

# 基于分形的金属材料海水腐蚀形貌图像分析诊断系统\*

王守琰<sup>1)</sup> 宋诗哲<sup>1,2)</sup>

1) 天津大学材料学院, 天津 300072

2) 中国科学院金属研究所金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016

**摘要** 将分形的概念应用于腐蚀形貌图像的特征提取, 计算扫描得到的实海腐蚀试片图像的分形维数、广义维数、面积因子和空隙特征, 并作为分析诊断系统的输入. 用模糊模式识别理论建立了基于图像分形特征的腐蚀形貌图像诊断系统, 可以由图像的分形特征值判断金属的表面腐蚀形貌.

**关键词** 腐蚀形貌, 分形, 特征提取, 模式识别

中图法分类号 TG171

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)01-0094-05

## CORROSION MORPHOLOGY DIAGNOSING SYSTEM OF METALLIC MATERIALS IN SEAWATER BASED ON FRACTAL

WANG Shouyan<sup>1)</sup>, SONG Shizhe<sup>1,2)</sup>

1) School of Materials, Tianjin University, Tianjin 300072

2) State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: SONG Shizhe, professor, Tel: (022)27407338, E-mail: szsong@tju.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59899144-3) and National Key Basic Research and Development Programme of China (No.G19990650)

Manuscript received 2003-01-27, in revised form 2003-06-05

**ABSTRACT** The theory of fractal geometry is used to analyze the corrosion morphology images, which were acquired by scanner. The fractal dimension, generalized dimension, area factor and lacunarity of metallic corrosion images of samples that exposed in seawater were calculated. Taking the obtained characters of metallic samples and their corrosion modality as the knowledge base, the diagnosing system identifying corrosion modality of metallic material in seawater was established according to the theory of fuzzy pattern recognition. The morphology of corrosion images can be identified by acquired fractal characters.

**KEY WORDS** corrosion morphology, fractal, feature extraction, pattern recognition

基于对复杂自然景物自相似性的描述, Mandelbrot 创立了分形几何学理论, 提出用分形维数的概念来度量自然现象的不规则程度. 自然界中的许多现象都具有分形特征, 而人造物体都不具有分形特征. 分形学的基本思想是: 客观事物具有自相似的层次结构, 局部与整体在形态、功能、信息、时间、空间等方面具有统计意义上的相似性, 即自相似性. 自相似性原理的引入使分形理论成为研究和处理自然与工程中不规则图形的有力工具<sup>[1]</sup>.

自然界中材料的腐蚀大多也呈现分形特征, 1984 年, Mandelbrot 等<sup>[2]</sup> 首先把金属断裂表面作为分形表面处理, 并将断裂表面的分形维数与材料的冲击韧性联系起来. 在腐蚀现象观察过程中得到的图像在不同的尺度下也表现出复杂的不规则的形状. Costa 等<sup>[3]</sup> 用分形几何概念研究了出现点蚀的 316L 不锈钢的表面 SEM 照片, 求得了蚀孔轮廓的分形维数. 其它的有关分形在腐蚀中应用的报道大都集中于应力腐蚀开裂研究<sup>[4-6]</sup>.

图像的分形维数是图像的重要特征之一, 本文计算扫描得到的实海金属材料腐蚀形貌图像的分形维数 ( $FD$ )、广义维数  $D$ 、面积因子  $K$  和缝隙特征  $A$ , 并将试样的  $FD, D, K, A$  值和对应的腐蚀形貌作为诊断系统的知识库, 用模糊模式识别理论建立基于图像分形特征的腐蚀形貌诊断系统.

\* 国家自然科学基金 59899144-3 和国家重点基础研究发展规划资助项目 G19990650

收到初稿日期: 2003-01-27, 收到修改稿日期: 2003-06-05

作者简介: 王守琰, 男, 1977 年生, 博士生

## 1 腐蚀形貌图像分形特征的计算

### 1.1 腐蚀形貌图像分形维数的求法

Mandelbrot<sup>[7]</sup> 认为具有分形特征的表面具有自相似性, 设  $n$  维欧氏空间中的有界集合  $B$  具有分形特性, 通过分形维数可以描述和测量其分形特性. 在实际中, 常用 Richardson 定律来估计分形维数  $FD$

$$N_\varepsilon = K\varepsilon^{-FD} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon=1, 2, 3 \dots$  为尺度因子,  $N_\varepsilon$  是尺度  $\varepsilon$  下的度量特征值,  $K$  为分形系数. 但是, 直接利用 (1) 式计算分形维数是很困难的. 求取腐蚀形貌图像分形维数的方法有多种, Chaudhuri 等<sup>[8]</sup> 在总结分析了众多算法的基础上, 提出了一种简单、快捷并具有较高精度的称为 DBC “盒子” 维数的方法来求取分形维数. 其思路如下:

(1) 式两边取对数, 有

$$\lg(N_\varepsilon) = \lg(K) + FD \lg(1/\varepsilon) \quad (2)$$

由 (2) 式, 将大小为  $M \times M$  的腐蚀形貌图像考虑成为一个三维空间, 坐标  $(x, y)$  代表二维平面, 图像灰度值代表  $z$  轴方向. 将  $(x, y)$  二维平面分割成大小为  $s \times s$  的格子 ( $s$  为整数,  $M/2 \geq s > 1$ ), 因此, 在每一个格子中有许多体积为  $s \times s \times s'$  的小盒子的堆砌. 设腐蚀形貌图像的灰度级为  $G$ , 则  $s' = \lfloor s \times G/M \rfloor$ . 如图 1 所示, 假定  $s = s' = 3$ , 使第  $(i, j)$  个格子中图像最小和最大的灰度值分别落入堆砌的序号为  $k$  和  $l$  的盒子中. 令  $n_\varepsilon(i, j) = l - k + 1$ , 图 1 中  $n_\varepsilon(i, j) = 3 - 1 + 1 = 3$ . 将所有格子的  $n_\varepsilon(i, j)$  求和, 则有

$$N_\varepsilon = \sum_{i,j} n_\varepsilon(i, j) \quad (3)$$

通过  $s$  的变化引起  $\varepsilon$  的变化, 用最小二乘法来拟合  $\lg(N_\varepsilon) - \ln(1/\varepsilon)$ , 求出斜率即为  $FD$ . 这种计盒维数在图像的邻近区域灰度值变化很大时仍有很好的结果.

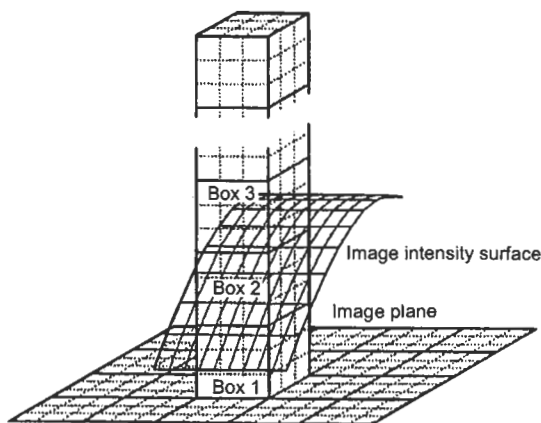


图 1  $n_\varepsilon$  的计算方法

Fig.1 Calculation method of  $n_\varepsilon$

### 1.2 面积因子和缝隙特征

1.2.1 面积因子 分形维数是腐蚀形貌图像表面不规则程度的一种度量, 它反映了腐蚀形貌图像灰度曲面的粗糙程度. 本文将引入另外两个反映腐蚀特征的参数—面积因子<sup>[1]</sup>和缝隙特征<sup>[9]</sup>.

考虑 (1) 式中的系数  $K$ , 对于一个理想的平坦的分形曲面, 其分形维数  $FD$  为 2, 此时系数  $K$  为灰度曲面的表面积. 给定一个理想分形曲面,  $K$  为一常数, 若图像是由不同的纹理曲面组成,  $K$  将不再是一个常数, 而是尺度  $\varepsilon$  的函数, 它反映了尺度变化情况下曲面面积的变化, 取不同的尺度, 由 (1) 式可得

$$K = \frac{N_{\varepsilon_1} - N_{\varepsilon_2}}{\varepsilon_1^{-FD} - \varepsilon_2^{-FD}} \quad (4)$$

式中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为不同尺度, 可见  $K$  值反映了腐蚀形貌图像表面积随尺度变化的空间变化率.

式 (2) 表示在  $\lg(N_\varepsilon) - \lg(1/\varepsilon)$  坐标系下的一条直线,  $\lg(K)$  恰为该直线在纵坐标轴  $\lg(N_\varepsilon)$  上的截距,  $K$  的大小相当于该尺度下的灰度曲面面积. 由此可以看出, 系数  $K$  实际上是一个类似于面积的分形参数, 称之为面积因子. 不同的腐蚀形态由于其表面的起伏程度各不相同, 因而面积因子的大小也不同. 对于光滑的曲面,  $K$  值较小, 起伏的曲面  $K$  值较大. 所以, 面积度量同分形维数一样反映了图像表面的粗糙程度, 即图像灰度曲面的“起伏程度”. 实验表明, 面积度量在许多方面往往能更好地体现不同曲面的特性. 对于腐蚀形貌图像而言, 分形维数  $2 < FD < 3$ , 而  $K$  取值范围是正实数, 所以它对于不同性质的曲面具有更好的区分度. 腐蚀形貌图像灰度曲面越粗糙, 灰度变化越强烈,  $K$  值越大.

1.2.2 缝隙特征 Mandelbrot 和 Voss<sup>[9]</sup> 曾指出不同的分形集可以具有相同的  $FD$  值和具有差异很大的纹理. Mandelbrot 引入“空隙”以刻画此现象. 对腐蚀形貌图像  $f$  而言, 用尺度为  $\varepsilon$  的盒子进行覆盖时, 设  $f$  所含总像素数为  $P$ , 则有

$$A(\varepsilon) = \frac{P^2 - N_\varepsilon^2}{P^2 + N_\varepsilon^2} \quad (5)$$

用来描述空隙特征. 针对不同的腐蚀形貌, 当腐蚀试样形貌的纹理细密时, 空隙特征  $A$  值小, 而腐蚀形貌纹理粗糙时  $A$  具有较大的值. 即  $A$  也可以用于对不同的腐蚀形态纹理的特征进行表征.

### 1.3 多重分形

具有自相似特征的集合可以用分形维数来进行表征, 但只适用于简单的情形. 对于各向异性的尺度特征, 就必须选用更合适的方法进行计算和表征, 即多重分形. 用上述 DBC 方法计算分形维数时的一个缺点是: 在统计非空

盒子的数目时没有考虑每个盒子中包含像素点的多少,即没有根据每个盒子中点的多少对盒子进行加权处理,忽略了像素点的密度分布问题,从而影响腐蚀形貌图像的分析 and 诊断. 为此,针对每个边长为  $s$  的盒子分配一个量

$$\mu_i = \frac{N_i}{P} \quad (6)$$

式中  $N_i$  是第  $i$  个盒子所包含的像素数. 腐蚀形貌图像多重分形特征的一种简单的近似算法<sup>[10]</sup>可以描述为,将  $M \times M$  大小的腐蚀形貌图像分割为  $s \times s$  的子块,令

$$\mu_\varepsilon(i, j) = \frac{n_\varepsilon(i, j)}{N_\varepsilon} \quad (7)$$

$$\chi(q, \varepsilon) = \sum_{i, j} [\mu_\varepsilon(i, j)]^q \approx \varepsilon^{\tau(q)} \quad (8)$$

式中  $n_\varepsilon(i, j)$  和  $N_\varepsilon$  与式 (3) 所定义的相同,  $\tau(q)$  为质量指数,  $q \in \mathbb{Z}$ , 则有

$$(q-1)D(q) = \tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg \chi(q, \varepsilon)}{\lg \varepsilon}, \quad q \neq 1 \quad (9)$$

$$D(1) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \lg(\mu_i)}{\lg \varepsilon} \quad (10)$$

对于各向同性的分形集合,所有的  $\mu_i$  值相等,此时  $D(q)$  不随着  $q$  的变化而变化,但是对于腐蚀形貌图像而言,  $D(q)$  一般会随着  $q$  的增加而减小. 注意到  $q=0$  时,由式 (9) 所得到的分形维数即是腐蚀形貌图像的  $FD$  值.

## 2 腐蚀形貌图像特征的选择

腐蚀形貌图像分析诊断系统由两部分组成:腐蚀形貌特征的提取和诊断系统的设计. 选取腐蚀形貌图像的分数维  $FD$ 、面积特征、空隙特征和多重分维  $D(q)$  对腐蚀形貌图像进行如下特征提取:

特征 1: 分数维  $FD$  作为一个特征,采用 DBC 方法,根据公式 (3) 求取.

特征 2: 腐蚀形貌图像的面积因子  $K$ ,根据公式 (4) 求取.

特征 3: 腐蚀形貌图像的缝隙特征  $A$ ,根据实验选取  $\varepsilon=5$ ,以  $A(5)$  作为一个特征,由公式 (5) 求取.

特征 4, 5, 6: 腐蚀形貌图像的多重分形维数,选取  $q=1, 2$  和  $3$  作为输入诊断系统的腐蚀形貌图像特征值,根据公式 (9), (10) 求取.

## 3 腐蚀形貌分析诊断系统的建立

采用基于欧式距离的模糊模式识别模型对腐蚀形貌图像进行分析诊断,给定论域  $U, X, Y$  是论域  $U$  的两个模糊子集,  $x_i, y_i$  分别为模糊集  $X, Y$  的第  $i$  个元素,则  $X, Y$  之间的欧式距离定义为

$$D(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (|x_i - y_i|)^2} \quad (11)$$

此定义适用于论域为有限集,  $n$  是论域中元素的个数.

对由  $n$  类经专家确诊过的标准样本集  $M_1, M_2, \dots, M_n$  组成的腐蚀形貌诊断系统,  $M_i (i=1, 2, \dots, n)$  类相应应有  $j$  个实海试片的特征值作为标准样本. 设  $M_{it}$  表示第  $i$  类的第  $t$  个实海试片的特征值,待识别实海试片为  $S, D(S, M_{it})$  表示  $S$  与任一标准样本  $M_{it}$  的欧式距离,则有

$$D(S, M_i) = \min_{1 \leq t \leq j} \{D(S, M_{it})\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

如果

$$D(S, M_k) = \min_{1 \leq i \leq n} \{D(S, M_i)\}$$

则待识试片  $S$  诊断为第  $k$  类腐蚀形貌特征<sup>[11]</sup>.

## 4 诊断系统的建立、运行与可靠性验证

### 4.1 特征值的计算

采用 AGFA 公司的 Studiostar 扫描仪将图像信息转化为图像处理时必须的数字信号,所用试样是榆林海域不同区带 8 年实海挂片的碳钢和低合金钢试片,试样表面腐蚀产物已经由各个实验网站按照标准程序去除;扫描前采用添加 0.2% 硫脲的 5% 盐酸溶液去除表面浮锈. 具体的采集参数、扫描腐蚀形貌图像和图像预处理方法见文献<sup>[11]</sup>. 对处理后的图像计算特征值,得到的结果于表 1 示出,表中 A、B 代表试样的正反两面.

### 4.2 诊断系统的运行

由于实海腐蚀试样两面腐蚀形貌有所不同,因此将正反两面扫描得到的试样腐蚀形貌图像全部输入系统作为知识库的标准样本. 采用基于欧式距离的模糊模式识别模型对碳钢、低合金钢在榆林海域不同区带挂片 8 年的腐蚀形貌图像共 20 幅进行了分析并建立了基于图像分形特征的腐蚀形貌特征分析诊断系统. 采用可视化编程语言 Visual Basic 6.0 建立了上述系统. 图 2 为诊断系统的诊断结果显示窗,水平和垂直滚动条内显示的是系统诊断出的相应样本的腐蚀形貌图像;窗体下部文本框内显示系统诊断得到的所输入的样本的腐蚀形貌特征的描述.

### 4.3 诊断系统的可靠性检验

表 1 所列试样腐蚀形态参见全国海水腐蚀网站“八五”数据汇编,用作诊断系统的标准样本. 为了验证系统的有效性,从中选取了 No.5 和 No.10 试样作为待识样本对系统进行检验. 系统输入为从扫描得到的实海腐蚀试片图像中提取的 6 个特征值;系统输出为试样的腐蚀形貌特征描述;待识样本 No.5(16Mn, 全浸区)和 No.10(10CrMoAl, 飞溅区)与标准样本的距离由表 2 示出. 结果表明:待识样本 No.5 与标准样本 No.4 最为接近,距离为 0.0517,故可将待识样本 No.5 与标准样本 No.4 判为同类,诊断结果为:均匀溃疡腐蚀,与实际表面形貌图像符合;待识样本 No.10 与标准样本 No.9 最为

表 1 腐蚀形貌图像的特征值

Table 1 Feature values of corrosion morphology images

Image No.	Exposed zone	Steel	Sample side	$FD$	$D(3)$	$D(2)$	$D(1)$	$K$	$A$
1	Immersion	20	A	2.9275	2.2541	2.4622	2.5912	2.2195	0.8958
2	Immersion	20	B	2.9567	2.2485	2.4708	2.6337	2.1857	0.8922
3	Immersion	08Al	A	2.9051	2.4180	2.4678	2.6317	2.2856	0.9023
4	Immersion	08Al	B	2.9234	2.4395	2.4684	2.6187	2.2369	0.8931
5	Immersion	16Mn	A	2.9271	2.4438	2.4719	2.5681	2.2315	0.8986
6	Immersion	16Mn	B	2.9324	2.5047	2.4737	2.6296	2.2110	0.8950
7	Tide	10CrMoAl	A	2.9407	2.4853	2.4731	2.5887	2.1814	0.8940
8	Tide	10CrMoAl	B	2.9245	2.4763	2.4700	2.6779	2.2312	0.8913
9	Splash	10CrMoAl	A	2.9419	2.4395	2.4774	2.6363	2.1793	0.8940
10	Splash	10CrMoAl	B	2.9410	2.4627	2.4749	2.6436	2.1824	0.8934
11	Immersion	10CrMoAl	A	2.9468	2.4397	2.4699	2.6236	2.2081	0.8907
12	Immersion	10CrMoAl	B	2.9299	2.4309	2.4686	2.6713	2.2259	0.8876
13	Tide	09CuPTiRE	A	2.9258	2.4309	2.4686	2.6713	2.2449	0.8932
14	Tide	09CuPTiRE	B	2.9303	2.4377	2.4682	2.6700	2.2321	0.8912
15	Splash	09CuPTiRE	A	2.9499	2.4336	2.4668	2.5732	2.1971	0.8362
16	Splash	09CuPTiRE	B	2.9533	2.4396	2.4743	2.5601	2.1490	0.8870
17	Immersion	09CuPTiRE	A	2.9365	2.4565	2.4729	2.6727	2.2045	0.8901
18	Immersion	09CuPTiRE	B	2.9481	2.4240	2.4724	2.6538	2.1788	0.8896
19	Immersion	10CrCuSiV	A	2.9219	2.4569	2.4725	2.5033	2.2281	0.8989
20	Immersion	10CrCuSiV	B	2.9384	2.4926	2.4747	2.6636	2.1976	0.8918

Note: A-Positive, B-Negative,  $FD$ -Fractal dimension,  $D$ -Generalized dimension,  $K$ -Area factor,  $A$ -Laucinarly character

表 2 待识样本与标准样本的欧式距离

Table 2 Euclidean distances ( $d_E$ ) between unknown samples ( $U_s$ ) No.5 and No. 10 and standard samples ( $S_s$ )

$U_s$	$S_s$	$d_E, 10^{-2}$	$U_s$	$S_s$	$d_E, 10^{-2}$
No.5(No.10)	No.1	19.17(21.9)	No.5(No.10)	No.12	10.48(6.21)
	No.2	21.32(21.51)		No.13	10.51(7.71)
	No.3	9.03(11.92)		No.14	10.24(6.29)
	No.4	(5.17(6.69)		No.15	7.58(9.72)
	No.6	8.92(5.35)		No.16	8.78(9.39)
	No.7	6.98(5.94)		No.17	10.95(3.75)
	No.8	11.48(6.36)		No.18	10.5(4.10)
	No.9	8.75(2.46)		No.19	6.64(14.90)
	No.11	6.40(4.07)		No.20	11.33(3.92)

接近, 距离为 0.0246, 故可将待识样本 No.10 与标准样本 No.9 判为同类, 诊断结果为: 布满蚀点及蚀坑且局部严重蚀穿, 与实际表面形貌也完全相符, 由此说明该系统的诊断是可靠的。

#### 4.4 与灰度分布方法的比较

本文作者曾建立了一种基于灰度值分布的腐蚀形貌图像诊断分析系统<sup>[11]</sup>. 考虑本文中提取的特征 4, 即  $q=1$  时的多重分维 (见 10 式),  $\mu_i$  (见 6 式) 相当于图像灰度

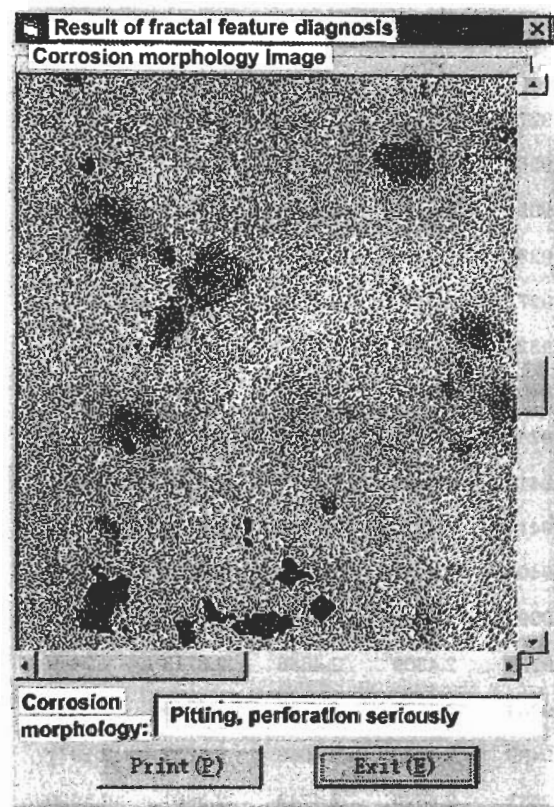


图2 No.10 试样诊断系统显示的诊断结果

Fig.2 Result given by diagnosing system of No.10 sample

值分布的概率密度, 即  $D(1)$  反映了腐蚀形貌图像的灰度值分布. 虽然灰度值分布的方法可以对金属材料的腐蚀形貌作出判断, 但本文提取的腐蚀形貌图像的特征值考虑了更多的因素, 因而由分形特征判断得到的诊断结果更准确. 以 No.10 试样为例, 用灰度值分布方法诊断的结果显示为试样局部有蚀穿, 而由分形特征值方法诊断得到的结果为试样严重局部蚀穿, 与实际情况更为符合.

## 5 结论

(1) 从腐蚀形貌图像中提取的分形特征可以用于腐蚀形貌图像分析诊断并具有较好的诊断结果.

(2) 与灰度值分布方法建立的腐蚀形貌图像诊断系统相比, 本文从腐蚀形貌图像中提取了更多的特征值, 考虑了多种因素, 因而诊断结果也更准确.

## 参考文献

- [1] Zhang K H, Wang J R, Zhang Q H. *Opto-Electronic Eng*, 2001; 28: 52  
(张坤华, 王敬儒, 张启衡. 光电工程, 2001; 28: 52)
- [2] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. *Nature*, 1984; 308: 721
- [3] Costa J M, Sagues F, Vilarrasa M. *Corrs Sci*, 1991; 32: 665
- [4] Chen J, Long Q Y, Chen J Z, Long Q W. *J Chin Soc Corros Protect*, 1991; 4: 344  
(陈军, 龙起易, 陈继志, 龙期威. 中国腐蚀与防护学报, 1991; 4: 344)
- [5] Jiang X G, Chu W Y, Xiao J M. *J Chin Soc Corros Protect*, 1995; 15: 57  
(蒋兴钢, 褚武扬, 肖纪美. 中国腐蚀与防护学报, 1995; 15: 57)
- [6] Dong S H, Lv Y M. *J Chin Soc Corros Protect*, 2001; 2: 106  
(董绍华, 吕英民. 中国腐蚀与防护学报, 2001; 21: 106)
- [7] Dong L K. *Theory and Application of Fractal*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1990: 174  
(董连科. 分形理论及其应用, 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1990: 174)
- [8] Niruparm S, Chaudhuri B B. *Sign Process*, 1995; 42: 181
- [9] Li K H, Liu Z K, Lin F. *J Remot Sens*, 2001; 5: 353  
(李厚强, 刘政凯, 林峰. 遥感学报, 1995, 5: 353)
- [10] Chaudhuri B, Sarkar N. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intellig*, 1995; 17: 72
- [11] Wang S Y, Kong D Y, Song S Z. *Acta Metall Sin*, 2001; 37: 517  
(王守琰, 孔德英, 宋诗哲. 金属学报, 2001; 37: 517)