

一种面心立方合金的流变应力及应变速率敏感性的表象模型及其计算机模拟

钱匡武
(机械系)

提 要

在R. E. Reed—Hill提出的体心立方合金塑性变形总流变应力的物理模型的基础上,建立了一种置换式面心立方合金Cu—3.1at. % Sn的总流变应力的表象模型。此总流变应力由三项组成,即内应力、有效应力及由于动态应变时效所引起的应力。有效应力和应变速率及温度成指数函数关系。动态应变时效应力遵循修正了的Harper关系式。内应力则被假定为以和弹性模量同样的规律随温度而改变。将此模型输入计算机进行模拟计算,所得结果和实验数据吻合很好,说明此模型成功地描述了在77K至500K温度范围内,合金的总流变应力和应变速率敏感性随温度的变化规律。

关键词: 面心立方合金; 动态应变时效; 流变应力; 应变速率敏感性; 表象模型

一、前 言

金属材料中的动态应变时效(DSA)现象早已为人们所熟知。很多重要的工业合金在常规的应变速率和通常应用的温度范围内,都经受着动态应变时效。其中很多种钢,以及Ti、V、Nb合金等,在略高于室温时,就会发生DSA。作者的部分工作已经证明了以上事实^[1-3]。因此,在应用这些材料时,不能不考虑DSA对其使用性能的影响。但目前在许多情况下,DSA的重要性常被忽略。其重要原因之一,就在于过去一直没有一种简单的物理模型,能用来描述所有与动态应变时效过程有关的复杂情况。R. E. Reed—Hill^[4]从A. van den Beukel的理论^[5-7]出发,认为:在存在DSA的温度范围内,金属产生塑性变形时的总流变应力,由不存在DSA时的应力 σ 和由DSA引起的应力 σ_D 这两个独立分量所组成。已经证明^[4, 8],对体心立方合金, σ 可用应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的指数函数来描述; Delobelle等人^[9-10]则应用修正了的Harper公式,将体心立方合金的 σ_D 进一步分成两个分量:一个是Snoek有序化的结果,另一个则是形成Cottrell气团的结果。也就是说, R. E. Reed-Hill提出的体心立方合金的总流变应力应为:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \sigma + \sigma_D \\ &= \sigma + \sigma_{Snoek} + \sigma_{Cottrell}\end{aligned}\quad (1)$$

本文对上述模型进行了修正、补充,并把它应用于面心立方合金中,输入计算机进行模

本文1987年1月29日收到。

拟计算，并与实验测得的结果进行比较。

二、试验步骤

1. 试样制备：将试验材料加工成 $\phi 3.8 \times 20\text{mm}$ ，两端带螺纹的拉伸试样，在993K下进行半小时退火，以获得约为0.05mm的晶粒直径。

2. 机械性能试验：拉伸试验在1125型Instron电子拉伸机上，在77~900K之间进行。在300~450K之间，拉伸在可搅拌的油浴炉中进行。高于450K的拉伸在垂直式电阻炉中，在流动的高纯氩气保护下进行。低于300K的试验则分别在液态氮、丙酮-干冰溶液及冰水中进行。温度精度控制在 $\pm 2\text{K}$ 范围。

在应力作用下的时效是利用试验机的循环加载系统来实现。用这种方法，可求得由于在时效时发生的应变（即DSA）所引起的加工强化^[11]。

三、试验结果

1. Cu-3.1at%Sn合金的流变应力

图1显示了Cu-3.1at.%Sn合金在0.02应变量下的流变应力和温度之间的关系。

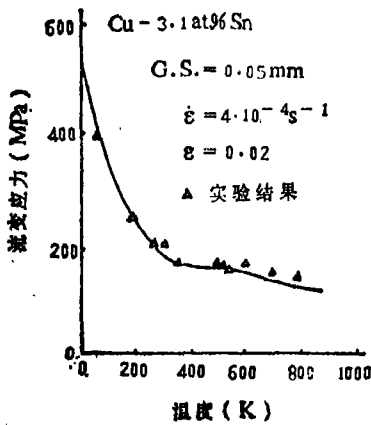


图1流变应力—温度关系曲线

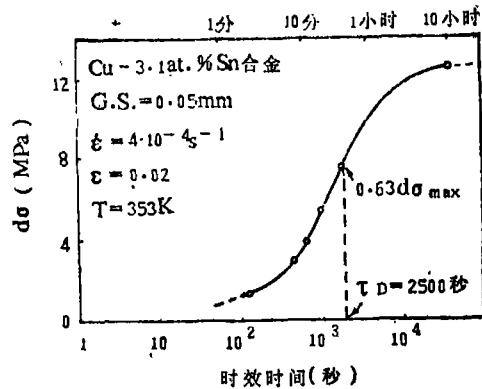


图2应力作用下时效的动力学曲线

2. 在应力作用下时效所出现的屈服点重现

用一组试样进行在应力作用下的时效试验：时效时间从120秒至36000秒，温度在293至353K之间，预应变量为0.02。图2表示在353K下所得到的时效动力学曲线。

3. 应变时效时的激活能的确定

测定应变时效所需激活能的方法有多神：

(1) B. Russell^[12]测定Cu-3.2at.%Sn合金开始出现锯齿屈服所需激活能为 $7.6 \times 10^4 \text{J/mol}$ 。

(2) McCormick法^[13]，由在恒定应变速率下所测得的出现锯齿式屈服的临界应变量的对数值和温度的倒数之间的线性关系，可求出激活能 $Q = 8.18 \times 10^4 \text{J/mol}$ 。

(3) 作者提出^[1]另一种测定 Q 的方法：图3给出了对应于不同应变速率的临界应变量和

温度的关系曲线。取 $\epsilon_c = 0.02$ ，和 $\epsilon_c - T$ 曲线相交给出三个点，并据此给出了图4所示的 $\log \dot{\epsilon} - 1/T$ 之间的关系。应用线性回归的方法，求出激活能为 $8.0 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 。

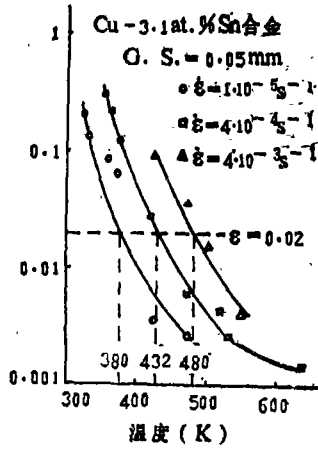


图3 恒临界应变变量下测激活能

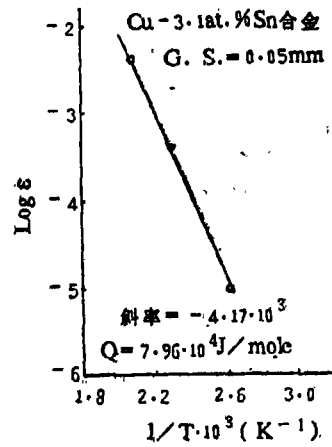


图4 $\log \dot{\epsilon} - 1/T$ 关系

以下将用这三种方法测得的激活能的平均值 $7.9 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 来计算流变应力。

4. 应变率敏感性:

图5显示了应变量为0.02时的应变率敏感性和温度之间的关系。值得注意的是，在390~620K之间，应变率敏感性是负值。

四、结果讨论及结论

1. 流变应力是温度的函数。

作者提出^[1]，在象Cu-3.1at.%Sn这类具有较高溶质浓度的置换式固体中，其总的流变应力应包含三项：

$$\sigma_t = \sigma_E + \sigma^* + \sigma_D \quad (2)$$

式中， σ_t 是总流变应力。 σ_E 是流变应力的长程内应力分量，可用下式表示：

$$\sigma_E = \sigma_{E_0} (1 - \alpha T) \quad (3)$$

其中 σ_{E_0} 为一常数，相当于0K时的内应力； α 为合金的杨氏模量的温度系数。 σ^* 是流变应力的短程有效应力分量，即相当于(1)式中的 σ ，可用下式表示：

$$\sigma^* = \sigma_0^* (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{kT/H_0} \quad (4)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 是应变率， σ_0^* 、 $\dot{\epsilon}_0$ 及 H_0 是常数， k 是波尔兹曼常数， T 是绝对温度。 σ_D 是流变应力的DSA分量。对置换式面心立方合金而言，它只包含Cottrell应变时效分量，可用下式

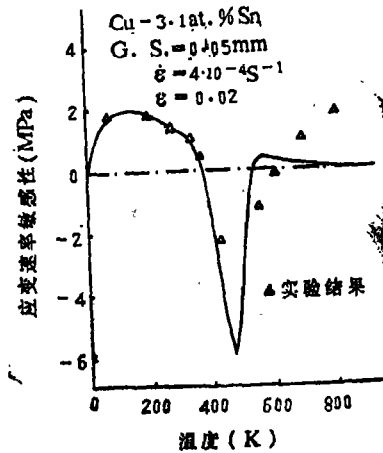


图5 应变率敏感性—温度关系

表示:

$$\sigma_D = \sigma_{Dm_0} \cdot \exp[-\beta(T-350)] \left\{ 1 - \exp[-(tw/\tau_D)^{2/3}] \right\} \quad (5)$$

其中 σ_{Dm_0} 是在Cottrell气团形成时所能产生的最大强化应力(实验测得这一最大应力出现在350K); β 是 σ_{Dm} 的温度系数,称为“动态回复因子”; t_w 是与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及应变变量 ϵ 有关的常数,称为“DSA的等待时间”; τ_D 是出现屈服点重现时的弛豫时间,可用下式表示:

$$\tau_D = \tau_{D0} \cdot \exp(Q/kT) \quad (6)$$

式中 τ_{D0} 在某一确定的应变变量下为一常数; Q 是应变时效激活能。

因此,将公式(2)展开,得到

$$\begin{aligned} \sigma_t = & \sigma_{E0} (1 - \alpha T) + \sigma_0^* (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{kT/H_0} \\ & + \sigma_{Dm_0} \exp[-\beta(T-350)] \left\{ 1 - \exp[-(tw/\tau_D)^{2/3}] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

2. 应变速率敏感性和温度的关系

由公式(7),将 σ_t 对 $d \ln \dot{\epsilon}$ 取导数,就可容易得出应变速率敏感性和温度的关系式:

$$\begin{aligned} S = \frac{d\sigma_t}{d \ln \dot{\epsilon}} = & \sigma_0^* \frac{kT}{H_0} (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{kT/H_0} - \frac{2}{3} (tw/\tau_D)^{2/3} \cdot \sigma_{Dm_0} \\ & \cdot \exp[-\beta(T-350)] \left\{ \exp[-(tw/\tau_D)^{2/3}] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

3. 总流变应力及应变速率敏感性的计算机模拟计算

由公式(7)看出,某一材料在恒定的应变速率下进行塑性流变时,在一定的应变变量下,其总流变应力只是温度的函数。因此,只需将各项常数系数值输入计算机,就可以容易地计算出在任意温度下,材料的总流变应力。计算程序的框图如图6。同理,可按类似框图,计算应变速率敏感性。

4. 总流变应力公式中各参量的确定

(1) DSA分量的确定:

已测得应变时效激活能 $Q=7.9 \times 10^4 \text{ J/mol}$;由图2所示应力作用下时效的动力学曲线可量得弛豫时间 τ_D 在353K时应为 2.5×10^3 秒。由这一 Q 及 τ_D 值,可由公式(6)求得 $\tau_{D0} = 6.8 \times 10^{-9}$ 秒。在应力作用下的时效试验所用的预应变速率约为 $4 \times 10^{-4} \text{ 秒}^{-1}$,时效时的应变速率约为 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ 秒}^{-1}$,这时所得到的最大屈服点重现值约为15Mpa,这仅代表在这两个应变速率下其DSA应力之间的差值,显然它小于可能达到的最大应变时效应力。因此,我们可以取350K(此时应变时效应力最大)下的 $\sigma_{Dm_0} = 26 \text{ Mpa}$ 。为使计算机结果能很好地和实验相符,将公式(5)中的 β 取值为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。附带指出:由上述参量所求得流变

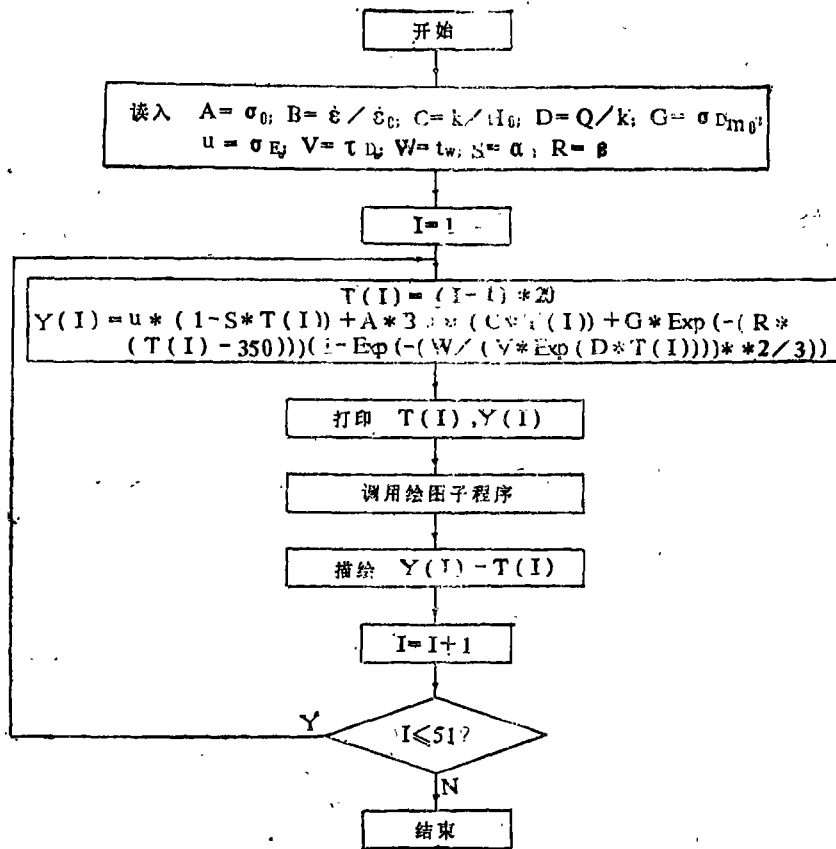


图 6. 计算流变应力的程序框图

应力的 DSA 分量的绝对值不超过总流变应力的 10%。

(2) 非应变时效应力分量的确定:

作者已证明^[8], 只需通过几个简单的试验, 给出在确定的应变变量及基本应变速率下流变应力与温度之间的关系曲线, 就可得出所需数据, 计算出(至少是在一阶近似上)流变应力的非应变时效分量, 其中包括:

σ_0 —0K 时的流变应力, 可通过直接把流变应力—温度实验曲线外延至 0 K 来求得。

T_m —应变速率敏感性达最大值时对应的温度。

S_m —应变速率敏感性的最大值。

σ_{E_0} —可由下式^[8]直接求得:

$$\sigma_{E_0} = \frac{\sigma_0 - e \cdot \sigma_m}{1 - e \cdot E_m/E_0} \quad (9)$$

其中 e 是自然对数的底, E_m 及 E_0 分别是 T_m 及 0 K 时的杨氏模量, 而比值 E_m/E_0 可由公式 (3) 求得。从实验所测得的数据可估算出: $\sigma_0 = 575 \text{ MPa}$; $T_m = 140 \text{ K}$; $\sigma_m = 300 \text{ MPa}$ 。利用这些数据, 根据公式 (9), 可求得 $\sigma_{E_0} = 153 \text{ MPa}$ 。由于在低于 300 K 的低温区, DSA 对总流变应

力的影响可忽略不计^[1]，因此：

$$\sigma_0^* = \sigma_0 - \sigma_{E_0} \quad (10)$$

由此可求出在 0 K 时的有效应力 $\sigma_0^* = 422 \text{ MPa}$ 。与此相似，由于 σ_m 是已知的，而 T_m 时的内应力 σ_{E_m} 可由公式(3)求出，因此，可推算出 T_m 时的有效应力 $\sigma_m^* = 155 \text{ MPa}$ ； H_0 和 $\dot{\epsilon}$ 则可由下式求得^[8]：

$$H_0 = \frac{kT_m \sigma_m^*}{S_m} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon} \exp(-\sigma_m^*/S_m) \quad (12)$$

将上述所有各项参数输入计算机，即可算出从 0 K 至 1000 K 温度区间的总流变应力及应变速率敏感性，描绘成图 1 及图 5 所示的光滑曲线。实验测得的结果也分别同时标在这两张图上。可以看出，一直到 500 K，理论计算值和实验结果都吻合得很好，从而证明了这一关于 DSA 的表象模型，至少可以成功地描绘在 500 K 以下，面心立方置换合金的总流变应力及应变速率敏感性和温度之间的关系。温度高于 500 K，此模型不完全适用，需进一步加以修正；据分析，这是由于在较高温度下，这种合金的形变机理发生了改变，此时位错攀移及回复过程将起主导作用。

参 考 文 献

- [1] K. W. Qian (钱匡武) et al, Acta Metall, 31, 87 (1983).
- [2] 钱匡武, 金属学报, 21, A203 (1985).
- [3] K. W. Qian (钱匡武) et al, Proc. 5th Intl. Con. of Heat Treatment of Materials, Budapest Hungary, Oct. P. 592, (1986).
- [4] R. E. Reed-Hill, Proc. Int. Con. on Kinetics and Thermodynamics of Metallurgical Processes, Bangalore, India (1981).

- (5) A. van den Beukel, *Physica Status Solidi(a)*, 30, 197 (1975).
- (6) S. H. van den Brink et al., *Physica Status Solidi(a)*, 30, 469 (1975).
- (7) A. van den Beukel, *Acta Metall.*, 28, 965 (1980).
- (8) K. W. Qian (钱匡武) et al., *Scripta Metall.*, 16, 807 (1982).
- (9) P. Delobelle et al., *Scripta Metall.*, 12, 765 (1978).
- (10) P. Delobelle et al., *Mater. Sci. Engn.*, 29, 261 (1977).
- (11) G. F. Bolling, *Phil. Mag.*, 4, 537 (1959).
- (12) B. Russell, *Phil. Mag.*, 8, 615 (1963).
- (13) P. G. Mc Cormick, *Acta Metall.*, 20, 351 (1972).

A Phenomenological Model of the Flow Stress' and Strain - Rate Sensitivity of an fcc Alloy With Its Computer Simulation

Qian Kuangwu

(Department of Mechanical Engineering)

Abstract

Based on the Physical model of the flow stress of a plastically deformed bcc alloy proposed by R. E. Reed-Hill, a phenomenological model of the total flow stress of an fcc alloy was set up according to the experimental measurements of flow stress and strain-rate sensitivity of Cu-3.1at. % Sn alloy. The total flow stress is composed of three components including an internal stress, an effective stress and a stress resulting from dynamic strain aging. The effective stress was assumed to be related to the strain rate and the temperature by a power law, the dynamic strain aging component to obey a modified Harper's relationship, and the internal stress to vary with the temperature by the same rule as that of young's modulus. The model was sent to the computer for simulating and found that it could successfully describe both the total flow stress and the strain-rate sensitivity of at least up to 500K.

Keywords, face-centered cubic alloy (fcc), dynamic strain aging(DSA), flow stress, strain-rate sensitivity, phenomenological model