

文章编号: 1006-9941(2007)03-0257-04

穿孔球缺罩形成杆式射流数值模拟研究

曾必强, 姜春兰, 王在成

(北京理工大学爆炸与科学国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用有限元软件对边缘有孔和无孔球缺罩的杆式射流形成过程进行了数值模拟。分析了球缺罩形成杆式射流的成型过程, 并对有孔和无孔两种球缺罩的成型过程进行了对比, 发现有孔罩所形成射流速度偏低、侧向速度不为零, 并对此进行了分析讨论获取了孔洞对形成杆式射流的影响方式及其影响规律。最后对模拟结果进行了实验验证。证实该仿真和真实情况具有很好的一致性。

关键词: 爆炸力学; 杆式射流; 带孔球缺罩; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3

文献标识码: A

1 引言

在战斗部工程化设计过程中考虑到其在发射或投放过程中受炮管或布撒机构的限制, 有时需在药形罩边缘开孔。以前为近炸引信放置过线管而在药形罩边缘所开孔径由于尺寸较小对药形罩的影响也较小所以常被忽略不计, 随着子母弹的大规模运用一些子弹药要求为放置定高探杆而在药形罩边缘开孔, 定高探杆的尺寸较过线管大, 开孔后对药形罩射流形成过程及破甲威力影响是战斗部工程设计者不得不面对的问题。

现有的聚能装药射流形成模型一般简化为瞬间压垮, 忽略了爆炸加载这一物理变化过程^[1], 由于该问题涉及到众多细节因素且球缺罩的爆炸成型机理不同于锥角罩的爆炸成型机理^[2], 所以很难用现有的射流成型模型对此进行工程计算。本文利用 LS-DYNA 有限元软件对边缘有孔和无孔球缺罩形成杆式射流的过程进行了模拟, 并对结果进行了实验验证。

2 结构模型及数值模拟所用材料模型

本研究中选定战斗部球缺罩的外径为 D , 装药高度为 $0.8D$, 在装药后端中心起爆, 罩上开孔在药形罩边缘, 孔径为 d , 如图 1 所示。

战斗部壳体为 4340 钢, 材料特性在有限元计算中选用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程^[3]表示为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + \ln(\varepsilon^*)](1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, σ 为主应力, ε 为等效塑性应变, $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$ 为相对应等效塑性应变率, $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 为无量纲温度,

其中 T_m 和 T_r 分别表示材料的熔点与室温, 而常数 A 、 B 、 c 均由试验测定。4340 钢的材料参数如表 1 所示。

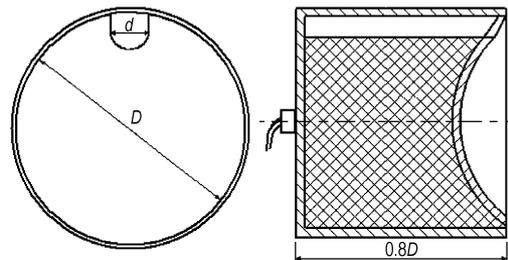


图 1 边缘开孔的破甲弹示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of shaped charges

表 1 4340 钢材料参数

Table 1 Parameters of steel materials

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	G/GPa	A/MPa	B/MPa	c	Gruneisen 常数 γ_0
7.83	81.8	792	510	0.014	1.67

药形罩为高导无氧铜 (OFHC) 有限元计算中选用 Steinberg 材料模型和 Gruneisen 状态方程^[3,4]表示为:

$$G = G_0 \left[1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] \exp \left(- \frac{fE_i}{E_m - E_i} \right) \quad (2)$$

式中, G 为剪切应力, p 为压力, V 为相应体积, E_c 为常温压缩能, E_m 为材料熔化合能, $R' = R\rho/A$, 其它参数都由试验测定。高导无氧铜的材料参数如表 2 所示。

装药选用 B 炸药, 有限元计算中用高能炸药爆轰模型 (HIGHEXPLOSIVE BURN) 表示, 状态方程采用 JWL 状态方程:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中, 爆轰产物的压力 p 表示为相对体积 V 和内能 E 的函数, 而 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 都是由试验测定的常数。 B

收稿日期: 2006-08-30; 修回日期: 2006-10-25

作者简介: 曾必强(1982-), 男, 博士, 研究方向为弹药工程。

e-mail: zbiq82@sohu.com

炸药的性能参数和JWL状态方程参数如表3所示。

表2 高导无氧铜材料参数

Table 2 Parameters of copper materials

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	G_0/GPa	b	h	f	Gruneisen 常数 γ_0
8.96	47.7	2.83	0.000377	0.001	2.02

表3 B炸药的爆炸性能参数及状态方程参数

Table 3 Parameters of explosive and JWL state equation

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	P_{CJ}/GPa	$D_{CJ}/m \cdot s^{-1}$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.7	28.0	7800	1141.8	23.9	5.7	1.65	0.60

3 算法选择及有限元模型

3.1 算法选择

杆式射流数值模拟方法主要有 Lagrange 法和 ALE 法,采用 ALE 算法可以避免大变形带来的网格严重畸变、产生负体积或节点速度过高,导致程序终止,无法得到成型射流形体参数和速度等信息^[5],这给研究问题带来诸多不便。所以文中选用 Lagrange 算法,采用软件提供的网格自适应法控制网格的严重畸变。

3.2 有限元模型

为了减少计算量,在建模计算中选用三维二分之一模型进行仿真计算。根据以上分析在计算中单元类型选用 8 节点实体单元(Solid164)建模。网格划分中由于映射网格划分的网格大小较为均匀,形状比较规则在计算中具有较好的稳定性和计算精度,所以在网格划分中使用映射(Mapped)方式进行了划分,如图2所示。在炸药爆轰过程中爆炸产物和球缺罩表面保持接触,所以在这期间两者间选用了滑移接触,当射流形成后删除炸药单元和两者间的接触。

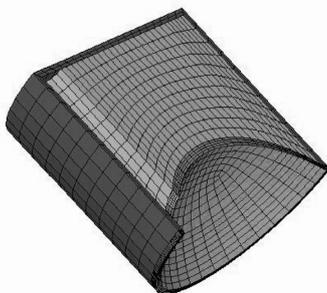


图2 数值计算有限元模型

Fig. 2 Finite element model of shaped charges

4 数值模拟结果及分析

为了对比边缘开孔药形罩和无孔药形罩杆式射流

的成型过程,分别对某型号所用边缘开 $D/12$ 孔径的球缺罩和同等尺寸无孔球缺罩进行数值模拟计算。

4.1 JPC 成型过程对比分析

根据数值计算,无孔和有孔球缺罩的压垮成型过程如图3所示,杆式射流成型过程头部和尾部速度位移历程曲线如图4所示,由无孔和有孔球缺罩形成杆式射流在不同飞行距离的对比如图5所示。

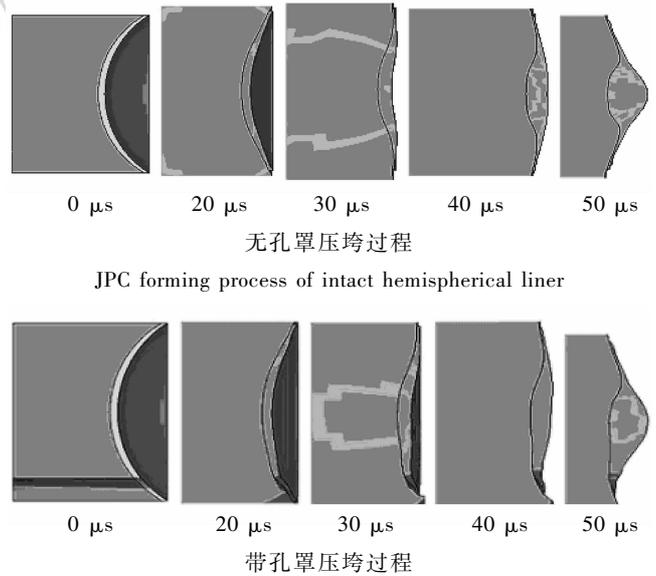


图3 两种球缺罩的压垮过程对比

Fig. 3 JPC forming process of two kinds of liners

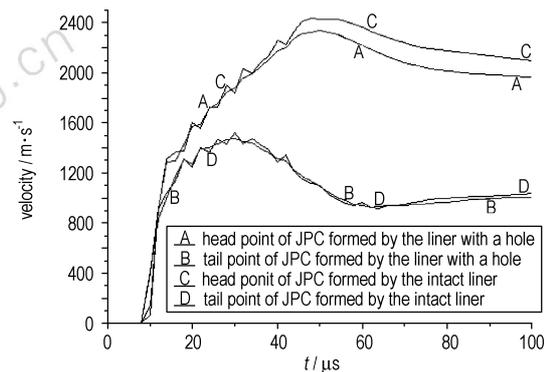


图4 初始阶段杆式射流头尾速度历程曲线

Fig. 4 Curves of the head and tail velocity

at the beginning of the jet-formation

由图3~图5可见球缺罩形成杆式射流过程为:在爆轰压力作用下球缺罩由里向外翻转变形,罩体各微元获得各自相应方向和速度的速度,然后在各微元惯性力作用下,逐步向轴线压缩,在压缩过程中球缺罩顶点处原内表面单元被继续加速形成射流最前端,原顶点外表

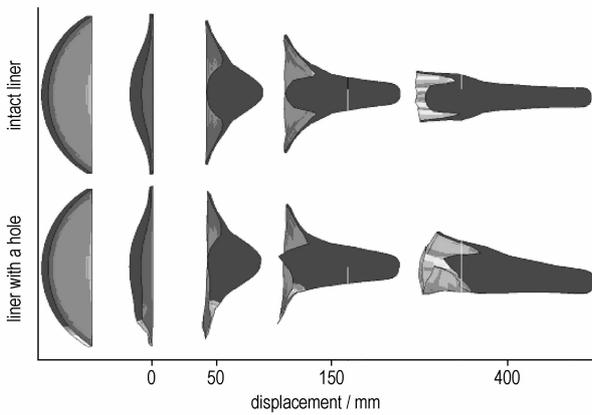


图 5 无孔罩和有孔球缺罩形成射流对比

Fig. 5 Comparison of the two processes in jet-formation

面单元被相对减速形成尾部单元,原罩体内表面由于速度不同距离不断被拉大,最后形成一束首尾速度梯度较小的粗射流。通过图 3 的比较可见有孔球缺罩在压垮过程中由于罩体孔洞后面炸药空洞的影响孔洞附近微元受爆轰压力加速较小;由于球缺罩孔洞附近微元速度较小造成球缺罩的有孔边压缩不彻底,形成射流速度偏低;罩体孔洞处质量的缺失造成有孔边和对边碰撞过程中没有完全抵消对边径向速度,造成射流有一个侧向速度,向前运动中会发生偏移(见图 5)。

4.2 有孔和无孔球缺罩形成杆式射流参数对比

球缺罩有 $D/12$ 的孔和无孔两种情况下所形成杆式射流在最佳炸高(500 mm)时的参数计算结果如表 4 所示。 v_j 、 v_s 、 l 和 d 分别为杆式射流在炸高 500 mm 时的射流头部和尾部速度、射流长度和头部直径, v'_j 和 v'_s 为杆式射流头部单元和尾部单元在球缺罩径向指向孔洞方向的速度。根据计算结果得到的有孔球缺罩所形成的射流头部和尾部单元在孔洞方向的位移和射流飞行距离关系曲线如图 6 所示。

表 4 有孔和无孔的球缺罩形成杆式射流参数对比

Table 4 Comparison of the parameters of JPC

hole size	v_j /m · s ⁻¹	v_s /m · s ⁻¹	l /mm	d /mm	v'_j /m · s ⁻¹	v'_s /m · s ⁻¹
0	2002.6	1189.4	124.2	15.75	0	0
1/12D	1948.5	1197.1	113.8	19.29	46.81	20.02

根据表 4 可以得出:由有孔球缺罩形成的杆式射流头部速度和长度都比无孔时所形成的小,尾部速度和射流直径则要比无孔时大,通过具体数值可看出 $D/12$ 的孔对球缺罩形成杆式射流的初始参数有一定的影响,但并不是很严重,根据上面的分析,当孔径较

大时该影响会有所加大;所形成射流的头部和尾部单元在径向的运动速度不为零且均指向孔洞方向,射流头部在弹径向的速度大于射流尾部在弹径向的速度,这将引起射流头部单元的速度方向与尾部速度方向不重合,造成射流在飞行中将有一定的偏移,根据上面的分析可推断出,当孔径增大时该速度也将快速增大。

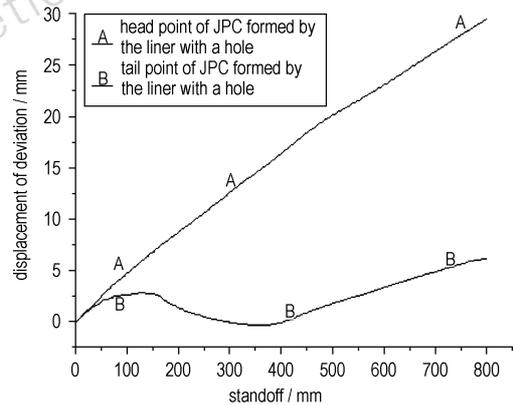


图 6 有孔罩形成射流头部和尾部在孔洞方向的偏移距离随炸高变化曲线

Fig. 6 Curves of the head and tail offset displacement

由图 6 可见,射流头部和尾部单元在孔洞方向的位移随着炸高的增加而增大。射流头部的偏移量和炸高变化基本呈线性关系,尾部单元由于受杆体的影响开始阶段运动方向有反复,后期偏移量则和炸高变化基本呈线性关系。

5 试验验证

根据以上计算模型,选相同尺寸的无孔球缺罩和边缘带 $D/12$ 大小孔径的球缺罩以及相同装药和壳体材料密度进行了验证试验。炸高取 500 mm(最佳炸高),靶体选用 $\Phi 150$ mm × 200 mm 的圆柱形实心钢靶(见图 7)。



图 7 实验装置图

Fig. 7 Photograph of experimental set-up

试验结果发现无孔球缺罩形成射流在靶板上的穿孔位于靶板中心位置,形状为基本规则的圆形;带孔球缺罩形成射流在靶上的穿孔偏向球缺罩孔洞方向,形状为狭长形,如图8所示。具体数值如表5所示, Φ_{\max} 为靶上穿孔最大直径、 Φ_{\min} 为靶上穿孔最小直径、 b_{\max} 为靶上穿孔边沿离中心最远距离、 b_{\min} 为靶上穿孔边沿离中心最远处的对边距中心距离、 L 为穿孔深度。

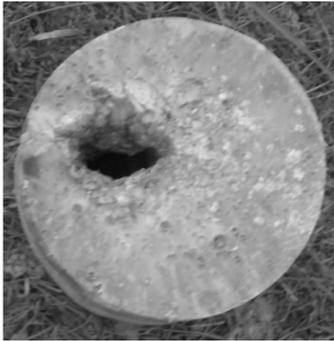


图8 带孔罩射流打靶效果图

Fig.8 Photograph of the liner with a hole

表5 两种结果对照表

Table 5 Comparison of the two results

result	hole size	Φ_{\max} /mm	Φ_{\min} /mm	b_{\max} /mm	b_{\min} /mm	L /mm
test	0	25	24	12	-13	125
	$D/12$	50	23	53	3	120
simulation ¹⁾	0	25	25	12.5	-12.5	130
	$D/12$	42	25	47	-5	121.5

Note: 1) result of simulation calculated from Table 5 and Fig. 6.

由表5可见试验所得结果与仿真所得结果基本一致,可以验证本文所得孔洞对球缺罩成型影响规律的正确性。

6 结论

(1) 有孔球缺罩在压垮中受压不均匀表现为非对称压垮,导致其形成的射流形状以及速度都不能保持轴对称,无孔球缺罩则不存在该问题,所得射流外形、速度均为轴对称。

(2) 有孔球缺罩形成的射流速度和长度比无孔时形成准射流速度和长度小,但在孔径与药形罩直径比较小时($\frac{d}{D} < \frac{1}{6}$)相差并不大。所以在带孔药形罩结构设计时应考虑其孔径和球缺罩直径的比值。

(3) 有孔球缺罩形成杆式射流向前运动中会向罩体孔洞方向偏移,随孔洞增大该偏移量将会增大,工程设计中应考虑该偏移是否会造成脱靶或影响到射流对靶板的侵彻能力。

参考文献:

- [1] 陈智刚,尤政,赵太勇,等. 聚能装药破甲弹药形罩压垮过程的数学模型[J]. 含能材料,2004,12(增刊): 531-533.
CHEN Zhi-gang, YOU Zheng, ZHAO Tai-yong, et al. Mathematic model for overwhelm process of shape-charged cartridge case[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12 (Supplement): 531-533.
- [2] 何顺录,鲁春. 半球罩聚能装药的射流形成及参数计算[A]. 破甲文集[C],1987,5: 103-108.
- [3] Molinari J F. Finite element simulation of shaped charges[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2002, 38: 921-936.
- [4] 时党勇,李裕春,张胜明. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社,2005.
- [5] 刘记军,唐德高,贺虎成. EFP成型飞行及侵彻钢靶特性的数值模拟分析[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(1): 71-73.
LIU Ji-jun, TANG De-gao, HE Hu-cheng. Numerical simulation and analysis of characteristic of EFP forming flying and penetrating steel target[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 71-73.

Numerical Simulation of Jet Formation to Hemispherical Liner with Hole

ZENG Bi-qiang, JIANG Chun-lan, WANG Zai-cheng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The proceedings of jet formation to whole hemispherical liner and hemispherical liner with hole were numerically simulated with the finite element code LS-DYNA3D. The distinctions between the whole hemispherical liner and the hemispherical liner with hole were presented by theoretical and numerical way. The distinctions between velocity and offset direction were accentuated. The theoretical presents and numerical results are found to be in good agreement with the experimental data, and are reasonable and helpful for engineering design.

Key words: explosion mechanics; jet-formation; hemispherical liner with hole; numerical simulation