

# Mg-Li-Al 合金阻尼性能的研究

## Research on Damping Capacity of Mg-Li-Al Alloys

马春江, 张 荻, 覃继宁, 丁文江

(上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

MA Chun-jiang, ZHANG Di, QIN Ji-ning, DING Wen-jiang

(State Key Lab of MMCs, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 研究了 MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的阻尼性能。结果表明, Mg-Li-Al 合金的阻尼性能随锂含量的增多和温度的提高而明显增高。其中 MgLi8Al 合金的室温阻尼性能达到  $Q^{-1}=0.01$  的高阻尼值。MgLi8Al 合金的阻尼明显大于 MgLi4Al 合金的阻尼是由于 MgLi8Al 合金相界阻尼的贡献。

关键词: Mg-Li-Al 合金; 阻尼

中图分类号: TG146 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 05-0012-03

**Abstract:** The damping capacity of MgLi4Al and MgLi8Al alloys was studied. The results showed that the damping capacity of Mg-Li-Al alloys increases with the temperature and lithium content. For MgLi8Al alloy as an example, the damping capacity go up to  $Q^{-1}=0.01$ , in the range of high damping metallic materials. The higher damping capacity of MgLi8Al alloy may be attributed to the interface damping between (Mg) and (Li) phases.

**Key words:** Mg-Li-Al alloy; damping

镁合金具有比重低、比强度高、比模量高、良好的阻尼和电磁屏蔽性能, 在航天和航空工业中得到广泛的应用。以镁合金制备航天飞机仪表盘、电器设备壳体等构件不仅可以减小振动, 还可以减小宇宙射线对电子仪器设备的电磁干扰, 提高电子仪器设备的精度和使用寿命。为了进一步减轻结构件的重量, 并解决镁合金难以塑性加工的问题, 许多材料工作者向镁中加入密度仅为  $0.53\text{g}/\text{cm}^3$  的锂用来制备 Mg-Li 基合金, 以适应航天、航空工业对轻质结构材料的需求<sup>[1-6]</sup>。然而, 关于 Mg-Li 合金的功能性能还未引起足够重视。因此, 本工作对 Mg-Li-Al 合金的阻尼性能进行研究, 为研制具有结构和功能一体化的超轻型材料提供理论和应用基础。

### 1 实验方法

制备 Mg-Li-Al 合金原材料纯度 (wt%) 为: Mg 99.9, Li 99.95, Al 99.99。合金熔炼采用电阻坩埚炉进行。由于镁锂合金化学性质非常活泼, 熔炼时采用熔剂和氩气进行保护。制备的 Mg-Li-Al 合金化学成分如表 1 所示。阻尼性能测试采用 DMTA-MK-IV 型动态机械热分析仪进行。阻尼测试试样通过线切割并机械磨光后制成, 尺寸为  $50\text{mm} \times 4\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。

表 1 Mg-Li-Al 合金化学成分

Table 1 Composition of Mg-Li-Al alloys

合金种类	Li	Al	Mg
MgLi4Al	4.04	1.58	balance
MgLi8Al	8.67	1.36	balance

### 2 结果和讨论

#### 2.1 阻尼性能

图 1 为 MgLi4Al 合金在 30~250 温度范围内的阻尼-温度谱。可以看出, 当在温度低于 150 时,

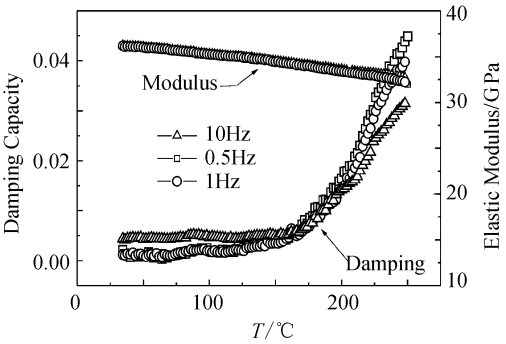


图 1 MgLi4Al 合金阻尼-温度谱 ( $\omega = 10^4$ )

Fig. 1 Damping capacity of MgLi4Al alloy

MgLi4Al 合金阻尼随温度提高增加不明显;当温度大于 150 后,阻尼随温度的提高而显著增高。另外还发现,频率对 MgLi4Al 合金在低温和高温下阻尼的影响是不同的。在温度较低时,高频阻尼相对较大;当温度升高到大约 160 之后,低频阻尼随温度提高增高加快,超过高频阻尼。在测试温度范围内, MgLi4Al 合金的弹性模量随温度升高而线性减小,并且不受频率的影响。

MgLi8Al 与 MgLi4Al 合金具有相似的阻尼-温度行为(见图2)。不同的是 MgLi8Al 合金的低频阻尼在较低的温度(130 )就超过高频阻尼,且随温度提高阻尼增加速度更快;当温度高于 230 后阻尼快速增加,在 250 时, 0.5Hz 的低频阻尼达到  $Q^{-1}=0.2$  的高阻尼值。另外,当温度在 200 左右时,有一个明显的阻尼峰,而且高频阻尼峰更加明显。与阻尼相对应, MgLi8Al 合金的弹性模量随温度升高而线性减小;当温度接近 200 时,弹性模量偏离线性关系而明显降低。

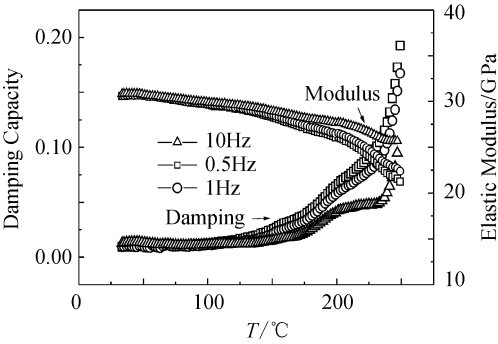


图2 MgLi8Al 合金阻尼-温度谱 (  $\epsilon = 10^{-4}$  )  
Fig.2 Damping capacity of MgLi8Al alloy

比较 MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的阻尼值(见表2)。由表2可见, MgLi8Al 合金的室温阻尼和高温阻尼都明显大于 MgLi4Al 合金的阻尼,并且高温阻尼差更加明显。另外, MgLi8Al 合金的室温阻尼值达到  $Q^{-1}=0.01$ , 属于高阻尼合金的阻尼范围。

表2 MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的阻尼值比较  $Q^{-1} (10^{-3})$   
Table 2 Comparison of damping capacity for MgLi4Al and MgLi8Al alloys

合金种类	35		80		120		160	
	1Hz	10Hz	1Hz	10Hz	1Hz	10Hz	1Hz	10Hz
MgLi4Al	2.12	4.37	1.45	4.38	2.10	4.35	6.43	5.77
MgLi8Al	9.39	12.6	10.35	11.04	13.23	12.30	25.74	17.38

2.2 阻尼机理分析

金属材料的阻尼是承受循环载荷下的机械振动在材料内部的能量耗散现象,按能量耗散的机理可分为热弹性阻尼、磁性阻尼和缺陷阻尼等<sup>[7]</sup>。对于实际的金属材料,由于材料种类和载荷条件不同,有可能某种阻尼机制起主要作用,也可能几种阻尼机制共同起作用。Mg-Li-Al 合金属于非铁磁性材料,不存在磁性阻尼;而热弹性阻尼相对其它阻尼很小<sup>[8]</sup>。因此, Mg-Li-Al 合金的阻尼主要来源于材料内部的缺陷阻尼,其中包括位错、晶界和相界引起的阻尼。

2.2.1 位错阻尼

从图1和图2可以看出, MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的阻尼随温度变化可分为两个区段,即室温至 150 范围内阻尼随温度升高改变不明显区段和 150 温度后阻尼快速增高区段。在较低的温度范围内,位错阻尼是 MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的主要阻尼机制。根据 K-G-L 位错阻尼理论,在低频范围内 ( $< \text{kHz}$ ),因位错运动产生的阻尼可由下式表示<sup>[9]</sup>:

$$Q^{-1} = Q_a^{-1} + Q_f^{-1}$$

其中:  $Q_a^{-1} = C_1 \frac{b^2}{\epsilon_0} \exp(-\frac{C_2}{\epsilon_0})$ ;

$$Q_f^{-1} = C_3 f^2 / b^2$$
;

其中  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  是物理常数;  $b$  分别为位错密度和柏氏矢量;  $\epsilon_0$  和  $f$  分别为振动应变振幅和频率。可见,位错阻尼与位错密度成正比,并与应变振幅和振动频率有关。在图1和图2的阻尼-温度谱中,由于实验的应变振幅是固定的( $\epsilon_0 = 10^{-4}$ ),并且在低温范围内的阻尼随频率升高而增大(见表2)。因此, MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的室温阻尼来源于和频率有关的位错阻尼。随着温度的升高,由于位错密度的减小,位错阻尼对材料整体阻尼的贡献减小。因此,当温度大于 150 后, MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的阻尼快速增高必然有其它阻尼源的贡献。

2.2.2 界面阻尼

界面是 Mg-Li-Al 合金的另一重要阻尼源。在多晶金属材料中,晶界具有粘性的特征。晶界的粘性流动将循环载荷下的机械能转换为热能,从而导致能量损耗<sup>[10]</sup>。对晶界阻尼的研究表明,晶界阻尼受温度和晶粒尺寸、晶界上杂质原子数量的影响<sup>[11]</sup>。杂质原子分布于晶界,对晶界起着钉扎作用,从而使晶界阻尼明显下降。图3为 MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金的光学显微组织照片。由图3可以看出, MgLi4Al 合金具有 (Mg) 单相组织;而 MgLi8Al 合金具有  $\alpha + \beta$  双相共晶混合组织。其中,  $\alpha$  相为 Li 固溶于 Mg 中的固溶体,呈白色条板状分布于  $\beta$  相基体中;  $\beta$  相为 Mg 固溶于 Li 中的固溶体。另外, MgLi4Al 和 MgLi8Al 合金中还

有少量  $\text{AlLi}$  化合物存在于晶界上。在较低的温度下, 由于  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的晶界、相界的可动性较小, 并存在  $\text{AlLi}$  化合物对晶界滑移的阻碍作用, 界面阻尼的贡献较小; 随着温度的升高, 晶界和相界

的可动性增大,  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的阻尼性能明显增高。

从表2还可以看出,  $\text{MgLi8Al}$  合金的室温和高温

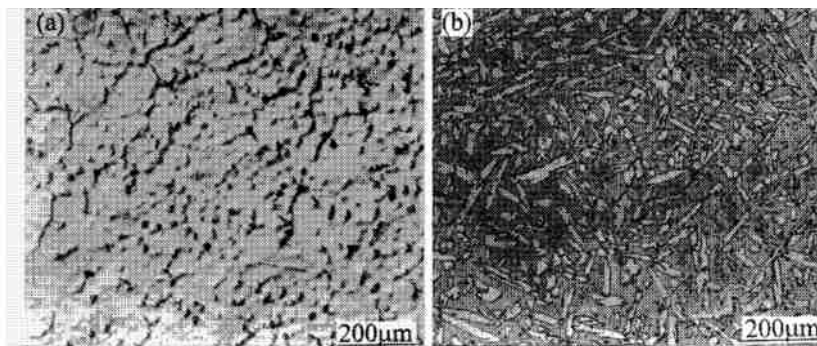


图3  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的光学显微组织

Fig. 3 Optical microstructure of (a)  $\text{MgLi4Al}$  and (b)  $\text{MgLi8Al}$  alloys

阻尼都明显大于  $\text{MgLi4Al}$  合金的阻尼。由于这两种合金的阻尼测试条件是一致的, 只是这两种材料的组织不同。因此,  $\text{MgLi8Al}$  合金的阻尼大于  $\text{MgLi4Al}$  合金的阻尼必然是由  $\alpha$  和  $\beta$  相的相界面阻尼引起的, 和  $\alpha$  相的相界面微滑移成为  $\text{MgLi8Al}$  合金的另一重要阻尼源, 结果使  $\text{MgLi8Al}$  合金具有较  $\text{MgLi4Al}$  合金更高的阻尼。另外, 从图2可以看出,  $\text{MgLi8Al}$  合金在 200 左右时有一个明显的阻尼峰, 并伴随着明显的模量软化, 而  $\text{MgLi4Al}$  合金没有该阻尼峰。因此, 可以断定该峰为相界面阻尼峰。该峰的出现可能是由于  $\text{MgLi8Al}$  合金中的  $\text{Li}$  在高温下的扩散性增强, 发生了  $\alpha$  和  $\beta$  相的相界面溶质原子的扩散迁移, 从而引起较大的能量损耗。

### 3 结论

(1)  $\text{Mg-Li-Al}$  合金具有良好的阻尼性能, 并受锂含量、温度和频率的影响。随着温度的升高,  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的阻尼都相应提高。频率对  $\text{Mg-Li-Al}$  合金的室温阻尼和高温阻尼影响是不同的。在较低的温度下,  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的高频阻尼大于低频阻尼; 当温度升高到一定温度后, 低频阻尼增大, 超过高频阻尼。另外,  $\text{MgLi8Al}$  合金的室温和高温阻尼都明显大于  $\text{MgLi4Al}$  合金的阻尼, 其室温阻尼达到  $Q^{-1} = 0.01$ , 属于高合金的阻尼范畴。

(2)  $\text{MgLi4Al}$  和  $\text{MgLi8Al}$  合金的室温阻尼机制主要是位错阻尼; 当温度升高到一定值后, 除了位错阻尼外, 还有相界面阻尼的贡献;  $\text{MgLi8Al}$  合金的阻尼明显大于  $\text{MgLi4Al}$  合金的阻尼主要是由于  $\text{MgLi8Al}$  合金的相界面阻尼的贡献。

### 参考文献

- [1] Hori Shigenori and Fujitani Wataru. Light Metals, 1990, 40 (4): 285.
- [2] Hatta Hidenori and Li Zaizhe et al. Light Metals, 1995, 45 (12): 702.
- [3] Ramesh Chandran and Sakai Tetsuya et al. Light Metals, 1998, 48 (1): 13.
- [4] Sanschagrin A, Tremblay R. Et al. Materials Science and Engineering, 1996, A 220: 69.
- [5] Ma Chunjiang, Zhang Di et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 11 (4):
- [6] 马春江, 张荻. 稀有金属, 1999, 23 (6): 1.
- [7] Lavernia E J and Zhang J et al. Key Engineering Materials, 1995, 104-107: 691.
- [8] Zhang J. and Perez R J et al. Acta Metall Mater, 1994, 42 (2), 395.
- [9] Granato A and Lucke K. J Appl Phys, 1956, (27): 583.
- [10] Zhang Jinmin and Robert J et al. Materials Science and Engineering, 1994, R13: 325.
- [11] Ke T S, J Appl Phys, 1949, 20: 1226.

基金项目: 国家自然科学基金(59631080); 国家教委博士学科点专项科研基金(9524815); 金属基复合材料国家重点实验室基金和上海交通大学科技发展基金。

收稿日期: 2001-01-24

作者简介: 马春江(1962-), 男, 讲师, 博士, 主要从事轻合金及其复合材料的研发, 联系地址: 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室(200030)。

本文编辑: 杨雪