

## 准晶增强 Mg-0.6%Zr 合金的力学与阻尼性能

马 戎, 董选普, 陈树群, 程 鲁, 樊自田

(华中科技大学 材料成型与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘 要:** 在 Mg-0.6%Zr 高阻尼合金中加入质量比为 5 的 Zn 与 Y 元素, 通过普通铸造方法向其中引入 Mg-Zn-Y 系准晶进行强化, 并在此基础上研究准晶增强 Mg-0.6%Zr 合金的力学和阻尼性能。结果表明: Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金中生成一定含量的  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相,  $I$  相的生成能大幅度提高 Mg-0.6%Zr 合金的力学性能; 常温下 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的阻尼行为可由 G-L 位错模型解释, 高温下界面阻尼机制启动, 合金的阻尼值急剧升高;  $I$  相等准晶颗粒对晶界有钉扎作用, 导致高温下 Mg-4.5%Zn-0.9%Y-0.6%Zr 等合金的阻尼性能不如 Mg-0.6%Zr 合金的。

**关键词:** Mg 合金; 准晶; 阻尼性能; 力学性能; 位错; G-L 模型

**中图分类号:** TG 146.2

**文献标志码:** A

## Mechanical and damping properties of Mg-0.6%Zr alloy reinforced by quasicrystals

MA Rong, DONG Xuan-pu, CHEN Shu-qun, CHENG Lu, FAN Zi-tian

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Zn and Y elements with a mass ratio of 5 were adopted to fabricate Mg-Zn-Y quasicrystal through convention cast method to strength the Mg-0.6%Zr high damping magnesium alloy, based on which the damping behavior of the quasicrystal-reinforced Mg-0.6%Zr alloy was investigated. The results show that a certain content of  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  quasicrystal phase generates in the Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys, and the mechanical properties are substantially enhanced compared with that of the Mg-0.6%Zr alloy. The damping behavior of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys at room temperature can be explained by G-L dislocation model, while at high temperature, the damping value of the alloys increases rapidly because the interface damping mechanism starts. The crystal boundary is pinned by the quasicrystal particles, like the  $I$ -phase, which results in the damping capacity of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys at elevated temperature is lower than that of Mg-0.6%Zr alloy.

**Key words:** magnesium alloy; quasicrystal; damping property; mechanical property; dislocation; G-L model

噪声与振动是存在于任何动态和机械系统的物理现象, 该现象会对机械设备及操作人员产生一系列的不良后果<sup>[1]</sup>, 因此, 研制一种同时具有减振降噪及优良力学性能的结构功能一体化材料, 将振动和噪声抑制在源头, 对现代工业发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。金属镁

及其合金是目前密度最低的商用金属结构材料, 具有高比强、电磁屏蔽以及优异的铸造、切削加工性能和易回收等优点, 而镁合金的高阻尼减振性更是其他金属结构材料所不具备的<sup>[3]</sup>。在各种 Mg 基二元合金中, 由于 Zr 的晶粒细化效果最好, 使得 Mg-Zr 合金兼具

**基金项目:** 华中科技大学材料成型与模具技术国家重点实验室自主课题(09-3)

**收稿日期:** 2011-09-26; **修订日期:** 2012-04-05

**通信作者:** 董选普, 教授, 博士; 电话: 027-87558252; E-mail: dongxp@mail.hust.edu.cn

阻尼高、力学性能优的特点,是高阻尼镁合金中最有前途的二元合金<sup>[4]</sup>,而 Mg-Zr 系合金中的 Mg-0.6%Zr(质量分数,下同)合金由于既具有良好的阻尼性能,又具有一定的力学性能,因此受到国内外研究人员的青睐<sup>[5]</sup>。

镁合金的阻尼机制属于位错型阻尼,传统的镁合金强化方法会不同程度地降低镁合金的阻尼性能<sup>[6]</sup>。为了在尽量保持镁合金阻尼性能的基础上进一步提高其力学性能,必须引入新的强化机制。准晶具有高硬度、耐蚀和耐热等特点,特别适合用作韧性基体材料中的强化相<sup>[7]</sup>。在 Mg-Zn-Y 三元合金相图上,存在稳定准晶和  $\alpha$ -Mg 两相共存区,LEE 等<sup>[8]</sup>的研究发现 Zn/Y 比(质量比,下同)为 5~7 时,通过普通铸造的方法即可获得  $\alpha$ -Mg 和准晶 I 相共存的两相组织,因此可以通过控制 Zn/Y 比,采用常规凝固方法使准晶相弥散分布于镁合金基体中,获得高性能的镁基材料<sup>[9]</sup>。目前已有学者研究了常规凝固条件下 Mg-Zn-Y 系准晶的形成规律<sup>[10-11]</sup>,并通过准晶强化方法研究了镁系准晶对常见牌号镁合金力学性能的影响<sup>[12-13]</sup>,然而镁系准晶对镁合金阻尼性能的影响研究却鲜有报道。因此,本文作者通过在 Mg-0.6%Zr 合金中加入一定比例的 Zn 和 Y 元素进行合金化,以期得到准晶增强的 Mg-0.6%Zr 合金,并在此基础上研究不同准晶含量 Mg-0.6%Zr 合金的力学性能和阻尼性能。

## 1 实验

本实验在纯 Mg 中分别加入一定含量的 Zr、Zn 和 Y 等元素,制备出 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金,其中 Zr、Y 以中间合金形式加入。为有利于准晶生成,将 Zn/Y 质量比控制在 5 左右,具体成分如表 1 所列。将一定量的纯 Mg 锭和纯 Zn 锭放入坩埚电阻炉中加热至熔化,待合金液温度升至 750 ℃时分别加入 Mg-Y

及 Mg-Zr 中间合金并用钟罩不断搅拌,同时撒入少量精炼剂进行精炼,搅拌约 5 min 后将合金液升温至 780 ℃,在此温度下静置约 10 min,然后关闭电炉,待合金液随炉降温至 700 ℃时扒渣浇入拉伸试棒金属型中,金属型预先加热到 250 ℃。整个熔炼及浇注过程采用 99%CO<sub>2</sub>+1%SF<sub>6</sub>(体积分数)混合气体进行保护。

将浇注得到的试棒经打磨飞边后在 Zwick Z100 材料试验机上测试力学性能,拉伸速率为 2 mm/min,试棒尺寸如图 1 所示。阻尼温度谱在铂金-埃尔默仪器上海有限公司生产的 Diamond DMA 上测试,采用拉伸形变模式,测试温度范围为室温~400 ℃,阻尼性能用损耗角正切  $\tan \varphi$  表征。为避免试样在加工过程中产生应力和变形,阻尼测试试样均采用线切割方式制取,尺寸为 50 mm×6 mm×0.5 mm。在拉断后的试棒上截取断口试样,在 Quanta 200 型环境扫描电镜(ESEM)上观察断口形貌;微观组织试样经镶嵌、预磨及抛光后用体积分数为 1%的 HF 水溶液腐蚀,在金相显微镜下观察微观组织,并对试样进行能谱(EDX)分析和 X 射线衍射(XRD)分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 合金的微观组织

图 2 所示为 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的金相组织。由图 2 可知,在纯 Mg 中加入 Zr 元素后,由于 Zr 在 Mg 中主要以含 Zr 质点的形式存在,Zr 与 Mg 同为密排六方结构且晶格常数相近,对纯 Mg 晶粒有很好的细化作用,因此,Mg-0.6%Zr 合金晶粒相对于纯 Mg 得到了很大程度的细化,其形状为大量花瓣状大枝晶和少数细小圆整的小晶粒;在 Mg-0.6%Zr 合金中加入 Zn 和 Y 元素合金化后,合金晶粒进一步细化,在晶界上出现了沿晶界连续分布的第二相组织,而且随着 Zn+Y 元素含量的增加,第二相的含量迅速增加:当 Zn 含量为 0.7%时,晶粒平均直径约为 50  $\mu\text{m}$ ,晶界

表 1 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的名义成分

Table 1 Nominal compositions of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys

| Sample No. | Nominal composition      | Mass fraction/% |      |     |      |            |
|------------|--------------------------|-----------------|------|-----|------|------------|
|            |                          | Zn              | Y    | Zr  | Mg   | w(Zn)/w(Y) |
| 1          | Mg-0.6%Zr                | —               | —    | 0.6 | Bal. | —          |
| 2          | Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr  | 0.7             | 0.14 | 0.6 | Bal. | 5          |
| 3          | Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr | 2.25            | 0.45 | 0.6 | Bal. | 5          |
| 4          | Mg-4.5%Zn-0.9%Y-0.6%Zr   | 4.5             | 0.9  | 0.6 | Bal. | 5          |

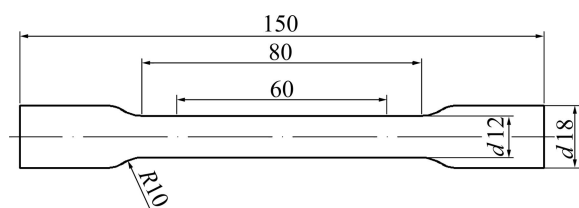


图 1 拉伸试棒尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen for tensile test (mm)

上分布着一定量的第二相; 当 Zn 含量增加到 2.25% 时, 第二相含量急剧升高, 主要沿晶界分布; 当 Zn 含量达到 4.5% 时, 晶粒直径明显减小, 使得晶界数量增加, 第二相含量也进一步增加, 有少量第二相颗粒分布于晶内。

图 3 所示为对合金元素含量居中的 Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr 合金的微观形貌及各区域的能谱分析的结果。其中 1、2、3 处分别是基体、晶界、第二相, 根据能谱分析结果, 基体中只有  $\alpha$ -Mg 存在, 而且其中没有其他元素的原子固溶(见图 3(b)), 只有晶界附

近有极少量的 Zn 元素存在(见图 3(c)), 几乎所有的 Zn 和 Y 元素都集中在第二相中而没有固溶在基体中(见图 3(d))。

## 2.2 合金的相组成

根据能谱分析结果, Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金中的第二相中富含 Zn 和 Y 元素, 为了进一步弄清该相组成, 对 4 种实验合金进行 XRD 分析, 其结果如图 4 所示。由图 4 可知, 在 Mg-0.6%Zr 合金中只有初生的  $\alpha$ -Mg 相和  $\alpha$ -Zr 相存在, 根据 Mg-Zr 二元相图, 常温下 Zr 在 Mg 中几乎不固溶, 仅以含 Zr 质点的形式存在, 与此结果相符; 当在 Mg-0.6%Zr 中添加了 Zn 和 Y 元素后, 合金中均出现了  $I$ -Mg<sub>3</sub>YZn<sub>6</sub> 相, 其衍射峰尖锐, 且具有一定的衍射强度, 这说明这种相在合金中的含量较多。Mg<sub>3</sub>YZn<sub>6</sub> 是一类具有稳定二十面体结构的准晶相, 具有较高的强度、硬度和热稳定性, 均匀分布的准晶相的存在能极大地提高基体的力学性能, 更重要的是准晶的生成减少了基体金属中固溶原子的含量: Zn 和 Y 在 Mg 中的最大固溶度分别为

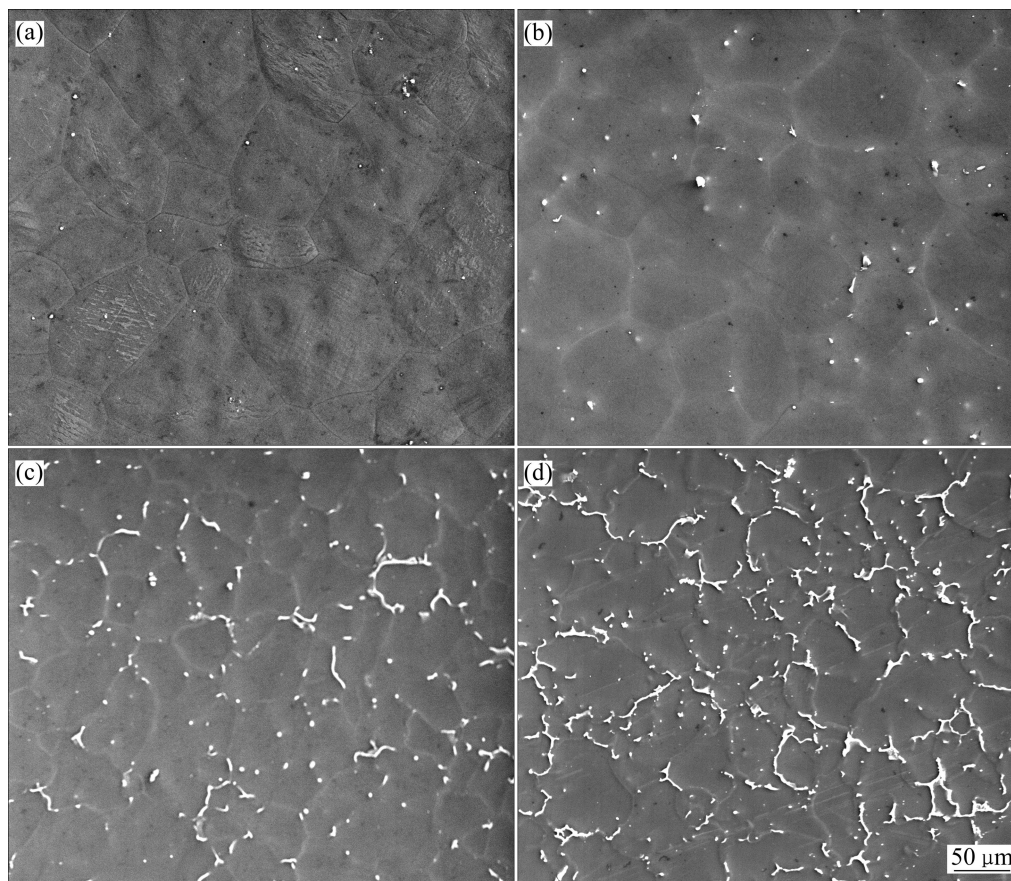


图 2 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的金相组织

Fig. 2 Optical microstructures of four Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys: (a) Mg-0.6%Zr; (b) Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr; (c) Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr; (d) Mg-4.5%Zn-0.9%Y-0.6%Zr

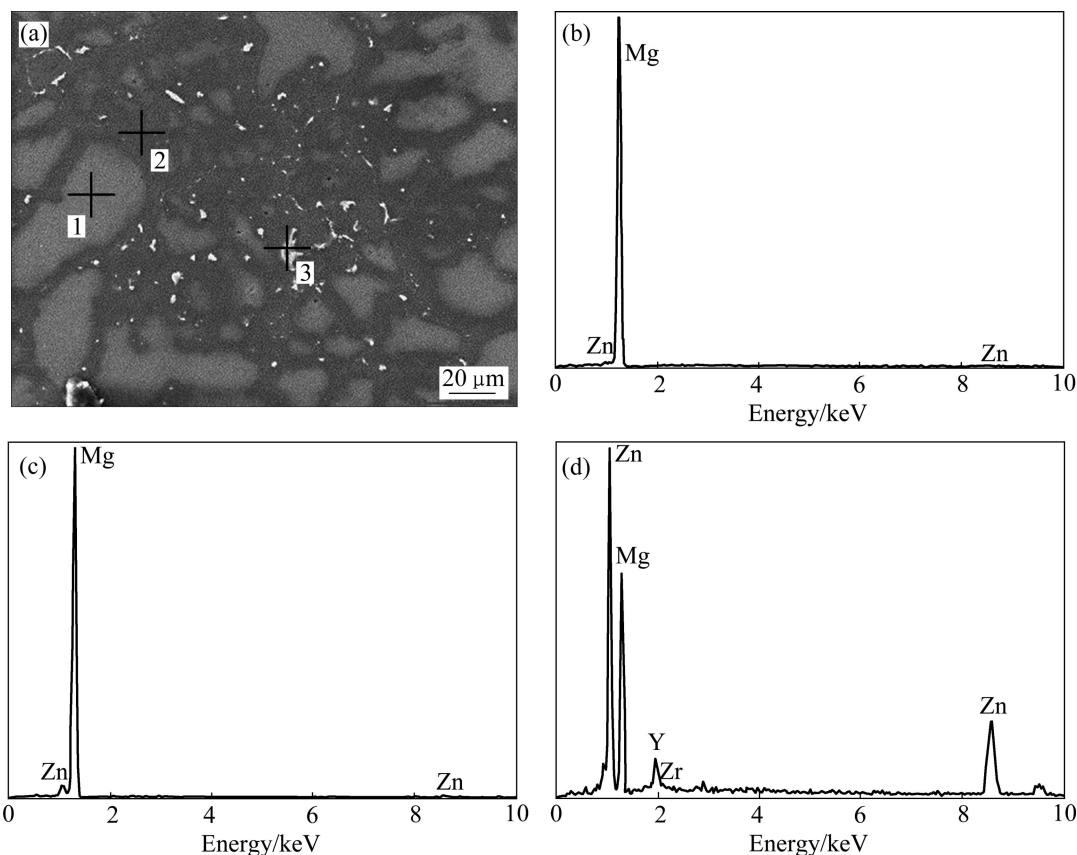


图3 Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr合金的微观形貌及各区域的EDX分析结果

**Fig. 3** Morphology and EDX results of Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr alloy: (a) Positions of EDX test; (b) EDX result of Position 1 (matrix); (c) EDX result of Position 2 (grain boundary); (d) EDX result of Position 3 (second phase)

6.2%和11%，在常温下Zn和Y在Mg中的固溶度也能达到2%左右，但是在Mg-Zn-Y三元合金中，在常规凝固条件下一定比例的Mg、Zn、Y元素就能形成三元合金相，包括 $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$ （二十面体准晶）、 $W\text{-Mg}_3\text{Y}_2\text{Zn}_3$ （面心立方结构）和 $H\text{-Mg}_{12}\text{YZn}$ （六边形长周期结构）<sup>[14]</sup>，由于Mg-5xZn-xY-0.6%Zr合金中主要成分是Mg而Zn和Y的含量较低，因此有足够的Mg元素来形成三元相，这样就使得Mg中的合金元素绝大部分都参与生成三元合金相而不是固溶到基体金属中。

除了 $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$ 相外，在3种Mg-Zn-Y-Zr合金中还出现了一种衍射峰值较强的 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相，根据相关资料<sup>[15]</sup>，这种 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相是Mg中的 $\alpha$ 相，和基体Mg同属于密排六方结构， $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相的生成一方面减少了基体中固溶Zn原子的含量，另一方面，由于 $\text{Mg}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}$ 相和基体Mg结构相同，和基体具有界面共格效应，能够作为异质形核核心促进形核，从而进一步细化合金晶粒。

### 2.3 合金的力学性能

4种合金的力学性能测试结果如图5所示。从图5可以看出，相对于Mg-0.6%Zr合金，加入Zn和Y元素后的合金力学性能有了很大幅度的提高，而且随着Zn和Y元素含量的增加，合金的力学性能进一步提高，甚至超过170 MPa，但提高的幅度越来越小。

对拉伸测试后的试样观察其拉伸断口的微观组织，结果如图6所示。图6(a)所示的断口中存在大量的小剪切平面和极少量的小韧窝，还有晶粒被拔出后留下的有棱角的凹坑，表现为明显的解理断裂。随着合金元素含量的增加，晶粒尺寸被不断细化，在断口上表现为剪切平面的平均尺寸越来越小，数量越来越少，局部区域还出现了少量由于塑性变形而产生的细小韧窝，韧窝数量随着准晶含量的增加而逐渐增加，到最后的断口中几乎观察不到剪切平面（见图6(b)~6(d)），说明Mg-5xZn-xY-0.6%Zr合金的断裂机制由解理断裂逐渐转变为准解理断裂<sup>[16]</sup>。这是由于液相中的含Zr质点能够作为异质形核核心，而且液相中生

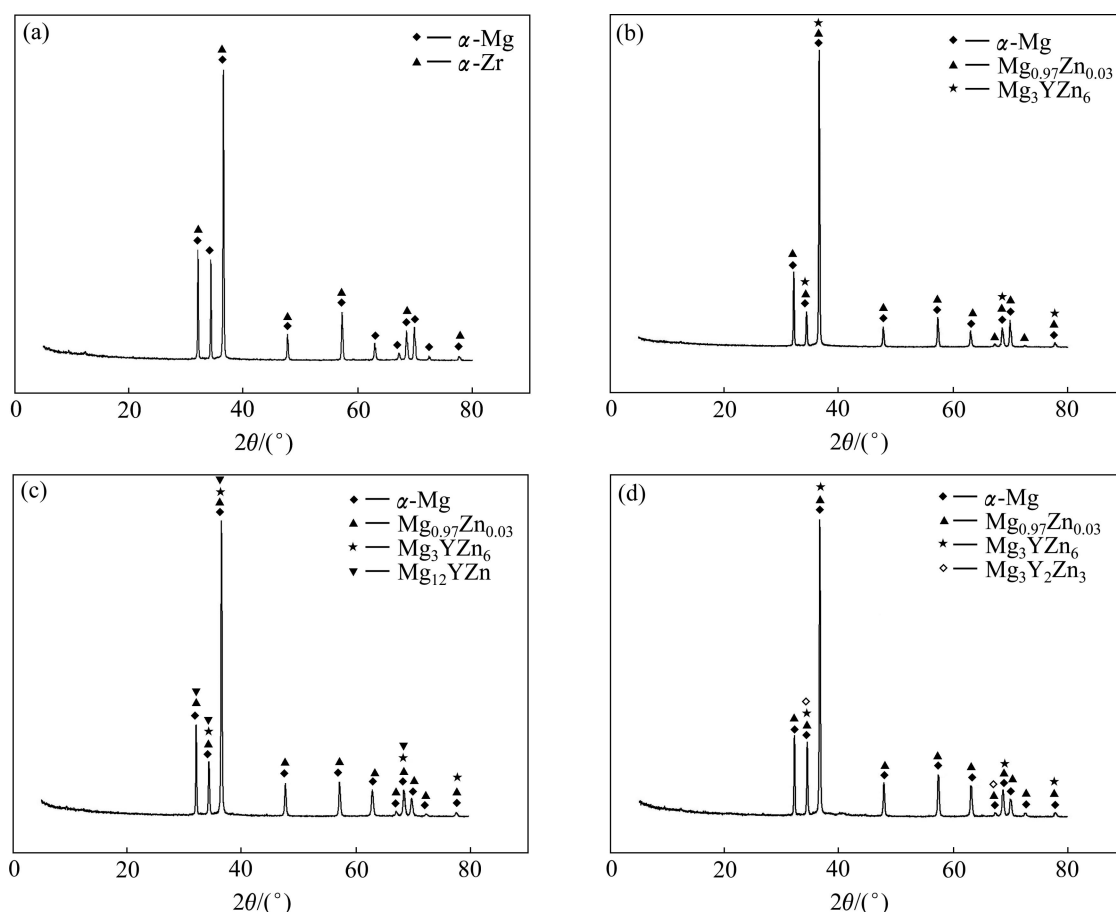


图 4 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的 XRD 谱

**Fig. 4** XRD patterns of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys: (a) Mg-0.6%Zr; (b) Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr; (c) Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr; (d) Mg-4.5%Zn-0.9%Y-0.6%Zr

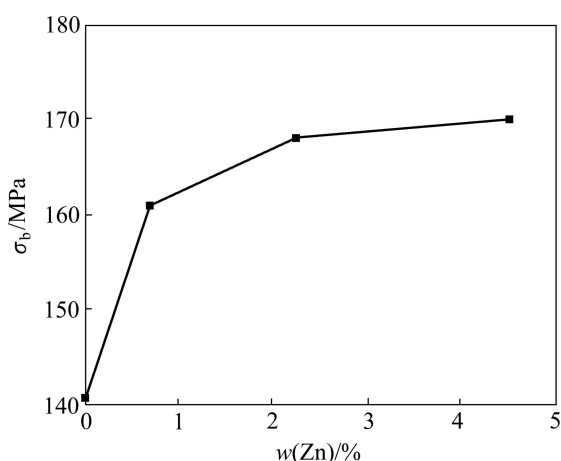


图 5 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的力学性能

**Fig. 5** Tensile properties of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys

成了  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相, 分布在固液界面前沿, 阻碍晶粒长大, 从而细化了基体合金的晶粒; 而且弥散分布的  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相和 Mg 基体有良好的界面共格对应和较强的界面结合能力, 对晶界具有一定的钉扎

作用, 能够限制晶界的滑移, 同时高硬度的  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶颗粒在受力过程中还能起到传递载荷的作用, 从而提高基体合金的力学性能。由于 Zr 在 Mg 中的固溶度极低以及生成了 Mg-Zn-Y 系准晶, 4 种合金内部几乎没有固溶原子存在, 因此, 合金强度的提高可归结于内生准晶颗粒带来的弥散强化以及晶粒细化所带来的细晶强化。

## 2.4 合金的阻尼性能

对 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金进行阻尼性能测试, 其阻尼—温度谱如图 7 所示。由图 7 可以看出, 随着 Zn 和 Y 元素的加入, 4 种实验合金的阻尼值总体呈下降趋势, 说明合金元素的加入对 Mg-0.6%Zr 合金的阻尼性能有一定的不利影响。加入 Zn 和 Y 元素后, Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr 合金相对于 Mg-0.6%Zr 合金其阻尼性能大幅度下降, 然后随着合金元素含量的增加, 这种下降幅度减小。4 种合金的阻尼—温度谱有相近的变化趋势: 在常温阶段

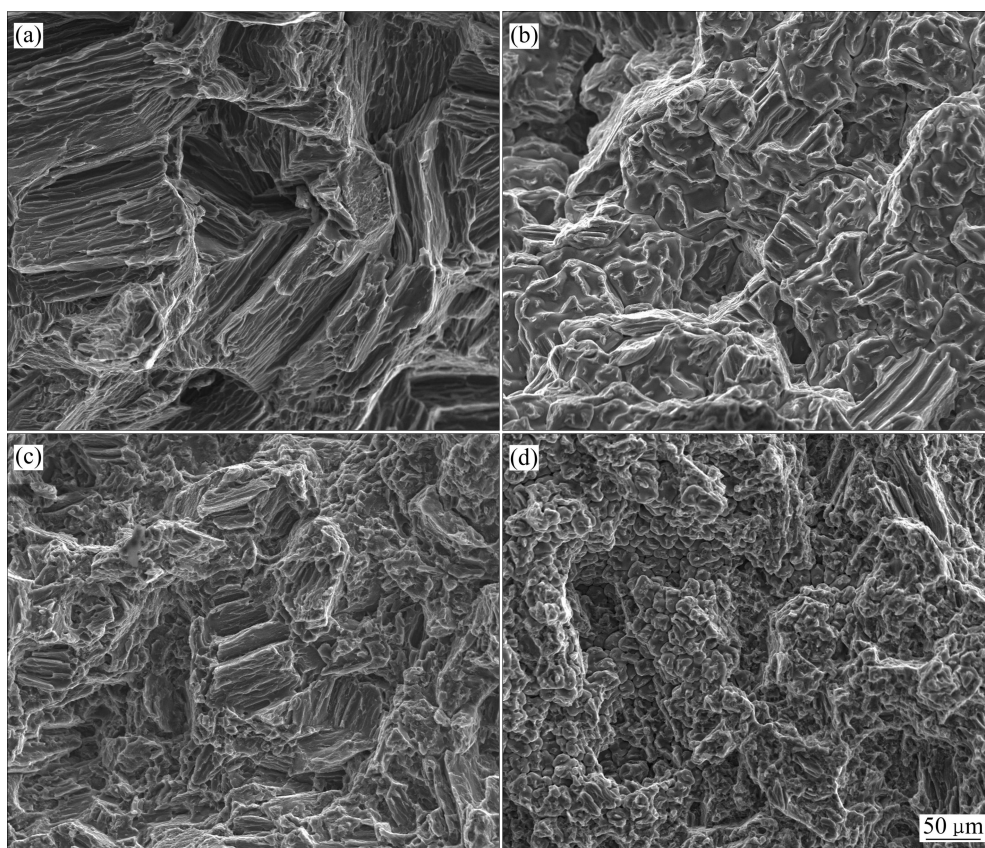


图 6 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的拉伸断口 SEM 像

Fig. 6 Fracture SEM images of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys: (a) Mg-0.6%Zr; (b) Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr; (c) Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr; (d) Mg-4.5%Zn-0.9%Y-0.6%Zr

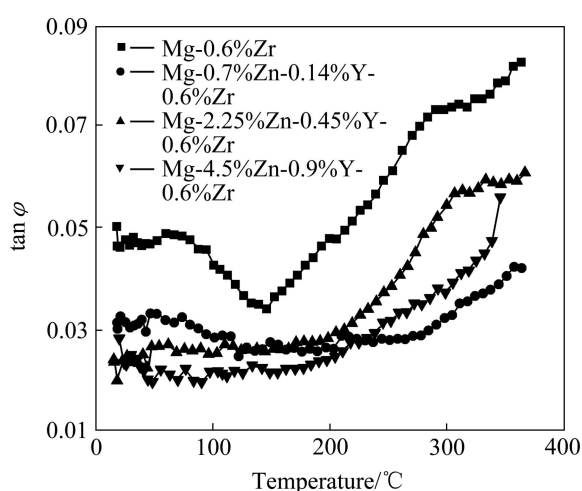


图 7 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的阻尼—温度谱

Fig. 7 Temperature dependent damping of Mg-5xZn-xY-0.6%Zr alloys

( $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 4 种合金的阻尼值只在某一小范围内有微小波动, 几乎不随温度的升高而改变, 而在  $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  阶段, 在 4 种合金的阻尼—温度谱中都观察到了明显的阻尼峰; 从约  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  开始合金阻尼值都随温度的升

高有较小幅度的下降, 然后随温度升高而急剧上升, 但 Mg-0.7%Zn-0.14%Y-0.6%Zr 合金的阻尼值增加并不明显, 其阻尼—温度曲线较平; 当温度达到  $275\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时, 在 4 种合金的阻尼—温度谱中又观察到另一阻尼峰, 其中 Mg-0.6%Zr 合金和 Mg-2.25%Zn-0.45%Y-0.6%Zr 合金的阻尼峰较明显, 而另 2 种合金阻尼峰不是十分明显。

### 3 讨论

纯 Mg 及其常见合金的阻尼机制属于位错阻尼, 其特征符合 G-L 模型: 镁合金中的位错线受到两类钉扎作用, 一类是溶质原子、空穴等形成的弱钉扎, 另一类是晶界、析出相和位错节点等形成的强钉扎, 在外加振动载荷的作用下相邻钉扎点之间的位错段会发生来回弓出运动, 在运动过程中消耗振动能量, 宏观上便表现为阻尼减振性能<sup>[17-18]</sup>。本实验中阻尼—温度谱的测试应变振幅为  $1\times 10^{-4}$ , 属于低应变振幅范围, 根据 G-L 模型, 常温阶段该范围内镁合金的阻尼性能

可由损耗角正切  $\tan \varphi$  和品质因子倒数  $Q^{-1}$  等价表征, 其阻尼值可表示为

$$Q_L^{-1} = BAL^4 \omega / (36Gb^2) \quad (1)$$

式中:  $A$  为位错密度;  $L$  为位错段的平均长度;  $\omega$  为振动角频率;  $G$  为剪切模量;  $b$  为柏氏矢量;  $B$  为系数。

细小弥散的  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相的生成极大地增加了合金内部界面和合金相的数量, 同时 Zr 元素能细化 Mg 基体的晶粒, 使得晶界数量大幅增加。这些界面和合金相都是位错运动的有效阻碍。界面和合金相数量的增多, 相当于增加了合金中位错上的强钉扎点数量, 使位错段的平均长度  $L$  逐渐减小, 结合式(1)分析, 在某一温度下合金的阻尼值会随着合金元素含量的增加而呈下降趋势, 该结论与本实验阻尼性能测试的结果相符合, 因此, 一定温度下该 Mg-Zn-Y-Zr 系合金的阻尼行为也可由 G-L 位错模型解释。

在 4 种实验合金中都观察到了明显的阻尼峰。其中在 50 °C 附近的阻尼峰出现温度低, 峰宽很大, 而且随着合金元素含量的增加该阻尼峰向低温方向移动, 因此认为该阻尼峰是一个同位错在基面上运动相关的内耗峰<sup>[19]</sup>; 而在温度高于 275 °C 阶段, 4 种 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的阻尼值都随温度的增加而急剧上升, 其阻尼值随温度的变化关系已明显不满足 G-L 位错模型。相关研究表明, 金属中的晶粒间界具有粘滞性<sup>[20]</sup>, 当外加应力大于晶界间的结合力时, 相邻晶粒会沿着晶界发生相对滑移, 在滑移的过程中, 晶界间的粘滞作用会使能量发生衰减, 即产生晶界阻尼。随着温度的升高, 晶界间的结合力会逐渐减弱, 达到一定温度后晶界便开始发生相对滑移, 晶界阻尼机制启动: 温度较低时, 晶界间的粘滞滑移距离很小, 从而耗散的能量较少, 而在高温下晶界间的粘滞作用随着晶界结合力的减弱而减小, 此时即使粘滞滑移距离增大, 阻尼也不会增加, 因此在某个中等的温度范围内会出现阻尼最大值, 即 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金在高温阶段的阻尼峰属于晶界阻尼峰。4 种实验合金晶界阻尼峰的峰值随着合金元素含量的增加而逐渐减小, 峰高也趋于平缓, 这是由于  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相等合金相对晶界还具有钉扎作用, 阻碍了晶界的滑移, 从而降低了合金在该温度下的阻尼值。

## 4 结论

1) 通过向 Mg-0.6Zr%高阻尼合金中添加 Zn 和 Y 元素, 用常规铸造方法在 Mg-0.6%Zr 合金引入高含量

稳定存在的 Mg-Zn-Y 系准晶相, 制备出 Mg-Zn-Y 系准晶增强的 Mg-Zn-Y-Zr 合金。

2)  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相的引入提高了 Mg-0.6%Zr 合金的强度, 最高达到 170 MPa, 断裂机制由解理断裂逐渐转变为准解理断裂。

3)  $I\text{-Mg}_3\text{YZn}_6$  准晶相的形成能在一定程度上降低 Mg-0.6%Zr 合金的阻尼性能, 且随着准晶含量的增加这种降低效果增强; 在室温~400 °C 测试范围内 Mg-5xZn-xY-0.6%Zr 合金的阻尼温度谱中出现了两个明显阻尼峰, 低温下的阻尼峰属于与位错相关的阻尼峰, 高温下的阻尼峰属于晶界阻尼峰; 在某一确定温度下 Mg-Zn-Y-Zr 系合金的阻尼行为可由 G-L 位错模型解释。

## REFERENCES

- [1] 刘定胜. 高阻尼合金在兵器上的潜在应用[J]. 兵器材料科学与工程, 1994, 17(3): 63-70.  
LIU Ding-sheng. Potential applications of high damping alloys on ordnance engineering[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1994, 17(3): 63-70.
- [2] 王敬丰, 魏文文, 潘复生, 汤爱涛, 丁培道. 金属阻尼材料研究的新进展及发展方向[J]. 材料导报, 2007, 23(7): 15-18.  
WANG Jing-feng, WEI Wen-wen, PAN Fu-sheng, TANG Ai-tao, DING Pei-dao. New development and prospect of research on metallic damping materials[J]. Materials Review, 2007, 23(7): 15-18.
- [3] 王敬丰, 凌 闯, 潘复生, 汤爱涛, 丁培道. 合金元素对镁合金阻尼性能影响的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(3): 90-95.  
WANG Jing-feng, LING Chuang, PAN Fu-sheng, TANG Ai-tao, DING Pei-dao. Research progress in influence of alloying elements on damping properties of magnesium alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(3): 90-95.
- [4] 刘 广, 张振忠, 张少明, 沈晓东, 马立群. 高阻尼镁锆合金的研究进展及展望[J]. 材料导报, 2006, 20: 425-428.  
LIU Guang, ZHANG Zhen-zhong, ZHANG Shao-ming, SHEN Xiao-dong, MA Li-qun. Research progress and prospect of high damping Mg-Zr alloys[J]. Materials Review, 2006, 20: 425-428.
- [5] 刘楚明, 纪仁峰, 周海涛, 陈明安. 镁及镁合金阻尼特性的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1319-1325.  
LIU Chu-ming, JI Ren-feng, ZHOU Hai-tao, CHEN Ming-an. Research and development progress of damping capacity of magnesium and magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1319-1325.
- [6] 许巧平, 苏芳珍. 高阻尼材料的阻尼机制及发展趋势分析[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 45-47.

- XU Qiao-ping, SU Fang-zhen. Analysis on damping mechanism and research trend of the high damping materials[J]. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 2009, 28(3): 45–47.
- [7] 袁武华, 张晨晨, 陈吉华. 准晶相增强高性能镁合金的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(2): 91–93.
- YUAN Wu-hua, ZHANG Chen-chen, CHEN Ji-hua. Research progress in quasicrystal-reinforced high performance magnesium alloys[J]. Materials Review, 2007, 21(2): 91–93.
- [8] LEE J Y, LIM H K, KIM D H, KIM W T, KIM D H. Effect of volume fraction of quasicrystal on the mechanical properties of quasicrystal-reinforced Mg-Zn-Y alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 449/451: 987–990.
- [9] 郑明毅, 吴 昆, 乔晓光, 李淑波, 胡小石. 镁系准晶与高性能镁合金[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(6): 666–671.
- ZHENG Ming-yi, WU Kun, QIAO Xiao-guang, LI Shu-bo, HU Xiao-shi. Quasicrystals containing magnesium and high performance magnesium alloys[J]. Materials Science & Technology, 2004, 12(6): 666–671.
- [10] 卢庆亮, 闵光辉, 王常春, 于化顺. Mg-Zn-Y 合金中准晶相的形成与结构表征[J]. 山东大学学报: 工学版, 2005, 35(1): 9–12.
- LU Qing-liang, MIN Guang-hui, WANG Chang-chun, YU Hua-shun. Formation and characteristics of quasicrystalline phase in Mg-Zn-Y alloy[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2005, 35(1): 9–12.
- [11] 张金山, 王晓明, 杜二玲, 严 杰, 许春香. Y 和 Mn 含量优化对 MgZnYMn 球形准晶形成的影响[J]. 铸造, 2009, 58(1): 24–27.
- ZHANG Jin-shan, WANG Xiao-ming, DU Er-ling, YAN Jie, XU Chun-xiang. Effect of yttrium and manganese content on formation of MgZnYMn spherical quasi-crystal[J]. Foundry, 2009, 58(1): 24–27.
- [12] 杜二玲, 王荣贵, 张金山, 许春香, 王红霞, 周翠兰. 镁基准晶对 AZ31 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2009, 58(6): 555–558.
- DU Er-ling, WANG Rong-gui, ZHANG Jin-shan, XU Chun-xiang, WANG Hong-xia, ZHOU Cui-lan. Effect of Mg-based quasicrystals addition on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy[J]. Foundry, 2009, 58(6): 555–558.
- [13] 张金山, 王晓明, 裴利霞, 杜宏伟, 严 杰, 田爱环, 梁 伟. 镁基准晶对 AZ91 合金组织与性能的影响[J]. 铸造, 2007, 56(7): 687–690.
- ZHANG Ji-shan, WANG Xiao-ming, PEI Li-xia, DU Hong-wei, YAN Jie, TIAN Ai-huan, LIANG Wei. Influence of Mg-based quasi-crystals on microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy[J]. Foundry, 2007, 56(7): 687–690.
- [14] 郭华明, 刘子利, 刘新波. Y 含量对 Mg-Zn-Y 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(10): 664–666.
- GUO Hua-ming, LIU Zi-li, LIU Xin-bo. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(10): 664–666.
- [15] LÜ Wei-ling, CHEN Ti-jun, MA Ying, XU Wei-jun, YANG Jian, HAO Yuan. Effects of increase extent of voltage on wear and corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on AZ91D alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: 354–360.
- [16] 纪仁峰, 刘楚明, 刘子娟, 张 佳, 周海涛, 陈明安. 微量 Ca 对 Mg-0.6Zr 合金力学性能及阻尼行为的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(1): 105–108.
- JI Ren-feng, LIU Chu-ming, LIU Zi-juan, ZHANG Jia, ZHOU Hai-tao, CHEN Ming-an. Effect of small amounts Ca on mechanical properties and damping capacity of Mg-0.6Zr alloy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(1): 105–108.
- [17] SUGIMOTO K, NIIYA K, OKAMOTO T, KISHITAKE K. A study of damping capacity in magnesium alloys[J]. Transactions of Japan Institute Metals, 1977, 18: 277–288.
- [18] GRANATO A, LUCKE K. Theory of mechanical damping due to dislocations[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(6): 583–593.
- [19] 万迪庆, 杨根仓, 王锦程. 高阻尼镁合金温度相关内耗特征及溶质影响[J]. 铸造技术, 2009, 30(7): 904–907.
- WAN Di-qing, YANG Gen-cang, WANG Jing-cheng. Temperature dependent internal friction characteristic and solute effect of high damping magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2009, 30(7): 904–907.
- [20] 葛庭燧. 固体内耗理论基础: 晶界弛豫与晶界结构[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2000.
- GE Ting-sui. Theoretical basis of solid internal friction: Relaxation and structure of grain boundary[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2000.

(编辑 龙怀中)