

SMA 微夹钳的研究^{*}

李路明 王立鼎

(中国科学院长春光机精密机械研究所机电部, 长春 130022)

摘要 SMA(形状记忆合金)是本世纪六十年代出现的一种功能材料,具有广阔的应用前景。目前,SMA 主要用作工程材料,如管接头、工程弹簧等。本文试图利用 SMA 的形状记忆特性,制作微小的功能夹持器,用于微机械零部件的装配中;并从马氏体热弹性变形出发,对这种 SMA 微夹钳的设计原理、动力学特性、变位量的可控性及其与温度的关系进行了深入的研究。在文章最后,讨论了 SMA 微夹钳工作过程中的能量转化关系。

关键词: 形状记忆合金;微夹钳;设计原理;动力学特性

1 引言

形状记忆合金分为 TiNi 形状记忆合金、铜基形状记忆合金和铁基形状记忆合金等几种。其中,应用得最多的是 Ni-Ti 系合金。因为 Ni-Ti 系合金具有较高的机械性能,抗蚀性好,可恢复的应变量大,恢复力大且与人体的相容性好等突出优点,这是其它合金不可比拟的。铜基合金的记忆特性虽然比不上 TiNi 合金,但其生产成还不足 TiNi 合金的十分之一以下,加工性能好。到目前为止,发现的铁基形状记忆合金已有多种。最早发现的 FePt、FePd 合金具有形状记忆效应,马氏体相变为热弹性型。近年对铁基形状记忆合金的研究主要放在不锈钢为基体的合金上。

形状记忆合金元件的变位量与温度、内阻之间存在一一对应关系,在变位过程中有力输出,可以做功。SMA 作为可控执行元件,具有体积小,可控精度高等特点,可以概括为以下三点:

(1) SMA 元件既是温度传感器,又是执行元件,集中了两种功能,便于机构简化。针对具体元件,温度——电阻、变位量——电阻曲线可通过理论分析和实验数据采样、处理两种方法获得。

* 收稿日期: 1997年1月20日

国家科委攀登计划资助项目

(2) SMA 功率重量比很大。即使是非常小的元件, 它的功率重量比也几乎没有减小。

(3) SMA 相变过程中产生的变位量与其电阻存在一一对应关系, 电阻作为反馈, 可实现闭环控制。

本文介绍利用 SMA 细丝制作具有传感功能的微型夹钳的工作原理、设计方法, 及实现精细操作动作的实验功能。

2 SMA 微夹钳的工作原理和设计计算

2.1 热弹性马氏体相变与温度关系

在金属马氏体相变中, 根据正、逆相变温度滞后大小 (A_s-M_s) 和马氏体长大方式分为热弹性和非热弹性马氏体相变。普通铁碳合金的马氏体相变为非热弹性马氏体相变, 相变温度滞后非常大, 约为几百度。马氏体片几乎是在瞬间就长大。形状记忆合金的马氏体相变属于热弹性马氏体相变, 其相变温度滞后比非热弹性马氏体相变小一个数量级以上。有的形状记忆合金的温度滞后可达到 1 。冷却过程中形成的马氏体相和母相的界面表现出弹性式的推移, 在相变过程中一直保持着良好的协调性, 并随温度的变化而继续长大或收缩。正是这种相界面的弹性式推移使马氏体热弹性相变变形具有柔顺的特点。通过已有实验, 可知马氏体量是温度的函数, 在相变全过程中, 马氏体片的大小只与某一温度相对应, 并且具有很高的重复性, 如图 1 所示。相变前后母相和马氏体相的化学自由能 G 和温度 T 的关系, 在恒压力下有

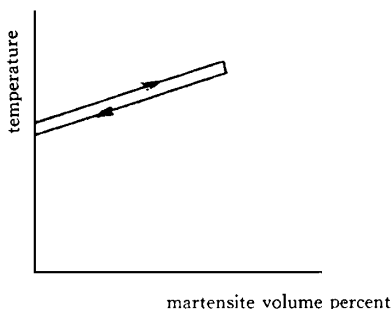


Fig. 1 Formation and disappearance of martensite

$$G = H - TS \tag{1}$$

$$H = U + PV \tag{2}$$

式中, G —自由能;

H —焓;

T —温度;

S —熵;

U —内能;

P —压力;

V —体积;

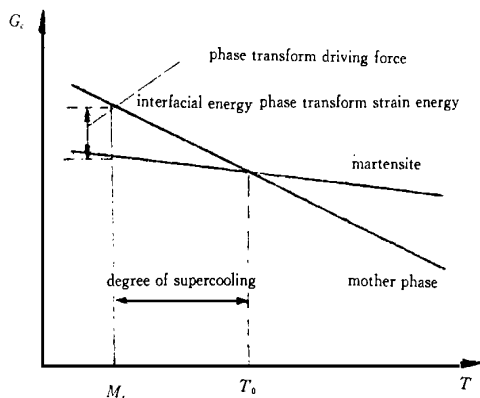


Fig. 2 The relation between biphas free energy and temperature

$G-T$ 关系曲线如图 2 所示。图中, 母相和马氏体相在 T_0 相交, 在 M_s 点马氏体相变开始进行, 则 M_s 点的两相的相变化学驱动力为 ΔG_c^M 。

$\Delta G_c^M = G_c^M - G_c^P$ 。此时, 在 M_s 点有不连续的体积变化, 即一次相变, 表明已相变区域和未相变区域形成于明确的相界面。相界面的形成和变形的发生都要非化学自由能, 即需要过冷度,

得到相变驱动力以克服相变的切变阻力和变形阻力。

2.2 微夹钳的结构设计及数学模型的建立

环形结构的微夹钳, 结构如图 3 所示, 能在高温下 (A_f 以上) 闭合和在低温下 (M_f 以下) 张开。采用环形结构, 便于利用现有的形状记忆合金丝状材料。将 \mathcal{Q} 以下的细丝经端面加工, 按变径圆理论进行设计。变径圆理论是这样的: 在图 4 所示的坐标系上, 作一过原点 o 的圆, 圆心 p 在 y 轴上, 半径为 r_0 , 该圆与 y 轴的另一交点为 $A B$ 重合点。保持圆弧 $A O B$ 长度不变, 增大半径 r_0 到 r_1 , 并使半径增大后的圆始终过原点 o 。保持圆心 p 在 y 轴上, 圆弧 $A_1 O B_1$ 为张开的微夹钳, 圆弧 $A_1 B_1$ 即张开的钳口。圆弧 $A_1 O B_1$ 随变径圆半径的增大, 可达到极限位置 $A_3 O B_3$ 。此时, 变径圆的半径为 r_3 , 圆心 p 在 y 轴上 $-r_3$ 处。圆弧 $A_1 O B_1$ 另一个极限位置为 $A B$ 两点重合, 即圆 $A O B$, 半径为 r_0 , 为微夹钳的闭合状态。

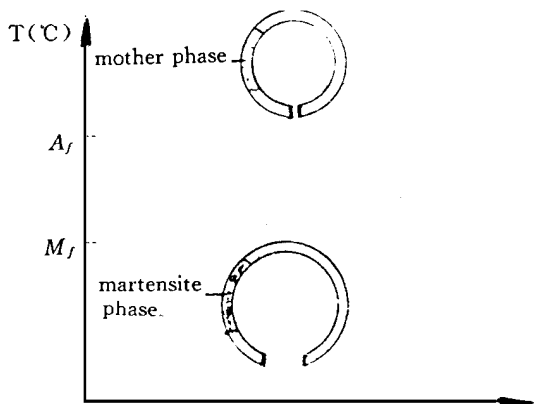


Fig. 3 Relation between circular clamp and temperature

利用这种变径圆理论, 可根据要夹持小物体的大小, 设计夹钳的最大开口量、形状记忆的位置和记忆训练的变形量。下面拟用理论力学的广义坐标法来描述这种环形结构的动力学情况。这种环状微夹钳的夹力实质是来自于形状记忆合金相变时的相变驱动力, 其能量来源是驱使相变得以进行的相变前后系统总的自由能差, 最终实质是热能。不妨设 A 、 B 点的夹持力为 F_x 、 F'_x , 如图 5 所示, 且 $F_x = -F'_x$, 该质点系的两个质点 A 和 B 的坐标分别为 X_A 、 Y_A 、 X_B 、 Y_B , 按变径圆理论建立的环形结构曲率半径为 r 。由于存在约束条件:

$$- X_A = X_B \tag{3}$$

$$Y_A = Y_B \tag{4}$$

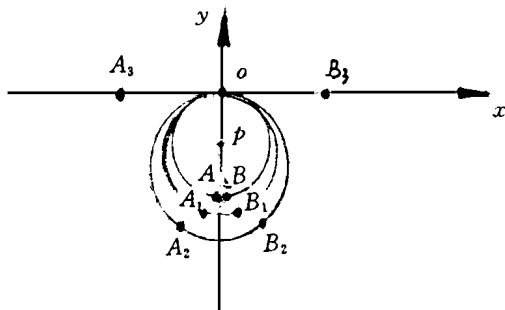


Fig. 4 Variable radius circle

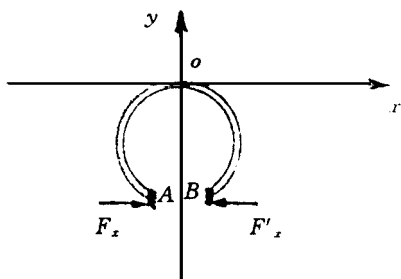


Fig. 5 Positive clamping forces on point A and B

$$2\pi r_0 = 2r \arcsin\left(\frac{OA}{2r}\right) = 2r \arcsin \frac{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2}}{2r} \quad (5)$$

故只有 X_A 是独立坐标。可设环状微夹钳的广义坐标为变径圆半径 r ，则

$$2r \arcsin \frac{X_A}{r} = 2\pi r - 2\pi r_0 \quad (6)$$

等式两边变分，整理得

$$-\frac{r}{r^2 - X_A^2} \delta X_A = \left(-\frac{X_A}{r^2 - X_A^2} + \pi \right) \delta r \quad (7)$$

夹持主动力 F_X 、 F_r 所作虚功

$$\delta W_F = 2F_X \delta X_A \quad (8)$$

则对应广义坐标 r 的广义力为

$$Q_r = -\frac{\delta W_F}{\delta r} = -\frac{2F_X \delta X_A}{\delta r} \quad (9)$$

将(7)代入(9)，得

$$Q_r = \frac{2F_X}{r} (X_A + \pi \sqrt{r^2 - X_A^2}) \quad (10)$$

以上建立的广义力与实际夹持力的关系，为利用变径圆设计环状微夹钳及其夹持力计算打下了理论基础。下一步还要深入分析马氏体量在相变过程中作为时间函数的可控性。结合环状微夹钳相变中两相自由能差值计算及建模，基于变径圆理论，由广义力 Q_r 出发用能量法来计算夹持力。对于提高形状记忆合金执行器的控制性能很有意义。

3 微夹钳工作过程中能量转换关系

SMA 微夹钳作为执行器，工作时需要相变驱动力。从相变理论来看，相变驱动力来源是外界热能的输入输出。表现温度上的过冷度和过热度的温度变化，导致 SMA 元件内部的两相（M 相和 P 相）之间的自由能差。这种自由能差产生的相变驱动力提供了微夹钳的夹持力，对外做功。微夹钳工作过程中的能量流程关系如图 6 框图所示。框图中马氏本相变中， G_s 是马氏体形成界面能。将马氏体近似为透镜状，那么， G_s 可表示为

$$G_s^{P \rightarrow M} = 2\pi r^2 \sigma$$

式中， σ ——单位面积界面能；

$G_e^{P \rightarrow M}$ ——是弹性变形能，可表示为

$$G_e^{P \rightarrow M} = V(A \frac{t}{r})$$

式中， A ——弹性应变因子； $A(t/r)$ ——单位体积弹性应变能； V ——马氏体近似体积 $\pi r^2 t^2$ 。

G_d 是塑性变形能, 可表示为

$$G_d^p M = V(B \frac{l}{r})$$

式中, B —— 塑性应变因子。

化学能 $\Delta G_c^p M$ 可表示为

$$\Delta G_c^p M = V \Delta g_c$$

式中, Δg_c —— 单位体积内化学自由能变化。

非化学自由能 $\Delta G_{nc}^p M$ 包括 $G_s^p M$ 、 $G_e^p M$ 和 $G_d^p M$ 。以马氏体正相变为例, 根据相变一般规律, 相变得以进行的条件是相变前后系统总自由能改变小于零。SMA 微夹钳中新旧两相化学自由能相等的温度是 T_0 , 当温度降到 M_s 点以下, 满足了马氏体相变需要的过冷度, 即形成了相变驱动力(如图 2 示), 相变驱动力主要是为了克服相变时的切变阻力和变形阻力, 包括 $G_s^p M$ 、 $G_e^p M$ 、 $G_d^p M$, 并且被利用来对外做功。全自由能变化为

$$\Delta G^p M = \Delta G_c^p M + \Delta G_{nc}^p M + W_l$$

式中, W_l —— 对外做功的机械能。等号右边第一项大于后二项, 则马氏体晶核就长大, 相变进行。当温度降到 M_f 点以下时, 相变结束, SMA 微夹钳停止对外做功, 钳口到达关闭位置, 动作停止。用 DSC 法测量时, M_s — M_f 之间出现放热峰, 相反, 在 A_s — A_f 之间出现吸热峰。

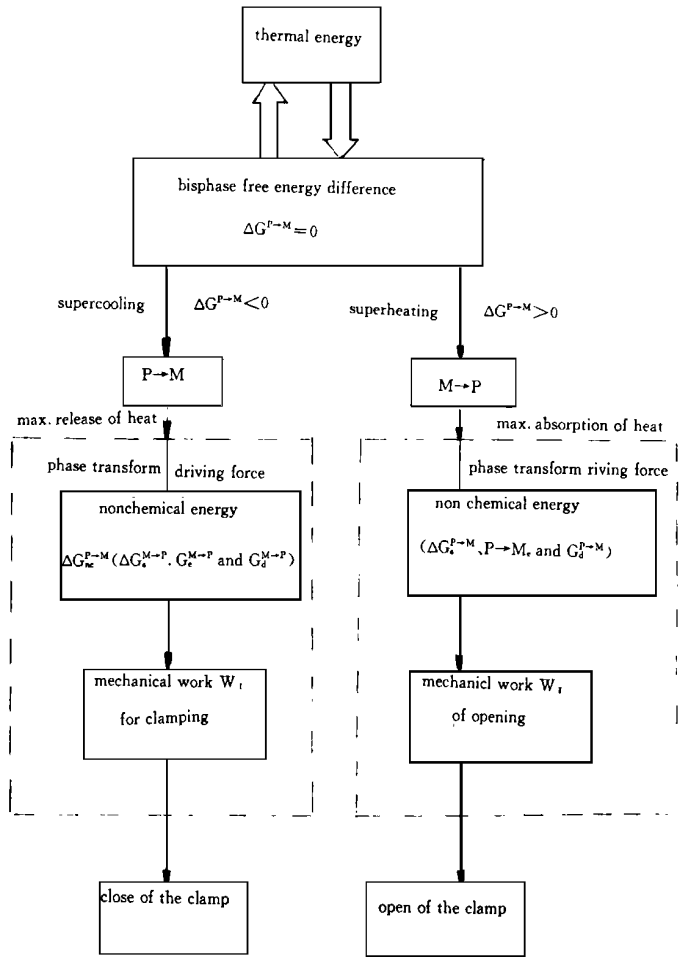


Fig. 6 Energy transform

4 小 结

将形状记忆合金用于微操作夹钳, 是一种尝试。本文从材料选取出发, 提出环形夹钳的结构设计原理和工作原理。首次应用变径圆方法来设计环形夹钳, 建立了环形夹钳的数学模型, 并结合 SMA 微夹钳的数学模型, 并结合 SMA 微夹钳的工作过程分析了能量的转换关系。所有这些工作有利于指导 SMA 微夹钳的设计、制造和测试。下一步工作可以通过能量的方法尝试建立热力学和动力学之间的联系, 并从应用的角度出发, 分析研究该元件的各种机械性能和

控制性能。

参 考 文 献

- [1] 杨杰, 吴月华. 形状记忆合金及其应用. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1993
- [2] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 北京: 科学出版社, 1980
- [3] 王儒润等. 美国形状记忆合金技术的研究与应用. 出国考察报告, 1993, (2): 97 ~ 114

Study on SMA Microclamp

Li Luming, Wang Liding

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Shape Memory Alloy(SMA) is a kind of functional marterial which began to appear in 1960s. It has great applications in industry field. It used to be made as pipe connecter、engineering springs etc. We try to manufacture tiny part with SMA, and use it as functional clamp in MEMs assembly. Based on the constituents of the alloy、clamp openness-temperature corresponding relation and thermal elastic transformation, the work principles、dynamic characteristics of the SMA microclamp is introduced in this article. At last we discuss the energy transform relation during the clamp working process.

Key words: Shape Memory Alloy, Microclamp, Design principle, Dynamic characteristics

李路明 男, 1969年9月生。1991年毕业于哈尔滨船舶工程学院机械系。1993年考入中科院长春光机所, 攻读硕士学位。1995年免试提前攻读博士学位。博士课题是微电子机械微操作系统。