

[文章编号] 1004-0609(2000)05-0680-04

挤压变形对 SiC_w/ZK51A 镁基复合材料组织和性能的影响^①

胡连喜¹, 李小明¹, 王尔德¹, 丛 飞²

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 北京卫星制造厂, 北京 100080)

[摘 要] 利用透射电镜、扫描电镜和拉伸试验等实验方法, 研究了铸态和挤压态 SiC_w/ZK51A 镁基复合材料的组织与力学性能。结果表明, 挤压铸造 SiC_w/ZK51A 复合材料经等温热挤压后, 其力学性能有很大提高。主要原因是: 挤压变形能消除铸造缺陷, 增强 SiC 晶须与 ZK51A 镁合金基体的界面结合, 使复合材料中 SiC 晶须发生定向分布, 沿挤压方向呈准一维分布特征, 晶须的增强承载能力得到充分发挥。

[关键词] SiC 晶须; ZK51A 镁合金; 金属基复合材料; 挤压; 组织性能

[中图分类号] TG 376.2

[文献标识码] A

在现有金属结构材料中, 镁合金的密度最小。用它制作结构零件, 可大大降低构件质量, 实现产品轻量化。在航空航天、汽车等领域, 其应用前景广阔。但是, 镁合金的力学性能相对较低, 使它的应用范围目前还受到很大限制。因此, 采用陶瓷粒子、晶须或纤维进行增强, 提高镁合金材料的力学性能, 已成为扩大其应用范围的一条重要途径。

目前, 已报道的制备镁基复合材料的方法主要有粉末冶金^[1, 2]、搅拌复合铸造^[3, 4]和挤压铸造^[5~7]等。其中, 挤压铸造法被认为是一种简便有效的方法。但是, 常规的挤压铸造, 是在高压下迫使液态基体金属渗入增强材料预制体, 它容易使液态金属产生紊流流动, 发生氧化或卷入封存气体。对于极其活泼的镁合金, 该问题将更为突出。为克服传统挤压铸造工艺的上述不足, 作者提出了低压浸渗复合-高压凝固成型的二步挤压铸造法^[8], 制备了 SiC_w/ZK51A 复合材料, 取得了良好效果。本文进一步探讨挤压变形对该工艺制备的 SiC_w/ZK51A 复合材料组织和性能的影响。

1 试验方法

本试验所用基体材料为工业用 ZK51A 镁合金, 其标准成分为 Mg-4.6Zn-0.7Zr (质量分数, %)。增强材料为 β-SiC 晶须, 其直径为 0.3~1.0 μm, 长度为 15~50 μm。SiC_w/ZK51A 复合材料挤压坯料为 d40mm×50mm 圆柱体, 采用二步挤压铸造法制备, 参考已有相关研究^[8~10], 主要工艺参数选择

为: 模具与晶须预制体预热温度 400~450 °C, 镁合金液浇注温度 760 °C, 浸渗压力 0.4~0.5 MPa, 浸渗时间 12~15 s, 凝固成型压力 100 MPa, 保压时间 60 s。SiC_w/ZK51A 复合材料的挤压试验在等温条件下进行, 挤压设备为 1000 kN 液压机, 挤压坯料与模具的加热温度为 360 °C, 挤压比为 16:1。

SiC_w/ZK51A 复合材料的力学性能通过室温拉伸试验测定, 拉伸试样为 d5mm 标准圆柱试样, 拉伸方向与挤压方向一致, 拉伸时试样中段置引伸计, 其标距为 15 mm, 拉伸速度为 0.2 mm/s。复合材料的微观组织在 EM430 透射电镜上进行观察, 电镜薄膜样品采用离子减薄法制备。复合材料中 SiC 晶须的尺寸与分布特征及拉伸试样断口形貌, 采用扫描电镜观察。

2 试验结果与分析

图 1 表示铸态与挤压态 SiC_w/ZK51A 复合材料中晶须的分布形态与尺寸特征, 可见, 复合材料中 SiC 晶须的分布形态在材料挤压前与挤压后有很大差异。在铸态 SiC_w/ZK51A 复合材料中, 晶须分布形态基本保持预制体时的特征, 呈三维无序状态, 晶须相互交叉搭接现象非常明显; 经挤压后, SiC 晶须产生明显定向排列, 沿挤压方向呈准一维分布。从晶须的尺寸特征来看, 铸态材料中晶须长度较大, 而挤压态材料中晶须长度相对较小, 但挤压后绝大多数晶须长径比仍在 10~15 以上。挤压态材料中晶须发生定向分布, 是由于挤压前排列位向

① [收稿日期] 1999-09-14; [修订日期] 2000-02-01

[作者简介] 胡连喜(1961-), 男, 教授, 博士。

偏离挤压方向的晶须在挤压过程中为适应金属基体的塑性流动, 而使得其排列位向朝挤压方向偏转的结果; 挤压后晶须长度有所减小, 是挤压前相互交叉搭接或其排列位向偏离挤压方向较大的晶须在挤压过程中不适应金属基体的塑性流动而被折断所致。由于挤压后 SiC_w/ZK51A 复合材料中 SiC 晶须产生明显定向分布, 并且晶须仍具有较大长径比, 根据复合材料载荷传递增强理论^[1]可知, 这将有利于充分发挥晶须的增强承载作用, 提高复合材料的弹性模量和强度性能。

图 2 是挤压态 SiC_w/ZK51A 复合材料的透射电镜照片。经透射电镜观察, 发现 SiC 晶须与 ZK51A 镁合金基体的界面结合良好, 未发现任何界面脱粘缺陷。这表明在本试验条件下, 挤压变形对该复合材料的界面结合没有不良影响。事实上, 由于挤压时材料处于三向压应力状态, 且变形温度较高, 将有利于晶须/基体界面机械结合强度增加和材料中缺陷的愈合, 这从本文后面给出的拉伸断口形貌可得到印证。此外, 本研究对 SiC_w/ZK51A 复合材料进行透射电镜观察, 未发现 ZK51A 镁合金基体中

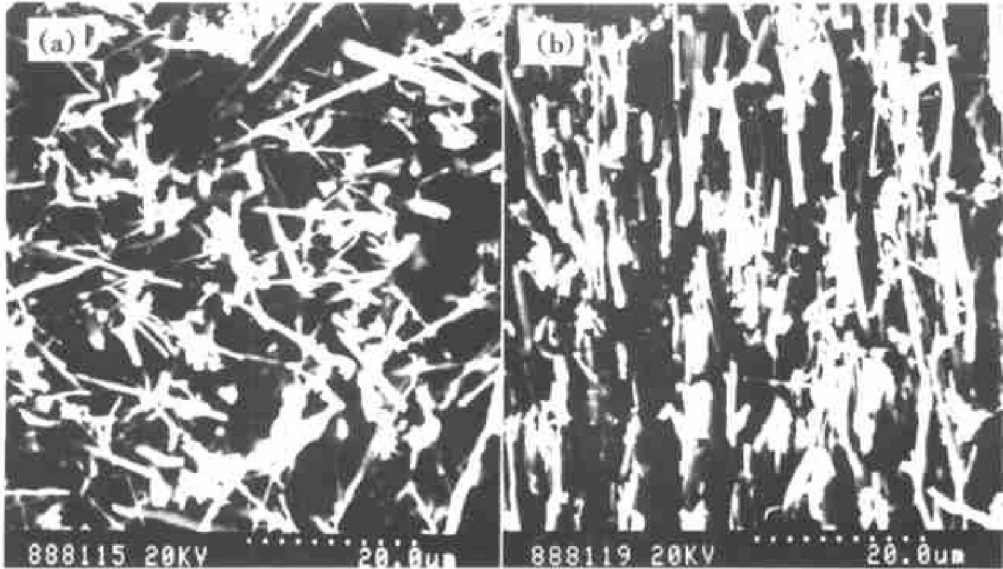


图 1 SiC 晶须的分布形态与尺寸特征
Fig. 1 Distribution and size feature of SiC whiskers
(a) —As cast; (b) —As extruded

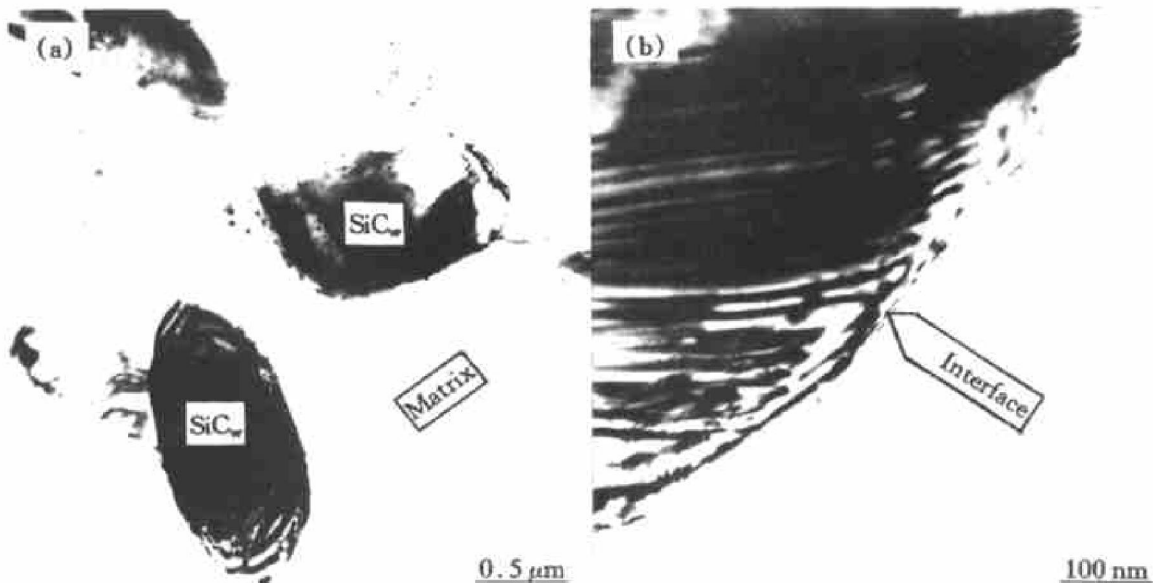


图 2 SiC_w/ZK51A 复合材料透射电镜照片
Fig. 2 TEM photos of SiC_w/ZK51A composite
(a) —Matrix and whiskers; (b) —Interface

有任何类似于其它复合材料中的高密度位错存在。这表明 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料的强化机制主要是 SiC 晶须的承载作用。因此,充分发挥晶须的承载作用,是提高该复合材料力学性能的关键。

表 1 列出了铸态与挤压态 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料的室温力学性能数据。可见,与 ZK51A 基体合金相比, $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料的力学性能指标(E , σ_s , σ_b)均有大幅度提高, SiC 晶须的增强效果非常明显。在本试验范围内,一方面, SiC 晶须的强化效应随晶须加入量增加而相应提高;另一方面, SiC 晶须加入量相同时,挤压态复合材料力学性能又明显高于铸态复合材料。这表明 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料力学性能不仅取决于 SiC 晶须加入量,而且与晶须在基体中的分布形态密切相关。由于挤压变形后,晶须沿挤压方向呈准一维分布特征,同时仍保持了较大长径比,因而其增强承载作用得到充分发挥,复合材料弹性模量和强度性能大幅度提高。

图 3 是 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料室温拉伸断口的扫描电镜照片。可以清楚地看到,挤压态复合材料中晶须分布均匀,方向性非常明显,沿挤压方向呈准一维分布;铸态复合材料中晶须分布则呈无规则状态,且晶须分布均匀性也相对较差,能观察到晶须的相互交叉搭接与晶须聚集现象。挤压态 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料拉伸断口为韧窝断口,韧窝中心多为晶须露头,未发现晶须的拔出或晶须/基体界面脱粘现象,其断裂特征是:晶须受力达强度极限后断裂而形成裂纹源,裂纹源在基体中扩展形成孔洞,孔洞发展连成一片导致材料断裂。这表明增强

表 1 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ composites

Material	State	φ_f	E/GPa	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$
ZK51A	①	—	43.7	165.8	223.6	9.80
$\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$	①	0.10	54.6	237.3	291.7	1.49
	②	0.10	62.3	280.5	338.5	1.86
	①	0.20	65.1	308.7	356.2	0.91
	②	0.20	81.6	379.8	430.3	1.18

①— As cast ; ②— As extruded

晶须与基体结合良好,通过基体/晶须之间的载荷传递,晶须的增强承载作用得到了充分发挥。铸态 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料的拉伸断口上韧窝较少,能观察到晶须(尤其是排列位向与拉伸方向垂直的晶须)与基体的脱粘现象,表明晶须/基体界面结合状况尚不如挤压态材料。因此,该材料的断裂过程可能是:在相对较低的应力水平下,某些晶须与基体的脱粘导致较早产生尺寸较大的裂纹源,大尺寸裂纹源的快速扩展使材料相对较早发生断裂。所以,铸态 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料经等温挤压变形后不仅弹性模量与强度性能大大提高,而且延伸率也有提高。

3 结论

1) $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 复合材料经 $360\text{ }^\circ\text{C}$ 等温挤压变形后,晶须产生明显定向排列,沿挤压方向呈准一维分布特征,晶须分布均匀性也得到改善,晶须长

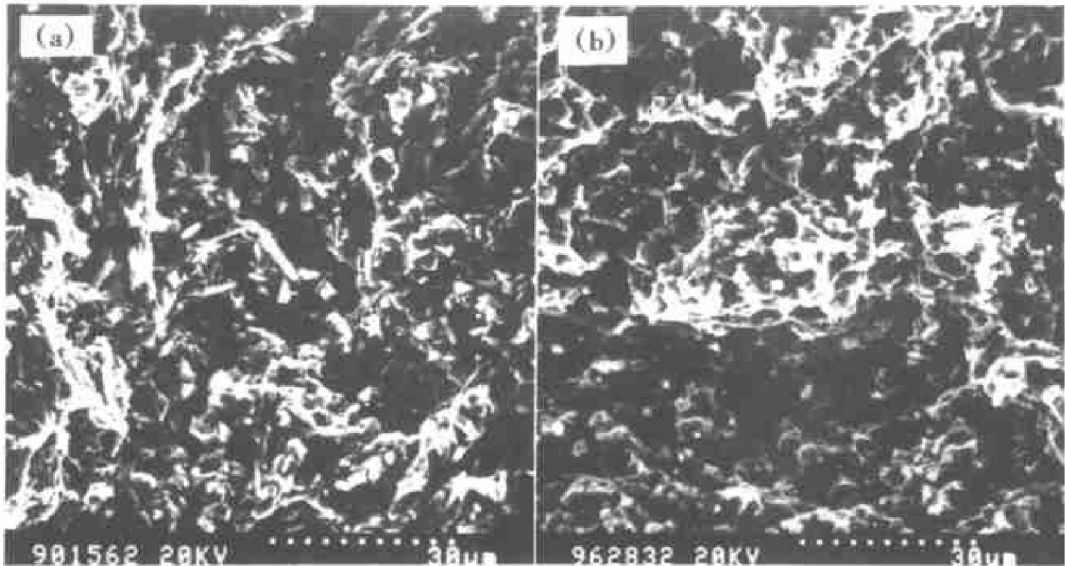


图 3 拉伸断口扫描电镜照片

Fig. 3 SEM photos of fractured tensile specimens
(a) — As cast ; (b) — As extruded

度虽有所降低,但仍具有较大长径比。

2) 等温挤压变形有利于增强 SiC_w/ZK51A 复合材料的晶须/基体界面结合,消除界面脱粘和晶须相互交叉搭接等缺陷,使复合材料受力时晶须/基体间能更有效进行载荷传递。

3) 由于挤压变形的上述作用,使 SiC_w/ZK51A 复合材料经等温挤压变形后的力学性能,尤其是弹性模量和强度性能与铸态时相比有很大提高,晶须的增强潜力得到更加有效的发挥。

[REFERENCES]

- [1] Mordike B L, et al. Powder metallurgical preparation of composite materials [J]. J Trans Powder Metall Assoc India, 1990, 17(12): 7.
- [2] Krishnadev M R, Angers R, Nair K C G, et al. The structure and properties of magnesium-matrix composites produced by squeeze casting and extrusion [J]. JOM, 1993(8): 52.
- [3] Laurent V, Jarry P, Regazzoni G, et al. Processing-microstructure relationships in compocast magnesium/SiC [J]. J Mater Sci, 1992, 27: 4447.
- [4] Tissier A, Apelian D and Regazzoni G. Magnesium rheocasting: a study of processing-microstructure interactions [J]. J Mater Sci, 1990, 25: 1184.
- [5] Nakagawa M, Wada T, Kamado S, et al. Manufacturing conditions and mechanical properties of alumina short fiber/AZ91D magnesium alloy composites [J]. J Japan Inst Light Metals, 1995, 45(1): 21.
- [6] CHANG Si-young, et al. Mechanical properties and fracture process of SiC_w/Mg composites produced by squeeze casting and extrusion [J]. Materials Transactions, JIM, 1997, 38(1): 18.
- [7] Takahiro S, Hiroshi K, Shigeharu K, et al. Structure and mechanical properties of hybrid Mg-Zn-Ca alloy composites reinforced with δ -Al₂O₃ short fiber and 9Al₂O₃ • 2B₂O₃ [J]. J Japan Inst Light Metals, 1996, 46(12): 650.
- [8] HU Lian-xi and WANG Er-de. Properties of SiC_w/ZK51A magnesium matrix composite by two-step squeeze casting [J]. Mater Sci and Eng A (accepted for publication).
- [9] HU Lian-xi, YANG Yi-wen and LUO Shou-jing. Determination of the threshold pressure for infiltration of liquid aluminium into alumina short fiber preform [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(4): 133.
- [10] HU Lian-xi(胡连喜), YANG Yi-wen, LUO Shou-jing, et al. Investigation on kinetics of infiltration of liquid aluminium into alumina fibrous preform [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(suppl.1): 75.
- [11] Piggott M R. Load-bearing fiber composites [J]. Pergamon Press Ltd, 1980.

Extrusion deformation on microstructure and mechanical properties of SiC_w/ZK51A magnesium matrix composite

HU Lian-xi¹, LI Xiao-qiang¹, WANG Er-de¹, CONG Fei²

(1. School of Materials Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China;

2. Beijing Satellite Manufacturing Plant, Beijing 100080, P. R. China)

[Abstract] The microstructure, fracture morphology, and mechanical properties of both squeeze cast and subsequently isothermally extruded SiC_w/ZK51A magnesium matrix composite were experimentally investigated by means of transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, and tension test respectively. The results show that the as-extruded composite possesses much higher mechanical properties than the as-cast composite, especially modulus of elasticity and mechanical strength. The main reason for this lies in that the extrusion deformation not only helps to improve the whisker/matrix interfacial bonding and to eliminate casting defects, but also makes the SiC whiskers tend to align uniformly and quasi-unidirectionally in the extrusion direction, leading to excellent reinforcing effect by load transfer.

[Key words] SiC whisker; ZK51A magnesium alloy; metal matrix composite; extrusion; microstructure and mechanical properties

(编辑 彭超群)