

文章编号: 1006-9941(2015)09-0898-05

## RDX 基铝纤维炸药静态压缩力学性能

林谋金<sup>1,2</sup>, 崔晓荣<sup>1</sup>, 马宏昊<sup>2</sup>, 李战军<sup>1</sup>, 贾虎<sup>3</sup>

(1. 广东宏大爆破股份有限公司, 广东 广州 510623; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027; 3. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061)

**摘要:** 为了提高 RDX 基含铝炸药的力学性能, 用铝纤维替代含铝炸药中的铝粉制备了 RDX 基铝纤维炸药。进行了准静态力学实验, 将得到的不同铝纤维含量的铝纤维炸药的弹性模量以及单轴抗压强度拟合计算, 得到了铝纤维炸药弹性模量以及单轴抗压强度与铝纤维体积分数的关系表达式。结果表明, 用拟合弹性模量实验数据得到的铝纤维的增强系数为 8.19。铝纤维能显著增强铝纤维炸药的力学性能, 其弹性模量、抗压强度以及残余强度随着铝纤维体积分数增加而增大。当铝纤维体积分数为 0% ~ 30% 时, 铝纤维炸药的临界应变随着铝纤维含量的增加而增大, 当铝纤维体积分数高于 30% 时, 铝纤维炸药的临界应变不随着铝纤维含量变化。采用正态分布函数, 进行了铝纤维体积分数为 10% ~ 40% 的铝纤维炸药工程应力-应变曲线的拟合, 其拟合的校正决定系数为 0.987 ~ 0.998。体积分数小于 38.1% 的特定铝纤维含量的铝纤维炸药的单轴抗压强度可用拟定的关系式计算。

**关键词:** 铝纤维炸药; 力学性能; 增强系数; 弹性模量; 抗压强度; 临界应变; 正态分布函数

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.012

### 1 引言

近年来, 随着装甲防护的加强, 动能穿甲弹以及钻地弹在使用过程中遭遇的环境条件越来越恶劣, 因此要求这类弹药具有良好的力学性能<sup>[1-2]</sup>, 而传统的熔铸炸药 (TNT) 具有低强度、韧性差以及易发生脆裂损伤等缺点, 不能满足新时期武器装备的要求<sup>[3]</sup>, 因此目前主要有采用浇注的高聚物粘结炸药 (PBX) 来替代早期的 TNT 熔铸炸药。PBX 中的惰性添加剂较高, 使其在受力后可以产生较大的变形, 能将高速碰撞过程中的一部分撞击能量储存和消耗在粘结剂中, 使混合炸药中的主体炸药颗粒所承受外界作用力大大降低, 从而使 PBX 具备较强的抗过载能力<sup>[4]</sup>, 因此 PBX 在复杂环境中的力学性能及力学响应已成为含能材料研究的热点<sup>[5-8]</sup>。部分研究者<sup>[9]</sup> 为了提高药柱力学性能, 向炸药中添加纤维类材料, 纤维材料在炸药基质间起连接作用, 因此该方法也可以提高炸药的强度和韧

性。目前, 在炸药中添加纤维的工作仍不深入, 不同基体炸药、不同类型的纤维材料、长度以及添加量等对药柱力学性能的影响还需进一步探讨。本研究综合考虑炸药的能量以及力学性能, 以 RDX 为基体炸药, 采用铝纤维为药柱的增强材料, 即将传统含铝炸药中的铝粉用铝纤维替代, 得到新型铝纤维炸药, 以期改善铝纤维炸药的成型性, 同时增强铝纤维炸药的力学性能。前期研究表明<sup>[10]</sup>, 铝纤维能提高基体炸药 RDX 的爆炸威力, 本工作主要研究 RDX 基铝纤维炸药静态压缩力学性能, 以加深对纤维类炸药力学性能认识, 为含铝炸药的研究工作提供参考。

### 2 药柱制备与实验

将 10 g 含有不同质量分数 (0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%) 的铝纤维炸药在相同压力下压制成长径比相近的圆柱形药柱 (无壳药柱), 因此药柱的高度随着铝纤维含量增加而降低 (16.71 ~ 21.4 mm), 药柱的密度随着铝纤维含量增加而增加 (1.60 ~ 2.05 g · cm<sup>-3</sup>), 其中, 药柱的直径为 19.28 mm, 基体炸药 RDX 的配比为 RDX : Wax = 95 : 5, 铝纤维采用熔喷法制成, 其直径为 50 ~ 90 μm。另外铝纤维为长纤维, 因此制备药柱时需要将铝纤维与基体炸药 (RDX) 分批依次加入到药柱模具中。实验采用

收稿日期: 2014-08-08; 修回日期: 2014-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51174183, 51374189); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (11202109)

作者简介: 林谋金 (1985-), 男, 博士, 主要从事含能材料及爆炸力学相关领域研究; e-mail: lmj2012pt@163.com

通信联系人: 马宏昊 (1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事爆破器材与工业安全及爆炸力学相关领域研究。e-mail: hhma@ustc.edu.cn

MTS809 材料试验机对不同含量的铝纤维炸药进行准静态压缩实验,以位移加载方式进行加载,加载速率为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,药柱两端涂有凡士林,以降低药柱端面摩擦力的影响。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验结果

实验得到含有不同铝纤维含量的铝纤维炸药载荷 ( $F$ )-位移 ( $s$ ) 曲线,如图 1 所示。

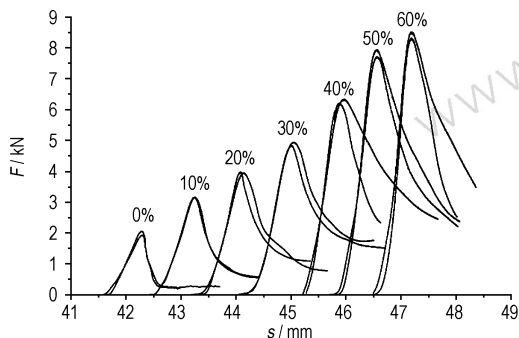


图 1 不同铝纤维含量的铝纤维炸药载荷-位移曲线

Fig.1 Loading-displacement curves of aluminum fiber explosives with different content of aluminum fiber

由图 1 可得,实验得到不同铝纤维含量的铝纤维炸药在载荷-位移曲线上上升阶段与峰值部分重复性较好,但其在下降阶段,铝纤维含量为 0%~30% 的重复性较好,而铝纤维含量为 40%~60% 的曲线下下降阶段重复性较差,与铝纤维开始出现断裂导致残余强度不稳定有关。随着铝纤维含量增加,铝纤维炸药的最大压缩载荷从 2 kN 增加到 8.5 kN,说明铝纤维能显著提高无壳药柱的抗压能力。实验后得到部分铝纤维炸药的压缩破坏效果,如图 2 所示。

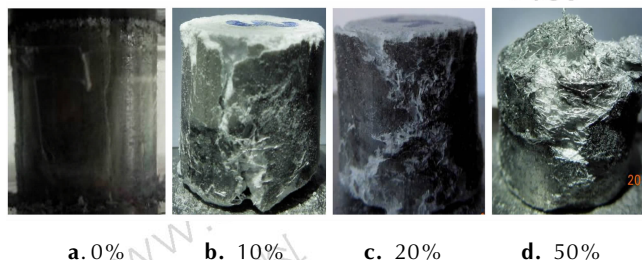


图 2 含有不同铝纤维含量的铝纤维炸药压缩破坏效果

Fig.2 Compression failure effect of aluminum fiber explosives with different content of aluminum fiber

由图 2 可知,铝纤维含量为 0% 的基体炸药 RDX 在压缩加载过程中,首先是药柱表面裂纹沿轴向裂开,

说明药柱外表面在加载初期以拉应力形式破坏为主,如图 2a 所示,同时也说明基体炸药 RDX 的抗拉强度较低。在加载结束后药柱外面部分完全散掉,内部破坏为顶角约为  $50^\circ$  的圆锥体,说明药柱内部在加载后期以剪切形式破坏。铝纤维含量为 10% 的铝纤维炸药在压缩破坏时,药柱破坏过程与 RDX 相似,说明铝纤维炸药的抗拉强度依然较低,药柱外表面仍以拉应力形式破坏为主,但裂纹间有铝纤维连接,整个药柱没有完全散掉,药柱具有残余强度,如图 2b 所示。铝纤维含量为 20% 的铝纤维炸药在压缩加载前期,药柱外表面未出现轴向裂纹;药柱在压缩加载后期,与轴线成  $45^\circ$  的方向上开始出现明显裂纹,如图 2c 所示,说明药柱整体是仍以剪切形式破坏的,即铝纤维显著增强了基体炸药的抗拉强度,但对其抗剪强度没有显著增强,铝纤维含量为 30% 的铝纤维炸药破坏形式与含量为 20% 的相似。铝纤维含量为 50% 的铝纤维炸药在压缩加载结束时部分铝纤维发生断裂现象,如图 2d 所示,铝纤维含量为 40% 以及 60% 的破坏形式与含量为 50% 的相似。铝纤维含量少于 30% 时,药柱在压缩加载破坏后主要是以 RDX 破碎脱落为主,而发生断裂的铝纤维较少,当铝纤维含量大于 30% 时,铝纤维炸药在压缩加载破坏后部分铝纤维开始出现断裂情况,说明铝纤维对基体炸药的抗拉强度增强效果开始减弱。综上所述,铝纤维含量较低时,铝纤维炸药的无壳药柱的力学性能主要取决于铝纤维与基体炸药之间的粘结力,铝纤维含量较高时,铝纤维炸药的无壳药柱的力学性能主要取决于铝纤维自身的抗拉强度。

#### 3.2 应力-应变曲线拟合

对不同铝纤维含量的铝纤维炸药载荷-位移曲线计算处理得到对应的工程应力-应变曲线,如图 3 所示。

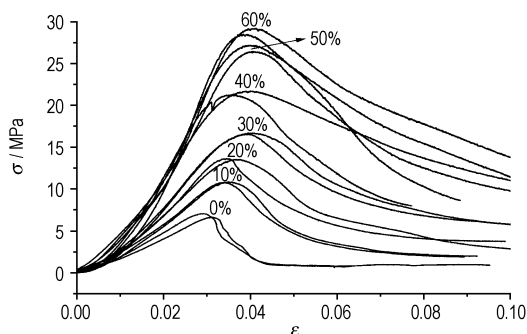


图 3 不同铝纤维含量的铝纤维炸药应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of aluminum fiber explosives with different content of aluminum fiber

由图 3 可知, 铝纤维炸药药柱的工程应力-应变曲线在加载初期阶段表现出非线性行为, 可能与药柱加载端面不平整有关, 另外随着铝纤维含量的增加, 曲线起始段的非线性行为开始变得不明显, 因此曲线初始段的非线性行为也可能与加载初期压实药柱中孔隙有关。在载荷继续作用下, 曲线近似为线性关系, 随着载荷的继续增加, 曲线并未出现明显的屈服行为, 所以不同铝纤维含量的铝纤维炸药仍属于脆性材料。曲线上最大应力所对应的应变可以确定为临界应变, 对于铝纤维含量为 0% ~ 30% 的铝纤维炸药, 其临界应变随着铝纤维含量的增加而增大, 对于铝纤维含量为 30% ~ 60% 的铝纤维炸药, 其临界应变不随着铝纤维含量增加而增加, 说明 30% 的铝纤维含量是影响药柱力学性能的主要因素开始发生变化的临界含量, 即铝纤维含量低于 30% 时, 药柱破坏主要取决于铝纤维与基体炸药之间的粘结力, 铝纤维含量高于 30%, 药柱破坏开始取决于铝纤维自身抗拉强度。另外铝纤维炸药的残余强度随着铝纤维含量的增加而增大, 说明在基体炸药中加入铝纤维能提高无壳药柱破坏后的残余强度。随着铝纤维含量增加, 药柱的单轴抗压强度从 6.9 MPa 增加到 28 MPa, 说明铝纤维能显著提高无壳药柱的单轴抗压强度。

针对低含量的铝纤维炸药在准静态下的应力-应变曲线的起始段存在一个非线性缓慢上升过程, 且得到的应力-应变曲线加载阶段与正态分布函数曲线相似, 因此本研究取正态分布函数作为低含量的铝纤维炸药在准静态下的工程应力-应变拟合函数, 其表达式为:

$$\sigma = \sigma_m \cdot e^{-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_m)^2}{n^2}} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_m$  为试样的单轴抗压强度, MPa;  $\varepsilon_m$  为试样的临界应变,  $n$  为无量纲常数。根据式 (1) 对实验得到

的铝纤维炸药工程应力-应变曲线进行拟合, 其中含量为 10% ~ 40% 的铝纤维炸药拟合效果如图 4 所示。

由图 4 可知, 采用正态分布函数拟合含量为 10% ~ 40% 的铝纤维炸药工程应力-应变曲线的加载阶段能得到较好的拟合效果, 其拟合的校正决定系数为 0.987 ~ 0.998, 甚至可以对应力-应变曲线的部分卸载阶段进行拟合。随着铝纤维含量增大, 曲线起始段的非线性行为开始变得不明显, 因此函数对曲线起始段的拟合效果开始变差, 进一步说明式 (1) 比较适用于应力-应变曲线的初始阶段具有非线性的情况, 具体的拟合系数见表 1。利用表 1 中系数可以用函数形式描述铝纤维含量为 10% ~ 40% 的铝纤维炸药应力-应变曲线。

表 1 不同铝纤维含量的铝纤维炸药应力-应变表达式拟合系数

Table 1 Fitted coefficient of stress-strain expression for aluminum fiber explosives with different content of aluminum fiber

aluminum fiber	10%	20%	30%	40%
$\sigma_m$ / MPa	10.885	15.334	16.699	21.689
$\varepsilon_m$	0.0373	0.0416	0.0418	0.0397
$n$	0.0185	0.0207	0.0227	0.0232

### 3.3 弹性模量分析

由于含有不同铝纤维含量的铝纤维炸药属于纤维复合材料, 因此其弹性模量可用函数描述为<sup>[11]</sup>:

$$E_f = \frac{1 + \xi V_f \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi}}{1 - V_f \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi}} E_m \quad (2)$$

式中,  $E_f$  为复合材料弹性模量, GPa;  $E_f$  为纤维弹性模量, GPa;  $E_m$  为基体弹性模量, GPa;  $V_f$  为纤维的体积含量, %;  $\xi$  为纤维的增强系数,  $\xi$  越大表示纤维的增

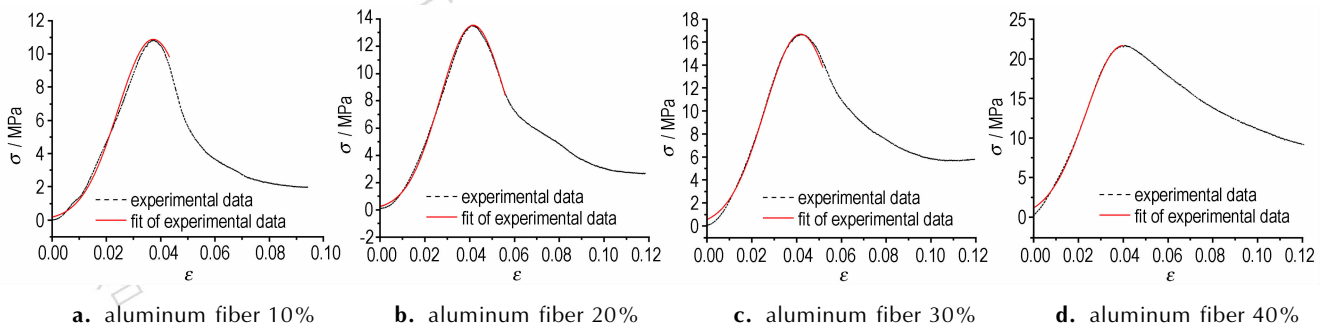


图 4 不同铝纤维含量的铝纤维炸药的应力-应变曲线拟合结果

Fig. 4 Fitting results of stress-strain curves for aluminum fiber explosives with different content of aluminum fiber

强作用越显著。铝纤维炸药中的基体弹性模量为基体炸药 RDX 的弹性模量,纤维的弹性模量为铝纤维含量为 100% 的铝纤维柱体弹性模量。由于公式中含有纤维的体积含量,而实验中的铝纤维炸药配方采用质量配比,故需要通过铝纤维的密度计算铝纤维炸药中铝纤维的体积含量,得到铝纤维炸药弹性模量与铝纤维体积含量关系,如图 5 所示。其中,炸药药柱的弹性模量由非线性不是很明显的一段应力-应变曲线进行确定,或者根据最大载荷的 5%~20% 载荷范围对应的曲线段进行确定<sup>[6]</sup>。

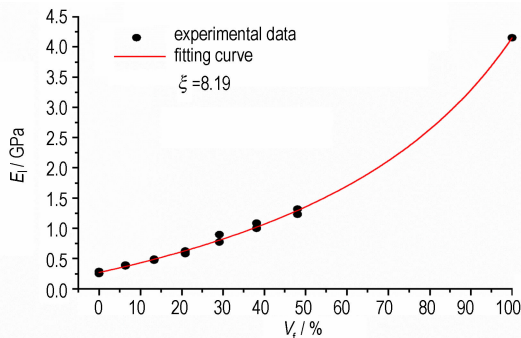


图 5 铝纤维炸药的弹性模量与  $V_f$  的关系曲线

Fig. 5 The relation curve of  $E_t-V_f$  for aluminum fiber explosives

由图 5 可得,随着铝纤维含量增加,铝纤维炸药药柱的弹性模量从 0.25 GPa 增加到 1.25 GPa。实验中不同铝纤维含量的铝纤维炸药弹性模量重复性较好,说明铝纤维炸药中的铝纤维与基体炸药 RDX 混合地比较均匀。通过不同含量铝纤维炸药的弹性模量拟合计算得到铝纤维增强系数  $\xi=8.19$ ,并且拟合效果较好,说明铝纤维能显著增强铝纤维炸药的力学性能。另外将  $\xi=8.19$  代入公式(2)可得到不同含量的铝纤维炸药弹性模量计算公式,因此可根据基体炸药(RDX)的弹性模量方便计算得到不同含量的铝纤维炸药弹性模量。

### 3.4 抗压强度分析

对不同铝纤维含量的铝纤维炸药工程应力-应变曲线进行分析计算,得到单轴抗压强度与铝纤维体积分数的关系,如图 6 所示。

由图 6 可得,实验得到不同铝纤维含量的铝纤维炸药抗压强度重复性较好。当  $V_f < 38.18\%$ ,铝纤维炸药的单轴抗压强度随着铝纤维含量增加而线性增加,即铝纤维能显著提高铝纤维炸药的单轴抗压强度。铝纤维炸药的抗压强度与铝纤维体积分数的关系表达式为:

$$\sigma_m = 6.903 + 50.79 V_f \quad (3)$$

其中, $\sigma_m$  为铝纤维炸药试样的单轴抗压强度,MPa。根据公式(3)可以计算体积含量小于 38.18% 下特定铝纤维含量的铝纤维炸药单轴抗压强度。

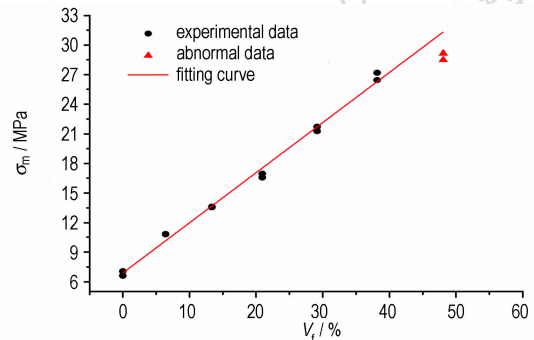


图 6 铝纤维炸药的单轴抗压强度与  $V_f$  关系

Fig. 6 The ultimate stress- $V_f$  curve for aluminum fiber explosives

## 4 结论

对不同铝纤维含量的铝纤维炸药进行准静态压缩实验,探讨铝纤维含量对无壳药柱压缩力学性能的影响,得到如下主要结论。

(1) 铝纤维炸药的弹性模量、单轴抗压强度以及残余强度随着铝纤维含量增加而增大,通过对不同含量的铝纤维炸药弹性模量以及单轴抗压强度进行拟合计算,得到弹性模量以及单轴抗压强度与铝纤维体积分数的关系表达式。

(2) 当铝纤维含量为 0%~30% 时,铝纤维炸药的临界应变随着铝纤维含量的增加而增大,当铝纤维含量高于 30% 时,铝纤维炸药的临界应变不随着铝纤维含量变化。

(3) 通过对不同铝纤维含量的铝纤维炸药弹性模量进行拟合计算,得到铝纤维增强系数  $\xi=8.19$ ,说明铝纤维显著增强铝纤维炸药的力学性能。

(4) 采用正态分布函数对含量为 10%~40% 的铝纤维炸药在准静态下的工程应力-应变曲线进行拟合,其拟合的校正决定系数为 0.987~0.998,因此可用拟合得到的表达式描述低含量铝纤维炸药的应力-应变曲线。

(5) 体积含量小于 38.18% 下特定铝纤维含量的铝纤维炸药单轴抗压强度可用公式  $\sigma_m = 6.903 + 50.79 V_f$  计算。

(6) 铝纤维炸药(无壳药柱)的力学性能在铝纤维含量较低时主要取决于铝纤维与基体炸药之间的粘

结力,在铝纤维含量较高时主要取决于铝纤维自身的抗拉强度。

#### 参考文献:

- [1] 郑保辉, 王平胜, 观罗, 等. 短切纤维对 RDX/TNT 熔铸炸药的力学改性[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 786-790.  
ZHENG Bao-hui, WANG Ping-sheng, LUO Guan, et al. Mechanical reinforcement on the melt-cast explosive of RDX/TNT by chopped fibers[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 786-790.
- [2] Rumchik C G, Jordan J L. Effect of aluminum particle size on the high strain rate properties of pressed aluminized explosives[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2007: 95-798.
- [3] 郑保辉, 罗观, 舒远杰, 等. 熔铸炸药研究现状与发展趋势[J]. 化工进展, 2013(6): 134-136.  
ZHENG Bao-hui, LUO Guan, SHU Yuan-jie, et al. Research status and prospect of melt-cast explosive [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013(6): 134-136.
- [4] 林聪妹, 刘世俊, 张娟, 等. 粘结剂增强对 TATB 基 PBX 力学性能的影响[J]. 广州化工, 2012, 40(14): 77-79.  
LIN Cong-mei, LIU Shi-jun, ZHANG Juan, et al. Influences of binder enhancement technology on mechanical properties of TATB-based polymer bonded explosives[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(14): 77-79.
- [5] 郭虎, 罗景润, 谢朝阳. PBX 细观损伤特征及表征方法研究综述[J]. 四川兵工学报, 2012(1): 125-129.  
GUO Hu, LUO Jing-run, XIE Zhao-yang. Review of microscopic damage characteristics and characterization methods of polymer bonded explosives[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012(1): 125-129.
- [6] 罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系研究[D]. 中国工程物理研究院, 2001.  
LUO Jing-run. Study on damage, fracture and constitutive relation of PBX [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001.
- [7] Ellis K, Leppard C, Radesk H. Mechanical properties and damage evaluation of a UK PBX[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, (40): 6241-6248
- [8] 李俊玲, 卢芳云, 傅华, 等. 某 PBX 炸药的动态力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2011(2): 159-164.  
LI Jun-ling, LU Fang-yun, FU Hua, et al. Research on the dynamic behavior of a PBX explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011(2): 159-164.
- [9] 刘艳秋, 马忠亮, 肖忠良, 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): 30-32.  
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): 30-32.
- [10] 林谋金, 马宏昊, 沈兆武, 等. 铝纤维对黑索今水下爆炸性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2014(3): 379-384.  
LIN Mou-jin, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. The effect of aluminum fiber on underwater detonation performance of RDX [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014(3): 379-384.
- [11] Halpin J C, Tsai S W. Effects of environmental factors on composite materials[R]. AFML-TR-67-423, 1969.

## Static Compression Mechanical Properties of RDX Based Aluminum Fiber Explosive

LIN Mou-jin<sup>1,2</sup>, CUI Xiao-rong<sup>1</sup>, MA Hong-hao<sup>2</sup>, LI Zhan-jun<sup>1</sup>, JIA Hu<sup>3</sup>

(1. Guangdong Hongda Blasting Co Ltd, Guangzhou 510623, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**Abstract:** To improve mechanical properties of RDX based aluminized explosives, the RDX based aluminum fiber explosive was prepared by replacing aluminum powder in aluminized explosive with aluminum fiber. The fitting calculation of the elastic modulus and uniaxial compression strength of aluminum fiber explosive with different content of aluminum fiber obtained by quasi-static compression mechanical experiment was carried out. The relation expression of the elastic modulus and compression strength with aluminum fiber volume content for aluminum fiber explosive was obtained. Results show that the reinforcement coefficient of aluminum fiber obtained by fitting experimental data of elastic modulus is 8.19. The aluminum fiber can significantly enhance the mechanical properties of aluminum fiber explosive. With increasing the aluminum fiber content, its elastic modulus, compression strength and residual strength of aluminum fiber explosive increase. When aluminum fiber volume content is 0%–30%, the critical strain of aluminum fiber explosive increases. When aluminum fiber volume content is higher than 30%, the critical strain of aluminum fiber explosive does not change. The fitting of the engineering stress-strain curves of aluminum fiber explosive with aluminum fiber volume content of 10%–40% is performed by a normal distribution function, its fitting correction coefficient of determination is 0.987–0.998. The uniaxial compression strength of aluminum fiber explosive with specific aluminum fiber content of less than 38.1% for volume fraction can be calculated by the proposed relation.

**Key words:** aluminum fiber explosive; mechanical properties; elastic modulus; compression strength; critical strain; normal distribution function

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.012