

Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的高温变形及加工图

孔凡涛, 张树志, 陈玉勇

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用 Gleeble-1500 热压缩模拟试验机进行压缩实验, 在变形温度为 1 100~1 250 、应变速率为 10^{-2} ~ 1 s^{-1} 的范围内, 研究 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的高温变形行为, 并基于动态材料模型, 建立 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的加工图。结果表明: Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的高温变形流变应力对温度及应变速率敏感; 流变应力随应变速率的增大而增大, 随温度的升高而减小; 动态再结晶是导致流变软化及稳态流变的主要原因; Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的安全热加工区域为温度 1 200~1 230 , 应变速率 10^{-2} ~ 10^{-1} s^{-1} 。

关键词: TiAl 合金; 高温变形; 动态再结晶; 加工图

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Hot deformation and processing map of Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy

KONG Fan-tao, ZHANG Shu-zhi, CHEN Yu-yong

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The hot deformation behavior of Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy was investigated by hot compressive tests on Gleeble-1500 thermal simulation test machine in the temperatures range of 1 100~1 250 and strain rate range of 0.01 ~ 1 s^{-1} . Based on dynamic materials model, the processing map for the Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy was obtained. The results show that the flow stress is sensitive to temperature and strain rate. And the flow stress increases with increasing the strain rate and decreases with increasing the deformation, the smaller the flow stress. Dynamic recrystallization is the main reason for flow softening and stable flow. The hot deformation of Ti-46Al-2Cr-4Nb-0.2Y alloy can be carried out safely in the region with a strain rate range of around 10^{-2} ~ 10^{-1} s^{-1} and temperature range of around 1 200~1 230 .

Key words: TiAl alloy; hot deformation; dynamic recrystallization; processing map

γ -TiAl 金属间化合物中金属键和共价键共存, 使之兼有金属和陶瓷的性能, 如高熔点、低密度、高弹性模量、好的高温比强度及优异的高温抗氧化性等优点, 是一种可以替代钛合金和某些镍基合金在高温条件下使用的备选材料, 但是 TiAl 合金的本质特征决定了其是一种难变形材料, 这大大限制该材料工业化的生产应用^[1-2]。

近年来, 基于动态材料模型(Dynamic materials model, DDM)加工图的研究快速发展, 并成功应用于

铝合金、镁合金、钛合金以及金属间化合物等材料的高温变形机理研究上^[3-5]。根据动态材料模型, 进行热加工变形的工件是一个非线性能量耗散单元。外力输入的能量主要表现在如下两个方面: 一个是塑性变形, 大部分转为热量, 也有小部分储存在材料中; 另一个是显微组织转变, 如相变、回复、再结晶等。用于塑性变形的能量用 G 表示, 用于显微组织转变的能量用 J 来表示。在热加工过程中, 外力对材料所输入的能量(P)可表示如下:

$$P = \sigma \dot{\varepsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \alpha d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \alpha d\sigma \quad (1)$$

式中： σ 为流动应力； $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。

在一定外力下，这两种能量所占的比例定义为应变速率敏感指数 m ：

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\varepsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\varepsilon}} = \frac{d(\lg \sigma)}{d(\lg \dot{\varepsilon})} \quad (2)$$

根据动态材料模型，能量的耗散取决于材料的加工流变行为，符合幂指数方程：

$$\sigma = k \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

式中： k 为常数。

因此，

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

当 $m=1$ 时，材料处于理想线性耗散状态， J 达到最大值 J_{\max} ，

$$J_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \dot{\varepsilon} \quad (5)$$

引入一个反映材料功率耗散特征的无量纲参数功率耗散效率 η ，即

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (6)$$

参数 η 描述了材料在给定温度和应变范围内起不同作用的微观机制，是 ε 、 $\dot{\varepsilon}$ 以及 T 的函数，可以在 $\dot{\varepsilon}$ 与 T 所构成的平面上画 η 的等值线投影图，即功率耗散图。

根据塑性加工中大应变塑性变形的极大值原理，当 $dD/d\dot{\varepsilon} < D/\dot{\varepsilon}$ 时，出现失稳， D 是给定温度下的耗散函数。按照动态材料模型， $D=J$ ，由此可以得到流变失稳判据：

$$\varepsilon(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (7)$$

参数 $\varepsilon(\dot{\varepsilon})$ 作为 $\dot{\varepsilon}$ 与 T 的函数，在能量耗散图上标出该值为负的区域，称为流变失稳区域，该图便是流变失稳图。流变失稳判据的物理意义如下：假设施加在系统上的应变速率为 S_0 ，如果系统不能以应变速率 $S(S > S_0)$ 使系统产生熵，那么当系统承受应变速率 S 以上的速率时，会产生局部流变或者产生流变失稳。

本文作者通过高温压缩实验，分析 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金在高温压缩过程中流变应力与温度和应变速率等变形条件的关系以及流变应力的变化规律，并根据动态材料模型，建立 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的

热加工图，据此分析压缩过程中组织变化规律和软化机理，提出合理的塑性加工区，为优化 TiAl 合金的热加工技术奠定基础。

1 实验

实验用原材料为海绵钛 (> 99.7%)，高纯铝 (> 99.99%)，其他添加元素均为添加金属与铝的中间合金。合金名义成分分别为(摩尔分数，%)：Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y。按照设计的成分配比后，在水冷铜坩埚真空感应熔炼炉中熔炼成合金材料，并切割成实验用试样，试样实测成分分别为 Ti-44.55Al-2.05Cr-3.92Nb-0.26Y(摩尔分数，%)。将试样进行均匀化退火处理(900 ℃，48 h)和热等静压处理，热等静压处理采用氩气作为保护气氛，边升温边充氩气直至 170 MPa，然后开始在 1250 ℃ 下保温 4 h 后随炉缓冷。

热压缩模拟在 GLEEBLE-1500 热压缩模拟试验机上进行，试样经线切割制备成 $d8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的标准试样，应变速率分别为 0.01、0.05、0.1、0.5 和 1 s^{-1} ，变形温度分别为 1100、1125、1150、1175、1200、1225 和 1250 ℃，变形量为 60%。为了减小压头与试样间的摩擦，在试样端面涂抹石墨加以润滑。以升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 升温，达到预定温度后保温 1 min，然后以预定实验速率开始压缩。变形结束后立即水淬，以保留高温下的变形组织进行后续的组织分析。变形后的试样经锯切、镶嵌、研磨和抛光后，采用扫描电子显微镜(SEM)观察高温变形后的显微组织。

2 结果与讨论

2.1 变形条件的影响

通过 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的热压缩模拟，可得到不同温度及应变速率条件下的真应力—真应变曲线，典型的真应力—真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可以发现，在相同温度下，流变应力随应变速率的增大而增大，在相同应变速率下，温度越高，流变应力越小。流变应力的变化受加工硬化及动态软化两个因素的影响，两者在加工过程中同时进行，通过相互竞争决定起主导作用的因素。加工硬化主要是由于位错密度增加，导致位错塞积，在曲线上表现为流变应力随变形量的增加而不断提高。对于 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y

合金来说, 动态软化主要表现为以下两个方面: 1) 在相同应变速率下, 随着变形温度的升高, 发生有序—无序转变, 金属原子热振动的振幅增大, 原子间的相互作用力减弱, 滑移阻力减小, 新滑移不断产生, 使变形抗力降低; 2) 高温下动态再结晶导致变形抗力降低, 这在图 1 的曲线上表现得非常明显。

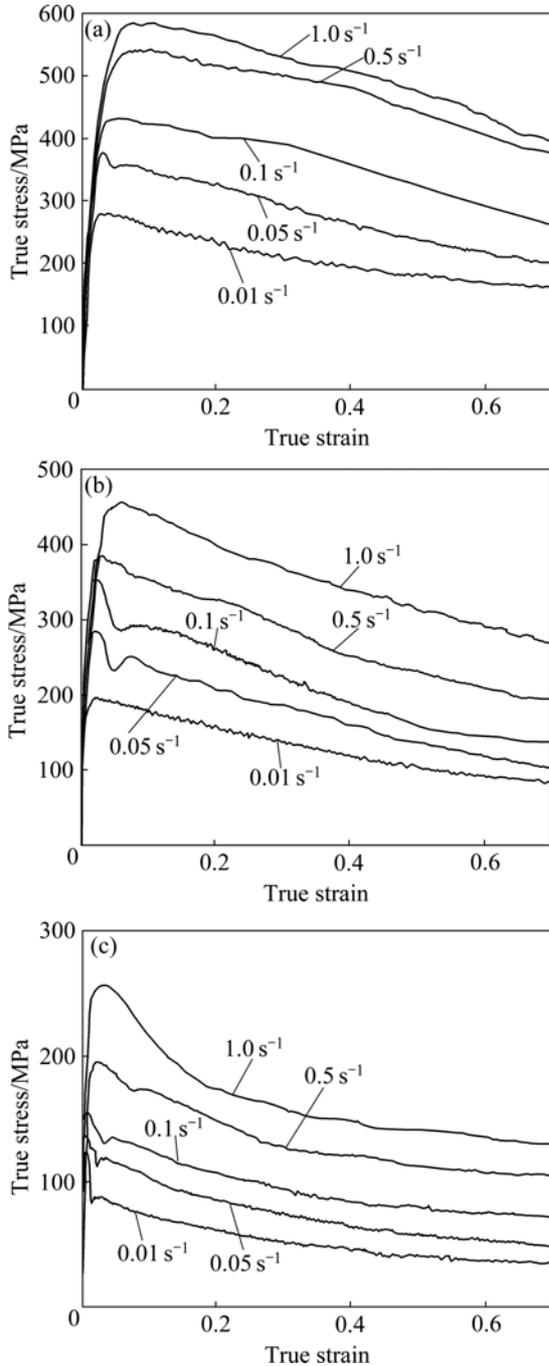


图 1 不同温度及应变速率下 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的热压缩变形真应力—真应变曲线

Fig.1 True stress—true strain curves of Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy during hot compression deformation at different temperatures and strain rates: (a) 1100 °C; (b) 1175 °C; (c) 1250 °C

2.2 加工图

根据动态材料模型, 按照合金在不同应变速率、不同温度下获得的流变应力值得到 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金在应变为 0.5 时的加工图, 结果如图 2 所示。图 2 中阴影区域由于应变速率较高, 为失稳区, 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。在整个应变速率低于 0.1 s^{-1} 的区间, 功率耗散效率较高, 容易发生动态再结晶, 其中温度在 1150~1180 °C 范围内, 为发生 $\alpha_2 + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma$ 相变区域; 在温度为 1200~1230 °C 区间, 功率耗散效率超过 0.5, 易发生完全再结晶, 有利于材料的高温变形。

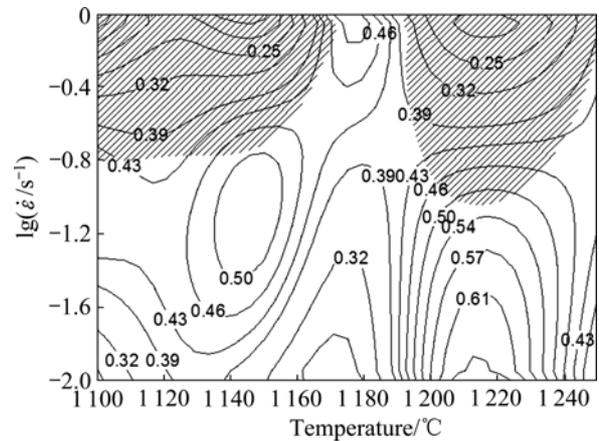


图 2 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的加工图

Fig.2 Processing map for Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy at strain of 0.5

2.3 高温变形过程中的组织演变

Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 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 所示。TiAl 合金由于层错能较低, 动态再结晶容易发生。由图 3 可以发现, Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 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, 均可以促进动态再结晶的发生。在应变速率低于 0.1 s^{-1} 的范围内, 均有动态再结晶发生, 再结晶晶粒均为等轴的 γ 晶粒。当变形温度达到或超过 1200 °C、应变速率低于 0.1 s^{-1} 时, 合金发生完全动态再结晶(见图 3(d))。在温度为 1200~1225 °C、应变速率低于 0.1 s^{-1} 的变形条件下, 等轴 γ 再结晶晶粒的尺寸非常细小、均匀, 其晶粒尺寸只有 5~10 μm 。对 TiAl 合金热加工来说, 细化晶粒及动态再结晶均是有益的。动态再结晶可导致流变软化并同步形成稳态流变, 这均有利于高温变形。当温度达到 1250 °C 时, 在较低的应变速率条件下 (0.1 s^{-1}), 发

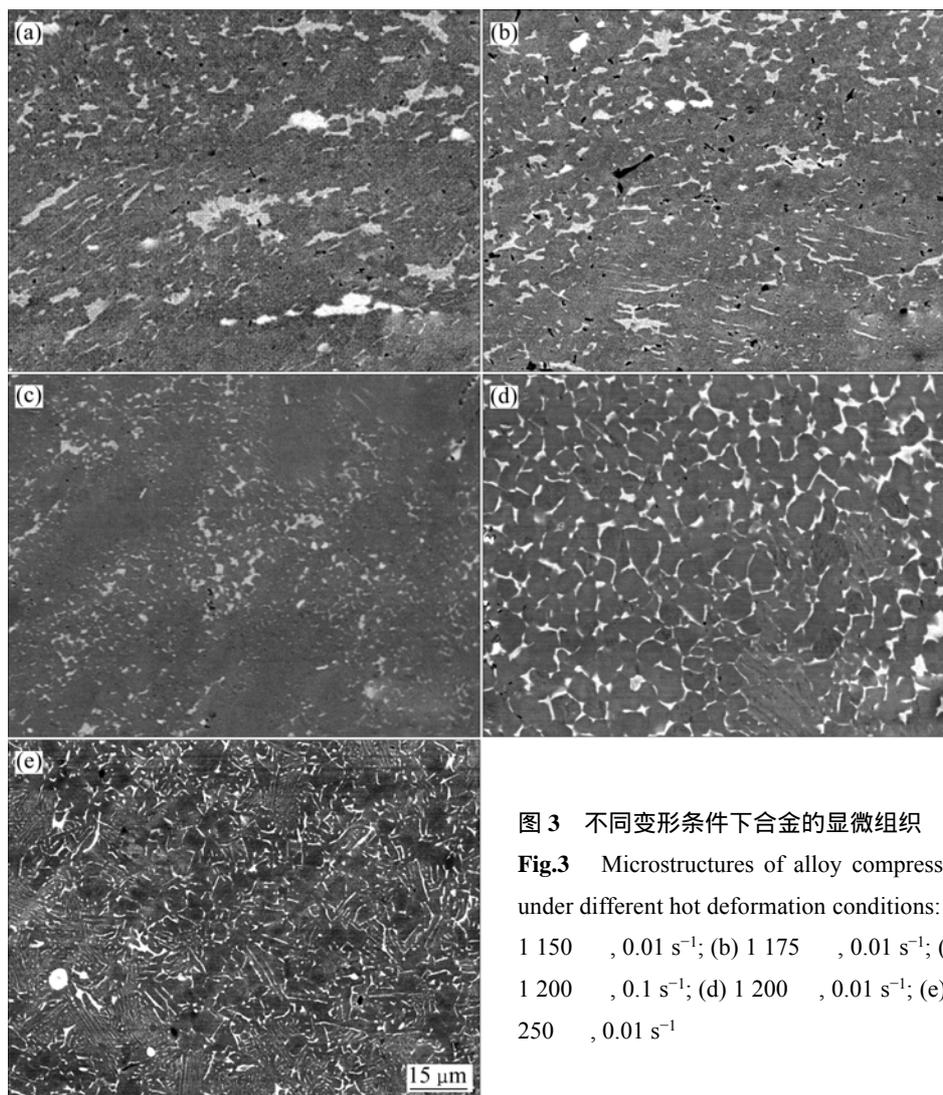


图3 不同变形条件下合金的显微组织

Fig.3 Microstructures of alloy compressed under different hot deformation conditions: (a) 1 150 °C, 0.01 s⁻¹; (b) 1 175 °C, 0.01 s⁻¹; (c) 1 200 °C, 0.1 s⁻¹; (d) 1 200 °C, 0.01 s⁻¹; (e) 1 250 °C, 0.01 s⁻¹

现大量的层片晶团析出，并发生再结晶晶粒长大的现象(见图 3(e))，这不利于 TiAl 合金的后续热加工。上述结果与加工图的结果是一致的。

结合 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的加工图及显微组织的变化规律，可确定其安全的变形条件如下：温度为 1 200~1 230 °C，应变速率为 0.1~0.01 s⁻¹。

3 结论

1) Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金高温变形流变应力对温度及应变速率敏感。流变应力随应变速率的增大而增大，随温度的升高而减小。动态再结晶是导致流变软化及稳态流变的主要原因。

2) 基于动态材料模型，建立了 Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金加工图。确定安全的热加工区域如下：温

度为 1 200~1 230 °C，应变速率为 0.1~0.01 s⁻¹。

REFERENCES

- [1] WU Xin-hua. Review of alloy and process development of TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2006, 14: 1114-1122.
- [2] LORIA E A. Quo vadis gamma titanium aluminide[J]. Intermetallics, 2001, 9: 997-1001.
- [3] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Processing maps for hot working of titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 82-88.
- [4] POLETTI C, DIERINGA H, WARCHOMICKA F. Local deformation and processing maps of as-cast AZ31 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 516: 138-147.
- [5] QYSZKOWSKI R, BYSTRZYCKI J. Hot deformation and processing maps of an Fe₃Al intermetallic alloy[J]. Intermetallics, 2006, 14: 1231-1237.

(编辑 龙怀中)