文章编号：1004-0609(2009)01-0044-06

AZ91D 和 A380 合金模态参数识别和激励响应测试

张　力[1]，赵振奇[1]，张丁非[2]，汪先国[3]，黄新华[1]

(1. 重庆大学 机械工程学院，重庆 400030；
2. 重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心，重庆 400030；
3. 重庆建设摩托车股份有限公司，重庆 400050)

摘　要：采用多参考最小二乘复频法对具有相同结构的AZ91D镁合金试件和A380铝合金试件进行模态参数识别。在同等激励脉冲输入条件下进行2种材料时域激励响应特征的多特征点对比测试，比较AZ91D镁合金替换A380铝合金前后试件结构动力学性能的差异，通过整体频响函数和激励响应特性对 AZ91D 镁合金阻尼减振的工程实际效果进行评价。结果表明：在几何结构相同的情况下，2 种材料的固有频率和固有振型模态参数相似，AZ91D镁合金试件具有更好的模态阻尼比。但由于镁合金材料刚性较低，仅通过直接的材料替换，镁合金材料的高阻尼减振性难以在实际工程中得到有效表现。

关键词：镁合金；阻尼特性；模态分析；振动响应
中图分类号：TG 146　　**文献标识码**：A

Modal parameter identification and vibration response testing of AZ91D and A380 alloys

ZHANG Li[1], ZHAO Zhen-qi[1], ZHANG Ding-fei[2], WANG Xian-guo[3], HUANG Xin-hua[1]

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
3. Chongqing Jianshe Motorcycle Co. Ltd., Chongqing 400050, China)

Abstract: The modal parameter identification was contrastively carried out to test the components of AZ91D magnesium alloy and A380 aluminum alloy with the same structure. The structural dynamics properties of the test pieces were researched by modal parameter identification based on the LMS PolyMax method, and the vibration damping capacity of AZ91D magnesium alloy was evaluated by frequency response function and further investigated by vibration response testing at several characteristic points on the test pieces. The results show that the two kind materials with the same geometry structure have the similar natural frequency and principle mode, and the test pieces of AZ91D Mg alloy have higher modal damping ratios. However, the outstanding vibration damping capacity of magnesium alloys can not be exhibited only by material replacement rather than structural redesign because of the lower stiffness of magnesium alloys.
Key words: magnesium alloy; damping capacity; modal analysis; vibration response

镁合金是大量使用的工程结构材料中密度最低的，其比强度明显比铝合金和钢的高，比刚度与铝合金和钢的相当[1−4]。镁合金具有良好的阻尼减振性，其高阻尼减振性明显比其他结构材料的高[5−8]，在抑制机械振动和削弱波的传播以达到控制噪声和稳定结构方面具有潜在应用价值[8−10]。同时，镁合金还具有良好

基金项目：国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613700)；国防基础科研资助项目(C1020060350)；重庆市自然科学基金资助项目(2005BB4166)
收稿日期：2008-04-14；**修订日期**：2008-10-21
通讯作者：张　力，教授，博士；电话：023-65103556；E-mail: zhangli20@cqu.edu.com

的切削加工性、铸造成型性及尺寸稳定性，且其易回收利用，导热性优良，抗电磁干扰及屏蔽性等特点，被认为是最具有应用开发前景的商用轻质材料，在航空、汽车和电子工业的应用日益广泛[11−15]。为研究 AZ91D 镁合金替换 A380 铝合金后结构动力学性能的差异，评价其阻尼减振的工程实际效果，对具有相同结构的 AZ91D 镁合金试件和 A380 铝合金试件进行了模态参数的识别和激励响应特性的对比测试。

1　模态分析及测试系统

工程领域弹性结构可以离散化为有限个质量、弹性和阻尼元件组成的 n 自由度线性振动系统，其动力学微分方程为

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{x}}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{x}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{f}(t)\} \tag{1}$$

式中　$\{\ddot{\boldsymbol{x}}\}$ 为加速度向量；$\{\dot{\boldsymbol{x}}\}$ 为速度向量；$\{\boldsymbol{x}\}$ 为位移向量(或响应向量)；$[\boldsymbol{M}]$ 为质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 为阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$为刚度矩阵。对方程进行傅氏变换，经整理得

$$\{\boldsymbol{X}(\omega)\}=[\boldsymbol{H}(\omega)]\{\boldsymbol{F}(\omega)\} \tag{2}$$

式中　$\{\boldsymbol{X}(\omega)\}$和$\{\boldsymbol{F}(\omega)\}$分别为响应用激励的傅氏变换的向量和激励向量；$[\boldsymbol{H}(\omega)]$为系统频响函数矩阵。频响函数(Frequency response function, FRF)反映振动系统输入与输出间的关系，是频域中识别模态参数的依据[16]。

采用激振实验方法，对一个自由度为 n 的比例阻尼系统的第 p 个自由度进行激励，而在第 r 自由度上测量响应，从而得到频率响应函数 $\boldsymbol{H}_{rp}(\omega)$。当 r、p 遍历 1、2、…、n 时，共可得到 $\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{n}$ 个频率响应函数，形成 $\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{n}$ 阶频响函数矩阵。频响函数与模态参数之间存在如下关系：

$$\boldsymbol{H}_{rp}(\omega)=\sum_{s=1}^{n}\frac{\boldsymbol{u}_r^{(s)}\boldsymbol{u}_p^{(s)}}{\boldsymbol{K}_s-\omega^2\boldsymbol{M}_s+i\boldsymbol{C}_s\omega} \tag{3}$$

式中　r、p 为 1、2、…、n；$\boldsymbol{u}_r^{(s)}$和$\boldsymbol{u}_p^{(s)}$分别为第 s 阶主模态向量中第 r 行和第 p 行的元素，称为 r 点和 p 点的主振型向量；$\boldsymbol{K}_s$、$\boldsymbol{M}_s$和 $\boldsymbol{C}_s$ 分别为第 s 阶模态刚度、模态质量和模态阻尼。实验模态分析通过测试试件的频率响应函数来获取模态参数。

AZ91D 镁合金和 A380 铝合金试件的对比实验模态分析，选用 LMS 公司的 LMS Virtual.Lab 软件的 Modal Impact 模块。信号读入和处理设备选用 LMS 的信号调理和数据采集器。激励力锤选用 PCB 公司生产的带有压电式力传感器的力锤(型号 356A15)，敏感度为 2.03 mV/g，模态激振器为 PCB 公司生产的 2100E11；振动传感器选用美国 PCB 公司生产的加速度传感器，型号为 086C03，敏感度为 2.03 mV/g(见图 1)。图 1 所示为实验模态分析系统及测试零件。由图 1 可看出，对比实验模态分析试件选用 AZ91D 镁合金曲轴箱盖和 A380 铝合金曲轴箱盖，2 种材料曲轴箱盖的几何结构相同。

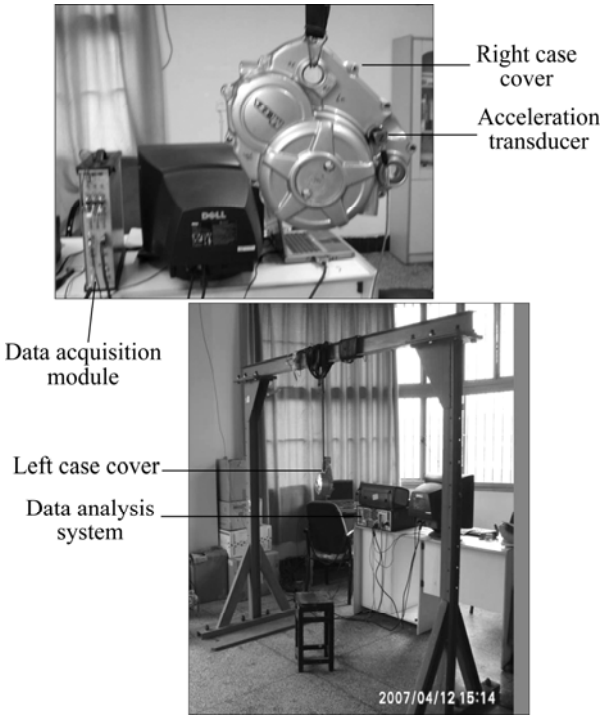

图 1　实验模态分析系统及测试零件

Fig.1　Modal analysis test rig and test-pieces

为减少传感器及其附件对测试试件所产生的附加质量，采用单点拾振，逐点敲击方法来进行模态测试。对左箱盖和右箱盖，实验分别采用 38 和 42 个测点，以反映试件的主体轮廓。在测试过程中，使用锤击实现脉冲激振，设定频率带宽 4 kHz，分辨率为 1 Hz。图 2 所示为 AZ91D 左箱盖试件第 4 点测量的激励脉冲信号、激励响应信号和相干函数曲线。

2　模态参数的识别与分析

模态参数的识别采用 LMS 的多参考最小二乘复频域法(PolyMax 法)，该方法以频响函数测量数据为基础，既适用于弱阻尼，也适用于强阻尼和密集模态系统的参数识别，特别是在强阻尼和密集模态情况下，仍可获得相当清晰的稳态图，容易实现物理模态定阶，

即使是未得到充分激励的模态，也能良好地对参数进行识别。在模态识别参数的基础上，采用频响函数(FRF)综合和模态置信准则(Modal assurance criterion, MAC)来对模态参数识别的质量进行评估。图 3 所示为选取左曲轴箱盖第 38 测点进行频响函数综合模态模型的验证结果。由图 3 可看出，从识别的模态模型拟合重构的频响函数与实测的频响函数在模值和幅角两方面都体现较好的一致性。

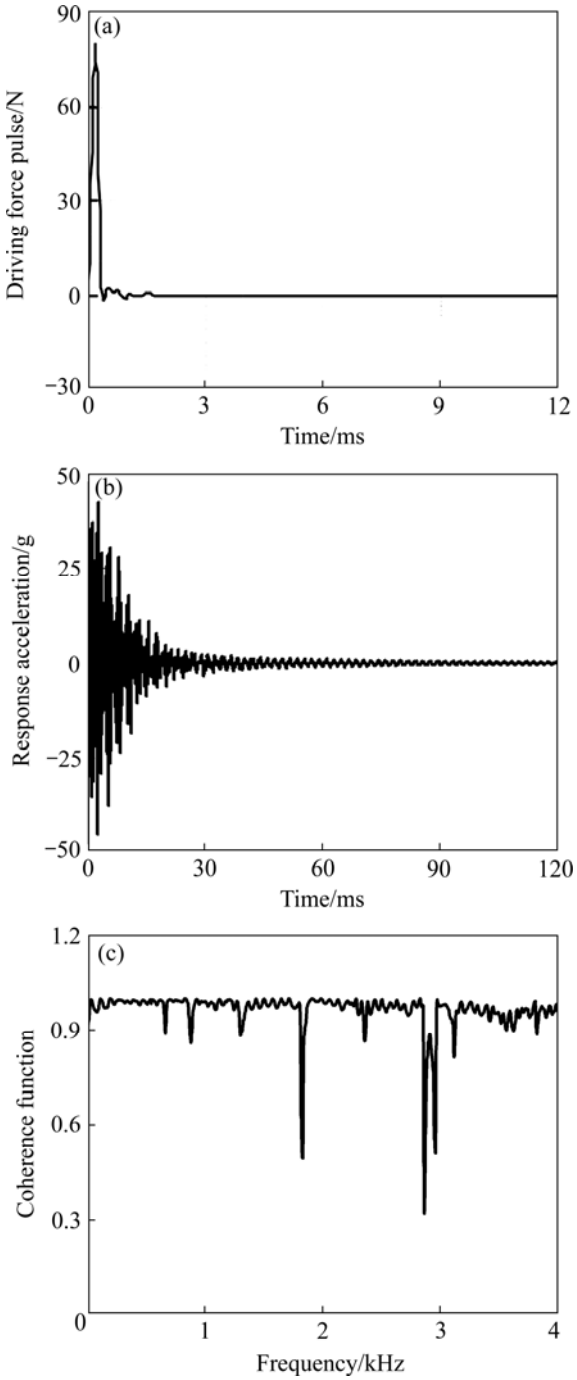

图 2 AZ91D 合金左箱盖第 4 点的激励、响应和相干函数曲线

Fig.2 Actuating signal(a), response signal(b) and coherence function(c) at 4th measure point of left crankcase cover of AZ91D alloy

综合所有测试点的频响函数，可以得到试件的稳态图，并通过 MAC 置信准则评判所选频率的正确性。从稳态图中可获取频率、振型、阻尼比等参数，其中 AZ91D 左箱盖试件和 A380 左箱盖试件的整体频响函数曲线的比较如图 4 所示。图 5 所示为 AZ91D 试件实验模态参数识别得到的前四阶固有振型。在设定的频率带宽范围内，AZ91D 试件和 A380 试件分别存在 11 阶模态(见表 1)。由表 1 可看出，AZ91D 试件和 A380 试件的各阶固有频率接近，2 种材料试件的同阶固有频率之比(Natural frequency ratio)接近于 1。比较 AZ91D 试件和 A380 试件的固有振型，两者各阶固有振型表现出相似的变形特征。两者固有特性近似的现象与 AZ91D 材料和 A380 材料属性参数之间的内在关系相关，2 种材料的弹性模量与质量密度的比值比较接近。

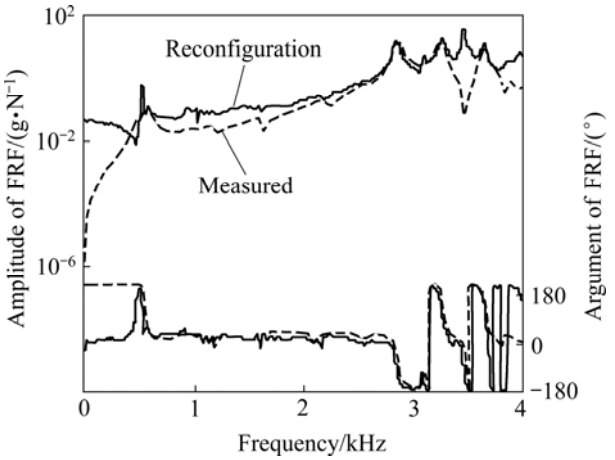

图 3 AZ91D 合金左箱盖试件模态模型的验证

Fig.3 Validation of mode model for left crankcase cover of AZ91D alloy

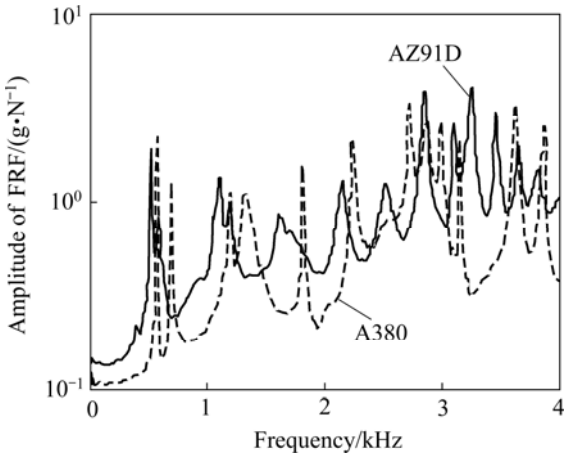

图 4 AZ91D 和 A380 合金试件整体频响函数曲线

Fig.4 Frequency response function curves of AZ91D and A380 crankcase covers

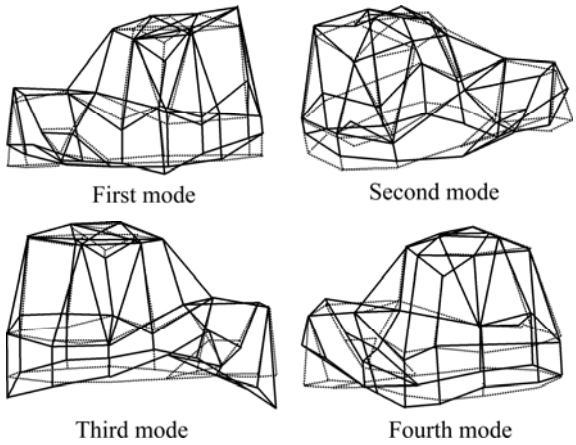

图 5　AZ91D 合金左箱盖试件前四阶固有振型模型

Fig.5　Model of left crankcase cover of AZ91D alloy

表 1　AZ91D 和 A380 箱盖试件的模态参数

Table 1　Modal parameters of AZ91D and A380 crankcase covers

Order	AZ91D		A380		Ratio of natural frequency
	Frequency/Hz	Damping ratio/%	Frequency/Hz	Damping ratio/%	
1	524	0.60	560	0.28	0.936
2	592	1.52	688	0.46	0.860
3	1110	1.39	1186	0.66	0.936
4	1727	0.95	1802	0.28	0.958
5	2132	0.84	2238	0.30	0.953
6	2535	1.15	2712	0.26	0.935
7	2843	0.56	2857	0.38	0.995
8	3097	0.33	2973	0.18	1.042
9	3250	0.39	3135	0.11	1.037
10	3638	0.34	3618	0.25	1.006
11	3814	0.61	3851	0.21	0.990

从表 1 可看出，AZ91D 试件的模态阻尼比只有在极个别情况下比 A380 试件的低，其余各阶阻尼比都明显高于 A380 试件的模态阻尼比。但 AZ91D 镁合金高阻尼特性在的试件整体频响函数曲线上却难以体现(见图 4)。由图 4 可看出，在设定的频率范围内，AZ91D 试件的整体频响函数曲线幅值在总体上反而高于 A380 试件的整体频响函数曲线幅值。

3　激励响应特性的测试

频响函数表征结构输入和输出间的关系在频域中的表达，结构系统的整体频响函数体现了各测点频响函数的线性组合，据试件整体频响函数的完整信息可完全确定结构的动态特性。对于几何结构相同的 AZ91D 试件和 A380 试件，当 AZ91D 试件的整体频响函数曲线幅值高于 A380 试件的整体频响函数曲线幅值时，表明在同等激励下，AZ91D 试件结构的表面振动和激发噪声的能量较 A380 试件的更大。在此情况下，AZ91D 材料的高阻尼特性对实际结构的减振降噪的作用难以体现(见图 4)。

在第 p 自由度进行激励，而在第 r 自由度上测量响应时，频响函数的形式可在式(3)的基础上进一步整理为

$$\boldsymbol{H}_{rp}(\omega)=\sum_{s=1}^{n}\frac{1}{\boldsymbol{K}_{es}[(1-\overline{\omega}_s^2)+2i\xi_s\overline{\omega}_s]} \tag{4}$$

式中　ω_s 为第 s 阶模态的频率比；ξ_s 为第 s 阶模态的阻尼比；$\boldsymbol{K}_{es}$ 为第 s 阶模态的等效刚度，它与响应测点 r 和激励点 p 位置有关，表征响应测点 r 和激励点 p 间结构的等效刚度。因此，在 2 种材料试件固有特性接近的情况下，频响函数不仅与表征阻尼特性的模态阻尼比 ξ_s 相关，且受到表征结构刚度的模态等效刚度 $\boldsymbol{K}_{es}$ 的影响。由此可见，除材料的阻尼特性之外，结构刚度也是影响结构减振降噪效果的重要因素。

为深入分析结构刚度对减振降噪效果的影响，在同等激励脉冲输入条件下，进行了 AZ91D 和 A380 这 2 种试件的时域激励响应特性的对比测试。图 6 所示为通过实验测试得到的 AZ91D 和 A380 这 2 种材料右箱盖试件在第 22、第 32 和第 35 测点位置的时域激励响应曲线。由图 6 可看出，在具有结构特征代表性的第 22、第 32 和第 35 测点位置，AZ91D 试件对激励脉冲响应的振幅衰减效果都要明显比 A380 试件的好，反映了 AZ91D 材料具有更高的阻尼性能。但在同等激励作用下，AZ91D 试件初始阶段的时域响应幅值却明显比 A380 试件的的高。

对于结构相同的 2 种材料试件，响应测点和激励点间的等效刚度主要取决于各自材料的弹性模量。由于 AZ91D 材料的弹性模量远比 A380 材料的小，在相

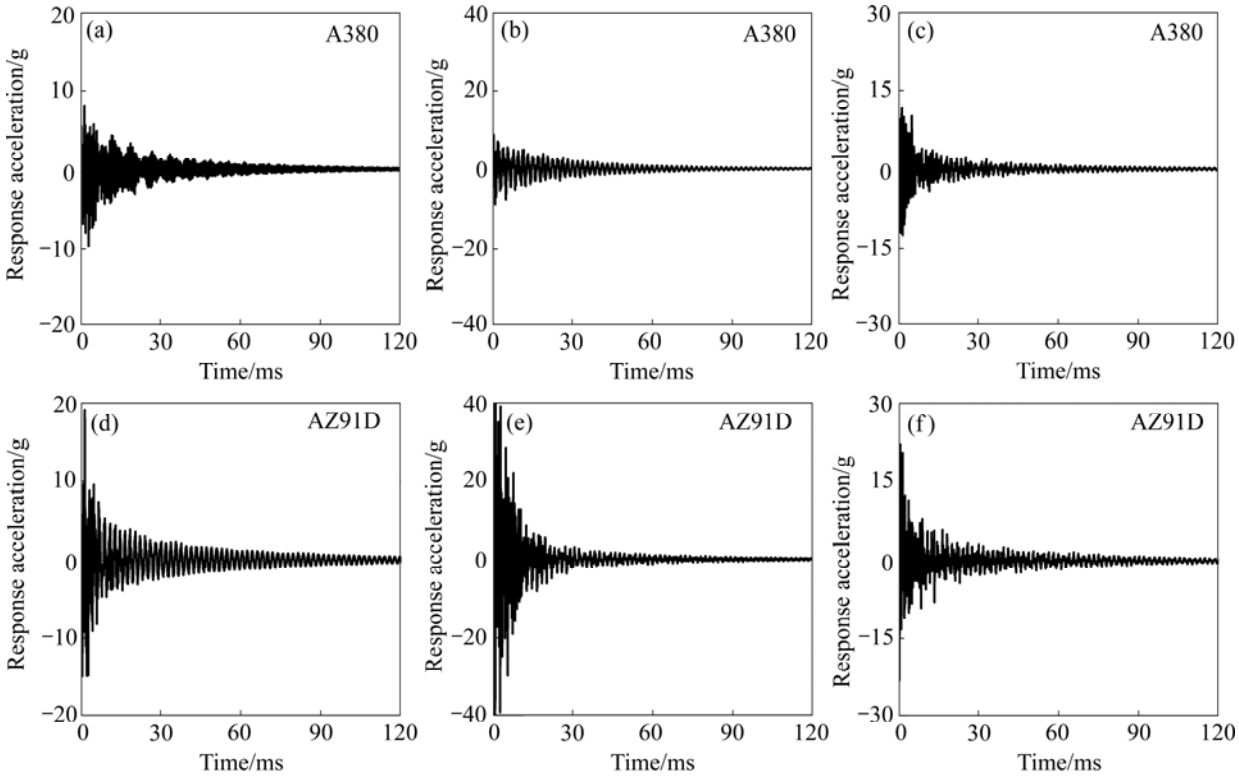

图 6 A380 和 AZ91D 合金右箱盖试件的激励响应特性

Fig.6 Vibration response characteristics of right crankcase covers of A380 and AZ91D alloys: (a) A380, at 22nd measure point; (b) A380, at 32nd measure point; (c) A380, at 35th measure point; (d) AZ91D, at 22nd measure point; (e) AZ91D, at 32nd measure point; (f) AZ91D, at 35th measure point

同结构条件下，AZ91D 试件的整体刚度明显比 A380 试件的低。在外界同等激励作用下，AZ91D 材料所具有的较低结构刚度特征，使 AZ91D 试件对外界激励响应的幅值较 A380 试件的更大，在一定程度上抵消了 AZ91D 材料所具有的高阻尼特性的优点，从而导致 AZ91D 材料的高阻尼性能难以在实际结构的减振降噪方面无法得到有效体现。因此，采用 AZ91D 镁合金替换 A380 铝合金后，采取相应措施强化原有结构的整体刚度具有重要意义。

4 结论

1) 在相同结构条件下，AZ91D 材料和 A380 材料的固有频率和固有振型等动力学固有特性相似，这种特征为在较大工程范围内进行镁合金材料和铝合金材料的直接替换提供了便利。

2) 在同等激励力的作用下，AZ91D 试件对振动信号的振幅衰减效果要明显比 A380 试件的好。然而，AZ91D 试件刚度明显比相同结构的 A380 试件的低，其初始时域响应幅值远远比 A380 试件的高，从而使 AZ91D 试件整体的频响函数曲线幅值反而要比 A380 试件的略高。因此，AZ91D 材料替换 A380 材料后，对原有结构刚度的强化具有重要作用。

REFERENCES

[1] CLOW B B. Magnesium industry review[J]. Advanced Materials & Processes, 1996, 150(4): 2.

[2] LAMBRI O A, RIEHEMANN W, TROJANOVA Z. Mechanical spectroscopy of commercial AZ91 magnesium alloy[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(12): 1365−1371.

[3] JEAL N. High-performance magnesium[J]. Advanced Materials and Processes, 2005, 163(9): 163−167.

[4] WOLF B, FLECK C, EIFLER D. Characterization of the fatigue behaviour of the magnesium alloy AZ91D by means of mechanical hysteresis and temperature measurements[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(12): 1357−1363.

[5] ZHANG X N. Effect of reinforcements on damping capacity of pure magnesium[J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22(7): 503−505.

[6] NISHIYAMA N, ASANO S. Evaluation of amplitude dependence of internal friction in high-damping metals[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2001, 65(2): 109−114.

[7] GOKEN J, RIEHEMANN W. Damping behavior of AZ91 magnesium alloy with cracks[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 370(1/2): 417−421.

[8] WAN D, WANG J, LIN L, FENG Z, YAN G. Damping properties of Mg-Ca binary alloys[J]. Physica B: Condensed Matter, 2008, 403(13/16): 2438−2442.

[9] 张　津, 陶艳玲, 孙智富, 付丽娟, 施　全. 镁合金 AZ91D 的阻尼减震性能[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 186−189.
ZHANG Jin, TAO Yan-ling, SUN Zhi-fu, FU Li-juan, SHI Quan. Vibration damping capacity of AZ91D magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 186−189.

[10] 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.

[11] PANTELAKIS S G, ALEXOPOULOS N D, CHAMOS A N. Mechanical performance evaluation of cast magnesium alloys for automotive and aeronautical applications[J]. J Eng Mater Technol, 2007, 129(3): 422−430.

[12] SONG G. Recent progress in corrosion and protection of magnesium alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(7): 563−586.

[13] BENEDYK J C. Magnesium advances in automotive applications[J]. Light Metal Age, 2005, 63(3): 36−38.

[14] POWELL B P. Magnesium alloys cast into auto powertrain components[J]. Advanced Materials and Processes, 2004, 162(8): 60−61.

[15] 曾荣昌, 柯　伟, 徐永波, 韩恩厚, 朱自勇. Mg 合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673−685.
ZENG Rong-chang, KE Wei, XU Yong-bo, HAN En-hou, ZHU Zi-yong. Recent development and application of Magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 673−685.

[16] 师汉民, 谌　刚, 吴　雅. 机械振动系统—分析、测试、建模与对策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1992: 293−305.
SHI Han-min, CHEN Gang, WU Ya. Mechanical vibration system—Analysis, measurement, modeling, control[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992: 293−305.

(编辑　李艳红)