

陶瓷基复合材料不同加工工艺的表面形貌分析研究

Morphology Analysis of SiC_f/SiC Ceramic Matrix Composites Machining Surface With Different Processing Technology

中航工业复合材料技术中心先进复合材料国防科技重点实验室 焦健 王宇 邱海鹏 陈明伟 李秀倩 高淑雅
中国科学院宁波材料技术与工程研究所 张文武

[摘要] 主要对比分析了机械加工、高压水射流加工、激光加工的3种不同加工工艺对SiC_f/SiC复合材料表面形貌的影响。结果显示机械加工与高压水射流加工表面孔洞和微裂纹均较多,水切割表面呈现出纤维拔出状态;空气环境中激光加工的表面平整,出现了封孔特征,孔洞和微裂纹数量少,氮气环境中激光加工的表面形貌生长了一层SiC晶粒,可起到愈合表面孔洞和微裂纹的作用。

关键词: 机械加工 水射流加工 激光加工 表面形貌

[ABSTRACT] Machining process, high-pressure water-jet machining process, laser processing are used on SiC_f/SiC composites to obtain the machined surface, the effect of processing on the surface morphology is analyzed. The result shows that the inherent pores are exposed on the machined surfaces by water-jet machining process and machining process and the initial micro-cracks grow on the surfaces. A smooth surface coated by SiO_x with a few of micro-cracks is obtained after laser processing in air environment with the vanishing of part of the inherent pores, which proves that a sealing effect on SiC_f/SiC composites treated by laser processing. A similar effect is observed on the surface of sample cutted by laser processing under inert gas. SiC grain deposits on the surface of composites to form a SiC layer, which plays a role in sealing the inherent pores.

Keywords: Machining process Water jet machining process Laser processing Surface morphology

连续纤维增强陶瓷基复合材料由于高比强、高比模、低热膨胀系数、低比重、不易磨损和优良的高温化学稳定性,而且具备对裂纹不敏感性、不易发生大面积断裂的特性,是一种优良的高温结构材料,受到航空、航天、核能等多领域的广泛关注。近年来,该材料的制备工艺、力学性能等问题也越来越受到学术界和工程界的

重视^[1]。

碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料(SiC_f/SiC)构件制造过程中,二次加工是一个重要环节,加工后的表面质量、尺寸精度和位置精度等对SiC_f/SiC复合材料构件的力学性能、可靠性和使用寿命等都有重要影响,因此二次加工问题已成为限制该种材料构件工程化应用的主要瓶颈之一。

由于陶瓷基复合材料的硬度大,通常用传统的磨削工艺等进行加工,不但加工效率低,严重影响构件的制造周期,而且在加工过程中容易产生变形层、表面/亚表面微裂纹等缺陷,导致构件强度降低,故陶瓷基复合材料的二次加工技术研究对推动陶瓷基复合材料在航空发动机等高温结构上的推广应用意义重大^[2]。

1 试验部分

国产SiC纤维经过三维四向编织工艺制备的纤维预制体,以PCS先驱体溶液为浸渍液,采用PIP工艺经过多次浸渍—裂解循环,获得SiC_f/SiC复合材料,具体制备工艺及参数参见文献[3]。

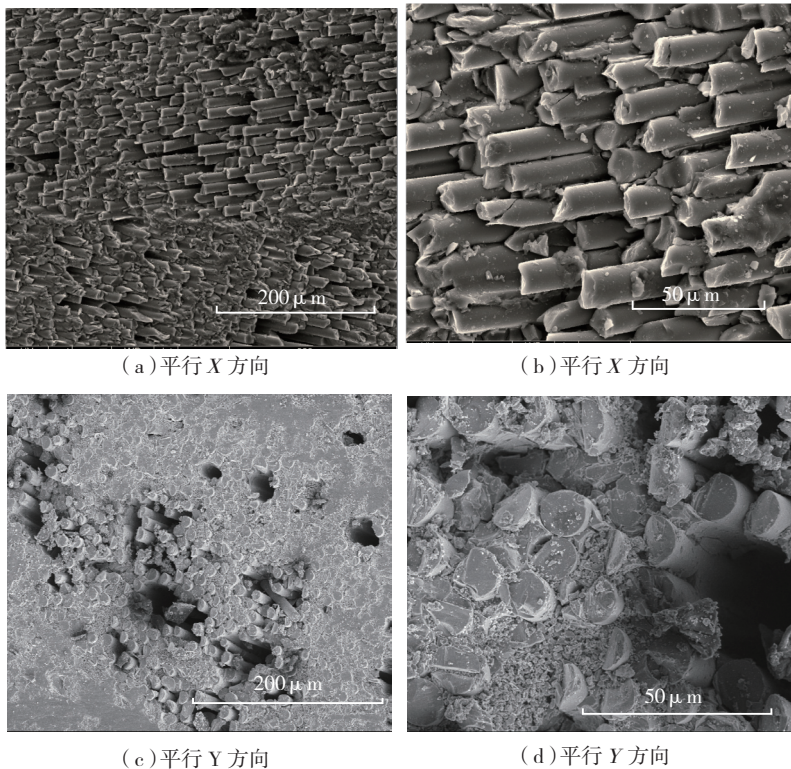
分别采用磨削加工、高压水射流加工以及激光加工制备测试样品,其中激光加工采用532nm和1064nm波长的光束进行短脉冲激光加工(ns、ps量级)。对平行于纤维预制体的编织方向(X方向)和垂直于纤维预制体的编织方向(Y方向)上的表面形貌采用扫描电子显微镜(SEM)结合X射线能谱仪(EDS)对表面显微结构进行观察和成份分析。

2 结果与讨论

2.1 机械加工SiC_f/SiC复合材料表面形貌分析

SiC_f/SiC陶瓷基复合材料延性和冲击韧性低、加工过程中易产生分层、撕裂、毛刺、拉丝、崩块、表面质量差等缺陷,是典型的难加工材料。

SiC_f/SiC复合材料的机械加工工艺有车削加工、磨削加工、铣削加工及钻削加工等方法,由于SiC_f/SiC复合材料具有硬度高、热导性差等切削难



(a)平行 X 方向

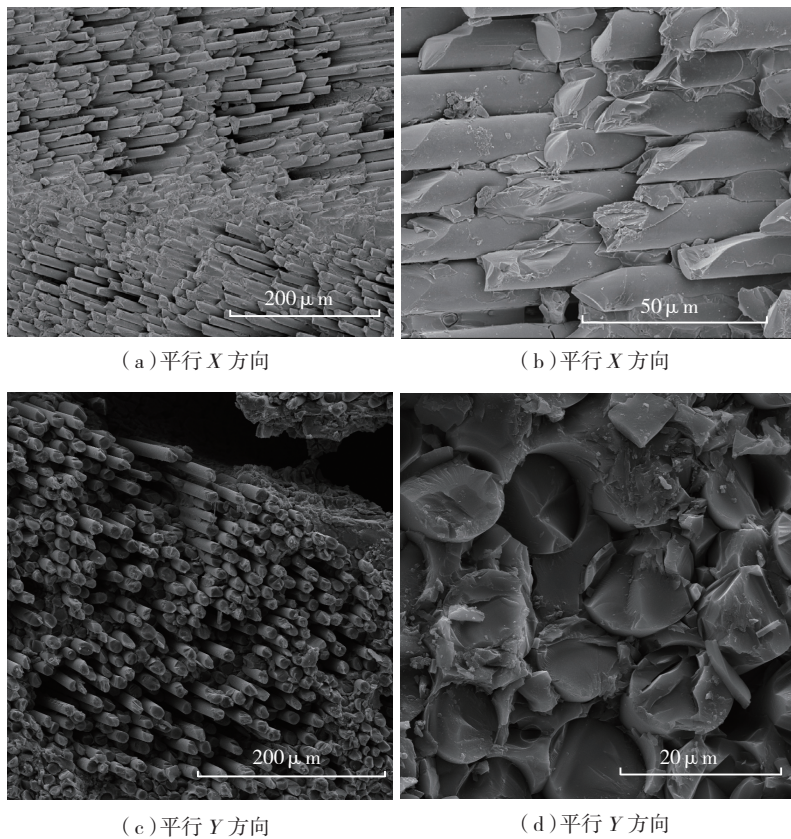
(b)平行 X 方向

(c)平行 Y 方向

(d)平行 Y 方向

图1 磨削工艺加工后的SiCf/SiC材料表面

Fig.1 Machined surface of SiCf/SiC using grinding process



(a)平行 X 方向

(b)平行 X 方向

(c)平行 Y 方向

(d)平行 Y 方向

图2 采用高压水射流加工后的SiCf/SiC材料表面

Fig.2 Machined surface of SiCf/SiC using high-pressure water jet

点,加工时刀尖部位温度很高,极易造成刀具缺损、崩刃及磨损,尺寸精度及形状精度控制比较困难^[4]。

采用磨削工艺加工后的材料表面如图1所示。图1(a)和(b)是平行于X方向的机械加工表面形貌,图1(c)和(d)是平行于Y方向的机械加工表面形貌。

从图中可以看出,X方向和Y方向的加工表面上很不平整,在断面上均可观测到很多的几十 μm 的孔洞,这些孔洞主要是由于致密化过程中基体未完全填满预制体内的空隙而引起的,属于材料内部固有孔洞。在纤维切割截面附近的表面基体破坏较大,有微裂纹的存在,纤维束内部纤维之间存在孔隙,加工过程中存在着纤维的剪断拔出与相应的基体带出,许多纤维与基体分离,其余的大部分区域分布着许多基体或纤维的碎屑。

由于加工时刀具作用在材料上的应力超过了SiCf/SiC复合材料的强度极限,导致表层材料形成小区域性的破裂和崩塌。当切削应力很小时,材料主要以塑性变形方式被去除,加工表面较光滑,随着切削力增大,冲击作用将会使材料表面产生大量的微裂纹^[5]。

2.2 水射流加工 SiCf/SiC 复合材料表面形貌分析

高压磨料水射流加工是在较高的工作压力下,在高速流动的纯水中加入一定数量的磨料颗粒后而形成的一种液固两相高速射流。该工艺具有较强的切割加工能力,能切割金属以及其他的非金属材料^[6]。

采用高压水射流加工后的材料表面如图2所示。图2中,(a)、(b)是平行于X方向的水切割加工表面形貌,(c)、(d)是平行于Y方向的水切割加工表面形貌。

由图中可见,与机械加工类似,表面上也出现了孔洞。与机械加工结果相比,裸露在外的纤维断面更不平整,纤维束的切断部分呈现出拔出状态,纤维之间的陶瓷基体被带有磨料的高速水流刷

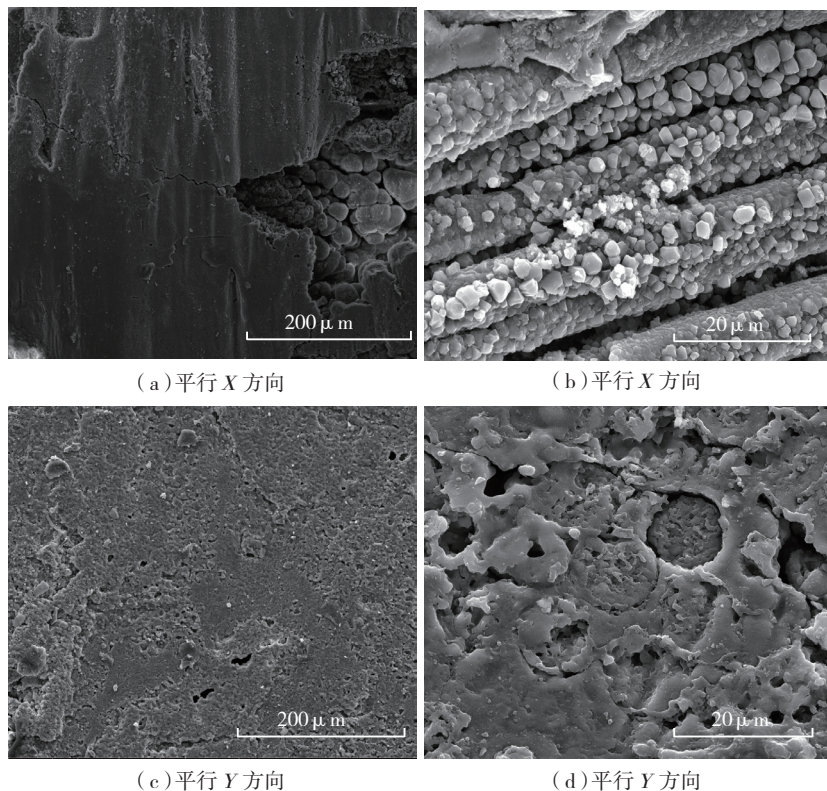


图3 空气中激光加工后的SiC_f/SiC材料表面
Fig.3 Machined surface of SiC_f/SiC using laser process in air environment

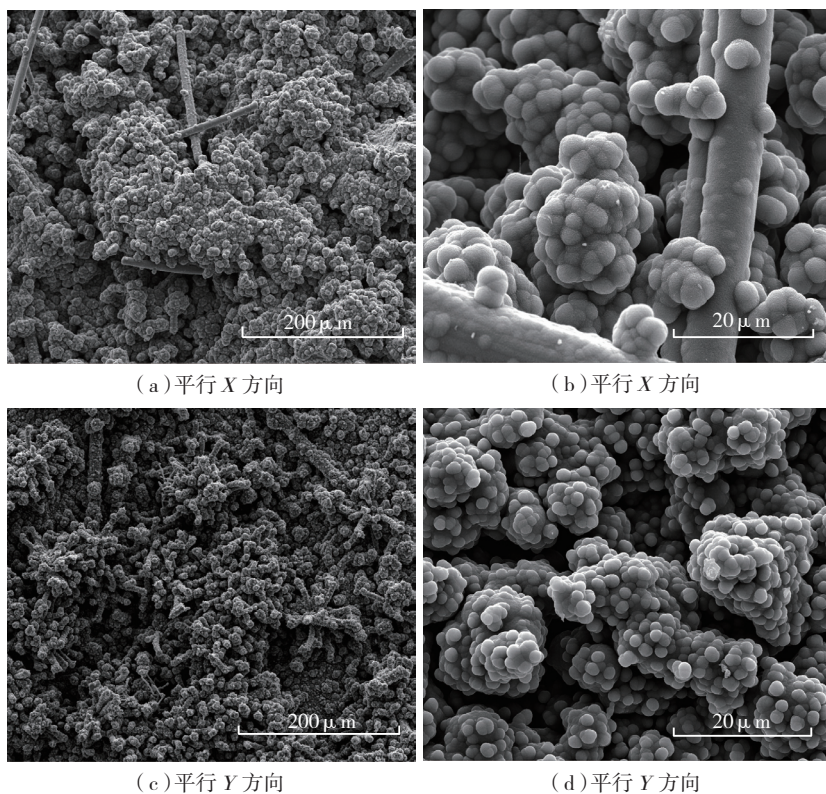


图4 惰性气体环境中激光加工后的SiC_f/SiC材料表面
Fig.4 Machined surface of SiC_f/SiC using laser process under inert gas

蚀,因此并未出现大面积剥离后基体或纤维碎片。

由于磨料在高速水流的带动下会对基体部分陶瓷表面作用一个很大的冲击力,使陶瓷表面处于压缩状态,而其内部处于拉伸状态。当拉应力超过陶瓷的抗拉强度时,会在陶瓷表面产生微裂纹。水进入裂纹形成水楔作用,在裂纹尖端产生拉应力集中,同时带有锋利棱角的磨料可对陶瓷产生微切削作用。在磨料水射流的打击作用下,液固两相高能射流对陶瓷产生强烈的冲蚀作用。最终导致裂纹进一步扩展并交叉,材料发生脆性断裂去除^[7]。由于陶瓷基复合材料中纤维与基体界面层的存在,转移了陶瓷基体微裂纹的扩展,同时由于SiC纤维内部结构的取向性,保留了纤维断头处的拔出形貌和剪断的纤维截面。

2.3 激光加工 SiC_f/SiC 复合材料表面形貌分析

激光加工工程陶瓷材料,是利用一束能量密度极高的激光束照射到被加工工件(陶瓷)表面上,光能被加工表面吸收,并有一部分转化成热能,使表面加工局部温度迅速升高产生熔化以至气化并形成凹坑。随着能量的继续吸收,凹坑中的蒸气迅速膨胀,把熔融物高速喷射出来,同时产生一个方向性很强的冲击波,这样材料就在高温、熔融、气化和冲击波作用下被蚀除^[8]。

激光一般靠加热熔化、升华材料,波长、脉宽、扫描速度等使用不当将导致严重的热损伤,虽然有效避免了机械加工引入的刀具磨损,加工精度也较水刀加工高,但是现阶段加工效率低、控制难度大、成本较高。

采用空气中激光加工后的材料表面如图3所示。图3中,(a)、(b)是平行于X方向的激光加工表面形貌,(c)、(d)是平行于Y方向的激光加工表面形貌。

激光加工后的SiC_f/SiC表面形貌

与机械加工和水射流加工有着显著的不同。加工表面的平整度有了很大提高,表面还出现了封孔效果,孔洞数量大为减少。仅少量材料内部固有的大孔洞未完全封堵,在材料熔化后形成的新表面上小孔洞的数量已经很少,表面仍存在少量微裂纹(如图3(a))。图3(d)中可以看出,加工后表面的纤维与基体被覆盖了一层涂层。

采用惰性气体环境中激光加工后的材料表面如图4所示。图4中,(a)、(b)是平行于X方向的激光加工表面形貌,(c)、(d)是平行于Y方向的激光加工表面形貌。

惰性气体环境下激光加工的SiC_f/SiC表面微观形貌呈现出类似CVD沉积工艺制备的SiC涂层的微观形貌,虽然微观结构上看粗糙度较空气环境加工的表面大,但是加工过程中生长出了SiC晶粒覆盖在表面。除了一些较大孔洞没有封住外,表面无微裂纹存在。

由于激光能量输出的高能瞬时特性,SiC在极短的时间内分解成气态Si和C。光斑范围内温度梯度的存在使温度场内不同位置的Si与C在不同的条件下结晶生长。激光离开后,生长过程中止,表面形态完整地保留下来。控制条件不同,可能形成不同的形貌特征,图4(c)图中表面生成了SiC短晶须形貌。根据报道^[9],以激光为热源,SiC纳米颗粒材料为前驱体,用激光照射SiC纳米颗粒可原位生长出晶须。

2.4 不同加工方式得到的SiC_f/SiC复合材料表面成分分析

不同加工方式得到的SiC_f/SiC复合材料加工表面EDS分析结果如表1所示。

表1 SiC_f/SiC复合材料加工表面成份EDS分析

元素	原子百分比/%			
	机械加工表面	水射流加工表面	激光加工表面(空气气氛)	激光加工表面(惰性气氛)
C	60	51	30	60
O	19	24	45	2
Si	21	25	25	38

机械加工表面EDS结果表明,材料基体中主要由Si、C、O等元素组成。由于制备工艺中有机前驱体在陶瓷化过程中裂解不充分,引入了氧元素,同时裂解产物中残留了多余的C元素^[10],加工表面基本反映了制备材料的内部组成。

高压水射流加工表面EDS结果类似于机械加工表面的EDS结果,表面富C。空气环境中SiC_f/SiC复合材料激光加工表面EDS的结果显示,与机械加工工艺与高压水射流工艺比较,该表面的C元素的含量明

显降低,氧元素含量增加,可能的原因是SiC在激光作用下分解,分解生成的C原子与氧反应从表面上被带走, Si原子与氧反应后生成SiO₂残留在表面上。惰性气体环境中激光加工后表面的EDS结果显示, SiC_f/SiC复合材料加工后表面氧元素含量降低幅度较大,接近消失,可能是基体在激光作用下升华再快速沉积到材料表面。

3 结论

通过比较分析SiC_f/SiC复合材料机械加工、高压水射流加工、激光加工的3种不同加工表面形貌,发现不同的加工方式在加工表面孔洞大小及数量、表面微裂纹数量上有着明显的区别。

机械加工与高压水射流加工表面孔洞和微裂纹较多,水切割表面呈现出平整的纤维拔出状态;采用激光加工的表面较为平整,孔洞和微裂纹数量较机械加工和水射流加工少,出现了封孔特征,可能是在空气环境中形成了SiO₂的涂层,惰性环境中的激光加工表面生成了起覆盖作用的SiC晶粒。加工过程产生的微裂纹会在材料使用的应力循环过程中缓慢扩展,影响材料的使用寿命,故实际使用过程中,需根据加工效果、加工效率、加工成本、合理优化加工过程。

参考文献

- [1] 邓娟利,范尚武,成来飞,等.三维针刺C/SiC复合材料无纬布纤维方向对材料力学性能的影响.硅酸盐通报,2012(03):571-574.
- [2] 池宪,吴凡,锁小红.C/SiC陶瓷基复合材料磨削参数优化研究.航空精密制造技术,2012(1):41-43.
- [3] 焦健,孙明,邱海鹏,等.高性能连续碳纤维增强碳化硅复合材料的制备及其高温力学性能的研究.功能材料,2011(S3):401.
- [4] 王平,张权明,李良.Cf/SiC陶瓷基复合材料车削加工工艺研究.火箭推进,2011(2):67-70.
- [5] 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.
- [6] 陈林.基于磨料水射流的工程陶瓷钻削试验研究[D].成都:西华大学,2012.
- [7] 张凤莲.磨料水射流切割工程陶瓷机理分析.机床与液压,2004(6):25-27.
- [8] 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.现代制造工程,2012(10):5-10.
- [9] 唐陈霞,赵剑峰,关芳芳.激光照射SiC纳米颗粒原位生成SiC晶须.材料研究学报,2008,22(2):164-166.
- [10] Jiao J, Qiu H P, Li X Q, et al. The pyrolysis processing of polycarbosilane studied by TG, XRF, IR, XRD, and XPS. Key Engineering Materials, 2012(512-515):965-970.

(责编 亿霖)