

爆炸波对靶板冲击损伤的动力有限元模拟^{*}

侯满义, 范惠林

(空军航空大学航空军械工程系, 长春 130022)

摘要:基于动力有限元方法, 确定炸药、空气和靶板的本构模型和状态方程参数, 建立了爆炸波对四边固支靶板冲击的数值模拟模型, 得到了靶板的凹陷损伤变形形式。爆炸波超压、靶板塑性变形模式以及靶板中心挠度的数值模拟结果与理论计算及相关试验结果吻合较好, 验证了模拟方法和模型参数的准确性。

关键词:爆炸波; 靶板; 冲击损伤; 装备损伤; 动力有限元

中图分类号: O383; TP391.7 **文献标志码:** A

Dynamic Finite-element Simulation on Panel Impact Damage Subjected to Blast

HOU Manyi, FAN Huilin

(Department of Aviation Ordnance Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the dynamic finite element method and defining the parameters of detonator, air and target board, the simulation model of blast impact on the target board with rivet in the border was built. The board deformation was simulated. The simulation results of blast wave overpressure, the board plastic deformation and the camber of the board center are consistent with theoretical analysis and experiments, the simulation method and parameters are proved to be reliable and helpful for researching the equipment structural impact damage caused by blast.

Keywords: blast wave; target board; shock damage; equipment damage; dynamic finite element

0 引言

对于靶板结构的冲击损伤问题, 国内外有着大量的研究^[1]。由于靶板的损伤与冲击加载形式有关, 在高速冲击载荷作用下, 靶板的本构关系变为高度非线性, 所以直接采用理论分析方法就比较困难, 常常需要结合实弹试验进行修正, 这就增加了研究的成本和成果的局限性。近年来, 冲击动力学和有限元理论的快速发展与应用, 使得这类动力分析问题变得更为深入^[2-3]。文中基于 LS-DYNA 显式动力有限元程序, 通过合理选择结构材料模拟参数, 实现了爆炸波对靶板结构的冲击损伤有限元模拟。

1 动力有限元方法原理

动力有限元方法的基本求解思想是把存在动力外载的计算域离散剖分为有限个互不重叠

且相互连接的单元, 在每个单元内, 选择一些合适的节点作为求解函数的插值点, 将微分方程中的变量改写成由各变量的节点值与插值函数组成的线性表达式, 离散求解。然后通过单元应力、应变的积分, 得到整个计算域的以应力、应变和位移等为参数的破坏响应形式^[3]。

LS-DYNA 是一种非线性动力分析有限元程序, 适于求解各种二维和三维非弹性结构的高速碰撞、爆炸和模压等大变形动力响应问题^[4]。

2 爆炸波冲击损伤数值模拟

2.1 模拟算法及模型

文中采用流固耦合算法, 基于 LS-DYNA 程序, 模拟靶板在 TNT 爆炸波作用下的变形行为, 并计算不同 TNT 当量下的爆炸波对不同厚度靶板的冲击损伤结果。

考虑靶板结构和爆炸波的空间对称性, 建立

^{*} 收稿日期: 2008-11-09

作者简介: 侯满义(1979-), 男, 河南商丘人, 讲师, 博士, 研究方向: 航空军械技术研究与应用。

1/4 实体模型(如图 1)。炸药和空气单元采用 ALE 算法^[3];钢板采用八节点六面体 Solid164 单元和 Lagrange 算法,材料的失效采用等效塑性应变准则。Lagrange 材料和 ALE 材料间进行流固耦合。钢板边界固支,对空气设定透射边界。

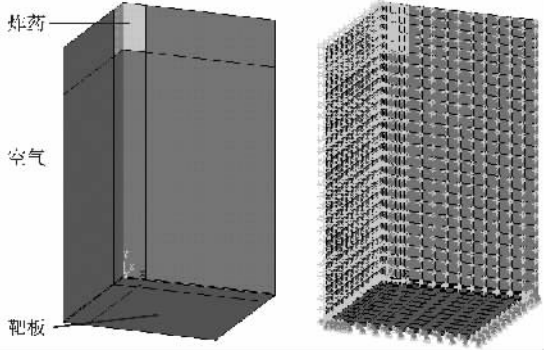


图 1 炸药、空气、靶板的 1/4 实体模型和边界条件
空气和 TNT 材料的状态方程参数设置如下。

1) 空气的状态方程

空气材料采用 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程描述^[3]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

式中, $\mu = \frac{1}{V} - 1$, V 为比容; $C_0 \sim C_6$ 为常系数; E 为内能。对于空气, $C_0 = -1 \times 10^{-6}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$; 密度取 1.293 kg/m^3 。

2) TNT 的状态方程

TNT 炸药全部引爆以后,其爆轰产物的压力根据标准的 JWL 方程描述:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中: E 为单位质量内能, V 为比容, A, B, ω, R_1, R_2 为常数。

对于 TNT 炸药, $A = 371.2 \text{ GPa}$, $B = 3.231 \text{ GPa}$, $\omega = 0.3$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$; 密度取 $1.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 初始质量比内能为 4.19 MJ/kg , 初始爆轰速度为 6.93 km/s ^[2-3]。

3) 靶板的本构模型和状态方程

钢质靶板采用带 Gruneisen 状态方程的 Johnson-cook 本构模型。

描述金属材料动态行为的 Johnson-cook 本构模型定义为^[3]:

$$\begin{cases} \sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n) \cdot (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}) \\ \epsilon^f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) \cdot (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot (1 + D_5 T^*) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A, B, n, c, m, D_1 \sim D_5$ 均为常系数; $\sigma_y, \sigma^*, \epsilon^f, \bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^*$ 为材料的应力应变特性参数; T^* 为同源温度。

描述材料压力 p 与比容 V 关系的 Gruneisen 状态方程定义为:

$$p = \frac{\rho_0 C \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}\right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (4)$$

式中: C, S_1, S_2, S_3, a 和 γ_0 为常系数, $\mu = \frac{1}{V} - 1$, E 为材料内能。

材料本构模型和状态方程参数^[5] 见表 1、表 2。

表 1 靶板的 Johnson-cook 本构模型参数

A/ MPa	B/ MPa	n	C	m	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
792	510	0.26	0.014	1.03	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2 靶板的 Gruneisen 状态方程参数

C	S ₁	S ₂	S ₃	γ ₀	A	E ₀	V ₀
0.4569	1.49	0.0	0.0	2.17	0.46	0.0	1.0

2.2 结果对比

经计算,钢质靶板在小当量炸药爆炸冲击后没有破损,仅出现凹陷塑性变形,如图 2 所示。

为了验证模拟方法和模型参数的正确性,文中根据以上建模过程,针对文献[1]中的试验条件建立了模拟计算模型。采用

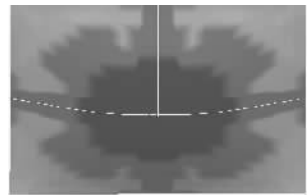


图 2 靶板冲击塑性变形
TNT 裸装炸药,靶板为边长 50cm 的正方形 A3 钢板,厚度分别取 0.1cm 和 0.2cm,四边固支。并将冲击波超压、靶板变形模式及靶板中心挠度的

模拟结果与文献中的理论值和试验值进行了比较。

2.2.1 爆炸波超压峰值对比

空中爆炸冲击波峰值压力的经验公式^[6]为:

当 $0.473 \leq R/\sqrt[3]{w} \leq 7.6$ 时,

$$P_m = 0.658 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^3 + 0.261 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^{1.5} \quad (5)$$

式中: P_m 为爆炸波超压峰值 (MPa); w 为等效 TNT 装药量 (kg); R 为爆心距指定点的距离 (m)。

考察按表 3 中第 4 组试验参数进行的模拟计算结果, 选取靶板中心上面的 No. 7926 空气单元, 冲击波在该单元的超压时程如图 3 所示, 其峰值压力为 22.30 MPa, 根据式 (5) 计算所得的冲击波峰值超压为 21.71 MPa, 两者相近。

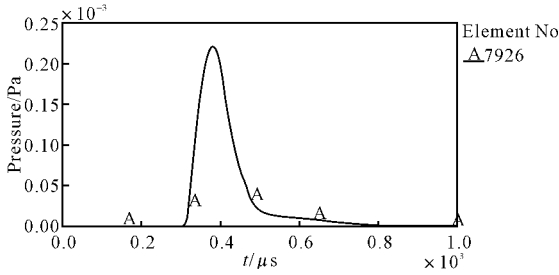


图 3 空气单元 No. 7926 的压力时程

2.2.2 靶板塑性变形对比

在爆炸波超压作用下, 靶板最终产生大的塑性变形, 挠度时程如图 4。最终由图 2 所示的靶板冲击塑性变形结果与文献[1]试验所得结果一致。

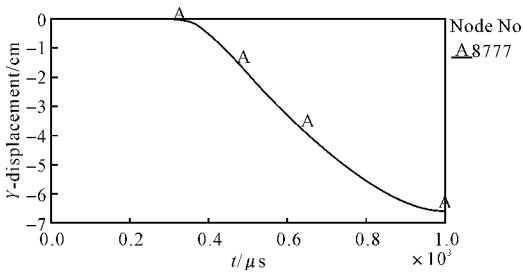


图 4 靶板中心节点的挠度时程

2.2.3 靶板中心挠度对比

表 3 是 4 种试验条件下的数值模拟结果与试验结果及理论计算结果^[1]的比较。可以看出,

数值模拟结果与试验值和理论值有着良好的一致性。

表 3 数值模拟结果和试验值、理论值的比较

序号	板厚 /cm	药量 /g	炸距 /cm	挠度/cm		
				试验值	理论值	模拟值
1	0.1	700	98	7.90	7.63	8.16
2	0.1	700	80	10.20	10.96	11.22
3	0.2	700	47	7.90	8.27	8.81
4	0.2	1078	95	6.90	6.28	6.52

由此可以说明, 文中建立的动力有限元数值模拟方法和参数合理, 模拟结果可靠, 该方法可以用来分析或预测板结构在爆炸波作用下的冲击损伤。

3 结论

通过将有限元模拟结果与理论分析及试验结果的比较, 说明了文中建立的爆炸波冲击四边固支靶板结构的有限元模型、采用的流固耦合计算方法以及空气、炸药和靶板的材料本构及状态参数是可靠的。利用有限元模拟方法, 可以科学地分析或预测装备的板结构受高速冲击的响应特性和损伤机理。

参考文献:

- [1] 王芳, 冯顺山, 俞为民. 爆炸冲击波作用下靶板的塑性大变形响应[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(3): 58-61.
- [2] 梁斌, 陈忠富, 陈小伟. 爆炸载荷对混凝土毁伤效应分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 104-107.
- [3] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] Corporation Livermore Software Technology. LS-DYNA Theoretical Manual[Z]. 1998.
- [5] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 451-456.
- [6] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.