

SiC_p/Al 复合材料在太阳能电池阵展开机构上的应用

李瑞祥 王治易 肖杰

(上海机电设备研究所 上海 200245)

欧阳求保 王文龙

(上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室 上海 200030)

文 摘 介绍了 SiC_p/Al 复合材料的机械性能、热力学性能、加工性能,以及在太阳能电池阵展开机构中的应用情况。分析认为采用 SiC_p/Al 复合材料,充分发挥了其高比模量、高比强度和良好的耐磨性能,其管材、型材已达到了应用阶段。

关键词 金属基复合材料,颗粒增强,太阳能电池阵,展开机构

Applications of Silicon Carbide Particle Reinforced Aluminum Composites to Solar Array Deployable Mechanism

Li Ruixiang Wang Zhiyi Xiao Jie

(Machine-Electron Equipment Research Institute Shanghai 200245)

Ouyang Qiubao Wang Wenlong

(State Key Lab. of Metal-Matrix Composites of Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030)

Abstract Mechanical, thermodynamic and machining properties of silicon carbide particle reinforced aluminum matrix (SiC_p/Al) composites, and its applications to solar array deployable mechanism are reviewed. The SiC_p/Al composites are characterized by its high specific modulus, high specific strength and wearing resistance, and its tube and profile products have reached the stage of practicability.

Key words Metal matrix composite, Particle reinforced, Solar array, Deployable mechanism

1 引言

SiC_p/Al 复合材料具有比强度高、比模量高、耐磨性好、热导率高、热膨胀系数低等优异性能,且这些性能可根据需要在一定范围内进行调整,并可采用传统的金属成形加工设备和方法,如挤压、轧制、锻造、精密铸造等进行加工成形,在航空航天领域中有着广泛的应用前景^[1~3]。

目前美国、俄罗斯和日本在 SiC/Al 复合材料的

研制应用方面,处于较为领先的地位,尤其是美国、俄罗斯在国防军事领域中广泛地应用 SiC/Al 复合材料,取得了显著的成就,美国航天局用 SiC/Al 复合材料制造涡轮发动机,已进入地面试车阶段,美国海军飞行动力试验室已经研制成 SiC/Al 复合材料薄板,应用于新型舰载战斗机上^[4]。俄罗斯航空、航天部门将 SiC/Al 复合材料应用于卫星的惯导平台和支承构件上。我国上海交通大学复合材料研究所

收稿日期:2000-04-12;修回日期:2000-11-27

李瑞祥,1964年出生,研究员,主要从事航天器太阳能电池阵研制工作

对铝基复合材料组分优化设计、复合材料制备、成形、材料组织与性能等方面开展了系统深入的研究工作,并取得了重大进展, SiC_p/Al 复合材料研制方面取得了很好的成果。哈尔滨工业大学采用压铸法开始对 SiC/Al 复合材料的制作和应用进行了研究。沈阳金属研究所采用粉末冶金法,航空材料研究所采用铸锭冶金法相继开展了 SiC/Al 复合材料的研究。为设计先进的太阳能电池阵展开桁架机构,上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室研制了 SiC_p/Al 复合材料中空长螺杆、杆件和螺母等共三百多件。从这些零部件的使用场合来看,可以充分发挥 SiC_p/Al 复合材料高比模量、高比强度和良好耐磨性的优势,是 SiC_p/Al 复合材料在我国航天领域中的一次重要应用。

2 SiC_p/Al 复合材料使用性能

根据太阳能电池阵展开桁架对材料的性能要求,分别采用 LC4、LD10 作为基体材料,工业用 SiC 颗粒及球化处理颗粒作为增强剂,并研究了不同的热处理工艺,在以上材料组合及工艺试验的基础上进行大量的筛选和研究工作。SiC_p/Al 复合材料的性能与基体铝合金的种类、颗粒的种类和含量、颗粒的形状和尺寸等有关,并受材料制备、成形加工等因素的影响。通过复合材料的组分优化设计,并选择合适的制备工艺和成形方法,可以得到不同的性能,满足各种需要。随着 SiC 含量的增加,复合材料的弹性模量明显提高,当含量为 15% 时,弹性模量值可达 95 GPa,当含量为 20% 时,弹性模量可达 100 GPa。而随着 SiC 含量的增加,复合材料的抗拉强度并没有明显的增加,延伸率则明显降低。另外随着颗粒含量的增加,材料制备、零件成形、切削加工等难度增加,复合材料的密度也略有增加。因而在颗粒含量的选择上,必须综合考虑满足弹性模量要求的前提下,尽量降低增强剂的含量,以满足其它各项性能的要求(特别是延伸率)。本文针对 SiC_p/Al (SiC 质量分数为 14%,金属基为 LD10) 复合材料的性能进行研究。

2.1 SiC_p/Al 复合材料力学性能

研制出的 SiC_p/Al 复合材料及 LD10 的力学性能见表 1。测试结果表明,复合材料强度比 LD10 铝合金基体强度提高了约 9%,弹性模量提高了约 32%,而延伸率下降了约 63%。

宇航材料工艺 2001 年 第 5 期

表 1 SiC_p/LD10 (14%) 复合材料及 LD10 的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of LD10 and SiC_p/LD10 composite (14%wt)

试样 编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	延伸率 / %
1	500.9	410.5	94.1	4.24
2	510.7	420.8	95.1	4.34
3	503.1	413.3	95.4	2.65
平均	504.9	414.9	94.9	3.74
LD10	462	-	72	10

2.2 SiC_p/Al 复合材料热膨胀系数

复合材料的热膨胀系数测试在 PERKIN—ELMER TMAT 上进行,测试的温度范围为 0~300,测试结果见表 2。结果表明复合材料具有较低的热膨胀系数。

表 2 SiC_p/LD10 复合材料及 LD10 热膨胀系数(14%) *

Tab. 2 Thermal expansion coefficient of LD10 and SiC_p/LD10 composite (14%wt)

试样 编号	试样高度 /mm	热膨胀系数/ K ⁻¹			
		20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	
1	11.940	16.54	17.40	20.09	
2	11.883	16.62	17.39	20.25	
3	11.874	16.73	17.49	20.39	
平均	11.899	16.63	17.43	20.24	
LD10	-	22.5	23.4	24.4	

*升温速度为 5.0 /min,压力为 100 MN。

2.3 SiC_p/Al 复合材料导热性能

复合材料的热导率测试在 NETZSCH TCT 416 上进行,测试结果见表 3。结果表明复合材料具有良好的导热性。

表 3 SiC_p/LD10 复合材料热导率

Tab. 3 Thermal conductivity of SiC_p/LD10 composite

试样 编号	冷端温度 /	热端温度 /	热导率 / W · (m · K) ⁻¹
1	26.00	59.80	147.0
2	25.70	59.80	146.0
3	26.00	59.80	149.0

2.4 SiC_p/Al 复合材料与铝合金和钛合金性能比较

SiC_p/Al 复合材料与铝合金和钛合金的性能比较见表 4。

表 4 SiC_p/Al 复合材料、LD10、TC4 性能比较

Tab. 4 Property comparison of SiC_p/LD10 composite with aluminum alloy and titanium alloy

材料	密度 / g cm ⁻³	抗拉强度 / MPa	比强度 / 10 ² m	拉伸模量 / GPa	比模量 / 10 ⁵ m	热膨胀系数 / 10 ⁻⁶ K ⁻¹
SiC _p /Al	2.85	500	175	95	33	16.6
LD10	2.8	460	164	72	26	22.5
TC4	4.5	1 000	222	110	24	8.9

结果表明,金属基复合材料的比模量较大,其比强度和热膨胀系数介于基体铝合金(LD10)和钛合金(TC4)之间。由此可见,金属基复合材料在空间桁架结构上的应用是非常合适的。

3 SiC_p/Al 复合材料加工性能

3.1 切削加工工艺难点

由于 SiC_p/Al 复合材料的颗粒硬度很高,约为 HV 2 700,普通的硬质合金刀具硬度仅为 HV 1 700 左右,而且随着颗粒含量的提高, SiC_p/Al 复合材料的硬度更高而且更脆,用一般机械加工方法很容易使铝合金基体局部熔化,生成积屑瘤,并使刀具磨损变钝,造成复合材料表面粗糙度升高,相应的形位公差、尺寸精度也就很难保证。

3.2 切削加工方法

在采用各种刀具进行加工试验的基础上,选用人造多晶金刚石(PCD)刀具比较合适。为了提高切削加工精度,切削速度为 100 r/min ~ 300 r/min,切削深度为 0.1 mm ~ 0.3 mm。由于普通的铰刀和钻头磨损很大,难于加工,所以选用了碳化钛涂层的铰刀和钻头,表面粗糙度为 0.8。

为了达到较高的机械性能,在粗加工之后,需要进行淬火热处理和尺寸稳定性的时效处理。

4 SiC_p/Al 复合材料应用情况

4.1 太阳能电池阵展开机构简介

太阳能电池阵展开机构主要由截面为三角形的可折叠空间桁架、收藏箱、动力传动装置和折叠机构等组成,如图 1 所示。收拢状态下的尺寸为 495 mm × 878 mm,展开后的尺寸为 495 mm × 11 645 mm,伸缩比达到 1 13。

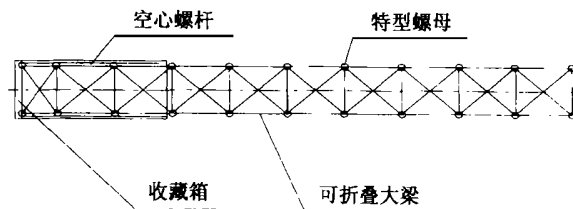


图 1 展开机构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a deployable mechanism

4.1.1 截面为三角形的可折叠空间桁架

截面为三角形的可折叠桁架是一种可伸缩的空间网格桁架,它由刚性三角框架、折叠式大梁、插销式锁紧装置和互套式对角拉杆等组成,共有 38 节。用 SiC_p/Al 复合材料制成的工字形截面的可折叠大梁位于等边三角形的顶点处。用刚性三角框架和跨越每一节间面的对角交叉的互套式拉杆支撑着,三角框架中的边框采用航天材料及工艺研究所制造的碳纤维复合材料管材,三角框架顶点处的特形螺母是用 SiC_p/Al 复合材料制成,该特形螺母是和传动系统中的螺杆相配合。互套式的对角拉杆对每一节提供交叉支撑,以提高桁架的抗剪刚度和抗扭刚度。

4.1.2 收藏箱

收藏箱是采用无面板的箱形骨架,由上底板、下底板和立柱等组装起来,其上装有动力传动装置和折叠机构等,在展开机构展开或受载时,箱体用来支撑桁架,在桁架收拢时,箱体用来容纳折叠了的桁架。上底板、下底板和立柱等主要受力构件这次采用的是铝合金(LD10),根据模态试验情况,箱体刚度稍欠不足,下一步拟采用 SiC_p/Al 复合材料替代。

4.1.3 动力传动装置

动力传动装置由电机、减速装置、传动机构和手动机构等组成。传动机构为螺杆螺母式, SiC_p/Al 复合材料螺杆装于三角箱体的三角形顶点处,通过齿形链条带动,使三根螺杆达到同步旋转。

4.1.4 折叠机构

折叠机构为固定在箱体中央的三叉形结构。由立柱、三叉架和带有特殊斜面的 SiC_p/Al 复合材料导向摇臂及拉伸弹簧等组成。桁架的伸展和收缩以及伸展时桁架节间铰链处的锁定,收缩时桁架节间铰链处的解锁都要靠此机构的作用才能完成。

4.2 SiC_p/Al 复合材料在关键受力件中的使用情况

(1) 可折叠大梁

在太阳能电池阵展开机构中,有三种可折叠大梁分别采用 SiC_p/Al 复合材料,充分发挥了其高比模量的特性,使展开后的展开机构一阶基频大大提高。另外好的耐磨性,可以省去了在关节铰链处安装减磨轴承,大大提高了安装的精度。

(2) 特形螺母

在太阳能电池阵展开机构中,采用 SiC_p/Al 复合材料生产特形螺母,充分发挥了其好的耐磨性,可以大大提高特形螺母的使用寿命。如采用常规的铝合金材料,只经过几次运动,就会引起很大的磨损,甚至出现咬死现象。

(3) 空心螺杆

在太阳能电池阵展开机构中,有三根空心螺杆采用 SiC_p/Al 复合材料,充分发挥其好的耐磨性,大大提高了使用寿命。另外,高比强度和高比模量的特性,大大减轻了机构的质量,三根空心螺杆比用钛合金材料减重约 4 kg。

(4) 导向摇臂

在太阳能电池阵展开机构中,有三个导向摇臂采用 SiC_p/Al 复合材料,主要充分发挥了其好的耐磨性,大大提高了使用寿命,同时可以在其上直接加工螺纹孔,省去了加钢丝螺套的环节,提高了安装的可靠性。

5 试验

5.1 展开试验

全部零部件加工完成后,组装成太阳能电池阵空间网格桁架式展开机构,进行了总装后的各种性能测试和展开试验,各项性能指标正常,展开平稳。因此 SiC_p/Al 复合材料得到了一次完整的实际应用,为展开机构的研制成功发挥了重要作用。

5.2 模态试验

在展开试验之后,进行了太阳能电池阵空间网格

桁架式展开机构的模态试验,试验结果表明,展开前五节的一阶基频由原来用铝合金制造的 28 Hz 上升到现在的 36 Hz;完全展开状态下的一阶基频由原来用铝合金制造的 0.80 Hz 上升到现在的 1.10 Hz。由此可见, SiC_p/Al 复合材料的使用,充分发挥了其高比模量的特性,使展开后的展开机构一阶基频大大提高。

6 结论

(1) 针对太阳能电池阵空间网格桁架式展开机构对材料性能的要求,设计出了合理的 SiC_p/Al 复合材料组分:基体为 LD10,增强剂为工业用的 SiC 颗粒,质量分数为 14%,制备出优质的 SiC_p/Al 复合材料。

(2) 在太阳能电池阵空间网格桁架式展开机构中,有四种零部件采用了 SiC_p/Al 复合材料,充分发挥了 SiC_p/Al 复合材料高比模量、高比强度和良好耐磨性的优势。

(3) SiC_p/Al 复合材料的使用,大大提高了展开机构展开后的一阶基频。

(4) SiC_p/Al 复合材料在太阳能电池阵空间网格桁架式展开机构中成功应用,积累了材料制备、成形、加工等方面的经验,为进一步推动 SiC_p/Al 复合材料的应用,打下了良好的基础。

参考文献

- 1 Liu H et al. An overview on ceramic particles reinforced aluminum composites. 材料研究学报,1995 增;9(12):561
- 2 Srivatsan T S et al. Processing techniques for particulate reinforced metal aluminum matrix composites. J. Mater. Sci.,1991;26:2 965
- 3 黄泽文. 金属基复合材料的大规模生产和商品化发展. 材料导报,1996;10(增):18
- 4 Lee KonBae et al. Interfacial reaction in SiC_p/Al composite fabricated by pressureless infiltration. Scripta. Materialia,1997;36(8):847