

碳化硅陶瓷基复合材料 加工技术研究进展*

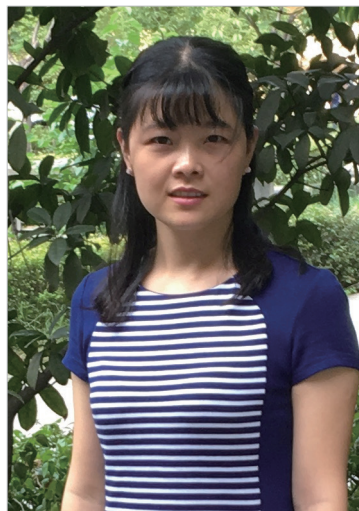
王 晶, 成来飞, 刘永胜, 刘小瀛, 张 青

(西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072)

[摘要] 碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC)是一种新型战略性热结构材料,在航空、航天、核能等高新技术领域具有广阔应用前景。但 CMC-SiC 材料硬度高、不导电等特性决定了实现其高精度、高质量加工较为困难。综述了 CMC-SiC 材料的传统加工和特种加工工艺的研究现状与进展,重点阐述了激光加工陶瓷及 CMC-SiC 材料的加工机理和加工效果。最后,指出了 CMC-SiC 材料加工技术的发展趋势。

关键词:碳化硅陶瓷基复合材料;激光加工;加工机理

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.050



王 晶

博士研究生,就读于西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室,研究方向为陶瓷基复合材料制备工艺与精密加工技术研究。

碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC,包含 SiC/SiC 和 C/SiC 两种材料)

* 基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ12007504);国家自然科学基金项目(51302220, 51472201, 51032006);中央高校基本科研(3102015BJ(II)MYZ26)。

具有低密度、高比强、高比模、耐高温、耐磨损和耐化学腐蚀等优点^[1-5],同时由于纤维的增强和增韧作用,有效提高了陶瓷材料的断裂韧性,因而在航空航天、能源、交通等领域具有广泛应用前景^[6-11]。

二次加工是 CMC-SiC 复合材料及其构件制备过程中不可或缺的重要环节,尤其是随着实际服役环境的日益苛刻,CMC-SiC 复合材料的超精细微纳加工的要求越来越高:如用于制造涡轮整体叶盘和涡轮静子件及发动机调节片等精密构件、航空发动机燃烧室火焰筒和涡轮叶片的气膜冷却孔(直径 300~700 μm)、核包壳管的封装微孔等,加工质量的高低将严重影响结构件的力学性能和使用性能。但是,CMC-SiC 复合材料是一种难加工材料,其硬度为 2840~3320 kg/mm^2 ,仅次于金刚石和立方氮化硼;且 CMC-SiC 复合材料属于各向异性材料,容易在切削力的作用下产生毛刺、分层、撕裂、崩边等损伤,易导致零件报废,影响加工质

量^[12-13]。因此,寻找一种高精度、高质量的加工手段一直是研究人员所追求的热点。

本文综述了 CMC-SiC 复合材料加工方法的研究进展,并分析了传统加工与特种加工的优缺点,最后指出激光加工技术在 CMC-SiC 复合材料加工方面体现出强大的发展潜力。同时,对激光加工技术的原理与加工工艺进行了分析,重点介绍了超短脉冲激光加工 CMC-SiC 复合材料的这一“冷”加工技术在微、精、细加工等领域的独特优势,为该技术在 CMC-SiC 复合材料的应用提供理论依据和试验支撑。

CMC-SiC 加工技术

CMC-SiC 复合材料的二次加工技术是促进其应用产业化的关键因素。美国国家航空航天局(NASA)在《21 世纪的航空技术》报告中曾表示,在其发动机材料研究规划中要优先发展陶瓷基复合材料的制备工艺及其加工技术^[14]。目前,可用

于 CMC-SiC 复合材料的加工方法主要有传统的机械加工、高压水射流加工、超声波加工、电火花加工和激光加工等^[15-27]。

1 传统机械加工技术

传统机械加工主要是指对 CMC-SiC 复合材料进行车削、切削、磨削、钻孔等,其方法具有工艺成熟、操作简单、加工效率高及设备投入少等特点,西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室利用自主研发的金刚石刀具,发展了 CMC-SiC 材料的机械加工技术,解决了大型复杂薄壁构件的切割、打孔、打磨、抛光等加工技术难题(图 1)。王平等^[18]研究了 C/SiC 陶瓷基复合材料的车削加工工艺,证明了利用传统机械加工方式加工 C/SiC 复合材料的可行性。但该方法也存在刀具(钻头)磨损过快,材料表面受到机械应力作用,容易在材料表面产生凹坑、毛刺、撕裂等问题(见图 2^[19]),严重制约了加工质量与加工精度,同时加工过程产生大量碎屑和粉尘,加工环境有待改善。

2 特种加工技术

为了解决上述传统机械加工方法由于刀具磨损与切削热引发的加



图1 传统机械加工的CMC-SiC复合材料构件
Fig.1 CMC-SiC composite structure machined by traditional technology

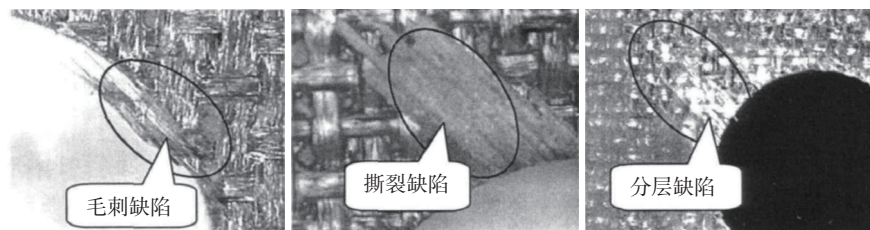


图2 机械加工后复合材料形貌
Fig.2 Microstructures of composites after mechanical machining

工精度、表面质量、生产环境等问题,特种加工技术逐渐发展起来。特种加工技术区别于传统加工方法,属于非接触式加工,成功应用于 CMC-SiC 复合材料的特种加工技术包括高压水射流法、超声加工技术、电火花加工技术、激光加工技术。

高压水射流法能够克服传统机械加工的部分缺点,对加工样品的厚度几乎没有限制,且加工阻力较小,不易出现撕裂和分层现象。西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室发展了 CMC-SiC 材料的高速磨料流加工技术,解决了 CMC-SiC 材料切割、打孔的加工速度和效率问题(图 3)。焦健等^[20]研究了高压水射流法对 SiC/SiC 复合材料的切削和打孔加工,结果表明在加工中通过调整工艺参数能够获得预期的试验结果。但在研究中同时发现,高压水射流法在加工工件厚度增加时容易在表面出现毛刺,且容易出现纤维拔出(图 4(a))和崩边现象(见图 4(b))^[20],对复合材料的加工质量产生极大影响。高压水射流的特点主要适合于构件的外形粗切边和制孔,且加工后构件厚度方向易形成梯度。

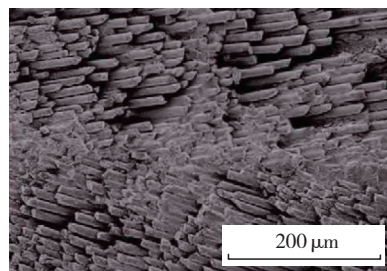
超声加工是超声波发生器通过将电能转变为超声电频振荡,并固定在振幅扩大工具上,产生超声振动,利用工作液中的悬浮颗粒对工件表面进行撞击和抛磨来实现材料去除(图 5)^[21]。其优点在于能够加工到点和绝缘材料,且不受材料硬度限制,能够加工复杂 3D 结构,同时具有加工速度快和无热效应的特性^[21-22]。但是其加工精度受到其加工振幅限

制,更适合于表面切削和复杂三维型面的加工,无法满足高精度数百微米级别微孔加工的需求。

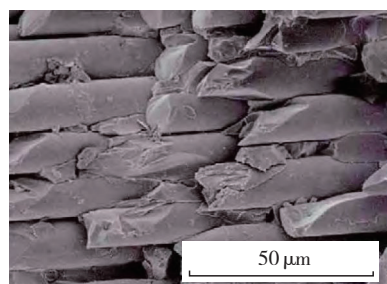
电火花加工是通过悬浮于电介



图3 高压水射流法加工复合材料构件
Fig.3 CMC-SiC composite components machined by waterjet



(a) 纤维拔出



(b) 崩边

图4 采用高压水射流加工后的SiC/SiC材料表面

Fig.4 Microstructures of SiC/SiC machined by waterjet

超声波发生器

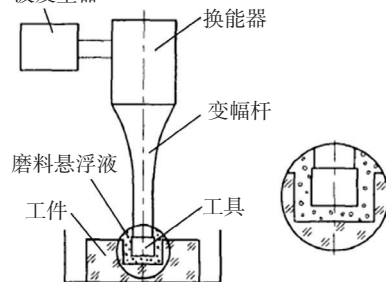


图5 超声波加工原理

Fig.5 Principle of ultrasonic machining

质中的高能等离子体的刻蚀作用,使表层材料发生熔化、蒸发或热剥离而达到加工材料的目的。由于加工过程中模具未与工件直接接触,故无机械应力作用于材料表面,因此电火花加工是一种无接触式精细热加工技术^[23]。Muttamara 等用普通电火花成形机和辅助电极电火花加工系统相结合,在 Si₃N₄ 陶瓷工件上成功地加工了直径 55 μm 的微孔(图 6)^[24]。同时,由于大多数陶瓷材料是离子型、共价型或二者结合的多晶材料,为电的绝缘体,限制了该技术的发展应用。

激光加工原理

以激光作为加工能源,在硬脆性陶瓷材料加工方面的应用发展潜力已见端倪^[25-26]:它可以实现无接触式加工,减少了因接触应力而对陶瓷带来的损伤;聚焦的高能激光束作用于陶瓷局部区域的能量可达 10⁸J/cm² 以上,加之陶瓷材料对长波长激光的吸收率高达 80% 以上,瞬间就可使材料熔化蒸发,实现高效率加工;由于聚焦光斑小,其热影响区小,可以达到精密加工的要求;激光的低电磁干扰以及易于导向聚焦的特点,方便实现三维及特殊面的激光加工,因此激光加工技术十分适合用于加工陶瓷材料(图 7)^[26]。根据激光器作用方式的不同,激光加工通常可分为两种:连续激光加工和脉冲激光加工。

1 连续激光加工原理

连续激光属于热加工,它是指利用激光束投射到材料表面产生的热效应来完成加工过程,通过聚焦获得高能量,达到使固体材料通过融化或蒸发而消除的目的。由于激光的发散角小和单色性好,理论上可以聚焦到尺寸与光的波长相近的小斑点上,再加上其强度高,因此其加工的功率密度可达到 10⁸~10¹⁰W/cm²,温度可达 1 万 °C 以上。在这样的高温下,任

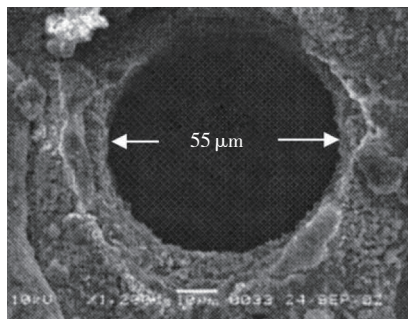


图6 电火花加工 Si₃N₄ 复合材料微孔形貌
Fig.6 Morphology of Si₃N₄ machined by electric discharge machining

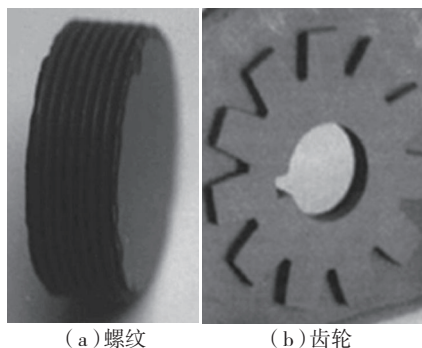


图7 激光加工的陶瓷构件
Fig.7 Ceramics components machined by laser

何材料都将瞬时急剧熔化和汽化,并爆炸性地高速喷射出来,同时产生方向性很强的冲击。因此,连续激光加工是材料在光热效应下产生高温熔融和受冲击波抛出的综合过程,这种加工过程可分为 3 个阶段(图 8):加工材料吸收激光能量;光能转化为热能使材料加热;通过熔化、汽化去除材料^[27]。

2 超短脉冲激光加工原理

脉冲激光器是指激光借助高能量、高密度光子引发或控制光化学反

应的各种加工过程,也称为激光光化学反应加工。其单个激光脉冲宽度小于 0.25s,每间隔一段时间才工作一次的激光器具有很大输出功率,适用于激光打标、切割和测距等。脉冲激光又可根据脉冲宽度的不同分为长脉冲激光(>100ns)和短脉冲激光(<100ns)。

近些年来,随着超短脉冲激光技术的发展,其“冷加工”特性在工业生产中应用已逐步引起人们的重视。超短脉冲激光与材料的作用过程为:首先,通过非线性吸收过程吸收激光能量,在材料内部形成等离子体(见图 9),非线性吸收过程主要通过多光子电离和雪崩电离实现^[28]。然后,当等离子体浓度达到一定临界值时,材料开始强烈吸收激光能量,直至材料被去除。

在超短脉冲激光加工机理研究方面, Yalukova 等^[29]使用不同波长激光对有纤维和无纤维增强的聚合物进行加工,分析超短脉冲激光与聚合物复合材料的加工机理,结果表明:对于波长为 1064nm(红外光波段)的激光和 532nm(可见光波段)激光,主要以热熔融方式去除,加工孔边缘易形成热影响区;而对于波长为 266nm(紫外光波段),多光子吸收为激光与材料作用的主要机理,主要以价键断裂方式去除材料,孔边缘热影响区很小。赵清亮等^[30]分析了飞秒激光加工 SiC 烧蚀阈值及去除机理,结果表明: SiC 与飞秒激光作用是典型的多光子和非线性吸收过程,材料去除以

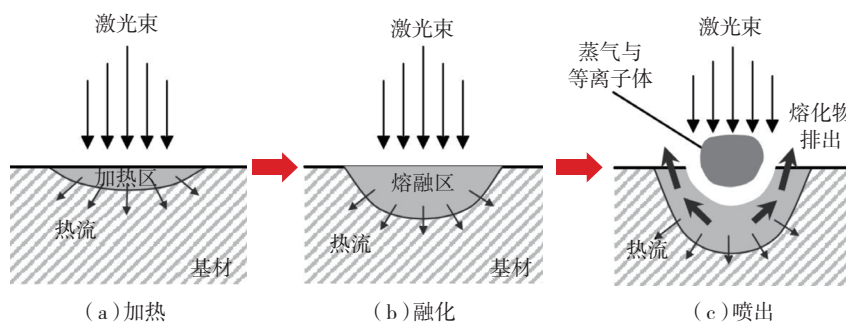


图8 连续激光光束与材料相互作用过程示意图
Fig.8 Schematic diagram of interaction with continuous laser beam and materials

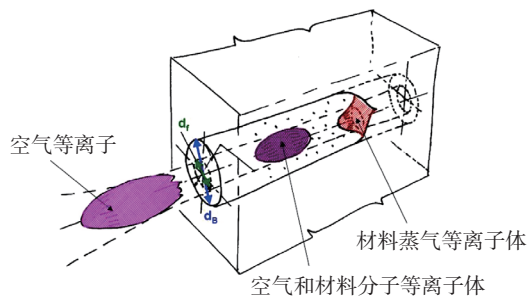


图9 超短脉冲激光打孔过程中不同类型的等离子体
Fig.9 Different types of plasma in ultrashort laser drilling

汽化和爆炸机制为主。

激光加工工艺

激光加工是一种新兴的加工手段,主要利用激光束投射到材料表面产生的热效应来完成加工过程,通过聚焦获得高能量,达到使固体材料通过融化或蒸发而消除的目的,从而实现对材料的切割、焊接、表面处理及微加工^[31](见图10^[26])。它对材料的种类和硬度无选择性,应用范围很广,对高硬度材料和大批量加工有很大的优势^[32-35]。

1 连续激光加工

连续型激光器可在一段较长时间范围内以连续方式持续进行激光输出,可实现激光焊接、激光打孔、激光切割等,被加工材料通过熔化、蒸发的方式得以去除。连续激光加工对材料种类变化的适应性强,加工速度快,应用范围广,特别是在高硬度材料的大批量加工中具有优势^[36-37]。但是,由于加工中易形成重铸层、微裂纹和热影响区,其应用有很大局限性(见图11(a))。

2 超短脉冲激光加工

超短脉冲激光一般是指脉冲宽度小于10ps的激光脉冲。其加工精度高,加工损伤较小,是精密微加工的理想工具,其加工效果明显优于连续激光加工(见图11(b))。Moreno等^[38]研究了飞秒激光对碳材料增强聚合物材料的微加工试验,结果表明:碳纤维增强聚合物能够获得较好的加工效果,填充物的尺寸和

形状对加工质量的影响较大。Das等^[39]研究了150fs激光对具有热障涂层的高温合金的微孔加工,试验表明加工后样品无分层、重铸和裂纹等严重损伤,且具有较高的内壁光洁度,但加工效率较低。

CMC-SiC 复合材料 超短脉冲激光加工

作为激光加工技术的一个分支,超短脉冲激光因其加工CMC-SiC复合材料具有近乎零损伤、精度高、无重铸层等优点,成为加工技术领域的研究热点。Hu等^[40]研究了采用超短脉冲激光加工SiC/SiC复合材料微小通孔与盲孔,分析了其加工特性,研究表明:加工后微孔壁面光滑,表面无重铸层,并可保证其加工精度。Wang等^[41-43]开展了皮秒激光对C/SiC复合材料的微加工工艺和机理

研究,其结果表明皮秒激光参数,如加工功率(图12)、加工步进、扫描速度等对C/SiC复合材料微孔加工质量和效率有较大影响。加工功率较低时,激光功率密度较低,孔内形成的反冲气压较低,则孔内形成的碎屑不能及时喷出孔外,使得出口处直径远小于入口处直径,轴向锥度明显;加工功率较高时,打孔过程中形成大量蒸汽相物质,孔内产生强烈的冲击波,形成反冲高压,使得去除物质从孔内高速向外喷射(图13)。Liu等^[44-45]开展了使用皮秒激光对SiC/SiC复合材料的微加工工艺和机理研究,其结果表明皮秒激光参数,如能量密度、扫描速度、加工方式(见图14)等对SiC/SiC复合材料微孔加工的质量和效率有较大影响^[45]。

西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室对C/SiC复合材料超短脉冲激光加工进行了系统深入研究,结果表明该技术加工分辨率高,具有优异的加工精度与一致性,

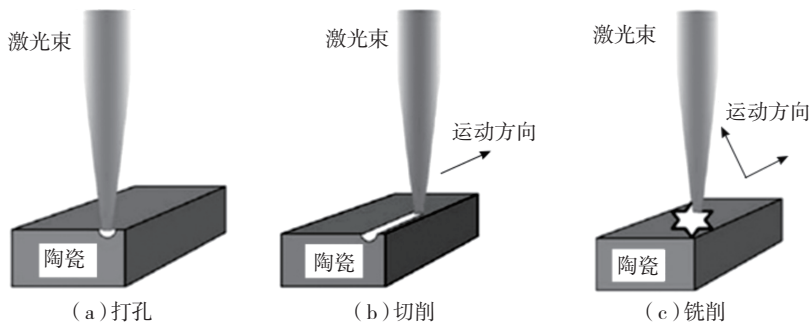


图10 激光加工过程示意图

Fig.10 Schematic diagram of laser processing

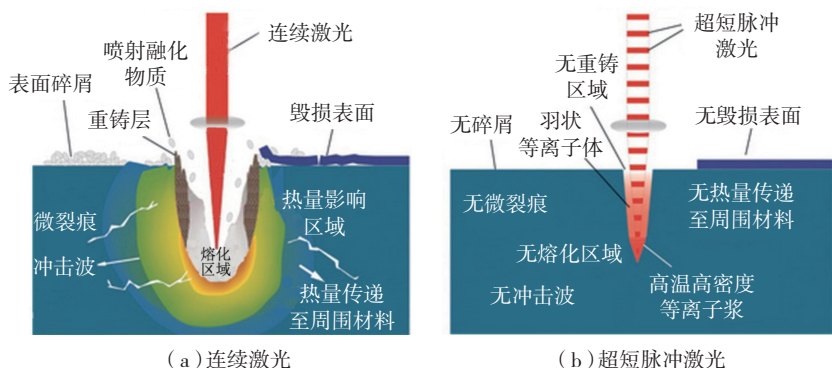


图11 连续激光与超短脉冲激光加工效果对比

Fig.11 Comparison of the machining effects between continuous laser and ultrashort pulse laser

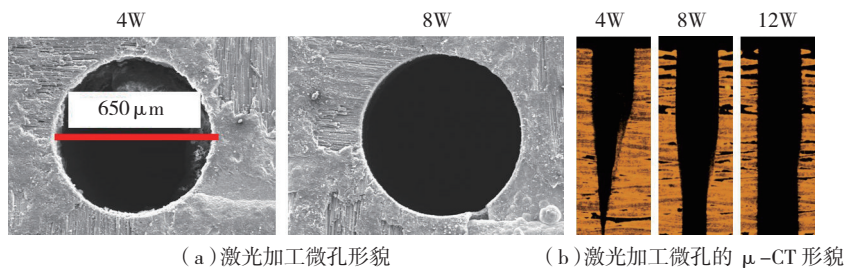


图12 加工功率不同的C/SiC皮秒激光加工微孔形貌

Fig.12 Morphology of drilling holes with different processing powers in C/SiC by picosecond laser

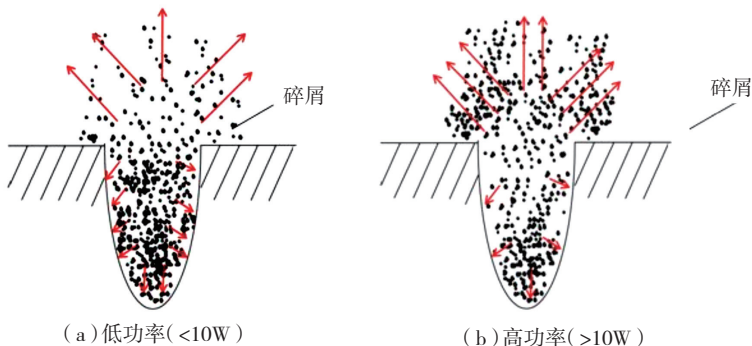


图13 加工功率不同的C/SiC皮秒激光加工模型

Fig.13 Drilling models for C/SiC with different processing powers by picosecond laser

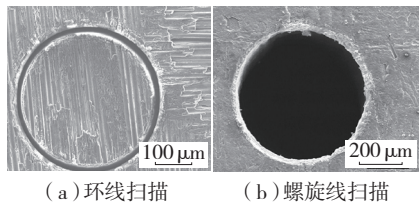


图14 不同加工模式下的SiC/SiC皮秒激光加工微孔形貌

Fig.14 Morphology microholes in SiC/SiC composites under different machining modes

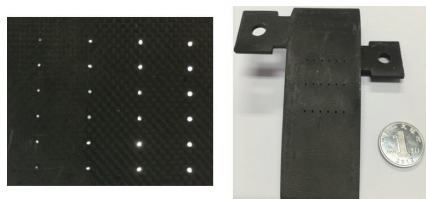


图15 超短脉冲加工C/SiC复合材料构件阵列微孔

Fig.15 Array micro-holes of C/SiC components machined by ultrashort laser

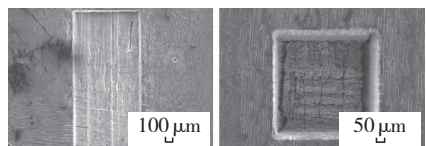


图16 超短脉冲加工C/SiC复合材料构件方槽

可成功实现 C/SiC 复合材料精密、低损伤、高效率的加工需求,图 15 和图 16 分别展示了 C/SiC 复合材料构件阵列微孔与方槽超短脉冲激光加工。

结束语

随着 CMC-SiC 复合材料应用领域的不断扩大,发展高效精密加工技术显得较为迫切。传统机械加工技术在加工 CMC-SiC 复合材料时具备工艺简单、加工效率高等优点。同时为了提高该技术的加工精度,应采用电镀超硬磨料刀具或与特种加工工艺相结合。特种加工技术如高压水射流加工、超声波加工、电火花加工等,需要一系列的革新以满足 CMC-SiC 复合材料的加工需求。例如:高压水射流加工中应采用硅砂等硬度较小的磨料,以实现低损伤加工;超声波加工中应采用旋转超声波仪器,将系统的加工效率提高 6~10 倍;电火花加工中可采用电解液法和高压法来创造产生火花放电的条件,实现对非导电陶瓷的加工。

激光加工技术作为新型特种加工工艺,对提高加工精度、自动化生产、“绿色制造”、减少材料损耗等方面起着越来越重要的作用。一方面,系统开展有关激光加工工艺及作用机制研究具有重要意义;另一方面,采用激光与其他技术复合可显著提高加工效率与加工精度,显示出更为广泛的应用潜力,如:在喷射液电电解-激光复合工艺技术、激光辅助切削技术、激光复合焊接技术、激光复合电火花技术等。

参考文献

[1] 张立同, 成来飞, 徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展 [J]. 航空制造技术, 2003(1): 24-32.
ZHANG Litong, CHENG Laifei, XU Yongdong. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1): 24-32.

[2] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 155-170.

[3] ROSSO M. Ceramic and metal matrix composites: routes and properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1-3): 364-375.

[4] VOORDE M H, NEDEL M R. CMCs: research in Europe and the future potential of CMCs in industry[J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 1996, 17(4): 3-21.

[5] XU Y D, CHENG L F, ZHANG L T, et al. Mechanical properties of 3D fiber reinforced C/SiC composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 300(1-2): 196-202.

[6] NATHAL M V, LEVINE S R. Development of alternative engine materials[M]// ANTOLOVICH S D, STUSRUD R W, MACKAY R A, et al. Superalloys. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1992: 329-340.

[7] PIELIESCH R J. Composites move into jet engines design[J]. Aerospace America, 1991, 29(7): 7-11.

[8] 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.
ZHANG Litong, CHENG Laifei. Discussion on strategies of sustainable development of

continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(2): 1-6.

[9] 傅恒志. 未来航空发动机材料面临的挑战与发展趋势[J]. *航空材料学报*, 1998, 18(4): 52-61.

FU Hengzhi. Challenges and development of future aero-engine materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1998, 18(4): 52-61.

[10] KRENKEL W. C/C-SiC composites for hot structures and advanced friction systems[J]. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2008, 24(4): 583-592.

[11] OHNABE H, MASAKI S, ONOZUKA M, et al. Potential application of ceramic matrix composites to aero-engine components[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(4): 489-496.

[12] KARNIK S R, GAITONDE V N, RUBIO J C, et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model[J]. *Materials and Design*, 2008, 29(9): 1768-1776.

[13] DAVIM J P, REIS P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 160(2): 160-167.

[14] 荆君涛. 陶瓷基复合材料零部件的复杂曲面加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

JING Juntao. The research of the ceramics matrix composites' manufacturing technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.

[15] 张文武, 张天润, 焦健. 陶瓷基复合材料加工工艺简评[J]. *航空制造技术*, 2014(6): 45-49.

ZHANG Wenwu, ZHANG Tianrun, JIAO Jian. Comment on ceramic matrix composites machining processes[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(6): 45-49.

[16] 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 and Manufacture*, 2005, 45(12): 1402-1411.

[17] DENG J X, TAICHIU L. Surface integrity in electro-discharge machining, ultrasonic machining, and diamond saw cutting of ceramic composites[J]. *Ceramics International*, 2000, 26(8): 825-830.

[18] 王平, 张权明, 李良. C/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 Ping, ZHANG Quanming, LI

Liang. Research on turning technology of C_f/SiC ceramic matrix composites[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2011, 37(2): 67-70.

[19] 佟沐霖. 碳纤维复合材料钻削过程仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.

TONG Mulin. Research on finite element analysis and experiment of drilling of carbon fiber reinforced polymer composites [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.

[20] 焦健, 王宇, 张文武, 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 Jian, WANG Yu, ZHANG Wenwu, 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.

[21] 王瑞刚, 潘伟, 蒋蒙宁, 等. 可加工陶瓷及工程陶瓷加工技术现状及发展[J]. *硅酸盐通报*, 2001(3): 27-35.

WANG Ruigang, PAN Wei, JIANG Mengning, et al. Research and development on processing technology of ceramics and engineering ceramics[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2001(3): 27-35.

[22] LEE T C, CHAN C W. Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 71(2): 195-201.

[23] 刘永红, 于丽丽, 李小朋, 等. 非导电工程陶瓷电火花磨削技术[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(8): 132-136.

LIU Yonghong, YU Lili, LI Xiaopeng, et al. Technology for electrical discharge grinding of non-conductive engineering ceramics[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(8): 132-136.

[24] MUTTAMARA A, FUKUZAWA Y, MOHRI N, et al. Probability of precision micro-machining of insulating Si₃N₄ ceramics by EDM [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140(1-3): 243-247.

[25] 季凌飞, 闫胤洲, 鲍勇, 等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1686-1692.

JI Lingfei, YAN Yinzhou, BAO Yong, et al. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1686-1692.

[26] 张保国, 田欣利, 余安英, 等. 工程陶瓷材料激光加工原理及应用研究进展[J]. *现代制造工程*, 2012(10): 5-10.

ZHANG Baoguo, TIAN Xinli, SHE Anying, et al. Research progress on principle and

application of laser machining for engineering ceramics[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2012(10): 5-10.

[27] 袁立新. 喷射液束电解-激光复合加工系统及加工工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

YUAN Lixin. Research on system and techniques of hybrid processing of laser beam machining with jet electrochemical machining[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[28] JONATHAN B A. The role of focusing in the interaction of femtosecond laser pulses with transparent materials[D]. Cambridge: Harvard University, 2003: 57-72.

[29] YALUKOVA O, SÁRADY I. Investigation of interaction mechanisms in laser drilling of thermoplastic and thermoset polymers using different wavelengths[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66: 1289-1296.

[30] 赵清亮, 姜涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 172-177.

ZHAO Qingliang, JIANG Tao, DONG Zhiwei, et al. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 172-177.

[31] 曹明翠, 郑启光, 陈祖涛, 等. 激光热加工[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.

CAO Mingcui, ZHENG Qiguang, CHEN Zutao, et al. *Laser thermal*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995.

[32] YILBAS B S, SAMI M. Study into the effect of beam waist position on hole formation in the laser drilling process[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 1996, 210(3): 271-277.

[33] 张铭峰, 张胜雄. CO₂ 激光控制断裂切割氧化铝陶瓷基片最佳条件的探讨[J]. *中国激光*, 2000, 27(11): 1045-1049.

ZHANG Mingfeng, ZHANG Shengxiong. Discussion on optimum conditions of CO₂ laser cutting alumina ceramic substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1045-1049.

[34] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A*, 1996, 63(2): 109-115.

[35] HIRAYAMA Y, OBARA M. Heat effects of metals ablated with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2002, 197(1): 741-745.

[36] ALLMEN M V. Laser drilling velocity

in metals[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(12): 5460–5463.

[37] YILBAS B S, SEMI M. Study into the effect of beam waist position on hole formation in the laser drilling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1996, 210(3): 271–277.

[38] MORENO P, MÉNDEZ C, GARCÍA A, et al. Femtosecond laser ablation of carbon reinforced polymers [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(12): 4110–4119.

[39] DAS D K, POLLOCK T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated $CM_{s}X_{4}$ superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,

209(15–16): 5661–5668.

[40] HU W Q, SHIN Y C, KING G B. Micromachining of metals, alloys, and ceramics by picosecond laser ablation [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(1): 165–174.

[41] WANG C H, ZHANG L T, LIU Y S, et al. Ultra-short pulse laser deep drilling of C/SiC composites in air[J]. Applied Phxicsa, 2013, 111(4): 1213–1219.

[42] LIU Y S, WANG C H, LI W N, et al. Effect of energy density on the machining character of C/SiC composites by picosecond laser [J]. Applied Physics A, 2014, 116(3):

1221–1228.

[43] 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.

[44] LIU Y S, WANG C H, LI W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in SiC/SiC composites by picosecond laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3131–3140.

[45] LI W N, ZHANG R H, LIU Y S, et al. Effect of different parameters on machining of SiC/SiC composites via pico-second laser[J]. Applied Surface Science, 2016, 364: 378–387.

Research Development on Processing Technology of Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites

WANG Jing, CHENG Laifei, LIU Yongsheng, LIU Xiaoying, ZHANG Qing

(Science and Technology on Thermostructural Composites Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Continuous fiber reinforced silicon carbide composite (CMC–SiC) is a new strategic thermo-structural material. It has wide range of application in the filed of aviation, aerospace, nuclear power and high-tech fields, et al. However, it is very difficult to conduct a high precision and high quality machining due to its high hardness, non-conducting properties. In this paper, the research status and development of the traditional and special processing technology of CMC–SiC are reviewed, and the mechanism and effect of laser machining on CMC–SiC are emphasized. At last, the developmental trend of processing technology of CMC–SiC is pointed.

Keywords: Silicon carbide ceramic matrix composite; Laser machining; Machining mechanism

(责编 谷雨)

(上接第 49 页)

Ultrasonic Assisted Machining of Ceramic Matrix Composites

DING Kai¹, SU Honghua², FU Yucan², CUI Fangfang¹, LI Qilin¹, LEI Weining¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

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

[ABSTRACT] Ceramic matrix composites have great potential in space applications due to excellent properties such as superior mechanical property, high temperature resistance and low density. However, these composites are difficult to be processed for its high hardness and brittleness. Many studies show that ultrasonic assisted machining is suitable for processing ceramic matrix composites. Compared to conventional machining technologies, ultrasonic assisted machining can reduce cutting forces, improve machined surface quality and so on. Ultrasonic assisted drilling and ultrasonic assisted grinding of the two kinds of ceramic matrix composites (C_f/SiC and SiC_f/SiC) that developed well are introduced. In addition, some problems among ultrasonic assisted machining of these composites are analyzed and some countermeasures are also suggested.

Keywords: Ceramic matrix composite; Ultrasonic assisted drilling; Ultrasonic assisted grinding; Process quality evaluation system; Parameter matching performance

(责编 谷雨)