

# 沸腾表面凹坑的尺度分布特征

王安良<sup>1</sup>,吴玉庭<sup>2</sup>,杨春信<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系,北京 100083; 2. 清华大学 工程力学系,北京 100084)

**摘 要:**在沸腾表面上储气(或汽)凹坑是形成活化核心的关键因素。文中从类似 Sierpinski 地毯的经典分形表面出发,成功构造了凹坑以不同尺度分布的表面。研究结果表明凹坑的尺度分布维数与表面形貌的分形维数是两个含义不同的概念,机械表面凹坑(或凸点)的尺度分布特征符合分形理论。分析活化核心的测量结果,表明活化核心的尺度分布同表面上凹坑的尺度分布一样具有分形特征。

**关 键 词:**池沸腾;凹坑;活化核心;分形维数

中图分类号:TK124 文献标识码:A

## 1 引 言

在核态池沸腾过程中,气泡主要在过热表面离散分布的活化核心位置产生,准确描述活化核心的尺度和空间分布特征对计算沸腾换热具有重要价值。直接测量沸腾表面的活化核心分布比较困难,从 20 世纪 60 年代到现在,只有为数不多的学者进行了实验测量,并且对不同的实验表面和沸腾工质测量结果差别很大<sup>[1~16]</sup>。由于表面上储气(或汽)凹坑是形成活化核心的重要因素,人们试图建立表面凹坑与活化核心之间的关系,以表征活化核心的密度分布<sup>[12,16~17]</sup>。

大量的研究表明机械加工表面具有自相似或自仿射的分形特征<sup>[18]</sup>,并且在接触热阻<sup>[19~21]</sup>、摩擦与磨损等工程领域得到广泛应用<sup>[19~21]</sup>。人们通常关注的是表面粗糙度轮廓曲线和曲面的分形特征,其拓扑空间维数分别为二维和三维。根据不同的物理含义,分形维数的典型定义有: Hausdorff 维数、相似维数、容量维数和谱维数等<sup>[22]</sup>。在描述轮廓线长度(或表面积)与测量尺度关系时,这些分形维数理论上是等价的。实际上,表面轮廓曲线或曲面的分形维数是对不规则几何图形长度或面积的测量,并不能准确地描述表面上凹坑尺度分布特征。

机械加工表面上的凹坑,放大观察类似于月球

表面上的月坑,其大小分布并没有特征尺度。用凹坑直径  $r$  作为粗视化参数,直径大于  $r$  的凹坑的数目具有统计相似的特征,称为尺度分布维数。凹坑的尺度分布维数与几何分形维数是两个不同的数学概念,具有不同的物理含义。本文试图说明它们之间的区别和联系,这是建立表面凹坑与活化核心之间关系并描述表面活化核心尺度与空间分布特征的基础。我们首先从典型的几何相似表面分析。

## 2 类似 Sierpinski 地毯的表面

分形几何的一个著名例子是 Sierpinski 地毯(如图 1 所示)<sup>[22]</sup>,其构造方法是:把一正方形平面  $3 \times 3$  等分,去掉中间的小正方形,然后对其余 8 个小正方形,每个同样  $3 \times 3$  等分,也去掉中间的小正方形,重

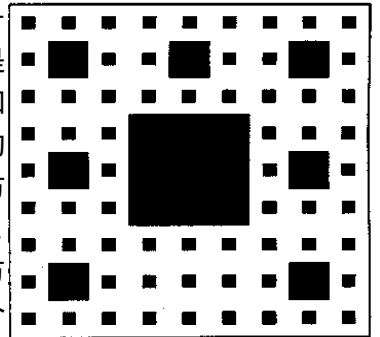


图 1 Sierpinski 地毯

复操作可以到无穷,代与代之间的缩小比例为  $1/3$ 。以第  $n$  代小正方形作为测量的“尺子”,经过  $n$  代操作后测量表面剩余的面积(用测度  $N_{a1}$  表示),则测度  $N_{a1}$  与尺度  $r$  具有严格的相似关系,相似维数为:

$$D_{a1} = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1.8928 \quad (1)$$

如果上述构造过程在立方体的上表面进行,每一代正方形表面  $3 \times 3$  等分后,在中间小正方形的位置挖一个同等边长的正方体凹坑,经过第一代构造共生成 13 个小正方形。一种方案是每次在上一代生成的所有小正方形表面挖坑,包括凹坑的内表面,生成的表面称为“坑里有坑”表面。重复下去,构造的

收稿日期:2002 - 08 - 02; 修订日期:2003 - 04 - 15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50176003)

作者简介:王安良(1974 - ),男,山西新绛人,北京航空航天大学博士研究生。

图形也具有严格的几何自相似性,总表面积的测度用  $N_{a2}$  表示,其相似维数为:

$$D_{a2} = \frac{\ln 13}{\ln 3} = 2.3347 \quad (2)$$

另一方案是只在正方体的上表面挖坑,即凹坑的内表面不再挖坑,生成的表面称为“坑里无坑”表面,从表面上看就是 Sierpinski

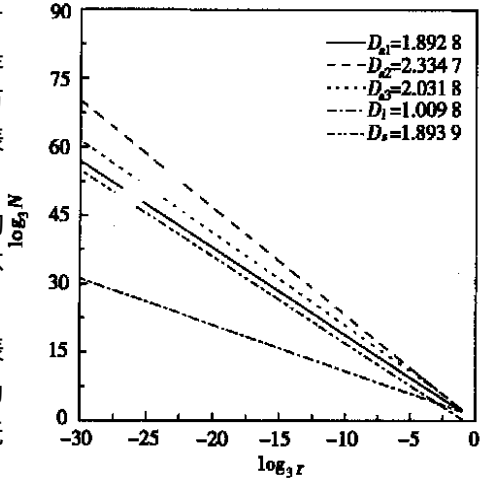


图 2 Sierpinski 表面的分形特征

地毯。以每一代的小正方形作为测量尺度,表面的总面积用测度  $N_{a3}$  表示。

在“坑里无坑”地面上选择适当位置,轮廓线具有类似于 Koch 曲线的自相似性,轮廓线的长度用测度  $N_l$  表示。以小正方形边长  $r$  作为粗视化的尺度,测量“坑里无坑”表面上边长大于  $r$  的凹坑的个数,并用测度  $N_s$  表示。本文称测度  $N_s$  与尺度  $r$  的关系为凹坑的尺度分布特征。

上述各测度具有不同的物理涵义,  $N_{a1} \sim N_{a3}$  是对表面积的测量,  $N_l$  表示轮廓线的长度,而  $N_s$  是对凹坑密度的描述。各测度与凹坑尺度在双对数坐标图上的关系如图 2 所示。除了  $N_{a1}$  和  $N_{a3}$  与尺度  $r$  的关系是严格自相似以外,其余测度的分形维数与尺度  $r$  有关,构造过程中每一代各测度值如表 1 所示。

表 1 表面形貌尺度与测度的关系

| 尺度 $r$          | 表面上<br>剩余面<br>积 $N_{a1}$ | 总表面积<br>(坑里有<br>坑) $N_{a2}$ | 总表面积<br>(坑里无坑)<br>$N_{a3}$    | 轮廓曲线<br>长度 $N_l$        | 边长大于 $r$<br>的凹坑数<br>$N_s$ |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| $\frac{1}{3}$   | 8                        | 13                          | $5 \times 9 - 4 \times 8$     | $3^2 \cdot 2^2$         | $\sum_{i=1}^1 8^{i-1}$    |
| $\frac{1}{3^2}$ | $8^2$                    | $13^2$                      | $5 \times 9^2 - 4 \times 8^2$ | $3^3 \cdot 2^3$         | $\sum_{i=1}^2 8^{i-1}$    |
| $\frac{1}{3^3}$ | $8^3$                    | $13^3$                      | $5 \times 9^3 - 4 \times 8^3$ | $3^4 \cdot 2^4$         | $\sum_{i=1}^3 8^{i-1}$    |
| ...             | ...                      | ...                         | ...                           | ...                     | ...                       |
| $\frac{1}{3^n}$ | $8^n$                    | $13^n$                      | $5 \times 9^n - 4 \times 8^n$ | $3^{n+1} \cdot 2^{n+1}$ | $\sum_{i=1}^n 8^{i-1}$    |

### 3 构造凹坑的尺度分布特征

上述类似 Sierpinski 地毯的表面有个显著特点:凹坑尺寸能够无限的小。根据粗视化方法,这种理想分形表面的凹坑尺度分布维数可以表示为:

$$D_s(r) = - \frac{\lg N_s(r)}{\lg r} \quad (3)$$

式中:  $N_s(r)$  — 尺度大于  $r$  的凹坑数目。

而现实中的表面,凹坑分布即使具有自相似的分形特征,也必然存在上限与下限。表面上的凹坑数  $N_s(r)$  不能表示成尺度  $r$  的幂函数形式,即式(3)的右边不能为常数,所以无法定义通常的分形维数。根据 Takayashu<sup>[23]</sup> 广义分形维数的定义,当把尺度  $r$  和测度  $N_s(r)$  画在双对数坐标系上时,二者具有直线关系,分形维数即为直线的斜率,即凹坑尺度分布的分形维数为:

$$D_s(r) = - \frac{d \lg N_s(r)}{d \lg r} \quad (4)$$

同理,表面积的分形维数为:

$$D_a(r) = - \frac{d \lg N_a(r)}{d \lg r} \quad (5)$$

式中:  $N_a(r)$  — 以半径为  $r$  的凹坑作为尺度测量的表面积。

轮廓线的分形维数为:

$$D_l(r) = - \frac{d \lg N_l(r)}{d \lg r} \quad (6)$$

式中:  $N_l(r)$  — 以尺子  $r$  测量的轮廓线长度。

基于 Takayashu<sup>[23]</sup> 广义分形维数的思想,我们可以构造这样一种表面:凹坑尺度满足一定的分布特征,凹坑位置随机选取。为了简单起见,仍然以正方形凹坑为例,且每一代凹坑的内表面不再挖坑。实际构造时,将正方形表面逐代划分网格,随机选取每一代凹坑的位置,按照如下指数规律确定表面上尺度大于  $r$  的凹坑总数目:

$$N_s(r) = C \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-D_s} \quad (7)$$

式中:  $r_0$  — 最大凹坑的边长;  $C$  — 常系数;  $D_s$  — 凹坑的尺度分形维数。

从 1.5 ~ 4, 选择六种尺度分布维数  $D_s$ , 每种表面构造四代凹坑,结果如图 3 所示。从图 3 可以直观地看出,随着分布维数的增大表面上凹坑数越来越稠密。

图 4 结果显示,在一定尺度范围内,与凹坑的尺度分布特征相对应,表面积的测度也具有近似的直

线关系。给定凹坑尺度分布维数  $D_s$ , 对应的表面积分形维数与轮廓线分形维数如表 2 所示。表 2 结果显示, 随着尺度分布维数增大, 表面积的分形维数也在增大, 而没有挖坑的剩余面积的分形维数在减小, 且单条轮廓线的分形维数与测量位置有关。

表 2 构造表面的分形特征

| 尺度分布<br>维数 $D_s$ | 表面积维数        |                | 轮廓线维数 $D_l$              |                       |
|------------------|--------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
|                  | 总面积 $D_{a3}$ | 剩余表面积 $D_{a1}$ | 坐标 $y = 0.33 \text{ mm}$ | 坐标 $y = 1 \text{ mm}$ |
| 1.498 6          | 2.008 0      | 1.998 0        | 1.000 1                  | 1.000 0               |
| 2.000 0          | 2.016 4      | 1.995 7        | 1.000 1                  | 1.026 4               |
| 2.491 5          | 2.036 8      | 1.990 2        | 1.026 4                  | 1.075 9               |
| 3.000 0          | 2.082 1      | 1.976 7        | 1.241 7                  | 1.026 4               |
| 3.504 0          | 2.181 1      | 1.940 8        | 1.120 2                  | 1.026 4               |
| 4.000 0          | 2.372 0      | 1.831 3        | 1.416 5                  | 1.086 2               |

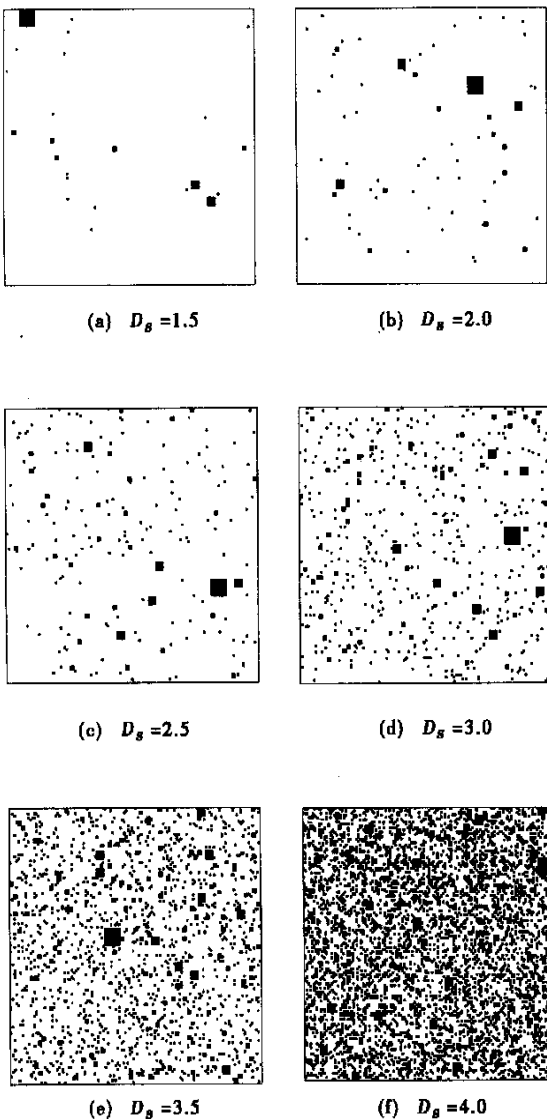


图 3 凹坑以不同尺度分布的表面

通过构造凹坑以不同尺度分布的表面, 我们可以看出: 在一定的尺度范围内, 凹坑的尺度分形维数

可以大于 3, 此时表面积的分形维数仍然在 2 ~ 3 之间, 轮廓线分形维数也在 1 ~ 2 之间, 这符合表面几何分形的基本规律。

#### 4 实际凹坑的尺度分布特征

由于凹坑的形状不影响其尺度分布特征, 所以上一节对具有规则凹坑表面的构造方法和结论, 应适用于实际中具有不规则形状凹坑的机械加工表面。自然界中, 表面上的凸点与凹坑相互对称, 其尺度分布特征的研究方法也是相通的。最早, Mandelbrot 发现地球表面上岛屿数量的累计分布服从如下规律<sup>[24]</sup>:

$$N(a) \sim a^{-B} \tag{8}$$

式中:  $a$  — 小岛面积;

$N(a)$  — 面积大于  $a$  的小岛总数。

$B$  — 小岛的尺度分布指数。

Mandelbrot 将指数  $B$  与小岛海岸线的分形维数  $D_l$  相关联<sup>[24]</sup>, 并给出如下关系式:

$$B = D_l / 2 \tag{9}$$

受 Mandelbrot 研究小岛分布的启发, Majumdar 和 Bhushan 试

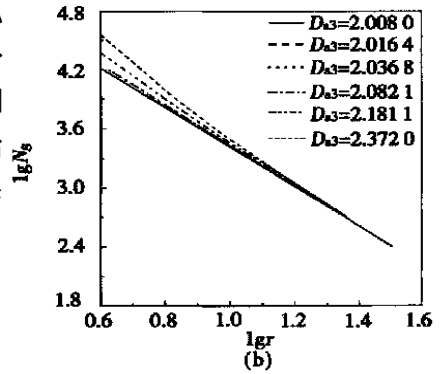
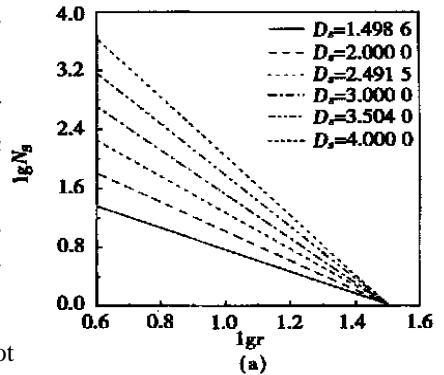


图 4 凹坑尺度分布维数与总表面积分形维数的关系

图应用分形理论描述机械加工表面或磁盘表面的凸点或凹坑的尺度分布特征<sup>[19]</sup>。由于海岸线的分形维数  $D_l$  在区间 (1, 2) 的范围内, 如果 Mandelbrot 的结论能够推广到一般的分形表面, 指数  $B$  的取值应在 (0.5, 1) 之间。分析 Majumdar 和 Bhushan 对磁盘与磁带的测量结果 (如图 5 所示), 我们可以看出在凸点面积较小的区域 (图 5 中面积小于  $P$  点的部分), 指数  $B = 0.54$  或  $0.56$ , 与表面轮廓曲线的分形维数 1.08 或

1.12 相对应。但是在凸点面积较大的区域,指数  $B = 1.47$  已经不与任何数值在区间(1,2)的分形维数对应了。由于无法解释这个现象, Majumdar 和 Bhushan 谨慎地指出凸点尺度分布指数与表面轮廓曲线分形维数的关系有待进一步研究<sup>[19]</sup>。与表面的凸点相对应, Wang 等人<sup>[12]</sup>和 Yang 等人<sup>[16]</sup>测量了沸腾实验板表面上的凹坑尺度分布,如图 6 所示。他们测量的凹坑尺度分布指数分别为 6.0(凹坑口的切角小于 90°)和 4.2(凹坑的顶角小于 60°),尺度分布指数也已经远远大于 3。

通过研究凹坑不同尺度分布的构造表面,我们可以看出凹坑的尺度分布维数与表面几何分形维数是两个含义不同的概念,表面上凹坑(或凸点)的尺度分布维数不受欧氏空间维数的限制,类似的例子还有有机物颗粒的大小分布<sup>[25]</sup>。从这个角度出发,Mar-

ndelbrot 研究小岛的大小分布只是尺度分布维数与几何分形维数关系的一个特例,而机械加工表面凹坑(或凸点)的尺度分布与表面的几何分形特征并不是一一对应的关系。实际上, Majumdar 和 Bhushan 的实验结果就是多重分形的一个典型实例,而 Wang 等人<sup>[12]</sup>和 Yang 等人<sup>[16]</sup>测量凹坑尺度分布维数的

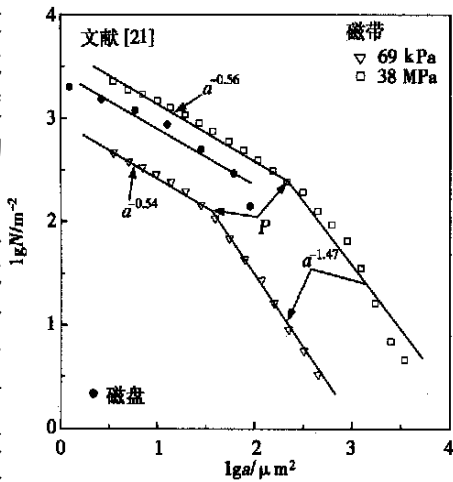


图 5 表面凸点的尺度分布

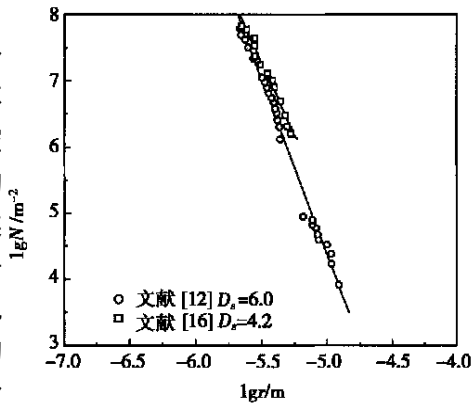
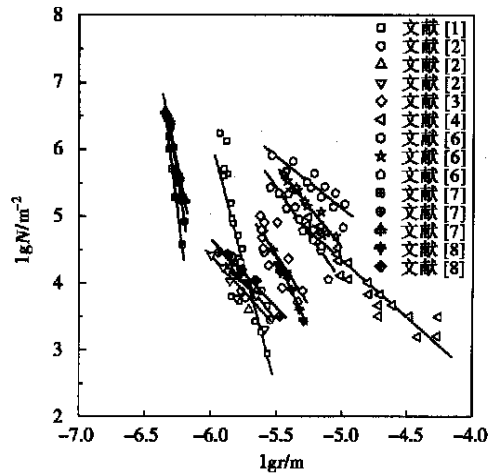
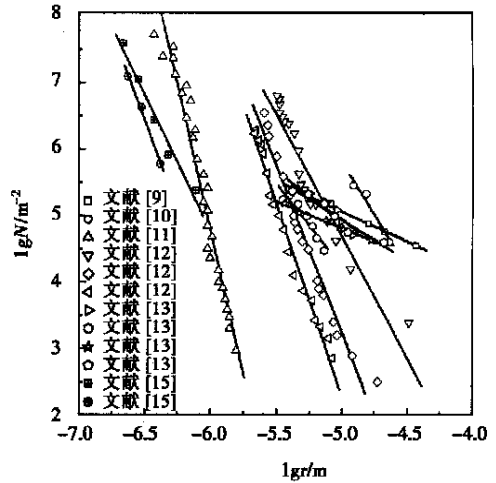


图 6 表面凹坑的尺度分布

结果也同样符合分形理论。



(a)



(b)

图 7 测量的活化核心密度与半径的关系

早在 1982 年, Takayashu<sup>[23]</sup> 根据粗视化的方法,把描述物体自相似特征的尺度分布指数称为广义分形维数,并从理论上证明了尺度分布维数也具有分形的一般特征。文献<sup>[26]</sup>简单地把尺度分布维数与表面的轮廓线维数等同起来,并作为一个通用结论,是对分形思想的误解。实际表面上单条轮廓曲线的分形特征与测量位置有关,但是在表面上随机位置测量足够多条曲线,这些曲线的统计性质就能够表征整个表面的分形特征。建立实际表面上轮廓曲线与凹坑尺度之间分形特征的关系,将是一个更具有挑战性的工作。

### 5 沸腾表面的活化核心密度

表面上凹坑是形成活化核心的直接因素,建立

二者之间的关系是当前研究者所关注的问题<sup>[12,16]</sup>。众所周知,凹坑并不等同于活化核心,主要原因是:一方面,不是所有的凹坑都能活化;另一方面,表面上的划痕和斑点也能够形成活化核心。活化核心的形成除了与表面的几何形貌有关外,与工质的热物性和表面的湿润性也有直接关系。考虑到表面湿润的影响:Wang等人<sup>[12]</sup>认为表面上只有不到10%的凹坑能够转换成活化核心;Yang等人<sup>[16]</sup>认为顶角大于表面接触角的凹坑可能是活化核心,例如对于水在不锈钢表面上沸腾,能够活化的凹坑顶角应不大于60°。

由于实际测量活化核心比较困难,目前为止,只有为数不多的研究者直接测量了活化核心密度。本文尽可能全面地收集了目前为止活化核心的测量结果,活化核心密度如图7所示,实验条件与方法见表3。与凹坑的尺度分布类似,几乎所有的测量结果均显示活化核心密度与半径可以表示成如下关系式:

$$N_b(r) = C_b \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-m} \quad (10)$$

式中: $r$ —活化核心半径;

$m$ —活化核心尺度分布指数;

$N_b(r)$ —半径大于 $r$ 的活化核心数目。

活化核心的尺度分布满足分形的一般特征:具有相似的结构,能够以某种形式定义分形维数,且分形维数大于其拓扑维数。由于活化核心的尺度分布

同样没有特征尺度,我们仍然采用活化核心半径作为粗视化的尺度,这样定义的分形维数与Takayashu<sup>[23]</sup>定义的广义分形维数的概念是一致的。

从表3结果可以看出,不同工质、材料和测量方法获得活化核心密度,尺度分布指数 $m$ 差别很大(相差甚至1个数量级),取值范围0.91~16,且大部分测量值都大于1。这与表面凹坑分布的测量结果相类似。但是表面活化核心与凹坑并不是一一对应的关系。对于凹坑分布维数为6.0的铜板表面,Wang等人采用表面处理来改变表面的湿润性<sup>[12]</sup>,即改变了气泡的接触角。随着接触角从90°减小到18°,活化核心分布指数从3.72增大到5.92,而活化核心数目明显减小。活化核心的分布指数小于凹坑的分布维数。Yang等人测量的活化核心分布指数(为3.22)也小于凹坑的分布维数(为4.2)<sup>[16]</sup>。

以上分析可以看出,表面凹坑的尺度分布维数与活化核心的尺度分布指数一般情况下并不相同,进一步工作的关键是建立凹坑与活化核心二者之间的联系。

需要指出的是,沸腾实验中比较容易测量的是热流密度与过热度。近年来,我们采用沸腾换热机理模型预测活化核心密度,为预测和描述表面活化核心的分布特征提供了很好的思路<sup>[15,27~28]</sup>。

表3 测量活化核心的实验列表

| 作者                              | 年代   | 宏观几何形貌 | 材料     | 工质  | 标准大气          | 测量方法   | 分布指数 $m$  |
|---------------------------------|------|--------|--------|---|---------------|--------|-----------|
| Ceartner, et al <sup>[11]</sup> | 1960 | 平板     | 铜      | Nickel salts solution                               | 1             | 电镀计数法  | 7.5       |
| Kurihara, et al <sup>[2]</sup>  | 1960 | 平板     | 铜      | Acetone n - Hexane CCl <sub>4</sub> CS <sub>2</sub> | 1             |        | 2.74~3.68 |
| Griffith, et al <sup>[3]</sup>  | 1960 | 平板     | 铜      | Methanol Ethanol Water                              | 1             |        | 4.44      |
| Brown <sup>[4~5]</sup>          | 1967 |        | 不锈钢    |   |               | 特殊气泡仪  | 3.95      |
| Shoukri, et al <sup>[7]</sup>   | 1975 | 平板     | 铜      | Water Metranol                                      | 1             | 显微镜观测法 | 2.06~4.33 |
| Judd, et al <sup>[7]</sup>      | 1975 | 平板     | 氧化渡层玻璃 | R113 CCl <sub>4</sub> Chloroform<br>Dichloroethane  | 1             | 显微镜观测法 | 12~16     |
| Singh, et al <sup>[8]</sup>     | 1976 | 平板     | 铜      | Water Methanol                                      | 1             |        | 4.94      |
| Nakayama <sup>[9,14]</sup>      | 1980 | 平板     | 铜      | R11   | 1             | 拍摄法    | 0.91      |
| Yang, et al <sup>[10,16]</sup>  | 1988 | 平板     | 不锈钢    | Water   | 1             | 观察法    | 3.22      |
| Barthau <sup>[11]</sup>         | 1992 | 水平圆管   | 铜      | R114  | 1.5 1.91 2.47 | 拍摄法    | 7.1       |
| Wang, et al <sup>[12]</sup>     | 1993 | 平板     | 铜      | Water   | 1             | 显微镜观测法 | 3.7~5.92  |
| Chien <sup>[13~14]</sup>        | 1996 | 水平圆管   | 铜      | R123  | 1             | 高速摄影法  | 0.82~2.52 |
| Luke <sup>[15]</sup>            | 2000 | 水平圆管   | 铜,不锈钢  | Propane   | 不同压力          | 高速摄影法  | 4.1~5.36  |

## 6 结 论

(1) 凹坑的尺度分布维数与表面几何分形维数是两个不同的概念,凹坑的尺度分布维数可以大于

3,这与分形理论的基本思想并不矛盾,即表面积的分形维数在2~3之间,轮廓线的分形维数在1~2之间。区分这两个概念,有助于准确地理解机械加工表面凹坑和凸点的尺度分布特征,为进一步建立表

面几何分形维数与尺度分布维数之间的关系打下基础。

(2) 沸腾表面上活化核心与凹坑直接相关,活化核心的分布特征与凹坑类似,但是其尺度分布维数一般不同,通常活化核心的分布维数要比凹坑的尺度分布维数小。

建立活化核心与凹坑之间的关系是进一步的研究工作,例如通过表面湿润性(典型参数为接触角)把二者关联起来。而采用沸腾机理模型预测活化核心密度,是描述沸腾边界条件的另一种途径,在难以测量活化核心和表面几何特征的情况下具有实际价值。

致谢:本文研究也是对郁伯铭教授评论一文的答复<sup>[26]</sup>,感谢郁伯铭教授对我们工作的关注。

#### 参考文献:

- [1] GAERTNER R F, WESTWATER J W. Population of active sites in nucleate boiling heat transfer [J]. *Chem Engng Prog Symp Series*, 1960, **56**(30): 39 - 48.
- [2] KURIHARA H M, MYERS J E. The effects of superheat and surface roughness on boiling coefficients[J]. *AIChE Journal*, 1960, **6**: 83 - 91.
- [3] GRIFFITH P, WALLIS J D. The role of surface conditions in nucleate boiling[J]. *Chem Engng Prog Symp Series*, 1960, **56**(30): 49 - 63.
- [4] BROWN W T. Study of flow surface boiling[D]. USA: Mechanical Engineering Department, M. I. T., 1967.
- [5] MIKIC B B, ROHSENOW W M. A new correlation of pool - boiling data including the effect of heating surface characteristics trans [J]. *ASME J of Heat Transfer*, 1969, **91**(2): 245 - 250.
- [6] SHOUKRI M, JUDD R L. Nucleation site activation in saturated boiling[J]. *Trans ASME J Heat Transfer*, 1975, **97**(1): 93 - 98.
- [7] JUDD R L, SHOUKRI M. Nucleate boiling on a oxide coated glass surface[J]. *Trans ASME J Heat Transfer*, 1975, **97**(3): 494 - 496.
- [8] SINGH A, MIKIC B B, ROHSENOW W M. Active sites in boiling [J]. *Trans ASME J Heat Transfer*, 1976, **98**(3): 401 - 406.
- [9] NAKAYAMA W, DAIKOKU T, KUWAHARA H, *et al.* Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surface[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1980, **102**: 445 - 456.
- [10] YANG S R, KIM R H. A mathematical model of the pool boiling nucleation site density in terms of the surface characteristics[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1988, **31**(6): 1127 - 1135.
- [11] BARTHAU G. Active nucleation site density and pool boiling heat transfer-an experimental study[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1992, **35**(2): 271 - 278.
- [12] WANG C H, DHIR V K. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface[J]. *Trans ASME J Heat Transfer*, 1993, **115**(3): 659 - 669.
- [13] CHIEN L H. Mechanism and analysis of nucleate boiling on structured surfaces[D]. USA: Pennsylvania State University, 1996.
- [14] HAIDER S I, WEBB R A. Transient micro-convection model of nucleate pool boiling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(15): 3675 - 3688.
- [15] LUKE A, CORENFLO D. Heat transfer and size distribution of active nucleation sites in boiling propane outside a tube [J]. *International Journal Thermal Science*, 2000, **39**: 919 - 930.
- [16] YANG S R, MU Z M, WANG J W, *et al.* On the fractal description of active nucleation site density for pool boiling[J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**: 2783 - 2786.
- [17] LUKE A, ELMAR BAUMHOGGER, PATRICK SCHEUNEMANN. 3-Dimensional description of the microstructure of heated surfaces in nucleate pool boiling[A]. *Proc Conf "Boiling 2000 Phenomena & Emerging Applications"* [C]. Alaska: Anchorage, 2000. 136 - 151.
- [18] GANTI S, BHUSHAN B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces[J]. *Wear*, 1995, **180**: 17 - 34.
- [19] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces[J]. *ASME J of Tribology*, 1990, **112**(1): 205 - 216.
- [20] 陈国安,葛世荣,王军祥. 分形理论在摩擦学研究中的应用[J]. *摩擦学学报*, 1998, **18**(2): 179 - 184.
- [21] 陈国安,葛世荣. 基于分形理论的磨合磨损预测模型[J]. *机械工程学报*, 2000, **36**(2): 29 - 33.
- [22] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- [23] TAKA YASU H. Differential fractal dimension of random walk and its applications to physical systems[J]. *Journal of the physical society of Japan*, 1982, **51**(9): 3057 - 3064.
- [24] MANDELBROT B B. Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of coastlines, and the number-area rule for islands[A]. *Proceedings of the national academy of science* [C]. USA, 1975. 3825 - 3828.
- [25] 黄 遵,柯家骏. 分形粒度分布模型颗粒过程的统一性[A]. 辛厚文. 分形理论及其应用[C]. 合肥:中国科技大学出版社, 1993. 294 - 297
- [26] 郁伯铭. 对“用饱和核态池沸腾换热机理模型预测加热壁面活化核心密度”一文的评论[J]. *热能动力工程*, 2002, **17**(2): 211.
- [27] KOCAMUSTAFAOGLU G, ISHII M. Interfacial area and nucleation site density in boiling systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983, **26**(9): 1377 - 1387.
- [28] 吴玉庭,杨春信,袁修干,等. 用饱和核态池沸腾换热机理模型预测加热壁面活化核心密度[J]. *热能动力工程*, 1999, **14**(5): 337 - 339.

(渠 源 编辑)

透平导叶应用不同周向弯曲母线改进设计的研究 = **A Study of the Improved Design of Turbine Guide Vanes by Using Different Circumferential Curved Generatrices** [刊, 汉] / FANG Chuan-hui, DAI Ren, CHEN Kang-ming (Power Engineering Institute under the Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2003, 18 (3) . - 288 ~ 290

By using a numerical calculation method compared and studied is the influence of different circumferential curving of guide vanes on cascade flow performance. The study involves the distribution of total pressure loss factor, outlet gas flow static pressure and Mach number along the blade height. Calculations are based on time-average Navier-Stokes equations with a turbulence model being of Baldwin-Lomax type. The results of the study indicate that the positively leaned blade of the guide vanes can improve blade-root local flow performance, but offers a poor blade-tip flow performance, thus resulting in a very limited enhancement of the flow performance of the cascade as a whole. J type curvature is conducive to improving both the blade-root and blade-tip flows. Moreover, the curved generatrix lends itself easily to calculation optimization. C type curved blade offers a relatively good blade-tip flow performance, but it is difficult to select an optimization for a curved generatrix. **Key words**: curved blade, generatrix, total pressure loss, cascade flow

沸腾表面凹坑的尺度分布特征 = **Size Distribution Characteristics of Cavities on a Pool Boiling Surface** [刊, 汉] / WANG An-liang, YANG Chui-xin (Department of Flying Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100083), WU Yu-ting (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2003, 18 (3) . - 291 ~ 296

The presence of a gas (or steam) cavity on a boiling surface constitutes a key factor for the formation of an activation nucleus. Based on a classical fractal surface similar to Sierpinski carpet the authors have successfully constructed a series of surfaces with different size distribution of cavities. The results of a study indicate that the cavity size distribution dimension and surface shape fractal dimension are two concepts with different connotations. The size distribution characteristics of a mechanical surface cavity (or convex point) conform to a fractal theory. An analysis of the measured results of activated nucleus has shown that both the activated nucleus size distribution and cavity size distribution on a surface have fractal characteristics. **Key words**: pool boiling cavity, activated nucleus, fractal dimension

空气侧换热器结霜时传热与阻力特性研究 = **An Investigation of Heat Transfer and Resistance Characteristics in Case of Frost Formation at an Airside Heat Exchanger** [刊, 汉] / YAO Yang, JIANG Yi-qiang, MA Zui-liang, et al (Municipal Environmental Engineering Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2003, 18 (3) . - 297 ~ 300

On the basis of conservation of mass, momentum and energy and with the use of a distribution parameter method a dynamic mathematical model was set up for an airside heat exchanger during frost formation. This model has coupled a frosting sub-model with a heat exchanger sub-model. The model was used to analyze the time-dependent variation of frost thickness under different temperatures and relative wetness values as well as the impact of frosting on airside heat exchanger heat transfer and resistance. The results of the analysis indicate that frosting condition will change under different operating conditions. Under a given temperature the greater the relative wetness, the more serious is the frost formation and the shorter is the time interval for frost thawing. At a given relative wetness the frosting at an operating condition of 0 is more serious than at that of -4. With an increase in frosting quantity there will be a decrease in heat transfer rate and a gradual decrease in airflow rate. Meanwhile, there is a drastic increase in resistance. **Key words**: air source heat pump unit, frosting, heat transfer and resistance, distribution parameter