

高强高导耐磨铝基材料的研究进展

李银华^{1,2} 涂杰松^{1,2} 宗立君³ 贾 丹^{1,2} 詹胜鹏^{1,2} 杨 田^{1,2} 刘 炼^{1,2} 段海涛^{1,2}
(1.武汉材料保护研究所; 2.特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室;
3.国网山东省电力公司电力科学研究院)

摘 要 铝基材料以其伸长率高、质轻、导电性好等特点越来越得到重视,但其强度较低、耐磨性较差限制了其应用。综述了提高铝基材料强度、耐磨性与导电性的方法及研究进展,并对不同方法进行了比较;介绍了国内外铝基复合材料的研究使用情况,并对铝基材料的发展趋势进行了展望。

关键词 铝基材料;合金化;复合材料;碳材

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in High Strength, High Conductivity and Wear Resistance
Aluminum Based Materials

Li Yinhua^{1,2}, Tu Jiesong^{1,2}, Zong Lijun³, Jia Dan^{1,2}, Zhan Shengpeng^{1,2},
Yang Tian^{1,2}, Liu Lian^{1,2}, Duan Haitao^{1,2}

[1.Wuhan Research Institute of Materials Protection; 2.State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology; 3.Material Laboratory of State Grid Corporation of China (Shandong), State Grid Shandong Electric Power Research Institute]

Abstract: Aluminum based materials have been paid more attention due to the light weight, good electrical conductivity and other unique advantages. However, the low strength and poor wear resistance limits its application. The research progress of different methods to improve the strength, wear resistance and electrical conductivity of aluminum matrix materials was summarized comparatively. The research and application of aluminum matrix composites at home and abroad were introduced, and the development trend was prospected.

Key Words: Aluminum Matrix Material, Alloying, Composite, Carbonaceous Material

纯铝具有密度小、熔点低、抗腐蚀性强、导热和导电性良好等特点而得到广泛应用,但纯铝的强度较低、耐磨性较差限制了其应用。由其衍生的铝合金材料具有密度低,导电性、导热性和抗蚀性优良,强度接近或超过优质钢,塑性好,可加工成各种型材,而被工业上广泛使用,使用量仅次于钢。然而,随着经济的发展,对铝基材料的要求也越来越高,如在快速发展的电力和航空航天领域,铝基材料作为质轻的导体材料,希望在提高铝基材料强度的同时,保证其导电性维持在较高的水平,同时希望其耐磨性越来越好。本课题针对强度、导电性和耐磨性能要求较高的铝基材料展开讨论,介绍了目前常见的提高综合性能的方法及其研究进展,论述了国内外铝基材料的应用情况,并展望了铝基材料的发展趋势。

1 高强高导耐磨铝合金制备

提升铝基材料强度、耐磨性的基本原理有:固溶强化、沉淀强化、颗粒强化、析出强化、细晶强化、加工硬化等。提升电导率的基本原理:构建导电通道,减小金属基体的自由电子散射等。按照添加到铝基体中的元素类别,分为合金化法和复合材料法。

1.1 合金化法

提高纯铝强度和耐磨性的方法之一是添加合金元素,通过固溶时效强化、析出强化或加工硬化的方式来提升强度。而铝合金的电导率取决于合金中溶质原子的含量。溶质原子含量越低,合金的电导率越高,因此

收稿日期:2021-03-24;修改稿收到日期:2021-04-14
基金项目:国家电网资助项目(520626180043)
第一作者简介:李银华,女,1982 年出生,高级工程师,武汉(430030),E-mail:121256382@qq.com
通信作者:段海涛,男,1981 年出生,研究员,武汉(430030),E-mail:duanhaitao2007@163.com
引用格式:李银华,涂杰松,宗立君,等. 高强高导耐磨铝基材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 079-1 085.
LI Y H, TU J S, ZHONG L J, et al. Research progress in high strength, high conductivity and wear resistance aluminum based materials [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 079-1 085.

为了得到高电导率的铝合金材料,必须严格控制合金元素和杂质元素的含量。而要获得高强度和高耐磨性铝合金,则必须增加合金元素的含量。因此,铝合金的强度和电导率之间存在矛盾,提高强度必然导致电导率下降,见图 1^[1,2]。

溶质原子对铝合金导电性的影响还与溶质原子的存在状态有关。与固溶态相比,析出相对电导率的影响较小。同时,随着析出相体积分数增大,析出相呈细小弥散状能够起到时效强化效果。因此,需要找到一种或几种合金元素,其在铝基体中的固溶度较低,当少量添加的条件下,就能析出大量均匀弥散的强化相,在保持铝合金高电导率的前提下又能获得高强度和高耐磨性。

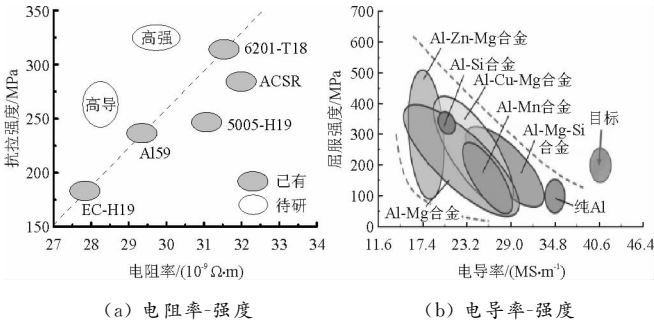


图 1 铝合金的强度与电导率关系^[1,2]

Fig.1 The relationship between strength and resistivity of aluminum alloy

1.2 复合材料法

铝基材料在制作复合材料上有许多特点,如伸长率高、密度小、可塑性好、易于加工等。同时,铝基复合材料比强度和比刚度高,高温性能好,耐疲劳和耐磨性好。按照增强体的不同,铝基复合材料可分为纤维增强铝基复合材料和颗粒增强铝基复合材料。纤维增强铝基复合材料具有比强度、比模量高,尺寸稳定性好等一系列优异性能,但价格昂贵,主要用于航天领域,作为航天飞机、人造卫星、空间站等的结构材料^[3~6]。颗粒增强铝基复合材料的常用增强颗粒有 SiC、Al₂O₃、BN 等,金属间化合物如 Ni-Al、Fe-Al 和 Ti-Al 也被用作增强颗粒。颗粒增强铝基复合材料可用来制造卫星及航天用结构材料、飞机零部件、金属镜光学系统、汽车零部件等^[7~13];此外还可以用来制造微波电路插件、惯性导航系统的精密零件、涡轮增压推进器、电子封装器件等^[14~17]。

自碳基材料(石墨烯、碳纳米管、碳纤维等)成功制备以来,与碳基材料相关的基础研究和工程应用研究也成为近几年的研究热点。不同形态结构的碳材有其独特的力学、电学、化学及光学等性能,均受到材料界的极大重视^[15,18~20]。相比于铝材传统增强体,碳基材料凭其优良的综合性能,被认为是一种非常有发展前途的铝

基增强体材料^[21~27]。

2 提高纯铝的强度、耐磨性、导电性

2.1 合金化法

HERRINGTON R^[28]发现在铝中添加 Zr 能提高铝的耐热性能,但是较低 Zr 含量的 Al-Zr 合金时效强化效果较差^[29,30]。增加 Zr 含量,虽然能够起到一定的析出强化作用^[31,32],但合金的电导率会显著下降。Al 中添加 0.1% (摩尔分数)的 Sc 时,就会有明显的时效强化效果,而且时效析出的 Al₃Sc 在 300 ℃ 以下能够长期稳定存在,具有良好的热强稳定性^[33],但是 Sc 的价格较高。Er 和 Yb 等元素具有与 Sc 相似的析出强化过程,能够时效析出 Al₃Er 和 Al₃Yb 相,提高铝合金的强度,而对电导率影响很小^[34,35]。但是 Er 和 Yb 在铝合金中的溶解度最大为 0.03%~0.04% (摩尔分数),强化效果尚不能达到添加 Sc 元素的。

稀土铝合金导线的电导率和力学性能测试结果显示,添加 0.1% 的 Er (质量分数)的合金电导率为 36.83 MS/m,而 Er 含量为 0.05% 时,合金的电导率降低至 36.46 MS/m;复合添加 0.05% 的 Er 和 0.05% 的 Ce 后,合金的电导率又有所提升,但是仍然低于添加 0.1% 的 Er 的合金。从力学性能测试结果来看,单独添加 0.1% 的 Er 的铝合金导线具有最佳的电导率和强塑性,见表 1^[36]。单独添加稀土元素对铝合金的力学性能提升有限,为大幅提高强度,合金化必不可少。技术路线仍然是净化晶粒,增加弥散析出相,以综合提高导电性和力学性能。LIN G 等^[37]对 6063 铝合金进行 180 ℃ 预时效 2 h,经变形量为 70% 的冷轧,180 ℃ 再时效 6 h,抗拉强度和电导率分别达到了 301 MPa 和 34.16 MS/m。这为提高综合性能提供了新思路,但仍存在组织结构不稳定的问题。

表 1 稀土元素与过渡元素对铝电导率和强度的影响^[36]

Tab.1 Effect of rare earth and transition elements on conductivity and strength of aluminum alloy			
合金	电导率/ (MS·m ⁻¹)	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
Al-0.1Er-0.03Zr	36.83	159.44	2.91
Al-0.05Er-0.03Zr	36.46	150.29	2.72
Al-0.05Er-0.03Zr-0.05Ce	36.59	152.26	2.90

合金化方法能够显著提升力学性能,但在综合提升力学性能、摩擦性能及导电性能方面效果欠佳,即使采用变形、热处理等手段获得了一定的提升,其稳定性也较差。

2.2 复合材料法

铝基复合材料常添加 SiC、Al₂O₃ 等陶瓷材料作为

增强体制备,使力学性能显著提高,但导电性降低明显。如用搅拌法往铝基体中添加不同含量的 SiC、Al₂O₃ 颗粒^[38~41],导电性均较同样搅拌处理的铝材不同程度降低,最大减值达到了 50%。即使 SiC 存在一定的电子隧道效应,仍不能改变其导电性大幅降低的趋势^[42]。陶瓷增强体是电的不良导体,增加电子散射与阻碍电子传输是降低其导电性的主要原因。

碳材(碳纤维、碳纳米管、石墨烯等)相对于陶瓷材料具有良好的导电性,用碳材做增强体存在不降低甚至提升铝基复合材料的导电性可能,有希望成为制备高强高导耐磨性良好的新型铝基复合材料的良好选择。

碳纤维是常用、成本低廉的碳材,但研究发现其与铝易发生反应生成 Al₄C₃ 脆性相,使复合材料性能损伤,加之碳纤维本身制备过程中存在大量缺陷,导致导电性远逊于铝,这使得碳纤维增强铝基复合材料仍以提升强度为主,对导电性有负作用^[5,43,44]。

碳纳米管一方面为高的电子迁移率提供了极好的电子传输通道,另一方面碳纳米管在铝基体中存在非共格界面和两者间肖特基势垒(≈0.2 eV),会影响电子在复合材料中的传输^[45]。SO K P 等^[45]通过液相超声分散 0.1% (体积分数)碳纳米管和纯铝粉混合,冷压成形后热挤压,结果发现不仅仅材料的强度大幅度提升(68.1 MPa),而且材料的电导率达到 37.27 MS/m,超过了铸态纯铝的电导率。聂俊辉等^[46]认为碳纳米管会降低纯铝的导电性,试验证明,在纯铝中复合 W-CNTs,当加入体积分数为 0.75% 时 W-CNTs 复合材料的电导率下降到纯铝的 93.9%,且随着 CNTs 的含量增多,复合材料的电导率越低。但 JING S 等^[47,48]采用碳纳米管单向定向排列或交叉铺层定向排列的方式制备出复合材料,其导电性能达到原始金属基体水平。为减小碳纳米管与铝基体间截面对电子传递的阻挡作用,SO K P 等^[45]尝试通过挤压工艺制备了体积分数为 0.5% 的 CNTs 的铝基复合材料,挤压工艺提高了碳纳米管与铝的紧密接触程度,复合材料相比铝基体的电导率提升了 5% (见图 2)。

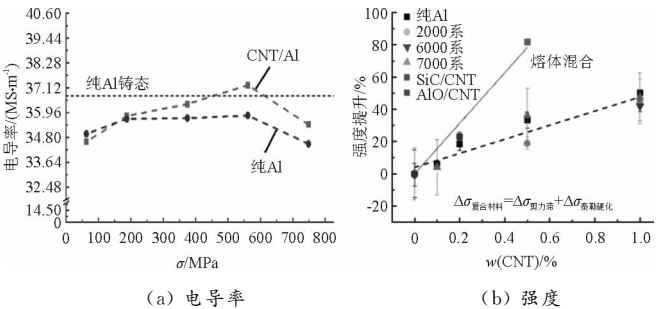


图 2 CNT/Al 复合材料电导率随挤压强度提升同时提升^[45]
Fig.2 The conductivity of CNT/ Al composites increases with the increase of extrusion strength

在耐磨性方面,AHMADI M B 等^[49]用热压法制备了 CNTs/Al 耐磨复合材料,发现热压可进一步降低复合材料烧结体的磨损率。NI Y 等^[50]发现,与热压法相比,放电等离子烧结法制备的 CNTs/Al 复合材料磨损率较低,且摩擦因数更稳定。LI P 等^[51]发现,与粉末冶金法制备的 CNTs/Al 复合材料相比,区域熔炼基体具有更良好的流动性,有助于组织细小微孔的填补和焊合,提高碳管和铝基体的界面结合力,以得到更加致密且耐磨的复合材料。MANSOOR M 等^[52]用感应电熔法制备 CNTs/Al 复合材料,并合理解释了材料摩擦磨损过程中的失效机制。XU W P 等^[53]用搅拌摩擦加工技术促进碳管与铝基体的机械结合,制备了抗磨 CNTs/Al 复合材料,随 CNTs 含量的增加,并未发现因 CNTs 团聚导致材料耐磨性降低的现象。ZHOU S M 等^[54]用无压浸渗法制备 CNTs/Al 复合材料,当载荷为 30 N,速度为 157.1 mm/s 时,与铝相比,该工艺可明显降低材料的摩擦因数和磨损率。低含量的 CNTs 可填充在基体颗粒间的微孔中,提高材料硬度和耐磨性,若 CNTs 分散性低,CNTs 团聚分布在基体中,将降低材料的烧结致密度,恶化材料的摩擦磨损性能^[55],因此,碳纳米管与铝基体间的界面结合以及分散性对复合材料的性能具有决定性作用。

石墨烯的电子迁移率超过 1.5 m²/(V·s),远高于铜的 0.003 2 m²/(V·s)和铝的 0.001 5 m²/(V·s),其在改善铝基复合材料导电性方面优势更为突出^[56~60]。用 CVD(化学气相沉积)方法在纯铝箔表面沉积石墨烯层,之后重复叠加并热压制成三明治结构,获得的复合材料中石墨烯的导电性能是纯铝基体的 70 余倍,这为石墨烯提升铝合金的导电性提供了实践证明^[61]。LI M 等^[62]将石墨烯纳米板与铝粉用球磨混合、冷压成中间合金后,与铝熔体熔炼、连铸连轧成的棒材较纯铝强度提高了 36.8%,电导率仅比纯铝低 0.7%,证明石墨烯纳米板与纯铝间界面对电子的散射作用可以降到较低水平,以保证复合材料的高导电性。考虑到石墨烯纳米板易团聚、不易分散的问题,WU G H 等^[63]、KIM D Y 等^[64]用廉价石墨直接制备铝基复合材料,用单方向的片状热挤压工艺,对铝与石墨颗粒烧结材料体多次挤压,成功实现了石墨颗粒在铝基体中剥离成石墨烯纳米片。该方法制备的铝基复合材料导电性提高了约 0.58 MS/m。

表 2 为以纯铝为基体制备的石墨烯复合材料的性能^[65~69]。纯铝基复合材料的抗拉强度相比纯铝在 200 MPa 左右。而 LI Z 等^[66]利用纳米叠片精细化控制制备得到的层状复合材料的抗拉强度达到近 300 MPa。表明选择合适的制备工艺,使增强体与铝基体间作用达到

合理状态,其增强效果仍有继续提升空间。

表 2 纯铝基复合材料的性能

Tab.2 Performance list of pure aluminum matrix composites							
铝纯度/%	增强体	含量/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%	电导率/(MS·m ⁻¹)	制备方法	文献来源
100	石墨烯	0.00	64	34.0	—	超声分散 熔融铝液	[65]
		0.20	78	33.0			
		0.30	84	24.0			
		0.40	95	21.5			
		0.50	232	21.0			
100	石墨烯	0.60	212	12.0	—	球磨+仿生 纳米叠片	[66]
		0.75	260	5.5			
		1.50	302	5.5			
99.5	石墨烯	0.25	124	56.0	33.88	搅拌铸造	[67]
		0.50	137	55.5	33.32		
		1.00	142	46.0	32.64		
		2.00	144	39.5	31.97		
99	石墨烯	0.50	187	24.0	—	改性石墨烯+ 粉末冶金	[68]
		0.75	213	22.0			
99.6	石墨烯	1.00	200	18.0	—		
		0.20	150	29.0	34.12	搅拌摩擦加工+热挤压	[69]

以碳材为增强相制备铝基复合材料,其强度提升程度与陶瓷增强体相比较弱。但是在抑制电导率下降方面具有明显的优势,因此,以碳材作为增强相,纯铝为基体进行复合,在获得提升力学性能和耐磨性能同时保持良好导电性具有巨大价值。

3 铝基复合材料国内外应用情况

3.1 国外研究与应用现状

铝基复合材料的发展历史已有 30 多年,已在航空航天、兵器工业和民用工业等领域获得应用^[70~73]。

3.1.1 航空航天领域

航空航天构件中应用最多的是粉末冶金法制备的颗粒增强铝基复合材料,具备上述材料制备能力的机构主要有美国的 DWA 公司和英国的 AMC 公司。DWA 公司与洛克希德·马丁公司及空军合作,将粉末冶金法制备的 SiC 颗粒增强铝基复合材料替代铝合金材料用于 F-16 战斗机腹鳍,使蒙皮刚度提高 50%,服役寿命提高 4 倍,大大节省了飞机的维护保养成本。AMC 公司用高能球磨粉末冶金法制备出了高刚度、抗疲劳的 SiC 颗粒增强铝基复合材料,采用该材料制造的直升机旋翼系统连接件已用于 Eurocopter 公司生产的 N4 和 EC-120 型直升机旋翼连接件及 NH90 型直升机旋翼动环与不动环,其疲劳极限比铝合金构件提高 50%~70%,弹性模量提高 40%,服役寿命提高 5 倍,质量与钛合金构件相比大幅降低。美国普惠公司将挤压态 SiC 颗粒增强铝基复合材料作为风扇出口导流叶片用

于使用 PW4000 系发动机的波音 777 客机上。其抗冲击能力(冰雹、鸟撞等外物冲击)和抗冲蚀能力(沙子、雨水等)优于树脂基复合材料,并使制造成本下降 30% 以上^[70]。

3.1.2 兵器工业领域

美国陆军早在 20 世纪 70 年代末期就对氧化铝颗粒增强铝基复合材料进行了研究。采用复合材料制造的坦克履带板不仅耐磨性能提高,还可使车辆整体质量从 544~680 kg 下降至 272~362 kg。美国海军地面武器中心把 SiC 颗粒增强铝基复合材料用于船舶结构体和舱板。采用 SiC 纤维增强铝合金复合材料制成的跨度为 30 m 的舟桥,质量只有 5 t,刚度比铝合金提高 30%^[71]。

3.1.3 民用工业领域

美国 Duralcan 公司采用 SiC 颗粒增强铝基复合材料制造汽车刹车盘、活塞及变速箱等零部件,与传统铸铁类产品相比减重约 50%,同时耐磨性能和高温性能大幅提高。加拿大 Alcan 公司采用 20%~30% 的 SiC 颗粒增强铝基复合材料制造通风式刹车盘,现已装配于福特、通用等汽车的前后轮上。此外,德国和日本等国家采用铝基复合材料制备的刹车装置业已在快速轨道交通领域获得了应用^[72,73]。

3.2 国内研究与应用现状

近年来在需求牵引下,我国也开展了颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用研究工作^[74~78]。目前,我国已基本掌握具有自主知识产权的颗粒增强铝基复合材料制备工艺,性能与国际先进领先水平接近,构件已实现装机应用,少量产品实现了批量生产。

北京航空材料研究院研制的高刚度、抗疲劳的 SiC 颗粒增强铝基复合材料已成功应用于国内直升机旋翼连接件。与铝合金相比,构件刚度提高约 30%,寿命提高约 5 倍,与钛合金相比,构件减重约 25%。此外,采用铝基复合材料制造的航空发动机液压分油盖已通过初步试车试验,卫星遥感器镜体已通过内部伸长率鉴定^[76]。

哈尔滨工业大学研制的 SiC 颗粒增强铝基复合材料管件已应用于某卫星天线丝杆。采用 SiC 颗粒增强铝基复合材料生产的某型号惯性测量与导航系统构件,突破了大尺寸高品质制备技术,所制备的材料在交变温度场下尺寸稳定性在 0.001% 以内,已成功应用于某型号的惯性测量与导航系统主体构件。

长春光学精密机械与物理研究所利用 SiC 颗粒增强铝基复合材料优异的结构承载功能及卓越的热控功能,设计研制出航空机载光电稳定平台的主承力框架,

现已通过考核定型试飞。

当前,国内科研机构以 SiC 颗粒增强铝基复合材料体系为主,以碳材为增强体的铝基复合材料研究较多,但同时满足高强度、高导电性和耐磨性的成果较少^[77,78]。且大多数采取粉末冶金,采取熔炼方式制备的较少,究其原因碳材和铝基的润湿性差、碳材在铝液中的分散性差以及铝碳的界面反应难以控制等没有得到有效解决。

武汉材料保护研究所有限公司采用钎剂作为改性剂,石墨烯做为增强体,将钎剂、纳米石墨烯和纳米铝粉在行星式球磨机中充分混合。采用电磁感应炉熔炼,全程氩气气氛保护,强机械搅拌,热挤压成功制备石墨烯增强铝基复合材料。扫描电镜检测显示,石墨烯分散均匀(见图 3),石墨烯含量高达 1.42%,电导率达到了 34.22 MS/m。通过改进改性工艺和冶炼工艺,有望成功开发高强高导高耐磨铝基复合材料。

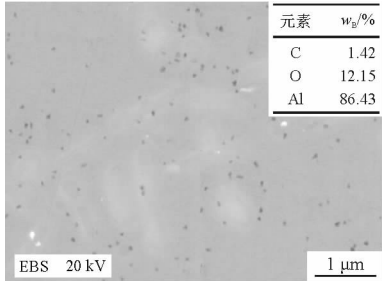


图 3 石墨烯增强铝基复合材料扫描电镜照片和能谱分析
Fig.3 SEM images and EDS analysis of graphene reinforced aluminum matrix composites

4 铝基材料发展趋势

铝基材料具有密度小、熔点低、导热和导电性能好等特点,已在航空、汽车等领域广泛应用。铝基材料是工程构件朝高性能、轻量化、绿色制造方向发展的重要基础,但是,不同的提高性能的方法仍有一定的局限性。

(1)合金化方法同时提高铝合金导体材料的强度、耐磨性和导电性方面的研究取得的效果不显著。与热加工和热处理工艺相结合,虽然提高了强度和导电性,但稳定性较差,铝合金导体材料的高强度和导电性不能保持。合金化方法提升铝合金材料综合性能受限,但可以作为提升材料综合性能的补充手段。

(2)纯铝基体制备的复合材料的力学性能普遍低于铝合金基的力学性能,同时增强体的材质和种类对提升效果有较大差异。碳材增强体对于纯铝基体的增强效果明显弱于陶瓷增强体,但对纯铝基体的导电性影响较小。

(3)导电性好的碳材在提升铝基复合材料导电性方

面有巨大潜力,结合其低密度、高比强度的优势,碳材增强体铝基复合材料替代钢铁材料是高性能、轻量化的优选方案,是未来发展的一个重要方向。

参 考 文 献

[1] SEDAT K. Modificagtion of AA6201 alloy for manufacturing of high coinductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all aluminium alloy conductors[J]. Materials and Design, 2006, 27: 821-832.

[2] 孙德勤, 潘琰峰, 高健, 等. 高强耐热全铝合金导线的研究与开发[J]. 轻合金加工技术, 2006, 48(8): 5-8.

[3] 李廷举, 刘嘉鸣, 杨茜, 等. 碳纤维增强铝基复合材料制备及强化机制研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 177-1 181.

[4] 刘艺. 连续碳纤维增强铝基复合材料制备工艺研究[D]. 陕西汉中: 陕西理工大学, 2020.

[5] 王敏, 曲迎东, 李广龙, 等. 镀镍短碳纤维增强铝基复合材料的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 117-1 120.

[6] PEI R S, CHEN G Q, WANG Y P, et al. Effect of interfacial microstructure on the thermal-mechanical properties of mesophase pitch-based carbon fiber reinforced aluminum composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 756, 8-18.

[7] 吕品回, 王小锋, 董翠鸽, 等. 表面改性 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料的制备与表征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 27(9): 2 567-2 577.

[8] GUO W, HOU J, LIN T S, et al. Joining high volume fraction SiC particle reinforced aluminum matrix composites (SiC_p/Al) by low melting point stannous oxide-zinc oxide-phosphorus pentoxide glass [J]. Ceramics International, 202, 47(3): 3 955-3 963.

[9] 杨涛, 刘润爱, 王文先, 等. 热轧高含量 B₄C 颗粒增强 Al 基复合材料的成形性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2 234-2 243.

[10] 周立玉, 李秀兰, 钟强, 等. 陶瓷颗粒增强铝基复合材料制备工艺研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(18): 21-25.

[11] XIAO Z R, NIE J H, FAN J Z. Effect of SiC defects on performance of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Science Forum, 2020, 5 930: 730-738.

[12] LI H, XU P, JIAO L, et al. Surface wear behavior and strengthening mechanism of Al3Zr particle reinforced aluminum matrix composites prepared in situ[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2019, 7(4): 045 013.

[13] GONG D, JIANG L T, GUAN J T, et al. Stable second phase: The key to high-temperature creep performance of particle reinforced aluminum matrix composite[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A770(7): 1-7.

[14] 王剑桥, 雷卫宁, 薛子明, 等. 石墨烯增强金属基复合材料的制备和应用研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(12): 18-27.

[15] 张丹丹, 沈洪雷, 曹霞, 等. 石墨烯增强金属基航空复合材料研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 1-10.

[16] 李嘉, 于翔, 张静. 石墨烯复合材料在输电储电器件中的应用进展[J]. 新型工业化, 2017, 7(2): 1-7.

[17] 董桂霞, 吕易楠, 韩伟丹, 等. 超级电容器电极材料的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2016, 5(34): 384-389.

- [18] KHAN M, UD DIN R, WADOOD A, et al. Effect of graphene nanoplatelets on the physical and mechanical properties of Al6061 in fabricated and T6 thermal conditions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 790: 1 076-1 091.
- [19] NAM Y, KI D K, SOLER-DELGADO D, et al. A family of finite-temperature electronic phase transitions in graphene multilayers[J]. *Science*, 2018, 362(6 412): 324-328.
- [20] 王剑桥, 雷卫宁, 薛子明, 等. 石墨烯增强金属基复合材料的制备及应用研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 18-27.
- [21] BUASRI A, PRASANWON C, BOONSONG B, et al. The fabrication of graphene-reinforced aluminum composites by powder metallurgy and uniaxial pressing[J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 780: 10-14.
- [22] 吕国莹. 电工用铝和铝合金在电缆工业中的应用与前景[J]. *科技视界*, 2014(19): 335-335.
- [23] SABOORI A, PAVESE M, BADINI C, et al. Microstructure and thermal conductivity of Al-graphene composites fabricated by powder metallurgy and hot rolling techniques[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(7): 675-687.
- [24] ZHOU W, MIKULOVA P, FAN Y, et al. Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high performance conductor[J]. *Composites*, 2019, B167: 93-97.
- [25] SIE C T. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheet[J]. *Materials Science and Engineering*, 2013, R74(10): 281-350.
- [26] CHYADA F A, JABUR A R, ALWAN H A. Effect addition of graphene on electric al conductivity and tensile strength for Recycled electric power transmission wires[J]. *Energy Procedia*, 2017, 119: 121-130.
- [27] 燕绍九, 杨程, 洪起虎, 等. 石墨烯增强铝基纳米复合材料的研究[J]. *材料工程*, 2014(4): 1-6.
- [28] HERRINGTON R. The effect of single additon metals on the recrystallization electrical conductivity and rupture strength of pure aluminum[J]. *Transaction of ASM*, 1949, 41: 443-448.
- [29] KNIPLING K E. Development of a nanoscale precipitation strengthened creep resistant aluminum alloy containing trialuminide precipitates[D]. USA: Northwestern University, 2006.
- [30] HORI S, SAJI S, KOBAYSHI T. Prolonged aging of an Al-0.22%Zr alloy[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1973, 37: 1 134-1 138.
- [31] KNIPLING K E, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Precipitation evolution in Al-Zr and Al-Zr-Ti alloys during isothermal aging at 375~425 °C[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56: 114-127.
- [32] KNIPLING K E, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Nucleation and precipitation strengthening in dilute Al-Ti and Al-Zr alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transaction*, 2007, A38: 2 552-2 563.
- [33] ROYSET J, RYUM N. Scandium in aluminum alloys[J]. *International Materials Reviews*, 2005, 50(1): 19-44.
- [34] WEN S P, XING Z B, HUANG H, et al. The effect of erbium on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Zr alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, A516: 42-49.
- [35] NIE Z R, LI B L, WANG W, et al. Study on the erbium strengthened aluminum alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546-549: 623-628.
- [36] 余倩, 谢竹君, 李镜. 稀土铝合金导线的合金化与性能研究[J]. *铸造技术*, 2018, 39(7): 1 431-1 435.
- [37] LIN G, ZHANG Z, WANG H, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy by thermomechanical treatment[J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, A650: 210-217.
- [38] 姜慧丽, 陈送义, 陈康华, 等. Zr 伸长率分数对 7003 铝合金组织与腐蚀性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(10): 2 614-2 621.
- [39] CANDAN E, AHLATCI H, CIMENOGLU H. Abrasive wear behaviour of Al-SiC composites produced by pressure infiltration technique[J]. *Wear*, 2001, 247(2): 133-138.
- [40] CAO L, WANG Y, YAO C K. The wear properties of an SiC-whisker-reinforced aluminium composite[J]. *Wear*, 1990, 140(2): 273-277.
- [41] 樊建中, 桑青梅. 颗粒增强铝基复合材料的研制, 应用与发展[J]. *材料导报*, 2001, 15(10): 55-57.
- [42] SUGANESWARAN K, PARAMESHWARAN R, THANGAVEL P, et al. Investigations on micro hardness, electrical and thermal conductivity of AA7075 surface hybrid composites produced through friction stir processing[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 116 548.
- [43] CIBY S, PAI B C, SATYANARAYANA K G, et al. Structure form during processing short carbon fiber-reinforced aluminum alloy matrix composites[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1993, 2(3): 353-357.
- [44] RAMS J, URE A A, ESCALERA M D, et al. Electroless nickel coated short carbon fibres in aluminium matrix composites[J]. *Composites*, 2007, A38(2): 566-575.
- [45] SO K P, KUSHIMA A, PARK J G, et al. Intragranular dispersion of carbon nanotubes comprehensively improves aluminum alloys[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(7): 1 800 115.
- [46] 聂俊辉, 史娜, 张亚丰, 等. 碳纳米管增强铝基复合材料的研究[A]. 中国有色金属加工行业技术进步产业升级大会[C]. 广州, 2011.
- [47] JING S, LUN X, LIN Z, et al. Enhanced strength and excellent transport properties of a superaligned carbon nanotubes reinforced copper matrix laminar composite[J]. *Composites*, 2016, A88: 148-155.
- [48] JING S, LUN X, LIN Z, et al. Effects of ply-orientation on microstructure and properties of super-aligned carbon nanotube reinforced copper laminar composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(8): 1 747-1 758.
- [49] AHMADI M B, SHARAFIMASOOLEH M, SHADLOU S, et al. Effect of functionalization of graphene nanoplatelets on the mechanical response of graphene/epoxy composites[J]. *Materials & Design*, 2015, 66: 142-149.
- [50] NI Y, CHEN L, TENG K, et al. Superior mechanical properties of epoxy composites reinforced by 3D interconnected graphene

- skeleton[J]. ACS applied Materials & Interfaces, 2015, 21(7): 11 583-11 591.
- [51] LI P, ZHENG Y, LI M, et al. Enhanced flame-retardant property of epoxy composites filled with solvent-free and liquid-like graphene organic hybrid material decorated by zine hydroxys-tannate boxed[J]. Composites, 2016, A81: 172-181.
- [52] MANSOOR M, SHAHID M. Tribological properties of MWCNTs strengthened aluminum composite fabricated by induction-melting[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1 101: 62-65.
- [53] XU W P, KE L M, XING L, et al. Study of carbon nanotubes on wear performance of aluminum matrix composites by friction stir processing[A]. Asme International Manufacturing Science & Engineering Conference[C], 2011.
- [54] ZHOU S M, ZHANG X B, DING Z P, et al. Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique[J]. Composites, 2007, A38(2): 301-306.
- [55] LI Z, CAI X, ZHOU L, et al. Effect of CNTs content on mechanical properties of CNTs/Al5083 composite materials[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(1): 175-177.
- [56] 肖瑞. 石墨烯及其 Al-20Si 基复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [57] YAN S J, ZHANG X Y, YANG C, et al. Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nano-flakes[J]. Mater. Sci. Eng., 2014, A612: 440-444.
- [58] LI M, GAO H Y, LIANG J M, et al. Microstructure evolution and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 172-178.
- [59] FADHIL A, CHYADA A R, JABUR H A, et al. Effect addition of graphene on electrical conductivity and tensile strength for recycled electric power transmission wires[J]. Energy Procedia, 2017, 119: 121-130.
- [60] BARTOLUCCI S F, PARAS J, RAFIEE M A, et al. Graphene-aluminum nanocomposites[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528: 7 933-7 937.
- [61] CAO M, LUO Y Z, XIE Y Q, et al. The influence of interface structure on the electrical conductivity of graphene embedded in aluminum matrix[J]. Advanced Materials Interfaces, DOI: 10. 1002/admi. 201900468.
- [62] LI M, GAO H Y, LIANG J M, et al. Microstructure evolution and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 172-178.
- [63] WU G H, YU Z H, JIANG L T, et al. A novel method for preparing graphene nanosheets/Al composites by accumulative extrusion-bonding process[J]. Carbon, 2019, 152: 932-945.
- [64] KIM D Y, NAM S J, ROH A, et al. Effect of interfacial features on the mechanical and electrical properties of rGO/Al composites[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(20): 12 001-12 012.
- [65] 徐驰, 朱和国. 石墨烯的制备及其在能源方面的应用研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(2): 326-332.
- [66] LI Z, FANG L, TAN Z Q, et al. Uniform dispersion of graphene oxide in aluminum powder by direct electrostatic adsorption for fabrication of graphene/aluminum composites[J]. Nanotechnology, 2014, 25 (32): 325 601.
- [67] 仇法文. 石墨烯增强铝基复合材料的制备与研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [68] LIU G, ZHAO N Q, HIC S, et al In-situ synthesis of graphene decorated with nickel nanoparticles for fabricating reinforced 6061Al matrix composites[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A699: 185-193.
- [69] ZHANG S, CHEN G Q, QU T M, et al. Simultaneously enhancing mechanical properties and electrical conductivity of aluminum by using graphene as the reinforcement[J]. Materials Letters, 2020, 265: 127 440.
- [70] CHIARAMONTE T, ROMERO M J, FABREGUETTE F. Cathodoluminescence and structural studies of nitrided 3D gallium structures grown by MOCVD[J]. J. Lumin, 2009, 129(3): 176-180.
- [71] BARTSCH K, ARNOLD B, KALTOFEN R, et al. Effects of catalyst pre-treatment on the growth of single-walled carbon nanotubes by microwave CVD[J]. Carbon, 2007, 45(3): 543-552.
- [72] LIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354: 56-58.
- [73] XU N S, EJAZ H S. Novel cold cathode materials and applications [J]. Mater. Sci. Eng., 2005, R48: 47-189.
- [74] DITCHEK B M, HEFTER J, MIDDLETON T R. Microstructure of czochralski-grown Si-TaSi₂ eutectic composites[J]. J. Crystal Growth, 1990, 102: 401-412.
- [75] 程雪利, 赵波, 刘传绍. 颗粒增强金属基复合材料的制备进展[J]. 现代制造工程, 2005(9): 5-8.
- [76] 黄永攀, 李道火, 王锐, 等. 铝基复合材料的性能、应用及制造工艺[J]. 湖南冶金, 2004, 32(2): 3-6.
- [77] 金鹏, 刘越, 李曙, 等. 颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用[J]. 材料导报, 2009, 23(11): 24-27, 39.
- [78] 樊建中, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料研究与应用发展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 1-7.

(编辑: 栗万仲)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |