

# 非金属射流引爆反应装甲能力的数值模拟

徐永杰<sup>1,2</sup>, 王晓东<sup>1</sup>, 赵雄飞<sup>3</sup>, 郑娜娜<sup>4</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760;  
3. 重庆嘉陵特种装备有限公司, 重庆 400032; 4. 陆军装备部驻北京地区军事代表局驻长治地区军事代表室, 山西 长治 046000)

**摘要:** 针对反应装甲日益广泛应用于装甲车辆防护的情况, 提出了一种用于引爆反应装甲的小口径非金属药型罩聚能战斗部方案。在实验探究尼龙射流可以引爆模拟反应装甲的前提下, 通过数值模拟的方法, 对比5种非金属材料药型罩射流的成形情况确定了环氧树脂作为药型罩材料; 以Held引爆判据为标准对炸高、药型罩壁厚、药型罩锥角以及罩顶内圆半径四个因素开展正交设计和极差分析, 得到了非金属药型罩聚能装药对带壳装药起爆能力的影响程度结果, 以及优化后的药型罩结构参数; 基于优化结构的非金属药型罩聚能装药, 对多种炸高下非金属射流冲击起爆反应装甲的过程进行了模拟。结果表明: 非金属材料药型罩聚能装药能够形成形态良好、头部速度高的非金属射流, 同时具有在多种炸高情况下引爆反应装甲的能力。研究结果可为非金属材料药型罩聚能战斗部的设计提供相关技术参考。

**关键词:** 聚能装药; 非金属材料; 反应装甲; 正交设计; 爆炸反应装甲

**中图分类号:** TJ410 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.06.0003

**引用格式:** 徐永杰, 王晓东, 赵雄飞, 等. 非金属射流引爆反应装甲能力的数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 133-139.

XU Yongjie, WANG Xiaodong, ZHAO Xiongfei, et al. Numerical simulation of the capability of non-metallic jet to detonate reactive armor[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(2): 133-139.

## Numerical Simulation of the Capability of Non-Metallic Jet to Detonate Reactive Armor

XU Yongjie<sup>1,2</sup>, WANG Xiaodong<sup>1</sup>, ZHAO Xiongfei<sup>3</sup>, ZHENG Nana<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Chongqing Hongyu Precision Industrial Co., Ltd., Chongqing 402760, China;  
3. Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 400032, China;  
4. Changzhi Military Representative Office of Beijing Military Representative Bureau,  
Army Equipment Department, Changzhi 046000, China)

**Abstract:** In response to the increasingly widespread application of reactive armor for armored vehicle protection, a small-caliber non-metallic liner shaped charge warhead was designed for detonating reactive armor. On the premise that the nylon jet can detonate simulated reactive armor, through numerical simulation methods, epoxy resin was determined as the liner material by comparing the shaping of the jet formation of five different non-metallic material liners. Orthogonal design and range analysis were conducted on the stand-off, liner thickness, liner cone angle and liner inner radius, using the Held detonation criterion,

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 山西省基础研究计划(202403021221125, 20210302124690)

作者简介: 徐永杰(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事弹药高效毁伤技术的研究。E-mail: yongqiang515@nuc.edu.cn.

revealing the extent of the influence of non-metallic liner shaped charges on the detonation capability of shell-loaded explosives, as well as the optimized structural parameters of the liner. Based on the optimized non-metallic liner shaped charge, simulations were performed on the process of detonating reactive armor using non-metallic jets under various stand-off. The results show that the non-metallic material liner shaped charge warhead can form a well-shaped non-metallic jet with a high tip velocity, while also possessing the ability to detonate reactive armor under various stand-off. This provides relevant technical references for the design of non-metallic liner shaped charge warheads.

**Key words:** shaped charge; non-metallic material; reactive armor; orthogonal design; explosive reactive armor

## 0 引言

爆炸反应装甲结构简单、造价低廉,能够显著提高坦克等装甲车辆对破甲弹药的防御能力。双层结构反应装甲对破甲弹的防护效率可达95%左右<sup>[1]</sup>,因此通过技术手段破坏反应装甲,降低其防护效果的需求日渐凸显。

串联聚能装药战斗部是目前比较成熟并得到广泛应用的反装甲战斗部设计<sup>[2]</sup>,一级战斗部破坏反应装甲并为二级主战斗部提供通道。门建兵等<sup>[3]</sup>设计了串联EFP战斗部设计,采用高速摄影方法来拍摄串联EFP侵彻反应装甲防护靶板的动态过程,结果表明,前级EFP可引爆反应装甲,后级EFP在避开干扰的同时仍具备较高的侵彻威力。严晨等<sup>[4]</sup>基于数值模拟研究了不同法线角引爆反应装甲对聚能射流的干扰。梁宇等<sup>[5]</sup>研究了聚能射流以不同法线角侵彻时薄层装药反应装甲中夹层药的起爆和传爆规律。余庆波等<sup>[6-7]</sup>采用数值模拟与理论计算等方法,研究了聚能战斗部作用条件对重型反应装甲干扰作用时长的影响及不同命中位置对反应装甲引爆特性和飞散特性的影响。随着材料技术的发展,非金属材料特性使得其可以作为药型罩材料的另一种选择。史志鑫<sup>[8]</sup>对前级为低密度药型罩材料的串联战斗部侵彻带反应装甲目标的过程开展了数值模拟,结果表明串联结构对该目标具有良好的侵彻威力。吉庆等<sup>[9]</sup>对环形尼龙射流成型和侵彻反应装甲过程开展了研究,数值模拟结果表明尼龙射流能够在不引爆反应装甲的同时形成大孔径通孔。Yi等<sup>[10]</sup>分析了聚四氟乙烯(PTFE)射流的膨胀现象,并实现了对反应装甲穿而不爆的效果。陈杰<sup>[11]</sup>将铜粉加入到PTFE中进行改性处理后得到了Cu/PTFE材料,在实现穿而不爆的同时提高了侵彻能力。

董方栋等<sup>[12]</sup>对非金属材料冲击带壳装药的过程进行了数值模拟与实验,其中树脂材料形成的射流具有更佳形态及延展性。赵鹏铎等<sup>[13]</sup>设计了一种双层药型罩结构,并对聚能射流侵彻反应装甲开展了数值模拟,结果表明其形成的射流可实现穿而不爆的效果。刘同鑫等<sup>[14]</sup>对非金属材料射流的成形过程进行了数值模拟,研究发现PTFE可在短时间形成形态良好、稳定的射流。

综上,本文选取尼龙(NYLON)、环氧树脂(EPOXY)、有机玻璃(LUCITE)、苯氧树脂(PHENOXY)、聚四氟乙烯(TEFLON)等非金属材料作为药型罩材料,运用有限元软件AUTODYN对小口径非金属材料破甲战斗部引爆反应装甲的过程进行数值模拟,并对战斗部结构参数进行优化,得到一种性能较为良好的战斗部结构参数,以为工程应用提供相关参考与理论支撑。

## 1 模型与试验

### 1.1 物理模型

聚能装药结构如图1所示,起爆方式为装药底部中心点起爆。

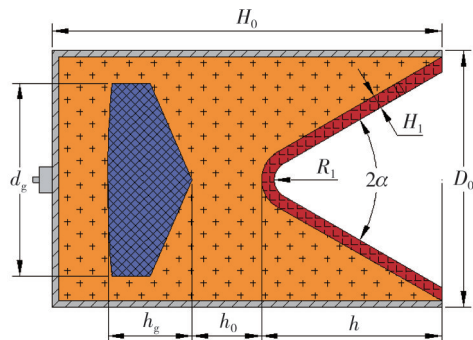


图1 聚能装药结构示意图

Fig. 1 Schematic of shaped charge structure

图1中, $D_0$ 为装药直径,40 mm; $H_1$ 为药型罩壁厚,3.2 mm; $2\alpha$ 为药型罩锥角,44°; $R_1$ 为药型罩顶

部内圆半径, 1.5 mm;  $d_g$ 为隔板直径, 30 mm;  $h_0$ 为罩顶药高, 12 mm;  $h_g$ 为隔板厚度, 13 mm;  $H_0$ 为战斗部装药高度;  $h$ 为药型罩顶高度。

### 1.2 试验研究

为探究上述结构的非金属射流冲击反应装甲的可行性, 对非金属药型罩聚能装药引爆模拟反应装甲进行了试验, 靶场试验布置方案如图 2 所示。其中, 非金属药型罩材料为尼龙, 模拟反应装甲由上下两层装甲及中间夹层装药组成, 炸高为 3 倍装药口径。试验结果如图 3 所示。

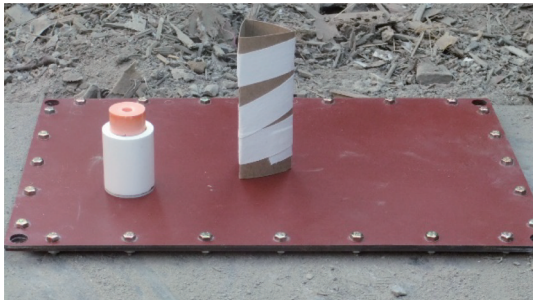


图 2 靶场试验布置方案  
Fig. 2 Experimental layout plan



(a) 装甲面板



(b) 装甲背板

图 3 非金属射流冲击后的装甲  
Fig. 3 Armorer plate impacted by non-metallic jet

试验结果表明, 当非金属药型罩材料为尼龙时, 聚能战斗部在 3 倍炸高下爆发形成的非金属射流可以穿透并引爆模拟反应装甲, 验证了非金属射流引爆反应装甲方案的可行性。

## 2 数值模拟结果与分析

为深入探究不同材料、不同结构的非金属药型

罩聚能战斗部形成的非金属射流能否引爆反应装甲, 对不同材料、不同结构的非金属药型罩战斗部冲击反应装甲进行了数值模拟。

### 2.1 有限元模型

利用软件 AUTODYN 建立数值仿真模型, 采用二维 Euler 耦合 Lagrange 算法进行计算, 网格大小为 0.25 mm×0.25 mm, 对空气域边界施加 FLOW\_OUT 条件以模拟无限空气域。有限元计算模型如图 4 所示。



图 4 有限元计算模型示意图  
Fig. 4 The calculation model of finite element method

### 2.2 材料模型参数

在数值模拟中材料均来自 AUTODYN 数据库, 其中反应装甲的金属板材料选取 4340 钢, 采用 Johnson-Cook 本构方程描述<sup>[15]</sup>, 材料参数如表 1 所示, 其表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  和  $m$  皆为材料常数;  $\epsilon_p$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ ,  $\dot{\epsilon}^*$  是量纲为 1 的等效塑性应变速率,  $\dot{\epsilon}_0$  一般取值为  $1.0 \text{ s}^{-1}$ ;  $T^*$  为熔化温度。

表 1 4340 钢材料参数

Tab. 1 Parameters of 4340 steel

$\rho/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$G/\text{GPa}$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
7.83	77	792	510	0.26	0.014	1.03

战斗部及反应装甲装药均为 B 炸药, 其中战斗部装药采用 JWL 状态方程 (Equation of State, EOS) 描述<sup>[16]</sup>, 其表达式为

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \eta} \right) \exp(-R_1 \eta) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \eta} \right) \exp(-R_2 \eta) + \frac{\omega e}{\eta}, \quad (2)$$

式中:  $p$  为压力;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为压力和等熵膨胀压力线性关系的常数;  $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为炸药相关常数;  $\eta = \rho/\rho_0$ ,  $\rho_0$  为炸药初始密度,  $\rho$  为炸药爆发之后的密度;  $e$  为比内能。

夹层装药采用 Lee-Tarver 状态方程描述<sup>[17]</sup>, 材料参数如表 2 所示, 该模型假设炸药的反应速率由冲击压力和炸药内形成的热点表面积控制,

反应速率方程为

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z, \quad (3)$$

式中:  $F$  为炸药反应度( $F=0$ 表示未反应,  $F=1$ 表示完全反应);  $I$  为冲击起爆项的速率常数;  $G_1$  为燃烧项的速率常数;  $G_2$  为爆轰项的速率常数;  $a$  为

冲击起爆项的密度阈值;  $b$ 、 $c$ 、 $e$  为未反应炸药的影响指数;  $d$ 、 $g$  为已反应炸药的影响指数;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为压力和密度的指数;  $p$  为爆炸气体压力。Lee-Tarver 反应速率方程由三项组成, 第一项为冲击起爆项  $I(1-F)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x$ , 第二项为燃烧项  $G_1(1-F)^c F^d p^y$ , 第三项为爆轰项  $G_2(1-F)^e F^g p^z$ 。

表2 B炸药材料参数

Tab. 2 Parameters of COMP B

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$P_{CJ}/\text{GPa}$
1.717	524.23	7.678	4.2	1.1	0.34	7 980	29.5

药型罩的材料采用 Shock 状态方程描述<sup>[18]</sup>, 材料参数如表 3 所示, 其表达式为

$$p = p_H + \rho\Gamma(e - e_H). \quad (4)$$

式中:  $p_H$  为 Hugoniot 压力;  $\rho$  为密度;  $\Gamma$  为格森系数;  $e$  为内能;  $e_H$  为 Hugoniot 内能。

Shock 状态方程描述的是 Hugoniot 曲线外一点的压力及内能与曲线上某点的压力及内能的关系, 一般认为格森系数与材料的温度无关, 给定的固体材料在绝热条件下的格森系数  $\Gamma=2$ , 在一定的压力范围内可认为  $\rho\Gamma$  为常数。

表3 药型罩材料参数

Tab. 3 Parameters of liner material

材料	EOS	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_1$	$S_1$	$\Gamma$
环氧树脂 (EPOXY)	Shock	1.186	0.273	1.493	1.13
有机玻璃 (LUCITE)	Shock	1.181	0.226	1.816	0.75
尼龙 (NYLON)	Shock	1.140	0.229	1.630	0.87
苯氧树脂 (PHENOXY)	Shock	1.178	0.226	1.698	0.55
特氟龙 (TEFLON)	Shock	2.153	0.184	1.707	0.59
高导无氧铜 (CU-OFHC)	Shock	8.930	0.394	1.489	2.02

材料的射流形成速度比高导无氧铜材料要更加快速。随着非金属材料射流进入伸长阶段, 可以观察到不同非金属材料的射流形态有显著区别: 环氧树脂材料所形成的射流, 头部直径大、射流连续性良好; 有机玻璃、苯氧树脂以及特氟龙所形成的射流成型效果良好, 但头部较细且连续性有所下降; 尼龙所形成射流的凝聚性、连续性均表现较差。

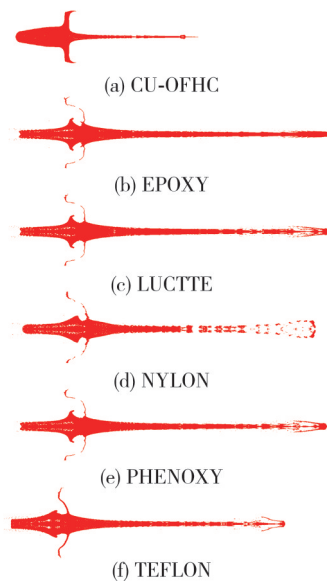


图5 不同药型罩材料的射流成形图

Fig. 5 Jet forming of different liner materials

### 2.3 聚能装药射流成形情况

对非金属射流的成形过程进行数值模拟, 当射流到达3倍装药口径(Charge Diameter, CD)位置时的形态如图5所示。

在高导无氧铜作为药型罩的材料时, 起爆后经过  $4\ \mu\text{s}$  爆轰波开始作用于药型罩, 罩顶受到压力作用被压垮, 向轴线处汇集闭合, 射流开始形成。随着爆轰波的持续作用, 射流进入到伸长阶段。在非金属材料射流的成形过程中, 明显可以看出非金属

不同药型罩的材料所形成的射流头部速度如图6所示, 可以看出, 非金属材料射流的头部速度均大于  $8\ 500\ \text{m/s}$ , 而传统的高导无氧铜在相同装药结构下所形成的射流仅为  $5\ 500\ \text{m/s}$  左右, 相比非金属材料头部速度约低  $35.3\%$ 。在非金属材料中, 环氧树脂、有机玻璃、尼龙、苯氧树脂在射流速度方面均表现良好, 在相同装药结构下能够获得更大的速度, 但聚四氟乙烯所形成射流的最高速度仅为  $8\ 500\ \text{m/s}$  左右, 比其他非金属材料射

流的速度约低 1 200 m/s, 同时其与有机玻璃、环氧树脂在射流形成过程均出现了颈缩现象, 主要由于其速度梯度过大以及材料自身性质所致。

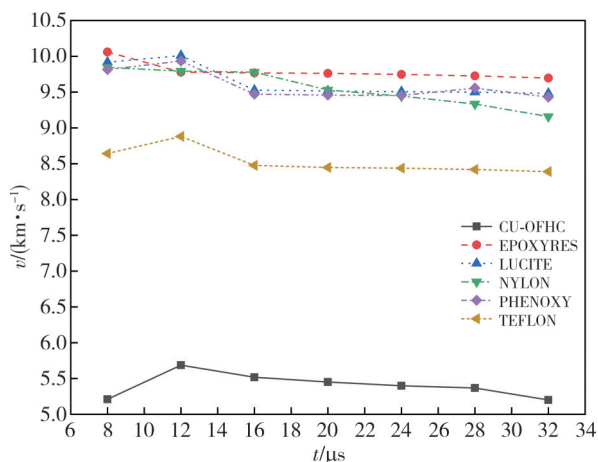


图 6 不同材料射流头部的速度

Fig. 6 Jet tip velocity of different liner materials

以上研究结果表明, 环氧树脂药型罩形成的非金属射流连续性更好, 头部速度更高, 故选取环氧树脂作为聚能战斗部药型罩的材料。

### 2.4 药型罩结构参数的影响

针对非金属材料药型罩的结构进行优化设计, 分别选用炸高(A)、壁厚(B)、锥角(C)以及罩顶内圆半径(D)作为正交优化的4个因素, 针对各因素分别设置四水平, 其中炸高的大小通过选取不同倍数装药口径(CD)来获得, 采用L16正交表来进行数值仿真模拟, 各因素水平内容如表4所示。

表 4 因素水平表

Tab. 4 Orthogonal optimization factor and level

水平	因素			
	A/CD	B/mm	C/(°)	D/mm
1	2	2.0	32	1.0
2	3	3.2	44	1.5
3	4	4.4	56	2.0
4	5	5.6	68	2.5

针对非均质炸药的冲击起爆问题, 在工程应用上有非常多的表征方式, 主要是以Held的 $v^2d$ 判据<sup>[19]</sup>作为射流对反应装甲引爆能力的标准, 进而确定最佳聚能装药结构参数。

根据正交设计方案开展数值模拟, 结果如表5所示。极差分析结果如表6所示, 其中,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 分别为各水平所对应引爆能力的平均值,  $R_j$ 为同因素下不同水平对应引爆能力的极差值。

表 5 正交设计方案设计表

Tab. 5 Orthogonal optimization scheme design

方案	炸高/CD	壁厚/mm	锥角/(°)	内圆半径/mm	$v^2d/(m^3 \cdot s^{-2})$
1	1	2.0	32	1.0	$2.2084 \times 10^5$
2	1	3.2	44	1.5	$2.7694 \times 10^5$
3	1	4.4	56	2.0	$3.0422 \times 10^5$
4	1	5.6	68	2.5	$3.1363 \times 10^5$
5	2	2.0	44	2.0	$3.3647 \times 10^5$
6	2	3.2	32	2.5	$3.6321 \times 10^5$
7	2	4.4	68	1.0	$1.3685 \times 10^5$
8	2	5.6	56	1.5	$3.0380 \times 10^5$
9	3	2.0	56	2.5	$3.2077 \times 10^5$
10	3	3.2	68	2.0	$2.7822 \times 10^5$
11	3	4.4	32	1.5	$3.7882 \times 10^5$
12	3	5.6	44	1.0	$3.2244 \times 10^5$
13	4	2.0	68	1.5	$2.7669 \times 10^5$
14	4	3.2	56	1.0	$2.9056 \times 10^5$
15	4	4.4	44	2.5	$3.4715 \times 10^5$
16	4	5.6	32	2.0	$3.9673 \times 10^5$

表 6 极差分析表

Tab. 6 Range analysis

方案	炸高/CD	壁厚/mm	锥角/(°)	内圆半径/mm
$K_1$	278.91	288.69	339.90	242.67
$K_2$	285.08	302.23	320.75	309.06
$K_3$	325.06	291.76	304.84	328.91
$K_4$	327.78	334.15	251.35	336.19
$R_j$	48.87	45.46	88.55	93.52

如图7所示, 各因素对引爆能力的影响可通过极差值大小加以判断, 由此可确定各因素的重要程度。

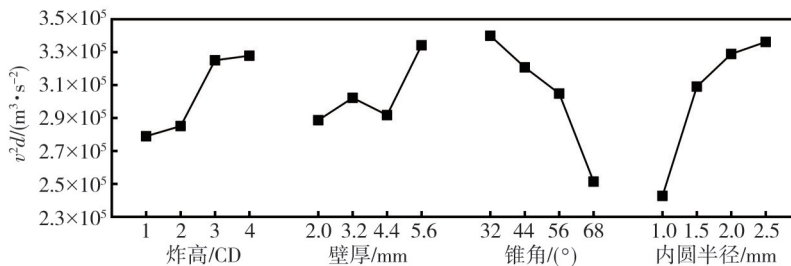


图 7 极差分析图

Fig. 7 Range analysis

由图7可以看出, 各因素对起爆能力的影响由高到低依次为内圆半径—锥角—炸高一壁厚。

根据极差分析结果可以确定非金属药型罩聚能装药的最佳结构参数为壁厚5.6 mm、锥角32°、内圆

半径2.5 mm, 以此作为药型罩的结构参数, 对不同炸高下引爆反应装甲的过程开展数值模拟。

## 2.5 非金属药型罩侵彻反应装甲结果

根据前述确定的最佳结构参数, 利用数值仿真方法模拟不同炸高下战斗部冲击反应装甲的过程, 反应装甲反应度云图如图8所示, 其中反应装甲由两层2/4/2结构(2 mm钢板, 4 mm炸药, 2 mm钢板)的带壳装药构成, 并且外侧包覆2 mm厚的4340钢作为屏蔽层, 各结构之间相距4 mm。

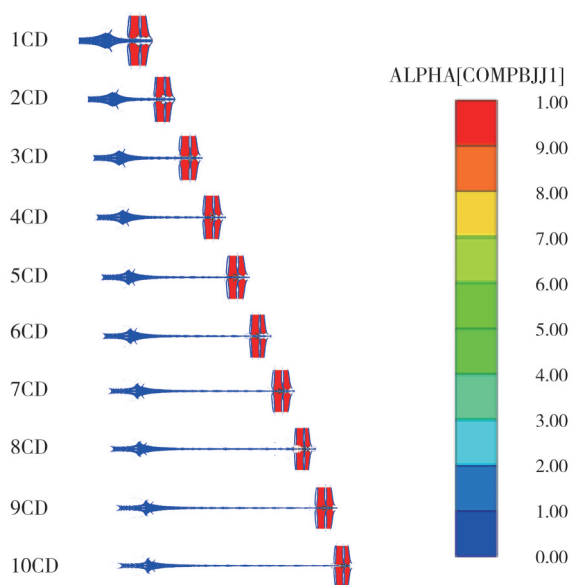


图8 不同炸高下战斗部引爆反应装甲的反应度云图

Fig.8 Nephogram of jet detonate ERA in different stand-off

在不同炸高下射流冲击反应装甲时, 其夹层装药的反应度均能使装药完全反应并进入到稳定爆轰阶段。同时, 非金属材料药型罩形成的射流在多倍炸高的情况下均可穿透并引爆反应装甲, 这与前述实验探究的结果相吻合。

在1倍炸高时, 非金属射流于 $17.5 \mu\text{s}$ 穿透第1层带壳装药面板, 此时装药内部压力最高值为35.9 GPa, 超过B炸药的临界起爆压力5.63 GPa, 内部装药进入稳定爆轰阶段, 侵彻过程中第2层带壳装药内部压力最高值为28.8 GPa, 超过临界起爆压力, 穿透后孔径约为10 mm; 在5倍炸高时,  $33 \mu\text{s}$ 时第1层带壳装药内部压力最高值达到30.43 GPa, 侵彻过程中第2层带壳装药压力最高值为27.9 GPa, 均超过临界起爆压力, 穿透后孔径约为8 mm; 在10倍炸高时, 非金属射流于 $54 \mu\text{s}$ 侵彻第1层带壳装药, 内部压

力最高值为14.95 GPa, 侵彻过程中第2层带壳装药中最高压力为29.9 GPa, 均超过临界起爆压力, 穿透后孔径大小约为8 mm。

不同炸高时非金属射流侵彻造成的孔径存在差别, 在1倍炸高时侵彻造成的孔径约为10 mm, 随着炸高的增加反应金属板的孔径逐渐减小, 2倍炸高时孔径约为9 mm, 3倍炸高时孔径约为8 mm, 之后随着炸高的增加孔径的变化逐渐减小, 最终孔径稳定在7.5 mm左右。孔径产生变化主要原因是在炸高较低时射流处于压垮汇聚阶段, 此时射流头部的直径较粗, 而随着炸高的增加射流逐步伸长, 最终射流头部直径趋于稳定, 由此造成侵彻的孔径随炸高发生变化。

## 3 结论

本文对采用非金属材料作为药型罩的小口径聚能装药引爆反应装甲的过程进行了数值模拟, 并开展了正交设计与极差分析, 结论如下:

1) 相比金属铜药型罩, 非金属材料药型罩形成的射流延展性更好, 头部速度更高, 头部直径更大, 其中, 环氧树脂药型罩所形成的射流各项水平均优于其它非金属材料。

2) 极差分析表明非金属药型罩聚能装药对带壳装药起爆能力的影响由高到低依次为: 内圆半径、锥角、炸高、壁厚。

3) 以壁厚5.6 mm、锥角 $32^\circ$ 、内圆半径2.5 mm作为非金属药型罩的结构参数, 在不同炸高下射流冲击反应装甲时, 其夹层装药的反应度均能使装药完全反应并进入到稳定爆轰阶段。

## 参考文献:

- [1] 姬龙. 反爆炸反应装甲理论与关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] 曹红根. 爆炸式反应装甲穿而不爆的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [3] 门建兵, 聂源, 蒋建伟, 等. 反爆炸反应装甲串联爆炸成型弹丸匹配设计方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2369-2378.  
MEN Jianbing, NIE Yuan, JIANG Jianwei, et al. Matching design method of tandem efp for anti-explosive reactive armor [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2369-2378. (in Chinese)
- [4] 严晨, 郁红陶, 雷若奇, 等. 反应装甲对金属射流的干扰作用研究[J]. 弹道学报, 2024, 36(1): 63-69.  
YAN Chen, YU Hongtao, LEI Ruoqi, et al. Study on

- the interference of reactive armor to metal jet[J]. *Journal of Ballistics*, 2024, 36(1): 63-69. (in Chinese)
- [5] 梁宇, 李如江, 张华申, 等. 射流斜侵彻薄层装药结构数值模拟和试验研究[J]. *火工品*, 2023(4): 43-49. LIANG Yu, LI Rujiang, ZHANG Huashen, et al. Numerical simulation and experimental study on oblique penetration of thin layer charge by jet[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2023(4): 43-49. (in Chinese)
- [6] 余庆波, 钟世威, 王健, 等. 射流作用条件对重型反应装甲干扰时长的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(4): 383-389. YU Qingbo, ZHONG Shiwei, WANG Jian, et al. Research on the effect of jet action conditions on interference duration of heavy reaction armor[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(4): 383-389. (in Chinese)
- [7] 余庆波, 钟世威, 肖艳文, 等. 命中位置对引爆重型爆炸反应装甲影响数值模拟[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(2): 151-157. YU Qingbo, ZHONG Shiwei, XIAO Yanwen, et al. Numerical simulation of influence if hit position on detonating heavy explosive reaction armor[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(2): 151-157. (in Chinese)
- [8] 史志鑫. 串联毁伤元对斜置反应装甲目标的侵彻性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [9] 吉庆, 王志军, 伊建亚, 等. 环形聚能装药尼龙射流成型及侵彻过程数值模拟研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(5): 134-138. JI Qing, WANG Zhijun, YI Jianya, et al. Numerical simulation study on performance and penetration of nylon jet by annular shaped charge[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(5): 134-138. (in Chinese)
- [10] YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Reaction characteristics of polymer expansive jet impact on explosive reactive armour [J]. *e-Polymers*, 2020, 20(1): 292-302.
- [11] 陈杰. 基于 SPH 算法的 PTFE-Cu 粒子流侵彻性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [12] 董方栋, 王志军, 尹建平, 等. 低密度射流冲击带壳装药起爆阈值的数值仿真[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(4): 49-51. DONG Fangdong, WANG Zhijun, YIN Jianping, et al. Numerical simulation on initiating value of low-density jet impacting explosive with shell [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(4): 49-51. (in Chinese)
- [13] 赵鹏铎, 贾子健, 王志军, 等. 双层药型罩对反应装甲穿而不爆及后效作用研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(S1): 37-44. ZHAO Pengduo, JIA Zijian, WANG Zhijun, et al. Study of penetration-but-non-explosion and after-effect of double-layer Liner against ERA [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 37-44. (in Chinese)
- [14] 刘同鑫, 尹建平, 王志军, 等. 低密度射流形成过程的数值分析[J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 96-99. LIU Tongxin, YIN Jianping, WANG Zhijun, et al. Numerical analysis of the formation process of low-density jet [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 96-99. (in Chinese)
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [16] LEE E L, HORNING H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRI-50422 [R]. Livermore: Lawrence Radiation Laboratory, 1968.
- [17] 张雪朋, 刘亚昆, 伊建亚, 等. 复合装药包覆式活性侵彻体成型及侵彻研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(7): 1-5. ZHANG Xuepeng, LIU Yakun, YI Jianya, et al. Study on formation and penetration of the wrapped reactive projectile formed by double-layer shaped charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(7): 1-5. (in Chinese)
- [18] MCQUEEN R G, MARSH S P, TAYLOR J W, et al. The equation of state of solids from shock wave measurements, high-velocity impact [M]. New York: Academic Press, 1970.
- [19] HELD M. Initiation criteria of high explosives at different projectile or jet densities [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21(5): 235-237.