

doi: 10.7690/bgzd.2020.03.017

铝金属放热对破片加载能力影响试验研究

彭泓铮¹, 涂兴文², 黄开书¹, 闫石³, 杨丰友¹, 肖师云¹, 万力伦¹

(1. 重庆红宇精密工业有限责任公司特种产品二所, 重庆 402760; 2. 空军驻西南地区军事代表室, 重庆 402760;
3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要:为提高炸药爆轰对金属破片的做功能力,对铝粉释放热对金属破片加载能力的影响进行探讨。以浇注 HMX 基 PBX 炸药为研究对象,通过对不同铝粉含量的炸药配方和试验弹的设计,参照 GJB772A—1997 方法,测试不同铝粉含量爆热,对战斗部破壳作用特点及金属破片加载作用过程进行分析,并对其金属破片加载能力进行评估。研究结果表明,铝金属放热做功和加载时间的匹配性是影响其破片加载能力的重要原因。

关键词: 铝金属; 爆热; 破片加载; 放热做功

中图分类号: TJ410.2 **文献标志码:** A

Experiment and Study on Effect of Heat Release of Al on Fragment Acceleration Ability

Peng Hongzheng¹, Tu Xingwen², Huang Kaishu¹, Yan Shi³, Yang Fengyou¹, Xiao Shiyun¹, Wan Lilun¹

(1. No. 2 Research Institute for Special Products, Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760, China; 2. Military Representative Office of Air Force in Southwest Region, Chongqing 402760, China;
3. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the acceleration ability of explosive detonation on metal fragments, the effects of the heat release of Al on the acceleration ability of metal fragment were discussed. By taking the cast heating PBX based on HMX as research object, the study on the effect of the heat release of Al metal on the ability to accelerate fragment was carried out through analysis of the warhead breaking and the loading process of metallic fragment based on the design of explosive formulas with different content of Al metal and testing of explosion heat according to GJB 772A-97. The results indicated that loading capacity of fragment is due to the matching ability between powering of heat release for Al and accelerating time including the time of explosive detonation, warhead broken time and loading time of detonation.

Keywords: Al; detonation heat; fragment acceleration; power of heat release

0 引言

炸药金属破片加载能力是众多含能材料研究者在配方设计、做功能力评估考虑的重要因素,也是装药造型时的一项关键性能参数,破片速度则是杀伤爆破战斗部威力性能的重要参数^[1]。研究认为,破片速度与炸药爆速呈现正相关关系(例如格尼能速度 $\sqrt{2E} = D/\sqrt{8}$),爆速每增加 100 m/s,破片速度增加 18~30 m/s。同时,爆热作为炸药五大能量示性数之一,是决定炸药爆炸毁伤特性的源动力,对金属破片加载能力具有重要的影响^[2-3]。

为提高炸药爆轰对金属(或破片)的做功能力,科研工作者大多向混合炸药中引入高燃值金属,特别是铝粉,从而提高炸药的爆热,并且从铝粉含量、粒度、形貌、氧化剂形态、装药结构、分子结构等角度对炸药做功效能及其对金属(破片)加速性能进

行研究^[4-5]。黄辉等^[6]采用 VISAR 研究了铝粉粒度、氧化剂形态对 RDX 基含铝金属炸药对金属加载能力。M.N.Makhov 等^[7-8]则利用电探针法研究含铝炸药对金属飞片加载特性的研究,提出通过炸药氧平衡、爆热、铝粉活性、粒度等特性评估炸药爆轰金属加载能力的评估方法。陈朗等^[2]通过激光速度干涉仪法研究了压装含铝炸药驱动一维平板的能力。王克强^[9]则根据分子结构特点,利用量子力学原理和化学动力学的观点,探讨了炸药分子结构与其加速金属能力之间的关系。由于铝粉在炸药爆轰过程中呈现出较强非理想爆轰特征:化学反应区宽、反应产物复杂、后续二次反应或多次反应,因其爆轰作用的复杂性使得铝粉在炸药中爆轰及功效特性仍未有明确清晰和统一的认识^[10]。

破片加载能力是炸药做功效能之一,目前大多通过圆筒试验、飞片等试验研究其做功效能,对

收稿日期: 2019-11-08; 修回日期: 2019-12-22

作者简介: 彭泓铮(1987—),男,四川人,硕士,工程师,从事含能材料的应用研究。E-mail: penghong198674@163.com。

于破片加载能力的影响研究较少。为此，笔者以浇注 HMX 基 PBX 炸药为研究对象，采用大小颗粒铝粉复配，设计不同铝粉含量的炸药配方，通过测试炸药爆热反映铝粉放热特性，采用工程方法对其金属破片加载能力进行评估，探讨铝粉释放热量对金属破片加载能力的影响，确定最优铝含量，以期为杀爆战斗部炸药配方设计提供参考。

1 炸药配方和试验弹设计

1.1 炸药配方设计

为寻求铝粉含量对炸药爆热和金属破片加载能力的影响，设计了固相含量为 89%，铝粉含量分别为 0%、10%、15%、20%、25%、30%、35% 共 7 个炸药配方，采用真空捏合真空-振动浇注工艺，制备尺寸为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 和 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 药柱分别测试爆热和爆速，并装填试验标准弹(具体见图 1)，以进行破片加载能力测试。炸药配方具体见表 1。

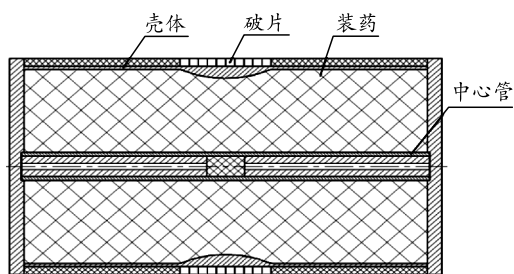


图 1 标准试验弹结构

表 1 含铝炸药配方

序号	炸药组分及配比/%			装药密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
	HMX	Al	HTPB 粘结剂	
1	89	0	11	1.68
2	79	10	11	1.73
3	74	15	11	1.77
4	69	20	11	1.80
5	64	25	11	1.82
6	59	30	11	1.84
7	54	35	11	1.87

1.2 标准试验弹设计

目前杀伤爆破战斗部破片速度设计时经常使用到格尼能 E ，而格尼能 E 与炸药爆速 D 的关系^[11]为：

$$E = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)} \quad (1)$$

式中： E 为格尼能； D 为炸药爆速，m/s； γ 为炸药爆轰产物的多方指数，通常取 3。

当多方指数取 3 时，则有

$$\sqrt{2E} = D / \sqrt{8} \quad (2)$$

式中 $\sqrt{2E}$ 为格尼能速度，m/s；

研究认为：当炸药的爆速每增加 100 m/s，格尼速度增加 35 m/s，破片初速增加 18~30 m/s。由于本次试验破片采用等初速设计，因此，其破片初速与爆热存在以下关系^[12]：

$$v_0 = \sqrt{(Q_v - E_c) \frac{2\beta}{(1 + 2\beta/\varphi)}} \quad (3)$$

式中： v_0 为破片初速，m/s； Q_v 为炸药爆热，J/g； E_c 为爆轰产物内能，J； φ 为壳体形状函数； β 为装填比， $\beta = \frac{m}{M}$ ，其中 m 为装药量，kg； M 为试验弹质量，kg。

由此可见，在其他条件一定时，炸药爆热增大，则破片初速增加。综合式(1)一式(3)可知，破片速度与炸药的爆速和爆热均呈正相关关系。

为了避免实验中各种干扰因素对速度测试的影响，准确获取真实结果，试验弹设计采取了以下技术措施：

- 1) 试验弹直径针对特定应用条件设定为 200 mm，壳体材料为铝合金；
- 2) 以试验弹轴向破片速度最大处为中心，设置全预制钨合金破片，破片尺寸为 6 mm×6 mm×6 mm 且全部破片采用等初速设计；
- 3) 中心管对称设计，起爆点设置在轴线中心。标准试验弹结构如图 1 所示。

2 试验部分

2.1 爆热测试

爆热测试仪器如图 2 所示。将规格为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的药柱(质量约 70 g)置入量热弹中，爆炸后产生热量通过弹体进行传热到量热弹周围的蒸馏水中，使得水温缓慢上升，当热量达到平衡时，测定蒸馏水的温升，利用预先标定好的量热系统的热容值，可求出单位质量炸药放出的热量，即炸药爆热，具体参照 GJB772A—1997 方法 701.1 绝热法进行测试。

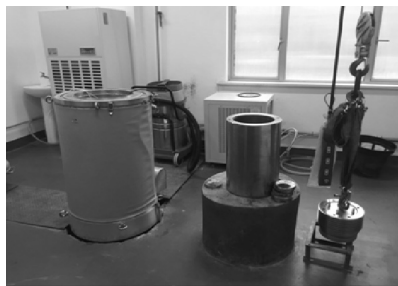


图 2 爆热测试仪器

2.2 爆速测试

采用规格为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 药柱，按照 GJB772A—1997 方法 702.1 爆速电测法进行测试。

2.3 破片加载能力测试

目前，工程上对于金属破片加载能力的测试大多采用破片穿甲率和破片初速来进行评估。本次实验拟采用两者进行综合评估。为对比分析标准试验弹的破片穿甲能力，需在特定距离处设置特定厚度的钢靶板，靶板的厚度和布置距离应以破片打击速度满足对预定厚度钢靶板的弹道极限为条件。弹道极限是用于评定靶板和射弹或破片性能的速度值，规定的撞击体具有这样的速度就能够穿透规定材料、规定厚度并按规定条件安装的靶板^[13]。破片对钢靶板的弹道极限速度按下式^[14]计算：

$$v_{50} = \left(\frac{h / \cos \alpha}{km_f^{1/3}} \right)^{3/4} \quad (4)$$

式中： v_{50} 为弹药极限速度，m/s； h 为靶板厚度，m； α 为破片入射角； m_f 为破片质量，kg； k 为实验修正系数。

根据预估的试验弹破片初速和破片速度衰减系

表 2 炸药配方爆热及破片速度、穿甲率测试结果统计

序号	炸药配方组成	爆热/(kJ/kg)	爆速/(m/s)	破片平均速度/(m/s)	穿甲率/%
1	HMX/Al/HTPB=89/0/11	4 927	8 350	1 806.9	78.6
2	HMX/Al/HTPB=79/10/11	5 289	8 232	1 840.3	82.9
3	HMX/Al/HTPB=74/15/11	5 816	8 198	1 862.5	82.3
4	HMX/Al/HTPB=69/20/11	6 321	8 120	1 905.6	95.1
5	HMX/Al/HTPB=64/25/11	6 612	8 040	1 850.8	83.4
6	HMX/Al/HTPB=59/30/11	7 210	7 894	1 823.4	79.1
7	HMX/Al/HTPB=54/35/11	7 154	7 789	1 799.3	78.4

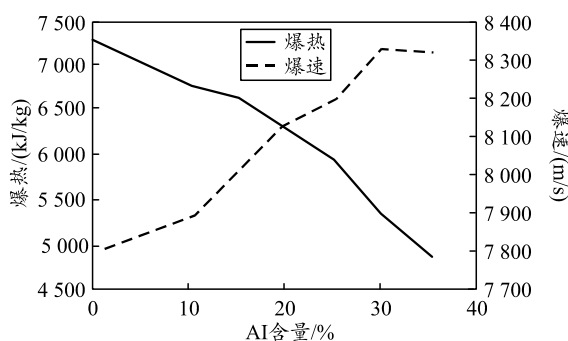


图 4 爆热和爆速随铝含量变化关系

3.2 讨论与分析

3.2.1 铝含量对实测爆热影响分析

在本次实验“HMX/Al/粘结剂”复合体系中，保证固相含量（“HMX+Al”总含量）89%不变的条件下，改变 HMX 和 Al 粉含量，按照全氧化法，充分考虑增大燃烧效应，计算得到最大燃烧效应的理

数，可计算得到满足要求的钢靶板厚度和设置距离。根据计算结果，实验时在距爆心 12 m 处，设置 12 mm 厚钢靶板，用于观测破片穿甲率。采用高速摄影测试破片在距爆心 8 m 内的平均速度，实验布置如图 3 所示。

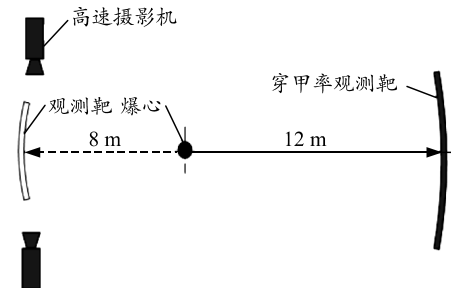


图 3 破片加载能力试验现场布置

3 结果与讨论

3.1 实验结果

参照 GJB772A—1997 相关方法，测试了 7 个炸药配方的爆热，并使用 7 个炸药配方装填标准试验，通过测试标准试验弹破片穿甲率和破片速度对炸药破片加载能力进行了评估，相关实验结果见表 2。图 4 和图 5 是根据表 2 绘制的关系曲线。

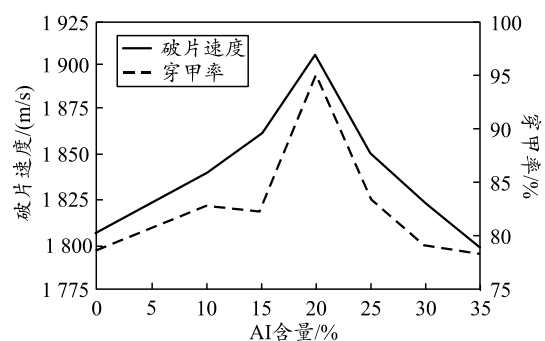


图 5 破片速度和穿甲率随铝含量变化关系

论量，此时铝粉加入量为 29.7%，是铝粉加入量的理论最大上限。

从图 4 铝含量与爆热关系曲线可发现，本次实验 HMX 浇注 PBX 体系爆热最大值的铝金属含量为 30%~35%。分析认为：浇注热固性 PBX 炸药本质上是一种填充型复合功能材料，存在着连续相和分散相，随着 Al 含量增大，作为连续相的 HMX 的基

体连续性减弱，炸药爆轰初始能量和压力降低，铝粉以其良好的导热性，吸收系统的热量增多，使得整个复合体系温度下降，导致铝粉化学反应度下降，加之爆轰产物中除了 Al_2O_3 外，可能存在少量 AlN 等产物，从而使铝粉实际最佳加入量高于理论加入量 29.7%，增加到 30%~35%。

3.2.2 爆热对其破片加载能力分析

从表 2 可以看出：随着金属含量的增加，炸药爆速逐渐下降，而炸药爆热则逐渐增大到 7 210 kJ/kg，随后降低到 7 154 kJ/kg。由此可见，就本次试验 HMX 浇注 PBX 体系爆热最大值的铝金属含量为 30%~35%，具体见图 4。图 5 为破片速度和穿甲率随铝含量变化关系曲线。从图中可知：随着铝金属含量的增大，破片速度和穿甲率均呈现先增大后减小的趋势，当铝粉含量为 20%时，其破片速度为 1 905.6 m/s，穿甲率为 95.1%，均达到最大值，而其爆热只有 6 321 kJ/kg，未达到其爆热最大值。

由此可见：铝金属在炸药爆轰过程中释放出大量热，快速加热爆轰产物，气体膨胀做功并持续加载破片达到最大速度值；当铝含量过多(例如本次实验铝含量超过 20%)时，虽然释放出大量的热，却未完全用于加载破片，一部分热量则通过其他形式进行释放(例如冲击波超压)。文献[14]分析认为，这主要是由含铝炸药自身反应特点和战斗部破壳作用特点所导致的。

1) 含铝炸药自身反应特点。铝金属引入炸药配方中成为一种含铝复合炸药。其作为一种非理想混合炸药，炸药均匀性和二次或多次反应放热是其爆轰下的 2 个重要特点(这 2 个特点是非理想炸药爆轰特点)。文献[14]认为，含铝炸药在外界强冲击波作用下，首先是炸药中猛炸药组分(例如 HMX、RDX 等)点火起爆，随后铝金属放热释放能量，整个爆轰过程较理想炸药的爆轰时间明显增长，其后续效应增强。由此可见，铝粉在炸药爆轰过程中较理想炸药比，会释放出大量热量，从而使得爆轰产物(特别是气体产物)温度升高，体积快速膨胀，且反应作用时间增长，最终增强了炸药的做功效能。这一点从表 2 中含铝炸药较配方 1 破片平均速度和穿甲率相当或有所提高的试验结果得到验证。

2) 战斗部破壳作用特点。根据典型杀伤战斗部爆炸过程的闪光 X 射线照相和相应试验分析^[12]，战斗部壳体半径在爆轰产物作用下膨胀到 $r_p=(1.6\sim 2.6r_0)$ 时(r_p 为壳体破裂半径， r_0 为壳体未膨胀时半

径)，壳体破碎成破片，这段时间可认为是炸药爆轰产物对破片加载作用的主要时间，简称“战斗部开壳时间”，其与炸药装药爆轰时间相比，是后者时间的 4 倍。例如 122 mm 榴弹，炸药装药起爆至爆轰结束时间为 60 μs ，而壳体塑性变形至全部形成破片约需要 250 μs 。另外，研究认为：预制破片战斗部爆炸过程基本现象与整体式战斗部爆炸过程的基本现象类似，壳体塑性变形至全部形成破片的时间远大于炸药装药爆轰时间，即壳体直径 r_0 膨胀到 r_p 的时间远大于炸药装药爆轰时间。

如图 6 所示，金属破片加载主要分为 3 个阶段^[12,15]：1) 首先炸药装药发生爆轰产生大量高温高压气体产物；2) 战斗部开壳时间，使得壳体在爆轰产物作用下发生膨胀破碎，大约为第一阶段作用时间的 4 倍；3) 战斗部壳体膨胀破碎，爆轰产物继续加载破片，当其受到的空气阻力与爆轰产物对破片的推力达到平衡时，破片速度达到最大，即破片初速。

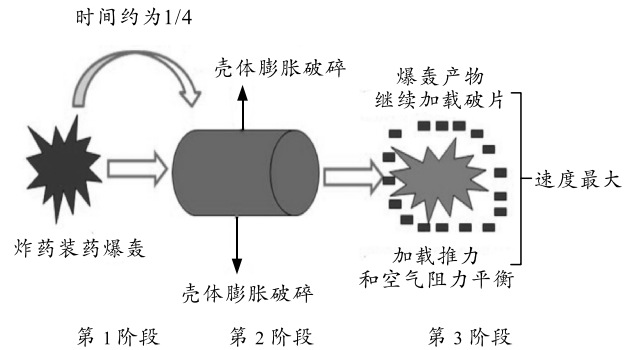


图 6 金属破片加载过程

由以上分析可知：炸药爆轰对金属破片加载共有 3 个阶段，炸药装药爆轰时间远小于炸药爆轰产物对破片加载作用的时间(“战斗部开壳时间”)。战斗部壳体膨胀过程和爆轰产物继续加载破片的过程中，含铝炸药配方中的铝在高温、高压的环境下释放出大量的热，使得爆轰气体产物温度升高，体积膨胀，快速对外做功加载金属破片，充分发挥了含铝炸药释放大量热和持续性优势，实现了对破片的持续加载。

结合实验结果可知：当铝金属含量达到 20%时，其在“炸药爆轰时间+战斗部开壳时间+爆轰产物加载时间”(简称“加载时间”)内，能够完全发生反应释放热量，与本次试验弹破片加载时间具有良好的匹配性，使得爆轰产物急剧膨胀加载破片，破片速度达到最大；当金属铝含量小于 20%，虽然在加载时间内能够完全反应释放热量，却无法实现对金

属破片全过程加载;当金属铝含量大于20%时,虽然实现了对金属破片全过程加载,却无法完全在加载时间完全释放热量,导致热量转化成其他形式(例如冲击波超压)释放,反而未使破片速度达到最大。

4 结论

笔者以浇注 HMX 基 PBX 炸药为研究对象,设计不同铝粉含量的炸药配方,测试不同铝粉含量爆热,对其金属破片加载能力进行评估,分析了战斗部破壳作用特点及金属破片加载作用过程,探讨铝粉释放热量对金属破片加载能力的影响。研究结果表明:

1) 随着金属铝粉含量的增大,炸药的爆速呈现逐渐下降的趋势,爆热则逐渐升高,其爆热最佳含量在30%~35%;破片速度和穿甲率则呈现先升高后下降的趋势,最佳含量为20%;

2) 铝金属在“加载时间”完全发生反应释放热量,实现破片全过程加载,且能量完全利用,铝金属放热做功加载和加载时间良好的匹配性是其破片速度达到最大的重要原因。

参考文献:

- [1] 谭凯元,韩勇,罗观,等. HMX 基 PBX 的做功能力及其 JWL 状态方程[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 42-45.
- [2] 黄亚峰. 复合金属化炸药及其能量释放机理研究[D]. 北京: 中国兵器科学研究院, 2004.
- [3] 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: 9-12.
- [4] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 79-108.
- [5] 韩勇,黄辉,黄毅民,等. 不同直径含铝炸药的做功能力[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 5-7.
- [6] 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.
- [7] MAKHOV M N, GOGULYS M F. Acceleration ability and heat of explosive decomposition of aluminized explosives [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2004, 40(4): 176-183.
- [8] MAKHOV M N, ARKHIPOV V I. Evaluation of the acceleration ability of aluminized high explosives[C]. Proceedings of the 33rd International Annual Conference of ICT. Karlsruhe:ICT, 2002.
- [9] 王克强. 炸药的加速金属能力与分子结构关系的探讨[J]. 火炸药学报, 1998(1): 30-33.
- [10] 李昆,高立龙,陈春燕,等. 铝粉含量及粒度对炸药驱动能力的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 179-183.
- [11] 曹柏楨. 飞航导弹战斗部与引信[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 21-30.
- [12] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用下册—爆炸对目标的作用和穿甲作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 3-18.
- [13] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 53-54.
- [14] 黄菊,王伯良,仲倩,等. 温压炸药能量输出结构的初步研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 164-168.
- [15] 张国伟,韩勇,苟瑞君,等. 爆炸作用原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 221-225.