

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.09

瞬态超高压压阻式传感器技术研究

张敏华, 胡晓红, 王育维, 屈洁, 张薇薇

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘 要: 针对现有压力传感器不能满足高压、高温、高冲击等恶劣环境下高膛压测试的现状, 提供了一种瞬态超高压压阻式传感器。该传感器利用惠斯通半桥式工作原理, 选用具有良好压阻效应的硅锗锰铜丝作为敏感元件材料, 通过改进制作工艺和装配方式, 使该传感器能够承受瞬态高压、高温, 实现对 0 ~ 800 MPa 动态压力测试。对比分析表明: 在高、低、常温状态下, 该传感器非线性误差均不大于 0.5%, 具有灵敏度高、体积小、安装灵活方便的特点, 可广泛应用于高膛压火炮及高压密闭爆发器试验装置的压力测试与研究。

关键词: 高膛压; 传感器; 敏感元件; 非线性误差; 标定

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0034-04

The Technology Research of Transient Ultra-high Pressure Piezoresistive Sensor

ZHANG Minhua, HU Xiaohong, WANG Yuwei, QU Jie, ZHANG Weiwei

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: Aimed at the problems of that present pressure sensor can not adapt high pressure testing in high pressure, high temperature and high impact environment, a transient ultra-high pressure piezoresistive sensor was provided. The sensor works with the Wheatstone half bridge, sensitive element is made of well-piezoresistive alloy manufactured by SiGeMnCu, by improving the production process and assembly method, the sensor can realize 0 ~ 800 MPa dynamic pressure testing in transient high pressure and high temperature environment. The contrast analysis shows that the nonlinear error of the sensor is not greater than 0.5% at the high, low and normal temperature respectively, the sensor has a high sensitivity, small volume and flexible installation advantages. It can be widely used in pressure testing and research of high pressure gun and airtight exploder device.

Key words: high pressure; sensor; sensitive element; the nonlinear error; calibration

0 引言

随着国内外高膛压火炮技术的发展, 电测膛压已超过 600 MPa, 而膛内压力曲线的测试是研究火炮内弹道与装药结构及火炮性能的重要手段^[1]。一般用于火炮膛压测试的主要有压阻式、应变式和压电式传感器。而国内现有的压阻^[2]或应变式传感器最高测量压力只达到 400 MPa, 压电式传感器测量压力虽达到 1000 MPa, 但其来源主要依靠进口, 价格高、配件昂贵, 在使用上也受到各种条件影响(如湿度、电缆、装配方式等), 不适合用于高膛压火炮测试。本文提出一种适用于高膛压火炮及高压密闭实验装置膛压-时间(P-t)曲线测试所用的超高压压阻式传感器, 能够在火炮发射及高压密闭爆发器燃烧过程中产生的瞬态高压、高温环境下进行动态压力测量, 测量范围达到 0 ~ 800 MPa。该传感器选用具有良好压阻效应的硅锗锰铜丝作为敏感元件材料, 通过改进制作工艺和装配方式, 实现了在高、低、常温状态下非线性误差均不大于 0.5% 的性

能, 而且传感器灵敏度高、体积小、安装灵活方便, 不受安装位置的影响, 可广泛应用于高膛压火炮及高压密闭爆发器试验装置的压力测试与研究。

1 工作原理

所研究的传感器采用压阻式压力传感器工作原理^[3], 如图 1 所示。将阻值相同的四个电阻连接成

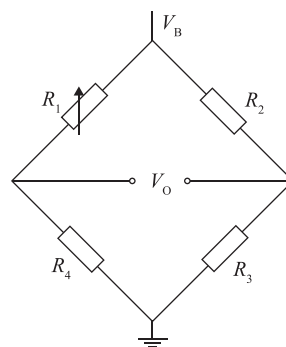


图 1 压阻式压力传感器工作原理图

Wheatstone 电桥。其中 R_1 为压阻传感器； R_2 为补偿电阻，起温度补偿的作用； R_3, R_4 为固定电阻； V_B 为外加电压。当环境温度改变时，补偿电阻与测量电阻阻值同比例改变，使桥路输出不受影响^[4]。

Wheatstone 电桥电路的输出

$$V_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_B \quad (1)$$

当传感器不受力时，电阻值满足关系式 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ，电路的输出为零，因此在设计中，要求 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，也即俗称的等臂电桥，在无外力时电桥处于平衡状态。

当传感器上存在压力时，其内部压敏电阻将发生形变，使得 R_1 的阻值变为 $R_1 + \Delta R_1$ ，Wheatstone 电桥失去平衡，产生输出

$$V_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1)(R_3 + R_4)} V_B \quad (2)$$

代入 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，且 $\Delta R_1 = \Delta R$ ，由 $\Delta R / (2R) \ll 1$ 可得

$$V_0 \approx \frac{\Delta R}{4R} V_B \quad (3)$$

此时压力传感器输出电压 V_0 正比于电阻的增量 ΔR ，电阻值发生变化，电桥失去平衡，产生的电压输出为 ΔR 应力应变产生电阻增量的电压值，通过电桥电路把电阻丝的电阻变化转换成电压的输出，然后提供给放大器电路放大后即可得到测试结果。

瞬态超高压压阻式传感器以硅锗锰铜电阻丝作为敏感元件^[5]，敏感元件安装在传感器压力腔内，当用于压力测量时，腔内注满介质油，所有敏感元件浸在一个全部密闭的腔体内，压力通过介质油传递到敏感元件周围，其受力处处相等，此时电阻丝的有关参数值均发生变化，引起电阻 R 的变化，即

$$dR = \frac{L}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dL - \rho L \frac{1}{S^2} dS \quad (4)$$

式中： ρ 为金属丝电阻率； L 为金属丝长度； S 为金属丝的截面积。

在周围压力均匀作用下，金属内部原子间距缩小，改变了原来的排列状态，这种排列状态的改变使电阻率也发生变化，而 L 和 S 的变化十分微小，敏感元件在压力作用下直接呈现电阻率变化。因此，式(4)可近似写成

$$dR = \frac{L}{S} d\rho \quad (5)$$

电阻 R 的变化由电阻率 ρ 的变化决定，而电阻率 ρ 是随压力和温度而变化的，硅锗锰铜合金的温度系数小，温度对电阻值的影响非常小，具有良好的压阻效

应，因此该瞬态超高压压阻式传感器压力的变化与硅锗锰铜丝电阻率的变化成正比。

2 结构设计及敏感元件制作

2.1 本体结构设计

为了使传感器具有通用性和互换性，设计瞬态超高压压阻式传感器安装尺寸为 M10 × 1，总长 30 mm，密封面采用平面加斜面的自紧密封方式。其结构如图 2 所示，实物如图 3 所示。

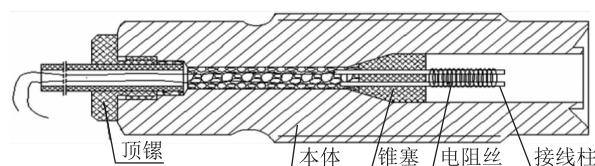


图2 超高压压阻式传感器结构示意图



图3 超高压压阻式传感器实物图

设腔体内承受的最大压力为 800 MPa，选取安全系数 $n_s = 1.1$ ，该传感器本体选择高强度马氏体特种时效钢，其抗拉极限为 $\sigma_b = 2060$ MPa，屈服极限为 $\sigma_s = 1990$ MPa，腔体内径为 $r_1 = 2 \times 2.25$ mm，外径为 $r_2 = 2 \times 4.35$ mm，按照第二强度理论计算腔体可承受的压力为

$$\begin{aligned} p &= \frac{3 \sigma_b r_2^2 - r_1^2}{2 n_s 2 r_2^2 + r_1^2} \\ &= \frac{3}{2} \times \frac{2060}{1.1} \times \frac{4.35^2 - 2.25^2}{2 (4.35)^2 - 2.25^2} \\ &= 907 \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (6)$$

从计算结果可以看出，传感器结构强度满足最大膛压 800 MPa 的使用要求。经过反复的加压试验，该传感器能够承受 800 MPa 的高压。

2.2 敏感元件制作

敏感元件作为该瞬态高压压阻式传感器的核心部件，制作工艺如下：两根接线柱从陶瓷锥塞通孔穿过，两端各留一定的长度，并用高强度绝缘胶密封固化后作为传感器的两个极，一端焊接导线作为传感器两个极的引出线，另一端两根接线柱的根部焊接事先准备好的硅锗锰铜丝，在电阻丝二分之一长度处打结系一根棉线，之后将电阻丝从接线柱的顶端往下均匀缠绕，棉线亦均匀缠绕于电阻丝之上捆扎固定，起保护作用。

此时测量引出线保证其电阻为 120 Ω。装配时,在锥塞锥体的外部涂抹高强度绝缘胶,使锥塞的锥面和本体的锥面充分接触并固化。将顶螺旋入,导线穿进套管进入顶螺的中心孔内,端面用环氧树脂胶固化。

3 标定与试验

标定时利用标准仪器产生已知的非电量并输入到待标定的传感器中,然后将传感器输出量与输入量的标准量做比较,获得一系列校准数据或曲线。静态标

定量信号不随时间变化的静态标准下,对传感器的静态特性如非线性、灵敏度等指标进行检定。动态标定主要是研究传感器的动态响应。

3.1 静态标定

按国军标对环境试验样的要求,将 3 只超高压压阻式传感器封装好置于保温设备中,分别在低温 -40 ℃、高温 +50 ℃、常温 20 ℃中连续保温 12 h 以上,迅速取出安装在 3 级标准的 YU-1000 活塞式压力标定机上进行等压力间隔静态标定^[6],标定结果见表 1。

表 1 静态标定结果

传感器号	温度/℃	标定结果/MPa										非线性 /% F · S	灵敏度 /K F · S
		0	100	200	300	400	500	600	700	800			
T-03	20	-0.0044	0.2745	0.5504	0.8271	1.1045	1.3815	1.6586	1.9356	2.2127	0.13	2.7734	
	-40	-0.0069	0.2735	0.5492	0.8239	1.1012	1.3816	1.6556	1.9324	2.2092	0.23	2.7753	
	+50	-0.0073	0.2729	0.5492	0.8261	1.1044	1.3820	1.6597	1.9373	2.2150	0.13	2.7808	
T-04	20	-0.0044	0.2752	0.5507	0.8285	1.1061	1.3835	1.6609	1.9383	2.2158	0.17	2.7773	
	-40	-0.0069	0.2754	0.5522	0.8305	1.1101	1.3890	1.6679	1.9468	2.2257	0.24	2.7948	
	+50	-0.0037	0.2743	0.5507	0.8285	1.1057	1.3830	1.6603	1.9376	2.2149	0.05	2.7737	
T-07	20	-0.0046	0.2739	0.5505	0.8263	1.1038	1.3808	1.6577	1.9346	2.2116	0.10	2.7726	
	-40	-0.0069	0.2730	0.5493	0.8260	1.1040	1.3815	1.6590	1.9365	2.2140	0.17	2.7794	
	+50	-0.0074	0.2740	0.5502	0.8266	1.1054	1.3832	1.6610	1.9389	2.2167	0.26	2.7857	

注:标定结果 $P=a+bN$ 。

从计算结果可看出,在高、低、常温状态下传感器的非线性误差均不大于 0.5%,其灵敏度基本不变^[7]。表明此瞬态超高压压阻传感器所用的敏感元件对温度变化不敏感,具有温度互补功能,不会引起输出特性(灵敏度)的波动。

3.2 动态标定

采用落锤式动态压力标定机 Kistler6909 对瞬态超高压压阻式传感器和 Kistler6215 型压电传感器进行动态对比标定,标定结果见表 2,动态标定曲线如图 4 所示。

表 2 动态标定结果

发序	压阻系统		压电系统		曲线 相关系数	相对 误差
	峰值 /MPa	上升时间 /ms	峰值 /MPa	上升时间 /ms		
1	144.67	1.35	144.58	1.24	0.9924	0.0151
2	146.62	1.29	147.02	1.18	0.9915	0.0168
3	145.64	1.49	145.39	1.38	0.9964	0.0071
4	147.36	1.17	147.25	1.0	0.9967	0.0066
5	143.69	1.12	142.95	1.1	0.9907	0.0185

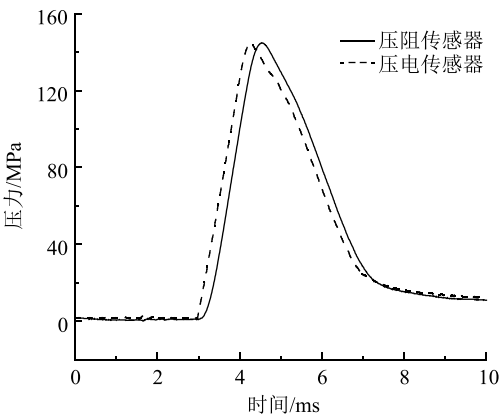


图 4 动态标定压力-时间曲线

从压力曲线可以看出,瞬态超高压压阻式传感器与压电传感器所测曲线趋势完全一致,但压电传感器具有更高的频响,所测曲线压力上升时间快。

3.3 动态试验

将装配好的瞬态超高压压阻式传感器与 Kistler6215 型压电传感器同时安装在 200 ml 高压密闭爆发

器装置上进行动态试验, 试验采用双芳 3-16/1 标准药, 装填密度 $\Delta = 0.2 \text{ g/cm}^3$, 通过 DEWE3010 数据采集系统得到试验曲线, 如图 5 所示。试验结果表明, 瞬态超高压压阻式传感器与 Kistler6215 型压电传感器所测压力值一致, 其误差不超过 0.5%。

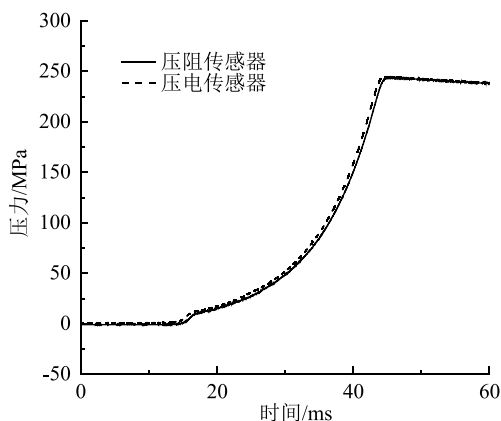


图5 动态试验压力-时间曲线

瞬态超高压压阻式传感器用于某大口径高膛压火炮上的压力测试, 实测膛底和坡膛压力-时间曲线, 如图 6 所示。火炮实弹射击试验所测曲线平滑, 抗干扰能力强。

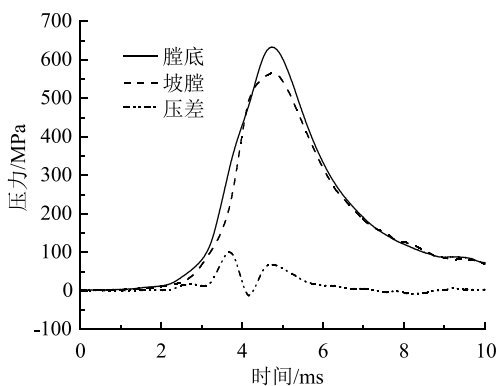


图6 实测膛内压力-时间曲线

4 总结

阐述了瞬态超高压压阻式传感器的工作原理和设计思路, 着重阐述了敏感元件制作工艺及装配方式, 从静态、动态标定以及动态试验结果可以看出其性能稳定, 在高、低、常温状态下非线性误差均不大于 0.5%, 灵敏度高, 能够承受瞬态高温、高压环境, 实现对 0~800 MPa 动态压力测试。该传感器可促进国内高膛压火炮技术发展, 特别是可应用于大口径高膛压、高初速火炮内弹道与发射装药技术研究, 且具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 曹万有, 张文柱, 王道洪. 高膛压火炮技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [2] 伞海生, 宋子军, 王翔, 等. 适用于恶劣环境的 MEMS 压阻式压力传感器[J]. 光学精密工程, 2012(3): 550-555.
- [3] 孟丽凡, 郑宾. 传感器原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.
- [4] 闫文静, 张鉴, 高香梅. 压阻式压力传感器性能的研究[J]. 传感器世界, 2012, 18(2): 14-17.
- [5] 冷莹莹. 超高压锰铜电阻压力计的研制[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [6] 狄长安, 孟祥明, 边鹏, 等. 高压压电传感器静态与准静态校准方法研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(2): 86-105.
- [7] 韩锐锐, 张兆华, 任天令, 等. 压阻式压力传感器灵敏度与线性度的仿真方法[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(2): 96-101.

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2017208C015)



张敏华(1984-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为测控技术。