文章编号:1000-5773(2009)03-0229-07

曲率半径对双层球缺罩形成串联爆炸成型弹丸的影响*

郑 宇,王晓鸣,李文彬,李伟兵

(南京理工大学机械工程学院国防重点学科实验室,江苏南京 210094)

摘要:为了研究曲率半径对串联爆炸成型弹丸(EFP)形成的影响,利用有限元软件AUTODYN,对双层球缺罩串联EFP的成型过程进行了数值仿真,在此基础上分析了双层球缺罩串联EFP的形成机理,探讨了曲率半径对串联EFP的影响规律。开展了双层药型罩EFP形成的实验研究,得到了串联EFP形成过程的X光照片,仿真和试验结果比较一致。仿真与试验结果都表明:双层球缺罩可以形成前后分离的串联EFP,双层球缺罩的曲率半径对串联EFP的速度、外形和长径比有较大影响。

关键词:爆炸力学;药型罩;串联;爆炸成型弹丸;曲率半径

中图分类号:TJ410.3 **文献标识码**:A

1 引 言

随着军事科技的日新月异,各种军事目标的防护能力不断加强,复合装甲、爆炸反应装甲等技术的出现,使传统聚能装药面临着严峻的挑战。多层爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile,EFP)是近几年提出的新概念战斗部。设计合理的多层药型罩在同一轴线上连续射出多个串联随进EFP,可以巧妙地解决爆炸反应装甲问题。多层药型罩的能量转换与吸收机制更合理,化学能的利用更充分,可以明显提高弹丸的侵彻能力,因此多层EFP技术成为国内外EFP战斗部研究的热点之一[1-7]。S. C. Hong等对多层药型罩的形成过程进行了数值仿真研究。K. Weiman等对带有铁质尾部的钽质EFP进行了细致的研究。R. Fong在K. Weiman的工作基础上对两层和三层的球缺战斗部进行了试验研究,获得了长径比较大的EFP战斗部。但至今尚未见到药型罩形状、材料等因素对双层球缺罩形成串联EFP的影响分析。

本研究以双层铜质球缺罩为研究对象,采用数值模拟方法探讨了串联EFP弹丸的形成过程以及球缺罩曲率半径对串联EFP的影响。开展了相应的试验研究,证实了数值模拟的可信性。虽然内外球缺罩的材料都是铜,但研究结果对其它材料的双层球缺罩也是适用的。

2 双层球缺罩串联EFP形成机理

图1是数值模拟出的炸药起爆后双层球缺罩变形过程的几个典型状态图。从图中可以看出,双层球缺罩毁伤元形成机理是:爆轰波扫过药型罩后,靠近轴线的微元(称之为碰撞微元)被压跨,因为具有足够的径向速度,可以运动到轴线上(图1(b)),此后在轴线发生碰撞,内外微元因速度差且相互之间没有牵连而首先产生分离(图1(c)、图1(d))。

* **收稿日期**:2008-04-29;**修回日期**:2008-09-11

作者简介:郑 宇(1981—),男,博士,讲师,主要从事弹丸高效毁伤研究. E-mail:zhengyu9989@yahoo.com.cn

通讯作者:王晓鸣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事高效毁伤、灵巧弹药总体技术研究. E-mail:wxm202@126.com

远离轴线的微元(称之为翻转微元),没有足够的径向速度无法运动到轴线,因此开始阶段翻转微元的内外层速度相同,无法分离。当碰撞微元在轴线上碰撞并分离后,内罩的碰撞微元和翻转微元之间会产生牵连作用,使得翻转微元得到加速,并逐渐与外罩微元分离(图 1(e)),这个阶段,内外罩之间会因为摩擦力而产生动量交换,但此时摩擦力很小且作用时间短暂,对两罩的速度影响不大。

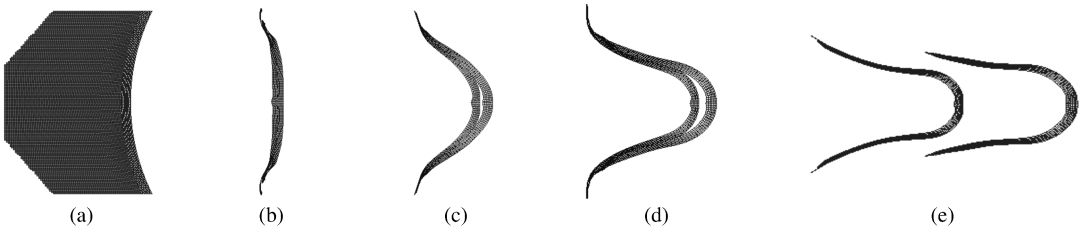


图 1 不同时刻串联 EFP 的数值模拟结果

Fig. 1 Tandem EFP diagrams of simulation at different times

双层球缺罩毁伤元的形成取决于很多因素,这些因素之间相互作用,影响着双层球缺罩的形成过程,这些因素包括:内外罩材料的选择、内外罩之间的结合方式、内外罩的几何尺寸、炸药的选择、起爆方式的选择等[6-7]。从双层球缺罩毁伤元形成机理分析可知,在双层球缺罩毁伤元的形成过程中,很重要的一个因素是碰撞微元与翻转微元的确定。一旦确定这个条件,即可分别使用成熟的射流形成理论和 EFP 翻转理论求出各微元的速度并最终得到内外罩的整体速度,并可以得出战斗部最终的形状。而球缺罩曲率半径的变化,会改变爆轰波对药型罩作用力的大小与方向[8],从而改变药型罩不同位置的压垮速度,而碰撞微元与翻转微元正是由压垮速度决定的,而曲率半径是决定微元压垮速度的重要因素之一,对于双层药型罩串联 EFP 的形成至关重要。本工作主要以数值仿真方法,研究曲率半径对双层铜质球缺罩毁伤元的形成的影响。

3 数值计算

3.1 结构及有限元模型

本研究使用在爆炸力学领域广泛使用的有限元程序 AUTODYN-2d,对双层球缺罩的形成进行仿真计算。有限元模型如图 2 所示:中心点起爆,无壳,由 8701 炸药和双层铜罩组成,内外罩都为锥弧结合罩。本工作中外罩指靠近炸药的药型罩,内罩指远离炸药的药型罩,内外罩厚度都为 1.5 mm。装药口径 60 mm,装药高度 40 mm,圆弧部分曲率半径 48 mm,圆锥段锥角 140°。与有限元模型相对应的双层罩实物照片如图 3 所示。

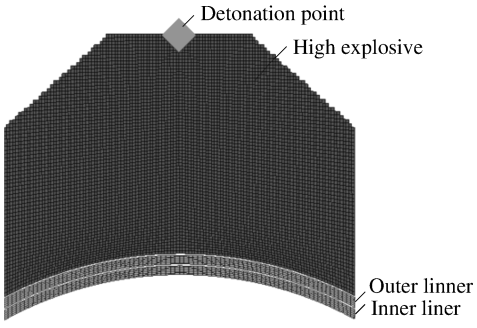


图 2 双层球缺罩有限元模型

Fig. 2 Numerical model of double-layer shaped charge liner

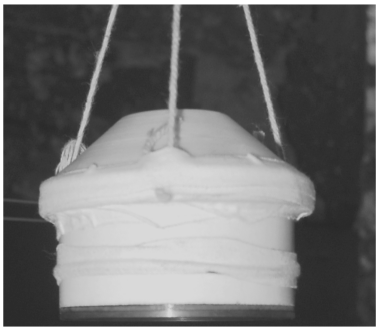


图 3 双层药型罩照片

Fig. 3 Picture of double-layer shaped charge liner

3.2　算法简介

有限元算法的选择决定了双层药型罩数值仿真的成败。对于串联 EFP 的形成,必然涉及到不同接触面的碰撞和滑移,采用 Euler 形式的网格无疑是不合适的,因此本研究采用 Lagrange 形式的网格进行计算。与 Euler 算法相比,Lagrange 算法的优势在于可以清楚地刻画不同界面之间的相对运动,便于设置传感器取出特定位置的物理量。难点在于,在压垮及翻转过程中,药型罩变形剧烈,网格会产生相当大的变形,甚至出现负面积。解决的办法:一是建模时,有意将药型罩网格建成细长形状;二是在药型罩压垮过程中,适时使用 Remap 算法,重新划分网格。Remap 是 AUTODYN 软件所特有的一种算法,在Lagrange算法情况下,当网格严重变形以至于计算无法进行下去后,将网格重新规则划分,同时将节点的物理量进行重新分配,这样处理过后,计算可以继续下去,且计算精度可以保证。双层罩之间的接触采用 AUTODYN 自带的 Lagrange-Lagrange 自由接触算法,保证两个接触面可以发生相互碰撞和滑移。

3.3　材料模型及参数

药型罩材料采用冲击状态方程,它是 Mie-Grüneisen 状态方程的一种,对于材料的压缩状态,其形式如下[9]

$$p = p_{\mathrm{H}} + \gamma_0 \rho_0 (e - e_{\mathrm{H}})$$

式中:$p_{\mathrm{H}} = \rho_0 c_0^2 \mu (1+\mu)[1-(s-1)\mu]^2$;$e_{\mathrm{H}} = (1/2)(p_{\mathrm{H}}/\rho_0)[\mu/(1+\mu)]$;$\mu = \rho/\rho_0 - 1$;$\rho_0$ 为初始密度;c_0、s、γ_0 为材料参数。

药型罩材料的屈服模型采用 Johnson-Cook 形式[9]

$$\sigma_{\mathrm{y}} = (A + B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})(1 + C \cdot \lg \varepsilon_{\mathrm{p}}^{*})(1 - T_{\mathrm{H}}^{m})$$

式中:σ_{y} 为材料的动态屈服应力,ε_{p} 为有效塑性应变,$\varepsilon_{\mathrm{p}}^{*}$ 为有效塑性应变率,T^{*} 为相对温度,A 为静态屈服应力,B 为应变硬化系数,n 为应变硬化指数,C 为应变率相关系数,m 为温度相关系数。表达式的 3 项分别反映了材料的应变效应、应变率效应和热软化效应。药型罩材料紫铜的本构方程参数值取自 AUTODYN 软件的材料库[9]。

8701 炸药选用 JWL 状态方程,此状态方程通常用于描述高能炸药及其爆轰产物,其形式为

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

8701 炸药的参数为[10]:$\rho = 1.69\ \mathrm{g/cm^3}$,$D = 8300\ \mathrm{m/s}$,$p_{\mathrm{CJ}} = 29.6\ \mathrm{GPa}$,$A = 85.2\ \mathrm{GPa}$,$B = 1.8\ \mathrm{GPa}$,$R_1 = 4.6$,$R_2 = 1.3$,$\bar{\omega} = 0.34$。

4　试验研究

从上述的数值模拟结果可以看出,双层铜质球缺罩形成串联 EFP 在技术上是可行的,为了进一步验证双层球缺罩的性能,设计了与数值仿真对应的铜质双层罩方案(见图 3)。为了便于设计夹具进行加工,双层药型罩实物采用锥弧结合形式,圆锥段不大,可以近似模拟球缺罩。试验手段为 X 光摄影,采用 300 kV 脉冲 X 光机进行拍摄,两个 X 光射线管布设成 45°汇交,出光时间差可以精确到 1 μs。药型罩以垂直方式布设,为了减小风的影响,使用吊锤保证成型后的聚能侵彻体经过两个 X 光射线管的交汇轴。通过设置两个脉冲 X 光射线管不同的出光时间,一次试验可以得到两张不同时刻的 X 光照片。试验场地的布置如图 4 所示。

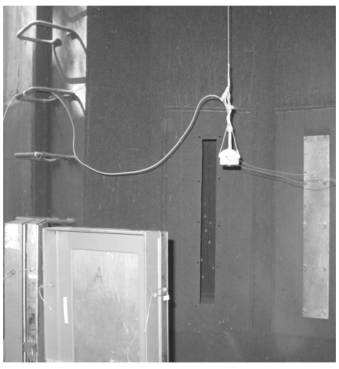


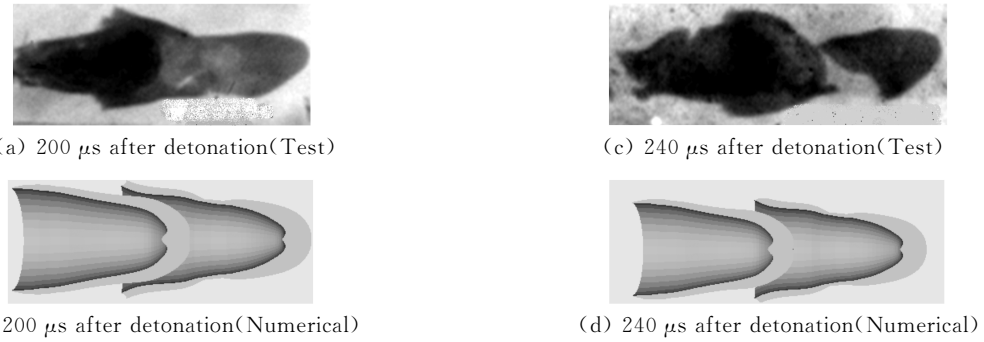
图 4　试验场地布置

Fig. 4　Test set-up

5 仿真与试验结果分析

5.1 仿真与试验结果对比

仿真与试验的结果对比如图 5 所示。其中图 5(a)、图 5(c)为试验结果，图 5(b)、图 5(d)为仿真结果，X 光拍摄时刻和仿真时刻均为起爆后 200 μs；表 1 为仿真与试验结果的对比，表中，v_a 为前 EFP 速度，v_b 为后 EFP 速度，l_a 为前 EFP 长度，l_b 为后 EFP 长度，d_a 为前 EFP 直径，d_b 为后 EFP 直径。



(a) 200 μs after detonation(Test)　(c) 240 μs after detonation(Test)

(b) 200 μs after detonation(Numerical)　(d) 240 μs after detonation(Numerical)

图 5 仿真与试验的 EFP 形态

Fig. 5 Numerical and test diagrams of EFP

表 1 仿真试验结果对比(起爆后 200 μs)

Table 1 Comparison of numerical and test results(200 μs after detonation)

Results	v_a/(m/s)	v_b/(m/s)	l_a/(cm)	l_b/(cm)	d_a/(cm)	d_b/(cm)
Simulation	1680	1540	4.72	3.76	1.66	1.86
Test	1610	1500	4.94	3.83	1.61	1.81

从结果对比可以看出：

(1) 仿真和试验都证明：设计合理的双层铜药型罩在爆轰产物作用下可以前后分离，形成了两个明显的 EFP 侵彻体。

(2) 试验结果的内罩 EFP 发生了断裂，这是因为设计不够合理，药型罩中间部分太薄，而且起爆的不对称造成了受力的不均匀，因此 EFP 在自锻过程中被拉断了。从仿真结果也可看出，当 R 较小时，内罩形成的 EFP 的中间部位太薄，很容易断裂。除设计因素外，药型罩为车削加工，加工完毕后没有进行处理，材料残余应力较大，所以仿真当中出现的壁厚太薄处在试验中就出现了断裂现象。下一步工作，主要从设计上避免出现断裂：增大球缺罩的曲率半径，适当将药型罩壁厚加大。另外，加工方式拟采用铜板旋压加热处理的工艺来减小残余应力。

(3) 与试验相比，仿真结果的速度值预报偏大，侵彻体长度预报值偏小，直径预报值偏大。但两者的误差不大，表明仿真模型和参数的设置较合理，可以用于代替试验，进行参数变化对侵彻体性能的影响研究。

5.2 曲率半径的影响

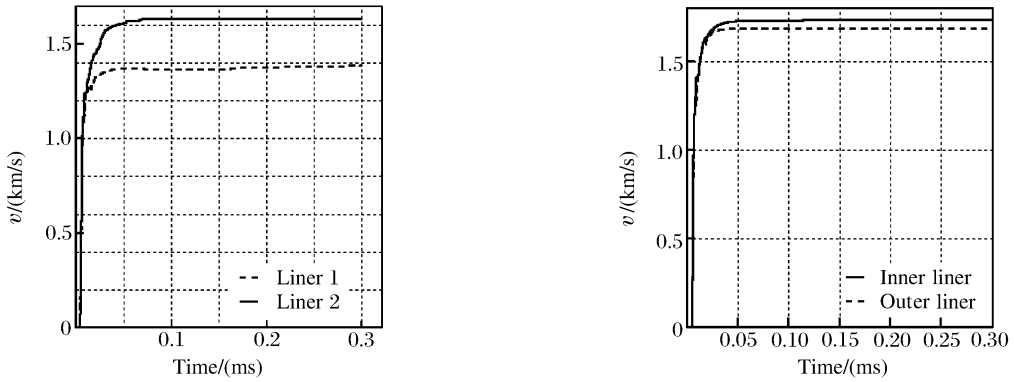
采用上述的数值模型，其它参数不变，仅改变外罩外轮廓的曲率半径 R，进行了一系列仿真，得到了曲径比 R/D(D 为装药直径)对内外罩速度、长径比的影响。考虑到曲率半径太小会产生射流，而双层药型罩产生射流的机理与产生串联 EFP 的机理是不同的，因此曲率半径的取值为：$R=50,55,60,65,70,75$。即 $R/D=0.83,0.92,1.0,1.08,1.17,1.25$。

表 2 为起爆 300 μs 后串联 EFP 的速度、长径比和外形，表 2 中，k_a 为前 EFP 长径比，k_b 为后 EFP 长径比。图 6 为内外罩速度变化的时间历程，图 7 为内外罩最终速度和长径比与装药曲径比的关系。

表 2　曲率半径对串联 EFP 形成影响的仿真结果(起爆后 300μs)

Table 2　Effects of curvature radius on the shape of tandem EFP

R/D	v_b/(m/s)	v_a/(m/s)	k_b	k_a	Shape of kill elements
0.83	1302	1683	3.3	2.8	
0.92	1492	1698	2.7	2.6	
1.00	1550	1710	2.4	1.9	
1.08	1576	1718	2.2	1.9	
1.17	1619	1722	1.8	1.7	
1.25	1678	1731	1.6	1.4	



(a) $R=0.83D$　　(b) $R=1.25D$

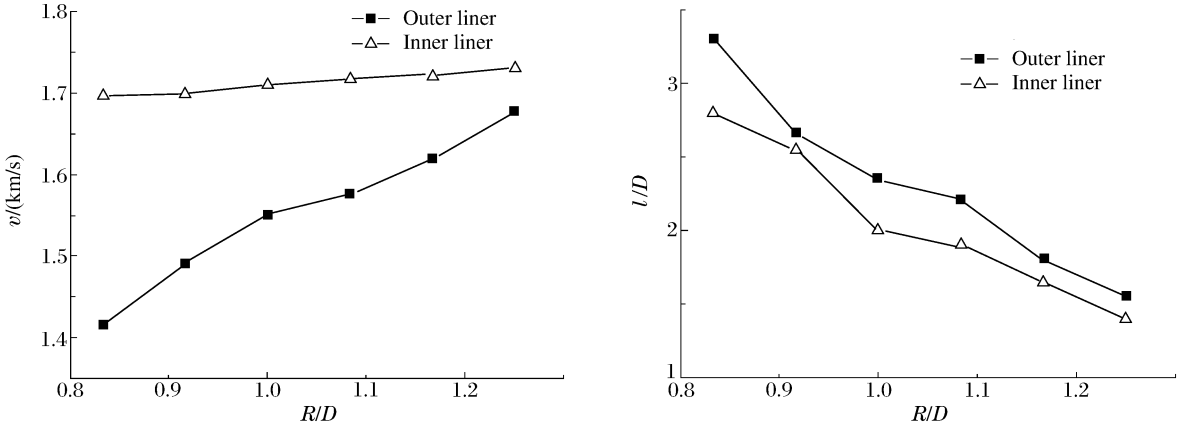
图 6　内外罩速度变化的时间历程

Fig. 6　Velocity history of inner and outer liner

从表 2 可以看出:随着曲率半径 R 的增大,前后 EFP 的速度都在增大,原因是药型罩获得的轴向速度分量在增大。而外罩形成的 EFP 速度增幅较大,因此前后 EFP 的速度差在减小。侵彻体形态由前后串联的两个 EFP 逐渐过渡到首尾相连、增大长径比的单一 EFP 的形式。

从图 6 可以看出:当曲率半径较小时($R=0.83D$),内罩速度历程服从指数规律,而外罩速度先增大到极值,然后会略微下降一些,造成这种现象的原因是曲率半径较小时,外罩形成的 EFP 与内罩形成的 EFP 会发生碰撞,当曲率半径增大时,碰撞现象消失。

从图 7 可以看出：随着曲率半径 R 的增大，内外罩形成的战斗部长径比都在减小，形成的 EFP 空腔逐渐变大，重心逐渐前移，当 R/D 大于 1.1 时，战斗部形式为首尾相连的单一 EFP，此时战斗部的长径比介于 3.0～4.2 之间。在内外罩厚度相同的前提下，如果希望形成前后串联的两个战斗部，则 R/D 要小于 1.1；如果希望形成首尾相连的单一战斗部，则 R/D 要大于 1.1。



(a) Velocity (b) l/D

图 7 内外罩最终速度和长径比与装药曲径比的关系

Fig. 7 Relationship between velocity, l/D and R/D of outer and inner liner

6 结 论

(1) 试验与数值模拟结果表明，设计合理的双层球缺罩可以形成分离的 EFP 侵彻体。

(2) 数值模拟与试验结果对比发现，有限元模型和参数设置合理可用于预报试验结果。

(3) 双层药型罩的曲率半径 R 是决定侵彻体形态的重要参数之一。在其它参数不变的情况下，通过调整 R，可以获得双 EFP 的组合或者增大长径比的单一 EFP。如果进一步考虑双层药型罩的材料，厚度和厚度比等因素，可以获得效果更好的 EFP 侵彻体。

References:

[1] Curtis J P, Cornish R. Formation Model for Shaped Charge Liners Comprising Multiple Layers of Different Materials [A]//Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics [C]. San Antonio, Texas, USA: International Ballistics Committee, 1999: 458-465.

[2] Hong S C, Niu Y M. Numerical Simulation of the Multiplayer Explosively Formed Projectile [A]//Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistic [C]. Jerusalem, Israel: International Ballistics Committee, 1995: 315-324.

[3] Fong R, Ng W, Weimann K. Testing and Analysis of Multi-Liner EFP Warheads [A]//Proceedings of the 20th International Symposium of Ballistics [C]. Florida, USA: International Ballistics Committee, 2002: 578-582.

[4] Weiman K, Blache A. Explosively Formed Projectile with Tantalum Penetration and Steel Stabilization Base [A]//Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics [C]. San Antonio, Texas, USA: International Ballistics Committee, 1999: 603-608.

[5] Waiters W P, Zukas J A. Fundamentals of Shaped Charges [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1989: 11-21.

[6] Li G B. Research Development of Composite Liners of Shaped Charge [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1995, 18(1): 63-68. (in Chinese)
李国宾. 双层药型罩的研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 1995, 18(1): 63-68.

[7] Ji G J. Numerical Simulation and Theory Research on Jet Formation of Shaped Charge [D]. Nanjing: Nanjing Uni-

versity of Science and Technology,2004:57-59. (in Chinese)
纪国剑. 聚能装药形成射流的仿真计算与理论研究 [D],南京:南京理工大学,2004:57-59.

[8] Li Y C, Yang W J, Shen W. Influence of Liner Curvature Radius on Parameters of Explosively Formed Penetrator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003, (1): 45-48. (in Chinese)
李裕春,杨万江,沈　蔚. 药型罩曲率半径对爆炸成型弹丸参数的影响 [J]. 火工品,2003,(1):45-48.

[9] Century Dynamics Ltd. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software User Manual [Z]. Ramon, USA: Century Dynamics Incorporated, 2001.

[10] Zhang X F, Chen H W, Zhao Y S. Numerical Simulation of Shelled Explosive Initiated by EFP [J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(1): 90-92. (in Chinese)
张先锋,陈惠武,赵有守. EFP 冲击引爆带壳炸药数值模拟研究 [J]. 弹道学报,2006,18(1):90-92.

Effects of Liner Curvature Radius on Formation of Double-Layered Spherical Segment Charge Liner into Tandem Explosively Formed Projectile (EFP)

ZHENG Yu, WANG Xiao-Ming, LI Wen-Bin, LI Wei-Bing

(*Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense, School of Mechanical Engineering, NJUST, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: In order to study the influences of liner curvature radius on the formation of double-layer shaped charge liner (DLSCL) into tandem explosively formed projectile(EFP), the numerical simulations on the mechanical phenomenon of DLSCL forming into tandem EFP were carried out by using two-dimensional finite element dynamic code AUTODYN. The formation mechanisms of DLSCL and the influence of curvature radius on the formation of DLSCL were studied. After tests on the formation of DLSCL were performed, the X-ray pictures were obtained. Comparisons between experimental results and numerical simulation results show a good agreement. It can be concluded from the results that DLSCL can form tandem EFP and the liner curvature radius has great influence on the velocity, shape and l/D radius of tandem EFP.

Key words: explosion mechanic; shaped charge liner; tandem; explosively formed projectile; curvature radius