

文章编号: 1000-4750(2015)10-0203-06

高能炸药驱动下弹体膨胀破碎过程试验研究

陈 醇¹, 李伟兵¹, 王晓鸣¹, 李文彬¹, 吴银海²

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094; 2. 73146 部队, 福建, 泉州 362000)

摘 要: 为了获得高能炸药驱动下战斗部壳体破碎机理, 选取新型弹体材料 30CrMnSiNi2A 钢、40CrMnSiB 钢以及典型弹体材料 50SiMnVB 钢, 采用超高速摄影技术拍摄壳体静爆, 获得了不同弹体材料壳体膨胀破碎过程, 引入弹体径向膨胀系数, 建立了考虑弹体材料性能影响的壳体径向膨胀距离随时间变化的函数关系式, 并试验测定了三种材料弹体形成破片的最大初速。分析试验结果发现, 新型弹体材料壳体膨胀速度和破片初速更大, 相比 50SiMnVB 钢壳体, 30CrMnSiNi2A 钢和 40CrMnSiB 钢壳体形成破片的最大初速分别提高了 19.0% 和 31.9%。不同合金钢材料壳体形成破片初速沿壳体轴向分布规律相同, 最大初速出现在距起爆点约 70% 圆筒长度处。该研究结果将为杀爆战斗部壳体材料选取及设计提供参考依据。

关键词: 弹药工程; 壳体膨胀; 弹体材料; 破片速度; 超高速摄影技术; 测速技术

中图分类号: TJ410 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0197

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EXPANSION AND FRACTURE OF PROJECTILES UNDER HIGH POWER EXPLOSIVES

CHEN Chun¹, LI Wei-bing¹, WANG Xiao-ming¹, LI Wen-bin¹, WU Yin-hai²

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Unit 73146 of PLA, Quanzhou 362000, China)

Abstract: To acquire the fracture mechanism of warhead shells under high power explosives, three projectile materials: 30CrMnSiNi2A steel, 40CrMnSiB steel and 50SiMnVB steel were examined. By capturing static burst of the projectiles using an ultra-high speed camera, the expansion and fracture processes of the three projectiles were obtained. The radial expansion coefficient of projectiles was employed to derive the relationship between the radial projectile expansion and time, taking into consideration projectile material properties. In addition, the maximum initial velocities of fragmentation of the three materials were tested. It was found that, the velocity of projectile expansion and the initial velocity of projectile fragmentation of new materials were larger. Compared with the 50SiMnVB steel shell, the maximum initial velocities of projectile fragmentation were improved by 19.0% and 31.9% for 30CrMnSiNi2A steel and 40CrMnSiB steel, respectively. The distribution of initial velocity of fragmentation along the axis of the projectile was the same for different projectile materials, and the maximum initial velocity occurred at 70% of the projectile length away from the ignition point. This study is expected to provide guidance for material selection and design for fragmenting warhead shells.

Key words: projectile engineering; shell expansion; projectile material; fragment velocity; ultra-high speed photography; velocity test technology

收稿日期: 2014-03-17; 修改日期: 2014-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202103); 南理工紫金之星培养基金项目(2013zj-0201)

通讯作者: 李伟兵(1982-), 男, 浙江人, 副教授, 博士, 从事弹丸终点效应与目标毁伤技术研究(E-mail: njustlwb@163.com).

作者简介: 陈 醇(1989-), 男, 浙江人, 硕士生, 从事高效毁伤技术研究(E-mail: saver120@163.com);

王晓鸣(1962-), 男, 江苏人, 教授, 博士, 从事弹药总体技术研究(E-mail: 202xm@163.com);

李文彬(1965-), 男, 山东人, 研究员, 博士, 从事弹药高效毁伤技术研究(E-mail: acnet@mail.njust.edu.cn);

吴银海(1980-), 男, 江苏人, 高工, 学士, 从事弹药总体技术研究(E-mail: wyh73146@mail: njust.edu.cn).

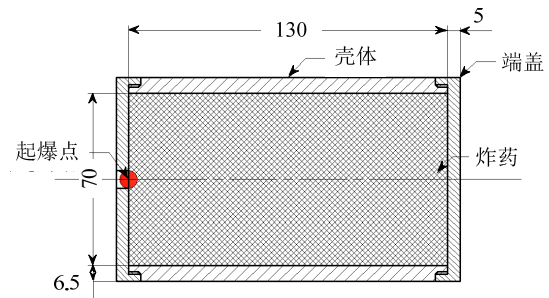
战斗部壳体在爆炸加载下的高应变率变形和破碎情况与形成破片的质量分布、初速、飞散角等都有极大的关联,直接影响着破片战斗部的毁伤威力^[1]。由于其重要的研究意义和应用价值,很早就引起了国内外学者的重视。Taylor^[2]提出了壳体爆炸膨胀断裂的依据,并建立了理论模型,该模型能较好地描述低爆压下柱壳的断裂过程;Gurney^[3]研究了炸药加载下金属圆管的膨胀破碎,给出了金属圆管爆炸形成破片速度的公式;Hoggatt等^[4]讨论了处于环向压应力状态的壳壁内层中的剪切断裂机制。20世纪70年代,国外首先使用数值模拟的方法仿真了壳体膨胀破碎过程,对理论研究的成果进行了验证^[5]。近年来数值模拟的方法在国内也得到了广泛的应用。孔韶祥等^[6]基于流体弹塑性模型,对45#钢管的膨胀断裂进行了数值仿真。随着光电技术的发展,许多新的试验方法和测试方法被引入到壳体膨胀破碎的研究中来。梁凯金^[7]首先将超高速摄影技术引入到壳体破碎机理研究中来,并成功拍摄到有机玻璃板模型破裂发展过程。胡八一等^[8]采用前照明分幅摄影技术,研究了45#钢管在3种不同猛度炸药加载下的膨胀断裂行为;胡海波等^[9]通过高速分幅和X光相机讨论了金属柱壳在爆炸加载断裂中的单旋现象。但在见诸报告的研究中,较少有人通过试验对高能炸药驱动下新型战斗部材料壳体的膨胀破碎过程展开研究,比较不同材料特性对战斗部壳体膨胀破碎过程的影响。

本文针对高能炸药装药下,新型弹体材料30CrMnSiNi2A钢和40CrMnSiB钢壳体以及典型弹体材料50SiMnVB钢壳体,利用超高速摄影技术试验研究壳体膨胀破碎过程,并测定了壳体破碎形成破片的最大初速,分析了不同弹体材料性能对壳体膨胀及破碎形成破片性能的影响规律。

1 试验设计

1.1 弹丸结构与壳体材料选取

采用弹体静爆试验,获取真实爆轰环境下壳体破碎及其破片形成过程。杀爆战斗部70%~80%的破片由弹丸中段圆柱部产生,且破片质量分布较为合理,故弹丸圆柱部形成破片的特征参量对弹丸的毁伤威力有决定性的影响。为了研究结果更具代表性和适用性,采用标准圆筒形试验弹,弹体结构示意图和试验弹丸如图1所示。其中装药直径为70 mm,圆筒长度为130 mm,壁厚为6.5 mm。装药选用高能炸药JO-8,起爆方式为圆筒一端中心起爆。试验弹的壳体材料分别选用30CrMnSiNi2A钢、40CrMnSiB钢和50SiMnVB钢。3种壳体材料的性能参数及试验方案见表1,高能炸药JO-8的特性参数见表2。



(a) 弹体结构



(b) 试验弹丸

图1 弹体结构示意图及试验弹丸

Fig.1 Projectile structure sketch and experimental projectile

表1 壳体材料性能参数及试验方案

Table 1 Parameters of material characteristics and experiment program

| 方案号 | 壳体材料 | 炸药 | 密度/(g/cm ³) | 极限抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa | 断裂韧性 | 热处理方式 |
|-----|--------------|------|-------------------------|------------|----------|--------------------|------------|
| #1 | 30CrMnSiNi2A | | 7.85 | 1650 | 210 | 61 ^[10] | 正火+水淬+中温回火 |
| #2 | 40CrMnSiB | JO-8 | 7.87 | 1250 | 193 | 86 | 正火+水淬+中温回火 |
| #3 | 50SiMnVB | | 7.86 | 1190 | 209 | 97 | 正火+水淬+中温回火 |

表2 高能炸药JO-8特性参数

Table 2 Parameters of high power explosive JO-8

| 炸药名称 | 密度/(g/cm ³) | 爆速/(m/s) | 爆压/kPa | 单位体积能量/(kJ/m ³) |
|------|-------------------------|----------|----------------------|-----------------------------|
| JO-8 | 1.80 | 8590 | 3.22×10 ⁷ | 1.06×10 ⁷ |

1.2 测试方法介绍

利用超高速摄影仪对壳体膨胀破碎及破片形成过程进行拍摄,比较分析不同弹体材料性能对壳体膨胀及破片形成的影响。超高速摄影技术在弹道

分析、动态破坏、爆炸测试及裂纹扩展研究等方面具有很高的工程应用价值。试验采用的超高速摄影仪最高可达 6×10^6 帧/s, 通过标准以太网和移动设备进行连接, 利用专用软件实现对相机的调试和控制。考虑到超高速摄影仪的曝光时间极短, 自然光条件下抓拍的图像较暗且与环境对比度较低, 故采用两盏 2000 W 的强光灯对试验弹体近距离照明, 并对合金钢弹体表面进行喷漆, 以增强图像的亮度和对比度, 如图 2 所示。试验中超高速摄影仪的触发采用电离式触发, 如图 3 所示。将触发线修剪平齐后放置在药柱的顶端, 起爆后爆轰波将炸药周围空气电离化, 使触发线导通, 随即向控制终端发出下降沿脉冲信号, 摄影机接到信号后按照预先设置的曝光时间和增益抓拍图像。过短的曝光时间会造成图像的亮度和对比度极低, 过长的曝光时间则会带来图片拖影, 影响清晰度。综合考虑以上两点, 将超高速摄影仪的曝光时间设置为 $5 \mu\text{s}$, 每两幅图像间的时间增益为 $1 \mu\text{s}$ 。在对超高速摄影图像壳体边缘按像素点进行标定过程中, 图像的最小分辨率可以达到 3 个像素点, 在本文中的试验距离上, 一个像素点对应的实际距离为 0.25 mm , 故标定的系统误差不大于 0.75 mm , 该误差完全能够满足研究需要。



图 2 照明系统

Fig.2 Illumination system

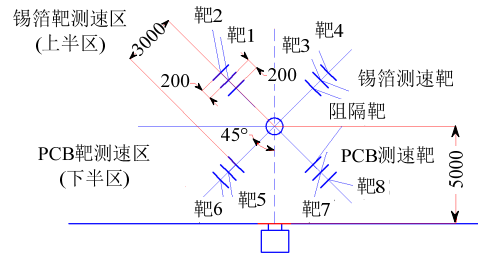


图 3 电离式触发

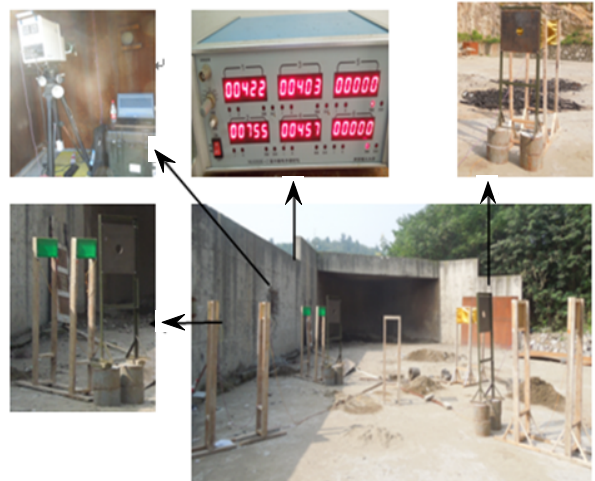
Fig.3 Ionization trigger

1.3 试验现场布置

弹体膨胀及测速试验布置如图 4 所示。不同弹体材料性能对壳体破碎及破片形成的影响最终会体现在破片的初速差异上, 故除利用超高速摄影仪对弹体静爆过程进行拍摄外, 同时设计测速装置对弹体形成破片的最大初速进行测定。测速采用锡箔靶和 PCB 印刷电路板靶两种方法同时进行, 试验中设置了四组测速靶, 并在其中两组测速靶前安放了冲击波阻隔靶, 以减小冲击波对测速装置的干扰。



(a) 试验布置示意图



(b) 试验现场

图 4 壳体膨胀及测速试验布置图

Fig.4 Shell expansion and velocity test experimental layout

弹体静爆产生的破片对超高速摄影仪及其控制设备有极大的破坏力, 试验中必须对仪器进行防护。在超高速摄影系统的外部搭建 20 mm 厚钢制防护罩, 用以抵御高速破片的杀伤作用。并在防护罩的镜头孔前后各加装一块 25 mm 厚防弹玻璃, 对摄影仪镜头进行防护。此外, 高能炸药爆炸产生的冲击波在一定范围内具有很强的毁伤能力, 必须对拍摄的安全距离进行计算。根据原子核爆的经验^[11-12], 装药在无限空气介质中爆炸时产生的冲击波超压可用式(1)计算。当试验弹丸在地面上爆炸时, 空气冲击波相当于在半无限空间中传播, 可近似地看作是两倍的装药在无限空间中爆炸, 其冲击波超压可用式(2)计算。高能炸药 JO-8 的 TNT 当量换算如式(3)所示^[11]。

$$\Delta P_1 = 0.082 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.26 \frac{\sqrt[3]{\omega^2}}{R^2} + 0.60 \frac{\omega}{R^3} \quad / \text{MPa} \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = 0.104 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{R} + 0.422 \frac{\sqrt[3]{\omega^2}}{R^2} + 1.37 \frac{\omega}{R^3} \quad / \text{MPa} ,$$

$$1 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10^{[13]} \quad (2)$$

$$\omega_{iT} = \omega_i \frac{Q_{vi}}{Q_{VT}} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中： ω /kg 为 TNT 装药量； R /m 为距装药中心的距离(m)； ω_i 为高能炸药药量； Q_{vi} 为高能炸药爆热； Q_{VT} 为 TNT 的爆热，取 $Q_{VT}=1000$ ； ω_{iT} 为高能炸药的 TNT 当量。

根据上述公式和 JO-8 炸药的性能参数，计算得到试验弹装药在距起爆点 5 m 处的冲击波超压为 0.054 MPa，其对设施的破坏等级为严重破坏^[11]。为了能够在距试验弹 5 m 处拍摄壳体膨胀及破片形成过程，将超高速摄影仪架设在留有镜头孔的 500 mm 厚钢筋混凝土墙之后，从而大幅度降低冲击波超压对其的影响，并在超高速摄影仪三角支架的下方铺设海绵垫，用以减少试验弹爆炸引起的振动对拍摄的干扰。

试验后发现对超高速摄影仪的多层防护是必要的，每次试验都对防护墙和各层防弹玻璃造成了不同程度的损伤。第一发试验弹静爆后，第一层防弹玻璃出现了大面积的裂纹和弹坑，但并没有被破片穿透。第二发试验弹静爆后，第一层防弹玻璃大部分已经粉末化，强度大幅度降低，且有一定数量的破片已穿透其防护，在第二层防弹玻璃上留下了浅坑。两发试验弹静爆后，第一层防弹玻璃已基本失去防护能力，必须进行更换。

2 试验结果及分析

2.1 壳体膨胀破碎超高速摄影结果及分析

30CrMnSiNi2A 钢壳体、40CrMnSiB 钢壳体以及 50SiMnVB 钢壳体膨胀破碎过程超高速摄影图像，如表 3~表 5 所示。

表 3 30CrMnSiNi2A 钢壳体膨胀过程

Table 3 Process of 30CrMnSiNi2A steel shell expansion

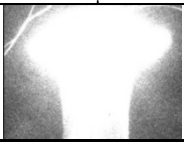
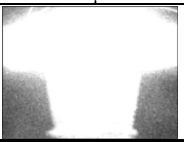

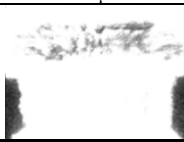
| 时间 | 10 μ s | 20 μ s | 25 μ s | 40 μ s |
|---------|--|--|---|--|
| 超高速摄影图像 |  |  |  |  |

表 4 40CrMnSiB 钢壳体膨胀过程

Table 4 Process of 40CrMnSiB steel shell expansion

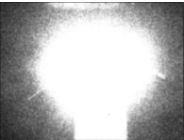



| 时间 | 10 μ s | 20 μ s | 30 μ s | 40 μ s |
|---------|---|---|--|---|
| 超高速摄影图像 |  |  |  |  |

表 5 50SiMnVB 钢壳体膨胀过程

Table 5 Process of 50SiMnVB steel shell expansion


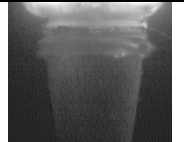
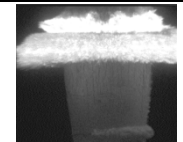
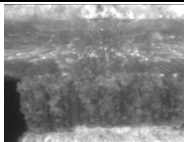
| 时间 | 10 μ s | 20 μ s | 35 μ s | 40 μ s |
|---------|---|---|--|---|
| 超高速摄影图像 |  |  |  |  |

表 3~表 5 显示了 30CrMnSiNi2A 钢、40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢 3 种材料壳体膨胀过程。在炸药爆炸加载下，壳体材料薄弱点处首先出现裂纹，裂纹不断扩展，最后交织在一起形成破片。比较 3 种材料壳体膨胀破碎过程超高速摄影图像发现高能炸药装药下，30CrMnSiNi2A 钢壳体在起爆后 20 μ s，炸药柱内爆轰波传播至壳体底部，引起壳体底部发生爆轰；25 μ s 时，从超高速摄影图像中可

以看到壳体开始破碎；40 μ s 时，有大量破片形成。壳体两端对炸药爆轰能量存在着明显的泄压作用，且起爆点处一端泄压起始时刻更早，即炸药爆轰能量泄露更为严重，故在接近起爆点处破片初速最小，破片的最大初速出现在距离起爆点约 70%圆筒长度处。40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢壳体膨胀过程与 30CrMnSiNi2A 钢壳体膨胀过程相似，但壳体开始破碎的时间较晚，分别在 30 μ s 和 35 μ s 左右。

现选取远离起爆点 70%壳体长度处位置作为研究对象, 3 种材料壳体起爆后, 壳体径向膨胀距离随时间的变化曲线, 如图 5 所示。

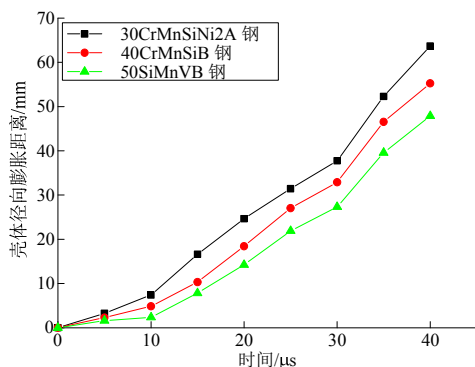


图 5 壳体径向膨胀距离随时间的变化

Fig.5 Change of shell radial expansion distance over time

由图 5 和表 1 可知, 高能炸药装药下, 弹体径向膨胀速度与弹体材料的极限抗拉强度呈正相关, 与动态断裂韧性的呈负相关。引入弹体径向膨胀系数 δ , 并对图 5 中的弹体径向膨胀距离关于时间的数据点运用 MATLAB 数学分析软件进行拟合。50SiMnVB 钢为现阶段杀爆弹的主要选材, 以其材料性能参数为基准, 取 50SiMnVB 钢弹体径向膨胀系数 $\delta=1$, 得到高能炸药装药下 50SiMnVB 钢弹体径向膨胀距离关于时间的函数关系:

$$d = 0.0261t^2 + 0.1894t \quad (4)$$

式中: d/mm 为弹体径向膨胀距离; $t/\mu\text{s}$ 为起爆后时间。因弹体径向膨胀速度与弹体材料的极限抗拉强度呈正相关, 与动态断裂韧性呈负相关, 故设弹体径向膨胀系数 δ 为:

$$\delta = \lambda \frac{A^m}{B^n} \quad (5)$$

式中: A/MPa 为弹体材料极限抗拉强度; B 为动态断裂韧性; λ 、 m 、 n 为常系数, 且其值均大于零。将表 1 中 4 种弹体材料性能参数代入 MATLAB 拟合结果, 可以确定弹体径向膨胀系数 δ 中的待定常系数值。

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln 1650 & -\ln 61 \\ 1 & \ln 1250 & -\ln 86 \\ 1 & \ln 1190 & -\ln 97 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln \lambda \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln 1.354 \\ \ln 1.167 \\ \ln 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由此得到, 三代高能炸药装药下弹体径向膨胀距离随时间的变化函数关系式:

$$d = \delta(0.0261t^2 + 0.1894t) \quad (7)$$

$$\delta = 0.7308 \frac{A^{0.1898}}{B^{0.8197}} \quad (8)$$

通过 MATLAB 拟合得到的函数关系式与试验结果数据的误差不大于 10%, 能够较为准确地反映高能炸药装药下不同材料壳体径向膨胀距离随时间的变化关系。

2.2 壳体形成破片最大初速测定结果及分析

3 种材料壳体形成破片最大初速的试验测定结果见表 6, 其中 30CrMnSiNi2A 钢壳体形成破片的最大初速为 1956.1 m/s, 相比 40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢壳体形成破片的最大初速, 分别提高了 19.0%和 31.9%。每一发试验弹的四组测速结果有小幅波动, 这主要是由测速系统的系统误差所引起, 但每一发的测速结果最大差值仅为 6%, 可认为试验测速结果能够反映弹体形成破片的最大初速。

表 6 测速试验结果

Table 6 Results of velocity test

| 方案号 | 弹体材料 | 炸药种类 | 壳体壁厚/mm | I组速度/(m/s) | II组速度/(m/s) | III组速度/(m/s) | IV组速度/(m/s) |
|-----|--------------|------|---------|------------|-------------|--------------|-------------|
| #1 | 30CrMnSiNi2A | | | 1956.1 | 1863.2 | 未捕捉到 | 1896.9 |
| #2 | 40CrMnSiB | JO-8 | 6.5 | 1547.2 | 1557.4 | 1643.9 | 1593.6 |
| #3 | 50SiMnVB | | | 1463.2 | 1413.9 | 1483.1 | 1458.7 |

综合分析壳体膨胀超高速摄影结果及壳体破碎形成破片的最大初速测定结果, 弹体材料性能对壳体膨胀破碎过程及最终形成破片性能有很大的影响。从表 1 可以看出 30CrMnSiNi2A 钢的极限抗拉强度明显高于 40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢, 这减少了壳体提前破碎而造成的能量泄露, 使材料断裂的时刻更加逼近炸药爆轰能量充分释放的时刻。故 30CrMnSiNi2A 钢壳体膨胀速度最大, 30CrMnSiNi2A 钢壳体形成破片的初速也要高于

40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢壳体形成破片。但是 30CrMnSiNi2A 钢的断裂韧性较小, 材料容易发生脆性断裂, 所以其壳体破碎程度很高, 形成的破片质量偏小。

3 结论

(1) 利用超高速摄影技术, 获得了 3 种不同弹体材料 30CrMnSiNi2A 钢、40CrMnSiB 钢和 50SiMnVB 钢壳体膨胀破碎过程, 其中

30CrMnSiNi2A 钢壳体膨胀速度最大, 其在起爆后 $25 \mu\text{s}$ 壳体开始破碎, 而 40CrMnSiB 钢壳体开始破碎的时间分别为起爆后 $30 \mu\text{s}$ 和 $35 \mu\text{s}$ 。

(2) 引入弹体径向膨胀系数, 建立了考虑弹体材料性能影响的壳体径向膨胀距离随时间变化的函数关系式。

(3) 不同合金钢材料壳体形成破片初速沿壳体轴向分布规律相同, 在接近起爆点处破片初速最小, 最大初速出现在距起爆点约 70%圆筒长度处。

(4) 试验测定了两种材料弹体形成破片的最大初速, 新型弹体材料破片初速更大, 相比 50SiMnVB 钢壳体, 30CrMnSiNi2A 钢和 40CrMnSiB 钢壳体形成破片的最大初速分别提高了 19.0%和 31.9%。

参考文献:

- [1] 李向东, 钱建平, 曹兵, 等. 弹药概论[M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 22—23.
Li Xiangdong, Qian Jianping, Cao Bing, et al. Ammunition introduction [M]. 1st ed. Beijing: National Defense Industry, 2004: 22—23. (in Chinese)
- [2] Taylor G I. Scientific paper of Taylor G I [M]. London: Cambridge University Press, 1963: 48—61.
- [3] Gurney G W. The initial velocities of the fragments from bombs, shells and grenades [R]. Ballistics Research Laboratories Report, 1943.
- [4] Hoggatt C R, Recht R F. Fracture behavior of tubular bombs [J]. Journal of Applied Physics, 1968, 30(2): 315—321.
- [5] AI-Hassani S T S, Johnson W. The dynamics of the fragmentation process for spherical shells containing explosives [J]. International Journal of Mechanics Science, 1969, 11(1): 545—549.
- [6] 孔祥韶, 吴卫国, 杜志鹏, 等. 圆柱形战斗部爆炸破片特性研究[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 243—249.
Kong Xiangshao, Wu Weiguo, Du Zhipeng, et al. Research on fragments characteristic of cylindrical warhead [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 243—249. (in Chinese)
- [7] 梁凯金. 记录爆破破裂过程的超高速摄影方法[J]. 工程力学, 1986, 3(3): 32.
Liang Kaijin. Ultra-high speed camera method for recording the process of explosion and fracture [J]. Engineering Mechanics, 1986, 3(3): 32. (in Chinese)
- [8] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 49—54.
Hu Bayi, Dong Qingdong, Han Changsheng, et al. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1): 49—54. (in Chinese)
- [9] 胡海波, 汤铁钢, 胡八一, 等. 金属柱壳在爆炸加载断裂中的单旋现象[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 97—106.
Hu Haibo, Tang Tiegang, Hu Bayi, et al. An study of uniform shear bands orientation selection tendency on explosively loaded cylindrical shells [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 97—106. (in Chinese)
- [10] 周义清, 张治民. 30CrMnSiNi2A 钢在不同应变率下的力学性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 46—50.
Zhou Yiqing, Zhang Zhimin. Effect of deformation on transformation and microstructures of dual phase steel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(4): 46—50. (in Chinese)
- [11] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 78—85.
Wang Ruce, Zhao Guozhi. Projectile terminal effect [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 78—85. (in Chinese)
- [12] 苏木青. 实用火炮内弹道计算程序[J]. 华东工程学院学报, 1979, 3(1): 12—15.
Su Muqing. Practical artillery internal ballistics calculation program [J]. Journal of East China Institute of Engineering, 1979, 3(1): 12—15. (in Chinese)
- [13] 魏惠之, 朱鹤松, 汪东晖, 等. 弹丸设计与理论[M]. 南京: 南京理工大学, 1991: 53—71.
Wei Huizhi, Zhu Hesong, Wang Donghui, et al. Projectile design and theory [M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1991: 53—71. (in Chinese)