文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-14

TNT基含铝炸药水下近场爆炸冲击波载荷及驱动特性

柳 剑',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。采用数值仿真方法探究球形 TNT 装药水下爆炸 2 R₀~6 R₀(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。通过 TNT 炸药水下爆炸 5 R₀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。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 铝粉在可能在爆 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

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

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

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,DOI:10.11943/CJEM2025021. LIU Jian,BAI Fan,ZHANG Long-hui. Near-field Explosion Shock Wave Loading and Driving Characteristics of TNT Based Aluminized Explosivess[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), DOI:10.11943/CJEM2025021.

CHINESE JOURNAL OF ENERGETIC MATERIALS

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

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(R₀~6R₀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。





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 m·s⁻¹, λ_{w} =1.75, 钢参数为 c_{s} =4569 m·s⁻¹, λ_{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]:

 $C_{R}(p_{1}) = 0.012p_{1}^{5} - 0.0211p_{1}^{4} + 0.1440p_{1}^{3} - 0.0211p_{1}^{4}$

 $0.4753p_1^2 + 0.7974p_1 + 1.9560$ (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]:

$$m \,\mathrm{d}\,u_{\rm p}/\,\mathrm{d}\,t = C_{\rm R}(p_{\rm 1})p_{\rm 1} - \rho_{\rm 2}D_{\rm 3}u_{\rm p}$$
 (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,kg·m⁻²; u_p 为金属平板的运动 速度,m·s⁻¹, ρ_2 为反射冲击波作用后水的密度,kg·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 p₁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 击波下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



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

示。采用 Euler-Lagrange 耦合算法,欧拉空气域为 400 mm×400 mm×200 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 mm×15.6 mm×3 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):

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

式中,p为压力,GPa;A,B,R₁,R₂,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]

	2							5
ρ /g·cm ⁻³	D /mm∙µs ⁻¹	р /GPa	A /GPa	<i>B</i> /GPa	R_1	R_{2}	W	E ∕MJ∙kg ⁻¹
1.583	6.880	19.4	307.3	3.898	4.485	0.79	0.30	4190

空气采用采用理想气体状态方程描述,具体的表达式为^[18]:

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

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

3

含能材料 XXXX年 第 XX 卷 第 XX 期 (1-13)

(6)

 表 2
 空气的状态方程参数^[18]

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

 ρ/g·cm⁻³
 γ
 ē / kJ·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:



图4 水的两相状态方程[18]

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

这里, c_0 的值取1647 m·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]:

$$\sigma_{\gamma} = \left(A + B\varepsilon_{p1}^{n}\right) \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{p1}}{D}\right)^{\frac{1}{q}}\right)$$
(7)

式(7)中: σ_{γ} 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{s}_{p1} 为塑性应变率,钢板的材料参数如下表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 metalplates^[18]

E/GPa	V	A / MPa	В	n	D	q	
210	0.28	264	400	1	40	5	

图 5 为 5 R₀爆距处飞片的加速过程,当爆距为 5 R₀时,冲击波经过 53.04 µs 到达飞片表面,经过 19 µs 左右,飞片速度达到最大,之后飞片的速度出现 震荡。





Fig.5 Evolution contour of shock wave loading and plate velocity at 5 R₀ for spherical TNT underwater explosion

图 6 为 TNT 水下爆炸 2 R₀~6 R₀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2R₀~6R₀不同距离处金属飞片速度 u₀

的仿真结果代入到公式(2)中,对时间 t进行微分,再 利用 vpasolve 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 R₀~6 R₀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 R₀~6 R₀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 R₀~6 R₀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 $R_0 \sim 6 R_0$ 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 $R_0 - 6 R_0$

		0 0	
distance	incident shock wave	first peak speed	acceleration
	F F	max(1) , e	
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





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

含能材料

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 R₀~6 R₀ 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 R₀和 6 R₀时刻的压力云图,图 8 为 TNT 炸药水下爆炸后 2 R₀~6 R₀距离处自由场压 力-时程曲线。

然后,将球形TNT 2 R₀~6 R₀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



b. the shock wave reaches the position of 6 R_0

1400 .27 GPa shock wave pressure(2 R₂) 1200 shock wave pressure(3 R.) shock wave pressure(4 R) 1000 shock wave pressure(5 R₀) shock wave pressure(6 R) 800 p / MPa 593.5 MPa 600 351.3 MPa 400 14 246.6 MPa 190.4 MPa 200 ٥ -200 Ó 20 40 60 80 100 120 140 t/μs

图 8 水下球形 TNT 炸药爆炸后 2 R₀~6 R₀距离处自由场压力时程曲线

Fig.8 Free field pressure histories at distances of 2 R_0 -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_{umax(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_{umax(1}),2 R₀~6 R₀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_{umax(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 R₀和 3 R₀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2R₀~6R₀处自由场压力与气背金属飞片入射波压力对比



表5 2 R₀~6 R₀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 $2R_0-6R_0$

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 g·cm⁻³,球形装 药半径为31 mm,爆速为6860 m·s⁻¹(实测)^[19];金属 飞片的材料、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 O235A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 m·s⁻¹, 采集 仪的带宽为8 GHZ,采样频率为25.0 GS·S⁻¹,,有效记 录时间长度设置为100 us。



a. laser spots on the tested fragment

```
b. testing arrangement
```

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 持完成,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 m·s⁻¹和 189.1 m·s⁻¹,加速时间分别为18.7 μs 和18.1 μs,两





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

	maximur	maximum speed of fragment / $m \cdot s^{-1}$		peak pre	ssure of incid	free filed pressure / MPa	
	testing va	alue V_E	simulation value V_s	testing va	alue P_{IE}	simulation value P_{IS}	simulation value P _{FE}
o ## o # / 0/	182.7	189.1	185.9	252.2	263.8	255.4	246.6
error/ %	1.7	1.7	-	2.3	7.0	3.6	-
		1		1.1	1		

果见表6。

350

300

250

200

150

100

50

Λ

0

MPa

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。

3 不同配方TNT基含铝炸药水下近场爆炸 试验

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

30

破片最大速度时刻

30 t/μs

Fig.13 Free field pressure and incident wave pressure of TNT

15

图13 TNT炸药水下爆炸自由场压力与入射波压力

free field pressure(simulation)

preesure of incident wave(simulation)

preesure of incident wave(probe 1)

-preesure of incident wave(probe 2)

45

45

60

350

300

250

200

150

100

50

-10

60

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

表7 不同配方的	TNT及	TNT基含铝炸药
----------	------	----------

Table 7	TNT and T	TNT based	aluminized	explosives w	vith different formula	tions
---------	-----------	-----------	------------	--------------	------------------------	-------

number	component of charge	content / %	size of aluminum / μm	radius of charge / mm	density of charge / $g \cdot cm^{-3}$	mass of charge / g
1#	TNT/AI	95/5	2	31	1.60	201.2
2#	TNT/AI	85/15	2	31	1.68	210.9
3#	TNT/AI	75/25	2	31	1.76	222.6
4#	TNT/AI	85/15	0.2	31	1.68	212.3
5#	TNT/AI	85/15	20	31	1.68	213.5

含能材料

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 15(a)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。处驱动金属飞片 PDV 测试结果

Fig.14 PDV test results of metal plates at 5 R₀ driven by underwater explosion of different formulated aluminized explosives





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5R。 处的水中入射冲击波压力。同时,表8中数据为TNT 炸药和5中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 R₀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 R₀subjected 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 μm)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 μm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 μm 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)号、(4)号和(5)号配方含铝炸药水下爆 炸结果可知,当铝粉含量均为15%时,20 µm 铝粒子 与2 µm 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/AI 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 R₀处入射冲击波峰值压力 Table 8 Peak incident shock wave pressure at 5 R₀ in underwater explosions of different formulated explosives

number	peak incident wave	average val-	comparison with	
	pressure / MPa	ue / MPa	INT results / %	
0	263.8	258.0	_	
0	252.2	230.0		
1	248.1	246.2	-16	
1	244.3	240.2	-4.0	
2	232.3	22E E	_ 9 7	
2	238.6	233.3	-0./	
3	188.5	100 1	26.7	
3	189.6	109.1	-20.7	
4	267.2		2.0	
4	263.5	205.4	2.9	
5	230.4	221.4	10.2	
5	232.3	231.4	-10.5	

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(2μm)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, MIKSIS 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

CHINESE JOURNAL OF ENERGETIC MATERIALS

含能材料

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]. Chi-

nese 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 Explosivess

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 . Firstly, 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. 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. Results also show that for every 5% increase in the content of 2 μ m 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 μ m and 2 μ m 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 waves.

Key words:aluminized explosive; underwater near-field explosion; shock wave; metal plateCLC number:TJ55; O64Document code:A

DOI: 10.11943/CJEM2025021

(责编:高毅)

图文摘要:



(d) Experimental cylinder and fiber optic probe (e) Experimental spherical aluminized expllosive

During the process of the movement of metal plates driven by underwater explosion shock wave, there must be mathematical laws between the shock wave pressure and the movement of plates. In the case where the near-field explosion shock wave loadings of aluminized explosives is not easily directly measured, this study constructed a model based on the velocity of the metal plate to calculate the incident shock wave pressure skillfully. And the effectiveness and applicability of the model were verified through numerical simulation methods. Finally, underwater explosion tests were conducted on TNT and five different TNT based aluminized explosives combined with the PDV, obtaining the shock wave loading and driving characteristics of different aluminized explosives, revealing the detonation reaction mechanism of TNT based aluminized explosives from the macroscopic perspective.