

doi: 10.7690/bgzd.2022.03.016

含铝炸药爆热性能与破片加载特性关系探讨及验证

彭泓铮¹, 黄开书¹, 吴欣欣¹, 万力伦¹, 江涛¹, 朱英中¹, 焦云多¹, 肖师云²

(1. 重庆红宇精密工业集团有限公司军研二所, 重庆 402760;

2. 重庆红宇精密工业集团有限公司军研一所, 重庆 402760)

摘要: 以浇注 HMX 基含铝炸药为研究对象, 构建炸药爆轰加载假设模型。探讨爆热与破片速度的关系, 并使用不同粒径设计了不同铝含量的炸药配方, 测试了炸药爆速和爆热及其对全预制破片速度和穿甲率的影响。试验结果表明: 随着铝氧比和爆热的增加, 破片速度和穿甲率呈现先升后降的趋势, 当铝氧比和爆热分别为 0.35 和 6 200 kJ/kg 时, 其破片速度和穿甲率分别为 1 890 m/s 和 89%, 破片加载能力达到最大, 验证了含铝炸药爆热与破片加载特性存在数学极值关系, 工程上存在最佳匹配点。

关键词: 含铝炸药; 爆热; 破片加载; 铝氧比

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Discussion and Verification of Relationship Between Heat of Aluminized Explosives and Acceleration Characteristics of Fragments

Peng Hongzheng¹, Huang Kaishu¹, Wu Xinxin¹, Wan Lilun¹,
Jiang Tao¹, Zhu Yingzhong¹, Jiao Yunduo¹, Xiao Shiyun²(1. No. 2 Research Institute for Military Products, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd.,
Chongqing 402760, China; 2. No. 1 Research Institute for Military Products, Chongqing Hongyu
Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In this paper by taking the cast heating PBX based on HMX as research object, the construction of hypothesized model of fragment acceleration of explosive explosion was established and the relationship of explosion heat and fragment velocity was discussed. The experimental verification was realized by the design of explosive formula with different Al content of several particle sizes and testing of several items including fragment velocity, penetration percentage, explosion velocity and explosion heat. The results indicated that the mathematical extreme value relationship between fragment velocity and explosion heat was existed, while the fragment velocity and penetration percentage shows the trend of increasing and then decreasing with increasing of Al/O ration and explosion heat. The fragment acceleration was best when the Al/O ratio and explosion heat was 0.35 and 6 200 kJ/kg respectively, indicating that fragment velocity and penetration percentage was maximized of 1 890 m/s and 89% which verifies the mathematical extreme value and optimal matching engineering point of the relationship between fragment velocity and explosion heat.

Keywords: aluminized explosive; explosion heat; fragment acceleration; ration of Al/O

0 引言

炸药装药是战斗部毁伤能量的源泉, 爆速 (explosion velocity)、爆热 (explosion heat)、爆压 (explosion pressure)、爆温 (explosion temperature)、爆容 (explosion volume) 则是描述炸药能量水平的性能参数, 其中爆速和爆热是常用来评价炸药能量性能的关键参数, 特别是爆热常用来评价炸药装药 TNT 当量^[1-4]。炸药作为战斗部毁伤的起始能源, 所释放的能量并不是直接作用于目标, 而是转化为特定的毁伤元 (例如破片、冲击波超压、射流、气泡水流) 对目标进行毁伤^[5-7]。由此可见, 从炸药爆轰到目标毁伤, 存在着能量转化的问题, 即毁伤元能

量只是占据炸药总能量的一部分, 甚至很小部分, 毁伤元能量和炸药能量性能、战斗部结构设计和作用环境介质存在很大关系^[8-9]。爆速、爆压、爆热等性能参数只是用于表征炸药装药作为毁伤源的总能量水平, 而炸药爆轰能量与毁伤元能量转化则是炸药装药和战斗部设计者在提高战斗部威力性能设计时不可回避的重要问题^[10]。

破片作为杀伤爆破战斗部重要的毁伤元, 其速度是战斗部设计者重点考虑的关键威力性能参数^[11], 广泛用于计算破片初速的方法是 GURNEY^[12] 提出的格尼能公式, 在一定程度上反映了炸药爆轰驱动金属的加速能力, 但没有考虑爆轰产物膨胀规

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2021-12-28

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

律及驱动的金属对膨胀过程的影响。研究认为^[13]：含铝炸药由于其组分铝在高温高压条件下发生化学反应，在极短的时间内释放出大量的热，提高了装药爆轰对金属或破片的做功能力。对传统高爆速炸药而言，其能量性能参数主要表现在爆速降低、爆热增加、爆压降低、威力明显增强(如破片加载能力增强)，由此可见爆热对破片加载能力具有重要影响，而目前炸药爆热对破片加载特性影响规律研究甚少。

目前由于测试技术的限制，含铝炸药能量性能参数能够准确获得的主要是爆速和爆热，特别是随着铝粉的加入，炸药爆热会显著增加，爆速降低^[14]。笔者以浇注 HMX 基含铝炸药为研究对象，从理论上分析了爆热与破片速度关系，通过炸药爆热和爆速与对破片驱动能力的测试，探讨了壳体膨胀与破片速度的关系，构建爆热、爆速、壳体膨胀与破片速度的效能关系，为破片杀伤式战斗部用炸药配方设计和装药选型提供参考。

1 爆热与破片初速关系理论分析及探讨^[15]

爆热是炸药做功能力的总能量，其对破片速度具有重要影响，为获得破片速度与炸药爆热之间的理论关系，炸药爆轰时特作以下假设：1) 假定爆轰瞬时完成；2) 不考虑爆轰产物沿轴向飞散；3) 壳体壁为等厚，所形成的破片具有相同初速。其假设模型如图1所示。

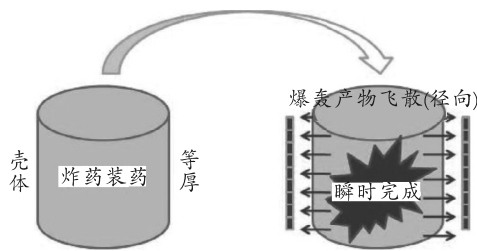


图1 炸药爆轰加载破片假设模型

根据能量守恒定律，圆柱形装药的破片速度 v_0 可由下式确定：

$$E_c + E_g + E_e + E_M + E_i = E_{H \cdot E} \quad (1)$$

式中： E_c 为破片动能； E_g 为爆轰产物动能； E_e 为爆轰产物内能； E_M 为壳体的变形能； E_i 为壳体周围介质吸收的能量； $E_{H \cdot E}$ 为炸药爆轰过程释放的总能量， $E_{H \cdot E} = m \cdot Q_v$ (其中： m 为炸药质量，kg； Q_v 为爆热，kJ/kg)。

研究表明^[15]：壳体变形吸收的能量 E_M 和壳体周围介质吸收的能量 E_i 约占整个炸药装药能量 1%，因此可忽略不计。故式(1)可转化为：

$$E_c + E_g + E_e = m \cdot Q_v \quad (2)$$

1) 破片动能 E_c 。

壳体破碎形成一系列破片，破片质量均相同，且破片速度相等，则 E_c 可表达为：

$$E_c = M v_0^2 / 2 \quad (3)$$

式中： M 为壳体质量，kg； v_0 为破片速度，m/s。

2) 爆轰产物动能 E_g 。

爆轰产物动能 E_g 可由下式表达：

$$E_g = M_1 v^2 / \phi = m_1 v^2 / (2n + 2) \quad (4)$$

式中： m_1 为爆轰产物质量，kg； v 为爆轰产物速度，m/s； ϕ 为形状函数， $\phi = 2n + 2$ 。

由于爆轰产物加载破片，近似认为爆轰产物速度与破片速度相同，并假设爆轰产物流动速度沿着径向呈线性分布 $n=1$ ，则有：

$$E_g = m v_0^2 / 4 \quad (5)$$

式中： m 为装药质量，kg； v_0 为破片速度，m/s。(注①：假设炸药装药爆轰后所有爆轰产物用于驱动金属破片，根据装药爆轰前后质量守恒定律，爆轰产物质量 $m_1 =$ 装药质量 m)。

3) 爆轰产物内能 E_e 。

爆轰产物内能表达为：

$$E_e = m \int_0^\infty p dV = m p v / (\gamma - 1) = m p / \rho (\gamma - 1) \quad (6)$$

式中： v 为壳体完全破裂时爆轰产物的比容； m 为装药质量(同注①)，kg； p 为爆轰产物压力，Pa； ρ 为爆轰产物密度，g/cm³； γ 为多方指数。

将式(3)、(5)和(6)代入式(1)中，经过一系列转化可得到式(7)~(10)：

$$M v_0^2 / 2 + M v_0^2 / 4 + m p / \rho (\gamma - 1) = m Q_v \quad (7)$$

$$M v_0^2 / 2 m + v_0^2 / 4 + p / \rho (\gamma - 1) = Q_v \quad (8)$$

$$(M / 2 m + 1 / 4) v_0^2 = Q_v - p / \rho (\gamma - 1) \quad (9)$$

$$v_0^2 = (Q_v - p / \rho (\gamma - 1)) \cdot (2 \beta / (1 + \beta / 2)) \quad (10)$$

其中： β 为装填比， $\beta = m / M$ ； m 为装药质量，kg； M 为壳体质量，kg。

式(10)中 $p / \rho (\gamma - 1)$ 项为炸药爆轰状态方程的描述，一般通过圆筒试验进行确定。根据文献[15]，当装药为轴对称圆柱形时，可表达为：

$$E_e = m p / \rho (\gamma - 1) = m Q_v (r_0 / r)^{(2\gamma - 2)} \quad (11)$$

通过式(11)可得爆热与破片速度之间的关系：

$$v_0 = \sqrt{2 Q_v [1 - (r_0 / r)^{2\gamma - 2}] / (1 / \beta + 1 / 2)} \quad (12)$$

式中： v_0 为破片速度，m/s； r_0 为装药半径，mm； r

为壳体膨胀半径, mm; γ 为多方指数; β 为装填比; Q_v 为爆热, kJ/kg。

从式(12)表达形式可知: 破片速度 v_0 与炸药爆热 Q_v 、壳体膨胀半径 r 、多方指数 γ 及装填比 β 之间呈现出非线性关系, 存在着数学上的极值点, 即工程上存在着最佳匹配点, 与战斗部结构设计和装药性能有着密切关系^[16]。

1) 公式中壳体膨胀半径 r 、装填比 β 与战斗部结构设计有着密切关系, 特别是壳体材料、结构、力学性能有着密切关系。从式(12)可知, 在其他参数一定的情况下随着战斗部爆轰膨胀半径和装填比增大, 有利于破片速度的提高;

2) 式中爆热 Q_v 、多方指数 γ 则与装药相关, 随着爆热 Q_v 和多方指数 γ 的增大, 也可增大破片的速度, 然而多方指数 γ 是炸药爆轰的重要参数之一, 特别是混合炸药爆轰历程、产物、状态方程复杂, 对多方指数 γ 的测试目前还没有准确的办法。

综上, 对于含能材料设计者而言, 可通过炸药

爆热 Q_v 及战斗部的装填比 β 来提高破片的速度。目前对于提高上述 2 个性能参数的重要方法之一就是向炸药中引入高热值高密度金属燃料, 从而提高炸药爆热和装药密度。目前混合炸药中常用的金属燃料大多选择 Al 粉。

2 试验验证

2.1 试验设计^[17]

破片加载能力在工程上一般用破片速度和破片穿甲率进行表征。为寻求炸药爆热、爆速、铝氧比与破片速度和破片穿甲率之间的关系, 笔者以 HTPB 粘结剂体系为载体, HMX 为猛炸药主体, 复配大小粒度级配铝粉, 设计 5%~35% 共 7 个不同铝含量的炸药配方(具体比例见表 1), 采用真空一捏合一真空一振动的混制浇注工艺, 制备爆速和爆热样品, 并分别装填标准试验弹测试其破片速度和破片穿甲率, 寻求爆速、爆热与破片速度和破片穿甲率之间的关系。

表 1 炸药配方配比及相关理论参数

序号	炸药组分及配比			理论参数				
	HMX/%	Al/%	粘结剂/%	爆速/(m/s)	密度/(g·cm ⁻³)	爆热/(J/g)	铝氧比/%	Gurney 系数 $\sqrt{2E}$ /(m/s)
1	91	0		8 619	1.742	5 192	0	2 869
2	81	10		8 449	1.790	6 167	0.171	2 791
3	76	15		8 368	1.816	6 655	0.273	2 753
4	71	20	9	8 278	1.842	7 142	0.389	2 713
5	66	25		8 191	1.868	7 630	0.523	2 675
6	61	30		8 076	1.895	8 118	0.682	2 627
7	56	35		7 991	1.923	8 605	0.867	2 590

上表中 Gurney 系数 $\sqrt{2E}$ 计算根据文献[18]进行了计算, 计算公式如下:

$$\sqrt{2E} = D * \sqrt{2/(\gamma^2 - 1)(\gamma/(\gamma + 1))^\gamma} \quad (13)$$

式中: $\sqrt{2E}$ 为格尼能速度, m/s; D 为炸药爆速, m/s; γ 为炸药多方指数。按照文献[18], 工程上按照式(14)计算:

$$\gamma = \rho_0 / (0.14 + 0.26\rho_0) \quad (14)$$

式中 ρ_0 为炸药密度, g/cm³。

试验弹设计: 试验弹直径为 $\phi 230$, 高度为 227 mm, 采用中心起爆, 壳体外侧布置全预制 6 mm×6 mm×9 mm 钨合金破片, 其结构如图 2 所示。

2.2 测试方法

1) 爆热。

参照 GJB772A—97 方法 701.1 绝热法进行测试。药柱规格为 $\phi 28$ mm×40 mm, 药柱质量约 40 g。

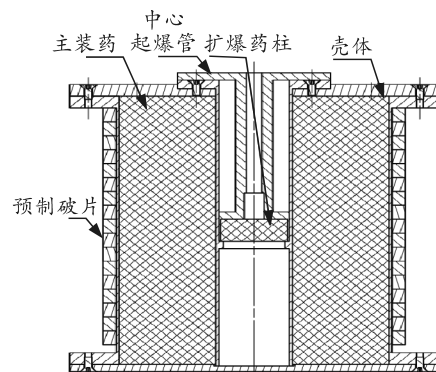


图 2 试验弹结构

2) 爆速。

按照 GJB772A—97 方法 702.1 爆速电测法进行测试。药柱规格为 $\phi 50$ mm×50 mm。

3) 破片加载能力。

按照图 3 布置破片加载能力测试现场, 在距爆心 14 m 处设置 12 mm 厚的钢靶板, 用于观测破片穿甲率, 在距爆心 10 m 处通过高速摄影测试破片速度。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

参照 GJB772A—97 相关方法,测试了 7 个炸药

配方的爆热和爆速,并使用 7 个炸药配方装填标准试验弹,通过测试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。相关试验结果如表 2 所示。

表 2 含铝炸药爆热、爆速及破片速度、穿甲率测试结果

序号	炸药配方	爆热/(J/g)	爆速/(m/s)	铝氧比/%	破片速度/(m/s)	穿甲率/%
1	1	4 977	8 547	0	1 826	80.6
2	2	5 389	8 432	0.171	1 860	84.9
3	3	5 976	8 298	0.273	1 882	85.1
4	4	6 411	8 120	0.389	1 910	95.4
5	5	6 728	8 021	0.523	1 870	86.4
6	6	7 318	7 914	0.682	1 843	81.1
7	7	7 224	7 859	0.867	1 810	79.4

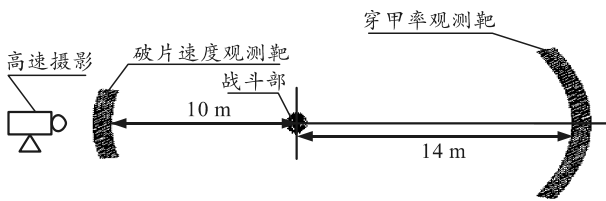


图 3 破片加载能力测试

3.2 讨论

3.2.1 铝粉对炸药爆热影响

从表 2 和图 4 可看出,随着铝粉含量的增大,炸药的爆速呈现下降趋势,而爆热呈现上升趋势,对其进行非线性拟合,铝粉含量与爆速和爆热关系分别见式(15)和(16),其拟合系数分别为 0.971 4 和 0.957 3。

$$V_D = 8585.52 - 21.533W_{Al\%}; \quad (15)$$

$$Q_v = 4887.7 + 72.65W_{Al\%}. \quad (16)$$

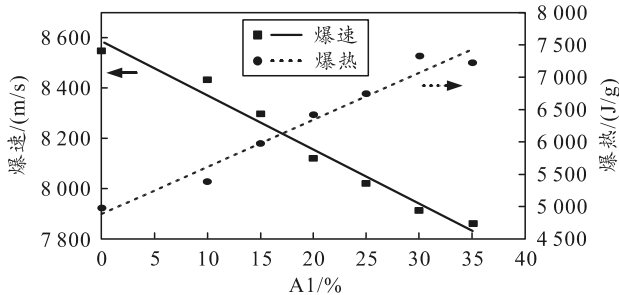


图 4 爆热和爆速随铝含量变化关系

从上图中铝含量与爆热曲线关系发现,本次试验 HMX 浇注 PBX 体系爆热最大值的铝金属含量为 30%~35%。根据文献[13],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,HMX 的基体连续性减弱,而铝粉导热性良好,吸收了系统的热量,使得炸药初始爆轰压力降低,加之爆轰产物复杂,使得铝粉实际最佳加入量高于理论加入量 29.7%,增加到 30%~35%之间。

3.2.2 爆热与破片加载特性关系分析

从表 2 中可知,当向炸药中加入铝粉后,其爆速呈现明显下降趋势,从而导致其格尼能速度明显下降,在一定程度上预示着含铝炸药对破片加载能力减弱。为进一步探讨炸药爆热和爆速与破片加载能力(主要由破片速度和穿甲率表征)之间的关系,笔者对表 2 中炸药爆热、爆速、铝氧比、破片速度、穿甲率进行了分析处理和多元非线性拟合,获得了爆热、爆速、铝氧比与破片速度和穿甲率变化关系曲线,其变化趋势分别如图 5、6 所示。

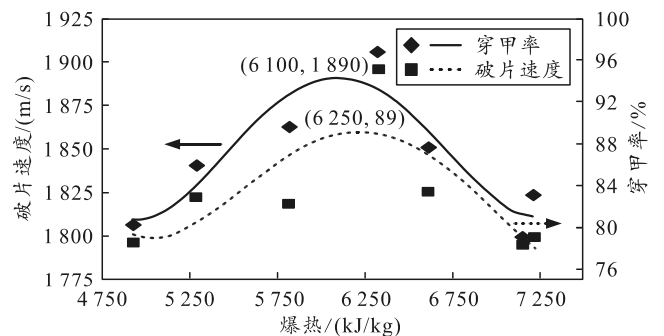


图 5 破片速度和穿甲率随着爆热变化关系

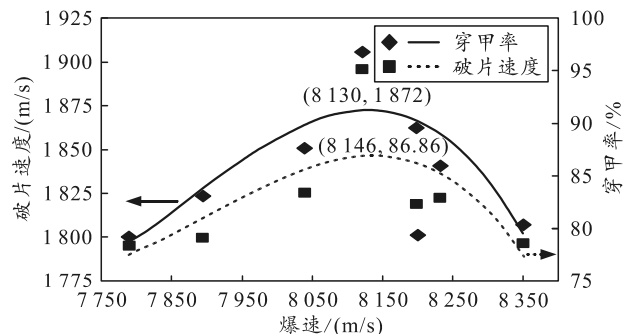


图 6 破片速度和穿甲率随着爆速变化关系

从图中可知,破片速度和穿甲率与爆速和爆热均存在着先上升后下降的趋势,即存在着最佳值。从图 5 破片速度和穿甲率与爆热变化关系曲线发现:破片速度最大为 1 890 m/s,穿甲率最大为 89%,

其分别对应的最佳爆热值为 6 100 和 6 250 kJ/kg；从图 6 发现：破片速度最大为 1 872 m/s，穿甲率最大为 86.86%，其分别对应的最佳爆速值分别为 8 130 和 8 146 m/s。如图 7 所示，当 HMX 基含铝炸药爆热和爆速分别处于 6 100~6 250 kJ 和 8 130~8 146 m/s 区间时，其对全预制破片加载能力达到最强，此时所对应的铝含量在 18%~20%之间，其铝氧比约为 0.35。

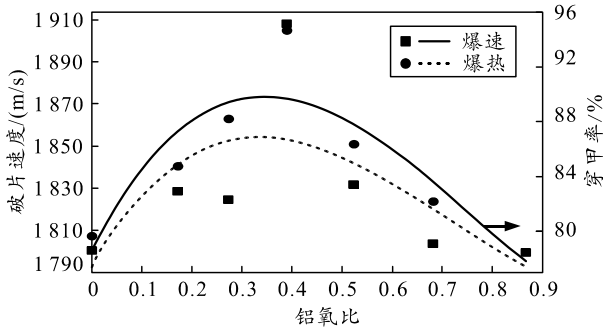


图 7 铝氧比与穿甲率和破片速度变化关系

为进一步寻求炸药爆热与破片速度和破片穿甲率之间的数学极值关系，笔者对破片速度和破片穿甲率与爆热和爆速关系进行了非线性拟合，见式(17)和(18)，拟合系数分别为 0.494 9 和 0.159 3。

$$v_0 = 64\,995 - 429.86Q_v + 0.010\,84Q_v^2 + 1.206 \times 10^{-6}Q_v^3; \quad (17)$$

$$P_{\text{穿甲率}} = 6\,624.07 - 4.374Q_v + 0.001\,07Q_v^2 - 1.105 \times 10^{-7}Q_v^3 + 4.585 \times 10^{-12}Q_v^4. \quad (18)$$

从式(17)、(18)可知，破片穿甲率和破片速度与炸药的爆热存在着数学上的极值点，即工程上存在着破片速度和破片穿甲率与炸药爆热最佳匹配点，这一点验证了式(12)的观点。笔者所使用的 HMX 基含铝炸药，其破片速度和破片穿甲率最大值所对应的爆热和铝氧比分别为 6 200 kJ/kg 和 0.35。由此可见，加入少量的铝粉有利于破片速度和穿甲率的提高，单纯使用格尼能速度来考察破片加载能力是欠妥的。研究表明：同一种炸药对不同金属加载速度是不同的，例如文献[19]作者使用 JO-9159 炸药在同样测试条件分别对无氧铜(Cu)、钛合金(TC4)和高强度钢(G50)进行了圆筒加速试验，结果表明无氧铜(Cu)、钛合金(TC4)和高强度钢(G50)3种金属加速最大速度分别为 1 670.3、2 155.2、1 698.6 m/s，其膨胀速度与时间的关系曲线如图 8 所示。分析认为^[19-20]：3种材料最主要区别就是力学性能存在重大区别，在爆轰加载过程中则表现为壳体的膨胀半径 r 。由此可见，破片速度与壳体的膨胀半径有着

密切关系。

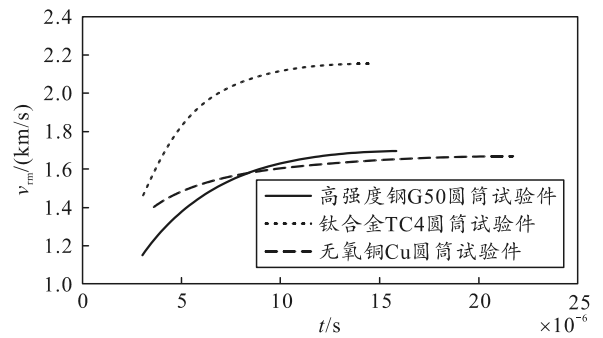


图 8 不同壳体材料圆筒壁膨胀速度^[19]

同时，结合本次试验结果，对炸药装药而言^[21]：含铝炸药中适量的铝粉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(>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)。因此，适量的铝粉有利于破片速度的提高。综上所述，根据破片速度与炸药爆热的理论关系式(13)可知，其与炸药的爆轰产物方程(关系式中的 γ 指数)和战斗部壳体膨胀作用特点(关系式中壳体膨胀半径 r)有着密切关系，单纯使用 Gurney 速度(对炸药而言就是爆速)来评判其对金属破片加速能力是欠妥的，应从炸药性能和壳体材料及装药结构综合考虑提高破片速度。

4 结论

1) 战斗部破片速度 v 与炸药爆热 Q_v 、壳体膨胀半径 r 、多方指数 γ 及装填比 β 之间呈现非线性 $v_0 = \sqrt{2Q_v[1-(r_0/r)^{2\gamma-2}]/(1/\beta+1/2)}$ 的理论关系，存在着数学上的极值点，预测工程上存在着最佳匹配点。

2) HMX 基含铝炸药爆热和铝氧比分别为 6 200 kJ/kg 和 0.35 时，其破片速度和破片穿甲率分别为 1 890 m/s 和 89%，达到最大值，存在工程上最佳匹配关系，试验验证了含铝炸药爆热与破片加载特性之间存在着数学上的极值关系。

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: 18-21.
 [2] 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.