

文章编号: 1004-0609(2004)02-0194-05

CuAlMn 形状记忆合金的高阻尼特性^①

郑成琪, 程晓农

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 用悬臂梁弯曲共振法研究了新型 CuAlMn 系形状记忆合金在马氏体态和母相态的阻尼特性。研究结果表明: 室温马氏体态 Cu-10.5% Al-6% Mn(质量分数)和室温母相态 Cu-11% Al-8% Mn 形状记忆合金在表面应变振幅为 4.05 MPa 时, 都具有很高的阻尼性能, 内耗 Q^{-1} 接近 0.1; 两种形态的 CuAlMn 形状记忆合金的阻尼性能都随应力振幅增加而下降, 且母相态合金阻尼性能下降速度更快。

关键词: 高阻尼金属; 形状记忆合金; 阻尼性能; CuAlMn 合金

中图分类号: TG 146.11; TG 132

文献标识码: A

High-damping capacity of CuAlMn shape memory alloys

ZHENG Cheng-qi, CHENG Xiao-nong

(Department of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The damping properties of CuAlMn shape memory alloys both in martensite and parent phase were investigated using cantilever resonant-bar technique. It is found that Cu-10.5% Al-6% Mn and Cu-11% Al-8% Mn (mass fraction) shape memory alloys exhibit high damping capacity both in martensite and parent phase, with internal friction (Q^{-1}) approximately as high as 10^{-1} when the applied stress amplitude is 4.05 MPa. The damping capacity decreases with increasing surface stress amplitude in either martensite or parent phase, while it decreases faster in alloy with parent phase.

Key words: high-damping metals; shape memory alloys; damping capacity; CuAlMn alloys

阻尼金属由于其优良的力学性能和较高的减振能力, 且抗振频率宽, 可以直接作为结构材料使用, 因而成为减振降噪的首选材料之一。开发功能结构一体化的高阻尼金属, 在保证较好力学性能的基础上提高其阻尼性能, 可使其具有更为广泛的工程应用前景^[1, 2]。

形状记忆合金具有 3 大功能特性: 形状记忆效应、伪弹性和高阻尼特性, 前两者已经得到较深研究, 而高阻尼特性的研究则相对滞后^[3~5]。欧盟委员会资助的“Manside Project”是世界上开发形状记忆合金高阻尼特性的最大专项研究^[6], 主要承担该项目的比利时、意大利和德国近年来开始研究 Ni-Ti, CuZnAl 和 CuAlBe 的阻尼特性^[6~8]。因而形状记忆合金高阻尼特性的研究和开发也越来越受到重

视^[9, 10]。

新型 CuAlMn 系形状记忆合金^[11, 12], 由于其良好的热稳定性和优良的力学性能, 近年来正受到越来越多研究者的关注, 成为铜基形状记忆合金的又一研究热点, 然而对其阻尼性能的研究迄今还没有报道。本文作者开发了 CuAlMn 系形状记忆合金的高阻尼应用, 研究了室温组织和应变振幅对阻尼性能的影响, 以进一步探究形状记忆合金的阻尼机理。

1 实验

1.1 试样制备

① 收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-07-20 作者简介: 郑成琪(1971-), 男, 讲师, 博士研究生。
通讯作者: 郑成琪, 电话: 0511-8786409, 13815178212; E-mail: zheng_chengqi@163.com

用中频感应电炉 Al_2O_3 坩埚在氩气保护下熔炼了 3 组不同成分的合金, 合金名义成分见表 1。金属型热模浇注, 铸锭尺寸 $d\ 40\ \text{mm} \times 230\ \text{mm}$, 切割浇冒口后车削去除表面氧化皮, 线切割取样, DSC 试样尺寸为 $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$, 阻尼试样尺寸为 $170\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 。试样热处理工艺为: $850\ ^\circ\text{C}$ 固溶处理 3 min, 室温水淬, $180\ ^\circ\text{C}$ 时效 20 min 后空冷。金相试样腐蚀剂为: $10\ \text{g}\ \text{FeCl}_3 + 25\ \text{mL}\ \text{HCl} + 100\ \text{mL}\ \text{H}_2\text{O}$ 。相变点测试采用 NETZSCH DSC204 差热分析仪, 变温速率 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

1.2 阻尼性能测试

用自由衰减法测量试样的阻尼性能。测试设备采用悬臂梁共振装置^[13, 14], 加载方式为自由端砣码定量加载, 试验中分别测试了 0.098, 0.176, 0.490 和 0.980 N 4 种不同载荷下的阻尼性能。阻尼性能用对数衰减率 δ 可表示为

$$\delta = \frac{1}{n} \ln(a_0/a_n) \tag{1}$$

式中 a_0 是初始振幅; a_n 是 n 个周期后的振幅; n 是 a_0 和 a_n 之间的周期数。

表征材料阻尼最常用的参数是 Q^{-1} (内耗) 和 C_{SD} (Specific damping capacity), 当阻尼较小时 ($Q^{-1} \ll 1$ 时)^[2], δ 与 Q^{-1} 和 C_{SD} 的关系为

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{C_{SD}}{2\pi} \tag{2}$$

对于高阻尼金属(Hidamets), 一般定义其 $Q^{-1} \geq 10^{-2}$, 其精确表达式为

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} \left[1 - \frac{\delta}{2\pi} + \dots \right] \tag{3}$$

当 $Q^{-1} = 10^{-2}$ 时, 式(2)的误差约 0.5%, 当 $Q^{-1} = 10^{-1}$ 时, 式(2)的误差约为 5%。实验中阻尼性能参数之间的换算按式(2)进行。

2 结果及讨论

2.1 室温组织与阻尼性能的关系

表 1 给出了根据 CuAlMn 系形状记忆合金和普通 Cu-12Al 二元合金的一阶振型计算的阻尼性能测试结果, Cu-12Al 二元合金的阻尼能力仅为 $Q^{-1} = 1.07 \times 10^{-2}$, 而 CuAlMn 系形状记忆合金(Cu-10.5Al-6Mn 和 Cu-11Al-8Mn) 的阻尼能力比 Cu-12Al 合金几乎高出一个数量级, 达到 $Q^{-1} \approx 10^{-1}$, 试验结果证实了 CuAlMn 系形状记忆合金的高阻尼特性。

通常认为: 形状记忆合金在马氏体态具有高阻尼特性, 而母相态合金的阻尼能力很差。但本试验发现: 单一母相和单一马氏体态都有可能获得高阻尼性能。Cu-11Al-8Mn 合金具有单一母相组织, 其金相组织如图 1 所示, 其阻尼能力高达 $Q^{-1} = 9.97 \times 10^{-2}$, 甚至超过单一马氏体态的 Cu-10.5Al-6Mn 合金, 其金相组织如图 2 所示。对于这一试验结果可以认为, 形状记忆合金的耗能机制主要包括 3 个方面: 界面切变滑移、马氏体变体和孪晶再取向以及应力诱发马氏体相变。单一马氏体态 Cu-10.5Al-6Mn 的耗能机制是界面切变滑移, 马氏体变体和孪晶再取向; 单一母相态 Cu-11Al-8Mn 合金的耗能机制很可能是应力诱发马氏体相变。母相态具有高阻尼的条件是外加应力振幅大于诱发马氏体相变的临界应力。

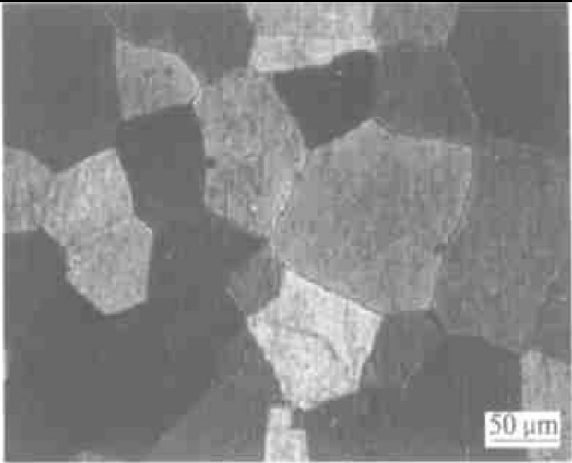


图 1 Cu-11Al-8Mn 的金相组织

Fig. 1 Metallograph of Cu-11Al-8Mn alloy

表 1 合金成分, 相变点及阻尼性能

Table 1 Composition, phase transformation temperature and damping capacity of alloys studied (Stress amplitude: 4.05 MPa)

Specimen	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$M_s/^\circ\text{C}$	$\delta/\%$	$Q^{-1}/10^{-2}$	Specific damping capacity/ $\%$
Cu-12Al	88.0	12.0	0		3.36	1.07	6.72
Cu-10.5Al-6Mn	83.5	10.5	6.0	107.0	30.72	9.78	61.44
Cu-11Al-8Mn	81.0	11.0	8.0	-33.2	31.32	9.97	62.64

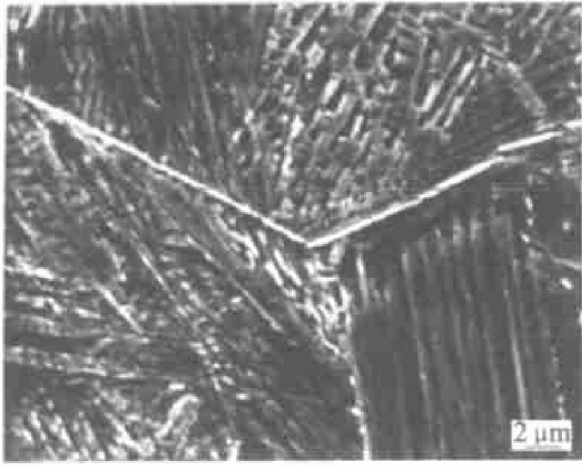


图2 Cu-10.5Al-6Mn的金相组织

Fig. 2 Metallograph of Cu-10.5Al-6Mn alloy

2.2 应力振幅对室温阻尼性能的影响

通过改变砝码质量,测试了4种不同表面应力下材料的阻尼性能,图3、4所示分别是Cu-11Al-8Mn和Cu-10.5Al-6Mn合金在不同表面应力振幅下的自由衰减曲线。悬臂梁试样固定端的最大表面

应力可以按式(4)计算:

$$\sigma = \frac{FLh}{2I_x} \quad (4)$$

式中 F 是悬挂砝码而产生的力; L 是悬臂梁长度; h 是悬臂梁厚度; I_x 是惯性矩。

一般认为孪晶型阻尼合金的阻尼能力随应力振幅增加而增加,而本实验中对CuAlMn系形状记忆合金的试验结果却正好相反。在测试范围内(试样最大表面应力为4.05~40.51 MPa),CuAlMn系形状记忆合金的阻尼性能随应力振幅增加而下降,且母相态阻尼性能随应力振幅增加而下降的速度较快。由图3、4可见:随着表面应力振幅增加,Cu-11Al-8Mn和Cu-10.5Al-6Mn试样的振幅衰减速度都变慢,阻尼性能下降。图5所示是Cu-11Al-8Mn合金和Cu-10.5Al-6Mn合金的阻尼性能(Q^{-1})随应力振幅变化的对比曲线。从图5可以看到:当应力振幅很小时,Cu-11Al-8Mn和Cu-10.5Al-6Mn合金的阻尼性能相当;但是当应力振幅较大时,Cu-11Al-8Mn合金的阻尼性能远小于Cu-10.5Al-6Mn

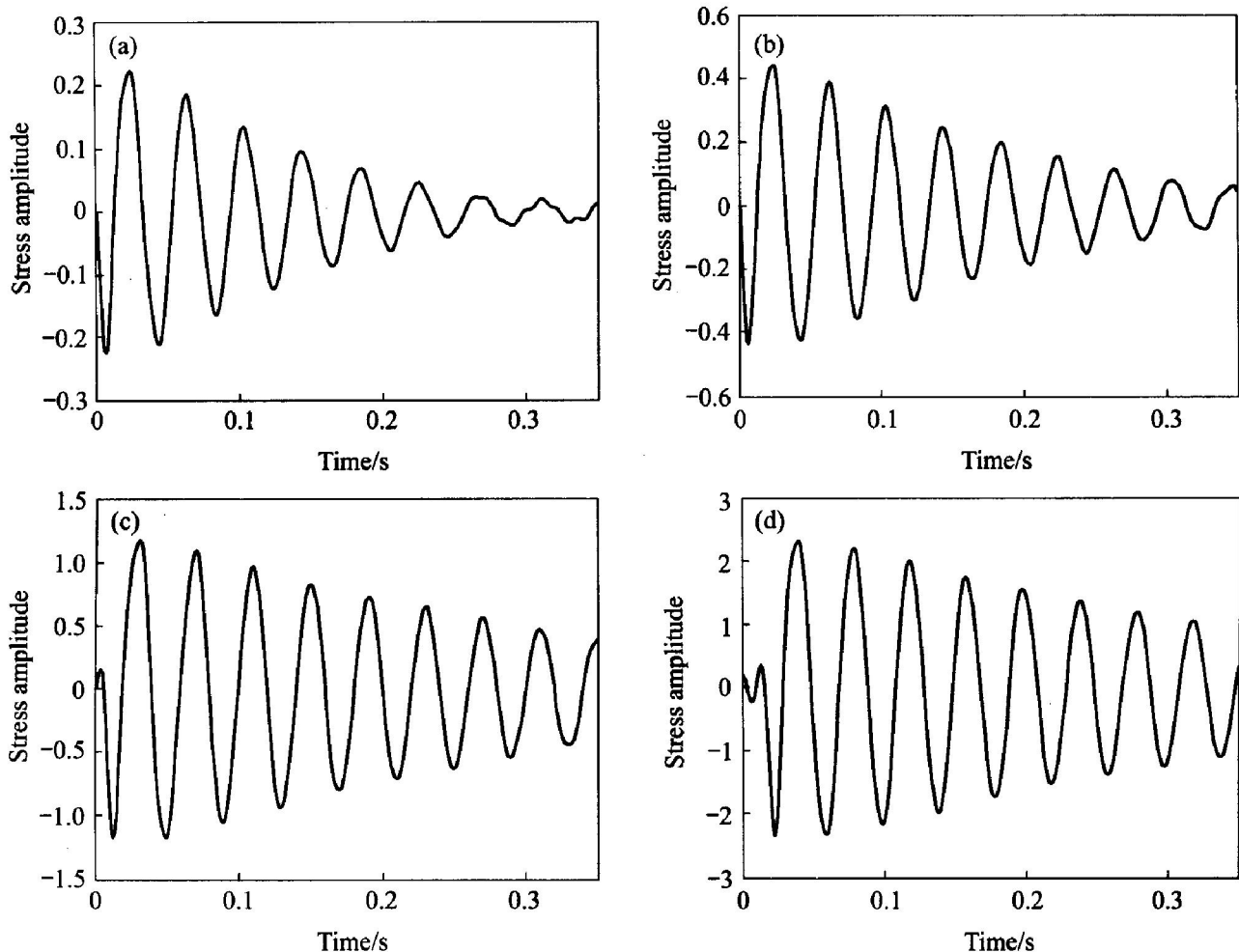


图3 Cu-11Al-8Mn合金随载荷变化的自由衰减曲线

Fig. 3 Free-decaying oscillations of Cu-11Al-8Mn alloy under different input stress amplitude

(a) -4.05 MPa; (b) -9.10 MPa; (c) -20.25 MPa; (d) -40.51 MPa

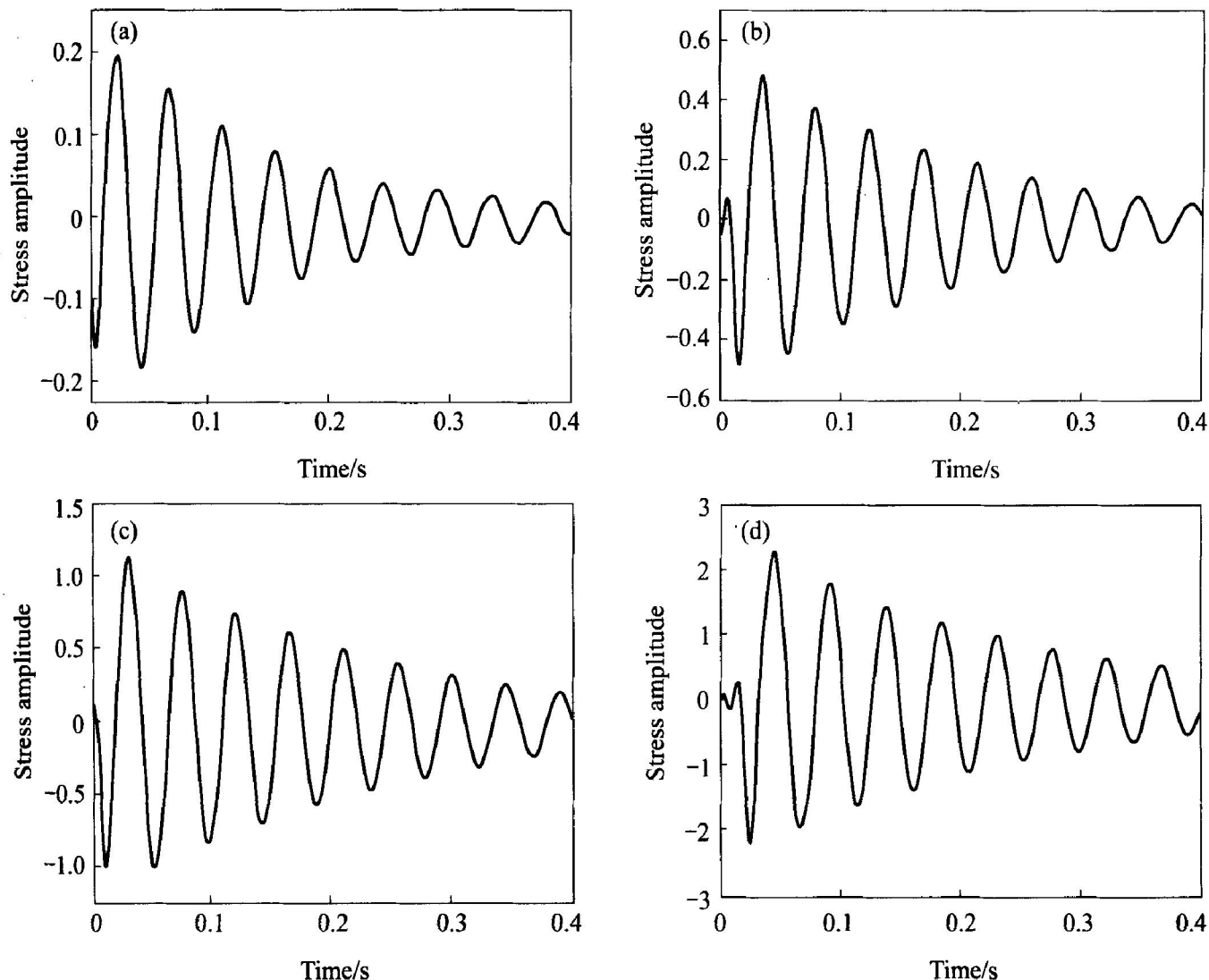


图 4 Cu-10.5Al-6Mn 合金随载荷变化的自由衰减曲线

Fig. 4 Free-decaying oscillations of Cu-10.5Al-6Mn alloy

under different input stress amplitude

(a) -4.05 MPa; (b) -9.10 MPa; (c) -20.25 MPa; (d) -40.51 MPa

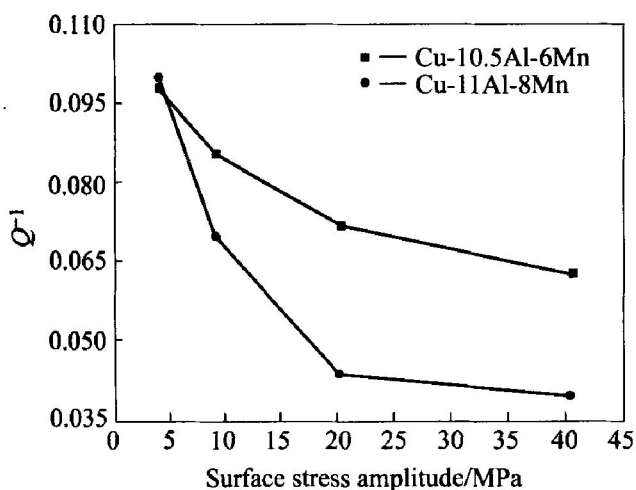


图 5 Cu-10.5Al-6Mn 和 Cu-11Al-8Mn 合金阻尼性能与应力振幅的关系曲线

Fig. 5 Stress-amplitude dependence of damping property of Cu-10.5Al-6Mn and Cu-11Al-8Mn alloys

合金的。

阻尼性能随应力振幅增加而下降的原因可以用能量的观点来初步解释, 比阻尼能力可表示为: $C_{SD} = \Delta W / W$ (ΔW 是振动一个周期衰减的能量, W 是振动一周总能量), 随着应力振幅增加, 虽然界面切变滑移行程增加或应力诱发马氏体数量增多, 一个振动周期内的耗能 ΔW 会有所增加, 但是振动一周的总能量 W 也在增加, 阻尼能力 C_{SD} 的变化要看二者综合作用的结果。对于单一马氏体态的 Cu-10.5Al-6Mn 合金, 主要耗能机制是: 热弹性马氏体孪晶界面在交变外力作用下发生切变滑移, 产生非弹性应变而使应力松弛, 从而将外加机械能耗散; 当应力振幅增大时, 界面切变滑移的难度也会随之增加, 与振动总能量 W 相比, 耗能 ΔW 的增速较慢, 所以阻尼性能随应力振幅增加而下降。

对于单一母相态的 Cu-11Al-8Mn 合金的主要耗能机制是应力诱发马氏体相变, 随着应力振幅增加, 虽然应力诱发马氏体数量和尺寸有所增加, 但是应力诱发马氏体相变的阻力会急剧增大, 随应力增加诱发生成的新马氏体数量逐步减少, 应力诱发马氏体相变耗能机制受阻, 从而使阻尼性能下降比单一马氏体态的 Cu-10.5Al-6Mn 合金更为显著。

3 结论

1) CuAlMn 形状记忆合金在单一马氏体态和母相态都有可能具有高阻尼特性。最大表面应变为 4.05 MPa 时, 内耗 Q^{-1} 接近 0.1。

2) CuAlMn 形状记忆合金的阻尼性能受试样最大表面应力的影响, 在 4.05~40.51 MPa 范围内, 无论是马氏体态还是母相态, CuAlMn 形状记忆合金的阻尼性能都随应力振幅增加而下降, 且母相态合金阻尼性能下降速度较快。

REFERENCES

- [1] 徐祖耀. 材料研究与发展的瞻望[J]. 上海有色金属, 1999, 20(2): 49-50.
XU Zuryao. Perspective in materials research and development[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1999, 20(2): 49-50.
- [2] Ritchie I G, Pan Z L. High-damping metals and alloys [J]. Metall Trans, 1991, 22A(3): 607-616.
- [3] Hondgson D E. Damping applications of shape-memory alloys[J]. Mater Sci Forum, 2002, 394-395: 69-74.
- [4] Humbeeck J V, Liu Y. Shape memory alloys as damping materials[J]. Mater Sci Forum, 2000, 327-328: 331-338.
- [5] Humbeeck J V. The high damping capacity of shape memory alloys[J]. Z Metallkd, 1995, 86: 176-183.
- [6] Liu Y, Humbeeck J V. On the damping behaviour of Ni-Ti shape memory alloy[J]. Journal De Physique. IV: JP, 1997, 7(5): C5-519-C5-524.
- [7] Moroni M O. Damping characteristics of a CuZnAlNi shape memory alloy [J]. Mater Sci and Eng, 2002, A335(1-2): 313-319.
- [8] Song Z L, Zhu J S, Qian Y S, et al. Low frequency damping properties of Cu-Al-Be alloy during the phase transformation[J]. Solid State Communications, 2001, 118(5): 257-262.
- [9] Jee K K, Jang W Y. Damping mechanism and application of Fe-Mn based alloys[J]. Mater Sci Eng, 1999, A273-275: 538-542.
- [10] Jun Y H, Choi C S. Effect of deformation on the damping capacity in an Fe-23% Mn alloy[J]. Metall and Mater Trans A, 1999, 30A: 667-669.
- [11] Sutou Y, Kainuma R, Ishida K. Effect of Co addition on the ordering and martensitic transformations in Cu-Al-Mn shape memory alloys [J]. Mater Sci Forum, 2000, 327-328: 473-476.
- [12] Toshihiro O, WANG J J, Yuji S, et al. Two-way shape memory effect induced by bending deformation in ductile Cu-Al-Mn alloys[J]. Mater Trans JIM, 2002, 43(7): 1676-1683.
- [13] 王丽萍, 郭二军. Zn、Al 对 Mn-Cu 减振合金减振性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(1): 78-84.
WANG Lirping, GUO Erjun. Influences of Zn and Al content of MnCu damping casting alloy on damping property[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(1): 78-84.
- [14] 张忠明. 金属材料阻尼性能测试系统[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(2): 133-137.
ZHANG Zhong-ming. Testing system for determining damping capacity of metal materials[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2): 133-137.

(编辑 龙怀中)