

铝、铜、镁对铸态锌基合金组织和 阻尼性能的影响^①

张忠明 王锦程 徐东辉 宋广生 杨根仓 周尧和

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要 研究了铝、铜、镁等合金化元素对铸态锌基合金组织和室温下阻尼性能的影响, 利用悬臂梁法测试了合金的阻尼性能。结果表明, 锌铝二元合金随铝含量增加, 初生 α 相增多, 共晶体逐渐减少直至消失。镁、铜等合金元素对 Zn-27% Al 合金 α 相的大小和分布无大的影响。镁、铜可固溶于基体中, 当其含量较高时, 分别在组织中形成 $MgZn_2$ 化合物和 $CuZn_5$ 化合物, 分布于晶界。铝含量在 6%~60% 范围内的锌铝合金在铸态下均具有高的阻尼能力; 铜、镁等合金化元素的加入降低了 Zn-27% Al 合金的阻尼性能。Zn-Al 系合金的高的阻尼性能是在外部的交变应力作用下, 晶界和相界间的粘滞性滑动以及 α 相发生局部的微塑性变形, 使振动能量得以消耗而造成的。

关键词 锌基合金 合金化元素 阻尼性能

中图法分类号 TG113.1 TG113.22

锌基合金具有良好的力学性能、耐磨减磨性能以及其它一些独特的性能(如碰撞时不产生火花, 无磁性等), 用其代替部分铜合金甚至铝合金具有明显的经济性, 同时, 该合金熔点低、耗能少、成本低廉、成型方便, 适合于多种铸造方法, 因此具有很强的市场竞争力, 其研究也不断深入。

作为结构材料, 除具有一定的强度和优良的加工性能之外, 还应具有一定的阻尼性能^[1], 近年来, 锌基合金阻尼性能的研究已引起了人们的关注^[2-4]。在锌基合金中, 常用的合金化元素有铝、铜和镁, 适量加入对力学性能的提高很有好处, 同时还可提高材料的耐磨性、耐腐蚀性等。研究表明^[5], 在锌基合金中加入铜、镁等合金化元素对其阻尼性能也有影响, 但研究不够深入和具体。本文研究了铝、铜、镁等合金化元素对锌基合金组织和阻尼性能的影响, 试图建立起组织和阻尼性能间的关

系, 以便为控制锌基合金的阻尼性能提供理论和实验依据。

1 实验方法

1.1 合金成分设计

首先向纯锌中加入不同质量分数的纯铝, 研究不同铝含量下的锌铝二元合金的阻尼性能, 从中选出阻尼性能较好的锌铝合金作为基体合金, 在此基础上, 加入合金化元素铜、镁, 以研究铜、镁含量对锌铝合金阻尼性能的影响。

1.2 试样制备

原材料选用 1[#] 电解 Zn, Al-50Cu 中间合金, 工业纯 Mg 和工业纯 Al(99.6%)。熔炼在 3kW 的电阻炉中进行。金属液熔炼好后浇注预热至 250~260℃的金属型中制取试块, 浇注温度控制在合金液相线温度以上 60~80℃。

① 国家自然科学基金资助项目 59671026 收稿日期: 1998-09-17; 修回日期: 1998-12-12

张忠明, 男, 31岁, 讲师, 博士研究生

待试块冷却后取出,用线切割设备在金属型试块上切取矩形阻尼试样,试样尺寸为 $85\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

1.3 阻尼性能测试

阻尼性能的测试是用悬臂梁法进行的,其测试原理是:试样一端固定,另一端在外力的激发下作自由振动,在试样进行自由振动过程中,其振动幅度将逐渐衰减,利用仪器把悬臂梁自由振动时的振幅衰减曲线记录下来,则阻尼性能 Q^{-1} 可由下式确定:

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{A_{n+1}}{A_n}\right) \quad (1)$$

式中 A_n 和 A_{n+1} 分别是试样第 n 次和第 $n+1$ 次振动的振幅值。

2 实验结果

2.1 铝含量对锌合金组织及阻尼性能的影响

图1分别是 Zr-14% Al, Zr-27% Al, Zr-50% Al 和 Zr-68% Al 合金的金相组织。可见,铸态下 Zr-14% Al 的组织(图1(a), (e))是由初生的富铝 α 相和共晶组织组成,规则共晶和不规则共晶同时存在,其中,共晶反应产物中的富铝相已发生共析分解,在初生的富铝 α 相的周围形成了珠光体圈,如图1(e)所示。Zr-27% Al(图1(b))和 Zr-50% Al 的组织(图1(c))均由树枝晶发达的初生富铝 α 相(白色)、围绕其周围的 β 固溶体(灰色)以及分布于晶界的非平衡共晶组织(黑色)组成。根据 Zr-Al 相图^[6],在 $443\text{ }^{\circ}\text{C}$ 通过包晶反应形成的 β 固溶体是不稳定的, $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下将通过共析反应分解为 α 和 β 固溶体。图1(f)是 Zr-27% Al 合金在扫描电镜下的微观组织,图中共析体和离异共晶清晰可见,共析产物是典型的层片状结构,层片间距约为 $0.2\sim 0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。而 Zr-68% Al 的组织(图1(d))是单相固溶体,已发生一定的脱溶分解反应。由图可见,锌铝二元合金随铝含量增加,初生 α 相增多,共晶体逐渐减少直至消失。

图2所示是不同铝含量下锌铝合金阻尼性

能影响曲线。由图可见,随着铝含量的升高,阻尼值缓慢上升,当铝含量为 35% 至 50% 时,合金的阻尼值达到最高,超过此范围,阻尼值开始下降。纯铝的阻尼值最低,但其加入到锌中,则 ZA35 合金的阻尼值比纯铝提高了近 4 倍,从图中还可看出,铝含量在 6% ~ 60% 范围内的锌铝二元合金的阻尼值均比较高。

由于 Zr-27% Al 在锌铝合金系列中综合力学性能最好,应用相对较多,同时上面的实验结果也表明其具有高的阻尼能力,因此在考查铜、镁的影响时是以 Zr-27% Al 合金为基体的。

2.2 铜、镁对 Zr-27% Al 合金组织及阻尼性能的影响

Zr-27% Al 合金中加入镁、铜等合金元素后,从金相组织上看镁和铜对 α 相分布和大小无大的影响。少量的镁可固溶于基体中,同时在晶界形成偏析和化合物。通过对含有 1% Mg 的 Zr-27% Al 合金进行 X 射线衍射分析和能谱微区成分分析可知,合金中形成了 MgZn_2 化合物(图3(a))。当铜含量较低时,也可以固溶基体中,对合金起固溶强化作用。当铜加入量较高时,将与锌形成化合物,分布于晶界(图3(b)),铜含量越高,该化合物相越多。通过对含铜 2% 的 Zr-27% Al 合金进行 X 射线衍射分析和能谱微区成分分析可知该化合物是 CuZn_5 即 ϵ 相。图4(a)、(b)分别是铜、镁对 Zr-27% Al 合金阻尼性能的影响曲线,由图可见,随着合金中铜含量的增加,阻尼性能持续下降,当铜含量增加到 4% 时,与基体合金相比,阻尼能力下降了 50%;少量的镁即可引起合金阻尼能力下降,但当镁量大于 0.02% 时,再增加镁的含量,阻尼能力变化不大。

3 分析与讨论

阻尼性能是材料消除机械振动的一种能力,材料的阻尼特性依赖于金属中的应力诱导下的缺陷运动,而缺陷的运动又与材料的组织有关。

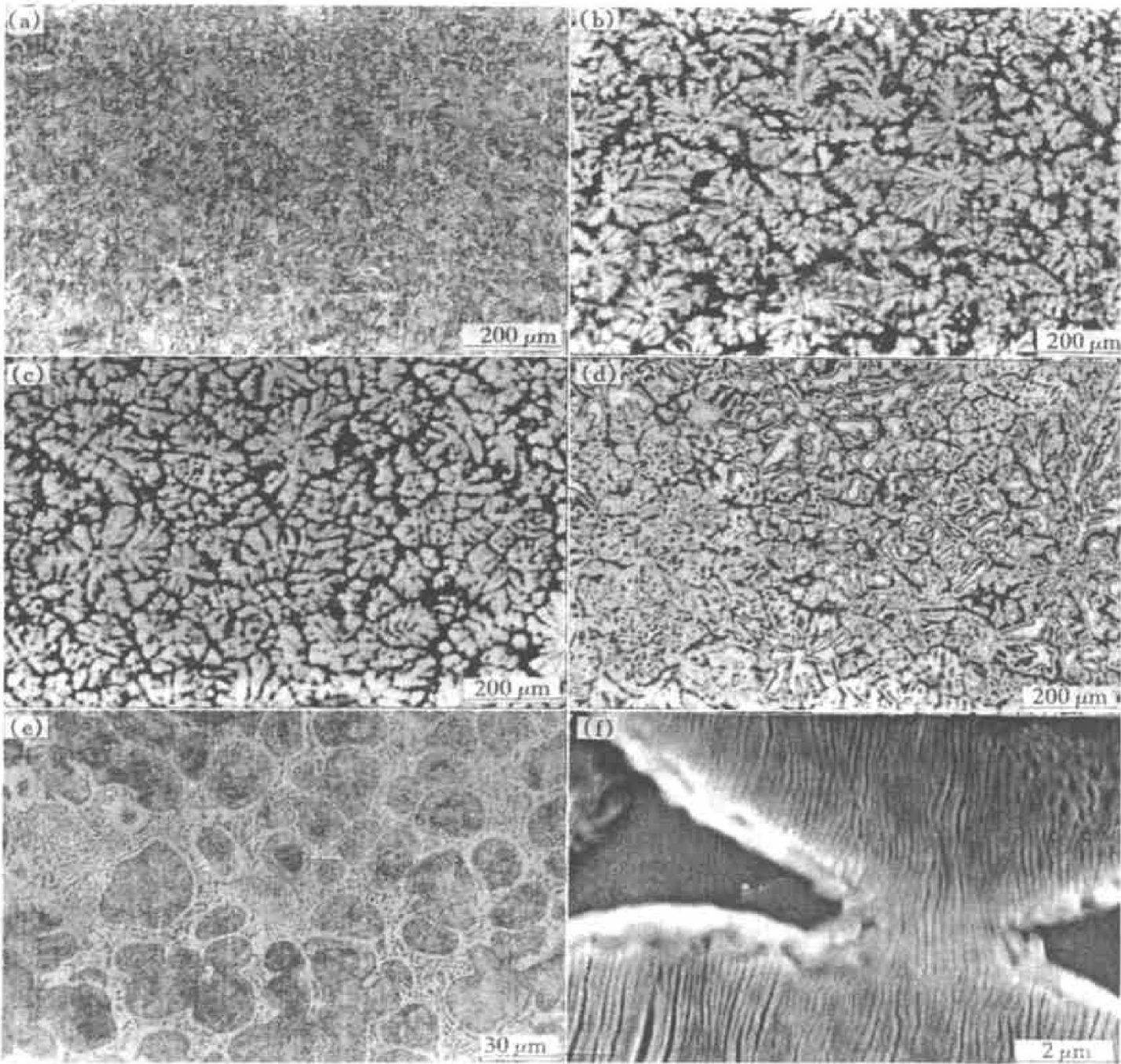


图 1 Zr-Al 合金金相组织

Fig. 1 Microstructures of Zr-Al alloys

(a) —Zr-14% Al (OM); (b) —Zr-27% Al (OM); (c) —Zr-50% Al (OM);
(d) —Zr-68% Al (OM); (e) —Zr-14% Al (OM); (f) —Zr-27% Al (SEM)

在锌中加入铝后，锌铝二元合金在室温下的平衡组织是由富 Al 的 α 相和富 Zn 的 η 相组成的两相组织。研究表明^[1]，晶界具有粘滞性质，能够在切应力的作用下发生粘滞性滑动。如图 5 所示，在外加的剪切应力的作用下，晶粒 1 和晶粒 2 产生相对滑动，这样在晶粒间界两端及晶粒 3 和晶粒 4 中就会引起反抗运动的应力。在低应力下，在晶粒 3 和晶粒 4 中只

会引起弹性畸变；当位移增大时，反抗应力也随之增大。这样通过粘性滑动，最初作用在界面上的剪切应力减小，与此同时，晶粒的角上则集中了越来越多的剪切应力。当晶界上绝大多数地方的剪切应力降为零时，弛豫过程便终止了，界面停止滑动；由于在低应力下晶粒 3, 4 中产生的应变是完全弹性的，在外加应力撤去之后，这种弹性应变使晶界产生一个相反的

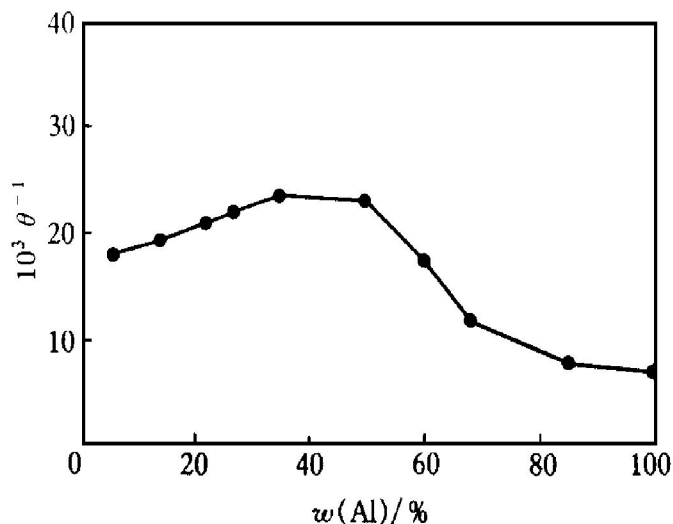


图 2 Al 含量对锌铝合金阻尼性能的影响

Fig. 2 Influence of Al content on damping capacity of Zr-Al alloy

剪切应力, 产生弹性后效, 当回复完全后, 晶界两边的变形消除了, 试样回到原始状态。在晶粒间界的滑动过程中, 剪切应力要克服晶粒间界的粘滞性做功, 从而引起机械能的消耗而使其变为热能。在外部的交变应力作用下, Zr-Al 合金的晶界和相界间可以产生粘滞性滑动, 消耗振动能量; 同时 Zr-Al 合金中富 Al 的 α 相和富锌的 η 相具有不同的弹性模量, 富锌相的弹性模量较大 (其弹性模量 E 约为 82 GPa^[7]), 铝相的弹性模量较小 (其弹性模量 E 约为 68 GPa), 这样, 在同一应力作用下, 富锌相和富铝相产生的应变大小不同, 便在两相的

界面上造成应变不匹配, 这种应变不匹配不仅有助于两相的界面滑动, 当应力较大时还可能产生较大的应力集中, 使富铝的 α 相产生局部

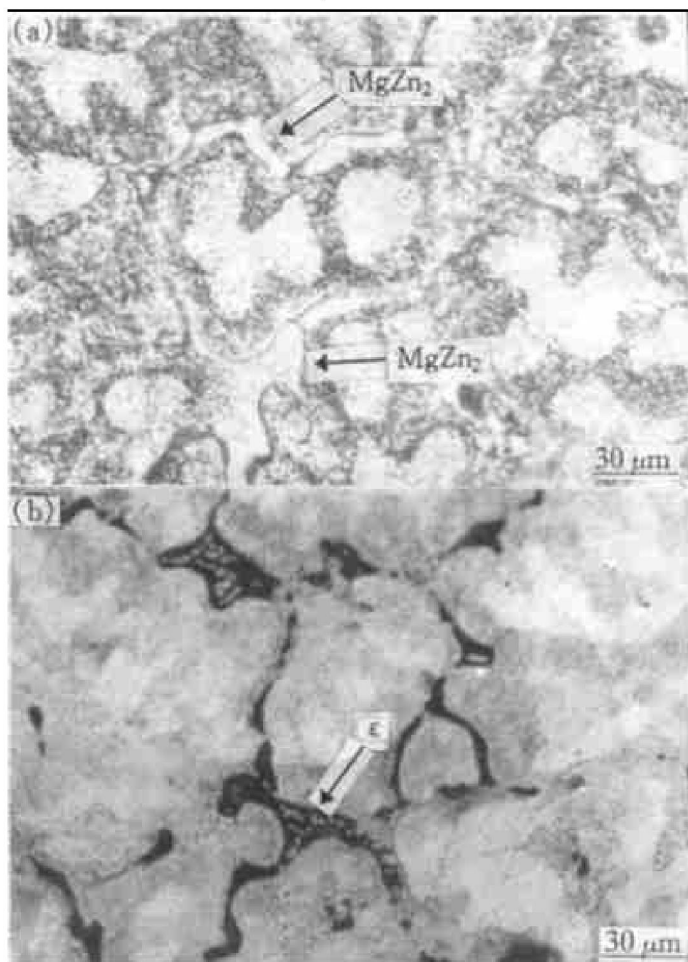


图 3 Zr-27% Al 合金中形成的 ϵ 相和 $MgZn_2$ 相

Fig. 3 ϵ phase and $MgZn_2$ phase in Zr-27% Al alloy

(a) -1% Mg; (b) -2% Cu

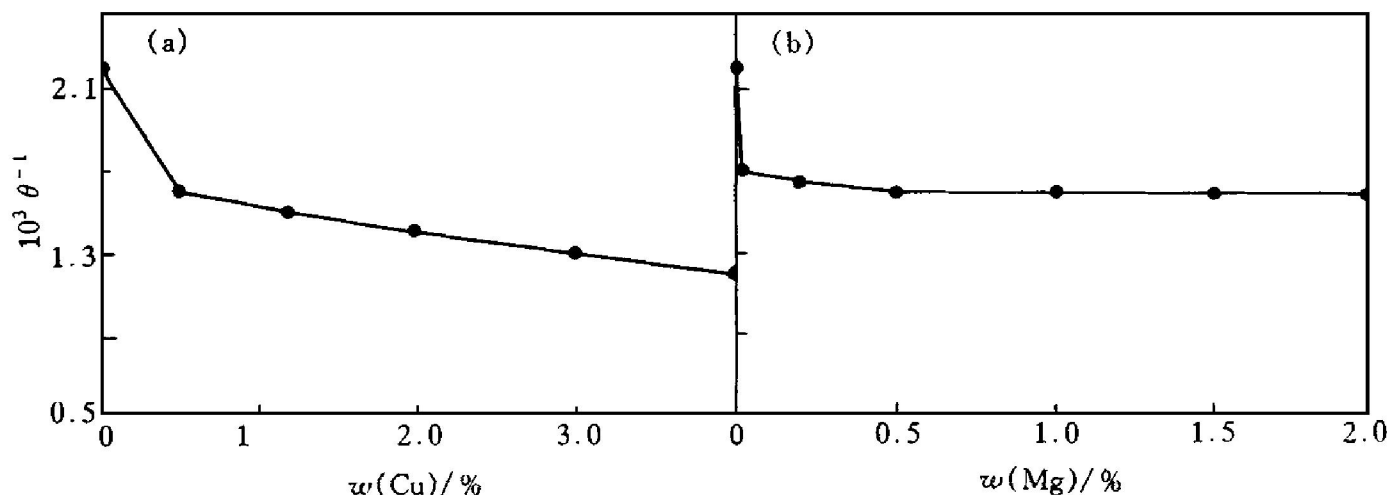


图 4 Cu, Mg 含量对 Zr-27% Al 合金阻尼性能的影响

Fig. 4 Influence of Cu, Mg content on damping capacity of Zr-27% Al alloy

(a) -Cu; (b) -Mg

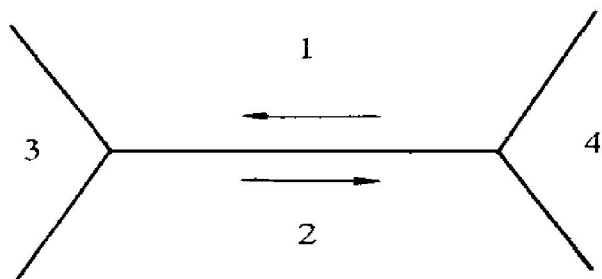


图5 界面粘性滑动示意图

Fig. 5 Schematic diagram of interface viscous sliding

的微塑性变形,也使振动能量得以消耗。关于后一点,作者在对 Al/SiC 复合材料的阻尼特性进行数值模拟中已得以证实^[8]。由于晶界和相界间的粘滞性滑动以及铝基体的局部微塑性变形,从而使 Zr-Al 合金具有较高的阻尼能力。当铝含量较高,如铝含量超过 60% 时,合金在高温下形成单相固溶体 α 相,且在冷却过程中不发生共析转变,只发生不完全脱溶分解,因此在室温下的组织是单相固溶体的不完全脱溶分解组织,这样富锌的 η 相较少;当铝含量较低时, α 相析出量也少,即 α 相和 η 相的相界面少,因而阻尼能力较低。只有当铝、锌含量在适当的范围内时,才会产生较多的 α 相和 η 相的相界面,从而使合金具有高的阻尼能力。

当界面上析出第二相粒子时,研究表明这种粒子能妨碍和阻止界面弛豫^[9]。根据粘性滑动模型,界面的平均滑动距离正比于晶粒的大小,但当在界面上形成沉淀物粒子时,界面的平均滑动距离则正比于 $N^{-1/2}$, N 是界面上单位面积的沉淀物粒子数。可见界面上析出的粒子数越多,则平均滑动距离越小。由于界面上的沉淀物很快使界面的平均滑动距离大大减小,同时沉淀物还增大了界面的滑移阻力,这样不利于界面的粘性滑动,因而相应的弛豫强度必定减小很多,阻尼相应也减小。在 Zr-27% Al 合金中加入镁、铜等合金化元素后,一部分偏聚在晶界上,并在晶界和相界上形成第二相,这样阻碍了晶界和相界的弛豫,使合金

的阻尼性能下降。同时少量的镁加入 Zr-27% Al 合金以后,可以强化 $\alpha(\beta)$ 的晶胞键络,从而提高了 $\alpha(\beta)$ 的稳定性^[10],不利于 β 相的分解和 α 相的脱溶分解,这样使合金在室温下的两相相界面面积减少,阻尼性能下降。

从力学角度考虑,纯锌的力学性能很差,无使用价值,应用中常加入强化元素。铝是锌合金中首选的强化元素,随着铝含量的增加,锌铝合金的强度和延伸率增大。当铝含量在 25% ~ 27% 时,合金的强度和延伸率达到最佳的匹配,同时在这一区间,合金的阻尼能力也是较高的。为了进一步提高 Zr-27% Al 合金的力学性能,常加入镁和铜对合金进行强化,一般镁含量在 0.02%、铜含量在 3% 左右即有非常好的强化效果,但从上面的结果可以看出,铜、镁在大幅度提高 Zr-27% Al 合金的力学性能时,也大大地降低了合金的阻尼能力。材料的阻尼性能与材料的强度是一对矛盾,高强度材料的阻尼性能低,而低强度材料的阻尼性能高^[1],因此在需要综合考虑材料的力学性能和阻尼性能时,必须对材料的成分加以调整,以妥善解决这一矛盾。

4 结论

(1) Zr-27% Al 合金中加入镁、铜等合金元素后,对 α 相的分布和大小无大的影响。镁、铜可固溶于基体中,当其含量较高时,分别在组织中形成 $MgZn_2$ 化合物和 $CuZn_5$ 化合物,分布于晶界。

(2) 铝含量在 6% ~ 60% 范围内的锌铝合金在铸态下均具有高的阻尼能力;铜、镁等合金化元素的加入降低了 Zr-27% Al 合金的阻尼能力。

(3) Zr-Al 合金的高的阻尼性能是在外部的交变应力作用下,晶界和相界面间的粘滞性滑动以及 α 相发生局部的微塑性变形,使振动能量得以消耗而造成的。

REFERENCES

- 1 Ke T S(葛庭隧). Advances in Mechanics(力学进展), 1995, 25(2): 243.
- 2 Pang Shaoping(庞绍平) and Quan Meihua(全梅花). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 140.
- 3 Liu Y C, Yang G C and Lu Y L. J Mater Sci Technol, 1997, 12: 447.
- 4 Zhang Zhongming, Wang Jincheng, Lu Yili *et al.* Tran Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(3): 500.
- 5 Otani T, Hoshino K and Kurosawa T. Journal de Physique, 1981, C5: 935.
- 6 Sahoo M and Whiting L V. AFS Transactions, 1984, 38: 870.
- 7 Chinese Society for Metals(中国金属学会) and The Nonferrous Metals Society of China(中国有色金属学会). Handbook of Physical Property of Metal Materials(金属材料物理性能手册). Beijing: The Publishing House of Machinery Industry, 1987.
- 8 Xu Donghui(徐东辉), Zhang Zhongming(张忠明), Wang Jincheng(王锦程) *et al.* Foundry Technology(铸造技术), 1998, (3): 15.
- 9 Nowick A S and Berry B S. Anelastic Relaxation in Crystalline Solids. New York: Academic Press, 1972.
- 10 Shi Zhongliang(施忠良). PhD Dissertation. Nanjing: Southeast University, 1993.

EFFECT OF Al, Cu, Mg CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND DAMPING CAPACITY OF ZINC BASED ALLOY

Zhang Zhongming, Wang Jincheng, Xu Donghui, Song Guangsheng,
Yang Gencang and Zhou Yaohe

*State Key Laboratory of Solidification Processing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China*

ABSTRACT The effect of Al, Cu, Mg content on microstructure and damping capacity of as-cast zinc based alloy was studied. The damping properties were measured by the cantilever beam technique. Experimental results indicate that as the content of Al increasing in Zn-Al alloy, the content of primary α phase increases, while the content of eutectic decreases gradually and finally disappears completely. The addition of Cu, Mg to Zn-27% Al alloy has no effect on the distribution and the volume fraction of primary α phase. Cu, Mg can solute in Zn-27% Al alloy, and form intermetallic compound particles $MgZn_2$ and $CuZn_5$, respectively, when their contents are high. When the Al content is in the range of 6% ~ 60%, the zinc-aluminum alloys have high damping capacity. However, Cu, Mg will reduce greatly the damping capacity of Zinc-based alloy. The phase interface slipping between α phase and η phase or the grain boundary viscous sliding may occur when the material is under cyclic loading. Meanwhile, the elastic module of α phase and η phase are different, thus the strain of α phase mismatches that of η phase, which leads to infinitesimal plastic deformation of α phases. Therefore, the effective energy dissipation will be generated in the zinc-aluminum alloy.

Key words Zinc-based alloy damping capacity alloying elements

(编辑 黄劲松)