第54卷第5期
2014年9月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 54, No. 5
Sept. 2014

工程物理、工程力学

文章编号：1000-8608(2014)05-0487-04

压杆材料对反射超压测量影响研究

宜晨虹，胡美娥*，于锦泉，谷　岩

（中国工程物理研究院 流体物理研究所，四川 绵阳　621900）

摘要： 用有限元方法对应变式压杆压力传感器系统进行研究，研究3种不同材料的压杆对应变式压杆压力传感器测试结果的影响；数值模拟了不同上升前沿的梯形脉冲及三角形脉冲条件下不同材料压杆的响应误差. 研究结果表明，铍压杆对测试结果的影响最小，铝合金压杆影响最大；另外，脉冲上升前沿和测量位置对测试结果的影响也很大. 模拟结果对压杆材料的选择有一定参考价值.

关键词： 反射超压；应变；应力波；压杆

中图分类号： O384　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201405001

0 引　言

在爆炸冲击领域研究中，空气冲击波反射超压的确定是研究结构动力学响应的基础. 测量空气冲击波反射超压比较常用的方法是使用应变式压杆压力传感器[1]. 利用应力波在压杆中的传播原理测量扰动压力的思想最早由 Hopkinson[2] 提出，早期国外的研究一般集中在压杆的频率响应等方面[3-7]. 国内对压杆压力传感器的研究，最早源于范良藻等[8]，而对应变式压杆压力传感器的研究则源于西北核技术研究所的研究人员. 胡永乐等[9]介绍了应变式压杆压力传感器测量空气冲击波反射超压的原理及方法；王长利等[10]介绍了测试仪器系统的构成及工作原理；张德志等[11]对应变式压杆压力传感器系统进行了数值模拟研究，研究了系统的可测频率下限、频响特征和测量的有效时间等. 研究表明应变式压杆压力传感器是一种频响高、量程大、抗干扰能力强和结构简单的测量仪器，可用于爆炸近区壁面反射压力测试. 不同材料加工的压杆对应力波传播的影响不同，在选取材料时应尽可能选取对应力波传播扰动小的材料. 本文用数值模拟的方法研究3种材料性能差异较大的压杆材料的应力波传播，以定量得到压杆材料性质及力学性能对测试结果的影响，为压杆材料选择提供参考.

1 应变式压杆压力传感器原理介绍

应变式压杆法测量反射超压基于如下思想：已知压力脉冲作用在压杆的一端，它在杆内激发一个沿杆传播的应力脉冲，在圆杆的某处利用高灵敏度动态应变片，测量杆中应力随时间的变化，根据弹性应力脉冲在圆杆中的传播规律就可以推断出这个端面上外加的压力脉冲的特征.

细长杆中纵波的波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \tag{1}$$

式中：x、u 分别为细长杆横截面的坐标和位移；c_0 为纵波在细长杆中的传播速度，$c_0 = \sqrt{E/\rho}$，E、ρ 分别为杆材料的弹性模量和杆的密度. 在弹性范围内，杆的 c_0 为常数，因此式(1)属于二阶拟线性偏微分方程. 根据偏微分方程理论，波动方程(式(1))的解为

$$u = f(x \mp c_0 t) \tag{2}$$

由此可知，位移 u 以波的形式沿杆长传播，其传播速度为 c_0.

对式(1)求一阶偏导可得

$$v = \partial u/\partial t = \mp c_0 f'(x \mp c_0 t) \tag{3}$$

$$\varepsilon = \partial u/\partial x = f'(x \mp c_0 t) \tag{4}$$

$$\sigma_x = E\varepsilon = Ef'(x \mp c_0 t) \tag{5}$$

收稿日期： 2014-03-29；　**修回日期：** 2014-07-23.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11172279).
作者简介： 宜晨虹(1975-)，男，博士，副研究员，E-mail：yichenhong@163.com；胡美娥*(1978-)，女，工程师，E-mail：micromiss@163.com.

可见,质点速度、应变、应力也都以波速 c_0 沿杆长传播.

式(1)有一个特解为

$$u = u_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - c_0 t) \tag{6}$$

式(6)表示沿 x 方向传播的正弦行波,显然,波长 λ 和波的传播速度无关.根据傅里叶分析方法,任何脉冲都可以用它的正弦分量叠加来表示.既然各个正弦分量都以同样的速度 c_0 传播,那么脉冲在传播过程中,各个正弦分量之间不会发生相位差,因此,在脉冲的传播过程中,其形状不变.

根据以上理论,对不同材料压杆的应变式压杆压力传感器系统进行数值模拟,可以定性或半定量地得到压杆材料力学性质对测试结果的影响,为空气冲击波反射超压实验测量结果的科学解读提供重要参考.

2 计算模型

有限元计算程序采用动力学分析常用的软件LS-DYNA.3种材料的力学参数见表1.3种材料的压杆直径均取5 mm,其中铝合金压杆和钢压杆的长度为370 mm,铍压杆的长度为740 mm.因为声音在铍中传播速度快,为了消除自由端反射对测点的影响,铍压杆需要加长.为了使计算带来的误差不影响结果的比较,各个压杆截面的单元形状划分完全相同,单元长度也相同.铝合金和钢压杆的纵向单元为740个,铍压杆的纵向单元为1 480个;横截面单元均为75个.为了提高计算精度,单元划分为规整的六面体.根据力学对称性原理,计算模型取四分之一进行计算,截面处取对称约束,有限元计算模型见图1.边界均为自由边界,计算取时长100 μs.

在进行测试实验时,应变片的位置一般在距端面5~10 cm,因此研究5 cm和10 cm处的响应.分别对对称梯形脉冲和三角形脉冲在压杆中的传播进行了数值模拟研究.脉冲施加在压杆端面,峰值为100 MPa.

表1 材料参数

Tab.1 Material parameters

材料	泊松比	弹性模量/GPa	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	声速/($m \cdot s^{-1}$)
铍	0.05	306	1 840	12 895
铝合金	0.33	70	2 700	5 091
钢	0.28	209	7 800	5 176

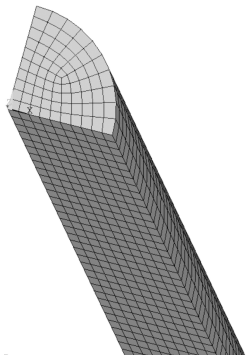


图1 有限元计算模型

Fig.1 The FEM model

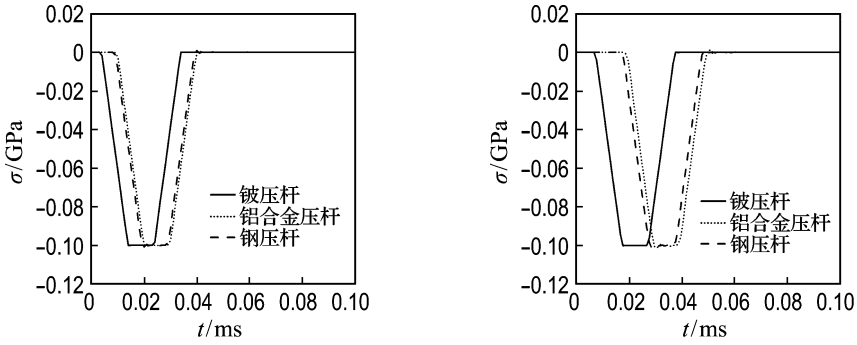
3 计算结果

图2给出了上升前沿为10 μs的梯形脉冲在距加载端5 cm和10 cm处的应力响应.从图可知,脉冲在铍压杆中传播时保持初始形状,脉冲幅值几乎没有振荡,而脉冲在铝合金压杆和钢压杆中传播至5 cm处时,幅值振荡很小,传播至10 cm处时,幅值振荡变得明显.

图3给出了上升前沿为5 μs的梯形脉冲在距加载端5 cm和10 cm处的应力响应.和图2一样,脉冲在铍压杆中传播时保持初始形状,脉冲幅值几乎没有振荡,而脉冲在铝合金压杆和钢压杆中传播至5 cm处已可观察到细微的幅值振荡,在10 cm处时幅值振荡更为明显.

图4给出了上升前沿为1 μs的梯形脉冲在距加载端5 cm和10 cm处的应力响应.可以看到,脉冲在铍压杆中传播时保持初始形状,脉冲幅值几乎没有振荡;而铝合金压杆和钢压杆在5 cm处的响应差别很大,铝合金压杆中应力峰值提高了约16%,而钢压杆中应力峰值提高了约4%;在距加载端10 cm处铝合金压杆中应力峰值提高了约19%,而钢压杆中应力峰值提高了约17%,差别趋于缩小.

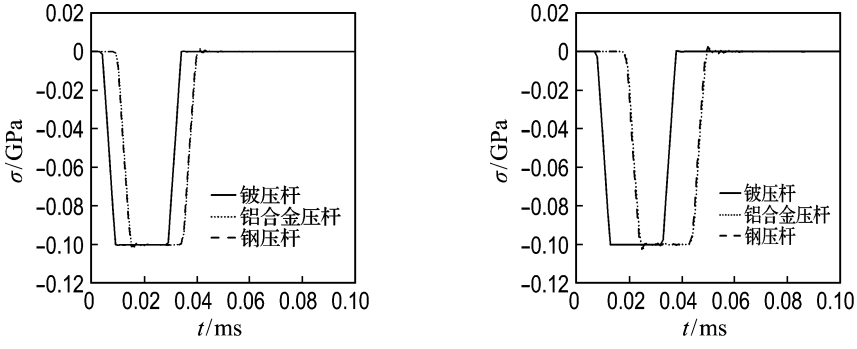
图5给出了上升前沿为1 μs的三角形脉冲在距加载端5 cm和10 cm处的应力响应.从图可以看到,铍压杆的应力峰值衰减最小,其次是钢压杆,铝合金压杆的应力峰值衰减最大.在距加载端5 cm处,铍压杆的应力峰值衰减了8.2%,钢压杆的应力峰值衰减了34%,而铝合金压杆的应力峰值衰减了39%;在距加载端10 cm处,相应衰减值分别是14%、41%和44%.而反向振荡幅度却是铝合金压杆最大,钢压杆次之,铍压杆最小.



(a) 5 cm 处　　(b) 10 cm 处

图 2　10 μs 上升前沿梯形脉冲传播至不同位置处的应力响应

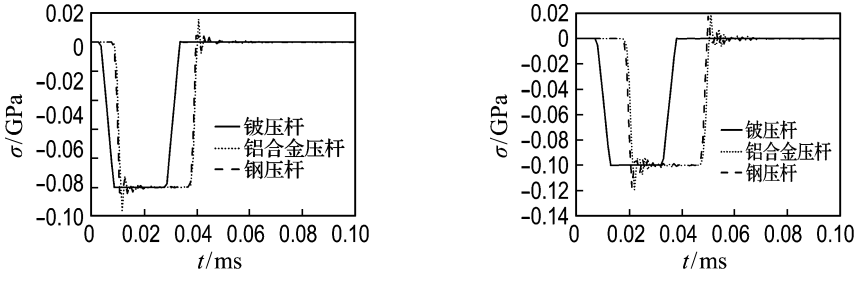
Fig. 2　Stress response at different positions in the transmition of the trapezoidal impulse with rising front of 10 μs



(a) 5 cm 处　　(b) 10 cm 处

图 3　5 μs 上升前沿梯形脉冲传播至不同位置处的应力响应

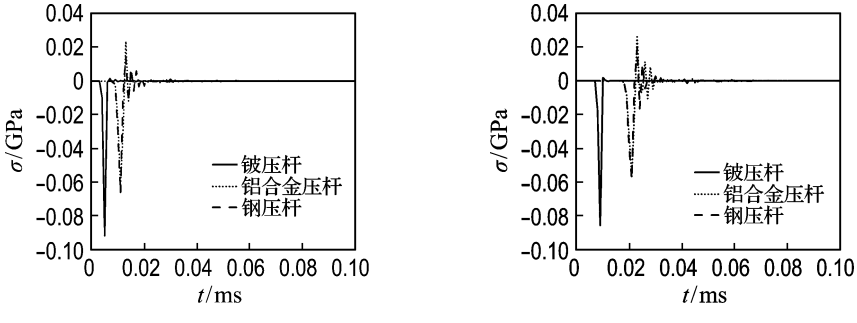
Fig. 3　Stress response at different positions in the transmition of the trapezoidal impulse with rising front of 5 μs



(a) 5 cm 处　　(b) 10 cm 处

图 4　1 μs 上升前沿梯形脉冲传播至不同位置处的应力响应

Fig. 4　Stress response at different positions in the transmition of the trapezoidal impulse with rising front of 1 μs



(a) 5 cm 处　　(b) 10 cm 处

图 5　1 μs 上升前沿三角形脉冲传播至不同位置处的应力响应

Fig. 5　Stress response at different positions in the transmition of the triangle impulse with rising front of 1 μs

4 结 语

从以上计算可知,脉冲上升前沿越短,测量的波形振荡越剧烈;离加载端距离越远,振幅及波形失真越大;不同的压杆材料对测试结果的影响很大,铍是一种应力波振荡小、频率响应高、应力峰值衰减小的理想压杆材料,而钢在波形振荡与应力峰值衰减方面都略优于铝合金.因此,在选择压杆材料时,应选用弹性模量较高的材料;进行测试时,建议应变片尽可能布置在距离加载端比较近的位置.另外,本文的结论也可用于霍普金森压杆实验.

参考文献:

[1] Dick R D, Williams J D, Wang X J. Measurement of pressure from explosives in a closed chamber and the free field [R] // **ARL-CR-309**. Adelphi: Army Research Laboratory, 1996: 8-22.

[2] Hopkinson B. A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives by the impact of bullets [J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Physical, Mathematical and Engineering Sciences**, 1914, **A213**: 437-452.

[3] Jones I R. A review of the pressure bar technique for measuring transient pressures [R] // **AD-264548**. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1961: 1-15.

[4] Ragland K W, Cullen R E. Piezoelectric pressure transducer with acoustic absorbing rod [J]. **The Review of Scientific Instruments**, 1967, **38**(6): 740-742.

[5] Blackstock A W, Kratz H R, Feeney M B. Piezoelectric gauges for measuring rapidly varying pressures up to seven kilobars [J]. **The Review of Scientific Instruments**, 1964, **35**(1): 105-110.

[6] Edwards D H, Davies L, Lawrence T R. The application of a piezoelectric bar gauge to shock tube studies [J]. **Journal of Scientific Instruments**, 1964, **41**(10): 609-613.

[7] Jones I R. Beryllium pressure bar having submicrosecond risetime [J]. **The Review of Scientific Instruments**, 1966, **37**(8): 1059-1061.

[8] 范良藻,李国彬,李广达. 标定激波管的激波前沿构造和毫微秒传感器[J]. 力学学报, 1986, **18**(6): 558-560.
FAN Liang-zao, LI Guo-bin, LI Guang-da. The structure of shock-wave front in calibration shock-tube and the pressure transducer with nanon-second response [J]. **Acta Mechanica Sinica**, 1986, **18**(6): 558-560. (in Chinese)

[9] 胡永乐,林俊德,金飞华,等. 应变式压杆压力传感器在冲击波载荷测试中的应用[J]. 实验力学, 2006, **21**(5): 547-552.
HU Yong-le, LIN Jun-de, JIN Fei-hua, *et al*. Strain type pressure rod gauge used for measuring blast loading [J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2006, **21**(5): 547-552. (in Chinese)

[10] 王长利,李 焰,张德志,等. 容器内爆炸多传感器测试系统的原理设计与应用[J]. 实验力学, 2007, **22**(2): 131-136.
WANG Chang-li, LI Yan, ZHANG De-zhi, *et al*. The principle design and application of multi-sensors testing system for explosion in container [J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2007, **22**(2): 131-136. (in Chinese)

[11] 张德志,李 焰,钟方平,等. 冲击波壁面反射压力的压杆测试法[J]. 兵工学报, 2007, **28**(10): 1256-1260.
ZHANG De-zhi, LI Yan, ZHONG Fang-ping, *et al*. Pressure bar method to measure the reflected blast wave pressure in small scale distance [J]. **Acta Armamentarii**, 2007, **28**(10): 1256-1260. (in Chinese)

Research on effects of materials of pressure bar on measure of reflected pressure

YI Chen-hong, HU Mei-e*, YU Jin-quan, GU Yan

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The finite element method is applied to analyze the strain type pressure bar system. The effects of three different materials of the pressure bar on measure results obtained by the strain type pressure bar system are studied. By numerical simulation, the response errors of pressure bars with different materials under different rising front of trapezoidal impulse and triangle impulse are investigated. The results show that the influence of the beryllium pressure bar on the measure results is minimum and that of the aluminum alloy pressure bar is maximum. In addition, the impulse rising front and measuring position have great influence on the measure results. The simulation results can provide some references for choosing the material of the pressure bar.

Key words: reflected pressure; strain; stress wave; pressure bar