

Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金阻尼性能及机理研究

孟德浩 邢力超 王非凡 马飞 袁文全

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

文 摘 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金已开始应用于航天结构产品,其材料阻尼性能直接关系到结构的动态特性及响应,采用DMA测试仪对其阻尼性能进行了测试并分析了其阻尼机理。结果表明:Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金阻尼性能随应变振幅增大而增大,其常温下符合G-L位错阻尼理论;合金阻尼性能随温度升高而增加,在测试的1~80 Hz范围内,频率越低则阻尼随温升的变化越敏感,温度对其阻尼性能的影响符合Schoeck理论。

关键词 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金, 阻尼性能, 阻尼机理

中图分类号:TB30

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.013

Research on Damping Performance and Mechanism of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr Magnesium Alloy

MENG Dehao XING Lichao WANG Feifan MA Fei YUAN Wenquan

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract The Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy had been used in aerospace structural products, its internal damping performance was directly related to the dynamic characteristics and response of structures, the internal damping performance of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy was studied using DMA tester and the mechanism was analyzed. The results show that the damping of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy gradually increases with the increase of strain amplitude and the mechanism at temperature conforms to the G-L dislocation damping theory. The damping performance of alloy gradually increases with the increase of temperature. Within the tested frequency range of 1~80 Hz, the lower the frequency is, the more sensitive the damping is to the change of temperature, and the influence of temperature on damping performance conforms to the Schoeck theory.

Key words Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy, Damping performance, Damping mechanism

0 引言

由于发动机工作和气动噪声等的影响,航空航天结构面临严酷的振动和噪声环境^[1-2],其对结构的减振性能提出了迫切的需求。以Mg-6Gd-3Y-0.5Zr为代表的稀土耐热镁合金具有比强度高、比模量大、耐高温性能好和阻尼性能好等优点,虽然其已在航空航天等大型主承力结构上开始应用^[3-5],但目前主要是利用稀土耐热镁合金的耐热性能好、比强度高的优点等来进行减重设计,其阻尼性能研究较少,阻尼对结构减振方面的影响缺乏定量评价。材料阻尼性能是影响结构动态特性的重要参数之一,因此研究稀土镁合金的阻尼性能对结构的减振设计和动态特性优化具有重要的意义。

高强高阻尼合金是国内外研究的热点之一,材料的阻尼既和材料成分、组织等有关,又和外部使用环境(如应变和温度等)有关。RIEHMANN^[6]研究了纯镁和高纯镁的阻尼性能,发现杂质含量、退火处理的时间和温度及应变振幅等都对阻尼性能有影响。田铁^[7]发现合金元素的含量影响了基体镁中位错源的数量和分布,从而影响了阻尼性能。ZHANG^[8]研究了纯镁阻尼性能,发现纯镁阻尼随应变振幅增加而快速增加,符合G-L位错阻尼理论。田铁^[9]研究了AZ91D等合金在大应变振幅下的阻尼变化,阐释了在循环剪应力作用下,位错的滑移增殖运动会导致阻尼的加速增长。LEVINSON等^[10]发现当温度超过130℃后,MgLi₈Al合金阻尼随温度上升开始不断升高。目前关于Mg-Gd-

收稿日期:2023-01-20

第一作者简介:孟德浩,1986年出生,高级工程师,主要从事结构设计、材料应用研究工作。E-mail:dh_meng0015@163.com

Y-Zr系合金组织、力学性能研究较多,而对其阻尼性能研究较少,且多是进行了材料阻尼的测试,缺乏系统的机理分析^[11-12]。当材料成分确定后,开展材料阻尼性能随外部环境的影响研究对于工程上获取一手的阻尼性能很有必要^[13]。

材料的内部阻尼是由材料内部各种物理机制引起的,不同材料的物理机制可能不同,但本质上都是将外部的机械能转化为热能释放出去。自从20世纪中叶以来,镁及镁合金的内部阻尼机理是研究的热点之一,镁及镁合金常温下主要涉及的阻尼类型有位错型阻尼、孪晶型阻尼等^[14]。位错型阻尼理论认为镁合金材料中位错的运动引起了能量的消耗从而产生了内部阻尼。GRANATO和LÜCKE^[15-16]完善了前人关于位错阻尼的理论,提出了位错钉扎和脱钉模型,简称为G-L位错理论,关于纯镁及镁合金的大量研究表明,镁合金室温下的阻尼符合G-L位错钉扎脱钉理论^[17-20]。孪晶型属于界面型阻尼,是孪晶界面在外载荷作用下运动引起的能量消耗。采用机械变形在镁合金中引入大量孪晶^[21-22],通过孪晶界的运动消耗能量也可以增大镁合金的阻尼性能。当超过一定的温度后,镁合金阻尼会随温度的增加而快速增加^[10]。关于高温下的镁合金的阻尼机理,一部分学者认为是晶界的黏滞性滑动引起的^[23-24];也有部分学者认为是位错和缺陷的交互作用引起的,Schoeck按此种假设给出了激活能与阻尼的关系式^[25]。

本文首先介绍了阻尼测试方法,然后选取航天用大型Mg-6Gd-3Y-0.5Zr结构件,从其本体上切取了测试试样,采用DMA测试仪研究其阻尼性能随应变振幅、温度和频率的变化规律,并对其室温和高温下的机理进行研究,该研究对于稀土镁合金的机理研究及其在航天结构上的应用具有一定的指导意义。

1 镁合金阻尼测试

镁合金阻尼测试一般采用共振棒法中的单悬臂法^[26],测量仪器一般采用DMA动态热机械分析仪,其原理为通过强迫运动来测试试样的应力应变相位差以计算阻尼。本实验采用DMA-Q800型动态热机械分析仪^[27],采用单悬臂梁进行夹持,夹持方式如图1所示。

从Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金铸件(铸造方式为

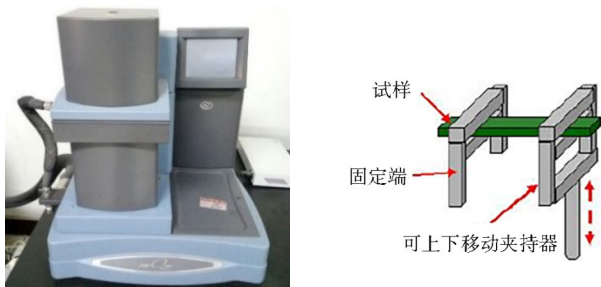


图1 DMA-Q800测试仪及夹持方式

Fig. 1 DMA-Q800 analyzer and its internal clamping structure

差压砂型铸造)上切取试块制作试样,每种试样有若干件;另外选取铸造纯镁作为对比材料进行研究,试样尺寸均为40 mm×10 mm×1 mm。

2 结果与分析

2.1 应变振幅对合金阻尼性能影响及机理

采用DMA测试了室温下Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金阻尼随应变振幅的变化,并采用纯镁作为对比试样进行了研究。测试频率为1 Hz,最小应变振幅 4×10^{-6} ,最大应变振幅 2.2×10^{-3} ,测试结果见图2。

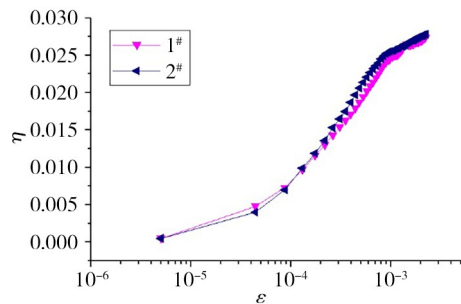


图2 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金阻尼随应变振幅变化曲线
Fig. 2 The Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy damping variation curve with strain amplitude

由图2可以看出,两个试样的重复性较好,阻尼随应变振幅的增加而不断升高,当超过一定应变振幅后,阻尼随应变振幅变化曲线的斜率不断增大,此过程对应位错弦挣脱弱钉扎点而在强钉扎点间运动的过程,当应变振幅超过 1.3×10^{-3} 后,阻尼随应变振幅变化曲线的斜率有明显的降低,原因是位错的纠缠等导致的,测试结果表明Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金室温下的阻尼性能与G-L位错理论吻合得较好。

图3为铸造纯镁阻尼随应变振幅的变化曲线,可知当应变振幅小于 1.5×10^{-5} 时,纯镁的阻尼基本保持不变,根据G-L理论,此阶段为应变无关阻尼,主要跟测试频率有关。当应变振幅超过 1.5×10^{-5} 后,纯镁的阻尼开始快速上升。

根据G-L理论,阻尼由应变无关阻尼 η_i 和应变相关阻尼 η_{ii} 两部分组成^[28],分别表示如下^[14]:

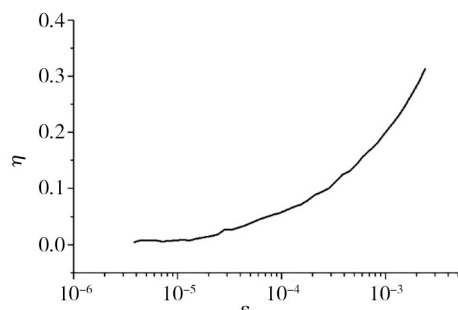


图3 铸造纯镁阻尼随应变振幅的变化曲线

Fig. 3 The pure magnesium cast damping variation curve with strain amplitude

$$\eta_T \sim \Delta L_c^4 \quad (1)$$

$$\eta_H = \left(C_1 / \varepsilon \right) e^{(-C_2 / \varepsilon)} \quad (2)$$

$$C_1 = (\Delta F_B L_N^3) / (6bEL_c^2), C_2 = F_B / (bEL_c) \quad (3)$$

式中, ω 表示角频率, Δ 表示可动位错密度, L_c 表示弱钉扎点间的平均位错长度, L_N 表示强钉扎点间的平均位错长度, ε 表示应变幅, F_B 表示位错与溶质原子间的结合力, b 表示位错的柏氏矢量, E 表示弹性模量。

从式(1)中可知, L_c 的改变将显著的影响应变无关阻尼 η_I 。式(2)可写为如下形式:

$$\ln(\varepsilon \eta_H) = -\frac{C_2}{\varepsilon} + \ln C_1 \quad (4)$$

如果 $\ln(\varepsilon \eta_H)$ 和 $1/\varepsilon$ 呈线性关系, 说明此合金的应变相关阻尼符合 G-L 理论。

Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金的 G-L 图如图 4 所示, 可知 $\ln(\varepsilon \eta_H)$ 和 $1/\varepsilon$ 的线性关系良好, 进一步说明了 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金室温下的阻尼机理符合 G-L 位错钉扎脱钉理论。

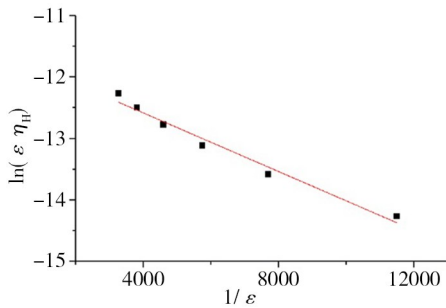


图4 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金的 G-L 图

Fig. 4 G-L diagram of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy

图 5 显示了 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金和纯镁随应变幅变化的对比图, 可以在所测试的应变幅范围内, 纯镁的阻尼性能都高于 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金, 随应变幅的增加, 两者阻尼的差距越来越大。对于位错型阻尼, 由于稀土等元素的加入, Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金存在的固溶原子和时效析出相会使 L_c 和 L_N 降低, 根据式(1)和式(2)可知, 合金的应变无关阻尼和应变相关阻尼都会显著降低。

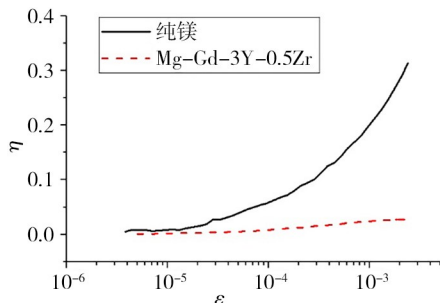


图5 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金与铸造纯镁阻尼-应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of damping-strain curve between Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy and pure magnesium cast

2.2 温度对合金阻尼性能影响及机理

测试了 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金的阻尼温度谱, 温度范围为 30 ~ 330 °C, 测试频率为 1 Hz, 应变振幅大小为 8.7×10^{-4} , 结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 随着测试温度的升高, 阻尼的性能不断上升。在不同的温度区间, 曲线上升的斜率也有所不同, 整体上温度越高, 曲线的斜率越大, 说明高温对 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金阻尼的影响很显著。随着温度升高, 原子运动不断加剧, 合金中的可动位错密度和有效位错长度增加, 且高温下 β' 析出相的长大也会减弱对位错的阻碍作用^[29], 上述的综合影响导致阻尼随温度的增加而快速增加。

对于纯镁及镁合金的研究显示, 升温过程中, 纯镁及镁合金会出现一些阻尼峰, 主要是晶界的黏滞性滑动引起的, 但当合金中的溶质原子较多或晶界处存在偏析时, 该晶界阻尼峰变得不明显或消失。在测试的温度区间内, Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金未出现明显的阻尼峰, 只有其中两根试样在 275~290 °C 之间出现了一个小的平台, 可能的原因为 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金晶界附近存在 Gd、Y 固溶原子及时效析出相, 这导致晶界阻尼峰不明显, 另外, 较大的应变振幅下, 合金中快速增长的位错阻尼也可能掩盖晶界阻尼的影响。

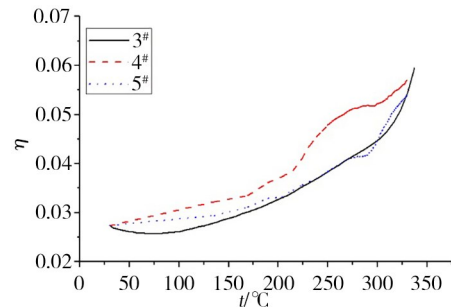


图6 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金阻尼-温度谱

Fig. 6 Damping-temperature spectrum of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy

为了研究 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金高温下的阻尼机理, 保持测试温度不变, 又进行了 10、20 和 80 Hz 下的合金阻尼温度谱, 测试结果如图 7 所示。由图可知, 不同测试频率下合金的阻尼都随温度的升高而升高, 且超过 135 °C 后, 阻尼的增长更为迅速。另外, 测试频率越高, 合金阻尼性能随温度增长得越慢, 这个趋势与黏弹性弛豫理论的预测一致。

根据 Schoeck 理论^[25], 阻尼和激活能的关系式的对数形式为:

$$\ln(\eta_T - \eta_{am}) = (\ln K - nU/kT) - n \ln \omega \quad (5)$$

式中, η_T 表示某一绝对温度 T 下的阻尼, η_{am} 表示室温下的阻尼, k 表示玻尔兹曼常数, 其值取 1.38×10^{-23}

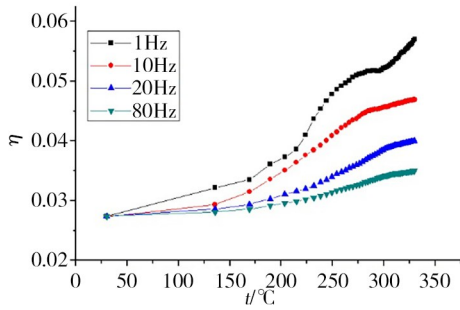


图7 不同频率下的合金阻尼温度谱

Fig. 7 Damping-temperature spectrum of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy with different frequencies

J/K, U 表示激活能, K 和 n 为无量纲常数。

若合金的 $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ 与 $\ln \omega$ 及 $1/T$ 的线性关系良好,则可以判断合金高温下的阻尼变化符合Schoeck理论,且可以通过曲线求解激活能 U 。

将Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金的测试数据带入式(5),得到了 $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ 与 $\ln \omega$ 及 $1/T$ 的关系曲线,分别见图8和图9,可知 $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ 与 $\ln \omega$ 及 $1/T$ 的线性关系都比较好,说明高温下合金阻尼性能变化符合Schoeck理论,通过计算可知,169~279 °C之间的 n 值为0.36,激活能 $U=0.77$ eV。Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金阻尼随温度快速上升相关的激活能相比Mg-9.5Li-0.5Zn合金的0.59 eV要高^[30],原因是Li原子半径小,高温下Li原子在镁合金中的扩散相比Gd、Y更为容易。

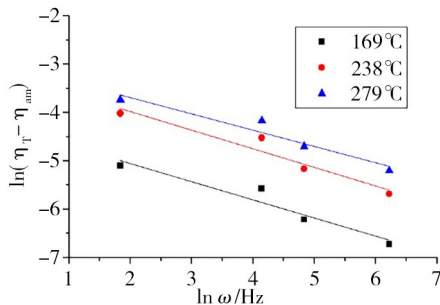


图8 $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ 与 $\ln \omega$ 的关系曲线

Fig. 8 Relation curves of $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ and $\ln \omega$

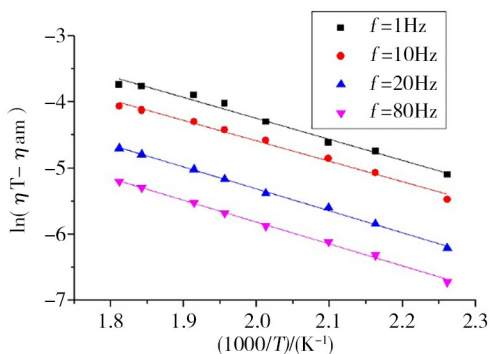


图9 $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ 与 $1/T$ 的关系曲线

Fig. 9 Relation curves of $\ln(\eta_T - \eta_{am})$ and $1/T$

3 结论

(1)合金化后的Mg-6Gd-3Y-0.5Zr阻尼性能相比纯镁大幅降低。

(2)超过一定应变振幅后,Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金阻尼随应变振幅的增大而逐渐增大,其常温下的阻尼机理符合G-L位错理论。

(3)在测试的室温~330 °C范围内,Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金阻尼随温度增加而升高,在1~80 Hz频率范围内,频率越高则阻尼随温升的变化越小,其阻尼机理符合Schoeck理论。

(4)对于有高温承载需求的稀土镁合金结构件,高温及大应变状态更易发挥合金的阻尼减振性能。

参考文献

- [1] 潘忠文,廉永正,曾耀祥,等. 运载火箭振动环境试验条件解析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(6):29-32.
- [2] PAN Z W, LIAN Y Z, ZENG Y X, et al. Elucidation of vibration environmental test conditions for launch vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(6):29-32.
- [3] 王晓雷, 南宫自军, 龙梁, 等. 惯组飞行角振动环境测量与环境条件设计[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(1):37-40.
- [4] WANG X L, NANGONG Z J, LONG L, et al. Measure of IMU'S angular vibration environment during a rocket flight and design of test condition [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(1):37-40.
- [5] MENG D H, ZHOU B, WU D, et al. Parameter optimization of gas tungsten-arc repair welding technique in Mg-6Gd-3Y-0.5 Zr alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(2):345-353.
- [6] 孟德浩, 李培杰, 肖旅. 大型Mg-Gd-Y铸件成分、热处理优化和性能评价[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(2):38-43.
- [7] MENG D H, LI P J, XIAO L. Composition and heat treatment optimization and performance evaluation of large Mg-Gd-Y castings [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(2):38-43.
- [8] 丁文江, 付彭怀, 彭立明, 等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2):103-109.
- [9] DING W J, FU P H, PENG L M, et al. Advanced magnesium alloys and their applications in aerospace [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(2):103-109.
- [10] RIEHEMANN W, ABED EL-AL F. Influence of ageing on the internal friction of magnesium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 310(1):127-130.
- [11] 田铁. 镁合金阻尼特性的实验研究[D]. 重庆: 重庆工学院, 2008.
- [12] TIAN T. Experimental Study of Magnesium Alloy Damping Capacities [D]. Chongqing: Chongqing Institute of Automobile, 2008.
- [13] ZHANG X N. Effect of reinforcements on damping [J]. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第1期

capacity of pure magnesium [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2003, 22(7):503-505.

[9] 田铁. 镁合金位错阻尼减振机理及其在内燃机零部件中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

TIAN T. Research on Dislocation Damping Mechanism of Magnesium Alloys and Application for Internal Combustion Engine Parts[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[10] LEVINSON D W, MCPHERSON D J. Phase relations in magnesium-lithium-aluminum alloys [J]. *Transactions of the ASM*, 1956, 48:689-705.

[11] FU P H, PAN H, GAO F, et al. Damping capacity of several high strength magnesium alloys [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2013, 33(7):593-596.

[12] GAO F, FU P, LI Y, et al. Tensile properties and damping capacity of cast Mg-Gd-Y-Al alloys [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2014, 34(4):440-444.

[13] 方前锋, 朱震刚, 葛庭燧. 高阻尼材料的阻尼机理及性能评估[J]. *物理*, 2000, 29(9):541-545.

FANG Q F, ZHU Z G, GE T S. Characterization and mechanism of high damping materials [J]. *Physics*, 2000, 29(9):541-545.

[14] 孟德浩. 铸造 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金组织性能及结构动态特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.

MENG D H. Research on Microstructure Properties and Dynamic Characteristics of Cast Mg-6Gd-3Y-0.5Zr Alloy [D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.

[15] GRANATO A, LÜCKE K. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(7):789-805.

[16] GRANATO A, LÜCKE K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(6):583-593.

[17] SUGIMOTO K, NIIYA K, OKAMOTO T, et al. A study of damping capacity in magnesium alloys [J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1977, 18(3):277-288.

[18] SUGIMOTO K, MATSUI K, OKAMOTO T, et al. Effect of crystal orientation on amplitude-dependent damping in magnesium [J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1975, 16(10):647-655.

[19] 范国栋. 纯镁和镁合金的阻尼及微塑变行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

FAN G D. Research on Damping and Microplastic Behavior of Pure Mg and Mg Alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[20] WANG J, LU R, QIN D, et al. A study of the ultrahigh

damping capacities in Mg-Mn alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 560:667-671.

[21] CUI Y, LI Y, SUN S, et al. Enhanced damping capacity of magnesium alloys by tensile twin boundaries [J]. *Scripta Materialia*, 2015, 101:8-11.

[22] SOMEKAWA H, WATANABE H, BASHA D A, et al. Effect of twin boundary segregation on damping properties in magnesium alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 129:35-38.

[23] 陶艳玲. 镁合金阻尼减振性能及机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.

TAO Y L. Study on Damping Performance and Mechanism of Magnesium Alloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[24] KÊ T S. Experimental evidence of the viscous behavior of grain boundaries in metals [J]. *Physical Review*, 1947, 71(8):533-546.

[25] SCHOECK G, BISOGNI E, SHYNE J. The activation energy of high temperature internal friction [J]. *Acta Metallurgica*, 1964, 12(12):1466-1468.

[26] 李沛勇, 戴圣龙. 材料阻尼及阻尼合金的研究现状 [J]. *材料工程*, 1999, 27(8):44-48.

LI P Y, DAI S L. Status of research on material damping and damping alloys [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1999, 27(8):44-48.

[27] 孟德浩, 李培杰, 徐文涛, 等. Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金和 ZL114A 铝合金阻尼性能研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(6):98-102.

MENG D H, LI P J, XU W T, et al. Damping performance of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy and ZL114A aluminum alloy [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(6):98-102.

[28] 鲁若鹏. Mg-Zn-Y 合金中 LPSO 相的调控及其对阻尼和力学性能的影响机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

LU R P. Microstructure Evolution of LPSO Phase and the Corresponding Damping Capacities and Mechanical Properties in Mg-Zn-Y Alloys [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[29] LIU W, ZHOU B, WU G, et al. High temperature mechanical behavior of low-pressure sand-cast Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(4):597-604.

[30] WU S K, CHANG S H, CHOU T Y, et al. Low-frequency damping properties of dual-phase Mg-xLi-0.5Zn alloys [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2008, 465(1/2):210-215.