

纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料加工技术研究进展

袁芳¹ 徐亮¹ 赵国龙² 王新永¹ 陈旭辉¹ 裴天河¹
魏金花¹ 李晴淞¹ 李军平¹ 冯志海¹ 王金明¹

(1 航天材料及工艺研究所, 先进功能复合材料技术重点实验室, 北京 100076)

(2 南京航空航天大学, 机电学院, 南京 210016)

文 摘 纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料具有密度低、强度高、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等优点, 在航空航天及其他高温条件使用领域具有广泛的应用潜力。然而难加工特点制约了这类材料的广泛使用。由于存在硬度高、脆性大和各向异性特点, 高精度低损伤加工成为其工程应用必须解决的关键技术之一。本文主要综述了近年来纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料加工技术研究进展, 综合分析了不同加工方法的加工原理、理论模型构建、工艺参数优化、表面质量控制与损伤形成机制等, 讨论了当前存在的主要问题, 对未来研究方向提出了发展与展望。

关键词 纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料, 加工, 研究进展

中图分类号: TG506

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.02.009

Research Progress on the Machining Technology of Fiber Reinforced Silicon Carbide Matrix Composite

YUAN Fang¹ XU Liang¹ ZHAO Guolong² WANG Xinyong¹ CHEN Xuhui¹ PEI Tianhe¹
WEI Jinhua¹ LI Qingsong¹ LI Junping¹ FENG Zhihai¹ WANG Jinming¹

(1 Science and Technology on Advanced Functional Composite Materials laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Fiber reinforced SiC matrix composites (FRCMC-SiC) have significant potential in aerospace application and other high temperature conditions due to their special properties such as low density, high strength, thermostability, anti-oxidation and anti-ablation. However, the application of these composites has been hindered seriously because of their poor machining characteristics. The high-quality and low-damage machining technology must be solved in the use of this kind of high hardness, high brittleness and anisotropy materials. In this paper, the recent progress on the different machining technologies of FRCMC-SiC is reviewed. The material removal mechanism, theoretical model construction, parameters optimization, defect form and surface quality control are summarized and discussed. Finally, the existing problems are discussed, and the development trend of machining technology of FRCMC-SiC in the future is also put forward.

Key words FRCMC-SiC, Machining, Research progress

0 引言

纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料(Fiber Reinforced SiC Matrix Composites, FRCMC-SiC)是一类以连续纤维为增强体骨架、以 SiC 陶瓷为基体经过不同工艺方法复合而成的复合材料,按照纤维种类不同可分为 C

纤维增强 SiC 基复合材料(C_f/SiC)和 SiC 纤维增强 SiC 基复合材料(SiC_f/SiC)两种。FRCMC-SiC 复合材料综合了连续纤维优良的力学性能和 SiC 陶瓷良好的物理化学性能,具有密度低、强度高、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等优良性能,在航空、航天、能源、交通等

收稿日期:2022-03-10

基金项目:先进功能复合材料技术重点实验室开放基金(6142906210610)

第一作者简介:袁芳,1981 年出生,硕士,工程师,主要从事复合材料加工工艺研究工作。E-mail:yuanfanghit2004@126.com

通信作者:徐亮,1984 年出生,博士,研究员,主要从事复合材料加工工艺与装备技术研究工作。E-mail:sduxlg@126.com

领域具有广泛的应用前景,被认为是继C/C复合材料之后发展的又一新型战略性材料^[1-3]。

FRCMC-SiC复合材料的研究和发展已超过半个多世纪,国外从20世纪70年代后期开始一直致力于该类材料的设计、工艺、考核及应用研究。法国Snecma公司生产的调节片、密封片在700℃工作100h,减重50%,疲劳寿命优于高温合金,已在航空发动机实现装机使用,在超燃冲压发动机燃烧室、进气道前缘、主动冷却面板等方面也开展了大量研究工作^[4-5]。作为高超声速飞行器大面积隔热系统,C_f/SiC复合材料在X-37B、X-38、IXV等飞行器头锥、鼻锥帽、迎风面盖板、控制舵等部分得到应用,替代原有金属隔热系统实现结构减重和耐温等级提升,为飞行器设计和实现提供了基础与保障。其中,X-37B已成功完成5次飞行试验,累积在轨时间达到2865d,表明C_f/SiC复合材料在重复使用天地往返飞行器领域具有较好的应用潜力^[6-7];IXV已成功完成首次高速再入飞行试验,飞行器表面最高温度接近1649℃,飞行试验持续约100min,除了验证飞行器的机动性和制导性能以外,也考察了包括C_f/SiC复合材料在内的热防护系统的安全性和可靠性^[8-10]。除此之外,国外在FRCMC-SiC复合材料在卫星支架、空间光学系统、装甲防护、核聚变反应堆、燃气轮机热端部件、高性能跑车刹车系统等领域也开展了大量基础研究和应用技术工作,部分已实现成功应用。

国内从20世纪末开始开展FRCMC-SiC复合材料研究,经过近30年的发展,相关科研院所和工业部门在高性能连续纤维研发技术、复合材料制备工艺、界面设计与微结构控制、表面抗氧化技术等方面开展了大量研究工作。西北工业大学多年来一直从事FRCMC-SiC复合材料化学气相浸渗工艺研究,解决了基于增强纤维、界面相、基体与涂层的微结构单元强韧化协同问题,在薄壁构件的成型和致密化方面具有较为成熟的工艺技术^[1,5,11]。航天材料及工艺研究所、上海硅酸盐研究所、国防科技大学、沈阳金属研究所、中航复合材料有限公司、航天非金属材料研究所、中南大学等单位在FRCMC-SiC复合材料前驱体浸渍/裂解法(PIP法)、化学气相浸渗法(CVI法)、反应熔渗法(RMI法)研究比较深入,基本形成了适用不同微观结构、不同性能水平、不同尺寸量级、不同使用需求条件的复合材料体系和制备工艺技术^[12-15]。目前,国内FRCMC-SiC正处于全面发展和应用阶段。

FRCMC-SiC由基体、纤维和界面组成,其中SiC基体或SiC纤维(SiC_f/SiC)属于超硬脆性材料,导致材料存在高硬度、大脆性和各向异性特点,使得高精度

低损伤加工技术成为这类材料工程应用必须解决的关键技术之一,特别是对于航空航天具有复杂曲面、凹腔、沟槽、孔洞、台阶等结构更是如此^[16-17]。本文主要综述近年来纤维增强SiC陶瓷基复合材料加工技术研究进展,综合和分析不同加工方法加工原理、理论模型构建、工艺参数优化、表面质量控制与损伤形成机制等,讨论现有研究存在的主要问题,对未来研究方向提出展望。

1 纤维增强陶瓷基复合材料的常规机械加工技术

纤维增强陶瓷基复合材料的常规机械加工技术主要包括磨削、铣削、车削和钻削等,国内大连理工大学、天津大学、南京航空航天大学、航天材料及工艺研究所、东北大学、华侨大学等单位围绕上述常规机械加工技术开展了系统深入研究,重点主要集中在工艺参数优化、材料去除机理、刀具优选和刀具失效机理等方面。

1.1 磨削加工

磨削是纤维增强陶瓷基复合材料构件获得最终加工表面和尺寸精度的常用机械加工工艺,现有研究主要针对复合材料的磨削特性、纤维方向角对材料磨削过程的影响、加工表面质量和磨削去除机制等方面开展。张立峰等^[18-22]研究了C_f/SiC复合材料的磨削特性,建立了磨削力预测模型并开展了金刚石砂轮磨削试验,分析了纤维方向角、磨削用量等对磨削力和加工表面质量的影响,揭示了磨削机理。结果表明磨削用量对磨削力具有显著影响,磨削力随磨削速度的提高而降低,而随着磨削深度和进给速度的增大而增大;纤维方向角对材料去除方式和加工表面粗糙度有较大影响;复合材料以脆性去除为主,材料的破坏形式主要是基体开裂、界面失效和纤维断裂的综合模式。CAO等^[23]研究了磨削用量和纤维方向角对磨削力和磨削表面质量的影响,结果表明提高砂轮速度可提高加工表面质量,而当纤维方向角为0°时切削力最大,纤维方向角不同时材料去除机制不同。TAWAKOLI等^[24]对比分析了常规磨削和断续磨削两种方法加工C_f/SiC复合材料的磨削力和表面质量,结果表明断续磨削可减少划擦和犁耕效应,降低磨削比能,从而获得了较高的表面质量,加工表面粗糙度 R_a 可达0.3 μm(目前文献报道的最小表面粗糙度)。XU等^[25-27]研究了磨削速度和纤维方向角对磨削力和表面质量的影响规律,结果表明提高磨削速度可降低磨削力、提高表面质量,不同纤维方向角时加工表面粗糙度不同,如图1所示。

在磨削机理方面,单颗磨粒划擦实验是研究磨削机理的主要方法。LI等^[28]开展了单向C_f/SiC复合材料的单颗磨粒划擦实验,结果表明复合材料发生

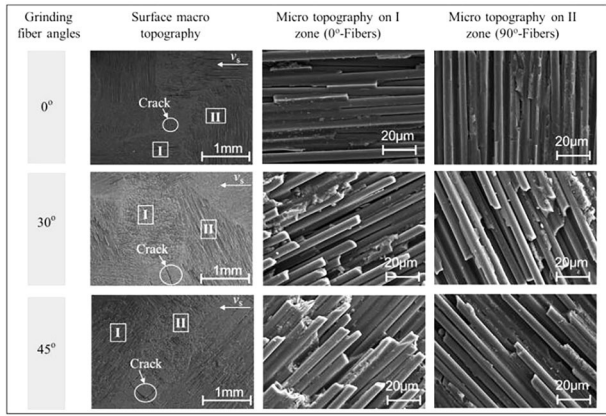


图1 不同磨削纤维角时2D C_f/SiC复合材料的加工表面形貌^[26]

Fig. 1 Morphology of the ground surfaces after different grinding fiber angles of 2D C_f/SiC composite^[26]

脆性断裂,材料破坏形式包含基体脆性破坏、纤维断裂、纤维拔出和界面脱粘。LIU等^[27]通过单颗磨粒划擦实验研究了2D C_f/C-SiC复合材料的磨削机理,发现复合材料以脆性模式去除,即基体产生裂纹,基体/纤维脱粘和纤维断裂,而磨粒切入角对纤维束的去除形式有较大影响(图2)当磨粒沿经向和纬向切入时,受磨粒挤压作用,纤维束和基体发生大面积脱粘,纤维束呈大块断裂;当磨粒沿法向切入时,纤维束发生剪切断裂或弯曲断裂,此时纤维束和基体仅有小面积脱粘,因此纤维束碎断并拔出,在加工表面留下小孔洞。YIN等^[29]研究了磨削速度对SiC_f/SiC复

合材料去除机理影响的研究,结果表明沿纤维经向,高速磨削时纤维发生脆性断裂,基体发生撕裂;而在低速磨削时,纤维发生犁耕现象,基体发生涂抹。沿纤维纬向,高速磨削时纤维被完全去除;而低速磨削时发现有残留未切断的纤维。LIU等^[30]使用平底和锋利金刚石磨粒划擦2D C_f/SiC复合材料实验发现,两种磨粒作用下SiC基体均以脆性模式去除,加工表面存在裂纹、基体剥落、纤维拔出和纤维冒头等缺陷。使用锋利金刚石磨粒划擦时,SiC基体和SiC纤维还发生了塑性断裂,如图3所示。

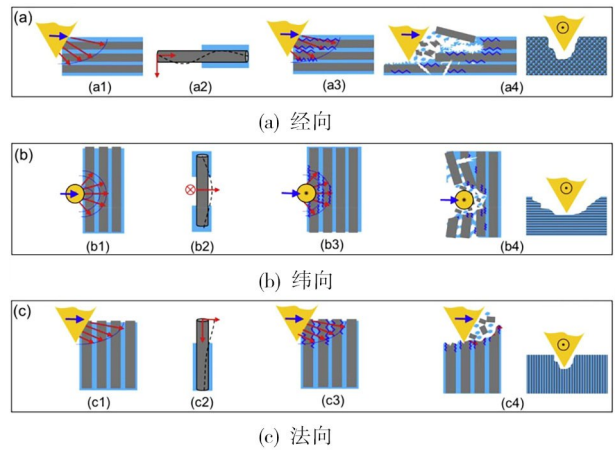
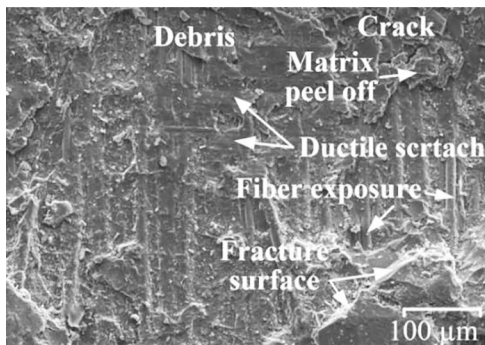
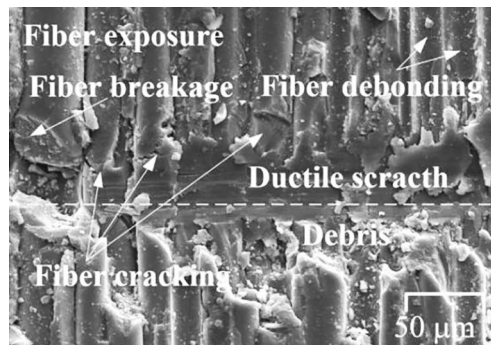


图2 单颗磨粒切割纤维束的三种模式^[27]

Fig. 2 Three modes of the single-grain cutting into a fiber bundle^[27]



(a) 基体塑性断裂



(b) 纤维塑性断裂

图3 锋利金刚石磨粒划擦SiC_f/SiC复合材料的表面形貌^[30]

Fig. 3 Morphology of SiC_f/SiC composite after scribing by sharp diamond grit^[30]

为了改善C_f/SiC复合材料的磨削性能,国内外学者将微量润滑(MQL)技术应用到C_f/SiC复合材料的磨削加工中。ADIBI等^[31]对比研究了干磨削、MQL磨削和使用切削液磨削C_f/SiC复合材料的磨削力和加工表面质量,结果表明MQL作用下磨削力最小、砂轮磨损最低、加工质量最高。与干磨削相比,MQL作用下磨削力降低了38.88%,磨削比提高了115.38%,表面粗糙度Ra降低了75.26%。QU等^[32-33]研究了MQL磨削C_f/SiC复

合材料过程中MQL的作用机制,其工艺原理示意图如图4所示。磨削过程中,微量润滑液体进入工件材料的缺陷区域,如纤维拔出孔和基体裂纹处,磨削热导致水蒸发,带走大量的热量,从而降低了磨削温度。同时,润滑介质在磨粒和工件材料之间形成油膜,降低了摩擦力,提高了砂轮寿命。与干式磨削和使用切削液磨削相比,微量润滑磨削的表面粗糙度最小,加工质量最优,如图5所示。

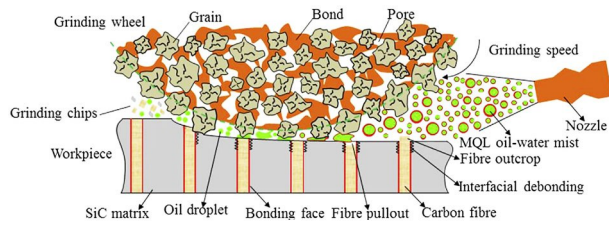


图4 微量润滑磨削 C_f/SiC 复合材料^[32]

Fig. 4 MQL grinding of C_f/SiC composite^[32]

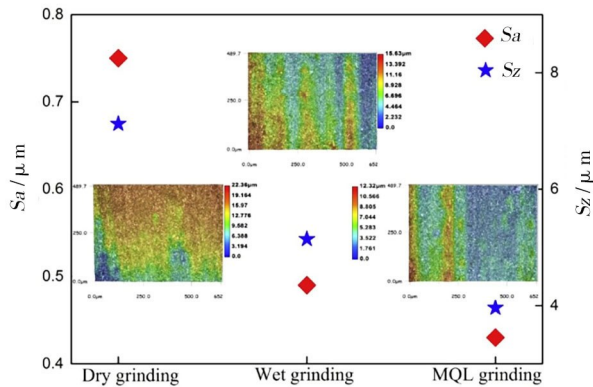


图5 干磨削、湿磨削和MQL磨削 C_f/SiC 复合材料的 S_a 对比^[32]

Fig. 5 Surface roughness of the C_f/SiC composite under dry, wet and MQL grinding^[32]

1.2 钻削加工

孔加工是航空航天领域高端装备制造过程中极为重要的工艺组成部分,即使纤维增强陶瓷基复合材料结构件可以使用近净成形以减少材料的二次加工,但是近净成形工艺难以获得高质量孔,不可避免要使用制孔工艺。航空航天装备中装配孔的数量巨大,对高效制孔提出了迫切需求。纤维增强陶

瓷基复合材料结构件连接装配后,通常无法采用二次复合工艺消除连接间隙和材料缺陷,因此高精度高质量制孔成为保障装配可靠性的关键。国内外学者针对纤维增强陶瓷基复合材料的制孔工艺建模、参数优化、材料去除机理等方面开展了大量研究。

毕铭智^[34]采用高速钢、硬质合金、PCD和电镀金刚刀具钻削三维针刺 C_f/SiC 复合材料的对比试验表明,PCD刀具加工获得的孔质量和精度最高,轴向力比高速钢和硬质合金分别低60%和46%,PCD刀具寿命是硬质合金刀具的4倍。钻削轴向力随主轴转速提高而降低,随进给速度提高而增加,且进给速度对轴向力影响最大。孔壁有毛刺,孔出口产生了崩边缺陷。张国栋等^[35]开展了钎焊金刚石钻头钻削 $C/C-SiC$ 复合材料试验,研究了钻削用量,即钻头转速和进给量对钻削力和孔出入口质量的影响规律。结果表明,钻削力随着转速的增加而降低,随着进给量的增加而升高;钻削力对孔质量有显著影响,且孔的入口质量比出口质量高。钻孔过程中,由于孔出口处材料处于单边约束状态,在钻头的推挤作用下,孔出口处常常产生撕裂或崩边等缺陷。为了解决上述问题,XING等^[36]在 $C/C-SiC$ 复合材料钻孔试验中,在材料出口侧采用石墨板作为支撑层,支撑层不仅提高了工件的刚度,而且使得出口处材料得到双向约束,降低了出口缺陷(图6)。钻削参数对钻削力、孔质量和刀具磨损具有显著影响,随着钻削速度的提高和进给量的降低,钻孔质量升高。纤维方向和切削速度方向对加工质量有较大影响,当两方向夹角为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时,加工导致材料分层减弱。

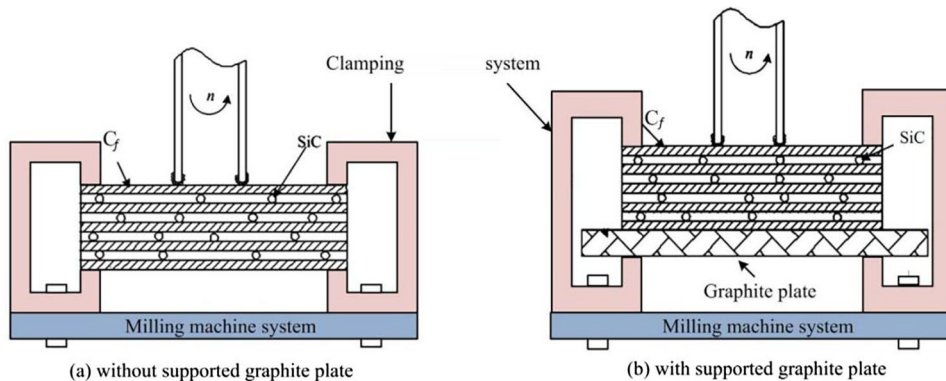


图6 未使用和使用石墨支撑层进行钻孔的装夹示意图^[36]

Fig. 6 Drilling types with and without supported graphite plate^[36]

由于纤维增强陶瓷基复合材料具有高硬度、各向异性和非均质性等特性,其钻削过程中钻削力呈现不对称性,容易导致钻头偏斜甚至折断。DIAZ等^[37]采用概率论方法建立了考虑 SiC_f/SiC 复合材料特性的钻削力模型,如图7所示,并开展了钻削试验研究。材料的高硬度导致高钻削力,材料的各向异性和非均质性导致

致钻削过程中产生径向分力;材料不同部位处纤维、基体和气孔的体积分数不同,所以钻削过程中径向分力不断变化。为了探明加工缺陷形成机制,DIAZ等^[38]采用拉曼光谱法检测了 SiC_f/SiC 复合材料钻削过程中由于机械应力和热应力而导致的材料应变,探明了材料特性对加工过程的影响。 SiC 纤维以脆性去除为主,加

工获得的残余应力为拉应力,因此热应力梯度是导致纤维应变的主要原因。而SiC基体以塑性去除为主,加工获得的残余应力为压应力,因此机械应力是导致基体应变的主要原因。

螺旋铣削(Helical Milling)制孔,也称为行星钻(Orbital Drilling)是使用高速旋转的立铣刀沿着螺旋线轨迹进给,从而在工件上铣削出直径大于立铣刀直径的圆孔的新工艺。该工艺中立铣刀沿螺旋轨迹进给,将工件材料逐层铣削去除,因此比常规钻削工艺的轴向力低,出口毛刺少;由于加工孔的直径比刀具直径大,切削区域不封闭,散热条件好,易于排屑,因此比常规钻削的切削温度低,且一把刀具可以加工多种规格的孔。张瑾瑜等^[39]对比研究了C_f/SiC复合材料螺旋铣削和钻削制孔效果,表明由于螺旋铣削采用偏心加工,消除了麻花钻横刃的挤压作用,因

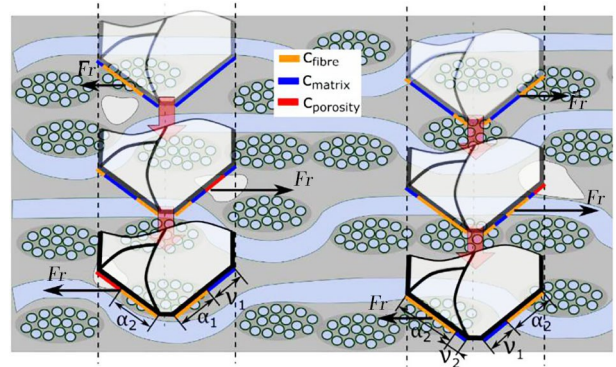
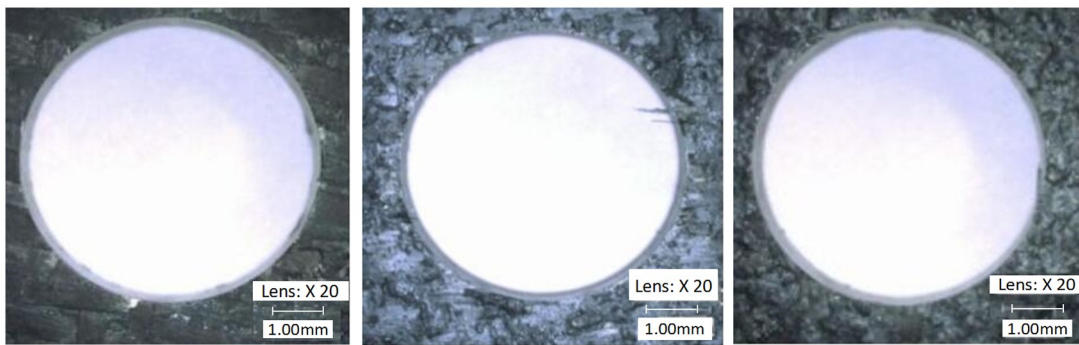


图7 复合材料不同部位处钻头所受径向力示意图^[37]
Fig. 7 Radial forces on the drill bit at different parts of the composite^[37]

此轴向力降低,螺旋铣孔的轴向力约为钻削孔轴向力的56.9%,孔壁粗糙度和孔径差均小于钻削,且加工缺陷降低(图8)。



(a) 钻削入口 (b) 钻削出口 (c) 螺旋铣削出口

图8 C_f/SiC复合材料钻孔和螺旋铣孔的进出口质量^[39]

Fig. 8 Hole qualities of C_f/SiC composite obtained with drilling and helical milling processes^[39]

1.3 铣削加工

磨削加工虽然可获得较高的加工表面质量和精度,但其加工效率依然较低,当材料去除量较大时,使用铣削刀具加工纤维增强陶瓷基复合材料可大幅度提高加工效率。现有研究表明,金刚石刀具是加工陶瓷基复合材料的理想刀具,使用金刚石刀具可获得较高的使用寿命和良好的加工表面质量^[40-45]。HU等^[46]使用PCD刀具铣削二维C_f/SiC复合材料的研究表明,随着铣削速度的增加,切削力和加工表面粗糙度均降低,而进给速度对切削力和加工表面粗糙度的影响趋势则相反;材料去除机理为纤维断裂、基体破碎和纤维-基体脱粘;当纤维方向角为90°时加工表面质量最优(表面粗糙度Sa为2.028 μm)。何涛等^[47]研究了PCD刀具铣削C_f/SiC复合材料的表面完整性,结果表明提高切削速度能改善表面质量,增大切深会使表面质量严重恶化,加工表面存在纤维层状脆断、拔出和纤维束断裂等缺陷。

现有针对纤维增强陶瓷基复合材料铣削加工的

研究大多集中在工艺参数对切削力和加工质量的影响,并对工艺参数进行优化,而忽略了切削温度的研究。复合材料对加工冷却条件要求苛刻,若使用切削液来降低切削温度,则切削液会渗入材料固有的孔洞中,在刀具的挤压作用下,孔洞内的切削液会导致裂纹萌生并向材料内部扩展,造成严重的亚表层损伤。因此,复合材料必须在干切削或近干式切削条件下加工,由于复合材料的高硬度和强耐磨性,切削温度高,不仅导致刀具磨损速率快,而且降低了加工质量。徐亮等^[48-50]开展了低温铣削纤维增强陶瓷基复合材料的相关研究,搭建了低温加工装置,对比研究了干切削、液氮和低温CO₂冷却铣削C_f/SiC复合材料的切削力、切削温度、刀具寿命和加工表面质量,研究了材料去除机理和刀具失效机理(图9)。研究表明,干切削C_f/SiC复合材料的切削温度可达700℃,且切削力大、刀具失效快,导致加工损伤严重。低温介质大幅度降低了切削温度(降低了40%以上),相同切削用量下刀具寿命提高了50%以上。

低温铣削中复合材料以脆性去除为主,PCD刀具磨损机理主要是磨粒磨损。张健强^[51]研究了液氮和室温条件下C_f/SiC复合材料的拉伸、弯曲强度和微观组织演变,表明两种温度下复合材料的力学性能相当,且微观组织无明显变化。由此可见,低温加工不仅可以降低切削温度,提高刀具寿命和加工效率,而且对复合材料的性能没有影响,在复合材料加工领域

具有良好应用前景。SHYAM等^[52]开展了MQ铣削C_f/SiC复合材料的试验研究,对比分析了自制的蔬菜基绿色切削油(vegetable-based green cutting fluid)和商业化石油基矿物油对加工质量的影响。结果表明自制的绿色切削油可获得更高的加工表面质量,表面粗糙度降低了17%,加工缺陷主要包括纤维拔出、纤维断裂、基体裂纹和界面脱粘。

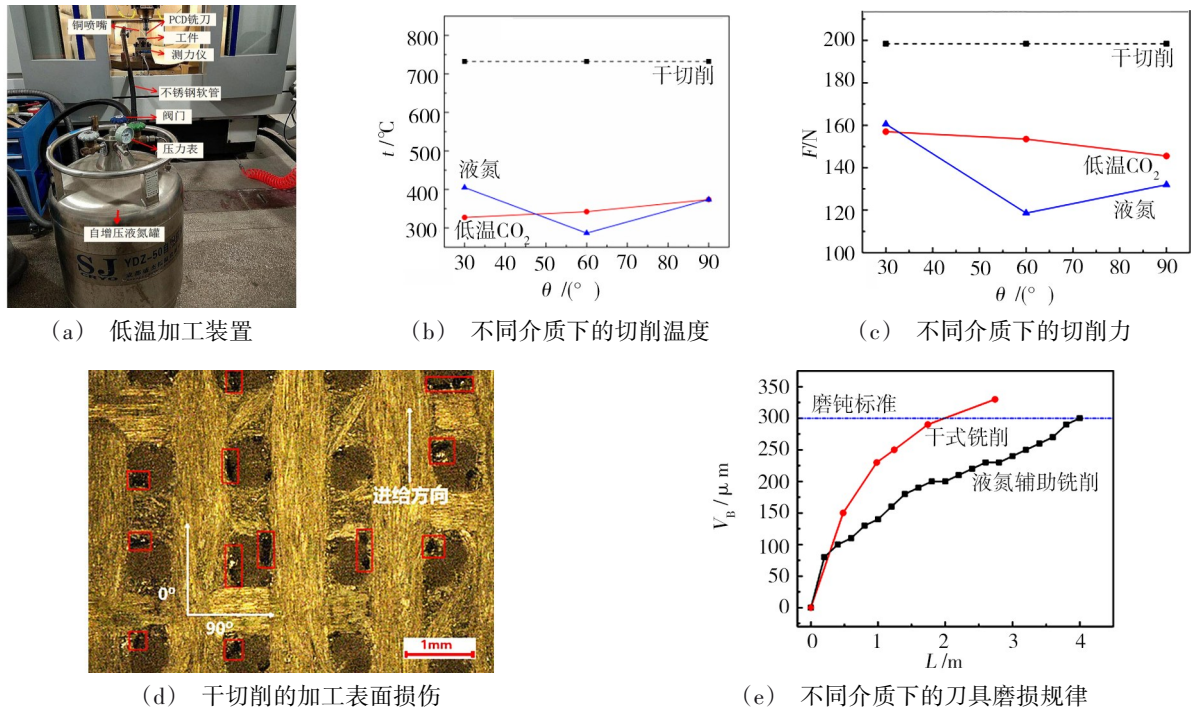


图9 C_f/SiC复合材料加工试验结果^[48-50]

Fig. 9 Machined experimental results of C_f/SiC composite^[48-50]

刀具被誉为工业的“牙齿”,在纤维增强陶瓷基复合材料的常规机械加工中,刀具材料和结构对于加工效率、加工质量具有重要影响。刀具材料方面,王平等^[40]选用人造金刚石聚晶车刀对C_f/SiC复合材料进行车削加工试验,研究表明选取适合的刀具和切削参数能够有效保证C_f/SiC复合材料的加工质量,加工Sa达到了6.3 μm,尺寸精度达到0.03 mm。加工刀具的改进作为提高C_f/SiC复合材料加工质量和加工效率的重要途径之一,使得学者们也纷纷对适用于C_f/SiC复合材料加工的刀具进行了研究。向道辉等^[53]制备了碳纤维复合材料专用CVD金刚石涂层刀具,并对比了该CVD金刚石涂层刀具与普通硬质合金刀具的钻削性能。毕智铭等^[34]选用高速钢刀具、普通硬质合金刀具、PCD刀具和电镀金刚石刀具分别对C_f/SiC复合材料进行钻削、铣削加工试验,确定了PCD刀具是加工C_f/SiC复合材料的最佳刀具,并分析了工艺参数对加工质量的影响。吴煜斌等^[54]试验分析了金刚石铣刀、硬质合金铣刀、金刚石磨棒和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

超硬铣刀加工C_f/SiC复合材料的切削性能,结果表明相比其他三种刀具,金刚石铣刀能有效地改善加工表面粗糙度,提高亚表面质量。相关研究表明,相比于传统的硬质合金刀具和涂层刀具等,PCD刀具更为适合碳纤维增强陶瓷基复合材料的加工,但是研究仅停留于对比不同结构、材料的刀具的加工性能,确定适用于纤维增强复合材料加工的刀具材料种类,即针对现有刀具进行选型,开展切削匹配性研究。

刀具结构研究方面,陈杰等^[55]研究了PCD刀具几何参数对2D C_f/SiC复合材料铣削力、表面粗糙度和加工缺陷的影响规律。结果表明,刀具前角和钝圆半径对铣削力具有显著影响,随着前角和钝圆半径的增大,铣削力和轴向力增大。当刀具前角为3°,后角为20°,刃口钝圆半径为10 μm时,加工质量最优。ZOU等^[56]采用PCD刀具对2D C_f/SiC复合材料进行了钻削加工,分析了钻头后角以及顶角分别对钻削性能的影响。LACALLE等^[57]通过试验,研究了不

同涂层“菠萝”刃铣刀铣削复合材料时的切削加工性能。并分析材料加工缺陷产生的原因,“菠萝”刃铣刀将切削刃离散化,提高了加工效率,但是该铣刀制备工艺较为繁琐,生产成本低,而且切削刃离散化使得容屑槽空间较小,切屑不易排出,热量积聚使得切削区域温度高,涂层易脱落,刀具磨损严重而无法继续使用。

另外, LACALLE 等^[57]还通过优化刀具结构来改变轴向力方向的方法,设计了压迫式立铣刀。侧刃呈左右旋反向结构,切削刃沿轴向具有左旋和右旋的螺旋槽,切削时可将工件材料置于螺旋角交叉处,通过改变铣削加工时的轴向力方向,从而实现抑制材料分层的目的。该铣刀能够有效抑制复合材料铣削加工时的加工缺陷,但是因为切削刃较长,铣削复合材料时切削力大,刀具磨损快。苗光等^[58]针对复合材料的铣削加工,设计了一款交错 PCD 立铣刀。将四个倾角方向不同的 PCD 刀片焊接到硬质合金刀体上,相邻刀齿的倾角大小相同,但方向不同,加工时有效抑制了碳纤维复合材料的加工缺陷。现有针对刀具结构设计方面的研究多为针对碳纤维增强树脂基复合材料加工刀具的设计,而针对 FRCMC-SiC 复合材料铣削加工的专用刀具结构设计等方面的文献较少,相关研究亟待开展。

2 纤维增强陶瓷基复合材料的特种加工技术

特种加工技术也称为“非传统加工技术”(Non-Traditional Machining, NTM),指利用热能、电能、光能、化学能等能量达到去除或增加材料的加工方法。纤维增强陶瓷基复合材料的特种加工技术主要包括激光加工、电火花加工、水射流加工等,国内西北工业大学、西安交通大学、山东大学、哈尔滨工业大学、中航工业复合材料技术中心等单位围绕特种加工工艺、能量对材料的作用机理、工艺参数优化和加工质量等开展了大量研究工作。

2.1 激光加工

激光加工是利用高能量密度的激光束使工件材料去除、变形、改性、沉积或连接等的加工技术。激光能量作用集中、效率高、可控性高,且激光加工属于非接触加工,不产生机械应力,不存在刀具磨损和替换等问题,适合加工如纤维增强陶瓷基复合材料等高硬度、高脆性材料。目前激光加工纤维增强陶瓷基复合材料的研究主要集中在激光的选择、加工工艺、加工参数优化和材料去除机理等方面。

激光包括脉冲激光和连续激光两类,其中脉冲激光如纳秒、皮秒和飞秒激光等的单脉冲能量很高,可以在极短时间内使作用区域的工件材料温度上升到材料的熔点或升华温度,从而达到去除或改性材

料的目的。ZHANG 和 LIU 等^[59-60]使用皮秒激光加工 C_f/SiC 复合材料微孔,研究了激光参数如能量密度、扫描速度、填充间距等对微孔加工质量的影响。结果表明复合材料的激光钻孔过程中产生熔渣和等离子体,吸收了部分激光能量,导致微孔呈锥形,微孔出口处圆度较低,加工精度低;同时微孔周围和内壁上附着熔渣,降低了加工质量。ZHAI 等^[61]使用皮秒激光在 C_f/SiC 复合材料表面制备微沟槽,发现激光能量密度对微沟槽形状和加工质量具有显著影响,当激光能量密度较高时,微沟槽的形状精度和加工质量较高;使用氩气保护可避免微沟槽表面氧化。WANG 等^[62]对比研究了飞秒激光和皮秒激光加工 C_f/SiC 复合材料的加工效率和质量,结果发现皮秒激光加工的表面呈波浪形,附着有纳米氧化物颗粒,表明材料发生了热熔融;采用低功率的飞秒激光加工的表面质量较高,加工损伤较少。

激光加工中,经透镜透射后的激光束呈锥形,因此激光钻孔或激光切割的材料截面也呈现锥形,当孔深增大或板材厚度增加时,加工精度越低。刘壮等^[63]开展了飞秒激光加工 SiC_f/SiC 复合材料厚板的孔型特征研究,表明激光能量密度对孔深和锥度影响较大,在优化激光参数下,小孔锥度仍然达到了 12.38° 。为了进一步降低激光钻孔的锥度,LIU 等^[64]开展了 C_f/SiC 复合材料的激光环钻制孔试验研究和工艺参数优化,结果表明环钻工艺可有效降低孔的锥度;工艺参数优化后,孔的锥度进一步降低,且激光热影响层厚度降低,如图 10 所示。

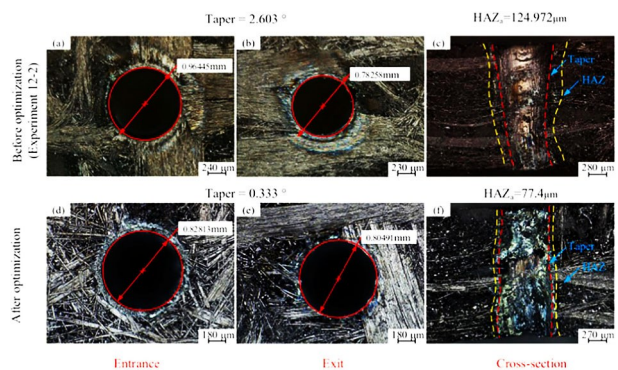


图 10 激光环钻制孔的锥度和热影响层^[64]

Fig. 10 Taper and HAZ of the holes machined with laser trepan drilling^[64]

ZHAI 等^[65]研究了飞秒激光加工 SiC_f/SiC 复合材料的加工机理,飞秒激光去除 SiC_f/SiC 复合材料是一个复杂的物理化学过程,包含激光能量的吸收、热传导、雪崩电离、等离子体膨胀、液相爆破和其他过程,如图 11 所示。当激光能量和光斑重叠率较高时,材料去除过程以光热效应为主导,此时复合材料发生

融化并飞溅出来;由于表面张力作用,飞溅出来的熔融物质将分散并收缩成为颗粒,从而形成观察到的火花现象,如图 11(a)所示。当激光能量和光斑重叠率较低时,材料去除过程以光化学效应为主导,此时复合材料吸收多光子能量后发生电离,形成等离子体,如图 11(b)所示。

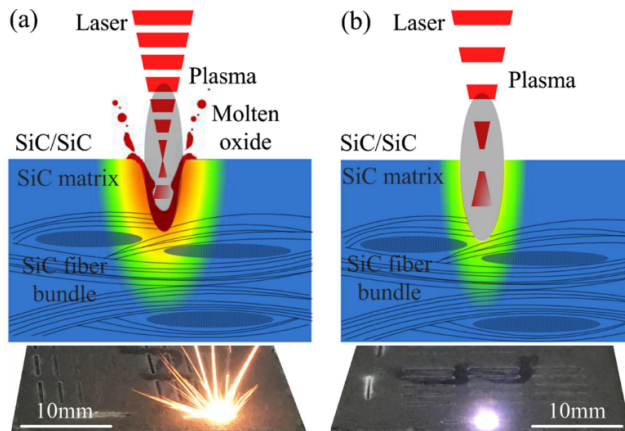


图 11 飞秒激光加工 SiC_f/SiC 复合材料机理和试验观察^[65]

Fig. 11 Mechanisms and experimental observations of picosecond laser machining of SiC_f/SiC composite^[65]

2.2 电火花加工

电火花加工技术(EDM)是通过工件电极和工具电极之间脉冲性火花放电时的电腐蚀来去除材料,以达到对工件尺寸、形状和表面质量要求的加工技术。

C 纤维和 SiC 均为导电材料, YUE 和 ZHANG 等^[66-67]研究了电火花加工 C_f/SiC 复合材料的可行性和材料去除机理,结果表明 EDM 过程中热应力超过复合材料的拉伸强度,导致材料发生破坏而去除,加工表面存在大量的裂纹和材料剥落等加工缺陷。电火花制孔试验发现,产生的碎屑会阻碍加工的进行,且碎屑堆积会导致二次放电,进一步降低了加工效率。使用 Cu 电极可获得较高的尺寸精度和表面质量,但是电极会发生损耗。HE 等^[68]开展了电火花线切割 2D C_f/SiC 复合材料试验,表明纤维方向对加工表面粗糙度具有显著影响。加工缺陷主要包括纤维脱粘、碎屑和重铸层,且碳纤维产生了微裂纹。

由于纤维增强陶瓷基复合材料的导电率较低,且电火花加工过程中碎屑排出效率低,导致材料去除率较低。为了解决上述问题, WEI 等^[69-70]采用电极振动和电介质深度冲刷的方法促进碎屑排出,材料去除率和加工表面质量得到提高。电火花加工 SiC_f/SiC 复合材料的试验结果表明, 高级间电压和低频占空比可使碎屑排出效率升高,因此材料去除率得到升高。材料去除过程包括裂纹产生、裂纹扩展和材料脱落,基体材料的热膨胀和非导电纤维断裂是

导致裂纹产生的主要原因。

2.3 磨料水射流加工

磨料水射流加工是以水为介质,通过高压发生装置获得较大能量,通过送料和混合装置将磨料加入到高压水射流中,形成固液两相混合射流,依靠磨料和高压水射流的高速冲击和冲刷,材料局部应力集中,从而产生冲蚀、剪切,实现材料去除的特种加工方法。磨料水射流加工工艺具有较强的切割加工能力,且对工件材料的厚度几乎没有限制;该工艺产热少,且高速高压水射流可时时带走加工产生的热量,加工几乎没有热损伤;该工艺还具有绿色环保的优点。

焦健等^[71]开展了高压水射流加工 SiC_f/SiC 复合材料的试验研究,发现陶瓷基体被磨料水射流冲蚀,加工表面出现较多冒头纤维,切割面不平整。高压射流对复合材料工件的高冲击力导致材料表面处于压缩状态,而其内部处于拉伸状态。当拉应力超过材料的拉伸强度时,材料产生微裂纹,磨料对材料产生微切削作用而使材料发生脆性断裂去除。

3 纤维增强陶瓷基复合材料的复合加工技术

复合加工一般定义为在传统加工工艺中同时使用另外一种或多种形式的能量以实现材料去除的加工技术,如使用热能(激光加热)或动能(超声振动)^[72]。 LAUWERS 等^[73]将复合加工工艺分为不同能量/工具的组合和不同作用机理的可控组合两类,其中前者又分为辅助加工(如激光辅助加工、超声振动辅助加工等)和组合加工(如电火花/电化学加工等),后者包括磨削硬化等。复合加工的目标是实现“1+1=3”的效果,即复合加工工艺既能综合多种工艺的优点,又能克服单个工艺的缺点,成为机械加工领域研究的重点和热点。

国内外学者针对纤维增强陶瓷基复合材料的复合加工技术开展了大量的理论分析、有限元仿真和试验研究,主要包括超声振动辅助加工、激光辅助加工、电火花和超声复合加工、水射流和激光复合加工等。研究结果均表明,相对于单个加工工艺,复合材料的复合加工中切削力和刀具磨损降低,材料的加工性和加工表面质量得到提高。

3.1 超声振动辅助加工

超声振动辅助加工(UVAM)是一种综合了传统机械加工和超声波技术的新型复合加工技术,是在刀具或工件上施加可控的高频振动,改变刀具与工件之间的接触和作用状态,使刀具与工件发生周期性的接触和分离。国内北京航空航天大学、南京航空航天大学、天津大学、大连理工大学等单位针对纤维增强陶瓷基复合材料的超声振动辅助加工技术开

展了大量研究, 研究表明超声振动辅助加工纤维增强陶瓷基复合材料可有效降低切削力, 降低刀具与切削间的摩擦因数, 提高加工效率、加工表面质量和刀具寿命。国内外学者围绕纤维增强陶瓷基复合材料的超声振动加工, 设计搭建了超声振动装置^[45, 74-76], 开发了超声振动加工、旋转超声振动加工和超声扭转振动加工等工艺^[77-81], 并研究了超声振动加工机理、加工工艺优化、刀具失效机理和损伤抑制方法等。

LIU 等^[82]研究了超声振动辅助铣削 C_f/SiC 复合材料中的切削力和表面质量, 并与常规铣削加工进行了对比研究。结果表明, 超声振动辅助铣削的切削力 F_x 、 F_y 和 F_z 分别降低了 43.7%、29.16% 和 68.09%。BERTSCHE 等^[83]对比研究了超声振动辅助磨削和常规磨削 SiC_f/SiC 复合材料的切削力、刀具磨损和表面粗糙度, 结果表明与常规磨削相比, 超声振动辅助磨削的切削力降低了 20%, 刀具磨损降低了 36%。

WANG 等^[81, 84]和 LI 等^[85]研制了超声振动辅助铰削实验平台, 由超声波发生器、变幅杆、换能器、专用刀柄和机床等构成; 研究了超声振动辅助铰削 C_f/SiC 复合材料, 建立了运动学模型分析加工机理, 并开展了试验研究。发现超声振幅对切削力和表面质量具有显著影响, 随着超声振幅的增加, 加工表面粗糙度降低。同时, 与常规铰削和磨削的对比研究表明, 超声振动辅助铰削的加工表面质量和形状精度得到显

著提升, 切削力下降了 40%~50%, 但表面粗糙度高于常规磨削。

旋转超声振动加工(RUM)在旋转刀具的轴向施加超声振动, 即超声振动方向与切削速度方向垂直。DING 等^[86]研究了旋转超声振动辅助钻削 C_f/SiC 复合材料的切削力、扭矩和钻孔质量, 试验发现与未施加超声振动相比, 施加超声振动后钻削力和扭矩分别降低了 23% 和 47.6%, 且钻孔质量得到提高, 表面粗糙度降低了 23%, 如图 12 所示。为了进一步降低 RUM 钻削 C_f/SiC 复合材料的撕裂缺陷, WANG 等^[87]采用阶梯锥套料钻加工 C_f/SiC 复合材料, 由于锥面的再加工效应, 轴向力降低, 孔出口的缺陷降低。旋转超声振动辅助钻削试验表明, 使用阶梯锥套料钻加工的孔出口撕裂尺寸平均降低了 30%, 且增大超声振幅可进一步提高孔出口质量。XUE 等^[88]研究了采用旋转超声振动辅助铰削加工的 C_f/SiC 复合材料的疲劳特性, 由于超声振动的作用, 加工表面的残余压应力最高可达 2 GPa, 因此抑制了界面裂纹, 并阻碍了纤维裂纹的扩展。与常规铰削加工的 C_f/SiC 复合材料相比, 旋转超声振动辅助铰削加工的 C_f/SiC 复合材料的疲劳损伤率降低了 80.5%, 且疲劳试验后剩余拉伸强度可达 95.8%。综上可知, 旋转超声振动辅助加工不仅可以降低切削力, 提高加工质量, 还可以提高材料的使役性能, 对扩大复合材料的应用具有重要的意义。

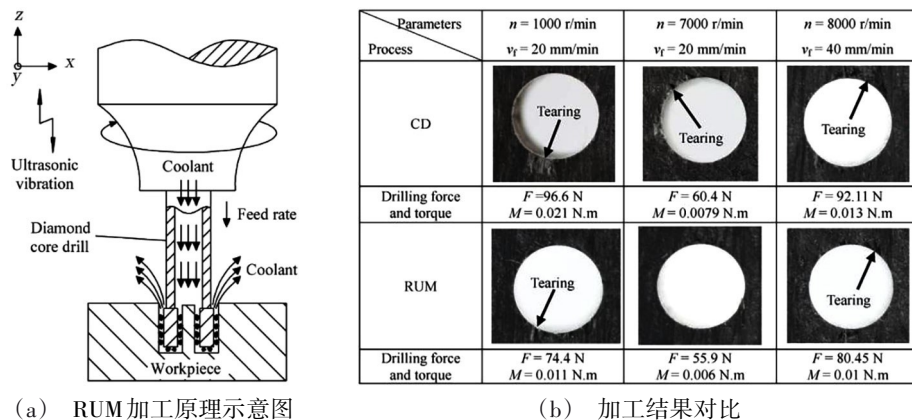


图 12 旋转超声振动辅助钻削^[86]

Fig. 12 Schematic diagram and experimental results of rotary ultrasonic machining^[86]

超声扭转振动(UTV)加工是在刀具绕主轴转动的同时对刀具的主运动方向施加超声振动, 即超声振动方向与切削速度方向相同。姜庆杰^[89]开展了超声扭转振动铰削 C_f/SiC 复合材料的试验研究, 建立了超声扭转振动铰削的运动学模型, 分析了切削力、加工质量和刀具磨损。结果表明, 超声扭转振动铰削的切削力明显降低, 该工艺可有效抑制毛刺、崩边等

加工缺陷, 减缓刀具磨损。WANG 等^[90]研究了纵扭复合超声振动辅助钻削 C_f/SiC 复合材料, 将轴向超声振动与扭转超声振动同时施加于刀具上, 与轴向超声振动辅助钻削相比, 该工艺的钻削力降低了 50%, 显著提高了钻削效率, 抑制了分层缺陷。

综上所述, 与常规切削相比, 超声辅助作用降低了切削力和刀具磨损, 提高了加工表面质量, 同时可

以提高材料的疲劳性能。但针对超声振动辅助加工纤维增强陶瓷基复合材料的作用机理,目前尚无统一论。ZHANG等^[91]揭示了超声振动对金刚石刀具磨损的影响机制,即超声振动加工过程中,由于刀具和工件断续接触,工件待加工表面材料发生氧化生成氧化膜,降低了金刚石刀具石墨化速率。

3.2 激光辅助加工

激光辅助加工(LAM)是利用激光的热效应软化待加工区域材料,在材料软化状态下使用刀具将其去除,从而降低了切削力,提高了材料的切削加工性。目前国内未见关于激光加热辅助加工在纤维增强SiC陶瓷基复合材料领域的研究报道。ROZZI等^[92]研究了激光加热辅助铣削C_v/SiC复合材料工艺,使用228 W连续激光辐照待加工材料,在材料软化状态用PCD刀具将其去除;与常规铣削相比,新工艺的切削力降低了40%。但是,由于激光功率高,刀工接触区温度高达1 000 °C,超过了金刚石材料的石墨化温度,PCD刀具的切削性能势必受到影响。

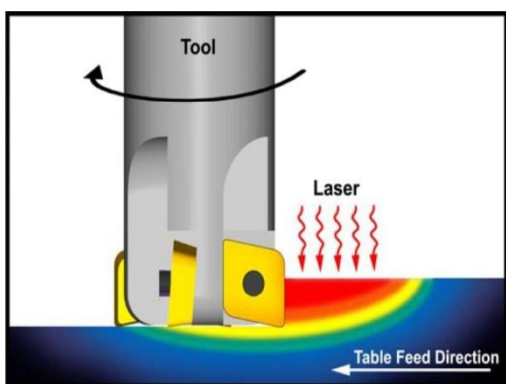


图13 激光辅助加工原理示意图^[92]

Fig. 13 Schematic diagram of laser assisted machining^[92]

ERDENECHIMEG等^[93]研究了激光加热辅助铣削C_v/SiC复合材料过程的切削力和加工表面粗糙度。在激光辐照下,待加工区域工件材料的温度升高(1 100~1 300 °C),强度降低。在相同的切削用量下,与常规铣削工艺相比,LAM工艺的切削力降低了40.7%,表面粗糙度降低了33.8%。ZHOU等^[94]试验研究了激光烧蚀辅助砂带磨削C_v/SiC复合材料的磨削力、磨削温度和加工表面粗糙度。激光光斑中心的瞬时最高温度可达3 000 °C,超过了SiC基体材料的分解温度(约2 700 °C)和C纤维的升华温度(约2 800 °C),中心向外有较大温度梯度。激光光斑中心区域复合材料被迅速蒸发,光斑周围的复合材料发生化学反应生成疏松且均质的熔融层(SiO₂和再结晶的SiC),因此材料的加工性得到提高。该工艺的磨削力、磨削温度和表面粗糙度分别降低了47%、40%和26%,砂带的磨粒磨损显著降低。

XU等^[95]对比研究了激光加热辅助微细切削和常规微细切削C_v/SiC复合材料的加工缺陷和表面粗糙度,表明激光辅助切削可有效抑制毛刺、凹坑等加工缺陷,加工表面粗糙度Sa可达3.841 μm。DONG等^[96]开展了激光加热辅助微细铣削SiC_v/SiC复合材料的研究,探索了激光加热温度(激光辐照区域工件材料的平均温度)对立方氮化硼微细铣刀的磨损和寿命的影响规律,分析了工艺的经济性。结果表明,在激光加热辅助作用下,刀具磨损降低了76%,刀具寿命提高了3.8倍;随着激光加热温度的升高,刀具磨损逐渐降低。与常规微细铣削工艺相比,在激光加热辅助微细铣削工艺中,当激光加热温度为1 307 °C时,加工成本降低了32.3%。

由上述研究可知,在激光加热辅助作用下,复合材料的切削力得到显著降低,进而刀具磨损和加工缺陷降低。但是,纤维增强陶瓷基复合材料的熔点高、硬度高,材料软化、熔化甚至气化所需的温度很高,现有研究中激光加热温度均高于1 000 °C。一方面激光热影响区较大,材料的物理力学性能发生改变,后续仍要将热影响区材料去除方可获得所需表面;另一方面,高温会降低刀具的切削性能,尤其针对金刚石刀具或金刚石涂层刀具,高温将导致金刚石发生石墨化。WANG等^[97]在研究激光加热辅助加工金属材料时发现,虽然激光加热辅助下切削力降低、刀具磨损速率降低,但是高温导致刀具刚度变弱并发生热膨胀,加工过程中容易发生跳动,降低了加工精度。为了解决上述问题,ZHAO等^[98-109]提出了激光诱导氧化辅助加工新方法,使用脉冲激光辐照待加工区域工件材料,并辅助通氧,诱导材料与氧气发生可控氧化反应,生成疏松多孔的氧化层,显著提高了材料的切削加工性。使用刀具快速去除氧化层,大幅度提高加工效率。材料氧化所需温度较低,即所需激光功率较低,因此激光的热影响区较小,在精加工阶段仅去除很小余量的材料即可获得所需表面。由于激光功率低,且通过调节激光参数可以实现对氧化层尺寸的调控,因此该工艺的可控性高,为纤维增强陶瓷基复合材料高效高质量加工提供了新途径。

3.3 激光水射流加工

激光水射流加工(LWJM)是通过专用装置将激光束完全包含在水射流中,激光在水射流和空气界面处发生反射,沿着水射流路径传播,最终作用到工件表面(图14)^[110]。由于水是光密介质,空气是光疏介质,基于全反射原理,当激光束从水射流进入到界面处时会发生全反射,因此水导激光原理上类似于光纤,激光能量全部作用到工件表面上,不会穿过水射流而损失。水射流冷却切削区,减小了激光热影响区;同时水射流将切屑冲刷带走,避免了切屑累积或重凝在加工表面。

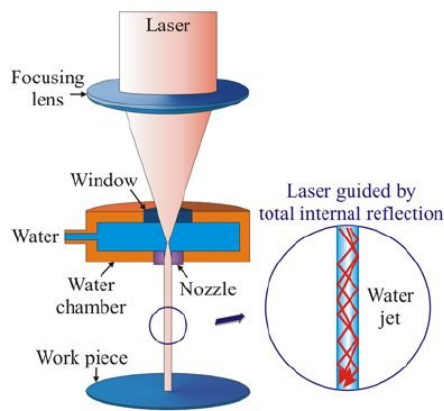


图 14 激光水射流加工原理示意图^[110]

Fig. 14 Schematic diagram of laser water jet machining^[110]

徐俊杰^[111]开展了SiC_f/SiC复合材料的水导激光加工工艺基础研究,搭建了纳秒绿光为激光光源的高耦合水压水导激光加工系统,并进行了划槽切割和打孔试验研究。采用多道直线的加工方式,切断

了厚度为3 mm的SiC_f/SiC复合材料,断面未发现重凝层和热影响区,仅发现少部分纤维断口有不同方向的台阶形貌,如图15所示。水导激光打孔时,采用螺旋轨迹加工了直径为1 mm的孔,入口和出口的圆度较高,没有毛刺产生,但是孔内壁生成了较薄的重凝层。但是,水射流的稳定性对激光水射流加工具有较大影响,且当水射流会在复合材料表面形成一层水膜,阻碍了激光对材料的充分烧蚀。为了解决这个问题,BAI等^[112]提出了同轴螺旋气体辅助激光水射流加工技术(CGALWJ),以SiC_f/SiC复合材料为加工对象,开展了理论分析和试验研究。同轴螺旋气体的作用一方面保证了水射流的稳定性,提升了激光水射流的加工能力;另一方面,气体促进了水快速从加工区域排出,并将切屑冲刷出来,阻止了切屑滞留和重铸层的生成,因此该工艺可以进一步提高加工效率和加工质量(图16)。

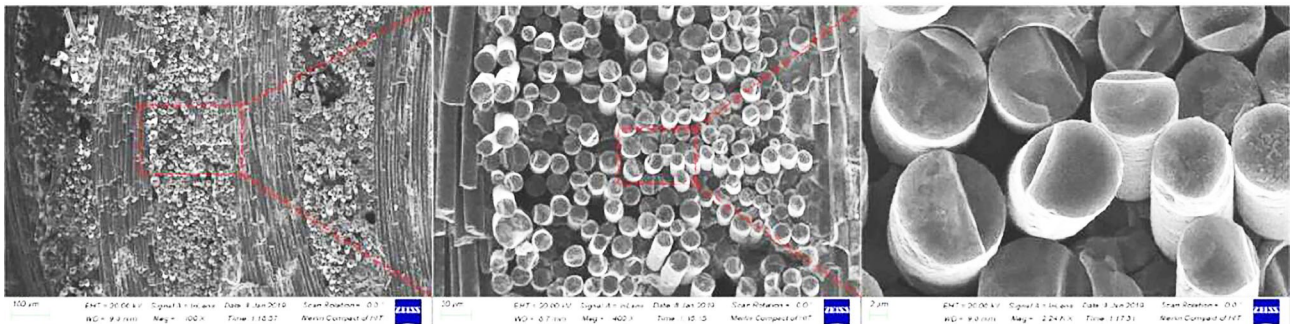


图 15 水导激光加工SiC_f/SiC复合材料的断口形貌^[111]

Fig. 15 Sectional morphology of the SiC_f/SiC composite machined with water jet guided laser machining^[111]

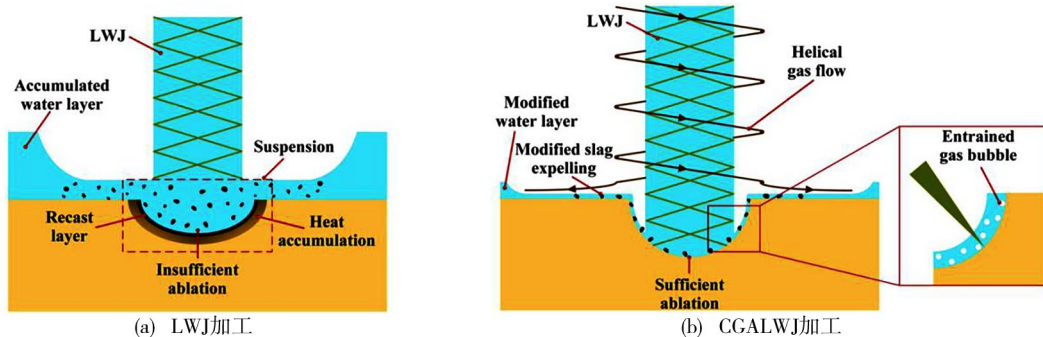


图 16 LWJ加工和CGALWJ加工效果对比示意图^[112]

Fig. 16 Schematic diagrams of LWJ machining and CGALWJ machining^[112]

4 总结与展望

FRCMC-SiC复合材料具有优异的物理和化学性能,在航空航天、轨道交通、核工业和高性能光学系统等领域具有广泛应用前景。该类复合材料普遍采用近净成形的制备方法,但是为了保证复合材料构件的使役性能、安全性和可靠性,一般需要对制备后的材料进行机械加工以获得较高的尺寸精度、形位精度和表面质量。复合材料具有高硬度、大脆性、各向异性和非均质性等特点,是一种典型的难加工材

料,给机械加工带来了挑战。国内外学者围绕C_f/SiC和SiC_f/SiC复合材料的常规机械加工、特种加工和复合加工工艺进行了较为系统的研究。

在常规机械加工技术中,磨削加工可获得较高的表面质量和加工精度,但是其材料去除效率普遍较低(<1 cm³/min)。切削加工由于高切削力和高切削温度,同时切削过程不稳定,刀具寿命普遍较短,换刀频率高且刀具成本高;提高切削速度虽可降低切削力,但是进给速度和背吃刀量必须保持低水

平,限制了材料去除率的提升。通过前期调研分析, C_r/SiC 复合材料铣削加工的最高去除率为 $1.6 \text{ cm}^3/\text{min}$ ($n=8\ 000 \text{ r/min}$, $f=200 \text{ mm/min}$, $a_p=0.8 \text{ mm}$, $\Phi 10$ 电镀金刚石刀具)。由此可见,加工效率依然是制约 FRCMC-SiC 在航空航天高端装备关键结构件中广泛应用的主要因素。

在特种加工技术中,激光加工的研究最多,工艺主要集中在激光制孔和激光加工表面微结构。激光能量作用集中,易于调控,尤其是脉冲激光的能量密度很高,可在极短时间内将作用区域材料熔融或气化,因此激光加工的材料去除率较高。但激光加工复合材料的表面质量和形状精度较差,飞溅出来的熔渣会附着在材料表面,降低了表面质量;激光加工存在热影响区,改变了材料的物理化学性能。激光束呈锥形结构,加工的结构形状也存在锥度,加工精度较低。

在复合加工技术中,超声振动辅助加工具有较低切削力和切削温度、较高加工质量,还可有效抑制毛刺、撕裂等加工缺陷,成为复合材料加工研究的热点。但是受到超声临界速度的限制,其提高加工效率的能力仍然有限。激光加热辅助加工虽可克服复合材料高硬度带来的高切削力难题,但是复合材料软化所需的激光能量很高,激光热影响区较大,工艺可控性差。同时,高温会降低刀具的切削性能,降低加工精度。

现有研究在加工工艺、刀具优选、工艺参数优化和表面形成机制等方面取得了一些有意义的结果,证明通过合理的工艺控制可以解决复合材料加工的部分难题,但仍不能获得高效、精密和无损伤加工。随着 FRCMC-SiC 复合材料应用领域的逐步扩大和复合材料结构件性能的逐渐提高,对复合材料高效精密加工的需求日益迫切。根据本文的综述分析,后续 FRCMC-SiC 复合材料的加工研究可从以下几个方面开展:

(1)加工刀具方面,缺乏基于刀具和复合材料切削特性匹配性的专用金刚石刀具技术。目前研究表明金刚石刀具是加工纤维增强陶瓷基复合材料的理想刀具,但相关研究仍然停留在针对现有金刚石刀具进行选型并开展切削试验,而缺乏金刚石刀具材料与结构对复合材料切削特性的影响规律的研究,复合材料加工专用刀具的设计与制备缺乏理论指导;

(2)质量表征方面,由于复合材料的各向异性和非均质性,FRCMC-SiC 的加工表面及亚表面微观组织和损伤形式等与金属材料不同,因此金属材料加工质量表征方法不完全适用于陶瓷基复合材料,需

要开发 FRCMC-SiC 复合材料特定的加工质量表征技术;

(3)加工质量与材料使役性能的映射关系尚不明确,现有研究重点关注加工工艺参数对加工质量的影响规律,而缺乏加工质量对材料使役性能如承载、抗氧化、疲劳、蠕变等影响,需要加强加工工艺与全寿命周期使用可靠性、性能寿命等关联关系研究。

参考文献

- [1] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型 SiC 陶瓷基复合材料的研究进展[J]. 航空制造技术, 2003(1): 24-32.
- [2] ZHANG L T, CHENG L F, XU Y D. Progress in research work of new CMC-SiC [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1): 24-32.
- [3] 何新波, 杨辉, 张长瑞, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料概述[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(2): 273-278.
- [4] HE X B, YANG H, ZHANG C R, et al. Review of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(2): 273-278.
- [5] JAMES A D. Advances in SiC/SiC composites for aero-propulsion [R]. NASA/TM-2013-217889, 2013.
- [6] BOUQUET C, FISHCHER R, LARRIEU J M, et al. Composite technologies development status for scramjet applications [C]. 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, Norfolk, VA, 15-19, 2003.
- [7] 张立同, 成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 1-6.
- [8] ZHANG L T, CHENG L F. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 1-6.
- [9] LARRY D H, CRAIG A S. The X-37 hot structure control surface testing[R]. NASA 20060056099, 2006.
- [10] VALENTINE P G. Hot structure control surface progress for X-37 technology development program[R]. NASA 20040086536, 2004.
- [11] TUMINO G, ANGELINO E, LELEU F. The IXV project—the ESA re-entry system and technologies demonstrator paving the way to European autonomous space transportation and exploration endeavours [R]. IAC-08-D2. 6. 01, 2008.
- [12] 康开华, 才满瑞. 欧洲过渡性实验飞行器项目[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(4): 58-62.
- [13] KANG K H, CAI M R. European intermediate experimental vehicle project [J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(4): 58-62.
- [14] 李文杰, 牛文. IXV 再入飞行器完成降落着陆试验[J]. 飞航导弹, 2014(1): 18-19.
- [15] LI W J, NIU W. IXV has completed the landing test [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(1): 18-19.
- [16] CHENG L F, XU Y D, ZHANG L T, et al. Oxidation behavior from room temperature to $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ of 3D-C/SiC composites with different coatings [J]. Journal of the American

Ceramic Society, 2002, 85(4): 989-991.

[12] 马登浩, 侯振华, 李军平, 等. 界面相对3D-SiC/SiC复合材料静态力学性能及内耗特征的影响[J]. 无机材料学报, 2021, 36(1): 55-60.

MA D H, HOU Z H, LI J P, et al. Interface type on the static mechanical properties and internal friction of 3D-SiC/SiC composites [J]. Journal of Inorganic Materials, 2021, 36(1): 55-60.

[13] 陈明伟, 谢巍杰, 邱海鹏. 连续SiC纤维增强SiC陶瓷基复合材料研究进展[J]. 现代技术瓷, 2016, 37(6): 393-402.

CHEN M W XIE W J, QIU H P. Recent progress in continuous SiC fiber reinforced SiC ceramic matrix composites [J]. Advanced Ceramics, 2016, 37(6): 393-402.

[14] 焦健, 陈明伟. 新一代发动机高温材料—陶瓷基复合材料的制备、性能及应用[J]. 先进高温材料, 2014(7): 62-69.

JIAO J, CHEN W M. New generation of high-temperature material for engine-preparation, property and application of ceramic matrix composites [J]. Advanced High-temperature material, 2014(7): 62-69.

[15] MAO W G, CHEN J, SI M S, et al. High temperature digital image correlation evaluation of in-situ failure mechanism: An experiment alframe work with application to C/SiC composites [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 665: 26-34.

[16] DIAZ O G, LUNA G G, LIAO Z R, et al. The new challenges of machining ceramic matrix composites (CMCs): Review of surface integrity [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139: 24-36.

[17] KLOCKE F, SOO S L, KARPUSCHEWSKI B, et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 581-604.

[18] 张立峰, 王盛, 李战, 等. 纤维方向对单向C/SiC复合材料磨削加工性能的影响 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(3): 373-377.

ZHANG L F, WANG S, LI Z, et al. Effects of fiber direction on grinding performance for unidirectional C/SiC composites [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(3): 373-377.

[19] 张立峰, 王盛, 乔伟林, 等. 单向复合材料C/SiC平面磨削力实验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1155-1159.

ZHANG L F, WANG S, QIAO W L, et al. Experimental study on surface grinding force of unidirectional C/SiC composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4): 1155-1159.

[20] ZHANG L F, WANG S, LI Z, et al. Influence factors on grinding force in surface grinding of unidirectional C/SiC composites [J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(3): 1073-1085.

[21] 张立峰, 王盛, 李战, 等. 单向复合材料C/SiC纳米刻划实验研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(4): 117-120.

ZHANG L F, WANG S, LI Z, et al. Experimental study on nanoscratch of unidirectional C/SiC composites [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(4): 117-120.

[22] 王涛, 王盛, 乔伟林, 等. 单向C/SiC复合材料平面磨削的磨削力模型研究 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(17): 2017-2021.

WANG T, WANG S, QIAO W L, et al. Research on grinding force model of plane grinding for unidirectional C/SiC composites [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(17): 2017-2021.

[23] CAO X Y, LIN B, ZHANG X F. Investigations on Grinding process of woven ceramic matrix composite based on reinforced fiber orientations [J]. Composites: Part B: Engineering, 2015, 71: 184-192.

[24] 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: 112-119.

[25] LIU Q, HUANG G Q, FANG C F, et al. Experimental Investigations on grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C_f/C-SiC composites based on reinforced fiber orientations [J]. Ceramics International, 2017, 43(17): 15266-15274.

[26] LIU Q, HUANG G Q, XU X P, et al. Influence of grinding fiber angles on grinding of the 2D-C_f/C-SiC composites [J]. Ceramics International, 2018, 44(11): 12774-12782.

[27] LIU Q, HUANG G Q, CUI C C, et al. Investigation of grinding mechanism of A 2D C_f/C-SiC composite by single grain scratching [J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 13422-13430.

[28] LI Y C, GE X, WANG H, et al. Study of material removal mechanisms in grinding of C/SiC composites via single-abrasive scratch tests [J]. Ceramics International, 2019, 45(4): 4729-4738.

[29] YIN J F, XU J H, DING W F, et al. Effects of grinding speed on the material removal mechanism in single grain grinding of SiC_f/SiC ceramic matrix composite [J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12795-12802.

[30] LIU Y, QUAN Y, WU C J, et al. Single diamond scribing of SiC_f/SiC composite: force and material removal mechanism study [J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 27702-27709.

[31] ADIBI H, ESMAEILI H, REZAEI S M. Study on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding of carbon fiber-reinforced SiC matrix composites (CMCs) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9-12): 3753-3767.

[32] QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Investigating minimum quantity lubrication in unidirectional C_f/SiC composite grinding [J]. Ceramics International, 2020, 46(3): 3582-3591.

[33] QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. An Investigation of carbon nanofluid minimum quantity lubrication

for grinding unidirectional carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119353.

[34] 毕铭智. C/SiC复合材料钻、铣加工技术的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.

BI M Z. Experimental research on drilling and milling of C/SiC composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[35] 张国栋, 邓建新, 张克栋, 等. C/C-SiC复合材料钻削加工工艺研究[J]. *工具技术*, 2014, 48(9): 12-16.

ZHANG G D, DENG J X, ZHANG K D, et al. Study of technique in drilling C/C-SiC composites [J]. *Tool Engineering*, 2014, 48(9): 12-16.

[36] XING Y Q, DENG J X, ZHANG G D, et al. Assessment in drilling of C/C-SiC composites using brazed diamond drills [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 31-43.

[37] DIAZ O G, AXINTE D A, NOVOVIC D. Probabilistic modelling of tool unbalance during cutting of hard-heterogeneous materials: A case study in ceramic matrix composites (CMCs) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 148: 217-226.

[38] DIAZ O G, AXINTE D A, SMITH P B, et al. On understanding the microstructure of SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) after A material removal process [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 743: 1-11.

[39] 张瑾瑜, 王宁, 赵建设, 等. C/SiC复合材料螺旋铣削与钻削制孔效果对比[J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(5): 39-40.

ZHANG J Y, WANG N, ZHAO J S, et al. Comparison between helical milling and drilling of C/SiC composite materials [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(5): 39-40.

[40] 王平, 张权明, 李良. C_v/SiC陶瓷基复合材料车削加工工艺研究[J]. *火箭推进*, 2011, 37(2): 67-70.

WANG P, ZHANG Q M, LI L. Research on turning technology of C_v/SiC ceramic matrix composites [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2011, 37(2): 67-70.

[41] QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Mechanical model and removal mechanism of unidirectional carbon fiber-reinforced ceramic composites [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 173: 105465.

[42] CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Hole exit quality and machined surface integrity of 2D C_v/SiC composites drilled by PCD tools [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(14): 4000-4010.

[43] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Study on surface/subsurface breakage in ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites [J]. *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 2017, 91(9-12): 3095-3105.

[44] 李巾锭, 任成祖, 吕哲, 等. 单颗粒金刚石平面磨削C/SiC复合材料的有限元仿真[J]. *材料科学与工程学报*, 2014, 32(5): 686-689, 715.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

LI J D, REN C Z, LV Z, et al. Finite element simulation of single diamond abrasive surface grinding C/SiC [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2014, 32(5): 686-689, 715.

[45] 王明海, 姜庆杰, 王奔, 等. C/SiC复合材料超声扭转振动铣削抑制损伤产生的机理[J]. *现代制造工程*, 2016(3): 103-109.

WANG M H, JIANG Q J, WANG B, et al. Mechanism of reduction of damage during ultrasonic torsional vibration milling of C/SiC composites [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(3): 103-109.

[46] HU M, MING W W, AN Q L, et al. Experimental study on milling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(8): 10581-10588.

[47] 何涛, 傅玉灿, 苏宏华, 等. C/SiC复合材料铣削表面完整性研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 710-706.

HE T, FU Y C, SU H H, et al. Study on surface integrity in milling of C/SiC composites [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(5): 710-706.

[48] XU L, ZHAO G L, ZHANG J Q, et al. Feasibility study on cryogenic milling of carbon fiber reinforced silicon carbide composites [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 37(3): 424-433.

[49] 王凯, 徐亮, 王新永, 等. 聚晶金刚石刀具低温冷却铣削C_v/SiC磨损机理[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(26): 11125-11129.

WANG K, XU L, WANG X Y, et al. Wear mechanism of polycrystalline diamond tool in cryogenic cooling milling of C_v/SiC composite [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(26): 11125-11129.

[50] 徐亮, 王凯, 王新永, 等. C_v/SiC复合材料低温铣削工艺优化研究[J]. *机械制造*, 2021(1): 36-40.

XU L, WANG K, WANG X Y, et al. Experimental study on cryogenic cooling milling performance of C_v/SiC composites [J]. *Machinery*, 2021(1): 36-40.

[51] 张健强. C_v/SiC复合材料的低温铣削基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.

ZHANG J Q. Fundamental research on cryogenic milling of C_v/SiC composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

[52] SHYAM, SRINIVAS M S, GAJRANI K K, et al. Sustainable machining of C_v/SiC ceramic matrix composite using green cutting fluids [J]. *Procedia CIRP*, 2021, 98: 151-156

[53] 向道辉, 秦强, 王艳凤, 等. 碳纤维复合材料专用CVD金刚石涂层刀具的制备及试验研究[J]. *工具技术*, 2015, 49(4): 24-28.

XIANG D H, QING Q, WANG Y F, et al. Preparation and test research of CVD diamond coated tool for carbon fiber composite material [J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(5): 24-28.

[54] 吴煜斌,张鹏飞,王乐,等. C/SiC复合材料表面粗糙度铣削加工工艺研究[J]. 航天制造技术,2021(1): 45-48.

WU Y B, ZHANG F F, WANG L, et al. Study on surface roughness milling process of C/SiC composite materials [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021(1): 45-48.

[55] 陈杰,安庆龙,明伟伟,等. PCD刀具几何参数对C_f/SiC复合材料铣削质量的影响[J]. 工具技术,2020,54(10): 3-8.

CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Milling quality assessment in milling 2D C_f/SiC composites by PCD tools with different geometric parameters [J]. Tool Engineering, 2020, 54(10): 3-8.

[56] ZOU F, CHEN J, AN Q L, et al. Influences of clearance angle and point angle on drilling performance of 2D C_f/SiC composites using polycrystalline diamond tools [J]. Ceramics International, 2020, 46(4): 4371-4380.

[57] LACALLE N L, LAMIKIZ A, CAMPA F J, et al. Design and test of a multitooth tool for CFRP milling [J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(26): 16.

[58] 苗光. 交错PCD立铣刀铣削碳纤维复合材料试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

MIAO G. Experimental research on milling carbon fiber reinforced plastics with staggered PCD end mill [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.

[59] ZHANG R H, LI W N, LIU Y S, et al. Machining parameter optimization of C/SiC composites using high power picosecond laser [J]. Applied Surface Science, 2015, 330: 321-331.

[60] LIU Y S, WANG C H, LI W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 3131-3140.

[61] ZHAI Z Y, WANG W J, ZHAO J, et al. Influence of surface morphology on processing of C/SiC composites via femtosecond laser [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 102: 117-125.

[62] WANG J, LIU Y, WANG W, et al. Character and mechanism of surface micromachining for C/SiC composites by ultrashort plus laser [J]. Advances in Applied Ceramics, 2017, 116(2): 99-107.

[63] 刘壮,方菊,李元成,等. 飞秒激光加工SiC/SiC复合材料厚板的孔型特征研究[J/OL]. 激光技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20220112.1352.002.html>.

LIU Z, FANG J, LI Y C, et al. Hole shape characteristics in femtosecond laser drilling of SiC/SiC composite thick plate [J/OL]. Laser Technology. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20220112.1352.002.html>.

[64] LIU C, ZHANG X Z, GAO L, et al. Feasibility of micro-hole machining in fiber laser trepan drilling of 2.5D C_f/SiC composite: experimental investigation and optimization [J]. Optik, 2021, 242: 167186.

[65] ZHAI Z Y, WEI C, ZHANG Y C, et al. Investigations on the oxidation phenomenon of SiC/SiC fabricated by high

repetition frequency femtosecond laser [J]. Applied Surface Science, 2020, 502: 144131.

[66] YUE X M, LI Q, YANG X D. Influence of thermal stress on material removal of C_f/SiC composite in EDM [J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 7998-8009.

[67] ZHANG Y F, CHEN W W, CHENG H W, et al. Machinability for C/SiC composite material by electrical discharge machining [J]. Materials Science Forum, 2018, 913: 536-541.

[68] HE W B, HE S T, DU J G, et al. Fiber orientations effect on process performance for wire cut electrical discharge machining (WEDM) of 2D C/SiC composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(1-4): 507-518.

[69] WEI C J, ZHAO L, HU D J, et al. Electrical discharge machining of ceramic matrix composites with ceramic fiber reinforcements [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1-4): 187-194.

[70] 魏臣隽,刘剑,许正昊,等. 纤维强化陶瓷复合材料的电火花加工[J]. 电加工与模具, 2015(1): 25-29, 33.

WEI C J, LIU J, XU Z H, et al. EDM of ceramic matrix composite with fiber reinforcement [J]. Electromachining & Mould, 2015(1): 25-29, 33.

[71] 焦健,王宇,邱海鹏,等. 陶瓷基复合材料不同加工工艺的表面形貌分析研究[J]. 航空制造技术, 2014(6): 89-92.

JIAO J, WANG Y, QIU H P, et al. Morphology analysis of SiC_f/SiC ceramic matrix composites machining surface with different processing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6): 89-92.

[72] LAPERRIERE L, REINHART G. CIRP Encyclopedia of production engineering [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

[73] LAUWERS B, KLOCKE F, KLIML A, et al. Hybrid processes in manufacturing [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 561-583.

[74] 钟翔福. C/SiC复合材料旋转超声振动辅助铣削实验研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.

ZHONG X F. Experimental research on rotating ultrasonic vibration assisted milling of C/SiC composites [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.

[75] 王岩. 轴向超声振动辅助磨削加工机理与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

WANG Y. The mechanism and experimental study of axial ultrasonic vibration assisted grinding [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[76] 曹晓燕. 2.5D SiO₂/SiO₂陶瓷基复合材料的磨削力与表面评价技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

CAO X Y. Study on grinding force and surface evaluation technology of 2.5D SiO₂/SiO₂ [D]. Tianjin: Tianjin University, 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

2015.

[77] BABBAR A, SHARMA A, JAIN V, et al. Rotary ultrasonic milling of C/SiC composites fabricated using chemical vapor infiltration and needling technique[J]. *Materials Research Express*, 2019(6):085607.

[78] 肖春芳, 韩冰. 超声辅助磨削加工碳纤维复合材料的磨削力分析[J]. *机械设计与研究*, 2018, 34(5): 140-142, 151.

XIAO C F, HAN B. Research on ultrasonic assisted grinding and grinding force of carbon fiber composites [J]. *Machine Design and Research*, 2018, 34(5): 140-142, 151.

[79] YUAN S M, FAN H T, AMIN M, et al. A cutting force prediction dynamic model for side milling of ceramic matrix composites C/SiC based on rotary ultrasonic machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1-4): 37-48.

[80] ZHANG C, YUAN S M, AMIN M, et al. Development of A cutting force prediction model based on brittle fracture for C/SiC in rotary ultrasonic facing milling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1-4): 573-583.

[81] WANG Y, SARIN V K, LIN B, et al. Feasibility study of the ultrasonic vibration filing of carbon fiber reinforced silicon carbide composites [J]. *The International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, 101: 10-17.

[82] LIU Y, LIU Z B, WANG X B, et al. Experimental study on cutting force and surface quality in ultrasonic vibration-assisted milling of C/SiC composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112 (7/8): 2003-2014.

[83] BERTSCHE E, EHMANN K, MALUKHIN K. Ultrasonic slot machining of a silicon carbide matrix composite [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(5-8): 1119-1134.

[84] 姜杰, 万淑敏, 林彬, 等. 超声振动铣削加工 C_r/SiC 复合材料试验研究 [J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(7): 1246-1252.

JIANG J, WANG S M, LIN B, et al. Experimental investigation on filing in ultrasonic vibration process of C_r/SiC composites [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(7): 1246-1252.

[85] 李欢. C_r/SiC 复合材料超声振动铣削加工技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.

LI H. Study on the ultrasonic vibration filing of C_r/SiC composites [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[86] 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: 2900-2907.

[87] WANG J J, FENG P F, ZHENG J Z, et al. Improving hole exit quality in rotary ultrasonic machining of 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第2期

ceramic matrix composites using a compound step-taper drill [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(12): 13387-13394.

[88] XUE F, ZHENG K, LIAO W H, et al. Experimental Investigation on fatigue property at room temperature of C/SiC composites machined by rotary ultrasonic milling [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(6): 3341-3356.

[89] 姜庆杰. C/SiC 复合材料超声扭转振动辅助铣削研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.

JIANG Q J. Research on the technology of ultrasonic torsional vibration assisted milling C/SiC composites [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2015.

[90] WANG J J, FENG P F, ZHANG J F, et al. Reducing cutting force in rotary ultrasonic drilling of ceramic matrix composites with longitudinal-torsional coupled vibration [J]. *Manufacturing Letters*, 2018, 18: 1-5.

[91] ZHANG X Q, DENG H, LIU K. Oxygen-shielded ultrasonic vibration cutting to suppress the chemical wear of diamond tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2019, 68(1): 69-72.

[92] ROZZI J C, BARTON M D. The laser-assisted edge milling of ceramic matrix composites [C]. *Proceedings of the 2009 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2009)*, West Lafayette, Indiana, USA, 2009: 845-852.

[93] ERDENECHIMEG K, JEONG H I, LEE C M. A study on the laser-assisted machining of carbon fiber reinforced silicon carbide [J]. *Materials*, 2019, 12: 2061.

[94] ZHOU K, XU J Y, XIAO G J, et al. A novel low-damage and low-abrasive wear processing method of C_r/SiC ceramic matrix composites: laser-induced ablation-assisted grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302: 117503.

[95] XU J K, TIAN J W, ZHAI C T, et al. Research on laser-assisted orthogonal micromachining technology of C_r/SiC composite [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(11-12): 4047-4058.

[96] DONG X Y, SHIN Y C. Improved machinability of SiC/SiC ceramic matrix composite via laser-assisted micromachining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(1-4): 731-739.

[97] WANG L H, XI J. Smart devices and machines for advanced manufacturing [M]. London: Springer-Verlag London Limited, 2008.

[98] XIA H J, ZHAO G L, ZHANG Y, et al. Nanosecond laser-induced controllable oxidation of TiB₂-TiC ceramic composites for subsequent micro milling [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(2): 2470-2481.

[99] XIN L J, ZHANG B, ZHAO G L, et al. Laser-induced oxidation-assisted micromilling of deep narrow microgroove on Inconel 718 [J]. *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, 2021, 114(1-2): 173-184.

[100] XIA H J, ZHAO G L, MAO P C, et al. Improved machinability of TiB₂-TiC ceramic composites via laser-induced oxidation assisted micro-milling [J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11514-11525.

[101] ZHAO G L, XIA H J, ZHANG Y, et al. Laser-induced oxidation assisted micro milling of high aspect ratio microgroove on WC-Co cemented carbide[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 465-475.

[102] 赵国龙, 冒鹏程, 杜亚男, 等. 激光诱导氧化辅助微细铣削TA19钛合金高深宽比微结构的研究 [J]. 表面技术, 2021, 50(6): 317-326.

ZHAO G L, MAO P C, DU Y N, et al. Fabrication of high aspect ratio feature on TA19 titanium alloy with laser-induced oxidation assisted micro-milling[J]. Surface Technology, 2021, 50(6):317-326.

[103] ZHAO G L, MAO P C, LI L, et al. Micro-milling of 65 vol% SiC_p/Al composites with A novel laser-assisted hybrid process [J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 26121-26128.

[104] ZHAO G L, HU M S, LI L, et al. Enhanced machinability of SiC_p/Al composites with laser-induced oxidation assisted milling [J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 18592-18600.

[105] XIA H J, ZHAO G L, HU M S, et al. Investigation on laser-induced oxidation assisted micro-milling of Inconel 718 [J]. Proc IMech E Part B: J Engineering Manufacture, 2020, 234(8): 1102-1112.

[106] ZHAO G L, XIA H J, LI L, et al. Study on laser-induced oxidation modification coupled with micro milling of WC-Co cemented carbide [J]. Ceramics International, 2020, 46(7): 9554-9566.

[107] XIA H J, ZHAO G L, LI L, et al. Fabrication of high aspect ratio microgroove on Ti6Al4V by laser-induced oxidation assisted micro milling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 419-428.

[108] YANG Y F, ZHAO G L, HU M S, et al. Laser-induced oxidation assisted micro milling of spark plasma sintered TiB₂-SiC ceramic [J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 12780-12788.

[109] XIA H J, ZHAO G L, YAN J H, et al. Study on laser-induced oxidation assisted micro milling of Ti6Al4V alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4): 1579-1591.

[110] GOBET M, OBI S, PAVIUS M, et al. Implementation of short-pulse lasers for wafer scribing and grooving applications [J]. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2010, 5(1): 16-20.

[111] 徐俊杰. SiC/SiC复合材料的水导激光加工工艺基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

XU J J. Basic research on the water-jet guided laser processing technology of SiC/SiC composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[112] BAI C, YE D, YUAN L, et al. Coaxial helical gas assisted laser water jet machining of SiC/SiC ceramic [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293:117067.