

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.012

两种介质中爆轰波和冲击波连续测量技术研究^{*}

李晓杰^{①②} 易生泰^① 闫鸿浩^① 王小红^① 李科斌^①

①大连理工大学工程力学系(辽宁大连,116024)

②工业装备结构分析国家重点实验室(辽宁大连,116024)

[摘 要] 通过自制的有机玻璃压导探针,对炸药、有机玻璃和水中的爆轰波和冲击波进行连续测量,得到了爆轰波和冲击波的时间历程演化曲线。由此计算出炸药爆速、有机玻璃和水中冲击波速度随时间的变化曲线;再由有机玻璃和水的冲击雨果尼奥关系式和动量定理,计算得到了炸药爆压、有机玻璃和水近场冲击波速度、压力变化曲线。结果表明:理论计算结果与有机玻璃和水的冲击波和炸药爆压试验结果基本吻合,能够准确反映冲击波在有机玻璃和水中的衰减规律。

[关键词] 有机玻璃;水;连续测量;探针;爆轰波;冲击波

[分类号] 0384

Continuous Measurement Technology of Detonation Waves and Shock Waves in PMMA and Water

LI Xiaojie^{①②}, YI Shengtai^①, YAN Honghao^①, WANG Xiaohong^①, LI Kebin^①

①Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

②State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment (Liaoning Dalian, 116024)

[ABSTRACT] Detonation waves and shock waves in explosive, polymethyl methacrylate (PMMA) and water were measured continuously by a new in-house made PMMA pressure probe to obtain time history curves of detonation wave and shock wave. The detonation velocity of explosives and velocity-time curves of shock wave in PMMA and water were calculated. Further, the near field explosive detonation pressure and speed curves of shock wave in PMMA and water were obtained by Hugoniot equation of PMMA and water and theorem of momentum. Theoretical calculation results agree well with the experiment, which can accurately reflect the attenuation law of shock wave in PMMA and water.

[KEYWORDS] PMMA; water; continuous measurement; probe; detonation wave; shock wave

引言

炸药的爆轰过程是一个快速的化学物理变化过程,同时产生大量热量和气态产物。冲击波是一种强压缩波,其特点是传播速度快、峰值压力大、持续时间短。目前,对爆炸的研究主要是理论分析、试验研究、数值模拟及三者有机结合的综合性探索^[1-3]。测量爆轰压力常用的方法有:电磁法^[4-5]、自由表面速度法、水箱电探针法^[6]等。理论上,只要在介质中产生稳定的冲击波,就可以计算出介质中冲击波稳定传播时的压力^[7]。将两种不同介质紧密贴合

在一起,使冲击波由一种介质传入另一种介质中,若仅已知一种介质的雨果尼奥曲线,则可用该介质的雨果尼奥曲线推导另一介质雨果尼奥曲线。笔者选用有机玻璃和水这两种雨果尼奥曲线已知的介质来验证该方法的准确性。

1 试验系统及测量原理

1.1 探针连续测量系统设计原理

试验中使用的多孔粒状铵油炸药的爆轰临界直径为50 mm。文献[8]指出,在用待研究金属材料制作的厚度为5~6倍装药

^{*} 收稿日期:2017-02-27

基金项目:国家自然科学基金(11272081,11672067)

作者简介:李晓杰(1963-),男,博士,教授,博导,研究方向:爆炸力学、爆炸加工、特种爆破。E-mail:393291800@qq.com

直径的圆柱形炸药,能够使得阵面弯曲度很小的爆轰波作用于金属板表面。圆柱形装药的直径比金属板厚度大 2~3 倍,因而,金属板中传播的冲击波阵面弯曲度很小。文献[9]指出,当药柱长度大于爆轰波面最大曲率半径时,爆轰波面的曲率半径是常数,为药柱直径的 2.0~3.5 倍。本文中的探针连续测量系统将探针放置于药柱中心,药柱直径为 100 mm,长度为 200 mm,有机玻璃长度为 20 mm,有机玻璃和水中有效数据取前 20 mm,可以保证在爆轰波到达有机玻璃前炸药已经达到稳定爆轰,爆轰波近似于平面波传入有机玻璃,并在有机玻璃和近场水中产生平面冲击波。

1.2 探针连续测量系统

图 1 为探针连续测量系统的示意图。

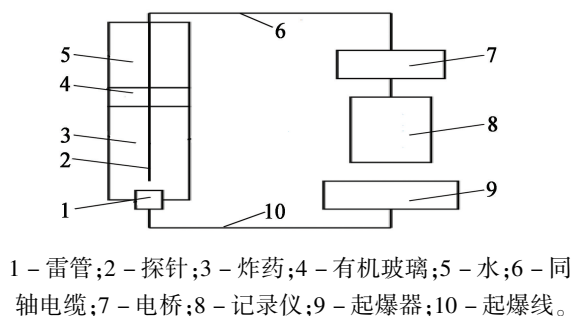


图 1 连续爆速测试系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous detonation velocity testing system

对爆轰波进行连续测量时,为使探针能够测得稳定的爆轰波,需要使探针起始端与雷管的距离保持 50 mm 以上,拉直探针并沿药柱中心线布置。整套装置放在空气中进行试验,试验布置如图 1 所示。

使用密度 1.076 g/cm^3 、爆速 $2\,500 \text{ m/s}$ 左右的多孔粒状铵油炸药。记录仪为高频示波器,采样率为 $80 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,每个单元时间设定为 $200 \mu\text{s}$,选用开阔场地进行对比试验。

2 测量数据的处理和分析

2.1 数据处理

电路原理如图 2 所示。高频示波器与探针串联,电路并联 200Ω 的电阻 R_0 和 12.95 V 的外接电源。由电路原理,有

$$\begin{cases} I = \frac{V}{R_t + R_0}; \\ R_t = (L_0 - Dt)r. \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_t 表示探针电阻; R_0 表示并联电阻; V 表示外界电源电压; L_0 表示探针初始长度; D 表示探针导

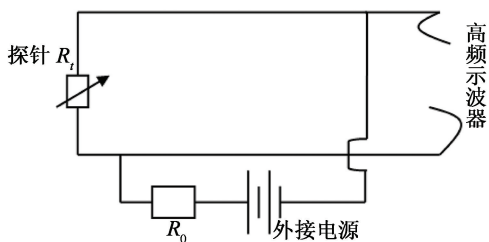


图 2 电路原理

Fig. 2 Circuit principle

通速度; r 表示探针电阻率。由式(1)得:

$$V_t = IR_t = V \left[1 - \frac{R_0}{(L_0 - Dt)r + R_0} \right]. \quad (2)$$

式中: V_t 表示电压随时间变化。再由式(2)得:

$$L = Dt = L_0 - \frac{R_0 V_t}{r(V - V_t)}. \quad (3)$$

由于电路中的同轴电缆内部电阻不能忽略,因此,考虑到同轴电缆内部电阻影响后的式(3)修正后为:

$$L = Dt = \left(L_0 + \frac{R'}{r} \right) - \frac{R_0 V_t}{r(V - V_t)}. \quad (4)$$

式中: R' 为同轴电缆电阻。

通过测量探针插入药柱中的长度,确定炸药与有机玻璃的分界面,也是连续数据线上直线部分的转折点、爆轰波与有机玻璃冲击波的分界点。

2.2 爆轰波速度的计算

根据确定的界点位置,对爆轰波和冲击波的传播数据进行线性拟合,最终得到柱状炸药的爆速和在有机玻璃、水中的冲击波传播速度。

以某一组试验为例,爆轰波拟合方程为: $x = 2.660t + 0.006$,炸药爆速为 $2\,661 \text{ m/s}$ 。有机玻璃中,冲击波拟合方程为: $x = 3.722t - 0.060$,冲击波初始速度为 $3\,722 \text{ m/s}$ 。水中,冲击波拟合方程为: $x = 2.966t - 0.006$,冲击波初始速度为 2.966 m/s 。

处理后的曲线如图 3 所示。

2.3 有机玻璃中冲击波压强的计算

当爆轰波垂直传入有机玻璃中后,传入有机玻璃中、界面处的冲击波符合动量定理,由此可得出

$$p_{t0} = \rho_{t0} D_{t0} u_{t0}. \quad (5)$$

式中: p_{t0} 表示传入有机玻璃中冲击波的初始压强; ρ_{t0} 表示有机玻璃的密度; D_{t0} 表示在有机玻璃中传播的冲击波的初始速度; u_{t0} 表示炸药与有机玻璃界面上有机玻璃中的质点速度。在资料中查询到密度为 1.186 g/cm^3 的有机玻璃雨果尼奥关系式^[10]

$$D_p = 2.85 + 1.35u_p. \quad (6)$$

式中: D_p 、 u_p 分别表示冲击波的速度和有机玻璃中

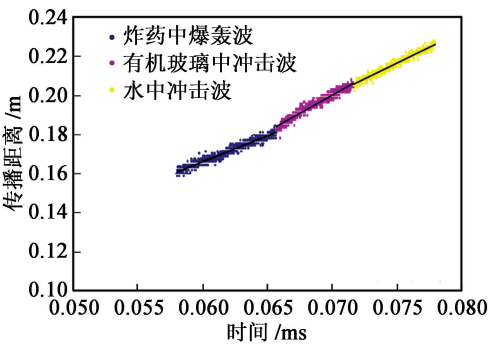


图3 爆轰波和冲击波连续传播曲线

Fig.3 Continuous propagation curve of detonation wave and shock wave

冲击波阵面上的质点速度。由式(6)可以得到用有机玻璃中冲击波速度表示的质点速度公式

$$u_p = \frac{D_p - 2.85}{1.35}。$$

(7)

把质点速度公式与动量定理公式联合,简化到冲击波的压强计算公式为:

$$p_p = \rho_{p0} D_p \frac{D_p - 2.85}{1.35}。$$

(8)

所采用的探针中的有机玻璃密度约为1.18 g/cm³,式(8)就是冲击波超压的计算公式,冲击波速度和有机玻璃密度代入式(7)、式(8)中,即可得出有机玻璃介质中冲击波阵面的初始介质运动速度 u_p 为 646.3 m/s,初始压强 p_p 为 2.853 GPa。

以炸药-有机玻璃体系为研究对象,符合质量守恒、动量守恒定律;考虑到炸药与有机玻璃介质分界面上质点速度连续、压力相等,利用冲击波的声学近似,得到炸药爆压的计算公式为:

$$p_H = \frac{p_{p0}(\rho_0 D + \rho_{p0} D_{p0})}{2\rho_{p0} D_{p0}}。$$

(9)

把上文计算的爆速(D)、冲击波初始速度(D_{p0})、冲击波初始压强(p_{p0})、炸药密度(ρ_0)和有机玻璃密度(ρ_{p0})代入式(9),计算得到工业炸药在炮孔内稳定爆轰产生的 C-J 面爆轰压力 p_H 为 2.46 GPa。由公式

$$p_H = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1}$$

(10)

计算得到绝热指数 $\gamma = 2.24$ 。文献[11]中,爆速在 3 000 m/s 左右的炸药 γ 值在 2.13~2.20 之间。但由于有机玻璃中的压力大于炸药爆压,所以炸药爆轰波在界面反射的是冲击波,用声学近似可能有较大的误差,所以用文献[7]的方法进行计算。

铵油炸药药柱爆炸后,在有机玻璃中产生爆炸冲击波,同时在爆轰产物中产生反射冲击波或稀疏

波。由于铵油炸药的冲击阻抗 ρD 小于有机玻璃的冲击阻抗 $\rho_p D_p$,所以产物中反射波为冲击波。在这种情况下,分界面处冲击波压力与速度的关系式为:

$$u_p = \frac{D}{\gamma + 1} \left[1 - \sqrt{2\gamma \frac{\frac{p_p}{p_H} - 1}{\sqrt{\frac{(\gamma + 1)p_p}{p_H} + (\gamma - 1)}}} \right]。$$

(11)

式(11)中, $p_H = \rho_0 D^2 / (\gamma + 1)$ 。其中, γ 采用试算法,取值范围为声学近似计算出的 γ 值附近。当 γ 取 2.30 时,计算得到 $u_p = 646.9$ m/s, $p_p = 2.854$ GPa。 u_p 和 p_p 与式(7)、式(8)所得结果最为接近,故 γ 取值为 2.30。处理后得到的曲线如图 4 所示。

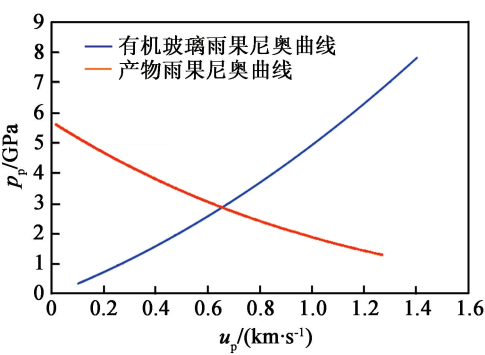


图4 有机玻璃雨果尼奥 p_p - u_p 曲线

Fig.4 Hugoniot p_p - u_p curve of PMMA

2.4 水中冲击波压强的计算

运用对比法,利用冲击波测介质状态参数。在有机玻璃中生成的稳定冲击波,到达有机玻璃和水交界面后,在水中产生冲击波,同时在有机玻璃中产生反射波。图 3 中得到有机玻璃和水中冲击波速度 D_p 、 D_w 分别是 3 722 m/s 和 2 966 m/s。图 4 为有机玻璃雨果尼奥曲线。此外,还有关系式

$$p_p = \rho_p D_p u_p；$$

(12)

$$p_w = \rho_w D_w u_w。$$

(13)

式(12)、式(13)分别为有机玻璃和水的波直线方程。

式(8)和式(11)的交点为有机玻璃中冲击波后的 p 和 u 值,将它们记作 p_p 及 u_p 。而标准材料中的反射波后状态应在向后的 p - u 曲线上,该曲线可近似取为有机玻璃雨果尼奥曲线以 A 点(图 5)为对称点所作的镜面反射。

水中冲击波的波后状态也应在有机玻璃雨果尼奥曲线镜像线上,同时还应在水的波直线上,故两者的交点就是波后状态值,即为 B 点。对比测量法所作曲线如图 5 所示,对比测量法得到的 p 为 2.30 GPa, u 为 776 m/s。

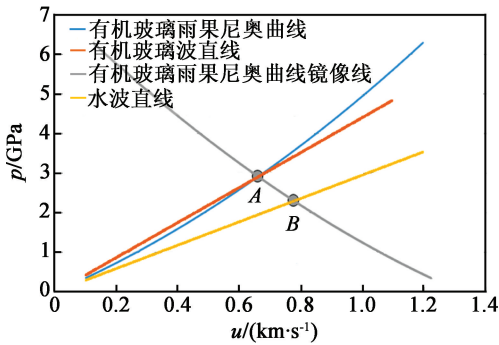


图 5 冲击波对比测量法所作曲线

Fig. 5 Curves used in contrast measurement of shock wave

根据美军军标 MIL—STD—1751^[12] 中水中冲击波速度与质点速度的关系可知：

$$D_w - 1.483 = 25.306 \lg(1 + \frac{u_w}{5.190})。 \tag{14}$$

可反解出质点速度 u_w 的数值：

$$u_w = 5.190(10^{\frac{D_w - 1.483}{25.306}} - 1)。 \tag{15}$$

根据式(15)解出 $u_w = 750 \text{ m/s}$ ，代入式(13)得到 p_w 为 2.23 GPa。 u_w 和 p_w 分别相差 3.5% 和 3.1%。表明该试验方案可以很好地对炸药中爆轰波和有机玻璃中冲击波进行连续测量。

介质中冲击波阵面介质运动速度 u_w 和压强 p_w 的试验结果如表 1 所示。

表 1 介质运动速度和压强试验结果

Tab.1 Medium velocity u and pressure results

项目	有机玻璃-水界面		
	理论值	试验值	差值/%
$u_w/(m \cdot s^{-1})$	750	776	3.5
p_w/GPa	2.23	2.30	3.1

3 结论

- 1) 实现了在一次柱状炸药爆炸中对爆轰波和有机玻璃、水中冲击波的连续测量,获得了真实、有效的试验数据。
- 2) 对有机玻璃和水中近场冲击波速度和超压分别运用公式和试验数据进行求解。结果表明,试验数据基本反映了冲击波的真实情况,该试验方案能很好地对爆轰波冲击波进行连续测量,得到了一种简便、经济的现场测量爆轰波和冲击波速度的方法。

3) 该试验方法能够准确地对爆轰波冲击波进行测量。在之后的试验中,可以将水替换成参数未知的材料,在爆轰过程中通过参数已知的材料来确定参数未知材料的参数。

参 考 文 献

[1] 罗松林,叶序双,顾文彬,等. 水下爆炸研究现状[J]. 工程爆破,1999,5(1):84-87,83.
LUO S L, YE X S, GU W B, et al. Summary of present research situation of underwater explosion[J]. Engineering Blasting, 1999,5(1):84-87,83.

[2] 肖川,宋浦,梁安定. 炸药水中爆炸规律的研究进展[J]. 火炸药学报,2006,29(6):19-22.
XIAO C, SONG P, LIANG A D. Research development of underwater explosion mechanism [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2006,29(6):19-22.

[3] 李晓杰,孙伟,闫鸿浩,等. 水下爆炸焊接和压实[J]. 爆炸与冲击,2013,33(1):104-107.
LI X J, SUN W, YAN H H, et al. Underwater explosive welding and compacting[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(1):104-107.

[4] 赵衡阳,梁云明. 电磁法实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1981(1):67-76.
ZHAO H Y, LIANG Y M. Experimental study by electromagnetic measuring method [J]. Explosion and Shock Waves,1981(1):67-76.

[5] 熊昌彦. 电磁法和压阻法同时测量爆压的探索[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(3):79-81.

[6] 薛彭寿,王淑萍. 大药量水箱法测定炸药爆轰压力的研究[J]. 火炸药,1992(2):10-19.

[7] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京:国防工业出版社,2003:430-433.

[8] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011.

[9] 北京工业学院. 爆炸及其作用[M]. 北京:国防工业出版社,1979.

[10] MARSH S P. LASL shock Hugoniot data [M]. Los Angeles:University of California Press, 1980.

[11] 郑锋,段赞,刘永明,等. 用水箱电探针法测定工业炸药的爆轰压力[J]. 煤矿安全, 2003, 34(6): 40-42.

[12] USAF. An analysis of the aquarium technique as a precision detonation pressure measurement gage: MIL—STD—1751[S].