DOI: 10.11883/bzycj-2017-0271

破片撞击起爆柱面带壳装药的临界速度修正判据*

王 昕,蒋建伟,王树有,门建兵
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 为获得适用于柱面带壳装药的冲击起爆修正判据,以 Picatinny 工程判据为基础加入修正项进行修正。采用 AUTODYN-3D 软件对破片撞击柱面带钢壳的 B 炸药进行数值计算,获得了破片入射角、装药曲率半径对炸药临界起爆速度的影响规律;通过拟合得到修正项表达式,建立了考虑破片入射角、柱壳装药形状函数的炸药起爆临界速度修正判据。判据计算值与实验数据和数值计算值吻合较好,该判据能较好的预测柱形带壳装药的冲击起爆条件。

关键词: 临界速度;冲击起爆;柱壳装药;修正判据
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

采用高速破片对来袭弹药进行可靠引爆是有效拦截的重要手段。其问题实质则是破片对带壳装药的冲击起爆问题。学者们针对这一问题已进行了广泛的研究,大多以破片冲击平面带壳装药的简化模型为基础开展分析,包括不同材质、形状破片[1-3]对不同厚度壳体、炸药冲击起爆的影响规律,以及建立的诸多半经验的起爆判据,如著名的 Held 经验判据[4]、Jacobs-Roslund 经验准则[5]、Picatinny 冲击引爆解析计算式[6]及非均相炸药起爆判据[7]等。也有学者对经典判据的适用条件进行补充修正,包括张先锋等[8]依据 Held[9]起爆裸装药的射弹临界速度计算模型,得到射弹起爆带壳装药判据[9];方青等[10]以 Jacobs-Roslund 准则为基础,将该准则向斜碰撞上扩展;陈卫东等[11]则推导了不同材质破片冲击起爆屏蔽装药的理论判据等。这些判据能较好预测平面带壳装药的冲击起爆。而实际应用中导弹战斗部多为圆柱形,杜茂华等[12]提到战斗部壳体曲率会影响毁伤元对带壳装药的冲击起爆。已有的数值模拟初步结果也表明,柱面带壳装药与平面带壳装药的冲击起爆特性存在差异[13]。基于平面带壳装药模型的判据已无法准确描述破片对实际弹药的冲击起爆,因此研究适用于柱面带壳装药的临界起爆速度判据非常必要。

本文中采用 AUTODYN-3D 数值计算软件,对球形破片以不同入射角起爆柱面带壳装药(简称柱壳装药)问题进行数值计算。在对数值模拟数据分析的基础上,通过建立入射角、柱壳装药形状系数的修正因子,得到基于 Picatinny 工程判据的柱壳装药临界起爆速度修正判据,并与已有的实验数据和数值模拟结果进行对比,验证该判据的普适性。

1 柱壳装药冲击起爆控制参量分析

现役弹药形状多为圆柱形,将破片对来袭弹药战斗部的相互作用简化为破片对柱壳装药的冲击起爆。图 1 所示为破片撞击柱壳装药的物理模型图,其中柱壳装药壳体厚度为 h,装药曲率半径为 r;破片着速为 v,入射角为 θ。

破片对柱壳装药的冲击起爆与破片、装药壳体、炸药以及两者交汇条件等因素相关,主要影响参量如下:

(1)破片:直径 d,长度 l,密度 ρ_p,弹性常数 E_p、γ_p,屈服极限 Y_p,形状系数 N_1;

(2)壳体:厚度 h,密度 ρ_t,弹性常数 E_t、γ_t,屈服极限 Y_t,形状系数 N_2;

* 收稿日期: 2017-08-09; 修回日期: 2017-10-18
第一作者: 王 昕(1990—),女,博士研究生; 通信作者: 蒋建伟,bitjjw@bit.edu.cn。

(3)炸药:炸药密度 ρ_e,单位质量炸药释放的化学能 E_e,膨胀系数 γ_e;

(4)弹靶相互作用条件:破片入射角 θ,攻角 β。

因此,带壳装药的临界起爆速度 v_{cr} 可写成以下函数表达式:

$$v_{cr}=f(d,l,\rho_p,E_p,\gamma_p,Y_p,N_1;h,\rho_t,E_t,\gamma_t,Y_t,N_2;\rho_e,E_e,\gamma_e;\theta,\beta) \tag{1}$$

选取 h、ρ_e、E_e 为基本量,根据量纲分析 π 定理,对上式进行无量纲化,得到:

$$\frac{v_{cr}}{\sqrt{E_e/\rho_e}}=f\left(\frac{d}{h},\frac{l}{h},\frac{\rho_p}{\rho_e},\frac{E_p}{E_e},\gamma_p,\frac{Y_p}{E_e},N_1;\frac{\rho_t}{\rho_e},\frac{E_t}{E_e},\gamma_t,\frac{Y_t}{E_e},N_2;\gamma_e;\theta,\beta\right) \tag{2}$$

在破片和柱壳装药材料不变的情况下,上式可简化为:

$$\frac{v_{cr}}{\sqrt{E_e/\rho_e}}=f\left(\frac{d}{h},\frac{l}{h},N_1,N_2,\theta,\beta\right) \tag{3}$$

因本文中所研究的破片质量较小,忽略破片尺寸变化引起的冲击起爆阈值的差异,并假定破片与柱壳装药交汇时攻角 $\beta=0°$,则临界起爆速度值只与破片入射角 θ 和柱壳装药形状系数 N_2 这 2 个无量纲函数相关。

无量纲形状系数 N_2 表征柱壳装药的形状对冲击起爆阈值的影响,可用壳体厚度 h 和曲率半径 r 组合表示:

$$N_2=\frac{h}{r} \tag{4}$$

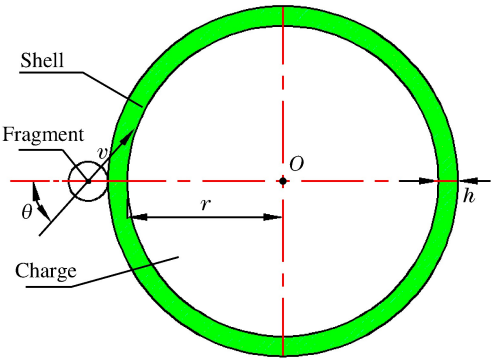


图 1　破片对柱壳装药作用剖面

Fig. 1　Tungsten fragment impact cylindrical shell charge at collision point

上述分析表明,在壳体厚度保持不变的情况下,对柱壳装药的冲击起爆产生影响的破片入射角 θ 和装药曲率半径 r 为相互独立的影响参量。下文中基于此开展修正判据的建立。

2　判据建立

Picatinny 工程判据基于屏蔽炸药的敏感系数 K_f、屏蔽板厚度 h、破片质量 m 这 3 个参数建立破片临界起爆速度计算式:

$$v_0=\left[\frac{K_f\exp(5.37h/m^{1/3})}{m^{2/3}(1+3.3h/m^{1/3})}\right]^{1/2} \tag{5}$$

该式能够较好预测破片垂直撞击平面带壳装药的起爆阈值。本文研究在该工程判据基础上添加入射角和基于曲率半径的柱壳装药形状系数修正项,以期预测破片起爆柱壳装药的临界速度。

在应用中提出如下假设:

(1)Picatinny 判据适用于小质量规则破片引发的炸药冲击起爆[14],不考虑破片形状变化引起的炸药冲击起爆差异;

(2)壳体为钢壳,暂不考虑柱壳装药壳体材质变化引起的炸药冲击起爆差异;

(3)破片运动速度与装药轴线垂直,仅考虑撞击位置的变化引起的入射角的改变;

(4)忽略破片与柱壳装药作用时,装药绕轴心转动引起的临界起爆速度误差。

基于上述假设建立判据修正项,记 v_0 为破片以入射角 $\theta=0°$ 起爆平面带壳装药($r=\infty$)时的临界速度;定义 $v(N_2,\theta)$ 为破片以入射角 $\theta\neq0°$ 起爆同等壳体厚度、装药曲率半径 $r\neq\infty$ 的柱壳装药临界速度。

定义 δ 表示破片起爆炸药的临界速度增量,称为修正因子,即:

$$\delta=\frac{v(N_2,\theta)-v_0}{v_0} \tag{6}$$

变换式(6)得:

$$v(N_2,\theta)=(1+\delta)v_0 \tag{7}$$

式中：v_0采用 Picatinny 工程判据公式计算，$v(N_2,\theta)$则由数值计算获得。

采用入射角 θ 和柱壳装药形状系数 N_2来反映破片与柱壳装药交汇条件和柱壳装药结构对临界起爆速度的影响，即 $\delta=f(\theta,N_2)$，因 θ、N_2相互独立，则 δ 可表示为：

$$\delta=f(\theta)f(N_2) \tag{8}$$

即

$$\delta=f(\theta)f(h/r) \tag{9}$$

式中：$f(\theta)$为特定装药曲率半径 r^* 条件下，不同入射角 θ 时的 δ 值，即：

$$f(\theta)=\delta(r^*,\theta) \tag{10}$$

保持壳体厚度不变，$f(h/r)$即为特定碰撞角度 θ^* 条件下，不同曲率半径 r 时的 δ 值与特定曲率半径 r^* 时 δ 值之比，即：

$$f(h/r)=\frac{\delta(r,\theta^*)}{\delta(r^*,\theta^*)} \tag{11}$$

以上为基于 Picatinny 工程判据应用在柱壳装药上的修正判据建立方法。

3　修正因子获取

式(10)～(11)为构造修正因子函数的方法，为获得具体表达式，针对破片与柱壳装药的作用过程进行数值模拟，采用数据拟合方法得到修正因子函数表达式。

数值模拟采用 AUTODYN-3D 软件，图 2(a)为破片撞击柱壳装药轴对称数值模型，依据典型预制破片战斗部结构，选取破片为质量 3g 的钨球，柱壳装药，长度 80 mm，壳体厚度 6 mm，装填 Comp-B 炸药。图 2(b)为钨球、壳体和炸药的离散化网格模型。首先开展网格收敛性及优化工作，考虑 CPU 机时及计算精度，网格数量选取为 2 048、2 800 和 19 200，采用 Lagrange 方法开展计算。

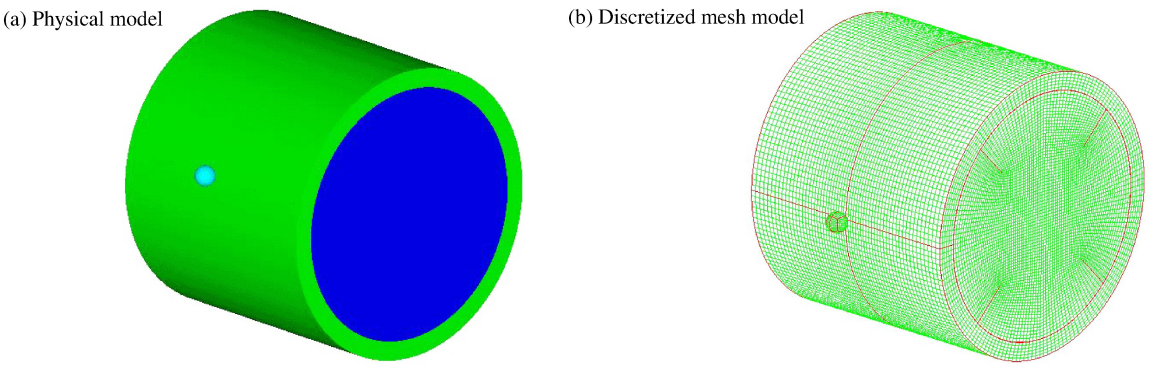


图 2　钨球与柱壳装药作用过程的物理及离散化网格模型

Fig. 2　Physical model and discrete model of tungsten fragment impact cylindrical covered charge

为描述炸药在冲击作用下的起爆过程，其状态方程采用 Lee-Tarver[15] 状态方程：

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t}=I\,(1-F)^b\,(\mu-a)^x+G_1\,(1-F)^cF^dp^y+G_2\,(1-F)^eF^gp^z \tag{12}$$

式中：F 为燃烧质量份数，它在模拟爆轰过程中控制炸药化学能的释放；参数 a 是临界压缩度参数；参数 I 和 x 为点火量冲击强度及持续函数；参数 G_1和 d 控制点火后早期增长函数；参数 G_2和 z 为高压反映率相关函数。表 1 为 Comp-B 炸药材料模型参数。

表 1 Comp-B 炸药材料参数

Table 1　Material parameters of Comp-B explosive

$I/\mu s^{-1}$	b	a	x	$G_1/(Pa^{-2}\cdot s^{-1})$	c	d	y	G_2	e	g	z
44	0	0.01	4.0	414×10^{-16}	0.222	0.667	2.0	0	0	0	0

破片和壳体选用能较好描述材料大应变、高应变率及高温状态的 Johnson-Cook 强度模型，材料强度模型、状态方程和侵蚀准则列于表 2。参数均取自 AUTODYN 标准数据库。

表 2　破片、壳体材料模型

Table 2　Material model of fragment and casing

部件	材料	状态方程	强度模型	失效应变
壳体	Steel 4340	Linear	Johnson-Cook	Geometric Strain
破片	Tungsten	Shock	Johnson-Cook	Geometric Strain

材料参数的正确与否与计算结果正确性直接相关。采用经典的 Picatinny 工程判据对已建立的数值模型行验证，表 3 为 2 种质量钨球垂直撞击起爆平面带壳 B 炸药的临界速度数值模拟与理论值的对比。可看出计算值与理论值误差约 5%，即认定数值算法的正确性。

表 3　临界起爆速度的数值模拟与理论值对比

Table 3　Comparison of critical initiation velocities between simulation and theory

m/g	h/mm	θ/(°)	v_{cr}/(m·s^{-1})		ε/%
			数值模拟	理论	
3	5	0	2 915	3 074.4	5.2
4	5	0	2 660	2 545.5	4.5

为得到柱壳装药受破片撞击后的起爆特性，设计 30 种工况开展计算，即钨球以入射角 θ=0°，15°，30°，45°，55°分别撞击装药曲率半径 r=40，60，75，100，200 mm，∞时的柱壳装药。图 3 所示为典型装药曲率下钨球以 v=2 826 m/s，不同 θ 撞击柱壳装药 t=8 μs 时刻应力图。可以看出，当 v 相同时，柱壳装药中的初始传入冲击波及压力随 θ 的增加而减小，θ=0°时炸药已完全爆轰，而其余入射角条件下无法发生稳定爆轰。而破片撞击起爆不同曲率半径的柱壳装药的过程与平板装药的起爆基本一致，本文中主要从临界起爆速度角度来说明柱壳装药与平面带壳装药的差异。

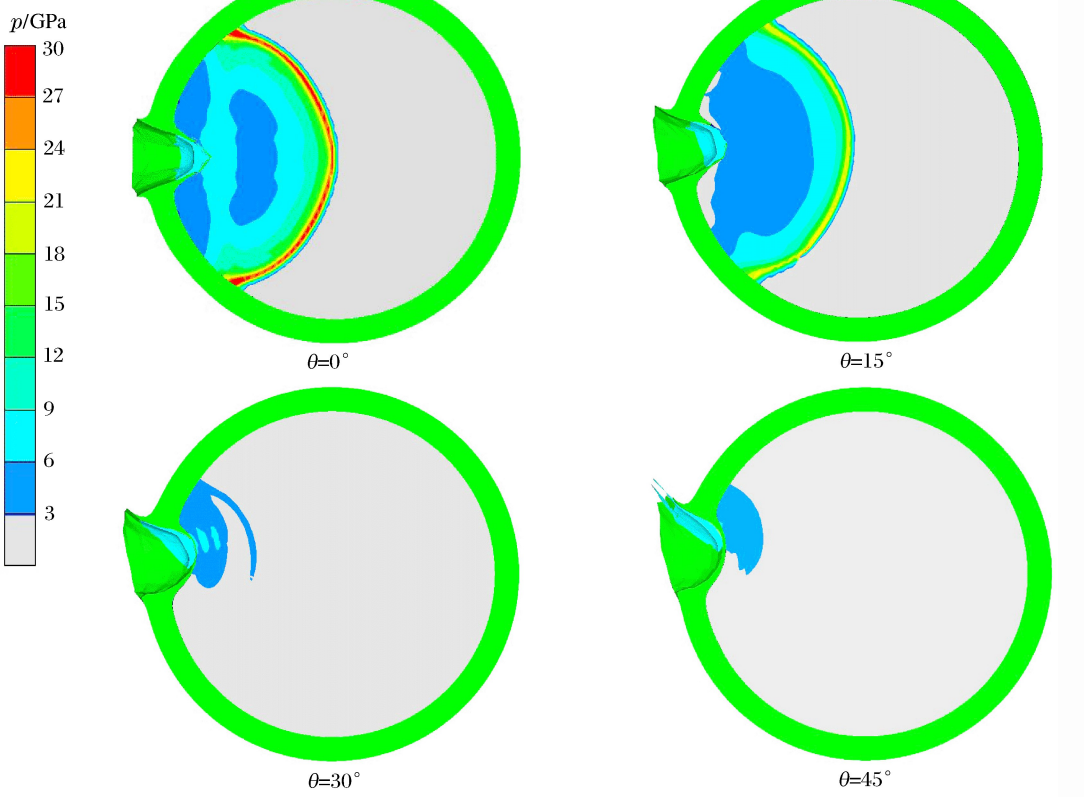


图 3　钨球以不同入射角撞击柱面带壳装药应力图

Fig. 3　Stress of tungsten fragment impact cylindrical shell charge with different incidence angles

采用升降法获得表 4 中炸药起爆的临界破片速度，对比各临界起爆速度可得出如下结论：

(1)入射角 θ 对柱壳装药冲击起爆影响较大。临界起爆速度随 θ 的增大而增加，装药曲率 $r=40$ mm条件下，$\theta=55°$时的起爆速度较 $\theta=0°$时增加 35.6%，较平面带壳装药增加 31.5%。

(2)装药曲率半径 r 对柱壳装药的冲击起爆有一定影响。除个别点外，临界起爆速度随 r 增加基本呈现非线性增大，入射角 $\theta=0°$条件下，$r=\infty$时起爆速度较 $r=40$ mm 时提高 3.2%。

在平面和柱壳装药($r=\infty$、$r=40$ mm)内距壳体炸药边界 4、8、12 mm 处设置观测点，编号分别为 1、2、3。将破片以入射角 $\theta=0°$起爆带壳装药时各观测点的压力进行对比，分析平面与柱壳装药冲击起爆阈值的差异。图 4 为 $v=3\,000$ m/s 时观测点的压力时程曲线。冲击波到达平面带壳装药的时间早于柱壳装药，但相同位置处柱壳装药内的压力值高于平面装药。

表 4 各工况下炸药起爆的破片临界速度

Table 4 Critical detonation velocity under various conditions

θ/(°)	v_{cr}/(m·s^{-1})					
	$r=40$ mm	$r=60$ mm	$r=75$ mm	$r=100$ mm	$r=200$ mm	$r=\infty$
0	2 826	2 838	2 828	2 840	2 868	2 915
15	2 918	2 912	2 915	2 920	2 940	2 955
30	3 069	3 073	3 084	3 078	3 088	3 092
45	3 396	3 412	3 407	3 423	3 437	3 541
55	3 832	3 830	3 835	3 845	3 837	3 843

定性分析柱壳装药冲击起爆速度低于平面带壳装药的原因。破片撞击柱壳装药时，会在壳体和炸药界面处发生波系的反射和透射，在炸药中传入透射波。由于柱壳装药曲率半径小于平面带壳装药，传入的波系会因曲率的存在而发生汇聚。相同撞击条件下、炸药内同一位置处的压力值高于平面带壳装药，因此，起爆柱壳装药易于起爆平面带壳装药。

根据式(6)、(10)～(11)将表 4 中临界起爆速度进行归一化处理，以获得柱壳装药临界起爆速度修正项，修正项的获取按文献[16]的方法进行拟合。当 $r=\infty$(平面带壳装药)时，令 $f(h/r)=1$，此时比较入射角对临界起爆速度的影响，即 $\delta=f(\theta)$。图 5 所示为 $f(\theta)$随入射角正弦 $\sin\theta$ 的变化关系，可以看出，其 $f(\theta)$随 $\sin\theta$ 的增大呈现指数增加。当入射角度大于 55°时破片将发生跳飞，临界起爆速度趋于无限大。进一步通过最小二乘法得出 $f(\theta)$随 $\sin\theta$ 的变化关系：

$$f(\theta)=-0.018+0.012\,\mathrm{e}^{\frac{\sin\theta}{0.245}} \qquad 0<\theta<55° \tag{13}$$

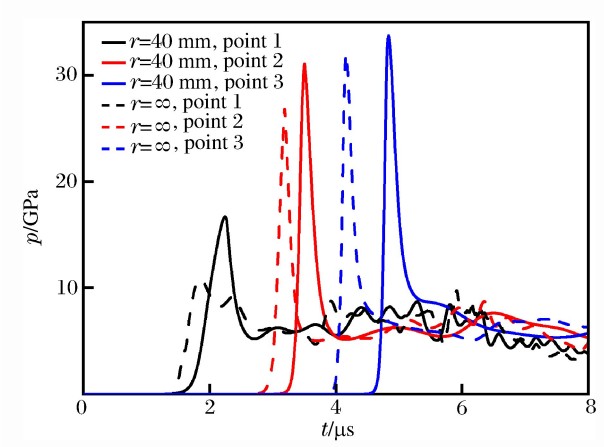


图 4 柱壳和平面带壳装药内相同位置观测点压力时程曲线

Fig. 4 Histories of pressure at same point in cylindrical charge and plate charge

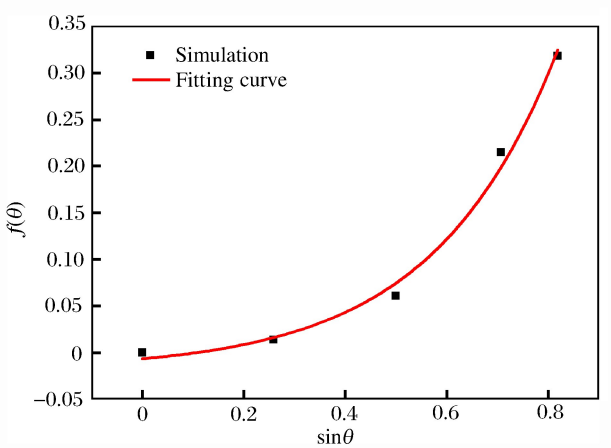


图 5 $f(\theta)$随入射角度正弦值的变化曲线

Fig. 5 Relation between $f(\theta)$ and $\sin\theta$

图 6～7 分别为不同入射角 θ 时的 $f(h/r)$和其平均值随壳体厚度与装药曲率半径比值(h/r)的变化关系。由图 7 可以看出 $f(h/r)$随 h/r 的增加而减小,但减小量在 2%以内,说明曲率半径对柱壳装药的临界起爆速度有一定影响但影响不大。进一步得出 $f(h/r)$随壳体厚度与装药曲率半径比值的变化关系,采用最小二乘法得到拟合公式为:

$$f(h/r)=0.981+0.019\,\mathrm{e}^{\frac{h}{-0.051\,6r}} \qquad 0\leqslant h/r<0.15 \tag{14}$$

综上,得到考虑破片入射角和壳体形状系数的临界起爆速度修正因子的 δ 的计算公式(9)、(13)～(14),将系数应用于式(5),则得到基于 Picatinny 工程判据的临界起爆速度修正模型:

$$v_0=\left[\frac{K_{\mathrm{f}}\exp(5.37h/m^{1/3})}{m^{2/3}(1+3.3h/m^{1/3})}\right]^{1/2}\left[1+(-0.018+0.012\,\mathrm{e}^{\frac{\sin\theta}{0.245}})(0.981+0.019\,\mathrm{e}^{\frac{h}{-0.051\,6r}})\right]$$
$$0<\theta<55^\circ,\quad 0\leqslant h/r<0.15 \tag{15}$$

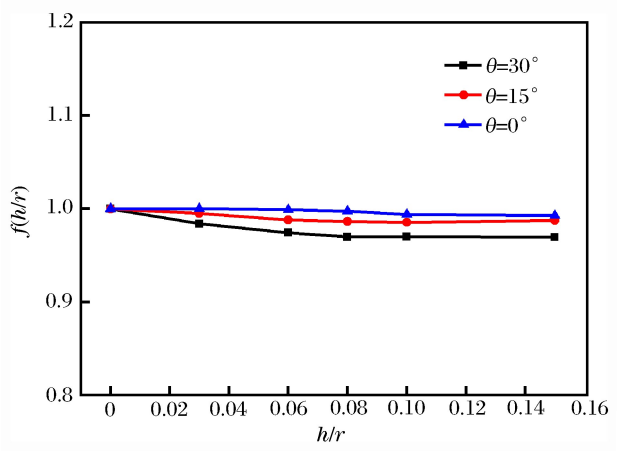


图 6　$f(h/r)$随壳体厚度与曲率半径比值的变化关系

Fig. 6　Relation between $f(h/r)$ and h/r

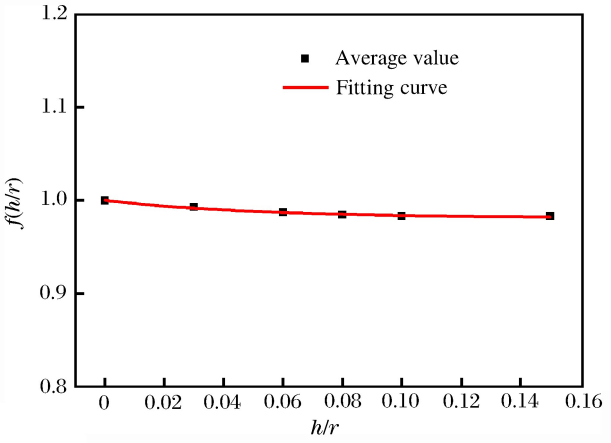


图 7　$f(h/r)$平均值随壳体厚度与曲率半径比值变化关系

Fig. 7　Relation between average value of $f(\theta)$ and $\sin\theta$

4　判据校验

由于式(15)为特定破片质量条件下的装药临界起爆速度计算判据,为检验判据是否具有普适性,与文献已公布实验结果及部分计算数据进行对比。

首先将判据修正值与文献[14]公布的实验数据进行对比,质量为 4.65 g 破片撞击起爆平面带壳装药的实验值在 2 231～2 522 m/s 之间,修正判据计算的起爆阈值为 2 347 m/s,修正判据计算值与实验数据吻合较好。

进一步开展不同质量破片撞击不同壳体厚度柱壳装药的数值模拟计算。表 5 为各工况下的临界起爆速度计算值及判据计算值。可以看出,计算值与判据修正值误差在 7%以内,可认定修正的修正判据普适性良好。该判据同样适用于其他材质破片对柱壳装药的冲击起爆阈值的计算。

表 5　不同质量破片临界起爆速度数值模拟与修正判据对比

Table 5　Comparison of critical initiation velocities between simulation and rectified criterion value

工况	m/g	h/mm	r/mm	θ/(°)	v_{cr}/(m·s^{-1})		ε/%
					数值模拟	修正判据	
1	4	6	50	0	2 657	2 528	4.59
2	4	6	75	30	2 928	2 730	6.76
3	5	6	40	0	2 181	2 205	1.10
4	5	6	40	15	2 237	2 254	0.76
5	5	6	40	30	2 414	2 381	1.36
6	4	5	40	0	2 217	2 182	1.60
7	4	5	40	30	2 438	2 357	3.44

5　结　论

采用数值模拟的方法，获得了破片以不同入射角起爆不同曲率半径柱壳装药的临界速度。通过对数值模拟结果的分析，建立了基于柱壳装药冲击起爆的修正判据，结论如下：

(1)入射角对柱壳装药冲击起爆影响较大，临界起爆速度随入射角的增大而非线性增加，装药曲率 $r=40$ mm 条件下，$\theta=55°$时的起爆速度较 $\theta=0°$时增加 35.6%；装药曲率对柱壳装药的冲击起爆有一定影响，临界起爆速度随曲率半径增加基本呈现非线性增大，入射角 $\theta=0°$条件下，$r=\infty$时起爆速度较 $r=40$ mm 时提高 3.2%。

(2)通过引入包含入射角 θ 和柱壳装药形状函数 h/r 的修正因子，对 Picatinny 工程判据进行修正，建立了适用于起爆柱面带壳装药临界破片速度的修正判据，判据校验表明修正判据与实验值与数值计算值误差小于 7%，能较好的预测柱壳装药的冲击起爆。

参考文献：

[1] 陈海利，蒋建伟，门建兵. 破片对带铝壳炸药的冲击起爆数值模拟研究[J]. 高压物理学报，2006，20(1)：109-112.
CHEN Haili，JIANG Jianwei，MEN Jianbing. Numerical simulation of fragment impacting on charge with aluminum shell[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2006，20(1)：109-112.

[2] 李小笠，屈明，路中华，等. 三种破片对带壳炸药冲击起爆能力的数值分析[J]. 弹道学报，2009，21(4)：72-75.
LI Xiaoli，QU Ming，LU Zhonghua，et al. Numerical analysis of impact initiation ability of three kinds of fragments on shell explosive[J]. Journal of Ballistics，2009，21(4)：72-75.

[3] 童宗保，王金相，彭楚才，等. 预制破片对屏蔽炸药冲击引爆研究[J]. 科学技术与工程. 2013，14(7)：173-177. DOI：10.3969/j.issn.1671-1815.2014.07.038
TONG Zongbao，WANG Jinxiang，PENG Chucai，et al. Study on shock initiation of shielded explosive by prefabricated fragment[J]. Science Technology and Engineering，2013，14(7)：173-177. DOI：10.3969/j.issn.1671-1815.2014.07.038

[4] HELD M. Initiation phenomenon with shaped charge jets[C]// Proceedings of the 9th International Detonation Symposium. Portland，Oregon，USA，1989：1416-1426.

[5] ROSLUND L A. Initiation of warhead fragments Ⅰ：Normal impacts[R]. Naval Surface Weapons Center，White Oak，1973.

[6] LLOYD R M. Conventional warhead systems physics and engineering design[M]. Virginia：American Insititute of Aeronautics and Astronautics，Inc.，1998：502-504.

[7] 章冠华，陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京：国防工业出版社，1991.

[8] 张先锋，赵有守，陈惠武. 射弹冲击引爆带壳炸药临界条件[J]. 弹道学报，2006，18(4)57-59.
ZHANG Xianfeng，ZHAO Youshou，CHEN Huiwu. The critical condition of shelled explosive initiated by projectile[J]. Journal of Ballistics，2006，18(4)57-59.

[9] HELD M. Initiation criteria of high explosive attacked with projectiles or jet densities[J]. Propellants，Explosives，Pyrotechnics，1996，21(5)：235-237.

[10] 方青，卫玉章，张克明. 射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的条件[J]. 爆炸与冲击，1997，17(2)：153-158.
FANG Qing，WEI Yuzhang，ZHANG Keming. On the projectile oblique-impact initiation conditions for explosive covered with a plate[J]. Explosion and Shock Waves，1997，17(2)：154-158.

[11] 陈卫东，张忠，刘家良，等. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟与分析[J]. 兵工学报，2009，30(9)：1187-1191.
CHEN Weidong，ZHANG Zhong，LIU Jialiang，et al. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive by fragment[J]. Acta Armamentarii，2009，30(9)：1187-1191.

[12] 杜茂华，王伟力，黄勇，等. 舰载超近程反导弹药冲击引爆战斗部的研究[J]. 工程爆破，2012，18(2)：14-17. DOI：10.3969/j.issn.1006-7051.2012.02.004.
DU Maohua，WANG Weili，HUANG Yong，et al. Research on impacting and igniting warhead by super close-in anti-missile ammunition on board[J]. Engineering Blasting，2012，18(2)：14-17. DOI：10.3969/j.issn.1006-7051.

2012.02.004.

[13] 王昕,蒋建伟,王树有,等.钨球对柱面带壳装药的冲击起爆数值模拟研究[J].兵工学报,2017,38(8):1498-1505. DOI:10.3969 /j.issn.1000-1093.2017.08.006.
WANG Xin, JIANG Jianwei, WANG Shuyou, et al. Numerical simulation on the initiation of cylindrical covered charge impacted by tungsten sphere fragment[J]. Acta Armamentarii, 2017,38(8):1498-1505. DOI:10.3969 /j.issn.1000-1093.2017.08.006.

[14] 梁争峰,袁宝慧.破片撞击起爆屏蔽 B 炸药的数值模拟和实验[J].火炸药学报,2006,29(1):5-9.
LIANG Zhengfeng, YUAN Baohui. Numerical simulation and experimental study of the initiation of shielded composition b impacted by fragment[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006,29(1):5-9.

[15] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosive[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362.

[16] IZADIFARD R A, FOROUTAN M. Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation[J]. Turkish Journal of Engineering and Enviromental Sciences, 2010,34(1):25-41.

Critical detonation velocity calculation model of cylindrical covered charge impacted by fragment

WANG Xin, JIANG Jianwei, WANG Shuyou, MEN Jianbing

(*School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In this work, to obtain the critical detonation velocity calculation model about the cylindrical covered charge impacted by fragments, we added the correction terms to the velocity calculation based on the Picatinny engineering criterion. We found out about the influence of the fragment impact angle and the charge curvature radius on the critical detonation velocity using the AUTODYN software through simulating the tungsten fragment impact cylindrical steel casing filled with B explosive. Based on the fitting expression, we established the critical velocity calculation model of the explosive initiation considering the impact angle and the charge shape function. The model calculation values are in good agreement with the experimental data and the simulation results, thereby suggesting that the model can provide a better prediction of the impact initiation of the cylindrical covered charge.

Keywords: critical velocity; impact initiation; cylindrical covered charge; calculation model

(责任编辑　王易难)