

文章编号: 1004-0609(2005)07-1019-07

基于 CuZnAl 形状记忆合金的框架结构抗震减振控制^①

司乃潮, 陆松华, 傅明喜, 王晓东, 史强军

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 利用形状记忆合金的本构关系, 分析了在自由应力状态下的残余应变与温度的关系。使用动态数据采集分析仪, 测试了安装 CuZnAl 形状记忆合金耗能器的框架结构的减振性能; 应用电子万能拉伸试验机测试了 CuZnAl 形状记忆合金的应力—应变滞回曲线, 借助透射电子显微镜, 分析了 CuZnAl 形状记忆合金在热机械循环过程中显微组织的变化; 比较了不同热处理工艺对 CuZnAl 形状记忆合金热机械循环后的滞回曲线面积及减振性能的影响。结果表明: CuZnAl 形状记忆合金用于框架结构具有较好的减振效果, 可明显降低框架结构的振动频率, 其中马氏体 CuZnAl 形状记忆合金耗能器具有较大的耗能能力, 经室温水淬时效 7 h 处理后减振效果最好。

关键词: CuZnAl 形状记忆合金; 本构关系; 框架减振; 滞回曲线; 热机械循环

中图分类号: TG 139.6

文献标识码: A

Aseismic and vibration control of frame structures with CuZnAl SMA dampers

SI Nai-chao, LU Song-hua, FU Ming-xi, WANG Xiao-dong, SHI Qiang-jun

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

Abstract: The relationship between the residual strain and the temperature under free stress condition is analyzed by using constitutive relation of SMA. The damping performance of the frame with CuZnAl SMA dampers is tested by dynamic data collecting analysis meter. Then the stress—strain curve of CuZnAl SMA is measured by electronic universal testing machine. The change of microstructure during thermo-mechanical cycle is analyzed by transmission electron microscope. The effects of different heat-treatment processes on the area of hysteretic loop and the damping capability of CuZnAl SMA after thermo-mechanical cycles are studied. Experimental results show that CuZnAl SMA has good damping capability in frame structure and can obviously reduce the vibration frequency. CuZnAl SMA in martensitic state has better damping ability, and the damping effect of the alloy after being quenched into water and aged for 7h is the best.

Key words: CuZnAl shape memory alloy; constitutive relation; structure damping; hysteretic loop; thermo-mechanical cycle

普通支撑框架是高层钢结构采用较多的结构形式。由于其刚度大, 同时支撑的滞回性能匮乏, 滞回环较小或退化, 耗能能力差, 偏心支撑综合钢框架抗震工作时以牺牲主梁为代价, 柱子和支撑的截面很大, 经济效果较差^[1]。因此, 近年来发展的新的框架减振体系是在支撑框架结构上安装专门的耗

能装置以消耗地震能量。形状记忆合金是一种集传感、驱动于一体的新型功能材料, 当外部环境的温度、应力发生变化时, 其形状会因为热弹性马氏体转变或逆相变而改变, 并产生较大的回复力。由于形状记忆合金具有超弹性性能、相变滞后性能, 其应力—应变曲线形成滞回环, 滞回环越大说明承载

① 基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2001091); 江苏省科技攻关资助项目(BE2004027)

收稿日期: 2005-02-28; 修订日期: 2005-04-28

作者简介: 司乃潮(1955-), 男, 教授。

通讯作者: 司乃潮, 教授; 电话: 0511-2927785, 8780194; E-mail: snc@ujs.edu.cn

过程吸收的能量越多, 因此可以利用形状记忆合金制成被动耗能抗震器^[2, 3]。

由于 CuZnAl 形状记忆合金价格相对低廉、生产工艺简单, 现已基本解决晶粒粗大及马氏体稳定化的问题^[4~7], 因而具有广阔的应用前景。形状记忆合金耗能器主要靠热弹性马氏体中的相变孪晶界或母相与马氏体的相界移动来消耗能量^[8~10], 故采用简单结构即可。本研究主要是寻找一种滞回曲线面积较大的 CuZnAl 形状记忆合金材料。考虑到试验的可操作性及成本问题, 在试验过程中以片状材料来分析材料的抗震性能。在多种热处理工艺的基础上, 测试了形状记忆合金片的耗能效果, 并测得其应力—应变曲线, 分析了热处理方式和形状记忆合金耗能抗震能力的关系。

1 实验

以电解铜、0# 锌、A00 铝为原料, 配制铜锌铝合金, 在 SS74-3 中频感应电炉中熔化, 当合金液温度达到 1 230 ℃左右时, 加入微量复合稀土, 浇注成 $d80\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的铸锭, 然后在 850 ℃退火 24 h 以消除应力, 切削去除氧化皮。在熔化时通过调整其化学成分, 获得 M_s 点分别为 50 ℃、66 ℃和 130 ℃(常温下为马氏体状态) CuZnAl 形状记忆合金。

材料经锻打后, 可以制成片状和板状两种试样。若要制成片状, 则轧制成片厚为 0.25 mm 的薄板, 然后根据自己的设计振动测试框架剪切成条。板材采用线切割加工, 尺寸为 $100\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。制备的材料经过多种热处理, 工艺见表 1。

用微机控制电子万能试验机测出不同热处理工艺的合金(尺寸为 $200\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$) 的应力—应变曲线, 在测量前, 对合金均预拉伸 3 次, 预拉伸过程中最大拉伸力为 80 N。电子拉伸后的试样, 用 JEM-2000E 型透射电子显微镜观察相结构和马氏体界面形貌, 透射电子显微镜试样先冷轧至 0.3 mm, 再机械减薄到 0.1 mm, 最后用双喷电解减薄。对一个 2 层钢框架结构进行框架振动控制试

验, 框架中安装 CuZnAl 形状记忆合金耗能器, 为简单起见, 仅考虑框架结构的一阶振型, 故将应变片式传感器粘贴在框架底层立柱的根部, 监测框架沿其宽度方向的振动。由于框架结构振动时, 单层内以对角线两端点的相对位移最大, 利用电阻应变片和动态数据采集分析仪测量该框架结构的振动衰减特性。试验时, 在框架顶部沿框架宽度方向施加少量初位移约束, 然后释放约束让框架振动至衰减结束。当振动结束后, 将 CuZnAl 形状记忆合金片加热, 利用 CuZnAl 形状记忆合金的形状记忆效应使 CuZnAl 形状记忆合金片式耗能器恢复到结构振动前的状态, 当结构再次振动时, CuZnAl 形状记忆合金耗能器再次发挥作用。

2 形状记忆合金材料的本构模型及应用

建立形状记忆合金材料本构模型的目的, 是为了描述形状记忆材料的机械行为以及相变过程中的力学特性。从工程应用的角度来看, 建立在唯象理论基础上的本构模型比较实用, 它避免了如自由能等较难测量的参量, 而定义了适用于工程计算的参量体系, 故在形状记忆合金材料的结构力学分析中发挥着巨大作用。

由热力学第一、第二定律给出^[11, 12]:

$$\rho U - \sigma + \frac{\partial q_{\text{sur}}}{\partial X} \rho q = 0$$

$$\dot{\rho} S - \rho \frac{q}{T} + \frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{q_{\text{sur}}}{T} \right] \geq 0 \quad (1)$$

式中 ρ 为现实构形密度; σ 为 Cauchy 应力; U 为内能密度; q_{sur} 为热流; T 为温度; q 和 S 分别为热源密度和熵密度。

利用 Helmholtz 自由能, 将式(1)变为

$$\left[\sigma - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon} \right] \dot{\epsilon} - \left[s + \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right] \dot{T} - \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \dot{\xi} - \frac{1}{\rho T} \frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{q_{\text{sur}}}{T} \right] \geq 0 \quad (2)$$

表 1 CuZnAl 形状记忆合金的各种热处理工艺

Table 1 Different heat-treatments of CuZnAl shape memory alloy

Number	Heating temperature/℃	Keeping time/h	Quenching	Aging temperature/℃	Aging time/h
1	830~850	0.5	Oil, room temperature	140~150	7, 10
2	830~850	0.5	Water, room temperature	140~150	7, 10
3	830~850	0.5	Oil, 150 ℃	140~150	7, 10

式中 $\bar{\sigma}$ 为 Kichhoff 应力; ε 为 Green 应变; f 为变形梯度; ρ 为相对参考构形的物质密度; ξ 为内变量, 代表相变过程中马氏体百分数。

利用这一结果, 可将马氏体的体积分数的变化表示成^[13]:

1) 奥氏体向马氏体转化或各个马氏体变体向一特定取向的马氏体转化(孪晶解孪)

当 $T > M_s$ 且 $\alpha_s^r + C_M(T - M_s) < \alpha_{eq} < \alpha^r + C_M(T - M_s)$ 时:

$$\xi = \frac{1 - \xi_0}{2}.$$

$$\cos \left| \frac{\pi}{\alpha_s^r - \alpha^r} (\alpha_{eq} - \alpha^r - C_M(T - M_s)) \right| + \frac{1 + \xi_0}{2} \quad (3)$$

$$\xi_r = \xi_0 - \frac{\xi_0}{1 - \xi_0} (\xi - \xi_0) \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta r \xi = \frac{1 - \xi_0}{2} \cos \left| \frac{\pi}{M_s - M_f} (T - M_f) + 1 \right| \\ \quad (M_f < T < M_s \text{ 且 } T < T_0) \\ \Delta r \xi = 0 \quad \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

2) 马氏体向奥氏体转化, 且 $C_A(T - A_f) < \alpha_{eq} < C_A(T - A_s)$ 时:

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left| \cos \left| \frac{\pi}{A_f - A_s} \left(T - A_s - \frac{\alpha_{eq}}{C_A} \right) \right| + 1 \right| \quad (6)$$

$$\xi_r = \xi_0 - \frac{\xi_0}{\xi} (\xi_r - \xi) \quad (7)$$

$$\xi_r = \xi_0 - \frac{\xi_0}{\xi} (\xi_r - \xi) \quad (8)$$

式中 M_s , M_f , A_s , A_f 分别为马氏体、奥氏体相转变的起始温度和结束温度; α^r , α_s^r 为低温下马氏体解孪时的起始和结束的临界应力; C_M , C_A 为转变温度—应力曲线的斜率。

由于将马氏体的体积分数分成由应力诱导的和由温度诱导的两部分, 因此这一本构关系在不同温度下均能描述形状记忆材料的应力—应变关系和形状记忆效应等。图 1 所示为在自由应力状态下的残余应变与温度的关系曲线。由图 1 可见, 当温度高于 A_f (71 °C) 时, 残余应变全部恢复, 反映出了 CuZnAl 形状记忆合金具有很好的形状记忆效应, 该合金的 M_s , M_f , A_s , A_f 分别为 66 °C、58 °C、63 °C 和 71 °C。

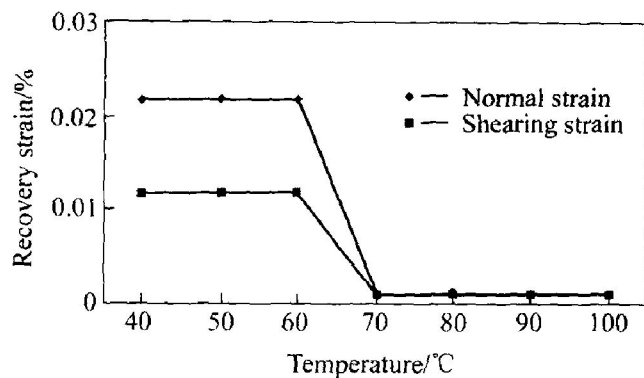


图 1 CuZnAl 合金恢复应变与温度的关系

Fig. 1 Relations between recovery strain and temperature of CuZnAl alloy

3 结果与分析

3.1 装上 CuZnAl 形状记忆合金耗能器的框架振动衰减特性

振动框架由 YDS-1 型动态数据集分析仪输出数据, 所得数据利用 matlab 编程计算和绘图。没有装形状记忆合金片状耗能器的振动衰减过程非常缓慢, 输出曲线如图 2(a) 所示。振动开始后 700(时间单位)时的振幅衰减率 $\eta = 0.225174$ 。振幅衰减率定义如下: $\eta = A_x/A_0$, A_0 为该次振动的最大振幅; A_x 为此后的第 x 个振幅。衰减时间 T_x 为 A_x 对应的时间与 A_0 对应时间的差值。

对振动曲线用快速傅里叶变换得到频谱曲线, 如图 2(c) 所示。可以得到框架振动的固有频率约为 65 Hz。而装上 SMA 耗能器以后, 振幅衰减速度明显加快, 振动频率亦有所降低, 约为 15 Hz(图 2(d))。图 2(b) 所示是装上经过室温油淬并时效 10 h 处理的相变点为 66 °C 的形状记忆合金片耗能器以后的振动衰减曲线。两次振动的振幅衰减率及衰减时间见表 2。由表 2 对比两次振动的衰减速度, 装上耗能器的只用了 9 个时间单位即衰减到 50% 以下, 到 49 时间单位时振幅已衰减到原来的 11%; 而未装耗能器的衰减 56 时间单位时振幅仍然有原来的 86.7%。

装上耗能器以后, 框架结构振动的固有频率有所降低。通过频谱分析得到各种热处理后的试样对应的振动框架的振动频率, 见表 3。表 3 中所列试样号 50m17 的意义: 50 表示形状记忆合金的 M_s 点为 50 °C, m 表示马氏体状态, 1 表示表 1 中序列号为 1 的淬火方式, 7 表示时效时间为 7 h; 其他编号

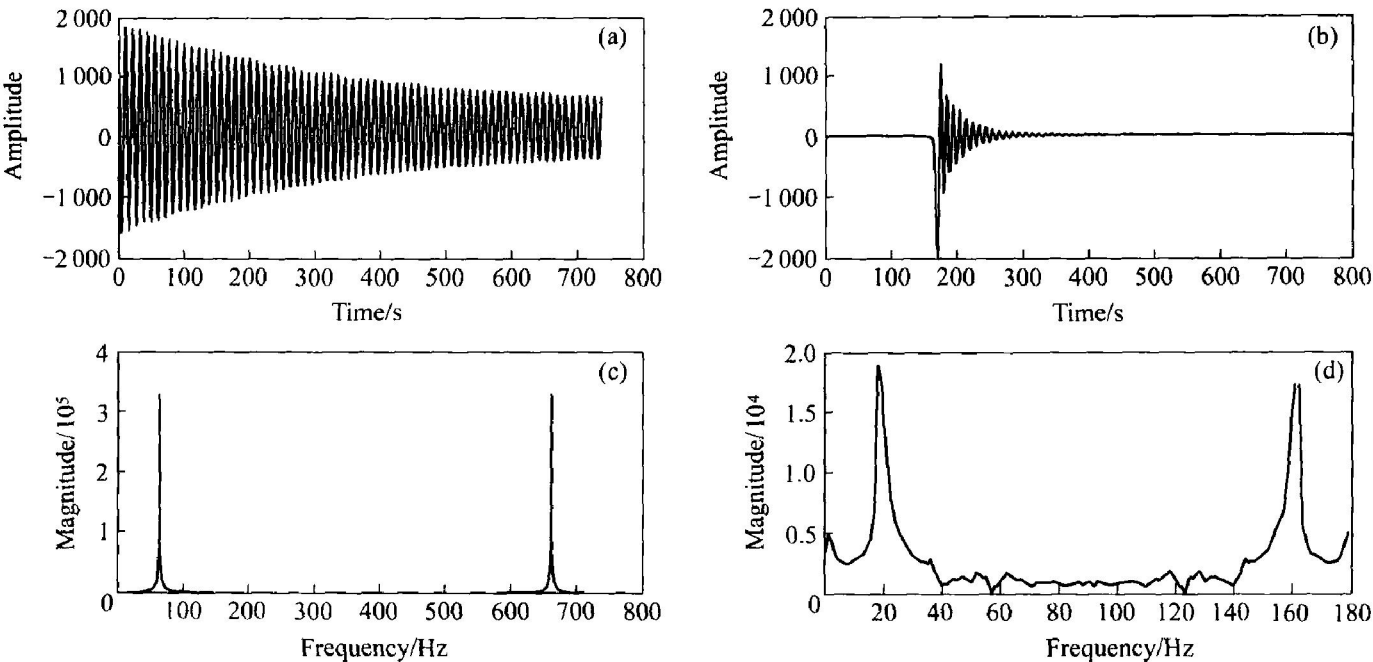


图 2 振动框架的振动衰减曲线和频谱曲线(图 2(a)、(b) 纵坐标没有单位, 仅表示振动幅度的大小, 示意振动衰减程度)

Fig. 2 Vibration attenuation curves and spectrum curves of frame structure
(a) and (c) —Without CuZnAl SMA dampers; (b) and (d) —With CuZnAl SMA dampers

表 2 未装耗能器和装上耗能器后的
2 个振动框架性能的对比

Table 2 Comparison of frame structure without dampers and one with dampers

Without CuZnAl SMA dampers		With CuZnAl SMA dampers	
Attenuation time, t_x	Amplitude damping ratio, η	Attenuation time, t_x	Amplitude damping ratio, η
11	0.963 314	9	0.470 168
22	0.915 244	18	0.298 317
34	0.881 088	28	0.224 885
45	0.882 985	38	0.168 791
56	0.866 540	49	0.112 698

依此类推。安装不同相变点、经过不同方式热处理的耗能器以后, 框架的振动频率都有所下降。在工程应用中可以利用此特性改变结构的振动频率以避免共振, 则结构不易发生疲劳并可长期使用。

3.2 热处理工艺对马氏体状态 CuZnAl 形状记忆合金耗能器减振效果的影响

实验中共有 3 种热处理方式以及各自 2 种时效时间, 并采用 M_s 为 66 ℃ 的马氏体状态的形状记忆合金。共有 6 组片状形状记忆合金耗能器, 每组 8 根, 分别装在 2 层框架上测试其耗能能力。

安装了 M_s 为 66 ℃ 的 SMA 耗能器后, 框架结构的振动衰减过程记录见表 4。在相同时效时间 7 h

表 3 安装不同耗能器后的框架振动频率

Table 3 Vibration frequency of structure with different dampers

Damper No.	Vibration frequency/Hz	Damper No.	Vibration frequency/Hz
50m17	7	66m110	18
50m27	2	66m210	10
50m37	7	66m310	10
50m110	3	130m17	8
50m210	8	130m27	5
50m310	8	130m37	11
66m17	11	130m110	6
66m27	44	130m210	11
66m37	24	130m310	7

条件下, 室温水淬合金的衰减效果最好, 其余两种淬火方式下的效果相近。当时效时间为 10 h, 比较表中的 η 值, 室温油淬合金的减振效果最好, 其次是分级淬火的, 水淬的相对稍差。而都采用室温水淬的淬火方式时, 时效 10 h 合金的减振效果明显优于 7 h 的; 都采用室温油淬时, 时效 10 h 的减振效果略有下降; 而分级淬火时效 10 h 的稍微优于 7 h 的。比较图 3 中各种热处理后合金的应力—应变滞回曲线面积, 66m17、66m27、66m37 中滞回面积最大的是 66m27。试样号 66m210 对应的滞回面积略小于 66m27 的, 而 66m110 和 66m310 对应的滞回

表 4 M_s 为 66 ℃合金的减振效果比较

Table 4 Comparison of vibration damping effect of CuZnAl alloys with M_s of 66 ℃								
66m17			66m27			66m37		
A_0	t_x	η	A_0	t_x	η	A_0	t_x	η
2048	10	0.956 543	2048	9	0.697 754	2048	9	0.768 555
	20	0.677 734		19	0.507 813		19	0.567 871
	31	0.480 957		29	0.334 473		30	0.388 672
	41	0.329 590		39	0.158 691		40	0.321 289
	52	0.238 770		50	0.104 492		50	0.240 234
66m110			66m210			66m310		
A_0	t_x	η	A_0	t_x	η	A_0	t_x	η
1961	9	0.470 168	2048	10	0.721 191	2048	9	0.549 805
	18	0.298 317		20	0.471 680		19	0.346 191
	28	0.224 885		30	0.399 902		29	0.265 137
	38	0.168 791		40	0.272 461		38	0.182 617
	49	0.112 698		51	0.180 176		48	0.142 090

曲线面积分别略大于 66m17 和 66m37 的, 对于 M_s 为 66 ℃的合金, 室温水淬时效 7 h 的减振效果最好 (见表 5)。

表 5 不同热处理工艺对合金
滞回曲线面积的影响

Table 5 Effect of different heat-treatments
on area of hysteretic loop

Damper No.	Area/ mm ²
66m17	302.1
66m27	346.7
66m37	321.4
66m110	308.2
66m210	340.8
66m310	326.5

3.3 马氏体状态 CuZnAl 形状记忆合金热机械循环滞回曲线

片状马氏体状态的 CuZnAl 形状记忆合金每次使用后都必须加热, 发生热弹性马氏体正逆转变各一次, 以消除残余应变。不同相变温度 CuZnAl 形状记忆合金的拉伸曲线见图 3。第 1 次拉伸以后加热, 片状试样的残余变形完全恢复, 而后的热机械循环逐渐有小部分不可恢复残余应变累积。试验中发现合金热机械循环 30 次后, 滞回面积明显缩小, 但 30 次以后滞回面积缩小幅度下降 (见图 3), 弹性屈服点对应的力和变形值都有所下降, 原因是热机械循环过程中产生大量位错及位错塞积阻碍了马氏体正逆转变的进行^[14]。在 CuZnAl 形状记忆合金马氏

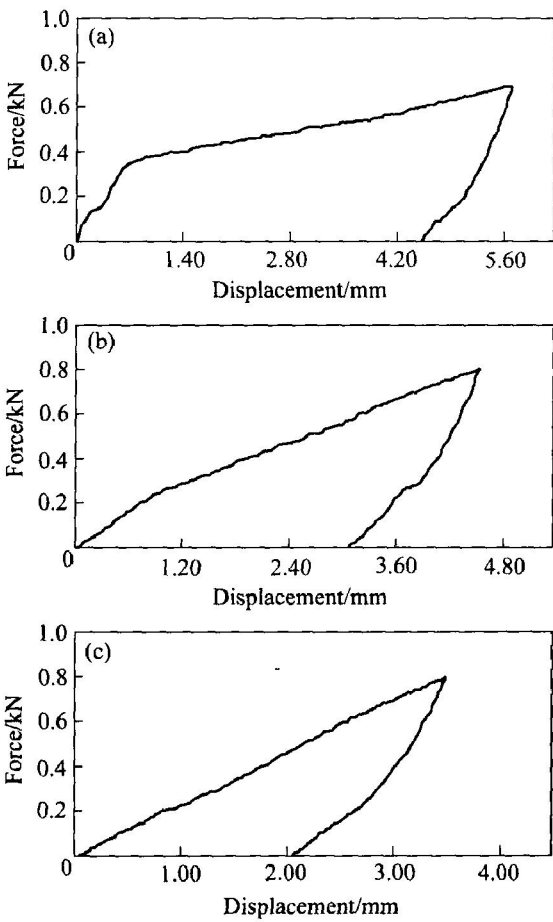


图 3 试样 66m27 的拉伸曲线
Fig. 3 Tensile curves of sample
66m27 after different thermo-mechanical cycles
(a) —1; (b) —30; (c) —50

体中, 热机械循环产生了 $1/2[1120]$ 位错, 它对应于母相的 $1/4[111]$ 位错, 即使马氏体逆转变后

它仍可以保留在母相中。 $1/2[1\ 1\ 2\ 0]$ 位错由 $1/3[1\ 0\ 0]$ 与 $1/2[1/3\ 1\ 2\ 0]$ 两个半位错生成, $1/3[1\ 0\ 0]$ 位错运动不破坏合金有序状态,而 $1/2[1/3\ 1\ 2\ 0]$ 位错运动同时破坏了nn有序与nnn有序。另外合金在冷热机械循环中位错不断积累,也会破坏合金的有序结构^[15, 16]。在经过同样次数的热机械循环后,虽然合金的有序度大大下降,但相对而言,原来有序度高的合金依然具有较高的有序度,故而滞回面积的减小幅度也较小。

为了查明马氏体条内的组织结构,用透射电镜进行了组织结构分析。观察表明,热机械循环次数少时,在马氏体条内出现了细小平行针状组织(图4(a))。随着热机械循环次数的增加,马氏体条内出现了平行台阶状变体和交叉状变体(图4(b)),在同样放大倍数下同一视场中显示马氏体条内的位错密度也逐渐增高。图4(c)和图4(d)所示为热机械循环后围绕 c^* 轴旋转所获得的一组电子衍射花样。这组电子衍射花样表明,该合金马氏体为M18R结构。在这组电子衍射花样中,沿 c^* 轴方向出现拖痕(图4(c)),而且随热机械循环次数的增加,沿 c^* 轴方向出现的拖痕强度增加(图4(d)),这正是层错所造成的衍射效应,可见该合金马氏体亚结构为基面

上的层错,而且随热机械循环次数的增加,马氏体亚结构(基面上的层错)的密度和数量大大增加。

随着时效时间的延长(大于7 h以后),马氏体的自协作性变差,且马氏体中产生了细条状、台阶状新变体(与图4(b)的结果相似)。这些小变体的出现是变体长大时,由于自协作不良造成畸变而产生的^[17]。细条状、台阶状变体的出现,破坏了马氏体原来良好的边界匹配关系,导致界面可动性降低,不利于马氏体的正逆转变与变形,导致马氏体有序度降低,这必然影响晶体学可逆性,导致滞回面积的减小,从而引起减振效果变差。

4 结论

1) 利用形状记忆合金的本构关系,分析了在自由应力状态下的残余应变与温度关系曲线,能够反映出形状记忆合金的形状记忆效应。

2) CuZnAl形状记忆合金可用于框架结构的被动振动控制并具有良好的减振性能,可明显降低框架结构的振动频率,从而使框架结构避开共振。

3) 热处理工艺对CuZnAl形状记忆合金热机械循环后的滞回曲线面积及减振性能有较大影响,室温水淬时效7 h的滞回曲线面积最大,减振效果最好。

4) 马氏体CuZnAl形状记忆合金耗能器具有较大的耗能能力,热机械循环30次后滞回面积亦大幅减小,这主要是因为合金在热机械循环过程中位错不断积累,破坏了合金有序结构,可逆马氏体量减少造成的。

REFERENCES

- [1] 王社良, 马怀忠, 沈亚鹏. 形状记忆合金在结构抗震控制中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(2): 115-118.
WANG She-liang, MA Hua-zhong, SHEN Ya-peng. Applications of shape memory alloy in aseismic control of structures[J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech, 1998, 30(2): 115-118.
- [2] 吴波, 孙科学, 李惠, 等. 形状记忆合金力学性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 104-111.
WU Bo, SUN Ke-xue, LI Hui, et al. Experimental research on mechanical properties of shape memory alloy[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(2): 104-111.
- [3] Salichs J, Hou Z, Noori M. Vibration suppression of

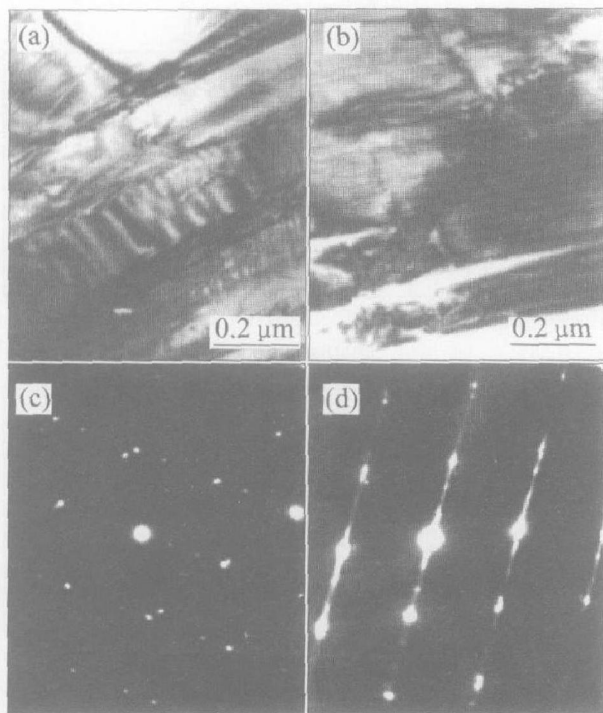


图4 热机械循环后合金的透射电镜组织及衍射花样

Fig. 4 TEM images and corresponding diffraction patterns of alloy after different thermo-mechanical cycles

(a) —1; (b) —50

- structures using passive shape memory alloy energy dissipation devices[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2001(10): 671 - 680.
- [4] SI Naichao. CuZnAl shape memory alloy refined with composite rare earths La + Ce[J]. *Journal of Rare Earths*, 1999, 17(4): 275 - 279.
- [5] 司乃潮, 赵国旗, 杨道清. 复合稀土对CuZnAl形状记忆合金力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(2): 393 - 398.
- SI Naichao, ZHAO Guoqi, YANG Daoqing. Effects of rare earth mixture on mechanical properties of CuZnAl shape memory alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(2): 393 - 398.
- [6] 司乃潮. CuZnAl(RE)形状记忆合金马氏体稳定化的研究[J]. *材料研究学报*, 1999, 5: 558 - 560.
- SI Naichao. Study on martensitic stabilization in CuZnAl(RE) shape memory alloys[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1999, 5: 558 - 560.
- [7] 徐桂芳, 司乃潮, 李玉祥. 不同组织状态的铜锌铝形状记忆合金滚动磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(5): 825 - 830.
- XU Guifang, SI Naichao, LI Yuxiang. Rolling wearabilities of different structural state CuZnAl shape memory alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(5): 825 - 830.
- [8] 李中付, 华宏星, 宋汉文. 用时域峰值法计算频率和阻尼[J]. *振动与冲击*, 2001, 20(3): 28 - 32.
- LI Zhongfu, HUA Hongxing, SONG Hanwen. Identification of frequencies and damping ratios with time domain peak values[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2001, 20(3): 28 - 32.
- [9] 司乃潮, 孙克庆, 赵国旗. 不同相变温度CuZnAl形状记忆合金的框架结构振动控制试验研究[J]. *铸造*, 2003, 11: 1058 - 1064.
- SI Naichao, SUN Keqing, ZHAO Guoqi. Experimental study of frame structure vibration control by using CuZnAl SMA of different phase transformation temperature[J]. *Foundry*, 2003, 11: 1058 - 1064.
- [10] 吴波, 孙科学, 李惠, 等. 热处理对形状记忆合金超弹性滞回性能的影响[J]. *振动工程学报*, 2000, 13(3): 449 - 454.
- WU Bo, SUN Kexue, LI Hui, et al. Effect of heat treatment on superelastic hysteretic properties of shape memory alloys[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2000, 13(3): 449 - 454.
- [11] Baz A. Comparison of different thermomechanical models for shape memory alloys[A]. Garcia E, Cudney H, Knowles G J. *Adaptive Structures and Composite Materials: Analysis and Application*[C]. New York: ASME, 1994. 9 - 19.
- [12] 张学仁, 聂景旭, 杜彦良. SMA智能复合构件控制裂纹的数值与试验研究[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(4): 357 - 361.
- ZHANG Xuoren, NIE Jingxu, DU Yanliang. Study on SMA intelligent structures for crack control[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1998, 13(4): 357 - 361.
- [13] 邹静, 钟伟芳. 形状记忆合金的多维本构关系[J]. *固体力学学报*, 1999, 2(20): 171 - 176.
- ZOU Jing, ZHONG Weifang. The multidimensional constitutive relations of shape memory alloys[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1999, 2(20): 171 - 176.
- [14] 司乃潮, 刘海霞, 祁隆飙. 冷热机械循环对CuZnAl形状记忆合金性能的影响[J]. *应用科学学报*, 2003, 21(1): 107 - 110.
- SI Naichao, LIU Haxia, QI Longbiao. Effects of thermal cycles on the properties of CuZnAl shape memory alloys[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2003, 21(1): 107 - 110.
- [15] Tadaiki T, Takamori M. Thermal cycling effect in Cu-Zr-Al shape memory alloy with B2 and DO3 type ordered structure in parent phase[J]. *Trans JIM*, 1987, 28(2): 120 - 128.
- [16] Perkins J, Muesing W E. Martensitic transformation cycling effect in Cu-Zr-Al shape memory alloy[J]. *Metall Trans*, 1983, 14A: 33 - 39.
- [17] 谭树松, 彭坤, 曾欲晓, 等. CuZnAl记忆元件的“台阶”效应[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(3): 356 - 361.
- TAN Shusong, PENG Kun, ZENG Yuxiao, et al. Plateau effect of CuZnAl memory elements[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(3): 356 - 361.

(编辑 杨兵)