

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.015

悬移质含沙量的比热容测量方法

张帆一,吴 腾

(河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 总结分析悬移质含沙量测量方法的代表性成果,评述各种测沙方法的适用性和突出优缺点。在此基础上,提出基于比热容原理测量含沙量的方法。该方法利用改制的比热容测量仪测定不同含沙量水体的比热容,建立含沙量与比热容之间的相互关系,进而通过测量浑水的比热容来确定水体含沙量。研究表明:水体含沙量与浑水比热容呈明显的负线性关系,可采用测量浑水比热容的方法来确定水体的含沙量;含沙量的测量精度与浑水比热容的测量精度密切相关。该方法从热力学的角度研究水体的含沙量,旨在为泥沙动力学的研究提供新思路。

关键词: 悬移度泥沙;水体含沙量;测量方法;比热容

中图分类号:TV14 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)05-0456-05

Sediment concentration measurement based on thermal capacity

ZHANG Fanyi, WU Teng

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Suspended sediment concentration measurement methods are summarized, and the advantages and disadvantages of these methods are described in this paper. On this basis, a new method for sediment concentration measurement based on thermal capacity is put forward. Experiments were carried out to examine the relationship between the suspended sediment concentration and the thermal capacity of sediment-laden water. The results show a significantly negative linear relationship between the suspended sediment concentration and the thermal capacity of sediment-laden water. Thus, it is feasible to measure the suspended sediment concentration by measuring the thermal capacity of the sediment-laden water. Furthermore, the measurement accuracy of the suspended sediment concentration is closely connected to that of the thermal capacity. The sediment concentration measurement method introduced in this paper can provide a new way for sediment dynamics study from the perspective of thermology.

Key words: suspended sediment; sediment concentration; measurement method; thermal capacity

水体含沙量是研究土壤侵蚀、水土保持、航道疏浚、河道演变分析的重要影响因素,故含沙量的测定尤为重要。目前测量水体含沙量的方法主要分为器测法和物理测法两大类^[1]。器测法主要包括烘干法和比重法。烘干法又称称重法。与烘干法相比,比重法所用的设备简单,测量方法更快、更直接。物理测法主要包括同位素测沙法、光电测沙法、遥感信息法以及电导率测沙法等。同位素测沙法^[2]可以利用 γ 射线衰减与水体中泥沙含量的关系推求泥沙含量。光电测沙法的测量原理是浑水消光定律^[3]。目前光电测沙法的成熟发展成果主要有红外光电测沙仪和激光测沙仪,但是由于实际水体中泥沙粒径、浓度均匀分布的概率很低,所以按测量原理测沙存在误差。并且在高含沙量下透射光强较难辨识,所以在高含沙量条件下仪器使用受限。遥感信息法定量悬浮泥沙的原理与光电法测沙的方法类似,只是光电法测沙主要考虑透射光线部分,而遥感信息法测沙更多的是考虑测量光波能被悬沙散射的部分。但是遥感信息法要求有专用的设备和较好

收稿日期: 2013-04-01

基金项目: 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(201205XCX032);武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(2011B085)

作者简介: 张帆一(1992—),男,江苏盐城人,本科生,主要从事港航工程研究。E-mail:zfy_nanjing@163.com

通信作者: 吴腾,讲师。E-mail:wuteng@hhu.edu.cn

的天气、最佳测试时间等,而正常条件下水体的反射率很低,所以测量误差相对较高^[4-5]。电导率测沙法利用了含沙水混合物中泥沙含量的变化会引起其介电常数变化^[6]这一电物理学性质^[7]。电导率测量系统构造简单、成本低、使用安全、响应速度快,并且已经有了较成熟的设备。但由于电导率受温度影响较大,电容两端输出电压随温度、土壤含盐量升高有所变化,故率定要求较高,使电导率测沙法的适用条件受到一定限制,目前尚处在理论研究阶段。

总体而言,目前物理测沙法的研究多集中于光、声、电、力^[8-16],而基于热学性质测定悬移质含沙量的探索领域还是一片空白,事实上热能也是水体的固有特性之一。笔者基于热学原理提出比热容含沙量测量方法,并通过试验建立水体含沙量与比热容之间的关系,探讨悬移质含沙量的比热容测量方法。

1 测量方法

1.1 基本原理

比热容是指单位质量物体升高或降低 1℃ 所吸收或放出的热量,是表征物体吸放热能力的物理量。单位质量的沙和水由于比热容相差很大,使一定体积下含沙水的比热容相对于纯水会发生变化,这种变化可以通过电路加热时间来反映,从而计算出含沙水的比热容,再根据含沙水比热容与含沙量的关系反推出水体含沙量。

1.2 浑水比热容测量装置及试验过程

比热容仪由两个依据物理标准进行自行改装设计的量热器构成,量热器实际上是保温性能较好的加热装置,可以利用电阻丝对内部量热筒装液体加热,利用针式电子温度计读出升高的温度,用秒表读出加热时间,结合电压表及电流表读数等参数即可计算出含沙浑水的比热容。测量装置如图 1 所示。

试验过程如下:先向加热装置内注入待测液体,启动加热装置,利用电阻丝对内部桶装液体加热,为保证液体受热均匀,利用搅拌棒进行搅拌。利用针式电子温度计计温,电压表和电流表分别记录加热电路的电压和电流,秒表控制时间。再根据升高的温度、加热时间、电阻及额定电压等参数进行计算,从而得出液体的比热容。

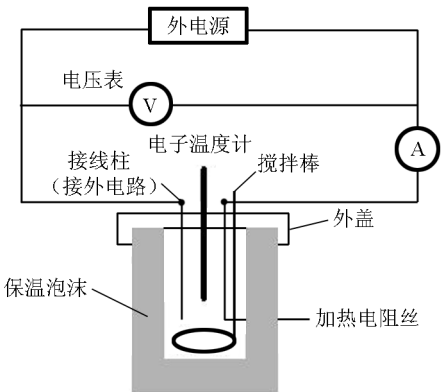


图 1 比热容测量装置示意图

2 测量装置的率定

比热容基本表达式如下:

$$E = cm\Delta T \tag{1}$$

$$E = UIt \tag{2}$$

式中: E ——物体吸收的热量; c ——比热容; m ——物体的质量; ΔT ——升高的温度; U ——电压; I ——电流; t ——时间。

比热容测量装置除液体所需的能量外还存在系统能量耗散,进行含沙水比热容测量前,需要对测量装置进行率定。为方便计,可将量热系统内除待测液体外所有物质的热容量都折合为综合“系统热容量”,同时对比热容考虑加入因散热造成的热量损失的校正系数 η ,那么比热容测量系统的表达式可写为

$$E = E_0\Delta T + \eta cm\Delta T \tag{3}$$

式中 E_0 为系统的热容量。

为确定式(3)中的参数,笔者进行了清水的比热容试验,所得结果见表 1。图 2 为系统每升高单位温度吸收的热量 $E_1(E_1 = E/\Delta T)$ 与清水质量 m_w 的关系,所得关系式中截距为系统热容,斜率为清水的比热容。由图 2 可知,系统热容为 62.2 J/K,清水的比热容为 4 298.8 J/(kg · K)。则式(3)可转化为

$$c = \frac{\frac{E}{\Delta T} - \frac{E_0}{\Delta T}}{\eta m} = \frac{\frac{E}{\Delta T} - 62.2}{\eta m} \tag{4}$$

由于试验中未考虑散热造成的热量损失,导致计算的吸热量比实际的吸热量大,故得到的比热容测定值偏大。一般在一个标准大气压下,温度 10 ~ 15℃ 之间纯水的平均比热容为 4 187 J/(kg · K),故式(4)中校

正系数 $\eta=4\,298.8/4\,187=1.03$ 。

表 1 清水试验测量数据

Table 1 Experimental measurements of water							
试验组次	清水质量/kg	初始温度 T_1 / ℃	最后温度 T_2 / ℃	电流/ A	电压/ V	加热时间/ s	E_1 / (J · °C ⁻¹)
1	0.08	12.8	22.9	4.50	2.78	330	408.74
2	0.09	13.2	22.4	4.50	2.79	330	450.34
3	0.10	13.4	21.8	4.50	2.79	330	493.23
4	0.11	13.7	21.5	4.50	2.79	330	531.17
5	0.12	12.9	19.5	4.50	2.79	330	570.68
6	0.13	12.9	19.6	4.50	2.80	330	620.60
7	0.14	12.5	18.7	4.50	2.80	330	670.65

3 浑水比热容与水体含沙量的相关性研究

3.1 粉煤灰沙样试验

采用粒径 0.015 mm 的均匀粉煤灰作为试验沙样,其干密度为 1.9 t/m³,试验水样为初始温度接近室温的普通清水。把粉煤灰和水配制成不同含沙量(质量浓度,下同)的多组试验溶液,对每组溶液分别取 1 L 液体加入比热容仪中进行试验,试验组次及试验结果如表 2 所示。

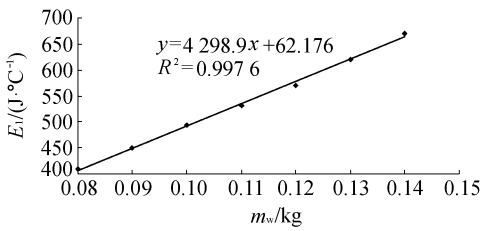


图 2 E_1 与 m_w 的关系

Fig. 2 Relationship between E_1 and m_w

表 2 含粉煤灰浑水比热容试验条件及结果

Table 2 Thermal capacity test of sediment-laden water containing fly ash							
试验组次	粉煤灰质量浓度/ (kg · m ⁻³)	初始温度/ ℃	结束温度/ ℃	加热时间/ s	电压/ V	电流/ A	$c_{\text{浑1}}$ / (J · (kg · °C ⁻¹))
1	9.9	12.1	19.7	300	4.5	2.79	4166.03
2	29.5	12.9	20.4	300	4.5	2.79	4 147.42
3	48.7	13.6	21.2	300	4.5	2.79	4 007.32
4	95.0	12.6	19.9	300	4.5	2.79	4 004.93
5	181.0	12.9	20.2	300	4.5	2.79	3 671.19
6	259.1	12.8	20.2	300	4.5	2.79	3 336.72
7	330.4	13.1	20.2	300	4.5	2.79	3 247.52
8	395.8	13.4	20.4	300	4.5	2.80	3 092.56
9	456.0	13.6	20.6	300	4.5	2.80	2 899.27
10	511.5	14.1	21.0	300	4.5	2.80	2 773.42
11	563.0	14.3	21.3	300	4.5	2.80	2 577.13
12	610.7	13.8	20.6	300	4.5	2.79	2 512.50
13	655.2	14.3	21.1	300	4.5	2.80	2 396.52

利用比热容测定仪测量含沙水的比热容,再采用式(4)计算浑水的比热容。由表 2 可知,浑水的比热容随水体含沙量的增大呈递减趋势。产生这样的结果,主要是由于水体的比热容较大,粉煤灰的比热容较小,当浑水中含沙量增大时其比热容会明显降低,故表 2 中浑水比热容的测量结果与理论相符合。图 3 为含沙量与浑水比热容的关系曲线,本次试验中浑水比热容与含沙量的相关关系为

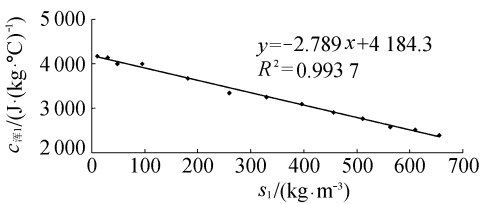


图 3 $c_{\text{浑1}}$ 与 s_1 的关系

Fig. 3 Relationship between c_1 and s_1

$$c_{\text{浑1}} = - 2.82s_1 + 4\,187 \tag{5}$$

式中: $c_{\text{浑1}}$ ——粉煤灰浑水的比热容; s_1 ——含沙量(粉煤灰质量浓度)。

由试验结果可知粉煤灰浑水的比热容与含沙量呈明显的相关关系($R^2=0.993\,7$),因此可以通过测量比热容的方法,利用比热容与含沙量之间的相关关系来确定水体的含沙量。

3.2 塑料沙样试验

表 3 为粒径 0.1 mm 的均匀塑料沙水样浑水比热容试验条件及结果。从表 3 可以看出,含塑料沙浑水的比热容与水体含沙量呈明显的递减关系。图 4 为塑料沙含沙量与比热容之间的关系,可以看出拟合曲线与实测值之间相关性显著,关系式为

$$c_{\text{浑}2} = - 3.92s_2 + 4\,249.9$$

(6)

式中: $c_{\text{浑}2}$ ——含塑料沙浑水的比热容; s_2 ——含沙量(塑料沙质量浓度)。

表 3 含塑料沙浑水比热容试验条件及结果

Table 3 Thermal capacity test of sediment-laden water containing plastic sand

试验组次	塑料沙质量浓度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	结束温度/ $^{\circ}\text{C}$	加热时间/ s	电压/ V	电流/ A	$c_{\text{浑}2}/$ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$)
1	9.91	25.5	31.6	300	4.2	2.40	4 167.43
2	29.20	25.6	31.7	300	4.2	2.40	4 086.51
3	47.83	25.6	31.6	300	4.2	2.40	4 085.07
4	91.67	25.4	31.2	300	4.2	2.40	4 052.77
5	169.23	26.0	31.9	300	4.2	2.40	3 643.55
6	235.71	25.8	32.1	300	4.2	2.40	3 120.24
7	293.33	25.9	31.9	300	4.2	2.40	3 063.80
8	343.75	25.8	31.7	300	4.2	2.40	2 914.84
9	388.24	26.0	31.8	300	4.2	2.40	2 786.28
10	427.78	26.0	31.9	300	4.2	2.40	2 571.92
11	463.16	26.3	32.1	300	4.2	2.40	2 476.70
12	495.00	26.4	32.2	300	4.2	2.40	2 346.34
13	523.81	26.5	32.5	300	4.2	2.40	2 144.66

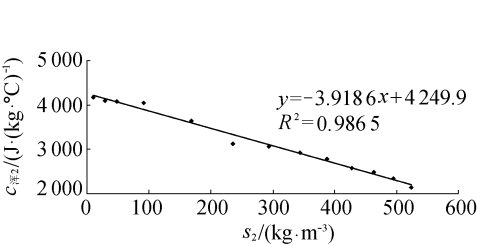


图 4 $c_{\text{浑}2}$ 与 s_2 的关系

Fig. 4 Relationship between c_2 and s_2

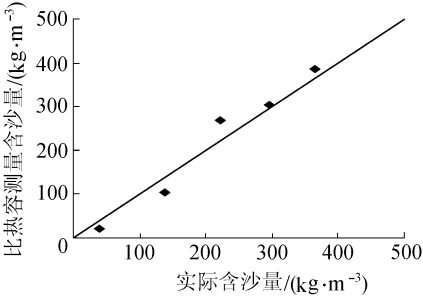


图 5 比热容法测量含沙量与实测含沙量的比较

Fig. 5 Comparison of observed sediment concentration and measured sediment concentration using thermal capacity method

4 比热容方法测量含沙量的应用

表 4 为比热容方法测量含沙量的应用结果。采用的试验沙为粒径 0.015 mm 的均匀粉煤灰,配制含沙量(粉煤灰质量浓度)为 0 ~ 400 kg/m^3 之间的浑水,试验加热时间为 300 s,温度变化范围为 12 ~ 20 $^{\circ}\text{C}$ 。图 5 为比热容方法获得的含沙量与实测含沙量的比较。由表 4、图 5 可以看出:测量值与实际值较接近;水体的含沙量越大则测量值越准确,水体含沙量较小时测量误差相对较大。分析原因,主要由于试验测量浑水比热容过程中存在能量损失,使测量的浑水比热容存在误差,并且含沙量越小时误差越明显。但比热容方法测量含沙量的应用结果也表明,采用热学原理测量水体含沙量的思路是可行的,若能提高浑水比热容的测量精度,则可以采用该方法较准确地测量水体的含沙量。

表 4 比热容方法测量含沙量

Table 4 Measurement of sediment concentration by measuring thermal capacity

试验组次	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	结束温度/ $^{\circ}\text{C}$	加热时间/ s	电压/ V	电流/ A	$c_{\text{浑}1}/$ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$)	比热容测量法 所得含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	实际含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对 误差/%
1	13.0	20.5	300	4.5	2.80	4 124.3	22.2	39.2	43.37
2	12.8	20.0	300	4.5	2.79	3 891.3	104.9	139.0	24.53
3	13.2	20.7	300	4.5	2.80	3 431.5	267.9	220.9	21.28
4	13.1	20.3	300	4.5	2.80	3 328.3	304.5	295.6	3.01
5	12.8	20.0	300	4.5	2.80	3 098.8	385.9	363.8	6.07

5 结 语

基于热学原理,采用试验方法研究了不同含沙浓度水体的比热容,建立了水体含沙量与比热容的相互关系,提出了基于比热容原理测量水体含沙量的思路。结果表明:浑水比热容与水体的含沙量密切相关,呈负线性关系;用比热容法获得悬移质含沙量,即根据特定试验条件下得到的回归方程和现场测得的比热容值,可以得出测点的悬移质含沙量;由于比热容测量精度与测量速度直接影响浑水含沙量测量的效果,因此,设计高精度、快速测量的比热容仪器是基于热力学原理测量含沙量的关键。

参考文献:

- [1] 牛占,周延年,赖世熹. 物理测沙技术的适用性研究[C]//中华人民共和国水利部. 江河泥沙测量文集. 郑州:黄河水利出版社,2000:48-58.
- [2] 中国科学院原子能研究所. 放射性同位素应用知识[M]. 北京:科学出版社,1959:30-35.
- [3] 张训时. 水利电测技术[M]. 北京:清华大学出版社,1993:20-40.
- [4] GORDON H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(10):1631-1636.
- [5] 李四海,恽才兴,唐军武. 河口悬浮泥沙浓度 SeaWiFS 遥感定量模式研究[J]. *海洋学报:中文版*, 2002, 24(2):51-52. (LI Sihai, YUN Caixing, TANG Junwu. A study for the quantitative remote sensing model sediment concentration in estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(2):51-52. (in Chinese))
- [6] 戴茜,单红仙,孟祥梅,等. 基于电导率测定海水悬沙含量试验研究[J]. *海洋学报:中文版*, 2008, 30(5):137-142. (DAI Qian, SHAN Hongxian, MENG Xiangmei, et al. Laboratory of study on suspended sediment content measurement based on electrical conductivity[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(5):137-142. (in Chinese))
- [7] TRAYKOVSKI P, GEYER W R, IRISH J D, et al. The role of wave induced density driven fluid mud flows for cross shelf transport on the Eel River continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20:2113-2140.
- [8] 方圣辉,张加晋. 不同泥沙含量水体光谱特性分析[J]. *测绘信息与工程*, 2007, 32(6):47-49. (FANG Shenghui, ZHANG Jiajin. Spectral property analysis of water suspended sediment concentrations[J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(6):47-49. (in Chinese))
- [9] HOLDAWAY G P, THORNE P D, FLATT D, et al. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19:421-441.
- [10] 熊贵枢,龙毓骞,李兆南. 近十年来泥沙测验技术的进展[C]//中华人民共和国水利部. 江河泥沙测量文集. 郑州:黄河水利出版社,2000:21-38.
- [11] 朱木兰,金海生. 正交曲线坐标系三维全沙数学模型[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2008, 36(4):525-531. (ZHU Mulan, JIN Haisheng. Quasi three dimensional mathematical model of total sediment transport in orthogonal curvilinear coordinates[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2008, 36(4):525-531. (in Chinese))
- [12] 窦银科,秦建敏,常晓敏. 水库大坝水位泥沙沉积量综合测报装置的研究[J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35(6):677-679. (DOU Yinke, Qin Jianmin, CHANG Xiaomin. The research of the digital synthetical device for observing and predicting reservoir dam water level and depositing amount of silt on the basis of the conductive characteristic of water[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(6):677-679. (in Chinese))
- [13] 丁坚,陶爱峰,王昌杰. 珠江口崖门出海航道骤淤分析[J]. *水利水电科技进步*, 2005, 25(6):41-45. (DING Jian, TAO Aifeng, WANG Changjie. Sudden deposition in Yamen waterway at Zhujiang River Estuary[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(6):41-45. (in Chinese))
- [14] 田苏茂,黄忠新,彭勤文,等. LISST 和浊度仪在三峡水库泥沙测报中的应用[J]. *水利水电快报*, 2012(7):77-79. (TIAN Sumao, HUANG Zhongxin, PENG Qinwen, et al. LISST and turbidity in sediment measured for Three Gorges Reservoirs applications[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2012(7):77-79. (in Chinese))
- [15] 张汉雄. 新型组合堰式自动径流泥沙测站的设计与应用[J]. *人民黄河*, 1999(7):29-32. (ZHANG Hanxiong. A kind design and application of sediment measured station for combination weir automatic runoff[J]. *Yellow River*, 1999(7):29-32. (in Chinese))
- [16] LAND J M, KIRBY R, MASSEY J B. Developments in the combined use of acoustic Doppler current profilers and profiling siltmeers for suspended solids monitoring[M]. New York:John Wiley & Sons, 1997:187-196.