

doi: 10.7690/bgzdh.2025.06.012

一种冲击波动态压力测量仪校准方法

张 琨, 付 宇, 李鹏飞, 任淑红

(中国兵器工业试验测试研究院检验与计量中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: 针对武器靶场冲击波超压测量仪的现场校准问题, 设计一种利用激波管对冲击波动态力测量仪校准的方法。基于波面在空气中的传输特性分析动态压力的产生过程以及数学关系。根据 Navier-Stokes 方程和有限体积法仿真对压力波在低压段内传播过程及在端面边界反射后产生的二次升压现象进行准确预测, 并对冲击波动态压力测量仪进行重复性测量。对测量信号的时域、频域以及相频特性进行分析。结果表明: 空气激波管能较好地模拟实际工况下的爆炸动态过程, 可对冲击波动态压力测量仪进行校准。

关键词: 激波管; 冲击波; 爆炸; 动态力; 校准方法

中图分类号: TJ410.5; O389 **文献标志码:** A

Calibration Method of Shock Wave Dynamic Pressure Measure Instrument

Zhang Kun, Fu Yu, Li Pengfei, Ren Shuhong

(Center of Metrological and Inspection, NORINCO Group Testing and Research Institute, Huayin 714200, China)

Abstract: Aiming at the problem of on-site calibration of shock wave overpressure measuring instrument in weapon shooting range, a method of calibrating shock wave force measuring instrument by using shock tube is designed. Based on the transmission characteristics of the wave surface in the air, the generation process and mathematical relationship of the dynamic pressure are analyzed. According to the Navier-Stokes equation and the finite volume method, the propagation process of the pressure wave in the low pressure section and the secondary pressure rise phenomenon after the reflection of the end face boundary are accurately predicted, and the repeatability measurement of the shock wave dynamic pressure measuring instrument is carried out. The time domain, frequency domain and phase frequency characteristics of the measured signal are analyzed. The results show that the air shock tube can well simulate the dynamic process of explosion under actual working conditions, and can be used to calibrate the shock wave dynamic pressure measuring instrument.

Keywords: shock tube; shock wave; explosion; dynamic force; calibration method

0 引言

在武器试验测试过程中, 伴随爆炸产生的微秒级冲击波作为武器系统威力评估的重要指标, 常用于各型号弹体战斗部爆炸试验威力测量以及各类制导武器末端性能的考核^[1-2]; 因此, 对动态压力传感器的准确性进行校准成为冲击波动态压力测量系统的关键技术^[3]。由于冲击波有作用时间短、高动态、高冲击以及多因素耦合等特点, 校准装置需要具备以下条件^[4-7]: 在模拟爆炸产生瞬间的工况条件时需要极高的响应能力; 可模拟实际工况的波面运动过程; 在校准测量装置末端需能承受瞬态强有力的冲击; 校准装置本身可精确测量多种影响因素。

目前, 动态压力测量校准包括快开阀压力校准、正弦压力校准、脉冲压力校准以及激波管动态压力校准等方法^[8]。快开阀压力校准系统响应时间仅到毫秒级, 正弦压力校准系统不能模拟实际工况下的测试量级, 脉冲压力校准系统在脉宽测量、灵敏度

测试方面具有良好的表现, 但阶跃上升时间较长, 而激波管可更好地模拟爆炸产生的过程以及具有出色的阶跃上升压力产生方法、带宽大以及过冲量便于计算等特性成为武器靶场校准冲击波动态压力的首选^[9]。

1 动态压力产生基本原理

某型战斗部爆炸冲击波归一化后的 2 维模型如图 1 所示, 负值代表冲击波的幅度方向。

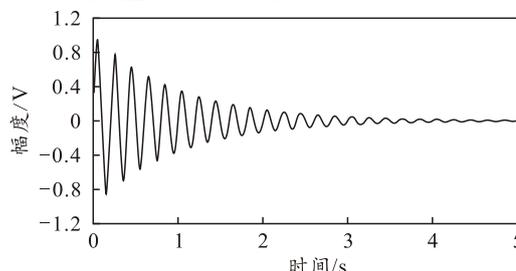


图 1 某爆炸冲击波归一化

在武器试验过程中, 爆炸发生时的冲击波随时

收稿日期: 2024-08-03; 修回日期: 2024-09-04

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSJT20208A001)

第一作者: 张 琨(1993—), 男, 陕西人, 硕士。

间的变化规律性衰减，其在模拟爆炸产生动态压力的过程中，阶跃压力波面震荡同时会在管腔内变化，同时幅值变弱^[10-11]。图 2 所示为激波产生装置以及测量系统。

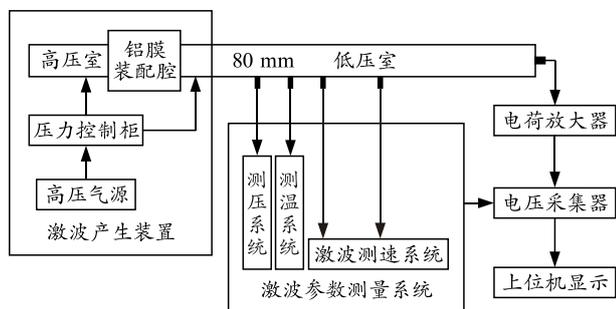


图 2 激波产生装置及测量系统

空气激波管作为阶跃压力产生的本体，可产生 ns 级的动态压力，发生激波的本体由 80 mm 口径、7 m 长的金属制管腔、气压控制柜、高压气源以及铝膜装配室组成。在铝膜装配室夹入不同厚度的铝膜片，通过高低压室的压力控制压缩气体或者惰性气体自然破膜，气体流动产生波面平整的入射激波，以模拟实际工况下的爆炸冲击波进行传感器校准。当激波管的工作介质为空气时，空气中的音速计算如式(1)所示：

$$a = 331.45\sqrt{T/273.15} \quad (1)$$

式中 T 为低压室工作介质的初始温度，单位为 K。

入射激波的马赫数如式(2)所示：

$$M_s = \sqrt{(6P_{21} + 1)/7} \quad (2)$$

式中 P_{21} 为入射激波的压力比，计算如式(3)所示：

$$P_{21} = P_2/P_1 = (M_s^2 - 1)P_1/6 \quad (3)$$

3 维关系如图(3)所示。当破膜前低压室压力大于 5 时，入射激波的压力比快速变化，可产生波面更为平整的阶跃压力。

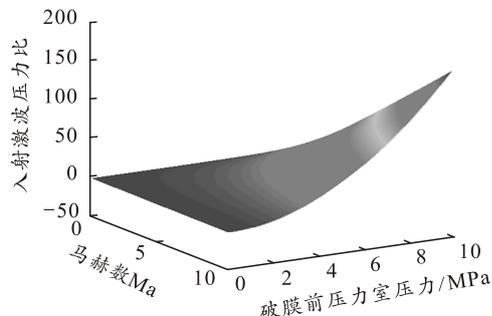


图 3 动态力各参数关系

入射激波的阶跃压力计算如式(4)所示：

$$\Delta P_2 = 7(M_s^2 - 1)P_1/6 \quad (4)$$

式中 P_1 为破膜前低压室压力； P_2 为入射激波压力。

由于入射激波速度快、压力大以及响应快等特点，激波阵面在运动到腔体端面后会形成反射激波，反射激波的反复运动会在传感器端面产生不同大小的阶跃压力。反射激波阶跃压力计算如式(5)所示：

$$\Delta P_3 = 7(M_s^2 - 1)[(M_s^2 + 5)/(4M_s^2 + 2)]P_1/3 \quad (5)$$

反射激波的压力比计算如式(6)所示：

$$\Delta P_4 = (7M_s^2 - 1)[(4M_s^2 - 1)/(M_s^2 + 5)]/3 \quad (6)$$

入射激波与反射激波的阶跃压力之比如式(7)所示：

$$\Delta P_5 = \Delta P_2/\Delta P_3 = (2M_s^2 + 1)/(M_s^2 + 5) \quad (7)$$

当马赫数趋于无穷大时，式(7)极限值为 2，当马赫数小于 10 时，阶跃压力比值呈现垂直式增长，表明激波发生的初始时刻管腔内气体参数变化更大。极限值逼近关系如图 4 所示。

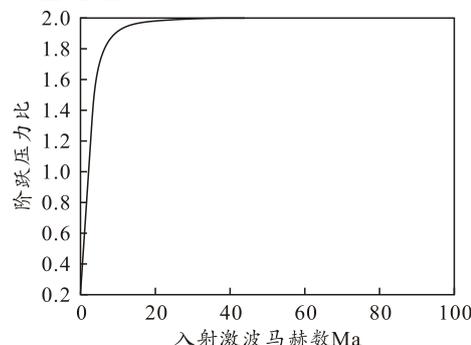


图 4 马赫数与入射激波关系

当入射激波的压力比 $P_{21}=2$ ，室温为 20 °C 时，得出射激波马赫数为 1.363，其入射激波的高压室压力为低压室的 2 倍，反射激波压力为 3.75 MPa。

2 基于有限体积法的动态力过程仿真

利用 ANSYS 仿真破膜后的管腔内激波的压力动态。由于激波管的内部流场空间近似于理想的圆柱体，因此假设计算模型为 2 维轴对称。且激波管内气体为空气，无明显物质浓度差异，故在仿真模型中忽略多种特性和化学反应。采用理想气体 Navier-Stokes 方程来模拟激波管内气体流动过程，其积分形式的控制方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V Q dV + \iint_S (f(Q) \cdot n) dS = \iiint_V (H + H_D) dV \quad (8)$$

式中： n 为网格单元边界法向量； Q 为单元守恒项； $f(Q)=F+G+F_D+G_D$ ； F 和 G 为对流通量； F_D 和 G_D 为对应粘性流动张量； H 和 H_D 为轴对称模型简化产生的源项矢量。根据有限体积计算模型，对激波管内气体压力动态传播过程进行仿真，如图 5 所示。

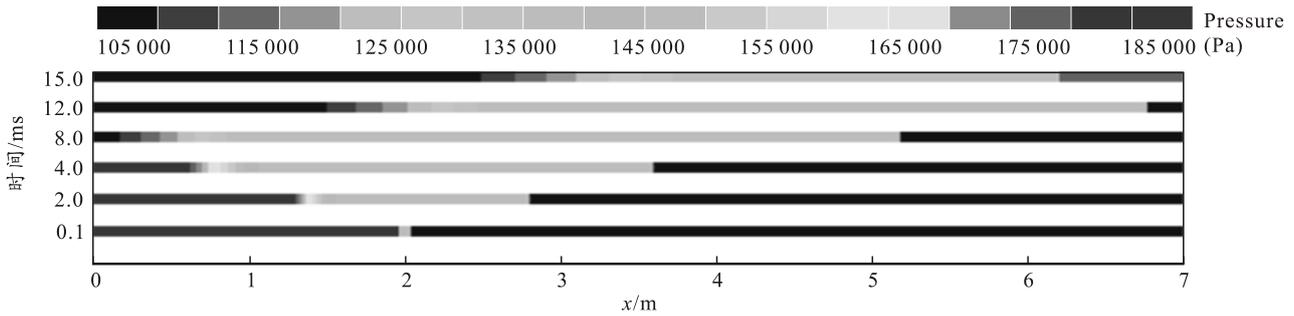


图 5 管腔内动态压力作用云

通过对不同时刻激波管内压力分布云图的对比, ANSYS 可清晰地仿真出管腔内气体压力传播过程, 尤其是压力波在低压段内传播及端面边界反射后产生的二次升压现象有较为准确的预测。为更了解激波管内的气体运动具体、准确的运动参数, 以及气体压力波与气体速度之间的关系, 对激波管内气体运动参数沿轴向分布情况进行对比析, 如图 6 所示。

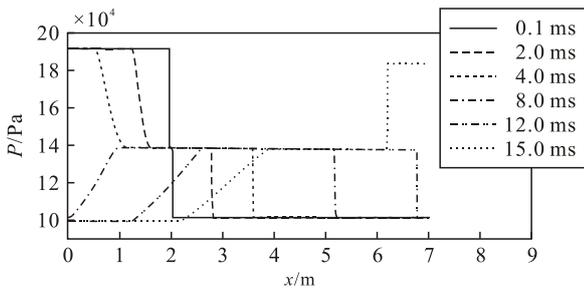


图 6 管腔内轴向压力变化

图 6 为激波管内轴向动态压力的变化过程, 可知阶跃压力波面在 0.1 ms 时 2 m 处压力骤降, 表明了激波在破膜后阶跃压力形成的瞬间。在产生动态压力时, 波面在激波管内沿轴向的运动速度也将持续上升, 如图 7 所示。

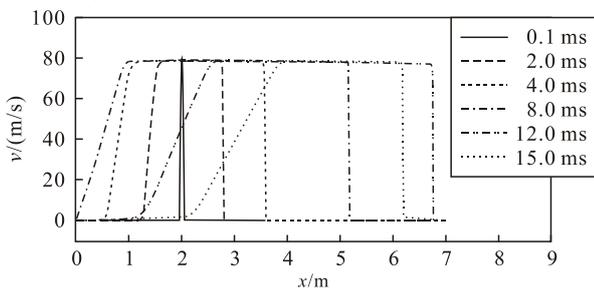


图 7 管腔内轴向速度变化

综合图 6 和 7 阶跃压力波面在 0.1 ms 时 2 m 处的运动参数可知: 破膜后形成力的瞬间, 速度快速上升, 压力快速下降, 表明了破膜后不同段气体的流动也随破膜逐渐增大。在 7 m 处时, 激波面因撞击传感器端面后速度急剧下降。

根据上述仿真可知, 大口径激波管能较好地模

拟实际工况条件下爆炸产生的冲击波, 其动态压力产生时速度以及压力都可控, 压力值准确、可靠, 速度平稳; 因此, 可以利用大口径激波管动态压力产生系统对冲击波超压测量仪进行校准。

3 校准测试和信号谱分析

基于以上分析, 利用激波管产生的动态压力进行冲击波超压测量仪校准测量, 测量连接如图 8 所示。此次校准测量仪选用 601CAB 系列 SN5265491 传感器, 激波管采用速度触发的模式, 自然破膜马赫数 1.3, 破膜压力 0.09 MPa。

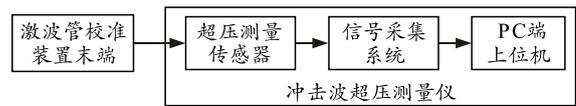


图 8 冲击波测量仪校准连接

在连续相同工况下, 对超压测量仪进行 10 次校准测量, 测量结果如表 1 所示。将冲击波测量仪的 10 次测试结果的平均值作为最终测量结果, 得到破膜时产生较为标准的动态压力幅值, 测量平均值为 0.096 MPa, 标准偏差为 0.004, 变异系数为 4.022%。

表 1 冲击波测试系统重复性测量结果

| 校准序号 | 测量结果 P/MPa | 校准序号 | 测量结果 P/MPa |
|------|---------------|------|---------------|
| 1 | 0.098 737 | 6 | 0.097 062 |
| 2 | 0.090 513 | 7 | 0.092 936 |
| 3 | 0.097 050 | 8 | 0.100 424 |
| 4 | 0.098 105 | 9 | 0.089 881 |
| 5 | 0.098 316 | 10 | 0.102 111 |

前 3 次测量结果对比如图 9 所示, 0.3 ms 前波形拟合度高, 在 0.1 ms 处波峰的误差值仅有 1%。

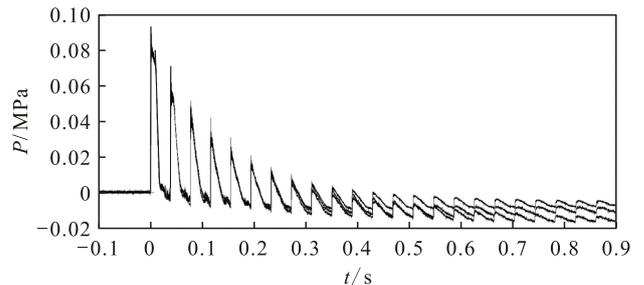


图 9 测量结果对比

取 10 次测量值中的 1 组典型数据进行信号谱分析, 测量结果如图 10 所示。

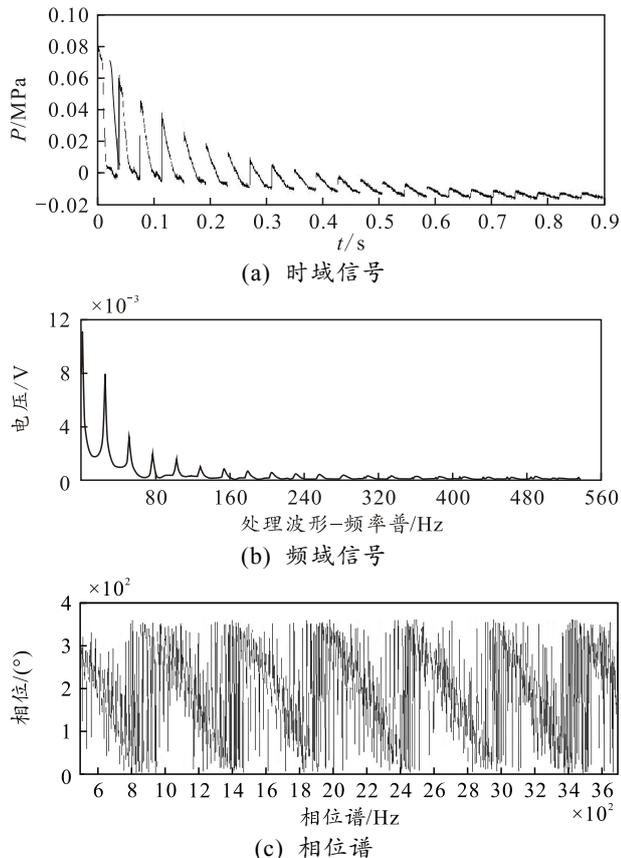


图 10 典型冲击波信号谱

图 10(a)信号每一簇波的最大值代表不同时刻冲击波面运动后产生幅值的大小, 每次阶跃式上升的斜率代表测量系统受激励后响应的长短, 每峰下面积表示冲量大小。如图 10(b)所示, 将时域信号进行 FFT 算法后, 根据频率特性曲线, 可知冲击波的本质是由不同频率的冲击信号组成。其相频特性曲线如图 10(c)所示, 信号的相位在一定频率点进行翻转, 该线性相位系统主谱上的噪声信号是由于信号中包括不同频率的谐波造成。

4 结论

1) 基于波面传输的特性分析, 得到入射激波马赫数与阶跃压力比的关系, 描述了波面传输过程的数学关系。通过参数计算, 得到了 20 °C 下, 入射激波的马赫数为 1.363, 反射激波压力为 3.75 MPa。

2) 利用 Navier-Stokes 方程及有限体积法对管腔内的波面传输过程进行仿真, 根据云图对比, 其结果表明激波管能够较好地模拟爆炸过程中产生的冲击波动态压力。

3) 根据 ANSYS 有限元软件仿真出了管腔内不同段气体压力传播的变化过程以及不同位置的气体传播速度运动参数, 对压力波在低压段内传播及端面边界反射后产生的二次升压现象有准确的预测。

4) 通过激波管对冲击波测量仪器进行了重复性测量。结果表明, 重复性测量平均值为 0.096 MPa, 标准差为 0.004, 变异系数为 4.022%, 测量误差为 1%, 该仪器能够较好地模拟实际工况下的爆炸过程并对冲击波测量仪进行校准。

5) 根据测试结果, 对测试信号的时域、频域以及相频特性进行分析, 并给出了信号中所包含的过冲量、幅值大小以及频率特性含义。

6) 该校准方法简单、实用性强、重复性与稳定性较好、可实现现场校准。对动态压力测量仪的校准响应时间达微秒级, 该系统装置和方法对于动态压力测量仪校准具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 李丽萍, 孔德仁, 苏建军. 毁伤工况条件下冲击波压力电测法综述[J]. 爆破, 2015, 32(2): 39-46.
- [2] 孔德仁, 李永新, 朱明武. 冲击波测量用压力传感器静态校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(Z1): 16-17.
- [3] 施宇成, 孔德仁, 徐春冬, 等. 爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 1-10.
- [4] 殷俊兰, 苏健军, 王辉, 等. 一种适合于水中爆炸压力测量的传感器[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(6): 67-68, 77.
- [5] 李强, 王中宇, 王卓然, 等. 压力传感器激波管校准条件下的动态参数估计[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1223-1230.
- [6] 史博, 杨军, 李程. 脉冲式动态压力校准系统模型及性能分析[J]. 计量学报, 2017, 38(S1): 136-141.
- [7] 杨凡, 孔德仁, 姜波, 等. 基于激波管校准的冲击波压力传感器动态特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 330-336.
- [8] 田俊宏, 张大有, 戴宜霖, 等. 动态压力校准技术现状分析[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(2): 9-14.
- [9] 魏娟, 张志杰, 赵晨阳, 等. 冲击波测试系统中压力传感器的实时动态补偿实现[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4): 545-550.
- [10] 刘渊, 杨军, 梁志国, 等. 一种基于激波管的阶跃加速度校准装置, CN112415228A[P]. 2021-2-26.
- [11] 王海锋, 禄晓飞, 涂勇国, 等. 冲击波超压测量数据处理方法研究[J]. 现代防御技术, 2020, 48(2): 69-73, 95.