



# 非理想炸药水下爆炸载荷传输特性对气背板结构响应的不确定度研究

柳 剑<sup>1</sup>, 于文泽<sup>2</sup>, 安丰江<sup>1</sup>, 吴 成<sup>1</sup>, 李 旭<sup>1</sup>, 代立辉<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 北京空间技术研制中心, 北京 100094)

**摘 要:** 为准确评估非理想炸药水下爆炸载荷传输过程中不确定度对舰船结构的毁伤效果的影响程度, 该文采用误差分析理论推导出非理想炸药水下爆炸载荷中峰值压力和时间衰减常数的不确定度对气背板结构初期响应的影响规律。结合理想炸药与非理想炸药水下爆炸试验数据, 研究表明: 非理想炸药水下爆炸冲击波峰值压力和时间衰减常数的不确定度明显高于理想炸药的载荷不确定度, 并且能够对 0.01 m 厚度的气背钢板结构初期响应产生 7%~9% 的相对不确定度, 在评估非理想炸药水下爆炸对舰船结构毁伤效果时值得注意。

**关键词:** 非理想炸药; 水下爆炸; 不确定度; 冲击波峰值压力; 时间衰减常数; 气背板

中图分类号: U661

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)10-0031-04

## Study on uncertainty of underwater explosion load transfer characteristics of non-ideal explosives to air-back plate structural response

LIU Jian<sup>1</sup>, YU Wenzhe<sup>2</sup>, AN Fengjiang<sup>1</sup>, WU Cheng<sup>1</sup>, LI Xu<sup>1</sup>, DAI Lihui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Manned Space Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to accurately assess the degree of influence of the uncertainty of the transmission of the underwater blast load of non-ideal explosives on the damage effect of the ship structure, the influence of uncertainty of peak pressure and time decay constant on the initial response of air-back plate structure under the underwater explosion load of non-ideal explosive is derived by using error analysis theory. Combining the underwater explosion test data of ideal explosives and non-ideal explosives, the results show that the uncertainty of the peak pressure and time decay constants of the underwater explosion shock wave of non-ideal explosives is significantly higher than these of the ideal explosives. The uncertainty of non-ideal explosive load can produce the relative uncertainty of 7%-9% of the initial response of air-back steel plate structure with a thickness of 0.01 m, which is worth noting when assessing the effects of underwater blasting of non-ideal explosives on the damage of ship structures.

收稿日期: 2018-04-27; 收到修改稿日期: 2018-05-28

作者简介: 柳 剑(1996-), 男, 辽宁葫芦岛市人, 硕士研究生, 专业方向为水下爆炸与防护。

通信作者: 安丰江(1979-), 男, 山东日照市人, 讲师, 博士, 研究方向为战斗部设计及水下爆炸与防护。

**Keywords:** non-ideal explosives; underwater explosion; uncertainty; peak shock pressure; time decay constants; air-back plate

## 0 引言

含铝炸药与理想炸药相比,在水下爆炸后冲击波作用时间长,衰减慢,可以使舰艇结构更容易产生塑性变形,毁伤效果好<sup>[1]</sup>。但是,经过大量的水下试验发现,含铝炸药冲击波峰值及时间衰减常数与爆炸相似率的符合程度较差<sup>[2]</sup>,表现出一定程度的离散性。这种特殊的能量传输特性会对结构响应产生一定程度的影响,使其具有不确定性。

徐更光等<sup>[3]</sup>通过对炸药水下爆炸冲击波参数传输相似分析,非理想含铝炸药冲击波能不满足距离的相似关系。王建灵等<sup>[3-4]</sup>研究了在水下爆炸测试试验中,由传感器自身的不确定度导致对冲击波能和气泡能的测量结果总和产生的相对不确定度大约为5%,并分析了传感器安装工艺、传感器灵敏度参数、传感器与试样之间距离测量等因素对测试结果的影响。张显丕等<sup>[5]</sup>对水下爆炸压力传感器技术进行了总结并提出优化。

目前国内外对于炸药水下爆炸载荷的不确定度还停留在测试仪器本身不确定度的评估,虽然认识到非理想炸药水下爆炸载荷随着对比距离的线性拟合度较差,但是对于舰船的毁伤与防护问题研究还处于空白阶段。

根据 G.I.Taylor<sup>[6]</sup>给出的流固耦合方程及 Young S.Shin<sup>[7]</sup>指导的 AD 报告<sup>[8-10]</sup>,得到 Taylor 平板理论的计算公式。本文利用误差分析理论,结合 Taylor 平板公式,进行了非理想炸药水下爆炸冲击波峰值压力 $p_m$ 和时间衰减常数 $\theta$ 的不确定度对于 Taylor 平板结构运动到达的最大速度 $v_m$ 及达到最大速度所用时间 $t_m$ 的不确定度理论分析,而且根据不同炸药、不同工况水下爆炸试验数据,得到了非理想炸药水下爆炸能量传输特性对 0.01 m 厚 Taylor 钢板结构响应的影响程度,分析了非理想炸药爆炸载荷呈现出较差线性程度的原因,可对舰船水下抗爆抗冲击防护提供一定的指导。

## 1 不确定度理论分析

### 1.1 Taylor 平板理论

Taylor 平板理论假设一单位面积质量为 $m$ 的无限平板受到平面冲击波的作用,炸药水下爆炸产生的入射冲击波压力时程 $p_i(t)$ 为

$$\begin{aligned} p_i(t) &= p_m e^{-t/\theta} \\ p_m &= 52.16 \left( \frac{W^{1/3}}{s} \right)^{1.13} \\ \theta &= 96.5 W^{1/3} \left( \frac{W^{1/3}}{s} \right)^{-0.22} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $p_m$ ——TNT 水中爆炸时冲击波峰值压力, MPa;

$W$ ——装药量, kg;

$s$ ——距离, m;

$\theta$ ——时间衰减常数,  $\mu\text{s}$ 。

由 Taylor 理论得到的平板最大速度为

$$\begin{aligned} v_m &= \frac{2p_m}{\rho_0 c_0} x_a^{1/(1-x_a)} \\ x_a &= \rho_0 c_0 \theta / m \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\rho_0$ ——水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$c_0$ ——水中波速, m/s;

$m$ ——单位平板面积上的质量,  $\text{kg}/\text{m}^2$ 。

而到达最大速度的时间为

$$t_{v_m} = \frac{\theta \ln x_a}{x_a - 1} \quad (3)$$

### 1.2 不确定传递规律分析

由式(2)和式(3)可知,影响 Taylor 板结构响应的两个因素主要是峰值超压 $p_m$ 和时间衰减常数 $\theta$ ,所以根据误差分析理论中不确定度的传递规律,得到由峰值超压 $p_m$ 和时间衰减常数 $\theta$ 的不确定度引起的 Taylor 平板运动最大速度的相对不确定度为

$$\frac{\sigma_{v_m}}{v_m} = \sqrt{\left( \frac{1}{p_m} \right)^2 \sigma_{p_m}^2 + \left( \frac{m}{(m - \rho_0 c_0 \theta)^2} + \frac{m \rho_0 c_0}{(m - \rho_0 c_0 \theta)^2} \ln \frac{\rho_0 c_0 \theta}{m} \right)^2 \sigma_{\theta}^2} \quad (4)$$

式中: $m$ ——平板的面密度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;

$\sigma_{v_m}$ ——Taylor 平板运动最大速度的不确定度, m/s;

$\sigma_{p_m}$ ——水中冲击波峰值压力的不确定度, MPa;

$\sigma_{\theta}$ ——时间衰减常数的不确定度,  $\mu\text{s}$ 。

同理得到 Taylor 平板运动达到最大速度时间的相对不确定度:

$$\frac{\sigma_{t_{v_m}}}{t_{v_m}} = \sqrt{\left( \frac{1}{\theta} + \frac{1}{\theta \ln \frac{\rho_0 c_0 \theta}{m}} - \frac{\rho_0 c_0}{\rho_0 c_0 \theta - m} \right)^2 \sigma_{\theta}^2} \quad (5)$$

其中,  $\sigma_{t_{m}}$  是 Taylor 平板达到最大速度时间的不确定度, s。

## 2 炸药水下爆炸试验数据分析

### 2.1 试验工况及结果

对于理想炸药 TNT 和非理想 RS211、RBUL, 在不同装药量条件下以及不同测试距离范围进行水下爆炸试验, 得到了冲击波峰值压力  $p_m$  和时间衰减常数  $\theta$  的试验数据。水下爆炸冲击波压力峰值  $p_m$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系如图 1~图 3 所示, 同时将对比时间常数  $\theta/W^{1/3}$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系如图 4~图 6 所示。

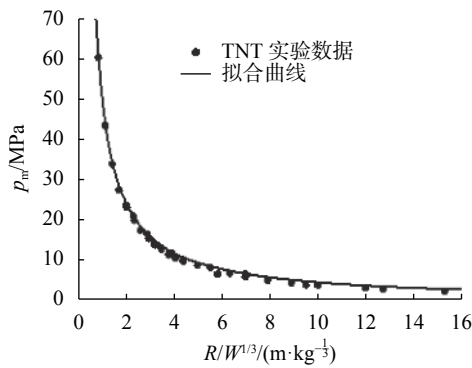


图 1 TNT 冲击波压力峰值  $p_m$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

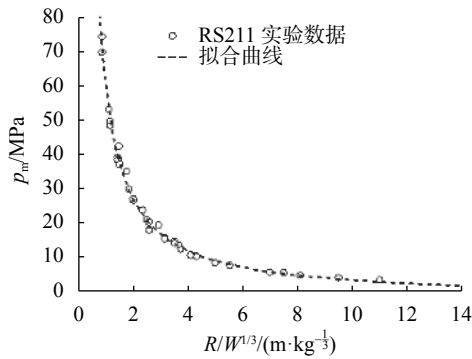


图 2 RS211 冲击波压力峰值  $p_m$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

### 2.2 试验结果分析

从压力峰值来看, 在整个测试距离范围内, TNT 的试验数据点与拟合曲线符合程度最好, 而 RS211 和 RBUL 存在数据点偏离的情况, 但 3 种炸药都能满足爆炸相似律关系。

对于含铝炸药, 当  $R/W^{1/3} \geq 3.5$  时 (相当于 1 kg 装药在 3.5 m 爆距处, 相当于 5 kg 装药在 5.7 m 爆距处), 数据点相似关系符合得较好; 当  $R/W^{1/3} <$

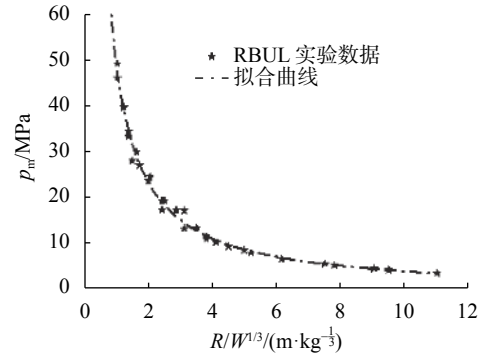


图 3 RBUL 冲击波压力峰值  $p_m$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

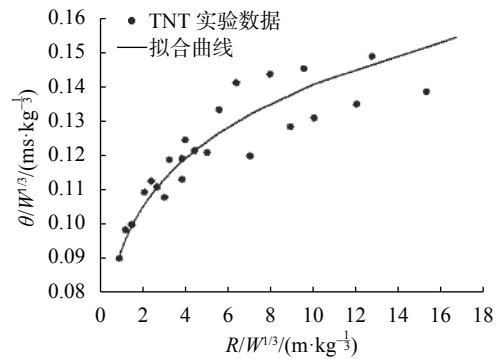


图 4 TNT 对比时间常数  $\theta/W^{1/3}$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

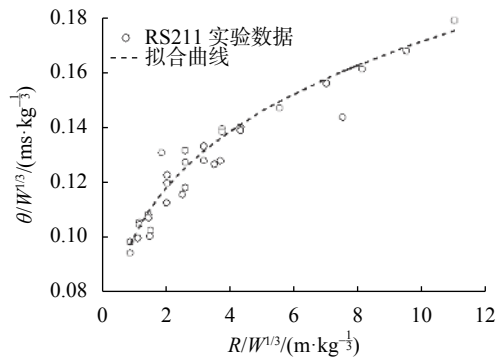


图 5 RS211 对比时间常数  $\theta/W^{1/3}$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

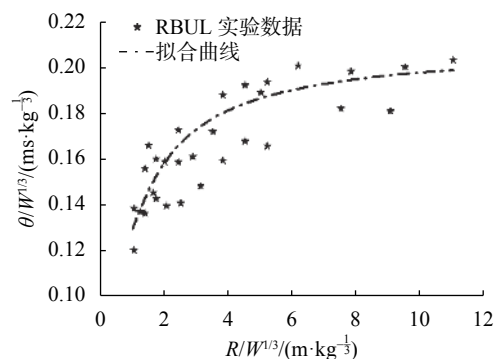


图 6 RBUL 对比时间常数  $\theta/W^{1/3}$  随对比距离  $R/W^{1/3}$  变化的关系曲线

3.5时,数据点产生离散。与TNT相比较,含铝炸药在较近爆距处和较远爆距处的这种区别,说明在距离爆炸源较远处,由于爆轰产物中铝粉的二次反应仍在持续,能量释放会继续影响到测点处的压力峰值;在较远处,测点处的压力峰值脱离了爆轰产物的影响,冲击波在水介质中的传播已属于自由衰减过程,满足相似条件<sup>[1]</sup>。

从时间常数来看,3种炸药的数据点都有一定程度的离散,但TNT的数据点基本上均匀分散于拟合曲线两侧,而含铝炸药特别是RBUL数据点的离散是不规则的。另外,在相同对比距离( $R/W^{1/3}$ )处,含铝炸药具有较高的时间常数值<sup>[2]</sup>。

对于非理想炸药的对比时间常数出现较大离散且离散不规则情况,除了对试验曲线中时间常数的人工判读带来一定的误差外,主要原因有:1)与炸药中铝粉的二次反应时间相关,铝粉的燃烧反应速率直接影响到时间常数;2)由于装药条件、试验环境等因素的影响,铝粉的二次反应远不如理想成分反应稳定,而表现出试验随机性,出现数据点的不规则偏离;3)对于不同质量的同一种含铝炸药来说,受尺寸效应等因素的影响,时间常数的变化并非呈线性增加或减少。因此,非理想炸药时间常数的相似性受到了较大的影响<sup>[3]</sup>。

### 3 水下爆炸载荷传输特性对气背板的结构响应影响程度分析

通过炸药的水下爆炸试验可知,不论是理想炸药还是非理想炸药,水下爆炸冲击波峰值的线性相关性要好于时间衰减常数的线性相关程度。根据式(4)和式(5)可知,影响Taylor板运动最大速度的因素来源于冲击波峰值压力和时间衰减常数的不确定度,影响其运动到最大速度的时间的因素来源于时间衰减常数的不确定度。

根据炸药水下爆炸试验数据,对于理想炸药TNT水下爆炸能量传播过程中,冲击波峰值压力的最大相对不确定度值大约是2.3%,此时,时间衰减常数的最大相对不确定度大约是2.9%。对于厚度为0.01m Taylor钢板,面密度为78.5 kg/m<sup>2</sup>,水的密度 $\rho_0=1\ 000\text{ kg/m}^3$ ,水中声速 $c_0=1\ 449\text{ m/s}$ ,由式(4)和式(5)可得到,Taylor板运动最大速度的最大相对不确定度大约是3%,运动到最大速度时间的最大相对不确定度大约是1.3%。因此可以说明理想炸药TNT水下爆炸时其爆炸载荷对Taylor板结构

冲击初期响应的不确定度影响很小。

对于非理想炸药RS211水下爆炸,冲击波峰值压力的最大相对不确定度值大约是4.1%,此时,时间衰减常数的最大相对不确定度大约是19.0%。由公式(4)和式(5)可得到,0.01m厚的Taylor钢板的运动最大速度的最大相对不确定度大约是7.05%,运动到最大速度时间的最大相对不确定度大约是7.6%。因此可以说明非理想炸药RS211水下爆炸时其爆炸载荷对Taylor板冲击结构初期响应的不确定度影响很大。

对于非理想炸药RBUL水下爆炸,冲击波峰值压力的最大相对不确定度值大约是4.5%,此时,时间衰减常数的最大相对不确定度值大约是21.0%。由式(4)和式(5)可得到,0.01m厚的Taylor钢板的运动最大速度的最大相对不确定度大约是7.7%,运动到最大速度时间的最大相对不确定度大约是9%。因此可以说明非理想炸药RBUL水下爆炸时其爆炸载荷对Taylor板结构冲击初期响应的不确定度影响更大。

由于水下爆炸测试的试验数据本身具有一定的随机性及不确定性,在进行不确定度传递过程中也会造成计算结果的偏差。

### 4 结束语

该文运用误差分析理论中不确定度的传递规律对Taylor公式进行分析,得到了水下爆炸冲击波峰值压力 $p_m$ 及时间衰减常数 $\theta$ 的不确定度对Taylor板初期结构响应的影响公式。结合不同炸药在不同工况下的水下爆炸试验数据,计算得出理想炸药与非理想炸药在水下爆炸时,对于Taylor板结构初期响应有着明显的不同。非理想炸药水下爆炸冲击波峰值压力和时间衰减常数的不确定度明显高于理想炸药的载荷不确定度,两种非理想炸药RS211和RUBL的冲击波峰值压力 $p_m$ 和时间衰减常数 $\theta$ 的不确定度对0.01m厚Taylor钢板结构初期响应会产生大约7%~9%的相对不确定度。

### 参考文献

- [1] 苗勤书,徐更光,王廷增.铝粉粒度和形状对含铝炸药性能的影响[J].*火炸药学报*,2002,25(2):4-8.
- [2] 周霖,徐更光.含铝炸药水中爆炸能量输出结构[J].*火炸药学报*,2002,26(1):30-32.

(下转第114页)