

文章编号: 1006-9941(2016)02-0144-05

真空环境下铝粉粒度与形状对 RDX 基炸药爆炸场压力和温度的影响

黄亚峰, 田轩, 冯博, 王晓峰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究真空环境下铝粉对含铝炸药爆炸场压力和温度的影响规律, 利用密闭爆炸罐测量了粒度为 4, 13, 28 μm 的球状铝粉和 130 μm 的片状铝粉的四种含铝炸药的爆炸场压力和温度。结果表明, 铝粉对含铝炸药爆炸场压力的降低显著性的顺序是 13 μm 球状铝粉 > 4 μm 球状铝粉 > 28 μm 球状铝粉 > 130 μm 片状铝粉, 铝粉对含铝炸药爆炸场温度的提升作用大小顺序是 28 μm 球状铝粉 > 130 μm 片状铝粉 > 4 μm 球状铝粉 > 13 μm 球状铝粉, 显示铝粉对含铝炸药爆炸场压力和温度的影响与铝粉粒度大小不具有相关性。

关键词: 化学反应动力学; 含铝炸药; 平衡压力; 平衡温度

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.006

1 引言

含铝炸药是在炸药中加入一定比例具有高燃烧热值金属铝粉的一类炸药, 其具有高爆热、高比容的特点, 广泛应用于对空武器弹药、水下武器弹药的装药中^[1]。因此, 含铝炸药成为混合炸药研究中的热点方向之一。

含铝炸药提高炸药的能量是通过铝粉与炸药爆轰后的气态产物发生二次反应释放大热量, 含铝炸药的惰性热稀释理论认为铝粉在炸药的 C-J 反应区内是惰性物质, 不参与反应, 因此, 含铝炸药中铝粉的含量对其爆热、爆速、爆压、金属加速能力以及冲击波超压具有显著影响, 含铝炸药的研究多集中在铝粉含量对炸药性能的影响方面。Gogulya^[2] 研究了奥克托今 (HMX) 基纳米含铝炸药的爆速、爆热、金属片加速能力等性能; Makhov^[3] 通过理论计算和实验测量研究了六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 基含铝炸药的爆热和加速能力; 沈飞^[4] 通过数值模拟和试验验证研究了两种不同尺寸的黑索今 (RDX) 基含铝炸药的作功能力; 王庭辉^[5] 通过理论计算研究了不同铝粉含量的 TNT 基和 HMX 基含铝炸药的爆压和波头处的放热;

冯晓军^[6] 等研究了铝粉含量对梯铝炸药爆压和冲击波参数的影响, 发现含铝炸药的爆压随铝粉含量的增加呈指数衰减, 近场冲击波超压亦随铝粉含量快速减小; 李媛媛^[7] 研究了密闭条件下铝粉含量对炸药爆炸场温度的影响。

含铝炸药的爆轰过程包含化学反应热力学和动力学, 这两种反应过程与铝粉颗粒度大小都具有密切关系。Cook^[8] 研究了铝粉颗粒大小对硝酸铵基炸药爆速的影响; Keicher T^[9] 研究了不同粒度铝粉对气泡能和冲击波峰压的影响; Peuker^[10] 研究了粒度和空气环境对 RDX 基含铝炸药的冲击波超压增强能力的影响; 冯晓军^[11] 研究了铝粉粒度对炸药爆炸能量的影响; 黄辉^[12] 研究了铝粉粒度对金属加速能力的影响, 发现纳米铝粉在爆轰波前沿参加反应促进金属加速能力的增强。

国内外对含铝炸药的研究多集中在铝粉对炸药性能的影响, 而本研究则利用爆炸罐在真空环境测量含铝炸药的爆炸场压力和爆炸场温度, 分析铝粉粒度对炸药爆炸场压力和爆炸场温度的影响规律, 研究铝粉粒度对含铝炸药爆轰性能的影响, 揭示铝粉粒度与铝粉反应性能之间的关系, 以为含铝炸药铝粉的选择、配方设计提供技术支持。

2 实验部分

2.1 实验样品

实验原材料: RDX, II 类, 国营 805 厂生产; 球型

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-11-08

基金项目: 国家重大专项 (00401030502)

作者简介: 黄亚峰 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事混合炸药技术研究。e-mail: huangyafeng204@163.com

通信联系人: 王晓峰 (1967-), 男, 研究员, 主要从事混合炸药技术研究。e-mail: wxclub@163.com

铝粉 FLQT2, 平均粒径为 $28\ \mu\text{m}$, 鞍钢实业微细铝粉有限公司生产; 球型铝粉 FLQT3, 平均粒径为 $13\ \mu\text{m}$, 鞍钢实业微细铝粉有限公司生产; 球型铝粉 FLQT4, 平均粒径为 $4\ \mu\text{m}$, 鞍钢实业微细铝粉有限公司生产; 片状铝粉 FLQ355A, 平均粒径为 $130\ \mu\text{m}$, 哈尔滨东轻金属粉业有限责任公司生产。实验样品配方为 60RDX/35Al/5 粘结剂, 配方中铝粉为以上四种不同型号。

样品制备: 首先将水浴温度升至为 $60\ ^\circ\text{C}$, 然后将粘结剂用一定量乙酸乙酯完全溶解, 依次加入黑索今和铝粉, 搅拌均匀, 乙酸乙酯挥发至物料呈拉丝状时, 将混合炸药倒出过筛、烘干, 最后将造型粉压制带 $8^\#$ 雷管孔的 $\phi 25\ \text{mm}$ 的药柱, 高度 $28\ \text{mm}$, 药柱质量为 $(25.000 \pm 0.050)\ \text{g}$ 。

2.2 实验装置

自研的实验装置如图 1 所示。密闭爆炸装置是一高为 $400\ \text{mm}$ 内径 $188\ \text{mm}$ 容积为 $5.8\ \text{L}$ 的圆柱形弹体。本实验装置的温度传感器采用美国 NANMAC 公司研制的具有自恢复能力的快速反应钨铼热电偶, 布置在距离端盖中心 $40\ \text{mm}$ 处, 下端距离上端盖底部 $180\ \text{mm}$, 传感器响应时间达 $10^{-5}\ \text{s}$, 最大可耐压力达 $135\ \text{MPa}$; 测温系统频带宽度为 $200\ \text{kHz}$; 放大倍数为 100 倍, 温度范围为 $-240 \sim 1200\ ^\circ\text{C}$, 精度小于 1% 。本实验装置的压力传感器采用美国 Kulite 公司超高温硅压阻传感器, 布置在距离端盖中心 $40\ \text{mm}$ 处, 传感器压力范围为 $0 \sim 14\ \text{MPa}$, 精度小于 1% 。

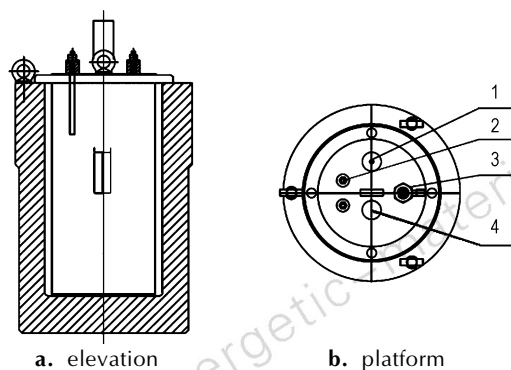


图 1 实验装置示意图

1—温度传感器, 2—点火装置, 3—通气装置, 4—压力传感器

Fig. 1 Schematic diagrams of experiment device

1—temperature sensor, 2—ignition device, 3—vent device, 4—pressure sensor

2.3 实验方法

首先将点火装置短路, 实验用含铝炸药样品悬挂

于距离上端盖 $20\ \text{cm}$ 处后将起爆雷管接到点火装置上, 然后将实验装置上端盖密封, 用真空泵抽空爆炸罐内的空气, 然后向爆炸罐内缓慢充入氮气, 如此循环三次, 将爆炸罐内的氧气完全抽走, 使爆炸罐内剩余气体的压力约为 $3\ \text{kPa}$, 起爆实验样品, 压力传感器和温度传感器记录 $50\ \text{s}$ 内的电信号数据, 最后通过通气装置用气体采样袋采集反应后的气体样品, 利用 Perkin Elmer 公司的 Clarus500 气相色谱仪对爆轰后的 N_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 等主要气体产物进行定量分析。

3 结果与讨论

3.1 爆炸场压力分析

通过真空爆炸罐密闭实验得含不同粒度铝粉的含铝炸药爆炸场压力随时间变化曲线, 如图 2 所示, 将图 2 的时间尺度缩小到 $1\ \text{s}$, 得图 3。由图 2 可知, FLQ355A 和 FLQT2 两种铝粉对爆炸场压力的降低效果基本相当, FLQT4 和 FLQT2 两种铝粉对爆炸场压力的降低效果基本相当, FLQ355A 和 FLQT2 两种铝粉对爆炸场压力的降低效果比 FLQT4 和 FLQT2 两种铝

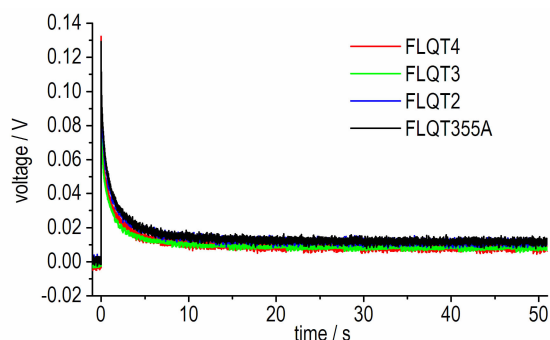


图 2 含不同铝粉炸药的爆炸场压力与时间曲线

Fig. 2 Curves of explosion field pressure vs. time for explosives containing different aluminum powder

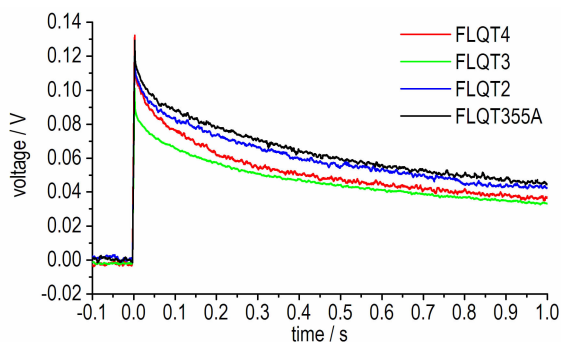


图 3 含不同铝粉炸药 1 s 内爆炸场压力与时间曲线

Fig. 3 Curves of explosion field pressure vs. time within one second for explosives containing different aluminum powder

粉小。由图 3 可知,四种粒度的铝粉对爆炸场压力的降低显著性的顺序是 FLQT3 > FLQT4 > FLQT2 > FLQ355A,上述结论可以用含铝炸药惰性热稀释理论解释,含铝炸药惰性热稀释理论认为作为惰性物质的铝粉在单质炸药爆炸瞬间不参与反应,由于铝是热的良导体,可以从爆轰产物中吸收热量,因此便降低了爆轰波阵面的能量,使爆速、爆压明显下降,粒度越小,比表面积越大的稀释剂,降低效果越明显。因此,惰性热稀释理论推测的四种粒度的铝粉对爆炸场压力的降低显著能力的顺序应是 FLQT4 > FLQT3 > FLQT2 > FLQ355A,而依据实验结果,平均粒度为 4 μm 的 FLQT4 的铝粉应该比平均粒度为 13 μm 的 FLQT3 铝粉对爆炸场压力的降低效果更明显。这种现象解释是,单质炸药爆轰反应时间在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ s,这个时间内纯铝可热透的半径约在 10 μm 以内,非金属颗粒约在 1 μm 以内^[1]。由于铝颗粒外表面有一层 Al_2O_3 的非金属薄膜,实际能够热透的半径远小于 10 μm 。因此平均粒度为 4 μm 的铝粉在单质炸药的爆轰反应时可以完全热透变成液体导致体积变大,存在少量铝粉冲破 Al_2O_3 薄膜暴露后在爆轰波阵面前沿参与反应放出大量热量,从而弥补了爆轰波阵面降低的能量。

3.2 爆炸场温度分析

通过密闭真空爆炸罐测得含不同粒度铝粉的含铝炸药爆炸场温度与时间变化曲线如图 4,将图 4 的时间尺度缩小到 1 s,得图 5。由图 4、图 5 可知,铝粉粒度对含铝炸药爆炸场温度的提升作用大小顺序是 FLQT2 > FLQ355A > FLQT4 > FLQT3。图 5 显示,FLQ355A、FLQT2、FLQT3 等三种铝粉的爆炸温度有明显的先下降然后再升高的现象,而 FLQT4 铝粉不存在下降趋势,而是呈现出逐渐升高随后形成一个温度平台。爆炸场温度实验结果可以用含铝炸药惰性热稀释理论解释,含铝炸药中的单质炸药首先发生瞬间爆炸并释放出大量热量,铝粉吸收爆轰波阵面的热量使波阵面的能量减小以及气体向外膨胀做功致使爆轰产物温度下降,当铝粉完全热透变成液体,体积逐渐增大,致使铝粉表面的三氧化二铝薄膜破裂而与爆轰产物发生二次反应释放大量的热量,温度上升,反应完成后,系统温度呈缓慢下降趋于平衡,因此爆炸场温度呈现先下降后上升最后缓慢下降趋于平衡。对于粒度较小的 FLQT4 铝粉,其在单质炸药爆炸瞬间,铝粉颗粒已全部热透变成液体,体积逐渐增大,涨破表面的三氧化二铝薄膜发生二次反应释放热量,其释放的热量抵消了其吸收的热量,所以爆炸场温度没有出现先降低

后升高的趋势,而是形成一个温度平台,在铝粉二次反应后,系统温度呈缓慢下降趋于平衡。

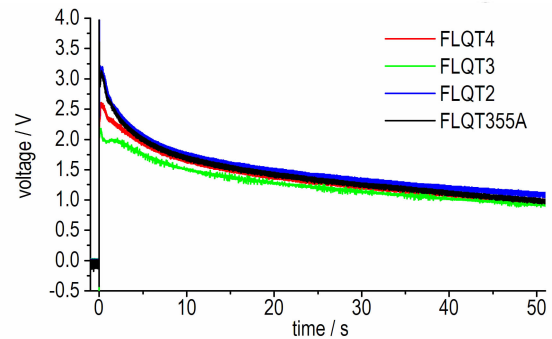


图 4 含不同铝粉炸药的爆炸场温度与时间曲线

Fig. 4 Curves of explosion field temperature vs time for explosives containing different aluminum powder

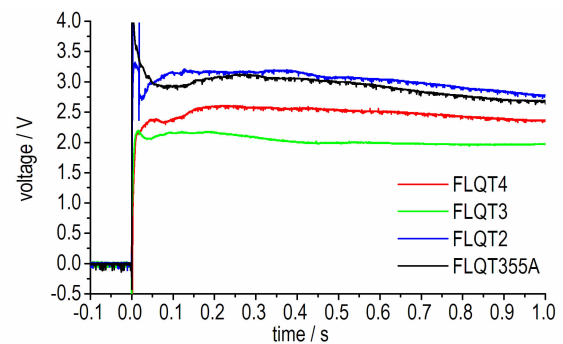


图 5 含不同铝粉炸药的 1 s 内爆炸场温度与时间曲线

Fig. 5 Curves of explosion field temperature vs time within 1 s for explosives containing different aluminum powder

3.3 气体产物分析

反应后各气态产物分析结果见表 1,含铝炸药气态产物的定量分析是采用外标法,首先测量标准样的气象色谱,将各组分含量与色谱峰的面积相对应,然后测定本实验的气态产物的气象色谱进行定量分析。现有标准样为 CH_4 、 CO_2 、 N_2 和 CO 的混合气体,因此实验所得数据为 CH_4 、 CO_2 、 N_2 和 CO 的定量分析数据,其余气体没有定量分析。由表 1 数据可知,含不同粒度铝粉的炸药爆轰后气态产物含量不同,其中含 FLQT3 铝粉含铝炸药反应后的 CO 气体最大,剩余氧含量最多。含不同铝粉炸药爆轰后气态产物中氧含量的多少顺序为 FLQT3 > FLQT4 > FLQ355A > FLQT2。

由含铝炸药的二次反应理论^[8]可知,含铝炸药的反应可分成三个阶段:一是无氧爆轰阶段,主要是炸药中的单质炸药发生分解反应。二是无氧燃烧阶段,主要是炸药中的铝粉等可燃组分与单质炸药的分解产物发生氧化还原反应,此反应不需要外界的氧气。三

是有氧燃烧阶段,主要是无氧燃烧阶段剩余的铝粉等可燃组分与周围空气中的氧气发生反应。前两个阶段是含铝炸药爆轰反应阶段,是炸药自身爆轰能释放阶段,第三个阶段是后燃烧阶段,因本实验是在真空环境下进行,不存在第三阶段反应。铝粉发生氧化反应必须有两个前提:一是与氧化剂充分接触,二是必须提供足够高的反应温度使铝粉与氧化剂发生反应。含铝炸药爆轰产物向外膨胀时可以使铝粉与氧化性气态产物发生湍流作用而密切接触,因此条件一不是问题,所以含铝炸药中铝粉的反应效果取决于含铝炸药爆轰能量释放提供的环境温度。含不同铝粉炸药的爆炸场温度分析已知,爆炸场温度大小顺序为 FLQT2 > FLQ355A > FLQT4 > FLQT3,与炸药最终气态产物中氧含量的大小顺序正好相反,说明温度越高越有利于铝粉与氧化剂反应消耗掉氧元素,反应放出的热量继续维持高温环境,促进铝粉与氧化剂的充分反应。

表 1 含不同铝粉炸药爆轰后的气态产物

Table 1 Gas products after detonation for explosives containing different aluminum powder %

sample	CH ₄	CO ₂	N ₂	CO	content of remainder oxygen element
FLQT4	1.78	0.09	25.84	26.45	26.63
FLQT3	1.69	0.09	23.05	37.69	37.87
FLQT2	1.45	0.04	35.60	24.92	25.00
FLQ355A	1.54	0.05	35.35	26.40	26.51

4 结 论

利用密闭爆炸罐实验,研究了真空环境下四种不同铝粉对含铝炸药的爆炸场压力和爆炸场温度的影响规律,分析了铝粉的反应性能,得到以下结论:

(1) 四种铝粉对含铝炸药爆炸场压力的降低显著性的顺序是 13 μm 球状铝粉 > 4 μm 球状铝粉 > 28 μm 球状铝粉 > 130 μm 片状铝粉,因此铝粉对含铝炸药爆炸场压力的降低能力与铝粉的粒度大小不具有相关性。

(2) 四种铝粉对含铝炸药爆炸场温度的提升作用大小顺序是 28 μm 球状铝粉 > 130 μm 片状铝粉 > 4 μm 球状铝粉 > 13 μm 球状铝粉,因此铝粉对含铝炸药爆炸场温度的提升作用与铝粉的粒度大小不具有相关性。

(3) 铝粉发生氧化反应的条件一是需与氧化剂充分接触,二是必须有较高的温度,因此含铝炸药爆轰后的环境温度越高越有利于铝粉的氧化反应。

参考文献:

- [1] 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: 364-391.
- [2] Gogulya M F, Makhov M N, Brazhnikov M A, et al. Explosive characteristics of aluminized HMX-based nanocomposites[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(2): 198-212.
- [3] Makhov M N. Heat of explosion and acceleration ability of aluminized hexanitrohexaazaisowurtzitane-based compositions[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2014, 8(2): 186-191.
- [4] 沈飞,王辉,袁建飞,等. RDX 基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 777-780. SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei, et al. Different diameter cylinder tests and numerical simulation of RDX-based aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 777-780.
- [5] 王庭辉,段祝平,苏健军,等. 广义 C-J 条件在计算含铝炸药波头参数中的应用[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 68-74. WANG Ting-hui, DUAN Zhu-ping, SU Jian-jun, et al. Application of generalized C-J condition at detonation of aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 68-74.
- [6] 冯晓军,王晓峰,黄亚峰,等. 铝粉含量对梯铝炸药爆压和冲击波参数的影响[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 1-4. FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, HUANG Ya-feng, et al. Effect of aluminium content on the detonation pressure and shock wave parameters of TNT/Al explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2009, 32(5): 1-4.
- [7] 李媛媛,王建灵,徐洪涛. Al-HMX 混合炸药爆炸场温度的实验研究[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 241-243. LI Yuan-yuan, WANG Jian-ling, XU Hong-tao. Experimental study on blasting temperature of Al-HMX compound explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 241-243.
- [8] Cook M A, Filler A S, Keyes R T, et al. Aluminized explosives[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1957, 61(2): 189-196.
- [9] Keicher T, Happ A, Kretschmer. Influence of aluminium/ammonium perchlorate on the performance of under-water explosives[J]. *Prepellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24: 140-143.
- [10] Peuker J M, Krier H, Glumac N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34: 2205-2212.
- [11] 冯晓军,王晓峰,李媛媛. 铝粉粒度和爆炸环境对含铝炸药爆炸能量的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 24-27. FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, LI Yuan-yuan, et al. Effect of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion of aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(6): 24-27.
- [12] 黄辉,黄亨建,黄勇,等. 以 RDX 为基的含铝炸药中铝粉粒度和氧化剂形态对加速金属能力的影响[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 7-11. HUANG Hui, HUANG Heng-jian, HUANG Yong, et al. The influence of aluminum particle size oxidizer morphology in RDX-based aluminized explosives on their ability to accelerate metals[J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(1): 7-11.

Effect of Particle Size and Shape of Aluminum Powder on the Explosion Field Pressure and Temperature of RDX-based Explosive in Vacuum Environment

HUANG Ya-feng, TIAN Xuan, FENG Bo, WANG Xiao-feng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To investigate the effect rule of aluminum powder on the explosion field pressure and temperature of aluminized explosive in vacuum environment, the explosion field pressure and temperature of four kinds of aluminized explosives containing spherical aluminum powder with particle size of 4, 13 μm and 28 μm and slice aluminum powder with particle size of 130 μm were measured in a sealed explosion chamber. Results show that the significance of aluminum powder on the explosion field pressure of aluminized explosive reduces in the order of 13 μm spherical aluminum > 4 μm spherical aluminum > 28 μm spherical aluminum > 130 μm slice aluminum and the effect of aluminum powder on the explosion field temperature of aluminized explosive raises in the order of 28 μm spherical aluminum > 130 μm slice aluminum > 4 μm spherical aluminum > 13 μm spherical aluminum, revealing that the effect of aluminum powder on the explosion field pressure and temperature has no correlation with particle size of aluminum powder.

Key words: chemical reaction kinetics; aluminized explosive; equilibrium pressure; equilibrium temperature

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.006



《含能材料》损伤与点火专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部