

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0391

# 多破片对柱壳装药冲击起爆速度阈值的数值模拟研究\*

郭淳<sup>1</sup>, 郭尚生<sup>2</sup>, 钱建平<sup>1</sup>, 顾文彬<sup>1,3</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 辽沈工业集团有限公司产品研发中心, 辽宁 沈阳 110045;

3. 中国人民解放军陆军工程大学, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为了研究实战环境中多个钨球破片对导弹战斗部(柱壳装药)的冲击起爆问题, 采用 AUTODYN-3D 数值模拟软件, 基于单破片撞击柱壳装药模型, 建立多破片撞击柱壳装药的模型, 开展了不同钨球个数、空间碰撞位置间隔(撞击角  $\theta$ 、轴向球心距  $l$ )及时间间隔对冲击起爆特性影响的数值模拟, 获得了带壳 B 炸药的起爆速度阈值。结果表明: 相同条件下, 随着钨球个数的增加、空间碰撞位置间隔的减小, 起爆速度阈值逐渐减小, 6 个钨球同时撞击的起爆速度阈值约为单个作用下的 50%; 双钨球作用下, 柱壳装药相较于平板装药更难以起爆; 双钨球间隔撞击柱壳装药时, 起爆速度阈值均随着撞击时间间隔的增大而先减小后增大, 最小起爆速度阈值约为同时撞击时的 95%, 且  $|\theta_2| < |\theta_1|$  ( $\theta_1$  为第 1 个钨球的撞击角,  $\theta_2$  为第 2 个钨球的撞击角)时更容易起爆柱壳装药。

**关键词:** 柱壳装药; 多破片; 冲击起爆; 起爆速度阈值

中图分类号: O389; TJ410.3

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Numerical simulation on shock critical initiation velocity of cylindrical covered charge by multiple fragment impacts

GUO Chun<sup>1</sup>, GUO Shangsheng<sup>2</sup>, QIAN Jianping<sup>1</sup>, GU Wenbin<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Product R&D Center, Liaoshen Industries Group Co., Ltd., Shenyang 110045, Liaoning, China;

3. The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to investigate the shock initiation of missile warhead (cylindrical covered charge) by multiple tungsten spherical fragment impacts under actual combat circumstance, based on the analysis of single fragment impact, the numerical simulations were carried out by using AUTODYN-3D software. The influence on the shock initiation characteristics of different number, distance separation (impact angle  $\theta$  and axial spherical center distance  $l$ ), time separation were analyzed, and the critical initiation velocity of covered Comp B was obtained by the up-down method. The obtained simulation results show that, the critical initiation velocity decreases with the tungsten fragments number increase and the distance separation decrease. The critical initiation velocity of cylindrical covered charge impacted by six fragments synchronously is about 50% compare to the single fragment. The cylindrical covered charge is more difficult than plane covered charge to detonate by double fragments when the impact velocity below the critical velocity of a single fragment. The critical initiation velocity decreases initially and then increases with the increase of time separation when fragments impacting asynchronously on the cylindrical covered charge. The minimum critical initiation velocity of cylindrical covered charge impacted by double fragments

\* 收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2020-03-05

第一作者: 郭淳(1988—), 男, 博士研究生, 53chun@163.com

通信作者: 钱建平(1962—), 男, 博士, 教授, 13951837475@139.com

synchronously is about 95% comparing with that of impacted by double fragments asynchronously. For  $|\theta_2| < |\theta_1|$  ( $\theta_1$  is the impact angle of the first fragment,  $\theta_2$  is the impact angle of the second fragment), the cylindrical covered charge is easy to detonate by double fragments asynchronously. The results provide the reference for cumulative damage assessment of cylindrical covered charge by multiple fragment impacts.

**Keywords:** cylindrical covered charge; multiple fragments; shock initiation; critical initiation velocity

如何有效拦截来袭导弹,一直是反导弹药研究的热点问题。悬浮弹幕协同反导弹药是利用其多个子弹药战斗部协同作用产生的高速破片场毁伤来袭导弹<sup>[1]</sup>,此破片场由成百上千个飞散方向任意的破片(预制破片或爆炸成型弹丸)组成。应用具有一定分布密度的破片撞击来袭导弹并引发导弹战斗部起爆是毁伤导弹最有效的方法之一。

针对破片冲击起爆战斗部的问题,大多数学者是将其等效为单破片或多破片冲击起爆平板装药的问题进行研究。单破片冲击起爆平板装药的问题,学者们已通过理论、数值模拟和试验等方法进行了大量研究<sup>[2-8]</sup>。在单破片冲击起爆平板装药的基础上,一些学者也曾开展了多破片冲击起爆平板装药的研究。其中李文彬等<sup>[9]</sup>研究了双破片冲击起爆裸装药的机理;Lueck等<sup>[10]</sup>利用4组不同的参数,论证了Lee-Tarver点火增长模型模拟多破片冲击起爆炸药的可行性;贾宪振等<sup>[11]</sup>、梁斌等<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究了多破片撞击平板装药的情况,得到了起爆速度阈值的变化规律。

然而,现实中战斗部多为圆柱结构,一些学者曾在试验和数值模拟过程中考虑了战斗部为圆柱结构的情况,但都是采用单破片进行研究。其中宋浦等<sup>[13]</sup>针对某型破片式战斗部对带壳柱装药模拟靶的撞击毁伤试验研究,得到柱壳装药的毁伤阈值范围;江增荣等<sup>[14]</sup>通过数值模拟得到重金属材料破片可以提高毁伤战斗部的能力;辛建国等<sup>[15]</sup>研究得到破片及破碎的柱面薄壳对壳内装药的撞击、摩擦等机械作用是引燃/引爆薄壳装药的主要原因;王昕等<sup>[16]</sup>通过数值模拟分析了单个破片冲击起爆柱壳装药的规律,得到命中位置和装药曲率半径对柱壳装药冲击起爆的影响。

在实战环境中,战斗部很有可能受到多个破片的累积毁伤作用,从现有文献可以看出,关于多破片冲击起爆柱壳装药问题的研究尚不深入全面,因此本文将采用数值模拟的方法研究多钨球破片对柱壳装药的冲击起爆问题。采用AUTODYN-3D数值模拟软件,在单钨球破片撞击柱壳装药模型的基础上,建立多钨球破片撞击柱壳装药的模型,分析当存在一定空间间隔(撞击角、轴向球心距)和时间间隔的条件下,多钨球破片冲击柱壳装药的起爆过程,得到相关参数(钨球个数、装药半径、撞击角、轴向球心距和时间间隔)对起爆柱壳装药速度阈值的影响规律。研究结果可为反导弹药战斗部的设计和破片累积毁伤评估提供参考。

## 1 数值模拟模型

### 1.1 单钨球冲击起爆柱壳装药模型

为了建立多钨球破片撞击柱壳装药的模型,先建立单个钨合金球破片冲击起爆带钢壳的圆柱B炸药的模型,如图1(a)所示,进行数值模拟。其中钨球质量为 $m$ ,半径为 $r$ ;炸药装药半径为 $R$ ,长度为 $L$ ;壳体厚度为 $H$ 。假设钨球垂直于带壳装药轴线入射。

采用AUTODYN-3D程序,简化计算,建立1/2模型,通过对称性实现全模型,如图1(b)所示。其中,钨球、钢壳和B炸药均采用Lagrange网格,网格数量分别为2 048、28 800、192 000。

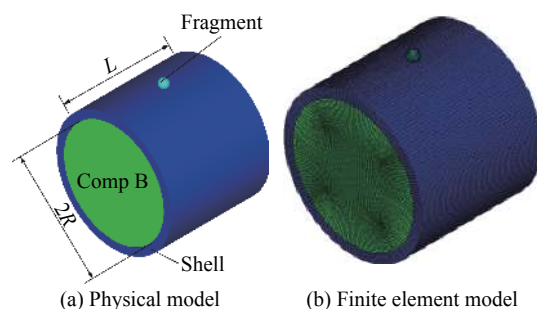


图1 单钨球冲击柱壳装药的物理模型和有限元模型  
Fig. 1 Physical model and finite element model of single tungsten fragment impacting on cylindrical charge with steel casing

钨球、钢壳和 B 炸药的材料参数均从 AUTODYN 材料库<sup>[17]</sup> 选取。B 炸药的状态方程采用 Lee-Tarver 三项反应过程炸药起爆模型, 该模型可以很好地模拟非均质炸药的冲击起爆特性:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z \quad (1)$$

式中:  $F$  为反应比(炸药气体质量与炸药总质量比),  $\rho$  和  $\rho_0$  为炸药当前密度和初始密度,  $p$  为炸药爆轰压力, 其余参数为常数。式(1)中右边第 1 项为点火项, 描述了热点燃烧阶段; 第 2 项为成长项, 描述了燃烧从热点向内部和外部的颗粒传递阶段; 第 3 项为快反应项, 描述了燃烧快速向爆轰转变的过程。炸药反应物和未反应物均采用 JWL 状态方程。B 炸药材料参数见表 1。破片和柱壳的材料状态方程、强度模型和失效方程见表 2。

表 1 B 炸药材料参数

Table 1 Material parameters of composition B

$I/\mu s^{-1}$	$b$	$a$	$x$	$G_1$	$c$	$d$	$y$	$G_2$	$e$	$g$	$z$
44	0.222	0.01	4	414	0.222	0.667	2.0	0	0	0	0

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	失效模型
破片	钨合金	Shock	Johnson-Cook	Geometric strain
壳体	4340 合金钢	Linear	Johnson-Cook	Geometric strain

### 1.2 多钨球冲击起爆带壳装药模型

在单破片冲击起爆柱壳装药模拟模型的基础上, 增加钨球破片数量, 建立如图 2 所示的双钨球撞击柱壳装药的简化模型, 其中双钨球完全相同, 质量均为  $m=3\text{ g}$ ; 两球间平行于装药轴线方向的球心距即轴向球心距为  $l$ 。假设钨球均垂直于带壳装药轴线入射。图 3 为任意一个钨球碰撞点的截面示意图。其中,  $AA'$ 、 $BB'$  为圆柱装药相互垂直的两个对称面, 双破片撞击时, 假设碰撞点在  $AA'$  面的同一侧;  $O_0$ 、 $O_{i_0}$  ( $i=1, 2, \dots$ , 最大值为钨球总个数) 分别为装药的轴心和初始钨球球心,  $O_i$  为碰撞瞬间的钨球球心; 钨球的初始速度为  $v_i$ , 钨球从初始位置运动到碰撞点的距离为  $h_i$ , 忽略钨球在飞行过程中的速度衰减, 即碰撞速度亦为  $v_i$ ;  $O_0O_{i_0}$  的连线与  $v_i$  的夹角为撞击角  $\theta_i$ ; 设  $\theta_i$  在  $\angle AO_0B$  范围内取正值, 以步长为  $5^\circ$ , 从  $0^\circ$  到  $60^\circ$  设置一系列观测序列, 列号设为  $\theta_{i-j}$  ( $j=0\sim 12$ ), 在每列上设置间距为  $5\text{ mm}$  的观测点  $\theta_{i-j-k}$  ( $k=1\sim 9$ ); 设  $\theta_i$  在  $\angle A'O_0B$  范围内取负值, 以步长为  $-5^\circ$ , 从  $0^\circ$  到  $-60^\circ$  设置一系列观测序列, 列号设为  $\theta_{i-j}$  ( $j=0\sim 12$ ), 在每列上设置间距为  $5\text{ mm}$  的观测点  $\theta_{i-j-k}$  ( $k=1\sim 9$ ), 其中点  $\theta_{i-j-1}$  在装药表面, 点  $\theta_{i-j-9}$  与  $O_0$  重合。

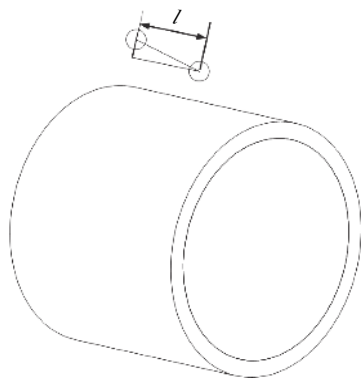


图 2 双钨球撞击柱壳装药的简化模型

Fig. 2 Simplified model of double tungsten fragments impacting on cylindrical charge with casing

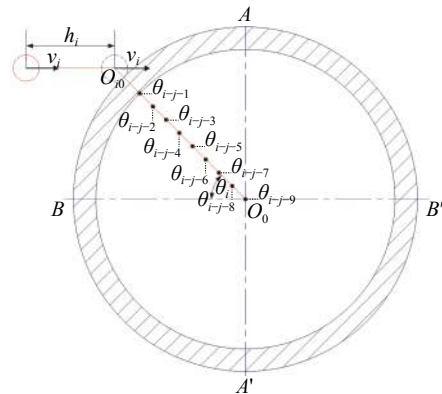


图 3 截面位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross section

综上,通过  $l/r$  和  $\theta_i$  表征两钨球的空间碰撞位置间隔,  $h_i/r$  表征两钨球的时间间隔。

## 2 数值模拟结果与分析

为了研究多钨球累积冲击起爆柱壳装药的问题,先对单钨球在不同位置冲击起爆柱壳装药的情况进行数值模拟,以 10 m/s 为步长,得到装药半径  $R=40$  mm 时,单钨球起爆柱壳装药的速度阈值随撞击角  $\theta$  的变化如图 4 所示。由图 4 可以看出,当  $0^\circ \leq \theta < 25^\circ$  时,起爆装药的速度阈值随  $\theta$  的增大而缓慢增长;当  $25^\circ \leq \theta < 55^\circ$  时,起爆装药的速度阈值随  $\theta$  的增大而迅速增长;当  $\theta \geq 55^\circ$  时,钨球发生跳飞,本文中不考虑跳飞的情况。简单来说,起爆速度阈值随撞击角增大呈指数增长是因为钨球破片速度方向上的壳体厚度的不同引起的。撞击角度越大,钨球速度方向上的壳体越厚,因此需要更大的起爆速度。

本文中采用的单钨球模型的撞击角度与起爆柱壳装药的速度阈值间的变化关系,采用最小二乘法得到拟合公式为:

$$v_i = 2809 + 60.93e^{\theta/18.1} \quad 0^\circ \leq \theta < 55^\circ \quad (2)$$

式(2)可作为研究多钨球起爆柱壳装药的基础,方便获得其中任意一个钨球的碰撞位置对应此位置的单钨球冲击起爆柱壳装药的速度阈值。

当  $\theta=0^\circ$  时,钨球沿柱壳装药的径向碰撞时的起爆速度阈值为 2 840 m/s,与文献 [16] 中数值的误差为 0.5%,表明本文中采用的模拟模型具有较好的吻合性,采用冲击起爆机制开展引爆机理研究是合理的。当  $d=7.6$  mm、 $H=6$  mm 时,数值模拟得到起爆速度阈值为 2 700 m/s,对比文献 [14] 的试验值 2 676 m/s,误差为 0.9%,表明在改变钨球尺寸时,该模型仍有较好的适用性。因此可在单破片冲击起爆柱壳装药模拟模型的基础上,增加钨球破片数量,分析多钨球破片对柱壳装药冲击起爆的影响。

### 2.1 钨球个数的影响

在实战环境中,导弹战斗部可能受到多个高速破片的同时打击,图 5 展示了 1、2、3、4、6 个钨球的撞击位置方案,钨球关于柱壳装药的法线成轴对称,两两钨球间的球心距为  $2r$ 。图 6 为 5 种方案下多钨球同时冲击柱壳装药的起爆速度阈值的变化曲线,可以看出当钨球个数从 1 个增加到 4 个时,起爆柱壳装药的速度阈值变化明显,4 个钨球作用时的速度阈值约是单个的 55%;当从 4 个增加到 6 个时速度阈值的变化曲线趋于平缓,6 个钨球作用时的速度阈值约是单个的 50%。随着钨球个数的增加,钨球撞击柱壳装药产生的冲击波数量增加,使得多道冲击波作用下更容易叠加成更强的冲击波,所以随着钨球个数的增加,起爆速度阈值逐渐减小。而随着钨球个数的增加,钨球球心距离撞击位置的轴对称中心更远,在到达叠加位置时每道冲击波衰减得更多,所以钨球个数从 4 个增加到 6 个时,个数对速度阈值的影响已经不明显。

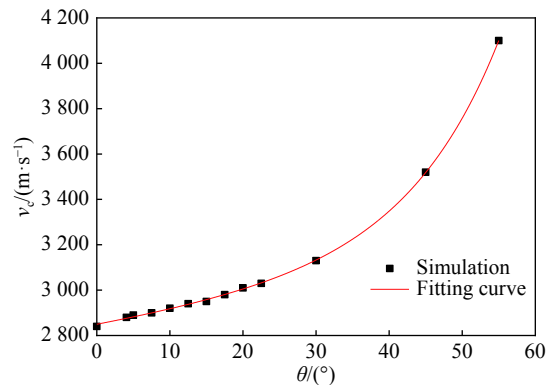


图 4 起爆速度阈值随撞击角的变化曲线

Fig. 4 Curve of critical velocity vs. impact angle  $\theta$

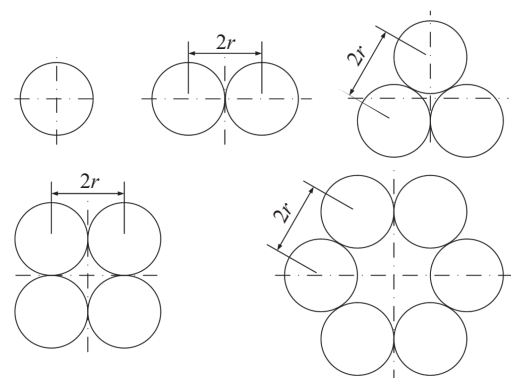


图 5 多钨球撞击位置方案

Fig. 5 Multiple tungsten sphere fragment impact options

## 2.2 装药半径的影响

由于柱壳装药柱面的存在, 在研究双钨球紧靠在一起的情况时分为两种情况: 一是关于  $BB'$  平面对称, 并沿着平行此平面的方向撞击柱壳装药的情况; 二是双钨球同时碰撞柱壳装药同一母线的情况。得到这两种情况下的柱壳装药起爆速度阈值随装药半径倒数的变化, 如图 7 所示。由于选取的计算步长为  $10 \text{ m/s}$ , 可以看出针对不同的装药半径, 起爆柱壳装药的速度阈值没有明显差异, 这是由于在双钨球紧靠在一起时, 不同装药半径的带壳装药在两种对称情况下的钨球速度方向的壳体厚度与  $H$  近似相等, 因此可以认为此时装药半径对速度阈值没影响。

## 2.3 碰撞位置的影响

### 2.3.1 双钨球撞击的情况

双钨球冲击起爆柱壳装药时, 双钨球的空间碰撞位置可分为两种情形: 一是两个碰撞位置关于柱壳装药的任意对称面而对称; 二是两个碰撞位置不关于柱壳装药的任意对称面对称。

当双钨球同时撞击柱壳装药, 碰撞位置关于平面  $BB'$  对称 (双钨球的撞击角  $\theta_1 = -\theta_2$ 、双钨球轴向球心距  $l = l_{12} = 0$ ) 时, 装药起爆速度阈值随撞击角的增大而增大, 起爆速度阈值的最小值约为对应位置单个钨球作用的 76%, 如图 8 所示。当  $|\theta_1| = |\theta_2| \geq 20^\circ$  时, 随着撞击角的增大起爆速度阈值已近似等于单个钨球的速度阈值。

双钨球同时碰撞柱壳装药同一母线 ( $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ ) 时, 装药起爆速度阈值随钨球球心距离的变化如图 9 所示。由前文知, 当双钨球紧靠在一起时 (即  $l = 2r$ ), 柱壳装药与平板装药具有相同的阈值起爆速度。随着间隔距离的增大, 速度阈值增大, 并最终趋近于单个钨球的速度阈值, 起爆速度阈值的最小值约为单个钨球作用的 77%。当球心距在 7 倍钨球半径范围内, 即速度小于单个钨球撞击柱壳装药的起爆速度阈值时, 相同的球心距条件下, 起爆柱壳装药的速度阈值不小于平板装药, 即柱壳装药相对于同厚度的平板装药更难以起爆, 这是由于此时冲击波在柱壳装药中传播的损耗比在平板装药中多。对于柱壳装药, 球心距为 4 倍钨球半径时, 双钨球的起爆速度阈值约为单个的 92%, 即  $l < 4r$  时双钨球起爆柱壳装药的叠加作用明显。

而当双钨球碰撞位置不关于柱壳装药的任意对称面对称时, 选取双钨球分别以撞击角  $0^\circ$  和  $20^\circ$  撞击柱壳装药时, 装药起爆速度阈值随球心距的变化如图 10 所示, 双钨球的起爆速度阈值的最小值约为单钨球以  $0^\circ$  撞击时的 95%。可以看出当  $|\theta_1| \neq |\theta_2|$ 、 $l \neq 0$  时, 即当两个钨球撞击角度一定时, 圆柱装药的起爆速度阈值随球心距的增加而增大, 最终趋于撞击角度绝对值更小的钨球起爆装药的速度阈值。

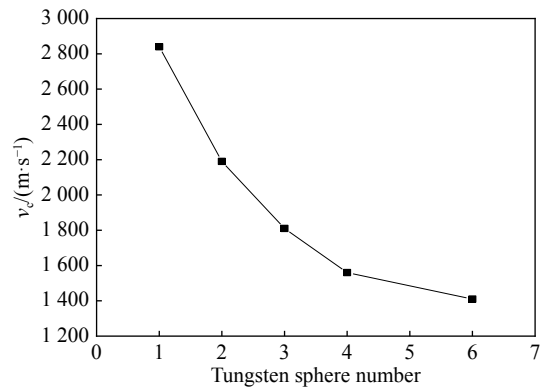


图 6 起爆速度阈值随钨球个数的变化

Fig. 6 Critical velocity vs. tungsten sphere number

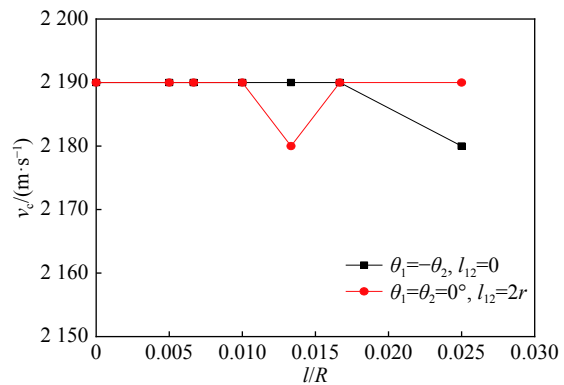


图 7 起爆速度阈值随装药半径倒数的变化

Fig. 7 Critical velocity vs.  $l/R$

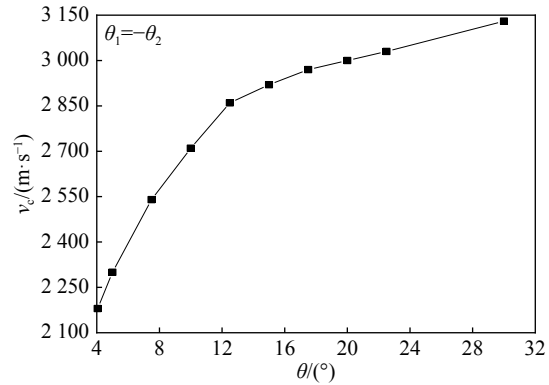


图 8 双钨球起爆速度阈值随撞击角的变化

Fig. 8 Critical velocity vs. impact angle  $\theta$  (double tungsten sphere fragments)

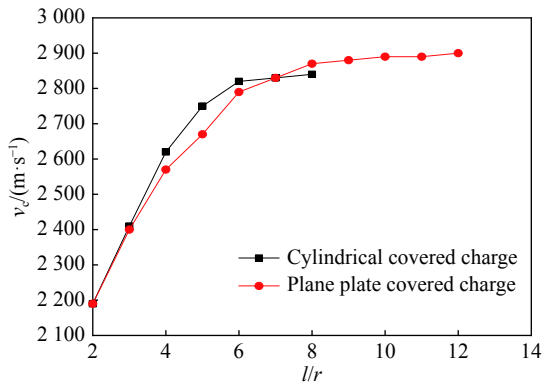


图 9 柱壳装药和平板装药起爆速度阈值随球心距的变化  
Fig. 9 Critical velocities of cylindrical and plate charge

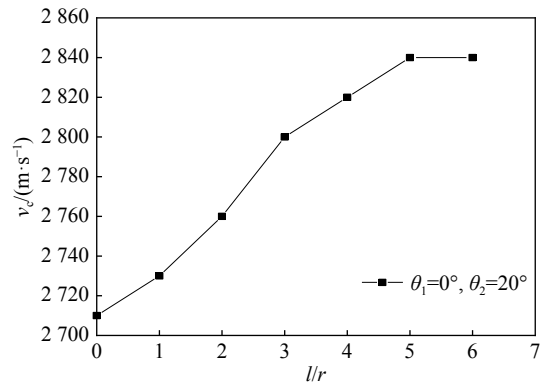


图 10 双钨球起爆速度阈值随轴向球心距的变化  
Fig. 10 Critical velocity vs. axial ball center distance  $l/r$  (double tungsten sphere fragments)

2.3.2 4 个钨球撞击的情况

4 个钨球同时撞击柱壳装药位置的方案如图 11 所示, 假设 4 个钨球同时撞击, 撞击形状近似为“矩形”和“菱形”。

图 12 是 4 个钨球呈“矩形”撞击柱壳装药在不同的空间间隔作用下, 装药的起爆速度阈值随轴向球心距 (钨球 1、2 的轴向球心距与钨球 3、4 的轴向球心距相等时, 即  $l=l_{12}=l_{34}$ ) 的变化。当撞击角度相同时, 随着轴向球心距  $l$  的增大, 起爆速度阈值增大。而当钨球轴向球心距  $l$  相同时, 随着撞击角的增大, 起爆速度阈值增大。由图 6、图 12 可以得出, 4 个钨球以“矩形”撞击时的起爆速度阈值的最小值约为撞击角度绝对值最小的单钨球作用时的 54%。

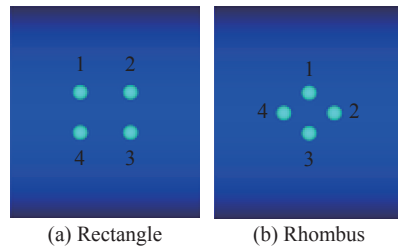


图 11 4 个钨球打击位置方案  
Fig. 11 Four tungsten fragments combat options

图 13 是 4 个钨球呈“菱形”撞击柱壳装药在不同的空间间隔作用下, 装药的起爆速度阈值随钨球 2、4 轴向球心距 ( $l=l_{24}$ ) 的变化。当撞击角度相同时, 随着轴向球心距  $l$  的增大, 起爆速度阈值增大; 而当钨球间轴向球心距  $l$  相同时, 随着撞击角的增大, 起爆速度阈值增大。可以看出, 4 个钨球间排得越紧密, 即空间间隔越小, 装药的起爆速度阈值越小, 4 个钨球以“菱形”撞击时的起爆速度阈值的最小值约为撞击角度绝对值最小的单钨球作用时的 55%。

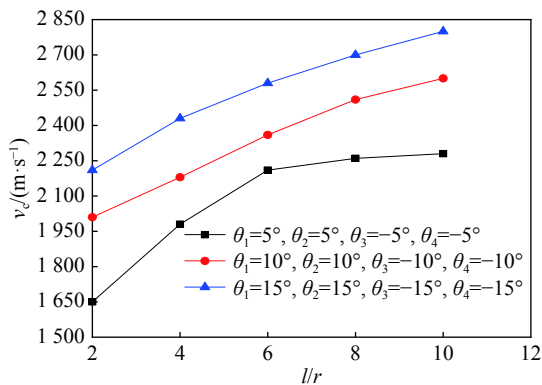


图 12 “矩形”结构起爆速度阈值随轴向球心距的变化  
Fig. 12 Critical velocity vs. axial ball center distance  $l/r$  (rectangle)

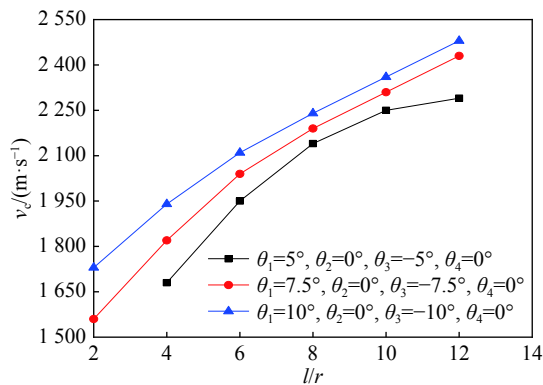


图 13 “菱形”结构起爆速度阈值随轴向球心距的变化  
Fig. 13 Critical velocity vs. axial ball center distance  $l/r$  (rhombus)

因此,当多钨球破片同时撞击柱壳装药时,起爆速度阈值随空间碰撞位置间隔的增大而增大,这是由于间隔的增大造成每个破片产生的冲击波到达叠加位置时衰减得更多。

## 2.4 时间间隔的影响

为了研究时间间隔对起爆速度阈值的影响,也可分为两种情况分析:一是双钨球破片的球心在同一个圆柱截面;二是双钨球破片的球心不在同一个圆柱截面。

假设双钨球的球心在同一个圆柱截面,即 $l_{12}=0$ 。分别研究不同撞击角下,速度阈值随时间间隔(即 $h_2/r$ )的变化;当2个钨球碰撞位置相同、而碰撞顺序不同时,速度阈值随 $h_2/r$ 的变化。

由图14可以看出,3种情况均是钨球1先碰撞柱壳装药,钨球2后碰撞,当双钨球撞击角分别为 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=10^\circ$ 时,装药起爆速度阈值随撞击时间间隔的增大而增大,最后达到单个钨球的速度阈值;而在 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=20^\circ$ 时,装药起爆速度阈值随碰撞时间间隔的增大先减小后增大;在 $\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ 时,装药起爆速度阈值随碰撞时间间隔的增大先减小后增大。 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=20^\circ$ 与 $\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ 的2条变化曲线的趋势基本保持一致,都是先减小后增大,最小的起爆速度阈值约为同时撞击的97%。

当 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=10^\circ$ 时,由于两个钨球距离较近,钨球2撞击瞬间,钨球1已经侵彻一段距离,而钨球1对于钨球2的侵彻过程造成干扰,所以随着撞击时间间隔的增大需要更高的起爆速度阈值。本文不侧重研究这种互相干扰的情况。当 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=20^\circ$ 、 $v=2800$  m/s时,选取 $h_2=7, 9, 14$  mm,提取不同计算文件中同一观测点 $\theta_{2.5.2}$ 的压力-时间曲线,如图15所示。可以看出,当 $h_2=9$  mm时,峰值压力最大,其次是 $h_2=7$  mm,而 $h_2=14$  mm时压力最小,即随着 $h_2$ 的增大,峰值压力先增大后减小。当 $\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ 、 $v=2800$  m/s时,同样选取 $h_2=7, 9, 14$  mm,提取不同计算文件中同一观测点 $\theta_{2.0.2}$ 的压力-时间曲线,如图16所示。从图16可以看出,当 $h_2=9$  mm时峰值压力也是最大,同样可以得到随着 $h_2$ 的增大,峰值压力先增大后减小。对比图15和图16,在相同时间间隔下,图16中观测点的峰值压力均高于图15中对应点的峰值压力。因此,采用相同的撞击速度 $v=2800$  m/s时,无论钨球撞击的先后顺序怎样,随着时间间隔的增大,炸药内同一位置的压强值均先增大后减小,因此,起爆装药的速度阈值随时间间隔的增大先减小后增大。考虑钨球撞击先后顺序时,在 $|\theta_2| < |\theta_1|$ 的情况下更容易起爆柱壳装药,产生这种变化趋势的原因,可以借鉴一维平面冲击波的相互作用来解释。先减小是由于第2个钨球破片撞击时,第1个钨球破片的冲击波没扫过第2个钨球的撞击区域,所以两道冲击波迎面相遇发生叠加。后增大是由于第2个钨球破片撞击时,第1个钨球破片的冲击波扫过第2个破片的撞击区域,而冲击波的传播相对于波前介质是超音速的,而相对于波后介质是亚音速的,因此第2个钨球破片形成的冲击波必定追赶上第1道冲击波,叠加成更强的一道冲击波。而追赶过程相较于迎面相遇过程,两破片的冲击波衰减得更多,所以需要更高的起爆速度阈值。在考虑撞击先后顺序时,以相同速度撞击时,后撞击的撞击角小于先撞击的角度时,后一个钨球速度方向的壳体厚度更薄,冲击波传播过程衰减相对少,更容易与前一道冲击波叠加成更强的一道冲击波,所以 $|\theta_2| < |\theta_1|$ 时更容易起爆柱壳装药。

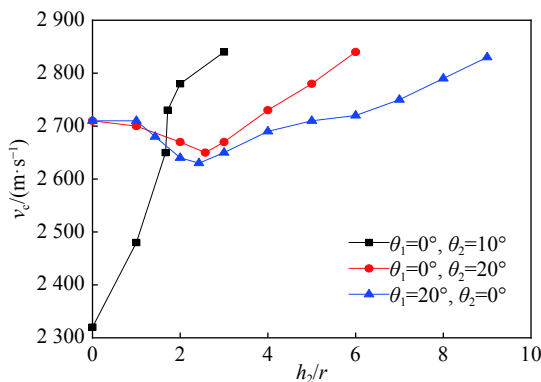


图14  $l_{12}=0$ 时起爆速度阈值随时间间隔的变化

Fig. 14 Critical velocity vs. time interval  $h_2/r$  ( $l_{12}=0$ )

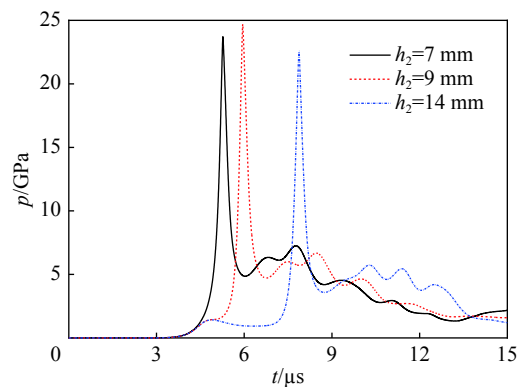


图15 观测点 $\theta_{2.5.2}$ 的压力时间曲线

Fig. 15 Pressure-time curves at observation point  $\theta_{2.5.2}$  ( $v=2800$  m/s)

当两个钨球球心不在同一圆柱截面时,选取  $l_{12}/r=2$  进行研究,钨球 1 先碰撞柱壳装药,钨球 2 后碰撞。当  $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_2=20^\circ$ 、 $l_{12}/r=2$  与  $\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=0^\circ$ 、 $l_{12}/r=2$  时,装药起爆速度阈值均随碰撞时间间隔的增大先减小后增大,最小的起爆速度阈值约为同时撞击的 95%,如图 17 所示。当 2 个钨球的撞击位置相同、撞击顺序不同时,曲线的整体趋势是相同的,都是先减小后增大。在  $h/r < 7$  范围内,  $|\theta_2| < |\theta_1|$  时的起爆速度阈值小于  $|\theta_2| > |\theta_1|$  时的速度阈值,即当 2 个钨球撞击角度一定时,后撞击的撞击角小于先撞击的角度时,更容易起爆柱壳装药。

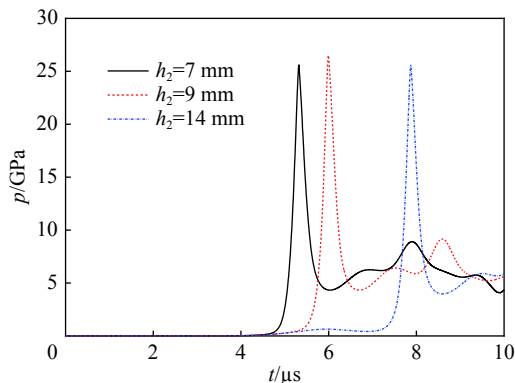


图 16 观测点  $\theta_{2,0.2}$  的压力时间曲线

Fig. 16 Pressure-time curves of  $\theta_{2,0.2}$  ( $v=2\ 800\ \text{m/s}$ )

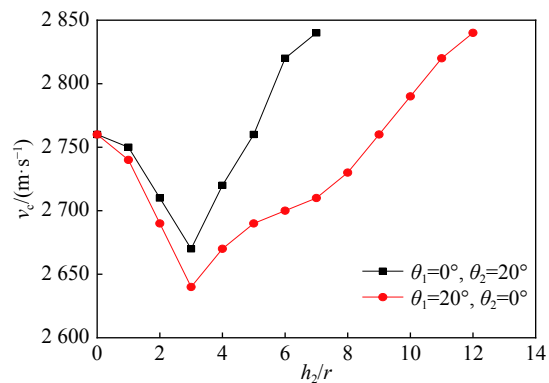


图 17 起爆速度阈值随时间间隔的变化

Fig. 17 Critical velocities vs. time interval  $h_2/r$  ( $l_{12}/r=2$ )

### 3 结论

通过 AUTODYN-3D 软件对多钨球破片冲击起爆柱壳装药特性的研究,得到以下结论。

(1) 相同球心距情况下,以柱壳装药的法线为对称轴,随着钨球个数的增加,起爆柱壳装药的速度阈值明显减小,4 个钨球作用时的速度阈值约是单个钨球以  $0^\circ$  撞击的 55%,6 个钨球作用时的速度阈值约是单个钨球以  $0^\circ$  撞击的 50%。

(2) 双钨球紧靠在一起撞击柱壳装药时,装药半径对装药起爆速度阈值影响不明显。当以  $\theta_1=\theta_2=0^\circ$  撞击时,柱壳装药和平板装药有明显的差别,当  $l \leq 7r$  时,柱壳装药相较于平板装药更难以起爆,且  $l < 4r$  时双钨球起爆柱壳装药的叠加作用明显。

(3) 多钨球同时撞击柱壳装药的起爆速度阈值均随着撞击角、轴向球心距的增大而增大,最终趋近于多钨球破片中撞击角绝对值最小的那枚破片碰撞位置对应的单钨球起爆装药的速度阈值。双钨球作用时起爆速度阈值的最小值约为撞击角绝对值最小的单钨球作用时的 76%,4 个钨球作用时起爆速度阈值的最小值约为撞击角绝对值最小的单钨球作用时的 54%。

(4) 双钨球间隔撞击柱壳装药的起爆速度阈值均随撞击时间间隔的增大而先减小后增大,最小起爆速度阈值约为同时撞击的 95%,且  $|\theta_2| < |\theta_1|$  的方案更容易起爆柱壳装药。

### 参考文献:

- [1] 居仙春. 炮射布阵式悬浮弹幕特性及其协同反导效能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 7-8; 34.
- [2] JAMES H R. Critical energy criterion for the shock initiation of explosives by projectile impact [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1988, 13(2): 35-41. DOI: 10.1002/prop.19880130202.
- [3] HELD M. Initiation phenomena with shaped charge jets [C] // 9th International Symposium on Detonation. Portland, Oregon, US: OCNR, 1989: 1416-1426.
- [4] 陈卫东, 张忠, 刘家良. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟和分析 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(9): 1187-1191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.09.007.

CHEN W D, ZHANG Z, LIU J L. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by



- fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1187–1191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.09.007.
- [5] 方青, 卫玉章, 张克明, 等. 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 Q, WEI Y Z, ZHANG K M, et al. On the projectile oblique-impact initiation conditions for explosive covered with a plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(2): 153–158.
- [6] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2006.04.016.  
ZHANG X F, ZHAO Y S, CHEN H W. The critical condition of shelled explosive initiated by projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 2006, 18(4): 57–59. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2006.04.016.
- [7] 王树山, 李朝君, 马晓飞, 等. 钨合金破片对屏蔽装药撞击起爆的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2001, 22(2): 189–191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2001.02.012.  
WANG S S, LI C J, MA X F, et al. An experimental study on the initiation of covered charge impacted by tungsten alloy fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(2): 189–191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2001.02.012.
- [8] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2006.01.002.  
LIANG Z F, YUAN B H. Numerical simulation and experimental study of the initiation of shielded composition B impacted by fragment [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(1): 5–9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2006.01.002.
- [9] 李文彬, 王晓鸣, 赵国志, 等. 多破片命中时炸药的冲击起爆研究 [J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(1): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2004.01.002.  
LI W B, WANG XM, ZHAO G Z, et al. Study on shock initiation of explosive by the impact of multi-fragment [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(1): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2004.01.002.
- [10] LUECK M, HEINE A, WICKERT M. Numerical analysis of the initiation of high explosives by interacting shock waves due to multiple fragment impact [C] // 26th International Symposium Ballistics. Miami, FL, USA: NDIA, 2011: 73–81.
- [11] 贾宪振, 陈松, 杨建, 等. 双破片同时撞击对 B 炸药冲击起爆的数值模拟研究 [J]. *高压物理学报*, 2011, 25(5): 469–474. DOI: 10.11858/gywlb.2011.05.014.  
JIA X Z, CHEN S, YANG J, et al. Numerical study of explosives initiation by simultaneous impact from two fragments [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(5): 469–474. DOI: 10.11858/gywlb.2011.05.014.
- [12] 梁斌, 冯高鹏, 魏雪婷. 多枚破片冲击引爆带盖板炸药数值模拟分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(6): 62–66; 69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2013.06.018.  
LIANG B, FENG G P, WEI X T. Numerical simulation on shock initiation of composition explosive of cover board subjected to multi-fragment [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(6): 62–66; 69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2013.06.018.
- [13] 宋浦, 梁安定. 破片对柱壳装药的撞击毁伤试验研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1): 87–88, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2006.01.029.  
SONG P, LIANG A D. Experimental investigation on charges covered shell damaged by fragments impact [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 87–88, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2006.01.029.
- [14] 江增荣, 李向荣, 李世才, 等. 预制破片对战斗部冲击起爆数值模拟 [J]. *弹道学报*, 2009, 21(1): 9–13.  
JIANG Z R, LI X R, LI S C, et al. Numerical simulation on shock initiation of performed fragment to warhead [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 9–13.
- [15] 辛建国, 徐豫新, 李超, 等. 破片冲击柱面薄壳装药实验 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 222–227.  
XIN J G, XU Y X, LI C, et al. Experiment of fragment impact on cylinder charge covered with thin shell [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 222–227.
- [16] 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 X, JIANG J W, WANG S Y, 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.
- [17] AUTODYN, Users manual [Z]. California: Century Dynamics Corporation, 2005.

(责任编辑 曾月蓉)