

文章编号: 1006-9941(2015)01-0062-05

某 RDX 基含 Al 炸药发射安全性

肖 玮, 李亮亮, 屈可朋, 付改侠

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 用 400 kg 大型落锤实验和一级轻气炮实验研究了某 RDX 基含 Al 炸药(R-Al 炸药)的发射安全性, 获得了炸药装药在两种实验条件下的应力-时间曲线。进行了 R-Al 炸药与铸装 B 炸药发射安全性的比较。结果表明: R-Al 炸药在大型落锤加载应力 1.47 GPa、加载时间 3.04 ms 及一级轻气炮加载应力 660 MPa、加载时间 41 μ s 条件下未发生点火; 铸装 B 炸药在大型落锤加载应力 840 MPa、加载时间 2.10 ms 及一级轻气炮加载应力 394 MPa、加载时间 40 μ s 条件下发生点火, 显示 R-Al 炸药的发射安全性优于铸装 B 炸药。

关键词: 爆炸力学; 发射安全性; 大落锤实验; 轻气炮实验; 含 Al 炸药

中图分类号: TJ55; V512⁺.2

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.013

1 引 言

炸药装药的发射安全性是指, 在发射过程中, 炸药装药不会因发生自燃、自爆而导致膛炸、早炸的性能。随着炸药装药能量、装填密度的提高, 感度也在提高, 因此炸药装药的发射安全性越来越突出, 在一定程度上制约着炸药的合理应用^[1]。

针对炸药装药的发射安全性, 国外的研究手段主要有: 气体炮冲击实验器^[2]、高速液压伺服装置^[3]、落锤^[4]、155 mm 短管榴弹炮射击实验器^[5]。大型落锤装置的加载参数(应力、时间)能覆盖榴弹炮发射时的膛内加载参数, 因此国内主要采用大型落锤装置^[6]进行炸药发射安全性的评估(加载时间为毫秒量级)。一级轻气炮能够完整记录弹丸碰撞装药过程中, 炸药装药上加载的应力随时间变化的整个过程, 且加载时间为微秒量级, 能够模拟微秒量级炸药装药的发射安全性。

王豪^[1]采用理论与数值模拟相结合的方法, 对弹丸膛内发射过程中炸药装药的应力和温度变化进行了计算研究, 陈锐^[7]从炸药损伤的角度研究了装药缺陷对发射安全性的影响, 滕婉婷^[8]从粘结钝感体系、助剂、装药密度、铝粉含量和铝粉粒度等方面对温压炸药的机械感度、成型性能、静态力学性能、动态力学性能

进行了研究, 通过发射安全性实验对温压炸药配方进行了验证。关于 RDX 基含铝炸药(R-Al 炸药)的研究主要集中在冲击波感度^[9]、爆炸能量预估^[10]、压缩本构^[11]等方面, 有关 R-Al 炸药发射安全性方面的报道很少, 因此, 有必要对 R-Al 炸药的发射安全性进行研究, 为其应用于战斗部奠定基础。

本实验采用 400 kg 大型落锤研究了 R-Al 炸药在毫秒量级的发射安全性, 并与文献[6]所报道的铸装 B 炸药大型落锤实验结果进行了对比, 采用一级轻气炮装置研究了铸装 B 炸药、R-Al 炸药在微秒量级的发射安全性, 对 R-Al 炸药进行安全性评估, 为炸药的筛选提供参考。

2 理论基础及实验原理

2.1 理论基础

炸药装药在膛内发射时的主要加载参数为应力(σ)及应力加载时间(t), 这就要求进行模拟实验的装置所获取的 σ 、 t 必须覆盖其范围(σ 为 50 ~ 400 MPa, t 为 3 ~ 5 ms), 才可模拟炮弹发射时的应力变化过程。

王世英^[6]已验证了大型落锤模拟装置的加载参数与炸药在火炮内实际发射时的主要力学特征参数基本相当, 可完全用该装置模拟炸药在高膛压火炮内的实际发射加载环境, 同时, 考虑到炸药装药在膛内发射时, 炸药的底部受力最大, 故该处的炸药最易于因高膛压作用而点火起爆, 采用大型落锤模拟装置模拟此处受力条件, 即可评价炸药装药的发射安全性, 大落锤的

收稿日期: 2013-12-23; 修回日期: 2014-04-30

作者简介: 肖玮(1973-), 男, 工程师, 主要从事火炸药安全性研究。

通信联系人: 李亮亮(1983-), 男, 工程师, 主要从事火炸药动态力学性能研究。e-mail: pep2968@163.com

加载参数与实际(122,130,155 mm 榴弹)发射加载参数见表 1。

表 1 大型落锤的加载参数与实际发射时的参数

Table 1 Loading parameters of large drop hammer and the actual parameters at launch

method	loading time /ms	loading stress /MPa	curve width /ms
drop hammer	≤5	31.2 ~ 1000	3 ~ 5
actual parameters at launch	≤5	50 ~ 400	3 ~ 5

2.2 实验原理

大型落锤模拟加载装置组成及受试样弹示意图如图 1 所示。

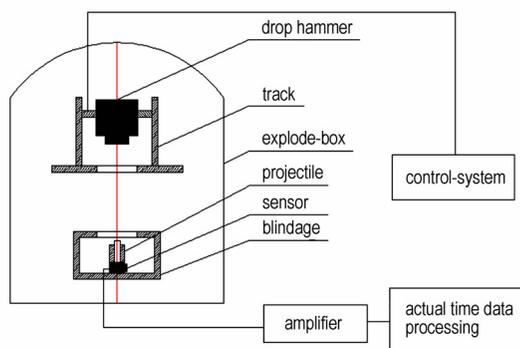


图 1 落锤装置组成及受试样弹示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of drop hammer device and bomb sample

大型落锤模拟加载装置由落锤、轨道、爆炸室、样弹、防护掩体、压力传感器、控制系统、信号放大器及数据处理系统等组成。实验时,某一重量落锤被提升到一定高度,以自由落体方式下降并撞击样弹,压力传感器捕获落锤给予受试样弹的应力加载波形,通过信号放大器放大后,从数据处理系统中可直接读出应力数值及加载时间。此模拟装置最大加载应力达 1.5 GPa,上升前沿约为 2 ~ 3 ms,加载速率为毫秒量级。一级轻气炮模拟加载装置组成如图 2 所示。

轻气炮是目前特别通用的高速发射和高压加载工具,它能发射各种形状的弹丸,而且弹丸的质量、尺寸和材料范围广泛。轻气炮的优点是,弹丸在承受较低的加速度和较小应力的情况下,能获得较高的速度。

把高压气室充到预定弹速需要的气压,自励式快开锥阀迅速开启(毫秒级),高压气体推动弹丸前进,弹丸经炮管的导向和不断加速后,在出口时达到最高

速度并与事先安装在靶箱内的实验靶碰撞后完成实验。碰撞时弹丸对炸药装药加载应力波,通过信号放大器(扬州无线电二厂 YE1940)放大后,从数据处理系统(四川拓普测控科技有限公司 Topview2000 软件)中可直接读出应力数值及加载时间。此试验装置加载速率为微秒量级。轻气炮能完整地记录弹丸对炸药装药快速压缩的整个过程中,应力随时间的变化情况,是非常具有优势的研究微妙量级炸药装药高过载发射安全性的试验手段。

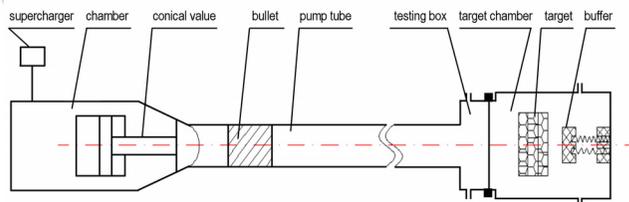


图 2 一级轻气炮结构示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of one-stage light-gas gun structure

3 实验

3.1 样品制备

大型落锤实验中使用 R-Al 炸药,样品尺寸 $\Phi 40$ mm $\times 40$ mm,约 80 ~ 90 g;一级轻气炮实验使用铸装 B 炸药和 R-Al 炸药两种炸药装药,所用样品尺寸 $\Phi 30$ mm $\times 30$ mm,约 36 ~ 40 g,铸装 B 炸药成分为:RDX 60%, TNT 40%,蜡 1%,密度为 $1.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;R-Al 炸药是以 RDX 为基的含铝炸药,密度为 $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。实验用样品如图 3 所示。

3.2 样弹组成

两种实验样弹壁厚均为 40 mm,用上下两个击柱将炸药夹紧,炸药与上下击柱间设置调整器(聚四氟乙烯材质, $\Phi 40$ mm $\times 5$ mm)。考虑到一级轻气炮实验时,高速压缩过程中炸药装药与样弹内壁可能存在摩擦作用,为消除此种因素对炸药安全性的影响,在炸药与内壁之间设置缓冲层(聚四氟乙烯, $\Phi 40$ mm,壁厚 5 mm)。两种实验样弹分别如图 3b、图 3c 所示。

3.3 仪器及实验条件

大型落锤模拟加载实验:大落锤模拟加载装置,锤重 400 kg,落高 0 ~ 4.00 m,可以模拟的应变率加载范围: $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$,常温条件。

轻气炮加载实验:一级轻气炮装置,铝质弹丸,质量 2.1 kg,轻气炮气室压力可调,可以模拟的应变率加载范围大于 10^5 s^{-1} ,常温条件,对称碰撞。

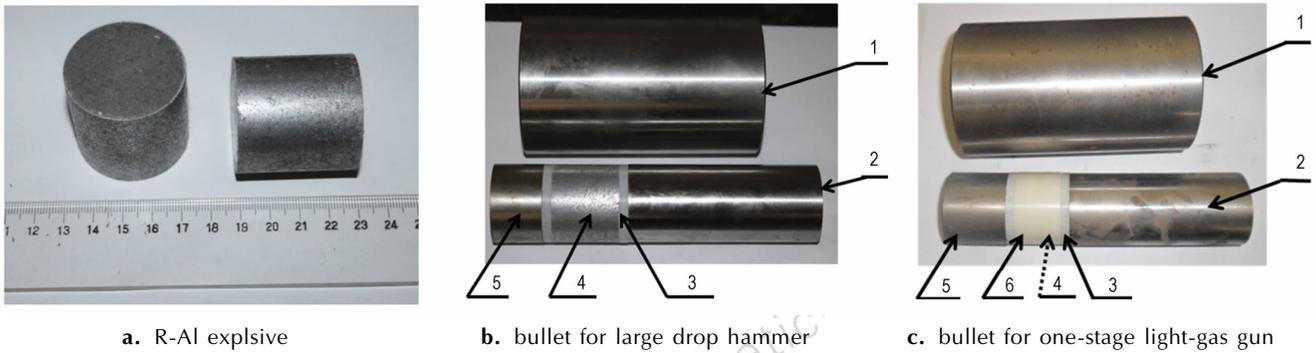


图3 实验样品及样弹

1—壳体, 2—上击柱, 3—调整器, 4—炸药, 5—下击柱, 6—缓冲层

Fig.3 Sample and bullet of experiment

1—projectile body, 2—long piston, 3—seal, 4—explosive, 5—short piston, 6—buffer

4 结果与讨论

4.1 大型落锤实验

将所制备的 R-Al 炸药装配于样弹中, 实验所用样品及样弹照片如图 3 所示。鉴于铸装 B 炸药在 1.75 m 落高^[6]即发生点火 (ignition), 其落锤实验曲线如图 4a^[6]所示, 故 R-Al 炸药的起始落锤高度 H 从 1.70 m 开始, 大型落锤模拟加载实验应力-时间 (σ - t) 曲线见图 4b, 以高度 $H=3.00$ m 为例说明 (未爆, no-ignition), 其他高度下的曲线类似, 实验结果如表 2 所示。

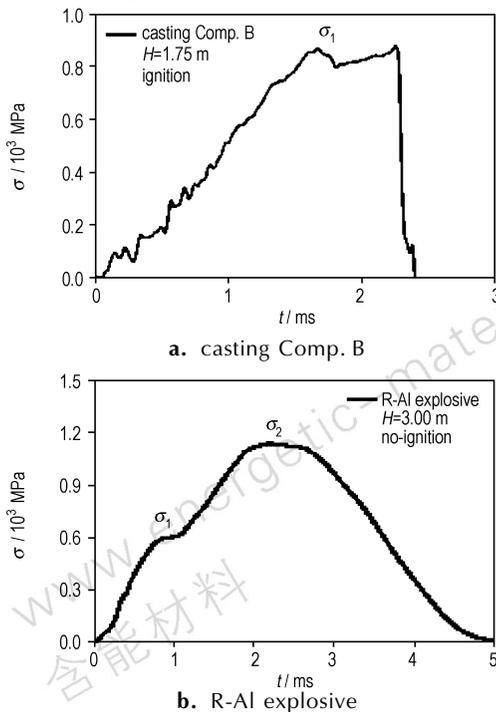


图4 铸装 B 炸药及 R-Al 炸药大落锤实验曲线

Fig.4 Curves of large drop hammer experiment for casting Comp. B and R-Al explosive

表2 R-Al 炸药及铸装 B 炸药大落锤实验数据

Table 2 Data of large drop hammer experiment for R-Al explosive and casting Comp. B

No.	explosive	H /m	σ /GPa	t /ms	ignition /no-ignition
1	R-Al	1.70	0.89	3.08	no-ignition
2		1.90	0.92	2.52	
3		2.10	0.98	3.12	
4		3.00	1.14	2.20	
5		3.80	1.22	3.04	
6		4.00	1.47	3.04	
7	casting Comp. B ^[6]	1.75	0.84	2.10	ignition

Note: H is the height for drop hammer, σ is loading stress, t is loading time.

从表 2 可看出, 铸装 B 炸药在落锤高度 $H=1.75$ m 即发生点火, 而 R-Al 炸药在 $H=4.00$ m 时依旧安全, 可见, R-Al 炸药发射安全性明显优于铸装 B 炸药。

铸装 B 炸药, 在 TNT 中添加了较敏感的 RDX, 一方面提高了敏感度, 另一方面, 增加了炸药结构的脆性, 因此增加了微裂纹或裂缝, 导致部分气体的泄露, 引起炸药拒爆, 这就需要对剩下的气体形成较高的压力, 炸药才可能发生点火。铸装 B 炸药点火是这两方面共同作用的结果。落锤高度较低时, 载荷较小, 且作用时间较长, 故微裂纹等泄露空气的可能性增加; 而落锤高度较高时, 载荷较大, 且作用时间非常短, 微裂纹没有足够的时间泄露空气, 相当于空气腔的绝热压缩, 热点处热量累积, 拒爆可能性降低。因此, 某一高度后, 这两方面作用都将有利于点火, 故铸装 B 炸药的点火阈值将不会很高。

R-Al 炸药, 在 RDX 中添加了非爆炸性的 Al, 由于金属 Al 的传热性能比较好, 因此增加了整个炸药的热

传导性,可及时将热点处的热量传递出去,避免了热点处的热量累积,因此可以降低系统的敏感度。同时由于配方中少量低分子钝感剂的作用,炸药的塑性提高,避免了脆性强度断裂,炸药内部应力集中点减少,故而安全性大大提高。

大型落锤实验可以模拟炸药在高膛压火炮内的实际发射加载环境(应力、时间),并能对炸药装药受力薄弱处进行强化加载,但其应力加载时间为毫秒量级。而 Barry Fishburn^[12]认为发射过程中炸药装药可能的点火时间范围为 $10\ \mu\text{s} \sim 10\ \text{ms}$,包含毫秒和微秒两个量级,此时需借助一级轻气炮对微妙量级的发射安全性进行评估。

4.2 一级轻气炮实验

所获得的铸装 B 炸药及 R-Al 炸药的一级轻气炮实验 σ - t 曲线如图 5 所示。

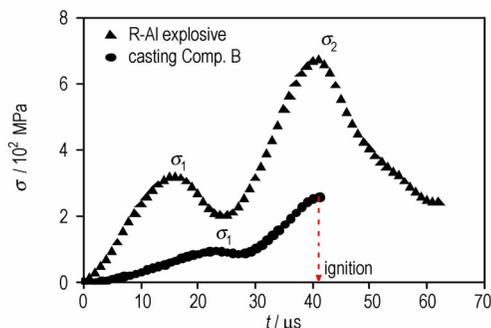


图 5 铸装 B 炸药及 R-Al 炸药的轻气炮实验曲线

Fig. 5 Curves of one-stage light-gas gun experiment for casting Comp. B and R-Al explosive

从图 5 可以看出,R-Al 炸药 σ 为 660 MPa, t 为 $41\ \mu\text{s}$,结果未发生点火,铸装 B 炸药 σ 为 394 MPa, t 为 $40\ \mu\text{s}$,结果发生点火。可见应力加载时间在微秒量级内,R-Al 炸药的发射安全性优于铸装 B 炸药。这从另一方面说明一级轻气炮实验装置可以模拟微妙量级的炸药装药发射安全性。

对比大型落锤实验及一级轻气炮实验曲线(图 4、图 5)可以看出,图 4b 和图 5 曲线上有两个峰,为方便讨论,分别记为 σ_1 和 σ_2 ,Barry Fishburn^[12]认为 σ_1 峰是加载载荷对炸药缺陷的快速压缩,这种作用导致热点处的温度升高, σ_2 峰是加载载荷对炸药的再次压缩,第二次压缩对热点处温度的升高没有贡献。可见,由于添加了导热性良好的 Al 粉,R-Al 炸药在经过第一次压缩后,Al 粉有效地将热量导出,避免了热量的积累,而铸装 B 炸药经过第一次加载后,热点处的热量累积,温度升高,超过了炸药允许的温度后,引起了

炸药的点火,这从另一方面解释了 R-Al 炸药的大型落锤及一级轻气炮实验曲线均有两个峰,且未点火,而铸装 B 炸药(图 4a)只有一个峰(σ_1),且在第二个峰之前发生点火。

R-Al 炸药在毫秒和微秒两种加载应力时间段内,加载应力峰值均超过 660 MPa,考虑到 155 mm 底凹弹全装药常温下的膛压最大值 330 MPa^[13],说明 R-Al 炸药在模拟实验条件下具有良好的发射安全性。

5 结 论

(1) 分别采用大型落锤装置和一级轻气炮模拟了毫秒量级和微秒量级铸装 B 炸药及 R-Al 炸药的发射安全性,结果显示铸装 B 炸药在毫秒(2~3 ms)及微秒($40\ \mu\text{s}$)量级均发生点火,而 R-Al 炸药在毫秒(2~3 ms)和微秒($41\ \mu\text{s}$)两种加载时间范围内进行加载应力的强化实验(应力约 660 MPa)时,均不发生点火。

(2) 在微秒量级时间段,一级轻气炮能很好地模拟炸药发射药安全性,可采用此手段对炸药微妙量级的发射安全性进行筛选。

(3) 在承受载荷作用时,R-Al 炸药中添加的 Al 粉有效地降低了热点处的温度,提高了发射安全性。

参考文献:

- [1] 王豪. 炸药装药发射安全性计算研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
WANG Hao. Calculation on launching safety of explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [2] Lieb R J. Impact-generated surface area in gun propellants[R]. AD-A200 468/7/GAR, 1988: 1-12.
- [3] Lieb R J. Correlation of the failure modulus to fracture-generated surface area in uniaxially compressed M43 gun propellant[R]. AD-A302 379/3/HDM, 1995: 1-19.
- [4] Gazanas G A. Mechanical response of M30, XM39 and JA2 propellant at strain rate from 10^{-2} to $250\ \text{s}^{-1}$ [R]. AD-A231 435/9/GAR, 1991: 1-15.
- [5] Gazanas G A, Juhasz A, Ford J C. Strain rate insensitivity of damage-induced surface area in M30 and JA2 gun propellants [R]. AD-A238 666/1/GAR, 1991: 1-6.
- [6] 王世英, 胡焕性. 炸药装药工艺对发射安全性的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 20-22.
WANG Shi-ying, HU Huan-xing. The effect of different charging processes on the launch safety[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26(1): 20-22.
- [7] 陈锐. 装药缺陷对发射安全性的影响[D]. 北京:北京理工大学, 2006.
CHEN Rui. Influence of charge flaws on launch safety[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2006.
- [8] 滕婉婷. 温压炸药发射安全性相关研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
TENG Wan-ting. Study on launch safety of thermobaric explosive

- [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [9] 曾代朋, 谭多望, 李尚斌, 等. 含铝炸药冲击波感度的实验和数值计算研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 148-151.
ZENG Dai-peng, TAN Duo-wang, LI Shang-bin, et al. Experimental and numerical calculation study on shock sensitivity of aluminum explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 148-151.
- [10] 常艳, 张奇. 含铝炸药爆炸能量预估[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 770-774.
CHANG Yan, ZHANG Qi. Explosion energy prediction of aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 770-774.
- [11] 陈荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 一种含铝炸药压缩力学性能和本构关系研究[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 460-463.
CHEN Rong, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, et al. Mechanical behavior and constitutive model of pressed aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(5): 460-463.
- [12] Barry Fishburn. Design modification and calibration of the picatinny activator for setback safety testing of sadarm [R]. AD-251858, 1992.
- [13] 王世英, 李向东. 新型压装含铝炸药应用于大口径榴弹发射安全性模拟研究[J]. 计测技术, 2013, 33(Suppl.): 37-40.
WANG Shi-ying, LI Xiang-dong. Simulation study on launch safety of application of a new aluminized explosive in the large calibers HE shells [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2013, 33(Suppl.): 37-40.

Launch Safety of RDX-based Aluminized Explosive

XIAO Wei, LI Liang-liang, QU Ke-peng, FU Gai-xia

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

Abstract: The launch safety of RDX-based aluminized explosive (R-Al explosive) was studied by 400 kg large drop hammer experiment and one-stage light-gas gun experiment. The stress-time curves of the explosive charge were obtained under the two different experimental conditions. Comparison of the launch safety of R-Al explosive and casting Comp. B was carried out. Results show that the ignition of R-Al explosive does not occur under the conditions of loading stress of 1.47 GPa and loading time of 3.04 ms for large drop hammer and loading stress of 660 MPa and loading time of 41 μ s for one-stage light-gas gun. The ignition of casting Comp. B does occur under the conditions of loading stress of 840 MPa, loading time of 2.10 ms for large drop hammer and loading stress of 394 MPa, loading time of 40 μ s for one-stage light-gas gun, revealing that the launch safety of R-Al explosive is better than that of casting Comp. B.

Key words: explosion mechanics; launch safety; large drop hammer experiment; one-stage light-gas gun experiment; aluminized explosive

CLC number: TJ55; V512+.2

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.013



《含能材料》高效毁伤弹药专栏征稿

高效毁伤弹药以“利用最小化成本获得最大化效果”为目标,对含能材料的性能和能量提出了更高的要求。为进一步促进高效毁伤弹药及其技术的研究,本刊将于2015年增设高效毁伤弹药专栏,内容涉及(1)传统含能材料的优化和改进以及先进含能材料的开发和应用,包括:传统含能材料合成、制造、处理和应用的新技术,新的CHON含能材料的开发和应用,金属化炸药,非传统概念炸药(如燃料空气炸药、温压炸药),高能量密度材料;(2)含能材料能量的控制输出研究,包括:能量输出增强(如组合装药),能量输出聚焦/定向,能量输出模式可控(如多模装药),能量输出范围可控(如低附带毁伤炸药)。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部