文章编号:1004-0609(2009)11-2011-07

点阳极电沉积枝晶的分形生长

王桂峰^{1,2}, 黄因慧^{1,2}, 田宗军^{1,2}, 刘志东^{1,2}, 高雪松²

(1. 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,南京 210016;2. 南京航空航天大学 机电学院,南京 210016)

摘 要:利用分形几何的原理模拟点阳极电沉积中枝晶的分形生长,分别研究阳极大小、射流速度、NiSO₄ 浓度 和温度等试验条件对点阳极射流电沉积中金属镍枝晶二维电沉积生长行为特性的影响,并从分形维数的角度对其 进行分析。结果表明:点阳极射流电沉积中的枝晶也呈分形生长,其分形维数随着点阳极尺寸的增大而增加;射 流速度的提高使枝晶簇根部的生长点明显增多,但在射流速度较低时,枝晶簇顶部的形貌较为致密;大量气泡的 析出有利于产生分枝,此时气泡对枝晶生长的形貌起主导作用,使射流速度变化时的分形维数出现波折;电解质 浓度的增大使枝晶簇的分形维数逐渐减小;且随着试验温度的提高,分形维数也随之增加。 关键词:镍;射流电沉积;分形生长;枝晶

中图分类号:TQ 153 文献标识码:A

Fractal growth of dendrite electrodeposited by point anode

WANG Gui-feng^{1, 2}, HUANG Yin-hui^{1, 2}, TIAN Zong-jun^{1, 2}, LIU Zhi-dong^{1, 2}, GAO Xue-song²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China)

Abstract: The fractal growth process of dendrite in jet-electrodeposition with point anode was stimulated. The influences of anode size, jetting speed, NiSO₄ concentration and experiment temperature on the growth property of dendrite growth and fractal dimension were investigated. The results show that the dendrite of metal Ni obtained in jet-electrodeposition with point anode is also fractal growth. The fractal dimension of dendrite increases with increasing anode size. With increasing jetting speed, the growing points at the bottom of dendrite increase significantly and the morphology at the top becomes denser when the jetting speed is low. At the same time, the bubble is helpful to produce branches and takes role in the dendrite growth at high current. So, the fractal dimension twists when the jetting speed changes. The increase of concentration of NiSO₄ makes the fractal dimension gradually decrease. With increasing experiment temperature, fractal dimension dendrite increases.

Key words: Ni; jet-electrodeposition; fractal growth; dendrite

金属电沉积或凝固过程中产生的枝晶具有形式上 的对称性和实质上难以理解的复杂性,且这一非线性 的生长问题采用传统的欧氏几何来处理是十分困难 的,甚至于无法获得数值解^[1]。分形几何学为这一研 究提供新的思路,尤其是分形研究可以利用计算机进 行模拟和计算,这样将电极理论中的实验与理论同现

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575104)

收稿日期:2008-11-24;修订日期:2009-04-06

通信作者:黄因慧,教授,博士;电话:025-84892520;E-mail:tianzj@nuaa.edu.cn

代最先进的科学技术结合在一起。通过模拟,推导出 一些理论上的计算公式,解决一些经典电化学未能顾 及的问题,使人们从另一个角度来了解电极过程动力 学^[2],以最终实现电沉积产物形态的可控生长。这无 疑有利于错综复杂的工业过程的顺利进行以及得到优 质的产品。

自 1984 年 MATSUSHITA 等^[3]把有限扩散凝聚模型(Diffusion-limited aggregation, DLA) 成功地应用到 金属锌二维电化学沉积过程和分形结构以后,人们对 二维空间中金属的电沉积现象产生极大的兴趣,金属 盐溶液的电沉积就成为人们研究分形生长理想的系 统,国内外大量研究人员利用该模型来模拟单个凝聚 体的分形生长,并利用圆形电解池点阴极电沉积的方 法成功制备各种金属的二维枝晶来加以验证^[4-5],但迄 今为止,还未有人研究过圆形电解池点阳极电沉积时 枝晶的生长机理。

本文作者利用基于 DLA 模型思想的点阳极电沉 积模型,模拟点阳极射流电沉积中枝晶的分形生长, 并采用圆形电解池点阳极射流电沉积的方法分别研究 点阳极尺寸、射流速度、浓度、温度等试验条件对点 阳极射流电沉积中金属镍枝晶二维分形生长行为特性 的影响,并从分形维数的角度对其进行分析。

1 实验

1.1 点阳极电沉积枝晶的模拟方法

DLA 模型是 WITTEN 和 SANDER^[6]于 1981 提出 用于描述分形生长的机制。该模型是用来模拟单个凝 聚体的分形生长。按照 DLA 模型,通过简单的运动 学和动力学方程就可以产生具有标度不变性的自相似 的分形结构,从而可以把分形理论和试验观察联系起 来,在一定程度上揭示出实际体系中分形生长的机理。

在金属电沉积的过程中,金属离子先是在溶液中 以随机的方式漂浮着,当施加电压时,金属离子在移 动过程中碰到阴极或沉积的金属时得到电子而发生沉 积,这与 DLA 模型的生长规则比较吻合,因此,这 一凝聚过程是可以使用 DLA 模型进行表述。

图 1 所示为通过 DLA 模型模拟的结果与圆形电 解池点阴极电沉积制备的枝晶的比较。由图 1 可看出, 两者具有很好的相似性,都得到分形的枝晶结构。表 明电沉积中枝晶的凝聚过程是可以使用此模型进行正 确表述的^[7-8]。

本文作者基于 Microsoft Visual C++ 6.0 编程,实



图 1 点阴极电沉积枝晶的模拟与试验结果的比较

Fig.1 Comparison of stimulation(a) and experimental(b) results of dendrite electrodeposited by point cathode

现圆形电解池点阳极电沉积中枝晶二维生长的模拟。 考虑到实际的电沉积过程存在各种非常复杂的因素, 简单的 DLA 模型难以正确表述金属离子在阴极的沉 积过程^[9],为了能恰当表述圆形电解池点阳极电沉积 过程中金属离子在阴极的还原情况,本文作者基于 DLA 模型的思想提出圆形电解池点阳极电沉积中枝 晶分形生长的模型,该模型同时考虑金属离子在电场 力作用下的移动、电解液射流以及在阴极发生还原反 应几率的不同这些方面。

1.2 点阳极射流电沉积的试验方法

制备二维镍枝晶所采用的点阳极射流电沉积的装置示意图如图 2 所示。由喷嘴将电解液以高速射流的 方式喷射到圆形普通玻璃板,随后超薄液层的形式向 外放射状喷向环状石墨阴极,点状圆形镍阳极通过玻 璃板上的小孔固定在液柱中间,阳极底部通过导线接 电源正极,环状石墨接电源负极。



图 2 点阳极射流电沉积的试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of jet-electrodeposition equipment with point anode

1.3 镀液配方和工艺条件

电沉积中所使用的镀液配方和工艺条件如表 1 所 列。其中硫酸镍是主盐,氯化镍是阳极活化剂,硼酸 是缓冲剂,试验中所用的试剂均为分析纯。

因前人在点阴极电沉积枝晶的试验研究中常采用 石墨芯作为阴极,同时考虑到石墨电极的良好导电性 以及沉积层金属在石墨基体上较强的附着力,点阳极 电沉积时采用环状石墨作为阴极,试验前对石墨进行 表面打磨,使表面光洁。

表1 电镀液配方和工艺条件

Tab	le 1	C	Composition	of	electro	lyte	and	process	parameters
-----	------	---	-------------	----	---------	------	-----	---------	------------

$ ho({ m NiSO_4}\cdot 6{ m H_2O})/({ m g}\cdot{ m L}^{-1})$	$ ho({ m NiCl_2} \cdot 6{ m H_2O})/({ m g} \cdot { m L}^{-1})$	$ ho({ m Boric})/{ m (g\cdot L^{-1})}$	pH value	Temperature /
150	_	-	-	55
250	40	38	3.8-4.3	50-60
350	-	-	_	55

1.4 试验分析方法

由于计盒维数(Box dimension)易于程序化计算, 因而得到广泛的应用^[10]。本文作者采用计盒维数的原 理,并基于 Microsoft Visual C++ 6.0 编程对电沉积所 得的电沉积产物的分形维数进行计算^[11]。计算枝晶分 形维数的步骤如下:首先,用计算机图像软件(Image J) 将枝晶的数码图片处理成黑白位图,然后运行自行编 写的分形维数计算软件调用黑白位图后很快会计算出 图片的分形维数,显示计算结果。

2 结果与讨论

2.1 模拟结果与试验所得枝晶的比较

图 3 所示为利用点阳极电沉积枝晶模拟和试验结 果的比较。图 3(b)所示为在圆形电解池中,电流保持 在 3.5 A,点阳极大小为 *d*15 mm,射流速度为 250 L/min,电解质浓度为 250 g/L,温度为 55 ,电沉 积 20 min 时,在石墨环上制备的金属镍枝晶。

由图 3 可见,通过该模型模拟所得的结果与点阳 极射流电沉积制备的枝晶是极为相近的,二者均表现 明显的分形生长形态,表明本文作者基于 DLA 模型 建立的分形生长模型可以对点阳极射流电沉积中枝晶 的生长机理进行正确表述。

图 4 所示为图 3(b)中枝晶的表面形貌。由图 4 可 以看出,在枝晶的分枝上又生长出很多小的分枝,属 于具有明显分形结构的枝晶,表明点阳极射流电沉积 中的枝晶也是分形生长的。

当电流密度较小时,过电位较小,整个电沉积过



图 3 点阳极电沉积模拟与试验结果的比较

Fig.3 Comparison of stimulation(a) and experimental(b) results of dendrite jet-electrodeposited with point anode



图 4 点阳极射流电沉积镍枝晶的表面形貌 Fig 4 Surface mombology of electrodeposited dendrite

Fig.4 Surface morphology of electrodeposited dendrite with point anode

程在电化学反应动力学控制的区域内,表面的溶质在 每个地方都非常富足,反应界面上有富裕的溶质离子 等待着电子交换,此时溶质的浓度梯度对沉积形态没 有产生影响。镍离子在表面经过化学反应得到电子后 成为沉积到晶体表面的单个原子,原子会迁移到晶体 表面的空穴或台阶等能量最低的地方,然后晶化成晶 体的一部分。由于镍原子迁移扩散的速度很快,所以 电化学反应出的原子的都可以顺着晶体表面的台阶一 层层生长,沉积物有着规则的晶体外形,且部分地方 存在着生长过程中留下来的层状台阶。当电流密度增 大时,过电位增大,过电位驱动的化学反应速度增加, 单位时间内扩散到电极表面的溶质的量逐渐小于可供 化学反应消耗的量。此时,整个体系的反应速度就由 溶质扩散的动力学因素所决定,电沉积过程完全受扩 散过程所限制。电极表面反应粒子浓度已经很小,从 溶液深处扩散来的反应粒子最容易到达的位置是表面 的一些微小突起的地方,那里扩散层厚度小,扩散空 间场大,扩散传质速度快,电流密度大,金属沉积速 度大;而凹坑处扩散层厚度大,扩散空间场受屏蔽, 扩散传质速度慢,电流密度小,沉积速度慢^[12]。随电 沉积的进行,这种差别愈来愈大,使金属结晶迅速向 液体深处延伸,沿溶液流向的尖端更易于得到溶质, 其生长形态就会呈现出分形结构。

2.2 点阳极大小对点阳极射流电沉积产物的影响

在点阳极射流电沉积时发现,点阳极尺寸的变化 会对环形石墨阴极上枝晶的形貌产生明显影响。图 5 所示为不同阳极尺寸时点阳极电沉积镍枝晶的形貌。 在点阳极电沉积过程中保持通过试验装置的电流恒定 (3.6 A)射流速度为200 L/min,电解质浓度为250 g/L, 温度为55 ,点阳极尺寸不同时,电沉积20 min 得 到的金属镍枝晶簇。

从图 5 中可看出,随着阳极尺寸的增加,枝晶簇 根部的生长点明显增多,其形貌向致密性转变,这与 模拟的结果极为相似。分析认为,阳极尺寸大小对电 位等值线的分布有很大的影响,阳极尺寸越大,阴阳 极间距离越小,圆形电解池中电势等值线越密集,电 场强度越大,推动离子运动的电场力也越大,离子在 电场中运动的速度随之增大,使金属离子更容易进入 到枝晶簇的内部生长点^[13];另一方面,由于点阳极真 实面积的增大,电极反应速度加快,加速了镍离子在 阴极的析出,随着金属镍沉积速度的加快,减弱屏蔽 效应的影响,增加离子到达枝晶簇内部被俘获、沉积 的机会相应增大,因此,枝晶簇根部的生长点明显增 多,生成的分枝较多,有利于得到形貌较为致密的沉 积产物。

本文作者对阳极尺寸大小不同时点阳极射流电沉 积所得枝晶的分形维数进行了计算。图 5 中各枝晶的 分形维数分别为 1.732、1.753 和 1.765。由图 5 可看出, 随着阳极尺寸的增加,电沉积产物的分形维数也随之 增加,这也是由于枝晶簇由开放的分枝结构向较为致 密的生长形貌转变而引起的,这与模拟的结果具有很 好的相似性。

2.3 射流速度对点阳极射流电沉积产物的影响 在点阳极射流电沉积时发现,枝晶的生长需要很



图 5 不同阳极尺寸时点阳极电沉积镍枝晶的形貌

Fig.5 Morphologies of Ni dendrites jet-electrodeposited by point anode under different anode sizes: (a) 10 mm; (b) 15 mm; (c) 20 mm

高的电流,此时必然会有大量的氢气泡析出。图 6 所 示为射流速度变化时点阳极电沉积枝晶的形貌。在点 阳极电沉积过程中保持通过试验装置的电流恒定(3.6 A),点阳极大小为 *d*15 mm,电解质浓度为 250 g/L, 温度为 55 ,射流速度不同时电沉积 20 min 得到的 金属镍枝晶簇。

从图 6 中可以看出,随着射流速度的增加,枝晶 簇根部的生长点明显增多。分析认为,随着射流速度 的加快,射流对电极表面各处的搅拌作用加强,使电 极表面上电流密度的分布更加均匀。这样,电极表面 上每一部分的反应潜力都得到充分的利用,因此,在 根部的生长点明显增多,其根部形貌比较致密^[14]。但 从图 6(a)和(b)中可发现,射流速度较低的时候,枝晶 簇顶部的形貌反而比较致密,分枝明显增多且较为细 小。这是由于射流速度较低时,被输送到已沉积枝晶 簇附近的金属离子的浓度较小,在同等的大电流密度 下,气泡的析出量大大增加,使枝晶簇顶部呈现出较 为致密的形貌,在较低的生长高度上,分枝间即相互 抵触,结合成圆形的顶面。在点阴极电沉积的试验中 也发现,大量气泡的析出,有利于产生多而细小的分 枝,使枝晶形貌呈现出致密的结构^[15]。点阳极电沉积 的结果也说明了射流速度和气泡的析出对枝晶的生长 特性起着显著的影响。

图 6 中各枝晶簇的分形维数分别为 1.732、1.753 和 1.726。由图 6 可看出,分形维数先增加后减小,这 是因为射流速度增加时,枝晶簇根部的生长点随之增 加,使根部形貌较为致密,分形维数增加。但同时由 于射流速度较大时,枝晶簇顶部气泡的析出量大大减 少,使顶部分枝明显减少,且较为粗大,呈现出疏松 分枝的形貌,分形维数开始减小。

2.4 电解质浓度对点阳极射流电沉积的影响

图 7 所示为 NiSO4 浓度变化时点阳极电沉积镍枝 晶的形貌。保持通过试验装置的电流恒定(3.5 A),点 阳极大小为 d15 mm,射流速度为 200 L/min,温度为 55 ,电解质浓度不同时,点阳极射流电沉积 20 min 得到的金属镍枝晶簇。

从图 7 中可以看出,随着硫酸镍浓度的增加,分 枝减少,沉积产物形貌由致密型向开放型转变,且在 相同沉积时间内,枝晶簇的生长高度逐渐增加。分析 认为,在大电流点阳极射流电沉积且电解液浓度比较 小的时候,气泡的析出量较多,所以,此时枝晶的分







图 7 NiSO₄浓度变化时点阳极电沉积镍枝晶的形貌 Fig.7 Morphologies of Ni dendrites jet-electrodeposited by point anode under different NiSO₄ concentrations: (a) 150 g/L; (b) 250 g/L; (c) 350 g/L

枝较多,形貌较为致密。同时,由于电解质浓度较小时,实际沉积的镍离子数减少,最终使此时枝晶簇的 生长高度较低,试验结果与模拟结果存在一定的差异, 但同时也说明气泡对枝晶的生长形态起着显著的影响。

图 7 中各枝晶簇的分形维数分别为 1.766、1752 和 1.723。由图 7 可看出,随着电解液中硫酸镍浓度的 增加,枝晶簇的分形维数随之减小。分析认为,虽然 浓度较大的时候,实际沉积的镍离子数增加,但由于 枝晶簇形貌向开放型生长形态转变明显,所以使分形 维数减小。

2.5 温度对点阳极射流电沉积影响的试验研究
 图 8 所示为温度变化时点阳极电沉积镍枝晶的形
 貌。保持通过试验装置的电流恒定(3.5 A),点阳极大



图 8 温度变化时点阳极电沉积镍枝晶的形貌

Fig.8 Morphologies of Ni dendrites jet-electrodeposited by point anode at different temperatures: (a) 50 ; (b) 55 ; (c) 60

小为 d15 mm,射流速度为 200 L/min,电解质浓度为 250 g/L,温度不同时,点阳极射流电沉积 20 min,得 到的金属镍枝晶簇。

从图 8 可以看出,随着温度的增加,分枝增多, 枝晶簇形貌向致密型转变,且在相同的沉积时间内, 枝晶簇的生长高度逐渐降低,这与模拟的结果具有很 好的相似性。分析认为,温度的升高使镍离子更容易 进入内部生长点,使枝晶簇形貌趋于致密^[16],生长高 度降低,同时点阳极电沉积时,温度的升高有利于气 泡的析出,所以,此时枝晶簇的形貌较为致密。

图 8 中各枝晶簇的分形维数分别为 1.726、1752 和 1.761。由图 8 可看出,随着电解液中温度的增加, 枝晶簇的分形维数随之增加,这主要由于枝晶簇形貌 向致密型转变而引起的。

3 结论

点阳极射流电沉积制备的枝晶簇与模拟结果
 具有极好的相似性,二者均表现明显的分形生长形态。

 2)随着点阳极尺寸的增大,枝晶簇根部的生长点 明显增多,其形貌向致密型转变,分形维数也随之增加。

3) 射流速度的提高使枝晶簇根部的生长点明显 增多。射流速度较低时,在大量气泡析出的影响下, 枝晶簇顶部的分枝明显增多,形貌较为致密,此时气 泡对沉积产物的形貌起主导作用,使射流速度变化时 的分形维数出现了波折。

 4) 在大量气泡析出的影响下,枝晶簇的形貌随电 解液浓度的升高向开放型转变明显,同时枝晶簇的分 形维数逐渐减小。

5) 温度的升高使枝晶簇形貌趋于致密,生长高度 降低,枝晶簇的分形维数随之增加。

REFERENCES

- BEN-JACOB E, GARIK P. The formation of patterns in non-equilibrium growth[J]. Nature, 1990, 343(8): 523–530.
- [2] BRADY R M, BALL R C. Fractal growth of copper electrodeposits[J]. Nature, 1984, 309(5): 225–229.
- [3] MATSUSHITA M, SANO M, HAYAKAWA Y, HONJO H, SAWADA Y. Fractal structures of zinc metal leaves grown by electrodeposition[J]. Phys Rev Lett, 1984, 53(3): 286–289.
- [4] SAWADA Y, DOUGHERTY A, GOLLUB J P. Dendritic and fractal patterns in electrolytic metal deposits[J]. Phys Rev Lett, 1986, 56(12): 1260–1263.

- [5] 杨兵初,戎茂华,罗成林. 锌电解沉积物生长形态转变的研究[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2005, 2(3): 85-88. YANG Bing-chu, RONG Mao-hua, LUO Cheng-lin. Transformation of growth morphology in the zinc electro-deposition[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 2(3): 85-88.
- [6] WITTEN T A, SANDER L M. Effective harmonic-fluid approach to low-energy properties of one-dimensional quantum fluids[J]. Phys Rev Let, 1981, 47: 1400–1408.
- [7] CHEN C P, JORNE J. Fractal analysis of zinc electrodeposition[J]. J Electrochem Soc, 1990, 137(7): 2047–2051.
- [8] 田宗军, 王桂峰, 黄因慧, 刘志东, 陈劲松. 金属镍电沉积中 枝晶的分形生长[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 167-173. TIAN Zong-jun, WANG Gui-feng, HUANG Yin-hui, LIU Zhi-dong, CHEN Jin-song. Fractal growth of Ni dendrite in electrodeposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 167-173.
- [9] 王桂峰,黄因慧,田宗军,刘志东,陈劲松,高雪松.平行板 电极喷射电沉积中的枝晶分形生长[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版,2008,36(4):35-39.
 WANG Gui-feng, HUANG Yin-hui, TIAN Zong-jun, LIU Zhi-dong, CHEN Jin-song, GAO Xue-song. Fractal growth of dendrites in jet electrodeposition with parallel plate electrode[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008. 36(4): 35-39.
 [10] 胡卫华,喻敬贤,杨汉西,左正忠.二维锌枝晶生长行为研究
- [10] 加工中,喻助奴,物次国,生正忠.二年中代留工(1)分析为[J]. 武汉大学学报:理学版, 2004, 50(4): 431-435.
 HU Wei-hua, YU Jing-xian, YANG Han-xi, ZUO Zheng-zhong.
 Dendrite growth of zinc in quasi-two-dimensional electrodeposition[J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2004, 50(4): 431-435.
- [11] GRIER D, BEN-JACOB E, CLARKE R, SANDER L M. Morphology and microstructure in electrochemical deposition of

zinc[J]. Phys Rev Lett, 1986, 56(12): 1264-1267.

[12] 尤红军,方吉祥,孔 鹏,丁秉钧.扩散限制和非扩散限制对 电沉积银形貌的影响[J].稀有金属材料与工程,2008,37(6): 1042-1045.

YOU Hong-jun, FANG Ji-xiang, KONG Peng, DING Bing-jun. Effects of diffusion limitation and non-diffusion limitation on the morphology of silver by electrodeposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(6): 1042–1045.

- [13] 陈书荣,谢 刚,崔 衡,马文会. 金属铜电沉积过程中分形研究[J]. 中国有色金属学报,2002,12(4):846-850.
 CHEN Shu-rong, XIE Gang, CUI Heng, MA Wen-hui. Fractal study on copper electrodeposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4):846-850.
- [14] 陈劲松,黄因慧,刘志东,田宗军,赵剑锋,赵阳培.喷射电 沉积快速成形的定域性试验研究[J].中国机械工程,2006, 17(13):1408-1411.

CHEN Jin-song, HUANG Yin-hui, LIU Zhi-dong, TIAN Zong-jun, ZHAO Jian-feng, ZHAO Yang-pei. Experimental research on rapid prototyping based on jet electrodeposition[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1408–1411.

[15] 王桂峰,黄因慧,田宗军,刘志东,陈劲松,高雪松.不同条件下金属镍电沉积中枝晶生长的分形维数[J].机械工程材料, 2008,32(8):16-19.

WANG Gui-feng, HUANG Yin-hui, TIAN Zong-jun, LIU Zhi-dong, CHEN Jin-song, GAO Xue-song. Fractal dimension of dendritic growth of metal Ni in electrodeposition[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(8): 16–19.

[16] 张皓东,谢 刚,李荣兴,陈书荣. 金属锌电沉积过程的分形研究[J]. 化学研究, 2005, 16(1): 52-54.
ZHANG Hao-dong, XIE Gang, LI Rong-xing, CHEN Shu-rong. Dendrite growth of metal zinc in electrodeposition process[J]. Chemical Research, 2005, 16(1): 52-54.

(编辑 李艳红)