

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.06.023

# 碳纤维木质复合材料电镜图像分析及形态特征研究

张冬妍, 宋现铭

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 图像分析同图像处理、计算机图形学等研究内容密切相关, 而且相互交叉重叠. 将改进的抗噪声能力强并考虑邻域像素的模糊C均值聚类算法应用到碳纤维木质复合材料研究中, 经过试验验证取得了满意的分割结果. 然后对分割结果进行碳纤维特征参数提取, 并设置一个碳纤维分布形态参数  $r$  来区分电镜图像中碳纤维有无黏连成束. 本研究为碳纤维木质复合材料均匀化识别提供了便捷的方法, 同时也为后期构建碳纤维木质复合材宏观模型提供数据支持.

**关键词:** 碳纤维木质复合材料; 图像分割; 改进FCM算法; 特征提取

**中图分类号:** TS653      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2019)06-1138-07

## Electron microscopic image analysis and morphological characteristics of carbon fiber wood composites

ZHANG Dong-Yan, SONG Xian-Ming

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Image analysis is closely related to image processing, computer graphics and other research contents, and overlaps with each other. The improved fuzzy C mean clustering algorithm with strong anti noise ability and neighborhood pixels is applied to the research of carbon fiber wood composites. The satisfactory results have been obtained the test. the characteristic parameters of carbon fiber were extracted and a carbon fiber distribution parameter  $r$  was set up to distinguish the carbon fibers in the electron microscope. This study provides a convenient method for the identification of carbon fiber wood composites, and provides data support for the later construction of macro and micro models of carbon fiber wood composites.

**Keywords:** Carbon wood composite materials; Image segmentation; Improved FCM; Feature extraction

### 1 引言

碳纤维木质复合材料相比普通人造板在力学性能上有很大的提高, 并赋予了木质复合板一定的导电性, 扩展了木质复合材料的性能特点和使用范围<sup>[1]</sup>. 复合材料的微观结构决定其宏观性能<sup>[2]</sup>, 本文针对碳纤维木质复合材料的电镜图像

进行研究. 目前国内学者研究进展如下, 宋博等<sup>[3]</sup>利用高斯拉普拉斯算子提取图像梯度, 设定阈值过滤获得图像的边缘稀疏矩阵, 然后在稀疏矩阵的基础上利用改进的加速分割测试特征检测算法, 从而减少了图像特征值的运算量以及运算时间. 任洪娥<sup>[4]</sup>根据木粉电镜图像属性, 对其进行特征参数提取, 建立数学模型, 探究木粉属性

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 黑龙江省留学归国科学基金(LC201408)

作者简介: 张冬妍(1976-), 女, 副教授, 研究方向为系统建模与仿真、木材科学与技术.

通讯作者: 宋现铭. E-mail: 594009521@qq.com

对木塑材料力学性能的对对应关系. 邹洪杰<sup>[5]</sup>利用最大方差法与数学形态学相结合对碳纤维木质复合材料的电镜图像分割处理, 并对处理后的二值图像进行碳纤维特征提取, 取得了满意的实验结果. 针对文献<sup>[5]</sup>, 对复合材料木质复合材料电镜图像中提取的特征参数不能够区分碳纤维成束或黏连在一起的情况, 针对上述问题展开研究.

## 2 碳纤维木质复合材料电镜图像预处理

图像预处理的目的是为了消除图像的噪声, 增强了原始图像的辨识能力及细节, 减少后期图像分割的误差, 并避免误分割. 由图 1(b)可以看出图像的灰度分布极不均匀, 像素灰度值大都集中在 100 左右. 灰度直方图均衡化的作用, 即为把图像的灰度直方图相对集中密集的区域进行均匀化的分散, 使得灰度直方图在整个范畴内能够分布均匀, 提高图像的对比度. 通过图 2 可以看出直方图均衡化能够消除部分噪声, 突出图像中的碳纤维信息, 同时削弱或去除胶与木纤维等不需要的信息.

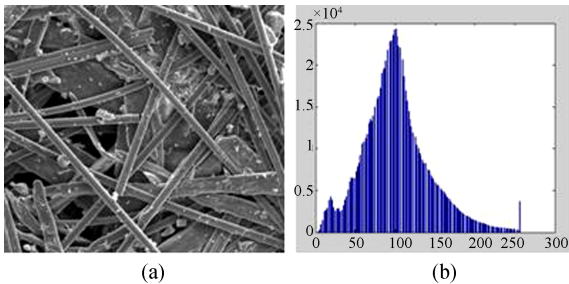


图 1 原始图像及其灰度直方图

Fig. 1 Original image and its gray histogram

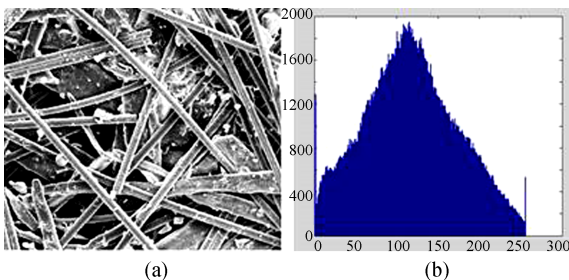


图 2 图像直方图均衡化后及其灰度直方图

Fig. 2 Histogram equalization and its gray histogram

由图 1 和图 2 的图像及其直方图进行对比, 能够发现均衡化后的直方图其灰度级分布更为均匀. 而均衡化后的图像里碳纤维和木纤维的对比更为显著, 因此提高了图像的对比度, 从而增强

图像的可读性以及分辨率.

中值滤波不仅能够有效地消除噪声, 而且对于图像中的细节能够很好地保留下来, 既能够较好地除去噪声, 又不会损坏图像内碳纤维的边缘细节. 本文选取滤波模板为  $7 \times 7$ , 实验结果如图 3 所示.

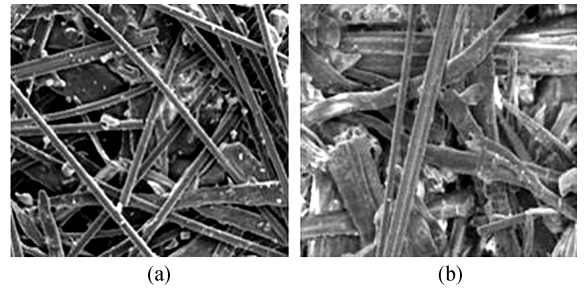


图 3 中值滤波结果

Fig. 3 Median filter results

## 3 碳纤维木质复合材料电镜图像分割与处理

图像分割在图像分析中有着重要的作用, 其中图像分割结果的好坏直接影响图像特征提取的结果准确与否. 模糊 C 均值算法<sup>[6]</sup> (Fuzzy C-Means, FCM) 常用在医学图像分割, 由于本文所采集的碳纤维木质复合材料的电子显微镜图像与医学上图像类似, 现将此方法应用到该碳纤维木质复合材料领域验证其实用性以及可行性.

### 3.1 传统 FCM 算法

FCM 算法采用迭代法优化目标函数来获得对数据集的模糊分类, 算法具有很好的收敛性, 是实际中应用最为广泛的一种模糊聚类算法. 下面将 FCM 的有关符号进行定义:  $\{x_i, i=1, 2, \dots, n\}$  是样本集合, 其中集合内元素个数为  $n$ ,  $c$  表示聚类数目;  $u_j, j=1, 2, \dots, c$  为每个聚类的中心;  $\mu_j(x_i)$  是第  $i$  个样本对于第  $j$  类的隶属度;  $\|x_i - u_j\|^2$  表示  $x_i$  到聚类中心  $u_j$  的欧几里得距离. 用隶属度定义聚类目标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b \|x_i - u_j\|^2 \quad (1)$$

其中,  $b > 1$  是一个可以控制聚类结果的隶属程度常数, 即为权重指数, 一般典型值取 2. 式(1)必须满足集合内样本对于每个聚类的隶属度之和为 1 的约束条件, 即为式(2).

$$\sum_{j=1}^c \mu_j(x_i) = 1, i=1, 2, \dots, c \quad (2)$$

在满足式(2)的前提下, 令  $J$  对  $u_j$  以及  $\mu_j(x_i)$

的偏导数为零,可求得式(1)的极小值,即得式(3)与式(4).

$$u_j = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b x_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b}, j=1,2,\dots,c \quad (3)$$

$$\mu_j(x_i) = \frac{[1/\|x_i - u_j\|^2]^{1/(b-1)}}{\sum_{k=1}^c [1/\|x_i - u_k\|^2]^{1/(b-1)}}, i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,c \quad (4)$$

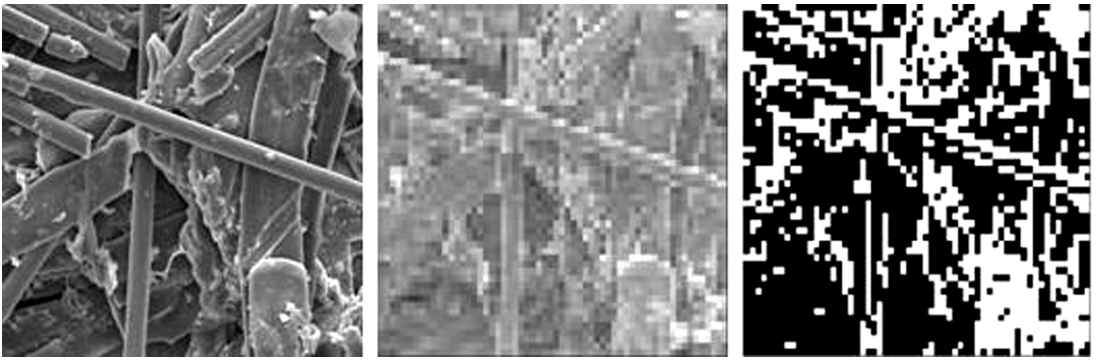
最后根据迭代法求解式(3)和(4),即为模糊C-均值聚类.其中在图像分割领域 FCM 发挥着重要作用,在灰度图像分割过程中,可把整幅图像的所有像素的灰度值作为样本点,算法采用一维欧几里得计算像素与聚类中心的距离.根据 FCM 算法的思想,如果某一像素关于某聚类中的隶属度越大,则表示该像素越属于该聚类;反之,隶属度越小,则表明该像素越不属于该聚类<sup>[7]</sup>.

### 3.2 改进 FCM 算法

FCM 算法具有很多优点,是一种计算较简便、无监督的算法,不需要使用训练样本.但 FCM 图像分割算法存在着很多缺点与不足,如对初始

值非常敏感,导致图像的误分割与过分割.且 FCM 算法只是利用了像素自身的灰度值或特征信息,而没有考虑其周围邻域像素的灰度值或特征信息,也没有像素的局部作用关系.本文将 FCM 与小波变换相结合,集中两者优点用于碳纤维木质复合材料的电子显微镜图像分割研究中来改善传统 FCM 算法的缺点与不足.

由小波理论可知,小波分解后的低频图像对噪声并不敏感,能够用较小的数据量包含电镜图像中轮廓与边缘等重要信息.正是由于低频图像数据量小,传统 FCM 算法只需运行很短的时间就可以得到聚类中心与初始分割结果<sup>[8]</sup>.首先将预处理后的电镜图像进行小波分解,进而可以得到如图 4 的低频图像.再将 FCM 图像分割算法应用到小波分解获得的低频率图像中,然后根据初始分割的聚类结果,把每一个聚类中的像素分别做标记,即每个像素有且只有一个被标记的标签.这些标签对我们改进像素特征值与欧几里得距离起着很大的作用.最终取得的分割效果如图 4 所示.



(a) 原图像

(b) 低频图像

(c) 低频 FCM 分割图像

图 4 小波分解低频图像与低频 FCM 分割图像

Fig. 4 Wavelet decomposition of low frequency image and low frequency FCM segmentation image

将 FCM 算法获取的低频图像分割结果利用小波逆变换,将其重建为和原态图像大小相同的图像.根据小波系数尺度内聚类与尺度间持久的特点,从低频到高频的空间相对位置不变.高频分量的小波系数继承具有最大相似值的低频分量的小波系数,所以两者标记的标签相同.即小波图像重建过程中将聚类标签依次完成从低频到高频小波系数的像素标记<sup>[9]</sup>.综上,通过上面的实验确定了聚类中心也得到了每像素的聚类标签.

再利用重构图像的信息,改进 FCM 算法.在小波逆变换重建图像过程中每一个像素都有一个

小波系数标签,当两个像素点标签相同,那么这两个像素点之间的相似性就会增加,从而可以推出聚类时两像素之间的欧几里得距离减小,可以定义参数  $\alpha$ ,使得两像素的标签相同时欧几里得距离减小,不同时其距离不变:

$$\alpha = \begin{cases} g, & x_i \text{ 和 } u_j \text{ 标签相同} \\ 1, & x_i \text{ 和 } u_j \text{ 标签不同} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $g$ 的范围为: $0 < g < 1$ .在后期实验中,当改进 FCM 算法的其他参数与输入图像不变时,分别令参数  $g$  取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,最终大量实验表明  $g$  取 0.8 时图像分割效果最佳.所以,

两个像素  $x_i$  与聚类中心  $u_j$  之间的欧几里得距离重新定义为:

$$d(x_i, u_j) = \|\alpha \cdot (x_i - u_j)\|^2 \quad (6)$$

由于传统 FCM 算法在计算像素的特征值时只利用了像素自身的灰度值信息, 并没有考虑其周围邻域像素的灰度值信息. 为了充分利用像素周围的邻域像素信息, 减少噪声的影响, 现重新定义像素的特征值  $v_i$  的计算方式, 即像素灰度特征值改为像素的灰度值与邻域像素的平均灰度值的加权和, 如式(7).

$$v_i = \beta \cdot x_i + (1 - \beta) \cdot \frac{1}{N_{R_j \in N(x_i)}} \sum x_i \quad (7)$$

式中  $x_i$  为像素的灰度值;  $N_R$  为邻域像素的个数;  $N(x_i)$  为像素  $x_i$  的邻域像素;  $\frac{1}{N_{R_j \in N(x_i)}} \sum x_i$  代表邻域像素的平均灰度.  $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$  为权重因子, 代表了一个像素和它邻域像素之间的相似性, 相似性越大其值就越大:

$$\beta = \frac{1}{N_{R_j \in N(x_i)}} \sum s_{i,j} \quad (8)$$

式(8)中  $s_{i,j}$  为像素  $x_k$  与其邻域像素  $x_i$  相似系数, 定义如下:

$$s_{i,j} = \begin{cases} 1, & |x_i - x_j| \leq D \\ 0, & |x_i - x_j| > D \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中  $D$  是预定义的阈值, 在本实验中由碳纤维木质复合材料电镜灰度图像属性可知, 当邻域内的两个像素灰度值之差小于 5 时, 认为两个像素相

似, 即定义  $D=5$ .

### 3.3 改进 FCM 算法实现以及实验结果分析

本文数字图像处理平台为 Win7 操作系统下的 MATLAB 2014a 版本, 采用 64 位 PC 机主频 2.70 GHz, 内存 6 GHz. 通过上一小节分析, 改进的 FCM 算法步骤实现步骤如下:

**Step1:** 将采集到的电镜图像进行预处理, 即灰度变换、直方图均衡以及中值滤波.

**Step2:** 将预处理后图像进行小波分解, 将 FCM 应用到低频图像中得到聚类中心和初始标签, 利用小波逆变换重建图像.

**Step3:** 由式(7)计算像素的特征值.

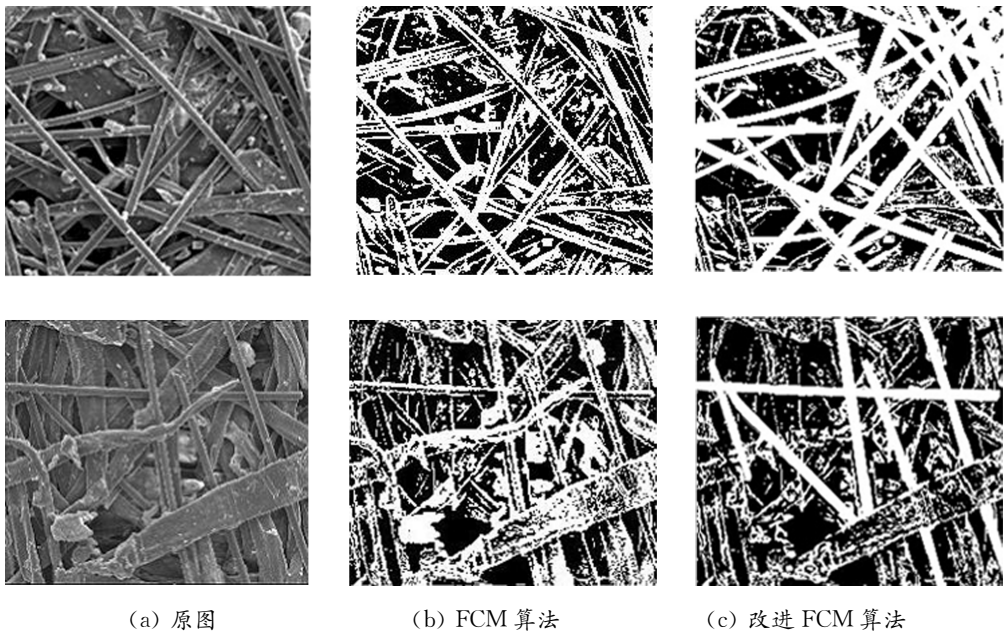
**Step4:** 由式(6)更新像素到聚类中心的距离.

**Step5:** 由式(3)、(4)更新图像的聚类中心以及隶属度.

**Step6:** 由式(1)计算新的目标函数  $J$ .

**Step7:** 若两次目标函数值满足  $|J_t - J_{t+1}| < \epsilon$  (其中  $\epsilon$  为最小迭代误差), 或者  $T > T_{\max}$  时聚类停止, 完成分割; 否则返回 Step3 继续执行.

本文实验算法参数设置为: 隶属度权重因子  $b=2$ , 聚类个数  $c=2$ , 迭代误差  $\epsilon=0.00001$ , 最大迭代次数设置为 100. 第一组电镜图像放大为 500 倍, 数量为 200 张. 改进 FCM 算法在实验中均取得了满意的分割结果. 选取其中 2 张进行分割结果对比, 见图 5. 图 5 中的(a)、(b)、(c)分别代表原图、FCM 算法分割效果、改进 FCM 算法分割效果.



(a) 原图

(b) FCM 算法

(c) 改进 FCM 算法

图 5 两种算法分割结果对比

Fig. 5 Comparison of two algorithm segmentation results

通过图 5 对比可知传统 FCM 算法由于没有空间约束力, 直接应用于图像分割中会有许多误分割, 碳纤维小条形区域体现得不够明显且存在大量噪声斑点. 新改进的算法很好地区别了碳纤维与木质纤维, 突出了碳纤维区域, 且抑制了噪声的影响, 达到了较好的分割效果.

表 1 两种算法的迭代次数与分割时间对比

Tab. 1 Comparison of the number of iterations of two algorithms and the time of segmentation

| 图象编号 | FCM 迭代次数/运行时间(秒) | 本文算法迭代次数/运行时间(秒) |
|------|------------------|------------------|
| 1    | 63/7.967 7       | 28/2.901 8       |
| 2    | 74/6.265 1       | 36/3.651 3       |
| 3    | 46/5.384 2       | 31/3.472 1       |
| 4    | 56/7.423 1       | 42/5.657 9       |
| 5    | 68/6.365 4       | 43/4.935 7       |
| 6    | 43/3.661 8       | 25/2.374 2       |

为了更进一步地说明本文改进 FCM 算法应用在碳纤维木质复合材料电镜图像的可行性以及有效性, 先选取经典阈值分割对分割结果进行分析. 其中阈值分割选取的算法为大津法, 即 Otsu 算法, 分割结果如图 6 所示.

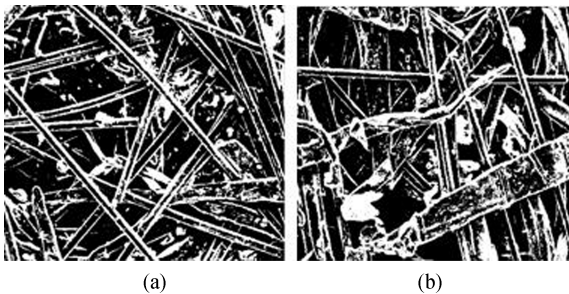


图 6 Otsu 算法分割结果

Fig. 6 Otsu algorithm segmentation results

实验结果对比分析可知, 虽然 Otsu 算法也能将碳纤维轮廓分割出来, 而且在分割时间上历时短, 但该算法同样存在类似传统 FCM 算法的问题, 容易将本来为背景木质纤维分割成目标区域, 本来为目标区域碳纤维分割成背景区域. Otsu 算法分割结果不能很好地区分碳纤维与木质纤维, 分割效果远不如改进 FCM 算法. 通过该对比更进一步地说明了本文改进 FCM 算法应用在碳纤维木质复合材料电镜图像的可行性以及有效性.

综上分割结果可知, 碳纤维的边缘并不连续, 存在间断, 而且在碳纤维的周围有很多不感兴趣的连通域, 这些连通区域对碳纤维的轮廓提取有

着很大的干扰. 为了解决上述存在的问题, 在图像边缘检测之前, 应通过数学形态学基本运算腐蚀、膨胀、开运算和闭运算来清除外部孤立噪声点以及填补目标中区域的空洞, 填补轮廓缝隙去除不感兴趣的区域. 本实验先对分割后的图像进行两次开运算, 再继续进行六次腐蚀. 最终处理结果如图 7 所示.

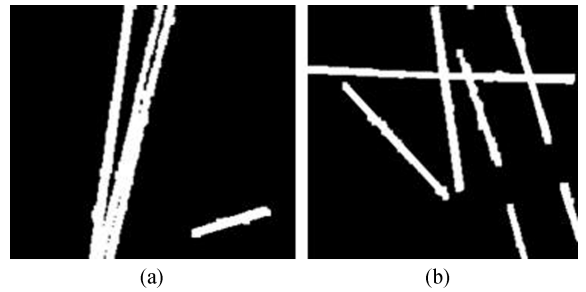


图 7 形态学处理后的二值图像

Fig. 7 Two value images after morphological processing

## 4 碳纤维的特征提取与分布形态

在图像分析中特征提取为关键步骤, 它是把检测到的图像特征从图像中提取出来<sup>[10]</sup>. 其中, 有些特征是直接视觉特征, 如边缘轮廓、亮度及纹理等; 有些则是测量、变换得到, 如图像的灰度直方图、图像的矩等<sup>[11]</sup>. 对于本研究, 主要识别碳纤维在复合板中的分布均匀化程度, 颜色及纹理显然不适合本研究, 故选取电镜图像中碳纤维条形区域的宽度, 长宽比和面积比作为碳纤维的特征量. 对上述图像分割结果运用 Sobel 算子进行边缘检测, 检测结果如图 8 所示.

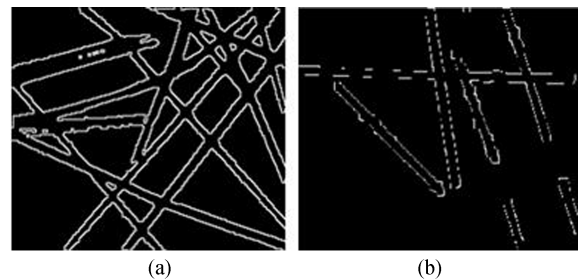


图 8 边缘检测后的结果

Fig. 8 Results after edge detection

在 MATLAB 中, 首先利用函数 `roipoly` 选取目标区域, 再利用函数 `[X,Y]=ginput` 计算两点坐标值, 再利用欧几里得距离公式求出两点之间的距离, 多次选点计算测量求平均, 即代表碳纤维条形区域宽度. 碳纤维目标区域的长宽比为目

标区域最小外接矩的宽与长的比值. 碳纤维目标区域的总面积比为灰度值为 255 的像素个数与图像总像素个数, 用到的函数为 bwarea.

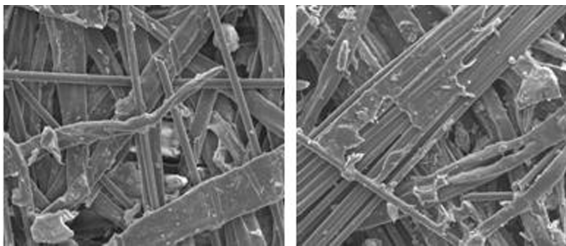
碳纤维木质复合板碳纤维特征值部分结果统计如表 2. 最终, 综合全部数据及其分别对应的电镜图像, 总结出碳纤维特征值分别为平均宽度小于 28, 长宽比大于 13, 总面积比在 0.3~0.5 之间, 碳纤维木质复合板中的碳纤维分布较均匀.

表 2 目标区域的特征值

Tab. 2 The eigenvalues of the target area

| 图像编号 | 平均宽度 | 长宽比   | 总面积比    |
|------|------|-------|---------|
| 1    | 22   | 16.21 | 0.421 6 |
| 2    | 21   | 15.54 | 0.354 8 |
| 3    | 25   | 15.94 | 0.215 6 |
| 4    | 23   | 20.57 | 0.356 5 |
| 5    | 19   | 17.23 | 0.515 4 |
| 6    | 29   | 20.26 | 0.395 6 |
| 7    | 18   | 19.32 | 0.492 1 |
| 8    | 26   | 17.84 | 0.359 6 |
| 9    | 137  | 2.51  | 0.751 6 |
| 10   | 74   | 18.16 | 0.654 4 |

由于碳纤维木质复合材料制作条件的限制碳纤维很难离散且无重叠的分布, 所以存在有些碳纤维是以多根形式分布, 甚至有些成束黏连在一起, 如图 9 所示. 碳纤维木质复合材料中碳纤维分布形态越均匀、离散, 其对应的力学性能及电学性能越优良.



(a) 单根 (b) 成束

图 9 碳纤维在模板中存在形式

Fig. 9 The form of carbon fiber in the template

利用以上图像处理结果, 图 9 对应的最终二值图像为图 10 所示:

上述碳纤维特征参数不能完全体现碳纤维分布形态, 为了解决区分碳纤维成束或黏连在一起的情况, 首先将上一节经图像处理后的图像等面积分为 3×3 个小矩形区域, 子图像分区如图 11 所示. 从图 11 可以明显看出有的小矩形块里没有

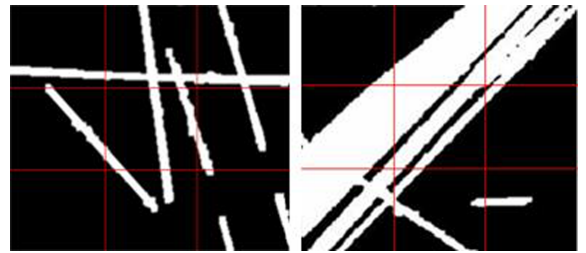
碳纤维, 而有的小矩形块里几乎全是碳纤维.



(a) 单根 (b) 成束

图 10 二值化后的图像

Fig. 10 Two valued images



(a) 单根 (b) 成束

图 11 形态学处理图像 3×3 子分区

Fig. 11 3×3 subdivision of morphological processing image

为进一步识别碳纤维木质复合材料均匀化程度, 下面设定一个碳纤维分布形态参数  $r$ ,  $0 \leq r \leq 1$ , 定义如下:

$$r_i = \begin{cases} 1, & 0.1 \leq \frac{s_1}{s_2} \leq 0.7 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^9 r_i}{9} \quad (11)$$

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ |
| $r_4$ | $r_5$ | $r_6$ |
| $r_7$ | $r_8$ | $r_9$ |

图 12 碳纤维分布形态模板

Fig. 12 Carbon fiber distribution form template

式(10)中  $s_1$  表示模板内小矩形区域中碳纤维面积,  $s_2$  表示小矩形区域面积, 即小矩形内面积比在  $[0.1, 0.7]$  之间  $r_i$  值取 1, 其他范围  $r_i$  值取 0. 形态参数  $r$  计算公式如式(11), 显然碳纤维分布越均匀,  $r$  值就越接近 1; 碳纤维重叠成束越严重,  $r$  值就越接近 0. 最终测试统计,  $r$  值大于 0.666 时碳纤维分布形态比较均匀离散.

## 5 结 论

通过本研究, 准确地将碳纤维特征值提取出来, 并设定碳纤维形态参数. 这些碳纤维特征值与参数为碳纤维木质复合材料均匀化识别提供了便捷的方法, 同时也为后期构建碳纤维木质复合材宏微观模型提供数据支持. 对优化碳纤维木质复合板材制造工艺, 研究碳纤维在复合板材中的相关特征与性能具有重要的实用价值. 本文为构建碳纤维木质复合材料的均匀化模型提供了数据基础, 同时为碳纤维木质复合材料的研制提供了理论基础, 也为新型复合材料的制备工艺优化提供新颖、有效的方法和科学依据, 达到缩短新型材料制备实验周期及性能预测的目的.

### 参考文献:

- [1] 韩克清, 严斌, 田银彩, 等. 碳纤维及其复合材料高效低成本制备技术进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31: 30.
- [2] 张冬妍, 林晓涵, 宋现铭. 基于计算机仿真分析的碳系木质复合材料的电学性能研究[J]. 黑龙江大学: 自然科学学报, 2017, 34: 372.
- [3] 宋博, 姜万里, 孙涛, 等. 快速特征提取与感知哈希结合的图像配准算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54: 206.
- [4] 郜洪杰. 基于数字图像处理的 SCFRW 均匀化模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [5] 任洪娥, 沈雯雯, 白杰云, 等. 基于最小二乘法的落叶松木粉粒径数学建模与分析[J]. 林业科学, 2015, 51: 164.
- [6] Barrah H, Cherkaoui A, Sarsri D. MAS based on a fast and robust FCM algorithm for MR brain image segmentation [J]. Int J Adv Comput Sci Appl, 2016, 7: 191.
- [7] 池桂英, 王忠华. 基于分层的直觉模糊 C 均值聚类图像分割算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38: 3368.
- [8] 马敏, 张彩霞, 陆成超, 等. 基于小波变换的 ECT 图像处理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47: 1947.
- [9] 史志红. 基于小波变换和 FCM 的医学图像分割[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [10] 田娟秀, 刘国才, 谷珊珊, 等. 医学图像分析深度学习研究方法研究与挑战[J]. 自动化学报, 2018, 44: 401.
- [11] Omari F A, Hui J, Mei C L, *et al.* Pattern recognition of eight hand motions using feature extraction of forearm EMG signal [J]. P Natl A Sci India A, 2014, 84: 473.

### 引用本文格式:

中文: 张冬妍, 宋现铭. 碳纤维木质复合材料电镜图像分析及形态特征研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 1138.

英文: Zhang D Y, Song X M. Electron microscopic image analysis and morphological characteristics of carbon fiber wood composites [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2019, 56: 1138.