

文章编号: 1004-0609(2003)05-1175-05

ZA27-4%Si 合金的阻尼性能及阻尼机理^①

张忠明^{1, 2}, 王锦程², 郭学锋¹, 刘宏昭¹, 杨根仓²

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 利用低频内耗测试技术研究了 ZA27-4% Si 合金的阻尼性能, 分析了合金的阻尼机理。结果表明: ZA27-4% Si 合金阻尼随频率增大而减小, 随温度升高而增大, 阻尼不随应变振幅的变化而变化; ZA27-4% Si 合金室温阻尼为 5.83×10^{-3} , 与 ZA27 合金阻尼相当; ZA27-4% Si 合金的阻尼是由合金内部的晶界和相界面滑动、位错振动以及各相的热膨胀系数和弹性模量间差造成的微塑性变形共同造成的。硅合金化的 ZA27 合金具有良好耐磨减摩性能和减振性能。

关键词: ZA27-4% Si 合金; 阻尼性能; 阻尼机理

中图分类号: TG 113

文献标识码: A

工业上用作滑动轴承的锌铝合金中, 通常加入 2%~5% (质量分数) Cu 以使合金获得需要的耐磨性能。研究表明^[1, 2]: 在提高锌铝合金的耐磨性方面, 硅比铜更加有效, 而且硅可以使这种合金长期时效过程中的尺寸稳定性得到很大改善。因此, 在实际使用中, Si 已经成为锌基合金中不可或缺的元素之一。

锌铝合金具有较高的阻尼性能, 这种特性对于轴承材料来说是很重要的。它使滑动轴承工作平稳、噪声低。庞绍平等研究了锌铝合金的阻尼性能^[3-6], 但对加入强化元素硅后阻尼性能变化的研究尚不够深入^[7]。作者在文献[7]的基础上, 进一步研究 ZA27 合金中加入质量分数为 4% Si 后 (以 ZA27-4% Si 表示), 合金阻尼行为和阻尼性能的变化规律及其内在原因。

1 实验

1.1 试样制备

在石墨坩埚电阻炉中用电解 Zn(99.99%)、Al-50Cu 中间合金、Al-33Si 中间合金、工业纯 Mg(99.95%) 和工业纯 Al(99.6%) 配制 ZA27 合金 (名义成分为 Zn-26% Al-1% Cu-0.01% Mg, 质量分数) 和 ZA27-4% Si 合金。然后出炉降温至 700 °C 后浇入金属型内制取试块。在试块上切取阻尼试样和金相试

样, 阻尼试样尺寸为 70 mm × 3 mm × 1 mm。

1.2 组织观察和阻尼性能测量

采用标准的金相方法打磨、抛光金相试样后用 Nital 溶液腐蚀, 用 Nueft-I 型光学显微镜观察组织。

合金的低频阻尼利用多功能内耗仪进行测试。阻尼大小用 Q^{-1} 表示。实验分别测试了 ZA27-4% Si 合金阻尼随温度 t 、应变振幅 A 和频率 f 的变化。频率 f 变化范围为 0.1~4.0 Hz, 测量温度范围为 20~150 °C。研究频率、温度对阻尼的影响时, 相对应变振幅 A 固定在 2×10^{-5} 。测试时升温速率为 3 °C/min。

2 实验结果

2.1 阻尼行为及阻尼性能

图 1 所示为在 20 °C, 1.0 Hz 条件下测试的合金阻尼性能随应变振幅的变化曲线。在应变振幅仅为 1.0×10^{-6} 时, 合金便有较高的阻尼, 为 4.89×10^{-3} 。随应变振幅增大, 阻尼提高。如当振幅为 3.0×10^{-6} 时, 阻尼提高到 5.54×10^{-3} ; 当应变振幅大于 3.0×10^{-6} 以后, 阻尼性能有微小波动, 但总体上变化不大。可以认为在实验范围内, 阻尼与应变振幅无关, 阻尼不随应变振幅的变化而变化。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50075068, 59671026); 中国博士后科学基金及凝固技术国家重点实验室开放课题资助项目 (200301) 收稿日期: 2002-09-02; 修订日期: 2002-11-20 作者简介: 张忠明 (1967-), 男, 副教授, 博士。

通讯联系人: 张忠明, 副教授, 博士; 西安理工大学 505 信箱, 710048; 电话: 029-2312009; 传真: 029-2312009; E-mail: zmzhang@xaut.edu.cn

图 2 所示为在应变振幅为 2.0×10^{-5} 时, 变化振动频率所得到的阻尼随频率的变化曲线。可见, 在测试的频率范围内, 阻尼总的变化趋势是随频率增大而减小。当频率很低时阻尼较高, 如频率为 0.05 Hz 时, 阻尼为 1.21×10^{-2} , 频率增大至 0.5 Hz 时, 阻尼降至 6.42×10^{-3} , 下降幅度较大, 此后随频率升高, 阻尼有升有降, 但总的变化趋势是逐渐下降。当频率为 4.0 Hz 时, 阻尼降为 4.03×10^{-3} 。

图 3 所示在不同频率下, 合金阻尼随温度的变化曲线。阻尼变化的总趋势是随温度升高, 合金阻尼增大。当温度较低时, 合金阻尼大小随温度的升高增幅较小, 而当温度较高时, 阻尼随温度的升高增幅明显增大。图 3 也进一步证实了合金阻尼随频

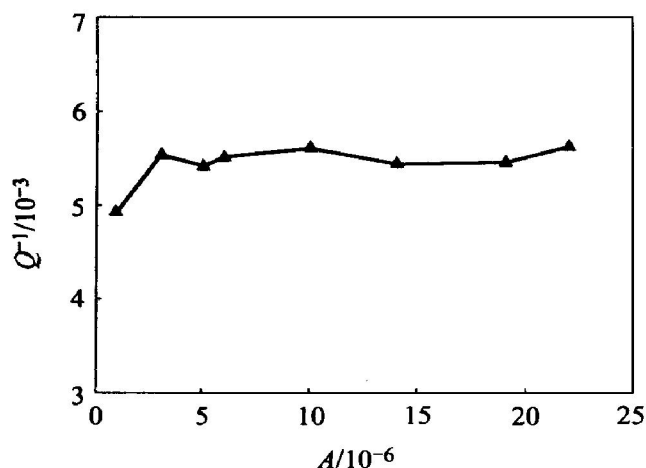


图 1 ZA27-4% Si 合金的 $Q^{-1}-A$ 关系曲线

Fig. 1 Variation of damping capacity Q^{-1} of ZA27-4% Si alloy with amplitude A

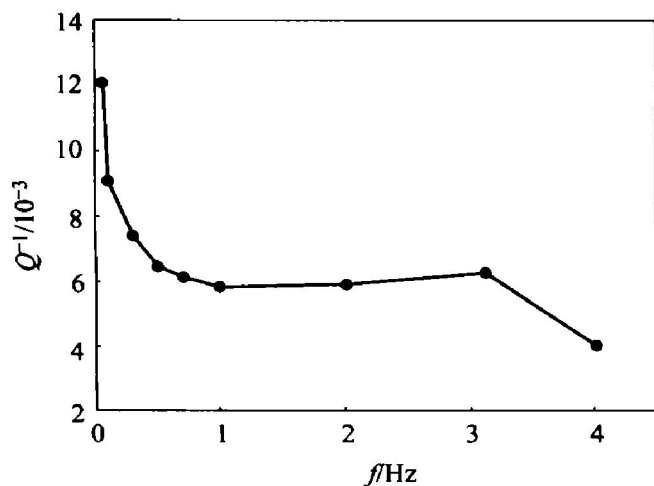


图 2 ZA27-4% Si 合金的阻尼与频率的关系

Fig. 2 Relation of damping capacity Q^{-1} of ZA27-4% Si alloy with vibration frequency f

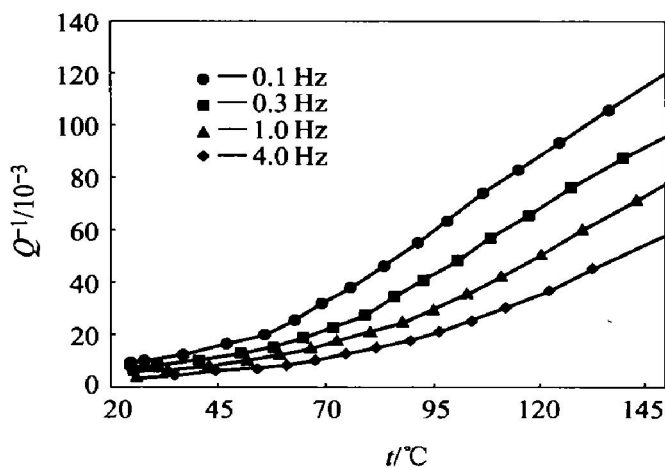


图 3 ZA27-4% Si 合金的阻尼性能与温度的关系

Fig. 3 Relation of damping capacity Q^{-1} of ZA27-4% Si alloy with temperature t

率的变化关系, 即同一温度下, 振动频率越高, 合金阻尼越低。

为了对比加硅前后 ZA27 合金阻尼的变化, 表 1 列出了在同一测试条件下这 2 种合金的阻尼性能。可以看到, ZA27 合金加硅后, 阻尼性能略有下降, 但下降幅度并不大, 仍保持 ZA27 合金的高阻尼性能。

2.2 组织及其形成过程

图 4 所示为铸态 ZA27-4% Si 合金的金相组织。可见, ZA27-4% Si 合金的铸态组织是由块状的初生硅相、初生 α 相、围绕 α 相周围的共析相以及分布于枝晶间的共晶组织组成。根据文献[8]可知, Si 与 Al, Zn 不形成三元化合物。ZA27-4% Si 合金在 490 °C 左右时析出富铝的 α 相。Al-Zn-Si 系在 440 °C

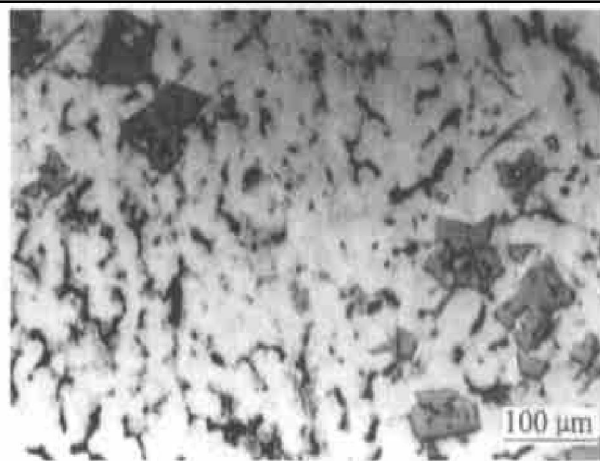


图 4 铸态 ZA27-4% Si 合金的金相组织

Fig. 4 Microstructure of as-cast ZA27-4% Si alloy

表 1 ZA27-4% Si 合金与 ZA27 合金的阻尼性能比较($f = 1.0 \text{ Hz}$)

Table 1	Comparison between damping capacities of ZA27 and ZA27-4% Si alloys								$Q^{-1}/10^{-3}$
	$t/^\circ\text{C}$								
	25	40	55	70	85	100	115	130	145
ZA27	6.87	8.65	12.68	18.10	25.69	35.15	47.97	60.74	76.69
ZA27-4% Si	5.83	7.46	10.71	16.22	23.45	33.89	46.55	60.43	75.12

时存在二元包共晶反应, 即 $L + \alpha \rightarrow \beta + \text{Si}$, 该反应的成分点约为 80% Zn 和 3% ~ 4% Si。合金通过这一反应, 形成富铝的 β 固溶体和硅相。合金在 380 $^\circ\text{C}$ 时还存在三元共晶反应, 即 $L \rightarrow [\beta + \text{Si} + \eta]_{\text{共晶}}$, 该反应的成分点约为 95% Zn 和 0.05% Si。反应产物 β 相将依附于原有 β 相上生长, 将其他共晶产物 Si 相和富 Zn 的 η 相排挤到枝晶间, 从而形成离异共晶。一次结晶完毕, 继续降温通过共析转变温区时, β 相发生共析转变, 即 $\beta \rightarrow [\alpha + \eta]_{\text{共析}}$, 从而形成类似于珠光体的层片结构。

3 分析与讨论

ZA27 合金组织由多相组成, 含有晶界和众多的相界面。当受到外加交变应力作用时, 合金的晶界和相界均受到一定的剪切力。当这种内在的剪切应力足以克服界面的粘滞应力时, 界面便发生微观的粘滞性滑动。研究结果表明^[9]: 室温下, 原子的滑动一般不超过一个原子半径, 在高温下这种滑动可以加大, 并导致产生粘弹性应变。原子的这种滑动是可逆的, 外力去除后又可恢复原位, 宏观上表现为振动能量的消耗; 同时, 位错对 ZA27 合金的阻尼变化也有影响。在外加交变应力作用下, ZA27 合金中的位错振荡可消耗能量, 且由位错引起的与振幅大小无关的阻尼与位错密度成正比^[4]。另外, 由于 ZA27 合金组织中有多个相同时存在, 各相的弹性模量并不相同, 这样当经受循环应力时, 各相产生的应变大小不同, 在不同相的界面上造成应变不匹配, 这种应变不匹配不仅有助于两相间的界面滑动, 而且当应力较大时还可能产生较大的应力集中, 使富铝的 α 相(软相)产生局部的微塑性变形, 在界面处发生塑性流动, 从而引发塑性功而耗能。关于这一点, 王锦程在对锌-铝合金的阻尼性能进行的计算机数值模拟研究中得到了证实^[10]。数值模拟研究结果表明, 材料的塑性变形主要发生在两相相界交角处的富铝 α 相中。以上的多个耗能机制的复合使得普通铸造条件下 ZA27 合金具有高的阻尼性能, 这种高阻尼主要归因于外加应力诱导下的

界面和位错运动以及塑性功而耗能。

当在 ZA27 合金中加入 4% 的 Si 后, 引起了材料组织和阻尼性能的变化。硅的加入对合金阻尼性能的影响主要来自以下几个方面。首先, 在合金凝固完成并冷至室温的过程中, 由于硅相与合金基体间的热膨胀系数相差很大^[11, 12] (纯硅为 $4.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{-1}$, ZA27 为 $26 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{-1}$), 便在硅相和基体界面之间产生了热不匹配, 从而使得合金内部在靠近硅相附近的区域中形成了很高的残余应力, 甚至大于基体材料的屈服强度(经简单计算可知, 在凝固后至室温之间的约 360 $^\circ\text{C}$ 温度变化区间中, 形成的热不匹配应变为 7.85×10^{-3} , 由此产生的应力约为 $6.2 \times 10^8 \text{ Pa}$, 而 ZA27 合金的屈服强度为 $3.65 \times 10^8 \text{ Pa}$), 从而在基体中产生了塑性变形, 消耗振动能量。另外, 硅相与合金中其他相的弹性模量相差较大^[11, 12] (如纯硅的弹性模量为 $1.45 \times 10^{11} \text{ Pa}$, ZA27 为 $7.9 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 大的弹性模量差异会引发塑性功而耗能。这是硅对提高阻尼有利的一面。另一方面, 硅相是六方结构, 硬而脆, 其固有阻尼很低。根据“混合规则”理论可知, 合金的整体阻尼大体可以理解为硅相和基体 ZA27 合金的体积分数与其各自阻尼性能的乘积之和, 这样由于硅相的阻尼性能很低, 在 ZA27 合金中加入 4% Si 后析出的硅相将导致合金阻尼下降。同时由于硅相是在凝固过程中析出的, 硅相与 α 相是半共格界面, 二者结合良好, 界面结合较强, 在受力时不易滑动。从 ZA27-4% Si 合金的金相组织可以看到, 初生硅相和共晶硅相均分布在晶界上, 这些晶界上的硅粒子会阻碍合金界面的滑移, 也不利于阻尼的提高。由此可见, 硅的加入引起了合金多方面的阻尼效应, 多种效应综合作用的结果, 导致 ZA27-4% Si 合金的阻尼性能略有下降, 但下降幅度并不大, 仍保持 ZA27 合金的高阻尼性能。

由实验结果及以上分析可知, ZA27-4% Si 合金具有相当高的阻尼性能, 这在轴承的应用中非常有利。通过在 ZA27 合金中加入适量的硅, 可望获得具有良好耐磨减摩性能, 又具有良好减振降噪效果的轴承合金。

4 结论

1) ZA27-4% Si 合金的阻尼随频率增大而减小, 随温度升高而增大, 阻尼不随应变振幅的变化而变化。

2) ZA27-4% Si 合金的阻尼较高, 在 25 °C, 振动频率为 1.0 Hz; 应变振幅为 2×10^{-5} 时, 合金阻尼为 5.8×10^{-3} 。

3) ZA27-4% Si 合金的阻尼是由合金内部的晶界和相界面滑动、位错振动以及各相的热膨胀系数和弹性模量间差造成的微塑性变形共同引起的。

4) 在 ZA27 合金中加入适量的硅, 可望获得具有良好耐磨减摩性能, 又具有良好减振降噪效果的轴承合金。

REFERENCES

- [1] Murphy S, Savaskan T. Metallography of zinc-25% Al based alloys in the as-cast and aged conditions[J]. Pract Met, 1987, 24(5): 204-221.
- [2] Savaskan T, Murphy S. Mechanical properties and lubricated wear of zinc-25% Al based alloys[J]. Wear, 1987, 116(2): 211-224.
- [3] 庞绍平, 全梅花. 微量锆对 Zr-22% Al 合金阻尼稳定性的影响[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 140-143.
PANG Shao-ping, QUAN Mei-hua. Effect of trace Zr on stability of damping capacity of Zr-22Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 140-143.
- [4] 张忠明, 王锦程, 刘宏昭, 等. 过饱和 ZA27 合金的阻尼性能及其与组织演变的关系[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 306-312.
ZHANG Zhong-ming, WANG Jin-cheng, LIU Hong-zhao, et al. Damping capacities of supersaturated ZA27 alloy and its relation with microstructural evolution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 306-312.
- [5] 庞绍平, 黄元峰, 石云宝, 等. 铜对 Zr-22Al 减振合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S1): 68-71.
PANG Shao-ping, HUANG Yuan-feng, SHI Yun-bao, et al. Effect of Cu on microstructures and mechanical properties of Zr-22Al vibration damping alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S1): 68-71.
- [6] LU Jun-sheng, Aken D C V. Analysis of damping in particle-reinforced superplastic zinc composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(9): 2565-2573.
- [7] 杨留栓, 庞礼军, 杨根仓, 等. 喷雾沉积含硅 ZA27 合金的阻尼性能[J]. 功能材料, 1995, 26(4): 359-361.
YANG Liu-shuan, PANG Li-jun, YANG Gen-cang, et al. Damping properties of ZA27 alloy containing silicon produced by spray deposition[J]. Functional Materials, 1995, 26(4): 359-361.
- [8] 蒙多尔福 L F. 铝合金组织与性能[M]. 王祝堂. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 556-558.
Mondolfo L F. Microstructures and Properties of Al Alloys[M]. WANG Zhu-tang. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1988. 556-558.
- [9] Zhang J, Perez R J, Lavernia E J. Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(9): 2395-2404.
- [10] 王锦程. 复相材料阻尼性能的数值模拟研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
WANG Jin-cheng. Numerical modeling of the damping capacity of dual-phase materials[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [11] 刘秀喜, 高大江. 半导体器件制造工艺常用数据手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992. 207-208.
LIU Xi-xi, GAO Da-jiang. Handbook of Common Used Data in the Techniques of Semiconductor Parts Fabricating Process[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1992. 207-208.
- [12] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第 3 卷(铸造非铁合金)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 404-406.
Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society. Foundry Handbook Vol. 3 (Nonferrous cast alloys)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. 404-406.

Damping capacity and damping mechanism of ZA27-4% Si alloy

ZHANG Zhong-ming^{1, 2}, WANG Jin-cheng², GUO Xue-feng¹, LIU Hong-zhao¹, YANG Ge-rong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

Abstract: The damping capacity of ZA27 alloy doped with 4% Si (denoted as ZA27-4% Si) was investigated by using a multifunctional internal friction apparatus; the damping mechanism of the alloy was also analyzed. It is found that damping capacity of the alloy increases with the increasing of temperature and the decreasing of frequency, while the damping capacity is not dependent on vibration amplitude. The damping capacity (i.e. Q^{-1}) of the ZA27-4% Si alloy is relatively high, the value of Q^{-1} in ambient temperature is 5.83×10^{-3} . It is indicated that the damping of the alloy is induced by phase interface slipping or grain boundary viscous sliding, the infinitesimal plastic deformation which is caused by the difference of elastic modules and heat expansion coefficients between phases of the alloy. Based on the experiment result, it is proposed that ZA27-4% Si is an excellent alloy with the properties of high damping, good wear-resistance, and is proper for the sliding bearing alloys.

Key words: ZA27-4% Si alloy; damping capacity; damping mechanism

(编辑 陈爱华)