

文章编号:1007-9629(2021)05-1060-06

Fe-Mn-Si 形状记忆合金电阻率特性

孙德平¹, 鞠 恒², 宋立国¹, 苑海超¹, 吕雨奇¹

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连海洋大学 机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为分析 Fe17Mn5Si10Cr5Ni 形状记忆合金(SMA)电阻率与奥氏体(γ) \rightarrow ϵ 马氏体相变及其逆相变的关系,通过动态电阻测量系统、X 射线衍射(XRD)、金相显微镜等,观测拉伸和加热过程中 SMA 电阻率、物相组成和显微组织的变化.结果表明:在 0%~7.0% 拉伸应变过程中,SMA 电阻率随着拉伸应变的增加而增大;在 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变期间,SMA 电阻率的增幅变大,且与 ϵ 马氏体含量的变化规律保持一致;5.0% 拉伸应变的 SMA 试样在加热及冷却过程中,其电阻率与温度成正相关关系;在 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变期间,SMA 电阻率的增幅随着 ϵ 马氏体含量的减少而变小.

关键词: Fe-Mn-Si 记忆合金;电阻率; $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体正逆相变

中图分类号: TG139⁺.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.022

Resistivity Characteristics of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy

SUN Deping¹, JU Heng², SONG Ligu¹, YUAN Haichao¹, LÜ Yuqi¹

(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Mechanical and Power Engineering College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to analyze the internal relationship between the resistivity of Fe-Mn-Si shape memory alloy (SMA) and the austenite(γ) \rightarrow ϵ martensite phase transformation and its reverse transformation, means of dynamic resistance measurement system, X-ray diffraction(XRD), metallographic microscope and other methods were used to measure and observe the resistivity, phase composition and microstructure of Fe-Mn-Si memory alloy during tensile and heating process. The test results show that during the 0%–7.0% tensile strain of the Fe17Mn5Si10Cr5Ni memory alloy, the resistivity of the alloy increases with the increase of the tensile strain. During the $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensite phase transformation, the increase range of resistivity increases, and is consistent with the change law of the content of ϵ martensite. During the heating and cooling process of the 5.0% tensile strained Fe17Mn5Si10Cr5Ni memory alloy sample, the alloy resistivity has a positive correlation with temperature. During the $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensite reverse phase transformation, the increase range of the alloy resistivity decreases as the content of ϵ martensite decreases.

Key words: Fe-Mn-Si shape memory alloy; resistivity; $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensite and reverse phase transformation

形状记忆合金(SMA)是一种具有形状记忆效应的新型结构-功能一体化材料,已经被广泛应用于航空航天、船舶、建筑、汽车和机器人等领域^[1].该类合金通过奥氏体(γ) \rightarrow ϵ 马氏体相变及其逆相变来实现形状记忆效应(SME),主要包括 Ni-Ti 基、Cu 基和 Fe

基 SMA^[2].SMA 在发生相变时,其电阻率会发生变化.因此,电阻率作为对 SMA 内部组织结构变化敏感的物理量之一,已经被广泛用来分析和表征 SMA 组织随温度、应力、应变变化的规律^[3].通过检测电阻率,可以了解 SMA 内部的相变情况,进而掌握其损

收稿日期:2020-06-17; 修订日期:2020-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879026,51709029);中央高校基本科研业务费专项(3132019308)

第一作者:孙德平(1974—),男,辽宁大连人,大连海事大学副教授,硕士生导师,硕士. E-mail: sdpdmu@dlnu.edu.cn

伤情况^[4-5].因此,研究SMA的电阻率特性具有重要意义^[6].到目前为止,关于Ni-Ti基SMA电阻特性的研究较多^[7-10],而兼顾经济性和形状记忆效应的Fe基SMA电阻率特性的研究相对较少^[11].

本文选用Fe基SMA中强度高、塑性好、易加工的Fe-Mn-Si合金^[12-13]作为研究对象,通过电阻原位测量、X射线衍射(XRD)、金相显微镜等,分析该类合金在拉伸、加热过程中电阻率与 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变及其逆相变机制之间的内在联系.

1 试验材料和试验方法

试验所用材料为自行冶炼的Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金,化学组成见表1.在冶炼过程中,选用工业纯铁、镍、电解锰、硅及电解铬,按配比混合后,在氩气保护下于真空中频感应熔炼炉中冶炼.经过保温、铸锭、退火及锻造等工艺处理后,线切割加工成所需尺寸(见图1,厚度为2 mm).为消除试样加工应力,拉伸前采取 $980\text{ }^\circ\text{C} \times 1\text{ h}$ 固溶处理.

表1 Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金的化学组成
Table 1 Chemical composition of Fe17Mn5Si10Cr5Ni

							w/%
C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Fe	
0.03	4.50	17.23	5.29	10.30	0.01	Res	

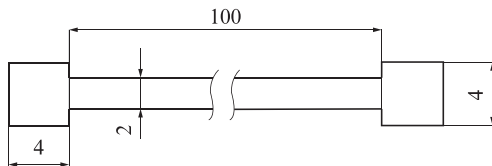


图1 试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample(size: mm)

通过自制拉伸机,应力诱发试样产生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体正相变,然后利用SXL-1008型程控箱式电阻炉,热诱发试样产生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变.

金相试样经过镶样、打磨、抛光处理后,首先采用体积比 $\gamma(\text{HF}) : \gamma(\text{H}_2\text{O}_2) : \gamma(\text{H}_2\text{O}) = 3 : 50 : 10$ 的HF溶液,对抛光试样进行化学抛光,消除因机械打磨抛光导致的表面相变薄层;然后,将1~2滴 CuSO_4 溶液(3 g CuSO_4 , 10 mL HCl, 30 mL H_2O)滴到已抛光表面,腐蚀10 s左右,当试样表面开始出现灰色斑点时,立即用大量清水清洗;最后,采用酒精棉球擦拭并吹干,通过Olympus gx51型金相显微镜分析Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金的微观组织.

利用日本理学公司生产的Rigaku D/MAX-3A型XRD分析Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样的相组

成.其主要技术参数如下:采用Cu K α 辐射,加速电压为40 kV,电流为150 mA,扫描速率为 $0.02(^\circ)/\text{s}$,扫描角度为 $30^\circ \sim 75^\circ$.

动态电阻通过QJ57型直流电阻电桥测量,试验过程中分别利用引伸计和电阻电桥测量试样的应变(s)和电阻(R).电阻测量原理如图2所示.其中: R_s 为拉伸应变为 s 时试样测量段的电阻, Ω ; R_1 为试样测量段以外及拉伸机回路的电阻, Ω ; R 为拉伸过程中测得电阻, Ω .

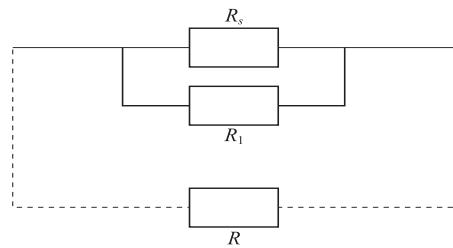


图2 拉伸试验中电阻测量方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram in the resistance measurement of tensile test

R_s 可通过式(1)求得.

$$R_s = \frac{R_1 R}{R_1 - R} \tag{1}$$

为消除试样长度、横截面积变化对导体电阻数值的影响,选用电阻率(ρ)来表征合金材料的电学特性^[14].电阻率与电阻之间的关系如式(2)所示.

$$R_s = \frac{\rho_s L_s}{S_s} \tag{2}$$

式中: L_s 为试样测量段拉伸应变为 s 时的长度,m; S_s 为试样测量段拉伸应变为 s 时的横截面积, m^2 ; ρ_s 为试样拉伸应变为 s 时的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$.

当试样拉伸应变为 s 时,忽略试样在拉伸过程中的微小体积变化.由拉伸前后试样的体积相等,可以得到式(3),拉伸后试样的长度 L_s 可由式(4)求得.

$$LS = L_s S_s \tag{3}$$

$$L_s = L(1 + s) \tag{4}$$

式中: L 为试样测量段未拉伸时的长度,m; S 为试样测量段未拉伸时的横截面积, m^2 .

根据式(2)~(4),即可推导出拉伸应变为 s 时电阻率 ρ_s 的计算式(5).

$$\rho_s = R_s \frac{S}{L(1 + s)^2} \tag{5}$$

2 拉伸过程中试样的电阻率特性

2.1 拉伸过程中试样的应变-应力关系

本文根据前期试验,在满足理论分析的前提下

选用拉伸应变范围为0%~7.0%。在室温环境下对Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样进行拉伸,其应力-应变曲线如图3所示。由图3可见:应变在0%~0.2%时,试样处于弹性应变状态,拉伸应力与应变呈线性关系;进入屈服阶段后,随着拉伸应变的继续增加,试样进入塑性变形阶段,拉应力同样随着应变的增加而增加,但增速放缓。

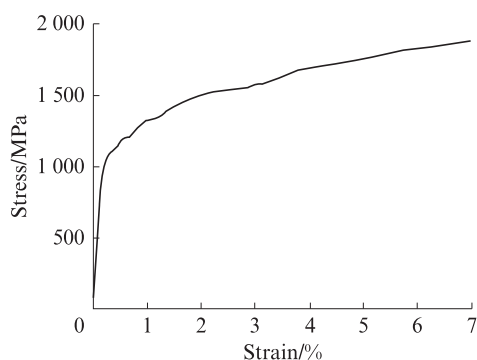


图3 Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of Fe17Mn5Si10Cr5Ni

2.2 拉伸过程中试样的物相

如图4所示,在拉伸过程中,拉应力作用于 γ 相时,通过单一取向的Shockley不全位错运动,诱发 γ 相产生单变体择优生长,形成 ϵ 马氏体。随着拉应力的增大,应力诱发 ϵ 马氏体之间会产生交互作用,并在交叉部位诱发生成 α' 马氏体^[15]。

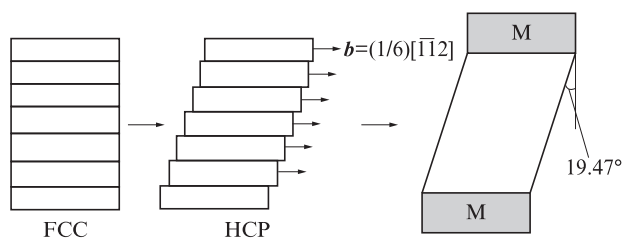


图4 应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变机制示意图
Fig. 4 Schematic illustration of stress-induced $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensite phase transformation mechanisms

为分析试样在拉伸(应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变)过程中的相变特性,对试样不同拉伸阶段进行物相测试。为简化试验,连续地选择0%、1.0%、3.0%、5.0%和7.0%拉伸应变试样进行XRD测试,结果如图5所示。

为更直观地分析不同拉伸应变试样的物相组成,本文采用直接比较法^[16]对不同拉伸应变试样的XRD图谱进行定量计算。XRD测定的多晶体衍射强度 I 可表达为:

$$I = \frac{KR}{2\mu} V \quad (6)$$

式中: K 为与衍射物质种类及含量无关的常数; R 为与衍射角 2θ 、晶面指数及待测物质种类有关的比例常数; V 为X射线照射的被测物质的体积, m^3 ; μ 为试样的吸收系数。

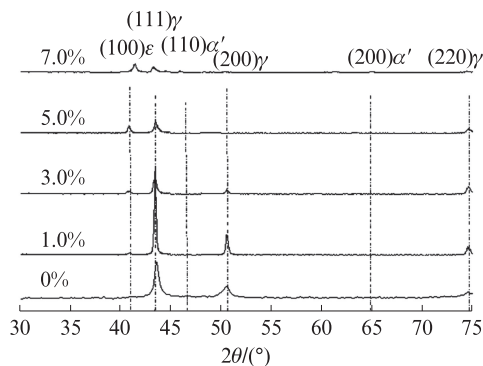


图5 不同拉伸应变Fe17Mn5Si10Cr5Ni记忆合金的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of Fe17Mn5Si10Cr5Ni under different tensile strains

设 C_γ 、 C_ϵ 、 $C_{\alpha'}$ 分别为 γ 、 ϵ 和 α' 相的体积分数, R_γ 、 R_ϵ 、 $R_{\alpha'}$ 分别为 γ 、 ϵ 和 α' 相的比例常数,则:

$$\begin{cases} I_\gamma = \frac{KR_\gamma C_\gamma V}{2\mu} \\ I_\epsilon = \frac{KR_\epsilon C_\epsilon V}{2\mu} \\ I_{\alpha'} = \frac{KR_{\alpha'} C_{\alpha'} V}{2\mu} \\ C_\gamma + C_\epsilon + C_{\alpha'} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)计算得到不同拉伸应变下的试样中 γ 、 ϵ 和 α' 相的体积分数,结果如表2所示。

表2 不同拉伸应变Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金中各相的体积分数

Strain/%	C_γ /%	C_ϵ /%	$C_{\alpha'}$ /%
0	100.0	0	0
1.0	53.5	46.5	0
3.0	31.7	68.3	0
5.0	26.6	73.4	0
7.0	24.5	73.4	2.1

由图5和表2可见:Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金的物相组成随拉伸应变增加而变化,与拉伸前单一 γ 相组成相比,拉伸后随着应变的不同,新增了 ϵ 和 α' 马氏体相,试样发生了典型的 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变及不可逆的 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变。具体相变规律如下:

(1)当拉伸应变从0%增加到5.0%时,(111) γ 、

(200) γ 及(220) γ 相的衍射峰面积不断减小, γ 相的体积分数不断降低(100.0% \rightarrow 53.5% \rightarrow 31.7% \rightarrow 26.6%);(100) ϵ 相的衍射峰面积不断增加, ϵ 相的体积分数不断提高(0% \rightarrow 46.5% \rightarrow 68.3% \rightarrow 73.4%);该拉伸应变范围内, α' 相含量一直为0%.

(2)当拉伸应变从5.0%增加到7.0%时,(100) ϵ 相的衍射峰面积基本不变,体积分数也维持在73.4%; γ 相衍射峰面积持续降低,体积分数由26.6%降低到24.5%;XRD图谱上新出现(110) α' 和(200) α' 相的衍射峰,其含量由0%增加至2.1%.

因此,在拉伸应变为0%~5.0%过程中,记忆合金发生了 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体相变,并在拉伸应变量为5.0%时, ϵ 马氏体相含量达到最大值;当拉伸应变为5.0%~7.0%过程中, ϵ 马氏体相含量没有继续增加,仅应变诱发不可逆的 $\gamma\rightarrow\alpha'$ 马氏体相变.

2.3 拉伸过程中试样的电阻率特性

0%~7.0%拉伸应变过程中,通过动态电阻测量系统及式(5),得到Fe-Mn-Si合金试样的应变-电阻率关系曲线,如图6所示.综合分析图3、5、6可以发现,电阻率与应变的变化关系分为4个阶段:

(1)第1阶段的拉伸应变范围为0%~0.2%,为合金试样的弹性变形阶段.该阶段内试样电阻率有一定程度的增加,但增速相对较慢.这是因为在弹性变形阶段,试样在单向拉应力的作用下,原子间距增大,所产生的点阵畸变对自由电子的定向运动产生阻碍,导致电阻率有一定程度的增加,但增速相对较慢.

(2)第2阶段试样产生塑性变形,其拉伸应变范围为0.2%~3.0%.在这一阶段,电阻率随着应变的增加而增加,且增速相对较快.究其原因在于,试样在拉应力作用下,发生塑性变形产生缺陷和畸变,同时由于该合金在拉应力的作用下产生应力诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体相变,也就是材料晶体间发生了可逆的不全位错运动^[17].这两方面的共同作用,导致记忆合金试样的电阻率在这一阶段随着拉伸应变的增加而增加,且增速相对较快.

(3)第3阶段试样的拉伸应变范围是3.0%~5.0%.电阻率随着拉伸应变的增加而增加,但速率与第2阶段相比较缓.分析可知,试样在此拉伸应变范围内仍继续发生塑性变形,产生了缺陷和畸变.同时也继续产生应力诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体相变,但由于位错的增多,马氏体相变阻力增加,降低了 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体相变的速率,马氏体的生成量明显小于第2阶段的生成量.所以虽然试样电阻率随着拉伸应变率的增加而增加,但增速与第2阶段相比变缓.

(4)第4阶段内试样与第2、3阶段类似,也发生了塑性变形,其拉伸应变范围为5.0%~7.0%.该阶段同样产生缺陷和畸变,但不同的是,由于第2、3阶段产生的马氏体交叉作用,阻碍了应力诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体继续生成.因此,该阶段电阻率的增加仅是由缺陷和畸变而造成的.值得注意的是,在该阶段出现 α' 马氏体.由于 α' 马氏体相变不具有可逆性,并且还会影响应力诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体的逆相变.本文将其归入拉伸应变所造成的缺陷,在后续的加热恢复试验中亦不选取有 α' 马氏体的试样.由于该阶段产生了 α' 马氏体,其缺陷比第1阶段多,故电阻率增速仍然稍大于第1阶段.

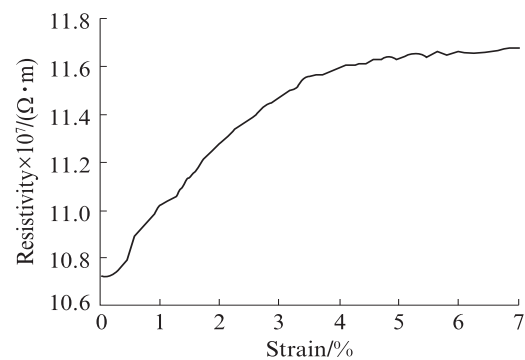


图6 Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni合金应变-电阻率关系曲线
Fig. 6 Strain-resistivity curve of Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni

3 加热过程中试样的电阻率特性

试样拉伸应变较大时, ϵ 马氏体含量较高,便于研究分析.鉴于 α' 马氏体相具有不可逆性,且会阻碍应力诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体的逆相变,故选定5.0%拉伸应变的Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni合金试样进行加热-冷却试验,并分析该过程中其电阻率变化规律.

3.1 加热过程中试样的物相

通过测得5.0%拉伸应变的Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni合金试样加热至不同温度并冷却至室温(23℃)的XRD图谱及显微组织,分析加热恢复(热诱发 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体逆相变)过程中合金试样的物相组成.图7为Fe₁₇Mn₅Si₁₀Cr₅Ni合金试样自室温加热至不同温度并冷却至室温后所测得的XRD图谱.由图7可见,加热至100℃再冷却至室温与未加热(室温)试样均由 $\gamma+\epsilon$ 相组成,且(111) γ 与(100) ϵ 相的组分基本一致,说明试样从室温升温至100℃的过程中,基本没有 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体逆相变产生.

试样在加热至250、350℃并冷却至室温后,测得的XRD图谱相同,均由单一 γ 相组成,说明 $\gamma\rightarrow\epsilon$ 马氏体逆相变发生在100~250℃升温过程中,而250~

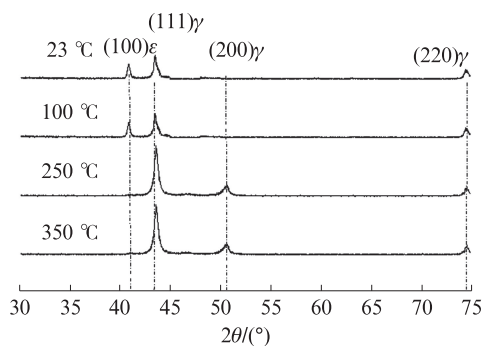


图7 Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金不同温度的XRD图谱
Fig. 7 XRD patterns of Fe17Mn5Si10Cr5Ni under different temperatures

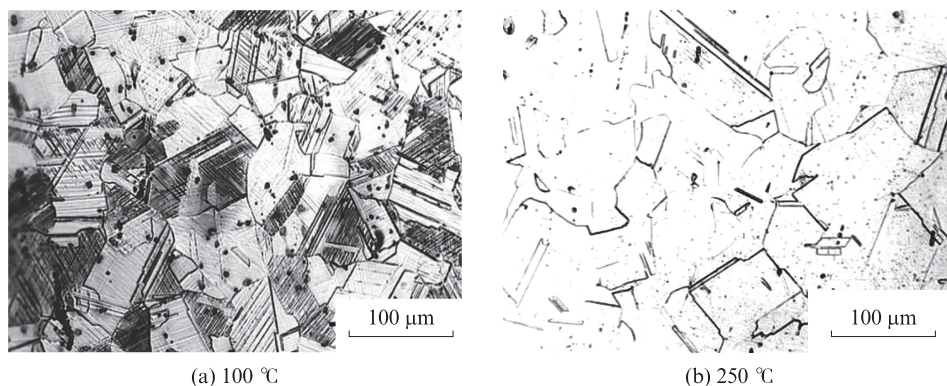


图8 Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金加热至100、250 °C后的显微组织
Fig. 8 Microstructure of Fe17Mn5Si10Cr5Ni after heating to 100 °C and 250 °C

3.2 加热过程中试样的电阻率特性

为分析加热过程中Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样的电阻率特性,将预变形量为5%的试样置于加热炉内,以2 °C/min的速率加热,利用QJ57型直流电阻测量加热过程(室温至350 °C)以及冷却过程中合金试样的电阻。由式(5)计算得到加热及冷却过程中的温度-电阻率关系曲线,如图9所示。由图9可见,曲线可分为4个阶段:

(1)第1阶段:从室温加热至100 °C过程中,温度升高导致自由电子的不规则热运动加剧,这种热运

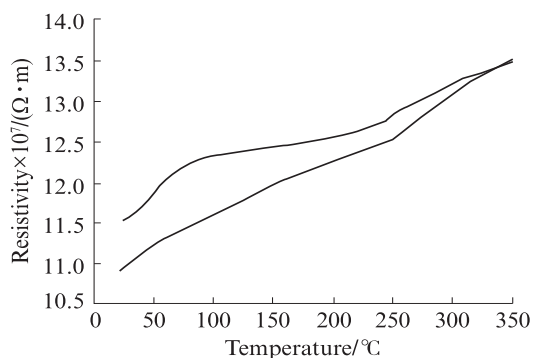


图9 Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金加热-冷却过程中的温度-电阻率关系曲线
Fig. 9 Temperature-resistivity curve of Fe17Mn5Si10Cr5Ni in heating-cooling process

350 °C升温过程中,没有 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变产生。

为进一步分析Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样加热过程中的相变,分别测得加热至100、250 °C并冷却至室温试样的微观组织,如图8所示。由图8可见:加热至100 °C的试样中,绝大部分白色母相(奥氏体)晶界内,都存在取向不一的黑色条状马氏体,表明诱发 ϵ 马氏体由于温度较低,促成逆相变的热驱动力较小,基本未发生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变,试样还是由 $\gamma + \epsilon$ 相组成;加热至250 °C后,试样显微组织基本由单一 γ 相组成,说明试样在由100 °C加热至250 °C的过程中,已经完成 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变。

动对自由电子的定向运动起阻碍作用,导致试样电阻率增加^[18]。由前述分析可知,该温度区间内记忆合金试样基本无相变产生,电阻率变化仅受温度单因素控制,与温度基本成线性变化关系。

(2)第2阶段:加热温度从100 °C升温至250 °C过程中,热能驱动试样产生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变,拉伸应变所造成的位错减少,由位错产生的对自由电子定向运动的阻碍作用变弱,总体呈现出电阻率随温度升高的速率变小。

(3)第3阶段:合金试样从250 °C升温至350 °C过程中,记忆合金内部组织均为 γ 相,无相变产生, γ 相也没有发生形核、长大,因而温度升高对试样电阻率的影响等同于第1阶段,分子热运动导致电阻率随温度升高而线性增加,变化率与第1阶段类似。

(4)第4阶段:合金试样从350 °C降温至室温,整个过程中合金组织均为 γ 相,无相变产生,试样自由电子的不规则热运动减弱,因而电阻率减小。

4 结论

(1)在应变量为0%~7.0%的拉伸过程中,Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样电阻率随着应变的增

大而增大,依次产生弹性应变(0%~0.2%)、塑性应变与 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变(0.2%~5.0%)和 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变(5.0%~7.0%),试样电阻率与应变变量及 ϵ 马氏体含量成正相关关系。

(2)在自室温加热至350℃的过程中,5.0%拉伸应变的Fe17Mn5Si10Cr5Ni合金试样在100~250℃产生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变,由 $\gamma + \epsilon$ 马氏体混合相转变为单一 γ 相,合金试样电阻率与温度成正相关变化。在发生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变的过程中,电阻率的增大速率由于位错的减少而变小,当 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体逆相变完成后,电阻率又与温度成正相关变化。

参考文献:

- [1] BIKAS C M, MADANGOPAL K, VIJAY H, et al. Development of texture and microstructure during cold rolling and annealing of a Fe-based shape memory alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5/6): 588-593.
- [2] 王伟,王博,阎石,等. Fe-Mn-Si-Cr系形,状记忆合金管道连接件试验研究[J]. 安全与环境学报,2018,18(6):2209-2213. WANG Wei, WANG Bo, YAN Shi, et al. Exploratory test on the Fe-Mn-Si-Cr series of the shape memory alloy pipe joint [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6): 2209-2213. (in Chinese)
- [3] CHURCHILL C B, GOULBOURNE N C, NAGUIB H E. Sensing of retained martensite during thermal cycling of shape memory alloy wires via electrical resistance[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Diego: SPIE, 2013: 868912.
- [4] 崔迪,李宏男,宋钢兵.NiTi形状记忆合金电阻特性研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(5):567-572. CUI Di, LI Hongnan, SONG Gangbing. Study on electrical resistance properties of NiTi shape memory alloy[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 567-572. (in Chinese)
- [5] 任刚. 试论电阻法在金属材料蠕变损伤检测中的运用[J]. 世界有色金属,2016(5):155-156. REN Gang. Try to talk about resistance method used in metal material creep damage detection [J]. World Nonferrous Metals, 2016(5): 155-156. (in Chinese)
- [6] 金嘉陵. Ti-Ni形状记忆合金的力学和电阻特性[J]. 上海钢研,2000(4):7-13. JIN Jialing. The mechanical and electrical resistant properties for a TiNi shape memory alloy[J]. Shanghai Steel & Iron Research, 2000(4): 7-13. (in Chinese)
- [7] 徐磊,王瑞,张淑洁.Ni-Ti形状记忆合金纤维相变的电阻特性[J]. 纺织学报,2010,31(3):15-19. XU Lei, WANG Rui, ZHANG Shujie. Electrical resistance properties of Ni-Ti shape memory alloy fiber in phase transformation[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(3): 15-19. (in Chinese)
- [8] 张雨焯,阎石,马宁,等. 基于Preisach理论形状记忆合金电阻-应变滞回模型[J]. 振动与冲击,2008,27(8):146-148. ZHANG Yue, YAN Shi, MA Ning, et al. Electrical resistance-strain hysteresis model for shape memory alloys based on preisach theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 146-148. (in Chinese)
- [9] 阎石,张雨焯,王伟,等. 形状记忆合金电阻-应变模型[J]. 沈阳建筑大学学报,2008,24(6):980-984. YAN Shi, ZHANG Yuye, WANG Wei, et al. Electrical resistance-strain model for shape memory alloys [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2008, 24(6): 980-984. (in Chinese)
- [10] 姜定成,田茂江,王勇,等. 镍铬系精密电阻合金的特性与研究现状[J]. 电工材料,2017(5):23-28. JIANG Dingcheng, TIAN Maojiang, WANG Yong, et al. Characteristics and research status of nickel chromium based precision resistance alloy [J]. Electrical Engineering Materials, 2017(5): 23-28. (in Chinese)
- [11] 文玉华,严密,李宁. Fe-Mn-Si-Cr-Ni形状记忆合金约束下相变的电阻原位分析[J]. 金属学报,2004,40(1):72-76. WEN Yuhua, YAN Mi, LI Ning. In situ resistance analysis on transformation of constrained Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(1): 72-76. (in Chinese)
- [12] 林成新,徐凯池,张佳琪. Fe-Mn-Si基形状记忆合金记忆效应的研究现状[J]. 材料保护,2016,49:143-147. LIN Chengxin, XU Kaichi, ZHANG Jiaqi. Research status of memory effect of Fe-Mn-Si based shape memory alloy [J]. Materials Protection, 2016, 49: 143-147. (in Chinese)
- [13] 邹芹,党赏,李艳国,等. Fe-基形状记忆合金的研究进展[J]. 材料导报,2019,33(12):3955-3962. ZOU Qin, DANG Shang, LI Yanguo, et al. Research progress of Fe-based shape memory alloys [J]. Materials Reports, 2019, 33(12): 3955-3962. (in Chinese)
- [14] 张广平,李孟林,吴细毛,等. 尺度对金属材料电阻率影响的研究进展[J]. 材料研究学报,2014,28(2):81-86. ZHANG Guangping, LI Menglin, WU Ximao, et al. Research progress on effect of length scale on electrical resistivity of metals [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(2): 81-86. (in Chinese)
- [15] 林成新. Fe-Mn-Si形状记忆合金的应力诱发马氏体相变和应变恢复特性[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002. LIN Chengxin. Stress-induced martensitic transformation and strain recovery characteristics in Fe-Mn-Si shape memory alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [16] 周玉,武高辉. 材料分析测试技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007:80-95. ZHOU Yu, WU Gaohui. Analysis methods in materials science [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 80-95. (in Chinese)
- [17] 刘林林,林成新,孙德平,等. Fe-Mn-Si形状记忆合金的应用研究现状及展望[J]. 天津理工大学学报,2010,26(2):40-45. LIU Linlin, LIN Chengxin, SUN Deping, et al. Current application studies and prospect of Fe-Mn-Si shape memory alloy [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2010, 26(2): 40-45. (in Chinese)
- [18] 苗芳,吴遵红,徐义,等. 承压设备金属材料电阻率-温度特性研究[J]. 科技创新与应用,2020(3):1-5. MIAO Fang, WU Zunhong, XU Yi, et al. Study on resistivity-temperature characteristics of metal materials for pressure equipment [J]. Technology Innovation and Application, 2020(3): 1-5. (in Chinese)