

# 聚能装药作用下材料等效数值仿真

王国辉<sup>1</sup>, 李向荣<sup>1</sup>, 徐峰<sup>1</sup>, 江增荣<sup>2</sup>

1. 装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072
2. 第二炮兵装备研究院第二研究所, 北京 100085

**摘要** 采用实验方法确定目标毁伤研究中材料等效存在一定困难。为此, 采用基于非线性动力学软件数值模拟仿真方法, 研究聚能装药作用下材料的等效。首先利用 AUTODYN 非线性动力学软件, 采用欧拉-拉格朗日的流固耦合方法, 进行大量数值计算, 通过比较相同计算时刻的破甲深度、所耗费时间以及射流头部速度等参数, 确定对应于药型罩为某锥角值的最佳炸高。在此条件下, 利用射流极限破甲剩余速度方法确定了两种钢材的等效系数, 某新型装甲钢与 45# 钢的等效系数约为 1.75。研究方法和研究结果对于某些弹药毁伤效能鉴定实验过程中等效靶的设置具有一定参考价值。

**关键词** 最佳炸高; 材料等效; 破甲剩余速度

**中图分类号** TP391.9, TJ71

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)09-0076-04

## Numerical Simulation of Armored Material Equivalent Under the Action of Shaped Charge

WANG Guohui<sup>1</sup>, LI Xiangrong<sup>1</sup>, XU Feng<sup>1</sup>, JIANG Zengrong<sup>2</sup>

1. Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China
2. The Second Research Department, Equipment Research Institute of Second Artillery of PLA, Beijing 100085, China

**Abstract** It is difficult to implement the material equivalent using the method of experiment in the field of the target damage research. This paper uses a simulation method based on non-linear dynamical software to study the material equivalent under the action of shaped charge warhead. With Euler-Lagrange method, a large number of numerical calculations were carried out using AUTODYN, a non-linear dynamics software. According to calculation results, comparing parameters such as jet tip velocity, penetration depth and consuming time, etc., the optimum stand-off of the shaped charge corresponding with some conic angle is identified. On the basis of above results, the equivalent coefficient between some armored steel and 45 steel is obtained by using the method of anti-armor residual velocity. According to the method, at the same optimum stand-off, the relative velocity is the same after the same jet penetrates different material targets with different thickness, which means that the different thickness is equivalent. The equivalent coefficient is about 1.75 for some newest armor steel and 45 steel. Research results provide an equivalent target setting for warhead damage efficiency checkup tests.

**Keywords** optimum stand-off; material equivalent; anti-armor residual velocity

### 0 引言

武器系统对目标毁伤效能实验一般采用等效靶。等效靶有两种, 一是对目标结构的等效, 将真实目标模拟成某种具有特定形状和物理特性的简化结构, 例如用均质靶板等效较复杂的装甲车辆防护结构、舰舷结构; 一种是对材料的等效, 通常用价廉易得的材料等效价格较高或难以大量获得的材料, 例如用普通装甲钢等效航母甲板用钢。建立科学合理的等效关系以准确衡量毁伤效能, 是当前毁伤效能研究中一个

较难解决的问题<sup>[1-2]</sup>。实验研究确定材料等效关系的成本太高, 随着计算机软硬件技术的迅速发展, 计算机仿真结合少量实验可大幅降低实验成本、缩短实验周期, 已被普遍应用。

毁伤效能实验中, 目标等效的实质就是在同样毁伤机理作用下抗毁伤能力相当。目前较多的目标等效是针对动能侵彻体的侵彻效应, 常用的等效方法有极限穿透速度法、剩余穿透深度法和冲击波等效法。本文采用 AUTODYN 非线性动力学软件进行数值模拟计算, 借鉴极限穿透速度法, 探索性研究

收稿日期: 2010-01-14

基金项目: 军内试验合作项目(2008ZX40)

作者简介: 王国辉, 副教授, 研究方向为武器系统毁伤评估与维修, 电子信箱: wangguohui1121@sohu.com

破甲剩余速度法对破甲弹作用下的钢材等效。

## 1 有限元建模

由于聚能装药的轴对称性,为节约时间,进行二维计算,且只需建立 1/2 模型,如图 1 所示。图 2 为计算时得到的射流状态图。由于聚能装药射流形成过程中材料变形严重,采用



图 1 聚能装药二维计算材料模型图

Fig. 1 2D material model of shaped charge



图 2 无靶板时射流状态图

Fig. 2 Formed jet at some instant

Euler 处理器。Euler 法的好处是网格不动且不变形,相当于材料在网格中流动,克服了单元网格畸变引起的数值计算困难。靶板采用 Lagrange 处理器。射流通过耦合将能量和压力传递给靶板,实现对靶板的侵彻,而靶板则对射流起几何约束作用。

由于 Euler 法对网格划分的要求较高,网格划分越精细,模拟结果越精确,选用网格尺寸为  $0.25\text{mm}\times 0.25\text{mm}$ 。

装药壳体和靶板的强度模型均采用 Johnson-Cook 模型。强度模型用于描述材料应力与应变之间的关系,而 Johnson-Cook 强度模型适用于材料应变率变化范围较大的情况,它主要考虑温度和应变率对材料屈服应力的作用,不考虑外部压力环境作用的情况,其本构关系的形式为<sup>[3]</sup>

$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)(1+C \ln \varepsilon^*)(1-(T^*)^m)$$

式中,  $\sigma$  为应力;  $\varepsilon$  为塑性应变;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  为无量纲塑性应变速率;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ,  $T$  为样品环境温度,  $T_r$  为室温,  $T_m$  为材料熔点;  $m$ 、 $n$  为与材料有关的系数。 $(A + B\varepsilon^n) \cdot (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$  和  $(1 - (T^*)^m)$  分别描述材料的加工硬化效应、应变速率效应和温度软化效应。

所用材料参数均采自 AUTODYN 材料模型库。表 1 给出了部分材料模型及参数, 表 2 给出了某种新型装甲钢和 45# 钢的部分参数。

表 1 材料部分参数

Table 1 Some parameters of the materials

| 部件   | 材料     | 状态方程      | 强度模型         | 失效模型 | 密度/(kg·cm <sup>-3</sup> ) |
|------|--------|-----------|--------------|------|---------------------------|
| 空气   | 空气     | Ideal Gas | None         | None | 0.001225                  |
| 炸药   | B 炸药   | JWL       | None         | None | 1.717                     |
| 药型罩  | 铜      | Shock     | None         | None | 8.932                     |
| 壳体   | 4340 钢 | Linear    | Johnson-Cook | None | 7.831                     |
| 靶板 1 | 某装甲钢   | Shock     | Johnson-Cook | None | 7.862                     |
| 靶板 2 | 45# 钢  | Shock     | Johnson-Cook | None | 7.842                     |

表 2 某装甲钢和 45# 钢参数

Table 2 Parameters of some armored steel and 45 steel

| 参数                                         | 某装甲钢              | 45 <sup>#</sup> 钢  |
|--------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| 剪切模量/kPa                                   | $8.3 \times 10^7$ | $8.19 \times 10^7$ |
| 屈服应力 $A$ /kPa                              | $7.2 \times 10^5$ | $4.96 \times 10^5$ |
| $B$                                        | $4.8 \times 10^5$ | $4.34 \times 10^5$ |
| $\dot{\varepsilon}_0$                      | 1.0               | 1.0                |
| $C$                                        | 0.01              | 0.07               |
| $m$                                        | 1                 | 0.804              |
| 特征热/(J $\cdot$ kg $^{-1}\cdot$ K $^{-1}$ ) | 702               | 477                |
| $C_0$ /(m $\cdot$ s $^{-1}$ )              | 4770              | 4390               |
| $n$                                        | 0.302             | 0.307              |
| $\gamma_0$                                 | 2.17              | 2.17               |
| $T_m$ /K                                   | 1782              | 1764               |
| $s$                                        | 1.586             | 1.49               |

## 2 最佳炸高的选取

金属射流自由运动时,其纵向存在速度梯度。为保证射流充分拉伸且不断裂,每一种聚能装药结构有一个最佳炸高,在此炸高下破甲最深最稳。本文对不同锥角的模型进行不同炸高的破甲仿真计算,根据破甲深度确定最佳炸高。图3给出了锥角为 $45^\circ$ 时炸高从30mm到90mm的模拟结果。

射流的最小速度通过仿真很难得到,这是由于锥角不同,药型罩的质量和装药的质量也有所不同,同时导致了射流的质量也不同。另一方面,角度变化和装药质量的差别不是很大,破甲的深度在差别上也不是太大,所以最大的破甲深度也很难精确得到。取计算周期为 3000 时刻的各种数据,包括射流的破甲深度、耗费时间及射流最顶部的速度,依据射流的剩余速度与破甲深度的关系<sup>[4-6]</sup>,给予一个相对因子,

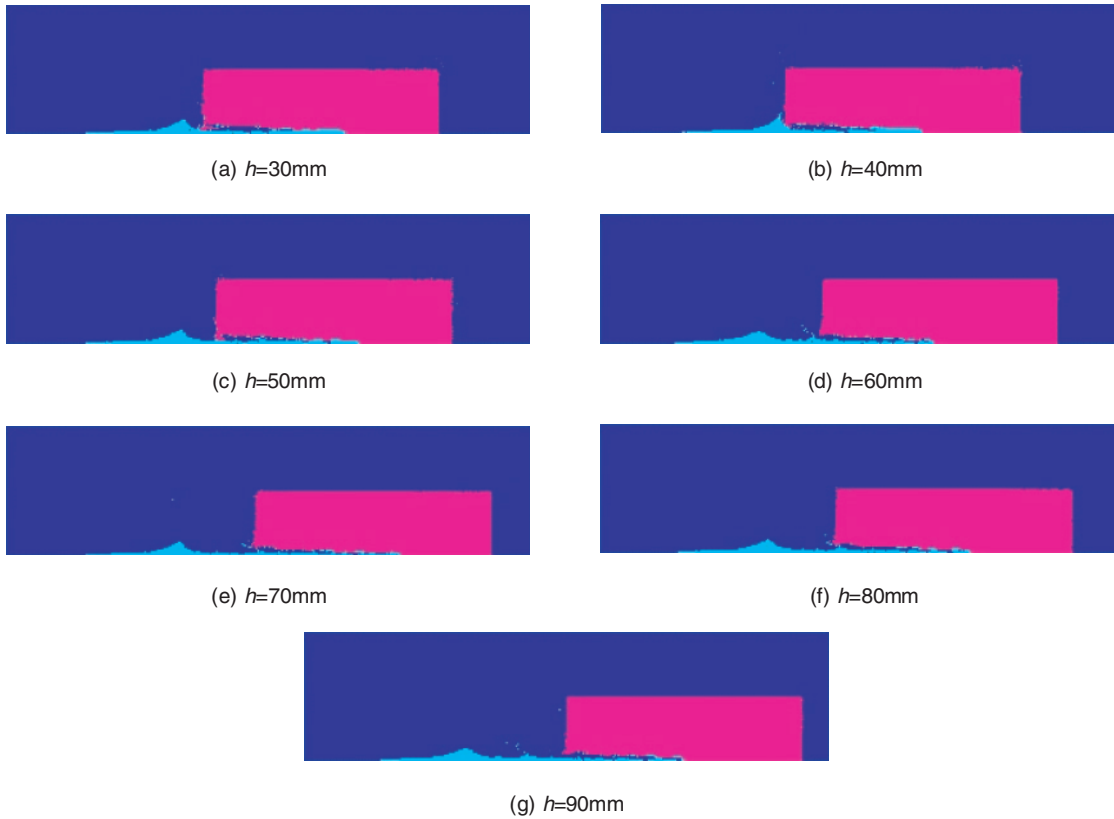


图3 锥角为  $45^\circ$  ,炸高  $h$  从 30mm 至 90mm 时的破甲图

Fig. 3 Penetration process with angle of  $45^\circ$  and stand-off ( $h$ ) from 30mm to 90mm

将这些数据进行拟合处理,得到了如图 4 和图 5 所示的相对穿深曲线,与参考文献[7]中的图形基本吻合。

图 4 为相同锥角时不同炸高的相对破甲深度曲线,可以看出,射流在锥角为  $45^\circ$ 、炸高为 70mm 时相对破甲深度最大。图 5 为相同炸高时不同锥角的相对破甲深度,可以看出,炸高为 70mm 的相对破甲深度曲线较好,在锥角为  $45^\circ$  时达到最大相对破甲深度。通过上述分析,最终选择锥角为  $45^\circ$ 、炸高为 70mm 的模型进行等效计算。

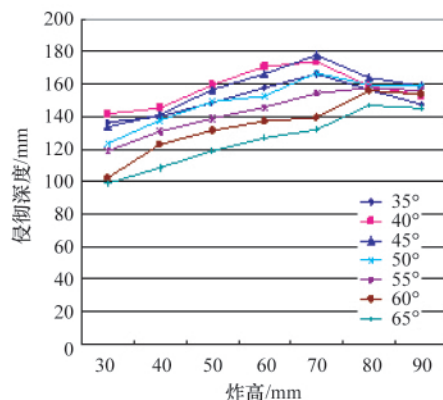


图 4 某锥角下相对破甲深度随炸高变化曲线

Fig. 4 Penetration depth vs the stand-off

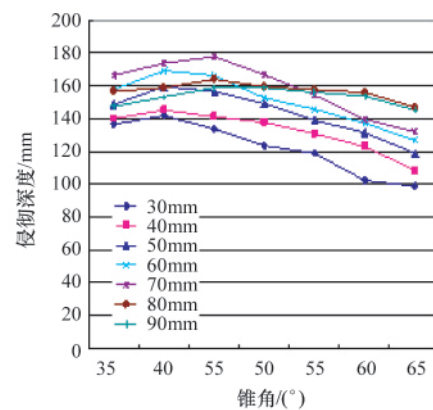


图 5 相同炸高时相对破甲深度随锥角变化曲线

Fig. 5 Penetration depth vs the conic angle

### 3 目标等效计算

以均质国产 45# 钢板为标准靶板,对某航母甲板用装甲钢进行仿真等效。取锥角为  $45^\circ$ 、炸高为 70mm、靶板厚度为 250mm,能量损耗 20%。图 6 为靶板某新型装甲钢的破甲图,其 3 幅子图分别为射流侵彻靶板后 0.06、0.07 和 0.08ms 时刻的状态图。通过后处理得到的不同时刻、侵彻不同材料靶板时射流头部速度,如表 3 所示。



图 6 射流对某装甲钢靶板侵彻数值模拟

Fig. 6 Numerical simulation of jet against some armored steel target

 表 3 不同时刻射流与靶板交界面处的速度  $v_j$  (单位: m/s)

 Table 3 Velocity ( $v_j$ ) of jet at target interface (unit: m/s)

| 时刻 $t/\text{ms}$ | 某新型装甲钢靶 | 45° 靶  |
|------------------|---------|--------|
| 0.06             | 3878.2  | 4436.6 |
| 0.07             | 3381.1  | 3833.8 |
| 0.08             | 2848.4  | 3376.9 |

穿甲弹作用下的极限穿透速度等效方法的基本原理是: 同一穿甲毁伤元穿透不同厚度的两种材料所需极限速度相同, 则说明具有此厚度的两种材料等效。参考这一点, 本文提出采用极限破甲剩余速度法, 相同射流在最佳炸高条件下, 对不同厚度的两种材料进行破甲后的剩余速度相同, 则说明具有此厚度的两种材料在破甲弹作用下是等效的。从计算结果上可以确定, 射流对某新型装甲钢和 45° 钢的侵彻深度相同时, 其剩余速度不同, 45° 钢的剩余速度要比某新型装甲钢大, 这主要是靶板材料的屈服强度等参数不同导致各自的抗侵彻能力不同, 某新型装甲钢的屈服强度一般在 690~830MPa 之间, 而 45° 钢的屈服强度仅为 490MPa 左右。从表 3 可以看出, 对于某新型装甲钢靶板,  $t$  为 0.06ms 时,  $v_j = 3878.2\text{m/s}$ , 对于 45° 钢板,  $t$  为 0.07ms 时,  $v_j = 3833.8\text{m/s}$ , 两者基本相同。相同剩余速度下, 45° 钢的侵彻深度约为 108.1mm, 某新型装甲钢的侵彻深度约为 75.5mm。依据极限速度等效原则, 可以认为相同极限穿透速度下, 138.1mm 的 45° 钢均质靶板与 79.5mm 的某新型装甲钢均质靶板对破甲弹的抗弹能力基本等效, 其等效系数约为 1.737。同样地, 靶板为某新型装甲钢, 0.07ms 时射流与靶板交界面处的极限速度与靶板为 45° 钢、0.08ms 时的速度基本相同, 这时 45° 钢的侵彻深度约为 165.1mm, 某新型装甲钢的侵彻深度约为 92.5mm, 这时的等效系数约为 1.785。两个等效系数相差很小, 因此可以认为某新型装甲钢与 45° 钢的等效系数约为 1.75。

#### 4 结论

利用仿真计算方法, 在最佳炸高条件下, 利用极限破甲剩余速度方法进行破甲弹毁伤作用下不同材料之间的等效研究是一种可行方法, 但等效系数的最终确定还需通过验证

实验修正。下一步工作主要是改变初始条件, 包括破甲弹结构参数、靶板材料参数以及破甲弹与靶板的相互作用参数, 进行大量仿真计算, 得到不同条件下的等效系数, 建立等效方程。

#### 参考文献 (References)

- [1] 米双山, 何剑彬, 张锡恩, 等. 战斗损伤仿真中的等效靶与破片终点速度研究[J]. 兵工学报, 2005: 26(5): 605-608.  
Mi Shuangshan, He Jianbin, Zhang Xi'en, et al. *Acta Armamentarii*, 2005: 26(5): 605-608.
- [2] 卢永刚, 钱立新, 杨云斌, 等. 目标易损性/战斗部威力评估方法[J]. 弹道学报, 2005: 17(1): 46-52.  
Lu Yonggang, Qian Lixin, Yang Yunbin, et al. *Journal of Ballistics*, 2005: 17(1): 46-52.
- [3] 胡昌明, 贺红亮, 胡时胜. 45 号钢的动态力学性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003: 23(2): 189-192.  
Hu Changming, He Hongliang, Hu Shisheng. *Explosion and Shock Waves*, 2003: 23(2): 189-192.
- [4] 杨玉林, 赵国志, 沈培辉. 目标对破甲弹防护能力的等效研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003(S3): 301-303.  
Yang Yulin, Zhao Guozhi, Shen Peihui. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003(S3): 301-303.
- [5] 杨超, 赵宝荣, 付克勤, 等. 剩余速度与靶板厚度关系的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2003: 26(6): 3-5.  
Yang Chao, Zhao Baorong, Fu Keqin, et al. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2003: 26(6): 3-5.
- [6] 曹兵. EFP 对有限厚 603 靶板侵彻的试验研究 [J]. 火工品, 2007(1): 48-50.  
Cao Bing. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(1): 48-50.
- [7] 王儒策. 弹药工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.  
Wang Ruce. *Ammunition engineering* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.

(责任编辑 代丽)

#### · 学术动态 ·



### “中国工程热物理学会 (燃烧学)学术年会”征文

由中国工程热物理学会主办的“中国工程热物理学会(燃烧学)学术年会”将于 2010 年 12 月 3—6 日在广州召开, 现向从事能源、动力、环境、石油、化工、冶金、航空、航天、核能和水利等相关领域中, 燃烧学专业和部门的研究人员征文。经学术会议评审出的优秀论文, 将推荐在《工程热物理学报》发表。征文截止日期为 2010 年 6 月 1 日。

联系方式: 北京北四环西路 11 号中国工程热物理学会秘书处 (100190); 电子信箱: combustion@ms.gjiec.ac.cn。