高压物理学报

平面冲击波在有机玻璃中的衰减规律

李金河，尚海林，傅　华

引用本文：

李金河，尚海林，傅华. 平面冲击波在有机玻璃中的衰减规律 [J]. 高压物理学报，2018，32(4)：044201.

LI Jinhe，SHANG Hailin，FU Hua. Attenuation of Plane Shock Wave in PMMA [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2018，32(4)：044201.

当期更多内容≫

您可能感兴趣的其他文章：

冲击压缩下 PMMA 的响应和光学特性

郝龙，王翔，王青松，康强，黄金

DOI：10.11858/gywlxb.2017.05.011

准等熵压缩下氟橡胶 F2311 的动力学行为实验研究

蔡进涛，王桂吉，张红平，赵锋，吴刚，陶彦辉

DOI：10.11858/gywlxb.2015.01.007

冲击载荷下 K9 玻璃的光学特性

胡昌明，李雪梅，彭建祥，张祖根，靳开诚，王翔，蔡灵仓，刘仓理

DOI：10.11858/gywlxb.2017.05.010

基于量纲分析的平面冲击波经验模型研究

赵传荣，孔德仁

DOI：10.11858/gywlxb.2016.06.014

用组合式电磁粒子速度计研究一种活性材料的反应特性

李金河，訾攀登，张旭，张蓉

DOI：10.11858/gywlxb.2017.03.013

有机玻璃-空气层结构对爆炸水池水下爆炸地基振动的影响

汪泉，汤有富，李志敏，宫婕，程扬帆，刘上豪，李成孝

DOI：10.11858/gywlxb.20170611

第 32 卷 第 4 期
2018 年 8 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 4
Aug., 2018

DOI: 10.11858/gywlxb.20170643

平面冲击波在有机玻璃中的衰减规律*

李金河,尚海林,傅 华

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,
四川 绵阳 621999)

摘要:采用 PVDF 压电式压力传感器测量了在∅100 mm 平面波透镜加载下经不同厚度∅100 mm 有机玻璃隔板衰减后的冲击波压力历程,实验结果与 LS-DYNA 数值模拟结果符合较好。研究结果表明,冲击波压力在有机玻璃中服从衰减系数为 0.028 89 的指数衰减规律。与其他研究者的研究结果对比说明,密实介质的衰减系数反映了其衰减特性,但受加载冲击波及装置尺寸的影响较大,应根据实际情况进行合理选择。

关键词:平面冲击波;PMMA 隔板;衰减

中图分类号: O382 **文献标识码**:A

冲击波在密实介质中的传播和衰减规律受到从事爆炸和防护等研究人员的高度重视。炸药的冲击波感度是其重要的安全性指标之一。隔板实验是早期建立的用于测定炸药冲击起爆性能的典型方法[1],通过升降法调整隔板厚度研究炸药的临界爆轰阈值。类似的改进的隔板实验(Modified Gap Test,MGT)[2]则用于研究低压作用下炸药的反应阈值和爆轰阈值。可见,隔板实验中,经隔板衰减后的输出压力是一个重要的数据。有机玻璃作为一种常用的衰减材料,其衰减规律受到广泛关注。Keller[3]、陈熙荣等[4]、王作山等[5]、王海福等[6]对密实介质中冲击波的衰减进行了研究,应用不同的方法建立了密实介质中冲击波的衰减模型。韩秀凤等[7]则对雷管输出冲击波在有机玻璃中的衰减进行了实验研究,由研究结果可知,冲击波在密实介质中传播时是按照指数规律衰减的,表达式为

$$p = p_0 \mathrm{e}^{-\alpha x} \tag{1}$$

式中:p 为冲击波进入密实介质传播距离 x 处的压力,GPa;p_0 为冲击波进入密实介质时的初始压力,GPa;α 为密实介质中冲击波压力衰减系数;x 为冲击波在密实介质中传播的距离,mm。

由文献可知,由于研究者的实验方法及实验装置不同,其得出的衰减系数具有很大的差别。因此,衰减系数 α 并不是一成不变的。在一维强冲击波的作用下,α 体现了隔板材料的属性,是一定值;而在其他情况,如散心爆轰波、雷管起爆输出冲击波等作用下,由于受到边侧稀疏等影响,其衰减系数将发生较大的变化。

本工作在研究低压冲击下炸药的反应阈值过程中,采用 PVDF 压电式压力传感器(简称 PVDF 计)测量了平面冲击波经过不同厚度有机玻璃隔板衰减后的输出压力,得到平面波透镜作用下有机玻璃隔板中冲击波的衰减系数,并与数值模拟结果及其他研究者的研究结果进行比较。

1 实验研究

1.1 实验装置

实验装置示意见图 1。平面波透镜爆炸后产生平面冲击波,在平面波透镜和有机玻璃界面处产生

* **收稿日期**: 2017-09-20; **修回日期**: 2017-10-06

作者简介: 李金河(1979—),男,副研究员,主要从事爆轰基础及炸药安全性研究. E-mail:leejinhe103@163.com

约 10.15 GPa 的压力(通过锰铜压力计测定,见图 2),经不同厚度的∅100 mm 有机玻璃隔板衰减后,由 PVDF 计测量有机玻璃隔板与炸药间的压力-时间(p-t)历程。平面波透镜为 RHT-901 高爆速炸药和 $Ba(NO_3)_2$/TNT(78/22,质量比)的低爆速炸药组成,其中低爆速炸药的密度为 2.45 g/cm^3。实验用炸药柱为 JO-9159,尺寸为∅40 mm×25 mm,密度为 1.842 g/cm^3。PVDF 计在低压下时间分辨率可达几十纳秒,压力测量精度高,可以得到准确的有机玻璃隔板中冲击波传播的衰减系数。但是,PVDF 薄膜安装在被测物体内部或之间,需要涂抹硅胶排除其间的空气,因此,对安装精度的要求较高,胶层及薄膜也可能使测试结果偏小。

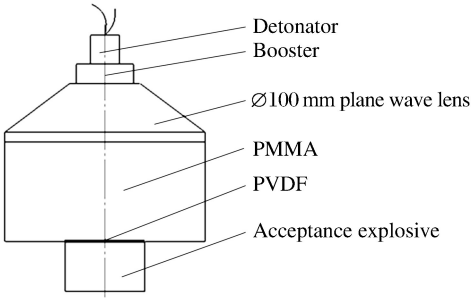

图 1　实验装置示意

Fig. 1　Sketch of experimental facility

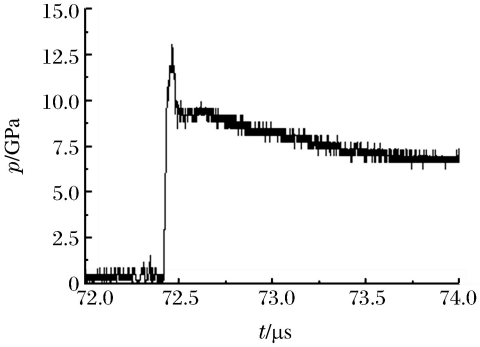

图 2　界面压力测量结果

Fig. 2　Interface pressure measured by manganin pressure gauge

1.2　实验结果

实验测量了冲击波经厚度分别为 50、70、80、90 和 100 mm 的有机玻璃隔板衰减后的压力-时间历程,典型的实验波形和相应的压力波形见图 3。压力波形由实验波形结合 PVDF 计的标定方程得到,标定方程为[8]

$$p=\frac{1}{10}\left\{5.8\left(\frac{Q}{A}\right)^{*}+3.8\left[\left(\frac{Q}{A}\right)^{*}\right]^{1.6}+0.55\left[\left(\frac{Q}{A}\right)^{*}\right]^{3.5}\right\} \tag{2}$$

式中:Q 为电荷;A 为 PVDF 计的敏感面积;$\left(\frac{Q}{A}\right)^{*}=0.018\left(\frac{Q}{A}\right)$为归一化电压幅值,它与积分器电容、准静态标定系数、标定时的温度以及积分器和记录器之间的衰减系数等密切相关[9]。图 3 中实验曲线上的第 1 个拐点代表隔板输出压力,第 2 个拐点代表炸药反应后的压力,这里只关注第 1 个拐点处的压力。不同隔板厚度对应的输出压力见表 1。

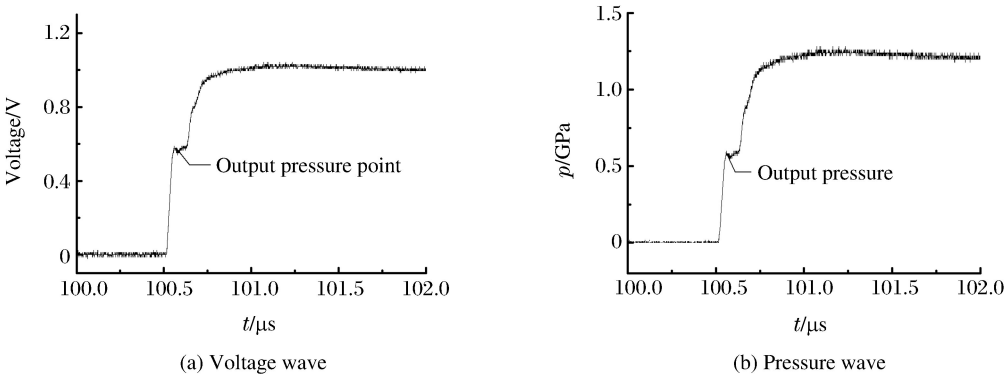

图 3　隔板厚度为 100 mm 时的电压和压力波形

Fig. 3　Voltage and pressure waves with 100 mm card gap

表 1　不同隔板厚度输出压力

Table 1　Output pressure with different card gap thicknesses

Card gap thickness/mm	Output pressure/GPa	Card gap thickness/mm	Output pressure/GPa
50	2.24	90	0.82
70	1.30	100	0.65
80	1.09		

2　数值模拟

采用 LS-DYNA 软件对平面冲击波加载下有机玻璃的衰减情况进行了二维数值模拟,计算模型如图 4 所示。加载炸药取低爆速炸药,采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程,线性起爆产生平面冲击波,主要计算参数见表 2[10];有机玻璃采用 MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 材料模型和 Grüneisen 状态方程,主要计算参数见表 3,其中:D 为炸药爆速,p_J 为炸药爆压,a、b 为材料的冲击雨贡纽参数。不同厚度有机玻璃对应的输出压力计算结果见图 5。

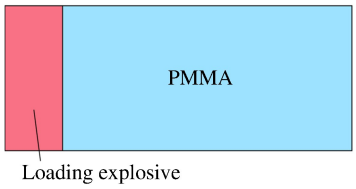

图 4　计算模型

Fig. 4　Calculation model

炸药爆轰产物的 JWL 状态方程[11]为

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \tag{3}$$

式中:e 为比内能;v 为比容;A、B、R_1、R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数。

表 2　炸药的主要计算参数

Table 2　Main computational parameters of explosive

Material	Density/ (g·cm^{-3})	D/ (km·s^{-1})	p_J/ GPa	A/ GPa	B/ GPa	R_1	R_2	ω
$Ba(NO_3)_2$/TNT(78/22)	2.6	4.476	11	1 265	1.55	5.8	2.0	0.6

表 3　有机玻璃的主要计算参数

Table 3　Main computational parameters of PMMA

Material	Density/(g·cm^{-3})	a/(km·s^{-1})	b
PMMA	1.186	2.598	1.516

由图 5 可知,实验结果和数值模拟结果具有较好的一致性。由此说明实验结果是可靠的,数值模拟采用的计算参数是合理的。采用(1)式对实验结果进行指数拟合,可得平面波透镜作用下有机玻璃的衰减系数为 0.028 89。

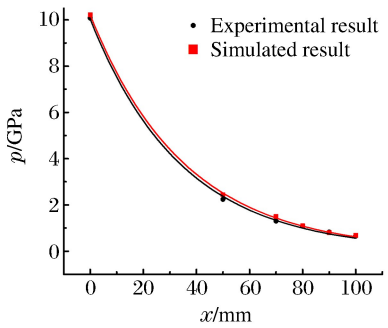

图 5　实验结果与数值模拟结果比较

Fig. 5　Comparison of experimental and simulated results

3　讨　论

将本研究结果与其他研究者的研究结果进行比较,如图 6 所示。由图 6 曲线可以清晰地看出:本研究的冲击波衰减最慢;文献[4]中采用∅40 mm 平面波透镜加载时,冲击波的衰减速率与本研究结果

比较接近；而文献[7]中采用雷管起爆作为加载方式时，其衰减速率最快。可见，不同实验装置和实验条件下有机玻璃的衰减速率差别很大。实验装置的尺寸越大，加载冲击波的平面性越好，冲击波在有机玻璃中的衰减速率越慢，即衰减系数越小。这主要是由于冲击波在传播过程中受到边侧稀疏波的影响，实验装置尺寸大，则受到的影响小，实验结果能更真实地反映有机玻璃的衰减特性。可见，衰减系数体现了隔板材料的衰减特性，但同时也受到实验装置本身的影响，是特定条件下的参数。在采用有机玻璃或其他物质作为隔板材料时，应根据实际情况选取合适的衰减系数，才能比较准确地得到所需要的压力。本实验结果可为相关平面冲击波加载实验提供参考。

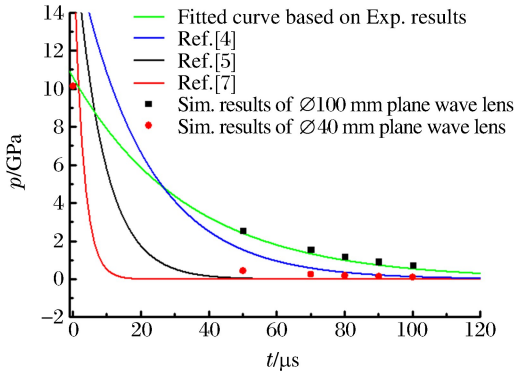

图 6　有机玻璃中冲击波衰减规律比较

Fig. 6　Comparison of shock wave attenuation in PMMA

4　结　论

(1) 采用∅100 mm 平面波透镜加载产生平面冲击波，用 PVDF 计测得距加载面不同距离处的冲击波压力，得到有机玻璃中冲击波的衰减系数为 0.028 89。LS-DYNA 模拟结果表明，计算结果与实验结果的一致性较好，说明实验结果可信度较高。

(2) 衰减系数受到实验装置尺寸大小及实验加载条件的影响，反映了材料在一定条件下的衰减特性。本实验结果受到侧向稀疏波的影响最小，比较真实地反映了有机玻璃的衰减特性。在实验设计时，应尽量减小稀疏波对加载冲击波的影响，以获得准确的实验压力条件。

参考文献：

[1]　孙承纬，卫玉章，周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京：国防工业出版社，2000：12.
SUN C W，WEI Y Z，ZHOU Z K. Applied detonation physics [M]. Beijing：National Defence Industory Press，2000：12.

[2]　LIDDIARD T P，FORBES J W. Physical evidence of different chemical reactions in explosives as a function of stress [C]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation，1989：1235-1242.

[3]　KELLER D V. Shock propagation in solids and foamed studies of non-hydrodynamic attenuation：AD-696271 [R]. 1966.

[4]　陈熙荣，王可，刘德润，等. 冲击波在不同隔板材料中的衰减特性研究 [J]. 兵工学报，1991，12(2)：77-79.
CHEN X R，WANG K，LIU D R，et al. The attenuation characters of shock wave in different baffles [J]. Acta Armamentarii，1991，12(2)：77-79.

[5]　王作山，刘玉存，郑敏，等. 爆轰冲击波在有机隔板中衰减模型的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报，2001，9(4)：316-319.
WANG Z S，LIU Y C，ZHENG M，et al. Study on the attenuation model of detonation shock wave in the PMMA gap [J]. Journal of Basic Science and Engineering，2001，9(4)：316-319.

[6]　王海福，冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算 [J]. 兵工学报，1996，17(1)：79-81.
WANG H F，FENG S S. An approximate theoretical model for attenuation of shock pressure in solid materials [J]. Acta Armamentarii，1996，17(1)：79-81.

[7]　韩秀凤，蔡瑞娇，严楠. 雷管输出冲击波在有机玻璃中传播衰减的实验研究 [J]. 含能材料，2004，12(6)：329-332.
HAN X F，CAI R J，YAN N. Study on attenuation of detonator shock wave in PMMA [J]. Energetic Materials，

2004,12(6):329-332.

[8] 赵继波,谭多望,张远平,等. PVDF 计在水中爆炸近场压力测试中的应用 [J]. 火炸药学报,2009,32(3):1-4.
ZHAO J B,TAN D W,ZHANG Y P,et al. Application of PVDF sensor in underwater explosive shock wave measurement at near-field [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellant,2009,32(3):1-4.

[9] Dynasen Inc. Piezofilm stress gauge [R]. Goleta,CA:Dynasen Inc. ,2006.

[10] 张世文,龙建华,贾宏志,等. 平面冲击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 S W,LONG J H,JIA H Z,et al. Measuring and numerical simulation of attenuation of planar shock wave in PMMA [J]. Acta Armamentarii,2016,37(7):1214-1219.

[11] LS-DYNA keywords user's manual [M]. Livemore:Livermore Software Technology Corporation,2001.

Attenuation of Plane Shock Wave in PMMA

LI Jinhe,SHANG Hailin,FU Hua

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics*,*Institute of Fluid Physics*,
China Academy of Engineering Physics,*Mianyang* 621999,*China*)

Abstract:In this study,we measured the pressure histories of the shock wave after passing through different thicknesses of PMMA card gaps under ∅100 mm plane wave loading by the PVDF piezofilm stress gauges. The experimental results accord well with the simulated results by LS-DYNA,which shows that the shock wave follows the exponential attenuation principle with an attenuation exponent of 0.028 89. The comparison of this result with those of other researchers' indicates that the attenuation exponent of the solid materials characterizes their attenuation capability,but is affected by given conditions such as the shock wave and the size of experiment facility,thus it is important to choose the attenuation exponent reasonably.

Keywords:plane shock wave;PMMA card gap;attenuation