文章编号：1000-5773(2011)04-0310-07

新型应变式高膛压测试系统研制*

李新娥[1,2]，祖 静[1,2]，徐 鹏[1]

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室，山西太原 030051；
2. 中北大学信息与通信工程学院，山西太原 030051)

摘要：根据电子测压器的特点，以测压器的端盖作为弹性敏感元件，研制出了一种新型的集测压器壳体与传感器于一体的应变式高膛压测试系统。利用厚板变形理论，对电子测压器壳体的力学特性进行了理论分析，并利用 ANSYS 对壳体的应力、应变分布及弹性敏感元件的模态进行了仿真模拟。50～550 MPa 静压标定实验结果表明，该测试系统的线性误差为 0.62%，基本误差为 4.6%，灵敏度为 2.2313×10^{-12} Pa^{-1}，压力测量范围可涵盖 0～600 MPa；动态实验结果表明利用该应变式测试系统测量高膛压是准确可行的。

关键词：压力；应变；膛压
中图分类号：O521.3；TH823 **文献标识码**：A

1 引 言

膛压测试对常规兵器的研究设计和生产验收极其重要。准确可靠的膛压数据是分析内弹道和装药结构的合理性、炮弹各部件(如弹体、引信、身管、炮尾和炮闩)的强度设计、后坐装置阻力曲线以及炮架强度和刚度设计的基本依据。传统的膛压测试仪器是放入式铜柱(铜球)测压器[1-2]。放入式铜柱(铜球)测压法较为成熟，它是将铜柱(铜球)测压器直接放入被测环境中，通过铜柱(铜球)的塑性变形量换算出最大压力，虽然使用方便，但只能得到最大压力，无法获取整个发射过程的膛压动态曲线[3]，现已无法满足高新武器研制的要求。目前，电子测压器已逐步取代内置式铜柱(铜球)测压器。电子测压器既有铜柱(球)测压器无引线、使用方便的特点，又有引线电测法测试精度高、能记录膛压-时间曲线的特点，并且可重复使用，但也存在不足之处。目前，国产的电子测压器采用的是压电传感器，存在着零点漂移问题，并且其体积较大，不能满足小口径火炮的膛压测试；而对于进口的电子测压器，虽然其体积小，仅为 22 cm^3，能够满足中、小口径火炮膛压测试的要求，但价格昂贵，不利于推广使用。

基于上述原因，我们研制了一种体积小、成本低的电子测压器。由于电子测压器在测试火炮膛压时，与药筒一起置于火炮膛内(见图 1)，火炮发射时膛内压力作用于测压器四周，各处受力一样，且在承压过程中测压器的壳体有较大的弹性变形，因此可以用测压器的端盖作为弹性敏感

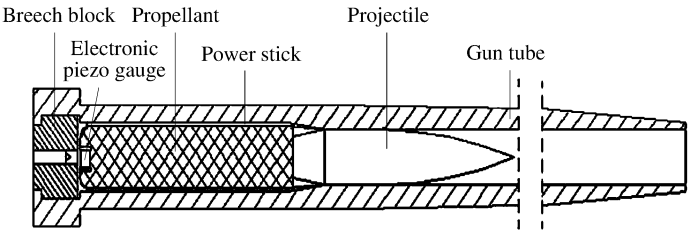


图 1 电子测压器应用示意图

Fig. 1 Application diagram of electronic piezo gauge

* **收稿日期**：2010-07-07；**修回日期**：2010-12-06
基金项目：国防科技重点实验室基金(9140C1204011007)
作者简介：李新娥(1971－)，女，博士，副教授，主要从事测试计量技术研究. E-mail：xine.li@sohu.com

元件,设计一种集测压器壳体与传感器于一体的应变式膛压测试系统。

2　弹性敏感元件的设计

电阻应变式传感器由弹性敏感元件和电阻应变片构成,通过测量电阻应变片的电阻值变化,确定被测压力的大小。弹性敏感元件的结构形式需要根据被测参数进行设计。

2.1　测压器的结构

在设计测压器结构时,依据 GJB 2973－97《火炮内弹道试验方法》,充分考虑火炮内弹道特性的影响,规定测压器的总体积(同时放入多个电子测压器时的总体积)小于药室容积的 2.5%,即遵循体积最小原则。应变式电子测压器的结构(见图 2)主要分为弹性端盖和筒体两部分。将弹性端盖作为测压器的敏感元件。测压器筒体的一端是闭合的。安装时,先将电路筒(包括电路板、电池及开关等)与弹性体端盖固定,然后与保护筒安装在一起。这种结构的改进不仅缩小了测压器体积,同时也回避了下端盖与筒体之间的密封问题。

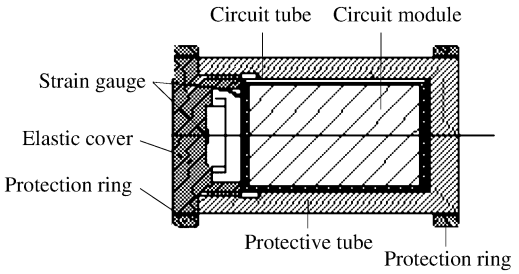


图 2　应变式电子测压器结构

Fig. 2　Structure of strain type electronic piezo gauge

2.2　弹性敏感元件的应力、应变理论分析

要使传感器具有较高的灵敏度,通常要求电阻应变片有较高的应变水平,即弹性体上的贴片部位应具有较高的应变水平。

本研究将测压器的弹性端盖作为应变式传感器的敏感元件,在弹性端盖底面粘贴高精度应变片,因此在设计弹性元件时应使整个端盖在受到外压时都处于弹性范围,并且保证应变片粘贴在最大应力处。由于弹性端盖是一个变厚度厚板,由厚板变形理论可以得到膜片在各方向上的应力和应变情况。

径向应力:
$$\sigma_r = 3p[R^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)]/(8h^2) \tag{1}$$

切向应力:
$$\sigma_t = 3p[R^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)]/(8h^2) \tag{2}$$

径向应变:
$$\varepsilon_r = (\sigma_r - \mu\sigma_t)/E = 3p(1-\mu^2)(R^2 - 3r^2)/(8Eh^2) \tag{3}$$

切向应变:
$$\varepsilon_t = (\sigma_t - \mu\sigma_r)/E = 3p(1-\mu^2)(R^2 - r^2)/(8Eh^2) \tag{4}$$

式中:p 为均布压力(Pa);E 为膜片材料的弹性模量(Pa);R 为膜片半径(cm);h 为膜片厚度(cm);r 为膜片任意部位的半径(cm);μ 为膜片材料的泊松比。

由(1)式～(4)式可以推得:在膜片中心($r=0$)处,切向应力与径向应力相等,切向应变与径向应变基本相等,并且具有正的最大值,即

$$\sigma_{r0} = \sigma_{t0} = 3pR^2(1+\mu)/(8h^2) \tag{5}$$

$$\varepsilon_{r0} = \varepsilon_{t0} = 3pR^2(1-\mu^2)/(8Eh^2) \tag{6}$$

在膜片边缘($r=R$)处,切向应力、径向应力和径向应变都达到负的最大值,而切向应变等于零,即

$$\sigma_{tR} = 3pR^2/(4h^2) \tag{7}$$

$$\sigma_{rR} = 3pR^2\mu/(4h^2) \tag{8}$$

$$\varepsilon_{rR} = 3pR^2(1-\mu^2)/(4Eh^2) \tag{9}$$

$$\varepsilon_{tR} = 0 \tag{10}$$

由上述分析可知,电阻应变片应沿径向粘贴在膜片中心,即应力最大位置处。弹性体结构如图 3 所示。

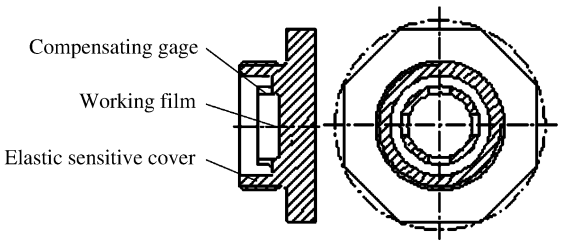


图 3　弹性体结构图

Fig. 3　Structural drawing of elastic body

3 弹性敏感元件的应力、应变分布的计算机模拟

由于端盖结构为变截面厚板，形状较为复杂，采用 ANSYS 软件，分析端盖在外压为 600 MPa 时的最大应力以及应变片粘贴位置的应变和应力。根据结构的对称性，取端盖的 1/4 进行强度分析，如图 4 所示。端盖材料为 18Ni 马氏体时效钢，屈服应力为 $\sigma_s=2\,000$ MPa。图 5 为弹性体节点图。根据筒体和端盖的连接情况，将筒体对端盖的约束简化为垂直于约束面的支撑，即在该面上 $u_y=0$，则在600 MPa 外压条件下端盖的最大应力和应变片粘贴位置处的应力分布如图 6 所示。可见，弹性端盖的 von Mises 应力小于材料的屈服极限，所以该敏感元件处于弹性状态。

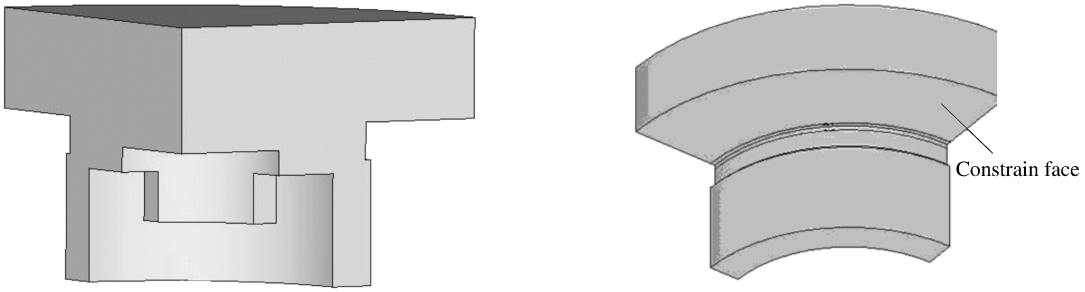


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

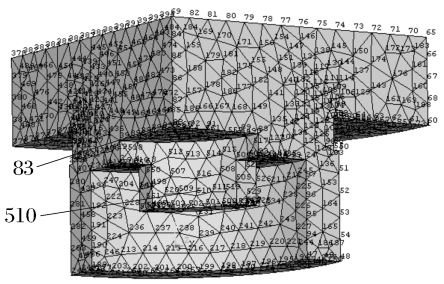


图 5 节点图

Fig. 5 Node diagram

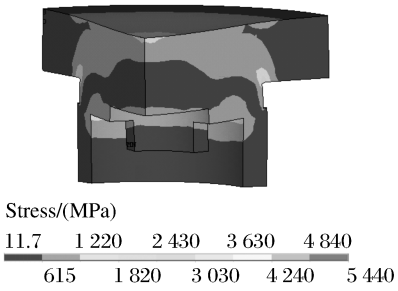


图 6 应力分布图

Fig. 6 Diagram of strain distribution

从仿真结果可以得到弹性体下底面中心的径向应变以及补偿片位置处的应变，结果列于表 1。从表 1 可以看出：端盖上中心位置（节点 83）处的应变较大，达到 2.64×10^{-3}，补偿片所在位置（节点 510）的应变约为 7.04×10^{-4}，因此应变片的粘贴位置是合理的。

表 1 弹性体下底面中心的径向应变及补偿片位置处的应变

Table 1 Radial strain at the bottom center of elastomer and the strain at the position of compensating gauge

Node No.	ε_x	ε_y	ε_z
83	$2.626\,0\times10^{-3}$	$-2.644\,8\times10^{-3}$	$2.645\,8\times10^{-3}$
510	$5.779\,3\times10^{-4}$	$-7.040\,1\times10^{-4}$	$6.026\,7\times10^{-4}$

另外，通过 ANSYS 仿真得到了传感器的应变-压力曲线，如图 7 所示。由图 7 可知，曲线的相关系数为 $R^2=0.996\,9$，基本接近线性。

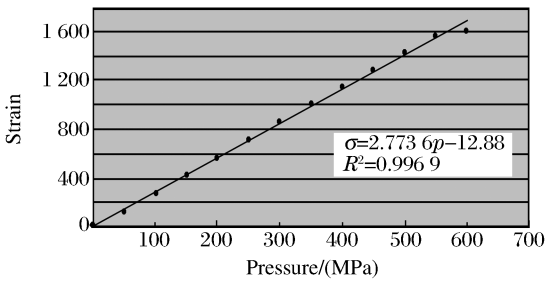


图 7 应变与外压的关系曲线

Fig. 7 Strain-pressure curve

4　端盖的模态分析

在设计动态条件下使用的传感器时,应尽量提高它的固有频率,使其达到所测信号频率的 10 倍以上。电阻应变式传感器的固有频率由弹性元件及电阻应变敏感元件决定。由于电阻应变敏感元件的频率响应很高,因此通常根据弹性元件确定电阻应变式传感器的固有频率。

在端盖下底面中心沿半径方向粘贴应变片,这样应变片就可以反映端盖弯曲振动振型引起的应变。采用 ANSYS 软件,对端盖进行模态分析。由安装结构分析可知,筒体发生轴向和径向变形时,端盖相对筒体作刚性位移,而刚性运动的频率为零频或接近零频,所以对端盖振动特性进行分析时,可忽略筒体,将筒体对端盖的作用简化为沿支撑面法向的刚性约束。模拟得到的各阶振型频率的误差将会很小[5]。

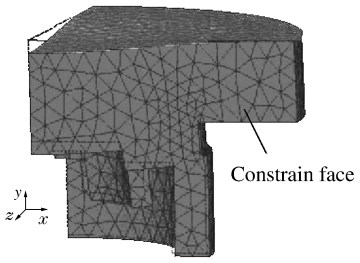


图 8　端盖第 2 阶模态振型图

Fig. 8　Second stage natural mode shape of end cover

对应端盖弯曲振动的第 2 阶模态振型如图 8 所示,其频率为 77.4 kHz,而膛压频率约 2 kHz,因此其固有频率满足要求。

5　应变片的选择

在选用电阻应变片时,要根据弹性体的结构、应力状态、材料、使用环境以及电阻应变片的阻值、尺寸、蠕变匹配等因素,综合考虑后再选择合适的应变片。

本设计中弹性体是板式结构,采样的是正应力,测试点主应力的状态是二维的,由第 3 节的仿真分析可知两个方向的应力基本相等,因此可以选择单轴应变片。由于弹性体应变区的直径仅为 9 mm,因此应变片尺寸不能太大。另外,应变片丝栅越小,测量精度越高,越能准确反映被测点的真实应变,因此,在加工精度可以保证的前提下,尽量选择栅长小的应变片。这里选择日本生产的 KFH-02-120-C1-11 型应变片,其基底尺寸为 2.5 mm×2.2 mm,敏感栅尺寸为 0.2 mm,阻值为 120 Ω,工作温度在 25～250 ℃[4-7]。

6　内置测量电路

内置测量电路主要由电阻应变式传感器信号调节电路及数据采集存储电路组成,测试电路原理图见图 9。将应变式传感器的工作片和补偿片分别作为 1/4 电桥的两臂。本研究采用的是高内阻恒流源 1/4 电桥,如图 10 所示。设恒流源的电流为 I_0,通过各臂的电流分别为 I_1、I_2。当电桥处于平衡态时,$R_1=R_2=R_3=R_4$,其中数控电位器对电桥进行自动平衡调节;当有压力信号时,R_3 产生 ΔR 的变化量,则电桥的输出电压 U_0 为

$$U_0 = I_2R_2 - I_1R_1 = \frac{1}{4}I_0\Delta R\,\frac{1}{1+\Delta R/(4R)} \tag{11}$$

其中 ΔR/R 很小,可以忽略,则

$$U_0 = \frac{1}{4}I_0\Delta R \tag{12}$$

该电压信号经放大电路放大后,再通过数据采集及存储电路进行 A/D 转换,存储到 MSP430 单片机内部的 Flash 存储器中,最后与计算机通信,并显示测量得到的动态压力曲线。

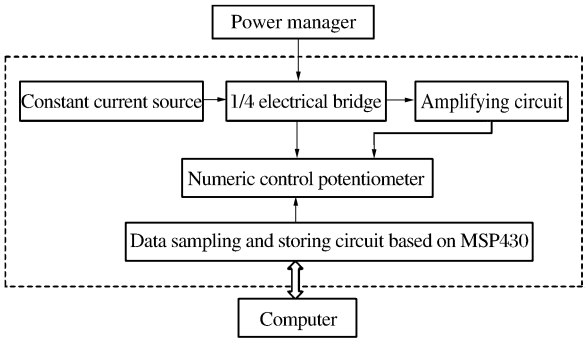


图 9 测量电路原理图

Fig. 9 Functional block diagram of measurement circuit

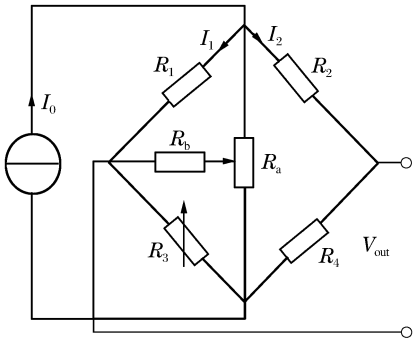


图 10 1/4 电桥

Fig. 10 1/4 electrical bridge

7 实验结果与数据分析

根据上述模型,制作了应变式压力传感器。为了验证传感器的性能,分别进行了静态和动态实验。

7.1 静态实验

进行静态实验时,将电阻应变片粘贴在弹性端盖上,粘贴位置如图 3 所示。粘贴前施加适当的预应力,以保证粘贴牢固;粘贴时,严格遵守应变片的粘贴工艺,以免粘贴的不准确性影响测量结果。静态应变仪与测量应变片、补偿应变片组成 1/4 电桥,加压装置选用 204 所生产的 1 000 MPa 油压标定机(见图 11)。由于应变式压力传感器无法安装到油压标定机的传感器安装座上,因此设计了专用的转接头、油腔及密封装置。实验采用逐步加压法,以 50 MPa 开始,每次加压幅度为 50 MPa,由于密封装置的限制,最终压力为 550 MPa。实验中环境温度稳定,测试装置运行良好,图 12 为实验测量结果及数据拟合曲线[6-11]。

从图 12 可以看出:电阻应变式传感器的拟合度 R_2 为 0.998,非常接近于 1,拟合程度较好,说明实测值与理论值吻合;灵敏度为 $2.231\,3\times10^{-12}$ Pa^{-1},与仿真结果有一定偏差。产生偏差的主要原因有以下 3 方面:(1)在利用 ANSYS 建模时,将圆形平膜片简化为周边固支状态,而实际中端盖是通过螺纹结构与筒体连接,模拟时没有考虑实际受力过程中螺纹的作用;(2)电阻应变片粘贴位置的准确程度将直接影响测量结果的准确性,因此粘贴工艺有待进一步改进;(3)温度变化会影响电阻值,因此应对电阻进行温度补偿,提高测量精度。通过对静态标定数据的分析计算,可以得到测试系统的线性误差为 0.62%,基本误差为 4.6%[12]。



图 11 1 000 MPa 油压标定机

Fig. 11 1 000 MPa oil calibration system

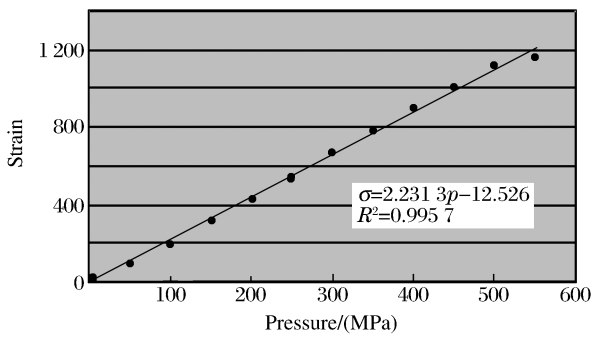


图 12 外压-应变曲线

Fig. 12 Pressure-strain curve

7.2 动态实验

动态标定实验设备采用中北大学自行研制的可以模拟火炮膛压信号的模拟膛压发生器。实验时,

将应变式测试系统(测量电路安装在测试系统的保护筒内)放置在模拟膛压发生器内,点燃模拟膛压发生器中的发射药,产生的模拟膛压将作用在应变式测试系统上。实验完毕后,将应变式传感器取出,与计算机相连,读出数据。测试曲线如图 13 所示。从图 13 中可以看出:所测膛压曲线平滑,符合内弹道设计和国军标的要求;测试系统具有一定的可靠性。

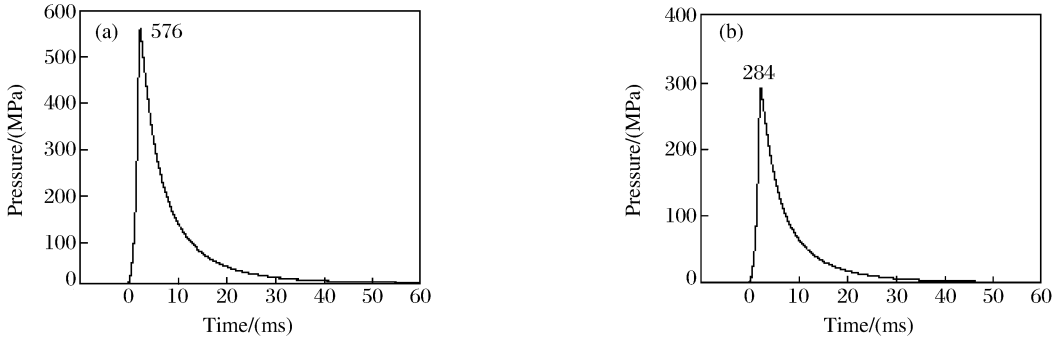


图 13　膛压测试曲线

Fig. 13　Measured chamber pressure curve

8　结　论

将测压器壳体作为弹性敏感元件,在壳体上粘贴电阻应变片,组成了新型的电阻应变式传感器。该传感器的体积可减小到 21 cm^3,不仅解决了传统压力传感器中传感器安装特性与测压器体积要求之间的矛盾,还使成本大大降低,为测压器的推广起到了一定的促进作用。通过理论分析和实验验证,证明了采用这种新型电阻应变式传感器测量膛压是切实可行的。

References:

[1] Zhang Y L, Liu G L. A Computer Test System of Gun Peak Chamber Pressure [J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(2): 78-98. (in Chinese)
张艳玲,柳光辽. 火炮膛压峰值的计算机测试系统 [J]. 弹道学报,1998,10(2):78-98.

[2] Zhang J L, Lu H N, Ren S M. The Dynamic Response Error in Chamber Pressure Measurement [J]. Journal of Taiyuan Institute of Machinery, 1993, (1): 22-26. (in Chinese)
张记龙,陆宏年,任树梅. 武器膛压测试传感器动态响应误差分析方法 [J]. 太原机械学院学报,1993,(1):22-26.

[3] Kong D R, Zhu M W, Shen A P, et al. Dynamical Characteristics Analysis of Copper Cylinder Crusher Gauge and Computer Simulation [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001, (2): 27-30. (in Chinese)
孔德仁,朱明武,申爱平,等. 铜柱测压器动态特性分析及计算机仿真 [J]. 火工品,2001,(2):27-30.

[4] Kang L J, Yang J H. Selection of Resistance Strain Gauge [J]. Weighing Apparatus, 2004, 33(6): 9-10. (in Chinese)
康鲁杰,杨继红. 电阻应变片的选用 [J]. 衡器,2004,33(6):9-10.

[5] Han Q G, Ma H A, Li R, et al. The Criterion for Crack of Tungsten Carbide Anvil Based on Finite Element Method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(1): 1-5. (in Chinese)
韩奇钢,马红安,李　瑞,等. 基于有限元法确立碳化钨顶锤的破裂判据 [J]. 高压物理学报,2010,24(1):1-5.

[6] Li J G. Design on Structure of Low Scale Pressure Sensor of Strain Type [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2006, 21(2): 63-65. (in Chinese)
李俊国. 一种小量程应变式压力传感器结构设计 [J]. 西南科技大学学报,2006,21(2):63-65.

[7] Zhai X Y, Ma J K, Lu C H. An Investigation of the Characteristic of Strain Transduces for Measuring Oil Film Pressure [J]. Lubrication Engineering, 2006, (4): 113-118. (in Chinese)
翟宵雁,马金奎,路长厚. 应变式油膜压力测量传感器特性研究 [J]. 润滑与密封,2006,(4):113-118.

[8] Qiao X G, Li T, Wang H L, et al. Study on the Resistance-Strain-Gage Pressure Sensor [J]. Sensor World, 2006, 12(11): 11-13. (in Chinese)
乔学光, 李 婷, 王宏亮, 等. 电阻应变式压力传感器的研究 [J]. 传感器世界, 2006, 12(11): 11-13.

[9] Cao L, Kim T S, Zhou J, et al. Calibration Technique for MEMS Membrane Type Strain Sensors [A]//Proceedings of the IEEE Symposium on Microelectronics [C]. Minneapolis, USA, 1999: 204-210.

[10] Zhao Y L, Zhao L B, Jiang Z D. A Novel High Temperature Pressure Sensor on the Basis of SOI Layers [J]. Sens Actuators A, 2003, 108(1-3): 108-111.

[11] Feng Y J. MEMS Capacitive Strain Sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(3): 629-632. (in Chinese)
冯勇建. MEMS 电容应变传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 629-632.

[12] Zheng X X, Liu Z Q, Wang R B, et al. Measurement of Shock Wavefront Produced by Ejecta Loading Device [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 188-192. (in Chinese)
郑贤旭, 刘振清, 王荣波, 等. 微喷加载装置中爆轰波阵面的测量 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 188-192.

A Novel Strain Type High Chamber Pressure Test System

LI Xin-E[1,2], ZU Jing[1,2], XU Peng[1]

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan* 030051, *China*;
2. *School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: According to the characteristics of electronic piezo gauge, a novel strain type high chamber pressure test system is developed, which takes the end cover of the electronic piezo gauge as an elastic sensitive component. The mechanical characteristics of electronic piezo gauge shell are analyzed using the deformation theory of thick plates. The stress/strain distribution and model of the elastic sensitive components are simulated by ANSYS software, and the 50－550 MPa static and dynamic calibration experiments are also conducted for comparison. The experimental results show that the linear error, basic error, sensitivity, and measurement range of the system are 0.62%, 4.6%, 2.231 3×10^{-12} Pa^{-1}, and 0－600 MPa, respectively. Therefore, the strain type high chamber pressure test system is feasible and accurate.

Key words: pressure; strain; chamber pressure