



Ti 颗粒增强镁基复合材料微观组织和力学性能的研究进展及展望

刘星雨^{1,2}, 杨 鸿^{1,2,3,4*}, 凡冀川^{1,2}, 潘晓媛^{1,2}, 谭 臻^{1,2},
陈先华^{1,2*}, 潘复生^{1,2,3}

(1. 重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 明月湖实验室, 重庆 401135; 4. 兰溪镁材料研究院, 浙江 金华 321100)

摘 要: Ti 颗粒增强镁基复合材料作为一种兼具轻量化与高性能的理想材料, 在航空航天、生物医疗等前沿领域展现出重要的应用潜力。近年来, 国内外研究者在 Ti 颗粒增强镁基复合材料的制备方法、合金系开发及强韧化机理理解等方面均取得了显著的研究进展。为此, 从制备 Ti 颗粒增强镁基复合材料的基体合金角度展开叙述, 讨论了基体合金体系、增强体特征、制备手段、变形方法等因素对镁基复合材料微观结构和力学性能的影响规律, 综合讨论了 Ti 颗粒增强镁基复合材料的强韧化机制, 最后对未来研究内容和发展方向进行了具有现实意义的展望。

关键词: Ti 颗粒; 镁基复合材料; 微观结构; 力学性能

中图分类号: TF046.6; TF533

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0039-15

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.005

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research progress and prospects of Ti particle-reinforced magnesium matrix composites: A review on microstructure and mechanical properties

LIU Xingyu^{1,2}, YANG Hong^{1,2,3,4*}, FAN Jichuan^{1,2}, PAN Xiaohuan^{1,2}, TAN Zhen^{1,2},
CHEN Xianhua^{1,2*}, PAN Fusheng^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Mingyue Lake Laboratory, Chongqing 401135, China; 4. Magnesium Materials Research Institute of Lanxi, Jinhua 321100, Zhejiang, China)

Abstract: Ti particle-reinforced magnesium matrix composites have emerged as ideal materials combining lightweight design and high performance, demonstrating significant application potential in frontier fields such as aerospace and biomedical engineering. In recent years, researchers worldwide have made remarkable progress in the fabrication methods, alloy system development, and understanding of strengthening and toughening mechanisms of these composites. In this regard, this review starts from

收稿日期: 2025-12-17; 修回日期: 2026-01-29; 接受日期: 2026-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (52571126 和 52225101); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2020B0301030006); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2023NSCQMSX0571)。

作者简介: 刘星雨: 2002 年出生, 女, 硕士研究生, 主要从事钛颗粒增强镁基复合材料凝固行为的研究, E-mail: 1623585208@qq.com; *通信作者: 杨鸿, 1992 年出生, 女, 博士, 副研究员, 主要从事镁基复合材料的高温力学行为研究, E-mail: hong.yang@cqu.edu.cn; *通信作者: 陈先华, 1978 年出生, 男, 博士, 教授, 主要从事新型高性能镁基材料与制备技术研究, E-mail: xhchen@cqu.edu.cn。

the perspective of the matrix alloys used for preparing Ti particle-reinforced magnesium matrix composites, discusses the influencing laws of factors including matrix alloy systems, reinforcement characteristics, preparation techniques, and deformation methods on the microstructure and mechanical properties of magnesium matrix composites, comprehensively summarizes the strengthening and toughening mechanisms of Ti particle-reinforced magnesium matrix composites, and finally presents a practically meaningful prospect for future research contents and development directions.

Key words: Ti particles; magnesium matrix composites; microstructures; mechanical properties

0 引言

镁是最轻的绿色金属结构材料,密度约为 1.74 g/cm^3 ^[1]。镁及其合金具有优异的比强度和比刚度、优良的电磁屏蔽性、良好的机加工与铸造性能,使其在航空航天、汽车、3C 电子等领域具有难以替代的作用^[2-3]。然而,镁及其合金相对较低的延展性、弹性模量、较差的耐腐蚀性和抗蠕变性能,限制了其在更广泛领域的应用^[4-5]。为突破这些性能瓶颈,高纯化、合金化、热处理、变形加工、表面处理等技术手段被广泛用于高性能镁合金的研发与制备^[6-8]。通过在镁合金基体中引入增强体来制备镁基复合材料,能同时赋予材料更高的强度和模量,这一优势使得镁基复合材料成为一个极具吸引力的研究方向^[9-10]。

镁基复合材料的增强体种类丰富,主要包括晶须增强体、连续纤维增强体、颗粒增强体等^[11]。颗粒增强体是研究和应用最广泛的类型,因为其成本相对较低、各向同性好,且易于用传统金属加工方法制备。其中碳化硅(SiC)、氧化铝(Al_2O_3)、氮化铝(AlN)等陶瓷颗粒虽能显著提升材料的强度、硬度与模量,但其固有的本征脆性以及跟镁基体较差的物理相容性,易导致界面结合不良、应力集中严重,从而不可避免地牺牲材料的塑性^[12-14]。相比之下,钛(Ti)颗粒作为一种金属增强体,跟镁基体界面结合良好、润湿性佳,且具有优异的协调变形能力,能够巧妙地平衡镁基复合材料强度与塑性之间的矛盾^[15-17]。Ti 颗粒增强镁基复合材料的独特优势,使其不仅在常规结构材料领域表现出巨大潜力,更在航空航天、生物医疗等先进领域展现出广阔的应用前景。

回顾已有研究,学者们对镁基复合材料的制备技术、增强体分布调控等方面已建立了系统的认识^[15]。然而,相关讨论多集中于工艺方法的革新,对于基体合金本身的关键作用则探讨有限。事实上,基体成分的差异直接决定了复合材料的界面结构与强化潜力。对此,笔者从制备 Ti 颗粒增强镁基复合材料的基体合金角度展开叙述,讨论了基体合金体

系、增强体特征、制备手段、变形方法等因素对镁基复合材料组织和力学性能的影响规律,分析了 Ti 颗粒增强镁基复合材料的强韧化机制,最后对未来研究内容和发展方向进行了展望。

1 Ti 颗粒增强镁基复合材料的制备手段

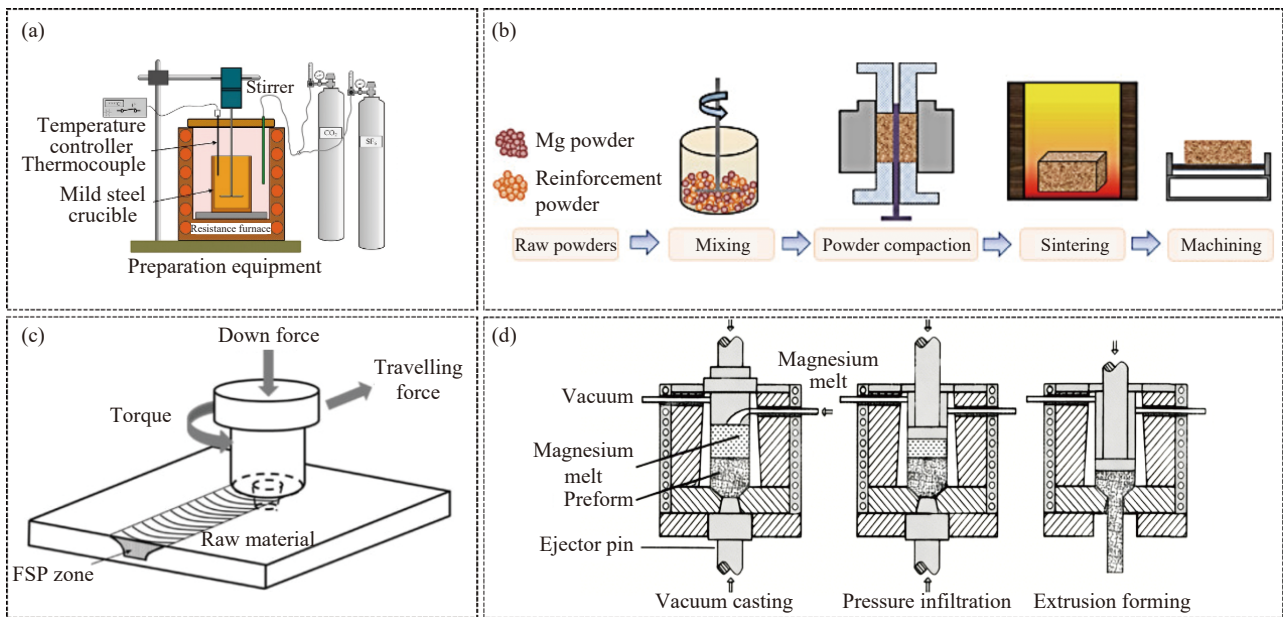
Ti 颗粒增强镁基复合材料的性能在很大程度上取决于所采用的制备技术。制备 Ti 颗粒增强镁基复合材料常使用搅拌铸造(Stir casting, SC)、粉末冶金(Powder metallurgy, PM)、搅拌摩擦加工(Friction stir processing, FSP)和熔体浸渗(Melt infiltration, MI)等方法^[9,11,15]。

如图 1(a) 所示,搅拌铸造法是一种应用广泛的液态制备工艺,其基本原理为:通过高速旋转的机械搅拌器在镁合金熔体中形成涡流,从而将增强颗粒均匀分散到熔体中,随后在坩埚中冷却成形或浇注成形^[18-19]。该工艺设备简单、效率高、成本低,具有规模化生产的潜力,特别适用于 Ti、SiC 等增强颗粒的引入^[20]。但在实际应用中仍面临若干挑战:①Mg 熔体易与氧气或增强体反应生成脆性化合物,影响界面结合强度;②Ti 在搅拌和凝固过程中上浮或下沉易造成分布不均匀;③传统搅拌铸造法制备的复合材料气孔率较高、增强体添加有限(体积分数 $<30\%$),制约材料性能的进一步提升^[21-22]。为克服上述局限,研究者们开发了多种改进措施,例如优化搅拌参数、采用惰性气体保护、添加合金元素改善润湿性,以及结合超声振动辅助分散等手段^[9,23]。CHEN 等人^[16]通过水流可视化试验,发现采用 75° 角变转速、变高度搅拌时,Ti 颗粒增强 AZ81(Ti/AZ81)复合材料中颗粒沉降有效降低,卷气和氧化物夹杂明显减少。随着工艺不断优化,搅拌铸造法在低成本制备 Ti 颗粒增强镁基复合材料方面仍将占据重要地位。

如图 1(b) 所示,粉末冶金法是一种典型的固态加工技术,其基本原理为:通过将镁合金粉末与增强体粉末均匀混合、冷压成形,然后在真空或保护性气氛下进行烧结,最终获得致密的复合材料^[9-10,15]。该工艺通过低温固态烧结,有效解决了 Mg 与 Ti 因

密度差异所致的偏析问题,并凭借其抑制界面反应、精准调控增强体及细化组织,可实现高体积分数(理论上可 $>50\%$)复合材料的制备,并保证 Ti 颗粒在镁基体中的均匀分布及各向同性^[24]。SU 等人^[25]利用该方法成功制备了 18%Ti/AZ61 复合材料。但该方法同样存在一定的局限性:①粉末处理过程存在燃烧风险,需严格的安全生产条件;②粉末表面的氧化

物会削弱颗粒间的结合,不利于材料的塑性;③难以制备形状复杂或大尺寸的坯锭。该制备方法往往需要结合后续的热变形处理(如挤压成型(Ext.)、轧制成型(Rol.))来进一步提高致密度和力学性能。总的来说,粉末冶金法可以使 Ti 颗粒增强镁基复合材料具有细小均匀的组织 and 优异的力学性能,这对实验室研究和小规模生产具有重要意义。



(a) 搅拌铸造法; (b) 粉末冶金法; (c) 搅拌摩擦加工法; (d) 熔体浸渗法

图1 Ti 颗粒增强镁基复合材料制备手段示意^[9,18,26,29]

Fig. 1 Schematic diagram of preparation methods for Ti particle-reinforced magnesium matrix composites^[9,18,26,29]

如图 1(c) 所示, 搅拌摩擦加工法是一种固态变形技术, 其基本原理为: 通过高速旋转的搅拌头插入金属基体, 在剧烈塑性变形和摩擦热的共同作用下, 显著细化基体组织、改善增强体分布、致密化组织, 从而实现材料性能的优化^[15,26]。该工艺不仅能通过重构微观组织(获得细晶、高比例高角晶界与弱织构)来协同提升 Ti 颗粒增强镁基复合材料的强度与塑性, 还可用于局部性能调控与修复, 同时从根本上避免熔铸缺陷^[15]。但其作为一种表面局部加工技术, 目前主要适用于板材或表面改性, 难以制备大体积三维复合材料构件; 且工艺参数优化对最终性能影响显著, 需要精确控制。对此, 研究者们对搅拌头移动速度、加工道次等工艺参数进行了探索, 并发现较低的移动速度和较高的加工道次有利于组织均匀性和力学性能的提高^[15,27]。DINAHARAN 等人^[28]的研究证实, 采用搅拌摩擦加工制备的 TC4(Ti-6Al-4V)/AZ31 复合材料抗拉强度高达 322 MPa, 性能已媲美部分挤压态复合材料, 突出该方法作为金属基复合材料重要制备路线的广阔潜力。

如图 1(d) 所示, 熔体浸渗法是一种将镁合金熔体渗入多孔增强体预制件中制备复合材料的工艺^[29-30]。该工艺凭借其制备高体积分数($>50\%$)、三维网络结构预制体的特点, 不仅能有效避免偏析、赋予复合材料各向同性的性能, 还可结合超声振动以改善润湿性与界面结合, 从而充分发挥增强体的承载作用, 显著提升材料的刚度、强度及耐磨性^[31-32]。然而, 该技术的应用仍受限于预制体的制备复杂性、严格的工艺控制要求, 以及由熔体流动阻力、高温等因素导致的孔洞和界面脆性相等一系列结构与界面问题。但 YAO 等人^[33]发现, Ti 颗粒与 Mg 之间良好的润湿性可有效减弱浸渗阻力。因此, 采用该工艺制备具有轻量化、强韧化的 Ti 多孔框架增强的镁基复合材料具有广阔的应用前景。

2 Ti 颗粒增强镁基复合材料的界面结构

界面作为 Ti 颗粒与镁基体间元素扩散、载荷传递的核心载体, 其反应类型、结构特征是复合材

料的研究核心。

Ti与镁基体的界面反应可按反应特征分为三类:无明显反应的物理结合型、合金元素参与的轻度冶金反应型及高温诱导的重度脆化反应型。Ti/Mg复合材料往往不发生界面反应,这种纯物理结合界面仅依赖范德华力与机械互锁,结合强度薄弱,无法发挥Ti颗粒的增强潜力^[3]。而过度界面反应会生成连续粗大的脆性化合物层,会诱发界面脆化开裂,显著恶化材料塑性。ZHANG等人^[34]研究发现,TC4与AZ91合金剧烈的界面反应削弱了TC4颗粒的载荷传递效应。因此,轻度冶金反应型是我们需要的、理想的界面类型。在实际的研究应用中,Ti/Mg体系界面通常具有良好的润湿性和冶金结合特征,界面反应倾向较弱,主要以原子互扩散行为为主,生成纳米级、不连续分布的金属间化合物。其中Al元素扩散活性最高,是触发界面反应的核心元素,易向Ti颗粒表面迁移形成Ti-Al系化合物,比如与Mg基体或Ti颗粒易形成半共格或共格关系的AlTi、Al₂Ti和Ti₃Al相,以及脆性的Al₃Ti相等^[2,16-17]。此外,Zr、Mn、稀土(RE)元素(Gd、Y等)则表现出选择性偏聚特性,优先在界面富集并生成与Mg基体或Ti颗粒具有一定位向关系的特征反应相,如Zr-Ti、Mn-Ti和Mg-RE相等^[35]。

现有研究普遍认为,这些具有位向关系的界面反应层对增强界面结合力、协调变形过程及提高界面传递效率具有重要意义。

3 Ti颗粒增强镁基复合材料的强化机理

在Ti颗粒增强镁基复合材料中,核心强化机制主要包括细晶强化、奥罗万强化、载荷传递强化和热错配强化四种。

细晶强化的核心原理是晶界对位错运动的阻碍作用。Ti颗粒可以通过异质形核、钉扎晶界和诱发动态再结晶等行为细化基体组织。晶粒越细小,单位体积内的晶界面积就越大。要使材料发生塑性变形,就需要更大的外力来驱动位错突破密集的晶界障碍,从而导致屈服强度(Yield Strength, YS)显著提高^[36]。

奥罗万(Orowan)强化,又称绕过强化。当位错在滑移面上运动遇到不可变形的Ti颗粒时,只能绕过颗粒,此时位错线会在颗粒之间发生弯曲,并最终在颗粒周围留下一个位错环。这个过程需要额外的剪切应力,从而提高了材料的屈服强度^[37]。

载荷传递强化的核心是将施加在基体上的载荷

通过界面有效地传递给高模量、高强度的增强体。当复合材料受到外力时,由于Ti颗粒的弹性模量(约110 GPa)远高于镁基体(约45 GPa),基体将通过它们之间的界面剪切应力把一部分载荷转移给Ti颗粒承担。Ti颗粒成为主要的承载单元,从而整体提升了复合材料的刚度和强度^[37]。

热错配强化是在复合材料制备和冷却过程中,由于基体与增强体热膨胀系数差异而自发产生的一种强化机制。镁基体的热膨胀系数(CTE约 $2.6 \times 10^{-5}/\text{K}$)远高于Ti颗粒(CTE约 $8.5 \times 10^{-6}/\text{K}$),冷却过程中镁基体的收缩远大于Ti颗粒,这种不协调的收缩导致在界面区域产生局部塑性应变,从而在基体中引入高密度的几何必需位错,增强复合材料抵抗变形的能力,以此提高复合材料的屈服强度^[38]。

在实际的Ti颗粒增强镁基复合材料中,上述四种强化机制相互关联、协同作用,构成Ti颗粒增强镁基复合材料的综合强化效果。

4 不同体系Ti颗粒增强镁基复合材料组织和性能研究

4.1 Ti颗粒增强Mg-Al系复合材料

4.1.1 Ti颗粒增强AZ31复合材料

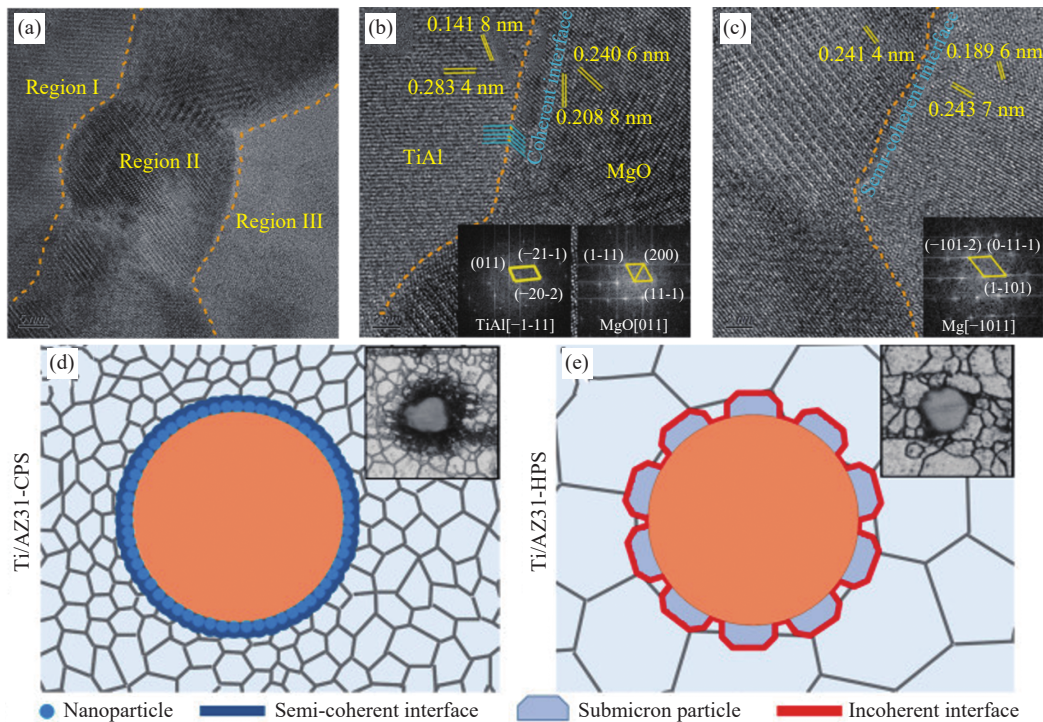
Ti颗粒增强镁基复合材料常采用AZ31(Mg-3Al-1Zn)作为基体合金。该基体合金优良的变形能力不仅保证了复合材料后续热变形的顺利进行,而且能够高效地将变形应力传递给高强度的Ti颗粒,并协调两者的塑性变形,从而显著降低因变形不协调而导致的开裂风险。近年来学者们通过搅拌铸造、粉末冶金等方法制备了Ti/AZ31复合材料,并进行了深入研究。

在搅拌铸造法制备的Ti/AZ31复合材料中,复合材料的综合性能与增强体尺寸密切相关。一般而言,减小增强体粒径是提升复合材料力学性能的关键:微小颗粒可以引起Orowan强化,颗粒细化会引发显著的应变梯度和位错增殖,比表面积增大引起界面接触面积增大及结合强度增加,这些机制都有利于复合材料综合力学性能的提升^[39]。因此,纳米级增强体在协同提升复合材料强度与塑性方面,有望展现出比微米级增强体更大的潜力。CHEN等人^[40]仅在AZ31中添加1%的纳米TC4颗粒,通过细化晶粒、强界面结合同步提高了AZ31板材在各方向的强塑性。然而,随着粒径的减小,表面能的急剧增大、范德华力作用及布朗运动的加强,都会影响纳米级增强体在基体中的分散性,进而限制其添

加量,最终影响复合材料的性能上限^[15]。相比之下,微米级 Ti 颗粒虽在单位强化效率上不及纳米颗粒,但凭借其在基体中优异的分散稳定性,可实现高达 10% 的添加量。YE 等人^[41]制备的 6%Ti/AZ31 复合材料获得了 245 MPa 的屈服强度、327 MPa 的抗拉强度(Ultimate tensile strength, UTS)及 20.4% 的延伸率(Elongation, El.),展现出优异的强塑性结合。

相比于搅拌铸造法,粉末冶金法对材料内部气孔与夹杂的净化能力更强。近年来,学者们从界面结合、变形工艺等角度探讨了粉末冶金法所制 Ti/AZ31 复合材料微观结构与力学性能之间的关联。GAO 等人^[42]采用冷压烧结法(CPS)制备纳米 Ti/AZ31 复合材料,发现 Ti/Al₃Ti、Al₃Ti/Mg 之间形成了稳定的共格界面。为进一步从原子尺度探究界面特性,第一性原理计算被广泛采用^[43-44]。BAO 等人^[45]通过真空热压烧结(HPS)原位合成了 Al₃Ti 颗

粒,确定了其与 Mg 基体间的晶体学取向关系为 $(10\bar{1}0)_{\text{Mg}} // (001)_{\text{Al}_3\text{Ti}}$ 与 $[\bar{1}2\bar{1}3]_{\text{Mg}} // [100]_{\text{Al}_3\text{Ti}}$,并基于第一性原理计算,从粘附功、界面能及断裂机制等角度综合论证了 Al₃Ti/Mg 界面具有较高的结合强度。在工艺影响方面, YE 等人^[46]对比了 HPS 和 CPS 两种方法对 Ti/AZ31 复合材料界面结构与性能的影响,指出 CPS 更易获得理想的界面组织。研究表明,纳米级界面产物与半共格界面能更有效地促进镁基体晶粒细化,从而提升材料强度,其效果远优于亚微米级产物与非共格界面。如图 2 所示,相比于 HPS 样品, CPS 样品在 Ti 颗粒边缘会通过扩散形成 TiAl 相,并在 TiAl 与 Mg 基体之间形成一层纳米级 MgO 过渡层; TiAl 与 Mg 基体分别通过共格与半共格方式与该 MgO 层结合,从而实现了界面在纳米尺度上的有效连接^[46-47]。因此, Ti/AZ31-CPS 展现出优于 Ti/AZ31-HPS 的强度性能,屈服强度和抗拉强度可分别提升约 60 MPa 和 20 MPa。



(a)Ti/AZ31-CPS 复合材料的 Ti/Mg 界面结构; (b)图(a)中 TiAl/MgO 界面及 TiAl、MgO 的快速傅里叶变换(FFT)图; (c)图(a)中 MgO/Mg 界面及 Mg 的 FFT 图; (d)Ti/AZ31-CPS 复合材料晶粒细化机理示意及光学显微组织(OM)图; (e)Ti/AZ31-HPS 复合材料晶粒细化机理示意及 OM 图

图 2 Ti/AZ31 复合材料的界面结构和晶粒细化机理示意^[46-47]。

Fig. 2 Interface structure and schematic diagrams of the grain refinement mechanism of Ti/AZ31 composites^[46-47]

传统粉末冶金制备的复合材料常因致密度不足,需借助后续塑性变形以实现组织致密化与性能优化。热挤压是最为基础的一种变形方法, TIAN^[48]与 CHEN^[49]等人报道,经热挤压后 Ti/AZ31 复合材料抗拉强度增幅约 60 MPa。在此基础上,非对称挤压(AE)通过引入强烈剪切变形,进一步细化组织、

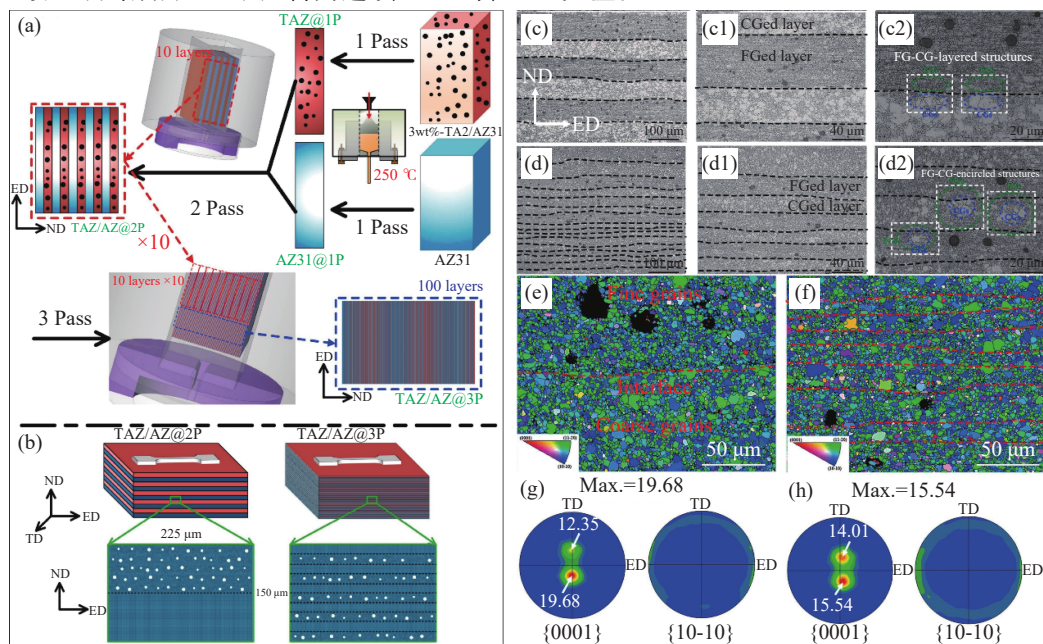
分散织构、均匀化几何必要位错(GNDs),促进了更多的应变释放和位错强化,导致 Ti/AZ31 复合材料在强度和塑性方面都获得提高,可实现屈服强度 183.8 MPa,抗拉强度 317.1 MPa,延伸率 11.5% 的最优性能组合^[50]。除单一变形路径外,多重变形工艺的叠加构建异质结构也为解决金属结构材料中

的强度-延展性协同难题提供了新思路。WANG 等人^[51-52]通过热挤压+多道次挤压、累积挤压粘结(AEB)工艺(图 3(a)(b)),成功制备出具有异质结构的 Ti 颗粒增强镁基复合材料。前者^[51]通过细晶强化、Orowan 强化与异质变形诱导(HDI)强化的协同作用,配合应变协调与裂纹钝化机制,实现了优异的强塑性配比。如图 3(c)~(c2)和 3(d)~(d2)所示^[52],后者在双道次(TAZ/AZ@2P)和三道次(TAZ/AZ@3P)挤压中分别形成了由富 Ti 细晶(FGed)区与无 Ti 粗晶(CGed)区交替组成的细晶-粗晶-层状异构(FG-CG-layered structure)和独特的细晶-粗晶环绕异构(FG-CG-encircled structure),这种环状异构不仅通过高局部应变梯度增强 HDI 效应,还将全局应变有效分散至微区,促进均匀变形并延缓局部失效,从而综合改善力学响应。在多道次挤压下, Ti 颗粒的存在使 AZ31 动态再结晶(DRX)机制由连续 DRX 转

变为不连续 DXR 主导,并将基体组织由单峰基面转为对称倾斜的双峰基面,有利于塑性提升,如图 3(e)~(h)所示。最终,该异质结构复合材料抗拉强度达 332.5 MPa,较均质材料提高约 50 MPa,同时保持了约 13% 的延伸率。

4.1.2 Ti 颗粒增强 AZ91 复合材料

AZ91(Mg-9Al-1Zn)是 Ti 颗粒增强镁基复合材料最理想的基体选择之一。AZ91 中高含量的 Al 不仅显著提升了强度与硬度,更重要的是其在凝固时形成的 $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶组织极大地改善了合金的铸造流动性,非常适合生产复杂薄壁铸件^[53]。近年来研究者们对 Ti/AZ91 镁基复合材料进行了研究,其力学性能显著优于传统 AZ91 合金,这主要归功于 Ti 增强体的引入以及微观结构的优化,包括显著的晶粒细化、对基体析出行为的调控以及独特的界面反应。



(a) 累积挤压粘结(AEB)工艺示意; (b) 拉伸取样位置示意; (c)~(c2) TAZ/AZ@2P 的 OM 图; (d)~(d2) TAZ/AZ@3P 的 OM 图; (e)~(g) TAZ/AZ@2P 的反极图(IPF)与极图(PF); (f)~(h) TAZ/AZ@3P 的 IPF 与 PF

图 3 累积挤压粘结(AEB)工艺示意及不同道次产物的显微组织与织构分析^[52]

Fig. 3 Schematic of the accumulative extrusion bonding (AEB) process and microstructure/texture analysis of products from different passes^[52]

Ti 颗粒的引入显著影响了 AZ91 基体的微观组织,包括晶粒细化与织构弱化两方面。SONG 等人^[54]发现即使在高过冷度抑制晶粒生长的条件下, Ti 颗粒仍可进一步细化晶粒,并激活非基面滑移,使材料在强化的同时保持良好延性。在热变形过程中, Ti 颗粒还能通过颗粒激发形核(PSN)与晶界钉扎效应,显著细化 Ti/AZ91 板材的晶粒并弱化织构强度,从而实现细晶强化与织构调控的协同效果^[55]。织构弱化有助于激发更多非基面滑移系,进而同步

提升材料的强度与塑性变形能力^[56-57]。Ti 颗粒还可以通过调控析出相的尺寸和分布,影响复合材料性能。研究表明^[58], Ti 颗粒的加入能细化并弥散共晶 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相,使其在固溶处理时更快溶解,从而显著缩短 Ti/AZ91D 复合材料的固溶时间;此外 Ti 颗粒界面促进 β 相析出,使其峰值时效时间缩短至基体合金的一半。LUO 等人^[57]在轧制后的 Ti/AZ91 复合板材中也观察到了 Ti 颗粒促进 $Mg_{17}Al_{12}$ 相形成的现象。该析出相一方面通过钉扎晶粒贡献强度,

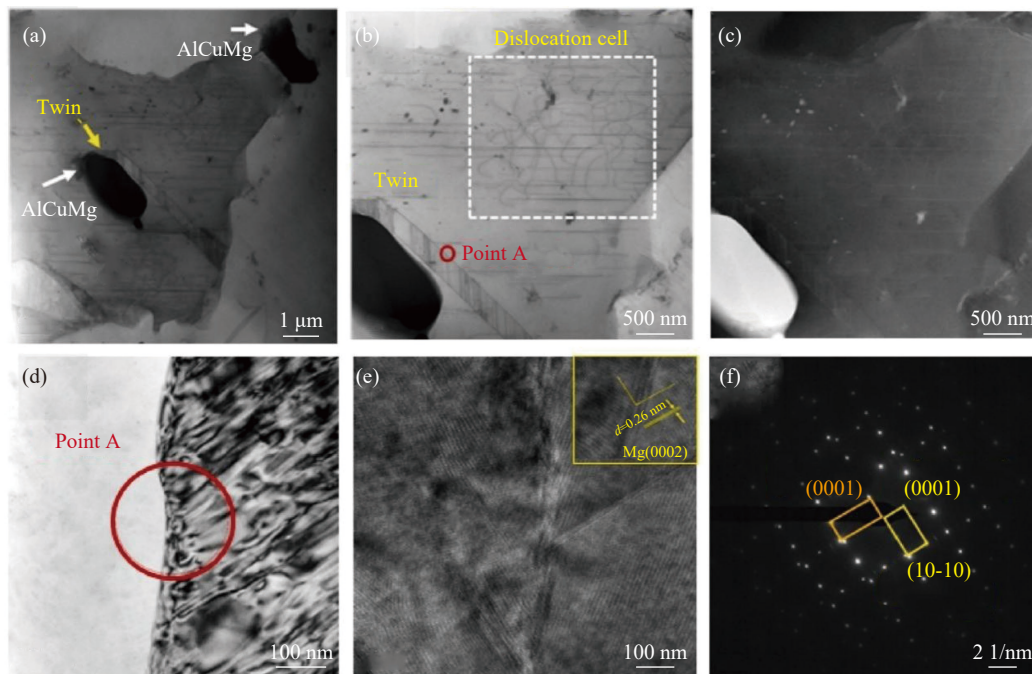
另一方面通过抑制动态再结晶形成异质结构,从而引入 HDI 强化^[59]。

Ti 颗粒与 AZ91 基体间的界面反应是实现强界面结合与高效载荷传递的基础。Ti 与基体中的 Al 元素作用,在界面处生成 Al_3Ti 、 Ti_3Al 等富 Al 相界面产物^[54,56,59-62]。这些反应层与 Mg 基体之间能形成共格或半共格界面,例如, $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Mg}_{21}(\text{Zn}, \text{Al})_{17}$ 共格界面和 $\text{Mg}_{21}(\text{Zn}, \text{Al})_{17}/\text{Mg}$ 半共格界面,这种复合的界面结构能极大地增强界面结合力,成为载荷从较软的镁基体向硬质 Ti 颗粒有效传递的关键通道^[62]。但是,剧烈的界面反应也可能对复合材料性能的优化产生反作用。CHEN 等人^[55]注意到, Ti/AZ91 复合板材的界面处过量生成的脆性、非共格 Al_3Ti 相会抑制 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形成,最终导致 Mg 复合材料的塑性恶化。

Ti 颗粒增强镁基复合材料性能的进一步提升还受限于增强体自身属性的单一性。因此,混合增强体金属基复合材料的研究得到了重视。这类混合复合材料的核心设计理念在于通过引入两种或多种在形态、尺寸或材质上互补的增强体,实现性能上的“取长补短”。例如,将高模量相与 Ti 颗粒相结合,具有二维片层结构的 GNP 是已知强度最高的材

料之一,且具有 1 TPa 的高弹性模量。WANG 等人^[63]采用电泳沉积法 (EPD) 结合轧制成型工艺制备了 GNP/Ti 混杂增强 AZ91 叠层复合材料,其抗拉强度和延伸率分别达到 243 MPa 和 20.8%。该材料的高延展性归因于: ①GNP 引入的非均匀应力场激发的非基面滑移; ②叠层结构对裂纹扩展路径的偏转与阻滞作用; ③Ti 颗粒与基体间的强界面结合及均匀应力分布。这类混合增强设计为复合材料性能的协同优化提供了可行路径。

为优化界面结构与性能,研究者还探索了利用金属颗粒对 Ti 进行表面改性的策略。ZHANG 等人^[64]发现,纳米 Cu 修饰的 Ti 颗粒能与 AZ91 反应在界面处原位生成 AlCuMg 相,有效抑制富 Al 相的形成,增强界面结合并促进孪晶,如图 4 所示。5%Cu@Ti/AZ91 复合材料屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 238、368 MPa 和 12%。与 Cu 的作用不同, Zn@Ti 颗粒通过降低 Al 固溶度,促使 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 Al_8Mn_5 动态析出,导致 Zn@Ti/AZ91 复合材料的晶界处和晶内在热挤压过程中分别形成大量亚微米尺寸的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 Al_8Mn_5 , 这些亚微米析出物促进动态再结晶的发生并抑制晶粒长大,最终通过双峰晶粒结构的形成显著提高力学性能^[65]。



(a)透射电子显微镜(TEM)明场像; (b)图(a)的放大像; (c)高角度环形暗场(HAADF)像; (d)A点孪晶形貌; (e)A点高分辨透射电子显微镜(HRTEM)图像; (f)A点对应的选区电子衍射(SAED)图谱

图4 AlCuMg相附近的孪晶^[64]

Fig. 4 Twins near the AlCuMg phase^[64]

4.1.3 力学性能和强化机制

表1总结了 Ti/Mg-Al 系复合材料的力学性能。

Ti/AZ31 复合材料具有可观的强度-塑性性能组合,是本综述中性能最为集中、稳定的一类复合材

料,其最优性能组合^[41]为 327 MPa 的抗拉强度和 20.4% 的延伸率。因此,当 Ti/AZ31 复合材料应用到工程实践中时,能够综合考虑制备成本与使用需求,避免不必要的成本和材料浪费。

表 1 Ti/Mg-Al 系复合材料力学性能
Table 1 Mechanical properties of Ti/Mg-Al composites

Matrix	Addition		Particle size/ μm	Methods	Mechanical properties			Refs.
	Particles	Contents/%			YS/MPa	UTS/MPa	EL./%	
AZ31	TC4	1	0.063	SC+Ext.	205, 193	272, 280	17.7, 23.2	[40]
	TC4	6	8	SC+Ext.	245	327	20.4	[41]
	Ti	1.5	0.05~0.1	PM	143	243	11.5	[42]
	Ti	6	8	HPS+Ext.	199	290		[46]
				CPS+Ext.	255	304		
	Ti	9	10	CPS+Ext.	264	294	8	[47]
	Ti	0.5	0.05~0.1	CPS+Ext.	201	304	8.4	[48]
	TC4	1	0.06	PM+Ext.	195	306	9.2	[49]
	Ti	6	20	HPS+AE	183.8	317.1	11.5	[50]
	Ti	1.2	70	HPS+AEB	207.3	315.2	7.8	[51]
AZ91	Ti	3	10	PM+AEB	222.7	332.5	12.8	[52]
	Ti	5	15	PM	123	211	21.8	[66]
	Ti	5	5~20	SC	185	313	7.87	[54]
	Ti	2	1.15	SC+Ext.	217	345	23.4	[55]
	Ti	1*	10	SC+Ext.	366	456	14.6	[56]
	Ti	10	15	SC+Ext.+ Rol.		365	12	[57]
	Ti	4*	6.5	SC	150	217	1.84	[58]
	Ti	4*	4.5	SC+Ext.	257	370	18.7	[59]
	Ti	5	45	HPS	98	221.1	10.9	[60]
	TC4	10	15~53	PM+Ext.	335	370	6.4	[61]
AZ91	Ti	5	53~75	HPS+Ext.	211	303	18.7	[62]
	GNPs+Ti	1.6	10	EPD+Rol.	160	243	20.8	[63]
	Cu@Ti	5	10	PM+Ext.	238	368	12	[64]
	Zn@Ti	5	10~20	PM+Ext.	248	378	15	[65]

注: *指代体积百分数。

Ti/AZ91 复合材料具有优于 Ti/AZ31 复合材料的极佳强度-塑性组合,其最优性能组合^[56]为 456 MPa 的抗拉强度和 14.6% 的延伸率。但 Ti/AZ91 复合材料的性能最为分散,强度和塑性跨度分别为 1.84%~23.4% 和 211~456 MPa,这类材料的综合性能与其制备工艺、热处理手段及变形加工方法等因素息息相关,因此在实际应用中可按需选择合适的工艺流程以获得相应的性能。总的来说,对于 Ti/Mg-Al 系复合材料而言,基体的强化作用有

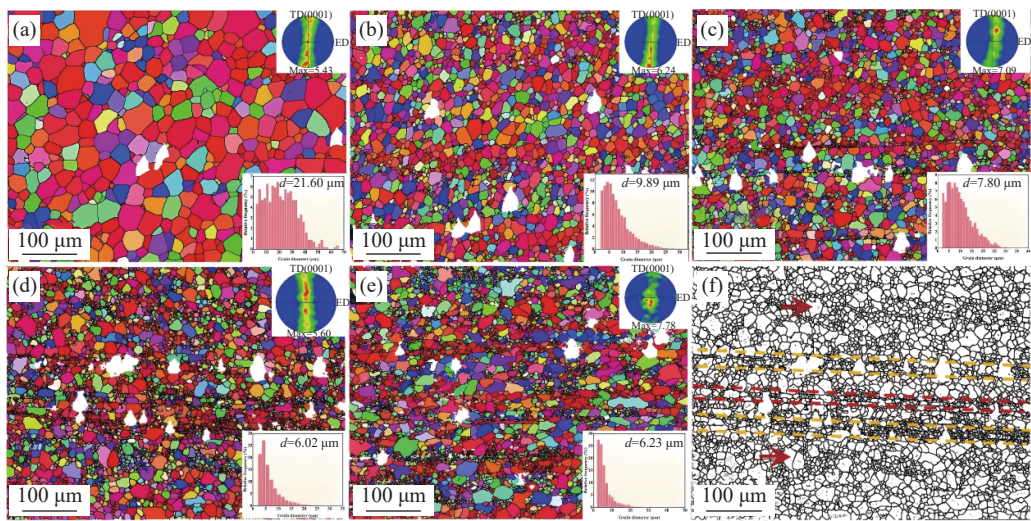
限,往往更依赖于后续变形工艺的强化作用,性能的提升则更多地依赖于细晶强化、载荷传递强化与织构弱化的协同。

4.2 Ti 颗粒增强 Mg-Zn 系复合材料

尽管 AZ 系列镁合金因其良好的铸造性能和综合力学性能而被广泛用作镁基复合材料基体合金,但其在强度、抗蠕变性能及轻量化潜力方面存在局限。这促使研究者转向具有更高性能潜力的 Mg-Zn-Mn 和 Mg-Zn-Ca 合金。这类合金是镁合金中强度最高的合金系之一,以其为基体开发 Ti 颗粒增强镁基复合材料具有广阔前景。

低成本的 ZM61(Mg-6Zn-1Mn)镁合金是首选基体材料,增强相 Ti 颗粒的添加量是精确调控 Ti/ZM61 复合材料最终性能的关键变量之一。FAN 等人^[67]制备了不同 Ti 颗粒含量的 ZM61 复合材料。该研究发现 2%Ti/ZM61 复合材料表现出最优综合性能:屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 288、383 MPa 和 22.1%。这主要归因于 Ti 颗粒添加引起的显著晶粒细化(平均晶粒尺寸 4.77 μm),使得细晶强化成为主要强化机制,同时晶界强化和热膨胀系数不匹配等因素也共同提升了材料性能。Mn 作为 Mg-Zn-Mn 合金系中的重要强化元素,其含量直接影响复合材料的界面产物类型、第二相分布及最终性能^[67-68]。基于此,FAN 等人^[69]进一步研究了 2%Ti/Mg-6Zn-xMn($x=0$ 、0.5%、1%、1.5%、2%)复合材料。随着 Mn 含量增加,晶粒尺寸有减小的趋势,双峰结构特征愈加明显,如图 5 所示;第二相显著增加,界面产物由 MgZn_2 转变为与 Mg 基体具有共格位向关系的 Mn_2Ti 相。当 Mn 的添加量为 1.5% 时,晶粒细化、第二相强化、HDI 强化和理想的界面结合效果达到最佳,使其综合力学性能达到最佳,屈服强度、抗拉强度和延伸率分别达到 239、366 MPa 和 20.6%。

Mg-Zn-Ca 合金系具有良好的生物相容性、可降解性以及力学性能可调控等优点,以其为基体研发生物医用复合材料展现出巨大潜力。FAN 等人^[70]分析了不同热挤压温度下可变形 Ti 颗粒对 Mg-6Zn-0.2Ca 组织和力学性能的影响机制。研究发现,热挤压后原本形貌不规则的 Ti 颗粒沿挤压方向被拉长为长条状,这一形态变化有效促进了镁基体中 DRX 晶粒的形核,并诱导纳米级 MgZn_2 相的均匀析出,成为性能强化的主要原因。在 240 $^{\circ}\text{C}$ 、0.1 mm/s 的挤压条件下,Ti/Mg-6Zn-0.2Ca 获得了高的屈服强度(约 383.6 MPa)、抗拉强度(约 404.8 MPa)和相当的延伸率(约 4.8%)。



(a) $x=0\%$; (b) $x=0.5\%$; (c) $x=1\%$; (d) $x=1.5\%$; (e) $x=2\%$; (f) 2Ti/Mg-6Zn-1.5Mn 复合材料的晶粒分布

图 5 挤压态 2Ti/Mg-6Zn- x Mn ($x=0, 0.5\%, 1\%, 1.5\%, 2\%$) 复合材料 EBSD 分析结果^[69]

Fig. 5 EBSD analysis of as-extruded 2Ti/Mg-6Zn- x Mn composites with varying Mn content ($x = 0, 0.5\%, 1\%, 1.5\%, 2\%$)^[69]

表 2 总结了 Ti/Mg-Zn 系复合材料的力学性能。Ti/Mg-Zn 系复合材料同样具有优异的强塑性组合, 并且其强度性能最为稳定, 最低强度都可达到 366 MPa^[69], 最优性能组合为 383 MPa 的抗拉强度和 22.1% 的延伸率^[67]。对于这类复合材料而言, 综合力学性能提升归因于可变形 Ti 颗粒和变形工艺的协同作用, 热变形过程 Ti 颗粒引发的细晶强化、HDI 强化及适当界面反应带来的载荷传递强化是主要的强化机制。目前对 Ti/AZ61 系复合材料的研究较少, 未来该复合材料在合金成分优化、制备方法选择等方面都具有极大的研究空间和应用前景。

表 2 Ti/Mg-Zn 系复合材料力学性能							
Table 2 Mechanical properties of Ti/Mg-Zn composites							
Matrix	Addition		Particle size/ μm	Methods	Mechanical properties		
	Particles	Contents/%			YS/ MPa	UTS/ MPa	EL./ %
Mg-Zn-Mn	Ti	2	15	SC+Ext.	288	383	22.10 [67]
	Ti	2	15	SC+Ext.	239	366	20.60 [69]
Mg-Zn-Ca	Ti		24	SC+Ext.	383.6	404.8	4.80 [70]

4.3 Ti 颗粒增强 Mg-RE 系复合材料

尽管 AZ 与 ZM 系列镁合金作为基体材料已被广泛研究并展现出各自的优势, 但其绝对强度与高温抗蠕变性能普遍不足, 限制了其在高端结构件领域的进一步应用。为了突破这些性能天花板, 研究者们将 Ti 颗粒增强镁基复合材料的基体选择转向了更具潜力的稀土镁合金体系。

4.3.1 Ti 颗粒增强 Mg-Y-Nd 系复合材料

WE43(Mg-4Y-3Nd-Zr)作为一种广泛应用的中

高强度稀土镁合金, 被视为高性能镁基复合材料最具前景的基体之一, 该体系在获得高强度的同时仍可保持良好塑性。WANG 等人^[71]通过超声辅助搅拌铸造与热挤压工艺, 仅添加 3%Ti 即可使复合材料实现屈服强度 241 MPa、抗拉强度 283 MPa 与延伸率 17.3% 的优异组合, 其强化机制归因于 Ti 颗粒诱导的 HDI 强化、细晶强化及富稀土析出相 (Ti_2ZrAl 、 $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ 、 Mg_{24}Y_5) 的 Orowan 强化协同作用。WANG 等人^[72]采用多向压缩(MDC)处理 6% Ti/WE43 时, 材料强度进一步提升, Ti 颗粒有效促进了拉伸孪晶的早期萌生与增殖, 强化机制由析出强化主导转变为孪晶界强化主导。TANG 等人^[73]对 6%Ti/WE43 的研究不仅验证了其优异强韧性, 更发现界面处形成的 Zr-Ti 扩散层与 Y_2O_3 颗粒显著改善了界面结合状态, 为高效载荷传递提供了结构保障。MAQBOOL 等人^[74-75]另辟蹊径, 采用搅拌摩擦工艺将 Ti、Al 和 Sn 混合颗粒与 WE43 复合, 使材料在抗拉强度 224 MPa 下延伸率高达 32.7%, 展现出强度与塑性的卓越平衡。性能的提升归因于剧烈的塑性变形与颗粒钉扎效应导致的晶粒显著细化(平均尺寸 3.5 μm)、织构弱化与增强体均匀分布, 以及稀土元素 Nd 在镁基体中的高溶解度。这一创新的材料选择与工艺搭配为开发高性能的 WE43 基复合材料提供了新的技术路径。

4.3.2 Ti 颗粒增强 Mg-Gd-Y 系复合材料

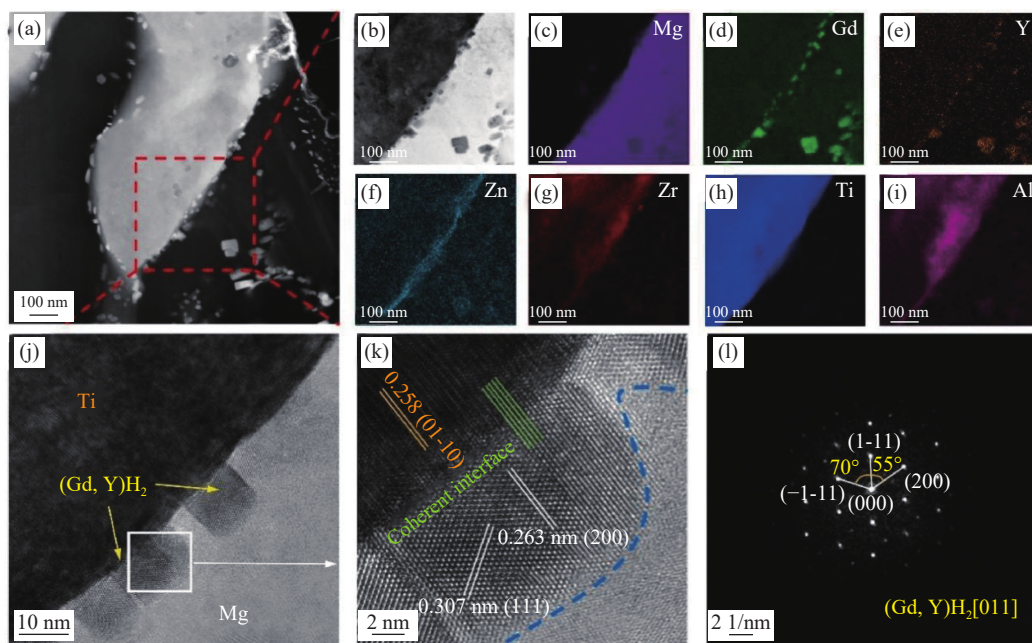
以 WE43 镁合金为基体的 Ti 颗粒增强镁基复合材料在面向对轻量化与绝对力学性能有极致追求的尖端领域时往往无法满足需求, 为此, 研究者将目光转向潜能更大的超高强度稀土镁合金。VW94 合

金(Mg-Gd-Y-Zn-Zr)本身作为一种高强韧、耐热的重稀土强化型变形镁合金,其核心优势在于变形(旋锻(RS)、滑动摩擦处理(SFT))或者热处理过程中能形成长周期堆垛有序结构(LPSO 相)、纳米 γ' 相和 β' 相等多相复合强化组织。当引入 Ti 颗粒作为增强体时,这些原生强化相的形态、分布及作用机制均发生显著变化,并与 Ti 颗粒产生显著的协同增强效应。Ti 颗粒的引入对基体中 LPSO 相的形态与分布具有关键的调控作用。研究表明,Ti 颗粒通过其与基体热膨胀系数差异引入高密度位错,促进了 RE 原子的扩散,从而显著促进了层片状 LPSO 相的形成,同时抑制了热处理过程中块状 LPSO 相的析出^[76-77]。这种高硬度、高热稳定性的层片状 LPSO 相,在变形过程中能与 Ti 颗粒协调变形,共同有效地阻碍位错运动,在提升强度的同时也有助于塑性的维持^[76,78]。

Ti 颗粒与富 RE 相的相互作用同样至关重要。富 RE 相易于在细 Ti 颗粒附近偏聚形核,这种分布特性使得富 RE 相与 Ti 颗粒能够共同贡献 Orowan 强化效应^[68,79]。然而,这也引发了富 RE 相与 LPSO 相对 RE 元素的竞争关系。当 Ti 颗粒含量适当时(5%),这种竞争关系达到最佳平衡,复合材料展现

出最优的综合力学性能(屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 255、378 MPa 和 12.08%)^[79]。而 Ti 颗粒含量过低时,过多的富 RE 相可能消耗稀土,反而可能导致层片状 LPSO 相含量不足。MAO 等人^[80]还发现,Al@Ti 颗粒的加入可以促进纳米晶 Zr 和富 RE 相的形成,进一步提高了复合材料的热稳定性和力学性能。

除了第二相,界面结构也是决定 Ti/Mg-Gd-Y 复合材料载荷传递效率与宏观力学性能的关键。大量研究结果表明,在 Ti 颗粒与 VW94 基体之间通常会形成一层纳米尺度的界面扩散层或反应层—富含 Mn 的 MnTi 扩散层或锯齿状 MnTi 相,这些金属间化合物能与两侧的 Ti 和 Mg 基体形成(较)强的界面结合,成为有效的载荷传递桥梁^[35,68,76,81]。更为重要的是,稀土元素的添加可以有效优化界面结构,它常在增强体与镁基体的界面处偏聚,降低界面能,抑制有害界面反应,从而改善界面结合状态与载荷传递效率。与前期研究不同的是,Ti/VW94 界面处还可析出齿轮状(Gd,Y) H_2 、Gd H_2 过渡相,其与 Ti 颗粒之间的错配度均较低,分别约为 1.94%、3.14%,这种共格/半共格关系能有效阻碍位错运动,形成强界面结合,而不易成为裂纹源^[79-80],如图 6 所示。



(a)~(i) Ti 颗粒界面局部区域元素分布; (j) Mg/Ti 界面产物形貌; (k) 图(j)中齿轮状(Gd,Y) H_2 相的 HRTEM 图像; (l) 齿轮状(Gd,Y) H_2 相的 SAED 图谱

图 6 5Ti/VW92 复合材料的界面微观结构和元素分布^[79]

Fig. 6 Interfacial microstructure and elemental distribution of the 5Ti/VW92 composite^[79]

其次,先进的制备技术与表面改性为构建理想界面提供了新途径。WANG 等人^[32]利用选区激光熔化(SLM)技术结合超声辅助熔渗工艺制备了

TC4 点阵结构增强 VW92 复合材料,重点研究了该复合材料的界面反应。从结构上看,基体与增强体界面结合良好,无明显气孔、夹杂或填充不足;界

面反应产物由 AlZr_2 、 Al_2Zr_3 和 $\alpha\text{-Ti}(\text{Zr})$ 颗粒组成。由边-边匹配模型表明, $\alpha\text{-Ti}(\text{Zr})$ 颗粒相与 $\alpha\text{-Mg}$ 之间的最小错配度仅为 0.4%, 可能的取向关系为 $(0002)_{\alpha\text{-Mg}} // (10\bar{1}0)_{\alpha\text{-Ti}}$ 中的 $[10\bar{1}0]_{\alpha\text{-Mg}} // [11\bar{2}3]_{\alpha\text{-Ti}}$, 此时的 $\alpha\text{-Mg}$ 晶粒可以在 TC4 点阵结构表面直接形核。此外, 利用电爆炸沉积技术对 Ti 颗粒进行 Al 涂层改性 ($\text{Al}@\text{Ti}$) 是一项突破性进展^[80]。在复合过程中, Al 涂层与 Ti 颗粒发生原位反应, 生成一层约 200 nm 厚的 Ti_3Al 金属间化合物。该界面层不仅与 Ti 核心结合牢固, 其与镁基体的物理相容性也更优, 表现为更高的界面断裂能和断裂韧性, 从而实现了超高效的载荷传递, 使 $\text{Al}@\text{Ti}/\text{VW94M}$ 复合材料展现出 319 MPa 的屈服强度和 388 MPa 的抗拉强度。

4.3.3 力学性能和强化机制

表 3 总结了 Ti/Mg-RE 系复合材料的力学性能。Ti/Mg-Y-Nd 复合材料的强度一般高于不含稀土的钛颗粒增强镁基复合材料, 但是伴随着一定的塑性下降, 大部分仍可维持在 8%~15%。该复合材料在强塑性协同方面仍具有很大提升空间。Ti/Mg-Gd-Y 复合材料表现出出色的强度值(最高强度突破 450 MPa), 但塑性相对有所下降, 其最优塑性不超过 15%^[78-79]。因此, 该材料弥补了 Ti/Mg-Y-Nd 复合材料在强度方面的缺失, 适用于对强度有极致要求的工件, 并且未来研究应重点集中于其塑性的显著提升, 有望成为一种战略性材料资源。对于 Ti/Mg-RE 复合材料而言, Ti 颗粒的引入不仅造成了细晶强化, 更通过经典的载荷传递和 Orowan 强化机制, 调控并优化基体自身的微观结构。具体表现为, Ti 颗粒引入的高密度位错促进了 β' 和 γ' 等纳米析出相的形成, 同时引导了层片状 LPSO 结构的生成, 有效强化基体。另一方面, Ti 颗粒与基体组元之间形成具有理想位向关系的界面, 有效强化界面结合。这种具有强化作用的增强体、界面、基体的协同增效, 是 Ti/Mg-Gd-Y 复合材料获得超常强度(>450 MPa)的根本原因。

4.4 Ti 颗粒在镁基复合材料中的构型化分布

基于现有研究内容发现, Ti 颗粒在镁基复合材料中的构型取决于制备、加工方法。常规均匀弥散分布、定向排列分布及网络互穿分布为 Ti 颗粒在镁基体中的典型构型。

均匀弥散分布作为最基础的构型, 是现有研究中应用最广泛的类型, 其核心目标是通过 Ti 颗粒均匀分散、界面原子均匀扩散形成均匀分布的金属间化合物, 强化界面结合, 实现强度与塑性的均衡提升^[42,54,60,66,76]。当前主流制备工艺为超声辅助搅拌铸

造、粉末冶金等。但该构型获得力学性能的优劣仍严重依赖于颗粒尺寸, 纳米级 Ti 颗粒因高表面能易形成微米级团簇, 导致局部应力集中, 制约性能提升上限^[40-41]。

表 3 Ti/Mg-RE 系复合材料力学性能
Table 3 Mechanical properties of Ti/Mg-Al composites

Matrix	Addition			Methods	Mechanical properties			Refs.
	Particles	Contents/%	Particle size/ μm		YS/ MPa	UTS/ MPa	EL./ %	
Mg-Y-Nd	Ti	3	15	SC+Ext.	241	283	17.30	[71]
	Ti	6	20	SC+MDC	255	316	8.90	[72]
	Ti	6	12~15	HPS+Ext.	267	337	15.10	[73]
	Ti, Al, Sn			FSP		224	32.70	[74]
Mg-Gd-Y	Ti	3.5	3.3/24.1	SC	162	240	7.70	[68]
	Ti	5	3.25	SC	173	256	5.90	[76]
	Ti	5	3.25	SC+Ext.	288	371	9.40	[77]
	Ti	3	8	SC+Ext.+RS	370	453	3.80	[78]
	Ti	5	7.8	SC+Ext.	255	378	12.08	[79]
	$\text{Al}@\text{Ti}$	5	1~20	SC+Ext.	319	388	11.70	[80]
	Ti	3.5		SC+Ext.+SFT	309	383	8.70	[82]

挤压、轧制等热变形工艺可诱导 Ti 颗粒沿变形方向定向排列, 形成条带状或纤维状结构。一方面, Ti 颗粒与基体的协同变形增强了组织的致密性, 优化界面结合强度^[47,57,67,79]; 另一方面, 条带状富 Ti 区往往通过 PSN 机制获得具有较高的强度和硬度细晶区, 与保留一定塑性和韧性的粗晶区交替形成双峰组织, 使材料在强度与塑性之间取得更好的平衡^[52,69,82]。但是组织的方向性会导致性能的各向异性, 该构型获得力学性能的优劣严重依赖于变形工艺参数, 参数波动易导致颗粒破碎或排列紊乱^[50]。

熔体浸渗法制备的三维连续网络互穿结构是近年来的研究新热点, 该结构通常通过 SLM 或 3D 打印技术预制 Ti 多孔骨架, 再经浸渗镁熔体构建而成^[29,33]。这种连续的骨架可以获得均匀的组织、性能分布, 并实现刚度与裂纹阻碍能力的大幅提升^[32]。该构型获得力学性能的优劣严重依赖于骨架与基体的填充能力, 过多、过大的孔洞都易导致构型失稳。

5 总结与展望

近年来, Ti 颗粒增强镁基复合材料在制备方法、界面研究、合金系开发及强韧化机理理解等方面均取得了显著的研究进展, 主要结论如下:

1) 在制备上, 从传统的搅拌铸造、粉末冶金到

先进的剧烈塑性变形工艺,再到具有创新性的熔融渗透法,研究者们通过工艺创新优化了Ti颗粒的分布状态,弱化了偏析,并实现了晶粒细化与织构弱化。

2) 在界面研究中,研究不仅局限于对界面产物的定性分析,而是从制备工艺、成分设计、界面结构和特征反应行为等多角度进行了大量研究和探索,丰富了Ti颗粒增强镁基复合材料的界面基础研究。

3) 在基体开发上,研究视野已从传统的AZ系

列,拓展至高塑性的Mg-Zn-Mn系、综合性能优异的Mg-Y-Nd系以及具备LPSO结构和纳米析出相的高强耐热Mg-Gd-Y系,深化了对“基体-界面-性能”三者内在联系的认识。

然而,多尺度计算模拟与材料设计结合的相关研究仍然不足。亟需引入跨尺度计算模拟,从微观层面理解界面结合本质,从宏观角度检验材料性能,并定量解析各强化机制的贡献,从而实现对复合材料成分、工艺、微观结构、性能的进一步优化。

参考文献

- [1] WANG H Q, LI J B, WANG Y T, *et al.* Deformation behaviors of Mg-Gd-Zn based high rare-earth magnesium matrix composites[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(7): 34-43.
(王海清, 李建波, 王毅涛, 等. Mg-Gd-Zn 高稀土镁基复合材料的变形行为[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(7): 34-43.)
- [2] WU Y, ZHOU B J, LIU J Y, *et al.* Investigation of the deformation behavior of titanium-particle-reinforced magnesium matrix composites through in situ synchrotron radiation diffraction[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 43: 111811.
- [3] GAO P F, WANG X J, HAN S L, *et al.* Investigation on synergistic deformation and microstructure evolution of non-alloyed Ti/Mg composites[J]. *JOM*, 2025, 77(5): 2753-2766.
- [4] TAN J, WANG F L, JIANG B, *et al.* Application status and prospects of magnesium alloy structural materials[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2023, 45(2): 93-105.
(谭军, 王芳磊, 蒋斌, 等. 镁合金结构材料应用现状与展望[J]. *自然杂志*, 2023, 45(2): 93-105.)
- [5] ZHOU T Y, XIE Z F, WANG S C, *et al.* Research progress in rolled magnesium alloys containing rare earth with high performance[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(8): 1-12.
(周桐羽, 谢泽峰, 王仕超, 等. 高性能轧制稀土镁合金研究进展[J]. *材料工程*, 2025, 53(8): 1-12.)
- [6] REN L B, FAN L L, ZHOU M Y, *et al.* Magnesium application in railway rolling stocks: a new challenge and opportunity for lightweighting[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1(2): 81-88.
- [7] YAN Z F, TIAN G Y, SU H, *et al.* Research progress of high-performance magnesium alloy[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(2): 101-113.
(闫志飞, 田光元, 苏辉, 等. 高性能镁合金的研究进展[J]. *铸造技术*, 2023, 44(2): 101-113.)
- [8] LI K, JI C, BAI S W, *et al.* Research status and prospects of wire-arc additive manufacturing technology for high-performance magnesium alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(7): 289-311.
(李坤, 吉辰, 白生文, 等. 高性能镁合金电弧增材制造技术研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(7): 289-311.)
- [9] YANG H, CHEN X H, HUANG G S, *et al.* Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: Review and perspective[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(9): 2311-2333.
- [10] WANG Y T, LI J B, LUO H, *et al.* The potential of deformable titanium reinforced magnesium-matrix composites: A review of preparation, characterization, and performance evaluation[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(8): 3490-3523.
- [11] XIONG J L, WU Y, LEI Q, *et al.* Research status and prospect of magnesium matrix composites and their preparation technology[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2024, 42(2): 340-350.
(熊锦林, 吴艳, 雷琪, 等. 镁基复合材料及其制备工艺研究现状与展望[J]. *材料科学与工程学报*, 2024, 42(2): 340-350.)
- [12] DING C, HU X S, SHI H L, *et al.* Development and strengthening mechanisms of a hybrid CNTs@SiCp/Mg-6Zn composite fabricated by a novel method[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(4): 1363-1372.
- [13] ZHANG B, YANG C L, SUN Y X, *et al.* The microstructure, mechanical properties and tensile deformation mechanism of rolled AlN/AZ91 composite sheets[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 763: 138118.
- [14] WANG C, DU Z L, GUO E Y, *et al.* Mechanical behavior of SiC reinforced ZA63 Mg matrix composites: experiments and 3D finite element modelling[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(3): 1294-1309.
- [15] XIAO L, LIU T T, CHEN X H, *et al.* Recent progress on the preparation technology and properties of magnesium matrix composites reinforced by metal particles[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(17): 155-168.
(肖璐, 刘婷婷, 陈先华, 等. 金属颗粒增强镁基复合材料制备技术及性能的研究进展[J]. *材料导报*, 2024, 38(17):

- 155-168.)
- [16] CHEN G, SONG J F, YANG H, *et al.* The microstructures and mechanical properties of low-cost Ti particles reinforced AZ81 composites[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 3494-3507.
- [17] CUI J H, YANG H, ZHOU Y X, *et al.* Optimizing the microstructures and enhancing the mechanical properties of AZ81 alloy by adding TC4 particles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 863: 144518.
- [18] LIU L, YU S R, LIU E Y, *et al.* Effect of Ni addition on the mechanical and degradation properties of hollow glass microsphere/Mg alloy composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157125.
- [19] YE H Z, LIU X Y. Review of recent studies in magnesium matrix composites[J]. *Journal of materials science*, 2004, 39(20): 6153-6171.
- [20] JIANG C Y, GU L D, XIONG H W, *et al.* Review of progress on fabrication technology of Mg matrix composites[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12(12): 4768-4807.
- [21] KANDPAL B C, JOHRI N, KUMAR L, *et al.* Stir casting technology for magnesium-based metal matrix composites for bio-implants - a review[J]. *Materials Today Proceedings*, 2022, 62: 4519-4525.
- [22] ISLAM S S U, KHAN N Z, KHAN M M. Effect of reinforcement on magnesium-based composites fabricated through stir casting: a review[J]. *Materials Today Proceedings*, 2021, 46: 6513-6518.
- [23] XIE Y, KANG Y H, LI X T, *et al.* Microstructure and mechanical properties of metal Ti particles reinforced AZ91D composite processed by stir casting[J]. *Foundry*, 2021, 70(7): 793-799.
(谢耀, 康跃华, 李新涛, 等. 搅拌铸造金属 Ti 颗粒增强 AZ91D 复合材料的组织与力学性能[J]. *铸造*, 2021, 70(7): 793-799.)
- [24] ZHANG S B, YU S R, XU J, *et al.* Present status and developing trends of particulate reinforced magnesium matrix composites[J]. *Foundry Technology*, 2016, 37(1): 1-6.
(张善保, 于思荣, 许骏, 等. 颗粒增强镁基复合材料的研究现状及发展趋势[J]. *铸造技术*, 2016, 37(1): 1-6.)
- [25] SU Q, HAN Y J, YU H, *et al.* Effect of annealing treatment on the microstructure and mechanical properties of bulk nanostructured Ti/AZ61 composites prepared by hot pressing[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 1447-1462.
- [26] SAGAR P, HANDA A. A comprehensive review of recent progress in fabrication of magnesium base composites by friction stir processing technique—a review[J]. *AIMS Materials Science*, 2020, 7(5): 684-704.
- [27] DINAHARAN I, ZHANG S, CHEN G Q, *et al.* Development of titanium particulate reinforced AZ31 magnesium matrix composites via friction stir processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820: 153071.
- [28] DINAHARAN I, ZHANG S, CHEN G Q, *et al.* Assessment of Ti-6Al-4V particles as a reinforcement for AZ31 magnesium alloy-based composites to boost ductility incorporated through friction stir processing[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(4): 979-992.
- [29] XU X L, LUO F, LU Y X, *et al.* Research progress on reinforced phases and preparation methods of magnesium matrix composite[J]. *Foundry Technology*, 2021, 42(10): 903-910.
(徐学利, 骆凡, 路永新, 等. 镁基复合材料增强相及其制备方法研究进展[J]. *铸造技术*, 2021, 42(10): 903-910.)
- [30] XIE X Z, CAI W T, GAO P F, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of bionic bone structure AZ91-Ti cross-composites[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2025, 46(4): 43-51,79.
(谢湘中, 蔡伟通, 高鹏飞, 等. 仿生骨结构 AZ91-Ti 交叉复合材料显微组织和力学性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2025, 46(4): 43-51,79.)
- [31] MA G H, XIAO H, YE J, *et al.* Research status and development of magnesium matrix composites[J]. *Materials Science and Technology (united Kingdom)*, 2020, 36(6): 645-653.
- [32] WANG H J, CHENG R J, CHEN X H, *et al.* Interfacial reaction of Ti6Al4V lattice structure-reinforced VW92 alloy matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2024, 37(3): 570-576.
- [33] YAO Y T, CHEN L Q. Processing of B4C particulate-reinforced magnesium-matrix composites by metal-assisted melt infiltration technique[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2014, 30(7): 661-665.
- [34] ZHANG C L, WANG X J, WANG X M, *et al.* Fabrication, microstructure and mechanical properties of Mg matrix composites reinforced by high volume fraction of sphere TC4 particles[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2016, 4(4): 286-294.
- [35] PU D M, CHEN X H, WANG J F, *et al.* Aging behavior of as-extruded Ti particles reinforced VW94 composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2024, 37(3): 401-406.
- [36] KWAK T Y, KIM W J. Mechanical properties and hall-petch relationship of the extruded Mg-Zn-Y alloys with different

- volume fractions of icosahedral phase[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 770: 589-599.
- [37] CHEN L Y, XU J Q, CHOI H, *et al.* Processing and properties of magnesium containing a dense uniform dispersion of nanoparticles[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 539-543.
- [38] ZHU Z H, NIE K B, MUNROE P, *et al.* Synergistic effects of hybrid (SiC+TiC) nanoparticles and dynamic precipitates in the design of a high-strength magnesium matrix nanocomposite[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 259: 124048.
- [39] DIERINGA H. Properties of magnesium alloys reinforced with nanoparticles and carbon nanotubes: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(2): 289-306.
- [40] CHEN X D, XU J, ZHENG K H, *et al.* Improving the mechanical properties of AZ31 sheet by adding nano-TC4 particles[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(5): 2238-2251.
- [41] YE J L, CHEN X H, LUO H, *et al.* Microstructure, mechanical properties and wear resistance of Ti particles reinforced AZ31 magnesium matrix composites[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(8): 2266-2279.
- [42] GAO P F, HAN S L, ZHANG Y H, *et al.* Investigation on the interface bonding and reinforcement mechanism of nano Ti/AZ31 magnesium matrix composites[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 4908-4919.
- [43] YANG J, WANG Y, HUANG J H, *et al.* First-principles calculations on Ni/W interfaces in steel/Ni/W hot isostatic pressure diffusion bonding layer[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 475: 906-916.
- [44] ZHANG J W, YU L M, LIU Y C, *et al.* Stable bonding of W and ODS steel fabricated by TLP diffusion technology through inserting a novel composite interlayer Zr/Cu[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299: 117341.
- [45] BAO L K, HAN S L, XI S K, *et al.* Characterization and modeling studies towards Al₃Ti/Mg interfaces in Ti reinforced AZ31 alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 147: 197-206.
- [46] YE J L, CHEN X H, LUO H, *et al.* Effect of interfacial structure on grain refinement and strength of Ti particles reinforced AZ31 composites[J]. *Vacuum*, 2022, 203: 111287.
- [47] YE J L, LI J B, LUO H, *et al.* Effect of micron-Ti particles on microstructure and mechanical properties of Mg-3Al-1Zn based composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 833: 142526.
- [48] TIAN W, GAO P F, HAN S L, *et al.* Effect of nano-Ti particles on microstructure and mechanical properties of Mg-3Al-1Zn matrix composites[J]. *Materials*, 2023, 16(6): 2407.
- [49] CHEN Y, YAO Y, HAN S L, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of TC4/AZ31 magnesium matrix nanocomposites[J]. *Materials*, 2023, 16(3): 1139.
- [50] WANG W Z, ZHANG J J, LI J B, *et al.* Influence of different extrusion methods on the microstructure, texture evolution and mechanical property of Ti_p/AZ31 composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 862: 144377.
- [51] WANG W Z, CHEN X, TENG X X, *et al.* Tailoring heterogeneous nano-reinforced Ti_p/AZ31 laminated composites with strength-ductility synergy via multiple extrusion process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1039: 182910.
- [52] WANG W Z, CHEN X, LU X R, *et al.* Designing high-strength ductile heterostructured Mg composites via micron-scale Ti inhomogeneity using accumulative extrusion bonding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 943: 148780.
- [53] GAO Y N, ZHENG L, ZHANG Q Y. Microstructure and properties of vanadium microalloyed cast magnesium alloy for automobile[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2023, 44(4): 190-195.
(高亚男, 郑镭, 张全逾. 钒微合金化汽车用铸造镁合金的组织与性能[J]. *钢铁钒钛*, 2023, 44(4): 190-195.)
- [54] SONG X D, WANG T G, LI X T, *et al.* Microstructure and mechanical properties of AZ91/Ti_p magnesium matrix composite ribbons fabricated by melt-spinning[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(9): 4668-4684.
- [55] CHEN X D, XU J, ZHENG K H, *et al.* Effect of Ti particles on microstructure and mechanical properties of Mg-9Al-1Zn based composite sheets[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 1242-1257.
- [56] XIAO L, LIU T T, CHU Y, *et al.* Effect of Ti particles on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2024, 37(3): 513-524.
- [57] LUO H, LI J B, YE J L, *et al.* Enhancing the mechanical properties and thermal conductivity of Ti/AZ91 composites through integrated extrusion and rolling continuous deformation processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1002: 175506.
- [58] GUO T T, ZHANG X H, KANG Y H, *et al.* Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti_p/AZ91D magnesium alloy composite fabricated by stir casting[J]. *Foundry*, 2023, 72(6): 673-679.
(郭婷婷, 张晓辉, 康跃华, 等. 热处理对搅拌铸造 Ti_p/AZ91D 镁基复合材料组织与力学性能的影响[J]. *铸造*, 2023, 72(6): 673-679.)
- [59] YANG H, CUI J H, ZHOU Y X, *et al.* Microstructures and the improved mechanical properties of AZ91 alloy by incorporating Ti-6Al-4V particles[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 7340-7353.

- [60] PU D M, WU S F, YANG H, *et al.* Effect of Ti particles on microstructure and mechanical properties of Ti_p/AZ91 composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 1362-1374.
- [61] LUO H, LI J B, YE J L, *et al.* Effect of Ti-6Al-4V particle reinforcements on mechanical properties of Mg-9Al-1Zn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(10): 3238-3249.
- [62] LUO H, LI J B, YE J L, *et al.* Influence of Ti-6Al-4V particles on the interfacial microstructure and strength-ductility synergetic mechanism of AZ91 magnesium alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112154.
- [63] WANG Y T, LI J B, GUAN B, *et al.* Microstructure and mechanical properties of hybrid graphene nanoplatelets/titanium particles reinforced AZ91 laminated composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 856: 144017.
- [64] ZHANG Y H, LI J B, HAN S L, *et al.* Analysis of Cu-decorated Ti particles as a reinforcement for AZ91 alloys prepared using the powder metallurgy method[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 5711-5723.
- [65] ZHANG Y H, HAN S L, GAO P F, *et al.* Regulating the bimodal structure and strength-ductility synergy of Zn-decorated Ti particles reinforced AZ91 composite through high-volume fraction Mg₁₇Al₁₂ precipitations[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 185: 108376.
- [66] LUO H, LI J B, GUAN B, *et al.* Investigating the microstructure-property relationship in Mg matrix composites reinforced by particles of different sizes using experiments combined with finite element simulation[J]. Powder Technology, 2024, 433: 119220.
- [67] FAN J C, YANG H, CHEN G, *et al.* Achieving enhanced strength-ductility synergy in Mg-6Zn-1Mn alloy by introducing deformable Ti particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 917: 147412.
- [68] PU D M, CHEN X H, DING Y, *et al.* Effect of Ti particles size on the microstructure and mechanical properties of Ti_p/VW94 composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 858: 144140.
- [69] FAN J C, YANG H, XIE W L, *et al.* Clarifying interfacial microstructures of Ti particle reinforced Mg-Zn-Mn composites to achieve good strength-ductility synergy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13(12): 5911-5928.
- [70] FAN Y D, DENG K K, WANG C J, *et al.* Work hardening and softening behavior of Mg-Zn-Ca alloy influenced by deformable Ti particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 833: 142336.
- [71] WANG H Q, LI J B, TANG B, *et al.* Heterogeneous deformation-induced strengthening of extruded Ti_p/WE43 composites[J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113526.
- [72] WANG H Q, LI J B, WANG Y T, *et al.* Effect of multi-directional compression on microstructure and mechanical properties of Ti_p/WE43 composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1007: 176497.
- [73] TANG B, LI J B, WANG Y T, *et al.* Mechanical properties and microstructural characteristics of Ti/WE43 composites[J]. Vacuum, 2022, 206: 111534.
- [74] MAQBOOL A, KHAN N Z. Fabrication and characterization of hybrid WE43 Mg alloy-based composite by friction stir processing with improved ductility[J]. Vacuum, 2023, 215: 112273.
- [75] MAQBOOL A, LONE N F, KHAN N Z, *et al.* Enhancing tribological properties via double-pass friction stir processing of novel Mg-Y-Nd-Zr/Ti/Al/Sn metal matrix composite[J]. Wear, 2025, 580-581: 206281.
- [76] PU D M, CHEN X H, WANG J F, *et al.* Effect of Ti particles on the LPSO phase and mechanical properties of Ti_p/VW94 composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3324-3336.
- [77] PU D M, CHEN X H, WANG J F, *et al.* Effect of Ti particles on the microstructure and mechanical properties of as-extruded Titanium-reinforced Mg-9Gd-4Y-1Zn-1Mn matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 879: 145278.
- [78] FAN J C, SUN Y, YANG H, *et al.* Influence of Ti particles on nanocrystallization and mechanical properties of Ti/Mg-Gd-Y-Zn-Zr composites during rotary swaging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1040: 183599.
- [79] FAN J C, SUN Y, YANG H, *et al.* Effect of Ti particles on the microstructures and mechanical properties of Ti particle reinforced Mg-9Gd-2Y-1Zn-0.5Zr composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 6322-6332.
- [80] MAO S, ZHANG C, LI X T, *et al.* Interfacial bonding and strengthening mechanism of Al-modified Ti particles reinforced VW94M magnesium matrix composites[J]. Materials Today Communications, 2025, 48: 113627.
- [81] WANG Y T, LI J B, CHEN X, *et al.* Hot deformation behaviors and microstructure evolution of Mg-RE composite with trace titanium particles addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1033: 181151.
- [82] LI Q F, CHEN X H, DING Y, *et al.* Mechanical property enhancement of Ti_p/VW94 composites via the construction of gradient ultrafine-grained structures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 4073-4082.