

文章编号: 1000-324X(2002)06-1306-05

Mo 添加对 Ni_3Al -TiC 润湿特性的影响机制研究

沈 强, 张联盟, 涂 溶

(武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 采用 2AP-LEITZ 高温显微镜对 TiC- Ni_3Al 的润湿接触角进行了实验测定, 着重探讨了 Ni_3Al 对 TiC 的润湿特性以及 Ni_3Al 中添加少量 Mo 的影响机制. 结果表明, TiC 与 Ni_3Al 之间具有良好的润湿性能. 5wt%Mo 的添加使 Ni_3Al 向 TiC 基板浸渗的深度增大, 并与 TiC 颗粒发生固溶反应置换出部分 Ti, 在其周围形成一个含 Mo 的壳层. 在这个壳层里, Ti、Mo 进一步与 Ni_3Al 固溶, 这些反应降低了液-固表面张力, 导致了润湿接触角的下降, 从而改善了 TiC- Ni_3Al 的润湿性.

关 键 词: Ni_3Al -TiC; Mo; 润湿特性; 影响机制

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A

1 引言

陶瓷增强的金属基复合材料即保持了金属良好的塑性、韧性和可加工性, 也具有陶瓷的高硬度、高弹性模量等, 并且材料的使用温度得到了明显提高. 其中, Ni_3Al 金属间化合物由于其在 900°C 附近具有独特的高温强度和高温抗氧化特性以及在脆性问题研究^[1~3]上的突破, 被认为是金属基复合材料中金属相的优选材料. 已有研究表明^[4~8], TiC 陶瓷增强的 Ni_3Al 基复合材料的屈服强度优于 Ni_3Al 基体, 强度值在一定的温度范围内随着温度的上升而升高, 表现出优异的常、高温力学性能. 众所周知, 对于以开发结构材料为目的的金属-陶瓷复合材料来说, 金属相与陶瓷相之间润湿特性的好坏十分重要, 因为它直接影响复合材料中的界面接合与使用性能. 本文着重于测定和探讨 Ni_3Al 对 TiC 的润湿特性以及 Mo 添加的影响机制.

2 实验

使用平均粒度为 $5\mu\text{m}$ 的 TiC 粉末, 在 1800°C、30MPa、60min 条件下热压烧结得到纯 TiC 基板, 经切割、研磨、抛光后备用. Ni_3Al 的平均粒度为 $6.3\mu\text{m}$, 将 Ni_3Al 粉末及掺 5wt% Mo 的 Ni_3Al 粉末分别压制成 $\phi 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 圆柱体素坯备用.

金属和陶瓷的润湿性, 通常可以通过测定两相界面的接触角来评价. 如图 1 所示, 金属熔融液在陶瓷基板上的铺展状态一般有两种情况, 当界面接触角 $\theta < 90^\circ$ 时, 两相之间能较好地润湿; 而接触角 $\theta > 90^\circ$ 时, 两相之间的润湿性则较差. 本文采用 2AP-LEITZ 高温显微镜对 TiC- Ni_3Al 的润湿接触角进行实验测定, 将 $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ 圆柱体素坯置于 TiC 基板上, 在

收稿日期: 2001-09-27, 收到修改稿日期: 2001-12-25

作者简介: 沈 强 (1970-), 男, 博士, 副研究员. E-mail: sqqf@yahoo.com

流动的 Ar 保护气氛中, 炉体以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 1420°C , 保温 60min. 期间, 拍摄金属相的熔融状态和形貌. 在照片上直接测定 TiC - $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ 的接触角.

为探讨 Mo 添加的影响机制, 在与接触角测定相同的温度下烧结制备 Ni_3Al 含量为 40wt% 的 TiC - Ni_3Al 复合材料, 其中 Ni_3Al 中 Mo 的添加含量分别为 0wt% 和 5wt%. 采用电子探针 (Hitachi JXA-8800R) 观察测定试样的润湿断面以及 $\text{Ni}_3\text{Al}(5\text{wt}\%\text{Mo})$ -TiC 复合材料断面的显微结构与组成元素的分布情况, 各复合材料的物相分析在 X 射线衍射仪 (Rigaku D/MAX-RB) 上进行.

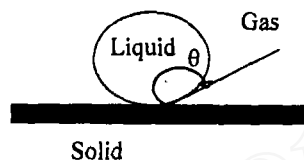


图 1 润湿角定义的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the definition of wetting angle

3 结果和讨论

$\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ 样品升温过程中变化情况与接触角的实验测定值如表 1 所示. 可以看到, 掺 Mo 的素坯的熔融开始温度略低于纯 Ni_3Al , 但液相大量出现的温度则是相同的, 都接近于 Ni_3Al 的熔点温度 (1395°C).

Ni_3Al -TiC 之间的润湿接触角仅为 17° , 表明 Ni_3Al 与 TiC 有非常良好的润湿性. 我们知道, Ni_3Al 与 TiC 两者晶体结构相似, 同属立方结构, 并且热膨胀系数的差异也较传统 TiC-Ni 金属陶瓷的小. 因此, Ni_3Al -TiC 是一个理想的金属-陶瓷复合体系. 掺 5wt% Mo 的 Ni_3Al 与 TiC 之间的润湿接触角为 11° , 与同样状态下的 Ni_3Al 相比, 接触角降低了 36%, 表明少量 Mo 的添加可以进一步改善 Ni_3Al -TiC 之间的润湿性.

表 1 $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ 升温过程中变化情况与接触角的实验测定值

Table 1 Changes of $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ samples during the heating process and the measured contact angles

Sample	Temperature of liquid appearing/ $^\circ\text{C}$	Temperature of liquid appearing abundantly/ $^\circ\text{C}$	Contact angle/ $^\circ\text{C}$
Ni_3Al -TiC	1370	1390	17
$\text{Ni}_3\text{Al}(5\text{wt}\%\text{Mo})$ -TiC	1365	1390	11

图 2 和 3 分别给出的是 Ni_3Al -TiC 和 $\text{Ni}_3\text{Al}(5\text{wt}\%\text{Mo})$ -TiC 润湿样品的断面形貌和诸元素沿 TiC 断面深度方向 (Ni_3Al 浸润方向) 的线分布情况. 可以看到, 它们的浸渗程度不同, Ni_3Al -TiC 样品中 Ni_3Al 仅浸渗至 TiC 基板内部 $2\sim 4\mu\text{m}$. 掺 5wt% Mo 的 Ni_3Al 向 TiC 基板浸渗的深度则明显较大, 如图 3 所示, 约为 $10\mu\text{m}$. 并且 Mo 元素的线分布宽度与 Ni、Al 元素的相同, 在 $10\mu\text{m}$ 附近 Mo、Ni、Al 同时消失, 而代表 TiC 的 Ti 元素的分布强度逐渐增加. 这一现象说明, 少量 Mo 的存在增强了 Ni_3Al 液体的浸渗能力, 使其沿 TiC 颗粒间的扩散和浸渗量大大增加.

我们选取 $\text{Ni}_3\text{Al}(5\text{wt}\%\text{Mo})$ -TiC 复合材料断面二次电子像中一个大小约为 $5\mu\text{m}$ 的 TiC 颗粒 (如图 4(a) 中箭头所指), 进一步对该颗粒周边的元素分布进行了反复线扫描分析, 结果如图 4(b). 可以看到, TiC 颗粒与 Ni_3Al 紧密接触, Ni_3Al 沿 TiC 颗粒粒间均匀粘附, 界面

上没有气孔. Ti 与 Ni、Al 元素的线分布强度特征刚好相反, Ti 分布线与 Ni 分布线的交点和 Al 分布线的拐点, 实际上是 TiC 颗粒的边缘, 即在 TiC 颗粒内部没有 Ni、Al. 而 Mo 元素在 TiC 颗粒边缘与 Ti 元素共同存在, 其峰值出现在 TiC 颗粒边缘的一定厚度范围内, 这是因为 Mo 是非常活泼的金属元素, 它极易置换 TiC 中的 Ti 而进入其晶格^[9]. 因此, 可以认为 Mo 与 TiC 在 Ni₃Al-TiC 的润湿界面上发生了固溶反应, 反应式如下:

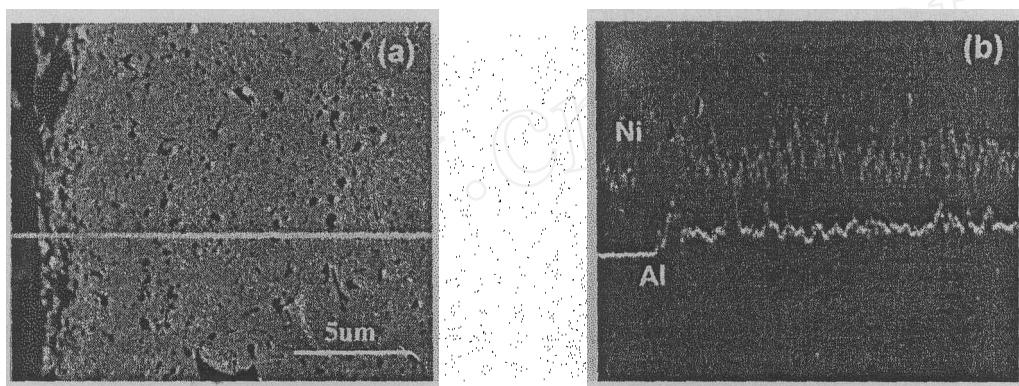
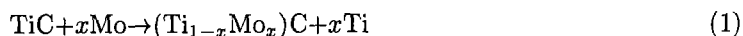


图 2 TiC-Ni₃Al 润湿界面的电子探针分析结果

Fig. 2 EPMA analysis of wetting interface of TiC-Ni₃Al

(a) Morphology of wetting interface; (b) Linear distribution of elements

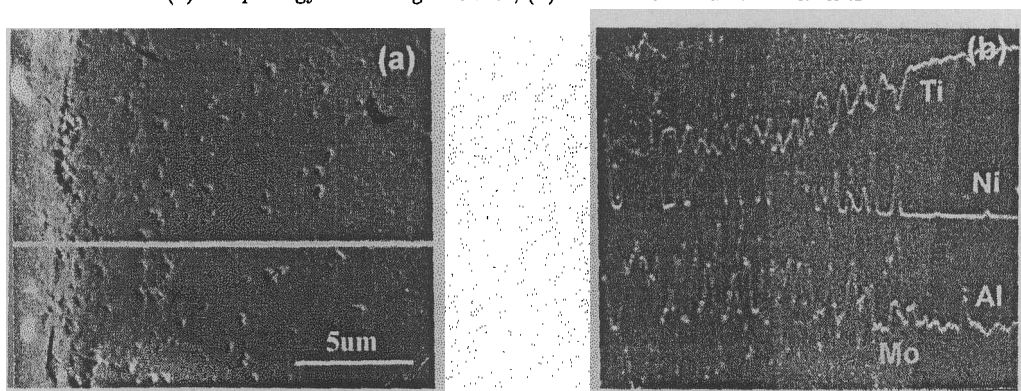
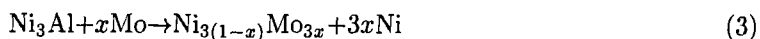
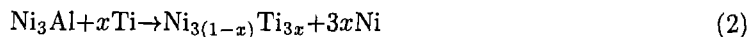


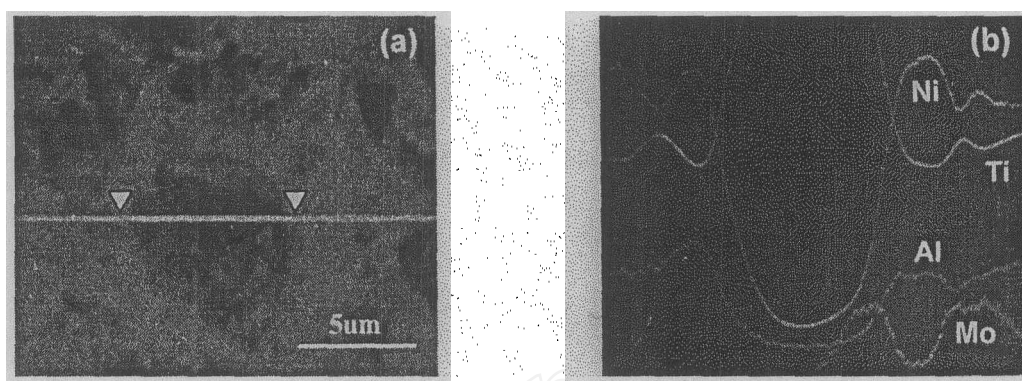
图 3 TiC-Ni₃Al(Mo) 润湿界面的电子探针分析结果

Fig. 3 EPMA analysis of wetting interface of TiC-Ni₃Al(Mo)

(a) Morphology of wetting interface; (b) Linear distribution of elements

不同 Mo 添加含量的 Ni₃Al-TiC 复合材料的 X 射线衍射图谱如图 5 所示. 图 5(a) 中只有 TiC 主相和 Ni₃Al 主相的特征峰, 表明 TiC 和 Ni₃Al 之间没有明显的界面反应. 文献 [4] 曾经指出 TiC 和 Ni₃Al 化学性质稳定, 它们之间仅有极少量的原子互扩散. 图 5(b) 中没有出现 Mo 特征峰, 却出现了 Ni 的特征峰. 表明 Mo 添加后, 与 Ni₃Al 或 TiC 发生了一定程度的固溶反应, 反应式如下:



图 4 TiC- $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ 复合材料断面的电子探针分析结果Fig. 4 EPMA analysis of cross section of TiC- $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Mo})$ composite

(a) Morphology of cross section; (b) Linear distribution of elements

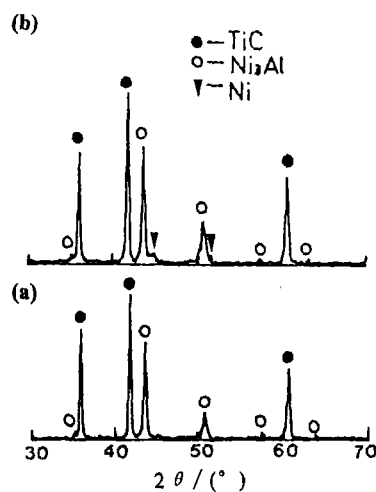
因此, 在 Ni_3Al 与 TiC 的润湿过程中, Mo 添加的影响机制可以表述为: TiC 基板中 TiC 颗粒中的 Ti 被部分 Mo 置换, 在 TiC 颗粒周围形成一个含 Mo 的固溶壳层. 在这个壳层里, Ti、Mo 与 Ni_3Al 发生固溶合金化^[10]. 这些反应使 TiC、 Ni_3Al 相互之间形成“TiC-Mo- Ni_3Al ”的“架桥”连结方式, 降低了液-固表面张力, 导致了接触角的下降, 从而进一步改善了 TiC 与 Ni_3Al 之间的润湿性. 这种界面润湿性能的改善, 将有利于 TiC- Ni_3Al 的界面接合和物化相容性, 可望大幅度提高 TiC- Ni_3Al 复合材料的力学性能.

4 结论

1. Ni_3Al 与 TiC 具有良好的界面润湿性, 其润湿接触角为 17° 左右.
2. 少量 Mo 的添加可以进一步改善 Ni_3Al -TiC 的润湿性, 润湿接触角下降至 11° 左右.
3. Mo 与 TiC、 Ni_3Al 在其润湿界面上发生了一系列固溶反应, 这些反应降低了液-固表面张力, 导致了接触角的下降.

参考文献

- [1] Liu C T, Stiegler J O. *Mater. Eng.*, 1984, **100**: 129-136.
- [2] Baker I, Schulson E M. *Scripta Metall.*, 1989, **23**: 1883-1889.
- [3] Choudhury A, Mukherjee A K. *J. Mater. Sci.*, 1990, **25**: 3142-3147.
- [4] Fuchs G E. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1988, **133**: 615-621.

图 5 TiC- Ni_3Al 复合材料的 X 射线衍射分析图谱Fig. 5 XRD patterns of TiC- Ni_3Al composite

(a) Without Mo content; (b) With 5wt% Mo content

- [5] Mei B C, Yuan R Z, Duan X L. *J. Mater. Res.*, 1993, **8**: 2830-2834.
- [6] 梅炳初, 袁润章 (Mei B C, *et al*). 硅酸盐学报 (*J. Chin. Ceram. Soc.*), 1994, **22**: 168-173.
- [7] Zhang L M, Liu L, Yuan R Z, *et al. Mater. Sci. & Eng. A*, 1995, **203** (1-2): 272-278.
- [8] 涂 溶, 欧阳美环, 赵 忠, 等. 科学通报, 1997, **42**: 449-453.
- [9] Nishigaki K, Doi H. *J. Powder & Powder Metall.*, 1980, **27**: 130-136.
- [10] 山口正治, 马越佑吉著, 丁树深译. 金属间化合物. 北京: 科学出版社, 1991. 151-153.

Effect of Mo Addition on the Wettability between Ni_3Al and TiC

SHEN Qiang, ZHANG Lian-Meng, TU Rong

(State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The wetting angle between the liquid Ni_3Al and the TiC solid matrix was measured by using a 2AP-LEITZ high temperature microscope at 1420°C under a flowing Ar gas atmosphere. The effect of Mo addition into Ni_3Al on the wettability of $\text{Ni}_3\text{Al-TiC}$ and the effect mechanism were mainly discussed. The result shows that, the wetting angle of $\text{Ni}_3\text{Al-TiC}$ is as low as 17° , indicating an ideal cermet system. When Mo is added, the wetting angle gains a further decrease, lower than 11° . It is considered that, a small amount of Mo diffuses into the boundary of TiC particles and forms solid solution. The substituted Ti then reacts with Ni_3Al in-situ. Thus decreases the tensile stress on the solid-liquid interface of $\text{Ni}_3\text{Al-TiC}$, leading to a great improvement in the wettability between Ni_3Al and TiC .

Key words $\text{Ni}_3\text{Al-TiC}$; Mo; wettability; effect mechanism