

γ 相的变形行为及其对 Ni-Al-Fe-B 合金形状记忆效应的影响

谢超英 江伯鸿 胡赓祥

(上海交通大学 520 教研室, 上海, 200030)

DEFORMATION OF THE γ -PHASE AND ITS EFFECT ON THE SHAPE MEMORY EFFECT OF A Ni-Al-Fe-B ALLOY

Xie Chaoying, Jiang Bohong, Hu Gengxiang

(Faculty 520 of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030)

摘要 通过显微组织分析和宏观力学, 研究了 Ni-Al-Fe-B 合金中 γ 相的变形行为及其对合金形状记忆效应(SME)的影响。结果表明: 在低应力作用下, Ni-Al-Fe-B 合金发生应力诱发马氏体相变时, 有少量 γ 相以滑移方式参与协调变形, 以至合金在较小的应变下也得不到完全的 SME。合金的形状记忆恢复率随应变增加呈现阶段性衰减趋势。当应变量为 4% 时, 形状记忆恢复率可达 75%。

关键词 相, 变形, 记忆, 合金, 效应

中图分类号 V259, TG139.6

Abstract The deformation of the γ -phase and its effect on the shape memory effect of a Ni-Al-Fe-B alloy were studied by means of optical and SEM metallographic examinations, microhardness measurement and compression test. It was found that a few γ -phases deformed coordinately in a slip manner when the stress induced martensitic transformation took place in the matrix at a low stress. The shape recovery ratio decreased by stages, with the increase of the strain. When the strain was 4%, the shape recovery ratio retained 75%.

Key words phases, deformation, memory, alloys, effects

NiAl 金属间化合物具有密度低($5.95\text{g}/\text{cm}^3$), 熔点高(约 1640°C)及抗高温氧化性能好等特性。在航空、航天工业领域显示出巨大的应用潜力, 受到各国材料科学工作者的关注^[1]。NiAl 金属间化合物的热弹性马氏体相变及其形状记忆效应现象早在 70 年代初已被发现^[2]。然而, NiAl 与其它金属间化合物一样, 其室温塑性极差, 但 Fe、Co、B 等是改善 NiAl 金属间化合物塑性的有效元素^[1, 3]。本文就 Ni-Al-Fe-B 合金中第二相 γ 的变形行为及其对合金形状记忆效应的影响规律进行了研究。

1 试验材料及方法

试验材料为 Ni-25.2at%Al-18.4at%Fe-B(100ppm), 在真空非自耗炉中炼制, 每个钮扣锭熔炼 3 至 4 次。钮扣锭进行 1150°C , 72h 的固溶淬水处理。

压缩试样从固溶处理钮扣锭中切取, 试样尺寸为 $4\times 4\times 8\text{mm}^3$, 压缩试验在 MTS-810 型试验机上进行, 位移速率为 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 。用光学显微镜和扫描电镜观察

1993 年 3 月 29 日收到, 1993 年 11 月 22 日收到修改稿

教委博士后科学基金资助课题

压缩变形试样显微组织。所有金相试样在机械磨制后经电解抛光, 电解液为 60% 硫酸加 40% 蒸馏水, 金相浸蚀液为 30% 盐酸水溶液加少量硫酸铜。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 为 Ni-Al-Fe-B 合金经 1 150℃, 72h 固溶淬火处理后的显微组织, X 射线衍射结果表明: 图中基体为 β 相(B_2 结构), 不规则块状第二相为 γ 相。图像分析测得 γ 相的含量为 22%。显微硬度测试结果表明: γ 相硬度比基体 β 相低。

2.2 γ 相的变形行为

图 2 为典型的 Ni-Al-Fe-B 合金形状记忆效应曲线。当应力达到一定值 σ_1 (应变量 $\varepsilon_1 = 1.1\%$) 时, 合金开始屈服, 在试样表面基体区域观察到形变导致的浮凸现象。试样经浸蚀后观察, β 基体中出现了应力诱发马氏体(见图 3(a))并在极少数 γ 相表面上出现了少量滑移线(见图 3(b)), 这些滑移线经再次抛光和浸蚀后完全消失, 表明有 γ 相以滑移方

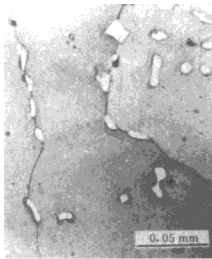


图 1 1 150℃, 72h 固溶淬火后显微组织

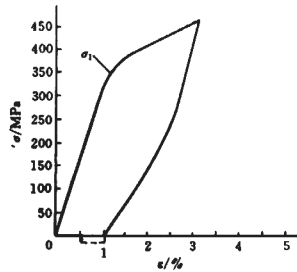


图 2 压缩-卸载-加热曲线

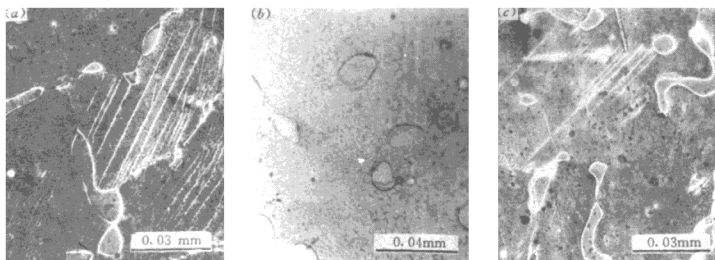


图 3 压缩变形显微组织

(a) 应力诱发马氏体; (b) γ 相表面滑移线; (c) 残留的马氏体

式参与协调变形,但屈服初期其数量极少。随着应变增大,应力诱发马氏体量增多,参与协调变形的 γ 相数量随之增多。

当应变 ε 为3.1%时卸载,应变逐渐恢复至1.05%(见图2),卸载应力-应变曲线呈明显的弧形,不仅有线性应变恢复,而且有伴随着应力诱发马氏体逆转变的非线性应变恢复。试样卸载后加热,其应变进一步得到恢复(见图2中虚线所示),呈现形状记忆效应。此结果与典型的TiNi和Cu基形状记忆合金的变形行为一致^[4]。金相观察发现,试样加热至应变不再恢复时,其显微组织中仍有少量应力诱发马氏体残留(见图3(c)),表明 γ 相参与协调变形使部分应力诱发马氏体发生了稳定化。由此可见,试样经压缩-卸载-加热后,残余应变 $\varepsilon_{残}$ 是由 γ 相变形引起的永久变形和部分应力诱发马氏体残留引起的塑性变形两部分组成。因此,试样的形状记忆恢复率应为 $\eta = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{残}}{\varepsilon}$ 。图4(a)为Ni-Al-Fe-B合金的残余应变($\varepsilon_{残}$)随应变 ε 的变化规律。 $\varepsilon_{残}$ 随应变 ε 增加呈阶段性增长趋势,应变 ε 较小时, $\varepsilon_{残}$ 增加趋势较小;当应变 ε 增至6%后, $\varepsilon_{残}$ 开始急骤增长。经金相组织观察应变达6%时, γ 相开始全面屈服,使塑性变形量迅速增加,因而 $\varepsilon_{残}$ 急骤增长。

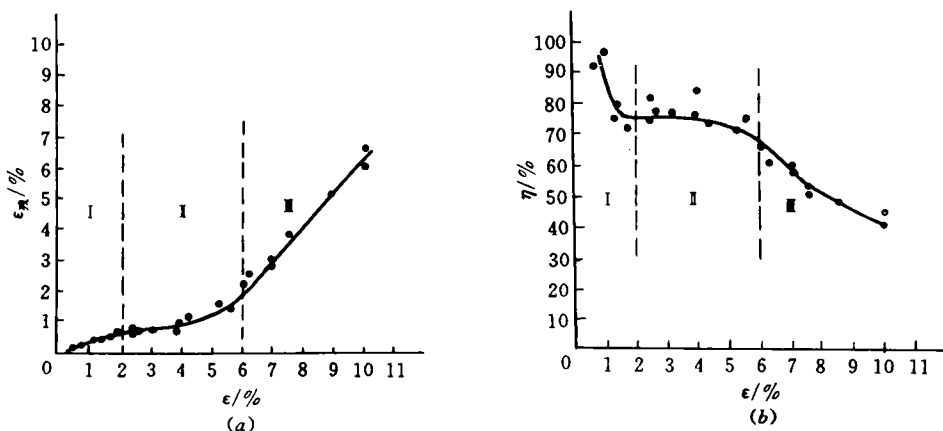


图4 残余应变 $\varepsilon_{残}$ 、形状记忆恢复率 η 与应变 ε 之间关系

(a) $\varepsilon_{残}$ - ε 关系; (b) η - ε 关系

2.3 γ 相变形对形状记忆效应的影响

图4(b)为Ni-Al-Fe-B合金的形状记忆恢复率(η)随应变(ε)的变化规律。比较图4(a)和图4(b)可见, η 下降趋势与 $\varepsilon_{残}$ 增长趋势有着明显的对应关系。在应力诱发马氏体相变初期阶段,应变较小($\varepsilon < 2\%$),有少数 γ 相参与协调变形,其数量随应变增加而增大; γ 相塑性变形使部分应力诱发马氏体发生了稳定化(见图3(c)),两者共同作用使 $\varepsilon_{残}$ 随着应变增加而增长(见图4(a)第I区),结果导致 η 明显地下降。当应变进一步增加($\varepsilon > 2\%$), $\varepsilon_{残}$ 增长趋势变小,出现了近似平台,此时 η 下降趋势也变小(见图4(a)和图4(b)第II区)。此结果表明,随着应变增加应力诱发马氏体量增多, γ 相参与协调变形的作用相对减弱,部分协调变形将由应力诱发马氏体来完成。因此,随应变增加, $\varepsilon_{残}$ 增长

的趋势变小, 相应的 η 下降趋势也变小。当应变 ε 增至 6% 后, γ 相开始全面屈服, 塑性变形量迅速增加; 此外, γ 相全面屈服将使更多的应力诱发马氏体发生稳定化, 这两方面因素共同作用结果使 $\varepsilon_{\text{残}}$ 急骤增长, 从而导致 η 急骤下降。Ni-Al-Fe-B 合金形状记忆恢复率 η 随着应变 ε 的变化规律与典型的 TiNi(或 Cu 基)合金不同, 后者的 η 一般在应变达到某个临界值后才开始下降, 此临界应变称为最大可恢复应变^[4]。TiNi(或 Cu 基)合金为单相 β 组织; 而 Ni-Al-Fe-B 合金具有 ($\beta+\gamma$) 双相组织, 其形状记忆恢复率 η 随着应变 ε 的变化呈阶段性下降趋势是由 γ 相变形行为所决定的。在较小应变时, 由于 γ 相参与协调变形, 其应变不可能完全恢复, 因此, 这种合金在一般情况下不可能获得 100% 的形状记忆恢复率。由于 Ni-Al-Fe-B 合金的形状记忆性能在应变达 6% 后急聚恶化, 其最佳的应变 ε 应控制在 2%~6% 范围。由图 4(b) 可见, 应变 ε 为 4% 时, 可获得 75% 的形状记忆恢复率, 对于实际应用具有重要价值。

3 结论

(1) Ni-Al-Fe-B 合金在应力诱发马氏体相变初期, γ 相以滑移方式参与协调变形, 在一般情况下, 不可能获得完全的形状记忆效应。

(2) Ni-Al-Fe-B 合金的形状记忆恢复率 η 随着应变 ε 增加呈阶段性下降趋势。在应变达 6% 后, 合金的形状记忆效应急骤下降。当应变控制在 4%, 合金可获得 75% 的形状记忆恢复率。

参 考 文 献

- 1 Darolia R. NiAl Alloy for High-temperature structural applications. JOM, 1991; (5): 44-50
- 2 Enami K, Nenno S. Memory effect in Ni-36.8at%Al martensite. Metall Trans, 1971; (2): 1487-1490
- 3 Ishida K, Kainuma R, Ueno N, Nishizawa T. Ductility enhancement in NiAl (B2)-base alloys by microstructure control. Metall Trans A, 1991; 22(2): 441-446
- 4 Krishnan R V, Delaey L, Tas H, Warlimont H. Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. J Mater Sci, 1974; 9: 1536-1544