DOI: 10.11883/bzycj-2017-0155
文章编号: 1001-1455(2018)01-0009-10

钛基纤维炸药水下爆炸性能的初步分析*

陈海军[1],马宏昊[1,2],沈兆武[1],王 波[1],杨 明[1],崔 宇[1]
(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽 合肥 230026)

摘要: 通过爆炸压力时程曲线分析含钛纤维炸药的压力峰值、水下比冲击波能、比气泡能、质量能量及能量密度变化趋势,通过对所得能量结果分析钛纤维炸药的化学反应过程。结果表明:含钛纤维炸药的压力峰值、比冲击波能随钛纤维含量的提高而降低,比气泡能随钛纤维含量的提高而增大,质量能量及能量密度都随钛纤维含量的提高而增大。随距离的增大,钛纤维炸药压力峰值衰减比 RDX 的慢,而不同钛纤维含量的钛纤维炸药的比冲击波能、比气泡能在不同距离处随钛纤维含量变化趋势基本一致。根据炸药反应释放的总比能量进行理论分析,得出钛纤维炸药爆炸反应方程式。

关键词: 钛纤维炸药;水下爆炸;总比能量;能量密度
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**: A

增大装药的能量密度是提高炸药爆炸能量的重要手段。为了提高炸药的能量,在炸药中添加适量的如镁、锂、铝、硼等物质。最开始通过在炸药中添加铝粉,利用铝粉与炸药的爆轰产物反应释放能量以提高炸药的爆炸威力[1]。对含铝炸药的爆轰性能已经有大量研究,冯晓军等[2]通过实验得出铝粉含量对炸药爆炸加速能力的贡献有一最佳值,RDX 基含铝炸药最佳含量为 15%。周俊祥等[3]研究发现铝粉与爆轰产物的反应明显减缓了水中冲击波后压力的衰减,提高了冲击波的能量及冲量。还有一些实验探究了硼添加剂对炸药性能的影响,如 Makhov[4]研究得出硼的加入能显著提高混合炸药的爆热和加速能力。黄亚峰[5]把硼粉加入 RDX 中,结果显示其可以提高炸药爆热、水下能量等。虽然对在炸药中加入各种添加剂的研究成果丰富,但对含钛炸药的研究很少。而金属钛具有比强度高,无磁性等优点,在地壳中含量约为 0.64%,其含量在金属中排在第四位[6],其单位质量的钛放热比黑索金等传统炸药高出许多,且钛的密度比较大(钛的密度达到 4.54 g/cm^3,而金属炸药中常用的含铝炸药中铝的密度只有 2.7 g/cm^3),使得在战斗部狭小的空间内能够携带更多的能量,在军事上具有极其重要的意义。因此,本文中以直径为 8 μm 的钛纤维作为炸药金属添加剂,来研究钛纤维炸药水下爆炸能量。

1 实 验

RDX 基含钛纤维炸药的配方见表 1。钛纤维直径 8.0 μm,混药时把钛纤维长度截成 3.0 cm,使钛纤维与 RDX 均匀混合,压成圆柱状药柱,药柱直径 1.3 cm,高 2.7 cm,如图 1 所示。炸药总质量为 5.0 g,密度为 1.4 g/cm^3,钛纤维的质量分数依次增大。采用铝壳包覆炸药,铝壳内径 1.3 cm,外径 1.6 cm,高 5.0 cm。每组配方炸药重复做 3 次实验。

表 1 含钛纤维炸药配方

Table 1 The formulation of Ti fiber explosive

序号	φ/%		
	RDX	Ti	wax
1	95	0	5
2	95	5	0
3	90	10	0
4	85	15	0

* **收稿日期**: 2017-05-04; **修回日期**: 2017-10-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(51674229,51374189);
中国科学技术大学重要方向培育基金项目(WK2480000002)
第一作者: 陈海军(1993—),男,硕士研究生; **通信作者**: 马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。



图 1 钛纤维和铝壳包覆的钛纤维炸药

Fig. 1 Ti fiber and Ti fiber explosive coated by aluminum shell

水下爆炸实验在水下爆炸箱中进行，如图 2 所示。$H_1=5.0$ m，为水的深度；$H_2=2.5$ m，为传感器距离水面的深度；$R_1=1.0$ m，为左侧传感器与药柱的距离；$R_2=1.2$ m，为右侧传感器与药柱的距离；$D=5.0$ m，为水下爆炸罐的直径。传感器与药柱保持在同一水平面。由于冲击波在水中传播，衰减较慢且信号比较稳定，因此每个距离处只用 1 个传感器即可。测试前用雷管对测量系统进行现场标定。

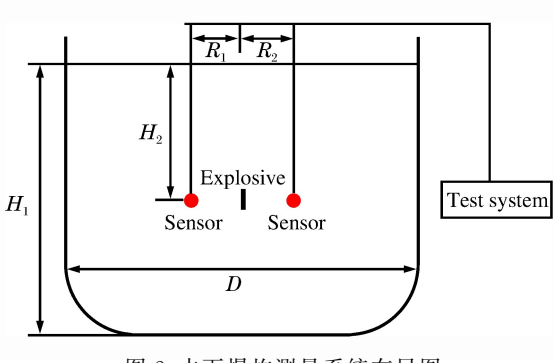


图 2 水下爆炸测量系统布局图

Fig. 2 System of underwater explosions

2 结果与分析

2.1 水下爆炸压力峰值分析

图 3 所示为含钛纤维炸药水下 2.5 m 起爆后距爆心 1.0 m 处的经过低通滤波处理后的冲击波压力时程曲线图。图中冲击波后面的几个压力峰值是由于水下爆炸箱壁面反射形成的，从图中可以看出含钛纤维炸药气泡脉动周期约为 51 ms。

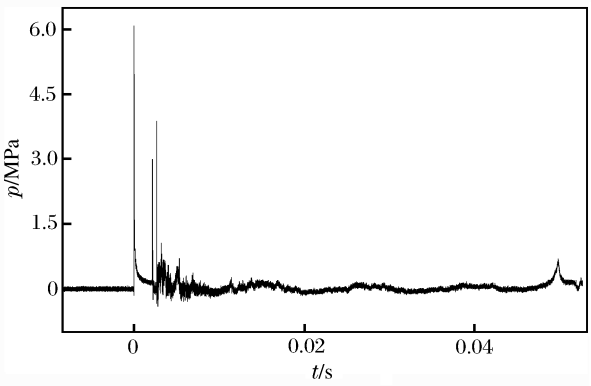


图 3 实验得到的钛纤维炸药水下冲击波压力时程曲线

Fig. 3 History of pressure for underwater shock wave of Ti-fiber explosive by experiment

学者们根据实验测试以及理论计算对炸药爆炸压力进行经验拟合，得出各种拟合函数表达式。比较经典的有奥尔连科[7]拟合的函数表达式：

$$p(t)=\begin{cases}p_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\theta}} & 0<t<\theta\\ p_{\mathrm{m}}0.368\theta/t & \theta<t<(5\sim10)\theta\end{cases}\tag{1}$$

式中：$p(t)$为冲击波压力随时间变化的函数，p_{m}为压力峰值，θ是衰减时间常数，为 p_{m}到 $p_{\mathrm{m}}/\mathrm{e}$ 的时间差，t 为时间。对压力时程曲线进行拟合前要确定压力峰值与时间常数，在对爆炸压力曲线进行分析的过程中，会发现压力时程曲线的压力峰值若直接读取会有较大误差，且有时不能准确判断峰值所处位置处，因此采用 Ethridge[8]作图法，对压力时程曲线的压力取对数，得到压力对数时程曲线，如图 4 所示。在压力对数时程曲线中，有一段呈线性，将线性段延伸，延伸段会与曲线上升段交于一点，取交点处对应的压力为该曲线的压力峰值，拟合得到的公式为：

$$\ln p=2.307-0.059t\tag{2}$$

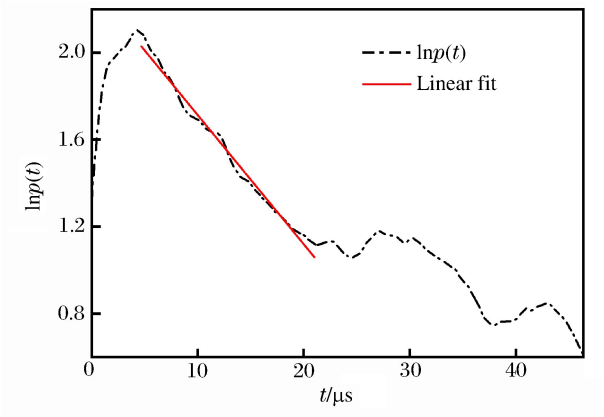


图 4　钛纤维炸药水下爆炸压力对数时程曲线

Fig. 4　History of logarithmic pressure for underwater explosion of Ti-fiber explosive

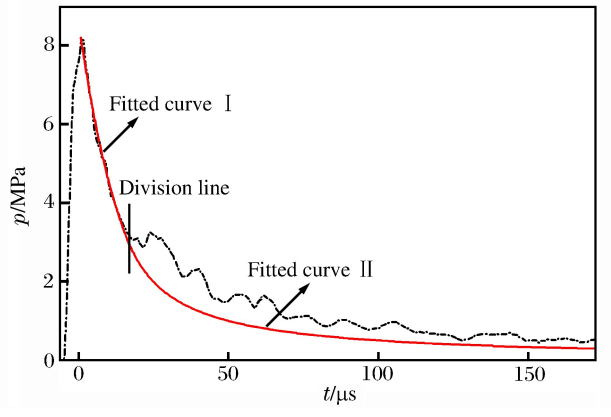


图 5　钛纤维炸药水下爆炸压力时程拟合曲线

Fig. 5　Fitted history of pressure for underwater shock wave of Ti-fiber explosive

根据式(1)对压力时程曲线进行拟合，如图 5 所示。图 5 中拟合曲线Ⅰ为 $t<\theta$ 部分的拟合，拟合曲线Ⅱ为 $\theta<t<10\theta$ 部分的拟合：对压力时程曲线初始段拟合效果较好，对后面曲线拟合效果不是十分理想，在 17.9 μs 之后，实验所得曲线在拟合曲线之上，这部分形成原因是钛的加入使得压力曲线相比于 *RDX* 有所提升，且在本实验中，药柱有铝壳约束，使钛纤维反应程度增强，加剧了实验压力曲线大于拟合压力曲线这种现象。图 5 中拟合曲线Ⅰ的拟合公式为：

$$p=8.66\mathrm{e}^{-\frac{t}{15.671}} \tag{3}$$

由以上可知：钛纤维炸药的压力时程曲线初始衰减部分可以用式(1)拟合，但后半部分拟合效果不理想。

对压力峰值进行量纲分析[9]：决定水中爆炸冲击波强度的因素有炸药质量 Q、装药密度 ρ_e、单位质量炸药释放的化学能 E_e、单位质量的钛释放的热量 E_t、爆炸产物的膨胀指数 γ_e、钛纤维含量的质量分数 φ、水的初始密度 ρ_w、状态方程压力参数 B、绝热指数 γ_w、药柱离传感器测点处的距离 R。水的状态方程可以表达为：

$$p-p_a=B\left[\left(\frac{\rho}{\rho_w}\right)^{\gamma_w}-1\right] \tag{4}$$

式中：ρ_w为水在常温下的密度，$B=299.10$ MPa，$\gamma_w=7.15$，p_a为爆炸前水的压力，p 为爆炸时水的压力，ρ 为爆炸时水的密度。于是，水下冲击波的峰值压力 p_m应当为上述因素的函数，即：

$$p_m=f(Q,\rho_e,E_e,E_t,\varphi,\gamma_e,\rho_w,B,\gamma_w,R) \tag{5}$$

可取 Q、ρ_e、E_e作为基本量，则上式可以化为下面的无量纲关系：

$$\frac{p_m}{\rho_e E_e}=f\left(\frac{E_t}{E_e},\varphi,\gamma_e,\frac{\rho_w}{\rho_e},\frac{B}{\rho_e E_e},\gamma_w,\frac{R}{(Q/\rho_e)^{\frac{1}{3}}}\right) \tag{6}$$

由于 ρ_e、E_e、E_t、γ_e、ρ_w、B、γ_w这些参数是固定的，无量纲的超压峰值便可简化为：

$$\frac{p_m}{\rho_e E_e}=f\left(\frac{R}{(Q/\rho_e)^{\frac{1}{3}}},\varphi\right) \tag{7}$$

由于 $(Q/\rho_e)^{\frac{1}{3}}$ 表征炸药的特征长度，则水下爆炸的超压峰值服从几何相似律。利用实验结果计算压力峰值与各物理量之间的关系时，由于公式中的 ρ_e、E_e保持不变，使得其对 p_m的大小影响保持不变，而且还由于对表达式中的 R、Q 及 p_m，都预先规定了所使用的单位，因此式(7)可以简化为：

$$p_m=f(R/Q^{\frac{1}{3}},\varphi) \tag{8}$$

即在该实验条件下，压力峰值只与 R 及 φ 有关，由于实验中在 R 变量上只有 1.0、1.2 m 两个数值，无法在 R 变量上进行深入分析，因此本文中主要对炸药随着 φ 的变化而分析各个性能的变化。对比冲击波能、比气泡能，总比能量进行量纲分析可以得出相似的结果。

图 6 所示为不同钛纤维含量的炸药含钛纤维的质量分数与压力峰值之间的关系，图中误差棒为每组数据的标准偏差。从图中可看出，在 1.0、1.2 m 距离处，拟合曲线分别为：

$$p_{\mathrm{m}}=2.002\mathrm{e}^{-\frac{\varphi}{3.375}}+6.757 \tag{9}$$

$$p_{\mathrm{m}}=6.553-0.023\varphi \tag{10}$$

在 1.0 m 处，压力峰值随钛纤维含量的提高呈指数形式衰减，在 1.2 m 处，压力峰值衰减较平缓。1.0 和 1.2 m 处，质量分数 15%的钛纤维相比 RDX 峰值降低了 22.95%、5.18%。一般情况下，炸药在水中爆炸时，其压力峰值与距离的关系为：

$$p_{\mathrm{m}}=A\left(\frac{R}{R_0}\right)^{\alpha} \tag{11}$$

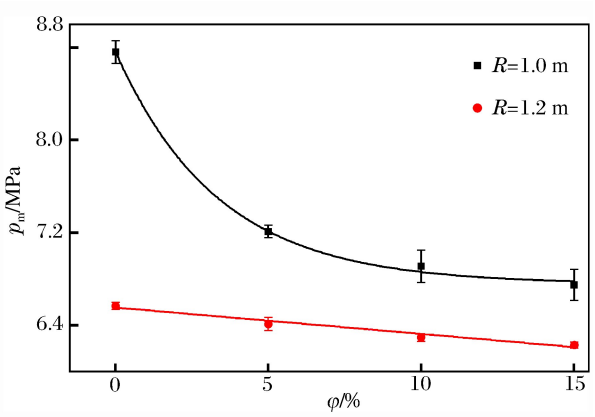


图 6 钛纤维炸药压力峰值与钛纤维质量分数关系

Fig. 6 Relationship between the shock wave peak pressure and the mass fraction of Ti fiber

式中：p_{m}为冲击波压力峰值，A、α 为待拟合系数，R 为药柱离传感器的距离，R_0为药柱的半径。α 的取值一般约为−1，可见压力峰值随比距离的增大，衰减较快。表 2 所示为钛纤维炸药在不同含量和不同距离处压力峰值的大小。表 3 所示为当加入钛纤维时，不同的钛纤维含量炸药相对于低含量钛纤维炸药压力峰值降低的比例。如钛纤维质量分数 5%对应压力峰值降低比例计算过程如下：先得到质量分数 0%时压力峰值与质量分数 5%时的压力峰值之差，再拿差值除以质量分数 0%时的压力峰值即得到压力峰值衰减比例。从表 3 中可以看出，当加入钛纤维后，随比距离的增大炸药峰值衰减较慢，原因为钛纤维参与反应，延缓了压力峰值的衰减。且根据表 2 中的数值可以计算出 RDX 随距离的增大压力峰值降低了 25%，质量分数 15%的钛纤维炸药随距离的增大压力峰值降低了 7.70%。

表 2 含钛纤维炸药在不同距离处各质量分数下的压力峰值

Table 2 The peak pressure of Ti-fiber explosive at different distances and different mass fraction

R/m	p_{m}/MPa			
	φ(Ti)=0%	φ(Ti)=5%	φ(Ti)=10%	φ(Ti)=15%
1.0	8.76	7.21	6.91	6.75
1.2	6.57	6.41	6.29	6.23

表 3 含钛纤维炸药在不同距离处各质量分数下的压力峰值降低百分比

Table 3 Percentage reduction in peak pressure of Ti-fiber explosive at different distances and different mass fraction

R/m	$(p_{\mathrm{m}}^{(0)}-p_{\mathrm{m}}^{(5\%)})/p_{\mathrm{m}}^{(0)}$	$(p_{\mathrm{m}}^{(5\%)}-p_{\mathrm{m}}^{(10\%)})/p_{\mathrm{m}}^{(5\%)}$	$(p_{\mathrm{m}}^{(10\%)}-p_{\mathrm{m}}^{(15\%)})/p_{\mathrm{m}}^{(10\%)}$
	φ(Ti)=5%	φ(Ti)=10%	φ(Ti)=15%
1.0	17.69%	4.16%	2.32%
1.2	2.44%	1.87%	0.95%

2.2 比冲击波能、比气泡能、总比能量、能量密度分析

比冲击波能 E_{s}和比气泡能 E_{b}可以利用测得的冲击波压力时程曲线再经下面的公式计算得到[10]：

$$E_{\mathrm{s}}=\frac{4\pi R^2}{Q\rho_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}}\int_0^{6.7\theta}\Delta p^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{12}$$

$$E_{\mathrm{b}}=\frac{(\sqrt{1+4CT_{\mathrm{b}}}-1)^3}{8C^3k^3Q} \tag{13}$$

式中：c_{w}为水的音速，m/s；T_{b}为炸药气泡脉动时间；C 为边界效应的校正系数，C 在实验条件保持不变的情况下是常数，在与该实验相同的条件下测得 C 值为−0.919 5 s^{-1}；k 为关于ρ_{w}和测点处流体总静水压力的常数，经实验测试 k 取值为 0.002 019。

图 7～8 所示为不同钛纤维含量的炸药含钛纤维的质量分数与比冲击波能 E_s、比气泡能 E_b 之间的关系。在图 7 中，随钛纤维质量分数的增大，比冲击波能呈递减趋势，质量分数为 15%的钛纤维炸药在 1.0、1.2 m 处相比 RDX 比冲击波能分别降低 6.25%、5.04%。在图 8 中，随钛纤维质量分数的增大，比气泡能呈增大趋势，质量分数为 15%的钛纤维炸药在 1.0、1.2 m 处相比 RDX 比气泡能分别增大了 24.33%、24.67%。比冲击波能在 1.0、1.2 m 距离处的拟合曲线分别为：

$$E_s = 1.436 - 0.006\varphi \tag{14}$$

$$E_s = 1.186 - 0.004\varphi \tag{15}$$

比气泡能在 1.0、1.2 m 距离处的拟合曲线分别为：

$$E_b = 3.021 + 0.049\varphi \tag{16}$$

$$E_b = 3.028 + 0.049\varphi \tag{17}$$

钛纤维作为一种金属添加剂，只有极少部分参与了炸药的爆轰反应，大部分钛纤维是与炸药的爆轰产物反应，释放热量。钛纤维炸药的比气泡能大于 RDX 的，而比冲击波能小于 RDX 的，这是由于大部分钛纤维在炸药爆轰过后才参与反应的。

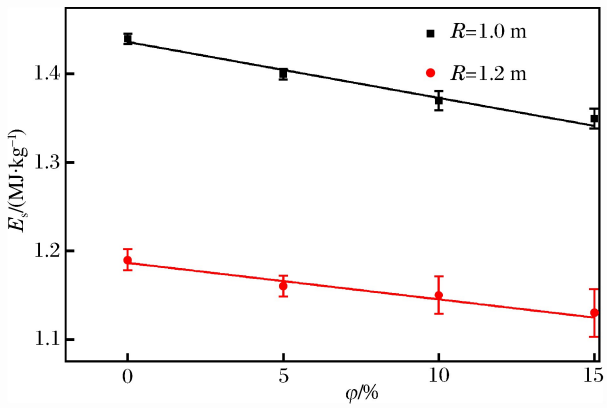


图 7　比冲击波能与钛纤维质量分数关系

Fig. 7　Relationship between the shock wave energy per unit mass and the mass fraction of Ti fiber

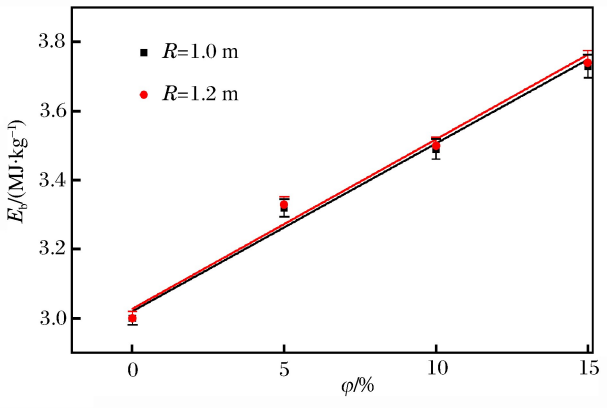


图 8　比气泡能与钛纤维质量分数关系

Fig. 8　Relationship between the bubble energy per unit mass and the mass fraction of Ti fiber

钛纤维炸药在反应的开始阶段，在爆轰波压缩下炸药发生化学反应放热，纯钛的熔点在 1 670 ℃，RDX 炸药的爆温在 3 400 ℃[11]，二氧化钛的熔点约为 1 800 ℃[12]。因此，钛纤维表面的氧化膜会因为高温破裂，纯钛外露，周围的炸药与钛发生反应。另一方面，爆轰波经过炸药，相当于对炸药进行绝热压缩，前一部分炸药爆炸产生的爆轰波会破坏钛纤维表面的氧化层，使部分未被氧化的钛释放出来，进而与炸药产生化学反应。由于炸药反应速度很快，这就使得只有很少的钛纤维直接参与炸药的爆炸反应，大部分钛是与炸药的爆轰产物反应。

RDX 炸药爆炸产生的气泡脉动时间约在 46 ms，在这段时间内，爆轰产物在高温状态下迅速向外膨胀，钛纤维与爆轰产物充分混合，其反应速率大大提高，钛纤维燃烧放出的热量又反过来加速产物的热膨胀，使整个爆炸过程持续下去，表现为气泡脉动时间随着钛纤维质量分数的增大而增加，气泡脉动时间的增加又表现在比气泡能的增大。钛纤维的加入，使得对前期压力做主要贡献的 RDX 的质量分数减少，大部分钛纤维还没有燃烧放热，而冲击波冲量是对压力的平方积分，从而含钛纤维炸药的比冲击波能随钛纤维质量分数的增大而降低。

炸药水下爆炸产生的总比能量计算公式：

$$E = K_f(\mu E_s + E_b) \tag{18}$$

式中：$\mu = 1 + 1.332\,8 \times 10^{-1} p_{CJ} - 6.577\,5 \times 10^{-3} p_{CJ}^2 + 1.259\,4 \times 10^{-4} p_{CJ}^3$，$p_{CJ} = \frac{1}{4}\rho_e D^2$。其中：$E$ 为总比能量，MJ/kg；μ 为冲击波损失因数；K_f 为炸药的形状参数，对于球形，取 1.00；非球形，取1.02～1.10；

本实验中 K_f 取 1.05。ρ_e 为药柱的密度，kg/m^3；D 为炸药的爆速，m/s；p_{CJ} 为 C-J 压力，GPa。

图 9 所示为钛纤维炸药爆炸总比能量与钛纤维质量分数关系。图中可以看出含钛纤维炸药的总比能量随钛纤维的加入呈增大趋势，加入质量分数为 10% 的钛纤维后，总比能量在 1.0、1.2 m 处分别增大了3.72%、5.65%；加入质量分数为 15% 钛纤维后，在 1.0、1.2 m 处分别增大了 6.79%、9.36%。钛纤维炸药在较远距离处的能量增大比较高，是因为在较远测点处，钛纤维得到充分燃烧，所释放能量更多。钛纤维加入使得炸药比冲击波能降低，比气泡能增大，相当于把炸药的总比能量在水中以气泡能形式释放出来，增强了炸药在水中的破坏效应。

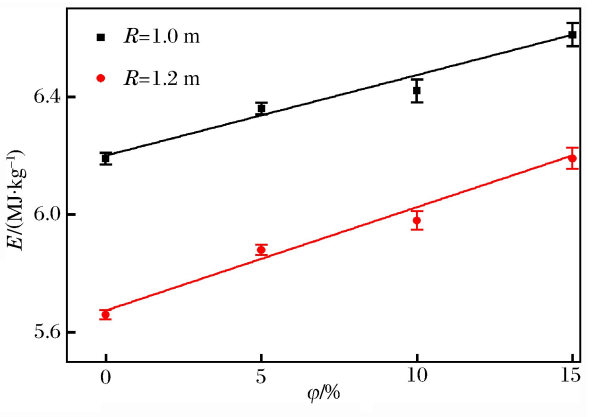


图 9 总比能量与钛纤维质量分数关系

Fig. 9 Relationship between the total energy per unit mass and the mass fraction of Ti fiber

图 9 中在 1.0、1.2 m 距离处，拟合曲线分别为：

$$E=6.201+0.027\varphi \tag{19}$$

$$E=5.675+0.035\varphi \tag{20}$$

对 RDX 而言，因距离的增大，能量降低了 8.56%。对质量分数 15% 的钛纤维炸药而言，因距离的增大，能量降低了 6.35%，即含钛纤维炸药在传播的过程中能量衰减较慢。

在本实验中，之所以加入铝壳是因为在前期实验中发现，若不加铝壳则在炸药爆炸时，炸药与水的接触面处反射的稀疏波会使钛纤维炸药中的钛纤维发生破坏，影响整个炸药的反应过程。而加入铝壳后，由于铝壳的约束作用使得钛纤维炸药能在炸药爆炸的瞬间反应，提高钛纤维炸药的能量利用率。铝壳的存在会使炸药的能量一部分用于破坏铝壳，且使铝壳产生一定的速度，从而消耗炸药的能量，使所测得的能量降低。由文献[13]可知：在有外壳约束的情况下，炸药爆炸产生破片的速度为：

$$V_f=\sqrt{2E_g}\left(\frac{M}{Q}+\frac{1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{21}$$

式中：E_g 为壳体破碎形成破片时 Gurney 能量，M 为壳体质量。在本文中铝壳的质量 M 是相同的，炸药的质量 Q 也是相同的，破片速度的差别取决于 E_g 的数值。由文献[14]可知：

$$\sqrt{2E_g}=0.739+0.622\sqrt{\rho_e\Phi} \tag{22}$$

$$\Phi=0.488\,9N\sqrt{q(1-\xi)} \tag{23}$$

式中：Φ 为混合炸药的能量示性数，N 为每克炸药所产生的气体爆炸产物的物质的量，mol/g；q 为每摩尔炸药的爆炸反应热，J/mol；ξ 为添加物占炸药的质量比，N、q 的值可在文献中查找到。Φ 值根据上面公式计算钛纤维炸药的结果为 6.47，RDX 对应的数值可在文献中直接查找，为 6.78，则根据 E_g 计算公式可以分别计算出钛纤维炸药、RDX 炸药的 $\sqrt{2E_g}$ 值分别为 2.63、2.65，其差别仅为 0.75%。由于铝壳各种性能是一样的，因此其只破坏铝壳所消耗的能量是相同的，而破碎的铝壳产生速度所消耗的能量差值只有 0.75%，且计算过程繁琐，因此本文中做了简化处理，简化过程对最终结果影响不大。

在比气泡能的计算过程中，由文献[15]可知：E_b 在实验条件相同的情况下只与炸药的气泡脉动时间 T_b 有关，而 $T_b=aW^{\frac{1}{3}}+bW^{\frac{2}{3}}$，其中 a、b 在相同的实验条件下为常数，本文实验中 $a=0.284\,89$，$b=-0.074\,63$，W 为等效的炸药质量，即把含钛炸药按爆热换算成 TNT 的质量。根据爆热转换，5 g RDX 转换成 6.91 g TNT，利用 T_b 的计算公式可求出 $T_b=0.051\,56$ s，由前面可知，因铝壳存在使得两种炸药消耗的能量差别为 0.75%，则含钛炸药换算成 TNT 的等效质量应为 6.858 g，计算出的 $T_b=0.051\,43$ s，其差别只有 0.25%，其数值比较小，忽略其计算对最终结果影响不大。

对于比冲击波能，比冲击波能的计算公式由式(12)可知，E_s 的变化只与距离和压力峰值有关，当距离不变时只与压力峰值有关。本实验中铝壳对比冲击波能的影响在于铝壳使炸药压力峰值产生变化，

而在文献[16]中：有外部约束时(约束外壳厚度较低时，如本文中铝壳厚度为 0.15 cm)，水下爆炸测得的压力峰值会稍有增大，即铝壳会影响炸药的比冲击波能，而具体影响范围的大小可以对比前面铝壳对总比能量和比气泡能的影响这两部分进行判断。根据前文中式(18)，可知：E_s 和 E_b 的综合变化导致了总比能量 E 的变化，而 E 的变化范围只有 0.75%，E_b 的变化范围只有 0.25%，且 E_s 和 E_b 是同方向变化的，则 E_s 的变化范围小于 0.75%。由此可见，铝壳对比冲击波能的影响在实验中也可以忽略。

根据前文中计算得到的炸药总比能量、RDX 炸药的密度、钛的密度、钛的质量分数，可以得到炸药的能量密度为：

$$e=\frac{E}{\frac{a}{\rho_e}+\frac{b}{\rho_{Ti}}} \tag{24}$$

式中：a 为单位质量钛纤维炸药中 RDX 炸药的质量，ρ_e 为 RDX 的密度，g/cm^3；b 为单位质量钛纤维炸药中钛的质量；ρ_{Ti} 为钛的密度，g/cm^3。

图 10 所示为钛纤维炸药能量密度与钛纤维质量分数关系。由图 10 可知：含钛纤维炸药的能量密度随钛纤维质量分数的增大而增大，在 1.0、1.2 m 处质量分数 15% 的钛纤维炸药的能量密度分别增大了 19.15% 和 22.02%。含钛纤维炸药能量密度比纯 RDX 炸药增大的较多，这是因为钛的密度比 RDX 大，单位体积所携带的能量比 RDX 高。

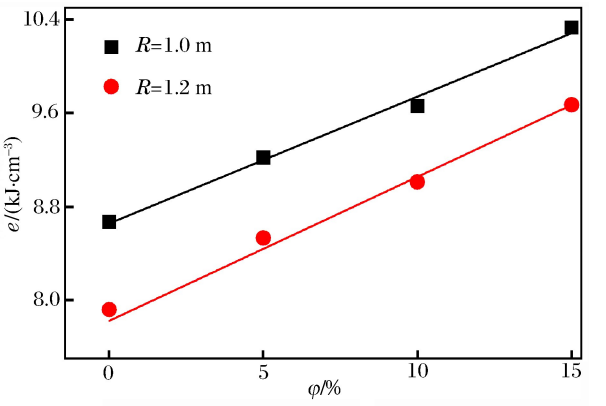


图 10 能量密度与钛纤维质量分数关系

Fig. 10 Relationship between the energy per unit volume and the mass fraction of Ti fiber

图 10 中的拟合曲线分别为：

$$e=8.657+0.108\varphi \tag{25}$$

$$e=7.923+0.115\varphi \tag{26}$$

对 RDX 而言，因距离的增大，所测得的能量降低了 8.56%。对质量分数 15% 的钛纤维炸药而言，因距离的增大，所测得的能量降低了 6.35%。

从上文中分析可知：1.2 m 处钛纤维炸药能量密度相对于 RDX 增大了 22.02%。文献中，在实验条件相同的情况下(1.2 m 距离处)10% 质量分数的铝纤维炸药总比能量为 5.290 MJ/kg[15]，把该比能量按照与钛纤维类似的方法转换成能量密度时，$e=\frac{5.29}{\frac{0.1}{2.7}+\frac{0.9}{1.6}}$ kJ/cm^3=8.82 kJ/cm^3，本文中计算的钛纤维能量密度为 9.66 kJ/cm^3，比铝纤维能量密度提高了 9.52%，这在军用炸药的使用中具有极其重要的意义，在战斗部空间普遍狭窄的情况下，提高单位体积的能量能使战斗部威力得到大幅度的提高。

2.3　对炸药爆炸反应方程式的理论分析

以下根据本实验中炸药所测得的能量，用理论方法确定炸药的爆炸反应方程式[17]。

对于 $C_aH_bO_cN_d$ 类炸药，产物组分多，情况复杂，在这里只考虑常见的 10 种爆炸产物，因此这里纯药柱爆炸变化方程的一般形式为：

$$C_aH_bO_cN_d=xCO_2+yCO+zC+uH_2O+wN_2+hH_2+iO_2+jNO+NH_3+HCN \tag{27}$$

RDX 是一种负氧平衡炸药，这类炸药的含氧量虽不能完全氧化炸药组分中的可燃元素，但足以使其生成完全汽化的产物，不含游离的固体碳，此时产物的主要成分为 CO_2、CO、H_2O、N_2、H_2，加入钛纤维后，会生成钛的氧化物和很少量的氮化物，这里为简化处理，从能量角度把钛的各种氧化物统一处理成 TiO_2，忽略钛的氮化物，爆炸变化方程为：

$$mTi+C_aH_bO_cN_d=mTiO_2+xCO_2+yCO+uH_2O+wN_2+hH_2 \tag{28}$$

根据 RDX 炸药在 1.0 m 处总比能量为 6.19 kJ/g，质量分数 15% 的钛纤维炸药在 1.0 m 处总比能量为6.61 kJ/g，其差别是由于总质量的 15% 被换成了钛纤维，而上面忽略了钛发生的复杂反应，按钛

纤维放热角度把钛的氧化物统一处理成 TiO_2，这样得出由于钛纤维的加入，5 g 炸药总能量提高了 2.1 kJ，而钛纤维反应放出的热量为 19.57 kJ/g，RDX 释放的能量为 5.54 kJ/g，则反应的钛的质量计算过程如下：先计算出被钛纤维替代的总质量为 5 g 的 RDX 的 15%部分释放的能量为 4.155 kJ，则 5 g 炸药中参与反应的钛释放的能量为 6.255 kJ，则参与反应的钛的质量为 0.319 6 g，取值为 0.32 g。根据钛的相对分子质量为 48，RDX 的相对分子质量为 222，反应的 RDX 为 4.25 g，则钛与 RDX 反应的摩尔比为 1∶2.87，爆炸变化方程变成：

$$Ti + 2.87C_3H_6O_6N_6 = TiO_2 + xCO_2 + yCO + uH_2O + wN_2 + hH_2 \tag{29}$$

产物间发生的平衡反应为：

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \tag{30}$$

根据质量守恒原则有：

$$\begin{cases} x + y = 8.61 \\ u + h = 8.61 \\ 2x + y + u = 15.22 \\ w = 8.61 \end{cases}$$

由于式(29)在爆炸化学反应中可以认为能瞬间完成，建立化学反应平衡，先假设该爆炸反应的爆温为 4 500 K，查表可得分压平衡常数为 $10^{0.93}$，利用迭代法求解这些未知数为：

$$\begin{cases} x = 1.34 \\ y = 7.27 \\ u = 5.27 \\ w = 8.61 \\ h = 3.34 \end{cases}$$

把 RDX 的系数化为 1，得到如下方程式：

$$0.35Ti + C_3H_6O_6N_6 = 0.35TiO_2 + 0.47CO_2 + 2.53CO + 1.84H_2O + 3N_2 + 1.16H_2 \tag{31}$$

利用爆炸产物的平均热容计算爆温，先计算爆炸产物的热容，爆炸产物的平均摩尔定容热容与温度的关系一般为：

$$\overline{C}_i = a_i + b_iT + c_iT^2 + d_iT^3 \tag{32}$$

式中：$\overline{C}_i$ 为第 i 种爆炸产物的平均摩尔定容热容，J/(mol·K)；a_i、b_i、c_i、d_i 为与产物组分有关的常数。

计算时一般取前两项，即认为平均摩尔定容热容与温度之间呈直线关系：

$$\overline{C}_i = a_i + b_iT \tag{33}$$

对于双原子气体(CO、N_2、H_2)，a_i、b_i 分别为 20.08、0.001 883；对于 CO_2，a_i、b_i 分别取 37.66、0.002 427；对于 H_2O，a_i、b_i 分别取 16.74、0.008 996；对于 TiO_2，a_i、b_i 分别取 56.16、0。

则由式(31)、(33)可得：

$$\overline{C} = \sum n_i\overline{C}_i = 202.53 + 0.030\,22T \tag{34}$$

式中：n_i 为第 i 种爆炸产物的物质的量，$\overline{C}$ 为炸药全部爆炸产物在温度间隔 T 内的平均热容。

假设在爆炸过程中：(1)爆炸过程反应热全部用来加热爆炸产物；(2)爆炸产物处于化学平衡和热力学平衡状态，热容只是温度的函数，则有：

$$q = \overline{C}(T_e - T_0) = \overline{C}\Delta T \tag{35}$$

式中：q 为每摩尔炸药的爆炸反应热，J/mol；T_e 为炸药的爆温，K；T_0 为炸药的初温，取 298 K；ΔT 为爆炸产物净增温度。

$$\begin{cases} \overline{C}_i = a_i + b_i\Delta T \\ \overline{C} = A + B\Delta T \\ A = \sum n_ia_i, B = \sum n_ib_i \end{cases} \tag{36}$$

把式(35)与式(36)联立，可得：

$$q = A\Delta T + B\Delta T^2 \tag{37}$$

$$T_e = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4Bq}}{2B} + 298\ \mathrm{K} \tag{38}$$

q 可通过盖斯定律由各物质的定压生成热计算得出，质量分数为 15%的钛纤维炸药爆热计算结果为 1 334.18 kJ/mol，即在该计算中取 1 mol 的 RDX 反应释放的能量，为 1 334.18 kJ。由式(34)可知 A、B 分别为 202.53、0.030 22，将其代入式(38)可求出 T_e 为 4 389 K，与假设的 4 500 K 相差 111 K，在计算爆温时能满足要求，式(31)即为质量分数为 15%的钛纤维的爆炸反应方程式，类似计算可以求出其他不同钛纤维含量的爆炸反应方程式。

3　结　论

本文中通过对加入不同质量分数钛纤维的 RDX 炸药做水下爆炸实验，分析压力峰值、比冲击波能、比气泡能、总比能量及能量密度变化情况，得出如下结论：

(1)钛纤维炸药为非理想炸药，在铝壳约束的情况下，压力时程曲线衰减的初始部分可用指数函数拟合，但压力衰减后半部分拟合效果不理想；

(2)含钛纤维炸药的压力峰值随钛纤维含量的提高而降低，随距离的增大，压力峰值相对 RDX 衰减明显变慢，RDX 随距离增大压力峰值降低 25.00%，质量分数为 15%的钛纤维炸药随距离增大压力峰值降低 7.70%；

(3)含钛纤维炸药比冲击波能随钛纤维含量的提高而降低，含钛纤维炸药的比气泡能随钛纤维含量的提高而增大，含钛纤维炸药比冲击波能、比气泡能在不同距离处随钛纤维含量变化趋势基本一致；

(4)含钛纤维炸药总比能量随钛纤维质量分数的增大而增大，质量分数为 10%的钛纤维炸药的能量密度相比质量分数为 10%的铝纤维炸药提升了 9.52%，钛纤维炸药的能量密度相对于铝纤维炸药的能量密度有较大提升；

(5)通过实验测得的炸药总比能量，用理论分析方法从能量角度确定了炸药的爆炸反应方程式。

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，2004：1-2.

[2] 冯晓军，王晓峰，徐洪涛，等. Al 粉对炸药爆炸加速能力的影响[J]. 火炸药学报，2014，37(5)：25-32.
FENG Xiaojun，WANG Xiaofeng，XU Hongtao，et al. Influence of Al powder on the explosion acceleration ability for explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants，2014，37(5)：25-32.

[3] 周俊祥，于国辉，李澎，等. RDX/Al 含铝炸药水下爆炸实验研究[J]. 爆破，2005，22(2)：4-10.
ZHOU Junxiang，YU Guohui，LI Peng，et al. Experimental study of the aluminized explosive RDX/Al explosion underwater[J]. Blasting，2005，22(2)：4-10.

[4] MAKHOV M N. Effect of aluminum and boron additives on the heat of explosion and acceleration ability of high explosives[J]. Russian Journal of Physical Chemistry B，2015，9(1)：50-55.

[5] 黄亚峰，王晓峰，赵东奎. RDX 基含硼炸药的能量特性[J]. 火炸药学报，2015，38(2)：39-42.
HUANG Yafeng，WANG Xiaofeng，ZHAO Dongkui. Energy characteristics of RDX-based boron-contained explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants，2015，38(2)：39-42.

[6] 许国栋，王桂生. 钛金属和钛产业的发展[J]. 稀有金属，2009，33(6)：903-912.
XU Guodong，WANG Guisheng. Development of titanium and its industry[J]. Chinese Journal of Rare Metals，2009，33(6)：903-912.

[7] 奥尔连科 Л П. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011：608-609.

[8] ETHRIDGE N. A procedure for reading and smoothing pressure-time data from HE and nuclear explosions[R]. Maryland：Army Ballistic Research Laboratories，1965.

[9] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2005：100-104.

[10] KOMISSAROV P V, BORISOV A A, SOKOLOV G N, et al. Experimental comparison of shock and bubble heave energies from underwater explosion of ideal HE and explosive composite mixtures highly enriched with aluminum[J]. Physics Procedia, 2015,72:18-20.
[11] 王光祖.超硬材料制造与应用技术[M].郑州:郑州大学出版社,2013:550-558.
[12] 王杏,魏唯濂,魏绍东.纳米二氧化钛的生产与应用[M].贵州:贵州科技出版社,2014:19-24.
[13] 古滨,陈博韬,李烨.反舰导弹战斗部破片对不同材料舰船结构的毁伤研究[J].舰船科学技术,2016,38(1):19-23.
GU Bin, CHEN Botao, LI Ye. Research on damage effect for vessel structures with various attributes from warhead fragments of anti-ship missile[J]. Ship Science and Technology, 2016,38(1):19-23.
[14] 孙业斌,惠君明,曹欣茂.军用混合炸药[M].北京:兵器工业出版社,1995:98-99.
[15] 林谋金.铝纤维炸药爆炸性能与力学性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014:50-69.
[16] 项大林,荣吉利,李健.金属壳体装药水下爆炸的冲击波特性[J].爆炸与冲击,2012,32(1):67-71.
XIANG Dalin, RONG Jili, LI Jian. Shock wave features of underwater explosion of explosives with metal shell [J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(1):67-71.
[17] 金韶华,松全才.炸药理论[M].西安:西北工业大学出版社,2010:25-28.

Preliminary analysis of underwater detonation performance of titanium fiber explosive

CHEN Haijun[1], MA Honghao[1,2], SHEN Zhaowu[1],
WANG Bo[1], YANG Ming[1], CUI Yu[1]
(1. *CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*;
2. *State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*)

Abstract: In this study we examined the changing tendency of the shock wave energy, bubble energy, total energy per unit mass and the total energy per unit volume by analysis of the pressure-time curves, and analyzed the chemical reaction process of the Ti fiber explosive through the total energy per unit mass. The results show that the peak pressure and the shock wave energy of the Ti fiber explosive per unit decreases as the Ti fiber content increases, the bubble energy per unit mass increases with the increase of the Ti fiber content, the total energy per unit mass and its energy density increase with the increase of the Ti fiber content. With the increase of the distance between the sensor and explosive, the rate of the Ti fiber explosive's peak pressure decay is slower than that of RDX, while the tendency of the shock wave energy and the bubble energy per unit mass with different contents of the Ti fiber explosive is basically in keeping with the increase of the distance. The chemical reaction process of the Ti fiber explosive was also obtained through the total energy per unit mass.

Keywords: titanium fiber explosive; underwater detonation; total energy per unit mass; total energy per unit volume

(责任编辑 王易难)