高压物理学报

# 铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及 能量输出结构的影响

田俊宏 孙远翔 张之凡

# Effect of Al/O Ratio on Underwater Explosion Load and Energy Output Configuration of Aluminized Explosive

TIAN Junhong, SUN Yuanxiang, ZHANG Zhifan

引用本文:
田俊宏, 孙远翔, 张之凡. 铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及 能量输出结构的影响[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):065101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190745
TIAN Junhong, SUN Yuanxiang, ZHANG Zhifan. Effect of Al/O Ratio on Underwater Explosion Load and Energy Output Configuration of Aluminized Explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):065101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190745

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190745

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

温压炸药水中爆炸的后燃反应研究

Afterburning Reaction of Thermobaric Explosive by Underwater Explosion

高压物理学报. 2018, 32(3): 035204 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170688

RDX基含铝炸药三波点高度的数值模拟

Numerical Simulation of the Three-Wave Point of RDX-Based Aluminized Explosives

高压物理学报. 2018, 32(3): 035101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170539

聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律

Shockwave Characteristics of Shaped Charge Exploded Underwater

高压物理学报. 2017, 31(4): 453 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.04.014

水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法

Theoretical Analysis of the Interaction between the Plate Structure and Strong Shock Wave in Underwater Explosion

高压物理学报. 2017, 31(4): 443 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.04.013

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/gywlxb.20180516

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/gywlxb.20180638

**DOI:** 10.11858/gywlxb.20190745

# 铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及能量输出结构的影响

田俊宏，孙远翔，张之凡

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

**摘要：**为了系统地研究铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及能量输出结构的影响，在验证数值模型有效性的基础上，针对铝氧比分别为 0、0.16、0.36、0.63 的 RDX 基含铝炸药，利用耦合欧拉-拉格朗日方法模拟了其水下爆炸连续的全过程，考虑了冲击波载荷和气泡载荷之间的耦合作用，从冲击波、气泡和能量输出结构三方面对影响效应进行评估。计算结果表明：随着铝氧比的增大，含铝炸药水下爆炸冲击波衰减时间常数、冲击波冲量、气泡脉动周期、气泡最大半径以及比气泡能都增大；铝氧比为 0.36 时，冲击波峰值压力、冲击波能流密度和比冲击波能达到最大。铝粉的加入对气泡能的提高相对于冲击波能更加显著。

**关键词：**含铝炸药；铝氧比；水下爆炸；冲击波；气泡；能量输出

**中图分类号：**O383 **文献标识码：**A

为了提高炸药的含能密度，人们在新炸药合成和复合炸药设计两方面进行了大量研究，其中，在炸药中加入适量铝粉是提高炸药能量的重要途径之一。含铝炸药作为一种高性能非理想炸药，其非理想组分能够在理想成分爆轰之后释放大量的能量，使得爆轰产物的温度和压力维持较长的时间而不至于过快衰减。将其应用于水下爆炸，还能改善冲击波能和气泡能在总能量中的比例关系，改善能量的输出结构，从而广泛应用于水下兵器战斗部的装填药。

为了最大化地发挥含铝炸药的效能，增强其做功能力，人们对含铝炸药的爆轰现象进行了研究，加强了对含铝炸药爆轰反应机理、做功能力等方面的认识。Svetlov 研究了铝粉粒度、铝粉含量对阿莫纳尔炸药爆速和爆压的影响，发现细颗粒铝粉含铝炸药的爆速高于粗颗粒铝粉含铝炸药的爆速，含铝炸药的爆速和爆压都随着铝粉含量的增加而降低[1]。周霖等[2]研究了铝氧比对含铝炸药水下爆炸能量输出结构的影响，计算了几种混合炸药水下爆炸的冲击波能、气泡能、冲击波超压方程中的系数以及冲击波峰值压力等。赵继波等[3]开展了 3 种不同铝氧比（铝氧比（Al/O）为炸药中铝原子和氧原子的摩尔比）RDX/Al 柱形装药水下爆炸实验，分析了铝氧比对冲击波峰值压力和压力衰减速率的影响。赵倩[4]将着眼点放在含铝炸药的铝氧比与结构动态响应之间的直接联系，研究了铝氧比对含铝炸药水下爆炸舰船毁伤的影响。

之前一般单独进行铝氧比对含铝炸药水下爆炸冲击波、气泡载荷或者能量输出结构的影响研究，较少将这些因素综合起来系统地分析。本研究在前人研究和数值模型有效性验证的基础上，运用耦合欧拉-拉格朗日（Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL）方法系统地研究了铝氧比对 RDX 基含铝炸药水下爆炸冲击波、气泡载荷以及能量输出结构的影响，通过对冲击波峰值压力 $p_{\mathrm{m}}$、冲击波压力衰减常数 $\theta$、比

* **收稿日期：**2019-03-25；**修回日期：**2019-04-19

**基金项目：**爆炸科学与技术国家重点实验室（北京理工大学）自主研究课题探索性项目（YBKT17-08）；中国博士后科学基金 (2017M620644)

**作者简介：**田俊宏（1992—），男，硕士研究生，主要从事水下爆炸研究. E-mail: junhong_tian@163.com

**通信作者：**孙远翔（1967—），男，博士，副教授，主要从事水下爆炸研究. E-mail: sunyuanxiang002@126.com

冲击波能 $e_s$、冲击波能流密度 $E$、气泡脉动周期 $T_b$、气泡最大半径 $R_b$ 以及比气泡能 $e_b$ 几个表征参数进行评估，从而为水中兵器战斗部装药提供一定的参考。

# 1　基本理论和方法

## 1.1　CEL 方法的基本理论

传统的拉格朗日算法在计算爆炸等大变形问题时，单元网格可能出现严重的畸变导致无法计算；欧拉算法虽然克服了此问题，但较难捕捉物质边界，而且与拉格朗日算法相比，欧拉算法在每个时间步内需要更多的网格和计算。这两种算法都有各自的缺陷，又有各自的优势，研究者致力于寻找能综合欧拉算法和拉格朗日算法优点的方法[5]。CEL 方法最早由 Noh[6] 提出，兼具拉格朗日网格和欧拉网格的优点，拉格朗日边界上的速度为欧拉计算提供动能约束，而材料的压力为拉格朗日区域提供加载力，两个求解器通过耦合面相互作用[7]，不仅可以解决大变形问题中单元变形奇异的弊端并精确描述物质的边界，而且还能连续无间断地模拟近场水下爆炸冲击波到气泡脉动、射流再到结构响应的全过程，可以考虑不同载荷间的耦合作用。目前将 CEL 方法应用于含铝炸药水下爆炸的研究还较少。

在 CEL 算法中，欧拉域中材料边界的捕捉涉及到欧拉体积方法，由于材料与欧拉节点之间具有相对独立性，流体材料在欧拉网格中的变化轨迹由单个欧拉单元中的欧拉体积分数（EVF）[8] 确定：材料充满单元时，EVF 为 1；当材料没有完全充满单元时，则按照材料充满部分所占欧拉单元体积大小的比例来表示其体积分数，剩余部分则默认为“空”。本研究应用的 CEL 算法基于中心差分法，求解过程中用位移的形式表示相应的速度和加速度，具体控制方程参考文献 [8]。

## 1.2　状态方程的选取

状态方程用来确定材料密度、温度、能量和压力等参数的函数关系。数值模拟时选取正确的状态方程对计算结果影响较大。水介质采用 $u_s$–$u_p$ 状态方程（$u_s$ 为线性冲击速度，$u_p$ 为质点速度），该状态方程建立在水介质不可压缩、黏性流体性质的条件下，可以较准确地模拟水在冲击波载荷作用下的运动过程。$u_s$-$u_p$ 形式的 Mie-Grüneisen 公式[9] 如下

$$p=\frac{\rho_0 c_0^{\,2}\eta}{(1-s\eta)^2}\left(1-\frac{\Gamma_0\eta}{2}\right)+\Gamma_0\rho_0 e_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中：$p$ 为压力，$\rho_0$ 为参考密度，$c_0$ 为声速，$\Gamma_0$ 和 $s$ 是与材料有关的常数，$e_{\mathrm{m}}$ 为单位质量内能，$\eta$ 为名义体积压缩应变。对于水介质，$\rho_0=1\,024\ \mathrm{kg/m^3}$，$c_0=1\,483\ \mathrm{m/s}$，$s=1.75$，$\Gamma_0=0.28$。

TNT 和含铝炸药的爆轰产物采用 JWL 状态方程[10] 描述。它是一种不显含化学反应、由实验确定参数的动力学半经验状态方程，能较准确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程，其形式如下

$$p_{\mathrm{e}}=A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v}+\frac{\omega e}{v} \tag{2}$$

式中：$p_{\mathrm{e}}$ 为爆轰产物的压力，$v$ 为爆轰产物的相对比容，$e$ 为比热力学能，$A$、$B$、$R_1$、$R_2$ 和 $\omega$ 为表征炸药特性的参数。本研究所用炸药的 JWL 状态方程参数如表 1 所示，其中：1(0) 表示铝氧比为 0 的 RDX 基含铝炸药，2(0.16) 表示铝氧比为 0.16 的 RDX 基含铝炸药，以此类推。

## 1.3　水下爆炸表征参数的计算

对于水下爆炸冲击波载荷，其表征参数主要是峰值压力 $p_{\mathrm{m}}$、衰减常数 $\theta$、冲击波冲量 $I$、能流密度 $E$、比冲击波能 $e_s$ 等；对于气泡载荷，其表征参数主要是气泡脉动周期 $T_b$、最大半径 $R_b$ 和比气泡能 $e_b$ 等。将这些表征参数的模拟结果与实验值进行对比，以评价模拟结果的精度。其中：冲击波衰减常数 $\theta$ 为冲击波压力从峰值 $p_{\mathrm{m}}$ 衰减到 $p_{\mathrm{m}}/\mathrm{e}$ 所需的时间，e 为自然对数的底；冲击波冲量 $I$、能流密度 $E$、比冲击波能 $e_s$、比气泡能 $e_b$ 的计算参考 Cole[13] 给出的公式

$$I=\int_0^{6.7\theta} p(t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

表 1　炸药材料参数[11−12]

Table 1　Explosive material parameters[11−12]

| Sample | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $A$/GPa | $B$/GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $e$/(J·g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TNT | 1 630 | 371.20 | 3.21 | 4.15 | 0.95 | 0.30 | 4 290 |
| RS211 | 1 750 | 758.00 | 8.51 | 4.90 | 1.10 | 0.20 | 4 509 |
| 1(0) | 1 667 | 334.77 | 9.50 | 6.71 | 1.26 | 0.21 | 5 636 |
| 2(0.16) | 1 720 | 361.55 | 27.42 | 4.81 | 1.89 | 0.32 | 6 206 |
| 3(0.36) | 1 788 | 709.60 | 20.27 | 5.37 | 1.90 | 0.34 | 6 956 |
| 4(0.63) | 1 853 | 761.51 | 9.16 | 5.45 | 1.74 | 0.23 | 7 441 |

$$e_{\mathrm{s}}=\frac{4\pi R^2}{W\rho_0 c_0}\int_0^{6.7\theta}p^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$E=\left(1-2.422\times10^{-4}p_{\mathrm{m}}-1.031\times10^{-8}p_{\mathrm{m}}^2\right)(\rho_0c_0)^{-1}\int_0^{6.7\theta}p^2(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

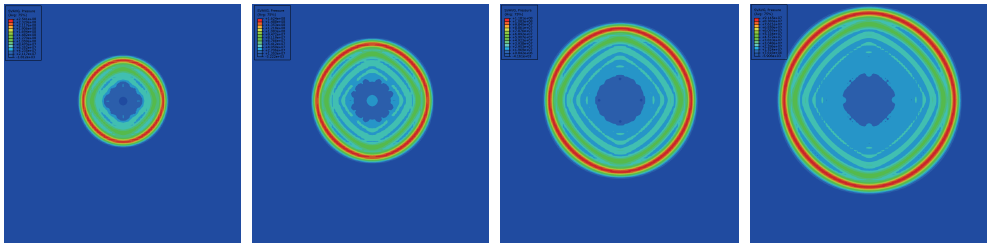
$$e_{\mathrm{b}}=\frac{0.684\,2p_{\mathrm{H}}^{5/2}T_{\mathrm{b}}^3}{\rho_0^{3/2}\cdot W} \tag{6}$$

式中: $p(t)$ 为冲击波压力时程, Pa; $\rho_0$为水的密度, kg/m$^3$; $c_0$ 为水的声速, m/s; $R$ 为爆距, m; $W$ 为装药的质量, kg; $p_{\mathrm{H}}$ 为爆心处静水压力, Pa; $T_{\mathrm{b}}$ 为气泡脉动周期, ms; $R/a$ 为比例距离。

## 2　数值模型有效性验证

为了验证数值模型的有效性, 采用 CEL 方法对文献 [14] 中的实验 RS211(RDX/TNT/Al/Desensitizing agent) 炸药和 TNT 水下爆炸全过程进行模拟, 将表征参数的计算结果与实验结果进行对比。分别对 RS211 炸药和 TNT 水下爆炸建立三维计算模型, 欧拉域的尺寸为 28 m×28 m×28 m, 其中包括深度为 24 m 的水域和垂直距离为 4 m 的空气域, 自由液面的初始压力与空气压力相同, 将质量为 3 kg 的炸药置于水深为 12 m 的水平面中心处。计算水域中施加了静水压力和重力的作用, 并且为了防止边界效应产生的反射波, 为欧拉域施加无反射边界条件。在兼顾计算精度和效率的基础上, 将炸药附近的网格单元作加密处理, 整个欧拉域的网格单元数为 4 199 202, 单元类型为 EC3D8R。炸药和水介质分别采用 JWL 状态方程和 $u_{\mathrm{s}}$-$u_{\mathrm{p}}$ 状态方程描述, 材料参数列于表 1。

计算结果如图 1 所示, 图中显示了 RS211 炸药水下爆炸不同时刻冲击波的传播情况。冲击波在各方向基本呈球对称分布, 其外层波阵面的压力最大, 呈强间断性。在毫秒量级时间内, 冲击波在水中迅速传播。图 2 显示了不同比例距离处 RS211 炸药冲击波在水中传播的压力时程曲线。由于实验[14]测量的是中远场的冲击波压力, 为了更全面地反映冲击波的传播, 图 2 中也给出了较近场的冲击波压力曲线。通过 CEL 方法计算得到的冲击波压力在极短的时间内达到峰值后, 衰减阶段存在较大的波动, 出现了双波峰或多波峰现象, 而且冲击波压力峰较光滑, 与实验测得的强间断压力时程曲线有差



(a) $t$=0.2 ms　(b) $t$=0.3 ms　(c) $t$=0.4 ms　(d) $t$=0.5 ms

图 1　不同时刻冲击波传播压力云图

Fig. 1　Shock wave pressure nephogram at different times

别。这是由于 CEL 方法在捕捉强间断特征现象时具有一定的缺陷，当冲击波到达水中某点时，压力的爬升需要一定的时间。

图 3、图 4 和图 5 分别为 RS211 炸药和 TNT 水下爆炸冲击波压力峰值 $p_m$、冲击波冲量 $I$ 和比冲击波能 $e_s$ 在不同距离处的计算值与实验值[14] 的对比曲线。从图中可以观察到，计算得到的冲击波峰值压力与实验值相差不大，而冲击波冲量和比冲击波能的计算值在一定爆距范围内比实验值偏高，其原因可能是数值模拟得到的冲击波达到峰值后的衰减阶段存在一定的脉动，但总体上 3 个表征参数的计算结果与实验值吻合较好。

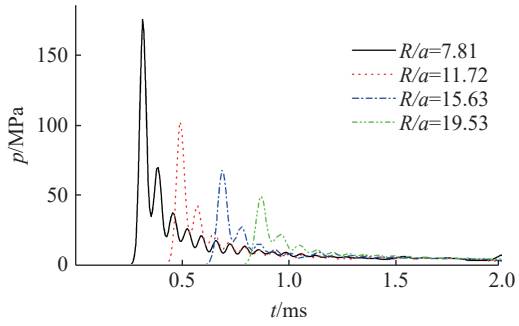



图 2　不同比例距离处压力时程曲线

Fig. 2　Pressure time history at different distances

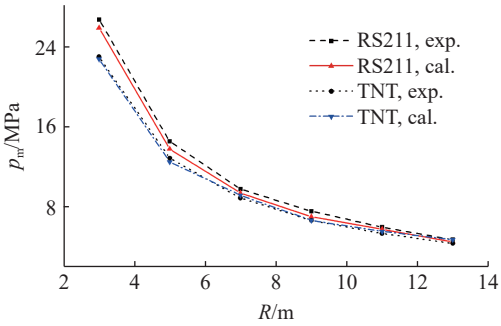



图 3　冲击波压力峰值对比

Fig. 3　Comparison of shock wave peak pressure

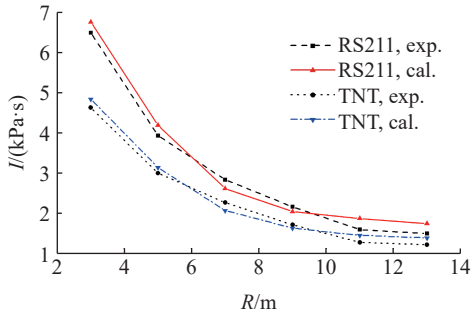



图 4　冲击波冲量对比

Fig. 4　Comparison of shock wave impulse

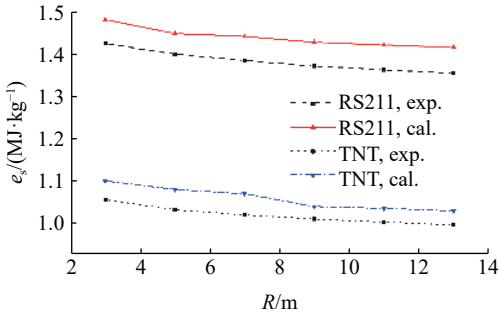
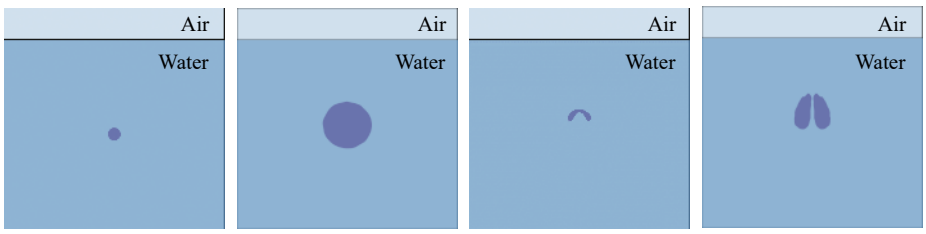



图 5　比冲击波能对比

Fig. 5　Comparison of specific shock wave energy

图 6 为 RS211 炸药水下爆炸气泡脉动过程示意图。图 6(a) 为初始气泡，此时气泡内部高温高压，以较高的速度向四周膨胀；图 6(b) 为气泡在第 1 个周期内膨胀到最大体积；图 6(c) 为气泡收缩至体积最小的状态，此时气泡已经发生了明显的坍塌，坍塌方向指向水面；图 6(d) 为气泡迅速坍塌，形成高速射流，且射流穿透气泡并冲击气泡壁的另一面，从而形成环状气泡。气泡在收缩阶段有较明显的上浮运动。将数值计算得到的 RS211 炸药和 TNT 水下爆炸的气泡脉动周期、比气泡能与实验值[14] 进行对比，如表 2 所示，计算得到的气泡脉动周期和比气泡能比实验值小，但误差在允许范围内。




(a) $t$=0 ms　(b) $t$=133.41 ms　(c) $t$=266.89 ms　(d) $t$=302.64 ms

图 6　RS211 炸药水下爆炸气泡脉动过程示意图

Fig. 6　Bubble impulse caused by underwater explosion of RS211

表 2　气泡周期和比气泡能的对比

Table 2　Comparison of bubble period and specific bubble energy

| Explosive | $T_b$/ms | | $E_b$/MJ | | $e_b$/(MJ·kg$^{-1}$) | | $e_b/e_{b,\,TNT}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Exp. | Cal. | Exp. | Cal. | Exp. | Cal. | Exp. | Cal. |
| RS211 | 273.33 | 266.89 | 9.441 7 | 8.789 9 | 3.059 5 | 2.846 5 | 1.52 | 1.48 |
| TNT | 235.99 | 232.56 | 6.097 2 | 5.815 6 | 2.017 2 | 1.928 9 | 1.00 | 1.00 |

从 RS211 炸药和 TNT 水下爆炸的计算结果可以看出，炸药中加入铝粉能较显著地提高冲击波冲量、比冲击波能和比气泡能。RS211 炸药水下爆炸比冲击波能和比气泡能相对于同质量 TNT 分别增加了 35% 和 48% 左右，因铝粉的加入而增加的气泡能相对于冲击波能更为显著。另外，铝粉的加入对冲击波峰值压力也有一定的影响，但程度不大。

从上述数值模拟结果与实验值[14]的对比可以看出，采用合理的边界条件、计算参数和有限元模型，CEL 方法可以较准确地模拟 RS211 含铝炸药和 TNT 水下爆炸冲击波传播和气泡脉动的全过程，计算得到的冲击波峰值压力、冲击波冲量、比冲击波能、气泡脉动周期以及比气泡能等表征参数均与实验值吻合较好，验证了数值模型的有效性，从而为模拟不同铝氧比含铝炸药水下爆炸的全过程打下基础。

## 3　铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及能量输出结构的影响

在验证数值模型有效性的基础上，运用 CEL 方法对铝氧比分别为 0、0.16、0.36、0.63 的 4 种 RDX 基含铝炸药水下爆炸全过程进行无间断的数值模拟，考虑了冲击波载荷和气泡载荷之间的耦合作用，旨在系统地研究铝氧比对含铝炸药水下爆炸冲击波、气泡载荷和能量输出结构的影响规律。

针对 4 种铝氧比的含铝炸药水下爆炸分别建立模型并且考虑炸药与水之间的相互作用，模型欧拉域的尺寸为 16 m×16 m×16 m，其中包括深度为 12 m 的水域和垂直距离为 4 m 的空气域，自由液面初始压力与空气压力相同，将质量均为 1 kg 的 4 种炸药放置于水深 4.7 m 处的水平面中心位置处。计算水域中施加了静水压力和重力的作用，并且为欧拉域施加无反射边界条件，以防止边界效应产生的反射波。在兼顾计算精度和效率的基础上，将炸药附近的网格单元作加密处理，整个欧拉域的网格单元数为 4 676 874，网格单元类型为 EC3D8R。4 种 RDX 基含铝炸药各组分的质量分数和铝氧比如表 3 所示，炸药和水介质分别采用 JWL 状态方程和 $u_s$-$u_p$ 状态方程描述，4 种 RDX 基含铝炸药状态方程的参数列于表 1。

表 3　RDX 基含铝炸药组分[15]

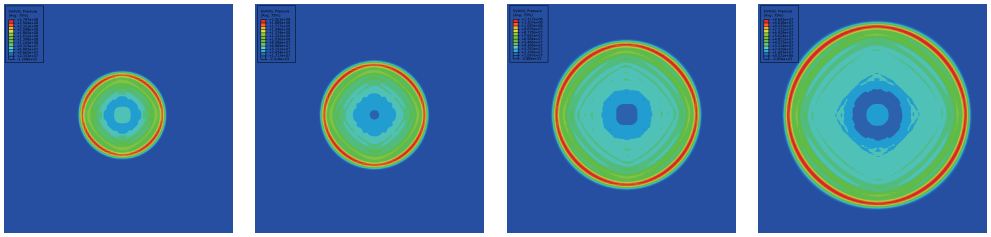
Table 3　Composition of RDX/Al explosives[15]

| Explosive | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | Mass fraction/% | | | | Al/O ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RDX | Al | Wax | C | |
| 1 | 1 667 | 95.5 | 0 | 2 | 2.5 | 0 |
| 2 | 1 720 | 85.5 | 10 | 2 | 2.5 | 0.16 |
| 3 | 1 788 | 75.5 | 20 | 2 | 2.5 | 0.36 |
| 4 | 1 853 | 65.5 | 30 | 2 | 2.5 | 0.63 |

### 3.1　铝氧比对冲击波载荷的影响

以铝氧比为 0.36 的 RDX 基含铝炸药水下爆炸为例，计算结果如图 7 所示。图 7 中显示了不同时刻冲击波在水介质中的传播情况，在毫秒级时间内，冲击波在水中迅速传播。图 8 显示了该含铝炸药在不同爆距处的冲击波压力时程，同样出现了双波峰或多波峰现象，原因已在第 2 节中阐述。

含铝炸药铝氧比对冲击波载荷的影响是通过冲击波峰值压力 $p_m$、冲击波衰减常数$\theta$、冲击波冲量 $I$ 和冲击波能流密度 $E$ 这 4 个参数进行表征的。为了凸显含铝炸药中铝粉对反应的支持效应从而方便



(a) $t$=0.15 ms　(b) $t$=0.20 ms　(c) $t$=0.30 ms　(d) $t$=0.40 ms

图 7　不同时刻冲击波压力云图

Fig. 7　Shock wave pressure nephogram at different times

比较，将比例距离 $R/a$ 的范围扩大到 10～60。通过 CEL 方法进行数值计算，得到不同铝氧比含铝炸药水下爆炸冲击波峰值压力 $p_{\mathrm{m}}$、衰减常数 $\theta$、冲击波冲量 $I$、冲击波能流密度 $E$，图 9～图 12 为铝氧比对这些表征参数的影响曲线。

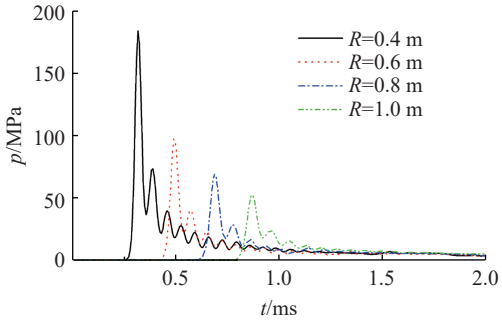



图 8　不同爆距处冲击波压力时程曲线

Fig. 8　Pressure time history at different distances

从图 9～图 12 中可以观察到，RDX 基含铝炸药的铝氧比对上述 4 个表征参数都产生了一定的影响。其中，冲击波峰值压力随着铝氧比的增加先增大后减小，在铝氧比达到 0.36 时，冲击波峰值压力达到了最大值。其原因是水域环境中氧的含量很低，当铝氧比较低时，不能够充分反应，导致冲击波峰值压力较低。随着铝氧比的增大，炸药相对含量降低，从而导致冲击波峰值压力降低，因此存在一个最优解。另外，冲击波能流密度同样随着铝氧比的增加先增大后减小，铝氧比达到 0.36 时，能流密度达到最大值。

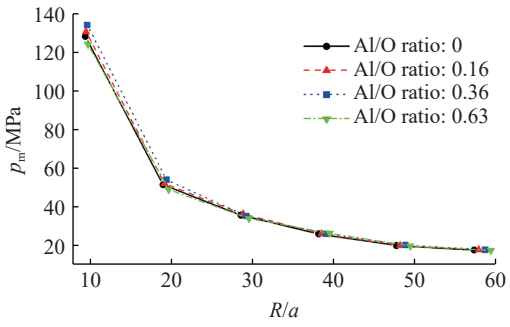



图 9　铝氧比对峰值压力的影响

Fig. 9　Effect of Al/O ratio on peak pressure

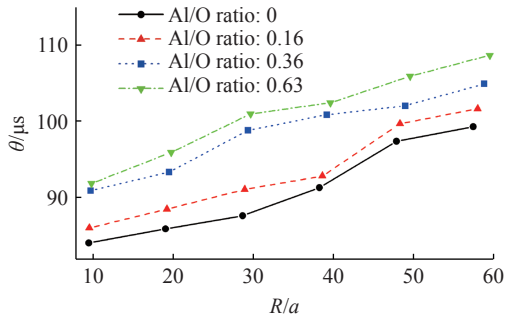



图 10　铝氧比对衰减常数的影响

Fig. 10　Effect of Al/O ratio on attenuation constant

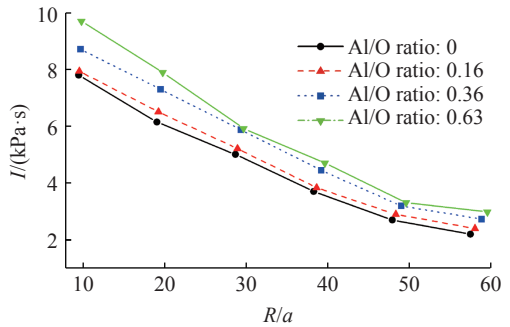



图 11　铝氧比对冲击波冲量的影响

Fig. 11　Effect of Al/O ratio on shock wave impulse

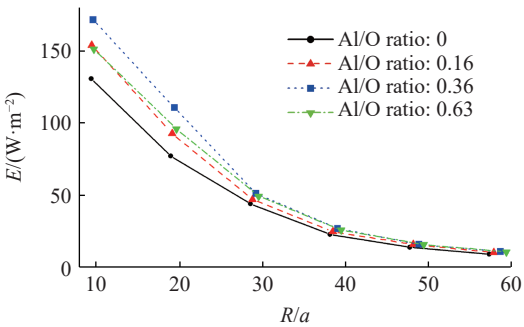



图 12　铝氧比对能流密度的影响

Fig. 12　Effect of Al/O ratio on energy flow density

压力衰减时间常数和冲击波冲量随着铝氧比的增加而持续增大，这应该是含铝炸药的非理想性导致的。在含铝炸药水下爆炸过程中，理想成分爆轰之后，还未反应的铝粉或者剩余的大量铝粉能与爆轰产物气体发生二次氧化反应，放出的热量支持了冲击波的传播，延缓了冲击波的衰减历程，并且随着铝氧比的增大，这种延缓压力衰减的效应逐渐变强。

尽管铝氧比对上述 4 个表征参数都有一定的影响，但影响程度有差别。铝氧比变化时，峰值压力的变化程度相对于其他 3 个参数明显偏小，表明冲击波峰值压力 $p_m$ 对铝氧比的变化不敏感，衰减常数 $\theta$、冲击波冲量 $I$ 和冲击波能流密度 $E$ 对铝氧比的变化比较敏感。

## 3.2　铝氧比对气泡载荷的影响

含铝炸药铝氧比对气泡载荷的影响是通过气泡脉动周期 $T_b$ 和气泡最大半径 $R_b$ 进行表征。采用 CEL 方法进行数值计算可得到不同铝氧比含铝炸药水下爆炸气泡脉动过程，由于此过程与前述 RS211 炸药水下爆炸气泡脉动过程的形态相差不大，这里不再赘述，仅给出脉动过程中气泡半径时程曲线。图 13 为 4 种 RDX 基含铝炸药水下爆炸气泡脉动过程的对比曲线，图 14 为铝氧比对气泡载荷的影响曲线。从图中可以观察到，随着铝氧比的增大，气泡的最大半径和脉动周期均增加。原因在于炸药水下爆炸后，在气泡边界处会形成水蒸气，随着铝氧比的增大，铝粉含量逐渐变大，爆轰产物膨胀过程中过量的铝粉和水蒸气反应，并释放大量的热量，该能量对气泡的脉动过程起到了支持作用，因此增加了气泡脉动周期。

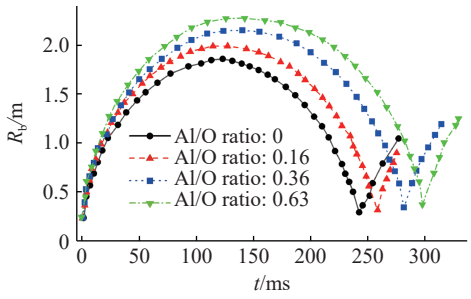



图 13　气泡半径时程曲线

Fig. 13　Time history of bubble radius

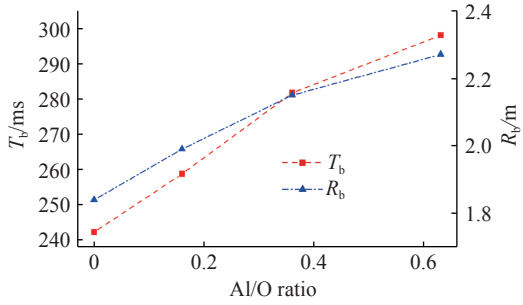



图 14　铝氧比对气泡载荷的影响

Fig. 14　Effect of Al/O ratio on bubble load

## 3.3　铝氧比对能量输出结构的影响

含铝炸药水下爆炸产生的能量，一部分以冲击波的形式从爆点向外扩散和传播，即冲击波能 $E_s$；一部分存在于爆轰产物气泡的脉动过程，即气泡能 $E_b$；还有一部分在冲击波传播过程中以热的形式散失，称为热损失能。图 15 为不同比例距离处铝氧比对比冲击波能的影响曲线，图 16 为 $R/a$=28.68 时铝氧比对能量输出结构的影响曲线。对于某一特定铝氧比的含铝炸药，当改变爆距时，发现比气泡能几乎不变，因此不再单独列出比气泡能随爆距的变化曲线。

从图 16 可以观察到，随着铝氧比的增加，比冲击波能 $e_s$ 先增大后减小，在铝氧比为 0.36 时达到最大；比冲击波能占比 $e_s/(e_b+e_s)$ 不断减少；比冲击波能和比气泡能两者之和 $(e_b+e_s)$、比气泡能 $e_b$ 以及比气泡能占比 $e_b/(e_b+e_s)$ 不断增大。这是因为随着铝氧比的增加，铝粉含量随之增加，爆轰反应区中大量能量被未反应的铝粉吸收，比冲击波能下降，铝粉的增加还会使炸药的爆热提高，因此比冲击波能的比例减小。而铝粉二次反应放出能量的过程与气泡脉动在同一时间尺度，为气泡膨胀做功提供能量，比气泡能和比气泡能占比都增大。

铝氧比从零增加到 0.36 时，比冲击波能 $e_s$ 提高 17.7%，比气泡能 $e_b$ 提高 57.2%，比冲击波能占比 $e_s/(e_b+e_s)$ 从 32.6% 降低到 26.6%，比气泡能占比 $e_b/(e_b+e_s)$ 从 67.4% 提高到 73.5%，比气泡能的提升幅度更大，表明铝粉的加入主要增加气泡能。值得注意的是，图 16 中比气泡能占总能量的比例远大于比冲击波能，原因在于测点距离爆炸中心较远，冲击波在传播过程中衰减较强，导致比冲击波能很小。

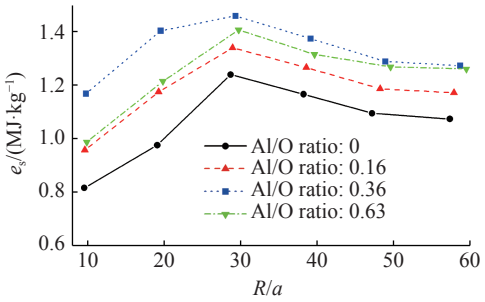



图 15　铝氧比对比冲击波能的影响

Fig. 15　Effect of Al/O ratio on specific shock wave energy

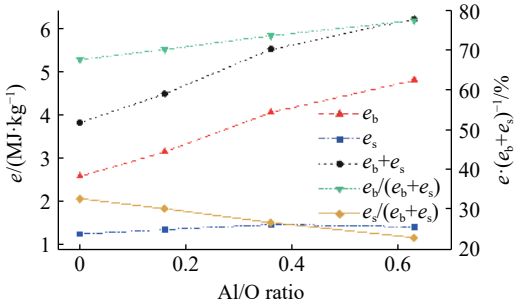



图 16　铝氧比与能量构成之间的关系($R/a$=28.68)

Fig. 16　Relation of Al/O ratio with energy($R/a$=28.68)

## 4　结　论

(1)通过 CEL 方法数值计算得到的 RS211 炸药和 TNT 水下爆炸的表征参数与实验值吻合较好，验证了数值模型的有效性。计算结果表明，RS211 炸药水下爆炸的比冲击波能和比气泡能相对于同质量 TNT 分别增加了 35% 和 48% 左右，因铝粉的加入而增加的气泡能比冲击波能更加显著。

(2)在冲击波载荷方面：随着铝氧比的增加，RDX 基含铝炸药水下爆炸冲击波衰减时间常数和冲击波冲量增大；冲击波峰值压力和冲击波能流密度先增大后减小，在铝氧比为 0.36 时达到最大。冲击波峰值压力对铝氧比的变化不敏感，衰减常数、冲击波冲量和冲击波能流密度对铝氧比的变化较敏感。

(3)在气泡载荷方面：随着铝氧比的增加，RDX 基含铝炸药水下爆炸气泡脉动的最大半径和周期都增大，气泡脉动特性与炸药爆热有较强的关系。

(4)在能量输出结构方面：随着铝氧比的增加，RDX 基含铝炸药水下爆炸的比冲击波能先增大后减小，在铝氧比为 0.36 时达到最大；比气泡能和比气泡能占比持续增大；而且铝氧比从零增加到 0.36 时，比冲击波能 $e_s$ 提高 17.7%，比气泡能 $e_b$ 提高 57.2%，铝粉的加入主要提高气泡能。

(5)铝氧比的改变对含铝炸药水下爆炸冲击波载荷、气泡载荷以及能量输出结构都有较大的影响，可以通过控制铝氧比的大小得到最佳水下爆炸威力。综合以上三方面的影响因素，最佳铝氧比应控制在 0.36 左右。需要指出的是，由于实验标定、状态方程参数等的限制，本研究仅选取了 4 种含铝炸药，铝氧比范围较粗略，因此得出的最佳铝氧比等结论是对含铝炸药水下爆炸特性趋势的总结，之后应结合实验细化和拓宽铝氧比的变化范围以获得更加详尽的结论。

## 参考文献：

[1] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 1–3.
CHEN L, LONG X P, FENG C G, et al. Detonation of aluminized explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 1–3.

[2] 周霖, 徐少辉, 徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究 [J]. 兵工学报, 2006(2): 235–238.
ZHOU L, XU S H, XU G G. Research on energy output characteristics for underwater explosion of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2006(2): 235–238.

[3] 赵继波, 李金河, 谭多望, 等. 铝氧比对水中爆炸近场冲击波的影响 [J]. 含能材料, 2009, 17(4): 420–423.
ZHAO J B, LI J H, TAN D W, et al. Effects of ratios of aluminum to oxygen on shock wave of cylindrical charge at underwater explosive close-field [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4): 420–423.

[4] 赵倩, 聂建新, 王秋实, 等. 含铝炸药水下爆炸及其对舰船毁伤的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 298–304.
ZHAO Q, NIE J X, WANG Q S, et al. Numerical simulation on underwater explosion of aluminized explosives and its damage to ship [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 298–304.

[5] 门建兵, 蒋建伟, 王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 99–101.
MEN J B, JIANG J W, WANG S Y. Fundamentals of numerical simulation for explosion and shock problems [M]. Beijing:

Beijing Institute of Technology Press, 2015: 99–101.
[6] NOH W F. CEL: a time-dependent two-space-dimensional coupled Eulerian-Lagrange code [M]// ALDER B, FERNBACH S, ROTENBERG M, et al. Methods in Computational Physics: Volume 3. New York: Academic Press, 1964: 117–179.
[7] BENSON D J, OKAZAWA S. Contact in a muti-material Eulerian finite element formulation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(39): 4277–4298.
[8] 李烨. 近场水下爆炸载荷及其对舰船局部结构毁伤研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
LI Y. Research on near field underwater explosion loads and local structure damage of vessels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
[9] HIBBITT H, KARLSSON B, SORENSEN P. Abaqus analysis user's manual version 6.10 [M]. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2011.
[10] JACOBS S J. On the equation of state for detonation products at high density [C]//12th Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1969.
[11] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 基于 KHT 程序的 RDX 基含铝炸药 JWL 状态方程参数预测研究 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 239–243.
XIANG D L, RONG J L, LI J, et al. JWL equation of state parameters prediction of RDX-based aluminized explosive based on KHT code [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(3): 239–243.
[12] 郅斌伟, 张志江, 马硕, 等. 水底爆炸冲击波峰值压力数值仿真 [J]. 爆破, 2009, 26(1): 22–24, 28.
ZHI B W, ZHANG Z J, MA S, et al. Research on shock wave peak pressure of under water explosion [J]. Blasting, 2009, 26(1): 22–24, 28.
[13] COLE R H. Underwater explosion [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948: 118–127.
[14] 张远平, 池家春, 龚晏青, 等. 含铝炸药水下爆炸性能的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(4): 316–320.
ZHANG Y P, CHI J C, GONG Y Q, et al. Experimental study on underwater explosion performance of aluminized explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(4): 316–320.
[15] 刘科种. 爆炸能量输出结构与高威力炸药研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
LIU K Z. Study on explosive energy output structure and high explosive charge [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.

# Effect of Al/O Ratio on Underwater Explosion Load and Energy Output Configuration of Aluminized Explosive

TIAN Junhong, SUN Yuanxiang, ZHANG Zhifan

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

**Abstract:** In order to study the effect of Al/O ratio on underwater explosion load and energy output configuration of aluminized explosives systematically, four kinds of aluminized explosives are taken into account, and their Al/O ratio are 0, 0.16, 0.36 and 0.63, respectively. Coupled Eulerian-Lagrangian method was used to simulate the whole process of underwater explosion of four kinds of aluminized explosives on the basis of verifying the effectiveness of numerical method. The coupling effect between shock wave and bubble was considered in the numerical simulation. The impact effect is explained from three aspects: shock wave, bubble and energy output configuration. Simulation results show that with the increase of Al/O ratio, shock wave attenuation constant, shock wave impulse, bubble period, bubble maximum radius and specific bubble energy of underwater explosion of aluminized explosives all increase. Shock wave peak pressure, energy flow density and specific shock wave energy reach the maximum when Al/O ratio is 0.36. The addition of aluminum improves bubble energy more significantly than shock wave energy.

**Keywords:** aluminized explosive; Al/O ratio; underwater explosion; shock wave; bubble; energy output