

DOI: 10.11973/jxgccl201806002

铝基滑动轴承合金的研究进展

曾美琴^{1,2}, 鲁忠臣^{2,3}, 陈进添⁴, 宋凯强^{1,2}, 胡仁宗^{1,2}, 朱敏^{1,2}(华南理工大学 1.材料科学与工程学院; 2.广东省先进储能材料重点实验室;
3.机械与汽车工程学院, 广州 510641; 4. 上海核威实业有限公司, 上海 201615)

摘要: 从种类、组织和性能等方面对铝基滑动轴承合金的研究和应用情况进行了综述,介绍了组织细化、添加合金元素、表面改性和双尺度结构调控等提高铝基滑动轴承合金性能的方法;提出新型铝基滑动轴承合金可借鉴高性能合金的新型制备工艺和组织设计,并结合铝基合金轴瓦带材的制备技术来进行设计和制备。

关键词: 铝基合金; 无铅化; 滑动轴承合金; 性能

中图分类号: TF125.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2018)06-0007-08

Research Progress on Al-based Sliding Bearing Alloys

ZENG Meiqin^{1,2}, LU Zhongchen^{2,3}, CHEN Jintian⁴, SONG Kaiqiang^{1,2}, HU Renzong^{1,2}, ZHU Min^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering;

2. Key Laboratory of Advanced Energy Storage Materials of Guangdong Province;

3.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

4. Shanghai Hewei Industrial Co., Ltd., Shanghai 201615, China)

Abstract: The research and application situation of Al-based sliding bearing alloys is reviewed in terms of type, microstructure and properties. The methods including structure refinement, alloying element addition, surface modification and dual-scale structure controlling for improving the properties of Al-based sliding bearing alloys are described. It is proposed that the new Al-based sliding bearing alloy can be designed and prepared by referring to the new preparation process and microstructure design of high-performance alloys and combining the manufacture techniques of Al-based alloy bearing shell strip.

Key words: Al-based alloy; lead-free; sliding bearing alloy; property

0 引言

将巴氏合金(锡基和铅基合金)、铝基合金或铜基合金等滑动轴承合金材料与低碳钢板复合,加工成的双层或者多层复合结构的半圆形轴瓦或圆形衬套,是滑动轴承中直接与轴或轴颈配合的摩擦偶件。常见的轴瓦为双金属或三金属轴瓦,一般包括表面涂层或耐磨减摩合金层、提高上下层结合强度的过

渡层和低碳钢带层等两层或三层结构;此外,还有全部采用轴承合金制成的整体轴瓦。据统计,截至2010年,我国轴瓦生产企业有400余家,每年轴瓦总产量约20亿片,年产值超过120亿元^[1]。近年来,高速铁路、轻轨、地铁和船舶等其他交通产业的迅速发展,进一步增大了轴瓦的市场需求。然而,我国轴瓦用轴承合金多是参考国外商品化牌号,通过添加或改变部分微量组元而得到的,有时还需应用各种涂层技术^[2]对轴承合金进行表面改性(增加第三层),来进一步提高轴瓦的性能特别是疲劳性能。这种现状导致国内轴瓦生产商的研发能力差,享有规模和品牌效应的企业不足10家,很难拥有在市场上具有竞争力的自主国产化牌号。2010年,我国车用轴瓦产量约10亿片(产值约40亿元),而美国辉门、奥地利米巴、德国KS、日本大丰和大同等企业

收稿日期:2017-04-28;修订日期:2018-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51501065);广东省自然科学基金资助项目(2014A030310395);国家金属材料近净成形工程技术研究中心开放基金资助项目(2016002)

作者简介:曾美琴(1964—),女,广东梅州人,副教授,硕士

通信作者:鲁忠臣讲师

的总产量仅约 11 亿片,但这些企业却占据了全球近 70% 的市场份额。

在常用的金属类滑动轴承合金材料中,巴氏合金(锡基和铅基轴承合金)的显微组织是经典的“双相结构”,即软基体组织中分布着硬脆的共晶体化合物相(如 Cu_6Sn_5 、 Cu_3Sn 、 SnPb)^[3-4],虽然拥有这种组织结构的合金具有很好的嵌藏性、顺应性、抗咬合性、减摩性,低的热膨胀系数以及良好的工艺性能等,但由于基体的强度很低,且基体承载能力和疲劳强度会随工作温度的升高和合金层厚度的增加而下降,因此只能应用于小型、轻载的汽车发动机轴瓦或衬套。铜基和铝基轴承合金具有比巴氏合金更高的疲劳强度,且添加了某些软金属元素(如锡、铅、镉、铋、锌和铟等)后具有较好的自润滑性,能够满足现代高速高载发动机在各种工况下的使用要求,因此得到了日益广泛的应用。此外,随着人们环保意识的增强,各国开始限制常用金属材料中有毒元素的使用。欧盟自 2011 年 7 月 1 日起就禁止铅元素在轻型车用发动机中的使用,这一规定给汽车滑动轴承合金及其表面涂层材料的开发和应用带来了变革^[5-6]。尽管在重载发动机材料的使用上还没有出台类似的法规,但这仅仅只是时间问题。总体而言,随着现代交通装备的迅速发展,以及发动机的高压缩比、紧凑设计和轻量化的发展趋势,轴承合金将向着高承载能力、高耐磨减摩性和环保(无铅)的方向发展^[7]。

常用铜基轴承合金的疲劳强度可达 150 MPa 左右,铝基轴承合金的只有 40~80 MPa;近几年开发的新型高强度铝基轴承合金的疲劳强度能达到 110~120 MPa,国外部分铝基轴承合金则提高到了 130 MPa 左右^[5-6]。虽然铝基轴承合金的性能与铜

基轴承合金的相比仍有一定差距,但由于其具有较高的综合力学性能、热传导性能和良好的耐腐蚀性能,且资源丰富、价格低廉,因此已成为普通乘用车发动机中滑动轴承的主导材料,其占比在美国达 90% 以上^[7]。目前,无铅化铝基轴承合金有两个发展方向:一是研制高疲劳强度的铝基轴承合金以替代传统铜基和铅基合金,满足高性能发动机中连杆轴承合金的需求;二是开发中等疲劳强度且具有高顺应性的铝基轴承合金,满足内燃机中承载负荷小于 1/2 连杆轴承负荷的主轴承材料的需求^[8]。

目前,国产铝基轴承合金品种单一,而且在合金熔炼,轴瓦的表面处理、性能和使用寿命等方面,与国外相比仍存在较大的差距。为了给国内相关研究人员提供参考,作者从合金种类、组织和性能、改性方法等方面对轴瓦用高性能铝基轴承合金进行了综述。

1 铝基轴承合金的种类

铝基轴承合金的应用始于 20 世纪 30 年代,到目前为止已发展出 Al-Sn、Al-Pb、Al-Si、Al-Zn 和 Al-Bi 等体系。Al-Sn 系轴承合金是应用最早的铝基轴承合金,并且在 20 世纪 50,60 年代在美国、英国、德国等国得到了突飞猛进的发展,其生产量增长了 100 多倍。进入 70 年代后,由于铜、锡等资源短缺、价格昂贵,研究人员开发出了廉价且自润滑性更优的 Al-Pb 系轴承合金,并在美国开始得到应用。Al-Si 系和 Al-Zn 系轴承合金是为了在高速、重载、增压强化条件下工作的主轴承和连杆轴承而开发的。经过长期发展,采用铝基轴承合金制造的单金属(即整体)轴瓦,以及双金属和三金属轴瓦已是很成熟的商品,如表 1 所示。双金属和三金属结构不仅能发挥出铝基轴承合金层的优异耐磨性能,还能满足

表 1 典型发动机用铝基轴承合金轴瓦的结构、性能及应用

Tab.1 Structures, properties and applications of typical engine bearing shells made from Al-based bearing alloys

合金牌号	轴瓦结构	硬度/HV	表面涂层	应用场合
Al20Sn1Cu	双金属	35	无	低载荷
Al40Sn1Cu	双金属	30	无	低载荷
Al8Sn2Pb2.5Si0.8Cu0.2Cr	双金属,无过渡层	40	无	中低载荷
Al12Sn4Si1Cu	双金属	45	无	中低载荷
Al4Si0.5Cu0.5Mg	三金属	70	Pb10Sn3Cu 合金	中低载荷
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	三金属	40	Pb18Sn2Cu 无镍栅	高载荷
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	三金属	40	含 MoS ₂ 的树脂涂层	赛车发动机轴瓦
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	整体轴瓦	40	无	止推片
Al11Si11Mg1CuNi	整体轴瓦	100	Pb18Sn2Cu 含镍栅	小端衬套
Al4.5ZnPb1Cu0.5Mg	三金属	55	Al20Sn 含镍栅	高载荷连杆轴瓦

滑动轴承整体静强度和疲劳强度的要求,在某些条件下还能改善耐腐蚀性,可应用于低、中、高等级别的轴瓦或连杆轴瓦;单金属轴瓦则主要应用

于止推片和端衬套。不同生产厂家根据 ISO 4383:2000 的要求而开发出的商业化铝基滑动轴承合金如表 2^[5]所示。

表 2 基于 ISO 4383:2000 开发的商用铝基轴承合金的种类及生产厂家^[5]

Tab.2 Types and manufacturers of industrial Al-based bearing alloys developed on basis of ISO4383:2000^[5]

类别	生产厂家	合金牌号
高锡铝合金	英国 Glacier 公司	AS16
	美国 Fed-Mogul 公司	G-174
	日本大同公司	A17S (AlSn17Cu1)
	韩国 KFM 公司	AC180 (AlSn18Cu1Cr0.2)
中锡铝合金	美国 Fed-Mogul 公司	G-272 (AlSn10Ni2Mn1Cu0.6)
	前苏联某公司	A09-1 (AlSn9Cu1Ti0.1)
铝锡硅铜合金		AS104 (AlSn10Si4Cu1)
	英国 Glacier 公司	AS124 (AlSn12Si4Cu2)
		AS124A/AS1241 (AlSn12Si4Cu1 固溶和时效处理)
	美国 Fed-Mogul 公司	A-500 (AlSn8Si2.5Pb2Cu0.8Cr0.2)
		TR-153 (AlSn15Si3Cu1)
	德国 Mahle 公司	AS104 (AlSn10Si4Cu1), AS124 (AlSn12Si4Cu2)
	日本大同公司	A17X (AlSn12Si2.5Pb1.5Cu0.7)
	日本大丰公司	A18X (AlSn10Si3Pb1.8Cu0.4Cr0.2)
铝硅合金	日本 NDC 公司	FA-130 (AlSn13Si3Cu0.7Pb2)
	英国 Glacier 公司	AlSi11Cu
	美国 Clevite 公司	AS154/CL154 (AlSi4Cu1)
	德国 Mahle 公司	AlSi11Fe0.7Cu0.8Mg0.8
铝铅合金	德国 KS 公司	KS951 (AlSi4Fe0.45Cu0.15Mg0.15), KS1257 (AlSi4Fe0.7Cu0.8Mg0.8)
		F66 (AlPb8.5Sn1.5Si4Cu1)
	美国 Clevite 公司	F85 (AlPb8.5Sn1.5Si4Cu1 固溶和时效处理)
	日本 NDC 公司	F96 (AlPb8.5Sn1.5Si4Cu1 退火处理)
	美国 Fed-Mogul 公司	F66 (AlPb8.5Sn1.5Si4Cu1)
铝锌合金		A400 (AlPb5Si0.5Mn0.3Cu0.1Mg0.1)
	德国 KS 公司	AlZn4Si1Pb (AlZn4.5Si1.5Cu1Pb1Mg0.5Ti0.1)
	奥地利 Miba 公司	AlZn4.5Mg

随着工业无铅化的推进,Al-Pb 系合金被逐步淘汰;Al-Si 系合金和 Al-Zn 系合金(如 SAE785、AlZn4SiPb 及 AlZn4.5Mg 等)的应用范围较小,且由于硬度高、嵌藏性和顺应性差,其表面通常需要电镀一层含铅的软合金层进行改性^[5,9];Al-Bi 系合金的工业应用极少,实验室研究较多^[10-11],这是由于铋属于硬脆相,不利于合金韧性和疲劳强度的提高;锡具有优异的固体润滑性能,能有效提高合金的表面性能,因此 Al-Sn 系合金一直是滑动轴承合金中十分重要的合金。目前,Al-Sn、Al-Sn-Si 系轴承合金被广泛应用于现代汽车发动机中,是最具潜力替

代 Al-Pb 系甚至 Cu-Pb 系的轴承合金。

2 不同铝基轴承合金的组织 and 性能

2.1 Al-Sn 系合金

Al-Sn 系合金在发动机轴承上的应用已有近 80 a 的历史^[3]。铝锡互不溶体系的混合热为 +19 kJ·mol⁻¹,在 (892±20) K 下锡在铝中的最大固溶度(原子分数)为 0.026%。Al-Sn 系合金结晶时,首先析出近纯铝的晶体,在达到共晶温度(502 K)时,锡呈片状或球状在铝的晶界上析出^[12];当锡含量较高时,由于铝和低熔点铝锡共晶体之间存在界面张力,

锡形成了网状组织,并将铝晶粒焊合在一起^[13]。Al-Sn 系合金中的少量组元以 Al₂Cu、Al₃Ni、Ni₂Al、Al₃Ti、初晶硅、共晶硅等硬脆金属间化合物相存在,分布于铝基体和低熔点铝锡共晶体中。冷轧加工使上述铸态组织中的铝锡等晶体拉长和破碎,硬脆金属间化合物相亦被破碎,在随后的 320~350℃保温 4~8 h 的再结晶退火处理过程中,破碎的金属间化合物相发生再结晶,而铝锡共晶体发生熔融;熔融的铝锡共晶体在表面张力的作用下沿铝的晶界收缩聚集,形成彼此连接的多角形“锡岛”^[13]。国产 A17X(AlSn12Si2.5Pb1.5Cu0.7)铝锡合金组织中的初晶硅相粗大,因冷轧加工时合金板的变形量大,其晶粒拉长现象十分严重。

Al-Sn 系合金中的锡含量是影响合金力学性能、摩擦学性能以及使用性能的重要因素。表 3 比较了不同锡含量 Al-Sn 系合金的性能^[14-16]。由表 3 可知,随锡含量的增加,Al-Sn 系合金的硬度和强度降低,承载能力也出现一定的下降,但是其最高工作温度有所提高,表面性能包括抗咬合性

和嵌藏性均更优良。低锡铝合金因具有较高的力学强度、良好的耐腐蚀性能和抗穴蚀能力,早在 20 世纪 30 年代末就得到了应用。英国 Rolls-Royce 公司、美国铝业公司(Alcoa)首先将低锡铝合金铸造成滑动轴承中的整体轴瓦,应用在汽车、拖拉机以及飞机发动机上;但由于此整体轴瓦的力学强度还不够高,轴承会过早疲劳,因此不能应用在高速发动机上。中高锡铝合金的应用始于 20 世纪 50 年代初,当时英国 Furmer 研究院锡研究所和 Glacier 金属公司共同解决了铝锡合金轧制(冷轧)工艺问题,并实现了中锡铝合金与低碳钢板复合双金属材料的工业化生产。目前,工业上使用较多的中锡铝合金中均添加了少量铜、硅、镍、锰、镁、铬、钛和锆元素。中高锡铝合金既继承了锡基合金较好的顺应性、嵌藏性,又具有含锡铝合金的高抗咬合性、耐高温性,同时其表面无需镀层,简化了轴瓦加工工艺,因此应用前景广阔。SAE778 中锡铝合金是近年来最为成功的商业化轴承合金之一^[8]。

表 3 Al-Sn 系轴承合金的性能对比^[14-16]

Tab.3 Comparison of properties of Al-Sn type bearing alloys^[14-16]

分类	锡质量分数/%	硬度/HV	疲劳强度/MPa	最高工作温度/℃	适用的发动机	抗咬合性	嵌藏性	镀层情况
高锡铝合金	17.5~22.5	30~35	90~95	170	中速中载荷	好	中	无
中锡铝合金	10.0~14.0	35~50	95~110	150	中速高载荷	好	中	无
低锡铝合金	5.5~7.0	60~70	105~120	150	高速高载荷	中	差	有

2.2 Al-Pb 系合金

Al-Pb 系合金是作为滑动轴承材料而逐步发展起来的。美国 Clevlta 公司于 1975 年首次生产 Al-Pb 系合金轴瓦,1979 年日本 NDC 公司引入该技术,到 1994 年,美国三大汽车公司生产的乘用车轴承中 Al-Pb 系和含铅 Al-Sn 系合金的占比已达 80%^[17]。这是因为与锡相比,铅的价格更低;与锡合金相比,铅合金的疲劳强度更高、减摩性能更优、防抱死性能更好;此外铅合金与球墨铸铁曲轴的匹配最为理想,能满足中等载荷高速发动机的需求^[18-19]。

铝铅互不溶体系的混合热为+50 kJ·mol⁻¹,且铝金属和铅金属的密度和熔点相差较大,因此熔炼时需要避免发生严重偏析。传统搅拌-速冷铸造法制造的 Al-Pb 系合金中,铅晶粒主要分布于 α-Al 基体的晶界,少量分布于 α-Al 基体的晶内,铅晶粒与铝基体之间的晶格取向呈各向平行关系^[20]。粉末冶金法也是一种有效控制铅晶粒尺寸、防止偏析的

方法。1995 年北京有色金属研究总院与北京汽车摩托车轴瓦厂合作,利用粉末轧制+烧结法建立了一条年生产能力为 1 000 t 的 Al-Pb 系轴承合金生产线^[17]。但是由于铝基粉末的活性较高且其表面存在钝化氧化层,使得合金的烧结致密性降低,且在合金层与低碳钢背界面处易形成不连续的铝铁脆性相,因此降低了轴瓦的疲劳性能^[7]。

由于铅在高温熔铸时会产生危害人体健康的有毒气体,此外含铅轴瓦在使用中会熔融析出铅而污染润滑油,给发动机的修理和报废处理造成困难,因此在进入 21 世纪后,国内外轴瓦生产商和科研机构均不再开发新的 Al-Pb 系轴承合金。

2.3 Al-Si 系合金

高性能的铝基轴承合金应具备与铅青铜对等的承载能力,还应具有良好的耐腐蚀性能,同时也不会产生铅污染问题。随着发动机曲轴轴承中流动油膜厚度的减小,研究人员对铝基轴承合金的抗黏滞性提出了更高要求^[21]。基于此,高强度 Al-Si 系轴承

合金成为了新的研发方向。Al-Si 系合金除了能够满足大功率发动机高疲劳性能和耐磨性能的要求外,还具有低成本和环保等特点。国际上大型轴瓦生产商所开发的 Al-Si 系轴承合金中的硅含量(质量分数,下同)范围为 2%~12%,其中硅含量在 2%~3%的低硅轴承合金主要应用中速和中载柴油发动机中。当成分接近共晶点(Al-12%Si,质量分数)时,一方面较高含量的硅显著提高了该 Al-Si 系轴承合金的强度,另一方面形成了铝硅亚共晶体组织,细小的硅晶粒均匀分布在铝基体中,显著提高了该合金的表面性能(如相容性等)^[22]。Al-Si 系合金不含软质相,其硬度比 Al-Sn 系合金的高 20 HV 左右,而轴承合金的顺应性与硬度存在反向关系,因此同其他高强度发动机轴承合金一样,Al-Si 系轴承合金也需要电镀一层含铅材料(如 PbSn10 合金)来改善其表面性能^[23],从而提高其顺应性。

高强度 Al-Si 系合金的商业化产品较少。由 Glacier 公司开发的 AlSi11Cu 合金中的硅、铜质量分数分别为 11%,1%,由于硅含量较高,该合金的疲劳强度比 AlSn20Cu 合金的提高了 65%,基本与 CuPb22Sn4 铅青铜的相当,满足了大多数高功率高速柴油机的最大载荷要求,通常用作主轴轴瓦和连杆轴瓦,并可与淬硬曲轴相匹配^[23]。Glacier-Vandervell 公司开发的 AS154 合金中的硅、铜、镁质量分数分别为 4%,0.55%,0.5%,该合金的疲劳强度比 AlSn20Cu 合金的提高了 50%,并替代 AlSn20Cu 合金应用于涡轮增压高速柴油机上^[23]。

2.4 Al-Zn 系合金

Al-Zn 系合金与 Al-Si 系合金一样,是为了进一步提高铝基轴承合金的承载能力和疲劳强度而发展起来的。Al-Zn 系合金含有质量分数为 5%左右的锌元素,因此该系合金具有较高的承载能力,主要应用于高速、重载柴油机的主轴上^[24]。锌在铝中的溶解度很大,当作为软相加入到铝基体中后,在铸造冷却过程中与铝形成单一的固溶体;锌的添加量应严格控制,过少则软质相作用不明显,过多则合金硬度过大,导致抗咬合性降低。最早的商用 Al-Zn 系合金是由德国 KS 公司开发的 AlZn4SiPb 合金,奥地利米巴公司在此基础上又开发出了 AlZn4.5Mg 轴承合金,该合金的化学成分(质量分数)为 4.5%Zn,1%Cu,1%Si,1%Pb,0.5%Mg,余 Al。铜元素可以降低 AlZn4.5Mg 轴承合金的热脆性而提高其铸造性能,降低应力腐蚀敏感性;硅元素可以通过提高合金

在熔铸过程中的流动性来改善其铸造性能,但会导致合金塑性的下降。AlZn4.5Mg 轴承合金的硬度为 55~65 HB,在 150℃下的屈服强度和抗拉强度均比 AlZn4SiPb 合金的提高了 35%,交变弯曲疲劳强度提高了 15%^[24]。米巴公司在 20 世纪 90 年代初开发了 B1Al(双铝)多层结构轴瓦,即在复合有一层 AlZn4.5Mg 或 AlZn4SiPb 合金的钢背上,再轧制上一层 AlSn20Cu 或 AlSn25Cu 合金耐磨减摩层,该多层结构轴瓦的承载能力比 AlSn20Cu 合金轴瓦的高 15%~20%,因此成功取代 Cu-Pb 系合金轴瓦而应用在 MAN16/24 型柴油机连杆上^[23]。此外,上海轴瓦厂也自主研制出了 AlZn5SiPb 合金^[25]。

但是,Al-Zn 系轴承合金的硬度较高,顺应性和嵌藏性较差,故其表面需要电镀一层铅锡或铅锡铜软金属层(厚 20~30 mm),以改善其表面性能。由于锌的化学性质比锡的更加活泼,在空气中锌的氧化速率高于锡的,因此在电镀前要进行浸锌处理,然后在锌层上电镀一层镍(或铜)栅中间层,以加强铅锡基镀层与铝锌合金的结合力,同时减缓锡向基体内扩散的速率。

2.5 Al-Bi 系合金

和铅、锡元素相比,铋元素也是低熔点组元,铝铋互不溶体系的混合热为 $+48 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。铋在铝合金基体中以游离态形式存在,在摩擦过程中可以改善铝基体的摩擦磨损性能,但铋是一种软且脆的材料,在铝基轴承合金受到摩擦剪切力作用时所表现的延展性远低于铅、锡等金属的,这制约了 Al-Bi 系合金在中低载荷下的自润滑性能和在高载荷下的疲劳强度^[26]。目前,成熟的商业化 Al-Bi 系合金产品很少。

3 提高铝基轴承合金性能的方法

目前,传统铸造法制备的铝基轴承合金的强度较低,硬度只有 30~60 HV,很难满足当前发动机高速、重载的要求^[27]。为此,研究人员先后进行了许多尝试来提高和改善铝基轴承合金的疲劳强度和摩擦学性能(顺应性),普遍适用的方法有组织细化、添加合金元素、表面改性或处理以及双尺度结构设计等^[7]。

3.1 组织细化

利用传统铸造法制备的铝基轴承合金中,软质锡、铅等相通常呈连续片状分布在铝晶界上,导致合金产生脆化,强度很低。而要获得高承载能力和高

摩擦性能,铝基轴承合金中的铝基体应保持高强度,同时软质锡、铅等相应细小且呈弥散分布。为此,研究人员分别采用表面沉积^[28-29]、快速凝固^[30-31]、剧烈塑性变形^[32]和机械合金化^[27,33]等方法来制备具有纳米相复合结构的铝基轴承合金。

BHATTACHARYA 等^[34]采用熔融旋淬法制备了纳米结构的 Al-Pb、Al-In 和 Al-Bi 合金,铅、铋和铟等纳米颗粒嵌入到强度较高的铝基体中,在细化的铝基体晶粒和纳米级颗粒的模量错配等强化机制的共同作用下,合金的硬度得到了显著提高;纳米级铅、铟和铋颗粒在磨损表面均会形成一层均匀的薄膜,起到一定的润滑作用,合金的摩擦学性能相对于铸态合金的有显著提高;此外,Al-Bi 合金在高载荷下具有更优的耐磨损性能。RAN 等^[35]应用机械合金化+热挤压方法制备得到纳米结构的 Al-Pb 轴承合金,粒径约 65 nm 的铅颗粒均匀分布在亚微米级的铝基体中,合金的屈服强度和硬度分别达到 440 MPa 和 182 HV 左右;这种纳米结构的 Al-Pb 合金具有粗晶合金无法比拟的摩擦学性能。LIU 等^[27,33]和朱敏等^[36]系统研究了机械合金化制备的 Al-Pb 和 Al-Sn 合金的纳米相结构及力学和摩擦学行为,发现所制备的纳米相复合铝基合金的硬度和摩擦学性能均有大幅度提高;与铸造法和粉末冶金法制备的粗晶铝基合金相比,纳米相复合铝基合金在干摩擦和油摩擦条件下均表现出更低的摩擦因数和磨损量;细化的基体晶粒和软质相颗粒的模量错配等强化作用提高了铝基合金的力学性能,而在摩擦热和滑动接触变形作用下,通过位错辅助变形和扩散蠕变等方式,纳米级锡、铅颗粒在磨痕亚表层拉长、粗化、扩散富集甚至生成纳米线,形成了自组织摩擦层,提高了铝基合金的摩擦学性能。以上研究表明,均匀且纳米化的组织可以显著提高铝基轴承合金的力学性能和摩擦学性能。

3.2 添加合金元素

添加铜、硅、镁等第三合金元素^[37-39]是铝基轴承合金常用的一种改性方法。一方面,合金元素可以强化铝基体,显著提高其硬度和强度;另一方面,合金元素对软质相锡、铅等颗粒的尺寸和分布等也会产生有利的作用。因此,添加合金元素可以有效改善合金的显微组织,提高力学性能和摩擦学性能,增大由正常磨损向剧烈磨损转变的载荷极限值。ZHU 等^[37]研究了添加铜元素对机械合金化制备的 Al-Pb 合金耐磨性的影响及其机理,发现铜的添加

有利于抑制铅颗粒的长大,并形成 CuAl_2 增强相,从而显著提高 Al-Pb 合金的硬度和耐磨性能。YUAN 等^[38]利用熔铸法研究了不同成分 Al-Sn-Si 合金的摩擦学行为,发现硅含量的增加对 Al-Sn-Si 合金的摩擦因数没有影响,但 Al-Sn-Si 合金的磨损率及其随载荷的增加幅度均小于 Al-Sn 合金的;在 Al-Sn-Si 合金中形成了 Sn-Si 的“包晶”式岛状组织,在磨损过程中,软质的锡相表现出优异的自润滑和减摩作用,硬质的硅颗粒则提供了高承载和高耐磨性能,因此 Al-Sn-Si 合金表现出比 Al-Sn 和 Al-Si 合金更高的耐磨性能。此外,为了提高 Al-Sn 合金磨损表面、亚表层自组织摩擦层的稳定性、润滑性,并克服粉末烧结对合金强度造成的损失,LU 等^[40-41]在 Al-Sn 合金中添加了镁和硅等合金元素,有效改善了合金的烧结致密性能,同时镁、硅等元素增强了锡纳米相(包括纳米颗粒和纳米线)在磨损面的传输和生长,有效降低了合金的摩擦因数。因此,添加合金元素除了对基体有强化作用之外,还可以促进软质相在滑动磨损表面的扩散和迁移,有利于改善合金的表面性能,特别是顺应性。添加第三合金元素是轴承合金性能提高的一个重要研究方向。

3.3 表面改性

摩擦磨损是一种与材料表面性能密切相关的行为,因此改变合金表面的组织结构和硬度也可以有效提高合金的摩擦学性能。合金表面改性的方法主要有电镀法、磁控溅射法、阴极溅镀法、喷丸处理法、强流脉冲电子束和离子束法等^[7],其中电镀法和磁控溅射法是目前工业上常用的工艺。在铝基轴承合金表面电沉积或者溅射一层厚 10~25 μm 的柔软的合金或高分子层,能有效提高该轴承合金表面的顺应性,加快轴瓦与轴的磨合,从而显著改善轴瓦的疲劳强度和摩擦学性能。米巴公司在镀层材料方面开展了一系列的研究工作,例如在 AlZn4.5Mg 轴承合金表面沉积 AlSn20 合金镀层,以提高轴承合金的疲劳强度和抗压性能;开发了一种称为“莱卡”的高性能聚合物涂料,该聚合物与 Al-Sn 系轴承合金有良好的结合强度,其耐磨性能、抗咬合性能和抗穴蚀性能均优于 PbSn18Cu2 合金镀层和聚四氟乙烯的^[42]。费特尔·莫古公司在应对重型发动机启停动作对轴瓦的磨损时,一方面将铝合金作为重型柴油机轴瓦的基层材料,替代了含铅的铜基轴承合金;另一方面开发出可替代铅的基于铁矿石的新型 IROX 涂层,并优化了与润滑油的相互作用;所制备的轴瓦

表现出高的耐磨性能和抗疲劳性能。MIYAJIMA等^[43]利用喷丸工艺使 MoS_2 黏结到无铅 Al-Sn-Si 轴承合金的表面,形成了厚 4~70 nm 的镀层,涂覆 MoS_2 层后合金的摩擦因数比无 MoS_2 层的降低了 70%,磨痕深度仅为无 MoS_2 层的 1/10 左右。这是因为 MoS_2 相聚集在硬质硅颗粒周围,隔离了合金与对磨副的直接接触。AN 等^[44]利用强流脉冲电子束和离子束对 Al-Pb 合金表面进行改性,提高了合金的硬度;在摩擦磨损过程中合金表面形成了富铅的致密润滑膜,明显降低了合金的摩擦因数和磨损率。

3.4 双尺度结构设计

2010 年卢柯院士在《Science》撰文^[45]指出,多尺度多级结构可能是优化金属整体性能的一个重要途径,可使材料同时获得高强度和高韧性。美国一项海军研究项目利用低温球磨+热挤压法制备出粒径集中在 100~300 nm 和 2~3 μm 的双尺度晶粒分布的 Al5083 铝合金,解决了纳米晶材料塑性变形不稳定的问题,并将该铝合金应用于 AAV7A1 系列两栖攻击舰上^[46]。双尺度结构实现了对纳米结构材料强度和塑性的调控,也为纳米结构材料在摩擦学领域的应用提供了可能。LU 等^[47-48]和 SONG 等^[49]利用机械合金化制备出双尺度结构的 Al-Sn 和 Al-Sn-Si 合金,这种细晶+粗晶的双尺度结构改善了合金的塑性和韧性;适当比例的细晶+粗晶结构使铝基体具有最佳的硬度和韧性匹配,粗晶的引入也改善了纳米相复合基体的塑性变形稳定性,促进了持续稳定氧化摩擦层的生成。双尺度结构设计为纳米材料在摩擦学领域的应用提供了新思路。

4 结束语

目前,滑动轴承合金正向着高承载能力、高耐磨减摩性能和环保(无铅)的方向发展。新型无铅化铝基轴承合金的研究重点集中于合金疲劳强度和耐磨减摩等性能的提高上。发展高疲劳强度的无铅化铝基轴承合金以替代部分铜基合金,既可以降低生产成本,又可以缓解电镀带来的环保压力;开发中等疲劳强度且具有优良摩擦学性能(高顺应性)的无铅铝基合金,可以替代 Al-Pb 系轴承合金应用于内燃机主轴承。高性能合金的新型制备工艺和组织设计,均可以被借鉴到铝基轴承合金的摩擦学应用领域。新型铝基轴承合金的设计及制备方法应该与铝基轴瓦带材的制备技术相结合,以实现新材料的规模化

应用。

参考文献:

- [1] 轴瓦行业研究报告[EB/OL]. (2011-10-13) [2017-04-28]. <http://wenku.baidu.com/view/zdd1c1a2284ac850ad02421f.html>.
- [2] 易智强. 内燃机轴瓦涂层技术综述[J]. 内燃机配件, 2008(4): 40-45.
- [3] 张宝义. 内燃机滑动轴承合金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 54.
- [4] 周卫铭, 郭忠诚, 龙晋明, 等. 电镀铅锡锑巴氏合金[J]. 机械工程材料, 2005, 29(1): 27-29.
- [5] 蒋玉琴. 国内外汽车滑动轴承合金发展现状及趋势[J]. 汽车工艺与材料, 2009(3): 10-13.
- [6] 李鹏. 国内外内燃机滑动轴承合金无铅化及其应用[J]. 汽车工艺与材料, 2009(7): 1-3.
- [7] 鲁忠臣. Al-Sn 轴承合金的双相双尺度结构与摩擦学性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [8] 李鹏. 国外公司新型系列无铅化铝基轴承合金材料的开发[J]. 汽车工艺与材料, 2013(9): 12-19.
- [9] 陈玉明, 揭晓华, 吴锋, 等. 铝基滑动轴承合金材料的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2007, 1(2): 95-98.
- [10] SILVA A P, SPINELLI J E, GARCIA A. Thermal parameters and microstructure during transient directional solidification of a monotectic Al-Bi alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1/2): 347-351.
- [11] PHANIKUMAR G, DUTTA P, GALUN R, et al. Microstructural evolution during remelting of laser surface alloyed hyper-monotectic Al-Bi alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 371(1/2): 91-102.
- [12] 刘辛. 互不溶 Al-Sn 合金的纳米相结构及其性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [13] 张宝义. 浅谈内燃机曲轴轴承(轴瓦)合金层材料及其双金属[J]. 内燃机与配件, 2014(11): 14-18.
- [14] 蒋玉琴, 侯福建. 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李永伟, 张少明. Al-Pb 轴瓦合金的应用及研究进展[J]. 材料导报, 1999, 13(2): 4-7.
- [18] 倪红军. Al-Pb 合金轴瓦材料的发展综述[J]. 特种铸造及有色合金, 1994(5): 29-32.
- [19] 孙大仁, 王连武, 刘勇兵, 等. 塑性变形对搅拌铸造铝-铅轴承合金组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2003, 27(8): 31-33.
- [20] 徐永富, 朱敏. Al-Pb 系耐磨合金的制造技术, 组织结构及力学性能[J]. 材料科学与工程, 1999, 17(2): 71-75.
- [21] 刘春慧, 程先华. 动载滑动轴承疲劳失效过程研究[J]. 机械工程材料, 2000, 24(3): 1-4.

- [22] 卢梅奎. 高速柴油机的硅铝合金轴承[J]. 车用发动机, 1982(5): 47-50.
- [23] 邹稳根. 国内外机车柴油机轴瓦发展与水平综述[J]. 铁道机车车辆工人, 2006(4): 1-8.
- [24] 汪蓓. 铝锌合金轴瓦材料微观组织与力学性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- [25] 徐理明, 包锡弟. 铝锌合金轴瓦的研究[J]. 内燃机配件, 1992(2): 7-11.
- [26] 朱国乾. 含铋铝基轴承材料摩擦磨损性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [27] LIU X, ZENG M Q, MA Y, et al. Promoting the high load-carrying capability of Al-20wt% Sn bearing alloys through creating nanocomposite structure by mechanical alloying[J]. Wear, 2012, 294: 387-394.
- [28] 尹树桐, 李庆芬, 郭亚军, 等. 滑动轴承磁控溅射镀层技术的应用研究[J]. 中国表面工程, 2002, 15(2): 39-41.
- [29] DE ROSA H, CARDUS G, BROITMAN E, et al. Structural properties of AlSn thin films deposited by magnetron sputtering[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(14): 1365-1367.
- [30] HARRIS S J, MCCARTNEY D G, HORLOCK A J, et al. Production of ultrafine microstructure in Al-Sn, Al-Sn-Cu and Al-Sn-Cu-Si alloys for use in tribological applications[J]. Materials Science Forum, 2000, 331: 519-526.
- [31] KONG C J, BROWN P D, HARRIS S J, et al. The microstructures of a thermally sprayed and heat treated Al-20 wt.%Sn-3 wt.%Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 403(1/2): 205-214.
- [32] NOSKOVA N I, VIL'DANOVA N F, FILIPPOV Y I, et al. Preparation, deformation, and failure of functional Al-Sn and Al-Sn-Pb nanocrystalline alloys[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2006, 102(6): 646-651.
- [33] 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): 1857-1863.
- [34] BHATTACHARYA V, CHATTOPADHYAY K. Microstructure and wear behaviour of aluminium alloys containing embedded nanoscaled lead dispersoids[J]. Acta Materialia, 2004, 52(8): 2293-2304.
- [35] RAN G, ZHOU J E, XI S, et al. Microstructure and morphology of Al-Pb bearing alloy synthesized by mechanical alloying and hot extrusion [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 419(1): 66-70.
- [36] 朱敏, 曾美琴, 欧阳柳章, 等. 机械合金化制备的 Al 基轴承合金的结构与性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 37-43.
- [37] ZHU M, ZENG M Q, GAO Y, et al. Microstructure and wear properties of Al-Pb-Cu alloys prepared by mechanical alloying[J]. Wear, 2002, 253(8): 832-838.
- [38] YUAN G C, ZHANG X M, LOU Y X, et al. Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(4): 774-780.
- [39] LUMLEY R N, SERCOMBE T B, SCHAFFER G M. Surface oxide and the role of magnesium during the sintering of aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(2): 457-463.
- [40] 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): 216-225.
- [41] 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 Sn nanophase lubrication and nano-Si polishing [J]. Wear, 2015, 338: 258-267.
- [42] 张乐山. 发动机轴承合金材料的无铅化发展状况[J]. 柴油机, 2005(增刊 1): 328-331.
- [43] MIYAJIMA T, TANAKA Y, KATSUKI H, et al. Friction and wear properties of lead-free aluminum alloy bearing material with molybdenum disulfide layer by a reciprocating test[J]. Tribology International, 2013, 59: 17-22.
- [44] AN J, SHEN X X, LU Y, et al. Microstructure and tribological properties of Al-Pb alloy modified by high current pulsed electron beam[J]. Wear, 2006, 261(2): 208-216.
- [45] LU K. The future of metals[J]. Science, 2010, 328(5976): 319-320.
- [46] NEWBERY A P, NUTT S R, LAVERNIA E J. Multi-scale Al 5083 for military vehicles with improved performance[J]. JOM, 2006, 58(4): 56-61.
- [47] LU Z C, ZENG M Q, GAO Y, et al. Significant improvement of wear properties by creating micro/nano dual-scale structure in Al-Sn alloys[J]. Wear, 2012, 296(1): 469-478.
- [48] LU Z C, ZENG M Q, GAO Y, et al. Minimizing tribolayer damage by strength-ductility matching in dual-scale structured Al-Sn alloys: A mechanism for improving wear performance[J]. Wear, 2013, 304(1): 162-172.
- [49] SONG K Q, LU Z C, ZHU M, et al. A remarkable enhancement of mechanical and wear properties by creating a dual-scale structure in Al-Sn-Si alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 325: 682-688.