

[文章编号] 1004- 0609(2001) 06- 0988- 05

铍铜带材弯曲应力松弛的力学行为^①

张新明¹, 毛新平¹, 邓至谦¹, 范 波¹, 周卓平¹, 曹金荣²

(1. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083; 2. 宁夏铝业股份有限公司, 石嘴山 753000)

[摘 要] 测定了 3 种铍铜合金带材经时效处理后的静态及动态弯曲应力松弛特性, 并根据应力松弛行为提出了 MAXWELL 线弹性-粘性体模型, 建立了剩余应力与时间及温度参数的关系式, 对静态和动态应力松弛特性进行了计算及预测。研究表明, 铍铜材(1.7%~2.0% Be)应力松弛曲线可分为 2 个阶段。在第 1 阶段, 应力松弛速率很高, 温度高时, 应力松弛更快; 在第 2 阶段, 应力松弛比第 1 阶段慢, 但随温度的升高, 应力松弛加快。给出了 3 种铍铜合金静态及动态应力松弛特性的计算式, 比较计算结果与实验数据后可见, 该模型对应力松弛行为的预测有较好的精确度。

[关键词] 铍铜; 应力松弛; MAXWELL 模型; 弯曲

[中图分类号] TG 146.2

[文献标识码] A

铍青铜作为一种弹性合金, 其质量体现在它的弹性极限和抗应力松弛特性上^[1]。Fox^[2]在研究铍铜合金条材的弯曲应力松弛特性时指出, 应力松弛的下降率与时间的对数成直线关系, 从而得出应力松弛率与时间的关系方程为 $(\sigma_0 - \sigma_t)/\sigma_0 = 10^A t^m$ 。Hashizume^[3]在研究了弹簧用铜合金板材的应力松弛特性后, 应用 L-M 法对应力松弛特性进行了计算和外推, 建立了 Hashizume 公式: $\lg \sigma_t = aT(20 + \lg t) \times 10^{-3} - b$ 。Bhattacharya^[4]在研究高分子材料聚合物的应力松弛行为时, 对常用的计算模型进行了简单的介绍, 如 Smith 模型和 LI 方程等, 并认为这些模型均能对应力松弛行为进行描述, 但都有局限性。PING^[5]在研究不锈钢的动态应力松弛行为时, 认为动态应力松弛依赖于两种形式的应力松弛, 即依赖时间的松弛和依赖循环次数的松弛, 并根据应变硬化理论对动态应力松弛进行了模拟。作者系统地测定了 3 种铍青铜带材的静态和动态应力松弛特性, 提出了适合铍青铜应力松弛行为的 MAXWELL 线弹性-粘性体模型, 建立了剩余应力与时间和温度参数的关系式。结果表明, 该模型和关系式能较好地描述铍青铜冷加工时效处理后的弯曲应力松弛特性。

1 实验

采用目前国内外比较常用的 3 个铍青铜生产厂家的淬火加工态(1[#], 2[#] 和 3[#]) 铍青铜带材作为实

验材料, 其厚度均为 0.2 mm。带材经峰值时效后测量其力学性能, 得出的力学性能如表 1 所列。

表 1 3 种铍铜带材产品的力学性能

Table 1 Mechanical properties of three Cu-Be alloys

Source	Sample cod	$\sigma_{0.2}$ /GPa	σ_b /GPa	E /GPa
A company	1 [#]	1.154	1.285	133.7
B company	2 [#]	1.106	1.223	133.1
C company	3 [#]	1.275	1.397	130.1

静态应力松弛实验采用的装置是参照美国 ASTM STP 676 及文献[6]中的原理自行设计而成。为了保证样品各横截面在弯曲过程中呈等应力状态, 采用线切割将样品切成如图 1 的形状。在规定温度下, 使其承受规定的初始弯曲应力(577.15 MPa)。在规定时间内测量出试样自由端的永久变形量 δ_t , 公式为

$$R = \frac{(\sigma_0 - \sigma_t)}{\sigma_0} \times 100\% = \delta_t / \delta_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中 R 为应力松弛率, σ_0 为初始应力, δ_0 为试样自由端的初始挠度; σ_t 为经过 t/h 后的剩余应力。实验温度为室温 25℃和 120℃。

动态应力松弛实验采用的装置是参照文献[7]的实验原理设计而成。在一定温度下, 使矩形试样(50 mm×10 mm)承受规定振幅和频率的弯曲应力(577.15 MPa), 在规定的振动次数后测量出试样的松弛量。同静态应力松弛实验一样可求出剩余应力

① [收稿日期] 2001- 01- 11; [修订日期] 2001- 04- 09

[作者简介] 张新明(1946-), 男, 教授, 博士生导师。

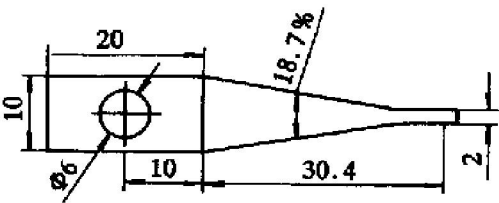


图 1 静态应力松弛实验用样品形状和尺寸

Fig. 1 Experimental specimen of static stress relaxation

与时间的实验数据。

2 模型的建立

与时间及温度相关的材料的应力松弛行为可以通过力学模型清楚地表示出来。在大多数情况下, 人们可将材料的滞弹性和粘性行为想象成具有线弹性(遵循虎克弹性定律)和线粘性(牛顿液体阻尼圆柱体)行为的组合体, 即 $\sigma = E \cdot \epsilon_e$, 和 $\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}_\eta$, 式中 σ 为法向应力, ϵ_e 为弹性应变, η 为粘度, $\dot{\epsilon}_\eta$ 为粘性应变速率。在 ϵ 不变的条件下, 此时只要考虑应力与时间的关系, 可将材料的应力松弛行为通过 MAXWELL 线弹性-粘性体模型进行描述, 如图 2 所示。基于应力松弛的定义, 有

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_\eta = 0 \tag{2}$$

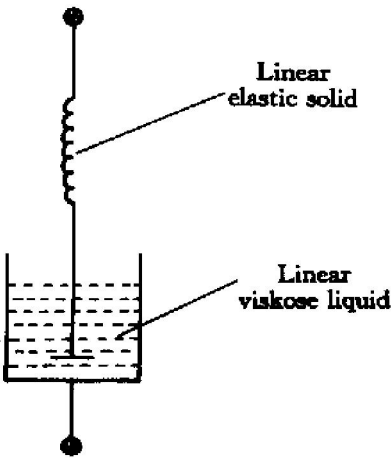


图 2 铍青铜材料应力松弛的 MAXWELL 模型

Fig. 2 MAXWELL model of stress relaxation for Cu-Be alloys

将应力应变关系式代入得: $E \dot{\epsilon} = \dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \sigma$
式中 $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_e$, $\dot{\epsilon}_\eta$ 分别为总应变速率、理想线弹性应变速率及线粘性应变速率, E 为理想弹性模量。

即: $\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \sigma = 0 \tag{3}$

式中 σ , $\dot{\sigma}$ 分别为应力及应力速率, η 为粘度。令 $E/\eta = 1/t_R$, t_R 称为时间因子, 则

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = - \frac{dt}{t_R} \tag{4}$$

积分后得 $\ln \sigma = - \frac{t}{t_R} + C$, C 为积分常数。

考虑当 $t = 0$ 时, $\sigma = \sigma_0$, $\sigma_0 = E \epsilon_0$ 并且设 t_R 与时间无关, 因此有

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-t/t_R) \tag{5}$$

式中 σ_0 为初始应力, t 为应力松弛时间。

对于依赖循环次数 N 的动态应力松弛行为, 式(5)中的 t/t_R 可转换成 N/N_R , 即

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-N/N_R) \tag{6}$$

利用 MAXWELL 线弹性-粘性体模型也可以求出应力松弛行为与温度的关系, 设 $\eta = \eta_0 \cdot \exp(-Q/KT)$, 则

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = - \frac{E}{\eta_0} \cdot \exp(-Q/KT) \tag{7}$$

式中 K 为 Boltzmann 常数, Q 为激活能。由式(7)可以看出, 剩余应力与温度的关系比较复杂。

3 实验结果

从图 3 和图 4 所示的静态与动态应力松弛实验曲线可以看出, 铍青铜的应力松弛可分为两个阶段, 对于静态应力松弛行为, $t_1 \approx 5$ h; 对于动态应力松弛行为, $N_1 \approx 10$ 次。第 1 阶段应力松弛很快, 但第 2 阶段下降很慢。所以在计算时可按照两个阶段进行。将应力松弛实验数据应用公式(5)和(6)计

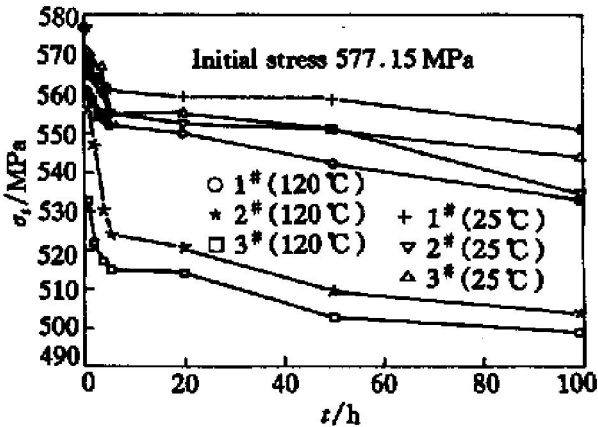


图 3 铍铜合金静态应力松弛实验曲线

Fig. 3 Experimental curves of static stress relaxation for Cu-Be alloys

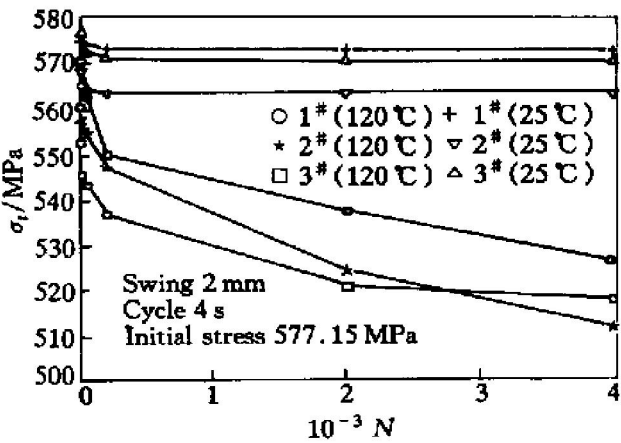


图 4 铍铜合金动态应力松弛实验曲线

Fig. 4 Experimental curves of dynamic stress relaxation for Cu-Be alloys

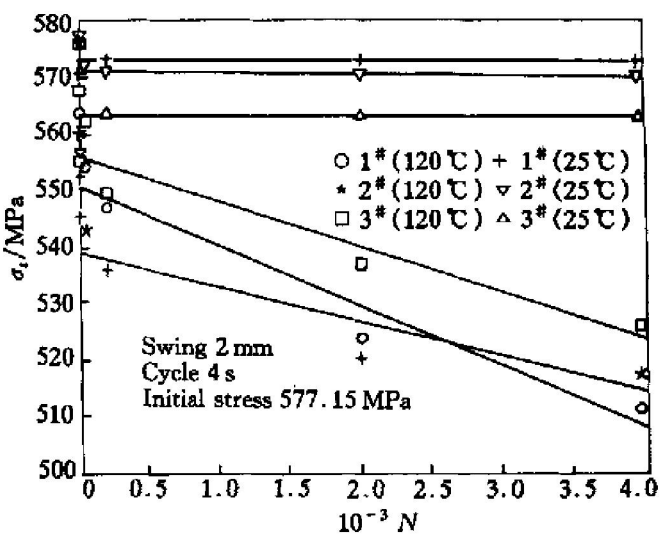


图 6 动态应力松弛按模型进行计算的曲线

Fig. 6 Calculated curves of dynamic stress relaxation for Cu-Be alloys

算后得出的计算式分别列表 2 和表 3 中。图 5 所示为铍青铜带材弯曲静态与动态应力松弛按模型计算的曲线，图中用几何形状表示的点为实验测试点。从图 5 和图 6 中可以看出，模型计算的结果与实验符合较好，误差不超过 5%。

4 讨论

应力松弛实际上是材料的弹性行为和粘性行为的综合体现。材料的应变 ϵ 是应力 σ 和温度 T 的函数， $\epsilon = \epsilon(\sigma, T)$ ，因此 $d\epsilon = \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \bigg|_T d\sigma + \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \bigg|_\sigma dT$ 。显然， $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \bigg|_T = \frac{1}{E}$ ， $\frac{\partial \epsilon}{\partial T} \bigg|_\sigma = \alpha$ 。则 $d\epsilon = \frac{d\sigma}{E} + \alpha dT$ ，式中 α 为线膨胀系数。如果单位体积的形变功 $dW = \sigma d\epsilon$ 转变为热能，在绝热条件下，则 $\sigma d\epsilon = c dT$ ， c 为单位体积的热容。由以上关系可得 $d\epsilon = \frac{d\sigma}{E(1 - \frac{\alpha}{c}\sigma)}$ 。将该式积分，并注意到 $\epsilon|_{\sigma=0} = 0$ ，则

$$E\epsilon = -\frac{c}{\alpha} \ln(1 - \frac{\alpha}{c}\sigma)$$
，即 $\sigma = \frac{c}{\alpha} [1 - \exp(-\frac{\alpha E}{c}\epsilon)]$ ，将该式用级数展开得 $\sigma = E\epsilon(1 - \frac{\alpha E}{2c}\epsilon + \dots)$ 。由此可见，材料的应力与应变之间的关系除线弹性首项 $\sigma = E\epsilon$ 外，还有热效应项，这是由于材料的滞弹性引起的。若在这种情况下，应用 MAXWELL 模型

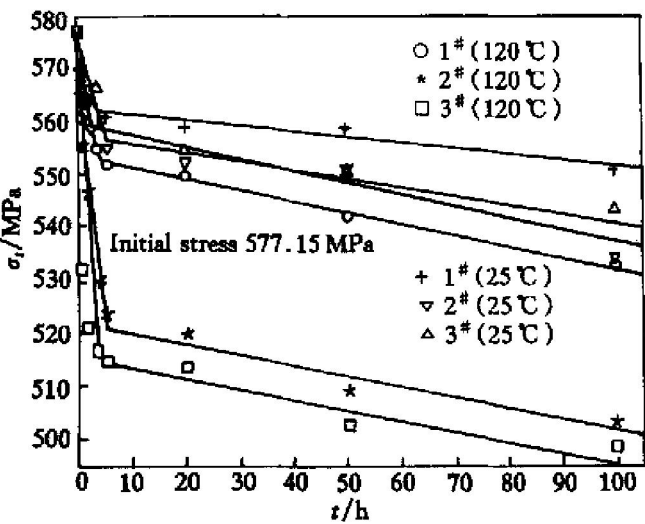


图 5 静态应力松弛按模型进行计算的曲线

Fig. 5 Calculated curves of static stress relaxation for Cu-Be alloys

表 2 铍青铜静态弯曲应力松弛特性计算式

Table 2 Calculating formulas of static stress relaxation for Cu-Be alloys

Source sample code		First stage	Second stage
A company	1# (25 °C)	$\ln \sigma_t = 6.349 - 4.39 \times 10^{-3} t$	$\ln \sigma_t = 6.333 - 2.04 \times 10^{-4} t$
	1# (120 °C)	$\ln \sigma_t = 6.343 - 6.69 \times 10^{-3} t$	$\ln \sigma_t = 6.317 - 3.92 \times 10^{-4} t$
B company	2# (25 °C)	$\ln \sigma_t = 6.348 - 6.10 \times 10^{-3} t$	$\ln \sigma_t = 6.327 - 4.38 \times 10^{-4} t$
	2# (120 °C)	$\ln \sigma_t = 6.340 - 1.74 \times 10^{-2} t$	$\ln \sigma_t = 6.258 - 3.90 \times 10^{-4} t$
C company	3# (25 °C)	$\ln \sigma_t = 6.354 - 6.24 \times 10^{-3} t$	$\ln \sigma_t = 6.324 - 2.53 \times 10^{-4} t$
	3# (120 °C)	$\ln \sigma_t = 6.312 - 1.68 \times 10^{-3} t$	$\ln \sigma_t = 6.245 - 3.54 \times 10^{-4} t$

表 3 铍青铜动态弯曲应力松弛特性计算式

Table 3 Calculating formulas of dynamic stress relaxation for Cu-Be alloys

Source sample code		First stage	Second stage
A company	1 [#] (25 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.357 - 3.14 \times 10^{-4} N$	$\ln \sigma_t = 6.352 - 4.45 \times 10^{-7} t$
	1 [#] (120 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.351 - 1.72 \times 10^{-3} N$	$\ln \sigma_t = 6.322 - 1.49 \times 10^{-5} t$
B company	2 [#] (25 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.357 - 1.49 \times 10^{-3} N$	$\ln \sigma_t = 6.335 - 2.68 \times 10^{-7} t$
	2 [#] (120 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.343 - 4.66 \times 10^{-3} N$	$\ln \sigma_t = 6.290 - 1.15 \times 10^{-5} t$
C company	3 [#] (25 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.357 - 6.15 \times 10^{-4} N$	$\ln \sigma_t = 6.349 - 7.71 \times 10^{-7} t$
	3 [#] (120 ℃)	$\ln \sigma_t = 6.343 - 3.11 \times 10^{-3} N$	$\ln \sigma_t = 6.311 - 1.97 \times 10^{-5} t$

来表示材料的这种非线性关系,如图 2 所示。

MAXWELL 应力松弛模型中只考虑了材料的 2 个参数(E , η)的串连,没有考虑材料的蠕变对应力松弛行为的影响,因而计算值与实验结果存在差距,尤其是在高温的情况下,差别更大,如图 5 和图 6 所示。

铍青铜在应力松弛实验过程中,总会存在内应力,这种应力在松弛的第 2 阶段随着时间的延长或循环次数的增加随温度变化(如图 3 和图 4),因而材料必定发生蠕变。材料的蠕变行为可通过 E , η 两个参数的并联描述(VOIGT 模型)。若综合考虑 MAXWELL 与 VOIGT 模型,理论预测的铍青铜的应力松弛特性,尤其是高温下的应力松弛特性可能更加接近实际情况。

在第 1 阶段,铍青铜应力松弛很快,这可能与材料中的可动位错有关^[8~11]。铍青铜虽经固溶时效处理,但材料中仍存在大量位错与空位。在应力与温度的激活作用下,位错将产生滑移和攀移,一方面异号位错相互抵消,另一方面同号位错趋于排成能量最低的状态。随着时间的延长,可动位错与空位的密度下降趋势减少,应力松弛减缓,表现为曲线上的第 2 阶段,如图 3 和图 4 所示。应力松弛特性还与材料的成分、组织结构有关。3 种铍铜合金不同的应力松弛特性曲线均是材料的这些内因对外的表现^[1,12]。

根据实验条件及 MAXWELL 模型计算的时间参数值和循环次数常数代入公式(5)和(6)中,可以计算出任意时间和任意循环次数的剩余应力 σ_t 。由此可见,应用 MAXWELL 线弹性-粘性体模型来模拟铍青铜合金带材的弯曲应力松弛行为具有实际的意义,而且可以利用公式(5)和(6)对实验数据进行外推计算,得出 $t = 1\,000\text{h}$ 甚至更长时间的静态应力松弛特性和 $N = 10^7$ 次的动态应力松弛特性。并且可以应用 MAXWELL 线弹性-粘性体模型进行产品的寿命设计。表 4 列出的数据为应用表 2 中的时间参数对铍青铜带材的弯曲静态应力松弛特性进

行的外推值($t = 1\,000\text{h}$)。 σ_{1000} 表示 1 000 h 后剩余应力值。

表 4 对弯曲静态应力松弛特性的外推值

Table 4 Predicted data of static stress relaxation for Cu-Be alloys

Source	Sample code	$\sigma_{1000}(25\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$	$\sigma_{1000}(120\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{MPa}$
A company	1 [#]	458.8	374.4
B company	2 [#]	261.3	353.9
C company	3 [#]	432.8	361.7

在进行产品的寿命设计时,我们一般以 25% 的松弛量作为失效的临界值,从表 4 中可以看出,1[#] 样品在室温 1 000 h 后还没有失效,但其他的样品均已经超过了失效的临界值。

5 结论

- 1) 采用悬臂梁法测定了 3 种铍铜合金经时效处理后的静态及动态弯曲应力松弛特性,发现 3 种合金的应力松弛行为差别较大。其应力松弛曲线可分为 2 个阶段。在第 1 阶段,应力松弛速度很快,温度高时,应力松弛更快;在第 2 阶段应力松弛比第 1 阶段慢,但随温度的升高,应力松弛加快。
- 2) 根据铍铜合金的弯曲应力松弛行为,提出了 MAXWELL 线弹性-粘性体模型,建立了应力松弛行为与时间和温度参数的关系式。
- 3) 应用 MAXWELL 线弹性-粘性体模型及所建立的时间与温度参数的关系式,对铍铜合金的应力松弛性能测试值进行了比较。MAXWELL 模型的计算值与实验结果比较接近。

[REFERENCES]

[1] LI Yrlian(李忆莲), HAN Yajing(韩雅静), YU Shurong(于淑骥), et al. 铍青铜的应力松弛性能及组织

- [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(1): 62– 65.
- [2] Fox A. Stress relaxation in bending of copper beryllium alloy strip [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1980, 8(3): 119– 126.
- [3] Hashizume K, Agatsuma T. Stress relaxation in bending on some copper alloys for spring use [J]. Journal of the Japan Copper and Brass Research Association, 1982, 21: 159– 167.
- [4] Bhattacharya M. Stress relaxation of starch/synthetic polymer blends [J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 4131– 4139.
- [5] PING Xiuer. Strength at High Temperature, Theory and Designing of Metal Materials [M]. Beijing: Science Press, 1983. 202– 209.
- [6] Harkness J C, Lorenz C S. Stress relaxation of beryllium copper in bending [A]. Annu Connector Symp Proc, 1979, 12: 37– 52.
- [7] Adachi T, Ishikawa S, Kainuma Y. Effect of temperature for spring properties in Be-Cu alloy [J]. Journal of the Japan Copper and Brass Research Association, 1989, 28: 159– 167.
- [8] LI Yilian(李忆莲), ZHANG Jieping(张捷平), SU Deda(苏德达). 冷拔碳素钢丝制弹簧松弛稳定性能及松弛机理的研究 [J]. Metal Science & Technology(金属科学与工艺), 1987, 9(3): 22– 30.
- [9] WANG Bojian(王伯健), ZHU Daming(朱达明), LI Zen(李臻). 超细晶粒形变热处理钢丝弹簧的应力松弛性能 [J]. Physical Testing and Chemical Analysis(理化检验), 1993, 29(6): 16– 19.
- [10] Trusov L I, Khvostantseva T P. Low temperature stress relaxation of nanocrystalline nickel [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 2956– 2961.
- [11] JIN Yao(金尧), WEI Nan(魏楠). 金属高温应力松弛行为研究 [J]. Journal of Mechanical Strength(力学强度), 1997, 19(3): 57– 60.
- [12] LI Tao(李涛), WANG Duo(王铎). 二相粒子对含夹杂金属材料力学性能的影响 [J]. Journal of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报), 1995, 27(5): 37– 40.

Stress relaxation characteristics in bending of Cu-Be alloys

ZHANG Xir-ming¹, MAO Xir-ping¹, DENG Zhi-qian¹, FAN Bo¹, ZHOU Zhuo-ping¹, CAO Jin-rong²

(1. Department of Materials Science and Engineering, Central South University,

Changsha 410083, P. R. China;

2. Ningxia Tantalum Joint Stock Company Limited, Shizuishan 753000, P. R. China)

[Abstract] The static and dynamic stress relaxation characteristics at different temperatures for three kinds of aged Cu-Be alloys which were subjected to bending were determined. The results showed that there is a marked difference in stress relaxation characteristics amongst these alloys, and that the relaxation behavior can be divided into two stages. In the first stage, the rate of the stress relaxation is very fast, however, in the second stage the rate of the stress relaxation is slow. The rate of relaxation will increase quickly with increasing temperature. According to the present investigation, MAXWELL viscoplasticity-elasticity model was suggested to describe the relaxation behavior of the alloys. A formula for the model, including time and temperature parameters, was proposed also. The calculated results are in good agreement with the experimentals.

[Key words] Cu-Be alloy; stress relaxation; MAXWELL model; bending

(编辑 黄劲松)