

提高形状记忆合金丝工作频率的一种方法

何存富 陶宝祺 金江 熊克

(南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京, 210016)

METHOD OF IMPROVING THE WORK FREQUENCIES OF SHAPE MEMORY ALLOY WIRE ACTUATORS

He Cunfu, Tao Baoqi, Jin Jiang, Xiong Ke

(Institute of Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016)

摘要 研究了提高形状记忆合金(SMA)工作频率的物理方法——研制细丝。给出了拉拔细丝的工艺流程,从理论上分析了在不同的加热和冷却过程中丝径与响应速度的关系,对2种丝径的SMA丝进行了性能对比测试。同时测定了2种丝径的SMA的响应速度。结果表明,丝径的减小对丝的相变性能,如最大恢复应变、最大恢复应力等影响不大,但可显著提高其动作频率。

关键词 形状记忆合金 驱动器 响应频率 智能结构

中图分类号 V258.5, TB332, TB301

Abstract A method of improving the work frequency of shape memory alloy wire actuators, developing fine wires, is investigated. The relation between the response frequency and the diameter is analyzed theoretically in different processes of heating and cooling a wire. The theoretical predictions are validated with experiments. The results show that the decrease of the diameter of a wire can not affect its phase transformation properties, but its work frequency can be increased markedly.

Key words shape memory alloy, actuator, work frequency, smart structure

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, 简称SMA)作为驱动器广泛应用在智能材料与结构中。由于SMA具有驱动应变大、回复应力高、弹性模量可变、性能稳定,且易于与基体材料相融合,使得SMA在智能材料与结构中倍受重视。但其在动态应用中存在一很大缺点,即动作频率低^[1],这严重限制了SMA的应用前景。因此,研究提高形状记忆合金的响应速度措施很有必要。本文研究了提高SMA动作频率的物理方法——研制细丝。从理论上分析了在不同的加热和冷却过程中丝径与响应速度的关系;按给出的拉拔细丝研制工艺,将 $\varnothing 1.5\text{mm}$ 的NiTi丝拉拔成 $\varnothing 0.2\text{mm}$,并对2种丝径的SMA丝进行了性能对比测试。同时测定了2种丝径的SMA的响应速度。

1 理论分析

将直径为 d ,长度为 l ($l \gg d$)的SMA丝置于某介质中加热或冷却,据加热、冷却方式不同分2种情况讨论:在流体介质中电阻加热;在流体介质中自然冷却或用热流体加热。

1.1 空气中电阻加热

由于SMA丝很细,而丝的导热系数同空气表面膜系数相比又非常大,使得丝的内部温度在任一时刻都可视为均一,因此可忽略其内热阻。在整个过程中丝的温度随时间变化只由表面热阻所决定。在这种情况下,丝的热平衡方程为

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = -A_s h(T - T_f) + I^2 R_e \quad (1)$$

这里, $R_e = \rho_e \frac{4l}{\pi d^2}$ (2)

式中: R_e 为丝的电阻; ρ_e 为丝的电阻率; l 为所通电流大小; ρ 为质量密度; c 为比热; A_s, V 分别表示丝的暴露表面积和体积; h 表示丝同温度为 T_f 的周围流体间的表面膜系数。

初始条件为

$$t = 0, T = T_0 \quad (3)$$

求解方程式(1)并应用初始条件式(3)得丝温随时间的变化关系为

$$T - T_f = (T_0 - T_f) \cdot \left[1 - \frac{4I^2 \rho_e}{h \pi^2 d^3 (T_0 - T_f)} \right] e^{-A_s h t / (\rho c V)} + \frac{4I^2 \rho_e}{h \pi^2 d^3} \quad (4)$$

取SMA及其它参数如下: $\rho = 6500\text{kg/m}^3$; $c = 920\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\rho_e = 0.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; $h = 10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

1998-05-20 收到, 1998-10-20 收到修改稿
国家自然科学基金、航空科学基金及博士后科学基金资助课题

($m^2 \cdot s$); $T_f = 20$; $T_0 = 21$; $I = 2A$ 。

计算 $\phi 0.5mm$ 与 $\phi 0.2mm$ 两种丝从 $T_0 = 21$ 电阻加热到 $T = 65$ (相变结束温度) 时的响应时间分别为 $2.88s$ 和 $0.072s$ 。二者之比约为 39.8 。

这一结果表明, 细丝在电阻加热过程中响应速度的提高特别明显, 随着直径的减小, 响应速度迅速提高。这就从理论上证明了拉拔细丝提高工作频率的可行性。

1.2 空气中自然冷却或热流体中加热

将丝置于空气中自然冷却时, 其热平衡方程为

$$\rho_c V \frac{dT}{dt} = -hA_s(T - T_f) \quad (5)$$

初始条件

$$t = 0, T = T_1 \quad (6)$$

则丝的温度 T 随时间变化的关系式如下

$$\frac{T - T_f}{T_1 - T_f} = e^{-A_s h t / (\rho_c V)} = e^{-t/\varphi} \quad (7)$$

参数

$$\varphi = \frac{\rho_c V}{hA_s} \quad (8)$$

为丝的时间常数。

φ 值越小, 丝所对应的温度变化越快。在给定热参数的情况下, 时间常数 φ 同比值 V/A_s 成正比。因此, 丝的表面积同体积之比越大, 温度变化就越快。

假设 2 种丝在相同条件下, 即丝的初始温度相同, 冷却环境相同(空气中自然冷却, $T_f = 15$ 相同), 热参数相同, 则冷却到同一温度时所需的时间比等于其直径之比。

采用热流体(热蒸汽或热风)激励 SMA 驱动器时, 是将丝置于热流体中加热, 此时的响应速度与丝径的关系和以上分析相同, 只是丝的温度在升高而已。可见, 在流体中加热或自然冷却过程中, 丝的响应速度与其直径成反比。

当丝周围的介质为固体时, 也可采用热传导的分析方法进行分析。

2 NiTi 记忆合金细丝研制工艺

2.1 拉拔工艺

将 $\phi 1.5mm$ 态的 NiTi 合金丝拉拔成不同规格细丝, 其拉拔工艺流程简图如图 1。

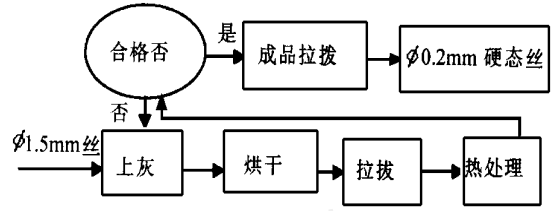


图 1 SMA 拉拔工艺流程图

这里, 上灰是指涂石墨基干灰涂料; 烘干为将涂料烘干; 热处理温度按不同丝径变化, 炉温范围为 $700 \sim 850$ (丝材实际温度为 600 左右); 每次拉拔的直径压缩率为 $8\% \sim 10\%$; 每次冷拉拔总变形量为 $15\% \sim 20\%$; 拉拔速度为 $15 \sim 20 m/s$ 。

在拉拔过程中, 取 $\phi 0.5mm$, $\phi 0.3mm$, $\phi 0.2mm$ 3 种规格的丝, 以备比较其性能参数。

2.2 训练工艺

将各种规格的硬态细丝进行定形处理(即训练), 其热处理工艺为:

- (1) 定长 根据现有条件, 选长度为 $350mm$;
- (2) 全奥氏体化 将定长后的 NiTi 丝在 720 时保持 $10min$, 然后在空气中自然冷却;
- (3) 时效处理 将全奥氏体化后的 NiTi 丝在 500 时保持 $20min$, 然后在炉中冷却;
- (4) 去氧化层 用 400 目细砂纸打磨掉表面氧化层;
- (5) 稳定性处理 在沸水(100)和冰水(冰水共存, 即 0)中, 冷热循环 $15 \sim 20$ 次, 每次在沸水和冰水中浸约 $1min$ 。

经以上处理工艺后, 得到可使用的 NiTi 细丝。

3 NiTi 合金丝的静态性能测试比较

NiTi 形状记忆合金的相变行为随合金成分、加工工艺及热处理的不同而变得相当复杂。为了验证 $\phi 0.2mm$ 或更细的细丝是否还有形状记忆效应, 形状记忆效应与粗丝($\phi 0.5mm$) 比较变化如何等问题, 对 $\phi 0.2mm$ 及 $\phi 0.5mm$ 两种规格的 NiTi 丝的性能, 如相变温度、最大恢复应变、最大恢复应力等进行了测试比较。测试方法见文献 [2]。

通过测定电阻变化率与温度的关系, 测得 2 种丝的相变温度如表 1 所示。

表1 SMA 丝的相变温度比较

规格	M s/	M s'/	A s/	A s'/
∅0.5mm	7	30	62	67
∅0.2mm	19	30	50	55

从∅0.2mm 细丝的电阻变化率与温度的关系曲线^[3]可看出,其相变过程也很明显,但与∅0.5mm 丝的相变温度有差异。导致这一差异的原因是两种材料的配方、冶炼工艺及热处理工艺等不同。图2为∅0.5mm 丝在不同初始应变下的σ-ε曲线,图3为对应图2的ε-T 曲线。

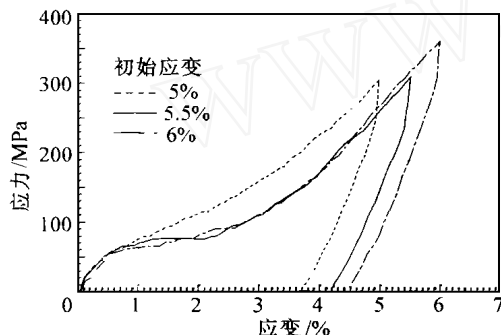


图2 σ-ε曲线

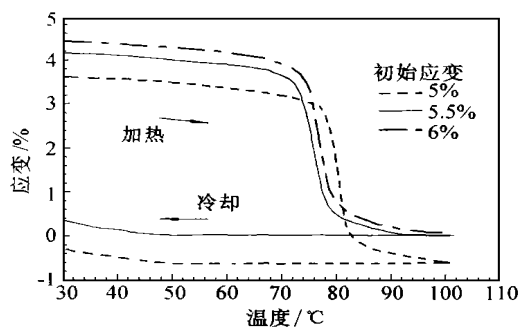
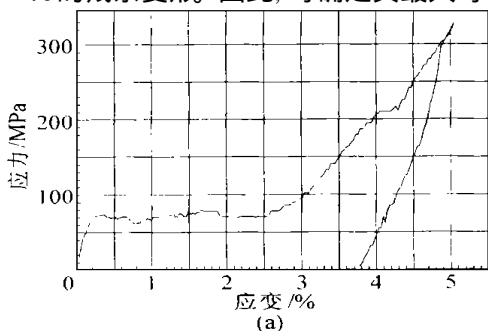


图3 ε-T 曲线

图4为∅0.2mm NiTi 丝在初始应变ε=5%的σ-ε曲线及对应的ε-T 曲线。

∅0.5mm 及∅0.2mm NiTi 丝在不同约束应变下的回复应力与温度的关系如图5所示。

从图2~ 图4 可看出,5%的初始应变可完全恢复。对于∅0.5mm 的丝,当ε=5.5%时,出现了约0.2%的残余变形。因此,可确定其最大可恢复



(a)

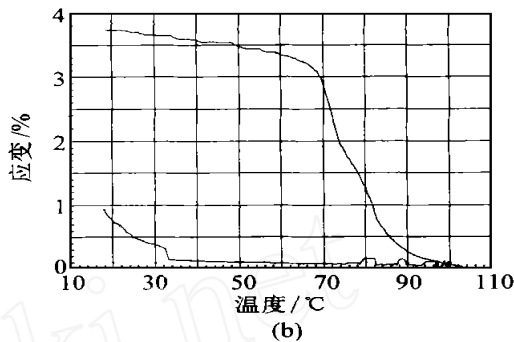


图4 初始应变ε=5%时的σ-ε及ε-T 曲线

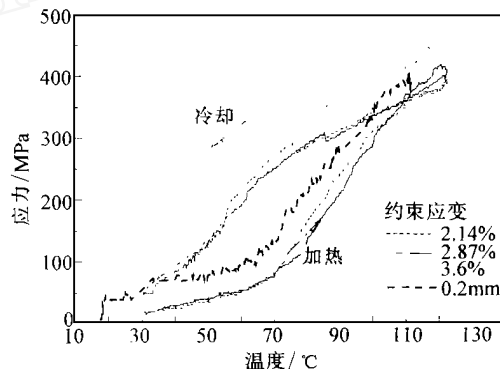


图5 恢复应力与温度的关系

应变为3.8%(对应于预变形量为5%)。对于∅0.2mm 的丝,测试结果显示,当初始应变为6%时,加温至110 仍有约2%的不可恢复应变。因此,可确定其最大恢复应变为5%。可见,经拉拔后的∅0.2mmNiTi 细丝与∅0.5mmNiTi 丝相比,其最大恢复应变相当。说明细丝的形状记忆效应没有发生变化。

图5 表明,2 种丝的最大恢复应力相当,约为400MPa。在一定的约束应变下,随着温度的升高,回复应力迅速增大;在同一温度下,预变量越大,回复应力也越大。

4 NiTi 记忆合金丝响应时间测试

受实验条件所限,SMA 丝的响应速度,以其在加热过程中的响应时间来度量,即从上电激励开始,到SMA 的位移恢复结束止。其实验装置简图如图6 所示。

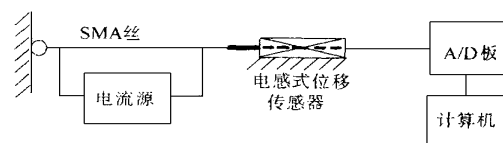


图6 SMA 响应速度测试装置简图

选取长度为600mm,直径为0.5mm,0.3mm 和0.2mm 3 种不同丝径的SMA 丝进行测定,测

得的结果如图7所示。

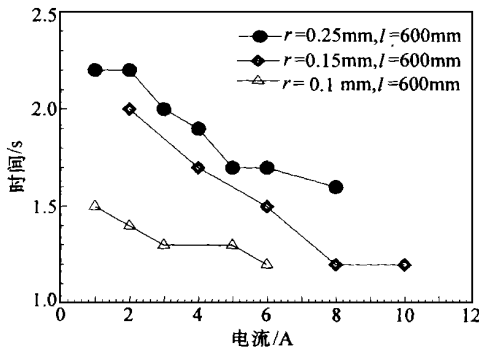


图7 响应时间与丝径和电流的关系

从图7可得出这样的结论: 同一丝径, 响应时间随着所通电流的增大而减小; 当所通电流相同时, 响应时间随丝径的减小而减小, 这与前面的理论分析式(4)相吻合。但其响应时间与理论分析的结果相差很大, 其原因之一是理论计算时 SMA 和其它参数的不确定以及其它简化假设; 另一原因是实验过程中, 电流源及位移传感器的动作上升时间较大, 要测定小于 1s 的动作时间存在较大误差。但总的趋势是正确的。

5 结论

提高 SMA 丝的响应速度可以通过研制细丝的物理方法来实现。本文研制的细丝其静态性能与粗丝相当, 而其响应时间比粗丝减小较明显。若研制更细的丝, 响应时间可进一步减小。

参考文献

- 1 陶宝祺 智能材料结构 北京: 国防工业出版社, 1997. 55~

57

- 2 何存富 改善形状记忆合金响应频率及其驱动结构变形的研究 见: 博士后研究报告, 南京航空航天大学, 1998
- 3 熊克 形状记忆合金增强复合材料自适应力学研究: [学位论文] 南京: 南京航空航天大学, 1997
- 4 Brinson L C, Bekker A, Hwang S. Deformation of shape memory alloys due to thermo-induced transformation. J Intell Mater Sys and Struct, 1996, 7(1): 97-107

何存富 男, 1958年生, 博士后, 副教授, 现在北京工业大学机电学院任教。主要从事实验固体力学、激光超声技术、智能材料与结构、测试技术及计算机测控方面的研究, 发表论文 30 余篇。

陶宝祺(见本期第 140 页简介)

金江 男, 1966年出生, 博士, 副教授, 现在南通工学院建工系工作, 主要从事计算力、智能材料结构方面的研究, 发表论文多篇。

熊克 男, 1960年生, 工学博士, 副教授, 1982年1月毕业于南京航空学院数学力学系力学师资班。1991年至今, 在南京航空航天大学材料与结构研究所从事智能复合材料结构和应变式传感器的研究, 是多项国家自然科学基金和航空科学基金项目的主要参加者, 与陶宝祺教授等合著《智能材料结构》, 发表论文多篇。曾获国家发明三等奖一次, 航空总公司科技进步二等奖 2 次。