

● 今日铸造 Today Foundry ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3280

氧化铝纤维增强铝基复合材料制备方法综述

路国通¹,王迎春¹,马小民^{2,3},王心超¹,王 赞¹,李景明¹,蒋世权¹,黄 茜¹

(1. 河南工业大学 机电工程学院,河南 郑州 457000; 2. 国装新材料技术(江苏)有限公司,江苏 苏州 215000; 3. 东南大学 机电工程学院,江苏 南京 211189)

摘要:氧化铝纤维增强铝基复合材料具有耐高温、耐磨损等特殊性能和高强度、高模量等综合性能,在工业上的应用越来越广泛。简介了氧化铝纤维增强铝基复合材料的研究进展,综述了氧化铝纤维增强铝基复合材料的制备方法及其制备原理、工艺过程,分析了各种制备方法的优缺点,展望了氧化铝纤维增强铝基复合材料制备工艺的发展方向及工程化需要解决的关键问题。

关键词:氧化铝纤维;铝基复合材料;制备方法;展望

中图分类号:TB332

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2024)11-1082-11

Research Progress on Preparation Methods for Alumina Fiber Reinforced Aluminium Matrix Composites

LU Guotong¹, WANG Yingchun¹, MA Xiaomin^{2,3}, WANG Xinchao¹, WANG Zan¹,
LI Jingming¹, JIANG Shiquan¹, HUANG Xi¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 457000, China; 2. National Equipment New Material & Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Suzhou 215000, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Resistance, wear resistance, and excellent comprehensive properties such as high strength and high modulus. In this paper, the research progress on alumina fiber reinforced aluminium matrix composites is briefly introduced. The main preparation methods, preparation principles and processes of alumina fiber reinforced aluminium matrix composites are reviewed. The advantages and shortcomings of these preparation methods are analysed, and the development direction of the preparation process of alumina fiber reinforced aluminium matrix composites and the key issues to be solved in engineering are explored.

Key words: alumina fiber; aluminium matrix composites; preparation method; prospect

金属基复合材料(metal matrix composite, MMCs)拥有轻质、高比强度、高比模量、抗疲劳等综合性能,并且其性能可设计性强,受到了世界各国的广泛关注和持续研究^[1-3]。铝基复合材料不仅具有良好的金属性能,而且有着更好的耐高温、耐磨损、抗蠕变性,是金属及复合材料中发展最快的一种^[4-5],近年来一直受到研究者的重视和研究^[6-8]。

纤维制造工艺简单、性能好,被广泛用作金属基复合材料中的增强相。纤维增强铝基复合材料是以

纤维作为增强相(分散相)材料、铝及其合金为基体材料复合制备而成。在纤维增强铝基复合材料中,金属基体起到连接纤维、协助承受载荷和传递载荷、保证复合材料结构稳定的作用。其中,金属基体必须能与增强纤维紧密结合,限制裂纹的进一步扩展。纤维拥有优良的强度和刚度,起到承受载荷,提高复合材料性能的作用^[9-10]。金属基体和增强纤维两者协同作用,使复合材料具有单一材料无法提供的特殊特性,实现 1+1>2 的功效。

收稿日期:2023-11-23

基金项目:国家自然科学基金(51201060);江苏省科技项目(BE2021056);姑苏创新创业领军人才计划(ZXL2021070)

作者简介:路国通,1999 生,硕士生。研究方向为金属基复合材料的制备及界面调控。Email: 2831803128@qq.com

通讯作者:王迎春,1974 生,博士,副教授。研究方向为金属凝固制造、陶瓷基复合材料制备及表明改性。Email: myangelruyu@163.com

引用格式:路国通,王迎春,马小民,王心超,王地赞,李景明,蒋世权,黄茜.氧化铝纤维增强铝基复合材料制备方法综述[J].铸造技术,2024,45(11): 1082-1092.

LU G T, WANG Y C, MA X M, WANG X C, WANG Z, LI J M, JIANG S Q, HUANG X. Research progress on preparation methods for alumina fiber reinforced aluminium matrix composites [J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1082-1092.

纤维增强铝基复合材料具有高的比强度、比模量,优异的耐高温性,低的热膨胀系数,良好的尺寸稳定性等,受到航空航天、汽车、机械电子等工业领域的重视^[11-13]。纤维增强铝基复合材料,常见的增强体主要有硼纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维和碳纤维^[14]。与碳纤维和硼纤维相比,氧化铝纤维密度略高,强度略低,但它的化学稳定性、耐腐蚀性、抗高温氧化性更好。在高温下,碳纤维和硼纤维很容易与基体发生反应,生成脆性相,影响复合材料的性能,而氧化铝纤维高温稳定性好,不容易与基体发生反应。氧化铝纤维作为电的绝缘体,不会发生电化学腐蚀,表面活性高,与铝基体之间的界面结合状态良好^[15-16],制备出的复合材料综合性能良好。美国用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{A206}$ 复合材料制造的坦克履带板,与铸钢相比,质量下降了近50%^[17]。牟俊东等^[18]用氧化铝纤维增强铝基复合材料制备了高性能活塞,在300和500℃下,复合材料的抗拉强度提高了20%左右。

氧化铝纤维增强铝基复合材料的制备方法很多,按制备工艺主要分为固相法和液相法。随着金属快速凝固科学理论及相关制备工艺的进步,增材制造也被应用到金属基复合材料的制备中。本文综述了氧化铝纤维增强铝基复合材料的制备方法及其制备原理、工艺过程,分析了各种制备方法的优点及存在的不足,阐述了世界各国氧化铝纤维增强铝基复合材料制备方法的研究现状,展望了氧化铝纤维增强铝基复合材料制备工艺的发展方向及工程化需要解决的关键问题,为系统研究氧化铝纤维增强铝基复合材料奠定了理论及实验基础。

1 固相法

固相法是在高温高压条件下,金属基体与增强纤维之间发生原子扩散,使二者复合成型的方法。固相法可以有效增加金属基体与纤维之间的浸润,减少偏析效应^[19]和脆性反应物的生成,避免凝固收

缩引起的高残余应力。固相法分为粉末冶金法和固相压延法。

1.1 粉末冶金法

粉末冶金法是在传统冶金工艺基础上开发、设计和应用的,是制备颗粒、晶须、短纤维等增强相增强金属基复合材料的一种常见制备工艺^[20-21]。粉末冶金法制备金属基复合材料的过程中所需温度较低,可以更好地控制界面反应。

粉末冶金法利用简单的机械手段将增强体与金属基体粉末按一定比例均匀混合,并在压模机上用机械力实现材料的简单固结,然后在真空或者惰性气体气氛下,在0.7~0.8倍金属基体熔点的温度下烧结并进行一段时间的保温(保温时间和零件尺寸、形状、组分等因素有关),通过颗粒间的冶金结合实现材料的简单固结,然后冷却成型^[22]。粉坯烧结见图1^[23]。

在烧结前,金属基体粉末与增强纤维通过机械方式均匀混合,增强纤维均匀地分散在金属基体粉末中,且在混粉过程中,两者比例可控,所以制备出的复合材料组织均匀,成分可控,强度、硬度等力学性能较好。Povirk等^[24]用粉末冶金工艺制备了 Al_2O_3 纤维增强 Ni_3Al 金属间化合物复合材料,结果表明,复合材料界面未发生化学反应,基体与纤维之间紧密结合,复合材料的室温延展性为10%。Haar等^[25]通过粉末冶金工艺制备了氧化铝短纤维增强铝基复合材料,结果表明,纤维断裂主要发生在最初的压实阶段,当压缩比为0.2时,由于基体的高延展性和纤维周围的位错和应力场所产生的塑性流动阻力共同作用,复合材料的强度提高了43%。权高峰等^[26]用粉末冶金工艺制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{2024Al}$ 复合材料,与铝合金基体相比,复合材料的弹性模量提高了28.6%,比例极限增加,断裂伸长率下降。Zhou等^[27]用粉末冶金法制备了散装和研磨过的氧化铝短纤维增强铝基复合材料,研究了纤维初始状态对复合材料性能的影响。结果表明,干法球磨减小了两种纤维平均长度的

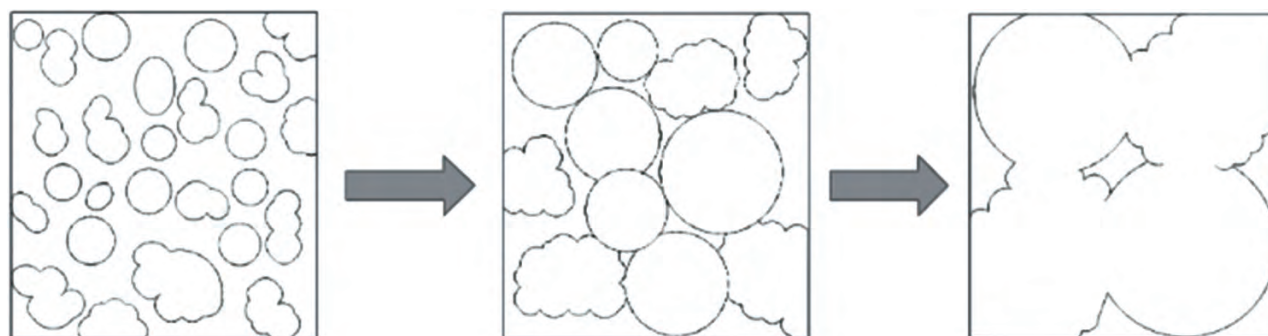


图1 粉坯烧结示意图^[23]

Fig.1 Process of powder sintering^[23]

差异,使纤维在基体中得到重新分配,并且散装纤维增强的复合材料在挤压和热处理过程中有着更好的增强效果。Moreno 等^[28]用热压工艺,在不同温度下制备了高致密度的氧化铝纤维增强铝铜合金复合材料。在热压过程中,由于扩散率高,Cu 从液相快速扩散到 Al 基体晶粒中而形成固溶体,这种瞬态液相可以作为润滑剂改善 Al 颗粒的塑性变形。在此过程中,部分液态相将氧化铝纤维浸渗包裹住,改善了氧化铝纤维和铝合金基体之间的浸润性,提高了复合材料的性能。

粉末冶金的工艺参数,即压实压力、烧结温度和烧结时间,对复合材料的物理和机械性能影响显著。秦兴文^[29]用粉末冶金法制备了YAG-Al₂O₃/Cu₁₄Al₃复合材料,研究发现,随着烧结温度的升高,复合材料的致密度先增加后减小(在 750 °C时致密度达到最大值);热压时间增加,复合材料的致密度也随之增加。Vairamuthu 等^[30]采用粉末冶金法制备了铝基复合材料,结果表明,烧结温度和压实压力对复合材料的密度和硬度等性能影响较大,抗压强度主要取决于烧结时间和烧结温度,与之相比,压实压力对复合材料综合性能的影响最大,影响率为 71.53%。

除了工艺参数对复合材料的物理和机械性能有关键影响外,增强体的类型和含量对铝基复合材料的物理和机械性能也有重大影响。Kaczmar 等^[31]用粉末冶金法制备了不同含量的氧化铝纤维增强 PM 6061 铝合金基复合材料,研究了纤维含量对复合材料性能的影响。结果表明,纤维含量决定复合材料的密度。纤维含量为 10%(体积分数,下同)的材料相对密度最高(99.3%),纤维含量为 30%的材料相对密度最低(97.5%)。当纤维体积分数为 15%时,最大拉伸强度为 390 MN/m²;当纤维体积分数为 15%和 20%时,复合材料的屈服强度最大。纤维含量增加,断裂伸长率随之降低。纤维/基质界面处的结合状态依赖于纤维含量,当增强体含量较少时,复合材料的界面结合较好,当增强体含量为 30%时,复合材料中孔洞较多且界面结合较弱,机械性能较差。

粉末冶金法操作简单,材料的复合和成型可一起完成,制造体系较为完善,材料利用率高。粉末冶金法在低于金属基体熔点的温度下进行,加工温度较低,能耗低,基体与纤维之间界面反应小,得到的复合材料晶粒细小、组织均匀、成分可控,力学性能较好。但粉末冶金法制备的产品缺陷多,容易产生局部应力,并且设备一次性投入大,模具费用相对铸造模具高,且制粉成本较高、生产率低,难以实现工业化生产。

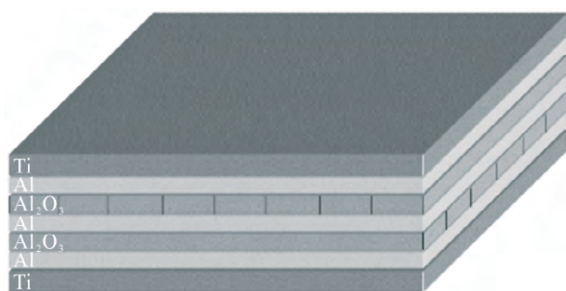
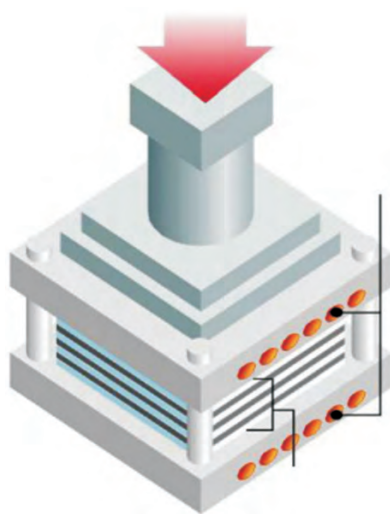
1.2 固相压延法

固相压延法是把铝箔与经表面处理后浸润铝液的纤维丝、复合丝或单层板按规定的次序叠层,制成预制片,然后放入热压模具内,在真空或保护气氛下,用热压或热等静压,使组成材料接触界面原子间相互扩散渗透粘接成型的制造方法^[32]。固相压延过程分为 3 个阶段:①粘接表面开始接触,在加热、加压作用下,材料发生轻微的塑性变形,材料表层原子相对运动,材料表面氧化膜破坏;②接触界面原子发生相互扩散,随着时间的进行,接触面间原子相互扩散渗透,使基体与基体之间、基体与增强体之间靠渗透作用紧紧粘接在一起;③结合界面消失,粘接过程完成,固相压延工艺参数,如热压温度、压力等对复合材料的影响很大。温度过低,原子扩散不充分,各组分粘接不牢靠;温度过高,复合材料界面反应严重,导致复合材料性能差。热压压力过大,会导致纤维破碎;压力过小,界面间原子扩散不充分,界面结合弱。

近年来,许多延性金属-脆性金属间化合物复合材料体系被设计制备,如 Ti-Al^[33-34]、Ni-Al^[35]、Nb-Al 和 Ti-Cu 体系^[36]。在延性金属-脆性金属间化合物复合材料体系中,主裂纹在脆性金属间化合物层中萌生和扩展,并分支成多个较小的裂纹,延性金属层阻止了分支裂纹的扩展^[33]。但是由于脆性金属间化合物塑性较差,复合材料的断裂韧性有限,限制了延性金属-脆性金属间化合物复合材料体系的应用。为了提高复合材料的韧性,学者们尝试在脆性金属间化合物相中引入连续陶瓷纤维作为增强相,被认为是最有前途的解决方法之一。

Vecchio 等^[37]为了提高 Ti-Al₃Ti 复合材料的断裂抗力,采用固相压延法制备了新型陶瓷纤维增强金属-金属间化合物层状(ceramic-fiber-reinforced metallic-intermetallic-laminate, CFR-MIL)复合材料,即 Al₂O₃/Ti-Al₃Ti 复合材料,引入了 Al₂O₃ 连续陶瓷纤维来提高 Ti-Al₃Ti 复合材料的韧性。结果表明,Al₂O₃ 纤维有效提高了复合材料的断裂抗力。纤维层可以阻止脆性 Al₃Ti 相形成裂纹,CFR-MIL 复合材料的断裂韧性高于未添加 Al₂O₃ 纤维的 MIL 复合材料。复合材料箔堆结构单元示意图见图 2^[37],反应箔烧结示意图见图 3^[37]。

Han 等^[38]采用固相压延法制备了连续 Al₂O₃ 陶瓷纤维增强 Ti-Al₃Ti 金属间化合物叠层(continuous Al₂O₃ ceramic fiber reinforced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminated, CCFR-MIL)复合材料。实验结果表明,复合材料界面结合良好,与基体材料相比,

图2 CFR-MIL 复合材料箔堆结构单元示意图^[37]Fig.2 Schematic diagram of the CFR-MIL composite starting foil stack arrangement in each structural unite^[37]图3 反应箔烧结设备示意图^[37]Fig.3 Schematic diagram of the reactive foil sintering apparatus^[37]

CCFR-MIL 复合材料在压缩和拉伸应力状态下的强度和破坏应变均有所提高,复合材料制造工艺示意图 4^[38]。

固相压延法是在金属基体熔点温度以下进行的,可以有效抑制界面反应,纤维与基体界面结合良好,且材料的复合成型可以一起完成。固相压延法制备的复合材料组织均匀、致密度高、无缩孔等

缺陷。受设备限制,固相压延法难以制备大尺寸且形状复杂的产品,仅能制备板状或低曲率板等形状简单的构件,且相关设备昂贵,生产成本低,大规模应用受到限制。去除金属表面氧化层,控制界面反应,保持表面清洁和高生产成本限制了其在工业中的应用。

2 液相法

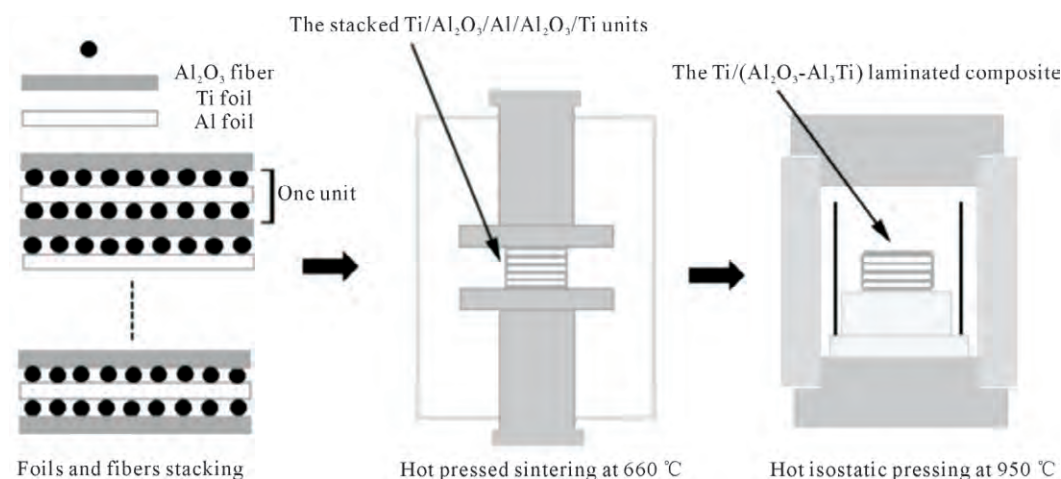
液相法是把熔融态金属与固态增强体材料进行复合,然后冷却成型的方法,分为挤压铸造、搅拌铸造和真空压力浸渗等方法,制备的复合材料界面结合紧密,属于强结合。

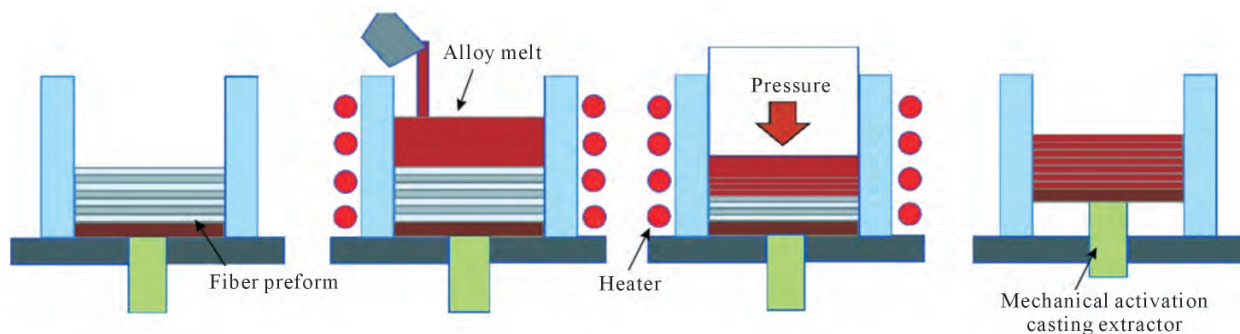
2.1 挤压铸造法

挤压铸造法是一种铸、锻结合的方法,可以有效解决气孔、偏析等铸造缺陷。首先将纤维预制体置于固定型腔中,然后将熔融态的金属浇入模具并进行机械加压,使熔融态的金属基体在持续高压作用下渗入纤维预制体,持续加压直到复合材料凝固成型,制备示意图见图 5^[39]。

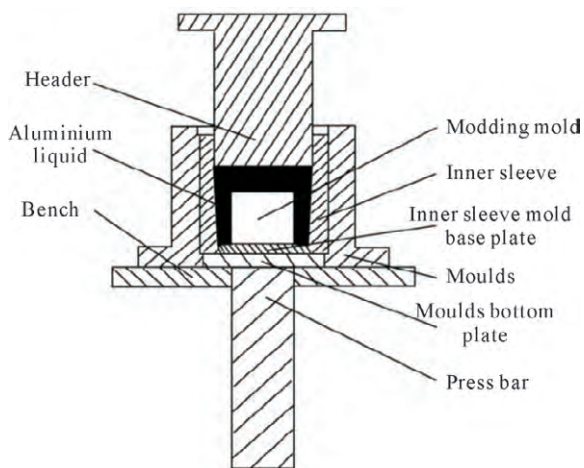
Zhang 等^[40]采用挤压铸造法制备了体积分数为 30%的氧化铝纤维增强 Al-Si 合金,结果表明,凝固条件对复合材料的组织和性能有很大的影响。在炉冷或空冷条件下,共晶硅倾向于在纤维表面形核长大,其在纤维表面的优先生长增加了纤维粗糙度,使复合材料的界面结合更加牢固,有利于提高复合材料的力学性能。Ren 等^[41]采用挤压铸造工艺制备了氧化铝颗粒和氧化铝纤维混合增强铝基复合材料,陶瓷增强体(包括颗粒和纤维)均匀地分散在基体合金中,无团聚现象。与基体合金相比,复合材料的热膨胀系数相对较低,硬度提高,弹性模量提高了 20%,高温拉伸强度提高了 21%。

铸造压力和增强纤维含量对铝基复合材料的性能影响很大。Cui 等^[42]用挤压铸造法制备了不同含

图4 连续 Al_2O_3 纤维增强 $\text{Ti}-\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料的制造工艺示意图^[38]Fig.4 Schematic illustration of the fabrication process for the continuous Al_2O_3 fiber reinforced $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ laminated composite^[38]

图5 挤压铸造法制备复合材料示意图^[39]Fig.5 Diagram of composites preparation by squeeze casting^[39]

量(体积分数为10%、17%和25%)氧化铝短纤维增强铝硅合金,研究了体积分对室温和350℃拉伸性能和低周疲劳性能的影响。结果表明,室温下,随着纤维体积分数增加,复合材料的拉伸强度减小,在350℃时,拉伸强度变化不大。在3种金属基复合材料中,体积分数为17%的金属基复合材料在低周疲劳试验下表现出最高应力水平。龚慧宇等^[43]以常规挤压铸造法为基础,提出了一种新型熔融高压压铸法制备复合材料的工艺,制备出的复合材料致密度更高,组织更均匀,且过程中无需制备预制体,生产效率更高。熔融高压压铸装置如图6^[43]所示。

图6 熔融高压压铸装置^[43]Fig.6 Die casting device for melting high pressure^[43]

向基体中添加La、Mg等微量元素可以降低金属表面的表面能和界面能,改善纤维与基体金属之间的浸润性。刘政等^[44]用挤压铸造法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-Mg-La}$ 复合材料,实验结果表明,La在复合材料界面上富集,提高了纤维与基体之间的润湿性。由于界面反应, MgAl_2O_4 晶核沿界面生长,在纤维与基体之间形成了非连续的反应结合界面,使纤维与基体之间的界面结合紧密。Zhang等^[45]用挤压铸造法制备了氧化铝纤维增强铝基复合材料,通过向基体中添加0.5%Ti(质量分数)改善了纤维与基体之间的浸润性,提高了复合材料的性能。

预制体的制备对铝基复合材料的性能有很大影响。目前,国内外关于纤维预制件对复合材料组织和性能影响的研究较少,方峰等^[46]对纤维预制件做了系统研究,结果表明,随着纤维体积分数和黏结剂质量分数的升高,预制体的抗压强度也不断提高。黏结剂质量分数较低时,预制件强度低,在复合材料制备过程中预制体可能发生变形甚至损坏,导致复合材料组织和性能不均匀;黏结剂质量分数过高时,预制体强度高,复合材料内部可能会形成网状组织和空洞,影响复合材料的致密度和机械性能。Asano^[47]用 SiO_2 作为黏结剂制备了纤维随机排列的预制体,采用挤压铸造法制备了氧化铝短纤维增强铝合金复合材料。结果表明,在纤维附近的Al中,可以看到Al与纤维之间的热膨胀失配而产生的位错。位错的形成表明,由于 SiO_2 黏结剂的存在,纤维与Al之间的界面结合较强。

挤压铸造法可用传统铸造设备,工艺成熟、成本效益高,适用于批量生产短纤维增强铝基复合材料中的小型铸件。外界持续施加压力,改善了金属基体与增强纤维之间的黏附力,增加了两者的浸润速度,缩短了界面反应时间,所制得的复合材料界面反应小,偏析和缩孔等常规铸造缺陷少,致密度高^[48]。因需要提前制备纤维预制体,所以增强纤维的分布均匀可控,复合材料的组织和性能有更高的可设计性。但预制体中容易形成封闭的孔洞,导致铝液无法充分浸润,影响复合材料的致密度。和固相法相比,挤压铸造法制备的复合材料更加致密,但挤压铸造过程中需要持续施加高压,容易造成纤维预制体的变形甚至损坏,从而影响产品质量。挤压铸造法对模具要求较高,且只能生产一些结构简单的零件,是制造工业级氧化铝纤维增强铝基复合材料的最简单高效的方法,有很好的前景。但是,在高温下容易生成脆性界面层,影响复合材料的性能。可以对增强纤维进行适当的化学处理或涂层处理,也可以向熔体中加入润湿剂,降低金属界面能,促进积极的界面反应。

2.2 搅拌铸造法

在金属基复合材料的制备方法中,搅拌铸造法是最成熟、经济且可大规模生产的方法。搅拌铸造是将基体金属加热至熔融状态,然后将增强体加入熔融态的金属液中,在机械搅拌或者超声波搅拌的作用下,使增强体均匀地分散在金属基体中,之后浇铸成型的一种方法^[49]。图 7^[50]为超声波搅拌铸造示意图。搅拌铸造法适用于制备颗粒、晶须、短纤维增强铝基复合材料。

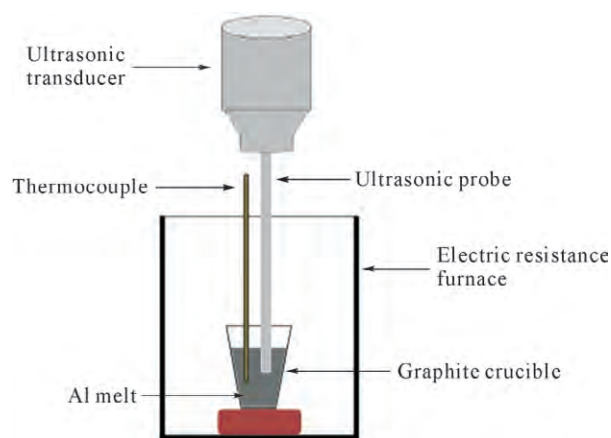


图 7 超声波搅拌铸造示意图^[50]

Fig.7 Schematic diagram of ultrasonic assisted casting^[50]

Chen 等^[51]采用搅拌铸造工艺,通过 Al_2O_3 纳米纤维和微米 Cu 颗粒的混合,将 Al_2O_3 纳米纤维引入铝基体中,制备了纤维直径为 10~20 nm 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料。实验结果表明,增强体的引入细化了铝基体晶粒,与基体相比,复合材料的硬度增加了 18%。Kurganova 等^[52]采用液相搅拌铸造法制备了纳米氧化铝纤维增强铝基复合材料。结果表明,复合材料的屈服强度增加了 50%;建立的修正系数(0.25~0.30)可用于预测铝基复合材料的强度。

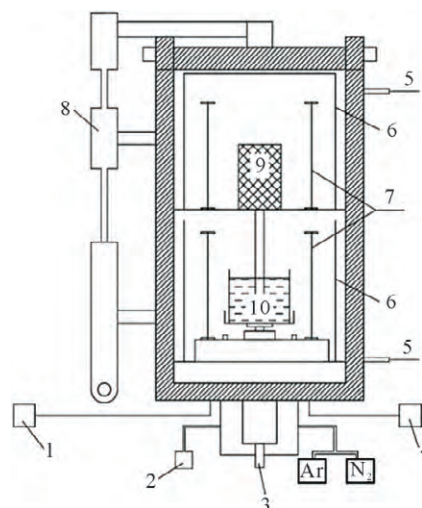
在搅拌过程中,由于范德华力和静电力作用,纤维容易发生团聚,而且在搅拌过程中熔体吸入大量空气,容易造成气孔等缺陷。半固态搅拌铸造法可以很好地消除团聚现象和减少气孔发生。半固态搅拌铸造法是把温度控制在液相线与固相线之间^[53],在液态金属中存在适量固态金属颗粒,加入增强体后,由于金属液黏性大,搅拌过程中,团聚的纤维被打散,使纤维均匀分散在金属基体中。本课题组^[54]用半固态搅拌法制备了不同含量的镀铜氧化铝纤维增强铝合金,结果表明,纤维在基体中分布均匀,无团聚现象。随着纤维含量的增加,复合材料的耐腐蚀性能降低。

搅拌铸造法工艺简单,对设备要求低,生产成本低、效率高,可以实现大型复合材料零件的制备,易

实现工业化生产。但是其加热温度高,容易烧伤纤维,从而影响复合材料的性能;存在传统铸造的固有缺陷,如气孔和偏析,影响产品质量。为了避免金属在高温下氧化,搅拌铸造法需要在严格的保护气氛条件下进行;在常压下进行制造,纤维与基体之间浸润性差,容易出现纤维下沉、搅拌不均匀等问题^[55]。减少纤维团聚和气孔,改善纤维与基体之间的浸润性,抑制高温下的不良反应(金属基体氧化、基体与纤维之间的界面反应),是改进工艺的关键。对氧化铝纤维表面做金属化处理,实现金属-金属接触,改善氧化铝纤维与 Al 之间的润湿性,抑制界面反应,提高复合材料的界面结合强度,从而提高复合材料的综合性能。

2.3 真空压力浸渗

真空压力浸渗法的原理是气压浸渗。首先需要制备纤维预制体,然后把制备的预制体放入模具内并抽真空,通入高压惰性气体形成压力差,在压力的作用下熔炼炉中熔融态的金属浸渗到预制体空隙中,最后冷却成型。在压入熔融态金属前,对模具腔体和纤维预制体预热,可以减小金属液浸渗时的粘滞阻力,使金属液更好地完成充型^[56],设备示意图见图 8^[57]。



1- 电源;2- 真空泵;3- 坩埚升降台;4- 数字控制表;5- 循环冷却水
6- 隔热罩;7- 加热线圈;8- 上塞升降机构;9- 预制体;10- 金属液

图 8 真空气压浸渗设备示意图^[57]

Fig.8 Schematic diagram of the vacuum gas-pressure-infiltration equipment^[57]

浸渗压力和预热温度对铝基复合材料的性能有很大影响,浸渗压力较高时,浸润效果更好,但是过高的浸渗压力可能会使纤维预制体变形甚至崩坏。当预热温度较高时,金属液流动性好,可以更好地充型,使复合材料的致密度更高。但是过高的预热温度会烧伤纤维,影响复合材料的性能。胡银生等^[58]用真

空压力浸渗法制备了氧化铝纤维增强铝基复合材料,纤维体积分数高达 40%,发现预热温度对复合材料致密度影响较大,预热温度提高,复合材料的致密度也随之提高。当预热温度为 560 °C 时,复合材料的拉伸强度最大,较基体合金提高了 302%。

除了工艺参数对复合材料的性能有关键影响外,基体种类、纤维类型和含量对铝基复合材料的性能也有重大影响。聂明明等^[59]选用不同铝合金为基体,用真空压力浸渗法制备了氧化铝纤维增强铝基复合材料,结果表明,基体种类对复合材料的致密度和微观组织影响较大。当基体为 ZL301 时,复合材料的致密度最高,为 99.2%,材料缺陷最少;当基体为 1A99 时,复合材料的致密度最低,为 96.8%。胡银生等^[60]选用不同纤维作为增强体,用真空压力浸渗法制备了纤维增强的铝基复合材料,发现纤维种类对复合材料的致密度和界面层厚度影响较大。当 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{f}$ 为增强体时,致密度最小,只有 98.2%,复合材料未发现明显界面层;当 SiC_f 为增强体时,致密度为 99.2%,复合材料界面层厚度为 275.3 nm;当 C_f 为增强体时,致密度最大,为 99.9%,复合材料界面层厚度为 327.4 nm。Yang 等^[61]用真空压力浸渗法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{f}/2024\text{Al}$ 复合材料,结果表明,复合材料强度随纤维含量的增加而增加,且均高于基体材料的强度。

许慧等^[62]用真空压力浸渗法和粉末冶金法制备了 $(40\%\text{SiC}_\text{p}+10\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{f})/2024\text{Al}$ (体积分数) 复合材料,结果表明,与粉末冶金法相比,真空压力浸渗法制备的复合材料中的增强相在基体中分布得更加均匀,且抗拉强度更高。

真空压力浸渗法工艺简单,过程压力可控,预制体不易变形,复合材料致密度高。制备过程通入高压惰性气体,可以有效避免金属氧化,减少甚至消除气孔等铸造缺陷,制备出的复合材料性能高。但其设备昂贵、压力系统复杂,需要制备预制体,工艺周期长、生产效率低,只能生产中小型零件^[63]。此方法也存在基体与增强纤维浸润性差的问题,而且在浸润过程中熔融金属可能会对增强纤维造成损伤,从而影响复合材料的性能。纤维表面改性可以很好地提高纤维与金属之间的浸润性,抑制界面反应,保护纤维不被烧伤^[64]。

3 增材制造的启发

近年来,增材制造技术不断推进,为金属基复合材料制备提供了新的思路。目前已经有学者用增材制造技术制备了碳纤维增强金属基复合材料,并取得了较好的研究成果,如杨立宁等^[65]先在碳纤维表

面镀铜,然后用增材制造方法制备了镀铜碳纤维增强金属基复合材料,研究表明,镀铜碳纤维与金属结合良好。与基体合金相比,复合材料的抗拉强度提高了 48%,工艺原理见图 9^[65]。

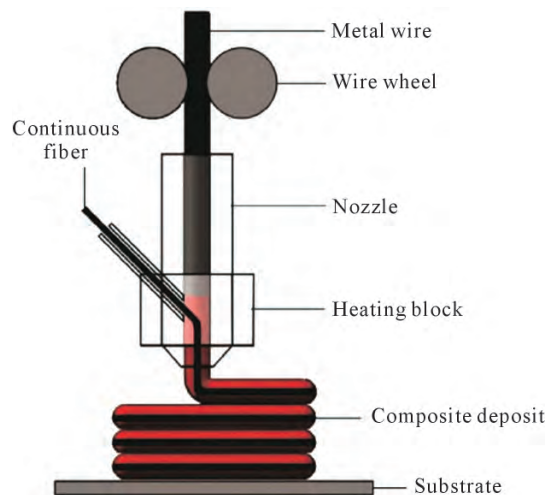


图 9 连续纤维增强金属基复合材料增材制造工艺原理^[65]
Fig.9 Principle of additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced metal matrix composites^[65]

Wang 等^[66]采用双层打印头 3D 打印工艺(double-layer printing head 3D printing process, DPP)制备了连续碳纤维增强锡铅基复合材料,提出了毛细力驱动和非均匀界面反应驱动纤维分散的双重机理。毛细力是驱动纤维分散的主要作用力,它受毛细作用的影响。另外,非均匀界面反应产生的驱动力也会促进纤维的分散,该研究填补了 3D 打印增强纤维分散机理的空白,为进一步提高复合材料的性能提供了理论支持。

逐层制造的方式、自由成形的制造能力,以及其对微观结构和机械性能逐点控制的潜力,使增材制造成为制备金属基复合材料最有前途的方法^[67-69]。国外对氧化铝纤维的研究较早,制备工艺相对成熟,如美国 3M 公司生产的 Nextel 系列,英国 ICI 公司生产的 Saffil 系列,日本 Sumitomo 公司生产的 Altex 系列等。我国对氧化铝纤维的研究也取得了很大进展^[70-72],如国装新材料技术(江苏)有限公司、东桁国纤新材料有限公司、上海榕融新材料科技有限公司等在氧化铝纤维的研究上取得了较大突破,实现了氧化铝纤维的商业化应用,这为氧化铝纤维增强铝基复合材料的制备与研究提供了物质基础。但是目前国内外关于 3D 打印制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{f}/\text{Al}$ 复合材料的研究较少,希望可以弥补这方面的空白。

4 总结与展望

氧化铝的表面能与铝的表面能相差很大,两者

很难润湿,这直接影响了氧化铝纤维增强铝基复合材料的综合性能。想要制备出品质较好的氧化铝纤维增强铝基复合材料,需要改善金属基体与增强纤维之间的浸润性,控制界面反应,减少纤维团聚和气孔的形成,以确保复合材料的综合性能。在以上制备方法中,可以通过纤维表面改性及涂层处理,提供金属-金属的界面接触,改善氧化铝纤维与铝基体之间的浸润性,提高界面结合强度。也可以向基体中添加 La、Mg 等微量合金元素降低金属的表面能和界面能,使基体和纤维可更好地浸润。

综上所述,未来制备氧化铝纤维增强金属基复合材料的重点需放在以下方面。

(1)进一步研究浸润性机制,改善金属与纤维之间的浸润性。

(2)深入研究键合界面之间的反应,提高金属与纤维之间的界面结合强度。

(3)对不同纤维、颗粒混合增强铝基复合材料进行研究,使金属基复合材料的微观结构和力学性能可控。

(4)分析过程中的热力学因素,为氧化铝纤维增强金属基复合材料的制备方法提供理论支持。

(5)改善工艺流程和相关技术参数,提高生产效率,降低生产成本,推动纤维增强铝基复合材料工业化生产。

(6)将 3D 打印技术应用于氧化铝纤维预制件和氧化铝纤维增强铝基复合材料的制备,开发新的生产工艺。

参考文献:

- [1] SINGH H, BRAR G S, KUMAR H, AGGARWAL V. A review on metal matrix composite for automobile applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 320-325.
- [2] 张荻,谭占秋,熊定邦,李志强. 热管理用金属基复合材料的应用现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2018, 37(12): 994-1001, 1047.
ZHANG D, TAN Z Q, XIONG D B, LI Z Q. Application and prospect of metal matrix composites for thermal management: An overview[J]. Materials China, 2018, 37(12): 994-1001, 1047.
- [3] 张文龙,陈嘉颐,张帆,顾明元,Deve H E. 连续氧化铝纤维增强铝基复合材料的新进展[J]. 材料导报, 2001(6): 7-9, 6.
ZHANG W L, CHEN J Y, ZHANG F, GU M Y, DEVE H E. New progress in continuous alumina-fiber-reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials Reports, 2001(6): 7-9, 6.
- [4] 张辉,裴东杰,牛炳博. 热挤压石墨烯/Al 基复合材料的组织及性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(5): 57-62.
ZHANG H, PEI D J, NIU B B. Investigation on the microstructure and properties of hot extruded graphene/Al matrix Composite[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(5): 57-62.
- [5] SHARMA A K, BHANDARI R, AHERWAR A, RIMASŠAUSKIEN R, PINCA-BRETOTÉAN C. A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2419-2424.
- [6] GARG P, JAMUWAL A, KUMAR D, SADASIVUNI K K, HUSSAIN C M, GUPTA P. Advance research progresses in aluminium matrix composites: Manufacturing & applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4924-4939.
- [7] UJAH C O, KALLON D V V. Trends in aluminium matrix composite development[J]. Crystals, 2022, 12(10): 1357.
- [8] UDAYA, FERNANDES P. Novel carbon nanotube and fly-ash reinforced Al composites for automobile and aerospace applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 35: 456-460.
- [9] 帅甜田. 真空热压扩散法制备层压编织 C/Al 复合材料工艺及组织研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2015.
SHUAI T T. Fabrication process and microstructure of laminated woven fiber reinforced Al matrix composite manufactured by hot pressing diffusion bonding[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [10] MUSSATTO A, AHAD I U, MOUSAVIAN R T, DELAURE Y, BRABAZON, D. Advanced production routes for metal matrix composites[J]. Engineering Reports, 2021, 3(5): e12330.
- [11] CAO J. The journal of materials processing technology 2018[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 254: A1.
- [12] 钟厉,韩西,周上祺. 纤维增强铝基复合材料研究进展[J]. 机械工程材料, 2002(12): 12-14.
ZHONG L, HAN X, ZHOU S Q. The progress in research of fiber-reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002(12): 12-14.
- [13] 景宏亮. C/Al 复合材料的制备与界面修饰的研究进展 [J]. 甘肃科技, 2019, 35(9): 70-72, 62.
JING H L. Reviews on the surfer modification and preparation of carbon fiber reinforced Al matrix composite[J]. Gansu Science and Technology, 2019, 35(9): 70-72, 62.
- [14] 张成良. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的制备和性能研究[D]. 兰州:兰州大学, 2008.
ZHANG C L. Studies preparation and properties of SiC particles reinforced aluminum matrix composites [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [15] 董天顺,崔春翔,刘双劲,薛海涛. 纤维增强铝基复合材料的发展现状[J]. 热加工工艺, 2006(3): 49-51, 55.
DONG T S, CUI C X, LIU S J, XUE H T. Advancement of fiber-reinforced aluminum matrix composites [J]. Hot Working Technology, 2006(3): 49-51, 55.
- [16] 吴复涛,于延龙,李春海,王绍昌,赵华社,谭建波. 纤维增强金属基复合材料研究进展[J]. 铸造设备与工艺, 2022(1): 52-56.
WU F T, YU Y L, LI C H, WANG S C, ZHAO H S, TAN J B. Research progress of fiber reinforced metal matrix composites [J]. Foundry Equipment and Technology, 2022(1): 52-56.
- [17] 费良军,朱秀荣,童文俊,王荣,徐永东,齐丕骥. 纤维增强铝基复合材料及其应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2001(S1): 150-152.
FEI L J, ZHU X R, DONG W J, WANG R, XU Y D, QI P X. Fiber reinforced aluminum matrix composite and application [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001(S1): 150-152.

- [18] 牟俊东,魏作山,冯增建,高希柱,杨振宁,杨景飞. 高性能活塞用氧化铝短纤维增强铝基复合材料[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(7): 650-652.
- MOU J D, WEI Z S, FENG Z J, GAO X Z, YANG Z Y, YANG J F. Preparation of Al_2O_3 short fiber reinforced aluminum matrix composites for high performance piston [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(7): 650-652.
- [19] 宋久鹏, BARRIERE T, 柳葆生, GELIN J C. 粉末注射成形中偏析效应及其影响的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2008(1): 33-37, 179-180.
- SONG J P, BARRIERE T, LIU B S, GELIN J C. Numerical analysis to segregation effects of powder injection molding [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008(1): 33-37, 179-180.
- [20] NOVÁK P. Advanced powder metallurgy technologies[J]. Materials, 2020, 13(7): 1742.
- [21] HUG E, DIRRAS G. News trends in powder metallurgy: Microstructures, properties, durability[J]. Metals, 2021, 11(8), 1216.
- [22] BODUKURI A K, SEWARAIA H K, RAJENDAR K, SAMPATH V. Fabrication of Al-SiC-B₄C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties[J]. Perspectives in Science, 2016, 8: 428-431.
- [23] 曹子林, 张林慧, 仲斌年, 王云思. 铝基复合材料的制备和研究现状[J]. 金属功能材料, 2023, 30(2): 29-39.
- CAO Z L, ZHANG L H, ZHONG B N, WANG Y S. Manufacture and current research of aluminum matrix composites[J]. Metallic Functional Materials, 2023, 30(2): 29-39.
- [24] POVIRK G L, HORTON J A, MCKAMEY C G, TIEGS T N, NUTT S R. Interfaces in nickel aluminide/alumina fibre composites[J]. Journal of Materials Science, 1988, 23(11): 3945-3950.
- [25] HAAR J H, DUSZCZYK J. Mechanical properties and microstructure of a P/M aluminium matrix composite with δ -alumina fibres and their relation to extrusion [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(4): 1011-1024.
- [26] 权高峰, 柴东朗, 宋余九. 氧化铝短纤维增强铝基复合材料的组织与性能[J]. 金属热处理学报, 1995, 16(4): 65-67.
- QUAN G F, CHAI D L, SONG Y J. Short alumina fiber reinforced aluminum composite [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1995, 16(4): 65-67.
- [27] ZHOU J, DUSZCZYK J. The choice of the initial form of δ - Al_2O_3 short fibers to reinforce the Al-4.5 Cu alloy prepared from elemental powders [J]. Journal of Materials Science Letters, 1998, 17: 1801-1804.
- [28] MORENO M F, GONZÁLEZ OLIVER C J R. Liquid phase densification of Al-4.5 wt. % Cu powder reinforced with 5 wt. % Saffil short fibers during hot pressing[J]. Powder Technology, 2013, 245: 13-20.
- [29] 秦兴文. YAG- Al_2O_3 -(ZrO_2)纤维增强高铝青铜复合材料的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- QIN X W. Preparation and properties of YAG- Al_2O_3 (ZrO_2) fiber reinforced high-aluminum bronze composites [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [30] VAIRAMUTHU J, SENTHIL KUMAR, STALIN B, RAVICHANDRAN M. Optimization of powder metallurgy parameters of TiC and B₄C reinforced aluminium composites by Taguchi method[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2020, 45(2): 249-261.
- [31] KACZMAR J W, KAINER K U. Effect of alumina fibre content on properties of PM 6061 aluminium alloy based composite materials [J]. Powder Metallurgy, 1992, 35(2): 133-136.
- [32] 李寅雪. 纤维增强铝基复合材料在输电导线中的应用[J]. 华北电力技术, 2010(8): 29-32.
- LI Y X. Application of fiber-reinforced aluminium matrix composites in conductor[J]. North China Electric Power, 2010(8): 29-32.
- [33] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F C, ROHATGI A. Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti- Al_3Ti metal-intermetallic laminate composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(6): 1595-1608.
- [34] LI T Z, JIANG F C, OLEVSKY E A, VECCHIO K S, MEYERS M A. Damage evolution in $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ - Al_3Ti metal-intermetallic laminate composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 443 (1-2): 1-15.
- [35] WANG H B, HAN J C, DU S Y, NORTHWOOD D O. Effects of Ni foil thickness on the microstructure and tensile properties of reaction synthesized multilayer composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 445-446: 517-525.
- [36] HAN Y Q, ZHU J Y, YAN H R, LIN C F, ZHAO Z L, PAN X C, WANG S Y. Effect of shape-memory alloy NiTi fiber on microstructure and mechanical properties of continuous ceramic Al_2O_3 fiber-reinforced Ti/ Al_3Ti metal-intermetallic laminated composite[J]. Advanced Composites Letters, 2020, 29: 1-9.
- [37] VECCHIO K S, JIANG F C. Fracture toughness of ceramic-fiber-reinforced metallic-intermetallic-laminate (CFR-MIL) composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 649: 407-416.
- [38] HAN Y Q, LIN C F, HAN X X, CHANG Y P, GUO C H, JIANG F C. Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al_2O_3 ceramic fiber reinforced Ti/ Al_3Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 688: 338-345.
- [39] 征立志, 周玉兰, 张云虎, 郑红星. 碳纤维增强金属基复合材料的研究进展[J]. 上海金属, 2023, 45(4): 1-9.
- ZHOU L Z, ZHOU Y L, ZHANG Y H, ZHENG H X. Progress in research on metal matrix composite reinforced by carbon fiber[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(4): 1-9.
- [40] ZHANG X X, WEI H M, WANG D Z, GENG L. Enhancement of interfacial bond strength of Al_2O_3 /Al-15Si composite by solidification process[J]. Rare Metals, 2007(S1): 286-290.
- [41] REN L Y, ZHANG Q, HU H. Fabrication and characterization of 5 vol. % Al_2O_3 +8 vol. % Al_2O_3 /A336 hybrid micron and nanocomposites[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 128: 3009.
- [42] CUI J J, LI B C, ZHANG G H, ZHANG J X, WEI Z S, FENG Z J, CAI W. Effect of fiber volume fraction on low cycle fatigue behavior of Al_2O_3 /Al-Si composites [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 268-270: 87-91.
- [43] 龚慧宇, 傅蔡安, 钱静, 马祺超, 徐广. 新型熔融高压铸造法制备铝/金刚石复合材料的研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(2): 58-61.
- GONG H Y, FU C A, QIAN J, MA Q C, XU G. Study on preparation of Al/diamond composite by new molten high pressure casting

- [J]. Hot Working Technology, 2023, 52(2): 58-61.
- [44] 刘政, 涂毅. La 对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-Mg}$ 复合材料凝固溶质偏析的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006(8): 465-467, 459.
- LIU Z, TU T. Effect of RE La on solute segregation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al-Mg}$ composites during solidification[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2006(8): 465-467, 459.
- [45] ZHANG G T, SU W, SUZUMURA A. Active-transient liquid phase (A-TLP) bonding of pure aluminum matrix composite reinforced with short alumina fiber using Al-12Si-xTi foils as active interlayer[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(3): 2026-2039.
- [46] 方峰, 江静华, 谈淑咏, 马爱斌, 蒋建清. 短纤维预制件强度对铝基复合材料组织的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002(3): 415-418.
- FANG F, JIANG J H, TAN S Y, MA A B, JIANG J Q. Effect of compressive strength of short alumina fiber preform on microstructure of MMC[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002(3): 415-418.
- [47] ASANO K. Preparation of alumina fiber-reinforced aluminum by squeeze casting and their machinability[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(11): 1312-1316.
- [48] 周珍珍. 基于真空气压浸渗的 3D-C_f/Al 复合材料微观组织及力学性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- ZHOU Z Z. Research on microstructure and mechanical properties of 3D-C_f/Al composites manufactured by vacuum pressure infiltration[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [49] SHARMA P, KHANDNJA D, SHARMA S. Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(23): 2192-2202.
- [50] GUPTA R, CHAUDHARI G P, DANIEL B S S. Strengthening mechanisms in ultrasonically processed aluminium matrix composite with in-situ Al_3Ti by salt addition[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 140: 27-34.
- [51] CHEN Y J, KURGANOVA Y A, SCHERBAKOV S P. Development and implementation of a technology for introducing reinforcement into aluminum matrix composite [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 934(1): 012030.
- [52] KURGANOVA Y A, KOLMAKOV A G, CHEN I, KURGANOV S V. Study of mechanical characteristics of advanced aluminum-matrix composites reinforced with SiC and Al_2O_3 [J]. Inorganic Materials: Applied Research, 2022, 13(1): 157-160.
- [53] 王金凤. 机械制造工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- WANG J F. Introduction to mechanical manufacturing engineering [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [54] 蒋世权, 王迎春, 马小民, 吴新猛, 张健, 黄茜, 李景明. 国产氧化铝纤维增强铝基复合材料的耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(22): 30-39.
- JIANG S Q, WANG Y C, MA X M, WU X M, ZHANG J, HUANG X, LI J M. Study on corrosion resistance of aluminum matrix composites reinforced with domestic alumina fibers [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(22): 30-39.
- [55] AKBAR H I, SUROJO E, ARIAWAN D, PUTRA G A, WIBOWO R T. Effect of reinforcement material on properties of manufactured aluminum matrix composite using stir casting route [J]. Procedia Structural Integrity, 2020, 27: 62-68.
- [56] 许久海, 徐志锋, 王振军, 余欢. 连续纤维增强铝基复合材料制备技术研究进展[J]. 铸造技术, 2010, 31(12): 1667-1670.
- XU J H, XU Z F, WANG Z J, YU H. Progress in research on fabrication of continuous fiber reinforced aluminum matrix composites [J]. Foundry Technology, 2010, 31(12): 1667-1670.
- [57] 王晓东, 骆毅, 胡耀政, 汪志太. 真空压力浸渗法制备 $\text{B}_4\text{C}/\text{ZL301}$ 复合材料的组织与性能[J]. 西安航空学院学报, 2023, 41(3): 61-66.
- WANG X D, LUO Y, HU Y Z, WANG Z T. Microstructure and properties of $\text{B}_4\text{C} / \text{ZL301}$ composite prepared by vacuum pressure infiltration[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2023, 41(3): 61-66.
- [58] 胡银生, 余欢, 徐志锋, 蔡长春, 聂明明. 纤维预热温度对连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(5): 361-370.
- HU Y S, YU H, XU Z F, CAI C C, NIE M M. Effect of fiber preheating temperature on mechanical properties of continuous $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composites [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(5): 361-370.
- [59] 聂明明, 徐志锋, 王振军, 余欢, 蔡长春, 王德清. 基体合金对连续 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料微观组织及抗拉强度的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(10): 3063-3071.
- NIE M M, XU Z F, WANG Z J, YU H, CAI C C, WANG D Q. Effect of matrix alloy on microstructure and tensile strength of continuous $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 3063-3071.
- [60] 胡银生, 余欢, 徐志锋, 聂明明, 徐燕杰, 姚菁. 增强纤维对连续纤维增强铝基复合材料界面和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2245-2254.
- HU Y S, YU H, XU Z F, NIE M M, XU Y J, YAO Q. Effect of reinforcing fiber on interface and mechanical properties of fiber reinforced aluminum matrix composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2245-2254.
- [61] YANG Y S, FENG K, ZHAO W X. Fabrication and properties of Al_2O_3 short fiber reinforced aluminium matrix composites [J]. Advanced Materials Research, 2011, 328-330: 1277-1280.
- [62] 许慧, 赵洋, 任淑彬, 曲选辉. 真空压力熔渗与热压烧结制备 ($\text{SiC}_p+\text{Al}_2\text{O}_3$)/2024Al 复合材料的组织与拉伸性能分析[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 951-956.
- XU H, ZHAO Y, REN S B, QU X H. Microstructure and tensile property of ($\text{SiC}_p+\text{Al}_2\text{O}_3$)/2024Al composites fabricated by vacuum pressure infiltration and hot pressing sintering: A comparative study[J]. Materials Reports, 2018, 32(6): 951-956.
- [63] DAOUD A. Wear performance of 2014 Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufactured by gas pressure infiltration [J]. Materials Letters, 2004, 58(25): 3206-3213.
- [64] 涂毅, 刘政. 改善氧化铝短纤维与铝液基体间浸润性的研究[J]. 轻金属, 2004(11): 40-42.
- TU T, LIU Z. Improvement on the wettability and adherence of Al_2O_3 (sf)/Al composites by matrix alloying[J]. Light Metals, 2004(11): 40-42.
- [65] 杨立宁, 张永弟, 王金业, 常宏杰, 杨光. 连续碳纤维增强金属基

- 复合材料增材制造工艺[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(11): 2084-2090.
- YANG L N, ZHANG Y D, WANG J Y, CAHNG H J, YANG G. Additive manufacturing process of continuous carbon fiber reinforced metal matrix composites[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(11): 2084-2090.
- [66] WANG X, TIAN X, LI D C. Dual mechanisms of fiber dispersion of Cf/Sn50Pb50 composites fabricated by double-layer printing head 3D printing process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 971-979.
- [67] GDRUNOV A I. Investigation microstructure of carbon fibers reinforced composite on Fe and Ni-based obtained by laser metal deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 364: 279-288.
- [68] SHAO C W, LI H Y, ZHU Y K, LI P, YU H Y, ZHANG Z T, GLEITER H, MCDONALD A, HOGAN J. Nano-additive manufacturing of multilevel strengthened aluminum matrix composites [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 5 (1): 015102.
- [69] HOJJATZADEH S M H, PARAB N D, YAN W T, GUO Q L, XIONG L H, ZHAO C, QU M L, ESCANO L I, XIAO X H, FEZ-ZAA K, EVERHART W, SUN T, CHEN L Y. Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3088.
- [70] 曾佳琪, 赵丽, 唐海洲, 冯慧, 毛雪, 张坤. 氧化铝纤维的制备及其应用研究现状[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(5): 65-70.
- ZENG J Q, ZHAO L, TANG H Z, FENG H, MAO X, ZHANG K. Research status of preparation and application of alumina fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry. 2021, 44(5): 65-70.
- [71] 钱伯章. 国内首家耐高温氧化铝纤维新材料工厂投产 [J]. 合成纤维, 2022, 51(12): 4.
- QIAN B Z. China 's first high temperature resistant alumina new material factory put into operation [J]. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(12): 4.
- [72] 李雪松. 氧化铝纤维的制备方法及其研究进展[J]. 山东化工, 2023, 52(16): 105-107.
- LI X S. Preparation and presearch progress of alumina fiber [J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(16): 105-107.