

变形温度、变形速度与TC6、TC11

钛合金组织、性能关系的研究

南昌航空工业学院 陈玉秀

一、前言

在传统拉伸试验时,金属的变形速度与实际锻压成形时的速度相差较大,显然,在此条件下对某种金属材料作出的塑性图,是难以准确地指导其锻压规范的制定的。通常进行瞬时拉伸试验时,试验机两夹头的相对速度不大于试验原标距长度的8%/min。对标距长度为30mm的试样,其相对速度约为3mm/min。而液压机的工作速度约为1~100mm/s,通用锻锤的工作速度约为5000~9000mm/s,高速锤的工作速度为15~25m/s。

本试验研究力求在较高速度下对TC6、TC11钛合金进行不同温度、不同速度下的瞬时拉伸。根据现有试验条件,只介绍在相当于液压机的工作速度范围内改变变形温度(T)和变形速度($\dot{\epsilon}$)来研究TC6、TC11钛合金的性能与组织的变化,同时探索这两种钛合金开始产生超塑性现象的 $T-\dot{\epsilon}$ 参数,并绘制塑性图。研究在不同 T 、 $\dot{\epsilon}$ 条件下瞬时拉伸的性能数据与相应的电镜组织、断口特征,力求把宏观力学问题与塑性成形原理紧密结合,以便更合理地制定塑性成形时的 $T-V$ 热力学规范,进而更有效地控制钛合金锻件的组织与性能,充分发挥材料的潜力。

二、试验方法

试验材料为TC6、TC11钛合金轧棒。试验采用 $\phi 5\text{mm}$ 标准试样,其标距长度 $L_0=30\text{mm}$ 。

原始组织为等轴组织。

本试验方法是將试验机的工作速度分别调整到3、100和200mm/min。试验温度为:室温、500、600、700、800和900℃。炉内均热带温度梯度 $\leq 8^\circ\text{C}$ 。试样拉断后即用透射电镜观察其断口形貌和组织形态。

三、试验结果与分析

1. 变形温度和速度对性能的影响

图1表示在同一设备上以不同工作速度进行瞬时拉伸时变形温度对TC6、TC11钛合金性能的影响。两种钛合金的塑性及强度指标随温度的变化而显著变化。

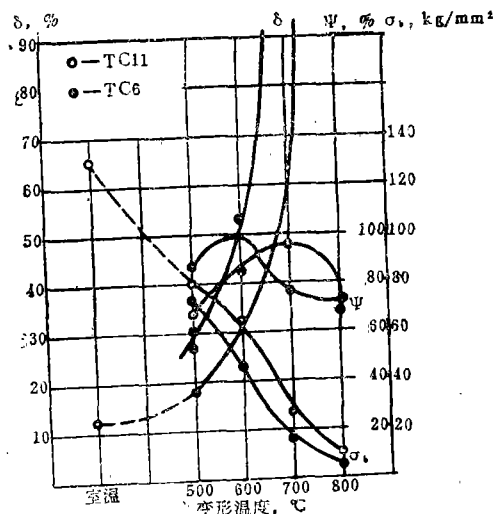
当温度为700℃、 $V=3\text{mm/min}$ 时,两种合金的 $\delta > 140\%$ 。此时TC6合金未拉断,而TC11合金的断口面积缩为一点,即 $\psi \approx 100\%$ 。

应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、变形温度 T 和性能之间的关系曲线如图2所示。

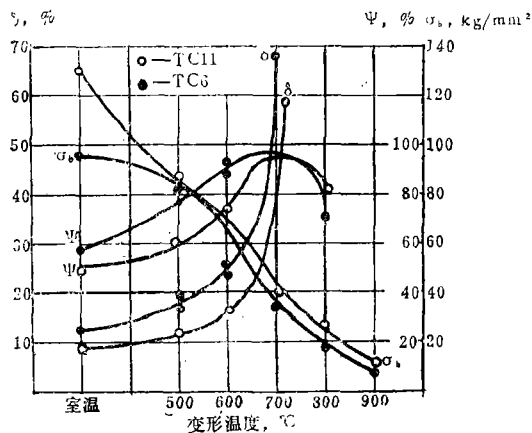
室温拉伸时, $\dot{\epsilon}$ 对TC6、TC11钛合金的 δ 值影响很小,而 σ 随 $\dot{\epsilon}$ 值的增加有明显提高。

500℃拉伸时, δ 随 $\dot{\epsilon}$ 值的增加而降低,而 σ 值的变化却不明显。

当在700℃、800℃进行拉伸时, $\dot{\epsilon}$ 对 δ 的影响特别明显。随 $\dot{\epsilon}$ 值增加, δ 值急剧下降;而当 $\dot{\epsilon}$ 值较小时,两种合金便呈现超塑性。但当 $\dot{\epsilon}$ 值增加到一定程度($\dot{\epsilon} > 5 \times 10^{-2}/\text{s}$)时,TC6钛合金的 δ 值又有所提高。TC6钛合金的 $\delta = 100\%$ 时的条件是 $T = 700^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} \approx 2 \times 10^{-2}/\text{s}$;



(a) $V=3\text{mm/min}$



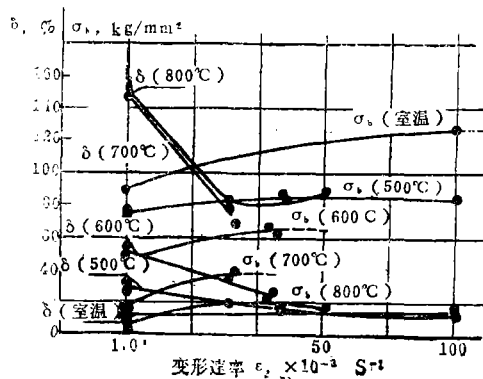
(b) $V=100\text{mm/min}$

图 1 TC6和TC11钛合金在不同速度 (V) 下拉伸的工艺塑性图

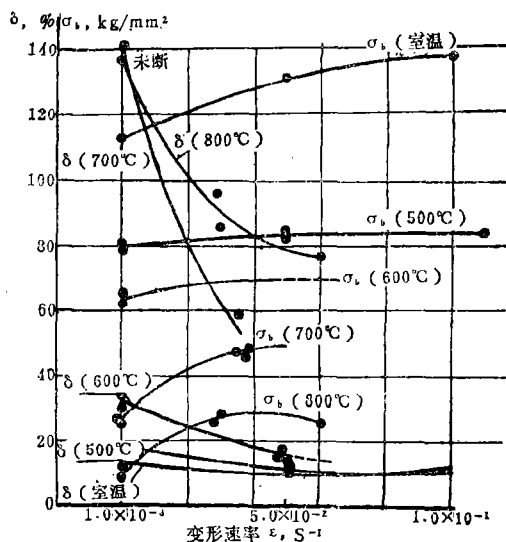
注: 1. 图中虚线部分为试样未拉断的情况下中止试验, 下同;
2. $1\text{kg/mm}^2=9.8\text{MPa}$.

TC11钛合金 $\delta=100\%$ 时的条件是 $T=700^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^{-2}/\text{s}$.

TC6钛合金在 800°C 、 $\dot{\epsilon} > 5 \times 10^{-2}/\text{s}$ 时已产生温升效应, δ 值升高, σ_s 值降低。此时产生动态回复及动态再结晶。在 900°C 即使 V 增加到 200mm/min 时, TC6、TC11钛合金均呈现超塑性特征。



(a) TC6



(b) TC11

图 2 $\dot{\epsilon}$ 对TC6、TC11钛合金性能的影响

2. 弹性模量 (E) 和温度 (T) 的关系

图3表明TC6、TC11钛合金在不同温度下的弹性模量。可见TC11钛合金的弹性模量对温度更为敏感。

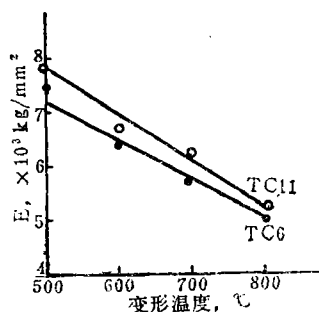
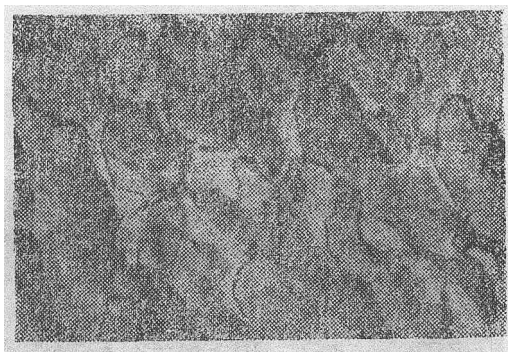


图 3 TC6、TC11的E-T曲线

3. 显微组织特征

试样拉断后未经热处理, 观察其电镜组织。TC6合金在 800°C 、 $V=200\text{mm/min}$ 的条件下拉伸后的纵向组织中晶粒定向排列仍较明显。当在 900°C 、 $V=100\text{mm/min}$ 的条件下, 其晶粒呈等轴状, 动态再结晶已充分完成(见图4a)。TC11合金因再结晶温度较高, 在 900°C 、 $V=200\text{mm/min}$ 的条件下, 晶粒仍较明显地定向排列(见图4b)。



(a) TC6, $V=100\text{mm/min}$



(b) TC11, $V=200\text{mm/min}$

图4 TC6、TC11钛合金在 900°C 不同速度拉伸后的电镜组织(复型) $\times 2340$

4. 断口形貌

从宏观断口上可观察到纤维区、放射区和剪切唇。这三部分的形成是由缩颈处的应力状态决定的。断口中央的纤维区为断裂的起源, 其

宏观平面与拉应力轴相垂直, 是在三向拉应力作用下裂纹缓慢扩展而形成的。同纤维区相邻的放射区是裂纹快速扩展所致。剪切唇则是断裂最后阶段形成的。剪切唇表面光滑, 其撕裂面与拉应力轴成 45° 角。

试验表明, 拉伸断口上的纤维区、放射区和剪切唇各占的比例, 随变形条件的变化而变化。一般说来, 随变形温度的提高或变形速度的降低, 纤维区和剪切唇所占的比例增加, 合金的延伸率提高。

TC6、TC11钛合金在透射电镜上的断口形貌属微观聚集型, 但其中也存在脆性断裂的特征。如TC6钛合金在 500°C 、 $V=200\text{mm/min}$ 的条件下进行拉伸的断口上呈“冰糖状”, 如图5a所示。然而TC11钛合金在 500°C 、 $V=200\text{mm/min}$ 的条件下拉伸的显微断口上, 韧窝明显拉长, 且每个韧窝尖上有一个第二相质点, 如图5b所示。说明应变速度增加, 其延伸率下降不明显。

图6a、b表示TC11钛合金在 600°C 温度分别以 $V=3\text{mm/min}$ 和 $V=100\text{mm/min}$ 的条件, 拉伸的断口形貌。当速度增加到 100mm/min 时, 其断口上的韧窝大小很不均匀, 导致塑性对应变速度有较大的敏感性。其原因可能是由于在该条件下瞬时拉伸时, 一旦发生缩颈, 因颈部横断面上各点应力状态不同, 使微孔长大的速率不一致, 扩张速率快且尺寸较大的微孔(韧窝)抑制甚至吞并了扩张速率慢且尺寸小的微孔。

从孔洞形成机制方面分析, 在显微断口上每个韧窝顶部有第二相质点(图5b), 说明第二相质点是韧窝形核的位置, 即孔洞的起源。当瞬时拉伸时一旦发生缩颈, 由于流变速度突变, 位错塞积, 滑移带、孪晶带相互影响, 应力集中严重。钛合金中硬而脆的第二相化合物在较大内应力作用下形成微裂纹, 即孔洞。在缩颈中心部分受三向拉应力, 孔洞优先在此形成。随着变形的继续进行, 中心孔洞及其它部位孔洞不断长大, 直至断裂。

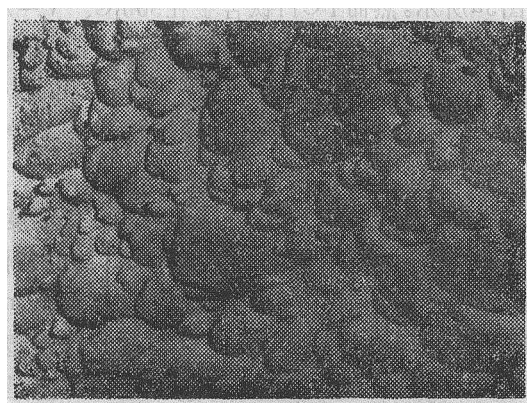


(a) TC6

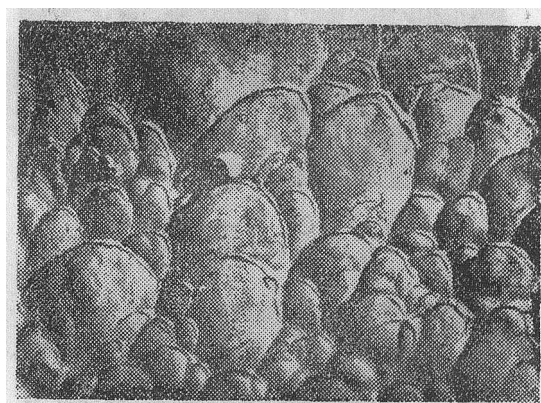


(b) TC11

图 5 TC6、TC11 钛合金在 500°C、V=200 mm/min 下的拉伸断口 (复型) ×3250



(a) V=3 mm/min



(b) V=100 mm/min

图 6 TC11 钛合金在 600°C 时不同速度拉伸的断口形貌 ×2600

试验证明, 在 TC6、TC11 钛合金瞬时拉伸的电镜断口中, 其韧窝大小和深浅, 除决定断裂时微孔生核数量和合金固有的相对塑性外, 还与变形速度、变形温度及应力状态等条件有关。

四、几个特点

1. 600°C 时 TC6 $\psi_{m.x} \approx 100\%$
TC11 $\psi_{m.x} \approx 86\%$
- 700°C 时 $\approx 2 \times 10^{-2}/s$ TC6 $\delta = 100\%$

$\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^{-2}/s$ TC11 $\delta = 100\%$
800°C 时 $\dot{\epsilon} > 5 \times 10^{-2}/s$ TC6 δ 值再次升高, σ_b 值下降; TC11 的 σ_b 值有下降趋势。

2. ψ 值随温度变化起伏较显著。

3. TC6、TC11 均属韧性断裂。电镜断口形貌为韧窝型。T、 $\dot{\epsilon}$ 及应力状态对断口形貌有较大影响, 但不完全因韧窝尺寸小而使塑性变差。

参加本试验研究的有赵健、朱政丰、刘军、纪家安等同志。