

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.002

基于分形理论的真空击穿后电极表面微观形貌特征分析方法

李洪涛¹, 尹 泽¹, 庄添鑫¹, 沈靖宇², 程 豪², 马 慧²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 文中的目标是提出基于分形理论的真空击穿后电极表面微观形貌特征分析方法。首先通过雷电冲击实验获得真空击穿后棒—板电极表面的微观形貌特征, 其次通过结构函数法估计电极表面的分形维数, 继而根据分形维数分析电极表面的形貌特征。结果表明, 分形维数可用于描述电极表面的微观形貌特征, 分形维数可用结构函数法进行估计。曲面横、纵两个方向的估计分形维数基本一致, 说明经过雷电冲击耐压试验后的电极表面形貌各向同性较好。板电极表面的分形维数受击穿能量大小影响, 与击穿电压无明显关系。棒电极尖端表面分形维数在不同实验条件下保持一致, 约为2.91。因此, 雷电冲击下真空击穿所形成的表面具有相似的形貌特征, 分形维数可用于描述此现象。

关键词: 真空间隙; 电极表面状况; 微观形貌特征; 分形理论; 耐压强度

Analysis Method for Micro-morphology Characteristics of Electrode Surface After Vacuum Breakdown Based on Fractal Theory

LI Hongtao¹, YIN Ze¹, ZHUANG Tianxin¹, SHEN Jingyu², CHENG Hao², MA Hui²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The objective of this paper is to propose a method for analyzing the micro-morphology characteristics after vacuum breakdown based on fractal theory. First, the micro-morphology characteristics on the rod-plane electrode surface after vacuum breakdown is obtained through the dielectric strength under lightning impulse voltage. Then, the fractal dimension of electrode surface is estimated by a structure function method and, based on the fractal dimension, the micro-morphology characteristics of electrode surface is analyzed. The results show that the fractal dimension can be used to describe the micro-morphology characteristics of electrode surface and can be estimated by the structure function method. The estimated fractal dimensions of the horizontal and vertical directions of the curved surface are basically identical, indicating that the electrode surface after the lightning impulse voltage test exhibits good isotropy. For the plane electrode, the fractal dimension of surface is affected by the breakdown energy, and has no obvious relationship with the breakdown voltage. For the rod electrode, the fractal dimension of tip surface remains consistent under different experimental conditions and the value is approximately 2.91. Therefore, the surfaces formed by vacuum breakdown under lightning impulse voltage has similar micro-morphology characteristics, and fractal dimension can be used to describe such phenomenon.

Key words: vacuum gap; surface condition; micro-morphology feature; fractal theory; dielectric strength

0 引言

当前环保型高压真空开关进入一个快速发展

阶段, 其真空绝缘设计成为研究的热点^[1-4]。电极表面形貌特征是影响真空间隙绝缘特性的重要因素。电极表面形貌分为宏观和微观两方面, 触头表

收稿日期: 2026-03-11; 修回日期: 2026-06-28

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023037)。

Project Supported by Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2023037).

面的微观形貌决定了触头表面的电场畸变程度,老炼即是改善触头表面的微观缺陷,而宏观触头形貌决定了触头宏观电场分布和有效面积,两者共同决定着整个真空间隙的电场分布,进而决定真空间隙的绝缘强度。故而研究触头表面微观形貌对真空间隙绝缘特性的影响十分必要。

分形作为一门新兴的几何理论,近年来被广泛运用到形貌特征的分析领域中。Dlouhý. I等人研究发现穿晶断裂和沿晶断裂的竞争关系会导致NiCr合金钢断裂面的分形维数和粗糙度变大,两种断裂面的分形维数界限为1.12。Erdem. S等人研究发现水泥受冲击后的断裂面界面孔隙度和分形维数与粗糙度两参数均成正相关^[5]。Costa J M等人研究发现SUS316L不锈钢的锈蚀表面蚀坑轮廓具有分形特征^[6]。翁桂荣和秦树伟对不同的断口如河流花样、裂纹扩张和拉伸断口等用分形维数进行表征和识别^[7]。刘宪芳研究了精密加工样品表面的分形特征以及加工参数对分形维数的影响规律^[8]。

在电气工程领域,孙才新等人提出可以将分形维数作为局部放电信号识别的特征量进行特征识别和分析^[9]。Daalder. J E和Hantzsch. E等人研究表明阴极斑点在无外加磁场的条件下的运动具有分形特征^[10-11]。Anders. S等人研究表明阴极斑点在电极表面的运动轨迹分形维数为2,是一种二维布朗运动^[12]。Zhang. Y等利用分形函数W-M函数构建了微凸起的轴对称模型,对微凸起表面的电场进行了仿真分析,得到微凸起表面微观场致增强系数的变化规律^[13-15]。Majumdar. A和Yan. W等建立了粗糙表面分形接触模型,该模型能更好的反映电接触理论中接触斑点的形成规律^[16-17]。

真空间隙在发生击穿以后的电极表面具有随机复杂的结构。相较于传统的利用粗糙度进行描述,分形在描述此类不规则的、随机的自然现象具有很大的优势。然而,目前对于分形是否能够有效描述电极形貌特性尚不清楚。

文中的目标是提出基于分形理论的真空击穿后电极表面微观形貌特征分析方法。首先通过雷电冲击耐压实验获得击穿后电极的表面形貌。其次采用分形维数结构函数法估计电极表面的分形维数。最终根据分形维数分析击穿过后电极表面的形貌特征。

1 分形理论

1.1 W-M分形函数

W-M函数最初是Weierstrass构造的一个处处

连续但不可导的函数,后被Mandelbrot作为典型分形曲线进行研究,其形式变化有多种,通常以余弦形式给出,见式(1)^[18]

$$z(x) = G^{(D_1-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-D_1)n}} \quad (1)$$

式(1)中: D_1 为曲线的分形维数, $1 < D_1 < 2$; G 为分形粗糙度,与曲线幅值有关; γ 为尺度参数, $\gamma > 1$; n_1 为最低频率分量阶数。

W-M函数直接定义了一条曲线上每个点(横坐标)的高度,在实际构造时,曲线对应的是一个离散的序列,由此形成的曲线是一个近似分形曲线。曲线上每一个点可以看成多个余弦分量的叠加,类似于傅里叶级数,各余弦分量的幅值和所占比重则由尺度参数 γ 和分形维数 D_1 决定。综合考虑构造序列的功率谱密度和相位随机性的要求,尺度参数 γ 通常取值1.5^[9],最低频率分量阶数 n_1 与取样长度 L 有关,通常取值

$$n_1 = -\frac{\ln(L)}{\ln(\gamma)} \quad (2)$$

分形粗糙度 G 是决定曲线高度方向的尺度系数,无实际物理意义,改变其值相当于对曲线进行高度方向的等比例缩放。使用一维W-M函数构造的粗糙轮廓线见图1,分形粗糙度取值均为 $G=10^{-9}$ m,分形维数 D_1 分别为1.2、1.5、1.8。随着分形维数 D_1 增大,曲线中的高频分量比例增加,小尺寸特征更加明显,曲线变得更加“粗糙”。

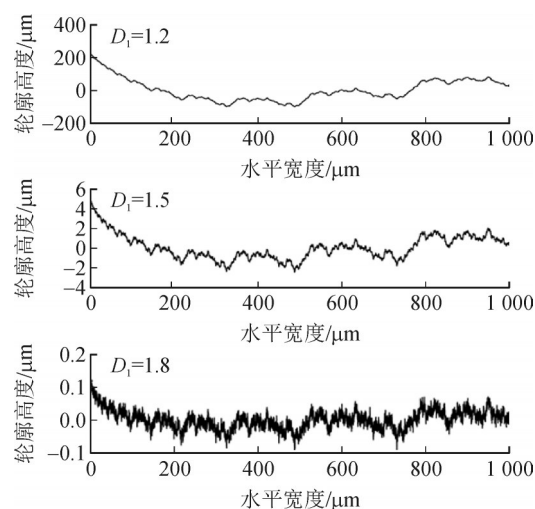


图1 一维W-M函数构造的轮廓

Fig. 1 Contour established by one-dimensional W-M function

1.2 分形维数结构函数法估计

同分形维数的定义,分形维数的计算也存在多种方法^[20-22]。文中选择结构函数法来估算粗糙表面横向与纵向每一条轮廓曲线的分形维数 D_1 ,使用关

系式 $D_2=D_1+1$ 获得粗糙表面的分形维数估计。并用 W-M 函数构建相应分形曲线和曲面,用于验证分形估算方法的有效性。

为对采用结构函数法对曲面分形维数进行估算准确度进行验证,以 0.025 的间隔, $D_2=2.025$ 为起始值, $G=10^{-8}$ 模拟生成 39 组 $768 \times 1\,024$ 的粗糙曲面。然后用结构函数法估算其分形维数,与理论分形维数进行对比。39 组模拟曲面利用结构函数估算的分形维数与其理论维数的比较见图 2。从图 2 中看出,当理论分形维数小于 2.50 时,模拟曲面的估算结果偏大且理论维数越大,偏差越小;当理论分形维数大于 2.50 时,估算值与理论值基本一致。且在分形维数大于 2.70 后,横、纵两个方向的估计分形维数基本相同,两个方向趋于同性。估算误差来源于模拟曲面的数据量相对较少, W-M 函数中除 DG 外的参数采用了经验数值。理论分形维数与估算值成一一映射的函数关系,说明估计值可以唯一的反应理论值所代表的分形特征,可以用结构函数法来估算其分形维数,进行曲面形貌特征的分析。

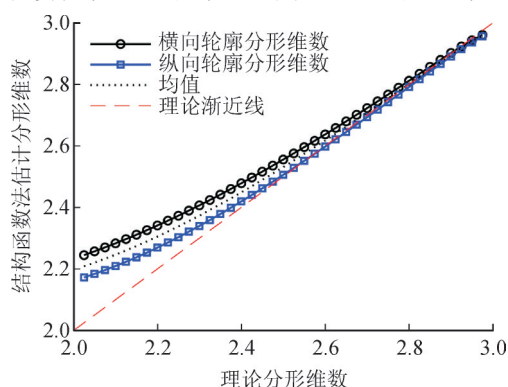


图2 结构函数法分形维数估计

Fig. 2 Fractal dimension estimation by structure function method

2 雷电冲击耐压实验

2.1 实验设置

本实验研究中的实验电极采用棒—板电极结构,见图 3,棒电极端部半径为 2 mm,板电极直径为 30 mm。电极材料为 SUS304。电极表面的初始粗糙度为 $0.8\ \mu\text{m}$ 和 $1.6\ \mu\text{m}$ 。棒电极端部与板电极中心的距离调节为 2 mm。实验中采用升降法于真空间隙间施加 800 次正极性雷电冲击电压^[23]。实验回路中通过串联 $238\ \Omega$ 的限流电阻以改变击穿能量。具体实验设置见表 1。采用 3D 激光显微镜 VK9700 扫描电极表面的微观形貌特征。

2.2 雷电冲击耐压实验后电极的微观形貌特征

棒—板电极微观形貌的扫描区域见图 4。对于

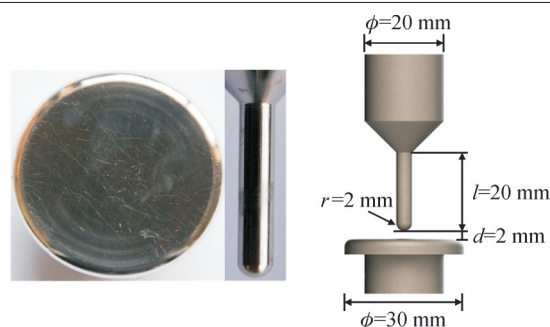


图3 电极结构示意图

Fig. 3 Electrode configuration

表1 实验条件的设置

Table 1 Setup of the experimental conditions

试样编号	电极材料	初始粗糙度/ μm	限流电阻/ Ω
L31R	SUS304	0.8	238
L310		0.8	0
L320		1.6	0

板电极,选择棒电极正对区域 1、边缘烧蚀区域 2、未烧蚀区域 3 这 3 个区域进行扫描;对于棒电极,选择尖端烧蚀区 1、近端烧蚀区 2、远端烧蚀区 3 这 3 个区域进行扫描。

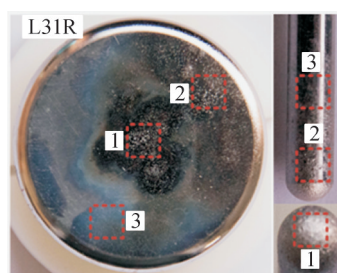


图4 微观形貌扫描区域

Fig. 4 Scan area of micro-morphology feature

经过雷电冲击绝缘特性实验的板电极样品 L31Rp、L310p、L320p 的典型扫描结果见图 5,图 5(a)、(d)、(g)为中心烧蚀区的光镜照片,图 5(b)、(e)、(h)为边缘烧蚀区的光镜照片,图 5(c)、(f)、(i)为边缘浅(未)烧蚀区的光镜照片。由图 4 可见 3 种实验条件下的板电极由中心向边缘再到浅烧蚀区,烧蚀程度逐渐变低,中心烧蚀区的熔融层光滑而非“山脉”般的起伏,在边缘浅烧蚀区仅有零星烧蚀斑点,还保留有初始的加工痕迹;而前两者中心烧蚀区熔融层起伏明显,且边缘浅烧蚀区形貌与串联电阻限流的电极 L31Rp 的边缘烧蚀区类似,遍布烧蚀斑点,覆盖了电极表面初始的加工痕迹。虽然电极表面初始粗糙度 L320p 比 L310p 大,但扫描区的对应烧蚀区形貌却显得更光滑,该形貌特征对应于 L320 电极真空间隙击穿电压更高。

雷电冲击绝缘特性实验后的 SUS304 棒电极样品 L31Rr、L310r、L320r 的典型扫描结果见图 6,

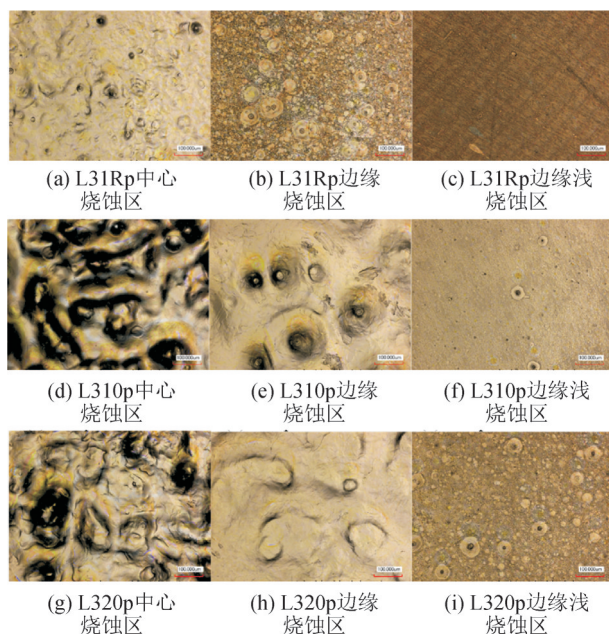


图5 雷电冲击实验后板电极的微观形貌特性

Fig. 5 Micro-morphology feature of plane electrode after the dielectric test

图6(a)、(d)、(g)为棒尖端烧蚀区的光镜照片,图6(b)、(e)、(h)为棒近尖端烧蚀区的光镜照片,图6(c)、(f)、(i)为棒远尖端浅烧蚀区的光镜照片。由图6可见3种实验条件下的棒电极烧蚀情况相似,棒电极除尖端完全被烧蚀,距尖端由近到远也有程度由重到轻的烧蚀痕迹。远尖端有部分烧蚀斑点,初始加工痕迹并未被完全破坏,初始粗糙度为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 的L320r电极初始加工痕迹明显比另两只初始粗糙的为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的电极粗糙。

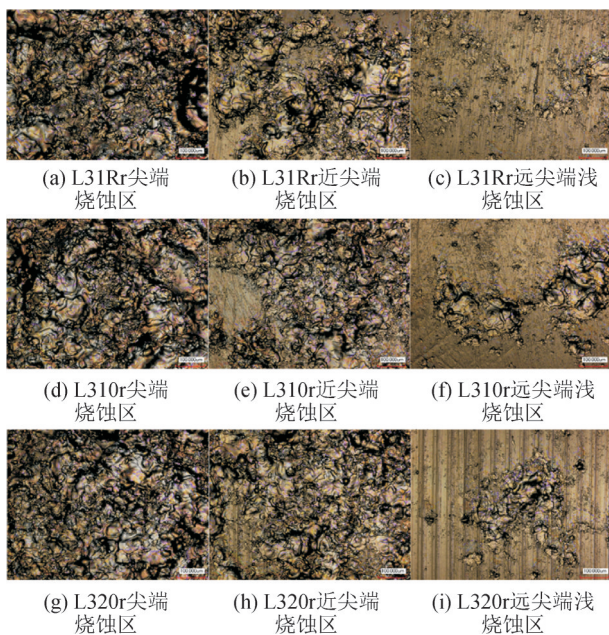


图6 雷电冲击实验后棒电极的微观形貌特性

Fig. 6 Micro-morphology feature of rod electrode after the dielectric test

3 基于分形的电极表面微观形貌分析

3.1 电极表面分形维数的估计

利用分形维数结构函数法计算所有扫描区域的分形维数,分别求取扫描区域的横向(x 方向)和纵向(y 方向)的各条轮廓线的分形维数,并将其两个方向分形维数的平均值 D_x 和 D_y 作为该扫描区域曲面的分形维数。板电极L310p正对棒电极尖端区域放大400倍时的分形维数估算见图7。由图7可见,同W-M函数模拟曲面相同,各条轮廓线的分形维数围绕均值上下波动,且波动范围均大致在 ± 0.2 左右。该曲面横、纵两个方向的估计分形维数 $D_x=2.7452$, $D_y=2.7477$ 基本一致,与W-M函数在较大分形维数时的情况相同,说明经过雷电冲击耐压试验后完全后的电极表面形貌各向同性较好。

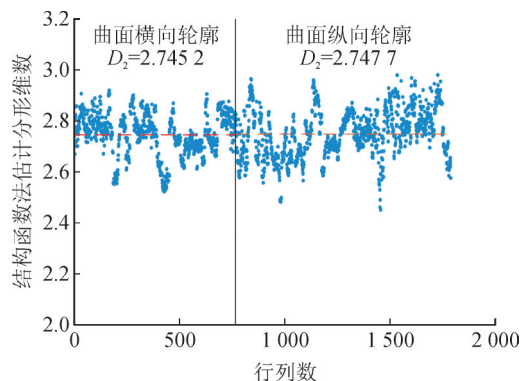


图7 L310p板电极中心放大400倍分形维数估计

Fig. 7 Estimated fractal dimension at 400 $\times$ magnification of plane center of L310p

板电极所有扫描区域的分形维数(放大倍数为400倍)见表2。棒电极所有扫描区域的分形维数。由于棒电极本身的曲率影响,数据为对棒电极的扫描数据去曲率后计算所得相应的形貌特征参数见表3。其中对实验前L310p、L320p、L310r、L320r求取每个电极所有扫描区域各自特征参数的平均值作为该电极的参考值;由于各电极分形维数 D_x 、 D_y 一致性较好,即各电极表面扫描区域可认为具有各向同性,这里采用 D_x 、 D_y 的平均值表示该区域的分形维数 D_2 。从表2、3中看出,棒电极与板电极相同,在雷电冲击耐压实验过后,烧蚀区的分形维数降低。这表明电极在经过雷电冲击电压老炼后,表面由加工痕迹主导的微凸起等被电弧烧蚀掉,高频分量减少,由烧蚀区光滑的低频分量占主导,从而绝缘薄弱区域减少,击穿电压逐渐抬升,达到老炼的效果。

3.2 电极表面分形维数与绝缘特性的关系

板电极各扫描区域的分形维数与50%击穿电压

表2 板电极表面的分形维数

Table 2 Fractal dimension of plane electrode surface

编号	区域	分维 D_2
L310p(实验前)	中心	2.987 2
L320p(实验前)	中心	2.990 5
L31Rp	中心	2.848 5
	边烧	2.961 0
L310p	浅烧	2.997 5
	中心	2.746 5
	边烧	2.575 2
L320p	浅烧	2.989 0
	中心	2.767 5
	边烧	2.516 5
	浅烧	2.974 1

表3 棒电极表面的分形维数

Table 3 Fractal dimension of rodelectrode surface

编号	区域	分维 D_2
L310r(实验前)	尖端	2.987 2
L320r(实验前)	尖端	2.990 5
L31Rr	尖端	2.906 2
	近端	2.936 4
L310r	远端	2.984 8
	尖端	2.916 9
	近端	2.947 0
L320r	远端	2.956 9
	尖端	2.909 1
	近端	2.948 9
	远端	2.944 9

U_{50} 的关系见图8。从图8中看出,板电极表面的分形维数与真空间隙雷电冲击击穿电压 U_{50} 无直接关系,但其形貌变化受击穿能量影响。串联电阻进行实验的板电极 L31Rp 表面分形维数相较初始形貌变化较小,而未串联电阻的两只电极烧蚀区域分形维数均有所下降且相差不大,与耐压大小无关。所有板电极的未烧蚀或浅烧蚀区受击穿影响较小,分形维数与实验前变化不大。

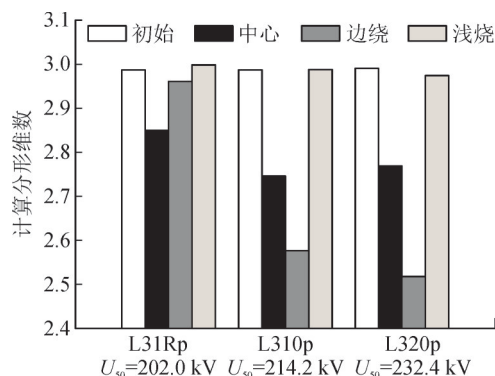


图8 板电极表面各区域分形维数

Fig. 8 Fractal dimension of each area on planesurface electrode

棒电极尖端分形维数 D_2 与雷电冲击击穿电压

U_{50} 的关系见图9。从图9中看出,雷电冲击电压的能量大小(是否串联电阻限流或雷电冲击电压的高低)不影响耐压稳定后棒电极尖端表面的分形维数。在该雷电冲击电压源下,真空间隙在雷电冲击电压老炼完成后,电极表面具有相同的分形维数, $D_2 \approx 2.91$ 。分形维数描述了粗糙表面所具有的结构特征,在雷电冲击电压作用下,电极表面形貌均在真空击穿作用下形成,真空击穿机理相同,则电极表面形貌具有的结构特征相同,即具有相同的分形维数。

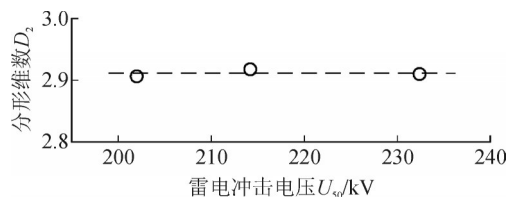


图9 U_{50} 与棒电极尖端分形维数 D_2 的关系

Fig. 9 Relationship between U_{50} and fractal dimension D_2 on the tip of rod electrode

4 结论

文中通过雷电冲击实验获得了击穿后棒—板电极表面的微观形貌特征。利用分形维数结构函数法估算了电极表面各个区域的分形维数 D_2 , 最终基于分形维数分析了不同实验条件下的电极表面形貌特征, 得到以下结论:

1) 分形维数可用于描述电极表面形貌特征, 分形维数可用结构函数法进行估计。曲面横、纵两个方向的估计分形维数基本一致, 说明经过雷电冲击耐压试验后的电极表面形貌各向同性较好。

2) 板电极表面形貌特征参数分形维数受雷电冲击击穿能量大小影响, 与雷电冲击击穿电压 U_{50} 无明显关系。板电极烧蚀区分形维数相较于实验前有所降低, 且未串电阻情况下降低更明显; 板电极未烧蚀区分形维数与实验前变化不显著。

3) 雷电冲击实验后, 不同实验条件下的棒电极尖端表面分形维数相等, 约为 2.91。因此, 雷电冲击下真空击穿所形成的表面具有相似的形貌特征, 分形维数可用于描述此现象。

参考文献:

- [1] 殷林飞, 叶泳孜, 张孝顺. 基于深度学习加速的电力系统分层分布式多目标优化调度[J]. 电力工程技术, 2026, 45(5): 27-39.
Yin Linfei, Ye Yongzi, Zhang Xiaoshun. Hierarchical distributed multi-objective optimal scheduling of power systems accelerated by deep learning[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45 (5): 27-39.
- [2] 梁振成, 胡楷涛, 罗翠云, 等. 高比例新能源电力系统极端口运行场

- 景辨识[J]. 电力工程技术, 2026, 45(5): 104-114.
- Liang Zhencheng, Hu Kaitao, Luo Cuiyun, et al. Identification of extreme operation scenarios for power systems with high - proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(5): 104-114.
- [3] 朱继忠, 高美云, 肖鹏飞, 等. 大规模海上风电并网与运行技术综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 2-24.
- Zhu Jizhong, Gao Meiyun, Xiao Pengfei, et al. Review on grid-connection and operation technologies of large-scale offshore wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 2-24.
- [4] 朱继忠, 程乐峰. 新型电力系统下的新能源主导多主体优化博弈决策理论及应用[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 2.
- Zhu Jizhong, Cheng Lefeng. Theory and application of renewable-energy-dominated multi-agent optimization game decision-making under the new-type power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 2.
- [5] Erdem S, Blankson M A. Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilometry[J]. Construction and Building Materials, 2013(40): 70-76.
- [6] Costa J M, Sagués F, Vilarrasa M. Fractal patterns from corrosion pitting[J]. Corrosion Science, 1991, 32(5): 665-668.
- [7] 翁桂荣, 秦树伟. 基于多重分形特征的金属断口图像识别[C]//第26届中国控制会议, 2007: 489-492.
- Weng Guirong, Qin Shuwei. Multifractal spectrum and their applications in metal fracture surface images identification[C]//The 26th China Control Conference, 2007: 489-492.
- [8] 刘宪芳. 超精密加工表面的功率谱密度与分形表征技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Liu Xianfang. Characterization of ultra precision machined surfaces using spectral density and fractal analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [9] 孙才新, 李 新, 李 俭, 等. 小波与分形理论的互补性及其在局部放电模式识别中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 73-76.
- Sun Caixin, Li Xin, Li Jian, et al. Research on complementarity between wavelet and fractal theory and relevant application in PD pattern recognition[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2001, 21(12): 73-76.
- [10] Daalder J E. Random walk of cathode arc spots in vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983, 16(1): 17-27.
- [11] Hantzsche E, Juttner B, Pursch H, et al. On the random walk of arc cathode spots in vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983, 16(9): 173-179.
- [12] Anders S, Juttner B. Influence of residual gases on cathode spot behavior[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(5): 705-712.
- [13] 王海龙, 何 山, 胡 帅, 等. 基于小波变换与TKEO的故障识别与定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 177-186.
- Wang Hailong, He Shan, Hu Shuai, et al. Research on fault identification and location method based on wavelet transform and TKEO [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 177-186.
- [14] Zhang Yingyao, Chen Shaojie, Xu Xinye, et al. Characteristics of micro-particle phenomena under electron beam bombardment in vacuum pre-breakdown processes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 618-624.
- [15] Zhang Yingyao, Wang Haoyu, Dai Decun, et al. Impact phenomena of metallic microparticles under breakdown voltages in vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1145-1152.
- [16] Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of Tribology, 1991, 113(1): 1-11.
- [17] Yan W, Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7): 3617-3624.
- [18] Berry M V, Lewis Z V, Nye J F. On the weierstrass-mandelbrot fractal function[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1980, 370(1743): 459-484.
- [19] Majumdar A A, Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces[J]. Trans Asme J Tribology, 1990, 112(2): 205-216.
- [20] 毕贵红, 李玉洪, 赵四洪, 等. 基于小波散射变换和Shuffle-PM-DA的永磁同步电机故障识别[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19): 6223-6241.
- Bi Guihong, Li Yuhong, Zhao Sihong, et al. Permanent magnet synchronous motor fault identification based on wavelet scattering transform and Shuffle-PM-DA[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19): 6223-6241.
- [21] 张登奎, 张立岩, 李志兵, 等. 基于经验小波变换的真空断路器关合预击穿燃弧时间分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(s1): 106-116.
- Zhang Dengkui, Zhang Liyan, Li Zhibing, et al. Analysis of pre-strike arcing time for vacuum circuit breaker closure based on empirical wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(s1): 106-116.
- [22] 李成贵, 董 申. 三维表面形貌的分形维数计算方法[J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(4): 36-40.
- Li Chenggui, Dong Shen. Counting methods of fractal dimension for 3D surface topography[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2000, 36(4): 36-40.
- [23] 刘 庆, 李永林, 沈靖宇, 等. 真空中火花老炼对棒-板电极表面状况的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 79-85.
- Liu Qing, Li Yonglin, Shen Jingyu, et al. Influence of spark conditioning on surface condition of rod-plane electrodes in vacuum [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 79-85.

李洪涛(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为开关类设备调试试验、状态诊断、故障分析等工作(通信作者)(E-mail: 5pro@163.com)。