

# 基于不同算法的低密度射流性能数值研究

陈杰<sup>1</sup>, 尹建平<sup>1</sup>, 黄松<sup>1</sup>, 张增军<sup>2</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 河北第二机械工业有限公司, 石家庄 050031)

**摘要:**为研究不同算法对低密度射流性能的影响,使用 AUTODYN 有限元软件,分别采用 Euler 多物质流固耦合方法和光滑粒子-有限元耦合方法(SPH-FEM)对低密度的 PTFE/Cu 药型罩形成射流及侵彻靶板进行数值研究;研究表明:Euler 方法形成的射流比 SPH 方法形成的射流速度低、长度短;与实验得到射流的 X 光照片相比,采用 SPH 方法仿真形成的射流具有更高的相似性;Euler 多物质流固耦合方法与 SPH-FEM 方法计算钢靶穿深均比实际深,开孔口径均比实际小;与实验穿靶相比,SPH-FEM 方法更符合实际情况,其计算的钢靶穿深、孔径的误差均小于 5%。

**关键词:**爆炸力学;数值模拟;耦合方法

**本文引用格式:**陈杰,尹建平,黄松,等.基于不同算法的低密度射流性能数值研究[J].兵器装备工程学报,2017(11):36-40.

**Citation format:**CHEN Jie, YIN Jianping, HUANG Song, et al. Numerical Study on the Performance of Low Density Jet by Different Methods[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(11):36-40.

中图分类号:TJ413

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)11-0036-05

## Numerical Study on the Performance of Low Density Jet by Different Methods

CHEN Jie<sup>1</sup>, YIN Jianping<sup>1</sup>, HUANG Song<sup>1</sup>, ZHANG Zengjun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Hebei Second Industrial Machinery Co., LTD., Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different methods on the performance of low density jet. The Euler multi-material fluid solid coupling method and the smoothed particle hydrodynamics finite element coupling method (SPH-FEM) was used to study the formation of jet and penetrating target plate by the finite element software of AUTODYN. The results show that: The jet formed by the Euler method has a lower speed and shorter length than that of SPH method. Compared with the X rays photos obtained by experiments, the jet formed by SPH method has a higher similarity. The numerical simulation of the steel target by the Euler multi-material fluid solid coupling method and the SPH-FEM method has a deeper penetration and smaller hole size than the actual target. Compared with the experimental target, the SPH-FEM method is more consistent with the actual situation, and the error of the penetration depth and the hole size is less than 5%.

**Key words:** mechanics of explosion; numerical simulation; coupling method

收稿日期:2017-07-01;修回日期:2017-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572291);山西省研究生联合培养基地人才培养资助项目(20160033);中北大学研究生科技立项资助项目(20171403)

作者简介:陈杰(1992—),男,硕士研究生,主要从事弹药毁伤技术研究。

聚四氟乙烯 (PTFE) 作为药型罩材料时形成的射流可以实现对反应装甲的穿而不爆<sup>[1-2]</sup>,但纯 PTFE 射流存在侵蚀性能不足的问题。Chang B H 等<sup>[3]</sup>通过在 PTFE 基体中加入一定粒径的质量分数为 38.5%,密度为 8.93 g/cm<sup>3</sup> 的铜粉进行改性得到聚四氟乙烯/铜 (PTFE/Cu),使其形成射流的侵蚀能力提高。数值模拟是研究聚能射流的性能的有效手段,但不同的算法在使用中都会出一些问题,当采用 Lagrange 有限元法模拟大变形过程时,会因网格发生大畸变和滑移面处理不顺等一系列问题,最终导致计算精度降低甚至计算终断,Euler 方法不存在网格发生大畸变问题,但难以准确描述各类界面<sup>[4]</sup>。光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, 简称 SPH) 是一种无网格的粒子方法,不仅有 Lagrange 方法计算描述物质界面准确的优势,又兼备无网格方法的长处,但对于复杂的结构很难准确的建立计算模型<sup>[5]</sup>。因此,本研究结合不同算法的优点,采用不同算法耦合的方式对 PTFE/Cu 材料药型罩形成射流及侵彻靶板进行研究。

## 1 计算模型

### 1.1 几何及有限元模型

为了研究不同算法形成低密度射流的性能,设计聚能装药几何结构如图 1 所示。采用等壁厚锥形罩,锥顶进行圆角处理,药型罩锥角 55°,口径 40 mm,装药高度为 1 倍药型罩口径,因壳体对射流形成的影响较小,暂不考虑壳体的影响,靶板直径 120 mm,厚度 50 mm,炸高为 120 mm。

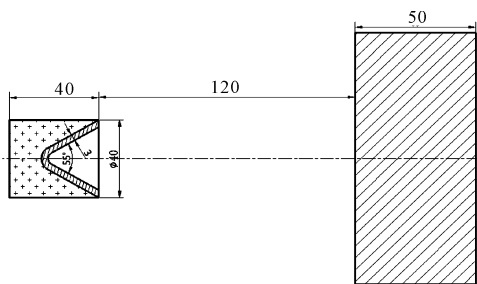


图 1 战斗部侵彻靶板几何模型模型

Euler 多物质流固耦合方法<sup>[6]</sup>是在描述聚能射流形成及侵彻靶板问题的过程中,将炸药和药型罩材料采用 Euler 算法,使材料在欧拉单元中流动,不存在单元的畸变问题,对靶板结构采用 Lagrange 算法,并且通过流固耦合的方式来处理相互作用,将流固分开建模能方便地建立爆炸、侵彻模型,如图 2 所示。

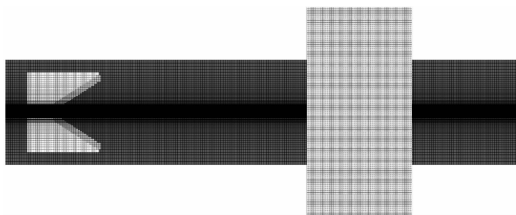


图 2 战斗部侵彻靶板多物质流固耦合模型

光滑粒子-有限元耦合方法 (SPH-FEM) 是结合光滑粒子流体动力学方法 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 与 Lagrange 有限元方法 (finite element method, FEM) 的优点<sup>[7]</sup>,在大变形区域 (炸药、药型罩) 采用 SPH 方法,小变形区域 (靶板) 采用 FEM 方法,采用 AUTODYN 有限元程序中的 SPH-FEM 耦合算法对聚能射流侵彻钢靶过程进行数值模拟,其模型如图 3 所示。

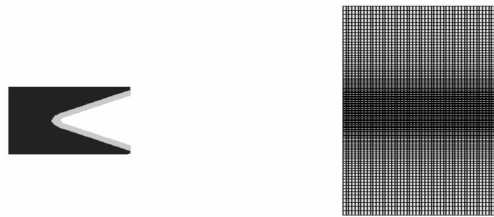


图 3 战斗部侵彻靶板 SPH-FEM 模型

### 1.2 材料模型及参数

数值模拟计算中选用 B 炸药,参数见表 1,选用 JWL 状态方程,JWL 状态方程能精确的描述爆炸驱动过程中,爆轰气体产物的压力、体积、能量特性<sup>[8]</sup>。

表 1 B 炸药的基本参数<sup>[3]</sup>

| 参数   | 数值      | 参数                                      | 数值    |
|--|---------|---|-------|
| $\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 1.717   | $R_2$                                   | 11.1  |
| $D / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$      | 7.98    | $\omega$                                | 0.34  |
| $A / \text{MPa}$                           | 524 230 | $E_0 / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$ | 8.5e6 |
| $B / \text{MPa}$                           | 7678    | $p_{C-J} / \text{GPa}$                  | 29.5  |
| $R_1$                                      | 44.2    |   |       |

药型罩材料为 PTFE/Cu,其材料模型为理想流体弹塑性模型,使用 von Mises 屈服准则、瞬时破坏准则和 Shock 状态方程来描述药型罩材料在爆轰波作用下的动态响应行为。PTFE/Cu 材料参数如表 2 所示。

表 2 PTFE/Cu 材料的基本参数<sup>[3]</sup>

| 参数                                       | 数值    | 参数                                      | 数值   |
|--|-------|---|------|
| $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 3.05  | Gruneisen coefficient                   | 0.9  |
| $G / \text{MPa}$                         | 1 370 | $C_1 / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$ | 1.34 |
| $\sigma_Y / \text{MPa}$                  | 46    | $S_1$                                   | 1.93 |

## 2 数值模拟

### 2.1 不同算法的低密度射流成型的数值仿真

当使用 Euler 多物质方法模拟射流的形成过程时,炸药和药型罩材料均采用 Euler 算法,在由空气填充的欧拉单元中流动,PTFE/Cu 射流的形成过程如图 4 所示。引爆战斗部

装药  $2 \mu\text{s}$  后爆轰波开始作用于药型罩,使其压垮成型;到  $5 \mu\text{s}$  时药型罩被全面压垮,药型罩材料受压后以很大的速度向中心挤压,并在轴线上发生碰撞后形成初期的射流和杵体,  $5 \sim 15 \mu\text{s}$  内被压垮的药型罩材料将全部在轴线上汇聚形成射流、杵体;此后射流随着时间的延长被拉长拉细,出现了颈缩和断裂现象,射流形态始终凝聚。

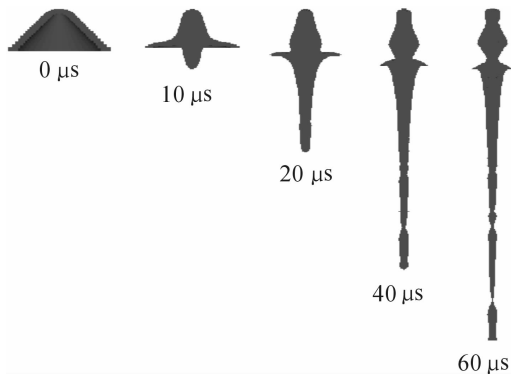


图4 采用 Euler 算法时 PTFE/Cu 射流的形成过程

当使用 SPH 光滑粒子方法来模拟射流的形成过程时,炸药和药型罩材料均采用 SPH 算法,使用带物理量信息的粒子代表所模拟的连续介质,材料间的相互作用由粒子间的相互作用来模拟,药型罩材料的变形不依赖于网格而通过粒子的运动描述。由图 5 采用 SPH 算法时 PTFE/Cu 射流的形成过程可以看到,采用 SPH 算法时,在药型罩被压垮到向中心挤压初步形成射流的过程与采用 Euler 算法时基本一致,到  $20 \mu\text{s}$  后,PTFE/Cu 射流在拉长过程中头部出现膨胀现象,直径逐渐变大,射流表现出了不凝聚的特性。

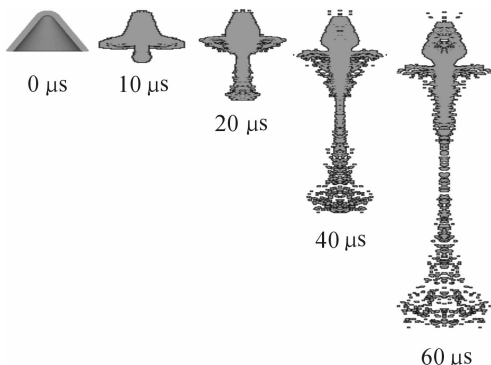


图5 采用 SPH 算法时 PTFE/Cu 射流的形成过程

从图 6、图 7 可以看出,两种算法对于射流性能的影响具有一致性。当炸药的爆轰波传到药型罩上时,药型罩被快速压垮形成射流头部,随着爆轰波压力的持续作用,药型罩材料和能量不断流入射流,射流头部继续加速,达到最大速度,两种算法形成的射流头部速度均在  $8 \mu\text{s}$  时达到最大值, Euler 算法的射流头部速度的最大值为  $6143 \text{ m/s}$ , SPH 算法射流头部速度的最大值为  $6463 \text{ m/s}$ ;此后,爆轰波的作用减小,药型罩材料和能量流入量减少,射流头部速度逐渐降低,最后趋于稳定,到  $60 \mu\text{s}$  时, Euler 算法的射流头部速度为

$5067 \text{ m/s}$ , SPH 算法的射流头部速度为  $6050 \text{ m/s}$ ;同时两种算法形成射流的长度随时间延长近似呈线性变化,到  $60 \mu\text{s}$  时, Euler 算法的射流长度达到  $27.8 \text{ cm}$ , SPH 算法的射流长度达到  $32.9 \text{ cm}$ 。

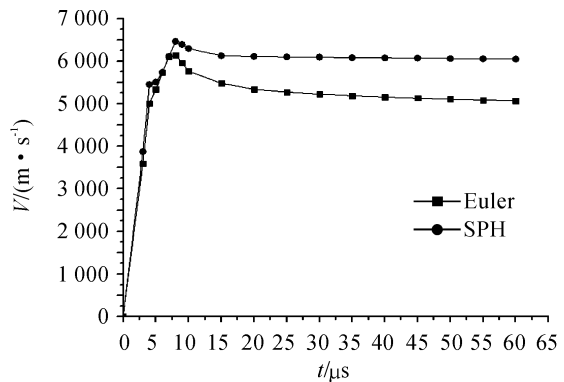


图6 不同算法形成射流头部速度变化

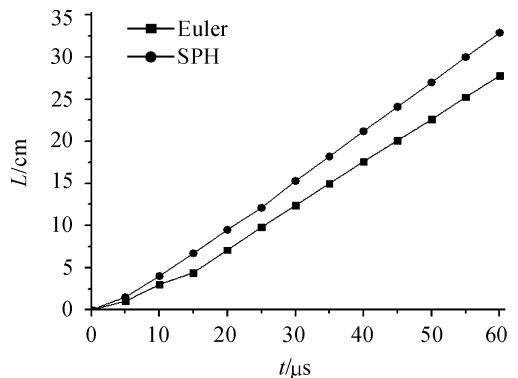


图7 不同算法形成射流长度变化

## 2.2 不同算法的低密度射流侵彻靶板数值研究

射流侵彻靶板的过程一般可分为 3 个阶段:开坑阶段、准定常侵彻阶段及侵彻终止阶段。数值模拟结果表明:当使用 Euler 多物质流固耦合方法时,PTFE/Cu 射流在  $t = 27 \mu\text{s}$  时刻开始以  $5252 \text{ m/s}$  速度侵彻靶板;当使用 SPH - FEM 耦合方法时,PTFE/Cu 射流在  $t = 25 \mu\text{s}$  时刻开始以  $6102 \text{ m/s}$  速度侵彻靶板;使用不同算法模拟射流侵彻靶板的过程与一般规律相一致,但不同算法模拟结果之间存在差异;使用 Euler 多物质流固耦合方法时,由于形成的射流形态凝聚,所以射流开坑能力强,开坑时间短;而使用 SPH - FEM 耦合算法时,射流表现出了不凝聚的特性,射流头部粒子飞散,导致射流开坑能力弱,开坑时间长;当完成开坑之后,射流头部速度迅速降低,但后续射流仍有较高速度对靶板形成连续的冲击,靶板材料被冲击侵蚀,进入准定常侵彻阶段;随着侵彻的加深,射流速度进一步降低,射流逐渐丧失侵彻能力,出现堆积现象,进入侵彻终止阶段。当侵彻终止后,使用 Euler 多物质流固耦合方法的侵彻深度达到  $31.5 \text{ mm}$ ,使用 SPH - FEM 耦合算法的侵彻深度达到  $29.1 \text{ mm}$ 。射流对靶板侵彻结果如图 8、图 9 所示。

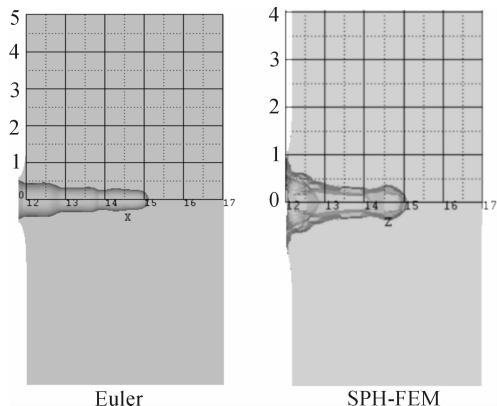


图8 射流的最终侵彻结果

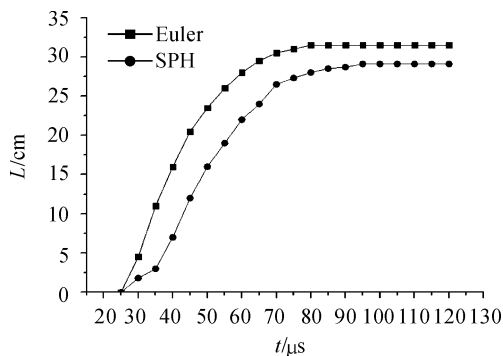


图9 侵彻深度变化

### 3 仿真结果与实验结果对比分析

为验证不同算法仿真结果的正确性,对 PTFE/Cu 材料药型罩形成射流及侵彻 45# 钢靶进行实验研究,并通过 X 射线摄影技术观察 PTFE/Cu 射流的特性(图 10)。实验布置如下(图 11)。



图10 摄影底片及聚能装药位置

从图 12 射流形成的实验与仿真结果分析,药型罩材料在压垮后向中心轴线闭合,在对称平面碰撞后沿轴线运动没有形成凝聚的射流,而是形成了飞散的粒子流;但在 20  $\mu\text{s}$  前表现出了很强的凝聚性,随着时间的延长射流头部表现出的粒子性越明显,射流头部材料粒子沿径向飞散也越明显;

在 40  $\mu\text{s}$  前,采用 SPH 方法仿真形成的射流比采用 Euler 方法仿真形成的射流在形态上与实验形成的粒子流有更高的相似性。



图11 侵彻靶板实验布置

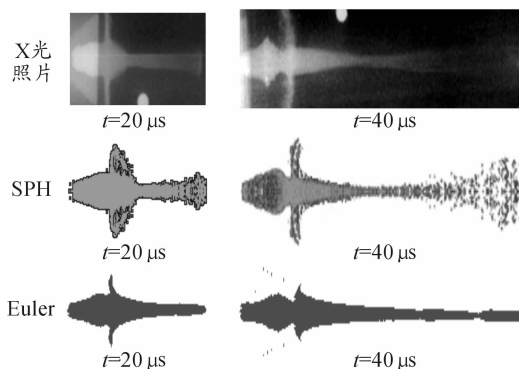


图12 实验与仿真结果对比

从表 3 射流侵彻靶板的实验与仿真结果对比可以得到,采用 Euler 方法时,射流的侵彻孔径比实际孔径小 43.3%,侵彻深度比实际深 13.7%;而采用 SPH 方法时,射流的侵彻孔径比实际孔径小 3.9%,侵彻深度比实际深 5%。综上,采用 SPH 方法得到的结果比采用 Euler 方法得到的结果误差小,使用 SPH 方法仿真结果与实际情况更符合。

表3 试验与仿真数据对比

| 试验 | 穿深/<br>mm | 入孔直径/<br>mm | 平均穿深/<br>mm | 平均穿孔/<br>mm |
|----|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 1# | 26        | 19.8        |             |             |
| 2# | 29        | 20.2        | 27.7        | 20.3        |
| 3# | 25        | 20.9        |             |             |
|    |           |             | 仿真          |             |
|    |           |             | Euler       | 31.5        |
|    |           |             | SPH - FEM   | 29.1        |
|    |           |             |             | 穿孔/mm       |
|    |           |             |             | 11.5        |
|    |           |             |             | 19.5        |

### 4 结论

1) 两种算法对于射流性能的影响具有一致性,射流速

度都先迅速增大,到达最大值后缓慢降低,最后趋于稳定,射流长度随时间延长近似呈线性变化;但 Euler 方法形成的射流比 SPH 方法形成的射流速度低、长度短;与实验得到射流的 X 光照片相比,采用 SPH 方法仿真形成的射流与具有更高的相似性。

2) Euler 多物质流固耦合方法与 SPH - FEM 方法计算钢靶穿深均比实际深,开孔口径均比实际小;与实验穿靶相比,SPH - FEM 方法计算的钢靶穿深、孔径的误差均小于 5%,使用 SPH 方法仿真结果与实际情况更符合。

## 参考文献:

- [1] 刘同鑫,尹建平,王志军,等. 低密度材料射流形成过程的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2014,37(5):63-66.
- [2] 刘同鑫. PTFE/Cu 材料的力学性能研究及应用[D]. 太原:中北大学,2015.
- [3] CHANG B H, YIN J P, CUI Z Q, et al. Numerical simulation of modified low-density jet penetrating shell charge [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2015, 14 (3):426-437.
- [4] 李磊,沈兆武,李学岭,等. SPH 方法在聚能装药射流三

维数值模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击,2012,32(3):316-322.

- [5] 郭志明,刘谋斌. 基于 SPH 的射流成形机理研究[J]. 兵器材料科学与工程,2013,36(4):37-40.
- [6] 米双山,刘东升,徐亚卿. 基于流固耦合方法的爆炸仿真分析[J]. 兵工自动化,2008,27(3):33-35.
- [7] 李磊,马宏昊,沈兆武,等. 聚能射流侵彻钢靶的 SPH - FEM 数值模拟[J]. 南京理工大学学报,2013,37(2):226-232.
- [8] YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Numerical simulation of steel target penetration by shaped charge distended jet with a high-polymer liner [J]. Strength of Materials, 2017, 49 (1):27-36.
- [9] 李庆鑫,王志军,陈莉,等. 一种超聚能装药结构的仿真[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(6):35-38.
- [10] 王志军,吴国东. 一种新型星锥状药型罩形成射流的数值模拟[J]. 兵工学报,2007,28(11):1397-1400.
- [11] 吴喜富,郑建国. 基于流固耦合的复合结构炮口制退器强度分析[J]. 兵工自动化,2016(7):19-22.

(责任编辑 周江川)

(上接第 35 页)

- [7] 王玉松. 7075 铝合金弹壳成形工艺优化及热处理工艺的研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [8] 王豪. 发射载荷下炸药装药密度对炸药应力和温度的影响[J]. 四川兵工学报,2011,32(3):34-37.
- [9] 王辉. 炸药爆炸产物 JWL 状态方程参数数值计算[D]. 西安:西安工业大学,2011.
- [10] 刘全,王瑞利,林忠. 爆轰计算 JWL 状态方程参数的不

确定度[J]. 爆炸与冲击,2011,33(6):647-654.

- [11] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报,2009,23(4):277-282.
- [12] 沈飞,王辉,袁建飞. 一种确定 JWL 状态方程参数的简易算法[J]. 振动与冲击,2014,33(9):107-110.

(责任编辑 周江川)