

[文章编号] 1004- 0609(2000)03- 0323- 03

Cu-11.19Al-6.43Mn 合金的形状记忆效应^①

娄明珠¹, 杨树林¹, 王碧文², 李 红², 王世民², 王 涛²

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110006; 2. 洛阳铜加工厂, 洛阳 471039)

[摘 要] 测试了 Cu-11.19Al-6.43Mn 合金的形状记忆效应, 研究了预变形程度、恢复温度和训练次数对该合金的单向和双向形状记忆效应的影响。结果表明: 该合金有一个能完全恢复的最大预变形程度 ϵ_m , 它随恢复温度的提高而增大, 其最大值约为 4.5%; 合金的双向记忆效应随训练次数增加而增大, 在适当的训练次数和训练温度下, 其最大的冷却和加热时的形状恢复量之比(R)值约为 30%。

[关键词] 铜基形状记忆合金; 形状记忆效应; 预变形

[中图分类号] GT113.25

[文献标识码] A

国内外对 Cu 基合金中的 Cu-Zr-Al 和 Cu-Al-Ni 形状记忆合金的研究已有许多报导^[1~5], Cu-Al-Mn 系形状记忆合金是最近几年新开发研究的铜基形状记忆合金。日本、欧美和前苏联等国家在有关文献^[6~13]上报导了他们对该合金的微观组织结构、热弹性马氏体转变的研究, 但是对其形状记忆性能的研究报导甚少。为此, 本研究检测了 Cu-11.19Al-6.43Mn 合金的单向和双向形状记忆性能, 分析了预变形程度、恢复温度对他们的影响。

1 试验

1.1 合金

用电解铜、电解锰、金属铝和微量的细化晶粒元素钴、镍和硼配制合金。用 10 kg 中频感应炉石墨坩埚熔炼, 用铁模铸造合金, 锭坯在 800 °C 下热轧成 2.0 和 0.8 mm 厚的试验用板材。试验合金的主要化学成分(质量分数)为: Cu-11.19%Al-6.43%Mn。测合金的电阻-温度曲线, 确定其马氏体特征转变温度为: $M_s = 44$ °C, $M_f = 20$ °C, $A_s = 33$ °C, $A_f = 94$ °C。

1.2 预应变、恢复温度对形状记忆效应的影响

从 800 °C 淬入室温水中的试样分成 6 组, 每组分别在 $d 120$ mm 轧机上给以 2.5% 至 9% 的 6 种程度不同的预变形。然后分别测它们在 100, 150, 200, 300, 400 °C 下的形状恢复率。形状恢复率用公式 $\eta = (h - h_0) / (H - h_0)$ 计算。式中 H 为试样的原始厚度; h_0 , h 分别为预变形和加热恢复后的试

样厚度。试样尺寸为 2 mm × 10 mm × 50 mm。

1.3 双向记忆效应

有双向记忆效应的合金, 不仅能记忆母相的形状, 而且能记忆马氏体状态下的形状。若试样在马氏体和母相之间循环地进行加热和冷却, 便会发生循环往复的可逆形状记忆效应, 合金的双向记忆效应要经过训练后方能逐渐形成。本试验用 0.8 mm × 5 mm × 80 mm 的直板试样, 在马氏体状态下先给以 2.5% 弯曲预变形、然后对其加热和冷却。预变形、加热和冷却恢复状态下的试样两端的距离分别为 L , L_j 和 L_L , 如图 1 所示。用参数 $\Delta L_j = L_j - L$, $\Delta L_L = L_L - L_j$ 表示试样在加热和冷却时的形状恢复量, 其比值 $R = -1$ 表示试样的加热与冷却形状恢复量相同, 但恢复的方向相反($R = \Delta L_L / \Delta L_j$, 一般 $0 \geq R \geq -1$)。重复上述过程, 测训练次数 N 对 R 的影响。加热恢复温度为: 100, 150, 200 °C, 冷

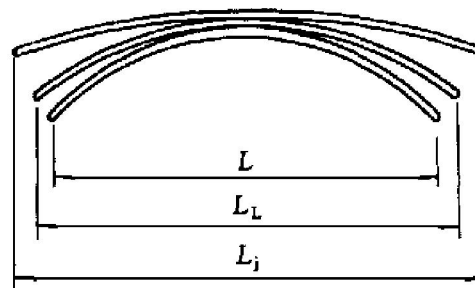


图 1 在预变形、加热和冷却状态下试样两端的距离

Fig. 1 Straight length between two ends of specimens
 L —Length during pre deformation; L_j —Length during heating;
 L_L —Length after cooling

① [收稿日期] 1999- 07- 30; [修订日期] 1999- 10- 18

[作者简介] 娄明珠(1959-), 女, 副教授。

却恢复温度为 10 ℃。

2 结果与分析

图 2 是试验合金的形状恢复率与预变形程度和恢复温度的关系曲线。对于任一恢复温度，当预变形程度小于某一临界值 ϵ_m 时，合金的形状恢复率均可达到 100%；而大于该临界值时，则形状恢复率随预变形程度的增加而减小。 ϵ_m 称为能完全恢复的极限预变形程度。提高恢复温度， ϵ_m 增大，当恢复温度为 400 ℃时， ϵ_m 约为 4.5%。当预变形程度一定时，提高恢复温度，形状恢复率增加，预变形程度达 9%，恢复温度为 400 ℃时，试验合金的形状恢复率约为 35%。

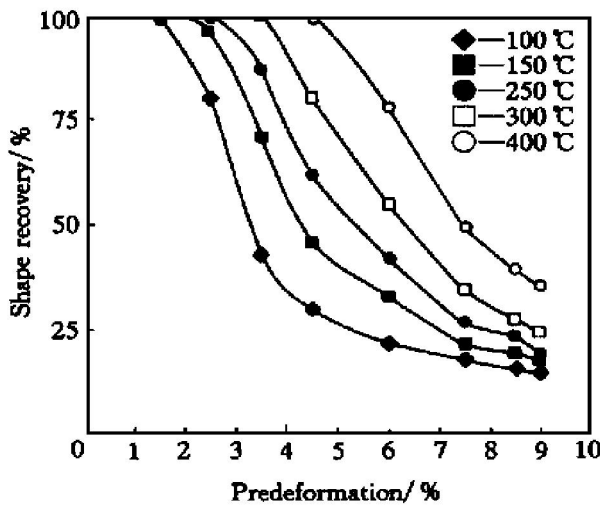


图 2 预应变程度对形状恢复率的影响

Fig. 2 Influence of pre deformation degree on shape recovery rate

图 3 是试验合金在不同温度下进行双向记忆效应训练时，其训练次数对 R 值的影响。由图可以看出， R 值随训练次数增加而逐渐增大，达到最大值后又有明显的降低趋势。训练温度为 150 ℃时有较高的 R 值，但是其最大值也仅为 30%。用同样的方法测 Cu-Zn-Al 记忆合金的 R 值，其最大值可达 65%~70%。

Cu 基形状记忆合金从高温 β 单相区快速冷却，可以抑制共析转变，而发生有序化转变和热弹性马氏体转变，使合金具有形状记忆效应。热弹性马氏体转变是可逆转变。图 4 是试验合金从 800 ℃淬火后获得的热弹性马氏体组织的金相照片。从照片上可以看出，马氏体组织中有许多孪晶和堆垛层错。图 5(a), (b), (c) 分别是合金的母相、马氏体

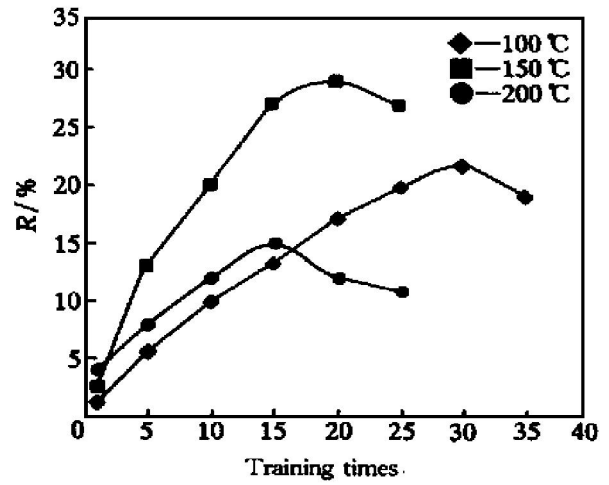


图 3 训练次数对 R 的影响

Fig. 3 Influence of training times on R



图 4 试验合金的热弹性马氏体组织 (×100)

Fig. 4 Thermo-elastic martensite structure of test alloy(×100)

和 马氏体经预变形后的晶体原子模型示意图。母相冷却，转变为马氏体；马氏体在外力作用下，于其有利取向的孪晶界产生移动，于是，晶体发生 ϵ 预变形。当晶体的温度升高到 A_f 点以上，其热弹性马氏体便逆转变为母相，随之，合金的预变形消失，形状恢复到母相状态。记忆合金在循环地升温-降温的可逆转变过程中，由于其晶体结构发生可逆转变，即可产生双向记忆效应。当合金的预变形量 $\epsilon > \epsilon_m$ 时，晶体内可能引入塑性变形机制，于是，试样的预变形不能完全恢复，当预变形量增大，其中塑性变形的比例增大，其形状恢复率减小。另外，由于提高试样的恢复温度，可以增大热弹性马氏体的逆转变驱动力，所以有利于合金的形状恢复。但是，若合金的恢复温度过高，或长期处于较高的温度下，会使合金的组织结构发生变化，如发生共析转变或第二相的析出等，从而使形状记忆效

应降低。

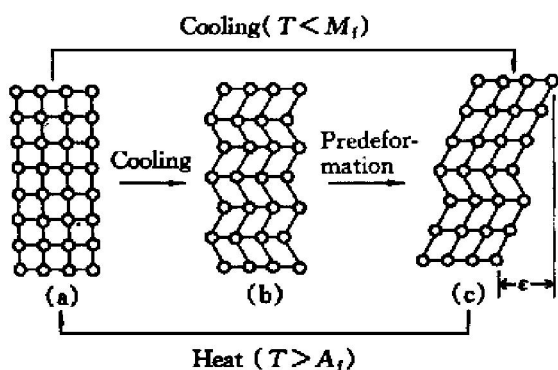


图5 加热、冷却对Cu基形状记忆合金原子模型图的影响

Fig. 5 Effect of heating and cooling on atomic model for Cu-based shape memory alloys

3 结论

1) Cu-11.19%Al-6.43%Mn合金有一个能完全恢复的最大预变形程度 ϵ_m , 它随恢复温度的提高而增大, 其最大值约为4.5%。

2) 该合金的双向记忆效应随训练次数增加而增大, 在适当的训练次数和训练温度下, 其最大的冷却与加热形状恢复量之比值 R 约为30%。

[REFERENCES]

[1] LU Wei (吕伟) and JIANG Bo-hong (江伯鸿). Cu-ZrAl合金的中温相变的组织和结构[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1992,

2(2): 47.

- [2] TAN Shu-song(谭树松), et al. 马氏体相变的动态观察[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(2): 47.
- [3] LI Chun-ming(李春明), et al. Cu-ZrAl合金贝氏体组织的扫描隧道显微镜研究[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(1): 48.
- [4] Kennon N, et al. Aging effects copper-based shape memory alloys [J]. Met Trans, 1982, 13A(4): 551.
- [5] Dutkiewicz J, et al. Effect of γ precipitates on the martensite transformation in Cu-Al-Mn alloys [J]. Mater Sci Engineering, 1995, A158: 119-128.
- [6] Murray J L, et al. Changes in stacking sequence of martensite plates interacting with particles [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1990, 24: 1163.
- [7] Kainuma R, et al. Thermoelastic martensite and shape memory effect in ductility [J]. Met Trans A, 1996, 27A: 2187.
- [8] Pado M, et al. Martensitic transformation in Cu-Mn-Al alloys [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 33: 877.
- [9] Mellor B, et al. Shape memory effects in Cu-Al-Mn alloys [J]. Cripta Metallurgica, 1986, 20: 839.
- [10] Zak G, et al. Shape memory effect in cryogenic Cu-Al-Mn alloys [J]. Scripta Materialia, 1996, 34: 363.
- [11] Dei J, et al. A position annihilation study of a Cu-Al-Mn martensite [J]. Scr Mater, 1987, 21: 119.
- [12] Schofield D, et al. Aging effects in copper-based shape memory alloys [J]. Met Technology, 1980, 4: 167.
- [13] Gil F J, et al. Kinetic grain growth in β -copper shape memory alloys [J]. Mater Sci Engineering, 1998, A241: 114.

Shape memory effect of Cu-11.19Al-6.43Mn alloy

LOU Ming-zhu¹, YANG Shu-lin¹, WANG Bi-wen², LI Hong², WANG Shi-min², WANG Tao²

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China;

2. Luoyang Copper Working Plant, Luoyang 471039, P. R. China)

[Abstract] The effect of shape memory of Cu-11.19Al-6.43Mn alloy was measured, an influence of pre-deformation degree, recovery temperature and training times on shape recovery of one and two way was studied. Besides, it was analyzed by atom model of crystal deform. Test results show: The alloy has the greatest pre-deformation degree of about 4.5%, which can be recovered completely, and increases with raising recovery temperature; 2) The bi-direction memory effect of the alloy is increasing with the raising training times, and at proper training times and temperature its greatest value of the ratio between shape recovery of cooling and heating is about 30%.

[Key words] copper based shape memory alloys; thermoelasticity martensite transformation; shape memory effect

(编辑 朱忠国)