

doi: 10.7690/bgzdh.2023.08.011

## 某球形雷体结构的毁伤特性数值研究

宗方勇<sup>1</sup>, 葛恩顺<sup>1</sup>, 李峰梅<sup>2</sup>, 刘俞平<sup>2</sup>, 程伟<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻广州地区军事代表局, 重庆 402263;

2. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

**摘要:** 为合理设计反水雷武器的尺寸及重量、提高作战效率, 对某球形雷体结构的毁伤特性数值进行研究。运用 LS-DYNA 软件开展水下静爆仿真, 采用 3 维模型求解; 分析裸药柱与某球形雷的作用距离、裸药柱装药量对雷体壳体毁伤的影响特性。结果表明: 当裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离从 210 mm 增加到 400 mm 时, 壳体变形量从 3.9% 降低到 2.2%; 裸药柱装药量从 0.5 kg 增加至 2.5 kg, 壳体变形量从 0.58% 降到 3.4%; 增大裸药柱装药量更能使雷体壳体结构加大塑性变形; 确定造成雷体壳体毁伤的临界装药量为 3 kg, 临界距离为 20 mm。

**关键词:** 某球形雷; 爆炸; 装药量; 作用距离; 数值模拟

**中图分类号:** TJ630.3<sup>+1</sup> **文献标志码:** A

## Numerical Study on Damage Characteristics of Spherical Torpedo Structure

Zong Fangyong<sup>1</sup>, Ge Enshun<sup>1</sup>, Li Fengmei<sup>2</sup>, Liu Yuping<sup>2</sup>, Cheng Wei<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office of Naval Equipment Department in Guangzhou, Chongqing 402263, China;

2. Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** In order to reasonably design the size and weight of the torpedo countermeasure weapon and improve the operational efficiency, the numerical value of the damage characteristics of a spherical torpedo structure was studied. The LS-DYNA software was used to carry out the simulation of underwater static explosion, and the three-dimensional model was used to solve the model. The operating distance between the bare grain and a spherical torpedo, and the influence of the bare grain charge on the damage characteristics of the torpedo shell were analyzed. The results show that when the distance between the outer surface of the bare grain and the outer edge of the torpedo shell increases from 210 mm to 400 mm, the shell deformation decreases from 3.9% to 2.2%, and when the charge of the bare grain increases from 0.5 kg to 2.5 kg, the shell deformation decreases from 0.58% to 3.4%; The plastic deformation of the shell structure of the torpedo can be increased by increasing the charge amount of the bare charge column; the critical charge amount causing damage to the shell of the torpedo is detertorpedod to be 3 kg, and the critical distance is 20 mm.

**Keywords:** spherical torpedo; explosion; charge; operating range; numerical simulation

### 0 引言

海洋已成为国家利益拓展和安全空间延伸的一个重要战略领域。随着军事、科技革命和产业变革不断向纵深发展<sup>[1-2]</sup>, 以无人系统技术为代表的高新技术正在广泛渗透和深入应用, 深刻影响着反水雷装备和技术的发展<sup>[3-4]</sup>。现代水雷的形状主要有球形、半球形、椭圆形和圆筒形, 其中, 球形雷体结构较为常见。精准预估出摧毁雷体所需的作用距离和装药量能够合理设计反水雷武器的尺寸及重量, 提高作战效率。综上所述, 研究作用距离及装药量对球形雷体结构的毁伤规律具有重要意义。笔者开展不同作用距离及装药量对某球形雷体的毁伤研究, 为反水雷武器的尺寸及重量的设计提供数据支撑。

### 1 数值模型与计算方法

#### 1.1 材料模型与状态方程

笔者运用 LS-DYNA 软件开展水下静爆仿真, 采用 3 维模型求解。

雷体装药采用 \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 关键字, 裸药柱采用 TNT 炸药, 通过 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型和 JWL 状态方程进行描述, 状态方程如下所示<sup>[5]</sup>:

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

式中:  $\omega$  为状态方程独立参数;  $P$ 、 $E_0$ 、 $V$  分别为爆轰产物压力、炸药比内能和比容。该方程能精确的描述爆轰气体产物的体积、压力、能量等特性。炸药主要参数如表 1 所示。

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-05-23

作者简介: 宗方勇(1978—), 男, 山东人, 博士。

表 1 炸药主要参数

炸药	爆速/(m/s)	爆压/GPa	$R_1$	$R_2$	$A$ /GPa	$B$ /GPa
TNT	630	21	4.15	0.9	373.8	3.5

水域本构模型和状态方程通过\***MAT\_NULL** 和\***EOS\_GRUNEISEN** 关键字进行计算, 具体参数如表 2 所示。

表 2 空气状态方程参数

$\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$c$ /(m/s)	$S_1$	$S_2$	$S_3$	DAMAO
1 000	1 480	1.921	-0.096	0	0.35

上表中:  $\rho$ 为密度,  $c$ 为声速,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和 DAMAO 为 GRUNEISEN 状态方程相关参数。

雷体壳体材料为 30CrMnSiNi2A, 采用 JOHNSON\_COOK 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程描述, 主要参数如表 3 所示。

表 3 30CrMnSiNi2A 的主要材料参数

$P$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$E$ /GPa	$G$ /GPa	$A$ /GPa	$B$ /GPa
7 850	209	80.4	158.7	48.8

### 1.2 计算模型

笔者采用 3D 模型建模方式, 考虑结构对称性建立 1/2 模型。水下爆炸数值模型如图 1 所示, 将雷体简化为  $\Phi 870$  mm 的球体结构, 壳体厚度为 7 mm, 药柱起爆点为中心处。采用流固耦合的方法进行模拟。雷体壳体及装药被水域包覆, 其中裸药柱、水域为欧拉网格, 雷体壳体、装药为拉格朗日网格, 网格尺寸为 2 mm, 雷体壳体底部位置为固定约束边界。

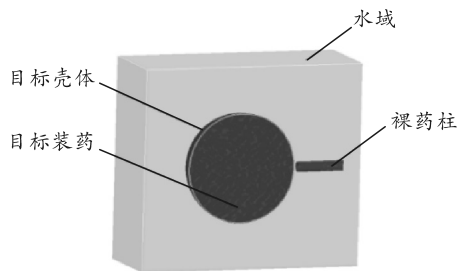


图 1 水下爆炸数值模型

## 2 水下静爆数值模拟

### 2.1 水下冲击波压力分布

通过 Ls-Dyna 进行数值模拟计算, 其中, 裸药柱尺寸为  $\Phi 80$  mm $\times$ 380 mm, 裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为 200 mm, 对水下爆炸进行了仿真分析。典型时刻冲击波压力分布云图如表 4 所示, 在 50  $\mu$ s 时, 作用在雷体壳体上的压力最大, 为 9 910 MPa, 裸药柱正对雷体中间偏下位置, 故雷体下部冲击波压力略微偏大。

表 4 典型时刻冲击波压力分布云图

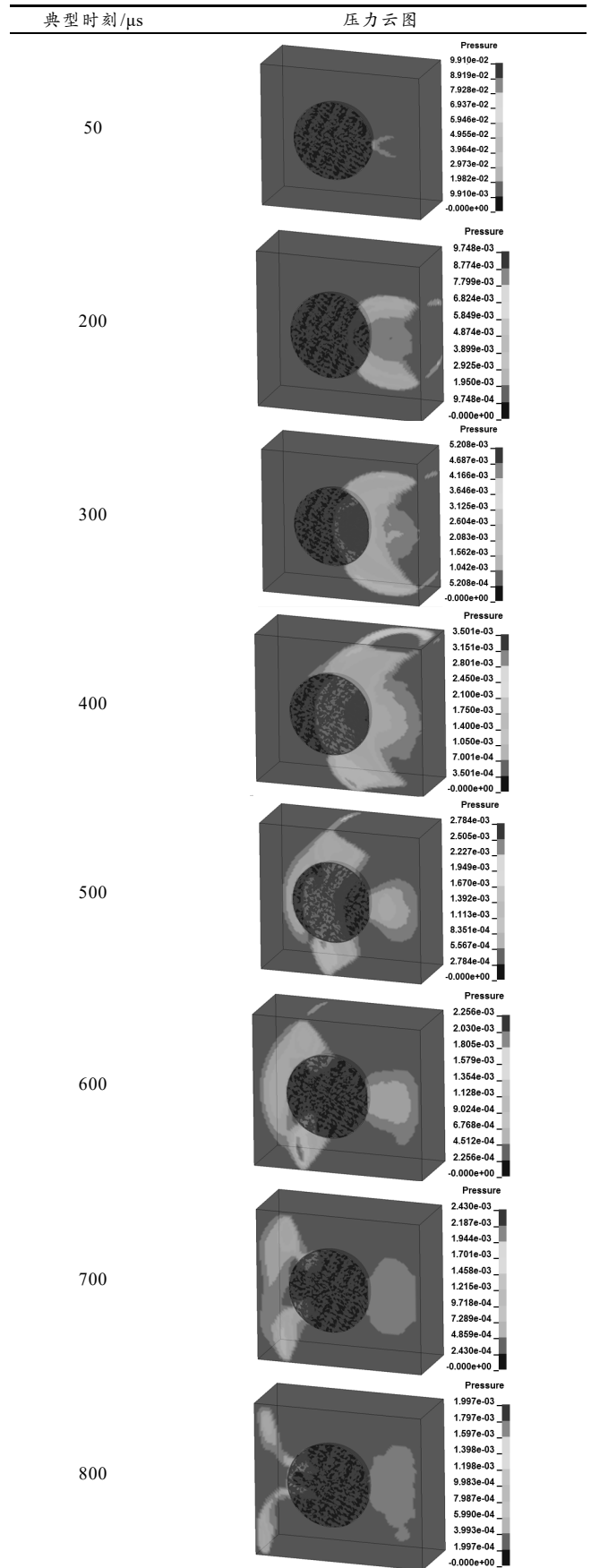


图 2 为雷体壳体外缘典型位置冲击波压力曲线，从图中可看出不同位置压力峰值大小及出现时间有所区别，靠近壳体外缘中间位置最先出现压力峰值，大小约为 225 MPa，壳体下边缘压力峰值最大，约为 240 MPa。

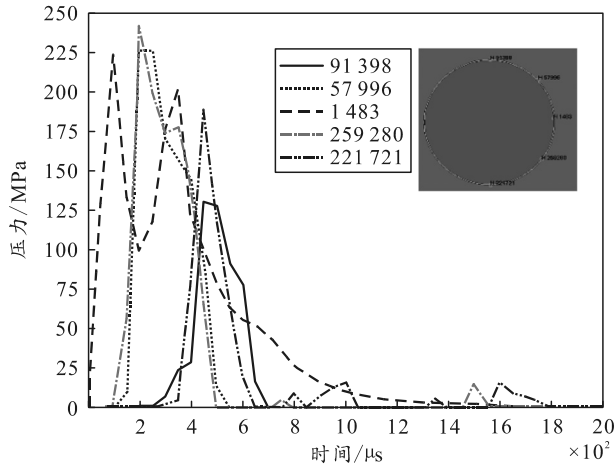


图 2 雷体壳体外缘典型位置冲击波压力曲线

### 2.2 不同距离对雷体毁伤情况分析

以裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为研究对象，开展不同距离下的水下爆炸数值模拟，重点分析不同工况下雷体毁伤情况，其中，裸药柱尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$ ，装药量为 3 kg。

以裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离 200 mm 为例，典型时刻雷体壳体等效应力云图见表 5 所示。根据雷体壳体毁伤情况距离按  $\pm 10 \text{ mm}$  进行调整，通过仿真发现当裸药柱尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$  时，裸药柱外端面与雷体壳体外缘临界距离为 200 mm，即当距离  $\geq 200 \text{ mm}$  时，雷体壳体结构遭到破坏，雷体壳体底部约束位置附近出现多条裂缝，小于临界距离时雷体壳体仅出现塑性变形，结构本身保持完整性，具体见图 3 所示。

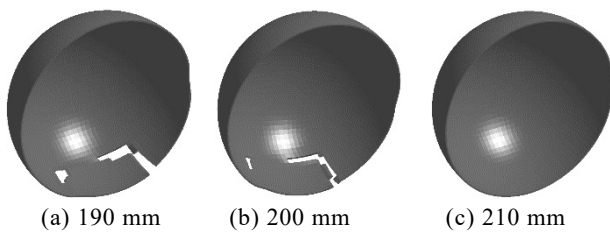


图 3 不同距离下雷体壳体毁伤情况

为进一步研究不同距离对雷体壳体塑性变形影响，分别统计雷体壳体外缘正对裸药柱位置处的最大变形量，并将其除以雷体半径进行无量纲化处理，图 4 为不同距离下雷体壳体变形量百分比曲线及应变云图。

表 5 典型时刻雷体壳体等效应力分布云图

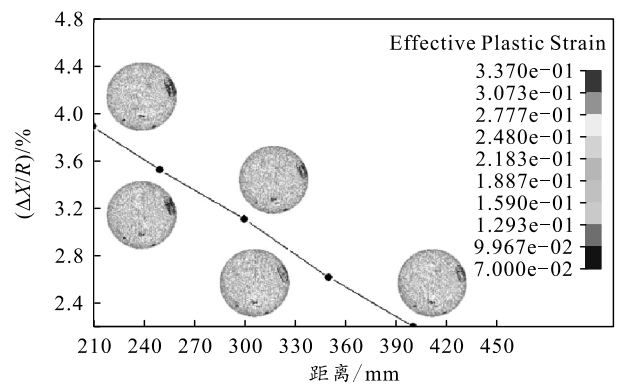
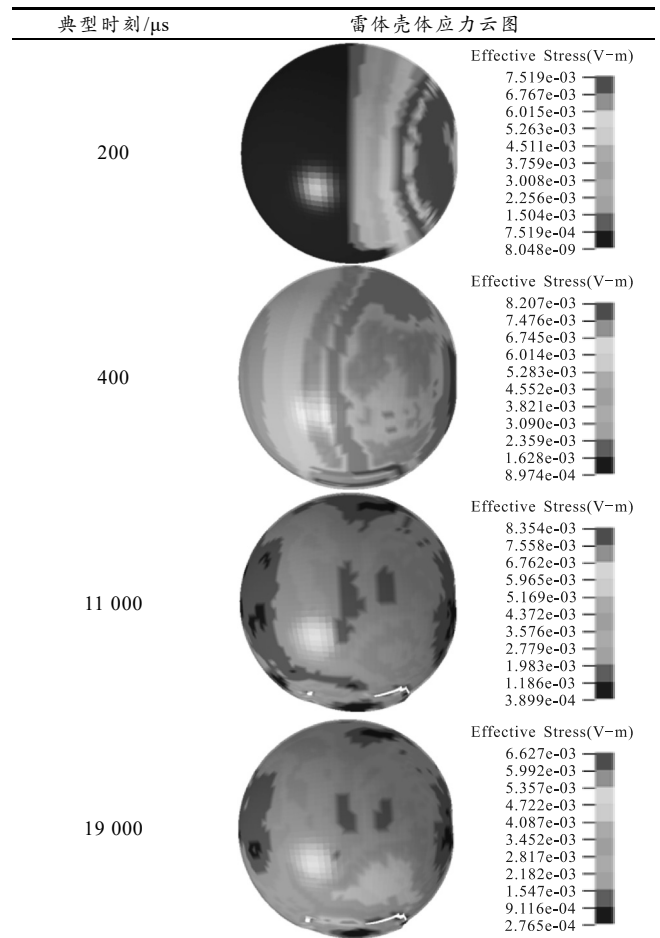


图 4 不同距离下雷体壳体变形量百分比曲线及应变云图

从上图中明显看出，裸药柱尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$  时，随着裸药柱外端面与雷体壳体外缘距离的增加，雷体壳体正对裸药柱位置变形量基本呈线性减小，作用距离从 210 mm 增加到 400 mm 时，壳体变形量从 3.9% 降低到 2.2%，但对雷体底部约束位置基本无影响。

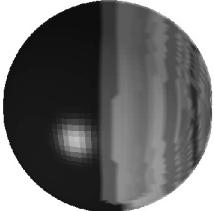
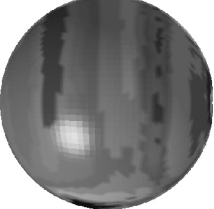
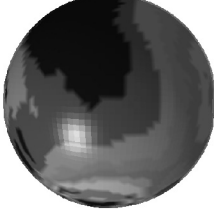
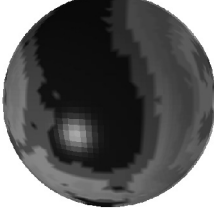
### 2.3 不同装药量对雷体毁伤情况分析

同一长径比下，通过调整裸药柱尺寸大小研究不同装药量对雷体毁伤情况影响，裸药柱长径

比不变，裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为 200 mm。

以装药量 2.5 kg 为例，典型时刻雷体壳体等效应力云图见表 6 所示。根据雷体壳体毁伤情况装药量按 ±0.5 kg 进行调整，通过仿真发现当裸药柱尺寸为  $\Phi 80\text{ mm} \times 380\text{ mm}$  且裸药柱外端面与雷体壳体外缘距离为 200 mm 时，临界装药量为 3 kg，即当裸药柱装药量  $\geq 3\text{ kg}$  时，雷体壳体结构遭到破坏，雷体壳体底部约束位置附近出现多条裂缝，小于临界装药量时雷体壳体仅发生塑性变形，具体见图 5 所示。

表 6 典型时刻雷体壳体等效应力分布云图

典型时刻/ $\mu\text{s}$	雷体壳体应力云图
200	 <p>Effective Stress(V-m)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>7.238e-03</li> <li>6.434e-03</li> <li>5.630e-03</li> <li>4.825e-03</li> <li>4.021e-03</li> <li>3.217e-03</li> <li>2.413e-03</li> <li>1.608e-03</li> <li>8.043e-04</li> <li>3.890e-08</li> </ul>
400	 <p>Effective Stress(V-m)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>8.078e-03</li> <li>7.231e-03</li> <li>6.383e-03</li> <li>5.536e-03</li> <li>4.688e-03</li> <li>3.841e-03</li> <li>2.993e-03</li> <li>2.145e-03</li> <li>1.298e-03</li> <li>4.504e-04</li> </ul>
11 000	 <p>Effective Stress(V-m)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>7.166e-03</li> <li>6.378e-03</li> <li>5.591e-03</li> <li>4.803e-03</li> <li>4.016e-03</li> <li>3.228e-03</li> <li>2.440e-03</li> <li>1.653e-03</li> <li>8.653e-04</li> <li>7.771e-05</li> </ul>
19 000	 <p>Effective Stress(V-m)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>5.194e-03</li> <li>4.629e-03</li> <li>4.064e-03</li> <li>3.499e-03</li> <li>2.934e-03</li> <li>2.370e-03</li> <li>1.805e-03</li> <li>1.240e-03</li> <li>6.746e-04</li> <li>1.096e-04</li> </ul>

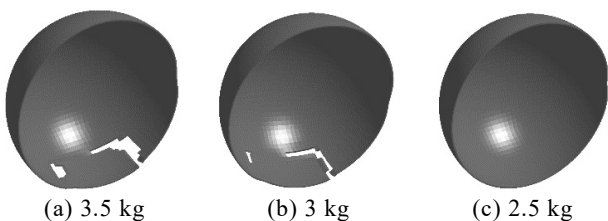


图 5 不同装药量下雷体壳体毁伤情况

为进一步研究不同装药量对雷体壳体塑性变形影响，分别统计雷体壳体外缘正对裸药柱位置处的最大变形量，并将其除以雷体半径进行无量纲化处

理，图 6 为不同距离下雷体壳体变形量百分比曲线及应变云图。

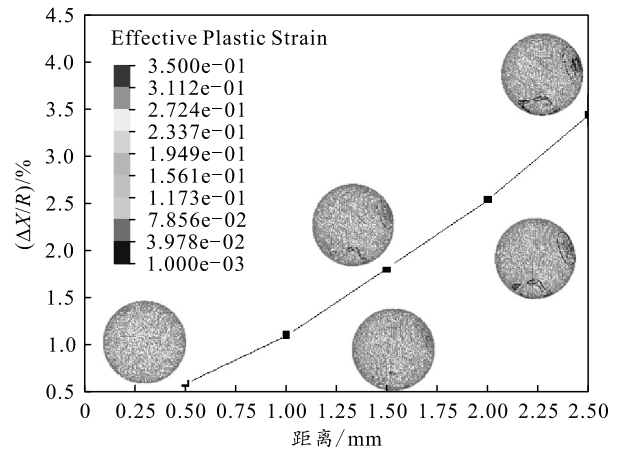


图 6 不同距离下雷体壳体变形量百分比曲线及应变云图

从上图中能明显看出，当裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为 200 mm 且裸药柱长径比不变时，随着裸药柱装药量的增加，雷体壳体正对裸药柱位置变形量基本呈线性增大，且雷体底部约束位置附近变形量逐渐增加，装药量从 0.5 kg 增加到 2.5 kg 时壳体变形量从 0.58% 增加到 3.4%。

### 2.4 基于距离及装药量的雷体毁伤方案优选

由于受结构本身尺寸及作用机制限制，分别开展特定装药量下能够达到雷体结构开缝/孔的临界距离和特定距离下能够达到雷体结构开缝/孔的临界装药量研究，可为方案初级阶段设计提供设计思路，为后期结构参数优化提供技术及数据支撑。

综上，将不同距离及装药量下雷体壳体产生塑性变形及毁伤情况进行统计，详见图 7、8 所示。

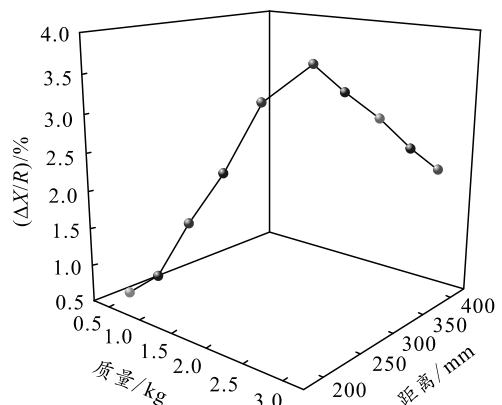


图 7 不同距离和装药量下雷体壳体变形量百分比曲线

从上图可知，特定距离下增加装药量使雷体壳体结构产生塑性变形量增加幅度较大。通过仿真计算确定临界装药量及临界距离。