DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0907-06

聚氨酯/钢夹芯结构爆炸载荷下动力学响应的数值模拟*

邹广平,孙杭其,唱忠良,熊海林

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:聚氨酯泡沫具有良好的缓冲和吸能性能,以硬质聚氨酯泡沫作为芯体,钢作为面板的夹芯结构在工程中用途广泛。为了研究聚氨酯/钢夹芯结构在爆炸载荷作用下的抗爆性能,利用 Ansys/Autodyn 非线性有限元程序对聚氨酯/钢夹芯结构在爆炸载荷作用下的动力学响应进行数值模拟分析,并与相同面密度的钢板进行对比。结果表明,加入聚氨酯芯体后,结构的吸收能量为相同面密度钢板的 1.49 倍,整体结构的抗爆性能得到很大的提高。

关键词:固体力学;抗爆性能;Ansys/Autodyn;聚氨酯;夹芯结构

中图分类号:O347.3　　**国标学科代码**:13015　　**文献标志码**:A

聚氨酯泡沫材料是一种密度小、价格低、成形容易的多孔介质,具有很好的吸收动能特性,是一种理想的缓冲吸能材料[1]。硬质聚氨酯泡沫的泡孔以闭孔为主,具有极低的导热系数、较低的密度、一定的强度和硬度,电学性能、隔声抗震效果优良,经过添加剂处理,又能提高阻燃性、耐水性、耐腐蚀性,广泛应用于汽车、建筑、造船等行业。在防护工程设计中,通常用硬质聚氨酯与钢板构成复合结构来抵御武器爆炸的打击,这种钢夹芯结构能够缓和冲击、减弱振荡、降低应力幅值,可以作为舰船的防护结构以提高其生存能力[2]。

本文中应用有限元方法,对聚氨酯泡沫夹芯结构在空气中 TNT 爆炸的动力学响应进行数值模拟,分析聚氨酯泡沫材料在整体结构中起的作用,并与相同面密度的钢板进行对比研究,以验证聚氨酯泡沫夹芯结构良好的抗爆吸能特性。

1　爆炸波在空气中的传播

TNT 在空气中爆炸时,在有限的空间中迅速释放出大量的能量,导致爆炸气体生成物的压力和温度局部上升,使其周围介质受到高温高压爆炸产物的作用。根据爆轰理论,爆炸产物向某一介质中飞散时,在飞散的瞬间,该介质中必然产生冲击波[3-4]。典型的理想气体中爆炸波的传播过程如图 1 所示。

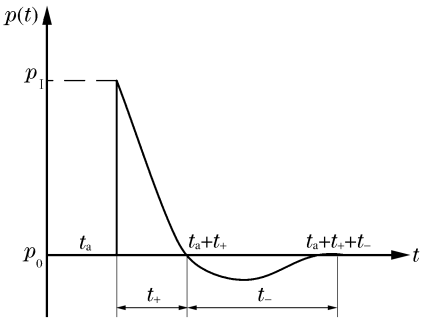

图 1 典型爆炸波在理想气体中的传播

Fig. 1 Typical pressure history for a free air blast wave

在 t_a 时刻,空气中某一点的压强瞬间达到峰值超压 p_I(与大气压 p_0 的差值),经过时间 t_+,压力很快衰减到大气压强 p_0,然后继续减小形成稀疏区,在时刻 $t_a+t_++t_-$ 时,压力回到大气压强。p_I 是峰值超静压[5],理想空气中波的传播规律可由改进后

* **收稿日期**:2013-09-04;**修回日期**:2015-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(11372081)

第一作者:邹广平(1963—　),男,博士,教授,博士生导师;**通讯作者**:唱忠良,lxsy@hrbeu.edu.cn。

的 Friedlander 经验公式描述[6]：

$$p(t)=p_0+p_1\left(1-\frac{t}{t_+}\right)\mathrm{e}^{-a\left(\frac{t}{t_+}\right)} \tag{1}$$

式中：t_+ 是正相持续时间，指数衰减因子 a 是一个与峰值超压值有关的经验常数。

2 数值计算模型

利用 Ansys/Autodyn 非线性有限元计算程序的多物质欧拉求解器来计算 TNT 在空气中的自由爆炸过程。Autodyn 程序采用有限差分以及有限体积法为主的流体数值计算方法，采用人工黏性算法来抹平物理场中的强间断，可以很好地模拟爆炸后压力波的传播规律。

2.1 模型描述

如图 2 所示，采用二维轴对称模型。聚氨酯/钢夹芯结构为直径 200 mm、厚 14 mm 的圆板，其中上下面板的厚度为 2 mm，中间聚氨酯芯体的厚度为 10 mm。炸药 TNT 半径为 10 mm，爆距 $R=100$ mm。将整个模型放到空气环境中去。空气采用 Euler 单元算法，夹芯结构采用 Lagrange 单元算法，采用流固耦合算法将聚氨酯/钢夹芯结构耦合到空气当中去。

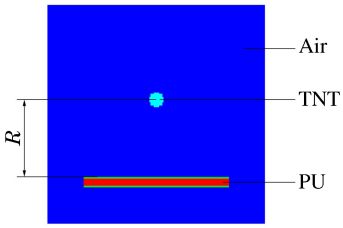

图 2 有限元模型

Fig. 2 FEM model

2.2 材料模型

空气采用理想气体模型，其性能一般采用线性多项式的状态方程来描述，其 Gama 形式为[7]：

$$p=(\gamma-1)\frac{\rho}{\rho_0}E \tag{2}$$

式中：p 为气体压力，γ 是比热比，ρ 表示空气的当前密度，ρ_0 是初始时刻的空气密度，E 为气体单位体积的内能。计算中，指定空气的比内能 $E=206.8$ kJ/kg(一个大气压强)。

对于 TNT 炸药，一般采用 JWL 状态方程来描述炸药爆轰过程中压力和内能及其相对体积的关系[8]：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{3}$$

式中：p 为爆炸产生的压力；V 为单位体积装药产生的爆轰产物的体积，即压力为 p 时的体积与初始体积的比值；E 是爆轰产物的体积内能；A、B、R_1、R_2 均为状态方程参数。

钢(Steel 3430)的本构方程采用 Johnson-Cook 来描述[7]：

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_{\mathrm{ref}}}{T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{ref}}}\right)^{m}\right] \tag{4}$$

式中：σ 为 Von Mises 等效流变应力；屈服极限 $A=792$ MPa；B 为加工硬化模量；n 为硬化系数；应变速率常数 $C=0.014$，热软化常数 $m=1.03$，$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 为等效塑性应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 为应变速率参考值；T_{ref} 为温度参考值；T_{m} 为材料熔化温度。

聚氨酯泡沫材料采用线弹性本构模型和线性状态方程[9]：

$$P=K\mu \tag{5}$$

式中：$\mu=(\rho/\rho_0)-1$，K 是材料的体积模量。

2.3 接触设置

面板与芯体之间采用 Lagrange/Lagrange Interaction 接触。夹芯结构与空气之间采用 Euler/Lagrange interaction 流固耦合接触，这样夹芯结构的整个外表面自动和空气单元接触，空气单元施加压力给夹芯结构单元，可以通过对夹芯结构表面进行积分得到节点力，同时，夹芯结构对于空气的作用相当于施加了流动约束，并且两者之间不考虑摩擦效应，部分覆盖的网格会被自动合并。

2.4 边界条件

为了模拟无限域中聚氨酯/钢夹芯结构的动力学响应，空气 Euler 单元采用 Flow_out 流体边界条件，用来模拟空气自由面，从而达到模拟空气无限大域的目的。夹芯结构 Lagrange 单元采用两端固支边界条件。

3 数值计算结果分析

为了提高计算精度和计算效率，对爆炸波在空气中的传播过程采用一维轴对称模型计算，利用 Autodyn 的 Remapping 功能将一维计算结果映射到二维轴对称模型中去。

3.1 空气中爆炸波的传播过程

某时刻空气中压强分布如图 3 所示。对空气中不同爆距设置观测点，得到其压力时程如图 4 所示。

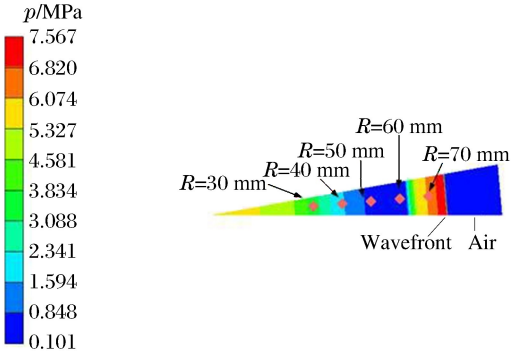

图 3 波在空气中的传播

Fig. 3 Pressure in air

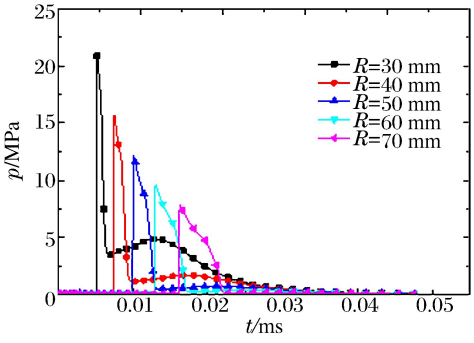

图 4 不同爆距压力时程图

Fig. 4 Pressure history of different points

为了说明空气中爆炸波传播的数值模拟精度，将计算结果与 Henrych(1979)给出的空气中冲击波峰值超压计算经验公式[10]对比：

$$p_1=\begin{cases}\dfrac{1.407\ 2}{Z}+\dfrac{0.554}{Z^2}-\dfrac{0.035\ 7}{Z^3}+\dfrac{0.000\ 625}{Z^4} & 0.05\leqslant Z<0.3\\ \dfrac{0.619}{Z}-\dfrac{0.033}{Z^2}+\dfrac{0.213}{Z^3} & 0.3\leqslant Z<1.0\\ \dfrac{0.066}{Z}+\dfrac{0.405}{Z^2}+\dfrac{0.329}{Z^3} & 1.0\leqslant Z<10\end{cases} \tag{6}$$

式中：p_1为冲击波峰值超压，$Z=R\cdot W^{-1/3}$为比例距离，R 为测点与爆心之间的距离，W 为 TNT 药量。图 5 是数值计算结果与经验公式的比较。可以看出，数值模拟与经验公式结果比较一致，当爆距较小时，Z 值太小会引起经验公式计算结果偏差较大。

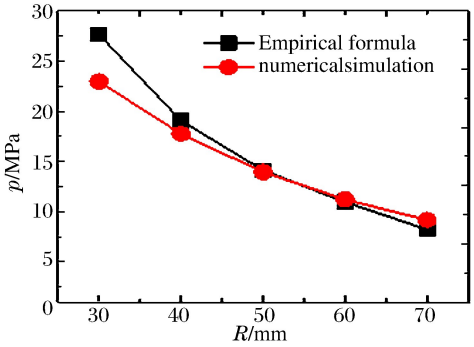

图 5 数值模拟与经验公式比较

Fig. 5 Comparison between simulation and empirical formula

3.2 夹芯结构动力学响应分析

当空气中的爆炸波达到夹芯结构，引起夹芯结构的动态响应过程。图 6 是不同时刻前后面板的 Mises 应力云图。

图 7 是前后面板离中心点不同距离的竖向速度时程图。当爆炸波传递到夹芯结构上面板后，上面板的最大速度在 0.38 ms 时刻为 15.4 m/s，下面板的最大速度出现在 0.32 ms，为 15.0 m/s，前后板的最大速度很接近。从图中可以看出，前后面板不同点的速度呈震荡规律变化，其原因是因为夹芯层聚氨

酯起的缓冲作用。通过压力波的传递，聚氨酯将前面板的能量传递到后面板，从而使前面板的速度减小，后面板的速度增大，反之亦然。压力波在夹芯结构之间反复传递，可以看出聚氨酯泡沫层很好的缓冲作用，对保护结构起很大的作用。

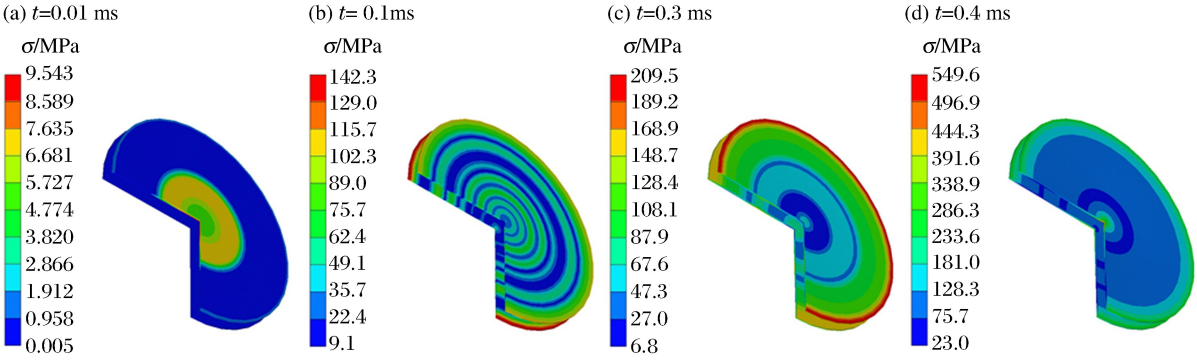

图 6 前后面板不同时刻 Mises 应力

Fig. 6 Mises stress at different time of the front and back shell

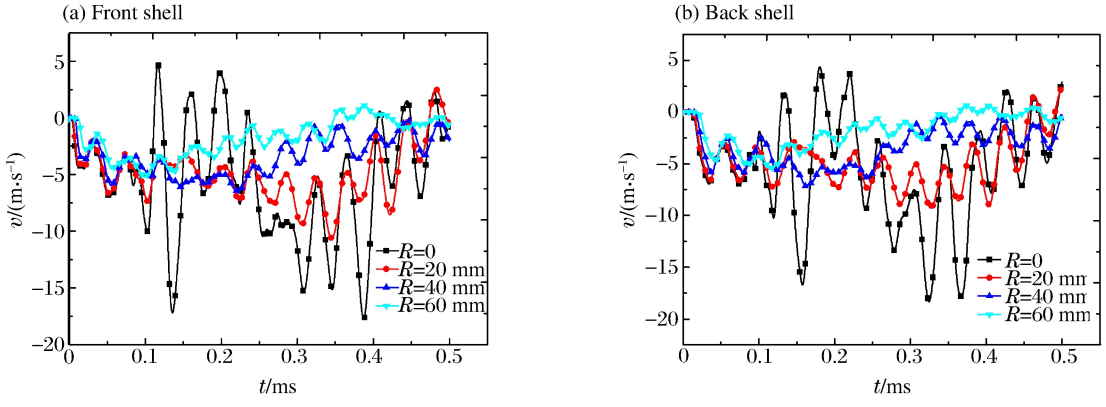

图 7 前后面板不同点速度时程图

Fig. 7 Velocity histories of different points of front shell and back shell

图 8 是前后面板中心点的加速度时程图。从图中看出，前面板加速度幅值逐渐增大到 1 897 m/s²，后面板的加速度幅值逐渐增大到 1 568 m/s²，并且前面板的加速度幅值大于后面板加速度的幅值。随后加速度幅值均减小，0.3 ms 时前后面板的加速度幅值均达到最小，随后，前后面板中心点加速度幅值逐渐增大，而且后面板的幅值略大于前面板的幅值。

对前后面板离中心点不同距离的挠度进行分析，如图 9 所示。后面板靠近中心点范围内的挠度值大于前面板。例如，前后面板距离中心点 20 mm 处的挠度分别为 2.1、2.6 mm，远离中心点的挠度大致相同。值得指出的是，在 0.2～0.28 ms 内，板上最大挠度并没有发生在中心点。

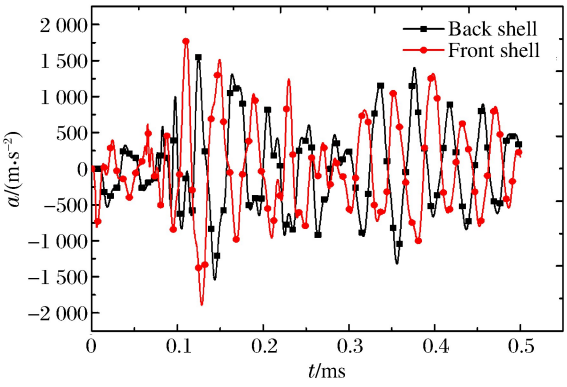

图 8 夹芯结构中心点加速度

Fig. 8 Acceleration histories of center points of the sandwich structure

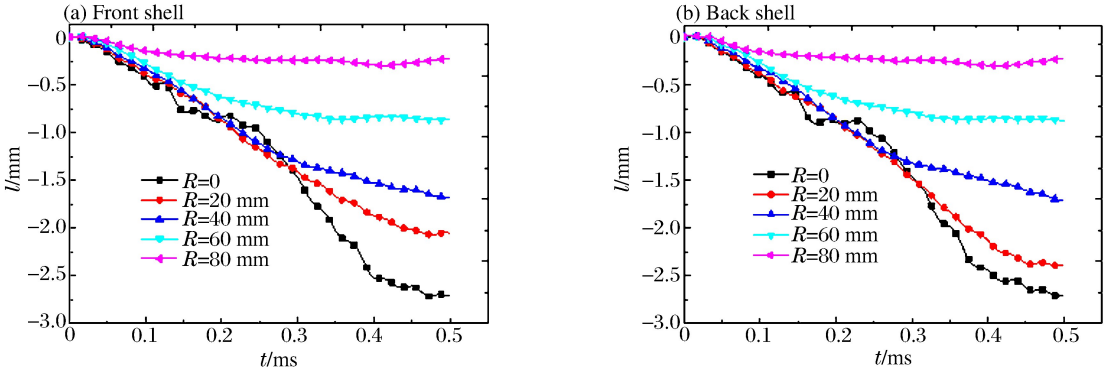

图 9 夹芯结构前后面板不同点位移变化曲线

Fig. 9 Displacement of plates at different points on the front and back shell of the sandwich structure

3.3 夹芯结构吸能特性分析

作为泡沫材料，聚氨酯具有很好的吸能特性。图 10 是不同材料在爆炸过程中吸能对比曲线。对聚氨酯夹芯结构分析，聚氨酯泡沫芯体吸收的能量为 31 J，前后面板吸收的能量为 73 J。在结构中，聚氨酯芯体质量所占的比重为 27%，吸收的能量占夹芯结构吸收总能量的 30%。这表明作为泡沫材料，聚氨酯具有较高的吸能效率。将夹芯结构与相同面密度的 5.6 mm 钢板进行比较分析可知，相同面密度的钢板吸收的能量为 70 J，加入聚氨酯泡沫芯体后，夹芯结构的吸收能量为相同面密度钢板的 1.49 倍，大大提高了结构的吸能能力。

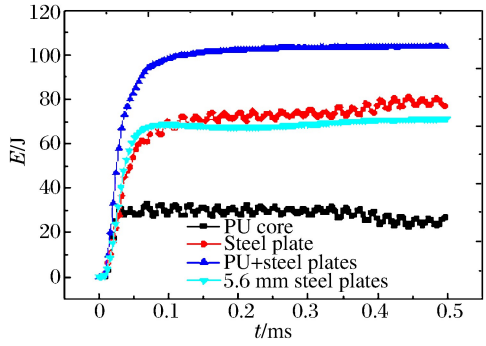

图 10 不同材料吸收的能量

Fig. 10 Energy absorbed by the materials

4 结 论

利用 Ansys/Autodyn 非线性有限元程序对聚氨酯/钢夹芯结构在 TNT 空气爆炸后的动力学响应进行了研究。数值结果并结合经验公式表明：

(1)用 Autodyn 模拟 TNT 在空气中爆炸后波的传播规律精度很高，说明本文数值模拟结果可信。

(2)在爆炸载荷作用下，前后面板的竖向速度成震荡规律变化，主要是由于聚氨酯泡沫芯体起的缓冲作用。前后面板中心点加速度幅值先增大后减小，然后又增大。并且在 0.3 ms 前，前面板中心点的加速度幅值略大于后面板的中心点加速度幅值，在 0.3 ms 后，后面板中心点的加速度幅值略大于前面板中心点的加速度幅值。

(3)在吸收能量方面，质量占 27%的聚氨酯芯体吸收的能量占夹芯结构整体结构的 30%，聚氨酯泡沫具有较高的吸能效率。与相同面密度的钢板比较可得，加入聚氨酯芯体后，结构的吸收能量为相同面密度钢板的 1.49 倍。说明聚氨酯/钢夹芯结构具有良好的吸能性能，可以设计成不同的结构形式以获得良好的抗爆性能。

参考文献：

[1] 胡时胜，刘剑飞. 硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性评估[J]. 爆炸与冲击，1998，18(1)：42-47.
Hu Shi-sheng, Liu Jian-fei. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of rigid polyurethane foam [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(1): 42-47.

[2] 黄超，姚熊亮，张阿漫. 钢夹层板近场水下爆炸抗爆分析及其在舰船抗爆防护中的应用[J]. 振动与冲击，2010，29(9)：73-76.

Huang Chao, Yao Xiong-liang, Zhang A-man. Near field of underwater explosions anti-explosion analysis of steel sandwich panel and its application in ship anti-explosion protection ship[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9):73-76.

[3] Baker W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1973.

[4] 李翼祺,马素贞.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992:217-230.

[5] Ngo T, Mendis P, Gupta A, et al. Blast loading and blast effects on structures—an overview[J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2007,7:76-91.

[6] Baker W E, Cox P A, Kulesz J J, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Access Online via Elsevier, 1983.

[7] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

[8] Dobratz B M. LLNL explosives handbook: Properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants [R]. Lawrence Livermore National Lab, CA (USA), 1981.

[9] Toqueboeuf W, Mortaigne B, Cottenot C. Dynamic behaviour of polycarbonate/polyurethane multi-layer for transparent armor[J]. Le Journal de Physique IV, 1997,7(C3):499-504.

[10] Henrych J, Major R. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier scientific publishing company, 1979.

Numerical simulation on dynamic response of polyurethane/steel sandwich structure under blast loading

Zou Guang-ping, Sun Hang-qi, Chang Zhong-liang, Xiong Hai-lin

(*College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: As polyurethane foam has a good cushioning and energy absorption performance, the sandwich structure with polyurethane foam as core and the steel as the shell plate has been widely used in engineering application. In this paper, in order to study the anti-explosion performance of the sandwich structure, the numerical simulation by Ansys/Autodyn nonlinear finite element code is adopted to analyze the energy absorption properties of the sandwich structure under blast loading and compared with that of the steel plate that has the same area density. The results show that, with the polyurethane foam as core body, the energy sandwich structure absorbed is 1.49 times that of the steel plate with the same area density, and the anti-explosion performance of the overall structure is greatly improved.

Key words: solid mechanics; anti-explosion performance; Ansys/Autodyn; polyurethane; sandwich structure

(责任编辑　曾月蓉)