

TC17 粉末钛合金 HIP/IF 复合工艺制备及组织性能演变

赵张龙¹, 郭鸿镇¹, 姚泽坤¹, 刘海彦², 汤慧萍²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 采用粉末热等静压(HIP)+等温锻造(IF)的复合工艺制备 TC17 粉末钛合金, 并分析研究工艺过程中合金组织和性能的变化。结果表明: 粒度 $<104\ \mu\text{m}$ 的雾化 TC17 合金粉末经热等静压后, 合金成分均匀, 显微组织为细针状的魏氏组织, 室温抗拉强度为 1210 MPa、延伸率仅为 4%; 经高低温慢速等温锻造后, 合金密度得到进一步提高(99.9%), 显微组织中的原始 β 晶粒得到完全破碎, 获得了细小的等轴晶粒; 固溶时效热处理后, 大量等轴 α 相均匀地弥散分布于 β 转变基体上, α 相尺寸很小, 约 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。最终粉末合金室温抗拉强度为 1210 MPa、延伸率高达 16%, 强度和塑性达到了良好的匹配, 并且远远超过技术条件要求。

关键词: 粉末钛合金; 热等静压; 等温锻造; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF 124.3, TG 319

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)08-1450-04

钛合金由于具有低密度、高强度及优良的耐热和抗腐蚀等特性, 在航空航天、医疗器械及化工领域备受关注, 但是昂贵的成本却限制了其广泛应用。粉末冶金是提高钛合金材料利用率、减少机加工工时、节约成本的一条近净成形工艺, 在国内外已受到较多的重视^[1~3]。

用于飞机发动机盘件的高强、高韧、高耐热性的 TC17 钛合金, 在熔炼过程中因 Cr 元素偏析而极易出现“ β 斑”(图 1), 导致材料性能降低^[4], 这对于发动机转动部件是非常不利的。本研究采用粉末热等静压(HIP)+等温锻造(IF)的复合工艺制备 TC17 粉末钛合

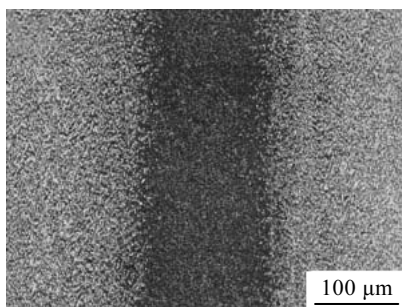


图 1 熔铸合金中典型的“ β 斑”

Fig.1 Typical “ β fleck” in ingot alloys^[4]

金, 利用粉末合金无偏析的特点来均匀合金成分, 细化组织, 同时再结合等温锻造进一步改善合金的组织性能。

1 实 验

采用氩气雾化法制备 TC17 球形粉末, 筛分出粒度 $<104\ \mu\text{m}$ 的粉末用于本研究, 粉末的化学成分(质量分数, %)为: Al 5.23, Sn 1.97, Zr 1.80, Mo 4.06, Cr 4.04, C 0.008, H 0.01, N 0.019, O 0.14, Fe 0.037, Ti Bal.。将粉末装入纯钛管内摇实后, 抽真空至 $10^{-3}\ \text{Pa}$ 进行封装, 随后在温度为 $910\ ^\circ\text{C}$ 、压力为 200 MPa 的条件下进行热等静压, 保温 3 h, 随炉冷却至室温。热等静压后在 TC17 合金相变点($890\ ^\circ\text{C}$)上、下分别进行等温锻造, 并进行 $800\ ^\circ\text{C}$, 4 h WQ+ $635\ ^\circ\text{C}$, 8 h AC 的固溶时效(SA)热处理。观察分析制备过程中粉末合金的微观组织和力学性能变化。

2 结果与分析

2.1 热等静压对粉末合金显微组织的影响

图 2a 为氩气雾化球形粉末的外貌, 图 2b 为粉末内部组织。可以发现, 在球形粉末内部存在很多“枝晶”晶粒。说明采用的球形粉末实际是“多晶”颗粒。

收到初稿日期: 2008-10-30; 收到修改稿日期: 2009-04-13

作者简介: 赵张龙, 男, 1981 年生, 博士, 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88493744, E-mail: zhaozhanglong000@sohu.com

同时发现,在个别粉末内部有空洞缺陷(如图 2b 箭头所示)。这是由于粉末在雾化过程中捕获了氩气所致。这种空洞与粉末表面有些是连通的,在真空排气过程中内部气体可以排除,但是也有些是闭孔,内部氩气将会遗留在热等静压粉末合金内部形成孔隙或微孔。

热等静压后粉末合金的显微组织如图 3a 所示。组织中的晶界比较模糊,且有断续现象,这是由于晶粒跨越原始粉末界面的生长导致界面消失所致^[3]。从组织中没有看到熔铸合金中极易出现的“ β 斑”(图 1),表明粉末合金的化学成分很均匀。采用排水法测定热等静压后合金的密度达到了 99.3%,说明热等静压致密化效果较好。原始粉末中存在的闭孔(图 2b)在热等静压过程中会随着粉末的变形而相应发生变化。如果变形充分,粉末内部的闭孔在外力作用下会完全闭合。但并不是所有的闭孔都会受到充分的变形,当闭孔变形不充分时,就会在热等静压后合金内部残留下孔隙。但在光学显微镜下没有观察到合金内部存在有孔隙(图 3a、3b),其原因与合金内部存在的微孔非常细小有关。文献[5]报道在热等静压 Ti-6Al-4V 粉末合金中有很小的微孔存在,即便是采用高分辨率的透射电镜,对于这种微孔的观察也是相当困难的,主要原因是微孔的数量极少、体积很小所致。

由于粉末合金的相关热处理规范尚未建立,所以本研究采用铸锻合金的 800 °C, 4 h WQ+635 °C, 8 h AC 的标准固溶时效热处理规范。热等静压粉末合金经过标准热处理后的显微组织如图 3b 所示。可以看到组织中的次生 α 相均匀细小,呈细针状分布; β 晶界趋于明显,但是 β 晶粒还比较粗大,这与粉末粒度和热等静压工艺参数的选择有直接关系。国外对粉末钛合金热等静压工艺及参数有较多的研究,取得了一定成果,低温长时间的热等静压工艺是一个研究方向^[6-8]。由于热等静压后合金内部存在微孔,并且组织还比较粗大,故合金的性能尚满足不了航空关键盘件的性能要求。因此,本研究对上述热等静压粉末合金进一步进行等温锻造,一方面可以去除热等静压粉末合金中存在的残余微孔,另一方面可以获得所需要的晶粒组织,最终提高粉末合金的力学性能。

2.2 等温锻造对粉末合金显微组织的影响

首先在 950 °C 进行初始等温锻造,利用合金在相变点(890 °C)以上良好的流动性进一步使合金密实化,然后在相变点以下(870 和 850 °C)进行第 2 次和第 3 次等温锻造,发挥大变形和再结晶的作用,达到破碎晶粒,得到细晶组织的目的。合金经过 3 次等温锻造变形后,组织如图 4a 所示。可以看出,原始 β 晶界(图 3a)已经得到了彻底的破碎,出现了大量细小的

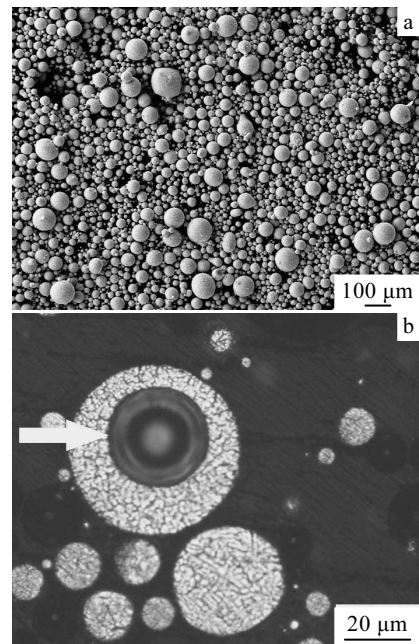


图2 氩气雾化粉末 SEM 照片及颗粒内部组织

Fig.2 SEM images of argon atomized powder (a) and its microstructure (b)

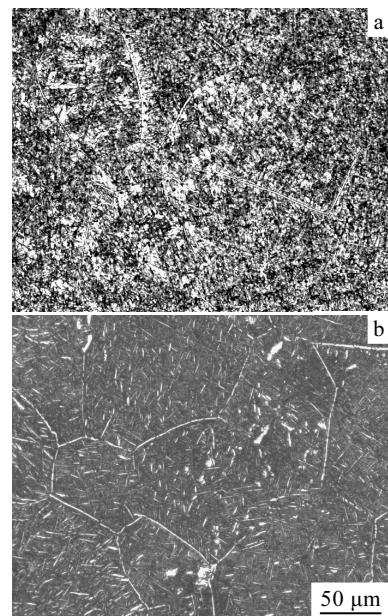


图3 热等静压和固溶时效后合金的微观组织

Fig.3 Microstructures of HIPed alloy (a) and solution-aged alloy (b)

再结晶等轴晶粒。采用排水法测定经等温锻造后的粉末合金相对密度为 99.9%, 接近理论密度。再经过标准热处理后,合金的显微组织如图 4b 所示,可见等轴 α 相弥散分布于转变 β 基体上,等轴 α 相尺寸非常细小,为 1~2 μm 。和图 3b 比较,经等温锻造后,粉末

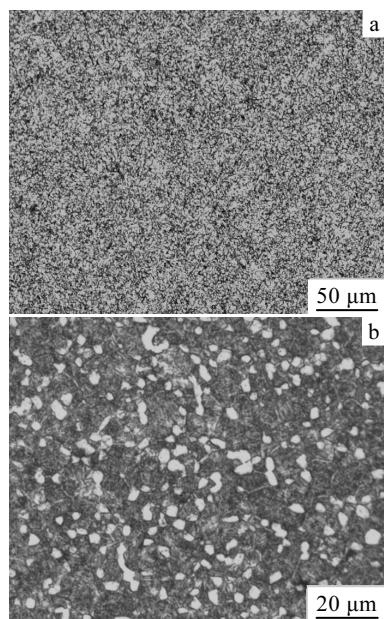


图 4 热等静压合金经等温锻造和热处理后的微观组织
Fig.4 Microstructures of HIPed alloys after isothermal forging (a) and heat-treatment (b)

合金的显微组织发生了显著的变化,热等静压后的细针状魏氏组织已完全消失,转变为均匀细小的等轴组织。

2.3 粉末合金的力学性能变化

粉末合金经热等静压+标准固溶时效处理及等温锻造+标准热处理后的室温和高温性能变化如图 5 所示。由图 5a 可见,热等静压后粉末合金的室温拉伸强度较高($\sigma_b=1210$ MPa, $\sigma_s=1150$ MPa),但是塑性比较差($\delta=4\%$, $\psi=10\%$)。经标准热处理后,强度稍有变化,塑性提高不大,这主要是因为热等静压后的原始组织在热处理过程中并未发生明显变化,合金晶粒组织仍然比较粗大。但是经过等温锻造变形、标准热处理后,粉末合金的塑性大幅度提高,延伸率提高到 16%,断面收缩率提高到 40%,同时强度还得到了提高,屈服强度由 1150 MPa 提高到 1170 MPa。这主要归因于晶粒组织均匀细小、化学成分均匀和等温锻造晶粒再次细化的效果。粉末合金在 400 °C 的高温性能如图 5b 所示。可见合金在高温下仍然保持着良好的强度和塑性。等温锻造后粉末合金的室温拉伸性能远远超过了航空用 TC17 钛合金标准(棒材室温拉伸: $\sigma_b \geq 1120$ MPa, $\sigma_{0.2} \geq 1030$ MPa, $\delta \geq 7\%$, $\psi \geq 15\%$; 盘模锻件室温拉伸: $\sigma_b \geq 1120$ MPa, $\sigma_{0.2} \geq 1030$ MPa, $\delta \geq 5\%$),高温拉伸性能也均满足航空用 TC17 钛合金标准要求(盘模锻件 400 °C 拉伸: $\sigma_b \geq 905$ MPa, $\sigma_{0.2} \geq 800$ MPa)。

图 6 为 TC17 粉末合金室温拉伸试样断口形貌。由图 6a 可见,热等静压后合金断口较平坦,有很大很

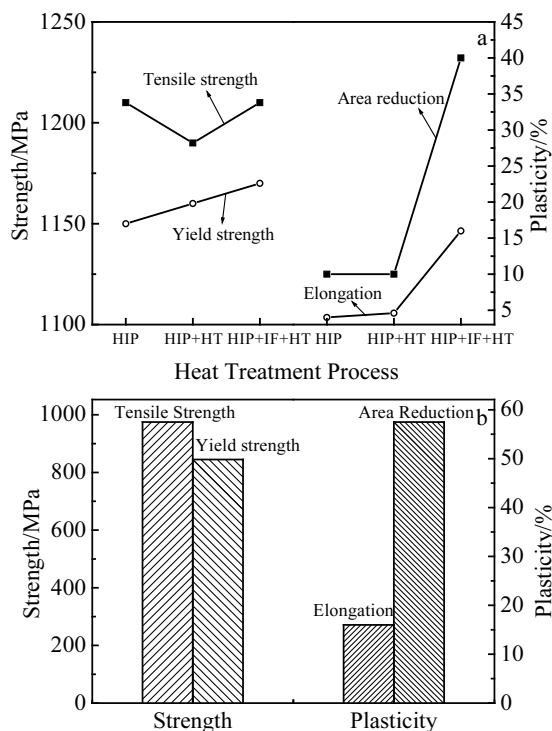


图 5 粉末合金的室温拉伸性能和 400 °C 高温性能
Fig.5 Tensile properties of powder alloys at room temperature (a) and at 400 °C (b)

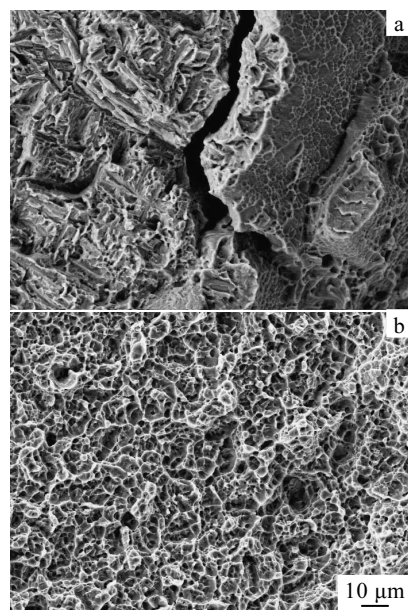


图 6 热等静压和等温锻造粉末合金的室温拉伸断口形貌
Fig.6 Fractograph of the HIPed alloy (a) and the isothermal forged alloy (b) at room temperature

深的裂纹存在。这是因为热等静压合金的原始颗粒晶界存在的较微小孔缺陷或夹杂物,在受到拉伸外力的作用后,这些缺陷作为裂纹源,形成裂纹,造成塑性严重下降。从热等静压+等温锻造和热处理后合金断

口形貌(图 6b)上可以看到,断口主要是由均匀的等轴韧窝组成,等轴韧窝较小,深度较大,说明合金的塑性良好。从断口的变化上也可以看出,等温锻造消除了热等静压合金中残留的微孔,改善了合金的组织,使力学性能得到显著提高。

3 结 论

1) 采用粉末热等静压+等温锻造的复合工艺所制备的 TC17 粉末钛合金密度达到了 99.9%。合金的化学成分均匀,有效地防止了“ β 斑”的产生。

2) 经热等静压及标准热处理后的粉末合金,显微组织为细针状的魏氏组织,但 β 晶粒还比较粗大;再经 3 次等温锻造及标准热处理后,大量细小的等轴 α 相均匀弥散分布于 β 转变基体上,等轴 α 相尺寸非常细小,为 1~2 μm 。

3) 所制备的 TC17 粉末钛合金力学性能优异,同时可利用制备工艺中的等温锻造实现粉末钛合金构件的近净成形。

参考文献 References

- [1] Tang Huiping(汤慧萍), Liu Yong(刘 咏), Huang Boyun(黄伯云) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(12): 1270
- [2] Tang Huiping(汤慧萍), Huang Boyun(黄伯云), Liu Yong(刘咏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(9): 677
- [3] Wu Yinjiang(吴引江), Lan Tao(兰 涛), Zhou Lian(周 廉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2000, 29(5): 336
- [4] Clifford E, Shamblen. *Metall Mater Trans B*[J], 1997, 28B: 899
- [5] Smarsly W, Lee Y T, Welsch G. *Metall Trans A*[J], 1985, 16A: 1831
- [6] Nesterenko V F, Goldsmith W, Indrakantia S S *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2003, 28: 137
- [7] Kim K T, Yang H C. *Powder Metallurgy*[J], 2001, 44(1): 41
- [8] Delo D P, Piehler H R. *Acta Mater*[J], 1999, 47(9): 2841

Preparation and Microstructure as well as Property of TC17 Powder Alloy by HIP/IF Process

Zhao Zhanglong¹, Guo Hongzhen¹, Yao Zekun¹, Liu Haiyan², Tang Huiping²

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

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: A technology combining hot isostatic pressing (HIP) with isothermal forging (IF) was used to prepare TC17 powder alloy, and the changes of its microstructure and properties were also researched and analyzed. The results indicated that the powder alloy prepared by HIP of atomized TC17 powder with particle size <104 μm exhibited a homogeneous chemical composition and a fine acicular Widmanstätten microstructure, and the tensile strength at room temperature (RT) was 1210 MPa, the elongation only 4%. After low-velocity IF at high and low temperature, the density of the powder alloy was further improved (99.9%), and primary β grains were broken completely, resulting in gaining fine and equiaxed grains. After solution aging heat-treatment, much equiaxed α phases distributed around transformed β matrix evenly, and their size was 1~2 μm . Finally, the powder alloy exhibited tensile strength of 1210 MPa at RT and elongation of 16%, and the strength and plasticity were matched excellently and exceeded technical demands for more.

Key words: powder titanium alloy; hot isostatic pressing; isothermal forging; microstructure; mechanical properties

Biography: Zhao Zhanglong, Ph. D., School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88493744, E-mail: zhaozhanglong000@sohu.com