

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-12

基于微元法的偏心起爆战斗部破片初速计算方法

刘恒言, 梁争峰, 阮喜军, 程淑杰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710006)

摘要: 目标方向的破片初速分布是评估定向战斗部威力的重要因素之一, 为此对偏心双线起爆下战斗部定向侧全域破片的初速计算方法以及相较于中心起爆的动能增益进行了研究。基于微元思想推导了定向侧周向不同位置处破片初速的计算方法, 开展了战斗部静爆试验, 并将实验结果与理论计算进行对比, 同时结合战斗部数值模拟结果对轴向速度修正函数进行了拟合, 依据现有研究对算法普适性进行了验证。结果表明: 所提出公式适用于偏心双线起爆战斗部, 理论计算与试验结果间的误差不超过 4.8%, 计算结果符合实际情况; 拟合所得修正函数可对轴向不同方位破片的飞散初速进行预估; 在战斗部参数变化时算法仍具有较好的普适性, 计算误差小于 7.11%; 与中心起爆相比, 采用夹角为 60° 的偏心双线起爆模式可使定向侧中心 -30°~30° 范围内破片总动能增加 34.9%。

关键词: 微元法; 定向战斗部; 偏心起爆; 破片初速; 动能增益

中图分类号: TJ410.1

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024023

0 引言

杀伤战斗部通过高能炸药爆炸驱动的高速破片对目标进行毁伤, 为控制破片质量与形状, 现多采用预制破片作为毁伤元, 并发展出偏心起爆、爆炸变形、随动式等多种类型的定向杀伤战斗部以提高对目标的毁伤能力^[1]。其中, 偏心起爆定向战斗部通过偏置战斗部起爆点的方式, 改变了战斗部装药的能量分配, 使得破片在杀伤战斗部周向呈非均匀分布, 相较于中心起爆战斗部, 其在远离起爆点一侧具有较高的破片动能增益, 通过多分位的引战控制系统即可实现对目标的定向高效毁伤, 是现阶段增强杀伤战斗部毁伤威力的一种重要手段^[2]。

对于偏心起爆定向战斗部而言, 定向侧破片速度的计算尤为重要。Li^[3]、陈放^[4]、Wang^[5]等对偏心一点起爆情况下的破片速度分布进行了分析, 采用能量分配点、等效装药半径或修正函数的方式对破片的飞散

速度进行计算。李元^[6]、沈慧铭^[7]基于 Gurney 公式提出了双线起爆下定向区破片初速计算方法, 可在已知装药和壳体参数时对定向区域破片速度进行计算, 理论计算与数值模拟结果较为接近。朱旭强^[8]将偏心两点转化为偏心一点起爆, 得到的公式可对起爆点对侧一定角度破片的初速进行计算。王力^[9]基于弹塑性方程对壳体膨胀速度进行推导, 得到了双线起爆下定向侧一定区域内的破片速度, 理论计算与仿真结果符合较好。

目前, 偏心起爆战斗部可采用单线或多线的起爆方式, 其中双线起爆模式下破片速度增益较高^[10-12]。而上述研究得到的破片初速计算方法在双线起爆模式下适用范围有限, 对于距离起爆对称平面较远处破片的相关计算有所欠缺, 或是对这些区域破片的速度计算结果与试验及仿真结果存在较大误差, 需进行人工修正。同时, 在对破片动能增益进行计算时未考虑到定向区周向与轴向不同方位破片的速度差异, 与工程实际存在偏差。为此, 本研究基于微元法及马赫爆轰理论, 提出了偏心双线起爆下定向侧周向不同方位破片初速的计算方法, 同时考虑端面稀疏波对轴向不同位置破片速度的影响, 依据数值模拟结果拟合得到了轴向破片速度修正函数, 最终得到定向侧全域破片的初速计算方法, 较为真实地反映了破片动能的增益情

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-02-23

网络出版日期: 2024-04-17

作者简介: 刘恒言(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事杀伤战斗部相关研究。e-mail: 1055698720@qq.com

通信联系人: 梁争峰(1972-), 男, 研究员, 主要从事兵器工业与军事技术领域相关研究。e-mail: 20421zf@sohu.com

引用本文: 刘恒言, 梁争峰, 阮喜军, 等. 基于微元法的偏心起爆战斗部破片初速计算方法[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2024023.

LIU Heng-yan, LIANG Zheng-feng, RUAN Xi-jun, et al. Initial Velocity Calculation of Eccentric Initiation Warhead Fragment based on Infinitesimal Method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2024023.

况,并通过战斗部静爆试验与现有研究结果对算法的准确性与普适性进行了验证。

1 定向侧破片初速计算方法的建立与验证

1.1 计算方法的建立

1.1.1 马赫爆轰波传播过程

对偏心双线起爆下战斗部爆轰波的传播过程进行分析,以起爆点所在一侧为战斗部起爆侧,对侧为战斗部定相侧,定向区域内破片速度变化的主要原因一是起爆点偏置导致的爆轰波传播距离增加,二是双线起爆时对称面处因碰撞产生的马赫爆轰导致局部压力上升。对于线起爆而言,若忽略端面稀疏波的影响,可认为战斗部各截面爆轰波传播状态相同,取任一横截面进行研究,可将其看作图1所示两点起爆的二维情况。

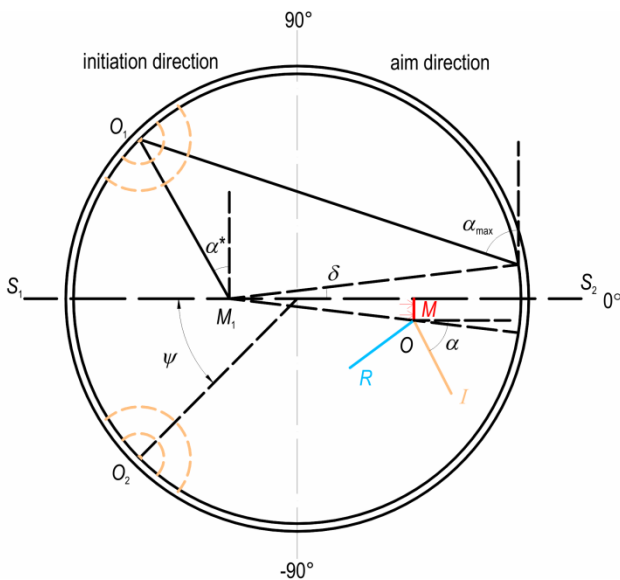


图1 偏心双线起爆战斗部截面爆轰波传播示意图

Fig.1 Shock wave propagation diagram of eccentric double-line detonating warhead section

战斗部主装药起爆后,自 O_1 、 O_2 两点产生不断向内传播的爆轰波阵面,其在到达起爆点对称平面 S_1S_2 处后发生碰撞,可分别看作是爆轰波与位于对称面处的刚性固壁间的碰撞^[13]。在碰撞后的一段时间内,爆轰波入射角度较小,此时产生正规反射,入射波 I 与反射波 R 交点 O 沿固壁随爆轰波传播不断向前运动,入射角 α 随之增加。当 α 到达某一临界角度 α^* 后,依据正规反射的条件无法得到反射波解析解,此时反射波后流团速度不再与 S_1S_2 平行,入射波与反射波交点 O 脱离固壁面,并在其与固壁间产生了强的间断面,即为

马赫爆轰波阵面 M ,爆轰入射波 I 、马赫爆轰波 M 与反射波 R 交汇于同一点,即三波点 O 。随着入射角度的继续增加,马赫爆轰波宽度增加,强度也随之变化,最终形成了一条弯曲的三波点迹线。

在求解马赫爆轰区域时考虑到工程实际,在一定程度上对马赫爆轰波的传播过程合理简化后再进行分析。依据激波极曲线法^[9]求得马赫爆轰临界入射角,结合起爆点夹角即可得到马赫爆轰波起点位置,将三波点迹线近似为与对称面夹角为 δ 的一条直线,依据流体动力学知识可对马赫反射各区域的物理量进行计算^[6]:

$$D_M = \frac{D_{CJ}}{\sin \alpha} \quad (1)$$

$$\frac{\rho_3}{\rho_H} = \frac{1}{\sin^2 \alpha} + \frac{\sqrt{1 - \lambda \sin^2 \alpha}}{\sin^2 \alpha} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_3} = \frac{k - \sqrt{1 - \lambda \sin^2 \alpha}}{k + 1} \quad (3)$$

式中 D_M 为马赫爆轰波爆速, $m \cdot s^{-1}$; D_{CJ} 为炸药CJ爆速, $m \cdot s^{-1}$; ρ_3 为马赫爆轰压力, GPa; ρ_H 为炸药CJ爆压, GPa; ρ_3 为马赫爆轰区密度, $kg \cdot m^{-3}$; ρ_0 为炸药初始密度 $kg \cdot m^{-3}$; α 为爆轰波入射角; λ 为过渡压缩系数,一般取1.1~1.2; k 为炸药绝热指数,计算时可近似取3。依据三波点理论^[14],马赫杆与介质运动方向间夹角可依据式(2)和式(3)结果进行计算,依据几何关系进一步得到马赫杆高度角 δ 的值:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{\sin(\alpha - \delta)}{D_{CJ}} \sqrt{\frac{\rho_3 - \rho_0}{\rho_0(1 - \rho_0/\rho_3)}} \right] \quad (4)$$

此时,爆轰波传播过程中因碰撞产生的马赫爆轰区域的相关参数及影响范围均已计算完毕,在此基础上可进一步推导定向侧的破片飞散初速。

1.1.2 定向侧破片初速计算方法

对于马赫爆轰波作用范围内的战斗部,在计算时采用微元思想,以马赫反射的起始点 M_1 为中心,取图2所示的马赫爆轰波加载范围内的扇形微元区域 A_1 为例进行分析。

在微元范围内,格尼公式成立的基本假设依旧满足,对应的战斗部局部装填比 β_1 为炸药微元质量与破片微元质量之比:

$$\beta_1 = \frac{0.5 \rho_e l_1^2 d \theta_1}{\rho_s h l_1 d \theta_1} = \frac{\rho_e R}{2 h \rho_s \sin \theta_1} \sin \left[\theta_1 + \arcsin \frac{\cos(\psi + \alpha^*) \sin \theta_1}{\cos \alpha^*} \right] \quad (5)$$

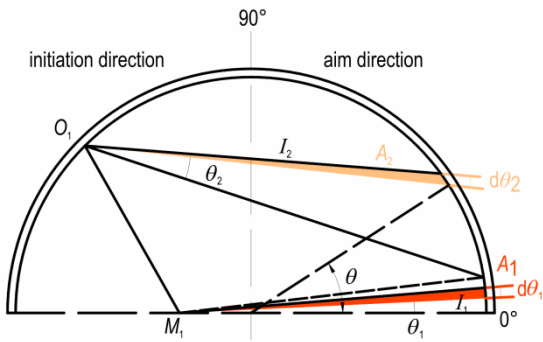


图2 战斗部微元示意图
Fig.2 Schematic diagram of warhead element

式中, ρ_e 为炸药密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; l_1 为马赫爆轰区所选微元半径, m ; R 为战斗部装药半径, m ; h 为破片径向尺寸, m ; ρ_s 为破片材料密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ψ 为起爆点和截面圆心连线与起爆对称平面间的夹角; θ_1 为图2中所选微元区域的方位角。考虑马赫爆轰波对炸药驱动破片能力的影响, 反映在格尼公式中即马赫爆轰加载区炸药格尼系数的变化, 对炸药格尼系数进行估算时, 认为其与爆速的变化直接相关^[15], 则马赫爆轰区炸药格尼系数 $\sqrt{2E_M}$ 为:

$$\sqrt{2E_M} = \bar{D}_M \sqrt{\frac{2}{\gamma^2 - 1} \left(\frac{\gamma}{\gamma + 1} \right)^{\gamma}} \quad (6)$$

其中炸药多方指数 $\gamma = \rho_e / (0.14 + 0.26\rho_e)$; \bar{D}_M 为马赫爆轰区平均爆速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。依据式(1)不难看出马赫爆轰波的传播速度随入射角度发生变化, 故先行计算马赫爆轰区入射角的最大值 α_{\max} , 确定入射角取值范围, 以计算马赫爆轰波爆速变化情况:

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi - \psi + \delta}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{\cos(\psi + \alpha^*) \sin \delta}{\cos \alpha^*} \quad (7)$$

$$v_{0c} = \begin{cases} \sqrt{2E_M} \eta \sqrt{\frac{1}{\frac{2h\rho_s \cos \alpha^*}{R\rho_e} [\cos^2(\psi + \alpha^*) + \cos^2 \alpha^* + 2\cos(\psi + \alpha^*) \cos \alpha^* \cos \theta]^{-0.5} + 0.5}} & 0^\circ \leq |\theta| \leq \theta_M \\ \sqrt{2E} \eta \sqrt{\frac{1}{\frac{h\rho_s}{R\rho_e} \cos^{-1}(0.5\psi + 0.5|\theta|) + 0.5}} & \theta_M < |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (11)$$

式中, 马赫爆轰区对应的周向临界方位角 $\theta_M = \delta + \arcsin[\cos(\psi + \alpha^*) \sin \delta / \cos \alpha^*]$, 其余各参数的含义及算法均已给出, 在战斗尺寸及材料基本参数已知的情况下, 即可对偏心双线起爆下战斗部定向侧 -90° 至 90° 范围内任一方位角对应的破片飞散初速进行计算。

进一步计算得到马赫爆速均值 \bar{D}_M :

$$\bar{D}_M = \frac{\int_{\alpha^*}^{\alpha_{\max}} D_M d\alpha}{\alpha_{\max} - \alpha^*} \quad (8)$$

将 \bar{D}_M 代入式(6)中得到 $\sqrt{2E_M}$, 采用格尼公式计算马赫爆轰加载区域周向不同角度的破片飞散初速 v_{0c} :

$$v_{0c} = \sqrt{2E_M} \eta \sqrt{\frac{1}{\beta_1^{-1} + 0.5}} \quad (9)$$

式中 η 为战斗部破片预制形式修正系数, 在计算壳体破碎形成的自然破片时取 1, 采用预制破片时一般取 $0.8 \sim 0.9$ ^[16]。

对于定向侧非马赫爆轰波影响区域, 爆轰波依旧以 CJ 爆速传播, 起爆点偏置导致的传播距离变化是改变战斗部破片初速的主要原因, 以图2中非马赫爆轰波影响区域的破片和装药微元 A_2 为例进行研究, 类似地, 传播距离的变化使局部装填比 β_2 变为:

$$\beta_2 = \frac{0.5\rho_e l_2^2 d\theta_2}{\rho_s h l_2 d\theta_2} = \frac{\rho_e R}{\rho_s h} \sin(\psi + \theta_2 + \alpha_{\max}) \quad (10)$$

式中, l_2 为非马赫爆轰区所选扇形微元半径, m ; θ_2 为图2所示微元方位角。将式(9)右侧马赫爆轰区炸药格尼系数 $\sqrt{2E_M}$ 替换为炸药格尼系数 $\sqrt{2E}$, 采用格尼公式即可对定向侧非马赫爆轰加载区域的破片速度进行计算。

考虑到破片沿战斗部圆周排布, 为便于实际计算, 将微元区域方位角 θ_1 和 θ_2 转化为战斗部周向方位角 θ , 得到不考虑端面稀疏波影响下的定向侧破片初速计算方法:

1.2 定向侧破片初速计算方法的试验验证

1.2.1 试验设计

为对理论分析所得计算方法的准确性进行验证, 设计图3所示的战斗部地面静爆试验, 战斗部主装药采用西安近代化学研究所生产的奥克托今(HMX)基炸药, 装药半径 110 mm, 高 160 mm, 破片为厚度 7 mm 的钨合金预制破片, 采用起爆线夹角 (2ψ) 为 60° 的六分位起

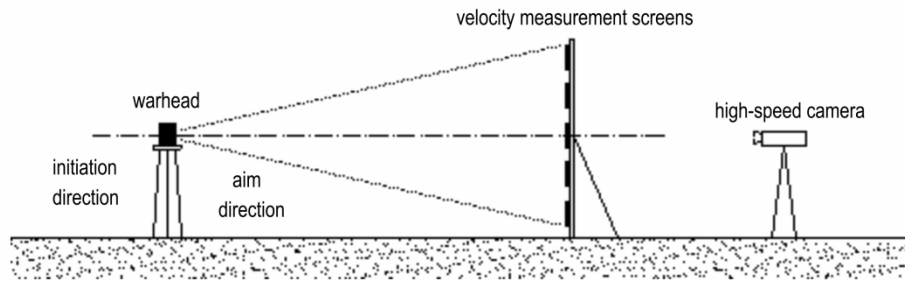


图3 试验布局示意图

Fig.3 Schematic diagram of test layout

爆系统, 邻位双线起爆模式, 放置约克公司的 Phantom V1212 系列高速相机记录装药起爆后的破片飞散过程。

考虑在试验中逐枚对定向侧不同方位破片的飞行轨迹进行准确追踪存在一定困难, 因此采用分区测速的方法, 将靶板设置在定向侧的同时, 沿周向和轴向划分数个区域, 通过放置断通靶得到破片到达各区域的时间, 结合破片速度衰减系数, 采用单靶距测速的方式^[17]得到一定方位角内的破片飞散初速, 并通过破片穿孔位置得到破片飞散角度, 回推得到战斗部未起爆时该区域破片对应的方位角, 最终得到定向侧周向和轴向各处破片的速度分布情况。

1.2.2 计算方法的试验验证

研究对采用偏心双线起爆模式的战斗部进行了地面静爆试验, 图4为试验所得不同时刻破片着靶的高速摄影结果。由图4可以看出, 定向侧中心区域破片最先着靶, 两侧破片依次到达, 破片飞散初速随周向方位角的增加而增加。将战斗部尺寸及材料参数代入式(11)中, 破片预制形式修正系数取0.85, 得到不同区域破片飞散初速的计算结果, 破片初速的试验与理论计算结果对比如表1所示, 与试验结果相比, 理论值略低, 这是由于在理论分析阶段划分马赫爆轰波影响区域与非马赫爆轰波影响区域时, 有部分装药对破片的驱动作用被忽略所导致的, 但总体上理论计算得到的破片飞散速度与实际情况符合良好, 最大误差不超过4.8%, 具有较高的计算精度, 推导结果可用于偏心双线起爆下战斗部定向侧不同周向方位角破片的初速预估。

同时, 高速摄影及测速结果(图4)表明, 战斗部周向方位角 θ 一定时, 轴向各破片速度分布也存在差异, 这是战斗部两端传入的端面稀疏波影响的结果^[18-19], 即使采用线起爆模式对这种情况有所改善, 但两端破片的飞散速度依旧低于中心破片, 因此得到破片在轴向上的速度分布情况对于偏心双线起爆定向战斗部同样十分重要。

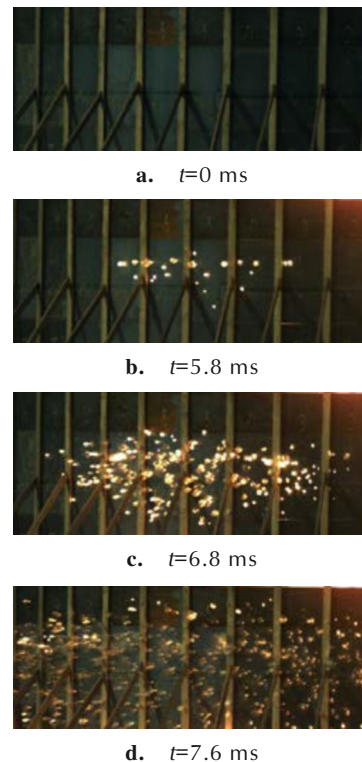


图4 定向侧不同时刻破片着靶情况

Fig.4 Process of directional side fragment hitting target at different times

表1 破片初速试验结果与理论计算对比

Table 1 Comparison of fragment velocity between experimental and calculated results

θ / $^{\circ}$	experimental results / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	calculated results / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	error / %
0	2630.2	2518.2	-4.26
15	2460.5	2342.5	-4.80
30	2385.6	2299.3	-3.62
45	2311.4	2240.3	-3.08
60	2243.4	2162.0	-3.63
75	2118.7	2059.5	-2.79
90	2007.2	1924.8	-4.11

Note: θ is circumferential azimuth angle of warhead.

2 破片速度分布的数值模拟

2.1 模型构建

在进行轴向不同方位角对破片速度的影响分析时,受轴向破片排布数量与飞散角制约,采用分区测速得到的试验数据有限,且靶板上破片分布杂乱,难以对各列破片进行区分,因此需要采用其他手段进一步得到详细的破片速度分布情况。数值模拟可以在一定程度上对试验进行复现,同时可具体追溯各枚破片的飞散情况,是现阶段战斗部相关领域的一种重要研究手段,故研究采用仿真软件建立模型对战斗部破片飞散过程进行数值模拟,研究偏心双线起爆下轴向方位角与破片飞散初速间的关系。

LS-DYNA 软件在战斗部数值模拟中已有广泛应用^[20-21],利用该软件建立剖面如图 5 所示的战斗部 3D 模型进行数值模拟,战斗部装药及破片尺寸与 1.2 节试验中保持一致,使用多物质流固耦合算法,装药及空气域划分 Euler 网格,战斗部其余部件采用 Lagrange 网格。

装药为 HMX 高能炸药,采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,密度为 $1890 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,爆速

$9110 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,爆压 42 GPa,利用 JWL 状态方程对其爆轰过程进行表述:

$$P(e, \bar{v}) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{v}} \right) e^{-R_1 \bar{v}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{v}} \right) e^{-R_2 \bar{v}} + \frac{\omega}{\bar{v}} E_v \quad (12)$$

式中, \bar{v} 为爆轰产物相对比容, E_v 为单位初始体积内能,其余未知量为圆筒试验标定系数;内衬和端盖为铝合金材质,采用 MAT_JOHNSON_COOK 本构模型和 GRUNEISEN 状态方程;钨合金预制破片采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 随动硬化模型。各部分材料具体参数^[20-22]在表 2 中给出。

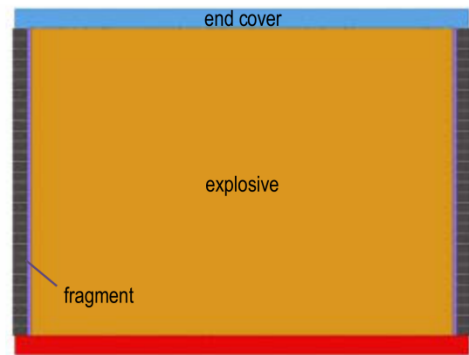


图 5 战斗部仿真模型
Fig. 5 Simulation model of warhead

表 2 战斗部模型相关参数^[20-22]

Table 2 Parameters of material model^[20-22]

parts	materials	LS-DYNA parameters									
explosive	HMX	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$D / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	p_{CJ} / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	e_0	
		1.89×10^3	9.11×10^3	42	778	7.07	4.26	1.1	0.36	10	
fragment	W	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E / GPa	PR	σ_y / GPa	E_t / GPa	β				
		1.8×10^4	357	0.303	2	7.9	1.0				
lining and end cover	Al alloy	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	G / GPa	A / GPa	B / GPa	N	C	M	T_m		
		2.77×10^3	27.6	0.265	0.426	0.34	0.015	1.0	775		

Note: ρ is density of material. D is detonation velocity. p_{CJ} is CJ detonation pressure. A, B, R_1, R_2, ω are calibration coefficient. e_0 is energy per unit volume. E is elasticity modulus. PR is Poisson ratio. σ_y is yield stress. E_t is tangent modulus. β is hardening parameter. G is shear modulus. A, B, N, C, M are model constants. T_m is Melting temperature.

2.2 模型验证

采用偏心双线起爆模式,起爆线夹角为 60° 时,以俯视视角观察战斗部起爆后的所有破片,其飞散过程如图 6 所示,可以看出在偏心双线起爆模式下,定向侧破片飞散速度明显高于起爆侧,高速破片集中在起爆点对称平面附近,随着破片周向方位角的增加,其飞散速度逐渐下降(图 6b~6c)。

图 7 为主装药起爆后战斗部截面的压力分布情况,观察可发现在起爆点对称面处出现了局部高压区,

与理论分析的情形一致。对战斗部中心行破片的飞散初速进行统计并与静爆试验结果进行对比,结果如表 3 所示,发现数值模拟所得结果与试验结果吻合较好,在周向方位角接近 90° 时误差略有增大,这可能是数值模拟中内衬在大变形下过早被删除导致该区域稀疏波传入所造成的结果。此外,破片速度随周向方位角的增加逐渐减小,变化趋势与试验结果一致。总体来看,建立的数值模拟模型较为可靠,可作为进一步研究的基础。

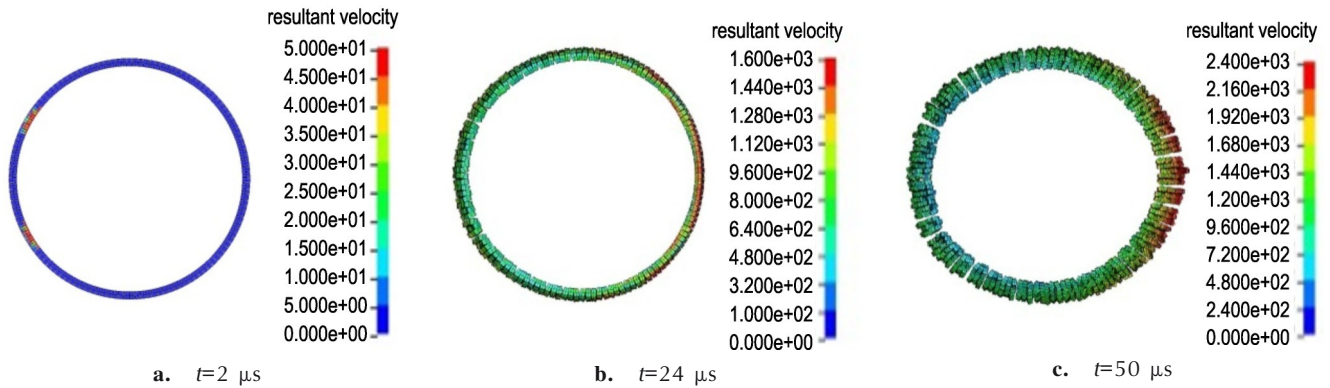


图6 不同时刻破片速度分布

Fig.6 Distribution of fragment velocity at different times

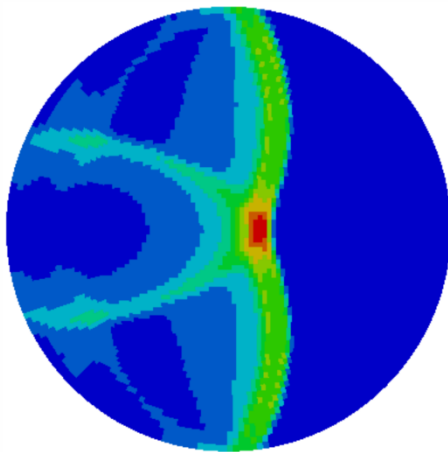


图7 爆轰波碰撞后的局部高压

Fig.7 Local high pressure after collision of detonation waves

表3 破片初速数值模拟与静爆试验结果对比

Table 3 Comparison of fragment velocity results obtained from numerical simulation and experiment

θ / ($^{\circ}$)	experimental results / $m \cdot s^{-1}$	simulation results / $m \cdot s^{-1}$	error / %
0	2630.2	2589.1	-1.56
15	2460.5	2310.5	-6.10
30	2385.6	2237.3	-6.22
45	2311.4	2190.0	-5.25
60	2243.4	2031.5	-9.45
75	2118.7	1934.3	-8.70
90	2007.2	1801.7	-10.24

3 破片初速算法完善、普适性验证及动能增益计算

3.1 轴向破片初速修正

在验证了模型的可靠性后,依据数值模拟结果对偏心双线起爆下战斗部轴向各方位角的破片速度计算

方法进行研究。对于轴向各破片而言,对应的装填比并未发生改变,速度变化仅与所在的轴向位置有关,因此当战斗部材料及直径沿轴向不发生变化时,其速度仅为轴向方位角的函数。稀疏波的传入,相当于在不改变装填比的情况下降低了受影响区域炸药爆轰驱动破片的能力,进而改变了破片速度,因此对于轴向各破片而言,需要对速度计算结果进行进一步修正^[23]:

$$v_0 = f(\varphi)v_{0c} \quad (13)$$

式中, v_{0c} 为不考虑端面稀疏波影响的破片初速, $m \cdot s^{-1}$,可通过式(11)求得;破片轴向方位角 φ 为破片质心(或壳体微元质心)和战斗部中心连线与战斗部柱体的中轴线间的夹角; $f(\varphi)$ 为关于破片轴向方位角 φ 的修正函数。

文献[24]基于格尼公式提出了一种端面中心点起爆情况下的轴向破片速度分布公式,具有较高的计算精度,对于本研究的偏心双线起爆下的战斗部而言,破片初速在战斗部两端面分布趋势相同,相较于文献[24]中的情况无需考虑起爆端与非起爆端破片速度的差异,从战斗部的试验和数值模拟得到的破片分布情况可以看出,当周向方位角 θ 发生变化时,轴向各破片的速度分布趋势也发生了变化,因此以文献[24]中提出的公式为基础,结合本研究对象,采用式(14)对偏心双线起爆下战斗部破片速度修正函数进行描述:

$$f(\varphi) = 1 - Ae^{-B(L/D - |\tan^{-1}\varphi|)} \quad (14)$$

式中, L 为战斗部高度, m ; D 为战斗部直径, m ;拟合系数 A 、 B 随周向方位角 θ 发生变化。当 φ 取 90° 时采用插值法得到修正函数的对应值。结合数值模拟得到的不同轴向方位各破片的初速统计结果对式(14)中的系数进行拟合,得到结果如图8所示。

图8中曲线为不同周向方位角下的破片初速计算

的拟合结果,散点为破片飞散初速的具体数据,各曲线对应的拟合系数在表4中给出。显然,拟合系数A、B与 θ 之间存在明显的函数关系,对不同战斗部而言, θ 取值范围总是相同的,因此在进行归一化后对A、B和 θ 间的关系进行分析,结果如图9所示。

从图9中可以得到,A、B分别与周向方位角呈多次函数关系:

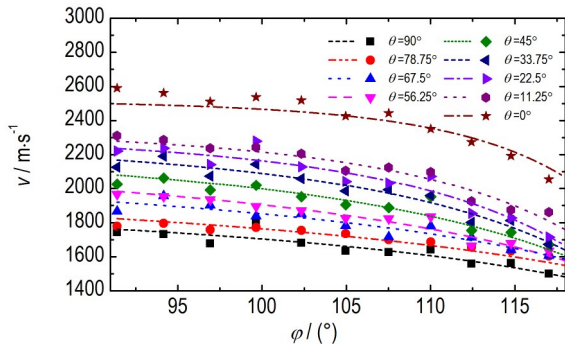


图8 不同轴向方位角处破片初速分布与拟合曲线

Fig.8 Distribution and fitting curves of initial velocity of fragments at different axial azimuth angles

表4 修正函数拟合结果

Table 4 Fitting results of modified function

$\theta / (^{\circ})$	A	B	R^2
0	0.5967	6.0975	0.93
11.25	0.5724	4.1545	0.97
22.5	0.6254	4.0088	0.96
33.75	0.5495	3.3608	0.97
45	0.4845	2.7201	0.95
56.25	0.4280	2.1886	0.97
67.5	0.3692	1.9700	0.94
78.75	0.3292	1.6699	0.93
90	0.3390	1.9634	0.92

Note: A, B are fitting coefficients of the modified function. R^2 is coefficient of determination.

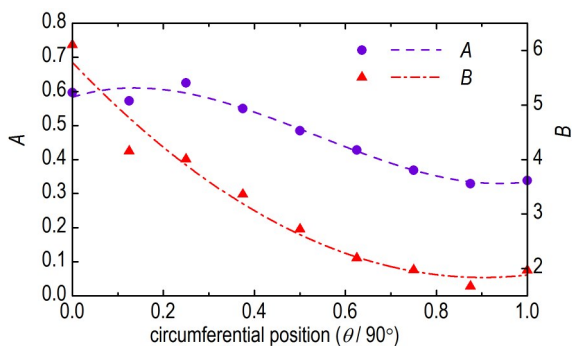


图9 拟合系数与破片周向方位关系与拟合曲线

Fig.9 Relationship and fitting curves between fitting coefficients and circumferential orientation of fragments

$$A = a_1 + a_2k + a_3k^2 + a_4k^3 \quad (15)$$

$$B = b_1 + b_2k + b_3k^2$$

式中, k 为归一化后的周向方位角,即 $k=\theta/90^{\circ}$; $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3$ 均为常数,通过拟合得到 $a_1=0.5834, a_2=0.4162, a_3=-1.7497, a_4=1.0855 (R^2=0.98), b_1=5.7814, b_2=-8.7405, b_3=4.8418 (R^2=0.97)$ 。将A、B的表达式代入式(14)中,得到修正函数的最终形式:

$$f(\varphi) = 1 - (0.5834 + 0.4162k - 1.7497k^2 + 1.0855k^3) e^{-(5.7814 - 8.7405k + 4.8418k^2)(L/D - |\tan^{-1}\varphi|)} \quad (16)$$

将式(16)代入式(13),即可得到偏心双线起爆下定向侧全域破片初速计算公式。为验证修正函数的准确性,另任取战斗部定向侧三列破片,依靠式(13)对所选破片的初速进行计算,得到结果如图10所示。

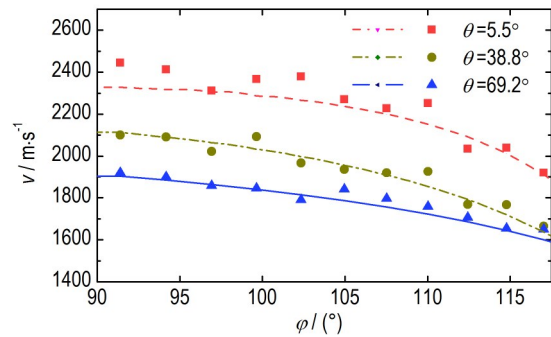


图10 修正函数准确性验证

Fig.10 Verification of the modified function

图10中曲线与散点分别代表理论计算值与实际值,当 $\theta=5.5^{\circ}, \varphi=91.4^{\circ}$ 时二者误差最大,为4.79%,该区域附近的理论计算结果略低,这是由于在理论分析中将爆轰波的三波点迹线简化为了一条直线,而实际上的马赫爆轰波影响区域边界为一条斜率随爆轰波入射角不断增加的曲线,这使得在对常规爆轰波影响范围内靠近 θ_m 的破片进行初速计算时得到的结果偏低,但误差仍处于很小的范围内,所提出公式在对偏心双线起爆战斗部进行初速计预估时具有足够的精度。

3.2 普适性验证

为验证所得公式的适用性,采用文献相关研究数据与本研究理论计算结果进行对比。文献[25]中战斗部装药半径23.6 mm,采用Comp-B炸药,爆压29.5 GPa,爆速7980 $m \cdot s^{-1}$,密度1.717 $g \cdot cm^{-3}$,壳体厚度6.08 mm,采用7.8 $g \cdot cm^{-3}$ 的45钢,起爆线夹角为 90° ,将该战斗部记为战斗部 W_1 。文献[26]所研究战斗部采用Octol炸药,装药直径126 mm,破片为8 mm的1020钢制立方体破片,因研究中并未给出具体材料参数,故采用其他文献中同种材料的数据作为计算

依据,其中Octol密度 $1.821\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速 $8480\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,爆压 34.2 GPa ^[27],1020钢密度为 $7.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[28],将起爆线夹角 60° 与 45° 两种情况的战斗部分别记为战斗部 W_2 与战斗部 W_3 。采用各战斗部相关参数及前文推导所得定向侧破片初速算法式(11)对对应战斗部的定向侧破片初速进行计算,并同文献中的数据进行对比,结果在表5中给出。

表5 不同战斗部破片初速理论计算与文献数据对比

Table 5 Comparison between theoretical calculation and literature data of fragment velocity of different warheads

warhead	θ / ($^\circ$)	literature data / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	theoretical ve- locity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	error / %
W_1	0	2038 ^[25]	1926	-5.50
	45	1704 ^[25]	1814	6.46
	90	1519 ^[25]	1411	-7.11
W_2	0	2715 ^[26]	2601	-4.20
	45	2271 ^[26]	2305	1.50
	90	2028 ^[26]	1992	-1.78
W_3	0	2688 ^[26]	2658	-1.12
	45	2306 ^[26]	2336	1.30
	90	2012 ^[26]	2063	2.53

从表5的理论计算与文献数据的对比结果可以看出,在战斗部参数与起爆线夹角改变的情况下,依据所得公式仍可对偏心双线起爆下战斗部定向侧破片初速进行较为精准的计算,文献数据与公式预测结果的良好吻合证明了公式推导时所做假设及变量选取的合理性,定向侧破片的初速计算方法具有较好的普适性。

3.3 破片动能增益

依据偏心双线起爆下战斗部破片初速的分布规律,其与采用中心起爆模式的相同参数战斗部相比,破片在轴向与周向均存在速度分布上的差异。在周向一定范围内,偏心双线起爆模式下破片初速高于中心起爆模式^[25],通过式(11)以及中心点起爆下的破片初速计算方法^[7]可对速度增益区域进行计算。同时对于轴向不同方位角的破片而言,线起爆模式提高了端面附近破片初速^[25],进而提升了整体破片的初速均值,因此在进行战斗部破片动能增益计算时需要同时考虑二者产生的影响,以得到更为准确的结果:

$$\Delta E_k = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E'_{kij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{kij}} - 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}'^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^2} - 100\% \quad (17)$$

式中, ΔE_k 为破片动能总增益; n 为所选破片的总列数;

m 为破片总行数; E'_{kij} 与 v'_{ij} 分别为偏心双线起爆下第 i 列、第 j 行破片的动能及初速, J 和 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; E_{kij} 与 v_{ij} 为中心起爆下对应的第 i 列、第 j 行破片动能与初速, J 和 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

为研究偏心双线起爆带来的动能增益,采用第2节中的战斗部数值模拟模型,模型尺寸及各部件材料参数均保持一致,仅改变起爆模式,对中心起爆下破片的飞散过程进行数值模拟,统计周向与轴向各区域破片的速度分布情况,与偏心双线起爆模式下的各区域速度分布进行对比,结果在表6中给出。由于统计破片数量较多,因此表6中仅给出部分方位角对应破片的飞散初速。

表6 偏心双线起爆和中心起爆下不同位置破片速度分布

Table 6 Distribution of fragment velocity at different positions for different detonation modes

θ / ($^\circ$)	φ / ($^\circ$)	fragment velocity of eccentric initiation / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	fragment velocity of central initiation / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	ΔE_k / %
0	90	2589.1	2136.2	21.2
	100	2536.5	1918.1	32.2
	110	2349.9	1738.7	35.2
15	90	2310.5	2142	7.9
	100	2241.4	1921.5	16.7
30	110	2090.7	1739.1	20.2
	90	2237.3	2133.5	4.9
	100	2193.6	1914.6	14.6
	110	2011.9	1735.3	15.9

Note: ΔE_k is total kinetic energy gain of fragment. φ is axial azimuth angle.

可以看出,受马赫爆轰以及爆轰波传播距离增加的影响,在轴向方位角 φ 相同时,起爆点对称平面附近($\theta=0^\circ$)破片获得的速度增益高于其他位置;而由于线起爆模式对端面稀疏波影响的改善,当周向方位角 θ 相同时,越靠近战斗部端面,破片获得的速度增益越高。依据式(17)及破片速度分布统计结果计算破片的动能增益,当起爆线夹角为 60° 时,偏心双线起爆模式下战斗部周向方位角 -30° 至 30° 范围破片的飞散初速均高于中心起爆模式,该范围内破片动能总增益为34.9%。

4 结论

(1)研究利用激波极曲线方法得到了偏心双线起爆模式下装药内部马赫爆轰波的影响范围,基于微元法推导了战斗部定向侧不同周向方位角下破片初速的

计算方法,所得公式计算结果与实测值误差在4.8%以内,计算结果较为准确,推导公式可用于偏心双线起爆下战斗部定向侧不同周向方位角破片的初速预估。

(2)研究建立了战斗部三维模型,对偏心双线起爆下破片飞散过程进行了数值模拟,并验证了模型有效性,依据数值模拟结果,拟合得到了破片轴向速度修正函数,结合速度修正函数,最终得到了偏心双线起爆下定向侧全域破片初速的计算公式,并利用已有研究结果对所提公式的普适性进行了验证,其在战斗部参数与起爆线夹角改变后依旧适用,与现有研究所得数据相比,计算误差小于7.11%。

(3)对采用偏心双线起爆模式的战斗部而言,定向侧一定范围内周向与轴向不同方位角处破片初速相较于中心起爆模式均有所提升,定向区中心60°范围内破片的动能总增益可达34.9%。

参考文献:

- [1] 崔瀚,张国新.定向战斗部研究现状及展望[J].飞航导弹,2019(3):84-89.
CUI Han, ZHANG Guo-xin. Research status and prospect of directional warhead [J]. *Aerospace Technology*, 2019 (3): 84-89.
- [2] 李鑫,王伟力,梁争峰.不同起爆方式下战斗部破片飞散特性[J].火箭与制导学报,2022,42(4):35-42.
LI Xin, WANG Wei-li, LIANG Zheng-feng. Dispersion characteristics of fragments of the warhead under different initiation modes[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2022, 42(4): 35-42.
- [3] LI Y, LI Y H, WEN Y Q. Radial distribution of fragment velocity of asymmetrically initiated warhead[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 99: 39-47.
- [4] 陈放,马晓青,段祝平.偏心起爆定向战斗部破片初速分布规律研究[C]//中国力学学会学术大会2005论文摘要集,中国力学学会,2005,1.
CHEN Fang, MA Xiao-qing, DUAN Zhu-ping. Study on the distribution law of fragment muzzle velocity of eccentric priming directional warhead[C]//Abstracts of the 2005 Academic Conference of the Chinese Society of Mechanics, Chinese Society of Mechanics, 2005, 1.
- [5] WANG M, LU F, LI X, et al. A formula for calculating the velocities of fragments from velocity enhanced warhead[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(2): 232-237.
- [6] 李元.偏心起爆定向战斗部若干理论与技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
LI Yuan. Study on theories and technologies of asymmetrically initiated warhead[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [7] 沈慧铭.多点起爆方式作用机理及其在战斗部中的应用研究[D].南京:南京理工大学,2018.
SHEN Hui-ming. Research on action mechanism of multi-point initiation way and its application in warhead [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [8] 朱绪强,黄川,李艳春,等.偏心起爆定向战斗部威力研究[J].含能材料,2014,22(1):89-93.
ZHU Xu-qiang, HUANG Chuan, LI Yan-chun, et al. Lethality investigation of azimuthal warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 89-93.
- [9] 王力,韩峰,陈放,等.偏心对称起爆战斗部破片初速的增益[J].爆炸与冲击,2016,36(1):69-74.
WANG Li, HAN Feng, CHEN Fang, et al. Fragment' velocity of eccentric warhead with double symmetric detonators[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 69-74.
- [10] 邓海,全嘉林,梁争峰.偏心起爆对战斗部装药能量分配增益的影响[J].爆炸与冲击,2022,42(5):3-15.
DENG Hai, QUAN Jia-lin, LIANG Zheng-feng. Influence of eccentric initiation on energy distribution gain of a warhead charge[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 3-15.
- [11] 黄静,孔凡勋,袁晋,等.多点偏心起爆对破片速度增益的影响[J].现代防御技术,2011,39(6):37-42.
HUANG Jing, KONG Fan-xun, YUAN Jin, et al. Influence of multi-spots off-axis initiation on fragment velocity gain[J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(6): 37-42.
- [12] WANG L, HAN F, CHEN F. Fragment velocity distribution of velocity enhanced warhead under double symmetric initiations [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41 (4): 672-681.
- [13] 缪玉松,李晓杰,王小红,等.爆轰波碰撞的聚能效应[J].爆炸与冲击,2017,37(3):544-548.
MIAO Yu-song, LI Xiao-jie, WANG Xiaohong, et al. Munroe effect of detonation wave collision [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 544-548.
- [14] 王继海.二维非定常流和激波[M].北京:科学出版社,1994:82-87.
WANG Ji-hai. Two-dimensional unsteady flow and shock wave [M]. Beijing: Science Press, 1994: 82-87.
- [15] 沈飞,王辉,袁建飞,等.炸药格尼系数的一种简易估算法[J].火炸药学报,2013,36(6):36-38.
SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei, et al. A simple estimation method for Gurney coefficient of explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(6): 36-38.
- [16] 吴艳青,刘彦,黄风雷,等.爆炸力学理论及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2021:270.
WU Yan-qing, LIU Yan, HUANG Feng-lei, et al. Theory and application of explosion mechanics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021: 270.
- [17] 王林,宫小泽,李晓辉,等.基于破片特性的破片初速计算方法[C]//2012航空试验测试技术学术交流会论文集.测控技术编辑部,2012,3.
WANG Lin, GONG Xiao-ze, LI Xiao-hui, et al. Calculation method of the fragment velocity on the fragment characteristics [C]//Proceedings of the 2012 Aeronautical Test and Testing Technology Academic Exchange Conference. Measurement & Control Technology Editorial Department, 2012, 3.
- [18] GUO Z W, HUANG G Y, ZHU W, et al. Mechanism and suppression of the effect of axial rarefaction waves on the eccentric initiation effect[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 124: 37-47.
- [19] GAO Y G, FENG S S, YAN X M, et al. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing with air parts at two ends [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 140: 44-57.

- [20] 刘伟, 梁争峰, 阮喜军, 等. 波形控制器对杀伤战斗部破片飞散特性影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(2): 023203.
LIU Wei, LIANG Zheng-feng, RUAN Xi-jun, et al. Research on the influence of wave shape controller on fragment scattering characteristics of fragmentation warhead[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(2): 023203.
- [21] 王庆书. 预制破片爆轰机理与数值模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021: 13-16.
WANG Qing-shu. Detonation mechanism and numerical simulation of prefabricated fragments[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2021: 13-16.
- [22] 戎鑫. 水下成型装药战斗部毁伤威力效应研究[D]. 太原: 中北大学, 2022: 28-30.
RONG Xin. Damage power effect of underwater shaped charge warhead [D]. Taiyuan: North University of China, 2022: 28-30.
- [23] 高月光, 冯顺山, 刘云辉, 等. 不同端盖厚度的圆柱形装药壳体破片初速分布[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1527-1536.
GAO Yue-guang, FENG Shun-sha, LIU Yun-hui, et al. Initial velocity distribution of fragments from cylindrical charge shells with different thick and caps [J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2022, 43(7): 1527-1536.
- [24] HUANG G Y, LI W, FENG S S. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 20-27.
- [25] 沈慧铭, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 圆柱壳体装药偏心多点起爆下破片速度的分布[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1039-1045.
SHEN Hui-ming, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Velocity distribution of fragments resulted by explosion of a cylindrical shell charge on multi-spots eccentric initiation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1039-1045.
- [26] 李元, 李艳华, 刘琛, 等. 爆轰波定向战斗部起爆参数研究(英文)[J]. 含能材料, 2016, 24(9): 915-921.
LI Yuan, LI Yan-hua, LIU Chen, et al. The initiation parameter of detonation wave aiming warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 915-921.
- [27] SRIDHAR P. Hydro code and microstructural analysis of explosively formed penetrators [D]. EL Paso, USA: University of Texas, 2000.
- [28] SACHIN S G, RAVINDRA K S. A numerical study on effect of strain rate and temperature in the Taylor rod impact problem [J]. *International Journal of Structural Changes in Solids*, 2012, 4: 1-11.

Initial Velocity Calculation of Eccentric Initiation Warhead Fragment based on Infinitesimal Method

LIU Heng-yan, LIANG Zheng-feng, RUAN Xi-jun, CHENG Shu-jie

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710006, China)

Abstract: The distribution of initial fragment velocity in the aim direction is one of the important factors for evaluating the power of the directional warhead. Therefore, the calculation method of the initial fragment velocity in the whole domain on the directional side of the warhead under the eccentric double-line initiation and the kinetic energy gain compared with the central initiation are studied. Based on the infinitesimal theory, the calculation method of the initial fragment velocity in different circumferential position on the directional side was derived, and the static explosive experiment of the warhead was carried out to compare with the theoretical result. Combined with the numerical result of the warhead, the axial velocity correction function was fitted, and the universality of the algorithm was verified according to the existing research. It is shown that the proposed formula is suitable for the warhead with eccentric double-line initiation, and the error between theoretical calculation and test results is within 4.80%, calculation result is consistent with actual situation. The fitting correction function can predict the initial velocity of the fragments in different axial direction. The algorithm still has good universality when the warhead parameters change and the calculation error is less than 7.11%. Compared with central initiation, the eccentric double-line initiation mode with an angle of 60° can increase the total kinetic energy of the fragments in the range of $-30^\circ-30^\circ$ from the center of the directional side by 34.9%.

Key words: infinitesimal method; directional warhead; eccentric initiation; initial fragment velocity; kinetic energy gain

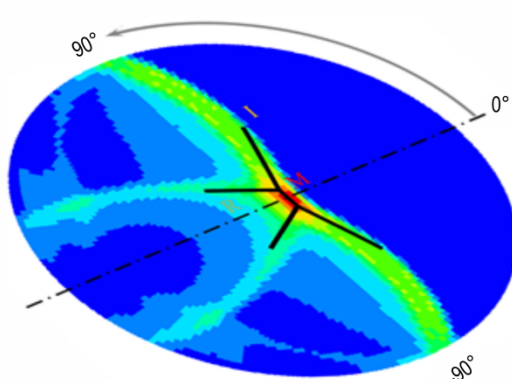
CLC number: TJ410.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024023

(责编: 卢学敏)

图文摘要:



Eccentric double-line initiation is currently considered as an important method for enhancing the warhead's damage power to the target. In this study, the calculation method for determining the initial velocity of fragments within a 180° directional range was derived using the infinitesimal method. The resulting formula demonstrated high accuracy, and a correction function was obtained through numerical simulation to account for velocity differences of axial fragments. In addition, this study investigated the gain of kinetic energy for fragments on the directional side.