

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2024.06.003

Sc 对 Al-Bi 偏晶合金凝固组织及耐磨性影响的研究

杨志彬¹, 常江¹, 成洁¹, 鞠晓婷¹, 李智翔¹, 余建波²

(1. 江苏科技大学 冶金工程学院, 江苏 张家港 215600;

2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 采用微合金化的方法, 研究了稀土元素 Sc 对 Al-Bi 偏晶合金凝固组织及耐磨性的影响。通过 OM、SEM、TEM、XRD 多功能材料表面性能测试仪等设备对试样进行检测分析。结果表明: 微量 Sc 元素的加入降低了富 Bi 相的形核能, 增加了形核位置, 有效地改善了富 Bi 相的成分偏析现象, 减小了 Al 基体的晶粒大小。同时微量 Sc 元素能显著提高 Al-Bi 合金的硬度及摩擦系数, 当 Sc 含量在 0.25 wt% 时硬度与摩擦系数皆取得极大值, 此时较未加 Sc 时, 硬度提升了 109%, 摩擦系数提升了 33%。当 Sc 的含量增加到 1 wt% 时, 试样中发现了密集的 Al₃Sc 相, 具有规则的几何轮廓, 并且有明显的偏聚行为。富 Bi 相与 Al₃Sc 相两种相单独析出, 互不干涉。

关键词: 偏晶合金; 微观组织; 摩擦系数; 析出相

中图分类号: TG146.2; TG115.5+8; TG178.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)06-0017-09

The Effect of Sc on the Tolidification Ticrostructure and Wear Resistance of Al-Bi Partial Crystalline Alloys

YANG Zhibin¹, CHANG Jiang¹, CHENG Jie¹, JU Xiaoting¹, LI Zhixiang¹, YU Jianbo²

(1. School of Metallurgical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The effects of rare earth element Sc on the solidification structure and wear resistance of Al-Bi partial crystal alloy were studied by microalloying method. The samples were tested and characterized by OM, SEM, TEM, multifunctional surface properties tester and other equipment. The results show that the addition of trace Sc element reduces the form energy of the Bi-rich phase and increases the nucleation position. It effectively eliminates the component segregation of the Bi-rich phase, and reduces the grain size of the Al matrix. At the same time, trace Sc element can significantly improve the hardness and friction coefficient of Al-Bi alloy, when the content of Sc is 0.25 wt%, the hardness and friction coefficient can reach the maximum value. Compared with without Sc, the hardness is increased by 109%, and the friction coefficient is increased by 33%. When the content of Sc increased to 1 wt%, a dense Al₃Sc phase was found in the sample, with a regular geometric profile and obvious segregation behavior. The two phases of Bi-rich phase and Al₃Sc phase are precipitated separately and do not interfere with each other.

Key words: partial crystalline alloy; microstructure; coefficient of friction; precipitated phase

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 张家港市科技计划项目(社会发展)(ZKS2104); 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室开放基金(JKF21-01); 上海大学高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室上海市钢铁冶金新技术开发应用重点实验室开放课题项目(SKLASS2021-01)

Fund: Zhangjiagang Science and Technology Plan Project(Social Development)(ZKS2104), Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction and Comprehensive Utilization of Resources of Ministry of Education Open Fund(JKF21-01), State Key Laboratory of High-Quality Special Steel Metallurgy and Preparation of Shanghai University, Shanghai Key Laboratory of New Iron and Steel Metallurgy Development and Application Open Project(SKLASS2021-01)

作者简介: 杨志彬(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事铝合金偏晶合金方面研究。

引用格式: 杨志彬, 常江, 成洁, 等. Sc 对 Al-Bi 偏晶合金凝固组织及耐磨性影响的研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(6): 17-25.

YANG Zhibin, CHANG Jiang, CHENG Jie, et al. The Effect of Sc on the Tolidification Ticrostructure and Wear Resistance of Al-Bi Partial Crystalline Alloys[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6): 17-25.

偏晶合金又称不溶合金,其典型特点是在液态下存在一个不混溶区间^[1]。偏晶合金种类繁多,其中 Al-Bi 合金是 Al 基偏晶合金的重要成员。Al-Bi 系合金具有良好的耐磨性、抗疲劳性和抗咬合能力,这是当软质的富 Bi 相弥散分布于 α -Al 基体中时能最大化的发挥偏晶合金自润滑,从而使合金拥有较低的摩擦系数。Al-Bi 合金常被用于轴承合金材料,并且在航天、船舶、汽车邻域都有着及其重要的位置^[2]。但由于此类合金基体与合金元素成分之间并不相容,在金属液降温过程中,从均一的液相会分离出两种液相。Bi 等不溶合金元素会通过扩散方式、Ostwald 熟化等方式,以小液滴的形式从富 Al 金属液中析出,并在 Stokes 重力凝并、Marangoni 运动以及 Brownian 碰撞等多种机理的联合作用下^[3],导致相分层,形成严重的成分偏析,进而使偏晶合金的机械性能及综合力学性能大幅下降。目前,科研工作者常采用,粉末冶金^[4]、外加磁场^[5]、搅拌铸造^[6]、快速凝固^[7-8]、加晶粒细化剂^[9]、微合金化^[10-11]等方法解决成分偏析问题。其中微合金化因易于操作且方便推广应用而受到广泛关注。研究表明第三元素的加入对偏晶合金的偏析、凝固过程都有较大影响。杨永辉等^[12]研究了 Ti 对 Al-Bi-Sn 难混溶合金凝固组织的影响,发现 Al 基体中析出了交错分布的棒状的 Al_3Ti 硬质化合物,阻碍了液滴的凝并过程,并提高了基体的硬度。舒小飞^[13]在机械合金化 Al-Sn 系轴承合金中添加 Si 后的组织结构及性能进行了研究,并发现添加 Si 能使合金的硬度有一定提高,但是当试样表层受到犁削并脱落时, Si 粒子会裸露出来,并增加摩擦副的阻力,最终提高摩擦系数。黎旺等^[14]探究了 Al-Bi 合金凝固过程及微合金化元素 Sn 的影响,结果发现 Sn 元素能影响 Al-Bi 合金的液-液相变过程,使富 Bi 相粒子得到细化,且 Sn 含量越高细化效果越强,当 Sn 元素的质量百分比 $\geq 0.10\%$ 时,细化效果最佳。因此,本实验试图通过微合金化的方式,于常规重力条件下,在 Al-Bi 偏晶合金中加入稀土元素 Sc(有研究发现,当 Sc 元素加入 Al 基合金时, α -Al 相及合金中其余析出相晶粒都得到大幅细化^[15-16]),研究 Sc 元素的加入对合金组织及摩擦性能的影响,并分析影响组织及性能发生变化的机理。

1 实验方法

本实验以 Al-10Bi 合金为研究对象,通过控制 Sc 元素的加入量以形成对照实验。原料中的 Al、Bi

金属块,其纯度皆为 99.99%,并通过添加 2% 的 Al-Sc 合金提供稀土元素 Sc。在常规重力条件下,以耐火黏土坩埚为容器,并控制井式熔炼炉升温至 850 $^{\circ}\text{C}$ 。为防止合金元素挥发,先将 Al 块置于炉内的坩埚中保温,待完全熔融后再按比例加入 Bi、Al-2 wt% Sc,在充分搅拌后,将合金液浇筑于内径 4 cm、高 12 cm 的柱形铜模具中空冷。脱模后在距离铸锭底部 1 cm 处(底部易于发生重力偏析^[17])进行切割并得到金相试样。经过砂纸研磨并用 P-2 型金相试样抛光机抛光处理后的金相试样,再用质量分数 5% 的 HF 溶液进行抛光面腐蚀。使用 Axio-Scope Al 型光学显微镜(OM),Quanta450 型扫描电子显微镜(SEM)及 JEM-2100F 型透射电子显微镜(TEM)观察试样的微观组织及结构。通过 Ultima IV 型 X 射线衍射仪(XRD)分析是否发生相变。通过 HVS-1000A 型多功能材料表面性能测试仪测定试样的摩擦系数,测试时间为 0.5 h,载荷为 20 N,滑动速度为 50 mm/min,干摩擦。选用显微维氏硬度测试仪测定试样的硬度,载荷 1 N,在待测面不同区域取五个测试点,所得数据分别去掉一个最大值与最小值并求其均值。以上实验均在室温下进行。

2 实验结果

图 1 为加入不同含量 Sc 元素的 Al-10Bi-xSc 合金的金相组织照片,放大倍率为 200 倍。在图 1(a)和(b)中都可观察到有较大的球型富 Bi 相颗粒且这些富 Bi 相颗粒主要分布于 α -Al 晶界处。而在图 1(c)至 1(f)观察到,富 Bi 相数目逐渐增多,尺寸也随着 Sc 含量的增加逐渐变小,分布位置逐渐从晶界处扩散到整个截面,呈现弥散分布。这说明微量 Sc 元素的加入促进了富 Bi 相的形核,同时降低了 Al 基体的晶粒大小。

图 2 为不同 Sc 含量下的 Al-10Bi-xSc 合金富 Bi 相平均粒径分布图。图 2 数据由图 1 金相照片中取 20 个尺寸较大且颗粒清晰的富 Bi 相,用 ImageJ 软件量取每个颗粒的最大直径,而后通过 Origin 软件所绘的统计图。从图 2 可观察到,随着 Sc 含量在 $[0, 0.25]$ 区间内增加,富 Bi 相颗粒的平均粒径由 8.55 μm 下降到 3.61 μm ,即大颗粒的富 Bi 相粒子减少,富 Bi 相直径变得越来越小。同时标准差也由 3.58 下降到 0.99,即富 Bi 相颗粒愈加均一。这说明微量的稀土元素 Sc 能够降低富 Bi 相颗粒。

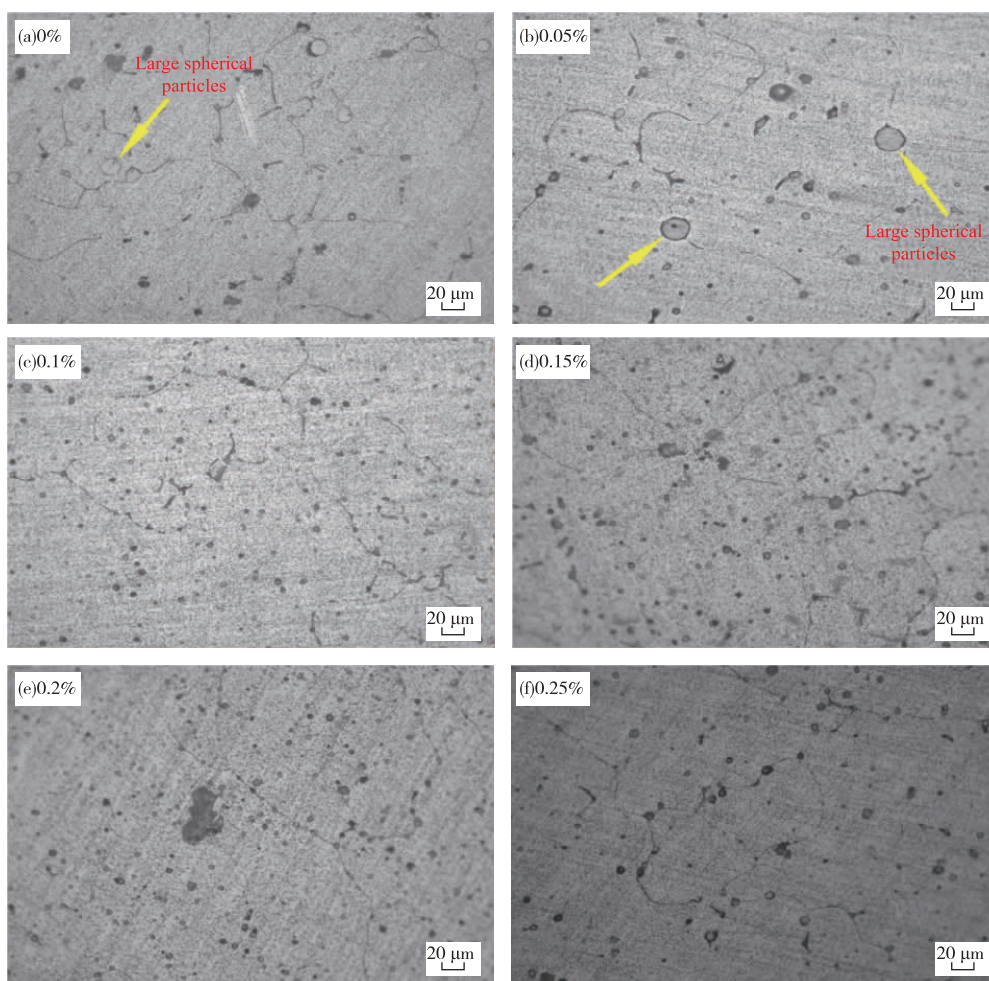


图 1 加入不同含量 Sc 元素的 Al-10Bi-xSc 合金 200 倍金相组织照片

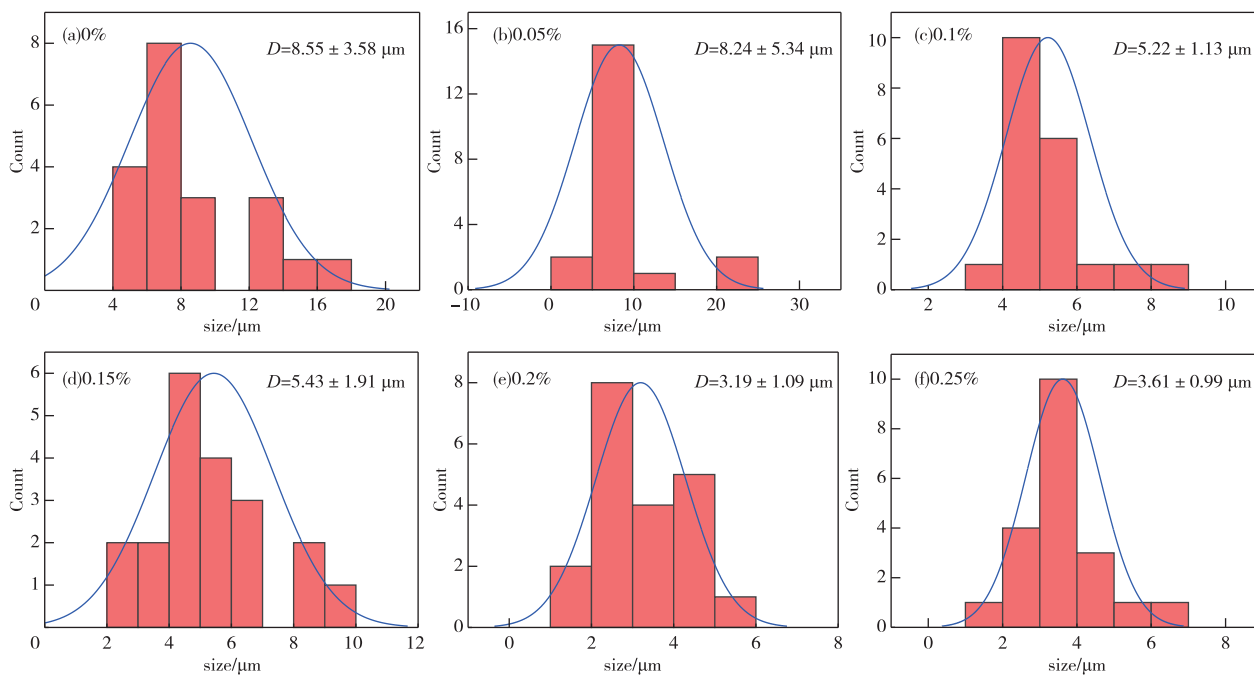
Fig. 1 200 $\times$ microstructure of Al-10Bi-xSc alloy with different content of Sc elements

图 2 粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution

为了进一步分析 Sc 元素在 Al-10Bi- x Sc 合金中的分布,将 Sc 的含量增加到 1%。图 3(a)为 Al-10Bi-1Sc 试样腐蚀前的 200 倍原始金相组织照片,图 3(b)为腐蚀后的金相照片(便于观察 α -Al 基体晶粒的基本特征)。

首先,在图 3(a)中可观察到 Sc 含量提升到 1%

时,单位面积下,富 Bi 相数量较 Sc 含量 0.25% 时有显著增多,且分布更弥散。而在图 3(b)中观察到 α -Al 基体的晶粒尺寸相较 Sc 含量 0.25% 时进一步减小。同时在图 3(a)、(b)中的箭头所指处发现数量较多的在二维上呈三角形、正方形、五边形等规则形状的相,其平均晶粒直径在 10 μm 左右。

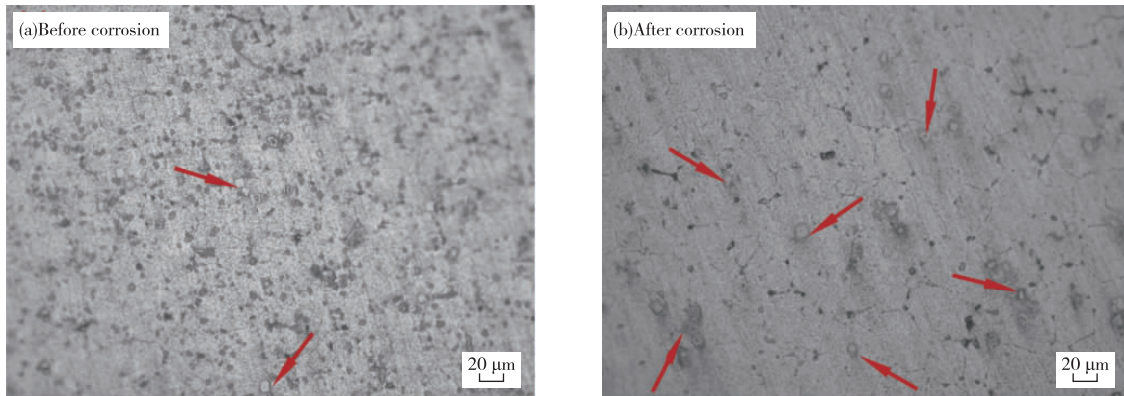


图 3 Al-10Bi-1Sc 试样 200 倍金相组织照片

Fig. 3 Al-10Bi-1Sc specimen 200 $\times$ metallographic structure images

图 4 为 Al-10Bi-1Sc 试样腐蚀后不同放大倍率下的 SEM 和 EDS 面扫照片。其中,图 4(a)为 400 倍 SEM 照片,照片中可明显地看到数量众多且形状规则的相,对应的在图 4(c)、(e)中可直观地观察到(a)区域中 Bi 元素与 Sc 元素的分布,对比可知,

图 4(a)中显示出亮白色的颗粒为富 Bi 相,多为蠕虫状及不规则形状,显然富 Bi 相在 α -Al 基体中的分部均匀而分散,而 Sc 元素则在部分区域分布密集,发生了明显的偏聚现象。而且富 Bi 相的分布与 Sc 元素偏聚的区域并无明显重叠。对图 4(a)中红色

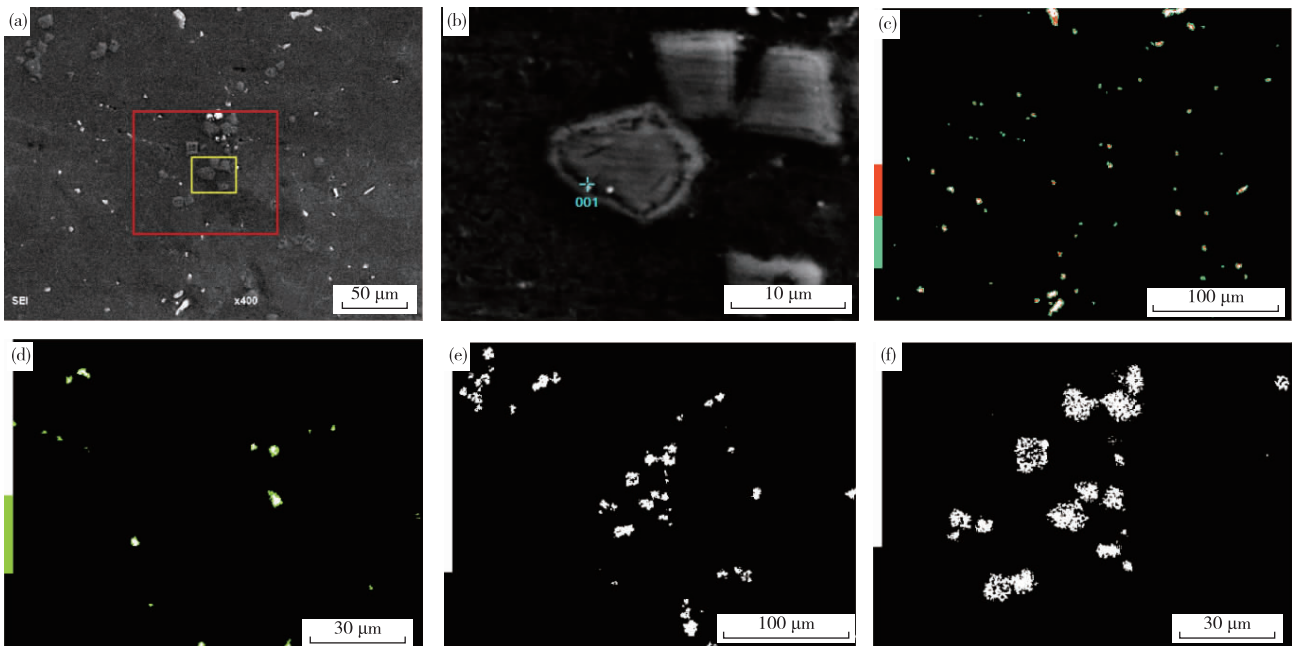


图 4 Al-Bi-1Sc 试样腐蚀后不同放大倍率下的 SEM 图像及表面扫描成分分析:(a)400 倍 SEM 照片,

(b)3 000 倍 SEM 照片,(c)、(d)Bi 元素分布图,(e)、(f)Sc 元素分布图

Fig. 4 Analysis of SEM images and surface scan composition at different magnifications after corrosion of Al-Bi-1Sc specimens: (a)400 $\times$ SEM photos, (b)3 000 $\times$ SEM photos, (c) and (d)Bi element distribution diagram, (e) and (f)Sc element distribution diagram

矩形内的区域(Sc元素分布较为密集)进一步放大到1 000倍,并对此区域再次进行能谱面扫描得到图4(d)、(e)。其中,从Sc元素分布图4(e)中可清楚观察到,富集Sc元素的区域轮廓呈现出多边形。而从将图4(a)中Sc富集的区域放大至3 000倍后所得到的图4(b)中也可观察到,富Sc相轮廓呈四边形,同时箭头所指的富Sc相拥有壳状结构,在核与壳之间发现了两个极其微小的富Bi相颗粒。因此可得,在图3中广泛分布的多边形相为富Sc相。

图5为不同Sc含量的Al-10Bi-*x*Sc合金试样的XRD图谱。通过对比图谱得,当Sc含量小于等于0.25%时,只有Al相的峰较为明显,而在Sc含量为1%试样的XRD图谱中可观察到有峰强度突增,通过对比标准PDF卡片初步判定该峰为Al₃Sc相的衍射峰。

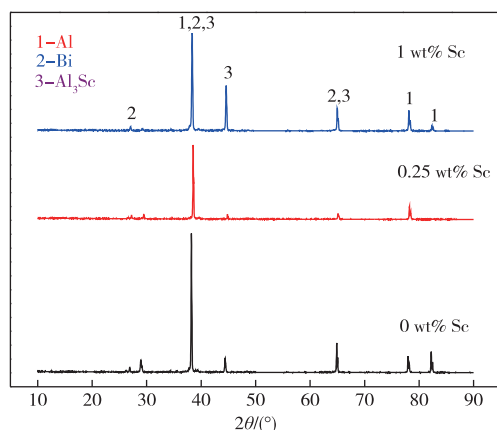


图5 合金在不同Sc含量下的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of alloys at different Sc contents

图6为Al-10Bi-1Sc试样的TEM照片与成分分析结果。其中,图6(a)为对试样局部放大20 000倍后的组织照片,照片中可清晰地观察到类矩形的第二相,对图6(a)中红色矩形与黄色矩形区域进行定量分析得到表1,定量分析的结果显示,红色矩形区域的Sc质量占比为23.70%,原子占比为15.71%,而黄色矩形区域的Sc质量占比仅有0.18%,原子占比为0.11%。显然红色矩形区域为类矩形第二相的一部分。这说明类矩形的第二相确实富集了大量的Sc元素;而属于α-Al基体的黄色矩形区域部分也检测出极少量的Sc元素,则可认为Sc元素并非全部发生偏聚,仍有极少量Sc存在于基体。对图6(a)中红色矩形区域进一步放大并经过傅里叶变换后得到图6(b)电子衍射斑点。由于晶体结构未知,故而采用PDF卡片法进行标定。通

过查标准PDF卡片并进行比对。用ImageJ测量A、B与中心斑点的夹角为42.65°,B、C与中心斑点的夹角为66.60°。将晶面指数代入晶面夹角公式进行验证:

$$\cos\varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}} \quad (1)$$

式中, φ 为晶面夹角, h 、 k 、 l 为晶面指数。可得,此衍射花样与编号为14-0412的Al₃Sc相匹配。故,可认为类矩形的第二相,其主要成分为Al₃Sc,立方晶系,空间群:Pm-3m(221), $a=4.10$ nm。

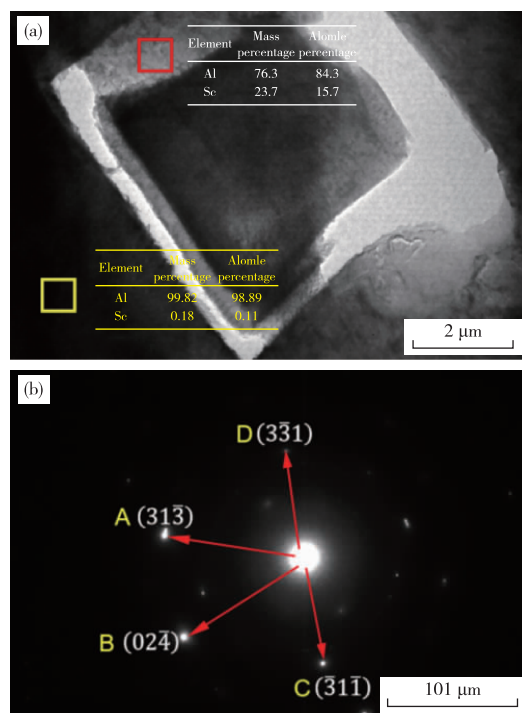


图6 Al-10Bi-1Sc合金的TEM照片及定量分析:

(a)20 000倍TEM照片,(b)电子衍射斑点

Fig. 6 TEM images of Al-10Bi-1Sc alloy: (a)20 000x TEM photograph, (b)Electron diffraction spots

以上研究表明:在Al-Bi合金中添加Sc,可以细化晶粒,改善第二相的分布,这有利于提升Al-Bi合金的耐磨性。因此对不同含Sc的Al-Bi合金进行耐磨性检测,其结果见图7。从图7可直观看出,随着Sc含量在[0,0.25]区间内增加,Al-10Bi-*x*Sc合金平均硬度呈增涨趋势。Sc含量在[0,0.15]区间内硬度增长缓慢,而在[0.15,0.25]区间内增长显著,在[0,0.25]区间内呈现出指数型增长趋势。Al-10Bi-*x*Sc合金试样在0 wt%Sc时试样硬度约为22.9 HV,而当加入0.25 wt%Sc后硬度约为47.5 HV,在数值上提升了107%,可见微量稀土元素Sc的加入对Al-Bi系偏晶合金硬度有显著提升。

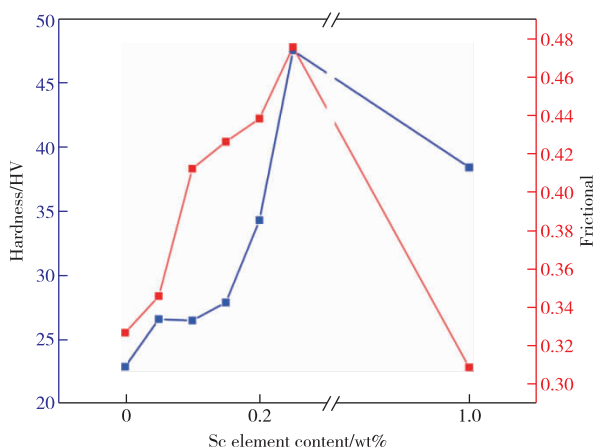


图 7 Sc 含量对 Al-Bi 合金硬度与摩擦系数大小的影响

Fig. 7 Effects of Sc contents on hardness and friction coefficient of Al-Bi alloy

同时,实验数据显示出,当进一步加入 Sc 元素至 1 wt% 时,合金硬度有小幅下降。而在摩擦系数的数据中观察到,对于 Al-10Bi- x Sc 偏晶合金,未加入 Sc 元素时的摩擦系数为 0.326,随着微量 Sc 所占质量百分比的增加,合金摩擦系数总体呈现出上升趋势,并在加入 0.25 wt% Sc 时达到摩擦系数的极大值 0.475,较未加入 Sc 时提高了 33%。因此可得,微量的稀土 Sc 的加入会增大 Al-Bi 系偏晶合金的摩擦系数,且 Sc 含量越大,合金摩擦系数越大。但当 Sc 含量提高到 1 wt% 时,摩擦系数出现最小值 0.306。这与 Al_3Sc 相的析出有关。同时注意到,从实验趋势上看,硬度与摩擦系数的变化趋势大致相同,因此可认为硬度与摩擦系数有内在相关性。

3 分析讨论

首先,在未加入 Sc 元素时,富 Bi 相主要于晶界处析出。这是由于,晶界作为一种缺陷,能更好地满足形核所需的能量起伏、结构变换及物质交换。而随着 Sc 质量百分比在 [0, 0.25] 区间内增加,富 Bi 相开始在 Al 基体内部形核生长,这是由于稀土元素往往能吸附杂质元素,并在晶体缺陷处形成稳定化合物^[18],不仅提高了金属液的浓度,使熔体的过冷度增大,同时这些稳定化合物颗粒为非均质形核提供了条件。从热力学角度而言,均匀形核的吉布斯自由能由界面能的增加与内能的降低两部分之和构成,即:

$$\Delta G_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma \quad (2)$$

而对非均质形核有:

$$\Delta G_2 = \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma \right) \left(\frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right) \quad (3)$$

式中, ΔG 为析出相在形核时总的吉布斯自由能变化值, ΔG_v 为原子由高能游离态转变为低能且规则排布的晶态的能量变化值, r 为形核半径, σ 为比表面能, θ 为晶核与型壁的接触角。显然 $\Delta G_1 \geq \Delta G_2$, 当且仅当 $\theta = 180^\circ$ 时等式成立,而在非极端情况下 θ 始终小于 180° 。由于这种非均质形核所需的 ΔG 更低,相当于增大了析出相的过冷度,故而降低了富 Bi 相在 α -Al 基体内部的形核与生长的难度。同时,过冷度增加会使临界形核半径减小,而形核率也会因此迅速增加,最终导致基体的晶粒细化,晶界面积增加。在常温下,晶界能有效阻碍位错的滑移,晶粒越细小,晶界的面积越大,因此,金属材料的强韧度往往与晶粒的细小程度有关,遵循 Hall-Petch 公式,其具体表达式为:

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + k d^{-0.5} \quad (4)$$

式中, k 为 Hall-Petch 因子。 k 主要表征了晶界强化的程度,代表了晶界作为障碍物抵抗滑移传播的能力。所以细晶强化是 Al-Bi- x Sc 合金硬度显著增加的原因之一。

而富 Bi 相晶粒大小降低是由于, Al_3Sc 是一种稳定相,拥有较高的熔点 (1320°C), 因此金属液在凝固过程中, Al_3Sc 相会在熔体中优先析出^[19], 导致熔体的黏度增大,阻碍了富 Bi 相的凝并偏析现象^[20]。

当 Sc 含量提升至 1 wt% 时,试样中析出了规则几何轮廓的 Al_3Sc 相,无独有偶,LIU 等^[21] 在研究熔盐电解制备 Al-Sc 合金中 Sc 和独特原生 Al_3Sc 的偏析行为时,在 Al-1.38 wt% Sc 合金中也发现了类似结构(其二维截面形状包括空心四边形、三叉戟星形、三角形、对偶三角形和十字形),并发现低冷却速率可以使富 Sc 相从枝晶状长成粗长方体或其他几何形状,但冷却速率与 Sc 元素的偏聚现象无关^[22]。由于本实验的试样在制备过程中并未干预冷却速率,而采用室温下在模具内缓慢冷却的冷却方式,冷却速率较低,因此产生了规则几何轮廓的 Al_3Sc 相。已经有研究指出,析出相的演变过程分为:形核、生长和吞并吸收(Ostwald 熟化)三个阶段^[23]。在形核阶段,过冷金属液中 Al 原子和 Sc 原子在基本作用力的影响下,发生团簇,体积不断变大,并达到临界形核半径。研究者推导出其形核速率为^[24]:

$$I = K \cdot \exp\left[\frac{-(4\pi\sigma(\gamma^*)^2 + Q^*)}{3kT}\right] \quad (5)$$

式中, K 为比例常数、 Q^* 为活化能、 h 为普朗克常数、 k 为玻尔兹曼常数、 σ 为比表面能、 T 为温度。显然当温度降低时, I 增大,形核速率增大。而在晶粒长大的过程中,液固界面的构造决定了晶体凝固的形状。大多数金属晶体凝固初期,属于非小平面形状,其典型特征为树枝型晶体。这是由于其固液界面呈负温度梯度,即液相温度随液-固界面距离的增大而降低。当固体界面向液相生长时,由于离固相界面越远的液相温度越低,过冷度越大,也越有利于晶核生长,突出的枝晶进一步液相生长,固液界面也就无法保持平面,并不断生出枝晶^[25]。并且已有研究证明当冷却速率快时, Al_3Sc 相确实呈枝晶状^[21]。当冷却速率缓慢时,原子得到充分扩散,并且以连续长大的生长方式生长,其生长速率受动态过冷度控制。由于受Al原子与Sc原子的扩散速率和熔点不同等因素的影响,最终形成了规则几何轮廓的 Al_3Sc 相,其具体机理有待探究。

吞并吸收阶段,即小的析出相溶解,其原子被更大的析出相吸收,使得 Al_3Sc 拥有较大的尺寸,这与本实验中平均晶粒达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的结果相吻合。该过程可参考如下模型^[26-27]:

$$r^3 - r_0^3 = \frac{8\sigma V_m^\beta}{9RT \left[\frac{C_1^\alpha (1 - k_1)^2}{D_1} + \frac{C_2^\alpha (1 - k_2)^2}{D_2} \right]} \quad (6)$$

该模型描述了析出相的吞并行为,式中, r_0 为起始时刻的半径、 r 为任一时刻的半径、 σ 为界面自由能、 V_m 为析出物的摩尔体积、 k_i 为第 i 种元素的分布系数、 D 为扩散系数、 R 为气体常数、 T 为温度、 α 与 β 代表不同的相。

有研究表明,软第二相颗粒(Bi、In和Pb)的尺寸和分布对偏晶合金的耐磨性起着重要作用。Al-Bi合金的磨损体积随着第二相相间距离的增加而增加,因此相间距离小、直径越小的颗粒分布越均匀,合金的耐磨性越好^[28-29]。有文献指出影响摩擦系数的主要因素有:材料的性质、载荷、滑动速度、温度、表面粗糙度、表面氧化膜等^[30]。由于本实验在实验过程中,载荷、滑动速度、表面粗糙度、温度等因素都得到严格控制,且试样表面氧化膜都为 Al_2O_3 ,因此,微量Sc含量提高导致试样摩擦系数呈现升高趋势的实验结果与Sc元素的加入及第二相的析出有关。

4 结论

1)微量Sc元素的加入增加了富Bi相的形核条件及形核位置,降低了富Bi相颗粒Al基体的晶粒大小,同时使富Bi相颗粒愈加均一。

2)将Sc的含量增加到 $1\text{ wt}\%$ 时,试样中发现了规则几何轮廓的第二相,通过XRD、TEM等手段进行分析,并最终确定该相为 Al_3Sc 相。

3)通过SEM+EDS分析发现, Al_3Sc 相有明显的偏析行为。且富Bi相与 Al_3Sc 相的分布并无明显重叠。即可认为两种相单独析出,互不干涉。

4)微量Sc元素的加入能使 $\alpha\text{-Al}$ 基体的晶粒细化,极大提高了Al-Bi合金的硬度,同时也提高了摩擦系数,当Sc含量在 $0.25\text{ wt}\%$ 时,硬度与摩擦系数皆取得极大值,此时较未加Sc时,硬度提升了 109% ,摩擦系数提升了 33% 。当Sc元素达到 $1\text{ wt}\%$ 时,摩擦系数取得最小值 0.306 。

参考文献:

- [1] WEI H T, WANG C P, YANG S Y, et al. Integrated design of hydrogen production and thermal energy storage functions of Al-Bi-Cu composite powders[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(40):14931-14940.
- [2] YANG Q, SUN Z, WANG Z. Effects of Sn, Si, and Cu addition on the microstructure and properties of hypermonotectic $\text{Al}_{92}\text{-Bi}_8$ alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 756:71-81.
- [3] 赵九洲, 江鸿翔. 偏晶合金凝固过程研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(5):682-700.
ZHAO Jiuzhou, JIANG Hongxiang. Research progress on the solidification process of polarized alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(5):682-700.
- [4] CHIARA C, ELISABETTA G. Combined powder metallurgy routes to improve thermal and mechanical response of Al-Sn composite phase change materials[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(12):3226-3239.
- [5] 李书豪. 电磁搅拌及稀土La添加对Al-Sn合金组织与性能的影响[D]. 赣州:江西理工大学, 2022.
LI Shuhao. Effects of electromagnetic stirring and rare earth La addition on the microstructure and properties of Al-Sn alloy[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [6] HAWKSWORTH A, RAINFORTH W M, JONES H. Solidification microstructure selection in the Al-rich Al

- La, Al—Ce and Al—Nd systems[J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 197(1/2): 286-296.
- [7] 唐跃跃, 赵李新, 陈正. 快速凝固条件下 Ni—Pb 偏晶合金的组织演变机理研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(6): 148-153.
TANG Yueyue, ZHAO Lixin, CHEN Zheng. Study on the microstructure evolution mechanism of Ni—Pb polarized alloys under rapid solidification conditions[J]. Precision Forming Engineering, 2022, 14(6): 148-153.
- [8] 俞伟元, 路文江, 陈学定, 等. 退火对快速凝固 Al—Si—Cu 合金脆性的影响[J]. 有色金属, 2005(3): 5-7.
YU Weiyuan, LU Wenjiang, CHEN Xueding, et al. Effect of annealing on the brittleness of rapidly solidifying Al—Si—Cu alloys[J]. Nonferrous Metals, 2005(3): 5-7.
- [9] WANG T M, CAO F, CHEN Z N, et al. Three dimensional microstructures and wear resistance of Al—Bi immiscible alloys with different grain refiners[J]. Science China (Technological Sciences), 2015, 58(5): 870-875.
- [10] 张宏闻, 洗爱平. 第三组元对 Al—Bi 偏晶合金凝固组织的影响[J]. 金属学报, 2000(4): 347-350.
ZHANG Hongwen, XIAN Aiping. Effect of the third component on the solidification microstructure of Al—Bi metastable alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000(4): 347-350.
- [11] 陈书, 赵九洲. Sn 对 Al—Pb 偏晶合金凝固过程及组织的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(5): 561-566.
CHEN Shu, ZHAO Jiuzhou. Effect of Sn on the solidification process and microstructure of Al—Pb polarized alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 561-566.
- [12] 杨永辉, 张林, 张道琦, 等. Ti 对 Al—Bi—Sn 难混溶合金凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1410-1415.
YANG Yonghui, ZHANG Lin, ZHANG Daoqi, et al. Effect of Ti on the solidification microstructure of Al—Bi—Sn immiscible alloys[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2021, 41(11): 1410-1415.
- [13] 舒小飞. 添加 Si 对机械合金化 Al—Sn 系轴承合金的组织结构及性能影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
SHU Xiaofei. Effect of Si addition on the microstructure and properties of mechanically alloyed Al—Sn bearing alloys[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 黎旺, 孙倩, 江鸿翔, 等. Al—Bi 合金凝固过程及微合金化元素 Sn 的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(7): 831-839.
LI Wang, SUN Qian, JIANG Hongxiang, et al. The solidification process of Al—Bi alloy and the influence of the microalloying element Sn[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(7): 831-839.
- [15] 胡志奎. Sc、Zr 含量对超重力场凝固 Al—Ni—Co 合金显微结构与力学性能的影响[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
HU Zhikui. Effect of Sc and Zr contents on the microstructure and mechanical properties of Al—Ni—Co alloy solidified in hypergravity field[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022.
- [16] 雷欣, 郭永春, 王建利, 等. Sc 添加量对 Al—Si 系活塞合金组织及蠕变性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023(22): 89-94.
LEI Xin, GUO Yongchun, WANG Jianli, et al. Effect of Sc addition on microstructure and creep properties of Al—Si piston alloys[J]. Thermal Working Technology, 2023(22): 89-94.
- [17] MAN T, ZHANG L, XU N, et al. Effect of rare-earth Ce on macrosegregation in Al—Bi immiscible alloys[J]. Metals—Open Access Metallurgy Journal, 2016, 6(8): 177.
- [18] 高红选, 卫广智, 樊磊, 等. 稀土元素铈对铸态 Al—Mg 合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属工程, 2014, 4(3): 15-17.
GAO Hongxuan, WEI Guangzhi, FAN Lei, et al. Effect of rare earth element cerium on microstructure and mechanical properties of as-cast Al—Mg alloys[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2014, 4(3): 15-17.
- [19] 路贵民. Al—Sc 合金热力学性质的研究[J]. 有色金属, 1999(2): 76-78.
LU Guimin. Study on the thermodynamic properties of Al—Sc alloys[J]. Nonferrous Metals, 1999(2): 76-78.
- [20] 周龙富. 复合稀土对 A356 铝合金的精炼及变质效果研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
ZHOU Longfu. Study on the refining and metamorphic effect of composite rare earth on A356 aluminum alloy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [21] LIU X, XUE J, GUO Z, et al. Segregation behaviors of Sc and unique primary Al_3Sc in Al—Sc alloys prepared by molten salt electrolysis[J]. Journal of Materials Science Technology, 2019, 35(7): 1422-1431.
- [22] HARATA M, YASUDA K, YAKUSHIJI H, et al. Electrochemical production of Al—Sc alloy in $CaCl_2$ — Sc_2O_3 molten salt[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 474(1-2): 124-130.
- [23] 陈显明, 范莹莹. 含 Sc 铝合金中 $Al_3Sc/Al_3(Sc_x, M_{1-x})$ 第二相粒子研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020,

- 40(9):958-963.
- CHEN Mingxian, FAN Yingying. Research progress on $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{(1-x)})$ second-phase particles in Sc-containing aluminum alloys [J]. *Special Casting and Non-ferrous Alloys*, 2020, 40(9):958-963.
- [24] ZHAO L C. Theory of solid transformation [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [25] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- HU Gengxiang, CAI Xun, RONG Yonghua. Fundamentals of materials science [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003.
- [26] KUEHMANN C J, VOORHEES P W. Ostwald ripening in ternary alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27(4):937-943.
- [27] PHILIPPE T, VOORHEES P. Ostwald ripening in multicomponent alloys [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(11):4237-4244.
- [28] FREITAS E S, SILVA A P, JOSÉ E, et al. Interrelation of microstructural features and Dry sliding wear behavior of monotectic Al-Bi and Al-Pb alloys [J]. *Tribology Letters*, 2014, 55(1):111-120.
- [29] FREITAS S E, SPINELLI E J, CASTELETTI C L, et al. Microstructure - wear behavior correlation on a directionally solidified Al-In monotectic alloy [J]. *Tribology International*, 2013, 66:182-186.
- [30] PERSSON B N J. Sliding friction [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998.

(上接第16页, Continued from P16)

- [10] 陈少华, 蒋家发, 刘哲, 等. 回火工艺对 H13E 钢显微组织及力学性能的影响 [J]. *热处理技术与装备*, 2021, 42(6):1-5.
- CHEN Shaohua, JIANG Jifa, LIU Zhe, et al. Effect of tempering process on microstructure and mechanical properties of H13E steel [J]. *Heat treatment Technology and Equipment*, 2021, 42(6):1-5.
- [11] 吴仁君, 张云义, 张方阳, 等. 热处理对 AlFeCoCrNiTi_{0.2} 高熵合金组织与性能的影响 [J]. *有色金属工程*, 2023, 13(11):41-48.
- WU Renjun, ZHANG Yunyi, ZHANG Fangyang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of AlFeCoCrNiTi_{0.2} high entropy alloy [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 13(11):41-48.
- [12] NING A, LIU Y, GAO R, et al. Effect of tempering condition on microstructure, mechanical properties and precipitates in AISI H13 steel [J]. *JOM*, 2021, 73(7):2194-2202.
- [13] ZHANG Z, DELAGNES D, BERNHART G. Microstructure evolution of hot-work tool steels during tempering and definition of a kinetic law based on hardness measurements [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 380(1/2):222-230.