

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20181225.009

韦炫辰, 张方旭, 唐红云, 等. 铝锡轴承合金的摩擦磨损机理与性能[J]. 广西科学, 2018, 25(6): 639-644.

WEI X C, ZHANG F X, TANG H Y, et al. Friction and wear mechanism and properties of Al-Sn bearing alloys[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(6): 639-644.

铝锡轴承合金的摩擦磨损机理与性能*

Friction and Wear Mechanism and Properties of Al-Sn Bearing Alloys

韦炫辰^{1,2}, 张方旭^{1,2}, 唐红云^{1,2}, 杨文超^{1,2}, 湛永钟^{1,2**}

WEI Xuanchen^{1,2}, ZHANG Fangxu^{1,2}, TANG Hongyun^{1,2}, YANG Wenchao^{1,2}, ZHAN Yongzhong^{1,2}

(1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004; 2. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西南宁 530004)

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metal and Featured Materials, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要: 铝锡轴承合金对大型载重汽车、坦克、高速汽车、拖拉机等的高速高压柴油机的发展有重要的意义。提高铝锡合金的耐摩擦磨损性能可节省大量能源并延长零件的使用寿命, 如何取得具有优良的耐摩擦磨损的铝锡合金成为研究的重点。本文介绍了提高铝锡合金的耐摩擦磨损性能的措施及其影响因素, 总结铝锡合金中锡元素含量改变、合金元素的添加、热处理与制备工艺的改变对铝锡合金的显微组织以及耐摩擦磨损性能的影响。

关键词: 铝锡合金 摩擦磨损性能 合金化 热处理 制备工艺

中图分类号: TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2018)06-0639-06

Abstract: Al-Sn bearing alloys are of great significance for the development of high speed and high pressure diesel engines for large trucks, tanks, high-speed cars and tractors etc. Improving the friction and wear resistance of Al-Sn alloys can save a lot of energy and prolong the service life of parts. How to obtain Al-Sn alloys with excellent friction and wear resistance has become the focus of research. This paper introduces the measures to improve the friction and wear resistance of Al-Sn alloys and their influencing factors, summarizes the changes in tin content, the addition of alloying elements, the heat treatment and the effect of changes in the

preparation process on the microstructure and friction and wear properties of Al-Sn alloys.

Key words: Al-Sn alloys, friction and wear properties, alloying, heat treatment, preparation process

0 引言

目前世界上 1/3~1/2 的能源以摩擦磨损形式在各类机械工作的过程中被消耗, 减少无用的摩擦消耗可节省大量能源。机械产品的易损零件大部分是由

收稿日期: 2018-07-21

作者简介: 韦炫辰(1985—), 女, 助理研究员, 硕士研究生, 主要从事合金材料研究。

* 广西大学广西有色金属及特色材料加工重点实验室开放基金项目(GXKFJ16-15), 广西大学实验室建设与实验教学改革项目和广西大学“大学生创新创业训练计划”项目(201710593238)资助。

** 通信作者: 湛永钟(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构功能一体化复合材料、铝钛等轻合金结构材料、基于材料热力学及晶体化学的材料设计研究, E-mail: zyzmatres@aliyun.com。

于磨损超过限度而报废的,控制其磨损可减少设备维修和制造零件的费用。其中轴承合金耐摩擦磨损性能的发展关乎着国民经济的发展,恰当控制摩擦磨损每年可以节约 1.3%~1.6% 的国民生产总值。根据轴承的工作环境与受力特点,轴承合金必须具备良好的减磨性与力学性能^[1-4]。铝锡合金是一种综合性能良好的轴承合金,具有良好的抗粘咬性、耐磨减磨性、耐腐蚀性、顺应性和嵌韧性等综合性能,又具有密度小、导热性好、承载能力大、疲劳强度高优越性^[5]。另外,轴承合金发展的趋势除了和发动机的设计有关以外,还有对环境、健康的关注^[6],轴承合金中铅元素的地位不断面临挑战^[7],铝锡合金受到了更多国内外研究人员的关注并正逐渐代替传统的锡青铜和巴氏合金。

Al-Sn 系合金作为发动机轴承材料已经有近 70 年的历史^[8],人们对铝锡合金的耐摩擦磨损性能的改进从未停止过,具有良好性能的铝锡合金可以提高发动机的性能,节省大量的能源与材料以实现节能环保目的。本文将对近年来有关铝锡合金的摩擦磨损性能的研究进展及其机理和影响进行总结和评述。

1 提高合金耐摩擦磨损性能的途径

组织细化是合金提高耐磨性能的重要途径,合金的晶粒尺寸与强度服从 Hall-Petch 关系^[9-11],因此细晶材料的硬度和强度常更高。根据 Holm-Archard 经典磨损公式 $\Delta V = K \left[\frac{L \cdot S}{H} \right]$ (ΔV : 磨损量, L : 载荷, S : 滑动距离, H : 磨损表面硬度), 硬度是影响合金的

表 1 铝锡轴承合金特性对比

Table 1 Comparison of properties of Al-Sn bearing alloys

合金类型 Alloy type	含锡量 Tin content (wt%)	硬度 Hardness (HV)	最高工作温度 Maximum operating temperature(°C)	适用于发动机 For engines	抗咬合性 Mesh resistance	嵌藏性 Embedding	镀层情况 Coating situation
高锡铝合金 High tin aluminum alloy	17.5~22.5	30~35	170	中速,中负荷 Medium speed, medium load	好 Good	中 Middle	无 Uncoated
中锡铝合金 Tin aluminum alloy	10.0~14.0	35~50	150	中速,高负荷 Medium speed, high load	好 Good	中 Middle	无 Uncoated
低锡铝合金 Low tin aluminum alloy	5.5~7.0	60~70	150	高速,高负荷 High speed, high load	中 Middle	差 Poor	有 Coated

高岩等^[5]研究锡含量在 3%~30% 的情况下,铝锡合金的摩擦磨损性能。发现在 Sn 含量为 9% 时开始明显表现出其保护作用,当 Sn 含量低于 9% 时,合金的硬度较高,减磨性能较差;当 Sn 含量高于 9% 时,合金随 Sn 含量增加而发生软化导致承载能力下

耐摩擦磨损性能的唯一因素,材料的硬度和磨损量成反比,即材料的晶粒越小则耐摩擦磨损性能越好^[12]。La 等^[13]将 Ti 细化到 300 nm 的超细晶态做摩擦学测试时发现,其摩擦系数有所下降,磨损率降低了 30% 左右。Jia 等^[14]将纳米复合结构的 WC-Co 合金中的 WC 晶粒从粗晶态减小到 70 nm 时,发现其磨损性能提高了一倍。

弥散强化是提高铝合金耐摩擦磨损性能的途径之一。杨才定^[15]将颗粒相 TiC 加入 6A02 铝合金中,发现在摩擦学测试下 TiC/6A02 铝基材料的磨损体积远小于基体 6A02 铝合金。晶体中沉淀相的存在能通过阻碍位错运动而产生强化,强化效果取决于位错切过或绕过沉淀相所需力和晶体密度^[16]。

2 提高铝锡合金耐摩擦磨损性能措施

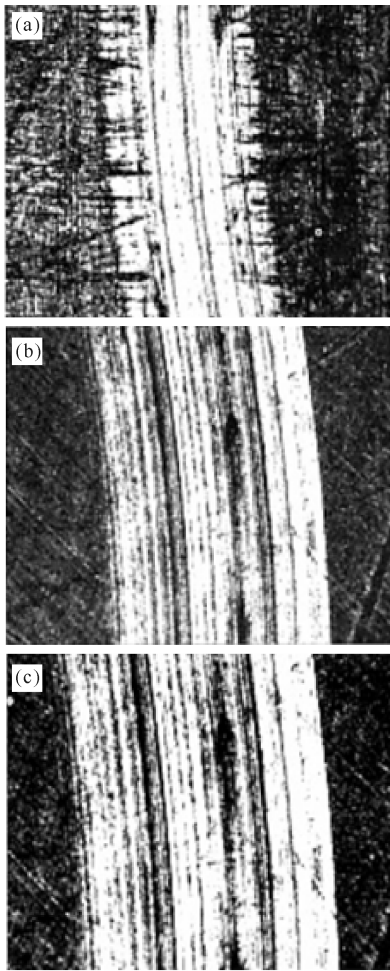
铝锡轴承合金中的软质点锡对其具有减少粘着磨损和润滑的作用,适当改善锡在铝锡合金中的含量与分布也是提高合金耐磨性能的重要途径。零件摩擦做功会产生热量,表面温度提高,软组织锡受热在摩擦副表面均匀地覆盖,使摩擦副表面间的剪切发生在软组织锡中。

2.1 锡含量的改变对铝锡合金耐磨性能的影响

铝锡合金由硬基体铝与软质点锡组成,锡含量会对合金的硬度以及软组织对轴承的润滑保护作用产生影响。表 1 比较了不同含 Sn 量的铝锡合金的各种性能^[17-19]。

降,耐磨性能较差,研究认为 Sn 含量为 9% 时铝锡合金具有较好的综合耐摩擦磨损性能。几种铝锡合金的显微磨痕形貌如图 1 所示^[5]。蒋玉琴等^[20]研究了铝锡合金轴瓦在 CA6102 发动机上的应用,认为低锡铝合金中的软质点共晶体较少,使铝基体的硬度较

高,轴径的摩擦磨损较严重;高锡铝合金的组织中含有较多的软质点,合金的硬度有所下降,但其减磨性有了较大的提升。



(a) $w(\text{Sn})=6\%$; (b) $w(\text{Sn})=9\%$; (c) $w(\text{Sn})=12\%$

图1 几种铝锡合金的显微磨痕形貌(50×)^[5]

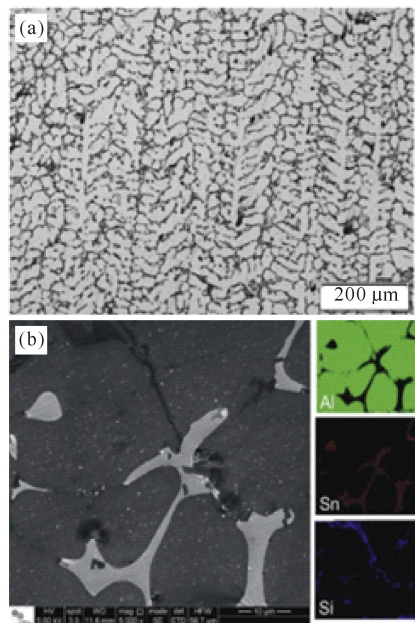
Fig. 1 Microscopic grinding mark morphology of several Al-Sn alloys (50×)^[5]

2.2 添加合金元素对铝锡合金耐磨性的影响

在制备铝锡合金的过程中添加微量的合金元素是提高铝锡合金的耐摩擦磨损性能的常用措施之一。微量的合金元素可以与铝基体形成共晶体,使合金的硬度与耐磨性提高。

研究表明单一合金元素的添加可以增加铝锡合金耐磨性:舒小飞等^[19]研究表明 Si 的添加阻止网状 Sn 形成,从而使合金的硬度增加,耐磨性变好。研究发现 Al-12% Sn-X% Si (X=0, 0.5, 2.5, 5) 合金在 550℃ 烧结后,随着 Si 的量增加,其磨损体积增加,耐磨性变差,但优于不含 Si 的合金;在 600℃ 烧结后,磨损体积随硅含量的变化先减小后增大,含硅量为 2.5 wt% 时磨损体积最小,耐磨性能最好。Felipe 等^[21]研究了 Cu、Si 元素对轴承合金摩擦学性能的影响。Al-Sn-Cu 合金中观察到最佳的耐磨性能与较粗的微

观结构有关,而细化的微观结构改善了拉伸性能,表明拉伸性能和耐磨性能之间呈反向关系。Al-Sn-Si 合金的耐磨性不受主枝晶间距大小的影响,但随着主枝晶间距的减小,其抗拉强度明显增大。三元 Al-Sn-Si 合金的典型微观结构如图 2 所示^[21]。贾涓等^[22]研究表明 Zn 的添加可以使轴承具有相当好的耐磨性,由于锌固溶在铝中,提高了基体硬度和强度,增加了耐磨性。锡在磨损过程中,受热熔化分布于整个接触表面,起润滑和减少粘着磨损作用。Lu 等^[23]研究了 Mg 的添加对铝锡合金中 Sn 相的分布和摩擦层稳定性的影响。研究认为 Mg 改善了锡的输送和纳米相分布,进而减少了摩擦系数,增强了氧化镁膜和配合表面上的摩擦层形成;强度和延展性的更好结合增加了摩擦层的稳定性。但过量添加 Mg 会导致 Mg_2Sn 和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 金属间相的量过高而使磨损性能恶化,镁含量为 1.2% 的 CG-30 Al-Sn 合金显示出最好的耐磨性。



(a) 强调树枝状基质的光学微结构, (b) 突出枝晶间区域的 SEM 图像

(a) Optical microstructure emphasizing the dendritic matrix, (b) SEM image highlighting the interdendritic region

图2 三元 Al-Sn-Si 合金的典型微观结构

Fig. 2 Typical microstructure of ternary Al-Sn-Si alloys

多元合金化对铝锡合金耐磨性有很好的改善作用。Lu 等^[24]研究了纳米 Si、Sn 的加入对 Al-12 wt% Sn 合金摩擦磨损性能的影响。研究发现 Si 颗粒的抛光作用与 Sn 富集产生的润滑作用以及合金硬度的增加,造成合金的摩擦系数与磨损量在加入 Si 后同时降低。当接触应力低于屈服强度时,样品呈现氧化磨损机制;当接触应力高于屈服强度,含硅

铝合金表现出光滑的磨损表面,这受氧化物磨损机制的控制。无硅合金的磨损主要是由氧化物和磨粒磨损,伴随粘着磨损。纳米 Si、Sn 的加入使 Sn 晶粒生长,这是由于 Si 相球磨引起的内应力传递,这种传递可以改善工作面的自润滑性。CG-30Al-12 wt% Sn 合金磨损表面的 SEM 图像如图 3 所示^[24]。Belov 等^[25]研究了 Cu 和 Si 对铸态和热处理状态下含 6 wt% Sn 和 20 wt% Sn 的铝锡合金结构的影响。发现在 500℃退火然后淬火可以显著改变 Sn 相颗粒的形态,Sn 相颗粒局部熔化形成球形,Cu 含量为 4 wt% 时淬火和时效后的合金硬度显著增加,Si 的添加也增加了合金的硬度。研究认为 Al₆Sn₄Cu₅Si 合金的摩擦学性能不逊色于抗磨青铜 Cu₄Sn₄Zn₁₇Pb。

2.3 热处理及制备工艺对铝锡合金耐磨性能的影响

铝锡合金的制备工艺与热处理工艺也会影响其组织与耐磨擦磨损性能。表 2 是铝锡合金在不同制备方法中的颗粒尺寸和显微硬度。

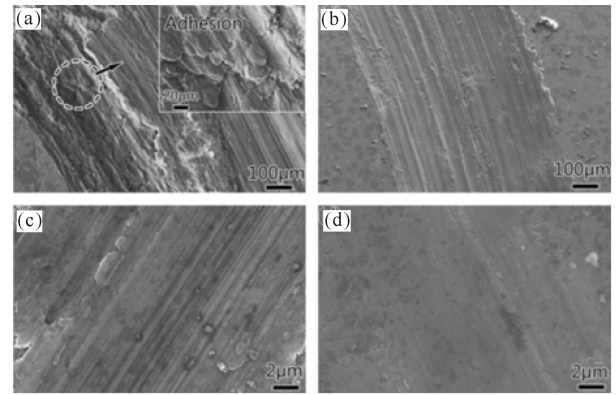
研究表明通过铸造制备工艺加热处理可使得耐磨性提升:章升程等^[26]采用直接水冷铸造法制备 Al-Sn-Cu 合金,发现合金在 190℃,4 h 时效处理时晶内出现了弥散分布的 Al₂Cu 析出相与纳米级尺寸的 β (Sn),在摩擦学测试下,其摩擦因数和磨痕宽度最

Table 2 Particle size and microhardness of Al-Sn alloys prepared by different methods

制备方法 Preparation method	合金成分 Alloy composition	Sn 相颗粒尺寸 Sn-phase particle size (μm)	硬度 Hardness(HV)
熔铸 ^[27] Melting ^[27]	Al-20%Sn	5~25	20.4
搅拌铸造 ^[28] Stir casting ^[28]	Al-20.3%Sn-1.1%Cu	5~20	29.1
粉末冶金 ^[29] Powder metallurgy ^[29]	Al-20%Sn	2~3	57.0
强烈塑性变形 ^[30] Strong plastic deformation ^[30]	Al-30%Sn	0.05	74.0
高速热喷涂沉积 ^[31] High speed thermal spray deposition ^[31]	Al-12%Sn	0.02~0.05	89.0
机械合金化 ^[32] Mechanical alloying ^[32]	Al-20%Sn	0.03	94.0
机械合金化 ^[33] Mechanical alloying ^[33]	Al-10%Sn	0.03	140.0

研究表明恰当的粉末冶金制备工艺可提升合金的耐磨性:赖曲芳^[34]通过粉末冶金工艺研究了 Al-12%Sn 的摩擦学性能,发现 Al-12%Sn 合金的 Sn 相比较细小而且分布更均匀,具有更为优异的耐磨性能。在 723 K 烧结时 Al-12%Sn 合金的耐磨性能最优,其磨损体积相对其他烧结温度最小,温度低于 723 K 时合金粉末间的结合强度低,高于 723 K 时晶

低,分别为 0.105 3 和 1 446.49 μm,磨损表面面貌最佳,具有良好的摩擦磨损性。细晶强化与弥散强化程度提高使合金的硬度提高,耐磨性能得到了提升。



(a)无 Si 合金,(b)含 Si 合金;(c)和(d)分别是(a)和(b)中所示的光滑摩擦层的放大视图^[24]

(a)Si-free alloys,(b)Si-containing alloys;(c) and (d) are magnified views of the smooth tribolayer shown in (a) and (b), respectively^[24]

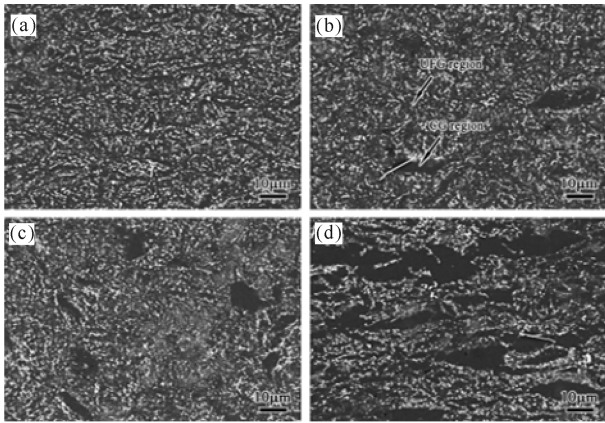
图 3 球盘测试期间在 2 N 负载下 0.5 h 后 CG-30Al-12wt%Sn 合金磨损表面的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of worn surfaces of CG-30Al-12 wt% Sn alloys after 0.5 h under a load of 2 N during ball-on-disk testing

粒明显长大使硬度下降。制备时添加 30%粗粉再经压制的合金粉末,在 823 K 烧结时 Al 在液相 Sn 中扩散速度增大导致 Sn 相呈片层状,形成的合金相比 Al-12% Sn 合金与工业轴瓦产品材料 (AlSn₁₂Si_{2.5}Pi_{1.7}Cu)具有更为优良的耐磨性能。Liu 等^[35]在不同烧结温度下制备具有不同均匀分布类型的 Sn 相的 Al-Sn 轴承合金,发现在 473 K 温度下烧

结的 Al-Sn 合金相比于在 423 K、523 K 和 573 K 烧结的合金产生了更为细化的组织与分布更均匀的 Sn 相,表现出最佳的摩擦磨损性能,特别是在高负荷的摩擦学测试下。

传统粉末烧结和热处理制备相结合的方式同样可以提升耐磨性;Song 等^[36]通过结合传统粉末烧结和热处理制备由粗晶粒和超细晶粒组成的双尺度结构 Al-Sn-Si 合金,发现样品中 Al-Si 低共熔混合物的存在引起 Al 异常晶粒长大,在 500℃ 和 550℃ 的退火温度下实现了高延展性和高强度的最佳匹配,表现出最佳耐磨性能,其主要磨损机制是氧化物磨损。整体式常温轧制 Al-Sn-Si 合金强度最高,由于延展性差导致脱层磨损,磨损性能差。在 600℃ 退火的合金其硬度和强度的大幅降低增加了氧化磨损过程中的局部损伤。在室温下轧制 Al-12Sn-2.5Si(wt%)合金的 SEM 图像如图 4 所示^[36]。



(a) 不退火, (b~d) 分别在 500℃、550℃ 和 600℃ 下退火^[36]

(a) No annealing, (b - d) annealing at 500℃, 550℃, and 600℃, respectively

图 4 在室温下轧制 Al-12Sn-2.5Si(wt%)合金的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of Al-12Sn-2.5Si (wt%) alloys rolled at room temperature

3 展望

作为轴承合金,铝锡合金耐摩擦磨损性能至关重要。材料在介观和微观尺度上的性能在很大程度上由其内部的微观缺陷如空位、空洞、位错、晶界和微裂纹所致^[37]。优化成分设计和合金化可使合金的硬度提高,增强相(Sn 相)均匀分布,使合金具有优异的耐磨性能,同时会带来一些不利的影 响,如成分偏析、耐腐蚀性降低等。而热处理工艺可改善这一不足,热处理可使合金组织均匀化、形成细晶组织,起到弥散强化的作用,从而提高合金硬度,增强合金的耐摩擦磨损性能。因此可通过用等径角压技术来制备铝锡合金

超细晶材料^[38],以及通过成分的优化设计、合金化、制备工艺和热处理工艺的优化等综合措施提升铝锡合金的耐摩擦磨损性能。

参考文献:

- [1] 布尚. 摩擦学导论[M]. 葛世荣,译. 北京:机械工业出版社,2007.
BHUSHAN B. Introduction to tribology[M]. GE S R, Tran. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [2] KRIM J. Friction at the atomic scale[J]. Scientific American, 1996, 275(4): 74-80.
- [3] BROWN W P, GALAND H, KINGSBURY G R, et al. Aluminium bi-metal bearing developments for automotive and medium speed diesel applications[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 1996, 48(3): 4-11.
- [4] RABINOWICZ E A. Friction and wear of materials [M]. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [5] 高岩, 曾建民, 司家勇, 等. 铝锡合金摩擦磨损性能的研究[J]. 铸造, 2005, 54(6): 591-594.
GAO Y, ZENG J M, SI J Y, et al. Study on wear-friction properties of Al-Sn bearing alloys [J]. Foundry, 2005, 54(6): 591-594.
- [6] LEPPER K, JAMES M, CHASHECHKINA J, et al. Sliding behavior of selected aluminum alloys [J]. Wear, 1997, 203: 46-56.
- [7] 张乐山. 薄壁轴瓦的几个新国际标准简介[J]. 内燃机配件, 2002, 1: 25-28.
ZHANG L S. Introduction to several new international standards for thin wall shaft [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2002, 1: 25-28.
- [8] FORRESTER P G. Bearing materials [J]. Metallurgical Reviews, 1960, 5(20): 507.
- [9] PELLEGGI J. Mechanical properties of materials [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [10] SYLWESTROWICZ W, HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results [J]. Proceedings of the Physical Society; Section B, 1951, 64 (9): 747-753.
- [11] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals [J]. Journal of the Iron Steel Institute, 1953, 174: 25-28.
- [12] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [13] LA P Q, MA J Q, ZHU Y T T, et al. Dry-sliding tribological properties of ultrafine-grained Ti prepared by severe plastic deformation [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (19): 5167-5173.
- [14] JIA K, FISCHER T E. Sliding wear of conventional and nanostructured cemented carbides [J]. Wear, 1997, 203/204: 310-318.
- [15] 杨才定. 原位合成 TiC 颗粒弥散强化 6A02 铝基材料显微组织和性能的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
YANG C D. Microstructure and properties of in-situ synthesis TiC dispersion reinforced 6A02 Al matrix material [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [16] STARINK M J, WANG P, SINCLAIR I, et al. Micro-

- structure and strengthening of Al-Li-Cu-Mg alloys and MMCs: II. Modelling of yield strength[J]. *Acta Materialia*, 1999, 47(14): 3855-3968.
- [17] 张文毓. 轴瓦材料工业化生产技术综合分析[J]. *新材料产业*, 2008, 4: 47-50.
ZHANG W Y. Comprehensive analysis of industrial production technology of shaft wattage material[J]. *Advanced Materials Industry*, 2008, 4: 47-50.
- [18] 马伟. 中锡铝合金轴瓦材料的开发应用[J]. *内燃机配件*, 2004, 2: 17-19.
MA W. Development and application of material of bearing bushing [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2004, 2: 17-19.
- [19] 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 X F. The influence of Si addition on the microstructure and properties of Ma Al-Sn bearing alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [20] 蒋玉琴, 侯福建, 孙亚军. 铝锡合金轴瓦在 CA6102 发动机上的应用[J]. *汽车工艺与材料*, 1999(3): 16-20.
JIANG Y Q, HOU F J, SUN Y J. Application of Al-Tin alloy bearing bush on CA6102 engine[J]. *Automobile Technology & Material*, 1999(3): 16-20.
- [21] FELIPE B, FEITOSA E S F, CHEUNG N, et al. Microstructure, tensile properties and wear resistance correlations on directionally solidified Al-Sn-(Cu; Si) alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 3621-3631.
- [22] 贾涓, 李俊, 袁泽喜. 铝-锡-锌轴承合金的性能与应用[J]. *武汉科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 24(1): 16-18.
JIA J, LI J, YUAN Z X. Property and application of Al-Sn-Zn bearing alloy[J]. *Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology: Nature Science*, 2001, 24(1): 16-18.
- [23] LU Z C, GAO Y, ZENG M Q, et al. Improving wear performance of dual-scale Al-Sn alloys: The role of Mg addition in enhancing Sn distribution and tribolayer stability[J]. *Wear*, 2014, 309(1/2): 216-225.
- [24] LU Z C, ZENG M Q, GAO Y, et al. Improving wear performance of dual-scale Al-Sn alloys by adding nano-Si@Sn: Effects of Snnanophase lubrication and nano-Si polishing[J]. *Wear*, 2015, 338/339: 258-267.
- [25] BELOV N A, AKOPYAN T, GERSHMAN I S, et al. Effect of Si and Cu additions on the phase composition, microstructure and properties of Al-Sn alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2730-2739.
- [26] 章升程, 潘清林, 李波, 等. 轴承用耐磨 Al-Sn-Cu 合金的显微组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(12): 3327-3335.
ZHANG S C, PAN Q L, LI B, et al. Microstructures and properties of wear-resistant Al-Sn-Cu bearing alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(12): 3327-3335.
- [27] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
SUN J S. *Wear of metals* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [28] ABIS S, BARUCCA G, MENGUCCI P. Electron microscopy characterization of Al-Sn metal-metal matrix composites[J]. *Journal of alloys and compounds*, 1994, 215(1): 309-313.
- [29] LITVINTSEV A, KAPUTKIN E. Determination of temperature ranges of phase transformations occurred in heating of PM Al-Sn-Cu-Mg Alloy[J]. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 1997, 2: 14-175.
- [30] KANEKO J, SUGAMATA M, BLAZ L, et al. Aluminum-low melting metal alloys prepared by mechanical alloying with addition of oxide[J]. *Key Engineering Materials*, 2000, 188: 73-82.
- [31] PLATIS F S. Electrodeposition of Aluminum-Tin alloys from organic electrolytes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1987, 134(10): 425.
- [32] 刘辛, 曾美琴, 马迎, 等. 纳米复合 Al-Sn 合金烧结中的组织和硬度变化[J]. *金属热处理*, 2009, (3): 27-31.
LIU X, ZENG M Q, MA Y, et al. Variation of microstructure and hardness of nanocomposite Al-Sn alloy during sintering[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2009, (3): 27-31.
- [33] ELWOOD E C. *Materials and Methods*, 1957, 6(4).
- [34] 赖曲芳. Al-12%Sn 合金的机械合金化制备及摩擦学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LAI Q F. Preparation and tribological properties of Al-12% Snr alloy by mechanical alloying[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [35] LIU X, ZENG M Q, MA Y, et al. Wear behavior of Al-Sn alloys with different distribution of Sn dispersoids manipulated by mechanical alloying and sintering[J]. *Wear*, 2008, 265(11/12): 1857-1863.
- [36] SONG K Q, LU Z C, ZHU M S, et al. Zeng. A remarkable enhancement of mechanical and wear properties by creating a dual-scale structure in an Al-Sn-Si alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325: 682-688.
- [37] 毛鸿, 罗志荣, 黄世叶, 等. 材料裂纹扩展分叉机理的晶体相场法研究[J]. *广西科学*, 2015, 22(5): 499-505.
MAO H, LUO Z R, HUANG S Y, et al. Phase-field-crystal modeling for crack propagation and branch of materials[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(5): 499-505.
- [38] 陈吉华, 严红革. 弹塑性变形在镁合金中的应用研究进展[J]. *广西科学*, 2015, 22(5): 473-480.
CHEN J H, YAN H G. Application and development of severe plastic deformation in magnesium alloys[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(5): 473-480.

(责任编辑: 陆 雁)