

[文章编号] 1004-0609(2002)04-0725-04

微量 Sc 和 Zr 对锌铝共析合金微观结构和阻尼性能的影响^①

罗兵辉, 柏振海, 谢佑卿

(中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

[摘 要] 采用金相显微镜、扫描电镜、XRD 及阻尼性能测试等手段研究了添加 Sc 和 Zr 对锌铝共析合金阻尼性能的影响。结果表明: 0.21% Sc 和 0.15% Zr 使锌铝共析合金铸态组织显著细化, 阻尼性能提高, 阻尼稳定性提高; 两种合金 Zr-22.1% Al 和 Zr-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr 分别在约 208 °C 和 195 °C 出现内耗峰。分析认为 Al_3Sc 及 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点对 α/α 、 α/β 、 β/β 界面的非弹性粘滞运动的阻碍引起高阻尼, 并致使峰位移向低温。同时, 这些质点有效地阻止位错的迁移和亚晶的形成、长大和合并, 使阻尼稳定性提高。

[关键词] Zr-Al 合金; 阻尼; Sc; Zr

[中图分类号] TG 113.22

[文献标识码] A

锌铝合金具有成本低和优良的力学性能, 尤其是超塑性, 因而有着广泛的应用。锌铝共析合金是该类合金中应用和研究得最多的合金, 它的一个显著特点是具有高的阻尼性能, 且不受磁场的影响。对阻尼性能的研究^[1~3]表明, 其高的阻尼性能归源于其结构特点, 它是由富 Al 的 α 相(软相)和富 Zn 的 β 相(硬相)组成的复相型合金, 振动时 α/α 、 α/β 、 β/β 相界面发生粘滞性可逆滑动吸收能量, 并转变成热能耗散。但是高阻尼的锌铝合金存在一个问题, 即在室温下, 合金中的 α 相及 β 相随时间延长会发生长大, 使力学性能和阻尼性能逐渐变化, 内耗值逐渐降低^[4]。为此, 庞绍平^[5]通过添加 B, Ti, Zr, La, Ce 等元素以改善锌铝共析合金性能稳定性。结果表明, 尽管该合金的力学性能和耐蚀性有大幅度改善, 但对阻尼性能的影响不明显。

Sc 是铝的弥散强化剂, 强有力的晶粒细化剂, 有效的再结晶抑制剂, 含铈的铝合金具有高强度和塑性, 良好的耐热性、耐蚀性和可焊性^[6, 7]。当 Sc 和 Zr 复合添加时其对铝合金的影响更为显著^[7, 8]。本实验通过在 Zr-Al 共析合金中添加微量 Sc 和 Zr 以改善合金的阻尼性能及阻尼稳定性, 并分析讨论了 Sc 和 Zr 对 Zr-22% Al 合金的阻尼影响机制。

1 实验

将 99.99% 的高纯铝和 99.98% 纯锌及 Al-2.16% Sc 和 Al-4% Zr 中间合金分别配制成 1[#] 和 2[#] 合金。用水冷模铸造, 试样成分分析结果为 1[#]:

Zr-22.1% Al; 2[#]: Zr-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr。经 350 °C, 4 h 均匀化退火后, 在 350 °C 下热轧至 1 mm 厚片状试样。试样在 350 °C 下保温 3 h, 在 20 °C 水中淬火。在光学显微镜上对试样进行组织形貌观察。用 D500 全自动 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射分析, $\text{CuK}\alpha$ 为辐射源, 步进扫描步长为 0.04°, 计数时间 2 s。在 KYKY-AM-RAY10008 扫描电镜上对断口形貌进行观察。将经处理后的试样切成 1 mm × 2.5 mm × 35 mm 片状, 在低频扭摆仪上测试内耗性能, 内耗测试时应变振幅为 1×10^{-6} , 内耗温度曲线测试时频率为 1 Hz, 升温速率为 5 °C/min。

2 实验结果

2.1 微观组织特征

图 1 所示为 Zr-22.1% Al 合金(1[#] 合金)和 Zr-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr 合金(2[#] 合金)的铸态组织。可见, 微量的 Sc 和 Zr 可显著细化 Zr-Al 共析合金组织。两种合金的拉伸断口形貌如图 2 所示, 亦可见其明显差别。从 X 射线衍射图谱(图 3)看出, 添加 Sc 和 Zr 后 Zr-22.1% Al 合金形成了 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子。

2.2 内耗

2.2.1 内耗随温度的变化特征

图 4 所示为两种合金经固溶处理后在温度区间 20~250 °C、频率 1 Hz 下内耗随温度的变化关系。

① [收稿日期] 2001-12-03; [修订日期] 2002-02-27

[作者简介] 罗兵辉(1965-), 男, 副教授。

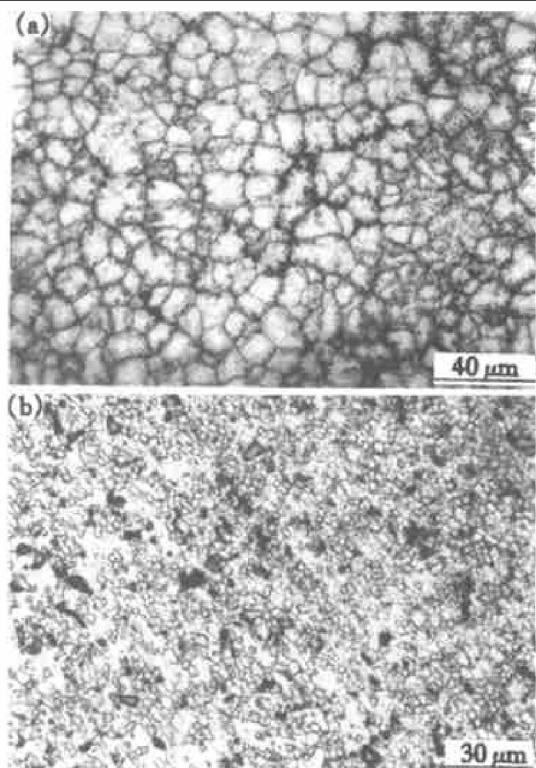


图 1 合金的铸态组织

Fig. 1 As-cast microstructures of alloys

- (a) —Zn-22.1% Al alloy;
(b) —Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr alloy

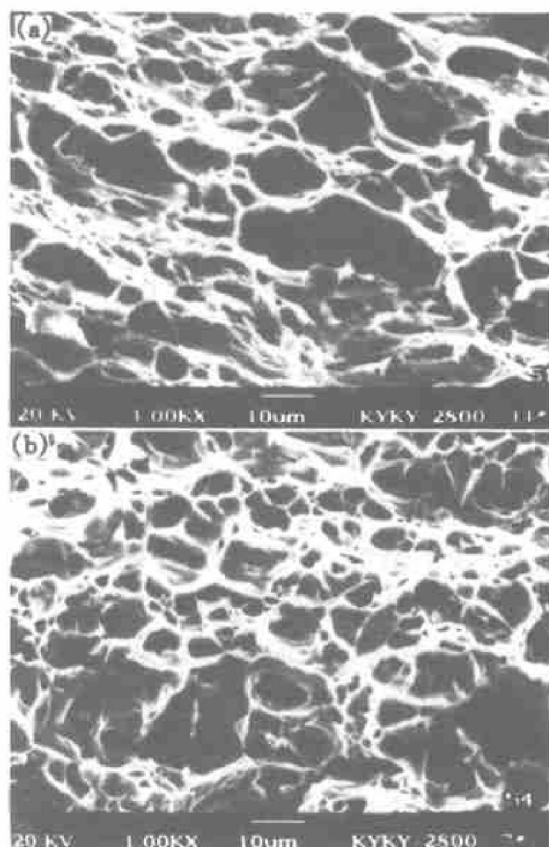


图 2 两种合金的拉伸断口形貌

Fig. 2 SEM morphologies of tensile fracture of alloys

- (a) —Zn-22.1% Al alloy;
(b) —Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr alloy

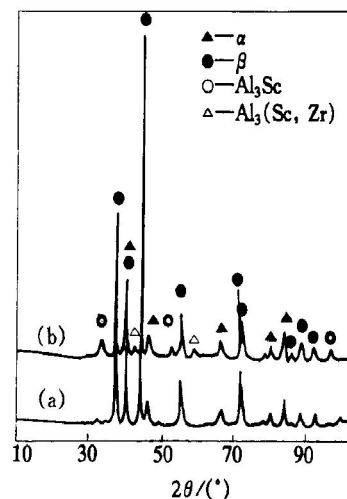


图 3 Zn-22.1% Al 合金(a)和

Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr 合金(b)的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of Zn-22.1% Al alloy (a) and Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr alloy (b)

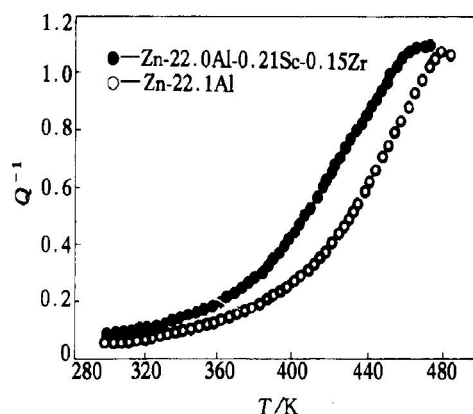


图 4 Zn-22.1% Al 及 Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr 合金内耗与温度的关系

Fig. 4 Internal friction vs temperature of Zn-22.1% Al and Zn-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr alloys

可见添加 Sc 和 Zr 的 Zn-Al 共析合金的内耗性能高于 Zn-22.1% Al 合金, 在温度高于 90 °C 后两者内耗 Q^{-1} 值随温度急剧增加, 并分别在约 208 °C 和约 195 °C 出现内耗峰, 然后逐渐降低。Sc 和 Zr 使 Zn-22.1% Al 合金的内耗峰位向低温移动 13 °C。

2.2.2 内耗稳定性

固溶处理后的两种试样在室温下随停留时间延长内耗值的变化如图 5 所示。可见刚开始时两种试样的内耗随时间延长有相似的变化趋势, 即固溶处理后内耗很快提高, 随后变缓, 再逐渐降低。但试样 1[#] 下降幅度较大, 试样 2[#] 下降幅度较小, 且试样 2[#] 在约 10⁴ h 后内耗趋于稳定, 说明添加 Sc 和

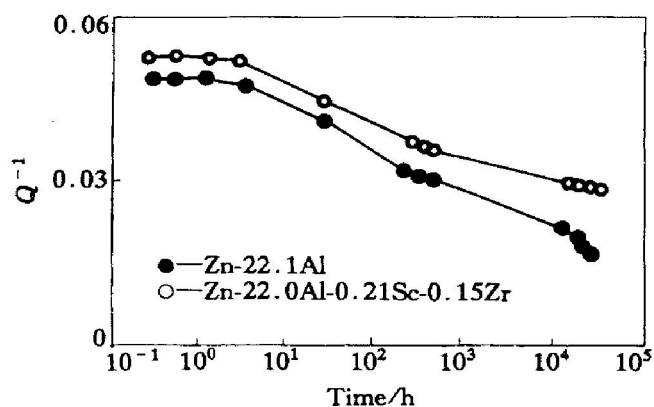


图5 Zn-22.1%Al及Zn-22%Al-0.21%Sc-0.15%Zr合金内耗随时间的变化关系

Fig. 5 Internal friction vs time of Zn-22.1%Al and Zn-22%Al-0.21%Sc-0.15%Zr alloys

Zr后Zr-Al共析合金的内耗稳定性得到显著改善。

3 讨论

Sc和Zr复合作用能显著细化Zr-Al合金的铸态组织(图1)。文献[7]认为在含Al的合金中,Sc与Al发生反应,从熔体中优先析出不熔性质点 Al_3Sc ,该质点的显微硬度达2550 MPa,为 AuCu_3 型立方结构,点阵常数 $a=0.410\text{ nm}$,晶体结构及晶格常数均与Al(fcc, $a=0.405\text{ nm}$)极为相近。合金凝固时,该质点起到非均质形核作用。Sc和Zr复合添加时,Zr在铝合金中有效促进钪的弥散、细小二次化合物 Al_3Sc 的析出,并能部分取代 Al_3Sc 中Sc原子形成三元化合物 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相质点,从X射线衍射图谱(图3)可见两质点相的存在。

锌铝共析合金是具有高阻尼的超塑性材料^[1, 2],其阻尼机制是振动时富Al的 α 相(软相)和富Zn的 β 相(硬相)界面,即 α/α , α/β , β/β 界面,产生粘滞线性流动,消耗能量。Zr-Al共析合金的晶粒越细,阻尼性能越高。因此,微量Sc和Zr使Zr-Al共析合金的阻尼性能提高,同时 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点具有高的热稳定性^[8],在高温下不长大、不溶解,能强烈钉扎位错和晶界,有效地阻止位错的迁移和亚晶形成、长大或合并,从而稳定合金的亚结构,使锌铝合金在高温下亦具有更高的内耗性能。

锌铝共析合金 $Q^{-1}-T$ 曲线中在约208℃(约 $0.6T_m$)产生内耗峰(Q^{-1} 最大约为1.1)。研究^[9]表明许多多晶体合金在约 $0.5T_m$ 时,由于热激活会

产生弛豫内耗峰,它们可根据晶界的应力弛豫,即晶界滑动或晶界迁移机制来解释。多晶铝在290℃时出现内耗峰。该峰是晶界弛豫造成的^[9]。对于Zr-Al共析合金,存在 α 相(富Al相), β 相(富Zn相)。文献[10]表明该合金多次变形后,微观结构基本不变,且维持在低位错密度,说明该合金的超塑性是晶界滑动机制。因此本文作者认为Zr-Al合金在约208℃出现的内耗峰是晶界可逆滑动造成的。由于存在 α/α , α/β , β/β 多相界面,其内耗峰宽度较多晶铝的内耗峰宽度大^[11]。

Zr-Al共析合金在约208℃出现内耗峰,该峰是晶界弛豫造成的^[11]。添加微量Sc和Zr后,峰位移向低温处(约195℃),但仍可认为内耗峰是晶界弛豫造成的。峰位移是 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子对晶界弛豫的影响造成的,因为晶界弛豫过程中弛豫时间 τ_0 与内耗峰的温度有关^[11],如果过程激活能不变, τ_0 的降低则导致峰温降低。 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子在晶界分布,阻碍晶界滑动,使弛豫时间 τ_0 减小,峰位移向低温。这一点与其它合金的高温内耗行为类似^[12]。

添加Sc和Zr后,Zr-Al共析合金内耗稳定性的提高亦是由于 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子对合金组织稳定性的影响造成的。Zr-Al共析合金随时间延长其内耗性能逐渐下降(图5),是由于其中的 α 和 β 相中的亚晶长大、组织不断粗化^[4]造成的。 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点具有高的热稳定性,能强烈地钉扎晶界,有效地阻止亚晶的形成、长大和合并,从而稳定合金阻尼性能。

4 结论

1) Zr-Al共析合金具有高的阻尼性能,并在约208℃出现内耗峰。Sc和Zr复合作用可显著细化Zr-Al共析合金的铸态组织,进一步提高锌铝共析合金在20~250℃温度范围内的内耗,并使Zr-Al合金内耗峰移至约195℃。峰位的移动是 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点对晶界滑动的阻碍作用造成的。

2) Zn-22%Al-0.2%Sc-0.15%Zr合金比Zr-Al共析合金具有更优良的内耗稳定性,其原因是 Al_3Sc 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子能有效地钉扎晶界,阻止晶粒长大。

[REFERENCES]

[1] Nuttall K. The damping characteristics of a superplastic

- Zr-Al eutectoid alloy [J]. Journal of the Institute of Metals, 1971, 79: 266–274.
- [2] Torisaka Y, Kojima S. Superplasticity and internal friction of a superplastic Zr-22% Al eutectoid alloy [J]. Acta Metal Mater, 1991, 39(5): 947–954.
- [3] ZHU X F, ZHANG L D. Internal friction and modulus associated with nonequilibrium diffusion-type phase transformation in an Al-Zn alloy [J]. J Phys F: Met Phys, 1988, 18: L159–L162.
- [4] Hinai M, Sawyer S, Masumoto H. Influence of heat treatment and cold working on ageing of logarithmic decrement in Al-Zn alloys [J]. J Japan Inst Metals, 1991, 55(6): 715–719.
- [5] 庞绍平. 微量元素 Zr, Ce, La 等对 Zr-22Al 合金性能的影响 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1992.
- PANG Shao-ping. Effect of Trace Zr, Ce, La on Properties of Zr-22Al Alloy [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1992.
- [6] Parker B A. The effects of small additions of scandium on the properties of aluminum alloys [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(2): 452–458.
- [7] Davydov V G. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 30–36.
- [8] 余琨, 黎文献. 微量 Sc 和 Zr 对 2618 铝合金再结晶行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 709–713.
- YU Kun, LI Wen-xian. Effect of minor Sc and Zr on the recrystallized behavior of 2618 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 709–713.
- [9] Nowick A S, Berry B S. Anelastic Relaxation in Crystalline Solid [M]. New York: Academic Press, 1972. 435.
- [10] 罗兵辉, 周善初. 锌铝共析合金的超塑性变形组织特征 [J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(4): 452–455.
- LUO Bing-hui, ZHOU Shan-chu. Superplastic microstructure characteristic of Zr-Al eutectoid alloy [J]. Journal of Central South University of Technology, 1996, 27(4): 452–455.
- [11] 冯端, 王业宁, 丘第荣. 金属物理 B [M]. 北京: 科学出版社, 1975. 557.
- FENG Duan, WANG Ye-ning, QIU Di-rong. Metal Physics B [M]. Beijing: Science Press, 1975. 557.
- [12] 罗兵辉, 谢佑卿. 铁含量对 Al-Si-Fe 合金微观组织及内耗性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 51–54.
- LUO Bing-hui, XIE You-qing. Effect of iron content on microstructure and internal friction of Al-Fe-Si alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 51–54.

Effect of trace Sc and Zr on microstructure and damping capacity of Zr-22% Al alloy

LUO Bing-hui, BO Zhen-hai, XIE You-qing

(Department of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

[Abstract] The effect of trace Sc and Zr on the internal friction and damping stability of Zr-22% Al eutectoid alloy was investigated. The experimental results show that the addition of 0.21% Sc and 0.15% Zr can improve the as-cast structure of the alloy and increase the damping capacity and damping stability of Zr-22% Al alloy. An internal friction peaks were observed about 208 °C and about 195 °C respectively in the present Zr-22.1% Al and Zr-22% Al-0.21% Sc-0.15% Zr alloys. The improvement of the structure and the damping capacity was found to be directly attributed to the precipitation of Al₃Sc and Al₃(Sc, Zr) phases from the aluminum alloy matrix. The internal friction mechanisms of the alloy were put forward.

[Key words] Zr-Al eutectoid alloy; internal friction; Sc; Zr

(编辑 袁赛前)