

# 分形理论对煤粉粒度和孔隙的表征

逯桂平

(中国煤炭科工集团有限公司 武汉设计研究院 湖北 武汉 430064)

**摘要:**介绍了分形理论的定义,说明自相似性和标度不变性是分形的2个重要特征。从粒度分形规律和煤粉研磨超细化分形2个方面对煤粉超细化分形进行了研究,说明煤粒研磨过程中,绝大部分能耗用在小颗粒的研磨上,颗粒表面分形维数越大,研磨能耗越高,颗粒形状越不规则,能耗越大。详细介绍了气体吸附法、压汞法和扫描电镜图像法3种测定煤粉孔隙分形维数的方法,阐述了煤粉粒度和孔隙的分形规律及国内外相关研究现状,着重说明了煤粉的研磨、高效燃烧、煤粒与孔隙发育程度的关系及煤粒孔隙的特点与瓦斯存在形式的关系。最后提出了煤粉粒度和孔隙的研究方向。

**关键词:**煤粉粒度;分形维数;孔隙;动态分布;超细化

中图分类号:TD941

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2012)03-0029-04

## Characterization of fractal theory on the size and pore of pulverized coal

LU Gui-ping

(Wuhan Design and Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Introduce the fractal theory definition and its two remarkable characteristics, self-similarity and invariant scale. From the aspects of fractal pattern and coal fines grinding super-fine fractal, super-fine of pulverized coal is studied. The results indicate that in the process of grinding, most of energy is consumed by grinding fine particles. Bigger fractal dimension and more irregular particle shape consume more energy. Three methods of gas absorption operation, mercury intrusion method and scanning electron microscopy image are described in detail. The fractal characteristics of pulverized coal size and pore as well as the research status at home and abroad are stated. The relationship between the coal grinding, efficient combustion, coal particle and development of pore degree and the relationship between the coal pore characteristics and form of gas existing are explained mainly. Based on the research, offer the direction for pulverized coal size and pore research.

**Key words:** pulverized coal size; fractal dimension; pore; dynamic distribution; super-fine

自然界中大量不规则事物的规律性都可以用分形来描述。一般来说,分形是大小碎片聚集的一种状态,是一些没有特征长度的图形、构造及现象的总称,即组成部分以某种方式与整体相似的形体称为分形。自相似性和标度不变性是分形的2个重

要特征。其中,分形维数作为定量描述分形的基本参量,是标度变换下的不变量。一般情况下,分形维数是一个分数(包括整数),用来表征分形的复杂程度,即分形维数越大,其客体就越复杂,反之亦然。在矿物加工工程领域,随着对微细煤粒需求的

加大,迫切需要对煤粉内部结构进行研究与表征。为了认识煤粉的内在规律性,很多学者基于最新的分形理论,以煤粉的粒度和孔隙为研究对象,以分形维数为参数,直接从非线性复杂系统的本身入手,建立了适于工程应用和煤粉研究的数学模型。

## 1 煤粒超细化分形研究

### 1.1 粒度分形规律

粒度是煤粉最基本的物理参数,对煤粉表面和孔隙结构具有十分重要的影响。由于实际的粒度分布是离散的,所以通常表征的粒度分布是离散粒子的颗粒质量分布;而传统粒度分布模型认为粒度的分布是连续的。随着分形理论的发展与应用,研究发现许多粉体具有分形结构,在此基础上,导出了计算粒度分布分形维数的关系式。如果粉体材料的粒度分布具有分形特征,即满足

$$Y_w(x) \propto x^{3-D} \quad (1)$$

式中,  $Y_w$  为小于  $x$  的粒子总质量与颗粒体系粒子总质量的比值;  $x$  为颗粒直径,  $\mu\text{m}$ ;  $D$  为分形维数。

若在双对数坐标下  $Y_w(x)$  与  $x$  之间存在线性关系,说明粉体粒度分布具有分形结构,设斜率为  $k$ ,则颗粒粒度分布分形维数  $D=3-k$ <sup>[1]</sup>。

### 1.2 煤粉研磨超细化分形研究

煤炭的研磨是一个复杂的非线性过程,能耗高、能量利用率低。传统研磨过程的粒度分布模型属于静态模型,不能直接反映研磨过程的特征。在此过程中,煤粒形状不随时间发生改变,即研磨后的小颗粒与研磨前的大颗粒在形状上具有一定的自相似性,所以煤粒的研磨过程符合分形的 2 个重要特征,用分形理论可以很好地表示煤粒研磨特点。在煤粉的粒度分形研究中,国内外学者对煤粉的超细化进行了大量研究。曾凡桂<sup>[2]</sup>利用分形几何理论,从颗粒形态学的角度分析得出基于分形理论的颗粒粉碎模型,并推演出煤中矿物质的解离模型,暗示了矿物解离度只与煤中矿物颗粒的分形维数有关。

为了预测并控制煤炭研磨过程中任意时刻的颗粒粒度分布,焦红蕾等<sup>[3]</sup>利用分形方法建立了表征煤炭研磨颗粒粒度分布动态变化的颗粒数分布模型、颗粒表面积分布模型和颗粒质量分布模型。颗粒数分布模型直观地描述了颗粒粒径主要存在

的范围;颗粒表面积分布模型可以用来研究研磨过程中能耗的变化;颗粒质量分布模型可以用来计算研磨颗粒的堆密度和成浆浓度。同时,通过分形粒度分布与实际粒度分布的比较,验证了模型的正确性。

研究表明:煤粒研磨过程中,绝大部分能耗用在小颗粒的研磨上;颗粒表面分形维数越大,研磨能耗越高;颗粒形状越不规则,能耗越大。对于粒度要求较高的工艺,在微小颗粒的研磨上,可采用冷冻研磨等方法<sup>[4]</sup>。

姜秀民等<sup>[1]</sup>通过对合山煤和晋城煤的研究,发现这 2 种煤样具有分形特征。衡量煤粉颗粒细度与均匀性的一个重要指标就是煤粉粒度分布分形维数,并且煤粉的物质组成(固定碳和挥发分)影响其分形维数,由此提出了煤粉经济细度的新概念,并提供了反映煤粉燃烧特性与炉内燃烧状况的信息,即煤粉颗粒的分形维数越大,细度越小、越均匀,煤粉燃烧性能就越好,为煤粉洁净高效燃烧提供了一个新的分析方法。

## 2 孔隙结构分形研究

### 2.1 孔隙的分形规律与方法

煤粉颗粒表面形态与多孔结构非常复杂,其内部孔隙表面积占煤粉颗粒总表面积的 95% 左右,作为反应介质和反应产物扩散的通道,孔隙结构的研究是煤反应研究的基础。

#### 2.1.1 气体吸附法

在  $N_2$  吸附试验中,吸附气体的相对压力  $P/P_0 < 0.37$  时,气体分子的吸附被认为是主要分子在微孔内的单分子层吸附,其吸附情况能完全反映固体的表面结构特征。按照 Avniet & Joarniec 提出的在  $N_2$  吸附中直接计算分形结构表面分形维数的公式为<sup>[5]</sup>

$$V/V_m = \theta = k \left[ \ln \left( \frac{P_0}{P} \right) \right]^{D-3} \quad (2)$$

式中,  $V$  是在相对吸附压力  $P/P_0$  时  $N_2$  的吸附容积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_m$  为 BET 计算得到的单层吸附容积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $\theta$  为相对吸附量;  $k$  为系数;  $D$  为气体吸附的表面分形维数。分形孔结构的孔容积与吸附相对压力是一个幂函数。根据测定的数据,以  $\ln(V/V_m)$  为横坐标,  $\ln[\ln(P/P_0)]$  为纵坐标,通过计算直线的斜率

来确定分形维数  $D$ 。

### 2.1.2 压汞法<sup>[6]</sup>

用压汞法确定多孔介质孔隙的大小及分布时,所测材料的尺寸要比分子吸附大 3 个数量级,对煤样进行压汞实验需要在一定压力下进行,如对半径为  $r$  的圆柱孔注入汞所需压力  $P$  为

$$P(r) = -2\sigma \left( \frac{\cos\theta}{r} \right) \quad (3)$$

式中,  $P(r)$  为外加压力, MPa;  $r$  为煤样孔隙半径, mm;  $\sigma$  为金属汞表面张力  $0.48 \text{ N/m}$ ;  $\theta$  为金属汞与固体表面接触角。

实验中,在给定压力下,总的孔隙体积等于注入到孔隙内的汞体积,压力  $P < 200 \text{ MPa}$ 。

具有分形结构的介质表面,其表面积  $A$  与标度  $R$  之间存在如下关系

$$A(R) = A_0 R^{2-D} \quad (4)$$

式中,  $A_0$  为常数;  $D$  为分形维数。

设不规则表面是由不规则的孔与外表面或其它孔的内表面接通造成的,每个孔都是圆柱孔,它的长度平均值与孔半径成正比,这样表面孔结构就可用孔容积来描述。若定义  $V_{P(r)}$  为孔隙半径大于  $r$  的孔隙总体积,单位为  $\text{mm}^3$ ,设它是一个指数分布,孔半径大于  $r$  的孔隙总表面积  $A(r)$  单位为  $\text{mm}^2$ ,则  $A(r) \propto r^{2-D}$ ,  $V_{P(r)} = V \propto r \times r^{2-D}$ ,  $P(r) \times r = A$ ,  $V_{P(r)} / P(r) \propto r \times r^{2-D} / (1/r)$ ,  $V_{P(r)} / P(r) \propto r^{4-D}$ , 则有

$$\lg A(r) = \lg A_0 + (2-D) \lg r \quad (5)$$

用孔容积来表述煤的表面结构,即

$$\lg \left( \frac{V_{P(r)}}{V_0} \right) = (D-4) \lg r \quad (6)$$

由  $\lg V_{P(r)} / \lg r$  与  $\lg r$  作图,得到斜率  $k$ , 则  $D-4 = k$ , 即分形维数  $D = 4+k$ 。

### 2.1.3 扫描电镜图像法<sup>[7-8]</sup>

基于图像处理技术与分形理论,利用扫描电镜图像,计算粒度分布分形维数、边界形状分形维数与解离表面分形维数。

## 2.2 煤粉孔隙的分形研究

国内外研究表明煤粉孔隙分形理论可以有效表征煤的孔隙结构类型。张玉涛等<sup>[9]</sup>利用分形理论对煤的孔隙结构进行了定量描述和研究,推导出煤孔隙分形维数的表达式,利用压汞法测量了煤样在不同温度下的孔隙分布,通过实验验证了煤孔所

具有的分形特征。

煤粉的表面结构不同,煤粉的燃烧特性也随之不同,在一定范围内,随着粒度的减小,表面结构越复杂,分形维数也越大,燃烧特性也随之增高<sup>[10]</sup>。而在煤的焦化过程中,煤焦颗粒的分形维数越大,煤焦表观燃烧反应系数却越小,并且呈指数关系<sup>[11]</sup>。

在煤的热解过程中<sup>[12]</sup>,分形维数先增大后减小,热解结束后呈增大趋势。通过颗粒分形孔隙可以定性地反映热解过程中孔隙分形维数的变化规律,并且以数值模拟的方法将热解过程中的分形维数进行量化定性。

在变温条件下煤的结构参数的研究中,何启林等<sup>[6]</sup>采用压汞法定量测定了不同温度、压力下煤样的孔径、孔容积与煤的表面积,并通过分形理论对这一过程进行分形特征描述。研究发现,在煤温小于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时,煤的容积分形维数增大,吸氧量增大,孔隙容积对煤的吸氧量起主要作用;当煤温不小于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时,煤的分形维数减少,煤的吸氧量增加,此时煤的吸氧量主要由氧化速率决定,而非孔隙结构特征。

在研究煤粒与孔隙发育程度的关系时,许江等<sup>[13]</sup>采用分形维数的大小表征不同粒径下型煤的孔隙发育程度。对于同种煤,在相同成型条件下,型煤的颗粒粒径越大,其孔隙的分形维数越小,孔隙越不发育,分布也越不均匀。

在煤体的渗透性与裂隙的分布规律研究中,胡耀青<sup>[14]</sup>得出煤体渗透性与裂隙的关系式及煤体渗透性随体积压力、水压、分形维数、强度的定量变化规律,对工程实践具有重要的指导意义。

在煤与瓦斯突出研究中<sup>[15]</sup>,煤粒孔隙的特点决定了瓦斯的存在形式。煤粒孔隙的维数可用于煤层气渗流分析,其中,煤体孔隙分形维数越大,煤体的短裂隙(瓦斯吸附孔隙)条数越大,使得煤体的强度降低,易发生煤与瓦斯突出。

## 3 结 语

煤粒分形维数反映了煤颗粒分布的动态变化,为粒径的分布、颗粒的能耗消散及水煤浆的制备奠定了非线性研究的基础,对预测并控制研磨过程具有重要作用。同时,通过对煤中孔隙的研究,能更

清楚了解煤中孔隙的分布与变化。通过研究孔隙分形维数的内在变化规律,建立了煤的孔隙与吸氧量、瓦斯突出、热解、燃烧等的相关模型,使之在指导工程实践方面具有重要作用。

参考文献:

- [1] 姜秀民,杨海平,李彦,等. 煤粉颗粒粒度分形分析[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 414-418.
- [2] 曾凡桂. 煤粉碎过程中粒度及解离度的分形模型[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1996.
- [3] 焦红蕾,夏德宏,张省现,等. 基于分形方法的煤炭研磨颗粒粒度分布模型[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(11): 1151-1153, 1170.
- [4] 焦红蕾,夏德宏,陈勇. 煤炭研磨过程的分形能耗模型[J]. 矿冶, 2007, 16(2): 9-11, 51.
- [5] 李珊珊. 精细水煤浆的颗粒孔隙、成浆及燃烧机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [6] 何启林,王德明,陆伟,等. 变温条件下煤结构与吸氧量的关系[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 865-869.
- [7] 杨志远,曲建林,周安宁. 超细煤粉颗粒形状分形维数与球磨工艺的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 342-345.

- [8] 宫伟力,安里千,赵海燕,等. 水射流解离煤的分形特征[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(2): 9-13.
- [9] 张玉涛,王德明,仲晓星. 煤孔隙分形特征及其随温度的变化规律[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 73-76.
- [10] 徐远纲,张成,夏季,等. 不同粒度煤粉的表面结构与燃烧特性研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 47-50.
- [11] 何威,何榕,王晓亮. 孔隙分形结构对煤焦燃烧特性影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(20): 40-45.
- [12] 王晓亮,何榕,陈永利. 煤颗粒热解过程中孔隙分形维数变化的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(2): 244-247.
- [13] 许江,陆漆,吴鑫,等. 不同颗粒粒径下型煤孔隙及发育程度分形特征[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(9): 81-89.
- [14] 胡耀青,赵阳升,杨栋,等. 煤体的渗透性与裂隙分维的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1452-1456.
- [15] 霍丙杰,张志. 基于煤体孔隙分形理论的煤与瓦斯突出机理研究[DB/OL]. 中国科技论文在线, 2007-12-02.

(上接第3页)

“十二五”煤炭科技发展目标的实现,离不开国内煤炭企业、大专院校和科研单位等科技创新主体的辛勤耕耘和无私奉献。“十二五”期间,各科技创新主体需结合自身优势,进一步增强基础条件设施建设,培养并锻炼科技人才队伍,积极开展科技攻关。届时,中国煤炭科学技术发展将呈现如下特点:煤炭地质保障技术取得重大突破,大型矿井快速建井技术、复杂地质条件下巷道施工技术日益成熟,年产能力更大、自动化水平更高的先进综采综掘装备研制成功,在地面或井下调度中心遥控井下采掘作业的先进技术成为可能,煤矿重大灾害事故多发的局面发生根本性好转,煤层气抽采与利用技术实现产业化,现代煤化工产业升级示范,煤炭科技将再上一个新的台阶。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

- [2] 王金华. 中国煤矿现代化开采技术装备现状及其展望[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 1-5.
- [3] 刘志强,洪伯潜. 改革开放30年煤矿井筒建设技术及装备发展[J]. 矿井建设, 2011, 32(1-2): 4-7.
- [4] 申宝宏,雷毅,郭玉辉. 我国煤炭科学技术新进展[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1779-1783.
- [5] 申宝宏,雷毅. 我国煤炭科技发展现状及趋势[J]. 煤矿开采, 2011, 16(3): 4-7.
- [6] 陈贵锋. “十二五”期间我国洁净煤技术发展值得关注的方向[J]. 中国能源, 2011, 33(8): 5-7.
- [7] 赵嘉博,刘小军. 洁净煤技术的研究现状及进展[J]. 露天采矿技术, 2011(1): 66-69.
- [8] 申宝宏,杨丽. 煤矿区低碳发展途径探讨[J]. 中国能源, 2010, 32(2): 5-7, 37.
- [9] 申宝宏,雷毅,刘见中. 中国煤矿灾害防治战略研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [10] 王显政. 贯彻落实十七届五中全会精神 提升煤炭工业科学化发展水平[J]. 中国煤炭工业, 2010(12): 4-7.
- [11] 王显政. 认清形势 理清思路 促进煤炭工业科学发展[J]. 煤炭经济研究, 2011, 31(1): 4-8.