

加锰钛铝金属间化合物的塑性变形^①

黄伯云^② 曲选辉^③ 温金海^④ 雷长明^⑤

(中南工业大学)

摘 要

本研究讨论了含Mn 1.5~2.0 wt.-%的TiAl合金的位错特性,并将这些特性与原子比接近50:50的二元钛铝合金进行了比较。实验结果表明:由于第三元素的添加,使TiAl合金中 $a/6[112]$ 型不全位错的钉扎效应大大减弱,于是 $a[101]$ 和 $a/2[112]$ 型超位错的运动和孪生过程对塑性变形起重要作用,导致TiAl合金的延性增加。此外还用热挤压和热锻对Mn元素增塑TiAl合金的可加工性进行了评估。

关键词: TiAl合金, 金属间化合物, 塑性变形, 位错结构, 层错带, 挤压, 锻造。

近年来,人类对高温金属间化合物产生了极大的兴趣^[1]。其中最引人注目的是关于钛铝合金(TiAl)的研究。该类材料将主要用作航天飞机蒙皮材料和高温推进系统构件等^[2]。如同其它高温金属间化合物一样,TiAl合金具有很好的高温强度和抗蠕变性能,尤其是它的低比重和高比强度。这些特点对航空器件有着十分重要的意义。但其室温脆性却严重地阻碍了它的应用^[3, 4]。

添加少量Mn能改善TiAl合金的室温延性,前期已有报导^[5]。本文则主要研究Mn对TiAl合金塑性变形的影响,重点是就二元TiAl合金和加Mn TiAl合金室温塑性改善的几种机制及可加工性进行讨论。

1 实验过程

TiAl及TiAl+2%Mn合金锭是在非自耗真空电弧炉中,于氩气保护下熔炼的。试样经1100℃退火24h,退火后进行力学性能检

测,用线切割机从中取切 2.9×0.4 mm薄园片。将薄园片磨成0.1 mm厚后,用双喷技术制取透射电镜样品。再在H-800电子显微镜上进行观察。操作电压是200 kV。

为了进行热挤压,加Mn合金试样经线切割成 $d 25$ mm的园棒,用碳钢进行包套。热锻样品为 $d 6$ mm的小园棒,亦用碳钢包套后进行热锻。

2 结果与讨论

2.1 变形亚结构

对二元TiAl合金轻微变形后,可观察到具有柏氏矢量为 $a/2[110]$ 的正常位错。随着变形量的增加,这些位错以相互缠结的网状出现并形成胞状结构(见图1),不会对塑性变形产生重大作用。随着变形量的进一步增加,则出现大量层错偶极子,并且这种层错偶极子的密度会随着塑性变形量的增加而增加(见图2)。

①本文得到国家“86.3”高新技术的资助,于1991年5月20日收到。

②教授; ③讲师; ④助研; ⑤助工

在此二元 TiAl 合金相同的变形条件下, TiAl+Mn 三元合金的位错亚结构有三个显著不同特征: 其一是没有观察到层错偶极子; 其二是发现有大量的堆垛层错带(见图 3); 其三是大量的孪晶(见图 4)。

Hug 等人^[6]研究了超位错的详细分解情况, 其中包括 Ti54Al 合金中的 $[101]$ 型和 $a/2[112]$ 型。他们认为这些超位错形成层错偶极子, 而这些层错偶极子的层错是外禀层错, 且其边界是 $a/6[112]$ 型不全位错。然而我们的观察和分析表明, 在 Ti50Al 合金中所观察到的层错偶极子, 是由 $a/6[112]$ 型不全位错包围的内禀层错^[7], 并且所有观察到的层错偶极子都是在 $\{111\}$ 滑移面上形成的。

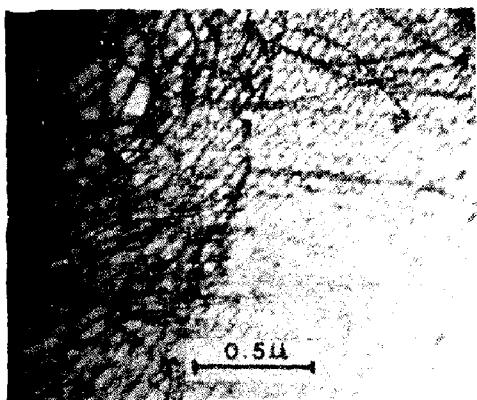


图 1 变形的 TiAl 合金的位错网结构

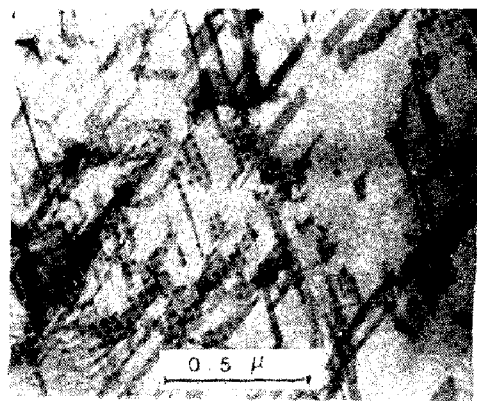


图 2 变形后的二元 TiAl 合金的层错偶极子

一些前期研究工作认为, 单相 TiAl 室温脆性是由 $[011]$ 和 $[101]$ 型超位错的某些部分被一种尚不清楚的机制钉扎造成的。这种钉扎形成高密度的层错偶极子, 包围层错的是 $1/6[112]$ 型不全位错^[3]。后来发现, 在大约 700℃

左右被钉扎的超位错克服其钉扎障碍, 并且层错偶极子消失, 于是呈现出明显的塑性^[4]。很显然, TiAl 金属间化合物的塑性变形特性是与层错偶极子紧密相关的。

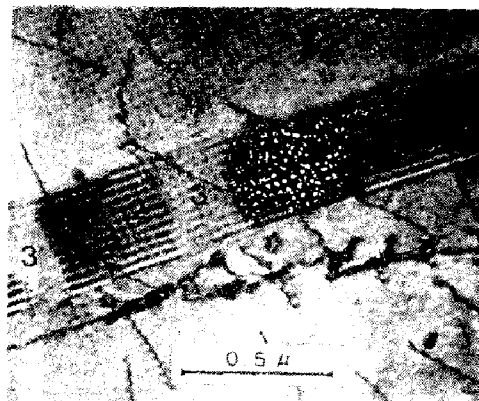


图 3 室温变形的 TiAl 合金中的堆垛层错带

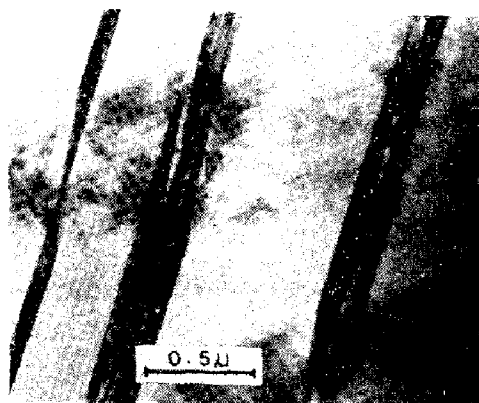


图 4 TiAl+Mn 合金中变形孪晶的 TiAl 图象

正如上述实验所指出的, 少量 Mn 的添加可使层错偶极子消失。造成这一现象的原因, 主要是由于 Mn 的添加消除了室温时对 $a/6[112]$ 不全位错的钉扎效应, 从而增加了超位错的可动性, 使塑性得到了改善。

从堆垛层错带的衬度特征看, 它们是属于相互重迭层错^[8]。当相互平行的 $\{111\}$ 面上彼此近邻的层错相互重迭时, 由于相邻面上两个层错堆垛时的相角差是 $\pm 2/3\pi$, 这就导致衍射条纹发生位移, (见图 3 中的 2 处)由于 $\alpha = 3n \times 2/3\pi$, 所以图 3 的每一个 3 处显示无衬度。这些相互迭盖的堆垛层错实际上是变形孪晶的胚胎, 它们是由螺旋型孪生位错源开动时形成的。

Mn 的加入不仅降低了 TiAl 合金的堆垛

层错能, 同时, 增加了 $a/6[112]$ 不全位错的可动性。这些 $a/6[112]$ 型位错也是孪晶位错。因此, 孪晶对变形起到了重要作用, 对塑性增加也作出了显著贡献。

2.2 加锰 TiAl 合金的加工性

通过加入 2wt.-% 左右的 Mn 可使 TiAl 合金的室温塑性得到明显的改善。为了考查加 Mn 合金的可加工性, 我们对 TiAl+2%Mn 合金进行了高温热挤压和热锻实验。图 5(a) 显示了具有不同挤压比的棒材。实验发现, 在挤压温度为 1100℃ 时, 选择合适的挤压速度, 在挤压比小于 6 时, 能够得到没有明显裂纹的完好挤压样品。图 6a 是该合金挤压件的显微组织。

图 5b 是一组热锻样品的实物照片。实验

表明在 1100℃ 下热锻可以获得变形量为 28% 而无表面裂纹的样品。图 6b 显示了一个锻造样品的纵截面的显微组织。

从图 6 的显微组织可以看出, 经热挤压和热锻后 TiAl+Mn 合金的晶粒明显被拉长了。此外, 还可以看到部分回复和再结晶组织。

3 结论

1 从微观亚结构来看, 添加 Mn 改善塑性的原因是由于增加了 $a/6[112]$ 不全位错和超位错的可动性及孪生过程所致;

2 添加适量 Mn 的铸态合金, 采用合适的加工参数, 可以进行热挤压和热锻。

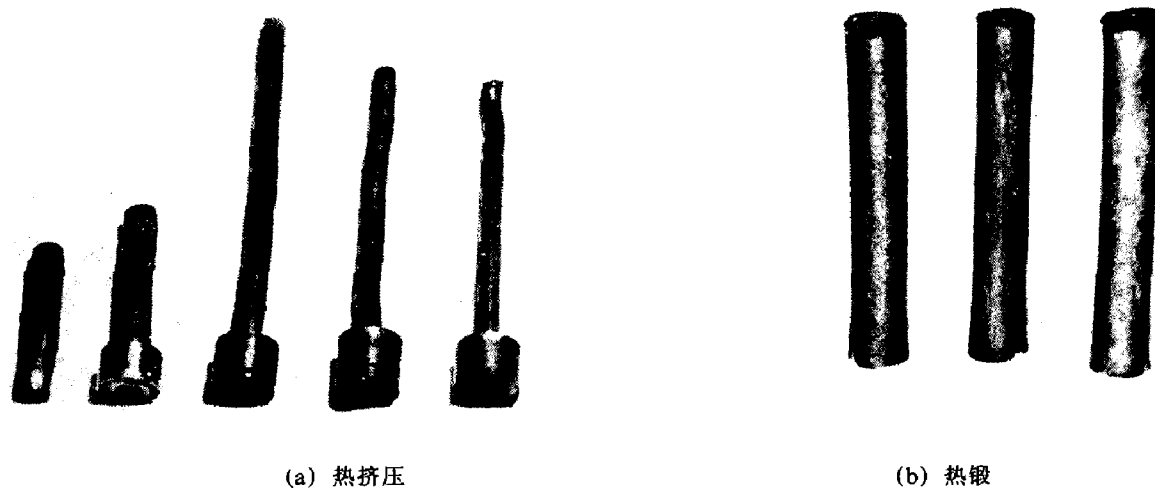


图 5 经热挤压和热锻后的 TiAl+Mn 合金棒

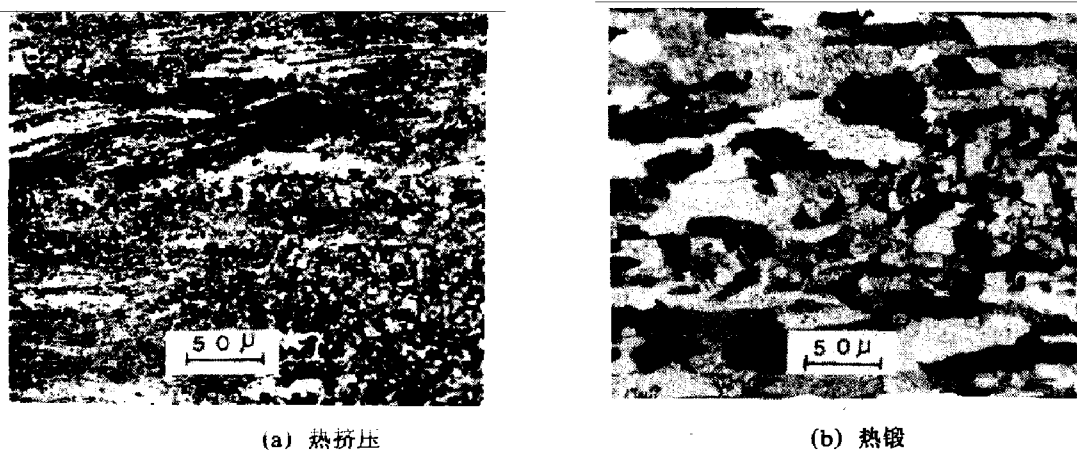


图 6 TiAl+Mn 合金样品经热挤压和热锻后的纵向显微组织

参考文献

- 1 Wenstendorp F F. Solid State Communications, 1970, 8: 139
- 2 周寿增等. 稀土永磁材料及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1990, 236
- 3 Den Broeder F J A, Buschow K H J. J. less-Common

Metals, 1972, 29: 65

- 4 Smeggile J G *et al.* In: AIP Conf. Proc., 1973, 1144
- 5 den Broeder F J A, *et al.* J. Appl. Phys., 1976, 47: 2688
- 6 Fidler J *et al.* J. M. M. M., 1980, 15-18: 1461
- 7 Pan Shuming (潘树明), *et al.* In: Proc. 7th International REPM Workshop, 1983.291

(上接 P55)

参考文献

- 1 Sauthoff G Z. Metallkde, 1989, 80: 337
- 2 Ronald T M F. Adv. Mater. Proc., 1989, 135: 39
- 3 Shechtman D, Blackburn M J, Lipsitt H A. Metall. Trans., 1974, 5A: 1373
- 4 Lipsitt H A, shechtman D, Schafrik R E. Metall. Trans., 1975, 6A: 1991
- 5 Qu X H, Huang B Y, Lu H B, Huang P Y. In: Proceedings of C-MRS International Symposium, Vol. 2, 1990, 737

- 6 Hug G, Loiseau A, Losalmon A. Phil. Mag., 1986, 54A: 47
- 7 Qu X H, Huang B Y, Qian Y, Kong X Y, Lu H B, Huang P Y. In: Proceedings of Sixth JIM International Symposium on Intermetallic Compounds-Structure and Mechanical properties, 1991, Japan, 797
- 8 Hirsch P, Howie A, Nicholson R B, Pashly D W, Whelan M I. Electron Microscopy of Thin Crystals. Huntington, New York: Robert E Krieger Publishing Company, 1977
- 9 Cottrell A H, Bilby B A. Phil. mag., 1951, 42: 329