

③  
13-16

第29卷 第3期

机 械 工 程 学 报

Vol. 29 No. 3

1993年6月 CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING Jun. 1993

# 高锰无磁钢的循环变形 特征及其机制\*

罗治平 宋德玉

(北京航空材料研究所 100095)

陈成澍<sup>✓</sup> 鄢文彬 陶佑卿 TG142.7

(西南交通大学)

**摘要** 研究了高锰无磁钢的循环变形特征, 以及微观组织结构的变化。发现当应变幅较低 ( $1/2 \Delta \epsilon_f$  为 0.25% 和 0.5%) 时, 室温下出现循环软化, 但在低温下循环硬化, 当应变幅较高 ( $1/2 \Delta \epsilon_f = 1.0\%$ ) 时, 在室温和低温下均循环硬化。实验材料的软化与 IS 结合体被破坏而产生的软化相符; 循环硬化来源于形变马氏体的产生, 在较高应变幅下还包括奥氏体基体的位错硬化。

**叙词:** 高锰钢 无磁钢 循环变形

## 0 前言

高锰无磁钢具有高的强度、韧度, 以及优良的低温性能和物理性能, 在机械工程中常用于大型构件的结构材料, 在服役过程中往往承受巨大的交变应力的作用, 如加载—卸载过程中的交变机械应力, 室温—低温工作的交变热应力等, 低周疲劳特性是其很重要的性能。但是, 迄今对高锰无磁钢低周疲劳特性的研究甚少。本文通过研究高锰无磁钢的循环变形特征, 探讨微观机制, 为高锰无磁钢结构件的安全使用提供理论依据。

## 1 实验方法

实验材料经 1100℃ 固溶处理, 成分(%): 0.43C, 18.00Mn, 5.28Cr, 1.69V, 0.12Ni, 0.47Si, 0.001P, 0.005S, Fe 余量。晶粒直径为 11.1μm, 室温下的强度为:  $\sigma_{0.2} = 566\text{MPa}$ ,  $\sigma_s = 1068\text{MPa}$ 。在 MAYES ESH50E 型电液伺服疲劳试验机上进行控制总应变幅低周疲劳实验, 采用对称拉-压三角应变波形, 恒应变速率为  $3 \times 10^{-3}/\text{s}$ , 用液氮冷却装置自动控制低温实验温度。在 D/max-rA 型 X 射线衍射仪上进行物相分析。采用 CoK $\alpha$  辐射, 进行  $\epsilon$  马氏体定量分析时, 选用 (101) $\epsilon$  和 (200) $\gamma$  峰用直接对比法测定。在 H-700 透射电子显微镜上, 利用双倾样品台观察组织结构, 工作电压为 200kV。

\* 国家自然科学基金资助项目。19910303 收到初稿, 19920505 收到修改稿

## 2 实验结果与分析

### 2.1 循环变形特征

实验材料在0.25%及0.5%应变幅下,在室温下变形时出现了一定程度的循环软化现象,但在低温下循环硬化,并且应变幅高时硬化更明显(图1a、b)。当应变幅为1.0%时,已观察不到室温下的软化现象,在室温和低温下均表现为循环硬化特征,并且硬化速率大于应变幅为0.5%时的硬化速率(图1c)。

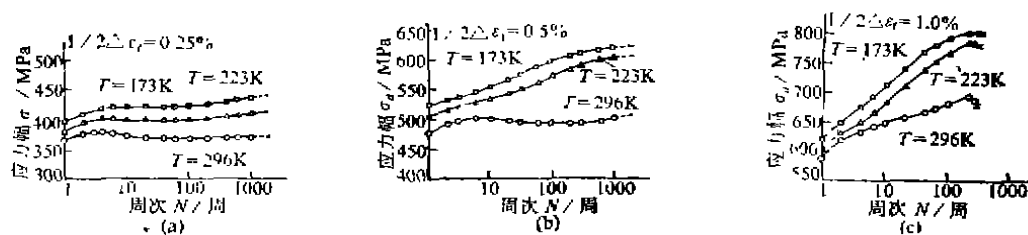


图1 不同应变幅下 $\sigma_a$ - $N$ 关系

### 2.2 形变马氏体的影响

实验材料的原始组织中含有第二相粒子,经电解萃取后,用 $x$ 射线分析表明为VC粒子。经循环变形后试样的 $x$ 射线衍射谱中,出现了明显 $\epsilon$ 马氏体相衍射峰,见图2。实验材料在较低应变幅(0.25%及0.5%)下,在室温出现了循环软化而在低温下硬化,原因在于低温更有利于 $\epsilon$ 形变马氏体产生。这种情况,与18-8不锈钢<sup>[1]</sup>相似。18-8不锈钢在低应变幅(0.25%)下在室温出现了软化,但在低温下由于 $\alpha$ 形变马氏体大量产生而循环硬化。但用 $x$ 射线定量分析发现,18-8不锈钢在1.0%应变幅下低温循环至断裂时, $\alpha$ 马氏体体积百分数在90%以上,但本实验材料即使在1.0%应变幅低温( $T=173\text{K}$ )循环至断裂后, $\epsilon$ 马氏体体积百分数 $f_\epsilon=25.8\%$ ,说明该材料中 $\epsilon$ 马氏体的转变远不及18-8不锈钢中 $\alpha$ 马氏体转变完全,因而两者对材料硬化的贡献是不一样的。 $\alpha$ 马氏体是18-8不锈钢产生循环硬化的主要原因,但在本实验中,较高应变幅(1.0%)下的剧烈循环硬化不可能完全由 $\epsilon$ 马氏体产生。

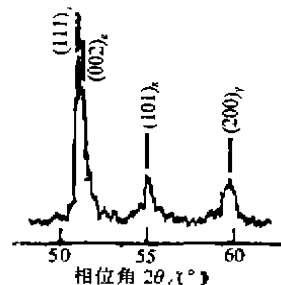


图2 循环变形后试样的 $x$ 射线衍射峰

### 2.3 奥氏体位错组态的变化

Fe-Mn-C合金在Mn含量为18%时层错能(SFE)最低<sup>[2]</sup>。用测量扩展位错节宽度的方法<sup>[3]</sup>测量了本实验材料的SFE值,在173K下 $\gamma \approx 9.9\text{mJ/m}^2$ ,其值比SFE很低的18-8不锈钢的值还小。在透射电镜下,位错总是呈现出平面状分布特征,可观察到大量宽的扩展位错,即使在高应变幅下也不产生位错胞状结构,这与18-8不锈钢明显不同。

材料微观组织结构的变化,与宏观变形行为是相关的。在初期硬化阶段( $N=5$ 周),发现位错间发生了一定程度的缠结,增加了位错间的相互作用力,这是导致初期硬化的原因。在循环软化阶段,位错在其滑移面 $\{111\}$ 内呈现出缠结较低的平面状组态(图3a),说明位错运动的某种短程阻力被克服,从而产生了宏观上的软化。但在较高应变幅( $1/2\Delta\epsilon_f=1.0\%$ )下观察不到这种位错组态,在位错带内位错的缠结程度很高(图3b)。当应变幅较

高时,大量的位错源被激活开动,但由于材料的SFE很低,扩展位错不易发生交滑移而只能形成塞积(尤其在VC粒子周围),发生缠结,宏观上将产生硬化的效果。这种硬化属于奥氏体基体的位错硬化(区别于产生 $\sigma$ 马氏体时的相变硬化机制),主要发生在较高应变幅下。在较低应变幅下,位错通过同一滑移面上异号位错的相遇可使位错密度降低,观察到位错的塞积程度不大,硬化的效果也就不明显。

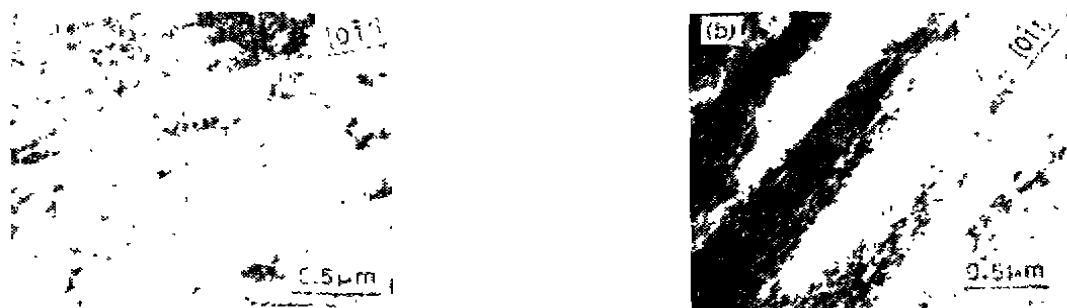


图 3 奥氏体位错组态 ( $T = 296\text{ K}$ )

(a)  $\frac{1}{2}\Delta\epsilon_t = 0.5\%$ ,  $N = 100$  周 (b)  $\frac{1}{2}\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ ,  $N = 100$  周

### 3 讨论

研究奥氏体钢低周疲劳特性时,提高了循环软化机制的IS结合体的概念<sup>[2,4,5]</sup>,认为C、N等间隙原子与Cr、Mn等置换原子在固溶条件下相互吸引而形成短程有序结构,即IS结合体;IS结合体在循环载荷下被破坏从而产生软化。这种软化出现于疲劳寿命的初期,在低应变幅下更明显(高应变幅增加了位错间的交互作用力,导致硬化速率的增加,而IS结合体被破坏产生的软化效应则观察不到了)<sup>[4]</sup>,并在软化阶段呈现出低缠结的平面状位错结构<sup>[2,4,5]</sup>,与本实验的结果相符。但本实验材料的原始组织中出现了碳化物(VC)而使固溶态C含量降低,因而软化不甚明显。循环硬化方面零来源于形变马氏体的产生,在较高应变幅下,还包括奥氏体基体的位错硬化。宏观上的循环硬化、软化与稳定是软化和硬化两个对立方面综合作用的结果。

### 4 结论

(1) 当应变幅较低( $1/2\Delta\epsilon_t = 0.25\%$ 和 $0.5\%$ )时,在室温出现循环软化,在低温循环硬化;当应变幅较高( $1/2\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ )时,在室温和低温均循环硬化。

(2) 奥氏体位错组态为平面状结构,在软化阶段位错缠结程度较低,在硬化阶段位错缠结程度很高。

(3) 实验材料的循环软化与IS结合体被破坏而产生的软化相符;循环硬化来源于形变马氏体的产生,在较高应变幅下还包括奥氏体基体的位错硬化。

## 参 考 文 献

- 1 罗治平, 陈成岗, 鄢文彬, 陶佑卿. 形变马氏体对亚稳奥氏体不锈钢应变疲劳性能的影响. 第三届全国马氏体相变讨论会论文集, 1990, 1:115~116
- 2 Shibata K, Kishimoto Y, Namura N, Fujita T. Cyclic softening and hardening of austenitic steels at low temperatures. ASTM STP857, 1985:31~46
- 3 刘文西, 黄孝瑛, 陈玉如. 材料结构电子显微分析. 天津大学出版社, 1989. 440~443
- 4 Shibata K, Kojita M, Chen C S, Fujita T. Effects of carbon and silicon on softening in low-cycle fatigue of austenitic stainless steels. Trans. ISIJ, 1988, 28 (5): 406~412
- 5 Kojita M, Chen C S, Shibata K, Fujita T. The effects of C and Si on low cyclic fatigue behavior of austenitic stainless steels. Trans. ISIJ, 1986, 26 (7): B-254

## CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF CYCLIC DEFORMATION OF HIGH MANGANESE NONMAGNETIC STEEL

*Luo Zhiping      Song Deyu*

*(Beijing Institute of Aeronautical Materials)*

*Chen Chengshu      Yan Wenbin      Tao Youqing*

*(Southwestern Jiaotong University)*

**Abstract** The cyclic deformation characteristics and microstructural changes of high manganese nonmagnetic steel have been studied. It was found that the experimental material showed cyclic softening at room temperature but cyclic hardening at low temperatures when the strain amplitudes were relatively low ( $1/2 \Delta \epsilon_i = 0.25$ ), 0.5%, but only cyclic hardening was showed at room or low temperatures when the strain amplitude was relatively high ( $1/2 \Delta \epsilon_i = 1.0\%$ ). The cyclic softening of the experimental material consisted with the softening which was resulted in by the decomposition of IS complexes. The cyclic hardening was due to the formation of deformation-induced martensite, and the effect of dislocation hardening of the austenite matrix under relatively high strain amplitude.

**Key words:** High manganese steel      Nonmagnetic steel      Cycle deformation

**作者简介** 罗治平, 男, 1965年6月出生。曾获西南交通大学工学硕士学位, 现在北京航空材料研究所攻读工学博士学位。主要从事材料的力学性能, 微观结构和新型稀土材料等的研究, 在国际学术刊物、国际学术会议及国内学报上发表论文20余篇。