文章编号:1004-0609(2010)S1-s0113-05

热变形参数对 BTi-62421S 合金微观组织及 性能的影响

张慧芳¹,张治民¹,张 星¹,李保成¹,马鸿海²

(1. 中北大学 材料科学与工程学院,太原 030051;2. 宝钛集团有限公司 科技部,宝鸡 721014)

摘 要:在 Gleeble-3800 热模拟实验机上对 BTi-62421S 合金铸态材料,在温度 850~1050 、应变速率 0.01~ 30 s⁻¹、变形程度 70%条件下进行了等温恒应变速率压缩实验。通过金相分析,研究热变形参数(变形温度、应变 速率)对 BTi-62421S 合金微观组织的影响。结果表明,变形温度和应变速率显著影响片层组织等轴化的程度,在 β 相变点以下,随着温度的升高,片层组织等轴化程度增大,组织更均匀。对变形后的试样做了硬度实验,结果 表明合金的硬度开始随着温度的升高而升高,出现峰值后降低。

关键词:BTi-62421S 合金;热变形;微观组织;硬度 中图分类号:TG 146.2 文献标志码:A

Effect of hot deformation parameters on microstructures and properties of BTi-62421S alloy

ZHANG Hui-fang¹, ZHANG Zhi-min¹, ZHANG Xing¹, LI Bao-cheng¹, MA Hong-hai²

College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
 Department of Science and Technology, Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The compression test of BTi–62421S alloy was carried out at temperatures of 850–1 050 , strain rates of $0.01-30 \text{ s}^{-1}$ and deformation of 70% by the Gleeble–3800 thermal-mechanical simulator. The effects of hot deformation parameters on microstructure of the alloy were investigated by optical microscopy. The results show that the equiaxial degree of lamellar structure is significantly affected by hot deformation parameters, including deformation temperature and strain rate. The deformation temperature and strain rate have significant effects on the equiaxial degree of lamellar structure. The phenomenon (the equiaxial degree of lamellar structure) is increased and the microstructure of alloy is more uniform with the temperature increasing below β phase transition point. Moreover, it can be also seen from hardness test that the hardness of the alloy increases firstly and then decreases with the temperature increasing.

Key words: BTi-62421S alloy; hot deformation; microstructure; hardness

钛合金具有高比强度、抗蠕变性能,耐高温和耐腐蚀性,是一种重要的金属结构材料,在航空航天等领域得到广泛的应用^[1-5]。然而,由于钛合金材料昂贵, 变形加工困难,成形工艺复杂,导致了其制件成本较高^[6-7]。现在,有人提出由铸造坯料直接塑性变形成形 复杂制件方案^[8],可以节约原材料,简化工艺,减少 能耗,从而降低钛合金制件的成本。

由于热变形工艺参数与微观组织演变之间的关系错综复杂^[9-11],使得控制工件热成形过程中微观组 织演变成为了实际生产需要解决的关键问题。此外, 由铸坯直接成形工件,其成形性及成形对产品性能的 影响研究甚少,工艺制定上也缺少参考依据。为此本

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50735005)

通信作者:张慧芳,博士研究生;电话:13513648327;E-mail:zhf990715@163.com

文作者研究热变形参数对 BTi-62421S 合金微观组织 及力学性能的影响,为 BTi-62421S 合金塑性变形组 织的控制和热变形工艺的制定提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用材料为宝钛集团提供的新型近 α 高温钛 合金 BTi-62421S 合金铸块, 该合金的 β 相转变点为 1 010 。供货状态为热等静压,其化学成分见表 1。

表1 BTi-62421S 合金的化学成分

Table 1Chemical compositions of BTi-62421S alloy (massfraction, %)

Ti	Al	Sn	Zr	Мо	Nb	Si
Bal.	5.3-7.0	1.2-2.5	3.0-4.5	0.3-1.3	1.0-2.5	0.1-0.6

BTi-62421S 合金原始铸态组织(图 1)是典型的魏 氏组织 β 晶粒非常粗大 ,呈等轴状 ,平均尺寸在 2 mm 左右 ,通过肉眼可以分辨;在原始 β 晶粒内部为平直 的片层 α ,并按一定位向排列 ,原始 β 晶界清晰、完整。



图1 原始组织

Fig.1 Initial microstructure

1.2 实验方法

热模拟试样尺寸为 d8 mm×12 mm, 实验在 Gleeble-3800 型热模拟实验机上进行, 压缩温度为 850、900、950、1000和1050, 变形速率为0.01、 0.1、1、10和30 s⁻¹, 变形量为70%(真应变1.2)。实 验加热速度为10 /s, 到温后保温5 min。压缩变形 后立即水淬试样,以保持高温变形组织形态。

测得了不同变形条件下变形后试样的洛氏硬度 值,再将试样沿轴线纵向剖开,制成金相试样。浸蚀 剂用 5%HF+12%HNO₃+83%H₂O 溶液,在 Image MAT A1 数码显微镜下观察了金相组织。

2 结果与分析

2.1 成形性能

压缩变形后试样出现两种情况,在较低温度或较 大应变速率时试样开裂,其它试样变形为鼓形。结合 试样开裂情况,给出铸态 BTi-62421S 合金压缩变形 *ċ* — *T*—开裂关系图(图 2)。可以看出,在 850 时,塑性 变形能力差;900 时,只能选择小的变形速率 0.01 s⁻¹,以保证变形的顺利进行;当升高温度到 950 以 上,基本没有热裂缺陷发生,并且还可以选择大的变 形速率。然而在实际加工过程中,考虑到设备能耗及 生产效率,应选择中等应变速率。



分析压缩实验结果可以看出,在本实验温度范围 内,随变形温度的升高,BTi-62421S 合金的塑性提高。 这主要是因为在低温下,密排六方晶格的 BTi-62421S 合金滑移系数目有限,塑性变形困难;而在高温条件 下,更多的滑移系被激活,塑性提高^[12]。

2.2 微观组织

变形温度对变形后微观组织的影响如图 3 所示。 由图 3 可看到,随着温度的升高,微观组织形貌发生 很大变化。在 850 变形时,微观组织形貌变化不是 特别明显,只是片层α由于应力作用发生了扭曲;900

时,片状α被压碎,开始出现等轴化现象,只是等 轴化率较低;950 时,片状α破碎程度加大,破碎 晶粒增多,等轴化率增大;1000 时,其组织为细小、



均匀的等轴组织。随着温度的升高,组织细小、均匀, 这是动态再结晶的特点。在1050 变形时,温度高 于 β 相变点, β 相晶粒变得更粗大,变形组织由被压 扁、拉长、粗大的 β 晶粒组成,粗大的晶粒内析出针 状 α ,说明在变形过程中主要发生了动态回复,但也 有少量动态再结晶。

研究表明^[13-15],采用高温变形可以控制α相形态 和最终的尺寸。经过变形后获得的细小等轴组织,具 有较高的疲劳强度和塑性,目前采用最广泛,而这种 组织只有在两相区变形才能得到。当变形温度超过β 温度后,相中原子扩散系数较大,β晶粒极易粗化。

应变速率对变形后微观组织的影响如图 4 所示。 由图 4 可以看出,随着应变速率的降低,破碎的片状 α 相逐渐演变成等轴状。当应变速率为 30 s⁻¹ 时,破 碎后的微观组织基本保持原始片层组织,只有极少量的细小等轴 α 出现;当应变速率为 1 s⁻¹时,有 40% ~ 50%的片层 α 演变成等轴状;当应变速率为 0.01 s⁻¹时,大部分片层 α 演变成等轴状。这说明应变速率对片层状组织的球化进程影响显著,应变速率越慢,球化过程进行得越充分。

2.3 力学性能

图 5 所示为变形温度和硬度关系图。由图 5 可见, 铸态 BTi-62421S 合金试样的洛氏硬度为 34.5 HRC, 变形后试样硬度普遍提高。应变速率为 1 s⁻¹时,试样 硬度随变形温度的升高而升高,在其余应变速率条件 下,硬度先随温度的升高而升高,直到出现一个峰值, 然后再下降其硬度逐渐下降且变化要平缓一些。这是





图 4 变形温度为 950 时,不同应变 速率下的 BTi-62421S 合金微观组织 Fig.4 Microstructures of BTi-62421S alloy deformed at 950 and different strain rates: (a) 0.01 s^{-1} ; (b) 1 s^{-1} ; (c) 30 s⁻¹



图 5 变形温度和硬度关系

Fig.5 Relationships between deformation temperature and microhardness

由于随着变形温度的升高,片状 α 等轴化程度增大, 组织变的越来越均匀,从而使硬度降低,塑性、韧性 提高。

3 结论

1)结合热模拟压缩实验试样开裂状态,获得 BTi-62421S 合金压缩变形 *i*—*T*—开裂关系图。通过 控制变形温度和应变速率等参数,可实现 BTi-62421S 合金的塑性变形。

 2) 变形温度、变形速率对 BTi-62421S 合金热变 形后的微观组织有重要的影响。在 β 相变点以下变形 时,随着变形温度的升高,应变速率降低,组织细小、 均匀;在β相变点以上变形时,合金中会出现粗大的 β 晶粒,这是应避免的情况。

3) BTi-62421S 合金的锻造工艺宜选择在 950~
 1 000 以及中等或较低应变速率下进行,这样可获得
 细小、均匀的等轴晶粒,从而获得综合性能较好的合金。

REFERENCES

- QI Yun-lian, XI Zheng-ping, ZHAO Yong-qing. Hot deformation behavior and microstructure evolution of titanium alloy Ti-Al-Zr-Sn-Mo-Si-Y [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(3): 537–540.
- [2] FERRERO J G. Candidate materials for high-strength fastener applications in both the aerospace and automotive industries [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 691–696.
- [3] MANFRED P, JORG K, CHARLES H V, CHRISTOPH L. Titanium alloys for aerospace applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 419–427.
- [4] ZENG Li-ying, HONG Quan, YANG Guan-jun, ZHAO

张慧芳,等:热变形参数对 BTi-62421S 合金微观组织及性能的影响

Yong-qing, QI Yun-lian, GUO Ping. Tensile and creep properties of Ti-600 alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17: 522–525.

- [5] GOGIA A K. High-temperature titanium alloys [J]. Defence Science Journal, 2005, 55(2): 149–173.
- [6] LI A A B, HUANG L J, MENG Q Y, GENG L, CUI X P. Hot working of Ti-6Al-3Mo-2Zr-0.3Si alloy with lamellar α+β starting structure using processing map [J]. Materials and Design, 2009, 30: 1625–1631.
- [7] SUN Sheng-di, GUO Bin, SHAN De-bin, ZHONG Ying-ying. Research on elevated temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V sheets [J]. Rare Metals, 2009, 28(6): 550–553.
- [8] 王强,张治民,张星,李保成.ZTC4 钛合金温变形力学 行为研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(增刊3): 616-619.

WANG Qiang, ZHANG Zhi-min, ZHANG Xing, LI Bao-cheng. Investigation on warm-forming mechanical behavior of ZTC4 titanium alloy [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2007, 36(S3): 616–619.

[9] 唐 泽,杨 合,孙志超,李志燕,段 桦. TA15 钛合金高 温变形微观组织演变分析与数值模拟[J].中国有色金属学报, 2008,18(4): 722-727.

TANG Ze, YANG He, SUN Zhi-chao, LI Zhi-yan, DUAN Hua. Microstructure evolution and numerical simulation of TA15 titanium alloy during hot compressive deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 722–727.

- [10] ZONG Y Y, SHAN D B, XU M, LÜ Y. Flow softening and microstructural evolution of TC11 titanium alloy during hot deformation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 1988–1994.
- [11] VO P, JAHAZI M, YUE S, BOCHER P. Flow stress prediction during hot working of near_α titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 477: 99–110.
- [12] 薛克敏,李 萍,吕 炎. Ti-15-3 合金高温变形的微观组织
 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 385-388.
 XUE Ke-min, LI Ping, LÜ Yan. Microstructure of Ti-15-3 alloy after high temperature deformation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(3): 385-388.
- [13] 陈慧琴, 郭 灵, 曹春晓. TC11 钛合金片层组织热变形行为及组织演变[J]. 航空材料学报, 2009, 38(3): 421-425.
 CHEN Hui-qin, GUO Ling, CAO Chun-xiao. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC11 alloy with lamellar structure [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 38(3): 421-425.
- [14] CUI W F, JIN Z, GUO A H, ZHOU L. High temperature deformation behavior of $\alpha+\beta$ type biomedical titanium alloy Ti-6Al-7Nb [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 252–256.
- [15] MOMENI A, ABBASI S M. Effect of hot working on flow behavior of Ti-6Al-4V alloy in single phase and two phase regions [J]. Materials and Design, 2010, 31: 3599–3604.

(编辑 何学锋)