

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.009

颗粒浑液浓度的光学测量方法

苏杭丽

(南京财经大学信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:在理论与实践相符合原则的指导下,从广义的 Lambert-Beer 定律出发,提出颗粒浑液浓度光学测量中光密度非线性校正问题的解决方法;使用沉降粒径指标,解决了颗粒浑液浓度测量受颗粒粒径影响的难题;此外,对混合颗粒消光系数的合理处理进行了尝试。这些问题的解决是台式光电泥沙分析仪研制成功的关键。

关键词:泥沙属性;浓度测量;光学测量

中图分类号:TB52*9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)03-0234-04

A method for optical measurement of suspended sediment concentration

SU Hangli

(School of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210003, China)

Abstract: According to theory and practice, based on consistent principles, the optical density nonlinear correction problem in particle concentration measurement was solved based on the generalized Lambert-Beer law. The problem of the effect of particle size on particle concentration measurement was solved using the size index. In addition, the extinction coefficient of the mixed particles was processed reasonably well. Solving these problems is the key to developing the desktop photoelectric sediment analyzer.

Key words: sediment properties; concentration measurement; optical measurement

1 消光测量浑液浓度的原理及实验

1.1 Lambert-Beer 原理与消光方程

在 Lambert-Beer 原理中,光密度 Y_0 正比于溶液质量浓度 c ,但是当 c 增大到一定程度时, $Y_0 \sim c$ 出现非线性^[1]。本文的研究对象是固体颗粒浑液系统。固体颗粒不溶于水,其浑液系统的消光规律与化学溶液系统不同,可以用推广的 Lambert-Beer 定律,其 Y_0 与 c 的关系如下^[2-3]:

$$\begin{cases} Y_0 = (Q_B + Q_S) NGL = \frac{aL}{r_s} (Q_B + Q_S) \frac{c}{d} \\ Y_0 = A(r_s) (Q_B + Q_S) \frac{c}{d} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_B ——光吸收消光系数; Q_S ——散射消光系数; r_s ——颗粒相对质量; $A(r_s)$ ——与 r_s 有关的系数; N ——单位体积的颗粒数; G ——单个颗粒的截面积; L ——透光悬浮液的厚度; a ——系数; d ——颗粒粒径。

式(1)称为前向消光方程,是固体颗粒浑液浓度光学测量的基本方程。该式表明, Y_0 与 c 成正比,与 d 成反比。

1.2 消光测量浑液浓度的实验

实验采用置换法,用1/10 000天平进行称重;量水用1 000 mL、500 mL长颈瓶进行。共做16种沙样实验。

a. 非白色。B 样品为粉煤灰,黑色,相对质量为 1.88, $d_{50} = 14 \mu\text{m}$;FB 样品为淤泥,褐色,相对质量为

收稿日期:2013-05-08
作者简介:苏杭丽(1973—),女,山东荣成人,副教授,博士,主要从事计算机应用研究。E-mail:su_hl@163.com

2. 65, $d_{50}=5\text{ }\mu\text{m}$; YL 样品为黄河液泥, 黄红色, 相对质量为 2. 65, $d_{50}=14\text{ }\mu\text{m}$; N_{25} 样品为筛下黄沙, 黄色, 相对质量为 2. 65, $d_{50}=15\text{ }\mu\text{m}$; N_{50} 、 N_{100} 样品为黄色, 相对质量均为 2. 65, d_{50} 分别为 $28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $42\text{ }\mu\text{m}$; NY 样品为黄河滩泥, 黄色, 相对质量为 2. 65, $d_{50}=38\text{ }\mu\text{m}$;

b. 白色矿粉类。W 矿粉为白色, 相对质量为 2. 65, $d_{50}=25\text{ }\mu\text{m}$; WW 矿粉为更白色, 相对质量为 2. 65, d_{50} 为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 。

c. 白钢玉粉系列。采用予南石粉厂生产的白钢玉系列产品 W_{40} 、 W_{28} 、 W_{20} 、 W_{14} 、 W_{10} 、 W_7 、 W_5 , 相对质量为 3. 33, 纯白色。

对以上的河流泥沙、白矿粉、白钢玉 3 类 16 种颗粒进行实验。结果表明: (a) Y_0 与 d 基本成反比; (b) Y_0 随着 c 增大, 都产生非线性, 以白钢玉最明显。需要说明的是, 式 (1) 含有 2 个未知数, 只有在特定情况下 (小含沙量、细颗粒、恒定粒径) 可以测定含沙量。

2 Y_0 与 c 的适线方程

2.1 颗粒重影概率及有效质量浓度

Beer 定律及广义 Beer 定律都存在一个问题, 即非线性问题。当颗粒浑液浓度高时, 浑液系统进入非线性, 颗粒光独立作用特性不再存在, 部分粒子失去作用。虽然各类泥沙情况有所差别, 但非线性都是存在的。非线性产生的机理在于颗粒产生重影。在光作用体内颗粒产生重影的概率为 $\left(\frac{S}{S_0}\right)^2$ (S_0 为总光通面积, S 为总挡光面积), 则 $S=\frac{3LS_0c}{16r_s d}$ 。颗粒的总重影概率^[2]为

$$\left(\frac{3L}{16r_s}\right)^2\left(\frac{c}{d}\right)^2=b\left(\frac{c}{d}\right)^2 \tag{2}$$

对消光定律进行修正得

$$Y_0=A(r_s)(Q_B+Q_S)\frac{c}{d}\left[1-b\left(\frac{c}{d}\right)^2\right]\approx A(r_s)(Q_B+Q_S)\frac{c}{d}e^{-b\left(\frac{c}{d}\right)^2}\approx A(r_s)(Q_B+Q_S)\frac{c}{d}e^{-BY_0^2}$$

则
$$Y_0e^{BY_0^2}=A(r_s)(Q_B+Q_S)\frac{c}{d} \tag{3}$$

其中
$$L\approx 3.4\text{ cm}\quad r_s=2.7\text{ g/cm}^3\approx 0.055\left(\frac{1}{g^2}\right)$$

式中: b ——系数; B ——非线性校正系数, B 的数值通过 $Y_0\sim c$ 线计算得到, 在 $0.01\sim 0.1$ 之间; $ce^{-b\left(\frac{c}{d}\right)^2}$ ——有效质量浓度。令 $Y_B=Y_0e^{BY_0^2}$, Y_B 为有效光密度, 则式 (3) 称为有效光密度的消光公式。

考虑重影概率后, Y_B 与 $\frac{c}{d}$ 成正比, 即式 (3) 与式 (1) 的差别。从理论上讲 B 为常数, 但事实上 B 值还有一定的变化, 可能还存在一定的内在规律。

2.2 Y_B 的校正作用

根据式 (3), Y_B 与含沙量成正比。为了验证式 (3) 的正确性, 以白色矿粉为例进行校正实验。

图 1 为白色矿粉光密度校正前后的对比图。校正前非线性明显, 用 $B=0.06$ 加以校正后, $Y_B\sim c$ 基本为直线。

对于河流泥沙的校正, B 从 $0.02\sim 0.03$ 得到直线族。白钢玉粉属于大非线性, 对 7 种试样分别用不同的 B 值进行校正, $Y_B\sim c$ 线性很好, 只是 B 变化较大, 且粒径越小, B 越大。

经过重影概率得到有效光密度 $Y_B\sim c$ 的方程完全适合于全部泥沙、白色矿粉、白钢玉粉等众多样品的光密度 $Y_0\sim c$ 方程, 故认定式 (3) 适线方程是正确的; 选用适当的 B 值, 计算 Y_B , 然后与 c 作图, 结果毫无例外得到直线。说明 Y_B 值作为直线校正函数是有效的; 校正 $Y_B\sim c$ 成直线是必要的, 因为只有此时, 每个样品 $Y_B\sim c$ 的斜率只有一个粒径值, 粒径与浓度才好分离, 测出 Y_0 与 d 值就可以解出 c 。

3 混合沙的消光系数

综合 Q_B ^[3] 和 Q_S ^[4-5], 得到单级配的总消光系数^[5]。在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 吸收消光起主要作用, 大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以

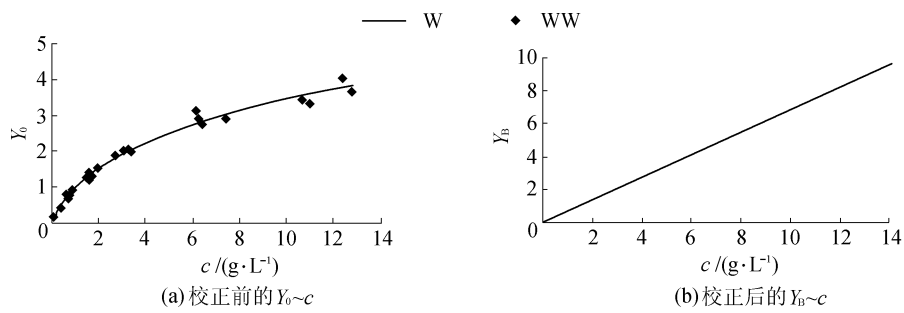


图1 白色矿粉光密度校正前后的对比

Fig. 1 Particle concentrations before and after optical density correction of white slags

后,散射消光起主要作用。 Q_B 与 Q_S 比较,颜色即波长因素起作用,而散射消光与波长颜色几乎无关。
但是河流泥沙颗粒是一个混合的多级配泥沙颗粒,它的大小组成是一个颗粒级配,所以泥沙样品的消光系数是一个平均的消光系数。

式中: Q_C ——多级配混合泥沙的平均消光系数; P_1 ——样品中小于 $1\mu m$ 部分所占百分比; P_2 ——样品中大于 $1\mu m$ 小于 $5\mu m$ 部分所占百分比; P_3 ——样品中大于 $5\mu m$ 部分所占百分比。

因为 $P_2 = P_5 - P_1$,由式(3)得 $Q_C = 1 + (Q_B - Q_S)P_1 + (Q_S - 1)P_5$ 成立。式中 P_5 为 $d = 5\mu m$ 时的累计百分比,它由仪器直接测出。考虑到级配曲线组成规律 $P_1 = P_5 \frac{d_1}{d_5} \approx 0.2P_5$,进一步得

$$Q_C = 1 + (0.2Q_B + 0.8Q_S - 1)P_5 \tag{5}$$

式中 Q_B 数值可取粒径小于 $1\mu m$ 吸收系数的平均值 $3 \sim 4$; Q_S 取粒径在 $1 \sim 5\mu m$ 范围内 Q_S 的平均值,为 $1 \sim 2$ 。式(5)改为

$$Q_C \approx 1 + 0.9P_5 \tag{6}$$

由此可见,多级配混合泥沙的平均消光系数是一个只与 P_5 有关的起伏不大的常数。 P_5 越大,泥沙颗粒越细;越细的泥沙 Q_C 越大。

4 指标粒径的计算与校正

4.1 指标粒径的计算^[6-13]

将 Lambert-Beer 公式由溶液浓度测量推广到浑水颗粒系统的浓度测量,公式中包含颗粒直径因子,用光学方法测出与浓度有关的光密度 Y_c ,并结合其他方法测出 d ,然后结合相关公式测出 c 。

在静水沉降条件下,平均粒径可用Stokes公式测定的沉降速度 $\omega(d)$ 确定,因为 $\omega(d) = kd^2$,根据式(3)有

$$\begin{cases} \frac{\Delta Y_c}{Y_c} = \frac{\Delta c}{c} \\ \frac{\Delta c}{c} = k\omega(d)\Delta t \end{cases} \tag{7}$$

式中: ΔY_c ——不同浓度的光密度差; k ——系数。所以

$$d = \frac{1}{k(T)\sqrt{\Delta t}} \sqrt{\frac{Y_{c0} - Y_{ct}}{Y_{c0}}} \tag{8}$$

式中: $k(T)$ ——与温度有关的系数; Δt ——时间差; Y_{c0} ——0时刻与浓度有关的光密度; Y_{ct} —— t 时刻与浓度有关的光密度。在固定时间差 Δt (如3 min),相同温度 T 下进行测试, $\sqrt{\frac{Y_{c0} - Y_{ct}}{Y_{c0}}}$ 的数值便为粒径大小的指标。

4.2 泥沙含量中指标粒径校正

由式(3)得

$$Y_B = A(r_s)(Q_B + Q_S) \frac{c}{d} \tag{9}$$

进行式(9)计算后,除了FB及B线以外,其余N类、NY类泥沙都统一在一条线上。说明 d 校正的理论及方法是正确的。B线不同,原因在于:其相对质量为1.88,小于天然泥沙;它们都是黑色的,吸收消光系数大于黄色泥沙。FB线不同,原因在于它们的粒径小于 $5\mu\text{m}$,沉降粒径计算的准确性有问题,公式另行讨论。

5 结 论

a. 在重影概率的基础上提出有效光密度方法,解决高浓度时光密度曲线的非线性问题,为粒径校正创造条件。

b. 在静水沉降的基础上提出粒径指标,作为校正函数并不直接算出粒径值的大小,简便合理。只要测出粒径指标、有效光密度,便可测出含沙量。

c. 作为前向散射规律,消光系数是一个重要问题。消光系数包括吸收系数和散射系数,特别是混合沙,既有一个级配组成的问题,还有一个消光系数的处理方法。本文对混合颗粒的消光系数作出了合理的处理。

参考文献:

- [1] BEER A. Bestimmung der absorption des rothen lichts in farbigen flüssigkeiten (Determination of the absorption of red light in colored liquids)[J]. Annalen der Physik und Chemie, 1852, 86: 78-88.
- [2] SKOOG D A, HOLLER F J, CROUCH S R. Principles of instrumental analysis[M]. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, Corp, 2007.
- [3] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
- [4] VAN D E HULST H C. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, Inc, 1981.
- [5] 卢永生, 徐友仁, 刘木林. 微粒散射消光系数的测定及理论[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1996, 24(4): 53-57. (LU Yongsheng, XU Youren, LIU Mulin. Measurement and theory of extinction coefficient of particle scattering[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1996, 24(4): 53-57. (in Chinese))
- [6] 卢永生. 光电泥沙分析仪[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1978(2): 142-158. (LU Yongsheng. Photoelectric sediment analyzer[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1978(2): 142-158. (in Chinese))
- [7] 陶菲, 张鹰, 王晶晶, 等. 悬浮泥沙浓度遥感反演模式研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 96-101. (TAO Fei, ZHANG Ying, WANG Jingjing, et al. Study on quantitative remote sensing models for measuring suspended sediment concentration[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 96-101. (in Chinese))
- [8] 苏杭丽, 卢永生. 库莫洛后向消光理论在测量颗粒粒径中的应用[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 736-739. (SU Hangli, LU Yongsheng. Measurement of particle size by KML back extinction equation[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 736-739. (in Chinese))
- [9] 许盈松, 黄振杰. 台湾集集堰沉沙池泥沙浓度与浊度率定关系研究[J]. 泥沙研究, 2009(3): 37-44. (XU Yingsong, HUANG Zhenjie. Rating relations between suspended sediment concentration and turbidity in Ji-Ji Weir settling tank[J]. Journal of Sediment Research, 2009(3): 37-44. (in Chinese))
- [10] 崔双超, 丁爱中, 潘成忠, 等. 泥沙质量浓度和 pH 对不同粒径泥沙吸附磷影响研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(5): 582-586. (CUI Shuangchao, DING Aizhong, PAN Chengzhong, et al. Effect of sediment mass contraction and pH on phosphorus absorption of different sediment size[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 48(5): 582-586. (in Chinese))
- [11] 许文盛, 陈立, 孙宇飞, 等. 泥沙浓度与粒径影响下河流溶解性物质侵蚀试验[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(1): 44-48. (XU Wensheng, CHEN Li, SUN Yufei, et al. Experiment on effects of sediment concentration and particle size on erosion of soluble matters in rivers[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(1): 44-48. (in Chinese))
- [12] 薛元忠, 何青, 王元叶. OBS 浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. 泥沙研究, 2004(4): 56-60. (XUE Yuanzhong, HE Qing, WANG Yuanye. The method and application of OBS in the measurement of sediment concentration[J]. Journal of Sediment Research, 2004(4): 56-60. (in Chinese))
- [13] 宋新江, 卢廷浩, 李炳蔚. 砂样平均粒径计算方法探讨[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 121-124. (SONG Xinjiang, LU Tinghao, LI Bingwei. Calculation methods for mean diameters of sand grain samples[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1): 121-124. (in Chinese))