

# SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声振动铣削试验研究\*

## Ultrasonic Vibration Assisted Milling Experiment of SiC<sub>f</sub>/SiC Ceramic Matrix Composites

杨卓勇 刘秀梅 刘智武 周峰 / 中国航发西航 熊一峰 汪文虎 / 西北工业大学

目前，陶瓷基复合材料（特别是SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料）的高效高质量切削加工仍是制约其快速工程化应用的瓶颈问题，需要全面深入展开相关研究。

**陶**瓷基复合材料（CMC）由陶瓷纤维和陶瓷基体组成，具有密度低、硬度高、热稳定性优异及化学耐受性强等特点，其密度为高温合金的1/3，强度为其2倍，能够在1000~1500℃（比高温合金高出200~240℃）高温环境中长时间工作，是替代高温合金发动机热端结构材料的首选<sup>[1,2]</sup>。SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的基体材料及增强相材料硬度高、抗磨损，使得材料的加工面临着刀具磨损严重、切削力大、加工质量难以满足要求等问题，甚至难以进行加工<sup>[3]</sup>。超声振动辅助加工技术是在传统机械加工工艺基础上，对刀具或工件施加高频率、微米级振幅的超声振动，缩短刀具与工件的接触时间、减小刀具与工件的摩擦力，获得更好加工性能的方法。作为决定该技术是否可以应用于SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的关键性因素之一，刀具的选取至关重要。通过开展超声振动辅助铣削试验研究，对比分析超声振动辅助铣削SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料过程中聚晶金刚石（PCD）复合片刀具、钎焊金刚石刀具和电镀金刚石刀具的加工表面质量、刀具寿命及刀具磨损形式，确定适合加工SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的刀具，并进一步分析切削参数对铣削力的

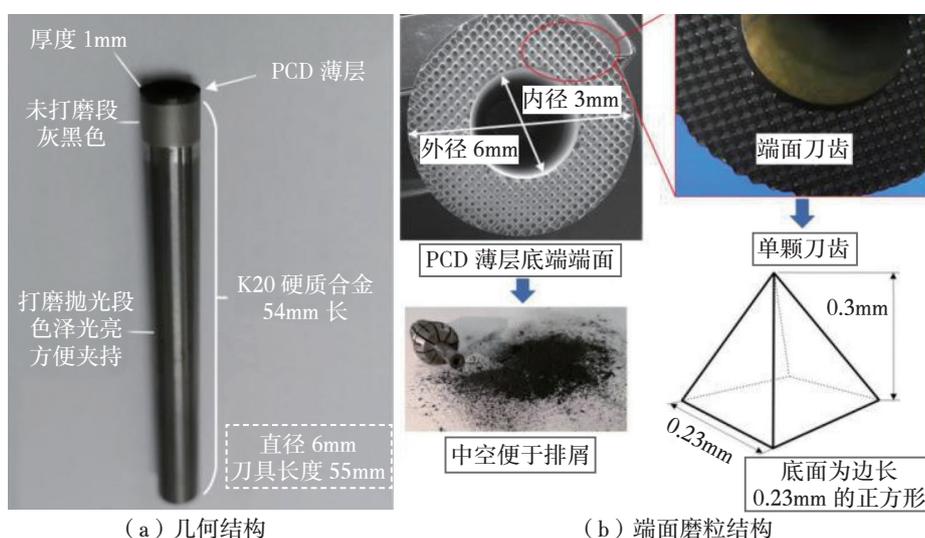


图1 PCD刀具几何结构及端面磨粒结构示意图

影响规律，理解刀具磨损机理，为后续进一步开展SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声振动辅助加工研究提供参考。

### 超声振动铣削试验 试验材料及加工刀具

试验样件材料为化学气相渗透（CVI）工艺制备的SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料，试验样件尺寸为80mm×45mm×3.8mm，其主要性能参数见表1。试验分别采用PCD刀具、50目钎焊金刚石刀具和100目电镀金刚石刀具，刀具直径均为6mm，刀长54mm（PCD刀具如图1所示）。

表1 SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料性能参数

参数	数值	偏差系数/%
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.26	1.1
孔隙率	9.9%	7.5
纤维直径/μm	7~11	—
抗拉强度/MPa	271.4	11.2
抗弯强度/MPa	443.8	8.1
层间剪切强度/MPa	63.2	16.2
抗压强度/MPa	454.2	4.8
断裂韧度/MPa·m <sup>1/2</sup>	24.1	11.0

\*中国航发自主创新专项资金项目（ZZCX-2019-022）

### 试验方案及数据测量

首先开展3种刀具铣削对比试验, 刀具对比试验加工参数见表2, 综合考察刀具的材料去除体积、加工表面质量及主要磨损形式, 优选出适用于加工SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的刀具。然后基于优选的刀具开展单因素试验(单因素试验加工参数详见表3), 研究加工参数对切削力的影响规律, 揭示刀具磨损机理。

### 试验结果分析

#### 加工表面粗糙度

对比3种刀具的加工表面粗糙度(如图2所示): PCD刀具加工表面粗糙度值最小, 加工表面质量最好; 对比钎焊金刚石刀具及电镀金刚石刀具加工表面粗糙度可以看出, 刀具磨粒目数越大、磨粒个数越多, 参与到加工过程中的磨粒也相应增多, 加工表面粗糙度值也随之降低, 表面质量会相对更好。同时, 分析试验过程中测量数据的误差棒, 可以看出PCD刀具加工表面粗糙度值的测量数据误差棒最小, 表明加工表面粗糙度值差异不

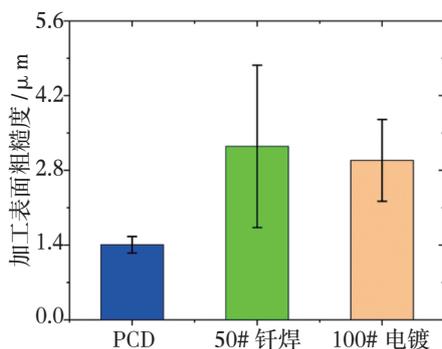


图2 3种刀具加工表面粗糙度

大、测量数据稳定性高, 加工表面质量高。

#### 刀具寿命

以材料去除体积表征刀具寿命, 对比3种刀具采用相同加工参数, 加工至刀具磨损失效时的试验结果(如图3所示)。在相同加工参数条件下, 100目电镀金刚石磨头去除材料体积为192mm<sup>3</sup>, 50目钎焊金刚石磨头去除材料体积为810mm<sup>3</sup>, PCD刀具去除材料体积为9720mm<sup>3</sup>, 3种刀具寿命比为50.6 : 4.2 : 1。分析试验结果可知, PCD刀具磨损小, 刀具寿命长, 电镀金刚石磨头磨损严重, 刀具寿命短。综合分析, 100目电镀

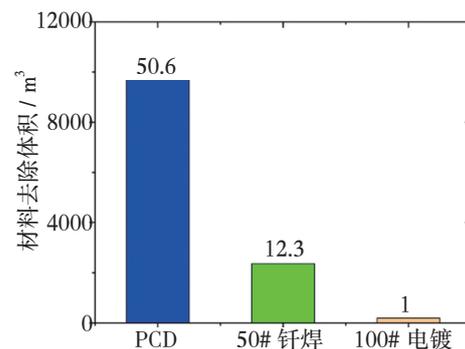


图3 刀具去除材料体积

金刚石磨头不适合加工SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料, PCD刀具及50目钎焊金刚石刀具可用于SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的加工。

#### 刀具磨损

根据刀具磨损形貌的扫描电镜(SEM)图可以看出, 金刚石磨粒表面布满了破裂断面, 磨粒棱边及型面发生了严重的磨料磨损(如图4所示)。这是由于电镀磨粒与刀具基体间结合强度不高, 在超声振动铣削过程中, 磨粒在磨料磨损的同时, 容易从刀具端面上剥落下来, 使得参与加工的磨粒数目减小, 铣削力增大, 刀具磨损加剧, 在去除材料192mm<sup>3</sup>后, 刀具端面被彻底磨平失效。

钎焊金刚石磨头磨损主要为磨粒的磨料磨损, 未发现磨粒的剥落。深入分析磨粒磨损形式, 磨粒表面有明显的硬质材料滑刻磨损痕迹及破裂断面, 表明金刚石磨粒在去除相同硬度的SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料时, 磨粒主要被硬质材料在表面进行磨料磨损, 在高频超声振动冲击下, 部分磨粒会被冲碎型面产生破裂断面。磨粒四周黏结剂亦被磨损说明, 磨粒发生了严重的磨料磨损, 磨粒凸起参与材料去除过程的部分已经被磨平。然而, 由于钎焊黏结强度相对电镀要高, 钎焊金刚石磨

表2 刀具对比试验加工参数

编号	主轴转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	切深/mm	振幅/μm	频率/kHz
#1	4000	200	0.20	6	30
#2	5500	300	0.15	6	30

表3 单因素试验加工参数

因素	水平			
	Lev-1	Lev-2	Lev-3	Lev-4
主轴转速/(r/min)	2500	4000	5500	7000
进给速度/(mm/min)	200	300	400	500
切深/mm	0.05	0.10	0.15	0.20
频率/kHz	20	30	45	—
振幅/μm	2	4	6	8

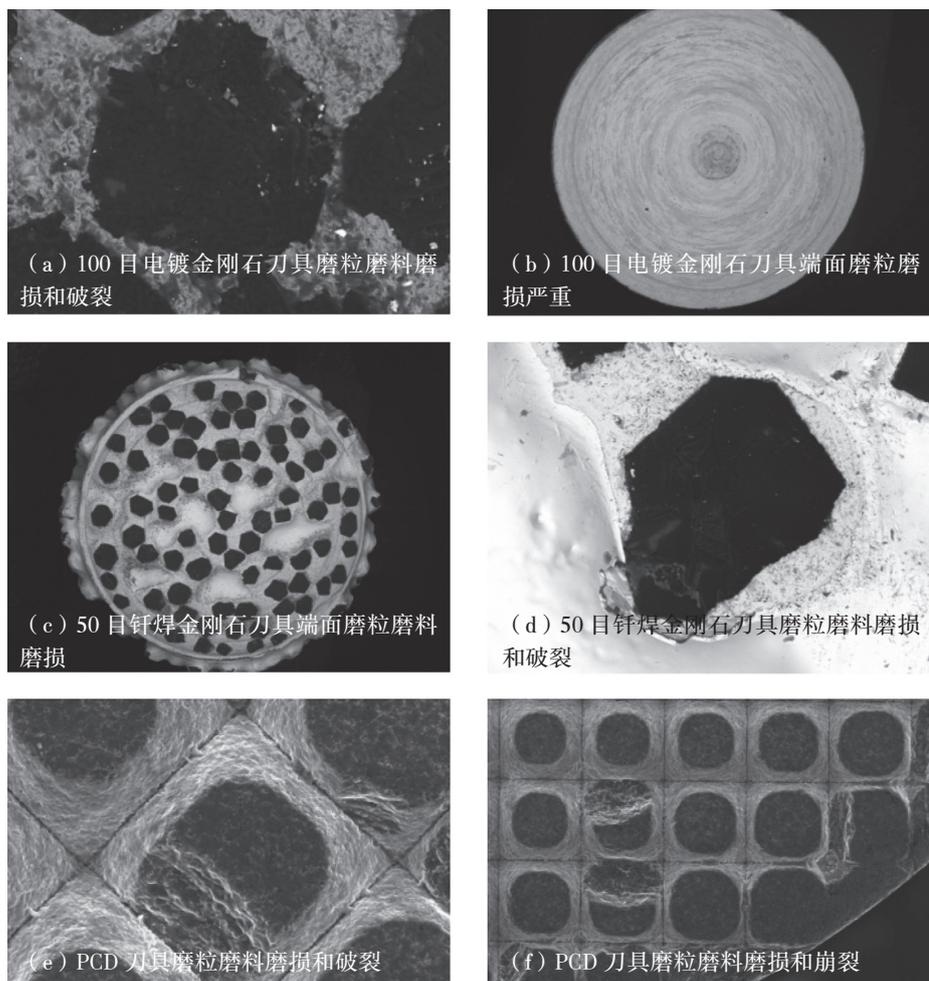


图4 3种刀具磨损形貌SEM图

粒不易被剥离出刀具基体形成磨粒的剥落。

PCD刀具锥刺型的磨粒主要磨损形式为磨粒的磨料磨损及磨粒破裂。由于PCD刀具材质及SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料硬度差异不大,在加工中刀具与去除材料相互磨损,极易造成PCD刀具磨粒的磨料磨损。同时,由于PCD及SiC陶瓷均属于脆性材质,在高频超声冲击下,磨粒容易发生破裂崩裂。然而,从SEM图可以看出PCD刀具整体磨粒磨损程度差异不大,这使得刀具加工过程相对更平稳,加工表面质量更高。

### 铣削力

加工参数对PCD刀具铣削力的

影响主要表现为:随着主轴转速的增加,PCD刀具铣削力逐渐降低;随着进给速度及切削深度的增大,铣削力急剧增大。切削力增大是造成PCD刀具磨损的主要原因,为了减小刀具磨损,延长刀具寿命,需要降低SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声振动辅助加工过程中的铣削力。由此可以确定, SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声振动辅助加工的主轴转速应不低于7000r/min,进给速度不高于300mm/min,切削深度小于0.1mm。

此外,根据超声振动参数对PCD刀具铣削力的影响可以发现,随着超声频率及超声振幅的逐渐增

大,PCD刀具的铣削力均呈现出先降低后增大的趋势。高频超声振动使得刀具与材料之间发生高频的冲击,在一定条件下会造成PCD刀具磨粒的崩裂,导致刀具磨损,增大铣削力及加工表面粗糙度,故需要合理的选择超声振动参数。根据试验结果可以确定合理的超声振动频率应为30kHz,超声振幅为4μm。

### 结束语

在上述试验的基础上,针对SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料的超声振动辅助铣削的研究,后续还应深入开展超声能场作用下的切削机理、微小孔加工的损伤形成机理与控制方法,以及超声振动参数与加工参数匹配性研究,合理选择各参数以强化SiC<sub>f</sub>/SiC陶瓷基复合材料超声辅助加工的优势,实现其优质高效加工。 **航空动力**

(杨卓勇,中国航发西航,研究员级高级工程师,主要从事航空发动机制造、工艺、规划、管理及体系建设研究)

### 参考文献

- [1] Niggemann C, Song Y S, Gillespie J W, et al. Experimental investigation of the controlled atmospheric pressure resin infusion (CAPRI) process[J]. Journal of composite materials, 2008, 42(11):1049-1061.
- [2] 王德忠. 环氧树脂生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001:4-10.
- [3] Yuan S M, Zhang C, Hu J J. Effects of cutting parameters on ductile material removal mode percentage in rotary ultrasonic face machining[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: journal of engineering manufacture, 2015, 229(9):1547-1556.