

## 镍基粉末高温合金枝晶间亚稳碳化物

马文斌<sup>1)</sup>, 刘国权<sup>1,2)</sup>✉, 胡本芙<sup>1)</sup>, 吴凯<sup>1)</sup>, 张义文<sup>3)</sup>

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

3) 钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081

✉ 通信作者, E-mail: g.liu@ustb.edu.cn

**摘要** 对急凝固镍基高温合金松散粉末热等静压成型合金中亚稳碳化物及其相间反应进行了研究. 随着热处理温度的升高, 粉末中合金元素的分布逐渐均匀化, 但枝晶间 MC 能在较高的温度下保持稳定, 使 Ti 和 Zr 在该处仍有较高含量. 原始粉末中枝晶间主要分布着块状和花状的 MC 型碳化物, 在预热处理过程中粉末枝晶间块状碳化物分解, 发生  $M_{23}C_6$  和  $M_6C$  的析出反应, 而花状碳化物的成分及形貌则保持相对稳定. 成型合金残余枝晶间分布的碳化物主要由块状  $M_6C$  和 MC 及花状 MC 组成, 形变再结晶可以促进枝晶间碳化物的溶解.

**关键词** 高温合金; 镍合金; 粉末冶金; 热等静压; 枝晶; 偏析; 碳化物; 预热处理

**分类号** TG146.1<sup>+</sup>5; TF124.32

## Non-equilibrium carbides in the interdendritic region of a nickel-based powder metallurgy superalloy

MA Wen-bin<sup>1)</sup>, LIU Guo-quan<sup>1,2)</sup>✉, HU Ben-fu<sup>1)</sup>, WU Kai<sup>1)</sup>, ZHANG Yi-wen<sup>3)</sup>

1) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) High Temperature Materials Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China

✉ Corresponding author, E-mail: g.liu@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** This article studies carbides and their reactions in nickel-base superalloy powders prepared by rapid solidification and the hot isostatic pressed (HIPed) alloy. With the pre-treated temperature rising, the segregation of alloy elements in the powders reduces, but MC carbides in the interdendritic region still exist at elevated temperatures. As a result, there are more Ti and Zr at this area. Blocky and petal-like MC carbides distribute in the interdendritic region of the initial powders. During the pre-heat treatment the blocky carbides decompose, and  $M_{23}C_6$  and  $M_6C$  precipitate in the interdendritic region; however, the petal-like carbides can remain stable at higher temperatures. Carbides in the interdendritic region of the HIPed alloy are composed of blocky  $M_6C$  and MC and petal-like MC carbides, but deformation and recrystallization can induce the MC carbides to decompose.

**KEY WORDS** superalloys; nickel alloys; powder metallurgy; hot isostatic pressing; dendrites; segregation; carbides; preheating

将粉末冶金的方法应用于高温合金其主要目的是消除因多种合金元素的添加而引起的成分偏析, 可得到组织性能稳定的高温合金部件. 但是, 由于材料和工艺的限制, 部分直接热等静压 (as hot isostatic pressing, As-HIP) 合金中存在着枝晶残

余<sup>[1-2]</sup>. 成分的不均匀必然会导致合金在制备和服役过程中析出相分布的不均匀, 对合金的制备及使用产生不利影响.

粉末预热处理是一种控制粉末高温合金中原始粉末颗粒边界 (previous particle boundary, PPB)

收稿日期: 2012-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2010CB631204)

的重要手段<sup>[3]</sup>, 因此对粉末中碳化物在不同温度下变化规律进行研究具有重要意义. 已有大量的研究工作关注于原始粉末枝晶间碳化物及其在预热处理后的变化规律<sup>[4-7]</sup>, 但对于成型合金中以残余枝晶形式分布的碳化物却鲜有报道.

本文对不同温度预热处理后粉末中枝晶成分偏析及碳化物转变进行探讨, 进而对直接热等静压合金原始粉末枝晶间分布的碳化物进行分析以得出温度及热等静压工艺对残余枝晶的影响规律, 从而为 FGH96 制备工艺的优化提供理论依据.

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验材料

合金经过真空感应炉熔炼, 铸成圆棒 ( $\phi 50$  mm), 采用车床去除表面氧化皮后作为等离子旋转电极棒使用. 雾化后进行筛分、去气、装包套和封焊. FGH96 合金粉末的化学成分见表 1. 粉末颗粒尺寸选用 50~300  $\mu\text{m}$  分级研究. 采用热等静压成型, 热等静压制度为 130 MPa 和  $(1180\pm 3)^\circ\text{C}$ .

表 1 FGH96 合金粉末的化学成分 (质量分数)

Cr	Co	W	Mo	Nb	Al	Ti	C	B	Zr	Ni
15.8	13	4.1	4.3	0.80	2.30	3.8	0.03	0.01	0.03	Bal.

### 1.2 实验方法

粉末试样制备采用化学沉积镀镍固定粉末的方法. 将沉积好的样品用 400# ~1000# 砂纸磨制成金相试样. 粉末预热处理的温度分别为 850、900、950、1050、1100 和 1150  $^\circ\text{C}$ . 保温时间为 5 h, 冷却方式为水冷.

侵蚀后的粉末和成型合金试样在扫描电子显微镜上进行观察. 采用一级碳萃取复型技术制备粉末和直接热等静压合金的透射试样. 成型合金及粉末一次碳膜萃取复型试样的制备方法如下: 利用真空喷碳仪在合金侵蚀表面喷镀一层碳膜, 取出后用小刀在镀膜表面划出 2 mm $\times$ 2 mm 网格并在侵蚀剂中浸泡 3 h, 用铜网捞起并用蒸馏水洗净晾干, 即制成碳化物的一次碳膜萃取复型试样. 利用 JMS-2100 透射电子显微镜结合 Oxford 能谱仪对萃取碳化物进行观察与分析. 采用 JEOL JXA-8100 电子探针对粉末中枝晶偏析进行测定.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 粉末中枝晶偏析及枝晶间碳化物

#### 2.1.1 粉末中枝晶偏析

利用扫描电镜及其附带的电子探针对 FGH96

合金粉末进行形貌观察与偏析测定, 分别测量粉末凝固组织中枝晶臂、枝晶间和枝晶臂三点, 用来表示粉末凝固组织偏析.

FGH96 粉末在不同温度预热处理后合金元素的偏析如图 1 所示. 分析结果发现, Cr、W 和 Mo 属枝晶臂偏析元素, 而 Nb、Ti 和 Zr 则属于枝晶间偏析元素; 且随着预热处理温度的升高, 枝晶臂与枝晶间元素含量的差距逐渐减小. 当预热处理温度为 1150  $^\circ\text{C}$  时弱碳化物形成元素的变化趋势接近于平缓, 而强碳化物形成元素 Ti、Nb 和 Zr 在枝晶间仍有一定程度的富集. 需要指出的是: 此处所述的强碳化物形成元素是指极易形成 MC 型碳化物的元素, 包括 Ti、Nb 和 Zr; 下文所述的弱碳化物形成元素是指形成 MC 型碳化物能力稍弱的元素, 包括 Cr、Mo 和 W.

在高温预热处理时, 枝晶组织存在的浓度梯度促进溶质原子在枝晶臂与枝晶间扩散, 温度越高扩散越快, 随着预热处理温度的升高枝晶偏析逐渐减小. 从图 1 中可以看出, 在不同温度预热处理时, 枝晶间有较高的 Cr 和 W 含量, 这也为  $\text{M}_6\text{C}$  和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  在预热处理过程中析出提供了成分准备. 当预热处理温度达到 1150  $^\circ\text{C}$  时, 粉末中大部分  $\gamma'$  相都溶入基体, 进一步促进合金元素的均匀化, 因此合金中的基体及  $\gamma'$  相形成元素 (Co、Cr、Mo、Al 等) 基本上分布均匀, 但此时粉末枝晶间仍分布着部分碳化物, 导致强碳化物形成元素 (Ti、Nb 和 Zr) 在枝晶间仍有一定程度的富集.

#### 2.1.2 枝晶间碳化物

利用透射电子显微镜结合能谱仪对原始粉末的碳化物一次碳膜萃取复型进行分析观察, 原始粉末中碳化物的形貌及分布如图 2 所示. 电子衍射结合能谱分析发现不同粒度粉末中的碳化物主要是 MC 型碳化物, 且大部分分布于枝晶间, 而枝晶臂上也有少量碳化物的分布. 原始粉末中的碳化物含有较多的弱碳化物和非碳化物形成元素, 称为 MC', 以示区别<sup>[5]</sup>. 从图 2 中可以看出, 粉末中碳化物的形貌大致可以分为花状、条状和块状. 观察发现原始粉末中大部分条状和块状碳化物沿着枝晶间断续分布, 且两种碳化物成分相近, 推测它们可能为同一类碳化物只是在二维截面上呈现不同的形貌而已, 因此将这两中碳化物统称为块状. 表 2 中列出了不同粒度原始粉末枝晶间 MC' 中强碳化物形成元素的含量, 可以看出随着粉末尺寸的减小 (冷速的增加), 块状 MC' 中强碳化物形成元素的含量逐渐下降, 而花状 MC' 的成分则没有明显的变化.

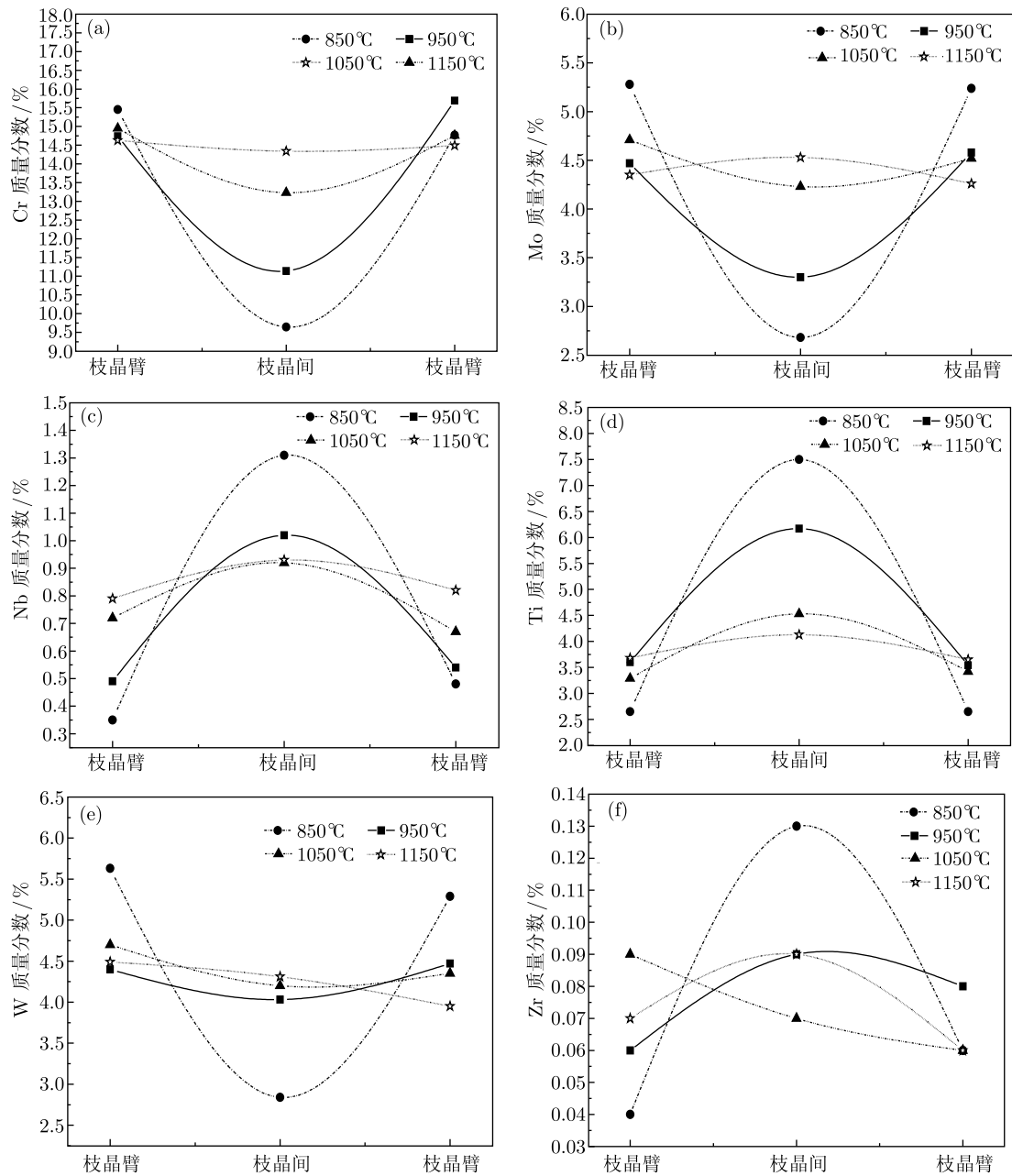


图 1 FGH96 合金不同温度预热处理粉末中合金元素的偏析. (a) Cr; (b) Mo; (c) Nb; (d) Ti; (e) W; (f) Zr

Fig.1 Elemental segregation of pretreated FGH96 powders at different temperatures: (a) Cr; (b) Mo; (c) Nb; (d) Ti; (e) W; (f) Zr

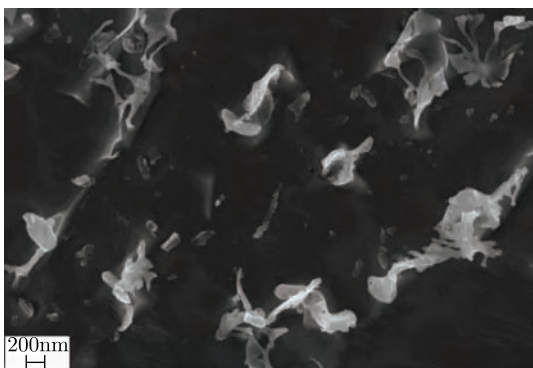


图 2 FGH96 合金原始粉末中析出相分布

Fig.2 Precipitate distribution in initial FGH96 powders

表 2 不同粒度 FGH96 原始粉末 MC' 中强碳化物形成元素 (Ti+Nb+Zr) 质量分数

Table 2 Strong carbides forming elements (Ti+Nb+Zr) mass fraction of MC' in initial FGH96 powders with different sizes %

粉末粒度/ $\mu\text{m}$	花状 MC'	块状 MC'
150~250	53.91	52.21
50~150	48.19	46.32
0~50	51.18	30.60

在经过不同温度预热处理之后, 花状和块状碳化物随着预热处理温度的变化呈现不同的规律. 块

状碳化物成分随温度的变化关系如图 3 所示. 当预热处理温度达到 950 °C 以上时, 随着预热处理温度的升高块状碳化物中强碳化物形成元素的含量大幅升高. 也可以说块状碳化物在预热处理过程中完成了由亚稳 MC' 向 MC 型碳化物的转变. 在 1100 °C 预热处理后粉末中块状 MC 碳化物形貌如图 4 所示.

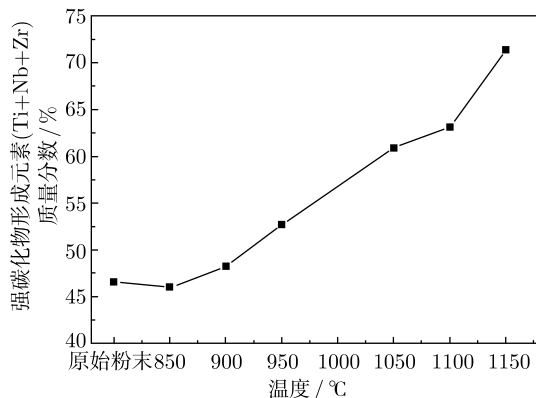


图 3 不同温度预热处理后枝晶间块状碳化物中强碳化物形成元素质量分数

Fig.3 Strong carbides forming elements mass fraction of block carbides pretreated at different temperatures

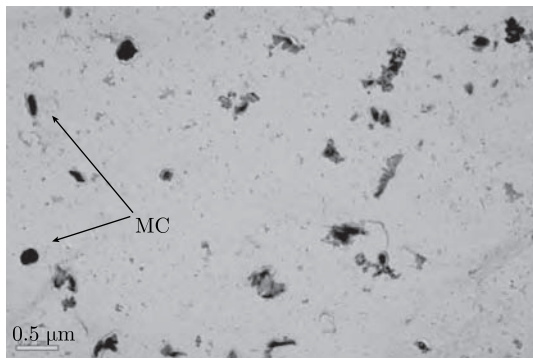


图 4 1100 °C 预热处理粉末中碳化物的一次萃取复型

Fig.4 Carbides extracted from the powders after preheating at 1100 °C

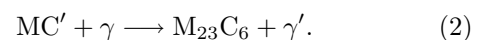
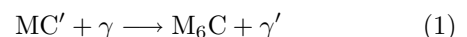
研究指出<sup>[9]</sup>, 在较高的冷速下碳化物与  $\gamma$  发生共晶的成分区域变宽, 碳化物以伪共晶 (MC+ $\gamma$ ) 的方式析出, 导致碳化物成分的复杂化. 因此推测原始粉末中的块状碳化物是由枝晶间的残液通过伪共晶的方式在相对较低温度下形成的, 此时枝晶间的残液中分布有较多弱碳化物和非碳化物形成元素, 在较高的冷速下这些元素来不及从碳化物中扩散出来, 使此类碳化物中含有较多的 Mo、W、Ni 等弱碳化物和非碳化物形成元素. 由于其形成温度较低且不稳定, 使其在预热处理过程中通过提高强碳化物形成元素的含量向稳定的 MC 转变, 同时大量弱碳化物形成元素在其周围富集导致了  $M_6C$  和  $M_{23}C_6$

的析出.

在枝晶间分布的花状 MC', 其形貌及成分随粉末粒度及预热处理温度的变化则又呈现不同的变化规律. 观察发现, 花状碳化物大多位于枝晶间, 随着粉末尺寸的减小花状碳化物的尺寸也逐渐减小. 能谱分析发现, 花状碳化物中强碳化物形成元素 (Ti、Zr 和 Nb) 的含量与粉末尺寸无明显关系 (表 2). Sun 等<sup>[8]</sup> 对定向凝固镍基单晶高温合金的研究指出, 凝固过程中析出的碳化物, 在冷却过程中不断消耗着残液中的碳化物形成元素, 使其界面前沿达到  $\gamma+MC$  的共晶成分, 从而以共晶的方式消耗尽残液, 形成界面为波浪状的碳化物. 在某急冷单晶镍基合金中也发现了类似形貌的碳化物以 MC+ $\gamma$  的共晶形式析出<sup>[9]</sup>, 所以原始粉末枝晶间分布的花状碳化物也是以共晶的方式形成的. 发生  $\gamma+MC$  共晶的成分范围是相对固定的, 因此冷速对花状碳化物的成分无明显影响, 而越小尺寸的粉末其凝固完成所需要时间就相对越短, 因此提供给花状碳化物长大的时间和空间相对较小, 所以花状碳化物的尺寸往往要受到粉末冷速的影响.

图 5 显示了在不同预热处理温度下粉末中花状碳化物的形貌. 可以看出花状碳化物在预热处理过程中其形貌没有较大变化, 在 1150 °C 的高温预热处理后仍然在枝晶间残留, 因此花状碳化物拥有较高稳定性. 利用能谱对预热处理粉末一次碳膜萃取复型中 MC' 成分进行测定发现, 花状 MC' 中强碳化物形成元素的质量分数随温度的变化程度并不大, 只是在较小的成分范围内波动 (图 6). 胡本芙等<sup>[10]</sup> 研究指出, 花状碳化物形成共晶温度较高, 在 1280~1300 °C 之间, 可以在较高的温度下保持稳定.

在后续的预热处理过程中发现, 块状 MC' 极易与周围的基体反应转变为  $M_{23}C_6$  和  $M_6C$  (图 7). 可以看到 950 °C 预热处理后, 在原块状 MC' 位置出现了  $M_{23}C_6$ , 而 1050 °C 预热处理后则出现了  $M_6C$ , 因此推测在该温度下发生了以下碳化物反应:



在粉末凝固后期析出的碳化物, 因已接近凝固完成阶段, 提供给碳化物形成的扩散时间很短, 含有较多的弱碳化物和非碳化物形成元素. 在后续的热处理过程中碳化物中弱碳化物形成元素向周围排出造成 Mo、Cr、W 等在 MC' 周围富集, 促进了  $M_6C$  和  $M_{23}C_6$  在 950~1050 °C 的范围内的析出, 同时块



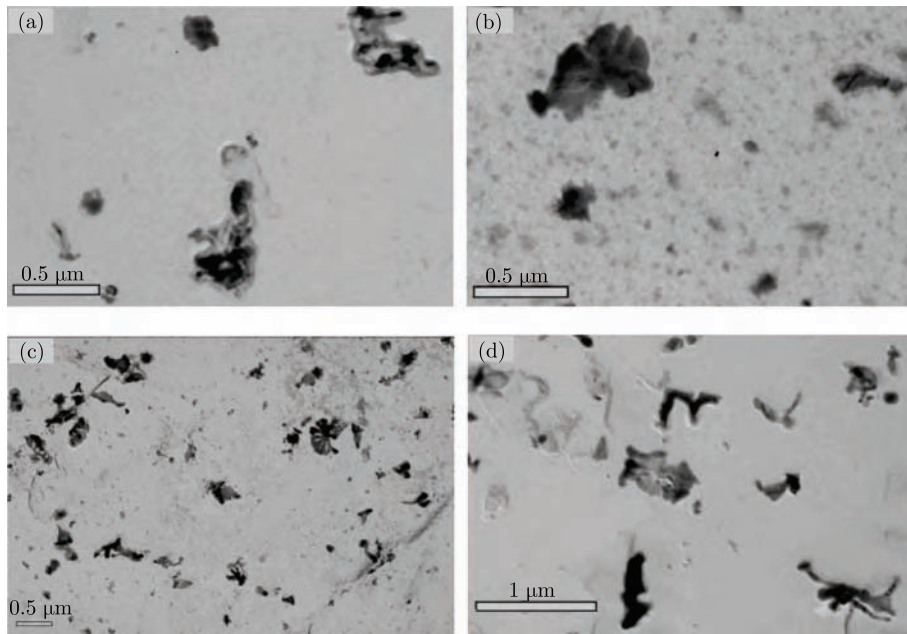


图 5 不同温度预热处理后 FGH96 粉末中碳化物. (a) 850 °C; (b) 950 °C; (c) 1050 °C; (d) 1150 °C

Fig.5 Carbides in FGH96 powders pretreated at different temperatures: (a) 850 °C; (b) 950 °C; (c) 1050 °C; (d) 1150 °C

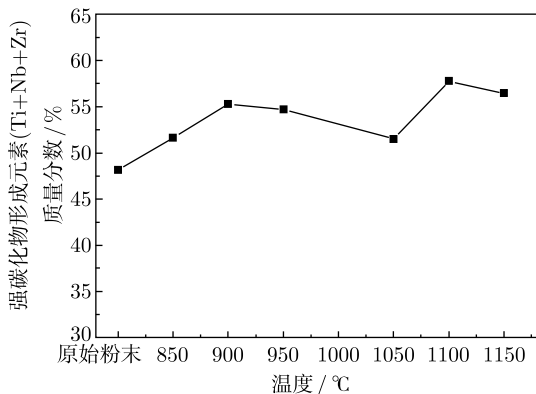


图 6 不同温度预热处理后粉末枝晶间花状碳化物中强碳化物形成元素质量分数

Fig.6 Strong carbides forming elements mass fraction of petal-like carbides in FGH96 powders pretreated at different temperatures

状 MC' 会逐渐分解为  $M_6C$  和  $M_{23}C_6$ , 而原 MC' 中

的 Ti、Nb 等元素并不能迅速的扩散开去而在新析出的  $M_6C$  和  $M_{23}C_6$  周围基体中富集.

当预热处理温度升至 1150 °C 时, 在粉末中已经观察不到  $M_6C$  或  $M_{23}C_6$ , 表明在该温度范围内, 只有 MC 型碳化物可以稳定存在. 利用电子衍射结合能谱分析粉末的一次碳膜萃取复型试样发现, 1150 °C 时粉末中的碳化物主要由块状和花状的 MC 型碳化物组成 (图 5(d)).

### 2.2 成型合金中的枝晶间碳化物

热等静压后合金发生形变再结晶的区域中碳化物均匀分布, 而在变形量较小的原始粉末中枝晶间碳化物成列分布, 如图 8(a) 所示. 在高倍下观察残余枝晶处分布的碳化物从形貌上可以分为两类, 一类为花状, 另一类为块状, 如图 8(b) 所示. 花状碳化物可能是在制粉过程中以共晶的方式析出的.

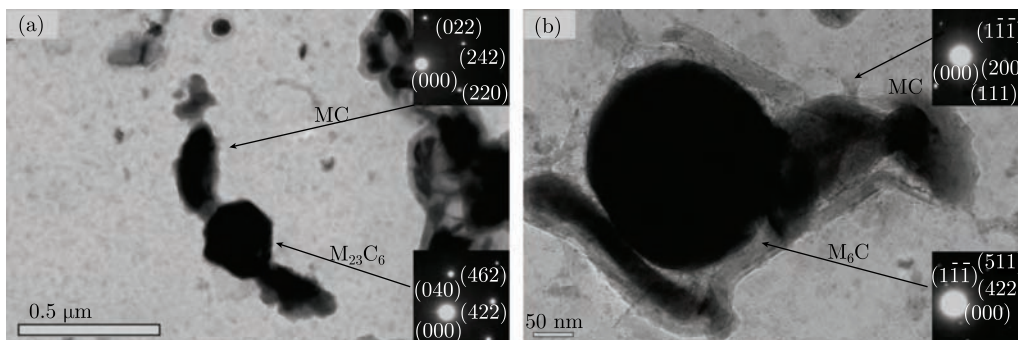


图 7 不同温度预热处理粉末中碳化物的转变. (a) 950 °C; (b) 1050 °C

Fig.7 Carbide transformations in the pretreated powders: (a) 950 °C; (b) 1050 °C

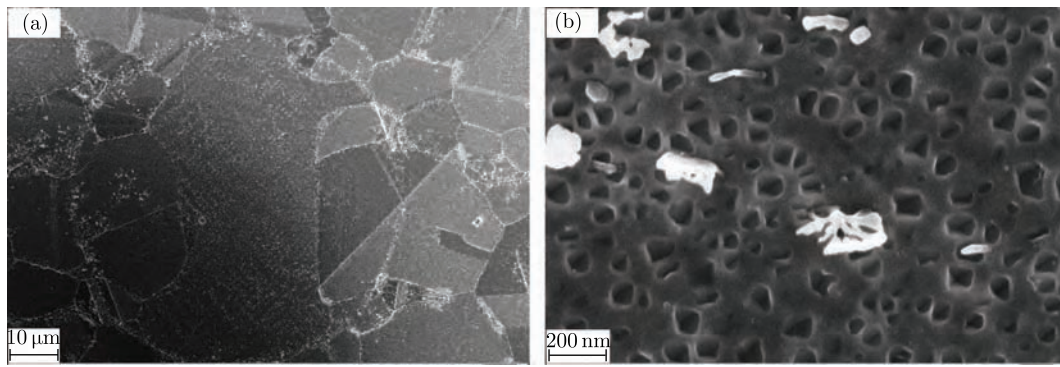


图 8 热等静压 FG96 合金中的碳化物. (a) 碳化物分布; (b) 碳化物形貌

Fig.8 Carbides of the HIPed FG96 alloy: (a) distribution of carbides; (b) morphology of carbides

利用电子衍射及能谱对热等静压合金碳化物一次碳膜萃取复型进行分析, 碳化物形貌如图 9 所示. 发现热等静压合金枝晶间碳化物大致可以分为三种, 富 W 的块状  $M_6C$ , 富 Ti 的块状和花状 MC. 利用能谱分析三种碳化物成分的结果如表 3 所示. 块状 MC 型碳化物含有比花状更多的强碳化物形成元素. 比较发现, 块状 MC 碳化物中强碳化物形成元素的含量与预热处理过程中在枝晶间析出的 MC 的成分相近, 因此推测在成型合金枝晶间分布的块状 MC 是在热等静压过程中由亚稳碳化物  $MC'$  转化而来的. 同时在 MC 的转变过程中向周围基体中排出一定量的弱碳化物形成元素如 W、Cr 和 Mo, 这些元素在基体的富集导致了  $M_6C$  在 MC 附近的

析出, 因此可以在枝晶间观察到  $M_6C$  的存在.

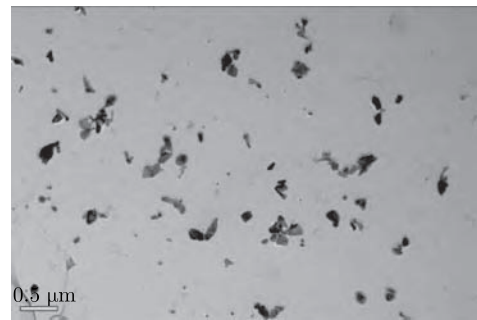


图 9 热等静压 FG96 合金枝晶间碳化物的一次碳膜萃取复型

Fig.9 Interdendritic carbides extracted from the HIPed FG96 alloy

表 3 热等静压 FG96 合金枝晶间碳化物成分 (质量分数)

Table 3 Composition of interdendritic carbides in the HIPed FG96 alloy

碳化物	强碳化物形成元素 (Ti+Zr+Nb)	弱碳化物形成元素 (Cr+Mo+W)	非碳化物形成元素 (Ni+Co+Al)	%
块状 MC	79.81	20.00	0.19	
块状 $M_6C$	43.98	54.06	1.96	
花状 MC	67.48	31.29	1.23	

在变形量较大的区域各种缺陷的密度高, 原子的扩散速率高, 再结晶的发生进一步促进了成分的均匀化, 能大幅地减轻枝晶偏析<sup>[11]</sup>, 因此在热等静压过程中, 在原始枝晶间分布的 Ti、Nb、Zr 等强碳化物形成元素逐渐扩散开来, 使得原始枝晶间不再成为碳化物选择析出的位置, 在再结晶区域观察到碳化物大多呈块状均匀分布. 原始枝晶间分布的花状碳化物在变形过程中部分被破碎, 且发生再结晶的温度已接近碳化物的溶解温度, 因此推测碳化物可能发生了类似于在亚固溶处理过程中再结晶诱发  $\gamma'$  相溶解的反应<sup>[12]</sup>. 畸变能促使再结晶前沿的碳化物溶入基体并在再结晶晶粒内部以颗粒的形态均匀析出, 使得再结晶区域碳化物分布得更加弥散和

细小. 在变形较小的原始粉末内部, 不会发生再结晶促进碳化物溶解的现象, 也就没有 MC 型碳化物的溶解和再析出, 致使未发生再结晶的区域中, 碳化物的分布与残余枝晶存在着一定的对应关系.

### 3 结论

(1) Mo、Cr 和 W 属枝晶臂偏析元素, 而 Nb、Ti 和 Zr 则属于枝晶间偏析元素, 随着预热处理温度的升高, 粉末中合金元素的分布逐渐均匀化, 但因枝晶间碳化物在预热处理过程中析出使得高温预热处理后 Ti、Nb 等在枝晶间仍有较高的含量.

(2) 随着预热处理温度的升高粉末枝晶间依次发生  $M_{23}C_6$  (850~1050 °C) 和  $M_6C$  (950~1100 °C) 的

析出反应。

(3) 原始粉末中的枝晶间主要分布着块状和花状的 MC'。其中花状的 MC' 能够在较高的温度下保持成分及形貌的稳定, 随着温度的上升块状 MC' 中强碳化物形成元素 Ti、Nb 和 Zr 的含量逐渐上升。

(4) 在未发生再结晶的原始粉末颗粒中枝晶间碳化物成列分布, 主要由富 Ti 的块状和花状 MC 及富 W 的块状 M<sub>6</sub>C 组成, 而在再结晶区域中只观察到呈块状均匀分布的碳化物。

### 参考文献

- [1] Wang X Q, Luo X J, Zou J W. Effects of hip temperature on microstructure of FGH96 superalloy. *J Aeronaut Mater*, 2006, 26(3): 293  
(王旭青, 罗学军, 邹金文. 热等静压温度对 FGH96 粉末高温合金显微组织的影响. 航空材料学报, 2006, 26(3): 293)
- [2] Jia J, Tao Y, Zhang Y W, et al. Effects of hip temperature on microstructures of a new P/M superalloy. *J Aeronaut Mater*, 2008, 28(3): 20  
(贾建, 陶宇, 张义文, 等. 热等静压温度对新型粉末冶金高温合金显微组织的影响. 航空材料学报, 2008, 28(3): 20)
- [3] Zhao J P, Tao Y, Yuan S Q, et al. The problem of prior particle boundary precipitation in P/M superalloys. *Powder Metall Ind*, 2010, 20(4): 43  
(赵军普, 陶宇, 袁守谦, 等. 粉末冶金高温合金中的原始粉末颗粒边界 (PPB) 问题. 粉末冶金工业, 2010, 20(4): 43)
- [4] Wu K, Liu G Q, Hu B F, et al. Carbides in a new type Hf-Ta-containing nickel-based superalloy powder. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(11): 1464  
(吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 含 Hf 和 Ta 新型镍基高温合金粉末中碳化物相的研究. 北京科技大学学报, 2010, 32(11): 1464)
- [5] Hu B F, Chen H M, Song D, et al. Research on MC type carbide in nickel-based superalloy powders during rapid solidification. *Acta Metall Sin*, 2005, 41(10): 1042  
(胡本芙, 陈焕铭, 宋锋, 等. 镍基高温合金快速凝固粉末颗粒中 MC 型碳化物相的研究. 金属学报, 2005, 41(10): 1042)
- [6] Wu K, Liu G Q, Hu B F, et al. Research on trace elements-containing phases in a new type nickel-based P/M superalloy. *Rare Met Mater Eng*, 2011, 40(2): 279  
(吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 新型镍基粉末高温合金微量元素相研究. 稀有金属材料科学与工程. 2011, 40(2): 279)
- [7] Gao Z G, Zhang G Q, Li Z, et al. Microstructure characteristics of superalloy powders during rapid solidification prepared by argon atomisation. *Powder Metall Technol*, 2011, 29(2): 93  
(高正江, 张国庆, 李周, 等. 氩气雾化高温合金粉末的凝固组织特征. 粉末冶金技术, 2011, 29(2): 93)
- [8] Sun W R, Lee J H, Seo S M, et al. The eutectic characteristic of MC-type carbide precipitation in a DS nickel-base superalloy. *Mater Sci Eng A*, 1999, 271(1): 143
- [9] Wang H M, Zhang J H, Tang Y J. Rapidly solidified MC carbide morphologies of a laser-glazed single-crystal nickel-base superalloy. *Mater Sci Eng A*, 1992, 156(1): 109
- [10] Hu B F, Chen H M, Song F, et al. The effect of pre-heating on carbide precipitates in FGH95 superalloy powders prepared by PREP. *Acta Metall Sin*, 2003, 39(5): 470  
(胡本芙, 陈焕铭, 宋锋, 等. 预热处理对 FGH95 高温合金粉末中碳化物的影响. 金属学报, 2003, 39(5): 470)
- [11] Luo X J, Ji S. Application study of plastic processing method in P/M superalloys // *The Second International Symposium on Advanced Metal Forming Technology and the 9th China Conference on Advanced Technology of Plasticity*. Beijing, 2005: 159  
(罗学军, 计晟. 塑性加工方法在粉末高温合金中的探索研究 // 第九届全国塑性工程学术年会、第二届全球华人先进塑性加工技术研讨会论文集. 北京, 2005: 159)
- [12] Dahlen M, Winberg L. The influence of  $\gamma'$ -precipitation on the recrystallization of a nickel base superalloy. *Acta Metall*, 1980, 18(1): 41