



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104607808 A

(43) 申请公布日 2015. 05. 13

(21) 申请号 201410757474. 0

(22) 申请日 2014. 12. 11

(71) 申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路 127 号

(72) 发明人 王晶 刘永胜 张青 成来飞

张立同

(74) 专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 王鲜凯

(51) Int. Cl.

B23K 26/382(2014. 01)

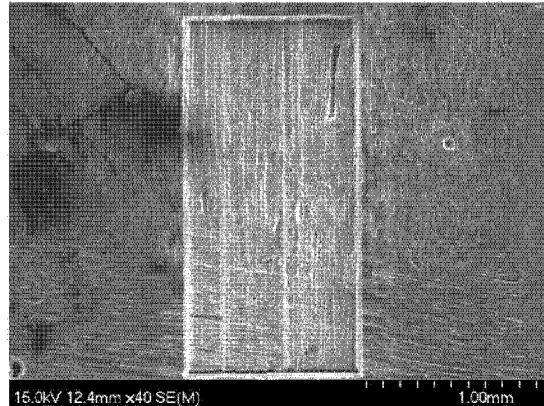
权利要求书1页 说明书8页 附图1页

(54) 发明名称

利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种利用飞秒激光对陶瓷基复合材料进行超精细微孔加工的方法，将碳化硅陶瓷基复合材料试样置于工作台上，利用飞秒激光对厚度小于3mm的试样进行螺旋线逐层加工或线性扫描加工。在微加工过程中，飞秒激光加工波长为400～1500nm，脉冲宽度为80～500fs，激光输出功率根据微孔加工要求而定，变化范围为20mW～20W，激光重复频率也根据微孔加工要求而定，变化范围为50K～25MHz。对试样采用逐层去除方式进行加工，加工头转速为2400rev/s。加工时优点：(1) 加工损伤小。加工完成后，损伤区域周围材料仍处于“冷”状态，因而热效应小；(2) 加工精度高。飞秒激光能量呈现高斯分布，加工中能量的吸收和作用被限制于焦点中心很小的体积内，加工尺度达到微米级至亚微米级。



1. 一种利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法,其特征在于步骤如下:

步骤 1:将 CMC-SiC 材料酒精浸泡下超声清洗,去除表面灰尘油污,用烘干箱进行干燥;

步骤 2:将 CMC-SiC 材料放置在三维精密位移加工平台上,飞秒激光经光路引导再经显微物镜聚焦在材料表面,以螺旋线逐层扫描加工圆孔,或以线性逐层扫描加工矩形孔;所述激光加工参数为:波长  $400 \sim 1500\text{nm}$ ,脉冲宽度  $80 \sim 500\text{fs}$ ,输出功率  $20\text{mW} \sim 20\text{W}$ ,重复频率  $50\text{K} \sim 25\text{MHz}$ ,加工头转速为  $2400\text{rev/s}$ 。

步骤 3:将微加工好的材料在酒精浸泡下超声清洗试样  $10 \sim 20\text{min}$ ,去除表面及侧壁残存碎屑。

2. 根据权利要求 1 所述利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法,其特征在于:所述步骤 2 实施螺旋线逐层扫描加工圆孔,或以线性逐层扫描加工矩形孔时,加工过程分为三步:1、先沿成形孔轴线方向逐层切除方式加工具有锥度的预成形孔,预成形孔的第一层的孔径为成形孔孔径的  $85 \sim 90\%$ ;2、然后采用逐层切除的方式,沿着预成形孔的轴线加工以消除预制孔的锥度,加工至成形孔孔径的  $95 \sim 98\%$  的通孔;3、对通孔表面进行逐层加工,消除孔壁上的微量氧化层,得到成型孔。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法,其特征在于:所述以螺旋线逐层扫描加工圆孔的过程分为三步:第一步采用加工功率  $7\text{W} \sim 20\text{W}$  及重复频率  $50\text{K} \sim 150\text{KHz}$ ,获得锥形通孔;第二次采用加工功率  $5\text{W} \sim 15\text{W}$  及重复频率  $50\text{K} \sim 100\text{KHz}$ ,获得柱形通孔;第三次采用加工功率  $3\text{W} \sim 12\text{W}$  及重复频率  $50\text{K} \sim 100\text{KHz}$ ,获得所需加工孔。

## 利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于陶瓷基复合材料超精细微加工领域,具体涉及一种利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法。

### 背景技术

[0002] 连续纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC)不但具有耐高温、低密度、高比模、高比强、抗氧化和抗烧蚀等碳化硅陶瓷材料的优异性能,而且克服了陶瓷材料脆性大和可靠性差的致命弱点,具有对裂纹不敏感、无灾难性损毁等特点,主要表现在可提高使用温度、减轻结构重量和增强可靠性的方面,因而在航空航天和国防领域有着巨大的应用潜力,受到世界各国的高度重视。

[0003] 随着实际服役环境的日益苛刻,CMC-SiC材料的应用对超精细微加工提出越来越高的要求,其加工质量、尺寸精度及位置精度等对整体构件力学性能、可靠性和使用寿命都有重要影响。如CMC-SiC材料用作航空发动机/工业燃气轮机燃烧室火焰筒和涡轮叶片时需要加工直径 $<\Phi 1.0\text{mm}$ 的气膜冷却孔,用作太空反射镜时需进行超高精度抛光,用作空天飞行器构件时其尖锐前缘的半径 $<0.5\text{mm}$ ,用作核包壳管时需加工封装微孔等。在经过成型制备的碳纤维复合材料结构件和零部件上,有许多装配连接用的定位微孔、微槽等需进行精密的机械加工,这对加工精度和加工质量要求高。这些微加工要求尺度小(直径 $<\Phi 1.0\text{mm}$ )、精度高,属于CMC-SiC材料研发的关键技术问题之一。

[0004] 由于CMC-SiC属于难加工材料,其硬度仅次于金刚石和立方氮化硼,很难对其进行超精细微加工,采用传统的机械加工方法加工碳纤维复合材料时主要存在以下问题:①材料加工困难,加工质量差。对于二维复合材料,由于其采用二维叠层方式进行铺设,层间结合力差,在切削加工时容易产生分层和撕裂等缺陷,降低了复合材料的使用性能。②刀具磨损严重,加工效率低。由于碳纤维复合材料的硬度高(HRC=53~65)、强度大、耐磨性好、导热性差,导致刀具磨损较快,使得工件的加工精度和表面质量难以保证。

[0005] 因此,如何实现CMC-SiC材料零部件的高质高效精密加工已成为当前国内先进制造领域亟待解决的难题之一。

[0006] 飞秒激光加工集超快激光技术、超高精度定位技术、显微技术于一身,是一种新型的CMC-SiC材料加工方式,与普通加工方式相比,主要优点如下:

[0007] (1) 加工损伤小。飞秒超短脉冲激光脉冲持续时间短,能量在极小时间和空间内完成与物质的相互作用。从加工开始至结束,热量来不及扩散,能量仅积累在材料微小区域的薄层内。加工完成后,损伤区域周围的材料仍处于“冷”状态,大大减弱了传统加工中热效应带来的诸多负面影响。

[0008] (2) 加工精度高。飞秒激光能量在空间和时间上都呈现高斯型或类高斯型分布。这可以使得只有聚焦光斑中心部位的强度可达到材料的加工阈值,此时加工中的能量吸收与作用范围被限制于焦点中心处很小体积内,加工尺度远小于光斑尺寸,达到亚微米级甚至纳米级。

[0009] 美国专利 (US5656186) 中通过研究纳秒和飞秒激光器加工不透明材料 (铝), 纳秒和皮飞秒激光器加工透明材料 ( $\text{SiO}_2$ ), 从而得到该材料击穿阈值和激光束的脉冲宽度的关系。美国专利 (US8171937) 利用飞秒脉冲的激光束源的高重复率的和低脉冲能量的特点, 发明了精密加工材料的装置, 该装置主要于角膜切瓣或透镜体校正视觉缺陷。欧洲专利 (US2012196454) 研究飞秒和皮秒的脉冲宽度对半导体材料表面微加工的影响。但是, 这几个专利加工方法和加工参数均不适用于陶瓷基复合材料的激光加工。中国专利 (CN103143841A) 研究了皮秒脉冲激光在陶瓷基复合材料中的应用, 得到合理的激光加工工艺参数和路径。王春辉等在 Appl. Phys. A 116, 1221–1228 (2014) 中发表文章, 采用了线扫和环扫两种加工模式, 分析了皮秒激光的能量密度对陶瓷基复合材料的加工区的形貌和化学成分的影响。但是, 上述科研中未能涉及到飞秒激光加工在陶瓷基复合材料中的加工应用。

[0010] G. Dumitru 等研究人员在 Applied Surface Science, 252 (2005) 352–357 中发表的论文 “Femtosecond laser ablation of diamond-like carbon films”, 通过改变飞秒激光的能量密度对加工类金刚石薄膜进行加工, 得到该材料烧蚀阈值。Makoto Yamaguchi 等在 Applied Physics A, 99 (2010) 23–27 中发表文章 “Raman spectroscopic study of femtosecond laser-induced phase transformation associated with ripple formation on single-crystal SiC” 采用拉曼分析法研究单晶碳化硅经过飞秒激光辐照后表面微观结构的变化。J. Bonse 等在 Appl. Phys. A 74, 19 – 25 (2002) 中发表的论文 “Femtosecond laser ablation of silicon – modification thresholds and morphology” 用量子物理学解释了飞秒激光烧蚀 Si 的形貌变化及物理过程。但是, 这几篇文章中试验方法仅仅是改变激光加工参数, 研究陶瓷材料的烧蚀阈值及烧蚀表面物理和化学形貌, 均未涉及具体的加工过程及详细的加工参数, 不能解决飞秒激光在 CMC-SiC 材料工程中的实际需要, 特别是目前急需解决的关于 CMC-SiC 材料的超精细微孔加工。

## 发明内容

[0011] 要解决的技术问题

[0012] 为了避免现有技术的不足之处, 本发明提出一种利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法, 解决现有服役环境中对 CMC-SiC 材料的超精细微孔加工的要求, 即满足实际应用中高精度定位的微孔加工的需求。

[0013] 技术方案

[0014] 一种利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法, 其特征在于步骤如下:

[0015] 步骤 1: 将 CMC-SiC 材料酒精浸泡下超声清洗, 去除表面灰尘油污, 用烘干箱进行干燥;

[0016] 步骤 2: 将 CMC-SiC 材料放置在三维精密位移加工平台上, 飞秒激光经光路引导再经显微物镜聚焦在材料表面, 以螺旋线逐层扫描加工圆孔, 或以线性逐层扫描加工矩形孔; 所述激光加工参数为: 波长  $400 \sim 1500\text{nm}$ , 脉冲宽度  $80 \sim 500\text{fs}$ , 输出功率  $20\text{mW} \sim 20\text{W}$ , 重复频率  $50\text{K} \sim 25\text{MHz}$ , 加工头转速为  $2400\text{rev/s}$ 。

[0017] 步骤 3: 将微加工好的材料在酒精浸泡下超声清洗试样  $10 \sim 20\text{min}$ , 去除表面及侧壁残存碎屑。

[0018] 所述步骤 2 实施螺旋线逐层扫描加工圆孔,或以线性逐层扫描加工矩形孔时,加工过程分为三步:1、先沿成形孔轴线方向逐层切除方式加工具有锥度的预成形孔,预成形孔的第一层的孔径为成形孔孔径的 85 ~ 90%;2、然后采用逐层切除的方式,沿着预成形孔的轴线加工以消除预制孔的锥度,加工至成形孔孔径的 95 ~ 98% 的通孔;3、对通孔表面进行逐层加工,消除孔壁上的微量氧化层,得到成型孔。

[0019] 所述以螺旋线逐层扫描加工圆孔的过程分为三步:第一步采用加工功率 7W ~ 20W 及重复频率 50K ~ 150KHz,获得锥形通孔;第二次采用加工功率 5W ~ 15W 及重复频率 50K ~ 100KHz,获得柱形通孔;第三次采用加工功率 3W ~ 12W 及重复频率 50K ~ 100KHz,获得所需加工孔。

#### [0020] 有益效果

[0021] 本发明提出的一种利用飞秒激光进行陶瓷基复合材料微孔加工的方法,根据 CMC-SiC 材料的特点,结合飞秒激光脉冲宽度极短、峰值功率极高使其对材料无选择加工的特点,在陶瓷基复合材料上实现微孔加工。本发明将碳化硅陶瓷基复合材料试样置于工作台上,利用飞秒激光对厚度小于 3mm 的试样进行螺旋线逐层加工或线性扫描加工。在微加工过程中,飞秒激光加工波长为 400 ~ 1500nm,脉冲宽度为 80 ~ 500fs,激光输出功率根据微孔加工要求而定,变化范围为 20mW ~ 20W,激光重复频率也根据微孔加工要求而定,变化范围为 50K ~ 25MHz。对试样采用逐层去除方式进行加工,加工头转速为 2400rev/s。加工时优点:(1) 加工损伤小。加工完成后,损伤区域周围材料仍处于“冷”状态,因而热效应小;(2) 加工精度高。飞秒激光能量呈现高斯分布,加工中能量的吸收和作用被限制于焦点中心很小的体积内,加工尺度达到微米级至亚微米级。

[0022] 本发明的主要优点是:(1) 可实现高精度的微孔加工,同样适用于高深径比微孔的加工,飞秒激光微加工速度快,成孔质量好,加工工艺简单,加工成形后经过简单清洗后表面较光滑,无需其他的后续处理。附图 2 给出了本发明所加工的 2D CVI C/SiC 复合材料圆孔加工的微结构特征。从图 2 中能够看出,所加工孔的入口圆度为 100%,出口圆度为 95%。经清理后,加工孔入口边缘无烧蚀。(2) 本加工方法可设计性好。对材料、加工形状没有选择性,可根据需要对微孔的形状及尺寸进行设计加工,更适用于加工孔径小于 1.0mm 的圆形孔和边长小于 1.0mm 的方形孔。(3) 非接触加工,热影响区域小。不用考虑微小裂纹的影响,热稳定较好,尤其适用于大批量重复性微孔加工。

[0023] 本发明能够解决 CMC-SiC 材料进行圆孔或方形孔的加工难题,具有加工工艺稳定性好、可设计性强、精度高等优点。

#### 附图说明

[0024] 图 1 是本发明的流程图

[0025] 图 2 是实施例 1 中加工的圆孔的微结构特征,其中,图 2a 是孔的入口;图 2b 是孔的出口

[0026] 图 3 是实施例 2 中加工方孔的微结构特征

[0027] 图 4 是实施例 3 中加工长方孔的微结构特征

#### 具体实施方式

[0028] 现结合实施例、附图对本发明作进一步描述：

[0029] 本发明提出了一种利用飞秒激光对陶瓷基复合材料进行微加工的方法，扩大了 CMC-SiC 材料研发应用范围，开拓一种新型的超精细冷加工方式，加工流程如图（1）所示。

[0030] 步骤 1，试样表面清洗。将碳化硅陶瓷基复合材料切割为块状试样；在酒精浸泡下超声清洗试样 15min；干燥后得到的清洗后的碳化硅陶瓷基复合材料试样。

[0031] 步骤 2，加工微孔。所述的孔是圆孔或方形孔；通过飞秒激光对碳化硅陶瓷基复合材料试样进行微孔加工。在微加工过程中，飞秒激光加工波长为 400～1500nm，脉冲宽度为 80～500fs，激光输出功率根据微加工的过程变化，其激光输出功率的变化范围为 20mW～20W，激光重复频率根据微加工的过程变化，其激光重复频率的变化范围为 50K～25MHz。对试样采用逐层去除方式进行加工，加工头转速为 2400rev/s。

[0032] 对试样进行加工，所述加工过程分为三步：

[0033] 第一步，预成形孔。所述预成形孔的孔径为成形孔孔径的 85～90%，采用逐层切除加工方式，加工过程为采用大功率、高重复频率激光快速穿孔，直至贯通。

[0034] 第二步，加工成柱形通孔。采用逐层切除的方式，沿着预成形孔的轴线加工，消除预制孔的锥度，从而加工至成形孔孔径的 95～98%。

[0035] 第三步，成孔。对通孔表面进行逐层加工，并消除孔壁上的微量氧化层，从而得到高质量的成型孔。

[0036] 加工中，相邻飞秒激光路径的间隙为 0.05～0.2mm；每层的加工深度为 5～20 μm。

[0037] 步骤 3，清洗：将飞秒激光加工微加工成型的圆孔试样在酒精浸泡下超声清洗试样 15min，去除表面及侧壁残存碎屑。

[0038] 加工圆孔时，以螺旋线路径逐层加工。

[0039] 当加工方孔时，以线性扫描路径逐层加工。

[0040] 具体实施例：

[0041] 实施例 1

[0042] 本实施例提出的成形圆孔的方法适用于 CMC-SiC 材料，本实施例中仅以 C/SiC 复合材料为例进行说明。所成形孔的直径为 600 μm（如图 2）。

[0043] 本实施例中，所使用的飞秒激光器采用立陶宛 Light Conversion 公司的 PHAROS 飞秒激光器。

[0044] 本实施的具体过程是：

[0045] 步骤 1，试样表面清洗。将 2D CVI C/SiC 复合材料加工成 20mm×10mm×3mm 的矩形块状试样，然后在酒精浸泡下超声清洗 15min 去除表面灰尘油污等杂质，最后用烘箱进行干燥，得到清洗后的试样。

[0046] 步骤 2，加工微孔。通过飞秒激光对 2D CVI C/SiC 复合材料试样进行微加工。本实施例中，对试样采用逐层去除方式进行加工，加工头转速为 2400rev/s，飞秒激光波长为 800nm，脉冲宽度为 100fs，激光输出功率和激光重复频率根据微加工过程调整工艺参数。

[0047] 具体过程是：将清洗后的试样放置在所使用的飞秒激光器对应的加工平台上，并使飞秒激光束通过物镜聚焦在 C/SiC 复合材料试样表面上待加工孔的中心处，焦距为 90mm。

[0048] 在 2D CVI C/SiC 复合材料试样上加工孔。所述加工过程分为三步：

[0049] 第一步,预成形孔。所述预成形孔的孔径为成形孔孔径的87%,采用沿所述成形孔轴线方向逐层切除方式加工。加工第一层时,以待成形孔中心为激光束起点,通过飞秒激光将 C/SiC 复合材料试样表面切除,并以螺旋状路径将切除的试样表面逐渐扩大至预定的孔径。将激光束移至待成形孔的中心,继续以螺旋线路路径加工的第二层。直至第二层逐渐扩大至预定孔的孔径。重复上述过程,直至预成形的通孔。所成型孔具有锥度,这是由于飞秒激光能量高斯分布的特征及微孔直径内碎屑对激光的反作用能力所决定的。

[0050] 预成形中,激光功率为 10W,重复频率为 76KHz ;当激光束螺旋状路径加工时,相邻螺旋线之间的间距为 0.08mm ;逐层加工中,每层加工深度为 26 μ m。

[0051] 第二步,消除预成形孔的锥度。通过消除预成形孔的锥度,使预成形孔的孔径达到 96%,采用沿所述预成形孔轴线方向逐层切除的方式消除预成形孔中的锥孔。在消除预成形孔锥孔时,激光束自所述预成形孔孔口处的内表面开始,以螺旋线路路径切除的所述预成形孔的孔口处的内表面,使预成形孔的孔径达到 96%,完成第一层加工。将激光束移至预成形孔内表面,继续以螺旋线路路径加工的第二层,直至第二层逐渐扩大至预定的孔径。重复上述过程,直至消除预成形孔中的锥度,并使预成形孔的孔径达到成形孔孔径的 96%。在消除预成形孔中的锥度中,在预成形孔的孔壁形成氧化层,本施例中,所述氧化层厚度为 20 ~ 30 μ m。

[0052] 在消除预成形孔中的锥度时,激光输出功率为 8W,重复频率为 70KHz ;当激光束螺旋状路径径向加工时,相邻螺旋线之间的间距为 0.03mm ;在逐层加工中,每层的加工深度为 15 μ m。

[0053] 第三步,成孔。对消除锥度的预成形孔中进行成孔的飞秒激光微加工,并消除所述消除锥孔的预成形孔壁上的氧化层。在成孔时,激光束对所述消除锥度的预成形孔表面进行逐层加工,激光自所述预成形孔孔口处内壁的氧化层,使所述预成形孔的孔径达到成形孔的要求,完成第一层加工。激光束沿所述预成形孔的轴线下移 6 μ m,继续采用环形方式切除孔壁,并去除所述预制成形孔内壁上的氧化层,完成第二层加工。重复上述过程,直至将所述预成形孔的孔径达到成孔要求,得到飞秒激光微加工成形的圆孔。

[0054] 成孔加工中,激光输出功率为 5W,重复频率为 60KHz ;在逐层加工中,每层的加工深度为 5 μ m。

[0055] 步骤 3,清洗。将所得到的飞秒激光器加工成形的圆孔置于酒精中超声清洗试样 15min,去除表面及孔壁残存碎屑。

#### [0056] 实施例 2

[0057] 本实施例提出的成形方孔的方法适用于碳化硅陶瓷基复合材料,本实施例中仅以 C/SiC 复合材料试样为例说明。所成型孔的平面尺寸为 650 μ m×650 μ m(如图 3)。

[0058] 本实施例中,所使用的飞秒激光器采用立陶宛 Light Conversion 公司的 PHAROS 飞秒激光器。

[0059] 步骤 1. 试样表面清洗。将 2D CVI C/SiC 复合材料加工成 20mm×10mm×3mm 的矩形块状试样,然后在酒精浸泡下超声清洗 15min 去除表面灰尘油污等杂质,最后用烘箱进行干燥,得到清洗后的试样。

[0060] 步骤 2,加工孔。通过飞秒激光在 2D CVI C/SiC 复合材料试样上加工孔。本实施

例中,对试样采用逐层去除方式进行线性扫描方形孔加工,扫描速度为1500mm/s。飞秒激光波长为800nm,脉冲宽度为100fs,激光输出功率和激光重复频率根据微加工过程调整工艺参数。

[0061] 具体过程是:将清洗后的试样放置在所使用的飞秒激光器对应的加工平台上,并使飞秒激光束通过物镜聚焦在C/SiC复合材料试样表面上待加工孔的任意一个角上,焦距为90mm。

[0062] 在2D CVI C/SiC复合材料试样上加工孔。所述加工过程分为三步:

[0063] 第一步,预成形孔。所述预成形孔的孔径为成形方孔孔径的87%,采用沿所述成形孔轴线方向逐层切除方式加工。加工第一层时,以待成形孔的任意一个角为激光束起点,通过飞秒激光将C/SiC复合材料试样表面切除,并以线性扫描路径将切除的试样表面逐渐扩大至预定的方形孔孔径。将激光束移至激光束起点,继续以线性扫描路径加工第二层。直至第二层逐渐扩大至预定方孔孔径。重复上述过程,直至预成形的方孔的87%。所成型孔具有锥度,这是由于飞秒激光能量高斯分布的特征及微孔直径内碎屑对激光的反作用能力所决定的。

[0064] 预成形中,激光功率为10W,重复频率为70KHz;当激光束以线性扫描路径加工时,相邻直线之间的间距为0.01mm;逐层加工中,每层加工深度为10μm。

[0065] 第二步,消除预成形孔的锥度。通过消除预成形孔的锥度,使预成形孔的孔径达到97%,采用沿所述预成形孔轴线方向逐层切除的方式消除预成形孔中的锥孔。在消除预成形方孔中的锥度时,激光束自所述预成形方孔孔口处的内表面开始,以线性扫描路径加工的所述预成形方孔孔口处的内表面,使预成形方孔的孔径达到成形方孔尺寸的97%,完成第一层加工。将激光束移至预成形方孔内表面,继续以线性扫描路径加工第二层,直至第二层逐渐扩大至预定的尺寸。重复上述过程,直至消除预成形孔中的锥度,并使预成形方孔的孔径达到成形方孔孔径的97%。在消除预成形方孔中的锥度中,在预成形孔的孔壁形成氧化层,本施例中,所述氧化层厚度为20~30μm。

[0066] 在消除预成形方孔中的锥度时,激光输出功率为8W,重复频率为60KHz;当激光束以线性扫描路径加工时,相邻直线之间的间距为0.01mm;在逐层加工中,每层的加工深度为8μm。

[0067] 第三步,成孔。对消除锥度的预成形方孔中进行成孔的飞秒激光微加工,并消除所述消除锥孔的预成形方孔孔壁上的氧化层。在成孔时,激光束对所述消除锥度的预成形孔表面进行逐层加工,光束自所述预成形方孔孔口处内壁的氧化层表面开始,采用线性扫描路径切除孔壁,并去除所述预成形方孔孔口处内壁的氧化层,使所述预成形孔的孔径达到成形孔的要求,完成第一层加工。激光束沿所述预成形孔的轴线下移6μm,继续采用线性方形路径方式切除孔壁,并去除所述预制成形孔内壁上的氧化层,完成第二层加工。重复上述过程,直至将所述预成形方孔的孔径达到成孔要求,得到飞秒激光微加工成形的方孔。

[0068] 成孔加工中,激光输出功率为5W,重复频率为50KHz;在逐层加工中,每层的加工深度为5μm。

[0069] 步骤3,清洗。将所得到的飞秒激光器加工成形的方孔置于酒精中超声清洗试样15min,去除表面及孔壁残存碎屑。

[0070] 实施例3

[0071] 本实施例提出的成形长方孔的方法适用于碳化硅陶瓷基复合材料,本实施例中仅以C/SiC复合材料试样为例说明。所成型长方孔的平面尺寸为 $1300\mu\text{m} \times 650\mu\text{m}$ (如图4)。

[0072] 本实施例中,所使用的飞秒激光器采用立陶宛 Light Conversion 公司的 PHAROS 飞秒激光器。

[0073] 步骤1. 试样表面清洗。将2D CVI C/SiC复合材料加工成 $20\text{mm} \times 10\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的矩形块状试样,然后在酒精浸泡下超声清洗15min去除表面灰尘油污等杂质,最后用烘箱进行干燥,得到清洗后的试样。

[0074] 步骤2,加工长方孔。通过飞秒激光在2D CVI C/SiC复合材料试样上加工长方孔。本实施例中,对试样采用逐层去除方式进行线性扫描长方形孔加工,扫描速度为 $1500\text{mm/s}$ 。飞秒激光波长为 $800\text{nm}$ ,脉冲宽度为 $120\text{fs}$ ,激光输出功率和激光重复频率根据微加工过程调整工艺参数。

[0075] 具体过程是:将清洗后的试样放置在所使用的飞秒激光器对应的加工平台上,并使飞秒激光束通过物镜聚焦在C/SiC复合材料试样表面上待加工孔的任意一个角上,焦距为 $90\text{mm}$ 。

[0076] 在2D CVI C/SiC复合材料试样上加工长方孔。所述加工过程分为三步:

[0077] 第一步,预成形长方孔。所述预成形孔的孔径为成形长方孔孔径的89%,采用沿所述成形孔轴线方向逐层切除方式加工。加工第一层时,以待成形孔的任意一个角为激光束起点,通过飞秒激光将C/SiC复合材料试样表面切除,并以线性扫描路径将切除的试样表面逐渐扩大至预定的长方形孔孔径。将激光束移至激光束起点,继续以线性扫描路径加工第二层。直至第二层逐渐扩大至预定长方孔孔径。重复上述过程,直至预成形的长方孔孔径的90%。所成型长方孔具有锥度,这是由于飞秒激光能量高斯分布的特征及微孔直径内碎屑对激光的反作用能力所决定的。

[0078] 预成形中,激光功率为 $12\text{W}$ ,重复频率为 $80\text{KHz}$ ;当激光束以线性扫描路径加工时,相邻直线之间的间距为 $0.01\text{mm}$ ;逐层加工中,每层加工深度为 $10\mu\text{m}$ 。

[0079] 第二步,消除预成形长方孔的锥度。通过消除预成形长方孔的锥度,使预成形长方孔的孔径达到97%,采用沿所述预成形长方孔轴线方向逐层切除的方式消除预成形长方孔中的锥孔。在消除预成形长方孔中的锥度时,激光束自所述预成形长方孔孔口处的内表面开始,以线性扫描路径加工的所述预成形长方孔孔口处的内表面,使预成形长方孔的孔径达到成形长方孔尺寸的97%,完成第一层加工。将激光束移至预成形长方孔内表面,继续以以线性扫描路径加工第二层,直至第二层逐渐扩大至预定的尺寸。重复上述过程,直至消除预成形长方孔中的锥度,并使预成形长方孔的孔径达到成形长方孔孔径的97%。在消除预成形长方孔中的锥度中,在预成形长方孔的孔壁形成氧化层,本施例中,所述氧化层厚度为 $20 \sim 35\mu\text{m}$ 。

[0080] 在消除预成形长方孔中的锥度时,激光输出功率为 $9\text{W}$ ,重复频率为 $65\text{KHz}$ ;当激光束以线性扫描路径加工时,相邻直线之间的间距为 $0.01\text{mm}$ ;在逐层加工中,每层的加工深度为 $8\mu\text{m}$ 。

[0081] 第三步,成孔。对消除锥度的预成形长方孔中进行成孔的飞秒激光微加工,并消除所述消除锥孔的预成形长方孔孔壁上的氧化层。在成孔时,激光束对所述消除锥度的预成形长方孔表面进行逐层加工,光束自所述预成形长方孔孔口处内壁的氧化层表面开始,

采用线性扫描路径切除孔壁，并去除所述预成形长方孔孔口处内壁的氧化层，使所述预成形长方孔的孔径达到成形孔的要求，完成第一层加工。激光束沿所述预成形孔的轴线下移 $6\mu m$ ，继续采用线性方形路径方式切除孔壁，并去除所述预制成形孔内壁上的氧化层，完成第二层加工。重复上述过程，直至将所述预成形长方孔的孔径达到成孔要求，得到飞秒激光微加工成形的长方孔。

[0082] 成孔加工中，激光输出功率为 $6W$ ，重复频率为 $56KHz$ ；在逐层加工中，每层的加工深度为 $5\mu m$ 。

[0083] 步骤3，清洗。将所得到的飞秒激光器加工成形的长方孔置于酒精中超声清洗试样 $15min$ ，去除表面及孔壁残存碎屑。

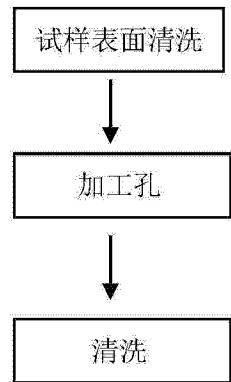


图 1

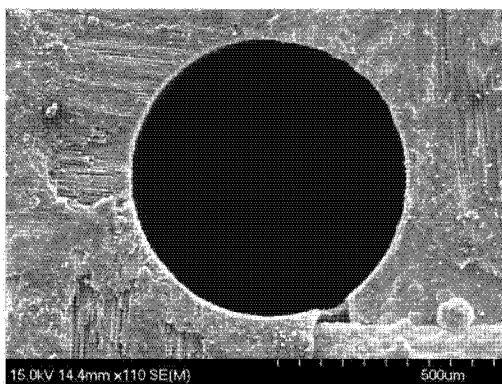


图 a

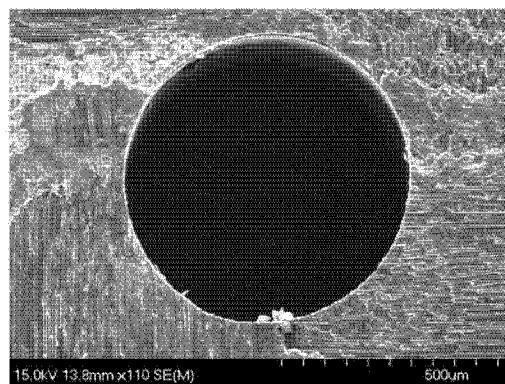


图 b

图 2

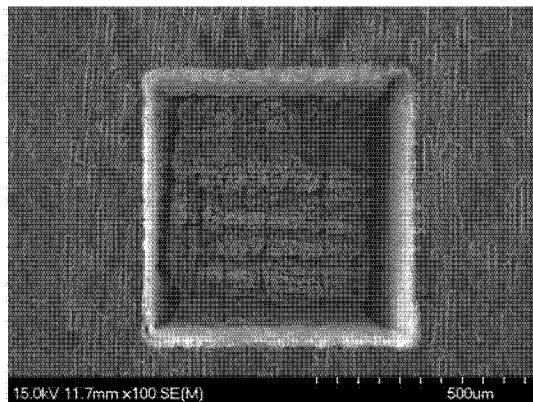


图 3

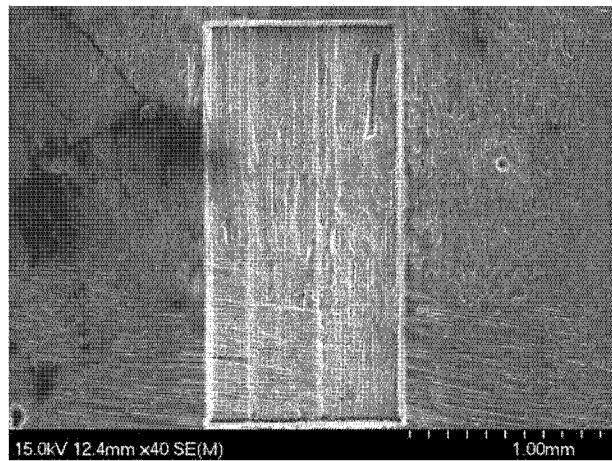


图 4