

# 评价机械加工表面形貌的小波变换方法\*

王安良

(北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系 北京 100083)

杨春信

(中科院力学所非线性力学国家重点实验室)

**摘要:**提出了用小波变换计算粗糙表面分形维数的新方法,并基于 Weierstrass - Mandelbrot 函数(W - M 函数 Majumdar - Bhushan 函数(M - B 函数)对该方法进行了验证,结果表明该方法具有很高的计算精度。应用小波变换方法对核态池沸腾试验板表面形貌的分形特征进行了评价,包括铜和不锈钢材料,轧制、砂纸打磨和表面机械抛光等 3 种加工方法生成 5 个粗糙度级别的试验板,研究结果表明该方法能有效评价表面形貌的分形特征。

**叙词:**小波变换 表面形貌 分形维数

**中图分类号:**TH161.14

## 0 前言

近年来,对表面形貌的分形特征及其描述引起了广泛的兴趣。分形理论的引入为解决难以处理和准确表达的复杂表面形貌问题提供了新的途径。实际上,表面形貌具有的随机性和复杂性,主要是指表面粗糙度的特征<sup>[1]</sup>。表面粗糙度的高度变化是一非平稳随机过程,并具有统计自仿射的分形特征,因此人们开始用分形参数对此进行有效准确地描述<sup>[2~11]</sup>。已有的研究表明,准确地计算表面形貌的分形维数非常关键,而不同的方法给出差别很大的计算结果,这对进一步研究造成了混乱。

小波变换是自 1986 年以来由于 Meyer, Mallat 及 Daubechies 等的奠基工作而迅速发展起来的一种数学工具,它在信号分析、图像处理、数据分析和故障诊断等方面已得到广泛的应用,并显示出了小波的能力<sup>[12~14]</sup>。对表面形貌的二维轮廓曲线和三维曲面的分析,可以看作是一维和三维信号处理,陈庆虎和李柱等人用小波变换方法提取二维轮廓粗糙度评定基准线和三维表面粗糙度评定基准面已经获得理想的效果<sup>[16,17]</sup>,同时他们对表面的沟槽、凹坑、凸台和刻痕等奇异特征用小波变换进行了有效的提取<sup>[18]</sup>。在频率域上,对表面形貌进行分形分析,常规的做法是采用功率谱法<sup>[3,4,8]</sup>。小波变换作为一新的滤波工具,在分析和提取信号时频局部特征所

具有的非常能力,提示我们它在分析具有分形特征的非平稳过程将会比 Fourier 变换优越。

在核态池沸腾过程中,加热面的微观几何特性是影响传热的重要因素。在统计意义下,如何定量描述活化核心分布是研究池沸腾的关键问题之一。有的学者研究认为加热面的活化核心是符合分形分布的<sup>[18,19]</sup>,但其同表面粗糙度的分形特征有怎样的联系,如何定量准确描述?

本文研究提出了用小波变换提取表面形貌分形维数的新方法,进而对核态池沸腾试验板表面粗糙度曲线的分形维数进行了分析计算,结果表明小波变换方法能有效评价机械加工表面形貌的分形特征。

## 1 小波变换方法

### 1.1 离散小波变换的构造原理

**定义 1** 如果函数族 $\{ \varphi_{k,n}(x) \}$ 是  $L^2(\mathbf{R})$  (实域的内积空间) 中的一个规范正交基,且

$$\varphi_{k,n}(x) = 2^{k/2} (2^k x - n) \quad (1)$$

式中  $k, n \in \mathbf{Z}$  (整数)

则称函数  $\varphi_{k,n}(x)$  为一个二进正交小波。

**定义 2** 设  $W_k$  是集合 $\{ \varphi_{k,n}(x) \}$ 的线性张成在  $L^2(\mathbf{R})$  中的闭包。 $L^2(\mathbf{R})$  能分解成  $W_k$  的直和(用符号“ $\oplus$ ”表示),相应的子空间为

$$V_k = \dots \oplus W_{k-2} \oplus W_{k-1} \quad k \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

对任意函数  $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$  有唯一分解

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g_k(x) \quad (3)$$

式中  $g_k(x) \in W_k$

\* 国家自然科学基金(59706007)、中科院力学所非线性力学国家重点实验室资助项目。20000829 收到初稿,20010218 收到修改稿

令  $f_k(x) \in V_k$ , 则

$$f_k(x) = \sum_{j=k-1} g_j(x) \quad (4)$$

并且

$$f_k(x) = g_{k-1}(x) + f_{k-1}(x) \quad (5)$$

**定义 3** 设  $\phi_{k,n}(x)$  是空间  $V_k$  下的二进正交

小波, 它的对偶形式为  $\phi_{k,n}(x)$ 。存在唯一对应的 4 个小波函数系数序列  $\{p_n\}, \{q_n\}, \{a_n\}, \{b_n\}$  ( $l^2$  (指标为整数的平方可和序列的集合) 使

$$\begin{cases} \phi_{k,n}(x) = \sum_n p_n \phi(2^k x - n) \\ \phi_{k,n}(x) = \sum_n q_n \phi(2^k x - n) \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi_{k+1,n}(x) = \sum_n [a_{n-2n} \phi(2^k x - n) + b_{n-2n} \phi(2^k x - n)] \quad (7)$$

称式(6)为  $\phi_{k,n}(x)$  和  $\phi_{k,n}(x)$  的两尺度关系, 式(7)为  $\phi_{k+1,n}(x)$  的分解,  $\{p_n\}, \{q_n\}$  称为再构造序列,  $\{a_n\}, \{b_n\}$  为分解序列。若令

$$\begin{cases} c_{k,n} = \langle f_k, \phi_{k,n} \rangle \\ d_{k,n} = \langle g_k, \phi_{k,n} \rangle \end{cases} \quad (8)$$

则有

$$\begin{cases} f_k(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{k,n} \phi_{k,n}(2^k x - n) \\ g_k(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{k,n} \phi_{k,n}(2^k x - n) \end{cases} \quad (9)$$

由  $\{c_{k+1,n}\}$  求  $\{c_{k,n}\}$  和  $\{d_{k,n}\}$  称为二进小波分解变换; 由  $\{c_{k,n}\}$  和  $\{d_{k,n}\}$  求  $\{c_{k+1,n}\}$  称为二进小波重构变换,  $\{c_{k,n}\}$  与  $\{d_{k,n}\}$  分别称作函数  $f(x)$  的  $k$  尺度逼近谱和小波谱<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} c_{k,n} = \sum_m a_{m-2n} c_{k+1,m} \\ d_{k,n} = \sum_m b_{m-2n} c_{k+1,m} \end{cases} \quad (10)$$

$$c_{k+1,n} = \sum_m [p_{n-2m} c_{k,m} + q_{n-2m} d_{k,m}] \quad (11)$$

本文采用道贝奇斯(Daubechies, 1988) 构造的一簇正交小波基<sup>[12,13]</sup>。该小波基是有限紧支撑的, 且具有正交性, 构造的小波  $\phi_{k,n}(x)$  具有  $r$  阶零点, 支撑区间为  $[0, 2r-1]$ 。对应的 4 个小波函数系数序列  $\{p_n\}, \{q_n\}, \{a_n\}, \{b_n\}$  有如下关系

$$\begin{cases} \{p_n\} = \{a_n\} \\ \{q_n\} = \{b_n\} \\ b_n = (-1)^{n+1} a_{-n+M} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $n$ ——整数, 且  $0 \leq n < M, M = 2r$

本文中  $f(x)$  为表面粗糙度曲线信号, 该信号的有限二进制离散形式是

$$\left\{ f_N \left( \frac{n}{2^N} \right) \right\}$$

式中  $N, n$ ——正整数, 且  $1 \leq n < 2^N$

选择  $r = 2, 3, \dots, 10$ , 采用 Mallat 算法 (或称塔式算法) 对该信号进行分解和重构<sup>[20]</sup>。该离散信号的道贝奇斯小波分解和重构变换分别为

$$\begin{cases} c_{k,n/2} = \sum_{m=-M+n}^n a_{m-n} c_{k+1,m} \\ d_{k,n/2} = \sum_{m=-M+n}^n b_{m-n} c_{k+1,m} \end{cases} \quad (13)$$

$$c_{k+1,n} = \sum_{m=n}^{n+M} [a_{n-m} c_{k,n/2} + b_{n-m} d_{k,n/2}] \quad (14)$$

式(13)和(14)中  $k = N-1, N-2, \dots, 1; 1 \leq n < 2^k; M = 2r$ 。

对于初始逼近谱  $\{c_{N,n}\}$ , 通常有两种解法: 直接选取法和取样函数法。

取样函数法能精确求解  $\{c_{N,n}\}$ , 根据取样定理<sup>[12,13]</sup>, 对于函数二进制离散取样, 实际上是假定了函数  $f(x)$  在支撑区间  $[-2^N, 2^N]$  上有

$$f(x) = \sum_{n=1}^{2^N} f_N \left( \frac{n}{2^N} \right) \frac{\sin(2^N x - n)}{(2^N x - n)} \quad (15)$$

简单推导有

$$c_{N,n} = \sum_{i=1}^{2^N} f_N \left( \frac{i}{2^N} \right) f_{iv}(i-n) \quad (16)$$

式中  $i \in \mathbf{Z}$ , 且

$$f_{iv}(i-n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin-t}{t} \phi_{N,n}(t+i-n) dt \quad (17)$$

式(17)可用 Romberg 积分求解<sup>[21]</sup>。

## 1.2 求解分形维数

计算表面粗糙度的分形维数已有许多方法, 应用这些方法求解表面形貌的分形维数, 已有文章论述<sup>[5,7]</sup>, 这里只重点介绍用小波变换计算分形维数。

**定理**  $\phi_{k,n}(x)$  是道贝奇斯小波,  $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$  是有界和连续的,  $f(x) \in C$  (指数为  $\alpha$  的 Holder 连接复数空间) 的充要条件是  $\{c_{N,n}\}$  的小波变换  $d_{k,n}$  满足不等式<sup>[13]</sup>

$$|d_{k,n}| \leq E \times 2^{-k(\alpha+1/2)} \quad (18)$$

式中  $E$ ——常数

——Lipschitz 指数, 且  $0 < \alpha < 1$ , 其定义参见文献<sup>[13]</sup>

则函数  $f(x)$  的分形维数为

$$D = 2 - \alpha \quad (19)$$

若令  $E_{\min} \leq E$ , 并对  $d_{k,n}$  取一范数, 式(18)可推导为

$$\frac{\sum_{n=1}^{2^k} |d_{k,n}|}{2^k} = E_{\min} 2^{-k(+1/2)} \quad (20)$$

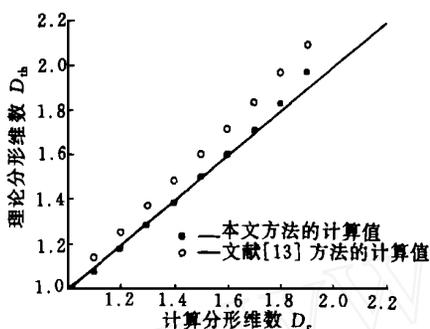
记

$$d_k^* = \frac{\sum_{n=1}^{2^k} |d_{k,n}|}{2^k} \quad (21)$$

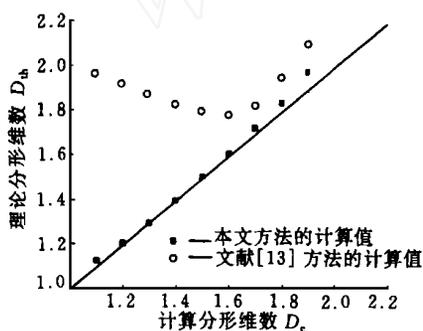
对式(20)两边取对数,得

$$\log_2 d_k^* = \log_2 E_{\min} - k(+1/2) \quad (22)$$

用最小二乘法求解式(22)得到  $E_{\min}$  和  $D_c$  值。该计算分形维数的方法比文献[13]介绍的方法计算精度和数据的一致性要高。文献[13]中  $d_k^*$  取每级小波谱模的最大值。两种方法的计算结果比较如图1所示。



(a) W-M



(b) M-B

图1 W-M与M-B函数分形维数计算值  $D_c$  与理论值  $D_{th}$  比较

### 1.3 计算方法验证

Weierstrass - Mandelbrot 函数(简称 W - M 函数)具有连续性、处处不可微性和自仿射性,广泛用于分形几何的研究<sup>[22]</sup>,形式如下

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos r^n x)}{r^{(2-D)n}} \quad (23)$$

式中  $D$  ——分形维数

$r$  ——本文取值为 1.5 的常系数

Majumdar 和 Bhushan 对 W - M 函数作了修正,用于模拟机械加工表面形貌的分形特征<sup>[3]</sup>,该函数(简称 M - B 函数)形式如下

$$f(x) = G^{(D-1)} \frac{(\cos r^n x)}{r^{(2-D)n}} \quad (24)$$

式中  $G$  ——尺度系数

$n_l$  ——与截止频率相关的量

本文选取不同的  $D$  值,基于这两种函数对小波变换方法进行了验证。计算时,对每个函数取了  $2^{13} = 8192$  个离散采样点。

因 W - M 函数采样点的初值同末值差别太大,为了减少边界失真效应,计算时采用了周期延拓的方法,这样计算分形维数时舍去了最高级的小波谱( $d_1^*$ );构成 M - B 函数时,取  $G = 9.8 \times 10^{11}$ ,  $n_l = 14$ 。同时为了消除边界效应,计算分形维数时不考虑最高两级的小波谱( $d_1^*$  和  $d_2^*$ )。

从图1计算结果可以看出,本文提出的小波变换方法具有很高的精度,计算误差在 4% 以内,在分形维数为 1.3 ~ 1.6 的范围内,计算精度甚至达到 1% 以下。同时小波谱的一范数具有很好的线性相关性。而文献[13]提供的方法对 W - M 函数计算的分形维数都偏大,对 M - B 函数差别更大。

## 2 表面粗糙度曲线测量

### 2.1 测量仪器及试验板加工方法

已有的研究表明,在核态池沸腾过程中表面粗糙度对沸腾有直接的影响。且已有研究者在进行核态池沸腾试验之前,测量表面轮廓作为对表面粗糙度的定性表征。但这些研究者尚未意识到表面可能具有的分形特征。将表面形貌的分形特征与核沸腾的传热机制相关联是本文作者研究的最终目的,而对试验板表面的微观几何特性进行测量、并准确地计算其分形特征参数是开展进一步工作的关键一步。因此,首先测量了试验板表面的粗糙度轮廓曲线。

测量所用仪器是中科院北京科学仪器研究中心研制的 SRAT-1 型表面粗糙度自动测量分析仪。该仪器是电学触针式的,测头直径为 2  $\mu\text{m}$ ,测量高度分辨率最小为 0.001  $\mu\text{m}$ ,采样间隔最小为 1.25  $\mu\text{m}$ 。

试验板为圆形不锈钢 304 和铜 H62 薄板,直径为 52 mm,不锈钢板厚 0.5 mm,铜板厚 1 mm。原材料直接选购市场上常见的轧制板材,车削加工成毛坯。每种材料分别用砂纸打磨和表面机械抛光的方法加工成为 4 种粗糙度,并选择一块毛坯作为参考,共 5 种粗糙度等级。试验板加工过程如下。

(1) 对各试验板标号,并在被加工测量表面的背面做 4 条直径线作为标记线:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  线,相邻

线夹角为  $45^\circ$ 。为了同以后沸腾试验表面温度信号作比较,表面粗糙度轮廓曲线应沿标记线位置取样, $a$  和  $c$  线对圆心对称取样, $b$  和  $d$  线距边沿  $1/4$  处为测量起始点(如图 2 所示)。

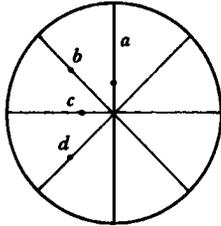


图 2 测量位置标记  
起始点

(2) 采用北京东新研磨工具有限公司生产的熊猫牌耐水砂纸 600 # 和 240 # 沿着一种方向手工进行打磨,加工后的表面为平行纹理。

(3) 采用绿色氧化铬和棕色氧化铁抛光膏对毛坯直接进行表面机械抛光。抛光轮转速为  $2\ 800\ \text{r/min}$ 。先用直径为  $150\ \text{mm}$  抛光轮对毛坯粗抛,然后用直径为  $300\ \text{mm}$  抛光轮精抛,抛光时间由人工控制。

(4) 测量粗糙度前,要对试验板表面用汽油或酒精清洗干净。

## 2.2 测量结果

首先在每一块试验板上随机选取 3 个位置,按照国家标准规定的取样长度测量传统的表面粗糙度参数,计算平均值如表所示( $R_q$  为取样长度内轮廓高度偏距的方均根值)。沿  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  标记线位置测量表面轮廓曲线,测量长度为  $8\ \text{mm}$ ,采用间隔为  $1.25\ \mu\text{m}$ ,保存数据文件转换成“dat”格式。

表 表面粗糙度测量结果

铜 H62		不锈钢 304		加工说明
序号	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	
01	0.038	0.049	0.045	氧化铁抛光
02	0.036	0.049	0.056	膏抛光
1	0.013	0.019	0.023	氧化铬抛光
2	0.014	0.021	0.018	膏抛光
3	0.431	0.563	0.332	240 # 耐水砂
4	0.457	0.610	0.377	纸打磨
5	0.185	0.239	0.192	600 # 耐水砂
6	0.243	0.322	0.131	纸打磨
7	0.317	0.437	0.115	轧制毛坯
8	0.216	0.286	0.082	

## 3 实例分析及其结果

对不锈钢和铜两种材料,3 种加工方法(轧制、

表面机械抛光和砂纸打磨)产生的 5 个粗糙度等级,20 块试验板所测量的 80 多条粗糙度轮廓曲线,采用小波变换方法计算了分形维数。每条曲线截取  $2^{12} = 4\ 096$  个测量点,选择二阶 Daubechies 基本小波求得初始逼近谱后,对其进行 11 级二进制小波分解。然后计算每级小波谱的一范数,并用最小二乘法得到分形维数。限于篇幅,对不锈钢和铜每种加工方法各选择 1 条曲线举例说明计算结果,如图 3 ~ 5 所示(图中  $a$  为测量曲线,图中  $b$  为小波变换计算的分形维数)。

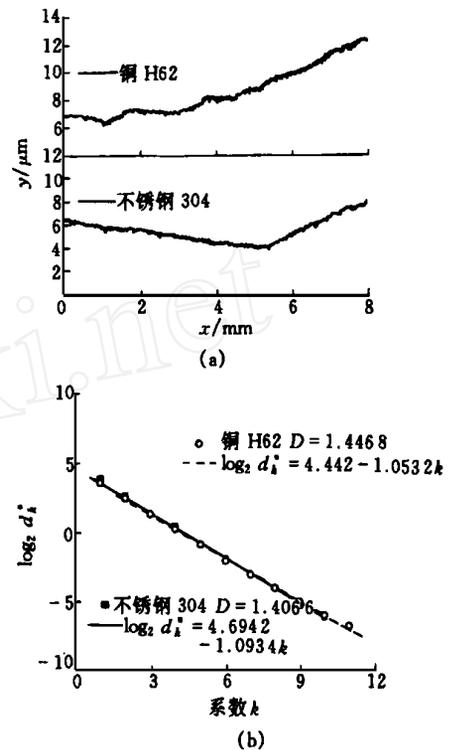


图 3 抛光表面粗糙度曲线及其分形维数

计算结果表明

(1) 小波变换能准确计算机加工表面粗糙度轮廓曲线的分形维数,小波谱的一范数具有较好的线性度。

(2) 随着表面宏观粗糙度水平的提高,无论是不锈钢还是铜材料,表面粗糙度轮廓曲线的分形维数有减小的趋势。例如,对不锈钢表面  $R_q$  值从  $0.377\ \mu\text{m}$  减小到  $0.018\ \mu\text{m}$ ,其分形维数  $D$  也从  $1.506\ 0$  减小到  $1.323\ 1$ 。这同费斌等人在  $R_q$  为  $0.17 \sim 0.28\ \mu\text{m}$  的研究结果是一致的<sup>[8]</sup>,但同李成贵等人在  $R_a$  为  $0.53 \sim 4.47\ \mu\text{m}$  范围的研究结论正好相反<sup>[9]</sup>,这说明在不同的粗糙度范围内,分形维数与粗糙度具有不同关联形式。

(3) 分析单块试验板的计算结果,发现不同标记位置轮廓曲线的分形维数存在较大的差别,而且采用机械抛光的表面比轧制板毛坯的表面分形维数差

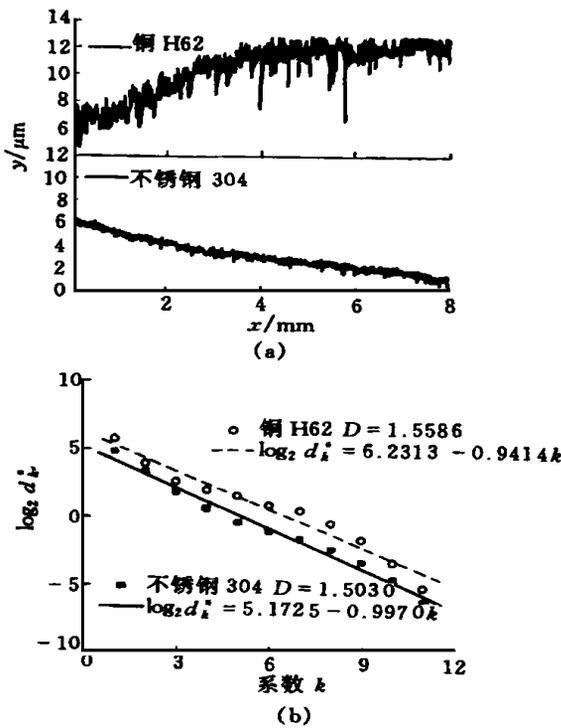


图4 砂纸打磨表面粗糙度曲线及其分形维数

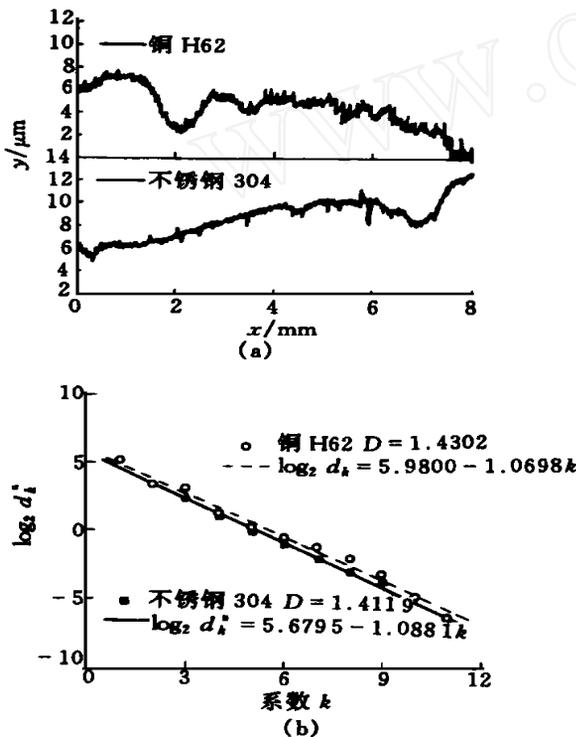


图5 轧制板表面粗糙度曲线及其分形维数

别要大,砂纸打磨的表面分形维数的差别最明显。同一块试验板表面轮廓曲线不同位置有不同的分形维数,这体现了用一般机械加工方法得到的表面形貌是各向异性的,仅用一个分形维数不足以准确描述加工表面的微观几何特征。用小波变换研究表面各向异性的形成机理是本文作者的进一步工作。

### 4 结论

(1)本文作者提出了小波变换计算分形维数的新方法,通过计算具有确定分形维数的W-M函数和M-B函数验证了该方法具有很高的计算精度。

(2)用小波变换方法评价机械加工表面形貌的分形特征具有很好的准确性。

对核态池沸腾试验板表面轮廓曲线的评价结果表明,砂纸打磨和表面机械抛光方法形成的表面是各向异性的。同一块加工表面上,不同方向的分形维数一般也不相同。进一步的研究工作包括表面各向异性的形成机理,粗糙度的分形特征与传统粗糙度参数以及表面活化核心分布之间的关系等。

### 参 考 文 献

- 1 Sayles R S, Thoma T R. Surface topography as a non-stationary random process. Nature, 1978, 271: 431~434
- 2 Gagnepain J J, Roques-carmes C. Fractal approach to two-dimensional and three-dimensional surface roughness. Wear, 1986, 109: 119~126
- 3 Majumdar A, Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces. ASME J. of Tribology, 1990, 112(1): 205~216
- 4 Ganti S, Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces. Wear, 1995, 180: 17~34
- 5 Hasegawa M, Liu J C, Okuda K, et al. Calculation of the a fractal dimensions of machined surface profiles. Wear, 1996, 192: 40~45
- 6 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究. 摩擦学学报, 1997, 7(1): 73~80
- 7 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 354~362
- 8 费斌, 王海容, 蒋庄德. 机械加工表面分形特性的研究. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 83~86
- 9 李成贵, 张国雄, 袁长良. 分形维数与表面粗糙度参数的关系. 工具技术, 1997, 31(12): 36~38
- 10 李成贵, 董申, 张国雄. 表面粗糙度评定参数的分形表征. 宇航计测技术, 1998, 18(4): 33~40
- 11 汪慰军, 吴昭同, 陈历喜, 等. 二维表面粗糙度的分形模拟与分析. 机械科学与技术, 1997, 16(6): 1059~1062
- 12 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998
- 13 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1999
- 14 朱治军, 李后强. 用小波分析进行分形反演的理论研究. 非线性科学的理论、方法和应用. 北京: 科学出版社, 1997

(下转第74页)

- 理( )、( ) . 金属学报,2001,37(2) ◇217~224
- 2 贾昌申,殷咸青,贾涛,等. 纵向磁场中的焊接电弧行为. 西安交通大学学报,1994,28(4) ◇7~13
- 3 Villafuerte J C, Kerr H W. Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds, Welding Journal,1990,69(1) ◇1s~13s
- 4 贾昌申,罗键,贾涛,等. 外加间歇交变纵向磁场对 GTAW 焊缝气孔的抑制. 航空工艺技术,1999,(3) ◇26~29
- 5 殷咸青,罗键,李海刚,等. 外加间歇交变纵向磁场对 GTAW 焊缝组织及其机械强度的影响. 机械强度,1999,21(4) ◇268~271
- 6 张榴晨,徐松. 有限元电磁场计算中的应用. 北京 ◇中国铁道出版社,1996

## DESIGN FOR EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF LD10CS IN ELECTROMAGNETIC STIRRING WELDING BY FEM

Luo Jian

(Shanghai Jiaotong University)

**Abstract:** The external longitudinal magnetic field of LD10CS aluminum alloy in EMS welding is calculated by FEM. The effects of the many factors (e. g. iron - core medium, mounting position etc) of the external magnetic field in EMS welding are discussed. On the basis of uniformity rule of external magnetic field, the single axisymmetrical coil is designed.

**Key words:** EMS FEM Magnetic calculation

**作者简介:** 罗键,男,1971 年出生,博士,中国博士后科研基金资助项目获得者,上海交通大学材料科学与工程学院焊接研究所博士后。主要从事磁控电弧焊接、摩擦焊接、高效率熔化焊接等焊接方法的基本原理、工艺设备、过程控制、专家系统以及数值模拟方面的研究工作。发表论文 30 余篇。

(上接第 69 页)

- 15 陈庆虎,李柱. 表面粗糙度提取的小波频谱法. 机械工程学报,1999(3) ◇41~43
- 16 陈庆虎,李柱. 表面粗糙度评定的小波基准线. 计量学报,1998(10) ◇254~257
- 17 陈庆虎,周轶尘. 表面奇异特征的小波提取. 武汉科技大学学报,1999,23(4) ◇343~346
- 18 Yang Chunxin. Reexamination of Correlations for Nucleate Site Distribution on Boiling Surface by Fractal Theory. Journal of Thermal Science,1997,6(2) ◇128~131
- 19 赵晓彤,杨善让,徐志明,等. 加热面活性汽化核心密度的分形描述. 工程热物理学报,1997,18(4) ◇469~473
- 20 徐铭陶,秦树人,陈志奎,等. 实施一维 Mallat 算法的几个问题. 重庆大学学报(自然科学版),1997(1) ◇7~13
- 21 程正兴,李水根. 数值逼近与常微分方程数值解. 西安 ◇西安交通大学出版社,2000

## APPLICATION OF WAVELETS TRANSFORM TO EVALUATE THE MECHANICAL SURFACE TOPOGRAPHY

Wang Anliang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Yang Chunxin

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract:** A new method of calculation the fractal dimensions of the rough surface by wavelets transform is proposed. Based on the Weierstrass - Mandelbrot function and Majumdar - Bhushan function with known fractal dimension, it is validated that this method can calculate quite accurately the fractal dimension. The fractal characterizations of the test surfaces for pool nuclear boiling experiment are evaluated by wavelets transform, the test panels are machined 5 scales roughness by rolling, sandpaper polishing and machine polishing in copper and stainless steel. The calculation results indicate the wavelets transform method is availability.

**Key words:** Wavelets transform Surface topography

Fractal dimension

**作者简介:** 王安良,男,1974 年出生,博士研究生。研究方向为表面形貌对沸腾和凝结的影响,非线性理论方法在相变换热中的应用等。