

# 一种新型聚能破甲战斗部及其发展趋势探讨

安二峰, 沈兆武, 周听清, 王德润

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230027)

**[摘要]** 针对当前以单罩聚能效应为主的聚能破甲战斗部, 提出一种新型多罩复合聚能装药结构, 探讨了其成型机理和联合破甲原理, 系统研究了主要装药结构参数对破甲效果的影响。实验结果表明, 该聚能装药结构比 EFP 装药结构, 在保持穿孔孔径相当和同等装药条件下, 可以提高穿深 50% 左右。在此基础上, 进一步提出反反应装甲目标新型聚能装药结构, 深化了聚能效应的内涵, 丰富了打击目标的手段。

**[关键词]** 聚能战斗部; 爆炸成型弹丸; 聚能射流; 反应装甲; 侵彻

**[中图分类号]** TJ413. +2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)06-0085-06

## 1 历史回顾

早在 19 世纪, 人们就已经发现了聚能现象, 直到 1923 年人们才开始对此有所研究。在第二次世界大战初期, 这一原理已应用于弹药设计, 出现了聚能破甲弹, 或称为空心装药破甲弹 (shaped charge)。这种聚能装药结构目前仍广泛地应用于反坦克、反装甲的各种导弹、炮弹、地雷以及其他弹药上。在民用爆破工程中, 聚能装药也得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

聚能装药作为一种产生高能量密度的技术, 在军事领域和民用领域得到了越来越广泛的应用。从装药结构上, 其发展历史大致可以划分为 3 个阶段:

第一阶段是聚能射流弹时代。聚能射流弹的应用始于第二次世界大战, 主要在军事方面。它以低炸高、大穿深为主要特点, 但其穿孔孔径很不理想, 后效不明显, 大大限制了其在复杂、多变的战争环境中的应用。

第二阶段是爆炸成型弹丸时代。到了 20 世纪 70 年代, 为适应复杂、多变的战争环境, 另一种聚能弹——爆炸成型弹丸 (EFP) 应运而生。它以

大炸高, 弹坑孔径大且均匀、反应装甲对其干扰小以及后效和气动性好为主要特点, 在一定程度上弥补了聚能射流的不足, 并很快应用于军事领域。

随着装甲技术的飞速发展, 先后研制出高强度的装甲材料、复合材料、非金属材料, 这些装甲材料均能有效地降低聚能破甲弹的作用。随着新技术和新概念的产生, 世界军事强国又相继研制和发展了复合装甲、反应装甲、主动装甲、电磁装甲和智能装甲等。这些先进的材料和装甲技术对聚能破甲弹又有了新的防护效果, 有的可使破甲效果下降 70% 以上, 大大提高了坦克和装甲车辆的生存能力<sup>[2]</sup>。为对付这些先进的装甲目标, 弹药品种也相应地得到了快速发展。

第三阶段是串联战斗部的发展和应用。从 20 世纪 80 年代至今, 串联战斗部得到了空前的发展, 它可以有效地对付反应装甲和复合装甲。对于 2 级串联战斗部来说, 无论是技术还是成本都是可以接受的, 但对于多级串联战斗部来讲, 技术复杂、成本高昂, 成为限制聚能装药战斗部继续发展的“瓶颈”。因此, 新型多罩复合聚能装药结构成为未来聚能战斗部发展的主要方向。

**[收稿日期]** 2003-12-30; **修回日期** 2004-01-13

**[作者简介]** 安二峰 (1975-), 男, 河南漯河市人, 中国科学技术大学力学与机械工程系博士

## 2 新型聚能战斗部的提出及破甲原理

随着现代战争的发展,防护能力的大大增强,从而使大锥角聚能罩形成的爆炸成型弹丸穿深太小的缺点暴露无遗<sup>[3]</sup>。在这种情况下,研究一种既能保证穿孔孔径又能提高穿深的新概念战斗部已迫在眉睫。为达到这个目的,人们无外乎从2个方面入手:a.从材料入手,寻找高性能炸药和优良的聚能罩材料。b.从装药结构入手,提出新颖的聚能罩结构或装药结构。这两种方式是相辅相成的,既各自独立又互相联系。

该新型聚能战斗部的研究具有重要的工程应用价值,主要体现在以下几个方面:

1) 在战斗部随进技术中,用于串联战斗部的一级装药,用来攻打钢筋混凝土工事等,例如钻地弹等。

2) 由于其破甲孔径大且均匀,穿深明显大于EFP穿深;因此,可直接用来攻击舰艇和轻型装甲车辆的甲板。

3) 由于该战斗部可产生射流和弹丸联合作用,并且射流和弹丸之间存在明显的速度差;因此,可在射流引爆反应装甲以后,利用弹丸对主装甲进行侵彻。

4) 从破甲孔径和深度来说,该聚能破甲战斗部破甲孔型比常规聚能战斗部好;可用于恶劣环境条件下的爆破施工,进行快速打孔,克服冻土条件下钻孔效率低下的问题。

5) 特殊地质条件下的石油射孔;例如,对含砂油层进行大孔径射孔,提高油井产能。

### 2.1 理论依据

对于典型的聚能射流破甲弹,在炸药爆炸作用下,药型罩被压合后,分别形成速度较高的射流和运行较慢的杵。当药型罩锥角增大时,向内压合部分显著减少,相应地射流和杵体之间的速度差也随之减小。Held发现,当半锥角接近75°时,射流和杵接近具有相同的速度。在这种角度下,将形成EFP。

由参考文献[4]可知:

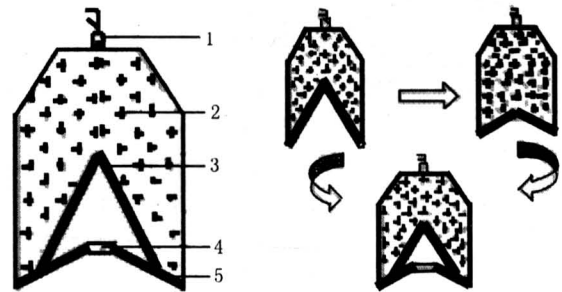
$$V = k \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (1)$$

假设EFP的穿孔孔径上下均匀,则:

$$V = \pi r^2 l = k \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (2)$$

式中:  $V$ —穿孔体积;  $r$ —穿孔半径;  $l$ —穿孔深度;  $k$ —材料常数;  $m$ —弹丸质量;  $v_0$ —弹丸速度。

由式(2)可知,在保持穿孔孔径不变时,穿孔深度与弹丸动能成正比。弹丸动能又与聚能罩接受的能量成正比,即与聚能罩的外表面积成正比。据此,作者提出了一种新型聚能装药结构<sup>[5]</sup>(见图1),在此基础上,选择高性能炸药和优良的聚能罩材料。其设计思路是:由原来普通爆炸成型弹丸的装药聚能罩与炸药直接接触改为图1所示的装药结构,使聚能罩与炸药接触面积明显加大,扩大了能量的接收面积,提高对目标的侵彻能力。



1—雷管和扩爆药; 2—主装炸药; 3—聚能射流药型罩(小锥角); 4—聚能射流通道(空孔); 5—爆炸成型弹丸药型罩(大锥角)

图1 新型聚能装药结构图

Fig.1 The new model shaped charge

其作用机理可从2个方面来阐述:

2.1.1 成型机理 当主装药引爆后,聚能罩3在炸药爆炸作用下首先产生压合运动,聚能罩3上部形成的高速射流从小孔穿出;下部在压合作用下与聚能罩5碰撞复合形成图2所示的弹丸。对EFP



1—聚能射流; 2—爆炸成型弹丸

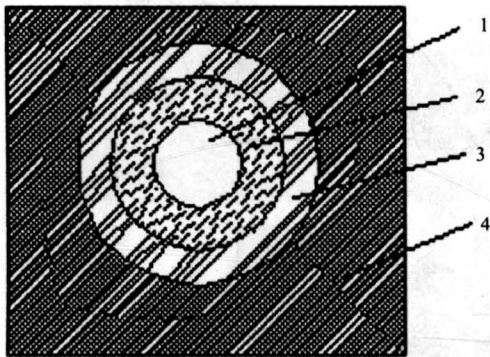
图2 射流和弹丸成型示意图

Fig.2 The sketch map of formed projectile and jet

的成型而言,有3种成型方式(翻转、压跨和混合)。在相同装药条件下,这3种成型方式是通过药型罩角度和厚度来控制药型罩微元轴向速度分布及

径向速度的大小和分布来实现的。翻转成型弹丸重心前移、成杆状弹丸飞行阻力小，有利于飞行稳定及提高存速。压跨成型弹丸重心靠后，飞行稳定性较差，但速度较高，适于炸高偏小的情况。该新型战斗部的弹丸形成与 EFP 的形成有很大相似之处，且该战斗部有效炸高小；因此，翻转和压跨成型将是主要研究内容，在此只涉及翻转成型。

2.1.2 穿靶机理 射流从小孔穿出后，首先拉动低速弹丸快速成形和加速，并在拉动过程中与弹丸脱离（图 2），随后对靶板开坑侵彻，使射孔周围材料发生热软化而形成塑性区<sup>[4]</sup>；低速弹丸在经过加速后，尾随射流而入并对射流开坑进行扩孔和再侵彻，从而完成了一个战斗部对靶板的二次侵彻（图 3），大大提高了战斗部对目标的侵彻能力。



1—射流射孔；2—塑性熔化区；3—剪切区；4—靶板

图 3 新型聚能结构对靶板的侵彻示意图

Fig.3 Sketch map of the penetration

2.2 实验结果

聚能战斗部装药口径为  $\phi 48$  mm，小锥角聚能罩锥角角度为  $45^\circ$ ，大锥角聚能罩锥角角度为  $125^\circ$ ，罩材料为紫铜，罩壁厚 2 mm。在该新型聚能装药结构设计基础之上进行了系统的静破甲叠靶实验，靶材为 45 号钢。穿深随主要结构参数和材料变化规律如图 4，图 5，图 6 和图 7 所示。

除了穿深外，破甲孔径也是该战斗部的另一个重要性能参数，如图 8 (a) 为 EFP 破甲实验结果，带壳装药，口径  $\phi 48$  mm，铸装 B 炸药 78 克。其破甲侵彻深度可达  $6 \times 8$  mm。图 8 (b)，(c)，(d) 所示为新型聚能装药结构破甲实验结果，带壳装药，口径  $\phi 48$  mm，铸装 B 炸药 70 克。该新型聚能战斗部的穿孔是由先导射流和后继随进弹丸共同作用的结果，当结构参数变化时，其穿孔孔径表现形

式复杂。

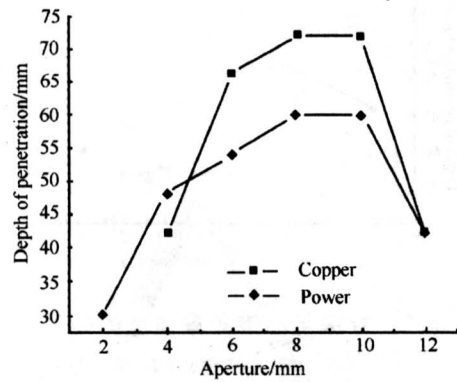


图 4 穿深与孔径的关系

Fig.4 relation between penetration depth and aperture

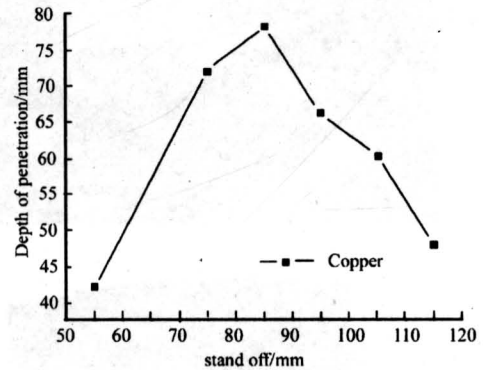


图 5 穿深与炸高的关系

Fig.5 Relation between penetration depth and stand off

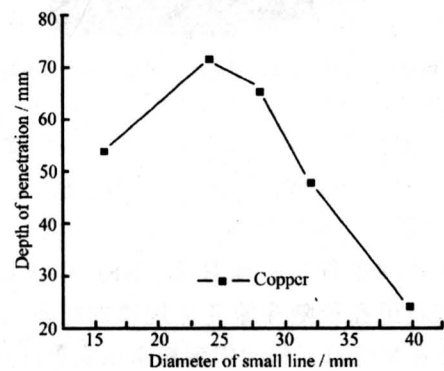


图 6 穿深与小锥角罩底面直径的关系

Fig.6 Relation between penetration depth and diameter of small liner

其中图 8 (b)，(d) 所示为先导射流开孔侵彻

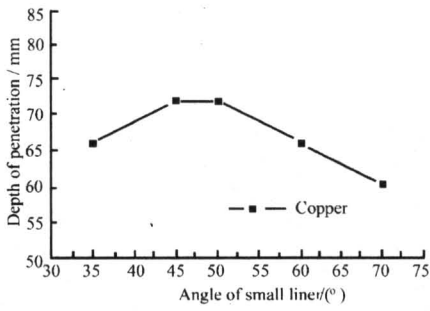
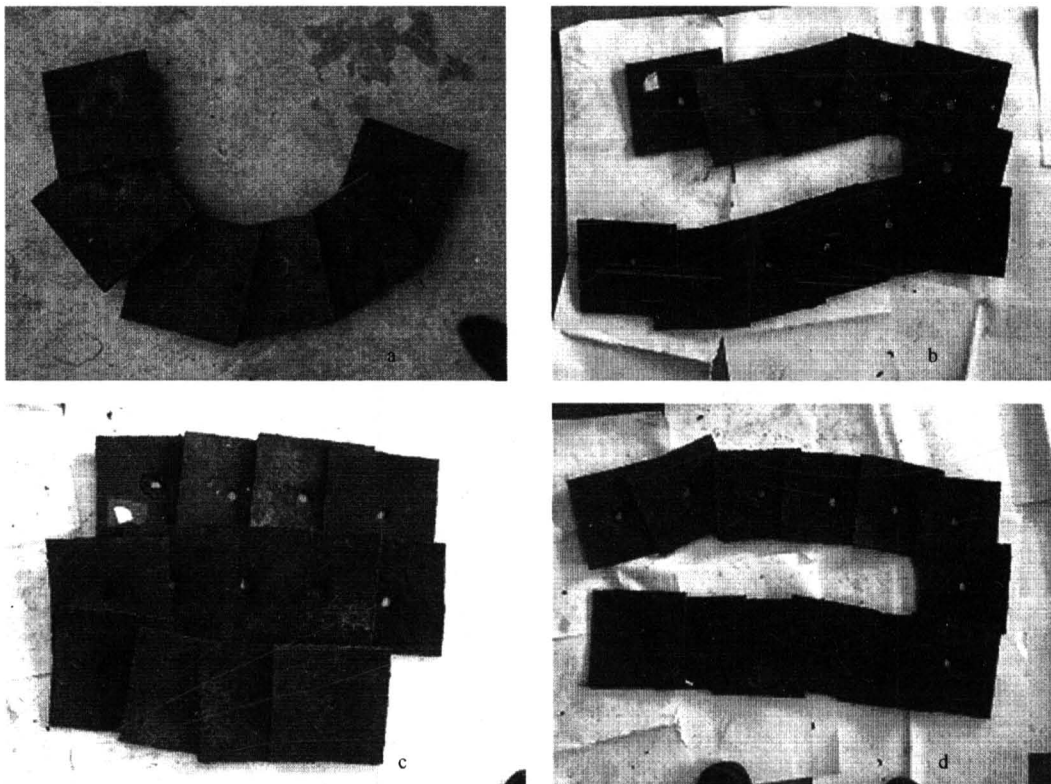


图7 穿深与小锥角罩角度的关系  
Fig.7 Relation between penetration depth and angle of small liner

和弹丸扩孔侵彻作用相当时，射流射孔刚好完全被弹丸二次扩孔侵彻结果所掩盖。所成孔上下均匀，孔形较好，侵彻深度达  $12 \times 6$  mm；图 8 (c) 则表现为射流的先导开孔作用强于弹丸的扩孔侵彻作用，因而上半部分表现为扩孔孔径，下半部分表现为射流射孔孔径，穿孔孔径上下不均，不易定量描述，穿深达  $13 \times 6$  mm。综合以上实验结果分析可知：在保持该新型战斗部侵彻孔径和 EFP 侵彻孔径相当条件下，该新型战斗部穿深可达 72 mm；在各自最佳炸高条件下，比 EFP 侵彻深度提高



(a) 普通 EFP 静破甲靶试结果<sup>[6]</sup>；(b) 新型聚能战斗部静破甲靶试；(c) 新型聚能战斗部静破甲靶试结果；(d) 新型聚能战斗部静破甲靶试结果

图8 典型实验结果

Fig.8 The typical experiment results

50%。在相同条件下，纯射流、EFP 和该新型聚能战斗部破甲孔径随穿深变化规律的比较见图 9。射流战斗部聚能罩材料为钨铜粉末压实罩 ( $\rho = 8.8 \text{ g/cm}^3$ )，其余 2 种战斗部聚能罩材料均为紫铜。

### 3 针对反应装甲目标的新型聚能破甲弹设计<sup>[5]</sup>

众所周知，反应装甲 (ERA) 是聚能射流的最有效防护手段之一，它可以降低射流穿深 70% 以上。反

应装甲结构简单，其基本单元是在两块金属板中间夹一层钝感混合炸药 (图 10)。当破甲弹以一定的角度倾斜撞击到反应装甲盒体时，弹丸的引信起爆，引爆主装炸药，形成聚能破甲射流。射流穿过盒体，冲击平板装药的前板，引爆平板装药。炸药爆炸驱动前、后金属板沿着其法线方向做背向飞离加速运动。运动的前、后金属板与射流不断作周期性切割扰动作用，持续干扰射流的侵彻作用和稳定性，使射流失去连续性和稳定性。同时，射流受到夹杂有金属碎片并向入

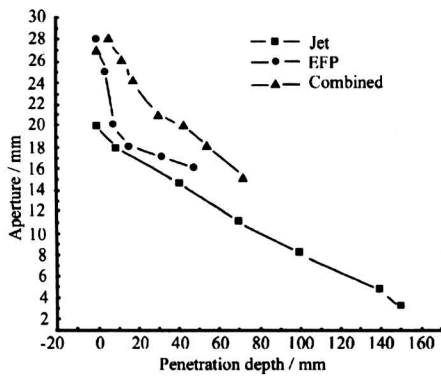


图 9 纯射流、EFP 和该战斗部破甲孔径随深度变化规律

Fig.9 the penetration depth change with crater aperture of jet, EFP and the new model warhead

口处高速喷出的爆轰产物的干扰作用，也使射流发生歪曲、断裂和飞散，从而大大降低破甲射流对主装甲的侵彻能力。

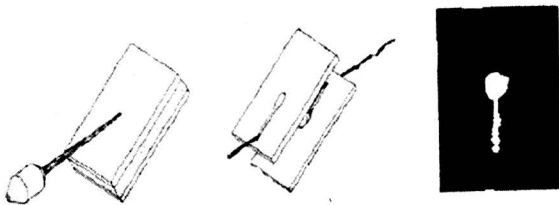


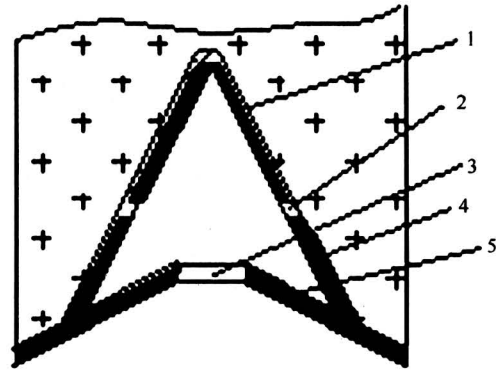
图 10 反应装甲与聚能射流的相互作用

Fig.10 the interaction between jet and ERA

在反坦克聚能战斗部设计中，由于爆炸反应装甲对射流的拦截和干扰，会使战斗部破甲能力大大降低。因此，战斗部设计应尽量使射流不与或少与飞板接触，从而减少穿深损失。通过对爆炸反应装甲作用过程的分析可知，有 2 种情况可达到此目的：一是上飞板的下端飞离弹轴线后，而下飞板的上端在碰撞主装甲后反弹但尚未运动到弹轴线的这段时间内，由于下飞板反弹后向上运动的速度较慢，上、下飞板之间所存在的空隙使后续战斗部有足够长的射流或弹丸不受干扰而通过；另一个是下飞板与主装甲碰撞并反弹向上运动，下飞板下端离开弹轴线时的情况。显然，前一种情况需要较短的延迟时间（约 40 μs），后一种情况需要较长的延迟时间（大于 150 μs）。基于上述分析，在对新型聚能装药结构做局部修改以后，提出一种新型反反应装甲目标的战斗部设计（图 11）。

小锥角聚能罩的上半部分拟采用复合材料或其他新材料，如爆炸复合材料等，可使小锥角聚能罩

上半部分只产生高速无杆体射流，该材料的选择和应用尚待进一步研究。而小锥角聚能罩下半部分与大锥角聚能罩复合形成弹丸，形成的射流和弹丸特性如图 12 所示。



1—小锥角聚能罩上部（复合材料等）；2—衬垫；3—空孔；4—小锥角聚能罩下部（紫铜）；5—大锥角聚能罩；

图 11 对反应装甲目标的聚能装药结构

Fig.11 The design to defeat ERA targets



1—低速弹丸；2—高速射流（无杆体）

图 12 反应装甲目标的聚能弹所形成的射流和弹丸特性

Fig.12 The flying jet and projectile

由于该新型聚能战斗部的有效炸高较小，所以射流和弹丸之间的延迟时间也应该不大。因此，第一种躲避反应装甲干扰情况下的延迟时间将作为该战斗部设计的依据。该新型聚能战斗部主要是基于在合适的炸高条件下，利用射流和弹丸之间巨大的速度差（达 8 000 m/s），先使高速射流引爆反应装甲并与之相互作用；几十微秒以后，低速弹丸趁虚而入，并对主装甲进行有效侵彻，如图 13 所示。

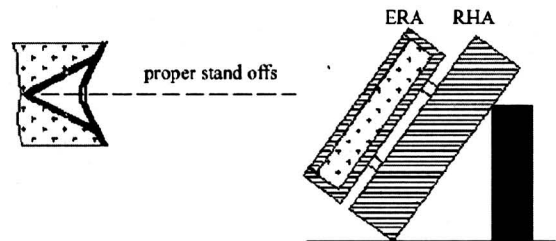


图 13 新型聚能战斗部对反应装甲目标实验示意图

Fig.13 Sketch map of the experimental facility

当主装甲目标太厚时,因该新型聚能战斗部有效炸高小,需在其后串联大口径的主级聚能射流战斗部,以提升其对目标的侵彻能力,完成对主装甲目标的致命打击。

#### 4 结论及展望

1) 基于能量观点提出了一种新型聚能战斗部及其演化方式。实验结果表明在保持穿孔孔径相当和同等装药条件下,该新型聚能战斗部的破甲深度比 EFP 战斗部提高 50%。

2) 该新型聚能战斗部无论是在对付混凝土类目标还是装甲目标时,均有其它聚能战斗部无可替代的功能,它丰富了聚能战斗部的内涵和对目标的打击手段,而且技术简单、性价比高,具有很大的发展潜力,应该深入研究。

3) 在民用领域里的很多应用有待推广使用,诸如特殊地质条件下的大孔径石油射孔技术和爆破中快速打孔技术等。

**致谢:** 作者对与 Professor Manfred Held (Germany) 所进行的有益探讨和交流表示感谢!

#### 参考文献

- [1] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 200~201
- [2] 美国陆军器材部. 终点效应设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 5
- [3] Weimann K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology propellants[J], Explosives, Pyrotechnics, 1993, 18 (5): 294~298
- [4] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 154~155
- [5] An Erfeng, Shen Zhaowu, et al. Application study on a shaped charge warhead[A]. Theory and Practice of Energetic Materials[C], 2003 IASPEP. Beijing/New York: Science Press
- [6] 秦友花, 周听清, 等. 爆炸成型弹丸的实验研究[J]. 实验力学, 2002, 17(2): 160~164

## A New Model Shaped Charge Warhead and the Discussion of It's Evolution

An Erfeng, Shen Zhaowu, Zhou Tingqing, Wang Derun

(Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**[Abstract]** The shaped charge warheads are designed only based on one single liner absolutely today. Authors of this paper put forward a new combined model of shaped charge warhead based on the energy viewpoint and discuss mechanisms of formation and penetration of jet and projectile. Then the steel target experiments are systematically made based on the model in order to find the influence of the key configuration parameters on penetration results. The experiment results reveal that the penetration of new model shaped charge warhead can achieve an increment about 50% than the penetration of current EFP under the same crater and charging conditions. A design of new shaped charge warhead is put out against the ERA.

**[Key words]** shaped charge warhead; explosively formed projectile; shaped charge jet; ERA; penetration