文章编号：1000-5773(2013)01-0083-07

多点起爆下药型罩表面压力分布规律研究*

赵长啸[1,2]，龙　源[1]，纪　冲[1]，李裕春[1]，谢全民[3]，路　亮[1]

（1.解放军理工大学，江苏南京　210007；
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
3.武汉军械士官学校，湖北武汉　430075）

摘要：为了掌握多点起爆下药型罩表面压力的分布规律以及起爆点参数对压力分布的影响，运用LS-DYNA 3D有限元软件，对多点起爆时爆轰波相互碰撞并作用于药型罩的过程进行数值仿真研究。仿真结果与实验结果吻合较好。研究结果表明：多点起爆时，爆轰波在起爆点的对称平面处发生碰撞，碰撞位置出现超压现象，导致作用于药型罩表面的爆轰载荷分布不均匀，爆轰波碰撞区域的压力高于非碰撞区域；随着起爆点间距的增大，爆轰波作用于药型罩顶部的压力逐渐增大，而边缘部位的压力则逐渐减小，当间距为50 mm时压力发生突降，即起爆点间距存在上限值；随着起爆点数的增加，药型罩表面微元的压力逐渐增大，但增加幅度逐渐减小，压力的总体分布规律相似。研究结果为带尾翼爆炸成形弹丸战斗部中起爆点参数等关键技术设计提供了理论依据。

关键词：爆炸成形弹丸；爆轰波碰撞；多点起爆；压力分布；药型罩
中图分类号：TJ410.33；O382　　**文献标识码**：A

1　引　言

带尾翼结构的爆炸成形弹丸(Explosively Formed Projectile，EFP)因具有良好的气动稳定外形和外弹道性能，可对目标实施有效的远距离打击，提高EFP对目标的毁伤概率，现已成为EFP战斗部研究的热点之一[1-6]。2001年，Bende等人[2]通过数值模拟研究发现，采用多点起爆方式可以获得带尾翼结构的EFP。2003年，于川等人[5]通过试验验证了多点起爆方式是获得带尾翼结构EFP的一种简单而有效的方法。采用多点起爆方式时，爆轰波之间相互碰撞，使药型罩表面压力分布不均，从而产生不同步翻转，形成尾翼。目前，关于多点起爆时药型罩表面压力分布的研究鲜有报道。因此，本研究以平板药型罩表面压力分布作为研究对象，结合爆轰波碰撞理论与数值模拟方法，对多点起爆方式下爆轰波的相互碰撞过程及药型罩表面压力分布进行数值模拟，分析多点起爆下平板药型罩表面环向与径向的压力分布规律以及起爆点位置与数量对压力分布的影响。将模拟结果与已有实验结果进行对比，检验数值模拟的可靠性。研究结果将为带尾翼EFP战斗部结构的进一步优化提供基于理论分析方面的设计依据。

2　数值模拟计算和分析模型

为了掌握多点起爆时各爆轰波的相互碰撞作用过程以及药型罩表面压力的分布规律，利用LS-DYNA 3D有限元计算软件，对多点起爆下爆轰波作用于紫铜平板药型罩的过程进行数值仿真。计

* **收稿日期**：2011-12-08；**修回日期**：2012-05-22
基金项目：爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ10-2M)
作者简介：赵长啸(1986－)，男，博士研究生，主要从事爆破器材应用技术研究. E-mail：blastingzhao@163.com

算模型尺寸如图 1 所示。炸药为圆柱形装药，装药半径为 30 mm，装药长度为 42 mm。药型罩为紫铜平板罩，半径为 30 mm，厚度为 10 mm。为了更清楚地了解药型罩在不同压力下的变化情况，防止药型罩被抛掷，在药型罩下方放置一块钢板，钢板厚度为 38 mm，中间设有圆槽，用于放置药型罩。装药采用多点起爆方式，起爆点位于炸药端面，呈对称分布。由于装药结构的几何形状具有对称性，因此根据对称性，选取 1/2 结构，建立三维有限元模型，如图 2 所示。由于炸药爆炸产生特大变形，若采用拉格朗日算法，则无法准确获得多点起爆时炸药爆轰波阵面形状和结构的变化情况，因此计算时采用欧拉算法，空气边界均采用透射边界，对称面采用对称边界。计算时，紫铜药型罩、A3 钢板采用 Grüneisen 状态方程、Johson-Cook 模型，装药 8701 炸药采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程、High_explosive_burn 模型，空气采用 Grüneisen 状态方程，具体参数参考文献[7]。

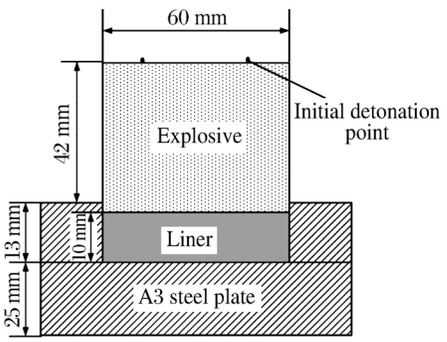


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

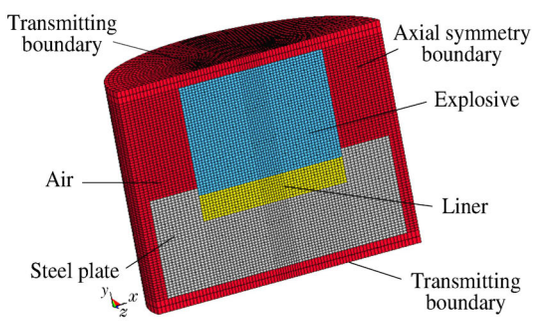


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

3 计算结果分析

3.1 两点对称起爆时药型罩的压力分布

由爆轰波传播理论[8]可知，多点同时起爆时，各起爆点产生的爆轰波均在两起爆点的对称平面处发生碰撞，并出现超压现象。可见，研究多点起爆时药型罩表面压力分布规律的实质是研究两爆轰波碰撞对药型罩表面压力分布的影响，因此本研究选取装药端面两点对称起爆下药型罩表面压力分布规律作为研究对象，通过理论分析与数值仿真，以获得多点起爆下药型罩表面压力分布的一般规律。

装药端面两点对称起爆下，装药轴线截面上的爆轰波传播与碰撞过程如图 3 所示。由图 3 可知，爆轰波相互碰撞并作用于药型罩的过程主要分为 4 个阶段：(1) 装药起爆后，以两起爆点为中心，发出两强度相等的球面爆轰波，如图 3(a)所示，此时爆轰波以球面波形式在炸药内部传播；(2) 两爆轰波在两起爆点的对称平面处相遇，发生迎面正心对碰撞，如图 3(b)所示，碰撞点处出现局部超压现象，压力增大，同时形成两道反射冲击波向两边的爆轰产物传播；(3) 两爆轰波发生正碰撞后继续传播，爆轰波阵面与对称平面的夹角 θ 从 0°开始逐渐增大，如图 3(c)所示，这时将发生两爆轰波的斜碰撞，碰撞点处压力升高，并且形成两道斜反射冲击波，以一定角度向两边的爆轰产物传播，碰撞区域的爆轰压力随夹角 θ 的变化而变化；(4) 爆轰波继续传播，作用于药型罩顶部，同时向爆轰产物反射冲击波，冲击波相互叠加，如图 3(d)所示，叠加处压力明显升高，使药型罩顶部获得更大的压垮速度。

端面两点对称起爆时，平板药型罩最终的受力分析结果如下：在装药端面两点对称起爆时，两起爆点同时发出等强度 C-J 爆轰波，爆轰波在炸药内传播并发生碰撞，导致爆轰波阵面结构与形状发生变化，在两起爆点的对称平面处出现超压现象；碰撞后的爆轰波继续传播，并作用于药型罩，使爆轰波碰撞区域对应的药型罩微元获得的压垮速度大于非碰撞区域，药型罩发生过度压垮，进而产生压痕。

为了验证药型罩的变形规律以及仿真结果的正确性，将仿真结果与相同条件下药型罩压痕实验结果[9]进行对比分析，如图 4 所示。由图 4 可知，无论是仿真结果还是实验结果，药型罩表面压痕的分布规律具有较好的一致性，表明仿真模型和仿真参数的设置较合理，可以用于分析多点起爆时平板药型罩

表面压力的分布规律。

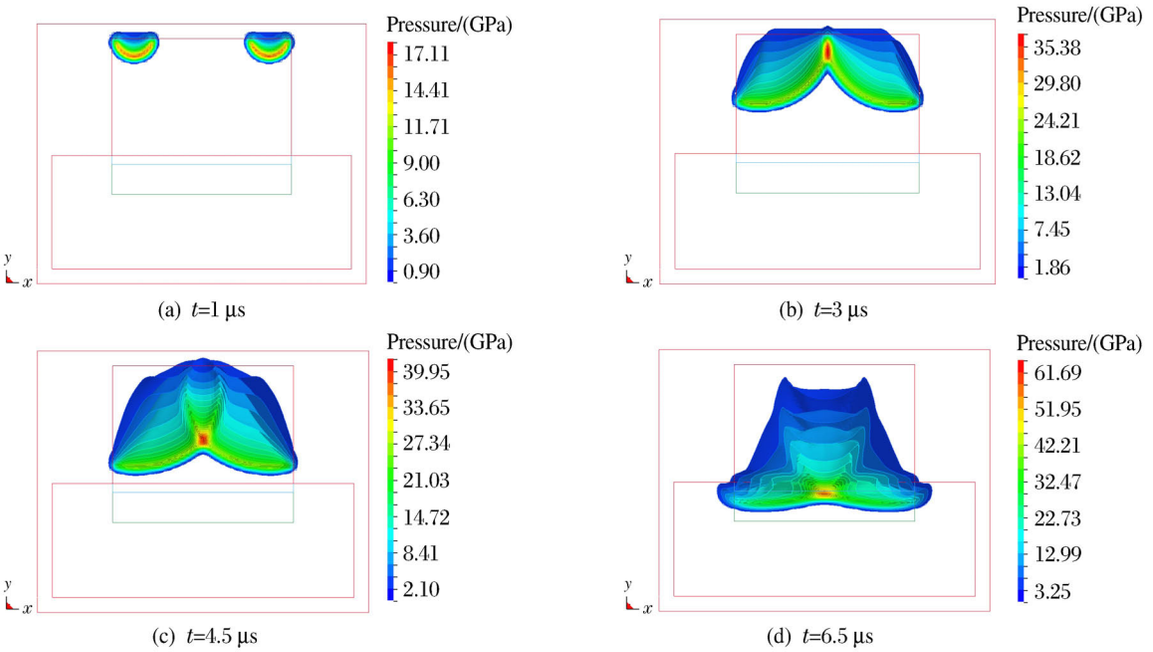


图 3　装药轴线截面上的波传播图

Fig. 3　Propagation of the waves in the cross section of grouped charge

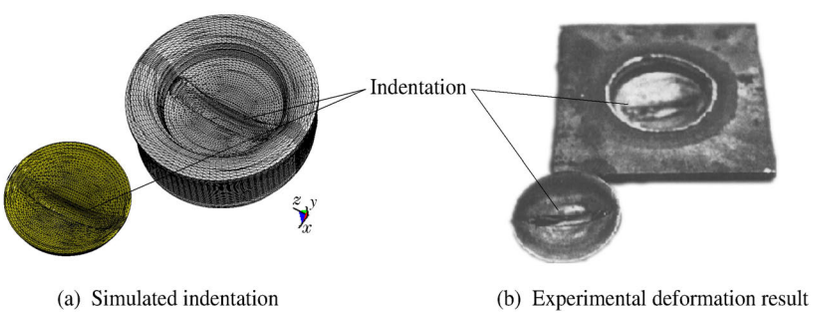


图 4　药型罩压痕计算结果与实验结果对比

Fig. 4　Comparison of the indentation on the liner between numerical and experimental results

3.2　药型罩的加载和运动分析

由爆轰波传播理论可知，爆轰载荷作用的强度、方向和时间决定了药型罩的初始运动速度[8]。为了进一步分析多点起爆时药型罩微元的运动规律，选取药型罩表面典型位置对应的节点，定量分析药型罩表面压力的变化规律。

图 5 为模型节点位置示意图。平面直角坐标系原点 O 位于药型罩顶部，x 轴位于经过其中一个起爆点 C 和装药轴线的平面内，设其中两起爆点在坐标平面的投影位于线段 AB 上。由此可知，药型罩表面压力场关于 z 轴对称，药型罩母线 OF 上的节点位于两侧球面爆轰波碰撞作用的超压区域，药型罩母线 OA 上的节点则位于单侧球面爆轰波直接作用区域，即非爆轰波碰撞区域，原点 O 位于中心超压区。

分别沿线段 OA 和 OF 提取 20 个节点的压力值作为纵坐标，以线段 OA 上各节点在 x 轴上的坐标和线段 OF 上各节点在 z 轴上的坐标的绝对值作为横坐标，将药型罩表面压力沿两条母线的变化曲线绘制在同一坐标系中，如图 6 所示。图 6 中，母线 OF 上节点的压力变化对应爆轰波碰撞作用区域，母线 OA 上节点的压力变化对应非爆轰波碰撞作用区域。由图 6 可知：两点对称起爆条件下，药型罩表面

同一径向位置上爆轰波碰撞区域微元所受的爆轰压力明显高于非爆轰波碰撞区域，并且随着径向距离的增加，药型罩微元的爆轰压力不断减小，即药型罩中心部位压力最大，边缘部位压力最小，与实际中药型罩被拉长形成弹丸的规律一致；另外，爆轰波碰撞区域的压力减小速度明显低于非爆轰波碰撞区域，因此药型罩表面两区域的压力差总体上随径向距离的增加而逐渐增大，药型罩压痕逐渐增大，从而产生尾翼。

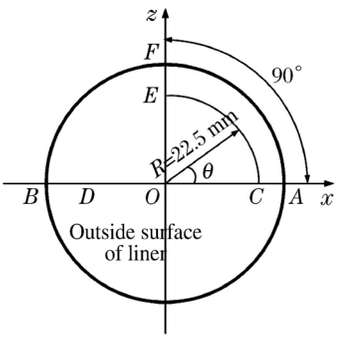


图 5 模型节点位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of model node position

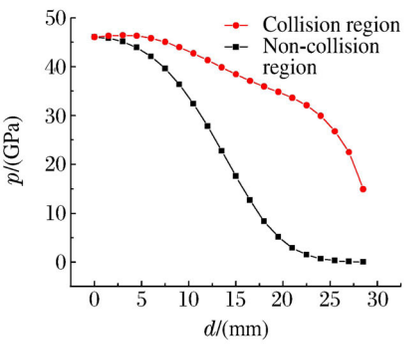


图 6 药型罩表面压力径向变化曲线

Fig. 6 Change curves of the pressure on the liner along radial direction

为了进一步了解药型罩爆轰压力的环向分布规律，根据装药的对称性，选取如图 5 所示的 1/4 药型罩进行研究。在药型罩表面、半径 $R=22.5$ mm 的环向上，选取 20 个节点压力，得到药型罩环向压力分布规律，如图 7 所示。由图 7 可知，随着 θ 的增大，药型罩环向压力逐渐增大，当 $\theta=0°$时，压力最小，$\theta=90°$时，压力最大，即从起爆点至爆轰波碰撞区域压力逐渐增大，且当 θ 介于 45°～90°时，压力增长速度相对较快，说明爆轰波碰撞区域的压力增加速度明显大于非碰撞区域。

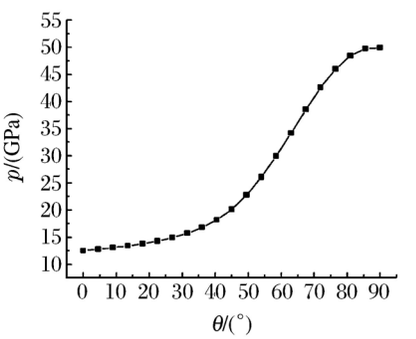


图 7 药型罩表面压力的环向变化曲线

Fig. 7 Change curve of the pressure on the liner along circular direction

3.3 起爆点间距对爆轰压力的影响

改变起爆点间距，不仅可以改变爆轰波碰撞后作用于药型罩顶部的波形，同时也会影响作用在药型罩上的压力。选取端面两点对称起爆方式作为研究对象，针对起爆间距的大小设计了不同的起爆方案，通过数值仿真，研究起爆点间距对药型罩顶部所受压力的影响。图 8 为起爆点位置示意图，其中 O_1、O_2 分别为装药端面两对称起爆点，d_0 为起爆点间距。

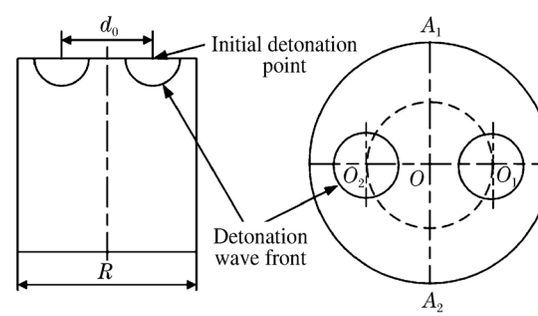


图 8 起爆点位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the positions of initiation points

图 9 为不同起爆点间距条件下药型罩表面爆轰波碰撞区域压力的径向变化曲线。由图 9 可知，随着起爆点间距 d_0 的增大，爆轰波作用于药型罩顶部的压力先增大后减小，当 $d_0=40$ mm 时，压力达到最大，为 53 GPa；而药型罩边缘部位的微元压力则随着起爆点间距的增大而逐渐减小，药型罩中心和

边缘微元的压力差逐渐增大,形成弹丸的长径比逐渐增大,侵彻能力逐渐增强;随着起爆点间距的增加,药型罩表面径向压力值的变化速率逐渐降低,导致药型罩在压垮形成弹丸的过程中,相邻单元的速度梯度随之减小,不易产生断裂现象,提供了形成大长径比弹丸的可能性;当起爆点间距 $d_0=50$ mm 时,边缘稀疏波效应对反应区的影响较大,导致其压力值发生突降,因此在设计带尾翼 EFP 战斗部结构时应注意起爆点间距具有最大值。

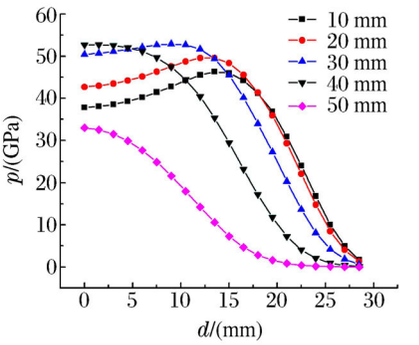


图 9　不同起爆间距时药型罩表面压力的径向变化曲线

Fig. 9　Changes of the pressure on the liner with different initiation distance along radial direction

3.4　起爆点数对爆轰压力的影响

研究起爆点数对爆轰波作用于药型罩表面波形和压力大小的影响,可以获得起爆点数对战斗部成形的影响规律。

图 10 分别为端面两点、3 点、4 点对称起爆和环形起爆时药型罩表面压力分布图。由图 10(a)～图 10(c)可知,多点起爆时,药型罩表面均是在相邻两起爆点的对称平面区域出现超压现象,且对称平面区域的压力远高于非对称平面区域,其原因为:装药端面多点同时起爆时,由于各起爆点同时发出等强度的 C-J 爆轰波,爆轰波碰撞使相邻两起爆点的对称平面处出现超压现象。因为药型罩边缘处爆轰碰撞区域微元所受的爆轰波冲击能量高于非碰撞区域,促使药型罩产生不同步翻转,EFP 尾部形成对称均布的突起,产生尾翼效应,所以尾翼个数与起爆点数相对应。

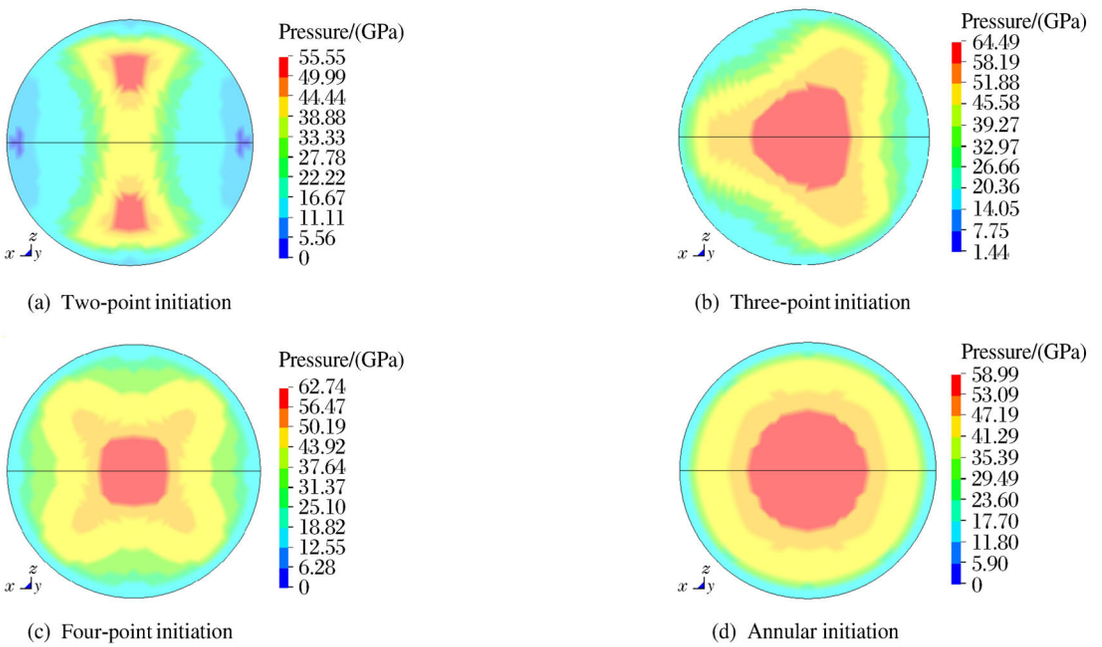


图 10　起爆点数不同时药型罩表面压力分布图

Fig. 10　Pressure distribution on the liner with different number of initiation point

图 11 为不同起爆点数时药型罩表面爆轰波碰撞区域的压力径向变化曲线。由图 11(a)～图 11(c)可知:起爆点数不同时,药型罩表面压力的径向变化规律是相似的,都是随着径向距离的增加而逐渐降低;当起爆点数增加时,药型罩受到的压力随之增加,但药型罩中心部分的压力增加幅度较大,而边缘部分的压力增加幅度较小;当采用 4 点起爆时,其压力峰值最大,约为两点起爆时的 1.5 倍,爆轰压力增

大，药型罩顶部微元获得的压垮速度随之提高，形成弹丸的长径比和速度都随之增大。此外，从图 11 还可以看出，随着起爆点数的增加，爆轰压力的增加幅度逐渐减小，当采用 4 点对称起爆时，药型罩顶部所受压力峰值与环形起爆时相差 5%，与 Bourne 等人[10]研究得到的结果一致，即 4 点以上的多点起爆与环形起爆的效果相差不大。其原因为：随着起爆点数的增加，炸药能量的利用率逐渐增大，但炸药所含的总能量是一定的，故随着起爆点数的增加，压力差逐渐减小。因此，4 点同时起爆能基本满足战斗部炸药利用率需求。

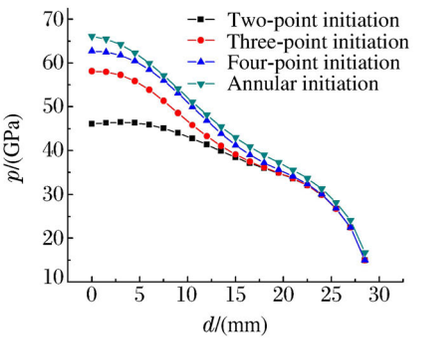


图 11 不同起爆点数时药型罩表面压力的径向变化曲线

Fig. 11 Change curves of the pressure on the liner with different initiation point number along radial direction

4 结 论

综合多点起爆下药型罩表面压力分布规律的理论分析和数值计算结果，得到如下结论。

(1) 多点起爆时，在药型罩表面、以罩顶为中心的相同半径圆环上，位于爆轰波碰撞区域的微元压力明显高于非碰撞区域，并且随着半径的增加，两区域的压力差逐渐增大；从爆轰波非碰撞区域到碰撞区域，在药型罩表面、具有相同半径的微元，其压力随着夹角(该微元、装药轴线所在平面与起爆点、装药轴线所在平面的夹角)的增大而逐渐增大，且碰撞区域的压力增长速度远高于非碰撞区域；药型罩压力分布不均匀，致使药型罩不同部位微元的冲击能量出现差异，从而产生不同步翻转，生成尾翼。

(2) 多点起爆时，随着起爆点间距的增大，爆轰波作用于药型罩顶部的压力先增大后减小，而药型罩边缘部位的微元压力则逐渐减小，药型罩中心和边缘微元的压力差逐渐增大，形成弹丸的长径比逐渐增大；随着起爆点间距的增大，药型罩相邻单元的速度梯度不断减小，促使弹丸在成形过程中不易产生断裂现象，提供了形成大长径比弹丸的可能性；但是，随着起爆点间距的增大，稀疏波的影响将逐渐增强，因此起爆点间距设置具有上限值。

(3) 多点起爆时，不同起爆点数下，药型罩表面压力的分布规律总体上是相似的，即均在相邻两起爆点的对称平面处出现超压现象，且压力远高于非对称平面区域；随着起爆点数的增加，药型罩中心部位微元受到的压力逐渐增加，而边缘微元的压力变化较小，压力差逐渐增大；当起爆点数为 4 时，与环形起爆时的压力最大仅相差 5%，基本满足炸药利用率的要求。

下一步工作将针对其它结构的药型罩，实验研究多点起爆下药型罩表面压力的分布规律是否与平板药型罩相同。

References:

[1] Bouet T H, Tarayre P, Guillon J P, et al. Study of a multi-point ignition EFP [C]//Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel, 1995: 159-166.

[2] Bender D, Chhouk B, Fong R, et al. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins [C]//Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001: 755-761.

[3] Li W B, Wang X M, Li W B. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(4): 414-424.

[4] Qi X Q, Long Y, Wan W Q, et al. Numerical simulation of effect of blasting wave on EFP performance [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(3): 115-117. (in Chinese)
亓秀泉，龙 源，万文乾，等. 爆轰波形对 EFP 性能影响的数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报，2008，28(3)：115-117.

[5] Yu C, Dong Q D, Sun C W, et al. The experimental studies of explosively formed projectile with star shaped tail

[J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(6):561-564. (in Chinese)
于　川,董庆东,孙承纬,等. 带尾翼翻转型爆炸成形弹丸试验研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(6):561-564.

[6] Gui Y L,Yu C,Liu C L,et al. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins [J]. Explosion and Shock Waves,2005,25(4):313-318. (in Chinese)
桂毓林,于　川,刘仓理,等. 带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):313-318.

[7] Zhou X. Technological researches on explosive formed projectiles [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology,2006. (in Chinese)
周　翔. 爆炸成型弹丸战斗部的相关技术研究 [D]. 南京:解放军理工大学,2006.

[8] Zhang B P,Zhang Q M,Huang F L. Detonation Physics [M]. Beijing: Weapon Industry Press,2001:180-182. (in Chinese)
张宝坪,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京:兵器工业出版社,2001:180-182.

[9] Cao B,Yu Z Y,Chen H W. An experimental investigation on the loading performance and propagation law of detonation Mach waves [J]. Journal of Ballistics,2000,12(2):78-83. (in Chinese)
曹　兵,宇志勇,陈惠武. 爆轰马赫波载荷特性及传播规律实验研究 [J]. 弹道学报,2000,12(2):78-83.

[10] Bourne B,Curtis J P,Cowan K G,et al. Variable multiple point initiated chemical energy warheads [C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics,San Antonio,USA,1999:426-433.

Distribution Law of Pressure on Liner Surface under Multi-Point Initiation

ZHAO Chang-Xiao[1,2], LONG Yuan[1], JI Chong[1],
LI Yu-Chun[1], XIE Quan-Min[3], LU Liang[1]

(1. *PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *Wuhan Ordnance N. C. O. Academy of PLA, Wuhan* 430075, *China*)

Abstract: In order to investigate the distribution law of pressure on the liner surface and the effect of initiation point parameter on the pressure distribution, the interaction of detonation waves with each other and with the liner is simulated by LS-DYNA software. The simulation results coincide well with the experimental data. The results of the study indicate that detonation waves collide with each other on the symmetry plane of the initiation points, and the pressure of collision position increases, which make the pressure distribution of liner uneven. While the distance between initiation points is bigger, the pressure of tip liner increases quickly, but the pressure of edge region of liner decreases gradually. When the distance is 50 mm, the pressure drops suddenly, namely the distance has a maximum value. The pressure of liner increases with the number of initiation point, but the increase rate reduces gradually, and the pressure distribution laws on the liner surface with different initiation numbers are similar. The conclusions can supply a theoretical basis for choosing appropriate initiation point parameters of the explosively formed projectile with star shaped tail.

Key words: explosively formed projectile; collision of detonation waves; multi-point initiation; pressure distribution; liner