

文章编号:1006-9941(2025)07-0766-12

TNT 基含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及驱动特性

柳剑¹,白帆²,张龙辉¹

(1. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854; 2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 西安 714200)

摘要: 炸药水下近场爆炸压力高、衰减快,测试难度大。为探究含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及其驱动特性,根据强冲击波驱动气背金属板运动理论,建立了基于金属板运动计算入射冲击波压力的模型。通过 TNT 炸药水下爆炸 5 R_0 处驱动 3 mm 气背金属飞片的试验,验证了冲击波压力计算模型的准确性。并采用数值仿真方法探究球形 TNT 装药水下爆炸 2 R_0 ~6 R_0 (装药半径) 距离处自由场冲击波压力及其对 3 mm 厚度钢金属气背飞片的驱动规律,并根据飞片速度-时程数据计算得到了发生空化现象前的冲击波压力。研究结果表明:对于含铝炸药,2 μm 铝粉含量每增加 5%,飞片加速时间增加约 4.4%;铝粉粒度越大,飞片的加速时间越长,而最大速度却显著减小;20 μm 及 2 μm 铝粉在爆轰反应区吸收能量,导致 TNT 炸药爆压、爆速下降,而 200 nm 铝粉在爆轰反应区部分参与反应并正向支持爆轰波传导。

关键词: 含铝炸药;水下近场爆炸;冲击波;金属飞片

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025021

0 引言

炸药水下爆炸后会形成冲击波和气泡两种形式载荷,并将自身爆热转换成冲击波能和气泡能。研究人员通过理论、仿真以及试验等手段对炸药水下爆轰,及其爆炸冲击波的形成传播规律(中、远场研究较多)和气泡脉动过程进行了系统研究,建立了关于水下爆炸冲击波和气泡动力学的理论模型和经验公式^[1-3]。含铝炸药作为常用装药,直接影响了冲击波能与气泡能的能量分配,会产生特定结构的爆炸冲击波与气泡载荷^[4]。但水中冲击波与气泡演化过程时间尺度差异大,压力峰值及持续时间也不同。同时研究存在试验难度大,成本高等困难^[5],因此本研究主要探究不同配方含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及其驱动特性。

为了研究水下爆炸近场冲击波压力随时间和距离的衰减规律,Kira 等^[6]利用高速摄影技术完整获得了水中冲击波的传播过程,计算了 3 倍装药半径内冲击

波的压力峰值,验证了近场水下爆炸冲击波呈指数形式衰减的规律。池家春等^[7]进行了关于混合药包的水下爆炸试验,探究了水下爆炸近场冲击波的传播特性,推导出了 1~10 倍装药半径距离内冲击波压力的经验计算公式。明付仁等^[8]基于 SPH 方法,对水下爆炸 6 倍装药半径以内的冲击波特性进行了数值模拟,数值模拟结果与经验公式计算结果一致性较高。与单质炸药相比,含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷峰值及衰减规律具有明显差异,胡宏伟、沈飞等^[9-10]通过试验和理论分析的方法对含铝炸药的近场冲击波特性开展了研究;采用高速扫描相机和阴影照相技术,获得了近场冲击波沿柱形装药轴向的传播轨迹,理论计算得到了含铝炸药近场冲击波传播速度及阵面压力随传播距离的衰减规律,并将该结果与 TNT 炸药进行了差异性对比。孙远翔等^[11]利用 PVDF 传感器对理想炸药 TNT 和含铝炸药 RL-F 进行了水下爆炸近场压力测试试验,并开展了数值模拟,二者的结果均表明含铝炸药近场压力衰减更缓慢。

此外,由于数值仿真和试验实施等难度均较大的原因,目前关于水下爆炸近场载荷对典型目标结构冲击响应及驱动问题的研究较少。但水下爆炸冲击载荷作用下结构的冲击响应及驱动特性是炸药做功能力和

收稿日期: 2025-01-05; 修回日期: 2025-03-09

网络出版日期: 2025-06-11

作者简介: 柳剑(1996-),男,工程师,主要从事水下爆炸与毁伤、先进防护材料与结构方向研究。e-mail:18810934039@163.com

引用本文: 柳剑,白帆,张龙辉. TNT 基含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及驱动特性[J]. 含能材料,2025,33(7):766-777.

LIU Jian, BAI Fan, ZHANG Long-hui. Near-field Explosion Shock Wave Loading and Driving Characteristics of TNT Based Aluminized Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(7):766-777.

能量输出特性的重要体现,对优化水下炸药配方十分关键。潘建强等^[12]利用一种预制飞片圆筒结构进行了爆炸测试实验,得到了水下爆炸近药包表面冲击波能流密度,并通过数值模拟验证了该测试技术的可行性。Sandusky 等^[13]进行了 5.6 倍和 6.9 倍 PETN 装药半径下的水下爆炸近场试验,利用激光干涉测速仪和分幅扫描相机得到了圆柱铝壳的速度时程和位移时程曲线。Wardlaw 等^[14]采用 DYSMAS 和 GEMINI 软件进行了水下近场爆炸研究,揭示了近距爆炸冲击波和气泡的相互作用过程,探究了其对流场载荷特性的影响。

含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷具有峰值压力高、压力上升时间短等显著特点,铝粉组分的反应对冲击波的压力峰值和衰减规律均有很大影响。在本研究中,首先基于金属板运动建立了水下近场爆炸冲击波压力计算模型;再开展数值仿真,获得 TNT 装药水下近场爆炸驱动气背金属板的运动规律,并通过模型计算得到入射波压力,与自由场冲击波压力仿真结果相比较;最后开展 TNT 及不同配方含铝炸药水下近场爆炸驱动金属飞片试验,一方面通过试验验证数值仿真结果和模型,另一方面分析不同配方 TNT 基含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷规律及其驱动特性。

1 水下近场爆炸冲击波压力计算模型

1.1 水下近场爆炸强冲击波载荷及其驱动金属板运动规律理论

与炸药空中爆炸相比,水下爆炸时由于水介质具有较大的密度和微小的可压缩性,所以水中爆炸冲击波强度远大于空中爆炸冲击波。例如,空中爆炸初始冲击波压力仅为 57 MPa,而 TNT 炸药水中爆炸初始冲击波压力峰值约为 12 GPa,相差 200 多倍^[9]。对于水下爆炸远场(峰值压力低于 100 MPa),冲击波对目标作用后的反射压力为入射压力的 2 倍。而对于水下近距爆炸($R_0 \sim 6R_0$ 药包半径内),冲击波压力峰值从药包表面约十几 GPa 的量级迅速衰减到几百 MPa。导致冲击波峰值压力和水的密度等物理参数变化剧烈,冲击波与结构间的相互作用具有强烈的非线性效应。这样的高压冲击波作用到金属板上时,金属板不能再视为刚体。此时不仅需要考虑水的可压缩性,还需要考虑金属板的可压缩性。而 Taylor 平板理论适用于冲击波峰值较小(低于 100 MPa)的情

况^[15],因此分析水中强冲击波与金属板的相互作用,不仅要考虑金属板运动及变形对周围水域中压力场的影响,还要考虑水和金属板在强冲击载荷下的状态方程。

对于水和钢板这两种凝聚态的介质,均满足冲击状态方程 $p = \rho D u_p = \rho (C_0 + \lambda u_p) u_p$ ^[16]。本研究为分析水下强冲击波与钢板作用后的波后状态,建立冲击波入射曲线,如图 1 所示。

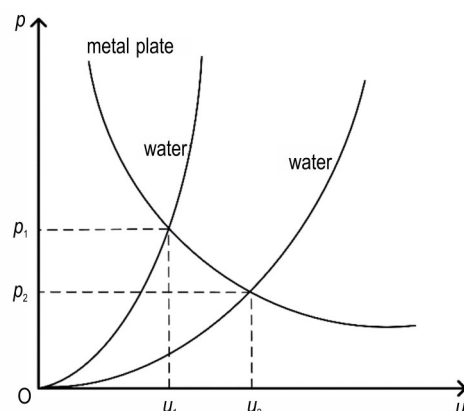


图 1 冲击波入射曲线

Fig.1 Shock wave incidence curve

在计算强冲击波作用后的冲击波反射系数 C_R 时,需要同时考虑水和结构材料的状态方程,设水参数为 $c_w=1483 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\lambda_w=1.75$,钢参数为 $c_s=4569 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\lambda_s=1.49$ 。采用雨贡纽关系替代声学假设中压力与速度的关系,引入状态方程建立强冲击波在平板表面反射后的波阵面参数关系,对 5 GPa 以下范围内的水中强冲击波作用金属钢板下的反射系数进行了数学拟合,得到了反射系数 C_R 与入射波压力的关系^[16]:

$$C_R(p_1) = 0.012p_1^5 - 0.0211p_1^4 + 0.1440p_1^3 - 0.4753p_1^2 + 0.7974p_1 + 1.9560 \quad (1)$$

式中, p_1 为入射波压力, GPa。

水下爆炸强冲击波与气背金属板结构的作用过程如图 2 所示。其中, p 为作用于金属板左侧的总压力, p_1 为入射波压力, p_2 为反射波波后压力, p_3 压力波为稀疏波,其波速为 D_3 。

稀疏波波后粒子速度与板运动速度相等,即 $u_3 = u_p$,因此辐射波的压力为 $p_3 = \rho_2 D_3 u_p$ 。入射波波前压力及粒子速度均假设为 0,根据动量守恒定律,可得平板的运动方程如式(2)^[16]:

$$m \frac{d u_p}{d t} = C_R(p_1) p_1 - p_2 D_3 u_p \quad (2)$$

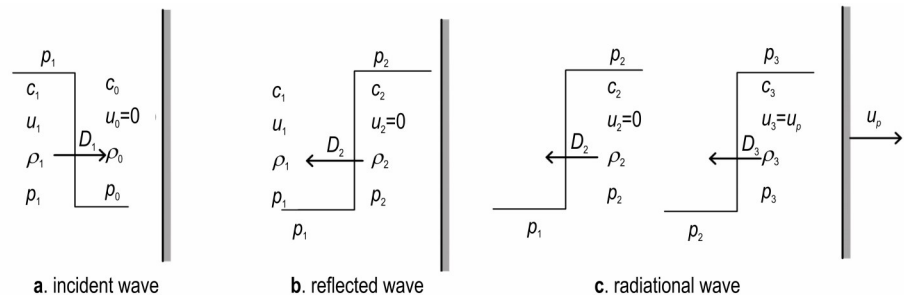


图2 水中近场强冲击波与金属板的作用过程

Fig. 2 The interaction process between near-field strong shock waves in water and metal plates

式中, m 为平板的面密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; u_p 为金属平板的运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ρ_2 为反射冲击波作用后水的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在初始时刻 $t = 0$ 时,平板的初始速度 $u_p = 0$ 。

1.2 水下近场爆炸冲击波压力计算模型

通过对公式(2)中金属板的速度 u_p 进行微分,可求解关于 p_1 的函数计算得到入射波压力,即通过金属板加速过程中的速度-时间关系求解得到炸药水下爆炸近场的冲击波压力-时间关系。由此可见,基于强冲击波作用下金属板运动规律可建立水下近场爆炸冲击波压力的求解模型。但是根据 Taylor 平板理论^[15]可知,在冲击波的作用下,气背板的速度由 0 开始逐渐增加。当金属板的速度达到最大值时,冲击波对板的反射压力下降到 0,之后反射压力将变为负值。由于水不能承受拉力,因此在板的速度达到最大值之后,水和金属板将产生分离。所以,利用该方法求解的压力其实是金属板加速到最大速度前作用于板上的水下近场冲击波压力。

为了通过金属板运动速度计算作用在其表面的冲击波压力,首先利用 Autodyn 开展水下爆炸驱动数值仿真获得气背金属板的加速规律。建立水下爆炸近场冲击波驱动气背金属飞片的数值计算模型,如图 3 所

示。采用 Euler-Lagrange 耦合算法,欧拉空气域为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。然后,在空气域内部填充柱形水域,柱形水域的高度为 200 mm ,整个模型中的欧拉域网格尺寸均为 2 mm 。炸药为球形 TNT 装药,半径为 31 mm ,网格尺寸为 3.1 mm 。利用方形飞片等效金属薄板,柱形水域周边建立预制金属方形飞片的 Lagrange 网格模型。单个预制飞片的尺寸为 $15.6\text{ mm}\times 15.6\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,飞片厚度方向网格尺寸为 1.5 mm ,长度方向网格尺寸为 1.6 mm 。每圈的飞片数量由柱形水域半径与飞片尺寸决定,高度方向共有 10 层飞片,层与层之间不连接。模型的空气域的上端、下端及两侧均采用无反射边界设置,Y-Z 平面为对称平面。

模型中炸药选择 TNT,其状态方程选择 JWL 状态方程^[17],其表达式如式(3):

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 \bar{V}} \right) \exp(-R_1 \bar{V}) + B \left(1 - \frac{w}{R_2 \bar{V}} \right) \exp(-R_2 \bar{V}) + \frac{w}{\bar{V}} e \quad (3)$$

式中, p 为压力, GPa; A, B, R_1, R_2, w 均为 JWL 状态方程常数,TNT 炸药的材料参数、爆压、爆速及爆热等参数如下表 1 所示。

表 1 TNT 炸药 JWL 状态方程参数^[17]

Table 1 Parameters of the JWL equation of state for TNT ^[17]								
ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	D / $\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	P /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	w	E /MJ $\cdot\text{kg}^{-1}$
1.583	6.880	19.4	307.3	3.898	4.485	0.79	0.30	4190

空气采用理想气体状态方程描述,具体的表达式为^[18]:

$$p = (\gamma - 1) \rho \bar{e} \quad (4)$$

式中, γ 为空气的绝热指数; ρ 为密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $\bar{e}$ 为单位质量空气内能, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。具体参数如表 2 所示。

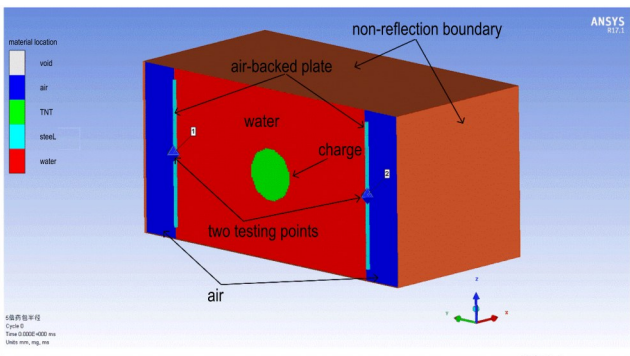


图3 水下爆炸近场冲击波驱动气背金属飞片的数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model of underwater explosion near-field shock wave driving air-backed metal plates

表 2 空气的状态方程参数^[18]

Table 2 Parameters of the equation of state for air^[18]

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	γ	$\bar{e} / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
1.225×10^{-3}	1.4	2.068×10^{-5}

水在数值计算时,采用基于 Shock 状态方程的 Two-Phase 状态方程^[18]。如图 4 所示,其不仅能够描述单一状态的水或水蒸气,还能描述二者同时存在的状态。

Two-Phase 状态方程表达形式为:

$$U_s = c_0 + s_1 u_p + s_2 u_p^2 \quad (5)$$

通常情况下, $S_2 = 0$, 则:

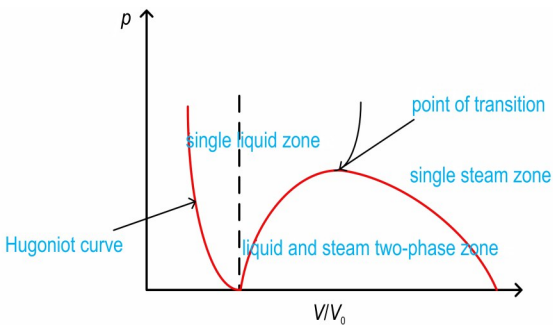


图 4 水的两相状态方程^[18]

Fig. 4 Two-phase equation of state for water^[18]

$$U_s = c_0 + s_1 u_p \quad (6)$$

式中, c_0 的值取 $1647 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, S_1 的值取 1.921。

金属飞片为钢质材料,采用 Cowper-Symonds 材料模型描述,表达式为^[18]:

$$\sigma_Y = \left(A + B \epsilon_{p1}^n \right) \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{p1}}{D} \right)^q \right) \quad (7)$$

式(7)中: σ_Y 为流动应力, A 为屈服应力, MPa, B 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数; D 和 q 为应变率硬化系数; $\dot{\epsilon}_{p1}$ 为塑性应变率, 钢板材料参数如下表 3 所示。

表 3 金属飞片的材料状态方程参数^[18]

Table 3 Parameters of equation of state for metal plates^[18]

E / GPa	ν	A / MPa	B	n	D	q
210	0.28	264	400	1	40	5

图 5 为 $5 R_0$ 爆距处飞片的加速过程, 当爆距为 $5 R_0$ 时, 冲击波经过 $53.04 \mu\text{s}$ 到达飞片表面, 经过 $19 \mu\text{s}$ 左右, 飞片速度达到最大, 之后飞片的速度出现震荡。

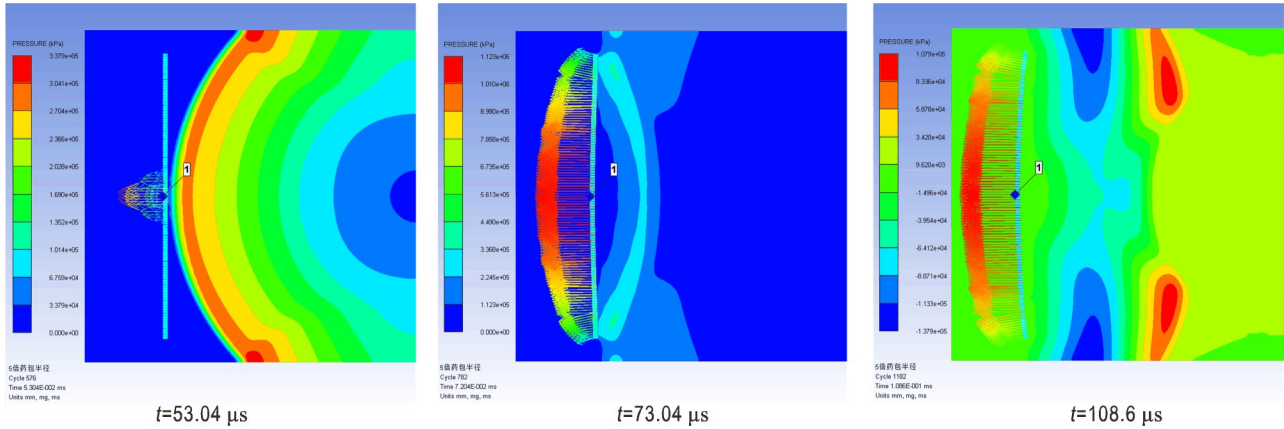


图 5 球形 TNT 水下爆炸 $5 R_0$ 处冲击波载荷与飞片速度的演化云图

Fig.5 Evolution contour of shock wave loading and plate velocity at $5 R_0$ for spherical TNT underwater explosion

图 6 为 TNT 水下爆炸 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 距离处金属飞片的速度-时程曲线。仿真结果表明, 金属飞片在水中入射冲击波作用下迅速加速到第一个峰值速度, 且距离炸药中心位置较近的飞片加速时间更短、峰值速度更高。由于仿真计算时间有限, 从飞片的加速曲线中没有发现爆轰气体对飞片进行二次加载的现象。同时, 速度在达到第一个峰值后曲线开始出现震荡波动, 这是由于应力波在飞片内部反射和透射等造成的。

将图 6 中 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 不同距离处金属飞片速度 u_p

的仿真结果代入到公式(2)中, 对时间 t 进行微分, 再利用 vpsolve 函数求解关于作用在飞片表面的入射波压力-时间关系。表 4 为 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 不同距离处计算得到的入射波峰值压力与飞片运动结果比较, 其中加速时间指的是飞片到达第一个峰值速度所用的时间。

由表 4 可知, 水下近场爆炸冲击波压力峰值及其驱动金属板能力与爆距并非是简单的线性规律。在 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 范围内, 爆距越大, 金属板达到的最大速度和入射冲击波峰值压力衰减速度越慢; 此外, 随着爆距

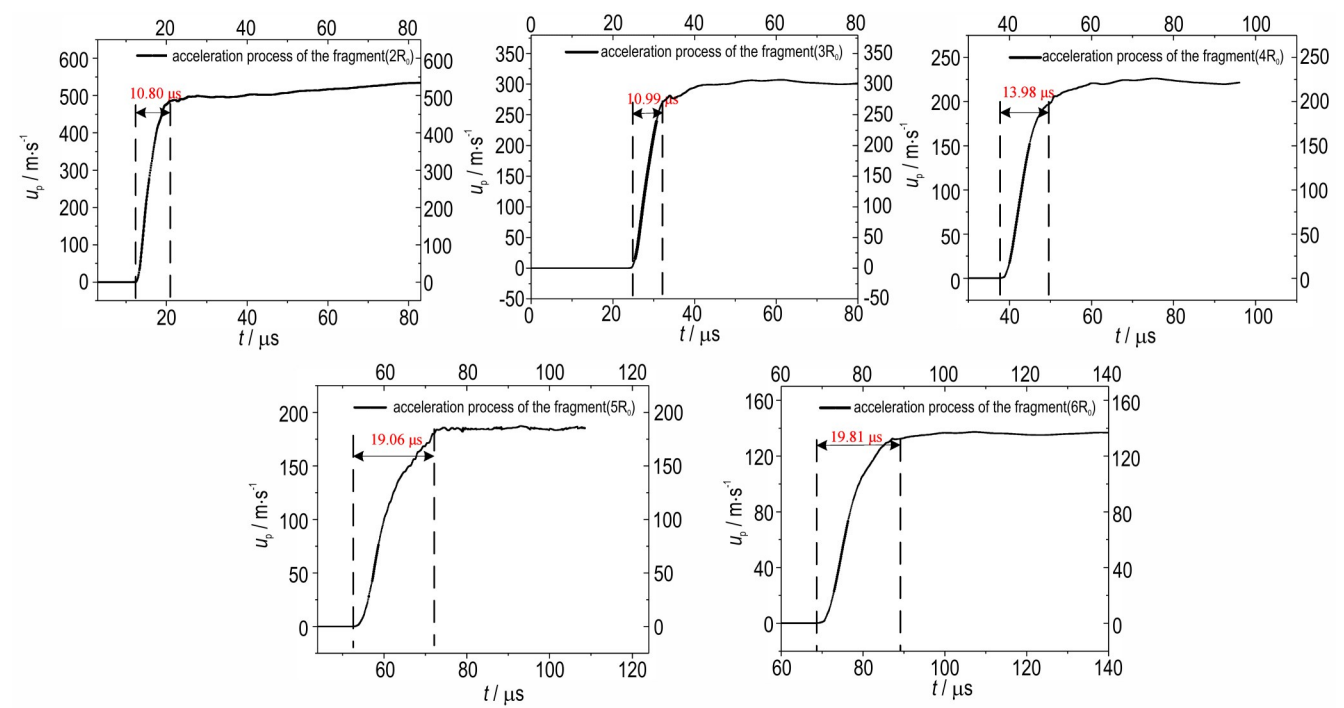


图 6 TNT 水下爆炸 2 R_0 ~6 R_0 处 3 mm 气背飞片的加速过程

Fig.6 The acceleration process of a 3 mm-thick air-backed plate at 2 R_0 ~6 R_0 for TNT underwater explosion

表 4 2 R_0 ~6 R_0 处入射波峰值压力与飞片加速过程比较
Table 4 Comparisons of incident shock wave peak pressures and the plate acceleration process at 2 R_0 ~6 R_0

distance	incident shock wave peak pressure / MPa	first peak speed $u_{\max(t)}$ / m·s	acceleration time / μ s
2 R_0	1255.9	488.1	10.80
3 R_0	594.8	281.2	10.99
4 R_0	365.1	206.2	13.98
5 R_0	255.4	185.9	19.06
6 R_0	205.3	132.6	19.81

的增加、冲击波压力的降低,金属板加速到最大速度的时间显著增大,表明冲击波载荷的驱动能力明显下降。

接下来开展球形 TNT 炸药水下爆炸后 2 R_0 ~6 R_0 距离处自由场压力的仿真计算,图 7 为水下爆炸自由场冲击波分别到达 2 R_0 和 6 R_0 时刻的压力云图,图 8 为 TNT 炸药水下爆炸后 2 R_0 ~6 R_0 距离处自由场压力-时程曲线。

然后,将球形 TNT 2 R_0 ~6 R_0 处水下爆炸自由场压力仿真结果与基于金属板运动的冲击波压力计算模型

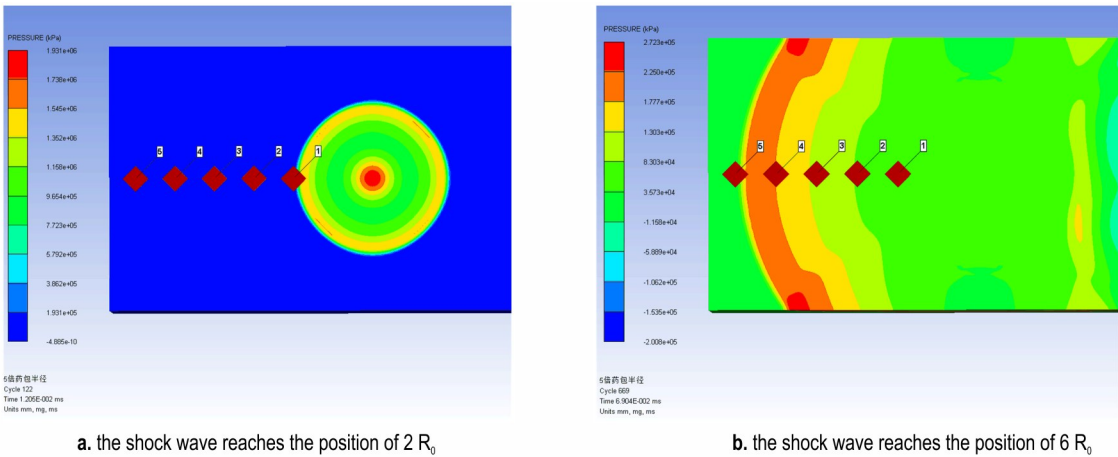


图 7 不同时刻球形 TNT 炸药水中爆炸冲击波自由场压力云图

Fig.7 Free field pressure contour of shock waves of spherical TNT underwater explosion at different time

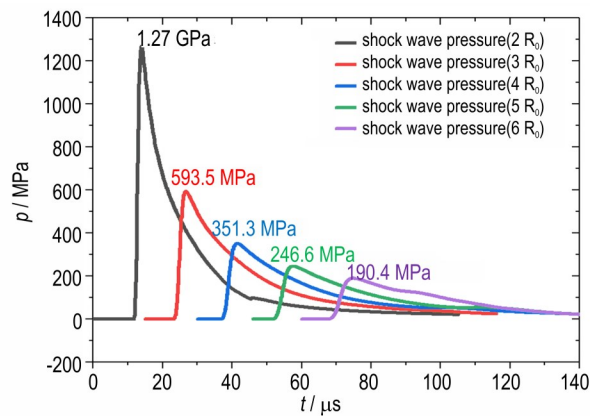


图8 水下球形TNT炸药爆炸后 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 距离处自由场压力时程曲线

Fig.8 Free field pressure histories at distances of $2 R_0 \sim 6 R_0$ after underwater spherical TNT explosion

结果相比较,结果分别如图9和表5所示。

在图9中, $t_{u \max (1)}$ 代表飞片到达第一个峰值速度的时刻,与冲击波作用其表面时刻的差值为飞片的加速时间。由图9可知,飞片达到最大第一个峰值速度时刻前($t_{u \max (1)}$), $2 R_0 \sim 6 R_0$ 距离处的水中自由场冲击波压力曲线与模型计算的作用在飞片表面的入射波压力曲线十分吻合,说明模型计算得到的压力即为水中爆炸冲击波压力;在 $t_{u \max (1)}$ 时刻后期,模型计算结果与自由场压力仿真结果出现明显的差异,原因是在金属板达到最大速度后与水分离,计算得到的压力不再是作用其表面的入射波压力,说明模型不再适用。由表5中压力峰值数据可知,自由场冲击波峰值压力与入射波峰值压力误差均小于10%,特别是在 $2 R_0$ 和 $3 R_0$ 距离处,二者的误差均小于1%,表明计算模型具有较高的准确性。

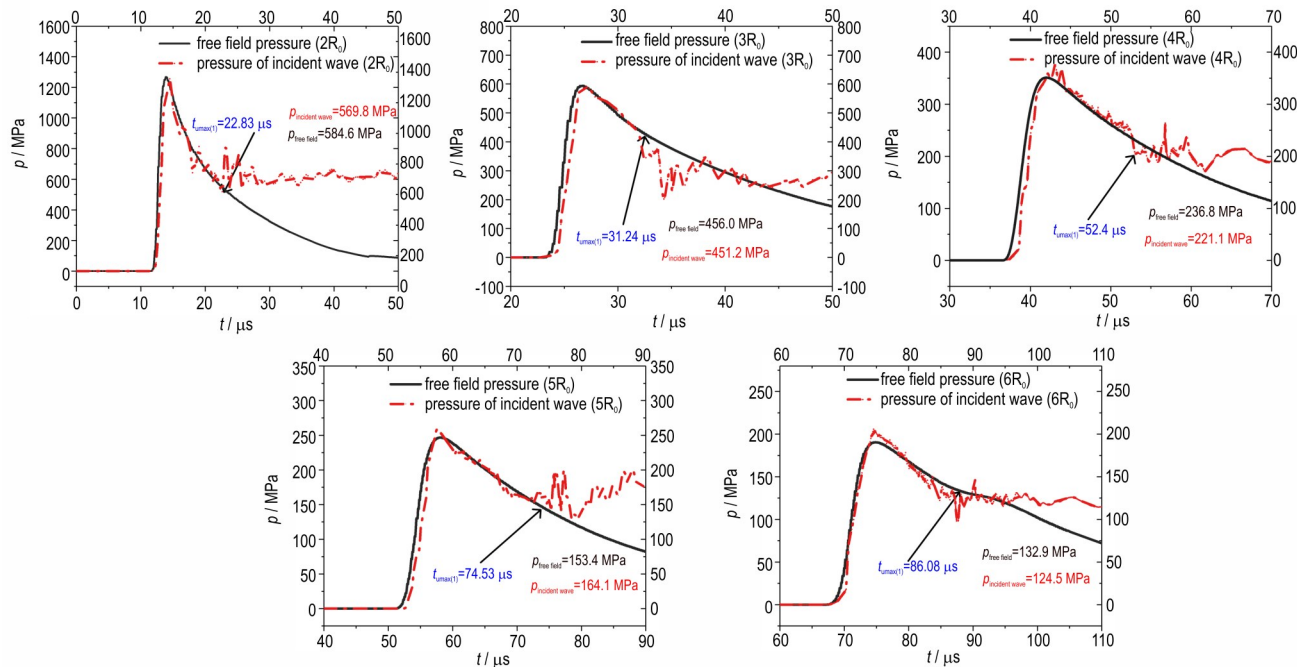


图9 水下爆炸 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 处自由场压力与气背金属飞片入射波压力对比

Fig.9 Comparisons of free field pressures and incident wave pressures of air-backed plates at $2 R_0 \sim 6 R_0$ in underwater explosion

表5 $2 R_0 \sim 6 R_0$ 处自由场冲击波与入射波峰值压力

Table 5 Peak pressures between free field shock wave and incident wave at $2 R_0 \sim 6 R_0$

distance	peak pressure of free field wave / MPa	peak pressure of incident wave / MPa	error / %
$2 R_0$	1266.9	1255.9	0.9
$3 R_0$	593.5	594.8	0.2
$4 R_0$	351.3	365.1	3.9
$5 R_0$	246.6	255.4	3.6
$6 R_0$	193.1	205.3	6.3

综上,通过分析水下近场爆炸强冲击波驱动金属板运动规律,建立了基于金属板运动的水下近场爆炸冲击波压力计算模型;开展了数值仿真,获得水下近场爆炸自由场压力和金属飞片运动数据,并利用仿真数据验证了压力计算模型的可行性、准确性及适用范围。

2 TNT炸药水下近场爆炸试验

2.1 试验方案

2.1.1 TNT炸药及金属飞片试样

为了验证数值模拟结果的准确性,开展了水下近

场爆炸试验,炸药与仿真所用的TNT状态基本一致,采用注药工艺自制,装药密度为 $1.58\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,球形装药半径为31 mm,爆速为 $6860\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (实测)^[19];金属飞片材料、质量和尺寸均与仿真状态一致,单枚金属飞片厚度为3 mm,方向边长尺寸为15.6 mm,材料为Q235A钢。

2.1.2 试验装置

试验装置及示意图如图10所示,整个装置由上、下圆筒和3层互不连接的预制金属飞片组成,飞片粘结在上下圆筒壁的中间,总共三圈,单圈为61枚飞片。圆筒与飞片材料一致,圆筒高度为596.8 mm,圆筒壁

内径为310 mm、厚度为3 mm。圆筒内部装满水,球形装药通过细绳悬挂于与待测飞片中心位置水平的高度。因此,炸药球心距离圆柱壳体的距离刚好为5倍装药半径。与预制飞片中心等高位置两侧分别利用探头支架固定PDV光纤探头,探头与飞片间的距离为60 mm。试验采用新西兰NI公司的便携式光子多普勒测速系统(PDV)测量水下爆炸后预制气背金属飞片的速度-时间历程,该PDV测试仪器的型号为NI PXIe-1078,其测速范围上限大于 $9000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,采集仪的带宽为8 GHz,采样频率为 $25.0\text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$,有效记录时间长度设置为100 μs 。

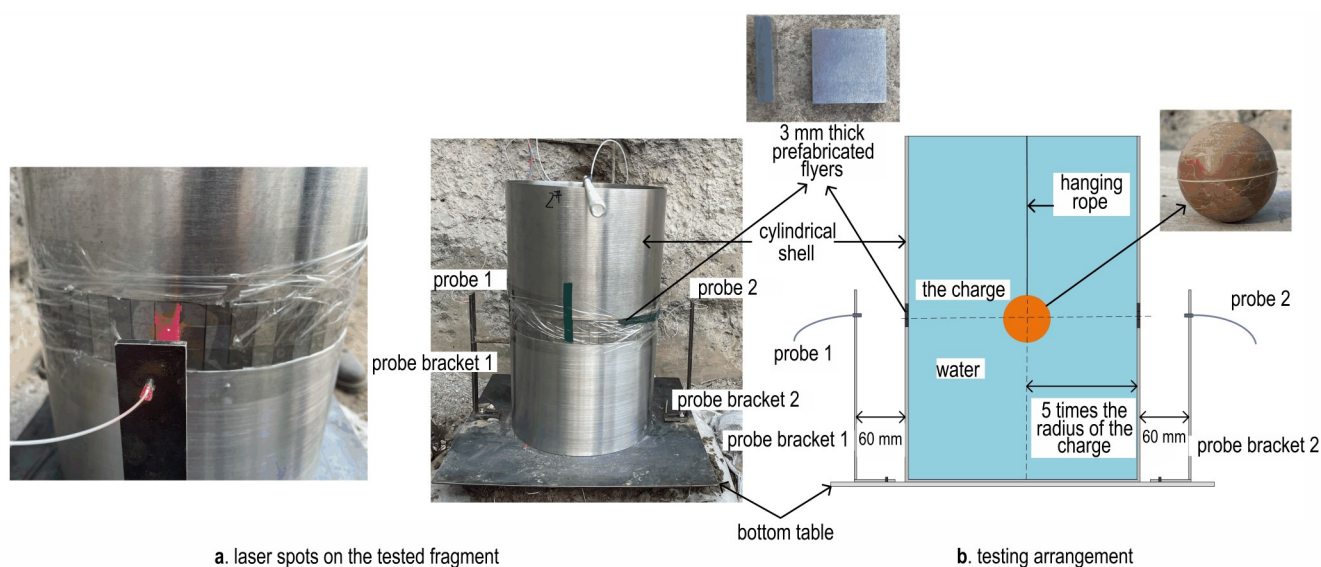


图10 炸药水下爆炸近场冲击波驱动气背金属飞片加速试验布置及示意图

Fig.10 Arrangement and schematic diagram of the acceleration of air-backed metal plates driven by near-field shock waves of underwater explosion

同时,一方面为了探究TNT炸药近场爆炸冲击波载荷对金属板的驱动特性,另一方面获得金属飞片加速过程的速度-时间曲线,验证数值仿真结果的准确性,以及基于金属板运动计算入射冲击波压力模型的可靠性。因此,试验中需要运用PDV速度干涉仪探头测量并记录飞片加速运动过程。

2.2 试验结果

图11为TNT炸药水下近场爆炸驱动金属飞片后收集得到的飞片和圆筒实物,其中飞片基本无变形、保持完整,圆筒壁有轻微变形。

水下爆炸试验中,PDV速度干涉仪两个光纤探头记录的飞片加速曲线如图12所示。由图12可知,在TNT炸药水下爆炸冲击波的作用下,两个探头所记录的飞片加速的最大速度分别为 $182.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $189.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,加速时间分别为 $18.7\text{ }\mu\text{s}$ 和 $18.1\text{ }\mu\text{s}$,两



图11 试验后收集的预制飞片和圆柱壳体

Fig.11 Plates and cylindrical shells retrieved after experiments

个探头的记录数据具有较好的一致性。而且,飞片最大速度试验值与仿真值的误差分别仅有-1.7%和1.7%,加速驱动时间误差分别仅为1.9%和5.0%,均能够说明数值仿真结果的可靠性。此外与仿真结果不

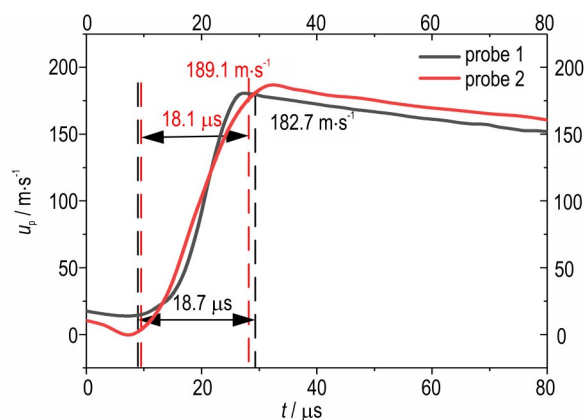


图 12 TNT 炸药驱动金属飞片加速的 PDV 测试结果
Fig.12 PDV test results of metal plate acceleration driven by TNT

同的是,在空气阻力的作用下,试验中飞片达到最大速度后速度开始呈现下降趋势。

2.3 模型验证

将飞片速度的试验结果与 TNT 炸药水下爆炸 5 R₀ 处飞片的仿真速度结果分别代入到式(2)中处理,

表 6 仿真结果与试验结果对比

Table 6 Comparison between simulation results and experimental results

	maximum speed of fragment / m·s ⁻¹			peak pressure of incident wave / MPa		free filed pressure / MPa
	testing value V _E	simulation value V _S		testing value P _{IE}	simulation value P _{IS}	simulation value P _{FE}
error/ %	182.7	189.1	185.9	252.2	263.8	255.4
	1.7	1.7	—	2.3	7.0	3.6

Note: error of maximum speed: $\frac{|V_E - V_S|}{V_S}$; error of peak pressure: $\frac{|P_{IE} - P_{FE}|}{P_{FE}}$, $\frac{|P_{IS} - P_{FE}|}{P_{FE}}$.

由图 13 可知,模型计算得到的入射波压力曲线在衰减阶段前期(对应的是飞片最大速度前)与自由场冲击波压力曲线吻合程度较高。且由表 6 可知,模型计算的入射波峰值压力与自由场峰值压力相比,误差也均小于 10%,验证了模型的可靠性和准确性。在图 13 中曲线后半部分,模型计算的入射波压力值与自由场压力值相比出现较大的震荡波动,说明此时不再是入射冲击波压力。

表 7 不同配方的 TNT 及 TNT 基含铝炸药

Table 7 TNT and TNT based aluminized explosives with different formulations

number	component of charge	content / %	size of aluminum / μm	radius of charge / mm	density of charge / g·cm ⁻³	mass of charge / g
1#	TNT/Al	95/5	2	31	1.60	201.2
2#	TNT/Al	85/15	2	31	1.68	210.9
3#	TNT/Al	75/25	2	31	1.76	222.6
4#	TNT/Al	85/15	0.2	31	1.68	212.3
5#	TNT/Al	85/15	20	31	1.68	213.5

分别得到作用在飞片上入射冲击波的模型计算结果(模型分别基于飞片的试验速度和仿真速度),再与自由场冲击波仿真结果相比较,结果如图 13 所示。此外,将飞片最大速度试验值和仿真值相比较,再将通过模型计算得到的入射波压力和自由场压力相比较,结果见表 6。

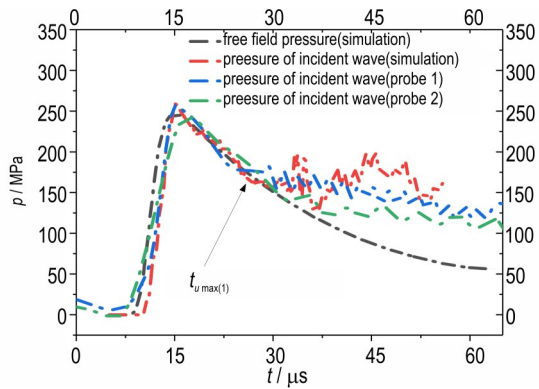


图 13 TNT 炸药水下爆炸自由场压力与入射波压力
Fig.13 Free field pressure and incident wave pressure of TNT

3 不同配方 TNT 基含铝炸药水下近场爆炸试验

3.1 试验工况

为了探究含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及驱动金属壳体能力特性,对 5 种不同铝粉粒度、含量配方的 TNT 基含铝炸药开展了水中爆炸近场(5 R₀)驱动飞片试验,试验工况如表 7 所示。本次试验中,含铝炸药

均采用注药工艺,均为球形装药,装药半径均为31 mm,其他条件与TNT炸药水下爆炸试验条件一致。

3.2 试验结果与讨论

5种不同配方含铝炸药水下爆炸驱动飞片的加速曲线分别如图14所示。

分析图12和图14,对比TNT炸药以及1#~5#配方含铝炸药水下爆炸结果,发现随着铝粉的加入,飞片的加速时间明显变长。这说明,铝粉在爆轰后的二次反应延缓了水中冲击波能量和压力的衰减,做功时间增加。当铝粉粒度相同时(均为2 μm),由图15a中可

以看出,飞片的加速时间与铝粉含量大致成正比例关系,铝粉含量每增加5%,飞片加速时间大约增加4.40%。但是,2#配方含铝炸药(TNT/Al 85/15)水下爆炸驱动飞片达到的最大速度最大,说明飞片的最大速度并不是随着铝粉含量的增加一直增加。由图15b所示,对比2#、4#和5#配方含铝炸药水下爆炸结果,发现当铝粉含量相同时,铝粉粒度越大,飞片的加速时间越长。除此之外,当铝粉含量(15%)相同时,飞片的最大速度也随着铝粉粒度的增加显著减小,但均高于TNT炸药水下爆炸驱动飞片的最大速度。

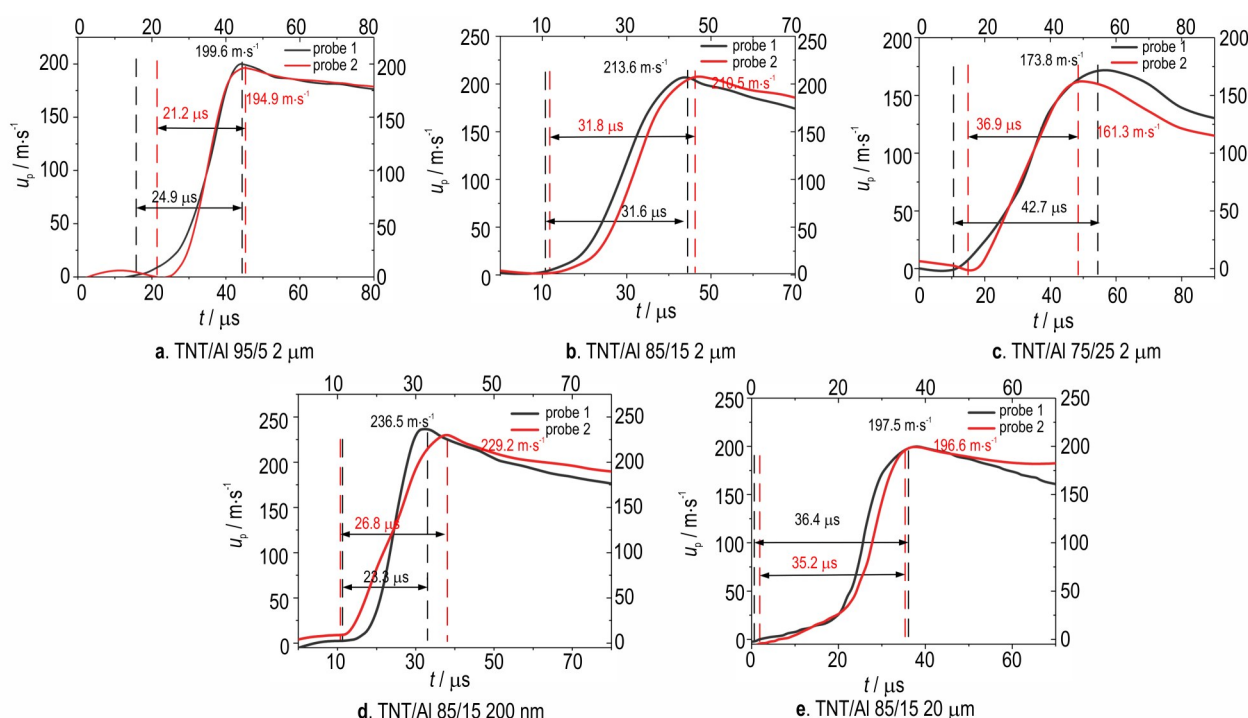


图14 不同配方含铝炸药水下爆炸5 R_0 处驱动金属飞片PDV测试结果

Fig.14 PDV test results of metal plates at 5 R_0 driven by underwater explosion of different formulated aluminized explosives

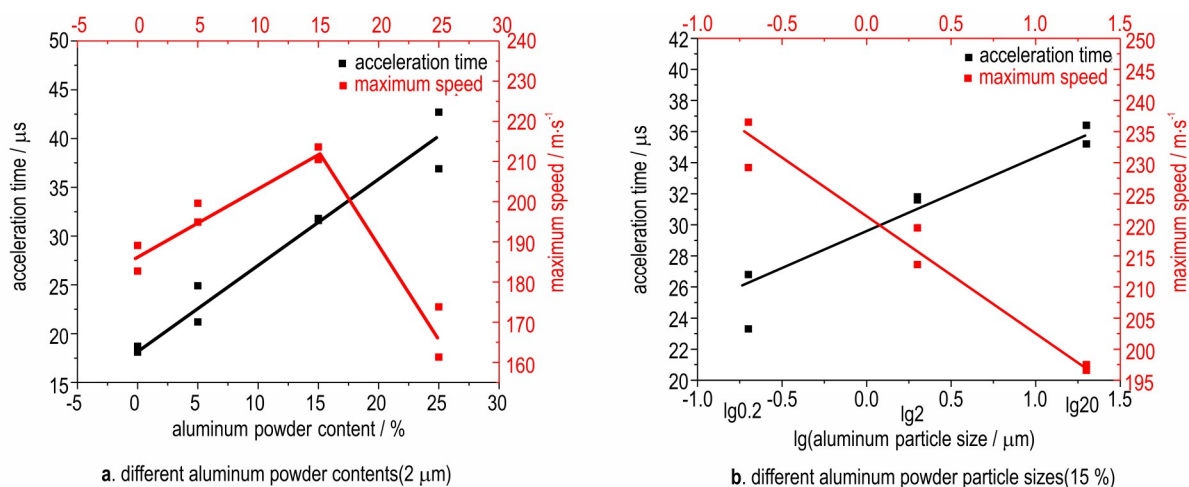


图15 不同铝粉含量、粒度下飞片的加速时间和最大速度

Fig.15 Acceleration time and maximum speed of plates for different aluminum powder contents and particle sizes

3.3 压力计算模型在含铝炸药水下爆炸试验中的应用

本研究将 5 种配方 TNT 基含铝炸药水下爆炸驱动气背金属飞片的速度-时程曲线分别代入公式(2),得

到如图 16 所示的 5 种配方含铝炸药水下爆炸在 $5 R_0$ 处的水中入射冲击波压力。同时,表 8 中数据为 TNT 炸药和 5 种配方含铝炸药通过模型计算得到的冲击波峰值超压的统计结果。

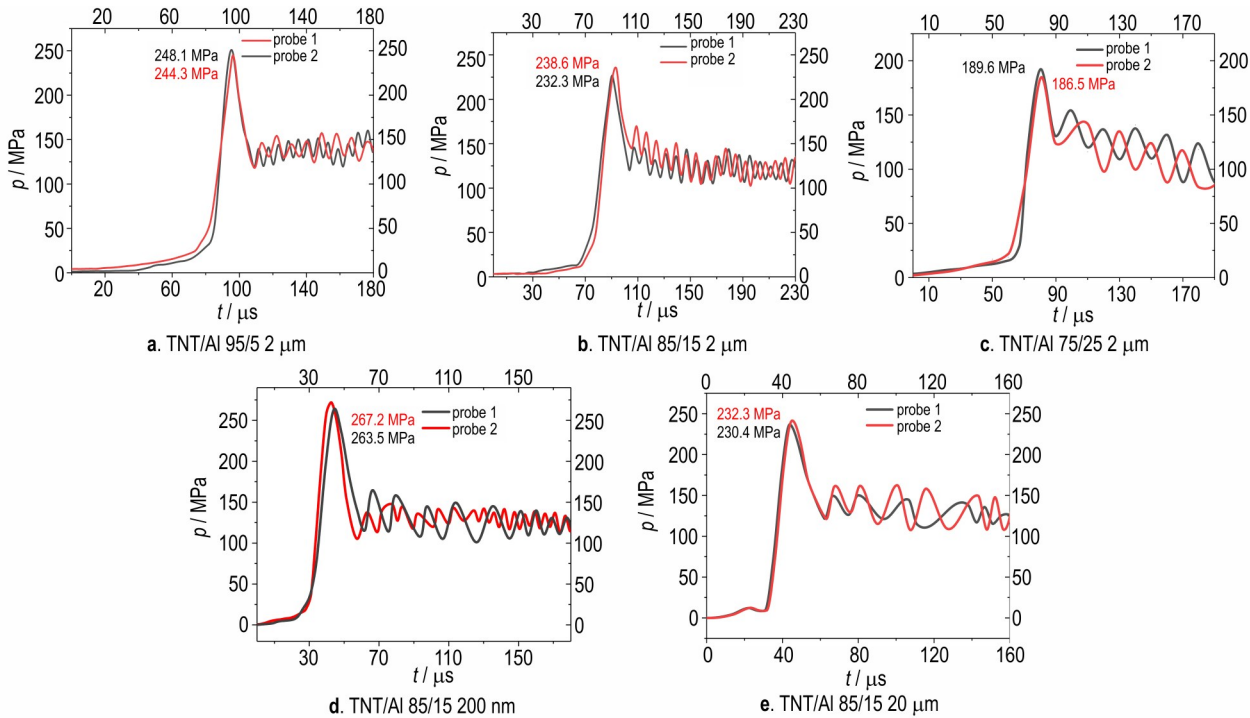


图 16 不同配方含铝炸药水下爆炸 $5 R_0$ 处驱动金属飞片的入射冲击波压力

Fig. 16 The incident shock wave pressure driving the metal plate at $5 R_0$ subjected to underwater explosion of different formulated aluminized explosives

分析图 13 和图 16,对比 TNT 炸药和 1#~3#配方含铝炸药水下爆炸后的计算结果可以发现,较 TNT 炸药相比,含铝炸药随着铝粉(粒度为 $2 \mu\text{m}$)的加入,其水下爆炸后飞片的入射冲击波峰值压力明显降低。如表 8 所示,当铝粉含量为 25% 时,入射波峰值压力下降 26.7%。通过分析水中初始冲击波参数可知,水中爆炸冲击波峰值参数主要由炸药的爆压和爆速决定。所以,当铝粉粒度为 $2 \mu\text{m}$ 时,加入铝粉,降低了炸药的爆压和爆速,并且铝粉含量越高,爆压和爆速降低的越多。这也能证明 $2 \mu\text{m}$ 的铝粉在爆轰反应区内基本不参与反应,反而通过自身的加速和升温吸收爆轰能量,使爆轰波阵面的参数降低。

对比(2)#、(4)#和(5)#配方含铝炸药水下爆炸结果可知,当铝粉含量均为 15% 时, $20 \mu\text{m}$ 铝粒子与 $2 \mu\text{m}$ 铝粒子的含铝炸药水下爆炸入射冲击波峰值压力相近,均低于 TNT 炸药水下爆炸结果。而当铝粒子尺寸为 200 nm 时,其峰值压力略高于(2.9%)TNT 炸药水下爆炸入射波峰值压力。结果证明,200 nm 尺寸

铝粉 TNT/Al 85/15 炸药的初始爆速与爆压较 TNT 炸药相比没有下降,反而在爆轰波阵面后续的驱动和做功能力显著增强。

表 8 不同配方炸药水下爆炸 $5 R_0$ 处入射冲击波峰值压力
Table 8 Peak incident shock wave pressure at $5 R_0$ in underwater explosions of different formulated explosives

number	peak incident wave pressure / MPa	average value / MPa	comparison with TNT / %
0	263.8	258.0	-
0	252.2		
1	248.1	246.2	-4.6
1	244.3		
2	232.3	235.5	-8.7
2	238.6		
3	188.5	189.1	-26.7
3	189.6		
4	267.2	265.4	2.9
4	263.5		
5	230.4	231.4	-10.3
5	232.3		

4 结论

本研究基于水下近场爆炸强冲击波与其驱动气背金属板运动规律,建立了基于金属板运动计算作用其表面入射冲击波压力的模型。开展了TNT炸药水下近场爆炸数值仿真,得到了自由场压力和气背金属飞片运动的规律,利用仿真数据验证了压力计算模型的可靠性和准确性。在此基础上,利用PDV速度干涉仪测试手段,开展了TNT炸药和不同配方含铝炸药水下近场爆炸驱动气背金属飞片试验,并通过试验结果验证了仿真结果和计算模型。同时还研究分析了TNT基含铝炸药水下爆炸近场冲击波超压规律及其驱动特性与铝粒子尺寸和含量的关系。主要结论如下:

(1) 在TNT炸药水下爆炸研究中,飞片加速过程的仿真和试验结果具有较高的一致性。分别基于飞片速度试验值和仿真值计算得到的入射波压力曲线与自由场冲击波压力曲线在压力衰减阶段前期(金属板最大速度时刻前)具有较高的一致性,且压力峰值误差也均小于10%,验证了冲击波压力计算模型的准确性、可靠性。

(2) 含铝炸药中铝粉的加入导致飞片加速时间明显变长,飞片加速时间与铝粉($2\text{ }\mu\text{m}$)含量大致成正比例关系,而飞片最大速度并不是随着铝粉含量的增加一直增加。飞片最大速度随着铝粉粒度增加显著减小,三种铝粒子尺寸(TNT/Al=85/15)含铝炸药水下爆炸驱动飞片最大速度均高于TNT炸药驱动结果。

(3) 微米级铝粉的加入明显降低水下爆炸后的冲击波峰值压力,说明微米级铝粉在爆轰反应区内基本不参与反应,降低了主体炸药的爆压和爆速。而含200 nm铝粒子含铝炸药(TNT/Al 85/15)水下爆炸冲击波峰值压力与TNT炸药结果相当,说明200 nm的铝粉可能在爆轰反应区部分参与反应,释放能量,并且正向支持爆轰波的传导。

参考文献:

- [1] COLE R H. Underwater explosions [M]. Princeton, USA: Princeton Univ Press, 1948.
- [2] KELLER J B, MIKISIS M. Bubble oscillations of large amplitude[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68 (2): 628-633.
- [3] ZHANG J-X, WANG S-S, JIA S-Y, et al. An engineering application of Prosperetti and Lezzi equation to solve underwater explosion bubbles[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(1): 017118.
- [4] 王晗程,何勇,焦俊杰.不同试验条件下水下爆炸能量输出特性研究[J].*南京理工大学学报*,2024,48(6): 747-755.
- WANG Han-cheng, HE Yong, JIAO Jun-jie. Energy output characteristics of underwater explosion under different experimental conditions[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2024, 48(6): 747-755.
- [5] 谷鸿平,陈达,张立建.非理想炸药水中爆炸载荷相似律数值仿真[J].*火炸药学报*,2024, 47(8):686-695.
- GU Hong-ping, CHEN Da, ZHANG Li-jian. Numerical simulation of similarity law of underwater explosion load produced by non-ideal explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(8): 686-695.
- [6] KIRA A, FUJITA M, ITOH S. Underwater explosion of spherical explosives[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 85(1-3): 64-8.
- [7] 池家春,马冰.TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究[J].*高压物理学报*,1999, 13(3): 199-204.
- CHI Jia-chun, MA Bing. UNDERWATER EXPLOSION WAVE BY A SPHERICAL CHARGE OF COMPOSITION B⁻³ [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13 (3) : 199-204.
- [8] 明付仁.水下近场爆炸对舰船结构瞬态流固耦合毁伤特性研究[D].哈尔滨工程大学,2014.
- MING Fu-ren. Damage Characteristics of Fluid-Structures Interaction of Warship Structures Subjected to Near-Field Underwater Explosions[D]. Harbin Engineering University, 2014.
- [9] 沈飞,王辉,余然.两种含铝炸药水中近场冲击波传播规律研究[J].*爆破器材*,2014, 43(5): 26-9.
- SHEN Fei, WANG Hui, YU Ran. Propagation characteristics of close-field shock wave for two aluminized explosives by underwater explosion [J]. *Explosive Materials*, 2014, 43 (5) : 26-9.
- [10] 胡宏伟,王建灵,徐洪涛.RDX基含铝炸药水中爆炸近场冲击波特性[J].*火炸药学报*,2009, 32(2): 1-5.
- HU Hong-wei, WANG Jian-ling, XU Hong-tao. Underwater Shock wave characteristics of RDX-based aluminized explosives in near-field range [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(2): 1-5.
- [11] 孙远翔,田俊宏,张之凡.含铝炸药近场水下爆炸冲击波的实验及数值模拟[J].*振动与冲击*,2020, 39(14):171-178.
- SUN Yuan-xiang, TIAN Jun-hong, ZHANG Zhi-fan. 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.
- [12] 潘建强,盛振新,毛海斌.水下爆炸条件下近药包表面能量测试技术研究[J].*中国测试*,2016, 42(10): 1-8.
- PAN Jian-qiang, SHENG Zhen-xin, MAO Hai-bin. Research on the measurement technology of energy near the charge for underwater explosion [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 1-8.
- [13] SANDUSKY H, CHAMBERS P, ZERILLI F. Dynamic measurements of plastic deformation in a water-filled aluminum tube in response to detonation of a small explosives charge [J]. *Shock and Vibration*, 1999, 6(3): 125-32.
- [14] WARDWAW JR A B, LUTON J A. Fluid-structure interaction mechanisms for close-in explosions[J]. *Shock and Vibration*, 2000, 7(5): 265-75.
- [15] 唐廷,朱锡,韦灼彬.水下爆炸冲击波作用下空气背衬平板的运动[J].*兵工学报*,2012, 33(7): 831.
- TANG Ting, ZHU Xi, WEI Zhuo-bin. Movement of Air

- backed plane plates subjected to shock wave of underwater explosion[J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2012, 33(7): 831.
- [16] 罗泽立, 周章涛, 毛海斌. 水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法[J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 443-52.
- LUO Ze-li, ZHOU Zhang-tao, MAO Hai-bin. Theoretical analysis of the interaction between plate structures and strong shock waves in underwater explosions[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(4): 443-52.
- [17] 宋浦, 杨凯, 梁安定. 国内外 TNT 炸药的 JWL 状态方程及其能量释放差异分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 42-5.
- SONG Pu, YANG Kai, LIANG An-ding. Differences analysis on JWL-EOS and energy release of different TNT charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(2): 42-5.
- [18] 周章涛, 刘建湖, 裴红波. 水下近距和接触爆炸流固耦合作用机理及加载效应研究[J]. 兵工学报, 2017, (S1): 136-45.
- ZHOU Zhang-tao, LIU Jian-hu, PEI Hong-bo. Fluid-structure interaction mechanism and loading effect in close-in and contact underwater explosions[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, (S1): 136-45.
- [19] 柳剑. 不同配方含铝炸药爆轰反应机理及驱动特性研究[D]. 北京理工大学, 2023.
- LIU Jian. Study on the Detonation Reaction Mechanism and Driving Characteristics of Aluminized Explosives with Different Formulations[D]. Beijing Institute of Technology, 2023.

Near-field Explosion Shock Wave Loading and Driving Characteristics of TNT Based Aluminized Explosives

LIU Jian¹, BAI Fan², ZHANG Long-hui¹

(1. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; 2. China Ordnance Industry Testing and Research Institute, Shaanxi 714200, China)

Abstract: The pressure of underwater near-field explosion is high and damping rapidly, which is difficult to test accurately. To investigate the near-field explosion shock wave loading and driving characteristics of aluminized explosives, a model was established to calculate the incident shock wave pressure according to the theory of strong shock wave driving air-backed metal plate. Finally, tests of underwater explosion driving 3 mm-thick air-backed steel plate at 5 R_0 were conducted on TNT and five different aluminized explosives, which verified the accuracy of the shock wave pressure calculation model. The free-field shock wave pressure at 2 R_0 –6 R_0 (charge radius) distance of spherical TNT charges and driving law of 3 mm-thick air-backed steel plate were calculated by numerical simulation. Then the shock wave pressure before cavitation was calculated based on the velocity-time history data. Results also show that for every 5% increase in the content of 2 μm aluminum, the acceleration time of plates increases by 4.4%. With larger particle size of aluminum powder, the acceleration time of plate is longer, but the maximum velocity is smaller. 20 μm and 2 μm aluminum powder absorbs energy in the detonation reaction zone, resulting in a decrease in the detonation velocity and pressure of TNT. While 200 nm aluminum powder may partially participate in the detonation reaction zone and release energy, which positively supports the propagation of detonation waves.

Key words: aluminized explosive; underwater near-field explosion; shock wave; metal plate

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025021

(责编: 高毅)