SiC 颗粒增强镁基复合材料的制备与组织性能研究

李宏伟，李增权

（河南质量工程职业学院 机电工程学院，河南 平顶山 467000）

摘要：目的 研究 SiC 体积分数对复合材料显微形貌、物相组成、拉伸性能、磨损性能和腐蚀性能的影响。**方法** 采用粉末冶金法制备 SiC_p/AS81 复合材料，采用相关仪器设备对不同 SiC 体积分数的 SiC_p/AS81 复合材料的显微形貌进行观察，对物相组成和组织性能进行分析。**结果** 随着 SiC 体积分数的增加，SiC 增强镁基复合材料的平均晶粒尺寸逐渐减小。0.25%（体积分数，下同）–SiC_p/AS81 和 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料中的 Si 元素分布较为均匀，而在 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中可见较多的 Si 元素团聚。随着 SiC 体积分数的增加，复合材料的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率先增大后减小，均在 SiC 体积分数为 0.50%时取得最大值。在 5~30 N 载荷下，0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的耐磨性能要优于 AS81 复合材料的耐磨性能。复合材料按耐腐蚀性能从高至低顺序排列如下：0.50%–SiC_p/AS81>0.25%–SiC_p/AS81>AS81>1.0%–SiC_p/AS81。**结论** 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料具有最好的综合性能，这主要与该复合材料中晶粒较为细小、均匀，以及材料缺陷较少、致密性较高等有关。

关键词：AS81 复合材料；SiC 体积分数；复合材料；组织；性能

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.005

中图分类号：TB333 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2023)05-0036-08

Preparation and Microstructure & Properties of SiC Reinforced Magnesium Matrix Composites

LI Hong-wei, LI Zeng-quan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Quality Institute, Henan Pingdingshan 467000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of SiC volume fraction on microstructure, phase composition, tensile properties, wear resistance, and corrosion resistance of composites. Powder metallurgy was used to prepare SiC_p/AS81 composites. Relevant instruments and equipment were used to observe the microstructure of SiC_p/AS81 composites with different SiC volume fractions, and the phase composition and microstructure properties were analyzed. The results showed that the average grain size of SiC reinforced magnesium matrix composites decreased with the increase of SiC volume fraction. The distribution of Si elements in 0.25% (volume fraction, the same below)-SiC_p/AS81 and 0.50%-SiC_p/AS81 composites was relatively uniform, and many Si element agglomeration could be seen in 1.0%-SiC_p/AS81 composites. With the increase of SiC volume fraction, the tensile strength, yield strength and elongation after fracture of the composites first increased and then decreased, and the maxi-

收稿日期：2021–12–29

Received：2021-12-29

基金项目：河南省科技厅科技攻关项目（202102310030）

Fund：Science and Technology Research Project of Henan Provincial Department (202102310030)

作者简介：李宏伟（1974—），男，硕士，副教授，主要研究方向为复合材料加工技术。

Biography：LI Hong-wei (1974-), Male, Master, Associate professor, Research focus: composite material processing technology.

引文格式：李宏伟，李增权. SiC 颗粒增强镁基复合材料的制备与组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 36-43.

LI Hong-wei, LI Zeng-quan. Preparation and Microstructure & Properties of SiC Reinforced Magnesium Matrix Composites[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 36-43.

mum value was obtained when the SiC volume fraction was 0.50%. Under 5-30 N load, the wear resistance of 0.50%-SiC_p/AS81 composites was better than that of AS81 composites. The order of corrosion resistance of composites from high to low was: 0.50%-SiC_p/AS81>0.25%-SiC_p/AS81>AS81>1.0%-SiC_p/AS81. 0.50%-SiC_p/AS81 composites have the best comprehensive properties, which is mainly related to the fine and uniform grains, less material defects and high compactness of the composites.

KEY WORDS: AS81 composite; SiC volume fraction; composite; microstructure; property

镁合金具有密度小、比强度高、散热性好等特点，已成为汽车、船舶和航空航天等行业的首选材料。随着现代工业的快速发展，镁合金强度不高、耐磨性和耐腐蚀性较差等问题在一定程度上限制了其应用范围[1]，可以通过在镁基中加入与基体物理和化学相容性好、载荷承受能力强的增强体（碳纤维、Al_2O_3 颗粒、TiC 颗粒等）[2]，来制备具有更高强度、更好耐磨性和耐腐蚀性的镁基复合材料，以满足现代工业对高综合性能镁基复合材料的应用需求。在众多的增强体颗粒中，SiC 颗粒因其硬度高、弹性模量高、与镁合金基体相容性好、价格低廉等优点而成为理想的制备镁基复合材料的增强体[3]。虽然目前科研工作已通过在镁合金基体中添加微米级 SiC 颗粒的方法来提升复合材料的强度，但是复合材料的塑性、耐磨性能等会有所降低[4-6]，如何在不降低复合材料塑性等的前提下提升镁基复合材料的强度等是值得研究的课题。文中在以 Mg–8Al–Sn 镁合金（AS81）为基体的材料中加入纳米级 SiC 颗粒，采用粉末冶金法制备了不同 SiC 体积分数的 SiC 增强镁基复合材料，研究了增强体 SiC 体积分数对复合材料组织和性能的影响，以期为高综合性能镁基复合材料的开发与应用提供参考。

1　实验

1.1　材料

实验材料包括质量分数为 99.94%的 Mg 粉（密度为 1.74 g/cm^3、粒度约为 80 μm）、质量分数为 99.87%的 Al 粉（密度为 2.70 g/cm^3、粒度约为 10 μm）、质量分数为 99.90.%的 Sn 粉（密度为 5.74 g/cm^3、粒度约为 32 μm）、质量分数为 99.85%的纳米 SiC 颗粒（密度为 3.22 g/cm^3、粒度约为 38 nm）。

1.2　试样制备

将 Mg 粉、Al 粉、Sn 粉（质量比为 91∶8∶1）进行机械球磨处理，然后倒入无水乙醇中进行 25 min 的磁力搅拌，得到 AS81 混合粉末备用。首先对 SiC 颗粒进行预氧化处理（285 ℃/15 min+585 ℃/15 min），然后置于无水乙醇中进行 25 min 的超声分散处理，再转入 AS81 悬浮液中进行 25 min 的磁力搅拌处理，经沉降处理后在真空干燥箱中进行 60 ℃/2 h 的干燥处理。将经过干燥处理的 SiC+AS81 混合粉末按照球料比 8∶1（质量比）的比例放入 XQM–12 型行星球磨机中进行转速 140 r/min、时间 15 h 的球磨处理（采用体积分数为 99.9%的高纯氩气保护），球磨前加入质量分数为 0.6%的硬脂酸作为控制剂。将经过预分散处理的混合粉末压制成 Φ30 mm 圆柱形试块（68 MPa、5 min），置于自制真空热压烧结炉中进行 475 ℃/1 h 的热处理（真空度<0.01 Pa），然后进行 110 MPa/15 min 的单轴加压处理使其致密化，随炉冷却后制备得到不同 SiC 体积分数的 SiC 增强镁基复合材料（*n*–SiC_p/AS81 复合材料，*n*=0%、0.25%、0.5%、1.0%，体积分数，下同），将烧结后的试样进行 430 ℃/3 h 的均匀化处理，在 350 ℃下保温 1.5 h 后进行挤压比为 10∶1 的热挤压（模具材质为 3Cr2W8V 压铸模具钢），挤压后进行 425 ℃/2 h 的热处理，之后随炉冷却至室温。

1.3　测试方法

采用线切割方法加工金相试样，经过机械研磨和抛光腐蚀后，在 Leica–DVM6 型光学显微镜上观察金相试样，并用附带软件统计晶粒尺寸分布。采用帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪对复合材料的物相进行分析（Cu 靶 Kα 辐射），扫描速度为 2（°）/min。采用 Quanta 200 型扫描电镜对复合材料的元素分布进行面扫描分析，并观察磨损形貌。在 MTS–810 型万能实验机上对 SiC 增强镁基复合材料进行室温拉伸性能测试，拉伸速率为 2 mm/min。采用阿基米德排水法测试复合材料的密度和气孔率[7]。在 SFT–2M 销盘式摩擦磨损实验机上对复合材料（Φ6 mm×12 mm）进行干滑动摩擦实验，磨损距离为 17 m、载荷为 5~30 N，并计算磨损率[8]。电化学性能测试在 PGSTAT 302F 型电化学工作站中进行，采用标准三电极体系（参比电极、辅助电极和工作电极分别为甘汞电极、铂电极和工作试样），腐蚀介质为 3.5%（质量分数）NaCl 溶液，扫描速度为 5 mV/s。

2　结果与分析

SiC 增强镁基复合材料的显微组织和晶粒尺寸统计分析结果如图 1 所示。可见，不同 SiC 体积分数的 SiC_p/AS81 复合材料的晶粒尺寸存在较大差异，具体

体现如下：在 AS81 复合材料中，晶粒尺寸主要分布在 2.5~10 μm，平均晶粒尺寸为 7.93 μm，且尺寸在 15 μm 以上的晶粒较多；在 0.25%–SiC_p/AS81 复合材料中，晶粒尺寸主要分布在 2~8 μm，平均晶粒尺寸为 4.61 μm，且尺寸基本都在 15 μm 以下；在 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料中，晶粒尺寸主要分布在 2.5~5 μm，平均晶粒尺寸为 3.96 μm，且尺寸基本都在 10 μm 以下；在 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中，晶粒尺寸主要

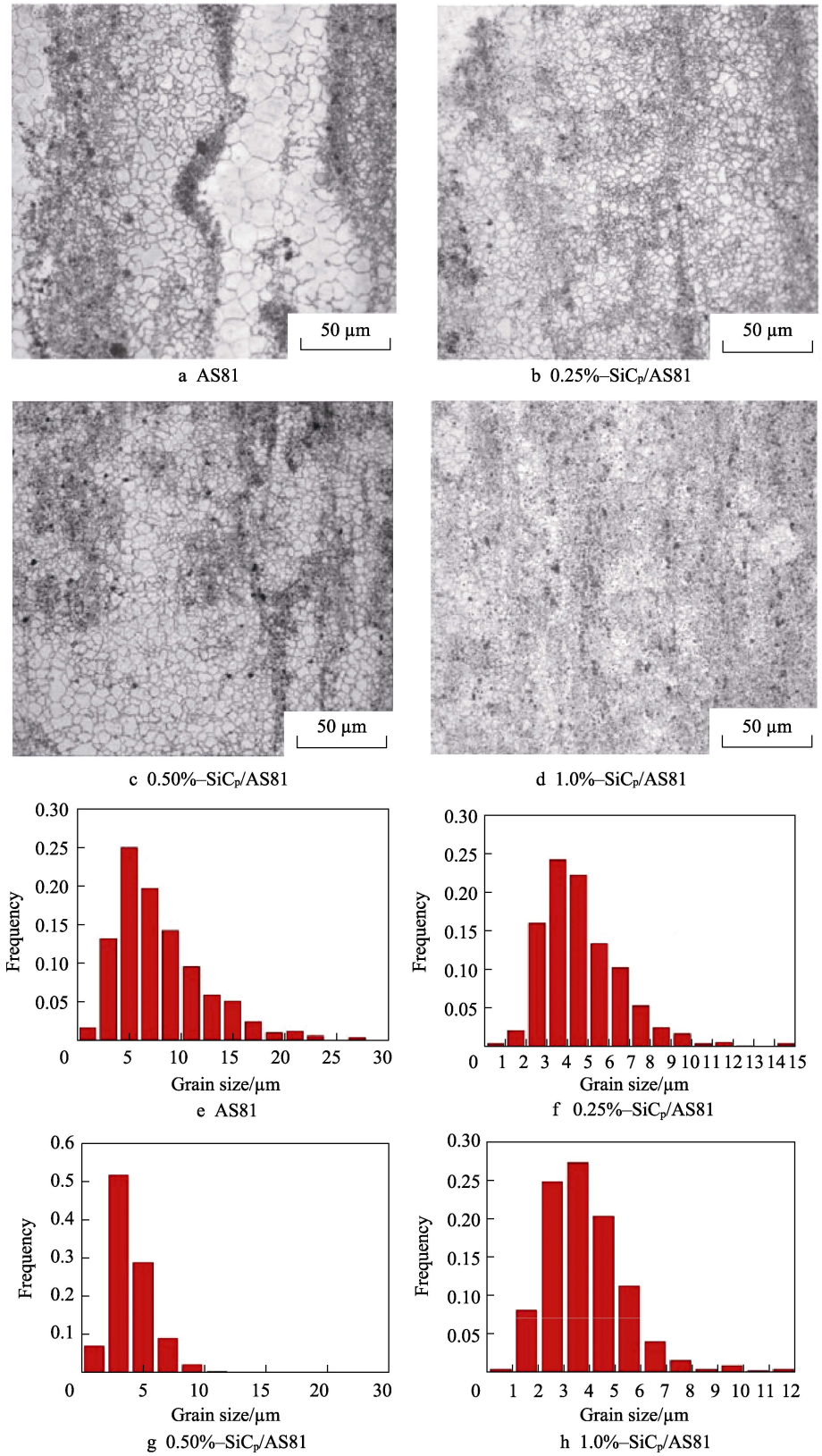


图 1 SiC 增强镁基复合材料的显微组织和晶粒尺寸统计分析结果

Fig.1 Statistical analysis results of microstructure and grain size of SiC reinforced magnesium matrix composites

分布在 1~7 μm，平均晶粒尺寸为 3.79 μm，且尺寸基本都在 12 μm 以下。由此可见，随着 SiC 体积分数的增加，SiC 增强镁基复合材料的平均晶粒尺寸逐渐减小，这主要是因为 SiC 的添加可以在起到钉扎作用的同时抑制动态再结晶的发生[9]。

SiC 增强镁基复合材料的 X 射线衍射分析结果如图 2 所示。可见，AS81、0.25%–SiC_p/AS81 和 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料主要由基体 Mg 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相组成，而在 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中，除 Mg 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相外，还存在一定含量的 SiC 相，这主要与此时 SiC 体积分数相对较大有关[10]。此外，在 4 种 SiC 增强镁基复合材料的 XRD 图谱中都未检测到

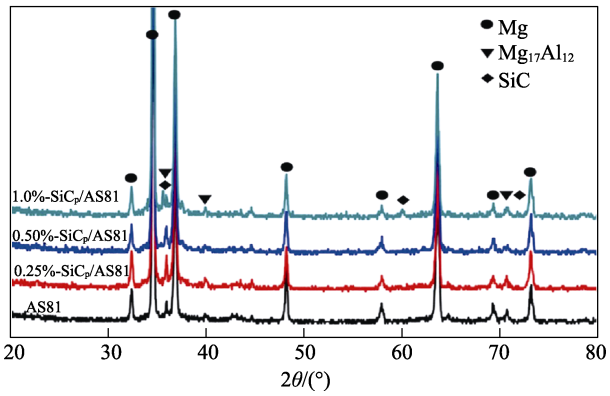


图 2　SiC 增强镁基复合材料的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of SiC reinforced magnesium matrix composites

MgO 的存在，这表明复合材料在制备过程中有效减少了氧化反应的发生[11]。

SiC 增强镁基复合材料的 SEM 形貌如图 3 所示。在 AS81 中，$Mg_{17}Al_{12}$ 相主要分布在晶界，晶粒尺寸不均，且存在较多的大尺寸晶粒。添加不同体积分数的 SiC 后，SiC 增强镁基复合材料的晶粒得到不同程度细化，亮白色第二相（$Mg_{17}Al_{12}$、SiC 相）明显增多，且由于 SiC 在复合材料中经过了充分混合和热挤压处理，在 0.25%–SiC_p/AS81、0.50%–SiC_p/AS81 和 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中亮白色第二相未见明显聚集，且主要沿晶界分布。

进一步采用元素面扫描的方法分析 SiC 在 SiC 增强镁基复合材料中的存在形式，SiC 增强镁基复合材料的 Si 元素面扫描分析结果如图 4 所示。对比分析可见，0.25%–SiC_p/AS81 和 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料中的 Si 元素分布较为均匀，而在 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中可见较多的 Si 元素团聚，这些呈团聚分布的 SiC 会在一定程度上降低复合材料的力学性能。

SiC 增强镁基复合材料的密度和气孔率测试结果如表 1 所示。由实测密度可知，挤压后不同 SiC 体积分数的 SiC_p/AS81 复合材料的密度都高于挤压前的，且挤压后复合材料的实测密度与理论密度较为接近，这表明粉末冶金法制备得到的 SiC 增强镁基复合材料缺陷较少[12]，通过挤压可以进一步提高复合材料的致密度。

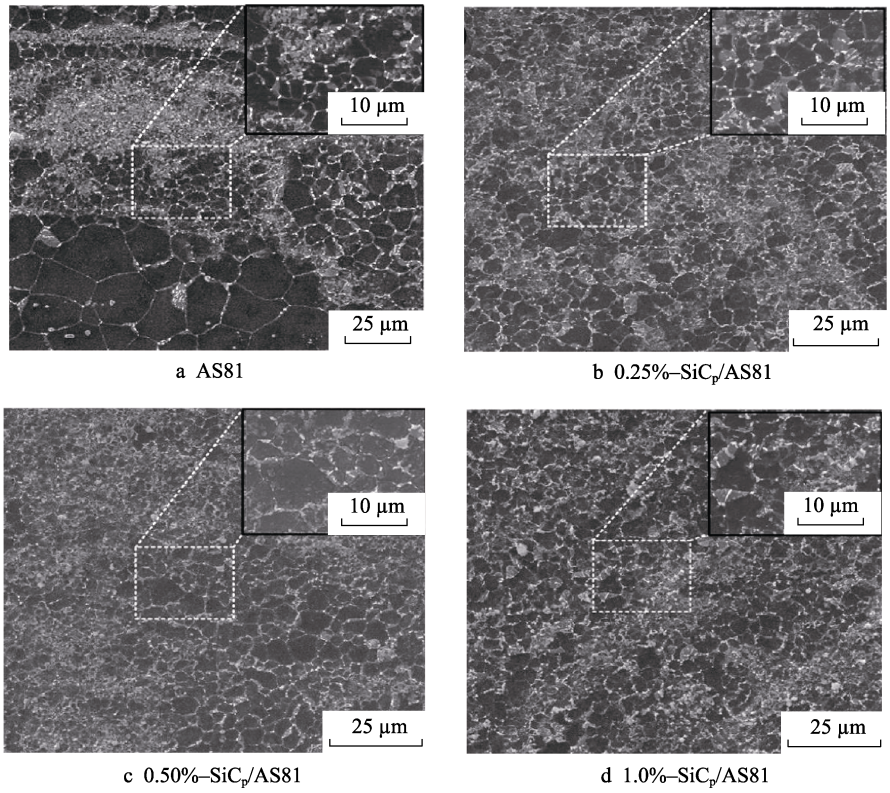
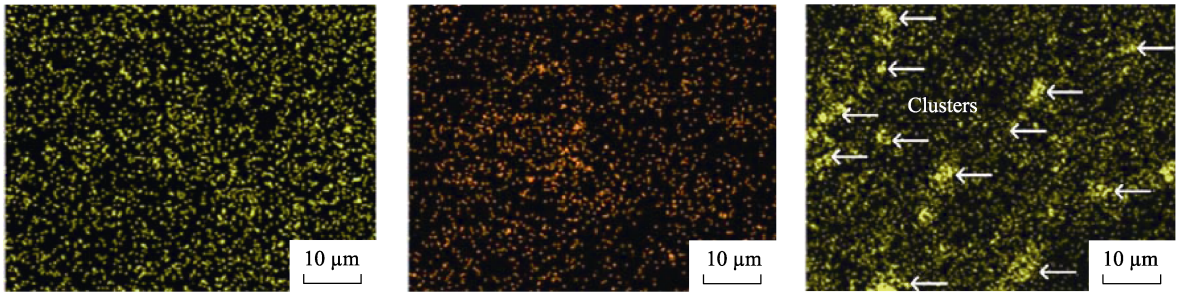


图 3　SiC 增强镁基复合材料的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of SiC reinforced magnesium matrix composites



a 0.25%–SiC_p/AS81　　b 0.50%–SiC_p/AS81　　c 1.0%–SiC_p/AS81

图 4　SiC 增强镁基复合材料的 Si 元素面扫描分析结果

Fig.4 Results of Si element surface scanning analysis of SiC reinforced magnesium matrix composites

表 1　SiC 增强镁基复合材料的密度和气孔率

Tab.1 Density and porosity of SiC reinforced magnesium matrix composites

Composite	Theoretical density/(g·cm^{-3})	Measured density/(g·cm^{-3})		Porosity/%	
		Before compression	After compression	Before compression	After compression
AS81	1.814	1.790	1.804	1.44	0.64
0.25%-SiC_p/AS81	1.818	1.791	1.809	1.62	0.61
0.50%-SiC_p/AS81	1.821	1.791	1.806	1.75	0.62
1.0%-SiC_p/AS81	1.829	1.793	1.819	2.05	0.61

SiC 增强镁基复合材料的应力–应变曲线如图 5 所示，SiC 增强镁基复合材料的拉伸性能如表 2 所示。未添加 SiC 的 AS81 复合材料的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 329 MPa、186 MPa 和 5.6%，添加 SiC 的镁基复合材料的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率都高于 AS81 复合材料的，且随着 SiC 体积分数的增加，抗拉强度、屈服强度和断后伸长率先增大后减小，均在 SiC 体积分数为 0.50%时取得最大值，与 AS81 复合材料相比，分别提高了 19.15%、34.41%、67.86%。

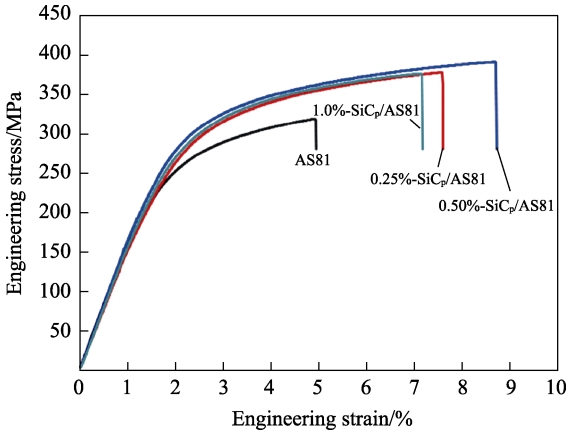


图 5　SiC 增强镁基复合材料的应力–应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of SiC reinforced magnesium matrix composites

表 2　SiC 增强镁基复合材料的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of SiC reinforced magnesium matrix composites

Composite	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongtaion/%
AS81	329	186	5.6
0.25%-SiC_p/AS81	376	220	8.0
0.50%-SiC_p/AS81	392	250	9.4
1.0%-SiC_p/AS81	373	241	7.5

SiC 增强镁基复合材料的磨损率测试结果如表 3 所示。可见，在相同 SiC 体积分数下，SiC_p/AS81 复合材料的磨损率会随着载荷的增加而逐渐增大。当载荷为 5~20 N 时，SiC_p/AS81 复合材料的磨损率会随着 SiC 体积分数的增加而逐渐减小。当载荷为 30 N 时，SiC_p/AS81 复合材料的磨损率随着 SiC 体积分数的增加先减小后增大，在 SiC 体积分数为 0.5%时取得最小值。这主要是因为 SiC 体积分数的增加会使 SiC_p/AS81 复合材料晶粒尺寸减小，在起到细晶强化作用的同时提高了复合材料的硬度[13]，此外，SiC 自身具有较高的硬度，在复合材料中可以作为硬质相而强化基体并抑制磨损，但是当载荷较大时（30 N），在 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中局部团聚的 Si 颗粒会出现剥落进而增大磨损率[14-16]。

表 3　SiC 增强镁基复合材料的磨损率测试结果

Tab.3 Wear rate test results of SiC reinforced magnesium matrix composites　　10^{-3} mm^3/m

Composite	Load			
	5 N	10 N	20 N	30 N
AS81	1.90	3.88	7.15	9.49
0.25%-SiC_p/AS81	1.83	3.40	6.14	9.10
0.50%-SiC_p/AS81	1.69	2.74	5.16	7.12
1.0%-SiC_p/AS81	1.45	2.39	5.02	8.22

SiC 增强镁基复合材料的磨损形貌如图 6 所示。对比分析可见，在不同载荷、不同 SiC 体积分数 SiC_p/AS81 复合材料的磨损形貌中都可见到平行于滑动方向的梨沟，局部可见由于塑性变形而产生的黏着现象。相对而言，0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的表面梨沟相对未添加 SiC 的 AS81 复合材料的更浅且窄，由于塑性变形而产生的黏着磨损、切削屑更少，这主要是因为 SiC 的加入可以起到强化基体和抵抗磨损的作用[17-19]。此外，随着载荷从 5 N 增加至 30 N，复合材料表面梨沟逐渐变深、变宽，当载荷为 30 N 时，0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的表面还出现了凹坑，这主要与磨损过程中 SiC 硬质颗粒从基体剥落有关[20-23]。整体而言，当载荷为 5~30 N 时，添加 SiC 的 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的耐磨性能要优于 AS81 复合材料的耐磨性能，这与表 3 的磨损率测试结果相吻合。

SiC 增强镁基复合材料的阳极极化曲线如图 7 所示，相应腐蚀电位和腐蚀电流密度测试结果如表 4 所示。可见，与 AS81 复合材料相比，0.25%–SiC_p/AS81 和 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的腐蚀电位发生了正向移动，而 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料的腐蚀电位最负。按腐蚀电流密度从小至大的顺序为 0.50%–SiC_p/AS81<0.25%–SiC_p/AS81<AS81<1.0%–SiC_p/AS81。根据材料的耐腐蚀性能与热力学参数（腐蚀电位）和动力学参数（腐蚀电流密度）的关系可知[24]，腐蚀电位越正腐蚀倾向越小，腐蚀电流密度越大腐蚀速率越快。由此可见，0.25%–SiC_p/AS81 和 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料的耐腐蚀性能优于 AS81 复合材料的，而 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料的耐腐蚀性能最差，这可能是因为 1.0%–SiC_p/AS81 复合材料中 SiC 添加过量造成局部存在团聚等缺陷，降低了材料的致密性，引起阴极反应的接触面积增大、腐蚀速率加快[25]，而在 0.50%–SiC_p/AS81 复合材料中第二相均匀分布，SiC 未见团聚现象，与基体界面接触较好，这有助于提升复合材料的耐腐蚀性能。

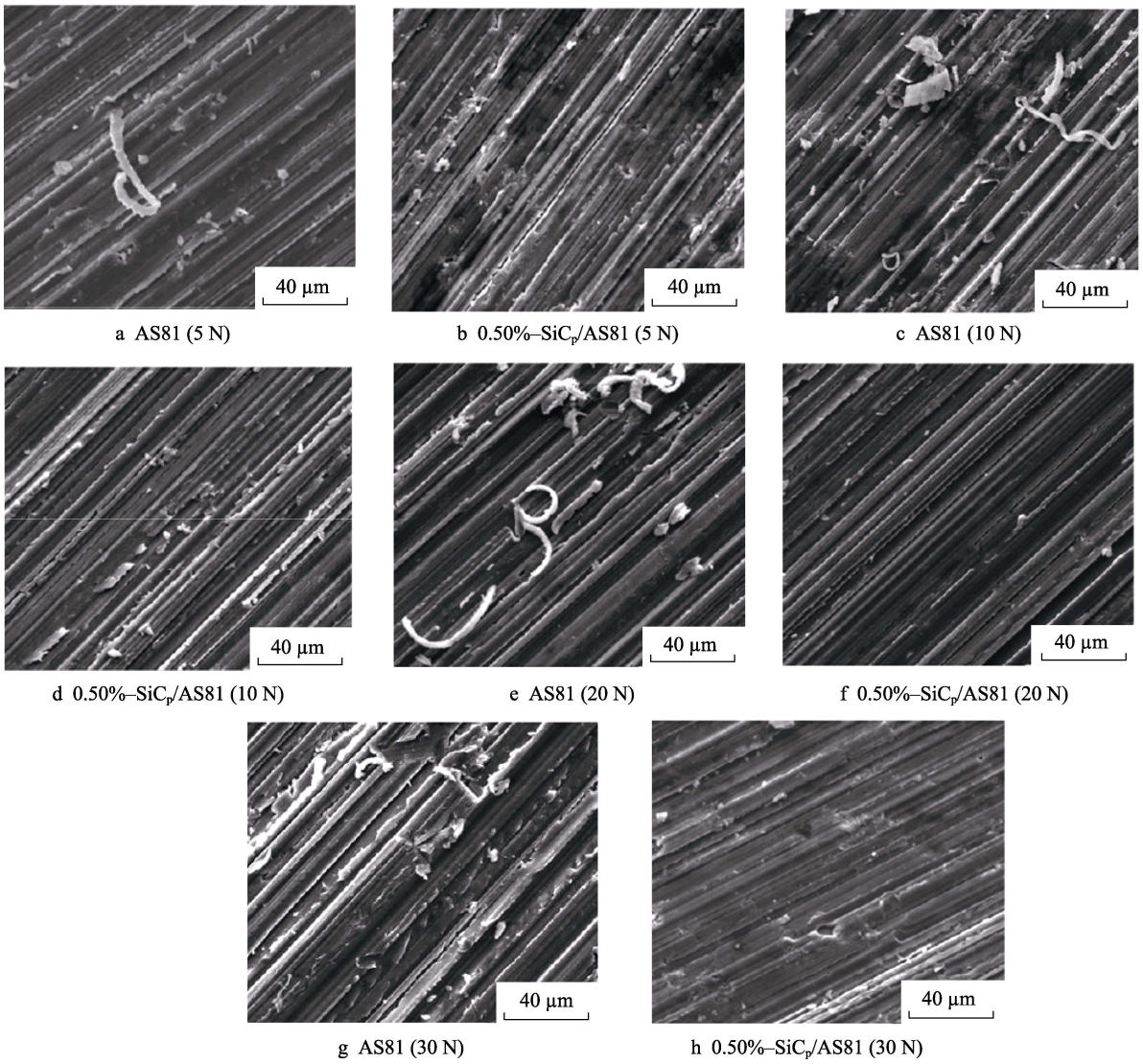


图 6　SiC 增强镁基复合材料的磨损形貌

Fig.6 Wear morphology of SiC reinforced magnesium matrix composites

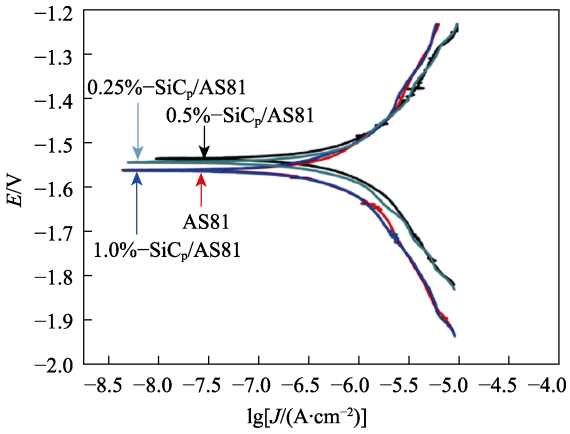


图 7 SiC 增强镁基复合材料的阳极极化曲线

Fig.7 Anodic polarization curve of SiC reinforced magnesium matrix composites

表 4 SiC 增强镁基复合材料的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Tab.4 Corrosion potential and corrosion current density of SiC reinforced magnesium matrix composites

Composite	Corrosion potential/V	Corrosion current density/($\times10^{-7}$ A·cm^{-2})
AS81	−1.57	10.2
0.25%-SiC$_p$/AS81	−1.55	8.0
0.50%-SiC$_p$/AS81	−1.54	4.2
1.0%-SiC$_p$/AS81	−1.58	20.2

3 结论

1）当 SiC 体积分数为 0%、0.25%、0.50%、1.0%时，SiC$_p$/AS81 复合材料的平均晶粒尺寸分别为 7.93、4.61、3.96、3.79 μm。AS81、0.25%–SiC$_p$/AS81 和 0.50%–SiC$_p$/AS81 复合材料主要由基体 Mg 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相组成，而在 1.0%–SiC$_p$/AS81 复合材料中除 Mg 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相外，还存在一定含量的 SiC 相。0.25%–SiC$_p$/AS81 和 0.50%–SiC$_p$/AS81 复合材料中的 Si 元素分布较为均匀，而在 1.0%–SiC$_p$/AS81 复合材料中可见较多的 Si 元素团聚。

2）添加 SiC 的镁基复合材料的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率都高于 AS81 复合材料的，且随着 SiC 体积分数的增加，抗拉强度、屈服强度和断后伸长率先增大后减小，均在 SiC 体积分数为 0.50%时取得最大值，分别相较于 AS81 复合材料的提高了 19.15%、34.41%、67.86%。0.25%–SiC$_p$/AS81 和 0.50%–SiC$_p$/AS81 复合材料的腐蚀电位相对 AS81 复合材料的发生了正向移动，而 1.0%–SiC$_p$/AS81 复合材料的腐蚀电位最负；腐蚀电流密度从小至大的顺序为 0.50%–SiC$_p$/AS81<0.25%–SiC$_p$/AS81<AS81<1.0%–SiC$_p$/AS81。

3）在 SiC 增强镁基复合材料中，较适宜的纳米 SiC 颗粒体积分数为 0.5%，此时复合材料具有较好的拉伸性能、耐磨性能和耐腐蚀性能。

参考文献：

[1] 樊振中，陈军洲，陆政，等. 镁合金的研究现状与发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(10): 1016-1029.
FAN Zhen-zhong, CHEN Jun-zhou, LU Zheng, et al. Research Status and Development Trend of Magnesium Alloys[J]. China Foundry, 2020, 69(10): 1016-1029.

[2] 宋亚虎，王爱琴，马窦琴. 微纳米混杂颗粒增强铝基复合材料的设计与研究进展[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(7): 1-12.
SONG Ya-hu, WANG Ai-qin, MA Dou-qin. Design and Research Progress of Micro Nano Hybrid Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(7): 1-12.

[3] 任峰岩，许磊，历长云，等. 粉末冶金法制备颗粒增强镁基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(1): 66-73.
REN Feng-yan, XU Lei, LI Chang-yun, et al. Research Progress of Particle Reinforced Magnesium Matrix Composites Prepared by Powder Metallurgy[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(1): 66-73.

[4] 王严，谢吉林，陈玉华，等. 镁基复合材料制备技术研究现状[J]. 精密成形工程, 2022, 14(12): 119-127.
WANG Yan, XIE Ji-lin, CHEN Yu-hua, et al. Research Status of Preparation Technology of Magnesium Matrix Composites[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (12): 119-127.

[5] 蒋傲雪，游志勇，段状正. 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.
JIANG Ao-xue, YOU Zhi-yong, DUAN Zhuang-zheng. Microstructure and Properties of Squeeze Cast SiC$_p$/AZ91D Magnesium Matrix Composites[J] Special Casting and Nonferrous Alloys, 2021, 41(7): 863-866.

[6] NIU X, LI G, ZHANG Z, et al. Simultaneously Improving the Strength and Ductility of Extruded Bimodal Size SiC$_p$/AZ61 Composites: Synergistic Effect of Micron/Nano SiC$_p$ and Submicron $Mg_{17}Al_{12}$ Precipitates[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 743(16): 207-216.

[7] SUN X F, WANG C J, DENG K K, et al. Aging Behavior of AZ91 Matrix Influenced by 5 μm SiC$_p$: Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 1263-1272.

[8] 张从阳，李志锐，方东，等. SiC$_p$/AZ91D 镁基纳米复合材料的室温拉伸行为及塑性变形机理[J]. 材料工程, 2020, 48(4): 108-115.
ZHANG Cong-yang, LI Zhi-rui, FANG Dong, et al. Room Temperature Tensile Behavior and Plastic Deformation Mechanism of SiC$_p$/AZ91D Magnesium Matrix Nanocomposites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(4): 108-115.

[9] RIQUELME A, RODRIGO P, MARIA D E R, et al. Evaluation of the Wear Resistance and Corrosion Be-

havior of Laser Cladding Al/SiC Metal Matrix Composite Coatings on ZE41 Magnesium Alloy[J]. Coatings, 2021, 11(6): 639-643.

[10] DENG K K, WANG X J, WU Y W, et al. Effect of Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of SiC_p/AZ91 Magnesium Matrix Composite[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 543(1): 158-163.

[11] 王翠菊, 孙雪飞, 聂凯波. 热挤压对双尺度 SiC_p/AZ91 镁基复合材料显微组织与拉伸性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 70-76.
WANG Cui-ju, SUN Xue-fei, NIE Kai-bo. Effect of Hot Extrusion on Microstructure and Tensile Properties of Two-Scale SiC_p/AZ91 Magnesium Matrix Composites[J]. Precision Forming Engineering, 2021, 13(3): 70-76.

[12] SHANG S J, DENG P H, CAI G Y, et al. Effect of Hot Extrusion Refinement of $Mg_{17}Al_{12}$ on Microstructure and Mechanical Properties of SiC_p/AZ91 Composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(11): 8-13.

[13] 张素卿, 苏倩, 于欢, 等. 超细 SiC 颗粒对球磨制备纳米晶 AZ91 镁合金组织及性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(6): 512-519.
ZHANG Su-qing, SU Qian, YU Huan, et al. Effect of Ultrafine SiC Particles on Microstructure and Properties of Nanocrystalline AZ91 Magnesium Alloy Prepared by Ball Milling[J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39(6): 512-519.

[14] RAM B, DEEPAK D, BALA N. Effect of Hot Extrusion on Microstructure and Tribological Behavior of Mg and Mg/SiC Metal Matrix Composite Produced by Stir Casting Route[J]. Materials Research Express, 2019, 6(6): 66555-66562.

[15] 白岩, 邓坤坤, 康金文. (Grp+SiC_p)/AZ91 镁基复合材料的力学及耐磨性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(7): 2251-2257.
BAI Yan, DENG Kun-kun, KANG Jin-wen. Mechanical and Wear Resistance of (Grp+SiC_p)/AZ91 Magnesium Matrix Composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(7): 2251-2257.

[16] SUWAS S, SURAPPA M K, KANNAN G, et al. Effect of Extrusion Ratio on the Microstructure, Texture and Mechanical Properties of (Mg/AZ91)(m)-SiC_p Composite[J]. Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Misrostructure and Processing, 2015, 624: 279-290.

[17] SHEN M J, YING W F, WANG X J, et al. Development of High Performance Magnesium Matrix Nanocomposites Using Nano-SiC Particulates as Reinforcement[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24: 3798-3807.

[18] NIE K B, DENG K K, WANG X J, et al. Microstructures and Mechanical Properties of SiC_p/AZ91 Magnesium Matrix Nanocomposites Processed by Multidirectional Forging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 622: 1018-1026.

[19] FAN D G, DENG K K, WANG C J, et al. Improved Workability of an Mg-5wt.%Zn Alloy by the Addition of Trace SiC_p[J]. Materials Today Communications, 2020, 6374(25): 101474-101581.

[20] 董成材, 周海涛, 李雪健, 等. SiC_p/AZ91 复合材料大口径管材的热挤压成形研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 53-58.
DONG Cheng-cai, ZHOU Hai-tao, LI Xue-jian, et al. Study on Hot Extrusion Forming of SiC_p/AZ91 Composite Large Diameter Pipe[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 53-58.

[21] 李怡然, 尧军平, 黄浩, 等. SiC/AZ91D 镁基复合材料单轴拉伸过程中裂纹萌生扩展机制[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(2): 185-196.
LI Yi-ran, YAO Jun-ping, HUANG Hao, et al. Crack Initiation and Propagation Mechanism of SiC/AZ91D Magnesium Matrix Composites during Uniaxial Tension[J]. Journal of Plastic Engineering, 2023, 30(2): 185-196.

[22] AKBRAIPANAH F, SABBAGHIAN M, FAKHAR N, et al. Influence of High Pressure Torsion on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ80/SiC Magnesium Matrix Composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 826: 141916.

[23] SHEN M J, YING T, CHEN F Y, et al. Effect of Micro- and Nano-SiC Particulate Reinforcements in Magnesium-based Metal Matrix Composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25: 2222-2229.

[24] LIN S P, NIE Z R, HUANG H, et al. Annealing Behavior of a Modified 5083 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1607-1612.

[25] MIAO Y, LIU X B, XING L Y, et al. Corrosion and Mechanical Behavior of the As-Cast and Solid- Solution-Treated AM50 Magnesium Alloy in Different Media[J]. Materials, 2023,16(6): 2406-2411.

责任编辑：蒋红晨