

TC25钛合金的热变形行为及热加工图

朱红¹, 蔡钢²

1. 贵州工业职业技术学院化学工程系 贵州贵阳 550008

2. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院 广东广州 511434

摘要: 利用DIL 805 A/D热模拟相变仪在950~1100℃、应变速率0.001~10s⁻¹、变形程度为50%的条件下对TC25钛合金进行热变形研究。根据试验数据绘制了TC25钛合金的真应力-真应变曲线,并对高应变速率条件下的变形温度进行修正,建立了TC25钛合金变形温度未修正和修正后的热加工图。结果表明:TC25钛合金在950~1100℃范围内变形的流变应力随着变形温度升高和应变速率降低而减小;高应变速率条件下,绝热效应导致温升更加显著;在相同应变速率条件下,变形温度越低,绝热升温现象更加明显;修正变形温度后的热加工图中流变安全区比未修正前的范围要大。

关键词: TC25合金; 热变形; 修正温度; 热加工图

1 序言

TC25合金是20世纪70年代初期苏联研制成功的典型 $\alpha + \beta$ 型马氏体热强钛合金,名义成分为:Ti-6.5Al-2Zr-2Sn-2Mo-1W-0.2Si^[1]。TC25钛合金能在500~550℃内长时间工作,是航空发动机压气机盘、机匣等结构的理想材料之一。在合适的锻造变形条件和热处理制度下可以获得理想的综合力学性能^[2, 3]。

热加工图是用于研究金属高温变形行为的有效方法,能反映金属在高温状态下变形过程中组织演化与变形参数之间的关系。同时,还能反映金属在塑性加工过程中的安全区域和危险区域。但是在热变形过程中,变形可能会引起试样温度的变化,从而使合金流变应力发生变化,不能获得准确的本构方程和热加工图,因此需要对变形温度进行修正。利用合金的热加工图,可以优化合金的热加工参数,从而对改善合金的加工性能、调控显微组织、避免缺陷的产生均具有重要的指导意义,目前已广泛应用于钛合金、铝合金和钢铁材料的热加工生产指导中^[4-6]。

本文以TC25钛合金为研究对象,对其进行高温热压缩试验,通过试验数据绘制真应力-真应变曲线,研究其热变形行为,并对高应变速率条件下的

变形温度进行修正,建立了该合金在变形温度未修正和修正后的热加工图,以期对TC25合金的热加工工艺优化提供理论依据和指导。

2 试验材料与方法

试验所用材料为某企业提供的直径25mm的TC25钛合金棒材,通过膨胀法测量得到合金的相变点为1029℃±5℃。图1所示为TC25钛合金试样的原始组织,呈典型的双态组织,白色等轴状的 α 相均匀地分布在 β 转变组织上。通过电火花线切割方式从合金棒材上切取 $\phi 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的热模拟试样若干,并用金相砂纸将表面磨至光亮。然后在德国巴赫的DIL 805 A/D高温相变/热模拟仪上进行热模拟压缩试验,仪器的控温精度±0.1℃。试验变形温度为950℃、980℃、1010℃、1040℃、1070℃、1100℃,应变速率为0.001s⁻¹、0.01s⁻¹、0.1s⁻¹、1s⁻¹和

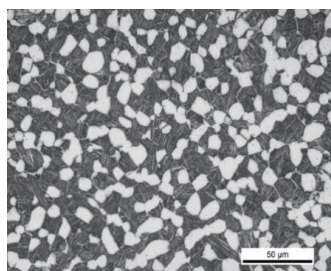


图1 TC25合金的原始组织

10s^{-1} ，变形量为50%。具体加热方式如下：以加热速率为 $300\text{℃}/\text{min}$ 将试样加热至变形温度，保温6min后进行变形，变形后以冷却速率为 $150\text{℃}/\text{s}$ 冷至室温。为减少试样两端的摩擦影响，在试样两端垫上钼片。试样温度由焊接在样品上的热电偶实时反馈给计算机。

3 结果与讨论

3.1 真应力-真应变曲线

图2所示为TC25钛合金在 950℃ 、 1010℃ 、 1070℃ 时不同应变速率条件下的真应力-真应变曲线。由图2可以看出，在变形温度恒定的条件下，合金的流变应力随着应变速率的增加而显著增大。在相同应变速率条件下，随着合金变形温度的升高，合金的流变应力逐渐降低。所有试样在变形初期，合金的流变应力随应变量的增加而迅速上升，呈近似垂直直线关系，这主要由于位错密度的快速增加所致^[7]。但随着合金形变量的增大，不同条件下的真应力-真应变曲线的变化趋势不尽相同。当变形温度为 $950\sim 1010\text{℃}$ 、应变速率为 0.001s^{-1} 时，合金的流变应力随着应变量增大而缓慢上升，未出现流变应力峰值，呈稳态流变特征；应变速率在 $0.01\sim 1\text{s}^{-1}$ 的条件下，随着应变量的增加，流变应力迅速增加到峰值后出现突降，再缓慢上升，最终达到稳态流变阶段。有研究表明，在该过程中发生了动态回复、动态再结晶^[7]。当应变速率为 10s^{-1} 时，随应变量增加，流变应力先快速上升，然后再缓慢增加，在真应变量为0.3左右时达到峰值后开始降低，研究表明该现象归因于变形热效率、动态再结晶和超塑性等^[8, 9]。

3.2 高应变速率下的绝热升温现象

图3所示为TC25钛合金在变形温度为 950℃ 和

1100℃ 、应变速率为 0.001s^{-1} 和 10s^{-1} 时，真应力、真应变和试样实际温度之间的关系。从图3可以看出，当合金在应变速率为 0.001s^{-1} 时，试样实际温度与预设变形温度基本相同，说明在变形过程中，试样的温度几乎没有发生变化，合金的流变应力也基本保持不变，压缩过程在等温条件下完成。这意味着合金在应变速率较低的情况下，变形所产生的温度散失到压头或周围环境中，没有使试样的温度上升。而当应变速率为 10s^{-1} 时，试样实际温度随着应变量增大而明显上升，如图中虚线所示。这是因为TC25合金在高应变速率下进行变形，变形时间短，变形产生的大量热量来不及散失，导致试样温度明显升高，最后使合金的流变应力下降^[10]。

从图3还可以看出，当合金在 950℃ 变形时，试样变形导致的升温最高约为 28℃ ；而 1100℃ 时，试样的变形导致的升温最高约为 10.5℃ ，并且合金在变形温度为 950℃ 的流变应力下降速率明显高于 1100℃ 时的速率，与试样实际温度升高速率之间有着良好对应关系。这说明合金在相同应变速率条件下，变形温度越低，绝热升温现象越明显。因此，在高应变速率条件下，TC25钛合金等温压缩形变产生的变形升温现象对真应力-真应变曲线影响较大，因此有必要对其变形温度进行修正。

3.3 高应变速率下温度修正及流变应力曲线

为了建立精准的TC25钛合金的热加工图，对高应变速率条件下的温度进行修正。在本试验中，当应变速率较小时，绝热升温现象不明显，因此只对高应变速率条件下（ 10s^{-1} ）的变形温度进行修正。修正时，假定试样在变形过程中升温是均匀的，而且合金的比热容 c 和密度 ρ 不随温度变化，由相关文献^[11]可知，试样的变形升温 ΔT 可用式（1）表示，

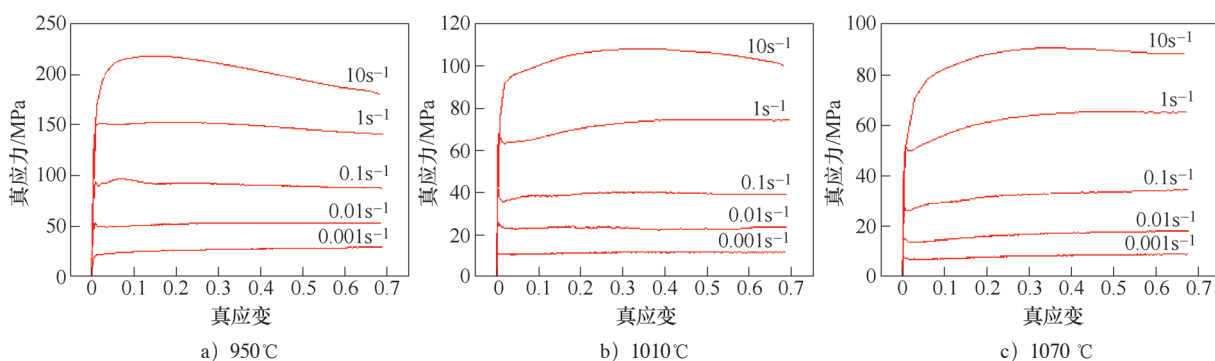


图2 TC25钛合金在不同变形温度下的真应力-真应变曲线

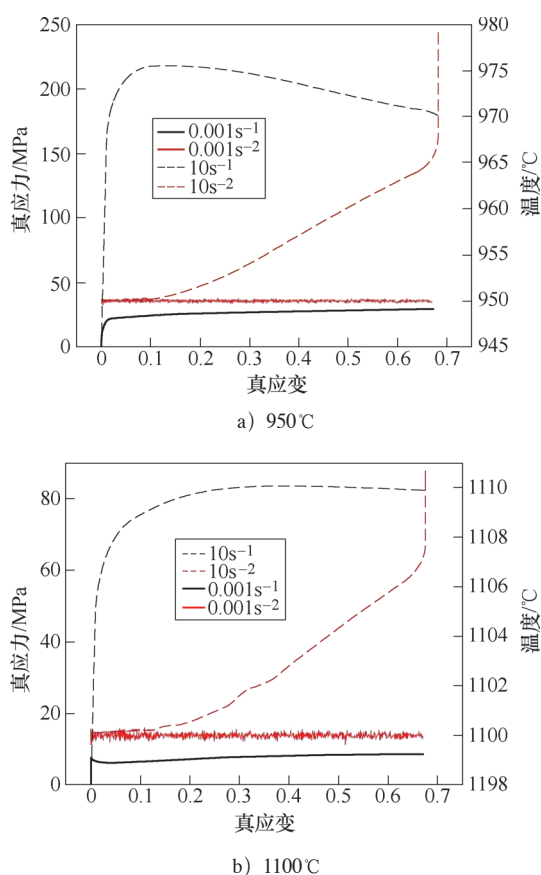


图3 TC25合金在不同温度下真应变-真应力和实际测量温度之间的关系曲线

即

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c} \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中 ΔT ——变形升温 (°C) ;

ϵ ——应变变量;

σ ——流变应力 (MPa) ;

η ——绝热因子;

ρ ——合金的密度 (kg/cm^3) ;

c ——比热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] 。

由相关文献^[12]可知, 应变速率为 10s^{-1} 时, 绝热因子 $\eta=1$ 。

根据式 (1), 可以计算出 TC25 钛合金在应变速率 10s^{-1} 条件下, 不同预设变形温度时的绝热升温与真应变变量之间的关系图, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 各预设变形温度下的变形导致的温度升高规律基本相同, 随着变形量增加呈线性升高, 并且在相同应变变量下, 随着预设变形温度的降低, 变形导致的温升 ΔT 越大, 变化趋势与实际温度监测的一致。变形温升 ΔT 引起的流变应力下降, 其应力下降幅度 $\Delta\sigma$ 可用式 (2) 表示^[13], 即

$$\Delta\sigma = \left[\partial\sigma / (1/T) \right]_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \left[1/(T_n + \Delta T) - 1/T_n \right] \quad (2)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——应力下降幅度;

σ ——试验获得的流变应力 (MPa) ;

T ——实际变形温度 (°C) ;

T_n ——预设的变形温度 (°C) 。

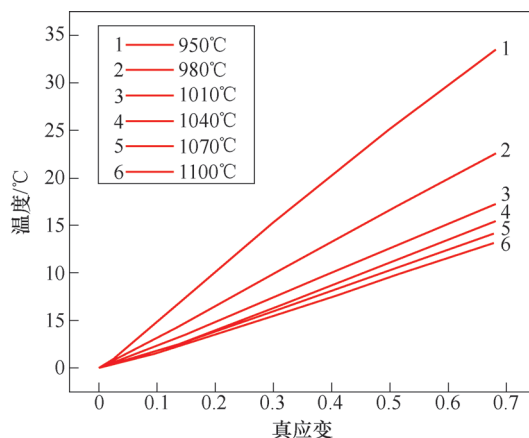


图4 TC25合金在不同变形条件下的变形升温效应

由式 (2) 可以得到经过温度修正后高应变速率条件下的真应力-真应变曲线, 如图 5 所示。由图可以看出, 修正后的流变应力比未修正的明显增大, 而且变形温度越低, 修正后的流变应力增加也越明显, 这与前面的变形温升 ΔT 的变化保持一致。在应变速率为 10s^{-1} 条件下等温压缩, 流变应力迅速增加, 然后流变应力再缓慢增加, 在应变变量 > 0.3 后流变应力才趋于平稳, 达到稳态变形阶段。

3.4 热加工图

图 6a 和图 6b 所示分别为 TC25 钛合金在真应变量为 0.5 时, 未修正变形温度和修正后的热加工图。由图可以看出, 热加工图由加工失稳区 (阴影部分) 和加工安全区构成。随着变形过程中应变速率的增加, 功率耗散系数有下降趋势。加工安全区的功率耗散系数值 η 值 $> 30\%$, 功率耗散系数值较大的区域集中在变形温度为 $1000 \sim 1100^\circ\text{C}$ 、应变速率为 $0.001 \sim 0.01\text{s}^{-1}$ 区域。由图 6b 可以看出, 修正变形温度后的热加工图中流变失稳区比未修正的减小了很多, 可以表明变形过程中的绝热升温效应对热加工图的影响较大。对于传热系数较小的钛合金来说, 要获得准确的等温、恒应变速率下的热加工图, 就必须对变形温度进行修正, 这对工艺参数优化更有指导意义。

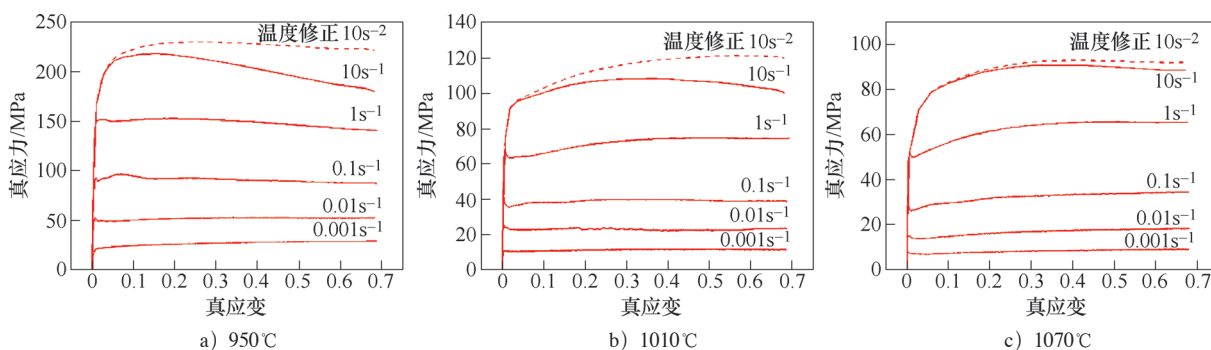


图5 TC25钛合金修正后的真应力-真应变曲线

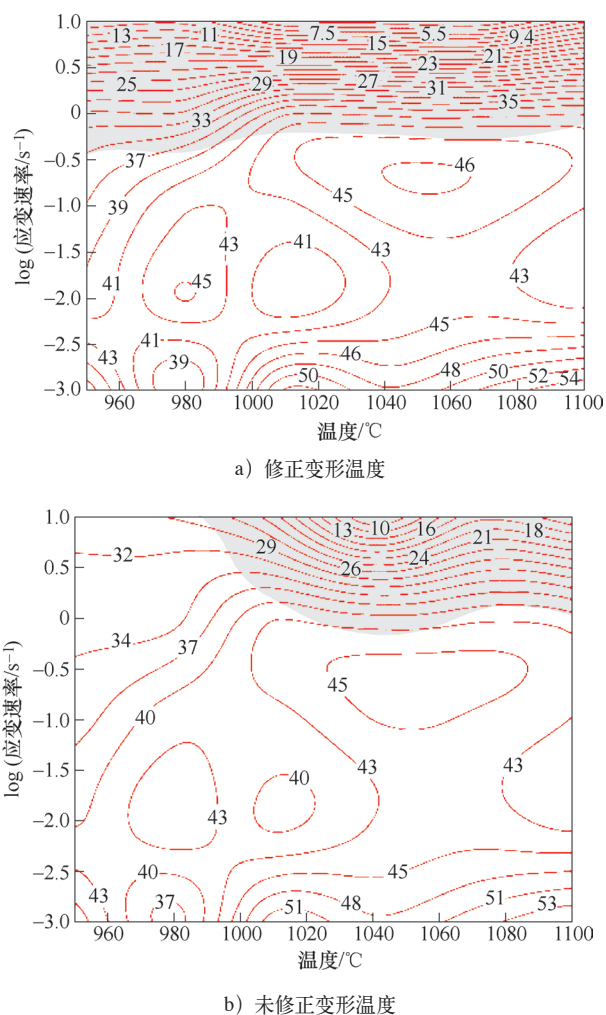


图6 TC25钛合金在应变量为0.5时的加工图

4 结束语

- 1) TC25钛合金在高温热压缩过程中, 流变应力随着变形温度升高和应变速率下降而减小。
- 2) TC25钛合金在高应变速率条件下变形时, 绝热效应导致温升更加显著。在变形速率恒定条件下, 变形温度越低, 绝热升温现象越明显。
- 3) TC25钛合金最佳高温变形工艺参数: 变形

温度为1000~1100℃、应变速率为0.001~0.01s⁻¹。

参考文献:

- [1] 魏寿庸, 王青江, 何瑜, 等.航空发动机用BT25和BT25y热强钛合金评述[J].钛工业进展, 2013, 30(4): 9-14.
- [2] 王杨, 曾卫东, 马雄, 等.BT25钛合金在两相区变形过程中的显微组织定量分析[J].中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1861-1865.
- [3] 彭新元, 刘元春, 周贤良, 等.双重退火对TC25钛合金组织与性能的影响[J].金属热处理, 2010, 35(4): 42-46.
- [4] 孙欢迎, 曹京霞, 王宝, 等.铸态阻燃钛合金的热加工图与变形机制研究[J].稀有金属材料与工程, 2013, 42(12): 2541-2546.
- [5] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T.Processing maps for hot working of titanium alloys[J].Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 82-84.
- [6] 周军, 曾卫东, 舒滢, 等.应用热加工图研究TC17合金片状组织球化规律[J].稀有金属材料与工程, 2006, 35(2): 265-269.
- [7] 张思远, 毛小南, 戚运莲, 等.β-CEZ 钛合金的热变形行为及加工图[J].稀有金属材料与工程, 2017, 46(4): 943-978.
- [8] 周大地, 曾卫东, 徐建伟.基于加工图的新型钛合金斜轧穿孔温度预测[J].稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2531-2536.
- [9] 曾卫东, 周义刚, 周军, 等.加工图理论研究进展[J].稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673-677.
- [10] 吴文祥, 韩逸, 钟皓, 等.2026铝合金热压缩变形流变应力行为[J].中国有色金属学报, 2009(19): 1403-1408.

冷锻件的预处理

郝丰林¹, 刘小丹¹, 蒋勇², 余国增²

1. 江苏双环齿轮有限公司 江苏淮安 223200

2. 苏州工业园区久禾工业炉有限公司 江苏苏州 215021

摘要: 通过对冷锻工艺的了解, 对一次正火组织不合格原因进行分析, 并提出了生产预防措施。

关键词: 冷锻; 正火温度; 预处理

1 序言

冷锻是冷模锻、冷挤压、冷镦等塑性加工的统称。冷锻是对物料再结晶温度以下的成形加工, 是在回复温度以下进行的锻造。生产中习惯把不加热毛坯进行的锻造称为冷锻。

工件在冷锻的过程中会发生加工硬化, 这是因为在钢中产生大量位错, 这些位错互相纠结在一起, 不能活动, 发生硬化。此外, 钢中的晶粒沿加工方向被拉长, 形成加工结构组织, 因此在多次冷锻过程中, 加工硬化会导致冷锻裂纹敏感性升高。

冷锻件表面质量好, 尺寸精度高, 能代替一些切削加工。冷锻能使金属强化, 提高零件的强度。冷锻可以避免金属加热出现的缺陷, 获得较高的精度和表面质量, 并能提高工件的强度和硬度, 节省能源, 并可进行高精度的近终形成形, 降低部件制造成本。冷锻是可以高精度、大批量、低成本制造各种机械结构零部件的加工方法。由于冷锻是在室温下进行加工, 因此有利于保护环境。

2 冷锻材料

由于是对坯料进行冷加工, 所以难以进行复杂形状部件的成形, 并且受到材料加工极限和设备条件的制约。此外, 虽然由于加工硬化可以改善材料

的材质, 但由于应变导入, 也产生了一些问题。但冷锻变形抗力大, 需用较大吨位的设备。

冷锻材料大都是室温下变形抗力较小且塑性较好的铝及部分铝合金、铜及部分铜合金、低碳钢、中碳钢、低合金结构钢。冷锻性好的材料是具有低变形抗力和高变形能的材料。为降低钢的变形抗力, 需要使冷锻前的材料处于软化状态。为此, 一般要对材料进行软化退火或球化退火。对于具有大量质软且延展性高(铁素体组织比例高的钢材)的低碳钢和渗碳钢, 可以在轧制状态下进行冷锻。但碳含量高的强韧钢和轴承钢, 一般要在冷锻前进行球化退火。即使是球化退火钢, 也会因成分的不同, 导致变形抗力不同。多次变形时需增加再结晶退火和其他辅助工序。对于钢材表面尽量是加工后的面, 可以减少冷锻后表面缺陷。对于表面有脱碳的材料, 在冷锻时表面会产生微细裂纹, 或使疲劳强度下降, 或是调质后硬度不足。因此, 对冷锻材料要有脱碳层允许深度的规定。此外, 材料表面增碳, 可提高材料的表面能。在对表面有残余应力的坯料进行冷锻时, 在自由表面上产生的拉应力会与残余应力相抵消, 从而可提高变形能。一般情况是, 根据球化率大小来确定冷锻钢的合格标准。钢在塑性加工时的断裂主要是延性断裂。延性断

[11] JIA W, ZENG W D, ZHOU Y G, et al. High-temperature deformation behavior of Ti60 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 4068-4074.

[12] MALINOV S, SHA W, GUO Z, et al. Synchrotron X-ray diffraction study of the phase

transformations in titanium alloys[J]. Materials Characterization, 2002, 48: 279-295.

[13] 罗坤杰, 张麦仓, 王宝顺, 等. Hastelloy G-3合金热变形特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4): 605-609.