

复合场作用下 SiC_p 含量对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织和性能的影响

薄文杰 李紫阳 刘鑫宇 耿桂宏
(北方民族大学材料科学与工程学院)

摘 要 在电磁模拟微重力+电脉冲电流复合场作用下制备了 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料,研究了增强体 SiC_p 含量对组织及性能的影响。结果表明,随着 SiC_p 含量增加,粗大骨骼状的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相逐渐转变为短棒状和颗粒状,Mg₂Si 含量逐步增加;晶粒尺寸先减小后增大,在 SiC_p 含量为 2.5% 时,复合材料的晶粒细化效果最好,平均晶粒尺寸为 86 μ m,相比未添加 SiC_p 的减小了 61.7%;显微硬度(HV_{0.05})逐渐提高,在 SiC_p 含量为 5% 时达到最高,为 86.2,相比未添加 SiC_p 的提高了 39.7%;抗拉强度先增大后减小,在 SiC_p 含量为 2.5% 时达到最高,为 161 MPa,相比未添加 SiC_p 的提高了 35%,但平均伸长率下降了 41.9%。

关键词 复合场;SiC_p 含量;SiC_p/AZ91D;显微组织;力学性能

中图分类号 TB331;TG113.1 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of SiC_p Content on Microstructure and Properties of SiC_p/AZ91D Magnesium Matrix Composites under Compound Field

Bo Wenjie, Li Ziyang, Liu Xinyu, Geng Guihong
(School of Materials Science and Engineering, North Minzu University)

Abstract: SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites were fabricated under the compound field of electromagnetic simulation microgravity and electric pulse current. The effects of SiC_p content in the reinforcement on the microstructure and properties of the materials were investigated. The results indicate that with the increase of SiC_p content, the coarse skeletal β -Mg₁₇Al₁₂ phase is gradually converted into short rod-like and granular, and Mg₂Si content is gradually increased. The grain size is decreased firstly and then increased, which is 86 μ m with optimal refining effect when SiC_p content is 2.5%, and reduced by 61.7% compared with that of ones without SiC_p addition. The microhardness is increased, which reaches up to 86.2 HV_{0.05} with SiC_p content of 5%, and increased by 39.7% compared to that of ones without SiC_p addition. The tensile strength is increased firstly and then decreased, which reaches the maximum of 161 MPa when SiC_p content is 2.5%, and increased by 35% compared to that of ones without SiC_p addition, while the average elongation is decreased by 41.9%.

Key Words: Compound Field, SiC_p Content, SiC_p/AZ91D, Microstructure, Mechanical Properties

镁合金因其密度低、比强度高、抗冲击性能好且易于回收利用和资源丰富等特点,受到研究者重视^[1]。然而,由于其强度低、延展性及抗蠕变能力差,限制了其应用^[2-3]。通过在镁合金基体中添加 SiC 硬质颗粒(SiC_p)制备成镁基复合材料,可以提高材料的强度、耐热性能、抗蠕变性能^[4],但传统铸造方法制备颗粒增强镁基复合材料易出现组织成分偏析、晶粒粗大等缺陷^[5]。

电磁模拟微重力场能够使 SiC_p/AZ91D 镁基复合

材料的组分分布更加均匀,缓解组分偏析和物相沉积现象,而强脉冲电流能够细化材料的晶粒尺寸^[6-8]。李紫阳等^[8]研究了外场对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织和性能的影响,发现不同外场处理后,其组织性能与常规铸造法制备的试样相比均有所提高,其中电磁模拟微重力+电脉冲电流复合场(以下简称复合场)的优化效果最佳,晶粒细化效果明显,组织中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的偏析现象减少,Mg₂Si 相由颗粒状转变为具有一定方向性

收稿日期:2023-01-05;修改稿收到日期:2023-05-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52061002);北方民族大学研究生创新资助项目(YCX21114)
第一作者简介:薄文杰,男,1997 年出生,硕士研究生,银川(750021),E-mail:952705033@qq.com
通信作者:耿桂宏,男,1964 年出生,教授,银川(750021),E-mail:gengguihong@163.com
引用格式:薄文杰,李紫阳,刘鑫宇,等. 复合场作用下 SiC_p 含量对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):945-949.
BO W J, LI Z Y, LIU X Y, et al. Effects of SiC_p content on microstructure and properties of SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites under compound field[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):945-949.

的蔷薇花状,其硬度和摩擦磨损性能均明显提高。然而,在复合场作用下不同 SiC_p 含量对材料组织及性能的影响报道很少^[9]。因此,本研究探究了 SiC_p 含量对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织与性能的影响,旨在为其进一步开发应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 复合材料的制备

以铸态 AZ91D 镁合金作为基体,平均粒径为 60 μm 的 SiC_p 作为增强体制备复合材料,其形貌见图 1。

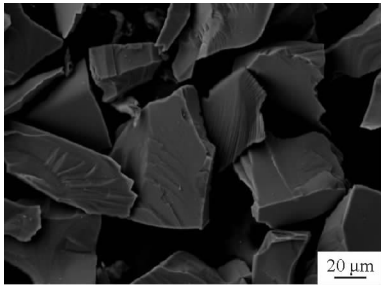


图 1 SiC_p 的形貌
Fig.1 Morphology of SiC_p particle

用带中间加料系统的真空感应搅拌炉进行材料制备, SiC_p 在 AZ91D 镁合金熔化后加入,加入过程中同时进行提拉和旋转搅拌,使加入的 SiC_p 在 AZ91D 基体中分布均匀,并再重熔 1 次。搅拌温度为 650 ℃,搅拌转速为 1 000 r/min,搅拌时间为 15 min,随炉冷却,用自主研发的复合场熔炼设备对 *n*SiC_p/AZ91D(*n*=0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、5.0, %,质量分数) 分别进行复合场的熔炼,加热工艺见图 2,复合场参数见表 1^[8]。

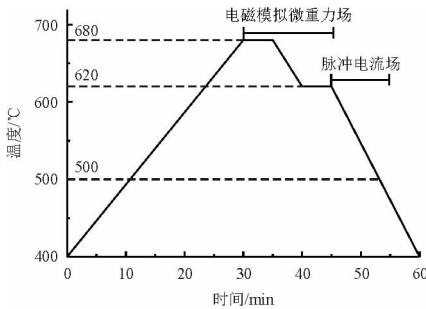


图 2 加热温度曲线
Fig.2 Heating temperature curve

表 1 电磁场和脉冲场参数

Tab.1 Parameters of electromagnetic field and pulse field				
磁场感应强度/T	脉冲电压/V	峰值电流/A	脉冲频率/Hz	脉冲宽度/μs
0.5	80	1 500	30	20

1.2 分析测试方法

在制备的镁基复合材料中部截取测试试样,进行打磨腐蚀,腐蚀液配比为 1 mL 的 HNO₃+20 mL 的冰乙

酸+60 mL 的乙醇+20 mL 的去离子水。用 ZEISS-Vert.A1 倒置光学显微镜、ZEISS-Sigma 500 型热场发射扫描电镜和岛津 XRD-6000X 射线衍射仪对合金进行微观组织测试和分析。通过 Image-Pro Plus 软件对材料的晶粒尺寸进行统计计算。用 HXD-1000TM 型硬度仪进行显微硬度测试,每个试样测 15 点,取平均值。在 CMT5305 型万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 1.5 mm/min,选取 5 个有效数据,测试试样尺寸见图 3。

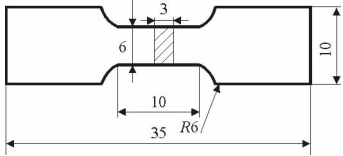


图 3 拉伸试样尺寸
Fig.3 Dimension of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 显微组织与相组成分析

图 4 为不同 SiC_p 含量的 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的 XRD 衍射图谱。可以看出,在 SiC_p 加入后,并没有出现 SiC_p 的衍射峰,而出现了 Mg₂Si 和 Al₄C₃ 的衍射峰,这是因为 SiC_p 和 AZ91D 合金基体发生了反应。随着 SiC_p 加入,β-Mg₁₇Al₁₂ 的峰强逐渐减小, Mg₂Si 的衍射峰强度增强。

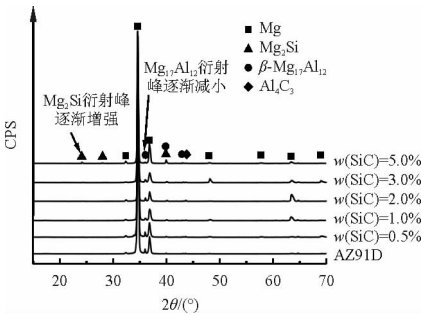


图 4 磁电复合场作用下不同 SiC_p 含量 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites with different SiC_p contents under magnetoelectric compound field

图 5 和图 6 分别为复合场作用下不同 SiC_p 含量的 SiC_p/AZ91D 复合材料的显微组织和晶粒尺寸。可以看出, AZ91D 镁合金中有粗大的初生晶粒,除网状的 β 相外,在部分晶界附近还有粗大骨骼状的 β-Mg₁₇Al₁₂ 组织,见图 5a。随着 SiC_p 含量增加,显微组织中粗大网状组织 β-Mg₁₇Al₁₂ 逐渐减少, Mg₂Si 相逐渐长大呈蔷薇花状。 SiC_p/AZ91D 复合材料的晶粒尺寸随着 SiC_p 含量

增加而减小,在 2.5% 时, SiC_p/AZ91D 复合材料晶粒最为细小,平均尺寸为 86 μm,比 AZ91D 基体减小了 61.7%;但随着 SiC_p 含量超过 2.5% 时,其晶粒尺寸会逐渐增大,见图 6。这主要是因为随着 SiC_p 含量增加,

SiC_p 与镁合金基体反应生成的 Mg₂Si 增多, Mg₂Si 的形貌也从弥散的颗粒状转变为蔷薇花状,并在复合场作用下 Mg₂Si 合并长大,形成树枝状,见图 5h。这导致熔液中细小弥散分布的非均匀形核基质数量减少,使得部分

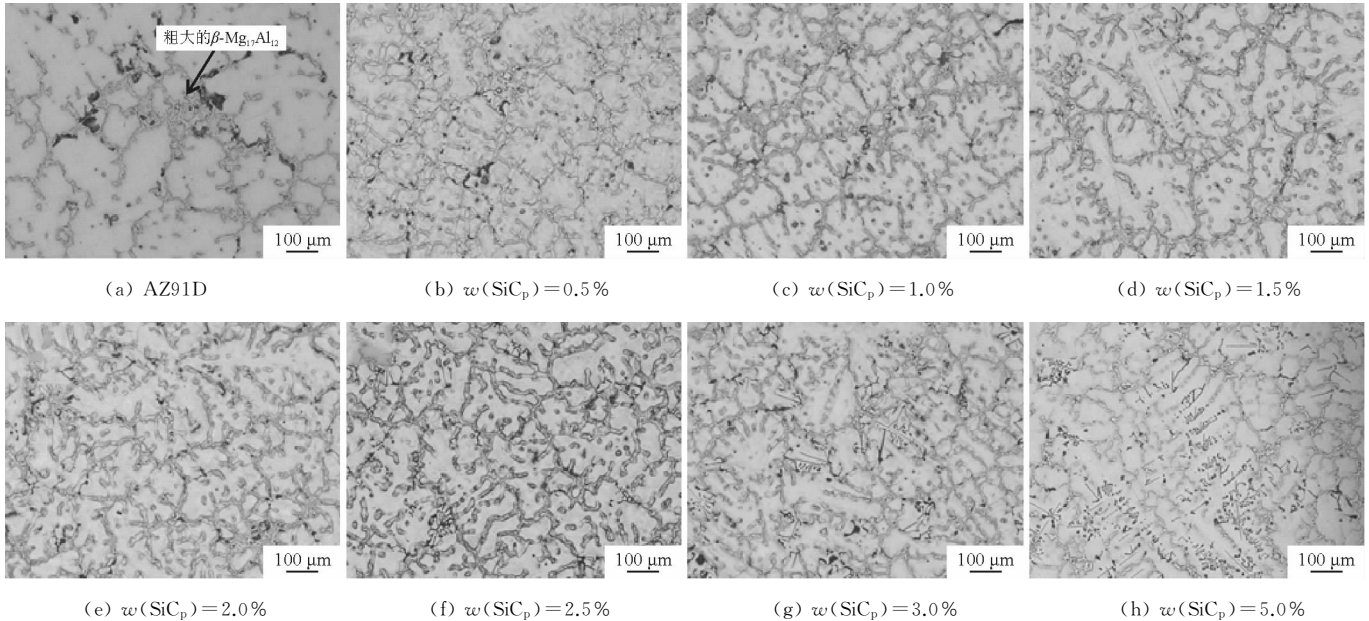


图 5 不同 SiC_p 含量的 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的显微组织

Fig.5 Microstructure of SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites with different SiC_p contents

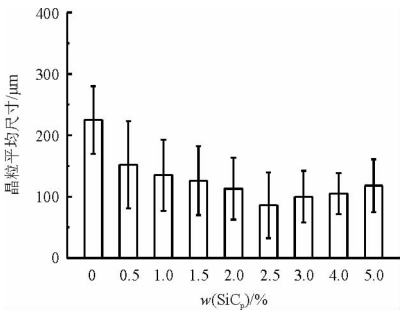


图 6 不同 SiC_p 含量下 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的晶粒尺寸

Fig.6 Grain size of SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites with different SiC_p contents

晶粒尺寸较大^[9]。

2.2 力学性能分析

图 7 为不同 SiC_p 含量的 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的显微硬度。可以看出,随着 SiC_p 含量增加,材料的显微硬度逐渐增大。5.0SiC_p/AZ91D 的显微硬度 (HV_{4.9}) 最大,为 86.2, AZ91D 镁合金的显微硬度最低,为 61.7, 5.0SiC_p/AZ91D 复合材料的显微硬度与 AZ91D 相比提高了 39.7%。

通过复合场处理后,除 SiC_p 的细晶强化作用外, SiC_p 和 AZ91D 基体反应生成的第二相能够明显提高材料强度。随着 SiC_p 含量增加,新生相 Mg₂Si 的含量逐渐增加,形貌由颗粒状向蔷薇花簇状转变,致使 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的显微硬度升高,这主要体现为

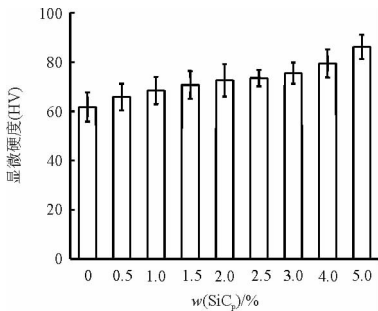


图 7 不同 SiC_p 含量下 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的显微硬度

Fig.7 Microhardness of SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites with different SiC_p contents

弥散强化和第二相强化。因此,具有较多蔷薇花簇状 Mg₂Si 相的 5.0SiC_p/AZ91D 显微硬度最大。

图 8 为在复合场下不同 SiC_p 含量的铸态 SiC_p /

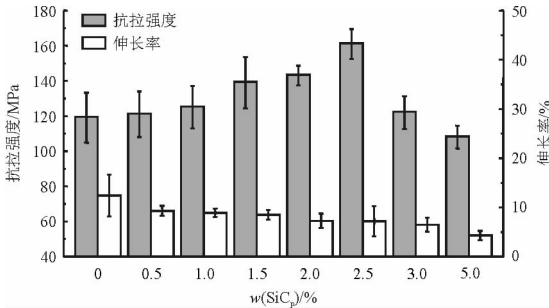


图 8 不同 SiC_p 含量铸态 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of as-cast SiC_p/AZ91D magnesium matrix composites with different SiC_p contents

AZ91D 镁基复合材料的力学性能。可以看出,随 SiC_p 含量增加,伸长率呈现出单调递减趋势,而抗拉强度则呈现出先增加后减小的趋势, SiC_p 含量为 2.5% 时,其抗拉强度最高,达到 161 MPa,之后抗拉强度随 SiC_p 含量增加而减少,在 SiC_p 含量增加到 5% 时抗拉强度最低,为 108 MPa。

图 9 为和图 10 分别 AZ91D、2.5 SiC_p /AZ91D 和 5.0 SiC_p /AZ91D 镁基复合材料断口的 SEM 形貌和 EDS 图谱。可以认为,图 9 中的谱图 1 的组织为 AZ91D 镁合金基体,谱图 2 的组织为 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相,谱图 3 的组织为 Mg_2Si 相。由图 9 可以看出,韧窝基本上出现在镁合金基体处,裂纹主要存在于 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 Mg_2Si 相上,而撕裂棱大多存在于 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相上。由于 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相是硬质相,在承受单向荷载时,往往是在

晶界处的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相先达到荷载极限,产生形态较大的台阶和撕裂棱。而在 2.5 SiC_p /AZ91D 中由于复合场的作用,晶粒得到明显细化,提高了材料性能。此外, SiC_p 与 AZ91D 合金发生了反应,使得晶界处的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相逐渐减少,并生成了硬度大于 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的 Mg_2Si 相。因此,载荷首先作用于硬质相 Mg_2Si 上,在达到荷载极限后产生裂纹,而后作用于 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相上发生裂纹和撕裂棱,最后将载荷传递至 $\alpha\text{-Mg}$ 基体。硬质相 Mg_2Si 的出现提高了材料的抗拉强度,而 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的减少却降低了材料的伸长率。在 5.0 SiC_p /AZ91D 断口形貌图中发现了大量的铸造缺陷,见图 9c,可以观察到明显的铸态晶粒和晶粒之间较大的缝隙,因此,可以断定材料组织中较多的铸造缺陷,是造成其抗拉强度低的主要原因。

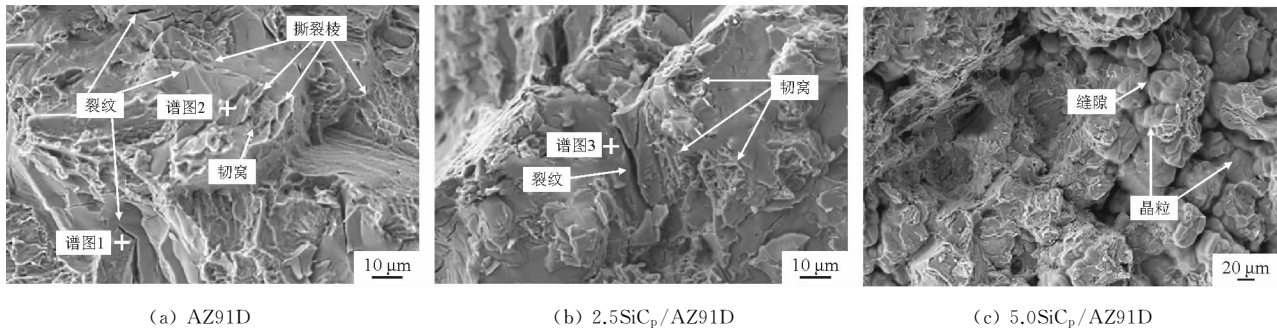


图 9 铸态 SiC_p /AZ91D 镁基复合材料的断口 SEM 照片
Fig.9 SEM fracture of as-cast SiC_p /AZ91D magnesium matrix composite

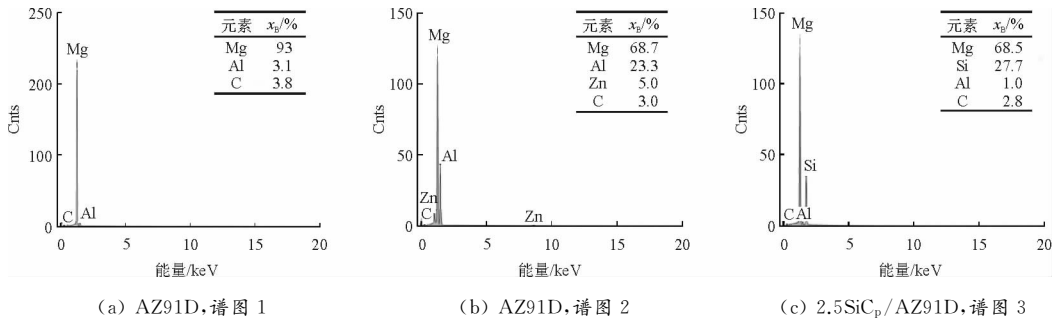


图 10 EDS 能谱分析图谱
Fig.10 EDS spectrum analysis

3 结 论

- (1) 复合场作用下,随着 SiC_p 含量增加, SiC_p /AZ91D 复合材料中粗大骨骼状的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相逐渐转变为短棒状和颗粒状, Mg_2Si 含量逐步增加。
- (2) 复合场作用下,随着 SiC_p 含量增加, SiC_p /AZ91D 复合材料晶粒尺寸先减小后增大,其中,2.5 SiC_p /AZ91D 复合材料的晶粒细化效果最好,平均晶粒尺寸为 86 μm ,相比未添加 SiC_p 的 AZ91D 减小了 61.7%。
- (3) 在复合场作用下, SiC_p /AZ91D 复合材料显微

- 硬度逐渐提高,其中,5.0 SiC_p /AZ91D 复合材料的显微硬度($\text{HV}_{0.05}$)最高,为 86.2,相比未添加 SiC_p 的 AZ91D 提高了 39.7%。
- (4) 在复合场作用下, SiC_p /AZ91D 复合材料抗拉强度呈先增大后减小的趋势,其中,2.5 SiC_p /AZ91D 复合材料的抗拉强度最高,为 161 MPa,相比未添加 SiC_p 的 AZ91D 提高了 35%,但平均伸长率下降了 41.9%。

参 考 文 献

[1] 丁文江.镁合金科学与技术[M].北京:科学出版社,2007.

不同挤压比下 CNTs/Mg 复合材料成形模拟及试验

徐雅琪¹ 梁军浩² 白春龙² 刘 健¹ 高乙尊³

(1.西京学院计算机学院;2.西安工程大学材料科学与工程学院;3.西京学院机械工程学院)

摘 要 基于 Deform-2D 仿真软件,模拟研究了挤压比对碳纳米管(CNTs)含量为 1% 的 CNTs/AZ91D 复合材料挤压成形的影响。在不同挤压比下,对挤压过程中的应变值、应力值以及成形载荷力进行数值模拟分析。结果表明,挤压比越大,复合材料内部的应变值和应力值越大,成形所需载荷也越大;挤压比的变化对轴向中心位置的应变和应力影响不大,对径向方向的应变和应力有较大影响。复合材料中 CNTs 分布在晶界处,当挤压比为 64 : 1 时,CNTs 在复合材料组织中分布更加均匀。

关键词 镁基复合材料;数值模拟;模具设计;挤压模拟

中图分类号 TG376.2;TB331;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Experiment on CNTs/Mg Composites under Different Extrusion Ratio

Xu Yaqi¹, Liang Junhao², Bai Chunlong², Liu Jian¹, Gao Yizun³

(1.School of Computer Science, Xijing University; 2.School of Materials Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University; 3. School of Mechanical Engineering, Xijing University)

Abstract: The influence of extrusion ratio on extrusion forming of 1.0% CNTs/AZ91D composites was simulated by Deform-2D software. Under different extrusion ratios, the strain value, stress value and forming load force during the extrusion process were analyzed. The results indicate that with increasing in the extrusion ratio, the strain and stress of the composites are increased, and the load force required for forming is increased. The variation of extrusion ratio has little effect on the strain and stress along the axial direction, which has great effect on the strain and stress along the radial direction. The carbon nanotubes in the composites are distributed at the grain boundary, which becomes more evenly distributed with the extrusion ratio of 64 : 1.

Key Words: Magnesium Matrix Composites, Numerical Simulation, Mold Design, Extrusion Simulation

镁合金是最轻的金属结构材料,同时还具有较高的阻尼容量和良好的减振性能,可承受较大的冲击振动负荷,适用于制造承受冲击和减振动的零部件。镁基复合材料因其密度小、比强度和比刚度高,且具有良好的尺寸稳定性和优良的铸造性能,在汽车制造工业中用于方向盘减震轴、活塞环、支架、变速箱外壳材料等^[1-5]。同

收稿日期:2022-10-08;**修改稿收到日期:**2022-12-10
基金项目:陕西省教育厅科研计划资助项目(21JK0954);陕西省重点研发计划资助项目(2022NY-085);西安市科技局高校院所科技人员服务企业资助项目(2022JH-RYFW-0045);西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS201863)
第一作者简介:徐雅琪,女,1989 年出生,讲师,西安(710123),E-mail: xuyaqi@xijing.edu.cn
引用格式:徐雅琪,梁军浩,白春龙,等. 不同挤压比下 CNTs/Mg 复合材料成形模拟及试验[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):949-954.
XU Y Q, LIANG J H, BAI C L, et al. Simulation and experiment on CNTs/Mg composites under different extrusion ratio[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):949-954.

[2] 吴国华,陈玉狮,丁文江.镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J].载人航天,2016,22(3):281-292.

[3] 曾小勤,朱庆春,李扬欣,等.镁合金中的第二相颗粒强化[J].中国材料进展,2019,38(3):193-204,250.

[4] 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: 539-543.

[5] 金培鹏,韩丽,王金辉.轻金属基复合材料[M].北京:国防工业出版社,2013.

[6] 余挺,王东新,秦春,等.强脉冲电流对 Cu-SiC_p/AZ91D 组织和性能的影响[J].真空科学与技术学报,2018,38(10):906-912.

[7] 余挺,王东新,秦春,等.微重力磁场对 Cu-SiC_p/AZ91D 复合材料组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10):1112-1115.

[8] 李紫阳,薄文杰,张清林,等.外场对 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料组织和性能的影响[J].复合材料学报,2022,39(1):275-284.

[9] CHEN T J, MA Y, LÜ W B, et al. Grain refinement of AM60B magnesium alloy by SiC particles[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(6): 6732-6738.

[10] 郭学锋.细晶镁合金制备方法及组织与性能[M].北京:冶金工业出版社,2010.

(编辑:刘卫)