

微量钪对 TiAl 基合金高温力学性能的影响^①

尹松波 黄伯云 贺跃辉 尹志民[†]

(中南工业大学粉末冶金研究所, †材料系, 长沙 410083)

摘要 研究了添加微量钪对具有全层片组织和双态组织的 TiAl 基合金在 900 °C 的高温力学性能的影响。结果表明, 微量 Sc 可以显著提高 TiAl 基合金的高温屈服强度及抗压强度。使用金相显微镜和透射电子显微镜详细地分析了试样高温压缩变形前后的显微组织及其变化, 在此基础上探讨了合金高温下的塑性变形行为及其微合金化强化机理。

关键词 TiAl 基合金 微量钪 显微组织 高温强度

中图分类号 TG146.2

TiAl 基金属间化合物, 由于其密度低、熔点高、弹性模量高和高温强度好等特点, 被认为是极具应用开发前景的新一代高温结构材料^[1]。组织的复合化是提高 TiAl 高温强度的一个重要途径, 如在 TiAl 中弥散分布碳化物第二相^[2]、或添加少量 Si 形成 Ti_5Si_3 粒子^[3]等, 可以提高 TiAl 金属间化合物的高温强度。

本研究在略富 Ti 的两种 TiAl 基合金中添加微量钪, 在分析了含钪析出物的形态、分布和对合金高温变形行为影响的基础上, 探讨了合金的微合金化强化机理。

1 实验方法

研究用合金的成分(摩尔分数, %)为 Ti-43Al, Ti-43Al-0.4Sc, Ti-48Al, Ti-48Al-0.4Sc, 微量 Sc 以 Al-Sc 中间合金形式加入。该合金采用氩气保护非自耗电弧熔炼而成。为了保证成分均匀, 合金被反复熔炼 4 遍。然后, 对含 Al 为 43% 的两组样品施以 1050 °C/48 h 的均匀化退火, 对含 Al 为 48% 的两组样品则在 1250 °C

保温 6 h 后再置入 900 °C 炉中随炉冷却。

采用电火花切割制得高温压缩变形试样, 尺寸为 $d 6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。高温压缩变形在 Gellble-1500 热模拟机上进行, 试验温度取 900 °C, 压缩时压头移动速度为 0.5 mm/min, 试验气氛为大气。金相试样按常规方法制得, 浸蚀剂为 1% (体积分数) HF + 1% HNO₃ + 98% H₂O, 金相分析在 Nephos- II 型光学显微镜上进行。透射电镜薄膜样品采用双喷电解减薄技术制得。电解液成分为 5% 高氯酸 + 95% 甲醇, 操作条件为 -30 °C, 40~50 mA, 20 V。薄膜样品的分析观察在 H-800 型透射电镜上进行, 操作电压为 200 kV。

2 实验结果

2.1 合金的高温压缩力学性能

四组研究合金在 900 °C 高温压缩的典型载荷一位移曲线见图 1。

从图中可以经测量计算得到合金的屈服强度 $\sigma_{0.2}$, 最大抗压强度 σ_b 以及屈强比。四组合

① 收稿日期: 1997-12-23; 修回日期: 1998-10-20 尹松波, 男, 24 岁, 硕士

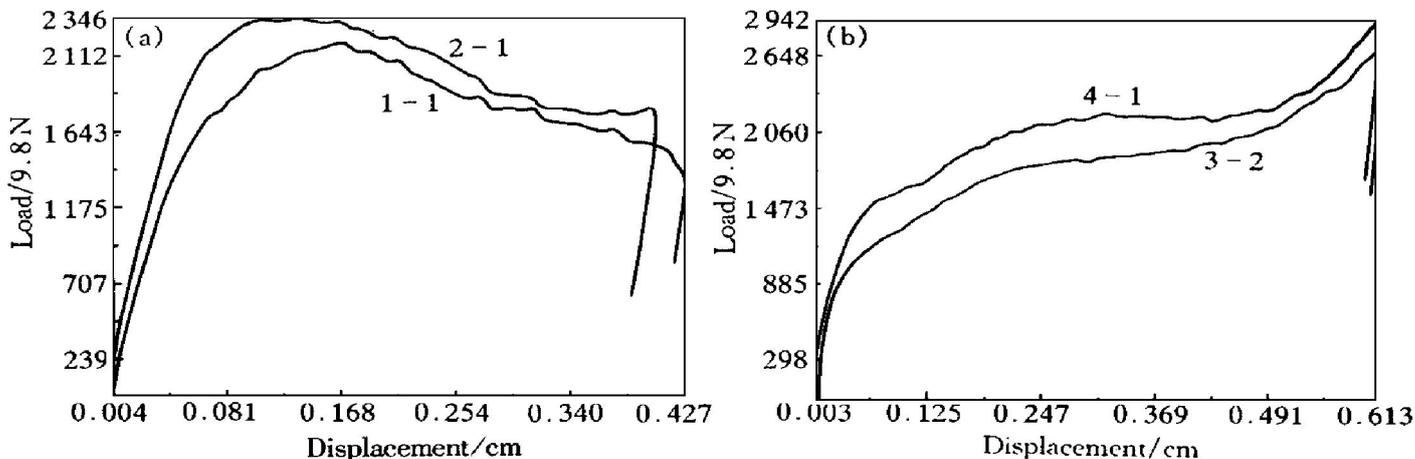


图 1 合金在900 °C下高温压缩的典型载荷-位移曲线

Fig. 1 Typical compression load-displacement curve of alloys tested at 900 °C

1-1—Ti-43Al; 2-1—Ti-43Al+0.4Sc; 3-2—Ti-48Al; 4-1—Ti-48Al+0.4Sc

金实验值的平均结果列于表 1。

表 1 TiAl 基合金 900 °C 高温压缩力学性能

Table 1 Mechanical properties of TiAl base alloys compressively tested at 900 °C

Alloy	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$ (%)
Ti-43Al	504	753	0.67
Ti-43Al+0.4Sc	629	863	0.77
Ti-48Al	304	961	0.32
Ti-48Al+0.4Sc	424	1041	0.44

表 1 的结果表明，在 Ti-43Al 和 Ti-48Al 基合金中添加微量钪，均可以大幅度提高 TiAl 基合金的高温屈服强度，其提高幅度均在 110 MPa 以上。还可以看出，Ti-43Al 合金有较高的高温强度，而 Ti-48Al 合金则有较好的延性。

2.2 合金的显微组织

(1) 未经变形的合金的显微组织

研究用合金经最终热处理所得的典型金相组织如图 2 所示。可以看到，经过 1050 °C/48 h 均匀化退火，Ti-43Al 为基的合金均呈现出全层片组织特征；经过 1250 °C/6 h 固溶处理的 Ti-48Al 合金则获得了 γ 晶粒+ α_2/γ 层片晶团的双态组织。

透射电镜下合金的高倍显微图象见图 3，由图可见 TiAl 基合金层片状晶团的形貌以及晶团之间锯齿状晶界；从图 3(c) 中还可以观察

到添加微量 Sc 的合金中有许多薄片状的析出相，尺寸约为 0.2~1 μm ，它们大部分分布在 γ/α_2 相界面上并沿层片方向排列，少部分则分布在 γ 相层片内。能谱分析结果表明，这种析出相为含 Ti, Al, Sc 三种元素的化合物，成分大体上为 $\text{Ti}_3(\text{Al}, \text{Sc})$ 。

(2) 经 900 °C 高温压缩变形的合金的显微组织

TiAl 基合金 900 °C 高温压缩变形后的典型组织见图 4 和图 5。

结果表明，第一，这些合金经高温压缩变形后，其层片状组织发生了弯曲变形，特别是靠近层片状共析晶团的边界区域变形尤其严重，邻接的边界区域可见到尺寸约为 0.3 μm 左右的等轴晶粒(图 4)；第二，合金变形后， γ 相与 α_2 相的宽度比减小，说明 γ 相变形程度大，而且宽片状 γ 相内位错密度较高，而窄片状组织内位错密度较低，且在层片状晶团内部发现大量强滑移带，这些滑移带与层片相边界均成一定的角度取向(图 5)。

3 分析与讨论

3.1 TiAl 基合金高温压缩变形后层片状晶团间出现等轴晶的原因

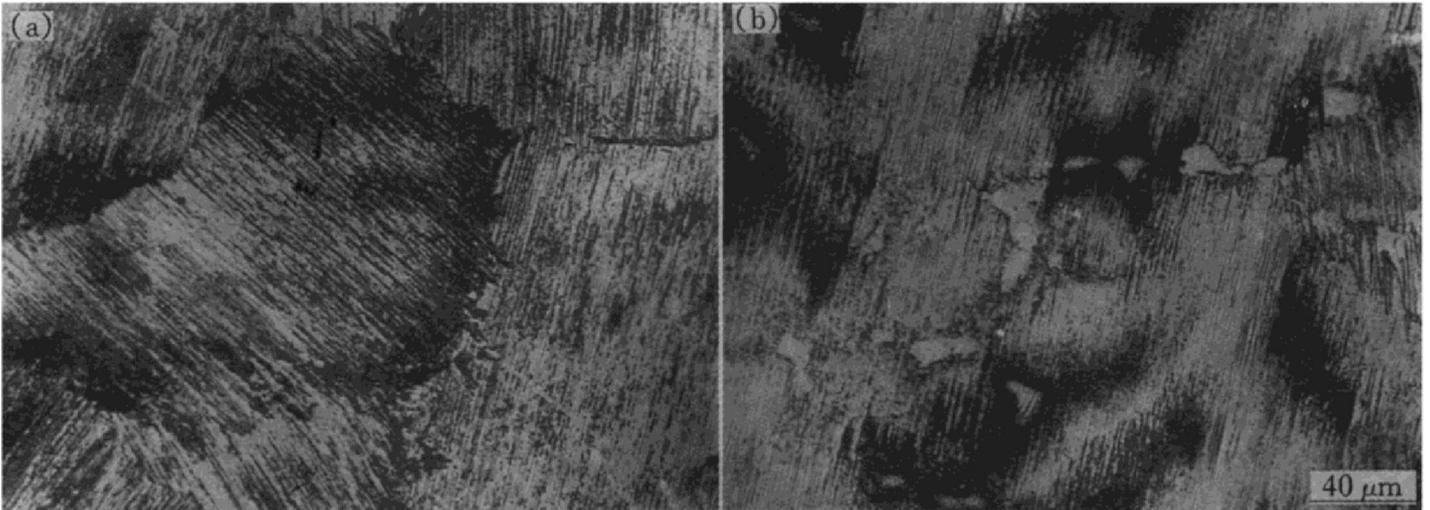


图2 研究合金的金相组织

Fig. 2 Optical microstructures

- (a) Ti-43Al base alloy, 1050 °C/48 h annealed, full lamellar structure;
 (b) Ti-48Al base alloy, 1250 °C/6 h annealed and then furnace cooled at 900 °C, duplex structure

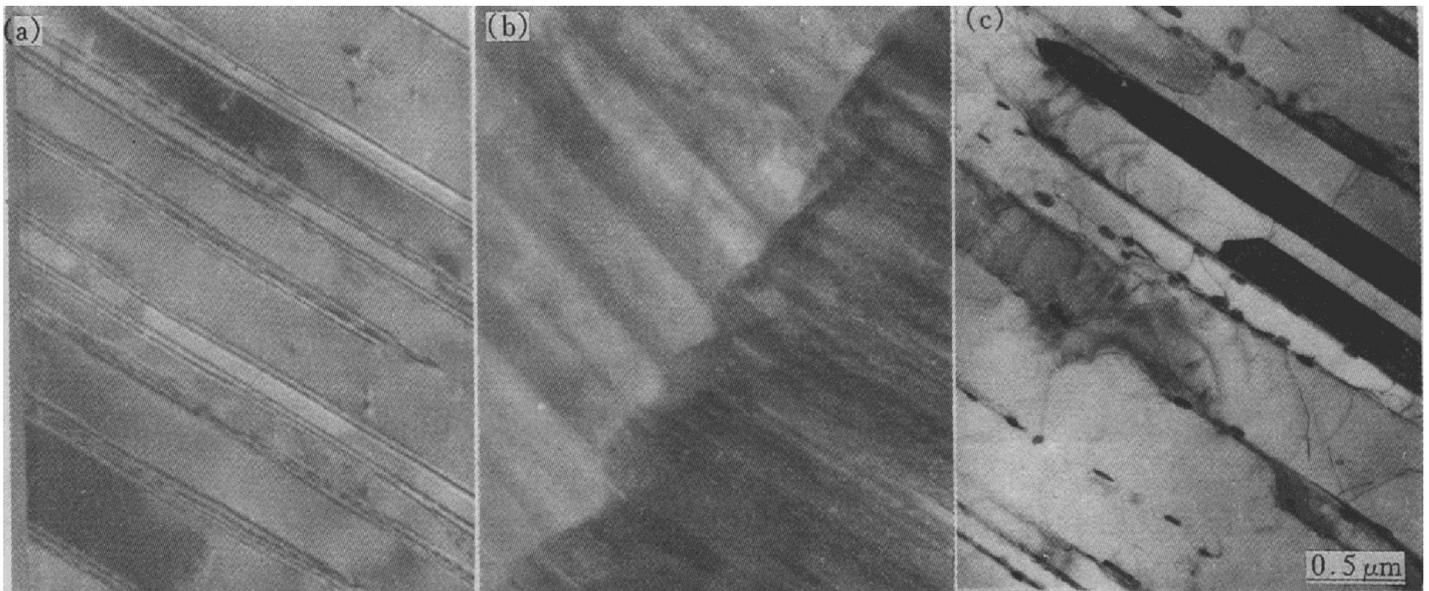


图3 添加微量 Sc 引起的 TiAl 基合金显微组织变化

Fig. 3 Microstructure variation of TiAl base alloy due to adding of Sc

- (a), (b) Ti-48Al alloy, lamellar structure (a) and zigzag boundary (b)
 (c) Ti-48Al-0.4Sc , precipitated at lamellar boundaries

文献报道^[5], 根据层片方向与外力轴向夹角的不同, 可以将层片组织的变形分为两种模式: 一种是易变形模式, 此时层片与外力轴成 $30^\circ \sim 75^\circ$ 的角度, 材料变形时表现出流变应力低且塑性好; 另一种是难变形模式, 它发生在层片晶团方向与外力轴平行或垂直的情况下, 材料变形时流变应力高而塑性差。这一事实对

于 TiAl 合金的高温力学行为有很大影响。当某些层片晶团处于难滑移取向时, 在变形过程中很难发生大量的位错滑移, 大量的位错被塞积, 在高的应力作用下, 层片通过晶格弯曲变形来调节层片取向, 使之接近易滑移取向(图4)。另一方面, 由于处于不同取向的层片晶团之间存在较大的力学性能差异, 必然会造成程

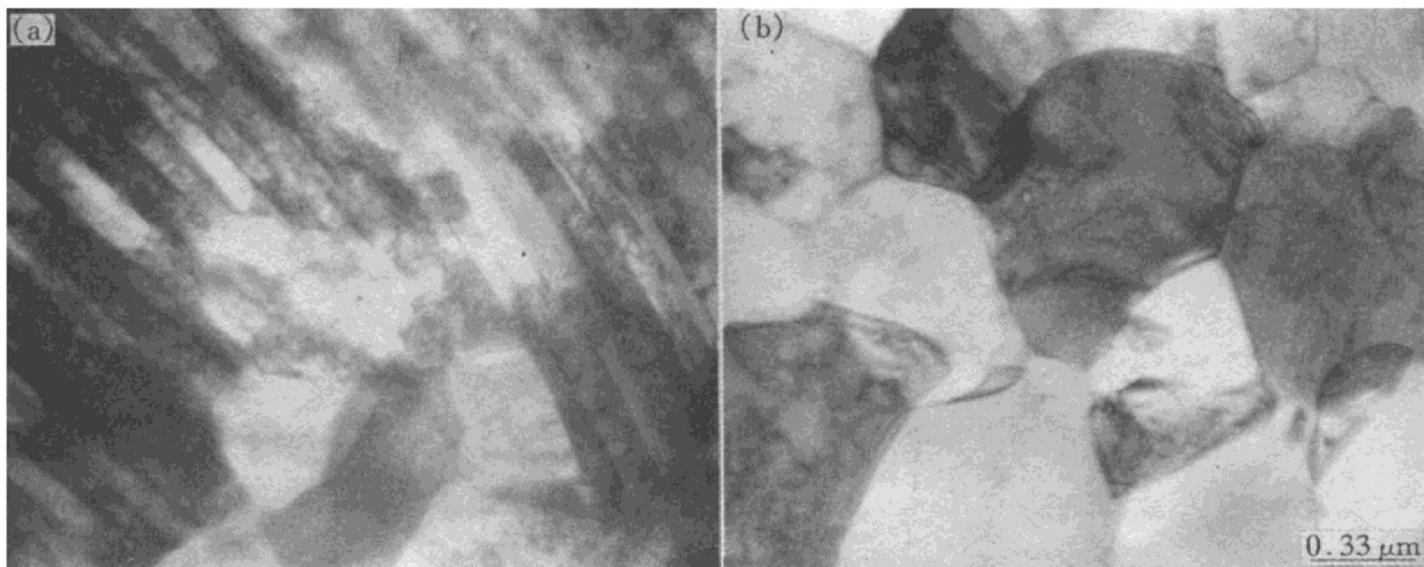


图4 TiAl基合金 900 °C高温压缩后的显微组织(以 Ti-48Al 为例)

Fig. 4 Microstructures of Ti-48Al base alloys after 900 °C compression

(a) —Bent lamellar and recrystallization grains; (b) —Recrystallization grains

度不同的变形不协调性，加上层片晶团的晶界往往呈啮合状的锯齿状晶界(图3)，这种界面结合能力很强的晶界不利于高温下层片晶团之间的晶界滑移和转动。这样，合金在高温下进行大变形量变形的同时，在高温热激活的作用下，容易在晶团的界面上发生动态再结晶以释放界面的变形储能。这可能是所研究的4种合金高温压缩变形后层片状晶团边界出现等轴晶区的主要原因。

3.2 不同铝含量 TiAl 基合金 900 °C 高温压缩变形屈服应力产生差异的原因

相图和金相实验结果均表明，所研究的合金室温下的显微组织分为2种，Ti-43Al 基合金为 γ/α_2 全层片状组织，Ti-48Al 为 γ 初晶和 γ/α_2 层片混合的双态组织。透射电镜观察分析的结果表明，900 °C 高温下 γ 相容易变形，说明变形抗力较低。Ti-48Al 基合金中 γ 相相对体积百分数较多，按照复相合金屈服强度理论，高温下合金的屈服强度会较低，屈服比也较低，而热塑性会较大，这就是表1所示的结果。

3.3 微量 Sc 在 TiAl 基合金中的存在形式及其对 TiAl 基合金高温压缩变形行为的影响

在 Ti-43Al 和 Ti-48Al 两种成份的 TiAl 合金中加入 0.4% 的钪，均引起合金层片组织中含钪化合物的析出。这种含钪化合物呈薄片状，大部分平行于层片方向分布在层片界面上，少部分分布在 γ 相层片内。大量的研究表明^[6-8]，在双相层片型 TiAl 合金中， α_2/γ 相界面对于合金室温和高温变形都有重要影响。高温变形时，若层片组织取向有利，层片组织在切应力作用下将沿层片界面发生滑移^[6]，成为高温下 TiAl 合金的一种重要变形方式。本研究所采用的合金组织，无论是双态还是全层片组织，均存在大量的层片晶团。添加微量钪，在 α_2/γ 界面上分布着较多的含钪析出物，这势必对于高温下层片之间的相对滑移起阻碍作用，从而增大合金的高温变形抗力。另一方面，在实验中我们观察到合金中 γ 板条内部及等轴 γ 晶粒内部存在着大量位错，标志着位错运动是合金高温下变形的的主要方式。这些变形亚结构同 γ 相内的含钪析出物之间存在强烈的交互作用(图5(b))，它们对合金 γ 板条内部变形起阻碍作用。

作者认为，上述两个方面的综合作用，都是微量钪使 TiAl 基合金高温屈服强度明显提高的主要原因。

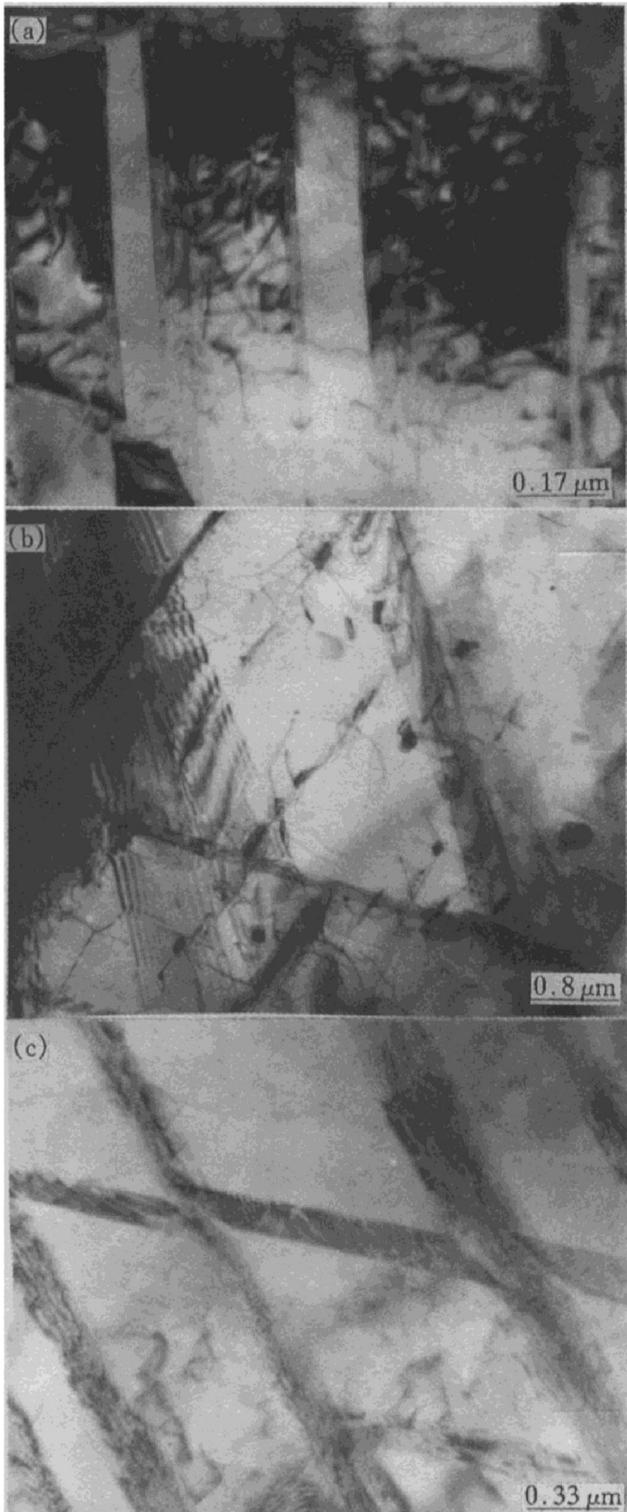


图5 含微量 Sc 的 TiAl 基合金 900 °C 高温压缩变形后的显微组织(以 Ti-48Al-0.4Sc 为例)

Fig. 5 Deformation microstructures of Ti-48Al-0.4Sc alloy deformed at 900 °C

(a) —Deformed subgrain structure;

(b) —Interaction of dislocation and particles containing Sc;

(c) —Intensive slip band within lamellar structure

4 结论

(1) 微量钪添加到 TiAl 基合金中, 能显著提高合金高温压缩变形时的屈服强度, 提高的幅度均在 110 MPa 以上。

(2) 900 °C 高温压缩变形, 所研究的合金的变形机制主要是位错滑移模式。在层片状组织区域, 可见到强滑移带切割层片状晶团。某些层片状晶团边界上可见到等轴晶区, 这可能是局部发生了动态再结晶的结果。

(3) 高温压缩变形时, γ 相容易变形, Ti-48Al 基合金为 $\gamma + \gamma/\alpha_2$ 双态组织, γ 相体积百分数较高, 变形抗力较低, 这种合金的高温屈服强度较 Ti-43Al 基合金稍低, 而热塑性则较好。

(4) 微量钪在 TiAl 基合金中主要以 $Ti_3(Al, Sc)$ 化合物形式存在, 这种化合物热稳定性好, 它们大部分分布在层片边界, 小部分分布在 γ 相层片内, 它们强烈阻碍 γ 相的高温塑性变形, 是含微量钪的 TiAl 基合金屈服强度显著提高的主要原因。

REFERENCES

- 1 Li Psitt H A. MRS Symp Proc, 1985, 39: 351.
- 2 结城勇, 天野宏, 鱼住稔. 日本金属学会志, 1994, 58: 564.
- 3 Mitao S, Tsugamas. In: Proc 2nd Japan Inter Sampe Symp, Vol. 1. 1991, 185.
- 4 He L L and Ye H Q. Philos Mag A, 1993, 67: 1161.
- 5 Fujiwarw T, Nakamura A and Hosomi M. Philos Mag A, 1990, 60: 591.
- 6 Zhao L R and Tangri K. Acta Metall Mater, 1991, 39: 2209.
- 7 He Yuehui(贺跃辉), Huang Baiyun(黄伯云), Zhou Kecao(周科朝) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(1): 75.
- 8 Chen Mingwei(陈明伟) and Lin Dongliang(林栋

梁). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 1994,

30: A416.

INFLUENCE OF MINOR Sc ADDITION ON HIGH TEMPERATURE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF TiAl BASE ALLOYS

Yin Songbo, Huang Baiyun, He Yuehui and Yin Zhimin

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT Effect of minor Sc addition on the microstructure and high temperature mechanical properties of Ti-43Al and Ti-48Al alloys was investigated. It was shown that addition of 0.4% Sc may remarkably increase the high temperature strength of the alloys at 900 °C. The microstructure of the samples both before and after compression test at 900 °C were analyzed with OM and TEM in details. Plastic deformation behaviour and strengthening mechanism of the studied alloys at high temperature were discussed.

Key words TiAl intermetallics minor Sc addition microstructure high temperature strength

(编辑 朱忠国)