

蜂巢基底纳米颗粒 SEM 图像分析方法研究

王 群

WANG Qun

北京城市学院 信息学部, 北京 100083

College of Information, Beijing City University, Beijing 100083, China

WANG Qun. Analysis method for SEM image of nanoparticles on honeycomb substrate. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(2): 21-24.

Abstract: The SEM image features of nanoparticles on honeycomb substrate are analyzed and the problems during extraction of characteristic values of the nanoparticles are clarified. The big hole of nanoparticle image and interference of getting particle size by touched particles after image binarization treatment are solved by using image analysis methodology such as the morphological filtering, histogram equalization, and particle analysis. The SEM image processing algorithm of nanoparticles on honeycomb substrate is stated, and the targets of characteristic values extraction of nanoparticle such as duty ratio and particle size distribution are archived. All these efforts lay the foundation of further quantitative evaluation and improvement of nanodevice parameters.

Key words: honeycomb substrate; nanoparticle; analysis method for SEM image

摘 要: 分析了蜂巢形基底上纳米颗粒 SEM 图像的特征, 阐明了纳米颗粒特征值提取所遇到的问题。借助形态学滤波、直方图均衡、颗粒分析等图像处理方法, 解决了图像二值化处理后纳米颗粒图像上的大孔洞、粘连颗粒影响粒径提取等问题。给出了蜂巢形基底上纳米颗粒 SEM 图像处理算法, 实现了占空比、粒径分布等纳米颗粒特征值提取的目标, 为进一步对纳米器件的参数进行定量评价和改进奠定了基础。

关键词: 蜂巢形基底; 纳米颗粒; SEM 图像分析方法

文献标志码: A **中图分类号:** TP391.4 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1307-0225

自 20 世纪 70 年代纳米颗粒材料问世以来, 历经了材料制备、物理/化学性质研究, 现已进入结构体研究阶段。纳米结构的制备、纳米器件的设计、纳米技术的开发已成为纳米科技领域探究的热点^[1-9]。随着纳米技术的深入开展和广泛应用, 人们逐步认识到纳米材料所展现的物理、化学、机械等方面的优越性能与它们的微观结构和表面形貌密切相关, 期望能够通过控制纳米结构材料的大小、形状、粗糙度、密集度等参数, 进而改善纳米器件的性能。由此采集纳米材料的表征数据成为推动纳米技术研究工作深入发展的关键一环。

近年来, 数字图像处理方法被引入纳米材料的微观结构分析中, 使纳米材料粒径大小、尺寸分布等的表征由定性提升到定量。聂鹏等^[10]以分形理论为基础提出纳米复合材料的透射电镜(TEM)图像图像处理和分散

相分散均匀性的定量评价方法。李宇罡^[11]等提出了一种基于 SEM 图像建立颗粒增强金属基复合材料二维微结构有限元模型的方法, 使其能够充分适用于纳米级颗粒增强金属基复合材料。何春霞、陆德荣等^[12]针对纳米 SiC/PTFE 复合材料的 SEM 图像提出了图像处理和材料颗粒分散程度定量表征方法。赵玲祥^[13]对石墨化学镀铜纳米镀层的 SEM、TEM 图像设计了一种局部的 OTSU 二值化方法, 并借助形态学方法识别颗粒进行表征。

从图像特征看, 上述研究都是在一个相对一致的背景下研究纳米颗粒图像处理和特征提取, 基于复杂图像背景分析纳米颗粒特征的研究较少。本文以蜂巢基底纳米颗粒 SEM 图像(典型图像如图 1 所示)为研究对象, 借助图像处理技术去除蜂巢底纹的干扰, 提取纳米颗粒的粒径分布、平均密集程度(占空比)等, 为定量评价制

基金项目: 国家自然科学基金(No.11374172); 北京财政项目(No.PXM2012_014202_000201)。

作者简介: 王群(1969—), 女, 博士, 高级工程师, 研究领域为数字图像处理、调度算法。E-mail: qunw@263.net

收稿日期: 2013-07-17 **修回日期:** 2013-08-20 **文章编号:** 1002-8331(2014)02-0021-04

CNKI 网络优先出版: 2013-09-26, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20130926.1644.002.html>

备条件与纳米颗粒形貌特征的关系奠定基础,进而支持定量研究纳米颗粒材料对结构体性能的影响。本研究工作对定量评价和改进纳米器件特性具有重要意义。

1 问题分析

直接观察图1可以发现,该图像的一些基本特征为实现纳米颗粒的特征数据提取提供了可能,这些特征包括:

(1)从灰度特征看,纳米颗粒与图像背景有灰度差,可以通过二值化方法使背景像素与纳米颗粒像素分离。

(2)从尺度特征看,纳米颗粒的粒径与作为基底的蜂巢壁的宽度有很大的尺度差异,这样可以借助数字图像处理的开运算能够在二值化后的图像中去除狭窄连接的特性消除基底的蜂巢状结构,还可以尽量减少纳米颗粒的像素点损失^[14]。

上述两个特征为纳米颗粒数量表征提供了基础,按照常规数字图像处理的步骤,经过读取SEM图像数据→图像二值化→开运算去除蜂巢结构像素,最终提取纳米颗粒的占空比、计算平均粒径等特征值实现研究目标。但在具体实现这个过程时,发现存在一些影响纳米颗粒特征数据准确性的图像特征需要关注:

(1)SEM图像中目标区域(颗粒)与背景灰度差较小,又受到蜂巢像素影响,二值化阈值难以确定。如图1(a)中两个椭圆标识出来的纳米颗粒区域和背景区域的图像灰度差别比较小,而整体上看蜂巢基底的像素灰度值较大,这样在进行全局性阈值计算过程中,势必会提高阈值的数值,使得灰度值与背景接近的纳米颗粒丢失像素。采用目前受到广泛推崇的最优阈值处理方法之一的Otsu方法^[15]对图1(a)进行处理的结果(如图1(b)所示)证明了上述推测。对比图1(a)就会发现图1(b)中用椭圆圈标识出来的部分都存在比较严重的纳米颗粒损失像素的情况,这种大孔洞用数字图像的闭运算技术也难以修复。这里需要说明的是,虽然蜂巢基底在二值化过程中也存在很多像素损失的情况,但是因为这些像素点是在提取纳米颗粒特征前要被清除的,因此在二值化的过程中不必关注这部分的像素损失。

(2)有些纳米颗粒粘连在一起,难以测算单个纳米颗粒的粒径。在根据4连通或8连通分割纳米颗粒时,会把粘连在一起的颗粒判定为一个颗粒,这样会影响粒径测算的准确度。分割粘连在一起的颗粒是数字图像处理的一个难点,至今还没有令人满意的算法完美地解决这个问题。

综上所述,避免蜂巢基底纳米颗粒二值化后大孔洞问题和避免粘连颗粒影响纳米颗粒尺度测算这两个问题成为蜂巢基底纳米颗粒SEM图像处理的关键问题。

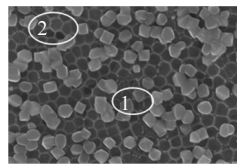


图1(a) 原图

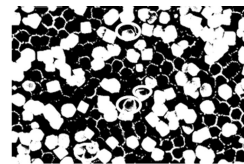


图1(b) 由Otsu算法算得的阈值处理后的图像,纳米颗粒出现较大孔洞

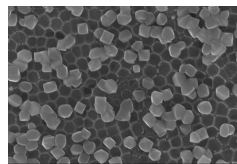


图1(c) 将(a)进行形态学滤波后的图像

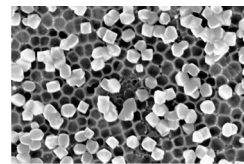


图1(d) 对(c)进行直方图均衡化后的结果

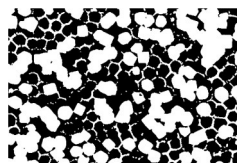


图1(e) 对(d)进行形态学交替滤波后得到的图像

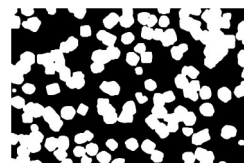


图1(f) 对(e)执行开操作,消除了蜂巢基底

2 关键问题解决方案

(1)解决蜂巢基底图像二值化后纳米颗粒大孔洞问题

SEM图像是灰度值为0~255之间的二维矩阵 F ,矩阵元素用 $f(x, y)$ 表示, $x \in [1, M], y \in [1, N]$ 。SEM图像是由暗色背景上的较亮物体组成,例如图1(a)背景灰度值较小颜色较暗,纳米颗粒和蜂巢基底等研究对象的灰度值较大颜色较亮。因此就有可能确定一个阈值 T ,使得:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases}$$

$g(x, y)$ 为取值为0或1的二值化图像,如图1(b)取值为0(黑色)的是背景,取值为1(白色)的是研究对象。现在的问题是因为原图像背景和研究对象的灰度值都不是均匀的,部分背景灰度值(如图1(a)圈2的部分)与研究对象灰度值(如图1(a)圈1的部分)差距较小,图像二值化阈值难以恰巧取到两者的临界值上,因为阈值 T 的取值偏大才会造成二值化的图1(b)中纳米颗粒出现较大孔洞。

从上面的分析可以看出,提升背景与研究对象的灰度差将有利于阈值 T 的确定,进而得到理想的二值化图像。一个比较理想的方法是将图1(a)灰度值的取值范围扩展到整个灰度值区间[0, 255]。观察图1(a)的灰度值域(如图2(a)所示)发现,虽然图1(a)像素的灰度值已经基本覆盖了[0, 255]的整个值域范围,但是在[0, 40]和[170, 255]的值域范围像素点分布很少,可以将这些值域范围的像素点视为图1(a)的噪声像素。这样就可以通过开-闭滤波进行图像形态学滤波的方式消除这些噪

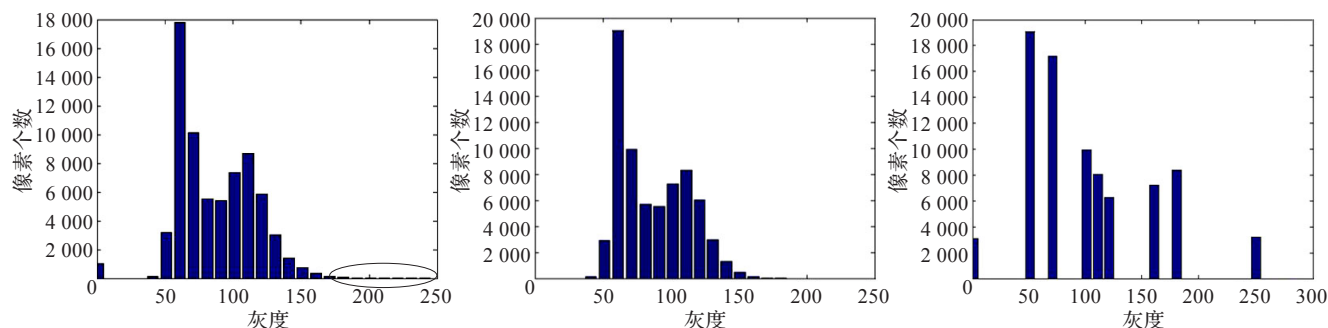


图2(a) 图1(a)的像素灰度分布图

图2(b) 图1(b)的像素灰度分布图

图2(c) 图1(c)的像素灰度分布图

声像素,有必要说明的是这样的滤波方式不会对目标对象的特征值带来影响。

采用半径1~2的圆盘状结构元对图1(a)进行交替顺序开-闭滤波后新的图像(图1(c)),其元素用 $foc(x, y)$ 表示,同样有 $x \in [1, M], y \in [1, N]$ 。直观可以看出与图1(a)相比,图1(c)强烈的亮像素和暗像素都减少了,若放大图片还可以看出原图1(a)左上角有一处类似划痕的噪声也被修复了。图2(b) $foc(x, y)$ 显示了像素灰度值分布图,可以看出头尾的噪声都已去除,低对比度的特点更加突出。

提高研究对象和背景像素灰度差的实质是提高对比度,使图像增强,这里选用直方图均衡化来实现。经过前面交替顺序滤波的新图像 $foc(x, y)$ 中灰度级 r_k 出现的概率近似为:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{MN}, k = 0, 1, \dots, 255$$

其中, MN 是图像 $foc(x, y)$ 中像素的总和, n_k 是灰度值为 r_k 的像素个数。直方图变换函数 T 如下:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^k n_j, k = 0, 1, \dots, 255$$

其中, r_k 是待处理图像中的亮度值, s_k 是经过直方图均衡化处理的灰度值输出。经过直方图均衡变化后,得到如图1(d)所示的新的蜂巢基底纳米颗粒图像,很明显图像中研究对象与背景间的像素灰度差提高了,其灰度分布图也证实了这一点(如图2(c)所示),主要灰度值分布不再是集中的,而是出现多个峰谷,变成离散度较大的分布,这就为确定图像二值化的阈值提供了方便。图1(e)是用 Otsu 方法对图1(d)进行二值化的结果,很明显原来图1(b)的大孔洞问题已得到很好的解决。

所述内容可以总结为两个步骤:首先采用开-闭交替顺序滤波,消除图像噪声,缩小图像值域范围,为后面的步骤提供更大的调整空间;接下来用直方图均衡提升较暗纳米颗粒像素与较亮背景间的灰度差。样例图像的实际执行结果说明了上述两个步骤对解决蜂巢基底纳米颗粒图像二值化后纳米颗粒出现大孔洞问题解决

的有效性。

(2) 解决粘连纳米颗粒对粒径测算的影响

本研究需要获取的纳米颗粒特征之一就是粒径,如果能把粘连颗粒分离,计算每一个颗粒的粒径尺度、得出其分布固然是一个好办法,但是由于粘连颗粒准确分离难度较大,使得研究工作的思路转向避开粘连颗粒分离的问题寻求实用的粒径测算方法。基于这样的思路,形态学颗粒分析方法^[14]可以间接用于估计颗粒的尺寸分布,而不需要识别并测量图像的每个颗粒。

形态学颗粒分析的原理比较简单。对于比背景亮且形状较为规则的颗粒,可以同时使用逐渐增大的结构元 B 对图像执行开操作,某个特殊尺寸结构元的开操作会对包含类似尺寸的颗粒的输入图像区域产生最大的效果。在本研究中经过开算子消除蜂巢基底的图像(图1(f))中包含了形状和尺寸不一的纳米颗粒,这些颗粒的集合用 X 表示,有 $1 \sim r$ 个单位尺度的结构元,它们构成了一个集合,用 $\{rB\} (r > 0)$ 来表示,其中 $rB = \overbrace{B \oplus B \oplus \dots \oplus B}^{r \uparrow}$ 。用序列递增的 rB 分别对 X 作开运算,则有:

$$\alpha_{rB}(X) = X \circ rB$$

这个过程可以形象地理解为用筛孔大小为 r 的筛子去筛图像,随着筛孔的增大对应尺寸的颗粒会被滤掉,小于颗粒尺度的筛孔(结构元)则对图像不会产生影响^[14]。图3(a)~(d)展现了经过递增单位尺度圆盘形结构元对图像图1(d)开操作后的结果。

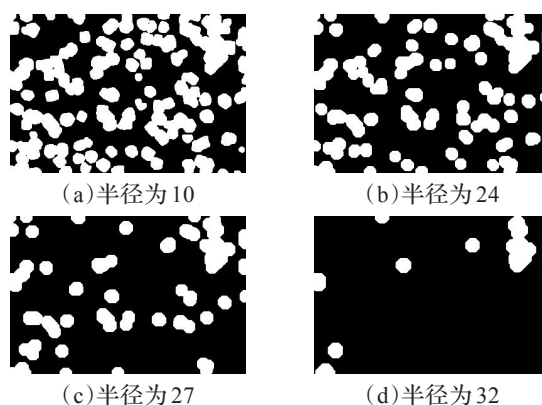


图3 用不同半径的圆盘形结构元处理图1(e)的结果

在上述筛选过程中,开操作的图像中会留下尺度不同的纳米颗粒,对颗粒个数进行统计,得到不同单位尺度纳米颗粒个数,统计表如表1所示,从图像看没有粘连的纳米颗粒粒径相差不大,因此可以认为在表1中占据73.08%的颗粒粒径半径在26~31单位尺度范围内,这就应该是研究对象的粒径分布范围。

表1 纳米颗粒粒径统计表

半径/像素	10	17	21	22	23	24	26	27	28	29	30	31	33	34	35	39	41	>45
数量	1	2	1	1	2	3	7	8	6	5	6	6	3	2	1	1	1	1

至此,影响蜂巢基底纳米颗粒SEM图像分析的两个主要问题均以解决。

3 分析方法总结及应用

综合上面的研究内容,可以总结出蜂巢基底纳米颗粒SEM图像分析的算法步骤,如图4所示。

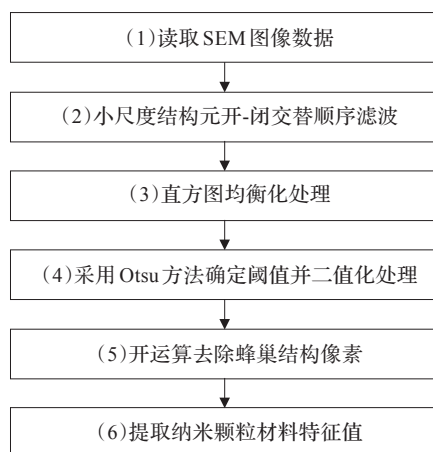


图4 蜂巢基底纳米颗粒SEM图像数据分析基本步骤

下面以图1(a)为例说明图4所示的分析过程:

(1)读取SEM图像,将图1(a)的中像素读取到 f ,获得一个 $686 \times 1\,024$ 的矩阵。

(2)用半径为1~2的结构元对 f 进行交替开-闭顺序滤波,消除图像噪声得到 foc 。在不改变纳米颗粒目标特征的前提下,客观上使像素灰度分布值域由图2(a)所示的直方图收窄为图2(b)所示的直方图。

(3)对 foc 进行直方图均衡化操作,得到高对比度图像(图1(d))和离散的像素灰度分布(图2(c))。

(4)用Otsu方法计算直方图均衡后图,得到阈值为0.498,进而用该值对图1(d)进行二值化,得到矩阵 g 及其对应的图像(图1(e))。

(5)根据蜂巢结构的尺度,用半径为9的圆盘结构元对 g 进行开操作消除蜂巢结构,得到矩阵 $g1$ 和呈现在黑色背景上的白色的纳米颗粒图像(图1(e)),该图像已具备提取目标特征值的基础。

(6)基于 $g1$ 计算纳米颗粒特征值:

①汇总 $g1$ 中白色像素(值为1),得到纳米颗粒像素总数为296 918。因为在前面所有的变换中都没有改变图像的尺寸(矩阵的规模),所以 $g1$ 总的像素数为 $686 \times 1\,024 = 702\,464$,背景像素数为405 546,占空比 $= 0.731\,4$ 。

②对 $g1$ 中的纳米颗粒进行8连通计数,得到独立的和粘连的纳米颗粒总数为52。

③用半径1~45圆盘结构元进行颗粒分析,获得 $g1$ 的不同粒径的纳米颗粒数(如表1所示),也可将这组数据用分布图的形式进行表征,如图5所示。从这个分布图可以更加直观地得到纳米颗粒粒径(半径)主要分布在26~32单位尺度之间。

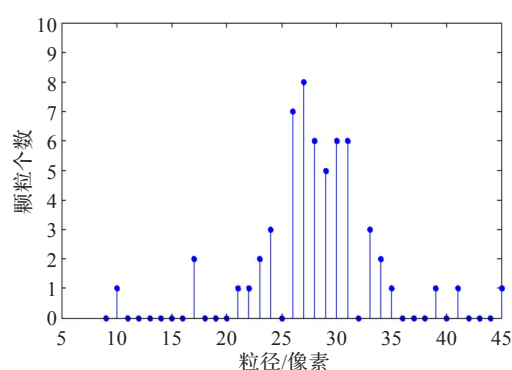


图5 纳米颗粒粒径分布图

4 结束语

本文综合应用形态学图像处理的多种方法解决了蜂巢基底纳米颗粒SEM图像特征数据分析中由于蜂巢和噪声干扰带来的二值化阈值难以确定的问题以及在粘连颗粒存在的条件下提取纳米颗粒粒径分布的问题。这种方法适用于蜂巢壁与纳米颗粒粒径尺度有较大差异的SEM图像分析处理,也对其他与纳米颗粒粒径尺度相差较大的其他复杂背景的图像处理具有一定的借鉴。

参考文献:

- [1] Konstantatos G, Sargent E H. Nanostructured materials for photon detection[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5: 391-400.
- [2] Cao J, Ionescu A M. Self-aligned lateral dual-gate suspended-body single-walled carbon nanotube field-effect transistors[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100.
- [3] Arico A S, Bruce P, Scrosati B, et al. Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices[J]. Nat Mater, 2005, 4: 366-377.
- [4] Simon P, Gogotsi Y. Materials for electrochemical capacitors[J]. Nat Mater, 2008, 7: 845-854.

(下转57页)

表2 几种数值积分方法计算震荡函数的结果

<i>m</i>	精确值	ES1	ES2	DE	本文算法
10	-0.634 665 18	-0.681 340 52	-0.650 340 80	-0.639 821 73	-0.634 434 90
20	-0.314 946 63	-0.372 804 25	-0.305 834 35	-0.310 359 06	-0.311 709 16
30	-0.209 672 43	-0.173 056 21	-0.235 568 15	-0.214 382 51	-0.207 775 34

在[0, 3]上的积分,已知该函数的积分精确值是1.546 036 00。基于混合基函数的ES方法^[1]获得最佳结果为1.545 500 00,基于不等距点分割的ES方法^[1]获得最佳结果为1.545 980 50,本文算法计算的结果为1.553 739 68。

例5 计算振荡积分^[12]:

$$I=\int_0^{2\pi} x\cos x\sin mx\mathrm{d}x$$

以ES1和ES2分别表示基于混合基函数的ES方法和基于不等距点分割的ES方法,用DE表示不等距点分割的DE方法,几种方法计算结果如表2所示。

5 结束语

文中先给出将任意(非等距)分割积分区间的定积分数值计算误差的几个结果,提出了一种基于遗传算法的优化积分节点分割的数值积分方法。通过典型的数值积分算例进行计算仿真,结果表明本文方法计算精度高,对被积函数要求低且适应性强,不但可以计算不存在初等原函数的被积函数的积分,而且可以求解奇异积分和振荡积分,是对传统的数值积分方法的一种改进。设计精度更高,稳定性更好的算法和求解多重积分的一般算法,在每一段小区间上如何更有效,以及如何降低误差将是今后研究的重点。

参考文献:

[1] 周永权,张明,赵斌.基于进化策略方法求任意函数的数值积分[J].计算机学报,2008,31(2):196-206.

[2] 韦杏琼,周永权.基于粒子群算法的数值积分方法研究[J].微电子学与计算机,2009,26(7):117-119.

[3] 曲良东,何登旭,曾绍东.基于人工鱼群算法的优化分割数值积分算法[J].计算机应用与软件,2009,26(11):58-60.

[4] 聂黎明,周永权.基于人工鱼群算法求任意函数的数值积分[J].数学的实践与认识,2009,39(19):127-134.

[5] 邓泽喜,黄飞丹,刘晓冀.一种求解数值积分问题的差分进化算法[J].计算机工程,2011,37(20):206-207.

[6] 罗玉雄,文卉.一种基于神经网络算法的数值积分算法[J].传感技术学报,2006,19(4):1187-1189.

[7] 徐理英,李立军.数值积分的神经网络算法研究[J].系统仿真学报,2008,20(7):1922-1924.

[8] 刘证,丁桂艳.关于定积分几种近似计算的误差估计[J].鞍山科技大学学报,2003,26(4):313-317.

[9] Holland J H.Adaptation in natural and artificial systems[M].[S.l.]:MIT Press,1975.

[10] 龚纯,王正林.精通MATLAB最优化计算[M].北京:电子工业出版社,2009.

[11] Burden R L,Faires J D.Numerical analysis[M].7th ed.[S.l.]:Thomson Learning Inc,2001.

[12] 同济大学数学教研室.现代数值数学和计算[M].上海:同济大学出版社,2004.

(上接24页)

[5] Soukoulis C M,Wegener M.Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J].Nat Photonics,2011,5:523-530.

[6] Wachsman E D,Lee K T.Lowering the temperature of solid oxide fuel cells[J].Science,2011,334:935-939.

[7] Xia Y N,Yang P D,Sun Y G,et al.One-dimensional nanostructures:synthesis,characterization,and applications[J].Advanced Materials,2003,15:353-389.

[8] Franklin A D,Tulevski G S,Han S J,et al.Variability in carbon nanotube transistors:improving device-to-device consistency[J].ACS Nano,2012,6:1109-1115.

[9] Gao D,Helander M G,Wang Z B,et al.C60:LiF blocking layer for environmentally stable bulk heterojunction solar cells[J].Adv Mater,2010,22:5404-5408.

[10] 聂鹏,王新鑫,高霁,等.纳米复合材料分散相分散均匀性的分形表征[J].北京航空航天大学学报,2009,35(7):852-855.

[11] 李宇罡,王斐霏,李险峰,等.纳米颗粒增强金属基复合材料微结构有限元模型研究[J].材料导报,2011,25(7):134-148.

[12] 何春霞,陆德荣,顾红艳.纳米SiC/PTFE复合材料颗粒分散程度及其与机械性能关系初探[C]//第十届中国复合材料学术会议论文集,2012.

[13] 赵玲祥.基于数字图像处理的材料均匀性定量表征[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[14] Gonzalez R C,Woods R E.数字图像处理[M].阮秋琦,译.3版.北京:电子工业出版社,2011:433-434.

[15] Nixon M S,Aguado A S.特征提取与图像处理[M].李实英,译.北京:电子工业出版社,2011:61-64.