

# 紫铜热变形流动应力的实验研究

管克智 樊百林 周纪华

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

**摘要** 采用恒变形速率凸轮压缩试验机对紫铜的流动应力进行了实验研究,分析了变形温度、变形速率、变形程度对流动应力的影响,同时对不同的数学模型结构进行了非线性回归,通过分析比较,提出了拟合精度高的流动应力数学模型。

**关键词** 紫铜, 流动应力, 数学模型, 凸轮试验机

目前,我国缺乏全面研究高温高速下有色金属紫铜的流动应力数学模型,而国外提供的流动应力曲线和数据(杂志,书发表)基本上不符合我国铜品种生产的需要。本文采用恒变形速率凸轮式压缩试验机对紫铜  $T_2$  的流动应力进行实验研究,得出紫铜  $T_2$  在不同变形温度、变形速率、变形程度下的流动应力曲线图,同时用不同的模型结构进行了非线性回归,通过分析比较,提出了适合热轧铜生产用的拟合精度高的计算机控制用的紫铜流动应力数学模型;同时也对我国的有色企业生产提供了一定的理论和实践依据。本文研究的紫铜  $T_2$ ,其化学成分(质量分数,%)为, Cu—>99.9, Pb—0.005, Zn—0.005, Bi—0.002, Fe—0.005, Sn—0.005, As—0.002, P—0.005, Sb—0.002。

## 1 热变形流动应力实验研究方法

### 1.1 设备及实验方法

采用自行设计制造的凸轮式高速形变试验机,以等变形速率压缩端面上带凹槽并在凹槽内充满不同软化点的润滑剂的圆柱形试件<sup>[1]</sup>,其试验范围为变形温度  $t=400 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 变形速率  $\dot{\epsilon}=5 \sim 65 \text{ s}^{-1}$ , 变形程度  $\epsilon=\ln(H/h)=0 \sim 0.6931$ 。为了保证压缩时使试件接近单向应力状态,必须使压缩表面具有良好润滑条件,因而采用了玻璃粉,高温润滑脂作润滑剂。在不同的试验温度下,采用不同化学成分的玻璃粉润滑剂。

### 1.2 微机高速数据采集系统

采用日本 KIKUSUI 公司生产的 DSS6521 双通道存贮示波器,通过 6522 并行接口与 IBM-PC286 微机连接,实现了瞬态波形的采集。凸轮形变试验机最高转速为 400 r/min,波形持续时间为 8~130 ms,为了保证在如此短的时间内采到正确的波形,在试验机上安装有非接触的触发装置。

## 2 热变形流动应力实验结果及分析

### 2.1 变形温度对流动应力的影响分析

通过实验得知,在变形速率、变形程度一定的条件下,随着变形温度的升高,流动应力下降.紫铜 T<sub>2</sub> 在热加工过程中,易发生软化,随着温度的增高,消除硬化所需的均热时间下降,软化速度随着温度的提高而增大,温度越高变形速率越低,软化过程的效果越大.

### 2.2 变形速率对流动应力影响分析

实验表明,变形速率对流动应力影响与变形温度有关.图1是紫铜 T<sub>2</sub> 的实验数据,可见变形速率与流动应力在双对数坐标下的变化成线性关系.由图2可以看出,变形温度越高,直线斜率越大,变形温度越低,直线斜率越小,这表明在变形温度较高时,变形速率对流动应力影响大,变形温度低时,变形速率对流动应力影响小.

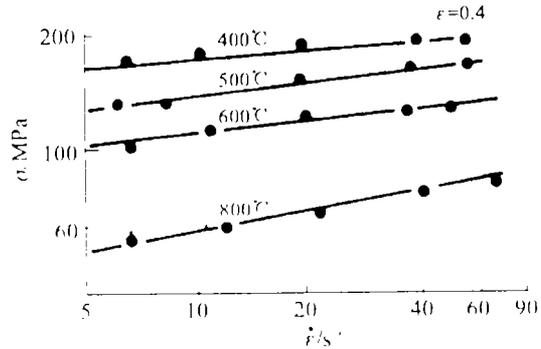


图1 T<sub>2</sub> 变形速率与流动应力的关系

### 2.3 变形程度对流动应力影响关系

从图2(a)中可以看出,在变形温度低时,流动应力随变形程度的增加而增大,但增大到一

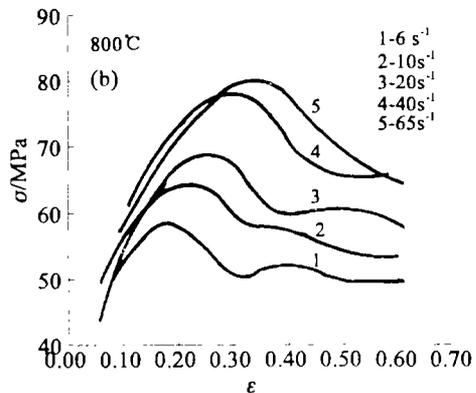
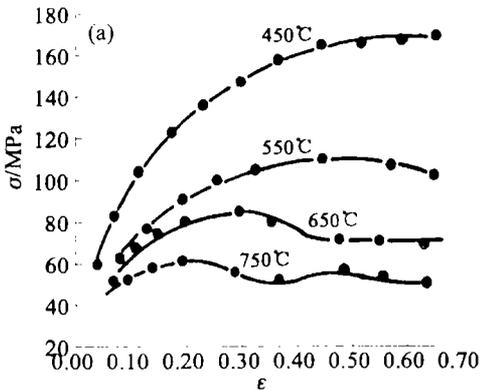


图2 (a) 变形温度的影响; (b) 变形速率的影响

定值后随变形程度的增加而减小或有减小趋势。从图 2(b)中可以看出,紫铜  $T_2$  在高温低速时(序号 1、2、3),由于软化时间长,紫铜在整个变形过程中处于断续再结晶状态,即产生了两轮再结晶。高温高速时(序号 4、5),由于软化时间短,紫铜  $T_2$  流动应力达到最高值时,随着变形程度的继续增加,流动应力呈明显的下降趋势,即处于连续再结晶状态。

### 3 热变形流动力应力数学模型

#### 3.1 数学模型的建立

在整个变形温度范围内,流动应力与变形温度没有明显的线性关系,但可以发现在某个温度段内,流动应力与变形温度在单对数坐标下有近似的线性关系:

$$\sigma = c e^{at} \quad (1)$$

流动应力与变形速率在双对数坐标下成线性关系,见图 1 所示。由于不同变形温度下,直线的斜率不同,所以变形速度对塑性流动应力的影响项中,包含着变形温度对流动应力的影响。根据这一规律,建立函数式

$$\sigma = c e^{at} \quad (2)$$

从图 2中可以看出,变形程度对流动应力影响关系中,随着温度的变化,影响规律也在变化,所以在变形程度的影响项中,还考虑了变形温度对变形程度的影响,即  $\sigma = \varepsilon^{a+b} + e^{ct}$ 。

为了更好地研究变形程度对流动应力的影响,本文共分析了以下 3 种形式:

$$\sigma = d \varepsilon^{a+b} e^{ct} \quad (3)$$

$$\sigma = c \varepsilon^a e^{bt} \quad (4)$$

$$\sigma = c \varepsilon^a \quad (5)$$

式中:  $a, b, c, d$  - 不同常数,与变形温度有关;  $\sigma$  - 塑性流动应力。其中式(4)是根据最大值函数方程<sup>[2]</sup>进行变换后所得;式(5)是幂函数方程;式(3)是在式(4)的基础上考虑了变形温度对变形程度的影响。

根据变形温度、变形速率、变形程度对流动应力的影响规律,综合考虑它们之间的影响关系,最后取下面 4 种模型函数式进行回归计算:

$$\sigma = e^{U_0} e^{U_1 T} \dot{\varepsilon}^{U_2 T + U_3} \varepsilon^{U_4 \varepsilon T} \varepsilon^{U_5 T + U_6} \quad (6)$$

$$\sigma = e^{U_0} e^{U_1 T} \dot{\varepsilon}^{U_2 T + U_3} e^{U_4 \varepsilon} \varepsilon^{U_5} \quad (7)$$

$$\sigma = e^{U_0} e^{U_1 T + U_2} \dot{\varepsilon}^{U_2 T + U_3} e^{U_3 \varepsilon} \varepsilon^{U_4} \quad (8)$$

$$\sigma = e^{U_0} e^{U_1 T} \dot{\varepsilon}^{U_2 T + U_3} \varepsilon^{U_4} \quad (9)$$

式中,  $\sigma$  - 塑性流动应力, MPa;  $\dot{\varepsilon}$  - 变形速率,  $s^{-1}$ ;  $\varepsilon$  - 变形程度(对数应变);  $t$  - 变形温度,  $^{\circ}C$ ,  $T = (t + 273) / 1000$ ;  $U_0 \sim U_6$  - 回归系数。

#### 3.2 回归结果及回归系数

采用 C 语言编制的回归程序对紫铜  $T_2$  实验数据,依据上述 4 种数学模型结构进行回归。对各种模型进行综合分析,取拟合精度高,方差小,并符合流动应力与变形温度、变形速率、变形程度变化规律的模型<sup>[4]</sup>。通过分析发现紫铜  $T_2$  在  $500 < t \leq 800$   $^{\circ}C$

温度时,采用(6)模型方差最小,拟合精度最好. 在  $400 < t \leq 500$  °C 温度时,采用(8)模型最佳. 表1是在热加工条件下采用(6), (8)流动应力模型公式中的回归系数.

表2 紫铜 T<sub>2</sub> 流动应力数学模型回归系数

温度/°C	模型	$U_0$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	S/MPa
$400 < t \leq 500$	(8)	6.0186	-0.5613	0.4524	-1.0263	0.6373	-	-	6.64
$500 < t \leq 700$	(6)	8.7571	-3.5322	0.0270	0.0821	-1.3465	-1.1689	1.6788	6.92
$700 < t \leq 800$	(6)	3.5148	1.0227	-0.4368	0.6087	-1.2039	-0.2140	0.5853	4.16

### 3.3 流动应力曲线

根据流动应力数学模型(6), (8)表达式及其回归系数,可以绘制出紫铜在不同变形温度、不同变形速率和不同变形程度下的流动应力曲线,如图3.

## 4 结论

(1) 低温  $400 < t \leq 500$  °C 时,紫铜 T<sub>2</sub> 热塑性流动应力数学模型采用(8)模型拟合试验数据具有较高的精度和较小的差;  
 $500 < t \leq 800$  °C 时,采用(6)模型拟合精度较高.

(2) 在高温低速的热变形条件下,紫铜 T<sub>2</sub> 产生动态再结晶现象.

(3) 变形速率对流动应力的影响关系中,必需考虑变形温度对变形速率指数的影响. 变形温度,变形速率对流动应力的影响有交互作用.

(4) 变形程度对流动应力的影响系数中,考虑了变形温度对变形程度的影响,变形温度、变形程度对流动应力的影响有交互作用.

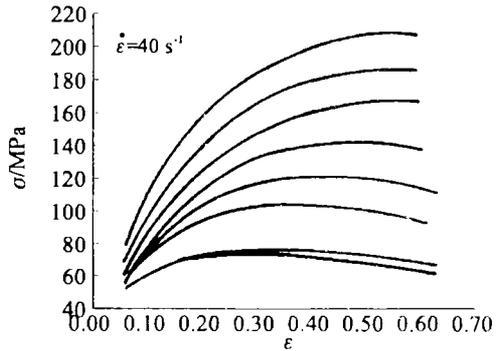


图3 紫铜流动应力曲线

### 参考文献

- 1 周纪华,管克智. 金属塑性变形阻力. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- 2 刘志万. 实验数据的统计分析和计算机处理. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1989
- 3 吴继庚. 实用数值计算方法与程序. 北京: 冶金工业出版社, 1991.

## Flow Stress of Red Copper at Hot Deformation

*Guan Kezhi Fan Bailin Zhou Jihua*

College of Mechanical Engineering , USTB, Beijing 10083, PRC)

**ABSTRACT** This paper mainly studies the mathematical models for flow stress of red copper by doing experiment with a cam plastometer at a constant deforming rate. The paper provides many flow stress diagrams concerning red copper under different strain temperatures, different strain rates and different deformation degrees . At the same time, on the foundation of analyzing and comparing the regression results of nonlinear models, mathematical models of high accuracy for flow stress was put forward.

**KEY WORDS** red copper, flow stress, mathematical model, cam plastometer

.....  
(上接第 8 页)

2 李中华等. 钻杆接头螺纹在拉伸载荷下弹塑性有限元分析. 石油专用管, 1994(1) : 53 ~ 56

## Finite Element Analysis of Casing Threads under Tensile Load

*Zang Yong*

College of Mechanical Engineering , USTB, Beijing 100083, PRC

**ABSTRACT** This paper discusses the mechanical behavior of the API 8 Round casing connection under tensile load by the FEM, the regular pattern of stresses/strain distribution along pin/box has been given.

**KEY WORDS** casing, thread, FEM