

退,注意力集中短暂且失误率高。过量的噪声环境会使人听力衰减而且是逐步加重的,绝不可忽视。有人对编织车间58名挡车工的水溶性维生素和蛋白质代谢水平测定并与对照组比较明显增高。另有研究表明,强噪声对脑有明显的伤害作用。中强噪声也有累积性潜在损伤效应。首先表现在生化指标的改变上,然后是细胞亚微结构的损伤,最后才出现宏观效应。切不可忽视中强噪声的累积性潜在损伤效应。近几年来由于制定了有关噪声控制的一些卫生标准,才使各类噪声得到比较严格的控制和管理,确保了人们的工作环境和身心健康。

对声致生物效应的研究的目的之一是探寻一个安全剂量标准,在研究和应用这些声辐射时到处在这种环境中的人员起到防护作用。我们认为对超声生物效应的研究,应重点放在诊断超声对孕妇的检查胎儿的发育上的影响上。目前,在尚未制定出超声诊断剂量标准以前,对孕妇检查的次数和每次检查的时间应加以限

制,确保诊断超声的安全性。其次是在超声生物效应研究的基础上开拓更新、更多的超声在生物医学领域中的应用,促进超声医学的迅猛发展。次声生物效应还研究的不多,原因在于次声的产生大多属于自然的,难于控制。所以,今后应加强对于次声波产生控制的研究,才能进一步推动次声生物效应的研究。噪声是当前环境污染的重要方面之一,应积极开展对噪声的控制,消除以及噪声潜在性危害机理的研究,唤起广大人民对噪声损害的足够重视。加强对环境污染的治理,从而保障人民的身心健康。

- [1] 马玉英、尚志远,声学进展, No. 3 (1984), 44.
- [2] 周万松,应用声学, 6-4 (1987), 6.
- [3] 尚志远等,中国生物医学工程学报, 5-1 (1986), 14.
- [4] D. L. Miller, *IEEE Transactions UFFC*, 33-2 (1986), 165.
- [5] 莫简主编,医用自由基生物学导论,人民卫生出版社, (1989), 59.
- [6] 于学文等,西安医科大学学报, 11-1 (1990), 79.
- [7] R. M. Moore et al., *America Epidemiology*, No. 116 (1982), 571.
- [8] 冯若,物理教师, No. 3 (1981), 5.

分形概念及其在材料科学中的应用

刘 军

(四川大学材料系,成都 610064)

本文首先结合几个数学构造分形的例子介绍分形概念,然后对分形在材料科学中的应用作了简要介绍,主要包括:粉体生长中的分形、断裂面的分形、离子注入等非平衡方法产生的分形、表面分形、无机材料中的分形、自旋玻璃中的分形。

Abstract

The concept of fractals is introduced with some examples on their mathematical generation. We then describe the application of fractals to research in material science and technology, including powder growth, fractal growth caused by non-equilibrium treatment, fractals of fractured surfaces, surface fractals, fractals in inorganic matter, fractals in spin glass and fractals in semiconductor thin films.

分形概念是由数学家 Mandelbrot^[1] 首先提出的。分形理论从几何学角度研究不可积系统几何图形的自相似性，它作为耗散结构理论和混沌理论的补充是定量研究自然界中复杂现象的有力手段。各学科工作者陆续将分形引入自己领域中研究一些相关问题。分形的研究现在已非常广泛和活跃，主要应用在数学、物理、化学、生物生理、医学、材料、天文、地理等领域中涉及由分离结构单元形成大的束团过程的研究上^[2]，例如聚合物科学中的凝胶与聚合过程，悬浮体和胶体物理学中絮聚和凝结过程，相变和临界现象中的渗流和形核过程，免疫学中的附着和抗体-抗原的凝聚过程，血液学中红血球的附着形成红细胞线串过程，材料科学中的晶化和树枝晶生长过程。由于具有分形特性的物质可能具有某种特殊功能，所以分形的研究对材料科学工作者很有吸引力。更广泛地说，分形体的形成对应着什么物理过程，它与材料的微观和宏观状态有什么关系，分形体形成的条件是什么，分形体维数度量了材料的什么性质，这一系列问题无疑地引起了材料科学工作者和数理科学家的极大兴趣。促使他们去研究分形的物理和数学机制，探索无序系统内部隐含的某种规律，用分形去标度规范无序系统。本文仅就近年来分形在材料科学中的应用作简要介绍。

一、分形概念

分形这个词起源于拉丁文 Fractus，原义是粉碎，具有分形特性的物体的维数常是分数。分形体不具有晶体几何的旋转对称和平移对称性，但具有其特有的标度对称、伸缩对称和自相似性。分形体的差别源于标度的不同而形状在不同尺度上是相同的。自相似性分两类：统计意义上的无规相似和数学意义上的严格的有规相似。自然界中的例子多属统计意义上的无规相似，如宇宙中的物质分布、复杂的生理系统、漫长的海岸线、高分子聚合物等；有规自相似如 Koch 曲线和 Sierpinski 海绵等都具有分形特

性。

1. 分形体的数学构造

(1) Cantor 棒分形

操作方法是取单位长度的线段一分为三，舍弃中间一段，余下两段再各分为三段，并舍弃其中的一段，如此进行同样操作以至无穷得到无穷集合。设 k 为操作次数， N_k 为进行 k 次操作后的线段数， r_k 为标尺与原长的比值，则有

$$N_k = 2^k; r_k = (1/3)^k.$$

由关系式

$$D = \ln N_k / \ln (1/r_k),$$

定义的维数 D 称作 Hausdorff 维数^[3]。在这个例子中 $D = \ln 2 / \ln 3$ ，分形维数介于曲线所嵌的欧氏空间维数与拓扑维数之间。

(2) Sierpinski 四面体分形

构成方式是取一单位体积正四面体，取每条棱中点连起来可得到八个小正四面体，去掉中间四个，余下角上四个继续同样的操作以至无穷。设 v_k 为 k 次操作后得到的小四面体体积， N_k 为小四面体个数，则有

$$N_k = 4^k.$$

$$v_k = (1/8)^k.$$

分形维数 $D = \ln N_k / \ln (1/v_k)^{1/3} = 2$ 。

分形维数恰好为整数，这说明具有分形特性的物体的分维并非一定为分数，这与分形体所嵌的欧氏空间维数有关。此例中标尺为 v_k ，总的四面体体积随标尺而变化。

(3) 随机分形

假设有一单位长线段平分为 n 段，其中 m 段被舍弃的概率为 $(1-p)$ ，被保留的概率为 p ，则余下线段总数为

$$N = n - m(1-p) = (n-m) + mp.$$

分形维数

$$D = \ln N / \ln n = \ln(n-m+mp) / \ln n,$$

D 就是随机分形的分维，它与概率 p 有关。对 Cantor 棒情形， $n=3$ ， $m=1$ ， $p=0$ ，代入上面公式得

$$D = \ln 2 / \ln 3,$$

结果与前面分析一致，说明规则分形只是随机

分形的特例。

2. 多重分形

分形可分为两类，一类是几何学上自相似均匀的分形，另一类是非均匀的多标度分形即多重分形。多重分形理论^[4]是为处理复杂而非均匀系统与过程而由 Halsey 等发展起来的。利用此理论能对自然界和物理过程中的分形现象进行更深入的分析。数学上多重分形可通过多种尺标重复迭代操作而产生，研究发现多种尺标的出现是混沌运动中存在多种 Liapunov 指数的直接结果。换句话说，随初始条件变化而发生的 Liapunov 指数的变化导致多标度分形的产生。由于多重分形的非均匀性，用一个参数不足以描述它，需要引入一系列参数 α ， $f(\alpha)$ 和 D_q (广义分形维数) 来对多重分形进行刻画， α 表示分形体中某区域的不均匀程度， $f(\alpha)$ 是对应区域的分形维数，不同区域值不同，对多重分形的描述可用 $f(\alpha)$ 谱图，不同 α 值区域具有不同的分形维数。多重分形概念提出后，有人对氯化铵的树枝状分形进行了多重分形研究，最近有人对失稳分解的早期阶段进行了多重分形分析。

二、材料科学中分形概念的应用

由于分形可用来规范无序随机体系，而材料科学中有许多涉及随机现象与过程的研究对象，分形维数可作为一个重要参量表征无序系统与随机系统，可用于规范系统的几何和动力学行为并指出其隐含的物理意义再作出解释。分形的引入有助于材料中无序系统的结构和性能的研究，因此，材料科学中的分形研究有很重要的意义。不少材料工作者已在这方面做了不少工作，并取得了一些有价值的结果，这里简要介绍部分工作。

1. 粉体生长中的分形

Schaefer^[5] 对气相火焰热解法制取的 SiO_2 粉体进行了分形研究，他利用小角散射对粉体进行测量获得了分形维数，还用其他方法求得了三种不同型号粉体的比表面、初级粉体粒度

团粒度等参数。经分析后认为，三种粉体都是质量分形的。粉体较大时，符合 DLCA (扩散控制束团凝聚模型)过程；大的团粒具有光滑的初级粒子，这说明初级粒子在形成初期是粗糙的，随着在火焰中的时间加长和团粒生长，这些初级粒子的表面被“退火”变得光滑了。因此，提出了 SiO_2 在火焰中的两阶段生长过程：先是由单体到小束团的弹道式生长模型加上“退火”效应，然后是束团与束团之间扩散凝聚的 DLCA 生长模式。

2. 非平衡方法产生分形

黄立基等^[6]通过离子束与固体相互作用这种材料改性的非平衡方法在 Ni 基合金中得到了分形结构。具体方法是用 Xe^+ 加速到 200 keV 后轰击镍基多层膜 (见图 1)，合金成分可通过改变交替沉积膜的相对厚度来控制，当注入剂量超过 $7 \times 10^{14} \text{Xe}^+/\text{cm}^2$ 时样品基本上由原来的多层晶态结构转化为非晶态 (见表 1)，透射明场电子显微镜分析可知其分形结构的形成对应于晶态与非晶态的共存，而当完全非晶化的薄膜在更大束流 Xe^+ 进一步轰击下，析出了新的亚稳相或平衡晶相。用电子显微镜、能量色散能谱、卢瑟福背散射谱仪、X 射线、四极探针等手段分析可知：分形结构的出现总是在薄膜完全非晶化以后，即无序的基体是分形结构产生的必要条件；在分形结构形成之前无序基体中首先形成具有一定结构的原子团；分形体的 Hausdorff 维数对固定组元的合金系统是相对恒定的；分形体本身是具有不同位向的小晶体结合而成；对应于分形体的形成电学参量有一跃变。作者还分析了离子注入引起的热力学参量变化，指出离子束辐照多层膜产生由晶态向非晶态的结构相变对应晶格畸变有一极大值；当非晶形成完全后，继续辐照所提供的能量用于形核驱动力，有助于形成晶相。这就是为何在实验中分形体只能在比较窄的剂量范围内出现的原因。

在以上研究的基础上，丁菊仁^[7]等研究了固体薄膜表面的磁性粒子的分形凝聚并得出了分形维数与磁作用之间的定量关系。实验样品

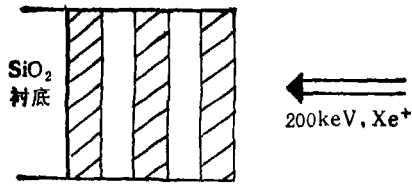


图1 实验示意图

表1 注入后薄膜结构变化

样品	注入剂量 ($\times 10^{14} \text{Xe}^+/\text{cm}^2$)			
	5	7	9	70
$\text{Ni}_{12}\text{Mo}_{15}$	Ni + Mo	非晶	非晶	hcp** + 非晶
$\text{Ni}_{60}\text{Zr}_{40}$	fcc	非晶	fcc* + 非晶	非晶

* fcc NiZr 平衡相; ** hcp 亚稳相.

是 Ag-Co、Fe-Cu 二元合金,两种金属交替沉积,然后用 Xe^+ 束流轰击,结果发现磁性粒子 Fe, Co 在表面重新聚集形成分形体。作者认为磁性粒子在表面的重新聚集源于其溅射产额较小,因而在表面浓度高于体内, Fe, Co 随机分布在表面通过扩散而凝聚成分形体。作者还研究了四种磁性粒子的分形聚集体的维数与它们的磁作用强弱之间的关系。具体方法是用离子束轰击单质膜产生分形体,算出分形维数,作分维与原子有效磁子数之间的关系曲线,经曲线拟合找出它们之间的定量函数关系,结果发现呈线性关系。计算结果表明磁性粒子聚集与 DLCA 过程一致。用非平衡方法产生分形的例子很多,除离子注入方法外还有溅射方法,如 Elam 在溅射沉积 NbGe_2 薄膜中发现了分形结构;另外还有热退火方法。其共同特点是非平衡处理导致粒子的重新聚集产生结构相变而形成分形体。

3. 断裂面分形

关于断裂面分形的研究,最早是由 Mandelbrot^[4] 等在 1984 年进行的。他们发现当一块金属因拉伸或冲击而发生断裂所形成的断裂面是粗糙而不光滑的,其形貌受金属的微观结构影响,同时也受宏观结构的影响。实验还证实了存在明显的中等尺度的可用分形表面来模拟

的区域。作者还引入一种被称作“切割岛分析”(slit islands) 的方法用来估算分维,给出了 300 号马氏体时效钢的切割岛分析数据(见图 2),图 2 中直线斜率为 1.55,由周长-面积关系可得分维 $D = 2/1.55 = 1.28$,此估算值与由断裂剖面分析所得结果一致。作者认为分形维数可作为金属断口粗糙度的量度。自此以后对断裂面分形的研究日趋增多。研究的角度因人而异。例如有人研究某种钢的断裂面分维与回火温度的关系,研究拉伸、冲击所致断裂面分维与拉伸性能、冲击性能之间的关系并讨论了显微组织对断裂面分维的影响,在断裂面研究中,计算分维一般利用周长-面积关系,最近龙期威指出用此法得到的分维依赖于尺标的选择,测量值不是真实的分维。

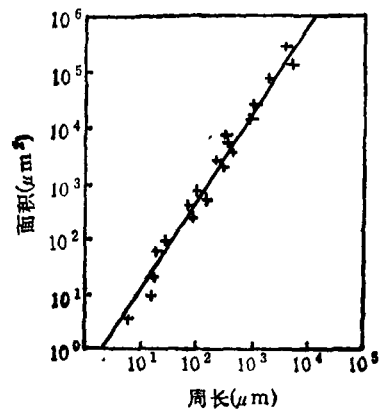


图2 切割岛分析的周长面积关系曲线
材料为 300 号马氏体时效钢; 标尺=1.5625 μm

4. 薄膜中的分形

利用非平衡方法可导致结构相变而产生分形。受此观点启发,人们利用加热退火这种非平衡处理方法对薄膜进行处理使得膜内粒子的重组和聚集产生分形结构。张济忠利用高温下汽相沉积得到了具有分形结构的 MoO_3 晶体,分形生长过程符合 DLCA 模型。有人对 a-Ge/Au 双层膜在不同退火温度下进行了研究,并用计算机进行了模拟,膜内产生分形凝聚形成分形体,分形体的形成与 a-Ge 的晶化和 Au 的缩聚有关。另外, Nathan 对 Al/a-SiC 加热退火实现界面反应,导致 Si 分形结构的产生。

林鸿溢^[9]通过加热 a-Si:H 膜得到了分形结构,实验方法为原位动态技术,对分形结构的透射电子显微像用 Sandbox 方法计算分维(见图 3)。图 3 中 N 为边长 L 的正四边形中分形结构格点数,由图中直线所得斜率就是分形维数值,结果发现温度为 450℃ 时得到分维为 1.69 的叉状结构;温度为 800℃ 时得到分维为 1.76 的岛状分形结构。通过对分形结构形成机制的分析可知:远离平衡态导致非晶相向微晶相的结构弛豫及微晶相向多晶相的结构相变;分形结构的形成对应薄膜物性的突变,因为物理特性跃变对应结构改变;分形区的产生过程是薄膜局域的有序化过程;分形区的形成对应于非晶与晶态的共存;这种分形生长不符合 DLA (扩散控制凝聚)过程,取决于生长过程若干物理因素。我个人认为在薄膜的晶化分形研究中还可以研究分维与某些参量之间的定量关系,定量地将分维与微观量、宏观量联系起来更深入地刻划分形体,赋予分形以更深的物理意义。

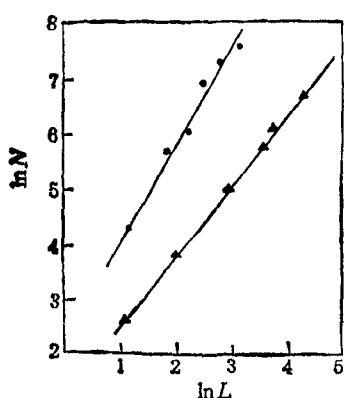


图 3 a-Si:H 薄膜分形体的 Sandbox 曲线

▲对应 $T = 450^{\circ}\text{C}$; ●对应 $T = 800^{\circ}\text{C}$

5. 表面分形

Avnir^[10]等通过对吸附剂的研究发现大多数材料的表面在微观上(分子尺度范围)具有分形特性,即在微观尺度上表面几何不规则性和缺陷在标度变换下具有自相似性。作者认为可用分维来表征表面不均匀性,对表面不均匀程度定量化数量化。研究结果表明,大多数分形维数在 2 与 3 之间。他们另外在对催化材料的

物理

研究中也观察到表面分形。Romeu^[11]研究了可作为催化材料的细小金属粒子的表面分形,用电子显微镜对金属粒子形貌进行观察后发现表面很粗糙,可用分形来表征。具体方法是先用透射电子显微镜获得金属粒子的形貌图,经过计算机处理得到经计算机重构的金属粒子的轮廓图,用此轮廓图根据一定方法求得金属粒子表面积与标尺间的关系,因此可得到分形维数。作者对几种金属用不同处理方法处理得到不同的分维(见表 2),从表 2 中可发现金属粒子作为催化材料在化学反应前后分维有变化。经化学反应后分维增大对应于金属表面粗糙度的增加,这说明分形概念可用于描述反应前后物质表面的变化情况。在大多数情况下用常规方法难于观察并定量描述粒子结构的细微变化,而分形概念引入使得定量表征反应前后粒子表面结构的差别成为可能。从表 2 中看出化学反应使得表征表面粗糙度的分形维数从 2.146 变为 2.330,表面粗糙度的细微变化用直观的数量差别被表达出来了。分形的应用为催化反应提供了极为有用的信息。

表 2 不同处理方式得到的金属粒子的表面分维

金属	衬底及生长类型	表面分维 D
金	10Pa 压力下 NaCl 晶体上汽相沉积	2.130
钯	同上	2.132
铂	同上	2.146
钯	盐在氢气中还原沉积在非晶碳衬底上	2.072
铂	碳衬底上盐在氢气中还原,在温度为 700℃ 时发生甲烷化反应	2.330

6. 无机材料中的分形

研究表明无机材料内部一定尺度范围内也存在分形结构。有人对球墨铸铁进行了研究,以分形几何学为基础建立球墨的二次电子像的分维布朗模型并利用分维布朗参数反映球墨本身的起伏。还有人研究了 Al-Si 共晶生长过程,发现 Si 相分枝簇是分形结构,分维度量了 Si 相分枝簇的分枝程度。还有人用小角中子散射(SANS)对铝硅酸盐气溶胶进行了研究^[12],发现气溶胶在较大尺度范围内呈现自相似性。

7. 自旋玻璃中的分形

Grest^[4] 对自旋玻璃从高温到低温淬火过程中所形成畴的性质进行了研究。淬火之前束团遵从渗流统计学, 淬火后观察到大束团在较大尺度范围内具有渗流特性, 与初始渗流束团有相同的 Hausdorff 维数; 在小尺度范围内束团是稠密的; 在中等尺度范围束团具有明显的分形特性。中等尺度区域对应真实的分形, 换句话说, 分形区对应于从短程稠密区向长程渗流区的过渡与共存, 这与离子束注入导致非晶化过程中分形产生对应于晶相与非晶相的共存观点类似。

最后谈谈自己对分形的极为粗浅和表观的观察: 在 a-Si:H 膜制备中发现 p 型掺杂的膜与玻璃衬底结合不牢, 当样品从样品室取出置于空气中, 膜开始脱落, 膜的脱落由一点逐渐发散开呈树枝状, 具有自相似性, 说明膜的脱落

过程也具有分形特性, 膜的脱落可能是由于应力过大造成的, 这种脱落可看成是应力作用下膜的分形脱落。

- [1] B. B. Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco, (1982).
- [2] F. Family et al. eds., *Kinetics of Aggregation and Gelation*, North-Holland, Amsterdam, (1984)
- [3] 丁菊仁等, *物理*, **19**(1990), 81.
- [4] J. L. Mccaulley, *Phys. Rep.*, **189** (1990), 227.
- [5] D. W. Schaefer, *MRS Symposia Proceedings, Materials Research Soc.*, **79**(1987), 47.
- [6] L. J. Huang et al., *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 2879.
- [7] 丁菊仁等, *中国科学A辑*, No. 11(1990), 1229.
- [8] B. B. Mandelbrot, *Nature*, No. 308 (1984), 721.
- [9] 林鸿溢, *半导体学报*, **11**(1990), 430.
- [10] D. Avnir et al., *Nature*, No. 308(1984), 261.
- [11] D. Romeu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986), 2552.
- [12] F. Chaput et al., *J. Non-Crys. Sol.*, **116**(1990), 133.
- [13] G. S. Grest et al., *Phys. Rev. B*, **30** (1984), 5150.

粒子与微粒的电磁和光捕获

张光寅 严向军 张春平

(南开大学物理系, 天津 300071)

本文对粒子和微粒捕获的主要方式: 电动捕获, 磁悬浮, 激光捕获的原理, 装置和应用作了简要介绍。就其特点进行了综合与比较, 同时也对它们的应用前景作了展望。

科学的发展要求对物质世界进行多方位的观察。在微观世界中需要更深入、细致的剖析。而微观物质的运动特性决定了它对实验技术高难度, 多方面的要求。几十年来发展起来同时仍在发展的粒子与微粒捕获技术使得人们越来越方便地对微观世界进行观察。从可见的粒子到肉眼看不见的微粒直到原子都实现了物理捕获和控制操作, 如带电粒子的电场捕获, 金属球的磁悬浮, 原子的激光冷却和捕获等。为更清楚地了解这些实验方法, 扩大视野和应用范围, 我们有必要进行一定的综合与比较。

一、带电粒子的电动捕获

实验中对真空中微尘粒子静电情况的研究导致了以交变电场进行粒子动态捕获方法的发展。直径数微米的带电粒子在交变和静电场中的捕获已实现。

1. 电动捕获原理^[1]

带电粒子在电场中会受到库仑力作用, 一些带电大分子团在电场力和重力共同作用下可以达到平衡, 如密立根实验中电子电量的测定,