

粉末镍基高温合金 FGH4586 组织和性能的研究

常 健 吕宏军 姚草根

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)



摘要:对粉末镍基高温合金 FGH4586 采用不同热等静压工艺成形后的力学性能进行测试, 并对其显微组织进行分析。结果表明, 对于 FGH4586 粉末冶金镍基高温合金, 采用 1200℃、140MPa 保温 3h 的热等静压成形, 合金完全致密, 密度达到 8.38g/cm³, 能够使碳化物在合金晶内和晶界均匀析出, 获得均匀的组织 and 较佳综合力学性能的合金。

关键词: 粉末高温合金 FGH4586; 热等静压; 显微组织; 性能

Research on Microstructure and Properties of P/M Superalloy FGH4586

Chang Jian Lv Hongjun Yao Caogen

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: The microstructure and properties of the P/M superalloy FGH4586 by different HIPed are studied. The results show that the alloy can be completely dense as 8.38g/cm³ after 1200℃/140MPax3h HIPed and achieve the better mechanical property with evenly distributed microstructure.

Key words: P/M Superalloy FGH4586; hot isostatic pressing; microstructure; properties

1 引言

航天发动机用高温合金的粉末冶金热等静压成形技术的研究已经开展了四十多年^[1]。粉末冶金技术作为实现低成本、近净成形、材料与结构成形一体化的新技术, 具有材料利用率高, 组织细小均匀等特点, 还能降低检测和维修成本, 延长疲劳寿命。该种成形方式尤其适用于受传统加工工艺和环境兼容性限制的高温合金和生产效率较低, 性能、寿命和可靠性要求较高的液体燃料火箭发动机用材料, 粉末高温合金热等静压成形更为可重复使用运载火箭技术和空间运输系统提供了可靠的技术保障, 是目前国内外镍基高温合金材料制备与成形的研究热点^[2, 3]。俄罗斯的粉末冶金技术开发早、技术成熟, 在火箭发动机中大量采用, 欧美的新一代液体火箭发动机也普遍采用了粉末冶金工艺制造涡轮泵关键零件。相比之下, 我国的粉末冶金制造工艺虽然作了很多的基础研究工作,

但无论是航空还是航天领域都还没有真正的实际应用, 距离可重复使用液体火箭发动机的工程应用还有相当的距离。本文主要对目前我国航天发动机常用的镍基高温合金 GH4586 采用粉末冶金热等静压成形后组织和性能进行研究。

2 试验材料和试验方法

2.1 实验材料

表 1 等离子旋转电极法制备 GH4586 合金粉末化学成分 (质量分数%)

元素	Cr	Ti	Al	W	Mo	Mg	Co	Fe	Mn
成分	19.46	3.47	1.79	3.58	7.98	0.003	12.41	0.16	0.01
元素	S	Si	B	P	C	N	H	O	
成分	0.002	0.10	0.010	0.009	0.06	0.0021	0.0006	0.0035	

作者简介: 常健 (1982-), 工程师, 材料学专业; 研究方向: 粉末高温合金。
收稿日期: 2014-01-16

采用粉末等离子旋转电极法 (PREP) 制备的镍基高温合金 GH4586 球形合金粉末, 其化学成分见表 1。对 100 目以下的 GH4586 合金粉末使用

MASTERSIZER2000 粒度分析仪进行粒度分析, 粒度分布结果如图 1 所示。

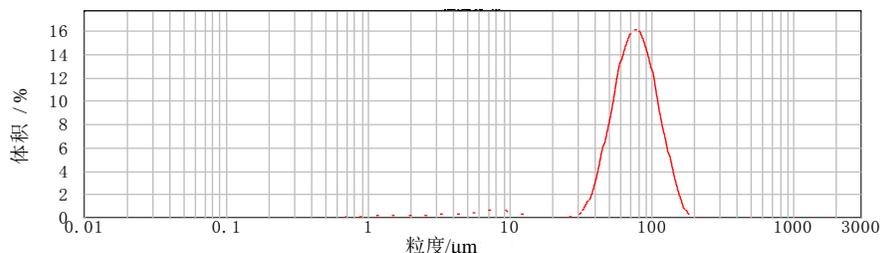


图 1 GH4586 合金粉末粒度分布曲线

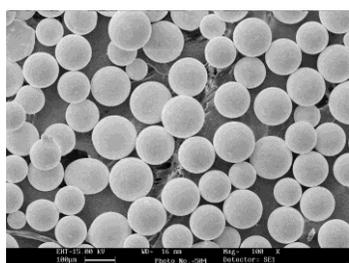


图 2 镍基高温合金 GH4586 粉末扫描形貌

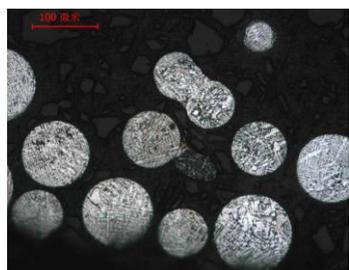


图 3 镍基高温合金 GH4586 粉末金相组织

图 2 所示为镍基高温合金 GH4586 粉末扫描电镜图像, 图 3 所示为镍基高温合金 GH4586 粉末金相显微镜图像。从图 2 中可以看出通过旋转电极法制得的

镍基高温合金 GH4586 粉末颗粒尺寸均匀, 但也存在一小部分椭球形及不规则形状的粉末颗粒。从图 3 可以发现颗粒中以树枝晶为主, 部分颗粒之间存在粘连, 并且粘连处也是树枝晶形貌。

2.2 实验方法

采用扫描电镜和金相显微镜对 GH4586 合金粉末颗粒形貌和组织进行观察。试验采用旋转电极法制备的 50~150μm 的 FGH4586 合金粉末, 并对其进行处理后, 在 1100℃、1180℃、1200℃和 1240℃四个温度进行热等静压成形, 压制压力 140MPa, 压制时间 3h。对不同热等静压工艺的 FGH4586 合金的密度、力学性能进行测定, 并使用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜对合金组织进行观察研究。

3 试验结果及分析

3.1 热等静压工艺对 FGH4586 合金密度的影响

对热等静压后的试样使用浮力法进行了密度测试 (测试天平精度 1/10000), 结果如表 2 所示。

表 2 不同热等静压温度的 FGH4586 合金密度

编号	1# (1100℃/3h/140MPa)	2# (1180℃/3h/140MPa)	3# (1200℃/3h/140MPa)	4# (1240℃/3h/140MPa)	理论密度
密度/g·cm ⁻³	8.36	8.38	8.38	8.37	8.36~8.38

从表 2 的测试结果看出, 在温度 1100℃、1180℃、1200℃和 1240℃, 压力 140MPa 下热等静压 3h 的 FGH4586 合金密度几乎相同, 合金均能达到完全致密状态, 合金平均密度达到 8.38g/cm³。

3.2 热等静压工艺对 FGH4586 合金力学性能的影响

对合金采用不同热等静压制度成形后, 进行统一制度的热处理, 并测试其力学性能, 结果如表 3 所示。

表 3 不同热等静压温度的 FGH4586 合金的力学性能

试样编号	HIP/℃	RP0.2/GPa	Rm/GPa	A/%	Z/%
1#	1100	1.08	1.35	7.5	13.1
2#	1180	1.15	1.42	9	13
3#	1200	1.13	1.44	12.9	17
4#	1240	1.04	1.13	2.5	5.9

由表3可知,随着热等静压温度从1100℃升高到1200℃,合金的强度和塑性也逐渐升高,并在3#出现强度与塑性的最大值,但随着热等静压温度的继续升

高,4#的强度和塑性却明显降低。

3.3 热等静压工艺对FGH4586合金微观组织的影响

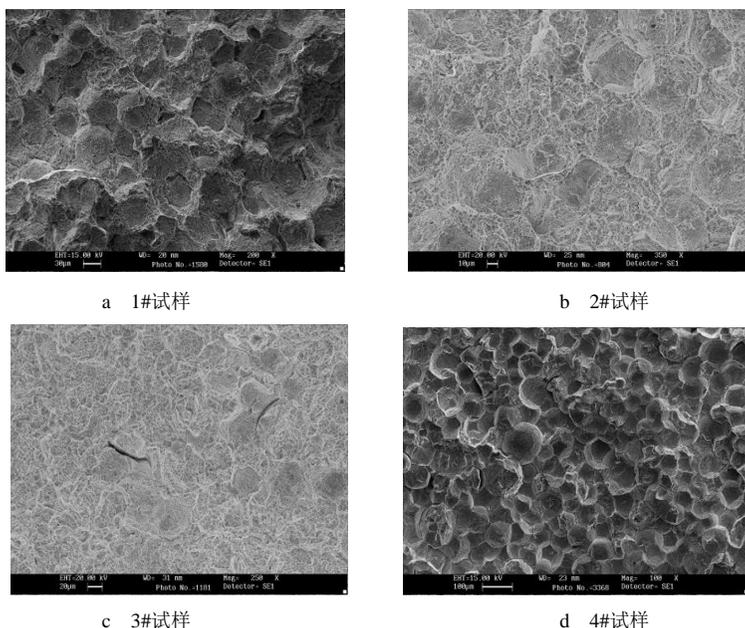


图4 不同热等静压温度的FGH4586合金拉伸断口

图4所示为不同热等静压制度成形的镍基高温合金FGH4586室温拉伸断口形貌。由图可知,经过1100℃热等静压的1#试样为穿晶断裂和沿PPB断裂的混合断口,在PPB断裂的颗粒表面发现部分枝晶组织仍然存在。与1#相比,经过1180℃热等静压的2#沿PPB断裂数量降低,穿晶断口处的韧窝组织数量增加,这与表3中2#试样塑性稍好于1#试样的结论一

致。3#试样的宏观断口较平整无起伏,颗粒几乎全部表现为穿晶断裂,韧窝组织明显、均匀,说明1200℃热等静压能够较好的成形合金并获得均匀的组织,使该热等静压温度下的合金具有较佳的力学性能。4#试样宏观断口具有一定起伏,主要表现为沿PPB断裂,断口处的颗粒变形不明显。

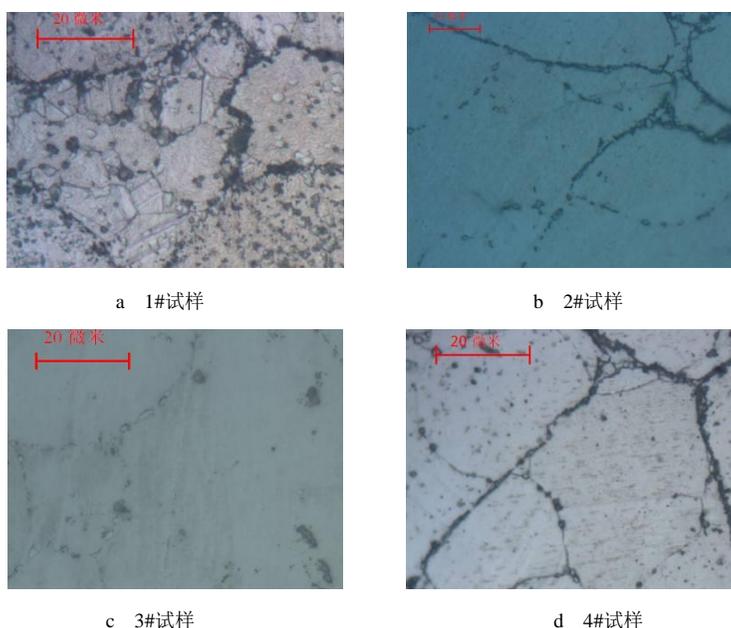


图5 不同热等静压温度的合金金相

图5所示为不同热等静压制度成形的镍基高温合金FGH4586金相组织照片。由图中可以看出,合金宏观上组织均匀,无宏观偏析存在。1100℃热等静压的1#试样晶内存在较多的残余枝晶组织形成的碳化物。相比1100℃热等静压的合金,1180℃热等静压的2#试样的残余枝晶组织大量减少,晶界上分布着链状连续的小尺寸碳化物。经过1200℃热等静压的3#试

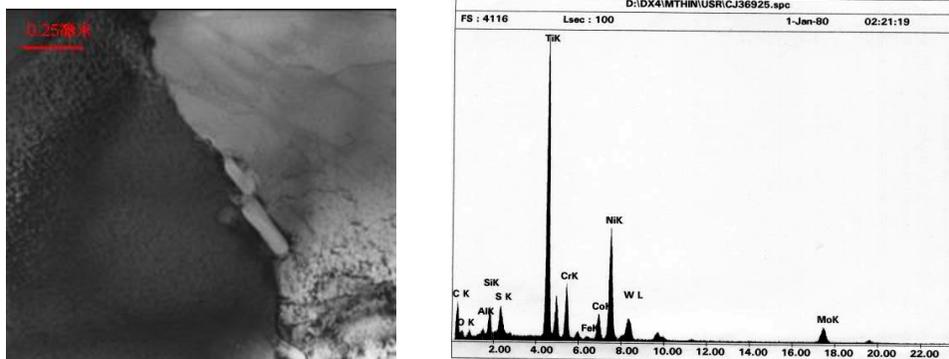


图6 直接热等静压的合金析出相形貌及其能谱图(TEM)

图6为经过1200℃热等静压的3#试样的碳化物形貌及能谱图。对图中原始颗粒边界处薄片状析出相进行能谱分析,确定该析出相为TiC,在能谱图中还发现元素氧的存在,推断原始颗粒边界是钛的氧碳化物,与DAHLEN推断其为Ti(C,N,O)一致^[4]。

分析认为,热等静压后的FGH4586合金表面就是以碳氧化合物 $TiC_{1-x}O_x$ 为核心形成大量薄片状TiC,这些连续分布的碳化物形成颗粒边界薄膜,弱化了粉末颗粒之间的结合力。虽然有部分大块的MC在固溶或时效过程中发生了生成 M_6C 或 $M_{23}C_6$ 的反应,但仍有大量的MC在晶界或原始颗粒边界上存在,导致碳化物在合金晶内和晶界上的分布不同对合金力学性能产生影响。因此,对于粉末镍基高温合金FGH4586,过高和过低的热等静压温度都将影响合金的力学性能,而经过1200℃、140MPa保温3h的热等静压成形,能够获得均匀分布的碳化物,有效强化合金基体和晶界,从而获得较佳的综合力学性能。

4 结束语

a. 粉末镍基高温合金FGH4586使用等离子旋转电极法(PREP)制备的球形合金粉末,有较好的球形度,表面光滑完整。

样,残余枝晶组织形成的碳化物完全消失,晶内和晶界处的碳化物尺寸接近且分布均匀。与其他制度相比,1240℃热等静压的4#试样由于热等静压温度较高,合金中的碳化物回溶,在随炉冷却过程中大量碳化物优先在能量较低、空位数较多的位置析出,最终导致碳化物主要集中分布在PPB和晶界上。

b. 对于FGH4586粉末冶金镍基高温合金,采用1200℃、140MPa保温3h的热等静压成形,合金完全致密,密度达到 $8.38g/cm^3$,能够使碳化物在合金晶内和晶界均匀析出,获得均匀的组织 and 较佳综合力学性能的合金。

c. 热等静压后的FGH4586合金原始颗粒边界处以碳氧化合物 $TiC_{1-x}O_x$ 为核心形成大量薄片状TiC,弱化了粉末颗粒之间的结合力,降低合金力学性能。

参考文献

- 1 Bampton C, Goodin W, Dam T V, et al. Net-Shape HIP powder metallurgy components for rocket engines. Rocketdyne Propulsion & Power, The Boeing Company
- 2 胡本美,刘国权,贾成厂,等. 新型高性能粉末高温合金的研究与发展. 材料工程, 2007(2): 49~53
- 3 Seliverstov D, Samarov V, Kratt E, et al. Development and manufacturing of "Net Shape" critical rotating parts for rocket propulsion systems from Ni-Base superalloy. 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 20-24 June 1999
- 4 Ingesten N G, Warren R, Winberg L. The nature and origin of previous particle boundary precipitates in P/M superalloy. High Temperature Alloy for Gas Turbine 1982. R Brunetandm, D Coutsouradis, T B Gibbons, et al. London: D Reidel Publishing Company