

文章编号: 1006-9941(2013)06-0786-05

## 短切纤维对 RDX/TNT 熔铸炸药的力学改性

郑保辉, 王平胜, 罗观, 黄勇

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用玻璃纤维、聚酯纤维、铝纤维、碳纤维 4 种短切纤维作熔铸炸药力学性能改性剂, 研究了压缩、拉伸力学实验中短切纤维的种类、添加量和长度对 RDX/TNT 65/35 熔铸炸药力学性能的影响。结果表明, 聚酯纤维对压缩强度的改善效果最佳, 添加量为 0.4% 时压缩强度达 27.94 MPa。铝纤维会显著降低炸药的拉伸强度和拉伸延伸率。玻璃纤维添加量为 0.2% 时拉伸、压缩力学性能均低于不掺杂纤维材料的 RDX/TNT 65/35 熔铸炸药。添加量在 0.2% ~ 1.0% 时, 65/35-RDX/TNT 的压缩力学性能随玻璃纤维用量的增加而升高。添加量分别为 0.01% 和 0.05% 时, 使用 3 mm 碳纤维的炸药拉伸力学性能好于使用 6 mm 碳纤维, 掺杂 0.05% 3 mm 碳纤维的炸药各项拉伸力学性能最好。

**关键词:** 固体力学; 熔铸炸药; 力学性能; 短切纤维**中图分类号:** TJ55; O34**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.019

## 1 引言

熔铸炸药具有成本低廉、成型性能好、装药自动化程度高等优点, 但是随着现代武器对装药的高能量特性、高毁伤效果、高安全性和长期贮存性能等方面的需求, 传统的 TNT 基熔铸炸药弹性韧性差, 强度低, 易发生损伤脆裂, 不能满足新时期武器装备的要求。为改善熔铸炸药脆性大、力学性能差的问题, 国内外开展了较多力学改性研究, 目前的方法主要有: (1) 以 DNAN、DNTF 等新型熔铸连续相代替 TNT<sup>[1-2]</sup>; (2) 改变生产工艺, 通过控制装药密度和成型质量调节产品的力学性能<sup>[3-5]</sup>; (3) 添加高聚物助剂(聚氨酯弹性体、聚砜等), 如以包覆 RDX 降低 B 炸药的渗油率和尺寸长大率, 提高强度和韧性<sup>[6-8]</sup>; (4) 添加纤维类材料。

纤维材料在基质间起桥梁的作用, 可以提高韧性和强度。刘艳秋等<sup>[9]</sup>采用聚丙烯腈基碳纤维对无壳弹药发射药药柱进行增强, 掺杂量为 3% 时压缩强度提高了近 60%, 碳纤维长径比增大时压缩强度会有所

下降; 廖学燕等<sup>[10]</sup>在 TNT 中添加 20% 铝纤维后其极限应力由 2 MPa 提高至 6.8 MPa, 应变提高至 0.039。目前在典型熔铸炸药中添加短切纤维的工作仍不深入, 不同类型纤维材料、添加量、长度等对力学性能的影响还需进一步探讨, 因此本实验选用了玻璃纤维、聚酯纤维、铝纤维、碳纤维 4 种材料作为改性剂, 研究其对典型熔铸炸药 RDX/TNT 65/35 力学性能的影响。

## 2 实验

## 2.1 材料及仪器

玻璃纤维( $\Phi 20 \mu\text{m} \times 4 \text{ mm}$ , E 级), 盐城市澳科玻璃纤维厂; 聚酯纤维( $\Phi 20 \mu\text{m} \times 3 \text{ mm}$ , 聚对苯二甲酸乙二酯(PET)100%), 滨州市金龙塑料有限责任公司; 铝纤维( $\Phi 70 \mu\text{m} \times 3 \text{ mm}$ ), 上海致义新材料科技有限公司; 碳纤维( $\Phi 7 \mu\text{m} \times 3 \text{ mm}$ 、 $\Phi 7 \mu\text{m} \times 6 \text{ mm}$ ), 南京纬达复合材料有限公司; TNT 和 RDX 为甘肃银光化学工业集团有限公司提供, 纯度大于 99%。

INSTRON8862 材料试验机。

## 2.2 实验方法

热蒸汽将熔铸小桶中 TNT 熔化, 添加一定量上述四种短切纤维和 RDX, 充分搅拌后, 抽真空 20 min, 注入模具, 冷却开模, 加工成各类试件进行力学性能测试。拉伸力学性能测试按 GJB772A-1997 417.1(拉伸应力-应变曲线, 电子引伸计法)进行, 试验速度  $0.20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 压缩力学性能测试按 GJB772A-

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金资助(11076002)

作者简介: 郑保辉(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事材料科学与工程研究。e-mail: zhengbaohui305@126.com

通讯联系人: 罗观(1972-), 男, 副研究员, 主要从事含能材料理论与实验研究。e-mail: lg839@sohu.com

1997 418.1 (压缩应力-应变曲线, 电子引伸计法) 进行, 试验速度  $5.00 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 纤维对 RDX/TNT 65/35 成型工艺的影响

在 RDX/TNT 65/35 熔融体系中, 由于铝纤维属于金属材料, 其与 TNT、RDX 的分子间作用力较弱, 材料表面吸附 TNT 量少, 熔铸体系的粘度变化较小, 铝纤维添加量小于 5% 时, 不会影响其浇铸工艺; 而玻璃纤维、聚酯纤维和碳纤维密度小, 在相同用量时比铝纤维数目多, 受工艺所限聚酯纤维最大添加量为 0.4%。实验使用的碳纤维直径仅有  $7 \mu\text{m}$ , 比表面积大, 吸附 TNT 的量多, 加入量为 0.1% 时, 熔融体系粘度尚不满足浇铸条件, 经试验其最大添加量为 0.09%。

纤维掺杂 RDX/TNT 65/35 成型质量如图 1 所示, 测得 RDX/TNT 65/35 的密度为  $1.730 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 添加 1.5% 铝纤维的炸药密度为  $1.737 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (图 1a), 掺杂 0.09% 碳纤维的炸药密度为  $1.729 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

(图 1b), 二者密度接近, 且 X 射线检测无缺陷, 成型质量均明显好于文献[10]报道的 TNT/Al 纤维 80/20 的成型效果(图 1c)。

#### 3.2 纤维类别对力学性能的影响

测试分别添加 0.4% 玻璃纤维、0.4% 铝纤维、0.4% 聚酯纤维和 0.09% 碳纤维的 RDX/TNT 65/35 的力学性能, 其结果见表 1。分析表 1 数据发现, 添加四种纤维材料均使熔铸炸药拉伸强度下降, 使用铝纤维下降最多, 由  $1.78 \text{ MPa}$  降至  $0.92 \text{ MPa}$ ; 各种纤维材料均使熔铸炸药的压缩强度升高, 聚酯纤维的提升效果最佳, 达到了  $27.94 \text{ MPa}$ , 其次是碳纤维, 炸药压缩强度提升至  $26.85 \text{ MPa}$ ; 玻璃纤维对炸药拉伸延伸率有明显改善(提升 33%); 碳纤维对压缩率和压缩断裂能量的提高最为显著, 添加 0.09% 3 mm 碳纤维使压缩断裂能量提高到  $0.300 \text{ J}$ , 碳纤维长度不同时(3 mm 和 6 mm), 炸药的拉伸强度和拉伸延伸率有较大差别。

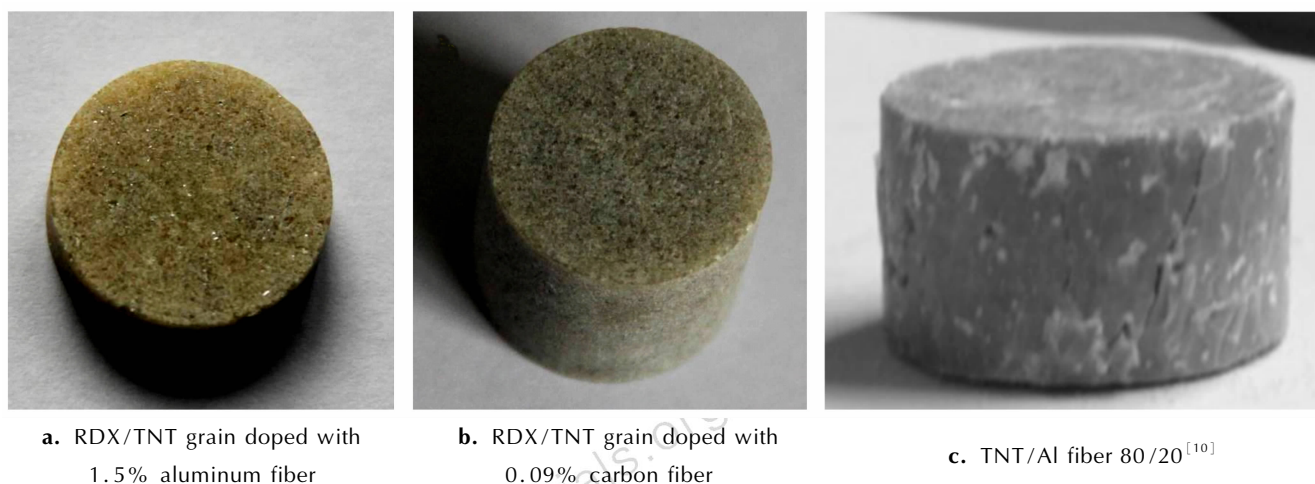


图 1 铝纤维和碳纤维掺杂成型药块

Fig.1 Molding grain doped with aluminum fiber and carbon fiber

表 1 纤维改性 RDX/TNT 65/35 力学性能

Table 1 Mechanical properties of RDX/TNT 65/35 modified with fibers

chopped fiber	amount /%	tensile strength /MPa	compressive strength /MPa	compressive rate /%	tensile elongation /%	compressive fragmentation energy/J
-	0	1.78	24.31	0.35	0.030	0.246
glass fiber	0.4	1.27	25.35	0.36	0.040	0.253
aluminum fiber	0.4	0.92	24.45	0.32	0.016	0.231
polyester fiber	0.4	1.32	27.94	0.33	0.031	0.259
carbon fiber <sup>1)</sup>	0.09	0.60	26.58	0.39	0.013	0.300
carbon fiber <sup>2)</sup>	0.09	1.42	26.85	0.39	0.035	0.296

Note: 1)  $\Phi 7 \mu\text{m} \times 3 \text{ mm}$  carbon fiber, 2)  $\Phi 7 \mu\text{m} \times 6 \text{ mm}$  carbon fiber.

4种纤维材料对RDX/TNT 65/35力学性能的影响与其本身性质有关。(1)聚酯纤维(聚对苯二甲酸乙二酯)具有细度大、强度高特点,其分子结构中的苯环与TNT分子中的苯环结合力强,相容性好,纤维加筋和桥联作用明显,因此可显著提高熔铸炸药的抗压强度。(2)纯铝材料在宏观尺寸上延展性、柔韧性好;但在微米尺度上铝纤维易断裂,与炸药分子作用力差,抗拉性能差,这可以从图1a炸药的表面结构得到证明,细小灰色区域即是铝纤维被整体拔出留下的凹陷。添加量为0.4%时拉伸强度和拉伸延伸率分别下降了48%和47%。(3)与铝纤维不同,玻璃纤维具有较好的韧性,碳纤维密度小、强度高、模量大,以玻璃纤维和6 mm碳纤维为添加剂,能使熔铸炸药RDX/TNT拉伸延伸率有不同程度的提高,其中6 mm碳纤维不仅使压缩强度、压缩率、压缩断裂能量和拉伸延伸率均有所提高,而且还是几种纤维材料中能使炸药的拉伸强度降幅最小。

### 3.3 玻璃纤维添加量对力学性能的影响

玻璃纤维用量对RDX/TNT 65/35力学性能的影响如图2所示。玻璃纤维用量为0.2%时,炸药拉伸、压缩力学性能比不添加任何物质的RDX/TNT 65/35性能差;在0.2%~1.0%添加量范围内,压缩强度、压缩率和压缩断裂能量随着用量的增加而升高,拉伸强度、延伸率、拉伸断裂能量也随着玻璃纤维添加量的增加而提高,但达到最大值后又随着用量的增加而降低。拉伸实验中,强度、延伸率和断裂能量在玻璃纤维添加量分别为0.6%、0.4%和0.6%时达到最大值。

分析玻璃纤维添加量对熔铸炸药力学性能影响规律的原因,主要是:在压缩实验中玻璃纤维起到类似于混凝土中钢筋的支撑桥梁作用,而拉伸力学性能主要依靠炸药分子间、炸药与纤维材料间的相互作用力。添加纤维后原来部分TNT与RDX、TNT分子内接触的方式被TNT与玻璃纤维、RDX与玻璃纤维所取代,当玻璃纤维添加量较小时(0.2%)后者的力量不能弥补前者的损失,拉伸力学性能比不掺杂纤维材料时差;随着纤维用量的增加,其与炸药分子的作用力不断增强,拉伸力学性能有所上升;但纤维用量继续增大时,分散性变差,玻璃纤维簇内空隙屏蔽了与TNT、RDX间的相互作用,导致拉伸力学性能急剧下降。对于压缩力学性能而言,添加量为0.2%时柔韧玻璃纤维的支撑作用不能弥补原来RDX、TNT刚性颗粒的支撑作用损失,随着用量的增加,纤维对整体的支撑作用迅速增强,因此在添加量为0.2%~1.0%范围内,压缩力

学性能随着玻璃纤维用量的增加而升高。

可见,纤维掺杂量不仅影响炸药熔融体系的粘度、可浇铸性和产品成型质量,还会影响到纤维材料的分散聚集状态和对TNT、RDX的吸附量和结合力,从而影响到熔铸炸药产品的强度、延伸率和断裂能量等力学性能。

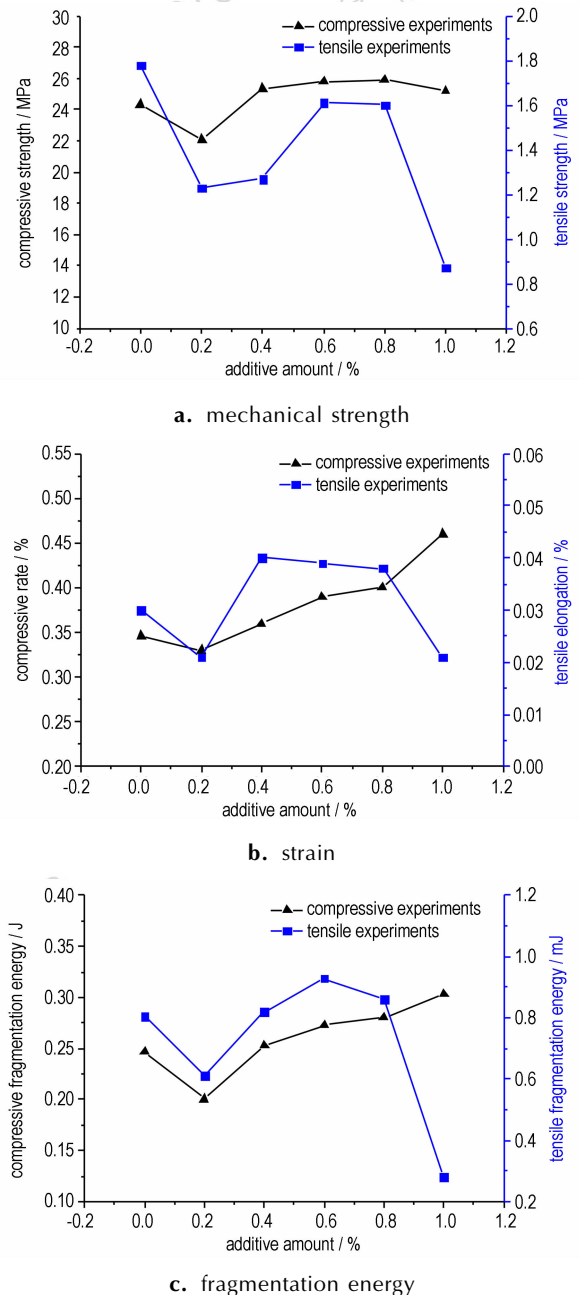


图2 玻璃纤维改性-RDX/TNT 65/35的力学性能

Fig. 2 Mechanical property of RDX/TNT 65/35 modified with glass fiber

### 3.4 碳纤维长度对力学性能的影响

碳纤维用量分别为0.01%、0.05%、0.09%时,

纤维长度对 RDX/TNT 65/35 拉伸强度、延伸率和拉伸断裂能量的影响如图 3 所示。添加量为 0.01% 和 0.05% 时,使用 3 mm 碳纤维的 RDX/TNT 65/35 拉伸强度、延伸率和拉伸断裂能量高于使用 6 mm 碳纤维;用量增至 0.09% 时,使用 3 mm 碳纤维炸药的拉伸强度、延伸率和拉伸断裂能量大幅降低,使用 6 mm 碳纤维,延伸率降低较多,而拉伸强度和拉伸断裂能量有所提高或者保持不变。

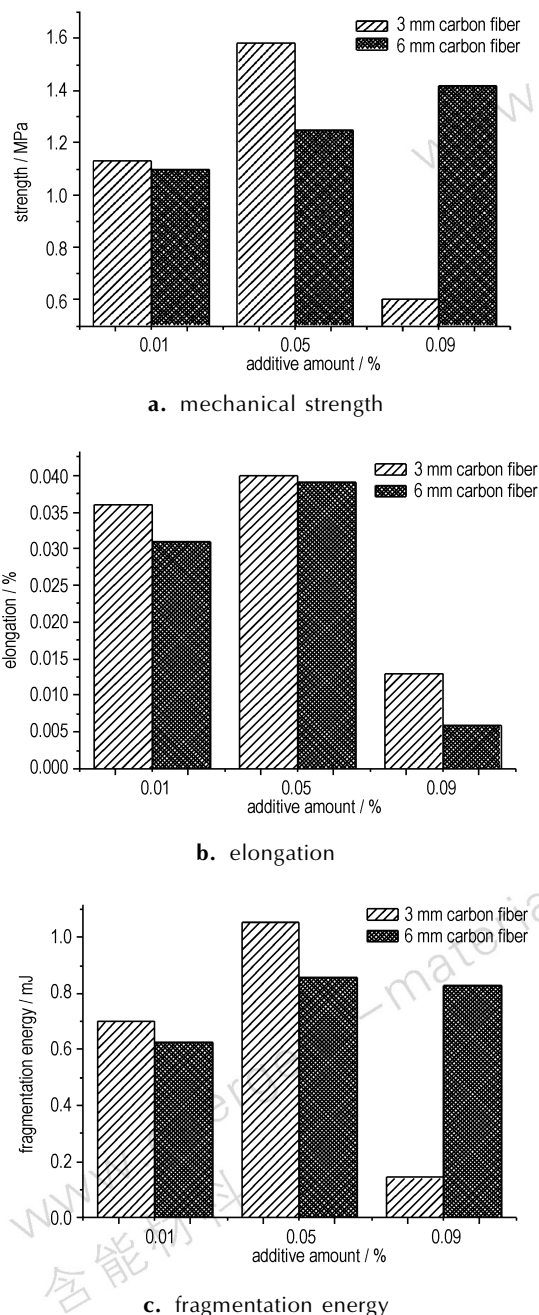


图 3 碳纤维改性 RDX/TNT 65/35 的拉伸力学性能

Fig. 3 Tensile mechanical property of RDX/TNT 65/35 modified with carbon fiber

复合材料受力时基体 TNT 把应力传递给纤维,使材料应力得以分散,由于短纤维应力传播路径短,响应要比长纤维迅速,再加上同等用量时短纤维的数目多于长纤维,应力分散更为均匀和有效,因此如图 3 所示,在添加量为 0.01% 和 0.05% 时,3 mm 碳纤维改性炸药的拉伸力学性能好于 6 mm 碳纤维拉伸力学性能。在掺杂量为 0.09% 时,熔融体系粘度大幅上升,3 mm 碳纤维数目是 6 mm 碳纤维的两倍,在熔融体系中的分散性更差,将纤维材料的空隙等微观缺陷带入的也更多,这导致 3 mm 碳纤维对力学性能的降低更为明显。总之,掺杂 0.05% 3 mm 碳纤维对 RDX/TNT 65/35 药柱的力学改性最佳,拉伸强度、延伸率和拉伸断裂能量均达到最高值。

#### 4 结论

(1) 玻璃纤维、聚酯纤维、铝纤维、碳纤维四种材料作为改性剂,熔铸炸药 RDX/TNT 65/35 压缩强度均升高,拉伸强度均降低,玻璃纤维对拉伸延伸率提高最多,铝纤维对拉伸强度和拉伸延伸率降低最多,聚酯纤维能显著提高压缩强度,碳纤维能明显提高压缩断裂能量。

(2) 玻璃纤维添加量对 RDX/TNT 65/35 力学性能有重要影响,添加量为 0.2% 时,拉伸、压缩力学性能均低于不掺杂纤维材料的 RDX/TNT 65/35,添加量为 0.2% ~ 1.0% 时,RDX/TNT 65/35 的压缩力学性能随添加量的增加而升高,添加量超过 0.8% 时炸药拉伸力学性能急剧下降。

(3) 碳纤维用量越大,其长度对拉伸力学性能的影响越显著,用量为 0.09% 时使用 3 mm 碳纤维,RDX/TNT 65/35 的拉伸强度和拉伸延伸率分别比使用 6 mm 碳纤维降低了 58% 和 63%,掺杂 0.05% 3 mm 碳纤维时 RDX/TNT 65/35 的拉伸力学性能较好。

#### 参考文献:

- [1] 张光全,董海山. 2,4-二硝基苯甲醚为基熔铸炸药的研究进展[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 604-609.  
ZHANG Guang-quan, DONG Hai-shan. Review on melt-castable explosives based on 2,4-dinitroanisole [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 604-609.
- [2] 王亲会,张亦安,金大勇. DNTF 炸药的能量及可熔铸性[J]. 火炸药学报, 2004, 11(4): 14-16.  
WANG Qin-hui, ZHANG Yi-an, JIN Da-yong. Energy and castibility of DNTF explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 11(4): 14-16.

- [3] 黄亨建, 董海山, 张明. B 炸药的改性研究及其进展[J]. 含能材料, 2001, 9(4): 183-186.  
HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming. Problems and developments in composition B modification research[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(4): 183-186.
- [4] Witt W, Sabranski U. A new method for cast-loading mixtures of explosives[J]. *Propellants and Explosive*, 1979, 4: 1-3.
- [5] Xu G, Hao Z Z, Xie J J, et al. Research on physical properties of composite explosive charges at gradually changing temperature environment[C]//Proc. China-Jpn. Semin Energ Mater Saf Environ, 1996: 229-238.
- [6] 曹欣茂. 国外 B 炸药改性技术重要进展[J]. 火炸药, 1994, (3): 35-39.
- [7] 黄亨建, 董海山, 张明, 等. 高聚物改性 B 炸药研究(II)[J]. 含能材料, 2005, 13(1): 7-9.  
HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming, et al. Research on modification of composition B with polymers(II)[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(1): 7-9.
- [8] 黄亨建, 董海山, 习彦, 等. 高聚物改性 B 炸药研究(III)[C]//全国危险物质与安全应急技术研讨会, 重庆, 2011, 55-59.
- [9] 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.
- [10] 廖学燕, 沈兆武, 姚保学, 等. 含铝纤维复合炸药的输出和力学强度[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(4): 424-428.  
LIAO Xue-yan, SHEN Zhao-wu, YAO Bao-xue, et al. Energy output and mechanical strength of aluminum-fibre-reinforced composite explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 424-428.

## Mechanical Reinforcement on the Melt-cast Explosive of RDX/TNT by Chopped Fibers

ZHENG Bao-hui, WANG Ping-sheng, LUO Guan, HUANG Yong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Using glass, polyester, aluminum and carbon fiber as the mechanical modifier of melt-cast explosive RDX/TNT 65/35, the influence of type, content and length on its mechanical property was studied through compressive and tensile experiments. Results show that, the modified effect on compressive strength with polyester fiber is the best, and the compressive strength of the explosive with 0.4% increases to 27.94 MPa. The tensile strength and tensile elongation decreases obviously with decrease of aluminum fiber. The tensile and compressive mechanical properties are degraded when using 0.2% glass fiber than that without fiber. The compressive mechanical performance of RDX/TNT 65/35 increase with the additive amount of glass fiber increase. With 0.01% and 0.05% carbon fiber separately, the tensile mechanical property with 3 mm carbon fiber is better than that with 6 mm carbon fiber, and tensile mechanical properties reach maximum using 0.05% 3 mm carbon fiber.

**Key words:** solid mechanics; melt-cast explosive; mechanical property; chopped fibers

**CLC number:** TJ55; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.019