

FGH4096 合金“项链”组织研究

宁永权¹, 姚泽坤¹, 岳太文¹, 郭鸿镇¹, 陶宇², 张义文²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 利用 SEM、EDAX 和 TEM 分析研究了 FGH4096 粉末高温合金的“项链”组织, 并对该组织的拉伸性能和晶细化作用进行探索。结果表明: 在热模变形后对 FGH4096 合金进行标准热处理和直接时效热处理均能够得到“项链”组织, 其中等轴细晶(约 4 μm)均匀镶嵌在非等轴粗晶(约 10 μm)周围, 该组织具有好的力学性能; 经过多方向锻造变形和标准热处理后, “项链”组织中的非等轴粗晶已被完全细化, 晶粒度级别由 ASTM5-6 细化至 ASTM12 以上, 表明“项链”组织能够为细晶组织提供细晶储备。

关键词: FGH4096 粉末高温合金; “项链”组织; 力学性能; 细晶储备

中图分类号: TG312

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1783-04

双性能涡轮盘制备是高推重比航空发动机必备的关键技术之一^[1], 但是由于研制时间短, 包括美国在内的几个先进工业国家的制备技术尚不成熟。尽管在 20 世纪 90 年代, 已有少量双性能涡轮盘被应用在发动机上, 但制造工艺仍然需要改进和完善。目前, 双性能涡轮盘研制主要有两个方向, 即双合金双性能和单合金双性能。无论哪种研制方向都要求盘缘部位合金具有良好的蠕变和裂纹扩展抗力, 盘心部位合金具有较高的拉伸强度和低周疲劳抗力。单合金双性能粉末盘实际是双晶粒组织, 即盘心部位的晶粒度(ASTM)在 10~12 级, 盘缘部位的晶粒度为 3~6 级^[2]。

第二代损伤型粉末高温合金 FGH4096 由于具有高的高温强度和抗裂纹扩展能力, 是制备高推重比发动机涡轮盘的首选材料, 受到航空发动机制造业的极大重视^[3~5]。对 FGH4096 粉末高温合金(原始晶粒度 5~6 级)进行大变形量预制坯时可获得“项链”组织。如果“项链”组织(等轴细晶组织镶嵌在非等轴粗晶周围)中等轴细晶组织完全取代其中的非等轴粗晶, 便可以得到均匀的细晶组织。因此本实验研究“项链”组织的产生以及对晶粒细化作用的影响, 为 FGH4096 粉末高温合金双性能涡轮盘细晶高强度端制备提供依据。

1 实验

实验用 FGH4096 合金由北京钢铁研究总院提供, 其名义化学成分(质量分数, %)为: C, 0.02~0.05; Al, 2.0~2.4; W, 3.8~4.2; Nb, 0.6~1.0; Mo, 3.8~4.2;

Ti, 3.5~3.9; Cr, 15.5~16.5; Co, 12.5~13.5; Fe, <0.5; B, 0.006~0.015; Mn, <0.15; Zr, 0.025~0.05; Si, <0.20; P, <0.015; S, <0.015; H, <0.001; N, <0.005; O, <0.007; Ni 基。母合金采用真空感应熔炼, 等离子旋转电极(PREP)方法制粉, 粉末尺寸 50~100 μm, 粉末经过真空脱气后包套并封焊后进行热等静压(HIP)成形。HIP 态 FGH4096 合金金相组织如图 1 所示, 其晶粒度为 5~6 级。

FGH4096 合金的锻造温度选择 1130 °C(模具温度为 950 °C), 在 6300 kN 四柱油压机上进行热模锻造成形; 变形后试样进行 1150 °C, 2 h OQ + 750 °C, 16 h AC 的标准热处理和 760 °C, 16 h AC 直接时效热处理; 按 GB/T 228-2002 及 GB/T 4338-2006 在 INSTRON-5585H 拉伸试验机上进行室温和 750 °C 拉伸试验。金相试验在 Olympus/PMG3 型卧式光学显微

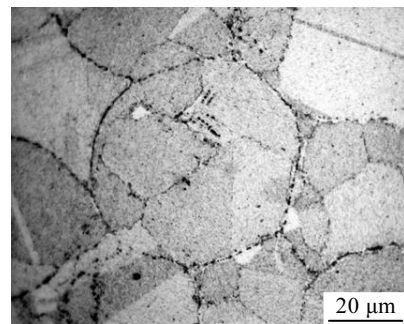


图 1 HIP 态 FGH4096 合金金相组织

Fig.1 Microstructure of as-HIPed FGH4096 alloy

收稿日期: 2008-10-17

作者简介: 宁永权, 男, 1982 年生, 博士生, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88493744, E-mail: ningke521@163.com

镜和 HITACHI 公司生产的 S-570 型扫描电镜上完成, 按照 ASTM 晶粒级别标准, 利用截线法统计测量出每个试样的晶粒度并记录数据。采用 H800 透射电镜对试样进行 TEM 分析。

2 结果与讨论

2.1 FGH4096 合金的“项链”组织

FGH4096 合金的典型“项链”组织形貌如图 2a 所示。扫描电子显微镜显示了直径 10 μm 的非等轴粗晶被等轴细晶颗粒 (4 μm) 镶嵌着。从图 2b 中可见, 碳化物颗粒大多位于晶界上, 特别是三晶粒交界处。体积稍大的碳化物可能是固溶处理没有完全溶入晶内造成, 较小的颗粒则可能是时效过程中析出的, 正是这些均匀分布于晶界上的碳化物, 提高了晶界的强度。从图 2c 还可以看到大晶粒表面有非常多的平行线, 这些平行线可能是位错沿滑移面滑移造成, 说明变形是先发生在晶界, 当晶界处继续变形受阻, 晶粒内部的滑移启动, 在变形结束时, 这些大颗粒内部的滑移还

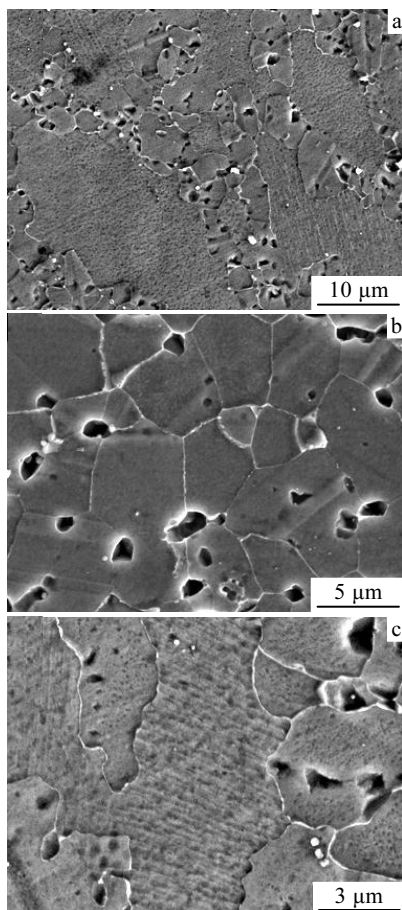


图 2 典型 FGH4096 合金“项链”组织的 SEM 照片

Fig.2 SEM images of link microstructure of FGH4096 alloy: (a) close-up view, (b) equiaxed fine grain, and (c) non-equiaxed coarse grain

未停止, 所以造成晶界处位错密度提高。在晶粒内, 在其后静态再结晶, 晶界能量高处先再结晶, 而造成“项链”组织。

对 FGH4096 合金的“项链”组织中非等轴粗晶和等轴细晶进行能谱分析 (EDAX), 结果示于表 1。可见在等轴细晶的化学成分中 Cr 和 Mo 的含量略高, 而 Al、Ti、W 的含量略低, 非等轴粗晶和等轴细晶并未出现明显的化学成分突变。

2.2 锻造工艺对 FGH4096 合金“项链”组织和拉伸性能的影响

FGH4096 合金经不同工艺条件变形后获得的“项链”组织中非等轴粗晶直径和等轴细晶体积比分布情况示于图 3。其中工艺 1 为“热模拔长+直接时效热处理”; 工艺 2 为“热模镦粗+标准热处理”; 工艺 3 为“多方向锻造+标准热处理”。在以上 3 种工艺获得的“项链”组织中, 等轴细晶尺寸比较接近 (均为 4 μm 左右), 但非等轴粗晶尺寸和体积分数则有很大区别。在 FGH4096 合金经过热模拔长和直接时效热处理 (工艺 1) 后获得的“项链”组织中, 非等轴粗晶尺寸最大, 呈 30 μm×10 μm 椭圆形状, 但分布比较均匀, 等

表 1 “项链”组织能谱分析结果

Table 1 Test results of EDAX

Element	Non-equiaxed coarse grain		Equiaxed fine grain	
	ω/%	at%	ω/%	at%
Al K	2.09	4.51	1.95	4.24
Ti K	3.92	4.76	3.61	4.41
Cr K	16.40	18.39	17.39	19.58
Co K	12.76	12.62	13.37	13.29
Ni K	56.32	55.93	54.13	54.00
Mo L	3.76	2.29	4.92	3.00
W M	4.75	1.51	4.64	1.48

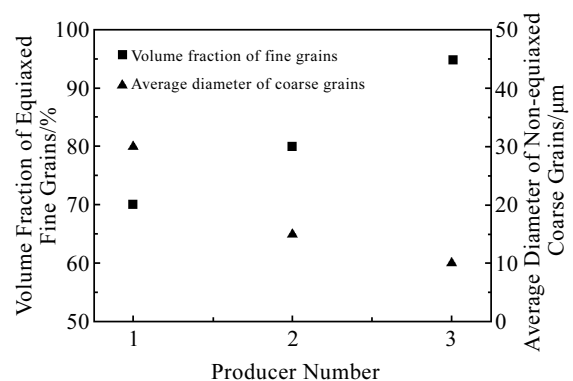


图 3 不同工艺下获得的“项链”组织中非等轴粗晶与等轴晶粒分布情况

Fig.3 Volume fraction of equiaxed fine grain and average diameter of non-equiaxed coarse grain in link microstructure of FGH4096 alloy

轴细晶体积分数约为全部晶粒的 70%左右; 在工艺 2 条件下获得的“项链”组织中, 非等轴粗晶尺寸减小, 分布均匀但形状不规则, 等轴细晶体积分数约为全部晶粒的 80%左右; 而多方向锻造和固溶时效热处理条件下获得的“项链”组织中, 仅有个别非等轴粗晶存在, 尺寸为(10~20) μm \times 8 μm 。

再结晶首先发生在晶界区域是造成上述区别的主要原因。粉末合金晶界处的晶核较多, 加之锻造工艺使晶界发生严重变形储存大量的能量, 这对于再结晶形核非常有利。对比锻造工艺 2 和 3 可知, 工艺 2 获得的“项链”组织中非等轴粗晶尺寸较大, 而工艺 3 得到的“项链”组织中已找不到大尺寸非等轴粗晶。二者生产工艺差别在于前者为单一方向成形, 而后者为多方向成形, 可见增加变形方向有利于晶界各处储存相近的能量, 再结晶更加容易同时发生, 所以等轴细晶数量增加, 非等轴粗晶尺寸逐步减小、数量减少, “项链”组织的细晶化程度得到进一步提高。

HIP 态 FGH4096 合金和“项链”组织的拉伸性能示于表 2。表中数据充分表明具有“项链”组织的 FGH4096 合金的拉伸性能相对于 HIP 态合金均有大幅度的提高, 其中室温和 750 $^{\circ}\text{C}$ 强度极限分别提高 180 和 220 MPa, 屈服极限分别提高 240 和 230 MPa; 延伸率指标提高幅度较小, 但断面收缩率高达原始态的 2 倍以上。表 2 中各数据充分表明具有“项链”组织的 FGH4096 合金具有良好的拉伸性能。

2.3 “项链”组织的细晶化作用

FGH4096 粉末经过 1130 $^{\circ}\text{C}$ 多方向锻造和固溶时效热处理工艺后可得到均匀的细晶组织(如图 4 所示)。其等轴细晶体积分数占 95%以上, 为避免个别非等轴粗晶的产生, 将原始晶粒 ASTM5~6 级组织细化到 ASTM12 级以上, 实现 FGH4096 高温合金的组织细化。经多方向累计大变形得到的细晶组织实际上是“项链”组织中大颗粒(图 4 中箭头所示)进一步变形细化而成, 尺寸已经接近甚至略小于等轴晶粒尺寸, 等轴粗晶尺寸约为 4 μm , 很大程度上实现了组织均匀化和细化。

超细晶 FGH4096 合金的 TEM 照片如图 5。可见

表 2 FGH4096 合金“项链”组织的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of link microstructure of FGH4096 alloy

State	$T/^{\circ}\text{C}$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_s/\%$	$\psi/\%$
HIPed	20	1550	1200	18.0	18.0
Link structure		1730	1440	22.0	36.5
HIPed	750	1200	1040	5.0	8.0
Link structure		1420	1270	8.0	23.0

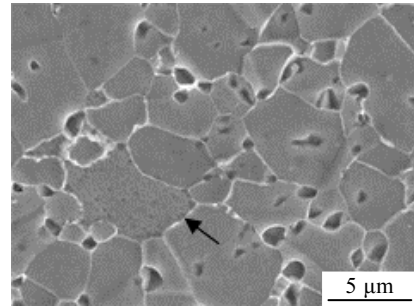


图 4 FGH4096 合金细晶组织的 SEM 照片

Fig.4 SEM image of fine grain microstructure of FGH4096 alloy

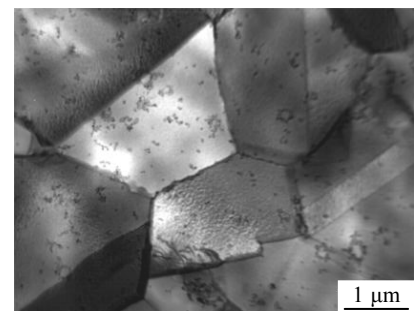


图 5 FGH4096 合金超细晶组织的 TEM 照片

Fig.5 TEM image of fine grain microstructure of FGH4096 alloy

等轴细晶粒晶界平直, 并且存在孪晶。综上所述, FGH4096 合金的“项链”组织能够为细化组织提供细晶储备。

3 结 论

1) FGH4096 合金的“项链”组织由等轴细晶(4 μm)镶嵌在非等轴粗晶(10 μm)周围构成, 该种组织具有很好的拉伸性能。

2) FGH4096 合金经多方向锻造和标准热处理后, “项链”组织中非等轴粗晶向等轴细晶转化, 得到 ASTM12 级的细晶组织。“项链”组织能够为均匀细晶组织提供细晶储备。

参考文献 References

- [1] Osamu Tsuda, Nobuo Kanamaru, Seiya Furuta *et al.* *Metal Powder Report*[J], 1991, 46(3): 31
- [2] Hu Benfu(胡本芙), Liu Guoquan(刘国权), Jia Chengchang(贾成厂) *et al.* *Materials Engineering*(材料工程)[J], 2007, 2: 49
- [3] Liu Jiantao(刘建涛), Liu Guoquan(刘国权), Hu Benfu(胡本芙) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(3): 418
- [4] Guo Weimin(国为民), Dong Jianxin(董建新), Wu Jiantao(吴

建涛) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2006, 17(1): 59

(刘建涛) *et al. Materials Engineering*(材料工程)[J], 2006, 12: 24

[5] Tian Gaofeng(田高峰), Jia Chengchang(贾成厂), Liu Jiantao

Link Microstructure of FGH4096 Alloy

Ning Yongquan¹, Yao Zekun¹, Yue Taiwen¹, Guo Hongzhen¹, Tao Yu², Zhang Yiwen²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The link microstructure of P/M FGH4096 alloy was investigated by SEM, EDAX and TEM. The tensile properties and grain refining effect of the microstructure was also discussed. The results show that the link microstructure could be obtained by the standard heat treatment or the direct-aging heat treatment for the alloy after hot-die forging, where the equiaxed fine grains (about 4 μm) distributed homogeneously in the non-equiaxed coarse grains (about 10 μm). The obtained microstructure has better mechanical properties. After the multiple forging and the standard heat treatment, the non-equiaxed coarse grains have been refined completely from ASTM5-6 to above ASTM12. It reveals that the link microstructure can provide fine grain reservation for the fine microstructure.

Key words: P/M FGH4096 alloy; link microstructure; mechanical property; fine grain reservation

Biography: Ning Yongquan, Candidate for Ph. D., College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88493744, E-mail: ningke521@163.com