

粉末压坯锻造和粉末压坯挤压纯钛的力学性能

梁 存¹, 马明星¹, 张德良¹, 贾明途², S. RAYNOVA², 闫健强¹

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240;

2. 怀卡托大学 工程系 先进材料中心, 新西兰 汉密尔顿 3105)

摘 要: 利用快速粉末压坯锻造和粉末压坯挤压的方法制备高致密度纯钛样品。在室温条件下, 对两种纯钛试样以应变速率 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 进行拉伸实验。采用光学显微镜和扫描电镜观察两种材料的显微组织, 以及拉伸试样断口和断口附近纵切面的形貌, 研究两种试样的断裂机制和固结情况。结果表明, 锻造纯钛和挤压纯钛都具有 α 相片状组织和较高的氧含量, 均具有较高的抗拉强度。从断口形貌分析可知, 两种试样的拉伸断裂均属于韧性断裂, 在应变速率 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下试样断口附近纵切面上未发现明显的由粉末颗粒被拉开所造成的空洞, 说明粉末坯在非常短的时间内就达到了非常好的固结状态。

关键词: 纯钛; 粉末冶金; 拉伸性能; 锻造; 挤压; 显微组织

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Mechanical properties of powder compact forged and powder compact extruded titanium

LIANG Cun¹, MA Ming-xing¹, ZHANG De-liang¹, JIA Ming-tu², S. RAYNOVA², YAN Jian-qiang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Waikato Center for Advanced Materials, School of Engineering, University of Waikato,
Private Bag 3105, Hamilton, New Zealand)

Abstract: High density titanium samples were prepared by rapid powder compact forging and powder compact extruding respectively, and their tensile properties were investigated under strain rate of $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at room temperature. The microstructure, fracture surface and morphology of the longitudinal section near fracture surface of the tensile test samples were observed by optical microscope and scanning electron microscope. The results show that both powder compact forged titanium and powder compact extruded titanium have very high tensile strength due to α lamella structure and high oxygen content. The fracture surface analysis of the forged titanium and extruded titanium specimens shows that their fracture modes belong to ductile fracture. No obvious cavities caused by separation of powder particles were observed under strain rate of $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, indicating that the samples prepared by powder compact forging or powder compact extrusion have a very good consolidation state in a very short consolidation time.

Key words: pure titanium; powder metallurgy; tensile properties; forging; extruding; microstructure

粉末冶金工艺用来制备金属型材和零部件, 可以实现少切削或无切削加工, 是一种高效、优质、精密、低能耗的制造金属型材和零部件的先进技术^[1-2]。采用

粉末冶金技术制备的零部件可以提高其市场竞争力。高密度使得粉末冶金产品具有优异的力学性能。因此, 为扩大粉末冶金零部件的应用范围, 必须提高其

基金项目: 新西兰科技部资助项目(UoWX0802); 国家自然科学基金资助项目(51271115)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 张德良, 教授, 博士; 电话: 021-54742214; E-mail: zhangdeliang@sjtu.edu.cn

密度以获得力学性能优异的粉末冶金零部件^[3-6]。在采用粉末冶金工艺时,可以将粉末压制成非常接近最终尺寸的压坯,而不需要或需要很少随后的机械加工,故能大大提高金属使用率,降低产品成本。钛的密度小,机械强度大,有良好的抗腐蚀性能^[7-11]。本文作者采用纯钛粉末和粉末压坯热锻以及粉末压坯热挤压的粉末冶金技术制备高致密度纯钛样品,研究样品材料的显微组织和拉伸力学性能以及断裂行为,目的是观察锻造和挤压这两种粉末冶金法制备的纯钛材料的拉伸性能和断裂形貌特征,探索同一应变速率下粉末压坯锻造纯钛和粉末压坯挤压纯钛材料的拉伸力学性能和断裂行为的差异。

1 实验

纯钛粉末压坯锻造圆饼状材料的制备工艺如下。将含氧量为 0.33% 的氢化脱氢(HDH)钛粉在 300 °C 和氩气保护的条件下热压,压力设定为 500 MPa,恒定压力加载下保温 5 min,得到粉末压坯。然后将粉末压坯用感应炉加热到 1 300 °C 进行部分烧结,最后使用 980 kN 的力对其进行开模锻造,粉末压坯锻造压缩比为 0.75,模具温度为室温。

纯钛粉末压坯挤压棒的制备工艺如下。先将钛粉放入模具中,在氩气保护的条件下加热至 250 °C 后,使用 580 MPa 的压力热压,恒定压力加载保温 10 min,得到粉末压坯。然后将粉末压坯用感应炉加热至 1 250 °C 进行部分烧结,最后使用 980 kN 力对其进行热挤压,模具温度为 550 °C,得到纯钛挤压棒,挤压比为 9。

将用粉末压坯锻造工艺制备好的圆饼状材料和挤压棒材料样品分别切割成狗骨状的拉伸试样。试样的横截面尺寸为 1.8 mm×1.7 mm,标距长度为 10 mm。拉伸实验仪器为 Zwick T1-FR020.A50,在室温条件下采用应变速率 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 进行拉伸,每种材料拉伸 3 个试样。使用氮氢氧分析仪 TCH600 检测锻饼和挤压棒中氧和氮元素的含量;用 MM-6 型金相显微镜、Sirion200 扫描电镜观察试样的显微组织、断口形貌以及断口纵切面附近的空洞情况,研究粉末压坯锻造纯钛(F/Ti)和粉末压坯挤压纯钛(E/Ti)试样的断裂机理和固结情况。

2 结果分析与讨论

由图 1 可知,粉末压坯锻造纯钛材料(F/Ti)的显微

组织为 α -Ti 全片状结构。由于试样是沿着锻造的垂直方向切割的,晶体取向较混乱。由图 2 可以看出挤压纯钛(E/Ti)的显微组织也是 α -Ti 全片状结构。由于试样是沿着挤压方向切割的,因此晶体取向有一定的方向性,晶粒比锻造纯钛的大一些, α -Ti 层片也比锻造纯钛明显更厚一些。片状的结构使得 E/Ti 和 F/Ti 材料都具有较高的抗拉强度。

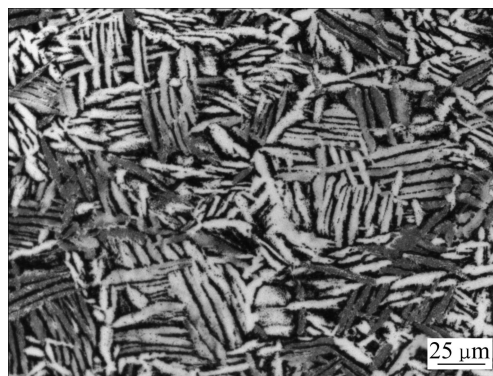


图 1 粉末压坯锻造纯钛的显微组织

Fig. 1 Microstructure of powder compact forged Ti

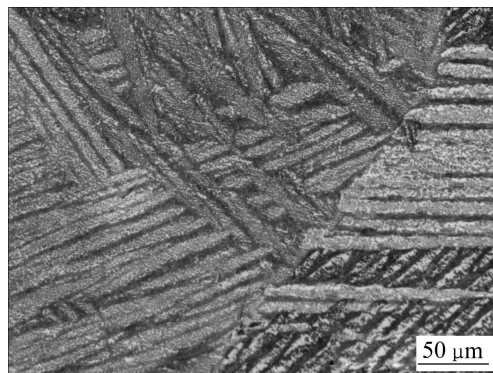


图 2 粉末压坯挤压纯钛的显微组织

Fig. 2 Microstructure of powder compact extruded Ti

粉末压坯锻造纯钛材料具有全片状显微组织和较高氧含量(0.45%),使得该材料具有较高的拉伸强度。在应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的条件下,样品的真应力—真应变曲线如图 3 所示。材料的平均屈服强度为 703 MPa,拉伸强度为 936.61 MPa,断裂总应变量为 15.2%。可见,材料具有较强的加工硬化性和塑性,与具有等轴晶组织的铸锭冶金钛相比,其强度高很多,但塑性较低。从图 3 还可看出, F/Ti 试样在失稳断裂前没有明显的颈缩现象出现。同样如图 3 所示,粉末压坯挤压纯钛拉伸试样的平均屈服强度为 612 MPa,拉伸强度为 920.52 MPa,断裂总应变量为 20.5%。试样在失稳断裂前也没有明显的颈缩现象出现。比较 F/Ti 和 E/Ti 试样的拉伸真应力—真应变曲线可知,

F/Ti 试样的屈服强度明显高于 E/Ti 的, 原因可能是 F/Ti 试样的晶粒较小, α -Ti 层片也较薄, 而且 F/Ti 试样的氧含量(0.45%)也明显高于 E/Ti 试样的氧含量(0.38%)。但是, F/Ti 试样的拉伸塑性比 E/Ti 的拉伸塑性稍差一些, 原因可能是前者含氧量比后者高。另外, 挤压棒拉伸试样是沿着挤压方向切割的, 晶粒取向具有一定的方向性, 因此沿着挤压方向拉伸时 E/Ti 试样的塑性可能会更好些。

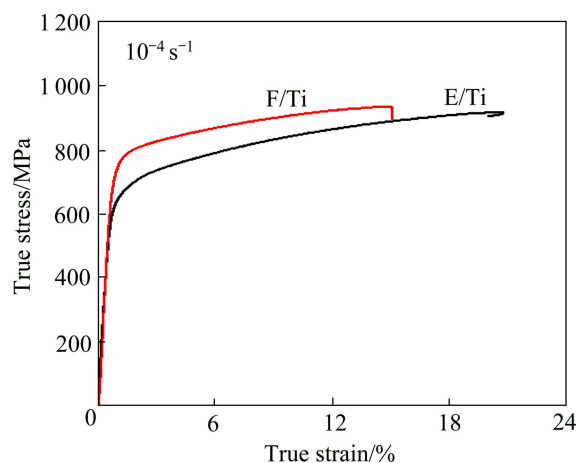


图3 粉末压坯锻造和粉末压坯热挤压样品的拉伸真应力—真应变曲线

Fig. 3 True stress—true strain curves of powder compact forged and powder compact extruded Ti specimens

如图4所示, 在较小的应变速率($1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)下, 粉末压坯锻造纯钛和粉末压坯挤压纯钛在断裂前都有明显的宏观塑性变形, 属于韧性断裂。拉伸正应力导致断裂表面形成等轴韧窝。韧窝的形成是空洞聚集所致。材料内部分离形成空洞, 空洞在滑移的作用下长大, 位错滑移导致变形的产生, 空洞之间相互聚集在一起形成韧窝状断裂。Ti 在室温下具有密排六方结构, 拥有的滑移系较少, 塑性变形主要靠滑移和孪生。因为滑移所需的剪切力小于孪生, 因此室温拉伸所产生的塑性变形主要由滑移控制。比较图4(b)和(d)可知, E/Ti 试样断口表面有较多韧窝, 而 F/Ti 试样断口表面有些区域较为平滑, 反映了 F/Ti 试样比 E/Ti 的屈服强度高, 而塑性则较 E/Ti 的稍差, 这可能与 F/Ti 材料中高的氧含量有关。钛中氧元素含量越高, 氧原子的固溶强化作用就更明显, 这是材料强度提高、塑性降低的另一个原因。

通过观察和分析在应变速率 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下拉伸断裂的拉伸试样断口和断口附近的纵切面形貌(图5)可知, 锻造纯钛和挤压纯钛材料在韧性断裂之前, 晶体都会产生大量的滑移, 试样有明显的宏观塑性变形。可以看出 F/Ti 试样比 E/Ti 试样断裂裂纹走向平齐, E/Ti 试样比 F/Ti 试样断口撕裂更为严重, 断口附近纵切面出现一些撕裂的裂痕。这些是拉伸过程中微孔聚集形成的微裂纹, 裂纹扩展导致试样断裂, 再次反映

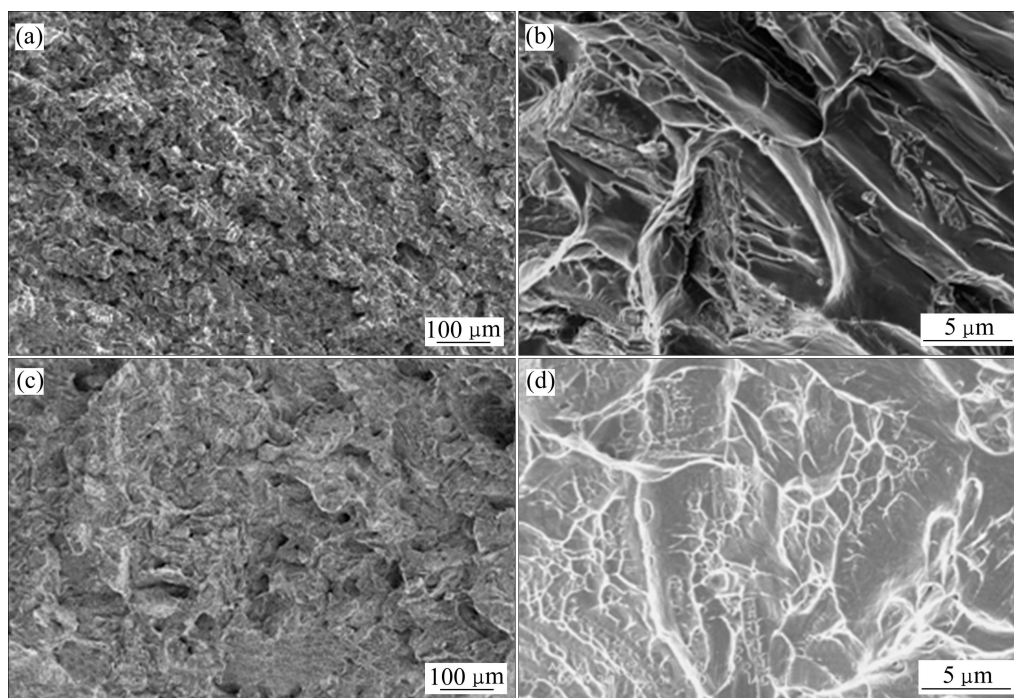


图4 粉末压坯锻造纯钛和粉末压坯挤压纯钛拉伸试样断口扫描电镜照片

Fig. 4 Fractographs of tensile specimens cut from powder conact forged Ti ((a), (b)) and powder compact extruded Ti ((c), (d))

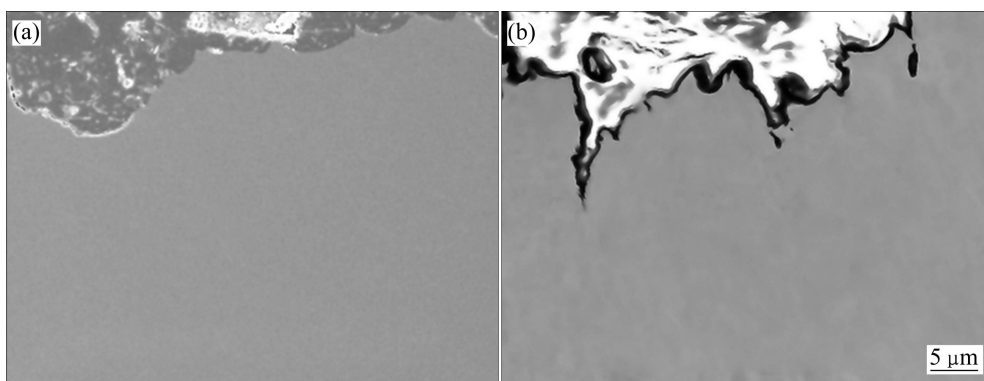


图5 粉末压坯锻造纯钛和粉末压坯挤压纯钛拉伸试样断口附近纵切面的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM micrographs of longitudinal sections of tensile specimens below fracture surfaces: (a) Powder compact forged Ti; (b) Powder compact extruded Ti

出 E/Ti 试样的塑性比 F/Ti 的好, 强度稍差。两种纯钛的断口附近纵切面上没有发现因为颗粒粘接不牢, 粉末颗粒在拉应力作用下分离所造成的空洞。说明这两种材料的固结状态都较好, 高致密度和高烧结程度使两种试样具有较高的强度。

3 结论

在室温条件下, 采用应变速率 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 对粉末压坯锻造纯钛和粉末压坯挤压纯钛材料进行拉伸实验, 观察试样的显微组织以及断口形貌。这两种纯钛材料具有较高的强度和一定的塑性, 都具有 α 全片状组织。两种材料的断裂机制均为韧性断裂, 断裂表面有许多韧窝。F/Ti 试样的屈服强度大于 E/Ti 试样的, 但 E/Ti 试样的塑性比 F/Ti 的好。两种试样断口纵切面附近都没有发现因为颗粒粘接不牢粉末颗粒在拉应力作用下分离所造成的空洞, 材料固结状态较好。高致密度和高烧结程度以及全片状组织是二者具有较高的强度和很好的塑形的原因。

REFERENCES

- [1] BACKOKEN W A, TUMER I R, AVERY D H. Superplasticity in an Al-Zn alloy[J]. ASM Trans, 1964, 57(6): 980-990.
- [2] HALES M P, HOLDSWORTH R. A code of practice for the determination of cyclic stress-strain data[J]. Materials at High Temperatures, 2002, 19(4): 165-185.
- [3] ARAN A. An experimental comparison of different methods to determine the rate sensitivity index of superplastic materials[J]. Scrip Met, 1979, 13: 843-846.
- [4] 王临茹, 赵永庆, 周 廉. 热轧 TC21 板材中 α 相形貌的演变[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 350-355.
- [5] WANG Lin-ru, ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian. Evolution of α phase morphology in hot-rolling TC21 titanium alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 350-355.
- [6] HART E W. Theory of the tensile test[J]. Acta Metallurgica, 1967, 15: 351-355.
- [7] ZHANG De-liang, RAYNOVA S, NADAKUDURU V, CAO Peng, GABBITAS B, ROBINSON B. Consolidation of titanium and Ti-6wt%Al-4wt%V alloy powders by powder compact forging[J]. Materials Science Forum, 2009, 618/619: 513-516.
- [8] 宋玉泉, 管志平, 马品奎, 宋家旺. 拉伸变形应变硬化指数的理论和实验规范[J]. 金属学报, 2006, 42(7): 673-680.
- [9] SONG Yu-quan, GUAN Zhi-ping, MA Pin-kun, SONG Jia-wang. Theoretical and experimental standardization of strain hardening index in tensile deformation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(7): 673-680.
- [10] HUTCHINSON J W, NEALE K W. Influence of strain-rate sensitivity on necking under uniaxial tension[J]. Acta Metallurgica, 1977, 25: 839-846.
- [11] 李赛毅, 文 浩, 雷力明, 张慧儒. TC11 合金两相区退火对微观组织与微观织构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3022-3028.
- [12] LI Sai-yi, WEN Hao, LEI Li-ming, ZHANG Hui-ru. Effect of annealing in two-phase field on microstructure and microtexture of TC11 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3022-3028.
- [13] JONAS J J, CHRISTODOULOU N, G'SELL C. The onset of flow localization in tensile samples containing geometric and metallurgical defects[J]. Scripta Metallurgica, 1978, 12: 565-570.
- [14] GHOSH A K. Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain-rate hardening[J]. Acta Metallurgica, 1977, 25: 1413-1424.

(编辑 袁赛前)