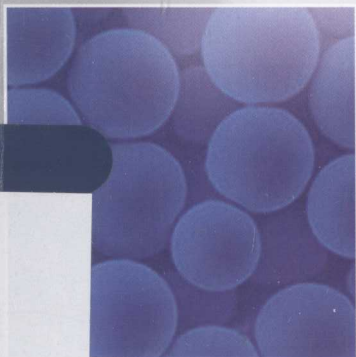


颗粒增强复合材料制备 与触变塑性成形



■ 闫 洪 张发云 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014008941

TB33
91

内容简介

颗粒增强复合材料制备 与触变塑性成形

闫 洪 张发云 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1696032

TB33

91

158800310

内 容 简 介

本书对作者近年来研究和开发的颗粒增强复合材料制备与触变塑性成形技术做了系统的介绍,内容包括颗粒增强复合材料的制备,颗粒增强复合材料的性能表征,颗粒增强复合材料半固态坯料制备,颗粒增强复合材料的二次重熔,颗粒增强复合材料触变压缩变形力学行为,颗粒增强复合材料触变塑性成形的本构关系建立,颗粒增强复合材料触变塑性成形的数值模拟。

本书可供高等院校师生、科研院所科研人员以及从事复合材料加工的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

颗粒增强复合材料制备与触变塑性成形/闫洪,张发云

著. —北京:国防工业出版社,2013. 10

ISBN 978-7-118-08958-5

I. ①颗… II. ①闫… ②张… III. ①颗粒强化—复合材料—材料制备②颗粒强化—复合材料—可塑成型
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 222123 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5½ 字数 134 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

颗粒增强金属基复合材料与基体合金相比,具有较高的比强度和比刚度,蠕变性能好,低热膨胀系数,低密度,良好的尺寸稳定性和导热性等优异的力学性能,在航空航天、汽车、电子工业、光学仪器制造、国防等领域中具有广阔的应用前景。

目前,颗粒增强金属基复合材料的主要制备方法为粉末冶金、压力浸渗、搅拌铸造等。粉末冶金法制备的复合材料性能优异,但其工艺流程长、工序复杂、金属粉末成本高,增强相与粉末混合易产生爆炸,同时制品的尺寸也受到限制。压力浸渗法是将颗粒增强相制成预制块,然后在压力作用下将熔体渗入预制件间隙中。该工艺存在的问题是预制块在压力作用下易变形,制得的复合材料微观结构不均匀,晶粒尺寸也比较大,有害界面反应难以控制。搅拌铸造法是将颗粒直接加入到基体金属熔体中,通过一定方式的搅拌使颗粒均匀地分散在金属熔体中并与之复合,然后浇注成锭坯、铸件等。此法对设备要求低、工艺简单、成本低,便于实现工业化生产,成本低。但在高速搅拌的漩涡中不可避免有气体和夹杂物混入,易出现偏析和“结团”现象,所以制成的复合材料性能往往不甚理想。颗粒的粒度不能太小,加入量也有限制。因此需要发展更好的制备方法。搅熔铸造法能较好地解决上述问题。该方法是把基体金属加热到液相线与固相线之间的适当温度进行搅拌。利用半固态熔体的触变性,在黏度适度的液固两相熔体中,边搅拌边加入颗粒等增强物。由于两相熔体中固相粒子的夹带和包裹作用,增强物与金属熔体润湿性良好,且分布均匀,并可增加增强物的复合量。然后将其升温到液相温度进行浇铸,就可得到增强物分散均匀的金属基复合材料。

颗粒增强金属基复合材料具有优良的高温性能和热稳定性,还有较高的耐磨性能,但却大大地降低了塑性,不利于对其进行二次塑性加工,成形复杂零件。随着半固态成形技术和理论的不断成熟与发展,为金属基复合材料塑性成形开拓了新的发展方向,其中触变塑性成形方法最具有优越性。触变塑性成形是指将已制备好的具有半固态金属组织的锭坯切成所需长度,用二次加热装置再加热到半固态状态,经锻造、挤压和轧制等变形方式成形为所需零件。与传统塑性加工相比,变形抗力低,能耗和成本低,对于复杂的零件可一次成形,提高生产率。

将半固态金属成形方法应用于复合材料制备及成形之中,不仅可以丰富复合材料的研究领域,而且对复合材料在工业上的应用具有重要指导意义。本书以复合材料 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 和 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{AZ61}$ 等为例,论述了颗粒增强复合材料的制备与触变塑性成形的技术理论。

全书共 8 章。第 1 章绪论,介绍复合材料的定义、分类及其制备方法,以及半固态技术的研究现状和发展趋势;第 2 章颗粒增强复合材料的制备,探讨了三种搅拌铸造工艺对颗粒增强复合材料微观组织的影响,并预测了 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料的力学性能;第 3 章颗粒增强复合材料的性能表征,分析不同条件下 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料的阻尼和蠕变性能;第 4 章颗粒增强复合材料半固态坯料制备,分别采用半固态等温热处理法和机械搅拌法制备了 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料、 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{AZ61}$ 复合材料和 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{Y112}$ 复合材料的半固态坯料,并研究了复合材料的半固态组织演变过程和机理;第 5 章颗粒增强复合材料的二次重熔,探讨了不同工艺参数对 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{AZ61}$ 复合材料二次重熔组织的影响规律;第 6 章颗粒增强复合材料触变压缩变形力学行为,主要介绍 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料触变压缩变形力学行为和触变压缩变形机制;第 7 章颗粒增强复合材料触变塑性成形的本构关系建立,阐述了 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料和 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{AZ61}$ 复合材料的触变塑性成形本构模型的建立过程;第 8 章颗粒增强复合材料触变塑性成形的数值模拟,采用第 7 章建立的复合材料触变塑性成形本构

模型,分别对 $\text{SiC}_p/\text{AZ61}$ 复合材料和 $\text{B}_4\text{C}_p/\text{AZ61}$ 复合材料的触变塑性成形过程进行了数值模拟,揭示了复合材料中间轴螺塞触变锻造和圆杆触变挤压的成形过程中的变形规律。

在撰写本书过程中,始终得到了课题组南昌大学陈国香教授、揭小平教授等,作者指导的博士生周冰峰、硕士生王建金、胡强、郑志刚、胡望杰等的帮助,在此表示衷心的感谢。同时感谢国家自然科学基金等项目的支持。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

于南昌大学

2013年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料的定义与分类	1
1.2 常用基体材料	2
1.3 颗粒增强体材料	2
1.4 颗粒增强金属基复合材料的制备方法	2
1.5 半固态成形技术及其成形方法	7
1.6 半固态成形的应用现状及发展趋势	12
参考文献	15
第 2 章 颗粒增强复合材料的制备	18
2.1 复合材料的制备方法	18
2.2 不同制备工艺对 SiC _p /AZ61 复合材料 微观组织的影响	19
2.2.1 全液态搅拌铸造法对复合材料 微观组织的影响	19
2.2.2 半固态搅拌铸造法对复合材料 微观组织的影响	20
2.2.3 搅熔铸造法对复合材料微观组 织的影响	21
2.2.4 不同搅拌工艺对复合材料形成机制的 影响因素分析	22
2.3 正交试验法对 SiC _p /AZ61 复合 材料制备工艺的优化	26

2.3.1	试验方案确定	26
2.3.2	试验结果与分析	26
2.4	BP神经网络对 SiC _P /AZ61 复合材料的力学性能预测	31
2.4.1	BP 网络	31
2.4.2	BP 网络的学习算法	32
2.4.3	SiC _P /AZ61 复合材料的力学性能预测	34
	参考文献	39
第 3 章	颗粒增强复合材料的性能表征	40
3.1	SiC _P /AZ61 复合材料的阻尼性能	40
3.1.1	温度对材料阻尼性能的影响	40
3.1.2	应变振幅对材料阻尼性能的影响	41
3.1.3	频率对复合材料阻尼性能的影响	42
3.1.4	SiC 增强颗粒含量对材料阻尼性能的影响	45
3.1.5	阻尼机制分析	46
3.2	SiC _P /AZ61 复合材料高温蠕变性能	50
3.2.1	恒定载荷、恒定温度下复合材料的蠕变性能	50
3.2.2	增强相 SiC 颗粒体积分数对复合材料蠕变性能的影响	52
3.2.3	复合材料的蠕变变形机理分析	52
	参考文献	55
第 4 章	颗粒增强复合材料半固态坯料制备	57
4.1	半固态等温热处理法制备 SiC _P /AZ61 复合材料半固态坯料	57
4.1.1	加热温度工艺	57
4.1.2	加热温度和保温时间对复合材料等温热处理组织的影响	58

4.1.3	SiC 颗粒体积分数对 SiC _P /AZ61 复合材料等 温热处理组织的影响	66
4.1.4	SiC _P /AZ61 复合材料与 AZ61 基体合金的 晶粒粗化长大趋势分析	69
4.1.5	复合材料等温热处理组织的演变机理	71
4.2	机械搅拌法制备 B ₄ C _P /AZ61 复合材料半 固态坯料	72
4.2.1	制备工艺	72
4.2.2	不同粒度和体积分数对复合材料 半固态组织的影响	72
4.2.3	机械搅拌法制备 B ₄ C _P /AZ61 复合材料半固态 组织的机理分析	75
4.3	机械搅拌法制备 B ₄ C _P /Y112 复合材料半 固态坯料	76
4.3.1	制备工艺	76
4.3.2	相同体积分数、不同颗粒度的 B ₄ C 颗粒对 复合材料微观组织的影响	77
4.3.3	不同体积分数、相同颗粒度的 B ₄ C 颗粒对 复合材料微观组织的影响	78
4.3.4	机械搅拌法制备 B ₄ C _P /Y112 复合材料半固态 组织的机理分析	79
	参考文献	80
第 5 章	颗粒增强复合材料的二次重熔	82
5.1	复合材料半固态坯料制备方法及二次重熔工艺	82
5.2	工艺参数对 B ₄ C _P /AZ61 复合材料二次重熔 组织的影响	83
5.2.1	复合材料在 580℃ 和 585℃ 的重熔组织演变	83
5.2.2	复合材料在 590℃ 和 595℃ 的二次重熔组织	86

5.2.3 复合材料在 600℃和 605℃的二次重熔组织	89
5.2.4 复合材料在 610℃的二次重熔组织	92
5.3 B ₄ C _P /AZ61 复合材料重熔组织演变机理	93
参考文献	94
第 6 章 颗粒增强复合材料触变压缩变形力学行为	96
SiC _P /AZ61 复合材料触变压缩变形力学行为	96
参考文献	112
第 7 章 颗粒增强复合材料触变塑性成形本构关系的建立	114
7.1 SiC _P /AZ61 复合材料触变塑性成形本构模型的建立	114
7.1.1 本构模型的建立	114
7.1.2 本构模型参数的求解	118
7.1.3 SiC _P /AZ61 复合材料触变塑性成形本构模型的回归验证	122
7.2 B ₄ C _P /AZ61 复合材料触变塑性成形本构模型的建立	123
7.2.1 本构模型的建立	123
7.2.2 本构模型参数的求解	123
7.2.3 B ₄ C _P /AZ61 复合材料触变塑性成形本构模型的回归验证	126
参考文献	127
第 8 章 颗粒增强复合材料触变塑性成形数值模拟	130
8.1 触变塑性成形数值模拟的基本假设和基本方程	130
8.1.1 基本假设	130
8.1.2 基本方程	131

8.2	SiC _P /AZ61 复合材料触变锻造数值模拟	133
8.2.1	模拟条件	133
8.2.2	模拟结果及分析	135
8.3	B ₄ C _P /AZ61 复合材料触变锻造数值模拟	144
8.4	SiC _P /AZ61 复合材料触变挤压数值模拟	147
8.4.1	模拟条件	147
8.4.2	成形过程模拟结果及分析	148
8.5	颗粒增强复合材料触变锻造试验	157
8.5.1	试验装置	157
8.5.2	SiC _P /AZ61 复合材料触变锻造	157
8.5.3	B ₄ C _P /AZ61 复合材料触变锻造	161
8.5.4	SiC _P /AZ61 复合材料触变挤压	162
	参考文献	164

第 1 章 绪 论

材料是社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。近年来,随着科学技术的飞速发展,对材料性能的要求越来越高。在许多领域,传统的单一材料已越来越不能满足实际需要。复合材料的出现是金属、陶瓷、高分子等单质材料发展的必然结果,是各种单质材料研制和使用经验的综合,也是单质材料技术的升华。复合材料的兴起与发展极大地促进了现代工业的进步,也为材料科学与工程学的持续发展注入了强大的生机与活力^[1-3]。

1.1 复合材料的定义与分类

1. 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。这些具有不同物理和化学性质的物质,以微观、细观或宏观等不同的结构尺度与层次,经过复杂的空间组合而形成的一个材料系统。复合材料的组分材料虽然保持其相对独立性,但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单加和,而是有着重要的改变。复合材料一般由基体材料与增强体材料组成。

2. 复合材料的分类

一般来说,复合材料有以下三种分类方法。

(1) 按基体材料的不同:可分为聚合物基、金属基、陶瓷基、塑料基、水泥基等复合材料。

(2) 按增强相形状的不同:可分为颗粒、纤维和层状等复合

材料。

(3) 根据其用途的不同:可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。

1.2 常用基体材料

复合材料的基体材料通常分为金属和非金属两大类。金属基体常用的有铝、镁、铜、钛及其合金等;非金属基体常用有合成树脂、橡胶、陶瓷、石墨和碳等。

1.3 颗粒增强体材料

颗粒增强体材料一般分为外加和内生两种,通常为具有高强度、高弹性模量,耐热、耐磨性好,耐高温的陶瓷、石墨等非金属颗粒,如 SiC 、 B_4C 、 Al_2O_3 、 TiC 、 TiB_2 、 BN 、 AlN 、 Si_3N_4 、 NbN 、 SiO_2 、 VC 、 WC 、 ZrC 、 ZrO_2 、 ZrB_2 、 MgO 、 MoS_2 、 Mo_2C 、 MoSi_2 、石墨和细金刚石等。

1.4 颗粒增强金属基复合材料的制备方法

颗粒增强金属基复合材料的性能、特点、应用和制造成本等在很大的程度上取决于其制备工艺和方法^[4-6]。制备颗粒增强金属基复合材料的方法很多,在制备过程中合金基体可以是液相,也可以是固体粉末;增强相可以直接外加引入,也可以在基体中原位合成。目前,颗粒增强金属基复合材料的制备工艺和方法可分为搅拌铸造法、粉末冶金法、原位生成法、挤压铸造法和喷射成形法等。

1. 搅拌铸造法

搅拌铸造法(图 1-1)制备金属基复合材料最早起源于 1968

年,由 S. Ray 在熔化的铝液中加入氧化铝,并通过搅拌含有陶瓷粉末的熔化状态的铝合金而来的^[7]。搅拌铸造法根据铸造时加热温度的不同可分为 3 种:①全液态搅拌铸造法。即在液相线以上的液态金属中加入增强体,搅拌一定时间后浇铸;②半固态搅拌铸造法。即在固液相温度之间加入增强体搅拌一定时间后浇铸;③搅熔铸造法。即在固液相温度之间加入增强体,搅拌一定时间后,升温至基体合金液相线温度以上后浇铸。搅拌铸造法的特点:工艺简单,操作方便,可以生产大体积的复合材料,设备投入少,生产成本低,适宜大规模生产。但加入的增强相体积分数受到限制,一般不超过 20%,并且搅拌后产生的负压使复合材料很容易吸气而形成气孔,同时,增强颗粒与基体合金的密度不同易造成颗粒沉积和微细颗粒的团聚等现象。谭彦显^[8]研究了不同铸造工艺条件下的 SiC_p/Mg(AZ81)复合材料的微观组织结构,并对其气孔率进行测定。结果表明:搅拌温度、颗粒体积分数和颗粒大小对气孔率有影响,搅拌温度越高和增强颗粒体积分数增加,气孔率上升;当增强颗粒尺寸一定时,气孔率随颗粒体积分数的增加而增加。高俊江^[9]采用搅拌铸造法制备了短碳纤维增强 2024 铝基复合材料,结果表明:碳纤维分散均匀,与基体结合良好;短碳纤维增强铝基复合材料铸态组织的气孔率比较高,密度和致密性相对较低。孙小岚^[10]采用搅拌铸造法制备出短碳纤维增强铝基复合材料,在制备过程中,采用上平下斜浆叶进行搅拌,既可避免卷入大量气体,又可使碳纤维分散均匀。



图 1-1 搅拌铸造法流程图

2. 粉末冶金法

粉末冶金法(图 1-2)是指将基体金属合金与增强体粉末混合

均匀后在模中冷压,除气后在真空中加热至固液两相区进行热压,最后烧结制得金属基复合材料的方法^[11]。粉末冶金法特点:可以制备出增强相体积分数非常高的金属基复合材料,并且不受基体合金种类与增强体类型的限制,通过粉末混合工艺可以使增强相在金属基体中达到分布均匀。但此工艺设备复杂、成本偏高,不易制备形状复杂的零件,而且在生产过程中存在粉末燃烧和爆炸等危险,不易进行大规模工业化生产,特别是对于制备体积偏大的金属基复合材料,粉末冶金法不是一种理想的制备方法。Z. Trojanova 等^[12]采用粉末冶金方法制备了纳米增强颗粒的镁基复合材料,较大地提高其力学性能,材料经 330℃热挤压后宏观组织清晰,材料的蠕变性能也得到相应提高;郗雨林^[13]研究认为采用合适的烘粉处理后,Mg 粉的新旧程度对复合材料的性能无明显影响,热压工序可以使镁基复合材料的性能更趋稳定。并且采用粉末冶金法制备了 SiC 颗粒及晶须增强 MB15 镁基复合材料的试样,结果表明:SiC 颗粒和晶须能显著提高 MB15 镁合金的室温强度和弹性模量,且 SiC 晶须的作用比 SiC 颗粒更明显;盛绍顶^[14]等人利用快速凝固粉末冶金法制备了 Si 增强 AZ91 镁基复合材料,获得的复合材料中增强相分布均匀,并在挤压过程中增强相与基体发生了反应,形成反应层,反应层中存在高温相 Mg_2Si ,使得复合材料表现出较好的高温性能;杜建全^[15]等人采用粉末冶金法制备了 SiC 体积分数分别为 20%、35%、50% 的 SiC_P/Cu 复合材料,结果表明:随着 SiC_P 含量升高,偏聚现象趋于明显,且 SiC_P/Cu 复合材料热导率变小。

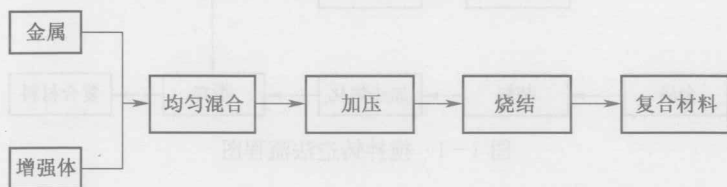


图 1-2 粉末冶金法流程图

3. 原位生成法

原位生成法^[16]指增强材料在复合材料制造过程中,在基体中自己生成和生长的方法,增强材料以共晶的形式从基体中凝固析出,也可与加入的相应元素发生反应,或者合金熔体中的某种组分与加入的元素或化合物之间的反应生成。前者得到定向凝固共晶复合材料,后者得到反应自生成复合材料。原位生成复合材料的特点:增强体是从金属基体中原位形核、长大的热力学稳定相,因此,增强体表面无污染,界面结合强度高。而且,原位反应产生的增强相颗粒尺寸细小、分布均匀,基体与增强材料间相容性好,界面润湿性好,不生成有害的反应物,无须对增强体进行合成、预处理和加入等工序。因此,采用该技术制备的复合材料的综合性能比较高,生产工艺简单,成本较低。从液态金属基体中原位形成增强体的工艺,可用铸造方法制备形状复杂、尺寸较大的净近成形零件。牛玉超^[17]等研究认为采用石墨坩埚、电磁搅拌和铝熔体中加入镁的工艺流程,可实现 Al_2O_3 颗粒和铝熔体的有效复合,进而制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{P})/\text{ZA35}$ 锌基复合材料,与基体合金 ZA35 相比,复合材料的耐磨性能有了明显的提高。崔峰^[18]等人以 Al 熔液为载体,采用原位反应生成形状规则、尺寸细小的 TiB_2 颗粒相,再将 TiB_2 颗粒传递到 ZA27 合金中,形成 TiB_2 颗粒增强的 ZA27 复合材料。 TiB_2 颗粒在 ZA27 复合材料中,分布均匀,平均直径在 $3\mu\text{m}$ 以下;并随着 TiB_2 颗粒含量增加,复合材料的抗拉强度、硬度明显提高。黄赞军^[19]等研究了原位反应中反应物配比中随着稀释剂铝量的增多,熔体内的自蔓燃反应启动得越慢,剧烈程度降低,但是反应产物的分布朝不均匀方向变化;熔体温度越高,反应启动得越快,而且剧烈;稀释剂镁粉的添加可以极大地缩短反应诱导时间,随着添加量的增加缩短更多。胡勇^[20,21]等人采用原位合成技术制备 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{AM60}$ 复合材料,获得了短棒状及中国汉字状的 Mg_2Si 相,当 Si 含量较高时,中国汉字状的 Mg_2Si 相消失,变成不规则的块状;对复合材料在半固态温度区间进行机械搅

拌,研究发现,搅拌温度越高,搅拌速度越大,固相颗粒越细小、均匀和圆整;随搅拌时间的延长,固相颗粒先变得细小、均匀和圆整,然后长大。张果^[22]利用原位生成法制备出 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Mg}-\text{Sn}$ 复合材料。通过调整 Si 和 Sn 含量,获得的复合材料组织致密、气孔夹杂较少。

4. 挤压铸造法

尽管挤压铸造的概念可以追溯到 1800 年左右^[23],但是第一次挤压铸造试验出现在 1931 年^[24]。挤压铸造法是制造金属基复合材料较理想的途径,此工艺先将增强体制成预成型体,放入固定模型内预热至一定温度,浇入金属熔体,将模具压下并加压,迅速冷却得到所需的复合材料。挤压铸造法特点:可以制备出增强相非常高体积分数的(40%~50%)的金属基复合材料,由于在高压下凝固,既改善了金属熔体的浸润性,又消除了气孔等缺陷,因此,挤压铸造法制造金属基复合材料质量较好,可以一次成形。贾玉玺^[25]认为挤压加工有助于提高 SiC 颗粒分布的均匀性,挤压棒料中的 SiC 颗粒在挤压方向上定向、有序排列;挤压加工可以消除 SiC/Al 复合材料中的疏松、气孔等缺陷,大幅度提高复合材料的强度和塑性。然而,在制备金属基复合材料时,应该适当地控制挤压力的大小,挤压力过大会引起金属熔体产生湍流,产生内部气泡和基体氧化。也会破坏复合材料的增强相,降低其机械性能。因此,分两步的挤压铸造(低压力的渗透和基体合金高压力的凝固)成功地制备了一种 $\text{SiC}_w/\text{ZK51A}$ 镁基复合材料^[26]。修子扬^[27]等人采用挤压铸造法制备了一种体积分数为 45%、粒径分别为 $10\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的颗粒增强金属基(SiC_p/Al)复合材料,经过 T6 热处理后,获得了弯曲强度与热物理性能较好的空间用复合材料。周洋^[28]采用搅拌铸造法制备了 $\text{SiC}_p/\text{EW61}$ 复合材料,获得的铸态复合材料中 SiC_p 主要沿晶界分布, SiC_p 质量分数越大、粒度越小,越容易发生团聚;且 SiC_p 与基体的界面结合力较低,导致铸态复合材料的弹性模量、屈服强度和抗拉强度较低,增强效果不明显;经热挤压及搅拌摩擦加工的复合材料,弹性模量值相对基体