复 合 材 料 学 报　　第 17 卷　第 2 期　5 月　2000 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol 17　No. 2　May　2000

文章编号: 1000-3851(2000)02-0038-04

SiC 颗粒增强铝基复合材料制备及机加性能研究

袁广江, 章文峰, 王殿斌, 桂满昌, 吴洁君

(北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘　要: 采用真空搅拌铸造法制备了 20vol% SiC 颗粒增强 A356 基复合材料。SiC 颗粒在基体中分布均匀, 材料抗拉强度 319MPa, 弹性模量 98.9GPa, 延伸率 1.4%。采用聚晶金刚石-PCD 刀具, 在切削速度 v= 30～40 m/min 时, 复合材料对刀具损耗最小, 工件表面粗糙度良好。

关键词: 真空搅拌铸造; 切削性能; SiC 颗粒增强; 铝基复合材料

中图分类号: TB331; TG711　　**文献标识码**: A

PREPARATION AND CUTTING PROPERTY OF SiC PARTICLES REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITE

YUAN Guang-jiang, ZHANG Wen-feng, WANG Dian-bin, GU IMan-chang, WU Jie-jun

(National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract: The A356 matrix composites reinforced by 20vol% SiC particulates were fabricated by vacuum stirring casting process. SiC particulates tend to be uniformly dispersed in the matrix. Tensile strength of the composite is 319MPa, elastic modulus is 98.9MPa, and elongation is 1.4%. Based on the test of PCD tool cutting SiC particles reinforced aluminum matrix composite, the article points out that the best total efficiency can be obtained when the cutting velocity is 30～40 m/min.

Key words: vacuum stirring casting; cutting performance; SiC particles reinforced; aluminum matrix composites

碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有较高的比强度、比刚度、弹性模量、耐磨性和低的热膨胀系数等优良特性, 而且还具有各向同性, 并能适用于不同的加工方法, 如挤压、锻造和轧制成各种型材等[1], 在航天航空和汽车工业上有广阔的应用前景。然而 SiC 颗粒与铝液之间的湿润性较差, 在 1000℃以下基本不润湿[2,3], 给制备 SiC 颗粒增强复合材料带来一定的困难。本文采用真空搅拌铸造法成功解决了 SiC 颗粒与铝液润湿问题, 制备了 SiC 颗粒在基体中弥散分布的复合材料, 并获得了优异复合材料最终性能。此外, 本文作者对 SiC 颗粒增强铝基复合材料机械加工性能进行了研究, 优化出了 PCD 刀具加工颗粒复合材料最佳切削速度范围。

1　实验研究方法

1.1　实验材料

实验所用 SiC 颗粒为 α 型, 尺寸为 10～14μm, 呈多角形态, 化学成分如表 1 所示。基体合金为 A356, 其化学成分如表 2 所示。最终制备复合材料为 20vol% SiC 颗粒增强 A356 基体复合材料。

表 1　SiC 颗粒化学成分(wt%)

Table 1　Chemical composition of SiC particulates (wt%)

SiC	Free Si	Free SiO_2	Free C	Fe(total)
98.0 min.	0.3 max.	0.5 max.	0.2 max.	0.2 max.

表 2　基体 A356 化学成分(wt%)

Table 2　Chemical composition of matrix A356 alloy (wt%)

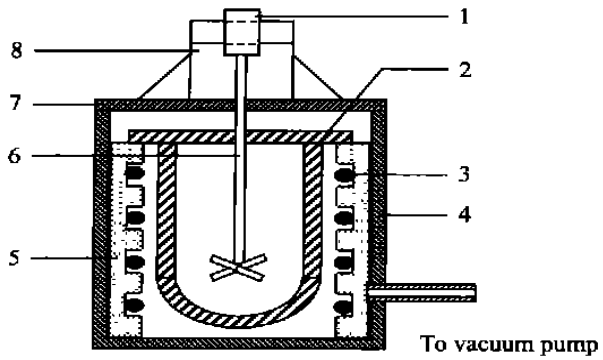
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	All other elements	Al
6.50～7.50	0.15 max.	0.20 max.	0.10 max.	0.30～0.45	0.10 max.	0.20 max.	0.15tot. 0.05max.	REM.

1.2　真空搅拌铸造技术

SiC 颗粒增强铝基复合材料的制备示意图如图 1 所示。

收稿日期: 1998-09-01; 收修改稿日期: 1999-03-08
基金项目: 国家 863 项目资助
作者介绍: 袁广江(1971), 男, 硕士, 工程师, 从事复合材料研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1—D. C. motor; 2—crucible; 3—heater; 4—shell; 5—lining; 6—impeller; 7—cover; 8—motor support

图 1 真空搅拌铸造炉结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of vacuum stirring casting equipment

首先将 A356 铸锭放入坩埚内熔化, N_2 除气 5min, 之后将 300℃干燥 8h 的 SiC 粉注入坩埚内铝液上部, 盖上炉盖, 放入搅拌器, 搅拌 2h 后浇铸。复合材料进行 T6 热处理, 在 540℃固溶处理保温 12h 后, 在 70~80℃水中淬火。在 170℃时效保温 6h 后空冷。

1.3 切削复合材料实验条件

试件为航天用产品。实验刀具用美国通用公司生产的粗颗粒 PCD 复合片制成, 其几何参数及机械物理性能参数分别如表 3、表 4 所示[4~6]。

表 3 PCD 刀具的几何参数

Table 3 Geometry parameters of PCD tools

front angle	back angle	main dip angle	arc radius of tool tip
-6°	6°	70°	0.1mm

实验在 CKM 6132 精密型车床上进行。测力时, 采用了 Kister 测力仪、Kistler 电荷放大器及 SC16 型光线示波器组成的测力系统。

2 实验结果和分析

2.1 SiC 颗粒与铝液间润湿的影响因素

SiC 和铝液的接触角 $\theta = 118$ [7] $> 90°$, 说明 SiC 颗粒和铝液润湿不好, 倾向于自我团聚, 这将引发许多问题, 如造成复合困难, 晶间易形成显微孔洞, 力学性能下降等。本文利用真空搅拌铸造法成功地解决了 SiC 颗粒与铝液的润湿问题。

实验中, 铝熔体中加入了 8%Mg、2%Ce 等活性元素, 另外还加入了 3% 的无机化合物使其在 SiC 颗粒表面生成界面反应层, 从而改善 SiC 颗粒与铝液间的润湿性能, 再通过机械搅拌提供的机械力将团聚 SiC 颗粒弥散分布于铝熔体中。

实验中, 保持 10Torr 的真空度, 以避免搅拌时卷入气体。

2.2 SiC 颗粒增强铝基复合材料显微组织

图 2 为 20vol% SiC/A356 复合材料的显微组织。可以看出, SiC 颗粒均匀弥散在基体上, 分布是随机的没有明显的成堆聚集出现。由图 3 复合材料的 TEM 组织可以看出, SiC 颗粒与基体之间的界面清晰, 结合良好, 没有脱开的现象。这表明, 使用真空搅拌铸造法, 能使铝液与 SiC 颗粒润湿复合, 得到致密的 SiC 颗粒增强铝基复合材料。

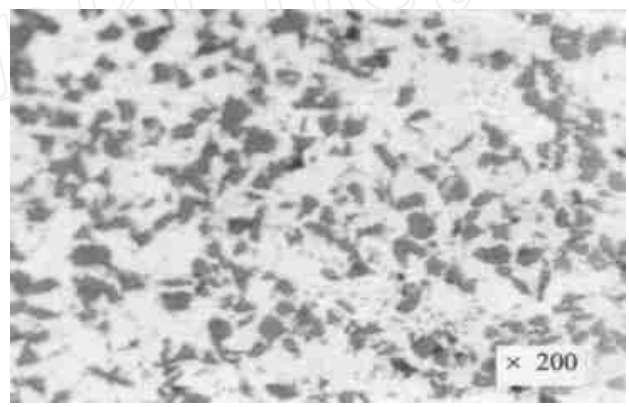


图 2 20vol% SiC/A356 复合材料显微组织

Fig. 2 OM micrograph of 20vol% SiC/A356 composite

图 3 20vol% SiC/A356 复合材料 TEM 组织

Fig. 3 TEM micrograph of 20vol% SiC/A356 composite

表 4 PCD 刀具的机械物理性能

Table 4 Properties of PCD tools

Hardness *HV*	Bending strength/MPa	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa	CTE /$10^{-6}\cdot F^{-1}$	Thermal conductivity /$W\cdot(cm\cdot K)^{-1}$
6500~8000	2800	4200	560	3~3.6	100~109

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 SiC 颗粒增强铝基复合材料力学性能

20vol% SiC 颗粒增强 A356 基复合材料室温力学性能如表 5 所示。

表 5　20vol% SiC 颗粒增强 A356 基复合材料室温力学性能

Table 5　Mechanical properties of 20vol% SiC/A356 composite

Materials	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	E /GPa	δ /%	Fracture strain/%
A356	276	200	75.2	6.0	—
20vol% SiC/A356	319	290	98.9	1.4	0.78

由表中可知，与基体性能相比较，复合材料拉伸强度提高了 12%，屈服强度提高了 45%，延伸率急剧下降到 1.4%。这主要是由于细小 SiC 颗粒在基体弥散分布，严重阻碍了位错运动，强化了基体造成的。

2.4 切削速度对加工 SiC 颗粒增强复合材料影响

2.4.1 切削速度对切削力的影响

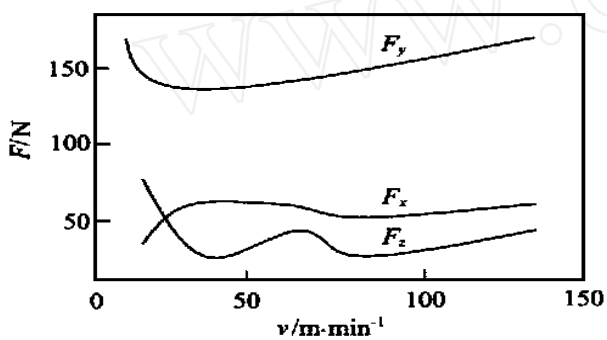


图 4　切削速度与静态力的关系曲线

Fig. 4　Relationship between cutting velocity and static stress
Tool: PCD; Workpiece: 20vol% SiC /A356 composite;
Cooling liquid: Emulsion f = 0.12mm/r, a_p = 0.10mm

图 4 为进给量 f = 0.12mm/r，切削深度 a_p = 0.10mm，采用乳化液作为切削液时切削速度与静态力之间的关系曲线。从图中可以看出，三向切削力 F_x、F_y、F_z 均随切削速度 v 的增大而增大。这是因为随着切削速度的增加，材料的应变率增大，单位时间内的切削体积增大，导致切削力随切削速度的增大而增大。另外 F_y 远远大于 F_x 和 F_z，这与金属切削情况截然不同，之所以出现这种情况，一般认为由于此复合材料含有高体积百分数高硬度 SiC 所致。另外，复合材料的抗压强度大于抗拉强度也导致 F_y 远大于其它两个分力。在切削过程中产生崩碎切屑，且集中在刀具附近，切屑与前刀面的接触面积小，磨擦力较小，切屑去除的方式是脆性断裂，这些因素导致 F_z 较小。

图 5 所示为切削速度对切削复合材料时动态力的影响。可以看出，切削复合材料时，振动现象十分明显，这是由于 F_y 是影响振动的主要因素。在切削复合材料时，F_y 又远大于其它两个分力，从而导致系统产生振动。复合材料中硬度分布不均匀，在一定程度上也加剧了振动。

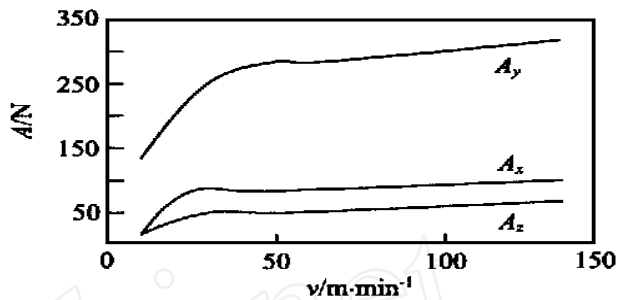


图 5　切削速度与动态力的关系曲线

Fig. 5　Relationship between cutting velocity and dynamic stress
Tool: PCD; Workpiece: 20vol% SiC /A356 composite;
Cooling liquid: Emulsion f = 0.12mm/r, a_p = 0.10mm

2.4.2 切削速度与切削长度、刀具耐用度的关系

PCD 刀具的硬度随温度升高而降低。当温度到达 700℃时，PCD 刀具开始石墨化，硬度迅速下降，刀具失效。PCD 刀具在切削 SiC 增强铝基复合材料过程中，随着切削速度的提高，切削温度明显升高。当切削速度大于 40m/min 时，切削温度达到 500℃，刀具磨损加剧，已不能继续切削。这是由于所测温度为距刀尖 2mm 以上的温度，当测量点温度达到 500℃时，刀尖温度已达到 700℃，刀具开始石墨化，所以切削复合材料时切削速度不能大于 40mm/min。

图 6 所示为切削速度与切削长度及刀具耐用度的关系曲线。从图中可以看出，刀具寿命随着切削速度的升高急剧下降。刀具磨损主要表现为刃口上的微小晶粒在切削力作用下首先脱落，在刃口附近出现凹凸不平的脱落痕迹，形成刀具刃口磨损。由于车削 SiC 增强铝基复合材料时刀具所受径向切削力较大，复合材料中又存在较多的 SiC 硬质相，两者共同作用造成刀具后面磨损。刀具磨损到一定程度刃口变钝，切削力剧增，继续切削，则将出现刀尖崩刃，最终导致刀具报废。

因此，加工 SiC 颗粒增强铝基复合材料时切削速度存在最佳范围，低于或者高于这个范围，刀具的寿命都会急剧降低，较低的切削速度还会导致表

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

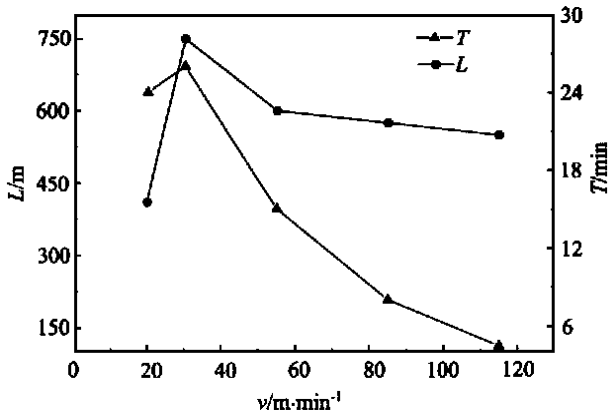


图 6 切削速度与切削长度、刀具耐用度的关系

Fig. 6 Relationship of cutting velocity *vs* cutting length and tool life

Tool: PCD; Workpiece: 20vol% SiC /A356 composite;
Cooling liquid: Emulsion f = 0.12mm/r, a_p = 0.10mm
Blunt standard: VB = 0.28mm

面粗糙度增大。从图 6 中可以看出, 当 v = 30～40m/min 时, 切削长度最长, 刀具寿命也较高。此时静态和动态力都较低。尽管在这个速度下, 切削效率不是很高, 但刀具成本、切削长度、表面粗糙度和切削力等均处于较佳状态。因此采用 PCD 刀具加工 SiC 颗粒增强铝基复合材料时, 推荐的合理切削速度范围为 30～40m/min。

3 结 论

(1) 采用真空搅拌铸造法, 可以制备出 20vol% SiC 颗粒增强A356基体复合材料, 颗粒弥散分布于基体中, 具有优良的综合机械性能。

(2) PCD 刀具切削 20vol% SiC /A356 复合材料存在最佳切削速度, 较高或者较低的切削速度都会显著降低刀具使用寿命。切削速度在 30～40m/min 范围内, 复合材料各项机加性能指标均处于较佳状态。

参 考 文 献

[1] Logsdon W A, Liaw P K. Tensile, fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of silicon carbide whisker and particulate reinforced aluminum metal matrix composites [J]. *Eng Fracture Mech*, 1986, 24 (5): 737～751.

[2] Laurent V, Chatain D, Eustathopoulos N. Wettability of SiC by aluminium and Al-Si alloys[J]. *J Mater Sci*, 1987, 22(1): 244～250.

[3] Ehrstrom J C, Kool W H. Production of rapidly solidified Al/SiC composites[J]. *J Mater Sci*, 1988, 23(9): 3195～3201.

[4] Lec M, Hibbs L E Jr. Role of deformation twin bands in the wear processes of polycrystalline diamond tools[C]. In: Ludema K C, Glaser W A, Rhee S K eds. The international conference on wear of materials 1979. 16～18: 485～491.

[5] 尹洁华, 王守安. 第四界中国国际机床展览会(CMT '95)展出的切削刀具[J]. 工具技术, 1996, 30(1): 2～13.

[6] Aytacoglu M E. PCD cutting tools gaining momentum [J]. *Cutting Tool Engineering*, 1983, 35(5～6): 49～55.

[7] Oh S Y, Cornie J A, Russell K C. Wetting of ceramic particulates with liquid aluminum alloys [J]. *Metall Trans A*, 1989, 20A (3): 527～541.

(上接第 33 页)

2 国外在复合材料结构研究领域热点课题介绍与评价

国际复合材料结构会议是一个多学科学术交流会议, 由于涉及领域较宽, 本报告仅就复合材料及其结构分析理论和实验研究领域相关的 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 14 和 15 等专题的国外研究动态作一介绍和评估。

从本届大会分组报告所涉及的研究领域可知, 目前国际复合材料结构研究的热点为下列几个方面。

2.1 智能材料和结构

智能材料和结构研究是一项多学科交叉的综合科学研究, 其研究内容与近代材料学、物理学、化学、力学、电子学、人工智能、信息技术、计算机技术、生物技术、加工技术及控制论等前沿科学及高技术研究密切相关, 在本次会议分组报告中约有七个专题中 13 篇论文都涉及到此项研究领域。其研究内容包括:

● 压电智能复合材料:

(1) 压电双材料系的断裂分叉问题研究;

(2) 含压电驱动器结构的振动控制问题研究;

(3) 含压电材料层合结构优化问题研究。

(下转第 45 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net