

基于 MATLAB 的 Ti80 合金热变形行为及热加工图

权思佳¹, 宋克兴^{1,2}, 张彦敏^{1,2}, 张斌斌³, 王 启³, 李 炎^{1,2}

(1. 河南科技大学, 河南 洛阳 471023)

(2. 河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室, 河南 洛阳 471023)

(3. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 用热模拟试验机、光学显微镜、MATLAB 软件研究了双态组织 Ti80 合金在变形温度 860~1020 °C、应变速率 0.001~10 s⁻¹、最大变形量 50% 下的热变形和热加工特性。结果表明: Ti80 合金为负温度敏感型、正应变速率敏感型材料, 主要软化机制随温度的升高由动态再结晶转变为动态回复。利用 MATLAB 编程构建了应变补偿本构方程与热加工图, 计算应力与试验应力的相关系数 $R=0.994$ 、平均相对误差 $AARE=7.443\%$; 合金最佳热加工工艺参数区间为: 温度 980~1015 °C、应变速率 0.013~0.100 s⁻¹, 该区峰值功率耗散系数 $\eta=64\%$ 。

关键词: Ti80 合金; 热压缩变形; 本构方程; 热加工图; MATLAB

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)11-3600-08

钛合金具有耐蚀、高比强度等综合性能, 目前在某些舰船部件中已经完全代替不锈钢材料^[1]。Ti80 合金名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo, 是我国自行研制的新型船用钛合金之一。由于钛合金室温加工变形抗力大, 所以实际生产中多采用热成形方式加工制件^[2-4]。因此, 有必要研究其热变形行为并建立热加工图以提高加工质量可控化。但目前针对 Ti80 合金热变形行为的研究报道较少: 李梁等^[5]构建了等轴组织 Ti80 合金的热加工图, 得出其最佳工艺参数为 930 °C/0.001 s⁻¹; Chen 等^[6]对双态组织 Ti80 合金建立了基于金属稳态模型的本构方程, 同时分析其热加工图得出, 940 °C/0.001 s⁻¹ 和 880 °C/1 s⁻¹ 为其最佳加工参数。上述研究均采用金属稳态模型及 Prasad 准则对 Ti80 合金进行本构方程及热加工图的构建, 但由于金属稳态模型无法反映合金高温软化机制^[7], 且 Prasad 准则只适用于纯金属或低合金钢^[8]。因此, 用上述方法研究钛合金的热变形行为存在着不足之处。

本研究以双态组织 Ti80 合金为研究对象, 通过热压缩试验分析其流变应力变化规律与合金软化机制, 利用 MATLAB 软件构建了其应变补偿本构方程及基于 Murty 失稳判据的热加工图, 并通过分析压缩后合金组织演变及试样失稳特征验证了以上结果。研究结果可为优化 Ti80 合金的热加工工艺参数、预测变形后合金组织提供理论指导。

1 实 验

试验材料为中船重工第 725 所提供的双态组织 Ti80 合金(热处理制度为 980 °C/1 h/AC), 化学成分(质量分数, %): 6.50Al, 3.18Nb, 2.04Zr, 1Mo, 余量 Ti, β 转变点为(1000±7) °C, 金相组织如图 1。

将 Ti80 合金加工为 $\Phi 8$ mm×12 mm 试样, 在 Gleeble-1500D 型热模拟试验机上进行热压缩试验。变形温度为 860、900、940、980 和 1020 °C; 应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹, 总压缩变形量为 50%。

试验过程: 以 10 °C/s 的速率将试样加热至各变形温度, 到温后保温 3 min, 以各应变速率对试样进行单向等温压缩试验。压缩结束后将试样水淬冷却, 以保留其高温变形组织。



图 1 试验用双态组织 Ti80 合金

Fig.1 Duplex structure of Ti80 alloy for test

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0300400); 河南省创新型科技团队 (C20150014)

作者简介: 权思佳, 女, 1994 年生, 硕士生, 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023, E-mail: quansijia1994@163.com

将热压缩后的试样沿直径对半剖开, 镶嵌、磨制、抛光并使用 Kroll 试剂(体积比 HF:HNO₃:H₂O=5:12:83)对试样剖面进行腐蚀后, 通过 Zeiss Axio Vert A1 型光学显微镜对试样进行显微组织观察分析。

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线分析

图 2 为不同应变速率下 Ti80 合金热压缩时真应力-真应变曲线。由图可知, 该合金为负温度敏感型、正应变速率敏感型材料, 且峰值应力对应的应变值随应变速率的升高而升高。应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 时, 随应变量的增加, 低温(≤940 °C)变形时合金流变应力均升高至峰值后缓慢下降, 为动态再结晶特征曲线(变形温升亦可引起合金流变应力下降, 因此后文通过组织观察对其进行验证); 高温(≥980 °C)变形时流变应力均升高至一定值后保持稳态, 为动态回复特征曲线。当应变速率为 10 s⁻¹ 时, 各温度下流变应力变化趋势虽基本不变, 但在变形前期出现短暂屈服降落, 即出现失稳现象。

金属的热变形是加工硬化与动态软化(包括动态回复、动态再结晶)的共同结果。变形温度升高时, 合金软化效应增强, 造成流变应力的降低; 应变速率增加时, 软化作用无法充分弥补加工硬化, 从而引起流变应力的升高、峰值应力对应的临界应变值升高。在

变形初期, 合金中出现大量位错增殖、塞积和缠结, 但动态软化来不及发生, 因此流变应力急速增加。随着变形的持续, 合金内积累的变形储能为动态软化提供了能量。 α -Ti 为 hcp 结构, 滑移系数量少造成变形储能积累较快, 同时该结构较低的层错能造成了动态再结晶临界值的降低^[9], 因此易发生再结晶; 而 β -Ti 为 bcc 结构, 滑移系多且层错能较高, 因此动态再结晶难以进行。当变形温度逐渐升高至相变点以上时, 合金中 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变程度逐渐加大直至完成, 合金中软化主要机制由再结晶转变为回复。此外, 高应变速率下屈服降落现象是由可动位错的大量增殖引起合金临界切应力突然降低造成的^[10]。

2.2 本构方程的构建与分析

本构方程是热成形仿真模拟的基础, 但目前大部分相关研究都使用金属稳态模型, 此方法简便快捷, 但无法反映金属高温流变过程, 即不能通过该模型评判金属高温变形机制^[7]。由 2.1 节可知, Ti80 合金的高温流变行为复杂, 涉及加工硬化、动态回复、动态再结晶 3 种变形机制, 且实际加工常在双相区进行^[11,12]。因此, 采用考虑应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦模型, 构建 Ti80 合金双相区的应变补偿本构方程:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (\text{for all stress}) \quad (3)$$

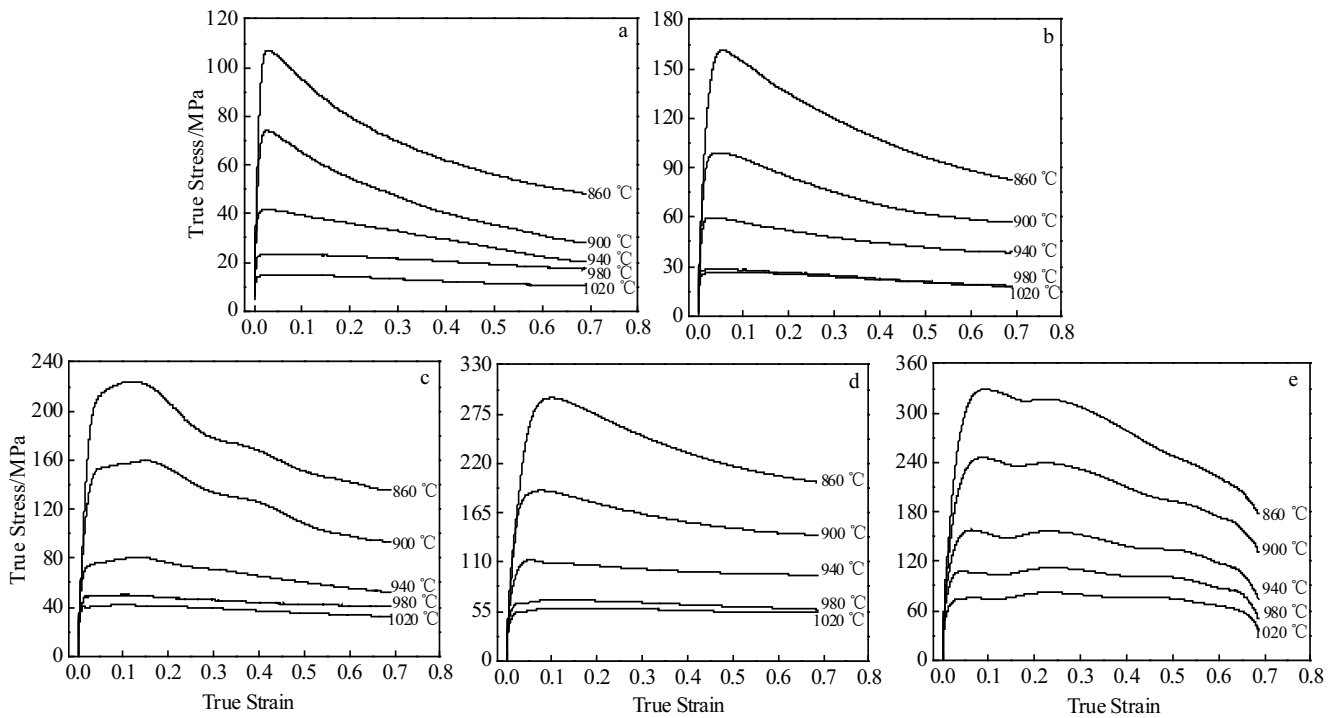


图 2 不同应变速率下 Ti80 合金热压缩时真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of Ti80 alloy at different strain rates under hot compression: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$, (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$, and (e) $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$

式(1)、(2)、(3)中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}); σ 为流变应力(MPa); Q 为热变形激活能($kJ \cdot mol^{-1}$); T 为变形温度(K); R 为摩尔气体常数($8.314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$); A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 β 、 $\alpha = \beta/n_1$ 均为受应变量影响的热变形参数^[13]。

分别对式(1)、(2)、(3)式两边取对数, 依次可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - Q/(RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha \sigma)] - Q/(RT) \quad (6)$$

将式(6)对 $1/T$ 求偏导, 可得:

$$\frac{Q}{R} = n \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1/T)} \quad (7)$$

由式(4)~(7)可知, 当 T 一定时, n_1 、 β 、 n 分别为 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 曲线的斜率; 当 $\dot{\epsilon}$ 一定时, $Q/(Rn)$ 为 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$ 曲线的斜率; $\ln A$ 为 $[\ln \dot{\epsilon} + Q/(RT)] - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 曲线的截距。以 $\epsilon=0.1$ 时各参数的求解为例: (1) 固定某一变形温度。取各应变速率与其 $\epsilon=0.1$ 时的 σ 值绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 散点图, 线性回归得斜率, 即为此时 n_1 、 β 、 $\alpha = \beta/n_1$ 值; 同理线性回归 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 散点图斜率, 即得 n 值。同理求得所有温度下的 n_1 、 β 、 α 、 n 并取平均值以减小误差(由于式(1)、(2)的使用条件分别为低应力水平与高应力水平, 因此 n_1 、 β 分别取峰值应力较低、较高的两条直线斜率的平均值), 即可得出 $\epsilon=0.1$ 时: $n_1=6.327$; $\beta=0.044$; $\alpha=0.007$; $n=5.366$ 。(2) 固定某一应变速率。取各变形温度与其 $\epsilon=0.1$ 时的 σ 值、 $\alpha=0.007$ 、 $n=5.366$ 绘制 $\ln[\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$ 散点图, 线性回归得斜率, 即可求得该应变速率下此时的 Q 值。同理求得各应变速率下 Q 值并取平均值, 即可得出 $\epsilon=0.1$ 时 $Q=968.7 kJ \cdot mol^{-1}$ 。(3) 取各变形温度、各应变速率与 σ 值、 $\alpha=0.007$ 、 $Q=968.7 kJ \cdot mol^{-1}$ 绘制 $[\ln \dot{\epsilon} + Q/(RT)] - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 散点图, 线性回归得截距, 即可得 $\epsilon=0.1$ 时的 $\ln A=96.491$ 。同理计算 $\epsilon=0.05 \sim 0.65$ (间隔 0.05) 下的各 α 、 n 、 Q 、 $\ln A$ 值。

将不同应变量下的 α 、 n 、 Q 、 $\ln A$ 值绘制散点图, 对其进行 2~9 次多项式拟合对比后发现 5 次多项式拟合精度最高(更低次和更高次分别出现欠拟合和过拟合导致精度降低), 如式(8)所示:

$$\begin{cases} \alpha = 0.010 - 0.051\epsilon + 0.329\epsilon^2 - 0.938\epsilon^3 + \\ \quad 1.310\epsilon^4 - 0.698\epsilon^5 \\ n = 5.417 + 4.937\epsilon - 80.577\epsilon^2 + 311.394\epsilon^3 - \\ \quad 501.321\epsilon^4 + 291.038\epsilon^5 \\ Q = (0.099 + 0.127\epsilon - 2.131\epsilon^2 + 7.872\epsilon^3 - \\ \quad 12.107\epsilon^4 + 6.769\epsilon^5) \times 10^7 \\ \ln A = (0.096 + 0.173\epsilon - 2.437\epsilon^2 + 8.803\epsilon^3 - \\ \quad 13.439\epsilon^4 + 7.490\epsilon^5) \times 10^3 \end{cases} \quad (8)$$

将式(3)本构方程化简表达为式(9)所示^[14]:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{\dot{\epsilon} \exp [Q/(RT)]}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{\dot{\epsilon} \exp [Q/(RT)]}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (9)$$

选取不同应变量代入式(8)求得 n 、 α 、 Q 、 $\ln A$ 值后, 将其与应变速率、变形温度代入式(9), 即可计算模拟出 Ti80 合金高温流变行为。由于本方法需大量重复取点作图拟合工作, 且后一步计算依赖前一步的计算结果, 所以易发生人为误差, 且一旦发生必须全部重新计算。因此, 考虑设计编程并使用 MATLAB 数学软件进行拟合与计算工作。具体程序如下:

```
Temp=[860, 900, 940, 980]; %输入试验温度 T/°C
E=[0.001, 0.01, 0.1, 1, 10]; %输入试验应变速率
ε/s-1
X=[0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45,
0.5, 0.55, 0.6, 0.65]; %输入 0.05 间隔下的各应变量 ε
S(:,:,1)=[104.454, 71.804, 41.123, 23.488; 161.441,
98.743, 59.307, 28.405; 212.804, 153.411, 76.261,
49.256; 261.161, 186.292, 112.251, 64.852; 302.225,
231.017, 156.137, 107.934];...
S(:,:,13)=[49.588, 29.121, 20.953, 17.467; 84.985,
57.436, 38.985, 18.227; 137.499, 94.633, 53.897, 41.166;
201.817, 141.214, 95.689, 58.066; 204.706, 158.428,
105.813, 80.331]; %创建应力三维矩阵(5×4×13): 第 1
维即 1~5 行对应 ε=0.001~10 s-1, 第 2 维即 1~4 列对
应 T=860~980 °C, 第 3 维即 1~13 层对应 ε=0.05~0.65
for m=1:13 %在各 ε 下进行此循环
for j=1:2 %在各 T 下进行此循环
y1=polyfit(transpose(S(:,j,m)),log(E),1);%对 lnε-σ
散点进行线性拟合
y2=polyfit(log(transpose(S(:,j+2, m))),log(E),1); %
对 lnε-lnσ 散点进行线性拟合
beta(j)=y1(1); %将 lnε-σ 拟合斜率值添入 β 向量
n1(j)=y2(1); %将 lnε-lnσ 拟合斜率值添入 n1 向量
end
aerfa0(m)=mean(beta)/mean(n1); %将 β、n1 向量取
平均值后计算 α 值(α=β/n1)
lnsinh=log(sinh(aerfa0(m).*S)); %求解 ln[sinh(ασ)]
for j=1:4 %在各 T 下进行此循环
y3=polyfit(transpose(lnsinh(:,j,m)),log(E),1); %对
lnε-ln[sinh(ασ)] 散点进行线性拟合
n(j)=y3(1); %将 lnε-ln[sinh(ασ)] 拟合斜率值添入 n
向量
end
n0(m)=mean(n); %n 向量取平均值
```

```

for i=1:5 %在各  $\varepsilon$  下进行此循环
y4=polyfit(1./(Temp+273.15), ln sinh(i, :, m), 1); %对
ln[ sinh( $\alpha\sigma$ )]-1/T 散点进行线性拟合
s(i)=y4(1); %将 ln[ sinh( $\alpha\sigma$ )]-1/T 拟合斜率值添入 s
向量
end
Q0(m)=mean(s)*8.314*n0(m); %将 s 向量取平均
值后计算 Q 值(Q=Rsn)
y51=repmat(transpose(log(E)),1,4); %将 ln  $\dot{\varepsilon}$  行向
量转置并重复 4 列为 5×4 矩阵
y52=repmat(Q0(m)/8.314./(Temp+273.15),5,1);%将
Q/(RT)行向量重复 5 行为 5×4 矩阵
y5=polyfit(ln sinh(:, :, m), y51+y52, 1); %对 [ln $\dot{\varepsilon}$ +Q/(R
T)] - ln[ sinh( $\alpha\sigma$ )] 散点进行线性拟合
lnA0(m)=y5(:, 2); %将 [ln $\dot{\varepsilon}$ +Q/(RT)] - ln[ sinh( $\alpha\sigma$ )]
拟合截距值赋给 lnA 值
end
yaerfa=polyfit(X, aerfa, 0, 5)
yn=polyfit(X, n, 0, 5)
yQ=polyfit(X, Q, 0, 5)
ylnA=polyfit(X, lnA, 0, 5) %以上分别将各  $\varepsilon$  下的  $\alpha$ 、
n、Q、lnA 值进行 5 次多项式拟合后, 输出各项拟合
系数
aerfa=polyval(yaerfa, X);
n=polyval(yn, X);
Q=polyval(yQ, X);
lnA=polyval(ylnA, X); %以上分别求各拟合多项式
中各  $\varepsilon$  对应的  $\alpha$ 、n、Q、lnA 值
yE=repmat(transpose(E), 1, 4); %将 E 行向量转置
并重复 4 列为 5×4 矩阵
yT=repmat((Temp+273.15), 5, 1); %将 Temp 行向量
转化为开氏温度并重复 5 行为 5×4 矩阵
for k=1:13 %在各  $\varepsilon$  下进行此循环
ZA=yE.*exp[Q(k)./(8.314*yT)]/[exp(lnA(k))];
Z1=ZA.^(1/n(k));
Z2=(ZA.^(2/n(k)+1)).^(1/2);
sigma0(:, :, k)=log(Z1+Z2)./aerfa(k); %以上为计算
各  $\varepsilon$  下的应力, 即公式(9)
end
sigma=sigma0 %输出计算应力三维矩阵
R=corrcoef(S, sigma) %输出试验应力与计算应
力的相关系数 R
AARE=mean(mean(mean(abs((sigma-S)./S))))%
输出试验应力与计算应力的平均相对误差 AARE
由以上编程可直接获取  $\alpha$ 、n、Q、lnA 拟合多项式

```

系数与各温度、应变速率、应变量下的计算应力, 即式 8, 同时可获得试验应力与计算应力的相关系数 R 、平均相对误差 AARE。图 3 为 Ti80 合金热压缩真实应力与计算应力的对比情况。由图可知, 该模型能够较准确地模拟合金真实流变行为。采用相关系数 R 、平均相对误差 AARE 定量评估该本构方程的拟合程度:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} = 0.994 \quad (10)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\% = 7.443\% \quad (11)$$

式(10)中, E_i 为各真实应力值, P_i 为各计算应力值, N 为全部数据点个数。本构方程计算值与试验值的相关系数 $R > 0.95$ 、平均相对误差 $AARE < 10\%$, 即具有强相关性, 表示计算结果与真实值吻合程度高。

2.3 热加工图的构建与分析

热加工图是评价金属加工成形性能的有效手段。通过热加工图的构建, 可以判断各工艺参数下的金属塑性成形过程, 从而达到控制组织演变的目的。根据 Prasad 提出的动态材料模型(DMM)可知, 材料在热加工过程中单位时间吸收的能量 P 为:

$$P = \sigma \dot{\varepsilon} = J + G = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon} d\sigma + \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} \quad (12)$$

式中, J 与 G 分别为材料在单位时间内发生组织演变与塑性变形所耗能量^[15]。在一定应力下, 这 2 种能量所占比例由应变速率敏感指数 m 决定:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\varepsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\varepsilon}} \quad (13)$$

当 $m < 0$ 时, 在某种程度上代表材料内出现微观缺陷^[16]; $0 < m < 1$ 时, 材料发生稳态流变; 当 $m = 1$ 时, 材料发生理想线性耗散, 此时 $J = J_{\max} = \dot{\varepsilon} \sigma / 2 = P / 2$; 当 $m > 1$ 时, 材料易发生孪生或形成剪切带。

材料在热加工中组织演变耗能与线性耗散能量的比值可用功率耗散系数 η 表示, 即 η 值越大, 材料组织演变程度越大。根据 Prasad 准则可得 $\eta = 2m / (m + 1)$, 但这一结论基于幂律方程 ($\sigma = K \dot{\varepsilon}^m$), 即认为 m 值为常数, 所以该 η 值求解公式只适用于纯金属或低合金钢^[8], 而 Murty 准则认为 m 随 $\dot{\varepsilon}$ 和 T 变化, 所以适用范围极广^[8, 17]。根据 Murty 准则可得 η 值为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{P - G}{J_{\max}} = 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\alpha \dot{\varepsilon}} \left[\left(\frac{\sigma}{m+1} \right)_{\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_{\min}} + \int_{\dot{\varepsilon}_{\min}}^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} \right] \right\} \quad (14)$$

同时, Murty 提出了材料塑性变形的流变失稳判据:

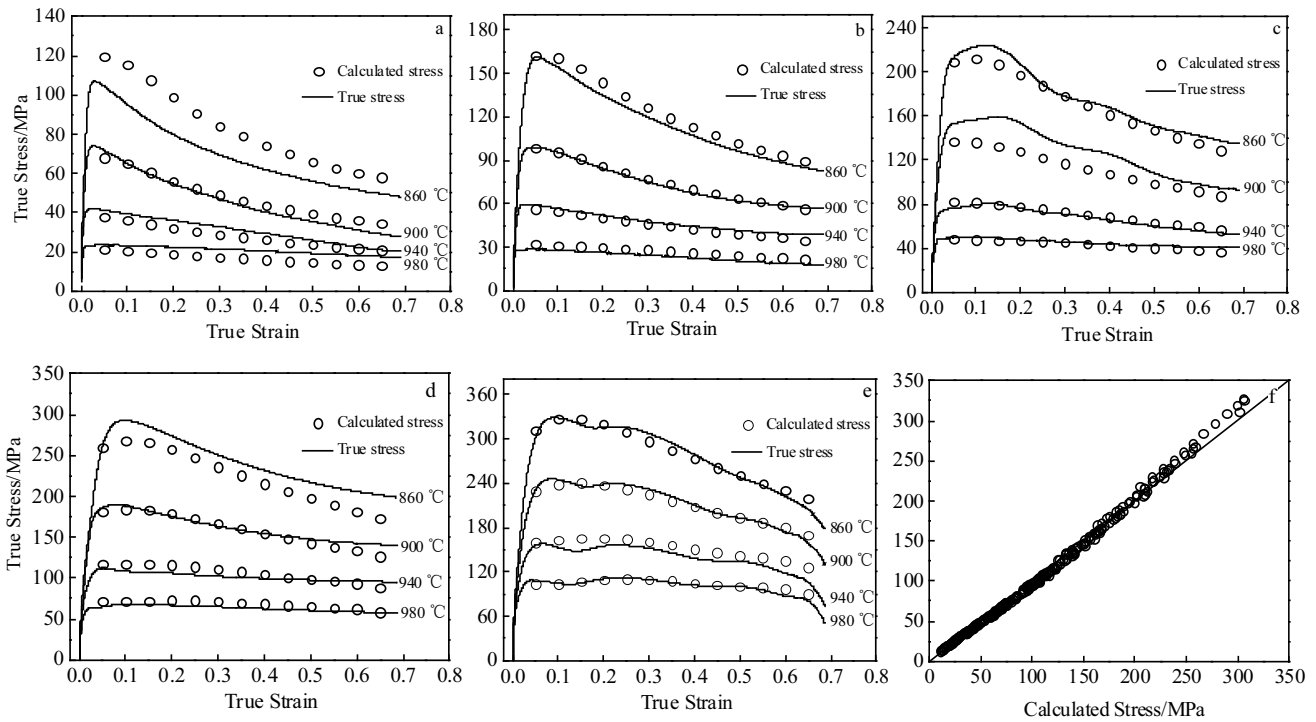


图 3 Ti80 合金热压缩真实应力与计算应力对比情况

Fig.3 Comparison of true stress and calculated stress of Ti80 alloy under hot compression: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$, (d) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$, (e) $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$, and (f) all of data

$$2m < \eta \text{ 或 } \eta \leq 0 \quad (15)$$

根据 η 值可绘制功率耗散图, 根据失稳判据可绘制流变失稳图, 两图叠加即可得材料热加工图。热加工图中非失稳区内 η 值较高的区域, 即为热加工最佳区域^[18]。但由式(14)可知, Murty 准则的缺点是涉及大量积分运算, 几乎无法实现人工求解。因此, 采用文献[17]中提出的 MATLAB 运算程序对合金热加工图进行求解。

图 4 为应变 0.36、0.69 下的 Ti80 热加工图(即工程应变为 0.3、0.5)。阴影部分为失稳区, 等值线数值为 η 值(%). 由图可见, 应变为 0.36 时的合金热加工安全区为: (1) (980~1015 °C)-(0.013~0.100 s^{-1}), 该区 $\eta > 45\%$, 峰值为 54%; (2) (875~910 °C)-(0.009 ~ 0.044 s^{-1}), 该区 $\eta > 45\%$, 峰值为 49%。应变为 0.69 时的合金热加工安全区为: (1) (975~1015 °C)-(0.013~0.145 s^{-1}), 该区 $\eta > 45\%$, 峰值为 64%; (2) (900~945 °C)-(0.001 ~ 0.003 s^{-1}), 该区 $\eta > 60\%$, 峰值为 77%。综上可知, Ti80 合金稳定的加工安全区为: (980~1015 °C)-(0.013 ~ 0.100 s^{-1}), 该区峰值功率耗散系数 $\eta=64\%$ 。

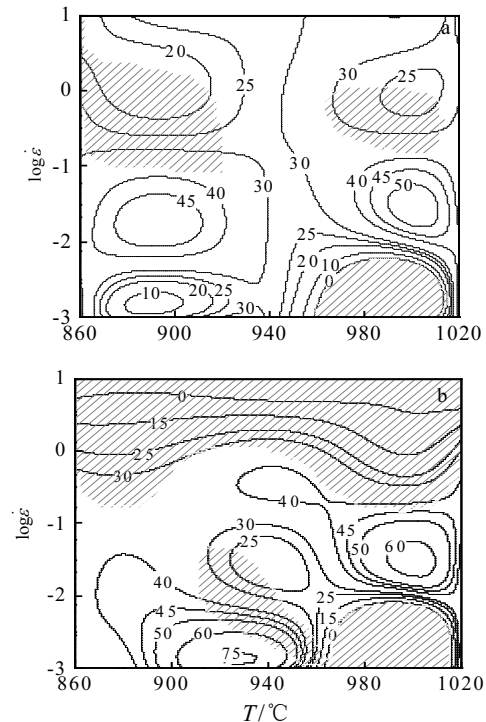


图 4 不同应变量下的 Ti80 合金热加工图

Fig.4 Processing map of Ti80 alloy under different strains:

(a) $\epsilon=0.36$ and (b) $\epsilon=0.69$

2.4 合金微观组织与失稳特征演变

图 5 为 0.1 s^{-1} 应变速率下不同变形温度热压缩后的 Ti80 合金金相组织。可见，随变形温度升高，再结晶晶粒数量减少、尺寸增大。变形温度为 $860 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，组织由含量均等的长轴状初生 α 相与转变 β 相(该相由 β 相和次生 α 相呈层状交替组成)构成， α/β 相界面处出现大量等轴小颗粒，如图 5a 所示，表明合金发生明显动态再结晶。变形温度为 $940 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，此时温度更接近相变点，因此合金中的初生 α 相含量减少。此外，虽然相界面处再结晶晶粒尺寸由于温度的升高而增加，但数量明显减少，如图 5b 所示，表明再结晶趋势有所减弱。变形温度为 $1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，由于此时温度已超过相变点 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，即 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变已经完成，合金为马氏体组织且内部 β 晶粒明显拉长变形、破碎，未发现明显的再结晶晶粒，如图 5c 所示，表明合金中的软化机制已经以回复为主。

图 6 为 $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度下不同应变速率热压缩后的 Ti80 合金金相组织。相比较低温度时， $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下合金再结晶现象明显弱化。随应变速率的增加，再结晶

晶粒数量增加、尺寸减小，初生 α 相长宽比增加、转变 β 相尺寸减小，但组织类型仍为双态。这是由于合金畸变能随应变速率增加而增大，从而造成再结晶晶核数量的增加。同时，变形时间随应变速率的增加而缩短，导致变形破碎的晶粒不能充分回复与再结晶。此外，相比图 5b、图 6b 中的再结晶晶粒数量明显减少，晶粒拉长现象明显。表明在相同的应变速率下，当温度由 $940 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，合金的主要软化机制由再结晶转变至回复。

图 7 为 $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度下不同应变速率热压缩后的 Ti80 合金失稳特征。根据试样边缘形貌和流变失稳现象可判断变形条件的优劣。图 7a、图 7c 试样边缘出现裂纹且内部发生流变失稳，图 7b 试样边缘呈较平滑的鼓形且内部变形均匀。由此判断： $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度下， 0.001 、 1 s^{-1} 发生失稳，而 0.1 s^{-1} 变形条件良好。

综上所述，合金组织演变规律与试样失稳特征结果与 2.1、2.3 节分析结果相吻合。

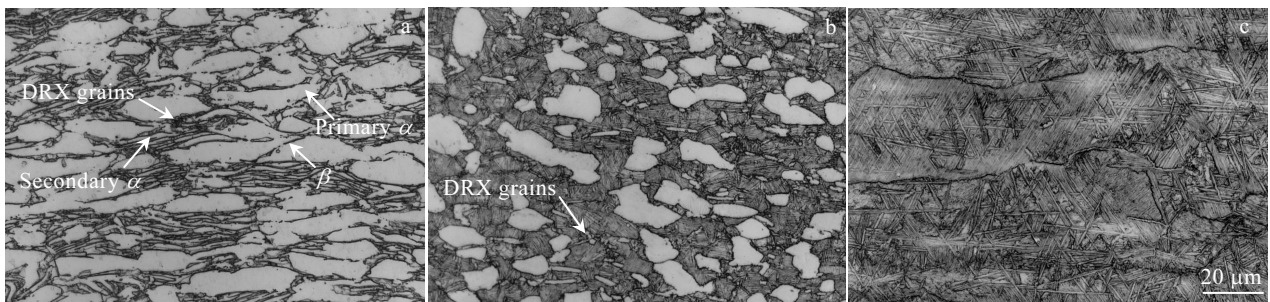


图 5 0.1 s^{-1} 应变速率下不同变形温度热压缩后的 Ti80 合金金相组织

Fig.5 Microstructures of Ti80 alloy at different deformation temperatures after hot deformation at strain rate of 0.1 s^{-1} : (a) $860 \text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $940 \text{ }^{\circ}\text{C}$, and (c) $1020 \text{ }^{\circ}\text{C}$

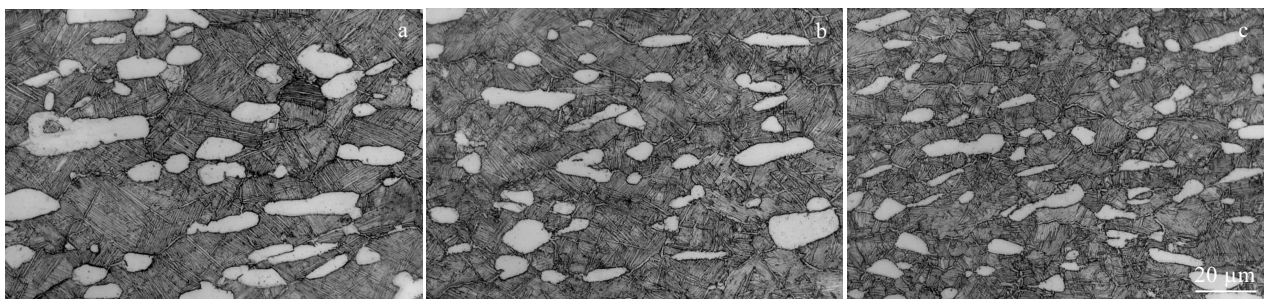


图 6 $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度下不同应变速率热压缩后的 Ti80 合金金相组织

Fig.6 Microstructures of Ti80 alloy at after hot deformation at $980 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and different strain rates: (a) 0.001 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} , and (c) 10 s^{-1}

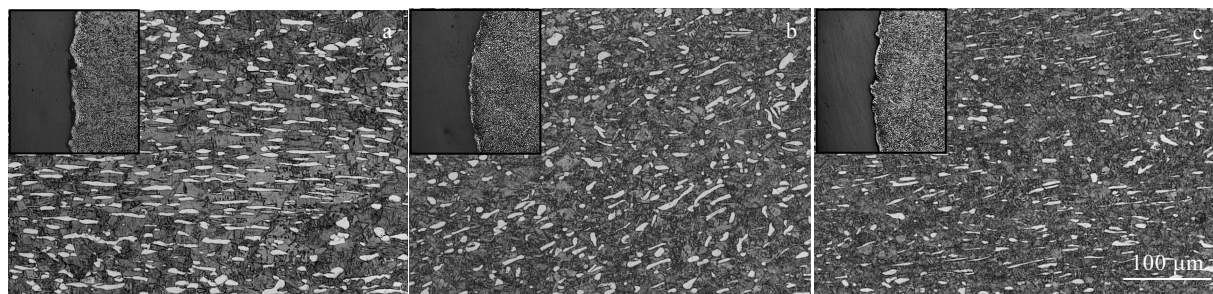


图 7 980 °C 变形温度下不同应变速率热压缩后的 Ti80 合金试样失稳特征

Fig.7 Instability characteristics of Ti80 alloy specimens with different strain rates after hot compression at 980 °C: (a) 0.001 s⁻¹, (b) 0.1 s⁻¹, and (c) 1 s⁻¹

3 结论

1) Ti80 合金为负温度敏感型、正应变速率敏感型材料, 且软化机制受变形温度的影响更为明显: 低温变形时(≤ 940 °C)以动态再结晶为主; 高温变形时(≥ 980 °C)以动态回复为主。

2) 在相变点以下温度进行热压缩时, 合金均为双态组织, 且动态再结晶晶粒数量、尺寸受变形温度和应变速率的共同影响: 变形温度升高时, 再结晶晶粒数量减少、尺寸增大; 应变速率增加时, 再结晶晶粒数量增加、尺寸减小。但在相变点以上热压缩后获得的马氏体组织中并未观察到明显再结晶现象。

3) 设计了基于 Arrhenius 双曲正弦模型的应变补偿合金本构方程 MATLAB 编程, 计算结果表示应变补偿下的 Ti80 合金本构方程精度较高, 计算值与试验值的相关系数 $R=0.994$ 、平均相对误差 $AARE=7.443\%$ 。

4) 利用 MATLAB 程序构建了基于 Murty 失稳判据的 Ti80 合金热加工图, 并通过观察试样失稳特征验证了该结果的可靠性。最终得出, 双态组织 Ti80 合金的最佳热加工参数区间为: (980~1015 °C)-(0.013~0.100 s⁻¹), 该区峰值功率耗散系数 $\eta=64\%$ 。

参考文献 References

- [1] Ye Yong(叶勇), Wang Jinyan(王金彦). *Materials Review(材料导报)*[J], 2012, 26(S2): 360
- [2] Ma Bolin, Wu Xiangdong, Li Xinjun *et al. Materials & Design*[J], 2016, 94: 9
- [3] Wang Cheng(王成), Zhao Xicheng(赵西成), Yang Xirong(杨西荣) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2010, 34(2): 298
- [4] Kim J H, Semiatin S L, Lee C S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 485(1-2): 601
- [5] Li Liang(李梁), Song Dejun(宋德军). *The Chinese Journal*

of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(1): 738

- [6] Chen Haisheng, Liu Xianghong, Liu Guangfa *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2016, 45(4): 900
- [7] Liu Jianglin(刘江林), Zeng Weidong(曾卫东), Xie Yingjie(谢英杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(11): 2742
- [8] Xiang Song(向嵩), Tan Zhilin(谭智林), Liang Yilong(梁益龙). *Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2013, 34(S2): 243
- [9] Yu Hui(于辉), Liu Shuaishuai(刘帅帅), Liu Ligan(刘利刚) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2017, 41(1): 1
- [10] Jian Haigen(蹇海根), Jiang Feng(姜锋), Zheng Xiuyuan(郑秀媛) *et al. Journal of Central South University, Science and Technology(中南大学学报, 自然科学版)*[J], 2011, 42(8): 2291
- [11] Chen Haisheng(陈海生), Luo Jinhua(罗锦华), Wang Wensheng(王文盛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(11): 2948
- [12] Jiang Peng(蒋鹏), Meng Xianliang(孟宪亮), Liu Yinqi(刘茵琪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(S3): 286
- [13] Yu Wei(余伟), Xu Lixiong(许立雄), Zhang Yi(张映) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2015, 36(10): 261
- [14] Gan Chunlei, Zheng Kaihong, Qi Wenjun *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(11): 3486
- [15] Zhu Xiaoxian(朱晓弦), Chang Hui(常辉), Xie Yingjie(谢英杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(S1): 204
- [16] Quan Guozheng(权国政), Wang Yang(王阳), Yu Chuntang(余春堂) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2013, 34(6): 169

- [17] Zhou Jin(周 军), Li Zhongkui(李中奎), Zhang Jianjun(张建军) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2007, 31(S2): 49
- [18] Xu Meng(徐 猛), Jia Weiju(贾蔚菊), Zhang Zhihao(张志豪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2708

Hot Deformation Behavior and Processing Map of Ti80 Alloy Based on MATLAB

Quan Sijia¹, Song Kexing^{1,2}, Zhang Yanmin^{1,2}, Zhang Binbin³, Wang Qi³, Li Yan^{1,2}

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

(2. Henan Key Laboratory of Advanced Non-ferrous Metals, Luoyang 471023, China)

(3. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The thermal deformation behavior and heat processability of Ti80 alloy with bimodal microstructure was investigated in temperature range of 860 ~ 1020 °C and strain rate range of 0.001 ~ 10 s⁻¹ with the maximal deformation of 50% by hot simulator, optical microscope and MATLAB software. Results show that the Ti80 alloy is negative temperature and positive strain rate sensitive material. Main softening mechanism changes from dynamic recrystallization to dynamic recovery when the temperature increases. In addition, the strain compensation constitutive equation and processing map were constructed by MATLAB programming. Correlation coefficient R between the predicted value and the experimental value of constitutive equation is 0.994, and average relative error AARE is 7.443%. The optimum processing parameter interval of Ti80 alloy is (980 ~ 1015 °C) in temperature and (0.013 ~ 0.100 s⁻¹) in strain rate, in which the peak of power dissipation η is 64%.

Key words: Ti80 alloy; thermal compression deformation; constitutive equation; processing map; MATLAB

Corresponding author: Song Kexing, Ph. D., Professor, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, P. R. China, Tel: 0086-379-64231912, E-mail: kxsong@haust.edu.cn