

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0111

# 杆式弹对厚壁壳体装药冲击起爆机制模拟分析\*

康浩博, 蒋建伟, 彭嘉诚, 李 梅

(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:** 为研究高速杆式弹冲击厚壁壳体装药的起爆机制, 运用冲击物理显式欧拉型动力学 SPEED 软件, 开展了不同弹径和弹长的钨合金杆式弹与厚壁壳体 Comp-B 装药相互作用过程的数值模拟, 采用升降法获得弹体起爆装药临界着速及装药起爆位置变化。研究结果表明: 弹体起爆装药临界着速随弹径增大而显著降低, 随弹长增大呈先降低后平缓变化的规律; 弹体以临界着速起爆装药时, 存在 2 种装药起爆机制, 即弹体贯穿壳体后的宏观剪切起爆和未贯穿壳体的低速冲击起爆, 且其机制随弹体着速在临界着速以上继续提高会发生转变, 最终均会转变为高速冲击起爆机制; 装药起爆位置均发生在炸药壳体交界面后一定距离处, 相同机制下此距离随弹体着速提高而减小。

**关键词:** 杆式弹; 起爆位置; 冲击起爆; 临界着速; 起爆机制

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Simulation analysis on the initiation mechanism of the explosive charge covered with a thick shell impacted by a rod projectile

KANG Haobo, JIANG Jianwei, PENG Jiacheng, LI Mei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to study the initiation mechanisms of the explosive charge covered with a thick shell impacted by a high-velocity rod projectiles, the shock physical explicit Eulerian dynamic software SPEED was applied to numerically simulate the interactions between the tungsten rod projectiles with different diameters and lengths and the Comp-B charge covered with a thick shell, the up-down method was used to obtain the critical impact velocity and the change of the detonation position, and the effects of the projectile diameter and length on the critical impact velocity were obtained. The initiation mechanisms of the Comp-B charge detonated by the projectile at the critical impact velocity were analyzed in depth, and the effects of the projectile impact velocity on the initiation mechanism and the detonation position were obtained. The research results show that the critical impact velocity decreases significantly as the projectile diameter increases, the critical impact velocity first decreases and then gradually changes as the projectile length increases. When the Comp-B charge is detonated by the projectile at the critical impact velocity, there are two initiation mechanisms, namely the macro-shear initiation mechanism after the projectile penetrates the shell and the low-velocity impact initiation mechanism without penetrating the shell. The mechanisms will transform as the projectile impact velocity continues to increase above the critical impact velocity. If the macro-shear initiation mechanism dominates when the Comp-B charge is detonated by the projectile at the critical impact velocity, it will transform into the high-velocity impact initiation mechanism; if the low-velocity impact initiation mechanism dominates at this time, it will first transform into the macro-shear initiation mechanism, and then transform into the high-velocity impact initiation mechanism. The detonation position is at a certain distance from the interface between the explosive and the shell, the distance decreases as the impact velocity of the projectile increases if the initiation mechanism remains the same.

**Keywords:** rod projectile; initiation position; impact initiation; critical impact velocity; initiation mechanism

\* 收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-07-20

第一作者: 康浩博(1997—), 男, 硕士研究生, 1399947337@qq.com

通信作者: 蒋建伟(1962—), 男, 博士, 教授, bitjw@bit.edu.cn

精确制导弹药作为摧毁高价值坚固目标的利器, 在现代战争中发挥了日益重要的作用, 为了提高弹药的生存能力和作用威力, 作为有效载荷战斗部的弹体和装药朝厚壁化和不敏感化发展, 这对传统反导弹药提出了严峻的挑战, 无论是依靠高速破片群的破片式反导战斗部, 还是高射速小口径动能穿甲弹, 均因其毁伤元打击动能不足, 无法有效击爆和毁伤来袭弹药, 这促使人们研究新的毁伤途径, 近年来电磁炮等新型发射技术的发展, 通过提高弹丸炮口动能方式使杆式弹拦截、毁伤来袭厚壁战斗部成为反导领域的热点问题。

有效毁伤来袭弹药的核心在于如何使毁伤元引爆屏蔽装药, 已有不少学者主要针对破片毁伤元开展冲击起爆研究, 获得了破片材料、形状、尺寸对不同厚度壳体装药冲击起爆的影响规律<sup>[1-5]</sup>, 并建立了一些经典的起爆判据<sup>[6-8]</sup>。方青等<sup>[9]</sup>对破片冲击带壳装药的起爆机制进行了总结, 主要存在 2 种起爆机制: 冲击起爆和宏观剪切起爆, 2 种机制同时存在, 分别作为主控机制和辅助机制, 当破片冲击薄壳体时, 主控机制为冲击起爆, 宏观剪切起爆影响较小可以忽略, 当破片冲击厚壳体时, 2 种机制的影响相对复杂。早期, 对杆式弹的冲击起爆研究主要局限于爆炸反应装甲引爆问题; 李小笠等<sup>[10-11]</sup>研究了长杆体垂直撞击带壳装药起爆机制, 并建立了与长杆体速度、直径、密度、速度、面板厚度及装药敏感性等因素有关的临界起爆条件; 李文彬等<sup>[12]</sup>通过试验研究了杆式侵彻体冲击起爆反应装甲的影响因素。近年来, 也有学者开展了穿甲弹对反舰导弹的研究; 马瑾等<sup>[13]</sup>建立了弹目交互模型、K 级和 C 级易损性模型、毁伤效应计算模型, 得到了典型毁伤等级下毁伤典型反舰导弹所需比动能; 陈浦等<sup>[14]</sup>采用 AUTODYN-2D 软件数值模拟获得了穿甲弹弹长、弹径和平头直径比等因素对典型导弹战斗部冲击起爆临界速度的影响; 姜颖资等<sup>[15]</sup>采用 LS-DYNA 软件数值模拟获得了穿甲弹入射角和偏轴距离对超音速导弹战斗部冲击起爆过程的影响。然而, 对于高速杆式弹与厚壁壳体战斗部的冲击起爆方面的研究鲜有报道, 仍需进行深入探究。

本文中, 采用应用冲击物理显式欧拉型动力学 SPEED 软件, 开展不同弹径和弹长的杆式弹冲击厚壁壳体装药过程的数值模拟, 利用升降法获得弹体起爆装药临界着速及装药起爆位置变化, 得到弹径和弹长对弹体起爆装药临界着速的影响规律, 深入分析弹体以临界着速起爆装药的起爆机制, 并探究弹体着速对起爆机制和起爆位置的影响, 以期研究结果可为反厚壁来袭战斗部的高速杆式弹设计提供参考。

## 1 数值模拟模型

### 1.1 物理模型

图 1 为杆式弹垂直命中模拟战斗部物理模型, 其中杆式弹具有一定长径比( $D$  为弹径,  $L$  为弹长), 材料为钨合金; 模拟战斗部柱形平板( $H$  为厚度)壳体, 材料为合金钢; 紧贴壳体后为炸药, 种类为 Comp-B, 可模拟真实状态下高速杆式弹冲击厚壁壳体战斗部过程。

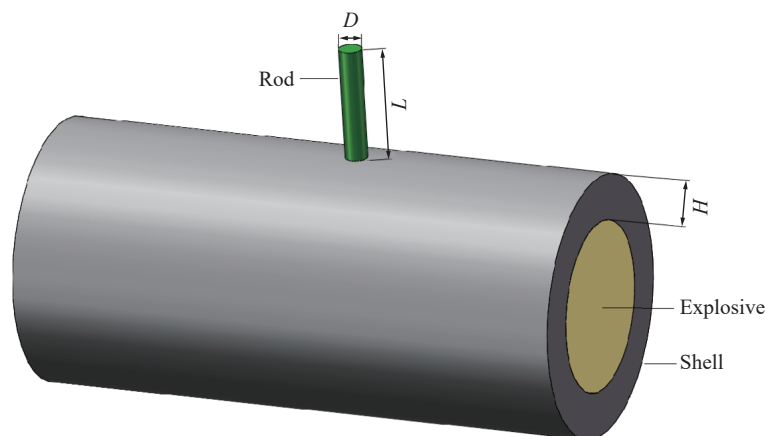


图 1 杆式弹垂直命中模拟战斗部物理模型

Fig. 1 The physical model for a rod projectile vertically impacting on a simulated warhead

### 1.2 数值建模

采用 SPEED 软件纯欧拉算法开展高速杆式弹冲击模拟战斗部过程的数值模拟。用于冲击起爆问题的数值模拟方法主要有拉格朗日、欧拉、光滑粒子流体动力学、拉格朗日-欧拉耦合算法等多种算法。杆式弹与厚壁壳体装药的相互作用过程采用欧拉算法, 不仅可避免杆式弹、壳体和炸药大变形引起的网格畸变, 又可以很好地描述炸药冲击起爆和爆轰过程。因此, 处理杆式弹对炸药冲击起爆数值模拟最合适的方法是欧拉算法。目前 AUTODYN、LS-DYNA 及 SPEED 等软件均有欧拉算法, SPEED 在这几款软件中具有更高的精度(三阶)和计算速度, 因此本文中采用该软件进行数值模拟。

为简化计算, 利用 SPEED 软件建立二维离散化模型, 考虑模型对称性, 建立 1/2 模型, 如图 2 所示。在杆式弹、壳体和炸药四周设置投射(transmissive)边界条件, 为杆式弹设置轴向初始速度条件, 并沿弹对称轴炸药层轴线设置多个观测点, 以记录杆式弹侵彻过程炸药内部的反应度和压力-时程曲线, 分析炸药的冲击起爆程度以及起爆位置变化。

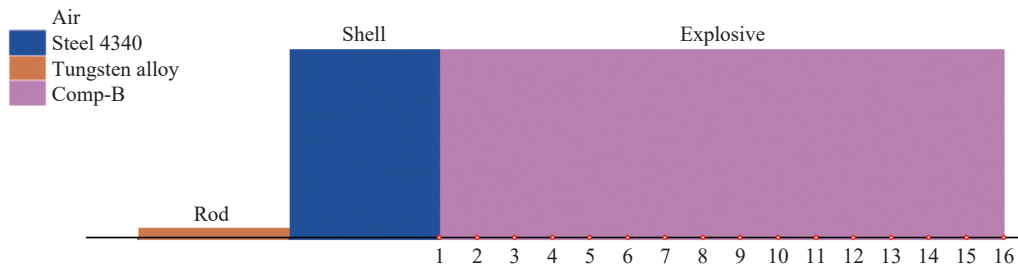


图 2 二维离散化模型

Fig. 2 The two-dimensional discrete model

钨合金、合金钢金属采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。金属材料材料模型、强度模型和失效模型见表 1, 金属 Johnson-Cook 强度模型参数见表 2, 参数均选自 SPEED 软件材料库。

表 1 金属材料模型

Table 1 Models for metal materials

部件	材料	状态方程	强度模型	失效模型
战斗部壳体	4340钢	Shock	Johnson-Cook	Johnson-Cook
杆式弹	钨合金	Shock	Johnson-Cook	Johnson-Cook

表 2 金属 Johnson-Cook 强度模型参数

Table 2 Johnson-Cook strength model parameters for metal materials

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$G/GPa$	$A/MPa$	$B/MPa$	$n$	$C$	$m$	$T_m/K$
4340钢	7.83	80.1	792	510	0.26	0.014	1.03	1793
钨合金	17.30	145.0	1506	177	0.12	0.016	1.00	1723

炸药采用 Lee-Tarver 三项式点火与增长模型<sup>[16]</sup>, 该模型能很好地描述炸药受冲击起爆阶段的反应率和完成度, 其形式如下:

$$\frac{\partial F_L}{\partial t} = I_L(1 - F_L)^{b_L} \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a_L \right)^{x_L} + G_{1L}(1 - F_L)^{c_L} F_L^{d_L} p^{y_L} + G_{2L}(1 - F_L)^{e_L} F_L^{g_L} p^{z_L} \quad (1)$$

式中:  $F_L$  为反应质量分数, 控制爆轰过程中炸药化学能释放;  $t$  为时间;  $\rho$  为当前密度;  $\rho_0$  为初始密度;  $p$  为压力;  $I_L$ 、 $b_L$ 、 $a_L$ 、 $x_L$ 、 $G_{1L}$ 、 $c_L$ 、 $d_L$ 、 $y_L$ 、 $G_{2L}$ 、 $e_L$ 、 $g_L$  和  $z_L$  为点火与增长模型方程参数。式(1)等号右边

第 1 项为点火项, 描述热点燃烧阶段; 第 2 项为成长项, 描述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, 该方程描述压力、体积和能量之间的变化关系, 其压力为:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{\bar{V}} \quad (2)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为方程需要确定的参数,  $\bar{V}$  为比容,  $E$  为体积内能。炸药 Lee-Tarver 模型参数见表 3, 炸药基本参数及 JWL 状态方程参数见表 4, 参数均选自 SPEED 软件材料库。

表 3 Comp-B 炸药 Lee-Tarver 状态方程参数

Table 3 Lee-Tarver equation-of-state parameters for Comp-B explosive

$t_L/\mu\text{s}^{-1}$	$b_L$	$a_L$	$x_L$	$G_{1L}$	$c_L$	$d_L$	$\gamma_L$	$G_{2L}$	$e_L$	$g_L$	$z_L$
$4 \times 10^6$	0.667	0.0367	7	140	0.667	0.333	2	1000	0.222	1	3

表 4 Comp-B 炸药基本参数及 JWL 状态方程参数

Table 4 Basic parameters and JWL equation-of-state parameters for Comp-B explosive

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_{CJ}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$p_{CJ}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.717	7980	29.5	524.2	7.678	4.2	1.1	0.5

### 1.3 计算工况

为了研究高速杆式弹冲击厚壁壳体装药过程中弹径和弹长对弹体起爆装药临界着速的影响, 模拟真实来袭厚壁战斗部尺寸, 取炸药长度为 300 mm, 其中两相邻观测点的间隔均为 20 mm, 壳体厚度  $H$  为 80 mm, 分别取弹径  $D$  为 8、12、16、20、24 和 28 mm, 弹长  $L$  为 80、100、120、140、160 和 180 mm, 设计了不同尺寸弹体共 36 组计算工况。

### 1.4 模型检验

材料参数的正确与否与模拟结果的正确性直接相关。本文中, 计算了文献 [17] 中圆柱形平头和球形钢射弹正向撞击带不同厚度钢盖板的 Comp-B 装药, 表 5 为弹体冲击起爆装药临界着速  $v_{cr}$  的模拟结果与试验结果的对比。从表 5 可看出, 模拟结果与试验结果吻合较好, 可认定模拟结果真实可信。

表 5 模拟结果与试验结果的对比

Table 5 Comparison between simulated results and tested ones

序号	弹体形状	$D/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$v_{cr}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
					模拟	试验
1	圆柱形平头	16.20	16.20	14	2025	1990±40
2	球形	16.67	16.67	12	2600	2650±50
3				6	1950	1910±60

## 2 弹体冲击起爆装药临界着速影响因素分析

### 2.1 弹径对弹体冲击起爆装药临界着速的影响

运用 SPEED 软件对各计算工况赋予一定着速  $v$  进行数值模拟。采用升降法求取弹体冲击起爆装药的临界着速, 即: 选取某一着速, 若炸药未起爆, 则提高着速继续计算; 反之, 则降低着速进行计算; 直到着速差为  $\pm 25$  m/s, 停止计算, 取该速度为弹体冲击起爆装药的临界着速  $v_{cr}$ 。以炸药内部各点压力  $p$  和反应度  $\alpha$  的变化作为炸药起爆与否的判据。Comp-B 炸药的 CJ 压力为 29.5 GPa; 反应度为反应的炸药单元与所有炸药单元的比,  $\alpha=0\sim 1$ , 其中  $\alpha=0$  代表未反应,  $\alpha=1$  代表完全反应。

图 3 为弹体起爆装药临界着速随弹径变化的曲线, 其中  $L$  为 140~180 mm 的曲线重合, 可以看出, 增大弹径可以有效降低弹体起爆装药临界着速。当弹径达到 16 mm 前, 弹体临界着速与弹径呈接近线性关系, 随弹径增大其临界着速迅速降低, 弹径每增大 4 mm 其临界着速降低约 400 m/s, 且弹长越大其临界着速的降幅越大; 当弹径从 16 mm 增大到 20 mm 时, 弹体临界着速出现突跃降低, 下降的趋势减缓; 当弹径达到 20 mm 后, 弹体临界着速仍与弹径呈接近线性关系, 但降幅相对减小, 弹径每增大 4 mm 其临界着速降低约 200 m/s, 且弹长不同其临界着速的降幅接近。

## 2.2 弹长对弹体起爆装药临界着速的影响

图 4 为弹体起爆装药临界着速随弹长变化的曲线, 可以看出随着弹长增大, 弹体起爆装药临界着速先逐渐降低后平缓变化, 即弹长存在一个临界值, 超过该临界值则不会影响弹体起爆装药临界着速。当弹径  $D$  为 8~16 mm 时, 弹长对弹体起爆装药临界着速的影响较大, 当弹长达到 140 mm 前, 弹长每增加 20 mm 其临界着速可以降低 125~275 m/s, 且弹径越大其临界着速的降幅越大, 当弹长达到 140 mm 后, 其临界着速趋于稳定; 当弹径  $D$  为 20~28 mm 时, 弹长从 80 mm 增大到 120 mm 其临界着速共降低 125~250 m/s, 之后已基本趋于稳定, 相对  $D$  为 8~16 mm 时其临界着速的变化范围明显减小。

## 3 起爆机制分析

### 3.1 宏观剪切起爆

在第 2 节中研究发现, 弹径  $D$  在 8~16 和 20~28 mm 区间时, 弹径和弹长对弹体冲击起爆装药临界着速的影响规律不尽相同, 随两者的改变, 临界着速虽呈现出相似的变化趋势, 但其变化程度差别较大。这可能是由装药起爆机制不同所造成的, 需对比弹径在 2 个区间时装药的起爆过程。由于规律的变化发生在弹径从 16 mm 增大到 20 mm 处, 因此选取弹长相同且弹径分别为 16 和 20 mm 工况的典型过程进行分析, 从而得出其起爆机制。

首先, 选取工况(弹径  $D=16$  mm, 弹长  $L=80$  mm)弹体以不同着速冲击厚壁壳体装药的典型过程进行分析, 图 5 为不同着速弹体对炸药起爆与未起爆典型时刻的压力云图。

从图 5 可以看出:  $t=0\sim 140$   $\mu\text{s}$ , 2 种着速的弹体侵入壳体时均形成敦粗并出现冲塞现象, 即壳体在弹体冲击下会形成一个直径略大于弹径的“塞子”, “塞子”不断向前运动, 之后贯穿壳体后进入炸药内部;  $t=140\sim 500$   $\mu\text{s}$ ,  $v=1\ 725$  m/s 的弹体仍未能起爆炸药, 仅有高压产物不断从弹体侵入口处溢出; 而在

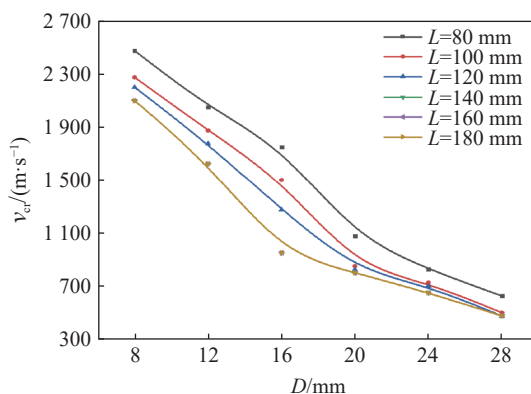


图 3 弹体起爆装药的临界着速随弹径的变化

Fig. 3 Change of critical impact velocity with projectile diameter

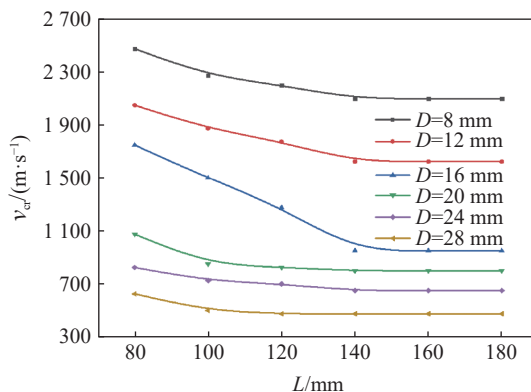


图 4 弹体起爆装药的临界着速随弹长的变化

Fig. 4 Change of critical impact velocity with projectile length

$t=225 \mu\text{s}$  时,  $v=1750 \text{ m/s}$  的弹体起爆炸药, 起爆位置发生在弹体头部后一定距离处, 以近似球面爆轰波从起爆位置向外传播形成稳定爆轰;  $t=240 \mu\text{s}$  时, 起爆位置后炸药几乎被完全起爆, 炸药后端面开始膨胀;  $t=500 \mu\text{s}$  时, 炸药已被完全起爆, 壳体出现较大位移。

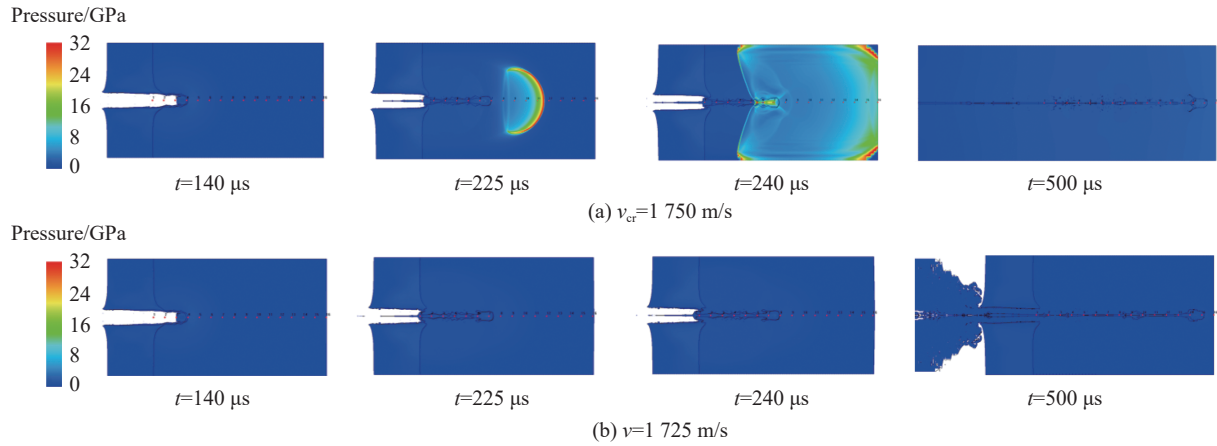


图 5 在不同着速弹体( $D=16 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ )冲击装药典型时刻的压力云图

Fig. 5 Pressure contours at typical times for the projectiles ( $D=16 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ ) impacting on the explosive charge at different impact velocities

图 6、7 分别给出了不同着速弹体对炸药起爆与未起爆时内部观测点的反应度和压力-时程曲线。从图 6(a)、图 7(a) 可以看出, 炸药起爆时反应度不断增大, 并在观测点 11 处先达到 1, 压力幅值先超过炸药的 CJ 压力, 可确定起爆位置发生在观测点 10 和 11 之间, 在观测点 11 处已形成稳定爆轰, 起爆位置后观测点处反应度依次达到 1, 压力幅值逐渐增大; 从图 6(b)、图 7(b) 可以看出, 炸药未起爆时观测点处反应度逐渐衰减, 压力幅值不断波动, 但远低于炸药的 CJ 压力。

该工况下弹体以临界着速侵彻装药时出现冲塞现象, 壳体发生较大变形, “塞子” 贯穿壳体后进入炸药内部, 其边缘不断剪切局部炸药, 使炸药内部出现高温, 从而起爆炸药, 该过程以宏观剪切起爆作为主控机制。因此, 弹径  $D$  在  $8 \sim 16 \text{ mm}$  区间时, 弹长对弹体临界着速具有显著影响。这是由于增大弹长可以提高弹体的侵彻能力, 使其在贯穿壳体后具有更高的剩余速度, 起爆炸药的能力增强。

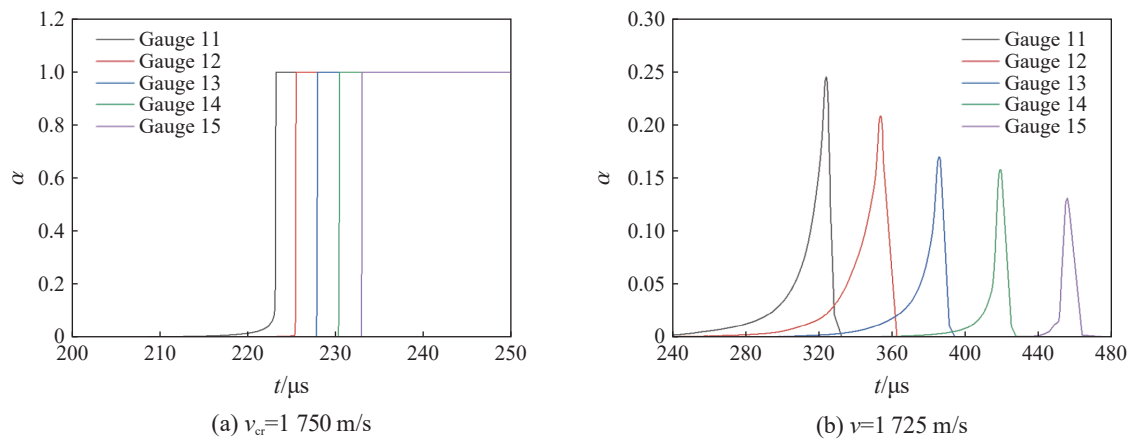


图 6 在不同着速弹体( $D=16 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ )冲击下, 炸药内观测点反应度-时程曲线

Fig. 6 Reaction fraction-time curves at the gauges in the explosive charge impacted by the projectiles ( $D=16 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ ) at different impact velocities

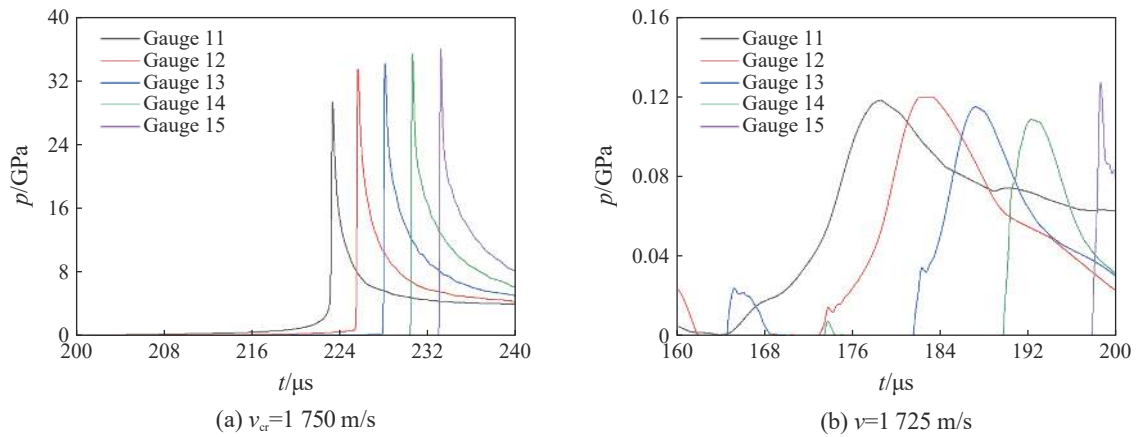


图 7 在不同着速弹体( $D=16\text{ mm}$ ,  $L=80\text{ mm}$ )冲击下炸药内观测点压力-时程曲线

Fig. 7 Pressure-time curves at the gauges in the explosive charge impacted by the projectiles ( $D=16\text{ mm}$ ,  $L=80\text{ mm}$ ) at different impact velocities

### 3.2 低速冲击起爆

然后, 选取工况: 弹径  $D=20\text{ mm}$ , 弹长  $L=80\text{ mm}$ 。对弹体以不同着速冲击厚壁壳体装药的典型过程进行分析, 图 8 为不同着速弹体对炸药起爆与未起爆典型时刻的压力云图。

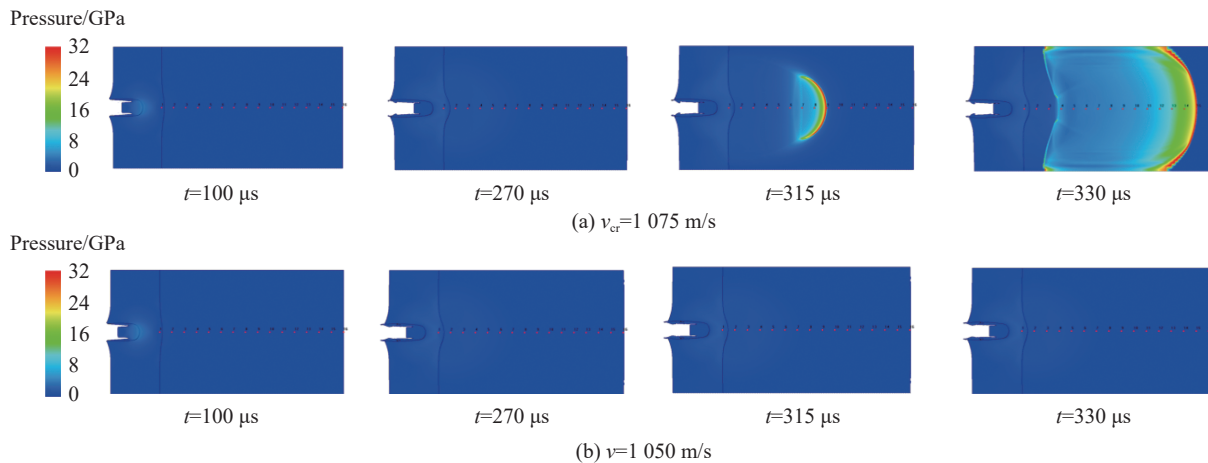


图 8 不同着速弹体( $D=20\text{ mm}$ ,  $L=80\text{ mm}$ )冲击炸药典型时刻的压力云图

Fig. 8 Pressure contours at typical times for the projectiles ( $D=20\text{ mm}$ ,  $L=80\text{ mm}$ ) impacting on the explosive charge at different impact velocities

从图 8 可以看出:  $t=0\sim 270\text{ }\mu\text{s}$ , 在 2 种着速的弹体侵彻作用下壳体变形较小, 未出现冲塞现象, 随着侵彻深度增加, 弹体速度迅速降低;  $t=270\text{ }\mu\text{s}$  时,  $v=1\text{ }050\text{ m/s}$  的弹体未起爆炸药, 此时弹体已不具备足够速度继续侵彻壳体; 而  $t=315\text{ }\mu\text{s}$  时  $v_{cr}=1\text{ }075\text{ m/s}$  的弹体起爆炸药, 此时侵彻深度约为壳体厚度的  $3/4$ , 起爆位置发生在离炸药壳体交界面约  $1/2$  装药长度处, 壳体仍未出现较大变形;  $t=315\sim 330\text{ }\mu\text{s}$ , 爆轰波传播过程与 3.1 节中的类似, 此时弹体剩余速度较低, 已无明显前进的趋势, 因此, 即使继续延长计算时间, 弹体仍无法贯穿壳体。

图 9~10 分别给出了不同着速弹体对炸药起爆和未起爆时内部观测点的反应度和压力-时程曲线, 从图 9(a)、图 10(a) 可以看出, 炸药起爆时反应度在观测点 8 处先达到 1, 但压力幅值并未达到炸药的 CJ 压力, 之后继续升高, 并在观测点 9 处先达过炸药的 CJ 压力, 可确定起爆位置发生在观测点 8 和 9 之间, 且距离观测点 8 更近, 因此观测点 8 处比观测点 9 处更早发生反应, 即观测点 8 处的炸药先被起爆,

在观测点 9 处已形成稳定爆轰; 从图 9(b)、图 10(b) 可以看出, 炸药未起爆时观测点处反应度缓慢增大, 但由于  $t=270 \mu\text{s}$  时弹体停止运动, 不会继续发生反应, 压力变化与 3.1 节中的类似。

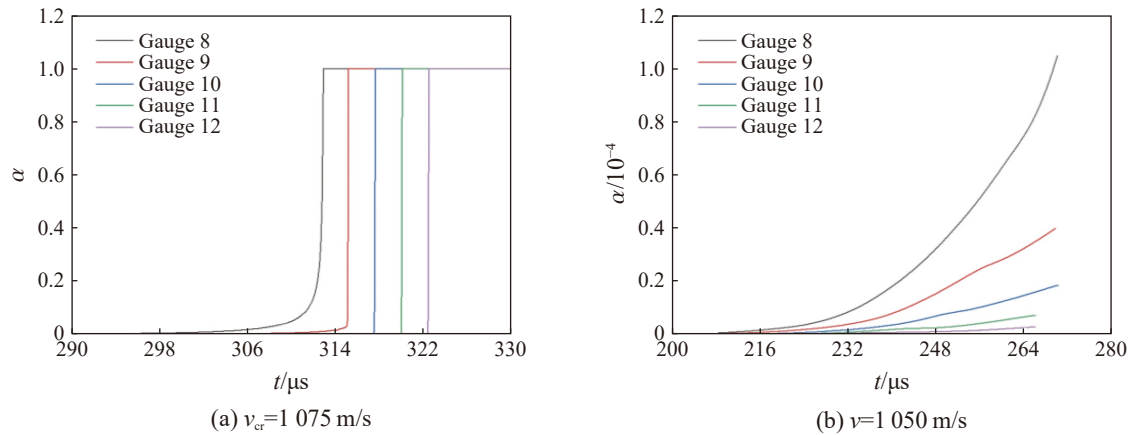


图 9 不同着速弹体( $D=20 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ )冲击下炸药内观测点反应度-时程曲线

Fig. 9 Reaction fraction-time curves at the gauges in the explosive charge impacted by the projectiles ( $D=20 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ ) at different impact velocities

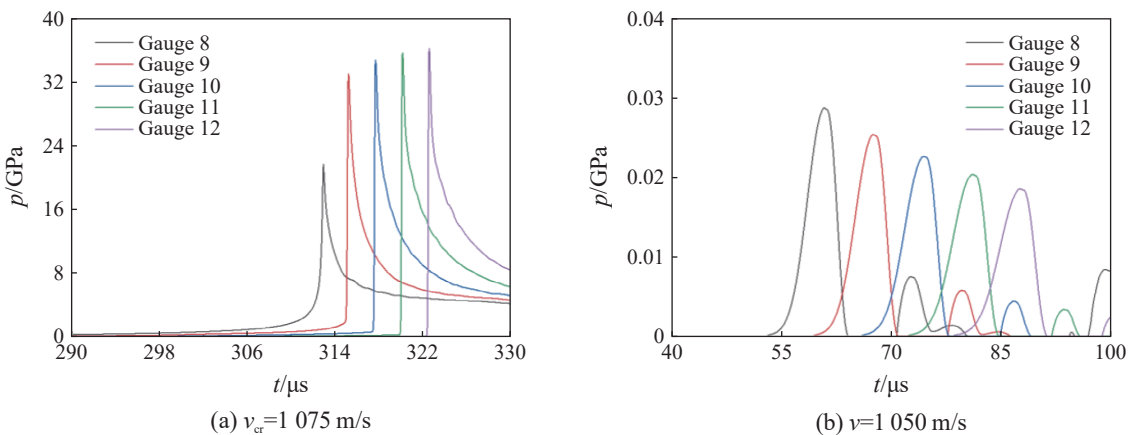


图 10 不同着速弹体( $D=20 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ )冲击下炸药内观测点压力-时程曲线

Fig. 10 Pressure-time curves at the gauges in the explosive charge impacted by the projectiles ( $D=20 \text{ mm}$ ,  $L=80 \text{ mm}$ ) at different impact velocities

该工况中弹体临界着速  $1\ 075 \text{ m/s}$  不足以贯穿壳体, 且弹体侵彻过程中无明显冲塞现象, 宏观剪切作用较弱, 推测炸药仍是在透射冲击波的作用下发生爆轰, 然而在以往研究中破片冲击起爆炸药过程中并未出现此类现象, 即破片在着速不足以贯穿壳体时难以起爆炸药, 为进一步探究在此条件下装药的起爆机制, 开展了与该工况中弹体直径和着速均相同的破片冲击厚壁壳体装药的数值模拟, 对比分析受破片与杆式弹冲击下装药内部压力变化, 图 11 分别给出了破片与杆式弹冲击厚壁壳体装药典型时刻的压力云图。

从图 11(a) 可以看出, 破片以着速  $1\ 075 \text{ m/s}$  冲击厚壁壳体装药,  $t=20 \mu\text{s}$  时, 前驱冲击波已跃过炸药壳体交界面进入炸药内部, 其波阵面峰值压力随传播距离增加不断衰减,  $t=100 \mu\text{s}$  时, 前驱波已接近炸药后端面, 峰值压力相对初始大大降低, 到  $t=300 \mu\text{s}$  为止, 炸药内部始终未发生爆轰反应。从图 11(b) 可以看出, 杆式弹以着速  $1\ 075 \text{ m/s}$  冲击时产生了压力幅值相同的前驱波, 与破片不同的是, 在  $t=100 \mu\text{s}$  前驱波扫掠过大部分炸药区域后, 虽然并未发生爆轰反应, 但在炸药壳体交界面上出现持续高压, 炸药内部产生了一个半椭圆形的高压区, 致使邻近炸药开始发生反应, 热量在相对封闭的空间内积累, 使得反应程度不断加剧, 高压区面积也随时间持续增大,  $t=300 \mu\text{s}$  时已超过  $1/2$  炸药面积, 最终在  $t=315 \mu\text{s}$  时在图 8(a) 中起爆位置处引发炸药爆轰反应。



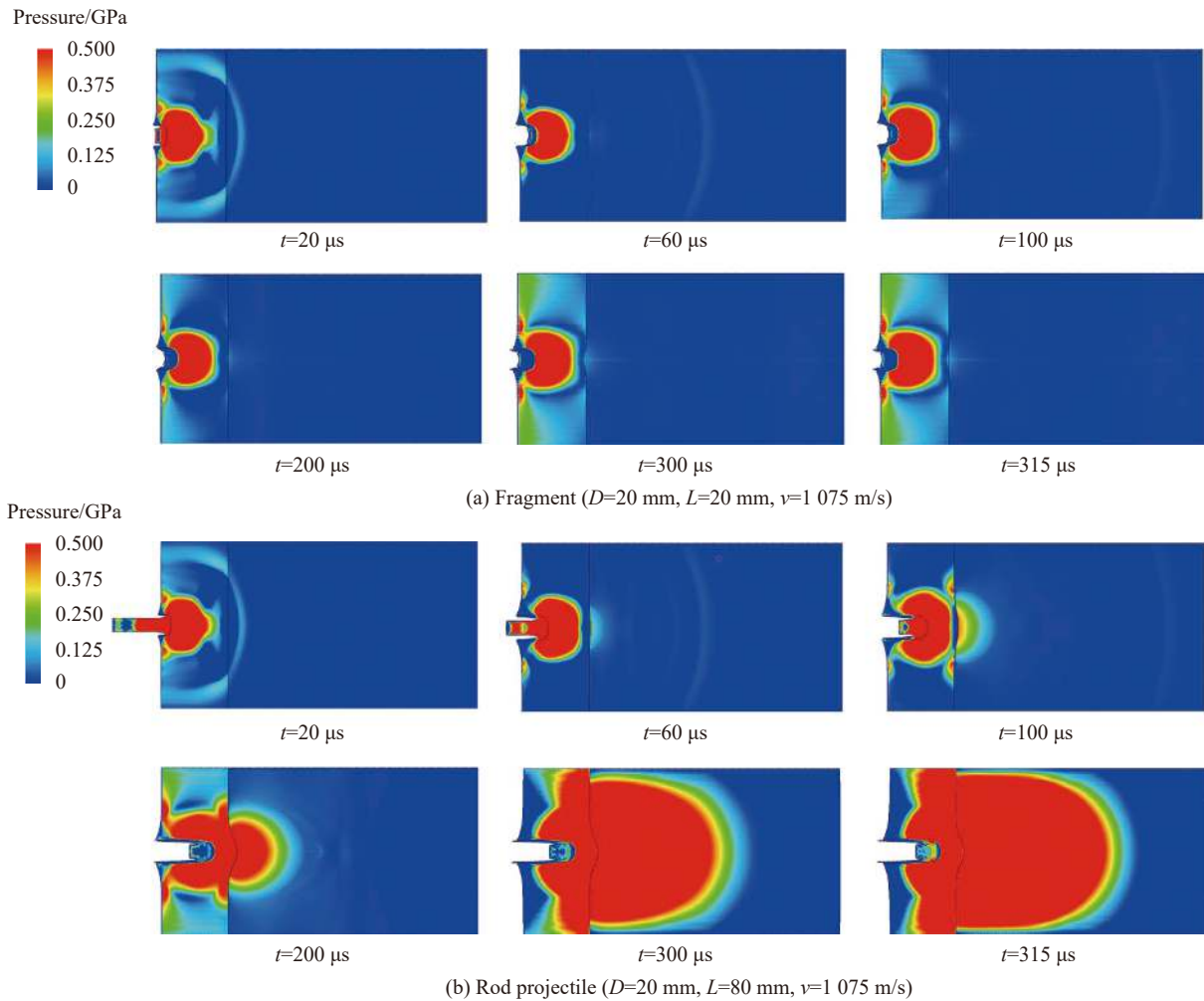


图 11 破片与杆式弹冲击装药典型时刻压力云图

Fig. 11 Pressure contours at typical times for a fragment and rod projectile impacting on the explosive charge

该工况中弹体始终无法贯穿壳体, 壳体也未发生明显变形, 经过较长时间弹体通过持续低速冲击作用起爆炸药, 该过程的主控机制为低速冲击起爆, 对于弹径  $D$  在 20~28 mm 区间时, 由于在此机制下弹体临界着速不足以贯穿壳体, 因此弹长对其临界着速的影响相对较小, 并且弹体需在炸药起爆前持续作用, 若未起爆时已停止运动, 则不会发生爆轰反应, 即弹体着速在一个很小的范围内时才会通过低速冲击起爆炸药, 因此其临界着速的变化范围相对  $D$  在 8~16 mm 区间时的明显减小。

### 3.3 起爆机制的转变

由上文计算结果分析可知, 弹体以临界着速起爆炸药时, 存在以上 2 种装药起爆机制: (1) 弹体贯穿壳体后起爆炸药, 主控机制为宏观剪切起爆; (2) 弹体未贯穿壳体起爆炸药, 主控机制为低速冲击起爆。然而弹体在临界着速以上继续提高着速时, 装药起爆机制是否会发生转变, 仍需进行深入探究。通过数值模拟对以上 2 个工况分别在 [1 750 m/s, 3 250 m/s] 和 [1 075 m/s, 2 575 m/s] 区间改变弹体着速, 之后分别对两者起爆过程的变化进行分析, 图 12 分别给出了不同直径弹体以典型着速起爆炸药时刻的压力云图, 图 13 为装药起爆位置随弹体着速变化的曲线,  $d$  为装药起爆位置离炸药壳体交界面的距离。

从图 12 可以看出, 当弹体着速远高于其临界着速时, 弹体通过高速冲击所产生的前驱冲击波直接起爆炸药, 此时弹体尚未贯穿壳体, 壳体变形量很小, 前驱波传入炸药内部后仅需很短的时间即可起爆炸药, 该过程的主控机制为高速冲击起爆。

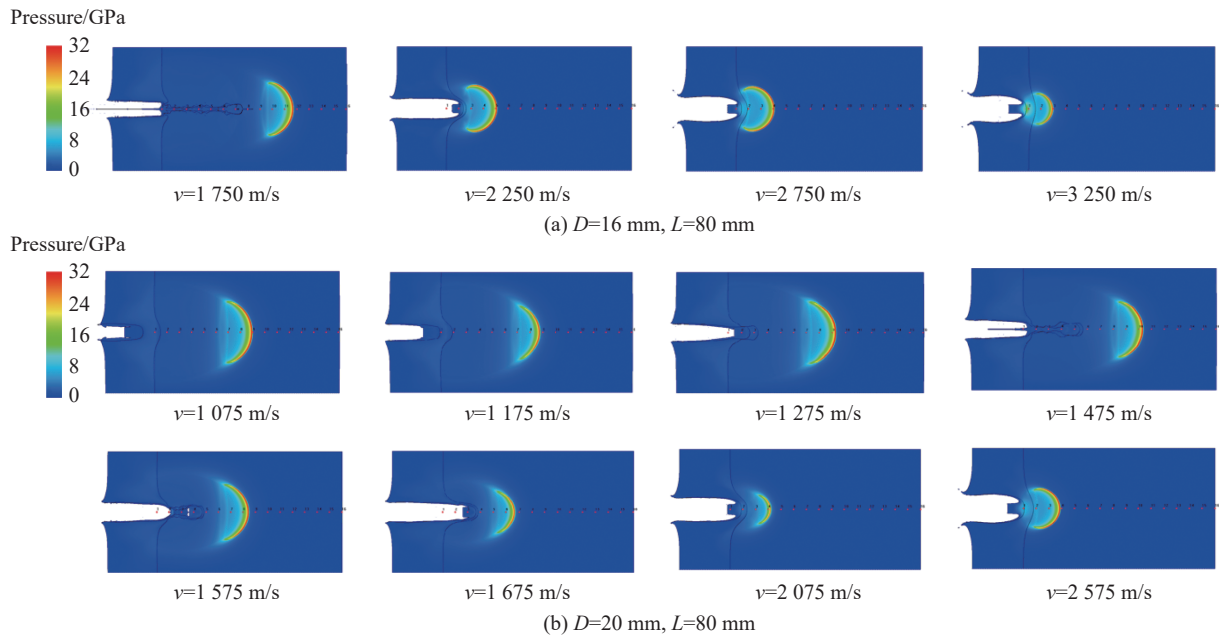


图 12 典型着速弹体起爆装药时刻压力云图

Fig. 12 Pressure contours of the explosive charge detonated by the projectiles at typical impact velocities

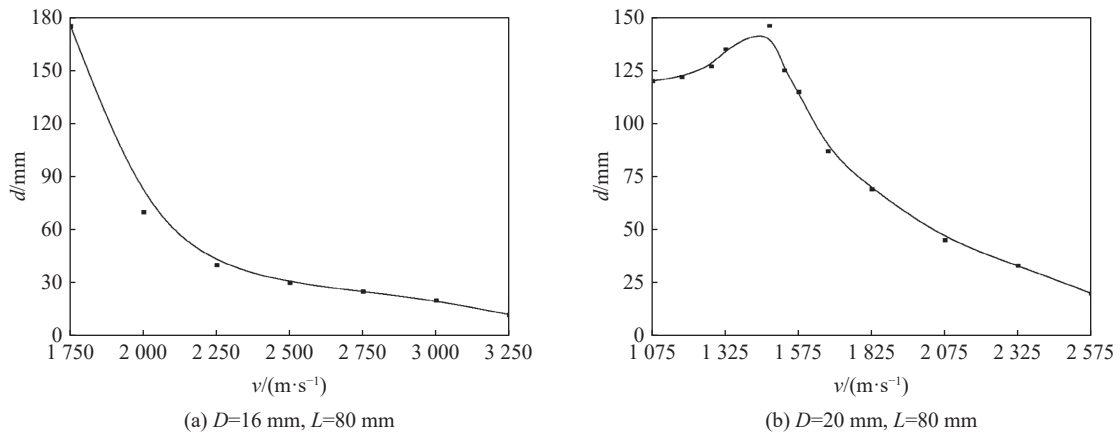


图 13 装药起爆位置随弹体着速的变化

Fig. 13 Change of detonation position with projectile impact velocity

从图 12(a)、图 13(a) 可以看出, 弹体( $D=16\text{ mm}, L=80\text{ mm}$ )以临界着速  $v_{cr}=1\ 750\text{ m/s}$  贯穿壳体后起爆炸药, 主控机制为宏观剪切起爆, 起爆位置发生在弹体头部后一定距离处; 着速  $v$  在  $1\ 750\sim 2\ 750\text{ m/s}$  区间时, 仍会出现冲塞现象, 但随弹体着速提高壳体变形程度减小, 宏观剪切作用减弱, 弹体侵彻过程中产生的冲击波增强, 主控机制从宏观剪切起爆逐渐向高速冲击起爆过渡, 起爆位置与弹体头部的距离不断减小, 位置变化明显; 着速  $v$  在  $2\ 750\sim 3\ 250\text{ m/s}$  区间时, 起爆位置与弹体头部的距离基本不变, 并缓慢接近炸药壳体交界面;  $v=3\ 250\text{ m/s}$  时弹体主要通过前驱冲击波作用起爆炸药, 宏观剪切已无法作为主导, 起爆位置邻近炸药壳体交界面。因此若弹体以临界着速起爆厚壁壳体装药时主控机制为宏观剪切起爆, 随弹体着速提高, 主控机制会从宏观剪切起爆逐渐过渡为高速冲击起爆。

从图 12(b)、图 13(b) 可以看出, 弹体( $D=20\text{ mm}, L=80\text{ mm}$ )以临界着速  $v_{cr}=1\ 075\text{ m/s}$  未贯穿壳体起爆炸药, 主控机制为低速冲击起爆, 起爆位置发生在离炸药壳体交界面约  $1/2$  装药长度处;  $v=1\ 175\text{ m/s}$  时弹体仍无法贯穿壳体, 主控机制未改变; 直到  $v=1\ 275\text{ m/s}$  时, 弹体着速虽较临界着速提高较少, 但已具备一定的剩余速度贯穿壳体, 出现明显的冲塞现象, 主控机制向宏观剪切起爆转变, 起爆位置变化尚不明显;

着速  $v$  在 1275~1675 m/s 区间时, 主控机制转变为宏观剪切起爆, 由于机制完全转变后, 起爆位置相对临界着速时距离炸药壳体交界面更远, 因此起爆位置会先远离炸药壳体交界面再逐渐接近, 不同机制下起爆位置变化不尽相同; 着速  $v$  在 1275~1675 m/s 区间时, 主控机制均为宏观剪切起爆, 起爆位置先远离后接近炸药壳体交界面, 不同主控机制下起爆位置变化不尽相同; 着速  $v$  在 1675~2575 m/s 区间时, 与弹体(弹径  $D=16$  mm, 弹长  $L=80$  mm)起爆炸药过程的转变类似, 随弹体着速提高宏观剪切作用减弱, 冲击波作用增强, 主控机制从宏观剪切起爆向高速冲击起爆过渡, 起爆位置接近炸药壳体交界面。因此若弹体以临界着速起爆厚壁壳体装药时主控机制为低速冲击起爆, 随弹体着速提高, 主控机制会先从低速冲击起爆转变为宏观剪切起爆, 再逐渐过渡为高速冲击起爆。

综上, 杆式弹起爆厚壁壳体装药共存在 3 种起爆机制。当弹体着速略高于其临界着速时, 可能会出现以下 2 种: 机制 1, 宏观剪切起爆, 此时弹体能够贯穿壳体, 并通过剪切作用起爆炸药, 起爆位置发生在弹体头部后一定距离处; 机制 2, 低速冲击起爆, 此时弹体无法贯穿壳体, 需通过较长时间的持续冲击起爆炸药, 起爆位置发生在炸药壳体交界面后距离较远处。当弹体着速远高于其临界着速时, 前 2 种机制最终均会转变为机制 3, 高速冲击起爆, 弹体无需贯穿壳体即可通过前驱冲击波起爆炸药, 起爆位置邻近炸药壳体交界面。

## 4 结 论

利用冲击物理显式欧拉型动力学 SPEED 软件, 对高速杆式弹冲击厚壁壳体装药过程开展了数值模拟研究, 探讨了该过程的起爆机制与规律, 获得的主要结论如下。

(1) 弹体起爆装药临界着速随弹径增大而显著降低, 随弹长增大呈先降低后平缓变化的规律。

(2) 弹体以临界着速起爆厚壁壳体装药时, 存在 2 种装药起爆机制: 一是弹体贯穿壳体后起爆炸药, 主控机制为宏观剪切起爆; 二是弹体未贯穿壳体起爆炸药, 主控机制为低速冲击起爆。

(3) 弹体在临界着速以上继续提高着速时, 装药起爆机制会发生转变, 最终均会转变高速冲击起爆机制。若弹体以临界着速起爆装药时主控机制为宏观剪切起爆, 则会过渡为高速冲击起爆; 若此时主控机制为低速冲击起爆, 则会先转变为宏观剪切起爆, 再过渡为高速冲击起爆。

(4) 不同起爆机制下装药起爆位置均发生在炸药壳体交界面后一定距离处, 相同起爆机制下此距离随弹体着速提高而减小。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 and Propellants, 2006, 29(1): 5-9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2006.01.002.

- [5] 卢锦钊, 智小琦, 李娟娟, 等. 六棱柱破片冲击起爆带壳 B 炸药速度阈值研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(1): 82–84; 120. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.01.021.  
LU J Z, ZHI X Q, LI J J, et al. Threshold velocity of hexagonal prism fragment impacting on Comp B with shell [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2016, 36(1): 82–84; 120. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.01.021.
- [6] HELD M. Initiation phenomena with shaped charge jets [C]// 9th International Symposium on Detonation. Portland, Oregon, US: OCNR, 1989: 1416–1426.
- [7] LLOYD R M. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]. Virginia: AIAA, 1998: 502–504.
- [8] ROSLUND L A. Initiation of warhead fragments I : normal impacts: NOLTR73-124 [R]. White Oak: Naval Surface Weapons Center, 1973.
- [9] 方青, 卫玉章, 张克明, 等. 射弹撞击带厚盖板炸药引发爆轰的机制 [J]. 弹道学报, 1997, 9(1): 16–20.  
FANG Q, WEI Y Z, ZHANG K M, et al. An investigation on the projectile impact initiation mechanism of detonation in explosive charges covered with a thick steel plate [J]. *Journal of Ballistics*, 1997, 9(1): 16–20.
- [10] 李小笠, 赵国志, 李文彬. 长杆体垂直冲击带盖板炸药的临界起爆准则 [J]. 弹道学报, 2004, 16(2): 51–55. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2004.02.012.  
LI X L, ZHAO G Z, LI W B. Critical energy criterion used to predict covered explosives impacted by rod [J]. *Journal of Ballistics*, 2004, 16(2): 51–55. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2004.02.012.
- [11] 李小笠, 赵国志, 李文彬, 等. 长杆体正撞击平面夹层装药引发爆轰的条件 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(3): 51–54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.03.016.  
LI X L, ZHAO G Z, LI W B, et al. The initiation condition of long rod projectile impact sandwich explosive [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(3): 51–54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.03.016.
- [12] 李文彬, 赵国志, 王晓鸣, 等. 杆式侵彻体冲击起爆反应装甲影响因素研究 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2003, 27(3): 230–233. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2003.03.002.  
LI W B, ZHAO G Z, WANG X M, et al. Study on effect factors of the impact initiation by rod penetrator into explosive reactive armor [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(3): 230–233. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2003.03.002.
- [13] 马瑾, 卢暾, 张兵, 等. 穿甲弹对反舰导弹毁伤效应研究 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(12): 211–215. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.12.041.  
MA J, LU H, ZHANG B, et al. Research on the damage effects of AMDS on anti-ship missile [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(12): 211–215. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.12.041.
- [14] 陈浦, 汤文辉, 冉宪文. 弹芯尺寸对于反导穿甲弹引爆能力的影响 [J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(4): 101–106. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.04.027.  
CHEN P, TANG W H, RAN X W. Study on influence of core dimensions on initiation ability of anti-missile armor-piercing projectile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(4): 101–106. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.04.027.
- [15] 姜颖资, 王伟力, 傅磊, 等. 钨合金穿甲弹对超音速导弹战斗部冲击起爆研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(3): 102–105. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.03.026.  
JIANG Y Z, WANG W L, FU L, et al. Research on the impact initiation to supersonic missile by tungsten heavy alloy penetrator [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(3): 102–105. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.03.026.
- [16] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362. DOI: 10.1063/1.862940.
- [17] 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. On the projectile oblique-impact initiation conditions for explosive covered with a plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(2): 153–158.

(责任编辑 张凌云)