钒钛材料与应用

TA18 钛合金热变形行为及热加工图研究

彭 力[1,2], 江 健[1,2], 罗小峰[1,2], 申学良[1,2], 王 莹[1,2], 邢 远[1,2]

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610303)

摘 要: 采用 Gleeble 3500 热模拟试验机研究了 TA18 钛合金在 750 ~ 1 050 ℃ 和 0.001 ~ 10 s^{-1} 条件下的热变形行为, 建立了 Zener-Hollomon 参数(Z 参数)的本构方程及热加工图。结果表明, TA18 钛合金 β 单相区的变形激活能为 310.71 kJ/mol, α+β 双相区的应变激活能为 578.78 kJ/mol。经过拟合得到了 TA18 钛合金在单相区和双相区变形的流变应力本构方程。通过对热加工图的分析, 确定了 TA18 钛合金合理的热加工参数范围为: 变形温度 825 ~ 900 ℃, 应变速率 0.01 ~ 0.05 s^{-1}。试验结果可为 TA18 钛合金热加工工艺参数的选择提供理论依据。

关键词: TA18 钛合金; 热压缩变形; 本构方程; 热加工图

中图分类号: TF823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2022)06−0045−06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.007 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Hot deformation behavior and processing maps of TA18 titanium alloy

Peng Li[1,2], Jiang Jian[1,2], Luo Xiaofeng[1,2], Shen Xueliang[1,2], Wang Ying[1,2], Xing Yuan[1,2]

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610303, Sichuan, China)

Abstract: The hot deformation behavior of TA18 Titanium alloy was investigated using the Gleeble-3500 test machine at 750 − 1 050 ºC with strain rates from 0.001 s^{-1} to 10 s^{-1}, and the constitutive equation including Zener-Hollomon parameter (Z parameter) and processing map was established. The results revealed that the activation energy of TA18 alloy in the β single-phase region and α+β two-phase region was 310.71 kJ/mol and 578.78 kJ/mol, respectively. The fitting flow stress constitutive equations were obtained. In addition, the processing maps showed that the optimal hot processing parameter ranges were 825 − 900 ºC with a strain rate of 0.01 ~ 0.05 s^{-1}. This study can provide a theoretical basis for selecting the hot working parameters of TA18 titanium alloy.

Key words: TA18 titanium alloy, hot compression deformation, constitutive equations, thermal processing map

0 引言

TA18 钛合金的名义成分为 Ti-3Al-2.5V, 是由 TC4(Ti-6Al-4V)钛合金演变来的低合金化近 α 钛合金。TA18 钛合金拥有良好的室温力学性能、优异的冷、热加工塑性和成形性; 该合金管材的室温性能优于工业纯钛, 其冷加工性和焊接性能高于 TC4 钛合金。此外, TA18 钛合金管还具有良好的耐腐蚀性能, 广泛应用于飞机液压和燃油等管路系统。国外用该合金制作的各种规格的钛合金管工艺

收稿日期: 2022−04−18

作者简介: 彭力, 1990 年出生, 男, 四川大英人, 工程师, 研究方向: 钛合金加工, E-mail: listen0812@163.com。

成熟，已在飞机管路系统中应用多年。相较而言，国内各环节工艺尚不成熟，还具有较大差距。

目前，对 TA18 钛管的研究多集中于织构演变[1−2]及冷轧工艺[3]，对其热加工性能研究较少。王云等[4]比较了径向锻造和轧制工艺所制备棒材的组织和性能，发现退火后的轧制棒材再结晶晶粒更加细小均匀。李维[5]研究了不同轧制变形量对成品棒材性能的影响，发现轧制变形量在 60% 以上，900 ℃退火后，棒材的强度和塑性能得到较好的匹配。

热加工所得坯料的质量往往决定了最后成品的质量，所以控制好热加工过程尤为重要。合金的热变形行为是进行热加工的理论基础，建立合金在高温下的本构模型是采用数值模拟进行工艺优化的重要前提。众多研究者对如 TC4[6]、TA15[7]等钛合金的热变形行为进行了研究，并构建了本构方程和热加工图，但鲜有对 TA18 热变形行为的研究。

笔者对 TA18 钛合金的热压缩行为进行了研究，得到了在不同应变速率和不同变形温度下的应力-应变曲线。通过对应力-应变曲线的分析，构建了 TA18 钛合金的本构方程，以期指导其热加工工艺的制定。

1 试验部分

进行热压缩模拟的坯料为经过锻造后的 Ø85 mm 棒材，取样规格为Ø8 mm×12 mm 的标准热压缩模拟试样。热压缩模拟试验在 Gleeble 3500 热压缩模拟试验机上进行，变形温度为 750、800、850、900、950、1 000 ℃ 和 1 050 ℃，应变速率为 0.01、0.1、1 s^{-1} 和 10 s^{-1}，压缩变形量统一为 50%，试样加热的升温速率为 10 ℃/s，到温后保温 3 min 再开始压缩变形。图 1 是用于热压缩试验的 TA18 钛合金金相组织图片。从图 1 可以看出，金相组织为拉长的等轴组织，由 α+β 两相组成。

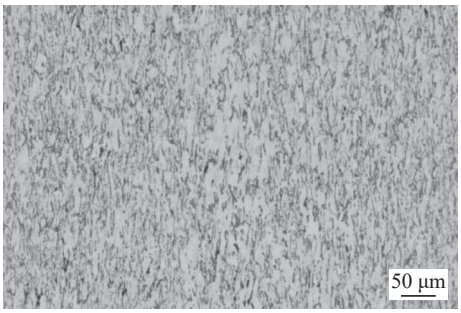


图 1 TA18 钛合金初始金相组织

Fig. 1 Original microstructure of TA18 alloy

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线分析

图 2 展示了 TA18 钛合金在不同变形条件下的热压缩模拟过程的真应力-真应变曲线。以第一阶段弹性变形末端的峰值应力作为变形抗力的衡量标准来看，变形温度和应变速率都对峰值应力有显著的影响。关于变形温度的影响，以图 2(c)中在不同温度条件下且应变速率为 1 s^{-1} 时的真应力-真应变曲线为例。当变形温度分别为 800、850、900、950 ℃时，当应变为 0.1 时，真应力-真应变曲线对应的应力分别为 209.60、124.05、57.36 、38.60 MPa。可见，当应变速率一定时，峰值应力随着变形温度的升高而逐渐降低。在应变速率为 0.01 s^{-1}，温度低于相变点变形时，流变应力迅速上升达到峰值后，呈连续下降趋势，软化机制以连续动态再结晶为主。在应变速率为 0.1 s^{-1}，温度为 750 ℃ 时，流变应力在下降后又出现了上升的情况，可能是再结晶晶粒细化和位错累计导致。当温度在 950 ℃ 及以上时，材料的流变应力达到峰值后基本稳定在一个定值，软化机制以动态回复为主。

关于应变速率的影响，横向对比图 2 中不同应变速率而变形温度同为 950 ℃，应变为 0.1 时对应的应力，应变速率分别为 0.01、0.1、1 s^{-1} 以及 10 s^{-1} 时，对应的应力分别为 18.23、27.82、38.60 、67.02 MPa(如箭头所示)。可见，当变形温度一定时，峰值应力随着应变速率的升高而逐渐升高。其它应变温度条件下，不同应变速率的真应力-真应变曲线的峰值应力具有相同的规律。

2.2 本构方程的建立

由于金属材料的热变形过程可以视为一种热激活过程，通常采用引入 Z 参数(Zener-Hollomon 参数)后的阿伦尼乌斯方程来描述金属材料热变形过程的本构关系。引入 Z 参数的阿伦尼乌斯方程如式(1)所示[8]。

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{1}$$

其中，$\dot{\varepsilon}$为应变速率(s^{-1})；Q 为热变形激活能(kJ/mol)；R 为摩尔气体常数；T 为变形温度(K)。此外，Z 与流变应力 σ 服从式(2)的关系[9]：

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{2}$$

其中，A、α 及 n 为相关常数，且均与温度无关。由式(1)和式(2)可得[10]：

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

在低应力水平下[11], 式(2)和式(3)可简化为:

$$Z = A_1\sigma^n \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_1\sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

在高应力水平下, 式(2)和式(3)可简化为:

$$Z = A_2 \exp(\beta\sigma) \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma)\exp(-Q/RT) \quad (7)$$

其中, A_1, A_2, β 均为与温度无关的常数。

β 单相区为低应力水平, 对式(5)两边取对数可得:

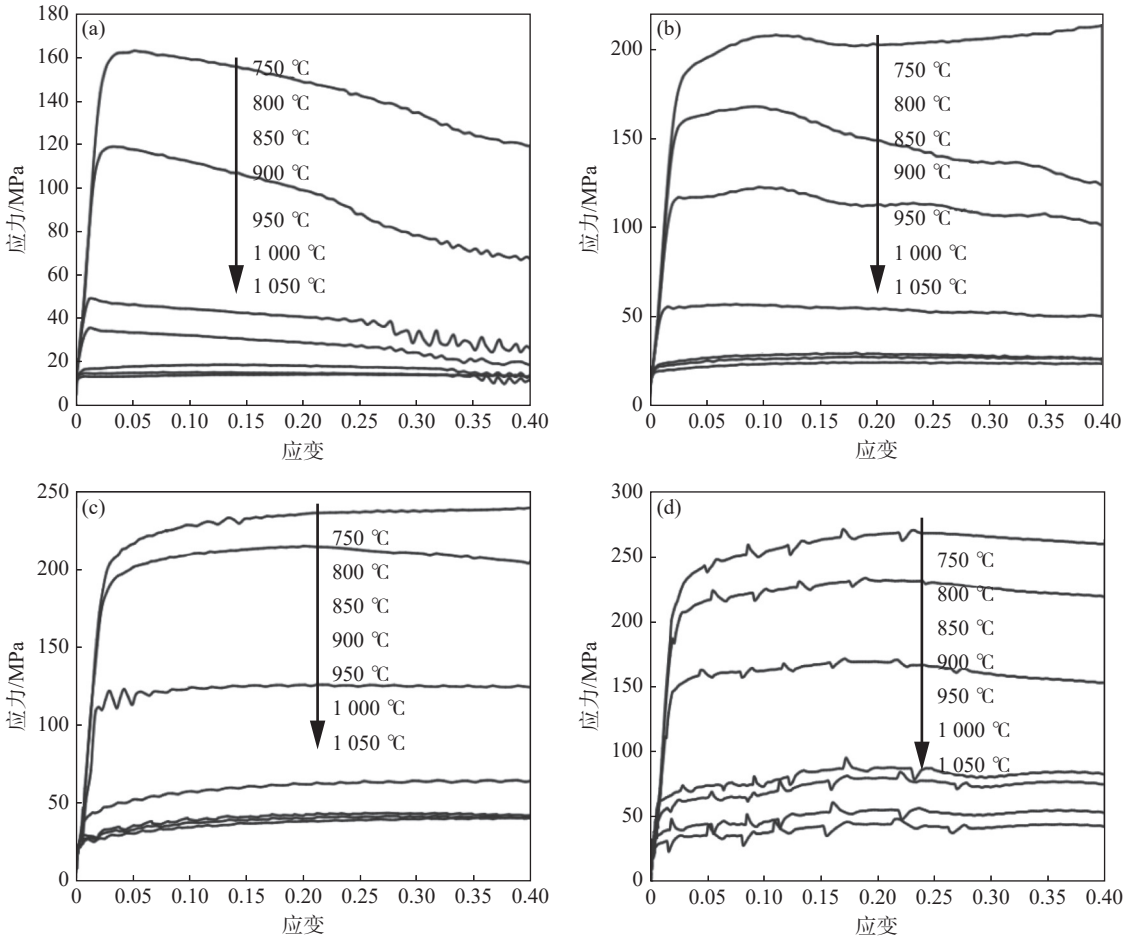
$$\ln\dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n\ln\sigma - Q/RT \quad (8)$$

在 900 ℃ 以下, 低于相变点, 对式(7)两边取对数得:

$$\ln\dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta\sigma - Q/RT \quad (9)$$

当温度一定时, $\ln\dot{\varepsilon} - \ln\sigma$, $\ln\dot{\varepsilon} - \sigma$呈直线关系, 斜率分别为 n 和 β。根据峰值应力, 在多个温度下, 对其进行多元线性拟合。

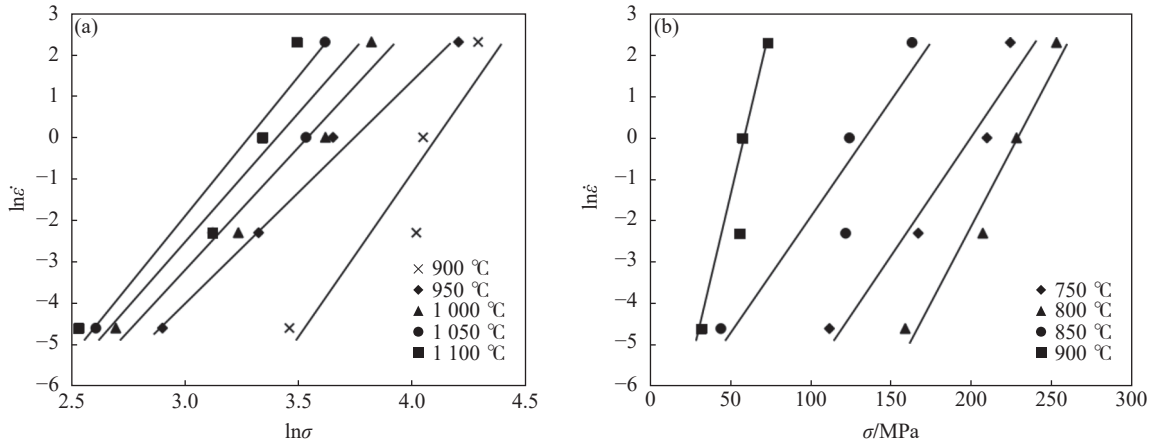
由图 3(a)可得到$\ln\dot{\varepsilon} - \ln\sigma$的曲线斜率, n 值选取峰值应力较低, 即温度较高时斜率的平均值, 得到 n=5.824 0。由图 3(b)可得到$\ln\dot{\varepsilon} - \sigma$ 曲线的斜率, 选峰值应力较高斜率的平均值得到 β=0.061 9, 因此 α=β/n=0.010 6。当应变速率不变时, 假定热变形激活能 Q 与温度无关, $\ln\sigma-1/T$, $\sigma-1/T$ 呈直线关系, 斜率分别为 Q/Rn 和 Q/Rβ。根据峰值应力, 进行多元线性拟合, 如图 4 所示。在低温高应力状态下, 取图 4(b)四条直线斜率的平均值, 得到 Q/Rβ=1 124.645, 因为 β=0.061 9, R=8.314 J/(mol·K), 则双相区应变激活能 Q=578.78 kJ/mol。同理, 在高温低应力状态下, 线性拟合取图 4(a)中直线斜率的平均值, 得到 Q/Rn=6.416 8, 由于 n=5.824 0, 则单相区应变激活能 Q=310.71 kJ/mol。



(a) $\dot{\varepsilon}$=0.01 s^{-1}; (b) $\dot{\varepsilon}$=0.1 s^{-1}; (c) $\dot{\varepsilon}$=1 s^{-1}; (d) $\dot{\varepsilon}$=10 s^{-1}

图 2　不同应变速率条件下变形的真应力-真应变曲线

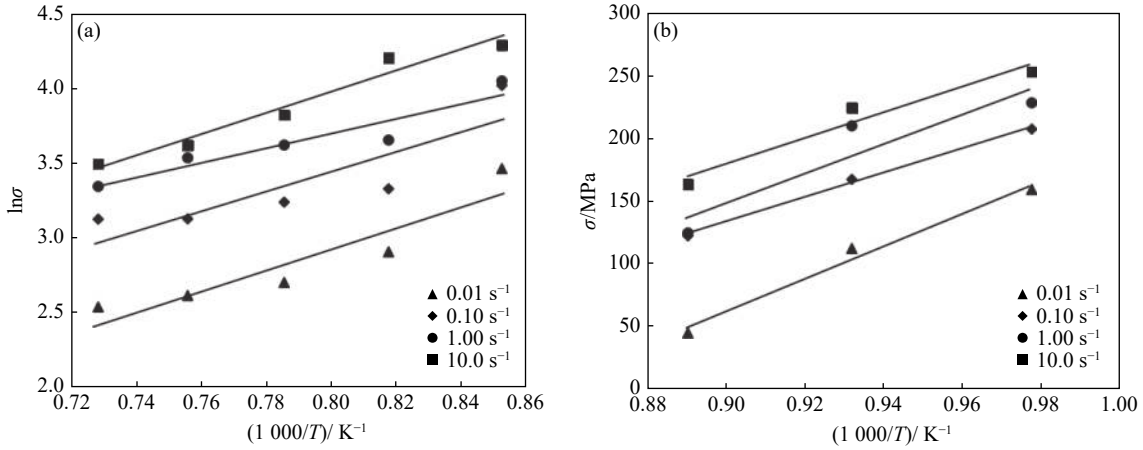
Fig. 2　True stress-true strain curves of TA18 alloy at different strain rates



(a) lnσ−lnε̇; (b) lnε̇−σ

图 3　应变速率与峰值应力的形变关系

Fig. 3　Relationship between strain rates and peak stress



(a) lnσ-1 000/T; (b) σ-1 000/T

图 4　应力和温度的变化关系

Fig. 4　Relationship between stress and temperature

对式(4)和(6)取对数得

$$\ln Z = n\ln\sigma + \ln A_1 \tag{10}$$

$$\ln Z = \beta\sigma + \ln A_2 \tag{11}$$

由式(1)计算得到 Z 值，带入式(10)(11)，得到 ln$Z$−lnσ 和 ln$Z$−σ 关系。

由图 5 拟合得，β=0.059 8，n=5.893 4，与之前计算结果相吻合，由截距计算得 A_1=3 178，A_2=2.3×10^{23}。由此得 TA18 钛合金热变形的本构方程如下：

1)在双相区，温度在 750 ~ 900 ℃ 时，

$$\dot{\varepsilon} = 2.3\times10^{23}\exp(0.0598\sigma)\exp(-578783/8.314T) \tag{12}$$

2)在单相区，温度在 900 ~ 1 050 ℃ 时，

$$\dot{\varepsilon} = 3178\times\sigma^{5.8934}\exp(-310710/8.314T) \tag{13}$$

2.3　热加工图的绘制与分析

金属材料的热加工图由功率耗散图与流变失稳图组成，通过对热加工图的分析可以得出合金最适宜的热加工区间。根据动态模型理论[12−13]，金属的热变形过程可视为材料本身能量耗散的过程。材料从外界吸收的总能量转换为塑性变形所需的能量和微观组织演变所需要的能量。其中微观组织演变所需能量占总消耗能量的比例为功率耗散因子，功率耗散因子 η 可由式 (14) 求出。

$$\eta = 2m/(m+1) \tag{14}$$

式中，$m = \dfrac{d\ln\sigma}{d\ln\varepsilon}$，其为应变速率敏感指数。

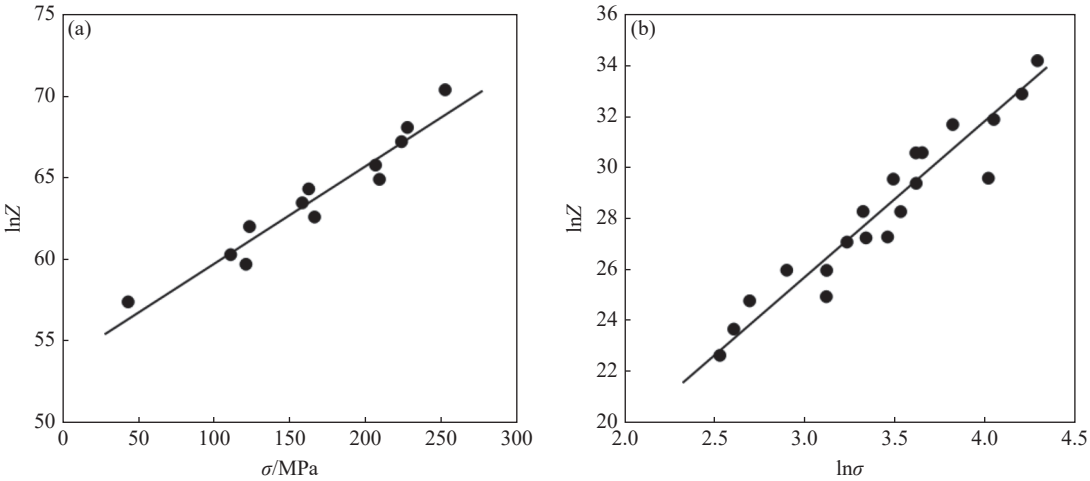
η 为无量纲常量，会根据变形温度和应变速率的变化而变化。一般认为 η 越大，越利于动态再结晶的发生，材料的热加工性能更佳。但是，高功率耗散因子也可能存在加工失稳现象。因此，还需要考虑材料热加工的失稳影响。根据 Prasad 等提出的

材料流动失稳准则可判断材料热加工的失稳区域，其表达式为[14]:

$$\zeta(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \qquad (15)$$

式中，ζ 为失稳因子。当 ζ<0 时，流动失稳现象就会发生。根据不同应变量下的应变及对应的变形温度和变形速率可获得各变形量下的塑性失稳图，其中 ζ<0 的区域为失稳区。结合功率耗散图和塑性失稳图即可获得材料在不同应变量下的热加工图。

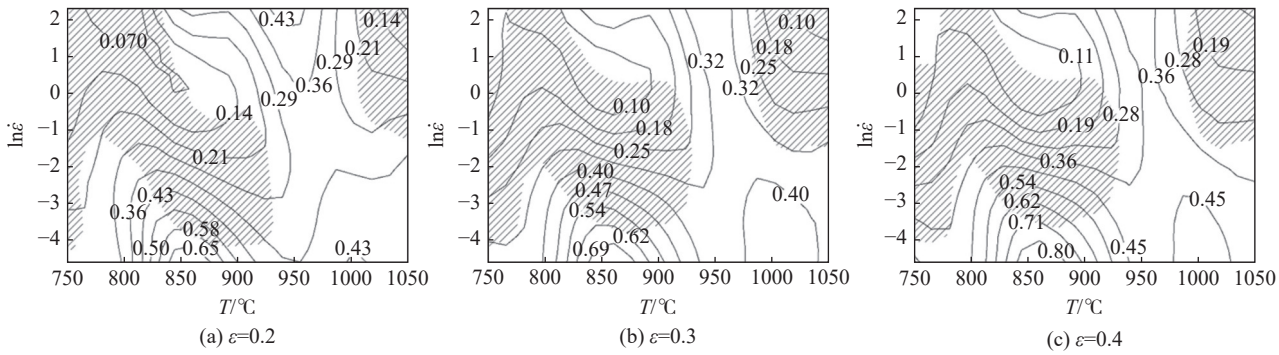
图 6 为采用上述方法构建的 TA18 钛合金的热加工图，其应变量分别为 0.2、0.3、0.4。图中的实线为耗散因子的等值线，阴影部分为塑性失稳区，即加工危险区。最大的功率耗散因子均出现在 825 ~ 900 ℃，应变速率在 0.01 ~ 0.05 s^{-1} 区间内，功率耗散因子介于 0.51 ~ 0.65。热加工图上的其中一个流变失稳区在 1 000 ~ 1 050 ℃，应变速率为 0.1 ~ 10 s^{-1}。即使变形温度高时变形抗力较低，但是过快的变形速率仍会导致 TA18 钛合金失稳。此外，850 ~ 900 ℃ 区间在高应变速率下也将失稳，随着应变量的增加，失稳区逐渐向高应变区移动。在温度低于 850 ℃ 后，失稳区的应变速率将逐渐扩大。在温度低于 775 ℃ 时，已经不适合在应变速率为 0.01 ~ 10 s^{-1} 范围内进行热加工。综上所述，TA18 钛合金最佳的热加工区间在 825 ~ 900 ℃，应变速率 0.01 ~ 0.05 s^{-1}。



(a) lnZ−σ; (b) lnZ−lnσ

图 5　lnZ 与应力的关系

Fig. 5　Relationship between lnZ and stress



(a) ε=0.2　(b) ε=0.3　(c) ε=0.4

图 6　TA18 钛合金不同应变下的热加工图

Fig. 6　Processing maps of TA18 alloy at different strains

3　结论

1)采用等温压缩试验获得了 TA18 钛合金的真应力-应变曲线，其流动应力随变形温度的降低或应变速率的增加而增加。

2) TA18 钛合金 β 单相区的变形激活能为 310.71 kJ/mol，α+β 双相区的应变激活能为 578.78 kJ/mol。经过拟合得到了 TA18 钛合金在单

相区和双相区变形的流变应力本构方程。

在单相区，温度在 900 ~ 1 050 ℃ 时，$\dot{\varepsilon} = 3178\times\sigma^{5.8934}\exp(-310710/8.314T)$在双相区，温度在 750 ~ 900 ℃ 时，$\dot{\varepsilon} = 2.3\times10^{23}\exp(0.0598\sigma)\exp(-578783/8.314T)$。

3）通过对 TA18 钛合金热加工图的分析，确定 TA18 钛合金合理的热加工参数范围为：变形温度 825 ~ 900 ℃，应变速率 0.01 ~ 0.05 s^{-1}。

参考文献

[1] Nicolás Bayona-Carrillo, Nathalie Bozzolo, Jean-Jacques Fundenberger, *et al*. Effect of recrystallization on tensile behavior, texture, and anisotropy of Ti-3Al-2.5V cold pilgered tubes[J]. Advanced Engineering Materials, 2011, 13(5): 383−387.

[2] Murty K Linga, Kishore R, Yan J, *et al*. Effect of annealing temperature on texture and creep anisotropy in Ti3Al2.5V alloy[J]. Materials Science Forum, 2005, 495-497: 1645−1650.

[3] Nan Li, Yang Yashe, Qi Yuanhao, *et al*. Rolling process of high-strength TA18 titanium alloy tubes for aviation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(1): 166−170.
（南莉, 杨亚社, 齐元昊, 等. 航空用高强TA18钛合金管材的轧制工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(1): 166−170.）

[4] Wang Yun, Yun Haiying, Li Wei, *et al*. Comparative study on microstructure and properties of TA18 titanium alloy bars prepared by two processes[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 104−106.
（王云, 韵海鹰, 李维, 等. 两种工艺制备的TA18钛合金棒材组织性能的比较研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 104−106.）

[5] Li Wei, Wang Xing, Kang Cong, *et al*. Effect of process parameters on properties of TA18 titanium alloy bars[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019, (5): 150−151.
（李维, 王兴, 康聪, 等. 工艺参数对TA18钛合金棒材性能的影响[J]. 机械工程与自动化, 2019, (5): 150−151.）

[6] Wu Yaojin, Liu Haijun, Xu Jian, *et al*. Constitutive equations and processing map for hot deformation of a Ti-6Al-4V alloy prepared with spark-plasma sintering[J]. Materials and Technology, 2020, (54): 25−32.

[7] Ji Hongchao, Peng Zhanshuo, Pei Weichi, *et al*. Constitutive equation and hot processing map of TA15 titanium alloy[J]. Materials Science, 2020, (7): 4.

[8] Zener C, Hollom J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22−32.

[9] Shi H, Malaren A J, Sellars C M, *et al*. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1997, 13(3): 210−216.

[10] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136−1139.

[11] Jonas J J, Sellars C M. Strength and structure under hot-working conditions[J]. Metallurgical Reviews, 1969, 130(14): 1−24.

[12] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control[J]. International Materials Reviews, 1998, 43(6): 243.

[13] Liu Jia, Wang Xiahui, Liu Jituo, *et al*. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of Cu-3Ti-3Ni-0.5Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 224−234.

[14] Xu C, Pan J P, Nakata T, *et al*. Hot compression deformation behavior of Mg-9Gd-2.9Y-1.9Zn-0.4Zr-0.2Ca alloy[J]. Materials Characterization, 2017, 124: 40−49.

编辑 唐 肖

宝钛集团特种金属公司 6 m 焊接管道项目投产

11 月 22 日，宝钛特种金属公司 6 m 大直径直缝焊接管道项目投产仪式在宝钛工业园举行。

据悉，6 m 大直径直缝焊接管道项目是宝钛特种金属公司根据市场需求，不断寻求新的利润增长点，在非标设备产业基础上延伸产业链和开发标准化产品的一项重要举措。该项目的建成投产标志着宝钛特种金属公司在国内有色金属大直径直缝焊接管道技术方面已处于领先地位，为今后的发展打下了坚实的基础。

摘自 http://www.baotigroup.com/view.php?id=16851