

水煤浆粒度级配模型和实践的研究进展

李 强, 廖长林, 侯 健, 张建胜

(清华大学 能源与动力工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:水煤浆是一种煤基液态燃料, 具有与燃料油相似的物理特性, 是煤炭高效清洁利用的一个重要途径, 可显著减少 NO_x 和 SO_2 的排放。目前我国水煤浆需求量已突破 2.5 亿 t/a, 粒度级配作为影响水煤浆浓度的重要因素, 使不同大小的煤颗粒互相填充, 尽可能减少空隙, 提高颗粒的堆积效率和水煤浆浓度。分析了粒度级配对水煤浆的影响, 指出在水煤浆制浆过程中, 粒度级配只涉及物理破碎和研磨, 能耗相对较小, 显著提升浓度, 具有广泛的适用性和经济性。论述了近年来新发展的粒度级配理论和模型, 特别是隔层堆积理论和分形级配理论, 并给出了具体的计算方法和公式, 以及假设和适用性。通过举例给出近年来隔层堆积理论的发展和运用, 以及对于堆积效率的具体评价; 分析了分形级配理论的可行性和新的研究进展, 以及在指导烟煤和褐煤级配时的应用效果; 给出了三峰级配的工艺流程、级配方案和工业实践案例。在粒度级配提高水煤浆浓度的基础理论和应用实践方面, 国内外学者已做大量工作。但在具体的理论细节方面, 如隔层堆积对于任意粒度分布的简化计算、分形级配的拟合精度以及三峰级配的粒度堆积评价还需更深入的研究。在级配理论应用于实践过程中, 基础理论和工业实践的结合还有待于进一步提高。在粒度级配基础上, 建议引入内在水分等影响因素, 建立跨煤种的预测模型。

关键词:水煤浆; 粒度级配; 隔层堆积; 分形级配; 三峰级配

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)01-0041-09

Research progress on coal water slurry particle size gradation model and practice

LI Qiang, LIAO Changlin, HOU Jian, ZHANG Jiansheng

(Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Power and Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Coal water slurry (CWS), a coal-based liquid fuel with similar physical properties to oil, is an important way for efficient and clean utilization of coal, which can significantly reduce the emission of NO_x and SO_2 . At present, China's CWS demand has exceeded 250 million tons/year. Particle size gradation technology is an important factor affecting the concentration of coal water slurry, as different sizes of coal particles can be filled with each other to improve the packing efficiency of particles and the concentration of CWS. This paper analyzes the influence of particle gradation on CWS, and points out that in the CWS making process, the particle gradation only involves physical crushing and grinding, and the energy consumption is relatively small, which has significant effect on improving the concentration and has wide applicability and economy. The theory and model of particle gradation developed in recent years, especially the interlayer packing theory and fractal gradation theory, are discussed, and the specific calculation method, formula, hypothesis and applicability are given. The development and application of the interlayer packing theory in recent years and the evaluation of the packing efficiency are given by examples. The feasibility and new progress of fractal gradation theory and its application in bituminous coal and lignite CWS are analyzed. The technological process and industrial practice cases of three-peak gradation are given. Scholars have done a lot of work on the basic theory and application of particle gradation to improve CWS concentration. However, in following specific theoretical details need to be further studied; the simplified calculation of interlayer packing for arbitrary particle size distribution, the fitting accuracy of fractal gra-

收稿日期: 2020-11-06; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.A20110601

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602602, 2017YFB0602703)

作者简介: 李 强(1988—), 男, 江苏常熟人, 博士研究生, 主要从事煤气化水煤浆和生物质煤浆研究。E-mail: qiang_li@tsinghua.edu.cn 通讯作者: 张建胜, 教授, 博士生导师, 从事煤气化、流化床和粉煤燃烧及污染控制理论与技术研究。E-mail: zhang-jsh@tsinghua.edu.cn

引用格式: 李强, 廖长林, 侯健, 等. 水煤浆粒度级配模型和实践的研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 41-49.

LI Qiang, LIAO Changlin, HOU Jian, et al. Research progress on coal water slurry particle size gradation model and practice [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 41-49.



移动阅读

dation and the theory of three-peak gradation. In the application of gradation theory, the combination of basic theory and industrial practice needs to be further improved. It is suggested to introduce the influence of internal water and establish a prediction model for different types of coal in the future research.

Key words: coal water slurry; particle size grading; layer stacking; fractal grading; three peak grading

0 引言

我国石油天然气储量少,且对外依存度不断加大,煤炭储量相对丰富,煤炭依然是我国的基础能源^[1-2],短期内难以被全面替代^[3]。要解决煤炭利用中产生的污染问题,关键要推进煤炭清洁高效利用^[4-5]。煤气化技术作为煤炭清洁高效利用的重要组成部分和煤化工的龙头技术,在化工、炼油、电力以及冶金等行业具有广泛的应用^[6]。目前工业化和大型化的煤气化工艺以气流床煤气化炉为主,从进料方式上可分为干法(煤粉进料)和湿法(水煤浆进料)。煤粉进料气化目前在国内应用较多的主要有 Shell、GSP 和航天炉等;水煤浆进料气化目前主要是 GE、四喷嘴和清华炉(晋华炉)等^[7]。水煤浆是一种重要的煤气化原料和液体燃料,在煤气化产业中,从煤消耗量方面统计,我国一半以上的煤气化装置采用水煤浆进料。据不完全统计,目前我国水煤浆使用量已超过 2.5 亿 t/a^[8-9]。

水煤浆是一种煤基液态燃料,具有与燃料油相似的物理特性,是煤炭高效清洁利用的重要途径,可显著减少 NO_x 和 SO₂ 排放。长期以来,炼焦煤等高阶煤制浆性能较好,但焦煤储量低、价格高,已无法满足水煤浆产业快速发展的需要^[10]。新疆、内蒙古和陕西等地具有丰富的低阶煤储量,且价格低,不仅能以低廉的价格保证水煤浆用煤的持续供应,提高经济性,同时又符合国家煤炭梯级利用和节能减排的政策^[11]。但低阶煤水分高、可磨性较差,制备的水煤浆浓度偏低(45%~55%),极大影响水煤浆的气化与燃烧效率。以 60%的水煤浆进料、1 500 t/d 处理量的气化炉为例,按效率粗略估算,若煤浆浓度降低 1%,每年需多消耗 4 000 t 煤^[12];对于热值 25 GJ/kg 的原料煤,在 55%的水煤浆、4 MPa 和 1 350 °C 条件下,若将水煤浆中煤浓度提高 5%,可多产合成气 5%,减少氧气消耗 7%^[13]。

粒度级配作为水煤浆浓度的 3 个重要影响因素(煤质、粒度级配、添加剂)之一,是决定水煤浆流变性和稳定性的重要因素。为保证水煤浆在燃烧或气化过程中的高效率,水煤浆粒径应小于 30 μm,74 μm 以下的颗粒含量应大于 75%^[14]。同时还要要求具有良好的粒度分布,使不同大小的煤颗粒互相

填充,尽可能减少空隙,提高颗粒的堆积效率和水煤浆浓度。因此,粒度级配技术是提高低阶煤成浆浓度的有效途径。

本文分析了粒度级配水煤浆的影响,指出在水煤浆制浆过程中,粒度级配只涉及物理破碎和研磨,能耗相对较小,对于浓度的提升效果显著,具有广泛的适用性和经济性;论述了近年来新发展的粒度级配理论和模型,给出了具体的计算方法和公式,以及假设和适用性。通过举例论述近年来粒度级配理论的应用及在工业生产中的实践和效果;最后提出粒度级配进一步发展的建议和展望。

1 粒度级配水煤浆的影响

1.1 影响水煤浆浓度的主要因素

水煤浆浓度的影响因素主要有煤的理化性质、粒度分布和添加剂。煤的理化性质包括煤的变质程度、化学组成(内在水分、含氧官能团、矿物组成等)、孔结构(平均孔半径、比表面积、孔容等)和表面特性(疏水性、zeta 电势等)^[15]。煤的理化性质中,平衡水分是影响煤成浆性的主要参数之一。在具有相同体积分数煤颗粒的水煤浆中,煤内部的平衡水分越多,意味着更少的干燥固体(或热值)添加到水煤浆燃料中。煤的亲水性越强,其表面和内部吸附的水越多,使水煤浆浓度降低^[15]。无烟煤由于缺乏挥发性物质,反应性较低,导致点火稳定性差,因此一般不适合制造水煤浆^[16-17]。除无烟煤外,高阶煤表面具有疏水性,易形成高浓度水煤浆。低阶煤(如褐煤)含有大量亲水的氧官能团,通常低阶煤制成的水煤浆成浆浓度小于 60%,但低阶煤水煤浆具有不凝聚、稳定性好和高反应性的优点^[18-19]。

水煤浆添加剂主要分为分散剂和稳定剂。分散剂一般是表面活性剂,附着在煤颗粒表面,防止颗粒团聚,促使煤颗粒在水中均匀分散,以提高水煤浆浓度。常见的分散剂有萘系、木质素系、腐植酸系、氨基磺酸盐系、聚羧酸系和脂肪族。稳定剂一般用于改善水煤浆稳定性,部分稳定剂通过产生疏松团聚结构(“软沉淀”),防止颗粒沉降或形成“硬沉淀”。常见的稳定剂有高聚物类(羧甲基纤维素、聚丙烯酸盐等)和高价阳离子盐类。不同煤种,对于不同添加剂的敏感度不同,即一种分散剂对于某种煤可

显著提高其制浆浓度,但对于另一种煤,或许不明显,甚至会降低其制浆浓度。有时分散剂和稳定剂的作用相反,说明其发挥作用的应用场景不同:稳定剂通常用于水煤浆储存,剪切速率低;分散剂通常用于水煤浆输运和雾化,剪切速率相对较高。因此,分散剂和稳定剂之间存在协同效应,需根据具体煤种设计。有学者^[20-22]在水煤浆中添加第二流体、第二颗粒,取得了一些研究成果,如将第2种不与悬浮液连续相混溶的流体(如煤油)加入干燥的褐煤颗粒中,在煤表面形成薄的疏水膜;将疏水性好的第二颗粒分散在第二流体中,加入褐煤水煤浆中。结果表明,加入第二流体后,褐煤水煤浆表观黏度降低;加入第二颗粒后,黏度进一步降低,主要是因为增加了褐煤表面疏水性。

对于低阶煤(如褐煤),自身含水量高(部分维多利亚褐煤的含水量超过60%),其制成的水煤浆浓度低于55%^[23]。因此人工改变煤的理化性质提升煤阶是一个研究方向,可降低含水量,生产高热值煤,并降低与褐煤有关的运输成本。常用的脱水技术有机械热压法、水热法、蒸汽流化床干燥法和微波干燥法等^[24-25],这些方法均涉及物理和化学反应过程,能耗较高,经济性有待进一步提高,缺少广泛的应用性。在制浆过程中添加分散剂和稳定剂,约占煤干基质量的1%或更少。添加剂可增加煤的成浆浓度,但成本较高,且缺少煤种的广泛适用性。在水煤浆制浆过程中,粒度级配应用广泛,因为只涉及物理破碎和研磨过程,粒度级配能耗相对较小,而提升浓度的效果显著,具有广泛的适用性和经济性。

1.2 粒度级配水煤浆浓度的影响

颗粒粒度分布是决定水煤浆制浆浓度以及流变特性的主要因素之一。粒度级配变化不仅影响其煤种的成浆性,同时影响其流动性和稳定性^[26]。一般来说,在粒度分布上采用双峰或多峰级配来提高煤颗粒的堆积密度,进而提高水煤浆浓度^[27-28]。较细的煤颗粒填充到较大的煤颗粒空隙中,形成更高的浓度填充体系,减少空隙吸收的水分,使加入的水尽可能多的以“自由水”形式存在,并起润滑作用,从而降低水煤浆的表观黏度,提高可制浆的最大浓度。

在粒度级配时,首先要考虑磨煤方式和研磨流程,近年来,三峰级配制水煤浆技术在工业上有较多应用,其通过传统单棒磨机基础上添加了细磨机和超级磨机,按照一定回流配比,在大颗粒间填充了平均粒径30 μm细颗粒和5 μm超细颗粒,使大小颗粒相互填充,实现了煤浆颗粒的三峰级配(图1),提高了煤浆堆积效率。相较于传统技术,三峰

级配可提高水煤浆浓度2%~5%^[29-33]。分级研磨技术也是工业上应用较多的新技术,可有效提高水煤浆中煤颗粒堆积效率,同时提高研磨效率^[34-37]。该技术将选择性粗磨与超细磨机进行有机组合,优化煤浆的粒度级配,与常规单磨机制浆工艺相比,煤浆质量分数可提高2%~4%。

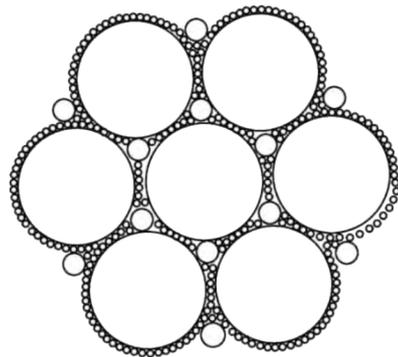


图1 三峰级配中颗粒堆积状态示意^[30]

Fig.1 Schematic diagram of particle packing state in three-peak gradation^[30]

2个技术的关键是引入超细磨机和增加粒度分级,通过控制回流比例以合理配置各分级粒度的比例,使粒度级配更合理,制造更高的堆积效率,增加制浆浓度。主要区别在于:①在最终粒度上,分级研磨为近似双峰级配,而三峰级配为3种粒度级配,其最小一级粒度约为6 μm,比双峰级配的粒度更小;②磨煤设备上,分级级配在粗磨机的基础上,增加了超细磨机和配套设备,而三峰级配在粗磨机的基础上,增加了细磨机和超细磨机,实现3种粒度的研磨。在设备投资方面,运营成本和煤浆浓度各有优劣,总体上均可有效提高水煤浆浓度。

近年来,新的理论和方法在粒度级配分析过程中得到了广泛应用,使煤粉堆积方式更优化,提高了水煤浆浓度。王俊哲等^[38-39]利用分形理论,研究煤粉粒度及颗粒级配技术,通过优化细粉级配,使煤粉粒度实际分布更接近理论模型的理想分布,大幅改善了神府煤粉成浆性。Yang等^[14]基于分形理论,提出了一种改进褐煤水浆填料状态的二级分形模型,结果表明,褐煤颗粒体系的堆积效率主要由74 μm以下颗粒的分形特性决定,分形维数在2.6~2.7,可显著改善充填状,当粗、细、超细3种不同分级的颗粒比例为7:0:3时,堆积效率最高,可增加2.9%的成浆浓度。

1.3 内在水分对粒度级配和水煤浆浓度的影响

在粒度级配理论中,水煤浆黏度随煤颗粒体积分数的增加而增加,由此提出最大堆积密度概念,对于某种煤,若其单峰粒度分布水煤浆体积分数为

65%时,黏度非常大,且快速上升;而理想化的多峰级配可理论上生成体积分数大于80%的水煤浆^[28]。

由于高阶煤和低阶煤内在水不同,在计算煤颗粒最大填充体积分数时,也需考虑内在水分,从质量分数转换成体积分数的方法也不同。对于高阶煤,可假设煤颗粒干燥,并忽略煤中水分。通过将煤质量(m_{coal})除以其密度(ρ_{coal})计算体积,因此,高阶煤制得的水煤浆体积分数(ϕ)的计算公式为

$$\phi = \frac{\frac{m_{\text{coal}}}{\rho_{\text{coal}}}}{\frac{m(\text{H}_2\text{O})}{\rho(\text{H}_2\text{O})} + \frac{m_{\text{coal}}}{\rho_{\text{coal}}}}, \quad (1)$$

式中, $m(\text{H}_2\text{O})$ 为水煤浆配制时加入水的质量; $\rho(\text{H}_2\text{O})$ 为水的密度。

低阶煤(如褐煤)具有多孔结构和亲水表面,含有大量水分,计算体积分数时应考虑内在水分,其计算公式为

$$\phi = \frac{1 + a_{\text{hum}} \left(\frac{\rho_{\text{lignite}}}{\rho(\text{H}_2\text{O})} \right)}{1 + \left(\frac{\rho_{\text{lignite}}}{\rho(\text{H}_2\text{O})} \right) \left(\frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m_{\text{lignite}}} \right)}, \quad (2)$$

式中, ρ_{lignite} 为低阶煤密度; a_{hum} 为煤的平衡水分,即煤接近100%相对湿度时的内部水分,一般从试验得到。

由于内在水分的存在,对于不同煤阶的煤种,虽然通过粒度级配均可达到很高的填充效率和堆积体积,但最终的黏度和最大成浆浓度不同^[40]。对于同一种煤,填充效率越高,黏度越小,粒度级配提升制浆浓度的效果越显著。

2 粒度级配理论和模型

2.1 粒度的表征和分布

粒度级配的关键是提高颗粒的堆积效率,在一定空间内使颗粒占据更多的体积,需要具体的理论来指导和设计粒径分布,提高堆积效率,即提高固体颗粒在有限空间内的体积分数。首先必须将颗粒分布进行函数化表达。

在实际水煤浆生产过程中,采用磨矿设备制得的煤粉颗粒分布通常属于连续分布状态。在级配理论研究中,应根据连续粒度分布的特性建立数学模型。对于给定条件下材料的堆积密度已开发出预测模型,Andreasen^[41]对连续粒径分布粉体的充填行为进行了研究,采用Gaudin-Schuhmann(G-S)方程描述真实粒径分布,即

$$F(d) = \left(\frac{d}{D_{\text{max}}} \right)^{\beta} \times 100\% \quad (3)$$

其中, d 为颗粒粒径; $F(d)$ 为小于粒径 d 的累积质量分数; D_{max} 为颗粒的最大尺寸; β 为特征参数。研究发现, $\beta = 0.5 \sim 0.8$ 时,堆积体系具有最高的堆积效率。辊式破碎机、颚式破碎机和棒磨机细粒级产物符合式(1),但球磨机产物仅近似符合^[42]。

G-S方程认为,颗粒体系存在粒径无限小的颗粒分布,不符合现实情况。Funk和Dinger^[8]将最小粒径 D_{min} 引入G-S方程,发展为Alfred方程,即

$$F(d) = \frac{d^{\beta} - D_{\text{min}}^{\beta}}{D_{\text{max}}^{\beta} - D_{\text{min}}^{\beta}} \times 100\%。 \quad (4)$$

通过计算机模拟发现, $\beta = 0.37$ 时,系统有最密堆积。但Suzuki等^[43-45]认为,对于致密的堆积系统, β 的最优值应为0.5~0.8。不同学者对于最优 β 值的差异,可能是由于试料的细度不同^[46]。

在水煤浆领域,最常用和更适用的表征粒度分布的公式为Rosin-Rammler公式^[46],即

$$F(d) = 100\% - \exp \left[\left(- \frac{d}{dx} \right)^{\alpha} \right] \times 100\%, \quad (5)$$

其中, α 为影响粒度分布曲线形状的特征参数; dx 为影响粒度分布曲线整体大小的特征尺寸,为 $F(d) = 63.21\%$ 时的值。 $\alpha = 0.7 \sim 0.8$ 时,颗粒系统有最紧密堆积。

2.2 隔层堆积理论

由于实际粒度分布大多为连续分布,现有理论无法通过直接计算得出连续分布的堆积效率。针对该问题,张荣曾等^[46-47]提出了隔层堆积理论,即对连续分布先作离散处理,再按粒径与孔径比划分成若干窄级别,进行隔层随机模拟堆积,用于计算任意粒度分布的堆积效率。Tu等^[42,48]在此基础上,提出一种相似但计算简易的评价堆积效果方法,以堆积效率 E 作为指导制浆试验的指标。

新的隔层堆积理论的具体推导和假设:

首先,根据颗粒从小到大,将颗粒划分为 n 个窄级。 S 为相邻粒度分级的粒度比, V_i 为第 i 级颗粒的体积分数(%), ε 为第 i 级颗粒空隙度, d_i 为第 i 级颗粒的最大尺寸。每层粒度非常窄时,可用来代表本层的整体粒度。由此可得到

$$d_n = D_{\text{max}}, d_1 = \frac{D_{\text{max}}}{S^{n-1}}, d_i = \frac{D_{\text{max}}}{S^{n-i}}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i = 100\%。 \quad (7)$$

为了保证细颗粒完全填充粗颗粒的空隙,粒度比应不小于5^[49],需将细粒度级的颗粒填充成更粗

的粒度,而不是与其相邻的粗粒度级,因此为了保证粒度比 $S^* > 5$,需跳过一定数量的级数,记为 m 。跳过 m 级粒度后, $(i+m)$ 级与 i 级的粒度比 $S^* = S^m$ 。对于球体,若 $S^* > 5$,可认为第 i 级颗粒可完全填充到 $(i+m)$ 级的孔隙。为便于计算,记 n 为 m 的整数倍,每 m 个级数算作一层,进行隔层堆积,计算过程为:

若 $(i+m)$ 级颗粒的空隙 (V_{i+m}^*) 可容纳 i 级中包含的所有颗粒,即表示为

$$V_{i+m}^* \geq V_{t_i}, \quad (8)$$

其中, V_{t_i} 为第 i 级所有颗粒的体积分数。由于第 i 级不仅包含本级颗粒,也包含下一个隔层填充颗粒的整体,因此有 $V_{t_i} > V_i$ 。若第 $(i+m)$ 级的空隙 (ε_{i+m}) 完全容纳第 i 级中包含的所有颗粒 V_{t_i} , 则

$$\varepsilon_{i+m}^* = \frac{V_{t_i}}{V_{t_i} + V_{i+m}}, \quad (9)$$

其中, ε_{i+m}^* 为第 $(i+m)$ 级空隙完全容纳第 i 级中包含所有颗粒时的空隙率。 $\varepsilon_{i+m} \geq \varepsilon_{i+m}^*$ 时,第 $(i+m)$ 级的实际空隙可完全容纳第 i 级中包含的所有颗粒; $\varepsilon_{i+m} < \varepsilon_{i+m}^*$ 时,第 $(i+m)$ 级的实际空隙无法容纳第 i 级中包含的所有颗粒。此时第 $(i+m)$ 级与第 i 级混合时,实际空隙率应为 ε_{i+m}^* , 因此逻辑公式为

$$\bar{\varepsilon}_{i+m} = \max(\varepsilon_{i+m}, \varepsilon_{i+m}^*), \quad (10)$$

其中, $\bar{\varepsilon}_{i+m}$ 为取 ε_{i+m} 和 ε_{i+m}^* 中较大值。相应的第 $(i+m)$ 级所有颗粒所占的体积分数为

$$V_{t_{i+m}} = \frac{V_{i+m}}{1 - \bar{\varepsilon}_{i+m}}. \quad (11)$$

同理,第 $(i+2m)$ 级的颗粒应包含本级颗粒以及第 $(i+m)$ 级的所有颗粒,此时第 $(i+2m)$ 级的体积分数也可由式(11)推导出。第 $1 \sim m$ 级填充到第 $(m+1) \sim 2m$ 级,第 $(m+1) \sim 2m$ 级填充到第 $(2m+1) \sim 3m$ 级,以此类推最终第 $1 \sim (n-m)$ 级的颗粒均可填充到最后的第 $(n-m+1) \sim n$ 级。所有颗粒所占空间体积(包含其所占的空隙)为

$$V = \sum_{i=n-m+1}^n V_{t_i} = \sum_{i=n-m+1}^n \frac{V_i}{1 - \bar{\varepsilon}_{i+m}}, \quad (12)$$

得出该颗粒体系的堆积效率 E 为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V} = \frac{100\%}{\sum_{i=n-m+1}^n \frac{V_i}{1 - \bar{\varepsilon}_{i+m}}}. \quad (13)$$

新的模型进行了如下假设和简化:① 粒子是无孔的,且空间均匀分布;② 整个系统可分为有限的

微团簇(micro-cluster),每个堆积模式和粒度分布相同。③ 微团簇可变形、重组和重新堆积,而不改变堆积密度。不同于干粉状态,除了颗粒无孔假设,以上假设和简化在悬浮液状态下,较接近实际。

2.3 分形级配理论

除了隔层堆积理论,分形理论在粒度级配方面也有很多发展和实践,以指导粒度级配和提高制浆浓度。在应用分形理论前,首先要证明煤的粒度分布是否具有分形特征,然后分析分形特征与堆积密度的关系^[11,14,31,38,50-52],Yang等^[14]从分形定义推导出当颗粒符合分形理论时的分布公式。

分形理论研究不规则几何,用自相似性描述图形、现象和原理,反映了复杂形体占有空间的有效性^[53]。近年来,分形理论在多孔介质渗透率模拟、动态纹理分类、絮凝结构分析等方面得到应用,并取得良好效果^[53-58]。分形对象遵循的相似律为

$$M(L) \sim L^{D_f}, \quad (14)$$

式中, $M(L)$ 为分形物体的测量值,如直线的长度、表面的面积、物体的体积; L 为长度比例尺; D_f 为分形维数^[59],计算公式为

$$D_f = \frac{\lg \left[N \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]}{\lg \frac{1}{\gamma}}, \quad (15)$$

其中, γ 为线性相似比; N 为在 γ 值下的测量值^[53]。可转化为

$$N(x) = N(x_{\max}) \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^{D_f}, \quad (16)$$

式中, x 和 x_{\max} 分别为分形材料的长度尺度和最大长度尺度; $N(x)$ 和 $N(x_{\max})$ 分别为在长度尺度 x 和 x_{\max} 下材料的测量值。

经研磨后的煤颗粒分布,可采用式(3)~(5)连续性方程描述,将分形理论应用于连续方程。对式(16)两边微分,则从粒度 $x \sim (x+dx)$ 内的煤粒数为

$$-dN = N(x_{\max}) D_f x_{\max}^{D_f} x^{-(D_f+1)} dx, \quad (17)$$

$x \sim (x+dx)$ 内的煤颗粒质量 dM 为

$$dM = \rho k_v x^3 (-dN) = k_v N(x_{\max}) D_f x_{\max}^{D_f} x^{2-D_f} dx, \quad (18)$$

其中, ρ 为煤样真实密度; k_v 为量纲分析得出的体积系数。根据煤粉粒径小于 x 的累积函数定义,可得

$$R(d) = \frac{M}{M_t} = \frac{\int_{x_{\min}}^x dM}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} dM_t} = \frac{x^{3-D_f} - x_{\min}^{3-D_f}}{x_{\max}^{3-D_f} - x_{\min}^{3-D_f}}, \quad (19)$$

其中, x_{\min} 为分形材料最小长度尺度; M_i 为颗粒总质量; M 为小于粒径 x 的颗粒总质量。式(19)与式(4)相似。由于水煤浆颗粒是三维系统, 基于分形理论, 其分形维数 $D_f = 2 \sim 3$ 。

3 粒度级配的应用和工业实践

3.1 隔层堆积级配的应用

近年来, 隔层堆积理论在最佳堆积的验证和指导煤粒度级配提升方面均取得了较好的效果^[14-42, 46-48, 60]。

对于 Rosin-Rammler 粒度分布(式(5)), 采用解析法求最佳 α 值较困难。张荣曾等^[47] 采取离散化方式求解, 采用在计算机上先按等比级数将粒度分布划分为多个窄粒级, 然后隔层进行随机充填, 并计算堆积效率, 得出堆积效率最高的模型参数 $\alpha = 0.7 \sim 0.8$, 这与实际制浆经验过程中的最佳 α 值接近。同理, 计算 Alfred 分布(式(4))在不同粒度下限时的堆积效率与分布参数 β 的关系, 并与 Rosin-Rammler 粒度分布进行比较, 结果如图2所示。

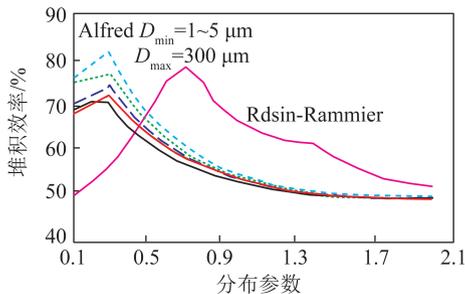


图2 不同粒度分布参数与堆积效率关系^[47]

Fig.2 Relation between distribution parameter and packing efficiency^[47]

从图2可知, Rosin-Rammler 粒度分布的堆积效率比 Alfred 粒度分布略低, 但相差不大; Rosin-Rammler 粒度分布参数与堆积效率的关系曲线比 Alfred 粒度分布平缓, 说明参数对堆积效率的影响不敏感, 在生产中有较强的适应性。

煤粒度采用式(3)~(5)连续性方程表达时, 隔

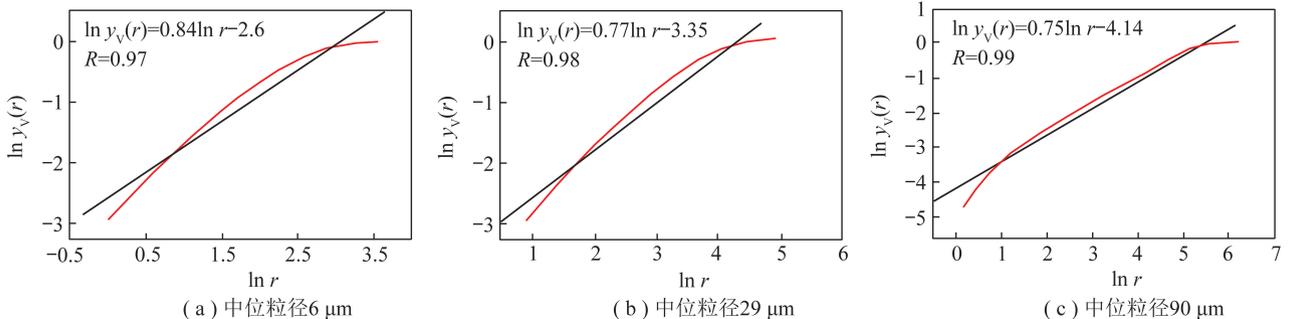


图4 不同粒度的煤颗粒累积含量(y_V)与粒径(r)的双对数关系拟合^[38]

Fig.4 Relation between particle accumulation distribution and particle size^[38]

层堆积理论不仅可计算粒度分布函数的理论堆积效率, 也可计算实际煤颗粒的堆积效率, 以预测同种煤、不同颗粒分布情况下制浆浓度的相对大小。Tu等^[42, 48] 通过隔层堆积理论公式计算烟煤和褐煤不同粒度级配的堆积粒度, 并通过制浆试验验证(图3)。从图3可以看出, 褐煤和烟煤水煤浆最大成浆浓度(100 s⁻¹剪切速率下黏度为 1 Pa·s 时的浓度)与堆积效率呈较强的线性关系。相同堆积效率下, 不同煤种的制浆浓度差异主要可能是由内在水分差异造成。

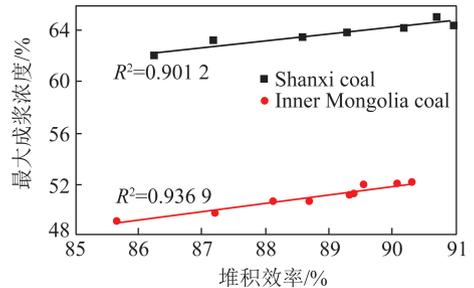


图3 堆积效率与最大成浆浓度的关系^[48]

Fig.3 Relation between packing efficiency with maximum solid concentration^[48]

3.2 分形级配理论的实践和应用

近年来, 学者将分形理论引入到粒度级配, 以指导提高颗粒堆积效率和提高制浆浓度, 并进行了很多理论验证和实际应用^[11, 14, 31, 38, 50-52]。

王俊哲等^[32] 研究了分形理论与煤粉粒度级配的相关性, 运用分形理论分析了不同粒度煤粉的粒径分布特性(图4), 拟合曲线有较好的线性关系, 线性相关系数在 0.95 以上, 呈现分形特征, 说明较粗和较细煤粉均具备分形特征, 且分形维数低于 2.3。通过将煤粉等比例级配, 其结果分形维数在 2.5 以上, 高于未级配煤粉分形维数, 可通过测定煤粉的分形维数评判级配好坏。在推导分形关系时, 假设最小粒度为 0, 这与实际不符, 产生了误差, 且拟合时线性相关系数有待进一步提高。

通过与实际粒度拟合和对比,发现式(19)拟合实际粒度分布时,仍有一定误差。Yang等^[14]以分形理论为基础,对褐煤水煤浆填料状态的分形模型进行系统研究,分析了分形模型在不同颗粒体系中的堆积效率和回归水平,发现褐煤颗粒体系的堆积效率主要由74 μm以下的颗粒分形特性决定。通过从最小粒度到74 μm进行拟合,发现分形维数的拟合系数均在0.99以上,有较好的一致性。同时通过隔层堆积理论计算了不同分形维数下的堆积效率,发现分形维数在2.6~2.7时堆积效率最高,并验证了对于同煤种此时的水煤浆制浆浓度最大,可提高约2.9%的成浆浓度。其推导出的分形维数公式和Alfred模型相似,与张荣曾等^[47]预测的最大堆积效率系数接近。

3.3 三峰级配

在工业实践中,需通过合理的磨煤机型选择较好的流程优化以实现粒度级配。三峰级配制水煤浆技术在工业上应用较多,对于水煤浆浓度的提高较显著^[29-33]。

典型的三峰级配工艺流程包括:2个粗浆配置系统、4个细磨系统和2个超细磨系统,通过控制粗浆在细磨和超细磨系统的分配以及回流比例,来控制粗浆、细浆和超细浆的质量比例^[30]。在级配粒度控制方面,为了实现相邻粒级颗粒有效的堆积填充,三峰级配最终确定棒磨粗浆粒径在100~150 μm,细浆粒径在20~30 μm,超细浆粒径在4~8 μm。细浆和超细浆的粒度取决于粗浆粒度,且每级平均粒度直径比接近5,粗浆、细浆和超细浆的质量比为85%:10%:5%。在工业应用中,三峰级配要添加磨煤设备,重整制浆流程,增加了初期投入,同时在运行过程中,增加的磨煤动力和磨球损耗增加了运行成本,但投入远小于提高水煤浆浓度带来的收益。在阳煤丰喜泉稷公司应用过程中,水煤浆浓度由60.1%提高到64.2%,另一家企业在表观黏度满足生产要求的条件下,煤浆浓度提高3.6%^[30,33]。

4 结语和展望

本文分析了粒度级配对水煤浆的影响,指出在水煤浆制浆过程中,粒度级配只涉及物理破碎和研磨,能耗相对较小,可显著提升浓度,具有广泛的适用性和经济性。论述了近年来新发展的粒度级配理论和模型,给出了具体的计算方法和公式,以及假设和适用性。通过举例论述近年来粒度级配理论的应用和在工业生产中的实践和效果。

在粒度级配提高水煤浆浓度的基础理论和应用

实践方面,国内外学者已做了大量工作。但在具体的理论细节和应用方面有待进一步研究:

1) 隔层堆积对于任意粒度分布的简化计算方面,可给出更加便捷和贴近实际的计算方法,前期假设有待具体化。

2) 目前分形级配理论对特定粒度分布拟合较好,但对于三峰分布和不规则粒度分布拟合较差,可进一步挖掘理论方法。

3) 三峰级配的粒度堆积评价和指导理论有待进一步研究。

基础理论对于工业实践的系统性影响有待积累和总结,特别是磨煤设备选型和流程优化实现最优级配方面,以及整体经济性评价方面。建议在粒度级配模型基础上,引入煤内在水分、颗粒间作用力等影响因素,建立跨煤种的浓度预测模型。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China energy statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Press, 2017.
- [3] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030, 2050)发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
China Energy Medium and Long-term Development Strategy Research Group. China energy medium and long-term (2030, 2050) development strategy research [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [4] LI Qiang, WANG Qian, KAYAMORI Anchan, et al. Experimental study and modeling of heavy tar steam reforming[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 178: 180-188.
- [5] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 15-19.
HU Min, TANG Qian, PENG Jianfei, et al. Analysis of sources and characteristics of atmospheric particulate matter in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2011, 36(5): 15-19.
- [6] CHEN Wenyong, XU Ruina. Clean coal technology development in China[J]. Energy Policy, 2010, 38(5): 2123-2130.
- [7] LI Qiang, ZHANG Jiansheng. Coal gasification[M] // Cheng Yi, JIN Yong. Multiphase reactor engineering for clean and low-carbon energy applications. Wiley: [s.n.], 2017.
- [8] 段清兵. 中国水煤浆技术应用现状与发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 129-133.
DUAN Qing-bing. Application status and development prospect of coal water mixture technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 129-133.

- [9] 唐宏青. 水煤浆气化的发展之路[J]. 化肥设计, 2018(1):82.
TANG Hongqing, Development of coal water slurry gasification [J]. Chemical Fertilizer Design, 2018(1):82.
- [10] 李发林, 尚庆雨, 王国房, 等. 低阶煤制备高浓度水煤浆技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6):20-26.
LI Falin, SHANG Qingyu, WANG Guofang, et al. Progress and technology development of preparing high concentration coal water slurry from low-rank coal [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6):20-26.
- [11] 孙海勇. 基于分形理论水煤浆粒度级配的研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2012.
SUN Haiyong. Research on particlesize grading of coal water slurry based on fractal theory [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2012.
- [12] 邹杰, 许玲玉. 水煤浆浓度变化对煤气化工艺的能耗影响分析[J]. 煤化工, 2016, 44(2):50-53.
ZOU Jie, XU Lingyu. Analysis on the influence of coal water slurry concentration change on energy consumption of coal gasification process [J]. Coal chemical Industry, 2016, 44(2):50-53.
- [13] 唐宏青. 水煤浆气化的发展之路[J]. 化肥设计, 2018, 56(1):5-7.
TANG Hongqing. Development of coal water slurry gasification [J]. Chemical Fertilizer Design, 2018, 56(1):5-7.
- [14] YANG Xiao, TU Yanan, REN Yangguang, et al. Optimization of packing state in brown coal water slurry based on the two-grade fractal model[J]. Fuel, 2016, 168:54-60.
- [15] LI Qiang, YANG Dingzheng, LIU Qingxia, et al. Effects of hydrothermal dewatering of lignite on rheology of coal water slurry[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97(1):323-329.
- [16] LI Qiang. Hydrothermal treatment of low rank coal for making high solid loading and stable coal water slurries[D]. Edmonton: University of Alberta, 2014.
- [17] KIJO Kleczkowska Agnieszka. Combustion of coal-water suspensions[J]. Fuel, 2011, 90(2):865-877.
- [18] KAWATRA S K, BAKSHI A K. The on-line pressure vessel rheometer for concentrated coal slurries[J]. Coal Preparation, 2002, 22(1):41-56.
- [19] MANFRED Rolf K. Coal-water slurry: A status report [J]. Energy, 1986, 11(11):1157-1162.
- [20] CHEN Xing, WANG Chunyu, WANG Ziyu, et al. Preparation of high concentration coal water slurry of lignite based on surface modification using the second fluid and the second particle [J]. Fuel, 2019, 242:788-793.
- [21] XU Menghan, LIU Haifeng, ZHAO Hui, et al. How to decrease the viscosity of suspension with the second fluid and nanoparticles [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1):3137.
- [22] ZHANG Jie, ZHAO Hui, LI Weifeng, et al. Multiple effects of the second fluid on suspension viscosity [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):16058.
- [23] LI Chunzhu. Advances in the science of victorian brown coal [M]. Elsevier: Elsevier Science Ltd., 2004.
- [24] KARTHIKEYAN Muthusamy, WU Zhonghua, MUJUMDAR Arun S. Low-rank coal drying technologies: Current status and new developments [J]. Drying Technology, 2009, 27(3):403-415.
- [25] FLEISSNER H. Method of drying coal and the like: US8066526A [P]. 1927-06-21.
- [26] 孙南翔, 徐志强, 曲思建, 等. 颗粒分布对高浓度水煤浆流变性能的影响[J]. 煤炭工程, 2015, 47(3):122-125.
SUN Nanxiang, XU Zhiqiang, QU Sijian, et al. Effect of particle distribution on rheological properties of high concentration coal water slurry [J]. Coal Engineering, 2015, 47(3):122-125.
- [27] ROH Nam Sun, SHIN Dae Hyun, KIM Dong Chan, et al. Rheological behaviour of coal-water mixtures. 1. Effects of coal type, loading and particle size [J]. Fuel, 1995, 74(8):1220-1225.
- [28] LASKOWSKI Janusz. Coal flotation and fine coal utilization [M]. [S.N.]: Gulf Professional Publishing, 2001.
- [29] 孙宗礼, 毛成龙. 三峰级配制浆工艺在煤化工生化污泥处理中的应用[J]. 煤化工, 2019(4):31-33.
SUN Zongli, MAO Chenglong. Research and Application of three-peak gradation pulping process in biochemical sludge treatment of coal chemical industry [J]. Coal Chemical Industry, 2019(4):31-33.
- [30] 毛成龙. 三峰级配制高浓度水煤浆成套技术及工业化应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(S2):264-268.
MAO Chenglong. Complete sets of technology for preparation of high concentration coal water slurry with three peak grades and its industrial application [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2):264-268.
- [31] 周永涛. 三峰分形级配水煤浆提浓技术研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(1):63-68, 73.
ZHOU Yongtao. Study on concentration extraction technology of three-peak fractal grade coal water slurry [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1):63-68, 73.
- [32] 段清兵, 吕向阳, 张胜局, 等. 三峰分形级配提浓技术在中煤陕西公司的应用实践[J]. 煤化工, 2018, 46(5):7-9, 34.
DUAN Qingbing, LYU Xiangyang, ZHANG Shengju, et al. Application of three-peak fractal grading and concentration technology in China coal Shaanxi company [J]. Coal Chemical Industry, 2018, 46(5):7-9, 34.
- [33] 孙南翔. 印度尼西亚褐煤成浆特性研究[J]. 煤质技术, 2019(4):19-21.
SUN Nanxiang. Study on slurry ability of Indonesia lignite [J]. Coal Quality Technology, 2019(4):19-21.
- [34] 火双红, 张垚, 肖建华, 等. 分级研磨气化煤浆提浓技术的实践应用[J]. 煤质技术, 2015, 30(5):55-58.
HUO Shuanghong, ZHANG Yao, XIAO Jianhua, et al. Industry application of gasification coal water mixture concentration technology by grade grinding [J]. Coal Quality Technology, 2015, 30(5):55-58.
- [35] 刘尚利, 孙海勇, 段清兵, 等. 分级研磨级配制浆技术的研究及应用[J]. 化学工程, 2015, 43(1):61-64.
LIU Shangli, SUN Haiyong, DUAN Qingbing, et al. Study and industrial application of coal water mixture by grade grinding technology [J]. Chemical Engineering, 2015, 43(1):61-64.
- [36] 张孝雨, 何国锋, 李磊, 等. 水煤浆性能的影响因素及技术进

- 展[J]. 洁净煤技术,2019,25(6):96-104.
- ZHANG Xiaoyu, HE Guofeng, LI Lei, et al. Influence factors and technical progress of CWS performance[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6):96-104.
- [37] 段清兵. 分级研磨低阶煤高浓度水煤浆制备技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10):113-115.
- DUAN Qingbing. Preparation technology and Application of high concentration coal water slurry for graded grinding low-rank coal [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10):113-115.
- [38] 王俊哲, 王渝岗, 张建安, 等. 煤粉的分形特征及其对水煤浆级配的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5):961-965.
- WANG Junzhe, WANG Yugang, ZHANG Jian'an, et al. Fractal characteristics of pulverized coal and its influence on CWS grading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5):961-965.
- [39] 王俊哲, 王渝岗, 方刚, 等. 基于 Alfred 模型提高神府煤水煤浆成浆性[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(12):117-119.
- WANG Junzhe, WANG Yugang, FANG Gang, et al. Improving slurry forming property of Shenfu Coal water slurry based on Alfred model [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(12):117-119.
- [40] 李春启. 水热处理制备高浓度褐煤水煤浆技术研究进展及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1):36-41.
- LI Chunqi. Research progress and industrialization prospect of high concentration lignite water slurry prepared by hydrothermal treatment[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1):36-41.
- [41] ANDREASEN Alfred HM. Zur Kenntnis des mahlgutes[J]. Kolloidchemische Beihefte, 1928, 27(6/12):349.
- [42] 涂亚楠. 颗粒级配优化及界面改性提高褐煤成浆浓度的研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2013.
- TU Yanan. Study on the improvement of lignite slurry concentration by particle gradation optimization and interface modification [D]. Beijing, China University of Mining and Technology-Beijing, 2013.
- [43] SUZUKI M, YAGI A, WATANABE T, et al. Estimation of the void fraction in a bed randomly packed with particles of three sizes [J]. International Chemical Engineering, 1986, 26(3):491-498.
- [44] SUZUKI M, OSHIMA T. Verification of a model for estimating the void fraction in a three-component randomly packed bed [J]. Powder Technology, 1985, 43(2):147-153.
- [45] SUZUKI Michitaka, MAKINO Kazutaka, YAMADA Masaharu, et al. Study on the coordination number in a system of randomly packed, uniform-sized spherical particles [J]. International Chemical Engineering, 1981, 21(3):482-488.
- [46] 张荣曾. 水煤浆制浆技术[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- ZHANG Rongzeng. Coal water slurry technology [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [47] 张荣曾, 刘炯天, 徐志强, 等. 连续粒度分布的充填效率[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6):552-556.
- ZHANG Rongceng, LIU Jiongtian, XU Zhiqiang, et al. Filling efficiency of continuous particle size distribution [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(6):552-556.
- [48] TU Yanan, XU Zhiqiang, WANG Weidong. Method for evaluating packing condition of particles in coal water slurry [J]. Powder Technology, 2015, 281:121-128.
- [49] BROWN G G G. Unit operations [M]. New York. [s. n.], 1950:21.
- [50] 段清兵, 吕向阳, 徐明磊, 等. 三峰分形级配水煤浆提浓技术研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6):37-42.
- DUAN Qingbing, LYU Xiangyang, XU Minglei, et al. Study on three-peak fractal grading and concentration technology of coal water slurry [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6):37-42.
- [51] 周俊虎, 李艳昌, 程军, 等. 精细水煤浆的颗粒分形特征对燃烧特性的影响规律[J]. 化工学报, 2007, 58(7):1805-1809.
- ZHOU Junhu, LI Yanchang, CHENG Jun, et al. Effect of particle fractal characteristics on combustion characteristics of fine coal water slurry [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58(7):1805-1809.
- [52] 张省现, 夏德宏, 吴祥宇. 水煤浆粒度分布的分形学研究[J]. 热科学与技术, 2004, 3(4):348-352.
- ZHANG Shengxian, XIA Dehong, WU Xiangyu. Fractal research on particle-size distribution of coal-water slurry [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(4):348-352.
- [53] FALCONER Kenneth. Fractal geometry: Mathematical foundations and applications [M]. Australia: John Wiley & Sons Ins., 2004.
- [54] LI Qiang, YANG Dingzheng, LIU Qingxia, et al. Hydrothermal de-watering of lignite water slurries; Part 2 surface properties and stability [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97(1):133-139.
- [55] TAN Xiaohua, LIU Jianyi, LI Xiaoping, et al. A simulation method for permeability of porous media based on multiple fractal model [J]. International Journal of Engineering Science, 2015, 95:76-84.
- [56] XU Yong, QUAN Yuhui, ZHANG Zhuming, et al. Classifying dynamic textures via spatiotemporal fractal analysis [J]. Pattern Recognition, 2015, 48(10):3239-3248.
- [57] LIAO Jimmy Y H, SELOMULYA Cordelia, BUSHHELL Graeme, et al. On different approaches to estimate the mass fractal dimension of coal aggregates [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2010, 22(5):299-309.
- [58] ZHOU Zukang, WU Peiqiang, CHU Benjamin. Cationic surfactant induced fractal silica aggregates: A light-scattering study [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1991, 146(2):541-555.
- [59] YU Boming, LI Jianhua. Some fractal characters of porous media [J]. Fractals, 2001, 9(3):365-372.
- [60] 涂亚楠, 徐志强, 蔡斌, 等. 一种评价颗粒堆积效果的简便方法及其应用[J]. 中国粉体技术, 2013, 19(5):53-59.
- TU Yanan, XU Zhiqiang, CAI Bin, et al. A simple method for evaluating the effect of particle stacking and its application [J]. Chinese Powder Technology, 2013, 19(5):53-59.