

高压物理学报

外界条件对中空结构物内爆冲击波的影响

孟令存 闫明 杜志鹏 张磊

Influence of External Conditions on Implosion Shock Wave of Hollow Structure

MENG Lingcun, YAN Ming, DU Zhipeng, ZHANG Lei

引用本文:

孟令存, 闫明, 杜志鹏, 等. 外界条件对中空结构物内爆冲击波的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4):044104. DOI: 10.11858/gywlb.20190849

MENG Lingcun, YAN Ming, DU Zhipeng, et al. Influence of External Conditions on Implosion Shock Wave of Hollow Structure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(4):044104. DOI: 10.11858/gywlb.20190849

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190849>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半穿甲战斗部穿孔尺度对舰船舱室内爆效应的影响

Influence of Hole Size of Semi-Armor-Piercing Warhead on Ship's Cabin Implosion Effect

高压物理学报. 2018, 32(6): 065111 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180547>

扰流板结构参数对冲击波衰减特性影响的仿真分析

Simulation Analysis of Influence of Spoiler Structural Parameters on Shock Wave Attenuation Characteristics

高压物理学报. 2018, 32(2): 025202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170585>

港池环境近水面水下爆炸特性及其毁伤效应

Loading Characteristics and Damage Effect of Near-Surface Underwater Explosion in Harbor Basin

高压物理学报. 2019, 33(4): 045103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180638>

刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究

Pressure Characteristics of Shallow Water Explosion near the Rigid Column

高压物理学报. 2019, 33(5): 055104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180704>

水下爆炸下有限尺度平板的载荷特性及结构响应试验研究

Experimental Investigation on Load Characteristics and Structure Response of Finite-Size Plate Subjected to Underwater Explosions

高压物理学报. 2018, 32(5): 055101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180516>

有机玻璃-空气层结构对爆炸水池水下爆炸地基振动的影响

Influence of Plexiglass-Air Interlayer Structure on Foundation Vibration of Small Pool Underwater Explosion

高压物理学报. 2018, 32(2): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170611>

外界条件对中空结构物内爆冲击波的影响

孟令存^{1,2}, 闫明¹, 杜志鹏², 张磊²

(1. 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 海军研究院, 北京 100161)

摘要: 在深水中工作的中空结构物承受巨大的静水压, 突然被压溃时会发生内爆, 产生冲击波, 对周围结构造成损伤。针对内爆冲击波受静水压力、真空体积影响机理不清的问题, 开展了光电倍增管水下内爆试验, 验证了 ABAQUS 中 CEL 耦合计算方法满足光电倍增管内爆模拟精度的要求, 并通过数值模拟分析了外界静水压、中空结构物的真空体积对内爆冲击波的影响规律。结果表明: 随着静水压、真空体积的增加, 冲击波压力峰值呈线性增加, 且距离内爆中心越远, 冲击波峰值增加越缓慢; 冲击波脉宽随静水压力的增加基本保持不变, 随真空半径的增加缓慢降低。

关键词: 水下内爆; 光电倍增管; 内爆机理; 内爆仿真; 内爆冲击波

中图分类号: O381; U663.85

文献标识码: A

中空结构物在深水环境下工作时, 表面将会承受高静水压力, 当中空结构物突然被压溃, 高压水流向压溃中心汇聚相撞, 形成内爆 (Implosion)^[1-2], 产生内爆冲击波, 对周围物体造成破坏。2014 年美国深海科研潜艇在深海工作时, 中空结构的外部工作设备在静水压下被压溃引发内爆, 对潜艇壳体造成损伤, 使其“遇难”。在中微子探测领域^[3-4], 由玻璃制成的具有中空结构的光电倍增管 (Photomultiplier tube, PMT) 是中微子探测的核心部件, 工作在深水环境时容易发生内爆。2001 年, 日本“超级神冈”中微子试验站发生 PMT 连锁爆炸事故, 炸毁近 8 000 个 PMT, 直接经济损失达 3 000 万美元^[5]。除此之外, 其他水下工作设备如管道、照明灯、摄像机等都有可能发生内爆, 因此内爆机理研究具有重要意义。

国内外学者针对水下内爆问题开展了诸多研究。美国海军作战中心 (NSWC)^[6] 在装有水的压力罐中进行了圆柱壳的水下内爆实验, 得到了铝制圆柱壳的内爆冲击波压力曲线, 并结合仿真研究了圆柱壳的内爆冲击波压力曲线的主要特征; Diwan 等^[7] 在压力罐中对 PMT 进行了 2 次水下内爆试验, 得到了 PMT 内爆发生过程及内爆冲击波压力曲线, 并利用任意拉格朗日欧拉 (ALE) 方法对 PMT 内爆进行了仿真, 得到的仿真结果与试验结果吻合较好; 杜志鹏等^[8] 将水下爆炸气泡动力学与水下内爆相结合, 基于能量守恒关系, 推导出不可压缩流体中球形容器内爆理论模型; 黄治新等^[9] 根据应力波原理, 提出了利用大型压力罐进行内爆试验的方法, 并通过此方法测得了 PMT 内爆冲击波。

上述研究主要针对特定结构的圆柱壳、PMT 进行试验和数值模拟研究, 没有考虑静水压、真空体积对中空结构物内爆的影响。本研究拟开展 PMT 水下内爆试验, 以验证 ABAQUS 软件 CEL 耦合计算方法模拟水下内爆的准确性, 并通过有限元模拟方式探究外界静水压力、真空体积对内爆冲击波的影响规律, 为深入分析中空结构物的水下内爆提供参考。

* 收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (10672181)

作者简介: 孟令存 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电倍增管内爆研究。

E-mail: 1605733924@qq.com

通信作者: 闫明 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事设备抗冲击研究。

E-mail: yanming7802@163.com

1 PMT 内爆试验与数值模拟

1.1 PMT 水下内爆试验

PMT 实物见图1,其形状如灯泡,总高度0.700 m,头部球体直径0.508 m,尾部圆柱直径0.100 m;其外壳材料为玻璃,厚度为5 mm,内部真空度为 10^{-4} Pa。PMT 水下内爆试验装置为直径3 m、长度5 m、壁厚30 mm的圆柱形钢制压力罐,其示意图见图2。压力罐侧面设有透明视窗,用于照明并放置高速摄影设备,可清晰地记录内爆全过程;压力罐内部设有工作平台,工作平台上放置液压式挤压装置,用于安装和引爆 PMT。受试验装置尺寸限制,将压力罐装入水时,无法模拟 PMT 在50 m水深的工作环境,为此利用外置空压机对压力罐内施加0.5 MPa压力进行模拟。通常情况下,采用水中压力值代表冲击波压力,故在试验过程中主要测量水中压力值。试验前,压力罐内共布置4个PCB 动水压传感器,测点 F_1 位于PMT正上方,距PMT中心0.41 m;测点 F_2 位于PMT赤道平面靠近压力罐入口处,距PMT中心0.55 m;测点 F_3 、测点 F_4 位于PMT赤道平面远离压力罐入口处,分别距PMT中心0.55和1.35 m。试验时,液压装置挤压PMT发生内爆,试验成功测得PMT水下内爆过程和压力数据。

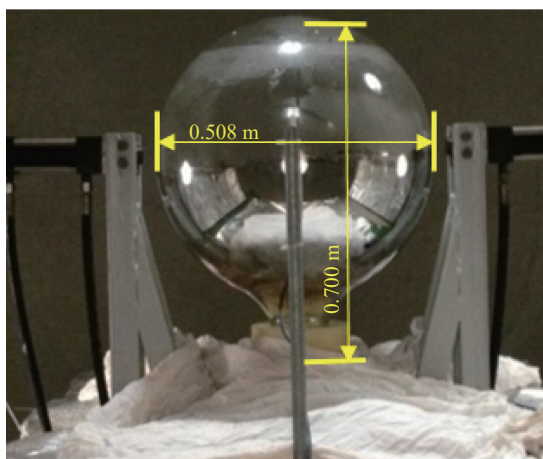


图1 PMT 实物

Fig. 1 Picture of actual PMT

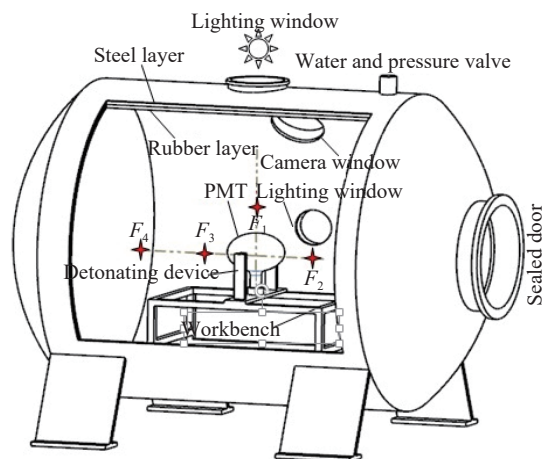


图2 压力罐示意图

Fig. 2 Schematic of the pressure tank

1.2 水下内爆试验结果分析

完成PMT内爆试验后,根据高速摄影所记录的影像,对内爆过程进行详细分析。将PMT水下内爆发生时间点记为零时刻($t=0$ ms),图3为PMT发生内爆典型特征时刻的图像。可以看出,PMT内爆过程可分为4个典型阶段:(1)挤压阶段($-16.00\sim-14.00$ ms),挤压装置挤压PMT使玻璃外壳产生微小变形,挤压装置附近玻璃外壳亮点缩小;(2)裂纹传播阶段($-14.00\sim-8.00$ ms),PMT玻璃外壳在 -12.33 ms产生初始裂纹, -8.00 ms裂纹迅速传播至整个球面;(3)整体压溃阶段($-8.00\sim0$ ms),PMT玻璃外壳在0 ms完全被压溃,碎片迅速向中心运动,各方向水流发生碰撞,产生内爆冲击波;(4)冲击波传播阶段(0 ms以后),玻璃碎片迅速向外飞散,冲击波以近似声速向外传播,图像出现黑色斑点,这是因为冲击波到达罐壁时发生反射,反射波与入射波发生叠加产生了空化气泡。上述阶段划分充分展现了PMT水下内爆发生过程及内爆冲击波的产生过程,对水下内爆数值模拟具有一定的指导意义。

1.3 PMT 水下内爆数值模拟

基于PMT水下内爆的试验结果,对PMT水下内爆进行数值模拟。由试验结果可知,在PMT内爆过程中,从裂纹产生到内爆发生共经历了14 ms,具有瞬时性;此外,考虑到PMT所处的环境,在内爆发生过程中还会存在流体与玻璃之间的耦合作用。根据上述分析,可利用有限元软件ABAQUS中的CEL算法对PMT水下内爆进行数值模拟。

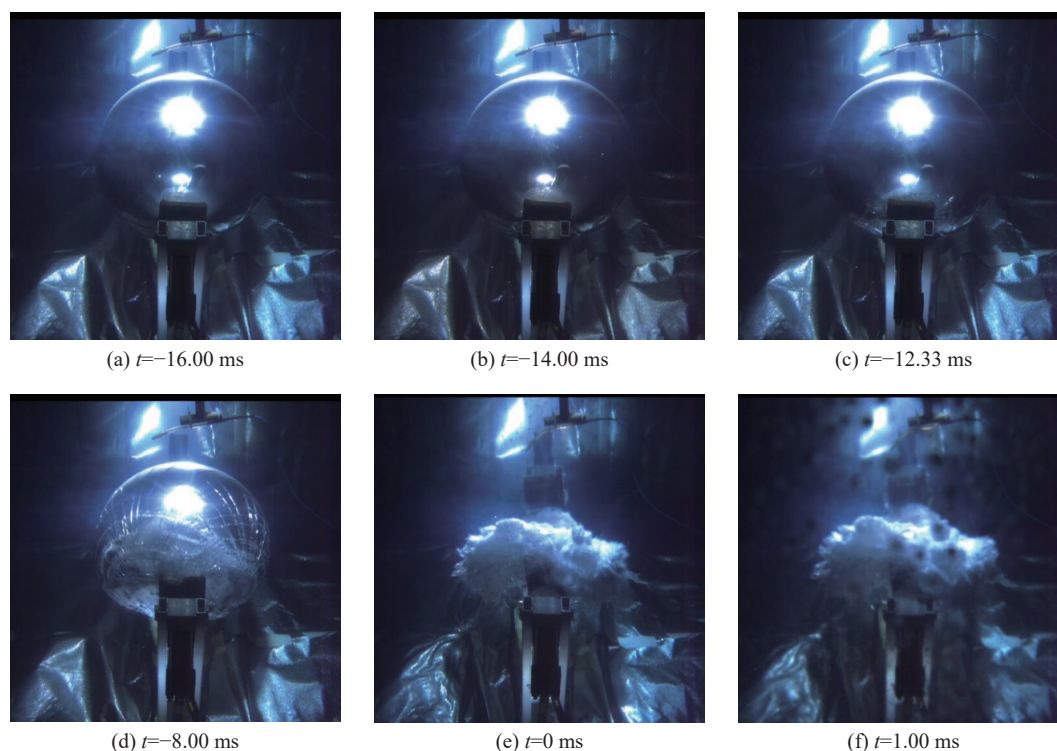


图 3 PMT 内爆过程

Fig. 3 Implosion process of PMT

图 4 为 PMT 内爆有限元模型中部截面图, 整个球体水域采用欧拉单元(EC3D8R), 中间网格密度大, 外部网格密度小, 以减小计算时间。红色部分的欧拉单元赋予水材料属性, 水采用 Grüneisen 状态方程描述, 密度为 1.0 g/cm^3 , 波速为 1480 m/s , 黏度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 在水域中利用初始应力场施加 0.5 MPa 的初始静压力, 且在水域外边界设置冲击波无反射、流体自由流入和流出的边界条件, 以模拟无限水域。蓝色部分的欧拉网格赋予真空材料属性。红色部分与蓝色部分交界处为 PMT 玻璃外壳, 采用六面体拉格朗日单元(C3D8R), 材料参数如下: 密度为 2230 kg/m^3 , 弹性模量为 2.77 GPa , 泊松比为 0.376 , 断裂极限为 40 MPa , 玻璃失效位移为 $0.1 \mu\text{m}$ 。在模型中输出与试验相同测点的压力值, 用于后期数据的相互验证及对比分析。数值模拟开始时, 对 PMT 外表面局部区域施加瞬时压力, 以模拟液压装置对 PMT 的挤压, 使得 PMT 破碎, 从而发生水下内爆。

欧拉网格具有与材料完全隔离的特性, 根据网格内材料的占比不同, 会呈现不同的网格颜色。当网格呈红色时, 欧拉网格中水的占比为 100% , 即水填满整个网格; 当网格呈蓝色时, 水的占比为零, 即没有水填充到网格。图 5 为数值模拟得到的流场运动过程。当 PMT 受到挤压时, 局部发生破碎, 水流从挤压位置涌入 PMT 内, 导致 PMT 的玻璃外壳全部压溃, 各方向水流迅速向 PMT 中心处汇聚并发生碰撞, 产生冲击波。整个 PMT 内爆过程共经历 13.6 ms , 与高速摄像拍摄的内爆过程及发生内爆的时间相近, 说明采用 CEL 耦合计算方法能够准确地模拟 PMT 发生内爆时水域流场变化过程。

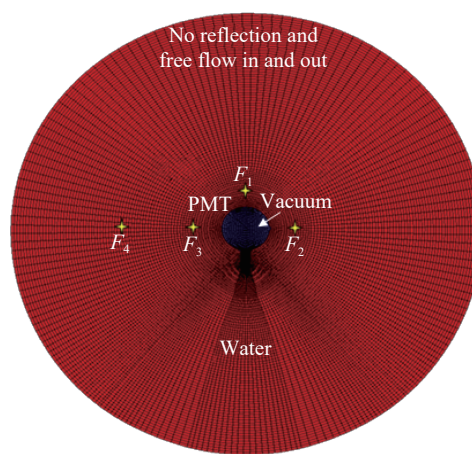


图 4 PMT 内爆仿真模型

Fig. 4 Implosion simulation model of PMT

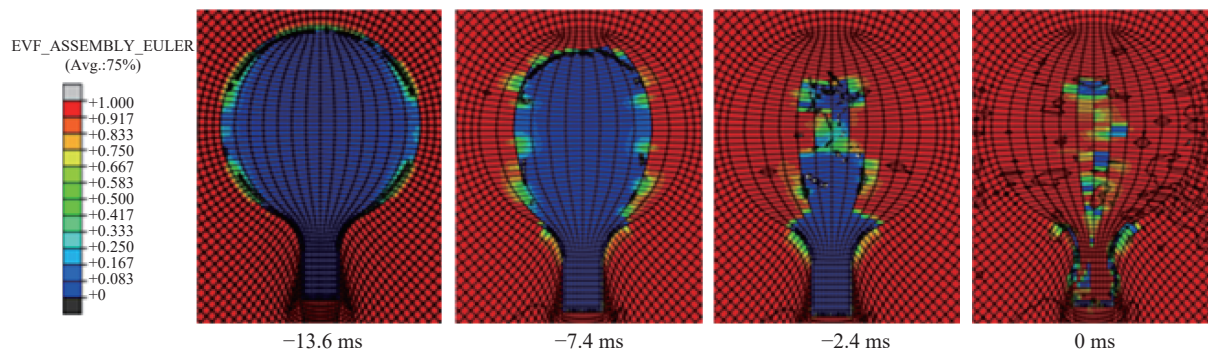


图 5 水域流场变化过程

Fig. 5 Change process of flow field in the water

1.4 试验与数值模拟结果对比分析

为进一步验证 PMT 内爆数值模拟方法的正确性,对数值模拟和试验的压力测点数据进行对比分析。由于试验中使用的是动压传感器,无法测出水中的初始静压力,所以将试验中的压力值均增加 0.5 MPa,以模拟所受的静水压作用。进一步调整试验压力值的起始位置,使试验与数值模拟压力峰值相对应。图 6 为各测点的内爆冲击波压力对比曲线,可以看出:无论是试验还是数值模拟,内爆冲击波压力峰值均较高,脉宽较小。数值模拟的压力曲线在零时刻附近出现振荡,这是由数值模拟过程中测点处的能量平衡引起的。在未达到压力峰值的曲线段,数值模拟与试验中均出现微弱压力降,这是由 PMT 玻璃外壳完全破碎后水流内涌存在速度势导致的。达到压力峰值后,数值模拟曲线快速恢复到平

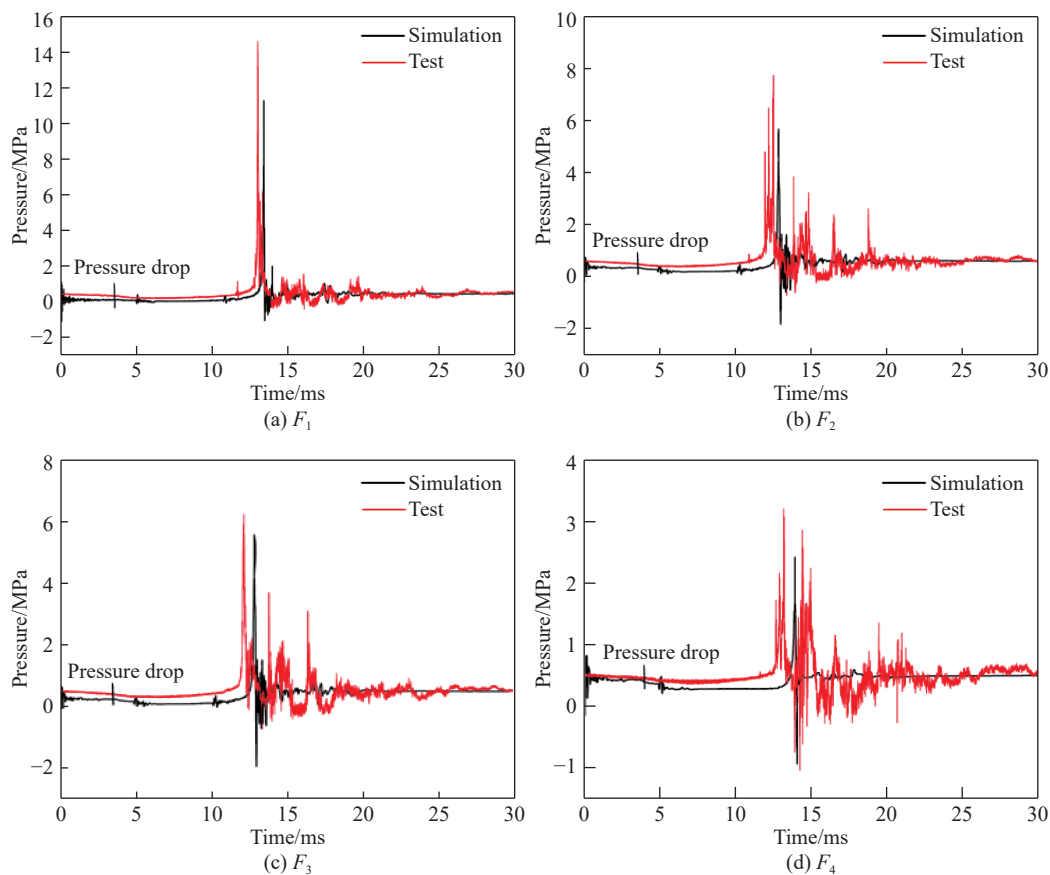


图 6 内爆压力对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of implosion pressure

衡位置, 而试验曲线出现振荡式衰减, 这是由于数值模拟中设置了无反射边界的水域条件, 而试验中由于压力罐尺寸的限制, 罐壁对冲击波具有一定的反射作用。总体而言, 数值模拟得到的内爆冲击波脉宽、峰值与试验结果吻合较好。

进一步对试验与数值模拟得到的压力峰值进行对比, 结果列于表 1。各测点峰值中, 模拟峰值普遍小于试验峰值, 这是由于数值模拟中玻璃材料本构方程与实际存在差异, 致使玻璃的破碎速率不同, 从而对内爆冲击波压力峰值产生一定的影响; 此外, 模拟时模型网格大小对结果精度也有一定的影响, 使得冲击波压力峰值降低, 但整体平均误差为 20.8%, 满足实际工程需求。选取内爆试验压力测点 F_1 的压力数据进行积分, 得到比冲量峰值为 2 700 Pa·s, 该能量相当于 50 g 标准 TNT 炸药按 Geers & Hunter 水下爆炸理论公式计算所得的能量。

表 1 试验和模拟得到的冲击波压力峰值对比

Table 1 Comparison of tested and simulated shock wave pressure peaks

Measuring point	Pressure peak/MPa		Error/%
	Test	Simulation	
F_1	14.63	11.28	22.90
F_2	7.68	5.53	27.90
F_3	6.18	5.53	10.51
F_4	3.19	2.49	21.90

2 内爆冲击波影响因素分析

在 PMT 水下内爆数值模拟方法正确建立的基础上, 利用数值模拟对内爆冲击波的影响因素进行研究。为了方便建模, 采用体积等效的方式将 PMT 等效为直径 0.5 m 的真空球体。

2.1 静水压力的影响

水下内爆发生时 PMT 玻璃外壳瞬间破碎, 水流急速碰撞产生冲击波。为了简化计算, 仅建立水域及真空球体区域模型。图 7 为建立的有限元简化模型。外部水域直径为 5 m, 内部真空球体直径为 0.5 m; 共设置 5 个压力测点, 编号为 $S_1 \sim S_5$, 分别距球心 0.25、0.35、0.45、0.55、0.65 m; 简化模型的材料本构、边界条件、载荷等计算参数保持不变; 根据 PMT 的实际工作环境, 共设置了静水压分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 及 0.7 MPa 的 5 种内爆工况进行数值模拟。

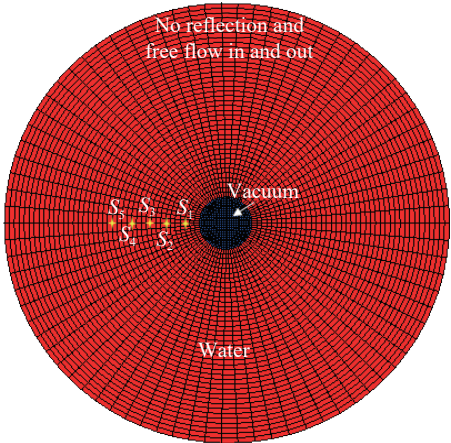


图 7 内爆简化模型

Fig. 7 Simplified model of implosion

图 8 显示了 0.5 MPa 静水压作用下水域流场的变化过程。可以看出: 计算开始时, 水流迅速向中心流动, 初始阶段, 水流速度由零开始进行加速, 水流总体运动较慢; 随着时间的延长, 水流获得了较大的运动速度, 向中心加快运动, 经历 10.25 ms 后, 水流发生碰撞产生内爆冲击波。

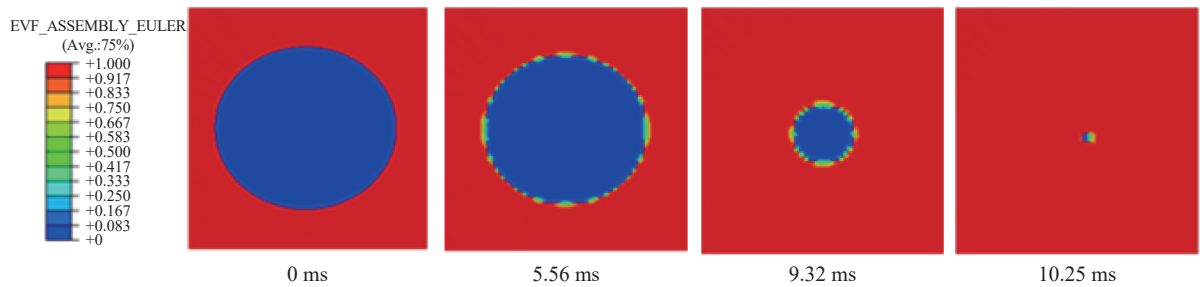


图 8 内爆水流涌入过程

Fig. 8 Water influx of implosion

进一步对测点的压力情况进行分析,图9为真空球体在5种工况下,水流高速碰撞产生冲击波,各测点的冲击波压力时程曲线。可以看出:各工况下压力曲线的变化趋势大致相同,首先在短时间内达到内爆冲击波峰值,随后压力值出现了不同程度的振荡,最后均稳定为零压力,且各测点的振荡形式相似;同一静水压下,随着测点距离的增大,内爆冲击波压力峰值显著减小。比较各工况下同一测点测得的冲击波压力峰值对应的时间可知,随着静水压力的增加,内爆发生的时刻提前。

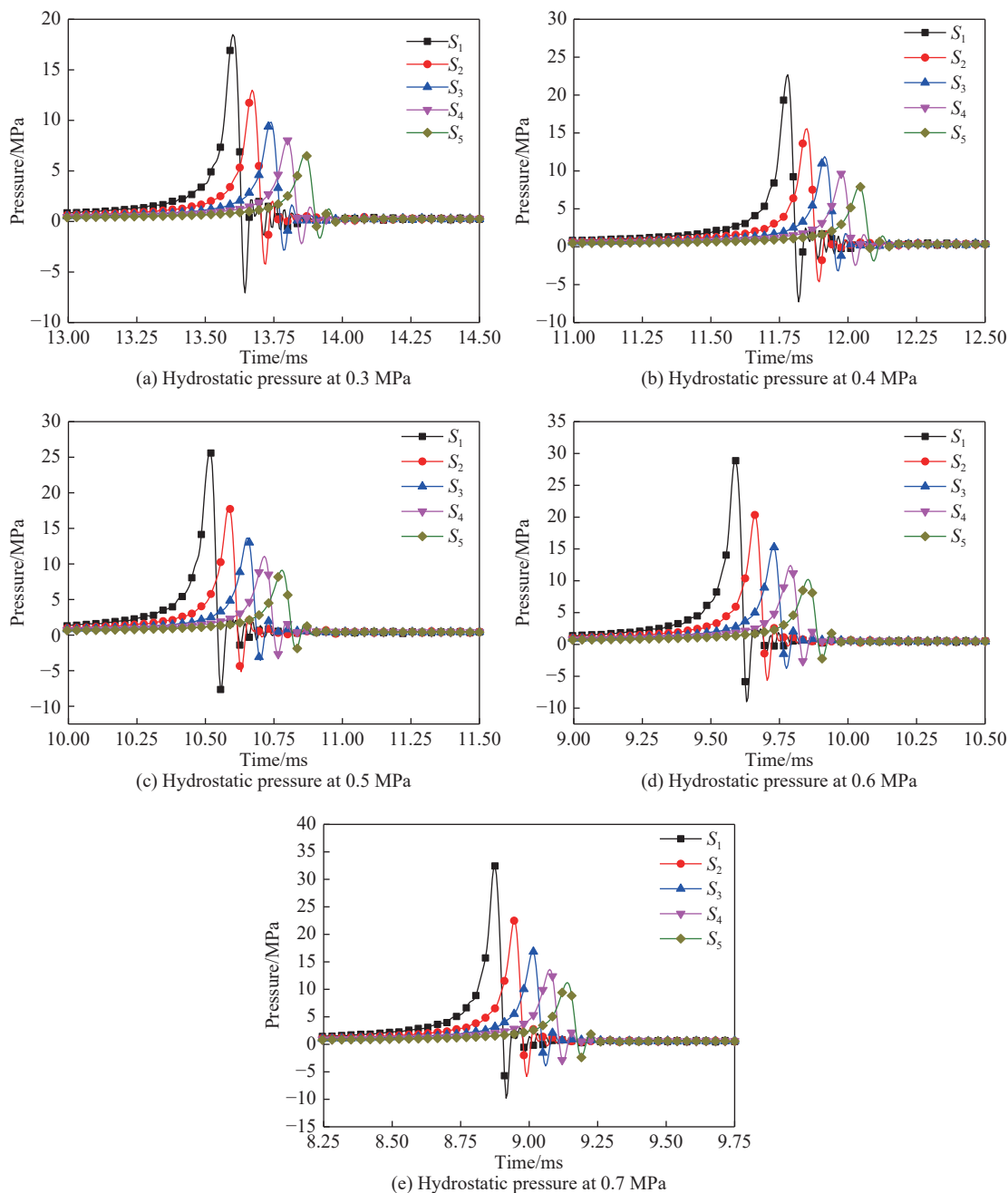


图9 压力时程曲线

Fig. 9 Curves of pressure varied with time

对图9中的冲击波压力峰值进行分析,以测点距离为横坐标,各测点冲击波压力峰值为纵坐标,绘制出各静水压下冲击波压力峰值随测点距离的变化规律,如图10(a)所示。分析发现,同一静水压下,冲击波压力峰值 p_m 随测点距离 x 的变化规律可用指数函数 $p_m = ax^b$ 进行拟合,拟合结果如表2所示。冲击波峰值衰减指数 b 在 $-1.067 \sim -1.107$ 范围,同比炸药的水下爆炸冲击波传播衰减指数(1.18)偏小。

以冲击波压力峰值的 10% 对应的两个时刻之间的差值定义为内爆冲击波脉宽, 选取 0.3 MPa 静水压下各测点脉宽进行讨论, 脉宽随测点距离变化曲线如图 10(b) 所示, 脉宽随距离的增大缓慢增大。

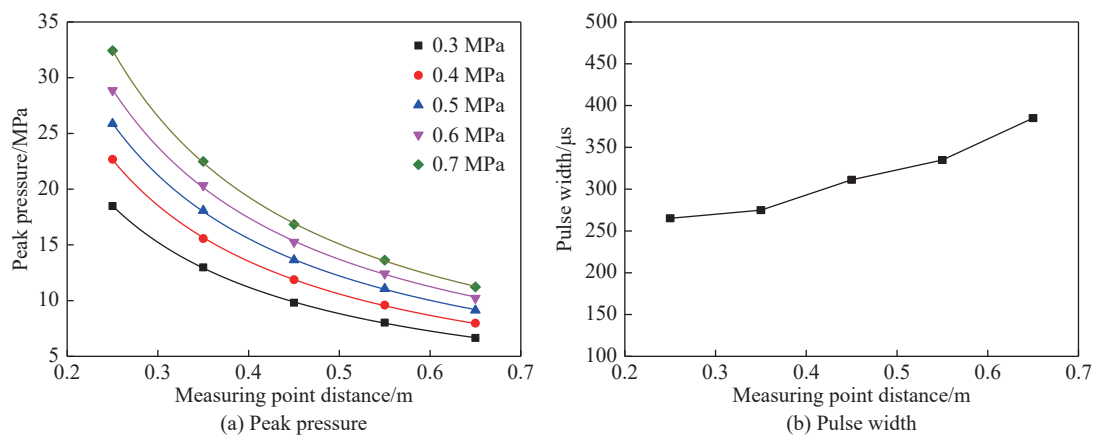


图 10 冲击波压力峰值和脉宽随测点距离变化曲线

Fig. 10 Curves of shock wave peak and pulse width with measuring point distance

为准确分析静水压对内爆冲击波的影响规律, 以静水压为横坐标, 测点的冲击波压力峰值为纵坐标, 对图 9 中各工况下不同测点冲击波压力峰值重新进行统计, 如图 11(a) 所示。可以看出, 对于同一测点, 冲击波峰值压力 p_m 随外界静水压力 p_h 呈线性增长趋势, 可用函数 $p_m = cp_h + d$ 对其进行线性拟合, 所得拟合系数值如表 3 所示, 斜率 c 随测点距离的增大而减小, 即距离内爆中心越远, 冲击波压力峰值变化越平缓。选取各静水压下 0.25 m 处测点脉宽进行讨论, 脉宽随静水压变化曲线如图 11(b) 所示, 脉宽随静水压力的增加基本保持不变。

表 2 拟合系数值

Table 2 Fitting coefficient values

Hydrostatic pressure/MPa	a	b
0.3	4.216	-1.067
0.4	4.957	-1.096
0.5	5.761	-1.084
0.6	6.488	-1.079
0.7	7.001	-1.107

表 3 拟合系数值

Table 3 Fitting coefficient values

Measuring point distance/m	c	d
0.25	34.075	8.631
0.35	23.771	6.004
0.45	17.434	4.770
0.55	14.026	3.932
0.65	11.409	3.338

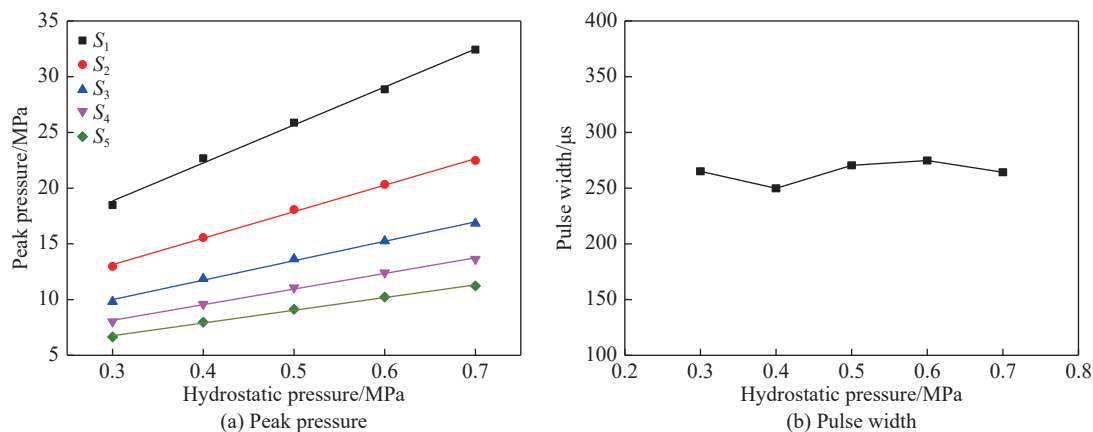


图 11 冲击波压力峰值和脉宽随静水压变化曲线

Fig. 11 Curves of shock wave peak and pulse width with hydrostatic pressure

2.2 真空体积的影响

将静水压设为 0.5 MPa, 选取与 2.1 节相同的压力测点, 真空球体半径依次修改为 0.15、0.20、0.25、0.30 及 0.35 m, 进行 5 种工况下的内爆数值模拟, 研究真空体积对内爆冲击波压力峰值的影响规律。

图 12 为不同工况各测点的内爆冲击波压力曲线。从图 12 可以看出: 真空球体半径越大, 内爆发生的时刻延后, 冲击波峰值越大。

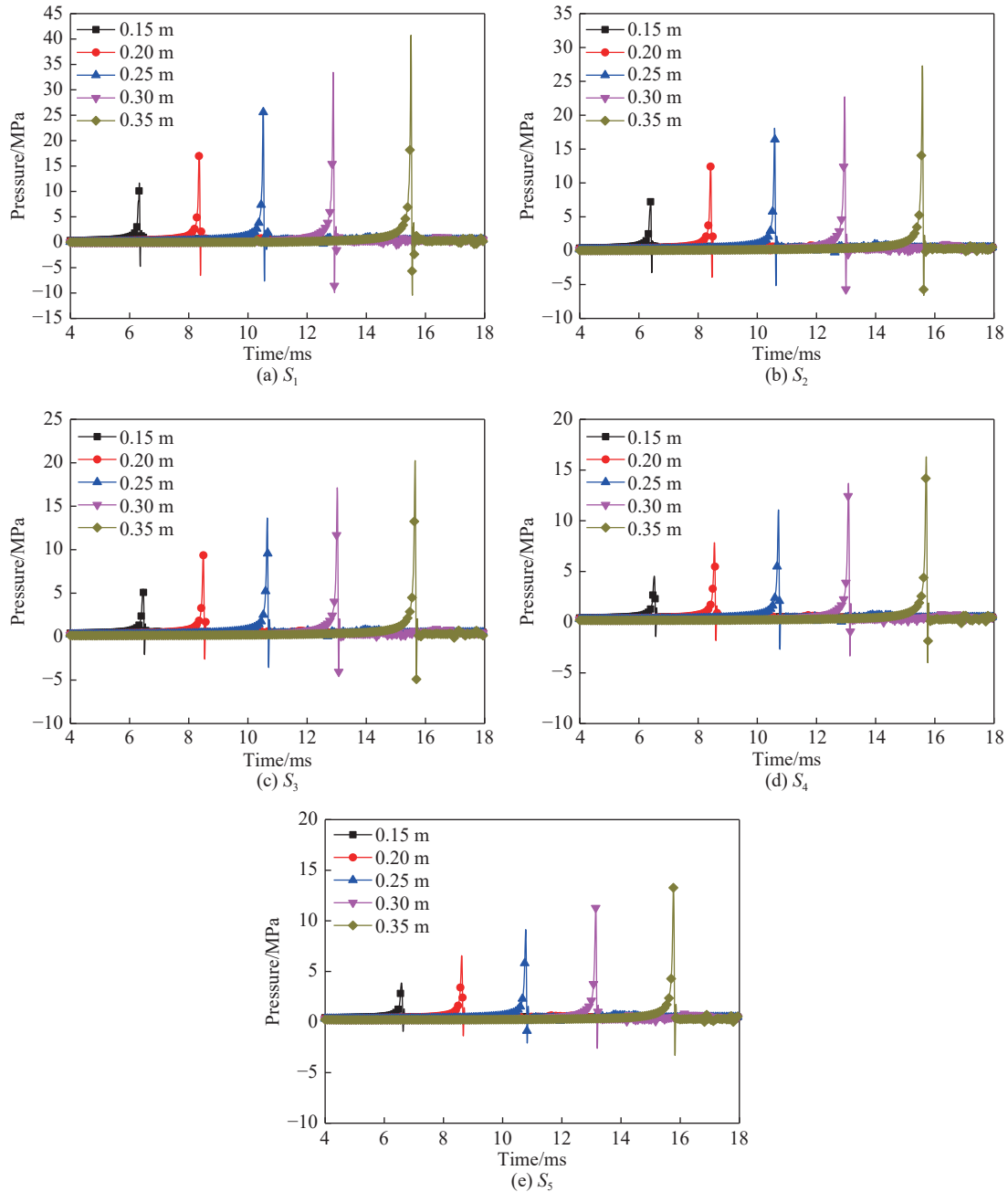


图 12 不同真空球体半径的冲击波压力时域曲线

Fig. 12 Curves of shock wave pressure with time under different vacuum sphere radii

对图 12 中的冲击波压力峰值数据进行统计, 以真空球体半径为横坐标, 冲击波压力峰值为纵坐标, 绘制图像如图 13(a) 所示。

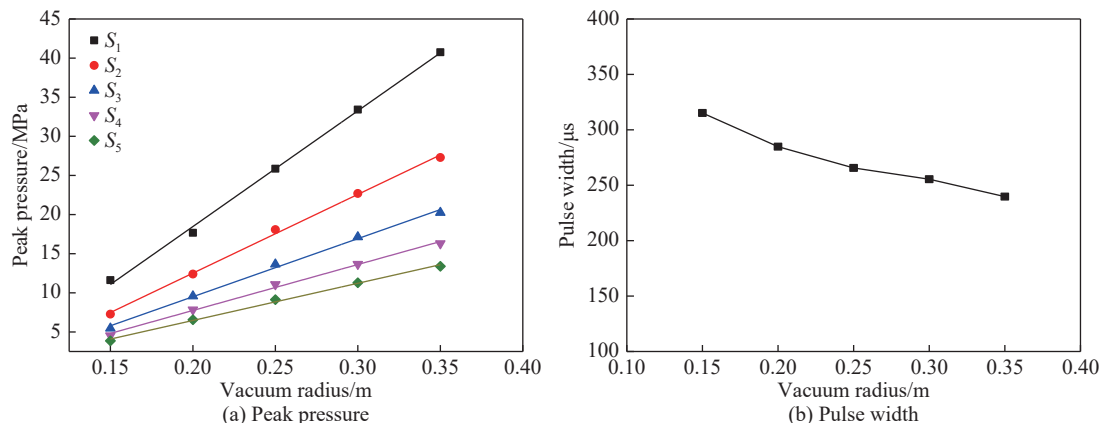


图 13 冲击波压力峰值和脉宽随真空半径变化曲线

Fig. 13 Curves of shock wave peak and pulse width with vacuum radius

从图 13(a) 可以看出, 冲击波压力峰值 p_m 随真空球体半径 r 呈线性变化。利用 $p_m = mr + n$ 进行线性拟合, 拟合系数值列于表 4。分析可得, 当距内爆中心位置一定时, 冲击波压力峰值随真空体积的增大呈线性增大, 且距离内爆中心越近的位置增长越快。选取各工况下 0.25 m 处测点进行脉宽讨论, 脉宽随真空半径变化曲线如图 13(b) 所示, 脉宽随真空半径的增大缓慢降低。

表 4 拟合系数值

Table 4 Fitting coefficient values

Measuring point distance/m	m	n
0.25	147.97	-11.125
0.35	100.68	-7.623
0.45	74.26	-5.351
0.55	58.72	-3.998
0.65	47.55	-3.045

3 结 论

(1) 对比 PMT 内爆试验与数值模拟结果可知, ABAQUS 的 CEL 数值模拟方法在模拟水下内爆发生过程、水域流场变化过程、冲击波压力峰值和脉宽等方面具有较高的模拟精度, 能够准确、全面地模拟 PMT 内爆的物理过程。

(2) 通过对不同静水压力下的内爆进行数值模拟, 得到了静水压力对内爆的影响规律: 内爆发生的时刻随静水压力的增加而提前; 内爆产生的冲击波压力峰值随测点距离增大呈指数衰减, 且衰减系数比水下炸药爆炸冲击波衰减系数小; 同一位置的内爆冲击波压力峰值随静水压力增加呈线性增长趋势, 且距离内爆中心越远, 冲击波压力峰值增长越缓慢; 冲击波脉宽随静水压力的增加基本保持不变。

(3) 通过对不同真空体积的内爆进行模拟, 得到了真空体积对内爆的影响规律: 内爆发生时刻随着真空体积的增大而延后; 同一位置的内爆冲击波峰值随真空球体体积的增大呈线性增长, 且距离内爆中心越近, 冲击波峰值变化越快; 冲击波脉宽随真空半径的增大缓慢降低。

参考文献:

- [1] HARBEN P E, BORO C. Implosion source development and diego garcia reflections [C]//23rd Seismic Research Review Worldwide Monitoring of Nuclear Explosions. Jackson Hole, WY, 2001: 21-23.
- [2] TACEY R K. Implosion research [J]. Sea Frame, 2008, 4(1): 13-15.
- [3] LING J J, MARY B, MILIND D. Implosion chain reaction mitigation in underwater assemblies of photomultiplier tubes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2013, 729: 491-499.
- [4] 曹俊. 大亚湾与江门中微子试验 [J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2014, 44(10): 1025-1040.
CAO J. Daya bay and Jiangmen underground neutrino observatory (JUNO) neutrino experiments [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(10): 1025-1040.

- [5] 吉村太彦. 超级神冈事故原因究明等委员会报告 [R]. 日本: 宇宙科学研究所, 2002.
YOSHIMURA M. Report on the Super-Kamiokande accident [R]. Japan: Institute of Space and Astronautical Science, 2002.
- [6] NAVAL U W C. Underwater implosion of cylindrical metal tubes [J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 80: 1–11.
- [7] DIWAN M, DOLPH J, LING J J, et al. Underwater implosions of large format photo-multiplier tubes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 670: 61–67.
- [8] 杜志鹏, 杜俭业, 李营, 等. 不可压缩流体中球型容器内爆理论模型研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(Suppl 1): 92–96.
DU Z P, DU J Y, LI Y, et al. An implosion theory for the spherical hollow vessel in the incompressible fluid [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(Suppl 1): 92–96.
- [9] 黄治新, 喻敏, 杜志鹏, 等. 水下中空结构物内爆试验方法研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 27–31.
HUANG Z X, YU M, DU Z P, et al. Implosion test method for underwater hollow structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 27–31.

Influence of External Conditions on Implosion Shock Wave of Hollow Structure

MENG Lingcun^{1,2}, YAN Ming¹, DU Zhipeng², ZHANG Lei²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;

2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: The hollow structure working in deep water is subjected to huge hydrostatic pressure. When it is suddenly crushed, it will explode and generate shock waves, and cause damages to the surrounding structure. Aiming at the problem that the implosion shock wave is affected unclearly by hydrostatic pressure and vacuum volume, the underwater implosion test of photomultiplier tube (PMT) was carried out. It was verified that the CEL coupling calculation method in ABAQUS satisfies the requirements of PMT implosion simulation accuracy, and then the effects of external hydrostatic pressure and vacuum volume of hollow structures on implosion shock waves were analyzed by simulation. The results show that with the increase of hydrostatic pressure and vacuum volume, the peak value of the shock wave increases linearly, and the farther away from the implosion center, the slower the increase of peak value of the shock wave. The pulse width of the shock wave remains basically unchanged with the increase of hydrostatic pressure, and decreases slowly with the increase of vacuum radius.

Keywords: underwater implosion; photomultiplier tube; mechanism of implosion; simulation of implosion; shock wave of implosion