军事装备测控技术

文章编号:1671-4598(2017)10-0112-04 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2017.10.030

中图分类号:TP3 文献标识码:A

基于 ANSYS/LS-DYNA 高速弹头冲击仿真

王玉华,黄凯明

(中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018)

摘要:高速弹头的侵彻问题是军工防护等领域研究的一个重要课题;采用有限元仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 为平台对高速弹头侵 彻靶板的过程进行了数值模拟;选取 Johnson-Cook 本构模型来描述侵彻过程,得到了速度为1 300 m/s 的子弹侵彻 6 mm 靶板的速度、加速度、能量变化曲线和 VonMises 应力云图,从而直观地显示靶板的变形情况和动态响应,有助于分析高速弹头的撞击过程;验证了 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真在分析侵彻问题中的可行性和优越性,对改进弹头和防护材料设计具有重要意义;并为防护材料设计进行高速冲击实验的研究提供了新的途径和思路。

关键词: 高速弹头; 侵彻; 有限元; 数值模拟

Simulation of High—speed Warhead Impact Based on ANSYS/LS—DYNA

Wang Yuhua, Huang Kaiming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China) **Abstract:** The penetration of high-speed warheads is an important issue in the field of military protection. The finite element simulation software ANSYS / LS-DYNA is used to simulate the process of high speed warhead penetrating the target plate. The Johnson-Cook constitutive model is used to describe the penetration process. The velocity, acceleration, energy change curve and VonMises stress cloud of the 6 mm target penetrating with a speed of 1 300 m/s are obtained. In this case The deformation and dynamic response of the target are visually displayed. It helps to analyze the high-speed warhead impact process. It is proved that the feasibility and superiority of ANSYS/LS-DYNA finite element simulation in analyzing the penetration problem are of great significance to improve the design of warhead and protective material. And it provides a new way and idea for the research of high-speed impact experiment of protective material design.

Keywords: high-speed warhead; penetration; FEM; numerical simulation

0 引言

进入 21 世纪以后,防护工程技术迅猛发展,各种新型防 护复合材料也层出不穷。国内外关于防护复合材料的性能研 究与性能测试的文献资料非常丰富,尤其是高速弹头对防护 复合材料的侵彻过程的研究是一个热点。在过去,人们对防 护复合材料的侵彻过程都是基于大量实验,然后对实验数据 进行回归分析,总结出一些有效的经验公式。这些经验公式 在理论分析和材料的设计中具有实用价值,但只是宏观的反 应侵彻过程,无法细致反映侵彻过程的物理本质^[1]。

高速弹头对防护复合材料的侵彻过程中,靶板可能会出 现破片、成坑、鼓包、崩落、断裂和贯穿等现象,发生弹性 形变和塑性形变。由于目前理论水平和实验条件的限制,人 们还不能对高速弹头在防护复合材料的侵彻过程中的受力情 况、速度和加速度变化情况以及其他参数进行完全清晰准确 地描述。随着计算机技术和数值计算方法的不断发展,数值 计算方法在高速碰撞和侵彻过程领域以其经济性和高效性逐 渐成为不可或缺的有效方法。数值计算方法能够全面地反映 碰撞过程中各个参数的变化,计算结果可以动态显示碰撞的 整个过程。同时,数值计算方法可以非常方便地调整材料的

收稿日期:2017-03-30; 修回日期:2017-04-18。

作者简介:王玉华(1964-),女,吉林通化人,博士,教授,主要从事 机电传动及自动化、电力系统检测与控制技术、电力变换技术方向的 研究。 密度、弹性模量、泊松比、失效应力、抗拉强度、伸长率、 切线模量等参数,选择不同的参数进行计算和对比,从而找 出各种参数对试验结果的影响。这样可以在节约实验成本、 减少人为干扰的基础上,可以更加深入的研究防护复合材料 受冲击时的动态特性,再现材料的碰撞过程^[2-3]。因而,数值 计算方法在防护复合材料高速碰撞和侵彻过程领域发挥的作 用越来越重要。

本文采用建立有限元模型进行数值计算的方法来分析子 弹对防护复合材料的碰撞和侵彻靶板的过程。数值计算方法 是以数学和物理为理论基础,计算机求解为辅助手段解决实 际问题的一种方法,可以在进行现场试验之前模拟碰撞和侵 彻的过程。结合现场试验的测试结果也可以修正仿真模型, 为子弹和防护复合材料的设计提供参考。

1 ANSYS/LS-DYNA 软件及应用

ANSYS软件是一款大型通用有限元分析软件,具有强大的数值模拟功能,能够进行结构、热、声、流体以及电磁场等领域的研究。LS-DYNA是著名的显式动力分析程序,可以非常精确稳定地处理各种高度非线性问题^[4-7]。本文采用了ANSYS建立有限元模型,并生成关键字输入文件,再由LS-DYNA程序进行分析,最后由LS-PREPOST进行后处理,完成高速弹丸对防护复合材料的碰撞和侵彻过程的数值模拟、仿真与分析,具体流程如图1所示。

子弹对靶板的高速碰撞和侵彻过程一直是军工和防护工 程等领域关注的重要研究课题。靶板在进行碰撞实验时受到

ANSYS前处理(有限元模型)				
关键字输入文件				
LS-DYNA计算				
LS-PROPOST后处理				

图 1 ANSYS/LS-DYNA 的计算流程图

冲击力的大小及其变化过程可以用来作为评价靶板性能的重 要参考指标。本文通过 ANSYS/LS-DYNA 建立合适的弹靶 模型进行仿真,计算出子弹碰撞靶板的形变过程中冲击力的 变化过程以及观察靶板的破坏形态,为防护材料设计提供参 考。在侵彻过程中,可能产生弹性形变、塑形形变或者断裂 等破坏。整个过程具有高速、高温、高压的特征。选取合理 的弹靶材料模型对整个过程的分析非常重要。

1.1 LS-DYNA 程序算法

LS-DYNA 程序主要是采用 Lagrangian 描述增量法^[4], 这种方法取初始时刻的质点坐标 X_j (j=1, 2, 3),在任意时 刻 t 对应的质点坐标为 X_j (j=1, 2, 3),可以得到质点的运 动方程为:

$$X_i = x_i(X_j, t) \ i, j = 1, 2, 3$$
 (1)

质点的动量方程:

$$\sigma_{ij-j=\rho}f_{i=\rho_{xi}} \tag{2}$$

其中: σ_{ij-j} 为质点的柯西应力; ρ 为当前质量密度; f_i 为 单位质量体积力; ρ_{i} (为该质点的加速度。

LS-DYNA 程序的标准算法是:

$$\begin{cases} q = \rho l \left(C_0 l \mid \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kk} \mid ^- C_1 a \mid \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kk} \mid , \right) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kk} < 0 \\ q = 0, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kk} \geqslant 0 \end{cases}$$
(3)

其中:特征长度 $l = \sqrt[3]{V}$; α 为局部声速; p 为当前质量密度; $|\epsilon_{kk}| = |\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}|$ 是应变率张量的迹; C_0 和 C_1 为常数。

由于高速碰撞发生的时候,在防护复合材料内部产生冲 击波,这种冲击波会在防护复合材料内部形成压力、密度、 能量、和质点加速度的间断点,使得系统微分方程产生奇异 点,因而使得系统很难成功求解。为了解决此问题而又能获 得相对准确的模拟结果,在实际计算的时候考虑引入人工体 积粘性项设置相关的系数来修正静止压力项^[8-10]。引入人工 体积粘性项这个方法最早是由 Von Neumanm 和 Richtmyer 于 1950年提出的。处理方法就是在压力项中加入一个人工体积 粘性 q,这样做的主要目的是使碰撞发生时应力波的强间断在 相当窄的区域内调整为急剧变化却保持整个过程是连续变化 的情况。确保系统微分方程可以求解。这个方法简单实用, 因而应用非常广泛,而在实际问题下算法会进行适当调整。

引进人工体积粘性 q 后,应力计算公式被修正为:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + (p+q)\delta_{ij}$$
(4)
其中: p 为应力; s_{ij} 为偏应力张量。

我中: P 乃应力; 新次 能量守恒方程为:

$$E = VS_{ij} \dot{\epsilon}_{ij-} (p+q)V$$
⁽⁵⁾

其中: E 为系统应变能; V 为所选构形体积; S_{ij} 为偏应 力张量; ϵ_{ij} 为应变率张量; q 为体积粘性阻力; p 为应力。

1.2 弹靶材料本构模型

由于子弹对靶板的侵彻问题是一个高度非线性的动力学

问题,因此在对这类问题进行数值模拟的时候,选取合理的 材料分析模型是能否得到准确结果的关键。在 ANSYS/LS-DYNA 中可以选取带有断裂失效的 Johnson-Cook 本构模型 来描述侵彻过程的力学性能^[8-10]。Johnson-Cook 本构模型在 大应变情况下的本构关系为:

$$\sigma_{y} = (A + B\bar{\varepsilon}_{p}{}^{n}(1 + Cln)\dot{\varepsilon}^{*})(1 - T^{*m})$$
(6)

其中: A, B, C, n, m为材料常数; ϵ_p 为材料等效塑性 应变; $\epsilon^* = \epsilon^* / \epsilon_0$ 为材料塑性应变率; $T^* = (T - T_r) (T_m - T_r)$ 为相对温度,其中, T_r为当前室温, T_m为材料的熔点 温度。

Johnson-Cook 模型考虑了各个材料的温度变化、应力变 化和应变率变化等情况,断裂应变的具体形式:

 $\varepsilon_f = (D_1 + D_2 exp D_3 \sigma^*)(1 + D_4 ln \varepsilon^*)(1 + D_5 T^*)$ (7) 式中, $\sigma^* = p/\sigma$ 为材料在三向应力状态下的静水压力与等效 应力之比; D_i (*i*=1~5)为材料常数。

1.3 Gruneisen 状态方程

在用 Johnson-Cook 定义材料时,需要结合 Gruneisen 状态方程^[8-10]来判断,该状态方程可以通过两种方法定义压力和体积的关系,从而确定材料是压缩的还是扩张的。当材料属于压缩时,通过具有立体撞击速度的 Gruneisen 状态方程定义的压力方程式如公式(8) 所示:

$$p = \frac{\rho_0 c^{2\mu} \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (s_1 - 1)\mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 3)^2} \right]} + (\gamma_0 + a^{\mu})E$$
(8)

对于膨胀材料:

$$p = \rho_0 c^{2\mu} + (r_0 + a^{\mu})E \tag{9}$$

式中, $C \neq V_{s-}V_{\rho}$ 曲线的截距; S_1 , S_2 , $S_3 \neq V_{s-}V_{\rho}$ 曲线 的斜率系数; V_s 为冲击波速; V_{ρ} 为质点速度; $r_0 \neq Gruneis$ en 常数; $a \neq 0$ 和 $\mu = p/\rho_0 - 1$ 的一阶体积修正量。 p 为当前密 度, ρ_0 为初始密度。

2 高速碰撞的仿真分析

子弹高速碰撞下靶板的动态力学响应是一个比较复杂的 问题,现在还没有一种有效的理论模能够完整的描述材料受 高冲击载荷时动态力学响应。目前比较成熟的研究是基于大 量现场试验而推导的各种经验公式。这些经验公式在处理一 些实际问题时发挥着非常关键的作用。但是这些公式对实际 情况进行了大量简化,因此在使用的时候有很大的局限性。 在各种情形下使用这些经验公式时需要根据实际情况考虑修 正公式的系数。而选择有限元法来计算靶板受高冲击载荷时 动态响应就是把子弹和靶板进行离散化,控制时间步长,可 以精确地模拟靶板受高冲击载荷的过程^[11]。

2.1 弹靶材料参数选择和仿真模型

高速弹头侵彻靶板材料时,靶板的变形属于大变形。靶 板在高速碰撞后会出现破片、成坑、鼓包、崩落、断裂和贯 穿等现象。这里选择的 Johnson-Cook 本构模型,考虑到了 这种大应变情况的出现,可以较真实的反映了弹靶材料的本 构关系,从而借助计算机模拟在实际碰撞中出现的破片、成 坑、鼓包、崩落、断裂和贯穿等现象。弹靶材料模型参数如 表 1, E 为弹性模量 (EX),μ为泊松比 (NUXY),ρ为密度 (DENS),其他相关的材料参数主要参考文献[12-14]。

表1 子弹和靶板材料模型参数表				
	Е	μ	ρ	
子弹	1.17	0.35	8.93	
靶板	2	0.32	7.83	

弹头形状设置头部为半球形的圆柱金属弹丸,半径 1.5 cm,长度 4.5 cm。靶板尺寸为 24 cm×24 cm×0.6 cm,弹头 垂直侵彻靶板, 初速度设置为1 300 m/s。由于弹丸和靶板都 是对称结构,为了提高仿真的效率,因此在使用 ANSYS/LS -DYNA 进行数值计算时可以简化为整个模型的四分之一进 行仿真计算。仿真模型采用三维 Lagrangian 网格, 网格类型 选用三维实体显式单元 3D Solid164 单元进行网格划分。子弹 与靶板撞击时,弹靶直接接触的区域具有应力较大且应力集 中的特点,所以在子弹与靶板撞击的附近区域采用更加细致 的网格划分,在远离子弹与靶板撞击的区域网格划分相对粗 糙。从而在考虑仿真效率的基础上提高仿真精度。子弹与靶 板的接触算法采用 * CONTACTERODINGSURFACETO-SURFACE 接触算法。为了节省 CPU 的资源,在进行单元的 处理时采用单点积分。同时要避免出现沙漏模态,即在材料 大变形分析中结果无效的问题,需要引入人工体积粘性项来 调整弹靶材料模型的体积粘性,来确保整个分析过程的正确 性。这里设置人工体积粘性项的线性系数为 0.06, 二次项系 数为 1.0, 从而增大弹靶模型的体积粘性。设置子弹垂直撞击 靶板 (-Z方向),并且约束了子弹其他五个自由度。仿真模 型单位采用 g-cm-µs 单位制。ANSYS/LS-DYNA 中划分 网格后的弹靶模型如图 2 所示。



图 2 划分网格的有限元模型

2.2 弹靶模型仿真过程及分析

设置计算时间为 40 µs,每 2 µs 输出一个数据结果文件。 计算结束后,利用 LS-DYNA 提供的后处理器 LS-PRE-POST 对之前产生二进制结果文件进行后处理,在 LS-PRE-POST 中导人结果文件 d3plot 可以得到子弹侵彻过程的速度、 加速度、能量曲线以及靶板在高速碰撞下的破坏情况,如图 3 ~5 所示。



图 3 为子弹侵彻靶板的速度曲线,横坐标表示时间,纵 坐标表示速度,从图 3 可以直观地看出整个侵彻过程的持续





时间和速度变化。这里子弹的运动方向为-Z方向。从图3可 知子弹以1300 m/s的速度垂直侵彻靶板后,子弹的剩余速度 速度约为1240 m/s。图4为子弹侵彻靶板的加速度曲线,横 坐标表示时间,纵坐标表示加速度,从图4可知侵彻过程中 最大加速度为1.2×10⁶ m/s²,对应时间约为6 µs,发生在侵 彻开始阶段,此刻的冲击力也达到最大。图5为子弹侵彻靶 板的能量曲线,横坐标表示时间,纵坐标表示系统能量,反 应了整个侵彻过程的能量变化。大约在15 µs 以后整个过程的 能量不再发生变化。



(c) State# 16 (d) State# 20-图 6 不同时间应力云图

图 6 为侵彻过程中选取了 4 个不同时间的 VonMises 应力云 图。图 6 (a) 为第 4 个时间子步的 VonMises 应力云图,对应 时间为 t=5.9906 μs。图 6 (b) 为第 9 个时间子步的 VonMises 应力云图,对应时间为 t=15.984 μs。通过对各个时间子步的 VonMises 应力云图分析可以得到,应力最大的区域为云图中子 弹与靶板直接接触的区域和附近区域,并且应力最大发生在侵 彻开始阶段。侵彻过程的后半段时间应力逐渐减小。对比不同 时间的 VonMises 应力云图,可以看到应力以弹靶接触点为圆 心,从侵彻穿孔的部分向四周扩散并且逐渐减小。

结合 4 个不同时间的 VonMises 应力云图,可以得到靶板 的破坏模式为剪切破坏,在整个侵彻过程中靶板不断吸收高 速子弹的能量,子弹速度在这个能量交换的过程中逐渐减小。 在侵彻过程后期,靶板发生剪切破坏,保持高侵彻速度的子 弹贯穿整个靶板。

在侵彻过程中,子弹速度非常快,子弹在剪切穿甲过程 中与靶板的摩擦过程非常剧烈。由于整个侵彻过程持续的时 间极短,子弹与靶板摩擦产生的热量不容易向四周传递,瞬 间产生的热量也加速了靶板的防护失效。观察侵彻后云图上 靶材的颜色、靶板的破坏形状以及靶板贯穿的周围样貌可知, 靶板在断裂破坏区域发生了一定程度的塑性变形。

3 结论

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对高速子 弹侵彻 6 mm 的靶板进行了数值模拟。借助仿真软件可以直观 地看到高速碰撞的整个过程和弹靶的受力情况。在子弹初速 度为 1 300 m/s 的情况下,靶板被子弹贯穿,贯穿之后子弹剩 余速度约为 1 240 m/s。侵彻过程中最大加速度为 1.2×10⁶ m/s²,此刻对应的冲击力也最大。在子弹与靶板直接接触的 区域发生了断裂,子弹与靶板直接接触的附近区域产生了弹 塑性形变。

采用有限元软件完成高速弹丸对防护复合材料的碰撞和 侵彻过程的数值模拟、仿真与分析。细致地反映了高速弹头 侵彻过程中间参数和物理量的变化,并且其结果直接以图形 方式显示高速碰撞的整个过程。在仿真试验过程中可以调整 改变各种参数进行计算,从而得到各种不同情况下的试验结 果,对比各组试验结果,可以找出各种参数对试验结果的影 响,找到影响试验结果的关键因素,总结出其中的规律,从 而有效地对子弹和防护材料设计进行优化。通过有限元仿真 软件对高速弹头侵彻过程进行数值模拟与之前采用简化理论 模型近似分析的方法相比,在弹靶模型的建立,侵彻过程运 动方程的求解以及计算结果的精度和可靠性方面具有不可替 代的优势。在进行现场试验之前通过采用 ANSYS/LS-DY-NA 有限元仿真软件对子弹侵彻过程分析,得到了大量有价值 的数据,这些数据可以作为现场试验的重要依据,同时有限 元仿真软件得到的结果也是对现场试验的扩展,对现场试验 起着重要的辅助作用,从而有助于更加准确的分析侵彻过程,

也节约了大量试验成本, 缩短了研发周期。

参考文献:

- [1] 许庆新,黄建中,沈荣瀛.装甲材料侵彻试验仿真[J].振动与 冲击,2006,25 (02):117-119,124,189.
- [2] 谷长春,石明全. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰撞过程的数 值模拟 [J].系统仿真学报,2009,21 (15):4621-4624.
- [3] 李 茂,朱 锡,侯海量,等.冲击波和高速破片对固支方板的 联合作用数值模拟[J].中国舰船研究,2015,10(6):60-67.
- [4] 张元豪,陈长海,朱锡. 钢/玻璃钢组合结构对高速弹丸的抗侵彻 特性 [J]. 中国舰船研究,2017,12 (01):93-100.
- [5] Guo Y Z, Li Y L. A Novel Approach to Testing the Dynamic Shear Response of Ti - 6Al - 4V [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 25 (3): 299-311.
- [6] Dey S, Borvik T, Teng X, etal. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44 (20): 6701-6723.
- [7] 刘 兵,陈小伟.平头弹穿透间隙式双层靶的穿甲模式 [J].爆 炸与冲击,2016,36 (01):24-30.
- [8] 王生武,石秀华,王永虎,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的加筋 板入水冲击仿真 [J]. 计算机测量与控制,2010,18 (06):1401-1403.
- [9] 尚晓江,舒建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [10] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYSY/LS-DYNA8. 1 进行 显式动力分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [11] 吴三灵, 李科杰, 张振海, 等. 强冲击试验与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] Dey S, Borvik T, Hopperstad O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30 (8/9): 1005-1038.
- Borvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration [J]. European Journal of Mechanics, A/Solids, 2001, 20 (5): 685-712.
- [14] 谢 恒, 吕振华. 破片侵彻纤维复合材料板的有限元数值模拟 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52 (01): 96-101.

(上接第 111 页)

故障模式的困境,不仅可以真实再现实装操作时某一板卡或部 件功能和故障模式,还能够模拟多部件多故障模式,并进行在 线调试。从系统的角度出发,硬件在环仿真技术允许在系统中 接入实物硬件,也就是可以把实体电路板或部件放在系统中进 行测试,以使得电路板或者部件能在满足系统整体性能指标的 环境中得到检验。由于该系统为虚实结合的系统,故实验结果 比纯数字仿真更接近实际。另一方面,本仿真平台采用开放型 设计,相关电路参数和系统程序可以随时修改,用以满足不同 装甲装备火控系统功能仿真、故障模拟及故障诊断,提高了使 用价值,拓宽了实际用途。

参考文献:

[1] 朱竞夫. 现代坦克系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

- [2] 杨国振,常天庆,张 雷,等.改进模糊层次分析法的火控系统 故障诊断方法 [J].火力与指挥控制,2016,02(2):162-165.
- [3]赵 鹏,常天庆,苏奎峰,等. 基于多 Agent 的坦克火控系统故障诊断方法 [J]. 测控技术, 2010, 29 (4): 31-34.
- [4] 徐宇宝. 基于 LabVIEW 和 Multisim 的虚拟电子实验系统 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2015, 31 (1): 73-75.
- [5] 陈海生, 王 峰, 郭晓云, 等. 一种 LabVIEW 和 Multisim 联合 仿真的方法 [J]. 电气电子教学学报, 2014, 36 (2): 118-120.
- [6] 史睿冰,孟祥会,田鸿源.火控系统仿真试验技术 [J]. 计算机 技术与信息发展,2012,10:73-74.
- [7] 郑书祥,姚 杰.硬件产品故障注入测试研究 [J].工业控制计 算机,2015,05:40-42.
- [8] 苏建刚,等. 自行高炮光电火控半实物仿真系统技术实现途经分析[J]. 火力与指挥控制,2013,38(7):160-163.