

# 基于热力学的 SMA 微夹钳工作原理的研究\*

李路明 王立鼎

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** SMA 形状记忆合金微夹钳是一种形状记忆合金微夹钳。它是利用形状记忆合金的记忆特性来产生夹持和张开动作。形状记忆合金产生动作的能量来源于热能, 表现为温度上变化, SMA 微夹钳与外界之间热能的输入输出。本文试图用热力学的方法求解 SMA 微夹钳的简单动力学问题。认为在  $M_s$  点以下, 马氏体与未转变的母相奥氏体处于某种平衡状态, 利用变温马氏体相变公式, 处理 SMA 微夹钳的热力学和动力学之间的定量或定性的数学关系, 得出一些对于设计和制造有用的结论, 从而为深入研究 SMA 微夹钳的热弹性马氏体相变的工作原理打下理论基础。

**关键词:** 微夹钳; 形状记忆合金; 马氏体热弹性相变

## 1 引 言

近年来, 热力学研究的一个重要趋势是研究非平衡过程, 如马氏体相变驱动力, 甚至马氏体相变本身。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。其中, 形状记忆合金的马氏体相变属于热弹性马氏体相变。在热弹性马氏体相变全过程中, 马氏体量是温度的函数, 只与某一温度相对应, 具有良好的线性和很高的重复性。冷却过程中形成的马氏体相和母相界面表现出弹性式推移, 在相变过程中一直保持良好的协调性, 并随温度的变化而继续长大或收缩。本文试图以这一物理现象为基础, 建立 SMA 微夹钳中马氏体量的温度函数, 采用热力学方法计算马氏体相变驱动力, 研究与时间、温度有关过程以及相变速度问题, 最终导出热力学与 SMA 微夹钳夹持动力学的数学模型。

按照马氏体的形成方式, 一类是在变温条件下形成的马氏体, 马氏体量是温度函数, 称为变温马氏体转变; 另一类是在等温条件下形成马氏体, 马氏体量是时间函数, 称为等温马氏体

收稿日期: 1997年3月4日

\* 本文系国家科委攀登计划资助项目

转变。形状记忆合金的马氏体转变属于变温马氏体转变。变温马氏体转变又分两种形式,一种是随温度改变,马氏体片的数目增加;另一种是随温度改变,马氏体片的尺寸增加。因为形状记忆合金的马氏体相变是以马氏体片的尺寸增加的,所以本文主要以这种马氏体片尺寸增加的变温马氏体转变为对象进行研究。

## 2 SMA 微夹钳热力学和动力学工作原理

### 2.1 马氏体相变动力学基础

一般钢铁马氏体相变时,其自由能  $\Delta G^{rM}$  按下式计算:

$$\Delta G^{rM} = \Delta G^{ra} + \Delta G^{aM} \quad (1)$$

式中,  $\Delta G^{ra}$  表示晶格由面心立方变为体心立方时释放出的化学自由能。 $\Delta G^{aM}$  为马氏体相变时,由于晶界增多、塑变、位错增加、应力等因素消耗的非化学自由能。当  $T = M_s$  时,  $\Delta G^{rM} = 0$ 。马氏体相变时,释放的化学自由能为

$$\Delta G^{rM} = (1 - X_c) \Delta G_{Fe}^{ra} + (1 - X_c) RT \ln \frac{r_{Fe}^a}{r_{Fe}^r} + X_c RT \ln \frac{r_c^a}{r_c^r} \quad (2)$$

式中,  $X_c$  为钢中碳的原子百分含量,  $R$  为气体常数  $8.3143 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ,  $T$  为相变温度(K),  $\Delta G_{Fe}^{ra}$  为纯铁从面心立方变为体心立方释放出的化学自由能。 $r_{Fe}^a, r_{Fe}^r$  为  $Fe$  在铁素体和奥氏体中的活度系数。 $r_c^a, r_c^r$  为  $c$  在铁素体和奥氏体中的活度系数,  $\Delta G^{ra}$  产生了马氏体相变的驱动力。对于具体的铁碳合金,  $X_c$  一定,则  $\Delta G^{ra}$  是温度  $T$  的函数,不妨设为  $\Delta G_{(t)}^{ra}$ 。通常根据实验,可以将(2)式写成

$$\Delta G_{(t)}^{ra} = (1202Y_c + 10915X_c) + T(RY_x Z_c / 5 - 3.72X_c) - T^2(2.63 \times 10^{-3}Y_c) + T^3(1.54 \times 10^{-6}Y_c) \quad (3)$$

其中,  $Y_c = 1 - X_c$

$$Z_c = 3 \ln[(3 - 8X_c) / 3(1 - X_c)] - \ln((1 - 6X_c) / (1 - X_c))$$

当  $X_c$  为常数时,  $Y_c, Z_c$  皆为常数。(1) 式中非化学自由能  $\Delta G^{aM}$  可表示为:

$$\Delta G^{aM} = \Delta G_1^{aM} + \Delta G_2^{aM} \quad (4)$$

其中,  $\Delta G_1^{aM}$  表示奥氏体和马氏体发生切变所消耗的能量。通常根据实验,将  $\Delta G^{aM}$  写成温度的一次函数:

$$\Delta G^{aM} = 244.5 + 0.09(1200 - T) \quad (5)$$

综合整理(3)、(5)二式,代入(1)式,可得马氏体相变自由能  $\Delta G^{rM}$  为

$$\Delta G^{rM} = (352.5 + 1202X_c + 10915X_c) + T(RY_x Z_c / 5 - 3.72X_c - 0.09) - T^2(2.63 \times 10^{-3}Y_c) + T^3(1.54 \times 10^{-6}Y_c) \quad (6)$$

可见,马氏体相变自由能是关于温度  $T$  的三次减函数,随温度  $T$  升高而下降。马氏体相变是非扩散型固态转变的重要类型,是一级相变。马氏体相变热力学的概念和研究方法是研究形状记忆合金热弹性马氏体相变的基础,其相变热力学特征、相变特征和机制将有助于研究形状记忆合金的相变特征和机制。

### 2.2 形状记忆合金的热弹性马氏体相变

形状记忆合金的马氏体相变属于热弹性马氏体相变。在  $M_f$   $T$   $M_s$  的相变全过程中,马

氏体体积  $V_m$  与温度保持着良好的线性关系和很高的重复性。设  $\Delta G_r^{P \rightarrow M}$  为母相转变为马氏体时的化学自由能差, 对一定成分的合金, 它是温度的函数。 $\Delta G_r^{P \rightarrow M}$  为整个相变阻力, 则  $\Delta G_r^{P \rightarrow M}$  可表示为

$$\Delta G_r^{P \rightarrow M} = \sigma_i \epsilon_n dV_m + \gamma_m dA + \xi \epsilon_n dV_m$$

式中,  $\sigma_i$  为相变应变 (及外加应力引起的应变) 引起的内应力,  $V_m$  为克原子体积,  $dV_m$  为马氏体长大或收缩的体积单元,  $dA$  为相应的表面单元,  $\epsilon_n$  为包括相变在内的总应变张量,  $\gamma_m$  为界面的表面能,  $\xi$  为相变时单位应变释放的能量, 该能量是由摩擦及产生不可逆的缺陷造成。在不加应力时,

$$|\Delta G_d^{P \rightarrow M}| = |\Delta G_r^{P \rightarrow M}|$$

显然热平衡条件为

$$|\Delta G_d^{P \rightarrow M}| = |\Delta G_r^{P \rightarrow M}| = |\sigma_i \epsilon_n dV_m + \gamma_m dA + \xi \epsilon_n dV_m| \quad (7)$$

$\Delta G_r^{P \rightarrow M}$  和  $\Delta G_d^{P \rightarrow M}$  都是  $V_m/V$  的函数, 按单位体积 (7) 式可写成

$$|\Delta G_r^{P \rightarrow M}| = |\sigma_i \epsilon_n + \gamma_m A + \xi \epsilon_n| \quad (8)$$

式中,  $A = dA/V$  为形状因子, 则 (8) 式为热弹性马氏体平衡的条件。由于  $\frac{\partial \Delta G_r^{P \rightarrow M}}{\partial T} < 0$ , 当温度降低时,  $\Delta G_r^{P \rightarrow M}$  增大, 而  $\Delta G_d^{P \rightarrow M}$  因温度的变化较小。当  $T < M_s$ , 马氏体形成并长大, 随  $V_m/V$  的增加,  $|\Delta G_d^{P \rightarrow M}|$  和  $|\Delta G_r^{P \rightarrow M}|$  都增大, 当满足 (8) 式时, 则

$$|\Delta G_d^{P \rightarrow M}| = |\Delta G_r^{P \rightarrow M}| = |\Delta G_r^{P \rightarrow M}|$$

即使未遇到任何障碍, 马氏体也停止长大, 达到平衡。升高温度, 马氏体将收缩, 直至消失; 降低至一定温度,  $|\Delta G_r^{P \rightarrow M}|$  增大, 马氏体继续形成或长大, 直到再次满足 (8) 式条件时长大停止, 又达到热平衡状态。当  $T < M_s$ , 并且一直保持

$$|\Delta G_r^{P \rightarrow M}| > |\sigma_i \epsilon_n + \gamma_m A + \xi \epsilon_n|$$

时, 将进行爆发式转变, 直至马氏体遇到障碍 (晶界、孪晶界、其它马氏体片) 时停止长大。而当  $T < M_s$  并且一直保持

$$|\Delta G_r^{P \rightarrow M}| > |\sigma_i \epsilon_n + \gamma_m A + \xi \epsilon_n|$$

时, 将进行逆转变。设  $R$  为逆转变参数, 为四复或逆转变分数, 可表示为

$$R(T, \sigma_a) = \frac{\sigma_i \epsilon_n + \gamma_m}{\sigma_i \epsilon_n + \gamma_m + \xi \epsilon_n} \quad (9)$$

式中,  $\sigma_a$  为外加应力。当所有相变驱动力全部马氏体储存, 即  $\xi = 0$  时, 则  $R = 1$ , 表示马氏体长大过程完全可逆。当释放能量较大, 即  $\xi$  较大时, 则  $R < 1$ , 表示长大过程部分可逆。当  $\xi$  很大,  $R = 0$  时, 则表示完全不可逆过程, 失去热弹性。

### 3 SMA 微夹钳中的夹力、温度、钳口开合量及其相互关系

形状记忆合金元件都是热驱动元件, SMA 微夹钳属于形状记忆合金元件, 所以也是热驱动的元件。其优点是把功能材料直接制成机械元件, 这是实现高性能机械系统的基础。本文的 SMA 微夹钳是根据变径圆理论设计的环状微夹钳。微夹钳采用现成的  $\Phi 0.2$  的拉拔的 TiNi 合金丝为材料, 按设计给出的闭合半径  $r_0$  弯曲成闭合圆, 制成环状夹钳。按设计的钳口张开量  $s$

推算出张开钳口时圆的半径  $r$ , 算出变径比  $r/r_0$ , 根据变径比  $r/r_0$  可进行形状记忆合金微夹钳的记忆训练。我们采用 TiNi 合金未制做微夹钳。TiNi 合金的形状回复量与元件疲劳寿命有关。经历了一定的热循环或应力循环后, 形状记忆特性开始逐渐衰减。当循环次数少时, TiNi 合金的形状回复量为 6% 以下; 当循环次数多时,  $N = 10^5$ , 形状加复量为 2% 以下。在这里, 我们采用 2% 的形状回复量。闭合半径  $r_0$  要根据给定的形状回复量来计算。如图 1, 已知  $Ql$  的 SMA 丝绕制成环状微夹钳。忽略绕制成环形后, SMA 丝的反弹效应, 且认为 SMA 丝中心轴线所在平面为中性面, 内径为  $r_0$ , 中径为  $D_2$ , 外径为  $D$ , 则微夹钳的形状变化量为

$$\Delta/l = [\pi D_2 - \pi r_0]/\pi D_2 \quad (10)$$

并且

$$D_2 = r_0 + \frac{d}{2} \quad (11)$$

因为  $\Delta/l < 2\%$ , 所以将 (14) 代入 (13) 中, 整理得

$$D_2 \leq 50d \quad (12)$$

只有满足 (15) 式, 在绕制环状微夹钳闭合圆时, SMA 的应变变量才会在形状回复量的允许范围。

SMA 环状微夹钳的张开和闭合的位置状态是利用双向记忆效应来实现的。双向记忆效应的处理就是使合金试样反复多次在升温 and 降温中可逆地发生形状变化, 加热升温时变成高温时的形状, 冷却降温时变成低温时的形状。SMA 微夹钳形状回复机制是热弹性马氏体相变中的晶体学可逆性。在热弹性马氏体相变中形成的 24 种不同位向的马氏体变体量母相的某一方向的晶格存在着晶格对应关系。正因为这个原因, 热弹性马氏体逆相变能回复到相变前一样的母相状态, 反之亦然。完全可逆的形状记忆合金在相变中的马氏体含量是温度的线性函数, 通过精密控制温度, 就能控制马氏体的含量, 也就能控制形状记忆合金元件的动作过程及变位量。形状记忆合金元件变位量与温度的关系如图 2 所示。形状记忆合金在母相状态的杨氏模量  $E_P$  和形状记忆合金在马氏体相状态的杨氏模量  $E_M$  不等, 且  $E_M \ll E_P$ 、在相变过程中的混合相的杨氏模量为

$$E = E_P(1 - V_m\%) + E_M \cdot V_m\%$$

式中,  $V_m\%$  Temperature-马氏体的体积分数。相应地, 微夹钳在各相的夹持力关系如下

$$F_P > F > F_M$$

式中:  $F_P$ ——微夹钳在母相的夹持力

$F_M$ ——微夹钳在马氏体相的夹持力;

$F$ ——微夹钳在相变中的夹持力。

## 4 小 结

本文从马氏体相变动力学出发, 探讨 SMA 微夹钳热

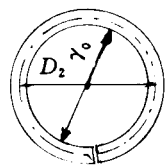


Fig. 1 Circular microclasp close condition

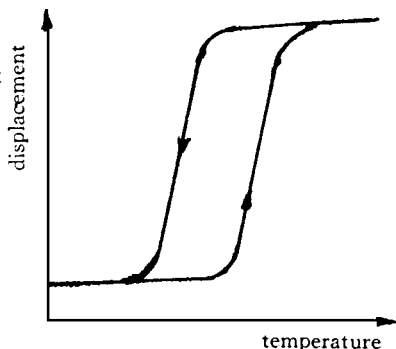


Fig. 2 Displacement and temp. relationship of SMA

弹性马氏相变的规律, 研究以形状记忆为动作特性的 SMA 微夹钳的热驱动工作原理, 并且以已研制的 SMA 环状微夹钳为例, 分析了夹持力、钳口张合量与温度的关系, 从设计和制造的角度进行了一些具体的探索。

### 参 考 文 献

- [1] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体, 科学出版社, 1980
- [2] 杨杰, 吴月华编. 形状记忆合金及其应用. 中国科学技术大学出版社, 1993, 5
- [3] American Society for Metals Phase Transformations Chapman & Hall Ltd. 1970, 115
- [4] 蒋正行等. 关于马氏体相变的热力学和动力学问题. 全国第一次马氏体相变会议论文集, 1982: 16~19

## Study on SMA Microclamp Work Principle Based on Thermodynamics

Li Luming, Wang Liding

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

### Abstract

SMA microclamp is a kind of microclamp made of Shape Memory Alloy. It utilize the close and open of the microclamp by the shape memory characteristic of this functional material. The energy source of the microclamp is the heat energy, which means the change on temperature of the microclamp, and input/output of the thermoenergy between the microclamp and the outside. This article try to analyse the simple dynamic problem of the microclamp by the thermodynamics. It is considered that when temperature begins to fall down under Ms, martensite and the untransformed mother-phase are in a kind of thermobalance. We try to use the equations in martensite transform to get the mathematical relationship between the dynamics of the microclamp and the temperature, also including some useful results for design and fabrication of the microclamp. We hope these results will form the work principle base for SMA microclamp.

**Key words:** SMA, Microclamp, Thermal martensite transform

李路明 男, 1969年出生。1991年毕业于哈尔滨工程大学机械系, 获学士学位。1993年考入中国科学院长春光学精密机械研究所读硕士学位, 曾从事过二维微位移工作台的研究。1995年1月推荐直接攻读博士学位, 研究领域为微电子机械系统。博士研究课题是研制“微操作系统”。