

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0031- 05

# C/SiC 复合材料残余应力的电火花小孔法测定研究\*

于 坤, 张长瑞, 曹英斌, 刘荣军

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 进行了  $Q$  SiC 复合材料残余应力的电火花小孔法表征。基于现有小孔法的不足以及材料的较好电导率, 提出了电火花打孔法的残余应力测量方法, 建立了相应的残余应力测量流程。进行了不同平整表面样品的残余应力测量。结果表明电火花打孔法具有较好的区分性, 也表明  $Q$  SiC 复合材料具有较小的本征残余应力和机加工应力, 这说明:  $Q$  SiC 复合材料作为反射镜材料具有很好的面形稳定性的优势。

**关键词:** 电火花方法; 残余应力测量; 小孔法;  $Q$  SiC 复合材料

中图分类号: TP323 文献标识码: A

## A Study of Residual Stresses on Short Carbon Fiber Enhanced Silicon Carbide Composites

YU Kun, ZHANG Chang-ru, CAO Ying-bin, LIU Rong-jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Feasibility of hole-drilling method for the measurement of residual stresses in short carbon fiber enhanced silicon carbide ( $Q$  SiC) composites was studied. Based on the disadvantage of conventional hole-drilling method and good electric conductance of high-hardness  $Q$  SiC composite, electric spark method (ESM), an alternative method, was presented and proved suitable. Then an experimental procedures for residual stresses of  $Q$  SiC composites were established. Finally the established ESM method was used for the measurement of residual stresses in two  $Q$  SiC samples with different machined surface. Results show that difference of residual stresses between two samples displays good distinguishing ability of the ESM method. Less intrinsic residual stresses and mechanically introduced residual stresses bring the advantage of surface figure stability for  $Q$  SiC composites used for reflecting mirror.

**Key words:** electric spark method; measurement of residual stresses; hole-drilling method;  $Q$  SiC composites

经过 20 多年的研究开发, SiC 及其复合材料以优异的物理性能和良好的工艺性能逐渐发展成为一种具有广阔应用前景的新型光学材料。它们很好地结合了第一代和第二代反射镜材料的优点, 又克服了两代材料的众多不足<sup>[1]</sup>: 具有像金属 Be 的轻质, 在可见/紫外波段和低温下有像玻璃一样优异光学性能以及优异热稳定性能。目前, SiC 及其复合材料已成为国内外轻量化反射镜镜坯研究和发展的主流方向之一。

面形稳定性是光学反射镜的一个重要指标, 反射镜在使用过程中的面形改变将大大降低反射镜的光学性能。面形可加工性、结构变形、热变形以及应力释放变形均会影响反射镜的空间面形<sup>[2]</sup>。前三种可以通过地面上的精密加工、结构设计以及空间的恒温控制等得以缓解和克服, 而后者只有通过一定的热处理方式使应力消除后才能保证使用中面形的稳定性, 而消除的先决条件便是如何有效地表征出反射镜表面的残余应力状态。因此残余应力的表征方法便显得尤为重要。

目前残余应力的表征方法主要分为有损法和无损法。无损法的代表是 X 射线法, 由于方法的固有特点, 对于多相材料, 所测量到的只是对应于某一相中某一晶面族的残余应力, 测量的残余应力是宏观残余应力和伪宏观残余应力之和。而小孔法作为典型的有损表征方法, 所测量到的仅是与相组成无关的宏观残余应力, 因此更易于反映整个材料的残余应力状态, 并且已成为国际上现场实测的标准方

\* 收稿日期: 2008- 12- 23

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 于坤(1979-), 男, 博士生。

法<sup>[3]</sup>。小孔法的测量深度要大大高于X射线法,因此结果能更好地反应材料内部的残余应力状态。目前开展的SiC及其复合材料的残余应力的测量主要是基于X射线衍射方法<sup>[4-7]</sup>,尚未见有小孔法测量的研究的报道。因此,本文进行了硬质C/SiC复合材料镜坯的小孔法残余应力表征工作,在现有打孔方法的不足以及材料自身特点的基础上,提出了电火花打孔法,并由此建立起了一套适合硬质C/SiC复合材料残余应力测量的改进小孔方法,完成了硬质C/SiC复合材料残余应力的测量。

## 1 试样制备与实验方法

### 1.1 试样制备

C/SiC复合材料,采用液相渗硅(Liquid Silicon Infiltration, LSI)工艺制备<sup>[8]</sup>。样片直径为45mm,试片1的平整表面经过粗磨、研磨得到,而试片2的平整表面仅经过粗磨得到。

### 1.2 小孔法残余应力测量原理

通过在样品表面某点钻孔,释放该点的残余应力,同时用专门的电阻应变仪来测量钻孔所释放的残余应变,进而求出钻孔前该点的残余应力。由于表面残余应力为平面应力状态,因此需要测量三个方向的释放应变,以求出相应的平面主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 以及主方向角 $\gamma$ 。三个应变计 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 的布置、主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 及主方向角 $\gamma$ 的示意图见图1。

### 1.3 残余应力小孔法测量法的主应力、方向以及应变释放系数的计算公式

主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和方向 $\gamma$ 的计算公式<sup>[9]</sup>

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1(A + B \cos \gamma) - \varepsilon_3(A - B \cos \gamma)}{4AB \cos \gamma} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_3(A + B \cos \gamma) - \varepsilon_1(A - B \cos \gamma)}{4AB \cos \gamma} \quad (2)$$

$$\gamma = \arctan \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_3$ 分别为应变花的0°、22.5°、90°方向测得的释放应变值; $A$ 、 $B$ 为应变释放系数,由于标定样品的制备相当复杂,所以一般是通过计算来得到两系数的值,计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$A = \frac{1 + \mu}{2E} \left[ \frac{a^2}{r^2} \right] \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{2E} \left[ 3(1 + \mu) \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right] \quad (5)$$

对于C/SiC样品,测得的弹性模量 $E$ 为170GPa,泊松比 $\mu$ 为0.21,孔半径 $a$ 为0.75mm,应变片栅丝中心距孔中心距离 $r$ 为2.5mm,由式(4)和式(5)得 $A$ 和 $B$ 分别为 $-3.20 \times 10^{-13}$ 、 $-9.72 \times 10^{-13}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 现有小孔方法的不足以及电火花打孔法的引入

对于小孔释放法残余应力的测量,目前可选用的钻孔方法有机械测钻仪钻孔、气喷磨蚀剂钻孔及空气涡轮驱动极高速钻孔等。从属于气喷磨蚀剂打孔的喷砂法由于打孔时引入的附加残余应力小、打孔较规整,是目前较好的残余应力测定用打孔方法。为此,本文考察喷砂法对硬质C/SiC复合材料的适用性。C/SiC复合材料喷砂孔的平面和剖面形貌见图2。

由图2可以看出,表层的喷砂孔的表面圆度较好,但随着孔深度的增大,孔边缘的规整度逐渐变差。如果应用喷砂法进行C/SiC复合材料的残余应力测量,势必会带来较大的误差,因此实现C/SiC复合材

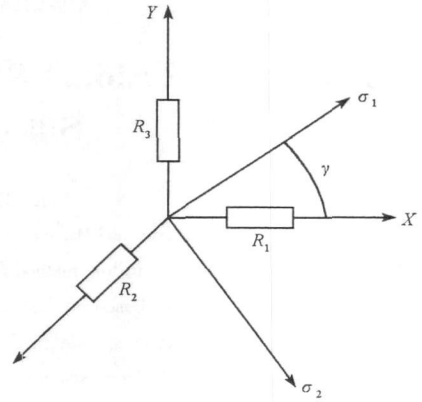
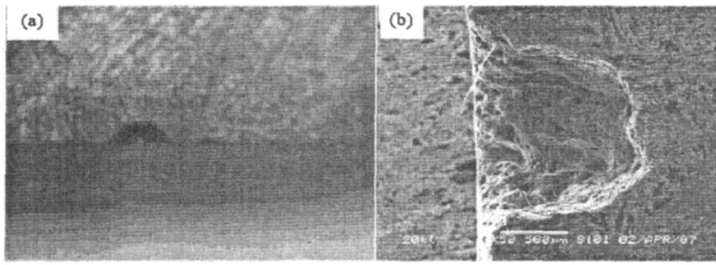


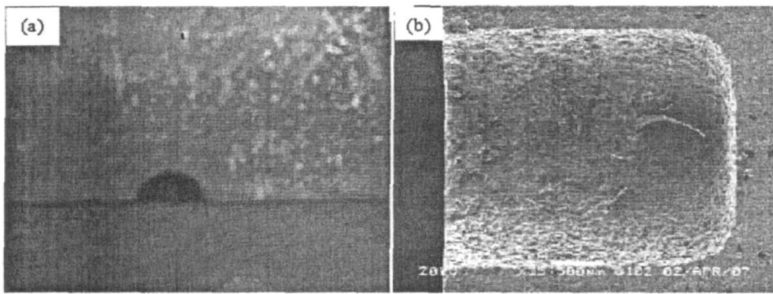
图1 三个应变计 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 的布置、主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 及主方向角 $\gamma$ 的示意图

Fig. 1 Sketch map of three strain gauges, principal stresses and principal azimuth angle

图 2  $Q$  SiC 复合材料上喷砂孔的平面图(a)和剖面图(b)Fig. 2 Planar and cross-sectional micrograph of sand-ejecting hole of  $Q$  SiC composite

料的小孔法残余应力测量必须选择一种替代的打孔方法。

硬质  $Q$ /SiC 复合材料是一种多相材料,其主要组分为 SiC, 另外还有少许的硅和碳,其较高的硬度决定了一般的常规方法(包括上述的喷砂法)很难实现规整打孔。但良好的电导率是硬质  $Q$ /SiC 复合材料的一个突出特点<sup>[1]</sup>, 这便使得其电火花打孔成为可能。为此进行了电火花打孔法对硬质  $Q$ /SiC 复合材料的适用性考察。 $Q$ /SiC 复合材料电火花孔的平面和剖面形貌见图 3。

图 3  $Q$  SiC 复合材料上电火花孔的平面图(a)和剖面图(b)Fig. 3 Planar and cross-sectional micrograph of electric spark hole of  $Q$  SiC composite

由图 3 可以看出,电火花孔的平面和周边的规整度均很好,孔质量并不会随着深度的增加而降低,因此电火花法可以实现硬质  $Q$ /SiC 复合材料的规整打孔。

## 2.2 试验流程

要实现电火花对  $Q$ /SiC 复合材料的打孔,需要打孔电极与导电样品的直接接触。而常用的应变花是通过将应变敏感栅粘结在树脂基板上的方式制成,树脂基板的绝缘性阻碍了电极与导电材料的导通,因而必须在应变花的某一位置进行预钻孔。由图 1 中某一点主应变的测定原理,应变花的三个应变敏感栅的交点即为应变测量点,因而预钻孔点应该选择在这个交点,尽可以实现电极的导通,又可以实现残余应力的测量。但是目前的电火花打孔机一般没有配备专门的显微对中装置,因而定位精度较差,不能满足小孔法残余应力测量的定位精度要求,在表面预设对中孔的方式可以解决这个问题。方法是利用现有的常规小孔法残余应力测量的钻孔中应用的显微对中方式,先在应变花敏感栅交点处预钻孔,然后在应变花上方粘帖树脂片,再钻一个对中孔。通过以上方式,便实现了电火花小孔法残余应力测量要求的导通以及定位要求,同时树脂片还起到了保护应变花的电火花灼伤的作用,由此建立的电火花小孔法



图 4 电火花小孔法残余应力改进方法的测量流程

Fig. 4 Experimental procedures of electric sparkle method for measurement of residual stresses of  $Q$  SiC composite

残余应力的测量流程如图4。

### 2.3 $\phi 45\text{mm}$ 硬质 C/SiC 复合材料表面的电火花法残余应力测量结果

按图4的测量流程,在贴片中心对中位置用1.5mm直径的铜电极,电火花方式打1.5mm直径、1.8mm深的孔,打孔结束后,记录应变花的0°、22.5°、90°方向的应变读数。

不同样品上不同测量位置的应变仪器读数见表1。

表1 不同样品上不同测量位置的读数结果

Tab. 1 Reading number of different positions of two samples

Sample and Position	Sample 1		Sample 2	
	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
$\varepsilon_{1d}/\mu\varepsilon$	- 38	- 32	- 81	- 84
$\varepsilon_{2d}/\mu\varepsilon$	- 39	- 34	- 76	- 86
$\varepsilon_{3d}/\mu\varepsilon$	- 41	- 31	- 78	- 83

应用的测量应变花的灵敏系数为2.07,而仪器显示负数默认的灵敏系数为2.00,需进行灵敏系数校正。同时考虑到应变仪的读数是针对1/4桥,而残余应力的测量采用的是1/2桥,因此需进行桥路校正。灵敏度校正和桥路校正的计算公式分别见式(6)和式(7)。

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{2.00}{2.07} \times \varepsilon_a \quad (6)$$

$$\varepsilon_f = \frac{1}{2} \times \varepsilon_a \quad (7)$$

其中  $\varepsilon_{\phi}$ 、 $\varepsilon_f$  分别为经灵敏系数和桥路校正后的读数,  $\varepsilon_a$  为应变仪的直接读数(见表1)。

由式(6)和式(7),仪器显示读数经过灵敏系数和桥路校正后的读数与仪器显示读数的关系如式(8):

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2.07} \times \varepsilon_a \quad (8)$$

表2 经灵敏度和桥路校正的不同样品、不同位置的读数结果

Tab. 2 Reading number of different samples and positions after sensitive coefficient and bridge circuit correction

Sample and Position	Sample 1		Sample 2	
	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	- 18.4	- 15.5	- 39.1	- 40.6
$\varepsilon_2/\mu\varepsilon$	- 18.8	- 16.4	- 36.7	- 41.5
$\varepsilon_3/\mu\varepsilon$	- 19.8	- 15.0	- 37.7	- 40.1

由表2中的校正读数及式(1)~(5),计算出的不同样品上不同位置的主应力见表3。

表3 不同样品、不同位置的残余主应力和方向的测量结果

Tab. 3 Principal stresses and direction angle of different samples and positions

Sample and Position	Sample 1		Sample 2	
	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
$\sigma_1/\text{MPa}$	30.2	24.0	60.7	66.6
$\sigma_2/\text{MPa}$	29.4	23.5	59.2	59.4

由上表可以看出:

同一样品不同位置的残余应力差异较小,这种差异可能是由于各处的温度场不同引入了不同大小的热残余应力所致;

不同样品间的差异较大,主要是由于表面平整方法的不同所致。不同平整方法的表面面形测量结

果见图5。

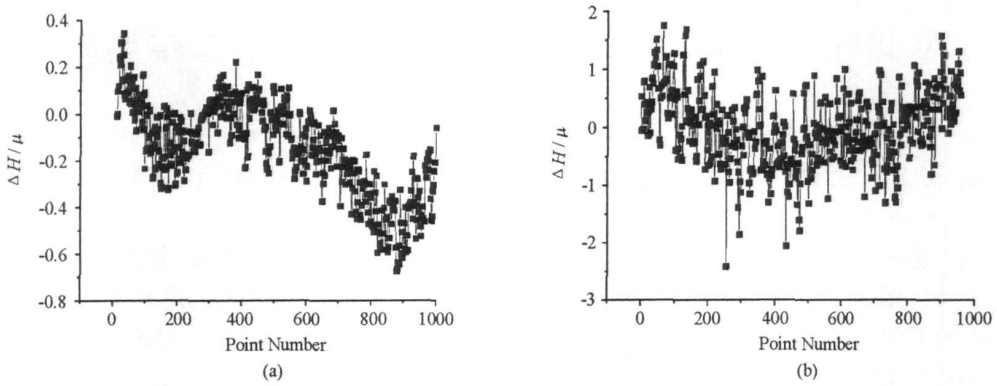


图5 粗磨-研磨表面(a)以及粗磨表面(b)的面形结果

Fig. 5 Surface Figure of C/SiC composite after lapped (a) and ground-lapped (b)

由表3和图5, 1#样品的平整表面是通过粗磨、研磨得到, 表面只存在较薄的研磨层(约数微米), 因此其表面残余应力在小孔法测量的释放应变中的作用较小, 测量应变反应的主要是本征残余应力的贡献。而2#样品是通过粗磨得到, 表面存在着较厚的粗磨层, 同时其又处于表面, 因此对释放应变的贡献较大, 因此测量到的残余应力更大, 由表3两个样品的对比可知, 粗磨表面引入的残余应力为拉应力, 这说明表面磨削热引入的热塑性残余拉应力对表面残余应力起主要作用<sup>[11]</sup>。以上进行的同一样品不同位置以及不同样品的结果表明所建立的电火花小孔法具有较好的区分能力。由上可知, 不同机加工表面的残余应力都比较小, 但研磨表面的应力更小, 考虑到钻孔深度内的本征残余应力的贡献较大, 因而本征残余应力值也不大, 要小于Be反射镜的残余应力( $124 \pm 13.68 \text{ MPa}$ )<sup>[12]</sup>, 因此C/SiC复合材料作为反射镜材料具有较好的面形稳定性的优势。

### 3 结论

(1) 对硬质的C/SiC材料, 针对目前较先进的喷砂打孔的孔边不平整问题, 利用C/SiC复合材料较好的电导率, 提出并进行了电火花打孔法研究。打孔效果明显好于喷砂法。

(2) 针对电火花打孔的工艺要求, 引入了应变化预钻孔、对中孔、应变花防护等工艺, 结合传统的小孔法测量工艺, 建立了电火花打孔法测量硬质C/SiC复合材料残余应力的测量流程。

(3) 进行了“粗磨-研磨”和“粗磨”两种C/SiC复合材料表面的电火花打孔法的实际残余应力测量, 不同样品的测量结果的较大差异, 表明该方法具有较好的区分性。C/SiC复合材料较小的本征残余应力和机加工应力使得其作为反射镜材料具有很好的面形稳定性的优势。

### 参考文献:

- [1] Panpenburg U, Pfang W, Cutter G S, et al. Optical and Optomechanical Ultra-lightweight C/SiC Components[C]//SPIE Conference on Optical Manufacturing and Testing III, Denver (Colorado), 1999.
- [2] 曹银花, 李林, 王智勇. 非球面金属反射镜在红外热成像系统中的应用研究[J]. 红外技术, 2006, 28(7): 373- 377.
- [3] ASTM E837- 01e1, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method[S].
- [4] Lu Y M, Leu I C. Microstructural Study of Residual Stress in Chemically Vapor Deposited  $\beta$ -SiC[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 124(2): 262- 265.
- [5] Zanola P, Bontempi E, Ricciadi C, et al. Characterization of Silicon Carbide Thin Films Grown on Si and SiO<sub>2</sub> Substrates[J]. Materials Science and Engineering B, 2004, 114: 279- 283.
- [6] Broda M, Pyzalla A, Reimers W. X-Ray Analysis of Residual Stresses in C/SiC Composites[J]. Applied Composite Materials, 1999, 6: 51- 66.
- [7] 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 碳化硅空间用反射镜坯体残余应力的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2006, 24(2): 61- 64.
- [8] Krennel W. Cost Effective Processing of CMC Composites by Melt Infiltration (LSI process)[J]. Am. Ceram. Soc., 2001, 2: 21- 26.
- [9] 中华人民共和国船舶行业标准 CB3395- 92, 钻孔应变释放测定残余应力[S].
- [10] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [11] 田欣利, 于爱兵. 工程陶瓷加工的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [12] 李瑞文, 董平. X射线测试Be应力的影响因素分析[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 139- 141.