



无铈镍基单晶高温合金的显微组织表征

庄晓黎^{1,2}, 吴红宇^{1,2}, 方 姣^{1,2}, 黄 岚^{1,2}, 江 亮^{1,2}

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 粉末冶金研究院, 长沙 410083)

摘 要: 采用螺旋选晶法制备一种新型无铈镍基单晶高温合金, 研究金相腐蚀剂对合金显微组织的影响, 以及合金元素的偏析和合金的显微组织。运用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、电子探针(EPMA)、X射线衍射(XRD)、电化学萃取、电化学工作站以及图像处理软件 Image pro plus(IPP)等技术方法, 对镍基单晶高温合金进行表征和研究。结果表明: 镍基单晶高温合金铸态组织由 γ 基体相、 γ' 强化相以及 γ/γ' 共晶相组成; 不同的金相腐蚀剂会形成不同的显微形貌, 这是由 γ 基体相和 γ' 强化相在相应腐蚀溶液中的自腐蚀电位决定的, 对于 γ' 相体积分数的评估, 应当选用腐蚀掉 γ' 相的图片用于计算; 铸态镍基单晶高温合金偏析严重, Cr、Co、W元素偏析于枝晶干, Al、Ta元素偏析于枝晶间。

关键词: 镍基单晶高温合金; 金相腐蚀剂; 显微组织; γ' 相; 元素偏析

中图分类号: TG113.12

文献标志码: A

单晶高温合金具有高的的高温强度、优异的蠕变与疲劳抗力以及良好的抗氧化性、抗热腐蚀性、组织稳定性和使用可靠性, 因此被广泛地应用于涡轮发动机等先进动力推进系统, 如涡轮叶片等热端部件^[1-4]。航空发动机涡轮叶片经历了从等轴晶、柱状晶、最后到单晶的发展历程^[3]。自 20 世纪 80 年代开始, 第一代单晶高温合金(PWA1480、CMSX-2、CMSX-3 和 SRR99 等合金)出现以来, 单晶高温合金的研究取得了突破性的进展^[4-5]; 第二代单晶高温合金(PWA1484、CMSX-4、Rene N5 和 TMS-82+等合金)在第一代单晶高温合金的基础上, 增加了 Re 元素, 后者显著提高了单晶高温合金的固溶处理温度, 使合金成分更加均匀; 第三代单晶高温合金(CMSX-10、Rene N6 和 TMS-75 等合金)在第二代单晶高温合金的基础上, 又进一步地增加了难熔金属如 Ta、Re、W 和 Mo 的含量, 进而再次提高单晶高温合金的固溶处理温度, 增大热处理窗口, 增强固溶强化的效果; 近年来, 通过添加 Ru、Pt 和 Ir 等元素, 发展出以 MC-NG、TMS-138、TMS-162 等为代表的第四代和第五代单晶高温合金^[4, 6]。从总的发展情况来看, 无 Re、3%Re、6%Re 和 4%Re+4%Ru(质量分数)基本上是第一代、第二代、第三代和第四代单晶高温合金化学成分的主要特

征^[7]。但是 Re、Ru 元素价格昂贵, 使得先进单晶高温合金的研制成本增加, 限制了这些合金的应用和推广。本文作者研究的单晶高温合金属于第一代无铈镍基单晶高温合金, 利用难熔金属固溶以及 γ' 沉淀析出相对合金进行强化, 期望可以达到与含 Re 单晶高温合金同样的性能。

单晶高温合金优异的性能与其显微结构密切相关, 对于镍基单晶高温合金而言, 其优良的力学性能尤其与 γ' 析出相、化学成分偏析密不可分, γ' 相的形貌、尺寸、体积分数将直接影响合金的高温力学性能, 而成分的偏析将不利于发挥合金的性能。因此, 准确地表征单晶高温合金的显微组织以及成分偏析就显得尤为重要。本文作者在高温度梯度的定向凝固炉中, 采用螺旋选晶法制备单晶试棒。研究并分析了具有(001)取向的单晶高温合金试样铸态的显微组织, 测定了枝晶干和枝晶间主要合金元素的偏析程度。

1 实验

实验所用的合金成分包括 Ni, Co, Cr, W, Al, Ta, C, B, Hf, Si, 其中 Cr 与 W 含量为 13.5%, Al

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013zzts188); 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA03A514); 国家自然科学基金资助项目(51401242, 61271356, 51205031); 中南大学粉末冶金国家重点实验室支持项目

收稿日期: 2015-07-10; **修订日期:** 2015-12-28

通信作者: 黄 岚, 副教授, 博士; 电话: 0731-88877812; E-mail: hazefog2013@yahoo.com

与 Ta 含量为 12%, Co 含量为 7.5%(质量分数), C、B、Hf、Si 作为微量元素加入, Ni 作为基体元素加入。母合金采用真空感应炉进行熔炼, 然后在具有高的温度梯度的定向凝固炉中, 采用螺旋选晶法制得 $d\ 12\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$, 取向为(001)的单晶试棒, 定向凝固时的抽拉速率为 $0.06\ \text{mm/s}$ 。用电火花切割法从单晶试棒上切取圆柱形试样, 试样经过研磨、抛光后, 用金相腐蚀液进行化学浸蚀, 所使用的金相腐蚀液如表 1 所示。利用 OM(LECIA DM4000M/DFC450)、SEM (QUANTA 650 FEG, FEI)、EPMA (JXA-8530F, JEOL)、电化学工作站以及 IPP 图像处理软件等分析测试技术, 对铸态单晶试样进行了宏观组织、 γ' 相显微组织、 γ/γ' 相在腐蚀剂中的极化曲线、 γ' 相体积分数以及元素偏析的表征、测量与分析。对于 γ/γ' 相极化曲线的测定, γ' 相通过电化学萃取的方法萃取出 γ' 相, 然后将 γ' 相粉末粘附在导电胶上, 最后在电化学工作站上进行极化曲线的测量。由于 γ 基体不能被萃取出来, 本文作者对 γ 基体极化曲线的测量限定在已腐蚀掉 γ' 相的样品表面上。 γ' 相的尺寸以及体积分数用 IPP 图像处理软件计算获取, 其中体积分数由面积分数代替, 并且两种状态的试样至少选取了 4 幅不同位置的 SEM 像进行计算, 计算公式可表示为

$$A_{\text{f}}=\frac{A_{\text{p}}}{A_{\text{t}}} \tag{1}$$

式中: A_{f} 为面积分数; A_{p} 为 γ' 相的总面积; A_{t} 为显微组织照片总面积。 γ' 相的平均体积分数($\bar{X}$)以及相应的标准差(σ_{SD})可表示为

$$\bar{X}=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N\left(X_i\right) \tag{2}$$

$$\sigma_{\text{SD}}=\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N\left(X_i-\bar{X}\right)^2} \tag{3}$$

式中: X_i 为第 i 幅 SEM 像计算所得的 γ' 相体积分数结

果; N 为用于计算的所有照片数量。
为判断此方法的准确性, 本文作者将通过电化学萃取计算得到的铸态单晶高温合金 γ' 相的体积分数与上述方法比较, 使用的萃取液为 20%(体积分数)的 H_3PO_4 水溶液, 电解电流为 $0.03\ \text{A}$ 。对于铸态单晶高温合金偏析的表征, 采用 EPMA 在样品表面 18×18 的点阵上打点, 点与点的间隔为 $100\ \mu\text{m}$, 束斑大小为 $d\ 2\ \mu\text{m}$ 的圆斑。打点完毕后, 剔除数据中的异常点后, 用 Origin 软件处理数据。采用考虑元素在固相中扩散的 Modified Scheil 方程

$$c_{\text{s}}=c_0 k\left(1-\left(1-2 \alpha k\right) f_{\text{s}}\right)^{(k-1) /\left(1-2 \alpha k\right)} \tag{4}$$

式中: c_{s} 为元素在固相中的含量; c_0 为元素的添加量; k 为偏析系数; f_{s} 为固相分数, $f_{\text{s}}=\left(X_i-0.5\right) / N$, X_i 为第 i 个位置点的序号; N 为总的打点数; α 为传质傅里叶数, 在单晶高温合金中一般取 0.01, 拟合出主要合金元素的偏析系数。本实验也用 EPMA 对试样表面进行了元素面分析, 得到元素的面分布图, 可以定量地表征合金元素的偏析情况。

2 结果与讨论

2.1 单晶高温合金的碳化物相

单晶高温合金中的碳化物相是合金中重要的微量相。为了观察合金中的碳化物相, 对抛光后的样品表面进行了观察。由于碳化物相比于高温合金基体硬度更大, 在抛光过程中它会被保留下来, 结合能谱数据可以判定, 图 1 中箭头所指的即为单晶高温合金抛光后保留在试样表面的碳化物相。图 1(a)和图 1(b)所示分别为二次电子图像和背散射电子图像。从图 1 中可以发现背散射电子图像的衬度优于二次电子图像。

2.2 单晶高温合金的金相组织

图 2 所示为铸态单晶高温合金经过腐蚀剂 1 腐蚀

表 1 镍基单晶高温合金的 3 种金相腐蚀液

Table 1 Three kinds of etchants for single crystal nickel-base superalloy

Etchant No.	Etchant solution	Etching condition	Ref.
1	5 g CuCl_2 +100 mL HCL+100 mL ethanol	Immersion etching at ambient temperature for 80–100 s	[8]
2	10 mL HNO_3 +20 mL glycerol+30 mL HCL	Immersion etching at ambient temperature for 30–45 s	[8–9]
3	33% HNO_3 +33% acetic acid+33% H_2O +1% HF	Immersion etching at ambient temperature for 10–20 s	[10]

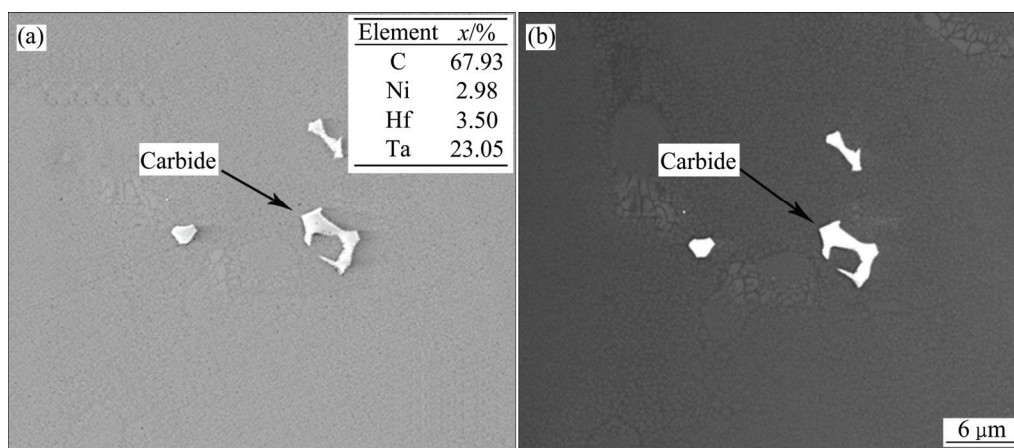


图 1 单晶高温合金的碳化物

Fig. 1 Carbides of single crystal superalloy: (a) SE mode; (b) BSE mode

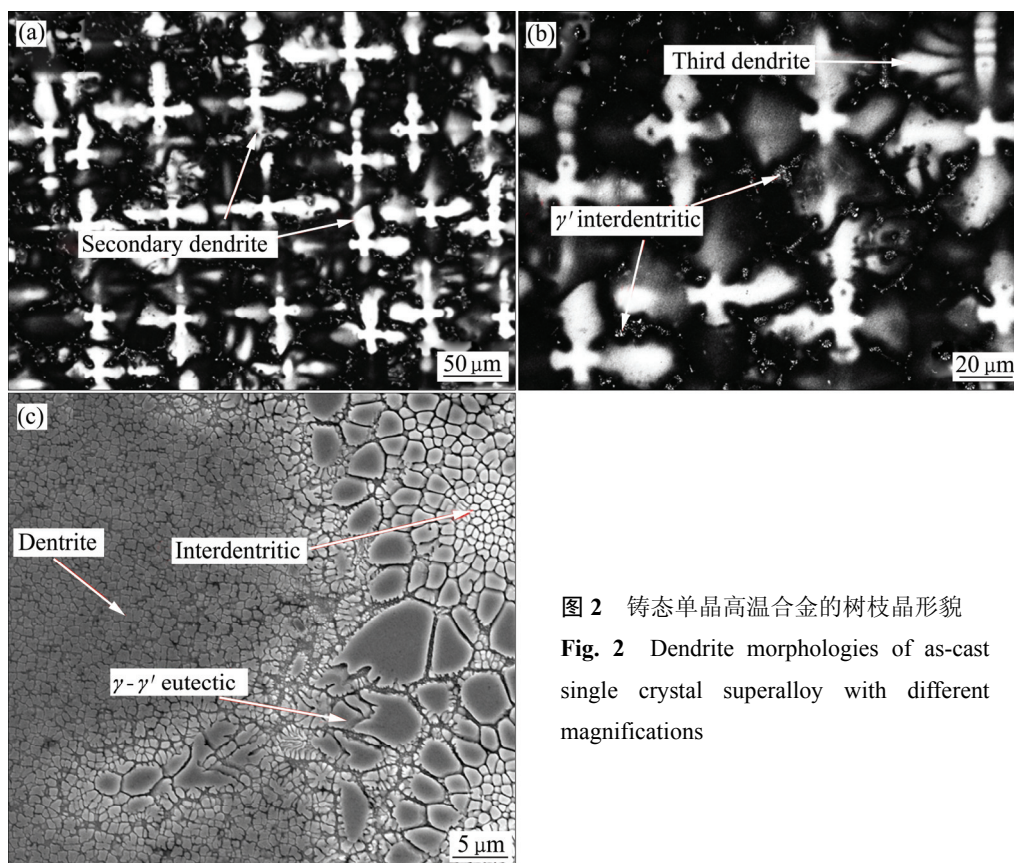


图 2 铸态单晶高温合金的树枝晶形貌

Fig. 2 Dendrite morphologies of as-cast single crystal superalloy with different magnifications

90 s 后横向的金相组织照片。从图 2(a)和图 2(b)中可以看出树枝晶形貌清晰可见、并且排列规则整齐,如箭头所示。图中“+”的中心为一次枝晶,“-”臂为二次枝晶,在二次枝晶上还能观察到部分三次枝晶,在枝晶间可以观察到粗大的 γ' 组织。图 2(c)所示为在更大的放大倍数下枝晶干和枝晶间 γ 、 γ' 相的分布情况。可以观察到在枝晶干上, γ' 相规则、细小,枝晶间上的 γ' 相粗大不规则,并且在枝晶间还分布着花瓣

状的 γ/γ' 共晶组织。由此可知,镍基单晶高温合金的铸态组织主要由 γ 基体相、 γ' 强化相以及 γ/γ' 共晶相组成。

2.3 单晶高温合金的 γ' 沉淀相

γ' 沉淀相是镍基单晶高温合金的主要强化相,其形貌、尺寸以及分布直接影响着单晶合金的高温性能,铸态镍基单晶高温合金 γ' 沉淀相如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)所示分别为用腐蚀剂 2 腐蚀 30 s 和腐蚀剂 3

腐蚀 20 s 所获得的显微组织照片。在图 3(a)中, 腐蚀剂 2 腐蚀掉 γ 基体, 保留 γ' 相, 因此深色区域代表 γ 基体, 浅色区域代表 γ' 相; 而在图 3(b)中, 腐蚀剂 3 腐蚀掉 γ' 相, 因此深色的区域代表 γ' 相, 而浅色的区域代表 γ 基体, 如图 3 中箭头所示。图 3 显示铸态单晶高温合金的 γ' 相形貌呈“田”字形。这是由于铸态的单晶高温合金冷却速率慢, 冷却析出的 γ' 相长大比较充分。因此 γ' 相尺寸比较粗大, 当 γ' 相长大到一定临界尺寸时, 通过自溶解, 释放弹性应变能导致 γ' 相发生了分裂, 进而 γ' 相的形貌发展成为“田”字形。贾建等^[11]、QIU 等^[12]、PAYTON 等^[13]、姚志浩等^[14]、宁礼奎等^[15]也有类似的研究发现。铸态单晶高温合金 γ' 相的尺寸通过 IPP 统计计算测定, 得到平均尺寸为 $1.38\ \mu\text{m}$ 。

2.4 单晶高温合金 γ/γ' 相极化曲线

为解释说明图 3 中两种金相腐蚀剂所产生的 γ' 相凹凸不同的结果, 对 γ/γ' 相在两种腐蚀剂中的极化曲线

进行了测量。图 4 所示为铸态 γ/γ' 相在腐蚀剂 2 和腐蚀剂 3 中的极化曲线, 纵坐标为腐蚀电流密度, 横坐标为电极电位, 曲线与横坐标的交点为自腐蚀电位, 即在电流密度为零时, 也就是化学腐蚀状态下的电位。自腐蚀电位越低, 表明越活跃, 在金相腐蚀过程中越容易被腐蚀, 自腐蚀电位越高, 越容易受到保护, 避免被腐蚀。图 4(a)中, γ 基体的自腐蚀电位为 35 mV, 而 γ' 相的自腐蚀电位为 55 mV, 因此在腐蚀剂 2 中, γ 基体相比于 γ' 相更加活跃, 最终导致 γ 基体被腐蚀剂 2 腐蚀掉, 而保留 γ' 相, 腐蚀后的微观结构如图 3(a)所示。图 4(b)中, γ 基体的自腐蚀电位为 755 mV, 大于 γ' 相的自腐蚀电位(670 mV), 因此在腐蚀剂 3 中, γ 基体相比于 γ' 相更加稳定, 在金相腐蚀过程中, γ' 相被腐蚀掉, 在样品表面留下空洞, 如图 3(b)所示。

2.5 单晶高温合金 γ' 相的体积分数

γ' 相的体积分数是决定单晶高温合金高温强度很重要的一个参数, 在高温下, γ' 相能有效地阻碍位错

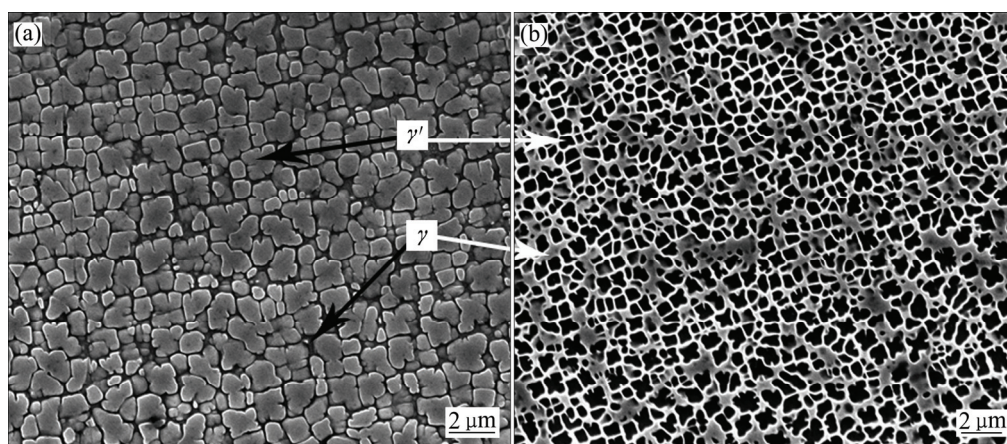


图 3 铸态单晶高温合金的显微组织

Fig. 3 Microstructures of as-cast single crystal superalloy: (a) Etchant 2, etching 30 s; (b) Etchant 3, etching 20 s

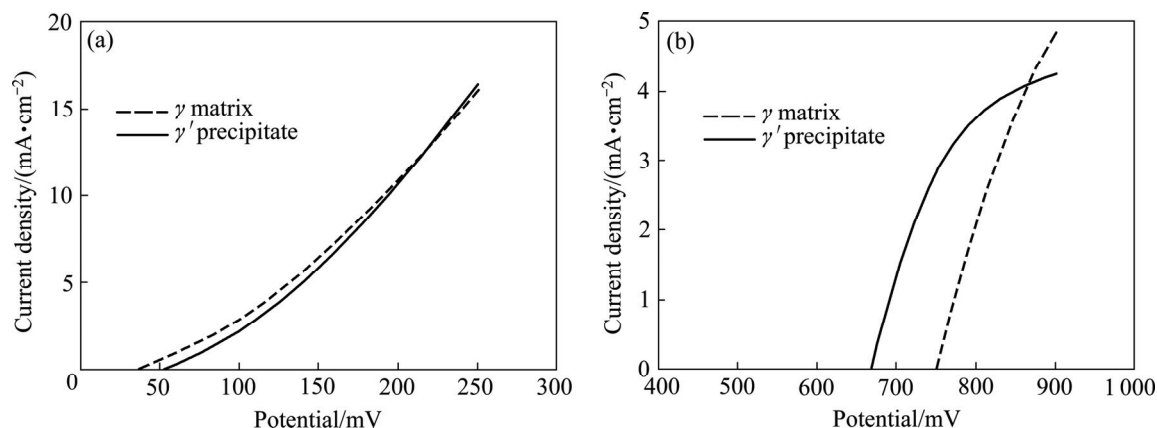


图 4 铸态单晶高温合金 γ/γ' 相的极化曲线

Fig. 4 Polarization curves of γ' precipitates and γ matrix for cast single crystal superalloy in two etchants: (a) In etchant 2; (b) In etchant 3

的滑移, 增强合金高温下的力学性能。因此, 对 γ' 相的体积分数的准确评估对预测合金的性能很有意义。目前对 γ' 相体积分数的计算最准确的还是电化学萃取法, 它将 γ' 相从合金中萃取出来, 计算其所占的比例, 但是该方法操作复杂, 耗时长。还有一种方法是图像法, 将 γ' 相的扫描电镜照片用 IPP 图像处理软件进行处理, 可以得到 γ' 相的面积分数, 亦即体积分数^[16], 该方法计算速度快, 但是在选取用于计算的 γ' 相的扫描电镜照片时, 需要注意不能选取腐蚀掉 γ 基体而保留 γ' 相的扫描电镜照片。图 5 所示为图像法计算 γ' 相体积分数的示意图; 图 5(a)所示为保留 γ' 相的计算示意图; 图 5(b)所示为腐蚀掉 γ' 相的计算示意图。本实验中至少选取了 4 个不同部位的显微组织照片用于进行 γ' 相体积分数的计算(计算公式见式(1))。图 5 中红色的面积代表 γ' 相所具有的面积, 它在整个照片中所占的比例即为 γ' 相的体积分数。运用 IPP 计算图 3(a)所示的 γ' 相体积分数为 $(80.27 \pm 0.79)\%$, 而图 3(b)所示的 γ' 相体积分数为 $(62.36 \pm 1.63)\%$, 两者相差很大。为了验证所计算的 γ' 相体积分数的准确性, 本实验中

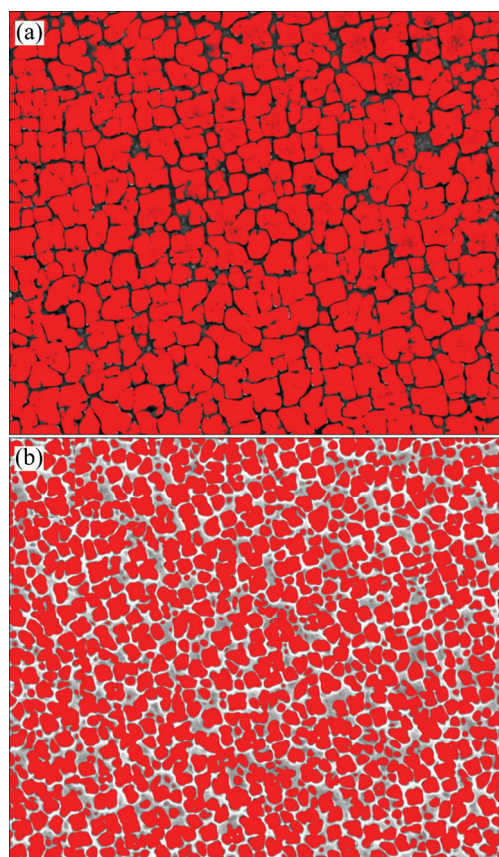


图 5 γ' 相体积分数计算示意图

Fig. 5 Examples of studied micrographs with highlighted γ' phases for volume fraction measurement: (a) Etched γ matrix; (b) Etched γ' precipitates

也采用电化学萃取的方法将铸态单晶高温合金的 γ' 相从 γ 基体中萃取出来, 并用于计算 γ' 相的体积分数。 γ' 相的体积分数如表 2 所示。

图 6(a)和图 6(b)所示分别为萃取的 γ' 形貌以及它的 XRD 谱。图 6(a)中 γ' 相的形貌与图 3 中形貌相似, 呈近方形。从萃取的 γ' 相可以看出, 一个大的 γ' 相是由 8 个小的 γ' 立方体组合而成; 而由图 3 观察到的 γ' 相为“田”字形, 这是由于图 3 所示为垂直于单晶高温合金(001)方向的一个平面图, 因此只能观察到 8 个小 γ' 立方体中的 4 个, 也就是“田”字形。图 6(b)中的 XRD 谱显示所萃取的物相为单相的 γ' 相。通过电化

表 2 不同方法计算的 γ' 相体积分数结果

Table 2 Volume fraction of γ' precipitates by different methods

Method	Volume fraction/%
Etchant 2	80.27±0.79
Etchant 3	62.36±1.63
Electrolytic extraction	65.95

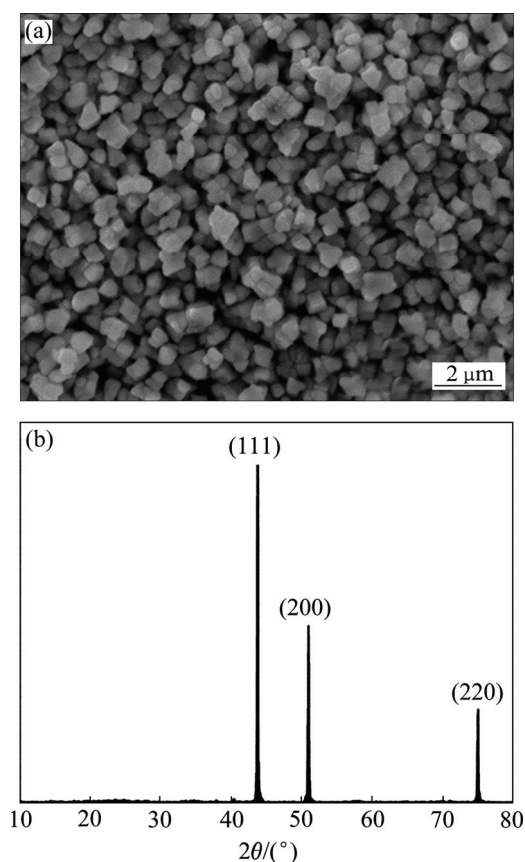


图 6 电化学萃取铸态 γ' 相形貌图以及相应的 XRD 谱

Fig. 6 SEM image(a) of electrolytic extracted γ' powder of cast single crystal superalloy and XRD pattern(b) of electrolytic extracted powder

学萃取的方法得到铸态单晶 γ' 相的体积分数为 65.95%, 这与用 IPP 计算图 3(b)的结果(62.36 ± 1.63)% 是相近的, 而与用图 3(a)计算的结果相差很大。在金相腐蚀过程中, 腐蚀掉 γ 基体的腐蚀剂也会使更底层的 γ' 相显露出来, 导致使用图 3(a)计算 γ' 相体积分数的时, 结果会偏大。因此, 在计算 γ' 相的体积分数时, 应当选取腐蚀掉 γ' 相的 SEM 像。

2.6 单晶高温合金枝晶干及枝晶间元素分布

单晶高温合金由于难熔元素含量高, 在铸态单晶高温合金中, 因为冷却速度慢, 熔点高的合金元素优先凝固, 熔点低的合金元素最后凝固, 导致铸态单晶高温合金不同的合金元素在枝晶干和枝晶间分布不同, 形成合金元素的偏析, 这不利于发挥镍基单晶高温合金优异的高温力学性能。因此, 对铸态单晶高温合金的元素偏析进行表征, 了解合金元素的偏析情况很重要。用 EPMA 分析铸态单晶高温合金枝晶干和枝晶间的元素偏析情况, 在试样表面一个 18×18 的矩阵区域内打点。图 7 所示为打点区域的 EBS 像, 从图 7 中可以看到比较明显的树枝晶形貌, 图 7 中白色的点为分布在枝晶间的碳化物。

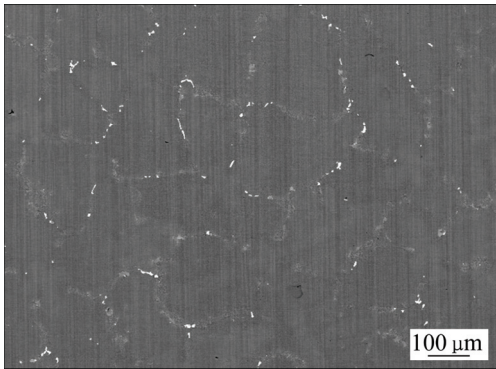


图 7 铸态单晶高温合金偏析测试区域

Fig. 7 Segregation testing area in as-cast single crystal superalloy

图 8 所示为合金元素的偏析示意图。以 Al+Ta 的含量为整体进行排序(见图 8(a)), Al、Ta 合金元素随着凝固过程的进行, 液相中的元素含量增加, 表明 Al、Ta 合金元素偏析于枝晶间。相反图 8(b)中的合金元素 Co、Cr 和 W 在凝固的初期在液相中聚集, 即偏析于枝晶干。

表 3 所列为经过 Modified Scheil 方程拟合后得到的主要合金元素的偏析系数。 K 值大于 1 表示合金元素偏析于枝晶干, 小于 1 表示合金元素偏析于枝晶间。由表 3 可知: 合金元素 Cr、Co、W 偏析于枝晶干,

为正偏析元素; 合金元素 Al、Ta 偏析于枝晶间, 为负偏析元素, 这与图 8 中的结果是一致的。为更加直观地表征合金元素的偏析情况, 本实验中也对合金元素进行了面分布扫描。图 9 所示为 EPMA 扫描的合金元

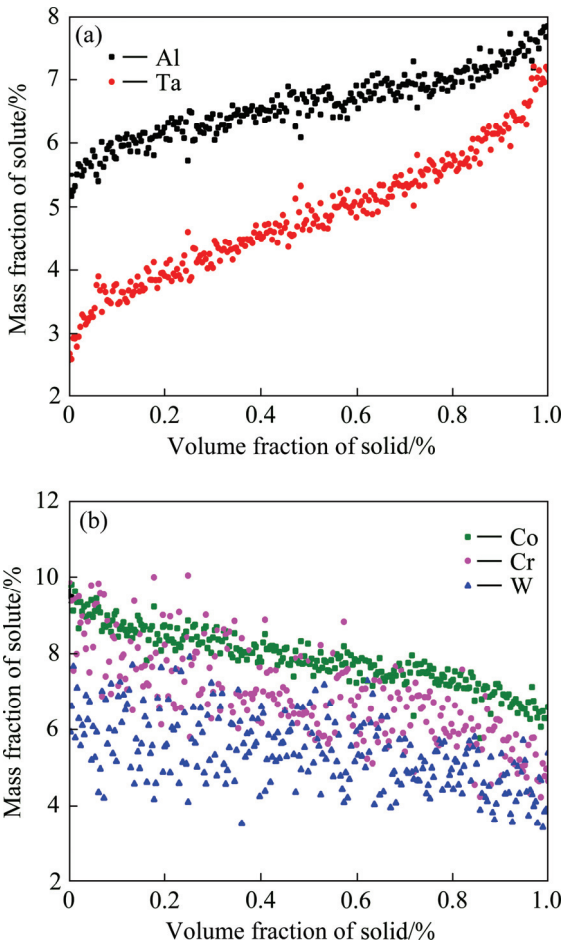


图 8 铸态镍基单晶高温合金元素偏析分析结果

Fig. 8 Segregation results in cast single crystal nickel base superalloy

表 3 合金元素在枝晶干和枝晶间的偏析系数

Table 3 Segregation coefficient analysis of alloy elements between dendrite and interdendrite

Alloy element	Segregation coefficient, K	Segregation orientation
Co	1.11	+
Cr	1.17	+
W	1.12	+
Ta	0.81	-
Al	0.92	-

“+” represents dendritic segregation; “-” represents interdendritic segregation.

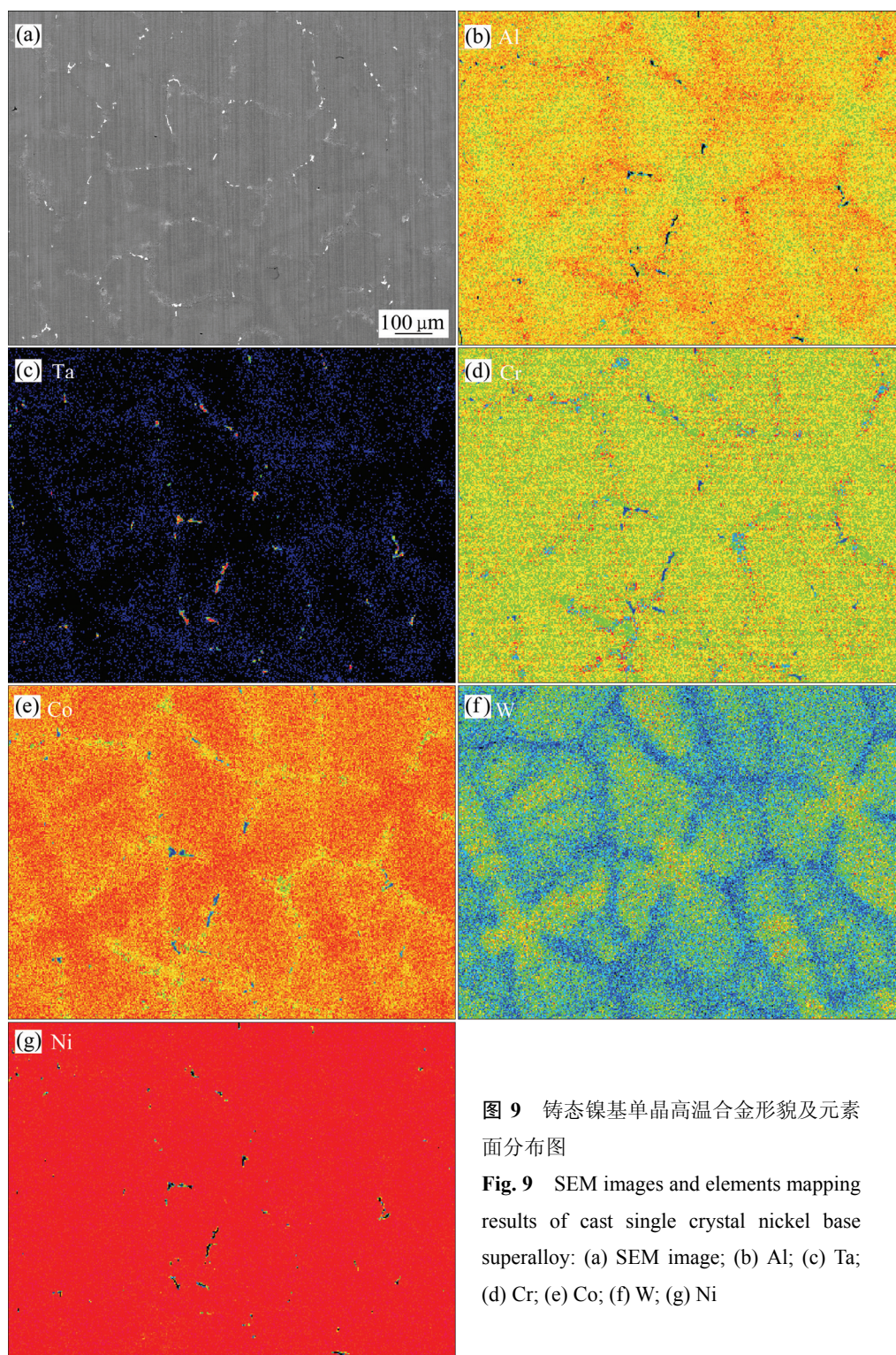


图9 铸态镍基单晶高温合金形貌及元素面分布图

Fig. 9 SEM images and elements mapping results of cast single crystal nickel base superalloy: (a) SEM image; (b) Al; (c) Ta; (d) Cr; (e) Co; (f) W; (g) Ni

素面分布图。图9中颜色越红的区域,代表该合金元素含量越高,蓝色的区域代表该合金元素含量最低。从图9中可知,Cr、Co、W合金元素偏析于枝晶干,Al、Ta合金元素偏析于枝晶间,验证了图8和表3的结果。

3 结论

1) 无铈镍基单晶高温合金铸态组织主要由 γ 基体相、 γ' 沉淀相以及 γ/γ' 共晶相组成,其中 γ' 相的形貌呈

“田”字形,平均尺寸为 1.38 μm ,体积分数为 $(62.36 \pm 1.63)\%$ 。

2) 经过金相腐蚀后,采用 γ/γ' 相自腐蚀电位的高低可以较好地说明单晶高温合金 γ' 相形貌的凹凸。

3) 根据 3 种方法获得 γ' 相体积分数的结果对比,确定采用腐蚀掉 γ' 相的 SEM 像用于计算 γ' 相体积分数。

4) 镍基单晶高温合金的铸态组织存在合金元素偏析,采用 Modified Scheil 方程拟合主要合金元素的偏析系数,确定 Cr、Co、W 合金元素偏析于枝晶干,Al、Ta 合金元素偏析于枝晶间。

REFERENCES

- [1] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 361–374.
- [2] REED R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. London: Cambridge University Press, 2006: 1–32.
- [3] SIMS C T, STOLOFF N S, HAGEL W C. Superalloys II[M]. New York: Wiley, 1986: 27–57.
- [4] 孙晓峰, 金涛, 周亦胄, 胡壮麒. 镍基单晶高温合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 1–11.
SUN Xiao-feng, JIN Tao, ZHOU Yi-zhou, HU Zhuang-qi. Research progress of nickel-base single crystal superalloy[J]. Materials China, 2012, 31(12): 1–11.
- [5] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 孙晓峰. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机, 2006, 31(3): 1–7.
HU Zhuang-qi, LIU Li-rong, JIN Tao, SUN Xiao-feng. Development of the Ni-base single crystal superalloys[J]. Aeroengine, 2006, 31(3): 1–7.
- [6] 朱鸥, 李玉龙, 张燕, 曹玮, 雷力明. 航空发动机用单晶铸造高温合金热处理工艺[J]. 铸造技术, 2013, 34(9): 339–342.
ZHU Ou, LI Yu-long, ZHANG Yan, CAO Wei, LEI Li-ming. Heat treatment process for single-crystal superalloys used in aeroengines[J]. Foundry Technology, 2013, 34(9): 339–342.
- [7] 马文有, 李树索, 乔敏, 宫声凯, 郑运荣, 韩雅芳. 热处理对镍基单晶高温合金微观组织和高温持久性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(6): 937–944.
MA Wen-you, LI Shu-suo, QIAO Min, GONG Sheng-kai, ZHENG Yun-rong, HAN Ya-fang. Effect of heat treatment on microstructure and stress rupture life of ni-base single crystal superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(6): 937–944.
- [8] VOORT G F V. Metallography of superalloys[J]. Industrial Heating, 2003, 70(10): 40–43.
- [9] VOORT G F V. Metallography and microstructures[M]. Ohio: ASM International, 2004: 820–859.
- [10] SALEHI R, SAMADI A, SAVADKOOHI M K. Influence of etchants on quantitative/qualitative evaluations of the γ' precipitates in a nickel-base superalloy[J]. Metallography, Microstructure and Analysis, 2012, 1(6): 290–296.
- [11] 贾建, 陶宇, 张义文, 张莹. 热等静压温度对新型粉末冶金高温合金显微组织的影响[J]. 航空材料学报, 2008, 28(3): 20–23.
JIA Jian, TAO Yu, ZHANG Yi-wen, ZHANG Ying. Effects of HIP temperature on microstructures of a new P/M superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(3): 20–23.
- [12] QIU C, WU X, MEI J, ANDREWS P, VOICE W. Influence of heat treatment on microstructure and tensile behavior of a hot isostatically pressed nickel-based superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 578(7): 454–464.
- [13] PAYTON E, PHILLIPS P, MILLS M. Semi-automated characterization of the phase in Ni-based superalloys via high-resolution backscatter imaging[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(10): 2684–2692.
- [14] 姚志浩, 董建新, 张麦仓, 陈昊. 铸造高温合金 K480 及 DD407 热处理中 γ' 相的析出行为[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 51–57.
YAO Zhi-hao, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, CHEN Hao. Precipitation behaviors of γ' phase in cast superalloy K480 and DD407 during heat treatment[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3): 51–57.
- [15] 宁礼奎, 郑志, 金涛, 唐颂, 刘恩泽, 佟健, 于永泗, 孙晓峰. 热处理对一种新型镍基单晶高温合金组织与性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(8): 1011–1018.
NING Li-kui, ZHENG Zhi, JIN Tao, TANG Song, LIU En-ze, TONG Jian, YU Yong-si, SUN Xiao-feng. Effect of heat treatments on the microstructure and property of a new nickel base single crystal superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(8): 1011–1018.
- [16] VOORT G F V. Metallography: Principles and practice[M]. Ohio: ASM International, 1999: 410–508.

Characterization on microstructure of non-rhenium single crystal Nickel-base superalloy

ZHUANG Xiao-li^{1,2}, WU Hong-yu^{1,2}, FANG Jiao^{1,2}, HUANG Lan^{1,2}, JIANG Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A new single crystal nickel-base superalloy was prepared with screw selecting method. The influences of etchants on microstructure, the segregation of alloy elements and the microstructure of alloy were studied. Optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy disperse spectroscopy (EDS), electron probe micro analysis (EPMA), X-ray diffraction (XRD), electrochemical extraction, electrochemical workstation and image analysis software image pro plus (IPP) were employed to characterize and study the single crystal nickel-base superalloy. The results show that the casting single crystal nickel-base superalloy is consisted of γ matrix, γ' precipitates and γ/γ' eutectic. Different etchants can cause different etching results which are determined by self-corrosion potential. As for γ' volume fraction evaluation, the γ' etchants can provide appropriate results. The segregation of casted single crystal superalloy is severe. The chromium, cobalt and tungsten are dendritic segregation, while the aluminum and tantalum are interdendritic segregation.

Key words: Ni-base single crystal superalloy; metallographic etchant; microstructure; γ' phase; elements segregation

Foundation item: Project(2013zzts188) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, China; Project(2012AA03A514) supported by the National High Research Development Program of China; Projects(51401242, 61271356, 51205031) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project supported by State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, China

Received date: 2015-07-10; **Accepted date:** 2015-12-28

Corresponding author: HUANG Lan; Tel: +86-731-88877812; E-mail: hazefog2013@yahoo.com

(编辑 龙怀中)