



# Fe-Mn-Si 记忆合金的疲劳特性

孙德平<sup>1</sup>, 鞠恒<sup>2</sup>, 苑海超<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 大连 116026;

2. 大连海洋大学 机械与动力工程学院, 大连 116023)

**摘要:** 为分析 Fe-Mn-Si 记忆合金的疲劳特性, 采用与该材料具有相同母相的 304 不锈钢作为对比材料, 通过弯曲疲劳试验法测量两者在应变幅值为 $\pm 3.5\%$ 时的疲劳断裂次数, 并利用 X 射线衍射法(XRD)和场发射扫描电镜(SEM)分析试样相组成和断口形貌。结果表明: Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的弯曲疲劳断裂次数分别为 1159 次和 63 次, 断口形貌依次为韧窝和撕裂棱。前者断裂时的物相基本为  $\epsilon$  马氏体, 而后者几乎全部由  $\alpha'$  马氏体组成, 表明应力诱发 Fe-Mn-Si 记忆合金发生  $\gamma \rightarrow \epsilon$  马氏体相变。相变过程中, 应力集中程度和裂纹扩展速度降低是 Fe-Mn-Si 记忆合金疲劳强度提高的机理。

**关键词:** Fe-Mn-Si 记忆合金; 疲劳特性;  $\gamma \rightarrow \epsilon$  马氏体相变

**文章编号:** 1004-0609(2020)-07-1620-06

**中图分类号:** TU973<sup>+</sup>.254

**文献标志码:** A

金属在循环载荷作用下, 即使所受的应力低于屈服强度, 亦会发生断裂, 这种现象称为疲劳<sup>[1]</sup>。在材料疲劳断裂过程中, 一般不会发生明显的塑性变形现象, 故很难检测和预防, 导致高危险性<sup>[2]</sup>。因此工程设备中需应用高疲劳强度的金属材料, 并且研究其疲劳特性具有实际意义<sup>[3-4]</sup>。

Fe-Mn-Si 记忆合金具有“应力自适应特性”, 即合金在循环应变作用下可发生可逆的  $\gamma \rightarrow \epsilon$  马氏体相变, 该过程中往复变形可吸收能量和减少应力集中来提高合金的疲劳特性<sup>[5]</sup>。目前, 科研人员主要研究 Fe-Mn-Si 记忆合金的形状记忆效应机理及提高方法<sup>[6-8]</sup>, 关于合金承受循环应变时疲劳特性研究较少。

本文通过弯曲疲劳试验方法分析 Fe-Mn-Si 记忆合金的疲劳特性, 并采用 X 射线衍射法(XRD)和场发射扫描电镜(SEM)观察分析 Fe-Mn-Si 记忆合金的物相组成以及断口形貌。

## 1 实验

本弯曲疲劳试验选用的材料为 Fe-17Mn-5Si-

10Cr-5Ni 记忆合金, 为对比研究试验材料的疲劳特性, 采用同为奥氏体母相的 304 不锈钢作为对比材料, 两者的化学成分如表 1 所示。利用 SDS-100 型电液伺服疲劳试验机进行室温条件下的 Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的循环疲劳试验。图 1 所示为弯曲疲劳试验的试样形状及尺寸。利用线切割机将材料加工完成后, 在热处理炉内进行(1000 °C, 1 h)固溶处理, 消除试样在加工过程中产生的马氏体, 使其完全由奥氏体相组成。

弯曲疲劳试验中, 对试样加载交变对称循环应力, 加载的应变-时间波形如图 2 所示。循环最大应变  $\epsilon_{\max}$  和循环最小应变  $\epsilon_{\min}$  分别为 3.5%和-3.5%; 平均应变  $\epsilon_m = (\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min})/2 = 0$ ; 应变比  $R = \epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = -1$ ; 加载频率为 3 Hz。

为保证弯曲疲劳试样承受等强度应力, 采用自制的弯曲疲劳夹具上下弯曲试样, 弯曲过程的简化力学模型如图 3(a)和(b)所示。其中, 向下弯曲过程的内力图 and 弯矩图如 4(a)和(b)所示。同理, 向上弯曲过程的内力图 and 弯矩图如 5(a)和(b)所示。

循环疲劳过程中, 利用 D/max-3B 型 X 射线衍射仪对 Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢表层进行相组成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879026)

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2020-04-28

通信作者: 孙德平, 副教授, 硕士; 电话: 13998448819; E-mail: sdpdmu@163.com

表 1 Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni 合金和 304 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemistry compositions of Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni alloy and 304 stainless steel

Material	Mass fraction/%						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Fe
Fe-17-Mn-5Si-10Cr-5Ni	0.03	4.50	17.23	5.29	10.30	0.01	Bal.
304 stainless steel	0.04	0.33	0.93	9.32	18.63	0.02	Bal.

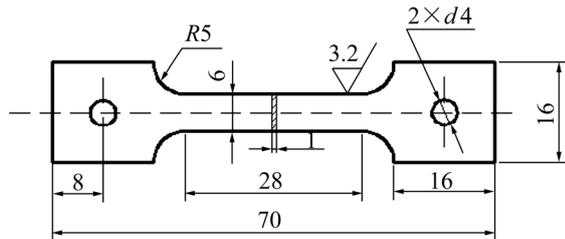


图 1 弯曲疲劳试验试样

Fig. 1 Specimen of bending fatigue test (Unit: mm)

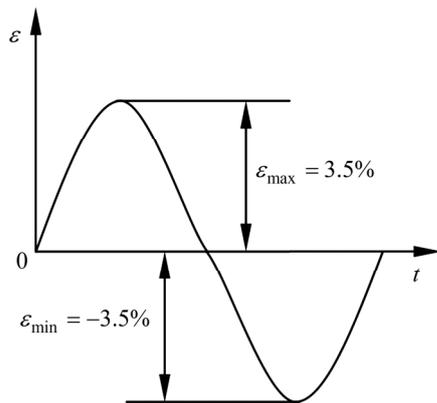


图 2 应变-时间波形图

Fig. 2 Oscillogram of strain and time

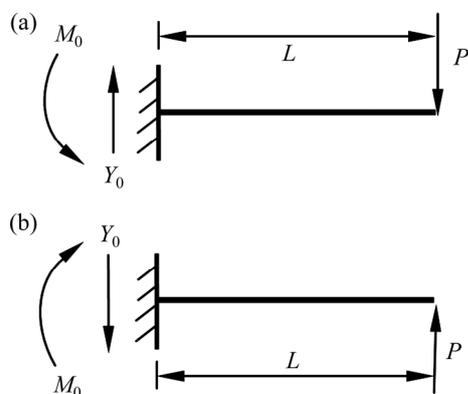


图 3 向下、向上弯曲过程的简化力学模型

Fig. 3 Simplify mechanical model of bending process:

(a) Downward; (b) Upward

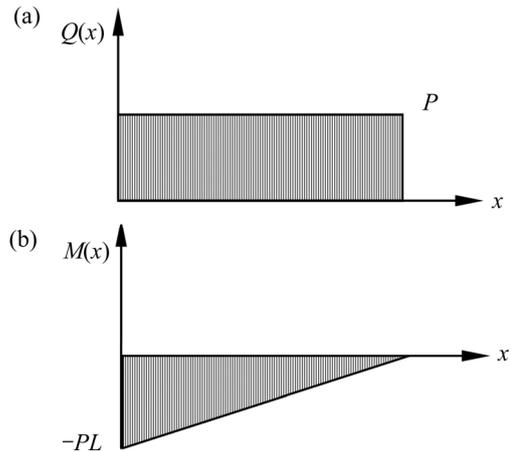


图 4 向下弯曲过程中试样的内力图和弯矩图

Fig. 4 Internal force diagram(a) and bending moment diagram(b) of downward bending process

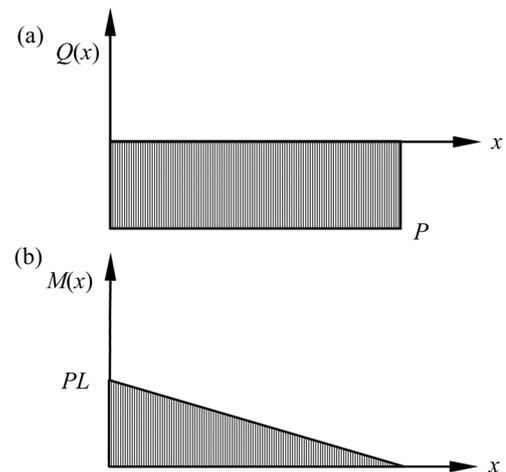


图 5 向上弯曲过程中试样的内力图和弯矩图

Fig. 5 Internal force diagram(a) and bending moment diagram(b) of upward bending process

分析。其主要技术参数如下: Cu  $K_{\alpha}$  辐射, 加速电压 40 kV, 电流 150 mA, 扫描速度 0.02 ( $^{\circ}$ )/s, 扫描角度为 30 $^{\circ}$ ~75 $^{\circ}$ 。循环疲劳断裂后, 通过 SUPRA 55 SAPHIR 型场发射扫描电镜分析断口形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 疲劳断裂次数及相组成

在应变幅值在 $\pm 3.5\%$ 的情况下, Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的弯曲循环断裂次数分别为 1159 次和 63 次, 前者的弯曲疲劳次数明显高于后者。图 6 所示为不同循环弯曲次数下的 304 不锈钢的 XRD 谱。

为更精确地了解弯曲疲劳试样相体积变化规律, 通过直接比较法定量计算 XRD 谱中各相含量<sup>[9]</sup>。根据图 6 得到不同弯曲次数条件下的 304 不锈钢中  $\gamma$  和  $\alpha'$  相的体积分数, 如表 2 所示。

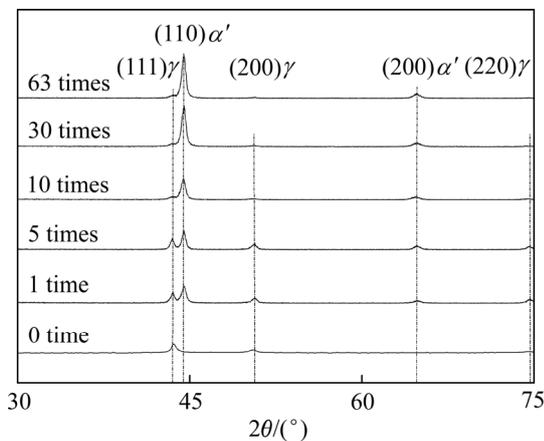


图 6 不同循环弯曲次数下的 304 不锈钢 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of 304 stainless steel under different bending cycles

表 2 在不同循环弯曲次数下的 304 不锈钢试样相体积分数  
Table 2 Phase constitution of 304 stainless steel specimens with different bending cycles

Bending cycle	Phase constitution/%	
	$\gamma$	$\alpha'$
0	100	0
1	42.3	57.7
5	38.6	61.4
10	16.4	83.6
30	9.8	90.2
63	3.7	96.3

由图 6 可知, 经循环弯曲后的 304 不锈钢的相组成为  $\gamma+\alpha'$ 。与弯曲前由单一奥氏体组织( $\gamma$ )组成的 304 不锈钢相比, 新增了  $\alpha'$  马氏体相, 表明 304 不锈钢试样发生了不可逆的  $\gamma \rightarrow \alpha'$  马氏体相变<sup>[10]</sup>。在 XRD 谱中,

衍射峰的面积大小实际上反应衍射峰所代表相在试样中的体积分数。故由循环弯曲次数的增加, (110) $\alpha'$  和 (200) $\alpha'$  马氏体相的衍射峰面积不断增加, (111) $\gamma$ 、(200) $\gamma$  及 (220) $\gamma$  奥氏体相的衍射峰面积不断减小这一现象可知, 在循环弯曲疲劳过程中, 304 不锈钢的母相  $\gamma$  奥氏体随循环次数的增加而逐渐减少, 新增相  $\alpha'$  马氏体相随循环次数的增加而逐渐增加。

由表 2 可知, 经 1 次循环弯曲后,  $\gamma$  奥氏体含量从 100% 降为 42.3%,  $\alpha'$  马氏体含量从 0% 增加到 57.7%; 经 10 次循环弯曲后,  $\gamma$  奥氏体含量降为 16.4%,  $\alpha'$  马氏体含量增加为 83.6%。在循环弯曲前期,  $\gamma \rightarrow \alpha'$  马氏体相变迅速产生, 且几乎与循环次数呈线性关系。从第 31 次到 63 次循环弯曲过程中,  $\alpha'$  奥氏体含量虽然继续增加, 但增速相对放缓。究其原因在于, 304 不锈钢在弯曲疲劳前期基本由奥氏体相组成, 可进行  $\gamma \rightarrow \alpha'$  相变的母相含量较高, 故产生的  $\alpha'$  相较多, 其含量增加较快。疲劳试验后期,  $\alpha'$  相增加速度随着母相  $\gamma$  的减小而降低。当 304 不锈钢最终断裂时, 其  $\gamma$  奥氏体含量仅为 3.7%,  $\alpha'$  马氏体含量为 96.3%, 说明在弯曲过程中, 绝大多数母相奥氏体发生了  $\gamma \rightarrow \alpha'$  马氏体相变。同理, 测量不同循环次数下 Fe-Mn-Si 记忆合金的 XRD 谱如图 7 所示。

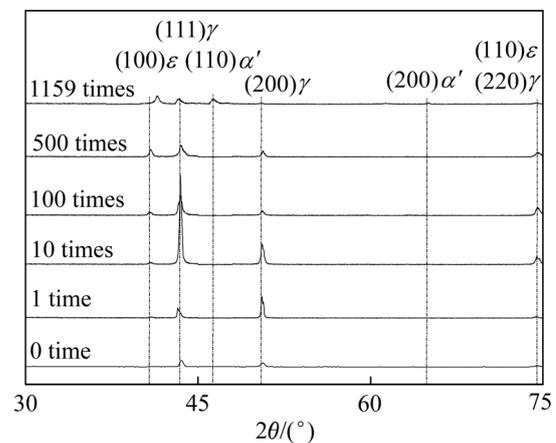


图 7 不同循环弯曲次数下的 Fe-Mn-Si 记忆合金 XRD 谱

Fig. 7 XRD patterns of Fe-Mn-Si memory alloy under different bending cycles

由图 7 可知, 循环弯曲后期 Fe-Mn-Si 记忆合金的相组成为  $\gamma+\epsilon+\alpha'$ , 与弯曲前由单一奥氏体组织组成的记忆合金相比, 新增了  $\epsilon$  和  $\alpha'$  马氏体相, 试样发生了记忆合金典型的  $\gamma \rightarrow \epsilon$  马氏体相变及不可逆的  $\gamma \rightarrow \alpha'$  马氏体相变。与 304 不锈钢不同的是, Fe-Mn-Si 记忆合金弯曲疲劳试验初期, 仅存在 (100) $\epsilon$  和 (110) $\epsilon$  马氏体相的衍射峰。并且马氏体峰面积随着循环弯曲次数的

增加而不断增加, (111) $\gamma$ 、(200) $\gamma$ 及(220) $\gamma$ 奥氏体相的衍射峰面积不断减小。在循环弯曲后期, 试样中才出现(110) $\alpha'$ 和(200) $\alpha'$ 马氏体相的衍射峰。通过直接比较法对 Fe-Mn-Si 记忆合金的 XRD 谱进行定量计算, 得到不同弯曲次数条件下的记忆合金中  $\gamma$ 、 $\varepsilon$  和  $\alpha'$  相的体积分数如表 3 所示。

表 3 不同循环弯曲次数下的 Fe-Mn-Si 记忆合金试样相体积分

Table 3 Phase constitution of Fe-Mn-Si memory alloy specimens with different bending cycles

Bending cycle	Phase constitution/%		
	$\gamma$	$\varepsilon$	$\alpha'$
0	100	0	0
1	52.6	47.4	0
10	19.6	80.4	0
100	4.5	95.5	0
500	2.6	97.3	0.1
1159	1.3	98.4	0.3

由表 3 可知, 经 1 次循环弯曲后, Fe-Mn-Si 记忆合金  $\gamma$  奥氏体含量从 100% 降为 52.6%,  $\varepsilon$  马氏体含量从 0 增加为 47.4%,  $\alpha'$  马氏体含量为 0%; 经 100 次循环弯曲后,  $\gamma$  奥氏体含量降为 4.5%,  $\varepsilon$  马氏体含量增加为 95.5%,  $\alpha'$  马氏体含量依旧为 0。在循环弯曲前期(0 次 $\rightarrow$ 100 次),  $\varepsilon$  马氏体含量由 0% 增加至 95.5%, 表明  $\varepsilon$  马氏体快速形核和长大的特点。从第 100 次到 500 次循环弯曲过程中,  $\gamma$  奥氏体含量继续减少,  $\varepsilon$  马氏体含量增加, 但两者变化放缓,  $\varepsilon$  马氏体的增加速度降低是由于母相  $\gamma$  含量的降低所致。该过程中,  $\alpha'$  马氏体含量由 0% 增加至 0.1%, 其成因是应力诱发  $\varepsilon$  马氏体的量随着弯曲循环次数的增加而增加,  $\varepsilon$  马氏体大量的产生使其由定向分布逐渐转变为交叉分布, 交叉部位的马氏体随着循环次数持续增加(500 次 $\sim$ 1159 次), 相互作用诱发出  $\alpha'$  马氏体, 使得  $\alpha'$  马氏体含量缓慢增加到 0.3%<sup>[11]</sup>。Fe-Mn-Si 记忆合金最终弯曲疲劳断裂时,  $\gamma$  奥氏体含量仅为 1.3%,  $\varepsilon$  马氏体含量为 98.4%;  $\alpha'$  马氏体含量为 0.3%, 说明在弯曲过程中绝大多数的母相奥氏体发生的相变是  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  马氏体相变。

## 2.2 弯曲疲劳断口形貌

为进一步分析试样弯曲疲劳断裂特性, 采用场发射扫描电子显微镜观测到 Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的疲劳断口形貌如图 8 所示。Fe-Mn-Si 记忆合金

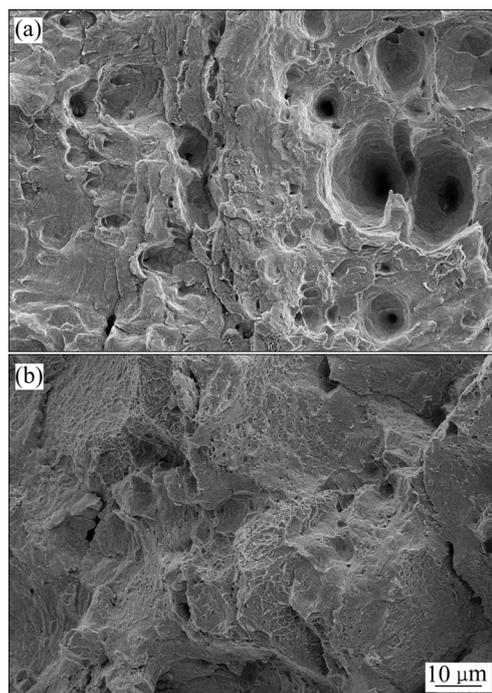


图 8 Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢疲劳断口的微观形貌  
Fig. 8 Microstructure of fatigue fracture inside Fe-Mn-Si alloy(a) and 304 stainless steel(b)

的断口由大小不一的韧窝组成(见图 8(a)), 该种断裂形式属于塑性断裂, 体现其较好的疲劳特性<sup>[12-13]</sup>。这种断裂形式的形成是由于 Fe-Mn-Si 记忆合金在承受循环应变时, 产生了  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  马氏体相变, 减缓了应力集中<sup>[14]</sup>。另外, 由于裂纹尖端的应力较大, 导致 Fe-Mn-Si 记忆合金在裂纹扩展方向产生马氏体, 抑制该裂纹扩展。随着弯曲次数增加, 合金在局部区域产生的颈缩横截面尺寸将减小到一定程度发生断裂, 形成大小不一的韧窝状结构。

由图 8(b)可知, 大量撕裂棱构成 304 不锈钢的断口, 这是准解理断裂(脆性断裂)的典型形貌<sup>[15]</sup>。准解理断裂是由于解理断裂核产生于 304 不锈钢的不同位置, 断裂核逐渐扩散断裂面, 进而产生断裂。由于没有抑制作用, 304 不锈钢的裂纹迅速扩展, 故其疲劳特性较差。与 304 不锈钢相比, Fe-Mn-Si 记忆合金由于存在应力诱发的  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  马氏体相变, 其应力集中程度降低, 裂纹的扩展速度降低, 故弯曲疲劳强度高。

## 3 结论

1) 在应变幅值在 $\pm 3.5\%$ 的情况下, Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的弯曲循环断裂次数分别为 1159

次和 63 次。

2) Fe-Mn-Si 记忆合金和 304 不锈钢的疲劳断口形貌依次为韧窝和撕裂棱, 分别属于塑性断裂和脆性断裂。

3) 随着疲劳次数的增加, 304 不锈钢的绝大多数母相发生了  $\gamma \rightarrow \alpha'$  马氏体相变, 断口基本由  $\alpha'$  马氏体组成。相同试验条件, 断裂后的 Fe-Mn-Si 记忆合金断口主要由  $\varepsilon$  马氏体组成。

4) Fe-Mn-Si 记忆合金疲劳强度高的机理是由于其存在应力诱发  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  马氏体相变。在相变过程中, 合金的应力集中程度降低, 裂纹扩展被抑制。

## REFERENCES

- [1] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1.  
YAO Wei-xing. Fatigue life prediction of structures[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 1.
- [2] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 243.  
ZHONG Qun-peng, ZHAO Zi-Hua. Fractography[M]. Beijing: High Education Press, 2006: 243.
- [3] SEIFI M, SALEM A, SATKO D, SHAFFER J, LEWANDOWSKI J. Defect distribution and microstructure heterogeneity effects on fracture resistance and fatigue behavior of EBM Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94(1): 263–287.
- [4] 马 权, 黄朝文. Ti-55531 合金的高周疲劳断口形貌分析[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2467–2475.  
MA Quan, HUANG Chao-wen. Fracture surface analysis of high-cycle fatigue for Ti-55531 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(12): 2467–2475.
- [5] 王金刚. Fe-Mn-Si 形状记忆合金的应力自适应特性和力学行为[D]. 天津: 河北工业大学, 2006: 26–27.  
WANG Jin-gang. The stress self-accommodation characteristic and mechanics behavior of Fe-Mn-Si shape memory alloy[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006: 26–27.
- [6] LAI M J, LI Y J, LILLOPP L, PONGE D, WILL S, RAABE D. On the origin of the improvement of shape memory effect by precipitating VC in Fe-Mn-Si-based shape memory alloys[J]. Acta Materialia, 2018, 155: 222–235.
- [7] PENG Hua-bei, CHEN Jie, WANG Yong-ning, WEN Yu-hua. Key factors achieving large recovery strains in polycrystalline Fe-Mn-Si-based shape memory alloys: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 20(3): 1700741.
- [8] LIU Wen-bo, LI Ning, WEN Yu-hua, ZHANG Shi-chao, YANG Shi-zhou. Effects of amount of pre-deformation on precipitation of NbC particles and shape memory effect of Fe17Mn5Si8Cr5Ni0.5NbC alloy during electropulsing treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): 193–197.
- [9] YU Qing-chun, ZHANG Shi-chao, YANG Bin. Dispersion of copper oxide supported on  $\gamma$ -alumina and its sulfation properties[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(11): 2644–2648.
- [10] LI Xi-feng, DING Wei, CAO Jian, YE Li-yan, CHEN Jun. In situ TEM observation on martensitic transformation during tensile deformation on SUS304 metastable austenitic stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015, 28(3): 302–306.
- [11] 林成新, 谷南驹, 张建军, 刘庆锁. Fe-Mn-Si 形状记忆合金的应力诱发马氏体相变的 X 射线分析[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(3): 1–4.  
LIN Cheng-xin, GU Nan-ju, ZHANG Jian-jun, LIU Qing-suo. X-ray analysis for stress-induced martensitic transformation in Fe-Mn-Si based shape memory alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(3): 1–4.
- [12] FU Jian-xin, CAO Cheng-ming, TONG Wei, PENG Liang-ming. Effect of thermomechanical processing on microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiMn high entropy alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(5): 931–938.
- [13] MORIN David, HOPPERSTAD Odd Sture, BENALLAL Ahmed. On the description of ductile fracture in metals by the strain localization theory[J]. International Journal of Fracture, 2018, 209(1): 1–25.
- [14] JU Heng, LIN Cheng-xin, YUN Tian, LIU Zhi-jie, JIANG Hui-ling, SUN De-ping. Mechanical properties study of Fe-Mn-Si shape memory alloy welding seam formed by laser welding with filler powder[J]. Materials, 2018, 11(8): 1454–1469.
- [15] 李培友, 王永善. 热处理温度对 Zr44Co56 合金显微组织和力学性能影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(11): 2299–2306.  
LI Pei-you, WANG Yong-shan. Effect of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of Zr44Co56 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, , 2017, 27(11): 2299–2306.

## Fatigue properties of Fe-Mn-Si memory alloy

SUN De-ping<sup>1</sup>, JU Heng<sup>2</sup>, YUAN Hai-chao<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** In order to analyze the fatigue properties of Fe-Mn-Si memory alloy, the 304 stainless steel that had the same parent phase was chosen as contrast material. The fatigue cycles were measured by bending fatigue test under the  $\pm 3.5\%$  strain amplitudes, and the phase compositions and fractures appearances of specimens were observed with X-ray diffraction (XRD) and field emission scanning electron microscope (SEM). The experimental results show that the bending fatigue break cycles of Fe-Mn-Si memory alloy and 304 stain steel is 1159 and 63, respectively, their fracture appearances are dimples and tearing ridges in turn. When the specimens break, the former phase compositions are almost  $\varepsilon$ -martensite, while the latter were basically composed by  $\alpha'$ -martensite. The phenomenon indicates that the bending stress induces the  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  martensite phase transformation of Fe-Mn-Si memory alloy, and the mechanism of fatigue strength improvement inside Fe-Mn-Si memory alloy is that stress concentration and crack speed reduce in the phase transition process.

**Key words:** Fe-Mn-Si memory alloy; fatigue properties;  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  martensite phase transformatio

---

**Foundation item:** Project(51879026) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2019-07-26; **Accepted date:** 2020-04-28

**Corresponding author:** SUN De-ping; Tel: +86-1398448819; E-mail: sdpdmu@163.com

(编辑 何学锋)