

文章编号:1006-9941(2023)08-0820-12

# 吸能边界条件下水下爆炸离心试验中冲击波传播特性数值模拟

李明<sup>1</sup>,张启灵<sup>1,2,3</sup>,李志<sup>1,2,3</sup>

(1. 长江科学院 工程安全与灾害防治研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 3. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 受限于模型试验箱尺寸,水下爆炸离心模型试验中爆炸荷载在试验箱边界产生的反射波必然会影响试验的预期效果,因此减小模型箱边界效应将会大幅度还原试验实际情况并提高试验精度。基于耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法对水下爆炸离心模型试验进行数值模拟,通过试验和理论结果对比及1、2、4、6、8 mm和10 mm尺寸网格分析,验证了数值模型的可靠性,在此基础上对比研究了5、10、15 mm和20 mm厚度橡胶和泡沫作为边界消能材料时水下爆炸离心试验中冲击波荷载的传播特性,分析了各边界材料的吸波耗能机理。结果表明:2 mm欧拉网格尺寸能够兼顾计算效率和计算结果准确性;在模型箱内壁敷设橡胶或泡沫材料能有效降低水下爆炸冲击波的反射效应;在5 mm厚度条件下,橡胶材料较泡沫材料对冲击波吸收效果更为明显,但随着材料厚度的增加,泡沫材料吸波效果更加优越;橡胶材料和泡沫材料对冲击波低频信号均有一定的抑制效果,而对高频段信号抑制效果较弱。

**关键词:** 水下爆炸;边界效应;数值模拟;吸波消能;离心模型试验

**中图分类号:** TJ55;TV32+

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2023125

## 0 引言

近年,大型水工结构工程的抗爆防护及损毁机理逐渐得到各国研究机构及学者的重点关注和研究<sup>[1-2]</sup>。水下爆炸能量主要以冲击波和气泡脉动两种方式释放,其中冲击波荷载对结构作用的压力峰值大、频率高<sup>[3]</sup>,而气泡荷载压力峰值小,但作用时间较长<sup>[4]</sup>,因此两者对水工结构产生的毁伤程度均不可忽略。由于水下爆炸原位试验存在较大的安全隐患,且其试验周期长、费用成本高,模型试验和数值模拟仍是现阶段研究水下结构爆炸动态响应及抗爆防护的主要手段<sup>[5-6]</sup>。

水下爆炸离心机试验能够模拟原型应力场环境,为爆炸过程和结构抗爆研究提供了有效的物理模拟途

径<sup>[7-9]</sup>。受限于模型箱尺寸,离心模型试验无法重塑现场试验中近场无边界限制的实际条件,爆炸冲击波在向外传播过程中与模型箱壁边界相互作用,产生的反射波对荷载作用过程和结构响应行为等试验结果均有一定的影响。而气泡荷载在模型箱边界相互作用过程中会逐渐溃灭,气泡中爆炸能量通过射流<sup>[10]</sup>几乎全部作用于模型箱壁,通过箱壁反射再次作用于试验对象的能量与冲击波相比较小。因此爆炸冲击波通过箱壁反射对离心试验精度的影响更为显著,削弱冲击波边界效应是提升爆炸离心试验精确度的重要方法。目前,已有学者认为设计水下爆炸离心模型试验时,宜在离心机负载范围内尽可能增加模型尺寸、提高蓄水高度,以减少试验边界的干扰<sup>[11-12]</sup>。在土工动力离心模型试验方面,边界效应问题一直是国内外学者关注的焦点<sup>[13-14]</sup>。Lee等<sup>[15]</sup>进行了动力离心模型试验边界效应研究,认为动力离心模型试验的理想边界应尽可能吸收入射波来降低对试验的影响。Lombardi等<sup>[16]</sup>在箱壁敷设泡沫吸收材料,减少离心机人工边界对土沉积物动力响应的影响,研究吸收材料的动态特性和耗能机理。Liu等<sup>[17]</sup>在探究饱和土中运输隧道内部爆破荷载作用下的响应时,在模型中设置绝缘泡沫塑料减

收稿日期:2023-06-06;修回日期:2023-07-25

网络出版日期:2023-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助(52109146),中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019394/GC)

作者简介:李明(1999-),男,硕士生,主要从事水下爆炸研究。  
e-mail:1594028904@qq.com

通信联系人:张启灵(1982-),男,正高级工程师,主要从事水下结构抗爆研究。e-mail:liam1982@163.com

引用本文:李明,张启灵,李志.吸能边界条件下水下爆炸离心试验中冲击波传播特性数值模拟[J].含能材料,2023,31(8):820-831.

LI Ming, ZHANG Qi-ling, LI Zhi. Numerical Simulation on Shock Wave Propagation Characteristics in Centrifugal Tests of Underwater Explosion with Energy Absorbing Boundaries[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):820-831.

少爆炸冲击波从末端的反射。马立秋等<sup>[18]</sup>针对爆炸离心边界效应问题设置三种边界材料探究吸波耗能性能大小,为减少边界反射能量选择最优材料,同时考虑了厚度对吸收冲击波能量的影响。尽管离心模型试验在爆炸物理模拟研究领域具有独特优势,但目前国内外有关水下爆炸离心模型试验中设置边界吸能材料的试验研究尚少,模型试验中的边界效应问题一直没有得到应有的重视。从以往爆炸离心模型试验可以看出,吸能边界的设置是降低边界效应对水下爆炸离心模型试验结果不利影响的常用措施,但没有对边界材料的吸能效率进行系统性研究并给出定量的分析。

鉴于此,本研究基于耦合欧拉-拉格朗日方法进行水下爆炸离心试验数值模拟,探究边界效应对水下爆炸荷载传播的影响,通过设置边界防护材料抑制反射波对模型试验的干扰,揭示其吸波耗能机理。针对不同材料种类和厚度,从压力、冲量和加速度等动态响应参数多维度探讨吸波耗能机理,并通过频谱分析观察不同材料的滤波效果,分析不同防护边界材料下水下爆炸离心试验中冲击波荷载特性,为最大程度降低边界效应对试验结果的影响提供科学依据。

## 1 数值模拟及工况

### 1.1 数值模拟模型

水下爆炸是一个复杂的瞬态动力学问题,目前基于有限单元法的拉格朗日算法和基于有限体积法的欧拉算法在水下爆炸数值模型中得到了广泛应用<sup>[19-20]</sup>。拉格朗日算法具有计算效率高的优点,但在分析流体、流固耦合问题以及固体结构大变形问题时,往往会因较大的网格畸变而导致计算精度严重下降。欧拉算法虽然能够解决网格畸变的问题,但是欧拉单元网格很难与物体边界网格重合,相对于拉格朗日方法难以捕捉物体边界并且计算效率较低。耦合欧拉-拉格朗日方法采用拉格朗日算法计算结构响应,欧拉算法计算流体运动,并在接触面进行耦合计算,既保证了网格的稳定性,也提高了模型计算速度<sup>[21]</sup>。

研究基于Abaqus/Explicit显示求解器进行数值模拟计算,以文献[12]中挡水结构水下爆炸离心模型试验为研究对象,采用1200 mm×400 mm×900 mm离心机模型箱,固定700 mm×400 mm×5 mm尺寸Q235钢板挡水结构,距离一侧边界150 mm,钢板前方置入600 mm深水体,后方为空气介质,同时在模型箱侧面和底面敷设泡沫和橡胶边界防护材料用于吸收

冲击波。针对水体和TNT炸药采用欧拉单元,钢板结构、边界材料采用拉格朗日单元建模,所有单元之间为通用接触,切向行为为罚摩擦,法向行为采用硬接触。拉格朗日单元为C3D8R网格类型,欧拉单元采用EC3D8R网格类型。具体模型示意图如图1所示,其中 $L$ 为爆点与钢板之间的距离, $D$ 为爆点与水面的距离。

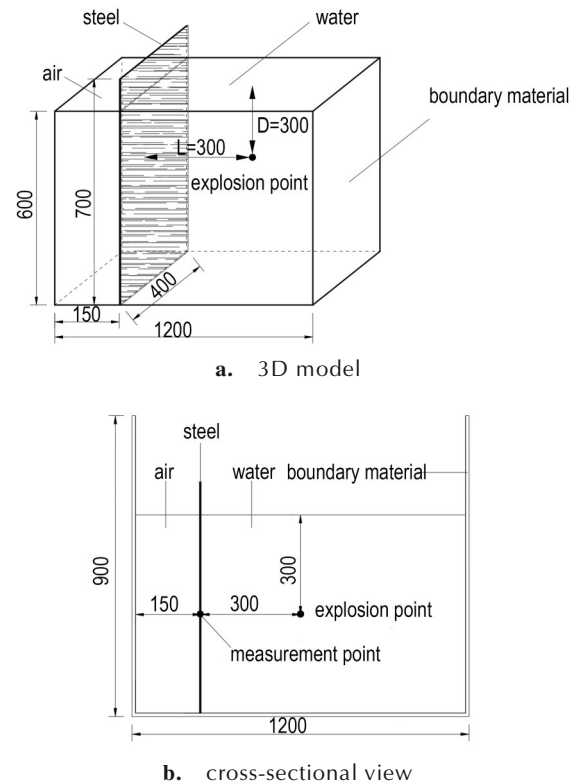


图1 模型示意图(单位:mm)

Fig.1 Diagram of model(unit: mm)

### 1.2 状态方程与本构参数

#### 1.2.1 水介质

假设流体粘性很小且具有不可压缩性,可采用 $U_s-U_p$ 线形状态方程进行模拟,其中 $U_s$ 为激波速度, $U_p$ 为粒子速度。结合N-S方程对水下爆炸水体运动进行精确模拟,得到水的状态方程<sup>[22]</sup>为:

$$p_w = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left( 1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (1)$$

式中, $p_w$ 是水体轰爆产生的压力,MPa; $\rho_0$ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $c_0$ 为流体波速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\eta$ 是名义体积压缩应变, $\eta$ 和 $c_0$ 决定了线形激波速度 $U_s$ 和粒子速度 $U_p$ , $\Gamma_0$ 为Gruneisen比例, $E_m$ 为单位质量内能,J; $s$ 是 $U_s-U_p$ 曲线斜率的系数;各参数取值见表1。

表1 水介质状态方程参数

Table 1 Parameters of the equation of state of water

$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^3$	$c_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$s$	$\Gamma_0$
1000	1483	1.75	0.28

Note:  $\rho$  is water density,  $c_0$  is fluid velocity,  $s$  is  $U_i-U_p$  coefficient of the slope of the curve,  $\Gamma_0$  is Grüneisen ratio.

### 1.2.2 TNT炸药

水下爆炸炸药状态方程常用JWL状态方程模拟<sup>[23]</sup>,该方程能够精准地描述爆轰产物膨胀运动过程,以TNT为炸药材料的JWL状态方程如式(2)所示:

$$p_e = A(1 - \frac{\omega\eta_0}{R_1})e^{-\frac{R_1}{\eta_0}} + B(1 - \frac{\omega\eta_0}{R_2})e^{-\frac{R_2}{\eta_0}} + \omega\eta_0\rho_1 e \quad (2)$$

式中, $p_e$ 为轰爆产物的压力,MPa; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 都是与炸药类型相关的参数, $A$ 和 $B$ 的单位为GPa, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 为无量纲参数; $\eta_0$ 为爆炸产物密度和初始炸药密度的比值,即 $\eta_0 = \rho/\rho_1$ , $\rho = 1630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;e为炸药单位质量的内能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。模型中设置爆速为 $6930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他参数取值见表2。

表2 TNT状态方程参数

Table 2 Parameters of the equation of state of TNT

$A / \text{Pa}$	$B / \text{Pa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$e / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
$3.5 \times 10^{11}$	$3.3 \times 10^9$	4.2	0.9	0.3	$3.7 \times 10^6$

Note:  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  are parameters related to the type of explosive.  $e$  is the internal energy per unit mass of explosive.

### 1.2.3 Yeoh橡胶模型参数

橡胶材料不仅具有较高的声波内耗性,其特性阻抗与水体接近,声波在两介质处吸收性好,能量更容易从水中传播到橡胶介质材料中,因此可以作为良好的水下吸声材料<sup>[24]</sup>。本模拟试验基于Yeoh超弹性橡胶材料应变能函数<sup>[25]</sup>进行赋值,Yeoh超弹性橡胶材料应变能函数如式(3)所示:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \left[ \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \right] \quad (3)$$

式中, $J$ 是总体积比; $\bar{I}_1$ 为第一应变张量不变量; $c_{i0}$ 和 $D_i$ 是与温度相关的参数,数值模拟中参数设置为 $c_{10} = 0.03$ , $c_{20} = -5 \times 10^4$ , $c_{30} = 7 \times 10^{-6}$ , $D_1 = D_2 = D_3 = 0$ 。

### 1.2.4 Hyperfoam泡沫模型参数

胞体是由构成胞元边缘和面的实体支柱和板组成的相互连接网络,而泡沫则是由三维堆积的多面体单元组成。泡沫材料受荷载作用是各向同性和非线性变化的,弹性可压缩变形特点明显,具有很好的能量耗散和应力软化性能,在吸收水下爆炸冲击荷载能量具有

独特的优势。本次模拟试验中泡沫的弹性行为基于应变能函数<sup>[26]</sup>如式(4)所示:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \right] \quad (4)$$

式中, $N$ 为材料参数, $\mu_i$ 、 $\alpha_i$ 和 $\beta_i$ 是与温度相关的材料参数,均为无量纲参数。 $\mu_i$ 和 $\alpha_i$ 控制离散型行为, $\mu_i$ 和 $\beta_i$ 控制体积性行为。模型中参数取值见表3。

表3 泡沫模型参数

Table 3 Parameters of the foam model

$\mu_1$	$\alpha_1$	$\mu_2$	$\alpha_2$	$\mu_3$	$\alpha_3$	$\mu_4$	$\alpha_4$	$\mu_5$	$\alpha_5$
-0.65	3.17	0.43	4.89	0.30	4.94	0.12	1.20	0.00	-3.36

Note:  $\mu_i$  and  $\alpha_i$  are temperature-related parameters.

### 1.3 模拟工况

模型中测点位于钢板迎爆侧表面距钢板底部300 mm高的轴线位置,爆点与测点距离为300 mm,爆点与水面的距离为300 mm,重力加速度为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,模拟试验工况见表4。通过对比工况1~3的冲击波压力时程曲线与Cole理论经验公式<sup>[27]</sup>衰减曲线来验证数值模拟的有效性。工况4~11分别在模型箱内壁敷设泡沫材料和橡胶材料作为吸能边界材料,以模拟不同材料对边界效应的抑制情况。同时考虑到材料厚度对吸波耗能的影响,每种边界材料分别设置了5、10、15 mm和20 mm四种厚度。

表4 数值模拟工况

Table 4 Numerical simulation conditions

No.	mass/g	boundary material	thickness/mm
1	1.0	none	-
2	1.6	none	-
3	3.0	none	-
4	1.0	foam	5
5	1.0	foam	10
6	1.0	foam	15
7	1.0	foam	20
8	1.0	rubber	5
9	1.0	rubber	10
10	1.0	rubber	15
11	1.0	rubber	20
12	1.0	non-reflection	-

### 1.4 网格敏感性分析

通过数值模拟探究水下爆炸冲击波传播规律时,欧拉网格尺寸对计算结果的精确度有较大影响<sup>[28]</sup>。模型采用较小的网格尺寸可以提高计算结果的精度,

但随着网格单元数量的增加,计算时长随之增加,计算效率会降低。因此,为兼顾计算效率和计算精度,模型需要确定出合适的欧拉网格尺寸。

本计算设置 1g TNT 炸药的药包半径为 8.5 mm, 拉格朗日网格尺寸采用固定值, 钢板结构网格尺寸为 4 mm, 模型箱网格尺寸为 30 mm。欧拉域分别采用 1、2、4、6、8 mm 和 10 mm 网格尺寸进行对比分析, 分析步设置为 500, 数值计算结果见表 5 和图 2。

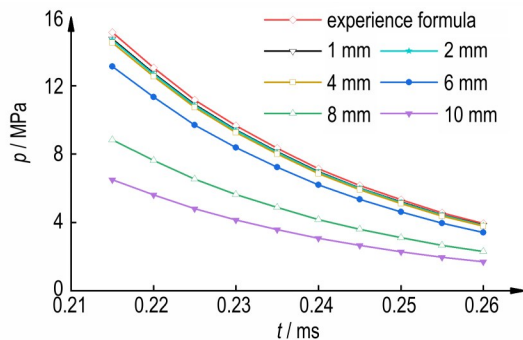


图 2 不同网格尺寸下冲击波压力时程对比曲线

Fig.2 Comparison of shock wave histories for different mesh sizes

表 5 不同网格尺寸结果数据误差表

Table 5 Results data errors for different mesh sizes

size/mm	number of meshes	peak pressure /MPa	error /%
1	$2.6 \times 10^8$	14.75	2.5
2	$1.2 \times 10^7$	14.71	2.6
4	$4.0 \times 10^6$	14.55	3.6
6	$1.4 \times 10^6$	13.13	13.0
8	$5.2 \times 10^5$	8.90	41.0
10	$2.7 \times 10^5$	6.62	56.2
empirical formula	-	15.10	-

由表 5 可知, 1、2、4、6、8 mm 和 10 mm 网格尺寸对应的测点压力峰值分别为 14.75、14.71、14.55、13.13、8.90 MPa 和 6.62 MPa, 与 Cole 理论经验公式结果分别相差 2.5%、2.6%、3.6%、13.0%、41.0% 和 56.2%。图 2 给出了不同网格尺寸下冲击波时程曲线与 Cole 理论经验公式曲线的对比, 可以看出, 随着网格密度的增加, 冲击波时程曲线愈加接近 Cole 理论经验公式理想曲线, 当网格尺寸设置为 2 mm 时, 计算值与理论值的误差小于 3%, 计算精度已满足工程要求。虽然 1 mm 网格尺寸试验结果更精准, 但计算耗时较长, 时间成本较高。因此, 本模型欧拉网格尺寸设置为 2 mm。Cole 理论经验公式如下式(5)~

(7) 所示:

$$p_0 = K_1 \times \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^\alpha \quad (5)$$

$$\theta = K_2 W^{1/3} \times \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^\beta \quad (6)$$

$$p = p_0 e^{(-t/\theta)} \quad (7)$$

式中,  $p_0$  为测点处的压力峰值, MPa;  $R$  为炸药与测点的距离, m;  $W$  为炸药的实际当量, kg;  $\theta$  为冲击波衰减系数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $K_1$  和  $K_2$  为炸药相关参数, 参数取值与炸药类型有关。本研究采用 TNT 炸药,  $K_1 = 52.40$  MPa,  $K_2 = 0.084 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\alpha = 1.13$ ,  $\beta = -0.23$ 。

### 1.5 模型可靠性验证

由于数值模拟计算基于理想化的模型试验条件, 计算结果往往与实际模型试验结果存在一定的偏差。为验证数值模拟结果的可靠性, 本研究将数值模拟计算结果与试验结果<sup>[12]</sup>和 Cole 理论经验公式结果进行比较, 通过水下爆炸冲击波波峰压力数值的近似性和压力时程曲线趋势的一致性来验证数值模拟结果的有效性和准确性。对于工况 No.1~3 计算得到的冲击波波峰压力模拟值、试验值和经验值如表 6 所示, 测点压力时程曲线趋势如图 3a~3c 所示。

由表 6 可知, 数值模拟计算中 3 种当量炸药水下爆炸压力峰值与 Cole 理论经验公式大小相当, 压力波波峰模拟值与经验值大小偏差分别为 2.6%、3.7% 和 4.0%, 模拟精度已满足试验验证要求, 同时也证实了相同网格尺寸对不同当量炸药的敏感性相差不大。模型试验 1.6 g 当量炸药所产生的波波峰压力为 19.28 MPa, 其试验值与数值模拟值结果偏差 7.4%, 误差在工程允许范围之内。图 3a~3c 分别为 3 种当量炸药时的冲击波压力时程曲线, 由图 3a~3c 可知, 数值模拟、模型试验和经验公式三者压力时程曲线上升、下降趋势及峰值基本一致。总的来说, 数值模拟符合实际水下爆炸实际情况, 验证了数值模拟结果的有效性和准确性。

表 6 数值模拟与经验公式压力波波峰偏差表

Table 6 Errors of peak pressure between numerical simulation and empirical formula

mass / g	$p_s$ / MPa	$p_e$ / MPa	$p_t$ / MPa	error / %
1.0	14.71	15.10	-	2.6
2.0	17.86	18.55	19.28	3.7
3.0	21.98	22.90	-	4.0

Note:  $p_s$  is simulated value,  $p_e$  is empirical value,  $p_t$  is test value, error is the deviation of the simulated and empirical values.

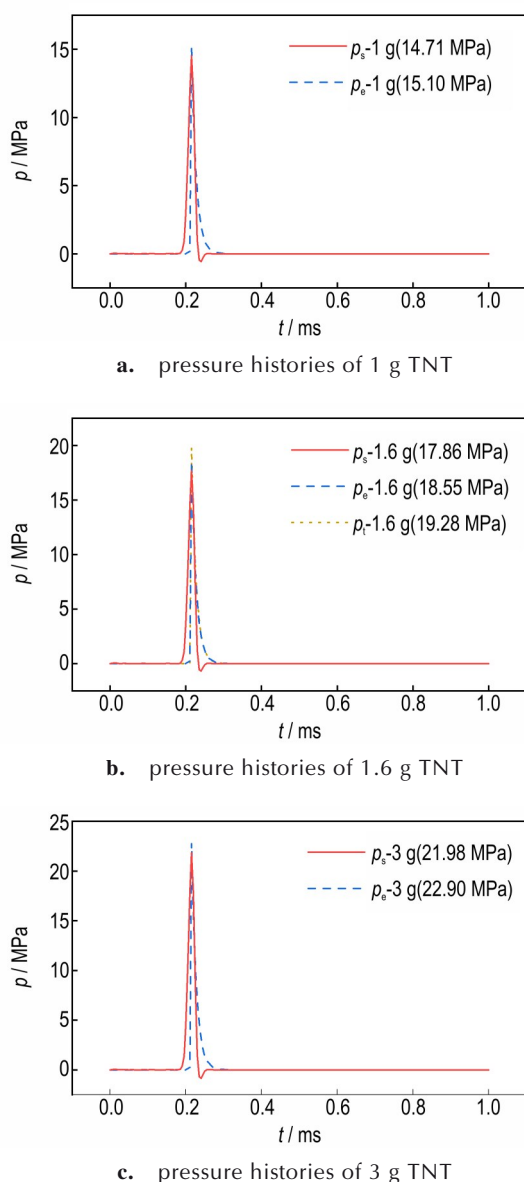


图3 数值模拟与经验公式压力时程曲线图

Fig.3 Pressure histories of numerical simulation and empirical formula

## 2 水下爆炸试验的模拟研究

### 2.1 试验部分

文献[12]基于中国水利水电科学研究院的LXJ-4-450大型土工离心机进行水下爆炸模型试验,以钢板挡水结构为研究对象,采用球形黑索金炸药(RDX)作为爆源进行试验。在爆距和水深均为300 mm的条件下,通过对重量约为1.6 g TNT炸药进行离心水下爆炸试验,在与爆源同高度、钢板等距离的位置布置压力传感器,通过输出压力时程曲线发现冲击波在

箱壁产生反射波也会作用于传感器,大小约为1 MPa左右。而此反射波压力将在一定程度上对试验数据采集的精度产生影响,对试验结果造成偏差。

本研究为消除反射冲击波对试验的影响,基于耦合欧拉-拉格朗日方法对水下爆炸离心模型试验进行数值模拟,对已有试验进行复现并验证其可靠性,并在离心机模型箱底面和侧面分别敷设5, 10, 15 mm和20 mm橡胶和泡沫防护材料进行消波处理,通过动态响应参数和频谱曲线定量和定性分析橡胶和泡沫材料在离心水下爆炸试验中的吸波耗能效果和机理。

### 2.2 模拟研究

#### 2.2.1 压力模拟分析

为探究橡胶和泡沫两种材料作为离心机模型箱边界材料的吸波耗能效果,通过比较水下爆炸在箱壁反射产生的冲击波压力第二次波峰数值大小,计算出不同工况下防护材料的吸能效率,探究橡胶和泡沫防护材料水下爆炸吸波耗能的机理及不同厚度对其吸能效率的影响,吸能效率公式如式(8)所示:

$$\text{吸能效率} = \frac{p_a - p_b}{p_a} \times 100\% \quad (8)$$

式中,  $p_a$  为无边界材料时冲击波第二次波峰峰压, MPa;  $p_b$  为设置边界材料时二次波峰峰压, MPa。

#### 2.2.2 冲量模拟分析

为评估水下爆炸冲击波荷载边界效应产生的反射波对钢板结构所增加的毁伤程度,引入以冲量为准则的威力参数类别<sup>[29]</sup>。以无边界防护材料(工况1)为对照试验,分别对工况1和4~11测点压力时程进行时间积分得到冲量参数,通过冲量定量分析来体现边界材料对冲击动能的削弱效果。由图4a~4f可知,压力冲击波荷载在炸药轰爆瞬间会直接作用钢板,因此首次压力波峰数值大小基本相同,对钢板结构造成的毁伤也基本一致。而在设置不同种类和厚度边界防护材料时,其冲击波作用于模型箱壁产生的反射波达到钢板表面形成的压力二次波峰大小有所不同。因此研究将选取各工况下测点压力时程二次波峰时段(0.25~0.34 ms)压力,对其压力进行时间积分得到冲量参数,进而分析不同材料及厚度对水下结构的防护效果。冲量积分公式如下式(9)所示:

$$I = \int p(t) dt \quad (9)$$

式中,  $I$  为冲量, Pa·s;  $p$  为测点处冲击波压力, MPa;  $t$  为冲击波作用的时间, ms。

### 2.2.3 位移模拟分析

爆炸荷载作用下,结构因吸收较多能量出现局部挠曲,产生的塑性变形通常作为结构毁伤程度的评判指标<sup>[30]</sup>。离心机试验中结构塑性变形主要受炸药药量、爆距和钢板支撑条件等多种主观因素的影响,而箱壁因边界效应产生的反射波也会增加变形幅值,因此有悖于理想试验状况,影响试验数据采集精度。为了降低边界效应产生的反射波对水下爆炸离心机试验的影响,本研究在箱壁敷设吸波耗能边界材料进行数值模拟计算,并另设一组无反射边界(冲击波从边界射出)为完全理想状态做对比,通过测点处的最大位移和残余变形对不同边界材料的防护效果进行分析。

### 2.2.4 频谱分析模拟分析

水下爆炸产生的冲击波荷载主要以声波形式输出,为探究橡胶和泡沫边界材料吸波耗能机理,了解防护材料对于水下爆炸冲击波不同频率波段的吸收效果,本研究提取各种工况下测点位移和加速度时程曲线。通过傅里叶变换将位移和加速度时域曲线变为频域曲线,基于频域曲线了解钢板结构在各频率时的幅值大小,观察敷设橡胶和泡沫材料时频域曲线下测点幅值的衰弱情况,通过加速度和位移频域曲线幅值体现出防护材料在不同频率下的吸波效果。当结构受外界以固有频率激励时,结构振动将会放大,固有频率模态阶数越低,结构越容易产生共振且能量占比越大,因此分析结构低阶模态是对结构受外部荷载作用时强度分析的重要内容。本研究利用 abaqus 数值模拟软件对钢板结构进行模态分析,得到前 6 阶模态固有频率和振型,并将位移时程曲线通过傅里叶变换后的频谱曲线与钢板结构前 6 阶模态固有频率相对应,得到不同边界防护材料下钢板固有频率时的幅值大小,通过幅值削弱值比较边界材料的防护效果。

## 2.3 结果与分析

### 2.3.1 压力

研究模拟了不同工况产生的压力时程曲线,对比如图 4 所示。由图 4a~4d 可知:设置 5 mm 边界材料厚度时,两种材料对吸收边界效应产生的二次冲击波均有一定的吸收作用,其中泡沫材料的吸能效率达 25.5%,橡胶材料的吸能效率为 57.4%;当边界材料厚度设置为 10 mm 时,泡沫和橡胶材料的吸能效率分别提升至 51.1% 和 67.0%;而当边界材料厚度达到 15 mm 时,泡沫材料的吸能效率提升至 85.1%,而橡胶材料吸能效率提升至 76.6%,此时泡沫较橡胶材料吸波效果更为突出;然而厚度继续提升至 20 mm 时,

泡沫和橡胶材料的吸能效率均提升较小,为 88.3% 和 79.8%。从图 4e~4f 可以看出,泡沫材料吸波效果随着厚度的增加更为显著,而橡胶材料吸波效果整体提升较弱。整体来看,在厚度 < 10 mm 时橡胶材料作为边界防护材料的吸能效率较泡沫材料更高,当防护材料厚度 > 10 mm 时,泡沫材料吸能效率优于橡胶材料,且泡沫材料吸能效率随着厚度提升更为明显。然而防护材料厚度至 20 mm 时,两种防护材料的吸能效率提升不明显,产生的原因为:① 15 mm 防护材料厚度能够吸收爆炸冲击波荷载产生的大部分能量,厚度继续提升对能量吸收的贡献并不大;② 由于模型箱空间有限,宽度仅有 400 mm,如果敷设防护材料过厚,爆炸冲击波在防护材料上未被吸收而产生的反射波与钢板的距离会被缩小,反射波的影响幅度反而会增大。

### 2.3.2 冲量

研究中不同种类和厚度防护材料时测点处冲量积分结果如图 5 所示,由图 5 可知不设置边界防护材料时的测点冲量峰值为 28.4 Pa·s,在箱壁设置 5 mm 橡胶和泡沫防护材料时,测点冲量峰值有所下降,数值为 12.1 Pa·s 和 19.5 Pa·s;边界防护材料厚度提升至 10 mm 时,测点冲量峰值降为 8.9 Pa·s 和 11.3 Pa·s;当厚度设置为 15 mm 时,测点冲量峰值为 6.8 Pa·s 和 4.3 Pa·s,整体削弱 76.0% 和 84.8%;厚度继续提升至 20 mm 时,橡胶和泡沫材料的防护效果提升较小,冲量峰值仅减少了 0.27 Pa·s 和 0.23 Pa·s。综上所述,泡沫材料整体提升效果优于橡胶材料,在 5 mm 和 10 mm 厚度边界防护材料条件下,橡胶材料较泡沫材料对反射波的吸收效果更佳。当厚度到达 15 mm,泡沫防护材料削弱爆炸冲击波对结构毁伤的效果更好,有效地降低了反射冲击波荷载对结构的影响,达到对水下结构的保护作用。而当厚度为 20 mm 时,两种防护材料基于厚度提升对水下结构的防护效果增强并不明显。

### 2.3.3 位移量

观察控制测点在不同工况下的位移趋势如图 6 所示,3 种工况下典型时刻钢板位移云图如图 7 所示,控制测点位移特征值量见表 7。通过图 6 可知,控制测点位移在 0.25 ms 之前持续上升至最大,受首次冲击波荷载作用后,出现 0.05 ms 的减小恢复趋势,减少一定量后受反射波影响出现二次增加。无反射边界工况下测点位移量曲线在受首次冲击波荷载后保持稳定下降趋势,符合理想状态下无反射波不会对结构产生影响的情况。由于反射波能量有限,整体位移量二次提升不大,幅值约为 0.5 mm 左右,持续上升 0.5 ms 后残余

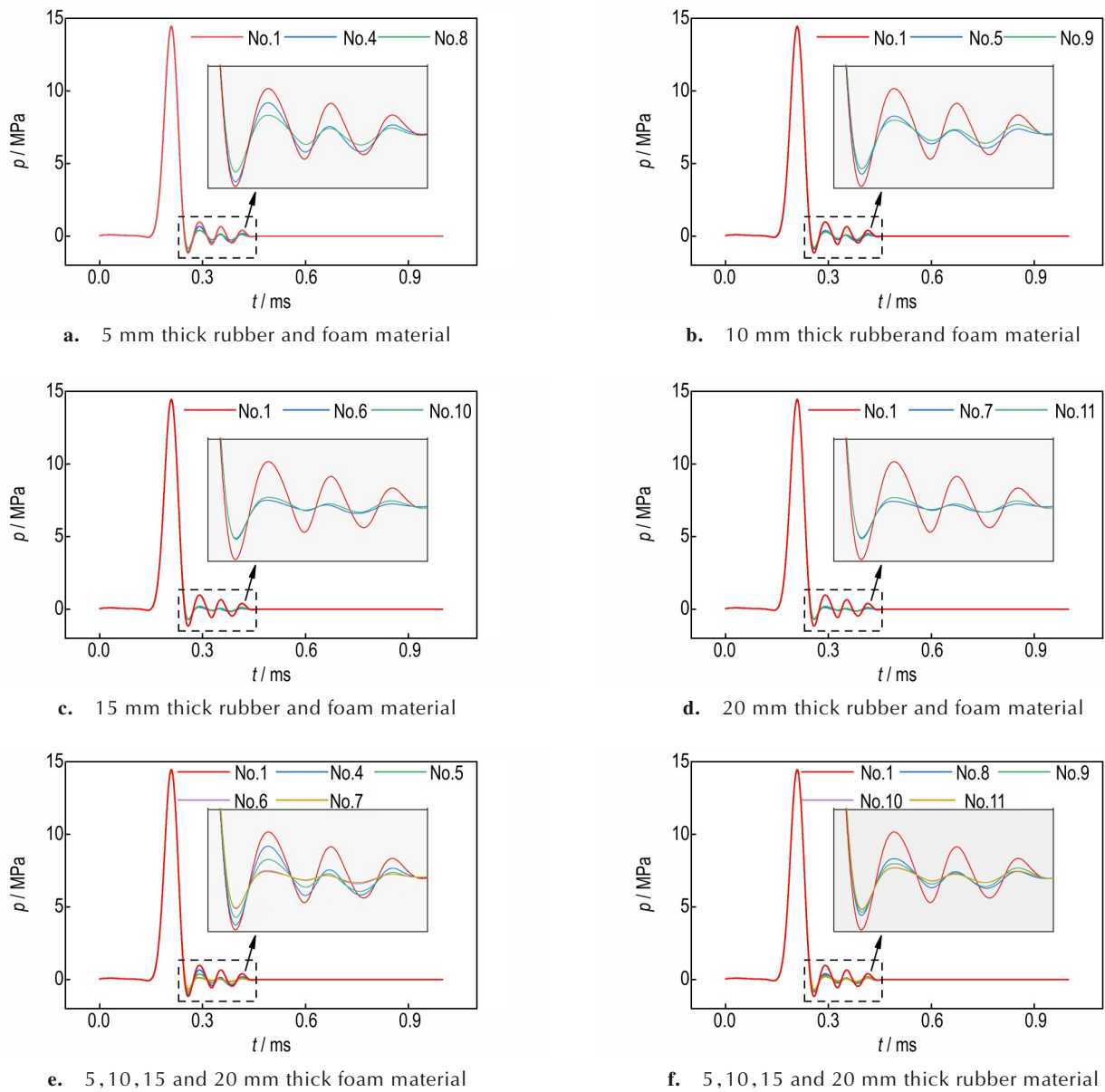


图4 压力时程曲线对比图

Fig.4 Comparison of pressure histories

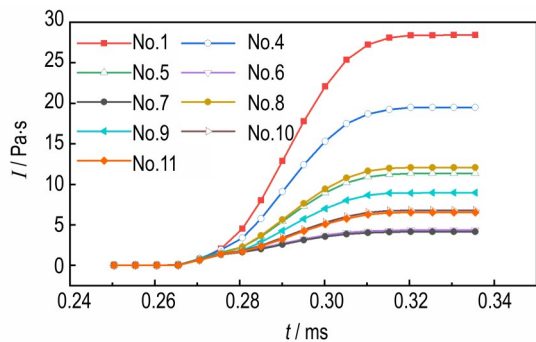


图5 不同吸能边界测点冲量积分图

Fig.5 Impulse integration diagram of gauges for different energy absorption boundaries

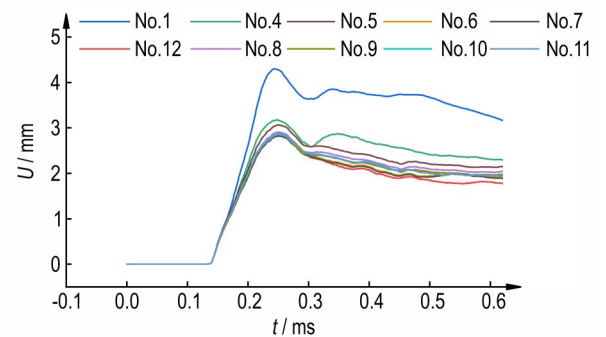


图6 控制测点位移曲线图

Fig.6 Displacement curves of control gauges

变形量保持慢速下降至平缓。由表7可知,无边界材料时,控制点最大位移可达到4.33 mm,约为理想状态的1.5倍。而布置边界材料可有效地减小最大位移量,在20 mm橡胶和泡沫边界条件下最大位移为2.85 mm左右,与理想状态相差无几。在5 mm泡沫材料的防护下,结构控制点残余变形量由3.17 mm降至2.30 mm,残余变形减小率为27.5%,厚度进而提升至15 mm时变形量为1.93 mm,厚度为20 mm时变形量

为1.90 mm。而橡胶材料在不同厚度残余变形分别为2.06 mm(5 mm)、1.99 mm(10 mm)、1.96 mm(15 mm)和1.95 mm(20 mm),与无反射边界时残余变形量1.80 mm接近,可见敷设边界材料效果明显。由图7a~7c可知,钢板产生的挠曲变形在钢板中部较为严重,高度与爆点相同。当 $t=0.14$  ms时,爆炸冲击波开始作用于钢板结构,钢板位移由测点处向四周发展,测点处变形量最大;当 $t=0.56$  ms时,无边界材料工况

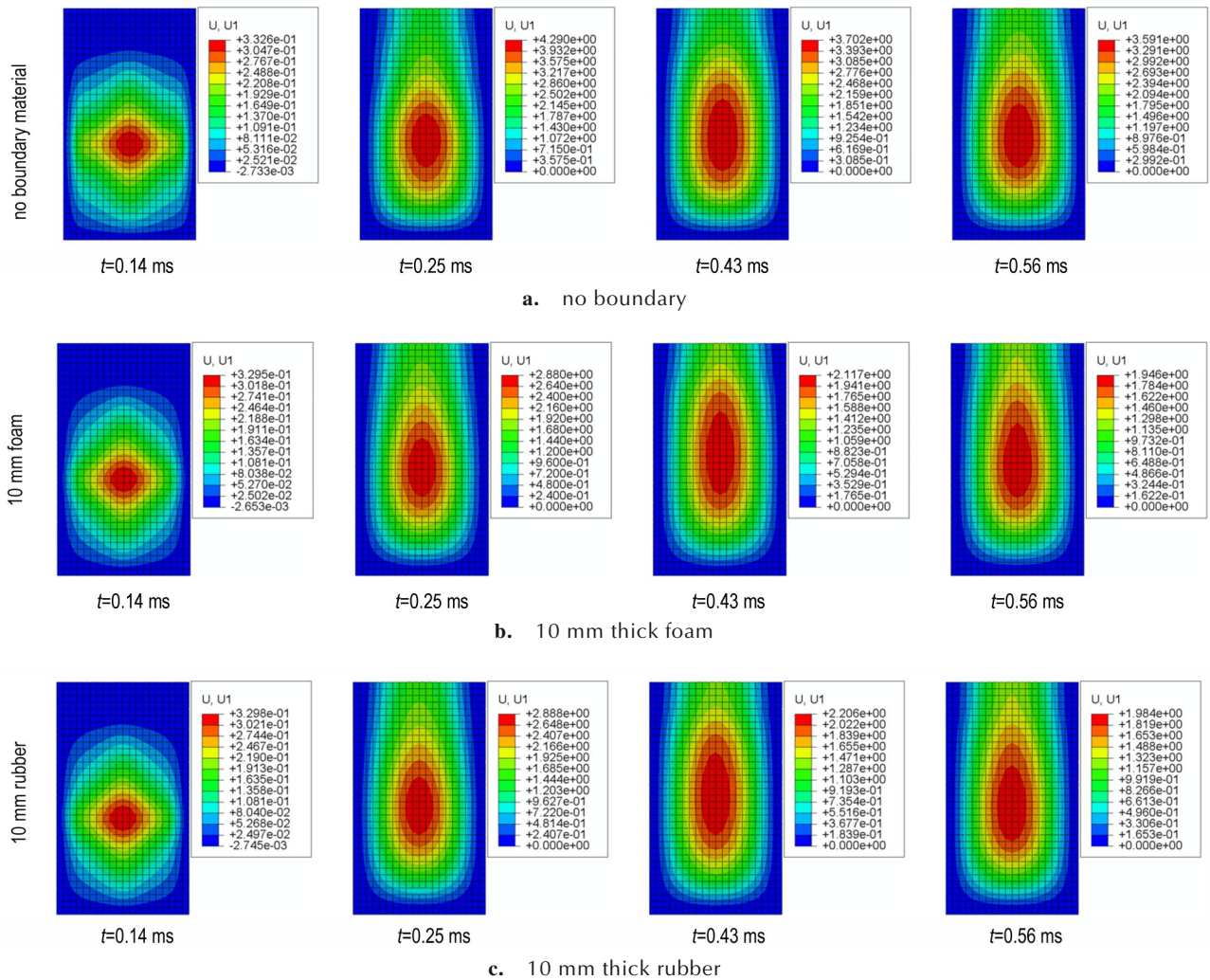


图7 典型时刻下钢板法向位移量云图

Fig.7 Contour plots of the normal displacement of steel plate at typical moments

表7 测点位移特征值表

Table 7 Characteristic values of the gauge displacement

condition	non-reflection	no boundary material	foam				rubber			
			5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
$S_{max}/mm$	2.80	4.33	3.20	3.05	2.85	2.82	2.95	2.92	2.87	2.85
$S_{rd}/mm$	1.80	3.17	2.30	2.16	1.93	1.90	2.06	1.99	1.96	1.95

Note:  $S_{max}$  is maximum deformation of gauges,  $S_{rd}$  is residual deformation of gauges.



下的钢板测点处法向位移达到 3.59 mm,而敷设 10 mm 泡沫和橡胶材料工况下的测点位移大小为 1.96 mm 和 1.98 mm,可见边界材料的防护效果较为明显。由于钢板侧边和底边与箱壁固支,通过典型时刻下钢板位移云图可以看出,挠曲变形范围向钢板上部移动,符合试验实际情况。

综上所述,边界材料可有效地降低箱壁边界效应产生的能量,降低反射波的干扰,一定程度上还原结构动力响应真实性,从而能够在实际工程中提高试验数据采集精度,为完善水下离心爆炸试验提供依据。

综合测点压力、冲量和变形量结构响应可知,在当前试验条件下,边界防护材料小于 10 mm 时,橡胶材料对爆炸冲击波的吸收效率优于泡沫材料,反之则泡沫材料效果更好。基于橡胶和泡沫材料自身物理特性,对两者吸波机理进行分析:由于橡胶材料的声阻抗与水体声阻抗更接近,声波在由水介质传播到橡胶材料介质中更容易被吸收而不是反射,因此即使厚度较小也会有良好的吸波效果,从而在小厚度时对冲击波能量的吸收高于泡沫材料,边界效应的抑制效果更加明显。随着边界材料厚度的增加,泡沫材料较强的可压缩性在吸收爆炸冲击波能量时有所体现,当冲击波

荷载作用于边界防护材料时,泡沫中气孔通过滞留和压缩,致使外界冲击波能转化为泡沫材料的变形势能和材料内能,从而达到较好的吸能消波效果。而橡胶材料随着厚度的增加,材料结构特性对吸波效率提升较小,整体冲击波吸收效率变化较小。因此,橡胶材料在低厚度时防护效果更好,而泡沫材料吸能效率随着厚度提升更为明显。

### 2.3.4 频谱分析

加速度时程傅里叶变换曲线如图 8 所示,钢板固有频率和不同工况下测点频谱曲线在钢板固有频率下的幅值见表 8。由表 8 可知,敷设泡沫材料和橡胶材料均可有效地减小钢板结构在固有频率时的位移幅值,当外界激励爆炸冲击波荷载频率为钢板结构 1 阶模态固有频率时,敷设 5 mm 泡沫材料和橡胶材料幅值可将位移幅值由 12.02 减小至 8.51 和 7.83,分别减少 29.2% 和 34.9%,敷设 10 mm 时幅值减少 31.4% 和 36.8%。当在 6 阶模态固有频率时,5 mm 泡沫材料和橡胶材料的幅值由 2.55 减少至 1.85 和 1.63,分别减少为 27.4% 和 36.1%,敷设 10 mm 时幅值减少 32.5% 和 38.4%,说明敷设两种边界材料在各模态阶数下防护效果基本一致,且随厚度提升效果增加并不明显。通

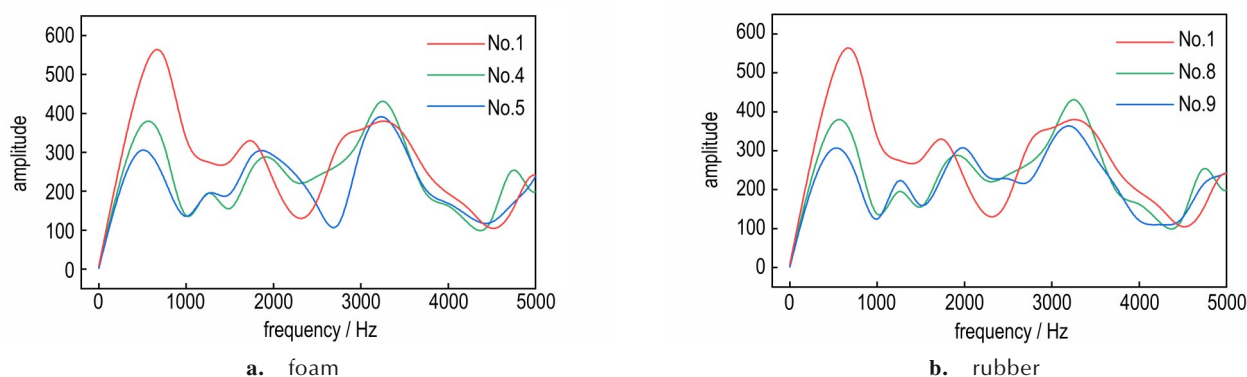


图 8 加速度时程傅里叶变换曲线

Fig.8 Fourier transform curves of acceleration histories

表 8 模态分析表

Table 8 Modal analysis

modal order	inherent frequency /Hz	amplitude				
		no boundary material	5 mm foam	5 mm rubber	10 mm foam	10 mm rubber
1	42.47	12.02	8.51	7.83	8.24	7.59
2	89.86	5.86	4.24	3.84	4.05	3.73
3	112.96	4.50	3.24	2.84	3.03	2.76
4	146.82	3.62	2.63	2.43	2.31	2.24
5	184.59	2.92	2.02	1.87	1.97	1.83
6	216.43	2.55	1.85	1.63	1.72	1.57

过图8频谱曲线可知,泡沫材料和橡胶材料滤波效果大致相同,在0~1700 Hz范围内,5 mm厚度下两种材料加速度幅值减小均约30%左右,10 mm厚度下加速度幅值均约减小40%左右,而在1700~5000 Hz范围内幅值基本没有被削弱。因此,泡沫材料和橡胶材料对低频信号有一定的过滤效果,而对高频信号滤波效果不明显。

综上所述,通过动态响应分析可知:橡胶和泡沫材料对水下爆炸离心试验边界效应均有一定程度地削弱作用,当防护材料厚度小于10 mm时,橡胶材料对冲击波的吸收作用、试验对象的防护效果和试验数据的精度提升优于泡沫材料,反之厚度大于10 mm时泡沫材料效果更好。整体看来,泡沫材料的吸波耗能效果随着厚度的提升较橡胶材料更为明显,但厚度提升至20 mm后,两种材料的防护效果均很难大为提升。通过频谱分析可知:橡胶和泡沫材料对水下爆炸冲击波的滤波效果基本一致,对低频信号段幅值削弱30%左右,对高频信号段几乎没有影响。该试验结果仅能体现近场水下爆炸离心试验条件下的实际情况,反映小当量炸药轰爆时模型箱壁敷设防护材料对冲击波的吸收效果,而对中远场及大当量炸药水下爆炸时,该厚度范围内的防护材料吸收效果未经试验验证,需要进一步研究考证。

### 3 结论

基于CEL数值模拟方法,建立了水-结构-炸药-边界全流固耦合模型,模拟出土工离心机水下爆炸冲击传播规律和结构动态响应。通过敷设不同边界材料对边界效应的影响进行数值模拟,对结构进行可靠性验证、动态响应分析和频谱分析,得到以下结论:

(1)CEL方法兼顾数值计算的精确性和高效性,在2 mm欧拉网格尺寸条件下,不同当量炸药冲击波压力时程曲线与经验公式曲线趋势一致,峰值误差在工程误差允许范围内,由此证明了数值模拟具有可靠性。

(2)通过压力、冲量和变形等动态响应参数分析橡胶和泡沫材料不同厚度下的冲击波荷载特性,发现敷设两种材料均可有效减少边界效应的影响。在当前试验条件下,厚度小于10 mm时橡胶材料冲击波吸收效果更好,当厚度大于10 mm时,泡沫材料效果更佳。泡沫材料吸波耗能效果随着厚度的提升更为明显,但厚度达到20 mm后,橡胶和泡沫两种材料吸波效果均提升微小。

(3)频谱分析得出橡胶材料和泡沫材料对水下冲击波滤波效果基本一致,对钢板前6阶模态固有频率时的幅值均减小30%左右。敷设边界防护材料对吸收0~1700 Hz低频信号波具有一定程度地作用,幅值削弱程度约为30%,而对大于1700 Hz高频信号段幅值影响不大。

#### 参考文献:

- [1] 李麒,王高辉,卢文波,等. 混凝土重力坝水下爆炸毁伤快速识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 46-53.  
LI Qi, WANG Gao-hui, LU Wen-bo, et al. A rapid identification method for underwater explosion damage of a concrete gravity dam [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(24): 46-53.
- [2] 张爱锋,姚苗苗,甄春博. 改进V型夹层板近场水下爆炸抗冲击性能研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(7): 13-17.  
ZHANG Ai-feng, YAO Miao-miao, ZHEN Chun-bo. Research on impact resistance of improved V-type sandwich panels in near-field underwater explosion [J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(7): 13-17.
- [3] LI L Q, AIRAUDO F N, LOHNER R. Study of underwater explosion near rigid cylinder column with numerical method [J]. *Ocean Engineering*, 270 (2023) 113294.
- [4] ZHANG A M, LI S M, CUI P. A unified theory for bubble dynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 2023(35): 1-28.
- [5] WANG Q S, LIU S C, LOU H. Calibration of numerical simulation methods for underwater explosion with centrifugal tests [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019(8): 1-19.
- [6] 赵玉红,赵文达,闫秋实. 水下爆炸荷载作用下结构动力响应及损伤破坏[J]. 工程爆破, 2022, 28(3): 1-10.  
ZHAO Yu-hong, ZHAO Wen-da, YAN Qiu-shi. Dynamic response and damage destruction of structures under underwater explosion loads [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(03): 1-10.
- [7] HUANG X, HU J, ZHANG X, et al. Effect of bubble pulse on concrete gravity dam subjected to underwater explosion: Centrifuge test and numerical simulation [J]. *Ocean Engineering*, 2022(243-Jan.1).
- [8] 马上,陈叶青,王振清,等. 水下爆炸离心机试验中爆炸荷载的缩比关系研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 20-29.  
MA Shang, CHEN Ye-qing, WANG Zhen-qing, et al. Study on load scaling relationship in centrifuge test of underwater explosion [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(10): 20-29.
- [9] 王思,胡晶,张雪东,等. 不同水深水下爆炸数值及离心试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 78-84.  
WANG Si, HU Jing, ZHANG Xue-dong, et al. Numerical analysis and centrifugal test of underwater explosion effect at different water depths [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 78-84.
- [10] ZHANG H, YIN Z G, CHEN M. Experiment on bubble characteristics of turbulent bubbly jets in pipe crossflow [J]. *Ocean Engineering*, 271 (2023) 113782.
- [11] 宋歌,龙源,钟明寿,等. 离心机和密闭加压容器中水下爆炸相似

- 关系[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 95-103.
- SONG Ge, LONG Yuan, ZHONG Mingshou, et al. Similarity relations of underwater explosion in centrifuge and pressurizing vessels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 95-103.
- [12] 胡晶,陈祖煜,魏迎奇,等. 挡水结构水下爆炸作用的离心模型试验[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1073-1081.
- HU Jing, CHEN Zu-yu, WEI Ying-qi, et al. Centrifuge modeling on dynamic response of water retaining structure by underwater explosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1073-1081.
- [13] SONG G, CHEN Z Y, LONG Y, et al. Experimental and numerical investigation of the centrifugal model for underwater explosion shock wave and bubble pulsation[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 142: 523-531.
- [14] 王体强,王永志,张雪东,等. 超重力振动台柔性叠层箱剪切效能评价方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 719-728.
- WANG Ti-qiang, WANG Yong-zhi, ZHANG Xue-dong, et al. Shear performance evaluation of a flexible laminar container with hypergravity shaking table tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 719-728.
- [15] LEE C J, WEI Y C, KUO Y C. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 34: 37-51.
- [16] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, SCARPA F, et al. Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 69: 46-56.
- [17] LIU H B, NEZILI S. Centrifuge Centrifuge modeling of underground tunnel in saturated soil subjected to internal blast loading[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(2): 06015001.
- [18] 马立秋,张建民,陈祖煜. 爆炸离心模型试验边界效应研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2013, 32(1): 49-54.
- MA Li-qiu, ZHANG Jian-min, CHEN Zu-yu. Boundary effects in blasting centrifuge modeling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 49-54.
- [19] 张晓庆,张庆辉,黄潇,等. 基于CEL方法的钢制平板近距水下爆炸数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(11): 8-11.
- ZHANG Xiao-qing, ZHANG Qing-hui, HUANG Xiao, et al. Numerical study of the underwater explosion near a steel plate using the CEL method[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(11): 8-11.
- [20] 姜忠涛,李焯,庞学佳,等. 近场水下爆炸气泡射流载荷冲击船体外板的动响应分析[J]. 振动与冲击. 2018, 37(9): 214-220.
- JIANG Zhong-tao, LI Ye, PANG Xue-jia, et al. Dynamic response of hull plates subjected to near field underwater explosion bubble jet load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9): 214-220.
- [21] 孙远翔,田俊宏,张之凡,等. 含铝炸药近场水下爆炸冲击波实验及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 171-178.
- SUN Yuan-xiang, TIAN Jun-hong, ZHANG Zhi-fan, et al. Experiment and numerical simulation study on the near-field underwater explosion of aluminized explosive[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 171-178.
- [22] 白峰涛,邹亚楠,付用全,等. 基于随机分布抛石模型的重力式沉箱码头水下爆炸毁伤数值模拟分析[J/OL]. 应用力学学报: 2023: 1-15.
- BAI Feng-tao, ZOU Yan-an, FU Yong-quan, et al. Numerical simulation analysis of underwater explosion damage of gravity caisson wharf based on a random stone model[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023: 1-15.
- [23] HAI L, REN X D. Computational investigation on damage of reinforced concrete slab subjected to underwater explosion[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106671.
- [24] 颜天,赵秀英,宋昊,等. 水声吸声材料与吸声结构研究进展[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 1-12.
- YAN Tian, ZHAO Xiu-ying, SONG Hao, et al. Advances in underwater sound-absorbing materials and structures[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science)*, 2022, 49(4): 1-12.
- [25] 张琦,时剑文,索双富,等. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的橡胶材料有限元分析[J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(6): 468-471.
- ZHANG Qi, SHI Jian-wen, SUO Shuang-fu, et al. Finite element analysis of rubber materials based on Mooney-Rivlin models and Yeoh models[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2020, 43(6): 468-471.
- [26] 卢富德,任梦成,高德,等. 超弹塑性泡沫连续冲击动力学行为分析的新方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 196-200.
- LU Fu-de, REN Meng-cheng, GAO De, et al. A new method for analyzing dynamic behavior of hyper-elastoplastic foam under continuous impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 196-200.
- [27] HUANG X, HU J, ZHANG X, et al. Bending failure of a concrete gravity dam subjected to underwater explosion[J]. *Journal of Zhejiang University. A. Science*, 2020, 21(12): 976-991.
- [28] 张社荣,李宏璧,王高辉,等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 93-100.
- ZHANG She-rong, LI Hong-bi, WANG Gao-hui, et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(8): 93-100.
- [29] 毛致远,段超伟,宋浦,等. 基于有效冲量的水下爆炸冲击波对平板结构的毁伤准则[J]. 高压物理学报, 2022: 1-12.
- MAO Zhi-yuan, DUAN Chao-wei, SONG Pu, et al. Criterion of plate structure damage caused by underwater explosion shock wave based on effective impulse[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022: 1-12.
- [30] 王高辉,高政,卢文波,等. 考虑初始应力的混凝土重力坝水下爆炸毁伤特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(11): 133-140.
- WANG Gao-hui, GAO Lu, LU Wen-bo, et al. Damage characteristics of underwater explosion of concrete gravity dam considering initial stress[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(11): 133-140.

## Numerical Simulation on Shock Wave Propagation Characteristics in Centrifugal Tests of Underwater Explosion with Energy Absorbing Boundaries

LI Ming<sup>1</sup>, ZHANG Qi-ling<sup>1,2,3</sup>, LI Zhi<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Engineering Safety and Disaster Prevention, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Research Center on National Dam Safety Engineering Technology, Wuhan 430010, China; 3. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Limited by the size of model test chamber, the reflection wave generated by explosion load on the boundary of test chamber would inevitably affect the expected results in the centrifugal tests of underwater explosion. Therefore, reducing the boundary effect will substantially restore the actual test situation and improve the test accuracy. Numerical simulation on centrifuge model test of underwater explosion was conducted based on the Coupled-Eulerian-Lagrangian (CEL) method. Through comparing experimental results with theoretical results and analyzing mesh sizes of 1, 2, 4, 6, 8 and 10 mm, the reliability of the numerical model was verified. Based on that, the shock wave propagation characteristics in centrifuge tests of underwater explosion with boundary energy absorbing materials of rubber and foam (thicknesses of 5, 10, 15 and 20 mm) were compared, and the mechanism of wave absorption and energy dissipation was analyzed. The results show that the Euler mesh size of 2 mm could balance the calculation efficiency and accuracy of calculation results. Laying rubber or foam materials on the inner wall of the model chamber could effectively reduce the reflection effect of underwater explosion shock waves. The rubber material is more effective in shock wave absorption than the foam material for the condition of 5 mm thickness. However, with the increase of material thickness, the foam material has a better absorption effect than rubber. Both rubber and foam materials have a certain inhibitory effect on low-frequency signals of shock waves, but the inhibitory effect on high-frequency signals is weak.

**Key words:** underwater explosion; boundary effect; numerical simulation; wave absorption and energy dissipation; centrifugal model test

**CLC number:** TJ55;TV32+

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023125

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 52109146); Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund Project (No. CKSF2019394/GC)

(责编:姜梅)