

文章编号: 1001-1455(2010)04-0424-05

含铝纤维复合炸药的能量输出和力学强度*

廖学燕¹, 沈兆武¹, 姚保学², 董树男², 马宏昊¹, 蒋耀港¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026;
2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 通过空中爆炸实验, 研究了铝纤维对爆炸能量输出的影响, 结果表明: $\omega_{Al}=0.20$ 的 TNT/Al, 冲击波压力峰值为 TNT 的 1.19 倍, TNT 当量为 TNT 的 1.29 倍; $\omega_{Al}=0.20$ 的 RDX/Al, 冲击波压力峰值为 RDX 的 1.20 倍, 爆热为 TNT 的 1.64 倍, 是 RDX 的 1.31 倍。通过抗压实验, 研究了铝纤维对炸药力学强度的影响, 结果表明, 铝纤维能增强 TNT 炸药的力学强度, 破坏应力为 6.8 MPa, 应变为 0.043。铝纤维对炸药能量和力学强度的双重增强特性, 可以为现代高性能炸药设计提供参考。

关键词: 爆炸力学; 能量输出; 空中爆炸; 含铝纤维炸药; 力学强度

中图分类号: O383.1 **国标学科代码:** 130·3520 **文献标志码:** A

铝作为高热值和低成本的金属, 通常以粉末的形式被加入到炸药中, 以提高炸药的爆热、冲击波效应和水中气泡能等效果。但是铝粉在炸药中是潜在的热点, 当炸药受到冲击的时候, 铝粉就成为热点^[1], 导致炸药的感度提高。近年来, 随着纳米技术的发展, 纳米铝粉对炸药的能量影响成为关注的热点^[2-3]。铝粉颗粒越细, 燃烧反应越快, 而爆轰前铝表面氧化层所占的比例越大, 导致活性铝的含量越低, 铝的有效利用率也就越低。Alex 铝(100~200 nm)活性铝含量只有 85%~88%^[4], 普通铝粉活性铝含量大于 99%; 纳米铝粒径从 50 nm 减小到 20 nm, 纳米铝粉反应放热从 3.721 kJ/g 减少到 0.928 kJ/g^[5]。如何提高铝比表面积, 同时保证铝的活性度, 就成为重要的问题。碳纤维对无壳药柱力学性有一定的增强作用, 加入碳纤维的药柱压缩强度由原来的 1.244 5 kg/mm² 提高到 1.966 7 kg/mm²^[6]。但是碳纤维对弹药能量贡献不大。

本文中, 将铝纤维加入炸药, 制备含铝纤维复合炸药, 同时探讨炸药能量输出问题和力学强度问题。一方面, 在炸药爆炸前, 铝纤维作为纤维增强材料, 能对炸药基体起到增强作用, 实现力学强度增强; 另一方面, 在炸药爆轰时, 爆轰产物高温、高压作用下, 铝纤维被撕裂成小单元颗粒, 裸露出大量的没氧化层的“新鲜”表面。这些“新鲜”表面在爆轰产物中快速燃烧释放大量的热量, 从而实现对炸药能量输出的提高。通过空中爆炸冲击波超压实验, 研究铝纤维对炸药能量输出的影响; 通过抗压实验, 研究铝纤维对炸药抗压强度的影响。

1 理论分析

含铝炸药因为有铝粉参加反应: 一方面, 含铝爆炸反应非常复杂, 理想爆轰模型已经不适用; 另一方面, 复合炸药对炸药组分、铝粉形状和尺寸、约束条件、炸药尺寸等影响因素很敏感。加上炸药爆轰本身高温、高压、高速等特点, 含铝炸药爆轰的研究很困难, 至今未能得出统一的结论。J. M. Philip^[7]将含铝炸药的爆轰反应分成 2 个阶段: 第 1 个阶段(CJ 反应区内), 含铝炸药的炸药组分爆轰分解, 生产爆轰产物, 并释放大量的热量, 有少部分铝参与第 1 阶段的反应; 第 2 阶段(CJ 面后), Al 在高温高压的条件下与 CO₂ 和 H₂O 等爆轰产物快速燃烧, 形成最终产物并释放大量的热量。含铝炸药输出总能量为

$$E_e = \omega_{CH} E_{CH} + \omega_{Al} \lambda_{Al} Q_{Al} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009-04-22; 修回日期: 2009-07-13

作者简介: 廖学燕(1981—), 男, 博士研究生。

式中： E_e 为复合炸药爆炸所释放的质量总能量； E_{CH} 为炸药组分释放的质量能量； w_{CH} 为炸药组分质量分数； w_{Al} 为复合炸药中铝的初始质量分数； λ_{Al} 为铝的反应度； Q_{Al} 为铝反应生产的质量热量。对于相同组分的含铝炸药， Q_{Al} 和 E_{CH} 相等，因此改变铝的质量分数 w_{Al} 和反应度 λ_{Al} ，就可以改变含铝炸药的能量输出^[8-9]。铝对爆炸作用的影响不但和铝释放的总能量有关，而且还与铝能量释放的速度有关，单位时间内铝反应的质量为^[10]

$$\dot{m}_{Al} = \rho_{Al} S_P N_P \dot{a} H(T_G - T^*) \tag{2}$$

式中： ρ_{Al} 为铝的密度， S_P 为铝的表面积， N_P 为铝的体积颗粒数， \dot{a} 为铝燃烧面速度， T_G 为爆轰产物的温度， T^* 为 Al_2O_3 的熔化温度。 $H(T_G - T^*)$ 为海氏函数，当 $T_G > T^*$ 时， $H(T_G - T^*) = 1$ ，否则， $H(T_G - T^*) = 0$ 。假定在相同条件下， ρ_{Al} 、 \dot{a} 、 $H(T_G - T^*)$ 为常数，若要提高 \dot{m}_{Al} ，可以改变 S_P 、 N_P ，即改变铝表面积。直接的方式是减小铝颗粒的粒径，如超细铝粉、纳米铝粉，但研究结果却有较大差异^[2-3]。其中的一个重要原因是，铝颗粒越细，表面被氧化的铝含量就越大，活性铝的含量就越低。Alex 铝含活性铝只有 85%~88%^[5]，纳米铝粒径从 50 nm 减小到 20 nm，纳米铝粉反应放热从 3.721 kJ/g 减少到 0.928 kJ/g^[6]。因此为了有效提高铝的质量反应速度，不仅要求铝的比表面积大，而且要求铝活性度高。

为了解决上述矛盾，本文中用铝纤维取代传统的铝颗粒，制得含铝纤维炸药。一方面，在爆轰前，铝纤维避免了表面积过大，导致的活性铝含量过低的问题。因为相同质量的纤维状铝的表面积小于颗粒状铝，铝纤维氧化层的面积小于铝颗粒。另一方面，爆轰反应时，铝纤维迅速断裂成小尺寸铝颗粒，增加了大量的燃烧表面，因此铝能快速燃烧释放热量，以提高复合炸药总能量。因为炸药爆轰时，炸药组分先反应，生成高温、高压和高速湍流的中间产物，把铝纤维迅速粉碎成小尺寸的铝颗粒，提高了铝纤维的比表面积，铝的质量反应速度也提高；同时铝纤维断裂处会裸露出没有氧化层的“新鲜”表面，这些“新鲜”表面燃烧速度高于有表面氧化层包裹的铝。

根据纤维增强机理，合理地加入纤维能增强基础材料的力学性能。在炸药中加入铝纤维，可提高炸药的强度。在炸药爆轰前，铝纤维作为增强纤维材料，可以在炸药内部起到桥连作用，使铝纤维和炸药形成一个复合整体，改善复合炸药的成型效果；当含铝纤维炸药受到外界应力时，铝纤维和炸药形成一个复合整体产生协同作用，提高炸药的力学强度。

2 炸药制备

原料有 TNT、RDX、添加剂和铝纤维，将原料按一定配比加工成药柱。铝纤维的等效直径 80 μ s、长度 2 mm。炸药配方和药柱参数见表 1。

表 1 炸药配方和药柱参数

Table 1 Formulations of explosives

炸药	$w/\%$				d/mm	h/mm	m/g
	TNT	RDX	Al 纤维	添加剂			
TNT	100	—	—	—	45.0	28	50
TNT/Al 纤维	80	—	20	—	45.0	28	50
RDX	—	95	—	5	25.2	25	20
RDX/Al 纤维	—	75	20	5	25.2	25	20

3 空中爆炸冲击波超压实验

3.1 空中爆炸实验设备

实验装置如图 1 所示，主要设备有爆炸容器、压电式压力传感器、电荷放大器、示波器和起爆器。爆炸容器尺寸为 $\varnothing 2.4\text{ m} \times 5\text{ m}$ ，钢板壁厚 7 cm。传感器与药包固定在爆炸容器中轴线上，水平距离为 94 cm。雷管为无起爆药导爆管雷管，RDX 药量 1 g。实验设定信号采样频率为 5 MHz，采样时间为 50 ms。

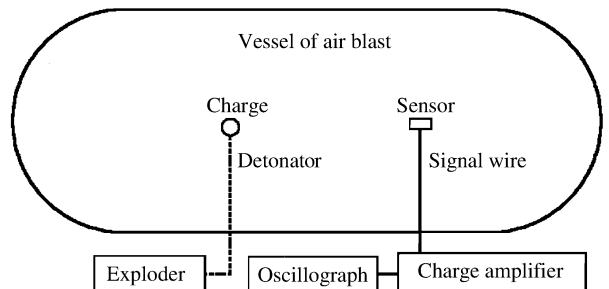


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental system

3.2 实验结果

实验测得的压力时程曲线如图2所示。炸药的冲击波压力峰值见表2。

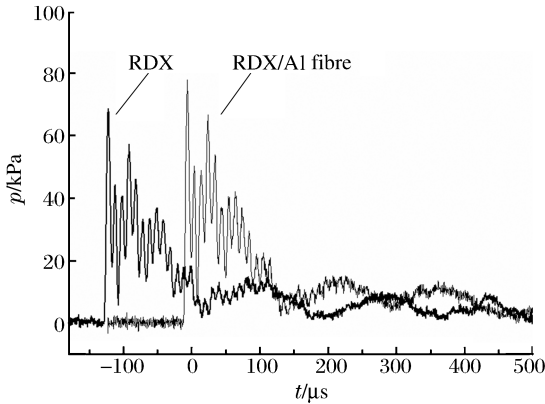


图2 压力时程曲线

Fig. 2 Curves of pressure

表2 空中爆炸实验结果

Table 2 Experimental results of air blast

炸药	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	p_m/kPa	Q_A/Q_T	\bar{p}_m/kPa	\bar{Q}_A/\bar{Q}_T
TNT	1.35	106.6	0.99		
	1.33	105.1	0.97	107.1	1.00
	1.35	109.5	1.03		
TNT/Al 纤维	1.27	128.4	1.29		
	1.25	131.2	1.31	127.9	1.29
	1.22	127.0	1.27		
RDX	1.70	69.2	1.30		
	1.57	66.3	1.22	67.4	1.25
	1.60	66.7	1.23		
RDX/Al 纤维	1.72	80.1	1.63		
	1.76	81.7	1.68	81.1	1.64
	1.78	78.6	1.61		

根据爆炸相似理论^[11]

$$p_m = f\left(\frac{\sqrt[3]{W(Q_A/Q_T)}}{R}\right) \quad (3)$$

式中： p_m 为空中冲击波超压峰值，MPa； R 为考虑点到爆心的距离，m； W 为炸药质量，kg； Q_A/Q_T 为炸药A爆热与TNT爆热的比值；令 $\varphi = \sqrt[3]{W(Q_A/Q_T)}/R$ ，根据实验可以拟合得到球形药包在空中点爆炸的冲击波超压峰值经验公式^[11]

$$p_m = 0.076\varphi + 0.25\varphi^2 + 0.65\varphi^3 \quad 1 \leq 1/\varphi \leq 15 \quad (4)$$

实验中，测点到爆心的距离与炸药半径比为38，可以将炸药近似为球形。20、50 g的TNT在94 cm处时， $1/\varphi$ 分别为3.46、4.2，满足式(4)适用范围，计算结果见表2。

从图2和表2可以看出，加入铝纤维后，能提高TNT和RDX炸药空中爆炸的冲击波超压；TNT的超压峰值增加至纯TNT的1.19倍，爆热提高至原来的1.29倍；RDX的超压峰值提高至纯RDX的1.20倍，爆热提高至TNT的1.64倍，RDX的1.31倍。铝纤维能有效提高炸药的能量输出，可以认为：在爆轰时，炸药组分先反应，产生的高温、高压和不稳定流场将铝纤维粉碎成小尺寸铝颗粒，铝纤维断裂处裸露出没有氧化层包裹的“新鲜”表面，这些“新鲜”表面与爆轰产物一接触即发生快速燃烧，释放大量的热量，提高了炸药的总能量。

4 力学强度实验

TNT和TNT/Al纤维试件尺寸为 $\varnothing 42.5 \text{ mm} \times 38.5 \text{ mm}$ ，采用WDW4100型万能试验机，加载速度为0.8 mm/min。TNT/Al纤维的应力应变曲线如图3，未测得TNT应力应变数据。试件破坏效果如图4。

TNT浇铸成型冷却后，出现明显的不规则孔隙，当试件被加载时，裂纹扩展，直到试件被破坏，破坏应变一般为0.007^[12]，破坏的TNT试件分裂出许多大块TNT碎片，表现出明显的脆性。TNT中加入铝纤维后，铝纤维在TNT内起到连接作用，炸药形成一个复合整体，浇铸药柱没有发现孔隙。铝纤维改善了TNT的成型效果。从图4可以看出，初始阶段试件被压实，被压实以后，承载能力提高，接着塑性加载到最大抗压6.87 MPa，应变为0.043，然后试件没有立即碎裂卸载，而是出现平缓卸载阶段。应变到0.06时试件仍没出现纯TNT似的破碎解体，呈现出较好的韧性。实验结束时，试件中出现一条明显的裂缝，裂缝与中轴线成约45°。可见，铝纤维提高了TNT炸药的成型效果和整体力学强度。

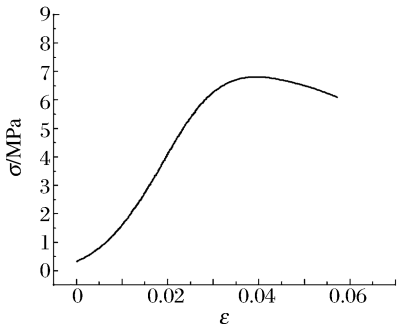


图3 TNT/Al纤维试件应力应变曲线

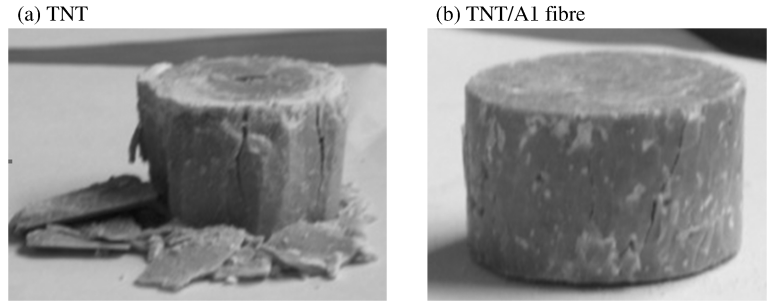
Fig. 3 Stress-strain curve
of TNT/Al fibre

图4 破坏效果图

Fig. 4 Failure patterns

5 结论

(1)用铝纤维代替铝颗粒制备复合炸药,可以解决铝比表面积和活性度的矛盾。对相同直径的铝纤维和铝颗粒,爆轰前,铝纤维比表面积较小,解决了铝活性度的问题。爆轰反应时,铝纤维迅速断裂成小尺寸铝颗粒,比表面积得到迅速提高,确保了铝的反应速率。

(2)铝纤维能有效提高炸药的能量输出。加入Al纤维($w_{Al}=0.20$)后,TNT超压峰值增加为纯TNT的1.19倍,爆热提高为纯TNT的1.29倍;RDX超压峰值提高为纯RDX的1.20倍,爆热为TNT的1.64倍,是RDX的1.31倍。

(3)铝纤维加入炸药,可以对炸药起到纤维增强的作用,使炸药形成一个复合整体,能改善炸药整体成型效果。

(4)铝纤维在炸药内起到有效的连接作用,与外界应力产生协同作用,得到纤维增强复合炸药,提高炸药的力学强度。

简单加入铝纤维,同时提高了炸药的能量输出和力学强度,可以为设计现代高性能炸药提供一个新的方向。下一步可以通过改变铝纤维的直径、长径比和含量,寻找合适的含铝纤维炸药配方。

参考文献:

- [1] 夏先贵,柏劲松,林其文,等.含铝炸药起爆机理的研究[J].含能材料,1999,7(3):133-136.
XIA Xian-gui, BAI Jing-song, LIN Qi-wen, et al. A study on initiation mechanism of Al-containing explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1999,7(3):133-136.
- [2] Brousseau P, Anderson C J. Nanometric aluminum in explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002, 27:300-306.
- [3] Aois A L, Gallic C L. Expertise of nanometric aluminum powder on the detonation efficiency of explosives[C]// 32nd Int Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001:1-14.
- [4] Mench M M, Kuo K K, Yeh C L, et al. Comparison of thermal behavior of regular and ultra-fine aluminum powders (Alex) made from plasma explosion process[J]. Combustion Science and Technology, 1998,135:269-292.
- [5] 郭连贵,宋武林,谢长生,等.粒径大小对高频感应加热制备纳米铝粉活性影响[J].含能材料,2006,14(4):276-279.
GUO Lian-gui, SONG Wu-lin, XIE Chang-sheng, et al. Effect of particle size on activity of aluminum nanopowders produced by high frequency induction heating[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006,14(4):276-279.
- [6] 刘艳秋,马忠亮,萧忠良,等.碳纤维对无壳弹药柱力学性能影响的研究[J].火炸药学报,1999,3:29-31.
LIU Yan-qiu, MA Zhong-liang, XIAO Zhong-liang, et al. Study on effect of carbon fiber on mechanical property of caseless ammunition[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999,3:29-31.
- [7] Philips J M. A reaction flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in no-ideal explo-

sives[M]. Materials Research Society, 1996;413-420.

- [8] 胡栋, 孙珠妹. 铝粉颗粒度对黑索金含铝炸药粉快速反应影响的微观特性研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 122-128.
- HU Dong, SUN Zhu-mei. Studies on the micro-behaviour of the influence of the aluminum particle size on the high speed reaction for RDX powder containing aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 122-128.
- [9] 陈朗, 张寿齐, 赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 250-255.
- CHEN Lang, ZHANG Shou-qi, ZHAO Yu-hua. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 250-255.
- [10] Massoni J, Saurel R, Lefrancois A, et al. Modeling spherical explosions with aluminized energetic materials[J]. Shock Waves, 2006, 16: 75-92.
- [11] Henrych J. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [12] 张元冲, 韩小平, 沈亚鹏, 等. TNT 模拟炸药动态压缩力学性能的实验测定及本构关系研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(2): 87-93.
- ZHANG Yuan-chong, HAN Xiao-ping, SHEN Ya-peng, et al. Experimental measurements of mechanical response of TNT and simulative explosives to dynamic compression loading and studies of their constitutive relationship[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(2): 87-93.

Energy output and mechanical strength of aluminum-fibre-reinforced composite explosives*

LIAO Xue-yan¹, SHEN Zhao-wu¹, YAO Bao-xue², DONG Shu-nan²,
MA Hong-hao¹, JIANG Yao-gang¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, Anhui, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Aluminum fibre was added into TNT and RDX explosives, respectively, to synthesize composite explosives with the aluminum-fibre mass fraction of 0.2. Air blast experiments were conducted in a steel explosion-containment vessel to investigate the effects of aluminum fibre on the explosive energy output. Results display that the overpressure and explosion heat of the aluminum-fibre-reinforced composite TNT explosive arrive at 1.19 and 1.29 times as high as those of the pure TNT explosive, respectively. The overpressure and explosion heat of the aluminum-fibre-reinforced composite RDX explosive arrive at 1.20 and 1.31 times as high as those of the pure RDX explosive, respectively. And the explosion heat of the aluminum-fibre-reinforced composite RDX explosive is 1.64 times as much as that of the pure TNT explosive. Mechanical strength tests were performed by a WDW4100 almighty test system to analyze the effects of aluminum fibre on the mechanical strength of TNT explosives. Test results show that the damage stress of the composite TNT explosive is up to 6.87 MPa and the corresponding strain is 0.043. And aluminum fibre can improve the mechanical strength of explosives. This research can provide reference for the design of high explosives.

Key words: mechanics of explosion; output energy; air blast experiments; aluminum fibre explosive; mechanical strength

* Received 22 April 2009; Revised 13 July 2009

Corresponding author: SHEN Zhao-wu, zwshen@ustc.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)