

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.05.012

聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能^{*}

王小伟¹,何金迎¹,祖旭东²,王丹勇¹,甄建军¹,陈强¹,胡文阁¹,翟文¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要:应用 LS-DYNA 有限元软件,对聚脲弹性体复合夹层结构在 0.5 kg 炸药 (TNT) 爆炸载荷作用下的动态响应过程进行数值模拟。研究了复合夹层结构厚度和质量固定条件下聚脲弹性体夹层厚度对复合夹层结构抗爆性能的影响。分析了不同聚脲弹性体夹层厚度对复合夹层结构变形的影响,并分析了聚脲弹性体夹层的吸波和吸能特性。结果表明,在爆炸载荷作用下,当复合夹层结构总厚度固定时,随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,复合夹层结构的抗爆性能先增大后减小,当钢板与聚脲弹性体夹层厚度比为 1.4 : 1.2 : 1.4 时,变形的整体性最好,其抗爆的潜力最大,其冲击波衰减率最大为 85.6%,能量吸收效果也最好,其综合抗爆能力较好;在质量固定条件下,随着聚脲弹性体夹层厚度的增加,其抗爆能力先增大后减小,当钢板与聚脲弹性体夹层厚度比为 0.903 : 3.5 : 0.903 时,其变形和能量吸收效果最好,冲击波衰减率最大为 81.87%,其综合抗爆能力较好。

关键词:聚脲弹性体;夹层结构;变形;数值模拟;冲击波衰减;吸能

中图分类号: O383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)05-0063-06

Antidetonation Properties on Composite Sandwich Structure with Polyurea Elastomer

Wang Xiaowei¹, He Jinying¹, Zu Xudong², Wang Danyong¹, Zhen Jianjun¹, Chen Qiang¹, Hu Wenge¹, Zhai Wen¹

(1. Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract : The dynamic response process of polyurea elastomer composite sandwich structure under 0.5 kg TNT explosion load was simulated by LS-DYNA finite element software. The effects of polyurea elastomer interlayer thickness on the anti-blast performance of composite sandwich structure under thickness and weight fixed conditions was studied. The influences of different interlayer thickness on the deformation of the composite sandwich structure were analyzed, and the wave absorbing and energy absorbing properties of the polyurea elastomer sandwich were also analyzed. The results show that, the anti-blast performance of the composite sandwich structure under the condition of explosion load is increased first and then decreased with the decreases of the polyurea elastomer interlayer thickness. When the steel plate and polyurea elasticity body interlayer thickness ratio is 1.4 : 1.2 : 1.4, the deformation of the structure is the best, the shock wave attenuation is 85.6%, the energy absorption is also the best, the comprehensive anti-explosive ability is better. In the limit of weight condition, the anti-blast ability increases and then decreases with the increase of the thickness of the polyurea elastomer interlayer. When the steel plate and polyurea elasticity body interlayer thickness ratio is 0.903 : 3.5 : 0.903, the deformation and energy absorption are the best, the shock wave attenuation is up to 81.87%, the comprehensive anti-explosive ability is better.

Keywords : polyurea elastomer ; sandwich structure ; deformation ; numerical simulation ; shock wave attenuation ; energy absorbing

无论在军事领域还是民用领域,爆炸冲击防护都极为重要。由单一材料制成的实体防爆结构虽然能够满足防爆要求,但通常会使得防护装置异常笨重,影响机动性能,尤其是需要移动的防护装置,如警用防爆罐、舰船、特种汽车等。尤其是近年来,国内外的安保形势对开发新型轻质抗爆结构提出了更高要求。

聚脲弹性体具有成本低、质量轻、吸收冲击能

量多等优点,对有效提高结构的抗爆性能具有显著的应用价值,吸引了国内外众多学者对其抗爆性能进行研究。Xue Liang 等^[1]对弹体侵彻过程中的能量耗散进行了数值模拟,发现当聚脲弹性体作为背

^{*} 山东省自然科学基金项目 (ZR2015EM023)

联系人: 翟文, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高效抗冲击与功能防护材料的研究

收稿日期: 2017-02-24

板时能够消耗弹体大量的动能。G. J. McShane 等^[2]研究发现,在军车底部喷涂聚脲弹性体可以有效地减小地雷爆炸或榴霰弹对内部乘员的伤害。S. S. Sarva 等^[3]研究了同种聚脲弹性体材料不同应变率下的压缩应力应变行为,发现聚脲弹性体具有高的应变率敏感性。S. A. Tekalur 等^[4]研究了聚脲弹性体和玻璃纤维制备的复合材料的抗爆性能,结果发现,复合材料能够更有效地抵御冲击波的冲击。甘云丹等^[5]数值模拟了聚脲弹性体涂覆钢板在水下爆炸载荷作用下的动态响应及抗爆能力,验证了聚脲弹性体对钢板抗爆性能的增强作用。N. Gardner 等^[6]对聚脲弹性体夹层复合材料的动态行为进行了研究,结果发现,其可以减小面板的变形。M. Grujicic 等^[7]提出了在高应变率加载条件下的聚脲弹性体具有良好的力学性能,将其涂覆在钢板结构上在爆炸冲击作用下可以明显提高其变形能力和吸能特性。把聚脲弹性体夹层作为头盔的吸能材料,以冲击波的超压峰值作为评估聚脲弹性体衰减冲击波能力,实验表明,聚脲弹性体衰减冲击波的效果较好^[8]。C. M. Roland 等^[9]研究发现,聚脲弹性体的存在对钢板的冲击变形有显著的影响。宋彬等^[10]通过仿真技术对聚脲弹性体夹芯防爆罐的抗爆性能进行了研究,结果发现,其具有良好的抵抗变形和吸收能量的特点。为了进一步提高结构的抗爆性能,设计不同限制条件下更加可靠的结构形式,为社会公共安全提供有效的防护器材和设施,笔者在复合夹层结构厚度和质量限制条件下,研究了聚脲弹性体厚度对复合夹层结构抗爆性能的影响,以获得聚脲复合夹层结构最佳结构参数。

1 理论分析

冲击波在介质中传播时产生具有一定应力峰值的应力波,它是以应力波的形式在介质中传播的,应力波在介质中的传播特性与介质的波阻抗参数有关,当介质分界面处是两种不同波阻抗的介质时,应力波就会发生透射和反射,但传入到另一种介质中的只有透射波,因此可用透射波公式来计算应力峰值。假设钢板厚度与聚脲弹性体的相同,在上面钢板的透射波应力峰值设为 σ_{T1} ,进入到聚脲弹性体夹层中的透射波应力峰值设为 σ_{T2} ,当应力波从上面钢板透射进入聚脲弹性体夹层中时,是从波阻抗大的介质传入波阻抗小的介质中的,根据不同介质界面的连续条件可知,聚脲弹性体中的透射波应力峰值为^[11]:

$$\sigma_{T2} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \sigma_{T1} \quad (1)$$

式中: σ_{T2} ——聚脲弹性体中的透射波应力峰值;

σ_{T1} ——上面钢板中的透射波应力峰值;

ρ_1 ——上面钢板的密度;

c_1 ——上面钢板中的弹性波速;

ρ_2 ——聚脲弹性体的密度;

c_2 ——聚脲弹性体中的弹性波速。

钢的密度 $\rho_1 = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 钢中的弹性波速 $c_1 = 5 \times 10^3 \text{ m/s}$, 聚脲弹性体的密度 $\rho_2 = 1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 聚脲弹性体中的弹性波速 $c_2 = 474.9 \text{ m/s}$ 。因此得:

$$\sigma_{T2} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \sigma_{T1} = 0.0245 \sigma_{T1} \quad (2)$$

应力波从聚脲弹性体中传播后进入聚脲弹性体与底面钢板的界面处,此时应力波在界面处产生透射波,透射波进入钢板时的应力峰值设为 σ_{T3} ,此时应力波从波阻抗小的介质传入波阻抗大的介质中,同样根据不同介质界面的连续条件可以得出底面钢板中的透射波应力峰值 σ_{T3} 为:

$$\sigma_{T3} = \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_{T2} = 0.0484 \sigma_{T1} \quad (3)$$

由此可知,由于聚脲弹性体的存在,使得应力波经过钢板-聚脲弹性体-钢板夹层结构后,其应力波峰值减小为 0.0484 倍,说明钢板-聚脲弹性体-钢板复合减振层能有效地减小冲击波的应力峰值,从而更好地提高了复合夹层结构的抗爆性能。经理论计算,当聚脲弹性体作为夹层材料时,应力波强度峰值的应力可以减小为 0.0484 倍,因此聚脲弹性体夹层抗爆性能较好。

2 数值计算模型

利用 ANSYS 前处理软件对不同的聚脲弹性体复合夹层结构进行建模,为模拟复合夹层结构在爆炸作用下的真实情况,设定周围的介质为空气。在数值模拟时,考虑到复合夹层结构为对称结构,为了计算方便,利用问题的对称性采用 1/4 模型建模,在对称面上施加对称约束。炸药采用点起爆方式,网格划分时钢板和聚脲弹性体模型采用 Lagrange 网格,空气和炸药模型采用 Euler 网格,两种网格通过 ALE 方法耦合,钢板与聚脲弹性体之间采用共节点法建模。

2.1 材料模型及参数

(1) 炸药的模型及状态方程。

炸药类型为 TNT,采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 本构模型,与该本构模型匹配的状态方程为 E OS_JWL^[12],本模拟中炸药状态方程的相关参数见表 1。

表 1 TNT 炸药状态方程的相关参数^[13]

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	V_0
371	3.23	4.15	0.95	0.3	7×10^9	1

注: A, B, R_1, R_2, ω 为 JWL 状态方程参数,由实验确定; E_0 为初始内能; V_0 为初始相对体积。

(2) 聚脲弹性体模型及参数。

根据聚脲弹性体的力学性能,选择合适的模型来模拟其力学性能,需要符合以下几个方面:

①模型需要适当的屈服准则来模拟材料断裂问题;

②模型应该含有弹性、塑性阶段来模拟聚脲弹性体的变形特性;

③由于在爆炸环境中,模型必须考虑材料应变率效应。

在 LS-DYNA 材料库中,选用 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型模拟聚脲弹性体的力学性能,该模型常用来模拟弹塑性材料,材料的屈服准则由断裂应变定义,材料的应力应变曲线由屈服强度、剪切模量定义或者通过 8 组塑性应变和应力的数组定义,应变率的影响采用 Cowper-Symbols 模型,聚脲弹性体的参数见表 2。

表 2 聚脲弹性体的参数^[5]

E/MPa	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	ν	σ_Y/MPa	E_t/MPa	σ_0/MPa
230	1.02	0.4	1.38	3.50	13.8

注: E 为弹性模量, ρ 为密度, ν 为泊松比, σ_Y 为动态屈服应力, E_t 为塑性硬化模量, σ_0 为静态屈服应力。

(3) 钢板模型及参数。

钢板选用 A3 钢,采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 本构模型,强化方式为随动强化,通过 Cowper-Symonds 模型考虑材料的应变率效应, A3 钢板的参数见表 3。

表 3 A3 钢板参数^[14]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_Y/MPa	E_t/GPa	C/s^{-1}	P
7.85	210	0.3	240	2	105	5

注: ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_Y 为动态屈服应力, E_t 为塑性硬化模量, C, P 为应变率参数。

2.2 数值计算方案

在固定复合夹层结构总厚度 (4 cm, 上面、下面钢板厚度相同,) 或固定总质量 (158.78 kg) 条件下, 对钢板和聚脲弹性体夹层不同厚度比的情况进行了仿真计算。

建模时, 复合夹层结构为半径 54 cm 的圆

形结构, 药柱尺寸为 $\varnothing 12 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$, 装药量均为 0.5 kg, 爆炸源置于复合夹层结构中心正上方 20 cm 处, 起爆点设置为药柱上表面中心处。图 1 为简易仿真示意图。

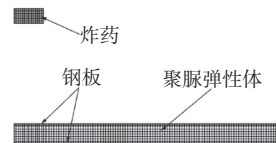


图 1 仿真示意图

3 结果分析

根据数值计算得到的数据对复合夹层结构的破坏情况进行分析, 研究钢板与聚脲弹性体的不同厚度比对复合夹层结构抗爆性能的影响。

3.1 在固定复合夹层结构总厚度条件下聚脲弹性体夹层厚度对复合夹层结构抗爆性能影响

首先对五种不同夹层厚度的模型进行仿真计算, 五种模型中聚脲弹性体夹层的厚度分别为 2.0, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8 cm, 因为复合夹层结构的总厚度固定为 4 cm, 所以单个钢板的厚度依次为 1.0, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 cm, 对比相同爆炸载荷下五种不同复合夹层结构的变形情况。因为被保护的人员或设备位于炸药的另一侧, 因而把底面钢板的变形作为考量复合夹层结构变形大小和破坏程度的主要因素。

通过仿真后处理软件得到五种复合夹层结构底面板的最大位移节点, 取节点的位移作为底面钢板变形的度量。得到五种复合夹层结构最大的轴向变形量以及结构的径向变形量, 变形主要集中在炸药正下方的圆形区域内, 变形较大但都未被破坏。在爆炸能量一定时, 复合夹层结构整体承受爆炸冲击要比局部承受爆炸冲击更不容易破坏, 因此结构变形时希望结构的径向变形要大, 轴向变形要小。结构的最大轴向变形量设为 h , 径向变形半径设为 r , 假设比例系数 $k=r/h$, 用 k 衡量结构变形的整体性, k 越大, 变形方式越趋于整体化, 可以抑制钢板由局部屈服流动失稳进而发展成局部破坏的状况^[5]。底面钢板的变形情况见表 4。

由表 4 可以看出, 当复合夹层结构厚度固定时,

表 4 五种复合夹层结构的变形情况

聚脲弹性体夹层厚度/cm	总质量/kg	h/cm	r/cm	k
2.0	158.78	1.87	33.14	17.72
1.4	194.37	1.36	35.75	26.28
1.2	207.35	1.18	44.69	37.87
1.0	219.49	1.05	35.47	33.78
0.8	231.63	1.02	33.82	33.15

随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,底面板的最大轴向变形量呈逐渐减小的趋势,且聚脲弹性体夹层厚度为 1.2, 1.0, 0.8 cm 时,其轴向变形量相差很小。因为聚脲弹性体夹层越薄,钢板越厚,而钢板的密度约为聚脲弹性体密度的 7.67 倍,因此其质量也迅速增大,而质量越大其轴向变形越困难。底面板的最大径向变形量呈先增大后减小的趋势,其结构变形的整体性也是先变好再变坏,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm 时,底面板的最大径向变形范围最大,变形的整体性最好,其抗爆的潜力最大。综合各个因素,单从变形情况来看,复合夹层结构总厚度固定时,随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,抗爆能力先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm 时,其抗爆性能最好。

冲击波在介质中传播时产生具有一定应力峰值的应力波,以应力波的形式在介质中传播。复合夹层结构中间部位因为距离炸药最近,因而应力也最大。在中间部位上面钢板的上表面和底面钢板的下表面各取一个单元作为特征单元,分别在五种复合夹层结构中提取两个单元,得到最大应力峰值 $\sigma_{\max}$ 以及应力波衰减率,结果见表 5。

表 5 五种复合夹层结构的上面、底面钢板的应力峰值

聚脲弹性体 夹层厚度 / cm	$\sigma_{1\max}$ / MPa	$\sigma_{2\max}$ / MPa	应力波 衰减率 / %
2.0	441.35	235.58	42.09
1.4	473.25	220.00	53.51
1.2	511.00	73.20	85.60
1.0	305.80	69.50	77.27
0.8	540.90	139.30	74.24

注: $\sigma_{1\max}$, $\sigma_{2\max}$ 分别为上面、底面钢板的应力峰值。

由表 5 可知,应力波在经过复合夹层结构后都发生了较大的衰减,从而得出聚脲弹性体复合夹层结构具有较好的吸波和减小应力峰值的特性。聚脲弹性体夹层厚度从 2.0 cm 减小到 0.8 cm 时,衰减程度先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm 时,衰减程度最大,为 85.60%,达到很好的衰减效果。通过对五种复合夹层结构上面、底面钢板应力峰值的比较可知,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm 时,可最有效地减小冲击波的应力峰值,从而更好地提高复合夹层结构的抗爆性能。

炸药爆炸产生的能量除了以声、光、热等形式消耗外,还有一部分被复合夹层结构吸收掉,最终转化为复合夹层结构的内能。不同复合夹层结构的吸能有所不同,表 6 给出了五种复合夹层结构上面、底面钢板和聚脲弹性体夹层吸收的内能,以及聚脲弹

性体夹层的内能吸收率。

表 6 五种复合夹层结构的内能吸收情况

聚脲弹性体 厚度 / cm	J_1 / kJ	J_2 / kJ	J_e / kJ	聚脲弹性体夹层 内能吸收率 / %
2.0	5.56	6.25	16.23	57.88
1.4	5.15	5.18	11.23	52.08
1.2	4.7	5.24	10.47	51.29
1.0	4.36	4.69	9.18	50.35
0.8	4.92	4.31	8.04	46.55

注: J_1 , J_2 和 J_e 分别代表上面、底面钢板及聚脲弹性体夹层吸收的内能。

从表 6 可以看出,聚脲弹性体夹层吸收的内能均高于上面、底面钢板吸收的内能,说明其具有较好的吸能特性。随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,其吸收的内能也越来越小,而上面、底面钢板吸收的内能总体也呈现减小的趋势。因此整个复合夹层结构吸收的内能总量逐渐减小。随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,其内能吸收率也逐渐减少,但只在一个较小范围内变化。相反,单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率随着聚脲弹性体夹层厚度的减小越来越大,如图 2 所示,说明聚脲弹性体夹层越薄,其内能吸收效率越好,越能充分发挥聚脲弹性体的吸能特性。同时考虑聚脲弹性体夹层的内能吸收率和吸收效率,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm 时,其吸能效果最佳。

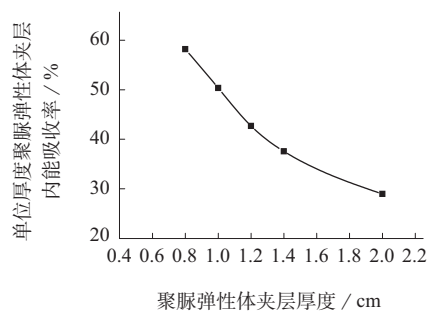


图 2 单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率与聚脲弹性体夹层厚度的关系

综合考虑复合夹层结构变形的整体性、冲击波衰减及能量吸收情况,在厚度固定条件下,随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,复合夹层结构的抗爆性能先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm,即钢板与聚脲弹性体夹层厚度比为 1.4 : 1.2 : 1.4 时,复合夹层结构的抗爆性能较好。

3.2 在固定复合夹层结构总质量条件下聚脲弹性体厚度对复合夹层结构抗爆性能的影响

在固定总质量为 158.78 kg 条件下,对五种不同的复合夹层结构模型进行仿真计算,五种模型中

聚脲弹性体的厚度分别为 0.5, 2.0, 3.5, 5.0, 6.5 cm, 因为总质量固定, 单个钢板的厚度依次为 1.097, 1.000, 0.903, 0.806, 0.709 cm。对比相同爆炸载荷下五种不同复合夹层结构的变形情况。同样把底面钢板的变形作为考量复合夹层结构变形大小和破坏程度的主要因素。

以五种复合夹层结构底面钢板的最大位移节点的位移作为底面钢板变形的度量, 考察五种复合夹层结构底面钢板的变形情况, 结果见表 7。

表 7 五种复合夹层结构的变形情况

聚脲弹性体 厚度/cm	复合夹层结构 总厚度/cm	底面钢板最大 轴向变形量/cm	底面钢板变 形率/%
0.5	2.694	1.71	63.5
2.0	4.000	1.87	46.7
3.5	5.306	1.83	34.5
5.0	6.612	1.80	27.2
6.5	7.918	1.79	22.6

由表 7 可以看出, 随着聚脲弹性体夹层厚度的增加, 底面钢板的最大轴向变形量最初增大, 当聚脲弹性体夹层厚度超过一定值时, 最大轴向变形量又逐渐减小。这是因为冲击波在聚脲弹性体中传播的时间变长, 其衰减作用加强, 作用在底面钢板的力就越小, 因此其底面钢板最大轴向变形量越来越小。其变形率随着聚脲弹性体夹层厚度的增加逐渐减小, 说明复合夹层结构越厚, 其变形越困难, 当聚脲弹性体夹层厚度超过 3.5 cm 时, 底面钢板的最大轴向变形量已经相差很小, 其厚度对于复合夹层结构的变形影响已不明显, 但厚度过大势必使结构占用太大空间, 不能过度追求低变形量而忽略其体积影响。因此认为聚脲弹性体夹层厚度为 3.5 cm 时, 复合夹层结构的抗爆效果最好。

在中间部位上面钢板的上表面和底面钢板的下表面各取一个单元作为特征单元, 分别在五种复合夹层结构中提取两个单元, 得到最大应力峰值 $\sigma_{\max}$ 以及应力波衰减率, 结果见表 8。

表 8 五种复合夹层结构的上面、底面钢板的应力峰值

聚脲弹性体 夹层厚度/cm	$\sigma_{1\max}$ / MPa	$\sigma_{2\max}$ / MPa	应力波 衰减率/%
0.5	289.10	233.00	19.40
2.0	441.35	255.58	42.09
3.5	326.50	59.18	81.87
5.0	284.80	72.42	74.50
6.5	276.60	76.89	72.20

注: $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{2\max}$ 分别为上面、底面钢板的应力峰值。

由表 8 可以看出, 冲击波在经过复合夹层结构时也有不同程度的衰减。随着聚脲弹性体夹层厚度的增加, 衰减率先增加再减小, 当聚脲弹性体夹层厚

度为 3.5 cm 时, 衰减率最大, 达到 81.87%, 而且底面钢板的应力峰值也最低 (59.18 MPa)。当聚脲弹性体夹层厚度达到 5 cm 和 6.5 cm 时, 底面板的应力峰值也很低, 衰减效果也很大, 说明增加聚脲弹性体夹层厚度可以明显降低冲击波的威力。

图 3 为单位厚度聚脲弹性体夹层冲击波衰减率与聚脲弹性体夹层厚度的关系。

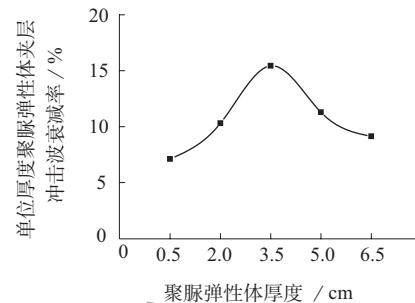


图 3 单位厚度聚脲弹性体夹层衰减冲击波百分比与聚脲弹性体夹层厚度的关系

由图 3 可直观看出, 单位厚度聚脲弹性体冲击波衰减率随聚脲弹性体厚度的增加先增大后减小, 当聚脲弹性体厚度为 3.5 cm 时, 复合夹层结构冲击波的衰减率最大。因此从冲击波衰减效果来看, 当聚脲弹性体厚度为 3.5 cm 时, 复合夹层结构的抗爆效果最好, 可发挥较好的消波作用。

表 9 给出了质量固定条件下复合夹层结构上面、底面钢板及聚脲弹性体夹层吸收的内能, 以及聚脲弹性体夹层内能吸收率。

表 9 五种复合夹层结构的内能吸收情况

聚脲弹性体 厚度/cm	J_1 / kJ	J_2 / kJ	J_e / kJ	聚脲弹性体夹层 内能吸收率/%
0.5	32.95	31.56	7.81	10.79
2	5.56	6.25	16.23	57.88
3.5	4.14	4.84	21.17	70.21
5	4.49	3.11	28.66	79.04
6.5	4.98	2.07	32.78	82.3

注: J_1 、 J_2 和 J_e 分别代表上面、底面钢板及聚脲弹性体夹层吸收的内能。

由表 9 可以看出, 聚脲弹性体厚度越大, 其吸收的内能越多, 而钢板吸收的内能也越少, 内能吸收率也越大。

单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率与聚脲弹性体夹层厚度的关系如图 4 所示。

由图 4 可知, 单位厚度聚脲弹性体夹层的内能吸收率随着聚脲弹性体夹层厚度的增加先增大后减小, 当聚脲弹性体夹层厚度低于 3.5 cm 时, 单位厚度聚脲弹性体夹层吸收的内能较多, 其能量吸收效

率高。综合考虑聚脲弹性体夹层内能吸收率和单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率两方面因素,认为当聚脲弹性体夹层厚度为 3.5 cm 时,内能吸收效果最好。

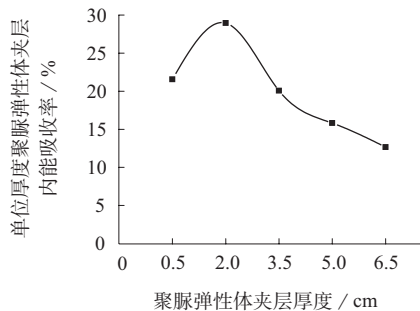


图4 单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率与聚脲弹性体夹层厚度的关系

综合考虑复合夹层结构变形、冲击波衰减及能量吸收情况,在质量固定条件下,随着聚脲弹性体夹层厚度的增加,复合夹层结构的抗爆性能先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 3.5 cm,即钢板厚度与聚脲弹性体夹层厚度比为 0.903 : 3.5 : 0.903 时,复合夹层结构的抗爆性能较好。

4 结论

通过 LS-DYNA 对聚脲弹性体复合夹层结构在爆炸载荷下的动力响应进行了模拟,在厚度和质量固定条件下,对聚脲弹性体夹层厚度对复合夹层结构抗爆性能的影响进行了研究,得到结论如下:

(1) 在厚度固定条件下,随着聚脲弹性体夹层厚度的减小,复合夹层结构的抗爆能力先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 1.2 cm,即钢板厚度与聚脲弹性体夹层厚度比为 1.4 : 1.2 : 1.4 时,其抗爆能力较好。

(2) 在质量固定条件下,随着聚脲弹性体夹层厚度的增加,复合夹层结构的抗爆能力先增大后减小,当聚脲弹性体夹层厚度为 3.5 cm,即钢板厚度与聚脲弹性体夹层厚度比为 0.903 : 3.5 : 0.903 时,其抗爆性能较好。

参考文献

- [1] Xue Liang, Mock W, Belytschko T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(11):981-1003.
- [2] McShane G J, Stewart C, Aronson M T, et al. Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(16):4407-4426.
- [3] Sarva S S, Deschanel S, Boyce M C, et al. Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates[J]. Polymer, 2007, 48(8):2208-2213.
- [4] Tekalur S A, Shukla A, Shivakumar K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials[J]. Composite Structures, 2008, 84(3):271-281.
- [5] 甘云丹,宋力,杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J]. 兵工学报, 2009, 30(2):15-18.
Gan Yundan, Song Li, Yang Liming. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(2):15-18.
- [6] Gardner N, Wang E, Kumar P, et al. Blast mitigation in a sandwich composite using graded core and polyurea interlayer[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(2):119-133.
- [7] Grujicic M, Pandurangan B, He T, et al. Computational investigation of impact energy absorption capability of polyurea coatings via deformation-induced glass transition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(29):7741-7751.
- [8] Grujicic M, Bell W C, Pandurangan B, et al. Blast-wave impact-mitigation capability of polyurea when used as helmet suspension-pad material[J]. Materials & Design, 2010, 31(9):4050-4065.
- [9] Roland C M, Fragiadakis D, Gamache R M. Elastomer-steel laminate armor[J]. Composite Structures, 2010, 92(5):1059-1064.
- [10] 宋彬,黄正祥,翟文,等. 聚脲弹性体夹芯防爆罐抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2009, 30(2):15-18.
Song Bin, Huang Zhengxiang, Zhai Wen, et al. Anti-detonation properties of explosion-proof pots made of sandwich structures with polyurea elastomer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 30(2):15-18.
- [11] 石少卿,刘仁辉,汪敏. 钢板-泡沫铝-钢板新型复合结构降低爆炸冲击波性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4):143-146.
Shi Shaoqing, Liu Renhui, Wang Min. Shock wave reduction behavior of a new compound structure composed of a foam aluminum layer between two steel plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(4):143-146.
- [12] Hallquist J O. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [13] 刘新让,田晓耕,卢天健,等. 泡沫铝夹芯圆筒抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23):166-173.
Liu Xinrang, Tian Xiaogeng, Lu Tianjian, et al. Blast-resistance behaviors of sandwich-walled hollow cylinders with aluminum foam cores[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23):166-173.
- [14] 张钟文,黄正祥,祖旭东,等. 异型夹层结构复合靶板抗射流侵彻性能研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(6):928-935.
Zhang Zhongwen, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Study on the effects of composite armor with corrugated sandwich against the shaped charge jet penetration[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(6):928-935.