

文章编号:1006-9941(2022)01-0050-08

结构参数对复合装药战斗部破片特性的影响

沈杨梅¹,李伟兵¹,曹营军²,李军宝¹,王晓鸣¹

(1.南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室,江苏南京210094;2.北京特种车辆研究所,北京100081)

摘要: 为了研究结构参数对复合装药战斗部破片特性的影响,采用AUTODYN-3D有限元计算软件,比较分析了复合装药战斗部在中心单点和内外同时两种起爆方式下爆轰波传播与壳体破碎过程,获得了壳体壁厚与中心装药直径对复合装药战斗部破片平均质量、破片速度等参数的影响规律。计算结果表明,随着壳体壁厚的增加或者中心装药直径的减小,单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的倍数越来越大,战斗部在不同起爆方式下威力输出差异越来越明显;静爆试验结果表明,内外同时起爆下的破片平均速度、冲击波超压和验证靶冲孔数较单点起爆下分别提高了27.1%、31.4%和39.3%,试验结果与仿真计算结果吻合较好。

关键词: 结构参数;复合装药;破片;爆轰波

中图分类号:TJ410

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2021184

1 引言

复合装药是战斗部实现可控毁伤的一种重要形式,国内外学者已对复合装药战斗部开展了系列研究。如Arthur Spencer^[1]设计了一种双层装药结构并开展了不同起爆方式下的静爆试验,发现采取外部起爆的方式能显著提高战斗部的爆轰能量与破片毁伤能力。Slyke等^[2]通过数值模拟研究发现内外层复合装药的尺寸对轴线处爆速影响较大,当外层装药厚度小于2 mm时,中心线爆速基本不变。Kato等^[3]研究了加钨粉的高密度炸药和高爆速炸药组成的复合装药结构,发现复合装药爆速明显提高,压强提高了两倍多。Manfred Held^[4]采用狭缝扫描技术,研究了柱状复合装药爆轰波传播过程的叠加效应,深入分析了复合装药的爆轰特性。丁刚等^[5]研究了复合装药在偏心起爆条件下的爆轰波特性,发现爆轰波的汇聚能显著提高

内层装药爆轰波的传播速度。吴成等^[6]通过对定向战斗部复合装药爆轰的超压区域及破片增益特性的机理分析,发现相比于现有单一装药的定向战斗部,复合装药结构的定向战斗部在不降低破片速度的基础上,可以明显增加破片定向分布密度,而且在实验数据上得到了验证。Hong X W等^[7]通过仿真研究了同轴多层复合装药的冲击波传播特性。可见,目前针对复合装药战斗部的研究大多围绕爆轰波的传播与能量输出展开,而对复合装药战斗部结构设计和参数影响研究见诸报道较少。

基于此,本研究针对不同起爆方式下的复合装药战斗部进行仿真研究,首先比较分析了复合装药战斗部在中心单点和内外同时两种起爆方式下爆轰波传播与壳体破碎过程,然后分别研究壳体壁厚与中心装药直径对复合装药战斗部破片平均质量、破片速度等参数的影响规律,最后进行了静爆试验验证。

2 仿真模型与研究方案

2.1 计算模型及方案选取

所研究的复合装药战斗部为多层环形嵌套式结构,由内至外分别为中心JH-2炸药、中间聚氨酯隔爆层、钝黑铝和45#钢壳体。战斗部高度为220 mm,装

收稿日期:2021-07-08;修回日期:2021-08-01

网络出版日期:2021-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(11972018)

作者简介:沈杨梅(1987-),女,硕士研究生,主要从事高效毁伤技术研究。e-mail:shyangmei@163.com

通信联系人:李伟兵(1982-),男,博士生导师,研究员,主要从事爆炸力学、高效毁伤技术研究。e-mail:njustlwb@163.com

引用本文:沈杨梅,李伟兵,曹营军,等.结构参数对复合装药战斗部破片特性的影响[J].含能材料,2022,30(1):50-57.

SHEN Yang-mei, LI Wei-bing, CAO Ying-jun, et al. Influence of Structural Parameters on Characteristics of Fragments from Warheads with a Composite Charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(1):50-57.

药高度为 200 mm,外层装药直径为 95 mm,壳体壁厚分别为 6、8、10、12 mm 和 14 mm,共计 5 种方案,研究壳体约束对复合装药战斗部在不同起爆方式下破片形成特性的影响规律。中心高能装药结构尺寸的改变是影响复合装药战斗部威力的主要影响因素,因此设计了 5 种中心装药直径 20、25、30、35 mm 和 40 mm,分析中心装药直径的影响规律。

采用 AUTODYN-3D 软件^[7]对复合装药战斗部爆炸形成破片的过程进行数值仿真。计算时,各部分结构皆采用拉格朗日算法^[7]。由于战斗部的几何结构具有对称性,为节约计算时间,建立 1/4 模型如图 1 所示,并在壳体外侧每隔 20 mm 设置一个动态 Gauges 点,以追踪不同位置处壳体在爆炸过程中的速度、位移等随时间的变化情况。本工作研究复合装药战斗部在单点起爆和内外同时起爆两种方式下的破片特性,两种起爆方式下起爆点位置见图 1,图 1 中 JH-2 处红点为单点起爆设置的起爆点,图 1 中 JH-2 和钝黑铝(DHL)处五个红点为内外同时起爆设置的起爆点。

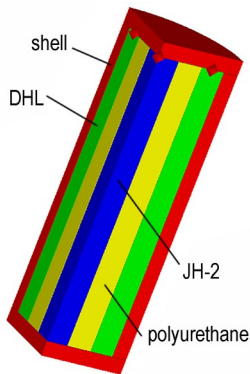


图 1 复合装药战斗部结构图(1/4 模型)

Fig.1 Structure diagram of the warhead with a composite charge(1/4 model)

2.2 材料参数

由于战斗部的起爆方式不同,装药的响应也不同,故内外层装药应根据起爆方式设置不同的炸药状态方程模型参数,其中 JH-2 均采用 JWL 状态方程,钝黑铝炸药在中心单点起爆时采用点火增长反应速率方程,在内外同时起爆时采用 JWL 状态方程。中间层聚氨酯采用 Shock 状态方程描述,具体的炸药模型参数及聚氨酯材料参数见表 1~表 4。壳体材料采用 45#钢,其

材料模型采用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型^[12],具体参数见表 5。

JWL 状态方程^[10]形式描述如下:

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

式中, p 为产物压力,Pa; V 为产物相对比容; E 为产物的比内能,Pa; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为待定系数,通过圆筒试验得到。

点火增长反应速率方程为^[11]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b + \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad (2)$$

式中, λ 为炸药反应度; t 为时间,s; ρ 为密度, $g \cdot cm^{-3}$; ρ_0 为初始密度, $g \cdot cm^{-3}$; p 为压力,Pa; I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 x 、 c 、 d 、 y 、 e 、 g 和 z 为常数。

Shock 状态方程^[12]形式描述如下:

$$p = \begin{cases} p_H + \Gamma \rho (e - e_H), \mu \geq 0 \\ \rho_0 c_0 \mu, \mu < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2}, e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (4)$$

其中, Γ 为 Gruneisen 系数; ρ_0 为初始密度, $g \cdot cm^{-3}$; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。

表 1 炸药 JWL 状态方程参数^[7]

Table 1 Parameters of JWL equation of state for explosives

explosive	ρ /g·cm ⁻³	D /m·s ⁻¹	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω
JH-2	1.72	8425	852.4	18.02	4.6	1.3	0.38
DHL	1.823	8270	752	12	4.4	1.3	0.33

表 2 炸药未反应 JWL 状态方程参数^[7]

Table 2 Parameters of unreacted JWL equation of state for explosives

explosive	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /kJ·mm ⁻³
DHL	4066	-133.9	7.2	3.6	0.9	0.00091

表 3 炸药点火增长模型反应速率方程参数^[8]

Table 3 Parameters of reaction rate equation of ignition and growth model for explosives

explosive	I	b	a	x	G_1	c	d	y	G_2	e	g	z
DHL	7e11	0.667	0	20	6500	0.667	0.111	1	200	0.333	1.0	3.0

表4 聚氨酯状态方程参数^[9]

Table 4 Parameters of equation of state for polyurethane

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	sound velocity / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	Yugongu coefficient λ	GRUNEISEN coefficient γ	shear modulus / GPa	yield strength / MPa
1.265	2.486	1.577	1.55	-	-

表5 45#钢的材料参数^[12]

Table 5 Material parameters of 45# steel

ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	GRUNEISEN coefficient	shear modulus / GPa	yield stress / GPa	hardening constant / GPa	Geometric Strain	Principal Strain
7.896	12.17	81.8	0.352	0.3	1	0.32

3 数值模拟结果及分析

3.1 不同起爆方式下爆轰波传播与壳体破碎过程

为了研究不同起爆方式对复合装药战斗部形成破片特性的影响,对比分析了单点起爆与内外同时起爆两种起爆方式下爆轰波传播及对壳体作用过程,获得单点起爆与内外同时起爆两种起爆方式下复合装药战斗部壳体膨胀、断裂到形成破片的过程,见图2和图3。

从图2可以看出,中心单点起爆下, $t=2 \mu\text{s}$ 时内层炸药形成的冲击波以一定角度斜入射聚氨酯隔爆材料中,由于内层炸药和隔爆材料的波阻抗不同,冲击波在

界面处发生折射; $t=13 \mu\text{s}$ 时外层装药中的冲击波已形成稳定爆轰波并以一定角度射入45#钢柱壳内,由于冲击波在聚氨酯材料中发生折射,使冲击波前沿作用于壳体的入射角减小,这加速了壳体变形初期的径向膨胀速度; $t=15 \mu\text{s}$ 时爆轰波在壳体内发生反射; $t=23 \mu\text{s}$ 时外层装药爆炸冲击波出现汇聚现象; $t=30 \mu\text{s}$ 时爆轰波和壳体充分作用,由于战斗部的爆轰压力急剧升高,外壳体在内部炸药爆轰压力和爆轰产物的作用下开始发生变形,端盖产生裂痕;在 $t=45 \mu\text{s}$ 时,壳体的中下部位出现较大裂痕;在 $t=60 \mu\text{s}$ 时,爆轰波继续传播,裂痕在爆轰产物和内部爆轰压力的作用下继续扩大;在 $t=100 \mu\text{s}$ 时,壳体发生大面积的破

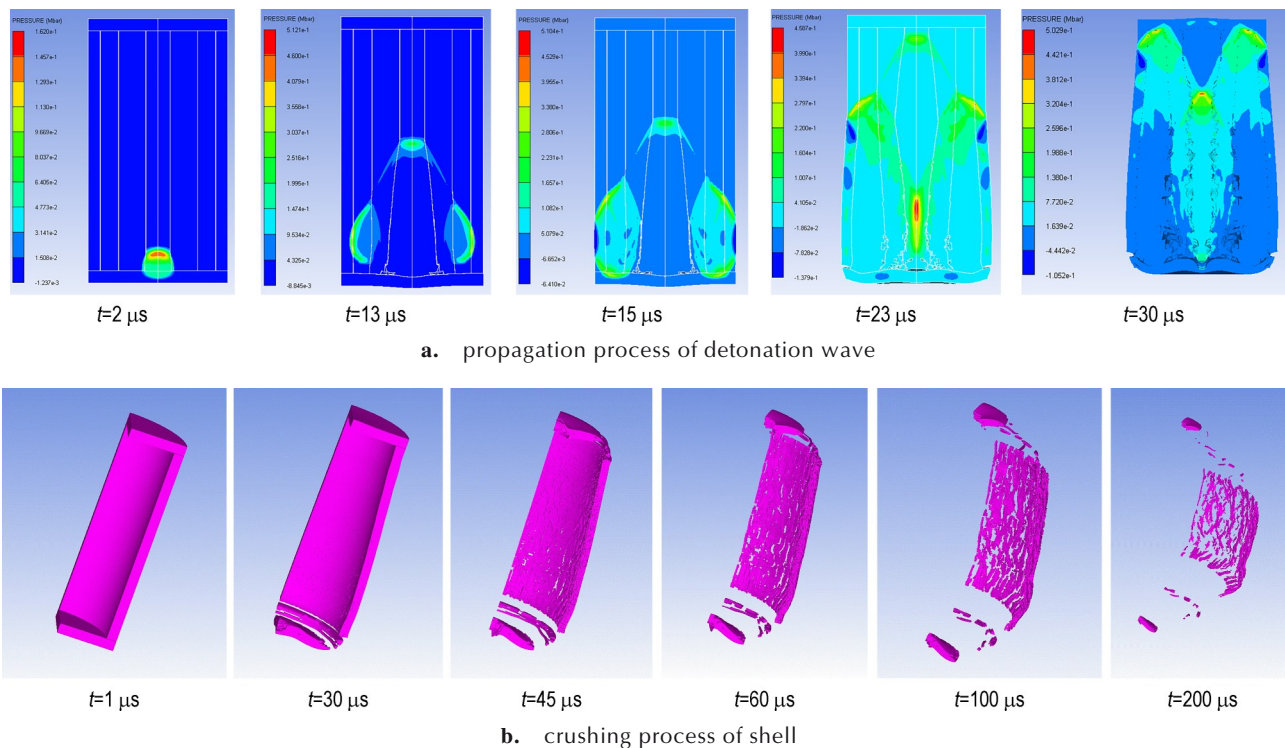


图2 单点起爆下复合装药战斗部爆轰波传播及壳体破碎过程

Fig.2 Propagation of detonation waves and shell breaking process of warheads with a composite charge under single-point initiation

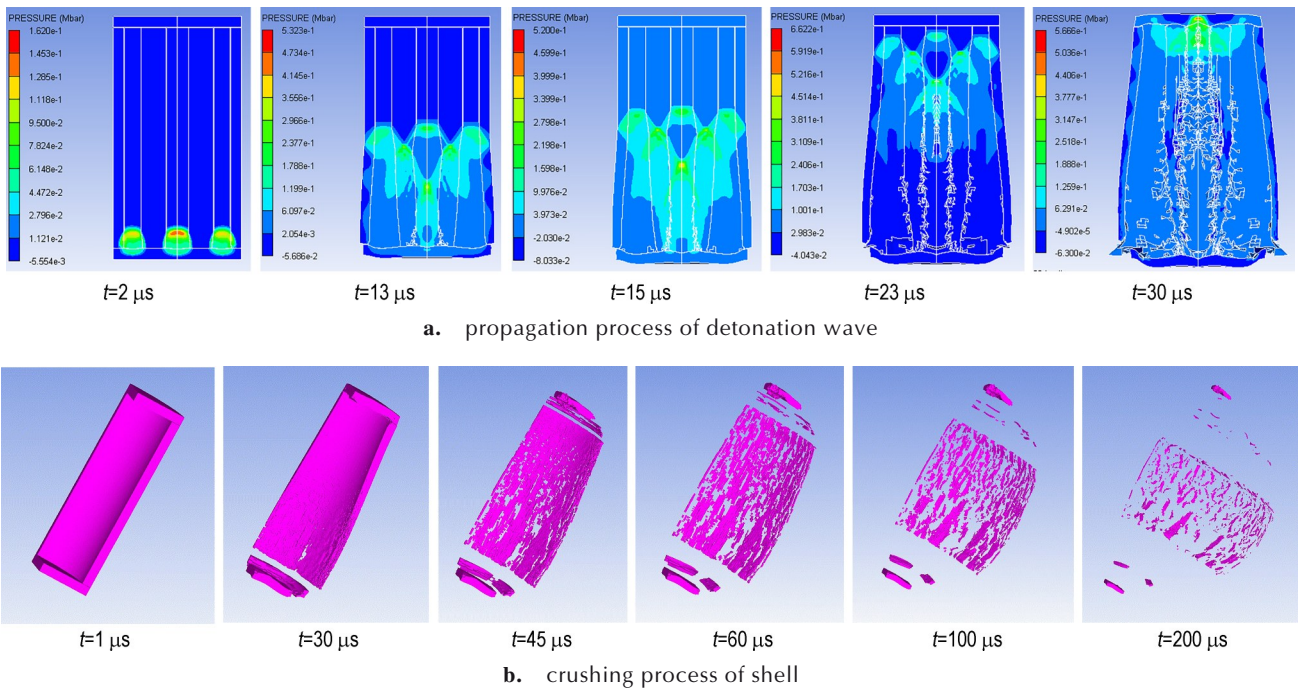


图3 内外同时起爆下复合装药战斗部爆轰波传播及壳体破碎过程

Fig.3 Propagation of detonation waves and shell breaking process of warheads with a composite charge under internal and external simultaneous initiation

裂;在 $t=200 \mu\text{s}$ 时,整个战斗部的壳体已经全部解体,单点起爆下的破片就此形成。

从图3可以看出,内外同时起爆下, $t=2 \mu\text{s}$ 时外层装药中各形成的冲击波前沿较早的作用在壳体,使靠近起爆端处壳体的膨胀变形时间提前,同时冲击波折射射入聚氨酯材料; $t=13 \mu\text{s}$ 时内外层装药中的冲击波已经出现多处汇聚现象,比单点起爆早了约 $10 \mu\text{s}$; $t=15 \mu\text{s}$ 时爆轰波继续传播,壳体发生明显变形; $t=23 \mu\text{s}$ 时壳体内观察到稀疏波; $t=30 \mu\text{s}$ 时冲击波已传遍壳体,壳体的中下部位出现较大裂痕,这比单点起爆下提前了约 $15 \mu\text{s}$;在 $t=45 \mu\text{s}$ 时,壳体的各个部位都出现了裂痕;在 $t=60 \mu\text{s}$ 时,冲击波继续传播,壳体发生大面积的破裂;在 $t=100 \mu\text{s}$ 时,壳体发生小部分解体;在 $t=200 \mu\text{s}$ 时,整个战斗部的壳体已经全部解体,内外同时起爆下的破片就此形成。

3.2 壳体壁厚的影响

为了对比分析不同壳体壁厚下复合装药战斗部的破片特性,需要选取合适的壁厚,壳体壁太薄了形成的破片比较少,太厚不容易形成破片。因此,选取破碎较为明显的 $200 \mu\text{s}$ 时刻壳体形态进行观察,得到两种起爆方式下,装药直径不变,而战斗部壳体壁厚为 $6\sim 14 \text{ mm}$ 的破片毁伤元仿真结果如图4所示。

从图4可以看出,壳体壁越薄,壳体形成破片的数

量越多,这主要是由于随着壁厚的增加,壳体对复合装药的约束越来越强,导致其破碎程度也明显减弱。此外,图4结果显示,当壁厚大于 10 mm 时,形成的大质量破片明显增多。

为进一步分析不同壳体壁厚下破片破碎程度,以 0.1 g 以上的破片作为研究对象,对不同起爆方式下的破片质量和数量进行统计,计算单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的数据,结果如图5所示。

从图5可以得出,在相同的装药类型和壳体材料下,随着壳体壁厚的增加,两种起爆方式下的破片平均质量皆呈现增长趋势,且单点起爆下破片的平均质量在壁厚大于 10 mm 后急剧增加,由约 4 g 增加至 12 g 左右,说明大于 10 mm 的壳体破碎程度明显降低;观察单点起爆下破片平均质量提高的数据可知,随着壳体壁厚的增加,单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的倍数越来越大,即复合装药战斗部在两种起爆方式下的威力输出差异越来越明显。

根据仿真设置的动态 Gauges 点,可以追踪在不同起爆方式下壳体爆炸过程中的速度,计算单点起爆下破片速度占内外同时起爆下的比例,见图6。由图6可以看出,随着壳体壁厚的增加,两种起爆方式下的破片速度皆显著降低。以单点起爆下的结果为例,当壁厚由 6 mm 增加至 14 mm 时,破片速度由 $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左

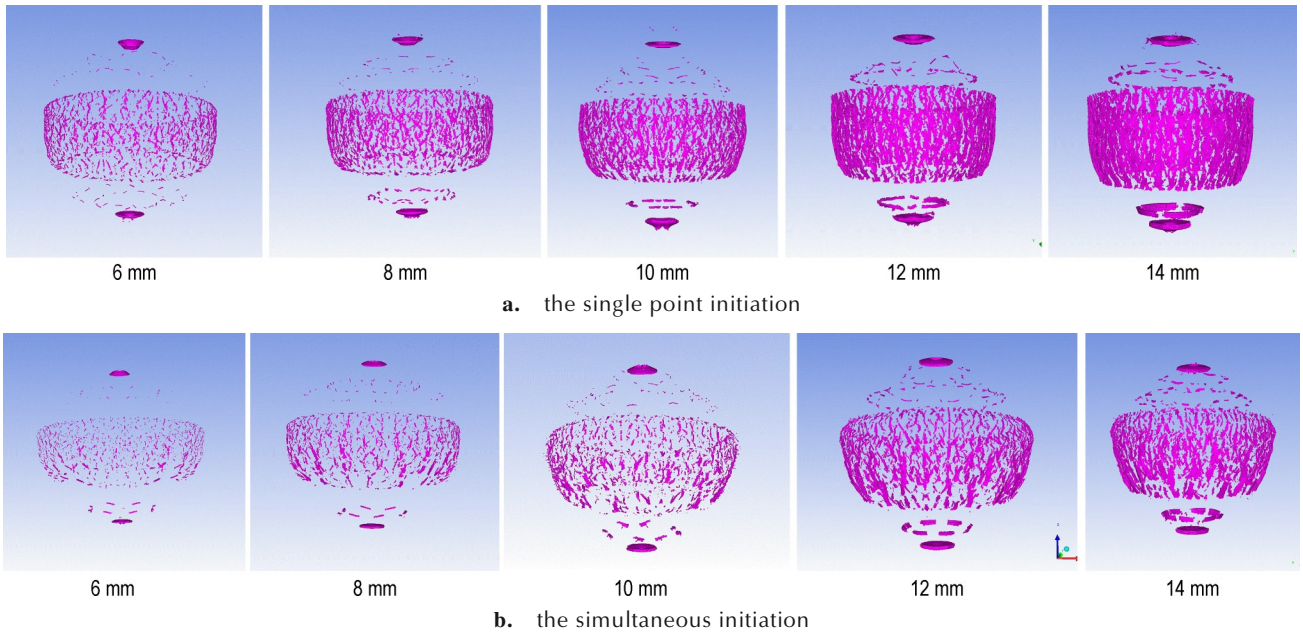


图4 两种起爆方式下复合装药战斗部破片飞散图($t=200\ \mu\text{s}$)

Fig.4 Dispersion of fragments from warheads with a composite charge under two initiation modes($t=200\ \mu\text{s}$)

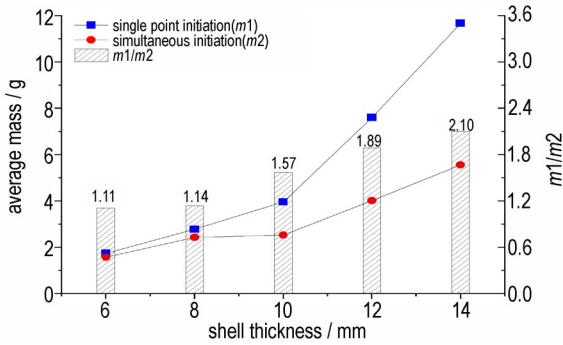


图5 不同壳体厚度下 0.1 g 以上破片平均质量变化

Fig.5 Variation of average mass of fragments above 0.1 g with different shell thicknesses

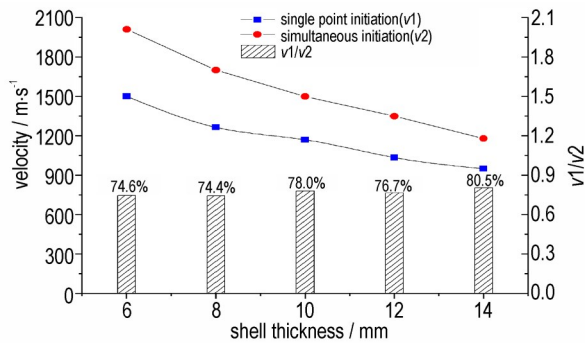


图6 不同壳体厚度下破片速度变化

Fig.6 Variation of fragment velocities with different shell thicknesses

右降低至 $1000\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,由此可见,壳体壁过厚可显著降低破片的速度。观察单点起爆下破片速度的占比可知,不同壁厚下,单点起爆下破片速度占比较为接

近,为 74.6%~80.5%。

3.3 中心装药直径的影响

为进一步研究中心装药直径对战斗部破片输出的影响,需要选取合适的尺寸,中心装药直径过小,起爆时装药不完全爆轰,中心装药直径过大,隔爆层隔爆效果差。因此选取壳体壁厚为 10 mm,针对中心装药直径分别为 20, 25, 30, 35 mm 和 40 mm,相应的隔爆层厚度分别为 22.5, 20, 17.5, 15 mm 和 12.5 mm,其余尺寸保持不变的装药结构开展研究。

同上节破片质量和数量的统计方法一样,这里不再赘述。在不同装药结构下,计算单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的数据如图 7 所示。从图 7 可以看出,在单点起爆下,随着中心装药直径的增加,0.1 g 以上破片平均质量急剧下降,由约 7.5 g 下降至 3g 左右,破片毁伤元的平均质量变化比较明显,这主要是隔爆层的厚度在逐渐减小,隔爆效果逐渐减弱;而在内外同时起爆下随着中心装药直径的增加,0.1 g 以上破片平均质量变化不大,主要集中在 3 g 左右波动,主要原因是内外同时起爆,隔爆层的隔爆效果对它们影响不大,且外层装药量没有变化,导致壳体破片的平均质量波动相对较小。随着中心装药直径的增加,直径 40 mm 时单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下并没有提高反而降低了,不能有效区分复合装药战斗部的毁伤威力。当中心装药直径为 20, 25, 30, 35 mm 时,随着中心装药直径的减小,

单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的倍数越来越大,即复合装药战斗部在两种起爆方式下的威力输出差异越来越明显。

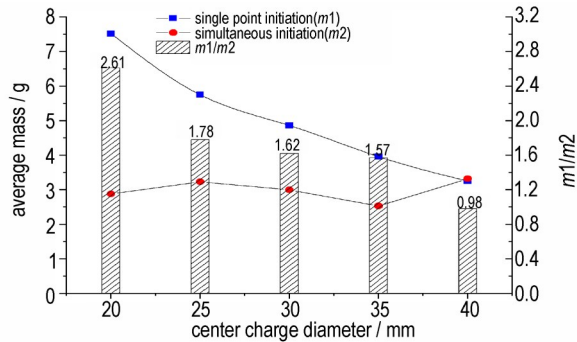


图7 不同中心装药直径下0.1 g以上破片平均质量变化图
Fig.7 Variation of average mass of fragments above 0.1 g with different central charge diameters

根据仿真设置的动态 Gauges 点,可以追踪在不同起爆方式下壳体爆炸过程中的速度,计算单点起爆下破片速度占内外同时起爆下的比例,结果见图8。由图8可看出,随着中心装药直径的增加,两种起爆方式下的破片速度皆缓慢上升。以单点起爆下的结果为例,当中心装药直径由20 mm增加至40 mm时,破片速度由 $1100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右上升至 $1300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,由此可见,中心装药直径的增加对破片的速度影响较小。观察单点起爆下的破片速度的占比可知,不同中心装药直径下,单点起爆下破片速度占比较为接近,为71.4%~75.6%。

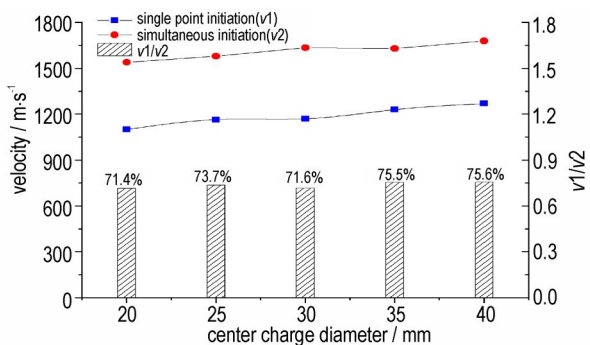


图8 不同装药直径下破片速度变化
Fig.8 Variation of fragment velocities with different central charge diameters

4 试验验证

4.1 试验设计

对两种起爆方式下,中心装药直径为35 mm,壳体壁厚为10 mm的复合装药战斗部进行静爆试验^[13],获得了平均破片质量、破片速度、冲击波超压和钢效应

靶穿孔数。试验采用两种起爆方式,分别为端面中心单点起爆和内外同时起爆,中心单点起爆主要通过8#电雷管实现,内外同时起爆主要由多点起爆网络实现,多点起爆网络由4根长度相同的带有扩爆装置的导爆索组成。复合装药战斗部竖直放置在高1 m的支撑台上,距离药柱垂直投影中心2 m处放置1个压电式压力传感器,传感器型号为美国PCB公司的113B21型压电式压力传感器,量程分别为50 psi和100 psi,传感器的谐振频率300 kHz,灵敏度 $50\sim 100 \text{ mV}/(\text{lb}\cdot\text{in}^{-2})$,采样频率为1 MHz,传感器接收端面与地面平齐;距离药柱垂直投影中心5 m处放置了3个钢效应靶,其外形尺寸为长2 m宽1 m厚3 mm;距离药柱垂直投影中心1.5 m和1.8 m处分别放置了测速靶;另外弹体后面还放置了回收沙箱。试验布局示意图如图9所示,现场试验图如图10所示。

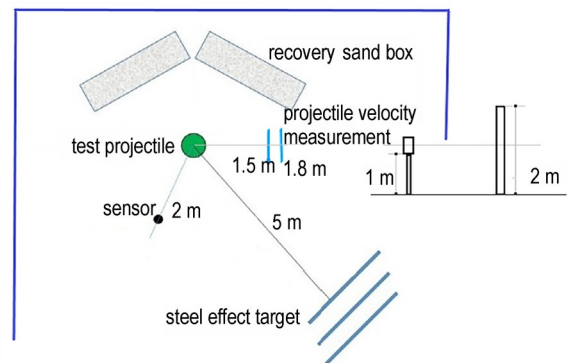


图9 试验布局示意图
Fig.9 Diagram of the test layout



a. test layout



b. warhead structure

图10 现场试验布局与战斗部结构图
Fig.10 Test layout and diagram of warhead structure

4.2 试验结果及分析

(1) 破片平均质量分析

两种起爆方式下回收的破片分布情况如图 11 所示。从图 11 中可以看出,中心单点起爆方式下回收的小质量破片明显少于内外同时起爆方式下的结果,而大质量破片则多于内外同时起爆;两种起爆方式下回收到的破片主要集中在 0~3 g, 1 g 以下的破片数目差异明显,这主要是由于内外同时起爆方式下装药反应较为完全,尤其是外层装药得到了充分反应。

分析回收的破片,可知:单点起爆下破片的平均质量为 3.01 g,内外同时起爆下破片的平均质量为 2.80 g。仿真中得到的单点起爆下破片的平均质量为 3.96 g,内外同时起爆下破片的平均质量为 2.53 g,试验数据与仿真数据相比,其相对误差分别为 24.0% 和 10.7%。

(2) 破片速度

采用测速靶对战斗部破片的飞散速度进行测量,得到单点起爆下破片的速度为 $1185.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,内外同时

起爆下破片的速度为 $1506.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,复合装药战斗部内外同时起爆比单点起爆方式下,破片平均速度提高了 27.1%。仿真中单点起爆下破片的速度为 $1230.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,内外同时起爆下破片的速度为 $1630.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,试验数据与仿真数据相比,其相对误差分别为 3.6% 和 7.6%,试验结果和仿真计算结果较吻合。

(3) 冲击波超压测量

冲击波压力测试使用了 1 个引线式壁面型压力传感器,测得 2 m 左右距离的冲击波反射压力,单点起爆下为 296.0 kPa,内外同时起爆下为 388.9 kPa,复合装药战斗部内外同时起爆比单点起爆方式,冲击波超压提高了 31.4%。

(4) 钢效应靶穿孔分析

统计钢效应靶的穿孔情况,如表 6 所示。由表 6 可看出,中心单点起爆方式下钢效应靶穿孔数为 28,而内外同时起爆方式下钢效应靶穿孔数为 39,复合装药战斗部内外同时起爆比单点起爆方式,验证靶穿孔提高了 39.3%。

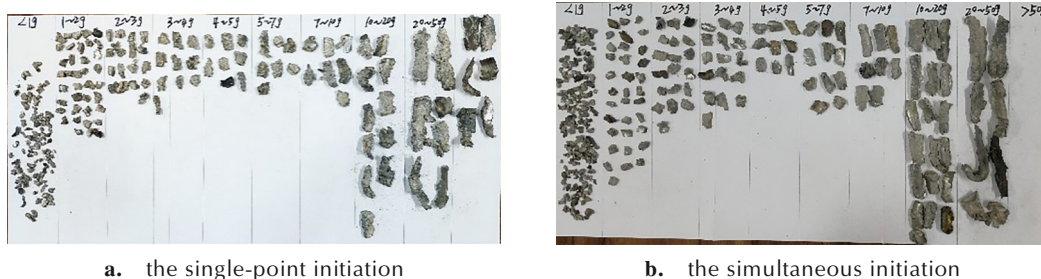


图 11 两种起爆方式下回收破片情况

Fig.11 The collection of fragments under two initiation modes

表 6 钢效应靶孔洞数目

Table 6 Number of steel effect target holes

initiation mode	number of first perforations	number of second perforations	number of third perforations	total number of perforations
the single point initiation	11	7	10	28
the simultaneous initiation	9	12	18	39

5 结论

研究了结构参数对复合装药战斗部破片特性的影响,利用 AUTODYN-3D 有限元软件仿真计算了不同的中心装药直径和壳体壁厚的战斗部,得到了破片特性的影响规律,并开展了战斗部的静爆试验,获得的主要结论如下:

(1) 获得了中心单点和内外同时两种起爆方式下

不同壳体约束的复合装药战斗部爆轰波传播与壳体破碎过程,中心单点起爆下聚氨酯隔爆材料存在对中心装药爆轰波的折射现象,而内外同时起爆下装药中产生了明显的爆轰波汇聚现象。

(2) 获得了复合装药战斗部结构参数对战斗部破片平均质量、速度等参数的影响规律,随着壳体壁厚的增加或中心装药直径的减小,单点起爆下破片平均质量相对于内外同时起爆下提高的倍数越来越大,战斗

部在两种起爆方式下的威力输出差异越来越明显;而两种起爆方式下的破片速度皆降低。

(3)获得了复合装药战斗部在中心单点和内外同时两种起爆方式下的静爆测试试验结果,其中内外同时起爆相比单点起爆方式,破片平均速度提高了27.1%,冲击波超压提高了31.4%,验证靶穿孔数提高了39.3%,试验结果与仿真计算结果吻合较好。

参考文献:

- [1] Spencer A, Corley J. Blast and fragmentation enhancing explosive. US, 5996501[P], 1999-12-07.
- [2] Slyke J, Ludwig W, Gamblej, et al. Effect of convergent detonation on gurney energy and cylinder expansion[C]//Germany: 27th International Symposium on Ballistics, 2013: 22-26.
- [3] Kato H, Murata K, Itoh S, et al. Investigation of jet formation with overdriven detonation in high density explosive[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 566(10): 327-332.
- [4] Held M. Detonation behaviour of adjacent high explosive charges with different detonation velocities[C]//US: The 13th Symposium (International) on Detonation, 2006.
- [5] 丁刚,袁宝慧.复合装药偏心起爆的爆轰波特性[J].*火炸药学报*, 2009, 32(1):79-82.
DING Gang, YUAN Bao-hui. Detonation wave characteristics of dual explosive under asymmetrical initiation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(1):79-82.
- [6] 吴成,赵士津,李申,等.定向战斗部复合装药爆轰的超压区域及破片增益特性的机理分析[J].*北京理工大学学报*, 2015, 35(8): 777-781.
WU Cheng, ZHAO Shi-jin, LI Shen, et al. Study on features of fragments gains and the super-pressure field in a directed warhead with double charge lamination[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(8): 777-781.
- [7] Hong X W, Li W B, Cheng W, et al. Numerical simulation of the blast wave of a multilayer composite charge[J]. *Defence Technology*, 2020, 16(2): 96-106.
- [8] 陈朗,冯长根,赵玉华,等.含铝炸药爆轰数值模拟研究[J].*北京理工大学学报*, 2001, 21(4): 415-419.
CHEN Lang, FENG Chang-gen, ZHAO Yu-hua, et al. Numerical simulations of the detonation of aluminized explosives[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(4): 415-419.
- [9] ANSYS Inc. AUTODYN theory manual[M]. Revision 4.1.San Ramon, California: Century Dynamics, 2001.
- [10] 栗保华,畅博,张立建,等.装药密度对炸药JWL状态方程的影响[J].*兵器装备工程学报*, 2021, 42(1):174-178.
LI Bao-hua, CHANG Bo, ZHANG Li-jian, et al. Influence of charge density on JWL equation of state of explosives[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(1): 174-178.
- [11] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [12] 刘鹏.装药与壳体的匹配关系[D].南京:南京理工大学, 2013.
LIU Peng. Matching relationship between charge and shell [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [13] 刘泽庆,张玉荣,赵建新,等.静爆试验测速图像中破片提取方法研究[J].*军械工程学院学报*, 2017, 29(1): 44-47.
LIU Ze-qing, ZHANG Yu-rong, ZHAO Jian-xin, et al. Research on the method of extracting fragments from velocity measurement image of static explosion testing [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2017, 29(1):44-47.

Influence of Structural Parameters on Characteristics of Fragments from Warheads with a Composite Charge

SHEN Yang-mei¹, LI Wei-bing¹, CAO Ying-jun², LI Jun-bao¹, WANG Xiao-ming¹

(1. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Special Vehicle Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the influence of structural parameters on characteristics of fragments from warheads with a composite charge, AUTODYN-3D finite element calculation software was used. Next the propagation of detonation waves and shell breaking process of warheads were compared and analyzed, under the central single-point initiation and the internal and external simultaneous initiation. Then the influence of shell thicknesses and central charge diameters on the average mass and velocity of fragments from warheads was obtained. The calculation results show that, with the increase of shell thicknesses or the decrease of central charge diameters, the average mass of fragments under single-point initiation increases more times than that under internal and external simultaneous initiation, and the difference in power output of warheads between those two initiation modes becomes more significant. The static explosion test results show that the average velocity of fragments, shock wave overpressure, and the number of witness target holes under internal and external simultaneous initiation increase 27.1%, 31.4%, and 39.3%, respectively, compared with those under single initiation. The test results are in good agreement with the calculation results.

Key words: structural parameter; composite charge; fragment; detonation wave

CLC number: TJ410

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021184

(责编:王艳秀)