

# 钎焊金刚石铣磨头加工 Cf/SiC 复合材料 微孔的试验研究

洪猛杰 陈卓 周嘉怡 王海旭 王建宇 黄国钦\*

华侨大学制造工程研究院, 厦门, 361021

**摘要:** Cf/SiC 陶瓷基复合材料是一种集各向异性和非均质结构为一体的典型高硬脆性难加工材料, 对其进行孔径小于 5 mm 的微孔加工难度大, 一直都是业界研究热点。采用三种小直径金刚石铣磨头进行制孔加工试验, 研究铣磨头制备的方法和末端几何形状对钻进力、使用寿命、微孔缺陷及工具表面质量的影响。结果表明, 取芯钎焊铣磨头所制微孔缺陷最少且使用寿命为平底电镀铣磨头的 3.6 倍、平底钎焊铣磨头的 2 倍; 取芯钎焊铣磨头具有端面取芯结构, 可有效减小钻进力, 在工具使用寿命和工件加工表面质量上与另两种铣磨头相较也有明显提升。

**关键词:** Cf/SiC 陶瓷基复合材料; 各向异性; 微孔加工; 以磨代铣; 金刚石铣磨头

**中图分类号:** TG74.7

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.002

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Experimental Study of Machining Micro Holes in Cf/SiC Composite Materials Using Brazed Diamond Milling Head

HONG Mengjie CHEN Zhuo ZHOU Jiayi WANG Haixu WANG Jianyu HUANG Guoqin\*  
Institute of Mechanical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021

**Abstract:** Cf/SiC ceramic matrix composites were typical high hardness and brittleness ones difficult to machine that combined anisotropy and heterogeneous structures. It was difficult to machine micro holes with a pore size of less than 5 mm, and always was a hot research topic in the industry. Three types of small diameter diamond milling heads was used for hole machining experiments, the preparation method of milling heads and the influences of end geometry on drilling forces, service life, micro hole defects, and tool surface quality were studied. The results show that the micro hole defects produced by the core brazing milling head are the least and the service life is 3.6 times that of the flat bottomed electroplating milling head and 2 times that of the flat bottomed brazing milling head, the core taking brazing milling head has an end face core taking structure, which may reduce drilling force and significantly improve the service life of the tool and the surface quality of the machined workpieces effectively.

**Key words:** Cf/SiC ceramic matrix composite; anisotropy; micro hole machining; replacing milling with grinding; diamond milling head

### 0 引言

Cf/SiC 陶瓷基复合材料具有低密度、高强度、低热导率、耐高温和耐腐蚀性能强等优点, 在航空、航天、航海各类交通运输工业以及国防工业等高端制造领域有广泛应用<sup>[1]</sup>。目前高端制造领域大量使用 Cf/SiC 陶瓷基复合材料制成部件, 一般都以铆钉或螺栓与其他部件组装, 以产生最终结构。此外, 大多数飞行器均采用电传控制模式, 需要在 Cf/SiC 陶瓷基复合材料上设置不同规格的用于电线穿引的小直径微孔。连接区域的微孔

和穿引电线的微孔往往是结构最脆弱的部分, 微孔质量会影响设备结构完整性。换言之, 设备的安全性和可靠性在很大程度上取决于微孔加工质量。

传统微孔加工以硬质合金铣刀钻铣加工为主, 温泉等<sup>[2]</sup>针对微孔麻花钻加工工艺进行了相关理论和试验研究。雷瑛等<sup>[3]</sup>分析了麻花钻在不同转速和进给速度下的温度变化对微孔质量的影响, 为优化微孔质量提供参考。传统微孔加工采用硬质合金铣刀钻铣加工, 轴向的钻进力大, 进出口处是推出材料而非切割材料, 易发生分层现象, 进而出现纤维断裂、纤维拔出、毛边、热损伤等形

式的微孔缺陷<sup>[4]</sup>。硬质合金刀具的切削刃较大,切削阻力大,对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料这类典型难加工的高硬脆性材料进行微孔加工时刀具切削刃产生严重磨损,且磨损之后刀具便失去了加工能力,其加工成本较高。除此之外,微孔规格繁多而导致所需刀具型号众多,加工过程需要频繁换刀,效率较低<sup>[4]</sup>。

国际上对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料的研究趋于火热,“以磨代铣”、超声辅助加工和螺旋铣削等新的加工工艺陆续出现<sup>[4]</sup>。国内外学者针对陶瓷基复合材料的钻孔质量、切削力等开展了研究,相比于金刚石磨粒刀具,以麻花钻为代表的硬质合金钻头在加工陶瓷基复合材料的孔时,其进出口推力和孔损伤更大<sup>[5]</sup>。XING 等<sup>[6]</sup>研究了工艺参数对陶瓷基复合材料钻孔加工的推力、分层因子、孔表面质量和刀具磨损的影响。LIU 等<sup>[1]</sup>以钎焊法制备套料钻加工 Cf/SiC 陶瓷基复合材料。陈玉荣等<sup>[7]</sup>、丁凯等<sup>[8]</sup>、贺虎等<sup>[9]</sup>使用超声辅助加工 SiCf/SiC 陶瓷基复合材料。高航等<sup>[10]</sup>提出的基于“微刃切削”原理的“以磨代铣”的磨削加工是设置刀具中心轴与加工孔圆心之间的偏置距离,以此实现陶瓷基复合材料不同规格孔的加工<sup>[2]</sup>。BIERMANN 等<sup>[11]</sup>设计了金刚石磨粒刀具不同形状的排屑流道,实现了陶瓷基材料加工质量的提升。SULTANA 等<sup>[5]</sup>探究了七种不同结构的单层钎焊金刚石磨粒刀具对陶瓷基复合材料加工的性能影响,结果均证明了使用金刚石磨粒刀具“以磨代铣”加工陶瓷基复合材料(ceramic-matrix composite, CMC)的可行性。

上述研究主要围绕孔径大于 5 mm 的常规孔的加工,加工工艺的研究已经相对成熟。由于加工孔径小于 5 mm 微孔所使用的金刚石铣磨头直径较小,故该情形下金刚石铣磨头存在金刚石团聚、金刚石把持力不足、干式磨削冷却困难等难点。Cf/SiC 陶瓷基复合材料微孔加工的困难和应用需求共存,对孔径小于 5 mm 的 Cf/SiC 陶瓷基复合材料微孔加工的研究具有较大的挑战性和研究前景。

本研究是基于“以磨代铣”的铣磨加工工艺的试验,采用小直径的金刚石铣磨头加工 Cf/SiC 陶瓷基复合材料直径为 4 mm 的微孔,通过对不同小直径金刚石铣磨头加工时的扭矩、磨削力、刀具磨损以及微孔质量的分析,验证小直径金刚石铣磨头对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料微孔的高效高质量加工的可行性,比较不同小直径金刚石铣磨头对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料制微孔加工的性能。

## 1 Cf/SiC 陶瓷基复合材料特点

被加工件为 Cf/SiC 陶瓷基复合材料,其内部结构如图 1 所示,以纤维交叉编织形成 Cf/SiC 陶瓷基复合材料工件板。

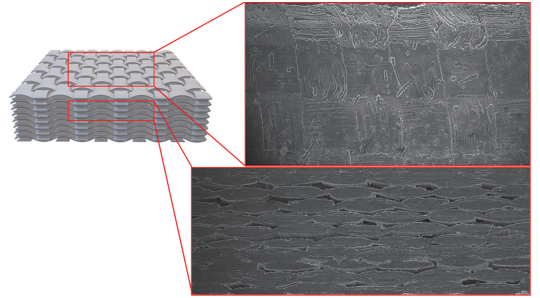


图 1 Cf/SiC 陶瓷基复合材料结构 SEM 图及示意图  
Fig.1 SEM image and schematic diagram of Cf/SiC ceramic matrix composite material structure

Cf/SiC 陶瓷基复合材料是一种具有各向异性和非均质结构的典型的高硬脆性难加工材料,加工时会出现较大切削力。同时,Cf/SiC 陶瓷基复合材料的高耐磨性、低热导率导致刀具在加工过程中极易损伤。传统硬质合金钻头钻孔过程中,入口处因接触面积大、连续切削困难而形成纤维拔出、毛刺等孔损伤,且出口处由于轴向的切削力过大,将纤维层推出而形成纤维分层损伤,这些损伤缺陷会影响制孔精度、装配可靠性。

## 2 “以磨代铣”制微孔原理

Cf/SiC 陶瓷基复合材料的耐磨性强,硬度高、低导热性和纤维交叉编织而导致的各向异性使之成为典型的难加工硬脆性材料。常规制孔加工采用以麻花钻为主的硬质合金刀具,由于其切削刃大,碳纤维硬质点持续接触而使其切削力波动大<sup>[12]</sup>,进而给刀具和工件带来了高温损伤,使得刀具快速磨损和工件加工质量无法得到保证,且硬质合金刀具有限的切削刃损坏之后刀具便失去了加工能力。金刚石磨粒工具的切削刃小而多,每颗金刚石相当于一个微刃的特点能够解决这些难点,这种多切削刃断续加工称为“微刃切削”原理,该原理相较于硬质合金刀具常规制孔切削力更小,热损伤更少,能够在极大程度上减少微孔缺陷<sup>[5]</sup>。

平底的金剛石磨粒工具在钻孔过程中,端面没有取芯,端面圆心处的线速度趋近于零而没有加工能力,故采用螺旋铣磨制孔的工艺,即“以磨代铣”<sup>[5]</sup>。该工艺的原理示意图见图 2:刀具主轴与微孔的中心轴设置一个偏置距离,使得刀具在高速自转的同时绕着微孔中心轴公转,且同时以

一定螺旋角轴向螺旋进给。图 3 为麻花钻加工 Cf/SiC 孔示意图,与麻花钻钻孔工艺相比,“以磨代铣”的加工工艺在减小切削力、提高排屑能力、抑制制孔缺陷和延长刀具寿命等方面均有明显优势。

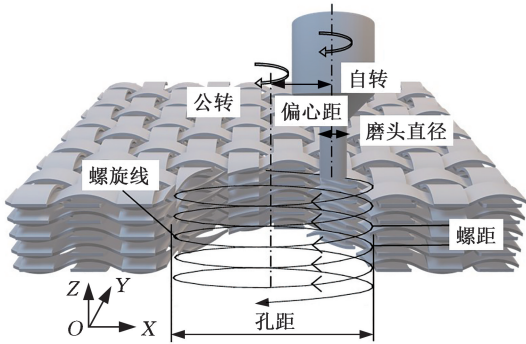


图 2 “以磨代铣”原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the principle of “replacing milling with grinding”

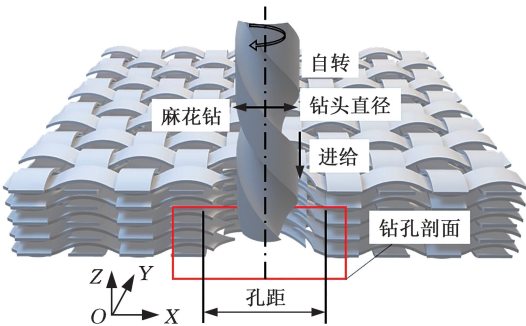


图 3 麻花钻加工 Cf/SiC 孔示意图

Fig.3 Schematic diagram of Cf/SiC hole processing with fried dough twists drill

### 3 试验条件与过程

#### 3.1 磨削性能试验装置

本磨削试验在高速数控雕铣机床(北京精雕 JDLVG600E-A10, 主轴转速  $0 \sim 2.8 \times 10^4$  r/min, 最大功率 11 kW)上进行。试验过程中,钻削力采用 Kister 9272 型号测力仪进行测量。

加工性能试验系统如图 4 所示,工件通过夹板夹在基板上,最后通过螺栓将测力仪固定在精雕机的工作台上,钻削过程力信号由测力仪捕获,通过信号放大器和动态信号分析仪传输至计算机端,计算机端即可及时记录分析试验过程获得测力数据。

#### 3.2 Cf/SiC 陶瓷基复合材料工件与金刚石铣磨头

试验材料为 Cf/SiC 陶瓷基复合材料,由碳纤维增强骨架和碳化硅基体交织而成,厚度为 2.4 mm。试验所用三种金刚石铣磨头分别为平底电镀铣磨头、平底钎焊铣磨头和取芯钎焊铣磨头,如图 5 所示。

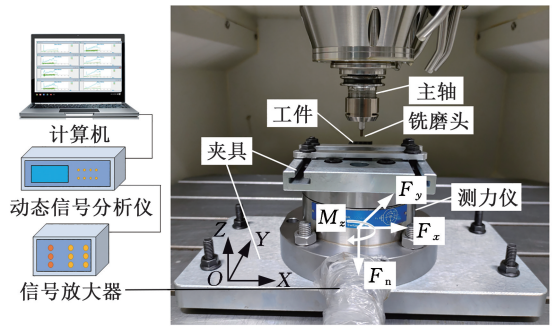


图 4 磨削加工试验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of grinding test system

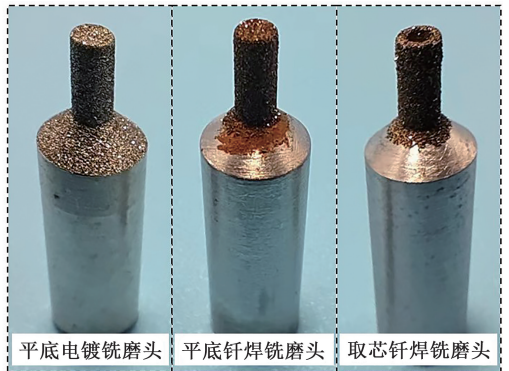


图 5 金刚石铣磨头实物图

Fig.5 Physical image of diamond milling head

三种金刚石铣磨头的金刚石种类、外径尺寸、取芯尺寸、制备来源见表 1。自行制备的钎焊金刚石铣磨头是采用 CuSn19Ti10 的铜基钎料在 VSF200 型真空钎焊炉(加热温度  $850 \sim 900$  °C)制备而成的。

表 1 铣磨头参数

Tab.1 Parameters of milling head

刀具类型	金刚石品级及目数	外径/mm	取芯尺寸	来源
平底电镀	四型半 230/270 目	2.2	无	深圳景旭
平底钎焊	四型半 230/270 目	2.2	无	自行制备
取芯钎焊	四型半 230/270 目	2.2	内径 1 mm 深度 4 mm	自行制备

#### 3.3 试验方案

使用干式磨削加工,试验参数见表 2。试验方法如下:分别使用平底电镀铣磨头、平底钎焊铣磨头和取芯钎焊铣磨头对厚度为 2.4 mm 的 Cf/SiC 陶瓷基复合材料进行贴壁螺旋钻 4 mm 微孔加工。每次钻孔过程都使用 Kister 9272 测力,加工完成后使用电子显微镜观测刀具形貌;每加工完成 3 个孔即超声清洗刀具,使用 JSM-IT500LA 型钨灯丝扫描电子显微镜(SEM)对刀具、工件形貌进行观测;加工至金刚石铣磨头出现基体损伤、磨粒脱落严重失去加工能力(报废)。

数据处理方法如下:①高频波形曲线。使用平底钎焊铣磨头对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料板进

表 2 加工参数

Tab.2 Processing parameter

主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	25 000
孔径 $d/\text{mm}$	4
螺距 $P/\text{mm}$	0.066
进给速度 $v/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	200

行螺旋钻孔,所获得的周向力  $F_x$ 、 $F_y$ ,轴向力  $F_z$  和扭矩  $M_z$  四个量表示为经典高频波形曲线信号。②轴向力及扭矩。数据共分 6 组,每组数据分别为每种刀具钻取 3 个孔数据的平均值。其中,三种刀具入口处的轴向力均为单次钻孔加工过程入口处的最大轴向力,出口处的轴向力为单层钻孔加工过程的出口处最大轴向力,扭矩和平均轴向力均为去除入口处和出口处的数据取平稳阶段平均值计算得到。③直径偏差。试验过程中,钻取三个孔都进行刀具清洗和 SEM 图拍摄,且直径偏差除了受到刀具堵塞、磨损的影响以外,还受机床工作环境的稳定性和刚性以及机床操作手法等钻孔条件变化的影响。因此,针对微孔直径偏差的数据分析,本文将公称直径与实测直径的差值作为每个孔的直径偏差<sup>[5]</sup>。一般高速铣削加工的精度为 IT7~IT8,本文试验选取 IT8 为合格标准。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 钻削力分析

Kister 9272 测力仪测量数据为周向力  $F_x$ 、 $F_y$ ,轴向力  $F_z$  和扭矩  $M_z$  四个量。

1)高频波形曲线。在表 2 所示加工条件下,使用平底钎焊铣磨头对 Cf/SiC 陶瓷基复合材料板螺旋钻孔获得的径向力分量  $F_x$ (图 6a)、径向力分量  $F_y$ (图 6b)、扭矩  $M_z$ (图 6c)、轴向力  $F_z$ (图 6d)稳定的典型信号。

图 6a~图 6c 均呈现平稳的正弦波信号,这是由于“微刃切削”下加工时应力集中较小,钻削力稳定;图 6d 的入口处和出口处均有明显增大,其原因是入口处刀具进刀速度较小,切削能力较弱,工件受到较大的轴向推力。

2)轴向力比较。图 7 为平底电镀铣磨头、平底钎焊铣磨头和取芯钎焊铣磨头 3 种刀具的轴向力变化折线图和扭矩变化折线图。

本试验中,平底电镀铣磨头加工 6 个孔达到报废标准,平底钎焊铣磨头加工 9 个孔达到报废标准,取芯钎焊铣磨头加工 18 个孔达到报废标准。本试验采用的取芯钎焊铣磨头使用寿命是平底电镀铣磨头的 3.6 倍,是平底钎焊铣磨头的 2 倍。

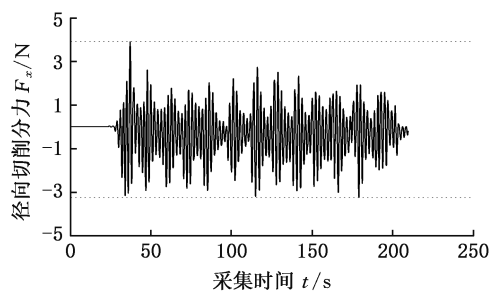
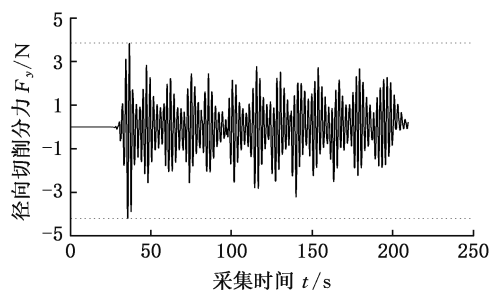
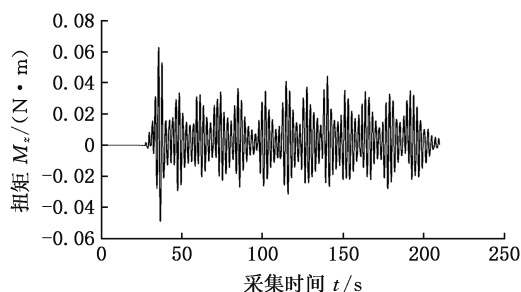
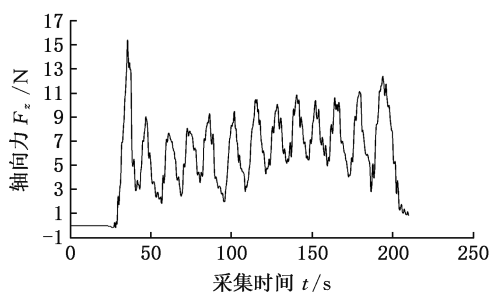
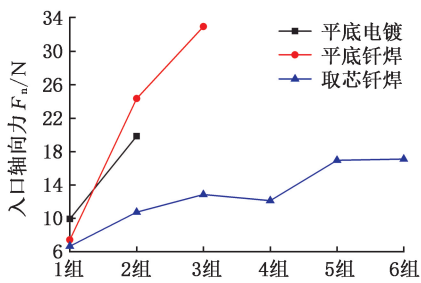
(a) 径向力分量  $F_x$  典型信号(b) 径向力分量  $F_y$  典型信号(c) 扭矩  $M_z$  典型信号(d) 轴向力  $F_z$  典型信号

图 6 平底钎焊铣磨头加工典型测力信号

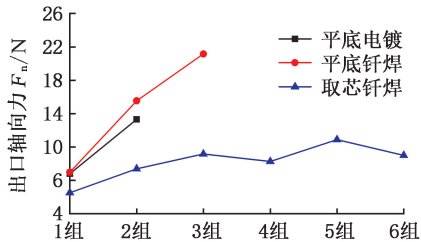
Fig.6 Typical force measurement signals for machining flat bottomed brazed milling heads

根据上述试验数据处理办法,将各个制孔过程的入口处最大轴向力、出口处最大轴向力、平稳阶段轴向力及平稳阶段扭矩所获得的数据分为 6 组,每组数据分别为每种刀具钻取 3 个孔数据的平均值,分别得到图 7a~图 7d。

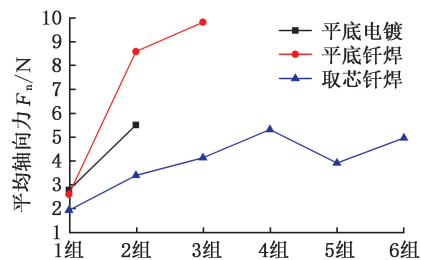
以图 7 所示数据计算分析,入口轴向力均值,取芯钎焊铣磨头为平底电镀铣磨头的 81.9%,为平底钎焊铣磨头的 56.5%,其中,平底钎焊铣磨头是平底电镀铣磨头的 145.1%;出口轴向力均值,取芯钎焊铣磨头为平底电镀铣磨头的 81.2%,为



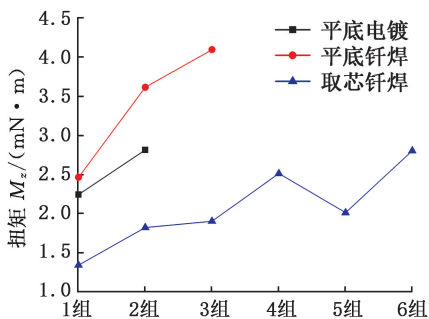
(a) 入口处最大轴向力折线图



(b) 出口处最大轴向力折线图



(c) 平均轴向力折线图



(d) 平稳阶段平均扭矩折线图

图 7 测力对比折线图

Fig.7 Force comparison line chart

平底钎焊铣磨头的 55.7%，其中，平底钎焊铣磨头是平底电镀铣磨头的 145.7%；稳定阶段，平均轴向力均值，取芯钎焊铣磨头为平底电镀铣磨头的 95.1%，为平底钎焊铣磨头的 56.2%，其中，平底钎焊铣磨头是平底电镀铣磨头的 169.2%；稳定阶段，扭矩均值，取芯钎焊铣磨头为平底电镀铣磨头的 81.7%，为平底钎焊铣磨头的 60.9%，其中，平底钎焊铣磨头是平底电镀铣磨头的 134.1%。

由上可知，平底钎焊铣磨头各处的轴向力和扭矩均有一个明显高于取芯钎焊铣磨头的趋势，其原因是取芯钎焊铣磨头为端面挖去一个内径 1 mm、深度 4 mm 的圆孔，接触工件的表面积仅为平底钎焊刀具的 3/4，从而导致轴向力和扭矩

均较小。平底电镀铣磨头相比平底钎焊铣磨头表面金刚石排布更为稀疏，接触工件的表面积相对较小而导致磨削力较小，故其轴向力和扭矩略小。由于表面金刚石排布更为稀疏且把持力不如钎焊金刚石刀具，虽然轴向力和扭矩较小但是金刚石磨粒容易脱落，故平底电镀铣磨头加工寿命不及钎焊金刚石铣磨头。

#### 4.2 孔加工质量分析

1) 直径偏差。Cf/SiC 陶瓷基复合材料工件应用过程中，为了连接操作的准确，在公差范围内获得孔是必要的。图 8 为三种刀具加工微孔的直径偏差折线图。

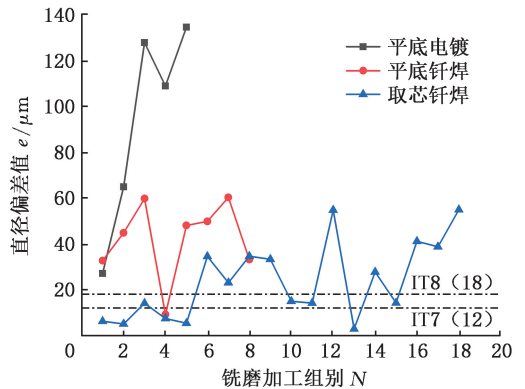


图 8 微孔直径偏差折线图

Fig.8 Box plot of micropore diameter deviation

由上述试验数据处理方法可知，试验过程中，直径偏差除了受到刀具堵塞、磨损影响以外，还受机床工作环境的稳定性和刚性以及机床操作手法等外部条件的影响，故以公称直径与实测直径的差值作为每个孔的直径偏差。

高速数控铣床的加工精度一般为 IT7~IT8，本试验以 IT8(18 μm 以下)为合格标准，取芯钎焊铣磨头加工孔合格率达到 50%，平底钎焊铣磨头加工孔合格率为 12.5%，平底电镀铣磨头加工孔合格率为 0，其中，取芯钎焊铣磨头加工的孔有 27.8%达到 IT7(12 μm 以下)，且由图 8 可以明显看出，电镀铣磨头钻孔直径的偏差值相对于钎焊铣磨头的偏差值较大，其原因主要为电镀金刚石颗粒把持力不足，金刚石容易脱落而导致刀具的尺寸持续变化较大。可以看出，取芯钎焊铣磨头的直径偏差整体较小，原因是取芯钎焊铣磨头取芯处能够容纳一部分磨屑并有利于排屑，其磨削力较小且稳定，故直径偏差较小。

2) 微孔加工的缺陷。钻孔过程中的微孔缺陷以纤维拔出、毛刺、分层等形式为主。碳纤维和碳化硅基体性能的差异，以及纤维交织取向、厚度的差异是造成大多数损伤的主要原因。

使用 JSM-IT500LA 型钨灯丝扫描电子显微

镜拍摄钻孔加工完成之后的工件形貌,图 9a~图 9c 为典型钻微孔的工件 SEM 图,图 9d、图 9e 为部分微孔的缺陷现象放大示意图。电镀铈磨头加工的孔相对于钎焊铈磨头来说撕裂分层现象更为严重,其原因是其磨粒分布较稀疏,磨粒持续快速脱落导致加工过程的轴向力较大,纤维被推出。取芯钎焊铈磨头轴向力最小,故其撕裂缺陷现象较少,微孔缺陷以毛刺为主。

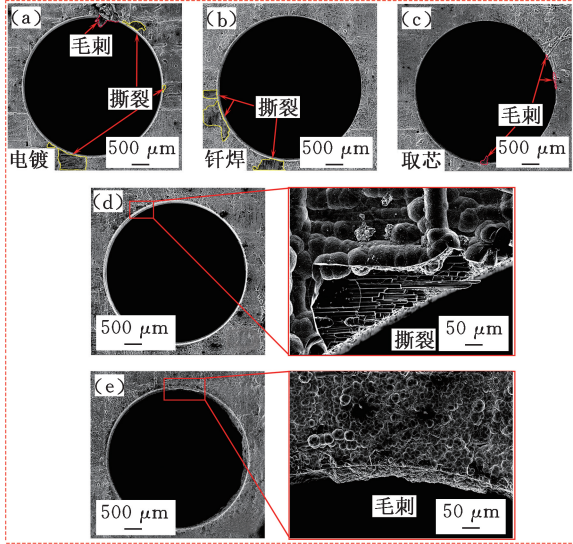


图 9 典型微孔缺陷 SEM 图

Fig.9 SEM image of typical microporous defects

### 4.3 工具磨损状态分析

使用 JSM-IT500LA 型钨灯丝扫描电子显微镜拍摄铈磨头钻孔加工过程形貌变化。图 10 为平底电镀铈磨头、平底钎焊铈磨头和取芯钎焊铈磨头未加工之前的端面 SEM 图。

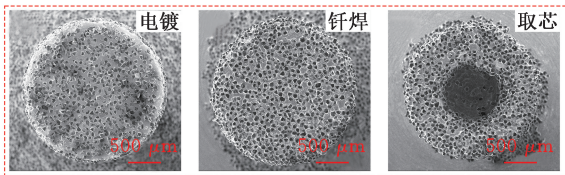
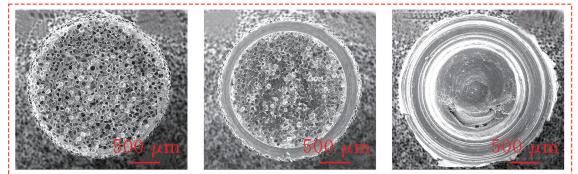


图 10 未加工金刚石铈磨头端面 SEM 图

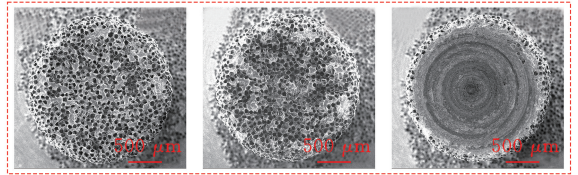
Fig.10 SEM image of the end face of the unprocessed diamond milling head

平底电镀金刚石铈磨头、平底钎焊金刚石铈磨头、取芯钎焊金刚石铈磨头每加工三次孔拍摄一次的刀具端面 SEM 图见图 11,每组图片为一种刀具加工开始至刀具报废的 SEM 图。

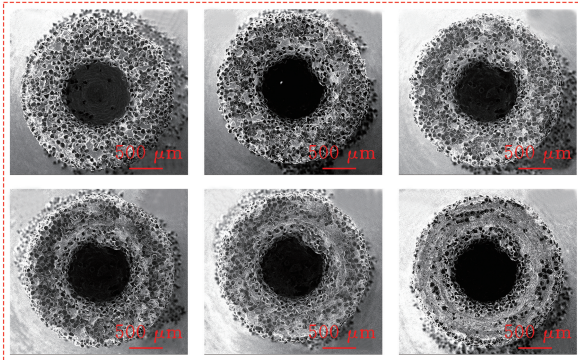
图 12 为三种铈磨头加工至报废的侧面 SEM 图。平底电镀铈磨头加工第 6 个孔的过程中发生火花飞溅现象,致使刀具基体损伤破坏;平底钎焊铈磨头出现严重的热损伤现象;取芯钎焊铈磨头加工至端面处金刚石磨粒脱落(加工第 18 个孔),电子显微镜下仍无明显热损伤。可能原因是端面



(a)平底电镀铈磨头



(b)平底钎焊铈磨头



(c)取芯钎焊铈磨头

图 11 加工过程金刚石铈磨头端面磨损 SEM 图

Fig.11 SEM image of diamond milling head end face wear during machining process

取芯结构能够为磨屑提供一个容屑空间,有助于减少磨屑堵塞问题;加工过程还增加了散热面积减少刀具热损伤;本次试验中取芯钎焊铈磨头使用寿命是平底电镀铈磨头的 300%,是平底钎焊铈磨头的 200%。

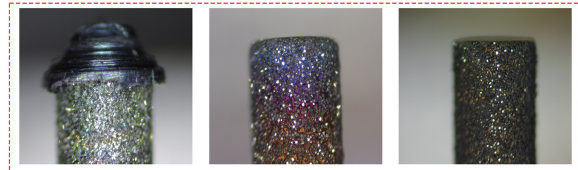


图 12 金刚石铈磨头热损伤的光学显微镜图

Fig.12 Optical microscope image of thermal damage in diamond milling heads

## 5 结论

1)加工寿命方面,取芯钎焊铈磨头使用寿命是平底电镀铈磨头的 3.6 倍,是平底钎焊铈磨头的 2 倍,其原因主要与钎焊法制备的小直径金刚石磨粒工具在磨粒出刃及把持方面优于电镀法制备的工具有关。

2)钻削力方面,与其他两种形式的铈磨头相比,取芯钎焊铈磨头在磨削过程中明显保持较小的轴向力和扭矩。取芯钎焊铈磨头是切断式结

构, 钻削过程的端面接触面积小且位于高线速度区, 因而表现出稳定且较低的力信号。

3) 微孔加工质量方面, 以 IT8 为合格控制标准, 取芯钎焊铣磨头的加工合格率达 50%, 是平底钎焊铣磨头加工合格率的 4 倍。主要得益于钎焊法制备的金刚石铣磨头磨粒把持度高, 金刚石磨粒不易脱落, 铣磨头直径尺寸保持较为稳定。此外, 取芯钎焊铣磨头的轴向力和扭矩较小, 加工过程稳定, 使得孔加工质量更高。

参考文献:

[1] LIU Qiong, HUANG Guoqin, XU Yongchao. Investigation of Drilling 2D Cf/C - SiC Composites with Brazed Diamond Core Drills[J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(2):349-356.

[2] 温泉, 赵悦, 巩亚东. 碳纤维复合材料小孔加工的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2018(1):86-89.  
WEN Quan, ZHAO Yue, GONG Yadong. Experimental Study on Small Hole Machining of Carbon Fiber Reinforced Composites[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1):86-89.

[3] 雷瑛, 李达. CFRP 微孔钻削主轴速度参数实验优化及孔壁质量研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4):69-71.  
LEI Ying, LI Da. Experimental Optimization of CFRP Microhole Drilling Speed Parameters and Study of Hole Wall Quality[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(4):69-71.

[4] 高航, 姚舜铭, 鲍永杰, 等. 低刚度约束下复合材料螺旋铣磨制孔[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(3):42-47.  
GAO Hang, YAO Shunming, BAO Yongjie, et al. Composite Holes by Spiral Milling at Low Stiffness Have Higher Accuracy[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(3):42-47.

[5] SULTANA Ireen, 史忠德, ATTIA Helmi, 等. 单层金刚石工具螺旋钻削复合材料的性能比较[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(3):273-284.  
IREEN SULTANA, SHI Zhongde, HELMI ATTIA, et al. Comparative Evaluation of the Performances of Single Layer Diamond Tools in Orbital Drilling of Composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(3):273-284.

[6] XING Youqiang, DENG Jianxin, ZHANG Guodong, et al. Assessment in Drilling of C/C-SiC Composites Using Brazed Diamond Drills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26:31-43.

[7] 陈玉荣, 苏宏华, 傅玉灿, 等. 超声振动辅助干式钻

削 SiC<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(21):47-51.

CHEN Yurong, SU Honghua, FU Yucan, et al. Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Dry Drilling for SiC<sub>f</sub>/SiC Ceramic Matrix Composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(21):47-51.

[8] 丁凯, 傅玉灿, 苏宏华, 等. C/SiC 复合材料组织对磨削力与加工表面质量的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 24(14):1886-1890.  
DING Kai, FU Yucan, SU Honghua, et al. Effect of C/SiC Composites Material Structure on Grinding Forces and Machined Surface Quality[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(14):1886-1890.

[9] 贺虎, 苏宏华, 陈燕, 等. 碳纤维复合材料钻削加工对比试验[J]. 航空制造技术, 2011, 54(14):52-54.  
HE Hu, SU Honghua, CHEN Yan, et al. Drilling Contrast Experiment of Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(14):52-54.

[10] 高航, 李睿祺, 许启灏, 等. 金刚石工具加工 SiO<sub>2t</sub>/SiO<sub>2</sub> 复合材料的可行性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(1):75-81.  
GAO Hang, LI Ruiqi, XU Qihao, et al. Feasibility Study on SiO<sub>2t</sub>/SiO<sub>2</sub> Composites Processed by Diamond Tools[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(1):75-81.

[11] BIERMANN D, BATHE T, RAUTERT C. Core Drilling of Fiber Reinforced Materials Using Abrasive Tools[J]. Procedia CIRP, 2017, 66:175-180.

[12] 郑雷, 袁军堂, 汪振华. 纤维增强复合材料磨削制孔的表面微观研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(12):1492-1496.  
ZHENG Lei, YUAN Juntang, WANG Zhenhua. Microscopic Study of Ground Surfaces of Drilled Holes in Fibre Reinforced Plastics[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(12):1492-1496.

(编辑 陈勇)

作者简介: 洪猛杰, 男, 2000 年生, 硕士研究生。研究方向为智能制造与精密加工。黄国钦\* (通信作者), 男, 1981 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为超硬磨料工具、高效精密加工、智能制造与装备。E-mail: smarthgq@hqu.edu.cn.

本文引用格式:

洪猛杰, 陈卓, 周嘉怡, 等. 钎焊金刚石铣磨头加工 Cf/SiC 复合材料微孔的试验研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(3):391-397.  
HONG Mengjie, CHEN Zhuo, ZHOU Jiayi, et al. Experimental study on Machining Micro Holes in Cf/SiC Composite Materials Using Brazed Diamond Milling Head[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):391-397.