

文章编号 :1007 - 649X(2000)03 - 0031 - 03

# 热机械循环对 Fe - Mn - Si 基合金记忆效应的影响

关绍康,石广新,任晨星,刘晓芳,沈宁福

( 郑州工业大学材料科学与工程系,河南 郑州 450002 )

摘 要 :通过不同变形量的弯曲试验,结合 X 射线衍射对相结构的分析,研究了热机械循环对 Fe - 17Mn - 5Si - 9Cr - 4Ni 记忆合金记忆效应的影响.结果表明:热机械循环能显著提高合金的记忆效应;当变形量为 4% 时,经五次循环后,相对回复率  $f_{sme}$  为 80.8%,绝对应变回复率  $\epsilon_T$  为 3.12%;当变形量为 6% 时, $f_{sme}$  为 79.3%, $\epsilon_T$  为 4.4%.随着变形量的增加, $f_{sme}$  逐渐减少,但绝对回复率相对提高;并且亚晶界及晶体内的胞状亚结构逐渐减少,晶粒度逐渐粗大.

关键词 :Fe - Mn - Si 基合金;热机械循环;组织;记忆效应

中图分类号 :TG 139+.6 文献标识码 :A

## 0 引言

形状记忆合金是一种集感知和驱动为一体的新型功能材料.铁基形状记忆合金原材料便宜,生产加工容易,成本仅为钛镍基的二十分之一左右<sup>[1]</sup>,用来制作管接头、夹具、安全装置等一次性使用元件,不必进行低温变形处理和低温储藏,为现场施工带来很大方便,且不需熔焊那样的高温加热、熔化,故不会损害周围材料,避免焊接处具有较差的耐腐蚀性能.因此,铁基形状记忆合金在石油、化工等行业具有广泛的应用前景.本文着重研究如何优化热处理工艺,以提高或改善铁基记忆合金的记忆效应.

## 1 实验方法与手段

### 1.1 合金熔配及处理工艺

利用 ZG - 10B 真空中频感应炉熔炼 Fe - 17Mn - 5Si - 9Cr - 4Ni 记忆合金.铸锭经 1150℃ × 10 h 均匀化退火后,热锻并轧制成 3 mm 厚的板材,然后采用线切割机制成 3 mm × 0.8 mm × 119 mm 的板条试样;采用热机械循环工艺改善合金的记忆效应,按照不同的变形量弯曲试样,于 650℃ 退火 30 min,测量角度后校直,用夹具固定;于 650℃ 退火 90 min.至此,称为一次训练,连续训练 5 次.

### 1.2 弯曲试验方法

弯曲试验如图 1 所示,采用 3 个圆柱形模具  $d_1 = \Phi 40$  mm;  $d_2 = \Phi 20$  mm;  $d_3 = \Phi 13.3$  mm,分别对应 2%、4%、6% 的变形量.

(1) 形变量计算公式:  $\epsilon_m = T/d$ ,

其中:  $T$  为试样厚度;  $d$  为模具直径.

(2) 相对回复率计算公式:  $f_{sme} = \theta_m / (180 - \theta_e)$ .

(3) 绝对应变回复率计算公式:  $\epsilon_T = \epsilon_m \times f_{sme}$ .

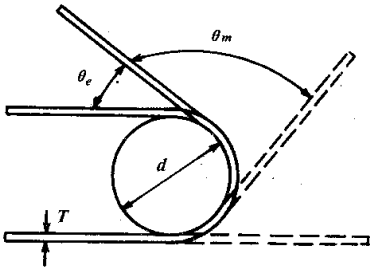


图 1 弯曲试验示意图

### 1.3 分析方法

(1) 金相分析:金相在 Olympus 金相显微镜上分析,腐蚀剂为水 60 ml,盐酸 15 ml,氯化铁 5 g.

(2) X 射线分析:在 Philips PW1700 X 射线衍射仪上进行,使用 Cu K $\alpha$  射线,电压 40 kV,衍射仪角速率为 0.025 (°)/s,角分辨率为 0.005 (°),测

收稿日期 2000 - 05 - 08;修订日期 2000 - 06 - 16

基金项目 河南省自然科学基金(994040900);河南省“模具、材料工程及装备”重点学科开放实验室资助项目

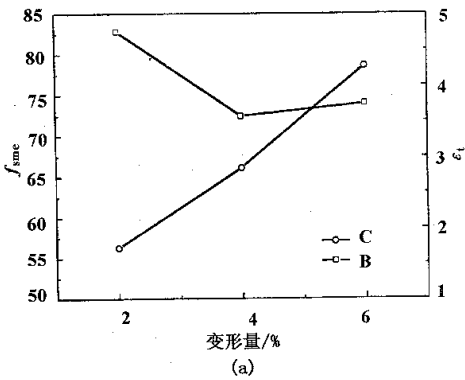
作者简介:关绍康(1964 - )男,河南省开封市人,郑州工业大学教授,博士,主要从事新金属材料及其制备技术的研  
万方数据

量步长 $0.01(^{\circ})$ .

2 实验结果与分析讨论

2.1 变形量对  $f_{sme}$  的影响

如图 2 所示 随着变形量的增加 相对回复率



$f_{sme}$  相应减少 这是因为试样总的应变量由塑性应变  $\epsilon_p$  和可回复性应变  $\epsilon_r$  组成. 当总变形量增加时  $\epsilon_p$  ,  $\epsilon_r$  都是线性增加 , 但由位错滑移引起的塑性变形的加速率高于由马氏体转变承担的可回复性形变量. 根据回复率的通用公式  $\eta = \epsilon_r / \epsilon = \epsilon_r / (\epsilon_p + \epsilon_r) \times 100\%$  ,  $\epsilon_p$  增加 ,  $\eta$  减少 .

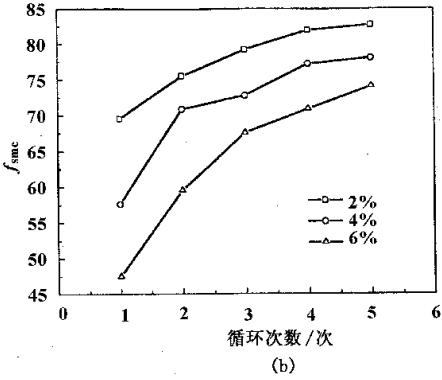


图 2 变形量及循环次数与  $f_{sme}$  的关系

2.2 循环次数与  $f_{sme}$  的关系

由表 1 可知 , 随着训练次数的增加 ,  $f_{sme}$  逐渐增加 . 前两次训练后 , 增幅较大 , 均达到 10% 以

上 . 第四、五次训练后 , 增幅较小或持平 , 并有下降趋势 . 试样经五次热机械循环后 , 最大回复率达到 86.7% 绝对回复率达到 4.4% .

表 1 循环变量、变形量与回复率和绝对回复率之间的关系 %

变形量	循环次数									
	1		2		3		4		5	
	$f_{sme}$	$\epsilon_T$	$f_{sme}$	$\epsilon_T$	$f_{sme}$	$\epsilon_T$	$f_{sme}$	$\epsilon_T$	$f_{sme}$	$\epsilon_T$
2	67.0	1.34	73.0	1.46	77.8	1.56	81.4	1.62	84.8	1.70
	72.0	1.44	78.0	1.56	80.5	1.61	82.6	1.65	80.8	1.74
4	57.4	2.30	71.0	2.84	73.0	2.93	80.3	3.21	80.9	3.12
	57.8	2.30	70.7	2.83	72.5	2.90	74.1	2.96	64.0	2.56
6	46.7	2.80	57.6	3.46	67.0	4.02	68.3	4.10	68.7	4.12
	48.3	2.90	61.4	3.68	68.0	4.08	73.4	4.40	79.3	4.42

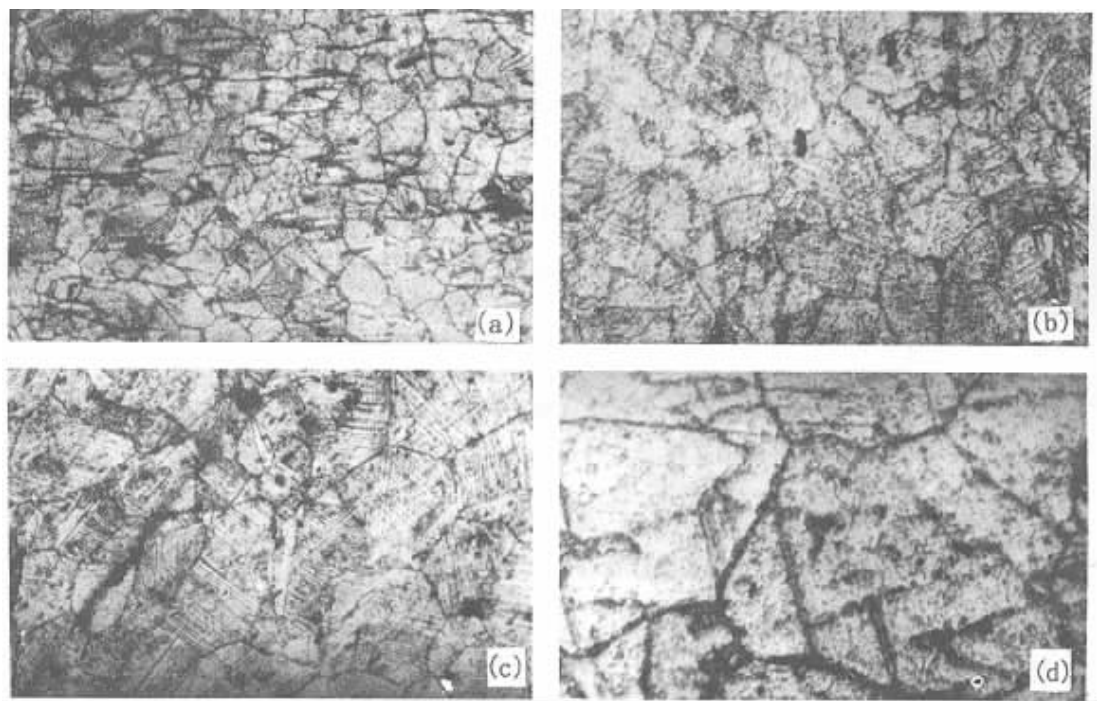
2.3 显微组织对  $f_{sme}$  的影响

如图 3 所示 随着试样变形量的增大 , 亚晶界及晶体内的亚结构逐渐减少 , 而晶粒逐渐粗大 . 这是因为在回复过程中 , 缠结位错通过多边形化而形成亚晶界 , 亚晶粒通过亚晶界的迁移而逐渐长大成晶粒 . 随着变形量的增加 , 晶粒存储的畸变能增加 , 亚晶界移动就加快 , 因而晶粒粗大 , 胞状亚结构减少并细化 , 在低倍显微镜下不易观察到 . 由图 3 可知 , 奥氏体晶粒内存在着大量典型的板条状马氏体 , 并有一定的方向性 , 有利于  $\epsilon \rightarrow \gamma$  的逆转变 .

2.4 相结构分析

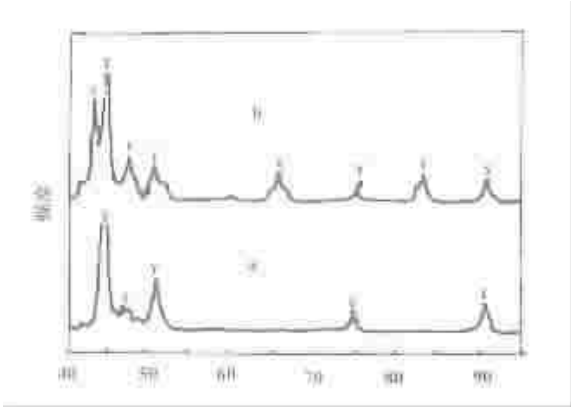
图 4 所示的曲线 1 是训练前 XRD 谱线 , 曲线

2 是热机械循环后试样的谱线 . 由曲线 1 可知 , 有 4 个峰位  $43.75^{\circ}$  ,  $50.5^{\circ}$  ,  $74.5^{\circ}$  ,  $90.5^{\circ}$  非常接近  $\gamma$  相的特征峰  $43.73^{\circ}$  ,  $50.93^{\circ}$  ,  $74.89^{\circ}$  ,  $90.99^{\circ}$  , 并且峰的强度可定性表明试样中  $\gamma$  相占绝大部分的比例 . 另外 , 有一峰位  $46.75^{\circ}$  与  $\epsilon$  马氏体的特征峰  $46.03^{\circ}$  相一致 , 且峰的强度较弱 . 因此 , 训练前的试样组织为  $\gamma$  体加少量  $\epsilon$  马氏体 . 由曲线 2 可知 , 有 3 个峰位  $44.3^{\circ}$  ,  $65.4^{\circ}$  ,  $82.8^{\circ}$  接近于马氏体的特征峰  $44.6^{\circ}$  ,  $65.2^{\circ}$  ,  $82.3^{\circ}$  , 且峰的强度较高 . 另外 3 个峰位  $50.0^{\circ}$  ,  $75.0^{\circ}$  ,  $91^{\circ}$  较符合  $\gamma$  体的特征峰  $50.93^{\circ}$  ,  $74.89^{\circ}$  ,  $90.99^{\circ}$  , 而强度较弱 . 这表明试样经训练后组织发生了很大变化 ,  $\epsilon$  马氏体占了主要部分 , 即发生  $\gamma \rightarrow \epsilon$  的相转变 .



(a) 2% 变形量训练后( 200 × )                      (b) 4% 变形量训练后( 200 × )  
(c) 6% 变形量训练后( 200 × )                      (d) 2% 变形量训练后( 1000 × )

图 3 不同变形训练后的显微组织



a—训练前 XRD 曲线 b—热机械循环后 XRD 曲线  
图 4 训练前后的 X 射线衍射曲线

2.5 机理分析

机械循环能引入位错和层错,位错在强化母相的同时阻碍了  $\gamma$  体长大,而层错有利于  $\epsilon$  马氏体形核<sup>[2]</sup>.机械循环主要通过阻碍应力来诱发马氏体的形成而使回复率  $\eta$  值减小.在两次机械循环之间加上中间退火,热机械处理对合金的记忆性能会有不同的影响.中间退火温度低,对循环引入的位错和层错的组态改变不起作用,这些热机械循环仍然使合金  $\eta$  值减小;中间退火温度太高,将机械循环引入的缺陷完全消除,合金的  $\eta$  值等于机械循环前  $\eta$  值;退火温度适当( 600 ℃ ± 100 ℃ ),机械循环引入的位错基本消除,但有利

于  $\epsilon$  马氏体形成的层错缺陷留存,这些热机械循环会改变记忆合金的记忆效应.X 射线衍射结果说明,适当的热机械循环处理后,应力诱发的  $\epsilon$  马氏体量增加.

3 主要结论

(1) 热机械循环能显著提高合金的记忆效应,当变形量为 4% ,经五次循环后,  $f_{sme}$  为 80.8% ,  $\epsilon_T$  为 3.12% ;当变形量为 6% 时,  $f_{sme}$  为 79.3% ,  $\epsilon_T$  为 4.4% .

(2) 随着变形量的增加,亚晶界及晶体内的胞状亚结构逐渐减少,晶粒逐渐粗大.

参考文献:

[ 1 ] REYHANI M M ,MCORMICK P G . Effect of microstructure of austenite of the shape memory effect in a Fe - Mn - Si - Ni alloy[ J ]. Scripta Metall Mater ,1994 ,31( 7 ) :875 - 878.  
[ 2 ] 刘汉强 ,陈继勤 ,程钺萱 . Fe - Mn - Si - Ni 合金形状记忆性能的改善[ J ]. 机械工程材料 ,1993 ,17( 4 ) :46 - 48.

( 下转 63 页 )

# Effect of Thermomechanical Cycling on the Shape Memory Effect in Fe – Mn – Si – Cr – Ni Alloy

GUAN Shao – kang , SHI Guang – xin , REN Chen – xing , LIU Xiao – fang , SHEN Ning – fu

( Department of Materials Science & Engineering Zhengzhou University of Technology Zhengzhou 450002 ,China )

**Abstract** :This paper deals with the effect of thermomechanical cycles on the shape memory effect of Fe – Mn – Si – Cr – Ni alloy by bending experiment method on different deformation magnitude ,combined with microstructure analysis using X – Ray diffraction .It is shown that the shape memory effect of alloy is obviously improved .By means of thermomechanical cycles i . e . ,when deformation magnitude is 4% , $f_{sme}$  is 80.8% , $\epsilon_r$  is 3.12% . As the deformation magnitude is increasing , $f_{sme}$  is reducing ,but  $\epsilon_r$  is increasing . While deformation magnitude is 6% , $f_{sme}$  is 79.3% , $\epsilon_r$  is 4.4% . Further ,surgrain boundary and intergrain cellar structure is reducing ,however ,size of grains is increased .

**Key words** :Fe – Mn – Si – Cr – Ni alloy ; thermomechanical cycle ; microstructure ; shape memory effect