

doi: 10.7690/bgzdh.2022.07.013

## 药型罩网格数量对数值模拟精度的影响

韩明蕾<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 周东康<sup>1</sup>, 宋雨桥<sup>2</sup>, 孙旭<sup>1</sup>

(1. 安徽方圆机电股份有限公司, 安徽 蚌埠 233010; 2. 中国人民解放军驻蚌埠军代室, 安徽 蚌埠 233010)

**摘要:** 为研究药型罩壁厚网格数量对某大口径破甲战斗部数值模拟可信度的影响, 应用非线性动力学有限元软件 AUTODYN, 对口径为 140 mm 的单锥罩射流形成及侵彻 1 000 mm 厚钢靶的过程进行数值模拟, 并开展静破甲试验。通过将药型罩壁厚的网格数划分为 5 种方案分别计算, 考察网格数对单锥罩射流形成及侵彻的影响规律。结果表明: 网格数量较少时, 射流提前断裂, 侵彻深度较低, 且与试验差距较大; 当药型罩壁厚的网格划分数为  $n=6$ 、7 时, 与试验结果最吻合。

**关键词:** 单锥罩; 数值模拟; 侵彻; 壁厚; 网格划分数

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Influence of Mesh Number of Liner on Numerical Simulation Accuracy

Han Minglei<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>, Zhou Dongkang<sup>1</sup>, Song Yuqiao<sup>2</sup>, Sun Xu<sup>1</sup>

(1. Anhui Fangyuan Mechanical and Electrical Co. Ltd., Bengbu 233010, China;

2. PLA Military Representative Office in Bengbu, Bengbu 233010, China)

**Abstract:** In order to study the influence of liner thickness and grid number on the reliability of numerical simulation of a big bore shaped charge warhead, the nonlinear dynamic finite element software AUTODYN was used to simulate the process of single-cone liner jet formation and penetration into 1 000 mm thick steel target with an aperture of 140 mm, and the static penetration test was carried out. By dividing the grid number of liner wall thickness into five schemes, the influence of grid number on the formation and penetration of single-cone liner jet was investigated. The results show that when the grid number is small, the jet breaks in advance and the penetration depth is low, and there is a big gap with the experiment; when the grid number of liner wall thickness is  $n = 6$  and 7, the results are most consistent with the experiment results.

**Keywords:** single-cone liner; numerical simulation; penetration; liner thickness; grid number

### 0 引言

随着计算机技术的发展, 有限元数值模拟在破甲弹装药结构设计上发挥着越来越重要的作用。大量的数值模拟表明: 1) 计算结果的准确性与材料模型的选择、参数的设置、算法的选择有很大的关系; 2) 在其他模型参数确定的情况下, 网格尺寸的划分对计算的结果有直接影响。Johanson<sup>[1]</sup>对比研究了在动态和静态载荷下, 网格尺寸对计算准确性的影响。门建兵等<sup>[2]</sup>研究了网格对混凝土侵彻数值模拟的影响并得出: 侵彻弹丸半径和网格边长的比值在 6 左右时, 结果最为理想。康彦龙等<sup>[3]</sup>研究了药型罩罩顶壁厚上划分不同数量的网格及不同的靶板径向尺寸对侵彻的影响规律, 结果表明, 药型罩罩顶壁厚至少划分 4 个网格, 靶板径向尺寸至少 2.25 倍装药口径, 计算结果较为理想。陈志文等<sup>[4]</sup>研究了参数化网格划分方法。笔者利用 AUTODYN<sup>[5]</sup>软件,

在其他模型参数确定情况下, 研究了口径为 140 mm 的等壁厚单锥罩, 壁厚上不同的网格划分数对射流成型及侵彻的影响规律, 并与试验结果进行比较, 以期数值模拟工作提供参考。

### 1 数值模拟

#### 1.1 装药结构模型

装药结构如图 1 所示, 由炸药、药型罩组成。装药直径为  $D=140$  mm, 装药长  $L=170$  mm, 药型罩为等壁厚单锥罩, 锥角取  $2\alpha=60^\circ$ , 壁厚为  $\delta=2.2$  mm。采用中心点起爆, 起爆点设在装药顶部。

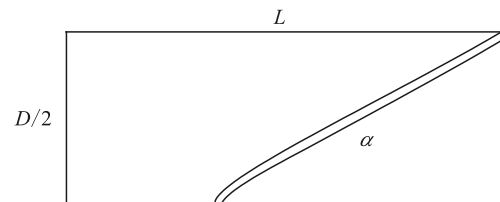


图 1 装药结构模型

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 韩明蕾(1987—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事破甲战斗部、攻坚战斗部、杀爆战斗部设计研究。

E-mail: 463237793@qq.com。

### 1.2 有限元结构模型

数值模拟基于 AUTODYN-2D 程序，分为射流的形成、侵彻 2 个过程，其中射流的形成用多物质 Euler-Godunov 算法，侵彻过程用 Lagrange 算法。装药结构为 2 维轴对称模型，周围填充空气域，边界定义为流出边界条件。图 2 为射流形成的有限元装药模型。

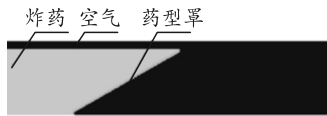


图 2 射流形成有限元模型

### 1.3 材料模型

药型罩材料采用紫铜，靶板材料为装甲钢 (rolled homogeneous armour, RHA)，2 种材料均选用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型，参数选自于 AUTODYN 材料库。炸药为 8701，采用 HIGH-EXPLOSIVE-BURN 模型和 JWL 状态方程，参数见表 1 所示。

表 1 8701 炸药模型参数

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$w$	$E_v$
1.70	0.840	6.03	0.1	4.3	1.1	0.35	0.092

### 1.4 网格划分

为了单独分析药型罩壁厚网格划分的不同对计算结果的影响，其他参数不变，将药型罩壁厚上的网格数划分为  $n=3、4、5、6、7$  5 种方案分别计算，网格形状为正方形，对应的网格大小分别为  $\zeta=0.73、0.55、0.44、0.37、0.31$  mm。图 3 为 5 种方案对应的网格划分结果。

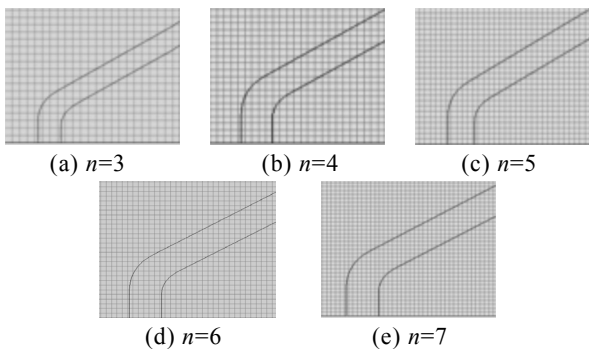


图 3 不同 n 值对应药型罩壁厚的网格划分

### 1.5 射流成型及侵彻结果分析

图 4(a)为不同的 n 值在  $t=96 \mu\text{s}$  时刻射流成型的对比情况。图中：随 n 值的增大，射流的形状并没有明显的规律， $n=3、6、7$  时，射流的头部为三角形； $n=4、5$  时，射流头部为水滴状； $n=6、7$  时射

流长度明显更长，形状也比较相似； $n=4$  时射流已经断裂， $n=3、5$  时也即将拉断。在  $t=96 \mu\text{s}$ ，炸高取 510 mm，对厚 1 000~1 100 mm 的装甲钢进行侵彻，侵彻结果如图 4(b)所示。表 2 为不同方案射流成型及侵彻结果。

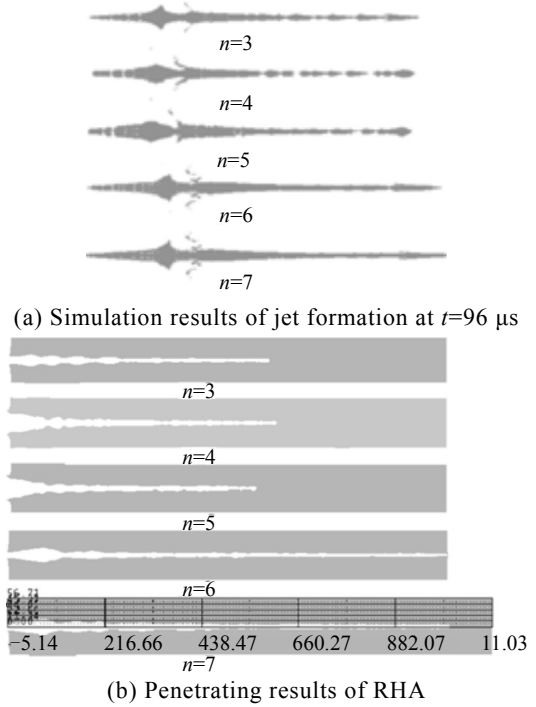


图 4 不同方案的射流形成及侵彻结果

表 2 射流成型及侵彻计算结果

n 值	射流长度/ mm	头部速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	尾部速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	侵彻深度/ mm
3	535	6 540	630	580
4	503	6 490	630	603
5	500	6 500	630	568
6	575	7 280	300	1 000
7	590	7 400	300	1 003

如图 4(b)所示，5 种方案的侵彻孔径及深度亦没有明显的规律， $n=4、5$  时，破孔为喇叭孔，正好与其水滴状的射流头部相对应； $n=6、7$  时，侵彻孔型及侵彻深度极为相近。从表 2 的计算结果看， $n=3、4、5$  时，射流长度及头尾速度比较接近，但侵彻孔型不一致，且侵彻深度不稳定； $n=6、7$  时，射流长度、头尾速度、侵彻孔型及侵彻深度都非常接近，可认为此时状态已稳定。

从图 4 和表 2 中的数据可得出以下结论：

1) 5 种方案的射流成型形状及侵彻结果没有明显的规律，可大致分为 2 种状态： $n=3、4、5$  时，射流长度及头尾速度比较接近，射流提前断裂，侵彻深度相对接近，归为第 1 种； $n=6、7$  时，射流长度、头尾速度、射流形状、侵彻孔型及侵彻深度都

非常接近，归为第 2 种；2 种状态之间没有过渡，从  $n=5$  到  $n=6$  计算结果直接跳变。

2) 当药型罩壁厚上的网格数划分为  $n=3、4、5$  时，射流长度及头尾速度比较接近，但射流形状及侵彻孔型不一致，且侵彻深度不稳定；当  $n=6、7$  时，射流长度、头尾速度、射流形状、侵彻孔型及侵彻深度都非常接近，可认为此时状态已稳定，计算结果可信。

3) 当  $n=6、7$  时，射流的头尾速度差更大，射流拉伸的更充分，侵彻深度也更大。

## 2 验证试验

### 2.1 试验弹的设计及试验布局

为验证这种装药结构的实际侵彻能力，设计了静破甲试验，试验弹主要由雷管、扩爆药、药型罩、主装药组成。试验弹外径为 140 mm，长度为 170 mm，主装药为 8701，压装而成，密度为  $1.70 \text{ g/cm}^3$ 。静破甲试验布置如图 5 所示。用 8 号雷管起爆扩爆药，再由扩爆药引爆主装药，用炸高筒将炸高固定为 510 mm，试验靶为多个 45 号钢叠加，靶板厚度 1 200 mm。



图 5 静破甲试验

### 2.2 试验结果及分析

由于破甲具有不稳定性，共进行了 4 发试验，图 6 为 4 发试验弹对 45# 钢的侵彻效果，表 3 为数值模拟与试验结果的对比，其中对 RHA 靶板的侵深乘以系数 1.1 即可转换成对 45# 钢的侵深。

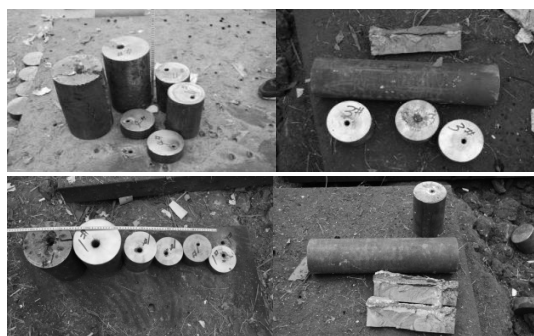


图 6 射流对钢靶的入孔与出孔效果

由下表可知，对于该聚能装药结构，当药型罩壁厚上网格划分为  $n=6、7$  时，数值模拟结果能

准确反映实际；当  $n < 6$  时，与实际出入较大。这是因为材料在较大的 Euler 网格间流动时容易丢失信息，而随着计算的累加，这种误差会越来越大。因此，对于该聚能装药结构要想计算准确，在药型罩壁厚上至少要划分 6 个网格。

表 3 数值模拟与试验结果对比

方案	入孔直径/mm	出孔直径/mm	靶板材料	侵深/mm
$n=3$	18.0	Null	RHA	580
$n=4$	46.8	Null	RHA	603
$n=5$	48.2	Null	RHA	568
$n=6$	14.2	11.3	RHA	1 000
$n=7$	14.2	11.4	RHA	1 003
1#	27.0	17.0	45 钢	1 101
2#	23.0	15.0	45 钢	1 204
3#	28.0	14.0	45 钢	1 034
4#	24.0	13.0	45 钢	1 178

## 3 结论

笔者采用非线性动力学有限元软件 AUTODYN，对口径为 140 mm 的单锥罩射流形成及侵彻 1 000 mm 厚钢靶的过程进行了数值模拟。对比分析了药型罩壁厚上 5 种不同的网格数划分对射流形成及侵彻结果的影响，并进行了验证试验，得出以下结论：

1) 当药型罩壁厚上的网格数划分为  $n=3、4、5$  时，射流长度及头尾速度比较接近，但射流形状及侵彻孔型不一致，且射流提前断裂，侵彻深度不稳定，并与试验结果相差较大，模拟结果不可信；

2) 当  $n=6、7$  时，射流长度、头尾速度、射流形状、侵彻孔型及侵彻深度都非常接近，此时状态稳定，并与试验结果相吻合，该聚能装药结构要达到准确计算，在药型罩壁厚上至少要划分 6 个网格。

## 参考文献：

- [1] JOHANSON M. Structural Behaviour in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelter, Non-linear Finiteelement Analyses and Experiments[D]. Goteborg, Sweden: Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 2000.
- [2] 门建兵, 隋树元, 蒋建伟, 等. 网格对混凝土侵彻数值模拟的影响[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(8): 659-662.
- [3] 康彦龙, 蒋建伟, 门建兵, 等. 仿真模型参数对射流成型及侵彻影响分析[J]. 系统仿真实报, 2011, 23(2): 262-264, 279.
- [4] 陈志文, 张春晓, 潘国强. 爆炸模型的参数化建模方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(6): 76-79.
- [5] Century Dynamics Inc. AUTODYN user Manual[M]. USA: Century Dynamics in Corporation, 2001: 80-110.