

水下爆炸载荷作用下弧面壳树脂试件应力波的传播机理*

汪恒¹, 陈佳慧², 李奕龙¹, 杨晓成³, 黄勇¹

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;

3. 西安北方庆华机电有限公司, 陕西 西安 710025)

摘要: 为探究水下场景采用环形爆炸索分离弧面壳试件时壳体结构上的应力传播机理, 采用试验与数值模拟相结合的方法对带有裙边的弧面壳光固化树脂试件在水下爆炸载荷作用下的动态响应问题进行了研究, 尤其关注多起爆点同步起爆环形爆炸索时弧面壳试件内部应力波的传播机理。研究结果表明: 不同起爆方式对弧面壳内部应力波传播的影响较大, 弧面壳上会形成不同数量的应力集中点, 且弧面壳顶点、应力集中点与相应的爆炸索爆轰波交汇点位于同一平面内, 应力集中位置与起爆方式具有强相关性; 随着起爆点数量增加, 弧面壳上应力集中点数量也随之增加, 应力集中点的峰值应力显著下降。相关研究成果可为同类结构的水下抗爆或分离装置的爆炸网络设计提供参考。

关键词: 光固化树脂; 多点起爆; 应力集中; 应力传播

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Investigation of stress wave propagation mechanisms in light-cured resin curved shell specimens under underwater explosion loads

WANG Heng¹, CHEN Jiahui², LI Yilong¹, YANG Xiaocheng³, HUANG Yong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China;

3. Xi'an North Qinghua Electromechanical Co. Ltd., Xi'an 710025, Shaanxi, China)

Abstract: To investigate the stress wave propagation mechanisms within curved shell structures during the separation of curved shell specimens by a ring-shaped detonation cord in an underwater environment, experimental testing and numerical simulation were combined to systematically investigate the dynamic response of light-cured resin curved shell specimens with integrated skirts subjected to underwater explosion loading. Particular emphasis was placed on elucidating the propagation mechanisms of stress waves within the curved shell when a ring-shaped detonation cord embedded in the skirt is synchronously initiated using multiple initiation points. By comparing the stress wave propagation processes under different initiation configurations, the influence of the initiation mode on stress wave evolution, stress concentration behavior, and the dynamic response of the curved shell is comprehensively analyzed. Numerical simulations were further employed to reveal the transient evolution of the stress field and to clarify the underlying mechanisms governing stress wave propagation and convergence within the curved shell. The results demonstrate that different initiation modes significantly affect the propagation characteristics of stress waves within the

*收稿日期: 2026-07-07; 修回日期: 2026-09-10;

第一作者: 汪 恒 (2000—), 男, 硕士研究生. E-mail: 1586942049@qq.com;

通信作者: 黄 勇 (1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: hy@njust.edu.cn。

curved shell, resulting in the formation of different numbers of stress concentration points. A distinct geometric relationship is observed among the apex of the curved shell, the stress concentration points, and the corresponding convergence points of the detonation waves generated by the ring-shaped detonation cord, all of which are consistently located on the same plane. This finding indicates a strong correlation between the locations of stress concentration and the initiation mode. Furthermore, as the number of initiation points increases, the number of stress concentration points increases correspondingly, whereas the peak stress at these locations decreases significantly. These findings provide a deeper understanding of stress wave propagation and stress concentration mechanisms in curved shell structures subjected to underwater explosion loading and offer valuable guidance for the design of explosive initiation networks for underwater blast-resistant structures and underwater separation devices with similar structural configurations.

Keywords: light-cured resin; multi-point initiation; stress concentration; stress wave propagation

光固化树脂具有优异的力学性能、高效的固化效率以及高精度的成形能力,在复杂结构制造中得到了广泛应用^{[1],[2]}。在航天器、水下发射等工程领域中,此类树脂组件还需在特定时刻实现快速、可靠的分离。爆炸切割分离技术凭借结构简单、可靠性高、同步性好等优点^[3],在此类应用中占据主导地位。

光固化树脂的压缩极限应力较大、而拉伸极限应力较小,在爆炸载荷下表现出明显的脆性。在针对脆性材料本构模型的研究中,数值模拟方法已逐渐成为提高研究效率、降低实验成本的有效研究手段^[4]。已有研究表明,数值模拟中在描述脆性材料方面 JH-2 本构模型有较高的预测精度^{[5],[6]},目前已被广泛应用在表征玻璃^[7]、岩石^{[8],[9]}、陶瓷^[10]等脆性材料的数值模拟中。近些年关于光固化树脂结构在爆炸冲击作用下动态响应与损伤分析中,Li^[11]指出了光固化树脂密封件在水下爆炸场景中受到的损伤是由爆炸冲击及水动力现象共同造成,并提出防护结构设计;Chen^[12]结合试验与数值模拟系统研究树脂平板在空气中与水下分别承受爆炸载荷后的断裂行为,同时探究结构几何特征对损伤演化的调控机制。

PMMA 与光固化树脂均属于典型聚合物材料,在冲击载荷作用下表现出的脆性断裂特征具有相似性。因此,针对 PMMA 等脆性聚合物的动态损伤研究也可为光固化树脂结构冲击响应分析提供参考。为深入理解 PMMA 材料在爆炸载荷下的动态响应与破坏机理,现有研究已从多个层面展开:采用可视化技术验证了数值模拟在预测 PMMA 中捕捉冲击波传播及裂纹扩展过程的可靠性^[13];利用传感器测量 PMMA 中的冲击波压力、动态应变等参数,并与数值模拟结果进行了对比验证^[14];结合试验与数值模拟系统探究装药类型、装药参数对切割 PMMA 玻璃的效果的影响规律^{[15]-[16][17]};基于 BP 神经网络的反演方法获取了 PMMA 的固有模态参数,进行数值模拟并与试验结果比较,两结果相差较小表明反演 JH-2 本构模型参数能够较好地应用于 PMMA 靶板爆炸切割模拟仿真^[18]。以上这些工作作为树脂材料的爆炸力学研究奠定了坚实基础。

关于水下爆炸冲击特性与传播规律,国内外学者也已从多方面展开研究。在水下爆炸载荷形成及传播机制方面,杜青松等^[19]使用数值模拟研究深海环境下水下爆炸现象,揭示了冲击波压力峰值及气泡脉动半径受装药量和水深共同影响;Stebnovskii 等^[20]研究了炸药壳体结构对水下爆炸初始阶段冲击波传播特性的影响,分析了炸药与水介质界面对能量传递过程的作用机制;针对水下爆炸载荷测试与参数获取问题,Pangilinan 等^[21]开展了水下冲击波测试,王进等^[22]结合实验数据反演炸药 JWL 状态方程参数,提高了水下爆炸数值模拟的可靠性。目前,数值模拟成为研究水下爆炸结构响应的重要方法,研究进一步拓展至水下爆炸载荷作用下的结构动态应力变化与失效分析方面。邓姚等^[23]研究了深水爆炸载荷作用下不同水深条件下壳体结构的冲击动弯矩、应力和应变分布规律;Wang 等^[24]研究了水下爆炸冲击波传播导致闸门结构损坏的机制;董琪等^[25]研究了水下接触及近场爆炸条件下沉箱码头的结构损伤演化过程,分析了冲击波传播、结构变形以及局部破坏之间的关系;Li 等^[26]研究了水下接触爆炸作用下双层圆柱壳结构的损伤特征,揭示了壳体中局部压力的分布特性,并发现气

泡载荷会持续对内壳产生冲击；Sun 等^[27]揭示了水下爆炸载荷与静水压力共同作用对薄壁圆柱壳动态屈曲强度的影响。总体而言，现有水下爆炸研究在水介质中冲击波的传播、典型结构动态应力响应与损伤机制等方面取得较为系统的成果，这些工作大都集中在研究冲击载荷以及气泡脉动载荷对结构的作用，对于水下爆炸后结构中应力波传播与叠加的研究尚待完善。

对于带有裙部的复杂弧面壳结构树脂试件，其在水下采用环状布置的爆炸索进行分离时，环形爆炸索产生环形爆炸载荷分离试件裙部及壳体部分后，受爆炸冲击的影响，壳体部分会产生应力波并沿壳体传播，这一特定场景中弧面壳上具有时序性的应力波传播与叠加规律尚不明确。该结构的几何特征与爆炸索的环状布置方式共同作用，使得不同数量起爆点的起爆模式可能导致截然不同的应力波传播路径与最终的损伤形态。因此，本文选择光固化树脂弧面壳试件进行水下爆炸试验，并采用有限元软件 Autodyn 开展相关数值模拟研究，系统研究多起爆点条件下弧面壳结构中的应力波传播机理。研究结果不仅能揭示其动态响应机理，更能为同类结构的抗爆或分离装置爆炸网络设计提供可靠的设计依据，具有重要的工程意义。

1 水下爆炸试验与数值模拟方法

1.1 试验装置及试验布局

试验在室内水箱中进行，水箱尺寸为 $4\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，水深保持在 0.3 m 。水箱底部为平底结构，配备一个圆环夹具用于放置弧面壳试件。弧面壳试件的形状及尺寸特征如图 1 所示。在试件的裙部设有一条直径为 303 mm ，截面为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 矩形的环形弱化槽，长 900 mm 、直径 1 mm 、装药线密度 0.35 g/m 的爆炸索沿弧面壳裙部弱化槽中心布置，整体呈留有小缺口的环形，缺口一端连接起爆装置，并使用粘合剂密封，使其与弱化槽保持稳定贴合。本文采用某型高能爆炸索作为线性装药，其炸药成分具体配方属于产品技术参数，不在本文讨论范围内。弧面壳试件放置在该圆环夹具上，与水槽底部保持 0.15 m 的距离。试验区域内布置拍摄速度设置为 20000 帧/秒 的高速摄像机，用以拍摄记录水下爆炸试验中试件的响应过程。试验装置的试件示意图及试验场地示意图如图 2 所示，其中图 (a) 是试验场地示意图，图 (b) 为弧面壳试件，爆炸索沿试件裙部弱化槽布置，使用粘合剂密封，橙色引线连接用于起爆弧面壳试件内环形爆炸索的雷管装置。

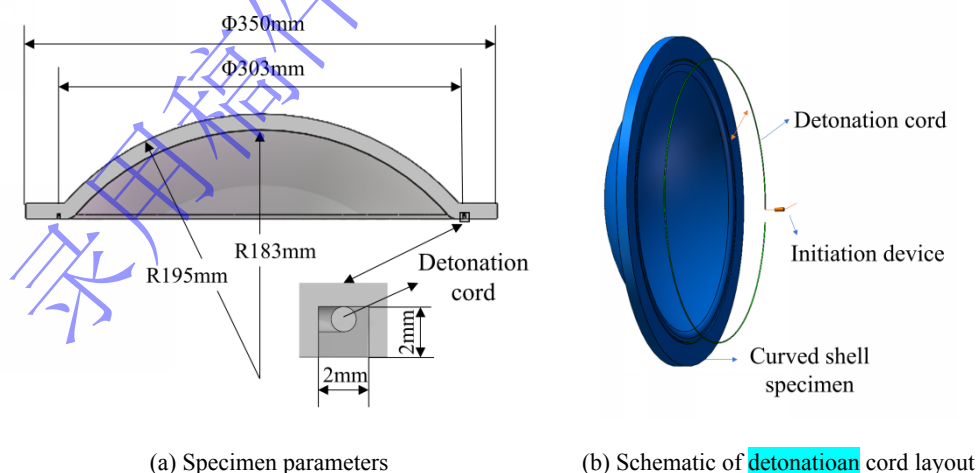


图 1 光固化树脂弧面壳试件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the light-cured resin curved shell specimen

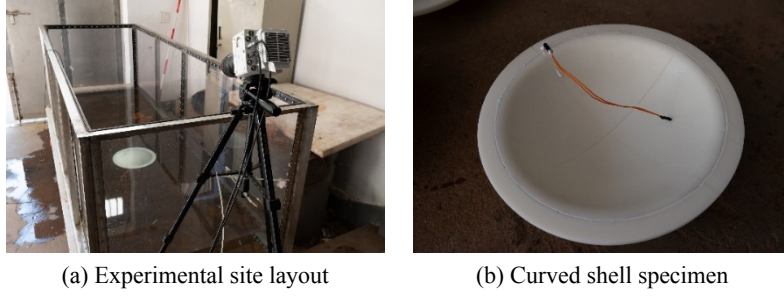


图2 试件及试验场地示意图

Fig.2 Schematic diagrams of the specimen and test site

1.2 有限元模型建立

水下爆炸过程的数值模拟基于有限元仿真软件 Autodyn 进行，水介质和爆炸索炸药采用 Euler 求解器描述，光固化树脂试件采用 Lagrange 求解器描述。两种求解域之间通过 Euler-Lagrange 耦合算法实现流固耦合相互作用。图 3 所示为数值模拟模型，其中创建了尺寸 380 mm×380 mm×300 mm 的流体域，流体域的四个侧边界和上边界均设置无反射自由流出边界，用以模拟无限流体域的爆炸过程；流体域底面边界设置为完全反射边界。直径 350 mm 的光固化树脂弧面壳试件设置在流体域中心，距离流体域底面边界 150 mm 的位置。弧面壳试件的形状及尺寸特征如图 3 所示，在试件的裙部设有一条直径为 303 mm，截面为 2 mm×2 mm 矩形的环形弱化槽，直径 1 mm、装药线密度 0.35 g/m 的爆炸索沿弧面壳裙部弱化槽中心设置。

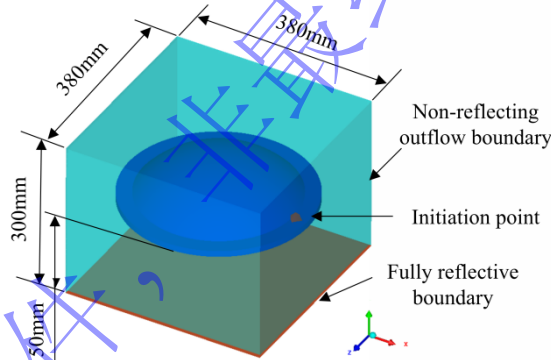


图3 3D 数值模拟样例示意图

Fig.3 Schematic diagram of the 3D numerical simulation example

1.3 材料模型

1.3.1 光固化树脂

本研究采用 JH-2 本构模型表征光固化树脂的材料性能，该模型被广泛用于脆性材料动态破坏的研究中，模拟脆性材料在大变形、高应变率以及高压下的强度、应变率效应、损伤劣化等现象^[28]。JH-2 材料本构模型包括强度模型、损伤模型、状态方程。

(1) 强度模型

强度模型的标准化形式可由下式来描述：

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

其中， σ^* 是当前标准化等效应力， σ_i^* 是完整材料的标准化等效应力， σ_f^* 是断裂材料的标准化等效应力， D 是损伤变量 ($0 \leq D \leq 1$)。

标准化等效应力 σ^* 具有如下一般形式：

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (2)$$

其中, σ 是实际等效应力, σ_{HEL} 是 Hugoniot 弹性极限 (HEL) 状态下的等效应力。完整材料的标准化强度可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \\ P^* = P / P_{\text{HEL}} \\ T^* = T / P_{\text{HEL}} \end{cases} \quad (3)$$

断裂材料的标准化强度可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \\ \sigma_f^* \leq \sigma_{f \max}^* \end{cases} \quad (4)$$

其中, A, B, C, M, N 为待定的材料常数; P^* 和 T^* 分别是标准化静水压和最大标准化静水拉伸强度; P 和 T 是实际的静水压和最大静水拉伸强度, P_{HEL} 是 Hugoniot 弹性极限 (HEL) 状态下的静水压; $\sigma_{f \max}^*$ 为最大标准化断裂强度; $\dot{\varepsilon}^*$ 为标准化应变率, 可以表示为 $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 。其中, $\dot{\varepsilon}$ 是实际的等效应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{s}^{-1}$ 是参考应变率。

(2) 损伤模型

JH-2 模型假定损伤为一个累积过程, 损伤的定义为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (5)$$

其中, $\Delta \varepsilon_p$ 是一个时间步内材料的等效塑性应变增量, $\varepsilon_p^f = f(p)$ 是与静水压 P 有关的等效塑性断裂应变。可以表示为:

$$\varepsilon_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (6)$$

其中, D_1 和 D_2 是材料参数。当 $P^* = -T^*$ 时, 材料不能承受任何塑性应变; 当 P^* 逐渐增大时, ε_p^f 也会随着增大。

(3) 状态方程

完整材料 ($D = 0$) 的静水压状态方程可以表示为:

$$\begin{cases} P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3, & \mu \geq 0 \\ P = K_1 \mu, & \mu < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, K_1, K_2, K_3 是材料常数 (K_1 是体积模量), $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ 是现在时刻的密度, ρ_0 是初始密度。

本研究中光固化树脂的 JH-2 本构模型参数如表 1 所示。

表 1 光固化树脂材料参数

Table 1 Material parameters of Light-cured resin

参数	数值
ρ (g/cm ³)	1.178
K_1 (GPa)	2.5
K_2 (GPa)	24.68
K_3 (GPa)	3.5
剪切模量 G (GPa)	2.45
σ_{HEL} (GPa)	0.75
A	1.957
B	2.492

爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves

C	0.001
M	0.586
N	0.586
HEL (MPa)	17.49
D_1	1.0
D_2	1.0

1.3.2 炸药

使用 JWL 状态方程描述炸药爆轰产物的压力比体积关系:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (8)$$

式中, p 为爆轰产物的压力; V 为爆轰产物的相对比容; E 为爆轰产物的比内能; A , B , R_1 , R_2 , ω 为与炸药性质相关的常数。炸药的材料参数如表 2 所示。

表 2 炸药材料参数

Table 2 Material parameters of the explosive

ρ (g/cm ³)	D (m/s)	P_J (GPa)	E_J (kJ/kg)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω
1.46	5120	31.88	655.78	58.45	0.9252	4.215	1.015	0.3

1.3.3 水

水的材料模型可使用 Autodyn 中材料库直接载入, 其在材料库中的材料名称、状态方程、强度模型、失效模型如表 3 所示。

表 3 水的模型选择

Table 3 Selection of Water Models

材料名称	状态方程	强度方程	失效模型
Water	Shock	None	None

1.4 网格无关性验证

水下爆炸问题中冲击波传播和结构响应对网格尺寸大小敏感, 为验证所采用数值方法的可靠性, 本文对网格密度进行了无关性研究。计算模型采用了 Euler-Lagrange 耦合算法, 网格划分不仅影响各计算区域内部响应精度, 同时影响流固耦合界面的计算稳定性。为保持较好的流固耦合效果, 本文中设置 Euler 网格尺寸不大于 Lagrange 网格尺寸的一半。本文以弧面壳顶点的峰值等效应力、峰值等效应力出现时间作为评价指标, 设置 Lagrange 网格尺寸由 4 mm 逐渐细化至 2 mm, 为保证耦合效果, 相应的 Euler 网格尺寸由 2mm 逐渐细化至 1 mm。4 种网格方案的对比结果如表 4 和图 4 所示, 当 Lagrange 网格尺寸为 2~2.5 mm 时, 关键物理量的相对变化均小于 5%, 且应力波传播特征基本保持一致, 进一步细化网格对计算结果的影响可忽略不计。综合考虑计算精度与效率, 本文最终采用 Lagrange 网格尺寸为 2.5 mm、Euler 网格尺寸为 1 mm 的配置进行后续所有数值模拟。

表 4 不同网格方案数值模拟结果

Table 4 Numerical simulation results for different mesh schemes

方案	欧拉网格尺寸/mm	拉格朗日网格尺寸/mm	峰值等效应力/MPa	峰值等效应力出现时间/ms
A	2	4	70.3	0.154
B	1.5	3	73.2	0.155
C	1	2.5	74.9	0.158
D	1	2	75.1	0.158

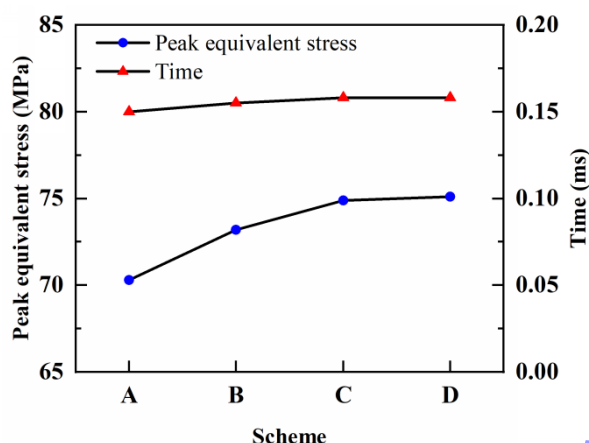


图4 不同网格方案数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results for different mesh schemes

2 试验及数值模拟结果分析

2.1 试验结果

图5为试验中高速摄像拍摄的水下爆炸试件破坏过程。图5(a)中位于试件下方的雷管引爆爆炸索。图5(b)可以观察到在水表面形成一圈螺旋形水花，试件整体尚未出现明显破碎情况。图5(c)中螺旋形水花更加清晰，并且在试件壳体部分出现了开裂破坏。在图5(d)中，水面的水花已经消失，试件壳体部分发生开裂，最终破坏成两瓣，试件裙部被分离开，并且裙部碎裂成多块。

试验中，爆炸索起爆后试件裙部和壳体受爆炸冲击先被分离，环形爆炸索产生的冲击波传至水面形成螺旋形的水花。爆炸发生后，高压爆轰产物迅速膨胀并驱动周围水体向外运动，形成初始冲击波并伴随气泡的产生与发展。当气泡膨胀到最大体积后，在外界静水压力的作用下开始收缩，气泡在惯性作用下发生周期性的膨胀和收缩，即气泡脉动过程。气泡首次膨胀到最大直径一般发生在数十毫秒，并且爆轰产物脉动的周期在毫秒量级^[19]，故在实际水下爆炸试验中，爆炸索起爆不仅产生强烈的冲击，其爆轰产物膨胀同样会引起气泡脉动作用于试件。在气泡形成初期，受冲击波和反射波的作用试件已经存在多处损伤，后续再继续受到气泡脉动载荷作用后，试件上存在损伤的区域损伤再次被强化，裙部出现多处破碎，弧面壳部位分裂。值得说明的是，在本文试验尺度和加载条件下，气泡脉动载荷并不能使试件达到强度极限导致失效，其仅能对已经受爆炸冲击作用后出现破坏的区域再次强化损伤，对于试件完好的区域其没有造成损伤。试验后试件仅有裙部分离处以及壳体断裂区域出现损伤，壳体其余部分并未出现可观测的细小裂纹可以证明气泡脉动并没有直接对树脂试件造成损伤。



(a) Phase 1



(b) Phase 2

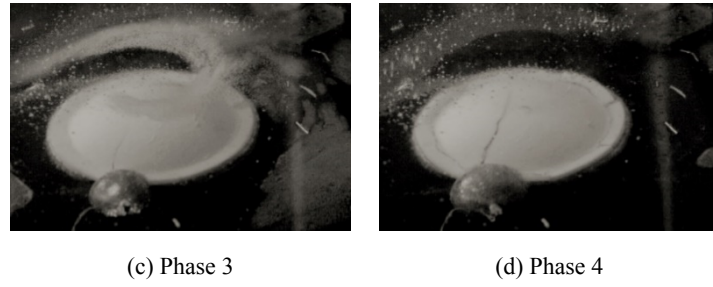


图5 试验高速拍摄过程图

Fig.5 High-speed camera images of the experimental process

2.2 数值模拟结果

图6和图7分别给出了数值模拟中树脂弧面壳试件的等效应力分布云图及损伤分布云图。在水下爆炸初期阶段, 环形爆炸索由起爆点沿环向逐步完成起爆, 爆炸产生的冲击波作用于试件表面后试件内部激发出应力波并开始传播。弧面壳试件受爆炸冲击作用, 预埋爆炸索的弧面弱化槽上方的树脂材料被完全破坏, 弧面壳试件被分离。被分离后的试件裙部继续受到应力波的作用, 后续从试件被分离处沿径向向外产生裂纹状损伤。同时, 爆炸冲击载荷诱导的应力波沿壳面传播并逐渐向顶点汇聚, 受起爆传播时序影响, 在弧面壳表面形成逐渐收敛的螺旋形高应力带, 最终在弧面壳顶点附近汇聚形成局部高应力区。如图6中 $t = 0.146 \text{ ms}$ 所示, 弧面壳试件顶点附近的应力区收敛形成一个应力集中点, 多方向应力波汇聚形成较大的压应力, 导致局部应力陡增诱发损伤。后续应力波以拉应力的形式从应力集中点向周围传播, 使得已损伤区域向周围衍生出新的裂纹状损伤。

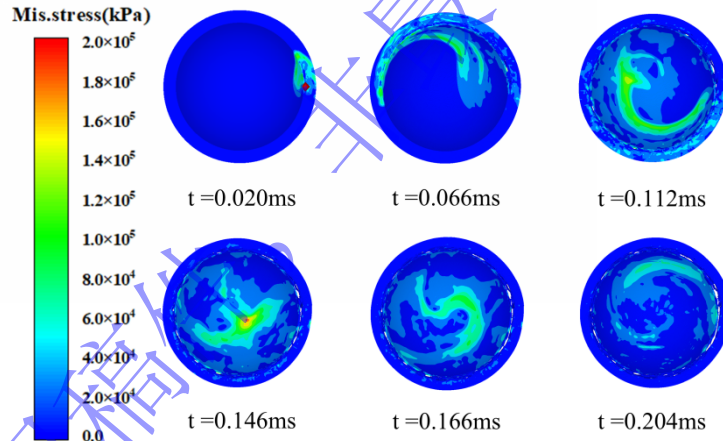


图6 数值模拟中试件的等效应力分布

Fig.6 Equivalent stress distribution of the specimen in the numerical simulation

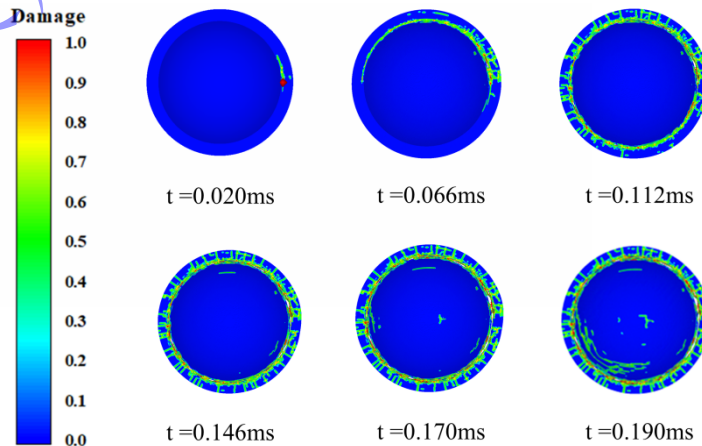


图 7 数值模拟中试件的损伤分布

Fig.7 Damage distribution of the specimen in the numerical simulation

观测点 164 位于弧面壳应力集中点位置处, 图 8 为观测点 164 在弧面壳试件上的位置示意图及其在冲击过程中的等效应力-时间曲线。该曲线有 3 个明显的等效应力峰值, 等效应力最高的第一个峰值为应力集中点出现时该观测点处的等效应力值, 等效应力值达到 151 MPa。该峰值具有持续时间短、等效应力值高的特点, 对树脂材料具有显著的破坏作用, 导致应力集中点处出现损伤, 并向周围发展出裂纹损伤。第二个等效应力峰值是由水中冲击波传播至水域底面的完全反射边界发生反射再次作用于弧面壳所致, 该峰值等效应力远低于第一次的峰值等效应力。

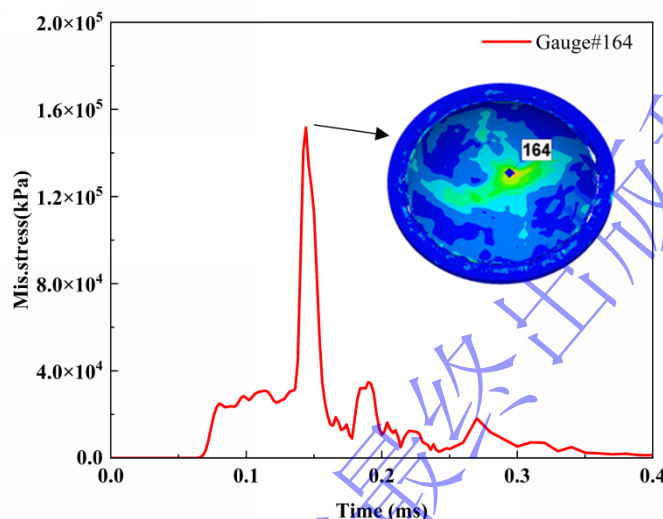


图 8 观测点位置图及等效应力-时间曲线

Fig.8 Location of the observation point and equivalent stress-time curve

2.3 数值模拟与试验对比验证

图 9 给出了弧面壳试件数值模拟与试验的结果对比。在数值模拟中逐渐产生的爆炸冲击作用于弧面壳后, 应力传播时间不同使壳面上出现如图 9(a)的螺旋形应力带分布; 在试验中由于爆炸索逐渐被引爆, 爆炸冲击将试件裙部分离后, 冲击会继续使水面产生如图 9(b)的不同高度的螺旋形水花。试验中并不能直接观察试件上的应力传播规律, 螺旋形水花的出现时刻也远远滞后于螺旋形应力带分布, 但两者均反映了爆炸索非同步起爆导致爆炸载荷具有时序性的特征。

数值模拟中试件完成分离后, 弧面壳试件壳体顶点附近会有应力集中区域形成, 该区域内最大等效应力会陡增至 151MPa, 超出材料的强度极限, 并进一步形成向外扩展的损伤。在数值模拟的损伤分布结果中, 试件壳体表面出现大范围的损伤分布, 并有一条经过应力集中区域且有使壳体发展到开裂现象的损伤。该条损伤从应力集中区域向外逐渐发展, 损伤路径上部分材料已经失效形成断裂现象, 该演化趋势与试验中壳体出现开裂的现象一致。另外数值模拟中被分离的试件裙部也出现材料失效, 有断裂成多段碎块的趋势, 这与试验中试件裙部破碎成多段碎块的结果也相一致。

当前数值模拟结果尚未完全达到试验中的最终断裂形态, 但损伤演化过程及主要破坏特征与试验结果具有较好一致性。数值模拟结果中壳体损伤从初始应力集中区域向外扩展, 并形成局部材料失效区域, 这可以合理描述壳体宏观断裂的起始位置和演化趋势。需要说明的是, 数值模拟中若想进一步捕捉壳体后续完全断裂的过程, 需要更多的计算资源。且由于制造过程中材料的加工工艺、爆炸索炸药的均匀性及爆炸索安装误差的存在, 导致试验中试件的开裂形态细节具有一定的随机性, 故数值模拟中试件开裂路径和试验存在一定的偏差是合理的, 但可以确定壳体的开裂起始于应力集中区域, 裂纹扩展方向受到局部应力状态控制。

因此, 数值模拟中弧面壳上的应力传播形态、损伤演化过程与试验结果基本一致, 表明所建立的

数值模型能够较为准确地反映弧面壳试件在水下爆炸载荷作用下的动态响应过程。

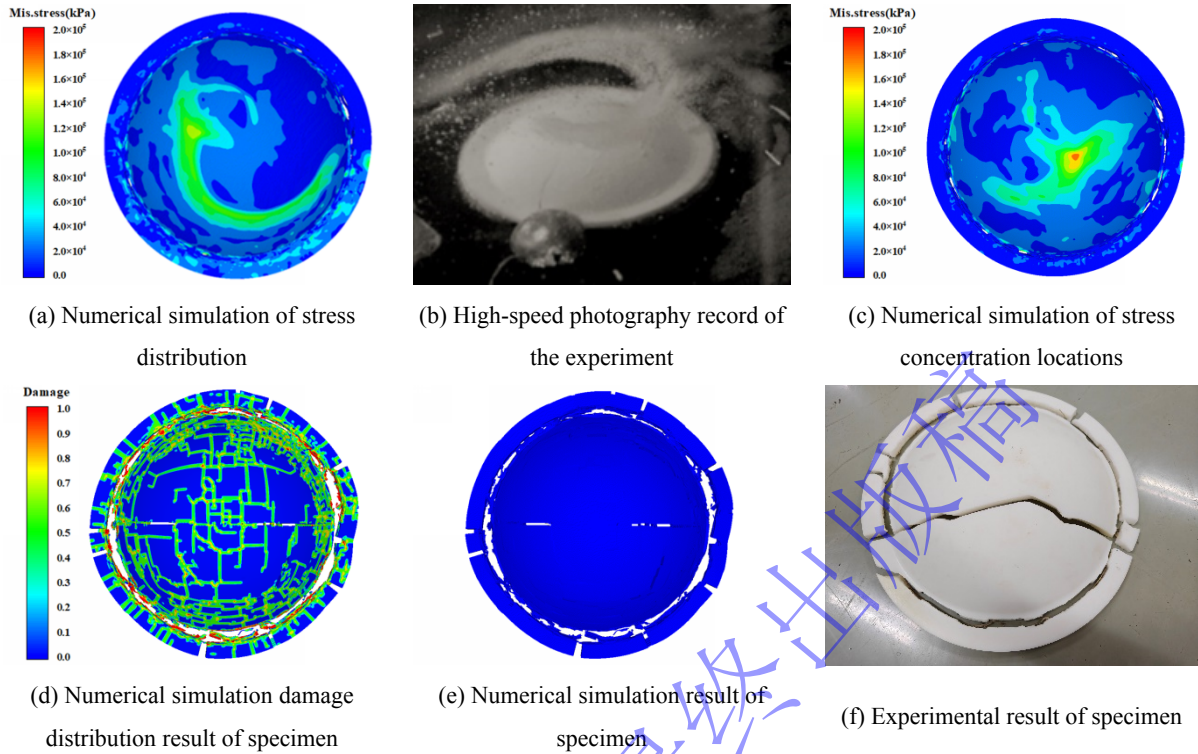


图9 试件试验与数值模拟结果对比

Fig.9 Comparison of experimental and numerical simulation results for the specimen

3 多起爆点工况数值模拟结果与讨论

试验中爆炸索一端连接起爆装置，爆炸索采用非闭环形布置，爆炸索仅沿单方向传爆。为进一步研究多点同步起爆对应力波传播及结构响应的影响，本文建立理想化闭合环形爆炸索模型，分别设置1个、2个和3个双向传爆的起爆点。该模型通过多点同步起爆且爆轰波双向传播，模拟多点起爆缩短整体传爆时间的工程应用场景。双起爆点工况中，两个起爆点关于环形爆炸索中心对称布置；三起爆点工况中，三个起爆点设置于环形爆炸索内接正三角形顶点位置，起爆点在初始时刻云图中用红点标识出。

3.1 单起爆点

图10和图11分别给出了单起爆点工况下树脂弧面壳试件的等效应力分布云图及损伤分布云图。单起爆点起爆后，爆轰波由起爆位置沿环形爆炸索向两侧传播。由于两条传爆路径对称，冲击载荷作用后弧面壳表面的应力传播过程也表现出明显的对称性。爆炸产生的冲击载荷首先作用于裙部区域，并以应力波形式向壳体内部传播。由于应力波在传播过程中受到弧面壳曲面结构约束，其传播方向并非简单沿径向扩散，而是在曲率作用下共同向弧面壳顶点区域汇聚，如图10中 $t = 0.081 \text{ ms}$ 时应力波形成环状应力区域并继续向内收缩。当应力波前在局部区域相遇时，不同方向传播的应力波动态叠加，使该区域承受的瞬态应力幅值显著提高，如图10中 $t = 0.116 \text{ ms}$ 时，应力波汇集并在弧面壳顶点附近形成一个应力集中点。进一步分析发现，应力集中区域主要由爆轰波传播路径和结构几何约束共同决定，由于两条传爆路径及其产生的应力波具有空间对称性，且应力波传播受到弧面壳几何曲率的约束，使得应力集中点的位置与爆轰波交汇点及弧面壳顶点在同一平面内。

如图11所示，爆炸索起爆后，爆炸产生的冲击先直接作用于弧面壳裙部，较大的冲击使爆炸索布置区域裙部材料失效，从而实现分离，但在 $t = 0.142 \text{ ms}$ 时，弧面壳壳体部分应力叠加的区域同样

出现材料失效。图 12 给出了弧面壳上观测点 66、74 和 92 处的等效应力 - 时间曲线，位于应力集中区域的观测点 74 有一个应力叠加所导致应力峰值，峰值等效应力达到 210 MPa，较高的峰值应力超过了光固化树脂材料的强度极限，使得该位置出现 $D = 1$ 的完全损伤。观测点 66 和 92 处曲线均有两个峰值，对应两次环状应力区域传播至该位置产生的响应。在应力波传播出现应力叠加以后，继续传播的应力波继续作用于弧面壳上，使得弧面壳上完全损伤区域延伸出裂纹状的 D 值较小的损伤积累，这些损伤积累表示该区域的材料强度退化但并未失效，这有可能会使得弧面壳在后续承受其余载荷时出现宏观上的破坏。

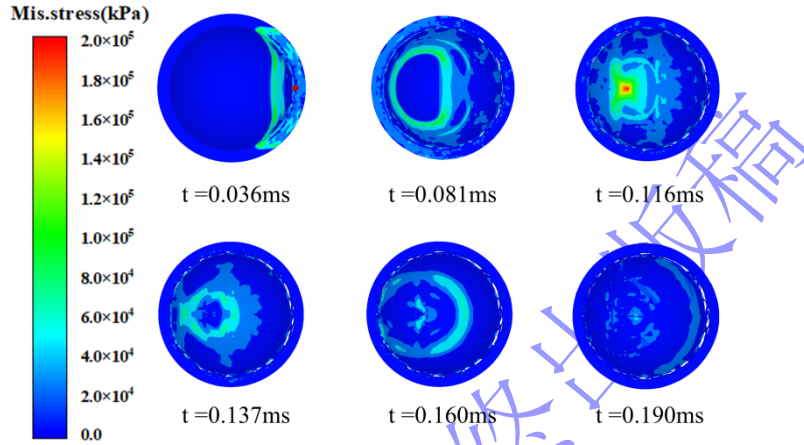


图 10 单起爆点工况等效应力分布

Fig. 10 Contour map of equivalent stress distribution under the single initiation point case

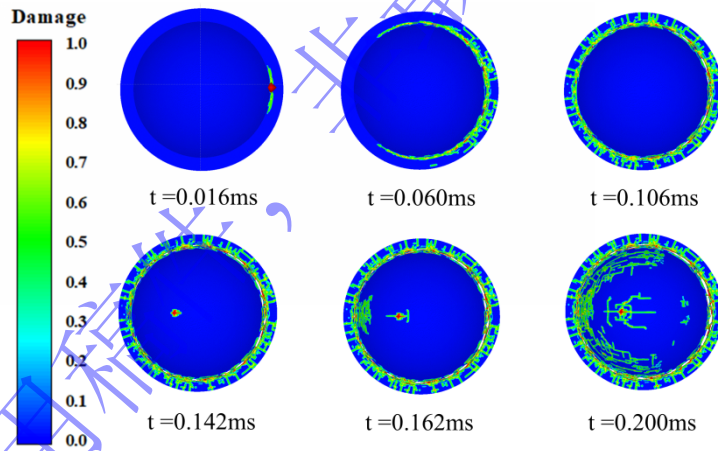


图 11 单起爆点工况损伤分布

Fig. 11 Contour map of damage distribution under the single initiation point case

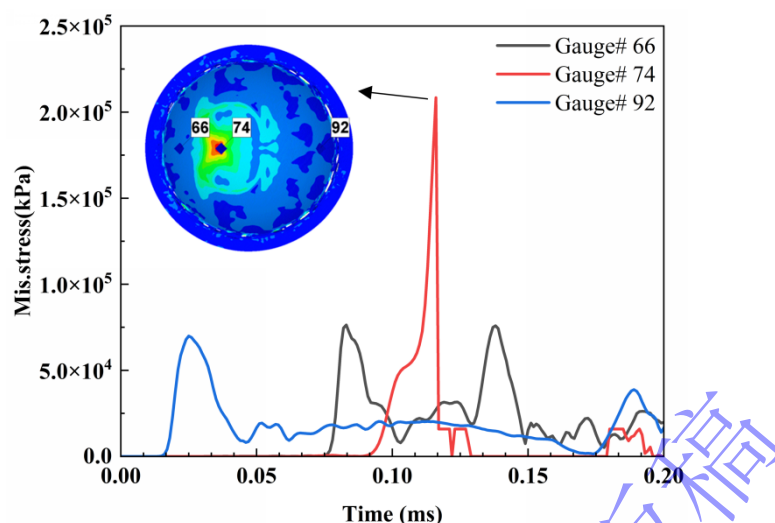


图 12 单起爆点工况观测点分布示意图及等效应力-时间曲线

Fig.12 Distribution of gauges and equivalent stress-time curves under the single initiation point case

3.2 双起爆点

图 13 和图 14 分别给出了双起爆点工况下树脂弧面壳试件的等效应力分布云图及损伤分布云图。与单起爆点工况相比，双起爆点的应力波的传播方式有了明显变化。由于两个起爆点关于爆炸索中心对称布置，双起爆点同时起爆后，四条爆轰波传播路径中，相邻传播路径之间具有对称性，弧面壳上应力传播也保持对称特征。爆炸索完全爆炸时壳体上出现如图 13 中 $t = 0.060$ ms 时的两个月牙状应力区域，随着应力波向弧面壳内部传播，不同方向传播的应力波逐渐发生汇聚，在 $t = 0.080$ ms 时两个区域应力波汇集出现两个应力集中点。相较于单起爆点，双起爆点条件下爆炸索上爆轰波交汇点增加，应力波传播路径的变化导致应力波集中区域增加，同时也使应力波汇集的时间提前。从空间分布规律来看，应力集中区域同样是由对称的应力波叠加形成，同时应力波传播同样受到弧面壳的几何约束影响，使得双起爆点中应力集中点的位置与爆轰波交汇点及弧面壳顶点同样在同一平面内。

如图 14 所示，与单起爆点工况相比，双起爆点条件下应力集中区域未直接出现完全破坏，仅产生 $D < 1$ 的损伤积累，并向周围扩展形成裂纹状损伤。出现这些损伤的区域材料并未直接失效，但材料强度降低。图 15 给出了观测点 44 和 216 处的等效应力-时间曲线，双起爆点的空间对称布置使两组传播路径具有相同的传播距离和相似的波传播过程，使得这两个应力集中点处的曲线高度重合。应力集中点处最大等效应力为 170 MPa，相比单起爆点工况下降约 19.1%，这是由于起爆点增加后，爆炸能量被分散到更多传播路径中，同时形成两个应力集中区域，在总装药量不变时，爆炸能量分散导致应力集中点最大等效应力降低。

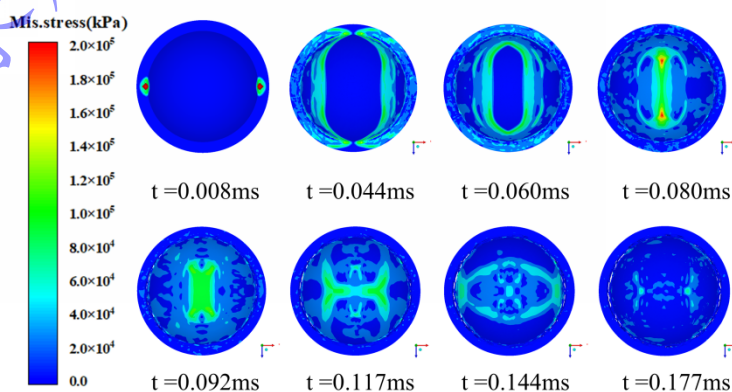


图 13 双起爆点工况等效应力分布

Fig.13 Contour map of equivalent stress distribution under the two initiation point case

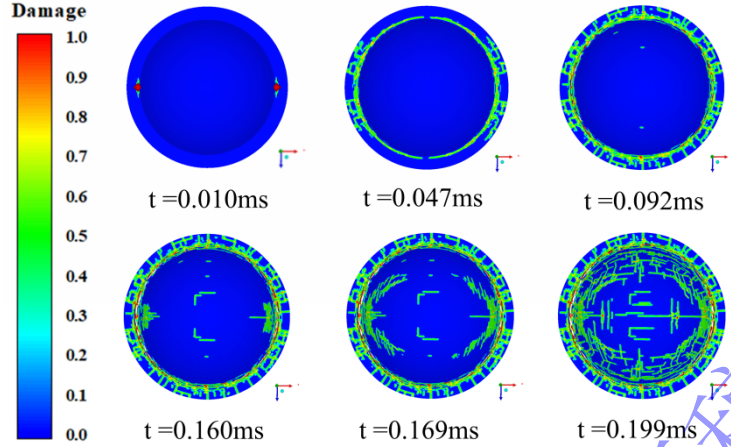


图 14 双起爆点工况损伤分布

Fig.14 Contour map of damage distribution under the two initiation point case

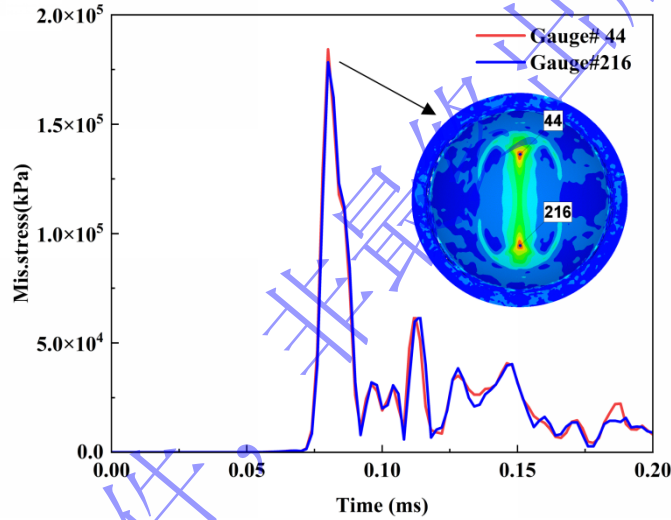


图 15 双起爆点工况观测点分布示意图及等效应力-时间曲线

Fig.15 Distribution of gauges and equivalent stress–time curves under the two initiation point case

3.3 三起爆点

图 16 和图 17 分别给出了三起爆点工况下树脂弧面壳试件的等效应力分布云图及损伤分布云图。与单起爆点及双起爆点工况相比，三起爆点工况应力波的传播规律大不相同。三起爆点条件下应力集中过程分为两个阶段。第一阶段中，三个起爆点产生的冲击波分别沿对应路径传播，在如图 16 的 $t = 0.064 \text{ ms}$ 时形成角形环带状应力区域，并在三角形环带三个顶点位置，由相邻起爆点传播产生的应力波发生叠加，首次形成 3 个应力集中点。第二阶段中，第一阶段中的初始应力集中点处的应力波进一步传播，并与其他传播路径上另外两个应力集中点的后续波前发生相遇。在如图 16 的 $t = 0.094 \text{ ms}$ 时，应力区域进一步演化形成“Y”形结构，并再次叠加形成 3 个应力集中点。该现象说明，三起爆点条件下的应力波传播过程中经历了两阶段叠加过程。第一次叠加是爆炸冲击产生的应力波直接叠加，第二次叠加则来源于初始应力叠加区域的二次应力波传播与另外两个应力叠加区域的二次应力波传播的再次耦合作用。由于三个起爆点具有 120° 空间对称分布特征，二次叠加后的高应力区域仍沿三个主要传播方向重新组织，因此最终形成具有 Y 形特征的第二组应力集中区域。

如图 17 所示，三起爆点条件下形成的多个应力集中区域均未出现完全破坏，仅产生 D 值较小的强度退化。这主要是由于爆炸能量进一步分散至多个区域，使单一区域承受的应力波幅值降低。图

18 中观测点 352 和 387 处分别对应两次应力叠加过程, 其峰值分别达到 130 MPa 和 146 MPa, 相比单起爆点工况最大应力分别降低 38.1%和 30.5%。因此, 三起爆点条件下虽然形成了更多应力集中区域, 但由于单个应力波汇集区域的能量降低以及波前同步汇聚程度减弱, 局部最大应力反而进一步下降。

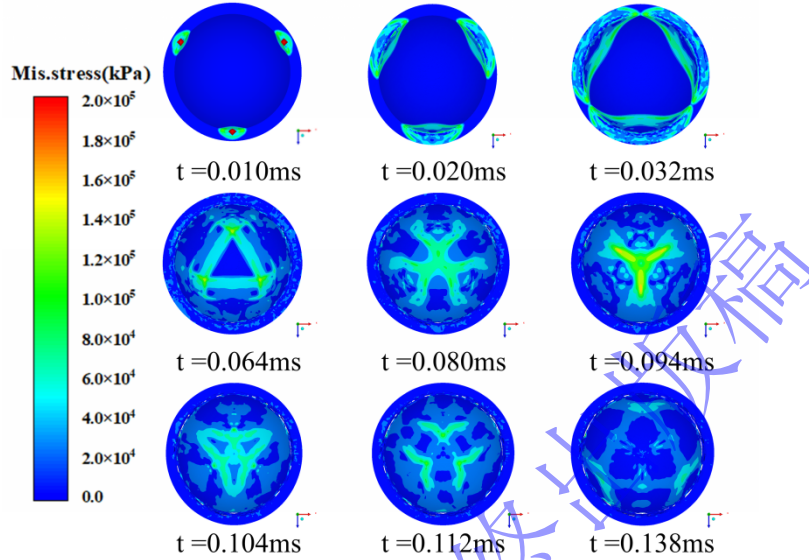


图 16 三起爆点工况等效应力分布

Fig. 16 Contour map of equivalent stress distribution under the three initiation point case

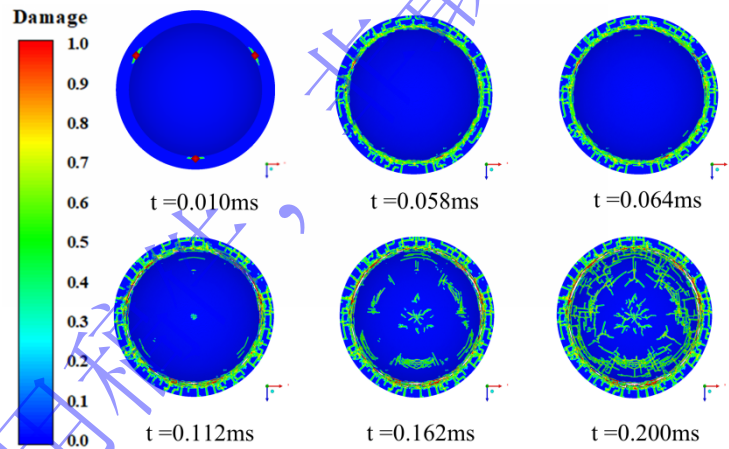


图 17 三起爆点工况损伤分布

Fig. 17 Contour map of damage distribution under the three initiation point case

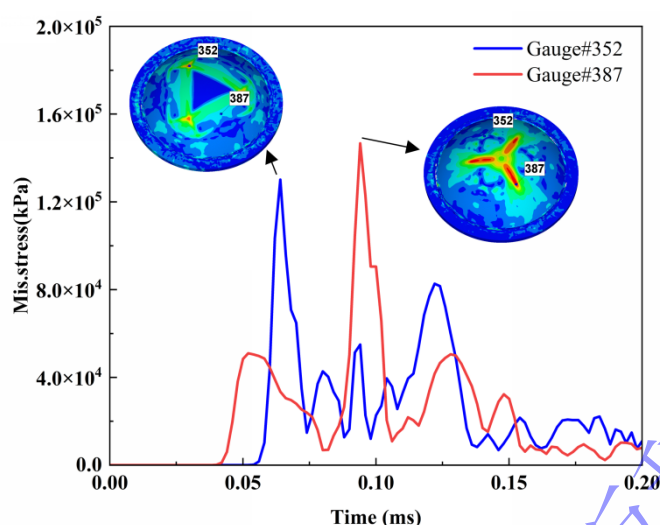


图 18 三起爆点工况观测点分布示意图及等效应力-时间曲线

Fig. 18 Distribution of gauges and equivalent stress-time curves under the three initiation point case

3.4 数值模拟结果讨论

数值模拟结果表明,使用环形爆炸索对弧面壳实施爆炸分离时,冲击载荷会在壳体内部激发应力波并沿曲面传播。应力波在传播过程中受到曲面边界与弧面壳几何结构约束,传播方向不断向内偏转。当来自不同路径的应力波前传播至壳体局部区域,应力波发生动态叠加导致局部瞬态等效应力快速升高,从而形成应力集中点。同时,不同工况下应力集中点的数量与空间分布呈现出极强的规律性,主要由起爆点空间分布、爆轰波交汇点以及壳体轴对称几何特征联合控制。单起爆点工况下两条对称传爆路径使应力波在顶点附近交汇,形成 1 个应力集中点;双起爆点工况中,形成爆轰波交汇的传爆路径具有对称性,使得不同区域出现对称的应力波传播现象,形成 2 个应力集中点;三起爆点工况中应力波则受 120° 空间对称分布控制,经历初始波前直接叠加与二次扩散波前耦合演化两阶段,先后两次形成 3 个应力集中点。由于各工况中爆轰波交汇点位置由起爆方式确定,应力波沿对称路径向内汇聚,使得波前在特定几何对称面上相遇叠加,所有应力集中点均与对应的爆轰波交汇点及弧面壳顶点处于同一几何平面内,应力叠加位置受起爆机制与几何构型严格调控。

应力集中点处的最大应力随起爆点数量增加显著降低,单起爆点时应力集中点的最大等效应力为 210 MPa,双起爆点工况中降至 170 MPa,降低 19.1%,三起爆点工况两次应力集中最大值分别达到 130 MPa 和 146 MPa,两阶段分别降低 38.1% 和 30.5%。这一变化源于能量空间分配与波前干涉机制的改变,在总装药量保持不变的条件下,起爆点数量增加使得原本集中于单一区域的爆炸能量被有效分散至更多区域中,显著稀释了单个爆轰波交汇点及其汇聚区域的能量密度。同时,应力波在前向传播过程中在弧面壳与水的交界面发生多次反射,波前能量也会被进一步耗散。应力集中点处最大应力峰值的降低,也使得应力集中区域的材料从发生 $D = 1$ 的完全损伤降格为 $D < 1$ 的强度退化,实现了在保障定点分离效果的同时对壳体主体结构完整性的有效保护。

4 结论

本研究对弧面壳试件开展了水下爆炸试验和数值模拟,在验证模型准确性的基础上,揭示了不同数量起爆点下弧面壳试件的应力传播机理。主要研究结果如下:

1. 环形爆炸索的爆炸冲击载荷在弧面壳上激发应力波后,受爆炸索传爆时序及弧面壳渐缩的几何特征约束,来自不同传爆路径的应力波会在局部区域发生动态叠加,导致局部应力快速升高形成应力集中点,同时较大的应力可能会对结构造成破坏。

2. 应力集中的数量及位置由起爆点数量、起爆点分布及弧面壳结构特殊的几何对称性共同控制。单起爆点时在壳体顶点附近形成 1 个应力集中点；双起爆点时形成 2 个中心对称的应力集中点；三起爆点时因 120° 空间对称及二次波前耦合，经历两阶段演化先后两次形成 3 个应力集中点。弧面壳顶点、应力集中点与相应的爆炸索爆轰波交汇点位于同一平面内，应力集中位置与起爆方式具有强相关性。

3. 在总装药量不变的前提下，增加起爆点将单一区域的应力集中转化为多区域的应力集中，应力波能量被分散到多个区域，有效削减了应力波叠加产生的最大应力值。单起爆点应力集中点的最大等效应力达 210 MPa；双起爆点时降至 170 MPa，降幅 19.1%；三起爆点时两次最大等效应力分别降至 130 MPa 与 146 MPa，降幅 38.1%和 30.5%。

参考文献

- [1] 叶钦臣, 赵秋丽, 李文栋, 等. 光/热双重固化树脂的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 122-126+130. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2024.08.015.
YE Q C, ZHAO Q L, LI W D, et al. Preparation and performance study of light/heat dual-curing resin[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(8): 122-126+130. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2024.08.015.
- [2] 肖玉洁, 季宁, 路学成, 等. 光固化 3D 打印光敏树脂改性进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 222-226. DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2025.12.040.
XIAO Y J, JI N, LU X C, et al. Modification progress of photosensitive resins for photocured 3D printing[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(12): 222-226. DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2025.12.040.
- [3] G'SELL C, HIVER J M, DAHOUN A. Experimental characterization of deformation damage in solid polymers under tension, and its interrelation with necking[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(13-14): 3857-3872. DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00184-1.
- [4] YI S, WU Y, GUO Y, et al. Impact resistance of laminated transparent ceramic composites[J]. Ceramics International, 2025, 51(25PC): 46686-46702. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.07.374.
- [5] TAN S, LONG S, YAO X, et al. An improved material model for loading-path and strain-rate dependent strength of impacted soda-lime glass plate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 1905-1919. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.010.
- [6] CHENG J, YANG Z, WANG C, et al. Effect of scratches on the damage characteristics of fused silica optics under extremely-high impact load[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 219: 107099. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107099.
- [7] YANG R, LING J, SU X, et al. Dynamic compressive behavior and constitutive parameters of chemically strengthened aluminosilicate glass[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2026, 333: 111844. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2026.111844.
- [8] BARANOWSKI P, KUCEWICZ M, GIELETA R, et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140: 103543. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103543.
- [9] WANG J, YIN Y, LUO C. Johnson-Holmquist-II(JH-2) constitutive model for rock materials: parameter determination and application in tunnel smooth blasting[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1675. DOI: 10.3390/app8091675.
- [10] HUANG J Y, YUAN J C, ZHU T T, et al. Dynamic compressive strength of alumina ceramics[J]. Ceramics International, 2022, 48(24): 36371-36382. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.196.
- [11] LI Y, YAN L, HUANG Y, et al. Dynamic response of dome - shaped sealing parts with different structures under explosion load in finite flow field[J]. Shock and Vibration, 2025, 2025(1): 2648490. DOI: 10.1155/vib/2648490.

- [12] CHEN J, LI Y, HUANG Y. Investigation of the failure mechanisms of photocurable resins under explosive shock loads[J]. AIP Advances, 2024, 14(10): 105218. DOI: 10.1063/5.0217922.
- [13] TORRES S M, VOROBIEV O Y, ROBEY R E, et al. A study of explosive-induced fracture in polymethyl methacrylate (PMMA)[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 134(7): 075103. DOI: 10.1063/5.0160147.
- [14] 张世文, 龙建华, 贾宏志, 等. 平面冲击波在有机玻璃中的衰减测试及数值模拟[J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1214-1219. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.07.008.
- ZHANG S W, LONG J H, JIA H Z, et al. Measuring and numerical simulation of attenuation of planar shock wave in PMMA[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1214-1219. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.07.008.
- [15] 邹德波, 赵铮. 冲击强度对爆炸切割脆性材料的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(8): 100-105. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.08.016.
- ZOU D B, ZHAO Z. Study on influence of impact strength on explosive cutting of brittle materials[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(8): 100-105. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.08.016.
- [16] 李志强, 王志华, 刘晓明, 等. 微爆炸切割航空有机玻璃板实验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(8): 970-974. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.08.008.
- LI Z Q, WANG Z H, LIU X M, et al. Experimental study of cutting PMMA plate with miniature detonation cord[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(8): 970-974. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.08.008.
- [17] 邹德波, 党帅营, 吕伟红, 等. 一种注塑成型 PMMA 材料爆炸切割研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(16): 39-42. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.16.007.
- ZOU D B, DANG S Y, LV W H, et al. Research on explosive cutting of an injection molded PMMA material[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(16): 39-42. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.16.007.
- [18] 张宇卓, 赵铮. 基于爆炸切割试验的有机玻璃本构模型参数反演[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(5): 139-149. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0006.
- ZHANG Y Z, ZHAO Z. Parameter inversion of the polymethyl methacrylate constitutive model based on explosive cutting experiment[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(5): 139-149. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0006.
- [19] 杜青松, 刘云龙. 深海水下爆炸冲击波载荷及气泡脉动特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(1): 89-99. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0515.
- DU Q S, LIU Y L. Research on the shock wave load and bubble pulsation characteristics of deep-sea underwater explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(1): 89-99. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0515.
- [20] STEBNOVSKII S V, CHERNOBAEV N N. Initial stage of an underwater explosion of cylindrical charges with foliated cases[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1982, 18(3): 358-362. DOI: 10.1007/BF00783052.
- [21] PANGILINAN G I, RUSSELL T P, BAER M R, et al. Underwater shock measurements using a ruby pressure gauge[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(5): 684-686. DOI: 10.1063/1.127085.
- [22] 王进, 刘雅婷, 边兴, 等. 基于水下爆炸的炸药 JWL 状态方程参数研究[J]. 兵器装备工程学报, 2026, 47(1): 96-102. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2026.01.011.
- WANG J, LIU Y T, BIAN X, et al. Research of parameters of the JWL EOS for explosives based on underwater explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2026, 47(1): 96-102. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2026.01.011.
- [23] 邓姚, 胡子啸, 葛辛辛, 等. 深水爆炸载荷作用下复合材料圆柱壳动响应特性[J]. 兵工学报, 2025, 46(12): 260-272. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0694.

- DENG Y, HU Z X, GE X X, et al. Dynamic response characteristics of composite cylindrical shell under deep-water explosion load[J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(12): 260-272. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0694.
- [24] WANG C, WANG Q, ZHANG S, et al. Dynamic response characteristics of the upstream face of radial gates in hydraulic engineering flood discharge tunnels under underwater explosion conditions[J]. *Structures*, 2025, 82: 110562. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.110562.
- [25] 董琪, 刘靖晗, 李凌锋, 等. 水下接触和近场爆炸作用下沉箱码头的毁伤特性[J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(1): 75-88. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0332.
- DONG Q, LIU J H, LI L F, et al. Damage characteristic of caisson gravity wharf subjected to underwater contact and near-field explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2026, 46(1): 75-88. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0332.
- [26] LI G, SHI D, CHEN Y, et al. A study on damage characteristics of double-layer cylindrical shells subjected to underwater contact explosion[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 172: 104428. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104428.
- [27] SUN W, ZHU T, CHEN P, et al. Dynamic implosion of submerged cylindrical shell under the combined hydrostatic and shock loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108574. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108574.
- [28] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(3): 211-231. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)00046-4.