● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.017

镁基复合材料增强相及其制备方法研究进展

徐学利,骆 凡,路永新,强 伟,张彬华,朱鹏龙
(西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710065)

摘 要:镁基复合材料表现出高的比强度、耐磨性、优异的导热性和导电性以及良好的阻尼能力,在航空航天、汽车以及生物医学等行业有着广泛的应用。综述了镁基复合材料的主要增强相类型及其对镁基复合材料的性能的影响,总结了镁基复合材料的制备方法,分析了不同制备工艺的优缺点。展望了增强相对镁基复合材料的强化及制备方法,指出镁基复合材料的研究重点是混合相增强和原位合成增强。

关键词:镁基复合材料;增强相;制备方法;力学性能
中图分类号:TB331 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)10-0903-08

Research Progress on Reinforced Phases and Preparation Methods of Magnesium Matrix Composite

XU Xueli, LUO Fan, LU Yongxin, QIANG Wei, ZHANG Binhua, ZHU Penglong
(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Magnesium matrix composites show high specific strength, wear resistance, excellent thermal and electrical conductivity and good damping ability, and are widely used in aerospace, automotive and biomedical industries. In this paper, the main reinforcement phase types of magnesium matrix composites and their effects on the properties of magnesium matrix composites are reviewed, the preparation methods of magnesium matrix composites are summarized, and the advantages and disadvantages of different preparation processes are analyzed. The strengthening and preparation methods of magnesium matrix composites were prospected. It was pointed out that the research emphasis of magnesium matrix composites was mixed phase strengthening and in-situ synthesis strengthening.

Key words: Magnesium matrix composite; Reinforced phase; Preparation method; Mechanical properties

镁以及合金作为一种轻金属材料,具有比强度高、阻尼性良好、散热性和导热性强等优点,是最具有发展前景的材料之一[1-3]。中国的镁资源极其丰富,但镁及其合金在作为结构材料时,弹性模量低、耐腐蚀性差以及力学性能相对较低,严重制约了镁合金在汽车、航空航天以及生物医学等领域的应用[4-6]。因此,为了提高镁及其镁合金的性能,制备镁基复合材料成为目前的研究方向之一[7]。

通过向镁以及镁合金中添加增强相,获得镁基复合材料[8]。增强相、镁基体及其与增强相之间的界面是镁基复合材料的重要组成部分。选择增强相的尺寸、形态以及种类,设计合理的制备工艺,使得增强相分布均匀,细化晶粒,与基体之间界面结合能力强,是保证镁基复合材料具有优良性能的前提[9-10]。本文综述不同种类的增强相及其对镁基复合材料性能的影响,总结镁基复合材料的制备工艺以及特点,展望未来高性能镁基复合材料及其制备工艺的发展方向。

1 镁基复合材料的增强相

1.1 镁基复合材料的单相增强

根据增强相的形态,镁基复合材料常用的增强相分为颗粒状、管状和片状。其中颗粒状包括碳化物颗粒、氧化物颗粒和金属颗粒,管状和片状分别指碳纳米管和石墨烯。增强相类型的选择是判断镁基复合材料的性能是否优良的决定因素之一。选择增强相时,要考虑增强相自身的性质、增强相与镁基体之间的物理化学反应、润湿性以及界面结合能力等因素。常用单增强相的种类以及特点如表 1 所示。

颗粒状增强相是镁基复合材料增强相中研究最

收稿日期:2020-08-27
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2021JQ-594,2020JQ-768);西安石油大学《材料科学与工程》省级优势学科资助项目;大学生创新创业训练计划项目(编号:S202010705008)
作者简介:徐学利(1963—),陕西泾阳人,硕士生导师.研究方向:材料组织性能控制、材料焊接工艺研究及教学.
电话:13909265785
通讯作者:路永新(1986—),甘肃平凉人,博士,讲师.研究方向:搅拌摩擦焊工艺及接头腐蚀与防护.
电话:15502907610,Email:luyongxin@xsyu.edu.cn

表1 常用单增强相的种类及特点

Tab.1 Types and characteristics of common single reinforced phase

形态	颗粒类型	种类	特点
颗粒状	碳化物颗粒	SiC、TiC、B_4C 等	热膨胀系数小、耐磨性好、硬度高、强度高等
	氧化物颗粒	Al_2O_3、SiO_2、ZrO_2 等	硬度高、强度大、耐磨性好等
	金属颗粒	Ti、Al、Ni 等	较高熔点，较好的硬度与延展性，且与镁及其镁合金界面结合好等
管状	碳纳米管[20]	/	弹性模量高、抗拉强度高、导热率高、质量轻等
片状	石墨烯[23]	/	高强度、高韧性、质量轻、超大的比表面积等

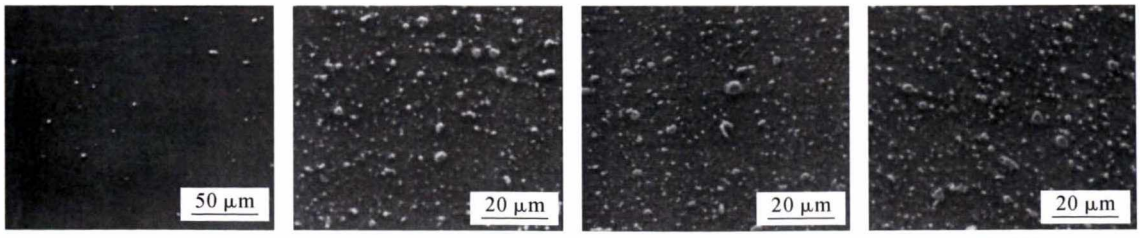
多的类型。常用的第 1 种增强相为碳化物颗粒，有 SiC[11]、TiC[12]和 B_4C[13]等颗粒。龙前生等人[11]制备 SiC 颗粒增强镁基复合材料。结果表明，当 SiC 含量为 1.5%，合金的抗拉强度最好，为 198 MPa。当搅拌时间为 15 min 时，该复合材料的拉伸强度和断后伸长率均增加。当搅拌温度为 600°时，该复合材料的力学性能最好。Yao 等人[12]制备了 TiC 增强 AZ91 镁基复合材料。结果表明，复合材料的磨损性能 TiC 含量和载荷有关。在不同的载荷下，与原位生成的细小 TiC 颗粒在基体中分布均匀，组织得到细化，并且 TiC 对复合材料的磨损性能起重大作用。第 2 种增强相颗粒为氧化物颗粒，有 Al_2O_3[14]、SiO_2[15]和 ZrO_2[16]等颗粒。Dinesh 等人[14]添加了不同体积分数的 Al_2O_3 颗粒制备镁基复合材料，结果表明，Al_2O_3 增强相颗粒与基体结合良好，且随着 Al_2O_3 颗粒体积分数的增大，该复合材料的拉伸强度和硬度均增大。第 3 种增强相颗粒为金属颗粒，有 Ti[17]、Al[18]和 Ni[19]等颗粒。Isaac 等人[17]添加了不同含量的钛(Ti)颗粒作为增强相对 AZ31 镁合金进行增强。由图 1 的 SEM 图看出添加 Ti 颗粒使基体晶粒得到明显细化，并且不同含量的 Ti 颗粒在搅拌区的分布很均匀，Ti 颗粒与基体 AZ31 形成了良好的界面[17]。

碳纳米管(Carbon Nano Tubes, CNTs)具有高强度、质量轻、韧性好、超大的比表面积、良好的抗拉强度和弹性模量等优点，对镁基复合材料来说，是一种理想的增强相[20]。覃嘉宇[21]向 AZ91 镁基体中添加 0.1%CNTs，制备了具有超细晶组织的 0.1% CNTs/AZ91 镁基复合材料。由图 2 中挤压态 AZ91 基体合金和 0.1%CNTs/AZ91 镁基复合材料的 TEM 图像可知，制备的镁基复合材料中 CNTs 分布均匀，且镁合金复合材料的晶粒得到处分细化，平均晶粒尺寸从 0.522 μm 降低到 0.346 μm。镁基合金复合材料的抗拉强度及屈服强度达到了 393 MPa 和 352 MPa，比基体提高了 4.5%和 6.0%。Li 等人[22]将预分散的碳纳米管加入到镁熔体中，然后对熔体进行超声处理之后得到镁基复合材料，结果表明，碳纳米管在块体复合材料中均匀且单一地分布，同时碳纳米管显著提高了材料的极限拉伸强度、屈服强度和伸长率[21]。

石墨烯(graphite nanoplatelets, GNPs)是继CNTs后出现的新的理想增强相[23]。将石墨烯添加到镁以及镁合金中，可显著提高材料的强度、腐蚀性及耐磨性。添加石墨烯的含量会影响镁基复合材料的性能。A. Saberi 等人[24]用不同含量石墨烯去增强镁合金，加入含量少的石墨烯使得镁基复合材料的晶粒分布均匀镁基复合材料在最类似于人类血浆的溶液 Kokubo 中的电化学参数见表 2[24]。由表 2 可知，镁合金、Mg- 0.5GNPs、Mg-1GNPs 和Mg9-2GNP 复合材料的腐蚀电流分别为 248.07、186.54、112.89 和 420.76 μA/cm^2，该复合材料的腐蚀性随石墨烯的含量先增加后减少。Du 等人[25]制备了 GNPs/ZK60 复合材料，该复合材料仅含 0.05% GNPs，可使屈服强度提高 62%，达到 256 MPa，表现出超高强化效率。理论分析表明，由于 GNP 与基体的 2D 界面接触和连续结合，GNP 的载荷传递对 GNP/ZK60 复合材料强度的提高贡献最大(约 72%)。

1.2 镁基复合材料的混杂增强

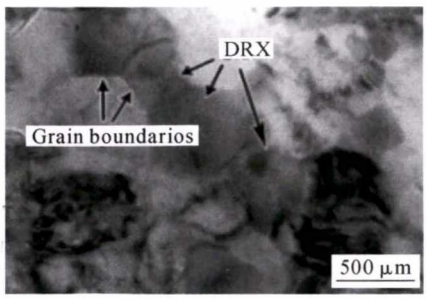
随着镁基复合材料应用的普及，对镁基复合材料性能的要求更加苛刻，单相增强的镁基复合材料已不能满足其服役要求。因此，向纯镁或镁合金中同



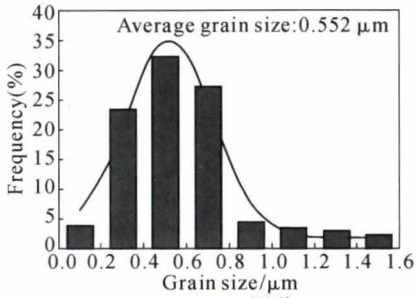
(a)0%　(b)7%　(c)14%　(d)21%

图 1 不同含量 Ti 颗粒的 AZ31/Ti 基复合材料的 SEM 显微照片

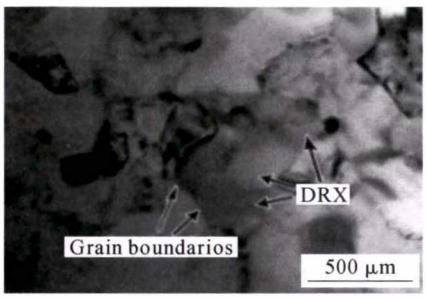
Fig.1 SEM images of AZ31 / Ti matrix composites with different contents of Ti particles



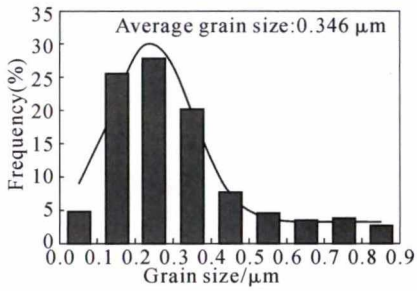
(a)AZ91合金



(b)TEM图像



(c)0.1%CNTs/AZ91复合材料



(d)晶粒尺寸分布

图 2 AZ91 基体合金和 0.1%CNTs/AZ91 复合材料的 TEM 图像及晶粒尺寸分布

Fig.2 TEM images of AZ91 matrix alloy and 0.1% CNTs / AZ91 Composite and grain size distribution

表2 复合材料的极化试验在Kokubo溶液中的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters of composite polarization test in Kokubo solution

试样	βa(v·dec-1)	-βc(v·dec-1)	Ecorr (VSCE)	icorr(μA/cm²)	R_p (Ω·cm²)
Mg	0.060	0.228	-1.47	248.07	83.39
Mg-0.5GNPs	0.073	0.278	-1.46	186.54	134.57
Mg-1GNPs	0.053	0.238	-1.45	112.89	166.55
Mg9-2GNPs	0.082	0.295	-1.49	420.76	66.21

时加入多种增强相制备出性能优良的混杂镁基复合材料是近年来的研究热点。当前，出现了多种类型的混杂增强相，如颗粒之间混杂、颗粒和 GNPs 混杂、颗粒和 CNTs 混杂、GNPs 和 CNTs 混杂等，表 3 列出了不同增强相的混杂以及混杂镁基复合材料的性能。由表 3 也可看出，选择合适的增强相以及配比对增强后复合材料的力学性能有着较大影响。

合适的混合比例会使不同种增强相发挥各自的优势，产生协同作用，从而扩大镁基复合材料的应用。刘宾[33]用不同含量的碳纳米管(CNTs)和微米碳化硅颗粒(SiCp)作为双增强相，利用粉末冶金法和和热挤压成型制备 AT620 镁基复合材料。根据表 4 可知，当混杂比为 1:1 时，1%CNTs+1%SiCp/AT620复合材料的抗拉强度达到 391 MPa、伸长率达到 15.3%、硬度达到 150.1 HV，比基体分别提高了36%、0.5%和 16.4%。因此，混杂增强可进一步提高镁基复合材料的力学性能。

表 3 不同增强相的混杂以及混杂镁基复合材料的性能

Tab.3 Hybrid of different reinforcement phases and properties of hybrid Magnesium Matrix Composites

基体	增强相	力学性能			其它性能	文献
		抗拉强度 /MPa	伸长率(%)	硬度(HV)		
AZ91	MWCNT+ GNPs	/	/	88.3	复合材料磨损性能最佳	[26]
AZ91D	CNTs+Cf	272	/	/	弯曲强度提高	[27]
Mg	MWCNT+SiC	/	/	78	致密度提高	[28]
AZ91D	WC+Gr	268	2.49	104	高耐磨性	[29]
Mg、AZ91D	B_4C+Ti	/	/	/	阻尼性能应变振幅和温度的升高而增强	[30]
AZ91	TiO_2+Pr+CNTs	194.19	7	/	/	[31]
AZ91E	SiC+FA	173	/	91.7	/	[32]
AT620	CNTs+SiCp	390.9	15.3	150.1	耐腐蚀性能最好	[33]
ZM5	B_4C+SiC	215	/	76.30	耐磨性提高	[34]

表 4 CNTs+SiCp/AT620 复合材料的力学性能[33]
Tab.4 Mechanical properties of CNTs+SiCp/AT620 composites

Material	UTS/MPa	YS/MPa	Elongation(%)	Hardness(HV)
AT620	268	238	14.4	129
AT620-0.5wt%CNTs+0.5wt%SiCp	355.7	272.6	8.8	147.3
AT620-0.5wt%CNTs+1.0wt%SiCp	370.2	322.6	8.3	148.7
AT620-0.5wt%CNTs+3.0wt%SiCp	414	363.4	7.5	153.9
AT620-0.5wt%CNTs+5.0wt%SiCp	434	383.1	7.2	151.9
AT620-1.0wt%CNTs+1.0wt%SiCp	390.9	325	15.3	150.1
AT620-3.0wt%CNTs+3.0wt%SiCp	419.2	351.8	6.7	145.8
AT620-5.0wt%CNTs+5.0wt%SiCp	410.4	366.1	5.4	139.5

2 镁基复合材料的制备方法

为了提高镁及其镁合金的综合性能，向镁及其镁合金中加入增强相制备镁基复合材料。但镁基复合材料中也存在一些问题，例如增强相与镁合金之间的润湿性较差、界面结合能力较弱以及增强相易团聚等问题，影响复合材料的性能。因此选择合适制备方法是至关重要的。目前已发展出众多的镁基复合材料的制备方法，可以分为粉末冶金法、搅拌铸造法、熔体浸渗法、喷射沉积法、搅拌摩擦加工、原位合成法。在选择具体制备工艺时应考虑增强相与基体的性能，不同制备工艺所获得的镁基复合材料性能也不尽相同，有时差异很大。

2.1 粉末冶金法

粉末冶金法(Powder Metallurgy)是最早用于制备镁基复合材料的工艺。通常是将预制好的增强相粉末和镁粉进行充分混合，通过不同的烧结方法得到所需的镁基复合材料，其过程如图 3 所示[35]。该工艺的特点是不局限增强相，增强相和镁基体之间的界面反应不严重，可以根据需求任意控制增强相和镁基体的比例，从而获得性能良好的镁基复合材料，但制备工艺复杂，产品生产周期较长，成本高，不适合大批量生产，工业化较为困难。Kavimani 等人[36]采用溶剂处理、机械合金化、冷压和最后在氩气气氛下在 560 ℃下烧结的方法使 0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%的还原氧化石墨烯(r-GO)纳米片均匀分散于 AZ31 镁合金中。结果表明，加入 0.4% r-GO 后，r-GO 在基体材料中分散均匀，且合金的硬度明显提高，达到 64.6 HV。

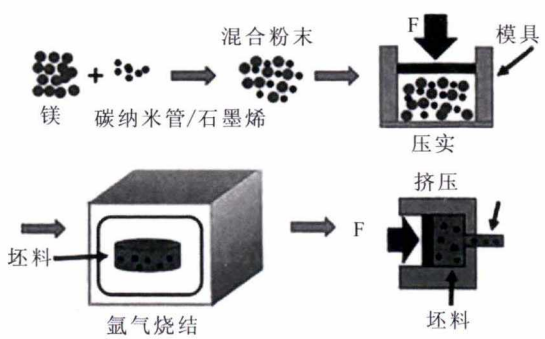


图 3 粉末冶金法过程示意图[35]
Fig.3 Schematic diagram of powder metallurgy process

2.2 搅拌铸造法

搅拌铸造法是最简单的一种液态制造方法。在材料熔融状态时加入增强相，搅拌一定时间后升温至基体合金液相线温度以上，并搅拌一定时间后凝固，得到镁基复合材料，过程示意图如图 4 所示[37-38]。搅拌铸造法适合制备添加少量增强相的镁基复合材料，一旦增强相过多，熔体中就会容易产生气孔，影响复合材料的性能。Huang 等人[38]采用搅拌铸造法制备了不同质量百分比的碳化硅颗粒(SiCp)的镁基复合材料。与基体相比，添加 1%SiCp 的复合材料显示出良好的机械性能和疲劳性能，这归因于 SiCp 在基体中均匀分布产生的晶粒细化以及基体和增强颗粒之间的强界面结合。

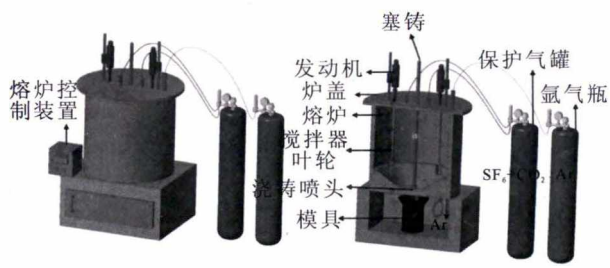


图 4 搅拌铸造法示意图[38]
Fig.4 Schematic diagram of stirring casting process

2.3 喷射沉积法

喷射沉积法是将增强相直接加入熔融液化的镁基体，利用惰性气体将熔融镁基体雾化，使之随雾化镁熔滴一同喷射沉积并快速凝固在基板上，其过程如图 5 所示[39]。与传统的方法相比，这种新型的镁合金制备工艺，具有以下优点：工艺制备快，生产效率高，适合于大规模的工业生产；可控制增强相的加入量，成本降低；制备过程时间短，且处于惰性气体气氛中，因此对镁合金具有良好的保护性；由于细晶强化作用，细化的镁合金晶粒，具有较好的断裂性能，

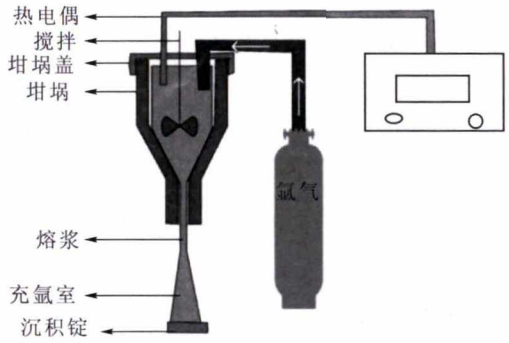


图 5 喷射沉积法过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of spray deposition process

强度和耐蚀性。但如果颗粒尺寸和镁基体不匹配，会出现气孔等缺陷。Tiwari 等[40]采用喷射沉积的方法，制备了不同体积分数的 SiC/Mg 复合材料，并且研究了在 NaCl 溶液中的腐蚀性为。结果表明，由于 SiC 颗粒的存在，耐蚀性降低，并且随着 SiC 的体积分数的增加，耐蚀性下降更为严重。

2.4 熔体浸渗法

熔体浸渗法就是先将增强相预压成形，倾入到镁基体熔体中合适的位置，在加压或者惰性气体条件下，使熔体浸渗到增强相预制块中，制备镁基复合材料，其示意图如图 6 所示[41]。它包括压力浸渗、无压浸渗和负压浸渗。压力浸渗是先将增强相颗粒做成预制件，加入液态镁合金后加压使熔融的镁合金浸渗到预制件中，制成镁基复合材料；无压浸渗是在保护气氛下不施加压力镁合金熔体就能良好地浸渗透预制件；负压渗透是造成真空、产生负压从而实现熔融镁合金队预制件的渗透。Yao 等人[42]利用溶体浸渗法制备 B_4C/Mg 复合材料时，通过向 B_4C 中添加量 Ti 粉，完成了纯镁的浸渗。结果表明，由于钛粉的存在，大大减小了熔融金属的表面张力，从而大大改善了熔融镁与预制件的润湿性。采用高压浸渗，可克服增强颗粒与基体不润湿的情况，气孔、疏松等铸造缺陷也可以得到很好的弥补。熔体浸渗法的优点是成型简单，可以制造高体积分数的复合材料。其缺点是预制件制作成本高，且对增强相与镁基合金基体之间的润湿性要求较高。

2.5 搅拌摩擦加工

搅拌摩擦加工(FSP)基于搅拌摩擦焊(FSW)的基本原理，改变材料微观结构和摩擦学性能的潜在热机械加工技术之一[43]。在搅拌过程中，搅拌头的反复运动和强烈搅拌作用，使搅拌加工区产生剧烈的塑形变形，破碎原有的粗大组织，通过动态再结晶实现微观结构的致密化、均匀化和细化，其过程如图 7所示。Vigneshkumar 等人[44]采用 FSP 法制备了 ZK60/SiCp 镁基复合材料，研究了刀具倾角对基体晶粒细化和 SiC 颗粒分布的影响。结果表明，当倾斜角度为 2°时，复合材料焊核区硬度较高，为 125 HV，且 SiC 颗粒在基体中分布较均匀。Joshi 等人[45]采用FSP制备了 B_4C 增强铸态镁合金(Mg-4Al-3Zn-3Sn-3Pb)，结果表明，复合材料表面 B_4C 颗粒分布均匀，晶粒结构细小。复合材料的硬度和耐磨性都得到显著提高。

2.6 原位合成法

原位合成法是将镁基体粉末与其发生反应的增

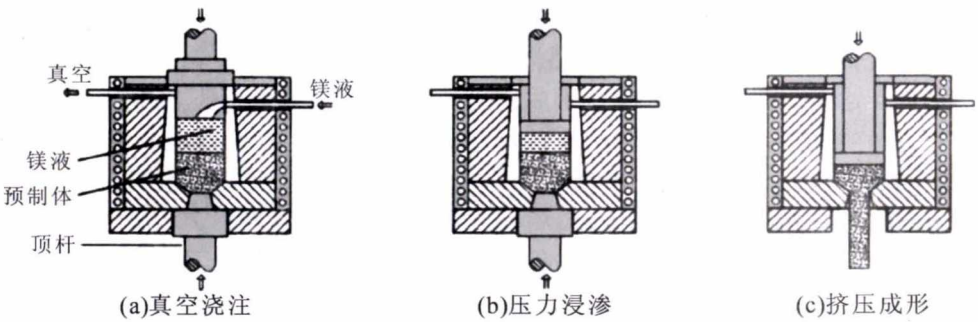


图 6 熔体浸渗法示意图

Fig.6 Schematic diagram of melt infiltration process

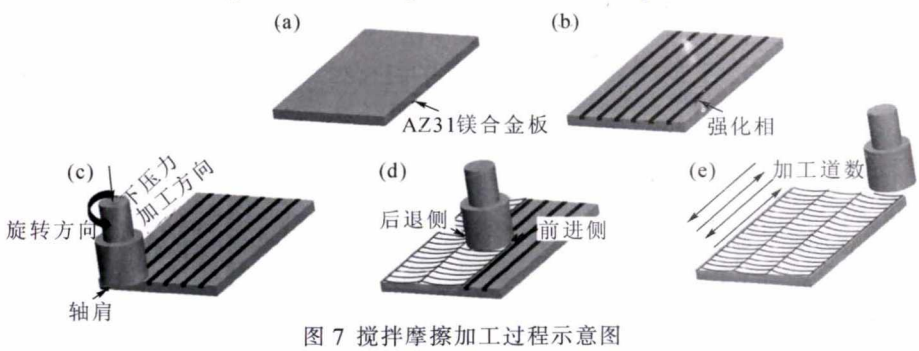


图 7 搅拌摩擦加工过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of friction stir machining process

强相粉末进行充分混合，在镁基体内原位生成晶粒细小、分布均匀的高硬度、高弹性模量的增强相，从而得到镁基复合材料[46]。与其他制备工艺相比，原位合成的复合材料具有更热稳定的增强体、更强的增强体-基体界面、更细的增强体颗粒以及均匀的分布。原位合成法包括自蔓延高温合成法、机械合金化、反应自发渗透法、接触反应法和化学气相沉积，各方法的应用列于表5。Meher等人[47]通过自蔓延高温合成法合成了不同体积分数的原位RZ5/TiB_2复合材料。结果表明，在RZ5镁合金基体中通过自蔓延反应生成了TiB_2颗粒，并且TiB_2颗粒分布均匀。添加8% TiB_2增强镁基复合材料后，材料的硬度、屈服强度和极限拉伸强度分别提高了27.92%、25.28%和18.56%。

表5 原位合成法的分类及应用

Tab.5 Classification and application of in situ synthesis

基体	增强相	方法	性能
RZ5	TiB_2	自蔓延高温合成法[47]	材料的磨损量随着载荷和滑动距离的增加增加。
Mg	硅粉	接触反应法[48]	复合材料的抗拉强度和弹性模量均显著高于未改性的复合材料。
Mg	Si粉	机械合金化[49]	复合材料的抗拉强度增加。
AZ91D	TiC-TiB_2	反应自发渗透法[50]	复合材料的弹性模量、弯曲强度和抗压强度均有较大提高
Mg	CNT	化学气相沉积	复合材料的抗拉强度显著提高

3 总结与展望

目前，常用的增强相包括金属颗粒、碳化物颗粒、氧化物颗粒、石墨烯和碳纳米管，这些增强相的强化能力各异，或多或少均能提高镁合金的力学性能。但是想要进一步增强其力学性能，单相增强就很困难，甚至由于过量增强相的团聚会起到相反作用。这时，选择两种或两种以上的增强相，使其发生协同作用，能显著提高复合材料的综合性能，扩大其应用范围。但混杂增强相中相的匹配关系、多种增强相的界面结合与强化机制以及设计和优化多种增强相增强镁合金力学性能的模型仍未探明，需要进一步的研究。此外，在进行镁基复合材料的制备时，粉末冶金法、搅拌铸造法、喷射沉积法、熔体浸渗法和原位合成法各有千秋。其中，采用原位反应法获得自生增强镁基复合材料，由于增强体在镁基体中原位生成，增强相与基体结合良好，更适合于制备高化学活性的镁合金为基体的复合材料。因此近几年发展十分迅速，不断有新工艺新方法发明并走向应用。但是目前的原位反应制备技术主要集中在铝基、钛基和铁基复合材料，关于镁基复合材料的研究比较少，大部分工艺和反应体系尚处于试验和研究阶段，从实验室转向工业化生产，还有许多地方需要进一步研究和探索。

参考文献：

[1] XU T, YANG Y, PENG X, et al. Overview of advancement and development trend on magnesium alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(3):536-544.

[2] JAYASATHYAKAWIN S , RAVICHANDRAN M , BASKAR N , et al. Mechanical properties and applications of Magnesium al loy-Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27(2): 909-913.

[3] YANG S, CHANG R. Advance in Antibacterial Magnesium Alloys and Surface Coatings on Magnesium Alloys:A Review [J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2020, 33(5):3-17.

[4] 纪宏超，李轶明，龙海洋，等. 镁合金在汽车零部件中的应用与发展[J]. 铸造技术, 2019, 40(1):122-128.

[5] 张忠明，杜庚艺，黄正华，等. 医用多孔镁合金植入材料的研究及其应用进展[J]. 铸造技术, 2020, 41(6):565-568.

[6] KURZYNOOWSKI T, PAWLAK A, SMOLINA I. The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20 (1):1-13.

[7] DENG K K, WANG C J, NIE K B, et al. Recent Research on the Deformation Behavior of Particle Reinforced Magnesium Matrix Composite: A Review [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32(4):1-13.

[8] CASATI R, VEDANI M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles-A Review [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2014, 4(1):65-83.

[9] DVBA, AVKBR, BKP, et al. Effect of heat treatment on magnesium alloys used in automotive industry: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2021,46(9):3769-3771.

[10] BHOI N K, SINGH D H, PRATAP S. Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles-A review [J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(6): 813-833.

[11] 龙前生，王伟伟，任广笑，等. 纳米SiC颗粒增强镁基复合材料半固态搅拌法制备工艺优化[J]. 铸造技术, 2016,37(5):848-852.

[12] JUNPING Y, WEN L, LEI Z, et al. Wear Mechanism for In Situ TiC Particle Reinforced AZ91 Magnesium Matrix Composites[J]. Tribology Letters, 2010, 58(2): 253-257.

[13] PATLE H, SUNIL B R, DUMPALA R. Sliding wear behavior of AZ91/B4C surface composite sproduced by friction stir processing [J]. Materials Research Express , 2020,7(1): 016586.

[14] Dinesh Kumar, M. Ravichandran, M. Meignanamoorthy, et al. Investigations on properties of Mg-Al_2O_3 composites fabricated via stir casting route [J]. Materials Today: Proceedings , 2020,27(2): 1132-1136.

[15] Vaira Vignesh R. Padmanaban R. Govindaraju M. Synthesis and Characterization of Magnesium Alloy Surface Composite (AZ91D-SiO_2) by Friction Stir Processing for Bioimplants [J]. Springer Nature,2019,12(5):1085-1102.

[16] AYDIN F, SUN Y. Microstructure and Wear of a Sintered Composite with a Magnesium Alloy AZ91 Matrix Reinforced with ZrO_2 Particles [J]. Metal Science and Heat Treatment, 2019, 61(5-6): 325-329.

[17] DINAHARAN I, ZHANG S, CHEN G, et al. Titanium particulate reinforced AZ31 magnesium matrix composites with improved ductility prepared using friction stir processing [J]. Materials Science and Engineering A,2019,772:138793.

[18] SAHU P K, DAS J, CHEN G, et al. Friction stir selective alloying of different Al% particulate reinforced to AZ31 Mg for enhanced mechanical and metallurgical properties[J]. Materials ence and Engineering A, 2019, 774:138889.

[19] 李博，龙威，周小平. Ni 元素增强 Mg_3Sb_2/Mg 复合材料的机理[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(2):21-25.

[20] WU L, WU R, HOU L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CNT-Reinforced AZ31 Matrix Composites Prepared Using Hot-Press Sintering [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(11):1-6.

[21] 覃嘉宇，李小强，金培鹏，等. 碳纳米管(CNTs)增强 AZ91 镁基复合材料组织与力学性能研究 [J]. 金属学报, 2019, 55(12): 1537-1543.

[22] LI C, WANG X, LIU W, et al. Microstructure and mechanical properties of magnesium matrix composite reinforced with carbon nanotubes by ultrasonic vibration[J]. Rare Metals, 2015, 9:1-6.

[23] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films[J]. 2004, 306(5696): 666-669.

[24] SABERI A, BAKHSHESHI-Rad H R, KARAMIAN E, et al. Magnesium-graphene nano-platelet composites: Corrosion behavior, mechanical and biological properties [J]. Journal of Alloys and Compounds.2020, 821:153379.

[25] DU X, DU W B, WANG Z H, et al. Ultra-high strengthening efficiency of graphene nanoplatelets reinforced magnesium matrix composites [J]. Materials Science & Engineering A Structural Materials Properties Misrostructure & Processing, 2018, 711: 633-642.

[26] TURAN M E, ZENGIN H, SUN Y. Dry Sliding Wear Behavior of (MWCNT +GNPs) Reinforced AZ91 Magnesium Matrix Hybrid Composites [J]. Metals and Materials International, 2019, 26(4): 541-550.

[27] ZHOU J, ZHONG K, ZHAO C, et al. On the role of carbon nanotubes addition in carbon fiber-reinforced magnesium matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(36):1-14.

[28] RAJMOHAN T, PALANIKUMAR K, BHASKAR S V. Synthesis and Characterization of Multi Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) Reinforced Sintered Magnesium Matrix Composites[J]. Journal of the Institution of Engineers (India), Series D. Metallurgical & Materials Engineering. Mining Engineering, 2016, 97(1):59-67.

[29] KUMAR K R. Characterization, Mechanical and Wear Behaviour of Magnesium (AZ91D)/Graphite/Tungsten Carbide Hybrid Composites Fabricated by Powder Metallurgy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73(10):2539-2548.

[30] YAO Y T, CHEN L Q, WANG W G. Influence of B_4C particle size on microstructure and damping capacities of (B_4C+Ti)/Mg composites [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (3): 648-656.

[31] NING L, HONG Y, QINGJIE W, et al. Fabrication of Carbon Nanotubes and Rare Earth Pr Reinforced AZ91 Composites by Powder Metallurgy [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(2):223-232.

[32] SARANU R K, CHANAMALAR, PUTTI S R, et al. Investigation of Microstructures, Mechanical Properties of AZ91E Hybrid Composite Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash [J]. Silicon, 2020, 13(7): 2145-2156.

[33] 刘宾. CNTs/SiCp 混杂增强 AT620 镁基复合材料的组织与性能研究[D]. 西南交通大学, 2019.

[34] 艾云龙，杨国超，张剑平，等. B_4C 和 SiC 颗粒增强 ZM5 镁基复合材料的组织及力学性能[J]. 铸造技术, 2008, 29(9):1234-1237.

[35] JIE C, BAO C G, WANG Y, et al. Microstructure and Lattice Parameters of AlN Particle-Reinforced Magnesium Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015(11):1354-1363.

[36] KAVIMANI, SOORYA PRAKASH K, THANKACHAN T. Investigation of graphene-reinforced magnesium metal matrix composites processed through a solvent-based powder metallurgy route[J]. Bulletin of Materials Science, 2019, 42(1):2-9.

[37] 齐磊，侯华，赵宇宏，等. SiCp 尺寸对 AZ91D 镁基复合材料显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(3):433-435.

[38] HUANG S J, SUBRAMANI M, ALEMAYEHU D B, et al. The Effect of Micro-SiCp Content on the Tensile and Fatigue Behavior of AZ61 Magnesium Alloy Matrix Composites[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 15:1-3.

[39] 于杨，李京京. 石墨烯增强镁基复合材料研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(8):8-14.

[40] TIWARI S, BALASUBRAMANIAM R, GUPTA M. Corrosion behavior of SiC reinforced magnesium composites [J]. Corrosion ence, 2007, 49(2):711-725.

[41] 欧阳海波，齐乐华，李贺军. 液态浸渗法制备碳纤维增强镁基复合材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1):67-73.

[42] YAO Y, CHEN L. Processing of B4C Particulate-reinforced Magnesium-matrix Composites by Metal-assisted Melt Infiltration Technique [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(7): 661-665.

[43] ARAB M, MARASHI S. Graphene Nanoplatelet (GNP)-Incorporated AZ31 Magnesium Nanocomposite: Microstructural, Mechanical and metal Tribological[J]. Tribology Letters, 2018, 66(4):1-11.

[44] VIGNESHKUMAR M, PADMANABAN G, BALASUBRAMANIAN V. Influence of Tool Tilt Angle on the Formation of Friction Stir Processing Zone in Cast Magnesium Alloy ZK60/SiCp Surface Composites[J]. Metallography Microstructure and Analysis, 2018, 8(2):58-66.

[45] JOSHI S, YUVARAJ N, SINGH R C, et al. Microstructural and Wear Investigations of the Mg/B4C Surface Composite Prepared Through Friction Stir Processing[J]. Transactions of the Indian In-

stitute of Metals, 2020, 73(12):1-12.

[46] 何天兵,胡仁伟,何晓磊,等. 碳纳米管增强金属基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2015, 43(10):91-101.

[47] MEHER A, MAHAPATRA M M, SAMAL P, et al. Abrasive Wear Behaviour of TiB2 Reinforced In-Situ Synthesized Magnesium RZ5 Alloy based Metal Matrix Composites[J]. Metals and Materials International, 2020, 1:3652-3665.

[48] ZHANG W, LI X, DING D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg_2Si/AZ91 Composites In Situ Synthesized by Using Silica Fume as the Si Source[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(10):5300-5311.

[49] LU L, THONG K K, GUPTA M. Mg-based composite reinforced by Mg_2Si composite [J]. Science Technology, 2003, 63 (5): 627-632.

[50] SHAMEKH M, PUGH M, MEDRAJ M. Processing and Characterization of In Situ (TiC-TiB_2)p/AZ91D Magnesium Matrix Composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(8):708-717.

[51] ZHAO R N. In situ synthesis of CNTs in Mg powder at low temperature for fabricating reinforced Mg composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 551: 496-501.

（上接第 902 页）

2012, (6): 66-76.

[5] WU P D, LLOYD D J, HUANG Y. Correlation of ridging and texture in ferritic stainless steel sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2006(427): 241-245.

[6] HUH M Y, ENGLER O. Effect of intermediate annealing ontexture, formability and ridging of 17% Cr ferritic stainless steel sheet [J]. Materials Science and Engineering A, 2001(308): 74- 87.

[7] 胡天雷. 400系铁素体不锈钢成形性能的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

[8] DANIEL D, JONAS J J. Measurement and prediction of plastic anisotropy in deep-drawing steels[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21A: 331-343.

TSFA便携式非接触红外测温仪

铸造测温的跨越



采用德国技术，激光/望远镜瞄准，只要扣动按键，炉内熔化温度、出炉温度、浇包温度、浇注开始与终了温度、冒口溢流温度就会瞬间显示。全程检测，快速、准确、方便。4米内目标不受距离影响。测温范围：1000~2000℃，铸铁、铸钢、铝铜不同合金发射率可调。

产品特点及技术参数

- 瞄准方式：激光/望远镜瞄准
- 目标距离：4 m 内测量与距离无关
- 激光聚焦：3600 mm距离激光聚焦为24 mm光斑
- 测量模式：最大值/最小值显示/记忆功能
- 扫描功能：对测量目标快速扫描并显示出测量的最大值
- 报警方式：高低温声光报警
- 存储功能：2000 个数据点

唐盛电子

纳米级短波精确测量物体温度，特别是熔融金属液态温度；带USB接口及软件，可设定仪器参数、存取数据可下载、连接计算机可以显示实时温度及温度曲线，对合金熔化及浇注温度的控制提供可靠的适时测量。

西安唐盛电子有限责任公司

地址：西安市雁翔路132号开元新村4单元201室
电话：029-83290862　　传真：029-88473613
Email: xatomson@163.com　　QQ：517221382