文章编号:1004-0609(2010)S1-s0514-04

BTi-62421S 合金高温变形流动应力模型

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型热加工模拟实验机上,对 BTi-62421S 合金在变形程度 70%、变形温度 850~1050 、 应变速率 0.01~30 s⁻¹范围内进行高温压缩实验。通过真应力—真应变曲线,分析流动应力随变形热力参数的变化 规律。结果表明:BTi-62421S 合金高温变形的流变应力随温度的升高和应变速率的降低而减小;随着应变的增大, 合金的真应力—真应变曲线在经历了明显的加工硬化阶段后达到最大值,然后出现流变"软化"现象。以经典的双 曲正弦形式模型为基础建立了 BTi-62421S 合金高温变形的本构方程,同时通过对数据回归处理计算了合金高温 变形的应力指数 n、应变激活能 Q。

关键词:BTi-62421S;高温变形;流动应力;本构模型 中图分类号:TG146.2 文献标志码:A

Constitutive model of flow stress for high temperature deformation 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;
 Scientific and Technical Department, Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The high temperature compression tests of BTi-62421S titanium alloy were carried out in the temperature range of 850-1050 and strain rate range of 0.01-30 s⁻¹ using the Gleeble3800 thermal-mechanical simulator. The change of flow stress with deformation thermal parameters was revealed from true stress—true strain curves. The results show that the true stress of high temperature deformation of BTi-62421S alloy increases with the decrease of deformation temperature and the increase of strain rate. With the increase of true strain, due to the work hardening of the alloy, the true stress attains the peak, and then flow softening occurs. The constitutive equation for high temperature deformation of BTi-62421S alloy is obtained on the basis of hyperbolic sine form model, and the material constants, including activation energy Q and stress exponent n are also obtained.

Key words: BTi-62421S Ti alloy; high temperature deformation; flow stress; constitutive equation

BTi-62421S 合金是宝钛集团自主研发的一种新 型近α高温钛合金,具有比强度高、蠕变性能及热强性 能好等突出优点,可满足高结构效益、高可靠性结构 件的使用,具有良好的应用前景。高温钛合金在获得 最终产品之前,需要在β单相区或α+β两相区进行热加 工^[1]。而钛合金材料的成形温度范围较窄,其变形抗 力对变形温度和变形速率很敏感^[2-4],与其它合金材料 相比,钛合金更难成形^[5-6]。为了提高钛合金零件的塑 性成形能力,各国学者对钛合金的高温变形行为及其 成形性能进行了大量的研究^[7-11]。由于 BTi- 62421S 是一种新型合金,目前尚未见其高温成形的相关研究 报道。本文作者通过热压缩实验,研究了 BTi-

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50735005)

通信作者:张慧芳;电话:13513648327; E-mail: zhf990715@163.com

62421S 合金流动应力随温度、等效应变和应变速率等 变形参数的变化情况,建立了流动应力模型,以期为 该合金塑性成形工艺的研究和计算机数值模拟提供理 论基础。

1 实验

实验所用材料为 BTi-62421S 合金铸块,尺寸为 155 mm×115 mm×90 mm,状态为热等静压,其β相 转变点为1010 ,其主要化学成分见表1。

表 1 BTi-62421S 合金的化学成分(质量分数,%)

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

热模拟试样尺寸为 d 8 mm×12 mm,实验在 Gleeble-3800型热模拟实验机上进行,压缩温度分别 为850、900、950、1000、1050 ,变形速率分别为 0.01、0.1、1、10、30 s⁻¹,变形量为70%(真应变1.2)。 实验加热速度为10 /s,达到预定温度后保温5 min。 压缩变形完成后立即水淬试样,以保持高温变形组织 形态。

2 结果与讨论

BTi-62421S 合金热压缩变形的真应力—真应变 曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出,在不同条件下, BTi-62421S 合金的真应力—真应变曲线表现为相似 特征。变形初期(达到真应力峰值前),流动应力随应 变的增加迅速增加,当应变超过一定值后,流动应力 开始下降并逐渐趋于稳定,出现稳态流动特征。 BTi-62421S 合金对变形温度非常敏感(见图 1(a)),给 定应变速率,流动应力随着温度的升高而显著降低, 且合金流动应力进入稳态流动时所需的应变也随着温 度的升高而减小。产生这一现象的物理本质可能是: 随着温度的升高,材料热激活作用增强,原子平均动 能和扩散速率增加,导致由动态作用引起的软化作用 增强,从而使得流动应力值变小,当加工硬化作用与 软化作用达到平衡时,所需要的应变值变小。

BTi-62421S 合金对应变速率非常敏感(见图 1(b)), 给定变形温度,流动应力随着应变速率的增加而增加,



图 1 BTi-6421S 合金的真应力—真应变曲线 Fig.1 True stress — true strain curves of BTi-6421S alloy: (a) Strain rate of 0.01 s⁻¹; (b) At 900

且峰值应变(峰值应力对应的应变)随着应变速率的增加而增加。这是由于变形速度增加时,变形过程缩短, 而要在短时间内驱使数目更多的位错同时运动,会使 位错交滑移、扩散、攀移更加困难,必然会导致金属 晶体的临界剪应力升高,使变形困难。

3 流动应力模型

金属的高温变形是热力学参数所支配的一个热激 活过程。温度和应变速率对流动应力的综合影响通常 采用受热激活控制的动力学方程来分析。目前,在金 属的热变形过程中,常用的力学模型是 Arrhenius 型 方程^[12-14]:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2[\exp(\beta\sigma)]\exp(-Q/RT)$$
⁽²⁾

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$$
(3)

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; A_1 、 A_2 、A、 n_1 、n、 α 、 β 均为 与温度无关的常数;A为结构因子;n为应力指数; α 、 β 和 n_1 之间满足 $\alpha=\beta/n_1$; σ 为流动应力;Q为变形激活 能;R为气体常数;T为热力学温度。

ZENER 和 HOLLOMON^[15]提出并实验验证了应 变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 *T* 的关系可用 Zener-Hollomon 参数 *Z* 表示:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{4}$$

对式(1)和(2)两边取自然对数,并假设Q与T无关,则可得

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \tag{5}$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma \tag{6}$$

将峰值应力代入式(5)和(6),得到 ln $\dot{\varepsilon}$ —ln σ 关系曲 线如图 2 所示, ln $\dot{\varepsilon}$ — σ 关系曲线如图 3 所示。由式(5) 和(6)可知,当温度一定时 n_1 和 β 分别为 ln $\dot{\varepsilon}$ —ln σ , ln $\dot{\varepsilon}$ — σ 曲线的斜率。取平均值得到 n_1 和 β 值分别为 $n_1=5.26$ 、 $\beta=0.021$,则 $\alpha=0.004$ 1。

假设热变形激活能 Q 与 T 无关,对式(3)两边取 自然对数,则可得

 $\ln \dot{\varepsilon} = \ln A - Q / RT + n \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ (7) 对式(7)的两边取偏微分

$$Q = R\left[\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\right]_{T} \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\right]_{\dot{\varepsilon}}$$
(8)

将不同变形温度下 BTi-62421S 合金的流动应力 σ 和 应 变 速 率 $\dot{\epsilon}$ 值 带 入 式 (7) , 绘 制 出 相 应 的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线(见图 4)和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - (1/T)$ 关系曲线(见图 5)。从图 4 可以看出 , $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 较好地满足线性关系。由式(7)可知 ,图 4 中直线斜率 即为 *n* 值 ,取平均值 ,得 *n*=5.38。

双曲正弦函数关系可用于描述合金所有应力水平 下 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 之间的关系^[14],因而能较准确地为通过改变应 变速率来控制热加工的应力水平和力学参数提供理论 依据。从图 5 可以看出, σ 的双曲正弦对数项和温度的 倒数之间满足线性关系,这表明,BTi-62421S 合金高 温压缩流动应力和变形温度之间满足 Arrhenius 关 系,同时意味着 BTi-62421S 合金高温变形是受热激活 过程控制的。由图 5 可求出各直线斜率的平均值为 15147.3。并由式(8)求得 Q 值为 678.36 kJ/mol。

由式(7)及图 5 可知, $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系直线的 截距,即为 $\ln A - Q/RT$ 的值,将Q,R,T 值代入即可 求得不同温度下的 $\ln A$ 值,取其平均值, $\ln A = 54.87$ 。 则材料常数 A 值为 6.73 × 10²³。

根据式(4)以及反双曲正弦函数的定义,可将流变 应力表达为 Zener-Hollomon 参数 Z 值的函数,并将

以上所求的 α 、A、n 值代入得

$$\sigma = \ln \{ (Z/(6.73 \times 10^{23})^{1/5.38} +$$

$$[Z/(6.73 \times 10^{23})^{2/5.38} + 1]^{1/2}]/0.0041$$

式中 $Z=\dot{\varepsilon}\exp(678.36\times 10^3/RT)$





Fig.2 Relationship between $\ln \dot{\varepsilon}$ and $\ln \sigma$



图 3 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 关系曲线

Fig.3 Relationship between $\ln \dot{\varepsilon}$ and σ



图 4 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 关系曲线

Fig.4 Relationship between $\ln \dot{\varepsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$



图 5 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 关系曲线 **Fig.5** Relationship between ln[sinh($\alpha\sigma$)] and 1/*T*

3 结论

1) BTi-62421S 合金对变形温度敏感,在同一应变 速率下,BTi-62421S 合金的流变应力和进入稳态流动 时所需的应变随温度的升高而降低。

2) BTi-62421S 合金对应变速率敏感,在同一变形 温度下,BTi-62421S 合金的流变应力和峰值应变随应 变速率的增大而提高,说明该合金是正应变速率敏感 材料。

 3) 可采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦函 数来描述 BTi-62421S 合金高温流变应力σ。

REFERENCES

[1] 崔文芳,洪 权,刘春明,周 廉.Ti-1100/0.1Y 高温钛合金 等温热压缩变形行为[J].东北大学学报,2003,24(6):572-575.

CUI Wen-fang, HONG Quan, LIU Chun-ming, ZHOU Lian. Hot deformation behaviours of Ti-1100/0.1Y alloy through isothermal hot compression tests[J]. Journal of Northeastern University (NaturalScience), 2003, 24(6): 572–575.

- [2] XU Wen-chen, SHAN De-bin, LÜ Yan, LI Chun-feng. Effects of hot deformation parameters on flow stress and establishment of constitutive relationship system of BT20 titanium alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(Special 2): 167–172.
- [3] CHEN Hui-qin, CAO Chun-xiao, GUO Ling, LIN Hai. Hot deformation mechanism and microstructure evolution of TC11 titanium alloy in β field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2008, 18(5): 1021–1027.
- [4] 罗 皎,李淼泉,李 宏,于卫新.TC4 钛合金高温变形行为 及其流动应力模型[J].中国有色金属学报,2008,18(8): 1395-1401.

LUO Jiao, LI Miao-quan, LI Hong, YU Wei-xin. High temperature deformation behavior of TC4 titanium alloy and its flows stress model[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1395–1401.

- [5] ODENBERGER E L, PEDERSON R, OLDENBURG M. Thermo-mechanical material response and hot sheet metal forming of Ti-6242[J]. Materials Science and Engineering A , 2008, 489: 158–168.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ZHAO Zhang-long, GUO Hong-zhen, WANG Xiao-chen, YAO Ze-kun. Deformation behavior of isothermally forged Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo powder compact[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15/16): 5509–5513.
- [9] NARAYANA MURTY S V S, NAGESWARA RAO B. On the flow localization concepts in the processing maps of titanium alloy Ti-24Al-20Nb[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104(1/2): 103–109.
- [10] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H, YUE S. Influence of thermomechanical processing on microstructural evolution in near-αalloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 416(1/2): 300–311.
- [11] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, PRASAD Y V R K. Hot working of commercial Ti-6Al-4V with an equiaxed α-β microstructure: materials modeling considerations[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 284(1/2): 184–194.
- [12] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, MALAS J C, FRAZIER W G, PRASAD Y V R K. Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial (ELI) grade Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 279(1/2): 289–299.
- [13] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, PRASAD Y V R K. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 325(1/2): 112–125.
- [14] 赵为纲,李 鑫,鲁世强,刘志和,王克鲁,李臻熙,曹春晓. TC11 钛合金高温变形本构关系研究[J]. 塑性工程学报,2008, 15(3): 123-127.
 ZHAO Wei-gang, LI Xin, LU Shi-qiang, LIU Zhi-he, WANG Ke-lu, LI Zhen-xi, CAO Chun-xiao. Study on constitutive relationship of TC11 titanium alloy during high temperature deformation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 123-127.
- [15] IMBERT C, RYAN N D, MCQEEN H J. Hot workability of three grade of tool steel[J]. Metall Trans A, 1984, 15(10): 1855–1864.