

Cu 含量对 Al-Cu 合金阻尼性能和储存模量的影响

苏宇辉 江鸿杰 张 平 刘崇宇 黄宏锋
(桂林理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用铸造法制备了不同 Cu 含量的 Al-Cu 合金,并对其微观组织、阻尼性能和储能模量进行研究。研究表明,Al-3Cu 和 Al-4Cu 合金中的 Al₂Cu 相细小且分布均匀,而 Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金中分布着大量块状和条状的 Al₂Cu 相。Cu 含量高的 Al-Cu 合金具有更好的阻尼性能。在 350 ℃时,Al-20Cu 合金的内耗值分别比 Al-3Cu 和 2024 铝合金高 168% 和 352.7%。由于 Al₂Cu 相阻碍了铝基体中的位错滑移运动,导致变形后的残余内应力增加,使得 Al-Cu 合金的储存模量随 Cu 含量增加而增大。Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金的储存模量(E_{IF})均高于 2024 铝合金,Al-20Cu 合金的 E_{IF} 值比 2024 铝合金高 230%。

关键词 Al-Cu 合金;Cu 含量;阻尼性能;储能模量

中图分类号 TG146.21;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.019 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Cu Content on Damping Performance and Storage Modulus of Al-Cu Alloy
Su Yuhui, Jiang Hongjie, Zhang Ping, Liu Chongyu, Huang Hongfeng
(School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology)

Abstract: Al-Cu alloys with different Cu content were fabricated by casting method, and the microstructure, damping properties and storage modulus of Al-Cu alloys were investigated. The results indicate that Al₂Cu phase in the Al-3Cu and Al-4Cu alloys is fine and uniformly distributed, while large amounts of massive and stripped Al₂Cu phases are distributed in Al-5.7Cu, Al-10Cu, and Al-20Cu alloys. Al-Cu alloys with high copper content exhibit desirable damping performance. The internal friction value of Al-20Cu alloy is 168% and 352.7% higher than that of Al-3Cu and 2024 Al alloy at 350 ℃, respectively. Al₂Cu phase hinders the dislocation slip in Al matrix, leading to the increase of residual internal stress after deformation, and the increase of storage modulus of Al-Cu alloy with the increase of Cu content. The storage modulus of Al-5.7Cu, Al-10Cu, and Al-20Cu alloys are higher than that of 2024 Al alloy, and the E_{IF} value of Al-20Cu alloy is 230% higher than that of 2024 Al alloy.

Key Words: Al-Cu Alloy, Cu Content, Damping Performance, Storage Modulus

Al-Cu 合金具有高耐热性、高耐磨损和高比强度等特性,被广泛用于电子零部件、航空航天和轨道交通等领域^[1-3]。工业的现代化发展对航空航天和电子零部件用材的要求越来越高,其设计趋向于选择减振降噪等性能优良的轻合金材料^[4]。减振降噪是飞机设计和高速列车制造中需要考虑的重要问题,其目的是提高飞机和动车组的安全性、舒适性和环保性^[5-6]。阻尼材料是一种将固体机械的振动能转化为内能并将其耗散的材料,提高材料阻尼性能是减振降噪的有效方法之一。但铝合金的低阻尼特性限制了其在航空航天等领域的进一步应用,因此,改善 Al-Cu 合金的阻尼性能有利于拓展其工程应用前景。

铝合金在室温下的阻尼行为主要表现为位错阻尼。在低应变条件下,铝基体中的固溶原子和第二相等强钉扎作用会阻碍位错的滑移,使得合金表现出较低阻尼特性^[7]。在高应变条件下,铝基体中的位错更易于发生滑移运动,促使合金中的位错阻尼贡献增加。高温条件下,铝基体中的界面和晶界更容易发生滑移运动,从而导致铝合金中发生界面和晶界阻尼行为^[8-9]。铝基体中的第二相颗粒可以增加位错和界面的数量,这有利于提高铝合金的阻尼性能^[10]。JIANG H J 等^[11]对 Al-Si 合金进行搅拌摩擦加工(FSP)后发现,FSP 使 Al-Si 合金基体中的 Si 颗粒破碎细化,增加了合金中的相界面数量,使得合金中的界面阻尼贡献增加。LIU C G 等^[12]

收稿日期:2022-11-02;修改稿收到日期:2022-12-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52061011);广西自然科学基金资助项目(2022GXNSFAA035574)
第一作者简介:苏宇辉,男,2000 年出生,学士,广西桂林(541004),E-mail:2076444285@qq.com
通信作者:江鸿杰,男,1980 年出生,副教授,广西桂林(541004),E-mail:jhj2014@glut.edu.cn
引用格式:苏宇辉,江鸿杰,张平,等. Cu 含量对 Al-Cu 合金阻尼性能和储存模量的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 688-1 693.
SU Y H, JIANG H J, ZHANG P, et al. Effects of Cu content on damping performance and storage modulus of Al-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 688-1 693.

采用粉末烧结技术制备了 $Y_2W_3O_{12}/Al$ 复合材料,研究发现增强相颗粒在铝基体中形成了大量的相界面,这些相界面诱发的界面阻尼行为增强了合金的阻尼性能。

Cu 是 Al-Cu 合金的主要强化元素,其强化相主要是 Al_2Cu 相^[13],这些第二相与铝基体形成大量的相界面。Cu 含量越高,在铝基体中形成的 Al_2Cu 相越多,使其相界面数量增加^[14],对合金的界面阻尼贡献越大。因此,有望通过改变 Al-Cu 合金中的 Cu 含量来调节和改善 Al-Cu 合金的阻尼性能。近年来,有研究者对 Al-Cu 合金的微观组织和力学性能进行了广泛的研究,但对其阻尼行为的研究较少。本研究采用常规铸造法制备出 Cu 含量不同的 Al-Cu 合金,并研究 Cu 含量对其微观组织、阻尼性能和储能模量的影响,探究 Al-Cu 合金的阻尼行为机理,为高阻尼 Al-Cu 系合金的设计与制备提供参考。

1 试验方法

以纯铝锭(纯度 $\geq 99.97\%$,质量分数,下同)和 Al-52Cu 中间合金为原料,在马弗炉中熔炼 Cu 含量分别为 3%、4%、5.7%、10% 和 20% 的 Al-Cu 合金,浇注温度控制在 700 $^{\circ}C$ 左右,得到铸件尺寸为 5.5 mm $\times$ 10 mm $\times$ 250 mm,将 Al-Cu 合金铸件在 495 $^{\circ}C$ 进行 24 h 均匀化处理后,再在 530 $^{\circ}C$ 固溶处理 2 h 后获得 Al-Cu 合金试样。此外,采用相同的热处理工艺对 2024 铝合金铸件进行处理。5 种 Al-Cu 合金和 2024 铝合金试样的化学成分见表 1。

将试样进行机械研磨抛光后用于扫描电镜观察,对研磨抛光试样进行阳极覆膜(覆膜液为 3 mL 的 HF 酸+1.1 g 的 H_2BO_3 酸+200 mL 的蒸馏水)处理后用于光学显微镜的偏光模式观察,将试样预磨至 60 μm 厚再进行电解双喷减薄(电解液为 30% 的 HNO_3 +70% 的 CH_3OH)后获得透射电镜试样;采用

表 1 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of Al-Cu alloys and

2024 Al alloy								%
合金	w_B							
	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
Al-3Cu	2.92	0.05	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	余量
Al-4Cu	3.89	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	余量
Al-5.7Cu	5.68	0.05	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	余量
Al-10Cu	9.85	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	余量
Al-20Cu	19.86	0.06	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	余量
2024	4.36	0.14	0.25	0.46	1.49	0.09	0.07	余量

场发射扫描电镜(SEM, ZEISS geminiSEM 300)、光学显微镜(OM, Leica-DMi8)和透射电镜(TEM, JEM 2010)对试样的微观结构进行表征;采用 X'Pert PRO X 射线衍射仪(XRD)对试样的相组成进行分析;采用动态力学分析仪(DMA242E, NETZSCH)对尺寸为 30 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.25 mm 的试样进行阻尼性能(即内耗)和储能模量测试,测试振幅(A)为 10 μm ,温度(T)为 30~360 $^{\circ}C$,频率(f)为 1 Hz,升温速率为 5 $^{\circ}C/min$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 Cu 含量对 Al-Cu 合金微观结构的影响

图 1 为不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的 OM 显微组织。可以看出,Al-3Cu、Al-4Cu、Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金的平均晶粒尺寸分别为 36.7、37.7、40.3、42.4 和 43.8 μm 。随着 Cu 含量增加,Al-Cu 合金的平均晶粒尺寸逐渐增大,Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金中存在大量的黑色颗粒,而 Al-3Cu、Al-4Cu 和 Al-5.7Cu 合金中仅存在少量细小的黑色颗粒。

图 2 为不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的 XRD 谱图。可以看出,Al-3Cu、Al-4Cu、Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金中的相组成均为 $\alpha-Al$ 和 Al_2Cu 相。这说明 Cu 含量的增加对 Al-Cu 合金的相组成没有影响,无新相生成。此外,高 Cu 含量的 Al-Cu 合金中 Al_2Cu 相的

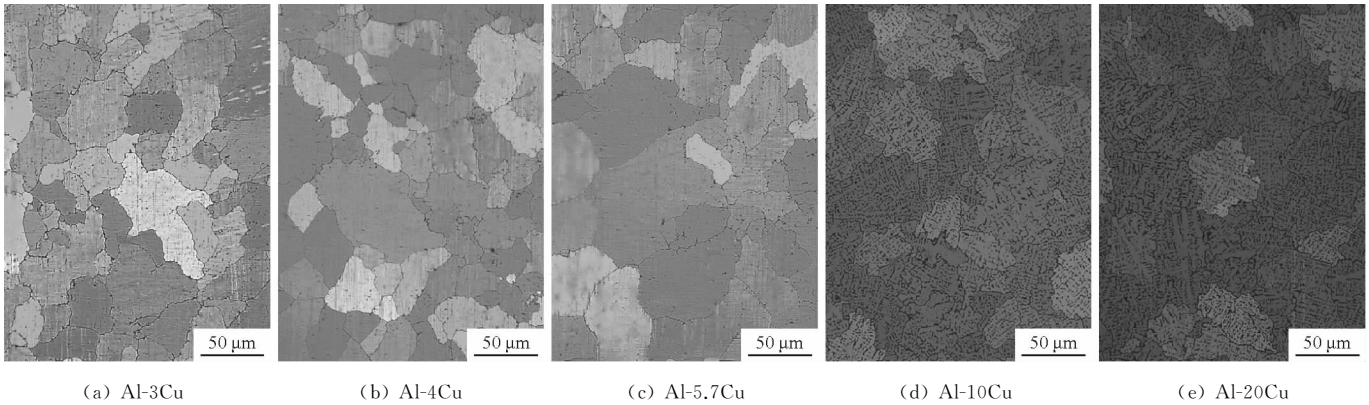


图 1 不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的显微组织

Fig.1 OM images of Al-Cu alloys with different Cu contents

衍射峰强度比低 Cu 含量 Al-Cu 合金高。这是由于随着 Cu 含量增加,过量的 Cu 不能完全溶解,在铝基体中生成大量的 Al_2Cu 沉淀相,使得 Al-Cu 合金中的 Al_2Cu 相衍射峰强度逐渐增加。

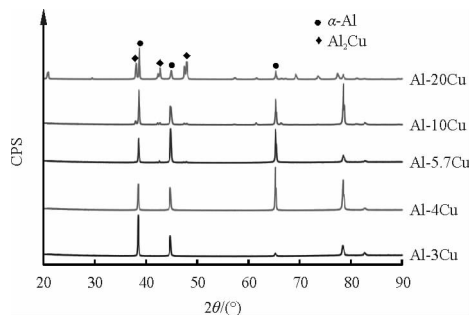


图2 不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的 XRD 谱图

Fig.2 XRD patterns of Al-Cu alloys with different Cu contents

图 3 为不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的 SEM 照片。可以看出,Al-Cu 合金试样中均存在大量的白色析出相。结合 XRD 分析结果可知,这些白色析出相为 Al_2Cu

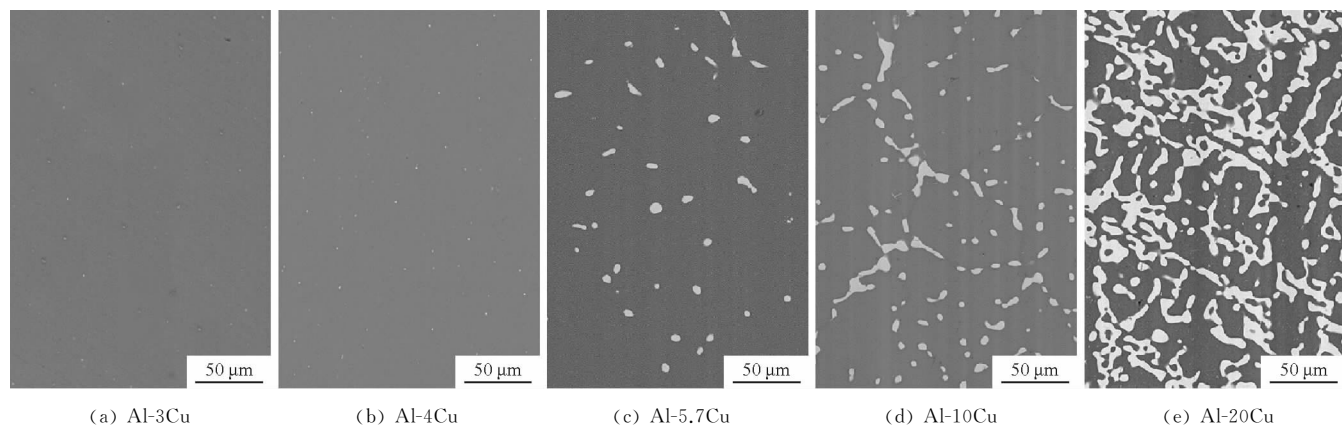


图3 不同 Cu 含量 Al-Cu 合金的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of Al-Cu alloys with various Cu contents

尺寸较大。

2.2 Cu 含量对 Al-Cu 合金阻尼性能的影响

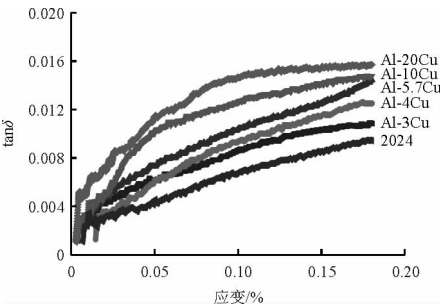
图 4 为 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的内耗-应变和内耗-温度曲线。由图 4a 可以看出,Al-Cu 合金和 2024 铝合金的内耗值均随着应变的增加而增大,其中 Al-Cu 合金的内耗值随着 Cu 含量的增加而增大。当应变量为 0.18% 时,Al-20Cu 合金的内耗值为 0.015 6,分别比 Al-3Cu 和 2024 铝合金的内耗值高了 45.8% 和 66%。室温下,铝合金的阻尼机制主要是位错阻尼。当应变较小时,Al-20Cu 合金中的位错运动受到大量粗大的 Al_2Cu 相阻碍,这使得位错难以滑移,导致合金内耗值较低。随着应变增加,Al-20Cu 合金中的部分位错克服了 Al_2Cu 相的滑移阻碍作用,诱发位错阻尼行为,使得合金内耗值增加。

由图 4b 可以看出,Al-Cu 合金和 2024 铝合金的内耗值随着温度的升高而增大。当温度高于 250 °C 时,

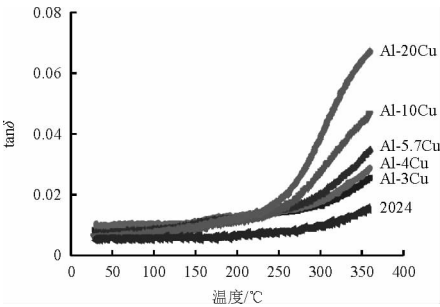
Al-3Cu 和 Al-4Cu 合金中的 Al_2Cu 相细小且分布均匀(见图 3a 和图 3b),而 Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金中则分布着大量块状和条带状的 Al_2Cu 相(见图 3c~图 3e)。在 548 °C 时,Cu 在 α -Al 中的极限固溶度为 5.65%,且随着温度下降,Cu 在 α -Al 中的固溶度逐渐减小,使得 Al-5.7Cu 合金在凝固过程中大量富余的 Cu 以 Al_2Cu 相形式较 Al-4Cu 合金先析出并长大,最终导致 Al-5.7Cu 合金中的 Al_2Cu 相比 Al-4Cu 合金中的多且尺寸大。有研究表明,合金中细小的析出相对晶界有钉扎作用,能抑制晶粒生长^[15]。结合图 1 和图 3 分析可知,Al-3Cu 和 Al-4Cu 合金中的 Al_2Cu 相较小, Al_2Cu 相可以有效地钉扎晶界,抑制晶粒生长,从而导致合金中晶粒尺寸较小。当 Cu 含量大于 5.7% 时,随着 Cu 含量增加,Al-Cu 合金中析出大量的 Al_2Cu 相且逐渐粗大化,这些粗大的 Al_2Cu 相丧失了对晶界的钉扎效应,不能抑制晶粒的生长^[16],导致 Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金的晶粒

Al-Cu 合金的内耗值随着 Cu 含量的增加而显著增加,且 Al-Cu 合金的阻尼性能优于 2024 铝合金。在 350 °C 时,Al-20Cu 合金的内耗值高达 0.067,分别比 Al-3Cu 合金和 2024 铝合金高了 168.0% 和 352.7%。铝合金的高温阻尼行为主要是界面阻尼和晶界阻尼。在高温(>250 °C)条件下,铝合金中易发生晶界和界面滑移^[5,7],从而诱发合金中的晶界和界面阻尼行为,提高了 Al-Cu 合金的阻尼性能。此外,随着 Cu 含量增加,Al-Cu 合金中的 Al_2Cu 相以脆性相的形式大量析出,并逐渐长大(见图 3)。 Al_2Cu 相在合金中形成大量的相界面,这些相界面在高温下发生滑移,从而引发界面阻尼行为,导致 Al-Cu 合金的内耗值增加。因此,Cu 含量高的 Al-Cu 合金在高温下呈现出更好的阻尼性能。

图 5 为 Al-3Cu 和 Al-20Cu 合金的透射电镜(TEM)照片。可以看出,Al-3Cu 合金中存在细小的 Al_2Cu 相,且 Al_2Cu 相周围的位错较少(见图 5a)。而



(a) 内耗-应变曲线(30 °C, 1 Hz)

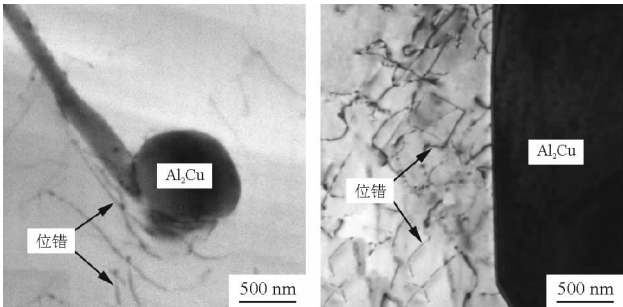


(b) 内耗-温度曲线(10 μm, 1 Hz)

图 4 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的内耗测试曲线图

Fig.4 Curves of internal friction of Al-Cu alloys and 2024 Al alloy

Al-20Cu 合金中存在粗大的 Al_2Cu 相,由于 Al_2Cu 相尺寸较大,在图中看不到完整的 Al_2Cu 相形貌,大量位错分布在 Al_2Cu 相周围(见图 5b)。固溶处理过程中,由于第二相与基体热膨胀系数差异导致界面处形成热错配应变,使得相界面处引发位错增殖,且合金中的第二相颗粒尺寸越大,数量越多,其位错密度越高^[11,17]。随着 Cu 含量增加,Al-Cu 合金中的 Al_2Cu 相逐渐析出且粗化,在粗大的 Al_2Cu 相周围出现大量位错,这些位错在振动形变过程中发生滑移运动,将机械能转化为内能,使得 Al-Cu 合金的内耗值增大。因此,Cu 含量高的 Al-Cu 合金阻尼性能较好,这与阻尼性能测试结果相一致。



(a) Al-3Cu

(b) Al-20Cu

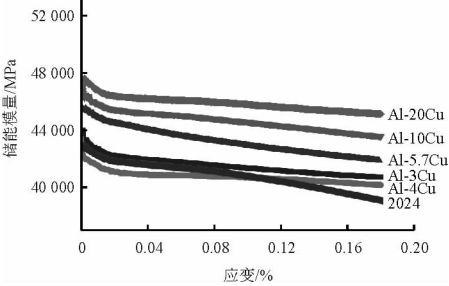
图 5 Al-Cu 合金的 TEM 照片

Fig.5 TEM images of Al-Cu alloy

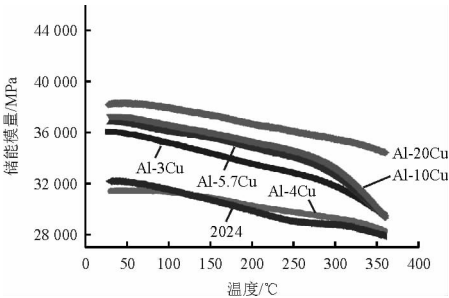
2.3 Cu 含量对 Al-Cu 合金储能模量的影响

图 6 为 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的储能模量-应

变和储能模量-温度曲线。由图 6a 可以看出,Al-Cu 合金和 2024 铝合金的储能模量均随着应变量的增加而减小,其中 Al-5.7Cu、Al-10Cu 和 Al-20Cu 合金的储能模量明显高于 2024 铝合金。有研究表明,材料的储能模量受其残余应力影响,残余应力越大,材料的储能模量越高^[18]。在振动变形过程中,随着应变增加,铝基体中会发生更多的位错滑移^[7],将振动能转化为内能,释放合金中的残余内应力,使得合金的储能模量逐渐减小。在 0.18% 应变条件下,Al-20Cu 合金的储能模量高达 45 096 MPa,分别比 Al-3Cu 合金和 2024 铝合金提高 9.7% 和 13.4%。这是由于 Cu 含量高的 Al-Cu 合金中存在大量粗大的 Al_2Cu 相,使得合金中存在大量的位错和相界面(见图 3 和图 5),在振动变形过程中,这些相界面阻碍位错运动,导致相界面处应力集中,合金中残余内应力增加,有利于提高 Al-Cu 合金的储能模量。由图 6b 可知,随着温度升高,Al-Cu 和 2024 铝合金的储能模量逐渐减小。在 350 °C 时,Al-20Cu 的储能模量为 34 389 MPa,分别比 Al-3Cu 和 2024 铝合金提高了 16.7% 和 23.6%。



(a) 储能模量-应变曲线(30 °C, 1 Hz)



(b) 储能模量-温度曲线(10 μm, 1 Hz)

图 6 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的储能模量测试曲线图

Fig.6 Curves of storage modulus of Al-Cu alloys and 2024 Al alloy

2.4 Al-Cu 合金的综合阻尼性能

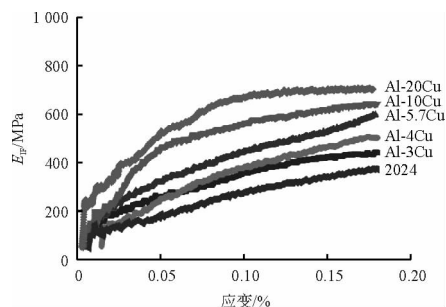
近年来,有研究报道通过储能模量与内耗的乘积值(E_{IF} , 综合阻尼指数)来评价材料综合阻尼性能(E_{IF})^[19]:

$$E_{IF} = E_s \cdot I_F$$

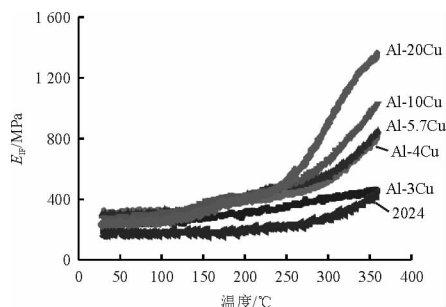
式中, E_s 和 I_F 分别为储能模量和内耗值,合金的 E_{IF} 值

越高,其综合阻尼性能越好^[20]。

图 7 为 Al-Cu 和 2024 铝合金的综合阻尼指数 (E_{IF}) 曲线。可以看出,Al-Cu 合金和 2024 铝合金的 E_{IF} 值均随应变和温度的增加而增大。Al-Cu 合金的 E_{IF} 值高于 2024 铝合金,且 Al-Cu 合金的 E_{IF} 值随 Cu 含量的增加而增大。在 0.18% 应变条件下 Al-20Cu 合金的 E_{IF} 值为 703 MPa,分别比 Al-3Cu 和 2024 铝合金提高了 59.7% 和 89.5%。在 350 °C 时,Al-20Cu 合金的 E_{IF} 值高达 1 361 MPa,分别比 Al-3Cu 和 2024 铝合金提高了 199% 和 230%。



(a) E_{IF} -应变曲线 (30 °C, 1 Hz)



(b) E_{IF} -温度曲线 (10 μm, 1 Hz)

图 7 Al-Cu 合金和 2024 铝合金的 E_{IF} 曲线图

Fig.7 E_{IF} curves of Al-Cu alloys and 2024 Al alloy

3 结 论

(1)随着 Cu 含量增加,Al-Cu 合金中的 Al_2Cu 相逐渐增多并呈现粗大化。Cu 含量的增加对 Al-Cu 合金的相组成没有影响,无新相生成。

(2)Al-Cu 合金的内耗值分别随应变、温度和 Cu 含量的增加而增大。在高温 (>250 °C) 条件下,Al-20Cu 合金的阻尼性能明显优于 Al-3Cu 和 2024 铝合金。 Al_2Cu 相在铝基体中引发大量位错和相界面,在振动形变过程中,这些位错和相界面发生的滑移运动将振动能转化为内能,使得 Cu 含量高的 Al-Cu 合金具有较好的阻尼性能。

(3)Al-Cu 合金的储能模量分别随应变和温度的增加而减小。在振动形变过程中,随着应变和温度增加,合金中出现更多的位错、晶界和界面滑移,导致残余内应力的释放,使得合金的储能模量减小。粗大的 Al_2Cu

相使得 Al-Cu 合金中存在大量的位错和相界面,这些相界面阻碍位错运动,导致合金中残余内应力增加,使得 Cu 含量高的 Al-Cu 合金的储能模量增大。

(4)Al-Cu 合金的综合阻尼指数随着 Cu 含量的增加而增大,Al-20Cu 合金的综合阻尼性能明显优于 2024 铝合金,高 Cu 含量 Al-Cu 合金有望作为轻质阻尼合金材料应用于航空航天和轨道交通等领域。

参 考 文 献

- [1] DENG J W, CHEN C, ZHANG W, et al. Densification, microstructure, and mechanical properties of additively manufactured 2124 Al-Cu alloy by selective laser melting[J]. Materials, 2020, 13 (19): 4 423.
- [2] 岳春雨, 黄宏军, 左晓姣, 等. 稀土 Pr, Sm, Y 对 Al-Cu 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(6): 713-716.
- [3] 文嘉利, 高志华, 高明伟, 等. 电磁搅拌对 2219 铝合金铸锭组织及环轧性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 861-864.
- [4] PARK U, LEE J H, KIM K. The optimal design of the mounting rubber system for reducing vibration of the air compressor focusing on complex dynamic stiffness[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 35(2): 487-493.
- [5] JIANG H J, CHEN Y, LIU C Y, et al. Evaluation of microstructure, damping capacity and mechanical properties of Al-35Zn and Al-35Zn-0.5Sc alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 739: 114-121.
- [6] 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[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(6): 98-102.
- [7] 于博文, 江鸿杰, 杨振兴, 等. 搅拌摩擦加工 5086 铝合金的微观组织与阻尼行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 575-579.
- [8] LI R X, WILDE G, ZHANG Y. Synergizing mechanical properties and damping capacities in a lightweight Al-Zn-Li-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 886: 161 285.
- [9] 黄文益, 江鸿杰, 王一博, 等. 6061 铝颗粒层增强 7075 铝基复合材料的微观结构及阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4 220-4 227.
- [10] WANG W G, LI C, LI Y L, et al. Damping properties of $Li_5La_3Ta_2O_{12}$ particulates reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 2009, A518(1): 190-193.
- [11] JIANG H J, LIU C Y, YANG Z X, et al. Effect of friction stir processing on the microstructure, damping capacity, and mechanical properties of Al-Si alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 1 173-1 179.
- [12] LIU C G, YU L M, MA Z Q, et al. Damping capacity of Al-12Si composites effected by negative thermal expansion of $Y_2W_3O_{12}$ particle inclusions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9 985-9 995.
- [13] ZHOU L, WU C L, XIE P, et al. A hidden precipitation scenario of the θ' -phase in Al-Cu alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 75: 126-138.
- [14] ZHANG Y, LI R Q, CHENG P H, et al. Microstructural evolution of Al_2Cu phase and mechanical properties of the large-scale Al alloy components under different consecutive manufacturing processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808: 151 634.

LZ91 合金板材微弧氧化复合膜层的腐蚀行为

王 润¹ 王忠军¹ 林 茹¹ 刁 爽¹ 胡奉雅² 李维娟¹

(1.辽宁科技大学材料与冶金学院; 2.鞍山钢铁集团公司海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室)

摘 要 在含有石墨烯电解液中对 LZ91 镁锂合金板材进行微弧氧化处理,获得微弧氧化(MAO)膜层,通过浸入法在 MAO 膜层上分别制备出双层导电膜层(MAO/CG)和三层防腐膜层(MAO/CG/AG)。利用金相显微镜和扫描电镜观察微观形貌,通过电化学工作站分析膜层腐蚀行为,利用霍尔效应测量膜层电导率。结果表明,当电解液中石墨烯浓度为 1.0 g/L 时,制备的 MAO 膜层腐蚀为 0.13 mm/a;MAO/CG 双层导电膜层的腐蚀速率为 0.04 mm/a,霍尔效应电导率为 7.89 S/cm;MAO/CG/AG 三层防腐膜层的腐蚀速率为 0.003 mm/a。

关键词 镁锂合金;微弧氧化;石墨烯;复合膜层;耐蚀性

中图分类号 TG178;TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Corrosion Behavior of Micro-arc Oxidation Composite Coating on LZ91 Magnesium Alloy

Wang Run¹, Wang Zhongjun¹, Lin Ru¹, Diao Shuang¹, Hu Fengya², Li Weijuan¹

(1.School of Material and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning;

2.State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Ansteel Group Corporation)

Abstract: LZ91 magnesium lithium alloy sheet was microarc oxidized in graphene electrolyte to obtain MAO film layer. A double-layer conductive film (MAO/CG) and a triple-layer anti-corrosion film (MAO/CG/AG) were prepared on the MAO film layer by immersion method. The micro morphology was observed by metallographic microscopy and scanning electron microscopy, and the corrosion behaviour of the film layers was analyzed by electrochemical workstation, and the electrical conductivity of the film layers was measured using the Hall effect. The results reveal that the minimum corrosion rate of prepared MAO film layer is 0.13 mm/a when the concentration of graphene in the electrolyte is 1.0 g/L, while that of MAO/CG double-layer conductive film layer is 0.04 mm/a and the Hall effect conductivity is 7.89 S/cm. In addition, the MAO/CG/AG triple-layer anticorrosive film layer has corrosion rate of 0.003 mm/a.

Key Words: Magnesium Lithium Alloy, Micro-arc Oxidation, Graphene, Composite Film, Corrosion Resistance

镁锂合金由于密度小、比强度高等特点,在需要轻量化结构化的现代工业领域中展现出广阔的应用前景,但是耐蚀性差,制约了其工业应用,因此需要对其进行表面处理^[1-2]。微弧氧化(MAO)利用表面弧光放电的瞬

收稿日期:2023-02-12;修改稿收到日期:2023-05-12

基金项目:海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室-辽宁科技大学联合基金资助项目[HGSKL-USTLN (2020)05]

第一作者简介:王润,男,1998 年出生,硕士研究生,辽宁鞍山(114051),E-mail:2252887231@qq.com

通信作者:王忠军,男,1969 年出生,教授,辽宁鞍山(114051),E-mail:zhongjunwang@126.com

引用格式:王润,王忠军,林茹,等. LZ91 合金板材微弧氧化复合膜层的腐蚀行为[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 693-1 699.

WANG R, WANG Z J, LIN R, et al. Corrosion behavior of micro-arc oxidation composite coating on LZ91 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 693-1 699.

[15] LI Z, WANG J, HUANG H. Influences of particle fractions on second-phase particles pinning grain coarsening processes[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 55(8): 3 434-3 449.

[16] HUANG Y, WANG Y, CHEN Z. Phase field simulation of the second phase particle precipitation at boundaries and its pinning effect[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(10): 1 751-1 755.

[17] ZHOU Q, HUA D P, DU Y, et al. Atomistic study of atomic structures and dislocation nucleation at Al/Al₂Cu interfaces[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 120: 115-126.

[18] NI N, WEN Y F, HE D L, et al. Synchronous improvement of loss factors and storage modulus of structural damping composite with functionalized polyamide nonwoven fabrics[J]. Materials and Design, 2016, 94: 377-383.

[19] GUO W, KATO H. Development of a high-damping NiTi shape-memory-alloy-based composite[J]. Materials Letters, 2015, 158: 1-4.

[20] ZHOU G F, JIANG H J, LIU C Y, et al. Effect of porous particle layer on damping capacity and storage modulus of AlSi30_p/5052Al composites[J]. Materials Letters, 2021, 300: 130 162.

(编辑:栗万仲)