

## TC21 钛合金热压缩本构方程及热加工图

孙 越, 孙 勇, 杨 勇, 凌云汉, 袁 超, 黄达力

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 为准确获得 TC21 钛合金塑性加工的变形特征和热加工条件, 合理设计锻造工艺参数, 利用 Gleeble-3500 热模拟机进行等温恒应变速率热压缩试验, 研究了 TC21 钛合金在变形温度为 830~1010 ℃、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup> 条件下的热变形行为, 采用 Arrhenius 双曲线正弦函数推导出 TC21 钛合金本构方程。并基于动态材料模型 (Dynamic Materials Model, DMM) 建立了 TC21 钛合金的热加工图。结果表明, 在本试验的变形条件下, 该合金的流变应力随着变形温度的降低和应变速率的升高而增大。根据热加工图确定了合金的热加工安全区域为: 变形温度为 900~940 ℃、应变速率为 0.01~0.05 s<sup>-1</sup> 和变形温度为 970~1010 ℃、应变速率为 0.01~0.08 s<sup>-1</sup>。

**关键词:** 钛合金; 本构方程; 流变应力; 热变形行为; 热加工图

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.032

**中图分类号:** TG146.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0242-07

## Constitutive equation and thermal processing map of thermal compression for TC21 titanium alloy

Sun Yue, Sun Yong, Yang Yong, Ling Yunhan, Yuan Chao, Huang Dali

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to accurately obtain the plastic processing deformation characteristics and thermal processing conditions of TC21 titanium alloy, and reasonably design the forging process parameters, the Gleeble-3500 thermal simulator was used to conduct isothermal thermal compression tests with constant strain rate, and the deformation temperatures of TC21 titanium alloy was 830–1010 ℃, the thermal deformation behavior under the condition of strain rates of 0.01–10 s<sup>-1</sup> was studied, the constitutive equation of TC21 titanium alloy was derived by using the Arrhenius hyperbolic sine function. Based on the dynamic materials model (DMM), the thermal processing map of TC21 titanium alloy was established. The results show that under the deformation conditions of this test, the flow stress of alloy increases with the decreasing of deformation temperature and the increasing of strain rate. According to the thermal processing map, the thermal processing safety zone of alloy is determined as: the deformation temperature of 900–940 ℃, the strain rate of 0.01–0.05 s<sup>-1</sup> and the deformation temperature of 970–1010 ℃, the strain rate of 0.01–0.08 s<sup>-1</sup>.

**Key words:** titanium alloy; constitutive equation; flow stress; thermal deformation behavior; thermal processing map

凭借密度低、比强度高、耐高温和耐腐蚀性好等优点, 钛及钛合金作为关键结构材料被广泛应用于航天航空领域中<sup>[1]</sup>。TC21 钛合金是一种  $\alpha+\beta$  型钛合金, 具有高强度和耐损伤性能<sup>[2-4]</sup>, 作为一种结构材料常应用于制造航天航空和军工领域各种类型的结构锻件和其他部件。

锻造技术是钛合金构件的主要塑性成形方法,

目前, 主要通过改进锻造工艺参数来提高钛合金构件的性能<sup>[5]</sup>。由于 TC21 钛合金难变形、变形抗力大、流动性差、成形温度区间窄等原因, 导致 TC21 钛合金对变形参数非常敏感。为了提升钛合金锻造构件的成形精度、成形性能以及产品合格率等, 一些学者<sup>[6-8]</sup>对此进行了相应的研究, 但国内钛合金锻造技术发展还不够成熟, 仍与国外部分先进国家有较大的差距。

为了准确获得 TC21 钛合金锻造成形特征和热加工条件, 合理地设计锻造工艺参数是实现钛合金锻造生产的重要要求。因此, 本文以 TC21 钛合金为研究对象, 在变形温度为 830~1010 ℃、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup> 条件下进行等温恒应变速率压缩

收稿日期: 2023-03-17; 修订日期: 2023-04-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB3706904)

作者简介: 孙 越 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 578347945@qq.com

通信作者: 孙 勇 (1971-), 男, 博士, 研究员

E-mail: sun\_yong\_89@163.com

试验。研究了该合金的热变形行为,并基于 Arrhenius 双曲线正弦函数建立了 TC21 钛合金本构方程,建立了 TC21 钛合金的热加工图,为合理制定 TC21 钛合金锻造工艺参数提供了一定的指导。

## 1 试验和材料

本文研究的 TC21 钛合金成分为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb,其化学成分组成见表 1。

表 1 TC21 钛合金的化学成分(%,质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of TC21 titanium alloy  
(%, mass fraction)

Si	Cr	Ni	Mo	Nb	Al	Sn	Zr	Ti
0.084	1.56	0.0071	2.86	1.97	6.44	2.06	2.16	余量

压缩试样直径为  $\Phi 8$  mm、高度为 13 mm。基于 Gleeble-3500 型热模拟试验机进行热压缩试验,升温速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ,到温后保温 3 min 使试样均匀受热,之后开始压缩,变形程度为 60%,压缩结束后采用气冷方式进行冷却,冷却速率为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。变形温度  $T$  选取为 830、860、890、920、950、980 和  $1010\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,应变速率  $\dot{\epsilon}$  为 0.01、0.1、1 和  $10\text{ s}^{-1}$ 。

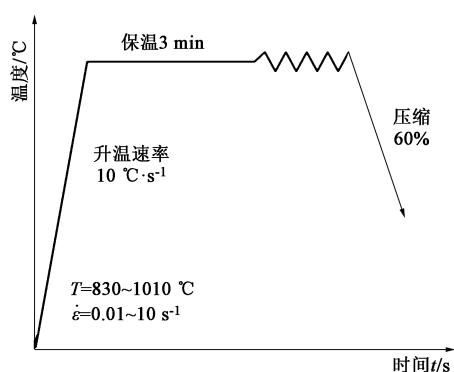


图 1 热压缩试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal compression test

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变行为分析

基于热压缩试验数据绘制的 TC21 钛合金在不同变形条件下的真应力-真应变曲线如图 2 和图 3 所示。图 2 为 TC21 钛合金在变形速率为 0.01、0.1、1 和  $10\text{ s}^{-1}$  下的真应力-真应变曲线。由图 2 可知,当应变速率一定时,峰值应力随着变形温度的升高

而降低。图 3 为 TC21 钛合金在变形温度 890、920、950 和  $980\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的真应力-真应变曲线。由图 3 可知,当变形温度一定时,峰值应力随着应变速率的升高而增大。从图 2 中可以看出,随着真应变的增大、真应力迅速达到峰值,这是加工硬化导致。但随着真应变的继续增大,曲线斜率开始下降,材料开始均匀塑性变形,当加工硬化和动态回复达到平衡时,曲线趋于稳定。高温热变形过程中,材料产生了明显的动态回复和动态再结晶软化行为,动态回复引起的软化过程是位错滑移产生的位错密度降低的结果,由于软化作用导致流变应力趋于稳定。

### 2.2 本构方程的建立

本构方程不仅可以预测材料在不同变形参数下的流变行为,还可以描述材料在热变形过程中的流变行为<sup>[9-10]</sup>。本文采用 Arrhenius 双曲线正弦函数<sup>[11-12]</sup>建立 TC21 钛合金本构方程:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $\sigma$  为应力;  $n$  为应力指数;  $Q$  为变形激活能;  $R$  为摩尔气体常数;  $T$  为变形温度;  $A$  与  $\alpha$  均为常数。

当  $\alpha\sigma \leq 0.8$ , 即低应力水平时:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

当  $\alpha\sigma \geq 1.2$ , 即高应力水平时:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

描述所有应力状态下的 Sellars 双曲正弦形式为:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

对式 (2)、式 (3)、式 (4) 等式取自然对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln \sigma + \ln A_1 - (Q/RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - (Q/RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - (Q/RT) \quad (7)$$

式中:  $\beta$  为加工硬化指数;  $A_1$ 、 $A_2$  为常数,其中  $A_1 = A\alpha^n$ ,  $A_2 = A/2^n$ 。

将不同变形条件下的数据代入式 (5)、式 (6) 中,绘制  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  与  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系曲线,如图 4 所示,求得  $n$ 、 $\beta$  的值。

对  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  进行线性拟合,并计算平均斜率(式 (8)),得到  $n=4.581$ ;对  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  进行线性拟合,并计算平均斜率(式 (9)),得到  $\beta=0.0739\text{ MPa}^{-1}$ ;根据式 (10),可得  $\alpha=0.0161\text{ MPa}^{-1}$ 。

$$n = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \quad (8)$$

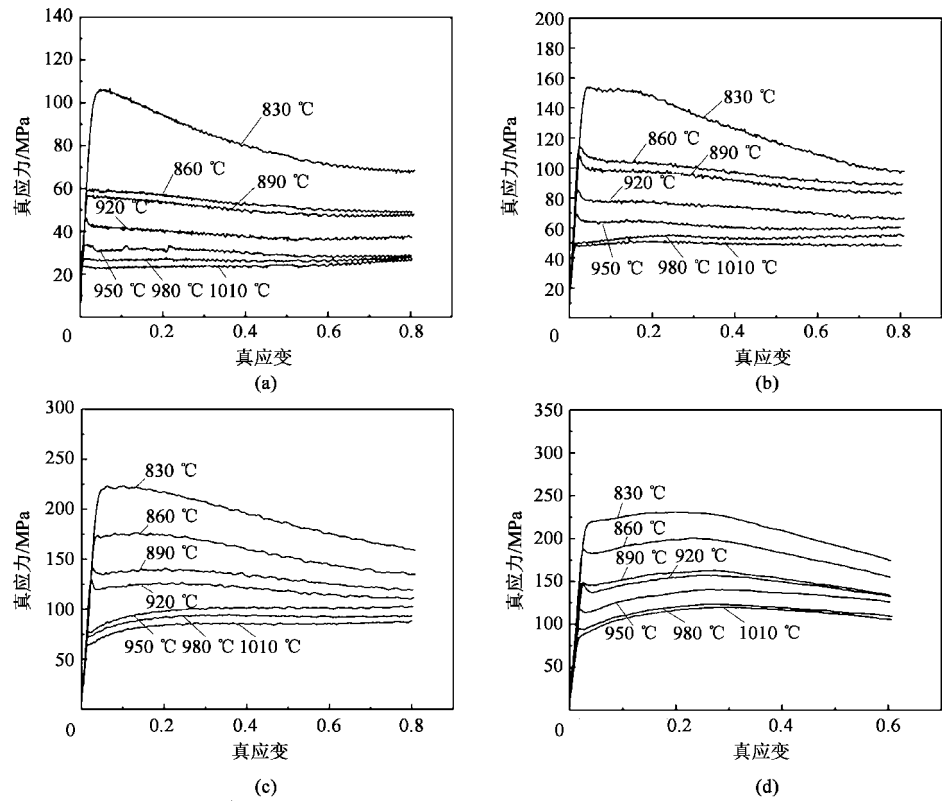


图 2 不同应变速率下的 TC21 钛合金的真应力-真应变曲线

(a)  $0.01\text{ s}^{-1}$  (b)  $0.1\text{ s}^{-1}$  (c)  $1\text{ s}^{-1}$  (d)  $10\text{ s}^{-1}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of TC21 titanium alloy under different strain rates

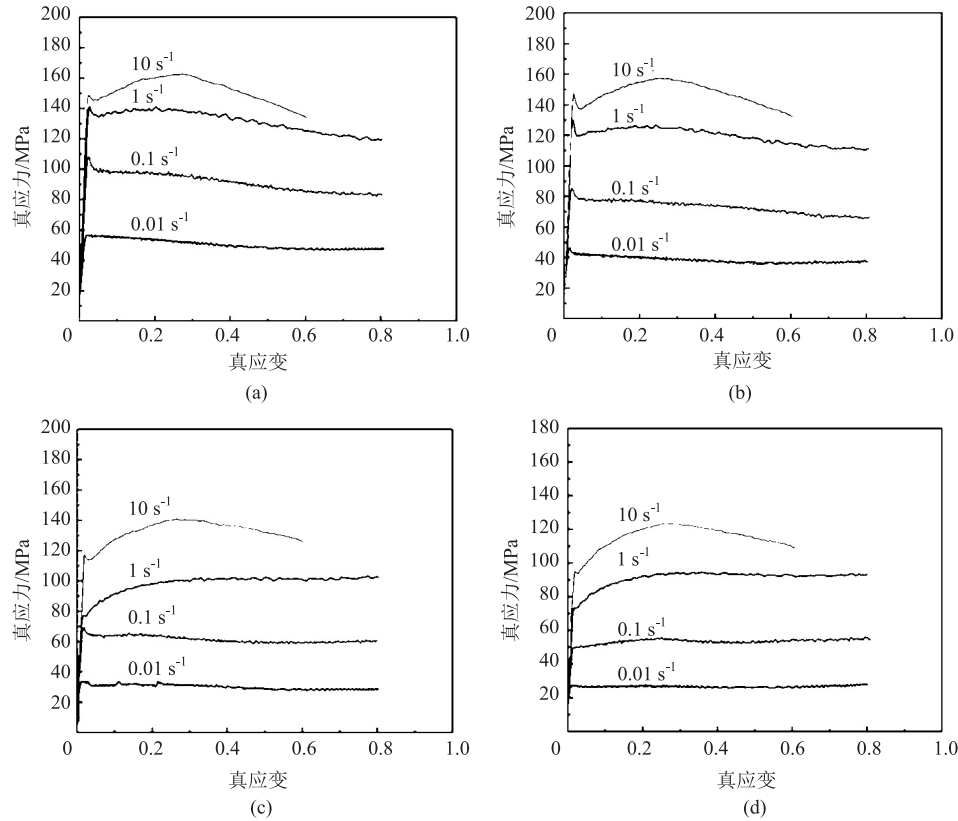


图 3 不同变形温度下的 TC21 钛合金的真应力-真应变曲线

(a)  $890\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b)  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  (d)  $980\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 True stress-true strain curves of TC21 titanium alloy under different deformation temperatures

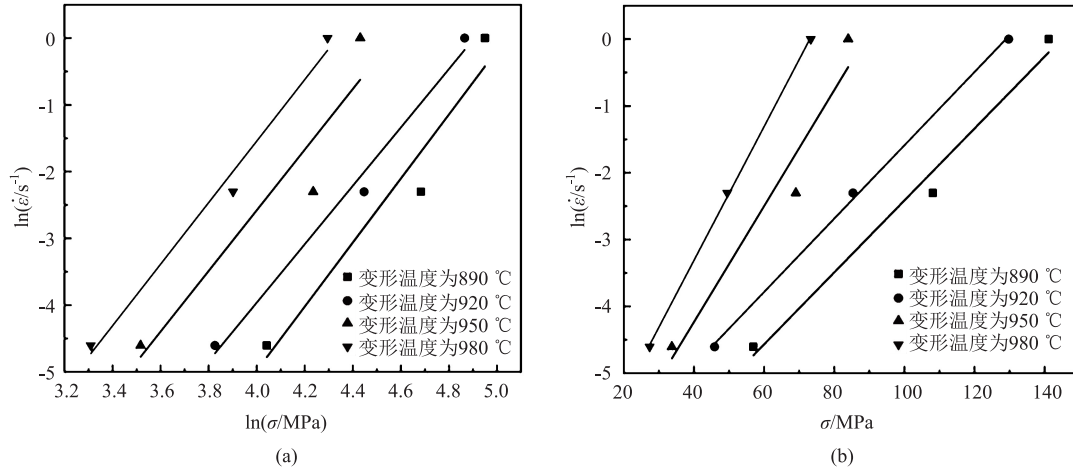


图4 应变速率与应力的关系

(a)  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  (b)  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 

Fig. 4 Relationships between strain rate and stress

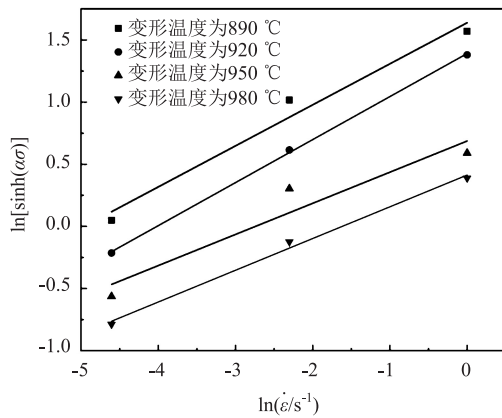
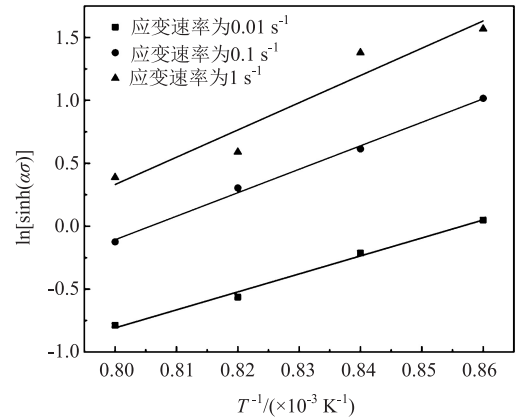
$$\beta = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \quad (10)$$

在一定变形温度或应变速率下, 对式 (7) 微积分得:

$$Q = R \cdot \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]} \right|_T \cdot \left. \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial T^{-1}} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (11)$$

绘制  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - T^{-1}$  关系曲线, 并进行线性拟合。计算求得  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$  直线斜率平均值为 0.2955 (图 5), 因此应变速率敏感系数  $m=0.2955$ ; 计算求得  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - T^{-1}$  直线斜率平均值为 18.208 (图 6), 将结果带入式 (11) 中求得  $Q=512289 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

图5 不同变形温度下 TC21 钛合金的  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  的关系Fig. 5  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$  relationship of TC21 titanium alloy at different deformation temperatures图6 不同应变速率下 TC21 钛合金的  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  与  $T^{-1}$  的关系Fig. 6  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - T^{-1}$  relationship of TC21 titanium alloy at different strain rates

根据式 (7) 可得:

$$A = \dot{\epsilon} [\sinh(\alpha \sigma)]^{-n} \exp(Q/RT) \quad (12)$$

根据 Zener-Holloman 参数  $Z$  可得材料在高温变形过程中, 应变速率与变形温度之间的关系为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \quad (13)$$

$Z$  参数为温度补偿应变速率因子, 对式 (13) 等式两边求自然对数得:

$$\ln Z = n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] + \ln A \quad (14)$$

将不同变形参数带入式 (13)、式 (14) 中, 计算求得不同变形参数下的  $\ln Z$  与  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  的值, 绘制  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  关系图, 并进行线性拟合, 如图 7 所示, 计算得到  $\ln A = 47.5734$ 。根据  $A_1 = A \alpha^n$ ,  $A_2 = A/2^n$ , 计算得  $A = 4.580 \times 10^{20}$ ,  $A_1 = A \alpha^n = 2.795 \times 10^{12}$ ,  $A_2 = A/2^n = 1.914 \times 10^{19}$ 。

综合以上计算结果,可得到 TC21 钛合金的本构关系模型,如式(15)所示。本文确定的 TC21

钛合金本构方程适用范围为:变形温度为 890 ~ 980 °C,应变速率为 0.01 ~ 1 s<sup>-1</sup>。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = 2.795 \times 10^{12} \sigma^{4.581} \exp(-512289/RT), \alpha\sigma \leq 0.8 \\ \dot{\varepsilon} = 1.914 \times 10^{19} \exp(0.0739\sigma) \exp(-512289/RT), \alpha\sigma \geq 1.2 \\ \dot{\varepsilon} = 4.580 \times 10^{20} [\sinh(0.0161\sigma)]^{4.581} \exp(-512289/RT), \alpha\sigma \text{ 取任意值} \end{cases} \quad (15)$$

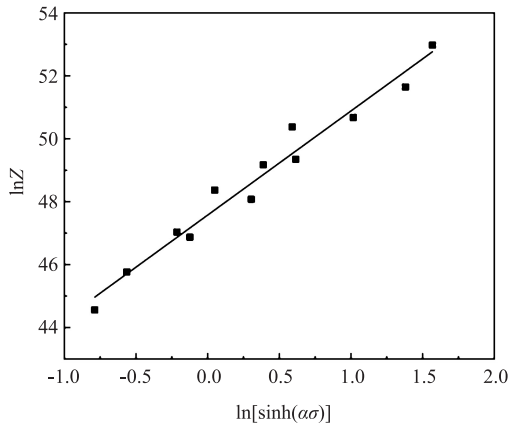


图 7  $\ln Z$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系

Fig. 7 Relationship between  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

### 2.3 热加工图的构建

热加工图是用来优化热加工工艺的重要工具,它记录了不同变形条件(变形温度、应变速率、应变量)下材料的塑性变形能力。利用热加工图可以判断金属材料塑性加工的安全区(如动态再结晶区)和流变失稳区(如空洞区和晶界裂纹区),对合理制定材料锻造工艺参数和精确控制材料微观组织结构具有一定指导意义<sup>[13]</sup>。本文基于 Prasad Y V R K 等<sup>[14]</sup>改进后的动态材料模型的热加工图构建 TC21 钛合金的能量耗散图和失稳图。

热加工图中不同区域对应着不同的变形机理,即不同的组织和性能。材料在热变形过程中,塑性变形所消耗的能量与组织演变所消耗的能量共同构成了材料单位体积内吸收功率  $P$ <sup>[15]</sup>,如式(16)所示:

$$P = G + J \quad (16)$$

式中:  $G$  为功率耗散量;  $J$  为功率耗散协量。

应变速率敏感系数  $m$  决定了吸收功率与功率耗散量和功率耗散协量之间的关系,  $\eta$  为材料的功率耗散因子,由式(17)~式(18)表示:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{1+m} \quad (17)$$

$$J_{\max} = \frac{P}{2} \quad (18)$$

式中:  $J_{\max}$  为最大功率耗散协量。

应变速率敏感系数  $m$  如式(19)所示:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \quad (19)$$

Prasad Y V R K<sup>[16]</sup> 提出了塑性变形过程中材料的流变失稳准则:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(m/m + 1)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \quad (20)$$

式中:  $\xi(\dot{\varepsilon})$  为失稳参数。

图 8 为 TC21 钛合金在真应变为 0.6 时的功率耗散图,由变形温度、应变速率和材料的功率耗散因子构成。其中  $\eta$  数值越大,组织演变消耗能量比例越大。图 9 为 TC21 钛合金在真应变为 0.6 时的失稳图,由变形温度、应变速率和失稳参数构成。失稳图根据不可逆热力学原理,通过  $\xi(\dot{\varepsilon})$  失稳参数来表示塑性变形失稳判据,图 9 中  $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$  部分为失稳区域。

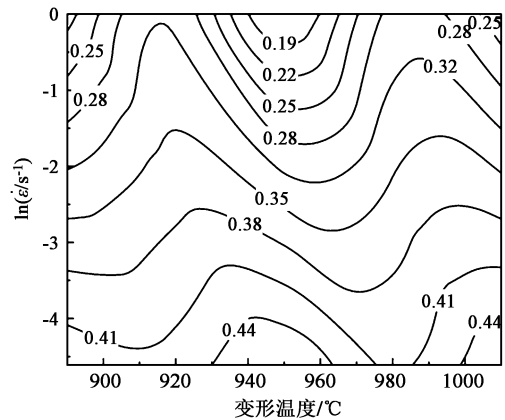


图 8 TC21 钛合金的功率耗散图

Fig. 8 Power dissipation diagram of TC21 titanium alloy

将功率耗散图与失稳图叠加得到 TC21 钛合金的热加工图。在安全区内  $\eta$  越高,材料越容易产生动态再结晶行为,从而导致流变软化逐渐形成稳定流变<sup>[17]</sup>。在失稳区内,外力对材料施加的力大部分转化为塑性变形的能量,导致功率耗散效率降低,因此,在失稳区内的材料容易产生开裂、形成绝热

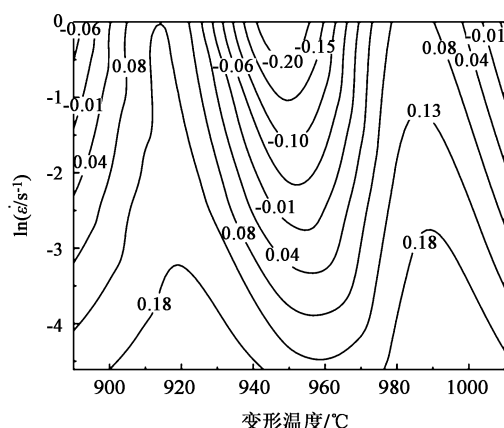


图9 TC21 钛合金的失稳图

Fig. 9 Instability map of TC21 titanium alloy

剪切带、局部塑性变形等缺陷<sup>[18]</sup>。TC21 钛合金在真应变为 0.6 时的热加工图如图 10 所示。图 10 中灰色区域为流变失稳区, 存在 3 个流变失稳区域, 分别为变形温度为 890~900 °C、应变速率为 0.22~1 s<sup>-1</sup>, 变形温度为 930~970 °C、应变速率为 0.05~1 s<sup>-1</sup>, 变形温度为 1000~1010 °C、应变速率为 0.22~1 s<sup>-1</sup>。在这 3 个区域内对 TC21 钛合金进行热加工易产生流变不稳定变形, 在实际生产中应避开这些区域。图 10 中区域 A 和 B 为 TC21 钛合金热加工安全区域, 分别为变形温度为 900~940 °C、应变

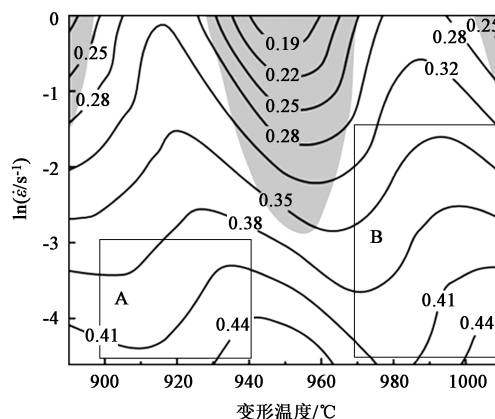
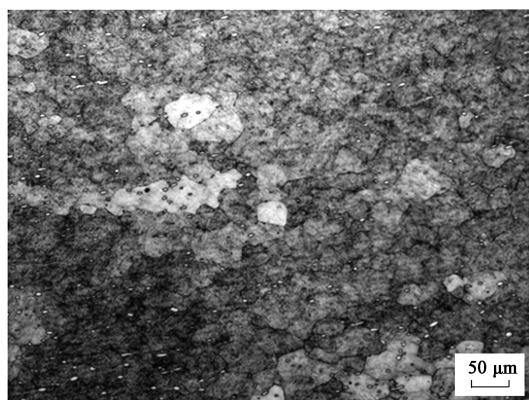


图10 TC21 钛合金热加工图

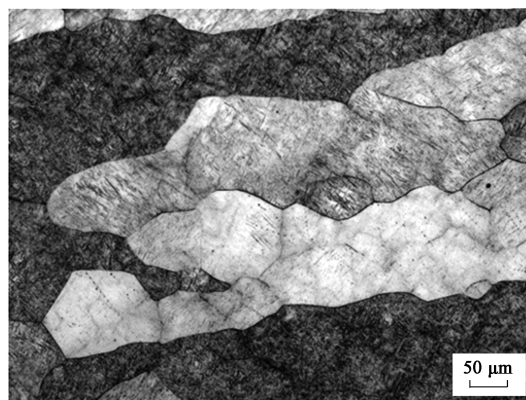
Fig. 10 Thermal processing map of TC21 titanium alloy

速率为 0.01~0.05 s<sup>-1</sup> 和变形温度为 970~1010 °C、应变速率为 0.01~0.08 s<sup>-1</sup>。

图 11a 为 920 °C、0.01 s<sup>-1</sup> 变形参数下合金的微观组织, 图 11b 为 980 °C、0.01 s<sup>-1</sup> 变形参数下合金的微观组织, 分别对应了热加工图的安全区域 A 和 B。从图 11 中可以看出, 经过变形后的 TC21 钛合金的微观组织明显无裂纹、绝热剪切带等缺陷产生。因此, 说明本文所构建的热加工图数据准确, 具有合理性, 为 TC21 钛合金热加工工艺参数的设计提供了科学依据。



(a)



(b)

图11 不同变形参数下的 TC21 钛合金组织

(a) 920 °C, 0.01 s<sup>-1</sup> (b) 980 °C, 0.01 s<sup>-1</sup>

Fig. 11 Microstructures of TC21 titanium alloy under different deformation parameters

### 3 结论

(1) TC21 钛合金在热变形过程中, 其峰值应力随变形温度的降低和应变速率的升高而增大。

(2) 在变形温度为 890~980 °C 和应变速率为 0.01~1 s<sup>-1</sup> 内, TC21 钛合金的平均变形激活能为 512289 J · mol<sup>-1</sup>, 平均应变速率敏感系数为 0.2955, 得到 TC21 钛合金的热变形本构方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 4.580 \times 10^{20} \times [\sinh(0.0161\sigma)]^{4.581} \times$$

$\exp(-512289/RT)$ 。

(3) 构建了 TC21 钛合金热加工图, 基于 Prasad 塑性失稳准则判定出 TC21 钛合金热加工安全区在变形温度为 900~940 ℃、应变速率为 0.01~0.05 s<sup>-1</sup> 和变形温度为 970~1010 ℃、应变速率为 0.01~0.08 s<sup>-1</sup> 内。

#### 参考文献:

- [1] 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展 [J]. 稀有金属, 2006, 30 (6): 850-856.  
Fu Y Y, Song Y Q, Hui S X, et al. Research and application of typical aerospace titanium alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30 (6): 850-856.
- [2] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (2): 280-292.  
Jin H X, Wei K X, Li J M, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (2): 280-292.
- [3] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 44-50.  
Zhu Z S. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34 (4): 44-50.
- [4] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 51-61.  
Zhao Y Q, Ge P. Current situation and development of new titanium alloys invented in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34 (4): 51-61.
- [5] 宗影影, 王琪伟, 袁林, 等. 航空航天复杂构件的精密塑性体积成形技术 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 1-15.  
Zong Y Y, Wang Q W, Yuan L, et al. Precision plastic volume forming technology for aerospace complex components [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 1-15.
- [6] 王新南, 朱知寿, 童路, 等. 锻造工艺对 TC4-DT 和 TC21 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 稀有金属快报, 2008, 319 (7): 12-16.  
Wang X N, Zhu Z S, Tong L, et al. The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of damage-tolerant titanium alloy [J]. Materials China, 2008, 319 (7): 12-16.
- [7] 张利军, 常辉, 薛祥义. 等温锻造技术及其在航空工业中的应用 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (21): 21-24.  
Zhang L J, Chang H, Xue X Y. Isothermal forging technology and its application in aviation industry [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (21): 21-24.
- [8] 张智, 巨建辉, 戚运莲, 等. 钛合金锻造工艺及其锻件的应用 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (23): 34-37.  
Zhang Z, Ju J H, Qi Y L, et al. Forging technology of titanium alloy and application of forgings [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (23): 34-37.
- [9] Han Y, Liu G W, Zou D N, et al. Deformation behavior and microstructural evolution of as-cast 904L austenitic stainless steel during hot compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 565: 342-350.
- [10] Xia L L, Xu Y, El-Aty A A, et al. Deformation characteristics in hydro-mechanical forming process of thin-walled hollow component with large deformation; Experimentation and finite element modeling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 4705-4714.
- [11] 王忠堂, 张士宏, 齐广霞, 等. AZ31 镁合金热变形本构方程 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18 (11): 1977-1982.  
Wang Z T, Zhang S H, Qi G X, et al. Constitutive equation of thermal deformation for AZ31 magnesium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18 (11): 1977-1982.
- [12] 于以标, 陈乐平, 徐勇, 等. 2060-T8E30 铝锂合金的热变形行为及本构模型 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (12): 4388-4394.  
Yu Y B, Chen L P, Xu Y, et al. Hot deformation behavior and constitutive model of 2060-T8E30 Al-Li alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (12): 4388-4394.
- [13] 鲁世强, 李鑫, 王克鲁, 等. 基于动态材料模型的材料热加工工艺优化方法 [J]. 中国有色金属学报, 2007, 99 (6): 890-896.  
Lu S Q, Li X, Wang K L, et al. Optimizing approach of materials hot working processes based on dynamic material model [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 99 (6): 890-896.
- [14] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1984, 15: 1883-1892.
- [15] 曲凤盛, 周杰, 刘旭光, 等. TC18 钛合金热压缩本构方程及热加工图 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (1): 120-124.  
Qu F S, Zhou J, Liu X G, et al. Constitutive equation and processing map of thermal deformation for TC18 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (1): 120-124.
- [16] Prasad Y V R K. Recent advances in the science of mechanical processing [J]. Indian J. Technol., 1990, 28: 435-451.
- [17] Robi P S, Dixit U S. Application of neural networks in generating processing map for hot working [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 289-294.
- [18] 谭志龙, 尹畅畅, 闻明, 等. NiPt15 合金热变形行为及热加工图研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (11): 4149-4156.  
Tan Z L, Yin C C, Wen M, et al. Hot deformation behavior and hot processing maps of NiPt15 alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (11): 4149-4156.