破碎带由局部区域扩展至贯穿拱板全宽度, 拱板的破坏模式由局部损伤演变为整体失效; 随着拱板跨度的增大, 拱端处的破坏程度减轻, 而跨中区域的破坏范围扩大; 相较于跨度为 400 mm 的拱板, 跨度为 600 mm 的拱板总耗散能增加了 4.3%。

关键词: 水下爆炸; 混凝土拱板; 爆炸试验; 毁伤特性

中图分类号: O382; TU599

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Analysis of the Damage Characteristics of Concrete Arch Slabs Subject to Underwater Contact Explosion

ZHAO Xiaohua¹, ZHANG Jiaqi¹, ZHAO Peng², WANG Gaohui³, DU Xueming¹, ZHAO Haonan¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. Zhengzhou Anyuan Engineering Technology CO Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: To investigate the damage characteristics of concrete arch slabs subjected to underwater contact explosions, a series of underwater contact explosion tests were conducted on three concrete arch slabs. During the experiments, the spalled fragments generated after detonation were carefully collected and quantitatively analyzed using a mass-based partitioning statistical method, enabling a systematic characterization of the fragmentation and spalling behavior of the slabs. On this basis, a three-dimensional fluid-structure interaction numerical model incorporating water, a concrete arch slab, and TNT was developed using the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. The reliability and effectiveness of the numerical model were validated by comparing the simulated macroscopic failure patterns and crack propagation paths with the experimental observations. Based on the validated model, further analyses were carried out to investigate the damage evolution process and stress wave propagation characteristics within the arch slabs under explosive loading, thereby systematically elucidating the damage mechanisms of concrete arch¹ slabs subjected to underwater contact explosions. In addition, parametric studies were

*收稿日期: 2025-11-27; 修回日期: 2026-5-18;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52479136、52309156); 河南省自然学科基金项目 (242300421228); 河南省高校科技创新人才支持计划 (26HASTIT045);

第一作者: 赵小华 (1991-), 男, 博士, 教授. E-mail: zhaoxh2014@126.com;

performed to examine the effects of explosive charge and span length on the damage characteristics of the arch slabs. The results indicate that, under underwater contact explosion, an annular damage zone composed of radial and circumferential cracks forms on the blast-facing surface of the arch slab. With increasing explosive charge, the number of spalled fragments increases and their size becomes progressively finer. As the span length increases, the structure tends to generate larger fragments. When the TNT charge increases from 0.4 g to 1.6 g, the annular damage zone on the blast-facing surface expands from a localized region to the full width of the slab, and the failure mode transitions from localized damage to global failure. With increasing span length, the damage degree at the arch ends decreases, while the damaged region near the mid-span expands. Compared with the slab with a span of 400 mm, the total energy dissipation of the slab with a span of 600 mm increases by 4.3%.

Keywords: Underwater explosion; Concrete arch slab; Explosion test; Destructive characteristics

近年来,随着水利工程、海洋工程以及水下交通工程的快速发展,水下结构的安全性成为国防和民用领域关注的焦点。水下接触爆炸作为一种极端荷载,对基础设施结构的正常运行造成了十分严峻的威胁^[1]。目前,国内外学者针对混凝土板^[2]、柱^[3]、梁^[4]等基本混凝土构件的水下抗爆性能已经积累了丰富的研究成果^[5-8]。然而,拱形结构因其独特的几何特性,在承受静水压力时具有良好的整体受力性能和结构稳定性,在跨河倒虹吸管道、水下穿越管道、高水位地区的埋地管网中同样得到了广泛应用^[9-11],拱形结构在爆炸荷载下的毁伤特性也亟待关注。

在已有拱形混凝土结构的研究中,大多关注点在拱形结构在空中或地下环境中受到爆炸荷载作用后的损伤机理与动力响应。如,陈昊等^[12]对土中浅埋钢筋混凝土直墙拱结构展开了爆炸试验,通过分析不同比例爆距下结构的损伤特征,结合数值模拟发现当比例爆距小于 $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,结构以局部破坏为主。Liu 等^[13]采用数值模拟方法,研究了近埋式爆炸下爆炸波在拱面上的传播与荷载分布,并建立了相应的分布函数。Huo 等^[14]利用地下爆炸试验,研究了拱形地下钢筋混凝土结构在侧顶爆炸下的损伤特性,并通过数值模拟结果提出了能够评估地下拱形结构在侧顶爆炸条件下损伤等级等效爆炸距离曲线。罗军洪等^[15]对具有拱形顶部结构的大跨度地下硐室开展了爆炸试验,定量研究了围岩及支护结构的抗爆性能,分析了不同爆炸荷载作用下硐室的应力、位移和破裂特征。Maiorana 等^[16]分析了爆炸荷载与拱桥损伤程度之间的关系,结合非线性动态分析结果,证明了爆炸荷载位置对拱桥的应力、应变和位移有强烈影响。围绕拱形结构抗爆防护,Yue 等^[17]通过分析聚脲加固混凝土拱结构抗爆试验的动力试验数据,揭示了聚脲加固混凝土拱结构在爆炸荷载作用下的宏观损伤模式。Jiang 等^[18]以玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)和砂浆为增强材料,设计制作混凝土拱架结构并进行了抗爆试验,证明了FRP网架和砂浆复合加固技术用于增强防护工程中拱形结构的抗爆能力的可行性。Song 等^[19]研究了覆盖聚脲涂层的RC直壁拱在接触爆炸下的损伤模式,结果表明,随着聚脲涂层厚度的增加,结构破坏面积、弹坑体积、背爆面损伤区域深度以及裂纹数量均呈显著下降趋势。以上研究为揭示拱形混凝土结构在空中及地下爆炸环境中的动力响应与破坏机理提供了重要参考。

随着近年来涉水工程的发展日益火热^[20],涉水建筑物的数量逐年增长,水下建筑物的抗爆性能同样亟须关注。由于水和空气的物理属性差异以及与爆炸产物的界面作用效应不同,爆炸冲击波在水和空气中传播特性存在较大差异^[21]。水下爆炸作用下的冲击波峰值压力及冲量均远大于空中爆炸^[22],此外,由于水的不可压缩性,冲击波在水下的衰减速度相较于空气中更加缓慢^[23],这导致结构遭受破坏的时间延长。因此,相同条件下,水下接触爆炸对混凝土构件造成的损伤明显大于相同装药量下的空中接触爆炸^[24, 25]。围绕混凝土拱板的水下抗爆性能,Fan 等^[26]设计了普通强度钢筋混凝土(NSRC)拱和高强度钢筋混凝土(HSRC)拱,并进行了两组水下爆炸试验,在数值模拟的基础上提出了峰值位移预测公式。而Zhao 等^[27]则针对内拱侧临空外拱侧临水条件这一特殊工况,探究了混凝土拱板在水下接触爆炸作用下的破坏模式与损伤机理,并得出拱板曲率的存在会增大拱板的损伤这

通信作者: 赵鹏(1982—),男,博士,正高级工程师. E-mail: 13253637588@163.com。

一结论。需要指出的是,在实际工程中拱形结构遭受爆炸作用时,爆源并不总是位于拱顶外侧,对于水下管道,可能发生爆炸物误入或内部、近内表面爆炸等事故,使拱板内侧直接承受冲击波作用,从而形成与外拱侧起爆工况显著不同的毁伤模式。因此,探究内拱侧受到水下接触爆炸作用时拱板的毁伤特性及损伤机理具有重要的工程意义。

本文通过爆炸试验与数值模拟相结合的方式,探究了水下接触爆炸作用下混凝土拱板的损伤特性及破坏机制。首先,制作三块不同跨度的混凝土拱板,开展水下接触爆炸试验,并对结果进行记录,结合爆炸荷载下拱板剥落的混凝土碎片统计数据,分析了拱板在水下爆炸荷载下的破坏模式,然后,采用 CEL 方法建立了拱板水下爆炸的全耦合数值模型,基于验证后的模型,进一步探究了药量和拱板跨度对拱板爆炸毁伤特性的影响机理。

1 爆炸试验

1.1 试件

为探究水下接触爆炸作用下混凝土拱板的破坏特性及毁伤模式,共进行了三组对比试验。试件为三块除跨度外其他尺寸均相同的混凝土拱板,每块拱板的内径为 300 mm,外径为 360 mm,拱板宽度为 500 mm,厚度为 15 mm,拱板跨度有 500 mm 和 600 mm 两种,如图 1 所示。试件由 C30 强度的混凝土浇筑,平均抗压强度为 32 MPa,抗拉强度为 1.8 MPa,弹性模量为 29791.5 MPa,泊松比为 0.2。

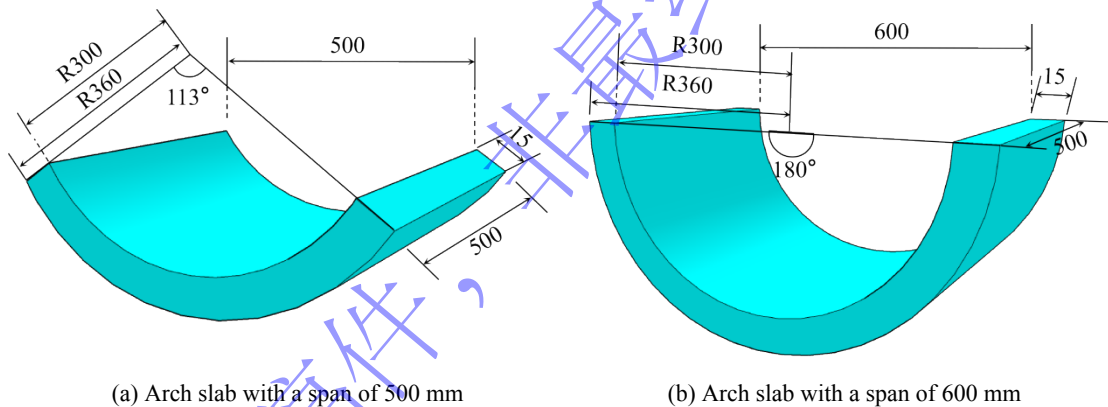


图 1 拱板尺寸 (单位: mm)

Fig.1 Arch slab dimensions (Unit: mm)

1.2 试验布置

为模拟水下爆炸环境,试验前期砌筑尺寸为长 2.3 m,宽 1.7 m 的蓄水池,在试验开始前进行蓄水至水深 1.2 m,如图 2(a) 所示。拱板试件两端由钢制夹具固定并放置于预制钢架上,使用吊机将预制钢架及试件吊装并沉放至试验水池的指定位置。为便于拱板碎片的收集分析,在钢架底部及四周铺设底网,如图 2(b) 所示。

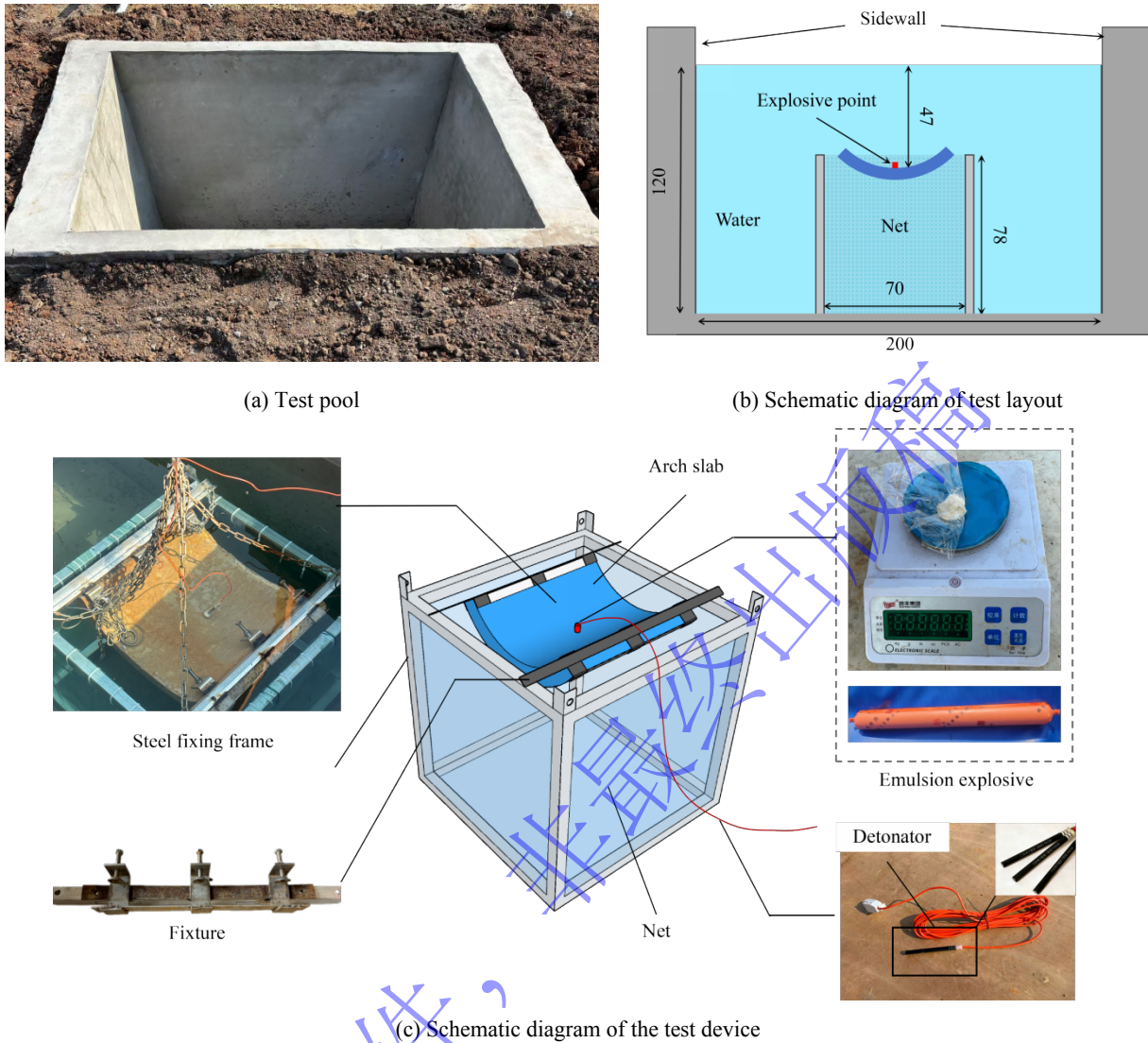


图2 试验设置 (单位: cm)

Fig.2 Test setup (Unit: cm)

试验使用的炸药类型为乳化炸药, 采用以爆轰产物和冲击波为主的单发无聚能穴电子雷管引爆, 起爆点均位于拱板内拱侧跨中位置, 其中 Q1 组及 Q2 组仅采用单发雷管, Q3 组使用单发雷管引爆 5 g 炸药, 如图 2(c) 所示。本试验中所用雷管的起爆药成分为二硝基重氮酚 (DDNP), 含量在 0.2 g~0.3 g, 主装药成分为黑索金 (RDX), 含量在 0.6 g~0.8 g, 为统一药量大小, 雷管及乳化炸药均已根据相关文献换算成相应 TNT 当量, 其中单根雷管等效于 1.6 g TNT^[28-30], 乳化炸药与 TNT 的换算系数取 0.625^[31], 试验工况如表 1 所示。

表 1 水下接触爆炸试验工况参数

Table 1 Experimental conditions of underwater contact explosion tests

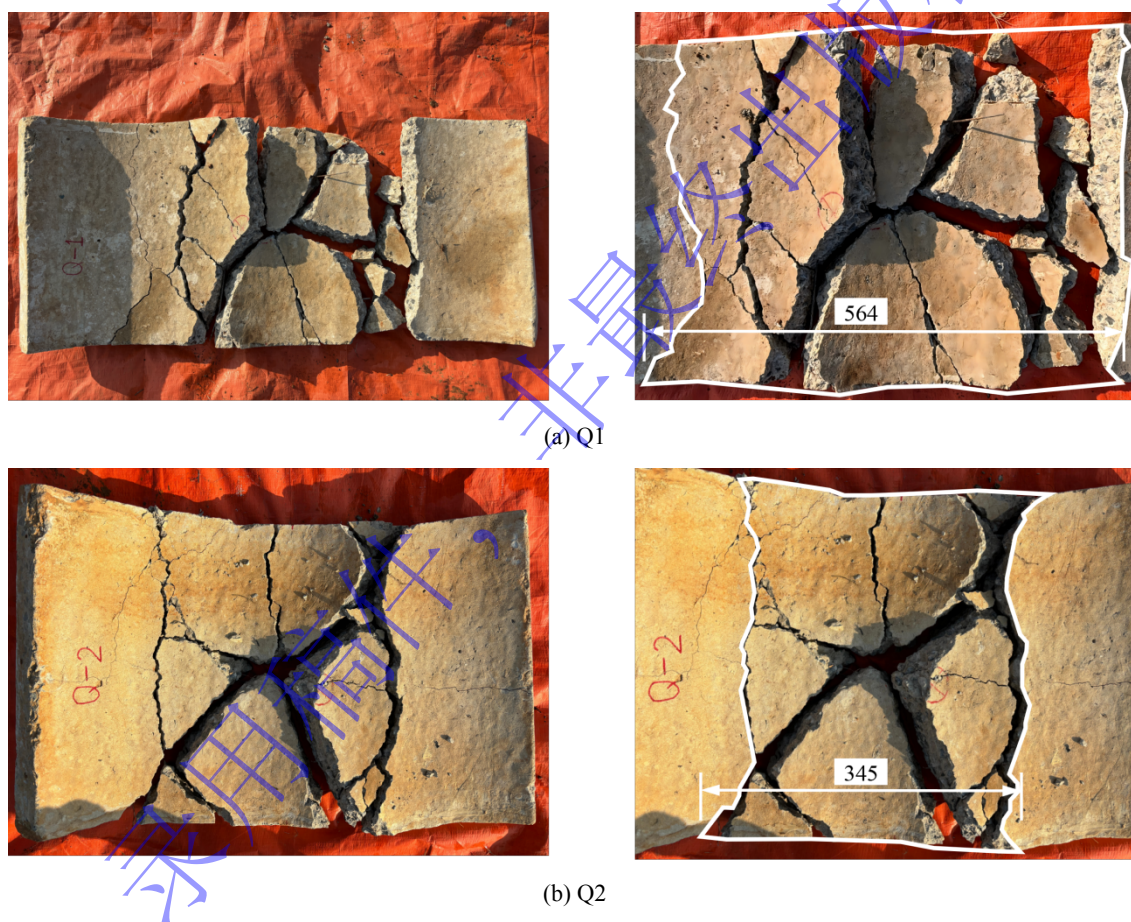
试件编号	拱板跨度/mm	TNT 当量/g	起爆位置
Q1	600	1.6	内拱侧跨中
Q2	500	1.6	内拱侧跨中
Q3	500	4.7	内拱侧跨中

受试验场地条件限制，试验水深相对有限，难以满足严格意义上的深水自由场条件。为评估有限水深对试验结果的影响，参考相关研究^[32]，当炸药中心至自由水面距离大于最大气泡半径的3倍时，边界效应可认为不显著。基于 Cole 经验公式对本研究试验工况进行估算，单发电子雷管在该水深条件下产生的最大气泡半径约为 8.35 cm，3 倍最大气泡半径小于试验中起爆点至自由水面的实际距离 47 cm。由此可见，本试验中可忽略水深的影响。

2 试验结果与分析

2.1 拱板破坏模式分析

三组试件的水下接触爆炸破坏形态如图 3 所示。从图中可以看出，在水下爆炸荷载作用下，Q1、Q2 和 Q3 三组混凝土拱板试件均产生贯穿性裂纹，拱板破碎成多个块体。





(c) Q2

图3 混凝土拱板水下接触爆炸测试结果 (单位: mm)

Fig.3 Underwater contact explosion test results of concrete arch slabs (Unit: mm)

从图 3(a) 中可以看出, 在 1.6 g 药量下, Q1 拱板发生了明显的整体性破坏。在冲击波作用下, 迎爆面产生直径约为 34.3 cm 的大面积环形破碎带, 贯穿拱板厚度的裂纹将拱板分解为多块, 使拱板完全失效。

图 3(b) 为试件 Q2 的破坏情况, 拱板跨度减小后, 整体破坏模式与 Q1 无明显差异, 均为跨中区域发生整体性破坏, 但破碎带范围有所缩小, 如表 2 所示。Q2 组相对破碎带最大直径相较于 Q1 组下降了 9.7%, 相对破碎带面积降低了 37.3%, 贯穿性裂纹数量基本相同。此外, Q2 组试件出现了由爆心扩展至拱端, 横向贯穿拱板的裂纹, 且拱端两侧边缘处产生少量的碎片剥落。

表 2 同等药量下不同跨度拱板迎爆面跨中区域破坏情况对比

Table 2 Comparison of failure condition in the mid-span area of blasting surface of different span arch slabs under the same explosive charge

编号	相对破坏直径 (破坏直径/破坏前拱板内弧长)	相对破坏面积 (破坏面积/破坏前内拱面面积)	贯穿性裂纹数/条
Q1	59.9	55.2	6
Q2	54.1	34.6	6

TNT 当量增大至 4.7 g 时, 爆炸荷载远超 Q3 组试件的承载能力, 环形破碎带进一步扩大, 多条裂纹将拱板贯穿, 分解为若干混凝土碎块, 如图 3(c) 所示。

2.2 碎片统计及分析

为进一步对混凝土拱板在水下接触爆炸作用下的损伤模式进行规律性分析, 对爆炸试验后 Q1, Q2, Q3 三组试件剥落的碎片进行了称重测量并完成了分区统计, 如图 4 所示。

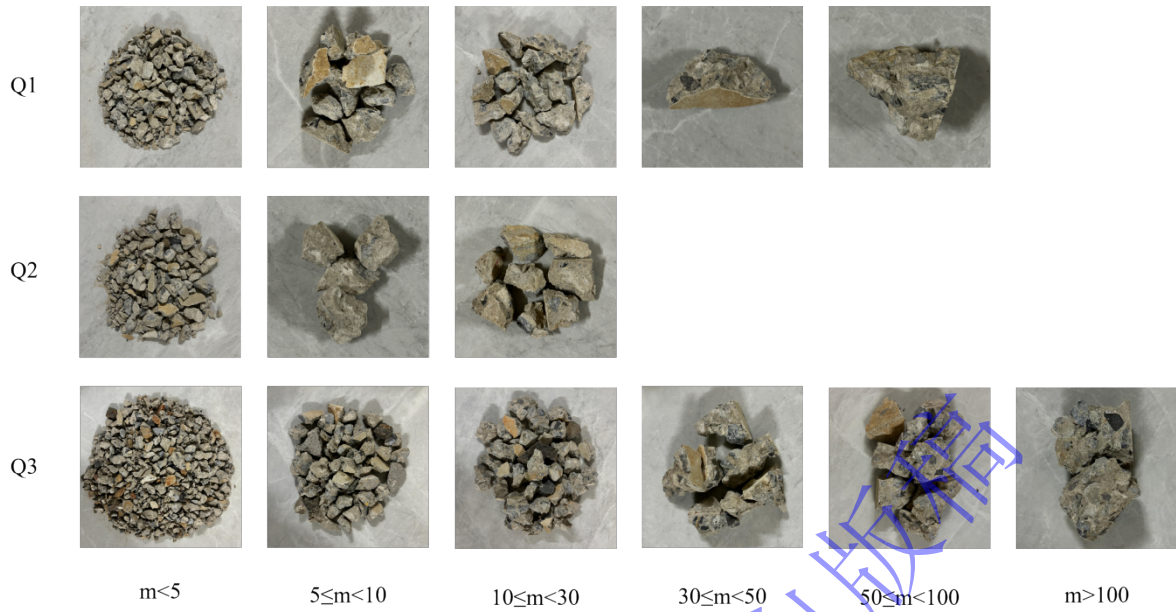


图4 碎片质量分区统计 (单位: g)

Fig.4 Statistics of fragment quality zoning (Unit: g)

在爆炸作用下, 爆心区域混凝土在爆轰作用下被压碎, 形成大量细小混凝土碎片, 同时, 拱板薄弱区域出现块体剥落, 形成尺寸较大的碎块。

对比不同试件的碎片质量分布可以发现, 跨度的变化影响碎片质量分布, 跨度增大时结构更易形成大块碎片; Q2 组碎片集中在小质量区间, 且无任何大于 30 g 的碎片, 其中小于 5 g 的碎片质量占比一半以上; 在相同大小的爆炸荷载作用下, 比 Q2 组拱板跨度更大的 Q1 组剥落的碎片质量也集中在中小质量区间, 其中 $10 \text{ g} \leq m < 30 \text{ g}$ 范围的碎片质量最多, 约占总量的 39%, 但同时也产生了 12% 质量在 50 g 以上的大块碎片。

当炸药量增大至 4.7 g 时, 试件剥落的碎片显著增多。Q3 组试件产生的碎片在三组中最多, 总质量约为 Q2 组 9 倍。此外, 药量增大后, 大块碎片所占比例也有所提升, 碎片分布向大块方向发展: Q3 组除产生了近一半中小质量的碎片外, 还产生了约 21% 的质量大于 50 g 的大块碎片, 而在 Q2 组中这些区间内的碎片质量为 0。

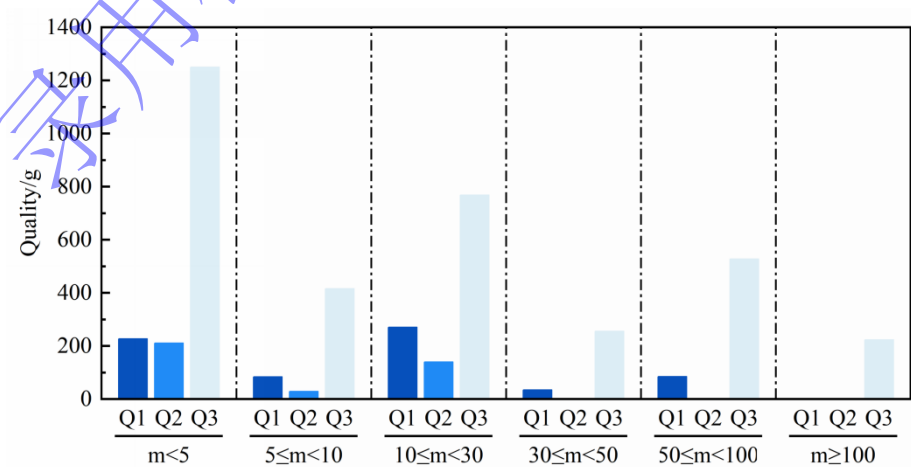


图5 碎片质量分布图

Fig.5 Distribution map of fragment mass

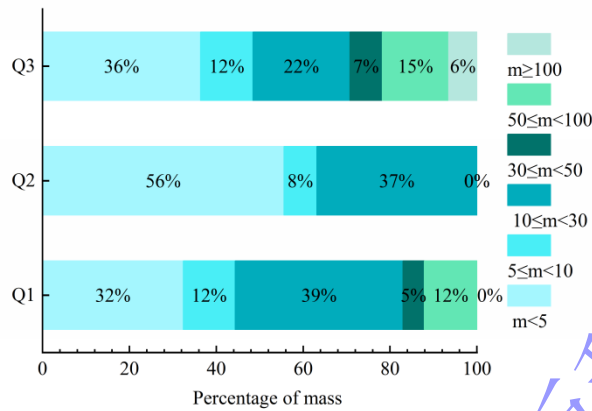


图 6 碎片质量百分比对比图

Fig.6 Comparison chart of fragment mass percentage

为了更加准确地评估各组碎片质量分布的均一性，采用衡量数据离散程度的常用指标变异系数 CV 进行分析，CV 越大表明分布越不均匀^[33]。计算式如下：

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

其中， σ 为标准差， μ 为平均值。计算结果如下表所示：

表 3 碎片质量变异系数

Table 3 Variation coefficient of fragment quality

	Q1	Q2	Q3
CV	0.8450	1.3045	0.6156

由表 3 可知，Q2 组碎片质量在不同区间之间分配的差异最大，Q3 最小，Q1 处于中间水平。结合毁伤结果分析，Q2 组在爆炸作用下主要产生小块碎片，碎片质量分布更为集中，导致碎片分配最不均匀，相比之下，跨度更大的 Q1 组由于形成了更多的大块碎块，碎片分布的范围更广，表明结构产生了更明显的整体破坏。损伤程度最大的 Q3 组则由于产生了最剧烈的整体破碎，碎块质量分布最广，表现为最均匀的质量分布特征。

3 数值模型

3.1 有限元模型

水下接触爆炸的数值模型采用拉格朗日-欧拉耦合算法^[34]建立，由混凝土拱板、炸药和水三部分构成，如图 7 所示。考虑到试验中所采用的为无聚能穴的钢制雷管，其起爆过程不具备典型聚能射流形成条件^[35-36]，故本文建模中未单独考虑雷管的聚能射流作用，而是用等效的 TNT 进行了简化处理。模型中，拱板两端设置固定约束，混凝土拱板采用适用于求解固体的拉格朗日单元建立，水体和 TNT 炸药则采用适用于模拟流体的欧拉单元建立。为兼顾计算精度与效率，对炸药中心的水体网格进行局部加密，并沿长度呈梯度分布。此外，在水体表面设置无反射边界以消除水体边界的反射波对计算结果的影响^[37]。

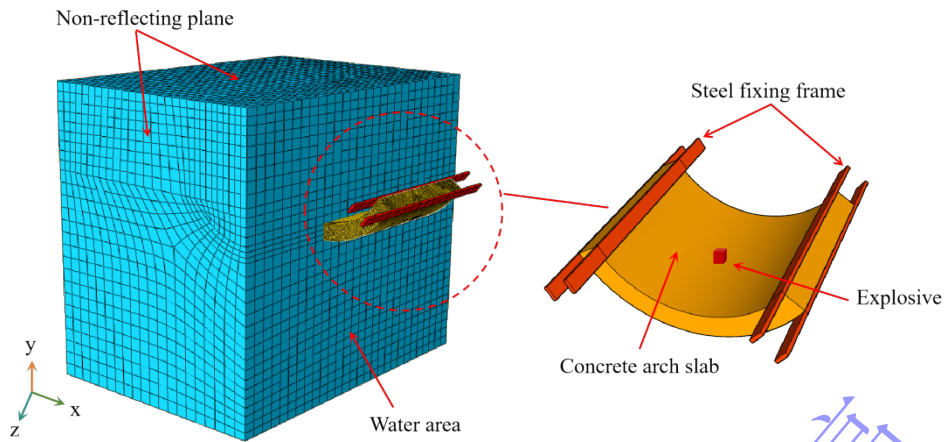


图7 数值模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of the numerical model

3.2 模型参数

3.2.1 炸药

利用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程^[38]描述水下爆炸作用产生的爆轰产物:

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

其中, A , B , R_1 , R_2 , ω 均为材料参数, p 为爆轰压力, V 为爆轰产物的相对体积, E 为爆轰产物的比内能。材料参数具体如下表所示:

表4 TNT 材料参数

Table 4 Parameters of TNT material

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1650	7	371.2	3.2	4.2	0.95	0.35

3.2.2 水

在水下爆炸作用瞬间及冲击波传播阶段, 水体以压缩状态为主, 因此, 采用基于爆炸冲击波速度与质点速度关系的 U_s-U_p 状态方程描述水体的动力学特性^[39], 具体表达式如下:

$$U_s = C_0 + sU_p \quad (3)$$

其中, U_s 代表冲击波速度; U_p 为质点速度; C_0 为水体中的声速, 取 $C_0 = 1435 \text{ m/s}$; s 为经验常数, 取 $s = 1.921$ 。

由于本试验起爆点水深相对较小, 气泡溃散较快, 且边界条件复杂, 无法准确计算气泡脉动荷载的大小, 因此忽略气泡脉动作用对本试验结果的影响^[40]。

3.2.3 混凝土

在本文中, 采用混凝土损伤塑性模型 (Concrete Damaged Plasticity, CDP) ^[41,42]对爆炸荷载下混凝土材料的非线性力学行为进行建模, 考虑到 CDP 模型基于低应变率条件建立, 难以反映混凝土材料在高应变率加载下的真实力学行为, 本研究中采用 CEB-FIB-1990 规范^[43]中的动态增大系数 (DIF) 计算公式来修正混凝土材料参数, 受压状态下混凝土的 DIF 计算公式如下:

$$CDIF = \frac{f_{cd}}{f_{cm}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_{c0}}\right)^{1.026\alpha_s} & \text{for } \dot{\sigma}_c \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \gamma_s \left(\frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_{c0}}\right)^{1/3} & \text{for } \dot{\sigma}_c > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\dot{\sigma}_c$ 为受压动态应变率，取值范围为 $3 \times 10^{-5} \sim 300 \text{ s}^{-1}$ ； $\dot{\sigma}_{c0}$ 为受压静态参考应变率，取 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ； f_{cd} 为混凝土动态抗压强度； f_{cm} 为混凝土静态抗压强度； α_s 为材料系数， $\alpha_s = 1/(5 + 9f_{cm}/10)$ ； γ_s 为修正系数， $\log \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2$ 。

由于混凝土对拉伸应变率更为敏感，其 TDIF 的斜率在转折点后通常比压缩更高，计算公式如下：

$$TDIF = \frac{f_{ctd}}{f_{ctm}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\sigma}_t}{\dot{\sigma}_{t0}}\right)^{1.016\delta_s} & \text{for } \dot{\sigma}_t \leq 1.0 \text{ s}^{-1} \\ \beta_s \left(\frac{\dot{\sigma}_t}{\dot{\sigma}_{t0}}\right)^{1/3} & \text{for } \dot{\sigma}_t > 1.0 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\dot{\sigma}_t$ 为受拉动态应变率，取值范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 160 \text{ s}^{-1}$ ； $\dot{\sigma}_{t0}$ 为受拉静态参考应变率，取 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ； f_{ctd} 为混凝土动态抗拉强度； f_{ctm} 为混凝土静态抗拉强度； δ_s 为材料系数， $\delta_s = 1/(10 + 6f_{cm}/10)$ ； β_s 为修正系数， $\log \beta_s = 6.111\delta_s - 2$ 。本研究使用的 CDP 模型参数如下表所示：

表 5 混凝土 CDP 模型材料参数

Table 5 Material parameters of concrete CDP model

E_c /(MPa)	泊松比	膨胀角/(°)	偏心率	f_{c0}/f_{b0}	K	粘性参数
29791.5	0.2	30	0.1	1.16	0.667	0.0005

3.3 网格敏感性分析

为了确保数值模拟结果的准确性与可靠性，进行网格敏感性分析十分必要^[44]。考虑 5 种单元尺寸（1 mm，3 mm，5 mm，7 mm，9 mm）对跨度为 500 mm 的混凝土拱板进行模拟，药量取 1.6 g，其他设置与 3.1 中所描述的条件相同。观察图 8 中动能曲线发现，动能峰值随拱板网格增大而升高，当拱板网格尺寸小于 5 mm 时，动能峰值无明显差异。因此，为兼顾计算精度与效率，模型中选择 5 mm 的网格对拱板进行建模。

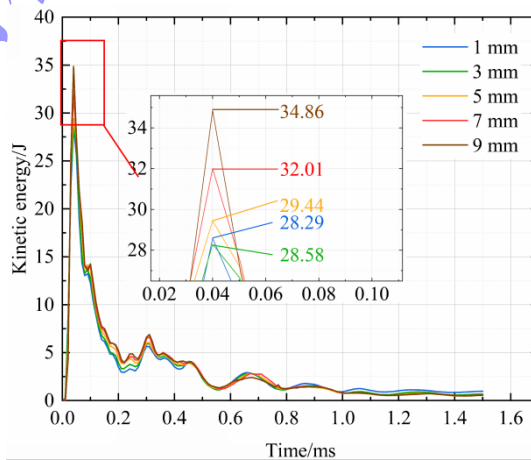


图 8 不同网格尺寸下拱板的动能时程曲线图

Fig.8 The kinetic time-history curves of the arch slabs under different grid sizes

3.4 有限元模型验证

为验证模型的准确性，对跨度 500 mm 的拱板进行了水下接触爆炸工况的仿真分析，结果如图 9 所示。可以看出，仿真结果中裂纹的分布情况与试验结果基本一致。此外，仿真结果中，迎爆面环形破碎带最大直径为 28.2 cm，与试验结果中的 25.6 cm，误差仅为 9.2%。因此，仿真模型能够较好地再现爆炸荷载作用下混凝土拱板的毁伤模式，证明所建耦合模型具有较好的可靠性和适用性。

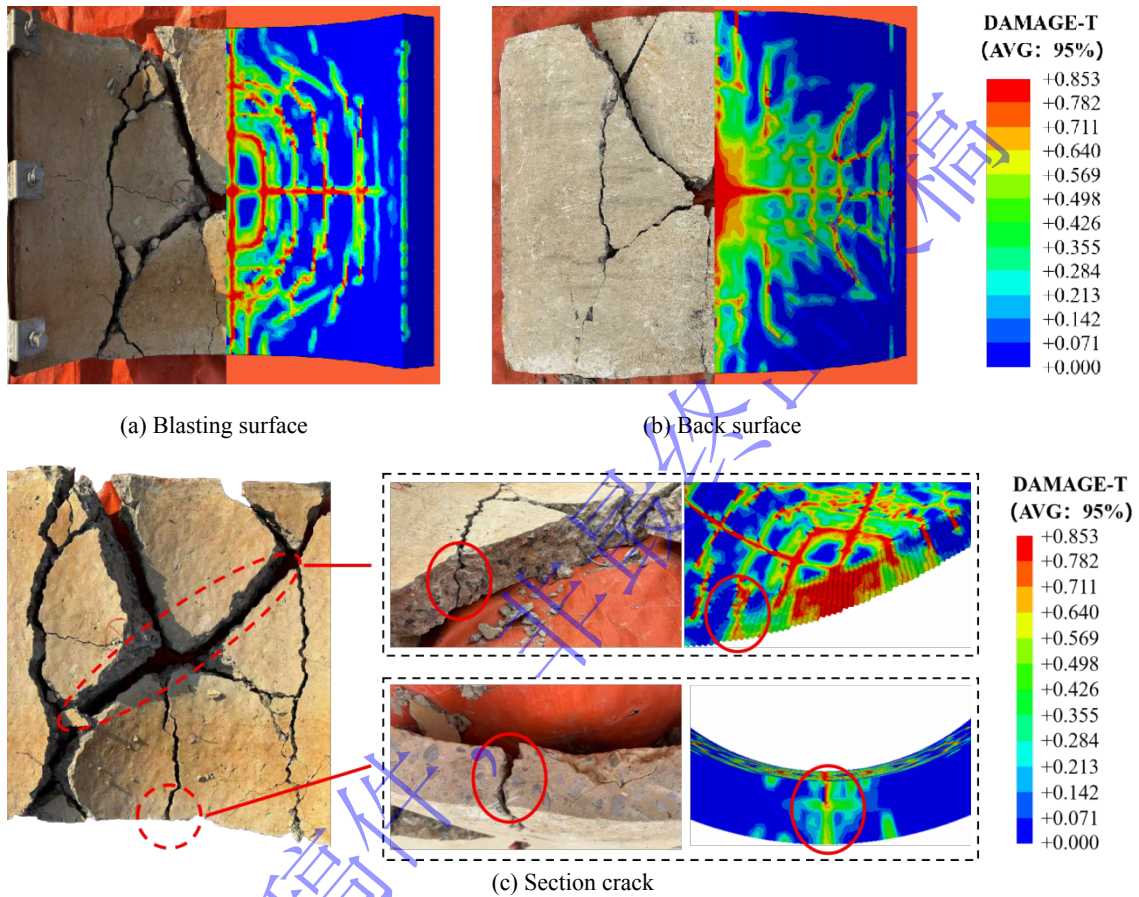


图 9 数值结果与试验结果对比图

Fig.9 Comparison between the numerical results and the experimental results

3.5 毁伤演化过程及损伤机理

图 10 展示了拱板在爆炸作用下的裂纹发展过程。炸药被引爆后，拱板表面在爆轰瞬间承受高压冲击波，在拱板曲率的影响下，冲击波使得拱板迎爆面形成环状损伤带 ($t=0.04$ ms)。 $t=0.1$ ms 时，产生了由爆心区域向四周扩展的裂纹，随着冲击波的进一步传播，环形损伤带与辐射状裂纹进一步扩展并贯穿拱板 ($t=0.16$ ms)，最终在 $t=1$ ms 时，裂纹基本发育完全。

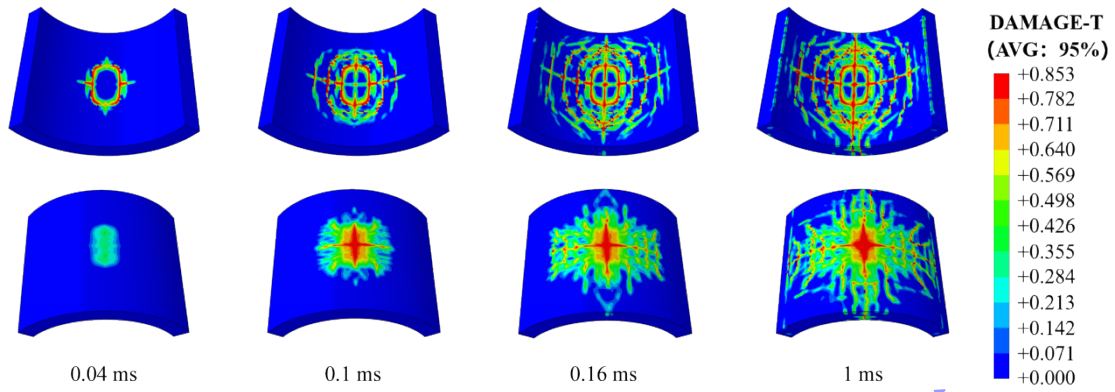


图 10 拱板损伤演化过程图

Fig.10 Diagram of the evolution process of arch slab damage

在混凝土拱板中，冲击波以瞬时应力的形式传播，图 11 和图 12 分别展示了爆炸过程中应力在拱板厚度和跨度方向上的分布情况，其中压应力为正值，拉应力为负值。

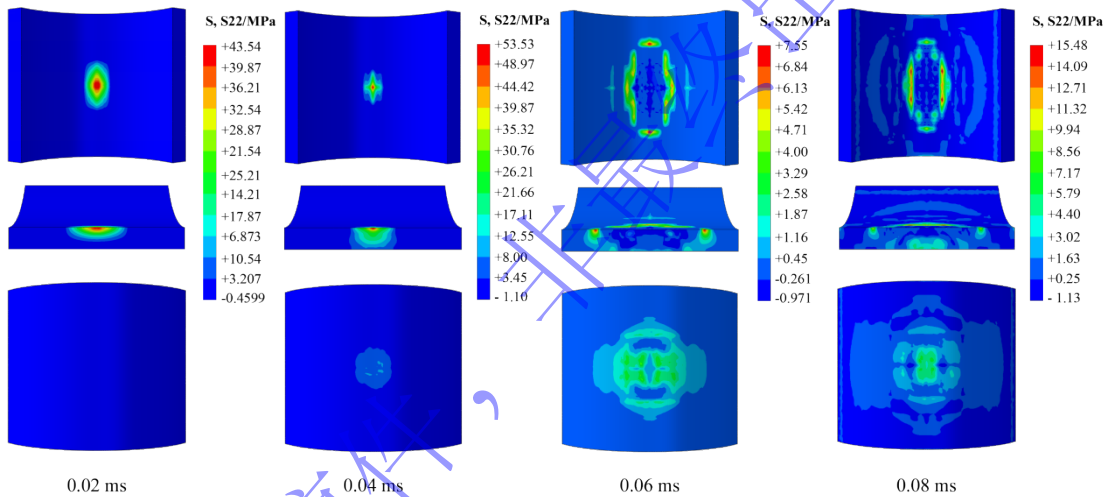


图 11 拱板厚度方向应力分布图

Fig.11 Stress distribution diagram of the arch slabs in the thickness direction

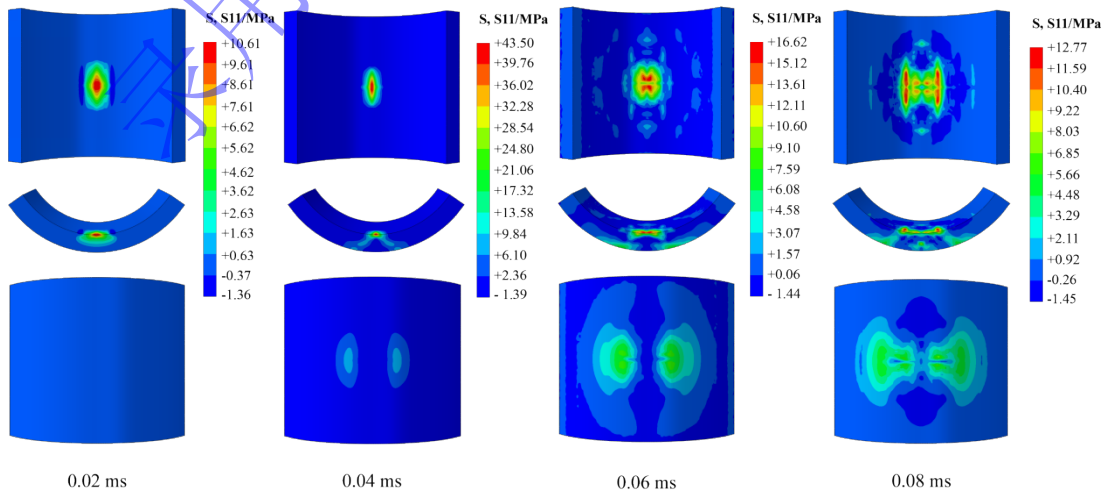


图 12 拱板跨度方向应力分布图

Fig.12 Stress distribution diagram of the arch slabs in the span direction

$t=0.02$ ms 时, 爆炸产生的球形冲击波以压缩波的形式作用于拱板表面, 超过混凝土抗压强度的压应力将爆心处的拱板压碎, 产生细小的混凝土颗粒。 $t=0.04$ ms 时, 压缩波到达拱板底部并进一步扩大作用范围, 随后, 部分到达拱板底部的压缩波在自由面经过反射后变为拉伸波再次作用于拱板, 形成环状拉伸带 ($t=0.06$ ms), 在超过混凝土抗拉强度的拉应力作用下, 混凝土开裂, 逐渐发展呈辐射状裂纹。

在 $t=0.06$ ms 和 $t=0.08$ ms 时, 可以看到在内拱侧形成了环状的压应力带, 这是由于在混凝土材料应变率效应的影响下, 冲击波作用于混凝土表面时, 除产生沿板厚方向传播的冲击波外, 还会产生垂直于板厚方向的横波, 球形传播的冲击波与横波交汇后, 形成环状压应力带。

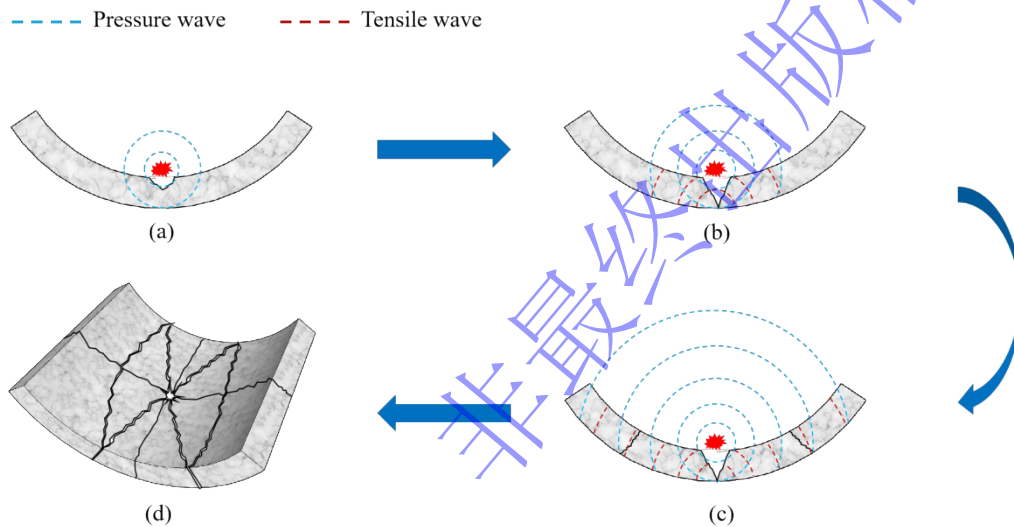


图 13 拱板毁伤原理示意图

Fig.13 Schematic diagram of the principle of arch slab damage

综合分析可知, 拱板的毁伤机理如下: 首先, 在爆炸冲击波及爆轰产物作用下, 爆心区域混凝土被压碎, 形成爆坑, 如图 13(a); 之后, 作用于拱板的冲击波以压缩波的形式沿板厚方向传播, 并在拱板底部自由面发生反射, 形成拉伸波后再次作用于拱板, 如图 13(b); 当拉应力超过混凝土抗拉强度后, 拱板产生径向扩展的辐射状裂纹, 如图 13(c); 随着应力波传播范围扩大, 在拱板曲率影响下, 拱腰区域产生较大的切向应力分量, 形成剪切应力集中带, 在剪切应力与拉应力的耦合作用下, 拱板两侧拱腰处纵向开裂, 形成环状裂纹。此外, 裂纹在背爆面拉应力的影响下与迎爆面呈钝角发育, 如图 13(d) 所示, 这造成了背爆面的环状破碎带区域大于迎爆面。

4 参数化分析

4.1 药量的影响

试验中 1.6 g 药量下拱板已经失效破碎, 为研究药量变化对拱板动态响应与破坏特征的影响规律, 考虑对 500 mm 跨度的拱板使用 4 种小药量 (0.4 g, 0.7 g, 1.0 g, 1.3 g) 进行模拟, 探究在水下接触爆炸作用下不同药量对损伤结果的影响。

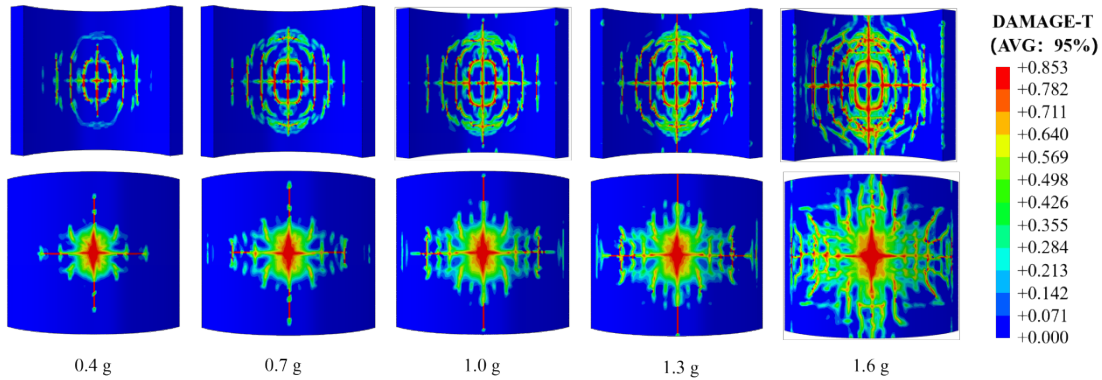


图 14 不同水下爆炸荷载下混凝土拱板的损伤模式

Fig.14 Damage modes of concrete arch slabs subject to different underwater explosive loads

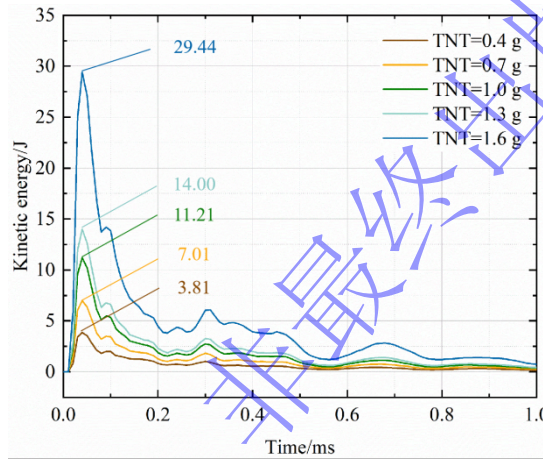


图 15 不同水下爆炸荷载下拱板的动能时程曲线

Fig.15 The kinetic time-history curves of arch slabs subject to different underwater explosion loads

观察图 14 中不同药量下拱板的损伤情况可以发现，药量的增加基本不改变拱板的破坏模式，但随着爆炸荷载的增大，迎爆面环形破碎带逐渐由跨中区域小范围发育为贯穿整块拱板宽度，辐射状裂纹也随之贯穿拱板。分析图 15 中的动能时程曲线，发现动能峰值随炸药质量呈非线性增大。值得关注的是，TNT 从 1.3 g 增大至 1.6 g 时，拱板的动能峰值陡增了 110%，可以推测 1.3 g TNT 为使拱板从局部损伤变为整体失效的临界值，拱板刚度不足以抑制爆炸冲击波使得结构进入强烈塑性变形阶段，造成动能迅速上升。

4.2 跨度的影响

为进一步探究不同跨度下拱板的毁伤特性，对比了 400 mm, 450 mm, 500 mm, 550 mm, 600 mm 等 5 种跨度的拱板在水下接触爆炸下的损伤结果，TNT 药量取 1.6 g，其他设置与前文所介绍的相同，损伤结果如图 16 所示。

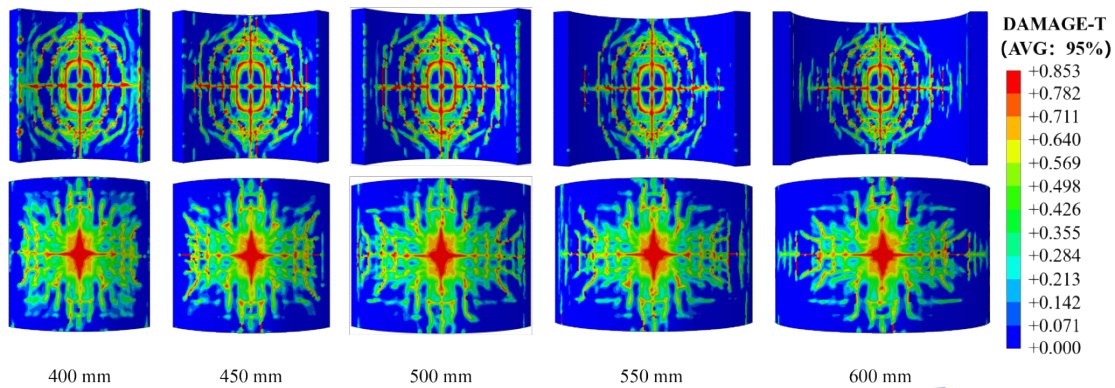


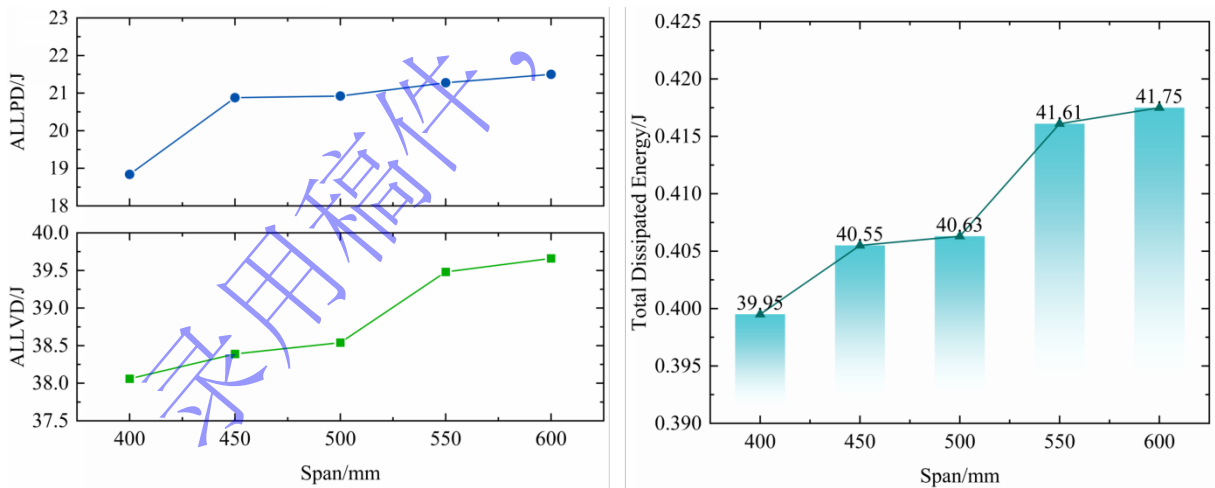
图 16 不同跨度的拱板在水下爆炸荷载下的损伤模式

Fig.16 Damage modes of arch slabs with different span subject to underwater explosive loads

炸药起爆后，产生的冲击波以球形向四周传播并随距离逐渐衰减，对于小跨度的拱板，爆源至两侧拱端的距离较短，冲击波衰减程度小，两侧拱端受到的冲击波强度更大。此外，在两端固定约束条件下，应力波在边界处反射并形成应力集中，最终导致小跨度拱板拱端两侧的破坏程度相较于大跨度拱板更明显。

随着拱板跨度增大，冲击波在拱板内表面的作用范围扩大，跨中区域承受的冲击波冲量增加，跨中环形破碎带呈现出扩展趋势，即在原有破碎带周围，横向中线两侧附近逐渐出现新的损伤，如图 16 所示。

在爆炸这种高应变率荷载下，结构主要发生塑性损伤，而塑性变形主要通过耗散能进行量化^[45]，图 17 中展示了主要的耗散能与拱板跨度之间的关系，其中 ALLPD (Plastic Dissipation) 代表塑性耗散能，ALLVD (Viscous Dissipation) 代表黏性耗散能。



(a) Dissipation energy of arch slabs with different span

(b) Total energy dissipation of arch slabs with different span

图 17 不同跨度拱板在爆炸过程中的耗散能

Fig.17 The dissipated energy of arch slabs with different spans during the explosion process

从图 17 中可以看出，拱板总体的耗散能随着拱板跨度的增大而增加，跨度 600 mm 的拱板，即半圆形拱板比 400 mm 的拱板总耗散能增大了 4.5%，即，大跨度的拱板损伤大于小跨度的拱板。这是由于在水下环境中，当起爆点位于内拱侧时，爆炸冲击波主要作用于拱板的凹面，大跨度的拱板为

冲击波提供了更大的传播反射空间, 导致冲击波在结构内部发生多次反射与叠加, 形成更大的局部应力集中和高应变区, 加剧了结构的破坏。小跨度拱板尺寸相对较小, 凹面空间也随之减小, 冲击波消散至水中的范围更大, 在结构中反复传播和叠加的次数有所降低, 因而损伤程度更低。

5 结论

本文结合爆炸试验与数值仿真方法, 针对水下工况, 探究了接触爆炸作用下混凝土拱板的毁伤特性。通过分析拱板剥落碎片的质量分区, 结合爆炸荷载下拱板内部冲击波的传播过程, 揭示了拱板内拱侧受到爆炸荷载时的破坏模式以及损伤机理。此外, 参数化分析了药量与拱板跨度对损伤结果的影响, 主要结论如下:

(1) 水下接触爆炸作用下, 拱板内拱侧跨中区域形成由环状裂纹及辐射状裂纹组合而成的环状破碎带。拱板跨度由 500 mm 增大至 600 mm 后, 相对破碎带面积增大了 37.3%, 相对最大直径增大了 9.7%; TNT 等效药量由 1.6g 增大至 4.7 g, 拱板在远超承载力的爆炸荷载下分解为碎块状。

(2) 药量与跨度影响拱板剥落碎片的质量分布。随着爆炸荷载的增大, 混凝土表面在冲击波的作用下被直接压碎, 产生了更多的小体积的碎块; 而跨度增大使得冲击波作用面积增大, 扩大了破坏范围, 更易形成大块碎片。

(3) 通过与试验结果的对比, 所建数值模型的准确性得到了验证。基于仿真分析发现, 拱板的辐射状裂纹由拉应力引起, 冲击波在拱板底部反射后形成拉应力波, 混凝土产生拉伸破坏; 环状裂纹的产生, 是剪切应力与拉应力对两侧拱腰共同作用的结果。

(4) 随着 TNT 等效药量从 0.4g 增大至 1.6g, 环形破碎带由跨中局部区域扩展至贯穿拱板, 拱板动能峰值呈非线性增大; 随着跨度的增大, 拱板两端破坏逐渐减小, 但由于大跨度拱板受到更多的冲击波冲量, 跨中区域破坏范围向拱端扩展。

参考文献

- [1] HE Z H, CHEN X Q, ZHANG X Q, et al. Damage prediction of hull structure under near-field underwater explosion based on machine learning [J]. Applied Ocean Research, 2025, 154: 104329. DOI: 10.1016/j.apor.2024.104329.
- [2] 汤长兴, 曹克磊, 赵瑜, 等. 钢纤维增强多孔混凝土板水下接触爆炸防爆机理及损伤等级预测[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(05): 60-75. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0239.
TANG C X, CAO K L, ZHAO Y, et al. Study on explosion-proof mechanism and damage level prediction of steel fiber reinforced cellular concrete slab in underwater contact explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(05): 60-75. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0239.
- [3] 杨允锴, 武双章, 高振儒, 等. 近爆作用下钢筋混凝土柱损伤判据的试验研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(05): 47-56. DOI: 10.19931/j. EB. 20220165.
YANG Y K, WU S Z, GAO Z R, et al. Experimental study on damage criterion of reinforced concrete column under the action of close range explosion [J]. ENGINEERING BLASTING, 2023, 29(05): 47-56. DOI: 10.19931/j. EB. 20220165.
- [4] 薛建锋, 章琪月, 许红浩, 等. 接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能[J]. 高压物理学报, 2025, 39(05):61-77. DOI: 10.11858/gywlxb. 20240881.
XUE J F, ZHANG Q Y, XU H H, et al. Blast Resistance of POZD-Coated Reinforced Concrete Beams under Contact Explosion [J]. CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS, 2025, 39(05):61-77. DOI: 10.11858/gywlxb. 20240881.

- [5] 刘靖晗, 高屹, 唐廷, 等. 梁板式高桩码头水下爆炸试验及数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(11): 29-38+49. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.11.004.
LIU J H, GAO Y, TANG Y, et al. Underwater explosion tests and numerical simulation of beam-slab high pile wharf [J]. JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK, 2025, 44(11): 29-38+49. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.11.004.
- [6] YU S Y, WU H X, ZHANG G K, et al. Experimental study on anti-shallow-buried-explosion capacity of a corrugated steel-plain concrete composite structure [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172: 104393. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104393.
- [7] NING J G, YANG S, MA T B, et al. Fragment behavior of concrete slab subjected to blast loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106370. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106370.
- [8] 李军润, 卢永刚, 冯晓伟, 等. RC箱型结构内爆炸载荷特性和动力行为分析[J/OL]. 爆炸与冲击, 2026, 46(01): 133-153. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0388.
LI J R, LU Y G, FENG X W, et al. Analysis of internal explosion load characteristics and dynamic behavior in RC box structures [J/OL]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(01): 133-153. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0388.
- [9] TRAN D H, NG A W M, PERERA B J C. Neural networks deterioration models for serviceability condition of buried stormwater pipes [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20: 1144-1151. DOI: 10.1016/j.engappai.2007.02.005.
- [10] KANG J, MENG X X, SU T, et al. Research on leakage control of river oil and gas pipelines based on accident situation evolution model [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2025, 96: 105615. DOI: 10.1016/j.jlp.2025.105615.
- [11] REDA A, HOWARD I M, FORBES G L, et al. Design and installation of subsea cable, pipeline and umbilical crossing interfaces [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 81: 193-203. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.006.
- [12] 陈昊, 卢浩, 孙善政, 等. 常规武器二次爆炸作用下浅埋钢筋混凝土拱结构破坏规律[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(08): 155-167. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0260.
CHEN H, LU H, SUN S Z, et al. Failure law of shallow buried reinforced concrete arch structure under secondary explosion of conventional weapons [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(08): 155-167. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0260.
- [13] LIU G K, WANG W, LIU R C, et al. Deriving formulas of loading distribution on underground arch structure surface under close-in explosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104608. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104608.
- [14] HUO Q, LIU G K, WANG W, et al. Failure mode and damage assessment of underground reinforced concrete arched structure under side top explosion [J]. Structures, 2024, 59: 105801. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105801.
- [15] 罗军洪, 刘宏伟, 付安琪, 等. 顶爆作用下地下大跨度硐室抗爆性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(05): 1630-1638. DOI: 10.20174/j.juse.2022.05.025.
LUO J H, LIU H W, FU A Q, et al. Study on Anti-Explosion Performance of Large-Span Underground Cavern under Top-Explosion Load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(05): 1630-1638. DOI: 10.20174/j.juse.2022.05.025.
- [16] MAIORANA E, TETOUOUGEN C D, ZAMPIERI P. Effect of blast load on the structural integrity of steel arch bridge slab [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106498. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106498.

- [17] YUE Z Y, ZHOU J N, WANG P, et al. Experimental study on the anti-blast performance of polyurea reinforced concrete arch structures [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77: 107483. DOI: 10.1016/j.job. 2023. 107483.
- [18] JIANG M R, QI S H, PU S K, et al. Experimental study on the blast resistance performance of FRP grid & mortar reinforced concrete arch structure [J]. *Materials*, 2022, 15(20): 7149. DOI: 10.3390/ma15207149.
- [19] SONG D Y, TAN Q H, CAO Y Y Y, et al. Experimental investigation on blast and post-blast performance of reinforced concrete straight-wall arches strengthened with polyurea coating [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 385: 131352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2023. 131352.
- [20] 陈健, 袁大军, 苏秀婷, 等. 超大直径水下盾构隧道施工技术进展与展望[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(02): 124-138. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt. 2024. 02. 012.
CHEN J, YUAN D J, SU X T, et al. Progress and Prospects of Construction Technology for Ultra-Large Diameter Underwater Shield Tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(2): 124-138. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt. 2024. 02. 012.
- [21] 黄超, 徐维铮, 曾繁, 等. 近水面空中爆炸冲击波的载荷特性[J/OL]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(01): 3-13. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0457.
HUANG C, XU W Z, ZENG F, et al. Research on Shock Wave Load Characteristics of Near Water Surface Blast [J/OL]. *Explosion and Shock Waves*, 2026, 46(01): 3-13. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0457.
- [22] 张社荣, 孔源, 王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(13): 148-153. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs. 2014. 13. 026.
ZHANG S R, KONG Y, WANG G H. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(13): 174-179. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs. 2014. 13. 026.
- [23] Kumar R A, Rajesh G, Jagadeesh G. The reflection and refraction of a curved shock front sliding over an air-water interface [J]. *Shock Waves*, 2022, 32: 497-515. DOI: 10.1007/s00193-022-01097-z.
- [24] Zhao X H, Wang G H, Lu W B, et al. Damage features of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 531-545. DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2017. 11. 007.
- [25] 杨广栋, 田许杰, 范勇, 等. 钢筋混凝土拱的水下抗爆性能[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(02): 39-54. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0235.
YANG G D, TIAN X J, FAN Y, et al. Blast resistance of reinforced concrete arches subjected to underwater explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(02): 39-54. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0235.
- [26] Fan Y, Yang G D, Tian X J, et al. Experimental and numerical investigation on normal strength and high strength RC arches subjected to underwater explosions [J]. *Engineering Structures*, 2025, 322(Part B): 119138. DOI: 10.1016/j.engstruct. 2024. 119138.
- [27] Zhao X H, Yang S H, Jia Y S, et al. Study on damage characteristics and mechanisms of arch concrete slabs with outer arch side facing water under inner-arch contact explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 191: 105007. DOI: 10.1016/j.ijimpeng. 2024. 105007.
- [28] 汪旭光, 郑炳旭, 张正忠, 等. 爆破手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
Wang X G, Zheng B X, Zhang Z Z, et al. *Blasting Handbook* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

- [29] Cooper P W. Explosives engineering [M]. New York: Wiley-VCH, 1996.
- [30] REN L J, MA H H, SHEN Z W, et al. Blast response of water-backed metallic sandwich panels subject to underwater explosion-Experimental and numerical investigations [J]. Composite Structures, 2019, 209: 79-92. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2018. 10. 096.
- [31] ZHENG X Y, LI H T, ZHANG C, et al. Experimental Study on Load Characteristics of Underwater Explosion for an Emulsion Explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 045101. DOI: 10. 11858/gywlb. 20220502.
- [32] Cui P, Zhang A M, Wang S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions [J]. Physics of Fluids, 2016, 28: 117103. DOI: 10.1063/1. 4967700.
- [33] 徐佳星, 夏珉, 杨克成, 等. 非球形颗粒系粒径分布的机器学习反演算法[J]. 光学学报, 2023, 43(09): 258-268. DOI: 10.3788/AOS221901.
XU J X, XIA M, YANG K C, et al. Machine Learning-Based Inversion Algorithm for Particle Size Distribution of Non-Spherical Particle System [J]. ACTA OPTICA SINICA, 2023, 43(09): 258-268. DOI: 10.3788/AOS221901.
- [34] Zaid M, Sadique M R, Alam M M. Blast analysis of tunnels in Manhattan-Schist and Quartz-Schist using coupled-Eulerian-Lagrangian method [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(69). DOI: 10. 1007/s41062-020-00446-0.
- [35] 董聪慧, 马志钢, 邵子豪, 等. 雷管爆炸产物与破片飞散过程研究[J]. 工程爆破, 2016(4): 82-86. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-7051. 2016. 04. 017.
DONG C H, MA Z G, SHAO Z H, et al. Flying process of explosion products and metal fragments of detonator [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(4): 82-86. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-7051. 2016. 04. 017.
- [36] 杜志明, 蒲薇华, 路光明. 典型雷管起爆、传爆过程模拟仿真[C]//中国兵工学会第十一届火工烟火学年会. 西安: 中国兵工学会, 2001: 39-47.
DU Z M, PU W H, LU G M. Simulation of initiation and detonation transfer process of typical detonators [C]//11th Annual Conference on Initiation and Pyrotechnics of China Ordnance Society. Xi'an: China Ordnance Society, 2001: 39-47.
- [37] 邢英剑, 赵小华, 方宏远, 等. 水下接触爆炸下拱形结构的毁伤特性分析[J]. 工程爆破, 2025, 31(02): 1-10+38. DOI: 10. 19931/j. EB. 20220317.
XING Y J, ZHAO X H, FANG H Y, et al. Analysis of damage characteristics of arch structure under underwater contact explosion [J]. ENGINEERING BLASTING, 2025, 31(02): 1-10+38. DOI: 10. 19931/j. EB. 20220317.
- [38] 甘宁, 孙卓, 玉帅. 水下爆炸载荷作用下船体梁毁伤特性研究. 舰船科学技术[J], 2025, 47(6): 7-12 DOI: 10. 3404/jissn. 1672-7649. 2025. 06. 002.
GAN N, SUN Z, WANG S. Research on damage features of the ship hull girder subjected to underwater explosion loads [J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(6): 7-12 DOI: 10. 3404/jissn. 1672-7649. 2025. 06. 002.
- [39] Rajasekar J, Kim T H, Kim H D. Visualization of shock wave propagation due to underwater explosion [J]. Journal of Visualization, 2020, 23: 825-837. DOI: 10. 1007/s12650-020-00664-9.
- [40] 王天召, 孙远翔, 陈岩武. 水下接触爆炸气泡脉动特性的理论研究[J/OL]. 爆炸与冲击, 2026, 46(01): 65-74. DOI: 10. 11883/bzycj-2025-0092.
WANG T Z, SUN Y X, CHEN Y W. Theoretical study of bubble pulsation characteristics in underwater contact explosions [J/OL]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(01): 65-74. DOI: 10. 11883/bzycj-

2025-0092.

- [41] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299–326. **DOI:** 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [42] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900. **DOI:** 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124: 8(892).
- [43] ROSSI P, VECCHIO F, BOULEAU P. Influence of loading rate on the tensile behaviour of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(5): 861-872.
- [44] KRAUTHAMMER T, OTANI R K. Mesh, gravity and load effects on finite element simulations of blast loaded reinforced concrete structures [J]. *Computers & Structures*, 1997, 63(6): 1113-1120. **DOI:** 10.1016/S0045-7949(96)00406-3.
- [45] 商贵昊, 商飞, 潘正伟. 超压与冲量综合作用下金属薄板的塑性变形特性分析与建模[J]. *高压物理学报*, 2025, 39(06): 48-56. **DOI:** 10.11858/gywlxb.20240958.
SHANG G H, SHANG F, PAN, Z, W. Analysis and modeling of plastic deformation characteristics of sheet metal under the combined action of overpressure and impulse [J]. *CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS*, 2025, 39(06): 48-56. **DOI:** 10.11858/gywlxb.20240958.