

# 合金成分对定向凝固合金 IC6 显微组织和力学性能的影响

The Effect of Composition on Microstructure and Mechanical Properties of a DS Alloy IC6

杨素玲, 韩雅芳, 李孙华 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

YANG Su-ling, HAN Ya-fang, LI Sun-hua

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 在研制  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基合金 IC6 的过程中系统地进行了 Al, Mo, B, C, Nb, Zr, W, Cr, Re 等元素含量对合金组织和力学性能影响的研究, 最终确定了合金的最佳成分 (wt%) 范围为: Ni-(7.5~8.5) Al-(10~14) Mo-(0.02~0.15) B。

**关键词:** IC6 合金; 合金化元素; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 08-0025-04

**Abstract:** The effects of alloying elements, Al, Mo, B, C, Nb, Zr, W, Cr, Re et al on the microstructure and mechanical properties were investigated during the development of a  $\text{Ni}_3\text{Al}$  base alloy IC6. On the basis of the experimental results, an optimum composition (wt%) range of Ni-(7.5~8.5) Al-(10~14) Mo-(0.02~0.15) B was determined.

**Key words:** alloy IC6; alloying elements; microstructure; mechanical properties

IC6 合金是一种定向凝固  $\text{Ni}_3\text{Al}$  金属间化合物基高温结构材料, 适合于 1000~1150 范围内作燃气发动机的导向叶片, 亦可用作该温度范围内的其它高温结构件。IC6 合金具有密度较低 ( $7.9\text{g}/\text{cm}^3$ )、初熔点高 (1315)、高温性能优越 (1100 /100h 的持久寿命可达 100MPa)、价格低 (低于普通商用高温合金, 为钴基合金的 20%~25%)、立足国内资源及可返回利用等优点<sup>[1-4]</sup>。目前该合金已成功用于某高性能航空发动机作导向叶片, 已通过各种试车, 试飞考核, 并投入批量生产, 在国际上率先将金属间化合物材料用作航空发动机热端关键部件。本工作主要研究主要合金元素对 IC6 合金的显微组织和主要力学性能 (室、中温拉伸强度和塑性, 以及 1100 的持久性能) 的影响。

## 1 试验方法

试验用的合金采用双真空感应熔炼工艺。在 IS65V8 炉中熔炼成母合金, 然后在 ISP-2 型定向炉内采用快速凝固法拉成试棒, 拉锭速度控制在 4~8mm/min。热处理制度为: 1260 /10h, OC。试样加工成  $\phi 5 \times 25\text{mm}$  标准试样。拉伸试验的速度为  $3.3 \times 10^{-4}/\text{s}$ , 持久试验在恒载蠕变试验机上进行, 试验温度为 1100, 温度控制在  $\pm 3$  之内。微观组织分析采用

背散射电子图像法在 JXA-840 扫描电镜上进行。

## 2 结果和讨论

表 1 为试验用的 IC6 合金的 6 种成分及其相对应的力学性能。

### 2.1 Al 含量的影响

Al 是组成  $\text{Ni}_3\text{Al}$  的主要元素, Al 对  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基合金的组织 and 性能有很大影响。当 Al 从 8.5% 降到 7.8%, 持久寿命从 20h 左右升到 110h, Al 降到 7.4%, 持久寿命增到 309h, 各提高性能 6 倍和 15 倍。这表明 Al 含量控制对性能的巨大影响, 但进一步降低 Al 含量将使合金失去  $\text{Ni}_3\text{Al}$  的 "R" 性能特征和持久性能下降。金相组织发现, 过量 Al 破坏了  $\gamma + \gamma'$  两相组织的合理组合。

### 2.2 Mo 含量的影响

Mo 在很多镍基高温合金中被用作固溶强化作用。Mo 不但是  $\gamma$  相的有效强化元素, 也是  $\gamma$  相的重要合金化元素。与 W, Ta, Nb 和 Hf 等其它难熔元素相比, Mo 在  $\gamma$  相和  $\gamma'$  相中都有较高的固溶度。如: 从室温至 800, Mo 在  $\gamma\text{-Ti}$  中的固溶度为 21 (at%), 而在 1260 时高达 36 (at%), 而在  $\gamma\text{-Ni}_3\text{Al}$  中其固溶度为 6at%~8at%<sup>[4,5]</sup>。由于 Mo 的原子半径大于 Ni 而小于 Al, 所以 Mo 的添加既能使  $\gamma$  也能使  $\gamma'$  产生晶

表 1 试验用的 IC6 合金及其力学性能

Table 1 IC6 alloy used for experiments and its mechanical properties

合金序号	化学成分/ w t %				拉伸性能 $\sigma_b$ , $\sigma_{0.2}$ /M P a, $\delta$ / %						1100 , 78.5M P a 下持久性能/h
	Al	M o	B	Ni	20			870			
					$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$ / %	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$ %	
1	8. 5	14. 0	0. 15	余	1149	632	10. 3	1039	1003	10. 0	20. 2
					1243	657	10. 1	1100	1060	14. 2	20. 3
2	7. 8	14. 0	0. 15	余	1085	701	10. 4	923	894	8. 0	94. 2
					1196	649	10. 5	916	898	8. 2	121. 1
3	7. 4	14. 0	0. 15	余	1265	825	11. 4	1035	970	5. 2	309. 5
					1180	825	10. 3	1040	950	7. 0	
4	7. 8	14. 0	0. 00	余	1080	790	17. 0	1050	995	8. 5	113. 0
					1100	800	14. 5	1035	965	8. 5	165. 4
5	7. 8	14. 0	0. 03	余	1230	815	18. 5	1020	910	16. 0	115. 3
					950	765	18. 0	1020	910	11. 0	188. 7
6	7. 8	14. 0	0. 05	余	1220	800	13. 0	1030	930	5. 5	67. 7
					1200	790	15. 0				95. 8

格畸变,从而增大对位错运动的阻力,达到强化合金的目的。而且,Mo 的熔点高,高温下在 Ni 和 Ni<sub>3</sub>Al 中的扩散系数小,所以 Mo 的添加可提高合金的高温组织稳定性。本研究测定了 Ni-Al-Mo-B 系合金中  $\gamma$  相的显微硬度与  $\gamma$  相中 Mo 含量的关系,示于图 1。结果表明:  $\gamma$  相的室温显微硬度随 Mo 含量的提高而提高。

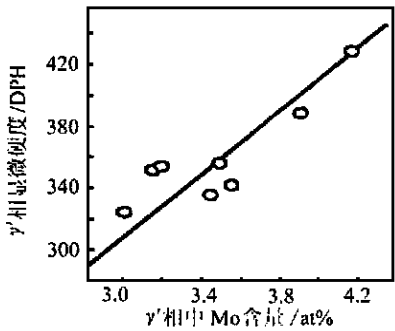


图 1 合金中  $\gamma$  相的显微硬度与  $\gamma$  相中 Mo 含量的关系

Fig. 1 The relation between the microhardness of  $\gamma$  phase and Mo in  $\gamma$  phase

本研究采用了 10%、14% 和 18% 三种不同的 Mo 含量,其结果表明:在 10% ~ 18% Mo 范围内,随着 Mo 含量的提高,合金的室温、中温 (870 ) 拉伸强度和 1100 的持久性能都有所提高。但为了降低合金的密度,最终选定了最佳 Mo 含量为 14%。

2.3 B 含量的影响

不同硼含量的合金的微观组织示于图 2 和图 3

中。图 2 是 Ni-7.8Al-14Mo 合金中加入不同量的 B 以后的合金抛光表面的 BSE 图像。可见,随着合金中 B 含量的提高,硼化物增多,在 0.03Bwt% 以下合金中基本不出现硼化物, B 含量为 0.05% 时出现了硼化物。硼化物的体积分数与合金中的硼含量成正比关系。由图 2 的 c, d 和图 3 中的 a, b 可以看到,硼含量的增加使合金中的单相大块  $\gamma$  区 (C 区) 增多。这是由于加入硼形成硼化物消耗了合金中 Mo 和 Ni 原子,从而使合金基体中 Al 的相对含量增加所致。

B 含量对 Ni-7.8Al-14Mo-B 合金系中温拉伸性能及高温持久性能的影响试验结果示于图 4 中。可以看出,当 B 含量低于 0.10wt% 时 B 含量不明显影响合金的室温和 870 的屈服强度,而当合金中的 B 含量高于 0.10wt% 时,拉伸强度开始下降;合金的拉伸塑性和 1100 的持久强度均首先随 B 含量增加而提高,至 0.03wt% 时达到最大值,然后两者都随着 B 含量的继续增加而降低。现有试验结果表明,合金的最佳 B 含量应为 0.03wt%。含 B 为 0.03% 的合金具有最高的高温持久性能和室温、中温拉伸性能。

微观组织的研究观察表明,成分为 Ni-7.8Al-14Mo-0.03B 的合金只有两种相,即  $\gamma + \gamma$  相组成,无硼化物和碳化物相。其次在此合金中铸态残留的枝晶干区的体积分数高于 B 含量较高的合金。这可能是由于  $\gamma$  相中高熔点元素 Mo 含量较高,使铸态的  $\gamma$  相在 1260 均匀化处理过程中较多地保留下来的结果。另外,合金中  $\gamma + \gamma$  相分布均匀,没有大块  $\gamma$  单相区。这种均匀弥散分布的  $\gamma + \gamma$  两相组织是合金具有优异强

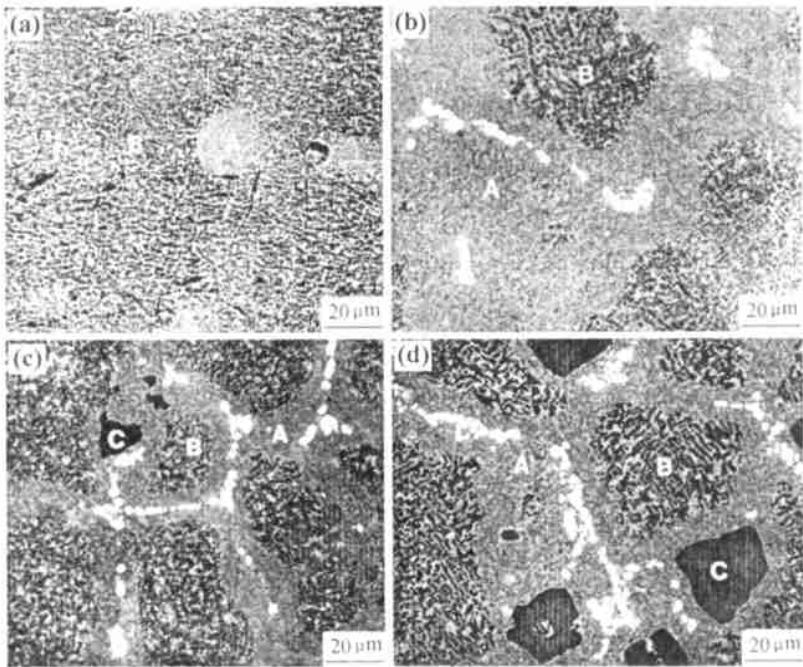


图 2 不同硼含量 IC6 合金的微观组织 (背散射电子图像)  
Fig. 2 The microstructures of different B contents (a) 0.03wt% B; (b) 0.05wt% B; (c) 0.10wt% B; (d) 0.15wt% B

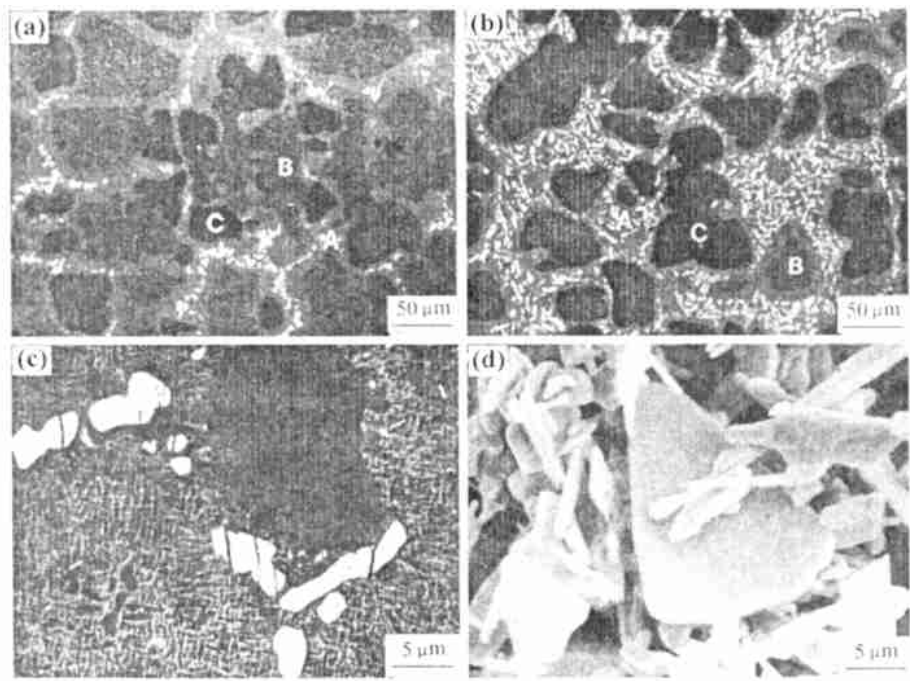


图 3 硼化物的形貌 (a), (b), (c) 分别为合金 1, 5, 11 的背散射电子图像;  
(d) 合金 11 的萃取粉末的二次电子图像  
Fig. 3 Morphologies of boride (a), (b) and (c) are  
back-scatter-electron image of alloy 1, 5, 11; (d) secondary-electron image of alloy 11

度和高温持久性能的主要原因。

硼化物在一些镍基高温合金中被认为是一种强化相。然而在本合金中, 硼化物对合金的持久强度反而有害。其原因可能是: 本合金系中, 硼化物分布不

均匀, 且尺寸较大, 一般为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  左右, 由于硼化物是脆性相, 所以在外加应力作用下, 这些大尺寸的硼化物中首先产生裂纹, 导致合金断裂; 硼化物的形成消耗了合金中的主要合金化元素 Mo, 而 Mo 在本

合金中既强化了 $\gamma'$ 相也强化了 $\gamma$ 相。

然而少量的硼 ( $0.02\text{wt}\% \sim 0.04\text{wt}\%$ ) 对合金是有益的。图 4 的结果表明, 在  $0.03\text{wt}\% \text{ B}$  使合金在  $1100^\circ\text{C} / (78.5 \sim 100) \text{ MPa}$  下的持久寿命提高  $36\% \sim$

$40\%$ , 其延伸率也有明显提高。而且, 因为本合金是定向凝固柱晶合金, 考虑到合金的横向性能, 合金中必须添加少量的 B 以改善合金的横向性能。试验结果表明, 无 B 合金的横向性能很差, 工程上不能接受。由

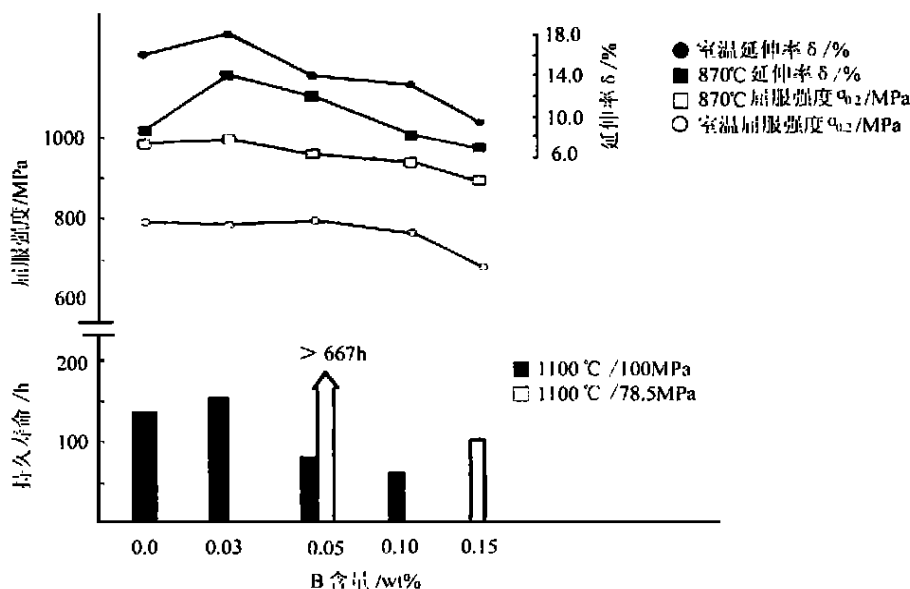


图 4 硼含量对 Ni-7.8Al-14Mo-B 系合金室温、中温拉伸性能及 1100 $^\circ\text{C}$  持久性能的影响

Fig. 4 The effect of B on the mechanical properties of Ni-7.8Al-14Mo-B alloy

此可见, 少量的 B 在本合金中不仅有益, 而且必要。

### 3 结论

(1) Mo 是合金中的主要强化元素, Mo 主要强化 $\gamma$ , 提高 $\gamma$ 的热稳定性, 对合金高温强度的提高起了很大作用。

(2) Al 是合金中的主要元素, 在保证 $\gamma$ 基体的前提下, Al 量不宜过高, Al 偏高造成组织中白色 $\gamma$ 单相块而影响合金的性能。 $\gamma$ 单相块越多性能越低。

(3) B 是合金中的微量元素, 过量的 B 形成硼化物而影响性能, 而且由于 B 量过高导致组织中白色 $\gamma$ 单相块的大量出现而严重降低性能。微量 B 对合金横向性能有利。

#### 参考文献

- [1] 李孙华, 韩雅芳, 马生, 谭永宁. Ni-Al-Mo 系  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基定向凝固高温合金的微观组织与力学性能 [J]. 北京科技大学学报, 增刊, 1991, 13: 59-64.
- [2] 韩雅芳, 李孙华. 一种先进的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基定向凝固高温合金的研制 [C]. 金属间化合物, 全国首届高温结构金属间化合物学术讨论会文集, 仲增墉, 叶恒强主编, 机械工业出版社, 1992. 1: 70-77.
- [3] Y F Han, R M Wang, M C Chaturvedi. Microstructure / Mechanical Property Relationship in a DS Cast  $\text{Ni}_3\text{Al}$  Base Alloy [J]. J of Mater Eng and Performance, 1993, 2 (4): 589-596.

- [4] Y F Han, R M Wang, M C Chaturvedi. Strengthening in a DS Casting  $\text{Ni}_3\text{Al}$  Base Alloy IC6 [J]. Advanced Performance Mater, 1995, 2: 259-268.

收稿日期: 2001-03-09

作者简介: 杨素玲 (1968-), 女, 工程师, 主要从事高温合金方面的研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 54 分箱 (100095)。

\* \* \* \* \*

(上接第 24 页)

- [4] A Haliyal, U Kumar, R E Newnham and L E Cross. J Am Ceram Soc, 1987, 70 (2): 119.
- [5] 杨祖培, 周欣山, 高峰等. 材料工程, 1998, 8: 43.
- [6] C Shaw, K S Liu. J Am Ceram Soc, 1995, 78 (1): 178.
- [7] 阮立坚, 李龙土, 桂治轮. 功能材料, 1997, 28 (2): 140.
- [8] Y Yamashita. Am Ceram Soc Bull, 1994, 73 (8): 74.
- [9] 李标荣, 莫以豪. 无机介电材料 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.

基金项目: 航空科学基金资助项目 (97G53083)

收稿日期: 2000-04-24

作者简介: 高峰 (1976-), 男, 现于西北工业大学材料科学与工程学院攻读博士学位, 从事电子功能陶瓷的研究, 西北工业大学材料科学与工程学院 401 教研室, E-mail: tiancs @ nwpu.edu.cn.