

高温固溶热处理对 HIP 态 FGH96 合金中碳化物影响规律的体视学研究

Effect of High Temperature Solution
Treatment on Carbides in HIPed
FGH96 Alloy by Stereology Method

马文斌¹, 刘国权^{1,2}, 胡本芙¹, 张义文³, 刘建涛³

(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)

MA Wen-bin¹, LIU Guo-quan^{1,2}, HU Ben-fu¹,

ZHANG Yi-wen³, LIU Jian-tao³

(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)

摘要: 利用金相显微镜, 扫描电镜和透射电镜并结合体视学基本原理, 对在不同固溶温度和冷却方式(空冷和炉冷)下热等静压(HIP)态 FGH96 合金中碳化物的数量、空间分布及尺寸分布等进行了定量表征和对比研究。结果表明: HIP 态 FGH96 合金中碳化物主要为富 Nb 和 Ti 的 MC, 在原始颗粒边界(PPB)上分布的碳化物主要为块状, 在 PPB 区域以外分布的碳化物主要由块状和花状 MC 组成。在 1180℃ 以下进行固溶热处理时, 碳化物含量增加并且加剧了合金中的 PPB; 当固溶温度达到 1180℃ 以上时, 随着固溶温度的升高, 合金中碳化物数量减少, PPB 逐渐消失。1200℃ 固溶后炉冷, 固溶在基体中的碳主要以非 PPB 碳化物形式重新析出, 会导致合金中 PPB 碳化物数量的降低, 即使合金中的碳化物总量与固溶热处理前几乎相同。另外, 空冷合金中 PPB 碳化物尺寸为单峰分布, 而炉冷合金中则表现为双峰, 后者与炉冷过程中碳化物能够重新析出密切相关。

关键词: 粉末高温合金; 高温固溶热处理; 碳化物; 定量表征; 体视学

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.11.008

中图分类号: TG113.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)11-0043-07

Abstract: The OM, SEM, TEM and the stereology method were used to observe and quantitatively characterize the carbides in HIPed FGH96 alloys before and after high temperature solution treatment at different temperature. The results show that the carbides in HIPed FGH96 alloy are mainly MC type carbides which are rich in Ti and Nb. The shape of PPB carbides was block, while the non-PPB carbides were petal and block. Compared with the HIPed alloy, the amount of PPB carbides as well as the total carbides in FGH96 alloy increased when the heat treatment temperature was below 1180℃. But the amount of carbides decreased and the PPB gradually disappeared with the increasing temperature when the heat treatment temperature was above 1180℃. The carbides precipitated mainly as non-PPB carbides if the HIPed alloy was furnace cooled. However, such re-precipitation was suppressed when the alloy was air cooled from the heat treatment temperature. Thus, when the alloy was either furnace or air cooled, the amount of PPB carbides was significantly reduced even the total amount of carbides retains almost the same as that in the HIPed alloy in case of furnace cooling. Moreover, the PPB carbide size distribution in the air cooling alloy appears a unimodal mode, while that in the fur-

nance cooling alloy is a bimodal one, the latter of which was resulted from the re-precipitation of carbides occurred in the furnace cooling process.

Key words: P/M superalloy; high temperature solution treatment; carbide; quantitative characterization; stereology method

粉末高温合金具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高和抗疲劳性能好等特点,使其成为高性能发动机热端部件的首选材料。FGH96 作为国内的第二代粉末高温合金,具有较高的蠕变强度,裂纹扩展抗力及较好的损伤容限性能^[1,2]。以直接热等静压工艺成型的 FGH96 合金涡轮盘挡板已率先应用于某新型航空发动机上^[3]。但是由于制备工艺和成分设计问题,直接热等静压合金中存在着较为严重的原始粉末颗粒边界(Previous Particle Boundary, PPB)^[4-6]。沿着 PPB 连续分布的第二相(大部分为 MC 型碳化物)形成了合金中弱结合界面^[7],对合金的加工和机械性能十分不利^[5,8,9]。已有研究指出 PPB 可以通过调整合金成分、粉末预热处理、两阶段 HIP 及高温固溶处理等方法得到缓解甚至消除^[10-12]。其中高温固溶热处理则是操作较为简单的一种方法,通过促使合金中大部分碳化物溶解^[13]以改善合金的 PPB。已有高温固溶热处理的研究多重点关注对合金组织的影响规律^[14],碳化物析出相在高温固溶热处理过程中的变化规律则鲜见报道。

本工作通过对高温固溶热处理及不同冷却方式下 FGH96 合金中碳化物的研究,以深入了解高温固溶热处理及其冷却方式对碳化物的影响规律,为 FGH96 合金的 PPB 控制提供基础数据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验用 FGH96 母合金经过真空感应炉熔炼,铸成 $\phi 50\text{mm}$ 的圆柱,利用车床去除圆棒表面氧化皮,作为旋转自耗电极备用。采用等离子旋转电极的方法(Plasma Rotating Electrode Process, PREP)制备合金原始粉末。雾化后的粉末经过筛分,去气,选取尺寸为 $50\sim 150\mu\text{m}$ 粉末封入不锈钢筒中,进行热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)。HIP 工艺制度为: 130MPa , $1180^\circ\text{C}\times 3\text{h}$ 。实验合金化学成分如表 1 所示。

1.2 实验方法

利用线切割从 HIP 合金锭上切取 $\phi 10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 圆柱 8 个,分别封入两个充满氩气的玻璃管中进行高温固溶热处理,具体热处理制度如表 2 所示,冷

表 1 FGH96 合金粉末的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of PREP FGH96 powders (mass fraction/%)

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

却方式分别为空冷(Air Cooling, AC)和炉冷(Furnace Cooling, FC)。

表 2 高温固溶热处理制度

Table 2 Heat treatment plan of high temperature solution treatment

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Annealing time/h	Cooling method
1140	5	AC
1160	5	AC
1180	5	AC
1200	5	AC
1220	5	AC&FC
1240	5	AC
1260	5	AC

HIP 及高温固溶后合金依次经过砂纸磨平和机械抛光后,进行侵蚀以制备金相及扫描电镜试样。金相和扫描电镜试样采用化学侵蚀的方法,浸蚀剂为: $5\text{g CuCl}_2 + 100\text{mL C}_2\text{H}_5\text{OH} + 100\text{mL HCl}$,浸蚀后的试样在 Leica 金相显微镜和 LEO-1450 扫描电镜下进行观察和照相。

采用计数网格的方法对合金中碳化物体积分数进行了统计,由于合金中碳化物分布并不均匀,应选择合适的放大倍数使观察视场能够覆盖较多面积以消除碳化物分布不均的影响,经过多次尝试后选取 $1000\times$ 的放大倍数,并按照体视学基本原理^[15],采用 $300\text{nm}\times 300\text{nm}$ 的网格进行碳化物体积分数的统计。按照置信度为 95% 时,碳化物体积分数测量的相对误差小于 5% 的原则选取视场数。

利用真空喷碳仪在浸蚀后的合金表面喷镀一层碳膜,用小刀在镀膜表面划出 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的方格,放入浸蚀液中浸泡 3h,利用铜网将碳膜捞出,洗净,晾干,即制成 HIP 合金碳化物的一次碳膜萃取复型。利用 JMS-2100 透射电子显微镜(TEM)及 Oxford 能谱仪对复型中碳化物的种类及成分进行测定。

2 实验结果与讨论

2.1 HIP 态 FGH96 合金中的碳化物

如图 1 所示,按照分布位置的不同可以将 HIP 态 FGH96 合金中碳化物分为两类,一类为在 PPB 上分布的碳化物,因此命名为 PPB 碳化物;而将另一类在 PPB 区域以外分布的碳化物成为非 PPB 碳化物。在 HIP 态 FGH96 合金中有相当一部分的碳化物成列分布在没有发生再结晶的非 PPB 区域,成为非 PPB 碳化物的主要组成部分。

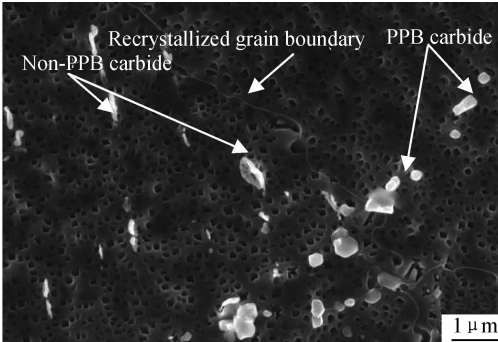


图 1 HIP 态 FGH96 合金中碳化物
Fig.1 Carbides in HIPed FGH96 alloy

利用 TEM 结合 EDS 对 HIP 态 FGH96 合金碳化物的一次碳膜萃取复型进行了分析观察,结果如图

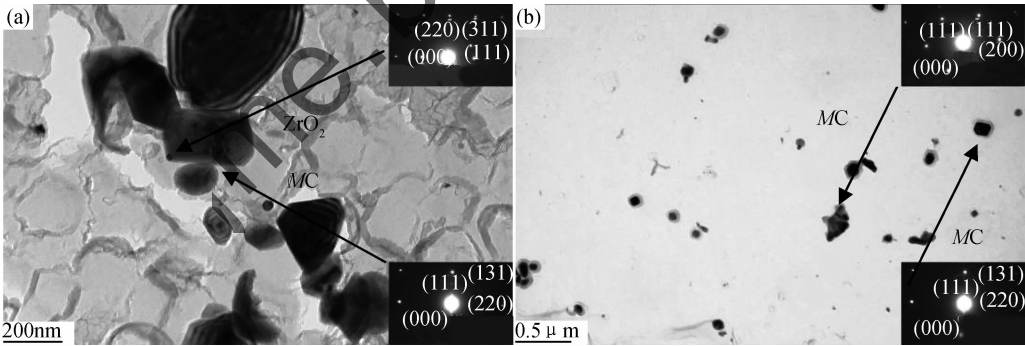


图 2 HIP 态 FGH96 合金中碳化物的一次碳膜萃取复型 (a)PPB 碳化物;(b)非 PPB 碳化物

Fig 2 Carbides extracted from HIPed FGH96 alloy (a)carbides distributed in PPB area;(b)carbides distributed out of PPB area

表 3 HIP 态 FGH96 合金中碳化物成分(质量分数/%)

Table 3 Composition of carbides in HIPed FGH96 alloy (mass fraction/%)

	Strong carbides forming element(Ti+Nb+Zr)	Weak carbides forming element(Cr+Mo+W)	Non carbides forming element(Ni+Co+Al)
Blocky PPB carbide	82.14	17.23	0.63
Blocky non-PPB carbide	75.81	25.00	0.19
Petaline non-PPB carbide	67.48	31.29	1.23

温度对合金中碳化物的影响规律。

利用 SEM 对经过不同温度固溶热处理的 HIP 态

2 所示,可以看出 PPB 碳化物主要由块状的 MC 碳化物组成,部分 MC 型碳化物中含有 ZrO₂ 的氧化物核心。而非 PPB 碳化物主要由花状和块状的 MC 型碳化物组成。结合能谱对萃取复型中碳化物成分进行分析发现,HIP 态 FGH96 合金中碳化物主要为富 Ti 和 Nb 的(Ti, Nb)C 组成,同时有少量的弱碳化物形成元素 Cr,Mo,W 固溶,碳化物的具体成分如表 3 所示。对比发现 PPB 碳化物中含有相对较多的强碳化物形成元素(Ti,Nb,Zr),而在 PPB 区域以外分布的花状 MC 中则含有相对较多的弱碳化物形成元素。Sun 等^[17]研究指出界面为波浪状的 MC 型碳化物是以 γ+MC 共晶的方式析出的,成分较为复杂^[18],含有相对较多的弱碳化物形成元素。研究发现^[19, 20]原始粉末中存在着花状,条状和块状的 MC 型碳化物。因此推测 HIP 态 FGH96 合金中的花状碳化物是在原始粉末急凝固过程中以 γ+MC 的形式析出的,而在 PPB 区域以外分布的块状碳化物则可能是合金粉末中原有的或是在 HIP 过程中析出的。

2.2 固溶温度对 HIP 态 FGH96 合金中碳化物的影响

实验测量得到 γ'固溶温度为 1118 ℃^[16],利用热力学计算软件 Thermo Calc 计算得到 FGH96 合金的固相线温度为 1280℃^[12],实验选取在 1140~1260℃ 的温度范围内进行高温固溶热处理,以深入研究固溶

FGH96 合金中碳化物形貌及分布进行了观察,EDS 分析证明固溶热处理后合金中大部分碳化物仍为富

Ti 和 Nb 的 MC 型碳化物。热处理合金中碳化物形貌及分布如图 3(b)~(d)所示。当固溶温度低于 1200℃ 时,仍然有大量的 PPB 碳化物存在,且在 1140℃ 固溶

热处理后合金中碳化物数量比固溶前还要多,并且有一定的粗化,而当固溶温度达到 1260℃ 时合金中已观察不到碳化物的存在。

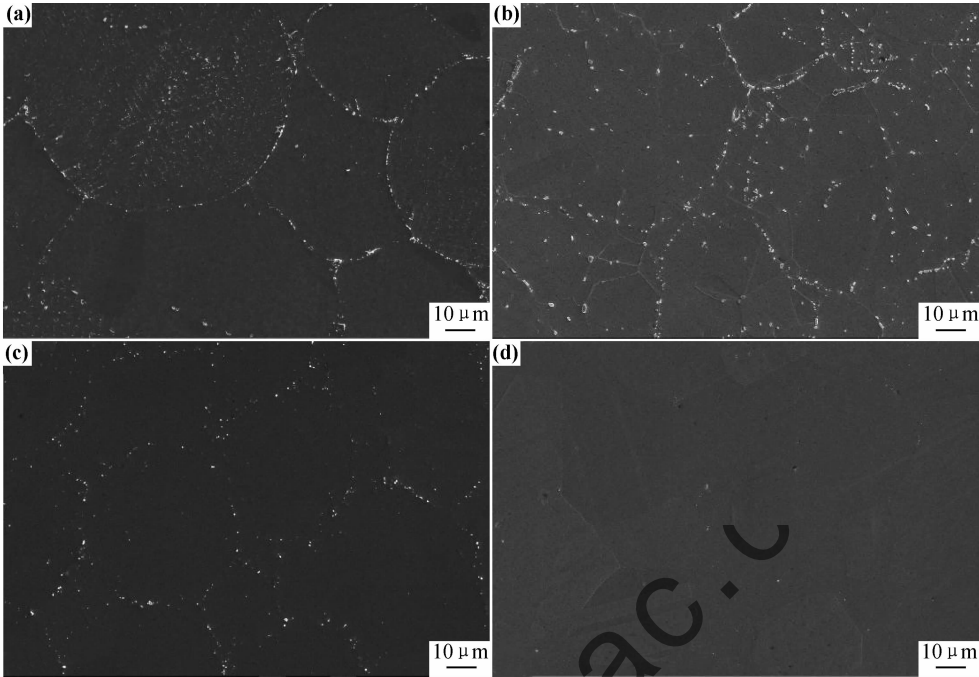


图 3 高温固溶温度对 HIP 态 FG96 合金中碳化物分布的影响

(a)HIP; (b)1140℃/5h, AC; (c)1200℃/5h, AC; (d)1260℃/5h, AC

Fig. 3 Carbides distribution of FG96 before and after heating at different temperatures

(a)HIP; (b)1140℃/5h, AC; (c)1200℃/5h, AC; (d)1260℃/5h, AC

与未经热处理合金(图 3(a))比较发现,在 1140℃ 以上进行固溶热处理时,合金中的再结晶进行完全,非 PPB 区域中成列分布的碳化物完全消失,并没有观察到花状碳化物存在。研究指出花状 MC 的析出温度可以达到 1280~1300℃^[18],而实验观察发现,在 1140℃ 固溶时花状 MC 却已完全溶解。在 HIP 态合金中花状 MC 大多分布于未发生再结晶的区域(图 1),因此

推测未再结晶区域中碳化物发生了类似于在亚固溶处理过程中再结晶诱发 γ' 溶解的现象^[21];畸变能促进再结晶晶界前沿碳化物溶解,并在再结晶晶粒内部以块状 MC 的形式重新析出。所以在完全再结晶的热处理合金中也就观察不到花状 MC 的存在。

利用体视学的计点法对不同温度固溶后合金中碳化物的体积分数进行了统计,结果如图 4(a)所示。当

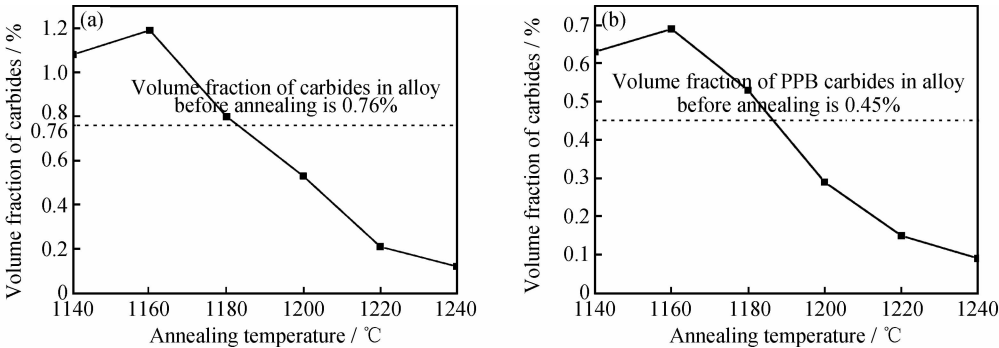


图 4 不同温度固溶热处理前后 FG96 合金中碳化物数量的实验测定结果(图中虚线 Y 值为热处理前 FG96 合金中总的碳化物体积分数和 PPB 碳化物体积分数) (a)碳化物总量; (b)PPB 碳化物含量

Fig. 4 Volume fraction of carbides in FG96 before and after heating at different temperatures

(the Y value of dashed line in figures are the volume percentage of carbides in FG96 alloy before heating)

(a) volume fraction of total carbides; (b) volume fraction of PPB carbides

固溶温度低于 1180℃ 时,合金中碳化物总量要高于 HIP 态合金,且在 1160℃ 固溶后合金中含有最多的碳化物。而当固溶温度高于 1180℃ 时,随着固溶温度的升高,合金中碳化物体积分数逐渐下降,当固溶温度达到 1240℃ 时在合金中只有少量的碳化物存在。PPB 碳化物含量随温度的变化与合金中碳化物总量的变化趋势相同(图 4(b))。从以上实验结果可以看出,在 1140~1240℃ 的温度范围内,FGH96 合金中碳化物析出量的高峰在 1160℃ 左右,此时合金中 γ' 相完全溶解,大量固溶于 γ' 中的 Ti 和 Nb 进入基体,促进了 MC 的析出,而当温度高于 1160℃ 时,基体中 C 的固溶度增加,MC 开始溶解,合金中碳化物含量逐渐降低。在低于 HIP 温度(1180℃)以下进行固溶热处理时,由于碳化物的析出导致合金中 PPB 进一步加重,从改善 PPB 的角度考虑,FGH96 合金高温固溶温度应选在 HIP 温度以上,固溶温度越高,合金中 PPB 碳化物的含量就越少,PPB 逐渐溶解,当固溶温度达到 1260℃ 时 FGH96 合金中 PPB 完全消失,然而此时合金晶粒组织已明显粗化。因此对于固溶温度的选择不应只考虑合金中 PPB 的严重程度,还应兼顾合金晶粒尺寸。通过观察不同温度固溶热处理后合金中 PPB 碳化物含量及晶粒组织,来选取一个合适的温度,在该温度下,既能最大程度的缓解 PPB,又能使合金的晶粒尺寸维持在较低的水平。由于成分设计的特殊性,当固溶温度过高时,FGH96 合金的力学性能会有一定的下降,因此下一步工作的内容,应将合金的组织与性能结合起来,通过优化高温固溶处理工艺,得到组织与性能兼优的合金。

2.3 高温固溶热处理冷却方式对 FGH96 合金中碳化物的影响

由表 4 可知,1200℃ 固溶处理后将 PPB 碳化物的体积分数由 0.45% 降至 0.35% (固溶炉冷) 和

0.32% (固溶空冷),但 1200℃ 固溶后炉冷后碳化物总量与固溶前几乎相同,其中非 PPB 碳化物数量反而有所增加。对此现象可作如下解释:在高温固溶加热时,

表 4 1200℃ 固溶热处理前后 FGH96 合金中的碳化物含量(体积分数/%)

	Total carbide	PPB carbide	Non PPB carbide
HIP	0.76	0.45	0.31
HIP+1200℃/FC	0.75	0.35	0.40
HIP+1200℃/AC	0.53	0.32	0.21

部分碳化物发生溶解。炉冷相对缓慢,允许在高温下已进入固溶体的碳再次析出,导致炉冷合金中碳化物含量在炉冷过程中又恢复到固溶热处理前水平。空冷冷速较高且试样尺寸较小,其冷却过程中没有足够时间允许碳化物重新析出,从而空冷合金中碳化物的体积分数(0.53%)。假定在空冷过程中完全没有碳化物重新析出,那么可以认为,1200℃ 固溶加热过程中有体积分数为 0.23% (约相当于原碳化物总量的 30%) 的碳化物发生了溶解,进而固溶碳在炉冷过程中以非 PPB 碳化物形式,而不是以 PPB 碳化物形式,再次析出。这充分表明,高温扩散使合金元素在较短的保温时间内由 PPB(高碳浓度区域)扩散到非 PPB 区域,使合金中碳原子的分布更趋均匀,从而促进了炉冷过程中碳化物在合金中均匀析出,而非在 PPB 上重新析出。

在更高分辨率下,对 1200℃ 固溶后炉冷和空冷合金中碳化物形貌进行观察,结果如图 5 所示。可以看出冷速对 PPB 碳化物的形貌无明显影响。经测量得知,空冷后碳化物颗粒的平均等效直径为 325nm,而炉冷后碳化物颗粒的平均等效直径则为 388nm。

对不同冷速下 PPB 碳化物等效直径的尺寸分布

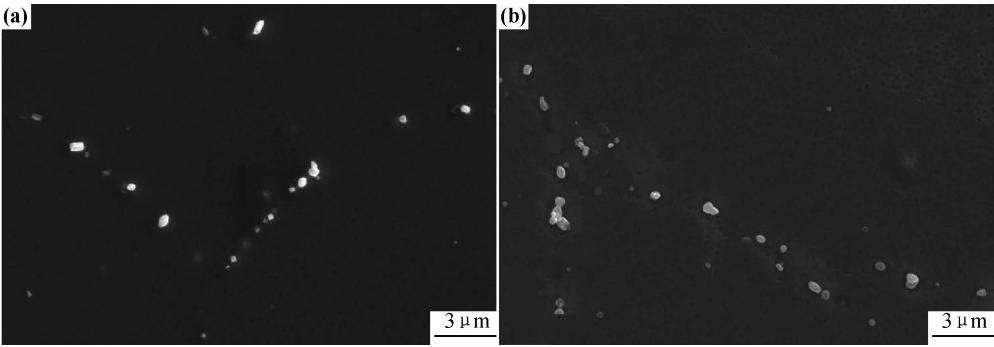


图 5 1200℃ 高温固溶热处理后炉冷和空冷 HIPed FGH96 合金中碳化物形貌
(a)1200℃/5h, 空冷;(b)1200℃/5h, 炉冷
Fig. 5 Carbides in HIPed FGH96 alloys before and after heating at 1200℃
(a)1200℃/5h, AC;(b)1200℃/5h, FC

进行了统计,结果如图 6 所示。空冷后 PPB 碳化物尺寸分布图中的峰值为 300nm,而炉冷后 PPB 碳化物尺寸分布的峰值则对应为 380nm。碳化物的尺寸分布,由于炉冷时 PPB 碳化物在高温下吸收了基体中固溶的碳元素而逐渐长大,造成了碳化物尺寸分布峰向大尺寸方向移动。而与空冷时碳化物尺寸分布不同的

是,炉冷合金 PPB 碳化物分布在小尺寸位置出现了新的碳化物分布峰,对应峰值为 140nm。这可能是由于冷却过程中由于基体中碳存在着一定的过饱和度,在冷却时部分碳化物析出,由于高温下未溶的碳化物优先长大,因此提供给冷却时析出碳化物的合金元素有限,所以此类碳化物尺寸相对较小。

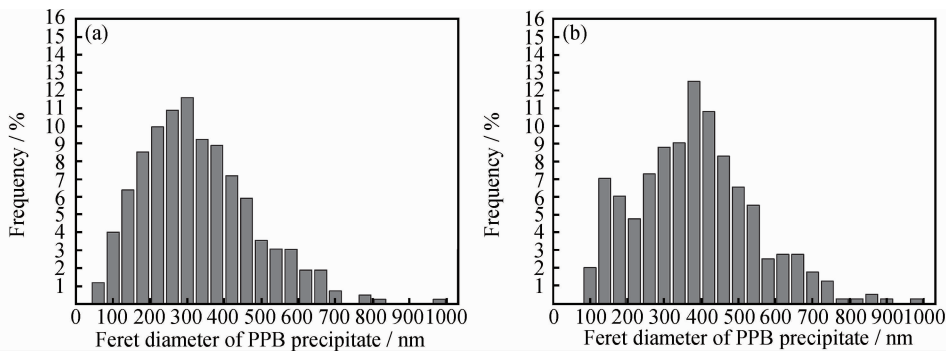


图 6 1200℃热处理后 PPB 析出相等效直径分布 (a)空冷;(b)炉冷

Fig. 6 Feret diameter distribution of PPB carbides in FGH96 alloys heated at 1200℃ (a)AC;(b)FC

3 结论

(1)HIP 态 FGH96 合金中碳化物主要为富 Ti 和 Nb 的 MC,PPB 碳化物主要为块状,非 PPB 碳化物主要为块状和花状。

(2)与未经过热处理合金相比,1180℃及以下进行固溶热处理时会增加合金中碳化物的数量,加剧合金中的 PPB,合金中碳化物含量在 1160℃达到峰值;固溶温度 1180℃以上时,随着固溶温度的上升,碳化物含量减少,合金中 PPB 逐渐消失。

(3)因空冷和炉冷抑制碳化物重新析出的能力不同,与 HIP 态合金相比,空冷合金中 PPB 碳化物和非 PPB 碳化物的体积分数均明显减小,而炉冷合金中非 PPB 碳化物的体积分数则有一定的升高,导致空冷合金中碳化物总量减少,而炉冷合金中碳化物总量与 HIP 态合金的基本相同。

(4)空冷合金中 PPB 碳化物的尺寸分布为单峰,而炉冷合金中则呈现为双峰,与高温固溶后空冷可以抑制碳的重新析出、炉冷过程中则存在碳化物重新析出的判断再次吻合。

参考文献

[1] 吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 新型涡轮盘用高性能粉末高温合金的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(3): 23—31.
WU Kai, LIU Guo-quan, HU Ben-fu, et al. Research progress of new type high-performance P/M turbine disk superalloy[J]. Materials China, 2010, 29(3): 23—31.

[2] 胡本芙, 刘国权, 贾成厂, 等. 新型高性能粉末高温合金的研究与发展[J]. 材料工程, 2007, (2): 49—57.
HU Ben-fu, LIU Guo-quan, JIA Cheng-chang, et al. Development in new type high-performance P/M superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2007, (2): 49—57.
[3] 迟悦, 张国星, 张义文, 等. Zr 含量对 FGH4096 合金组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 478—481.
CHI Yue, Zhang Guo-xing, Zhang Yi-wen, et al. The influence of Zr on microstructure and properties of FGH4096[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 478—481.
[4] 顾玉丽, 何玉怀, 陶春虎, 等. FGH96 镍基高温合金的高温低周疲劳断裂机理研究[J]. 材料工程, 2009, (9): 56—60.
GU Yu-li, HE Yu-huai, TAO Chun-hu, et al. Low cycle fatigue fracture mechanism at elevated temperature for FGH96 nickel-base superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (9): 56—60.
[5] RAO G A, SRINIVAS M, SARMA D S. Effect of oxygen content of powder on microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 436(1): 84—99.
[6] SHARMA K K, BALASUBRAMANIAN T V, MISRA R D K. Effect of boron on particle surfaces and prior particle boundaries in a P/M nickel based superalloy[J]. Scripta Metallurgica, 1989, 23(4): 573—577.
[7] RAO G A, KUMAR M, SRINIVAS, et al. Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy inconel 718[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 355(1): 114—125.
[8] PRAKASH T L, CHARI Y N, BHAGIRADHA E S, et al. Microstructures and mechanical properties of hot isostatically pressed powder metallurgy alloy APK-1[J]. Metallurgy Transactions, 1983, 4(14A): 733—742.

- [9] 谢兴华, 姚泽坤, 宁永权, 等. FGH4096 合金的动态再结晶与晶粒细化研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(1): 20—24.
XIE Xing-hua, YAO Ze-kun, NING Yong-quan, et al. Dynamic recrystallization and grain refining of superalloy FGH4096[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(1): 20—24.
- [10] 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[J]. 粉末冶金工业, 2010, 20(4): 43—49.
ZHAO Jun-pu, TAO Yu, YUAN Shou-qian, et al. The problem of prior particle boundary precipitation in P/M superalloys[J]. Powder Metallurgy Industry, 2010, 20(4): 43—49.
- [11] YANG W H, MAO J, WANG W X, et al. Effects of heat treatment on prior particle boundary precipitation in a powder metallurgy nickel base superalloy[J]. Advanced Performance Materials, 1995, 2(1): 269—279.
- [12] 赵军普, 袁守谦, 陶宇, 等. 高温扩散退火处理对 FGH96 粉末高温合金 PPB 的影响[J]. 材料导报, 2010, 24(9): 65—68.
ZHAO Jun-pu, YUAN Shou-qian, TAO Yu, et al. Effect of sub-solidus diffusion annealing on prior particle boundary precipitation of P/M superalloy FGH96[J]. Materials Review, 2010, 24(9): 65—68.
- [13] 曹腊梅, 李相辉, 陈晶阳, 等. 固溶温度对第三代镍基单晶高温合金 DD10 组织的影响[J]. 材料工程, 2011, (10): 23—27.
CAO La-mei, LI Xiang-hui, CHEN Jing-yang, et al. Influence of solution heat treatment temperature on the microstructure of the third generation Ni-based single crystal superalloy DD10[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (10): 23—27.
- [14] 张义文, 张凤戈, 张莹, 等. 一种消除粉末高温合金中 PPB 的方法[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(7): 513—518.
ZHANG Yi-wen, ZHANG Feng-ge, ZHANG Ying, et al. Method of elimination PPB in P/M superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(7): 513—518.
- [15] 余永宁, 刘国权. 体视学-组织定量分析的原理和应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 35—75.
- [16] 田高峰, 贾成厂, 刘建涛, 等. 固溶冷却介质对 FGH96 合金 γ' 相和性能的影响[J]. 材料工程, 2006, (12): 24—27.
TIAN Gao-feng, JIA Cheng-chang, LIU Jian-tao, et al. Effect of cooling medium on γ' precipitates and properties in FGH96 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, (12): 24—27.
- [17] 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[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 271(1): 143—149.
- [18] 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[J]. 金属学报, 2003, 39(5): 470—475.
HU Ben-fu, CHEN Huan-ming, SONG Feng, et al. The effect of pre-heating on carbide precipitates in FGH95 superalloy powders prepared by PREP[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(5): 470—475.
- [19] 马文斌, 吴凯, 刘国权, 等. PREP FGH4096 粉末凝固组织和碳化物研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 490—493.
MA Wen-bin, WU Kai, LIU Guo-quan, et al. Effect of cooling rate on microstructure of PREP FGH4096 powders[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 490—493.
- [20] 胡本芙, 陈焕铭, 李慧英, 等. 等离子旋转电极雾化 FGH95 高温合金原始粉末颗粒中碳化物研究[J]. 材料工程, 2003, (1): 6—9.
HU Ben-fu, CHEN Huan-ming, LI Hui-ying, et al. Research on the carbides in FGH95 superalloy powders prepared by prep during solidification[J]. Journal of Materials Engineering, 2003, (1): 6—9.
- [21] DAHLÉN M, WINBERRG L. The influence of γ' -precipitation on the recrystallization of a nickel base superalloy[J]. Acta Metallurgica, 1980, 28(1): 41—50.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB631204)

收稿日期:2012-07-04;修订日期:2013-07-18

作者简介:马文斌(1986—),男,博士研究生,粉末高温合金热处理及组织控制研究,E-mail:mawenbin138@163.com

通讯作者:刘国权(1952—)男,教授,博士,主要从事主要研究方向为高性能钢铁材料与航空发动机涡轮盘用粉末高温合金研究,联系地址:北京市海淀区学院路30号北京科技大学材料科学与工程学院主楼221室(100083),E-mail:g.liu@ustb.edu.cn

(上接第42页)

- [9] XIA N X, CAI Y R, JIANG T, et al. Green synthesis of silver nanoparticles by chemical reduction with hyaluronan[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86: 956—961.
- [10] JIGNASA N. SOLANKI. Highly monodisperse and sub-nano silver particles synthesis via microemulsion technique[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2010, 359: 31—38.
- [11] 郭桂全, 甘卫平, 罗贱向, 等. 正交设计法优化高分散超细银粉的制备工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1827—1831.
GUO G Q, GAN W P, LUO J X, et al. Optimization for preparation technique of highly dispersive ultrafine silver powders by orthogonal design[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(10): 1827—1831.
- [12] 宋永辉, 梁工英, 张秋利, 等. 球形纳米银粉的制备研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(4): 709—712.

SONG Y H, LIANG G Y, ZHANG Q L, et al. Research on preparation of spherical nanosized silvery powder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(4): 709—712.

- [13] 印万忠, 李先学, 韩跃新, 等. 液相化学还原法制备纳米银粉[J]. 矿冶, 2003, 12(4): 48—51.
YIN W Z, LI X X, HAN Y X, et al. Preparation of nanometric Ag powder by solution chemical reduction method[J]. Mining Metallurgy, 2003, 12(4): 48—51.

基金项目:高品质纳米功能粉体开发项目(桂科攻11107003-8);江苏省高校优势学科建设工程项目(苏政办发2011-6)

收稿日期:2012-09-08;修订日期:2013-08-10

作者简介:张小敏(1988—),女,硕士研究生,从事纳米金属材料方面研究工作,联系地址:江苏南京市新模范马路5号68分箱,南京工业大学材料科学与工程学院(210009),E-mail:zhangxiaominde@126.com