复合材料学报 第26卷 第4期 8月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0141-05

# C/C复合材料热解炭消光角测量中图像配准算法

蒲全卫[1]，齐乐华*[1]，李妙玲[1]，李贺军[2]
（1. 西北工业大学 机电学院，西安 710072；2. 西北工业大学 材料学院，西安 710072）

**摘　要：** 用偏振光显微镜旋转成像测量C/C复合材料热解炭消光角过程中，所采集的序列图像间经常出现目标偏移现象。针对该问题，提出了一种基于结构特征的图像配准算法。该算法采用圆边缘检测算子检测每幅图像中同一纤维圆截面的圆心，以圆心作为图像配准的匹配点，通过坐标变换实现图像配准。在热解炭消光角测量过程中的应用结果表明，该配准算法可以避免因目标偏移而造成的数据采集误差，保证消光角测量的准确实现。

**关键词：** C/C复合材料；消光角；图像配准；圆边缘检测算子；结构特征
**中图分类号：** TB332　　**文献标志码：** A

## Image registration algorithm in measuring the extinction angle of pyrocarbons in C/C composites

PU Quanwei[1], QI Lehua*[1], LI Miaoling[1], LI Hejun[2]
(1. School of Mechatronic, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Materials Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The object translation often occurs between the serial images, which are captured at different analyzer positions in the polarized light microscopy for determining the extinction angle (Ae) of pyrocarbon in C/C composites. The translation results in the incorrect Ae value. An image registration algorithm based on structure features was proposed for translation correction. A circular template was used in the algorithm to detect the centre of the same fiber circular section in each image as a matching point. The image registration was realized through coordinate transform. The proposed algorithm has been applied to the Ae measurement of pyrocarbon. The experiment result shows that the image registration can avoid the wrong sampling data caused by object translation and assure Ae measurement accuracy.

**Keywords:** C/C composites; extinction angle; image registration; circular template; structure features

热解炭作为C/C复合材料的重要组成成分，其组织结构的差异对材料物理力学性能有显著的影响[1-4]。通常利用热解炭的光学各向异性特征，在偏振光下观察其组织结构。Diefendorf和Tokarsky[5]提出了消光角的概念：在偏振光显微镜(PLM)下，从正交位置开始旋转检偏镜，热解炭的45°区域逐渐变暗，最暗的那一时刻检偏镜转过的角度就是热解炭的消光角。消光角的大小反应了热解炭的各向异性程度，是确定热解炭织构类型的标准[6-8]。显然，要准确测量消光角，需要操作者在测量过程中，能够准确地判断光强的最暗时刻[9-11]。由于不同操作者的眼睛对光的明暗变化的反应不同，测量的消光角也会存在一定差异。

为了保证测量结果的客观性，可采用偏振光旋转成像法获取检偏镜旋转到不同角度时的一系列试样图像，再利用图像分析技术分析这些图像上同一区域的灰度变化情况来得到消光角[12]。但是，采集到的系列原始图像中经常会出现目标偏移现象，难以保证数据采集的精度，从而造成错误的测量结果。本文作者针对这一现象，提出了一种基于结构特征的图像配准算法，用每幅图像中同一纤维圆截面的圆心作为匹配点，实现多幅图像间的配准，再以配准后的图像为基础，测得正确的消光角数值。

## 1　基于结构特征的图像配准算法

图像配准是修正多幅图像中目标偏移的一种有

**收稿日期：** 2008-09-10；**收修改稿日期：** 2008-12-15
**基金项目：** 国家自然科学基金(50742008)
**通讯作者：** 齐乐华，教授，博士生导师，主要从事复合材料工艺及理论、人工智能及应用方面的研究工作　E-mail：qilehua@nwpu.edu.cn

效途径，需要根据不同的应用场景选择不同的配准方法[13]。在 C/C 复合材料的偏光显微图像中，纤维的截面形状不随检偏镜位置的改变而变化，可以选择基于结构特征的图像配准算法，修正图像分析法测量消光角时系列图像间目标的偏移现象。

### 1.1　仿射变换

假设基准图像上的点($x'$，$y'$)对应待配准图像上的点($x$，$y$)，基准图像 $F'(x, y)$和待配准图像 $F(x, y)$之间的仿射变换可以表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = k\begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$k$ 为尺度因子；$\alpha$ 为旋转角度；$t_x$、$t_y$分别为偏移量。由于本文中的图像只存在偏移现象，待配准图像上所有像素点的新坐标就可以直接通过累加相应的坐标增量而求出，从而完成图像的配准。亦即

$$\begin{cases} x' = x + t_x \\ y' = y + t_y \end{cases} \tag{2}$$

### 1.2　结构特征及匹配点提取

为了有效地配准两幅图像，提取的结构特征应该满足下面几个条件：(1) 结构特征在基准图像和待配准图像上都存在；(2) 结构特征不会因为图像偏移而改变，几何意义明确；(3) 结构特征应和周围特征不同，在其周围区域是独特的。

在 C/C 复合材料的偏振光显微图像中，纤维横截面近似于一圆形，热解炭环绕在碳纤维的四周，它们之间存在着明显的灰度梯度。如果以每幅图像中同一根纤维的圆截面作为该幅图像的结构特征，求出圆截面的圆心，那么就可以用圆心作为该幅图像的匹配点。

微积分边界定位算法定位精度高，与 Hough 变换、最小二乘法等边界定位算法相比，不需要对边缘图像进行二值化处理，不存在二值化阈值的选择问题，十分有利于图像的批量处理。对于圆形边缘，微积分边界检测算子为

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} \mathrm{d}s \right| \tag{3}$$

式中：$I(x, y)$为灰度值函数；$r$ 为搜索圆的半径；$(x_0, y_0)$为圆心坐标；$s$ 为由参数$(r, x_0, y_0)$确定的圆周。该操作通过迭代运算，检测相邻圆周像素值变化最大的圆。用式(3)定位纤维圆截面轮廓的过程就是在参数空间$(r, x_0, y_0)$上搜索灰度梯度最大的圆周的过程，最后得到的 1 组参数$(r, x_0, y_0)$即决定了目标的结构特征和匹配点。

### 1.3　偏移量计算

在序列图像的相同位置上选取一块矩形区域作为模板，模板上要包含一纤维的圆截面图像，该纤维圆周作为结构特征，圆周中心点作为匹配点。模板的大小选取要适中，太大会影响计算的速度，太小则会出现在某些偏移量较大的图像中纤维截面不被模板包含的现象，影响圆边缘检测算子的应用效果，模板的最短边长度通常为纤维直径的 4～7 倍。通过在模板上提取结构特征，可以缩小搜索范围，提高定位的准确率和速度。

如果图像间存在目标偏移现象，那么根据式(3)计算出的匹配点的坐标值就会不一致。以第 1 幅图像为基准图像，后续每幅图像的匹配点坐标值减去第 1 幅图像的匹配点坐标值就是该幅图像相对于第 1 幅图像的偏移量 $t_x$、$t_y$。

## 2　实验结果与讨论

C/C 复合材料用 CVI 工艺制备，垂直于纤维截面分割成小块，在流动水下用砂纸对截面进行粗磨、细磨后，再用 0.5 μm 的金刚石研磨膏抛光。抛光后的试样置于 Leica DMLP 显微镜下观察，通过配套的 Leica DFC320 相机采集图像。从正交位置开始(0°)，逆时针旋转检偏镜，每隔 1°拍摄 1 张图像，直至检偏镜偏离正交位置 30°。采集的图像按顺序存储到计算机中，这样就得到 31 幅采样图像。整个图像采集过程中，试样保持不动。50 倍物镜下，图像大小为 1044×772 像素，代表实际尺寸 226 μm×167 μm，则每像素表示 0.216 μm。

用图像分析法测量热解炭的消光角需要提取每幅图像上被测热解炭 45°扇区的像素值，然后对提取的像素值进行分析计算，求得消光角[12]。但是采集的系列图像中，不同检偏镜位置的图像上相同目标间经常出现偏移现象。如果不修正目标偏移量，从不同图像上提取的同一位置的像素值将不属于同一目标。消光角测量结果的正确性就难以保证。因此，图像配准是保证热解炭消光角正确测量的关键。

消光角测量过程中图像配准的实现原理如图 1 所示。在第 1 幅图像上选取矩形区域时，记录下该矩形区域左上角顶点坐标($X_0$，$Y_0$)、宽($W_0$)和高($H_0$)。从第 2 幅图像开始，图像预处理后，直接进入图像截取部分，考虑图像偏移修正量，图像截取

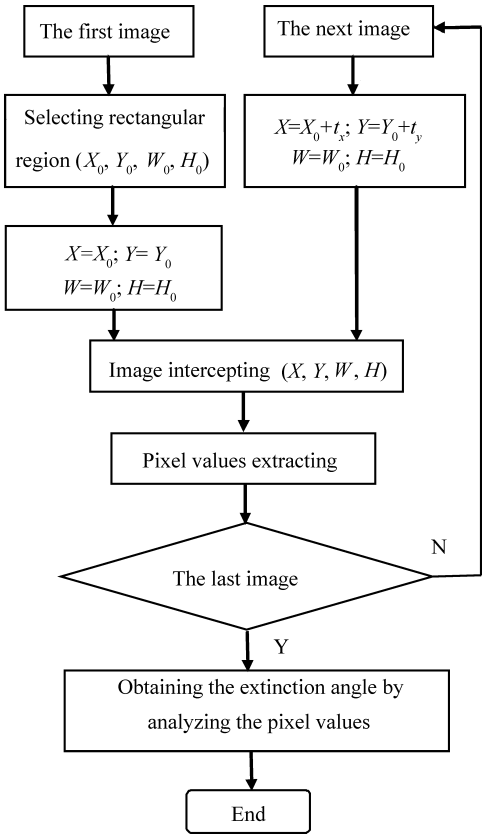
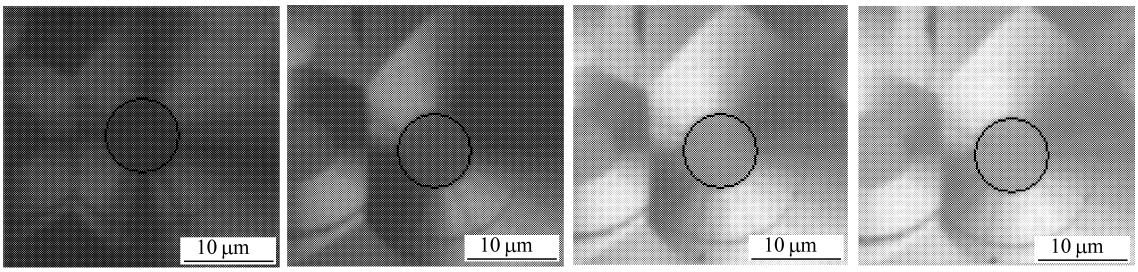



图 1　图像配准实现原理

Fig. 1　Implementation principle of image registration

的参数不再是 $X=X_0$、$Y=Y_0$、$W=W_0$、$H=H_0$，而变为 $X=X_0+t_x$、$Y=Y_0+t_y$、$W=W_0$、$H=H_0$。其中，$t_x$、$t_y$分别为前面已经计算出的该幅图像相对于第 1 幅图像的偏移量。通过在图像截取部分引入图像的偏移量，使每幅图像上所截取的矩形区域都对应于试样的同一区域，也就保证了在矩形区域提取像素时，是对同一目标进行的操作。该算法避免了在整幅图像上对每个像素点进行操作，只需调整每幅图像上截取的矩形区域的位置，对截取的区域上像素点坐标进行变换，在实现了图像配准功能的同时，也使计算效率得以提高。消光角测量过程中图像配准的实现原理示于图 1。

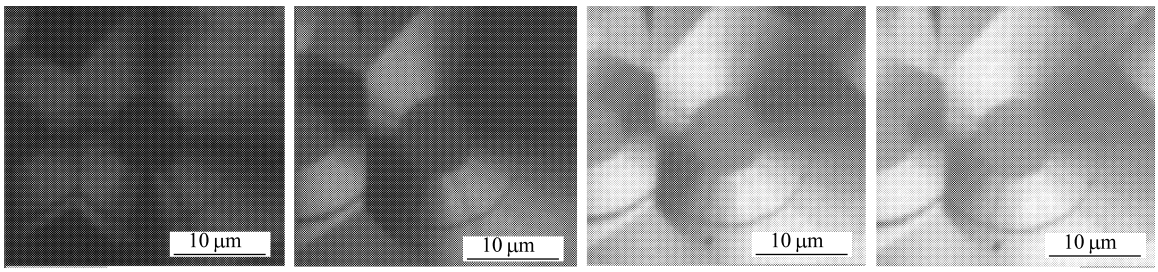
将本文中提出的配准方法应用于热解炭消光角测量中。图 2、图 3 列出了对采集的序列图像执行图像配准操作前后的效果图，仅给出了检偏镜位于正交位置即 0°(图 2(a))、10°(图 2(b))、20°(图 2(c))和 30°(图 2(d))时的局部图像作为代表。图 2 中所示为从原始序列图像中截取的相同坐标位置的模板图像，图中的黑色圆圈是用微积分定位边界法定位出的纤维圆截面轮廓。从图 2 可以看出，4 幅图像中纤维的位置存在着明显的偏移现象。通过采用以纤维截面几何形状为结构特征的图像配准算法，计算出各幅图像的偏移量，在消光角测量过程




(a) 0°　(b) 10°　(c) 20°　(d) 30°

图 2　偏移量计算中图像上的模板区域

Fig. 2　Template region of images in computing the offset




(a) 0°　(b) 10°　(c) 20°　(d) 30°

图 3　消光角测量中截取的矩形区域

Fig. 3　Intercepted rectangular region in measuring the extinction angle

中对序列图像进行修正。图 3 所示为修正后的效果，与图 2 相比，可以看到图像间的偏移现象已被消除，图像中的目标位置一致。

截取矩形区域后，在热解炭的 45°扇区上提取像素值进行分析计算，最后可以得到一拟合曲线，曲线的最低点即是消光角[12]。图 4 是对图 3 中所示的热解炭组织进行消光角测量的结果比较，横坐标表示检偏镜转过的角度，纵坐标表示像素值。其中图 4(a)表示未经配准直接提取的数据点及其拟合曲线，可以看出，曲线的走势始终呈下降趋势，不符合消光原理[9,12,14]。显然从未经配准的图像中提取的数据根本不是同一目标点的像素值，测量结果肯定是错误的。根据消光角的定义，曲线的走势应是先下降再上升[12,14]。图 4(b)表示经过配准后

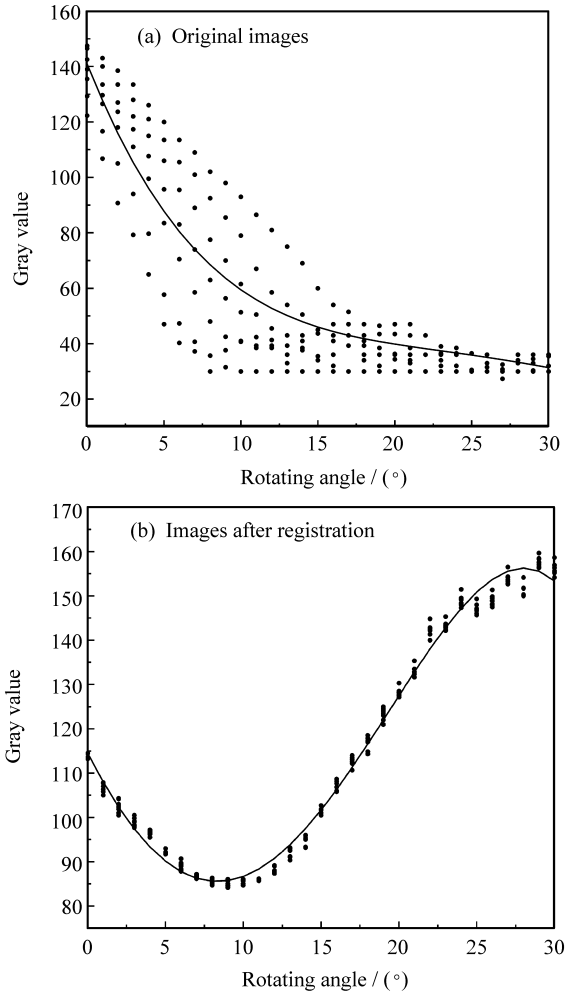



图 4　原始图像及配准后图像的消光曲线

Fig. 4　Extinction curves of the original images and the images after registration

测量的结果，图中曲线的走势符合消光角的定义，测量结果为 8.3°，与人工观察值之差大约为 1°，偏差范围与 Bourrat[14] 的研究结果相当。

## 3　结　论

（1）提出了一种基于结构特征的图像配准算法，该算法采用微积分边界定位算子，以纤维截面几何形状为结构特征，提取纤维圆截面圆心作为匹配点，以匹配点坐标变化量为图像偏移量完成序列图像的配准。

（2）本文作者所提出的图像配准算法能够较好地解决 C/C 复合材料热解炭消光角测量时采集的原始图像间存在的目标偏移问题，是保证热解炭消光角测量准确实现的基础。对于个别图像，由于热解炭与纤维界面相之间存在着很大的灰度梯度，进行纤维圆截面轮廓定位时，会发生一定的偏移。但这种偏移量很小，计算消光角时数据拟合过程会将其抵消，所以不会影响消光角的测量精度。

**参考文献：**

[1]　李贺军. 炭/炭复合材料 [J]. 新型炭材料，2001，16(2)：79-80.
Li Hejun. Carbon/carbon composite [J]. New Carbon Materials，2001，16(2)：79-80.

[2]　Guellali M，Oberacker R，Hoffmann M J. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of CVI-CFC composites with medium and highly textured pyrocarbon matrices [J]. Composites Science and Technology，2008，68(5)：1115-1121.

[3]　Xu Guozhong，Li Hejun，Bai Ruicheng，Wei Jian，Zhai Yanqiang. Influence of the matrix texture on the fracture behavior of 2D carbon/carbon composites [J]. Materials Science and Engineering A，2008，478(1/2)：319-323.

[4]　李妙玲，齐乐华，李贺军. C/C 复合材料组分含量的图像分析方法 [J]. 复合材料学报，2007，24(1)：106-111.
Li Miaoling，Qi Lehua，Li Hejun. Image analysis technique for the components of C/C composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(1)：106-111.

[5]　Diefendorf R J，Tokarsky E W. The relationships of structure to properties in graphite fibers，AFMLTR-72-133-Pt-3 [R]. New York：AD，1975.

[6]　Dupel P，Bourrat X，Pailler R. Structure of pyrocarbon infiltrated by pulse CVI [J]. Carbon，1995，33(9)：1193-1204.

[7]　Bourrat X，Fillion A，Naslain R，Chollon G，Brendlé M. Regenerative laminar pyrocarbon [J]. Carbon，2002，40(15)：2931-2945.

[8] 熊　杰，邹志强，汤中华，张红波，熊　翔. 载气对 C/C 复合材料 CVI 热解炭显微结构的影响 [J]. 复合材料学报，2004，21(6)：87-92.
Xiong Jie，Zou Zhiqiang，Tang Zhonghua，Zhang Hongbo，Xiong Xiang. Effect of carrier gas on the microstructure of CVI pyrocarbon in C/C composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(6)：87-92.

[9] 廖寄乔，黄伯云，黄志锋，陈　亮，陈腾飞. 热解炭微观结构的表征——热解炭各向异性的偏振光分析 [J]. 理化检验：物理分册，2002，38(11)：501-506.
Liao Jiqiao，Huang Baiyun，Huang Zhifeng，Chen Liang，Chen Tengfei. Microstructural characterization of pyrocarbon——Polarized light microscopic observation of anisotropy of pyrocarbon [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A：Physical Testing，2002，38(11)：501-506.

[10] 张保法，阮宏武，李东生. 偏光观察 C/ C 复合材料 [J]. 材料工程，2006(1)：32-34.
Zhang Baofa，Ruan Hongwu，Li Dongsheng. C/C composite as observed by polarized light [J]. Journal of Materials Engineering，2006(1)：32-34.

[11] Oberlin A. Pyrocarbons [J]. Carbon，2002，40(1)：7-24.

[12] Li Miaoling，Qi Lehua，Li Hejun，Xu Guozhong. Measurement of the extinction angle about laminar pyrocarbons by image analysis in reflection polarized light [J]. Materials Science and Engineering A，2007，448(1/2)：80-87.

[13] Brown L. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys，1992，24(4)：325-376.

[14] Vallerot J M，Bourrat X. Pyrocarbon optical properties in reflected light [J]. Carbon，2006，44(8)：1565-1571.