

陶瓷基复合材料超声辅助加工技术*

丁凯¹, 苏宏华², 傅玉灿², 崔方方¹, 李奇林¹, 雷卫宁¹

(1. 江苏理工学院机械工程学院, 常州 213001;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 陶瓷基复合材料具有优良的力学性能以及突出的耐高温、轻质等特性, 在航空航天等领域具有广阔的应用前景。但由于高硬脆性特点, 陶瓷基复合材料加工难度较大。诸多研究表明, 超声辅助加工技术是一种相对合适的加工方法, 与普通机械加工相比可有效降低切削力、改善加工质量等。对发展较为成熟的 C_f/SiC 、 SiC_f/SiC 两种陶瓷基复合材料的超声辅助钻削/磨削加工技术研究进展进行了介绍, 分析了其中存在的问题, 并提出了相应的对策。

关键词: 陶瓷基复合材料; 超声辅助钻削; 超声辅助磨削; 加工质量评价体系; 参数匹配性

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.042



丁凯

博士, 江苏理工学院机械工程学院讲师, 研究方向为陶瓷及其复合材料的高性能复合加工技术。参与国家自然科学基金 1 项, 主持江苏省高校自然科学研究面上项目 1 项。

陶瓷基复合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMC) 是在陶瓷基体中引入第二相材料, 使之增韧、增强的多相材料。与未增强陶瓷基体相比, 陶瓷基复合材料具有更高的硬度、断

* 基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目 (15KJB460010, 14KJB460011)。

裂韧性以及更优良的耐磨、耐热、抗蠕变、尺寸稳定性、抗烧蚀等性能特点, 在航空航天、国防领域具有广阔的应用前景^[1-4]。

陶瓷基复合材料基体主要包括氧化铝 (Al_2O_3)、碳化硅 (SiC)、氧化锆 (ZrO_2)、氮化硅 (Si_3N_4) 等; 增强体主要包括连续纤维、晶须、颗粒。研究表明, 与晶须、颗粒增韧方式相比, 连续纤维增韧具有最显著的效果^[2,5-6]。其中, 碳纤维增强碳化硅基复合材料 (C_f/SiC)^[7-8]、碳化硅纤维增强碳化硅基复合材料 (SiC_f/SiC)^[9-10] 是目前研究较多、应用较为成熟的陶瓷基复合材料。按照结构特征, 连续纤维增强陶瓷基复合材料包括二维编织结构和三维编织结构^[11-13]。相比较而言, 三维编织复合材料具有更优良的综合性能指标, 但制备工艺繁琐, 纤维变形严重, 性能具有较大的分散性。 C_f/SiC 复合材料使用温度可达到 $1650^\circ C$ 以上; 密度为 $1.7\sim 2.5g/cm^3$, 仅为高温金属结构材料的 $1/7\sim 1/3$, 该种材料的应用可极大减轻飞行器结构重量、提高飞行器搭载能力^[5]。目前国外已研制出 C_f/SiC 复合材料的

飞行器热防护部件、喷管和喉衬材料等, 如 NASA 已将 C_f/SiC 复合材料制作的襟翼、热防护部件成功应用于其 X 系列 (X-37、X-38) 航天试验机上^[11]。

虽然 C_f/SiC 等陶瓷基复合材料多数采用了如熔体浸渗法、化学气相渗透法等^[1-4] 近净成形的制备方法, 但为了满足装配及使用要求, 其构件一般需经过机械加工, 以达到零部件的尺寸形状精度和表面质量要求^[12]。根据应用场合不同, 陶瓷基复合材料主要加工形式包括孔加工^[13] (如飞行器襟翼、刹车片等) 及型面加工^[14-15] (如望远镜的反射镜基面)。虽然陶瓷基复合材料脆性低于陶瓷材料, 但由于其高硬度及纤维编织结构特征^[11-12], 仍然属于典型的难加工材料。目前陶瓷基复合材料构件制备时一般采用金刚石工具进行磨削/钻削或超声辅助磨削/钻削加工^[11,16]。根据 Tawakoli^[16] 的报导, 采用金刚石砂轮磨削加工陶瓷基复合材料构件时, 其加工成本可占到陶瓷基复合材料构件总生产成本的 $60\%\sim 80\%$, 甚至高达 90% 。其

他相关研究表明, C_f/SiC 等复合材料在磨削/钻削加工时极易产生纤维脆性断裂、拔出、加工孔出入口撕裂等缺陷^[17-20], 加工质量较差。因此, 对于陶瓷基复合材料而言, 如何改善其加工质量仍是该类材料所面临的关键问题之一。

超声辅助加工是在传统机械加工中工具与工件相对运动的基础上, 通过超声振动装置在工具或者工件上施加超声振动, 以改善材料加工性能的一种高性能复合加工技术^[21-24]。由于超声振动作用的引入, 工具与工件之间的接触状态和作用机理均发生变化, 材料去除机理也得以改变。根据加工形式的不同, 超声辅助加工包括超声辅助钻削、超声辅助磨削等^[25-29]。诸多研究表明, 对于陶瓷及其复合材料等脆性材料而言, 超声辅助加工可降低切削力并改善加工质量, 是一种非常适合的先进技术。因此, 采用超声辅助钻削/磨削技术以实现陶瓷基复合材料的高质量加工一直是研究的热点问题。

陶瓷基复合材料 超声辅助钻削技术

1 超声辅助钻削加工机理

典型超声辅助钻削装置如图 1 所示。超声辅助钻削时, 金刚石套料钻沿轴向以一定频率进行超声振动的同时以一定转速做旋转运动, 并通过轴向进给运动实现孔加工。在这一过程中, 套料钻端面及侧面上单颗金刚石磨粒的运动轨迹均为空间正弦曲线。在常用超声振动速度($v=3\sim 4\text{m/s}$)及钻削进给速度($v_f=10\sim 100\text{mm/min}$)条件下, 套料钻端面磨粒与工件之间呈高频“接触-分离”状态, 即套料钻端面上的金刚石磨粒通过对工件材料的高频撞击及正常磨削的复合作用实现材料去除^[20]。同时, 套料钻侧面磨粒起到一定程度的辅助磨削作用, 在表面微细沟槽自成机理^[25]作用下, 相邻磨粒在孔内壁表

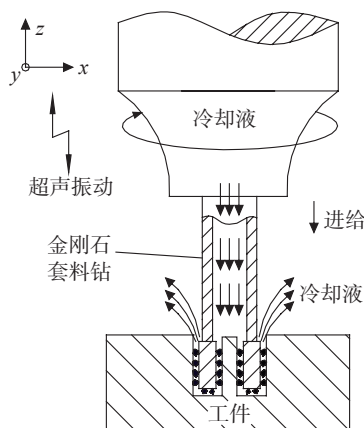


图1 超声辅助钻削加工示意图

Fig.1 Illustration of ultrasonic assisted drilling

面刻划出的沟槽相互交错重叠, 有利于改善其表面质量。

2 钻削力和扭矩

Li 等^[30]在超声振动频率 $f=20\text{kHz}$, 振幅为 35% 功率值, 主轴转速 $n=3000\text{r/min}$, 钻削进给速度 $v_f=0.09\text{mm/s}$ 条件下, 采用金刚石套料钻对两种不同规格的二维编织结构 SiC_f/SiC 复合材料板进行了普通钻削(Conventional Drilling, CD)与超声辅助钻削(Ultrasonic Assisted Drilling, UAD)对比试验。观察 SiC_f/SiC 复合材料的钻削力信号可知, 在钻削过程中, 由于这种材料显著的各向异性, 钻削力出现了明显的波动。同时可看出, 在相同条件下超声辅助钻削过程中的钻削力始终低于普通钻削时, 最大降低幅度约为 50%。

Ding 等^[20]在振动频率 $f=24.3\text{kHz}$, 振幅为 $A=3.5\mu\text{m}$, 主轴转速 $n=1000\sim 10000\text{r/min}$, 进给速度 $v_f=10\sim 40\text{mm/min}$ 条件下对二维编织 C_f/SiC 复合材料进行了超声辅助钻削与普通钻削对比试验。钻削力及扭矩信号同样表明: 由于 C_f/SiC 复合材料显著的各向异性, 钻削过程中其钻削力及扭矩也出现了较明显的波动, 如图 2、图 3 所示^[20]。同时可以看出, 相同条件下超声辅助钻削时的钻削力小于普通钻削时。在试验条件下, 与普通钻削相比, 超声辅助钻

削可降低钻削力约 7.4%~23%, 降低扭矩约 8.5%~47.6%。综上所述, 金刚石磨粒对材料的锤击作用及二者“分离”时磨削液对加工区域充分的冲刷作用是超声辅助钻削可降低钻削力的关键原因。

Liu 等^[27]采用椭圆超声振动钻削技术(即二维超声振动)对与二维编织 C_f/SiC 复合材料具有类似结构的 CFRP 进行了超声辅助钻削、普通钻削对比试验, 结果表明与普通钻削相比, 超声辅助钻削最大可降低钻削力、扭矩分别约为 60%、45%, 并指出超声辅助钻削的断续切削过程及良好的排屑能力是其可降低钻削力及扭矩的原因。

3 加工孔出口质量

C_f/SiC 复合材料的编织结构特点使其在钻削加工时出口处易出现撕裂缺陷。Ho 等^[19]采用以 SiC 、 B_4C 游离磨料为介质的超声加工方法对二维编织 C_f/SiC 复合材料进行了孔加工试验, 结果表明加工孔出口处的撕裂程度随工具静载荷增大而增大。Liu 等^[27]的研究结果表明, 与普通钻削相比, 一定参数条件下超声辅助钻削可改善孔出口质量。

Ding 等^[20]对 C_f/SiC 复合材料超声辅助钻削过程中的钻削力、扭矩与孔出口撕裂程度之间的关系进行了分析。结果表明, 相同条件下由于超声辅助钻削时钻削力与扭矩均小于普通钻削时, 相应地超声辅助钻削所获得的孔出口撕裂尺寸小于普通钻削时; 所采用的钻削工艺参数产生的钻削力越小, 则产生的孔出口撕裂尺寸越小(如图 4 所示)^[20], 并结合 C_f/SiC 复合材料在受力状态下微裂纹形成、扩展直至材料断裂的变化过程对上述现象进行了解释。这一规律同样也存在于 CFRP 材料^[27]的超声辅助钻削过程中。

4 孔内壁表面形貌

采用套料钻进行孔加工时, 在套料钻内部将获得被加工对象材料去

除而形成的芯棒。该芯棒材料的表面形貌可近似地反映加工孔内壁的表面形貌。Ding 等^[20]借助于 C_f/SiC 复合材料超声辅助钻削及普通钻削过程中产生的芯棒对孔内壁的表面形貌近似度进行了研究,图 5^[20]为 $f=24.3\text{kHz}$, $A=3.5\mu\text{m}$, $n=8000\text{r/min}$, $v_f=10\text{mm/min}$ 条件下所获得的芯棒的表面形貌。从图 5 中可以看出, C_f/SiC 复合材料钻削加工时所产生

的芯棒表面形貌特征主要包括材料内部固有的孔隙、碳纤维层状脆断、碳纤维拔出后形成的凹坑 3 部分。对比普通钻削与超声辅助钻削,可看出相同条件下普通钻削将比超声辅助钻削引起更大的碳纤维层状脆断尺寸及凹坑尺寸,从而导致孔内壁质量较差。图 6 (a)、(b)分别为相同条件下的普通钻削及超声辅助钻削孔内壁的表面轮廓曲线。可以看出,与普通钻削相比较,超声辅助钻削可获得相对平滑的孔内壁表面轮廓曲线,这与图 5 中所显示的规律相吻合。

Liu 等^[27]采用同样的方法对 CFRP 材料超声辅助钻削、普通钻削进行了分析,如图 7 所示。可以看出,与普通钻削相比,超声辅助钻削所获得芯棒表面几乎没有明显的分层现象,且表面无明显切屑残留与 C_f/SiC 复合材料超声辅助钻削加工特点一致。

总结超声辅助钻削可获得优于普通钻削的孔内壁质量的原因,主要包括如下方面: 较低的钻削力与扭矩、工具侧壁上的金刚石磨粒运动轨迹之间的交错重叠

作用及良好的排屑能力。

陶瓷基复合材料 超声辅助磨削技术

1 超声辅助磨削加工机理

超声辅助磨削时,超声振动可施加于砂轮上,亦可施加于工件上。按照振动维数的不同,超声辅助磨削(Ultrasonic Assisted Grinding, UAG)的振动形式包括一维振动及二维振动两种^[29-31]。一维振动即超声振动系统只沿一个方向产生振动,振动方向平行或者垂直于磨削加工表面;二维振动指超声振动系统沿两个方向同时产生振动,也称为椭圆振动。图 8 为一维振动超声辅助磨削中的砂轮振动模式及与工件加工表面的位置关系。其中轴向振动时,振动方向可能平行或者垂直于磨削表面;径向振动时,振动方向一般垂直于磨削表面;切向振动时,振动方向平行于磨削表面。

不同的振动维数、振动方向与磨削加工表面的相对位置关系条件下,超声辅助磨削的加工机理各有差异。20 世纪 60 年代,日本学者隈部淳一郎^[25]对超声辅助磨削进行了研究,首先提出了超声辅助磨削表面微细沟槽自成机理。他认为在振动方向平行于加工表面(轴向振动)的加工过程中,在一定的振幅 A 下,每颗磨粒的运动轨迹与附近磨粒的运动轨迹之间出现轨迹重叠,使得切屑被截短、体积变小,最终使得加工表面质量得以改善、磨削力减小。而在振动方向垂直于加工表面时,诸多研究表明材料去除过程源于磨粒对材料的锤击及正常磨削的复合作用。切向振动时,振动方向同样近似平行于加工表面,此时超声辅助磨削的特征在于断续磨削。而二维振动时,超声辅助磨削机理一般为两种一维振动分量对应的加工机理的复合作用。

2 磨削力及其比值

Tawakoli 等^[16]采用金属结合剂

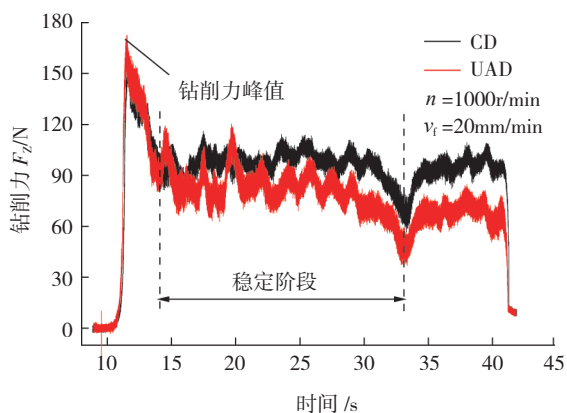


图2 C_f/SiC复合材料钻削力信号
Fig.2 Drilling force signals of C_f/SiC composites

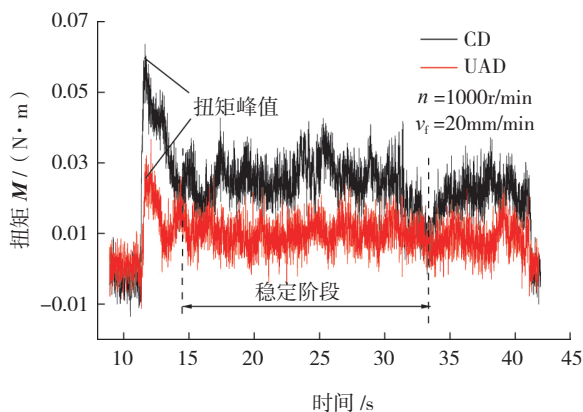
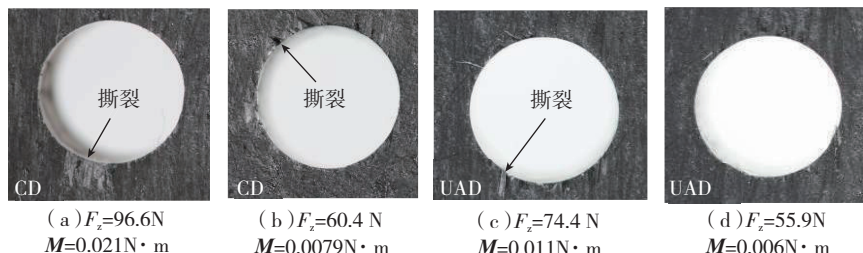


图3 C_f/SiC复合材料扭矩信号
Fig.3 Torque signals of C_f/SiC composites



注: (a)、(c): $n=1000\text{r/min}$, $v_f=20\text{mm/min}$; (b)、(d): $n=7000\text{r/min}$, $v_f=20\text{mm/min}$

图4 普通钻削及超声辅助钻削时孔出口质量对比

Fig.4 Comparison of hole exit quality between CD and UAD

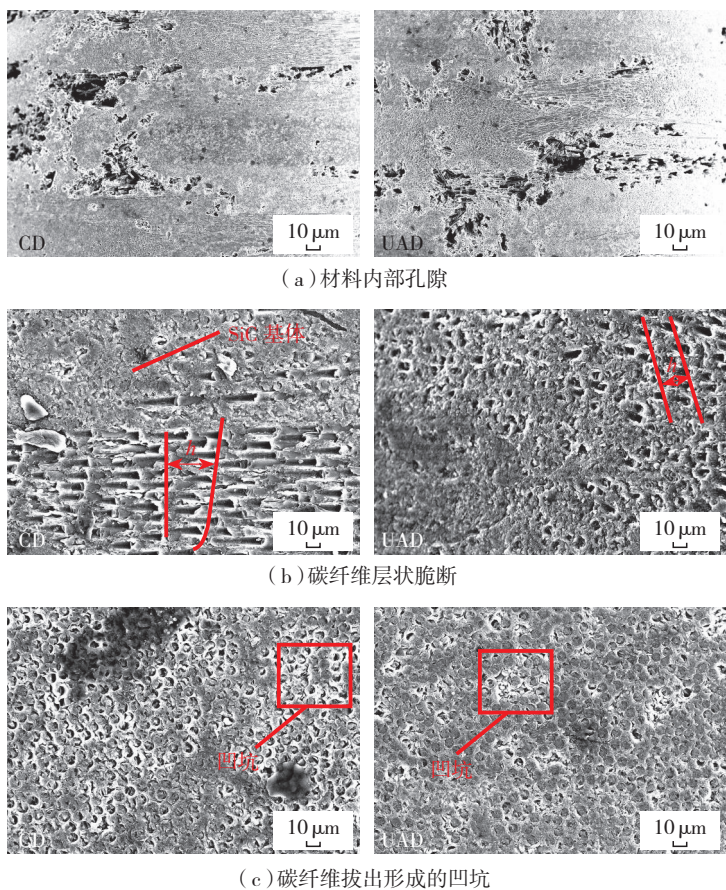


图5 普通钻削及超声辅助钻削C_f/SiC所获得芯棒表面形貌比较
Fig.5 Comparison of rod surface topographies of C_f/SiC by CD and UAD

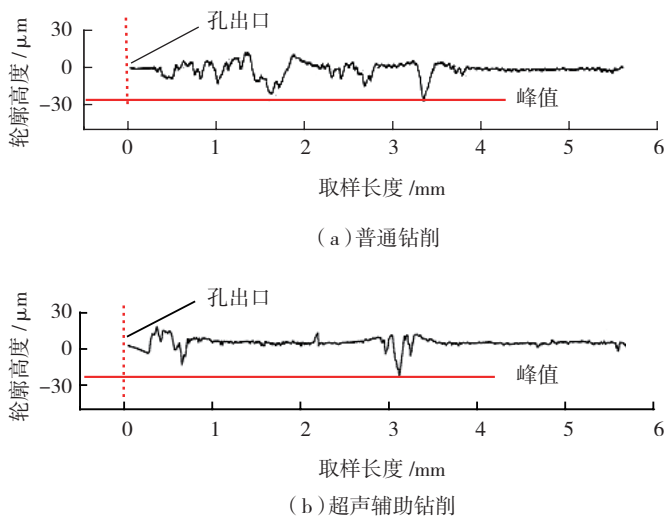


图6 C_f/SiC复合材料加工孔内表面轮廓曲线
Fig.6 Profile curve of the drilled hole inner surface in C_f/SiC

金刚石砂轮对两种不同组分比例(不同含量及规格的碳纤维、不同含量的SiC及Si)的C_f/SiC复合材料进行了普通磨削试验(即无超声辅助作用

的磨削, Conventional Grinding, CG)。结果表明, C_f/SiC复合材料的硬度越大、断裂韧性越小,其磨削力越大。丁凯等^[17]采用树脂结合剂金刚石砂

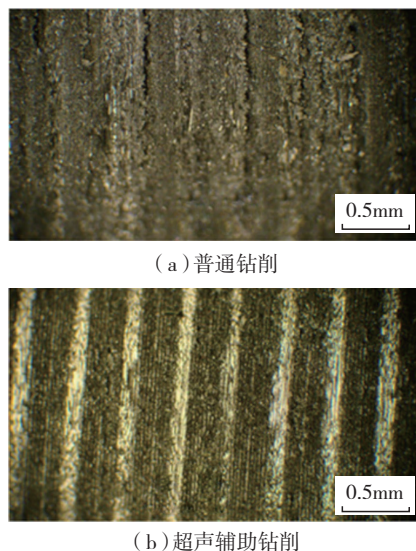


图7 普通钻削及超声辅助钻削CFRP所获得芯棒的表面形貌
Fig.7 Rod surface topographies of CFRP by CD and UAD

轮对二维编织C_f/SiC复合材料及SiC陶瓷进行了普通磨削对比试验,研究发现C_f/SiC复合材料磨削力明显小于SiC陶瓷的磨削力。上述研究均表明, C_f/SiC复合材料的各组分含量及编织结构均对磨削力有着显著的影响。

Azarhoushang等^[32]采用金属结合剂金刚石砂轮对与文献[16]中相同的两种C_f/SiC复合材料进行了超声辅助磨削与普通磨削对比试验。超声辅助磨削时,超声振动方向平行于磨削加工表面,所采用的工艺参数范围为 $f=20\text{kHz}$, $A=8\mu\text{m}$, $v_w=0.5\sim 3\text{m/min}$, $v_s=30\sim 120\text{m/s}$, $a_p=0.05\sim 0.6\text{mm}$ 。研究发现,与普通磨削对比,超声辅助磨削最大可降低磨削力约20%。此外,超声辅助磨削过程中磨削力比(法向力 F_n /切向力 F_t)随振幅的增大而略有降低。

本文作者采用金属结合剂砂轮在DMG Ultrasonic 20 Linear立式高速超声加工中心上对二维编织C_f/SiC复合材料开展了超声辅助磨削与普通磨削对比试验,对磨削力及力比进行了研究。超声辅助磨削时,超声振动方向垂直于磨削加工

表面,所采用的工艺参数范围为 $f=21.5\text{kHz}$, $A=4\mu\text{m}$, $v_w=0.05\sim 0.5\text{m}/\text{min}$, $v_s=1.26\sim 12.6\text{m}/\text{s}$, $a_p=5\sim 20\mu\text{m}$ 。典型磨削力信号及力比结果分别如图9、图10所示。由图9可以看出, C_f/SiC 复合材料磨削加工时法向力波动较大,尤其是普通磨削时。相同条件下,超声辅助磨削时的磨削力小于普通磨削时的磨削力。在试验参数范围内,与普通磨削相比,超声辅助磨削最大可降低法向磨削力约45%,切向磨削力约39%。由图10可以看出,在所有条件下,超声辅助磨削时磨削力比值均小于普通磨削时。在试验参数范围内,超声辅助磨削力比值在9.1~10.5之间,而普通磨削力比值在10.3~11.9之间。磨削力比值的大小取决于材料硬度大小及砂轮的锋利程度,因此与普通磨削相比,超

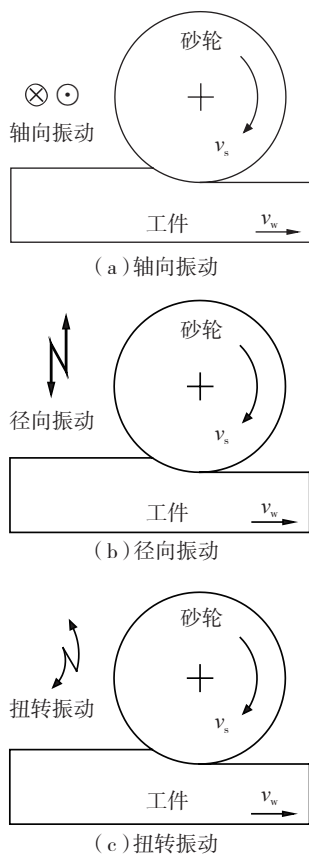


图8 一维振动模式及与加工表面的位置关系

Fig.8 One dimensional vibration mode and its relation with ground surface

声辅助磨削更容易实现材料去除。

Bertsche 等^[33]在 $f=21.6\text{kHz}$, $A=1\sim 5\mu\text{m}$, $v_w=0.5\text{m}/\text{min}$, $v_s=3.14\text{m}/\text{s}$, $a_p=50\mu\text{m}$ 条件下,采用金刚石铣磨头对二维编织 SiC_f/SiC 复合材料进行了铣槽加工试验。研究表明,与普通铣磨相比,超声辅助铣磨可降低切向力约20%,法向力约9%。

综上所述可知, C_f/SiC 复合材料的成分及结构对其超声辅助磨削力有显著的影响;与普通磨削相比,超声辅助磨削可显著降低磨削力。当超声振动方向垂直于磨削表面时,超声辅助磨削亦可显著降低磨削力比,从而明显改善 C_f/SiC 复合材料的磨削加工性。

3 磨削表面形貌与加工损伤形成机制

Ding 等^[34]在超声振动方向垂直于加工表面, $f=21.5\text{kHz}$, $A=4\mu\text{m}$,

$v_w=0.05\sim 0.5\text{m}/\text{min}$, $v_s=1.26\sim 12.6\text{m}/\text{s}$, $a_p=5\sim 20\mu\text{m}$ 条件下对二维编织结构 C_f/SiC 复合材料(原始微观形貌如图11所示)进行了超声辅助磨削与普通磨削试验,并对 C_f/SiC 复合材料磨削表面形貌进行了对比分析。典型普通磨削及超声辅助磨削加工表面微观形貌如图12所示。由图12中可以看出, C_f/SiC 复合材料磨削加工表面材料去除方式主要为孔隙周围(编织角处)纤维束脆性断裂、碳纤维区域阶梯状脆断,且断口形貌呈不规则曲线状。经对比可知,在两种方法所获得的加工表面中,纤维编织角处的断裂尺寸、碳纤维阶梯状断裂尺寸均没有明显差异。其中碳纤维阶梯状断裂尺寸约为 $40\sim 60\mu\text{m}$ (如图12(b)所示)。而在 SiC 区域,与普通磨削表面以光滑区域为主相比,超声

辅助磨削表面产生了由锤击作用所致的较大面积的脆性断裂。

超声辅助磨削过程中, C_f/SiC 复合材料损伤形成可由如下过程描述:在磨削力作用下,表层材料受到剪应力与拉应力的综合作用而产生裂纹。在拉应力作用下, SiC 基体首先出现裂纹并沿垂直于纤维/基体界面的方向扩展,到达界面时,裂纹暂时被阻止;纤维/基体界面结合较弱处(孔隙等组织缺陷的存在所致)在基体剪切和纤维、基体的非同步横向收缩作用下,裂纹重新开始扩展,尺寸增大,部分纤维在弱点处开始出现断裂,最终纤维出现大规模层状断裂。若存

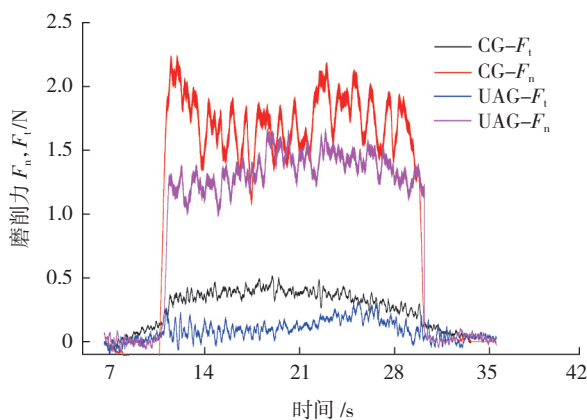


图9 典型 C_f/SiC 复合材料磨削力信号

Fig.9 Typical grinding force signals of C_f/SiC composites

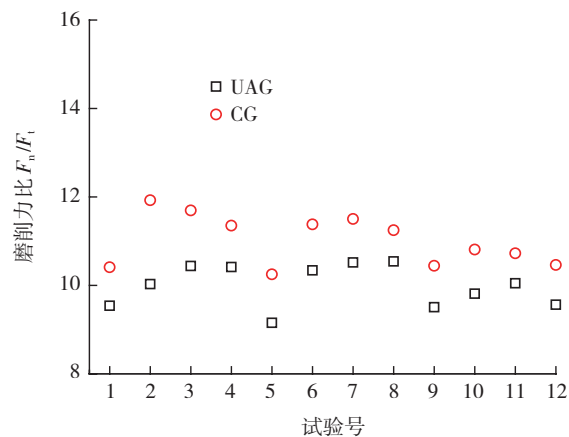


图10 C_f/SiC 超声辅助磨削与普通磨削力比

Fig.10 Grinding force ratio of CG and UAG C_f/SiC

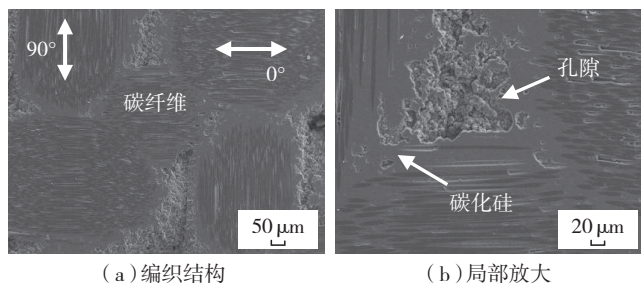
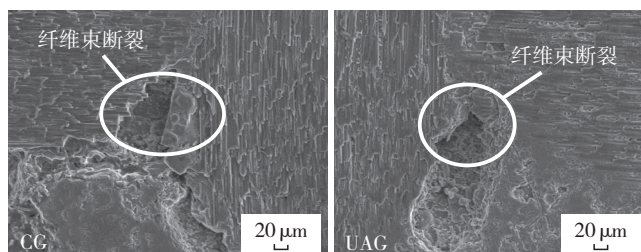
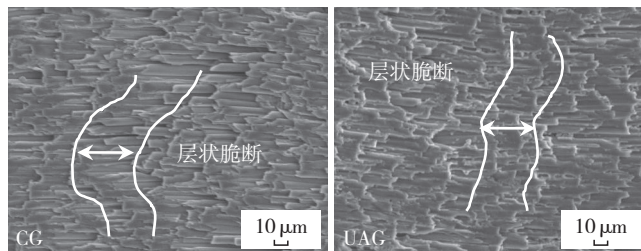


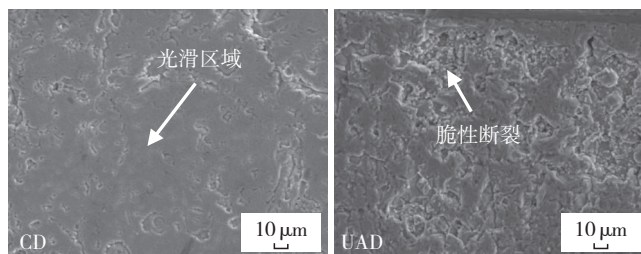
图11 二维编织 C_f/SiC 复合材料微观形貌
Fig.11 Micro-morphology of 2D braided C_f/SiC composites



(a) 孔隙微观形貌



(b) 碳纤维区域表面形貌



(c) SiC区域表面形貌

图12 C_f/SiC 复合材料加工表面微观形貌
($v_s=12.6m/s$, $v_w=100mm/min$, $a_p=10\mu m$)

Fig.12 Micro-morphologies of C_f/SiC ground surface
($v_s=12.6m/s$, $v_w=100mm/min$, $a_p=10\mu m$)

在与加工表面垂直的纤维,则这部分纤维在断裂后部分纤维断头将克服界面摩擦阻力从基体中拔出形成凹坑^[3,17]。

刘杰等^[18]通过对 C_f/SiC 复合材料高速深磨加工表面微观形貌的分析,认为磨削过程中,最初基体因磨削作用先开裂,同时纤维也受到剪切作用。随着磨削的进行,基体材料被逐渐去除、纤维出露,这时纤维同时

受到剪切作用与滑擦作用。随着摩擦加剧,磨粒压入SiC基体与碳纤维内部。由于基体的连续性被破坏,纤维还会受到局部的挤压作用,这些作用共同使纤维发生断裂从而形成脆性断裂。

4 表面粗糙度

丁凯等^[17,35]分别以轮廓算术平均偏差 R_a (取样长度为5.6mm)和表面算数平均偏差 S_a (测量面积为 $500 \times 500 \mu m^2$)为指标对两种二维编织 C_f/SiC 复合材料磨削表面粗糙度值进行了测量。在磨削用量分别为 $v_s=24m/s$, $v_w=4\sim 10m/min$, $a_p=10\sim 40\mu m$ 时, C_f/SiC 复合材料磨削表面粗糙度无明显变化, $R_a=0.8\sim 1.0\mu m$ 。磨削用量分

别为 $v_s=24m/s$, $v_w=4\sim 10m/min$, $a_p=20\sim 80\mu m$ 时, 0° 纤维区域磨削表面粗糙度 S_a 变化幅度很小; 90° 纤维区域磨削表面粗糙度随进给速度的增大无明显变化,但随磨削深度的增大而明显增大。试验条件下, 90° 纤维区域磨削表面粗糙度最大约为 $S_a=6.15\mu m$, 0° 纤维区域磨削表面粗糙度最大约为 $S_a=3.5\mu m$,此时平均值约为 $S_a=4.8\mu m$ 。Tawakoli对文献

[16]中 C_f/SiC 复合材料磨削表面粗糙度进行了测量,指标为 R_a 。测量结果显示, C_f/SiC 复合材料中碳纤维含量越大, R_a 值越大,但 R_a 值随磨削用量的变化而差别较小。

Azarhoushang对文献[32]试验条件下的超声辅助磨削表面(超声振动方向平行于磨削表面)及普通磨削表面粗糙度 R_a 进行了测量,结果表明与普通磨削相比,超声辅助磨削最大可降低 R_a 约30%。Bertsche对文献[33]中超声辅助铣磨 SiC_f/SiC 复合材料所获得的沟槽表面粗糙度 R_a 进行了测量分析。结果表明, 0° 纤维(平行于进给速度方向)表面 R_a 值大于 90° 纤维表面 R_a 值。沿两个方向测量的平均值约为 $R_a=1.5\sim 2.5\mu m$ 。

5 工具磨损

Bertsche等^[33]研究表明,采用超声辅助铣磨加工 SiC/SiC 复合材料时,与普通磨削相比,工具磨损量显著降低,其中铣磨头端面磨损量最大可减少约65%,同时内壁翻边现象也得到有效缓解。Azarhoushang等^[32]的研究同样表明,超声辅助磨削 C_f/SiC 复合材料时砂轮径向磨损量低于普通磨削时。整体而言,现有报道尚缺乏对陶瓷基复合材料超声辅助磨削过程中工具磨损机理、磨损过程与形式及其对加工过程、加工质量的深入研究。

陶瓷基复合材料超声辅助加工技术存在的问题及对策

迄今为止,国内外学者已对以 C_f/SiC 复合材料为代表的陶瓷基复合材料的超声辅助加工技术开展了初步的研究。但综合现有报道来看,超声辅助加工技术在陶瓷基复合材料构件制备过程中的应用仍存在一些问题,这极大地限制了陶瓷基复合材料的推广应用。现以超声辅助磨削/钻削为例对主要问题进行阐述如下。

(1) 缺乏准确的加工表面质量

评价体系。

由于 C_f/SiC 复合材料的编织结构特点及显著的各向异性,其在加工时往往会产生不同于普通陶瓷材料的加工损伤形式,如孔出口撕裂、磨削表面纤维层状脆断、纤维拔出等现象,致使表面质量较差。此时传统的表面质量评价参数(如表面粗糙度 R_a 等)难以准确反映此类材料的加工表面特征,已不再适用。但是现有研究一般仍采用表面粗糙度 R_a 为指标评定 C_f/SiC 复合材料的表面质量。这一问题使得难以对不同加工方法所获得的加工质量进行对比并作出评价。因此,以 C_f/SiC 复合材料为代表的陶瓷基复合材料加工中首先要解决的问题是应建立完善的加工质量评价体系,包括表面/亚表面损伤评价指标、表面粗糙度评价参数等。这就要求:首先,建立完善材料制备标准,确定不同用途时材料各组成相的比例及规格;其次,统计材料加工表面不同组成相、不同方向纤维的损伤形式及尺度,确定一定面积内的参数(如纤维层状脆断尺寸、表面算数平均偏差 S_a 等)以对其加工质量进行评价,为准确评价此类材料的加工质量奠定基础。

(2) 缺乏超声振动参数与加工参数匹配性研究。

超声辅助加工之所以比普通加工具有诸多优势,关键原因之一在于超声辅助加工过程中工具工作层磨粒与加工表面间相对运动状态的改变。以一维轴向振动超声辅助磨削为例,此时砂轮工作层磨粒运动轨迹为空间正弦曲线。当振动方向平行于加工表面时,磨粒运动轨迹间交错重叠,单颗磨粒切厚减小,使得磨削力降低,同时加工表面质量得以改善。而这种磨粒运动轨迹交错重叠程度取决于由超声振动频率、振幅与磨削用量所决定的空间正弦曲线及磨削弧区的形状与尺寸。虽然 Ding 等^[20,34]已初步讨论了磨削用量变化

对超声辅助效果的影响,但仍然不够深入。因此,未来关于陶瓷基复合材料超声辅助加工技术的研究中,应充分考虑超声振动参数、加工用量、加工负载变化可能引起的超声振动参数的改变之间的耦合关系,建立上述参数之间的匹配性模型,才能合理选择各参数以强化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。

(3) 超声辅助加工工具工作层磨粒排布要求不明确。

除超声振动参数与加工用量的匹配性之外,工具工作层磨粒排布规则将影响运动轨迹间的相互干涉程度,进而影响超声辅助磨削效果。因此,工具工作层磨粒的排布规则亦将对超声辅助磨削效果产生至关重要的影响。现有文献尚没有这方面的研究报导。未来超声辅助加工工具设计制作时,在保证其良好振动性能的同时,应在充分考虑陶瓷基复合材料合理的加工用量参数范围、超声振动参数与加工用量的匹配性的基础上,对其工作层磨粒的排布规则进行优化设计,为强化超声辅助加工优势奠定基础。

结束语

陶瓷基复合材料具有优良的力学性能以及突出的耐高温、耐磨、轻质等特性,在航空航天、国防、核能等领域具有广阔的应用前景。经过多年的发展,陶瓷基复合材料在制备、应用基础研究和工程应用研究方面都取得了显著的成果。与此相比,陶瓷基复合材料加工技术的研究相对滞后,仍处于探索阶段。

根据现有文献可知,目前关于陶瓷基复合材料超声辅助加工技术的研究主要集中在超声辅助加工与普通加工在加工负载(钻削力、扭矩、磨削力等)、加工表面形貌、加工质量、工具磨损等内容的对比方面,结果表明超声辅助加工技术相比于普通机

械加工在陶瓷基复合材料加工领域具有许多优势,如可降低切削力、降低加工损伤从而改善加工表面质量、减轻工具磨损等。但同时可以看到,目前陶瓷基复合材料的超声辅助加工技术仍存在诸多问题,如加工质量评价体系不完善、超声辅助加工用量选择缺乏依据、超声辅助加工工具要求不明确、材料结构对加工损伤形成机制的影响不明确等。今后应加强对于上述加工技术内容的研究,同时与陶瓷基复合材料的制备与构件设计、构件考核、构件应用研究等技术环节相联系,才能真正实现推动这类材料在航空航天及其他领域的工程化应用。

参考文献

- [1] WEINERT K, JANSEN T. Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [2] BANSAL N P, LAMON J. Ceramic matrix composites: materials, modelling and technology[M]. Cleveland: Wiley-American Ceramic Society, 2014.
- [3] 李云凯,周张健. 陶瓷及其复合材料[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
LI Yunkai, ZHOU Zhangjian. Ceramics and ceramic matrix composites[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [4] 王超,李凯娜,陈虎,等. 纤维增强陶瓷基复合材料加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(3): 55-60.
WANG Chao, LI Kaina, CHEN Hu, et al. Research progress of processing technology for fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(3): 55-60.
- [5] 邹武. 三维编织 C/SiC 复合材料的制备及其性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2001.
ZOU Wu. Research on preparation and properties of three-dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide matrix composites[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001.
- [6] BORKOWSKI L, CHATTOPADHYAY A. Multi-scale model of woven ceramic matrix composites considering manufacturing induced damage[J]. Composite Structures, 2015, 126: 62-

71.

[7] 代吉祥, 沙建军, 王首豪, 等. 纤维表面状态对 C/C-SiC 复合材料微观组织和相成分的影响 [J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1704-1712.

DAI Jixiang, SHA Jianjun, WANG Shouhao, et al. Influence of fiber surface state on microstructure and phase composition of C/C-SiC composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1704-1712.

[8] KUMAR S, KUMAR A, DEVI G R, et al. Preparation of 3D orthogonal woven C-SiC composite and its characterization for thermo-mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(19): 6210-6216.

[9] 邱海鹏, 陈明伟, 谢魏杰. SiC/SiC 陶瓷基复合材料研究及应用 [J]. 航空制造技术, 2015(14): 94-97.

QIU Haipeng, CHEN Mingwei, XIE Weijie. Research and application of SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(14): 94-97.

[10] ZHANG S, GAO X G, CHEN J, et al. Strength model of the matrix element in SiC/SiC composites[J]. Materials and Design, 2016, 101(5): 66-71.

[11] KRENKEL W. Handbook of ceramic composites[M]. New York: Springer-verlag, 2005.

[12] FUJIHARA K, OHSHIBA K, KOMATSU T, et al. Precision surface grinding characteristics of ceramic matrix composites and structural ceramics with electrolytic in-process dressing[J]. Machining Science and Technology, 1997, 1(1): 81-94.

[13] FAN S W, ZHANG L T, XU Y D, et al. Microstructure and properties of 3D needle-punched carbon/silicon carbide brake materials[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 2390-2398.

[14] ALFANO D, SCATTEIA L, CANTONI S, et al. Emissivity and catalytic measurements on sic-coated carbon fibre reinforced silicon carbide composite[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29: 2045-2051.

[15] ENYA K, YAMADA N, IMAI T, et al. High-precision CTE measurement of hybrid C/SiC composite for cryogenic space telescopes[J]. Cryogenics, 2012, 52: 86-89.

[16] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(2): 112-

119.

[17] 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.

[18] 刘杰, 李海滨, 张小彦, 等. 2D-C/SiC 高速深磨磨削特性及去除机理 [J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 113-118.

LIU Jie, LI Haibin, ZHANG Xiaoyan, et al. Investigation of grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C/SiC in high speed deep grinding[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 113-118.

[19] HO H C, TAI N H, LIU C S. Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC composite material[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(2): 133-142.

[20] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Experimental studies on drilling tool load and machining quality of C/SiC composites in rotary ultrasonic machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2900-2907.

[21] OLIVEIRA J F G, SILVA E J, GUO C, et al. Industrial challenges in grinding[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2009, 58(2): 663-680.

[22] THOE T B, ASPINWALL D K, WISE M L H. Review on ultrasonic machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38(4): 239-255.

[23] TABATABAEI S M K, BEHBAHANI S, MIRIAN S M. Analysis of ultrasonic assisted machining (UAM) on regenerative chatter in turning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(3): 418-425.

[24] NING F D, CONG W L, PEI Z J, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a comparison with grinding[J]. Ultrasonics, 2016, 66: 125-132.

[25] 隈部淳一郎. 精密加工振动切削 (基础与应用)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

KUMABE J. Precision machining: vibration cutting (Foundation and application)[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.

[26] NATEGH M J, RAZAVI H,

ABDULLAH A. Analytical modeling and experimental investigation of ultrasonic-vibration assisted oblique turning, part I: Kinematics analysis[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 63(1): 1-11.

[27] LIU J, ZHANG D Y, QIN L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.

[28] WANG Y, LIN B, WANG S L, et al. Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 77: 66-73.

[29] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic assisted grinding of silicon carbide[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9-12): 1929-1938.

[30] LI Z C, JIAO Y, DEINES T W, et al. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12): 1402-1411.

[31] LIANG Z Q, WU Y B, WANG X B, et al. A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in monocrystal silicon machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(8): 728-736.

[32] AZARHOUSHANG B, TAWAKOLI T. Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9-12): 945-955.

[33] BERTSCHE E, EHMANN K, MALUKHIN K. Ultrasonic slot machining of a silicon carbide matrix composite[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 945-955.

[34] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Experimental study on ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites[J]. Key Engineering Materials, 2014, 620: 128-133.

[35] 丁凯, 傅玉灿, 苏宏华, 等. C/SiC 复合材料磨削的表面 / 亚表面损伤 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2014, 34(4): 36-40.

DING Kai, FU Yucan, SU Honghua, et al. Surface/subsurface damage in C/SiC composites grinding[J]. Diamond & Abrasive Engineering, 2014, 34(4): 36-40. (下转第 56 页)