国防科技大学学报
JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
第18卷第3期 1996年9月 Vol. 18 No. 3

# 不同增强体镁基复合材料的阻尼性能*

张 虹 斯永敏 刘庆国

(国防科技大学材料工程与应用化学系 长沙 410073)

钱晓泰 宋永沙

(湖南冶金材料研究所)

**摘 要** 研究了短切碳纤维、碳化硅晶须、硼酸铝晶须为增强体的镁基复合材料在外加载荷下的阻尼性能，测量了它们的力学性能与断口特性。研究表明：增强体不同的镁基复合材料，阻尼性能不同；在所研究的几种增强体复合材料中，以短切碳纤维增强镁基复合材料的阻尼效果最好；短切碳纤维增强镁基复合材料界面对内耗有明显的影响。

**关键词** 镁基复合材料，内耗，界面

**分类号** TG115.24

# Damping Characteristics of Magnesium Composites Reinforced by Different Reinforcers

Zhang Hong Si Yongmin Liu Qingguo

(Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, NUDT, Changsha, 410073)

Qian Xiaotai Song YongSha

(Hunan Metallurgical Material Research Institute)

**Abstract** This paper deals with the damping characterstics of short carbon fiber、SiC whisker and $2B_2O_3 \cdot Al_2O_3$ whisker reinforced magnesium composites, analyses their mechanical properties and fracture surfaces. Damping behavior of magnesium composites vary as reinforcers. C (f) /Mg composites exhibit higher damping than whiskers reinforced magnesium composites. Fiber/matrix interface plays an important role in damping.

**Key words** magnesium metal matrix composite, interface, internal friction

从前，作为防止振动和噪声所采取的措施有：装配弹簧与减振器相配合，利用粘土或橡胶等非金属物质的弹性（弹性后效）来减振，以及使用消音材料和高密度物质来隔

* 1995年12月5日收稿

音。但是，由于这些措施都是将发生的振动和噪声在传递过程中加以控制和隔断，因此，对于较强的振动和噪声发生源，往往不能获得理想的效果。因此人们希望有一个从根本上解决振动及噪声的方法，即寻找一种既具有高阻尼减振能力又具有一定强度、刚度，且能制作振动发生源零件或机构的阻尼材料，将振动及噪声抑制在发生源处就。

高阻尼镁合金是减振合金中阻尼本领最高的一种，它的阻尼能力 SDC 可达 40%～60%[2]，遗憾的是，这种材料的强度低，不能作为结构件材料。研究者认为如果采用复合材料，即以高阻尼镁合金为基体，选择合适的增强体，通过复合材料设计，可望得到高强、高阻尼、低密度的减振材料。为此，我们选用高阻尼的镁合金 Mg－0. 63Zr 作为基体，短切碳纤维、碳化硅晶须、硼酸铝晶须为增强体，采用压力铸造复合工艺分别制作镁基复合材料，考察其阻尼性能。

作为结构件，材料是处于受力状态，为更贴近实际应用，实验采用了外加载荷的内耗测量方式，并且测量的是材料在加载和卸载过程中内耗与振幅的关系。

## 1 实 验

### 1.1 材料及样品制备

考虑到金属基复合材料制备工艺，选用的增强物有短纤维及晶须。采用压力铸造工艺复合，基体均为 Mg－0.63Zr。试样成分、种类列表 1。

### 1.2 力学性能测量

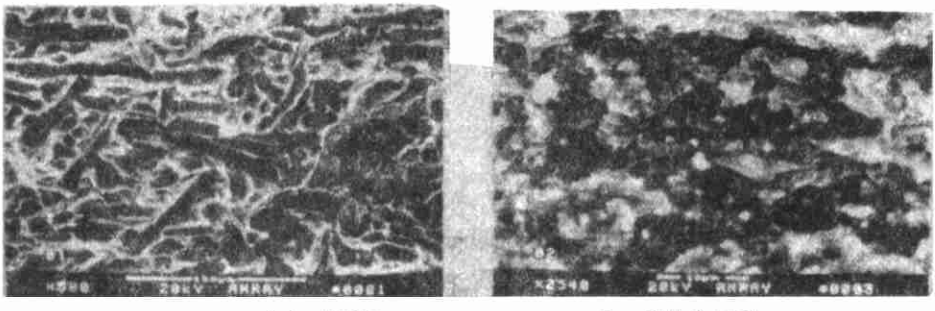
在电子拉伸机上测量了各种材料的拉伸性能，结果见表 1。

表 1 各种材料的力学性能

| 代 号 | M01 | M02 | M04 | J |
|---|---|---|---|---|
| 增强体类型 | 短切碳纤维 | 碳化硅晶须 | 硼酸铝晶须 | 无 |
| 增强体体积分数% | 30 | 25 | 28 | |
| 抗拉强度（MPa） | 193 | 176 | 163 | 153 |

### 1.3 扫描电镜分析

在 KYKY—1000B 扫描电镜上分析材料拉伸试样断口，其结果见图 1。



（a）短切碳纤维　　（b）碳化硅晶须

图 1 复合材料的拉伸断口扫描电镜象

### 1.4 内耗的测试

在DYNA STAT 粘弹谱仪（美国 Imass 公司产）上测量了在振动方式为强迫弯曲振动时的上述材料的内耗－应变谱（$Q^{-1}$—a）、内耗－频率谱（$Q^{-1}$—f），振动方式为强迫振动，其结果分别见图 2、图 3。

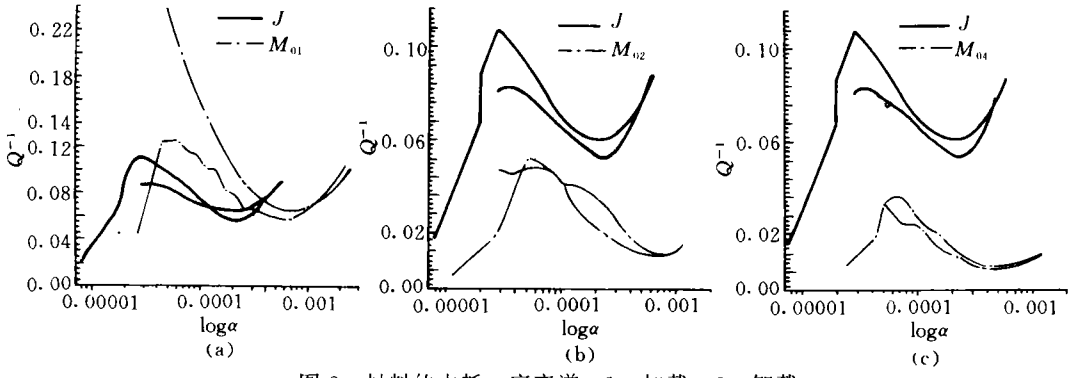



图 2　材料的内耗－应变谱　1—加载　2—卸载

## 2　实验结果分析

### 2.1　振幅效应

图 2 记载了试样的内耗－应变谱，其中图 2 (a) 是 M01 与 J 的对比，图 2 (b) 是 M02 与 J 的对比，图 2 (c) 是 M04 与 J 的对比。由图 2 可见，在加载过程中，无论是镁合金还是不同增强体增强的镁基复合材料，均显示出强烈的振幅依赖性，应变在 $10^{-5}$～$10^{-3}$ 时，内耗发生明显变化。

对于 Mg－Zr 来说，在室温下内耗与振动频率无关（见图 3），无论是在低振幅值还是高幅值均如此，背景内耗很高。在应变小于 $1\times10^{-4}$时，出现正常振幅效应，高于此值时出现反常振幅效应，在应变大于 $2\times10^{-3}$时，随振幅升高内耗升高。因此在应变等于 $1\times10^{-4}$时有一振幅峰出现。

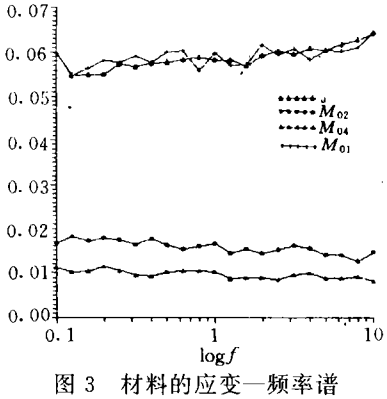



图 3　材料的应变—频率谱

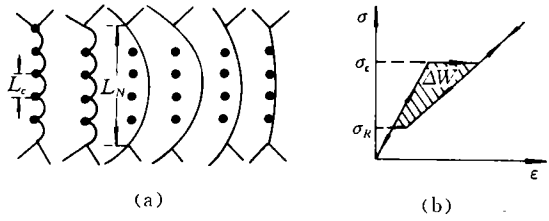



图 4　镁合金的内耗位错机制

Mg－0.63Zr 合金的阻尼机制属于位错型[3]，Granato－lucke 认为在晶粒内滑动位错

被杂质原子钉扎，当外应力增加时，位错线变成向外伸出的弧形（见图 4(a)），这时应力与应变的关系是线性的，当应力增强到某临界值 $\sigma_c$ 时，位错产生脱钉现象而出现滞弹性应变，卸载时脱钉的位错弹性地崩溃，它们在低得多的应力 $\sigma_k$ 下再被钉扎，因此形成滞后回线，回线所包围的面积为应变能，即在半周循环中所损耗的能量 $\Delta W$（见图 4(b)）。因为脱钉现象的时间极短，所以阻尼与频率无关而与应力振幅有关，属于静滞后型。

这一部分内耗可用以下公式表示[4]：

$$\Delta = \frac{\beta \Lambda L_N^3}{\pi^2 L_c} \cdot \frac{k\varepsilon' b}{L_c \varepsilon_0} \exp\left(-\frac{k\varepsilon' b}{L_c \varepsilon_0}\right) \rightarrow \frac{\Delta W}{\sigma_0^2 / G}$$

式中，$\Delta$ 为对数减缩量（$\Delta = \pi\theta^{-1}$），$\beta$ 为取向因子，$L_N$ 为位错网络平均结点长度，$L_c$ 为杂质间平均距离，$\varepsilon_0$ 为应变振幅，$\varepsilon'$ 为溶质溶剂原子错配参数，$b$ 为柏格氏矢量，$k$ 为与产生脱钉所需应力及取向有关的因子，$\sigma$ 为外加应力振幅。由此可见，随应变振幅的增强，参加脱钉的位错增加，内耗增加，但当应力太大，由于全部位错都已脱钉，$\Delta W$ 保持不变，进一步增大应力，内耗反而减小，因此出现一内耗振幅峰。当应变继续增大，内耗随之又升高，这是由于此时已发生塑性变形，内耗随变形量的增加而增加。

采用同一基体不同增强体的复合材料，无论是种类不同的晶须还是短切纤维，在内耗—振幅谱上的峰形与基体的峰形基本一致，模量变化亦基本一致（图 5），说明复合材料内耗的振幅效应主要是由基体导致的，增强物本身内耗较小。在室温至 300℃内，碳化硅晶须、碳纤维、硼酸铝晶须是稳定的，不会发生相变，故在该温度范围内不会有弛豫峰出现。

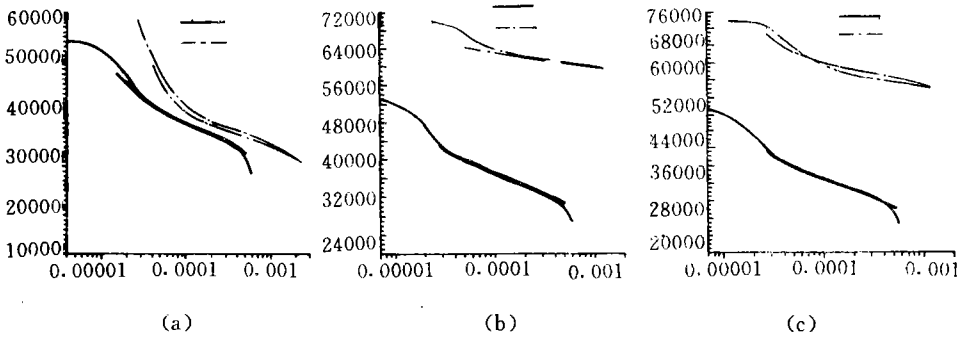



图 5　各种材料的应变—模量图

## 2.2　复合材料的内耗

### 2.2.1　组织结构对内耗的影响

虽然短切碳纤维、碳化硅晶须、硼酸铝晶须增强镁基复合材料的内耗—振幅谱的变化趋势相同，亦有较高的背景内耗，但整体的高度、峰位却不相同，由图 2 (b)、图 2 (c) 可见，碳化硅晶须、硼酸铝晶须复合材料的内耗—振幅谱整体比基体的向下、右移动，但短切碳纤维复合材料只向右移动，高度基本保持与基体相当。

从材料组织结构看，当增强物体体积分数相当时，细小弥散的晶须的加入比粗大的碳纤维更有效地降低了位错的可动距离（相当于减小了晶粒尺寸），$L_N$、$L_C$ 降低，启动位错所需应力增加，因此，晶须增强材料的振幅峰向高振幅移动，同时 $L_N$ 的减小大大降低了内耗，而且增强物越细、模量越高，曲线向下移动值越大（见图 2 (b)、(c)），由于增

强体对基体的强化，使得塑性变形在更高应变下发生，因此曲线再升高阶段亦向高应变方向移动。对于碳纤维增强材料，在此体积分数条件下，纤维与纤维间的基体的尺度与镁合金的晶粒大小相当，并不明显降低其 $L_N$、$L_C$ 值。曲线右移，亦说明碳纤维与晶须一样也起到了强化基体的作用。

2.2.2 界面对复合材料内耗的影响

复合材料的内耗来源于三个方面[1]：基体、增强体、增强体与基体间的界面。

三种复合材料的工艺均是（增强体预制件）600℃预热，800℃浇铸镁合金基体，其中碳化硅晶须与基体润湿性最好，碳纤维最弱。降低浇铸温度碳化硅晶须能够与基体压铸，而碳纤维则不行。因此，碳纤维增强材料中，增强相与基体界面存在的缺陷，如脱粘、空洞等，成为能量传输的不连续点，必然会对材料内耗有所贡献。从图 1（$a$）可见，碳化硅晶须增强材料的断口上组织细小，基本上看不出晶须的细微组织，说明其与基体结合良好，而碳纤维复合材料中可看到纤维与基体结合较弱，多数情况下是沿横向纤维界面剥开，纤维只从两个端头拔出，纤维与基体之间局部有孔洞存在。而硼酸铝晶须与基体结合情况介于以上两种之间，可见一些很微小的孔洞，有晶须拔出。可见，碳纤维增强材料的内耗没有明显的降低，这说明亦有界面及缺陷的贡献。

对比加载和卸载过程中内耗曲线（见图 2），发现镁合金与晶须增强复合材料的基本重合（见图 2（b）、（c）），而碳纤维的两条曲线却明显分离（见图 2（a）），且卸载曲线比加载曲线升高一倍。对这种现象可以 这样解释：加载引起材料塑性变形。明显的塑性变形，使基体金属中位错缠结，降低基体在卸载过程中的内耗，而塑性变形使原本结合较弱的增强体与基体界面遭到破坏，增加了材料中界面缺陷的数量，因而内耗增加。内耗的大幅度增加说明界面对材料的内耗有明显影响。但弱的界面显然会降低材料的力学性能及稳定性。

晶须增强材料与镁合金内耗曲线基本重合，一方面说明增强体与基体结合良好，另一方面亦说明界面对材料的内耗基本上没有贡献，曲线的高度可以代表晶须增强剂对复合材料内耗的相对贡献的大小。在界面对内耗有贡献的情况下，则可以由高应变时曲线的高度来判断增强体对材料内耗的相对贡献大小，因为此时高的应变量使界面缺陷基本焊合，以及材料的强烈塑性产生了高内耗，界面对内耗的作用可以忽略不计。所以，比较复合材料的三条曲线亦可得出以碳纤维增强镁基材料具有较高的内耗/力学综合性能。

## 3 结 论

（1）在本实验选用的增强体中，以短切碳纤维增强镁基复合材料具有最高的阻尼性能。最高峰值 $Q^{-1}$ 约为 $5.6\times10^{-2}$，属高阻尼材料。

（2）在短切碳纤维增强复合材料中，界面对内耗有明显的影响。

## 参 考 文 献


1 AD—A2B 712/XAD

2 Percez R J, Lavernia E J J. Materials Sci.,1993,28:2395～2404

3 高技术新材料要览编辑委员会. 高技术新材料要览. 中国科学技术出版社,1993:151

4 哈宽富. 金属力学性质的微观理论. 科学出版社,1983


（责任编辑 卢天贶）