

doi: 10.7690/bgzdh.2021.06.017

含铝炸药装药杀爆战斗部爆炸威力评估

肖师云¹, 丁 华², 华绍春², 陈 文¹, 刘俞平¹

(1. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究所, 重庆 402760; 2. 火箭军装备部驻重庆地区军事代表室, 重庆 400039)

摘要: 为科学评价含铝炸药装药杀爆战斗部爆炸后的能量释放与转换效率, 提出含铝炸药爆炸威力的等装药体积和等装药质量评估方法。以破片加速能力、冲击波超压和比冲量为评价参量, 采用等装药体积评估法和等装药质量评估法, 对铝粉含量 0%~25% 的含铝炸药标准试验弹试验结果进行分析与评估。结果表明: 铝粉含量对爆炸威力有重要影响, 密度效应是等装药体积评估结果增大的主要原因, 该方法具有一定的工程应用价值。

关键词: 含铝炸药; 杀爆战斗部; 爆炸威力; 评估

中图分类号: TJ410.4 **文献标志码:** A

Assessment of Explosive Power of Blast-fragmentation Warhead with Aluminized Explosive Charge

Xiao Shiyun¹, Ding Hua², Hua Shaochun², Chen Wen¹, Liu Yuping¹

(1. No. 1 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China;
2. Military Representative Office of Rocket Army Armament Department in Chongqing, Chongqing 400039, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the energy release and conversion efficiency of blast-fragmentation warhead with aluminized explosive charge after detonation, the equal charge volume evaluation method and the equal charge quality evaluation method for explosion power of aluminized explosive are proposed. Taking the acceleration capability of fragment, the overpressure of shock wave and the specific impulse as the evaluation parameters, the test results of the standard blast-fragmentation warheads loaded with aluminized explosives with the content of aluminum powder of 0%-25% were analyzed and evaluated by using the methods of equal charge volume evaluation and equal charge quality evaluation. The results show that the content of aluminum powder has an important influence on the explosion power, and the density effect is the main reason for the increase of the results of equal charge volume evaluation. This method has certain engineering application value.

Keywords: aluminized explosives; blast-fragmentation warhead; explosion power; evaluation

0 引言

含铝炸药是杀爆战斗部常用的一类高能炸药, 炸药中添加铝粉可提高战斗部的毁伤威力。炸药中加入铝粉后, 由于铝粉在爆轰波阵面后的二次反应中放出高热量, 故含铝炸药在爆轰时可产生较高的爆热和爆温, 但是炸药的爆速、爆压及爆容下降^[1-3]; 因此, 含铝炸药爆炸后的能量释放和转换需与战斗部杀伤元形成良好匹配才能有效提高战斗部的毁伤威力。

为分析不同含铝炸药爆炸后的能量释放与转换效率, 笔者基于杀爆战斗部威力表征参量, 采用等装药体积法和等装药质量法分别评估不同特性含铝炸药装药的杀爆战斗部爆炸威力, 并对不同铝粉含量炸药装药战斗部的威力进行了分析与评估, 以期含铝炸药配方设计和优化提供支撑。

1 威力参量确定

杀爆战斗部爆炸会产生冲击波和破片: 冲击波对目标结构主要为整体作用, 而破片对目标结构既有整体作用, 又有局部作用^[4]。冲击波作用载荷通常以冲击波超压和比冲量来表征, 而破片作用则主要以破片速度、破片质量和破片数量来表征^[5]。破片与冲击波作用载荷具有不同的衰减特性, 其对目标的杀伤范围具有显著区别, 故不同导弹武器系统对杀爆战斗部的毁伤威力要求各不相同^[6]。根据毁伤作用载荷, 可将杀爆战斗部分类为以破片毁伤为主冲击波为辅、冲击波毁伤为主破片为辅、破片与冲击波兼顾等 3 类。破片的数量和质量主要由战斗部结构确定, 破片速度、冲击波超压和比冲量则与含铝炸药能量释放与转换效率密切相关; 因此, 选择破片速度、冲击波超压和比冲量 3 个特征参量作

收稿日期: 2021-02-20; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 国防基础科研(2016209A003)

作者简介: 肖师云(1969—), 男, 重庆人, 硕士, 研究员, 从事弹药工程研究。E-mail: joonkyy@126.com。

为含铝炸药装药战斗部爆炸威力的评估参量。

2 评估方法

炸药装药在可预见的装药密度变化范围内,一般主要受战斗部总质量或者装药空间 2 种因素中的 1 种约束,故含铝炸药杀爆战斗部的爆炸威力评估可采用等装药体积评估或等装药质量评估。

2.1 等装药体积评估

等体积评估是在 2 种战斗部的装药容积相同且驱动的金属质量也相同的条件下,对爆炸后的毁伤威力评估参量进行对比分析,以获得不同含铝炸药装药的爆炸威力。炸药装药对金属的加速能力决定于炸药装药爆轰能量输出给金属的效率,美国 Kury 等提出圆筒试验,用实验中得到的格尼速度来表征炸药金属加速做功能力,炸药对金属加速所达到的最大初速可利用格尼能求出^[7]:

$$V_0 = f \cdot \sqrt{2E} (M/C + 0.5)^{-1/2} \quad (1)$$

式中: f 为试验修正系数; V_0 为破片初速; M 为战斗部爆炸后驱动的金属质量; C 为装药质量; $\sqrt{2E}$ 为格尼速度, m/s。

格尼速度 $\sqrt{2E}$ 表征了炸药对金属的加速能力。据此可得到不同杀爆战斗部的含铝炸药装药的格尼速度之比^[8]为:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2E_2}}{\sqrt{2E_1}} = \frac{V_{02}}{V_{01}} \left(\frac{M_2/C_2 + 0.5}{M_1/C_1 + 0.5} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中下标为 1 和 2 的参量分别为不同杀爆战斗部参数。当采用标准试验弹获得不同含铝炸药装药杀爆战斗部的破片初速后,根据式(2)即可得到含铝炸药装药的格尼速度之比;因此,当采用圆筒试验等方法获得基准炸药的格尼速度后,可由式(2)得到其他炸药的格尼速度。

假设 2 种杀爆战斗部仅装药类型不同,装药容积及其余结构参数均相同,可得到等装药体积下,不同含铝炸药装药杀爆战斗部的破片初速之比为:

$$V_{02}/V_{01} = \lambda \cdot \left((k/\rho_1 + 0.5)/(k/\rho_2 + 0.5) \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: λ 为 2 种含铝炸药装药的格尼速度之比; ρ_1 和 ρ_2 分别为 2 种炸药的装药密度; k 为标准试验弹结构系数, $k=M/V$; V 战斗部装药容积。

炸药爆炸后以极高的速度膨胀并对周围的空气造成压缩,形成爆炸冲击波。冲击波波阵面上的超压是影响冲击波破坏威力的主要因素,在超高压的作用下,目标将被摧毁。根据 π 定理及炸药在空气

中的爆炸相似律,可得到炸药爆炸时能量相似的公式^[7]:

$$\Delta P = f(\bar{\omega}) \quad (4)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为对比距离的倒数, $\bar{\omega} = \sqrt[3]{m_e}/R$, m_e 为炸药等效 TNT 当量质量; R 为距战斗部爆心的距离。

炸药 TNT 当量可根据能量相似原理换算,得出

$$m_e = m_i Q_i / Q_T \quad (5)$$

式中: m_e 为某炸药装药的 TNT 当量质量; m_i 为某炸药装药质量; Q_i 为某炸药爆热; Q_T 为 TNT 爆热,取 4 182 kJ/kg。

将式(4)用级数按多项式展开,并结合 TNT 炸药的实验数据,可得到工程上实用的冲击波超压峰值计算公式,典型自由场爆炸的空气冲击波超压峰值公式^[9]为:

$$\Delta P = 0.84\bar{\omega} + 2.7\bar{\omega}^2 + 7\bar{\omega}^3 \quad (6)$$

冲击波比冲量按下式计算:

$$i_+ = A\bar{\omega}^2 R \quad (7)$$

式中: A 为与地面性质有关的系数,在无限空气中爆炸时 A 取 200~250;在刚性地面爆炸时 A 取 320~400;在普通土壤地面爆炸时 A 取 300~370。

同样假设 2 种杀爆战斗部仅有装药类型不同,由式(5)和式(6)可知:在装药体积相同的条件下,密度为 ρ_1 的炸药装药在作用距离 R_1 处的空气冲击波阵面超压为 ΔP ,则密度为 ρ_2 的炸药装药在作用距离 R_2 处要得到同样的空气冲击波阵面超压 ΔP ,有

$$R_2/R_1 = \sqrt[3]{\rho_2 Q_2 / (\rho_1 Q_1)} \quad (8)$$

由式(7)得到等装药体积下 2 种含铝炸药装药爆炸后的冲击波比冲量之比为:

$$i_{+2}/i_{+1} = (\rho_2 Q_2 / (\rho_1 Q_1))^{2/3} \quad (9)$$

由式(3)、式(8)和式(9)可知:在设定的标准试验弹条件下,含铝炸药装药杀爆战斗部爆炸后的威力评估参量与炸药的装药密度和爆热相关,通过规定的标准试验弹试验测试获取威力参量后,可分析研究炸药装药密度和爆热对战斗部爆炸威力的影响规律,从而为含铝炸药配方优化提供参考。

2.2 等装药质量评估

假设 2 种杀爆战斗部仅装药类型和装药口径不同,装药质量及其余结构参数均相同,根据式(3)可得到等装药质量下,不同含铝炸药装药杀爆战斗部的破片初速之比为:

$$V_{02}/V_{01} = \lambda \quad (10)$$

由式(10)可知，在等装药质量条件下 2 种炸药装药杀爆战斗部的破片初速之比等于 2 种含铝炸药装药的格尼速度之比。

同理，由式(5)和式(6)可知，在等装药质量条件下 2 种装药要得到同样的冲击波超压峰值 ΔP ，有

$$R_2/R_1 = \sqrt[3]{Q_2/Q_1} \quad (11)$$

等装药质量下 2 种含铝炸药装药爆炸后在相同距离处的冲击波比冲量之比为：

$$i_{+2}/i_{+1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{2/3} \quad (12)$$

根据式(11)和式(12)计算在 $Q_2/Q_1=1.0\sim 3.0$ 范围内的 i_{+2}/i_{+1} 及 R_2/R_1 变化曲线，见图 1 和图 2。

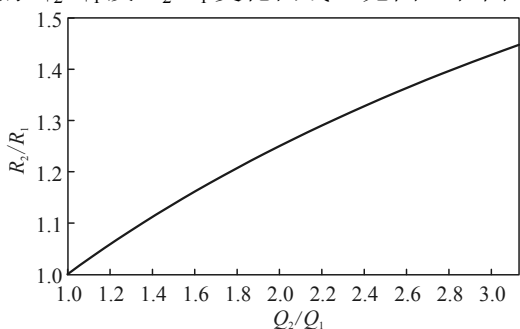


图 1 超压作用距离之比随装药爆热之比的变化

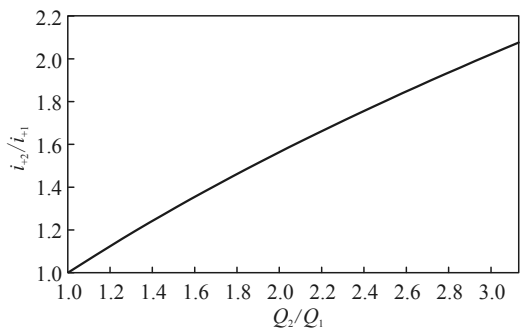


图 2 冲击波比冲量之比随装药爆热之比的变化

由图 1 和图 2 可知：在相同炸药装药质量情况下，冲击波超压作用距离和冲击波比冲量随装药爆热的增大而增大；当炸药装药爆热增加 1 倍 ($Q_2/Q_1=2$) 时，冲击波超压作用距离增大 0.26 倍 ($R_2/R_1=1.26$)，冲击波比冲量增大 0.59 倍 ($i_{+2}/i_{+1}=1.59$)，说明装药质量一定，含铝炸药装药爆热增加时，杀爆战斗部的爆炸威力增大。

3 应用实例

分别采用以上 2 种方法对文献[8]的测试结果进行分析评估。为消除结构效应对测试和评估的干扰，文献[8]采用标准弹静爆试验方法，测试了以 HMX 为基的不同铝粉含量含铝炸药装药战斗部爆炸后距

爆心 8 m 处的破片速度。试验用钨合金破片尺寸为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ ，其速度衰减系数为 0.010 6，标准试验弹装填的含铝炸药参数见表 1。

表 1 不同含铝炸药参数

编号	铝粉含量/%	炸药装填密度/(g/cm ³)	理论爆热/(kJ/kg)	理论爆速/(m/s)
0	0	1.725	5 769	8 520
1	10	1.783	6 517	8 431
2	15	1.788	6 810	8 378
3	20	1.793	7 102	8 324
4	25	1.810	7 395	8 266

标准试验弹静爆试验测试结果见表 2。由破片速度衰减规律可计算得到破片初速，根据 0 号基准炸药的格尼速度和式(2)可得到其他含铝炸药的格尼速度。

表 2 等装药体积下含铝炸药标准试验弹测试结果

编号	铝粉含量/%	8 m 处破片速度/(m/s)	破片初速/(m/s)	格尼速度/(m/s)
0	0	1 806.9	1 967	2 850 ¹⁾
1	10	1 840.3	2 003	2 927
2	15	1 862.5	2 027	2 965
3	20	1 905.6	2 074	3 035
4	25	1 850.8	2 015	2 955

注：1)为圆筒试验数据。

根据表 1 和表 2 数据，采用等装药质量评估法进行分析，由式(11)得到不同铝粉含量含铝炸药的格尼速度见表 3，与等装药体积评估法的数据对比见图 3。

表 3 等装药质量下含铝炸药标准试验弹分析结果

编号	铝粉含量/%	8 m 处破片速度/(m/s)	格尼速度/(m/s)
0	0	1 806.9	2 850 ²⁾
1	10	1 840.3	2 903
2	15	1 862.5	2 938
3	20	1 905.6	3 006
4	25	1 850.8	2 919

注：2)为圆筒试验数据。

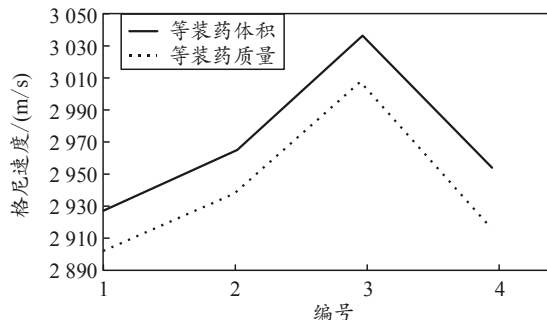


图 3 2 种评估方法下格尼速度的变化

评估结果表明：含铝炸药中铝粉含量在 0%~25% 范围变化时，存在 1 个破片驱动能力最优的铝粉含量。由表 2 与表 3 数据对比可知：采用 2 种评估方法获得的装药格尼速度有一定差异，等装药体

积评估时，由于装药的密度效应，评估得到的格尼速度较等装药质量评估高 1%左右。

根据表 1 中爆热和密度数据，由式(8)、式(9)、式(11)和式(12)可分别计算得到等装药体积和等装药质量下的冲击波超压作用距离之比、比冲量之比随装药爆热之比的变化关系，见表 4 及图 4 和图 5。

表 4 2 种评估方法下冲击波威力计算结果

编号	炸药装填 密度/ (g/cm ³)	理论 爆热/ (kJ/kg)	等炸药 体积评估		等装药 质量评估	
			R_i/R_0	i_{+j}/i_{+0}	R_i/R_0	i_{+j}/i_{+0}
0 ³⁾	1.725	5 769	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.783	6 517	1.05	1.11	1.04	1.08
2	1.788	6 810	1.07	1.14	1.06	1.12
3	1.793	7 102	1.09	1.18	1.07	1.15
4	1.810	7 395	1.10	1.22	1.09	1.18

注：3)表示该行数据作为比较的基准数据。

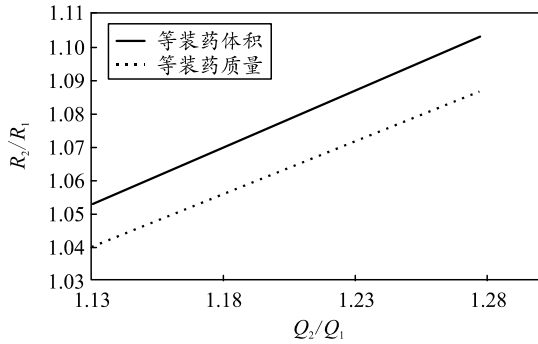


图 4 2 种评价方法下超压作用距离之比的变化

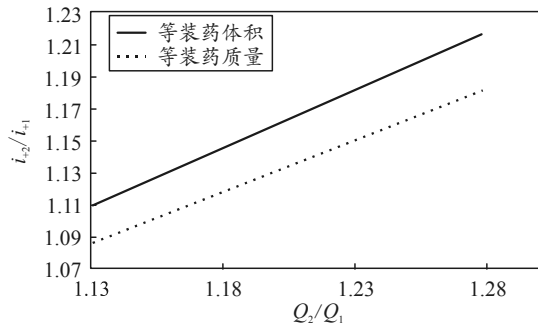


图 5 2 种评价方法下冲击波比冲量之比的变化

由计算结果可知：随着装药中铝粉含量的增加（铝粉含量 0%~25%），2 种评估方法得到的冲击波超压作用距离及比冲量均增大，但等装药体积评估得到的冲击波超压作用距离及比冲量较等装药质量评估结果增大约 1.6%和 3.3%，原因在于等装药体积下装药密度差异导致的装药质量不同。

含铝炸药的铝粉含量对炸药性能有重要影响，一般来说在铝粉含量不超过 35%时，随着含铝炸药中铝粉含量的增加，炸药平均密度增大，爆热增加，而爆速则减小，但是爆轰反应区增宽，破片持续加

载能力增强，单纯采用爆速难以有效评估含铝炸药对破片的加速能力；因此，采用标准试验弹进行战斗部爆炸威力评估是含铝炸药配方优化的重要手段。在针对不同含铝炸药的战斗部爆炸威力评估时，则需要分析杀爆战斗部的具体应用条件，对质量控制要求较高的宜采用等装药质量法进行炸药应用性能评估，而对尺寸控制要求较高的宜采用等装药体积法。

4 结论

笔者提出了评估含铝炸药装药杀爆战斗部爆炸威力的等装药体积评估法和等装药质量评估法，可作为含铝炸药配方设计和优化的依据。分析与评估实例表明：

1) 采用等装药体积法评估的破片驱动能力和冲击波威力较等装药质量法评估的结果均有所增大，最大增加约 3%；密度效应是等装药体积评估结果增大的主要原因；

2) 含铝炸药配方优化时，应根据杀爆战斗部的具体应用条件选择适宜的爆炸威力评估方法。

参考文献：

- [1] 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: 3-7.
- [2] 黄开书, 万力伦, 陈洋, 等. 含某金属粉炸药爆轰性能分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 94-96.
- [3] 孙晓乐, 万力伦, 杨琢钧, 等. 铝氧比对 CL-20 基含铝炸药水下能量输出结构的影响[J]. 兵工自动化, 2020, 39(7): 76-78.
- [4] 郑红伟, 陈长海, 侯海量, 等. 爆炸冲击波和高速破片载荷的复合作用特性及判据研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 24-31.
- [5] 王树山, 韩旭光, 王新颖. 杀伤爆破弹综合威力评估方法与应用研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1249-1254.
- [6] 肖师云, 冯成良, 刘俞平, 等. 基于杀伤面积的杀爆战斗部总体参数优化[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 32-36.
- [7] 张志鸿, 周中生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 271-274.
- [8] 肖师云, 刘俞平, 涂兴文, 等. 含铝炸药对全预制破片加速能力试验[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(11): 161-163.
- [9] 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 304-308.