

基于加工图的新型钛合金斜轧穿孔温度预测

周大地, 曾卫东, 徐建伟

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 采用 GLeeble-3500 热模拟机对新型海洋用钛合金 Ti80 进行压缩试验, 研究了该合金流动应力在不同变形参数下的变化, 并建立了高温本构方程和热加工图。由加工图中优化出的高功率耗散安全区, 初步判断斜轧穿孔法制备 Ti80 合金无缝管坯时的棒料初始温度; 并由有限元模拟及物理实验予以验证。结果表明: 在同一应变速率下, Ti80 合金流动应力对温度的敏感程度不同, 在两相区变形, 流变应力会随温度的降低而急剧增大; 在单相区变形, 流动应力则相差不大。建立的应变补偿型 Arrhenius 双曲正弦函数, 经验证能够准确预测流动应力的变化。所绘热加工图明确指出了 Ti80 合金热塑性成型时 2 个优化的工艺窗口: 一是在两相区低应变速率, 即 $925\sim 975\text{ }^{\circ}\text{C}/0.01\sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 附近; 二是在单相区中等应变率, 即 $1050\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}/0.1\sim 1\text{ s}^{-1}$ 附近。进一步对棒料初始温度在 950 、 1050 和 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的斜轧穿孔过程进行三维热力耦合有限元模拟, 发现 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 穿孔时顶头轴向力会激增为单相区穿孔时的 5~6 倍, 从而导致轧卡; 而单相区穿孔均能顺利进行。为降低能耗, 最终确定棒料初始温度 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最优穿孔温度, 并且在狄舍尔斜轧穿孔机上一火次成功试制出 Ti80 合金无缝管坯。

关键词: Ti80 合金; 热加工图; 狄舍尔穿孔机; 三维热力耦合有限元模型

中图分类号: TG337.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)08-2531-06

名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 的新型海洋用钛合金 Ti80, 是我国自行研制的一种中强、高韧、耐蚀、可焊的近 α 型钛合金。在海洋和船舶领域逐渐得到广泛的应用, 可用于制造舰船管道系统以及钻井平台隔水管等^[1,2]。

在钛管生产中, 斜轧穿孔是制备无缝管坯的一种重要方法, 其穿制的毛管质量好坏将直接影响后续的轧制工序, 进而对产品质量产生重大影响。尽管斜轧穿孔机自曼氏兄弟发明以来在工业应用上已经有了上百年历史, 但由于穿孔过程中金属流动的复杂性, 长久以来一直缺乏对新合金、新产品有效的预测模型^[3-5]。穿孔工艺的制定与调整严重依赖于经验的累积, 试制周期长、试错成本高, 无疑会降低企业的经济效益。

基于动态材料模型 (DMM) 和 Prasad 失稳准则的加工图, 由于其能够成功反映材料微观组织演变机制与热变形参数之间的关系, 并直观展现热加工安全区与流变失稳区, 作为一种重要且有效的工具, 已广泛应用于各种金属材料热加工工艺的制定与优化。曾卫东课题组基于铸态钛合金热变形行为及加工图的研究, 为避免铸锭开坯锻造过程中可能出现的各种缺陷,

对 Ti60^[6], TC21^[7], Ti40^[8] 钛合金铸锭开坯工艺进行了优化。孙欢迎等人^[9]通过加工图以及相应各区域显微组织观察, 发现阻燃钛合金铸锭常规锻造开坯容易开裂, 即使是在低应变速率条件晶粒细化也不明显, 因而较优开坯工艺为挤压方式。对于锻态钛合金的热变形行为, 众多学者也进行了大量的研究工作。Peng 等人^[10]通过加工图研究等轴组织 TC4-DT 合金热成型时, 发现在两相区高温低应变速率下加工会出现超塑性变形特征。Zhang 等人^[11]通过加工图研究等轴组织 TC11 合金热变形行为时, 发现在单相区的功率耗散峰值条件下变形会发生 β 相的动态再结晶。但对 Ti80 钛合金而言, 基于加工图的斜轧穿孔温度预测尚缺乏文献报道。

本工作以新型海洋用近 α 钛合金 Ti80 为原材料, 通过恒温恒应变速率的热模拟压缩实验, 研究其流动应力在不同工艺参数条件下的变化规律, 并在此基础上建立高温本构方程和热加工图。通过加工图中优化的高功率耗散安全区初步判断斜轧穿孔法制备 Ti80 合金无缝管坯时棒料的初始温度; 然后利用有限元模拟斜轧穿孔三维热力耦合过程, 并进一步通过物理实验试制无缝管坯, 从而验证基于加工图的穿孔温度预测的准确性。

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0301203)

作者简介: 周大地, 男, 1991 年生, 博士, 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88460516, E-mail: zdd142576@163.com

1 实验

试验用料为 Ti80 钛合金棒材, 化学成分如表 1 所示, 金相法测得的合金相变点为 1010 °C。沿棒材圆周方向加工出 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试样若干个, 使其轴向与棒材轴向相同。压缩实验在 Gleeble-3500 热模拟机上进行, 变形温度为 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100 和 1150 °C; 应变速率为 0.01, 0.1, 1 和 10 s^{-1} , 变形量为 60%。系统自动采集整个实验过程中的载荷-位移数据, 并转化为真应力-应变曲线。

斜轧穿孔过程中, 坯料中心区金属在交替拉压应力作用下会形成疏松区, 顶头若能及时参与塑性加工便可将实心棒料穿制成空心毛管。根据某型号狄舍尔穿孔机的实际尺寸 (重要几何参数见表 2), 用造型软件 Pro/E 建立三维有限元模型后导入到 DEFORM-3D 中。由棒料尺寸和毛管尺寸确定空间位置关系后, 所建立的三维模型如图 1 所示。在模型中假设一推板来代替实际生产中的推钢机, 使其速度略小于轧辊线速度, 待坯料充满变形区后速度降为 0。有限元模拟前将实心 Ti80 棒料采用四面体单元划分网格, 由于穿孔造成的大变形会导致网格严重畸变, 因此采用绝对网格尺寸和网格重划分功能来改善网格质量, 提高计算精度。毛管成型过程中坯料与穿孔工具之间为剪切摩擦, 由于轧辊入口锥常做有刻痕以增大摩擦, 所以坯料与轧辊之间的摩擦系数设置为 0.9; 钼基顶头表面有

表 1 Ti80 合金化学成分

Al	Nb	Zr	Mo	Si	Fe	O	Ti
6.12	3.10	2.07	0.94	0.03	0.02	0.10	Bal.

表 2 穿孔工具几何尺寸

Roll diameter/mm	Inlet-cone angle/(°)	Outlet-cone angle/(°)	Plug diameter/mm	Disc diameter/mm
345	3.5	3	69	483

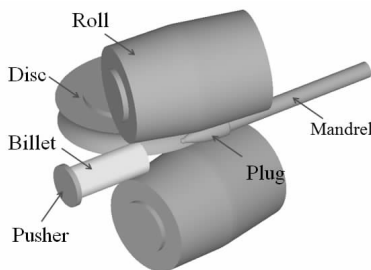


图 1 两辊斜轧穿孔机的几何模型

Fig.1 Three-dimensional geometrical modeling of Diescher's mill

氧化膜, 能够减小摩擦, 故坯料与顶头间摩擦系数设置为 0.3; 坯料与导盘间摩擦系数取中间值, 设置为 0.6。其它穿孔工艺参数如表 3 所示。

2 结果与分析

2.1 热模拟压缩实验

在对纯钛^[4]、近 α 钛合金^[3]以及 β 钛合金^[5]斜轧穿孔工艺的研究中发现, 穿孔能够顺利进行的前提是开穿温度在相变点以上, 因此研究新型 Ti80 钛合金热变形行为时, 温度要涵盖两相区到单相区较宽的温度范围; 同时, 由于斜轧穿孔速率高, 应变速率需覆盖准静态变形至较高应变速率条件下的变形。

图 2 为 Ti80 钛合金在不同变形温度和应变速率条件下的真应力-应变曲线。由曲线可以看出, Ti80 合金流动应力随温度的升高而降低, 随应变速率的增大而增大^[12]。变形初期, 由于位错密度的急剧增大导致加工硬化, 流动应力在小应变条件 ($\epsilon \leq 0.1$) 下便迅速达到峰值。随变形程度增加, 在两相区变形 ($T \leq 1000 \text{ °C}$) 时, 流动应力呈现连续软化特征, 且温度越低应变速率越大, 软化越明显; 有研究表明软化主要是由变形热效应、动态再结晶、动态回复以及流动失稳等原因所导致^[7,10]。在单相区变形时 ($T \geq 1050 \text{ °C}$), Ti80 合金流动应力差别不大, 均呈现稳态流变特征; 有文献归因于动态回复、动态再结晶以及超塑性变形^[6,10]。

2.1.1 本构方程

金属材料热变形是一个热激活的过程, 流动应力与应变速率和变形温度之间的关系可以通过 Arrhenius 双曲正弦函数进行耦合^[13], 如公式(1)~(3)所示:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (1)$$

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

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

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}), σ 为流动应力(MPa), Q 为表观激活能 (kJ/mol), R 为气体常数 ($8.315 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 为热力学温度 (K), $A_1, A_2, A, n_1, \beta, \alpha, n$ 为材料参数, 且 $\alpha = \beta/n_1$ 。

对公式(1), (2), (3)两边分别取自然对数后绘制 $\ln\sigma - \ln\dot{\epsilon}$, $\sigma - \ln\dot{\epsilon}$, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon}$ 以及 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 关系图, 采用最小二乘法进行线性拟合即可得到

表 3 斜轧穿孔工艺参数

Table 3 Important rotary piercing parameters of Diescher's mill

Plug advance/mm	Feed angle/(°)	Rolling speed/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	Plug temperature/°C	Roll and disc temperature/°C
40	10	30	300	100

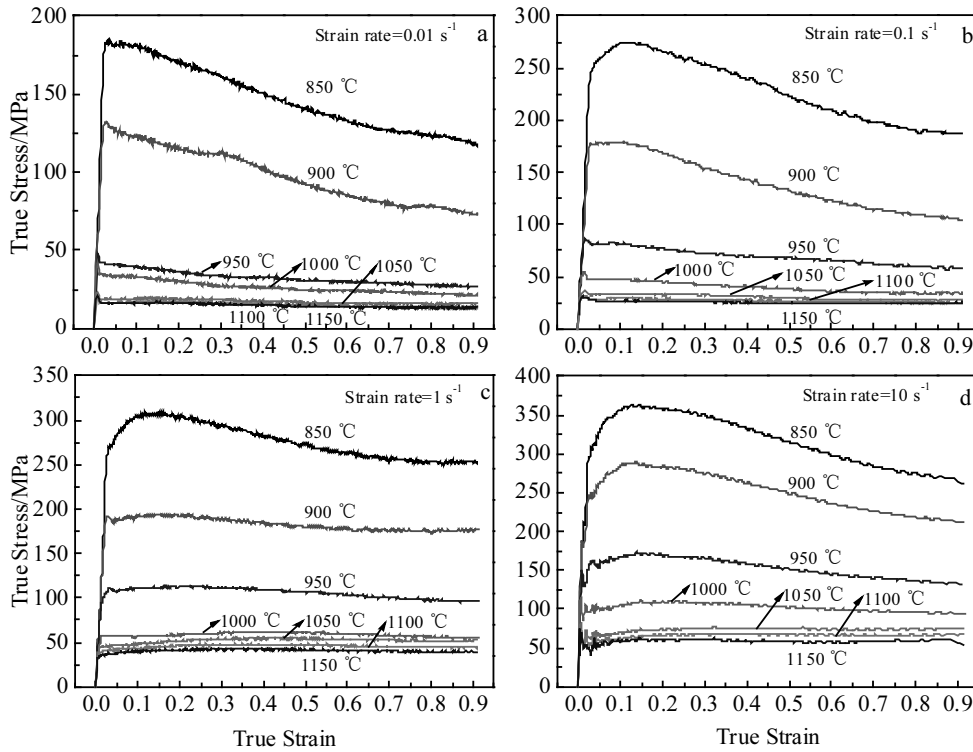


图 2 Ti80 合金不同应变速率下的真应力-应变曲线

Fig.2 Flow stress-strain curves for Ti80 alloy at strain rate of 0.01 s⁻¹ (a), 0.1 s⁻¹ (b), 1 s⁻¹ (c) and 10 s⁻¹ (d)

Arrhenius 方程中的各项参数。以应变 0.8 为例建立的本构方程在两相区和单相区的形式分别如公式(4)和(5)所示:

$$\dot{\epsilon} = e^{69.33} [\sinh(0.009\sigma)]^{4.3} \exp(-705/RT) \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = e^{8.67} [\sinh(0.029\sigma)]^{3.3} \exp(-156.4/RT) \quad (5)$$

本构方程是材料进行加工过程有限元模拟的基础，其精度决定了仿真结果的准确程度。常用温度补偿的应变速率因子 Z 参数 ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$)，来验证所得本构模型的精度^[6]。图 3 所示为 lnZ 与 ln[sinh(ασ)] 线性拟合的结果，发现在两相区两者的相关系数为 0.984，而在单相区两者的相关系数高达 0.992，充分证明了真应变 0.8 下的本构模型具有较高的预测精度。

有研究表明应变对金属热变形行为的影响不可忽视^[14]，必须对现有模型予以修正。图 4 所示为各模型参数随应变的变化。假设这些参数为应变的多项式函数，通过数据拟合显示只有 7 次多项式具有较高的相关系数 R。因此，添加了应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦函数模型能够为后续斜轧穿孔三维热力耦合有限元仿真提供充分的数据支持。

2.1.2 热加工图

基于动态材料模型 (dynamic material model) 和 Prasad 失稳准则的加工图由功率耗散图和失稳图叠加

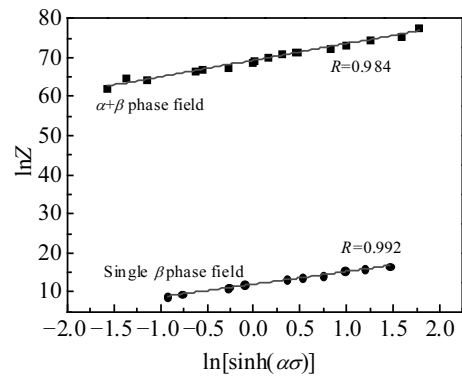


图 3 Z 参数与流动应力的关系

Fig.3 Plot of Z parameter as a function of flow stress in α+β and single β phase field

而成，可以清楚表达材料显微组织对所施加的工艺参数的响应。图 5 所示为 Ti80 合金在真应变 0.9 时所对应的加工图，图中阴影部分为流变失稳区，等值线上的数字表示功率耗散系数 (η)。η 值越大，组织演变耗散的能量占比越大，组织形态变化也越大。

从图中可以发现：在 1010 °C 附近，功率耗散系数等值线发生了明显的弯折，这种弯折被认为是由合

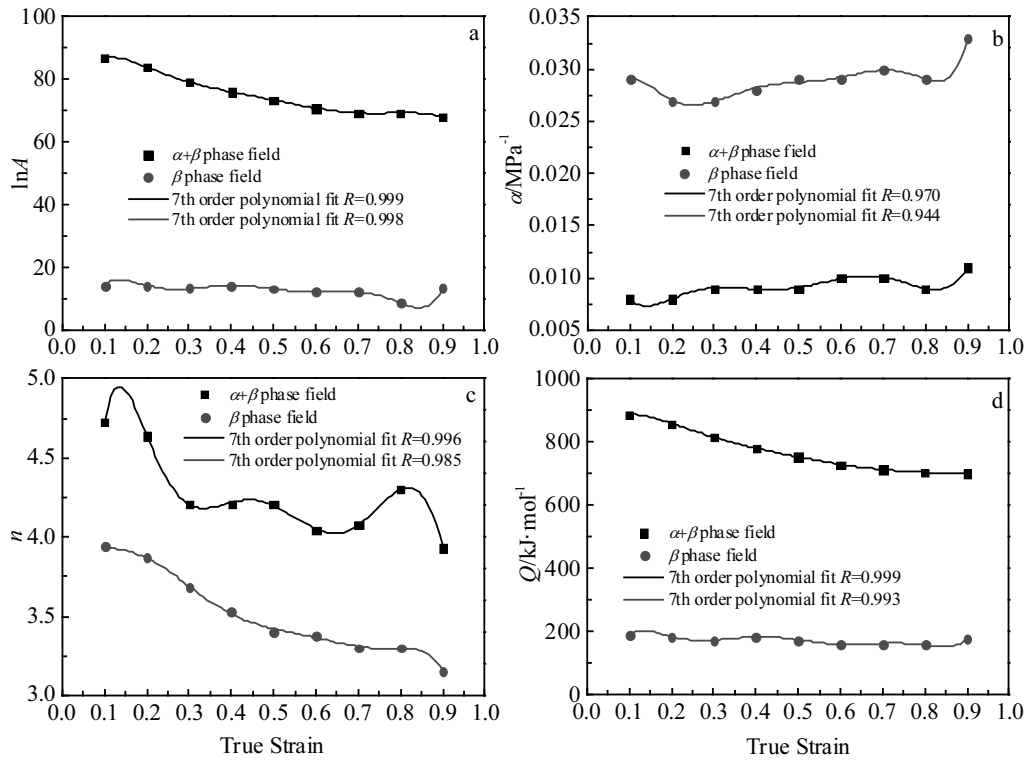


图 4 材料参数随应变的变化

Fig.4 Relationship between $\ln A$ (a), α (b), n (c), Q (d) and strain

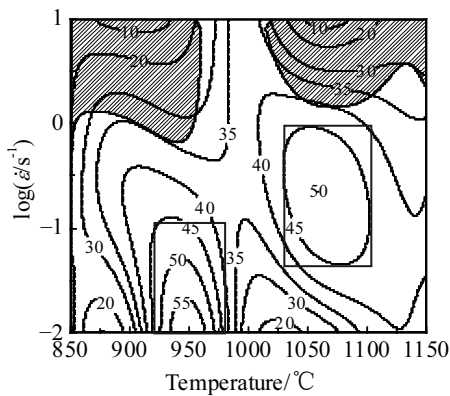


图 5 Ti80 合金在真应变为 0.9 时的加工图

Fig.5 Processing map for Ti80 alloy at strain of 0.9

金相变造成的，这与 TC4-DT^[10]，TC11^[15]等合金中的实验现象相一致。图中主要包括了 2 个加工时应避免的流变失稳区和 2 个较优的热加工工艺窗口（蓝线框所示）。

2 个失稳区，都在高应变率范围 ($\geq 1 \text{ s}^{-1}$)，通常由流动局域化、剪切带、楔形开裂、自由表面的纵向开裂等原因所致^[10,16]。2 个高功率耗散的安全区，1 个在两相区低应变速率，即 $925\sim 975 \text{ }^\circ\text{C}/0.01\sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 附近，该区域功率耗散系数均超过 45%，在 $950 \text{ }^\circ\text{C}/0.01$

s^{-1} 条件下达到峰值(60%)，通常认为 η 在 55%~ 60%，可能发生超塑性变形^[10,11,17]；1 个在单相区中等应变率，即 $1050\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}/0.1\sim 1 \text{ s}^{-1}$ 附近，该区域功率耗散系数峰值可达 50%，通常认为在该区域会发生 β 相的动态再结晶^[11,16,18]。

为了改善材料的可加工性以及控制微观组织，在 2 个高功率耗散安全区进行热变形无疑是很好的选择。但是，考虑到 Ti80 合金变形抗力随温度降低会显著提高，从而增大斜轧穿孔过程发生轧卡的几率；且穿孔过程中应变速率普遍在 1 s^{-1} 量级甚至更高^[19]，所以由加工图初步判断采用斜轧穿孔法制备 Ti80 合金无缝管坯时的棒料初始温度应选择在单相区，即 $1050\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围。

2.2 斜轧穿孔有限元模拟及物理验证

棒料初始温度是斜轧穿孔工艺调控的关键参数之一。要想顺利穿制出 Ti80 合金无缝管坯，穿孔温度既不能偏低，以免材料变形抗力大，金属流动受阻，造成轴向力增大以至发生轧卡；又不能太高，以免能耗高、金属烧损大及粗晶造成的性能恶化^[5]。因此，必须选择合适的开穿温度。

针对加工图优化出的 2 个工艺窗口，利用图 1 所建三维有限元模型，对 Ti80 合金棒料初始温度在 950、1050 和 1100 $^\circ\text{C}$ 条件下的斜轧穿孔过程进行热力耦合

计算。结果表明：两相区 950 °C 穿孔时发生了轧卡，未能穿透；而在单相区 1050 和 1100 °C 均能顺利完成热穿孔。顶头轴向力随温度的变化如图 6 所示。可以发现：两相区穿孔时的顶头轴向力会激增至单相区穿孔顶头轴向力的 5~6 倍，这是由于穿孔速率不能满足准静态变形条件所致。图 7 所示为 1050 °C 稳定穿孔阶段坯料外表面及纵剖面的应变速率分布。从图中可以看出，除坯料与导围工具接触地方外，绝大多数坯料所承受的应变速率都在 1 s^{-1} 量级，从而验证了加工图中两相区低应变速率工艺窗口不适合斜轧穿孔变形。

单相区 1050 和 1100 °C 热穿孔均能顺利进行且顶头轴向力相差不大，为降低能耗，最终选择 1050 °C 作为实际斜轧穿孔时的 Ti80 合金棒料初始温度。按照有限元模拟给定的工艺参数，在实际狄舍尔穿孔机上进

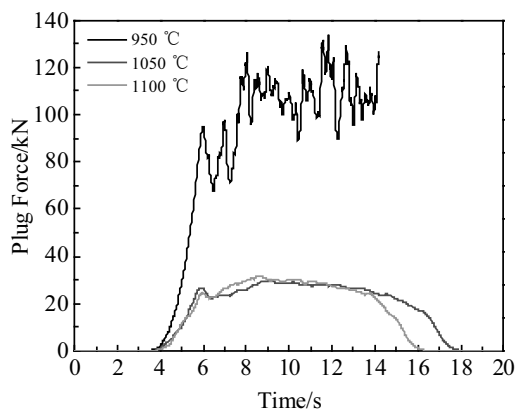


图 6 不同温度下的顶头轴向力

Fig.6 Plug force with different temperatures

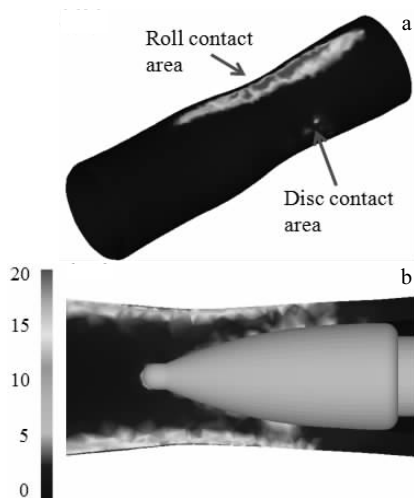


图 7 稳定穿孔阶段坯料外表面及纵剖面的应变速率分布

Fig.7 Strain rate distribution in the billet for stable piercing process: (a) outside the surface and (b) on the cross section

行物理实验，结果顺利穿制出 $\Phi 85 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 规格的 Ti80 合金无缝管坯，如图 8 所示。毛管内外表面光滑、无明显可见缺陷。



图 8 Ti80 合金斜轧穿孔管坯的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of Ti80 alloy tube through piercing process

3 结 论

1) Ti80 钛合金是一种温度和应变速率敏感材料，其流动应力会随变形温度的升高和应变速率的减小而降低。但在同一应变速率下，流动应力对温度的敏感程度不同：在两相区变形，流动应力会随温度的降低急剧增大；而在单相区变形，流动应力即使是在高应变速率条件差别也不大。

2) 应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦函数模型，经验证能够准确预测流动应力的变化。以真应变 0.8 为例，在两相区热变形的本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = e^{69.33} [\sinh(0.009\sigma)]^{4.3} \exp(-705/RT);$$

在单相区热变形的本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = e^{8.67} [\sinh(0.029\sigma)]^{3.3} \exp(-156.4/RT)。$$

3) 热加工图指明 Ti80 合金热塑性成型时 2 个优化的工艺窗口，1 个在两相区低应变速率，即 925~975 °C/0.01~0.1 s^{-1} 附近；1 个在单相区中等应变速率，即 1050~1100 °C/0.1~1 s^{-1} 附近。考虑到 Ti80 合金流动应力随温度的降低会显著提高，以及穿孔过程中应变速率在 1 s^{-1} 量级，初步判断 1050~1100 °C 为 Ti80 合金斜轧穿孔适宜温度范围。

4) 三维热力耦合有限元模拟结果显示在优化出的单相区 1050 和 1100 °C 热穿孔均能顺利进行，且顶头轴向力相差不大，仅为 950 °C 热穿孔轧卡时的 1/6~1/5。为降低能耗，最终确定 1050 °C 为 Ti80 合金斜轧穿孔适宜温度。该温度条件下，在实验轧机上一火次顺利穿制出无缝管坯。

参考文献 References

- [1] Chen Jun(陈 军), Zhao Yongqing(赵永庆), Chang Hui(常 辉) *et al. Materials Review(材料导报)*[J], 2005, 19(6): 67
- [2] Fu Zhaodi(富招弟), Li Zuochen(李佐臣), Huang Zhanghong(黄张洪) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2012, 41(14): 105

- [3] Zhao Bin(赵彬), Zhao Yongqing(赵永庆), Yang Yingli(杨英丽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(3): 202
- [4] Quan Yaping(权亚平), Wei Shouyong(魏寿庸), Yuan Jidong(袁继东) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2011, 28(2): 33
- [5] Zhao Hengzhang(赵恒章), Xin Zhengping(奚正平), Guo Dizi(郭荻子) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(3): 671
- [6] Peng Wenwen, Zeng Weidong, Wang Qingjiang *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 571: 116
- [7] Feng Fei(冯菲), Zeng Weidong(曾卫东), Zhu Yanchun(朱艳春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 251
- [8] Zeng Weidong(曾卫东), Zhou Yigang(周义刚), Shu Ying(舒滢) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(1): 1
- [9] Sun Huangying(孙欢迎), Cao Jingxia(曹京霞), Wang Bao(王宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(11): 2351
- [10] Peng Xiaona, Guo Hongzhen, Shi Zhifeng *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 605: 80
- [11] Zhang X Y, Li M Q, Li H *et al. Materials and Design*[J], 2010, 31(6): 2851
- [12] Zhu Xiaoxuan(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
- [13] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [14] 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
- [15] Huang L J, Geng L, Li A B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 505(1-2): 136
- [16] Wang Zhe, Wang Xinnan, Zhu Zhishou. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 692: 149
- [17] Jia Weiju, Zeng Weidong, Zhou Yigang *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(12): 4068
- [18] Jia Weiju, Zeng Weidong, Liu Jianrong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 530: 135
- [19] Pater Z, Kazanecki J, Bartnicki J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 177(1-3): 167

Prediction of Piercing Temperature via Processing Map for a New Marine Titanium Alloy

Zhou Dadi, Zeng Weidong, Xu Jianwei

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A new marine titanium alloy Ti80 was isothermally compressed on a Gleeble-3500 thermal simulator. The variation of flow stress under different processing parameters was studied and the elevated temperature constitutive equation and processing map were established. Based on the analysis of high power dissipation efficiency in safe region, the initial temperature of the bar stock was preliminarily determined as Ti80 alloy seamless tube was prepared through rotary piercing process. Finally, the estimation was verified by 3D thermo-mechanical coupled simulation as well as physical experiment. Results show that the sensitivity of flow stress of Ti80 alloy to the temperature varies under different strain rates. The flow stress increases sharply with the decreasing of temperature in $\alpha+\beta$ phase field; while there is slight difference in single β phase field. Taking strain compensation into consideration, the modified hyperbolic-sine Arrhenius type equation could give an accurate estimation of flow stress for hot deformation of Ti80 titanium alloy. The developed processing map shows two high power dissipation efficiency domains: one is in $\alpha+\beta$ phase field with low strain rate, i.e. 925~975 °C/0.01~0.1 s⁻¹; the other is in the β phase field with intermediate strain rate, i.e. 1050~1100 °C/0.1~1 s⁻¹. Finite element simulation for rotary piercing process was further conducted at initial temperature of 950, 1050 and 1100 °C for bar stocks. It is found that the plug force at temperature of 950 °C increases significantly to about 5~6 times higher than that in single β phase field, and what is worse, piercing in $\alpha+\beta$ phase field leads to rolled stock jamming in Diescher's mill. However, the piercing process in β phase field can be conducted well. For reducing energy consumption, the temperature of 1050 °C is considered as the optimal choice. In the end, Ti80 alloy seamless tube was produced successfully in Diescher's mill.

Key words: Ti80 alloy; processing map; Diescher's mill; 3D thermal-mechanical coupling model

Corresponding author: Zeng Weidong, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494298, E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn