

文章编号:1000-8055(2011)05-0997-06

飞机结冰冰型微结构特征的分形研究

杜雁霞¹, 桂业伟¹, 柯 鹏², 王勋年¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;
2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于分形几何的基本理论, 采用结冰风洞实验与金相显微实验相结合的方法, 对飞机结冰冰型的微结构特征进行了研究. 采用计盒维数法对冰型微结构的分形维数进行了计算, 获得了不同条件下前缘结冰及溢流结冰冰型的分形维数, 并建立了冰型分形维数与结冰条件之间的关系. 研究表明, 来流温度和速度对冰型的微结构特征及其分形维数有着重要影响. 来流速度越高或温度越低, 冰型微结构分形维数越大, 反之分形维数越小. 在相同条件下, 溢流结冰的微结构分形维数要低于前缘结冰.

关 键 词: 飞机; 结冰; 冰型; 微结构特征; 分形几何; 分形维数

中图分类号: V231

文献标志码: A

Investigation on the ice-type microstructure characteristics of aircraft icing based on the fractal theories

DU Yan-xia¹, GUI Ye-wei¹, KE Peng², WANG Xun-nian¹

(1. Computational Aerodynamics Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
2. School of Transportation Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The ice-type microstructure characteristics of aircraft icing were investigated by combining icing tunnel and metallography tests based on the theories of fractal geometry. The fractal dimension of the ice-type microstructure was calculated by means of box-counting dimension method, and the relationship between the fractal dimension and the icing conditions was analyzed. The results indicate that the inflow temperature and velocity of the air-flow have great influence on the fractal dimension of ice-type microstructure. The higher velocity or the lower the temperature means greater fractal dimension, and vice versa. Under the same icing conditions, the fractal dimension of runback icing is smaller than the leading edge icing.

Key words: aircraft; icing; ice-type; microstructure characteristics;
fractal geometry; fractal dimension

飞机结冰是影响飞机安全飞行的重要隐患之一. 由于结冰条件的不同, 生成的冰型不但在外观形貌上有所不同, 而且在密度、导热系数等热物性参数, 以及冰在飞机表面的黏附特性等方面均存

在较大差异^[1]. 由于结冰形貌的不规则性和随机性, 使经典体视学在描述结冰冰型方面尚存在较大难度. 迄今为止, 国内外对飞机结冰不同冰型的描述仅限于根据表观透明和致密程度定性划分为

收稿日期: 2010-04-25; 修订日期: 2010-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(50906097); 中国博士后科学基金特别资助项目

作者简介: 杜雁霞(1974—), 女, 四川成都人, 博士, 主要从事传热传质研究.

明冰、霜冰和混合冰^[2],不同冰型的物性参数则由经验数据分别给定.因而现行的冰型描述方法只能提供不同冰型的离散评价参数,无法实现冰型的定量描述并建立冰型与结冰条件之间的定量关系,从而使对结冰速率和冰型特征的预测以及防、除冰能量需求的准确计算尚存在很大的局限性.

Mandelbrot^[3]提出的分形理论,是描述自然界中不规则的、支离破碎物体的重要数学分支,近年来在晶体、聚集体、金属、陶瓷、高分子材料、多孔介质等的微观结构与宏观特性的研究中得到了越来越广泛的应用^[4-10],也为定量研究冰型特征这种随机和不规则性较强的对象提供了可能.但迄今为止,国内外关于飞机结冰冰型的分形研究鲜见报道.本课题从分形论的角度研究飞机结冰的微结构组织特征,以期对冰型特征定量描述机制的建立奠定基础.

1 冰型微结构特征获取的实验方法

为了研究不同气象条件下飞机结冰的冰型特征,本课题以“运八”超临界翼型和带电热除冰装置的平板模型为实验模型,在 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞内进行结冰实验.图1显示了来流温度 $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,来流速度 $V=8\text{ m/s}$ 条件下结冰风洞内翼型前缘结冰的实验冰型.保持平均水滴直径(MVD)和液态水含量(LWC)相对恒定,分别变换来流温度和来流速度,获得不同条件下的结冰冰型.将模型上生成的冰型取下并打磨平整,保持低温环境在金相显微镜下进行冰型微观结构透射图像的拍摄,并通过计算机进行显微图像的采集.图2是来流温度 $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,来流速度 $V=3, 8, 25\text{ m/s}$ 条件下翼型前缘结冰冰型的微结构图像(50倍放大).可以看出,不同条件下结冰冰型在微结构上表现为晶粒和气泡的随机分布.尽管气泡的大小、分布随结冰条件的不同而有所差异,但从统计意义上看,不同图像的部分和整体均存在自仿

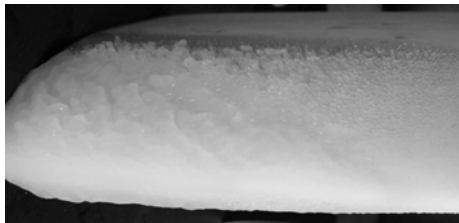


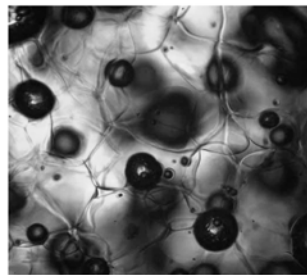
图1 结冰风洞内飞机翼型表面的结冰实验

($t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=8\text{ m/s}$)

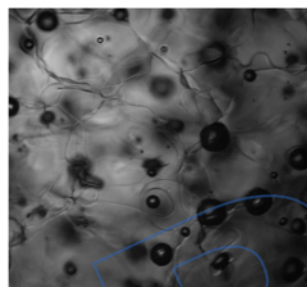
Fig. 1 Icing experiment in icing tunnel

($t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=8\text{ m/s}$)

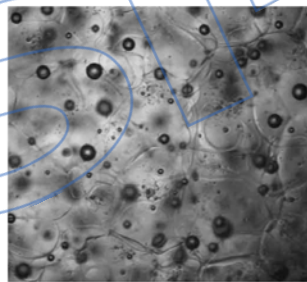
射意义上的相似,从而为采用分形几何的研究方法提供了可能.



(a) $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=3\text{ m/s}$



(b) $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=8\text{ m/s}$



(c) $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=25\text{ m/s}$

图2 不同来流速度下冰型的微结构图像

Fig. 2 Ice-type microstructure at different airflow velocities

2 计盒维数计算方法

分形维数是度量不规则物体或分形物最主要的指标.目前常用分形维数的计算主要包括Hausdorff维数、计盒维数(box-counting dimension)等方法^[11].在实际应用中,计盒维数法是常采用的一种方法.设 F 是 R^n 中的一个非空有界结合, $N_\delta(F)$ 是直径最大为 δ ,可以覆盖 F 的集的最少个数,则 F 的下、上计盒维数为^[3]

$$\underline{\dim} F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (1)$$

$$\overline{\dim} F = \overline{\lim}_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (2)$$

若上述两值相等,则这相等值即为 F 的计盒维数,记为

$$D = \dim F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_{\delta}(F)}{-\ln \delta} \quad (3)$$

为了获得不同冰型的分形维数,将采集图像进行滤波、图像增强及灰度转换,获得 256 级灰度的数字图像,并在一定阈值下经阈值截取和反色变换为二值黑白数字图像,为不同冰型分形维数的求取奠定基础. 计盒维数的计算采用像素点覆盖法^[12]. 图像由大小为 δ 的像素点组成,将二值化图像转换为一个由 1 和 0 构成的一个大型矩阵,其行列数分别对应于二值图的行列数,每个数值根据图像对应的点是黑或白分别取值为 1 或 0. 将所得数据文件依次划分为若干块,使得每一块的行数和列数都为 n , 包含 0(或 1)的块的个数记为 $N_{\delta_n}(F)$, 取 $n = 1, 2, 4, \dots, 2^i$, 即以 $1, 2, 4, \dots, 2^i$ 个像素点的尺寸为边长作块划分,从而得到盒子数 $N_1, N_2, \dots, N_{2^i}$. 由于 $\delta = \text{图像长度}/\text{像素点个数}$, 因而行和列均为由 n 个像素点组成的块,边长为 $\delta_n = n\delta (n = 1, 2, 4, \dots, 2^i)$. 对于一个具体图像, δ 为一常值,因此在计算时可直接用 $n\delta$ 代替 δ_n . 在双对数坐标平面内,以最小二乘法用直线拟合数据点 $(\ln \delta_n, \ln N_{\delta_n}(F)) (n = 1, 2, 4, \dots, 2^i)$, 所得到的直线斜率的负值即为该图像的计盒维数. 冰型分形维数计算程序流程图如图 3 所示.

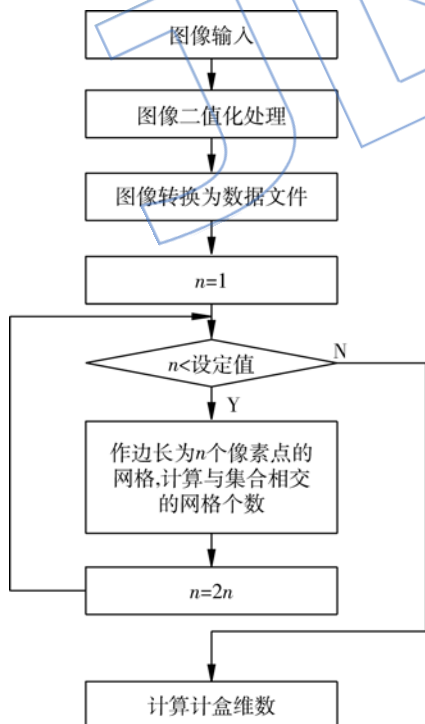


图3 冰型分形维数计算程序流程图

Fig. 3 Flow chart of calculation on ice-type fractal dimension

用 MATLAB 编制分维计算程序, 并利用 MATLAB 在图像变换、滤波、增强及边缘检测等图像处理方面的强大功能, 将图像的分形特征最大限度地表现出来. 为了验证算法的有效性, 采用所编程序对已知分形维数的图像^[10] (正方形和 Sierpinski 毯) 进行了计算, 误差均在 5% 以内, 从而验证了算法及程序的有效性.

3 冰型特征的分维计算

3.1 来流速度对分形维数的影响

图 4 是不同来流速度下冰型微结构的二值图 (横纵坐标为二值图的行列划分单元数). 采用所

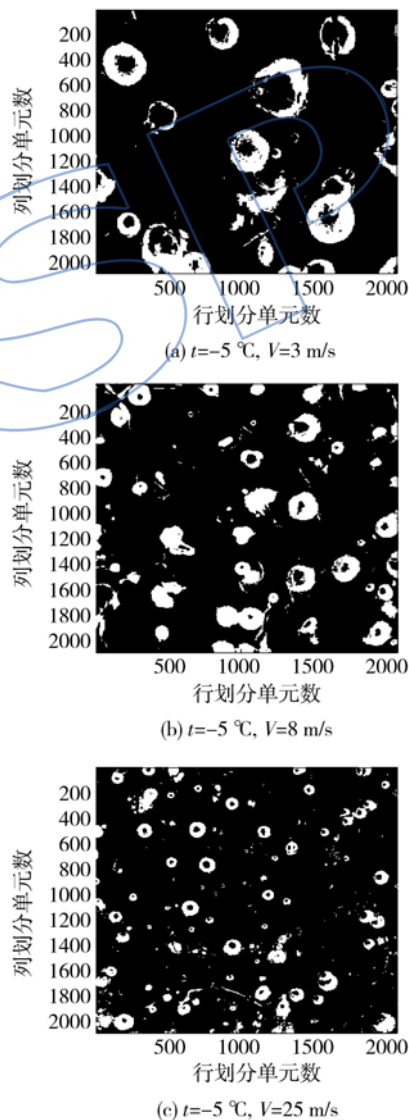


图4 不同来流速度下冰型的微结构二值图

Fig. 4 Binary image of ice-type microstructure at different airflow velocities

编程序对所获得的二值图像进行分维计算,可得不同结冰冰型微结构图像的分形维数,如图5、图6所示。

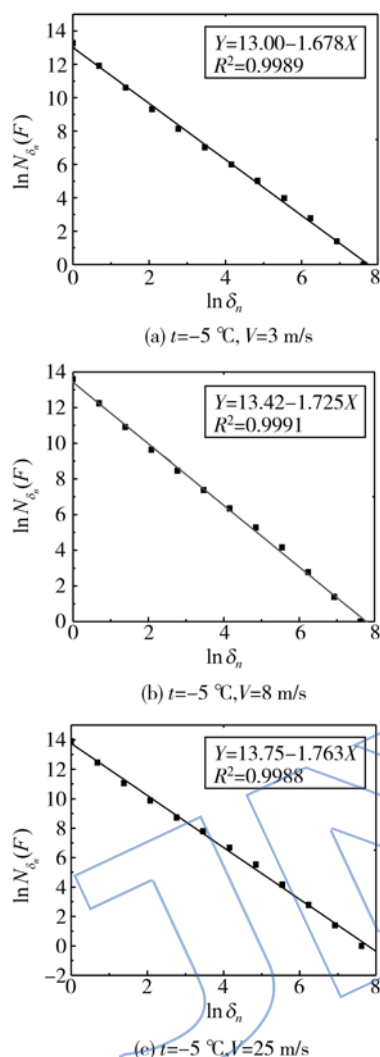


图5 不同来流速度下冰型的计盒维数

Fig. 5 Box-counting dimension of ice-type at different airflow velocities

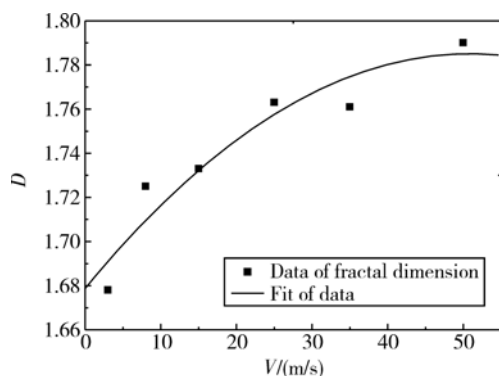


图6 冰型计盒维数随来流速度的变化

Fig. 6 Box-counting dimension of ice-type versus airflow velocity

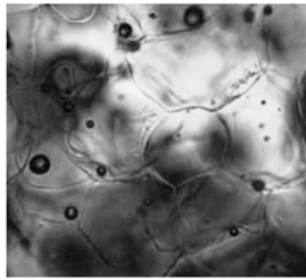
由图4、图5可以看出,从微观结构上看,不同来流速度条件下前缘结冰形成的冰型在气泡大小、数量及分布特征上均有很大程度的不同。随着风速的增加,气泡的数量相对增多但体积相对减小。这是由于来流在撞击物面时,将过冷水滴携带的空气粉碎,空气泡来不及逃逸就被包围在迅速凝固的水滴之中。从图5可以看出,来流温度 $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,来流速度 $V = 3, 8, 25\text{ m/s}$ 条件下的前缘结冰分形维数分别为 1.678, 1.725, 1.763。由于来流速度越高,来流对气泡的粉碎作用越强,因而气泡体积也相对越小,数量越多,图像的分形维数相对越大;反之,来流速度越低,对气泡的粉碎作用相对越弱,因而气泡体积相对越大,数量越少,图像的分形维数也相对越小。分形曲线较高的相关系数显示了冰型微结构图像具有较强的分形特征^[3]。图6为冰型分形维数随来流速度的变化曲线,可以看出,随着来流速度的增加,分形维数总体呈上升趋势,但数据较大的分散度显示了来流速度对分形维数影响的复杂性。

3.2 来流温度对分形维数的影响

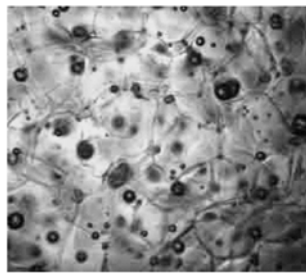
为了研究来流温度对冰型微结构的影响,保持来流速度相对恒定,变化来流温度进行实验,获得不同温度条件下的实验冰型。图7是来流速度 $V = 35\text{ m/s}$,来流温度 $t = -3, -10, -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下翼型前缘结冰的微结构图像。

采用与前述同样的方法可获得不同来流温度条件下冰型微结构的分形维数(如图8)。从图8可以看出,不同来流温度条件下结冰冰型不但在宏观透明程度上有所不同,而且在冰型微结构晶体粒度、气泡数量及分形维数方面也有着很大的差异。来流温度越高,气泡数量越少,晶体粒度越大,冰型分形维数越小;反之,来流温度越低,气泡数量越多,晶体粒度越小,冰型微结构图像的分形维数越大。这是由于在相同来流速度条件下,来流温度越低,水滴过冷度越大,在相同时间相同撞击速度条件下所形成的临界晶核数量增加。晶核数量的增加,使晶体生长时晶粒相遇的可能性增加,晶粒生长速率受到晶界限制,导致相同时间内晶粒不易长大,从而形成较小的晶体粒度。反之,来流温度越高,水滴过冷度越小,相同时间内所产生的临界晶核数相对较少,因而形成粒度较大的晶体。此外,当结冰温度较高时,结晶时间变长,气泡溢出的机会增多,因而晶体内部气泡相对较少;反之,结冰温度越低则结晶速率越大,过冷水滴携带的空气泡在水滴凝固之前逃逸的可能性减小,因

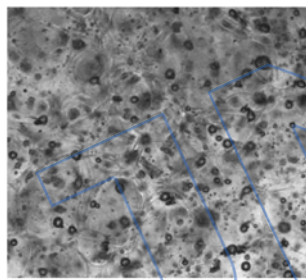
而晶体中气泡数量相对增多. 分形维数的大小正是反映了冰型微观结构的差异导致的图像不规则程度的高低.



(a) $t = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 35\text{ m/s}$



(b) $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 35\text{ m/s}$



(c) $t = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 35\text{ m/s}$

图 7 不同来流温度下冰型的微结构

Fig. 7 Ice-type microstructure at different airflow temperatures

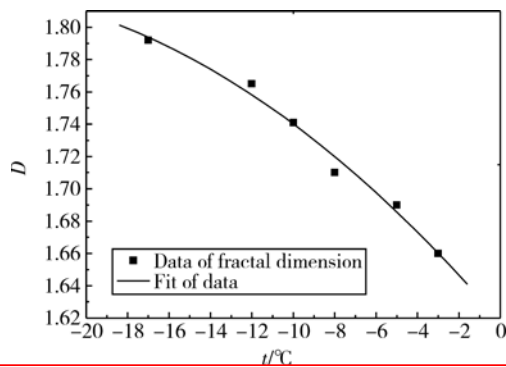


图 8 来流温度对前缘结冰分形维数的影响

Fig. 8 Fractal dimension versus airflow temperature for leading edge icing

3.3 前缘冰与溢流结冰的分形特征比较

为了研究溢流结冰与前缘结冰在冰型特征上的差别,课题进行了溢流结冰(runback icing)的风洞实验.图 9 为平板模型在结冰风洞内防冰装置开启状态下溢流结冰形成的实验过程及表观图像.图 10 为来流温度 $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 来流速度 $V = 25\text{ m/s}$ 条件下溢流结冰与前缘结冰的微结构比较.图 11 为不同来流速度下前缘冰与溢流形成的溢流结冰分形维数的比较.可以看出,随着来流速度的增加,无论是溢流结冰还是前缘结冰,冰型微结构的分形维数均趋于上升趋势,但在相同条件下,前缘结冰的分形维数要大于溢流结冰的分形维数.由于分形维数是表征分形体结构复杂程度的重要指标,因而表明相同条件下的前缘结冰与溢流形成的结冰在微观结构的复杂程度上存在着较大的差异.由于冰型的微结构特征在很大程度上会影响其宏观特性^[1],因此,这两种不同的结冰方式生成冰型在宏观特性上也有着很大差异,其表观透明和致密程度的不同也正是这种差异的重要表现形式.

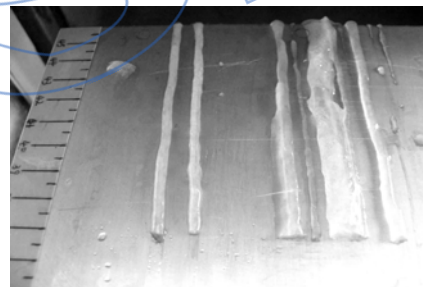
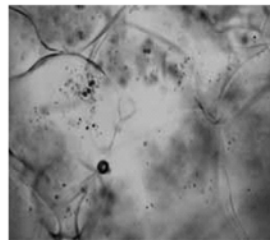
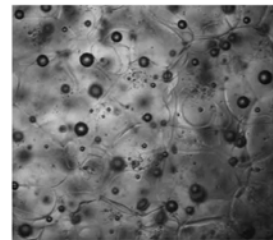


图 9 结冰风洞内的溢流结冰实验

Fig. 9 Runback icing test in icing tunnel



(a) 溢流结冰



(b) 前缘结冰

图 10 溢流结冰与前缘结冰的微结构图像比较
($t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 25\text{ m/s}$)

Fig. 10 Comparison of microstructure between leading edge and runback icing
($t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 25\text{ m/s}$)

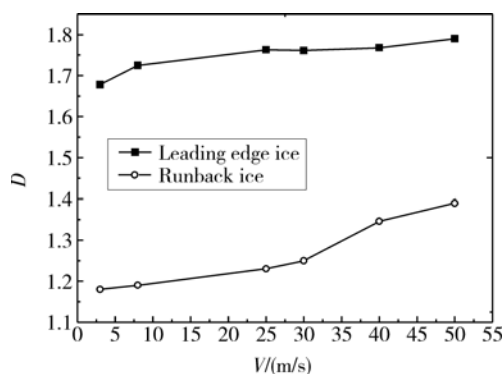


图11 溢流结冰与前缘结冰分形维数比较

Fig. 11 Comparison of fractal dimension between leading edge and runback icing

4 结论与分析

本文采用结冰风洞实验、金相显微实验及分形几何理论相结合的方法,对飞机结冰冰型的微结构特征进行了研究,所获得的主要结论有:

1) 飞机结冰冰型在微结构上具有较强的分形特征,来流温度和速度对冰型的微结构及其分形维数有着重要影响。来流速度越低,结晶中的气泡相对越大,数量越少,冰型的分形维数也越小;反之气泡相对越小,数量越多,冰型的分形维数也越大。来流温度越低,晶体粒度越大,结晶中的气泡相对较多,冰型的分形维数也越大,在表观上越不透明;反之晶粒度越小,气泡相对较少,因而冰型的分形维数越小,在表观上也更为透明。

2) 在相同条件下,溢流结冰的透明和致密程度要高于前缘结冰,而其微结构的分形维数却低于前缘结冰的分形维数,说明溢流结冰与前缘结冰在微结构的复杂程度上存在较大差异。由于冰的微结构特征很大程度上会影响其宏观特性,因而溢流结冰与前缘结冰物性参数方面存在的差异可为制定不同的防、除冰方式提供参考。

3) 由于分形维数的变化是介质内禀特性变化的表现,而介质微观组织的变化又与其形成条件紧密相关。因此,通过冰型分维的研究,可以从一个新的角度去认识结晶条件与微观组织之间的关系,有可能通过分形维数来定量表征不同冰型,

并通过分形维数的计算来分析飞机的结冰条件及冰型的宏观特性参数。

参考文献:

- [1] Hobbs P V. Ice physics[M]. Oxford: Clarendon Press, 1974.
- [2] Kind R J, Potapczuk M G, Feo A, et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena[J]. Progress in Aerospace Science, 1998, 34(5-6): 275-345.
- [3] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman and Company, 1983.
- [4] Yao S C, Pitchumani R. Fractal based correlation of for the evaluation of thermal conductivities of fibrous composites[J]. Transport Phenomena in Materials Processing, 1990, 146: 55-60.
- [5] Pitchumani R, Yao S C. Correlation of thermal conductivities of unidirectional fibrous composites using local fractal techniques[J]. Journal of Heat Transfer, 1991, 113: 778-796.
- [6] Sabau A S, Tao Y X, Liu G, et al. Effective thermal conductivity for anisotropic granular porous media using fractal concepts[C]// Proceedings of National Heat Transfer Heat Transfer Conference, New York: ASME Publication, 1997, 11: 121-128.
- [7] Libbrecht K G. The physics of snow crystals[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68(4): 855-895.
- [8] Chehroudi B, Talley D G, Coy E B. Fractal geometry and growth rate of cryogenic jets near critical point[R]. AIAA-99-2489, 1999.
- [9] Yoko K, Tomoaki H, Toru S. Factors affecting on the changes of ice crystals form in frozen food[R]. Tokyo, Japan: JSRAE Annual Conference, 2005.
- [10] 褚武扬, 宿彦京, 高克玮, 等. 材料科学中的分形[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [11] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 19-25.
PENG Ruidong, XIE Heping, JU Yang. Computation method of fractal dimension for 2-D digital image[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(1): 19-25. (in Chinese)
- [12] 丁保华, 李文超, 王福明. 分形图像分析与分形维数计算程序的设计[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(3): 304-307.
DING Baohua, LI Wenchao, WANG Fuming. Analysis of fractal image and design of fractal dimension calculation program[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(3): 304-307. (in Chinese)