

[文章编号] 1004- 0609(2001)S2- 0006- 05

NiTi 形状记忆薄膜的应用及进展^①

吴廷斌, 江伯鸿, 漆 璿

(上海交通大学 国家教育部高温材料及测试开放实验室, 上海 200030)

[摘 要] 介绍了当前国内外 NiTi 薄膜在以微机电系统(MEMS)为主的诸多领域中的应用研究情况, 分析了存在的问题, 并展望了今后的发展前景。

[关键词] NiTi 薄膜; 形状记忆合金; 研究; 应用; 进展

[中图分类号] TG 139. 6

[文献标识码] A

形状记忆效应是一种利用可逆热弹性马氏体相变实现多次回复到初始形状的固态现象。许多材料展示出这种效应, 其中性能最好、最稳定、应用最为广泛的是 NiTi 基形状记忆合金^[1]。块状和丝状 NiTi 合金的开发应用历史较长, 工艺也比较成熟。近 10 年内, NiTi 合金薄膜在微机电系统(MEMS)、溅射和微加工技术迅速发展的带动下日益受到人们的重视^[2]。最初对 NiTi 薄膜的研究主要集中于制备工艺、热处理工艺、性能测试等方面; 随着进一步研究的深入, NiTi 薄膜作为驱动或传感元件的应用研究逐渐成为研究热点之一。由于回复率高、回复力大, NiTi 薄膜在 MEMS 的驱动器和传感器设计和制造方面占有极其重要的地位。除此之外, NiTi 薄膜在诸如电容传感器、光缆控制器等领域也有独特的开发应用前景。本文作者重点介绍 NiTi 薄膜在 MEMS 中的应用研究概况, 并对今后可能的研究方向以及出现的问题作简单阐述。

1 NiTi 薄膜在 MEMS 中的应用

NiTi 薄膜在 MEMS 中主要用作驱动机构的驱动材料, 这些驱动机构包括各种伸缩机构^[3]、夹持机构^[4, 5]、阀门机构^[6~ 10]等等。同时, 也有少量利用 NiTi 薄膜的物性变化来制作传感元件的报道^[11]。

1.1 微型弹簧

用 NiTi 丝弹簧做成微驱动器的成功报道有很多, 但最细的 NiTi 丝直径只能达到 0.1 mm, 这极

大地限制了结构的微型化。如果能把 NiTi 薄膜直接加工成弹簧, 就可以大大减小结构的尺寸。

1990 年, Waller 等人^[3]采用刻蚀法制备的 NiTi 薄膜做成了微型弹簧, 通过电流加热驱动, 响应频率可以达到 20 Hz, 如图 1 所示。

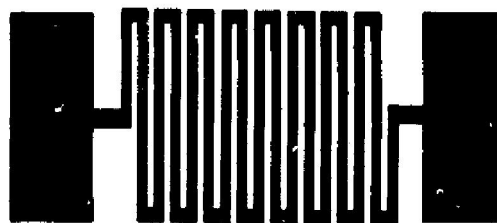


图 1 NiTi 薄膜弹簧示意图

Fig. 1 NiTi thin film spring

1.2 微型机械手/微钳

1993 年, Bayashi 等人^[4]用 NiTi 薄膜做成微型机器人的手臂。一个微型手臂使用 3 个可动微曲梁作为框架, 长度小于 1 mm。用通电控制 NiTi 薄膜的相变, 从而控制它的动作。

图 2 所示是美国 Lawrence Livermore 国家实

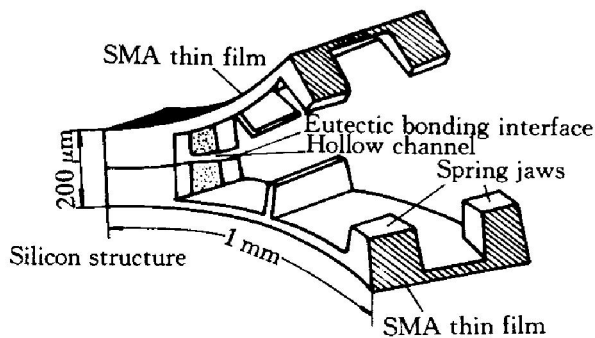


图 2 美国研制的微钳示意图

Fig. 2 Three-dimensional scheme of microgripper

① [基金项目] 中国比利时双边合作项目(B- 99- 02)

[收稿日期] 2000- 12- 26; [修订日期] 2001- 09- 26

[作者简介] 吴廷斌(1973), 男, 博士研究生。

验室于 1995 年设计制造的微钳^[5]。整个微钳厚 0.2 mm, 长 1 mm, 宽 0.38 mm。其中 TiNiCu 厚 5 μm , 硅片悬梁厚 12.5 μm 。受热时钳口张开 2 $\mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$, 相当于产生 20 mN 的驱动力, 工作频率为 100 Hz, 输入功率 30 mW (空气中) 或 150 mW (水中)。该微钳的相变温度正好在体温之上, 非常适于医用。

1.3 微型阀门

1.3.1 气阀(Pneumatic valve)

图 3(a) 是德国 Karlsruhe 研究中心研制的微气阀器件剖面图及原理图^[6]。该气阀尺寸为 6 mm $\times$ 6 mm $\times$ 2 mm。SMA 薄膜不是通过溅射制备的, 而是用激光切割 100 μm 厚的 SMA 自由膜成应力优化的图案状, 再粘贴到聚酰亚胺衬底上。SMA 受热时拉着绝缘块封住阀门, 平时由于气体的偏置力, 阀门是开着的。该阀门的输出功率为 35 mW, 驱动电压为 450 mV, 响应时间为 0.5~1.2 s。

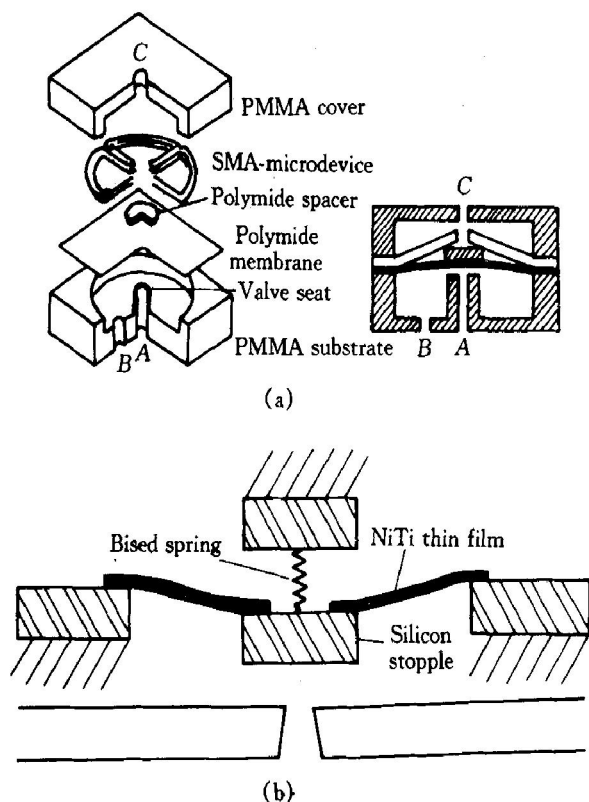


图 3 SMA 薄膜微气阀

Fig. 3 Scheme of SMA gas microvalve

图 3(b) 是美国 TiNi 合金公司 (TiNi Alloy Company) 制作的微阀示意图^[7,8]。加热时, TiNi 薄膜丝收缩, 拉起硅塞, 打开通道; 冷却时靠偏置弹簧的作用使 TiNi 薄膜丝拉伸, 封住通道。工作时硅塞位移可达 250 μm , 封住 400 Pa 以上的气压。通过改变薄膜丝的尺寸及数目, 可以获得所希望的驱动力和驱动位移。微阀的输出功率为 10 μW , 气流量

为 2 L/min。

1992~1995 年, 美国 TiNi 合金公司集中研究和开发了基于 Si 基板上溅射 NiTi 薄膜制成的微驱动器, 其制造工艺是从微电子制造及微机电工艺中借鉴来的, 包括图案化样品的制备。空气阀外观尺寸为 5 mm $\times$ 8 mm $\times$ 2 mm, 驱动电流为 50~150 mA, 比例控制通过反馈获得。在输出 0.5 N 力的情况下, 可产生 100 μm 的位移, 反应时间为几 ms。

目前, 美国 NiTi 合金公司的气阀产量有限, 主要用在分析仪器和医疗仪器中, 而流量控制器和压力调节器还处于实验阶段。

1.3.2 液阀

图 4 所示为美国 Lawrence Livermore 国家实验研制的 TiNiCu 薄膜微阀^[9]。加热 TiNiCu 薄膜导致 SMA/Si 膜片从玻璃上拉起 1~2 μm , 打开通道。

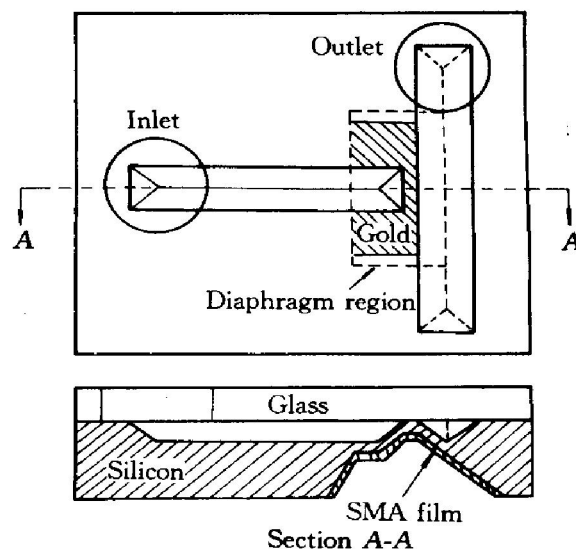


图 4 SMA 薄膜微阀的俯视图和截面图

Fig. 4 Top and cross-sectional views of bimorph SMA film microvalve

1.3.3 光阀

1998 年, Tabib 等人^[10]第一次将 SMA 薄膜应用于光学装置的设计制造中。因为在加热过程中, NiTi 薄膜会发生相变, 而母相和低温相具有不同的光学性质。经过测定发现, 在 550~850 nm 的波长范围内, NiTi 薄膜母相的光反射系数要比马氏体相的高出 45%。根据这个差别, 他们设计并制造了一个内孔直径为 0.26 mm 的实验性光阀。加热光阀时, 从内孔中穿透的光强度减弱 10%~17%。这种光阀将来可应用于许多有趣而又实用的光学仪器中, 比如光开关、显微镜、电器、火灾报警器等。

1.4 微型支撑架

传统微型设备是用沉积技术和去除牺牲层技术在 Si 基板上制造的。目前,正开发一种非平面微驱动器,它源于大型平板显示器(场发射显示器)的生产需要。平板显示器具有体积小、质量轻的优点,非常适合于计算机的输出设备。制造场发射显示器存在的一个难题就是显示器面板内的真空环境会给显示器前后板上造成很大的大气压力,迫使显示板内陷。问题的解决方案是在前后板之间加一个网状的微型支撑架,抵抗大气压力,但前提是不能挡住场发射离子轰击前面板,也即微型支撑架尺寸要小于两个像素之间的间隔。图 5 所示是平板显示器中的微型支撑架装置^[12]。它由支撑块、倾斜块和 Ni-Ti 薄膜驱动部分组成,由 NiTi 薄膜驱动支撑块直立起来,撑住前后面板。

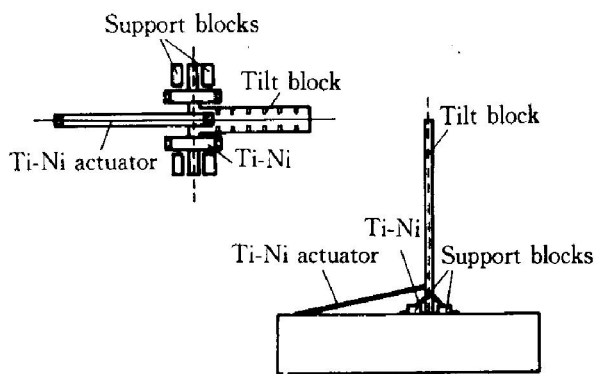


图 5 平板显示器中的支撑架

Fig. 5 Spacer in FED

1.5 微泵

微泵可应用在低流量精确处理场合,如药物输送,燃料进给,微量化学分析系统等领域。利用 SMA 的大回复力、大位移和输出功率大的优点,可以克服传统微泵的种种不足。

1988 年,William 等^[12]设计制造了两种微泵,一种是聚酰亚胺偏置弹簧式驱动,另一种是互补式驱动(见图 6)。结果表明,前者驱动能力达到 6 $\mu\text{L}/\text{min}$,后者则达到 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ 。随着驱动频率增大,冷却时间缩短,当没有足够时间从母相冷却至马氏体相时,泵膜振动频率就会下降。如果再增加驱动信号的频率,就会导致加热时间太多,冷却时间不够,从而马氏体相变无法充分进行,最后无法进行马氏体相变,最终导致泵膜停止动作。

2000 年,王莉等^[14]设计的微泵经测试发现,其工作的最佳脉冲电流占空比为 10:10,脉冲电流可在 10~120 mA 之间调节,平均电流 35~60 mA。微泵流量随电流的增加而增加,可达到 330 mL/min,微泵的膜片振幅为 2~6 μm 。

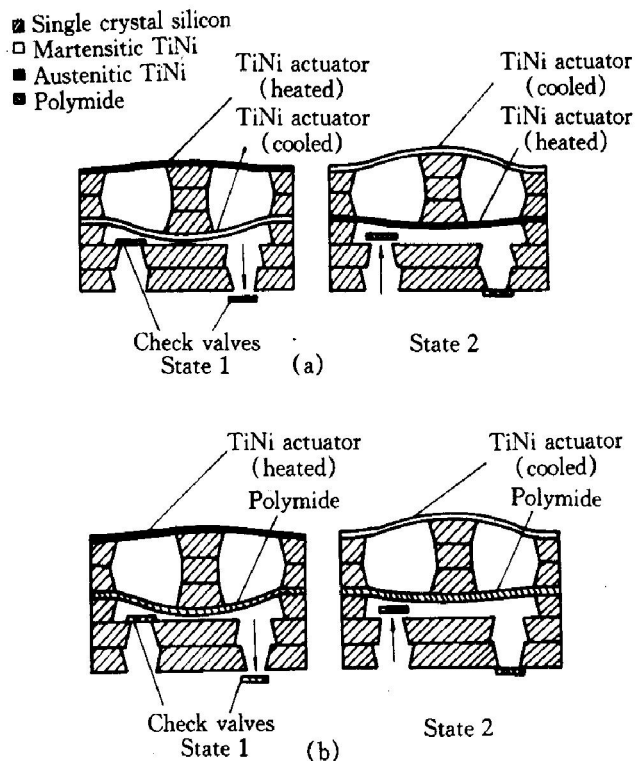


图 6 两种微泵示意图

Fig. 6 Micro-pump with complementary type design (a) or polyamides bias spring (b)

1.6 微型继电器

1999 年,美国 NiTi 公司用 NiTi 薄膜制成了微型继电器。它利用铝牺牲层技术在硅基底上溅射 NiTi 薄膜制得。电接触依靠沉积金膜,镍横梁依靠电镀。薄膜拉动横梁运动从而完成继电器的开闭。其适用于尺寸小,通断电流不超过 1 A 的情况下,可作为独立 IC 元件的保护装置或十字开关网络等。当电源关闭时,继电器本身不改变状态,所以,它只在状态改变时才消耗能量。在 1 cm^2 可制造 1000 个这样的继电器。

1.7 线性微驱动器

除了上述驱动位移垂直于膜面的微驱动器外,还有沿膜面驱动的微驱动器^[15](如图 7 所示)。该微驱动器由一个 TiNiCu 驱动弹簧和一个 TiNi 超弹

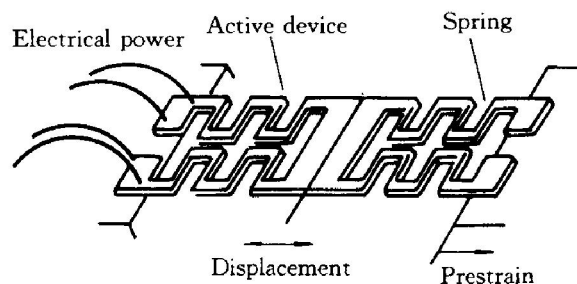


图 7 线性微驱动器

Fig. 7 Linear actuators moving horizontally

性弹簧组成, 通过控制加热实现线性位移控制。TiNiCu 弹簧通电加热时会收缩, 拉着 TiNi 弹簧水平向左移动。TiNi 弹簧由于超弹性和应力诱发马氏体相变, 所以易变形; 当 TiNiCu 停止加热时, 恢复到柔软的马氏体态, 对 TiNi 弹簧不再有很大力作用, TiNi 弹簧因外应力消失而回到奥氏体态, 就拉动 TiNiCu 弹簧向右回移, 实现水平的往复运动。该微驱动器可产生 500 μm 的驱动位移和 10 mN 的驱动力, 驱动功率为 190 mW, 加热和冷却时间分别为 300 ms 和 1.5 s。

1.8 NiTi 薄膜在智能结构中的应用

除了全部采用 NiTi 薄膜(或连同 Si 基片)制造微型驱动器之外, 还有人尝试把它同其它材料复合成一个具有不同材料各自优点的新型结构。1995 年 Jardine 等人^[16~18]设想利用压电材料的传感、驱动能力和 SMA 的驱动能力, 将它们复合起来构成有传感和驱动能力的复合材料。图 8 是 NiTi/PZT 多层复合材料结构示意图。

它作为一个智能阻尼系统, 可以用于振动的主动抑制。当应力波从左向右穿过该结构时, 首先到达 NiTi 层, 使 NiTi 薄膜发生应力诱发马氏体相变, 应力波中的一部分机械能转化成热能; 当应力波传播至第一个 PZT 层时, 产生电压信号, 这个信号被送到第二个 PZT 层, 又产生与原应力波相位不同的应力波, 以削弱应力波的传播强度。在这个体系中, 厚度不同的 TiO_2 层起着改变电阻、电容以调节相位的作用。考虑到应力波的速度可能超过系统的响应速度, 可在 TiO_2 层与第二个 PZT 层之间加上 Al(Ti 或 TiNi) 层作为缓冲层, 以减缓应力波速度。

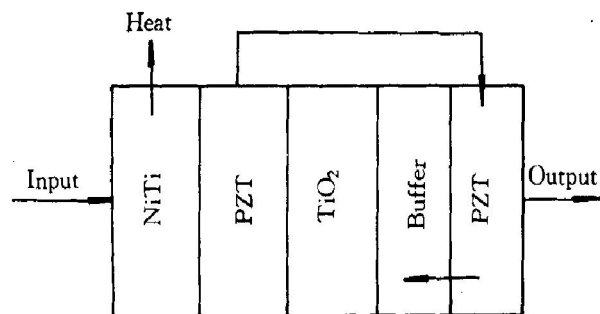


图 8 NiTi/PZT 主动阻尼结构示意图

Fig. 8 Scheme of smart NiTi/PZT active damping structure

上述 SMA 薄膜微驱动器根据其驱动结构大致可分为两类: 一类是 SMA 薄膜和硅基片组成双晶片型(Bimorph)的微驱动器。薄膜溅射沉积在硅基

片上, 利用两者之间的残余应力, 用硅基片作为偏置弹簧实现双向驱动; 另一类产生动作的薄膜是自由膜(Free-standing), 薄膜或者是通过溅射沉积到基片上再通过牺牲层技术将基片除去, 或者是通过机械冷轧的方法获得, 而后与其它驱动机构粘合在一起, 这类微驱动需要额外的偏置机构以实现双向往复运动。

2 NiTi 薄膜传感器

1998 年, Bendahan^[11]等人在 SiO_2/Si 基板上用磁控溅射方法制备 NiTi 薄膜, 利用 NiTi 薄膜相变时高低温相电容值的变化做成监控电流的传感器。同样, 这种传感器可集成在电子电路中。

3 存在问题

总体来讲, 目前 NiTi 形状记忆薄膜的应用研究呈现两大特点: 1) 学科交叉性 目前 NiTi 薄膜的研究人员不仅仅局限于材料学工作者, 而是包括机械、电子、信息以及医疗等诸多领域的科技人员; 2) 多系统高度集成化趋势 利用 NiTi 薄膜的易集成制造特点, 将其用于微机电系统(MEMS)、微光机电系统(MOEMS)等高度集成系统, 从而充分展现其小型化的特点及优势。

与此同时, 目前仍有一些问题阻碍 NiTi 应用研究的发展:

1) 对 NiTi 薄膜性能(形状记忆效应、寿命等)缺乏统一的或普遍认可的测试标准和评价准则, 这可能会阻碍从应用研究到最终产品化的进程。

2) 实际应用环境下的温度条件无法达到实验研究阶段的要求。由于天气或局部工作环境温度的波动(可能超出 NiTi 薄膜工作温度范围)、元件散热条件的改变等使得 NiTi 薄膜元件失效或误作用。这在元件的最初设计阶段应给以充分的考虑, 否则难以实现真正的实用化。

4 结束语

随着其制备工艺、性能研究的进一步成熟, NiTi 薄膜的应用研究前景将更为广阔, 尤其是在复合智能材料与结构、微机电系统驱动和传感元件的设计和制造方面, 必将会有突出表现, 相信会有更多的 NiTi 薄膜产品出现。

[REFERENCES]

- [1] Kazuhiro O, REN Xiao-bing. Recent developments in the research of shape memory alloys [J]. *Intermetallics*, 1999, 7(5): 511– 528.
- [2] Quandt E, Holleck H. Shape memory thin films of the system Ti(NiPdCu) [A]. *Materials for Smart System II* [C]. Pittsburgh PA, USA, 1997. 465– 470.
- [3] Walker J A, Gabriel K J. Thin-film processing of TiNi shape memory alloy [J]. *Sensors and Actuators*, 1990, A21(1– 3): 243– 246.
- [4] Kuribuyashi K, Shimizu S, Nishinohara T, et al. Trial fabrication of micro-sized arm using reversible TiNi alloy thin film actuators [A]. *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ Inter Cof of Intelligent Robots and Systems* [C]. Yokokama, Japan, 1993. 1697.
- [5] Lee A P, Ciarlo D R, Krulevitch P A, et al. A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation [J]. *Sensors and Actuators*, 1996, A54: 755– 759.
- [6] Skrobanek K D, Kohl M, Miyazaki S. Stress-optimised shape memory microvalves [A]. *Proceedings of the IEEE Microelectromechanical Systems (EMES)* [C]. Piscataway, NJ, USA, 1997. 256– 261.
- [7] Johanson A D, Martynov V V. Applications of shape-memory alloy thin film [A]. *The International Organization on Shape Memory and Superelastic Technologies* [C]. California, USA, 1997. 246– 256.
- [8] Gottschalk M. Thin-film NiTi alloy powers silicon microvalve [J]. *Design News*, 1993, 49(13): 127– 129.
- [9] Krulevitch P A, Lee A P, Ramsey P B, et al. Thin film shape memory alloy microactuators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, 5(4): 270– 281.
- [10] Tabib A M, Sutapun B, Huff M. Applications of TiNi thin film shape memory alloys in micro-opto-electro-mechanical systems [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, 77(1): 34– 38.
- [11] Bendhan M, Aguri K, Seguin J L, et al. NiTi thin films as a gate of M.O.S. capacity sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, 74(1): 242– 245.
- [12] Pister K S J, Judy M J, Burgett S R, et al. Microfabricated hinges [J]. *Sensors and Actuators*, 1992, 33(3): 249– 250.
- [13] William L, Harold K, Arth H, et al. Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 7(2): 245– 251.
- [14] Wang Li. Theory and techniques of thin film shape memory alloy microactuators based on silicon substrate [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2000.
- [15] Kohl M, Skrobanek K D. Linear microactuators based on the shape memory effect [A]. *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators* [C]. Chicago, USA, 1997. 785– 788.
- [16] Mercado P G, Jardine A P. Thin film multilayers of ferroelastic TiNi/ferroelectric PZT: Fabrication and characterization [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(1): 62– 70.
- [17] Mercado P G, Jardine A P. Materials development of smart thin-film TiNi/PZT heterostructures [A]. *Proceedings of SPIE* [C]. Bellingham, 1994.
- [18] Jardine A P. Synthesis of thin-film ferroelectrics on Si and shape memory effect TiNi substrates [J]. *Smart Materials and Structures*, 1994, 3(2): 140– 146.

Advancement in application research on NiTi shape memory thin films

WU Ting-bin, JIANG Bo-hong, QI Xuan

(Open Laboratory of Education Ministry for High-Temperature Materials and Testing,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, P. R. China)

[Abstract] A introduction to the latest progress in application research on NiTi shape memory thin film was made. Its potential application was prospected and some possible problems in future development was estimated.

[Key words] NiTi thin film; shape memory alloy; research; application; advancement

(编辑 杨 兵)