DOI: 10.11883/bzycj-2016-0214 文章编号: 1001-1455(2018)02-0345-08

柱壳约束对散心冲击波空间分布的影响*

张世文,龙建华,贾宏志,刘仓理
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 结合实验和数值模拟,研究了散心冲击波在金属柱壳约束下沿有机玻璃内部的空间分布。进行了点起爆柱状炸药驱动飞片加载实验,采用 Polyvinylidence Fluoride (PVDF)测试方法对有机玻璃内部的压力进行测试。实验结果显示:在冲击波传播过程中,在特定传播距离处,离中心轴越近,冲击波第一幅值压力越小,这是因为散心冲击驱动飞片成前凸形状,在飞片飞行过程中与有机玻璃碰撞面积越来越大,在远离对称轴部位冲击压力叠加累积效应更强引起的;但在随后的冲击波传播过程中,由于受到柱壳约束影响,离对称轴越近,冲击波幅值越小,这是由散心冲击波在约束柱壳边界反射与冲击波波阵面叠加的结果。通过对炸药网格大变形溢出柱壳翻转进行合理处理,对实验进行了数值模拟。数值模拟结果所得的冲击压力沿径向分布规律计算结果与实验结果定性相符。最后探讨了不同约束程度对这一规律的影响程度,结果表明,后续的冲击波幅值随着约束的增加而急剧增加。

关键词: 冲击动力学;PVDF;散心冲击波;衰减规律
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

冲击波衰减研究是一个相对古老的课题,但因涉及到火工品运输意外殉爆、高速撞击安全防护等问题,冲击波在有机玻璃、泡沫铝等吸能材料中的传播和衰减规律仍然受到工程和学术界关注[1-6]。以前的研究主要集中在改进材料本身属性方面,包括改进微结构。Goel 等[7]研究了闭孔泡沫铝对冲击波的衰减或增强规律。Al-Qananwah 等[8]研究了具有高表面体积比的纳米结构多孔材料对冲击波的衰减,研究结果表明在靶墙前面放置一层多孔材料使得冲击波幅值下降,靶墙内能量沉积下降 30%。这些研究主要关注整体衰减效果,对材料内部的冲击波信息关注相对较少。目前研究中,急需测试冲击波到达物体内部不同位置的时间以及幅值,这些实验结果对于炸药冲击起爆阈值、有机玻璃衰减层厚度设计等可提供直接依据。由于冲击波前沿上升较快,对埋入式传感器厚度尺寸提出了较高要求,以锰铜计为例,它的厚度可能超过 0.15 mm[9],埋入材料中会影响界面配合,从而影响到冲击波压力测试,进而影响到继续传播的冲击波状态,故测试元件越薄越好。PVDF 计厚度相对较小,只有 0.028 mm,加上包覆层后不超过 0.08 mm,有利于冲击波测试。

以前研究一般采用平均化处理来评估材料对冲击波的衰减能力,或者只在轴对称位置布置一个传感器[6],关注冲击波沿轴向的衰减,很少考虑材料内部同一个截面的空间分布形式。然而,在工程实验中,由于冲击加载的复杂性,冲击波在同一截面的空间分布多样,这对于测点布局以及测试结果的解读提出了很高的要求。

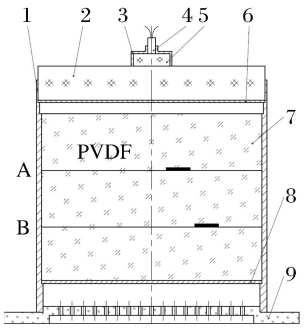
本文中,进行点起爆柱状炸药驱动飞片实验,产生散心冲击波,采用 Polyvinylidence Fluoride (PVDF)测试方法对有机玻璃内部的压力进行测量;重点关注柱壳约束对冲击波空间分布的影响,探讨该冲击波在有金属柱壳约束下有机玻璃中的衰减规律,并探讨所得规律的普适性。

1 实 验

1.1 实验装置及测试方法

实验装置如图 1 所示,采用点起爆主炸药驱动铝飞片,产生散心冲击波对有机玻璃进行加载,在 3 块

* **收稿日期**: 2016-07-20; **修回日期**: 2016-12-20
第一作者: 张世文(1971—),男,博士,副研究员,zhangswxueshu@163.com。



1. Cylindrical shell 2. Main explosive 3. Detonator set
4. Detonator 5. Boostor explosive 6. LY12 flyer
7. PMMA 8. Test LY12 plate 9. DPS probe stand

图 1 柱壳内冲击实验装置

Fig. 1 Experimental setup of shock wave in the cylinder

有机玻璃之间安装 PVDF 压力计，分析冲击压力在有机玻璃中的衰减。为考察测试可重复性，在 A 界面离对称轴 30 mm 处布置 3 个 PVDF 计，为分析冲击波在侧向稀疏波作用下引起的径向压力衰减规律，在 B 界面安装 3 个 PVDF 计，分别离对称轴 30、40 和 50 mm，用于分析冲击压力沿径向的分布和衰减。

主炸药为∅200 mm×30 mm 的 RHT-901 炸药，飞片采用 LY12 铝合金，厚 2 mm。柱壳为 45 钢，壁厚 4.5 mm。图 2 为有机玻璃界面 PVDF 布局。有机玻璃密度为 1.18 g/cm^3，分成 3 块，上两块高为 50 mm，底层有机玻璃分 2 种情况，第 1 发实验中(没有测试铝板和速度测试项目)高为 50 mm，第 3 发实验中由 48 mm 高的有机玻璃和 2 mm 厚测试铝板替代。PVDF 计由柱壳上打孔引出，方孔高2.5 mm，宽 25 mm。为防止第 1 个测试界面 A 对第 2 界面 B 影响，第 2 个界面 PVDF 与第一个界面错位 60°，图 3 为柱壳内冲击波实验装置实物图(限于篇幅，速度测试结果另文讨论)。

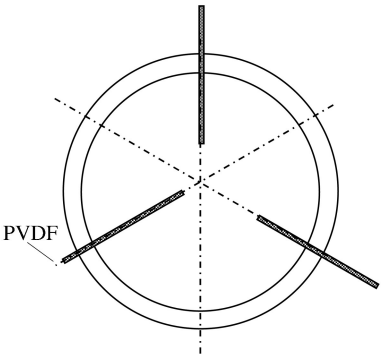


图 2 有机玻璃界面 PVDF 布局

Fig. 2 PVDF layout in PMMA interface

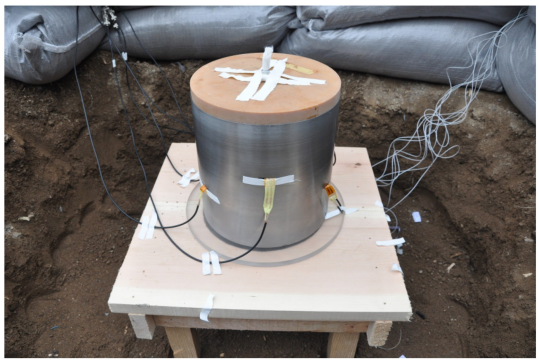


图 3 冲击波实验装置实物图

Fig. 3 Setup of shock wave experiment

1.2 实验结果

图 4 为第 1 发实验 PVDF 测试结果，其中：A 界面的 3 个 PVDF 布局均为距对称轴 30 mm 以考核其对称性，记为 A101、A102 和 A103；B 界面 3 个 PVDF 计，与对称距离分别为 30、40 和 50 mm，记为 B201、B202 和 B203，其中 B203 本次实验未测到信号。从图 4 可以看出，A 界面 3 个 PVDF 计冲击波到达时间测试结果基本重合，说明实验装置的对称性较好，但 B201 测得的冲击波小于 B202。图 5 为第 2 发实验测试结果，其中，图 5(c)为由图 5(b)的 PVDF 测量结果进行准静态校准换算后的压力时程曲线。A 界面 3 个 PVDF 计测试结果非常良好，表明目前的安装工艺针对有机玻璃来说基本成熟，B 界面 3 个 PVDF 计测试结果看似没有规律，但将其根据各自的换算系数 C_s 换算为压力时，结果与第 1 发相似，即离对称轴越近的地方冲击压力幅值越低。

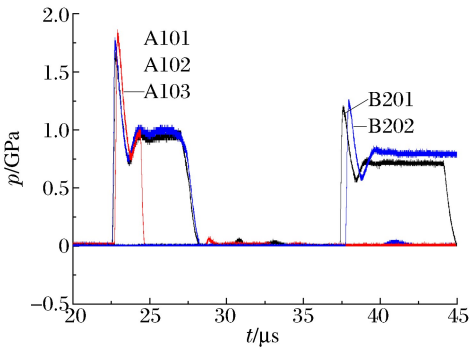


图 4 第一发实验 PVDF 测试结果

Fig. 4 Voltage curves measured with PVDF gauge in the first experiment

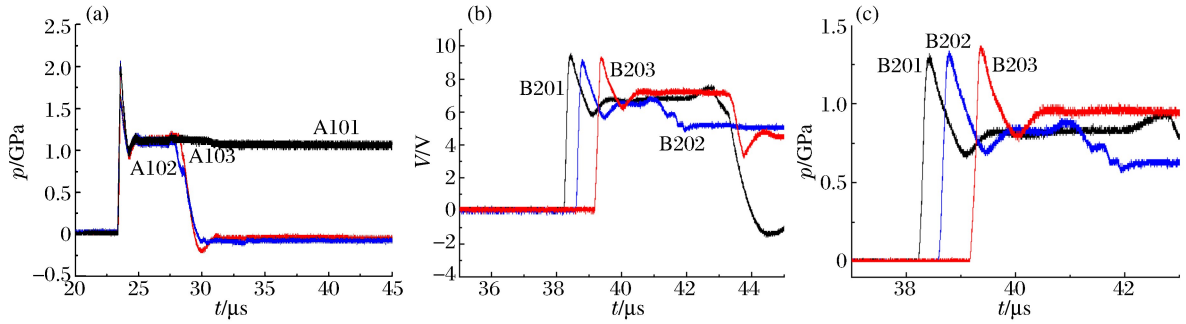


图 5　第二发实验 PVDF 测试结果

Fig. 5　Voltage and pressure curves measured with PVDF gauge in the second experiment

表 1 为 2 发实验 PVDF 压力测试结果比较，由表 1 可知，即使开展重复实验，冲击波压力幅值也很难完全一致，可能有 2 个原因：(1) 这两块主炸药储存时间较长，第 1 块主炸药直径膨胀近 0.5 mm，从而使得两者的密度有差异，带来做功能力的差异；(2) PVDF 计装配对结果也有一定影响。从目前的重复实验来看，这种差异是可以接受的。另外可以看出，B 界面处离对称轴距离越近，冲击压力幅值越低。

表 1　两发 PVDF 冲击波压力幅值测试结果对比

Table 1　Measured data of the two experiments

编号	距对称轴距离/mm	安装角度/(°)	C_s/(mC·cm^{-2})		峰值压力/GPa	
			第 1 发	第 2 发	第 1 发	第 2 发
A101	30	0	14.5	13.7	1.60	1.97
A102	30	120	14.4	13.3	1.74	2.00
A103	30	240	14.2	14.1	1.84	2.00
B201	30	60	14.3	14.3	1.18	1.29
B202	40	180	14.3	13.6	1.22	1.32
B203	50	300	14.4	13.6	—	1.35

2　数值模拟

2.1　计算模型

根据实验装置进行建模：忽略传爆药能量，采用轴对称模型。图 6 为计算模型，炸药上表面中心点起爆，产生散心冲击波，驱动 LY12 铝飞片撞击有机玻璃，研究有机玻璃内的冲击波传播过程。整个模型共 18 600 个单元。

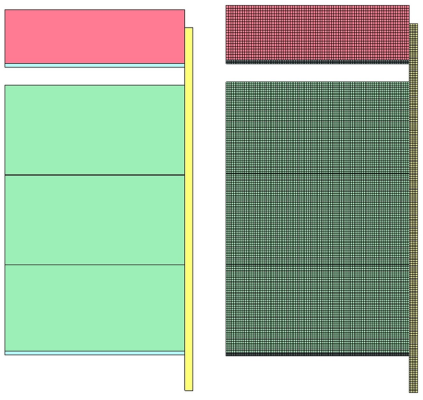


图 6　计算模型

Fig. 6　Model of simulation

2.2　材料参数

2.2.1　炸药参数

实验中主炸药为 RHT-901 炸药，密度为 1.684 g/cm^3，爆速为 7.79 km/s，爆压为 27 GPa，多方指数值为 2.78，采用 JWL 状态方程描述：

$$p(E,\bar{V})=A\left(1-\frac{\omega}{R_1\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{R_2\bar{V}}+\frac{\omega E}{\bar{V}} \tag{1}$$

式中：E 为比内能；$\bar{V}$ 为比容；参数 $A=602.08$ GPa，$B=12.25$ GPa，$R_1=4.554$，$R_2=1.21$，$\omega=0.37$[10]。

2.2.2 其他材料参数

本实验涉及的材料包括有机玻璃、LY12 铝合金和 45 钢，LY12 采用 J-C 本构和 Grüneisen 状态方程描述[11]，45 钢采用流体弹塑性模型和 Grüneisen 状态方程描述。本文中参数取自 AUTODYN Version 6.1 提供的参数[12]，如表 2 所示。其中：ρ_0 为初始密度，C_0 和 λ 为雨贡纽参数，Γ 为 Grüneison 系数，G 为剪切模量，σ_y 为屈服强度。有机玻璃本构关系采用简单的流体弹塑性模型描述。尽管有一些描述有机玻璃本构关系的文献[13-15]，但这些本构关系并未配套状态方程，即与状态方程配套的本构关系相对不多，本文计算着重于实验现象解释，因此材料参数的不准确对实验规律的判断影响相对较小。

表 2 JH-2 炸药计算参数

Table 2 Computational parameters of JH-2

材料	ρ_0/(g·cm^{-3})	C_0/(km·s^{-1})	λ	Γ	G/GPa	σ_y/MPa
45 钢	7.85	4.57	1.49	2.17	82	800
有机玻璃	1.181	2.26	1.816	0.75	3.2	140

需要强调的是，45 钢采用流体弹塑性模型时，考虑到柱壳破裂问题，设置失效应变为 0.4，一方面如果柱壳没有失效应变，既与实验现象不符，又会影响到炸药网格的极度扭曲而造成计算终止，另一方面，如果失效应变取值较小，柱壳删除过早，将会弱化柱壳约束对冲击波作用，从而影响研究结果。从计算结果可以看出，当失效应变取值 0.4 时，冲击波波头已经离开被删单元较远距离，即对于本研究关心的冲击波第一幅值，单元的删除不会对其产生影响。

图 7 给出了实验测点对应位置的冲击波压力计算结果，计算结果未加上雷管和传爆药作用时间(约 2 μs)。计算结果定性验证了实验结果趋势的合理性。从图 4～5 和图 7 可以看出，第 1、2 发实验 A101 到 B201 冲击波传播时间分别为 14.70 和 14.76 μs，计算结果为 14.7 μs，说明有机玻璃的状态方程参数中 C_0 和 λ 基本适合冲击波传播速度估算。

图 8 为冲击波在 B 界面任意一点 P 演化示意图，P 的压力来自于飞片在不同时刻撞击有机玻璃上表面产生的冲击波的综合叠加效应，从最初的 O 点碰撞产生的冲击波沿 OP 传播到 P 点，到滑移的 C 点碰撞产生的冲击波沿 CP 传播到 P 点。从图 8 可以看出，尽管 C 点撞击到有机玻璃相对较晚，但 CP 的距离比 OP 要小，因此有可能追上 OP 传来的冲击波，从而对冲击波第一幅值产生影响。另一方面，尽管单独的 O 点撞击产生的冲击波由于几何弥散效应在 B 界面将会造成离对称轴越远幅值越低的现象，但是随着前凸飞片碰撞有机玻璃，对 P 点冲击波压力有贡献的飞片碰撞面积越来越大，同样可造成离对称轴越远，冲击波第一幅值越大的实验现象。

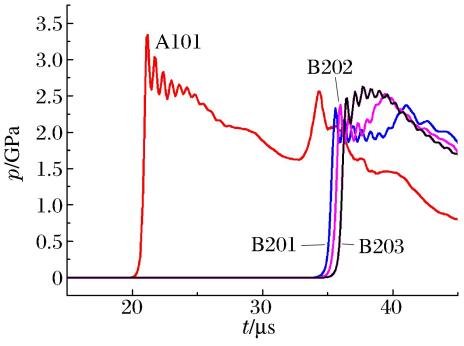


图 7 测试点对应位置压力计算结果

Fig. 7 Simulated results of measuring points

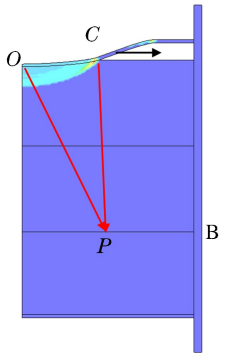


图 8 B 界面冲击波的因素分析

Fig. 8 Influences of shock wave on surface B

从实验结果来看，P 点的冲击压力在第一波冲击波传到后迅速衰减，然后再增加，同样出现离对称轴越近，冲击波幅值越低的实验结果，数值模拟也证实有这个现象。图 9 为炸药起爆不同时刻冲击波传

播过程计算结果。从图中可以看出，冲击波波阵面快于柱壳网格删除，即柱壳网格删除不会影响到柱壳约束对冲击波的影响研究。当冲击波在柱壳约束反射后，与冲击波波头相互作用，使得在 B 界面的冲击波离对称轴越远幅值越大的现象。

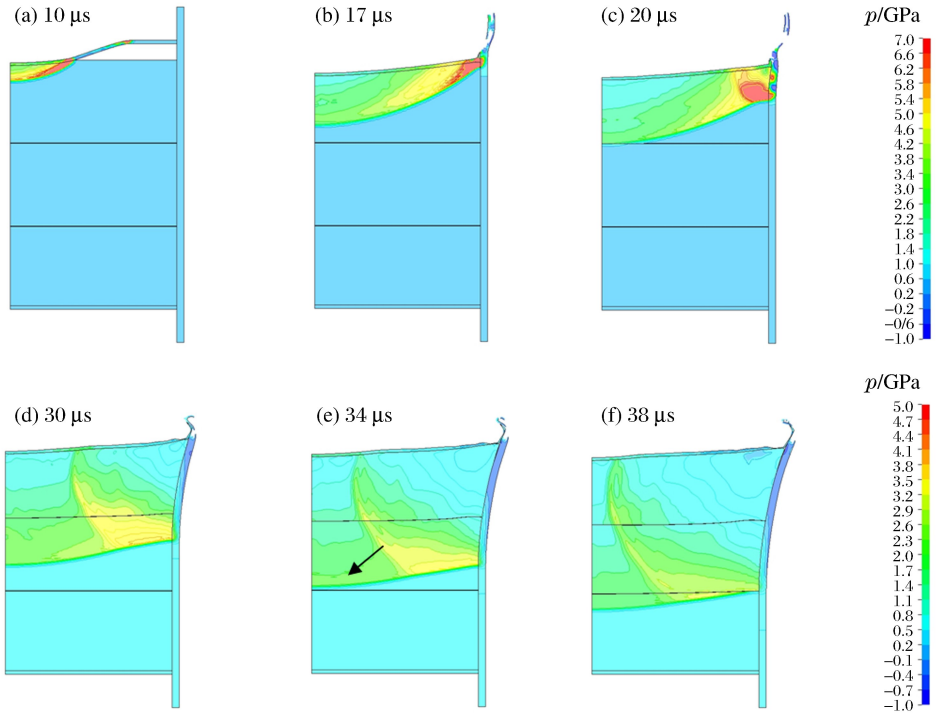


图 9　冲击波在柱壳约束下的传播过程计算结果

Fig. 9　Simulated results of shock wave in PMMA under restriction of cylindrical shell

根据图 8 和图 9，有机玻璃内冲击波第一幅值为：

$$p=\int_0^l p_1(t)\mathrm{d}l+p_2(t) \tag{2}$$

式中：$p_1(t)$为 OC 段飞片撞击对冲击压力贡献，$p_2(t)$为柱壳反射对冲击波第一幅值贡献，l 为 OC 的长度。对于同一个截面，离对称轴越远，OC 有效段越大。图 10 为有机玻璃内离撞击面（有机玻璃上表面）不同深度（5，10，…，125 mm）冲击波第一幅值-半径分布图，其中右图为左图剧局部放大。从图中可以看出，有机玻璃内可分为 3 个区域：I 区为混乱区，在这个区域内，冲击波第一幅值随半径关系不明显，一方面是由于散心冲击波本身衰减，另一方面由于有效撞击面积的综合叠加，这两个因素相互影响程度相当；II 为反常区，在这个区域内冲击波第一幅值随半径的增加而减小，此时有效撞击面积叠加效

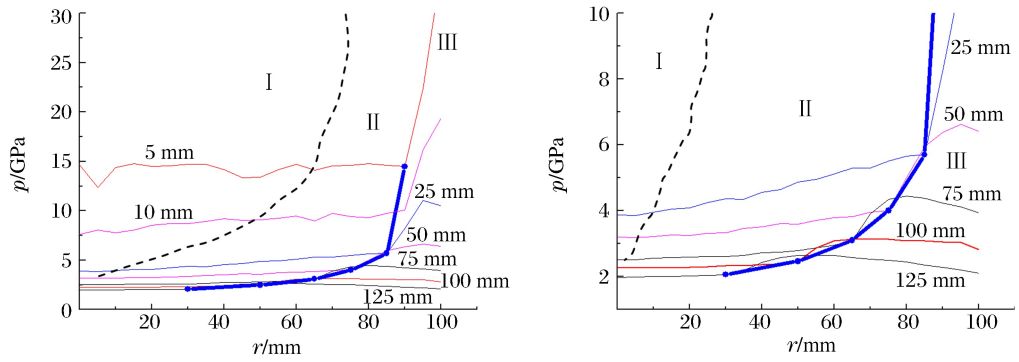


图 10　离有机玻璃上表面不同深度冲击波第一幅值-半径分布曲线

Fig. 10　First amplitudes of shock waves-radius curves at different depths from the upper surface of the PMMA column

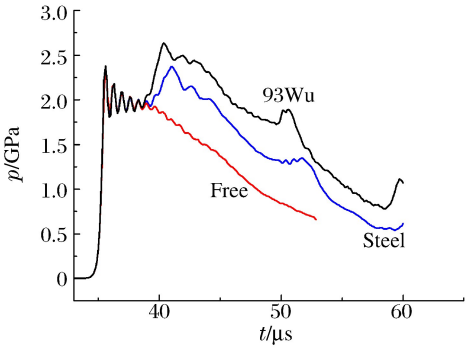


图 11 3 种不同约束对 B201 点冲击压力影响计算结果

Fig. 11 Pressures curves at point B201 under different restrictions

应起主要作用;III 为反射波影响区,在这个区域内,冲击波第一幅值与半径关系为迅速增加而又逐渐减小。其中 I、II 区的划分不是很明确,但可以肯定的是,在有机玻璃内部,存在一个冲击波第一幅值随半径的增加而增加的区域。

图 11 给出了没有柱壳约束、45 钢(7.85 g/cm^3)柱壳约束和 93 钨(17.35 g/cm^3)柱壳约束 3 种情况对界面 B 离对称轴 30 mm 位置点(B201)的冲击压力影响计算结果,可以看出,该点第一幅值不受柱壳约束影响,当柱壳约束增强时,对冲击波后期压力影响较大,约束越强,从柱壳边界反射的冲击波强度越大,与冲击波波头相互作用后幅值增加较快。93 钨约束时,其幅值甚至高过第一冲击幅值 10%,这种复杂的冲击波历史会不会影响到 PVDF 以及锰铜计的测试结果,需要进一步探讨。

4 讨 论

冲击波压力测量受到诸多因素影响,出现“测不出、测不准”或者重复性差的现象,加大了理论分析和数值模拟校核难度。以前基于实验为主导的经验认为,只有实验结果是比较可靠的,然而有些实验结果的处理方法又依赖于理论推导和假设,使得理论和实验的界限越来越模糊。

在测试原理方面,目前大多数冲击压力测量结果是通过压电转换信号间接得到,这种实验结果对测试机理要求较高,比如:PVDF 计测试面是否需要平行于冲击波波阵面,PVDF 计产生电压的有效面积是否等于激活面积(active area),压电效应的电荷积累和释放特征时间,静态标定与瞬态冲击标定的关系等。在安装工艺方面,作为相对较好的接触式测试方法,PVDF 计测量材料内部的冲击压力对装配工艺要求较高,文献[16]详细对其安装工艺进行了介绍。在一发重复实验中发现,如果只在 PVDF 计被测面积及其引线涂抹薄薄的一层硅橡胶,而其余部分没有均匀涂抹硅橡胶,同一位置所测最大冲击压力下降高达 70%,这一小小的细节足可以干扰对冲击波传播规律的研究。

在数值模拟方面,计算与实验结果差异的原因可能有以下几点。(1) 炸药材料参数:主炸药的 JWL 状态方程参数的适用性,存放多年的炸药参数变化多大没有精细标定。(2) 有机玻璃的状态方程参数和本构关系:由计算可知,有机玻璃中冲击压力从近 20 GPa 衰减到几百兆帕,同一组状态方程参数能否在如此宽的范围内适用值得探讨,而本构关系的选取直接影响到冲击波幅值衰减,材料的黏性、温升等因素同样会影响计算结果,通过人工黏性代替有机玻璃黏性发现冲击波幅值下降 30%或更多。(3) 建模问题:由于数值模拟无法做到精细的物理建模,特别是根据实际的安装情况建模,比如空气间隙和涂抹 PVDF 硅胶的建模以及空气和硅胶的材料参数等,这些都会影响计算结果。

实验和数值模拟 2 方面的不确定性因素会影响对规律性认识的判断。本文中通过数值模拟初步解释这一实验现象——离对称轴越近,冲击波幅值越小,基本可以确定这是一种规律而非实验偶然。当然,在实验设计中,飞片与有机玻璃之间的间隙是影响这一实验结果的重要因素,研究间隙大小与这一规律的关系是以后工程设计可以考虑的课题。通过对计算结果分析发现,在有机玻璃中离上表面较近的地方和远离上表面的部位,没有这种现象出现。这种现象只是在特定区域出现。通过对看似“反常”规律的解释,有助于消除不必要的疑虑,增强对实验和数值模拟结果合理性的信心。

3 结 论

开展了点起爆驱动主炸药驱动飞片撞击有机玻璃实验以及对应的数值模拟研究,通过实验和计算结果对比分析,获得了以下结论:

（1）获得了在特定范围内离对称轴越近冲击波第一幅值越低的实验结果，原因在于散心冲击造成飞片前凸，随着飞片撞击面积的增加，在有机玻璃内特定范围内冲击波叠加效应越发明显；

（2）冲击波压力历史对柱壳约束比较敏感，约束越强，从约束边界传来的反射波越强，可能造成后续冲击波幅值超过第一幅值 10%。

参考文献：

[1] 程和法，黄笑梅，薛国宪，等. 冲击波在泡沫铝中的传播和衰减特性[J]. 材料科学与工程学报，2004，22(1)：78-81.
CHENG Hefa，HUANG Xiaomei，XUE Guoxian，et al. Propagation and attenuation characteristic of shock wave in aluminium foam[J]. Journal of Materials Science & Engineering，2004，22(1)：78-81.

[2] 蔡军锋，易建政，续新宇，等. UHMWPE 纤维增强聚氨酯泡沫对爆炸冲击波衰减性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程，2009，25(4)：119-122.
CAI Junfeng，YI Jianzheng，XU Xinyu，et al. Shock wave attenuation properties of UHMWPE fiber reinforced polyurethane foam plastics[J]. Polymer Materials Science and Engineering，2009，25(4)：119-122.

[3] 郑志辉，胡时胜. 爆炸冲击波通过砾石层衰减规律的试验研究[J]. 工程爆破，2008，14(1)：1-7.
ZHENG Zhihui，HU Shisheng. Experimental study on shock wave attenuation caused by gravel layer[J]. Engineering Blasting，2008，14(1)：1-7.

[4] 徐荣青，崔一平，赵瑞，等. 有机玻璃中冲击波衰减特性的研究[J]. 激光技术，2008，32(3)：225-227.
XU Rongqing，CUI Yiping，ZHAO Rui，et al. Attenuation of laser generated shock waves in plexiglass[J]. Laser Technology，2008，32(3)：225-227.

[5] 陈亚红，白春华，王仲琦，等. 爆炸平面冲击波在金属颗粒介质中的衰减[J]. 高压物理学报，2011，25(6)：481-486.
CHEN Yahong，BAI Chunhua，WANG Zhongqi，et al. Planar explosion shock wave attenuation in granular meta[J]. Chinese Journal of High Pressure Physic，2011，25(6)：481-486.

[6] 姜夕博，饶国宁，徐森，等，冲击波在有机玻璃中衰减特性的数值模拟与实验研究[J]. 南极理工大学学报，2012，36(6)：1059-1064.
JIANG Xibo，RAO Guoning，XU Sen，et al. Numerical simulation and experimental research on shock wave attenuation properties in PMMA[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology，2012，36(6)：1059-1064.

[7] GOEL M D，ALTENHOFERB P，MATSAGAR V A，et al. Interaction of a shock wave with a closed cell aluminum metal foam[J]. Combustion，Explosion，and Shock Waves，2015，51(3)：373-380.

[8] AL-QANANWAH A K，KOPLIK J，ANDREOPOULOS Y. Attenuation of shock waves propagating through nano-structured porous materials[J]. Physics Of Fluids，2013，25：076102.

[9] 范春雷，胡金伟，陈大年，等. 无氧铜平面冲击波实验的锰铜应力计测试[J]. 高压物理学报，2008，22(1)：79-84.
FAN Chunlei，HU Jinwei，CHEN Danian，et al. Measurements in planar shock wave experiments for OFHC using manganin gauges[J]. Chinese Jounal of High Pressure Physic，2008，22(1)：79-84.

[10] 孙承伟，卫玉章，周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京：科学出版社，2000.

[11] 彭建祥. Johnson-Cook 本构模型和 Steinberg 本构模型的比较研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2006.

[12] AUTODYN：AUTODYN matsum_v6.1_review[Z]. Concord：Century Dynamics Inc，2010.

[13] 周风华，王礼立，胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击，1992，12(4)：333-342.
ZHOU Fenghua，WANG Lili，HU Shisheng，et al. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves，1992，12(4)：333-342.

[14] 管公顺，王少恒，成方圆. 不同加载应变率下有机玻璃的压缩破坏与力学行为，航空材料学报，2012，32(6)：96-101.
GUAN Gongshun，WANG Shaoheng，CHENG Fangyuan，et al. Compression failure and mechanics behavior of PMMA under different loading strain rates[J]. Journal of Aeronautical Materials，2012，32(6)：96-101.

[15] 史飞飞，索涛，侯兵，等. YB-2 航空有机玻璃的应变率和温度敏感性及其本构模型[J]. 爆炸与冲击，2015，35(6)：769-776.
SHI Feifei，SUO Tao，HOU Bing，et al. Strain rate and temperature sensitivity and constitutive model of YB-2 of

aeronautical acrylic polymer[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(6):769-776.

[16] 张世文,龙建华,贾宏志,等.平面波在有机玻璃中的衰减测试及数值模拟[J].兵工学报,2016,37(7):1214-1219.
ZHANG Shiwen, LONG Jianhua, JIA Hongzhi, et al. Measuring and numerical simulation of attenuation of planar shock wave in PMMA[J]. Acta Armamentarii, 2016,37(7):1214-1219.

Influence of cylindrical shell on spatial distribution of pressure during propagation of divergent shockwave

ZHANG Shiwen, LONG Jianhua, JIA Hongzhi, LIU Cangli
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: The propagation and spatial distribution of the divergent shock wave in PMMA under the restriction of a metal cylindrical shell were studied using experiment and numerical simulation. The flyer was driven by the cylinder high explosive initiated by a detonator at the center of the free surface and the inner pressure of PMMA was measured by PVDF. The experiment shows that the closer to the axis at a unique spot, the smaller the first pressure amplitude, which is the result of the increased impacted area of PMMA by the forward convex-shaped flyer due to the divergent shock wave and the increased integrative and accumulative effect of the pressure beyond the axis. But during the subsequent propagation of the shock wave, the closer to the axis, the smaller the pressure amplitude, which is the result of the interaction between the shock wave front and the reflection of the divergent shock wave from the cylindrical shell. The numerical simulation was performed well by adjusting the severe distortion of the mesh which may cause the termination of the calculation. The trend of the numerical result is in qualitative agreement with that of the experiment. Finally, we discussed the effect of different shell materials on the law of the distribution of the shock wave, and it is shown that the subsequent pressure increases as the heavy density of the cylindrical shell increases.

Keywords: impact dynamics; PVDF; attenuation of shock wave; attenuation

(责任编辑 王小飞)