

# 关于TC6钛合金的 $\beta$ 相动态再结晶研究

张志方 王庆如 王金友\*

## 前 言

众所周知,在变形金属中经常存在着再结晶现象<sup>[1]</sup>。按其出现的时机差别可分为静态再结晶和动态再结晶,前者是在金属变形后的受热条件下产生的,而后者却早在变形过程中就已经完成了。对于钛合金来说,目前有关动态再结晶的专门研究为数尚少,但是实践证明这是一个重要的课题<sup>[2]</sup>,它与钛合金的高温变形密切相关,需要加以研究。

近年来有关钛合金高温变形的研究表明,经过 $\beta$ 区变形的钛锻件一般都获得片状组织,其 $\beta$ 晶粒大小(D值)、集团 $\alpha$ 尺寸(d值)、单片 $\alpha$ 的厚度(b值)对于合金性能有着决定性的影响,尤其是D值的作用更为显著。当D、d、b值大小合适的时候就可以获 满意的综合性能,并且具有较好的热强性<sup>[3]</sup>。试验表明,能够使D、d、b值合适的有效途径就是控制和利用 $\beta$ 相的动态再结晶。问题在于,在什么条件下产生 $\beta$ 相的动态再结晶,其组织特点和变化规律又是怎样的。本文针对这些问题,采用TC6钛合金,通过一系列高温变形试验,对于 $\beta$ 相的动态再结晶行为进行了研究。

## 试验过程

### 1. 落锤锻粗试验

采用圆柱形试样( $\phi 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ),在100公斤自由落锤上进行锻粗变形。试样加热:960℃、980℃、1000℃、1030℃、1060℃

( $T_{\beta} 970^{\circ}\text{C}$ );变形量:0、30%、50%、70%、80%;应变速率: $10^{-2}\text{秒}^{-1}$ 。锻粗后立即水冷以抑制冷却过程中的静态再结晶,同时与空冷试样进行对比研究。为防止降温将全部试样用石棉绳缠裹,并将出炉至开锻的时间控制在2秒钟以内,锤座加垫云母片。

### 2. 曲柄压力机锻粗

采用圆柱形试样( $\phi 55\text{mm} \times 35\text{mm}$ ),在1500吨曲柄压力机上进行锻粗。试样加热:950℃、980℃、1000℃( $T_{\beta} 980^{\circ}\text{C}$ );变形量:50%、70%;应变速率: $5\text{秒}^{-1}$ 。

### 3. 液压机锻粗

采用圆柱形试样( $\phi 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ),在315吨油压机上进行锻粗。试样加热:970℃、990℃、1010℃、1040℃( $T_{\beta} 975^{\circ}\text{C}$ );变形量:0、30%、50%、60%、70%;应变速率: $10^{-2}\text{秒}^{-1}$ 。

### 4. 拉力机拉伸变形

采用圆形拉伸试样,在ZDM型拉力机上进行拉伸变形。加热温度:980℃( $T_{\beta} 970^{\circ}\text{C}$ );应变速率: $10^{-3}\text{秒}^{-1}$ 。

### 5. 模锻压气机叶片

采用圆棒试样( $\phi 24\text{mm} \times 164\text{mm}$ ),经过940℃一火顶锻夹扁后在2000吨曲柄压力机上模锻叶片,试样加热温度为1000℃( $T_{\beta} 980^{\circ}\text{C}$ )。

## 试验结果与讨论

### 1. $\beta$ 相动态再结晶的显微组织特征

TC6钛合金的高温变形试验表明,无论是锻粗、拉伸还是压扁变形,在条件充分时都能

\* 参加本工作的还有田长生、袁贞义、罗时雨和高健等同志。

产生 $\beta$ 相动态再结晶(如图1所示),其显微组织具有如下的特征:

(1)动态再结晶后的 $\beta$ 晶粒远小于原始 $\beta$ 晶粒。新晶粒有的呈等轴状,有的被拉长,前者说明再结晶完成后没有再承受新的变形,而后者则又承受了新的变形。

(2)当变形速度低(如 $10^{-2}$ 秒 $^{-1}$ )而变形程度大(如60%)时,能够产生二次动态再结

晶,即在被拉长的第一轮再结晶晶粒中又新的等轴 $\beta$ 晶粒(如图1, d),这是静态再结晶中所观察不到的现象。有时可以在同一个微组织中看到双重或三重晶粒尺寸,即原始 $\beta$ 粒、一次和二次动态再结晶晶粒同时存在。

(3)采用JEM-200型电子显微镜进行薄膜试样观察时,可以看到动态再结晶的位错组态与静态的有所不同。由于前者是在变形过程中形成的,所以新晶粒的中心部位总是存在着或多或少的变形,致使位错密度较高;反之后者就比较低,甚至完全消除(如图2)。

2. 微粗变形时的 $\beta$ 相动态再结晶

在变形试样中由于各部位变形程度不同,使动态再结晶存在差别。为了便于研究,本文全部选择变形区的中心部位进行金相观察分析。

通过各种微粗试验知道,当变形速率为 $10^{-2}$ 秒 $^{-1}$ ~ $10^2$ 秒 $^{-1}$ 时,在1000℃( $\beta$ 区)附近变形可以产生 $\beta$ 相动态再结晶,其开始之临界变形 $\epsilon_c$ 不大于30%;完成之临界变形 $\epsilon_r$ 为50~70%。图3示出TC6钛合金各种微粗试验中的一种典型情况。采用金相对比法<sup>[2]</sup>对于各种情况下的再结晶晶粒尺寸进行测量,并据此测量结果绘制了 $\beta$ 相的动态再结晶图(示于图4)。

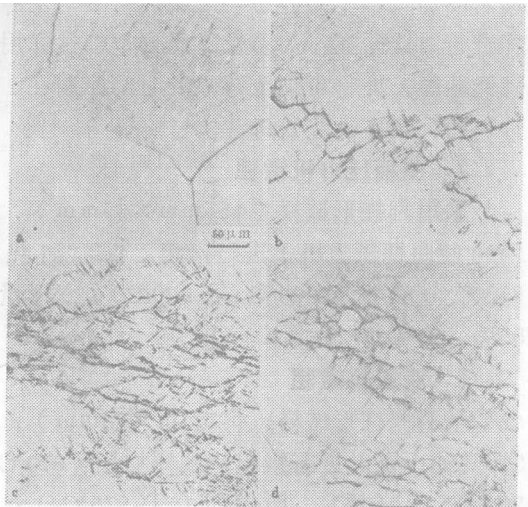


图1 TC6钛合金的 $\beta$ 相动态再结晶组织

a—变形前的原始组织      b—一次动态再结晶  
c—一次动态再结晶后又变形    d—二次动态再结晶

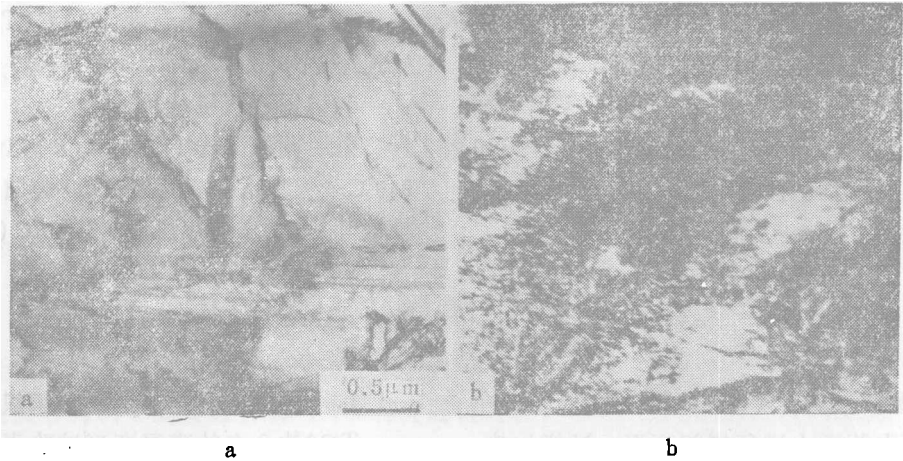


图2 TC6钛合金 $\beta$ 相再结晶的不同位错组态

a—静态再结晶      b—动态再结晶

从再结晶图可以清楚地看出，在一定温度下的再结晶晶粒尺寸，随着变形量的增加而先大后小。造成这种变化的原因可以由下面的有关研究获得解释<sup>[4]</sup>。晶粒直径  $d$  与形核率  $N$  及其长大速率  $G$  存在着一种近似的关系：

$$d = K \left[ \frac{G}{N} \right]^{1/4}$$

$$G = \frac{D_B}{KT} - \frac{E_s}{\lambda}$$

式中  $E_s$  — 变形储能； $D_B$  — 晶界扩散系数； $T$  — 温度； $\lambda$  — 晶界宽度； $K$  — 常数。显

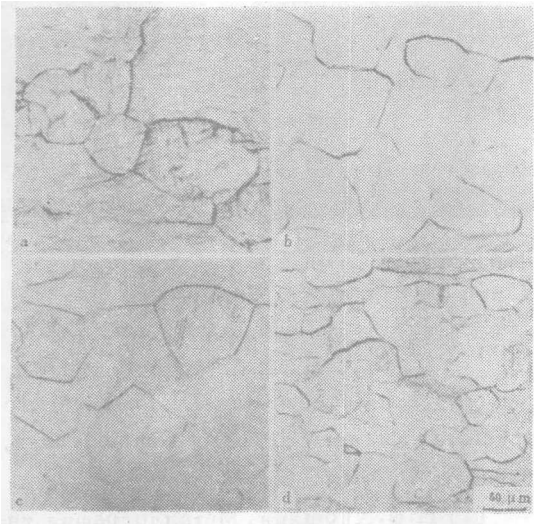


图 3 TC6 钛合金在落锤微粗时  $\beta$  相的动态再结晶组织

变形温度：1030℃； $\alpha + \beta \rightleftharpoons \beta$  完全转变温度：970℃；变形程度  $\epsilon, \%$ ：a—30；b—50；c—70；d—80。

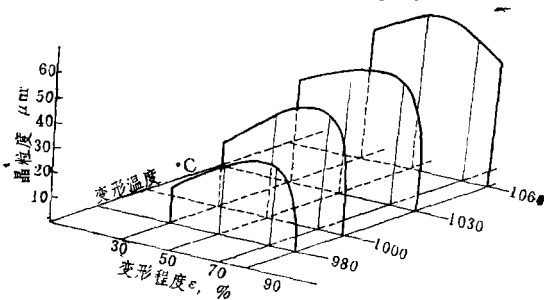


图 4 TC6 钛合金落锤微粗时的  $\beta$  相动态再结晶图

然，当  $T$  一定时， $G$  主要就取决于  $E_s$  了，随着变形量的增加  $E_s$  自然也要变大， $d$  值也就要增大。但与此同时  $N$  也随着变形量的增加而变大，并且自一定的变形量以后  $G/N$  值要显著变小，随之  $d$  值也就开始减小。

### 3. 拉伸变形时的 $\beta$ 相动态再结晶

当条件充分时，在拉伸变形的钛试样中也会产生  $\beta$  相的动态再结晶，这已为本文的研究结果所证实。图 5 示出 TC6 钛合金拉伸试样的显微组织。可以看到  $\beta$  相的动态再结晶都集中在拉伸缩颈区，而且在离开断口的地方又都出现在试样的周围区。这说明拉伸变形主要集中在缩颈区和试样的周围。

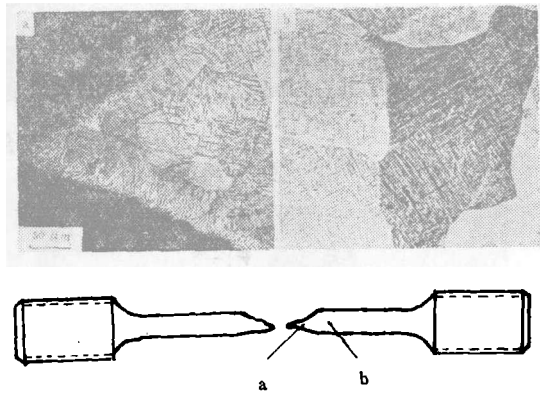


图 5 TC6 钛合金高温拉伸时的  $\beta$  相动态再结晶

### 4. 模锻叶片中的 $\beta$ 相动态再结晶

压气机叶片是发动机中的重要零部件，研究钛叶片尤其是大尺寸叶片的  $\beta$  相动态再结晶具有一定的意义。本文试验表明，要想使叶片获得再结晶组织必须把模锻温度提高到相变点 ( $T_\beta$ ) 以上才行。TC6 钛合金在 1000℃ ( $\beta$  区) 进行模锻的组织示于图 6，由此可以看到在叶片的剧变区已经普遍出现了  $\beta$  相动态再结晶组织。实际生产中希望这种剧变区越宽越好，因为这样易于保证机加工后的叶片完全具有匀细的再结晶组织。

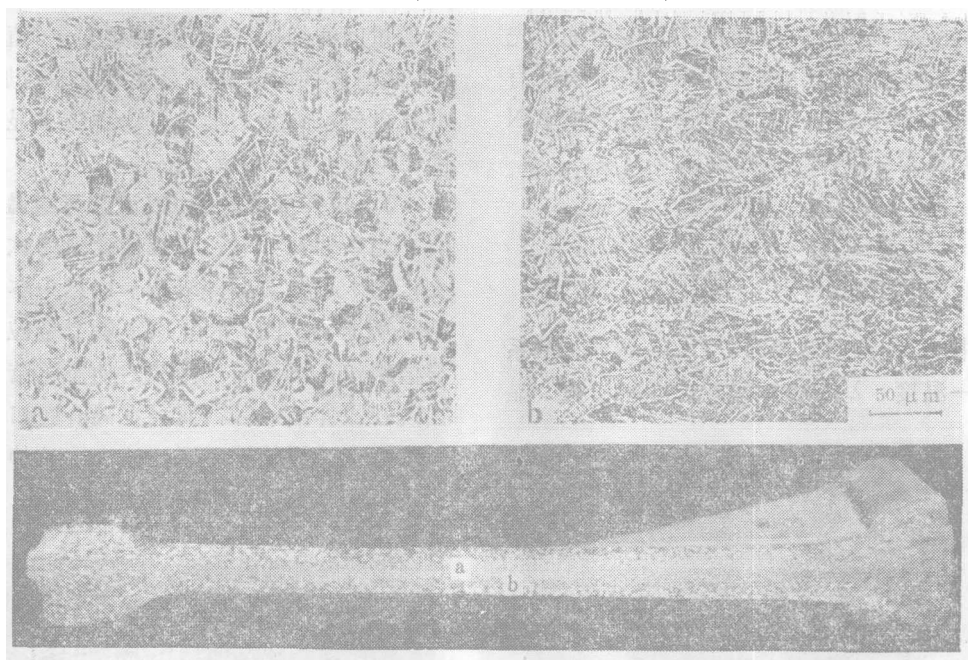


图 6 TC6 钛合金模锻叶片中的 $\beta$ 相动态再结晶

## 结 论

1. 当变形条件充分时, TC6 钛合金无论是镦粗、拉伸或压扁, 都能产生 $\beta$ 相动态再结晶。

2. TC6钛合金在 $1000^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\beta}$ 以上 $30^{\circ}\text{C}$ )左右, 以 $10^{-2}\text{秒}^{-1} \sim 10^2\text{秒}^{-1}$ 的应变速率变形时, 其 $\beta$ 相动态再结晶的起始临界变形量 $\varepsilon_c$ 不大于30%, 而完成临界变形量 $\varepsilon_c$ 大于50%。

3. 一般而言, 在 $T_{\beta}$ 以上的高温区变形获得粗大的再结晶组织; 欲获得匀细的组织须在 $\beta$ 区的下部进行较大的变形才成。

4. 进行拉伸变形时,  $\beta$ 相的动态再结晶主要集中于变形缩颈区, 只是少量地出现在试样的周围区域。

5. TC6钛合金在 $1000^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\beta}$ 以上 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ )采用曲柄压力机进行模锻叶片, 可以获得 $\beta$ 相动态再结晶组织, 此种组织主要集中于剧烈变形带。

## 参 考 文 献

[1] H.J.McQueen and J.J.Jonas, Microstructural Changes at high temperatures, 1981.

[2] Н.ф.Аношкин, Металлография титановых сплавов, Москва, 1980.

[3] 牧正志; 田村今男, 《材料》, 1981, Vol.30, No.329, P.211.

[4] J. D. Vevhoeven, Fundamentals of Physical metallurgy, Wiley, New York, 1975, P.345~ 347.

[5] 刘云旭, 金属热处理原理, 机械工业出版社, 1981版。

