

引文格式: 郭瑞鹏, 程敏, 卢正冠, 等. 粉末冶金TC11钛合金的热等静压制备与高周疲劳性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(17): 44-49.

GUO Ruipeng, CHENG Min, LU Zhengguan, et al. Powder metallurgy TC11 titanium alloy via hot isostatic pressing: Preparation, microstructure and high-cycle fatigue property[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(17): 44-49.

粉末冶金TC11钛合金的热等静压制备与高周疲劳性能研究*

郭瑞鹏¹, 程敏¹, 卢正冠², 徐磊²

(1. 太原理工大学, 太原 030024;

2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016)

[摘要] 粉末热等静压(HIP)技术可以近净成形高性能钛合金复杂构件,在航空航天领域具有广阔的应用前景。采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法制备了TC11预合金粉末,并对预合金粉末进行表征;在940℃/140MPa/3h条件下HIP成形了TC11坯体。采用OM、SEM、拉伸、冲击和旋转弯曲疲劳等手段对HIP坯体的显微组织和力学性能进行表征,研究了微气孔对HIP坯体疲劳性能的影响。结果表明,HIP坯体接近理论全致密,组织细小均匀,静力学性能接近甚至部分指标超越锻造合金,旋转弯曲高周疲劳强度(10^7 周次)为590MPa;空心粉形成的微气孔导致高周疲劳寿命呈现二重性,疲劳加载条件下,表面微气孔会优先成为裂纹萌生的位置,显著降低HIP坯体的高周疲劳寿命。

关键词: 粉末冶金; 热等静压; TC11钛合金; 显微组织; 疲劳性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.17.044



郭瑞鹏

讲师,博士,研究方向为粉末冶金与增材制造。

钛合金具有低密度、高强度、优异的耐腐蚀性和生物相容性等优点,已广泛应用于航空航天、海洋船舶和生物医学等领域^[1-2]。然而,高昂的原材料冶炼成本和较差的加工性能大幅增加了钛合金的使用成本^[3],进一步限制了钛合金在汽车等民用领域的应用。因此,近净成形技术一直是钛合金制备领域的研究热点。

典型的钛合金近净成形技术包括精密铸造、增材制造和粉末冶金等。精密铸造是一种低成本的近净成形工艺^[4]。钛合金过热度低、充形困难,近年来,研究人员陆续开发了重力铸造和离心铸造等多种精密铸造工艺,可以实现多种大型钛合金复杂结构件的近净成形^[5-7],然而成

品构件合格率仍有待提升。另一方面,钛合金熔点高,而且钛在高温下几乎与所有的坩埚材料发生反应,因此钛合金精密铸件中不可避免地引入夹杂等冶金缺陷。金属增材制造技术借助高功率激光束对金属粉末原料进行熔融、逐层堆积,加工精度高,可实现复杂结构零件的快速成形,具备加工高强度、难成形金属制件的能力,非常适合航空航天用钛合金复杂部件的精密制造^[8]。金属增材制造技术快速、柔性、产品开发周期短的工艺特点也迎合了小批量定制化制造与时效性的生产需求。增材制造技术是实现航天器结构轻量化-功能性一体化设计的有效途径^[9]。值得注意的是,钛合金增材制造对粉末的

* 基金项目: 国家自然科学基金(52205407,52401104); 山西省应用计划研究项目(202203021221072,202203021212237)。

粒径范围具有一定要求,比如激光选区熔化技术一般采用粒径 $53\ \mu\text{m}$ 以下的粉末,电子束熔融技术采用粒径 $45\sim 105\ \mu\text{m}$ 的粉末^[10-11]。目前广泛采用的钛合金制粉技术(如气体雾化法),粉末的粒径区间为 $5\sim 250\ \mu\text{m}$,且呈正态分布^[12]。因此,增材制造技术对于形状非十分复杂的大型零件(如薄壁回转体零件),其生产效率低、制备成本高。粉末冶金技术也是一种重要的近净成形工艺,通常被认为是“固态精密铸造”工艺,对粉末原材料的要求相对较低,适合制备形状相对复杂的钛合金构件。

粉末热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)技术是一种先进的粉末冶金工艺,该工艺制备的粉末钛合金致密度接近 100%,显微组织细小均匀、各向同性,无宏观成分偏析,力学性能优于铸造合金成分接近的锻件^[13-15]。Romero 等^[16]总结了不同粉末冶金工艺成形的粉末冶金钛合金的疲劳性能,发现 HIP 技术制备的疲劳强度最高,但是仍低于锻造合金,这可能是 HIP 态粉末钛合金中残留的微孔隙导致的。前期 Wegmann 等^[17]的研究表明,气体雾化法制备的钛合金粉末中存在空心粉,空心粉在随后的 HIP 成形过程中收缩演变为微气孔。Guo 等^[18]研究发现,微气孔对 HIP 态 TC4 合金的高周疲劳性能无明显影响,但热处理后形成的热诱导孔洞会降低高应力幅下合金的疲劳寿命。Cheng 等^[19]进一步研究发现, HIP 态 TC4 合金中的热诱导孔洞会显著降低合金的超高周疲劳寿命。由此推测, HIP 成形后的粉末钛合金疲劳性能与残留气孔及合金本身的强韧性有关。

TC11 钛合金是一种典型的高温钛合金,可在 $500\ \text{℃}$ 下长期服役,与 TC4 钛合金相比,其室温和高温强度均有较大幅度提升。然而,目前关于 HIP 工艺制备 TC11 钛合金的研究较少,由空心粉导致的微孔隙对 TC11

粉末钛合金高周疲劳性能的影响更是鲜有报道。因此,本文采用 HIP 工艺成功制备了 TC11 粉末钛合金,重点研究了微孔隙对 HIP 坯体高周疲劳性能的影响规律,研究结果可为 TC11 粉末冶金构件在航空航天等领域的应用提供重要的理论支撑。

1 试验及方法

采用中国科学院金属研究所的德国 ALD EIGA 50-500 型制粉机制备 TC11 钛合金粉末,制粉原理为无坍塌感应熔炼超声气体雾化法(Electrode induction melting gas atomization, EIGA);采用 ICP 7300 DV 型等离子发射光谱仪和 ONH836 型氧氮氢分析仪测试了制粉电极和预合金粉末的化学成分;采用英国马尔文 2000 激光粒度仪分析了预合金粉末的粒度分布;采用金相法统计预合金粉末的空心率。

热等静压制备流程:将预合金粉末填充至低碳钢圆柱形包套中,包套尺寸为直径 $50\ \text{mm}$ 、高 $120\ \text{mm}$ 、壁厚 $3\ \text{mm}$;经脱气处理和真空封焊后,转移至钢铁研究总院 RD-750 型热

等静压炉中进行 HIP 成形。根据前期 Guo 等^[20]的研究结果, HIP 温度一般为 β 转变温度以下 $50\ \text{℃}$ 。因此, TC11 预合金粉末的热等静压制度为 HIP 温度 $940\ \text{℃}$ 、压力 $140\ \text{MPa}$ 、保温保压 $3\ \text{h}$ 。

如图 1 所示,采用线切割切取 HIP 坯体的拉伸、冲击和高周疲劳试样。采用阿基米德法测试 HIP 坯体的致密度。金相试样的样品尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,样品经砂纸打磨、机械抛光和化学腐蚀后,采用 NIKONL 150 金相显微镜(OM)和 ZEISS Gemini 300 扫描电子显微镜(SEM)观察 HIP 坯体的显微组织。化学腐蚀试剂组成: $8\ \text{mL}\ \text{HNO}_3+4\ \text{mL}\ \text{HF}+88\ \text{mL}\ \text{H}_2\text{O}$ 。拉伸试样采用标准棒状样品,如图 1(a)所示,平行段长度为 $30\ \text{mm}$,直径为 $5\ \text{mm}$;拉伸试验在 Instron 5969 上进行,采用横梁位移控制,初始拉伸速率为 $0.2\ \text{mm}/\text{min}$,屈服后拉伸速率增加至 $2\ \text{mm}/\text{min}$ 。冲击测试在 SANS-ZBC2452-C 型冲击试验机上进行,试样尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 55\ \text{mm}$,U 型缺口深度 $2\ \text{mm}$,如图 1(b)所示。

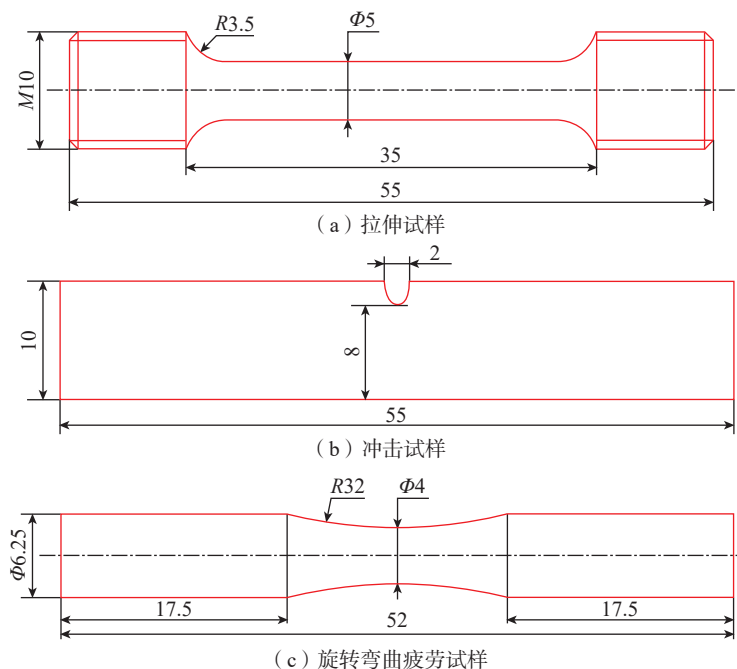


图 1 力学性能测试样品尺寸 (mm)

Fig.1 Dimensions of specimens for mechanical performance tests (mm)

疲劳试验在济南胜工 XWP-1000 型旋转弯曲疲劳试验机上完成,应力比为 -1,疲劳试样尺寸如图 1(c)所示。疲劳试样的表面状态为机加工表面,采用 SEM 观察拉伸和疲劳断裂试样的断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 预合金粉末表征

采用 EIGA 法制备的 TC11 钛合金粉末的化学成分如表 1 所示。可以看出,与锻造制粉电极相比,预合金粉末中主合金元素 Al、Zr 和 Mo 等元素含量几乎不变, Si、C、O 和 N 等杂质元素含量略有增加,这说明 EIGA 是一种洁净制粉方法。预合金粉末的表面形貌如图 2(a)所示,可以看出,预合金粉末几乎呈球形,存在少量不规则的粉末;另外,大颗粒粉末表面黏附少量卫星球。进一步对预合金粉末的粒度分布进行表征发现,粉末的粒径整体呈正态分布(图 2(b)),平均粒径为 105 μm 。预合金粉末的截面金相组织如图 2(c)所示,可以看出,EIGA 法制备的 TC11 粉末存在空心的现象,这与 Wegmann 等^[17]研究的结论相符。对不同粉末粒径的空心率进行统计,结果如图 2(d)所示。随着粒径的增加,空心率逐渐升高,全粒度区间 TC11 钛合金粉末的空心率约为 2.8%。空心粉的形成主要是在 EIGA 制粉过程中,金属液体在高压气体的作用下破碎,由于表面张力的作用,金属液滴在球化过程中可能会裹挟制粉炉中的惰性气体(通常为 Ar 气)^[18]。由图 2(c)可知,空心粉中的气孔一般呈规则球形,而传统铸造缩孔的形状不规则;同时经 HIP 成形后,传统铸造缩孔一般会完全闭合^[6],而空心粉中的气孔会演变为尺寸较小且含有一定内压的微气孔^[19]。

2.2 粉末压坯的显微组织和力学性能

TC11 预合金粉末经 940 $^{\circ}\text{C}/140\text{ MPa}/3\text{ h}$ 的 HIP 成形后,坯体的显微

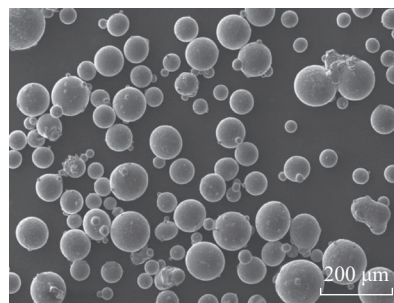
组织如图 3 所示。TC11 粉末钛合金的显微组织主要由等轴和片层 α 相组成。由显微组织的 SEM 像可知,TC11 粉末钛合金中存在少量 β 片

层(白色)。 β 相的形成是由于气体雾化制粉过程中,液滴快速凝固,粉末主要由马氏体组成, HIP 成形过程中,马氏体分解为 α 相和少量 β 片层。

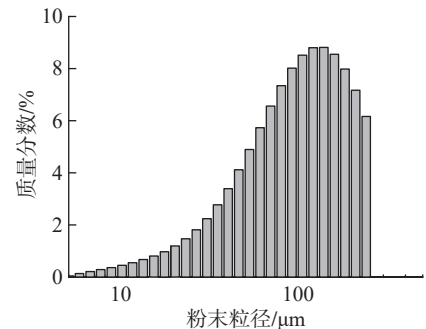
表 1 TC11 钛合金粉末的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of TC11 titanium alloy powder (mass fraction) %

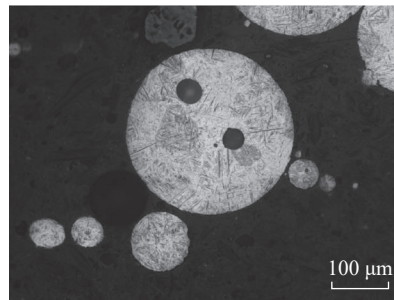
制粉方式	Al	Zr	Mo	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
制粉电极	6.4	1.4	3.5	0.125	0.225	0.008	0.090	0.008	0.001	余量
EIGA 法	6.4	1.4	3.4	0.123	0.239	0.013	0.010	0.012	0.001	余量



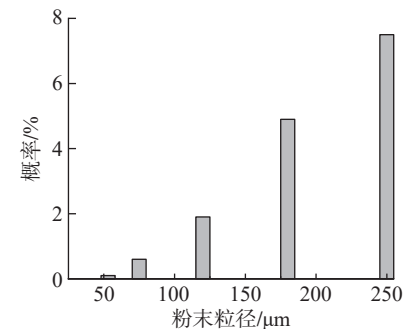
(a) 表面形貌 SEM 图



(b) 粉末粒度分布



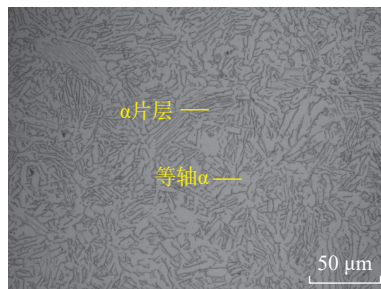
(c) 空心粉 OM 图



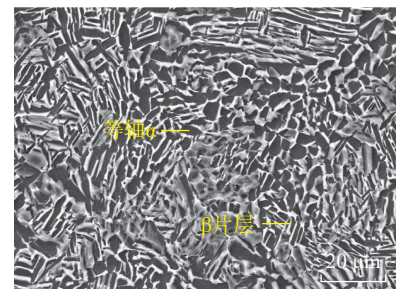
(d) 粉末粒度与空心率的关系

图 2 TC11 钛合金粉末的表面形貌和粒度分布

Fig.2 Surface morphology and particle size distribution of TC11 alloy powder



(a) OM 图



(b) SEM 图

图 3 HIP 坯体的显微组织

Fig.3 Microstructure of as-HIPed powder compacts

与 TC4 粉末钛合金相比^[20], TC11 粉末钛合金中 β 相的体积分数略有升高, 由 4.9% 增加至 10.2%; 同时等轴 α 相的尺寸和片层 α 相的宽度分别为 3.7 μm 和 1.9 μm , 明显细化, 这些组织上的差异可能与 TC11 钛合金中 β 稳定元素含量更高有关。值得注意的是, OM 和 SEM 图上均未观察到明显的孔隙, 同时 HIP 坯体的致密度为 99.8%, 由此可知, HIP 坯体的致密度接近理论全致密。

TC11 粉末钛合金的拉伸、冲击和高周疲劳性能如表 2 所示^[21] (锻件标准为 GJB494—1988; $R_{p0.2}$ 为屈服强度; R_m 为抗拉强度; A 为延伸率; Z 为断面收缩率; α_{ku2} 为冲击韧度)。可以看出, HIP 坯体的屈服强度、延伸率、断面收缩率、冲击韧度超越锻造合金, 疲劳强度接近锻造合金。虽然抗拉强度略低于锻件标准, 但是后续通过典型的固溶时效工艺, 预计可以大幅提升 TC11 粉末钛合金的抗拉强度。TC11 粉末钛合金的拉伸断口如图 4 所示。SEM 低倍照片显示断口上存在剪切唇, SEM 高倍照片显示断口上存在大而深的

韧窝, 拉伸试样呈现典型的韧性断裂特征。

2.3 粉末压坯的高周疲劳性能与断口分析

TC11 粉末钛合金的高周疲劳寿命结果如图 5 所示 (黑色方块代表疲劳裂纹源存在微气孔的试样; 蓝色圆点代表疲劳裂纹源无气孔的试样)。可以看出, 相同应力状态下, HIP 坯体的疲劳寿命数据分散较大。通过 SEM 观察疲劳断口, 发现所有断裂试样均从试样表面开裂, 将不同开裂方式的样品进行分类, 统计结果如表 3 所示。对于疲劳裂纹源处含有气孔的样品, 表 3 列出了气孔的等效直径。由图 3 可知, HIP 坯体中几乎没有微气孔, 同时拉伸断口形貌也未发现气孔, 这可能是由于微气孔一般不会影响合金的拉伸变形; 而气孔对 HIP 坯体的动态力学性能, 特别是疲劳性能影响显著。当试样表面存在微气孔时, 微气孔会优先成为裂纹萌生位置。由此可知, TC11 粉末钛合金的高周疲劳寿命具有“二重性”。

选取最大应力 600 MPa 时, 不同循环周次对应不同开裂方式下的

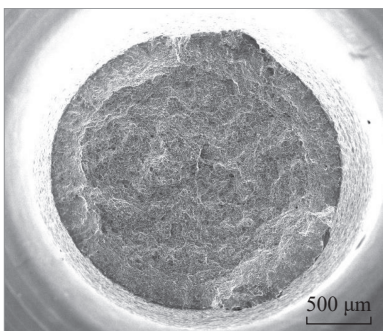
疲劳断口进行对比, 如图 6 所示。当试样表面无气孔时, 疲劳变形机制以位错滑移为主, 当疲劳损伤累积到一定程度后, 疲劳裂纹由表面萌生。当试样表面存在微气孔等缺陷时, 疲劳加载时会诱发应力集中, 在相同的循环周次下增大疲劳损伤程度, 进而加速疲劳裂纹萌生。值得注意的是, 由表 3 可知, 在相同应力状态下, 疲劳寿命与气孔尺寸并不是正相关关系。一般而言, 孔隙尺寸越大, 疲劳寿命越低, 但是气孔距离表面的位置及气孔的形状等因素也会影响试样的疲劳寿命。由于本文疲劳样本数量较少, 初步可以推断, 本文试验条件下, 微气孔的尺寸和距离表面位置都会影响 TC11 粉末钛合金的疲劳寿命。

在气体雾化法粉末中, 粉末空心率随着粉末粒径升高而增加 (图 2 (d)), 这与前期 Wegmann 等^[17] 关于 Ti-6Al-4V 粉末的统计结果一致。本文条件下, 气体雾化法粉末的平均粒径为 105 μm 。为降低残留微气孔对 TC11 粉末钛合金疲劳性能的影响, 可以改进制粉工艺, 提高细粉收得率, 或者通过筛分法减少粗粉的质量分数或体积分数, 从而降低气体雾化法粉末的平均粒径, 减少空心率。空心率的降低有利于进一步降低 HIP 坯体中的微气孔数量, 从而降低疲劳试样在表面气孔处断裂的概

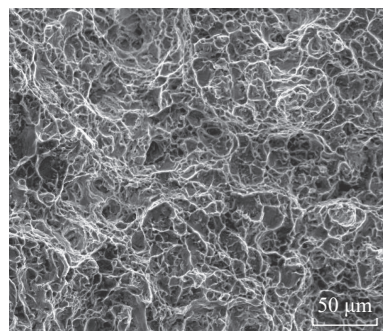
表 2 HIP 坯体的力学性能

Table 2 Mechanical properties of as-HIPed powder compacts

样品	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$\alpha_{ku2}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	疲劳强度/MPa
锻件标准	930	1030	9.0	30	295	590 ^[21]
HIP 态合金	989	1023	17.0	37	305	590



(a) 低倍SEM图



(b) 高倍SEM图

图 4 HIP 坯体的拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphology of as-HIPed powder compacts

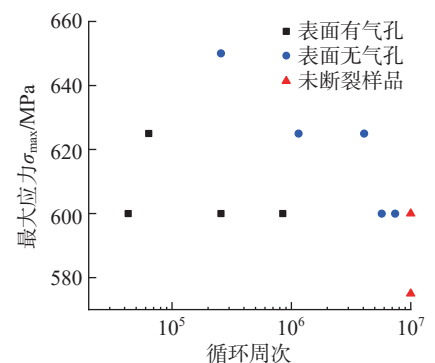


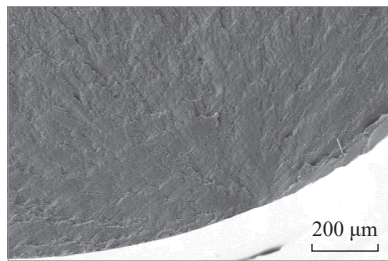
图 5 不同最大应力下 HIP 坯体的高周疲劳寿命

Fig.5 High-cycle fatigue lives of as-HIPed powder compacts under different maximum stresses

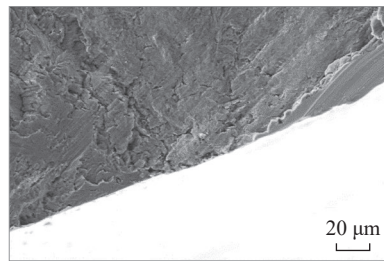
表 3 HIP 坯体的高周疲劳寿命及失效试样断裂方式

Table 3 High-cycle fatigue lives of as-HIPed powder compacts and the failure modes of failed specimens

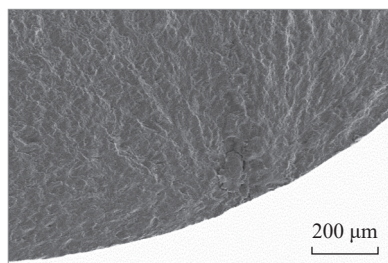
样品编号	最大应力 σ_{max} /MPa	疲劳寿命/万次	断裂位置	气孔尺寸/ μm
1	650	25.7	表面	无
2	625	407.0	表面	无
3	625	115.0	表面	无
4	625	6.4	表面	31.2
5	600	25.7	表面	14.9
6	600	42.8	表面	22.3
7	600	84.7	表面	21.5
8	600	571.0	表面	无
9	600	739.0	表面	无
10	600	1000	未断裂	—
11	600	1000	未断裂	—
12	575	1000	未断裂	—
13	575	1000	未断裂	—



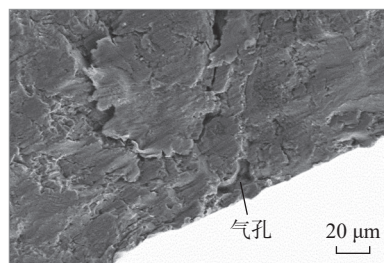
(a) 低倍SEM图, 循环周次571万次



(b) 高倍SEM图, 循环周次571万次



(c) 低倍SEM图, 循环周次84.7万次



(d) 高倍SEM图, 循环周次84.7万次

图 6 HIP 态 TC11 粉末钛合金的疲劳断口(最大应力 600 MPa)

Fig.6 Fatigue fracture of as-HIPed TC11 powder compacts (maximum stress 600 MPa)

率,进而改善 TC11 钛合金坯体的疲劳性能。

3 结论

(1) TC11 粉末钛合金的显微组织细小均匀,接近理论全致密,高周

疲劳强度可到 590 MPa,静态力学性能和疲劳强度与锻造合金相当。

(2) TC11 粉末钛合金的高周疲劳寿命呈现二重性,疲劳加载条件下,表面微气孔会优先成为裂纹萌生位置,显著降低合金的高周疲劳寿命。

参考文献

[1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.

[2] KUMAR P, RAMAMURTY U. High cycle fatigue in selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2020, 194: 305-320.

[3] FANG Z Z, PARAMORE J D, SUN P, et al. Powder metallurgy of titanium—Past, present, and future[J]. International Materials Reviews, 2018, 63(7): 407-459.

[4] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 412-427.

SUN Baode, WANG Jun, KANG Maodong, et al. Investment casting technology and development trend of superalloy ultra limit components[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 412-427.

[5] 杨锐, 崔玉友, 贾清, 等. 大尺寸薄壁钛合金筒体结构的离心精密铸造[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 56-59.

YANG Rui, CUI Yuyou, JIA Qing, et al. Centrifugal casting of large thin-wall cylindrical structure of titanium alloys[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(3): 56-59.

[6] FENG X, QIU J K, MA Y J, et al. Influence of processing conditions on microstructure and mechanical properties of large thin-wall centrifugal Ti-6Al-4V casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 362-371.

[7] YANG Y J, WANG X Y, LI X M, et al. Numerical simulation on solidification during vertical centrifugal casting process for TC4 alloy wheel hub with enhanced mechanical properties[J]. Materials, 2023, 17(1): 184.

[8] 宋波, 张金良, 章媛洁, 等. 金属激光增材制造材料设计研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 1-15.

SONG Bo, ZHANG Jinliang, ZHANG Yuanjie, et al. Research progress of materials design for metal laser additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 1-15.

[9] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): 1487.

[10] GHODS S, SCHULTZ E, WISDOM C, et al. Electron beam additive manufacturing of Ti6Al4V: Evolution of powder morphology and part microstructure with powder reuse[J]. Materialia, 2020, 9: 100631.

[11] WU Q, QIAO C, WU Y H, et

al. Numerical investigation on the reuse of recycled powders in powder bed fusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103821.

[12] CHENG M, WU J, LU Z G, et al. Effect of argon-induced porosity on mechanical properties of powder metallurgy titanium alloy components using hot isostatic pressing[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(10): 1386–1394.

[13] CAI C, SONG B, XUE P J, et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: Surface qualities, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686: 55–63.

[14] ZHANG K, MEI J, WAIN N, et al. Effect of hot-isostatic-pressing parameters on the microstructure and properties of Powder Ti–6Al–4V hot-isostatically-pressed samples[J].

Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(4): 1033–1045.

[15] GUO R P, CHENG M, ZHANG C J, et al. Achieving superior fatigue strength in a powder-metallurgy titanium alloy via in situ globularization during hot isostatic pressing[J]. Scripta Materialia, 2023, 228: 115345.

[16] ROMERO C, YANG F, BOLZONI L. Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes—A review[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 407–419.

[17] WEGMANN G, GERLING R, SCHIMANSKY F P. Temperature induced porosity in hot isostatically pressed gamma titanium aluminide alloy powders[J]. Acta Materialia, 2003, 51(3): 741–752.

[18] GUO R P, XU L, WU J, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of powder metallurgy Ti–6Al–4V alloy based on heat response[J]. Materials Science and

Engineering: A, 2015, 639: 327–334.

[19] CHENG M, LU Z G, WU J, et al. Effect of thermal induced porosity on high-cycle fatigue and very high-cycle fatigue behaviors of hot-isostatic-pressed Ti–6Al–4V powder components[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 98: 177–185.

[20] GUO R P, XU L, ZONG B Y P, et al. Characterization of prealloyed Ti–6Al–4V powders from EIGA and PREP process and mechanical properties of HIPed powder compacts[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(8): 735–744.

[21] 郑国华, 左桐, 张欣耀, 等. 燃机压气机叶片热强钛合金TC11 疲劳行为研究[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(3): 22–27.

ZHENG Guohua, ZUO Tong, ZHANG Xinyao, et al. Study on fatigue property of TC11 for compressor blade[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(3): 22–27.

Powder Metallurgy TC11 Titanium Alloy Via Hot Isostatic Pressing: Preparation, Microstructure and High-Cycle Fatigue Property

GUO Ruipeng¹, CHENG Min¹, LU Zhengguan², XU Lei²

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] Powder metallurgy through hot isostatic pressing (HIP) route, which is a promising near-net forming method, can fabricate high-performance titanium alloy components with complex structure for applications in the aerospace field. In this study, TC11 pre-alloyed powder was made by electrode induction melting gas atomization method, and the as-received powder was characterized. The powder compacts were HIP at 940 °C/140 MPa /3 h from the pre-alloyed powder. The microstructure of as-HIPed powder compact was observed by OM and SEM, and the mechanical properties were evaluated by tensile, impact and high-cycle fatigue tests. The effect of residual micro-pores induced by the hollow powder with gas bubbles on fatigue life of as-HIPed powder compact was also investigated. The results show that the TC11 powder compact is approaching to full density, and the microstructure is fine and homogeneous. The quasi-static mechanical properties of as-HIPed powder compacts are close to or even better than those of wrought alloys. The rotating bending fatigue strength is about 590 MPa at 10⁷ cycles. However, the duality of the high-cycle fatigue *S–N* curve is observed. The micro-pores located at the surfaces of specimens will preferentially become crack initiation sites under fatigue loading conditions, which will further significantly reduce the high-cycle fatigue life of the powder compacts.

Keywords: Powder metallurgy; Hot isostatic pressing (HIP); TC11 titanium alloy; Microstructure; Fatigue property

(责编 七七)