

射孔弹侵彻套管三维有限元模拟

亢方亮¹ 盛选禹²

(海军装备部驻重庆地区军事代表局¹, 成都 61002; 清华大学核能与新能源技术研究院², 北京 100084)

摘要 采用有限元分析软件 AUTODYN, 对油田使用的 Y1201 射孔弹的爆轰压垮药型罩过程和射流侵彻套管过程进行了模拟计算。爆轰材料采用 JWL 模型; 侵彻过程材料破坏采用 Von Mises 屈服应力准则。计算给出了射流形成过程、射流的速度分布曲线、药型罩动能随时间变化曲线。射孔弹发生侵彻的时间是 13 μs ; 射流侵彻后的速度为 3 992 m/s; 药型罩动能随时间变化, 在 15 s 时, 药型罩动能达到最大值, 为 1.24×10^7 J, 在 20 μs 时, 动能降低到一个稳定值, 为 1.2×10^7 J。

关键词 射孔弹 爆轰 射流 有限元分析

中图法分类号 TE355.9 TB41; **文献标志码** A

射孔完井是目前国内外使用最广泛的完井方法。在射孔完井的油气井中, 射孔孔眼是沟通产层和井筒的唯一通道。正确的射孔设计和恰当的射孔工艺, 可以使射孔对产层的损害最小, 完善程度最高, 获得理想的油气产能。

射孔弹的全物理过程是由爆轰将药型罩压垮, 射流形成与延展, 射流对靶侵彻等前、中、后期三个阶段组成的。因它是一个含有化学能释放, 在短时强冲击加载下产生热与机械功、有限体积变形与塑性畸变、相变与各种损伤破坏相耦合, 强非线性复杂的动态响应过程。因此, 根本无法严格地解析求解, 也就不可能进行精确地理论处理与分析。

目前, 国内油气井射孔主要是采用聚能射孔弹瞬间产生的高温高压高速的金属射流来完成。但是对于新开发的弹型和结构、效果是否能够满足现场施工要求, 穿深具体数字是多少, 以及射孔影响因素的分析, 一般采用地面试验的方法; 甚至专门设计模拟地下环境的试验装置^[1,2]; 而对于采用有限元计算方法, 对射孔弹性能进行计算分析, 报道较少。本文采用 CATIA 软件建立射孔弹的几何模型, 然后导入到 ANSYS 软件的 WORKBENCH 中, 利

用 ANSYS 软件, 对模型进行有限元网格划分, 并将划分网格后的模型导入到 AUTODYNE 软件中。在 AUTODYNE 软件中, 再补充建立空气、靶板的模型, 定义零件的材料属性、爆炸参数、计算控制参数、计算输出参数等, 对实际制造的一种射孔弹进行了分析计算, 并与地面试验数据进行了比较。由于计算分析过程时间很长, 因此, 本文的计算模型中只考虑了套管, 而没有考虑套管外的岩石结构。通过这种简化模型的分析, 可以比较不同的射孔弹结构, 侵彻套管后的能量变化, 也就能够比较出设计的尺寸是否合理。

1 理论计算基础

在射孔弹的实际使用过程中, 包含有 3 个具体过程: 炸药爆炸、形成射流、射流侵彻钢靶。

1.1 爆轰过程计算理论

爆轰分析的材料状态方程采用的能量方程是:

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v} \right) e^{-\eta v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_{21} v} \right) e^{-r_{2v}} + \frac{\omega e}{v} \quad (1)$$

该方程就是著名的 JWL 方程, 目前广泛用于爆炸过程中的流体动力学计算。对于很多炸药, 常数 C_1 , r_1 , C_2 , r_2 , B 和 ω 都通过实验测定了具体的数值。在 AUTODYN 软件中的材料库中, 也提高了相应的参数值, 用户如果知道炸药, 可以直接选择材料即可。

2011 年 5 月 23 日收到

第一作者简介: 亢方亮 (1976—), 男, 陕西潼关人, 硕士, 工程师, 研究方向: 核工程, 核动力。E-mail: cdzoed@sina.com。

这些参数是相互关联的,修改其中的一个参数,必须考虑对其它参数的影响。

在 AUTODYN 中,当使用 JWL 能量状态方程时,有下面的关系:

1.1.1 $V_{VNS} < V_{CJ}$

其中 V_{VNS} 是用户定义的冯诺依曼峰值体积,Chapman-Jouguet 体积定义为

$$V_{CJ} \equiv \frac{(\rho_0 u_d^2 - P_{CJ})}{(\rho_0 u_d^2)} \tag{2}$$

ρ_0 是用户定义的环境密度值, u_d 是爆炸速度。

1.1.2 $P_g(V_{Cj}, P_{Cj}) \approx P_{Cj}$

其中 P_g 是由气体状态方程赋值, E_{Cj} 是内能,与 V_{Cj} 自洽。这里

$$E_{Cj} = E_{o,g} - \frac{1}{2} P_{Cj} (V_{Cj} - 1) \tag{3}$$

当不等式 $\left| \frac{[P_g(V_{Cj}E_{Cj}) - P_{Cj}]}{P_{Cj}} \right| < 0.01 \tag{4}$

满足时,AUTODYN 接受 P_{Cj} 。

1.2 射流形成过程

在 AUTODYN 计算软件的说明中,出于商业目的,未给出射流计算的物理方程,但可以从其它已经发表的文献中^[3,4],了解射流形成过程的计算方程:

药型罩用 Johnson-Cook 本构模型和 Gruneisen 状态方程来描述,而 Gruneisen 状态方程为:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right] - \frac{a}{2} \mu^2}{[1 - (s_1 - 1) \mu] - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \tag{5}$$

式(5)中, c 是 $\nu_s - \nu_p$ 剪切-压缩波速曲线的截距, s_1 、 s_2 和 s_3 是 $\nu_s - \nu_p$ 曲线的斜率系数, γ_0 是 Grueisen 常数, α 是 γ_0 和 $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 的一阶体积修正量。

1.3 侵彻过程

射流侵彻过程,在 AUTODYN 中,处于商业原因,也没有给出理论方程。下面的方程也是基于发表的文献^[4,5]。如果材料处于流动状态,则动压为 $\frac{1}{2} \rho_t U^2$,其中 ρ_t 是材料密度, U 是侵彻速度, Y 是动

态屈服强度。得到:

$$\frac{1}{2} \rho_t U^2 > 10Y \tag{6}$$

根据伯努利方程,可得在撞击靶板过程中,射流速度为:

$$V = \left(1 + \frac{\sqrt{\rho_t}}{\sqrt{\rho_j}} \right) U \tag{7}$$

对于金属靶板材料的屈服,采用 Von Mises 模型:
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2 \tag{8}$$

也可以写成:

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = \frac{2Y^2}{3} \tag{9}$$

式(9)中, S_1 、 S_2 、 S_3 为主偏应力。

2 有限元计算模型

2.1 几何模型的建立

由于 AUTODYN 软件处理复杂几何形状的能力非常差,因此,一般不在 AOTUDYN 软件内建立几何模型,而是采用专业的 CAD 软件建立模型。在本文中,我们采用的是达索公司的 CATIA V5R17 版本建立几何模型。

由于我们采用的是 AUTODYN 的二维计算,因此在 CATIA 软件中,建立二维几何模型即可。具体方法是,在 CATIA 软件的草图编辑器工作台,绘制零件的界面,注意,只绘制截面的对称一半即可。在软件的线框和曲面工作台,将绘制的草图填充为面。同样的方法绘制 3 个零件的填充面,然后在软件的装配工作台,将 3 个零件装配在一起。具体软件的使用方法,见文献[6,7]。模型保存后,即可用于后面的计算。射孔弹的模型如图 1 所示,(a)图 1 是用于有限元计算的二维平面图,(b)图 1 是方便查看,将二维图旋转了 90 度得到的,相对于射孔弹图的 1/4 剖面。

射孔弹最外面是金属弹壳,中间是炸药,最内侧是药型罩。弹壳是一个圆柱形的空心结构,在其上端,有一个开孔,用于导爆所点燃弹壳内的炸药。该开孔位置也是计算模拟中的起爆点。在弹壳内,

安装有炸药。最内层是药型罩,一般为粉末冶金材料,其成份以重金属铜为主。

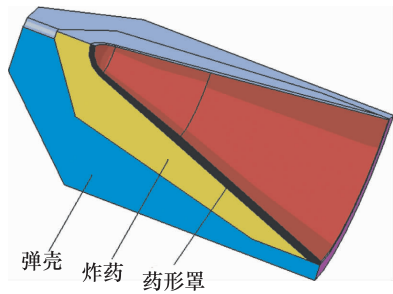


图1 射孔弹模型

2.2 建立动力学模型

使用 ANSYS workbench 功能,将射孔弹的二维模型导入到 ANSYS 12.0 软件中,建立显示动力学分析模型。

在显示动力学模块内,使用网格划分工具,对几何模型划分网格。注意,划分网格前,要把几何类型设置为轴对称类型。划分网格时,最小网格尺寸为 1.5 mm。

另外,由于 ANSYS workbench 要求设置计算时间和动力学参数。虽然这些参数并不实际用于 AUTODYN 计算中,但不设置这些参数,软件认为模型无效,因此需要设置虚假的计算时间和动力学参数,以便能够建立程序认可的模型。这些参数需要在 AUTODYN 中重新设置。

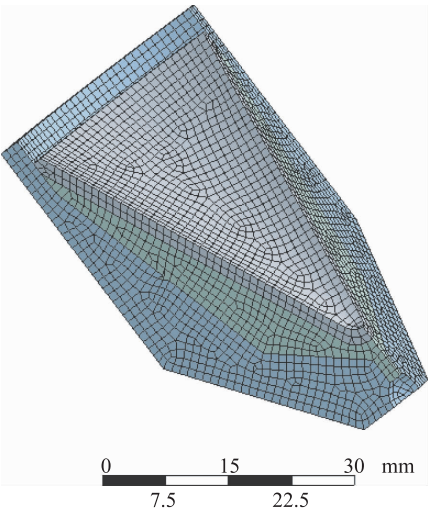


图2 计算模型的有限元网格

2.3 建立 AUTODYN 计算模型

通过 ANSYS workbench 功能,可以直接把划分网格后的模型导入到 AUTODYN 中。

在 AUTODYN 中,调入了软件材料库中的材料,使用的材料有空气、钢、铜、黑索金炸药。并且要人为添加一种新材料,用于设定钢靶的特性参数。在计算中,我们采用 45#钢的参数作为弹壳材料。在本计算中,药型罩密度为 10 g/cm^3 ,药性罩质量为 58 g。

还需要利用软件的简单建模功能,建立空气和钢靶的模型。在二维计算模型中,这两种材料均为矩形形状,由于形状简单,因此,在软件中可以方便地建立模型。

设置相互欧拉和拉格朗日网格之间的相互作用为自动即可,软件自动检测两种网格,并进行相互作用分析。最终建立的计算模型如图 3 所示。

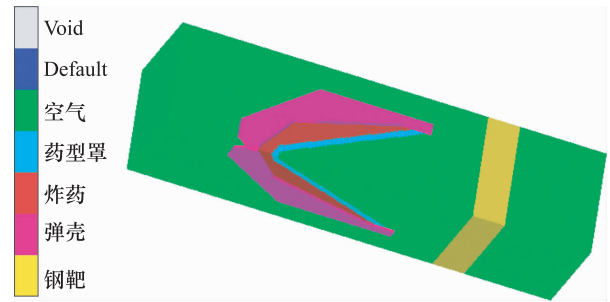


图3 AUTODYN 计算模型

在设计工程中,射孔弹最后要射穿的是水泥层。但在地面试验中,模拟射孔是采用的 45#钢板,而未采用混凝土材料。因此在我们的模拟计算中,也采用 45 #钢板作为目标靶。钢靶的炸高为 19.8 mm。45#钢弹性模量为 $E = 2 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$,泊松比为 $\nu = 0.3$ 。

3 计算结果及分析

计算分两步进行,首先计算炸药爆炸和压垮药型罩、形成射流的过程;第二个步骤计算射流对套管的侵彻过程,可以计算出射流侵彻套管后射流的能量分布。

3.1 药型罩压垮过程

图4给出了从计算开始到13 μs 药型罩被压垮形成射流的过程。因为在计算中,最关心的是药型罩在炸药作用下形成的射流,只有射流会最终侵彻钢靶,因此,在图4中只显示了药型罩的变形过程,没有给出弹壳在爆炸压力下的变形情况,也没有给出炸药本身在爆炸后变形,充满空间的过程。图4中只选了几个时刻的图像,未展示射流形成的整个过程。

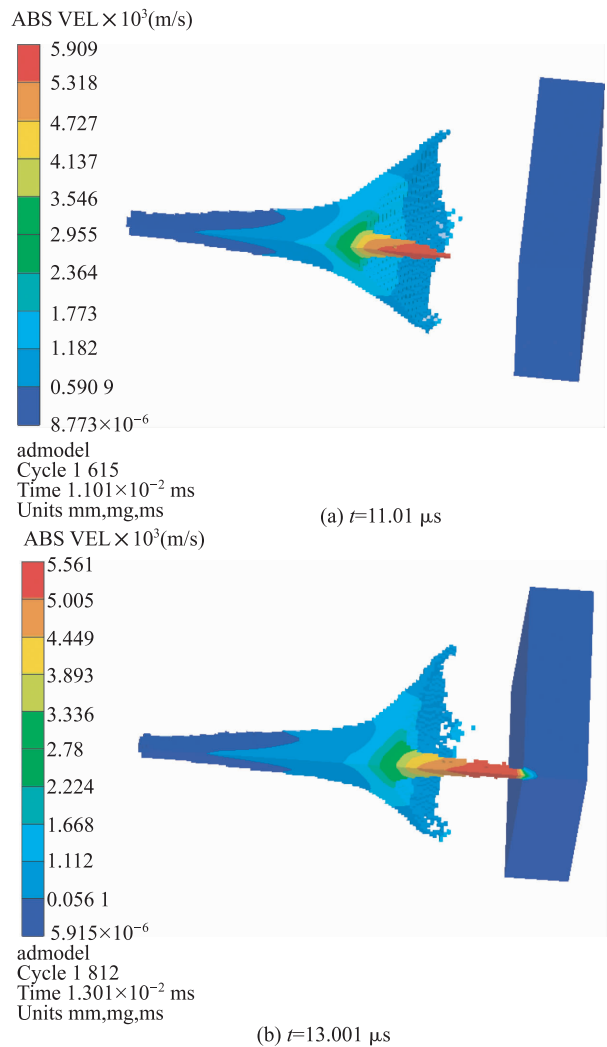


图4 射流形成过程的速度分布

在计算到13 μs 时,压垮的药型罩形成的射流开始接触到钢靶,此时,开始进行第二个步骤的计算。

3.2 射流侵彻过程

从计算开始后的13 μs 开始,射流前端接触到钢靶,射流开始侵彻钢靶,侵彻过程如图5所示。换句话

说,在爆炸开始13 μs 后,射流开始接触到钢靶。由于钢板很薄,射流很快将钢板穿透,并继续向前运动。

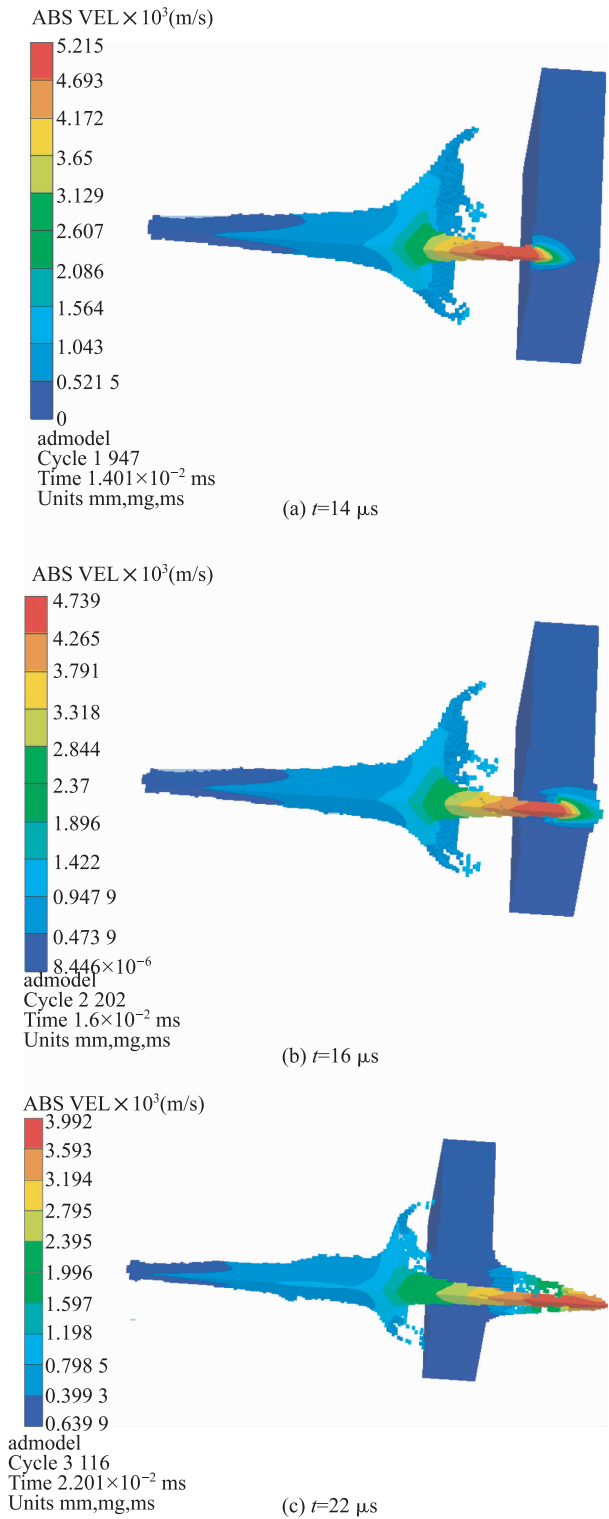


图5 射流侵彻钢靶过程时的速度分布

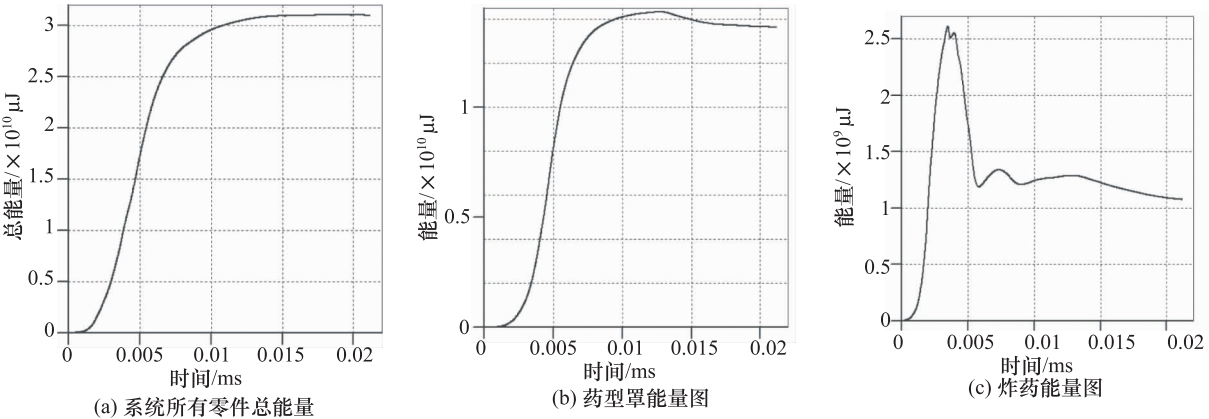


图 6 系统能量与时间关系曲线

图 6 给出的是系统能量随时间变化曲线。横坐标为时间,以爆炸开始时刻为 0 时刻,一直给到 26 μs 时刻的能量。图 6(a) 是系统的总能量,从图 6 中看到,在 15 μs 前,系统能量一直在增加。20 μs 后,总能量曲线基本持平,保存水平线,即不再随时间的增加而增加。从图 5(b) 看到,在 15 μs 时,射流基本侵彻穿透了钢靶,此时,射流可以在理论上不损伤任何能量的情况下,继续向前运动。而侵彻钢靶的过程已经完成,射流也不再消耗能量侵彻钢靶,因此,总能量变化曲线是和射流侵彻的过程完全对应的。

从图 6(b) 看到,药型罩的总能量在 15 μs 时,达到最大值随后开始降低。药型罩的能量分布图与射流过程是对应的:在 15 μs 前,一直是药型罩从炸药中获得能量,之后,药型罩生成的射流开始侵彻钢靶,射流的能量传递到钢靶,射流本身的能量降低。

因为后面的动能曲线基本不变化,所以后面时刻的动能未继续绘制出来。从图 6 中可以看出,在 13 μs 时,药型罩动能达到最大值,为 $1.24 \times 10^7 \text{ J}$,在 20 μs 时,动能降低到一个稳定值,为 $1.2 \times 10^7 \text{ J}$,在之后的时候,动能稍微有所降低,但变化很小,在图中基本显示为一条直线。

通过评价射流稳定后动能的大小,可以对射流侵彻后面岩石或者混凝土的效果进行估计和预测。射流动能愈大的,侵彻深度肯定大。因此,在不计算射流侵彻岩石或者混凝土的情况下,可以通过只

计算侵彻套管,估计射孔弹设计的形状是否合理。因为计算侵彻岩石和混凝土个过程很漫长,耗费机时很多,如果设计的参数变化很多,做侵彻岩石和混凝土计算难以满足工程需要。采用本文的,只计算侵彻套管,然后比较稳定后射流动能的方法,相对比较简单快捷,耗费机时少。

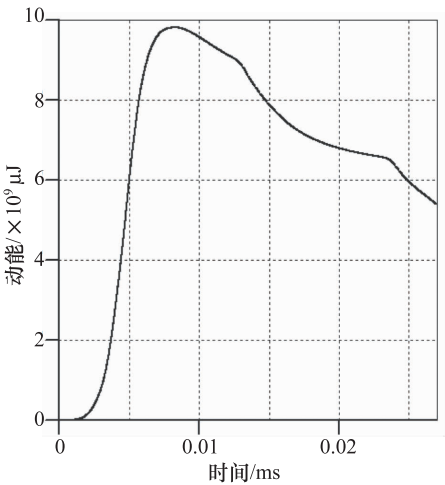


图 7 药型罩动能随时间变化曲线

4 结论

通过有限元分析,对射孔弹侵彻套管以及侵彻后射流形状和能量分布进行了计算。计算发现:射孔弹发生侵彻的时间是 13 μs ;射流侵彻后的速度为 3 992 m/s;药型罩动能随时间变化,在 15 μs 时,药型罩动能达到最大值,为 $1.24 \times 10^7 \text{ J}$,在 20 μs

时,动能降低到一个稳定值,为 1.2×10^7 J。

对于不同的射孔弹设计方案,在比较方案优劣时,可以不计算射孔弹侵彻混凝土和岩石的整个过程,而只计算侵彻套管,然后比较稳定后射流动能的方法。这样的方法相对比较简单快捷,耗费机时少。

参 考 文 献

1 彭原平,肖胜飏. 高温高压对射孔弹性能的影响. 测井与射孔, 2006;(1):61—65

2 李东传,孙新波,郭金荣,等. 聚能射孔弹在不同砂岩上的射孔

效果研究. 断块油气田, 2007;14(1):64—66

3 肖作智,梁德寿. 射流临界侵彻速度的数值计算研究. 兵工学报 弹箭分册,1985;(4):30—38

4 郑平泰,杨 涛,寇保华,等. 聚能射流侵彻混凝土靶板的工程计算方法研究. 弹箭与制导学报,2007;27(2):144—147

5 韩秀清,曹丽娜,曹宇新,等. 聚能射流形成及破甲过程的数值模拟分析. 科学技术与工程,2009;9(23):6960—6964

6 盛选禹. CATIA 曲线和曲面功能详解. 北京:机械工业出版社,2004

7 盛选禹. CATIA 机械设计命令详解. 北京:机械工业出版社,2009

3 Dimensional Finite Element Simulation on
Perforating Casing of Peroration Bullet

KANG Fang-liang¹, SHENG Xuan-yu¹

(798 Factory Military Representative Office,Chongqing Military Representations Bureau,General Armanents Department,

Chong qing 400060,P. R. China;Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University², Beijing 100084, P. R. China)

[Abstract] The whole processes of Y1201 peroration bullet explode and collapse shaped charge liner, jet flow penetration was simulated in finite element software AUTODYN. The JWL model was used for explosive detonation material. The failure criterion for penetrated material was Von Mises criteria. The simulation gave the detail process of jet flow formation, velocity distribution of jet flow, the energy variation of shaped charge liner with time. The calculation showed: the penetration time is 13 μ s, and the speed after penetration is 3 992 m/s, the kinetic energy of shaped charge liner varies with time, and reached the maximum 1.24×10^7 J at $t = 15 \mu$ s, then decreases to a stable value 1.2×10^7 J.

[Key words] perforation bullet explosive detonation jet flow finite element analysis