

# 合金薄膜高温压力传感器研究进展

李 伟, 陈怀礼

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 合金薄膜压力传感器克服了粘贴式应变压力传感器的缺点, 性能更优良, 适应恶劣环境压力测量要求。对合金薄膜压力传感器的工作原理进行了介绍, 比较了几种压力传感器的优缺点, 并以应用温度范围这一指标为中心论述了镍铬、铂钨及钯铬薄膜压力传感器的性能特点及研究现状。镍铬薄膜传感器适用于中、低温介质压力测量, 而铂钨、钯铬薄膜传感器适用于更高温度环境下的压力测量。

**关键词:** 压力传感器; 高温; 合金薄膜

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 05-0078-05

## Advance in alloy thin-film pressure sensor for high-temperature environment

LI Wei, CHEN Huai-li

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The alloy thin-film pressure sensor has overcome the shortcomings of stickup pressure sensor, has more excellent performances and is suitable for harsh environments. The working principle of the alloy thin-film pressure sensor is introduced in this paper. The advantages and disadvantages of several pressure sensors are compared. Taking the sensor's working temperature as an assessment index, the characteristics and development status of nickel-chromium (NiCr), platinum-tungsten (PtW) and palladium-chromium (PdCr) thin-film pressure sensors are elaborated. The conclusions are: NiCr thin-film pressure sensor is suitable for pressure measurement in the range of  $-269^{\circ}\text{C} \sim +350^{\circ}\text{C}$ ; PtW and PdCr thin-film pressure sensors are applied to pressure measurement at high temperature. The key technology and the application of alloy thin-film pressure sensor are reviewed.

**Keywords:** pressure sensor; high temperature; alloy thin-film

收稿日期: 2010-11-26; 修回日期: 2011-01-25

作者简介: 李伟 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机测试与试验技术

0 引言

随着现代科技的飞速发展,越来越多的工业生产和自动控制领域,如运载火箭燃烧室的压力测量、石油工业的井下压力测量以及柴油机、燃气轮机气缸压力监控等,都需要能在高温、腐蚀、振动等恶劣环境下工作的压力传感器。SOI、多晶硅等半导体压力传感器应用广泛,适于批量制作、成本较低廉,但并不适用于超高温环境的压力测量。以现代半导体平面工艺技术为核心、新材料为基础的合金薄膜压力传感器在恶劣环境中拥有其它传感器无可比拟的优势,具有广阔的应用前景。

1 合金薄膜压力传感器工作原理

合金薄膜压力传感器一般采用溅射、蒸镀等方法把合金淀积在弹性膜片上,薄膜应变层通过感受膜片的应变而产生相应电阻变化,从而完成非电量到电量的转换。其一般结构如图 1 所示。

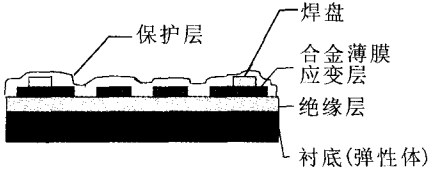


图 1 合金薄膜应变片结构

Fig. 1 Schematic of alloy thin-film strain gage

合金薄膜压力传感器的优点是结构紧凑,散热良好,尤其突出的是利用薄膜沉积代替了传统粘贴式应变片的胶接,从而克服了应变灵敏系数低及滞后、蠕变,稳定性差等缺点,能满足恶劣环境下压力测量的要求。

2 合金薄膜高温压力传感器研究现状

目前对高温压力传感器的研究主要包括:多晶硅、单晶硅、SOS(蓝宝石上硅)、SiC 等半导体高温压力传感器,金刚石薄膜、合金溅射薄膜高温压力传感器,光纤高温压力传感器等。半导

体传感器灵敏度高,芯片易于批量制作、成本低廉,其缺点是温度特性较差,最高使用温度一般为 200~350℃;且半导体传感器一般采用单晶硅作为衬底,超过 500℃后,其热可塑性问题无法解决——这些都限制了半导体压力传感器在更高温环境如火箭发动机燃烧室压力测量(>600℃)中的使用。金刚石的某些特殊性质(如化学上的惰性)以及极大的压阻效应、在高温下仍具有良好的压阻特性使其成为制作高温压阻型压力传感器的极佳材料,但目前对金刚石薄膜的理论研究与实际应用尚存在较大差距,如高温有氧环境下金刚石易表面石墨化,金刚石与金属间难以形成理想的欧姆接触等。光纤本身耐高温,制作光纤高温压力传感器是可行的,但其应用较为复杂、且对测量环境的要求较高。

相对于其它传感器,合金薄膜传感器虽然应变系数较低,但具有精度高、稳定性好、耐腐蚀、温度特性较好且应用温度范围较宽等一系列优点,这些优点能够保证合金薄膜压力传感器在高温燃气的恶劣环境中进行测量。

2.1 镍铬系合金薄膜压力传感器

镍铬系合金应用广泛、技术成熟,是目前制作中、低温应变计最优敏感材料之一。镍铬系合金典型代表有镍铬合金(镍铬 V),镍铬改良型合金(卡玛、伊文)等,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 镍铬系合金性能参数

Tab. 1 Basic parameters of NiCr alloy

名称及成分	镍铬 V (Ni80Cr20)	卡玛(Ni73Cr20 余 Fe, Al)
电阻率 (20℃, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	110	133
电阻温度系数 ( $\times\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )	110~130	$\pm 20$
应变灵敏系数	2.1~2.3	2.4~2.6
线膨胀系数 (20~100℃, $\times\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )	14	13.3
熔点(℃)	1400	约 1400
拉伸强度 (20℃, $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	70.3~140.6	91.5~127.0
对铜热电势( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	3.8	3

镍铬系合金具有较高的电阻率、较低的电阻温度系数、较高的应变灵敏系数，且改良型合金的应变灵敏系数随温度的升高而降低从而可对弹性体弹性模量进行温度自补偿等优点。但该系合金在高温下会发生有序-无序的变化（如图 2），即 K 状态，导致电阻不稳定，所以静态应用温度范围一般为-269 ~+350 ℃，适用于中、低温环境下的压力测量。

目前国内外合金薄膜压力传感器主要生产厂家如英国 Senstronics 公司、美国 Bell Howell 公司、汤姆逊公司及北京航天遥测遥控研究所、北京威斯特中航机电公司等所用敏感材料均为镍铬系合金，产品应用温度范围多为-50/60~+200 ℃，另外国内亦有超低温（-200 ℃）镍铬薄膜压力传感器的报道。

NASA 的 Lewis 研究中心对合金薄膜高温应变计的研究居世界前列。1983 年 Grant 等人研制的镍铬薄膜应变计，虽然受引线疲劳寿命所限而导致可靠性较差，但仍能满足高温（600 ℃）燃气环境中涡轮叶扇的动态应变测量要求。

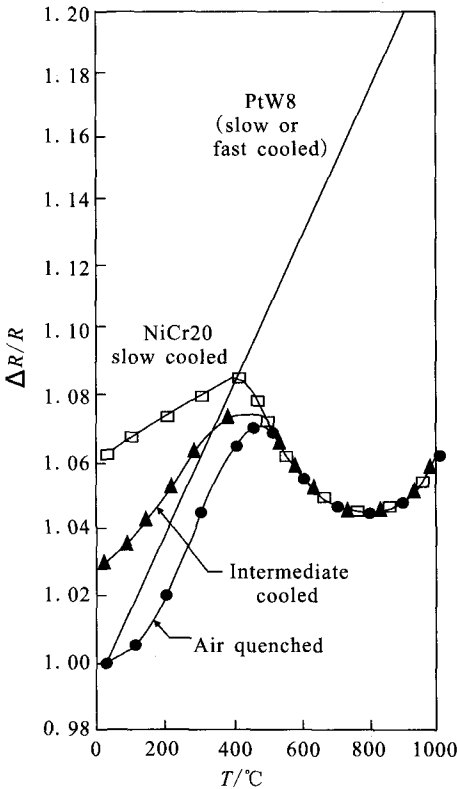


图 2 NiCr20 与 PtW8 电阻-温度变化趋势  
Fig. 2 Resistance versus temperature for NiCr20 and PtW8

2.2 铂钨合金薄膜压力传感器

铂钨合金的研究始于上世纪 60 年代，研究的目的是解决高温（600~1000 ℃）应变测量问题。高温下的主要问题是电氧化引起敏感材料的不稳定，以及由此引起的漂移。铂钨合金具有适中的电阻率，耐酸碱、抗腐蚀，特别是高温（700~800 ℃）下仍具有很好的抗氧化性，电阻温度系数与温度呈线性关系（如图 2），且应变灵敏系数较高，最高使用温度为静态 800 ℃，动态 1000 ℃。铂钨合金主要性能参数如表 2 所示，其缺点主要是电阻温度系数大，一般在 200 ppm/℃ 左右，实际使用中温度补偿较为困难。

表 2 铂钨合金性能参数

Tab. 2 Basic parameters of PtW alloy		
名称及成分	PtW8	合金 479 (PtW8.5)
电阻率(20℃, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	68	62
电阻温度系数( $\times\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )	227	140
应变灵敏系数	3.5	2.88(600 $^\circ\text{C}$ )/ 1.87(1000 $^\circ\text{C}$ )
线膨胀系数 (20~100 $^\circ\text{C}$ , $\times\text{ppm}/^\circ\text{C}$ )	8.3~9.2	9.48~10.09
拉伸强度	600 $^\circ\text{C}$ (20 $^\circ\text{C}$ , $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	58.4 29.5
静止空气中氧化	600 $^\circ\text{C}$ 速率( $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )	0.0008 0.001

彭士元等人利用蓝宝石作为弹性膜片研制的 Pt92W8 薄膜高温压力传感器主要性能指标如下：量程 0.2~10 MPa；精度 0.5% F·S；应用温度范围-10~400 ℃；零点温度飘移及灵敏度温度漂移均较小（ $10^{-4}$  量级），具有较好的长期稳定性。

2.3 钼铬合金薄膜应变计

为满足新一代航天器研制的需求，近二十几年来 Lewis 研究中心一直致力于合金薄膜高温应变计的研究。1987 年开始，C.O.Hulse 和 H.P. Grant 等人开始研制基于一种新合金钼铬(13%铬)的应变计。1997 年 Jih-Fen Lei 等人利用钼铬合金作为薄膜应变材料，在室温至 1100 ℃的燃气环境中对涡轮叶扇的动态应变进行了测量；在相

同的环境条件下, 利用铂电阻作温度补偿, 对静态应变也成功地进行了测量。

研究表明, 钯铬合金在 1000 ℃ 范围内组织结构稳定, 无相变, 并且在空气中自身能形成一层坚实的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 抗氧化层。钯铬合金的这些特性, 使得其电阻温度特性的稳定性、重复性好, 并且与升、降温速率关系不大。钯、铬及钯铬合金主要性能参数如表 3 所示。

钯铬合金的电阻温度特性、灵敏度温度特性均与温度成良好线性关系 (图 3、图 4), 且耐千度以上高温, 其制成的传感器可以应用于高温压力测量。但就 Lewis 研究中心研制的钯铬薄膜应变计而言, 存在的问题主要是: 设计使用寿命较短, 仅 50 小时; 高温会使绝缘层绝缘性能急剧下降, 从而导致应变计完全失效 (图 5)。

表 3 钯、铬及钯铬合金主要性能参数  
Tab. 3 Basic parameters of Pd, Cr and PdCr alloy

名称及成分	Pd	Cr	PdCr13
电阻率(20℃, μΩ·cm)	10.8	13	100
电阻温度系数(×ppm/℃)	3800	3000	170
应变灵敏系数	6.6	/	1.8
线膨胀系数 (20~100℃, ×ppm/℃)	12	/	/
熔点/℃	1552	1890	1300
弹性模量/MPa	120	248	/

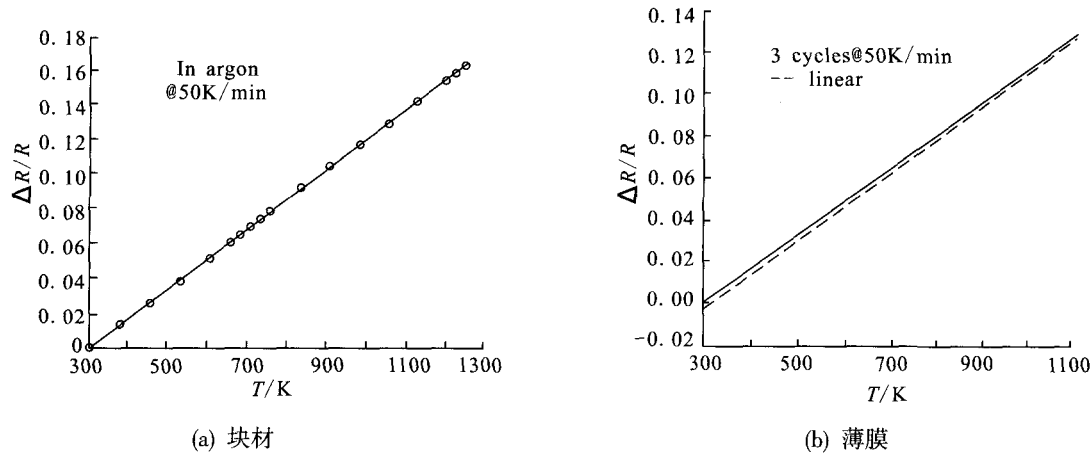


图 3 钯铬 (13%铬) 合金电阻温度特性  
Fig. 3 Resistance versus temperature for PdCr13

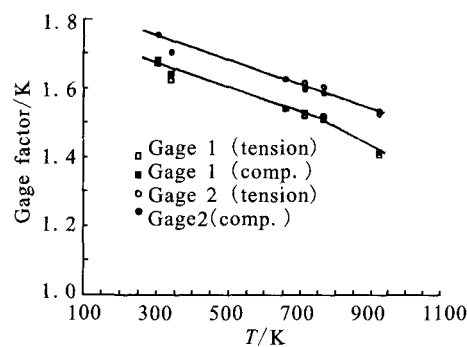


图 4 钯铬薄膜应变计灵敏系数温度特性  
Fig. 4 Gage factor versus temperature for PdCr13 thin-film strain gage

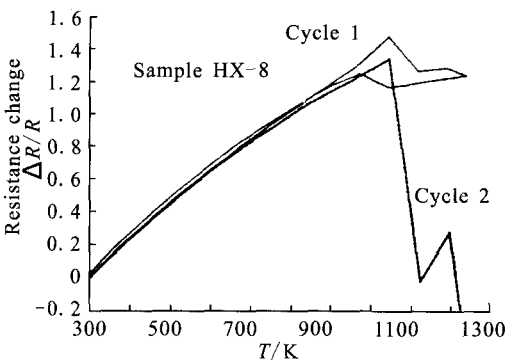


图 5 钯铬 (13%铬) 溅射薄膜电阻随温度变化情况 (1370 K, 10 h)  
Fig. 5 Variation of resistance for PdCr13 sputtered thin-film with temperature at 1370 K in 10 h

### 3 结论

本文主要对镍铬系、铂钨及钼铬薄膜高温压力传感器的主要性能进行了比较,并分析了其研究现状。镍铬薄膜传感器适用于中、低温压力测量,而铂钨、钼铬薄膜传感器/应变计适用于更高温( $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )压力测量。相比而言,钼铬薄膜应变计的耐高温性能更加卓越,电阻与灵敏度温度特性良好,如果其封装技术得以解决,必将拥有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张为,姚素英. 高温压力传感器现状与展望[J]. 仪表技术与传感器. 2002 (4): 6-8.
- [2] 韩小亮,朱作云,李跃进. 高温半导体压力传感器技术[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2001, 28(1): 120-124.
- [3] 莘海维,张志明,沈荷生,等. 高温压力传感器的新进展: 金刚石微压力传感器[J]. 化学世界, 2000 (增刊): 107-111.
- [4] 尹福炎. 电阻应变计敏感材料的发展(上)[J]. 传感器世界, 1998 (9): 9-13.
- [5] 尹福炎. 电阻应变计敏感材料的发展(下)[J]. 传感器世界, 1998 (10): 1-9.
- [6] 何迎辉,张修如. 超低温薄膜压力传感器的研制[J]. 传感器世界, 2004 (9): 21-23.
- [7] GRANT H P, PRZYBYSZEWSKI J S, ANDERSON W L, et al. Thin film strain gage development program. NASA CR-174707 [R]. USA: NASA, 1983.
- [8] 彭士元,欧阳左群. 能耐高温的合金薄膜压力传感器和变送器[J]. 测控技术, 1993, 12(4): 28-30.
- [9] LEI J F, MARTIN L C, WILL H A. Advances in thin film sensor technologies for engine applications. NASA 107418 [R]. USA: NASA, 1997.
- [10] LEI J F, WILL H A, MARTIN L C. Thin film for minimally-intrusive measurements in harsh high temperature environments. AIAA-98-3610[R]. USA: AIAA, 1998.
- [11] LEI J F. Palladium-chromium static strain gages for high temperature. NASA 93-12371[R]. USA: NASA, 1993.
- [12] HULSE C O, BALLEY R S, GRANT H P, et al. High temperature static strain gage development. NASA CR-189044 [R]. USA: NASA, 1990.
- [5] 马丹花,翁春生. 一维 CE/SE 方法在气液两相爆轰计算中的应用 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2008, (3): 25-29.
- [6] 洪滔,秦承森. 爆轰波管中铝粉尘爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 193-200.
- [7] FEDOROV A V, KHMEI T A. Numerical simulation of formation of cellular heterogeneous detonation of aluminum particles in oxygen[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2005, 41(4): 435-448.
- [8] HUANG Y, RISHA G A, YETIER R A, et al. Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(1): 5-13.
- [9] 翁春生,王浩. 计算内弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006, 77-94.
- [10] WANG Gang, ZHANG De-liang, LIU Kai-xin, et al. An improved CE/SE scheme for numerical simulation of gaseous and two-phase detonations[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(1): 168-177.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 51 页)

(编辑: 马杰)