

铝锡合金研究进展

孔令明^{1,2}, 阚洪敏^{1,2}, 陈 硕^{1,2}, 王晓阳^{1,2}, 龙海波^{1,2}

(1. 沈阳大学机械工程学院 辽宁省多组硬质膜研究及应用重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

(2. 沈阳大学机械工程学院 辽宁省先进材料制备技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 铝锡合金因其优异的力学性能、摩擦学性能和导电导热性能而广泛应用于机械制造、航空航天以及交通运输等领域。为适应不同领域的需求衍生出多种多样的铝锡合金制备方法, 其中机械合金化法可制备高强度铝锡合金, 但高能球磨过程易于促进锡晶须生长, 对合金材料安全性能有不利影响; 铸造法工艺简单能耗较少, 但易产生锡相的严重偏析; 表面沉积法可制备纳米级且成分均匀的铝锡合金, 但磁控溅射法和喷雾成型法均受限于基体形状, 且前者设备成本较高不利于大规模生产, 而电沉积法生产成本较低并且对于形状复杂的基体也能做到均匀镀覆, 有望取代一些高成本制备方法, 成为铝锡合金工业生产优选方案之一。另外, 调控各类方法中不同的工艺参数也会对铝锡合金的形貌及性能产生不同的影响。参考近年有关铝锡合金的研究报道, 综述了铝锡合金的制备方法、各种工艺参数对制备铝锡合金形貌和性能的影响以及铝锡合金在轴承材料、制氢材料和电子材料等方面的应用, 同时对铝锡合金的未来研究前景作出展望。

关键词: 铝锡合金; 制备方法; 工艺参数; 性能; 工程应用

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)10-0840-07

引用格式: 孔令明, 阚洪敏, 陈硕, 等. 铝锡合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(10): 840-846.

KONG L M, KAN H M, CHEN S, *et al.* Research Progress of Aluminum-Tin Alloy[J]. Materials China, 2023, 42(10): 840-846.

Research Progress of Aluminum-Tin Alloy

KONG Lingming^{1,2}, KAN Hongmin^{1,2}, CHEN Shuo^{1,2},
WANG Xiaoyang^{1,2}, LONG Haibo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Research and Application of Multiple Hard Films of Liaoning Province, School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

(2. Key Laboratory of Advanced Materials Preparation Technology of Liaoning Province, School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Aluminum-tin alloys are widely used in machinery manufacturing, aerospace, transportation and other fields because of their excellent mechanical properties, tribological properties, and electrical and thermal conductivity. In order to adapt to the research in different fields, a variety of aluminum-tin alloy preparation methods have been derived. Among them, the mechanical alloying method can prepare high-strength aluminum-tin alloys; but it is easy to promote the growth of tin whiskers to adversely affect the safety performance of alloy materials during high energy ball milling process; the casting process is simple and consumes less energy, but it is easy to produce severe segregation of tin phase; the surface deposition method can prepare nano-sized and uniform aluminum-tin alloys; but the magnetron sputtering method and spray molding method are both limited by the shape of the substrate, and the high equipment cost of the former is not conducive to large-scale production; while the production cost of electrodeposition method is low, and the coating can be evenly prepared on some complex-shaped substrates. It is expected to replace some high-cost preparation methods and become one of the preferred solutions for aluminum-tin alloy industrial production. In addition, adjusting different process parameters in various methods will also have different effects on the morphology and properties of aluminum-tin alloys. By referring to research reports on aluminum-tin alloys in recent years, the preparation methods of aluminum-tin alloys, the influence of various

process parameters on the preparation of morphology and properties of aluminum-tin alloys, and the applications of aluminum-tin alloys in bearing materials, hydrogen production materials and electronic materials are reviewed. At the same time, prospects for the future research of aluminum-tin alloys are put forward.

Key words: aluminum-tin alloy; preparation method; process parameters; properties; engineering applications

收稿日期: 2021-06-08 修回日期: 2021-12-03

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2021-MS-343)

第一作者: 孔令明, 男, 1997 年生, 硕士

通讯作者: 阚洪敏, 女, 1978 年生, 教授, 硕士生导师,

Email: kanhongmin2002@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202106007

1 前言

在现代工业工程中，铝基合金因其优异的性能而得到广泛应用。近年随着社会的发展和科技的进步，研究者们探索出许多具备优异性能的铝基合金以满足各种工业生产需求。其中铝锡合金具备优异的力学性能和摩擦学性能，并且其导电性、导热性较好，在航空航天、交通运输和机械制造等领域得到广泛应用。

由于 Sn 在 Al 中的极限固溶度低于 0.09% (原子数分数低于 0.02%)，因此，Sn 在大于 0.09% (质量分数，下同) 的铝锡合金是一种低共溶合金，各金属组分晶体单独存在^[1]，这种类型的结构形态决定了合金的良好性能，合金中坚韧的富铝基体能抵抗高机械载荷并使合金具备优良的导电性，锡相颗粒弥散分布于合金中可起到固体润滑剂的作用^[2]。

近年有关铝锡合金的研究报道有很多，归结起来主要有制备方法的探索、不同工艺参数对合金的影响以及合金在不同领域潜在应用价值的挖掘几个方面。本文归纳近年有关铝锡合金的研究，从制备方法、工艺参数、工程应用 3 个方面进行阐述总结，并展望铝锡合金的研究前景。

2 铝锡合金的制备方法

常见的铝锡合金制备方法有机械合金化法、铸造法、表面沉积法等，下文将对各种铝锡合金制备方法的优势与局限做出对比分析。

2.1 机械合金化法

机械合金化法利用高能球磨实现原子扩散、固态相变等过程，获得细小均匀的纳米级铝锡合金^[3]。机械合金化法制备的铝锡合金具有优良的摩擦学性能和较高的硬度^[4]，是制备高强度铝锡合金的一种有效方法。

Zhang 等^[5]通过机械合金化法在 300 °C 条件下制备了铝锡合金。研究发现高能球磨过程促进了锡晶须的生长，一方面通过 X 射线应力分析发现在热处理前后铝锡合金的平均压应力不同，热处理后随着锡晶须的生长释放了一部分平均压应力，因此在球磨过程中引入的残余应力可能是锡晶须生长的驱动力之一；另一方面高能球磨工艺可细化晶粒并产生大量粉末表面，同时颗粒之间的碰撞增加，又由于 Al/Sn 不润湿 (润湿角为 161.5°)，因此存储了大量的界面能，这也可能是锡晶须生长的驱动力。有研究表明锡晶须的存在和生长会造成严重的安全问题，例如引起电子系统的短路^[6,7]。因此就该方面而言，要想制备符合工业需求的铝锡合金，该方法还需进行更多相关的研究和改善。

2.2 铸造法

铸造法工业兼容性较高，常用于铝锡合金的大规模生产。Ramadan 等^[8]采用复合铸造技术制备出铝锡合金。Xu 等^[9]通过液固结合轧制制备出 $\text{AlSn}_8\text{Pb}_2\text{Si}_{2.5}\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 合金，由于液固结合轧制的特殊性，该合金层的组织分为 3 个部分：表面部分由 Sn 和 Pb 含量较高的细晶粒组成；中间部分由柱状晶粒组成；内部为 Pb 和 Sn 含量较低的粗等轴晶粒。

铸造法在铝锡合金制备方面最大的优势就是其工艺流程较短且能耗较小，但是由于 Al 和 Sn 具有较大的熔点差 (Al: 660.45 °C; Sn: 231.96 °C) 和密度差 (Al: 2.70 g/cm³; Sn: 7.30 g/cm³)，因此铝锡合金在铸造过程中，尤其是在热处理过程中往往存在 Sn 相严重偏析的问题，这也削弱了该合金材料的力学性能。为此研究者通过快速凝固^[10]、连续铸造以及搅拌铸造等方法对铸造法进行了改善，但该方法仍不适用于高性能铝锡合金的制造。

2.3 强烈塑性变形法

强烈塑性变形法利用较大的应力作用对合金材料的组织结构进行不断细化，以使 Al 基体上的 Sn 相能够分布得更均匀，进而使自润滑锡膜更容易形成^[11, 12]。

Bak 等^[13]采用挤压渗透法制备出由混合硼酸铝晶须、六方氮化硼和碳纳米管杂化的 Al-5Sn 金属基复合材料。研究发现在该金属基复合材料的制造过程中，金属熔体与增强材料在高压过程中的接触时间非常短，使得它们之间的界面反应最小，这是挤压渗透法的优势之一。Rusin 等^[14]采用等通道转角挤压的方法制备出铝锡合金，研究发现增加挤压次数有利于合金晶粒的细化，进而增强了合金的强度和承载能力，合金的摩擦磨损率也随着挤压次数的增加降低了 18%。

2.4 表面沉积法

表面沉积法通过物理、化学反应在基体表面沉积出铝锡合金。该方法制备的铝锡合金中 Sn 相分布均匀，并且可以制备出微米级甚至纳米级的合金材料，因此该方法制得的合金一般具备较高的抗疲劳强度和耐磨性。近年研究较多的方法为磁控溅射法和喷雾成型法。

磁控溅射法是在阴极附近放置一个平行于阴极表面且正交于电场的磁场^[15-17]，磁场产生的洛伦兹力会影响电子的运动，通过控制磁场强度可以把电子约束在靠近靶面的等离子体区域内^[18-20]，同时磁场使电子环绕靶面作圆周运动，电子能量得到充分释放与有效利用。于佃荣等^[21]以氩气为溅射气体，采用铝靶、锡靶和铜靶 3 靶配置，溅射功率分别为 60, 15 和 8 W，溅射 2 h 制备出形貌良好的 Al-Sn-Cu 合金涂层。宋惠等^[22]采用磁控溅射

法在轴瓦试样表面沉积出质地均一的 Al-Sn-Cu 减摩涂层, 该涂层硬度可达 120 HV, 与基体结合力达 60 N, 并且在油润滑条件下摩擦因数为 0.073。磁控溅射法制备的铝锡合金具有电离效率高、沉积速率快的优点, 但是该方法采用的设备成本较高、不适用于工业大规模生产, 并且该方法制备的铝锡合金镀层与基体的结合力较差, 进一步使该方法的应用受到限制。

另一种研究较多的方法为喷雾成型法。Liu 等^[23]将 Al(99.9%) 和 Sn(99.99%) 原料在氧化铝坩埚中熔化, 然后通过高压氩气流(5~8 MPa)雾化制备出高活性的 Al-20Sn 粉末合金。Anil 等^[24]将氮气作为惰性气体, 在 1.0 MPa 的雾化压力下, 使用收敛-发散喷嘴将熔体雾化为微米级液滴的喷雾, 然后以 350 mm 的沉积距离在铜基板上制备出成分均匀的 Al-20Sn 合金。喷雾成型工艺具有快速固化的效果, 沉积层表面与液滴气体界面间有高的传热率, 可保证喷雾沉积物化学成分与微观结构的均匀性, 进而获得高性能的铝锡合金。

磁控溅射法和喷雾成型法存在成本较高和复杂基体很难做到均匀溅镀这 2 方面弊端, 限制了这两种方法在工业生产中的应用。而电沉积法是一种具备独特优势的铝锡合金制备方法, 其电镀电路示意图如图 1 所示, 通直流电后产生回路, 金属阳离子在阴极基体表面由还原反应得电子产生合金镀层。相比于磁控溅射法和喷雾成型法, 电沉积法工艺流程简单易操作, 大大降低了生产成本, 且不受镀材形状限制, 对于形状复杂的基体也能进行均匀溅镀。1987 年, Platis 等^[25]采用电沉积法在有机溶剂体系中制备出铝锡合金, 但仅对 Sn 含量小于 6%

的合金进行了研究, 并且涉及到的工艺参数也有限, 而之后有关该方法的研究报道较少, 因此现有的研究成果并不能满足工业生产需求, 需要进行更深入的探索, 相信随着研究的不断突破, 该方法有望替代一些高成本的制备方法, 成为工业生产的优选方案之一。

3 工艺过程对铝锡合金的影响

不同的工艺过程对铝锡合金的组成、结构及性能存在较大影响, 下文介绍各种工艺过程对铝锡合金的影响。

3.1 添加第三相对铝锡合金的影响

由于传统铝锡合金的力学强度通常很低, 抗拉强度为 100~120 MPa, 而采用常规铸造技术制造的铝锡合金的维氏硬度仅为 30 HV 左右, 因此近年很多研究者通过加入第三相以改善其性能。

Anil 等^[24]发现, 在铝锡合金中加入 12.5% 的 Si 有利于提高其耐蚀性。同时由于 Sn 较软, 铝锡合金承受重负荷的能力较差, 而 Si 的添加能很好地提高铝锡合金的承载能力, 这在 Belov 等^[26]和 Bertelli 等^[27]的研究报道中也得到了验证。Ramadan 等^[8]分别采用 Sn+3%Cu 和纯 Sn 2 种镀锡物质制备铝锡合金, 发现相比于采用纯 Sn, 采用前者制备的复合材料剪切强度提高了 59%。原因在于一方面 Cu 的添加提高了合金的硬度和强度, 改善了合金的界面结构; 另一方面 Cu 的添加也提高了 Sn 的抗氧化性, 使双金属界面的氧化锡含量降低, 提高了合金表面的润湿性和可焊性, 进而增强了合金的剪切强度。Liu 等^[28]发现将 Bi 添加到铝锡合金中可以影响铝锡二元体系的亚稳态溶解度间隙。Rosales 等^[29]发现添加 3% (体积分数) 的 Bi 可以显著改善铝锡合金的摩擦学性能。Dong 等^[30]发现当铝锡合金中 Bi 的含量为 2% 时其自润滑性能最佳, 摩擦系数约为 0.23; 当合金中 Bi 的含量大于 2% 时, 因合金脆性增强导致其摩擦系数增加, 铝锡合金摩擦磨损性能降低。

尽管已将诸如 Si, Cu, Ni, Cr, Bi 和 Mn 的合金元素添加到铝锡合金中以增强其性能, 但是仍需要开发综合性能更加优异的铝锡合金来满足工业应用的需求, 因此许多研究者选择通过加入纳米材料对铝锡合金进行优化, 使该合金更具工业应用价值。Sethuram 等^[31]采用球磨和真空热压制备了石墨烯增强的铝锡基纳米复合材料。研究发现, 当分别引入 1% 和 2% 的石墨烯时, 铝锡纳米复合材料的相对密度降低了约 2% 和 5%, 硬度提高了 27% 和 48%。原因是存在于基体晶界处的石墨烯可通过阻碍晶体扩散而阻碍铝锡纳米复合材料的致密化, 从而导致纳米复合材料的密度降低。而当施加负载时, 均匀分布于铝锡基体中的石墨烯薄片具有高强度, 可显著抵

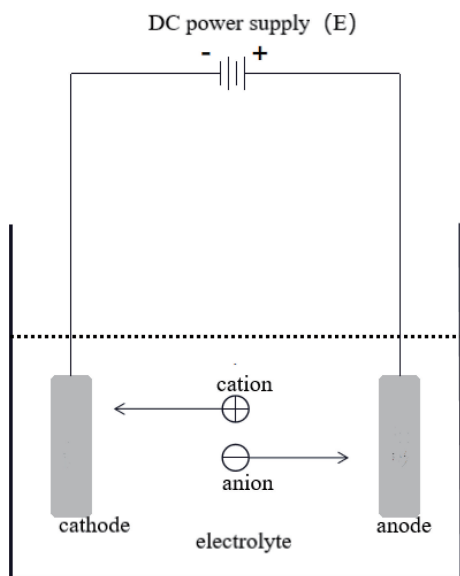


图 1 电沉积法电镀电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electroplating circuit by electrodeposition method

抗压头引起的变形。另外由于石墨烯的负热膨胀系数, 合金的塑性约束被石墨烯的膨胀强化, 并引起机械互锁, 从而束缚了晶界。Bak 等^[13]发现加入硼酸铝晶须、六方氮化硼和碳纳米管制备的 Al-Sn 金属基复合材料各项物理性能都有所改善, 相比于传统铝锡合金, 其耐磨性和柔韧性更好, 承重能力更强, 原因在于添加的 3 种第三相成分的优势累加以及缺陷互补: 六方氮化硼和碳纳米管润滑性较好但承重能力较差, 陶瓷材料硼酸铝晶须硬度较高、承重能力较好, 但润湿性较差, 3 种成分同时加入使得其性能得到了优化改善。Kalashnikov 等^[32]发现, 向铝锡合金中引入 3%~5% 的 Ti_2NbAl 金属间化合物颗粒可提高合金的耐磨性能, 并且金属间化合物颗粒的分散性越好, 合金的摩擦系数越小。

3.2 热处理对铝锡合金的影响

热处理对铝锡合金的性质有较大影响。Jayaram 等^[33]研究了冷却介质对铝锡合金微观结构及性能的影响, 发现淬火介质温度对 Sn 相在基体中的分布有显著影响, 冷水(6 °C)中淬火的合金具有最细的 Sn 相颗粒, 且其抗冲击性能以及硬度也最优。原因是相比于在常温水(28 °C)中淬火, 在冷水中淬火具有更快的冷却速率, 而冷却速率的提高可以使铝锡合金产生更好的微观结构, 这在之前的文献中^[34, 35]也有报道。另外铝锡合金中铝含量会影响合金强度, 而锡含量影响合金润滑性和抗冲击强度, 铝锡合金性能的提高可归因于 Sn 的更细分布有助于合金吸收能量, 从而改善了合金的抗冲击性能, 并且由于快速凝固, Al 基体变得足够硬, 从而提高了合金硬度。Song 等^[36]研究了 Al-Sn-Si 合金烧结样品分别在 400, 500, 550 和 600 °C 退火 1 h 条件下的力学和摩擦学性能, 发现在 500 和 550 °C 温度下退火铝锡合金延展性、强度和抗磨损性能最佳。

3.3 超声对铝锡合金的影响

铝锡合金为低共溶合金, 如图 2 所示^[37], Sn 在 Al 中的极限固溶度低于 0.09%。当在常规条件下发生液相分离时, 由于重力引起的 Stokes 运动, 密度较大的二次液相向下移动, 这通常会严重导致严重的宏观偏析, 使合金性能变差, 严重限制了低共溶合金的工业应用。相反, 如果第二相均匀地分散在基体中, 则可以提高合金的性能。因此迫切需要探索有效的技术方法, 以防止宏观分离模式下的液相分离, 生产均质的单晶结构。超声波处理是一种绿色环保的外场技术, 在材料制造中有巨大的应用潜力。Wang 等^[38]将强度不同的超声引入三元 Al-45Sn-5Si 合金的制造过程中, 研究超声对合金宏观和微观结构的影响。研究发现, 超声波的引入可以明显抑制由 Al 相和 Sn 相较大差异引起的 Stokes 沉降运动, 即

明显改善了合金的宏观偏析, 使 Sn 相在合金中的分布更为均匀。同时超声波产生的空化效应和声流也可使液相分离过程中 Sn 相快速成核、破裂和迁移, 进而使 Sn 相晶粒得到细化。研究者还发现超声波可通过抑制单晶结构沿首选方向的生长来改变其结构。随着超声频率的增加, Al 相从发达的枝晶转变为等轴晶, 但没有改变 Sn 相晶体结构。

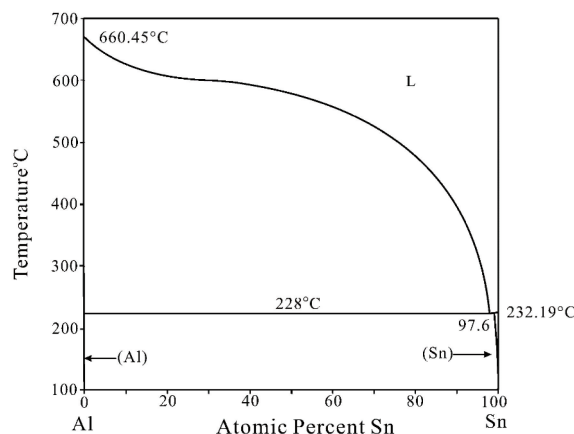


图 2 铝锡合金二元相图^[37]

Fig. 2 Aluminum-tin alloy binary phase diagram^[37]

3.4 其他工艺参数对铝锡合金的影响

其他工艺过程对铝锡合金的性能也有着重要的影响。Kleber 等^[39]在非稳态热流条件下于水冷模具中定向凝固, 制备出具有宽范围树突间距的铝锡合金, 并研究了树枝状网络结构对铝锡合金力学性能以及磨损性能的影响。研究发现, 铝锡合金的抗拉强度、屈服强度以及伸长率均随着初级枝晶臂间距的减小而增加, 这主要是由于合金枝晶阵列得到细化且第二相分布更均匀, 但是相反铝锡合金的耐磨性随着初级枝晶间距的减小而降低, 其原因在于较大的初级枝晶间距代表铝锡合金具有较大的富锡枝晶间区域, 而较软的锡相在合金界面层起到润滑作用, 有利于提高合金耐磨性。

Makhatha 等^[40]通过激光表面合金化法制备了以 AiSi1015 钢为基体、铝锡合金为涂层的复合材料, 研究发现, 激光参数对铝锡合金涂层形貌及性能有很大影响, 其中激光速率的主要作用是加快沉积速率并增加涂层的固化。随着激光速率从 0.6 增加至 0.8 m/min, 涂层中各相晶粒尺寸变小, 偏析元素均匀化, 其中细小的锡相在铝基体中均匀分布, 使得铝锡合金硬度提高。

Zhong 等^[41]研究了由交流电流和磁场作用产生的电磁振动频率对 Al-15Sn 合金相组织、逆偏析和拉伸性能的影响。研究发现, 随着电磁振动频率的增加, 金相组织宏观结构等轴晶比率逐渐降低, 柱状晶比率逐渐升

高, 其中在电磁振动频率为 200 和 500 Hz 时, 等轴晶比率不超过 15%。研究发现较低的电磁振动频率有利于改善合金板坯冷却层中的逆偏析, 这主要是由于电磁振动在低频下产生了更强的强制流动。较强的强制流动可以改善板坯的微观结构, 等轴晶粒减少了板坯侧面偏析通道的形成。同时, 由电磁振动引起的熔体的低频移动可使结晶器中的热量和溶质分布更加均匀。还采用较高的电磁振动频率, 合金的拉伸性能更好, 这可以通过金相组织中等轴晶比柱状晶拉伸性能差来解释。

4 铝锡合金的应用

铝锡合金具有优异的力学性能、摩擦学性能和导电导热性能等, 被广泛应用于机械制造、航空航天以及交通运输等领域。

4.1 铝锡合金在轴承材料中的应用

在内燃机中, 主轴承可使曲轴平稳旋转并保护曲轴不受损坏。发动机轴承通常在液力润滑状态下运行, 即厚润滑膜将曲轴和轴承表面分开, 但是在发动机启动和停止、速度和负载变化期间, 两个表面可能不会被润滑膜完全分开, 轴承可能会在边界润滑和混合润滑状态下工作, 在这些条件下, 轴承表面所采用的接触材料对构件的摩擦磨损性能就有非常大的影响。传统轴承材料多通过加入不同含量的 Pb 来改善其摩擦性能, 含 Pb 的轴承材料由于低摩擦特性以及出色的顺应性和嵌入性而被广泛使用^[42], 但是由于 Pb 对人的身体健康具有不利影响, 使得 Pb 在发动机轴承中的应用受到了限制^[43, 44]。近年铝锡合金由于其独特的物理和力学性能而被广泛应用于轴承制造中。Gebretsadik 等^[42]发现, 含铝锡合金覆盖层的轴承材料比含铅合金覆盖层的轴承材料具有更好的耐磨性。常规的基于铝锡材料的轴承系统通常包含 10%~20% 的 Sn^[45], 但是有报道称, 含有 6%~7% 的 Sn 的铝锡合金即可表现出相对较好的摩擦学性能^[46]。

4.2 铝锡合金在制氢材料中的应用

当今化石燃料的短缺和带来的环境污染已经引起了巨大的能源问题, 因此迫切需要对可再生和绿色能源进行开发和利用。在过去的几十年中, H 因高热值、清洁和可再生而被认为是最有前途的替代能源^[47]。有关 H 产生的研究较为普遍, 其中 Al 及其合金的成本较低、绿色环保且安全性较好, 因此通过铝及其合金的水解产氢引起了研究者的广泛关注。Liu 等^[23]制备出高活性的 Al-20Sn 复合粉末, 并将该粉末用于制 H, 该粉末呈共晶结构, Sn 均匀分布在 Al 晶界上。研究发现, Sn 的添加可减小 Al 的晶粒尺寸并使 Al 活化, 从而使 Al-20Sn 粉末具有较高的水解性能, Konno 等^[48]也得出相同的结论, 同

时还发现温度的升高有利于提高粉末的产氢率和转化率, 这是由于水解反应是从粉末表面的晶界开始, 而粉末表面的 Al 在水解时由于暴露于空气中而被钝化, 产生钝化层, 钝化层在较低温度条件下的破裂非常缓慢, 从而影响整个水解过程, 而升高温度有利于更快破坏钝化层, 进而提高氢转化率。有研究表明铝锡二元体系具有亚稳态溶解度间隙^[49], 对合金制氢具有不利影响, 因此可引入其他金属对合金制氢性能进行改善。Liu 等^[50]制备出 Al₄₇Sn₄₇Co₆ 合金用于制氢材料, 发现 Co 的添加可以有效促进合金液相分离, 从而改善铝锡二元体系存在亚稳态溶解度间隙的问题, 有利于制氢。

4.3 铝锡合金在电子材料中的应用

金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 在生产电子设备方面起着重要作用, 例如: 个人计算机, 数码相机和移动电话等。其中栅极电介质对 MOSFET 的性能起着重要作用, 目前多采用具有几个原子层厚的 SiO₂ 作为 MOSFET 的栅极电介质, 但 SiO₂ 存在泄漏电流和隧穿电流较高、功耗较大以及硼扩散严重的问题, 为解决上述问题, 生产商试图使芯片尺寸更小, 因此需要具有高介电常数的材料作为栅极电解质。Masoud 等^[51]采用溶胶凝胶法和旋涂法制备出 Al/Sn/La₂O₃ 纳米复合材料, 并将该纳米复合材料用作 MOSFET 的栅极电介质。其中 La₂O₃ 具有较高的介电常数 (约为 27), 满足栅极电介质高介电常数需求; Al 可以使复合材料更加无定形, 从而保证复合材料更加稳定; 而材料氧化生成的 SnO 可使复合材料的热稳定性较好。研究者发现, 随着 Al 和 Sn 含量的增加, 纳米复合材料晶体尺寸减小、屈服强度和屈服应力降低, 复合材料变得更加稳定, 隧穿电流和泄露电流降低。同时还发现在 250 °C 的煅烧条件下, Al/Sn/La₂O₃ 纳米复合材料具有非晶态的结构, 而具有非晶结构和平坦表面的纳米材料可以使 MOSFET 栅极中的硼扩散更少, 使复合材料稳定性增加。

4.4 铝锡合金在其他方面的应用

奥氏体不锈钢因其优异的耐蚀性而被广泛应用于不同领域, 特别是在海洋资源开发的框架结构材料制备。但是, 奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂经常发生在氯化物和其他腐蚀性溶液中。热浸镀 Al 可以在基体表面形成致密的 Al₂O₃ 膜, 从而提高钢板的耐蚀性。研究者基于铝合金牺牲阳极的原理对铝锡合金进行了改进, 如 Al-Ni-Sn 合金^[52]、Al-Zn-Sn-Si 合金^[53], 以优化材料耐蚀性能。

Al 因其良好的导电性、在空气中优异的耐蚀性能以及较低密度, 在电气工业中得到广泛应用, 特别是用于替代集流机构滑动触点中的煤-石墨, 因为煤-石墨在冲

击过程中经常因抗脆性断裂的能力低而分解。然而, 即使在低负荷的情况下, 纯 Al 在不润滑的情况下也与 Cu 咬合, 这种现象导致了其磨损严重, 并大大限制了电动机运行的速度, 而铜是目前不可替代的电动机集电器的材料。Shyrokov 等^[54]通过引入一定量的 Sn 相来降低引起摩擦表面咬死的粘附力, 并且对 Al 导电性的影响最小。

除以上几方面的应用, 研究者还发现铝锡合金在电池材料^[55]和光电材料^[56]等方面具有潜在的应用价值, 相信随着未来研究的不断深入, 铝锡合金将在更多领域发挥出它应有的价值。

5 结 语

铝锡合金力学性能及摩擦学性能较好, 且导电性能优良, 是现代工业生产中得到广泛应用的合金材料之一。在制备方法方面, 近年研究者通过各种方法制备出形貌及性能优良的铝锡合金, 其中机械合金化法制备的铝锡合金强度较高但是易促进锡晶须生长进而削弱合金材料的安全性能, 铸造法能耗低且工艺简单但是易产生锡相严重偏析, 磁控溅射法和喷雾成型法可制备纳米级铝锡合金但是受限于基体形状且前者成本较高, 而电沉积法既拥有表面沉积法可制备纳米级且成分均匀的铝锡合金的优点, 也具备成本较低、不受受镀基体形状限制的独特优势, 相信随着研究的不断深入, 该方法有望成为工业生产铝锡合金的优选方案之一; 在工艺过程方面, 研究者探索出各种工艺过程来对铝锡合金进行优化, 其中添加第三相固体颗粒能够显著改善铝锡合金性能, 并且该工艺过程比较适用于电沉积法制备铝锡合金的研究, 因此就该方向进行深入系统的研究具有很大价值, 另外相信随着工业的进步, 未来越来越多的优化方案也将被发掘; 在工程应用方面, 近年铝锡合金不仅在传统的轴承材料方面发挥其优势, 在制氢材料、电子材料以及光电材料等方面的研究价值也被越来越多的研究者所关注, 随着研究的不断深入, 未来铝锡合金将在更多领域大放异彩。

参考文献 References

[1] LAI Z M, YE D. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2016, 27(2): 1177-1183.

[2] ZENG M Q, HU R Z, SONG K Q, *et al.* *Tribology Letters* [J], 2019, 67(3): 84.

[3] LIU X, ZENG M Q, MA Y, *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2008, 506(1): 1-7.

[4] LIU X, ZENG M Q, MA Y, *et al.* *Wear*[J], 2012, 294/295: 387-394.

[5] ZHANG Y, ZHANG P, HE W, *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2020, 31(2): 1328-1334.

[6] SUN M L, LONG X P, DONG M Y, *et al.* *Materials Characterization*[J], 2017, 134: 354-361.

[7] HUANG C M, NUNEZ D, COBUM J, *et al.* *Microelectronics Reliability*[J], 2018, 81: 22-30.

[8] RAMADAN M, AYADI B, RAJHI W, *et al.* *Key Engineering Materials*[J], 2020, 4894: 108-114.

[9] XU G M, LI B M, GUI J Z. *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2006, 13(2): 73-76.

[10] CONFALONIERI C, GARIBOLDI E. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 881: 160596.

[11] RUSIN N M, IVANOV K V. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* [J], 2011, 52(6): 204-510.

[12] RUSIN N M, SKORENTSEV A L, KOLUBAEV E A. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2020, 29(3): 1955-1963.

[13] BAK J H, CHO D H, SHIN S, *et al.* *The Korean Institute of Metals and Materials*[J], 2018, 24(1): 205-215.

[14] RUSIN N M, SKORENTSEV A L. *Applied Mechanics and Materials* [J], 2013, 2585: 110-114.

[15] 郭巧琴, 蒋百灵, 李建平, 等. *特种铸造及有色合金*[J], 2010, 30(12): 1150-1152.

GUO Q Q, JIANG B L, LI J P, *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*[J], 2010, 30(12): 1150-1152.

[16] 郭巧琴, 李建平, 蒋百灵. *材料热处理学报*[J], 2015, 36(5): 161-166.

GUO Q Q, LI J P, JIANG B L. *Transactions of Materials and Heat Treatment*[J], 2015, 36(5): 161-166.

[17] GUO Q Q, LI J P, GUO Y C. *Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2015, 44(8): 1857-1861.

[18] 郭巧琴, 蒋百灵, 李建平. *中国有色金属学报*[J], 2012, 22(8): 2289-2294.

GUO Q Q, JIANG B L, LI J P. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J], 2012, 22(8): 2289-2294.

[19] 郭巧琴, 李建平. *西安工业大学学报*[J], 2016, 36(6): 481-484.

GUO Q Q, LI J P. *Journal of Xi'an Technological University*[J], 2016, 36(6): 481-484.

[20] 郭巧琴, 蒋百灵, 李建平, 等. *特种铸造及有色合金*[J], 2011, 31(4): 308-310.

GUO Q Q, JIANG B L, LI J P, *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*[J], 2011, 31(4): 308-310.

[21] 于佃荣, 江强, 周细应. *腐蚀与防护*[J], 2012, 33(11): 952-959.

YU D R, JIANG Q, ZHOU X Y. *Corrosion & Protection*[J], 2012, 33(11): 952-959.

[22] 宋惠, 刘智勇, 唐纬虹, 等. *兵器材料科学与工程*[J], 2017, 40(6): 26-29.

SONG H, LIU Z Y, TANG W H, *et al.* *Ordnance Material Science*

- and Engineering[J], 2017, 40(6): 26–29.
- [23] LIU Y H, LIU X J, CHEN X R, *et al.* International Journal of Hydrogen Energy[J], 2017, 42(16): 10943–10951.
- [24] ANIL M, BALAJI S, GHOSH M K, *et al.* Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2010, 19(9): 1357–1361.
- [25] PLATIS F S, CAPUANO G A. Journal of the Electrochemical Society [J], 1987, 134: 2425–2429.
- [26] BELOV N A, AKOPYAN T K, GERSHMAN I S, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 695: 2730–2739.
- [27] BERTELLI F, CHEUNG N, FERRIIRA I L, *et al.* The Journal of Chemical Thermodynamics[J], 2016, 98: 9–20.
- [28] LIU H X, WANG C P, YU Y, *et al.* Journal of Phase Equilibria and Diffusion[J], 2012, 33(1): 9–19.
- [29] ROSALES I, GONZALEZ R G, GAMA J L, *et al.* Materials Sciences and Applications[J], 2014, 5(5): 330–337.
- [30] DONG B W, WU Z P, WANG P F, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 874: 159756.
- [31] SETHURAM D, KOPPAD P G, SHETTY H, *et al.* Materials Today: Proceedings[J], 2018, 5(11): 24505–24514.
- [32] KALASHNIKOV I E, BOLOTOVA L K, KOBELEVA L I, *et al.* Inorganic Materials: Applied Research[J], 2021, 12(3): 750–754.
- [33] JAYARAM B, SATYANARAYAN. Transactions of the Indian Institute of Metals[J], 2019, 72(7): 1941–1947.
- [34] CHIKOVA O A, KONSTANTINOV A N, SHISHKINA E V, *et al.* Russian Metallurgy (Metally)[J], 2013, 2013(7): 535–544.
- [35] VALIZADEH A R, KIANI-RASHID A R, AVAZKONANDEH-GHARAVOL M H, *et al.* Metallography, Microstructure, and Analysis[J], 2013, 2(2): 107–112.
- [36] SONG K Q, LU Z C, ZHU M, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2017, 325: 682–688.
- [37] LIU Y, JIANG S, WU C J, *et al.* Journal of Phase Equilibria and Diffusion[J], 2019, 40(2): 235–246.
- [38] WANG B J, WU W H, LIU J M, *et al.* Applied Physics A: Materials Science & Processing[J], 2020, 126(2): 112–120.
- [39] KLEBER S C, ELISANGELA S M, FREDERICO A P F, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2010, 41(4): 972–984.
- [40] MAKHATHA M E, FATOBA O S, AKINLABI E T. International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2018, 94(1): 773–787.
- [41] ZHONG Y B, WANG H, WANG Y B, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2017, 48(7): 3377–3388.
- [42] GEBRETSADIK D W, HARDELL J, PRAKASH B. Wear [J], 2015, 340–341: 63–72.
- [43] LU Z C, GAO Y, ZENG M Q, *et al.* Wear[J], 2014, 309(1/2): 216–225.
- [44] BERTELLI F, FREITAS E S, CHEUNG N, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 695: 3621–3631.
- [45] FIGUEROA G G, JACOBO V H, ORTIZ A, *et al.* Tribology Letters [J], 2015, 59(5): 14–23.
- [46] KURBATKIN I I, BELOV N A, OZERSKIY O N, *et al.* Journal of Friction and Wear[J], 2014, 35(2): 93–97.
- [47] BOCKRIS J O M. International Journal of Hydrogen Energy [J], 2013, 38(6): 2579–2588.
- [48] KONNO C, CRUZ C, COSTA T, *et al.* International Journal of Hydrogen Energy[J], 2021, 46(24): 12654–12671.
- [49] LIU Y, LIU X, CHEN X, *et al.* International Journal of Hydrogen Energy[J], 2017, 42(16): 10943–10951.
- [50] LIU X J, ZOU H W, ZHANG J B, *et al.* Journal of Phase Equilibria and Diffusion[J], 2019, 40(2): 176–187.
- [51] MASOUD E, MEHMOUSH N, MANSOURE P, *et al.* Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences [J], 2019, 90(4): 637–646.
- [52] TU H, ZHANG Z Q, LIU Y, *et al.* Journal of Phase Equilibria and Diffusion[J], 2020, 41(1): 56–65.
- [53] 刘璇. 热浸镀 Al-Zn-In-Si 和 Al-Zn-Sn-Si 镀层的耐腐蚀性能及微观组织研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- LIU X. Corrosion Resistance and Microstructure of Hot-Dip Al-Zn-In-Si and Al-Zn-Sn-Si Coatings[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [54] SHYROKOV V V, KHLOPYK O P. Materials Science[J], 2010, 46(3): 371–375.
- [55] PAN X M, DUAN H P. Rare Metals[J], 2015, 41(12): 1–7.
- [56] 姚函好, 沈鸿烈, 李金泽, 等. 南京航空航天大学学报[J], 2015, 47(5): 672–677.
- YAO H Y, SHEN H L, LI J Z, *et al.* Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics[J], 2015, 47(5): 672–677.

(编辑 费蒙飞)