

SiC_p/Mg-6Zn-3Al 复合材料力学行为有限元建模研究

白淑英¹ 王 冲¹ 郭恩宇^{1,2} 陈宗宁^{1,2} 康慧君^{1,2} 王同敏^{1,2}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室;2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 针对 SiC_p/Mg-6Zn-3Al 镁基复合材料,建立了基于真实微观组织的二维有限元力学分析模型,采用模拟和试验相结合的方法深入研究了复合材料的变形和断裂行为,以及颗粒尺寸对材料力学性能的影响。结果表明,随着颗粒尺寸增加,复合材料的强度、塑性及加工硬化率均有下降。模拟分析表明,平面应变加载下模拟曲线与试验结果较吻合,拉伸过程中应力集中多发生在颗粒尖角及凹陷处;应力和应变均沿与拉伸方向呈 45°“X”状分布,中心处应力或应变的叠加会导致其成为裂纹源的形核位置。裂纹沿着高应力或应变区域扩展,导致局部区域应力的释放。颗粒尺寸的增加导致材料性能降低的本质在于大尺寸颗粒的载荷传递效果大幅降低。

关键词 镁基复合材料;力学性能;有限元模拟;平面应力;平面应变

中图分类号 TB331;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite Element Modelling of Mechanical Behavior of SiC_p/Mg-6Zn-3Al Composites

Bai Shuying¹, Wang Chong¹, Guo Enyu^{1,2}, Chen Zongning^{1,2}, Kang Huijun^{1,2}, Wang Tongmin^{1,2}

[1.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province),
School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology]

Abstract: A two-dimensional finite element mechanical analysis model based on real microstructures was established for SiC_p/Mg-6Zn-3Al magnesium matrix composites. The deformation and fracture behavior of the composites and the influence of grain size on mechanical properties were investigated intensively by combining simulation and experiment. The results indicate that the strength, plasticity and work hardening rate of the composites are all decreased with the increase of grain size. The simulation analysis reveals that the simulation curve under plane strain loading is in consistent with the experimental ones, and stress concentration often occurs in the sharp corners and depressions of grain during the tensile process. The stress and strain are distributed in an “X” shape along 45 ° from the tensile direction, and the superposition of the stress or strain at the center become the nucleation location of crack source. The crack is propagated along the high stress or strain area, leading to the release of local regional stress. The essence of grain size increase resulting in the property reduction is the great decline of load transfer effect of large grain.

Key Words: Mg Matrix Composites, Mechanical Property, Finite Element Simulation, Plane Stress, Plane Strain

镁合金是目前工业应用中最轻的金属结构材料,具有高比强度、比刚度、良好的成形性及生物相容性等特点,在航空、航天、医疗和交通等领域具有良好的应用前景^[1-2]。但是其强度低、韧性差、高温性能不足等缺点限制了其更广泛应用^[3]。向镁合金中加入各类增强相以制备出性能优异的复合材料成为近年来镁合金领域的

收稿日期:2022-12-23;修改稿收到日期:2023-02-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974058,52022017,U22A20174,51927801)
第一作者简介:白淑英,女,1998 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail: DUT_bsy@163.com
通信作者:郭恩宇,男,1985 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail: eyguo@dlut.edu.cn
引用格式:白淑英,王冲,郭恩宇,等. SiC_p/Mg-6Zn-3Al 复合材料力学行为有限元建模研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 620-1 627.
BAI S Y, WANG C, GUO E Y, et al. Finite element modelling of mechanical behavior of SiC_p/Mg-6Zn-3Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 620-1 627.

[62] YAO F P, LI J H, FANG L J, et al. Effect of ultrasonic vibration frequency on Ni-based alloy cladding layer[J]. Coatings, 2022, 12 (9): 1 305.
[63] HU G F, YANG Y, SUN R, et al. Microstructure and properties of laser cladding NiCrBSi coating assisted by electromagnetic-ultrasonic compound field[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126 469.

(编辑:彭瑾)

研究热点。增强体主要有长纤维、短纤维、颗粒和晶须等多种形式,其中陶瓷颗粒是最常用的增强相,如 SiC、B₄C、Al₂O₃等。增强体尺寸是影响镁基复合材料力学性能的重要因素。PODDAR P等^[4]比较了两种尺寸 SiC_p(15、150 μm)对 AZ91 性能的影响。发现 15 μm SiC_p比 150 μm SiC_p更能显著提高复合材料的屈服强度和弹性模量。HU M L 等^[5]采用固相合成法制备了(1% 500 nm+3% 5 μm)的双峰尺度 Al₂O_{3p}/AZ31 复合材料,发现由于双峰尺度 Al₂O_{3p}的存在,在纳米 Al₂O₃附近形成高密度位错区、微米 Al₂O₃附近形成粒子变形区,从而促进再结晶,同时双峰尺度 Al₂O₃的加入会阻碍基体晶粒的生长,从而显著提高 Al₂O_{3p}/AZ31 复合材料的屈服强度和抗拉强度。另外,颗粒含量也会影响复合材料的性能。JUTANAIMAN S 等^[6]采用搅拌铸造法得到 2%、4%、6%和 8%(体积分数)的 B₄C_p增强镁基复合材料,发现随着 B₄C_p数量增加,复合材料中产生了阻碍位错运动的新界面,使得添加 8%的 B₄C_p增强镁基复合材料具有理想的力学性能。

作为重要的金属基结构复合材料,镁基复合材料的力学性能和外载下的力学行为长期受到关注,并不断通过试验或者模拟研究揭示其力学性能的变化。采用传统的试验方法研究一般较为费时且成本较高,而利用有限元模拟的方法可以有效地预测材料在变形过程中的变形损伤行为,且可动态分析复合材料中组织的局部应力和应变分布情况,这对于预测材料在服役过程中的变形断裂行为并指导材料的成分设计与改进十分重要。然而,目前关于镁基复合材料的有限元建模研究工作仍然不完善,对于增强体颗粒形状的过度简化,使模拟结果不能完全反映真实材料的性能。如在 TiC_p/AZ91 镁基复合材料的二维有限元模型中^[7],将 TiC 颗粒分别简化为圆形、正方形及多边形颗粒,结果发现正方形颗粒易造成基体与颗粒大面积损伤,在 3 种简化颗粒形状的力学模型中,正方形颗粒失效最为严重,最易造成颗粒尖角处破碎。李超^[8]研究了 SiC_p分布以及不同体积分数(5%、10%、15%、20%)对 SiC_p/AZ91D 复合材料性能的影响,发现颗粒的局部团簇现象能够增加复合材料内局部区域的强化效果,且随着体积分数的增加复合材料强度提高但塑性下降,但该结论并未通过试验验证。此外,加载条件对于复合材料的力学性能也有重要影响,如平面应力加载和平面应变加载条件下复合材料表现出不同的力学响应行为。MA S M 等^[9]采用两种不同的加载方式模拟了(Ti-Al₃Ti)_{cs}/A356 复合材料的单轴拉伸行为和微观损伤演化,与拉伸试验结果相比,在平面应力加载条件下模拟值小于试验值,而平面应变加载条件下模拟值高于试验值。

目前针对镁基复合材料开展基于真实组织建模研究的报道较少。因此,以 SiC 颗粒增强 Mg-6Zn-3Al (SiC_p/ZA63)复合材料为研究对象,建立基于真实组织的二维有限元力学模型,结合试验与有限元模拟计算分析,研究不同颗粒尺寸及加载方式对 SiC_p/ZA63 复合材料变形过程中力学损伤行为的影响以及复合材料的变形、裂纹扩展过程,这对于新型镁基复合材料的设计及力学性能评价具有积极意义。

1 试验材料及方法

1.1 材料制备与表征

采用纯 Mg(99.95%,质量分数,下同)、纯 Zn(99.995%)和纯 Al(99.9%)制备 3%的 SiC_p/ZA63 复合材料。将纯 Mg 在 750 °C 下熔化,然后加入 Zn 和 Al,待其熔化后搅拌均匀,静置 5 min,随后冷却至 625 °C,将搅拌桨插入指定位置,开动搅拌桨,待熔体形成稳定涡流后,加入 3%的 SiC_p(450 °C 预热),搅拌 15 min 后,升温至 720 °C,浇注在 450 °C 的模具中,在一定压力下凝固。增强体 SiC_p的平均颗粒尺寸分别为 30 μm 和 50 μm,对应制备的复合材料分别命名为 MMC30 和 MMC50。作为对比,采用相同的工艺制备 ZA63 合金。合金及复合材料铸锭均在 350 °C 下固溶 10 h 后水淬,随后加工成 φ35 mm×70 mm 的试样,在 280 °C 挤压成 φ10 mm 的棒材,挤压速率为 0.5 mm/s。

依次使用 400 号、600 号、800 号、1000 号、1200 号、1500 号、2000 号和 3000 号氧化铝砂纸研磨试样,并采用 1.5 μm 粒径的金刚石抛光剂进行机械抛光。采用金相显微镜(Olympus GX51)和扫描电镜(JSM-7900F, JEOL)对 SiC_p/ZA63 复合材料的微观组织进行观察分析。沿挤压方向切取拉伸试样,试样尺寸为 10 mm×4 mm×2 mm。拉伸试验在 SUNS UTM5105 电子万能试验机上进行,初始应变速率为 0.01 s⁻¹,每种复合材料均测试 3 根试样。

1.2 有限元模型

1.2.1 复合材料建模

对试样的 ED-TD 面打磨、抛光得到截面的金相照片,用 Image J 软件对图片进行灰度对比、亮度修正调整等处理并对组织特征进行分割。将特征分割后的图片结果输入到 RasterVect 软件中进一步提取颗粒的边界轮廓,将结果导入到 Abaqus 中进行进一步的建模工作。为保证模拟与试验的可比性,建模中的加载方向与 ED 方向一致。由于边界处颗粒不完整,为了简化计算

和提高计算精度,去除边界上的颗粒。采用 Abaqus 软件中的 CPE3(三节点平面应变单元)和 CPF3(三节点平面应力单元)单元对基体和 SiC 颗粒进行网格划分以便有限元离散化,具体流程见图 1。采用 Abaqus 有限元分析软件为后续有限元建模和求解的软件包。同时

为了提高计算精度,对每种复合材料各随机选取 3 组组织区域进行有限元分析,见图 2。从图 2b、图 2e 的放大图可以看到,颗粒尖角处网格划分更为密集,有利于后续计算收敛。有限元模型内颗粒的数量和面积占比见表 1。

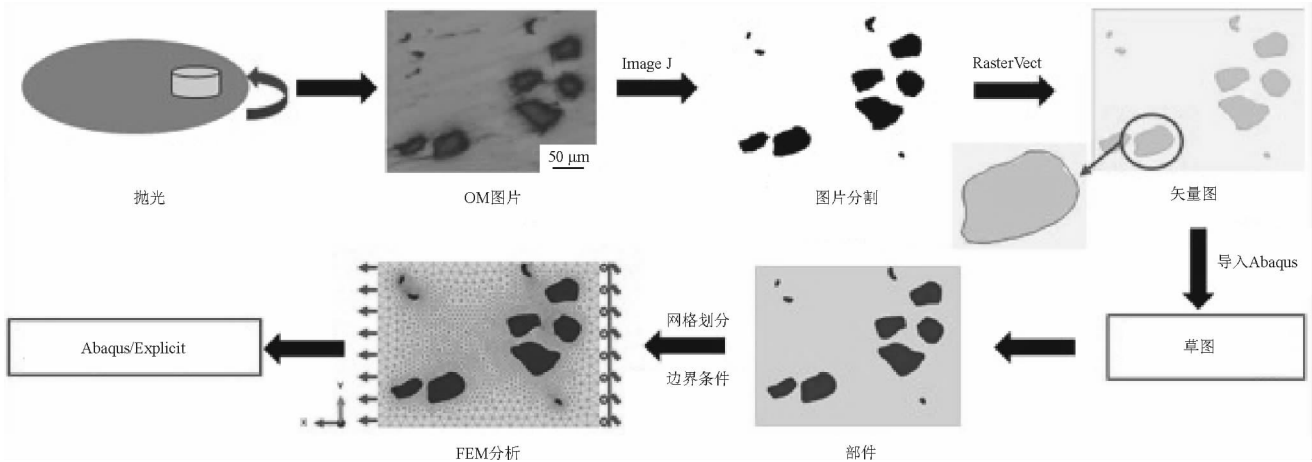


图 1 基于真实二维组织的 SiC_p/ZA63 复合材料有限元建模流程图

Fig.1 Flow chart of finite element modelling for SiC_p/ZA63 composite based on real two-dimensional microstructure

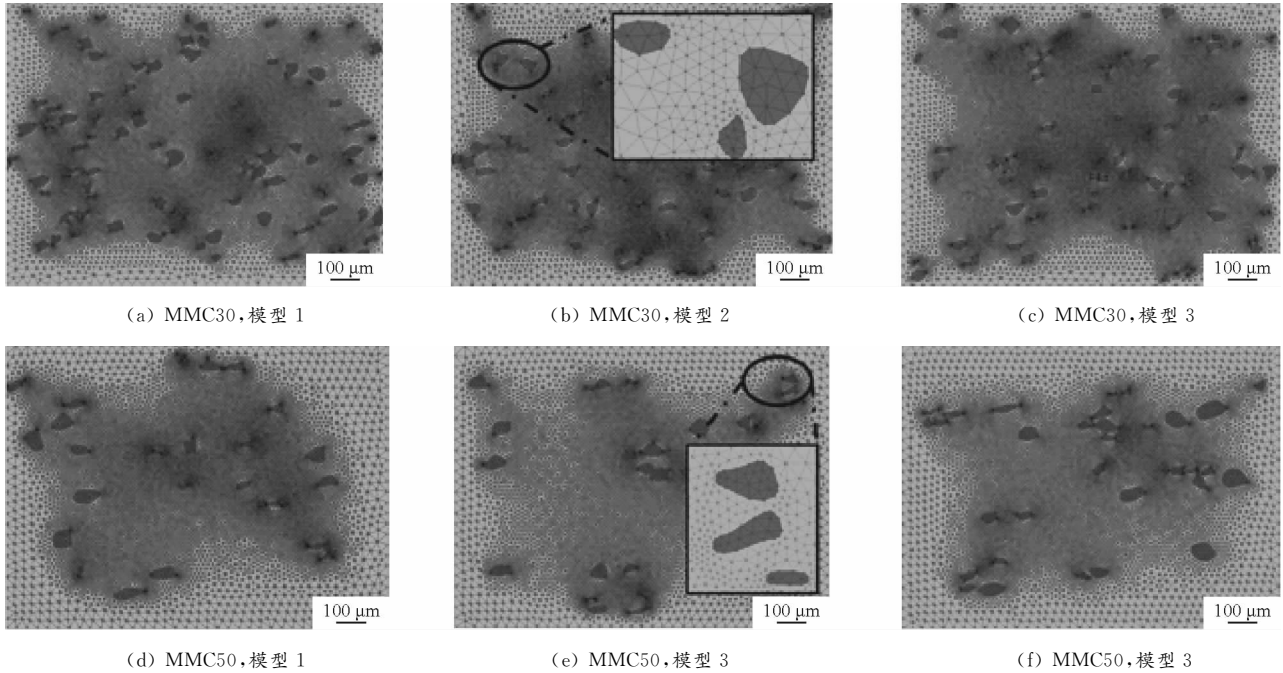


图 2 MMC30 及 MMC50 两种复合材料的有限元模型

Fig.2 Finite element models of MMC30 and MMC50 composites

表 1 有限元模型中颗粒数量与质量分数

模型	MMC30			MMC50		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3
颗粒数量	90	78	88	34	32	36
面积占比/%	3.12	2.76	2.93	3.04	2.86	3.25

1.2.2 加载方式的选择

考虑平面应力(垂直于平面方向上的应力为 0)单

元和平面应变(垂直于厚度方向上的应变为 0)单元两种加载方式。一般而言,大块拉伸薄板试样表面的组织在单向加载下可以近似处理为平面应力状态,而大厚度试样中心部位的微观区域组织在单向加载下可以近似处理为平面应变状态。因此,考察平面应力和平面应变的实际含义可以理解为同一组织在材料不同区域的力学响应效果。分别采用 CPE3 和 CPF3 两种不同单元来探究不同加载条件对于复合材料力学行为的影响。

1.2.3 失效机制建模

在 SiC_p/Mg 复合材料体系中,基体会发生弹塑性变形和金属延性损伤,SiC_p发生弹性变形和脆性破坏。SiC_p和基体材料的力学性能见表 2。

表 2 SiC_p和 ZA63 基体合金的性能

Tab.2 Properties of ZA63 alloy and SiC _p particles				
材料	密度/(g·cm ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
SiC ^[10]	3.2	450	0.17	-
ZA63	1.83	44	0.35 ^[11]	227

利用 Abaqus 自带的延性损伤模型对 ZA63 合金基体进行定义,为了使材料发生完全断裂并结合试验结果,设置断裂应变为 10%。对于 SiC_p,采用 Abaqus/Explicit 中的“brittle cracking”模型来描述颗粒的脆性断裂行为,ZHANG J 等^[12]在该模型中,基于 I 型断裂机制,采用简单的 Rankine 准则检测裂纹产生,当最大主拉应力超过 SiC_p强度时发生裂纹,颗粒的强度 σ_p^f 可以用 Griffith 准则^[13]估算:

$$\sigma_p^f = \frac{K}{\sqrt{D}}$$

(1)

式中, K 为与颗粒断裂韧度以及几何因素有关的常数; D 为颗粒直径, μm 。颗粒的强度极限与颗粒尺寸近似成反比。结合相关研究^[14],将 30 μm 和 50 μm 的颗粒强度通过计算分别设置为 1 200 MPa 与 800 MPa。同

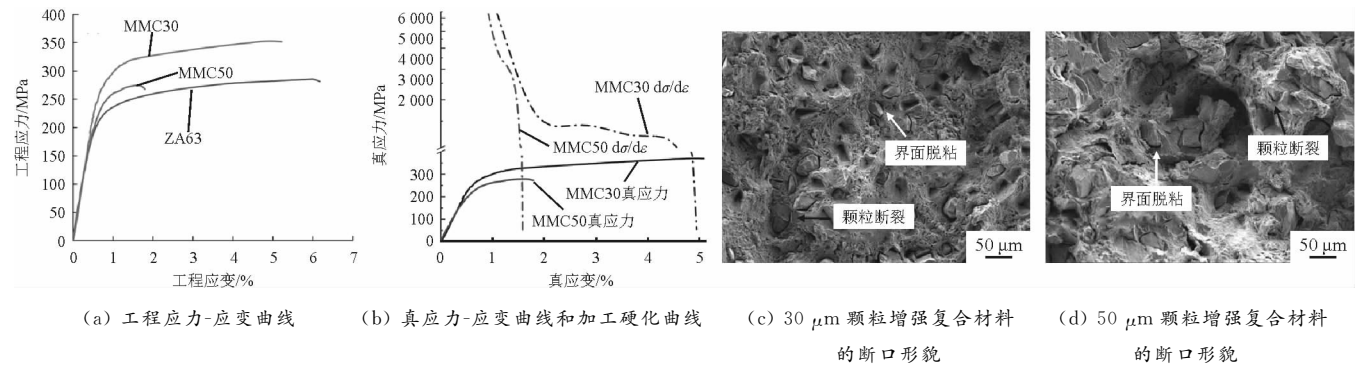


图 3 SiC_p/AZ63 复合材料的拉伸性能与断口形貌

Fig.3 Tensile properties and fracture morphologies of SiC_p/AZ63 composites

2.2 加载方式对复合材料力学性能的影响

图 4 为不同加载方式下 MMC30 的模拟与试验拉伸曲线对比以及计算模拟得到的不同变形结果。由图 4a 可知,材料在平面应变加载下的流变应力明显要高于平面应力加载下的,其主要原因是在平面应变加载条件下,材料处于 3 向应力状态,因此其应力值也更高。这也表明,即便相同的微观组织,如果其在材料中的区域不同,对于外力的力学响应也存在较大的差别。此外,使用平面应变单元获得的计算结果更接近试样的力学性能。

由图 4b 和图 4c 可以看出,两种加载情形下,材料

时假设颗粒与基体完美结合,不引入代表界面的实体单元,二者通过“绑定”命令连接,界面无破坏。

2 试验结果及讨论

2.1 复合材料的室温力学性能

图 3 为不同颗粒尺寸 SiC_p/AZ63 复合材料的力学性能曲线以及断口形貌。从图 3a 看出,随着 SiC_p 尺寸从 30 μm 增加到 50 μm , SiC_p/AZ63 复合材料的力学性能显著下降。屈服强度从约 278 MPa 下降到约 230 MPa,抗拉强度从约 351 MPa 下降到约 273 MPa,伸长率从约 5.1% 下降到约 1.7%,根据 Considere 准则^[15],加工硬化率在第 4 阶段时快速降低,在真应力-应变曲线中表现为流变应力的下降,此时,复合材料发生颈缩,见图 3b。随着颗粒尺寸增加,复合材料的加工硬化第 3 阶段缩短,导致 MMC50 复合材料的颈缩提前,拉伸性能下降,伸长率随着颗粒尺寸的增加而减小。由图 3c 和图 3d 可以看到,MMC50 断口中的韧窝变浅,基体的塑性变形能力下降。同时,在断口上可以看到颗粒断裂(黑色箭头)以及颗粒与基体间的较大缝隙,即界面脱粘现象(白色箭头)。综上,对于复合材料来说,室温条件下的断裂机制主要包括基体的延性损伤、颗粒断裂及颗粒与基体之间的界面脱粘。

的变形具有较大的不同。平面应变加载下复合材料的断裂主要是由断裂颗粒与损伤基体相连,主裂纹沿着高应变条带扩展,最终导致材料断裂。在平面应力加载下,虽然裂纹扩展也沿着高应变条带,但并未发生颗粒断裂,裂纹的萌生是由基体损伤导致。SUN X 等^[16]研究表明,平面应力单元更适合模拟较薄的拉伸试样,即厚度远小于宽度尺寸,如果拉伸试样的厚度与宽度相近,则选用平面应变单元。本试验拉伸试样的矩形截面为 4 mm×2 mm(厚度与宽度相近),因此,使用平面应变单元的模拟能够更好地估计二维模拟中的力学特性。

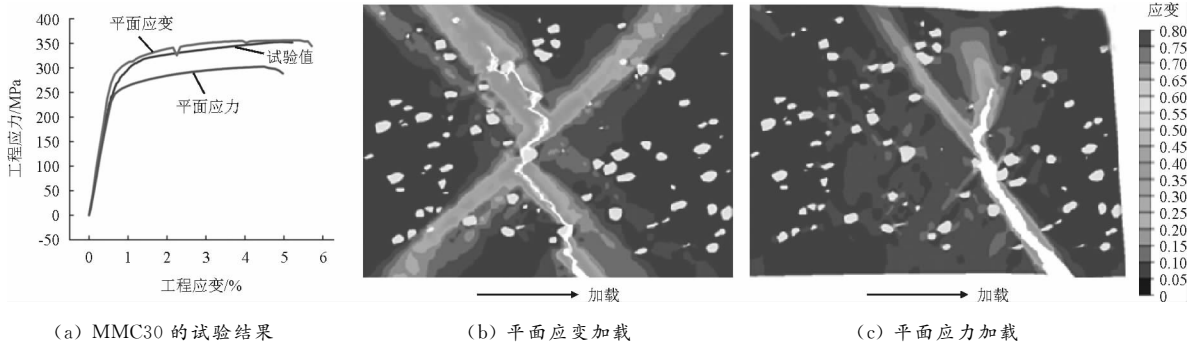


图 4 两种不同加载方式下 MMC30 的试验结果和模拟结果对比(应变水平:5.4%)
Fig.4 Experimental and simulation results of MMC30 under different loading modes

2.3 颗粒尺寸对复合材料损伤变形的影响

图 5 为 MMC30 和 MMC50 在平面应变加载下的模拟及试验拉伸曲线及其力学性能。从图 5a 可以看出,两种复合材料在弹性阶段曲线相似,随着应变的增加,当基体中的应力值达到屈服强度后,基体将发生塑性变形,虽然颗粒仍保持弹性变形,但基体的塑性变形占主导地位,导致复合材料的整体应力增幅下降,曲线变得平缓。随着载荷的进一步累积,复合材料内发生局部损伤^[17](黑色箭头),应力有所下降。当损伤扩大,主裂纹形成,复合材料的整体应力迅速下降(白色箭头),材料最终失效。由模拟曲线可知,随着颗粒尺寸增大,复合材料的屈服强度、抗拉强度和断裂应变均有下降。

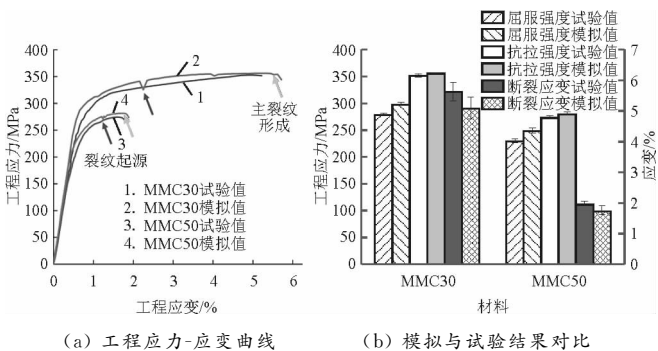


图 5 不同颗粒尺寸 SiC_p/ZA63 复合材料的拉伸模拟结果与真实试验结果

Fig.5 Simulation and experimental results of SiC_p/ZA63 composites with different grain sizes

从图 5b 可以发现,模拟得到的力学性能接近但略高于试验结果,这是由于在模拟过程中将复合材料视为无缺陷的材料,而实际材料中存在一定的缺陷,如微孔、断裂的颗粒等。MMC30 和 MMC50 的屈服强度模拟结果差值为 49 MPa,与试验值差值的变化规律一致。

图 6 是变形量为 0.8%(接近屈服应变)时,SiC_p/ZA63 复合材料中的 Mises 等效应力分布云图(单轴拉伸时 Mises 等效应力的值等于拉伸应力)、基体应变分布云图及弹/塑性区域的分布情况。由图 6a 和图 6d 可知,随着颗粒尺寸增加,基体和颗粒中的应力值均下降。

可以计算为:

$$\sigma_{SiC} = \frac{\sum_i^{N_{SiC}} \sigma_i V_i}{V_{SiC}} \quad (2)$$

$$\sigma_{Mg} = \frac{\sum_i^{N_{Mg}} \sigma_i V_i}{V_{Mg}} \quad (3)$$

式中, V_{SiC} 和 V_{Mg} 分别为颗粒和基体的体积分; N_{SiC} 和 N_{Mg} 分别为颗粒和基体中的单元数量; σ_i 为颗粒或基体中第 i 个单元的应力,MPa; V_i 为颗粒或基体中第 i 个单元的单元体积。

通过计算结果可知,MMC30 中的 σ_{SiC} 和 σ_{Mg} 分别是 636 MPa 和 290 MPa,MMC50 中的 σ_{SiC} 和 σ_{Mg} 分别是 402 MPa 和 213 MPa,表明载荷从基体转移到颗粒当中,颗粒承担更多载荷,即载荷传递效应^[18],从而提高复合材料的力学性能。由图 6b 和图 6e 可以发现,基体表面的最大塑性应变区域与拉伸方向的角度约为 45°,同时高应变带的连续性会由于颗粒的存在而中断,并且当颗粒相距较近的时候,中间的基体部分应变更高,见图 6b。此外,当颗粒发生断裂时,断裂颗粒的裂纹附近会出现明显的高应变区域,见图 6e。

当基体中应力超过屈服强度时会发生塑性变形,即图 6c、6f 中的深色塑性区域。由图 6c 和图 6f 可知,随着颗粒尺寸增大,基体中的塑性区域扩大。已有研究表明,在陶瓷颗粒增强镁基复合材料中,尺寸较大的颗粒($>1 \mu m$)之所以提高材料强度,其原因在于颗粒的细晶强化(具体表现在热加工变形时刺激再结晶形核)、位错强化(表现为在热加工后冷却时由于颗粒与基体之间热导率不同,造成位错密度的增加)和载荷传递效应^[19]。载荷传递效应随着颗粒尺寸的增加逐渐降低。而本研究中基体塑性区域的增加直接证明了载荷传递效应随着颗粒尺寸的增加而减弱,塑性区域的扩大会导致基体中更多区域率先达到屈服强度,从而会更早发生断裂,降低复合材料的性能。

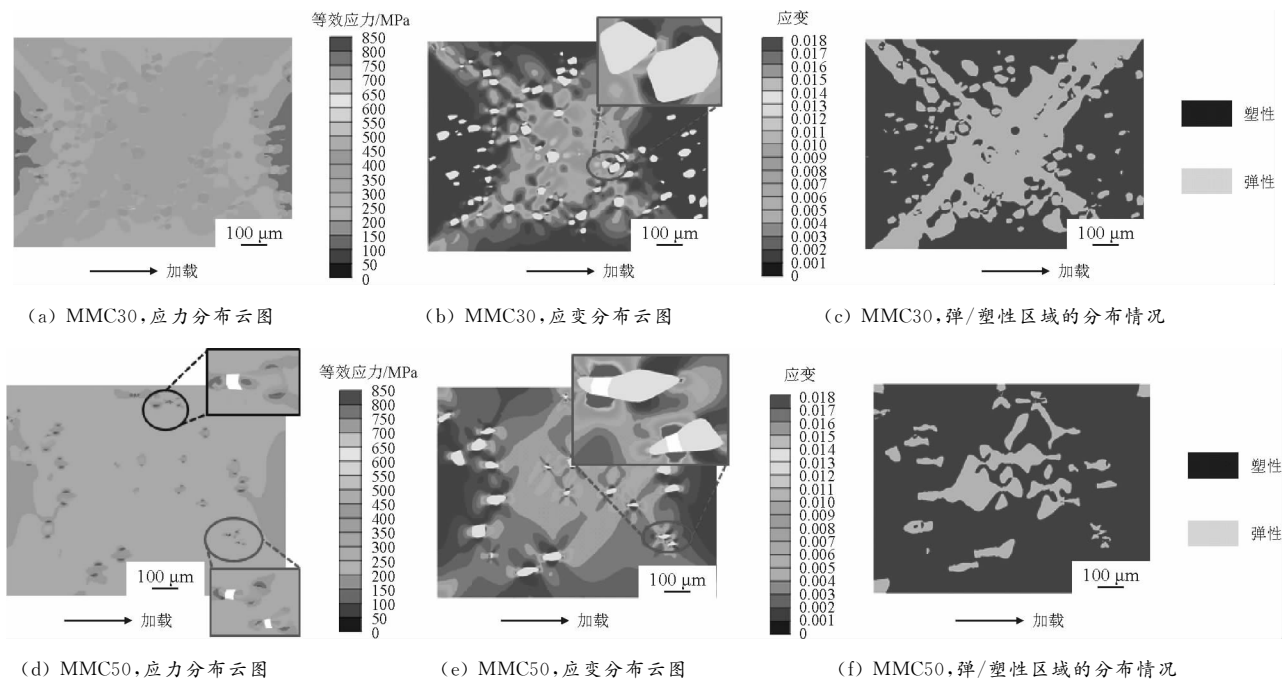


图 6 应变量 0.8% 时 SiC_p/ZA63 复合材料中的 Mises 等效应力分布云图

Fig.6 Mises effective stress distribution nephogram of SiC_p/ZA63 composites at a yield strain of 0.8%

图 7 是应变为 0.8% 时, MMC30 和 MMC50 中 SiC_p 中 Mises 等效应力的分布云图。可以看出, 高应力区主要位于颗粒的尖锐处或凹陷等高曲率位置, 见图 7a 中放大区域。当颗粒直径从 30 μm 增加到 50 μm, 颗粒上的平均应力从 636 MPa 下降到 343 MPa, 颗粒承载能力下降, 这再次表明颗粒尺寸增加, 颗粒的载荷传递效应降低。另外, 与 30 μm 颗粒相比, 在相同应变下, 50 μm 颗粒已经发生断裂, 导致损伤提早发生, 见图 7b 中放大图。图 7c 为 MMC50 中的颗粒断裂过程中的损伤演化, 颗粒损伤从凹陷处的高应力区开始, 当应变量达到 0.46% (未到 0.8%) 时, 颗粒已经完全断裂, 断口垂直于拉伸方向, 与铝基复合材料的试验研究结果类似^[20]。

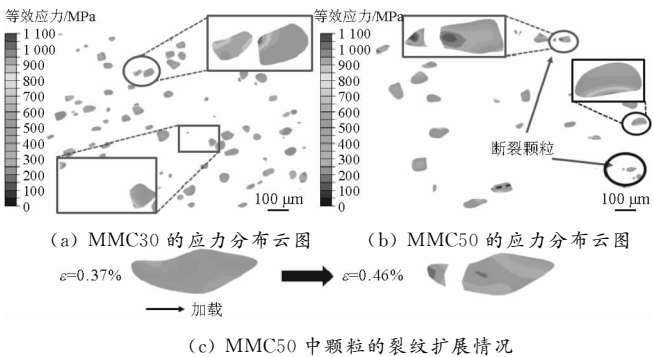


图 7 应变量为 0.8% 时, MMC30 和 MMC50 中 SiC_p 等效应力的分布云图

图 8 为 MMC30 中裂纹的萌生与扩展过程。当应变为 4.4% 时, 可以观察到在材料内部存在与拉伸方向约 45° 的高应力带, 同时在颗粒的边缘尖锐处存在应力集中, 见白色箭头, 在材料中可以看到颗粒的断裂以及基体的损伤, 见黑色箭头。另外, 在高应力区存在有颗粒断裂, 同时在材料的中心, 由于应力集中产生了微裂纹。随着应力增加, 裂纹逐渐扩展, 且扩展方向沿着 45° 的高应力条带, 同时在其他高应力区域形成微裂纹, 见图 8c 箭头。但是裂纹的扩展伴随着局部应力的释放, 导致材料内部高应力区域的减少 (见图 8b), 在拉伸曲线上表现为局部流变应力的下降 (见图 5a 白色箭头)。应力持续增加, 裂纹与别处微裂纹相连并扩展至试样表面, 导致材料的断裂, 见图 8c。从应变的角度观察发现, 材料内部应变的分布和应力相似, 与拉伸方向成 45°, 应变整体分布呈“X”状。在材料中心应变交汇处应变最大, 当刚性的颗粒与弹性基体之间的界面无法承受更大的应变时, 界面发生脱粘, 导致裂纹产生。随着应变增加, 裂纹逐步沿着与拉伸方向成 45° 的方向扩展^[21], 直至材料表面, 导致材料断裂。值得注意的是颗粒之间的距离也与裂纹的萌生存在密切联系。颗粒之间距离越小, 相邻位置颗粒之间的基体体积减少, 见图 8e, 在变形过程中, 颗粒不发生变形, 而变形主要由颗粒之间的基体承担, 由于基体体积减少, 使得其容纳变形的能力减小, 更容易在颗粒聚集处发生损伤。

断裂试样显微组织见图 9a~图 9c, 其中深灰色区域为基体, 浅灰色区域为颗粒。可以看到主裂纹附近存

Fig.7 Distribution of effective stress of SiC particles in MMC30 and MMC50 at a strain of 0.8%

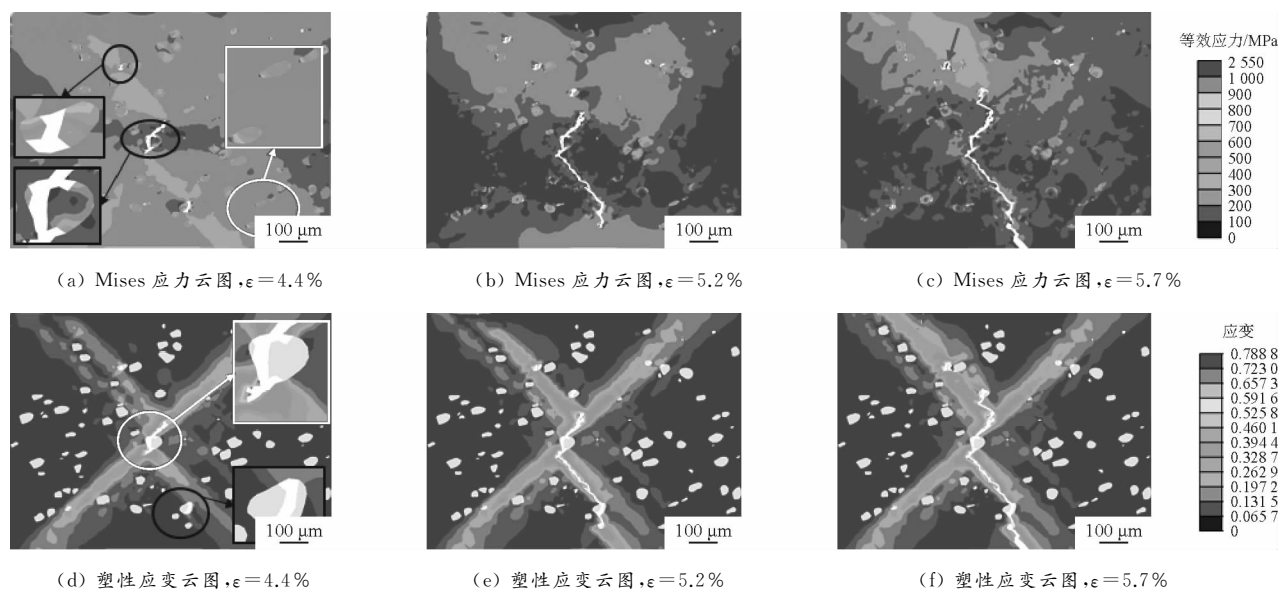


图 8 MMC30 中裂纹的萌生与扩展过程应变和应力云图

Fig.8 Nephogram of stress and strain during initiation and propagation of cracks in the MMC30

在断裂颗粒(图 9b)以及短裂纹(见图 9c)。颗粒断裂发生在应力集中的颗粒尖角以及凹陷处(见图 9b),同时裂纹尖端周围会发生基体损伤,形成微裂纹,后续拉伸过程中损伤基体会连接其他断裂颗粒,或沿 45°的拉伸方向扩展,直至试样断裂。在主裂纹附近会出现一些较短的裂纹以及界面脱粘现象,见图 9c。基于真实微观

组织模拟得到的断口放大图像见图 9d,模拟结果与试验观察到的现象基本相同,存在界面脱粘,颗粒断裂和基体延性损伤等现象,说明本研究建立的复合材料有限元模型能较好地预测材料的损伤与断裂行为,即复合材料的断裂机制主要包括基体的延性损伤、颗粒断裂及颗粒与基体之间的界面脱粘。

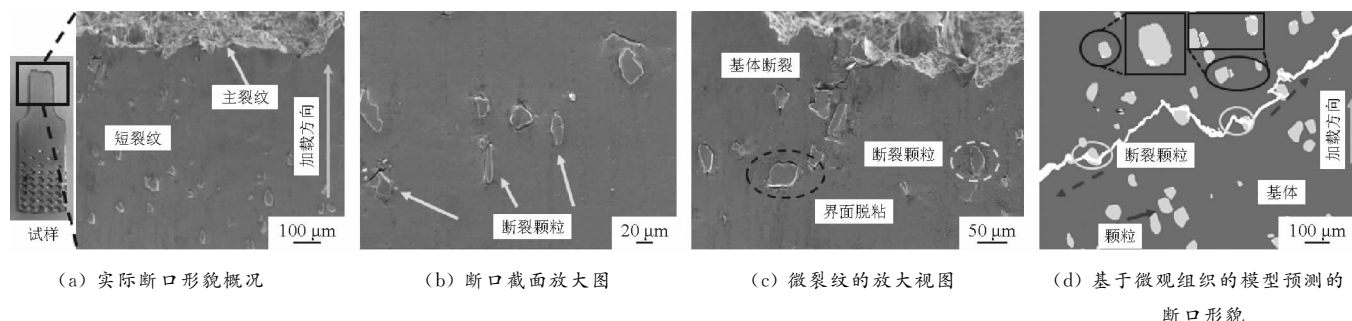


图 9 断裂试样的横截面断口图像

Fig.9 Cross-section morphologies of fractured specimens

3 结 论

(1)SiC_p/ZA63 复合材料的室温抗拉强度随着颗粒尺寸的增加而降低。当颗粒尺寸从 30 μm 增加到 50 μm, SiC_p/ZA63 复合材料的屈服强度下降约 48 MPa,抗拉强度下降约 78 MPa,断裂应变下降 66.7%。复合材料断裂方式主要为 SiC_p脆性断裂、颗粒与基体界面脱粘及基体延性损伤断裂。

(2)基于真实微观组织建立了二维有限元分析模型,分别采用平面应变和平面应力两种加载方式模拟不同颗粒尺寸 SiC_p/ZA63 复合材料的拉伸性能,结果表明,平面应力加载获得的计算值低于试验应力值,采用

平面应变加载方式获得的模拟拉伸曲线与试验结果相吻合。

(3)平面应变单元模拟结果表明,拉伸过程中应力与应变的分布类似,与拉伸方向呈 45°“X”分布,裂纹源最易在应力或应变带中心位置形成。裂纹的扩展沿着高应力或高应变带进行,扩展的同时会导致局部应力或应变的释放。颗粒尺寸增加导致力学性能下降的本质在于颗粒的载荷传递效果随颗粒尺寸的增加而降低。

参 考 文 献

- [1] DENG K K, CUI J, NIE B K, 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): 413-425.

- [2] PRASAD S, PRASAD S B, VERMA K, et al. The role and significance of Magnesium in modern day research-A review[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 10(1): 1-61.
- [3] 蒋傲雪,游志勇,段状正,等.挤压铸造 SiC_p/AZ91D 镁基复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 863-866.
- [4] PODDAR P, SRIVASTAVA V C, DC P K, et al. Processing and mechanical properties of SiC reinforced cast magnesium matrix composites by stir casting process[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A(460-461): 357-364.
- [5] HU M L, WEI S H, SHI Q, et al. Dynamic recrystallization behavior and mechanical properties of bimodal scale Al₂O₃ reinforced AZ31 composites by solid state synthesis[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(3): 841-848.
- [6] JUTANAIMAN S, SYAHRIAL A Z. Characteristics of magnesium/B₄C reinforced composite fabricated by stir casting method[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 924(1): 012 020.
- [7] 邵乐天,尧军平,胡启耀,等.增强颗粒形状、体积分数及分布对原位自生 TiC/AZ91 复合材料失效行为的影响[J].材料热处理学报, 2019, 40(1): 118-124.
- [8] 李超.基于 SiC_p/AZ91D 复合材料真实微观结构的多尺度模拟计算[D].太原:中北大学, 2014.
- [9] MA S M, ZHANG X Z, CHEN T J, et al. Microstructure-based numerical simulation of the mechanical properties and fracture of a Ti-Al₃Ti core-shell structured particulate reinforced A356 composite[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108 685.
- [10] SETIA S, CHAUHAN S R. Experimental investigation and comparison of output cutting regimes with finite element machining models for SiC_p based Al7075 composite[J]. Silicon, 2021, 14(3): 883-892.
- [11] LI Q A, ZHANG Q, WANG Y G, et al. Effects of Ca on mechanical properties of Mg-6Zn-3Al alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 117-119: 1 243-1 246.
- [12] ZHANG J, OUYANG Q B, GUO Q, et al. 3D Microstructure-based finite element modeling of deformation and fracture of SiC_p/Al composites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 123: 1-9.
- [13] NAN C W, CLARKE D R. The influence of particle size and particle fracture on the elastic/plastic deformation of metal matrix composites[J]. Acta Materialia, 1996, 44(9): 3 801-3 811.
- [14] GAO X, ZHANG X X, QIAN M F, et al. Effect of reinforcement shape on fracture behavior of SiC/Al composites with network architecture[J]. Composite Structures, 2019, 215(5): 411-420.
- [15] WEBER L, KOUZELI M, MARCHI C S, et al. On the use of Considere's criterion in tensile testing of materials which accumulate internal damage[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(5): 549-551.
- [16] SUN X, CHOI K S, LIU W N, et al. Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25(10): 1 888-1 909.
- [17] PENG P, GAO M Q, GUO E Y, et al. Deformation behavior and damage in B₄C_p/6061Al composites: An actual 3D microstructure-based modeling [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A781: 139 169.
- [18] ZHANG J F, ZHANG X X, WANG Q Z, et al. Simulation of anisotropic load transfer and stress distribution in SiC_p/Al composites subjected to tensile loading[J]. Mechanics of Materials, 2018, 122: 96-103.
- [19] MA S M, ZHUANG X C, WANG X M. Particle distribution-dependent micromechanical simulation on mechanical properties and damage behaviors of particle reinforced metal matrix composites [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(11): 1-19.
- [20] QI W, XU W X, ZHANG L C. Microstructure-based modelling of fracture of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Composites, 2019, B163: 384-392.
- [21] PANDEY A B, MAJUMDAR B S, MIRACLE D B. Deformation and fracture of a particle-reinforced aluminum alloy composite: Part I. Experiments [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2000, A31: 921-936.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

