

## 材料分析及测试

## 基于摩擦修正的 TA15 钛合金热变形行为及加工图

姚彭彭, 李萍, 李成铭, 薛传妹, 薛克敏

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 目的 采用 Gleeble-3500 热模拟实验机, 研究 TA15 钛合金在变形温度为 900~1050 °C、应变速率为 0.01~1 s<sup>-1</sup> 条件下的热压缩流变行为及变形组织。**方法** 采用一种简单有效的方法修正了 TA15 钛合金热压缩实验中摩擦引起的误差; 计算出了 TA15 钛合金的应力指数和热变形激活能, 建立了含有 Z 参数的双曲正弦函数形式本构方程; 基于 Murty 准则, 建立了其加工图。**结果** TA15 钛合金的热压缩流变行为可采用含有 Z 参数的双曲正弦函数形式本构方程来描述, 其平均变形激活能为 625.884 kJ/mol; 通过分析热加工图, 确定了最优热变形工艺参数为:  $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 。**结论** 研究结果可为 TA15 钛合金的塑性变形数值模拟提供基础, 对合理制定热加工工艺具有重要指导意义。

**关键词:** TA15 钛合金; 热变形; 摩擦修正; 本构方程; 加工图

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.009

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2014)04-0046-06

### Hot Deformation Behavior and Processing Map of TA15 Titanium Alloy Based on Friction Correction

YAO Peng-peng, LI Ping, LI Cheng-ming, XUE Chuan-meい, XUE Ke-min

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The flow stress behavior and deformation microstructure of hot compressed TA15 titanium alloy were investigated by hot compression tests on Gleeble-3500 thermal simulation machine in the strain rate range of 0.01~1 s<sup>-1</sup> and temperature range of 900~1050 °C. **Methods** A simple and effective correction method was adopted to reduce the errors caused by friction during the compression process of TA15 titanium alloy. The stress exponent and hot deformation activation energy at elevated temperature were calculated, and the constitutive equation including Z parameter was established on the basis of hyperbolic sine function model. Based on Murty criteria the processing map was obtained. **Results** The hot deformation behavior of TA15 titanium alloy could be described by a constitutive equation in hyperbolic sine function including Z parameter and the average hot deformation activation energy was 625.884 kJ/mol. The optimal thermal deformation process parameters were  $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$  by analyzing the processing map. **Conclusion** The results pro-

收稿日期: 2014-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175137); 安徽省自然科学基金资助项目(1308085JGD02)

作者简介: 姚彭彭(1991—), 男, 安徽阜阳人, 合肥工业大学硕士生, 主要研究方向为先进钛合金成形及组织性能控制技术。

通讯作者: 李萍(1973—), 女, 哈尔滨人, 教授, 博导, 主要研究方向为精密塑性成形技术及组织性能控制。

vided a basis for numerical simulation of plastic deformation and an important guiding significance for the rational development of thermal processing of TA15 titanium alloy.

**KEY WORDS:** TA15 titanium alloy; hot deformation; friction correction; constitutive equation; processing map

作为一种高 Al 当量的近  $\alpha$  型钛合金,TA15 钛合金由于具有较高的比强度、抗蠕变性和耐腐蚀性以及良好的焊接性能,在航空领域得到了广泛应用,如制造飞机隔框、壁板等受力复杂的重要结构零件<sup>[1-2]</sup>。钛合金材料属于难变形材料,TA15 合金更是一种热敏感型和速率敏感型材料,因此对于钛合金的热变形行为、热变形工艺参数对流变应力的影响、材料本构关系及加工图的系统研究较为重要<sup>[3-7]</sup>。文中在 TA15 钛合金相变点附近进行双相组织(即  $\alpha+\beta$  双相组织)的等温压缩实验,来研究流变应力与变形温度、应变速率的关系,采用修正后的流变应力建立其热变形的本构方程,基于 Murty 准则建立其加工图,并优化出合理的热变形参数。研究结果为 TA15 钛合金的塑性变形数值模拟提供重要基础,对合理制定其热加工工艺具有重要指导意义。

## 1 实验及实验数据修正

### 1.1 实验方案

实验材料为 TA15 钛合金,名义化学成分(质量分数,%)为 Al-6.96,V-2.31,Zr-2,Mo-1.7,其余由 Ti 平衡,相变点为 995 °C。在 Cleeble-3500 型热模拟实验机上进行 TA15 钛合金恒应变速率等温热压缩实验,采用  $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的圆柱形试样,变形温度为 900,950,1000,1050 °C,应变速率为 0.01,0.1,1.0  $\text{s}^{-1}$ ,变形程度为 60%;加热规范:以 10 °C/s 的速度升温到相应变形温度,然后保温 3 min(1000 °C 以上温度只保温 1 min),然后进行等温压缩变形实验。为减少压头与试样表面的摩擦,在试样两端加上钽片和润滑剂。

### 1.2 实验数据修正

对于单向热模拟压缩实验,影响实验精度的主要因素包括试样端面的摩擦力和试样变形过程中的温度。本实验在较高的温度和合适的应变速

率下进行,变形过程中由于温度变化引入的误差较小,但压头与试样间由于存在摩擦,压缩后的试样出现明显“鼓肚”现象,给流变应力曲线带来一定的误差,应给予修正。热压缩变形前后试样的示意图如图 1 所示,采用一种简单有效的方法对实验数据进行摩擦修正,修正后的应力  $\sigma$  由式(1)求出<sup>[8-9]</sup>:

$$\sigma = \frac{P \left( \frac{2mR}{h} \right)^2}{2 \left[ \exp \left( \frac{2mR}{h} \right) - \frac{2mR}{h} - 1 \right]} \quad (1)$$

式中:P 为修正前真应力;  $h = h_0 - \Delta h$ ,  $h$  为试样瞬时高度,  $h_0$  为试样初始高度,  $\Delta h$  为瞬时对应压下量;  $R$  为试样瞬时半径,  $R_0$  为试样初始半径,  $R = R_0 \sqrt{h_0/h}$ ;  $m$  为摩擦因子,采用式(2)计算:

$$m = \frac{(R_1/h_1)b}{(4/\sqrt{3}) - (2b/3\sqrt{3})} \quad (2)$$

式中:  $R_1 = R_0 \sqrt{h_0/h_1}$ ,  $h_1$  为压缩结束后试样高度;  $b = 4 \frac{\Delta R}{R_1} \cdot \frac{h_1}{\Delta h_1}$ , 其中  $\Delta R = R_M - R_T$ ,  $R_M$  为最大鼓肚半径,  $R_T$  为与压头接触的试样底面半径,  $\Delta h_1$  为压缩后试样高度变化量。

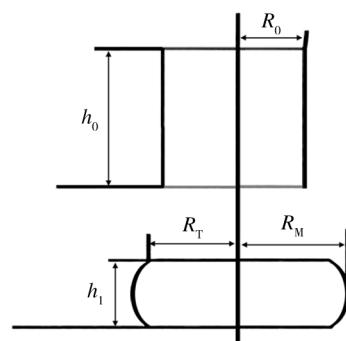


图 1 热压缩试样示意图

Fig. 1 Schematic of hot compression specimen

根据式(1)~(5)可计算出修正后的流变应力,图 2 所示为 TA15 钛合金热压缩变形修正后的流变应力曲线。

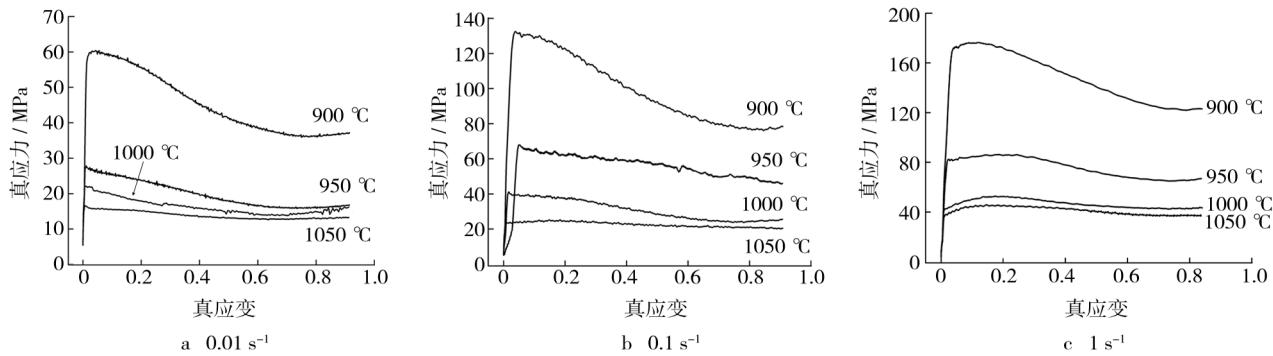


图2 TA15钛合金修正后的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of TA15 titanium alloy after correction

## 2 热变形本构方程

根据TA15钛合金修正后的真应力-真应变曲线,确定其在不同热变形条件下的峰值流变应力。从图2可以看出,TA15钛合金是一种温度敏感型和速率敏感型材料,即在热变形过程中,变形温度越低或者应变速率越高,峰值流变应力越高<sup>[10]</sup>。众多研究结果表明,由于合金热变形是一受热激活控制的过程,可以通过以宏观工艺参数(应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 、温度 $T$ )为基础的数学模型来描述其流变行为;不同应力条件下,流变应力 $\sigma$ (文中选取峰值流变应力)和宏观工艺参数之间的数学表达式如下所示<sup>[11-14]</sup>。

1) 低应力条件下,金属的流变可以通过指数模型来描述:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

2) 高应力条件下,金属的流变可以通过幂指数模型来描述:

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (6)$$

2) 所有应力状态下,金属的流变可以通过双曲正弦模型来描述:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (7)$$

式中: $Q$ 为激活能; $R$ 为摩尔气体常数; $T$ 为变形温度; $\sigma$ 为流变应力; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $A_1$ , $A_2$ , $A$ , $n_1$ , $n$ , $\alpha$ 和 $\beta$ 为相应的材料常数,与变形温度无关。

ZENER和HOLLOMON提出并验证了应变速率和温度的关系可用一项 $Z$ 参数表示,又被称为温度补偿应变速率因子,其定义如下:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)] = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (8)$$

对式(5)和(8)分别取自然对数可得:

低应力条件下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 - Q/(RT) + n_1 \ln \sigma \quad (9)$$

低应力条件下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 - Q/(RT) + \beta \sigma \quad (10)$$

所有应力状态下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A - Q/(RT) + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (12)$$

由式(8)–(10)可知,当变形温度一定时, $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 曲线的斜率分别为 $n_1$ 和 $\beta$ ,采用一元线性回归拟合,可得到 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 曲线。通过 $\alpha = \beta/n_1$ 关系式计算出不同温度下的参数 $\alpha$ ,将 $\alpha$ 带入式(11)进行线性回归,即可得到 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/K$ 关系曲线,如图3所示。

对式(11)进行偏微分可得到变形激活能 $Q$ :

$$Q = R \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \Big|_{\dot{\varepsilon}} \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \Big| \quad (13)$$

将 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/K$ 曲线的斜率值,以及气体常数 $R$ 代入式(13),求得TA15钛合金的变形激活能,见表1,并且计算出平均变形激活能为 $Q = 625.88455 \text{ kJ/mol}$ 。

表1 TA15钛合金不同热变形条件下的变形激活能

Table 1 Activation energy ( $Q$ ) of TA15 alloy under different deformation conditions

$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$			
	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C
1	522.050	675.519	746.253	698.248
0.1	534.462	691.580	763.996	714.850
0.01	427.049	552.591	610.453	571.184

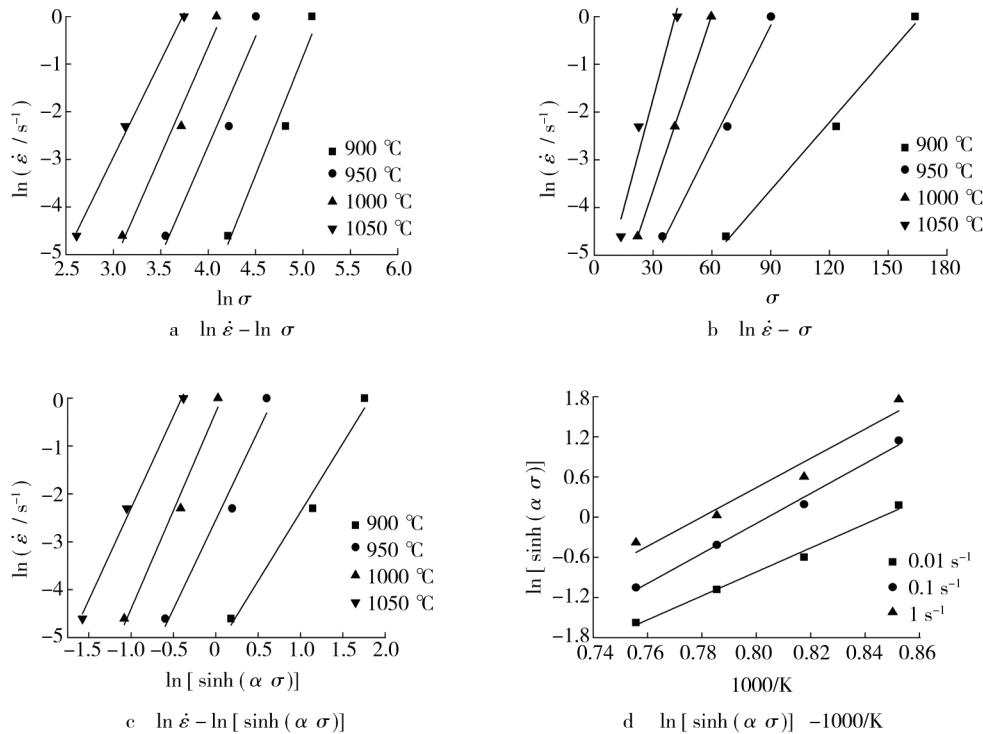


图3 TA15钛合金峰值流变应力与应变速率、变形温度的关系

Fig. 3 Relationships between peak flow stress and strain rate, deformation temperature of TA15 titanium alloy

将以上求得的参数代入式(12),通过线性回归获得 $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 之间的关系曲线,如图4所示。可以看出两者之间很好地满足线性关系,说明可用包含Z参数的双曲正弦函数形式的本构模型来描述TA15钛合金的流变应力行为。对图4进行一元线性回归分析,求得结构因子 $A=2.5104\times10^{25}\text{ s}^{-1}$ 。将求得的材料参数代入式(7),得到TA15钛合金热压缩时的流变本构方程如下:

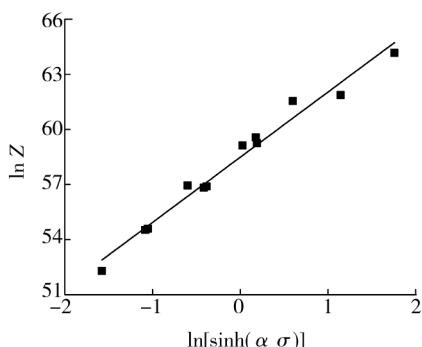


图4 TA15钛合金的峰值流变应力与Z参数的关系

Fig. 4 Relationship between peak flow stress and Z parameter of TA15 titanium alloy

$$\dot{\varepsilon}=2.5104\times10^{25}[\sinh(0.0150747\sigma)]^{3.54904} \cdot \exp(-625.88455\times10^3/RT)$$

根据双曲正弦函数的定义,可以将流变应力 $\sigma$ 表述为Z参数的函数<sup>[15]</sup>:

$$\sigma=\frac{1}{\alpha}\ln\left\{\left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n}+\left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{2/n}+1\right]^{1/2}\right\} \quad (14)$$

将Q值代入式(4)可得Z参数的表达式,进而可得用Z参数表示的峰值应力 $\sigma$ 、应变速率和温度T的本构关系式:

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp[625.88455\times10^3/(RT)] \quad (15)$$

$$\sigma=\frac{1}{0.0150747}\ln\left\{\left(\frac{Z}{e^{58.48507}}\right)^{1/3.54904}+\left[\left(\frac{Z}{e^{58.48507}}\right)^{2/3.54904}+1\right]^{1/2}\right\} \quad (16)$$

### 3 热加工图及分析

根据动态材料模型理论,耗散量 $G$ 和协耗散量 $J$ 两个部分组成了材料在热加工过程中单位体积内吸收的能量<sup>[16]</sup>,可用式(17)表示:

$$P=\bar{\sigma}\cdot\dot{\varepsilon}=G+J=\int_0^\sigma\sigma d\dot{\varepsilon}+\int_0^\sigma\dot{\varepsilon}d\sigma \quad (17)$$

式中:耗散量  $G$  大部分转化成粘塑性热,其余以晶体缺陷能的形式存储,这是由于材料发生塑性变形而引起的功率消耗,用协耗散量  $J$  表示材料变形过程中显微组织演化所消耗的能量。应变速率敏感指数  $m$  表示热加工过程中系统能量的瞬时分配比例:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\dot{\varepsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\varepsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \quad (18)$$

当协耗散量  $J$  达到最大值  $J_{\max}$  时,材料处于理想线性耗散状态,可以用式(19)表示,而表示材料成形过程中显微组织演变耗散的能量与线性耗散能量关系的功率耗散因子  $\eta$ ,则可以用式(20)表示,将耗散效率因子  $\eta$  的等值分布图绘制在  $T-\lg \dot{\varepsilon}$  的二维平面内,即可得到功率耗散效率图。文中采用 MURTY 提出的对任意流变应力-应变关系均适用的失稳评判准则来建立失稳图,失稳系数  $\xi$  与应变速率敏感指数  $m$  有关,如式(21)所示<sup>[17]</sup>:

$$J = J_{\max} = \frac{P}{2} = \frac{\dot{\varepsilon} \sigma}{2} \quad (19)$$

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (20)$$

$$\xi = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (21)$$

根据上述原则和方法,计算出 TA15 钛合金在不同热变形参数下的应变速率敏感性指数  $m$ 、功率耗散系数  $\eta$  和稳定性函数  $\xi(\dot{\varepsilon})$ ,在  $T-\lg \dot{\varepsilon}$  二维平面内,将绘制的耗散图和失稳图叠加,进而得到应变量为 0.6 时,TA15 钛合金的加工图,如图 5 所示。图中阴影部分代表热加工失稳区,可以发现,当应变量为 0.6 时 TA15 钛合金存在一个加工失稳区:变形温度为 900~928 °C、应变速率为 1~0.27 s<sup>-1</sup>;而

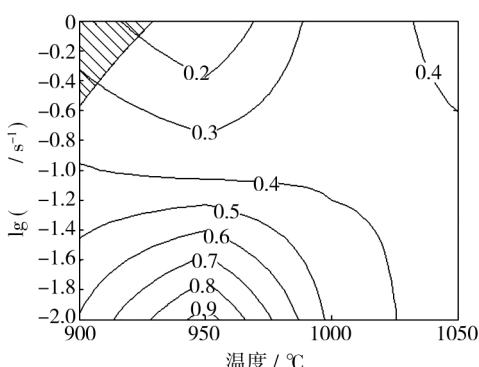


图 5 应变量为 0.6 时 TA15 钛合金的热加工图

Fig. 5 Processing map of TA15 titanium alloy at a strain of 0.6

对于加工图中的流变安全区,如果  $\eta$  值越大,即能量耗散效率越低,则可能发生了动态软化机制,比如动态再结晶、动态回复等,再结晶和回复都有利于材料的塑性加工<sup>[18-19]</sup>,因此这些区域对应的变形温度和变形速率一般便是最优的加工工艺参数。从图 5 中可以看出,本实验条件下,TA15 钛合金的最佳热变形工艺参数为  $T=950$  °C,  $\dot{\varepsilon}=0.01$  s<sup>-1</sup>。

## 4 结论

1) 采用一种简单有效的方法对恒应变等温压缩实验数据进行了摩擦修正,获得了 TA15 钛合金准确的流变应力曲线。

2) TA15 钛合金的平均变形激活能为 625.884 kJ/mol。流变应力、变形温度和应变速率之间的关系可用双曲正弦函数的本构方程描述:

$$\dot{\varepsilon} = 2.5104 \times 10^{25} [\sinh(0.0150747\sigma)]^{3.54904} \cdot \exp(-625.88455 \times 10^3 / RT)$$

流变应力也可用  $Z$  参数来描述:

$$\sigma = \frac{1}{0.0150747} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{e^{58.48507}} \right)^{1/3.54904} + \left[ \left( \frac{Z}{e^{58.48507}} \right)^{2/3.54904} + 1 \right]^{1/2} \right\}$$

3) 绘制出应变量为 0.6 时 TA15 钛合金的热加工图,确定了 TA15 钛合金合理的热变形工艺参数为  $T=950$  °C,  $\dot{\varepsilon}=0.01$  s<sup>-1</sup>。

## 参考文献:

- [1] WU Cheng-bao, YANG He, FAN Xiao-guang, et al. Dynamic Globularization Kinetics during Hot Working of TA15 Titanium Alloy with Colony Microstructure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(9): 1963—1969.
- [2] LIU Rui, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, et al. Dynamic Fracture Toughness of TA15ELI Alloy Studied by Instrumented Impact Test [J]. Rare Metals, 2010, 29 (6): 608—612.
- [3] 孙志超,杨合,沈昌武.基于逐步回归法的 TA15 钛合金本构模型的建立[J].锻压技术,2008,33(24): 110—115.  
SUN Zhi-chao, YANG He, SHEN Chang-wu. Establishment of TA15 Titanium Alloy Constitutive Model Based on Stepwise Regression Method[J]. Forging and Stamping

- Technology, 2008, 33(24): 110—115.
- [4] 权国政, 赵磊, 张艳伟, 等. Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 合金热变形激活动态再结晶的临界条件识别及表征 [J]. 功能材料, 2012, 43(2): 222—230.  
QUAN Guo-zheng, ZHAO Lei, ZHANG Yan-wei, et al. An Identification and Characterization for the Dynamic Recrystallization Critical Conditions of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V Alloy [J]. Journal of Functional Material, 2012, 43(2): 222—230.
- [5] 梁业, 郭鸿镇, 刘鸣, 等. TA15 合金高温本构方程的研究 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(4): 150—154.  
LIANG Ye, GUO Hong-zhen, LIU Ming, et al. Study on Constitutive Equations for Hot Deformation of TA15 Alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(4): 150—154.
- [6] 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(1): 3599—3604.
- [7] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H, et al. Hot Working Behavior of Near  $\alpha$  Alloy IMI834 [J]. Journal of Materials Science and Engineering A, 2005, 396: 50—60.
- [8] 张伟红, 张士宏. NiTi 合金热压缩实验数据的修正及其本构方程 [J]. 金属学报, 2006, 42(10): 1036—1040.  
ZHANG Wei-hong, ZHANG Shi-hong. Correction of Hot Compression Test Data and Constitutive Equation of NiTi Alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(10): 1036—1040.
- [9] 刘大博, 杨守杰, 王克鲁, 等. 2D70 铝合金热变形行为及加工图 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2077—2082.  
LIU Da-bo, YANG Shou-jie, WANG Ke-lu, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of Aluminum Alloy 2D70 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2077—2082.
- [10] 李成铭, 李萍, 赵蒙, 等. TA15 钛合金高温压缩变形行为与组织研究 [J]. 航空材料学报, 2013, 33(3): 25—29.  
LI Cheng-ming, LI Ping, ZHAO Meng, et al. Mechanical Behavior and Microstructure of TA15 Titanium Alloy during Hot Compression Deformation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(3): 25—29.
- [11] 段永华, 孙勇, 何建洪, 等. Pb-Mg-Al 合金的热变形行为与加工图 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 311—319.  
DUAN Yong-hua, SUN Yong, HE Jian-hong, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of Pb-Mg-Al Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 311—319.
- [12] VO P, JAHAZI M, YUE S, et al. Flow Stress Prediction during Hot Working of Near  $\alpha$  Titanium Alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 447: 99—110.
- [13] 孙朝阳, 刘金榕, 李瑞, 等. Incoloy 800H 高温变形流动应力预测模型 [J]. 金属学报, 2011, 47(2): 191—196.  
SUN Chao-yang, LIU Jin-rong, LI Rui, et al. Constitutive Modeling for Elevated Temperature flow Behavior of Incoloy 800H Superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2): 191—196.
- [14] 周舸, 丁桦, 曹富荣, 等. TC21 合金的热压缩变形行为及变形机理 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2111—2118.  
ZHOU Ge, DING Hua, CAO Fu-rong, et al. Hot Compression Deformation and Deformation Mechanisms of TC21 Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2111—2118.
- [15] WEISS I, SEMIATIN S L. Thermomechanical Processing of Beta Titanium Alloys—an Overview [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, A243(1/2): 46—65.
- [16] 孙欢迎, 曹京霞, 王宝, 等. 应用加工图技术优化阻燃钛合金高温变形工艺 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2351—2355.  
SUN Huan-ying, CAO Jing-xia, WANG Bao, et al. Optimization of Hot Deformation Parameters of Burn Resistant Titanium Alloy by Using Processing Map [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2351—2355.
- [17] NARAYANA M S V S, NAGESWARA R B, KASHYAP B P. Instability Criteria for Hot Deformation of Materials [J]. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 15—26.
- [18] 刘金豪, 刘建生, 熊运森, 等. TC4-DT 钛合金的热变形行为研究及加工图 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8): 1674—1678.  
LIU Jin-hao, LIU Jian-sheng, XIONG Yun-sen, et al. Hot Deformation and Processing Maps of TC4-DT Titanium Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(8): 1674—1678.
- [19] LUO Jiao, LI Miao-quan, YU Wei-xin. Microstructure Evolution during High Temperature Deformation of Ti-6Al-4V Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1323—1328.