

纤维束直接过滤积泥结构分形研究

王德英¹, 沈自求¹, 张万友², 张警声², 刘凡清²

(1. 大连理工大学 化学工程研究所, 辽宁 大连 116012;

2. 东北电力学院 应用化学系, 吉林 吉林 132012)

摘要: 通过对纤维束滤料积泥表面进行电镜照像及图像分析, 得到了不同条件下积泥孔隙结构的分维数, 并探讨了积泥孔隙结构分维数与过滤过程及直接过滤中混凝剂效果的关系. 结果表明, 分维数可用于研究积泥结构及其对过滤过程的影响, 且可用于评价直接过滤中混凝剂的效果.

关键词: 过滤/ 积泥结构; 分形; 分维数

中图分类号: O184; TU991.24 **文献标识码:** A

0 引言

在研究观察水过滤积泥形态方面, Baylis 做了开拓性的工作, 他使用放大镜, 透过玻璃窗观察悬浮粒子在滤池内的运动^[1]. Stanley^[2]用 γ -射线放射性元素示踪法, Ives^[3]用光导纤维内窥镜, 周北海^[4]用扫描电子显微镜等手段研究积泥形态. 以上方法具有直观性, 是一种定性的方法. Bourgeois^[5]采用显微照像和图像分析技术得出了细煤粉滤饼孔隙结构参数及其同滤饼渗透率的关系, 然而没有对滤饼结构进行更深入的研究. 徐新阳等^[6]在研究气压过滤滤饼结构时, 发现滤饼为一分段 Sierpinski 分形, 其分维数反映了滤饼孔隙尺寸分布情况和滤饼的可滤性, 分维数的大小与物料性质及操作条件有关. Brock 等^[7]用计算机技术模拟和测量了滤料表面二维空间上颗粒生长特性, 用孔隙周界曲线的分维数表征孔隙断面周界曲线的粗糙度, 并得出了分维数与模拟参数之间的关系. 这项技术可用于描述滤饼及颗粒空隙空间结构特性. 由于滤床中的积泥是由固体颗粒和为数众多的边界复杂、具有一定尺寸的孔隙组成的, 并且受过滤条件的影响, 对此用孔隙率显然不能揭示积泥结构的本质; 并且用传统的欧氏几何理论无法描述, 而分形几何理论的研究对象具有随机性及自相似性. 因此, 引入分形几何理论来定量描述和表征积泥的形态结构是合理的.

1 研究方法

1.1 过滤实验装置及方法

在过滤实验(图1)中, 过滤用水为人工配制, 所用粘土经烘干、研磨、筛分得到, 粒径为 $0.540.0 \mu\text{m}$. 过滤柱用透明有机玻璃制作, 内径 130 mm , 直筒高度 1200 mm . 滤柱两侧对称开有取样口和测压口. 内设床层孔隙调节器, 纤维束垂直悬挂在滤柱内, 纤维长度 1000 mm , 床层初始孔隙率 90% . 过滤方式采用上向流过滤, 流速 20 m/h , 原水浊度 30 FTU . 运行控制指标: 滤后水浊度不超过 5 FTU .

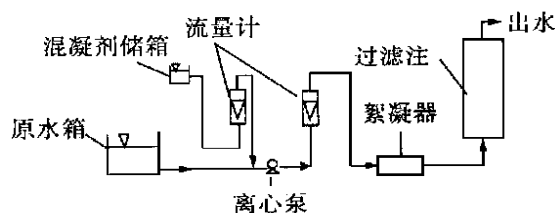


图1 过滤实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experimental facility for filtration

1.2 分维数的测定方法

分维数是分形几何理论中的主要概念, 它是拓扑学意义上欧氏维数的扩展, 其特点是维数取值可以不是整数. 自然界中的分形是多种多样的, 描述

它们的分维数也有多种形式,例如豪斯道夫(Hausdorff)维、相似维、关联维、信息维、容量维等,迄今为止人们尚未找到对任何事物都适用的形式.因此,分维数的测定方法也因对象而异,如材料断口的分维数用小岛法、微细颗粒聚集体的分维数用相关密度法、海岸线的分维数用圆规法^[6]测定等.积泥结构的分维数测定方法如下:过滤结束后,将滤柱内的水以水滴的形式极慢排空.经过约 24 h,纤维束上的积泥基本脱水熟化、固定.打开过滤柱,取出纤维束,剪取部分纤维丝,置于小圆台上并固定,高真空下脱水干燥、喷金.制备好的样品置于扫描电子显微镜(JXA-840)下进行不同放大倍数的观察和拍照,借助自动图像分析仪(ISP500)测试积泥孔隙结构参数.分维数测试计算采用小岛法,亦即周长-面积法:

$$1/D_F \cdot \lg P = 1/2 \cdot \lg A + C$$

式中: D_F 为孔隙断面周界的分维数; P 为孔隙断面的周长; A 为孔隙断面的面积; C 为常数.该式表示,对于相同的孔隙断面面积,孔隙越规则或者说内部越光滑, D_F 越小;孔隙越复杂、越不规整,内部越粗糙.

2 结果与讨论

图 2 为投加 0.5 mg/L 阳离子型聚丙烯酰胺(PAM,相对分子质量 10 万)时积泥在不同放大倍数下的扫描电子显微镜(SEM)照片.

积泥表面孔隙结构参数见表 1.

图 3 为不同放大倍数下的 $\lg P - \lg A$ 关系曲线,根据直线的斜率可求得积泥表面孔隙周界的分维数.

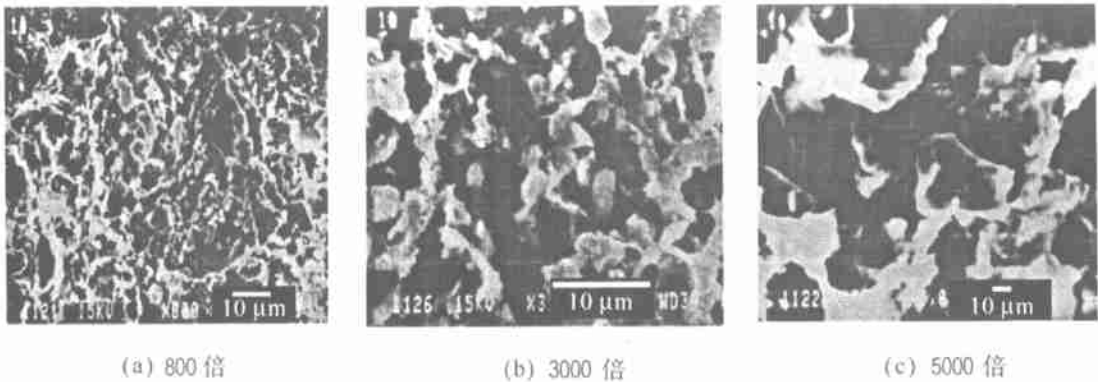


图 2 PAM 积泥表面 SEM 照片

Fig. 2 SEM photograph of deposition surface by added PAM

表 1 PAM 积泥表面孔隙结构参数

Tab. 1 Parameters of deposition surface porosity structure by added PAM

放大倍数	孔数密度/ mm^{-2}	$\phi/\%$	$A_{\text{min}}/\mu\text{m}^2$	$A/\mu\text{m}^2$	珈/ μm^2	$P_{\text{min}}/\mu\text{m}$	$P_{\text{max}}/\mu\text{m}$	珈/ μm
800	80	86.5	12.00	4 055.00	936.84	16.24	622.17	191.52
3 000	77	84.8	73.00	4 055.00	958.56	42.38	576.82	196.12
5 000	47	86.1	10.00	20 011.00	3 226.74	20.38	1 171.90	311.46

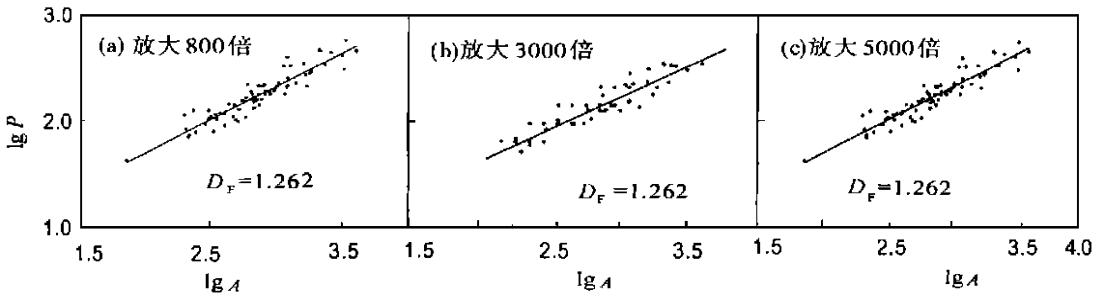


图 3 PAM 积泥表面孔隙周界分维数计算

Fig. 3 Calculation of fractal dimension for deposition surface porosity boundary by added PAM

由图 3 可以看出,不论放大倍数如何,积泥表面孔隙周界的分维数均为 1.262,这正是具有分形特征的物体所具有的特性——自相似性,或称之为伸缩对称性.

图 4 为投加 10 mg/L 聚合铝(PAC)积泥在不同放大倍数下的 SEM 照片. 积泥表面孔隙结构参数见表 2.

图 5 为不同放大倍数下的 $\lg P$ - $\lg A$ 关系曲线,根据直线的斜率可求得积泥表面孔隙周界的分维数. 可见,投加 PAC 后积泥表面孔隙同样具有分形特征.

比较图 3、5 可知,投加阳离子型 PAM 积泥表面孔隙周界分维数较大,说明其孔隙较复杂,更加不规整,内部较粗糙. 这有利于捕获水中的颗粒,

提高除浊效率,延长床层过滤周期或提高床层的截污容量. 但这也使得床层的水头损失增加或床层的渗透率降低. 同时说明可用积泥孔隙周界分维数评价混凝剂在直接过滤中的效果,即分维数大,混凝剂性能好;分维数小,混凝剂性能差.

比较表 1、2 可知,投加 PAM 比投加 PAC 积泥孔隙密度高,孔隙小而均匀,孔隙率大. 如果将表 1、2 同图 3、5 结果联系起来可以得知,积泥孔隙率高,积泥孔隙周界分维数大.

本文仅对积泥表面孔隙周界进行了分形研究,作者正在研究测得积泥孔隙空间分维数 ($2 < D_F < 3$) 的方法,这一方法的实现可望提高本研究成果的可靠程度和普适性.

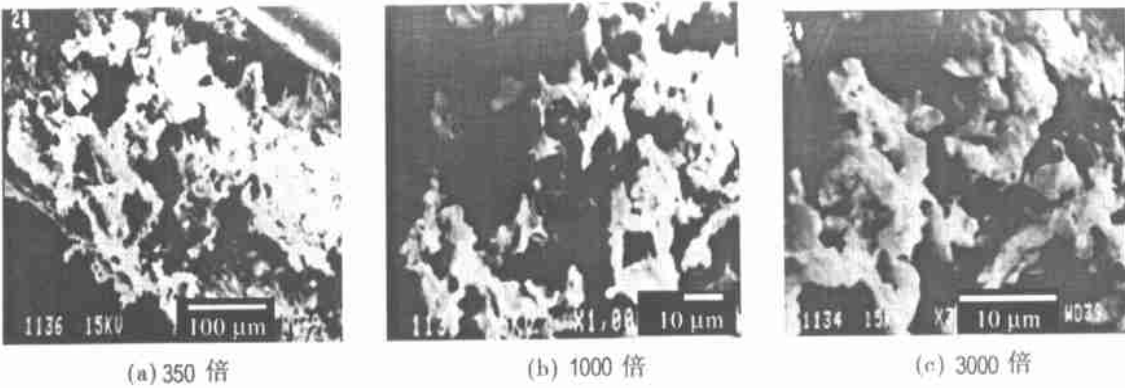


图 4 PAC 积泥表面 SEM 照片

Fig. 4 SEM photograph of deposition surface by added PAC

表 2 PAC 积泥表面孔隙结构参数

Tab. 2 Parameters of deposition surface porosity structure by added PAC

放大倍数	孔数密度/ mm^{-2}	$\varphi/\%$	$A_{\min}/\mu\text{m}^2$	$A/\mu\text{m}^2$	珩/ μm^2	$P_{\min}/\mu\text{m}$	$P_{\max}/\mu\text{m}$	珩/ μm
350	32	70.3	172.00	13 708.00	3 336.47	66.73	1 169.66	321.57
1 000	28	71.1	21.00	29 799.00	6 920.38	34.81	961.96	417.64
3 000	21	70.9	21.00	30 560.00	4 725.36	21.66	883.68	319.36

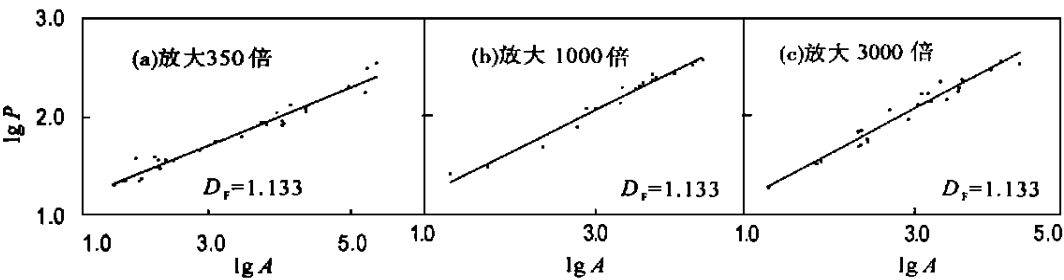


图 5 PAC 积泥表面孔隙周界分维数计算

Fig. 5 Calculation of fractal dimension for deposition surface porosity boundary by added PAC

3 结 论

(1) 扫描电镜-计算机图像分析是进行积泥形态研究的一个新方法, 它能提供积泥微观结构的有关信息.

(2) 不同条件下形成的积泥具有随机性, 是一种分形结构. 分维数 D_F 反映了积泥表面孔隙不规整程度, D_F 大, 孔隙复杂、不规整、内部较粗糙, 这有利于捕获水中的颗粒, 提高除浊效果, 延长过滤周期; 但床层的水头损失增大或渗透率降低.

(3) 分维数可用于评价直接过滤中混凝剂的效果; 分维数越大, 混凝剂性能越好.

参考文献:

- [1] HUDSON H E. Physical aspects of filtration[J]. *J AWWA*, 1969, **61**(1): 3-7.
- [2] STANLEY D R. Sand filtration studied with radiotracers[J]. *J San Eng Div Proc ASCE*, 1955, **81**(592): 1-23.
- [3] IVES K J. Filtration of clay suspensions through sand[J]. *Clay Minerals*, 1987, **22**: 49-61.
- [4] 周北海, 王占生, 全 浩. 纤维球-砂直接过滤积泥形态学的研究[J]. *环境科学进展*, 1993, **1**(2): 71-79.
- [5] BOURGEOIS F S, LYMAN G T. Morphological analysis and modeling of fine coal filter cake microstructure[J]. *Chem Eng Sci*, 1997, **52**(7): 1151-1162.
- [6] 徐新阳, 徐继润, 邓常烈, 等. 气压过滤的成饼动力学及其滤饼的分形结构[J]. *化工学报*, 1995, **46**(1): 8-14.
- [7] BROCK S T, TARLETON H E S. The use of fractal dimensions in filtration[A]. *World Congress Part Technology*: Vol 3[C]. Rugby: [s n], 1998. 2866-2875.

Study of fractal of deposition structure of direct filtration with fiber bundle

WANG De-ying¹, SHEN Zi-qiu¹, ZHANG Wan-you², ZHANG Jing-sheng², LIU Fan-qing²

(1. Res. Inst. of Chem. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116012, China;

2. Dept. of Appl. Chem., Northeast China Inst. of Electr. Power Eng., Jilin 132012, China)

Abstract : The fractal dimension of the deposition porosity structure in different conditions has been obtained by the photographing deposition surface in the fiber bundle as the filter media with the sweep electron microscope and image analysis. The relationship between the fractal dimension and the filtration processes and the effect of the coagulant in the direct filtration are discussed. The results show that the fractal dimension can be used for studying the deposition structure and its effect on the filtration process, and for estimating the effect of the coagulant in the direct filtration.

Key words : filtration/ deposition structure ; fractal ; fractal dimension