

TA15 钛合金高温热压缩变形行为及热加工图

徐 猛¹, 贾蔚菊², 张志豪¹, 谢建新¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 获得准确的钛合金塑性变形特征和热加工条件, 是钛合金挤压、轧制等塑性加工工艺参数选择的重要依据。本实验研究了 TA15 钛合金在应变速率 $0.01\sim 20\text{ s}^{-1}$ 、变形温度 $850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的压缩变形行为、组织特征, 采用 Arrhenius 双曲正弦函数模型推导出了 TA15 本构方程, 基于动态材料模型建立了合金在真应变 $0.1\sim 0.7$ 时的热加工图。结果表明, 在本实验的应变速率和变形温度的条件下进行压缩变形, 随着变形温度的升高, 合金中的 α 相逐渐向 β 相转变; 随着应变速率的提高, α 相向 β 相转变的程度逐渐减小。根据热加工图确定了合金的两个热加工安全区域: (1) 变形温度 $950\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率 $0.01\sim 0.37\text{ s}^{-1}$; (2) 变形温度 $875\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率 $1.65\sim 13.5\text{ s}^{-1}$ 。

关键词: TA15 钛合金; 热模拟实验; 流变应力; 动态再结晶; 热加工图

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2708-06

钛合金具有密度小、耐腐蚀性好、强度高以及耐高温等诸多优良特性, 是航空航天、海洋工程、国防军工等领域的关键材料^[1-3]。

TA15 钛合金是一种近 α 钛合金, 名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。与 TC4 等常用钛合金相比, 该合金最主要的特点之一就是焊接性能良好 (与其它钛合金互焊的焊缝强度系数可达 $90\%\sim 95\%$), 在焊接性能要求较高的承力框、密封舱等重要结构件方面具有广泛应用。

挤压是钛合金棒材、管材、型材的主要塑性成形方法, 由于钛合金挤压温度高、与模具材料反应严重、制品性能对变形温度较为敏感等原因, 挤压 (尤其是型材挤压) 过程的金属流动行为、表面质量、组织性能均匀性等控制要求较高。我国现在钛挤压技术发展较为缓慢, 虽然一些学者^[4-7]对钛合金管材和型材挤压成形的组织性能进行了相关研究, 但在挤压制品性能的稳定性、成品率、尺寸精度、成本等方面严重落后美国和俄罗斯等国家, 在一定程度上制约了我国钛合金制品在重大工程等领域的应用。

获得准确的钛合金塑性变形特征和热加工条件, 合理设计模具结构和优化挤压参数, 是实现钛合金型材挤压生产的前提。为此, 本实验采用 Gleeble-3800 热模拟试验机, 研究了 TA15 钛合金在应变速率 $0.01\sim 20\text{ s}^{-1}$ 、变形温度 $850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的压缩变形

行为, 在此基础上建立了合金在真应变 $0.1\sim 0.7$ 时的热加工图, 结合不同变形条件下的合金组织特征分析, 获得了合金的热加工安全区。相关研究结果可为 TA15 钛合金挤压、轧制等塑性加工工艺参数的选择及制品性能、质量控制提供参考。

1 实 验

实验材料为锻造退火态 TA15 钛合金, 合金的化学成分如表 1 所示, 主要元素为 Ti、Al、Mo、V、Zr。合金的组织如图 1 所示, 由 α 相(暗区)和 β 相(亮区)两相组成, 以 α 相为主。

在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行热压缩实验, 试样尺寸为 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$, 压缩时在试样两端添加石墨片或钼片 (低温 $850\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时加钼片, 高温 $1000\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时加石墨片), 以减小试样与压头间的摩擦系数, 减小试样不均匀变形导致的实验误差。根据合金相图确定热压缩实验条件为: 变形温度为 $850\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度间隔 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率分别为 $0.01, 0.1, 1, 10$ 和 20 s^{-1} , 加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 保温 5 min ,

表 1 TA15 钛合金的化学成分

Table 1 Composition of TA15 titanium alloy ($\omega/\%$)							
Al	Mo	V	Zr	Fe	C	N	Ti
6.33	1.55	1.94	1.66	0.054	0.01	0.01	Bal.

收稿日期: 2016-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0300900)

作者简介: 徐 猛, 男, 1990 年生, 硕士生, 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083, 电话: 010-62332253, E-mail: 13164238344@163.com

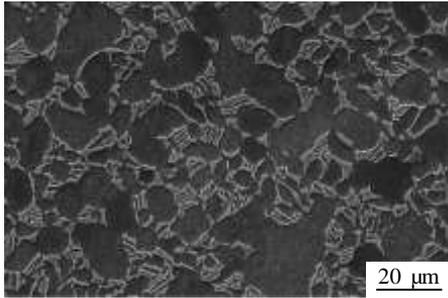


图 1 TA15 钛合金坯料组织

Fig.1 Microstructure of TA15 titanium alloy billet

工程应变为 70%，压缩实验结束后立即水淬，以保留高温变形组织。将试样沿轴向剖开，采用 ZEISS EVO-18 Special Edition 扫描电子显微镜观察剖面中心部位的组织形貌。

2 结果与讨论

2.1 TA15 钛合金的压缩应力-应变曲线和变形组织特征

TA15 钛合金在不同变形条件下压缩真应力-真应变曲线如图 2 所示。Ti-Al 合金由于层错能低，动态再结晶容易发生^[8]，所以 TA15 钛合金的变形温度及应变速率显著影响动态再结晶过程，变形温度的增加和应变速率的降低，均对合金的动态再结晶有明显影响。

由图 2 可以看出，当应变速率相同时，在较高的变形温度（1000 和 1050 °C）下，随变形量的增大，合金的流动应力基本不变，说明动态再结晶导致的软化和加工硬化相互抵消；在较低的变形温度（850~950 °C）下，随变形量增大，流变应力明显下降，说明随着变形的进行，动态回复和动态再结晶所起的软化作用逐渐大于加工硬化作用。

在较低的变形温度（850~950 °C）下，当应变速率较低（0.01~10 s⁻¹）时，应力在出现峰值后明显下降（如图 2a~2d），表现出明显的动态软化特征，而当应变速率较高（20 s⁻¹）时，应力并未出现峰值应力（如图 2e）。其原因是低应变速率下的变形时间较长，变形试样有充分的时间进行动态再结晶。

热变形过程中，材料在任何应变或稳态下的高温流变应力 σ 强烈地取决于变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ ，根据图 2 的应力应变曲线数据，采用 Arrhenius 双曲正弦函数模型^[9]来描述 TA15 钛合金的本构关系：

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

式中， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率（s⁻¹）； Q 为变形激活能（J/mol），与材料有关； σ 为流变应力（MPa）； n 为应力常数； T 为绝对温度（K）； R 为摩尔气体常数（8.314 J/mol K）； A 和 α 为与材料有关的常数。

对应力应变数据进行二次拟合，确定方程中的待定参数 A （结构因子）、 n （应力指数）、 Q （变形激活

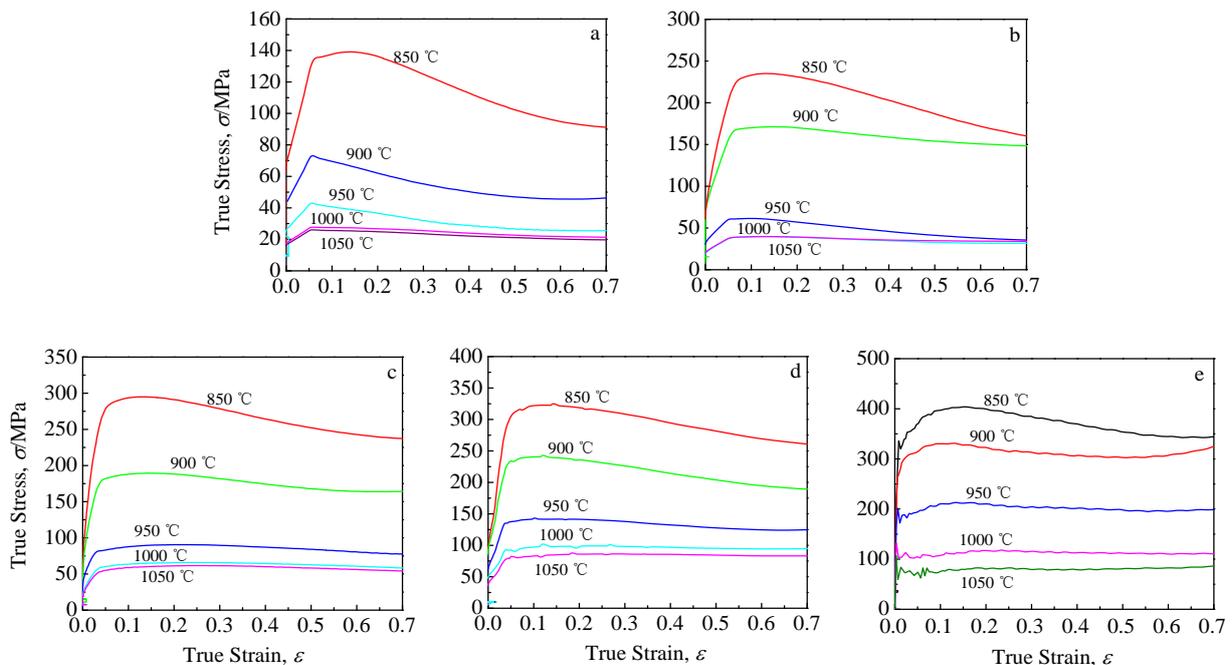


图 2 不同应变速率下 TA15 钛合金真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves for TA15 titanium alloy under different conditions: (a) 0.01 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, (d) 10 s⁻¹, and (e) 20 s⁻¹

能)、 α (应力水平参数), 代入到式 (1) 中可得到 TA15 钛合金塑性本构关系:

$$\dot{\epsilon}_{TA15} = 2.41 \times 10^{23} \left[\sinh(7.65 \times 10^{-3} \sigma) \right]^{3.95} \exp\left(-\frac{555.0 \times 10^3}{RT}\right) \quad (2)$$

TA15 钛合金在不同热变形条件下, 显微组织会发生显著转变, 合金的典型组织变化如图 3 和图 4 所示, 其中图 3 为同一变形速率 (1 s^{-1}), 不同变形温度 (850~1050 °C) 条件下的变形显微组织, 图 4 为同一变形温度 (950 °C), 不同应变速率 ($0.01 \sim 20 \text{ s}^{-1}$) 条件下的变形显微组织。

图 3 表明, 当变形温度为 850 °C 时, β 相所占比例不到 40%, 随着变形温度的升高, β 相的比例逐渐增加, 当温度达到 1050 °C 时, β 相所占比例达到 95% 以上。同时, 在较高的变形温度下 ($>950 \text{ °C}$) 试样中出现了明显的针状 α 相, 即在 β 相中析出了针片状的 α 相, 这种高温组织 (1000~1050 °C) 和低温组织 (850~950 °C) 具有良好的综合力学性能, 与低温组织 (850~950 °C) 相比, 高温组织 (1000~1050 °C) 具有更好的断裂韧性和蠕变强度, 但疲劳性能和热稳定性要稍差^[10]。

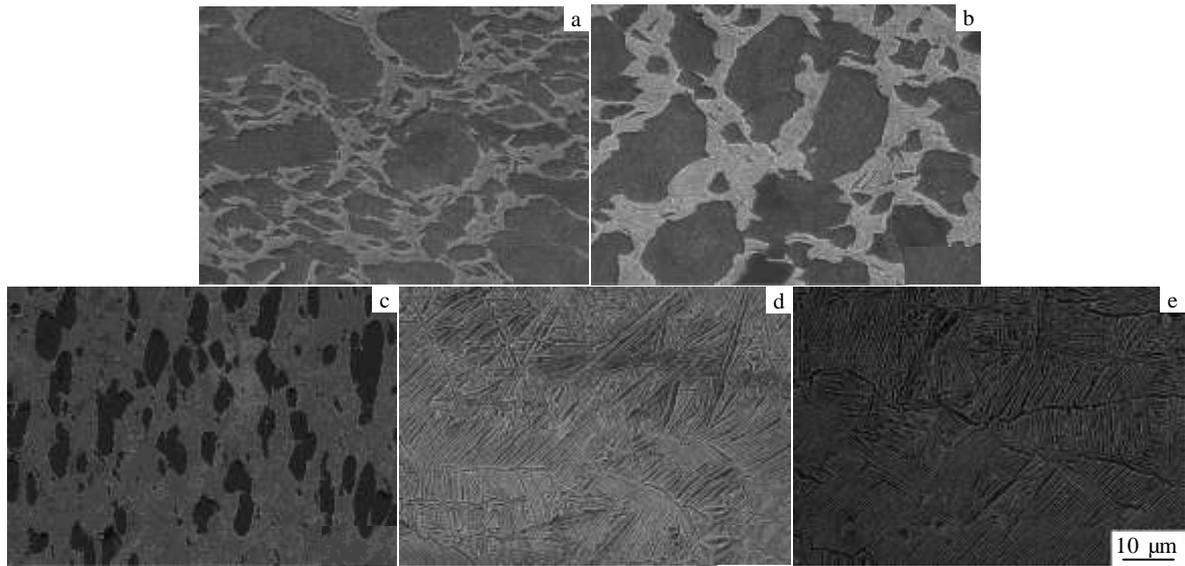


图 3 同一应变速率 $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ 下不同温度条件下的显微组织

Fig.3 Microstructures of alloy compressed at different hot deformation temperatures and 1 s^{-1} : (a) 850 °C, (b) 900 °C, (c) 950 °C, (d) 1000 °C, and (e) 1050 °C

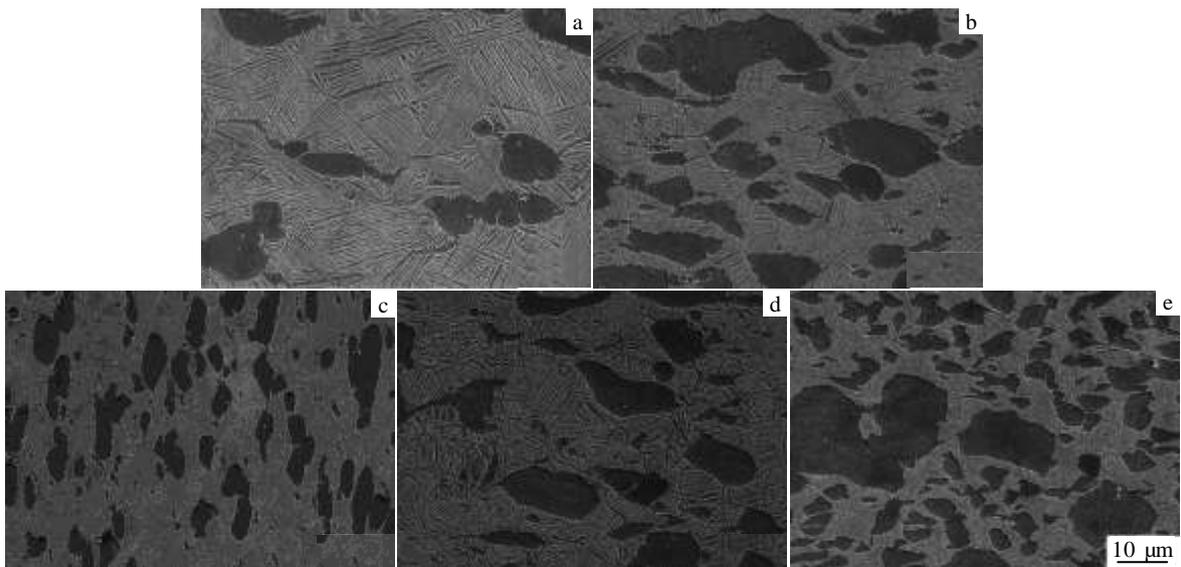


图 4 同一温度 $T=950 \text{ °C}$ 下不同应变速率条件下的显微组织

Fig.4 Microstructures of alloy compressed at different strain rates and 950 °C: (a) 0.01 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} , (c) 1 s^{-1} , (d) 10 s^{-1} , and (e) 20 s^{-1}

图 4 表明, 当应变速率为 20 s^{-1} 时, β 相所占比例为 60% 左右, 随着应变速率的降低, α 相逐渐向 β 相转变的程度逐渐增加, 当应变速率降低到 0.01 s^{-1} 时, β 相所占比例达到 90% 以上, 由于在应变速率小的情况下, 材料有充分的时间发生动态再结晶, 有充足的时间进行扩散。尤其是图 4a 所形成的组织, 与图 3 的低温组织 ($850\sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$) 类似, 在 β 相的基体上分布着一定数量的 α 相, 但总含量不超过 50%。这种组织具有较好的热稳定性和疲劳性, 综合性能良好, 随着应变速率的降低这种性能会更好^[10]。

2.2 TA15 钛合金的热加工图

热加工图由功率耗散图与流变失稳图两部分叠加组成, 其中功率耗散图为功率耗散因子 η 随应变速率和温度的变化情况^[11-13]。功率耗散效率越高, 越容易

发生动态再结晶, 而动态再结晶可导致流变软化并形成稳态流变, 有利于材料的热变形^[8]。流变失稳图根据流变失稳判据^[14]获得, 将失稳图与功率耗散图叠加即可得到热加工图。

对于金属材料而言, 加工图包含安全区、流变失稳区。在安全区内, η 值越大, 能量耗散状态越低, 材料的加工性能越好; 在失稳区内, 外力对材料做的功大部分转变成塑性变形的能量, 功率耗散效率比较小, 宏观上表现为试样开裂, 不适合热加工。目前, 热加工图最主要有两类, 一是在原子模型理论上建立的 Raj 加工图, 另一类是在动态材料模型理论上建立的 Prasad 热加工图^[15]。

本实验采用了基于动态材料数学模型的热加工图理论, 所建立的 TA15 钛合金的热加工图如图 5a~5g

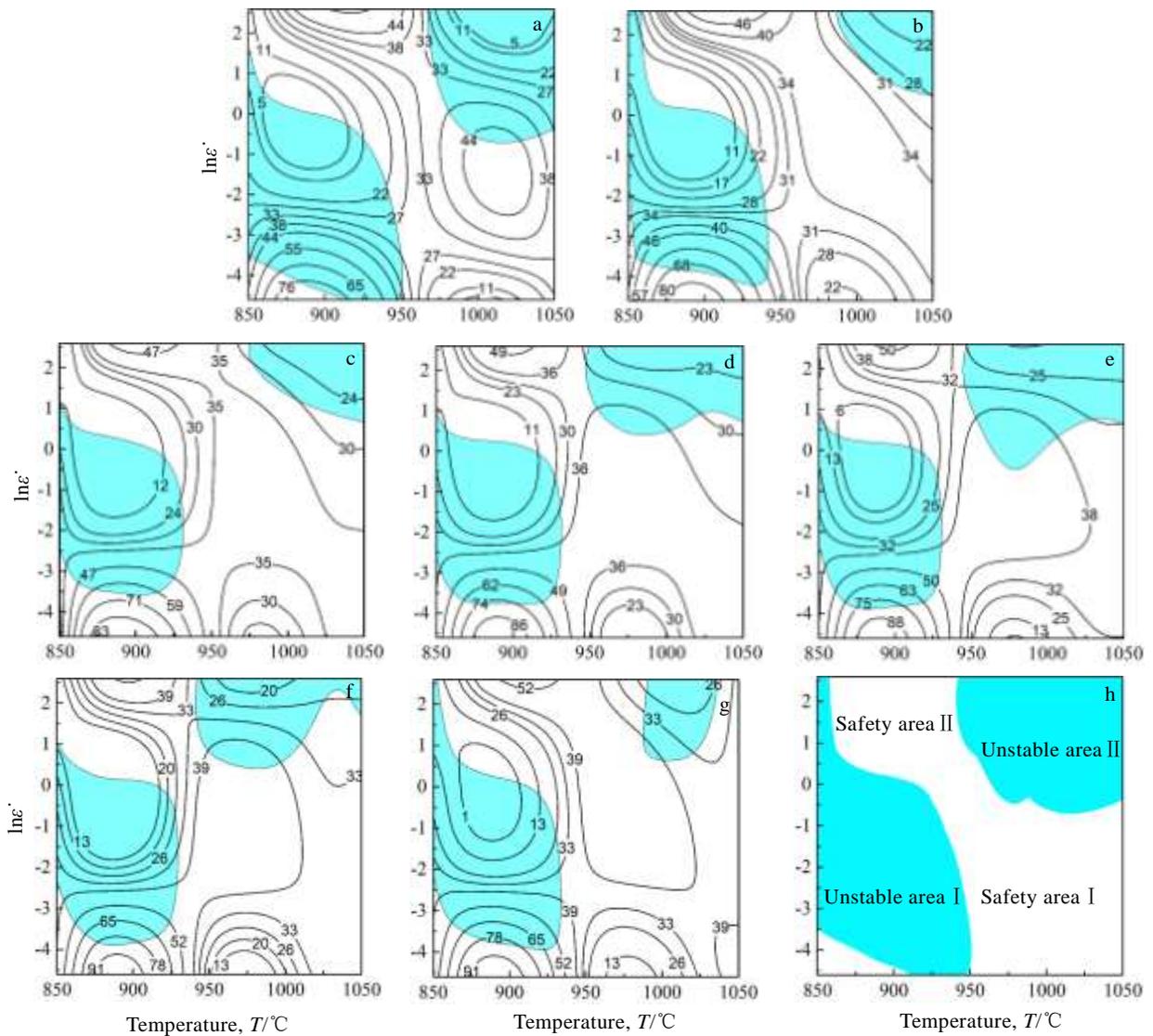


图 5 不同真应变时 TA15 钛合金的加工图

Fig.5 Processing maps for TA15 Titanium alloy at various true strains: (a) $\epsilon=0.1$, (b) $\epsilon=0.2$, (c) $\epsilon=0.3$, (d) $\epsilon=0.4$, (e) $\epsilon=0.5$, (f) $\epsilon=0.6$, (g) $\epsilon=0.7$, and (h) overlay graph

所示, 图中等高线上的数值代表功率耗散效率 η , 阴影部分代表热加工失稳区。

由图 5 可以看出, 应变量为 0.1~0.7 的 7 个热加工图具有两个失稳区 (分别在图中的左下角和右上角)。当应变量为 0.1 时, 第一个失稳区的变形温度为 850~950 °C、应变速率为 0.01~4.48 s⁻¹, 第二个失稳区的变形温度为 975~1050 °C、应变速率为 0.61~13.46 s⁻¹。随着应变量的增大, 第一失稳区的面积逐渐变小, 向低温高应变速率缩小, 第二个失稳区的面积也逐渐变小, 向高温高应变速率缩小。当真应变达到 0.3 的时, 第一个失稳区的变形温度为 850~925 °C、应变速率为 0.03~3.32 s⁻¹, 第二个失稳区的变形温度为 980~1050 °C、应变速率 2.23~13.46 s⁻¹。再随着应变量的增加第一个失稳区面积基本保持不变; 而第二个失稳区面积开始增大, 向低温低应变速率增大, 变形温度为 940~1050 °C、应变速 1.65~13.46 s⁻¹。当达到 0.7 时又开始变小, 变形温度为 930~1040 °C、应变速率 2.23~13.46 s⁻¹。如果在非稳定变形区内进行塑性变形, 微观组织可能出现各种不利的缺陷, 如空洞、楔形裂纹、绝热剪切带等, 所以应避免在这个区域内进行塑性加工。

将图 5 不同应变 (图 5a~5g) 的热加工图进行叠加, 如图 5h 所示。从图中可以看出, TA15 钛合金有两个加工安全区, 两个失稳区。据此可以确定 TA15 钛合金的安全热加工条件: 变形温度为 950~1050 °C、应变速率为 0.01~0.37 s⁻¹; 或者变形温度 875~950 °C、应变速率为 1.65~13.5 s⁻¹。

文献[16]表明, 绝热剪切带等失稳现象较难通过组织观察加以辨别, 通过组织特征判定是否失稳可靠性低。但是, 在安全区变形的合金若出现失稳组织特征, 则说明热加工图不正确。所以本实验选取热加工安全条件下的变形合金试样进行组织分析, 以验证热加工图安全区的合理性。

图 6a 为 900 °C、10 s⁻¹ 的变形条件下 (对应热加工图的安全区域 II) 合金的组织, 可以看出, 在均匀分布、含量超过 50% 的 α 相基体上存在一定数量的转变 β 组织; 图 6b 为 1000 °C、0.1 s⁻¹ 的变形条件下 (对应热加工图的安全区域 I) 合金的组织, β 相中析出大量的 α 相组织, 这两种组织都有较好的综合力学性能。

从图 6 中的显微组织可以看出, 变形后的显微组织比较均匀, 无裂纹、空洞、绝热剪切带等失稳现象产生, 说明图 5 所确定的热加工安全区是合理的, 对于 TA15 钛合金热加工工艺参数的选择具有一定指导意义。

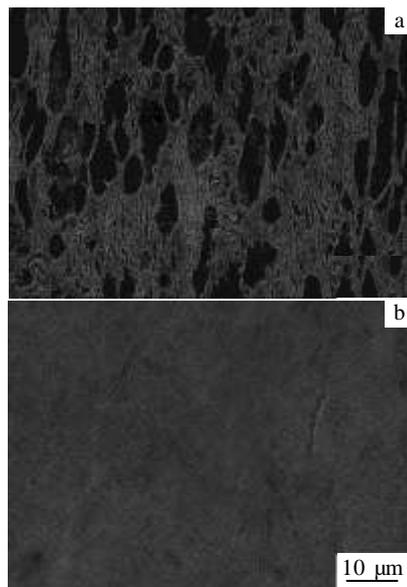


图 6 TA15 钛合金变形后的显微组织

Fig.6 Microstructures of TA15 titanium alloy compressed under different hot deformation conditions: (a) 900 °C, 10 s⁻¹; (b) 1000 °C, 0.1 s⁻¹

3 结 论

1) TA15 钛合金在应变速率 0.01~20 s⁻¹、变形温度 850~1050 °C 的压缩变形条件下, 应变速率一定 (1 s⁻¹) 时, 随着变形温度由 850 °C 升高到 1050 °C, α 相逐渐向 β 相转变, β 所占比例由 40% 增加到 95% 左右; 变形温度一定 (950 °C) 时, 随着应变速率由 0.01 s⁻¹ 升高到 20 s⁻¹, α 相向 β 相转变的程度逐渐减小, β 所占比例由 90% 降低到 60% 左右。

2) 基于动态材料模型, 建立了 TA15 钛合金的热加工图。合金进行热加工时, 存在 2 个会产生流变失稳现象的失稳区。当应变小于 0.4 时, 随着应变量的增大, 两个失稳区的面积逐渐减小, 当应变大于 0.4 时, 随着应变量的继续增大, 低温区 (850~950 °C) 的失稳区变化不大, 高温区 (970~1050 °C) 的失稳区逐渐增大, 当应变达到 0.7 时, 高温区 (970~1050 °C) 的失稳区又开始变小。

3) 根据 TA15 钛合金的热加工图, 确定了合金的两个热加工安全区域: 变形温度 950~1050 °C、应变速率 0.01~0.37 s⁻¹; 以及变形温度 875~950 °C、应变速率 1.65~13.5 s⁻¹。

参考文献 References

[1] Qu Fengsheng(曲凤盛), Zhou Jie(周杰), Liu Xuguang(刘旭

- 光) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(1): 120
- [2] Xiong Aiming(熊爱明), Chen Shenghui(陈胜晖), Huang Weichao (黄维超) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 447
- [3] Zhang Wangfeng(张旺峰), Cao Chunxiao(曹春晓), Li Xingwu(李兴无) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(7): 768
- [4] Yan Su(颜 苏). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010(20): 73
- [5] Li Xiaogang(李小刚), Tong Xuewen(佟学文), Li Nong(李 农) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2010, 27(3): 30
- [6] Nan Li(南 莉), Yang Yashe(杨亚社), Qi Yuanhao(齐元昊) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2011, 28(4): 36
- [7] Cai Haijiao(蔡海娇), Ye Wenjun(叶文君), Hui Songxiao(惠松骁) *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2013, 35(7): 895
- [8] Kong Fantao(孔凡涛), Zhang Shuzhi(张树志), Chen Yuyong(陈玉勇). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010(B10): 233
- [9] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [10] Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明), Zhou Yanbang(周彦邦). *Titanium Alloy for Aviation*(航空用钛合金)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985: 208
- [11] Zhou J, Zeng W, Ying S *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2006, 35(2): 265
- [12] Jia W, Zeng W, Zhou Y *et al. Materials Science and Engineering A* [J], 2011, 528(12): 4068
- [13] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. *International Materials Reviews*[J], 1997, 43(6): 243
- [14] Prasad Y V R K, Rao K P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 391(S1-2): 141
- [15] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1984, 15(10): 1883
- [16] Seshacharyulu T, Medeiros S C, Frazier W G *et al. Materials Letters*[J], 2001, 47(3): 133

Hot Compression Deformation Behavior and Processing Map of TA15 alloy

Xu Meng¹, Jia Weiju², Zhang Zhihao¹, Xie Jianxin¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Plastic deformation characteristics and hot processing conditions are important bases for the selection of processing parameters of extrusion and rolling of titanium alloy. The compressive deformation behavior and microstructure of TA15 alloy were investigated in the temperature range of 850~1050 °C and strain rate range of 0.01~20 s⁻¹. The constitutive equation of TA15 alloy was derived through Arrhenius hyperbolic sine function. Based on dynamic materials modeling (DMM), the processing map of TA15 alloy was established for strain of 0.1~0.7. The results show that α phase in the alloy gradually transforms to β phase with the increase of deformation temperature. The transform extent of α phase to β phase gradually decreases with the increase of the strain rate. According to the processing map, the two hot processing safety areas of the alloy are determined as: (1) deformation temperature 950~1050 °C, strain rate 0.01~0.37 s⁻¹; (2) deformation temperature 875~950 °C, strain rate 1.65~13.5 s⁻¹.

Key words: TA15 alloy; thermal simulation experiment; flow stress; dynamic recrystallization; processing map

Corresponding author: Zhang Zhihao, Ph. D., Associate Professor, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332253, E-mail: ntzzh2279@163.com