



Ti-28%Ta 合金的拉伸性能

赵少阳, 王利卿, 谈 萍, 殷京瓿, 李增峰, 沈 垒, 汤慧萍

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 西安 710016)

摘 要: 综合利用力学测试平台、数字图像相关技术、X 射线衍射分析、扫描电子显微观察等方法研究 Ti-28%Ta 合金的显微组织和拉伸性能, 并对断口显微形貌进行分析。结果表明: Ti-28%Ta 合金微观组织由主要的 β 相和少量的 α'' 马氏体相组成; 通过对 Ti-28%Ta 合金的拉伸性能分析, 并结合循环往复拉伸测试实验, 表明 Ti-28%Ta 具有优异的超弹性和塑性(断裂时的应变量为 28%); 通过对断口分析, 证实 Ti-28%Ta 合金的断裂方式为韧性断裂。

关键词: 超弹性; 马氏体相变; TiTa 合金; 拉伸性能; 数字图像相关技术

文章编号: 1004-0609(2020)-11-2570-08

中图分类号: TG146.4-1

文献标志码: A

钛及钛合金因其密度低、机械强度高、优异的耐腐蚀性和生物相容性, 被广泛应用于人体骨骼、牙齿、关节等硬组织的修复和替代。例如 Ti-6Al-4V(TC4)大量用于制造人工髋关节和人工骨头, 特别是矫形学和外科重建种植体^[1-3]。另外, 这些材料还显示出相对较高的抗疲劳强度和抗血栓性。但是近年来已有一些临床研究表明^[4-5], 使用 TC4、纯钛或者 TiNi 合金时会有钛离子及镍离子出现, 大量的 Ti 或 Ni 存在会增加局部炎症, 从而妨碍愈合过程。此外, 相关研究表明钛合金中的 Al 和 V 元素对器官组织有危害作用^[6-9]。因此, 寻求现有钛合金生物相容性的替代品已成为当前研究的热点问题。

TiTa 合金因其拥有优异的塑性、优良的抗腐蚀性和生物相容性, 使其成为理想的生物医用材料^[10-12], 主要应用于动脉轴和分泌管等外科领域。ZHOU 等^[13-16]对 Ti-Ta 二元合金的微观组织结构、力学性能、生物相容性等进行了系统研究, 其研究表明, 淬火态的 Ti-10%Ta 和 Ti-38%Ta(摩尔分数)合金具有较低的弹性模量, 分别为 69 GPa 和 67 GPa, 而抗拉强度分别为 587 MPa 和 600 MPa; 对合金的抗腐蚀性能的研究表明, Ti_2O_5 比 TiO_2 的抗腐蚀表现更稳定, 并且在两者的共同作用下, TiTa 合金具有非常优异的抗腐蚀性能。MARGEVICIUS 等^[17]对 Ti-28%Ta(摩尔分数)合金的研究结果表明, 合金在拉伸过程中出现的屈服平台是由于应力诱发马氏体相变引起的, 在高温淬

火过程中有 ω 相析出, ω 析出相的体积分数随热处理温度升高而增加, 并且 ω 相的析出会阻碍 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体相变, 进而影响合金的塑性。由于 Ta 元素在钛合金中是稳定 β 相的合金元素, 因此, TiTa 合金中的 Ta 元素含量对该合金的性能影响很大^[14, 18-19]。FEDOTOV 等^[20]研究了 Ti-Ta 二元合金高温淬火发生的相变与成分的关系。当 Ta 含量(质量分数)为 10%时, Ti-2.8%Ta(摩尔分数)合金相组成只有 α 相, 其晶体结构为密排六方(HCP)。但是, 随着 Ta 含量的升高, Ti-10%Ta(摩尔分数)合金开始出现 β 相, 该相为应力诱发马氏体相变的母相, 其晶体结构为体心立方(BCC)。并且, 当 Ta 含量增至 60%时, Ti-28%Ta 合金中只有 β 相, 随后其相组成不变。形变过程中, 由于应力诱发, β 相转变为马氏体相(α'' 相), 即发生 $\beta \rightarrow \alpha''$ 的相变过程^[21], 所以 TiTa 合金中 β 相含量越高, 合金的塑性越好。

到目前为止, 学者们对 Ti-28%Ta(摩尔分数)合金的多次形变过程中残余应力的变化及应变场分布的研究不多, 且分析还不够深入, 而残余应力的变化及应变场的分布恰恰是研究 TiTa 合金力学形变及马氏体相变过程的最重要、最基础的机理研究。因此, 本文选择 Ti-28%Ta(摩尔分数)合金作为研究对象, 利用 Instron 力学测试平台、数字图像相关技术(DIC)、XRD、SEM 和光学显微镜等分析手段, 对 Ti-28%Ta(摩尔分数)合金在多次循环往复拉伸形变过程中残余应力的

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0305800)

收稿日期: 2019-12-02; **修订日期:** 2020-05-28

通信作者: 王利卿, 工程师, 博士; 电话: 029-86231095; E-mail: wlq881120@163.com

变化、应变场的分布以及合金拉伸断口形貌进行研究,并对其显微组织进行表征,实验结果可为后期研究 Ti-28%Ta 合金提供重要的实验依据。

1 实验

本研究将钽粉和 0 级海绵钛按质量比进行均匀混合($m(\text{Ta}):m(\text{Ti})=6:4$),再将混合料压制成电极棒材,在真空自耗电极电弧炉里经过多次熔炼,熔炼弧电流和电压分别为 2 kA 和 30 V,获得 Ti-28%Ta(摩尔分数)合金棒材。将棒材在 950 °C 热锻至直径 30 mm,最后车加工去除表皮氧化层,最终获得的 Ti-28%Ta 合金中氧含量为 1.3×10^{-4} 。

用电弧线切割法,参照 GB/T 228.1—2010 线切割制取拉伸力学实验试样(如图 1 所示)。本实验采用 ZEISS AXIO 光学显微镜观察 Ti-28%Ta 合金的金相显微组织。利用 Bruker D8 Advance Phaser X 射线衍射仪对样品物相及含量进行表征。在室温下,通过 Instron-5967 型力学测试平台进行抗拉性能测试(GB/T 6804—2008),加载速度为 0.5 mm/min。采用 VIC-3D correlated solution PENTAX 高速摄像机通过数字图像相关技术并结合 Instron 力学测试平台对样品在循环往复加载卸载过程中进行应变场分布分析。最后,利用 JEOL JSM6400 型扫描电子显微镜观察拉伸样品的断口形貌。

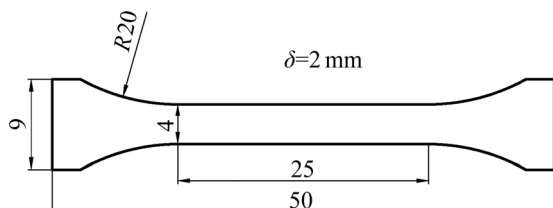


图 1 Ti-28%Ta 合金拉伸试样图

Fig. 1 Schematic diagram of Ti-28%Ta alloy tensile sample (Unit: mm)

2 结果和讨论

2.1 Ti-28%Ta 合金显微组织表征

图 2 所示为制备的 Ti-28%Ta 合金的 XRD 谱。从图 2 中可以看出, Ti-28%Ta 合金主要为 β 相和少量 α'' 马氏体相组成。这是由于熔炼过程造成的,在熔炼结束后 Ti-28%Ta 合金自高温快速冷却,该过程中由于从 β 相转变为 α 相的过程被抑制, β 相转变为同素异构的

α' 和 α'' 马氏体^[20, 22-23]。Ti-28%Ta 合金中没有发现 ω 相,这可能是冷却速度快从而抑制了 ω 相的产生^[24-26]。同时,由于 Ta 含量超过一定的范围后,反而会抑制 β 相向 α'' 相的转变^[25-26],所以,只检测到了少量的 α'' 马氏体相(见图 2)。

图 3 所示为 Ti-28%Ta 合金的金相显微照片。Ti-28%Ta 合金经过 950 °C 热锻后,晶粒沿着变形的轴向(最大变形方向)被拉长,晶格和晶粒均发生扭曲,局部晶粒间产生碎晶(见图 3(b))。图 3(a)和(b)中均出现了大量的黑色组织(条纹带),可能是熔炼不均匀导

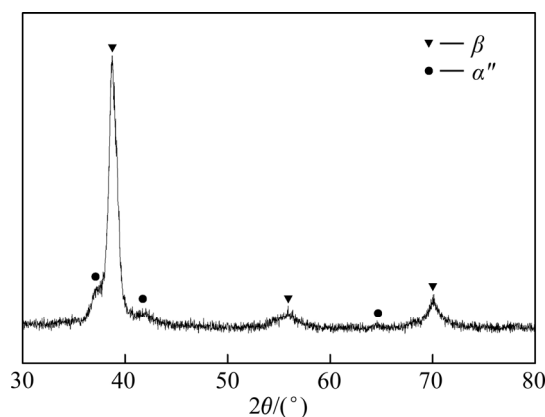


图 2 Ti-28%Ta 合金的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of Ti-28%Ta alloy

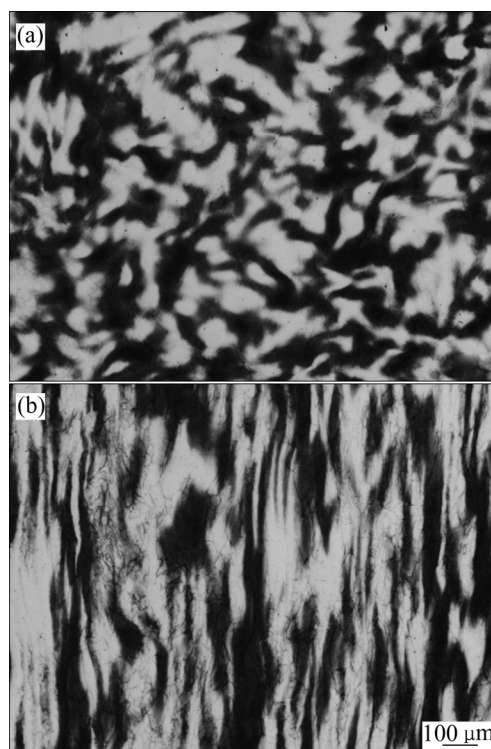


图 3 沿棒材轴向和垂直棒材轴向方向 Ti-28%Ta 合金的显微结构

Fig. 3 Microstructures of Ti-28%Ta alloy parallel to axial direction(a) and vertical to axial direction(b)

致原子序数较大的 Ta 元素偏聚所引起,即高原子序数元素富集区。由于 Ti 与 Ta 的熔点和密度都相差很大,在熔炼时极易产生偏析,所以上述现象是目前 Ti-Ta 系列合金熔炼时普遍存在的问题^[27]。

2.2 拉伸性能

Ti-Ta 合金具有优异的塑性和冷热加工性能,图 4 所示为 Ti-28%Ta 合金的室温拉伸曲线,应力-应变曲线可分为三个阶段^[28]:第一阶段为 β 相的弹性变形阶段;第二阶段为 β 相转变为 α'' 马氏体阶段(外力诱发的马氏体相变);第三阶段为断裂阶段。从图 4 中可看出, Ti-28%Ta 合金断裂时的应变量大于 25%,如此高的塑性是因为合金在拉伸过程中发生了马氏体相变,拉伸过程中加载力提供 β 相转变为 α'' 马氏体所需的能量^[29-30]。同时,结合图 2 中 XRD 谱可知, Ti-28%Ta 合金是典型的 β 型钛合金。一般而言, β 相是体心立方,有 12 个滑移系。由于 β 相的滑移系较多,所以 β 型钛合金更容易变形^[31]。Ti-28%Ta 合金经过热锻后,晶粒尺寸明显细化(如图 3(a)所示),晶界和亚晶界的数量增多^[32]。文献[31]中表述:塑性变形是通过位错的运动实现的,随塑性变形的进行,位错不断增值,位错间及位错与其他晶体缺陷产生交互作用而阻碍位错的运动,在晶格间起到钉扎作用,从而使合金断裂强度增加。由于拉伸塑性变形过程中的位错强化和锻造过程中的细晶强化的共同作用,从图 4 中可看出, Ti-28%Ta 合金的抗拉强度大于 630 MPa。

图 5 所示为 Ti-28%Ta 合金在 610 MPa 下 5 次循环往复加载卸载应力应变曲线图。从图 5 中可以看出,第一次循环往复中,应力从 540 MPa 加载至 610 MPa 过程中,应变迅速增大(由 3.8%增大至 9.2%),加载力

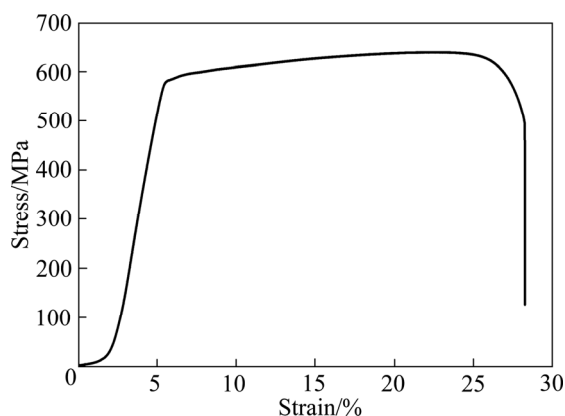


图 4 Ti-28%Ta 合金的拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve of Ti-28%Ta alloy

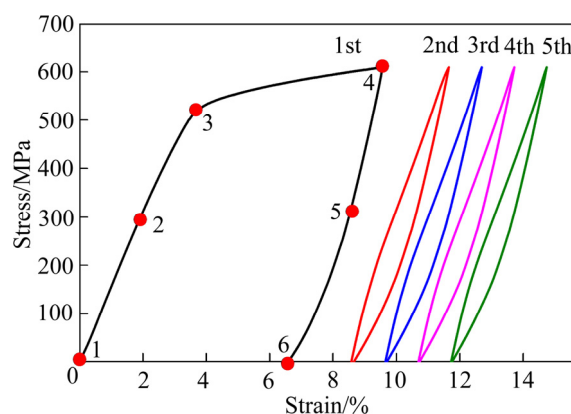


图 5 Ti-28%Ta 合金在 610 MPa 5 次循环往复加载卸载应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of Ti-28%Ta alloy after 5 cycles loading and unloading at 610 MPa

增加不明显,而应变迅速增大。这是由于在材料变形过程中,发生应力诱发马氏体相变^[28]。然而,随着加载力的卸去,同时有反作用力的作用存在,应变由 9.28%逐渐回复到 6.57%,这是一个马氏体逆相变过程^[28],即 α'' 马氏体回复转变为 β 相。随后,在接下来的 4 次循环往复加载卸载过程中,随着循环次数的增加,残余应变(见图 5 和 6)缓慢增加(6.57%→6.75%),且每周次的回复率接近 99%。循环往复加载卸载过程中,回线所包围的面积是应力循环一周所消耗的能量,称为内耗。若内耗随着循环次数的增加而变小,则说明每加载卸载一周次,残余应变在逐渐增大,如图 6 所示,内耗随着循环次数的增加而逐渐趋于一个稳定值,马氏体相变和马氏体逆相变之间的相互抵消作用趋于

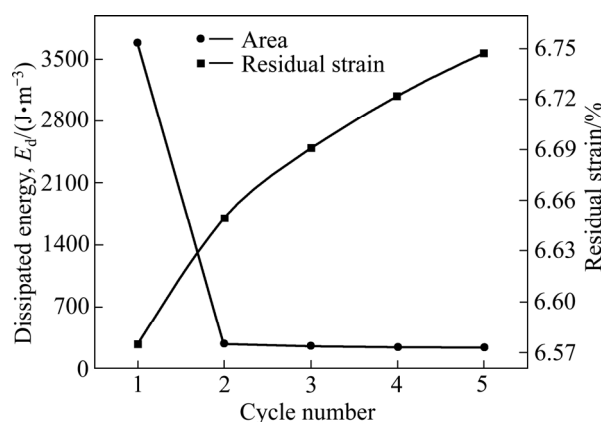


图 6 Ti-28%Ta 合金拉伸循环次数与残余应变及能量内耗的关系

Fig. 6 Relationship between residual strain and internal friction of Ti-28%Ta alloy and cycle number during cycling tensile test

平衡,表明了该合金具有优异的超弹性^[21,33-35,36]。

图 7(a)~(f)所示为利用数字图像相关技术,分析得到的第 1 次循环加载卸载实验中选取得 1(0)、2(2.00%)、3(3.60%)、4(9.28%)、5(8.52%)、6(6.57%)共 6 个位置(见图 5)的应变场分布及点位的追踪情况。从图 7 中可见,随着拉伸过程的进行,试样的应变逐渐增大,轴向应变增加较快,同时,横向应变也有所增大,且样品的上端位置的应变较下端集中,可推测如果拉伸加载一直持续下去,裂纹将会在样品上端位置形成,并最终扩展,直至断裂。图 7(g)和(h)为局部点位的追踪情况,当拉伸加载进行到最大应变时, $A'B'$ 两点间距明显较 AB 两点长。

2.3 断口分析

韧性断裂是材料断裂前产生明显宏观塑性变形的断裂,这种断裂有一个缓慢的撕裂过程,在裂纹扩展过程中不断消耗能量,在外力作用下,微孔连接(聚合)

形成微裂纹,通过裂纹扩展,直至最终断裂^[34-35]。在塑性变形过程中,位错引起的应力集中或高应变的不匹配而致使微孔成核,后面的位错所受排斥力大大下降而被迅速推向微孔,并使位错源重新被激活起来,不断放出新位错,新的位错连续进入微孔,遂使微孔长大,微孔形核长大和聚合在断口上留下的痕迹就是韧窝^[34]。图 8 所示为 Ti-28%Ta 合金在拉伸断裂之后的断口显微形貌、沿着以及垂直于应力方向的断口处金相组织显微照片。从图 8(a)和(b)中可见, Ti-28%Ta 合金的断口呈现出大量圆形或椭圆形的韧窝,韧窝大而深,且韧窝内部凹凸不平,并且大韧窝中包含小韧窝,是典型的微孔聚集断裂的基本特征^[34],即 Ti-28%Ta 合金的断裂方式为韧性断裂。同时,图 8(b)中大量韧窝的存在,也说明 Ti-28%Ta 合金具有极好的塑性。

图 8(d)所示为垂直于载荷方向的断口显微结构,在拉伸应力的诱变作用下, β 相转变为 α'' 马氏体相,

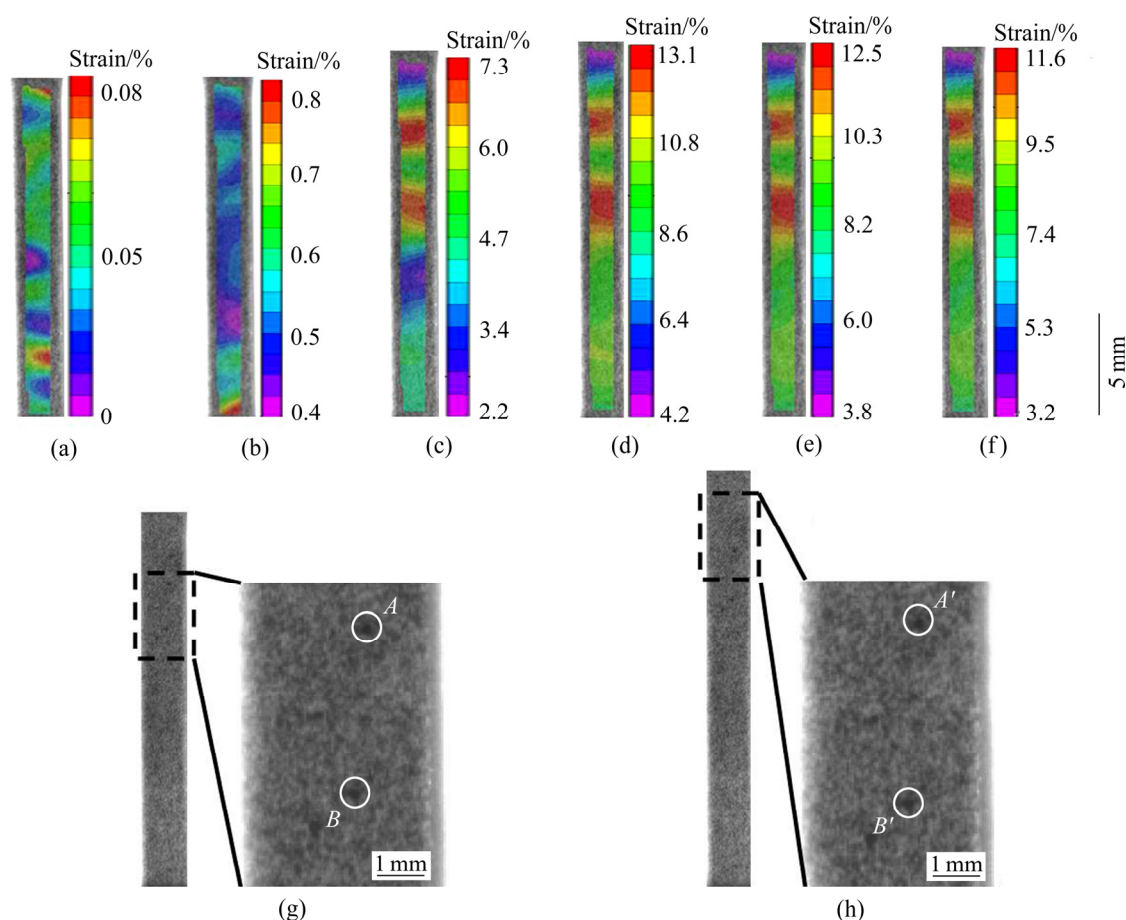


图 7 不同应变率时 Ti-28%Ta 合金在图 5 中第 1 次循环加载卸载实验中选取得位置 1、2、3、4、5、6 的应变场的分布

Fig. 7 Strain field distribution of Ti-28%Ta alloy at positions 1, 2, 3, 4, 5, 6 in Fig. 5 during first cyclic loading and unloading tensile test at different strain rates: (a) Position 1; (b) Position 2; (c) Position 3; (d) Position 4; (e) Position 5; (f) Position 6; (g), (h) Corresponding to tracking points for partial enlargement

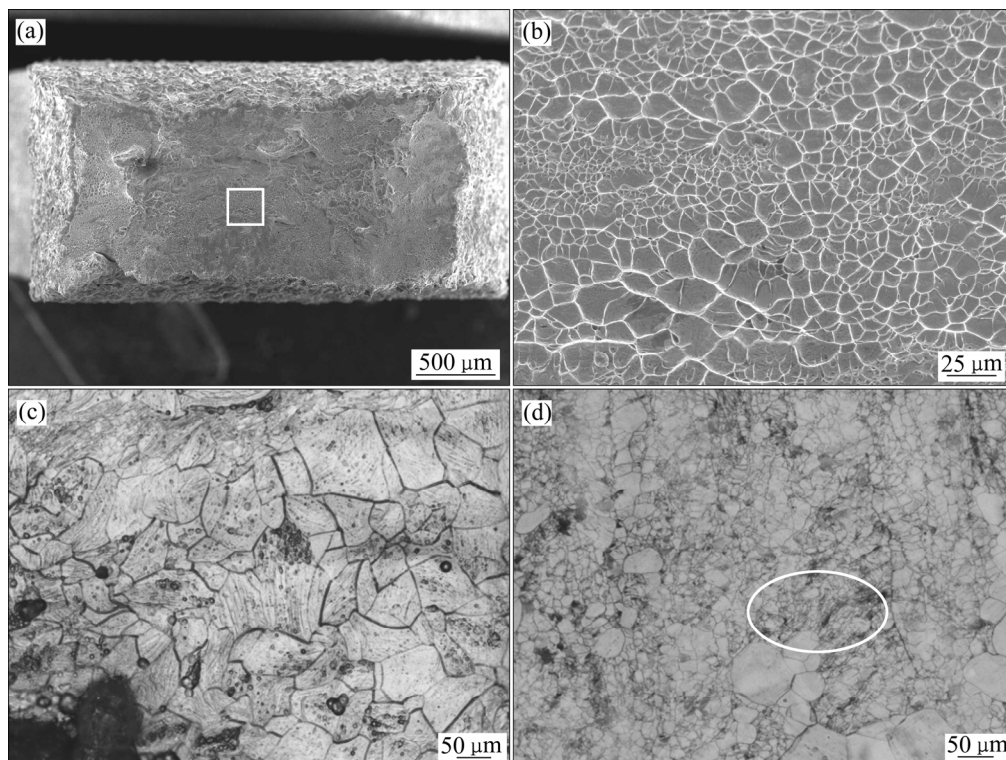


图8 Ti-28%Ta合金拉伸试样的断口形貌和显微结构

Fig. 8 Fracture morphologies of Ti-28%Ta alloy after fracture tensile test: (a) SEM image; (b) Partial enlargement of Fig. (a); (c) Optical image along with loading direction; (d) Optical image vertical to loading direction

从图8(d)中可观察到呈板条状的 α'' 马氏体,从而证实了2.1章节中在XRD中有 α'' 马氏体而未在金相照片中观察到 α'' 马氏体是因为分布不均的推测。同时,对比图8(c)和(d)中的晶粒尺寸,可以看出图8(d)晶粒尺寸明显细化,说明在垂直于应力方向的变形较大。

3 结论

1) XRD谱证实本实验研究的Ti-28%Ta合金主要为 β 相和少量 α'' 马氏体相;通过对拉伸性能分析,证实本研究中Ti-28%Ta合金的应力-应变曲线可分为以下三个阶段:第一阶段为 β 相的弹性变形阶段;第二阶段为 β 相转变为 α'' 马氏体阶段(外力诱发马氏体相变);第三阶段为塑性断裂阶段。结果表明,应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体相变所导致的相变诱导塑性,显著提高了 β 钛合金的力学性能。

2) 通过对拉伸性能分析并结合循环往复拉伸测试实验,表明内耗值随着循环次数的增加而逐渐趋于一个稳定值,马氏体相变和马氏体逆相变之间的相互

抵消作用趋于平衡,即Ti-28%Ta合金具有优异的超弹性和塑性。

3) 通过对拉伸断口形貌分析,证实Ti-28%Ta合金的断裂方式为韧性断裂中的微孔聚集断裂。

REFERENCES

- [1] 陈强,王庆娟,王鼎春,刘继雄,李强,周晓,梁博. 锻件组织不均匀性对新型 β 钛合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(1): 87-96.
CHEN Qiang, WANG Qing-juan, WANG Ding-chun, LIU Ji-xiong, LI Qiang, ZHOU Qiao, LIANG Bo. Effect of microstructure in homogeneity of forgings on microstructure and mechanical properties of new β titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(1): 87-96.
- [2] 刘畅,王辰宇,刘贺,王中汉,林高用. 3D打印Ti6Al4V钛合金支架的力学性能及生物相容性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(4): 758-765.
LIU Chang, WANG Chen-yu, LIU He, WANG Zhong-han, LIN Gao-yong. Mechanical properties and biocompatibility

- of 3D printing Ti6Al4V titanium alloy scaffolds[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(4): 758–765.
- [3] 张志强, 董利民, 胡明, 雷晓飞, 杨洋, 杨锐. 冷却速率对 TC16 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1391–1398.
- ZHANG Zhi-qiang, DONG Li-min, HU Ming, LEI Xiao-fei, YANG Yang, YANG Rui. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of TC16 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1391–1398.
- [4] 张敬. 镍化合物诱导肺癌发生的分子机理的研究[D]. 上海: 第二军医大学, 2006.
- ZHANG Jing. Nickel compounds induced molecular mechanisms of lung cancer[D]. Shanghai: The Second Military Medical University, 2006.
- [5] 葛顺楠, 宁北芳, 丁劲, 赵亚. 镍致癌机制的研究进展[J]. 肿瘤学杂志, 2007, 13(1): 75–79.
- GE Shun-nan, NIN Bei-fang, DING Jing, ZHAO Ya. The research progress of nickel carcinogenic mechanism[J]. Journal of Oncology, 2007, 13(1): 75–79.
- [6] ZHANG Ling-bo, WANG Ke-zheng, XU Li-juan, XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong. Effect of Nb addition on Microstructure, mechanical properties and castability of β -type Ti-Mo alloys[J]. Transaction of Nonferrous Metals of China, 2015, 25: 2214–2220.
- [7] MA Yun-qing, YANG Shui-yuan, JIN Wan-jun, WANG Yun-neng, WANG Cui-pin, LIU Xin-jun. Microstructure, mechanical and shape memory properties of Ti-55Ta-xSi biomedical alloys[J]. Transaction of Nonferrous Metals of China, 2011, 21: 287–291.
- [8] XU Li-juan, XIAO Shu-long, TIAN Jin, CHEN Yu-yong. Microstructure, mechanical properties and dry wear resistance of β -type Ti-15Mo-xNb alloys for biomedical applications[J]. Transaction of Nonferrous Metals of China, 2013, 23: 692–698.
- [9] 许艳飞, 文璟, 肖逸锋, 王章, 阳文豪, 易丹青, 刘会群, 吴靓, 钱锦文. 双级时效对 Ti-25Nb-10Ta-1Zr-0.2Fe 医用 β 钛合金显微组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(9): 1913–1918.
- XU Yan-fei, WEN Jing, XIAO Yi-feng, WANG Zhang, YANG Wen-hao, YI Dan-qing, LIU Hui-quan, WU Liang, QIAN Jin-wen. Effects of duplex aging on microstructure and mechanical properties of Ti-25Nb-10Ta-1Zr-0.2Fe alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(9): 1913–1918.
- [10] MARECI D, CHELARIU R, BOLAT G, CAILEAN A, CRANCEA V, SUTIMAN D. Electrochemical behaviour of Ti alloys containing M and Ta as β -stabilizer elements for dental application[J]. Science Direct, 2013, 23: 3829–3836.
- [11] OZAN S, LIN Ji-xing, LI Yun-cang, WEN C. New Ti-Ta-Zr-Nb alloys with ultrahigh strength for potential orthopedic implant applications[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 75: 119–127.
- [12] ACHARYA S, PANICKER A G, LAXMI D V, SUWAS S, CHATTERJEE K. Study of the influence of Zr on the mechanical properties and functional response of Ti-Nb-Ta-Zr-O alloy for orthopedic applications[J]. Materials & Design, 2019, 164: 107555.
- [13] ZHOU Y L, NIINOMI M. Ti-25Ta alloy with the best mechanical compatibility in Ti-Ta alloy for biomedical application[J]. Materials Science and Engineering C, 2009, 29: 1061–1065.
- [14] ZHOU Y L, NIINOMI M, AKAHORI T. Effects of Ta content on Young's modulus and tensile properties of binary Ti-Ta alloys for biomedical applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 371: 283–290.
- [15] ZHOU Y L, NIINOMI M, AKAHORI T. Decomposition of martensite α'' during aging treatments and resulting mechanical properties of Ti-Ta alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 384: 92–101.
- [16] ZHOU Y L, NIINOMI M, AKAHORI T, FUKUI H, TODA H. Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloy for biomedical application[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 398: 28–36.
- [17] MARGEVICIUS R W, COTTON J D. Stress-assisted transformation in Ti-60wt pct Ta alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29: 139–147.
- [18] IKEDA M, KOMATSU S Y, NAKAMURA Y. The effect of Ta content on phase constitution and aging behavior of Ti-Ta binary alloys[J]. Materials Transactions, 2002, 43: 2984–2990.
- [19] WU C Y, XIN Y H, WANG X F, LIN J G. Effects of Ta content on the phase stability and elastic properties of β Ti-Ta alloys from first-principles calculations[J]. Solid State

- Sciences, 2010, 12: 2120–2124.
- [20] FEDOTOV G, CHELIDZE T V, KOVNERISTY K, SANADZE V V. Phase-transformation in metastable alloys of the Ti-Ta system during heating[J]. Physics of Metals and Metallography, 1986, 62: 109–113.
- [21] 金万军. 生物医用 Ti-Ta 基合金的形状记忆效应和力学性能的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- JIN Wan-jun. Study on shape memory effect and Mechanical properties of Ti-Ta based alloys for biomedical applications[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [22] 赵 颖, 孙 威, 王国辉. Ti-26Nb-28Ta-5.5Zr 合金室温压缩变形过程中微观组织变化规律[J]. 稀有金属, 2012, 36(5): 694–699.
- ZHAO Jie, SUN Wei, WANG Guo-hui. Microstructures variation of Ti-26Nb-28Ta-5.5Zr alloy during compression at room temperature[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(5): 694–699.
- [23] 杨永健, 马秀梅, 孙 威. 生物医用 β 型 Ti-25.6Nb-19.4Ta 合金设计与微观结构的研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(2): 166–171.
- YANG Yong-jian, MA Xiu-mei, SUN-Wei. Design and microstructure of β -type Ti-25.6Nb-19.4Ta alloy for biomedical application[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(2): 166–171.
- [24] DOBROMYSLOVA A V, DOLGIKHA G V, DUTKEVICH B Y, TRENOGINAA T L. Phase and structural transformations in Ti-Ta alloys[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2009, 107(5): 502–510.
- [25] KIM H Y, KANAYA T, FUKUSHIMAL T, BUECONSEJOL P J S, MIYAZAKI S. Stability of Ti-Ta base high temperature shape memory alloys[J]. Materials Science Forum, 2012, 706/709: 1921–1924.
- [26] GORDIN D M, DELVAT E, CHELARIU R, UNGUREANU G, BESSE M, LAILLE D, GLORANT T. Characterization of Ti-Ta alloys synthesized by cold crucible levitation melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(8): 714–719.
- [27] LIU Yong, LI Kai-yang, WU Hong, SONG Min, WANG Wen, LI Nian-feng, TANG Hui-ping. Synthesis of Ti-Ta alloys with dual structure by incomplete diffusion between elemental powders[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015, 51: 302–312.
- [28] 张德闯. Ti-Nb-Mo-Sn 形状记忆合金的成分与组织优化及其对超弹性能的影响[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- ZHANG De-chuang. Optimization of composition and microstructure of Ti-Nb-Mo-Sn shape memory alloy and its effects on superelasticity[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [29] 赖敏杰, 李金山. 亚稳 β 钛合金的变形孪晶和应力诱发相变[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2185–2191.
- LAI Min-jie, LI Jin-shan. Deformation twinning and stress-induced phase transformation in metastable β titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2185–2191.
- [30] 马 权, 郭爱红, 周 廉. Ti1023 钛合金在时效过程的组织演化和拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(6): 1219–1225.
- MA Quan, GUO Ai-hong, ZHOU Lian. Microstructure evolution and tensile properties of Ti1023 titanium alloy during aging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(6): 1219–1225.
- [31] 赵 品, 谢辅洲, 孙振国. 材料科学基础教程[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 120–144.
- ZHAO Pin, XIE Fu-zhou, SUN Zhen-guo. Materials science basic tutorial[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2007: 120–144.
- [32] XU Sheng-hang, LIU Yong, YANG Chao, ZHAO Heng-lü, LIU Bin, LI Jian-bo, SONG Min. Compositionally gradient Ti-Ta metal-metal composite with ultra-high strength[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 712: 386–393.
- [33] 郑晓航. Ti-Ta-Zr 高温记忆合金的马氏体相变与形状记忆效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHEN Xiao-hang. Martensitic transformation and shape memory effects of Ti-Ta-Zr high temperature shape memory alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [34] 高建明. 材料力学性能[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007: 15–20.
- GAO Jian-ming. Material mechanics performance[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007: 15–20.
- [35] 赵 品, 谢辅洲, 孙振国. 材料科学基础教程[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 193–202.
- ZHAO Pin, XIE Fu-zhou, SUN Zhen-guo. Materials science basic tutorial[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2007: 193–202.
- [36] MAGHSOUDLOU A, ZAREI-HANZAKI A, ABEDI H R,

BARABI A, PILEHVA F, DIETRICH D, LAMPKE T. The room temperature tensile deformation behavior of thermomechanically processed β -metastable Ti-Nb-Zr

bio-alloy: The role of deformation-induced martensite[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 738: 15–23.

Tensile properties of Ti-28%Ta alloys

ZHAO Shao-yang, WANG Li-qing, TAN Pin, YING Jin-ou, LI Zeng-feng, SHEN Lei, TANG Hui-ping

(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The mechanical testing platform, digital image correlation technology, X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy were used to study the microstructure and tensile properties of Ti-28%Ta alloy, and the fracture morphologies were analyzed. The results show that the microstructure of Ti-28%Ta alloy is composed of main β phase and a small amount of α'' martensite phase. The tensile properties of Ti-28%Ta alloys and cyclic tensile tests show that Ti-28%Ta alloys have excellent superelasticity and plasticity (fracture elongation is 28%). The fracture analysis proves that Ti-28%Ta alloys have excellent superelasticity and plasticity. The fracture mode is ductile fracture.

Key words: superelasticity; martensitic phase transformation; TiTa alloy; tensile property; digital image correlation

Foundation item: Project(2017YFB0305800) supported by the National Key Research Development Program of China

Received date: 2019-12-02; **Accepted date:** 2020-05-28

Corresponding author: WANG Li-qing; Tel: +86-29-86231095; E-mail: wlq881120@163.com

(编辑 李艳红)