

Image - pro plus 软件在泥沙絮凝体结构特征分析中的应用

宋迪迪, 张根广, 张宇卓, 李青

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 旱区寒区水工程安全研究中心,
陕西省水工程安全与建设研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用 Image - pro plus 图像处理软件, 分析研究了絮凝体 SEM 图像, 提取了絮凝体外形尺寸及絮凝体内孔隙直径、孔隙率、孔隙比等特征, 分析了这些特征与泥沙浓度及絮凝剂浓度的关系。结果表明: 采用 Image - pro plus 软件处理得到的絮凝体结构特征的变化规律与现有结论基本一致, 絮凝体沉速随着絮凝体孔隙比的增大而减小, 证明了 Image - pro plus 软件应用于分析絮凝体 SEM 图像的可行性。

关键词: 泥沙絮凝体; 结构特征; 图像分析; 絮凝体孔隙; 表层分形维数; 沉降速度

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0156-06

Application of image - pro plus in analysis of sediment flocculation structure

SONG Didi, ZHANG Genguang, ZHANG Yuzhuo, LI Qing

(Water Engineering Safety Research Center in Cold and Arid Region, Water Engineering Safety and the Construction of Research Center, Shaanxi Province, College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Using Image - Pro plus software, we analyzed the SEM images and extracted the features of flocculation, such as the diameter, pore diameter, porosity, and void ratio. We also analyzed the relationships between the features mentioned above and sand concentration, and between these features and flocculant concentration. The results of flocculation characteristics variation laws using the Image - pro plus software were consistent with the existing conclusions, and flocculation settling velocity decreased with the increasing void ratio. Therefore, the Image - pro plus software can be applied to analyze the SEM images of flocculation.

Key words: sediment flocs; structural characteristics; image analysis; pore diameter of flocculation; surface fractal dimension; settling velocity

1 研究背景

泥沙在沉降过程中, 由于细颗粒泥沙间范德华力作用及表层电荷作用, 使得泥沙颗粒具有一定的吸附力, 进而吸附异电离子而形成双电层, 或吸附较小的泥沙颗粒形成絮凝体。絮凝体之间通常以点与点、点与面或面与面等方式结合, 造成絮凝体中形成孔隙^[1-2], 絮凝体内孔隙将被自由水充填^[3], 因此絮凝体沉速与单颗粒泥沙沉速有较大的不同, 研究泥沙絮凝体孔隙特征, 对研究絮凝体沉降速度具有重要的意义。

研究表明, 黏性细泥沙颗粒的粒径越小, 其比表面积越大, 泥沙颗粒的电化学作用越明显^[4], 泥沙粒径越粗, 絮凝的作用越弱。当泥沙颗粒粒径 $d > 0.03 \text{ mm}$ 时, 絮凝现象不显著; 当泥沙颗粒粒径 $d < 0.03 \text{ mm}$ 时, 絮凝作用逐渐增强; 当 $d < 0.01 \text{ mm}$ 时, 絮凝作用明显加强^[5]。

钱宁、马惠民、褚君达等人考虑了黏性细沙絮凝作用对水流特性的影响, 得到了泥沙絮凝体的沉速公式^[6]; 20 世纪 80 年代, Witten 和 Sander 将分形理论引入黏性细颗粒泥沙的絮凝研究, Gonzalez 等^[7]研究了雷诺数较小情况下的黏性细颗粒泥沙的沉降规律,

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279170)

作者简介: 宋迪迪 (1995-), 女, 河北正定人, 本科生, 主要从事水工水力学方面研究。

通讯作者: 张根广 (1964-), 男, 山西夏县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水工水力学方面的研究。

并基于絮凝体分形维数和孔隙率研究的基础上,提出了细颗粒泥沙沉降公式;柴朝辉等^[1]运用图像分析和统计学的方法得到了絮凝体沉速随着絮凝体孔隙直径减小及小孔隙所占比重增加而增加;王尚毅^[8]假定斯托克斯公式仍适用于絮凝体沉速计算,得到了黏性沙絮凝体的静水沉速不仅随着水温 T 、历时 t 、和初始浓度 n_0 的增加而增大,同时也随着絮凝体密度的减小而减小的结论;王家生等^[9]通过静水沉降试验,研究了河水中常见的阳离子对泥沙沉速的影响,得到了在离子浓度较小时,泥沙沉速随着离子浓度的增加而增大;在离子浓度较高时,泥沙沉速与离子浓度变化关系不大的结论;王家生等^[10]通过对阳离子影响下,黏性细颗粒泥沙絮凝沉降过程的分析,推导出了黏性泥沙沉速和水中离子浓度之间的关系式,并建立了含 Ca^{2+} 浓度参数的黏性泥沙絮凝沉降公式;朱中凡等^[11]通过模拟紊动水流条件,研究了水体紊动剪切对黏性细颗粒泥沙絮团发育的影响,得到了增加离子浓度或提高阳离子价态,将会促进絮凝体发育的结论;李文杰等^[12]通过观测絮凝沉降过程以及淤积形成的絮凝结构发现,絮凝体沉速是单颗粒沉速的 9 倍左右;柴朝辉等^[13]运用 Matlab 软件,模拟了黏性细沙的絮凝过程,得到了黏性泥沙絮凝体的分形维数随水流紊动强度的增强而逐渐变大,最终趋于稳定。

综上所述,有关絮凝体的研究成果虽然较多,但对絮凝体结构特征的研究较少;并且对絮凝体图像分析处理方法均采用单阈值法进行分割^[1],具有一定的主观性。因此,本文尝试采用 Image – pro plus 图像处理软件分析研究絮凝体 SEM 图像,提取絮凝体外形尺寸及絮凝体内孔隙大小、孔隙比、孔隙率等特征,分析这些特征与泥沙浓度、絮凝剂浓度的关系,进一步建立絮凝体孔隙比与絮凝体沉速的关系式。

2 实验仪器、材料和方法

2.1 实验仪器

实验采用的主要仪器:济南微纳公司生产的 Winner2008D 智能型全自动全量程湿法激光粒度仪,用于测量实验沙样级配;日本奥林巴斯公司生产的 BX51 型显微镜(包含 DP70 显微镜数码相机),该仪器可以高速捕捉高分辨率图像,并在高灵敏度和低噪声条件下获得清晰的荧光图像;日本日立公司生产的 S – 4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM),可对絮凝体样本形貌进行微米、纳米层级上观察分析,也可结合 X 射线能谱仪对絮凝体表面某区域或某点进行定性和定量分析;Image – Pro Plus (IPP) 图像处理分析

软件,是美国 Media Cybemetics 公司开发的一款二维和三维图像分析处理软件。集图像采集、处理和分析功能于一体,广泛应用于荧光成像、质量控制、材料成像、医学科研与工业生产中。在医学科研中,主要应用于定量检测鸡胚尿囊膜血管新生面积、真菌分子孢子形态、眼科角膜上皮愈合面积等^[14–16]。经过作者对该软件的实践摸索和应用,发现 Image – Pro Plus (IPP) 在分析测量絮凝体显微图片中具有独特的优势。其他实验仪器还包括电子天平、1 000 mL 量筒、烧杯若干、注射器、移液管和滴管等。

2.2 实验材料

实验分析沙样取自渭河杨凌河段洪水淤积体。实验前用 0.074 mm 的标准筛去除泥沙中的沙砾等大颗粒杂质,通过室内沉积进一步分选,分为 1[#]沙样和 2[#]沙样。沙样级配曲线采用济南微纳公司生产的 Winner2008D 智能型全自动全量程湿法激光粒度仪测得,见图 1。

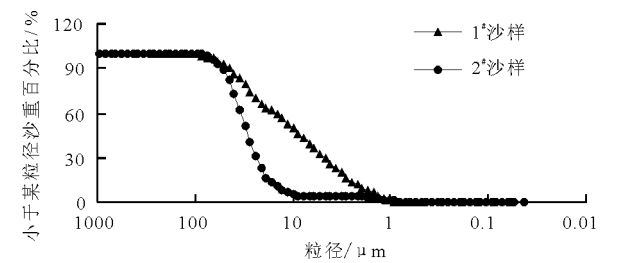


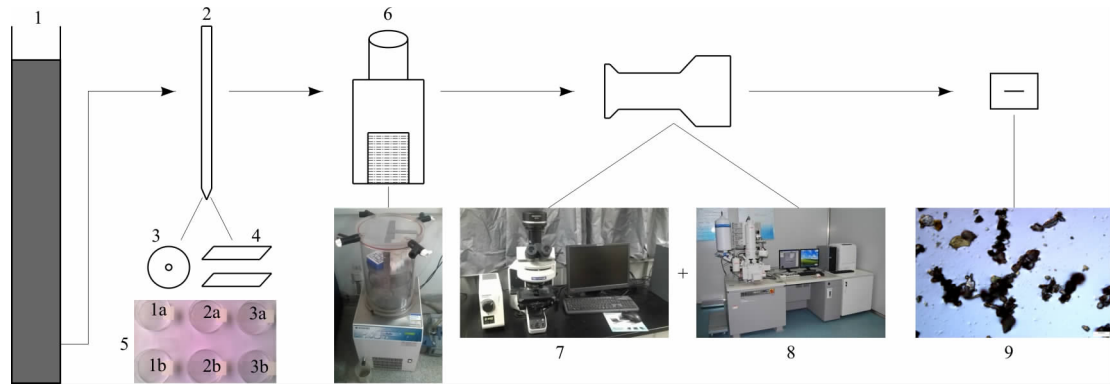
图 1 实验沙样级配曲线

2.3 实验方法

2.3.1 静水沉降实验 实验是在高 30 cm、直径为 6 cm 的 1 000 mL 量筒中进行,实验研究了 1[#]沙样浓度不变时,添加不同浓度絮凝剂(聚丙烯酰胺)及 2[#]沙样的情况下,絮凝体结构特征及沉速的变化规律,实验组次见表 1。具体实验流程如图 2 所示。

表 1 实验组次统计表 g/L

组次	1 [#] 沙样浓度	2 [#] 沙样浓度	絮凝剂浓度
1	20		
2	20		2
3	20		3
4	20		4
5	20		5
6	20		6
7	20	5	4
8	20	10	4
9	20	15	4
10	20	20	4
11	20	25	4



1 - 沉降筒, 2 - 移液管, 3 - 培养皿, 4 - 载玻片, 5 - 样品, 6 - 冷冻干燥机, 7 - 光学显微镜, 8 - 扫描电镜, 9 - 絮凝体图像

图2 实验仪器与流程示意图

2.3.2 絮凝体样本采集 为了完整获得易于破碎的絮凝体结构,在实验取样时,采用内径较大的移液管将絮凝体从沉降筒底部轻轻地移送到培养皿与载玻片上。之后将培养皿与载玻片放入冷冻机冷冻,冷冻 8 h 后进行冷冻干燥处理,干燥后的絮凝体样本待后续研究。

2.3.3 图像数据提取与分析 采用 S-4800 型场发射扫描电子显微镜及 BX51 + DP70 型显微镜观察絮凝体样本,得到不同放大倍数(10、20、40、250、500、2000、6000 倍)的絮凝体 SEM 图像,如图 3 所示。每一组实验仅选取其中某一倍数下的絮凝体图像供后续处理分析。

目前研究所采用的图像处理方法一般是对絮凝体图像采用单阈值法进行分割,将小于该阈值的区域

像素设为 0,认为是孔隙;大于该阈值的区域图像设为 1,认为是絮凝体^[1]。这种人为确定阈值的方法会影响絮凝体孔隙特征的提取和分析,具有一定的主观性。因此,本次图像处理尝试采用 Image-pro plus (IPP) 软件,运用该软件可不必先对图像进行灰度处理与阈值分割,从而可提高图像处理精度,更好地对絮凝体及其内部结构进行分析处理。处理与分析方法是直接将显微镜观测得到絮凝体图像导入软件即可对絮凝体特征进行提取,也可使用显微图片内刻度尺进行空间刻度校准,自动跟踪和测量物体属性,如面积、周长、直径、圆度和高宽比等,如图 4 所示。进而计算絮凝体的孔隙率、孔隙比、孔隙圆形度以及表层分形维数等(因原始数据量巨大,本文中没有列出),进一步确定这些参数与絮凝体沉速之间的关系。

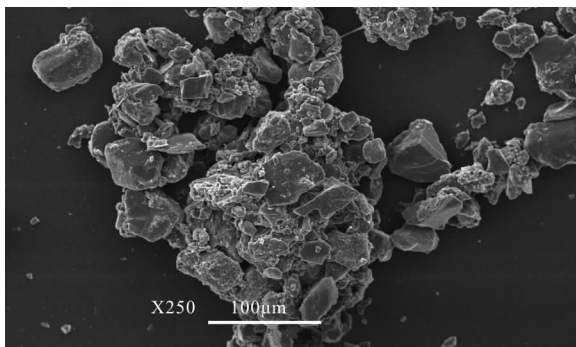


图3 絮凝体 SEM 图像(放大 250 倍)

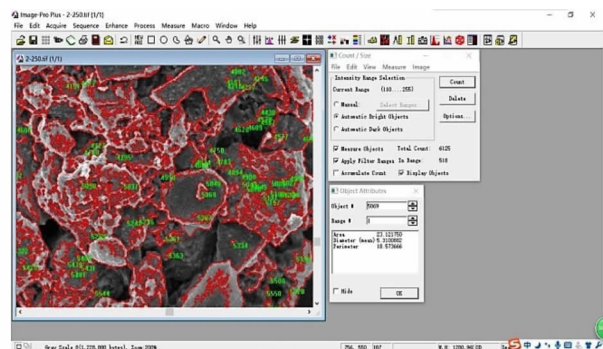


图4 IPP 处理后 SEM 图像

3 结果与讨论

3.1 絮凝体及其内部结构分析

3.1.1 絮凝体直径 运用 IPP 图像处理软件,对絮凝体 SEM 图像进行分析测量得到的絮凝体直径随絮凝剂浓度及 2#沙样浓度变化曲线见图 5、6。由图 5、6 可见,在沉降筒中 1#沙样浓度不变情况下,絮凝

体直径随着絮凝剂浓度的增大而增大;在 1#沙样浓度与絮凝剂浓度不变情况下,絮凝体直径随着 2#沙样浓度的增大而增大。

3.1.2 絮凝体表层分形维数分析 絮凝体外形尺寸虽然直观,但不能确切反映絮凝体结构。因此,目前普遍采用絮凝体周长的分形维数 D 来表述絮凝体的分形特征,其计算公式^[17] 如下:

$\ln P = (D/2) \cdot \ln A + C$ (1)

式中: P 为絮凝体对应多边形的等效周长, μm ; A 为与絮凝体对应多边形的等效面积, μm^2 ; C 为常数; D 为絮凝体形态的分形维数。

分形维数值一般介于 1 ~ 2 之间。当 $D = 1$ 时,表示絮凝体外形比较规则;当 $D = 2$ 时,表示絮凝体外形不规则^[18]。

根据絮凝体图像分析得到的絮凝体周长及面积,采用公式(1)计算得到絮凝体表层分形维数见表 2 及图 7。由表 2 及图 7 可见,在同样的 1[#]沙样浓度条件下,加入的絮凝剂浓度及 2[#]泥沙浓度对其最终形成的絮凝体表层分形维数基本没有影响,絮凝体表层分形维数随着絮凝体直径的增大而逐渐减小。研究结果与文献[19]结果基本一致。

表 2 絮凝体表层分形维数计算表

组次	1 [#] 沙样 浓度/ (g · L ⁻¹)	2 [#] 沙样 浓度/ (g · L ⁻¹)	絮凝剂 浓度/ (g · L ⁻¹)	表层 分形 维数	絮凝体 直径/ μm
1	20			1.228	1346.72
2	20		2	1.347	587.108
3	20		3	1.296	709.211
4	20		4	1.283	831.312
5	20		5	1.277	971.532
6	20		6	1.269	1111.93
7	20	5	4	1.286	891.204
8	20	10	4	1.265	1110.03
9	20	15	4	1.255	1179.37
10	20	20	4	1.235	1243.30
11	20	25	4	1.232	1297.35

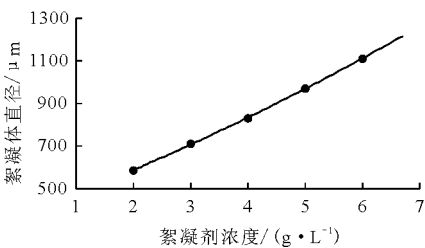


图 5 絮凝体直径随絮凝剂浓度变化曲线图

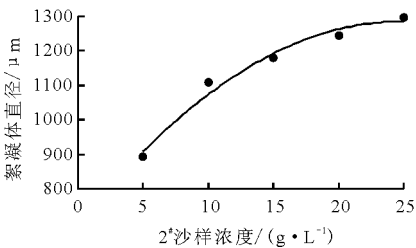


图 6 絮凝体直径随 2[#]沙样浓度变化曲线图

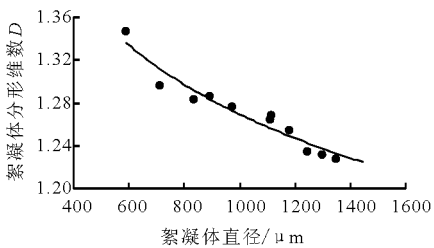


图 7 絮凝体表层分形维数随直径变化曲线图

3.1.3 絮凝体内孔隙直径 运用 IPP 软件,分析絮凝体 SEM 图像,测量得到不同泥沙浓度和絮凝剂浓度下的絮凝体孔隙直径见表 3 和图 8、9。由表 3 和图 8、9 可见,尽管实验中所采用的 1[#]沙样浓度、2[#]沙样浓度以及絮凝剂浓度有所变化,但其最终形成的絮凝体内部孔隙直径均在 0.2 ~ 500 μm 之间,可认为絮凝体孔隙均是毛细管孔隙,此结果与文献[1]的研究结果基本一致。

表 3 不同泥沙浓度、絮凝剂浓度下絮凝体孔隙直径统计表

组次	1 [#] 沙样浓度/ (g · L ⁻¹)	2 [#] 沙样浓度/ (g · L ⁻¹)	絮凝剂浓度/ (g · L ⁻¹)	孔隙直径/ μm
1	20			6.685
2	20		2	2.331
3	20		3	2.304
4	20		4	2.277
5	20		5	2.257
6	20		6	2.237
7	20	5	4	2.517
8	20	10	4	2.426
9	20	15	4	2.395
10	20	20	4	2.363
11	20	25	4	2.332

此外,从图 8、9 中可见,在相同的 1[#]沙样浓度情况下,孔隙直径随着絮凝剂浓度的增大而减小;在 1[#]沙样中添加 2[#]沙样后,混合沙样形成的絮凝体孔隙直径比单一同浓度沙样(1[#]沙样)形成的孔隙直径大;在相同的 1[#]沙样浓度与絮凝剂浓度情况下,孔隙直径随着 2[#]沙样浓度的增大而减小。

3.1.4 絮凝体孔隙结构参数计算 利用 IPP 软件,分析 SEM 照片,可得到絮凝体的横截面积 S 、絮凝体内孔隙面积 S_a 、絮凝体泥沙颗粒所占的面积 S_s 等参数,根据平面孔隙率和平面孔隙比^[20]的定义公式(2)、(3),可计算出孔隙比与孔隙率,结果见图 10、11 所示。

$$n = \frac{S_a}{S} \times 100\%$$
 (2)

$$e = \frac{S_a}{S_s}$$
 (3)

式中: n 为泥沙絮凝体的孔隙率,%; e 为泥沙絮凝体的孔隙比; S 为絮凝体对应多边形的等效面积, μm^2 ; S_a 为絮凝体内部孔隙等效多边形的面积, μm^2 ; S_s 为横截面中黏性泥沙颗粒所占的面积, μm^2 。

由图 10、11 可见,在 1[#]沙样浓度不变的条件下,絮凝体的孔隙率与孔隙比随着絮凝剂的浓度和 2[#]沙样浓度增大而减小。

3.1.5 絮凝体孔隙圆形度分析计算 泥沙絮凝体内孔隙投影面形状通常采用圆形度 C 来分析,圆形度又称复杂度、分散度,其计算公式^[21]为:

$$C = \frac{L^2}{S_a} \quad (4)$$

式中: L 为絮凝体孔隙的等效多边形周长, μm ; S_a 为絮凝体孔隙等效多边形的面积, μm^2 。

研究表明,当 $C = 4\pi$ 时,絮凝体孔隙为圆形; $C = 16$ 时,絮凝体孔隙为正方形; $C = 12\sqrt{3}$ 时,絮凝体孔隙为正三角形,且 C 值越大,孔隙形状越复杂。

利用 IPP 软件,分析 SEM 照片,可得到絮凝体孔隙周长、面积等参数,运用公式(4)可计算得到凝

体内孔隙圆形度计算值。

图 12 为实验组次 11 的计算结果,由图 12 可见,投影面的圆形度值在 4π 上下区间变动,可以认为,絮凝体孔隙基本为圆形,与文献[1]的研究结果基本一致。其他实验组次絮凝体内孔隙圆形度计算值分布情况与图 12 相似。

3.2 絮凝体沉速与絮凝体形态及孔隙的关系

黏性细沙在沉降过程中会吸附较小的颗粒形成絮凝体,尤其是在高分子聚合物溶液中,絮凝现象更为明显,但絮凝体发育并不会无限增大,而是在外观尺寸达到某一动态平衡状态时即停止发育,此刻即认为絮凝体发育完成。观察发育完成后的絮凝体沉降距离和时间,即可得到絮凝体沉降速度。运用 IPP 软件测量得到不同絮凝剂浓度和沙样浓度下的絮凝体沉速与絮凝体形态及孔隙的关系见表 4。

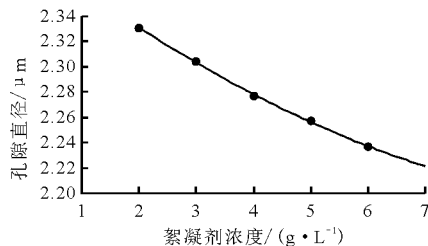


图 8 絮凝体孔隙直径随絮凝剂浓度变化曲线图

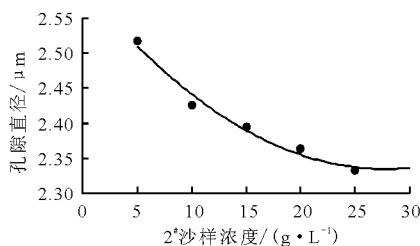


图 9 絮凝体孔隙直径随 2[#]沙样浓度变化曲线图

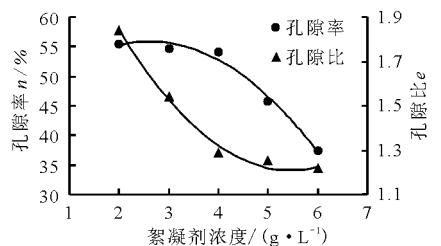


图 10 絮凝体孔隙率、孔隙比随絮凝剂浓度变化图

表 4 絮凝体沉速与絮凝体形态及孔隙的关系

组次	1 [#] 沙样浓度/ (g · L ⁻¹)	2 [#] 沙样浓度/ (g · L ⁻¹)	絮凝剂浓度/ (g · L ⁻¹)	沉速/ (mm · s ⁻¹)	絮凝体直径/ μm	孔隙直径/ μm	孔隙 个数	孔隙率/ %	孔隙比
1	20			0.1415	1346.72	6.685	2790	67.55	2.082
2	20		2	0.1796	587.108	2.331	1822	55.46	1.840
3	20		3	0.2044	709.211	2.304	1594	54.75	1.543
4	20		4	0.2291	831.312	2.277	1376	54.04	1.287
5	20		5	0.2509	971.532	2.257	1261	45.72	1.251
6	20		6	0.2727	1111.93	2.237	1140	37.40	1.215
7	20	5	4	0.3601	891.204	2.517	1389	43.80	0.638
8	20	10	4	0.4048	1110.03	2.426	961	41.12	0.625
9	20	15	4	0.4265	1179.37	2.395	603	29.64	0.412
10	20	20	4	0.4481	1243.32	2.363	255	16.15	0.199
11	20	25	4	0.4698	1297.35	2.332	223	12.67	0.164

由表 4 可见:当絮凝剂浓度增大时,絮凝体直径及沉速均随之增大,絮凝体内孔隙直径、孔隙个数、孔隙率均随之减小。说明在此情况下,絮凝体沉速由重力起主导作用,絮凝体引起的水流阻力起次要作用。在 1[#]沙样与絮凝剂浓度不变时,2[#]沙样浓度增大,絮凝体直径及沉速随之增大,絮凝体内孔隙直径和孔隙个数则随之减小。

根据表 4 中絮凝体沉速与孔隙比的实测资料点绘的关系曲线见图 13,拟合出絮凝体沉速与孔隙比的关系式为:

$$\omega = 0.0269e^2 - 0.235e + 0.5093 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.979$$

式中: ω 为泥沙絮凝体的沉速, mm/s ; e 为絮凝体孔隙比。

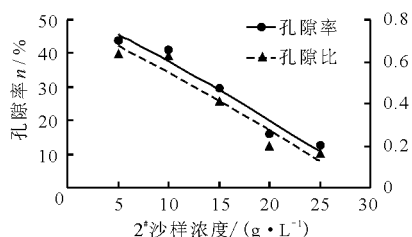


图11 絮凝体孔隙率、孔隙比随2#沙样浓度变化图

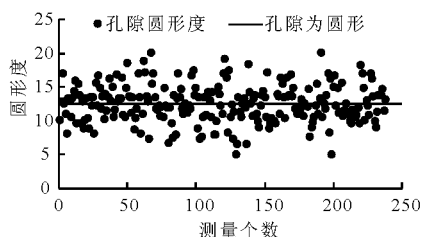


图12 絮凝体孔隙圆形度图

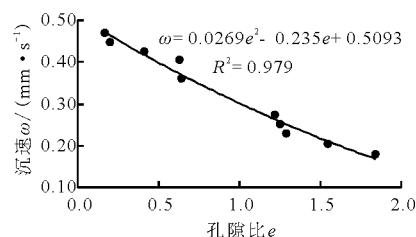


图13 絮凝体沉速随孔隙比变化曲线图

4 结 论

本文首次利用 Image-pro plus 图像处理软件,分析研究了絮凝体 SEM 图像,提取了絮凝体内孔隙直径、孔隙率、孔隙比等特征,分析了这些特征与泥沙浓度及絮凝剂浓度的关系。结果表明,本文分析得到的絮凝体结构特征变化规律与现有结论基本一致,说明 Image-pro plus 软件应用于分析絮凝体 SEM 图像是可行的。

(1)絮凝体中的孔隙大部分属于毛细管孔隙,孔隙投影形状近似为圆形;在1#泥沙浓度不变情况下,随着絮凝剂浓度的增大,则絮凝体外观尺寸、孔隙直径和孔隙率增大,而孔隙比减小;在1#泥沙浓度与絮凝剂浓度不变时,随着2#泥沙浓度的增大,最终形成的絮凝体直径随之增大,孔隙直径、孔隙率与孔隙比逐渐减小。

(2)在同样的1#沙样浓度条件下,絮凝剂浓度和2#泥沙浓度对其最终形成的絮凝体表层分形维数基本没有影响,分形维数均随着絮凝体直径的增大而减小。

(3)黏性细沙絮凝体的孔隙数及孔隙直径越小,孔隙率与孔隙比越小;絮凝体沉速随着絮凝体孔隙比的减小而增大。

参考文献:

- [1] 柴朝晖,杨国录,陈萌,等. 图像分析粘性细颗粒泥沙絮凝体孔隙初探[J]. 泥沙研究, 2011,36(5):24-29.
- [2] 朱中凡,赵明,杨铁笙. 水流剪切对细颗粒泥沙絮凝作用实验研究的综述[J]. 泥沙研究, 2010,35(4):73-80.
- [3] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [4] 杨靛青,王初,任杰,等. 细颗粒泥沙絮凝现象研究综述[J]. 水道港口, 2008,29(3):158-165.
- [5] 李慧梅,陈建国,袁玉萍. 高含沙浑水在絮凝剂作用下的絮凝沉降试验研究[J]. 泥沙研究, 2006,31(4):73-77.
- [6] 王明甫. 高含沙水流及泥石流[M]. 北京:水利电力出版社, 1994:7-20.
- [7] GONZALEZ E A, HILL P S. A method for estimating the flocculation time of monodispersed sediment suspensions [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998,45(11):1931-1954.
- [8] 王尚毅. 细颗粒泥沙在静水中的沉降运动[J]. 水利学报, 1964(5):20-29.
- [9] 王家生,陈立,刘林,等. 阳离子浓度对泥沙沉速影响实验研究[J]. 水科学进展, 2005,16(2):169-173.
- [10] 王家生,陈立,王志国,等. 含离子浓度参数的粘性泥沙沉速公式研究[J]. 水科学进展, 2006,17(1):1-6.
- [11] 朱中凡,赵明,杨铁笙. 紊动水流中细颗粒泥沙絮凝发育特征的试验研究[J]. 水力发电学报, 2010,29(4):77-83.
- [12] 李文杰,杨胜发,胡江,等. 三峡库区细颗粒泥沙絮凝的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015,23(5):851-860.
- [13] 柴朝晖,杨国录,王茜,等. 紊流对粘性细颗粒泥沙絮凝影响[J]. 水科学进展, 2012,23(6):808-814.
- [14] 许杨,赵英凯,毕明刚. Image-ProPlus 图像分析软件定量鸡胚尿囊膜血管新生面积的方法[J]. 中国比较医学杂志, 2007,17(12):745-748.
- [15] 周伯扬,方羽生,黄林华. Image-pro4_0 软件在真菌分生孢子测量上的应用[J]. 植保技术与推广, 2003,23(6):41.
- [16] 伍喜媛,秦莉,陈宇玺. Image-ProPlus 在眼科角膜上皮愈合面积测量中的应用[J]. 中国医学教育技术, 2010,24(2):183-186.
- [17] 唐朝生,施斌,王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008,30(4):560-565.
- [18] 张乃予,周晶晶,王捷. 泥沙絮团结构的试验研究综述[J]. 泥沙研究, 2016,41(1):76-80.
- [19] 杨铁笙,熊祥忠,詹秀玲,等. 粘性细颗粒泥沙絮凝研究概述[J]. 水利水电工程学报, 2003(2):65-77.
- [20] 熊承仁,唐辉明,刘宝琛,等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007,32(3):415-419.
- [21] 张建恩,曹长修,金琼. 图像处理中的圆分析算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005,28(11):47-49.