

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190228001

NiCr 和 TiAl 合金靶材阴极电弧弧斑的运动特性

左 帅¹, 王浩琦¹, 陈淑年¹, 庞 盼², 廖 斌^{1,2}

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875; 2. 北京市辐射中心, 北京 100875)

摘 要: 研究采用多弧离子镀膜技术镀膜时, 电弧放电阶段中电弧弧斑的运动对后续膜层质量与靶材烧蚀有着非常重要的影响, 目前很少有弧斑运动相关的研究。研究通过外加脉冲磁场以实现对阴极靶面磁场分布的精确调控, 探究了磁场分布对弧斑运动的影响, 并结合分形理论分析弧斑的运动轨迹, 系统研究了电弧放电过程中靶面电弧弧斑的运动特性。结果表明, 在永磁铁磁场与脉冲磁场共同作用下, 弧斑在原有的随机运动基础上叠加了反安培力方向的旋转运动与向靶沿扩散的漂移运动。随着靶面总磁场强度的上升, 弧斑平均运动速度增加, 弧斑寿命变短; 弧斑运动范围可控, 最大运动范围可覆盖靶面的 90% 以上; 分形维数可控, 镍铬合金靶和钛铝合金靶弧斑轨迹图像的最大分形维数可分别为 1.145 和 1.159, 对应靶材烧蚀区域面积达到 92%。通过改进工艺参数, 能够显著减少大颗粒污染并提升膜层质量, 同时通过维数可预测靶材烧蚀情况, 能更高效地利用靶材。

关键词: 多弧离子镀; 弧斑运动; 靶材烧蚀; 脉冲磁场; 分形

中图分类号: TG174.444

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)03-0059-10

Motion Characteristics of Cathodic Arc Spots of NiCr and TiAl Alloy Targets

ZUO Shuai¹, WANG Haoqi¹, CHEN Shunian¹, PANG Pan², LIAO Bin^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

Abstract: The motion of arc spot in arc discharge stage has very important influence on the quality of subsequent film layer and target ablation when using multi-arc ion plating technology. However, There are few investigations on arc spot motion so far. The influence of magnetic field distribution on arc spot motion was studied by applying pulse magnetic field to realize the accurate regulation of magnetic field distribution on the cathode target surface, and the trajectory of arc spot motion was analyzed based on fractal theory. The motion characteristics of arc spot on the target surface during arc discharge were systematically studied. Results show that under the synergetic effect of permanent magnet and pulsed magnetic field, the arc spot superimposes the rotation motion of the anti-ampere force direction and the drift motion towards the target along the diffusion direction on the basis of the original random motion. With the increase of the total magnetic field intensity of the target surface. The average velocity of the arc spot increases and the lifetime of the arc spot becomes shorter. The motion range of the arc spot can be controlled, and the maximum motion range can cover more than 90% of the target surface. The maximum fractal dimension of arc images of Ni-Cr alloy target and Ti-Al alloy target is 1.145 and 1.159, respectively, and the ablation area of the target reaches 92%. By improving the process parameters, large particles can be significantly reduced and the film quality is improved. At the same time, the ablation of target can be predicted by fractal dimension, and the target can be used more efficiently.

Keywords: multi-arc ion plating; arc spots motion; target ablation; pulsed magnetic field; fractal

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2019-05-14

通信作者: 廖斌(1984—), 男(汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 离子束表面处理; E-mail: liaobingz@bnu.edu.cn

引用格式: 左帅, 王浩琦, 陈淑年, 等. NiCr 和 TiAl 合金靶材阴极电弧弧斑的运动特性[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 59-68.

ZUO S, WANG H Q, CHEN S N, et al. Motion characteristics of cathodic arc spots of NiCr and TiAl alloy targets[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 59-68.

0 引言

离子镀技术是一种工作在真空条件下的物理气相沉积技术 (Physical vapor deposition, PVD), 它是在真空蒸镀和真空溅射两种镀膜技术的基础上发展而来。离子镀技术于 1973 年由 Mattox D.M.^[1] 提出并公开, 一直以来都备受关注并迅速发展, 目前已成为最先进、适用范围最广的表面处理技术之一。多弧离子镀是离子镀技术中较为先进成熟的一种技术, 因其在功能薄膜领域的独特优势而在离子镀技术中有着重要的地位。多弧离子镀技术具备以下特点: 入射粒子能量高, 膜层致密; 沉积速率快, 绕镀能力强; 一弧多用, 电弧既是蒸发源和离子源, 又是加热源和离子溅射清洗的离子源; 可镀材料广泛, 金属、塑料、橡胶、石英和陶瓷等, 这些特点使得多弧离子镀技术大量应用于机械加工、表面装饰与高温防护等领域^[2-4]。

在阴极真空电弧沉积过程中, 等离子体产生阶段即电弧放电过程十分重要, 其具体机理为: 在真空中触发针与阴极靶材短暂接触后分离, 分离的瞬间由于局部接触的导电面积减小, 电阻增大, 导致局部迅速形成高温使靶材金属熔化并形成液桥导电, 使得阴极靶材蒸发并离化产生等离子体, 在阴极靶材表面上能看到许多明暗相间并快速移动的小斑点, 其实质是一团团高温高压高聚集度的等离子团, 也被称作阴极电弧弧斑, 这些弧斑尺寸不定 (1~100 μm), 存在时间短 (一般在亚微秒以内), 电流密度非常大, 并随机出现在靶材表面, 其运动轨迹错综复杂, 最后等离子体随着这些弧斑的运动向外喷射, 并在真空靶室的基材表面沉积形成膜层^[5-6]。通过研究发现, 电弧的放电情况是由弧斑的运动所控制^[7-8], 因此弧斑的运动情况将直接影响电弧放电的稳定性、阴极靶材的烧蚀情况、等离子体质量、大颗粒去除问题等, 对后续成膜的质量有非常重要的影响^[9-11]。

为了更好地了解电弧放电过程中阴极靶材表面电弧弧斑的运动特性, 近年来国内西安理工大学曹伟产等^[12]研究了 Al_2O_3 对 CuW70 合金表面弧斑运动的影响, 试验发现在掺杂 Al_2O_3 粉末之前的合金表面, 弧斑多集中在固定区域重复燃烧 (多分布在 Cu 相), 而掺杂 Al_2O_3 粉末后, 弧斑多分布在 Al_2O_3 颗粒所在区域, 这让弧斑运动变得全

面且均匀。俄罗斯学者 Gennady A. Mesyats 等^[13]基于弧斑的微观结构建立了一个半经验流体动力学模型, 描述了在弧斑处的弧坑形成过程, 并在铜阴极材料上进行了试验, 发现试验结果所得的弧坑尺寸 (3~7 μm) 与弧斑存在时间 (15~60 ns) 与模型描述基本一致。国内外也提出了诸多关于弧斑的形成及运动理论, 如“电子爆裂发射模型”、“电荷受力漂移”等, 并阐述了弧斑在纵向、横向、轴对称等静态磁场中的运动情况, 但至今仍未有统一的理论对其进行解释^[14-17]。试验中引入脉冲磁场以实现阴极靶面磁场的精确调控, 观察在不同磁场条件下靶面弧斑的运动特性并分析其原理。

分形 (Fractal) 概念的正式提出是在 Mandelbrot^[18] 的《自然界的分形几何》中, 近年来, 分形已成为研究非线性系统以及非平衡状态的有效工具, 常用于定量表征复杂图形与复杂过程。在材料科学领域, 国内西安交通大学林启敬等^[19]观察了 Cu/Ti 纳米薄膜表面的分形特征, 并成功运用分形维数对其表面粗糙度进行了表征。马德里康普顿斯大学 T. Cebriano 等^[20]在硅晶基底上采用蒸发-沉积法制备了 Sb_2O_3 薄膜并观察其生长过程, 发现在一定基底温度条件下, Sb_2O_3 的微观与纳米结构的排列表现出分形特征。此外, 分形在生物学、天文学、经济学等领域均有广泛的应用^[21]。目前, 分形理论在离子镀领域多用于物理气相沉积中膜层成形的模拟, 以及膜层表面形貌的表征, 在电弧弧斑运动领域暂时没有相关理论与试验研究。

基于以上情况, 文中拟深入研究磁场对弧斑运动的影响以及弧斑运动轨迹的分形特征。结合弧斑运动模型, 对永磁铁提供的轴对称磁场与外加脉冲磁场耦合形成的靶面总磁场与电弧的弧斑运动的关系进行研究与分析, 研究在不同的磁场条件下弧斑运动轨迹的变化以及阴极靶材的烧蚀情况, 并以分形维数对靶材的烧蚀情况进行实时分析与预测, 最后达到高效利用材料, 节约成本, 优化镀膜工艺的目的。

1 试验方法

试验采用的设备为阴极真空弧镀膜机, 它由离子源、真空室及真空抽气系统、真空靶室及工件台、外加脉冲磁场系统及冷却水系统组成。图 1

是镀膜机的部分结构图, 弧源与阳极筒相接, 中间用橡胶圈进行密封, 阴极靶材位于阳极筒内, 永磁铁连接在靶材正后方, 在靶材表面产生一个轴对称磁场, 阳极筒外侧装载了脉冲磁场线圈, 脉冲磁场线圈在通入电流后产生脉冲磁场, 并与永磁铁提供的磁场一起作用于靶材表面, 通过改变通入线圈电流的频率与大小可以精确地调控脉冲磁场, 从而实现对靶材表面磁场的精准调控, 连接在阳极筒之后的是直管, 其上的引出线圈在通入电流后产生引出磁场, 作用是引出并过滤等离子体。

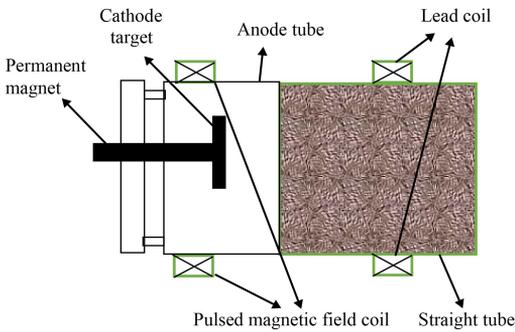


图1 部分镀膜机结构模型

Fig.1 Structure model of part coating machine

试验选取两种合金靶材作为试验对象, 镍铬合金靶(纯度 99.99%, Ni : Cr=8 : 2) 与钛铝合金靶(纯度 99.99%, Ti : Al=7 : 3), 靶材为圆柱形, 规格 100 mm×20 mm(直径×高度), 靶材边缘有一定角度的靶沿, 用以防止弧斑脱离靶材表面而造成设备损坏。拍摄观察所用的设备为照相机 Canon EOS 7D Mark II, 用于拍摄记录不同曝光时间参数下靶材表面弧斑的运动轨迹图像。试验目的是在电弧放电过程中, 对不同条件下弧斑的运动轨迹图像进行对比与分析, 研究磁场分布对弧斑运动的影响, 并通过计算弧斑轨迹图像的分形维数 D 来表征弧斑运动轨迹特征以及靶材的烧蚀情况。表 1 记录了两组试验的具体参数。第一组试验对象为镍铬合金靶材, 试验编号为 1、2 和 3, 试验参数为: 真空度达到 10^{-3} Pa 数量级, 弧流 110 A, 脉冲磁场频率 13 Hz, 脉冲磁场线圈电流分别为 9、18 和 27 A, 并改变相机曝光时间拍摄不同参数下镍铬合金靶材表面的弧斑运动轨迹图像。第二组试验对象为钛铝合金靶材, 试验编号为 4、5 和 6, 试验参数为: 真空度达到 10^{-3} Pa

数量级, 弧流 110 A, 脉冲频率 13 Hz, 脉冲磁场线圈电流分别为 9、18 和 27 A, 并改变相机曝光时间拍摄不同参数下钛铝合金靶材表面的弧斑运动轨迹图像。

表 1 NiCr 和 TiAl 合金靶材的试验参数

| Table 1 Experimental parameter of NiCr and TiAl alloy targets | | | | | |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|--------|
| Proce- dure | Pulsed magnetic field current/A | Pressure/ Pa | Arc current/ A | Pulsed magnetic field frequency/Hz | Target |
| 1 | 9 | 2.2×10^{-3} | 110 | 13 | Ni-Cr |
| 2 | 18 | 2.0×10^{-3} | 110 | 13 | Ni-Cr |
| 3 | 27 | 1.6×10^{-3} | 110 | 13 | Ni-Cr |
| 4 | 9 | 2.4×10^{-3} | 110 | 13 | Ti-Al |
| 5 | 18 | 2.2×10^{-3} | 110 | 13 | Ti-Al |
| 6 | 27 | 2.6×10^{-3} | 110 | 13 | Ti-Al |

2 结果与讨论

试验中由于永磁铁提供的磁场不易于精确调控, 过大或过小都会使得靶面的弧斑运动不够稳定, 甚至在试验中出现断弧或无法起弧的现象, 于是试验引入脉冲磁场, 通过改变脉冲磁场强度来调控靶面总磁场的强度, 因此阴极靶面的磁场由永磁铁磁场与外加的脉冲磁场共同耦合而成。从图 1 可知永磁铁位于阴极靶材中心的正后方, 在靶材表面形成一个轴对称磁场, 即磁场以靶面为中心呈轴对称分布, 在靶沿处的磁场方向与靶面有一定的夹角。外加的脉冲磁场线圈位于阳极筒外侧表面, 处在阴极靶材与永磁铁之间, 试验中将其在通入电流后产生的磁场看作一个稳定的轴对称磁场, 方向刚好与永磁铁磁场方向相反, 于是可以通过改变脉冲磁场的强度来调控阴极靶面总磁场的强度。通入脉冲磁场线圈的电流越大, 产生的脉冲磁场越强, 与永磁铁磁场抵消后, 阴极靶材表面的总磁场强度就越小。

图 2、图 3 分别是镍铬合金靶与钛铝合金靶在不同试验条件下所呈现的弧斑运动轨迹图像, 图 2(a)(b)(c) 和图 3(a)(b)(c) 表示通入脉冲磁场线圈的电流分别为 9、18 和 27 A, 6 组图中的数字表示由左至右的相机曝光时间参数依次为 1/4、1 和 2 s。

在电弧放电过程中, 由于局部电阻增大, 电流密度过高, 导致靶材局部高温熔化并离化形成弧斑, 这些弧斑的形成会在靶面上刻蚀出一个个弧坑, 弧坑中心下凹, 弧坑边缘形成许多微凸

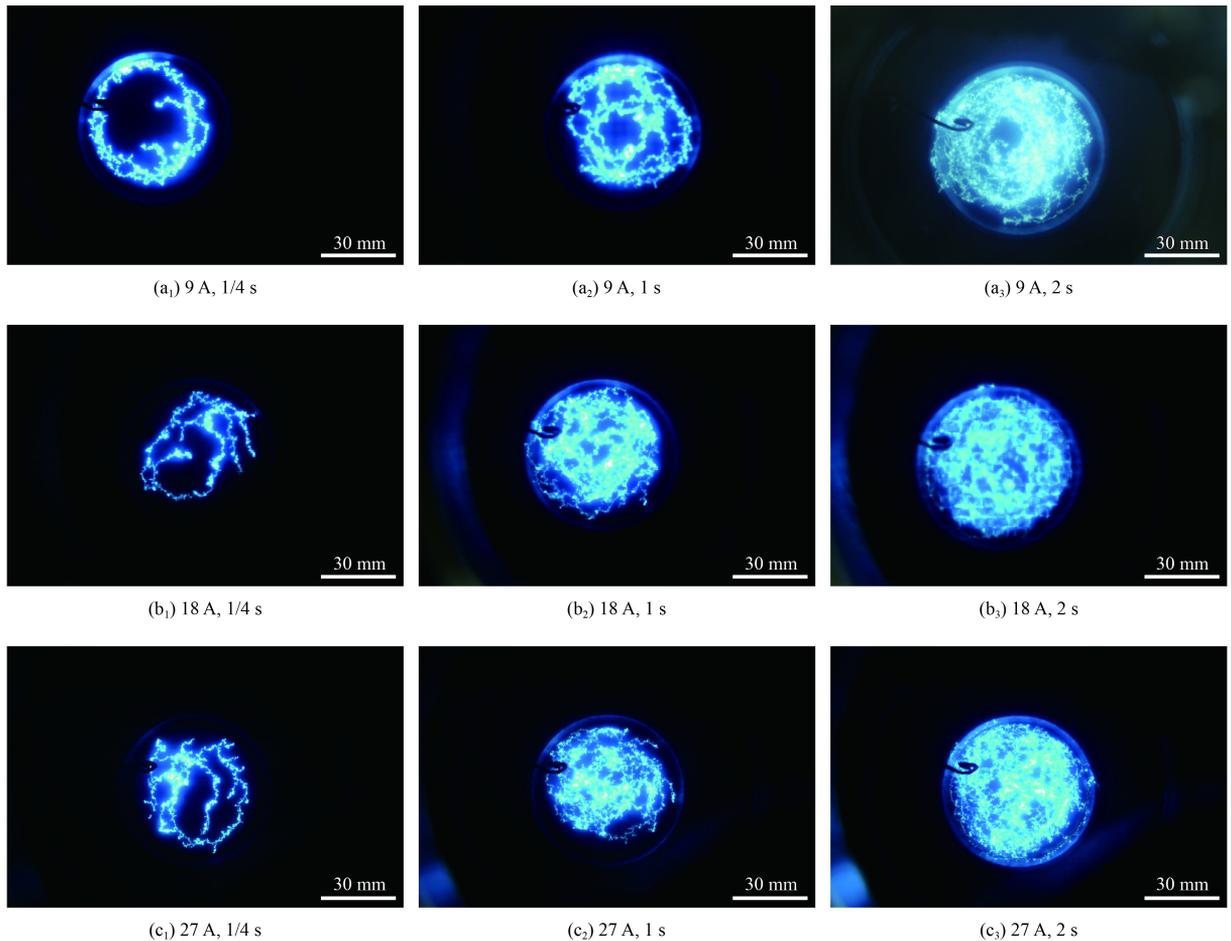


图2 不同脉冲磁场线圈电流下镍铬合金靶材表面的弧斑运动轨迹

Fig.2 Arc spots motion track of Ni-Cr target surface at different pulsed magnetic field coil current

体, 弧坑会向外喷射金属液滴、电子与金属离子。在弧坑处, 由于大量电子的发射会形成一个“电子漂移层”, 而弧坑内部随着高度的下降电场强度也随之减弱, 不利于电子的发射, 且弧坑中心由于电子漂移层的存在导致中心的电子密度大于边缘区域, 所以在弧坑边缘微凸体处正电荷密度更大, 于是在微凸体处的电流密度有很大概率能达到最大值从而形成新的弧斑, 同时又形成新的弧坑与微凸体, 如此往复, 弧斑的次第熄灭与形成构成了弧斑的运动。

引言中提到, 弧斑在靶面没有磁场作用时表现为随机运动, 试验中在靶面添加磁场作用后, 弧斑的运动状态出现了改变。从图2与图3中可以观察到, 弧斑在磁场作用下表现出明显的旋转运动。在分析时, 可将靶材表面磁场的横向分量看作一个以靶面中心对称的横向磁场。旋转运动的出现可以用电流密度的变化来解释, 由于电子

与离子的荷质比相差非常大, 导致离子在横向磁场作用下做旋转圆周运动的运动半径远大于电子, 所以离子的运动对于电荷密度的贡献非常小, 主要是电子的运动导致电荷密度的不平衡, 弧斑形成时弧坑处喷射出大量电子形成电子漂移层, 电子漂移层在磁场的作用下沿着安培力方向漂移, 导致在安培力的正方向上电子密度增大, 正方向上电场随之减弱, 从而在反方向上正电荷密度大于正方向, 于是在反方向上电流密度更容易达到最大值, 导致新弧斑更容易在反方向上形成, 在反方向上新弧斑的连续产生以及旧弧斑的熄灭就形成了弧斑反安培力方向的旋转运动。弧斑在磁场作用下还表现出向靶沿方向扩散的漂移运动, 靶材表面的轴对称磁场方向与靶面呈一定的角度, 漂移运动的方向就沿着磁场与靶面夹角的锐角方向, 即锐角法则, 其机理是纵向磁场分量使空间正电荷密度最大值更容易在磁力线与靶

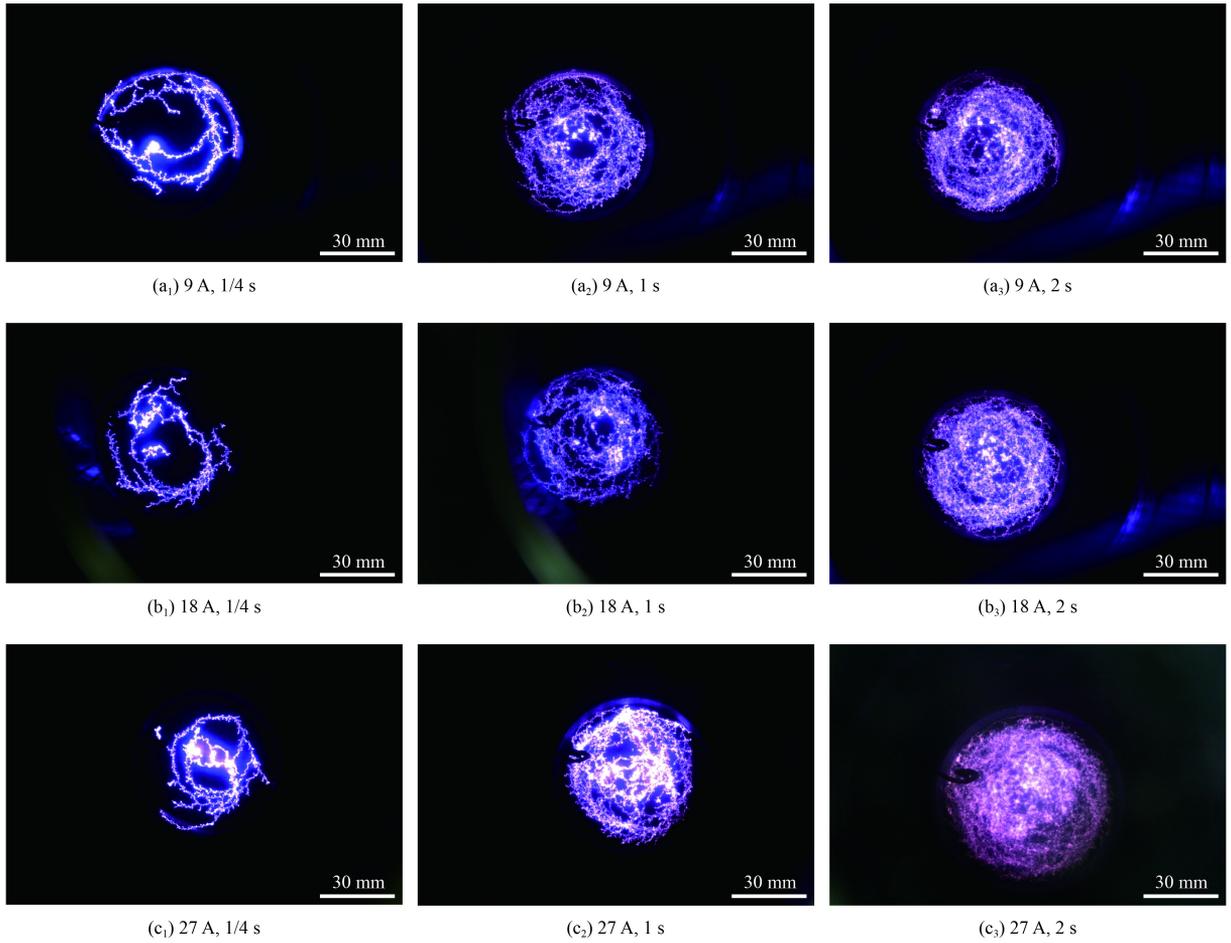


图3 不同脉冲磁场线圈电流下钛铝合金靶材表面的弧斑运动轨迹

Fig.3 Arc spots motion track of Ti-Al target surface at different pulsed magnetic field coil current

面夹锐角的方向出现, 所以弧斑还会做向靶沿扩散的漂移运动。

在图 2(c) 与图 3(c) 两组图中, 通入脉冲磁场线圈的电流为 27 A, 此时脉冲磁场强度较高, 即阴极靶面总磁场强度较低, 其靶面弧斑运动轨迹多集中在靶材的中心区域, 并存在一些又大又亮的弧斑, 这是由于弧斑的运动范围较小导致弧电流容易集中在某一阴极斑点, 这样的情况下弧斑会在某一点停留的时间较长, 从而形成较亮的大弧斑, 大弧斑由于局部电流密度和功率密度过高, 导致在其形成过程中常伴有大规模的液态熔池产生, 同时有更多的金属液滴从靶面喷发导致大颗粒污染, 影响等离子体的质量, 对后续的沉积镀膜过程不利。再观察图 2(a)(b) 与图 3(a)(b) 的 4 组图, 此刻脉冲磁场线圈电流为 9 和 18 A, 随着脉冲线圈电流减小, 脉冲磁场强度下降即阴极靶面总磁场强度上升, 弧斑轨迹变得细小分

散, 大弧斑明显比图 2(c) 与图 3(c) 要少, 即弧斑在靶面停留的时间减少, 弧斑形成与熄灭过程加快使得液态熔池规模变小, 能很大程度地减少大颗粒污染, 并为后面的沉积镀膜阶段提供高质量的等离子体。

在图 4 中描述了合金靶材表面弧斑运动速度的变化趋势, 由试验数据可知, 在通入脉冲磁场线圈电流分别为为 9、18 和 27 A 时, 镍铬合金靶的弧斑速度依次为 1.78、1.46 和 1.26 m/s, 钛铝合金靶的弧斑速度依次为 2.56、2.32 和 2.13 m/s。这个速度值是选取不同条件下的运动轨迹图像, 多次计算得到的弧斑平均速度, 是由一段时间内几个弧斑运动轨迹共同组成的宏观平均速度, 而非某个弧斑的瞬时速度, 这样得到的速度能更清晰地反映阴极靶材的烧蚀情况。从图 4 看出随着脉冲磁场电流的增加, 弧斑速度呈下降趋势, 分析可知, 在通入脉冲磁场线圈的电流为 9 A 时, 此

刻靶面总磁场强度高,镍铬合金靶材表面的弧斑运动速度比脉冲磁场线圈电流为18和27 A时的弧斑运动速度要快20%~50%。同样,脉冲线圈电流为9 A时,钛铝合金靶材表面的弧斑运动速度比另两种磁场条件下的弧斑运动速度要快10%~30%。即增大靶面总磁场强度能提高弧斑运动速度。这是由于在横向分量的磁场作用下,随着磁场强度的增加,形成新弧斑所需的时间变短,每个弧斑在靶面的停留时间更短,即弧斑的寿命更短,于是表现为图4中脉冲磁场强度较低即阴极区靶面总磁场强度较高时,靶材表面的弧斑运动速度更快,同时也与图2和图3中的现象相符,大弧斑减少,弧斑所形成的液态熔池规模更小,产生的金属液滴减少,能有效地减少大颗粒污染。

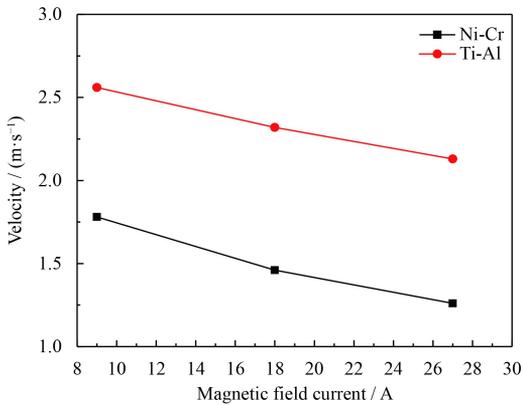


图4 不同脉冲磁场线圈电流下镍铬与钛铝合金靶材表面弧斑的平均运动速度

Fig.4 Average motion velocity of arc spots on Ni-Cr and Ti-Al targets surface at different pulsed magnetic field coil current

在靶面纵向分量磁场作用下,弧斑会表现出向靶材边沿扩散的漂移运动,这对研究靶材烧蚀有着重要意义。图5是两种合金靶材在不同磁场条件下弧斑的运动轨迹范围,在脉冲磁场线圈电流分别为9、18和27 A时,镍铬合金靶的弧斑运动范围直径依次为91.7、83.1和75.1 mm,钛铝合金靶的弧斑运动范围直径依次为91.5、84.8和78.5 mm。从图中可以得知,随着通入脉冲磁场线圈电流的上升,即阴极区靶面总磁场强度下降,弧斑漂移运动扩散的范围逐渐减小。这是由于在纵向分量磁场的作用下,电流密度最大值更容易在磁力线与靶面夹角区域即靶沿处出现,于是弧斑更容易在靶沿处生成,表现为弧斑向靶沿

扩散,靶面磁场强度越强,扩散运动就越强烈,所以在脉冲磁场线圈电流为9 A时,靶面总磁场强度相对最大,弧斑的运动范围达到最大值,能够覆盖靶材表面90%以上的区域,随着脉冲磁场线圈电流的增加,靶面的总磁场强度下降,靶材表面弧斑的扩散趋势减弱,最小时弧斑运动轨迹对靶材表面的覆盖率下降至75%左右,此时靶材的外围区域弧斑运动较少,靶材的烧蚀不够充分,对靶材有比较严重的浪费。

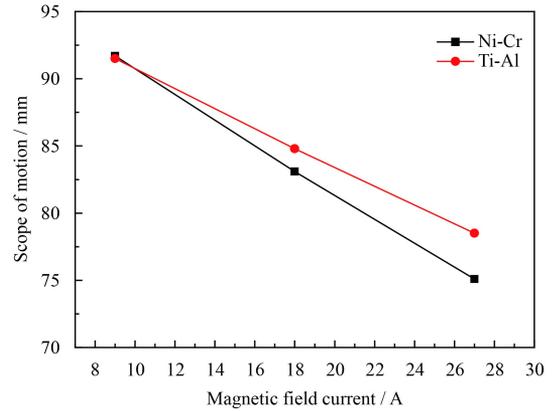


图5 不同脉冲磁场线圈电流下镍铬与钛铝合金靶材表面弧斑的运动范围

Fig.5 Motion scope of arc spots on Ni-Cr and Ti-Al targets surface at different pulsed magnetic field coil current

由于靶材表面弧斑运动的随机性以及复杂性无法用线性科学进行解释,于是结合分形理论计算了弧斑运动轨迹的分形维数D,分形维数能很好的表征弧斑运动轨迹的复杂程度,并能对靶材表面的烧蚀情况进行分析及预测,试验前猜测,弧斑轨迹的分形维数越大,则表明靶材被弧斑烧蚀的区域越大。试验结束后将运动图像在Matlab软件中处理并计算,在通入脉冲磁场线圈电流为9、18和27 A时,镍铬合金靶的弧斑运动轨迹分形维数D依次为1.145、1.127和1.103,钛铝合金靶的弧斑运动轨迹分形维数D依次为1.159、1.143和1.140。如图6所示,随着通入脉冲磁场线圈电流的上升,即靶面总磁场强度下降,分形维数D呈下降趋势,与图5中的弧斑运动范围变化趋势一致,分形维数越大,弧斑的运动轨迹就越复杂,靶材表面被烧蚀的区域就越大。结合图7、图8靶材的烧蚀情况进行分析,分形维数最大值就是从烧蚀图7(a)与图7(c)时得到,即镍铬合金靶与钛铝合金靶的运动轨迹分形

维数 D 分别为 1.1447 与 1.159, 此时从图 7(a)(c) 与图 8(a)(c) 可以看到其烧蚀情况非常理想, 被烧蚀区域达到了 92%, 各个区域的烧蚀也十分均匀。而维数较低时则对应图 7(b)(d) 与图 8(b)(d), 其靶材的烧蚀得不够充分, 对材料有一定的浪费。

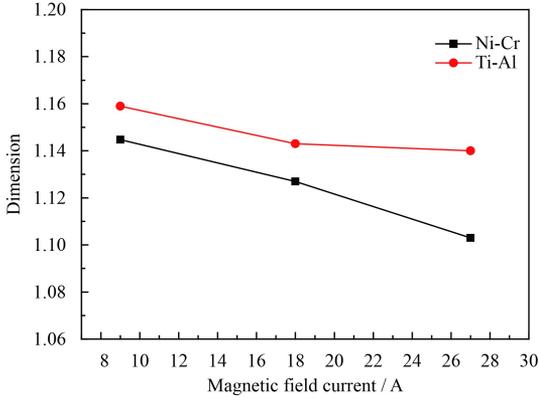


图 6 不同脉冲磁场线圈电流下镍铬与钛铝合金靶材表面电弧斑运动轨迹的分形维数

Fig.6 Fractal dimension of arc spots motion track on Ni-Cr and Ti-Al targets surface at different pulsed magnetic field coil current

通过精心设计与反复试验, 能够在试验过程中, 通过计算任意时刻弧斑轨迹的分形维数 D 来预测靶材的烧蚀结果, 并依此调整试验参数, 从而能让靶材达到理想的烧蚀结果, 这对镀膜工艺有着重要意义。

图 7(a)(b)、图 8(a)(b) 分别表示试验中镍铬合金靶材在较低和较高的脉冲磁场强度下烧蚀了约 20 h 后的形貌图、消耗深度图; 图 7(c)(d)、图 8(c)(d) 则表示钛铝合金靶材在较低和较高的脉冲磁场强度下烧蚀约 10 h 后靶材的形貌图、消耗深度图。由于靶材烧蚀后总体对称, 图 8 选取的是靶材的二分之一截面。

图 9 是根据图 8 计算得到的纵向上靶材烧蚀速度曲线, 其中图 9(a)(b) 表示镍铬合金靶, 图 9(c)(d) 则表示钛铝合金靶。图 9(a) 中镍铬合金靶材在靶面总磁场强度较高的情况下烧蚀一段时间后计算得到, 在半径 39 mm 区域内的纵向刻蚀速度为 0.60~0.65 mm/h, 紧接着在一小段刻蚀轨道处的刻蚀速度上升至 0.75 mm/h, 随后刻蚀速度开始下

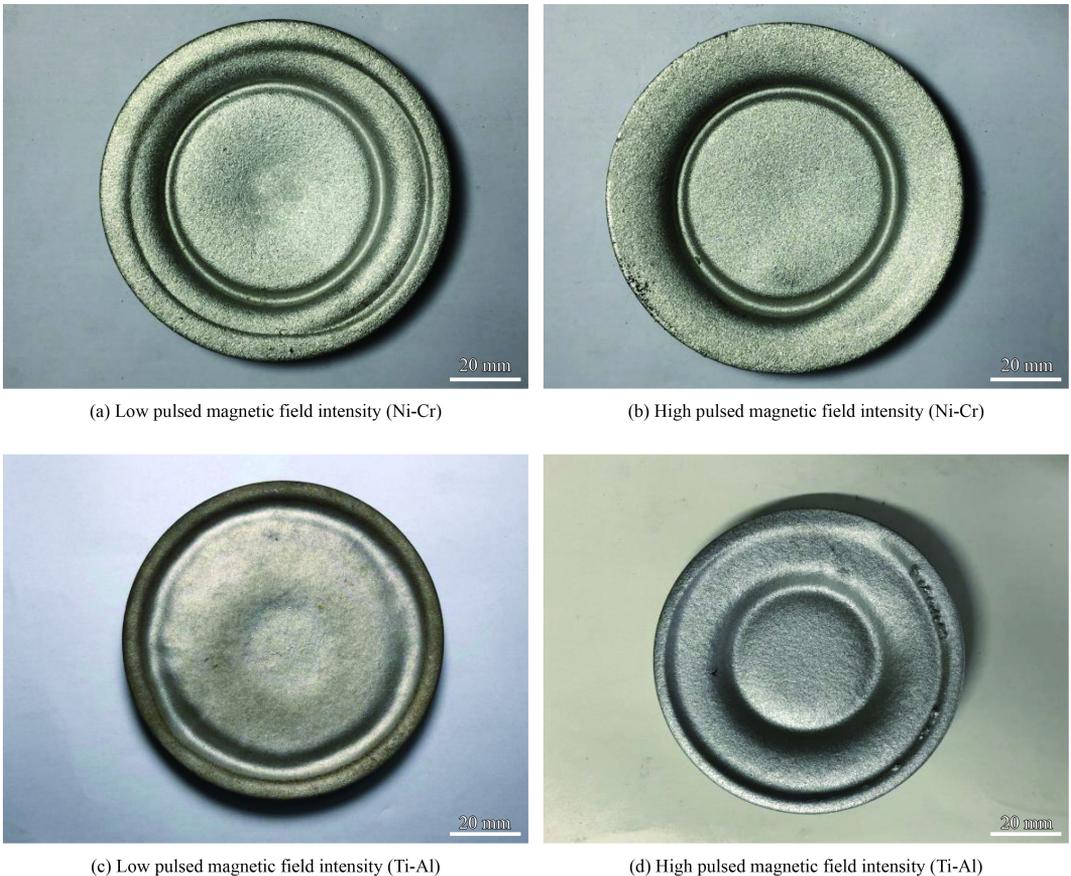


图 7 不同脉冲磁场强度下镍铬与钛铝合金靶材表面的烧蚀形貌图

Fig.7 Topographies of Ni-Cr and Ti-Al targets after ablation at different pulsed magnetic field intensity

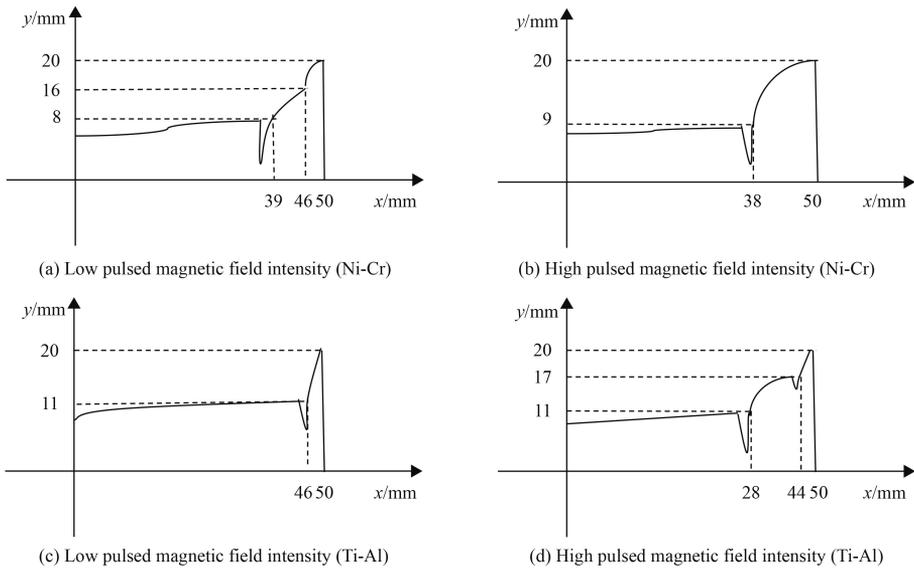


图8 不同脉冲磁场强度下镍铬与钛铝合金靶材损耗深度图

Fig.8 Ablation depth of Ni-Cr and Ti-Al targets at different pulsed magnetic field intensity

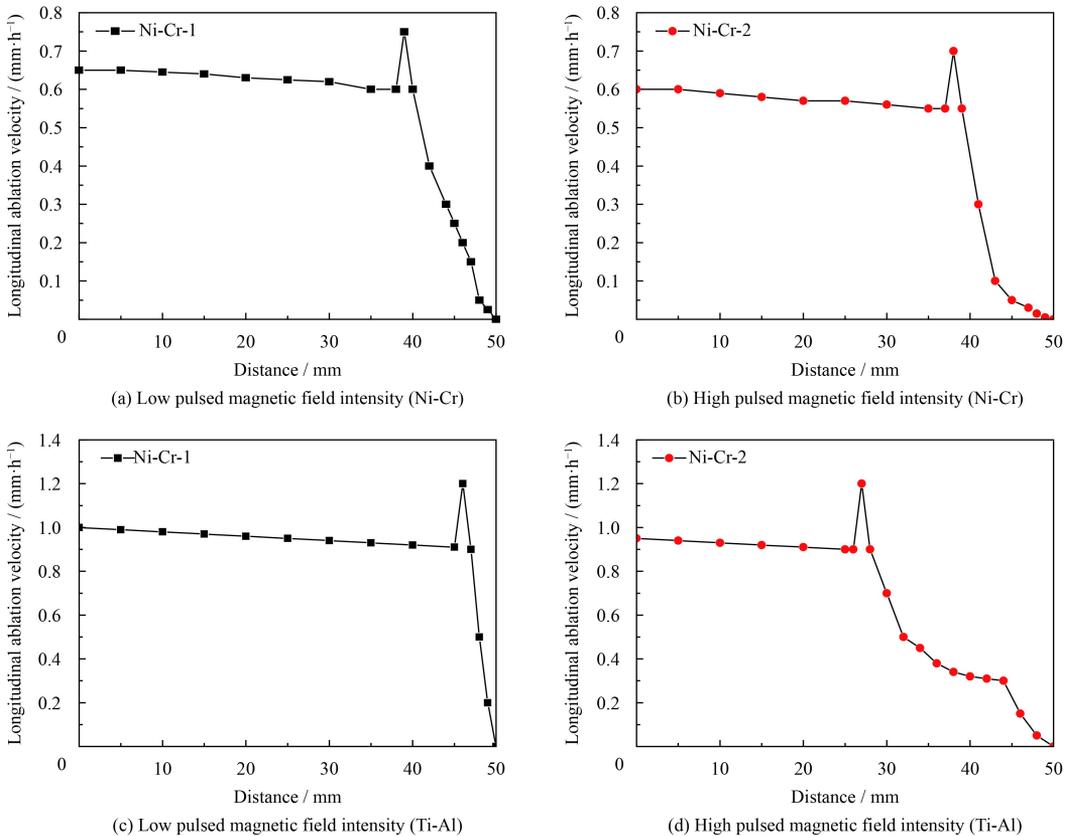


图9 不同脉冲磁场强度下镍铬与钛铝合金靶材烧蚀速度

Fig.9 Ablation rate of Ni-Cr and Ti-Al targets at different pulsed magnetic field intensity

降, 在半径 40 与 46 mm 之间纵向刻蚀速度从 0.60 下降至 0.20 mm/h, 随后速度迅速下降至 0, 总刻蚀范围占据靶面 90% 以上, 这与前面的弧斑运动范围与分形维数的分析一致。

图 9(b) 中则是在靶面总磁场强度较低的情况下烧蚀一段时间后计算得到, 在半径 38 mm 区域内的纵向刻蚀速度在 0.55 到 0.60 mm/h 之间, 刻蚀轨道处的刻蚀速度上升至 0.70 mm/h, 随后在半

径 39mm 以外的区域纵向刻蚀速度从 0.55 mm/h 迅速下降至 0, 与前一种情况相比较, 此时弧斑主要运动范围较小, 虽然外围区域也有烧蚀痕迹, 但多是弧斑的随机运动造成, 这是由于靶面磁场强度小, 向靶沿扩散的漂移运动受到限制, 导致靶材烧蚀不均, 在这种情况下所观察到的弧斑运动轨迹图像维数较低。

同样, 图 9(c) 与图 9(d) 也表现出相似的情况, 图 9(c) 图中钛铝合金靶材在靶面总磁场强度较高的情况下烧蚀一段时间后计算可知, 在半径 46 mm 区域内的纵向刻蚀速度为 1.0 mm/h 左右, 在刻蚀轨道处的刻蚀速度上升至 1.2 mm/h, 随后刻蚀速度迅速下降至 0, 这样的烧蚀情况非常理想, 靶材均匀下凹, 总体刻蚀范围占据靶面 92% 以上, 且被烧蚀区域内烧蚀速度起伏不大, 对靶材的烧蚀十分充分。

图 9(d) 中则是在靶面总磁场强度较低的情况下烧蚀一段时间后计算得到, 在半径 28 mm 区域内的纵向刻蚀速度为 0.90 mm/h 左右, 第一个刻蚀轨道处刻蚀速度上升至 1.2 mm/h, 随后在半径 29 与 44 mm 的区域纵向刻蚀速度从 0.90 下降至 0.30 mm/h, 在第二个刻蚀轨道处刻蚀速度上升至 0.5 mm/h, 随后迅速下降至 0, 虽然烧蚀面积不小, 但外围区域相比于中心区域烧蚀不够充分, 说明外围区域弧斑的运动较少。

从而可知在靶面总磁场强度较低的情况下靶材的边沿区域烧蚀不够充分, 对靶材有比较严重的浪费, 相比较下在靶面总磁场强度较高时靶材烧蚀一段时间后, 靶材烧蚀面积大, 消耗均匀, 靶材的利用率也非常高。

3 结论

(1) 阴极靶材表面的磁场分布能够直接影响阴极电弧弧斑的运动, 在无磁场环境中, 靶面上弧斑表现为随机运动, 在阴极靶材表面加上永磁铁磁场与脉冲磁场耦合的轴对称磁场作用后, 由于造成电流密度不平衡, 靶面上的弧斑运动会在原来的随机运动基础上叠加反安培力方向的旋转运动与向靶沿方向扩散的漂移运动。

(2) 随着阴极表面的总磁场强度上升, 弧斑的平均运动速度增大, 并在脉冲磁场线圈电流为 9 A 时达到最大值, 此时镍铬合金靶材表面弧斑运动速度为 1.78 m/s, 比另两种磁场条件下的速度快

了 20%~50%, 钛铝合金靶材表面弧斑运动速度为 2.56 m/s, 比另两种磁场条件下的速度快了 10%~30%, 同时弧斑寿命变短, 金属液滴发射量减少, 能有效地改善大颗粒污染问题, 有利于后续膜层沉积; 加强了靶面弧斑的漂移运动, 弧斑运动范围扩大, 最高时运动范围可达靶面 90% 的区域以上, 提升了靶材的利用率。

(3) 弧斑运动轨迹表现出分形特征, 并且分形维数能实现对靶材烧蚀情况的实时分析与预测。随着靶面总磁场强度的增加, 弧斑运动轨迹分形维数增大, 同时靶材损耗速率加快。在通入脉冲磁场线圈电流为 9、18 和 27 A 时, 镍铬合金靶的弧斑运动轨迹分形维数 D 依次为 1.145、1.127 和 1.103, 对应于分形维数最大值 1.145 的靶材纵向烧蚀速度达到最大为 0.60~0.65 mm/h; 钛铝合金靶的弧斑运动轨迹分形维数 D 依次为 1.159、1.143 和 1.140, 对应于分形维数最大值 1.159 的靶材纵向烧蚀速度达到最大为 1.0 mm/h 左右。靶材烧蚀的试验结果与分形维数预测的结果一致。

参考文献

- [1] MATTOX D M. Fundamentals of ion plating[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1973, 10(1): 47-52.
- [2] PALDEY S, DEEVI S C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 342(1): 58-79.
- [3] 姜雪峰, 刘清才, 王海波. 多弧离子镀技术及其应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 55-57.
JIANG X F, LIU Q C, WANG H B. Technology and application of multi-arc ion plating[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 29(10): 55-57 (in Chinese).
- [4] ANDERS S, RAOUX S, KRISHNAN K, et al. Plasma distribution of cathodic arc deposition systems[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(9): 6785-6790.
- [5] JUTTNER B. Characterization of the cathode spot[J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science*, 1987, 15(5): 474-480.
- [6] OHRING M, 奥林, 刘卫国, 等. 薄膜材料科学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 139-140.
OHRING M, AO L, LIU W G, et al. *Materials science of thin films*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 139-140 (in Chinese).
- [7] HANTZSCHE E. Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance[J]. *Institute of Electrical and Electronics En-*

- gineers Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 799-808.
- [8] BEILIS I I. Vacuum arc cathode spot grouping and motion in magnetic fields[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science, 2002, 30(6): 2124-2132.
- [9] MARTIN P J, BENDAVID A. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition[J]. Thin Solid Films, 2001, 394(1): 1-14.
- [10] TAKIKAWA H, TANOUE H. Review of Cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 992-999.
- [11] SIEMROTH P, ZIMMER O, SCHULKE T, et al. Vacuum arc evaporation with programable erosion and deposition profile[J]. Surface & Coatings Technology, 1997, 94-95(97): 592-596.
- [12] 曹伟产, 梁淑华, 马德强, 等. 添加 Al_2O_3 对 CuW70 合金阴极斑点运动特性的影响[J]. 材料工程, 2010(9): 49-53.
- CAO W C, LIANG S H, MA D Q, et al. Influence of Al_2O_3 addition on motion of cathode spot for CuW70 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(9): 49-53 (in Chinese).
- [13] MESYATS G A, UIMANOV I V. Semiempirical model of the microcrater formation in the cathode spot of a vacuum arc[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 1-6.
- [14] HARRIS L P. Transverse forces and motions at cathode spots in vacuum arcs[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science, 2007, 11(3): 94-102.
- [15] ZABELLO K K, BARINOV Y A, CHALY A M, et al. Experimental study of cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc in magnetic field[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5): 1553-1559.
- [16] LANG W, XIAO J, GONG J, et al. Influence of axisymmetric magnetic field on cathode spots motion in arc ion plating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(3): 372-379.
- [17] MIYANO R, SAITO T, TAKIKAWA H, et al. Influence of gap length and pressure on medium vacuum arc with Ti cathode in various ambient gases[J]. Thin Solid Films, 2002, 407(1): 221-226.
- [18] MANDELBROT B B, WHEELER J A. The fractal geometry of nature[J]. American Journal of Physics, 1998, 51(4): 286-287.
- [19] 林启敬, 吴昊, 张福政, 等. Cu/Ti 纳米薄膜表面形貌的分形表征研究[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 593-597.
- LIN Q J, WU H, ZHANG F Z, et al. Research on fractal characterization of the surface morphology of Cu/Ti nano thin film[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 593-597 (in Chinese).
- [20] CEBRIANO T, MENDEZ B, PIQUERAS J. Micro- and nanostructures of Sb_2O_3 grown by evaporation-deposition: Self assembly phenomena, fractal and dendritic growth[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 135(2-3): 1096-1103.
- [21] NOTTALE L. Scale relativity and fractal space-time: theory and applications[J]. Foundations of Science, 2010, 15(2): 101-152.