

二维锌枝晶分形结构的生长及数值模拟*

曾传昌 冯光曦 杨健华 孙正和** 王强

(哈尔滨工业大学(威海)理学院光电科学系,264209,山东威海)

摘要 我们利用电沉积法制备得到具有分形结构的二维金属锌枝晶,分析了阳极电极形状及衬底材料等实验参数对其生长的影响.将实验获得的分形图片经 MATLAB 处理得到二值化分形结构,并可由软件 Fractal - Fox 获取其分形维数.分别基于扩散限制凝聚生长(DLA)模型和布朗运动模型,可以利用 MATLAB 软件模拟获得了各实验参数对于分形结构的影响.我们将布朗随机因子引入分形结构生长的物理分析中,综合宏观和微观里的分形现象,分析了分形结构的生长机理.

关键词 电沉积; 二维金属锌枝晶; 分形结构生长机理

中图分类号 O 782.1; TQ 153.12 **文献标识码** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-4748.2015.03.019

1 引言

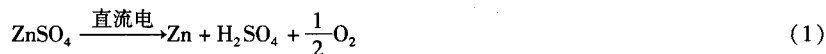
自 1975 年 Mandelbrot 提出了分形的概念,人们认识到分形维数这一概念是表征分形结构特征的重要参数,并在数学上逐渐发展起来一整套成熟的分形理论^[1,2].这得益于传统的数学研究方法与计算机图形学的有机结合.分形结构试验与理论作为非线性科学的一个重要分支,其在各个领域上的应用愈来愈广泛^[3].目前用于模拟分形自相似结构的主要数学方法包括 L - 系统法、迭代函数系统(IFS)法、受限扩散凝聚(DLA)法、粒子系统法等;在分析其分形维数时,数学上也提供了一系列分形的计算方法^[4].研究其物理成因也具有重要意义,但是目前这一方面的研究相对较少.电沉积法、溅射镀膜等方法在表面物理及材料科学等领域已有很成熟的应用,也是实验室获取分形结构的主要实验方法.在实际工业技术中,金属沉积是一种重要的冶金工艺,可成熟地用于金属的提取和提纯;然而在沉积过程中具有分形结构的金属枝晶的生长却常常受到生产试验条件的影响,所以往往难以按生长要求制备具有特定形态的金属枝晶.通常,研究者选择以电解硫酸锌来获取金属锌的二维分形枝晶结构,这需要熟悉并反复优化电沉积金属的制备工艺,对枝晶的生长中的各影响因素进行物理分析,实现二维分形枝晶的可控制备^[5-7].

本文就是采用金属电沉积法来制备具有明显分形结构的二维金属锌枝晶.本文首先利用环形电极电解硫酸锌,在适当条件下制备了清晰明显的具有分形结构的金属枝晶,研究分析了电压、浓度、溶液高度等实验参数对分形结构生长产生的影响;并且做了条形电极阳极、点电极阳极与环形阳极的对比试验以及普通滤纸衬底和金属衬底的对比试验,研究了各实验参数对于结果的影响.利用 MATLAB 软件对二维金属锌枝晶的光学图片进行二值化处理,用 Fractal - Fox 软件求得分形维数,并用 MATLAB 模拟出与实验效果相当的分形结构.我们将

布朗随机因子引入分形结构生长的物理分析中,从分形结构中系统能量最低原理以及耗散理论出发,从宏观和微观上分析了分形结构的物理成因.我们目前的结果对于分形结构的研究有较好的实验和理论借鉴意义.

2 实验部分

2.1 实验原理 硫酸锌的电解实验原理比较简单,属于电化学的范畴,在此我们首先给出其电化学反应方程式



在硫酸锌溶液中存在的阳离子有 Zn^{2+} 、 H^+ .当给溶液通直流电时,阳离子走向阴极和从阴极流出的的电子放电结合^[8].这个过程中在阴极会发生的反应有:



单质呈灰白色,本实验沉积出来的金属锌单质会因二维枝晶表面粗糙度较大而呈灰黑色.图 1 给出电沉积实验装置示意

收稿日期:2014-11-19

* 哈尔滨工业大学(威海)“大学物理精品课建设”基金(2012年)资助项目;“大学物理实验教学与创新”基金(IMIQ10110010)资助项目;山东省研究生教育创新计划基金(SDY12005)资助项目;哈尔滨工业大学(威海)大学生科技创新基金资助项目;哈尔滨工业大学(威海)研究生双语教学研究基金(WH2013014)资助项目.

** 通讯作者,男,副教授.

图. 我们采用硫酸锌固体(纯度 91.7%)作为电解质. 实验中我们以直径为 10 cm 的塑料培养皿为电化学反应容器,以相等大小普通滤纸作为沉积衬底浸没于溶液中;以直径为 9 cm、宽 0.5 cm 的环形金属锌片环绕器皿内壁底端作为电解阳极,以常用 7 mm 铅笔芯(石墨芯)作电解阴极. 实验前将铅笔芯液端打磨成针尖状. 实验时器皿内盛硫酸锌溶液高度控制在 1.5 mm 左右,阴极电极铅笔芯控制在刚好进入液面. 采用直流数字可调电源(量程为电压:0-40 V,电流:0-5 A)供电. 图 2 是实验实物图. 照片拍摄用的是普通相机.

2.2 电解实验 在本实验中,实验室温度一直为常温(~300 K). 实验中发现:溶液高度、溶液浓度以及外加电压的控制对分形结构的生长影响较大.

电解的溶液高度决定了沉积晶体的生长模式. 主要的生长模式有:三维岛状生长模式(Volmer - Weber, VW 模式)、二维层状生长模式(Frank - Vander Merwe, FM 模式)以及层岛状生长模式(Stranski - Krastanob, SK 模式)^[9,10]. 所以,溶液高度的适当与否,直接决定了二维分形枝晶的生长效果. 本文在多次试验分析后得出:电解溶液高度在 0.5 - 1 mm 范围内枝晶呈 FM 模式生长,大于 2 mm 的高度后就会开始 VW 模式生长. 处于 SK 生长模式下的金属锌枝晶其分形外貌最明显,效果最佳,因此我们实验中溶液高度控制在 1.5 mm 左右. 硫酸锌溶液浓度控制在 1.0 - 10 mol/L 范围中,直流电压设定在 1 - 25 V 之间,电解时间 10 - 50 min. 取出样品后自然晾干.

我们采用简单的控制变量法来研究溶液浓度和外加电压对分形结构生长效果的影响. 考虑到试验条件的可控性问题,本文采用了两种对比方法:1) 在三个器皿下同时分别生长,2) 在一个器皿里分时分区生长. 第一种方案的生长效果较优,所以本文采用前者的实验数据作为后续处理对象. 本文还做了电极形状对比试验和衬底材料对比试验两种对比试验.

2.3 分析方法与流程 在本文的研究过程中,总体流程如图 3 所示. 二值化处理以及模型都采用 MATLAB 编程^[11-15],具体流程如图 4 所示. MATLAB 模拟采用 DLA 和布朗运动两种模型,两者的共性是都考虑了粒子生长过程中的布朗控制. 在 MATLAB 模拟中用了生长步长和生长随机角分别表示实验中电压和浓度的作用,具体流程如图 5 所示. 而其他因子在模拟中并未涉及.

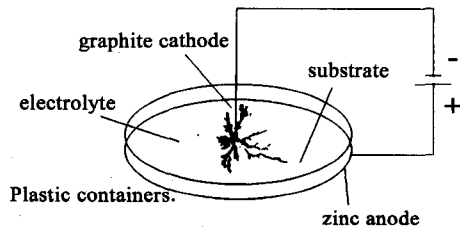


图 1 电解硫酸锌实验装置示意图



图 2 电解形成 Zn 分形晶枝结构的实验装置实物图

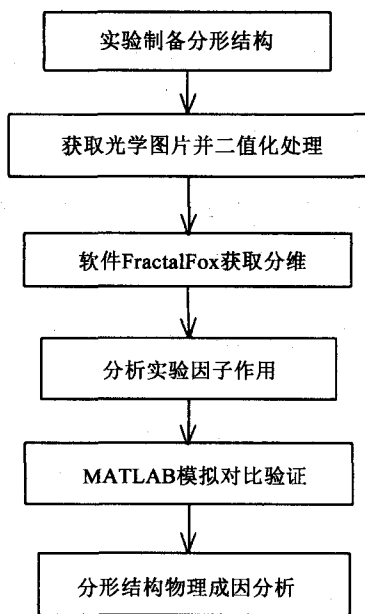


图 3 实验和理论分析流程图

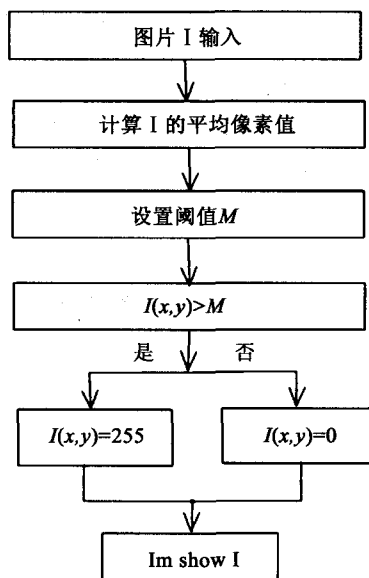


图 4 分形结构光学图片的二值化处理流程

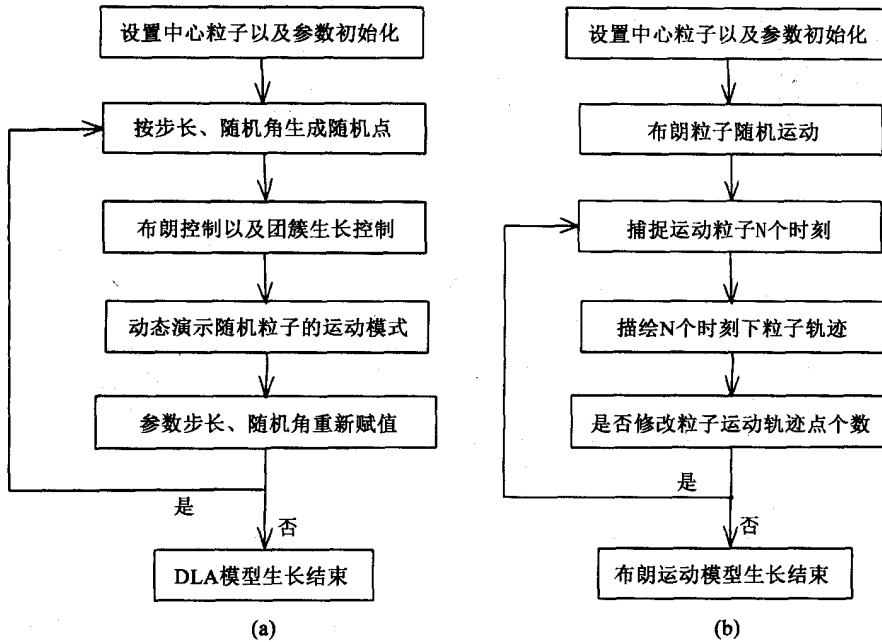


图5 分形结构两种模型模拟流程图对比(a:DLA模型, b:布朗模型)

3 结果和讨论

3.1 二维枝晶分形结构形貌分析 图6给出实验获得的二维 Zn 枝晶结构的光学照片,呈现明显的分形结构. 实验条件是:硫酸锌浓度为 1.5 mol/L,外加电压为 2.5 V,生长时间为 40 min.

3.1.1 浓度对分形结构的作用 我们控制外加电压(10 V)不变,分析溶液浓度对结构的影响. 图7给出不同溶液浓度下电沉积的金属锌枝晶结构的光学照片. 并且浓度关系为 a (约 1.5 mol/L) < b(约 4.0 mol/L) < c(约 6.0 mol/L). 从图中可以看出:随着浓度的增加,分形枝晶越发敞开,枝晶数目就减少,已生长的分枝对待生长分枝的屏蔽作用就越明显. 实验中的浓度,实际代表了粒子(即生长点)的密度分布. 在其生长过程中,以生长点为枝;浓度大时,枝较细,易成敞开状,即生长的屏蔽作用较大;浓度小时,需要在生长过程中寻找其他生长点,这样就导致了枝状数量较多. 为了便于计算金属枝晶结构的分形维数,先将图7的图片二值化处理,如图8所示.

3.1.2 电压对分形结构的作用 我们控制硫酸锌溶液浓度(约 3 mol/L)不变,分析外加电压对结构的影响. 图9给出不同外加电压下沉积的分形枝晶结构的光学照片. 并且外加电压满足关系 a (10 V) < b (16 V) < c (20 V). 从图中很明显可以看出:随着外加电压的增加,枝晶越来越密集化,而且电压为 20V 时所得的结构基本上已看不出中心部位的分枝了.

在实验中,所加电压会造成电场分布,从而使粒子获得定向运动速度或者放电速度. 未加电压时,硫酸锌溶液里粒子均匀分布;在中心电极加负电压后,电压越大, Zn^{2+} 粒子(离子)向中心移动速度越大,所以放电越迅速. 当超过一定电压后,粒子放电位置的自由选择作用就明显减弱了,在分形结构形貌上表示为分枝粗大致密. 反之,电压较小时,粒子放电位置的自由选择作用明显,实际表现为粒子自组织生长的随机过程,在分形结构形貌上表示为分枝较细,敞开生长,分形结构更加明显.

同上也图9的光学图片进行二值化处理,如图10所示.

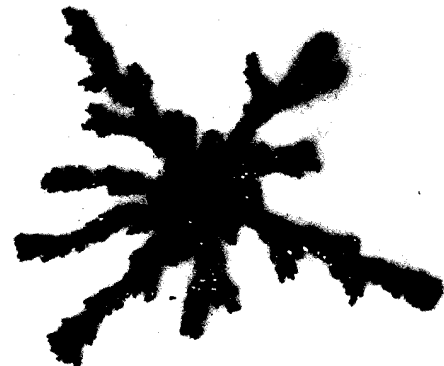


图6 典型的具有二维分形的 Zn 枝晶

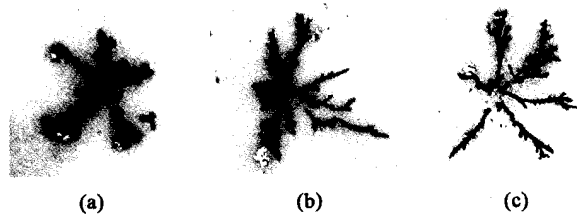


图7 外加电压 10 V 时不同浓度下生长的枝晶结构 (a: 1.5mol/L, b: 4.0mol/L, c: 6.0 mol/L)

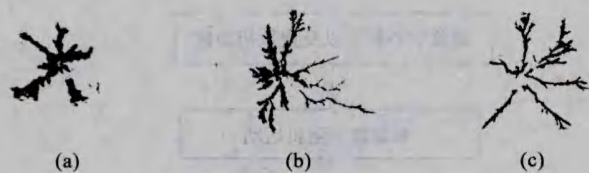


图8 分形结构(图7中的图片)的二值化处理图片

在电极形状对比实验中,我们采用了条形电极、点电极作阴极与环形阳极的对比试验.只有电极形状不同而其他实验条件相同时,结构的分形化生长相同,生长的分形结构外貌大致相同.进一步讲,将环形电极换成条形电极以及点电极阳极时,虽然电场从角向对称分布变成非均匀分布,但是分形结构的形貌并未相应发生明显变化.这说明分形结构的生长对于电极形状(也就是电场分布)的依赖性极小.同一个衬底,同样的电极形状,即使不在中心也能生成分形结构,而且其形貌或分维无太大差别.即使有时候长出的结构分形外貌少许不同,也是由于粒子分布在衬底不均匀等偶然因素所导致的.

在衬底对比试验中,我们做了金属铝衬底与普通滤纸的对比试验.实验结果显示:在金属衬底上由于光滑的表面无法附着生成的锌粒子,即使在生长的过程中粒子按分形化放电,锌粒子也无法按分形化长在表面上.另外由放电化学式可知在阴极周围

还有氢气产生,气体会使粒子的附着性变弱,这就使金属衬底更加不好生长分形结构.而滤纸衬底恰好与之相反,其粗糙的表面能让生成的锌粒子很好地沉积成为枝晶,从而在滤纸上呈明显的分形结构.所以实验时选择滤纸衬底或其他表面粗糙的材料便于我们对二维金属沉积分形枝晶的制备、分析和处理.

为了方便分析,我们把图7-10中实验获得的分形结构图片重新标号(其中图7的结构依次对应这里的a、b和c,图8的结构依次对应此处的 a_1 、 b_1 和 c_1 ,图9的结构依次对应此处的d、e和f,图10的结构依次对应此处的 d_1 、 e_1 和 f_1),并将上述分形结构用Fractal-Fox软件求其分形维数.分析结果如表1所示.结果表明:在求分形维数时,二值化处理的结果较好符合了真实的光学图片.

从表1中分形结构的二值化处理前后分形维数数据可以看出:随着浓度升高,所形成分形结构的分形维数相应增加;随着电压升高,所形成分形结构的分形维数也相应增加(图d、e、f的分维数据受光学图片效果影响,相对误差较大,但分维的增加趋势仍能显示;并且经二值化处理后的图片算得的分维增加趋势更明显).这一规律与以往研究的结果是类似的^[8].分形维数与传统意义上的维度概念并不相同:通常的维数有表示欧式空间的4个维度及描述动力系统中变量的个数两种意义,只能是整数;而分维表示的是分形结构的自相似程度,是一个极限概念,只能是分数^[1,4].当算法不同时,其分维数值也会不同.只有当分形结构在同一算法下得到的分维才能用来说明结构的自相似程度大小^[2].

分形维数仅代表结构的自相似性,是分形结构的一个表征态值,并不是从物理成因的角度来讨论分形结构.在本文后续部分,我们将避开传统上对于分形维数的数学讨论,分别从宏观和微观的角度分析分形结构的物理成因.

3.2 模拟与分析

3.2.1 DLA模型分形结构生长的模拟 在MATLAB模拟中分别以相应参量对应实验中的浓度、电压;溶液高度没有考虑,所以可以理解为二维生长. MATLAB模拟用 θ 表示随机角度,对应实验中的溶液浓度;步长 L 表示模拟中对粒子施加的随机运动单位,对应实验中的外加电压.另外,为了便于模拟数据处理和后续的机理分析,我们加上了参与生长的随机粒子数 N ,对应于 Zn 粒子.如 $1\theta-15\ 000-1$:表示在一个单位浓度和一个单位电压下,15 000个粒子生长成的结构.部分模拟结果如图11、12所示.

图11所示是生长步长 L 不变(即电压不变)时,随机角 θ (对应浓度)对分形结构生长的影响.从图11(a)到(c)可以看出: θ 越大,结构趋于敞开状,分枝数越少.这可以简单理解为: θ 在模拟中是控制随机角的取值, θ 越大,单位运动在角向上跨度就大,自然在团簇生长时也就越分散,整体结构表现出敞开状.

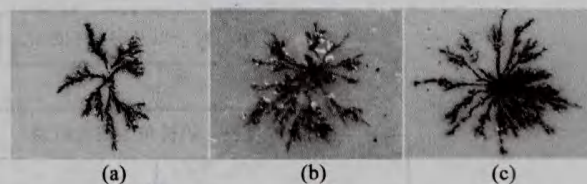
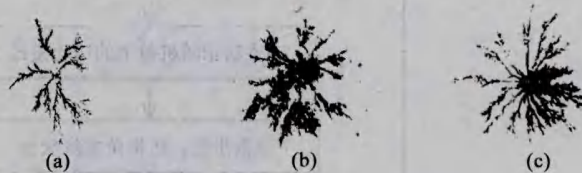
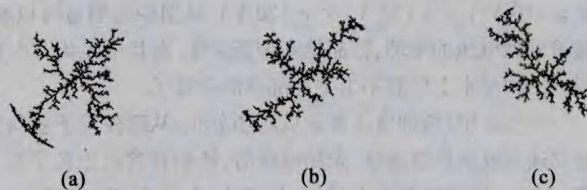
图9 电解液浓度为3.0 mol/L时不同电压下的分形枝晶结构
(a:10 V b:16 V c:20 V)

图10 分形结构(图9中照片)的二值化处理图片

表1 各分形结构分维处理结果

分形结构	a	b	c	d	e	f
分形维数	1.267 5	1.330 4	1.348 7	1.352 7	1.364 1	1.372 8
分形结构	a_1	b_1	c_1	d_1	e_1	f_1
分形维数	1.309 0	1.359 3	1.363 3	1.421 1	1.453 0	1.491 9

图11 Fractal结构的DLA模拟(相同步长 L 不同随机角 θ)

而图12所示是随机角 θ 相同时,不同步长 L 下模拟的分形结构.从图12(a)到(c)可以看出:随 L 变大,结构越发趋于枝晶密集化和粗壮化.至于结构的大小不一的原因,这是由于我们在模拟过程中设定参与运动的粒子数一定,其枝晶越粗壮致密,整个结构分布就越相对较小.顺带说明,图11(a)和图12(a)左下角的那条弧状粒子线是MATLAB编程代码局限所致,与结构分析无关.

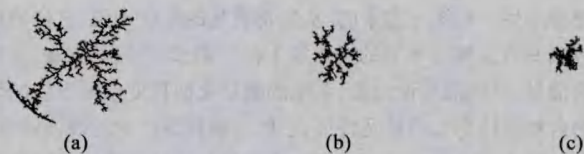


图12 Fractal结构的DLA模拟(不同步长 L ,相同随机角 θ)

从图11、12可看出,在参与模拟的粒子数相同的情况下, θ 对粒子运动的影响作用表现为让结构更趋于散开状,而步长 L 对粒子的影响作用表现为让结构趋于致密粗壮.这与实验所得的结论是相符的.

3.2.2 布朗运动模型分形结构生长的模拟 布朗运动是普遍存在的一种分子随机性运动,在分形结构形成时同样存在;但是以往人们往往忽略布朗运动对于分形结构物理成因的影响.在上述MATLAB模拟中充分利用了粒子运动的随机性,从图5的编程流程也可以看出两种模型的功能共同点—随机性.为了随机性原理的物理实现,我们考虑引入布朗随机因子,做了基于布朗运动的粒子轨迹分形的模拟分析.在图13、14中,纵、横坐标轴表示粒子在不同时刻相对于中心位置的坐标值.

模拟图像如图13所示.图a是步长作用一样但角向作用随机时粒子的15000个不同时刻的点迹.可以看出这和DLA模型中的分形结构还是有神似之处,也能体现出结构的自相似性.随机角给粒子提供了偏离中心位置的作用,表现为粒子聚集簇的分枝效应.图b是粒子在15000个时刻下的点迹,只考虑了步长的影响,随机角向作用均匀.可以看出粒子围绕设置的中心位置均匀分布.而且越是靠近中心位置粒子密度越大,分布显示较黑.实际作用中,布朗粒子的运动应当受到角向与径向(这里是步长)的共同作用,而且起作用的单位值也是随机的.这实际对应的就是DLA模拟的结果.

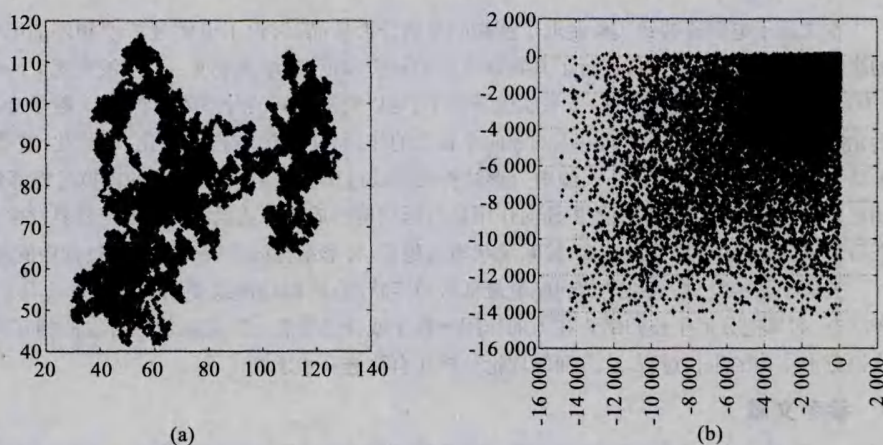


图13 布朗粒子运动点迹模拟分形结构

这实际对应的就是DLA模拟的结果.

图14是粒子的15000个轨迹点,它们是在相同的条件下获得的不同随机结构.可以看出:模拟条件一样时,粒子的15000个轨迹集合(生长的结构)也是不一样的,还是体现出系统粒子生长过程中受随机因子的影响.

布朗模型具有一定对比分析意义.当然,从其物理依据也不难分析出,对于一个随机粒子数为 N 的系统,在某个时刻下这 N 个粒子的运动状态(或者说轨迹的叠加效果),与其中某一个粒子在 N 个时刻下捕捉得到的运动状态或叠加轨迹是等效的.这也就是为什么能在布朗控制和团簇生长控制下模拟出DLA粒子生长的分形结构.对于布朗模型粒子的轨迹分形,我们能从其中看出一定的分形结构,或者说自相似性.

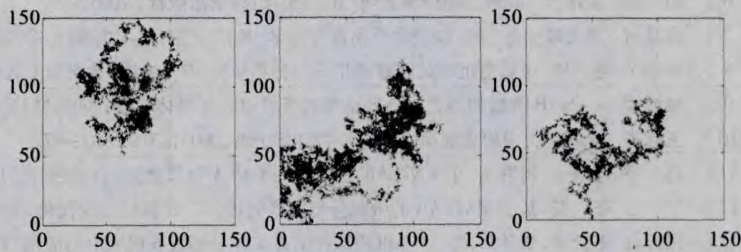


图14 相同条件下三次模拟的不同结构

MATLAB的DLA模型和布朗运动模型的模拟很好地验证了实验结果,也进一步深化认识了浓度、电压等因素在分形结构生长中的物理作用.另外,通过布朗模型与DLA模型的对比可以发现:电沉积分形结构的生长虽然表现为特定的枝晶结构,但其生长过程中充满着粒子沉积的布朗随机性.在非平衡状态下,将随机作用引入了分形生长的物理过程分析,粒子自组织形成分形结构是不言而喻的.

3.3 分形结构深入认识 本文电沉积实验制备的Zn枝晶二维分形结构属于微观作用上的分形生长.我们着重应用物理的普适理论来解释其形成的微观原因.其受力作用表现在粒子运动时受到的径向和角向的作用;在非平衡态下,粒子以分形结构凝聚,使得系统粒子的分布达到最稳态.

在宏观上分形现象也是普遍存在的.当把树枝从上往下投影时,在投影面上就是我们实验要获得的二维平面分形结构.树枝就是一种分形生长,只不过在实际生活中,树枝还有一个向上的生长动力,而水平方向上的生长是可以同我们研究的二

维分形生长相统一起来的.从生物进化的角度来说,这样的枝状分布能为其占有更大的空间资源、能量资源包括(阳光、水分等),只有这样分布了的树才能生存下来,即稳定的存在.在这分形分布作为一种自然选择是为了充分利用外界资源,充分获取能量.从耗散理论出发,系统的能量交换程度以及系统的熵在这种分布下能取得极值^[16,17].贝纳特流虽不像其他分形结构的自相似性那么明显及特征化,但贝纳特流产生的规格对流格子却能更好地通过对流使温度分布更加均匀,使系统能量达到最稳状态,此时熵值往往最低.雪花的分形结构的成型也是在降落过程中其自身散热和外界的作用产生^[18].这两个现象都是让系统的熵达到极值,同时系统与外界发生的能量交换值也达到最大.系统在非平衡态下选择分形化结构,以满足系统与外界的能量交换及熵流输出^[19-21].

远离平衡态的开放系统^[22-24],通过与外界交换物质和能量,可能在一定的条件下形成一种新的、稳定的有序结构,表现为分形结构.假设开放系统有能量,集中在有限区域里.当外界给予一个畸变条件,系统完成过渡态后具有新的能量,能量的交换会使系统在里呈分形结构均匀分布,分形分布使系统的熵值最低,状态最稳定.这里的分形结构是广义上的分形,布朗运动模型模拟生长的结构就属于广义上的分形结构,而本文制备的金属锌沉积分形枝晶结构就是一种狭义上的分形结构.当系统与外界作用的条件允许时,分形结构会由广义的分布转化为狭义分形分布.

4 结 论

本文基于电解硫酸锌实验制取了清晰明显的分形枝晶,讨论了电解液浓度和外加电解电压等实验条件对枝晶分形外貌的影响;对分形结构的生长进行了其物理成因的分析和模拟.结果表明:1) 浓液高度 1 mm - 1.5 mm, 电解液浓度 1.5 mol/L - 3.0 mol/L, 电解直流电压值 2 - 5 V 实验条件下,可以获得很好的分形 Zn 枝晶. 2) 粒子会在电压、浓度等因素的作用下选择分形化结构沉积生长. 粒子受到电压的径向生长力的作用,使分形结构致密化、粗壮化;粒子受到浓度角向随机力的作用,使分形结构呈敞开状、分散化. 3) 实验中分形结构的形成过程以及 DLA 模型中的模拟过程都包括了系统粒子的布朗运动过程. 布朗运动中的随机角向作用及随机径向作用是分形结构形成的本质原因. 4) 当与外界发生作用时,经过能量及熵流交换的过渡态后,系统粒子会形成分形结构,使系统状态最稳定. 分形结构的外貌受该作用过程中的随机影响.

类似于悬链线,系统也是达到能量最低最稳定状态;然而悬链线受明确的力的作用,在重力作用下柔线处于悬链线的分布状态.如果把分形生长归结为在力的作用下粒子或分形全息元间自组织即自发的相互分配系统域的过程,或许能更清楚地认识分形结构的生长过程.这方面的理论分析还有待进一步发展.

5 参 考 文 献

- [1] [英] Kenneth Falconer 著,曾文曲译.分形几何:数学基础及其应用[M].北京:人民邮电出版社,2007.
- [2] 沙 震,阮火军.分形与拟合[M].杭州:浙江大学出版社,2005.
- [3] 孙 震,吴自勤,黄 昀.分形原理及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [4] 孙博文编著.分形算法与程序设计:Visual C++实现[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] 杨展如.分形物理学[M].上海:上海科技教育出版社,1996.
- [6] 田 强,涂清云.凝聚态物理学进展[M].北京:科学出版社,2005.
- [7] 孙其诚,厚美瑛,金 峰.颗粒物质物理与力学[M].北京:科学出版社,2011.
- [8] 陈书荣,谢 刚.金属电沉积过程枝晶生长的分形研究[D].昆明:昆明理工大学,2002;132-145.
- [9] 林鸿溢. a-Si:H 薄膜的晶化与分形结构的形成[J].半导体学报,1990,11(6):1-7.
- [10] 王恩哥.薄膜生长中的表面动力学[J].物理学进展,2003,23(2):10-47.
- [11] 高 睿,谢淑云,陶继东.在 MATLAB 平台下实现 DLA 分形聚集生长的模拟[J].西南师范大学学报,2005,1:83-86.
- [12] 宁 吉,张 卫.基于 MATLAB 的微观分形图像处理[J].计算机与现代化,2013,2:6-14.
- [13] 谭万春,王云波,李冬梅,等.计算机模拟技术在絮体分形成长研究中的应用[J].水处理技术,2005,1:16-19.
- [14] 冉诗勇.利用 Matlab 模拟布朗运动测量实验[J].大学物理实验,2011,06:67-70.
- [15] 杨书申,邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算[J].中国矿业大学学报,2006,35(4):478-482.
- [16] 苏亚凤,李普选,陈 鹏,等.树状分形结构形成过程的实验研究[J].物理学报,2009,07:4531-4535.
- [17] 余仲卿.树枝的分布有奥妙[J].大自然探索,1987,02:160.
- [18] 殷雅俊,杨 帆,范钦珊.超级分形雪花的生长运动学[R].科学通报,2009,22:3433-3440.
- [19] 谭 鹏,徐 磊.一些典型的软物质物理中的非平衡自组织现象[J].物理,2012,01:20-24.
- [20] 魏 诺,王占民,朱陆莉.分形物理机制初探[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2003,31:91-93.
- [21] 魏 诺.分形图像物理机制的系统研究[J].西安建筑科技大学学报,2005,02:291-293.
- [22] 徐玖平,罗久里.拓展非平衡系统自组织理论的研究进展[J].科技前沿与学术评论,1999,04:52-56.
- [23] 刘若庄,马本望.非平衡系统中的自组织现象—“耗散结构”的理论与应用简介[J].物理,1979,05:449-455.
- [24] 申 维.耗散结构、自组织、突变理论与地球科学[M].北京:地质出版社,2008:1-12,56-67.

(下转第90页)

SPATIAL AND TEMPORAL EVOLUTION ANALYSIS ON REGIONAL DISCREPANCY AND POLARIZATION OF TOURISM ECONOMY IN CHINA

Zhang Guanghai Shang Xiuzhu

(Department of Tourism, School of Management, Ocean University of China, 266100, Qingdao, Shandong, China)

Abstract While the rapid development of China's tourism industry in recent years, tourism economic discrepancy and polarization phenomenon is increasingly prominent. Basing on panel data from 2001 to 2012, this paper makes quantitative analysis on the evolution process and the spatial and temporal pattern of regional discrepancy and polarization of tourism economy in china with Variation coefficients and polarization index. And this paper uses the spatial auto - correlation analysis to study distribution characteristics of Chinese provincial tourism economic polarization. The results show: the level of China's tourism economic discrepancy and polarization is on the decline; the tourism economic discrepancy and polarization of Eastern region reduces substantially but still relatively significant; the level and changes the tourism economic discrepancy and polarization of Central and Western region are very small, while the Northeast region has different rate rises; but tourism economic discrepancy and polarization among the four regions is shrinking; space distribution of four types of tourism economic polarization, including HH, LL, HL, LH, is rather clear.

Key words tourism economy; discrepancy and polarization; spatial and temporal pattern; spatial auto - correlation analysis

(上接第82页)

GROWTH AND SIMULATION OF TWO - DIMENSIONAL FRACTURAL ZINC DENDRITE STRUCTURE

Zeng Chuanchang Feng Guangxi Yang Jianhua Sun Zhenghe Wang Qiang

(Department of Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209, Weihai, Shandong, China)

Abstract Two - dimensional zinc dendrite with fractal structure was prepared by electrolysis of zinc sulfate. Some experimental factors, such as electrode shape and substrate, were analyzed which could affect the growth of fractal structure. The photos of zinc dendrite were processed into evident fractal structures by binarization using MATLAB, and their fractal dimension were calculated by Fractal - Fox software. The fractal structures were also simulated based on the models both of Diffusion - Limited Aggregation (DLA) and Brownian movement. We further introduced the Brownian random factor into the physical analysis of the growth of fractal structure. By comparing the fractal structure appeared macroscopically and microscopically, we obtained the physical mechanism for the growth of fractal dendrite.

Key words Electro - chemical deposition; two - dimensional metallic dendrite; physical mechanism for fractal structure