DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0335-08

含偏心起爆对 EFP 战斗部飞行特性的影响*

刘健峰[1,2],龙 源[1,2],纪 冲[1,2],赵长啸[3],姜 楠[1]

(1. 解放军理工大学野战工程学院,江苏 南京 210007;
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
3. 武汉军械士官学校,湖北 武汉 430075)

摘要: 为研究起爆不对称性对 EFP 战斗部飞行特性的影响,对不同偏心量下∅60 mm 弧锥结合罩 EFP 战斗部进行飞行弹道实验。实验结果表明:偏心起爆条件下,当相对偏心量小于 3.3% 时,EFP 在网靶穿孔接近圆形,弹丸飞行稳定;起爆相对偏心量达到 6.7% 时,弹丸飞行过程中摆动幅值增大,降低了对目标的打击精度和毁伤效果。利用 LS-DYNA 及 CFX 非线性动力学有限元程序对不同起爆偏心量下成型 EFP 的空气动力学特性进行数值模拟,描述了偏心起爆影响 EFP 成型对称性,改变弹丸在飞行过程中流场的分布特征,从而导致弹丸飞行过程中无规则运动的全过程。

关键词: 爆炸力学;非对称;空气动力;外弹道;偏心起爆;尾翼弹丸

中图分类号: O383;TJ410.33 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

随着近年来对新型反装甲灵巧弹药的研制,爆炸成形弹丸(explosively formed projectiles,EFP)战斗部受到越来越广泛的重视和研究。目前正在开发或生产的灵巧弹药多是基于 EFP 战斗部的末敏弹。这种 EFP 战斗部的终点弹道能力要求达到 1000 倍装药口径炸距以上仍可有效打击装甲目标的顶甲或侧甲。在实施远距离攻击时,为保证弹丸经过一个较长的空气弹道阶段后仍能以足够小的攻角准确毁伤目标,要求该类战斗部能够成型具有良好空气动力学特性的 EFP。由于 EFP 是作战实时起爆成型,其部件制造和装配过程中的不对称性以及偏心起爆的位置偏置都会对 EFP 成型造成影响,使实际成型的弹丸总是或多或少存在不对称性。这些不对称性将直接影响 EFP 外弹道飞行稳定性及着靶精度等:曹兵等[1]通过实验研究了偏心起爆对 EFP 成型的影响,得到了起爆偏心量与 EFP 头部横向剩余速度之间的关系;K. Jach 等[2]通过数值编码对药型罩施加偏心载荷,获得尾翼偏置的 EFP ;D. J. Brandeis 等[3]通过结构设计研究了各种不对称形状对爆炸成形弹丸空气动力性能的影响;C. Berner 等[4]研究了尾裙高度、数量及其非对称性对 EFP 空气动力特性及飞行性能的影响,并且用参数表示了在翻转运动缓慢时非对称性外形结构的的优点;P. Rouge 等[5]通过实验和数值计算研究了装药端面中心点起爆以及偏心起爆条件下爆轰产物以及成型弹丸内部压力、速度及变形分布特点。但是,对于由偏心起爆引起 EFP 外形不对称而对弹丸在飞行弹道(从 EFP 飞行到命中目标这段距离)运动规律及终点弹道散布水平的影响,尚未见有系统的研究。

本文中基于 60 mm 弧锥结合罩 EFP 装药,通过 EFP 飞行弹道实验研究不同偏心起爆方式下成型 EFP 外弹道运动规律特性及终点毁伤效应,利用数值模拟分析不同起爆偏心量下成型 EFP 的空气动力学特性,研究结果为 EFP 战斗部起爆参数设置提供有益参考。

1 实验设计

EFP 战斗部以自行优化设计的∅60 mm 变壁厚弧锥结合型紫铜罩战斗部为基础,药型罩口径为 56 mm,曲率半径为 46 mm,罩顶部壁厚为 3.5 mm。装药为圆柱形装药,装药高度为 60 mm,战斗部装

* **收稿日期**: 2013-10-29; **修回日期**: 2014-05-20
基金项目: 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ10-2M)
第一作者: 刘健峰(1988—),男,博士研究生,18260098162@163.com。

药结构如图 1 所示。

实验中采用相同装药结构的 EFP 战斗部:无偏心量时,采用装药端面中心点起爆方式,起爆点为图 2 所示起爆点 1;偏心起爆时,在距离装药端面中心点 2、4 mm 处分别设置偏心起爆点 2 和 3,起爆点分别为图 2 所示起爆点 2 和 3。采用偏心量 δ 与装药直径 d 的量纲一比值 K 表示偏心量相对于装药直径的大小,即 $K=\frac{\delta}{d}\times 100\%$,则 3 种偏心起爆方案的相对偏心量分别为 0、3.3%和 6.7%,图 2 即为 3 种不同相对起爆偏心量的设计方案示意图。



图 1 ∅60 mm EFP 战斗部实验照片图

Fig. 1 Experimental picture of ∅60 mm EFP warhead

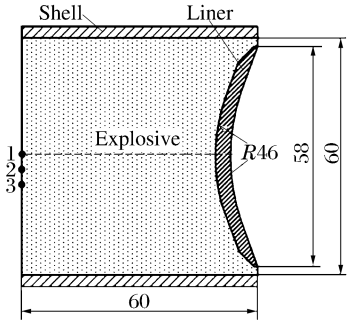

图 2 不同偏心量设计方案

Fig. 2 The design of different initiation eccentricity

图 3 所示为偏心起爆条件下 EFP 飞行弹道实验现场布置:EFP 战斗部水平设置,距离地面 1.5 m,沿 EFP 飞行弹道 15 m 处开始,按照 5 m 间隔共设置 15 块网靶,用来捕捉 EFP 飞行过程中弹形和飞行姿态变化。在离战斗部 15 m 处和 85 m 处分别设置 2 组铝箔靶测定 EFP 飞行中的速度及速度降。距战斗部中心 96 m 处设置 1 m×1 m×25 mm 的 45 钢方形靶,从而获得偏心起爆对 EFP 的立靶密集度以及侵彻威力的影响。实验之前将战斗部置于特制的木支架上,利用瞄准仪瞄准目标、水平测量仪调整靶板姿态,保证战斗部中心、网靶中心和钢靶中心处在同一水平面上。

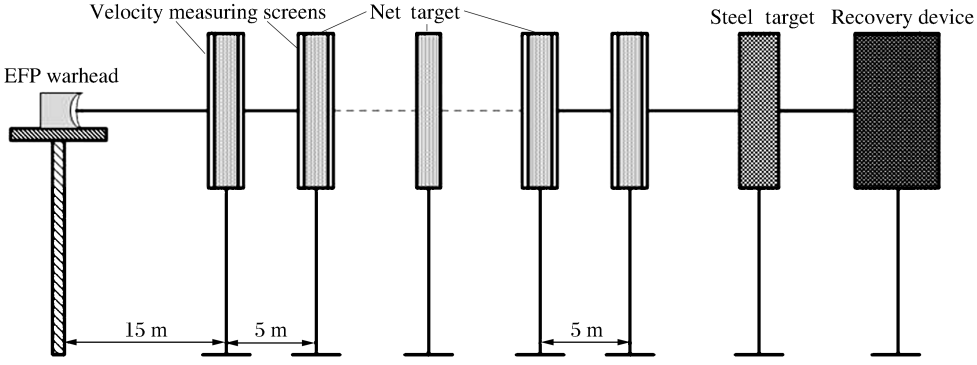

图 3 EFP 战斗部偏心起爆飞行弹道实验布置示意图

Fig. 3 Setup of EFP flight trajectory experiment

2 偏心起爆影响 EFP 飞行特性和弹道散布实验

EFP 飞行弹道实验中预先在网靶上竖直做一条直线,设置网靶时用铅垂线校正将其作为处理 EFP 飞行姿态的基准,每发弹丸连续穿过 15 个网靶。弹丸穿过网靶时,部分网靶破裂,未统计破裂靶纸信息。实验中无偏心时,回收有效靶纸 12 张;偏心量为 3.3%时回收到有效靶纸 12 张;起爆相对偏心量为 6.7%时回收到有效靶纸 13 张。图 4 所示为 3 发 EFP 在飞行弹道不同距离上部分网靶穿孔照片。

由图 4 可以看出网靶较好的记录了 EFP 飞行过程中姿态的变化情况。实验表明，无偏心量时，弹丸在网靶上的穿孔几乎接近圆形，说明弹丸运行稳定；当相对偏心量为 3.3%时，弹丸开始有小幅度波动变化，但是很快弹丸的运动就趋向于稳定，网靶穿孔逐渐接近圆形；当相对偏心量为 6.7%时，弹丸在网靶上留下的穿孔接近 EFP 纵向截面形状，扭曲变形的尾翼在网靶上得到了体现，说明成型 EFP 不具有对称性，弹丸在飞行过程中发生剧烈运动，外弹道运行稳定性较差。从 EFP 穿孔形状还可以发现 EFP 弹轴不仅与网靶法线之间的夹角 θ(攻角)改变，而且靶纸上弹孔长轴与铅垂线之间夹角 γ(摆动角)也不断发生变化。由此可以判断 EFP 在飞行过程中姿态变化很复杂，在攻角变化的同时还以弹道方向为轴发生摆动。

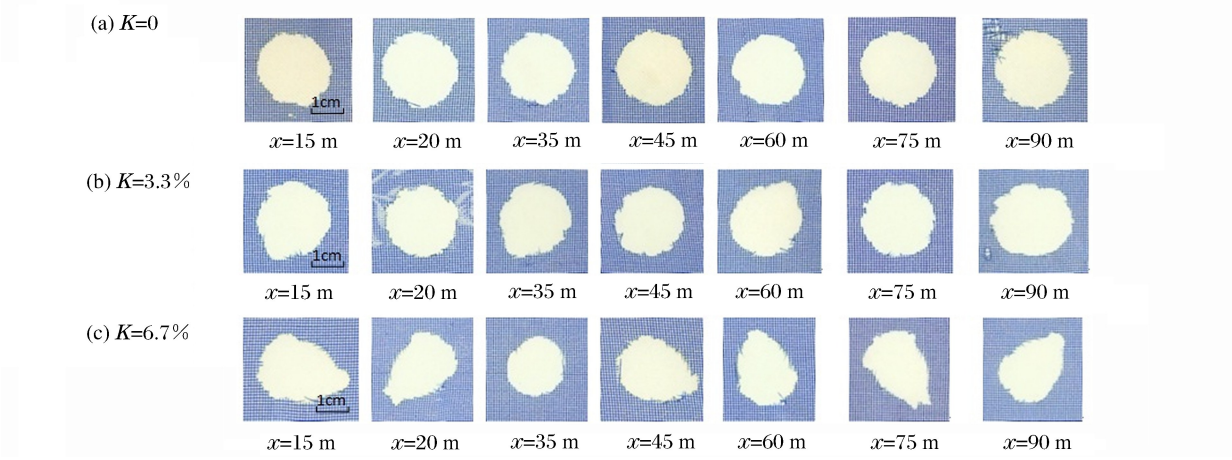

图 4　实验所得 EFP 在飞行弹道不同距离上网靶穿孔照片

Fig. 4　Experimental net target perforation photo of EFP at different distances on flight trajectory

EFP 在网靶上穿孔的形状由 EFP 的形状和着靶姿态决定，竖直布置的网靶可以捕捉 EFP 的外形和运动特点。通过网靶上的穿孔形状，尺寸及穿孔分布可以测定 EFP 飞行过程中运动学参数的变化情况[6]。图 5～6 所示为 EFP 飞行攻角和摆动角随飞行距离变化曲线图，图中设弹丸头部穿孔向上攻角为正，弹丸头部穿孔向下攻角为负，弹轴偏向铅垂线左侧摆动角为正，弹轴偏向铅垂线右侧摆动角为负。

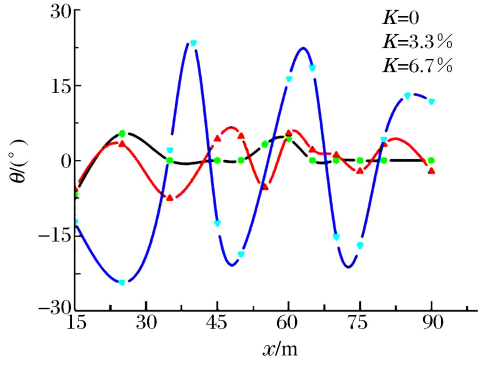

图 5　攻角随 EFP 飞行距离变化曲线

Fig. 5　Attack angle varied with different distance on flight trajectory

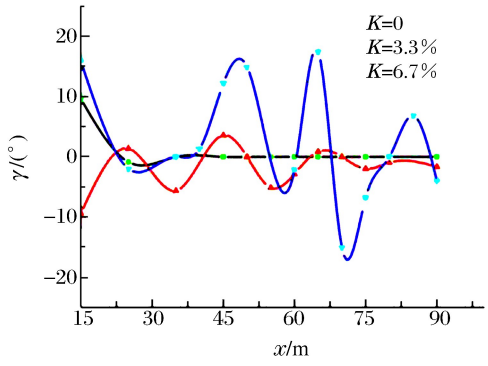

图 6　摆动角随 EFP 飞行距离变化曲线

Fig. 6　Swinging angle varied with different distance on flight trajectory

从图 5～6 中可以看出，EFP 飞行过程中必然伴随着攻角和摆动角的变化，EFP 在网靶上穿孔是弹丸在该网靶处攻角和摆动角的合成角度。完整 EFP 在飞行过程中攻角呈现非线性周期摆动，摆动幅度随弹丸运行距离增加有明显减小的趋势。当炸高大于 50 m 后，相对偏心量小于 3.3%时弹丸攻角基本保持在 10°以内，弹丸飞行稳定，即 EFP 进入攻角小幅波动的稳定飞行阶段；相对偏心量为 6.7%时，EFP 的攻角和摆动角摆动幅值较大而且摆动收敛速度较小，弹丸在空气中发生非周期性摆动。弹丸运行周期保持在 10^{-2} s 量级。

EFP 偏心起爆的弹道实验中，3 种偏心起爆成型的 EFP 均有效击穿距战斗部中心 96 m 处厚25 mm的方形 45 钢靶。图 7 所示为以瞄准靶心为原点建立坐标系，3 发 EFP 分别在钢靶上穿孔位置分布。从图 7 中可以看出 0 偏心量时，由于重力，风速等自然因素导致弹着点偏离靶心，EFP 飞行 96 m 时偏离靶心的绝对距离为 0.08 m。随着相对偏心量的增大，弹着点偏离靶心的位置逐渐增大，相对偏心量达到 6.7%时弹丸偏离靶心的绝对距离为 0.44 m，EFP 着靶精度明显降低。3 发弹丸击穿钢靶后在靶板上留下的穿孔都接近圆形。弹体穿过钢靶时，对靶板造成冲塞式破坏，从靶板坑壁可明显观察到紫铜材质 EFP 挤凿靶板留下的痕迹，在靶板背面还观察到由于层裂引起靶板背面破片崩落产生的环形区域。

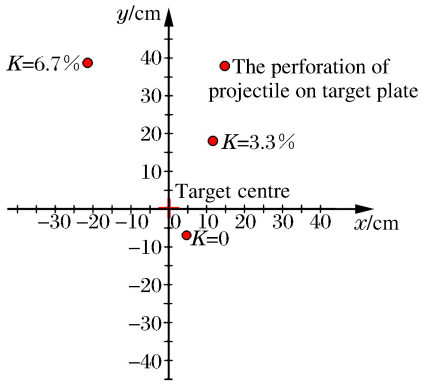

图 7 钢靶上弹丸穿孔分布图

Fig. 7 Perforation distributions of 45 steel target

3 偏心起爆对 EFP 成型及飞行特性的数值计算

为从理论上更深刻认识偏心起爆对 EFP 飞行特性及终点弹道散布的影响，采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对前述实验中偏心起爆条件下 EFP 成型过程进行数值模拟，并通过计算流体力学软件 CFX 对成型 EFP 的外流场特性进行数值模拟分析。

3.1 偏心起爆对 EFP 成型特性的影响

利用 Lagrange 网格对 EFP 战斗部计算模型进行划分。为提高分析效率，在文中取 1/2 物理模型进行数值计算，三维有限元计算模型如图 8 所示。

药型罩材料为紫铜，其本构方程选用 Johnson-Cook 模型，状态方程为 Mie-Grüneisen 方程；主装药为 8701 炸药，炸药本构关系的描述选用 HIGH-EXPLOSIVE BURN 形式，状态方程选用 JWL 状态方程；计算中添加 * CONTACT_SLIDING_ONLY _PENALTY 关键字定义炸药和金属罩之间接触算法，药型罩内部采用自动面面接触，从而可以有效地避免网格之间发生穿透、畸形。计算模型参数取自参考文献[7]。

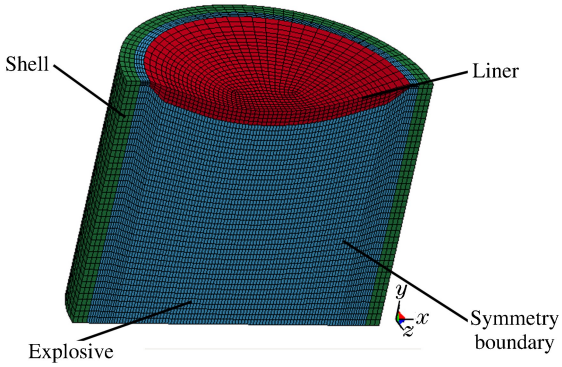

图 8 1/2 有限元计算模型

Fig. 8 The 1/2 structure of the finite-element model

图 9 所示为不同相对偏心量下 EFP 成型特点。0 偏心起爆时，当炸药起爆 200 μs 后，EFP 外形基本稳定，弹丸的飞行速度维持在 1 500 m/s 左右。偏心起爆时，爆轰波形相对于装药轴线产生偏斜，作用于药型罩后造成药型罩的不对称压垮。随着偏心量增大，弹丸头部和尾翼分别向相反的方向发生偏转：头部对称轴发生逆时针方向偏转，偏转角度对偏心量变化不敏感；尾翼对称轴发生顺时针方向偏转，偏心量对尾翼对称轴偏转的影响程度较大。相对偏心量控制在 1.7%以内时，弹丸外形基本不发生变化。相对偏心量超过 3.3%时，弹丸头部和尾翼的相对偏转角增大速率明显加快。

炸药起爆后，由于偏心量存在，弹丸获得一个垂直于弹轴的横向速度，运动方向沿偏心起爆点指向装药中心。随着偏心量增加，弹丸的横向速度效应越来越明显。图 10 所示为不同相对偏心量下弹丸横向速度的变化情况。当相对偏心量小于 3.3%时，弹丸横向速度随偏心量变化程度较小，当相对偏心量为3.3%时，弹丸获得横向速度仅为 6.1 m/s；相对偏心量超过 5%时弹丸的横向速度增加速率明显加快，当相对偏心量达到 6.7%时，弹丸的横向速度达到 17.3 m/s，经过百米量级中间弹道飞行后弹丸的射偏量增大，命中目标的准确性概率降低，这与实验中 3 种偏心起爆条件下 EFP 命中 96 m 处 45＃钢

靶的规律特点吻合较好。

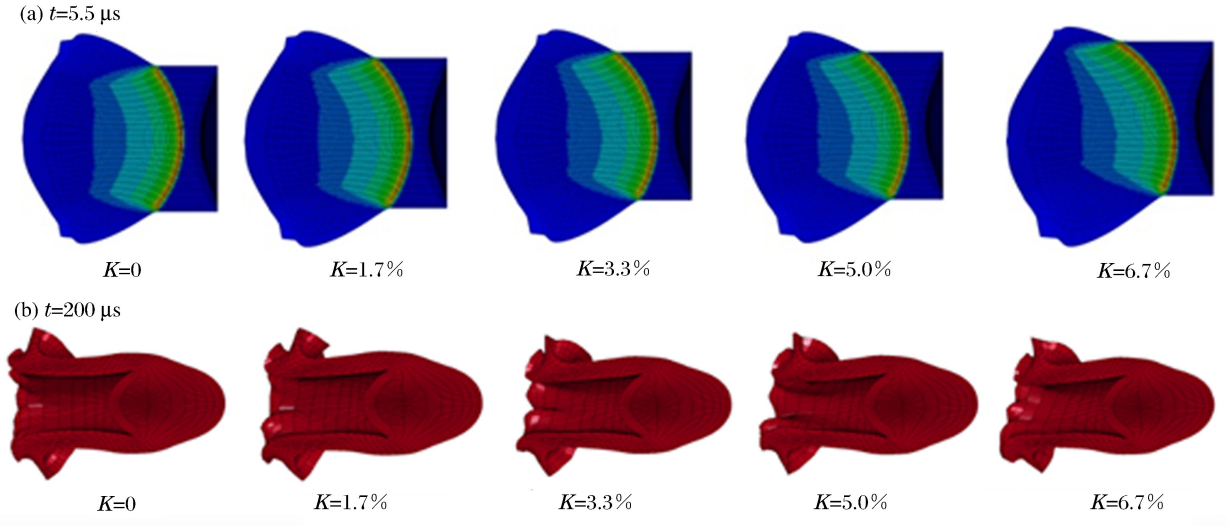

图 9　不同相对起爆偏心量影响 EFP 成型

Fig. 9　Influence of different relative initiation eccentricity on EFP forming

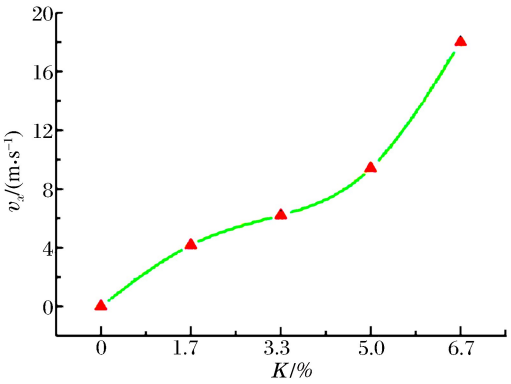

图 10　不同相对偏心量对弹丸横向速度效应的影响

Fig. 10　Influence of different relative initiation eccentricity on EFP lateral velocity

3.2　偏心起爆对 EFP 空气动力特性影响

为进一步研究偏心起爆条件下成型 EFP 的空气动力学特性，将在 LS-DYNA 中成型的 EFP 通过计算流体力学软件 CFX 对弹丸外流场特性进行数值模拟。数值计算基本方程为三维 Navier-Stokes 方程，湍流模型采用 SST 模型，采用“双时间步”的二阶隐式格式求解非定常过程。气动力计算条件为标准状态，即大气密度为 $\rho=1.25$ kg/m^3，大气压力为 101 325 Pa，大气温度 288.15 K，此时声速为 340.29 m/s。以 EFP 稳定成型的外形[8]及气动参数作为气动力学参数分析的初始条件。表 1 为气动力初始计算状态及基本参数，表中 S 为最大迎风面积，L 为 EFP 长度。

表 1　不同工况气动力初始计算状态及基本参数

Table 1　The initial calculation state and basic parameters of different aerodynamic conditions

K/%	v/(m·s^{-1})	S/cm^2	L/cm
0.0	1 500.08	3.02	4.31
3.3	1 496.89	3.53	4.14
5.0	1 487.00	6.37	3.95
6.7	1 475.08	9.15	3.73

图 11 所示为利用计算流体力学软件 CFX 得到不同起爆偏心量下 EFP 飞行弹道流场分布情况。由数值计算结果可以看出 EFP 在空气中超音速飞行，将会在弹丸头部产生弓形脱体正激波。此时弹丸头部区域压力相当高，造成弹体阻力增大，速度衰减加快。弧锥结合形药型罩经过爆炸成型后形成前折式尾翼对流经弹体表面气流起到进一步的阻碍作用，在尾翼前端形成了气体的滞止回流区。随着偏心量的增大，EFP 头部和尾翼相对扭曲程度增大，弹丸飞行过程中所受气动阻力增加，EFP 速度降迅速增大，弹丸的终点毁伤能力下降。

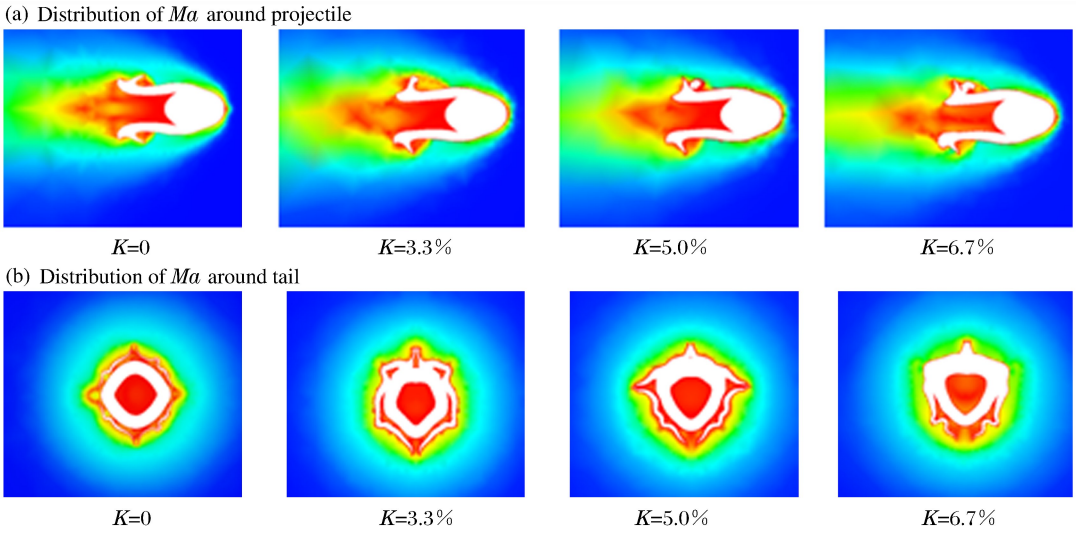

图 11 偏心起爆获得 EFP 的飞行弹道流场分布

Fig. 11 The distribution of EFP flow field on flight trajectory

从弹丸尾翼流场分布情况可以看出，随着偏心量增大，弹丸尾翼不对称性增加：尾翼附近，气体发生不对称的分离流动，周围流场分布特点由对称性逐渐发生畸变，弹体压心向弹体前部偏移；弹丸上下表面的压强差增大，产生法向力，在弹体上形成一垂直弹轴的力矩，使弹丸在一定攻角范围内做无规则的俯仰运动更加剧烈，增加了弹体本身的不稳定性，不利于弹体飞行。弹体尾部由于激波和回流区相互干扰以及尾翼结构的不对称性使弹尾流场分布不规则。当偏心量逐渐增大时，弹体尾翼流场分布逐渐由圆形向倒三角形变化，流场分布失去对称性，弹丸运动不稳定性增加。

尾翼弹丸在空气中运动的稳定性可以用弹丸抵抗外界干扰以保持自身飞行稳定的稳定储备量来衡量。为了定量的认识偏心起爆对 EFP 飞行稳定性的影响，引入稳定储备量 B 来表征不同相对偏心起爆量条件下，EFP 在中间弹道飞行阶段的稳定性。稳定储备量 B 是指弹丸阻力中心与质心位置的相对距离，即

$$B=\left(\frac{x_p}{l}-\frac{x_s}{l}\right)\times 100\%=(C_p-C_s)\times 100\% \tag{1}$$

式中：$C_p=2\left(\frac{F}{\rho S v^2}\right)$，其中 x_p、C_p 为弹丸阻力中心到弹丸头部的绝对距离和相对距离（C_p 又称弹丸压力中心系数）；x_s，C_s 为弹丸质心到弹丸头部的绝对距离和相对距离；l 为弹丸全长；F 为弹丸飞行时所受空气阻力；ρ 为空气密度；S 为最大迎风面积；v 为弹丸稳定成型后的飞行速度。其中 l、F、ρ、S、v 可以有数值计算直接获得，进而可以求得 C_p 和 B。

对于尾翼弹丸，要保证其能够在空气中良好的稳定飞行，其稳定储备量 B 必须满足：$B>15\%$[9]。

图 12 所示为不同偏心量条件下成型 EFP 的稳定储备量，从图中可以看出 0 偏心量的弹丸具有相当高的的稳定储备量，为 30.29%；当相对偏心量小于 5%时，弹丸的稳定储备量保持在 20%以上，弹丸飞行过程中所受的稳定力矩大于翻转力矩，即弹丸在飞行过程中抵抗外界干扰能力较强，能够稳定保持自身飞行稳定。当相对偏心量达到 6.7%时，弹丸稳定储量仅为 13.71%，弹丸飞行过程中的质心

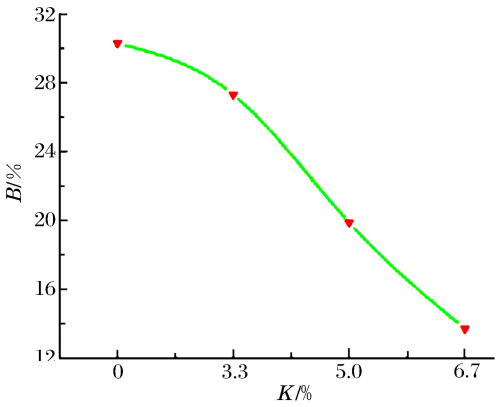

图 12 不同相对偏心量的弹丸的稳定储备量

Fig. 12 The stabilization storage of projectile with different relative initiation eccentricity

和压心距离较小，飞行过程中抵抗外界干扰能力迅速降低，弹丸飞行过程中易受外界条件干扰而发生大幅度摆动甚至翻转。EFP 在飞行过程中的攻角和摆动角摆动幅值较大而且摆动收敛速度较小，弹丸攻角长久偏离平衡位置，速度降增大。

综上所述，一方面偏心起爆使 EFP 获得垂直于弹轴的横向速度，影响弹道射偏量的大小，降低了对目标的打击精度；另一方面偏心起爆通过影响 EFP 对称成型，改变弹丸在飞行过程中流场对称性，使弹丸在飞行过程中的不稳定性增加，弹丸速度降增大，减弱了 EFP 对终点目标的毁伤效果。

4　结　论

本文中利用数值模拟分析不同起爆偏心量下成型 EFP 的空气动力学特性，得出如下结论：

(1)偏心起爆时，爆轰波对药型罩的不对称压垮导致 EFP 头部和尾翼对称轴线相对偏斜，弹丸获得垂直于弹轴的横向速度。随着偏心量的增大，EFP 横向速度效应明显，弹道射偏量增大，降低了对目标的打击精度。

(2)EFP 飞行弹道实验和数值计算结果表明：相对偏心量小于 3.3%时，EFP 在网靶穿孔接近圆形，说明弹丸在此偏心量内产生的不对称变形对 EFP 飞行稳定基本不发生影响；相对偏心量位于 3.3%～6.7%时，弹丸不对称变形程度增大，弹体周围流场分布逐渐失去对称性，当相对偏心量达到 6.7%时，EFP 在一路网靶上留下的穿孔接近弹丸纵向截面形状，说明弹丸在飞行过程中发生较大幅值的摆动，弹丸速度衰减增大，降低了 EFP 对目标的终点毁伤能力。因此，EFP 起爆的相对偏心量应当控制在 3.3%以内。

(3)利用偏心起爆条件下成型 EFP 的空气动力学数值计算结果和飞行弹道试验结果有效分析了偏心起爆对 EFP 飞行弹道稳定性的影响，为评价 EFP 飞行弹道的稳定性提供了一种简单有效的方法，研究结果为 EFP 战斗部起爆参数设置以及对目标的精确打击提供有益参考。

参考文献：

[1] 曹兵，高森烈. 偏心起爆对 EFP 成形形态影响的实验研究[J]. 弹道学报，1997，9(1)：27-30.
Cao Bing, Gao Sen-lie. The effect of eccentric initiation on explosive formed projectile shape[J]. Journal of Ballistics, 1997, 9(1): 27-30.

[2] Jach K, Mroczkowski M, Sarzynski A, et al. 3D free particle computer modeling of explosive formation of projectiles[C]// Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics. San Francisco, USA: International Ballistics Committee, 1996: 557-563.

[3] Brandeis D J. Effect of shape and asymmetry on the aerodynamic performance of explosively formed projectiles[C]// Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics. Stockholm, Sweden: International Ballistics Committee, 1992: 137-144.

[4] Berner C, Fleck V. Pleat and asymmetry effects on the aerodynamics of explosively formed penetrators[C]// Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, USA: International Ballistics Committee, 1999: 237-245.

[5] Rouge P, Weimann K. Consequences on EFP formation of an intentionally created default[C]// Proceedings of the 10th International Symposium on Ballistics, International Ballistics Committee. San Diego, USA, 1987: 277-288.

[6] 翁佩英，任国民，于骐. 弹药靶场试验[M]. 北京：兵器工业出版社，1995：32-42.

[7] 周翔. 爆炸成形弹丸战斗部的相关技术研究[D]. 南京：解放军理工大学，2006.

[8] 刘健峰，龙源，纪冲，等. 不同药型罩壁厚组合影响同轴 EFP 成型规律研究[J]. 工程爆破，2012，18(4)：9-13.
Liu Jian-feng, Long Yuan, Ji Chong, et al. Influence of different wall-thickness of arc-cone liner in collinear EFP forming performance[J]. Engineering Blasting, 2012, 18(4): 9-13.

[9] 魏惠之. 弹九设计理论[M]. 北京：国防工业出版社，1985：80-82.

[10] Bender D, Chhouk B. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 755-762.

[11] 赵长啸,龙源,余道强,等.切割式多爆炸成形弹丸成形及对钢靶的穿甲效应[J].爆炸与冲击,2013,33(2):186-193.
Zhao Chang-xiao, Long Yuan, Yu Dao-qiang, et al. Formation of incised multiple explosively-formed projectiles and their armor-piercing effect against steel targe[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,33(2):186-193.

[12] 纪冲,龙源,余道强,等.切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究[J].高压物理学报,2012,26(10):508-516.
Ji Chong, Long Yuan, Yu Dao-qiang, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of dual-mode warhead[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(10):508-516.

Effect of eccentric initiation on the flight characteristics and ballistic dispersion of EFP

Liu Jian-feng[1,2], Long Yuan[1,2], Ji Chong[1,2], Zhao Chang-xiao[3], Jiang Nan[1]
(1. *College of Filed Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *State key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *Wuhan Ordnance NCO Academy of PLA, Wuhan* 430075, *Hubei, China*)

Abstract: Flight trajectory experiments were conducted with ∅60 mm diameter EFP warhead in order to investigate the effect of eccentric initiation on the flight characteristics of EFP. The results indicate that the projectile flight stability with perforations nearly circular in the net target when eccentricity is less than 2 mm. The accuracy of strike is lower and terminal effects are less harmful because the projectile overturns during the flight, with the eccentric value of 4 mm. The forming of EFP and its flight characteristics with different eccentricity was numerically analyzed by using LS-DYNA and CFX. EFP is asymmetrical under the conditions of the eccentric initiation. It changes the symmetry of the flow field which leads to instability during flight. The research results provide a reference to detonation parameter of EFP warhead.

Key words: mechanics of explosion; asymmetrical; aerodynamic; exterior trajectory; eccentric initiation; projectile with stabilizing fins

(责任编辑 王易难)