

文章编号:1006-9941(2023)08-0797-11

双 EFP 冲击引爆带盖板 B 炸药的累积毁伤效应

郭 淳,张先锋,熊 玮

(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究多个爆炸成型弹丸(MEFP)对战斗部装药的冲击起爆问题,进行了单、双爆炸成型弹丸(EFP)冲击引爆带盖板 B 炸药的试验,测试了单 EFP 和双 EFP 对带盖板 B 炸药的冲击引爆能力,同时利用 AUTODYN 有限元软件开展了 EFP 对带盖板 B 炸药冲击引爆行为数值模拟研究,分别分析了单 EFP 和双 EFP 的成型过程、引爆带盖板 B 炸药的作用过程,获得了 B 炸药发生爆轰时的临界盖板厚度(H_c)。进一步,建立了双 EFP 同时引爆带盖板炸药临界条件的工程计算模型。试验结果表明:试验获得的 EFP 长 18 mm,直径 19 mm。单 EFP 冲击带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度范围为 $10\text{ mm} \leq H_c < 15\text{ mm}$,而双 EFP 作用时的临界盖板厚度范围为 $15\text{ mm} \leq H_c < 20\text{ mm}$ 。另一方面,数值模拟结果表明,在单 EFP 作用下,带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度为 13 mm;而双 EFP 作用下,带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度为 19 mm,相较于单 EFP 作用时的 H_c 提高了 46.2%,数值模拟结果与试验结果吻合较好。工程模型能较准确地预测双 EFP 同时冲击起爆带盖板炸药的临界起爆速度。

关键词: 双 EFP;冲击引爆;临界起爆速度;累积效应

中图分类号: TJ5;TJ 410

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023027

0 引言

随着各国防空反导技术的发展,涌现出多种新型反导弹药。悬浮弹幕协同反导弹药是通过其多个悬浮子弹战斗部生成射向随机的成百上千个 EFP(爆炸成型弹丸)单元联合毁伤来袭导弹等目标的新型防御性弹药。应用具有一定分布密度的多破片(预制破片或 EFP 等)冲击引爆目标战斗部,可以有效拦截来袭导弹或销毁废弃弹药。

破片对战斗部的冲击引爆问题,可以等效为破片引爆裸装药或带盖板炸药的问题进行分析研究。国内外学者对于单个破片引爆裸装药或带盖板炸药的问题进行广泛研究,提出了一系列经典判据:Held 准则^[1]、Jacobs-Roslund 经验准则^[2]、Rindner 经验准则^[3]及

Picatinny 兵工厂冲击引爆解析计算式^[4]等。方青等^[5]针对斜侵彻问题,对 Jacobs-Roslund 经验准则进行修正。陈卫东等^[6]提出了考虑破片材质问题的起爆判据。而针对多破片侵爆战斗部的问题,国内外学者主要侧重在预制破片对带壳装药起爆问题的研究,通过数值模拟^[7-11]与试验^[12-13]等手段研究了多预制破片同时或间隔撞击带壳装药(平板装药或柱壳装药)的起爆情况,得出起爆速度阈值的变化规律。而 EFP 作为一种在飞行速度、气动特性等方面比预制破片更加优秀的毁伤元,更适宜应用到近程与超近程反导武器研究中。针对单 EFP 冲击引爆屏蔽炸药问题,学者们做了大量研究。唐勇等^[14]基于非均相炸药的冲击起爆判据,分析了 EFP 侵彻铁质盖板,冲击波引爆炸药的可行性。张先锋^[15]在 Rindner 经验准则及 Held^[16]研究结论基础上考虑 EFP 长径比的影响,建立了 EFP 撞击引爆带壳炸药临界条件计算模型,计算结果与试验结果吻合较好。顾文彬等^[17]进行了从 EFP 成型到引爆带盖板炸药全过程的数值模拟研究,并与 EFP 成型的 X 射线试验结果和 EFP 引爆带盖板炸药的试验结果对比,得到口径为 65 mm 的战斗部生成的带尾翼 EFP 能引爆带 40 mm 厚盖板炸药盒。Zhang 等^[18]进行了 EFP

收稿日期:2023-02-21;修回日期:2023-05-22

网络出版日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助(12141202,12002170)

作者简介:郭淳(1988-),男,博士生,主要从事毁伤与弹药设计研究。e-mail:53chun@163.com

通信联系人:张先锋(1978-),男,教授,主要从事高效毁伤与防护技术研究。e-mail:lynx@njjust.edu.cn

引用本文:郭淳,张先锋,熊玮.双 EFP 冲击引爆带盖板 B 炸药的累积毁伤效应[J].含能材料,2023,31(8):797-807.

GUO Chun, ZHANG Xian-feng, XIONG Wei. Cumulative Damage Effect on Shock Initiation of Covered Composition B by Dual EFP Impacts[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):797-807.

冲击起爆柱壳装药的研究,得到了不同撞击角度对柱壳装药起爆的影响。对于多爆炸成型弹丸(MEFP)侵爆带壳装药的问题,目前仅在相关数值模拟中分析了MEFP的成型过程和引爆带壳装药的可行性^[19-21],而在试验与理论方面鲜有报道。

综上所述,目前针对MEFP引爆带盖板炸药的研究尚不深入,相应的计算模型亟待建立。为此,本研究进行了单、双EFP冲击引爆带盖板B炸药,分别研究了单EFP与双EFP对带盖板B炸药的引爆作用过程,获得了相应的B炸药发生爆轰的临界盖板厚度范围。基于试验模型并结合数值模拟分析了单、双EFP的成型过程与引爆带盖板B炸药的作用过程,获得了相应带盖板B炸药发生爆轰的临界厚度。进一步建立了双EFP同时冲击起爆带盖板炸药的临界条件的计算模型。相关研究结果可为MEFP战斗部的设计和多破片累积毁伤评估提供依据。

1 试验研究

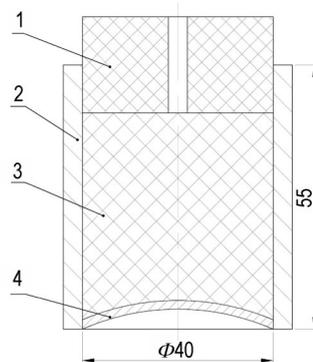
1.1 试件与仪器

为了研究MEFP对带盖板炸药的冲击引爆特性,分别开展了单、双EFP成型的X射线试验及单、双EFP冲击带盖板炸药试验,试验均采用独立带钢壳的聚能装药,结构如图1所示,主要由聚能装药、药型罩、壳体及雷管座组成。聚能装药为 $\Phi 40$ mm的JH-2(8701)炸药,药型罩采用钢质球缺形等壁厚罩,药型罩曲率半径为50 mm,壁厚1.8 mm。

为了得到单、双EFP的成型结果,采用300 kV脉冲X射线机对EFP成型过程进行拍摄,X射线试验示意图如图2所示,试验均采用独立带钢壳的聚能装药,聚能装药放置在X射线出光口与底片盒之间,调整聚能装药的高度,以确保成型的EFP能完整地底片上成像。利用微秒级电雷管同时起爆,通过控制X射线的出光时间,获取EFP在特定时刻的形态。结合EFP与出光口、EFP与底片盒间的距离,计算得到EFP的实际尺寸及飞行平均速度。

进一步开展单、双EFP冲击起爆带盖板B炸药的试验,布局如图3所示。试验依然采用独立带钢壳的聚能装药,利用微秒级电雷管同时起爆,炸高均为0.5 m。炸药盒盖板为钢质材料,其余壳体材料为聚氯乙烯(PVC),内部装填 $\Phi 140$ mm \times 80 mm B炸药(三硝基甲苯TNT/黑索金RDX=40/60)。在盖板处及其前0.1 m处分别布置测速靶,连接NLG202-Z型两路

测速仪,利用测速靶获得EFP的飞行速度 v 。将后效靶置于炸药盒后0.2 m处。为了更好地获得双EFP对B炸药的累积毁伤效果,使双EFP在盖板上的撞击点距离更近,将双孔聚焦装置(图3b中7)的孔轴线与盖板



a. schematic of the layout of shaped charge with shell



b. photograph of the shaped charge with shell

图1 带壳聚能装药结构

1—雷管座, 2—壳体, 3—药柱, 4—药型罩

Fig.1 Structure of shaped charge with shell

1—detonator holder, 2—shell, 3—shaped charge, 4—liner

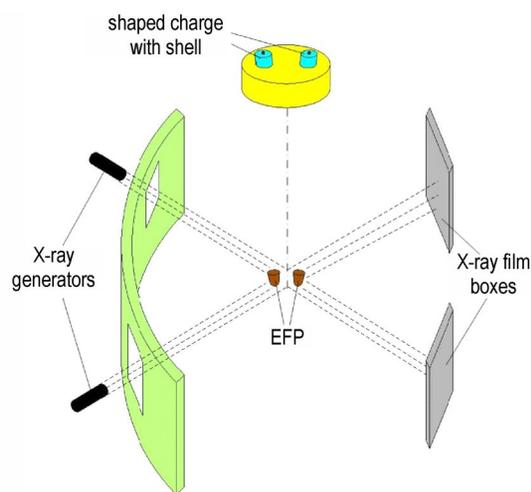


图2 X射线试验示意图

Fig.2 Schematic of the layout of X-ray experiments

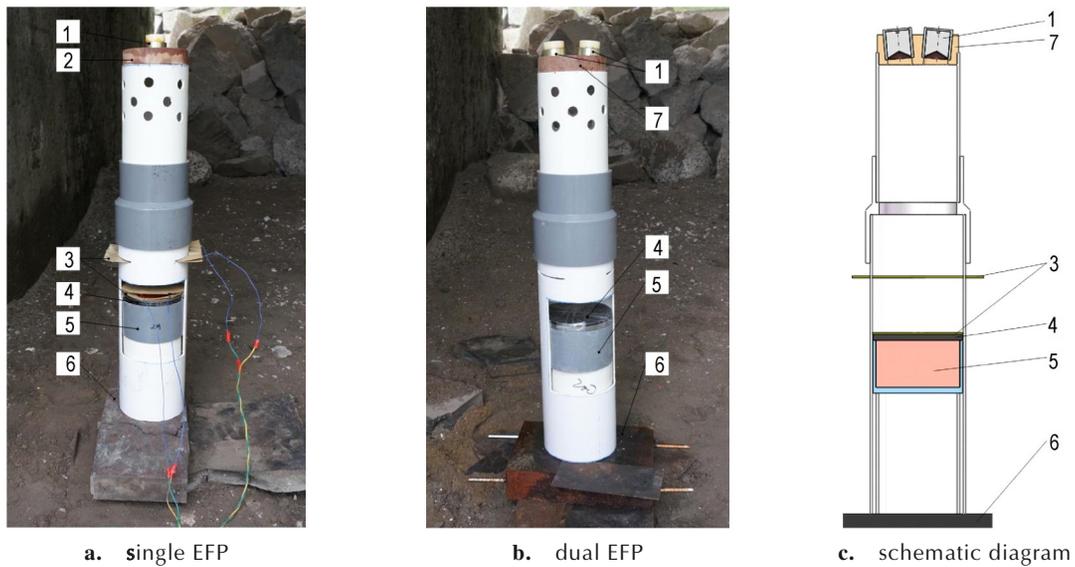


图3 试验布局及示意图

1—带壳聚能装药, 2—单孔聚集装置, 3—测速靶, 4—盖板, 5—炸药盒, 6—后效靶, 7—双孔聚焦装置

Fig.3 Experimental arrangement and schematic diagram

1—shaped charge with shell, 2—aggregation device with single hole, 3—velocity screens, 4—cover plate, 5—explosive box, 6—aftereffect target, 7—aggregation device with dual holes

法线的夹角设置为 4° , 同时双孔聚集装置起到隔爆的作用。其余图 3 中未标注部分装置均为 PVC 材质, 起支撑作用。并通过高速摄影在 50 m 外记录全过程, 拍摄频率 2000 fps。

1.2 试验方案

试验方案如表 1 所示, 方案 4 和方案 6 分别是方案 3 和方案 5 的重复性试验。为了避免冲击起爆试验结果的偶然性, 故对方案 3 和 5 进行了重复性试验。盖板厚度用 H 表示。

1.3 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示, 结合高速摄影及后效靶照片分析 B 炸药的响应情况。图 4 为高速摄影图, 其中 $500 \mu s$ 时刻为试验装置处局部放大图, 图 5 为后效靶破坏形态。由表 2 中得, 单 EFP 平均飞行速度为

$1981.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 双 EFP 靶前平均速度为 $2010.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 两者相差 -1.43% , 所以试验模型中单、双 EFP 的飞行速度均值近似相等, 由 EFP 飞行速度可以近似估算 EFP 开始侵彻盖板的时刻为 $250 \mu s$ 左右。

当单 EFP 冲击带 10 mm 厚盖板的 B 炸药时, 由图 4a~4f 看出, 在 $500 \mu s$ 时, 高速摄影中试验装置处上下各有一团火光, 分别是单个聚能装药爆炸和 EFP 冲击 B 炸药产生的; 当 $1000 \mu s$ 时, 出现大范围耀眼的白光。图 5a 中的后效靶上产生深约 15 mm、宽约 20 mm 的切割环; 可得出, 单 EFP 冲击带 10 mm 厚盖板的 B 炸

表 1 试验方案

Table 1 Experimental schemes

No.	number of shaped charge	thickness of cover plate(H) / mm
1	1	6
2	1	10
3	1	15
4	1	15
5	2	15
6	2	15
7	2	20

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

No.	velocity of EFP / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	high-speed camera	aftereffect target	Comp B response level
1	1975	bright white light	circular ring crater	detonation
2	1963	bright white light	circular ring crater	detonation
3	1985	yellow flame	none	deflagration
4	2003	yellow flame	none	deflagration
5	1960 1956	bright white light	circular ring crater	detonation
6	2031 2034	bright white light	circular ring crater	detonation
7	2040 2039	yellow flame	none	deflagration

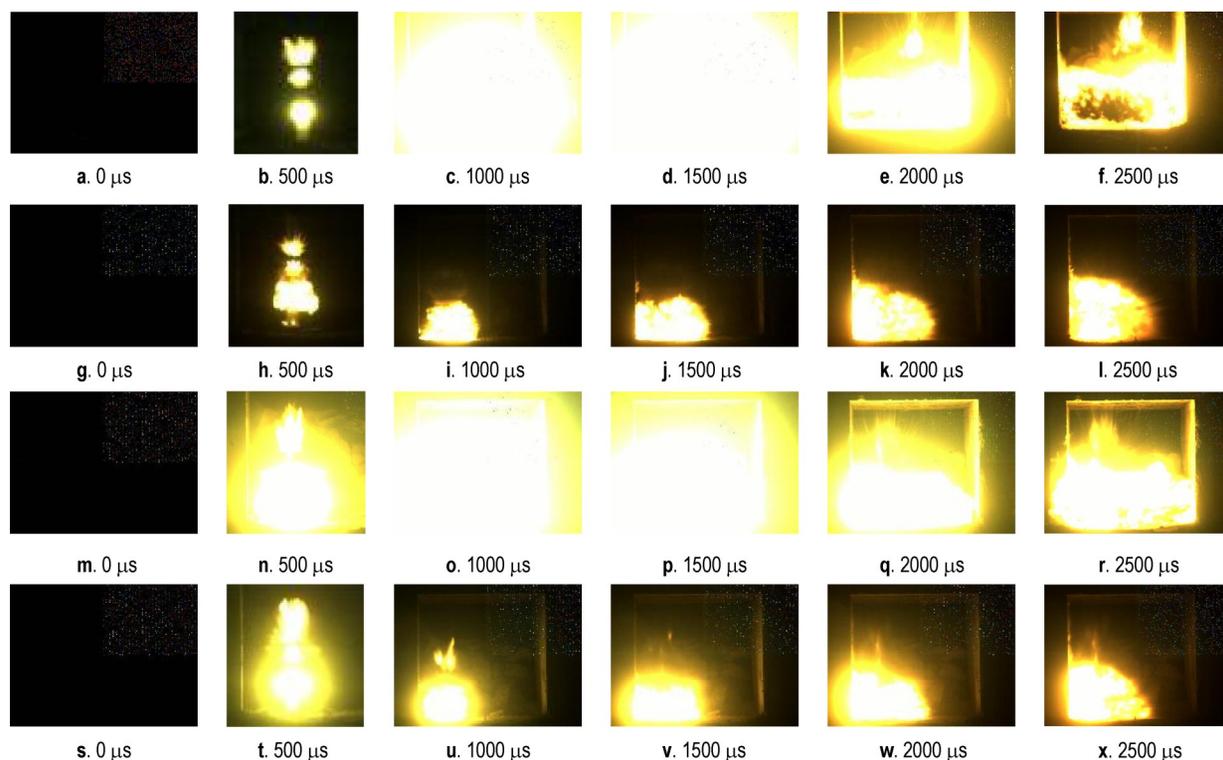


图4 单EFP与双EFP的高速摄影图(a~f为单EFP且 $H=10$ mm, g~l为单EFP且 $H=15$ mm, m~r为双EFP且 $H=15$ mm, s~x为双EFP且 $H=20$ mm)

Fig.4 The photographs of single and dual EFP from high-speed camera (a~f were single EFP with $H=10$ mm, g~l were single EFP with $H=15$ mm, m~r were dual EFP with $H=15$ mm and s~x were dual EFP with $H=20$ mm)

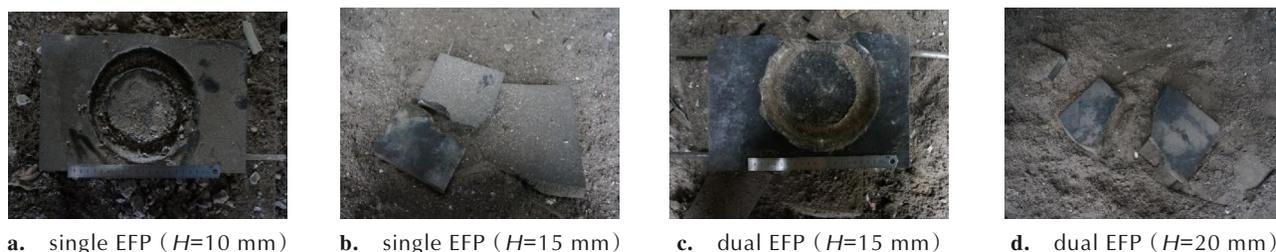


图5 后效靶破坏形态

Fig.5 The damage pattern of aftereffect target

药发生爆轰。当单EFP冲击带15 mm厚盖板的B炸药时,由图4g~4l看出,在500 μ s时,高速摄影中试验装置处上下各有一团火光;当1000 μ s时,上面火光熄灭产生烟雾,下面火光范围变大;随着时间的增加,火团范围变大。图5b中的后效靶裂开,表面没留下明显痕迹;可得出,单EFP冲击带15 mm厚盖板的B炸药未发生爆轰。当双EFP冲击带15 mm厚盖板的B炸药时,由图4m~4r看出,在500 μ s时,高速摄影中试验装置处上下也各有一团火光,并且比单EFP作用时火光更为耀眼,这是由于上面是由2个聚能装药爆炸产生的火光;当1000 μ s时,出现大范围耀眼的白光。图5c中的后效靶上产生深约15 mm、宽约20 mm的切割

环。双EFP冲击带15 mm厚盖板的B炸药发生爆轰。当双EFP冲击带20 mm厚盖板的B炸药时,由图4s~4x得出,在500 μ s时,高速摄影中试验装置处上下也各有一团火光,当1000 μ s时,下面火光范围变大;随着时间的增加,火团范围变大。图5d中后效靶裂开,表面没留下明显痕迹。双EFP冲击带20 mm厚盖板的B炸药未发生爆轰。通过对比可以看出,双EFP较单EFP的累积毁伤作用明显。

由试验结果可知,带盖板B炸药发生爆轰时,高速摄影均拍到耀眼白光,后效靶上均被冲击出切割环。而带盖板B炸药发生爆燃时,高速摄影拍到的火光没那么耀眼,后效靶可能发生裂开,表面没有明显痕迹。

切割环是由于 B 炸药被引爆发生爆轰,爆轰波沿着起支撑作用的 PVC 管传播对后效靶冲击产生的。

通过试验结果可以得到,单 EFP 冲击带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度(H_c)范围是 $10\text{ mm} \leq H_c < 15\text{ mm}$ 。而双 EFP 冲击带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度范围是 $15\text{ mm} \leq H_c < 20\text{ mm}$,说明双 EFP 相对于单 EFP 冲击带盖板 B 炸药引发爆轰的累积作用效果明显。

2 数值模拟

2.1 数值模拟模型

为了研究单、双 EFP 的成型及对带盖板 B 炸药的冲击起爆问题,利用 TrueGrid 网格划分软件,对试验模型进行适当简化,建立三维 1/2 模型,并导入 AUTO-DYN-3D 程序中进行数值模拟,如图 6 所示为双聚能装药的有限元模型。其中各部件均采用 Lagrange 网格,控制网格边长不超过 1 mm,并在 B 炸药轴线上设置一系列的 Gauges 观测点。

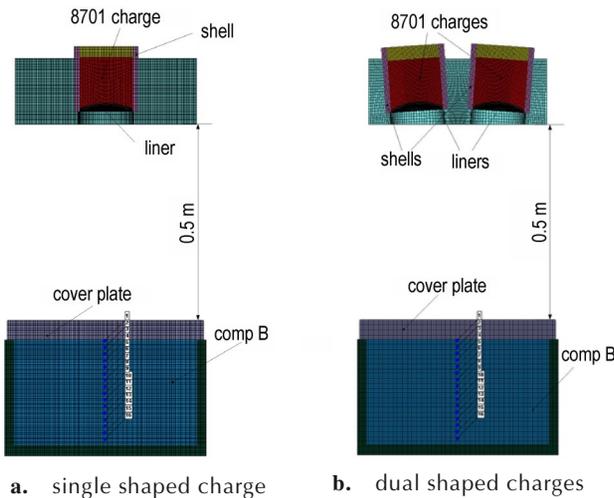


图 6 初始有限元模型

Fig.6 Initial finite element model

B 炸药的状态方程采用 Lee-Tarver 模型^[22]:

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

式中, F 为炸药气体质量与炸药总质量之比; ρ 和 ρ_0 分别为炸药当前密度与初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; p 为炸药爆轰压力, GPa; $I, G_1, G_2, a, b, c, d_1, e, g, x, y, z$ 均为常数。炸药反应物和未反应物均采用 JWL 状态方程。式(1)右侧第 1 项描述热点燃烧阶段;第 2 项描述燃烧从热点向内部与外部的颗粒传递阶段;第 3 项描述燃烧转

爆轰的过程。B 炸药材料参数见表 3。

表 3 B 炸药材料参数^[23]

Table 3 Material parameters of Composition B^[23]

$I/\mu\text{s}^{-1}$	b	a	x	G_1	c	d_1	y	G_2	e	g	z
44	0.0783	5.308	4	514	0.222	0.667	2.0	0	0	0	0

Note: $I, G_1, G_2, a, b, c, d_1, e, g, x, y, z$ are parameters of reaction rate equation.

8701 炸药的状态方程采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL)模型^[24]:

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

式中, A, B, R_1, R_2, ω 为材料常数; p 为爆炸产物的压力, GPa; E 为单位体积的内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为相对体积, m^3 。其中 8701 炸药的 JWL 参数如表 4 所示。

表 4 8701 炸药 JWL 参数^[25]

Table 4 JWL parameters of 8701 explosive^[25]

ρ $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	D $/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	p $/\text{GPa}$	E $/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	ω	A $/\text{GPa}$	B $/\text{GPa}$	R_1	R_2
1.71	8.315	28.6	8.499	0.34	524.23	7.678	4.2	1.1

Note: ρ is the density of the 8701 explosive; D is the detonation velocity; p is the C-J pressure of detonation wave; E is the specific internal energy per unit mass of the explosive; ω is the fractional part of the normal Ta- it equation adiabatic exponent; A and B are the pressure coefficients; R_1 and R_2 are the principal and secondary eigenvalues, respectively.

药型罩与盖板均采用 Johnson-Cook (JC) 强度模型, JC 模型能较好的描述材料大应变、高应变率及高温状态。模型表示为:

$$\sigma = \left(A + B \bar{\epsilon}_p^n \right) \left(1 + \ln \dot{\epsilon}^* \right) \left[1 - \left(T^* \right)^m \right] \quad (3)$$

式中, σ 为材料流动屈服强度, MPa; A, B, n, C, m 为材料相关常数; $\dot{\epsilon}^*$ 为量纲一有效塑性应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}_p$ 为有效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,取 1 s^{-1} 。 $T^* = (T - T_r) / (T - T_m)$,其中 T_r 与 T_m 分别为室温和材料熔化温度, K。

药型罩与盖板 JC 模型主要参数如表 5 所示。

在数值模拟中,固定的聚能装药结构生成 EFP 的仿真结果是相同的,即 EFP 的速度、形状等是一样的,

表 5 药型罩与盖板 JC 模型参数^[26-27]

Table 5 JC parameters of liner and cover plate^[26-27]

parts	A / MPa	B / MPa	n	C	m
liner	298.03	212.11	0.202	0.071	0.833
cover plate	410	20	0.08	0.1	0.55

Note: A, B, n, C, m are parameters of material.

所以通过调节盖板的厚度,结合B炸药反应度ALPHA的值来确定其响应程度^[28],进而可以得到B炸药在单EFP与双EFP作用下发生爆轰的临界盖板厚度。 $0 \leq \text{ALPHA} \leq 1$,即炸药发生反应部分与整体的比值。ALPHA取0时,炸药无任何反应;ALPHA取值在0~1范围内,表示炸药发生不完全反应。当ALPHA值为1时,表明炸药发生爆轰。

2.2 EFP成型的模拟过程

图7a和图7b分别是单EFP和双EFP的数值模拟成型过程,图8为EFP的飞行速度曲线。可以看出,单

聚能装药起爆后,爆轰波首先到达药型罩中心部分,将其压垮。随后整个药型罩发生翻转并继续拉伸,尾部收缩,在100 μs 后药型罩变形基本完成,形成飞行稳定的EFP。结合图8可以看出,单EFP在38 μs 后飞行速度保持不变。双聚能装药同时起爆后,2个药型罩翻转形成双EFP。由于试验设置了初始角度4°,图7b中双EFP在160 μs 后发生了碰撞,190 μs 后两者相互作用基本完成。结合图8,虽然双EFP间发生了相互作用,但对飞行速度没造成明显影响。对比单EFP与双EFP的飞行速度变化曲线可以发现,两者基本重合。

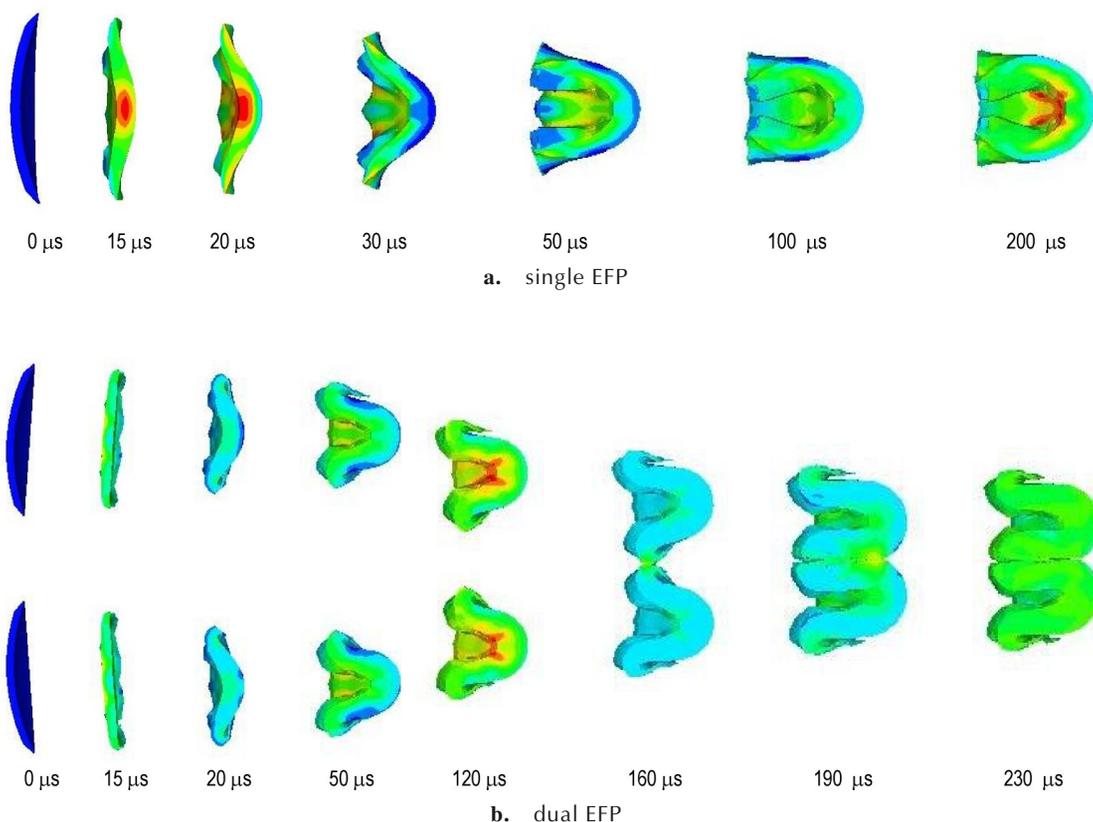


图7 单、双EFP的成型过程

Fig.7 Formation processes of single EFP and dual EFP

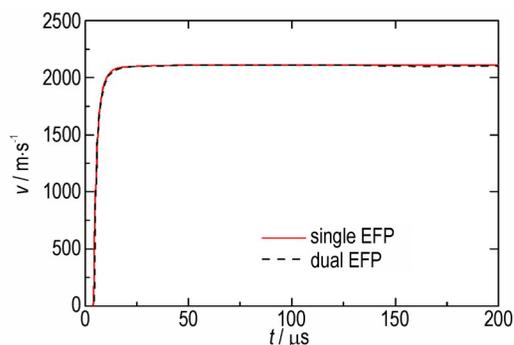


图8 EFP飞行速度曲线

Fig.8 Flight velocity curve of EFP

2.3 数值模拟模型校验

为了研究单、双EFP的成型情况,分别将X射线照片与数值模拟结果对比、试验测得的EFP速度与数值模拟结果对比,结果如图9及表6所示。由图9的单EFP与双EFP成型的X射线照片和数值模拟结果的对比,可以看出2种EFP的数值模拟形态与试验结果均吻合较好,得到EFP长为18 mm,直径为19 mm,同时由图9b看出双EFP试验采用微秒级电雷管同时起爆的一致性。将上述数值模拟模型得到的仿真结果与试验结果相对比,如表6所示。可以看出,数值模拟结

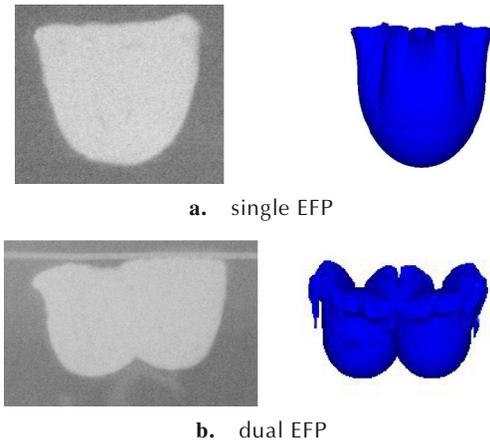


图 9 EFP 成型的 X 射线图片与数值模拟图对比 ($t=220 \mu\text{s}$)

Fig.9 Comparison of X-ray and simulated images of EFP formation

表 6 数值模拟与试验结果对比

Table 6 Comparison of simulated and experimental results

	velocity of EFP / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		error / %
	simulation	experiment	
single EFP	2108.6	1981.5	6.4
dual EFP	2103.3	2010.3	4.62

果与试验结果的误差在 7% 以内,可认定本研究采用数值模拟模型的准确性^[11]。

2.4 带盖板 B 炸药的引爆

为了研究盖板对单 EFP、双 EFP 起爆 B 炸药的影响,只改变盖板厚度,并保证其他部件的尺寸不变的条件下进行数值模拟研究,得到 B 炸药发生爆轰的临界厚度 H_c 。

2.4.1 单 EFP 冲击的情况

通过数值模拟得到,带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度 H_c 为 13 mm。图 10a、10b 分别为单 EFP 作用下,盖板厚度 $H=13 \text{ mm}$ 与 $H=14 \text{ mm}$ 时, B 炸药发生爆轰和未爆轰的反应度云图,图 11 是 $H=13 \text{ mm}$ 时观测点的压力曲线。由图 10a 和图 11 可以看出,当单 EFP 撞击盖板后,冲击波通过盖板传入 B 炸药,使炸药内部形成热点导致爆轰,观测点 Gauge#10 的峰值压力近似 25 GPa, B 炸药反应度为 1 的范围增大。而图 10b 中,当单 EFP 撞击盖板后,冲击波通过盖板传入 B 炸药,冲击波发生衰减未能引起 B 炸药爆轰, EFP 进入 B 炸药中仍没引起爆轰,此时炸药反应度为 1 的范围减小(由于侵蚀网格的删减)。

2.4.2 双 EFP 冲击的情况

由数值模拟得到,双 EFP 作用时,带盖板 B 炸药发

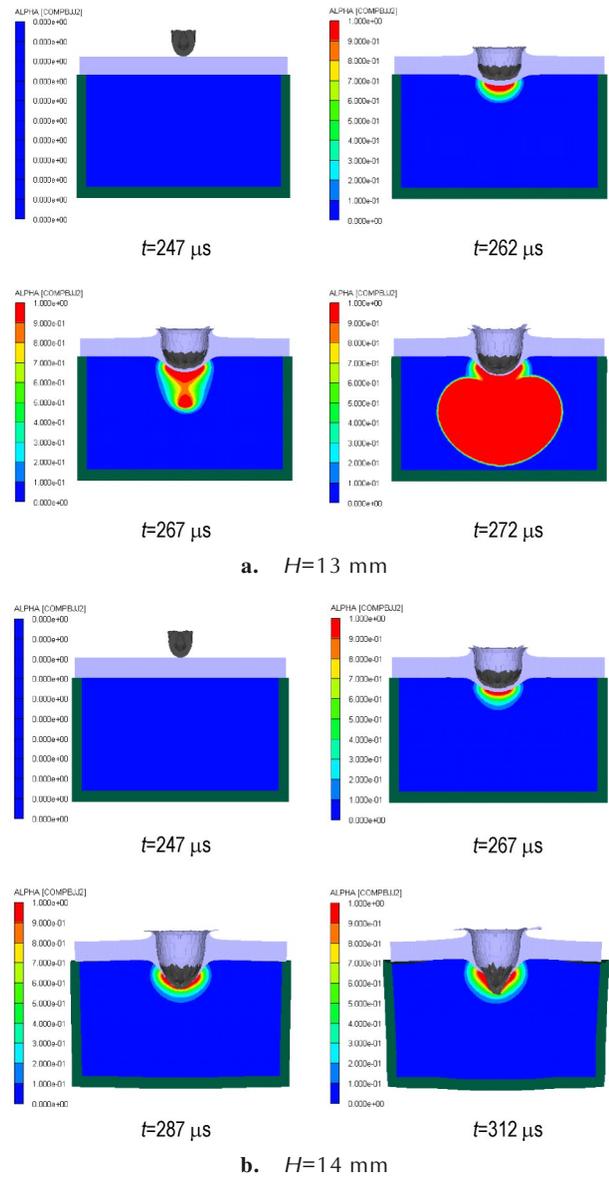


图 10 单 EFP 作用不同时刻的 ALPHA 云图

Fig.10 Reaction degree maps for single EFP impacting at different moments

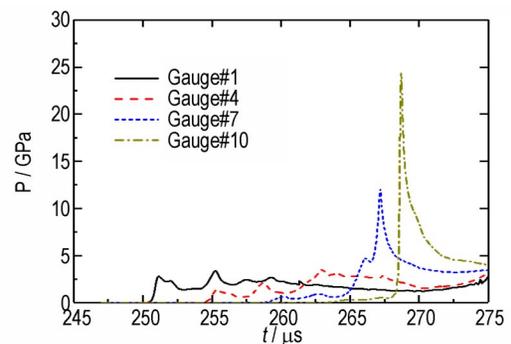


图 11 单 EFP 作用下的观测点压力曲线 ($H=13 \text{ mm}$)

Fig.11 Pressure curves of Gauge points for single EFP impacting ($H=13 \text{ mm}$)

生爆轰的临界盖板厚度 H_c 为 19 mm。图 12a 是双 EFP 作用下,带 19 mm 厚盖板的 B 炸药发生爆轰和未爆轰的反应度 ALPHA(左)与压力云图(右),图 13 是 $H=19$ mm 时观测点的压力曲线。可以看出, $H=19$ mm, 双 EFP 作用时,在 B 炸药产生 2 道冲击波传播并叠加成更强的一道冲击波,引起 B 炸药爆轰,观测点 Gauge#10 的峰值压力近似 25 GPa, B 炸药反应度 ALPHA 为 1 的范围增大。而图 12b 是双 EFP 作用下,带 20 mm 厚盖板的 B 炸药未爆轰的反应度 ALPHA 云图,当双 EFP 撞击盖板后,冲击波通过盖板传入 B 炸药,冲击波发生衰减虽然冲击波叠加,但仍未能引起 B 炸药爆轰,同时双

EFP 侵入 B 炸药中也没引起爆轰,炸药反应度 ALPHA 为 1 的范围减小(由于侵蚀网格的删减)。可以看出,双 EFP 引爆带盖板 B 炸药相较于单 EFP 作用具有明显的累积毁伤作用效果, H_c 相对提高了 46.2%。

3 工程计算模型

3.1 模型建立

前文试验由于受条件所限,以带盖板 B 炸药的临界起爆盖板厚度 H_c 作为判别条件,而在建立工程计算模型时,则是建立临界起爆速度 v_c 的计算模型。EFP 相较于传统的预制破片,由于其自身在成型过程中产

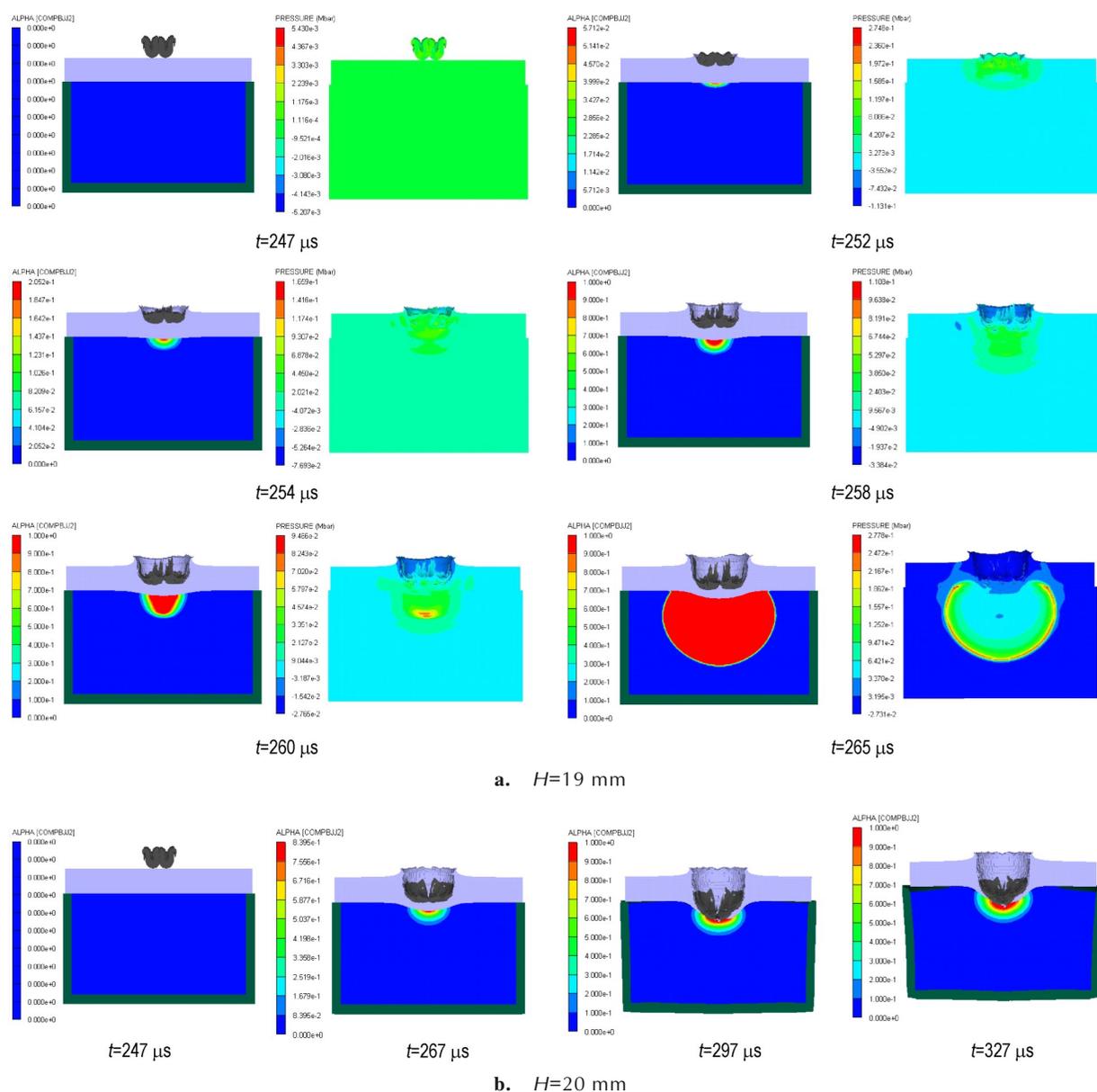


图 12 双 EFP 作用不同时刻压力的反应度云图

Fig.12 Pressure and reaction degree maps for dual EFP impacting at different moments

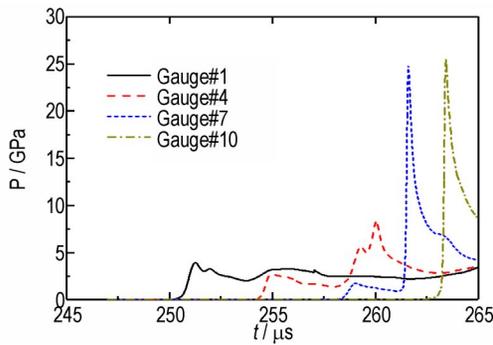


图 13 双 EFP 作用下的观测点压力曲线 ($H=19\text{ mm}$)
Fig.13 Pressure curves of Gauge points for dual EFP impacting ($H=19\text{ mm}$)

生 600~1000 K 左右的温度,使其在侵彻带盖板炸药时,更容易在炸药内部产生热点,利于炸药起爆。假设采用 2 个撞击速度与结构完全相同的 EFP, v_c 为双 EFP 同时撞击带盖板炸药的临界起爆速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; ΔH_1 、 ΔH_2 分别为盖板在 EFP 1、2 速度方向上的厚度, mm; s 为双 EFP 速度方向与炸药表面 2 个交点的距离, mm。建立如图 14 所示的模型。

基于单破片起爆带壳装药的 Jacobs-Roslund 经验准则,结合 BoxLucas 1 指数函数模型,文献[11]提出了双球头破片同时同速冲击带壳装药的临界起爆条件的计算模型:

$$v_c = A d^{-\frac{1}{2}} \left(1 - e^{-\frac{s}{d}}\right) + \frac{B(\Delta H_1 + \Delta H_2)}{2 d^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式中, v_c 为双 EFP 同时同速撞击带盖板炸药的临界起爆速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; ΔH_1 、 ΔH_2 分别为盖板在 EFP 1、2 速度方向上的厚度, mm; s 为双 EFP 速度方向与炸药表面 2 个交点的距离, mm; A 为球头破片作用时装药敏感系数, $\text{mm}^{3/2}\cdot\mu\text{s}^{-1}$; B 为球头破片作用时炸药壳体保护系数; d 为 EFP 直径, mm。

进而在式(4)右侧表征双破片作用下炸药感度的第 1 项中引入考虑温度影响的系数 K_T , 结合试验数据,

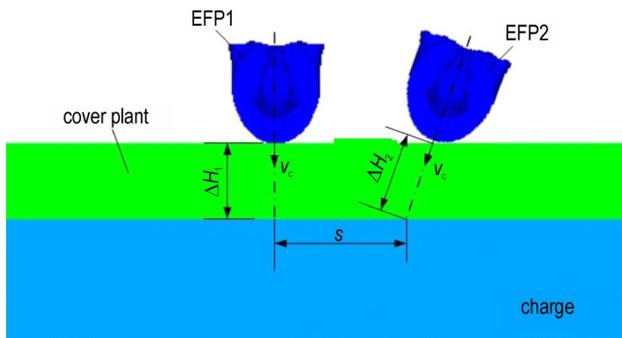


图 14 双 EFP 模型示意图
Fig.14 Schematic diagram of dual EFP

建立双 EFP 同速同时引爆带盖板炸药的临界速度的工程计算模型:

$$v_c = K_T A d^{-\frac{1}{2}} \left(1 - e^{-\frac{s}{d}}\right) + \frac{B(\Delta H_1 + \Delta H_2)}{2 d^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中, K_T 为考虑温度影响的系数; 其余式中物理量含义同式(4)。取 $A=5.0\text{ mm}^{3/2}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, $B=8.01$, $K_T=0.6$ 。

当双 EFP 撞击带盖板装药的速度 v_E 已知时, 由式(5)可推导出临界厚度的表达式:

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = 2B^{-1} \left[v_c d^{\frac{3}{2}} - K_T A d \left(1 - e^{-\frac{s}{d}}\right) \right] \quad (6)$$

式中物理量含义同式(5)。

3.2 模型校验

将数值模拟的双 EFP 以一定间隔同时垂直冲击带盖板 B 炸药 ($H=18\text{ mm}$) 的仿真结果与式(2)计算结果相对比, 结果如图 15 所示。由图 15 可以看出, 由式(5)所得计算结果与仿真结果的最大误差约 3% 左右, 式(5)能很好地预测双 EFP 同时起爆带盖板炸药的临界条件。当 $s > 3.5 d$ 时, 临界起爆速度 v_c 趋于定值, 此时双 EFP 相较于单 EFP 的累积效果已经不明显。

前文分别分析了双 EFP 以对称轴垂直冲击带盖板 B 炸药的情况, 现将双 EFP 的撞击角 θ 认为双 EFP 的对称轴与盖板法线的夹角, 如图 16 所示。可由临界起爆速度表达式(5)推导出临界厚度 ΔH 的表达式:

$$\Delta H = B^{-1} \left[v_c d^{\frac{3}{2}} - K_T A d \left(1 - e^{-\frac{s}{d}}\right) \right] \cos \theta \quad (7)$$

将其计算结果与仿真结果对比如图 17 所示, 仿真结果与式(7)计算结果的最大误差约 12% 左右, 也可较好地预测起爆带盖板炸药的临界条件。随着 θ 的增加误差也越来越大, 由于大角度 θ 使 EFP 存在跳飞的可能, 起爆条件变得复杂。

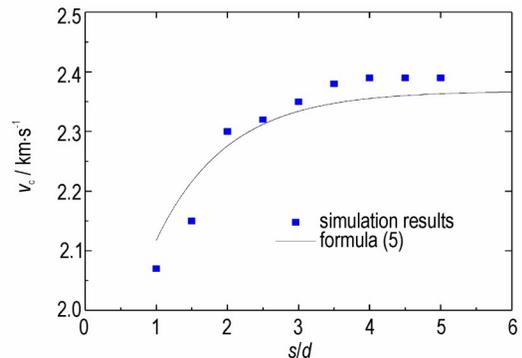


图 15 双 EFP 冲击带盖板 B 炸药的临界起爆速度 v_c 随 s/d 的变化关系

Fig.15 Relation between critical velocity v_c and s/d for shock initiation of covered Composition B by dual EFP

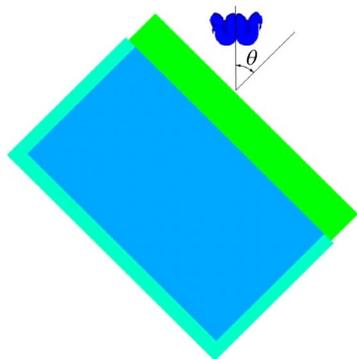


图16 撞击角度示意图

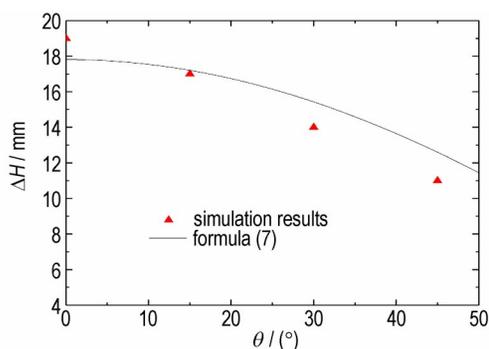
Fig.16 Schematic diagram of impact angle θ 

图17 临界起爆厚度随撞击角的变化曲线

Fig.17 Variation curves between critical initiation thickness and impact angle θ

3 结论

通过试验结合 AUTODYN-3D 数值模拟软件对单、双 EFP 冲击引爆带盖板 B 炸药作用过程的研究,得到以下结论:

(1) 由试验可知,单 EFP 冲击带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度(H_c)范围是 $10 \text{ mm} \leq H_c < 15 \text{ mm}$,而双 EFP 冲击带盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度范围是 $15 \text{ mm} \leq H_c < 20 \text{ mm}$,双 EFP 的累积毁伤作用明显。

(2) 由数值模拟可知,在单 EFP 与双 EFP 分别作用下,带多层盖板 B 炸药发生爆轰的临界盖板厚度分别为 13 mm 和 19 mm,双 EFP 相较于单 EFP 作用的 H_c 临界盖板厚度提高了 46.2%,双 EFP 的累积毁伤作用明显。

(3) 建立了双 EFP 同时引爆带盖板炸药的工程计算模型,能较好地预测双 EFP 的临界起爆速度。

研究结果可为 MEFP 战斗部的设计和破片累积毁伤评估提供指导。

参考文献:

- [1] HELD M. Initiation phenomena with shaped charge jets [C]// Proceedings of the 9th International Symposium on Detonation, 1989:1416-1426.
- [2] ROSLUND L A. Initiation of warhead fragments I: Normal impacts NOLTR 73-124 [R]. White Oak: Naval Surface Weapons Center, 1973.
- [3] QUIDOT M, HAMAIDE S, GROUX J, et al. Fragment impact initiation of cast PBXs in relation with shock sensitivity tests [C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Detonation. Massachusetts, 1993:113-121.
- [4] LLOYD R. Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design [M]. Washington: AIAA, Inc., 1998.
- [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 Qing, WEI Yu-zhang, ZHANG Ke-ming, 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] 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. CHEN Wei-dong, ZHANG Zhong, LIU Jia-liang. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1187-1191.
- [7] 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. JU Xian-chun. Study on the characteristics and synergistic anti-missile effectiveness of the array suspension projectile barrage by artillery delivered [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [8] 梁斌, 冯高鹏, 魏雪婷. 多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. LIANG Bin, FENG Gao-peng, WEI Xue-ting. 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.
- [9] 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 on Ballistics. Miami, FL, USA: NDIA, 2011: 73-81.
- [10] 郭淳, 郭尚生, 钱建平, 等. 多破片对柱壳装药冲击起爆速度阈值的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(6): 24-32. GUO Chun, GUO Shang-sheng, QIAN Jian-ping, et al. Numerical simulation on shock critical initiation velocity of cylindrical covered charge by multiple fragment impacts [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 24-32.
- [11] 郭淳, 郭尚生, 钱建平, 等. 双球破片冲击柱壳装药的临界起爆条件 [J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(2): 188-194. GUO Chun, GUO Shang-sheng, QIAN Jian-ping, et al. Critical initiation condition of cylindrical covered charge by double spherical fragments impact [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(2): 188-194.
- [12] HASKINS P J, BRIGGS R I, LEEMING D W, et al. Dual fragment impact of PBX charges [C]//Chau R. AIP Conference Proceedings. St. Louis, MO, USA: AIP, 2018: 100017.
- [13] LI Y, LI W, ZHANG Q, et al. Shock initiation of covered flake JH-2 high explosive by simultaneous impact of multiple fragments [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(7): 1133-1144.
- [14] 唐勇, 吴腾芳, 顾文彬, 等. EFP 冲击起爆带盖板装药的可行性分析 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(1): 73-75.

- TANG Yong, WU Teng-fang, GU Wen-bin, et al. Feasibility of BSW initiating explosive when EFP penetrating covered explosive[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2004, 5(1): 73-75.
- [15] 张先锋. 聚能侵彻体对带壳炸药引爆研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005: 59-80.
Zhang Xian-feng. The study of shelled charge initiated by shaped charge penetrator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005: 59-80.
- [16] HELD M. Initiation criteria of high explosive attacked with projectiles or jet densities[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21(5):235-237.
- [17] 顾文彬, 李旭峰, 李裕春等. EFP 引爆后盖板爆炸药盒数值模拟[J]. 弹道学报, 2013, 25(3): 59-63.
GU Wen-bin, LI Xu-feng, LI Yu-chun, et al. Numerical simulation of thick-cover-plate explosive-box Initiated by EFP [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 59-63.
- [18] ZHANG K, ZHAO C, JI C, et al. Numerical simulation and experimental study of the damage law of EFP warhead charging of cylindrical shells under different angles[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2022, 19(4): e451.
- [19] WANG X, QIN Z, GU J, et al. Computer simulation of MEFP forming and the impact initiation of shell-covered cylindrical charge[J]. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2021, 38: 154-160.
- [20] 张琨, 隋元松, 纪冲, 等. 两种 MEFP 战斗部对平面带壳装药起爆能力的数值分析[J]. 火工品, 2021, (1): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.007.
ZHANG Kun, SUI Yuan-song, JI Chong, et al. Numerical analysis of the detonation ability of two MEFP warheads against a planar shell charge [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021, (1): 23-26.
- [21] 张琨, 刘永旭, 赵长啸, 等. MEFP 协同冲击平面带壳装药数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 13-19.
ZHANG Kun, LIU Yong-xu, ZHAO Chang-xiao, et al. Numerical simulation of MEFP collaborative impact planar shell charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 13-19.
- [22] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosive[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [23] MURPHY M J, LEE E L, WESTON A M, et al. Modeling shock initiation in composition B[C]//Proceedings of the 10th Detonation Symposium. Boston, MA, US: LLNL, 1993: 963.
- [24] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. United States, 1968.
- [25] 鄢阿敏, 乔禹, 戴兰宏. 高熵合金药型罩射流成型与稳定性[J]. 力学学报, 2022, 54(8): 2119-2130.
YAN A'min, QIAO Yu, DAI Lan-hong. Formation and stability of shaped charge liner jet of CrMnFeCoNi high-entropy alloy [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2119-2130.
- [26] 杨柳, 罗迎社, 许建民, 等. 20号钢热拉伸流变特性的研究(I)[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2004, 26(2): 37-40.
YANG Liu, LUO Ying-bin, XU Jian-min, et al. Study on the rheological properties of steel 20 under thermal tension (Part I). *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2004, 26(2): 37-40.
- [27] 陈刚, 陈小伟, 陈忠福, 等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397.
CHEN Gang, CHEIN Xiao-wei, CHEN Zhong-fu, et al. Numerical simulation of failure model of 45 steel impacting by blunt penetrator of A3 steel[J]. *Explosion and Waves*, 2007, 27(5): 390-397.
- [28] Century Dynamics Inc. Explosive ignition users manual (Lee-Tarver ignition & growth) [M]. America: Century Dynamics Inc, 1999:122 221.

Cumulative Damage Effect on Shock Initiation of Covered Composition B by Dual EFP Impacts

GUO Chun, ZHANG Xian-feng, XIONG Wei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to investigate the shock initiation of warhead charge by multiple explosively formed projectiles (MEFP) impacts, the shock initiation experiments of covered Composition B by single EFP and dual EFP were conducted to test the shock initiation capacity of single EFP and dual EFP on covered Composition B. Moreover, the numerical simulations on shock initiation of covered Composition B by EFP were carried out by AUTODYN finite-element software, the formation processes of single EFP and dual EFP and their shock initiation processes of covered Composition B, were analyzed respectively, and the critical cover plate thickness (H_c) for the detonation of Composition B was obtained. Further, an engineering calculation model of the critical initiation condition of covered charge with dual EFP was established. The experimental results show that the length of EFP is 18 mm and the diameter is 19 mm. The critical cover plate thickness range is $10 \text{ mm} \leq H_c < 15 \text{ mm}$ for shock initiation of covered Composition B by single EFP impact, while the critical initiation cover plate thickness range is $15 \text{ mm} \leq H_c < 20 \text{ mm}$ for dual EFP impacts. Besides, the numerical simulation results show that the critical cover plate thickness is 13 mm for shock initiation of covered composition B by single EFP. While for the action of double EFP, the critical initiation cover plate thickness is 19 mm, which is 46.2% higher than that for single EFP. The numerical simulation results are consistent with experimental results. Finally, the calculation model can provide a good prediction of the critical initiation condition of the covered charge with dual EFP.

Key words: dual EFP; shock initiation; critical initiation velocity; cumulative effect

CLC number: TJ5; TJ 410

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023027

Grant support: National Natural Science Foundation of China (Nos. 12141202, 12002170)

(责编:姜梅)