

非晶态合金压力敏感元件和传感器

北京航空学院 王绪威 刘广玉

摘 要

本文对非晶态合金压力敏感元件和传感器的最新发展进行了综合评述。按照所利用的物理效应,把已开发的非晶态合金压力敏感元件划分为三类:超声传播效应,电阻-应变效应和应力-磁效应。在有关镍基应变计型压力敏感元件的讨论中,包括了作者参加的课题组的有关工作。

关键词 非晶态合金, 压力敏感元件; 传感器。

一、前 言

在控制和测量技术中,压力、温度和流量是三个重要的检测和控制参数,其中压力参数的测量又是发展和应用最广的。在近十几年,压力检测装置的研制、生产和应用取得了重大的发展,开发了多种应用不同新原理、新材料的压力敏感元件和传感器。

自80年代以来,人们开发了利用非晶态合金的各种敏感元件和传感器。由于非晶态合金具有多方面的优异性能,仅几年时间,就开发了很多种具有不同功能的高性能/价格比的新型敏感元件和传感器^[1-4]。这些敏感元件和传感器的共同特点是灵敏度高,温度稳定性好,响应快,线性度好以及最大工作温度高等,能满足不同工业领域和医疗工程等方面检测的需要。一些传统晶态材料的敏感元件很难同时具有上述全部优点,例如半导体敏感元件灵敏度高,但温度稳定性差,最大工作温度低,又如磁合金敏感元件温度稳定性好,但截止频率低,线性度也较差。

二、非晶态合金敏感材料的主要性能

非晶态合金敏感元件材料的优异性能是:

1. 高弹性,最大抗拉强度可达 $2.5\sim 4.0\times 10\text{MPa}$,因此可以承受高应力而不会断裂。
2. 电阻率大,约 $130\sim 180\mu\Omega\text{-cm}$ 。因此利用薄带和丝状材料即可构成快速响应的敏感元件。

1987年2月11日收到

3. 由于不存在晶粒和晶体的各向异性, 因此无论在畴壁位移和转动磁化区, 导磁率都高, 相对导磁率 μ_r 可高达 200000。在各类非晶态合金中, 以磁致伸缩为零的材料导磁率最高。

4. 富铁的非晶态合金磁致伸缩效应大, 因此可用以实现应力-磁效应和超声传播效应的各种敏感元件。

5. 磁致伸缩为零的非晶态合金具有很高的抗腐蚀能力, 而富铁的非晶态合金只要掺以适量的铬, 也可大大提高抗腐蚀能力。

由此可见, 上述非晶态合金敏感元件的种种优点是与这类合金材料的一些优异性能密切相关的。

三、非晶态合金压力敏感元件的分类

对至今已制成的各种非晶态合金压力敏感元件, 通过对其所利用非晶态合金材料的物理效应的分析, 我们将其分为三类(见表1) :

表1 非晶态合金压力敏感元件和传感器

物理效应	种类	材料成分	形式	性能	参考文献
超声传播效应	简单膜片式压力敏感元件	$Fe_{81}Si_{18.5}B_{10.5}Co_2$ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$	直接以薄带为弹性元件	量程有 0~3kPa, 0~80kPa, 0~15kPa 三种	1982[1]
	差动式压力敏感元件	$Fe_{70}Ni_{10}Si_5B_5$	薄带粘接在基片上	量程 0~20kPa	1984[2]
应力-磁效应	油压敏感元件	$(Fe_{95}Cr_5)-Si-B$	直接以薄带为弹性元件	量程 0~30×10 ⁸ kPa, 工作温度范围 -30°C~130°C	1983[9]
	一般压力敏感元件 (有几种不同结构)	铁基合金		量程 0~100kPa 等, 工作温度范围 -30°C~130°C	1983[8]
	管道流场压力敏感元件 (有几种不同结构)	铁基合金			1983[10]
	膜盒式压力敏感元件 (有几种不同结构)	铁基合金			1983[10]
电阻-应变效应	铁基应变计型压力敏感元件 (有两种不同全桥电路结构)	$Fe_{78}Cr_3(SiB)_{19}$	薄带粘接在基片上	最大工作温度 200°C	1981[5]
	镍基应变计型压力敏感元件 (有全桥和半桥两种电路结构)	$Ni_{68}Si_{15}B_{17}$	薄膜溅射在基片上	量程 (5~100)×10 ² kPa, 电阻温度系数 ±10×10 ⁻⁶ /°C, 最大工作温度 200°C	1984[6] 1983[7]

1. 超声传播效应的压力敏感元件和传感器。
2. 电阻-应变效应的压力敏感元件和传感器。
3. 应力-磁效应的压力敏感元件和传感器。

四、超声传播效应的压力敏感元件

利用超声传播效应的压力敏感元件是通过非晶态合金膜片的变形改变超声传播的特性以响应压力的变化。

非晶态合金的超声传播特性最早被利用制作超声延迟线,可调节延迟线等,以后又在延迟线的基础上制作包括压力敏感元件在内的各种敏感元件。这种压力敏感元件主要用于流体静压力,特别水压的检测,是一种高灵敏度和可靠的压力敏感元件,也是微压测量的较理想的敏感元件。

用于制作这类压力敏感元件的非晶态合金材料,主要是铁基和铁镍基非晶态合金薄带(见表1)。这类合金材料由于磁致伸缩大,因此超声传播效应十分显著。另外,这类合金材料的感生磁各向异性对外应力非常敏感,因此其超声传播特性对外应力非常敏感。

如表1所示,利用非晶态合金薄带超声传播效应的压力敏感元件有简单膜片式^[1]和差动式^[2]两类。图1(a)所示为简单膜片式压力敏感元件中的矩形膜片,利用非晶态合金带制成。膜片宽 a ,长 b ,厚 h ,周边为固支,在靠近膜片适当位置上,装有驱动磁头 D_1 和检测磁头 D_2 。输入磁头 D_1 的交变电流在膜片中产生平行于膜片的交变磁场,使膜片产生磁致伸缩,从而在膜片中产生超声波。超声波沿膜片传播到 D_2 下方,通过逆磁致伸缩效应改变膜片的磁化强度,同时使膜片外空间磁场变化,在 D_2 中感生一电动势,即有信号输出。

在垂直膜片方向加一静流体压力 P ,膜片产生如图示弯曲,其弯曲应力沿 Z 方向的分布见图1(b),为

$$\sigma = \sigma_m \frac{z}{(h/2)} \approx \frac{1}{4} P \left(\frac{a}{h} \right)^2 \frac{z}{(h/2)} \quad (1)$$

式中 σ_m 为膜片表面处应力。此式近似条件为 $b > 4a$ 。此应力分布所感生的磁各向异性引起的磁致伸缩变化率 $\Delta(\frac{\delta l}{l})$ 沿 Z 方向的平均值为

$$\overline{\Delta(\frac{\delta l}{l})} = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\frac{\alpha}{1 + \xi P^2} - \frac{1}{3} \right)$$

式中 $\alpha = \frac{M_s H}{3 \lambda_s \sigma_i}$, $\xi = \frac{(a/h)^4}{(4 \sigma_i)^2}$, 而 H 为 D_1 在膜片中所产生磁场强度, M_s 为膜片饱和磁化强度, λ_s 为饱和磁致伸缩系数, σ_i 为膜片中原剩余应力。进而可求出在压力 $P \approx \xi^{-\frac{1}{2}}$ 附近,由压力所引起超声波发生强度的变化率

$$\frac{\overline{\Delta(\delta l/l)}}{\overline{\Delta(\delta l/l)}_{P=0}} \approx \frac{1}{1 + \xi P} \approx 1 - \frac{(a/h)^2}{4 \sigma_i} P$$

即在 $P \approx \xi^{-\frac{1}{2}}$ 附近,超声波发生强度的变化率与压力 P 有线性关系。从而磁头 D_2 所检测电压

当压力 P 等于 0 时, 电桥处于平衡状态。当 P 不等于 0 时, 按上所述, 电阻 $3a$ 和 $3b$ 分别增加一定值, 电桥平衡被破坏, 在 $4a$ 和 $4c$ 间有与所加 P 相应的电压输出。若环境温度变化, 4 个电阻阻值变化相同, 即输出特性不受温度影响。

2. 镍基应变计型压力敏感元件^[6, 7]

从传统的应变计型压力敏感元件一直到上述非晶态铁基应变计压力敏感元件, 电阻应变计都是粘接在膜片上。压力敏感元件的特性将因粘接剂的蠕变、老化而受到影响, 使敏感元件的特性逐渐变坏。现在的镍基应变计压力敏感元件是利用物理气相沉积法, 在玻璃或陶瓷膜片上直接形成非晶态 $Ni_{88}Si_{15}B_{17}$ 合金薄膜, 然后再用光刻的方法在膜片上制作所需应变计图案。

这种非晶态合金除前述一般非晶态合金电阻—应变效应的各种特性外, 还具有电阻温度系数极小的优点。作者所研制的 $Ni_{88}Si_{15}B_{17}$ 合金薄带样品, 经中国科学院物理所用提拉振动样品磁强计测定, 在 4.2K 到 470K 温度范围内电阻温度系数很小, 约为 $6 \times 10^{-6} K^{-1}$ ^[7]。所研制的 $Ni_{88}Si_{15}B_{17}$ 合金薄膜样品, 经过预退火处理后, 其电阻温度系数最小可达到 $10^{-6} K^{-1}$ ^[7]。这些都与国外报导结果相同^[2]。因此利用这种材料作应变计的压力敏感元件一般不需再附加温度补偿装置。

六、应力-磁效应的压力敏感元件

利用应力-磁效应的压力敏感元件是通过非晶态合金膜片的变形改变电感或磁通以响应压力的变化。

应变计型的压力敏感元件, 即使是利用非晶态合金制作, 但由于其电阻最大变化率仍有限, 使得这类压力敏感元件的灵敏度和压力检测范围受到一定限制。利用应力-磁效应的压力敏感元件, 是直接以非晶态合金薄带作为膜片, 使这些局限性得到一定改进。

目前利用应力-磁效应的非晶态合金压力敏感元件已有近十种^[8-10], 这些压力敏感元件首先可以分成压力-电感转换型和压力-磁通转换型两类。

1. 压力-电感转换型压力敏感元件^[8, 9]

这类压力敏感元件由 4 个主要部分组成: 非晶态合金膜片; 铁氧体等软磁材料和膜片组成的磁路; 检测磁路电感的激励线圈; 外壳和检测电路。

图 8 所示为这类压力敏感元件中比较典型的一种结构。图中 10 是圆柱状软磁体, 在槽 11 内装有激励线圈 12, 引线 13 和 14 通过密封孔联接至检测电路。图中 16 为非晶态合金膜片, 与软磁体构成闭合磁路, 同时封闭环形槽, 使槽中处于真空或某一恒定压力下。

膜片感受流体压力时, 膜片中的应力使磁路的磁阻增加, 线圈的电感减少。检测电路可由电感的变化检测出流体压力。图 9 所示为在一个大气压的量程内, 电感约有 50% 的变化, 表明这类压力敏感元件的灵敏度很高。

2. 压力-磁通转换型压力敏感元件

属于这一类型的压力敏感元件有好几种, 本文只准备涉及其中应用较广的两种: 用于管道流场的压力敏感元件^[10]和膜盒式压力敏感元件^[10]。

和(b)分别给出这种压力敏感元件的简单结构和检测特性。可以看到这也是一种简单和可靠的压力敏感元件。

五、电阻-应变效应的压力敏感元件

利用电阻-应变效应的压力敏感元件是通过固定于膜片的应变计产生输出信号以响应压力的变化。在传统的应变计中，金属电阻丝应变计温度稳定性好，但输出电压低，最大工作温度较低，而且电阻丝抗拉强度低。半导体应变计灵敏度高，但温度稳定性差，最大工作温度不超过100℃，又由于抗冲击能力差，还必须有相应的保护措施。

非晶态合金制作应变计的压力敏感元件能消除上述种种缺点，并且滞后很小。电阻最大变化率高达5~6%，再加上电阻率大，因此单位应力引起的电阻变化的绝对值大；抗拉强度高，可靠性好；最大工作温度可达200℃；工艺简单；此外在合金中加入少量铬还可提高弹性变形率和抗腐蚀能力。

如表 1 所示，目前这类压力敏感元件有两种类型，不仅所用合金材料成分和形式不同，而且结构和工艺也不同。

1. 铁基应变计型压力敏感元件^[5]

图6所示为这种压力敏感元件的一种结构，电绝缘膜片1安装在外壳2中，在膜片1的背面粘接有非晶态 $Fe_{78}Cr_3(SiB)_{19}$ 合金薄带。通过腐蚀使薄带形成如图7所示的3a等4个矩形电阻，每个电阻沿箭头B方向的长度占总长主要部分。电阻3a和3b主要部分沿膜片径向，3c和3d沿周向。通过管嘴7加入流体压力时，膜片变形，电阻3a和3b阻值增加，而3c和3d阻值几乎不变。

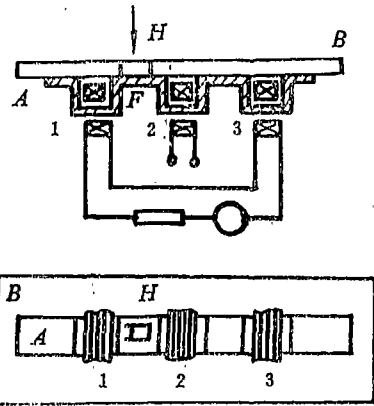


图5 差动式压力敏感元件 (a)线圈结构, (b)E_{0.1}随P变化特性

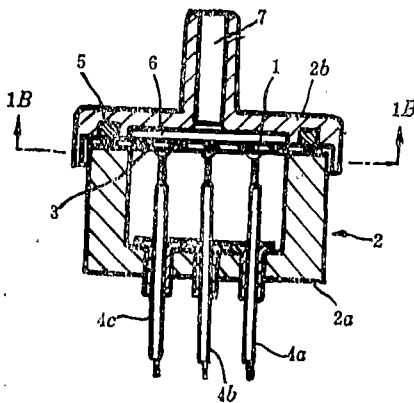


图6 铁基应变计型压力敏感元件

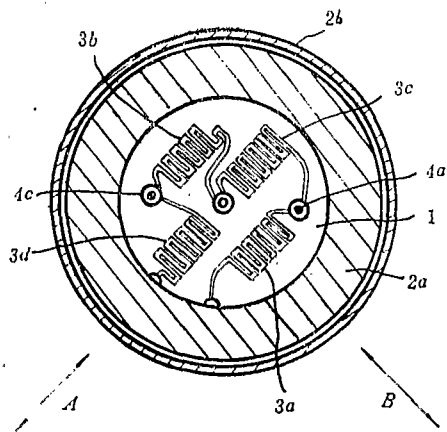


图7 铁基非晶态合金电阻体的布置

当压力 P 等于0时,电桥处于平衡状态。当 P 不等于0时,按上所述,电阻 $3a$ 和 $3b$ 分别增加一定值,电桥平衡被破坏,在 $4a$ 和 $4c$ 间有与所加 P 相应的电压输出。若环境温度变化,4个电阻阻值变化相同,即输出特性不受温度影响。

2. 镍基应变计型压力敏感元件^[6, 7]

从传统的应变计型压力敏感元件一直到上述非晶态铁基应变计压力敏感元件,电阻应变计都是粘接在膜片上。压力敏感元件的特性将因粘接剂的蠕变、老化而受到影响,使敏感元件的特性逐渐变坏。现在的镍基应变计压力敏感元件是利用物理气相沉积法,在玻璃或陶瓷膜片上直接形成非晶态 $Ni_{68}Si_{15}B_{17}$ 合金薄膜,然后再用光刻的方法在膜片上制作所需应变计图案。

这种非晶态合金除前述一般非晶态合金电阻—应变效应的各种特性外,还具有电阻温度系数极小的优点。作者所研制的 $Ni_{68}Si_{15}B_{17}$ 合金薄带样品,经中国科学院物理所用提拉振动样品磁强计测定,在4.2K到470K温度范围内电阻温度系数很小,约为 $6 \times 10^{-6} K^{-1}$ ^[7]。所研制的 $Ni_{68}Si_{15}B_{17}$ 合金薄膜样品,经过预退火处理后,其电阻温度系数最小可达到 $10^{-6} K^{-1}$ ^[7]。这些都与国外报导结果相同^[2]。因此利用这种材料作应变计的压力敏感元件一般不需再附加温度补偿装置。

六、应力—磁效应的压力敏感元件

利用应力—磁效应的压力敏感元件是通过非晶态合金膜片的变形改变电感或磁通以响应压力的变化。

应变计型的压力敏感元件,即使是利用非晶态合金制作,但由于其电阻最大变化率仍有限,使得这类压力敏感元件的灵敏度和压力检测范围受到一定限制。利用应力—磁效应的压力敏感元件,是直接以非晶态合金薄带作为膜片,使这些局限性得到一定改进。

目前利用应力—磁效应的非晶态合金压力敏感元件已有近十种^[8-10],这些压力敏感元件首先可以分成压力—电感转换型和压力—磁通转换型两类。

1. 压力—电感转换型压力敏感元件^[8, 9]

这类压力敏感元件由4个主要部分组成:非晶态合金膜片;铁氧体等软磁材料和膜片组成的磁路;检测磁路电感的激励线圈;外壳和检测电路。

图8所示为这类压力敏感元件中比较典型的一种结构。图中10是圆柱状软磁体,在槽11内装有激励线圈12。引线13和14通过密封孔联接至检测电路。图中16为非晶态合金膜片,与软磁体构成闭合磁路,同时封闭环形槽,使槽中处于真空或某一恒定压力下。

膜片感受流体压力时,膜片中的应力使磁路的磁阻增加,线圈的电感减少。检测电路可由电感的变化检测出流体压力。图9所示为在一个大气压的量程内,电感约有50%的变化,表明这类压力敏感元件的灵敏度很高。

2. 压力—磁通转换型压力敏感元件

属于这一类型的压力敏感元件有好几种,本文只准备涉及其中应用较广的两种:用于管道流场的压力敏感元件^[10]和膜盒式压力敏感元件^[10]。

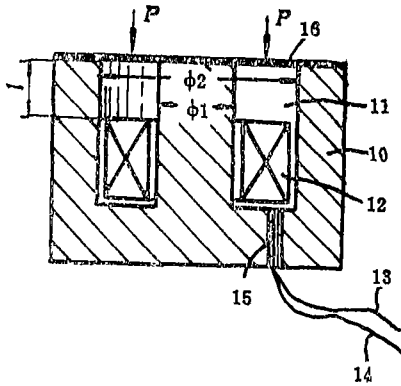


图8 一种典型压力-电感转换型压力敏感元件的结构 [8]

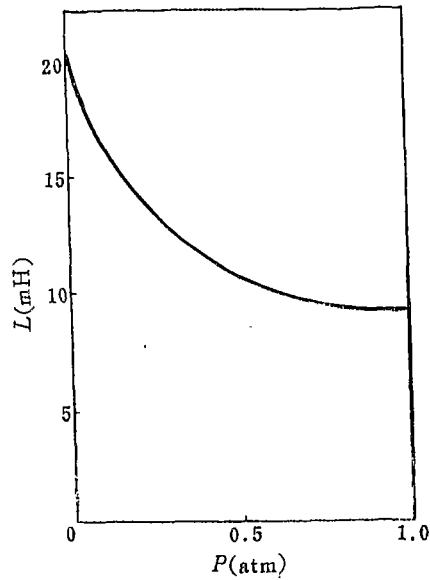


图9 电感随压力变化特性 [8]

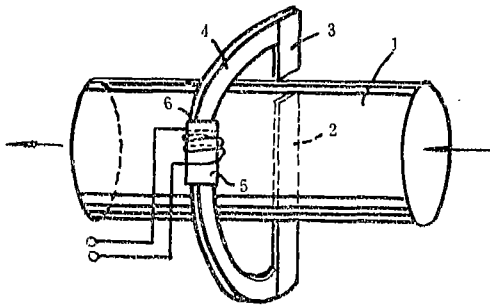


图10 用于管道流场测量的压力敏感元件的一种结构

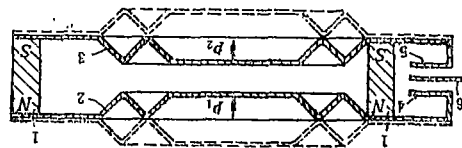


图11 膜盒式压力敏感元件的一种结构

图10所示为压力-磁通转换型的压力敏感元件中的一种。图中1是流体管道，2是非晶态合金弹簧片，固定于管道壁上，可在管中自由振动，3与2对称，4是连接元件2、3的弧状元件，3、4也都由磁性材料制成。5是一永久磁铁，与4联成一体，这样在2、3间存在磁场。6为绕在磁铁外的线圈，作为磁场敏感元件。当流场中压力改变时，弹簧片2位置发生改变，因此通过线圈的磁通量发生改变，这样，由检测电路就可检测出管道中流体压力的变化。

图11所示为膜盒式压力敏感元件。图中1为一空心圆柱形永久磁铁，其上、下底面分别为对压力敏感的波纹膜片2、3，并分别延伸到圆柱以外，构成相互平行的舌片4和5。在其中间还有一磁场敏感元件6，它可以是霍尔元件、感应线圈或类似元件。当膜片2、3处于相同压力下，中间磁场无变化。而当膜片2或3感受工作压力作用时，膜片2、3间的磁场发生变化，相应地舌片4、5间的磁场也发生变化。此时磁场敏感元件6就可通过检测电路提供与

所测压力相当的电信号。

图11中的虚线部分为膜片2、3的另一种结构,构成一种倍压式压力敏感元件。利用这种结构的压力敏感元件既可以检测出 P_1 、 P_2 间压力差,也适用于绝对压力的测量。

综上所述可知,非晶态合金的物理、机械性能优越,是一种理想的敏感材料。这种材料具有多种压力敏感的物理效应特性,因此可以制成相应效应的压力传感器。灵敏度高,线性度好,响应快,温度稳定性好和最大工作温度高等是这类传感器的特点。

非晶态合金压力传感器制造工艺简单,成本低,便于大量推广使用。

参 考 文 献

- 1 毛利佳年雄。(日)应用开发进むアモルファス金属材料,东京,株式会社シーエムシー,1982;120-132
- 2 Mohi K, Review on Recent Advances in the Field Amorphous-Metal Sensor and Transducers, IEEE Trans, 1984; 20; (5)942
- 3 Mohi K, Application of Amorphous Alloys to Sensors and Transducers, Proc. Conf. Rapidly Quenched Metals, RQ-5, 1985; M28: 1687
- 4 Hiltzinger H R, Application of Metallic Glasses in the Electronics Industry, IEEE Trans, 1985; 21; (5)2020
- 5 Mohi K, New Pressure Sensor, Kyushu Institute of Technology, 1984
- 6 Takayama K, A New Pressure Sensor, 7th Tech. Seminar for the New Sensors and Their Applications held by Inst. of Chemical Eng. of Japan, 1984
- 7 曾东宝等,用于力传感器的非晶态Ni-Si-B合金材料的研究,北京航空学院, BH-B2217, 1986
- 8 Yamashita I, A New Pressure Sensor, 7th Ann. Conf. on Mag. in Japan, 7aD-12, 1983
- 9 Yamashita I, A new Pressure Sensor, National Technical Report, 1983; 29; (3)484
- 10 Robert Bosch, GmbH, 7000 Stuttgart, DE: Neue Sensoren, 1983

AMORPHOUS-ALLOY PRESSURE SENSORS AND TRANSDUCERS

Wang Xuwei and Liu Guangyu

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

Recent advances of amorphous-alloy pressure sensors and transducers are reviewed. According to the utilized physical effect, the amorphous-alloy pressure sensors having been developed by this time are classified into three groups: Sensors utilizing the ultrasonic propagation effect; Sensors utilizing the resistance-strain effect and sensors utilizing the stress-magnetic effect. In the discussion of the Ni-base strain gauge pressure sensors, the related work of the research group joined by the authors is also included.

Key words amorphous alloy, pressure sensor, transducer.