

铝含量对 Ni₃Al 基合金 IC6E 微观组织和力学性能的影响

Effect of Content of Al on Microstructure and Mechanical Properties of Ni₃Al Base Alloy IC6E

乔 敏¹, 李树索¹, 马文有¹, 宋尽霞², 韩雅芳²

(1 北京航空航天大学, 北京 100083; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

QIAO Min¹, LI Shu-suo¹, MA Wen-you¹, SONG Jin-xia²,

HAN Ya-fang² (1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 为了确定 Ni₃Al 基合金 IC6E 中最佳的铝含量, 在成分为 Ni-14.0Mn-7.2Al-0.025B (质量分数/%, 下同) 的母合金中, 分别加入了四种不同含量的铝(0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%), 测定了这些合金的室温拉伸和 1050℃/90MPa 高温持久性能, 并采用扫描电镜分析了这些合金的微观组织。综合考虑这些合金的微观组织以及力学性能, 确定了在 IC6E 合金中最佳的铝含量为 7.8%。

关键词: Ni₃Al; Al 含量; 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(2006)04-0052-04

Abstract: In order to determine the optimum content of Al, alloys with the different amounts of Al (0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%) based on the master alloy composition of Ni-14.0Mn-7.2Al-0.025B (mass fraction/%) were prepared. The tensile strength at room temperature and stress rupture life at 1050℃/90MPa have been determined. The microstructures of the alloys have been studied by scanning electron microscopy. On the basis of the compromise of the microstructures and mechanical properties, the optimum content of Al was determined to be 7.8%.

Key words: Ni₃Al; aluminum content; microstructure; mechanical property

IC6 合金是由国内自行研制成功的具有自主知识产权的一种以有序金属间化合物 γ' -Ni₃Al 为基的定向凝固合金。其具有高温蠕变抗力高、初熔点高(1315℃)、密度低(7.9g/cm³)、1000~1150℃范围内持久强度高(1100℃/100h 的持久寿命可达到 100MPa)等特点, 适合于 1000~1150℃范围内作燃气发动机导向叶片, 亦可用作该温度范围内的其他高温结构件。目前该合金已经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^[1-4]。

IC6E 合金为成分与 IC6 合金相似的等轴晶合金。IC6E 合金是为满足 1050℃条件下工作的航空发动机复杂结构导向叶片而研制的一种新型 Ni₃Al 基合金。在满足使用要求的前提下, 采用同种材料的等轴晶合金的生产效率要高于定向合金, 使生产成本低于定向合金。本研究是为了确定 Al 含量对该合金力学性能的影响, 以及在此基础上确定 Al 在该合金中的最佳

成分量。

1 实验方法

研究用材料为等轴晶铸造 Ni₃Al 基高温合金, 其成分为 Ni-14.0Mn-7.2Al-0.025B (质量分数/%, 下同), 在 GVR-100 型真空感应炉中熔炼成 $\phi 75\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的母合金锭。然后在 DZG 型真空感应炉中进行重熔, 制备等轴晶试棒。在重熔过程中分别添加四种不同含量的 Al(0%, 0.4%, 0.6%, 0.8%)。因为母合金锭熔炼和重熔两个过程的真空度都很高(均达到 10⁻²Pa), 可以不计氧化烧损, 所以 Al 含量均只以加入量计算。最后所得四组不同 Al 含量的合金成分组成如表 1 所示。

将制得的四组等轴晶试棒经(1260±10)℃下保温 10h, 然后经空冷的热处理, 机加工成室温拉伸和高温持久试棒, 测试了这四组合金的室温瞬时拉伸性能和 1050℃/90MPa 的高温持久性能, 并使用扫描电镜分

析了相应的显微组织。

表 1 实验合金的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of alloys in the experiment (mass fraction/%)

Alloy	Al	Mo	Ni
1	7.2	14.0	Bal
2	7.6	14.0	Bal
3	7.8	14.0	Bal
4	8.0	14.0	Bal

2 实验结果和讨论

2.1 铸态组织

IC6E 合金的典型铸态组织如图 1 所示。合金按相的分布和形态分为 A、B、C 三个区域, A 区为枝晶间组织, 主要由(γ' + γ) 两相组织和碳化物构成; B 区为枝晶干组织, 由 γ' 和类似 A 区中的(γ' + γ) 两相组织共同构成一个网状组织, 实际上 B 区是一种 γ' + (γ' + γ) 的复合组织; 呈暗黑色的 C 区是 γ' 单相块比较集中的区域, 分布在枝晶间。

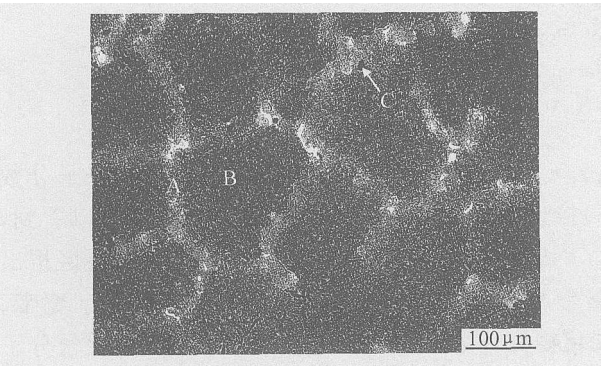


图 1 IC6E 合金铸态组织的背散射电子图像
Fig.1 Back scattering electron images of as-cast alloy IC6E

在铸态组织的枝晶间区域, 当 Al 含量为 7.2% 时, 在 BSEI 中没有发现呈深黑色的大块 γ' 单相区的存在。而在 Al 含量达到 7.6% 时, 铸态组织中出现了少量的 γ' 单相区, 随着 Al 含量的进一步增加, γ' 单相区出现了增大增多的趋势, 这是由于 Al 含量的增加直接导致富 Al 相 γ' 的增多, 而铸态组织中有比较严重的成分偏析现象, 所以随着 Al 含量的增加, 在铸态组织的枝晶间区域中的大块 γ' 单相区经历了一个从无到有, 并且逐渐增多的过程。

在高倍下观察这四组铸态合金的显微组织, 可以明显看到, Al 含量为 7.2% 的合金枝晶干区域的 γ' 相的尺寸约为 1~2 μ m, 其他三组合金枝晶干区域的 γ' 相的尺寸则基本没有差别, 约为 3~5 μ m。之所以会

出现 Al 含量为 7.2% 的合金枝晶干区域的 γ' 相的尺寸明显小于其他三组合金枝晶干区域的 γ' 相, 主要是由于这组合金中 Al 的含量较低, 而当 Al 含量高于 7.6% 时, 其他三组合金却并没有出现随着 Al 含量的增加, 枝晶干区域的 γ' 相尺寸继续增大的趋势。但是, 在枝晶间区域却出现了大块 γ' 相单相区, 并且随着 Al 含量的增加, 此单相区也不断增大增多。同时, 四组合金的枝晶间区域的 γ' 相尺寸基本没有变化。可以认为, 在 IC6E 合金的铸态组织中, 不论是在枝晶间区域还是在枝晶干区域, γ' 相均有一个“饱和值”。

2.2 热处理后的组织及力学性能

四种成分的合金经(1260 \pm 10) $^{\circ}$ C/10h, 然后空冷的热处理后所测得的室温瞬时拉伸性能和 1050 $^{\circ}$ C/90MPa 的高温持久性能如表 2 所示。

表 2 热处理态合金的室温瞬时拉伸性能和高温持久性能
Table 2 The tensile strength at room temperature and stress rupture life at 1050 $^{\circ}$ C/90MPa of alloys solution-treated at (1260 \pm 10) $^{\circ}$ C for 10h

Alloy	Mass fraction of Al/ %	σ_b / MPa	1050 $^{\circ}$ C/90MPa stress rupture life/h
1	7.2	860	18
2	7.6	907	40
3	7.8	955	64
4	8.0	866	46

2.2.1 室温拉伸性能及组织

由室温拉伸力学性能测试结果可知, 对于 IC6E 合金而言, Al 含量从 7.2% 7.6% 7.8% 8.0% 逐渐增加时, 相应的室温拉伸性能 σ_b 为 860MPa 907MPa 955MPa 866MPa, 室温拉伸性能 σ_b 出现了先增大后减小的规律。这主要是由这四组合金的强化机理决定的。

在 IC6E 合金中, γ' 的晶格常数约为 0.35859nm, 由于 Mo 的原子半径大(129pm), 大量 Mo 的溶入, 使 γ 相的晶格常数明显增大, X 衍射光谱确定 γ 相的晶格常数约为 0.36289nm。由于 γ' 和 γ 的晶格常数相差较大, 错配度高达 1.185, 所以在 γ'/γ 界面附近形成大量高密度的错配位错, 能有效地阻碍合金形变过程中的位错运动, 从而使合金强度提高^[5]。

图 2 为不同铝含量的 IC6E 合金经(1260 \pm 10) $^{\circ}$ C/10h 固溶处理后的背散射电子图像。可以明显看到, 随着 Al 含量的增加, 枝晶干 B 区域网状组织中 γ' 相的数量及尺寸明显增加, 当 Al 含量达到 8.0% 时, 甚至大部分的 γ' 已经串联在一起了。与铸态组织相比较, 却没有发现大块 γ' 单相区的存在, 这可能是

由于经过 $(1260 \pm 10)^\circ\text{C}/10\text{h}$ 的固溶处理, 大块的 γ' 单相区已经完全溶进了枝晶干区域, 由此也最终导致了

枝晶干区域的网状组织中 γ' 相的数量与铸态组织中的有明显的不同。

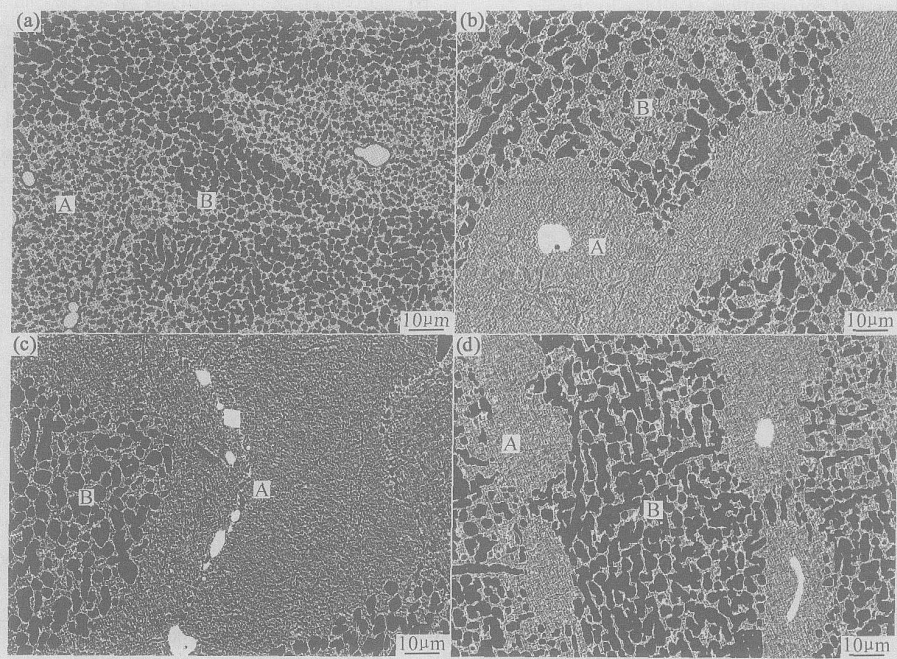


图2 不同 Al 含量的 IC6E 合金经 $(1260 \pm 10)^\circ\text{C}/10\text{h}$ 固溶处理后的背散射电子图像(BSEI)

(a) 7.2% Al; (b) 7.6% Al; (c) 7.8% Al; (d) 8.0% Al

Fig. 2 Back scattering electron images of alloy IC6E homogenized at $(1260 \pm 10)^\circ\text{C}$ for 10h with different content of Al

(a) 7.2% Al; (b) 7.6% Al; (c) 7.8% Al; (d) 8.0% Al

2.2.2 高温持久性能及组织

由高温持久力学性能测试结果可知, 对于 IC6E 合金而言, Al 含量从 7.2% 7.6% 7.8% 8.0% 逐渐增加时, 相应的高温持久寿命为 18h 40h 64h 46h, 高温持久寿命也出现了先增大后减小的现象。

由于随着 Al 含量的增加, 所形成的 γ' 相必然也会同时增多, 相对于 A 区的枝晶间组织, 枝晶干 B 区的网状组织富含有更多的 γ' 相。所以随着 Al 含量的增加, 枝晶间 A 区的 γ' 相逐渐减少。

图 3 为固溶处理后不同 Al 含量的 IC6E 合金 $1050^\circ\text{C}/90\text{MPa}$ 持久实验的背散射电子图像。由图 3 可知, 与热处理态的组织相比较, 当 Al 含量为 7.2% 时, 高温持久组织中已经没有枝晶干组织了, 而当 Al 含量大于等于 7.6% 时, 高温持久组织中均析出了大量白色的针状相和棒状相, 它们在合金中的分布不太均匀, 一般在枝晶间析出量较多, 且多呈针或棒状, 而在枝晶干区析出量较少, 且多呈颗粒状, 尺寸也较小。这是由于元素的枝晶偏析引起的。经 SEM/EDS 和 TEM 分析, 针状相和块状相应为同一种相, 只是形态不同, 大多是底心正交的 Y-NiMo 相, 也有少量的面心立方结构的 η 碳化物相。 Y-NiMo 相由 γ 相转变而

来: $\gamma \rightarrow \text{Y-NiMo} + \gamma'$, 其中 Ni, Mo 的含量(原子分数/%)接近于 1:1, 同时含有少量 Al。同时可以看到, 在 Y-NiMo 相周围一般都有 γ' 包复层, 在晶界区析出大量颗粒状 Y-NiMo 相的同时, 形成了晶界 γ' 宽带。 η 碳化物相也由 γ 相转变而来: $\gamma \rightarrow \eta + \gamma'$, 其化学分子式为 $\text{Ni}_6\text{Mo}_6\text{C}$, 是面心立方金刚石结构的 M_{12}C 型碳化物^[6]。

3 结论

(1) 比较四种 Al 含量分别为 7.2%, 7.6%, 7.8%, 8.0% 的 IC6E 合金的室温瞬时拉伸性能 and 高温持久性能, 可以得出, 当 Al 含量为 7.8% 时, IC6E 合金具有最好的综合力学性能。

(2) 为了达到一个最佳的强化效果, 在 IC6E 合金中, 枝晶干区域的网状组织中 γ' 相的数量和尺寸有一个“饱和值”, 当 γ' 相的数量和尺寸小于这个“饱和值”时, 不能达到最大的强化效果, 而当 γ' 相的数量和尺寸超过这个“饱和值”时, 大部分的 γ' 已经串联在一起了, 反而使强化效果有所降低了。

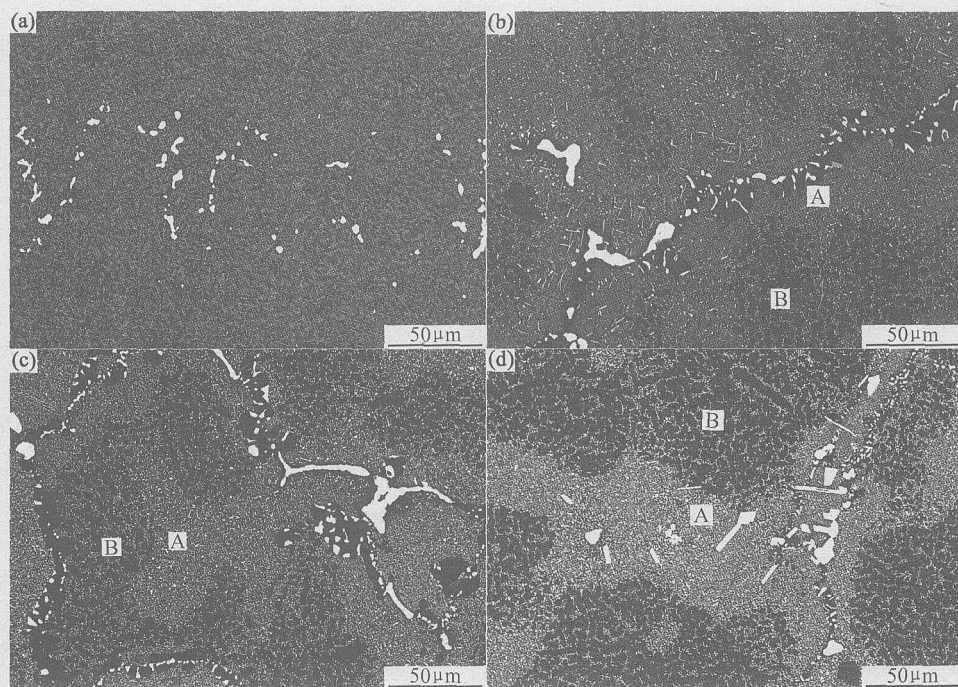


图3 固溶处理后不同 Al 含量的 IC6E 合金 1050℃/90MPa 持久实验的背散射电子图像(BSEI)

(a) 7.2% Al; (b) 7.6% Al; (c) 7.8% Al; (d) 8.0% Al

Fig. 3 Back scattering electron images of alloy IC6E after stress rupture test at 1050℃/90MPa with different content of Al

(a) 7.2% Al; (b) 7.6% Al; (c) 7.8% Al; (d) 8.0% Al

参考文献

- [1] 肖程波, 韩雅芳, 殷克勤, 等. 定向凝固 Ni_3Al 基合金 IC6 的高温蠕变行为[J]. 材料工程, 1996, (3): 6–8.
- [2] 肖程波, 韩雅芳, 张行安. 定向凝固 Ni_3Al 基高温结构材料 IC6A 合金的研究[J]. 材料工程, 2001, (6): 3–6.
- [3] 刘庆泉. Ni_3Al 基 IC6 高温合金工程应用研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增刊): 209–214.
- [4] 赵希宏, 韩雅芳, 谭永宁, 等. 定向凝固 Ni_3Al 基合金 IC6[J]. 材料工程, 1997, (9): 13–15.

[5] 韩雅芳, 李孙华. 定向凝固铸造 Ni_3Al 基合金 IC6[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994, (1): 48–51.

[6] 宋尽霞, 肖程波, 李树索, 等. 950℃长期时效对 Ni_3Al 基合金 IC6 的组织及力学性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(3): 250–254.

收稿日期: 2005-08-03; 修订日期: 2006-04-05

作者简介: 乔敏(1980–), 男, 硕士, 从事材料学方面的研究工作, 联系地址: 北京航空航天大学材料学院(100083)。

(上接第 40 页)

- [5] 祝大同. 我国覆铜板业的发展与展望[J]. 绝缘材料通讯, 2000, (1): 21–24.
- [6] 冷大光, 胡京江, 郭宗训, 等. 电解铜箔镀锌工艺的研究[J]. 金属学报, 1998, 34(11): 1227–1229.
- [7] GAVRILA M, MILLET J P, MAZILLE H, et al. Corrosion behaviour of zinc-nickel coating, electrodeposited on steel[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 123(3): 164–172.
- [8] SHEELA G, MALATHY PUSHPAVANAM, PUSHPAVANAM S. Zinc-nickel alloy electrodeposits for water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27: 627–633.
- [9] ELKHATABIF, BENBALLA M, SARRET M, et al. Dependence of coating characteristics on deposition potential for electrodeposited Zn-Ni alloy[J]. Electrochimica Acta, 1998, 44(10): 1645–1653.
- [10] 安茂忠. 电镀理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004. 178–197.

[11] TAKAMI. Method of surface treatment of copper foil for printed circuit boards and copper foil for printed circuit boards[P]. USA Patent: 5234573, 1993–10–10.

[12] 藤原和久, 丹博司, 藤井光南, 等. 具有优良的耐化学性和耐热性的用于印刷线路板的铜箔[P]. 中国专利: 1260684A, 2000–07–09.

[13] PETRAUSKAS A, GRINCEVIENĖ L, ÈEŠNIENĖ A, et al. Studies of phase composition of Zn-Ni alloy obtained in acetate-chloride electrolyte by using XRD and potentiodynamic stripping[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50: 1189–1196.

[14] 屠振密. 电镀合金原理与工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

收稿日期: 2005-10-09; 修订日期: 2006-04-29

作者简介: 王征(1972–), 男, 博士生, 主要从事应用电化学方面的研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学 411 信箱(150001)。