

燃煤机组 SCR 催化剂表面积灰板结层多重分形分析

张巍^{1,2,3}, 卢程^{1,2,3}, 陈冬林^{1,2,3}, 邓伟力⁴, 宋权斌^{1,2,3}, 冯延林⁵, 龚蔚成⁵, 宋健⁴

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 可再生能源电力技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

3. 清洁能源与智能电网湖南省 2011 协同创新中心, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南大唐节能科技有限公司, 湖南 长沙 410007;

5. 永清环保股份有限公司, 湖南 长沙 410330)

摘要:燃煤电站烟气中的飞灰在 SCR 催化剂表面沉积板结形成强垢是导致催化剂失活的重要原因,为及时清理催化剂表面强垢层,通常采用超声共振结合蒸汽吹扫将强垢去除,然而由于燃煤飞灰在催化剂表面的沉积板结使得强垢层形成较为稳定,导致现场高能耗操作下清灰效果不明显。为更好地研究飞灰在催化剂表面沉积板结对强垢形成的影响,借助现场小修期和 SCR 改造项目热态性能试验将不锈钢采样盘布置在 3 层催化剂层的迎风面进行采样,将 3 层 SCR 催化剂垢层样品采用原子力显微镜(AFM)进行表征测试,通过设置合适的阈值采用 Matlab 图形处理得到黑白二值图,并通过信息熵法获得盒子尺寸来分析多重分形标度区间的影响。结果表明,随着烟气的流程方向板结层的高程分区逐渐趋于碎片化,沉积飞灰粒度逐渐趋于均匀化,并随烟气流程的增加多重分形参数具有标度不变性;同时关联分形维数 D_2 随着烟气流程的增加逐渐与 Hausdorff 分形维数 D_0 接近;根据加权矩随变特性还发现板结层微观颗粒会随烟气流程的增加逐渐由疏松不均性演变为致密均匀性;由 3 层板结层多重分形谱对称性发现,随着烟气流程的延长,催化剂表面垢层多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 明显增加,相应垢层表面粗糙度逐渐增加,且垢层表面奇异峰分布更加明显,催化剂表面飞灰板结形成垢层的主导因素主要源于小颗粒、小高程的概率分布点。研究表明,随着烟气流程的增加,催化剂表面垢层的多重分形特征明显,沉积飞灰颗粒粒度变小,板结层的均匀性增加,微观拓扑表面的高程聚类特征消失,为超声波共振与蒸汽吹扫等现场清灰操作提供理论依据。

关键词:SCR 催化剂;表面垢层;多重分形谱;信息熵

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)02-0045-08

Multifractal analysis of fly ash deposition on SCR catalyst surface of coal-fired unit

ZHANG Wei^{1,2,3}, LU Cheng^{1,2,3}, CHEN Donglin^{1,2,3}, DENG Weili⁴, SONG Quanbin^{1,2,3},
FENG Yanlin⁵, GONG Weicheng⁵, SONG Jian⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Hunan Province 2011 Collarative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha 410114, China; 4. Hunan Datang Energy-saving Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China; 5. Yonker Environmental Protection Co., Ltd., Changsha 410330, China)

Abstract: The fly ash in the flue gas of coal-fired power station deposits a strong scale on the surface of the SCR catalyst, which is an important reason of catalyst deactivation. The ultrasonic resonance combined with steam purging method is usually used to clean the strong scale layer on the catalyst surface in time, However, due to the deposition of coal-fired fly ash on the surface of the catalyst, the formation of the strong scale layer is relatively stable, which results in the effect of ash removal under high-energy operation in the field not obvious.

收稿日期:2019-01-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19010502

基金项目:国家留学基金资助项目(201808430112);国家自然科学基金应急管理项目(51541601)

作者简介:张巍(1974—),男,湖南常德人,讲师,博士,从事清洁燃烧理论与能源环境仿真研究。E-mail:weizhang@csut.edu.cn。通讯作者:陈冬林,教授,博士,从事燃烧理论与高效低污染燃烧技术研究。E-mail:chendl_01@126.com

引用格式:张巍,卢程,陈冬林,等.燃煤机组 SCR 催化剂表面积灰板结层多重分形分析[J].洁净煤技术,2019,25(2):45-52.

ZHANG Wei, LU Cheng, CHEN Donglin, et al. Multifractal analysis of fly ash deposition on SCR catalyst surface of coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 45-52.



移动阅读

To better study the influence of fly ash deposition and agglomeration on the surface of the catalyst on the formation of strong scale, the stainless steel sampling tray was placed on the windward side of the three-layer catalyst layer for sampling by means of the field minor repair period and the thermal performance test of the SCR retrofit project. The samples of the three-layer SCR catalyst scale were characterized by atomic force microscopy (AFM). The black and white binary images were obtained by Matlab pattern processing by setting appropriate threshold values, and the box size was obtained by information entropy method to analyze the influence of multi-fractal scale interval. The results show that as the elevation zone of the stratification layer of the flue gas gradually becomes fragmented, the granularity of the deposited fly ash gradually becomes uniform, and the multi-fractal parameters have scale invariance with the increase of the flue gas flow. Meanwhile, the associated fractal dimension D_2 gradually closes to the Hausdorff fractal dimension D_0 with the increase of the flue gas flow. According to the variation property of weighted moment, it is found that the microscopic particles of the slab layer gradually change from loose non-uniformity to density uniformity with the increase of the flue gas flow. According to the multi-fractal spectrum symmetry of the three-layer slab layer, it is found that with the extension of the flue gas flow, the multi-fractal spectrum width $\Delta\alpha$ of the catalyst scale layer increases obviously, the surface roughness of the corresponding scale layer increases gradually, and the distribution of singular peaks on the surface of the scale layer is more obvious. The dominant factors of scale layer formation by fly ash deposition on the surface of the catalyst is mainly due to the probability distribution point of small particles and small elevation. The research shows that with the increase of flue gas flow, the multi-fractal characteristics of the scale layer on the catalyst surface become obvious, the particle size of the deposited fly ash becomes smaller, and the uniformity of the harden layer increases, and the elevation clustering feature of the micro-topological surface disappears, which provide a theoretical basis for on-site ash removal operations such as ultrasonic resonance and steam purge.

Key words: SCR catalyst; surface scaling layer; multifractal spectrum; information entropy

0 引言

根据《能源发展“十三五”规划》,我国正加快淘汰落后产能,促进煤电清洁高效发展;全面实施燃煤机组超低排放与节能改造,推广应用清洁高效煤电技术,严格执行能效环保标准,强化发电厂污染物排放监测。到2020年,煤电新建机组氮氧化物排放浓度不高于 50 mg/m^3 ^[1]。目前燃煤电厂SCR脱硝反应器普遍采用高温高尘的布置方式,烟气中携带大量燃煤飞灰,随运行时间增加,SCR脱硝催化剂的活性逐渐下降。燃煤飞灰对SCR催化剂的影响主要表现在磨蚀、堵塞、结垢、毒化等方面^[2-3],影响催化剂生命期的主要原因是燃煤飞灰在催化剂表面的附着与板结^[4]。催化剂表面飞灰板结的主要因素有压力、烟速、温度以及水汽成分^[5]。燃煤飞灰颗粒初始到达催化剂层时,在静电力、范德华力和液力桥的作用下,会以一定的随机概率借助较微弱的吸附力附着在催化剂表面层,在催化剂表面形成孔隙率较大的粉饼层,随粉饼层增厚,燃煤飞灰与粉饼层的碰撞以及粉饼层在风压作用下内部相互挤压,导致粉饼层孔隙率不断变小,催化剂表面发生粉尘板结,烟气中 NO_x 、 NH_3 与催化剂活性位的联系被板结阻断,最终导致脱硝反应无法正常进行^[6]。

由于多重分形理论可将不同程度的自相似性分解为不同奇异强度和分形维度的集合^[7],对于几何元素的不规则自仿射分形特征有较好描述,

因而多重分形技术受到各界学者的重视,并广泛应用于科学与工程领域。Kumar等^[8]通过计算声发射信号的多重分形谱准确得到了声传播过程中的最大传播类型和衰减类型。Xu等^[9]应用多重分形原理分析了腐蚀后钢材表面,发现腐蚀表面的多重分形谱可准确预测腐蚀表面的演化规律和趋势。Xu等^[9]基于奇异指数采用复合方法研究了负载型聚乙烯(PE)催化剂的表面形貌多重分形谱,结果表明多重分形谱的奇异强度跨度越大,则催化剂的活性越强。孙霞等^[10]以Si衬底上生长的ZnO薄膜的AFM图像为对象,研究了准确获得大范围内具有标度不变性多重分形谱的方法。因此,多重分形方法在微观表面中的应用实现了对物理量不均匀分布的定量表征。

本文采用原子力显微镜(AFM)观测3层SCR催化剂模块迎风面采集的飞灰沉积板结样品,通过计算获得样品的标度不变性多重分形谱,定量分析了催化剂表面板结层的多重分形特征,进而深入了解催化剂表面飞灰沉积板结的规律。

1 试验与方法

1.1 催化剂垢层采样试验

试验采样地点为大唐珙春发电厂3号锅炉。大唐东北电力试验研究所有限公司于2017年4月7日进行3号炉SCR改造项目热态性能试验。大唐珙春发电厂3号炉为武汉锅炉股份有限公司生产的WGZ1025/18.44-10型煤粉锅炉,锅炉结构为“ π ”

型布置,锅炉燃用煤质见表 1。在 BMCR 工况运行时,湿烟气量为 $1\ 110\ 831\ \text{Nm}^3/\text{h}$,烟气中燃煤飞灰

含量为 $73\ \text{mg}/\text{m}^3$,SCR 催化剂运行温度为 $360\ ^\circ\text{C}$,SCR 反应器催化层阻力为 $500\ \text{Pa}$ 。

表 1 3 号锅炉燃用煤质分析

Table 1 Property analysis of burning coal for No.3 boiler

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
M_t	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}	$(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
18.78	10.72	32.18	47.90	35.16	2.95	0.59	10.10	0.24	13.23

催化剂积灰板结层采样方法如图 1 所示。由于催化剂的主要迎风面为催化剂上表面,燃煤飞灰主要在催化剂上表面沉积—密实—板结,因此板结层的采样点主要设置在第 1、2、3 层催化剂上表面中心位置。为确保 SCR 催化剂表面板结层采样完整,采用 Tempfix™ 涂层将规格 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 的标准 304 不锈钢盘黏贴在 SCR 催化剂上表面的采样点。采样钢盘于 2016 年小修期布置,于 2017 年 SCR 改造项目热态性能试验期取出,采用吹灰器吹扫样品表面,将板结层连同采样钢盘置于高温管式炉中在 $350\ ^\circ\text{C}$ 进行焙烧紧固。

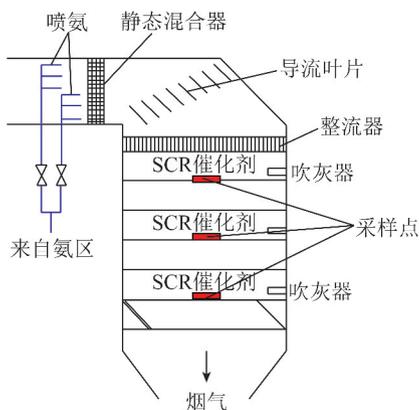


图 1 SCR 催化剂表面积灰板结层采样示意

Fig. 1 Sampling schematic diagram of deposit ash layers on the surface of catalyst

1.2 催化剂垢样图像获取

为了计算催化剂积灰板结层微观表面高度的概率分布,首先根据所得样品的三维 AFM 图转换为二维图,再将所得二维图形转化为灰度图,最后通过 Matlab 软件以 120 阈值将其化为黑白二值图,所有图像像素均为 $1\ 024 \times 1\ 024\ \text{dpi}$ 。

2 多重分形理论与计算

2.1 多重分形谱计算

多重分形方法常用于数理计量统计,对于沉积飞灰电镜图像可用盒计数法,并通过考虑盒内像素的各向异性^[11],对盒子内像素归一化处理后,

得到各盒子内沉积表面粗糙度的概率集,再用多重分形谱进行描述。按照盒内概率 $P_i(\varepsilon)$ 得到的幂函数为

$$P_i(\varepsilon_i) = \varepsilon_i^{\alpha_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

其中, ε_i 为盒子的尺度; α_i 为第 i 个盒子内的 Lipschitz-Hölder 指数特征密度,又称为奇异指数^[12],反映划分积灰垢层电镜图像所采用的各盒子内各像素点高程值的奇异程度。若所有像素点的高程值均相等,则 $\alpha = 1$,实际上每个像素点的高程均不相同,故 α 不等于 1。

若将覆盖积灰垢层电镜图像盒子数记为 $N(\varepsilon_i)$,则 $N(\varepsilon_i)$ 随 ε_i 的减小而增大,因此 ε_i 在图像尺寸范围内变化时, $N(\varepsilon)$ 与 ε 具有以下关系:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{f(\alpha)} \quad (\lim(\varepsilon) \rightarrow 0^+) \quad (2)$$

其中, $f(\alpha)$ 为相同 α 值的子集分形维数,一般将 $f(\alpha)$ 称为多重分形谱。 $f(\alpha)$ 是表示具有不同奇异特性盒子图像的分形维数集合,在采用某一尺度的盒子划分图像时,对具有各向异性的盒子图像能得到其准确的分形维数,有效避免简单分维只考虑盒子尺度与数目而不考虑盒内像素数的问题。

为了计算规则与不规则多重分形谱,从信息论的角度选择一个适合描述多重分形的参量——配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$,配分函数定义为对概率 $P_i(\varepsilon_i)$ 用加权矩 q 的次方进行加权求和,即

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_i P_i^q = \sum_i \varepsilon_i^{\alpha_i q} \quad (3)$$

令 $\tau(q) = \alpha_i q$,则 $\tau(q)$ 为 Rényi 指数,将式(3)两边取对数可得 Rényi 指数的表达式为

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (4)$$

为了得到覆盖积灰垢层电镜图像的多重分形谱,需要将广义分形维数进行 Legendre 变换^[7]。广义分形维数 D_q 与 Rényi 指数 $\tau(q)$ 的关系^[13]为

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q - 1} \quad (5)$$

由 Legendre 变换可得

$$D_q = \frac{\alpha q - f(\alpha)}{q - 1} \quad (6)$$

因此,多重分形谱可表示为

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau(q) \quad (7)$$

2.2 催化剂垢层多重分形分析

对于规则分形集,可通过统计物理方法对图形进行多重分形谱分析。而催化剂表面积灰垢层电镜图像一般为不规则分形集,因此必须通过盒计数法求出微观高程的概率分布,再借助统计物理方法对图像进行多重分形谱分析^[14]。第 (i,j) 个盒子中的概率为

$$P_{ij}(\varepsilon) = \frac{h_{ij}}{\sum h_{ij}} \quad (8)$$

式中, h_{ij} 为第 (i,j) 个盒子内的平均高程。

当加权矩 $q=0$ 时,由式(1)可知,不管盒子尺寸 ε 为何值,每个盒子的概率均为1,即有 $\chi_q(\varepsilon) = N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q=0)}$,这与简单分形公式 $N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D}$ 一致,因此 $q=0$ 时, D_0 为Hausdorff维数。

当加权矩 $q=1$ 时,必须采用盒计数法对催化剂表面积灰垢层进行多重分形分析,盒子尺寸的选取非常关键^[15]。Cowie等^[16]研究表明,信息熵很适于图像平面尺寸效应的研究。为保证盒子能恰好覆盖催化剂表面积灰垢层电镜图像,采用Matlab对图像进行计算确定图形的最大像素值,选取盒子尺寸 ε 处于0至最大像素值之间,则平均信息熵 H 为

$$H(\varepsilon) = - \sum P_i(\varepsilon) \ln P_i(\varepsilon) \quad (9)$$

由于信息熵的特点为各盒内概率相等时信息熵最大,各盒子概率越分布越不均匀,则信息熵越小。因此只有划分催化剂表面积灰垢层电镜图像的盒子越小时,各盒内概率越接近。因此,得到最大信息熵 $H_{\max}(\varepsilon)$ 对应的特征长度为最小盒尺度 ε_{\min} 。信息熵 $H(\varepsilon)$ 与信息维度 D_1 之间的关系^[17]为

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln H(\varepsilon)/C}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (10)$$

式中, C 为常数。

当加权矩 $q>1$ 时,由式(4)、(5)可知

$$D_q = \frac{\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}}{q - 1} \quad (11)$$

3 结果与讨论

3.1 催化剂板结层微观形态

为了更直观地研究燃煤飞灰在3层催化剂表面

的沉积板结情况,从现场取样并拍摄了上(第1层)、中(第2层)、下(第3层)催化剂表面垢层的AFM图像,如图2所示。第1层催化板结层表面的高程差明显高于第2层与第3层,且随着烟气行程方向的延长,垢层微观表面形貌逐渐变得复杂,从XY面的投影图可知,第2、3层的等高区域比第1层多,说明第1层催化剂为粗大颗粒形成板结层分区明显,而2、3层为细颗粒形成的板结层分区比较碎片化。采用盒计数法计算多重分形时,将XY投影图按照 ε 尺度划分盒子,并在每个盒子中以RGB色差变化统计盒子中的高度分布概率。为进行多重分析计算,将XY投影图以阈值120转化为黑白二值图,经过二值处理的图像使得多重分形谱的计算具有较好的标度不变性。

3.2 催化剂板结层广义分形维度数分析

加权矩 q 值是广义分形维数的类属划分的决定性因素:当 $q=0$ 时, D_0 为豪斯道夫维数(Hausdorff维数),在数值上近似与容量维数相等;当 $q=1$ 时, D_1 为信息维数;当 $q=2$ 时, D_2 为关联维数。因此,不同 q 对应不同类属的分形维数,3层催化剂板结层对应的配分函数对数如图3所示。显然, $q<0$ 时, $\ln \chi_q(\varepsilon)$ 的surf面随 $\ln \varepsilon$ 的增加呈现线性递减的趋势,而 $q>0$ 时 $\ln \chi_q(\varepsilon)$ 的surf面随 $\ln \varepsilon$ 的增加呈现线性增加的趋势。

理论上 $|q|$ 的取值越大越好,而实际过程中 $|q|$ 值大到一定程度时计算会发生溢出错误,且 $|q|$ 的细微变化都会导致分形维数成倍增长。通过摒弃无意义 q 值区域,在保证方差 R 大于0.95的条件下,计算得到有效 q 值范围内的广义分形维数,如图4所示。由图4可知, D_q 并非一个恒定的值,这表明催化剂板结层微观高程分布不均, D_q 随着加权矩 q 的增大而减小, $q \in [-5, 1]$ 时改变尤其剧烈,这表明3层催化剂板结层的具有明显的多重分形特征。 $q<-5$ 时第1、2层的广义分形维数比较接近, $q>-1$ 时第2、3层的广义分形维数比较接近。

为进一步具体化特殊意义维度,在 $\{q|q=1, 2, 3\}$ 条件下对广义维度的计算结果取值,分别得到了3层催化剂板结层表面的Hausdorff维数 D_0 、信息维数 D_1 和关联维数 D_2 (表2)。由表2可知, D_0 、 D_1 、 D_2 均随烟气行程的增加而增大,即先遇到含尘烟气的催化剂表面板结层的维度低,后遇到含尘烟气的催化剂表面板结层的维度高。但 D_0-D_2 的值却随烟气行程的增加而减小,这表明分形维度越高则关联分形维数与Hausdorff维数越接近。

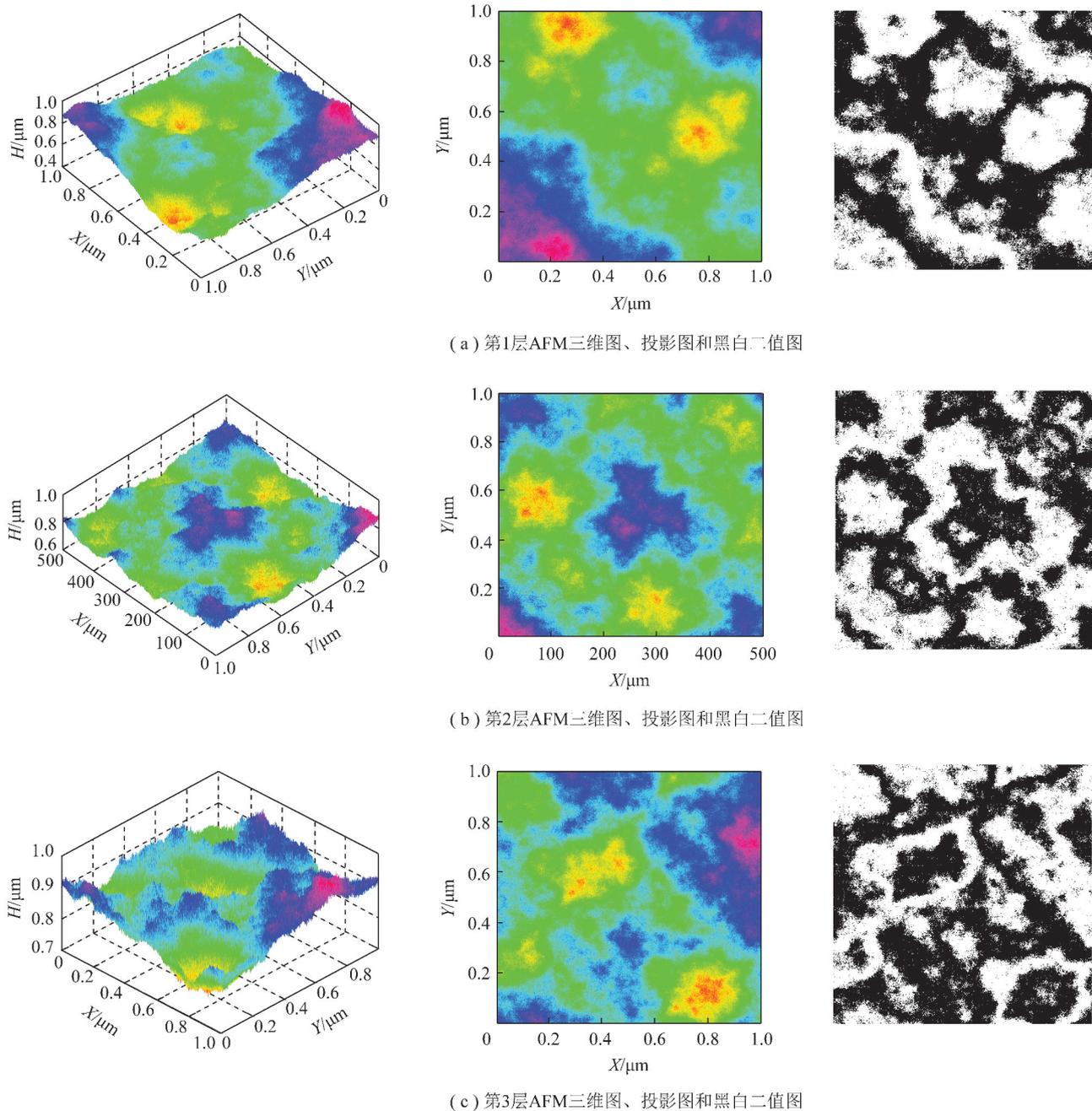


图 2 3 层催化剂沉积灰板结层 AFM 电镜图

Fig. 2 AFM of deposit ash layers on the surface of three-layer catalyst

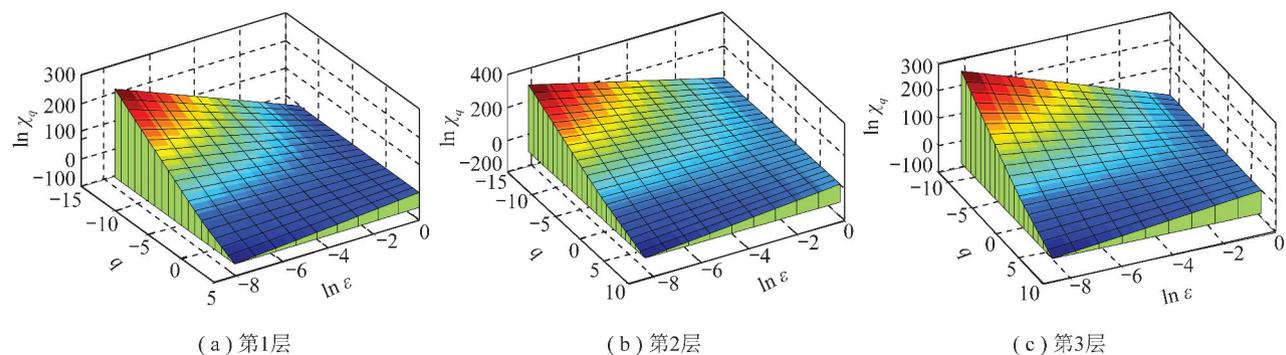


图 3 3 层催化剂沉积灰板结层 $\ln \chi_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$

Fig. 3 $\ln \chi_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ figures of deposit ash layers on the surface of three-layer catalysts

表2 广义分形维数的代表值

Table 2 Representative values of generalized fractal dimension

催化剂层	$-q$	q	D_0	D_1	D_2	D_0-D_2
第1层	-13	5	1.739	1.689	1.664	0.075
第2层	-15	9	1.805	1.760	1.736	0.069
第3层	-12	7	1.809	1.762	1.742	0.067

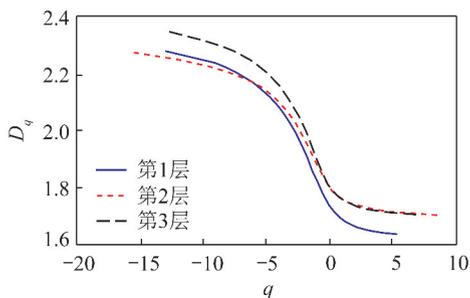


图4 广义分形维数随加权矩变化规律

Fig. 4 Variation law of generalized fractal dimension with weighted moment

3.3 加权矩随变特性曲线分析

3层催化剂表面板结层的奇异指数 α 与多重分形维数 $f(\alpha)$ 随着加权矩 q 的变化呈现一定的变化趋势(图5)。由图5可知,在有效 q 范围内(第1层催化剂: $q \in [-13, 5]$;第2层催化剂: $q \in [-15, 9]$;第3层催化剂: $q \in [-12, 7]$), α 随 q 的增大而减少,在 $q \in [-5, 5]$ 时 α 下降速度最快。 $q < 0$ 时,多重分形维数 $f(\alpha)$ 随 q 的增大而增大; $q > 0$ 时,多重分形维数 $f(\alpha)$ 随 q 的增大而减小。3层催化剂中第3层催化剂表面的板结层奇异度最大,这表明第3层催化剂板结层具有不均匀性和明显的多重分形特征;第3层催化剂表面的板结层具有最大的分形维数,第1层催化剂表面板结层具有最小分形维数,这表明第1层催化剂为迎风层,对含尘气流中的粗大颗粒具有拦截作用,形成的板结层在宏观上比较粗放,形成的垢层比较密实,因而维度不高,而第3层所接触的气流为经过2层催化剂层拦截后形成的板结层,由于粒度相对较小在宏观上得到的板结层比较精细,气流压力相对小使得形成的板结层较前2层疏松,因而维度较高。

3层催化剂表面板结层的Rényi指数 $\tau(q)$ 随着加权矩 q 的变化规律如图6所示。对于普通分形, Rényi指数 $\tau(q)$ 随 q 发生线性变化;对于多重分形, $\tau(q)-q$ 关系曲线是非线性变化。曲线的非线性程度越大,研究对象的多重分形特征越明显。试验表明在 q 取值范围内3层催化剂表面板结层的Rényi指数 $\tau(q)$ 都表现为非线性变化,说明板结垢层具有明显的多重分形特征。3层催化剂表面板结层的

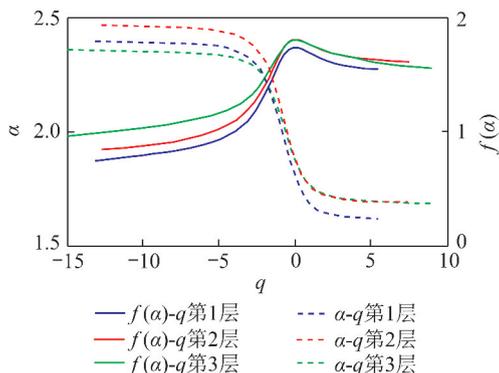


图5 奇异指数与多重分形维数随加权矩变化规律

Fig. 5 Variation law of singularity index and multifractal dimension with weighted moment

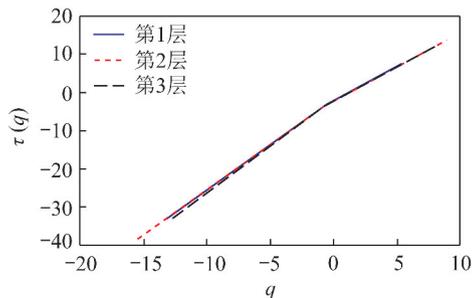


图6 Rényi指数随加权矩变化规律

Fig. 6 Variation law of Rényi index with weighted moment

Rényi指数重合度较高,当 $q=0$ 时3者的Rényi指数相等,当 $q > 0$ 与 $q < 0$ 时Rényi指数略有分散。

3.4 催化剂板结层多重分形谱

多重分形谱反映了催化剂板结层微观高度分布不均匀性,只有获得对象的多重分形谱才能定量描述分形维数随奇异指数的变化情况。3层催化剂表面板结层AFM图像的多重分形谱如图7所示。板结层多重分形谱曲线呈单峰钟形形状,其趋势呈现向右的钩状,对于处于不同催化剂层的板结图像,其钩的位置与宽度有所区别。一般来说分形谱的宽度越宽,表明图形的分形强度越强。由图7可知,第1层与第3层催化剂层的谱宽较大,第2层的谱宽较小,分形谱的宽窄影响表面均匀程度;从分形谱的高程来看第1层的分形维数最小,第3层分形维数最大,而分形维数又会影响表面颗粒板结程度。由此可知,首迎风催化剂板结层具有低值高强度分形维

数,板结层具有较低的粒度不均匀性且较为密实;未迎风催化剂板结层具有高值高强度分形维数,板结层具有较高的粒度不均匀性且较为疏松;而第 2 层催化剂板结层颗粒分布比较均匀。使用声波清灰器处理细颗粒形成的致密板结层时,清灰强度和频次相对较高;处理相对疏松的大颗粒板结层时,声波使用频次要少,吹灰也相当容易。3 层催化剂板结层的 $f(\alpha)-\alpha$ 谱线图均呈现右钩形状,这表明催化剂的板结强化主要由小颗粒引起,而大颗粒形成板结层的概率不高,这与实际过程相吻合。

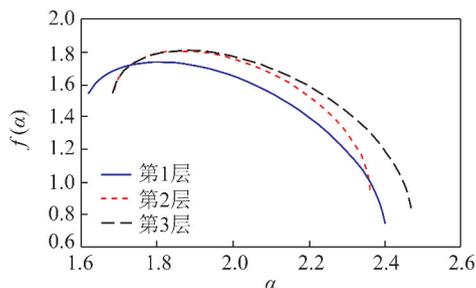


图 7 3 层催化剂沉积灰板结层多重分形谱

Fig. 7 Multifractal spectrum of depositash on the upper surface of three-layer catalysts

表 3 催化剂板结层多重分形谱的主要参量

Table 3 Main parameters of multi-fractal spectrum of depositash layers on the upper surface of three-layer catalysts

催化剂层	α_{\min}	α_{\max}	$\Delta\alpha$	$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\max})$	Δf
第 1 层	1.619 9	2.398 1	0.778 2	1.551 6	0.753 5	0.798 1
第 2 层	1.687 0	2.361 0	0.674 0	1.559 0	0.956 1	0.602 9
第 3 层	1.692 8	2.468 1	0.840 1	1.613 2	0.846 2	0.767 0

4 结 论

1) 讨论了燃煤电站 3 层催化剂表面积灰板结层微观表面的形貌和多重分形特征,3 层催化剂迎风面板结层具有典型的多重分形特征。通过对 AFM 图像的分析发现,第 1 层板结层微观高程分区较为明显,第 3 层微观高程分区较为碎片化,通过二值化处理图像使得多重分形分析具有标度不变性。

2) 通过对广义分形维度的分析,分别得到了 3 层催化剂板结层表面的 Hausdorff 维数 D_0 、信息维数 D_1 和关联维数 D_2 ,并随着烟气行程增加,关联分形维数与 Hausdorff 维数越接近。

3) 通过分析加权矩随变特性发现,第 3 层板结层具有较明显的粒度不均匀性且较为疏松,同时第 1 层板结层相对不均匀且较为密实。

4) 通过对多重分形谱形状分析发现,3 层板结层多重分形谱对称性较差,其谱线形状均呈现右钩形,由此得到板结层的微观形态以小颗粒与小高程

3 层催化剂表面积灰板结层主要特征参数见表 3。其中 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 定量表征了最小奇异值与最大奇异值之间的跨度, $\Delta\alpha$ 越大表明研究对象的高程分布越不均匀,因此 $\Delta\alpha$ 称为谱宽度。同时, $\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max})$ 能够很好地表征多重分形谱的对称度, $|\Delta f|$ 值越小则谱线的对称性越好,多重分形谱越易呈对称钟状;反之, $|\Delta f|$ 值越大对称性越差,多重分形谱越易呈钩状。 $\Delta f < 0$ 时谱线图呈现左钩状, $\Delta f > 0$ 时谱线图呈现右钩状。由表 3 可知,第 3 层催化剂板结层多重分形谱的谱宽度最大,为 0.840 1,说明第 3 层催化剂板结层的微观高程分布不均,该结果从图 2 的 AFM 观察也可得到验证。由于得到的 3 层催化剂表面积灰板结层谱对称度值绝对值 $|\Delta f|$ 均较大,因而其对称性较差,由于第 1 层 $\Delta f = 0.798 1$ 为 3 层中最大值,因而第 1 层催化剂板结层的对称性最差,第 2 层的对称性相对较好,第 3 层次之。3 层催化剂板结层均为 $\Delta f > 0$,因此其多重分形谱图均为右钩状,这表明小高程的概率分布占主导,而大高程的分布影响较小。

概率分布点主导。

5) 催化剂表面积灰板结形成过程是一个复杂的动力学过程,多重分形理论为催化剂迎风面积灰捕捉与板结密实过程分析提供了强有力的手段,并为催化剂表面声波清灰操作提供依据。

参考文献 (References):

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 能源发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016-12-26) [2019-01-05]. <https://baike.baidu.com/item/“十三五”能源规划/14664288Δfr=aladdin>.
- [2] 张巍,卢程,董鹏飞,等. 铜系低温选择性催化还原脱硝催化剂的研究进展[J]. 化工进展,2018,37(10):3858-3866. ZHANG Wei, LU Cheng, DONG Pengfei, et al. Research progress of copper based low temperature SCR denitration catalysts[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(10): 3858-3866.
- [3] ZHANG W, LU C, DONG P, et al. Influence of deposited carbon-black particles on pressure drop with ceramic ultra-filtration for treatment of coal-fired flue gas[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2018, 51(7): 566-575.

- [4] ZHANG W, LU C, DONG P, et al. Fractal reconstruction of microscopic rough surface for soot layer during ceramic filtration based on weierstrass-mandelbrot function [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(11): 4033-4044.
- [5] ZHANG W, LI C T, WEI X X, et al. Effects of cake collapse caused by deposition of fractal aggregates on pressure drop during ceramic filtration [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(10): 4415-4421.
- [6] 苗强. 脱硝技术的现状及展望 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(2): 12-19.
MIAO Qiang. Progress and prospects of denitration technology [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 12-19.
- [7] 高得力, 杨学昌, 王鹏. TiO_2 薄膜表面形貌的多重分形分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(1): 128-132.
GAO Deli, YANG Xuechang, WANG Peng. Multifractal analysis of TiO_2 thin film surface topographies [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(1): 128-132.
- [8] KUMAR J, ANANTHAKRISHNA G. Modeling the complexity of acoustic emission during intermittent plastic deformation: Power laws and multifractal spectra [J]. Physical Review E, 2018, 97(1): 1-3.
- [9] XU Shanhua, REN Songbo, WANG Youde. Three-dimensional surface parameters and multi-fractal spectrum of corroded steel [J]. Plos One, 2015, 10(6): 1-15.
- [10] 孙霞, 傅竹西, 吴自勤. 薄膜生长的多重分形谱的计算 [J]. 计算物理, 2001, 18(3): 247-252.
SUN Xia, FU Zhuxi, WU Ziqin. Multifractal calculation of thin film growth [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2001, 18(3): 247-252.
- [11] 孙霞, 吴自勤, 黄响. 分形原理及应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [12] HALSEY T C, JENSEN M H, KADANOFF L P, et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets [J]. Physical Review A, 1986, 33(2): 1141-1151.
- [13] SATO S, SANO M, SAWADA Y. Practical methods of measuring the generalized dimension and the largest Lyapunov exponent in high dimensional chaotic systems [J]. Progress of Theoretical Physics, 1987, 77(1): 1-5.
- [14] 赵玉新, 常帅, 张振兴. 地磁异常场的多重分形谱分析及构图法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(5): 529-536.
ZHAO Yuxin, CHANG Shuai, ZHANG Zhenxing. Multifractal spectrum analysis and mapping method of geomagnetic anomaly field [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(5): 529-536.
- [15] MEISEL L V, JOHNSON M, COTE P J. Box-counting multifractal analysis [J]. Physical Review A, 1992, 45(10): 6989-6996.
- [16] COWIE P A, SORNETTE D, VANNESTE C. Multifractal scaling properties of a growing fault population [J]. Geophysical Journal International, 1995, 122(2): 457-469.
- [17] 张济忠. 分形 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011.