

# SiC<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料制孔工艺

谢巍杰 邱海鹏 陈明伟

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

**文 摘** 分别采用机械钻削制孔与激光制孔两种工艺对 SiC<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料进行制孔,对其质量以及工艺特点进行评价分析。结果表明,机械钻削制孔孔径精度较好但存在刀具磨损严重、出现毛刺崩边现象等问题;激光制孔效率较高,但孔存在锥度且因热影响区的存在导致孔的内壁表面出现分层、裂纹等缺陷。

**关键词** 陶瓷基复合材料,机械制孔,激光制孔

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.009

## Drilling Process For SiC<sub>f</sub>/SiC Ceramic Matrix Composites

XIE Weijie QIU Haipeng CHEN Mingwei

(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300)

**Abstract** SiC<sub>f</sub>/SiC composites were drilled by machining process and laser process. The quality of holes and the characteristics of the two processes were analysed. The results show that machining drilling can get holes with better diameter but there are serious tool wear, burr side damage problems. Laser drilling has a better efficiency but there is taper hole and the existence of heat affected zone of wall surface causes defects such as delamination and crack.

**Key words** Ceramic matrix composites, Machining drilling, Laser drilling

### 0 引言

陶瓷基复合材料具有高比强、高比模、耐高温、抗氧化等优异性能<sup>[1-3]</sup>,在航天飞行器热防护构件、航空发动机热端部件、热核聚变防护罩等领域得到越来越广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。陶瓷基复合材料构件在实际应用中通常都需要与其他零部件装配连接,不可避免的要进行大量孔加工,而且孔的质量往往关系到构件的使用性能、可靠性、使用寿命等<sup>[6]</sup>。而陶瓷基复合材料属于典型的难加工材料,如何能制得满足工艺要求的孔成为目前一项亟待解决的难题。

目前陶瓷基复合材料制孔工艺主要包括机械加工工艺以及水刀、电火花、超声波、激光等特种加工工艺。钻削制孔属于传统的机械加工方法,它是利用刀具对材料进行钻削从而制孔。水刀是利用高速高压水射流冲击进行切削,其切削速度与深度能力好,但容易造成材料撕裂和切口附近区域损伤;电火花加工是利用成型工具和工件间的放电热效应实现去除加

工,因而具有较大的热效应且去除率较慢;超声波加工依靠工具高频振动带动磨粒去除材料,其没有热影响但必须先制作成型工具,加工效率偏低;激光制孔是利用超高能量密度的激光束产生的热效应使材料融化气化而去除,其加工分辨率高且无磨损问题,但需解决热影响与锥度等问题。以上不同制孔方法都有各自的优势和劣势,存在着精密性、高效性、低损伤性之间的矛盾<sup>[7-8]</sup>。本文选择钻削制孔和激光制孔两种工艺对 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料进行制孔并分析研究它们的工艺特点。

### 1 试验

#### 1.1 材料

选用国产的连续 SiC 纤维,采用 2.5D 的编织方式制得连续 SiC 纤维预制体。以聚碳硅烷 (PCS) 为先驱体,采用 PIP 工艺经过多次浸渍-裂解循环进行致密化,最终制得 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料,然后机械加工成一定厚度的板材。

收稿日期:2015-11-14

作者简介:谢巍杰,1989 年出生,硕士研究生,主要从事陶瓷基复合材料研究工作。E-mail:shanhenm@qq.com

## 1.2 制孔方法

分别采用硬质合金钻头钻削工艺和毫秒激光制孔工艺在厚度为 1.5、2、2.5 mm 的  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料板上进行制孔,孔径要求为 2.5 mm。

再选用 2 mm 厚的  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料板进行制孔,采用一把  $\Phi 2.5$  mm 的硬质合金刀具,在中途不更换刀具的情况下连续钻削 8 个孔并依制孔先后顺序对孔编号;同样再用毫秒激光器连续制 8 个  $\Phi 2.5$  mm 的孔并编号。

## 1.3 测试及表征

采用工具显微镜测量孔径。采用游标卡尺测量  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料板厚度。

采用 FEI Quanta 型扫描电镜对孔的微观形貌进行观察。

## 2 结果及讨论

### 2.1 两种工艺的孔径精度分析

以钻削工艺和激光制孔工艺制得的孔径为 2.5 mm 的孔为研究对象,分别测量孔的上下孔径并计算锥度,结果如表 1 所示。

表 1 不同工艺下的孔径和锥度值

Tab.1 Value of hole diameter and taper in different condition

板厚 /mm	制孔方式	上孔径 /mm	下孔径 /mm	锥度 /( $^\circ$ )
1.5	钻削	2.545	2.531	0.534
	激光	2.520	2.402	4.504
2.0	钻削	2.540	2.529	0.315
	激光	2.533	2.322	6.039
2.5	钻削	2.539	2.525	0.320
	激光	2.515	2.105	9.375

由表 1 可见,钻削加工得到的孔锥度很小,而采用激光制得的孔存在明显的锥度,而且随着材料厚度的增加,锥度越来越大。从锥度方面分析,激光制孔不如钻削制孔的孔径精度高。

再以 2 mm 厚的  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合材料板上两种制孔工艺制得的两组孔为研究对象,分别测量两组孔的入口端直径,结果见图 1。

由图 1 可知,采用钻削制得的 8 个孔,孔径有逐渐减小的趋势,这是因为随着刀具的剧烈磨损,刀径逐渐减小,所制的孔径也逐渐减小;而激光制孔所得的孔径则相对稳定。从这点来看,激光制孔的孔径精度稳定性比钻削制孔要好。也正因为钻削制孔存在严重刀具磨损的问题,实际操作中通常采用及时更换

刀具、二次扩孔等措施来保证孔径的精度。

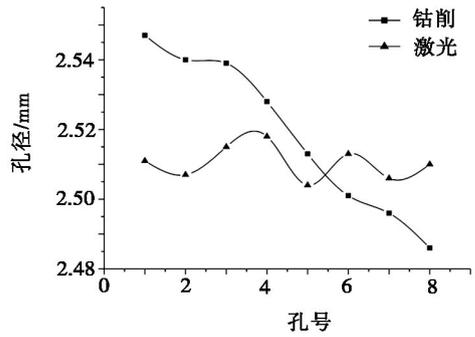


图 1 两种制孔工艺的入口端孔径值

Fig.1 Value of entrance holes in different condition

### 2.2 两种工艺的制孔缺陷分析

利用扫描电镜对两种工艺制得孔的微观形貌进行观察。

图 2 所示为钻削加工的孔中出现的一种典型缺陷,即在复合材料的加工表面出现未能整齐切断的纤维束和表面区域性微小不规则纤维断头,此称之为毛刺缺陷<sup>[9]</sup>。

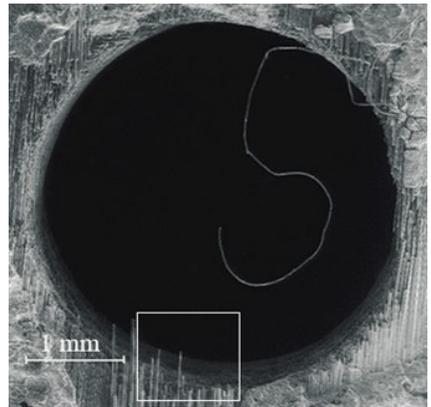


图 2 毛刺缺陷

Fig.2 Burr defect

毛刺缺陷的成因主要有两个方面。其一是因为  $\text{SiC}$  陶瓷纤维本身性质为易剪切断裂而不易拉伸断裂,所以钻削过程中纤维受力为拉伸方向的区域中更容易出现纤维拔出或不规则断头等现象而出现毛刺缺陷。其二是由于刀具磨损,刀刃不够锋利难以整齐切断纤维,造成毛刺缺陷。另外发现在孔的出口端更容易出现毛刺缺陷,这是因为出口端的表层纤维外侧没有约束,加之钻头的轴向力作用下纤维受力均处于拉伸状态,不易被整齐切断。

图 3 所示为钻削过程中常出现的另一种缺陷,即孔的端面附近区域会出现表层纤维与基体的缺失而形成的小缺口,称之为崩边缺陷<sup>[10]</sup>。

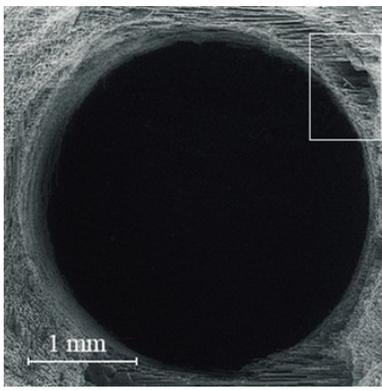


图3 崩边缺陷

Fig. 3 Cutting edge surface crack

孔的入口端出现的崩边缺陷主要是由钻削时钻头的挤压作用引起的。由于 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料的制备工艺特点,在 PIP 工艺过程中会生成大量小分子物质从基体中逸出,从而造成制备的复合材料中存在较多孔隙而致密化程度不高<sup>[11-12]</sup>,再加之 SiC 本身硬而脆的特性,当高速转动的钻头接触材料表面,并在轴向力作用下开始进入材料时,巨大的加工应力会超过材料的强度极限,导致在钻削入口端附近区域产生大量微裂纹并迅速扩展,最终发展形成大裂纹,一旦大裂纹生长超过扩展的临界尺寸,会造成材料发生脆

性断裂而崩裂脱落,表现为孔入口端出现崩边缺陷。孔的出口端则多是随着毛刺现象的恶化,表层纤维在拉伸应力下被刀具撕扯而与基体分离,最终造成表层材料的缺失而出现崩边现象。

图4所示为激光制孔的典型孔壁形貌。可以发现激光制孔的内壁有明显的热影响区,存在大量裂纹、分层等缺陷,这是由激光制孔的原理导致的。当高能激光束聚焦在加工表面上时,陶瓷对激光有较高的吸收率,光能被吸收并转化成热能,使局部区域温度迅速升高使材料融化、气化,形成的蒸气沿蚀坑高速向外喷出并产生冲击波,材料在这个过程中被高效除去<sup>[13-14]</sup>。激光制孔过程中有部分熔体会残留在孔壁上,冷却凝固后会形成再铸层,此过程中容易形成大量微裂纹,并由于热应力的存在,微裂纹易生长扩展形成大的裂纹最终导致出现分层等缺陷。

对比分析发现,两种工艺制得的孔壁质量存在较大差别。图5显示了两种工艺的孔壁微观形貌。由图5(a)可见钻削制得的孔壁有大量纤维裸露,并可见纤维断裂、纤维拔出等形态特征,孔壁较粗糙。图5(b)则显示激光制孔所得孔壁有较好的平整度,孔壁表面附有一层较光滑的再铸层。

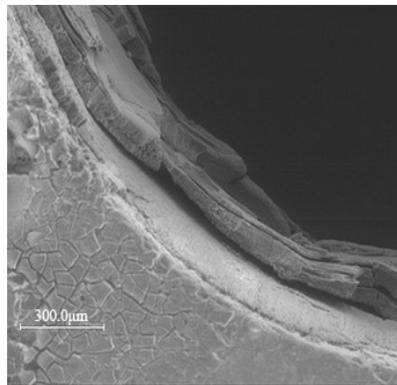
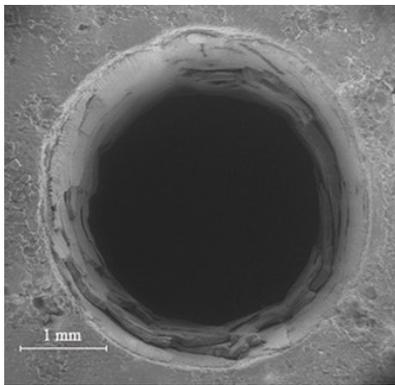
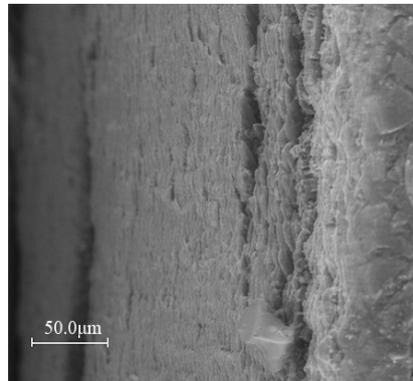
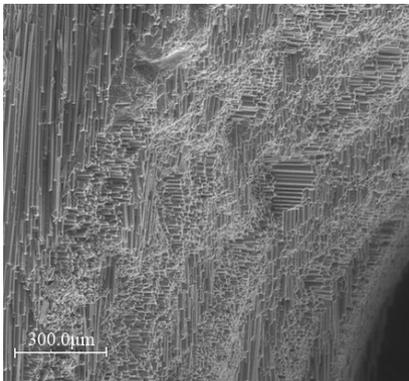


图4 激光制孔的孔壁热影响区形貌

Fig. 4 Morphology of heat affected zone by laser drilling



(a) 钻削工艺

(b) 激光工艺

图5 两种制孔工艺的典型孔壁形貌

Fig. 5 Typical morphology of hole wall

### 2.3 两种工艺的制孔效率分析

SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料的增强体与基体均为 SiC, 而 SiC 具有高的硬度以及耐磨性, 这就导致采用硬质合金钻头进行钻削制孔时, 存在非常严重的刀具磨损问题, 从而导致制孔过程中需要频繁进行刀具更换。刀具的频繁更换一方面大大提高了制孔成本, 另一方面也大大降低了制孔效率。以用规格为  $\Phi 2.5$  mm 的硬质合金钻头制孔为例, 刀具通常在连续钻削到第 8 个孔左右时即出现制孔质量明显下降或直接发生崩刃断刀等状况。更换刀具的时间占据了相当一部分制孔时间。

激光制孔为非接触式的, 这避免了刀具磨损的问题, 所以激光制孔具有连续大量制孔的能力, 借助数控机床等设备容易实现大量的点阵孔的自动化加工, 可以大大提高制孔效率。

### 3 结论

(1) 钻削制孔工艺制得的孔径锥度很小而具有较高孔径精度, 激光制孔工艺制得的孔则存在明显的锥度; 钻削制孔时若刀具更换不及时可导致所制孔径逐渐变小, 激光制孔则可获得较为稳定的孔径。

(2) 钻削制孔主要存在毛刺崩边等缺陷, 孔壁较为粗糙; 激光制孔因热影响区的存在而使内壁表面出现分层、裂纹等缺陷, 但孔壁较为平整。

(3) 钻削制孔因刀具磨损严重而需频繁更换刀具, 不利于提高制孔效率; 激光制孔不存在刀具磨损问题从而更易实现高效率的自动化制孔。

#### 参考文献

[1] 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(2): 1-6.

(上接第 45 页)

#### 参考文献

[1] BHARADWAJ L, FAN Y, ZHANG L, et al. Oxidation behavior of a fully dense polymer-derived amorphous silicon carbonitride ceramic[J]. Journal of American ceramic society, 2004, 87: 483-486.

[2] PAOLO C J. Mechanical properties of siliconoxycarbide ceramic foams[J]. Journal of American ceramic society, 2001, 84(10): 2245-251.

[3] RANGARAJAN S, ASWATH P B. Role of precursor chemistry on synthesis of Si-O-C and Si-O-C-N ceramics by polymer pyrolysis[J]. Material science, 2011, 46: 2201-2211.

[4] PANTANO C G, SINGH A K, HANXI ZHANG. Silicon oxycarbide glasses[J]. Journal of Sol-Gel Science And Technology, 1999, 14: 7-25.

[5] WALTERA S, SORARUA G D, BREQUEL H, et al. Microstructural and mechanical characterization of sol gel-derived

[2] 严春雷, 刘荣军, 曹英斌, 等. 超高温陶瓷基复合材料制备工艺研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(4): 7-11.

[3] 张立同. 纤维增韧碳化硅陶瓷复合材料——模拟、表征与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[4] 马彦, 马青松, 陈朝辉. 连续纤维增强陶瓷基复合材料国外应用研究进展[J]. 材料导报, 2007(S1): 401-404.

[5] 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(2): 155-170.

[6] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术[J]. 航空制造技术, 2009, 24: 61-64.

[7] 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.

[8] 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, 06: 89-92.

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

[10] 王奔, 高航, 毕铭智, 等. C/E 复合材料螺旋铣削制孔方法抑制缺陷产生的机理[J]. 机械工程学报, 2012, 15: 173-181.

[11] 孙明, 史一宁, 邱海鹏, 等. PIP 法制备陶瓷基复合材料构件的弯曲性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011(S1): 631-634.

[12] CHEN M W, QIU H P, JIAO J, et al. Preparation of high performance SiC<sub>f</sub>/SiC composites through PIP process[J]. Key Engineering Materials. 2013, 544: 43-47.

[13] 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.

[14] 袁根福, 曾晓雁. 硬脆性无机材料激光成形加工研究与应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2002(6): 47-51.

Si-O-C glasses[J]. Journal of the European ceramic society, 2002, 22: 2389-2400.

[6] PAOLO C. Engineering porosity in polymer-derived ceramics[J]. Journal of European Ceramic Society, 2008, 28: 1389-1395.

[7] DIFIORE R R, KATVALA V W, LEISER D B, et al. High efficiency tantalum-based ceramic composite structures[P]: B32B702, 7767305. 2010-08-03.

[8] 王重海, 刘瑞祥, 周长灵, 等. 非烧蚀热防护材料研究现状及发展趋势[J]. 现代技术陶瓷, 2014(2): 3-8.

[9] DAVID A S, DANIEL B L, DAVID A S, et al. Light-weight TUFROC TPS for hypersonic vehicles [R]. AIAA, 7945, 2006: 7-8.

[10] LIU Y Q, SHAO G, TSAKIROPOULOS P. on the Oxidation behavior of MoSi<sub>2</sub> [J]. Intermetallics, 2001(9): 125-136.