

文章编号:1673-9469(2021)03-0075-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.011

矩形片状材料在水中自由沉降规律研究

吴勇^{1,2},侯豪^{1,2},吴思麟^{1,2*},林小蔚^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要: 针对原位覆盖技术在覆盖过程中对底泥扰动的问题,提出一种利用片状土材料作为原位覆盖材料的新方法,并研究了材料在水中沉降的规律。采用堆场淤泥作为材料进行沉降实验,主要关注了材料的沉降速度与其入切角和自身性质之间的关系。结果表明:材料的入切角不会影响材料沉降稳定时的沉降速度;材料沉降稳定时的速度与材料的厚度、密度成正比。

关键词: 底泥污染;原位覆盖;非球体;片状

中图分类号: X52

文献标识码: A

Study on the Free Settlement of Rectangular Sheet Material in Water

WU Yong^{1,2}, HOU Hao^{1,2}, WU Silin^{1,2*}, LIN Xiaowei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: As the “internal source” of pollutants in water, polluted sediment has become a serious hidden danger of water environment for the water that exogenous pollution has been controlled. As a technique to prevent the secondary contamination of sediment, in-situ covering technology is limited in its development due to its disturbance to sediments during the covering process. To solve this problem, a new method using patchy soil as in-situ covering material has been proposed, and the law of material settling in water has been studied. The settlement experiment was carried out by using the silt as the material, and the relationship between the settling velocity of the material, its tangential Angle and its own properties was mainly concerned. The results show that the tangential Angle of the material does not affect the settling velocity of the stable settlement. When the material settlement is stable, the speed is proportional to the thickness and density of the material.

Key words: sediment pollution; in-situ coverage; non-spherical; sheet

通过隔绝外源输入等一系列手段治理污染水体的过程中,发现部分水体在治理后又重新出现污染情况。更进一步的研究发现这是因为底泥中含有大量的污染物,这些污染物在一定情况下会重新释放到水体中,造成二次污染。这部分底泥被称为污染底泥^[1-3]。原位覆盖是一种被用来解决污染底泥的常用技术手段^[4]。原位覆盖法是在污染沉积物上覆盖一层或多层覆盖材料,通过覆盖材料的物理隔绝、化学吸附等原理使得沉积物中污染物释放进水体的量减少甚至不释放的技

术^[5-6]。常用的覆盖材料有砂子、土工织物、混合材料等。使用材料覆盖后,底泥的二次污染问题可以得到一定的控制,且不存在后续的泥浆处理处置问题,具有很好的发展前景。但目前的施工技术一般将覆盖材料倾倒或泵送至目标水域,覆盖材料在沉降至污染底泥表面时具有较大的动量,与底泥接触后导致底泥产生剧烈扰动^[7],从而造成污染物的释放,这也是限制该技术广泛应用的最大问题。因此设计一种在沉降过程中保持较低动能的覆盖材料及施工方法十分必要。同样是

收稿日期:2021-01-08

基金项目:十三五国家科技重大专项(2017ZX07603-003-04)

作者简介:吴勇(1996-),男,江西鄱阳人,硕士研究生,主要从事污染底泥处理技术研究。

* 通讯作者:吴思麟(1992-),男,辽宁瓦房店人,博士,从事环境岩土,废弃泥浆处理、处置及资源化利用等研究。

降水,雪花由于其具有片状结构,在飘落过程中与雨滴相比具有较低的动量。因此将覆盖材料设计成片状结构,代替传统的颗粒状覆盖材料,可能是解决污染底泥原位覆盖过程中产生二次污染问题的技术方案。物体在水中沉降过程是水动力学研究的重要内容,学者已做了大量的计算、实验和模拟工作^[8-10]。人们首先关注球体的沉降规律,这得益于球体在沉降过程中的稳定性,因此球体在水中沉降的规律已经较为完善,不同尺寸不同密度下球体的沉降规律已较为清晰,建立了相对完整且精确的阻力系数标准曲线(C_D-Re)。但是自然界非球形颗粒居多,为了解释一些自然现象,解决一些生产生活中的问题就需要对非球形颗粒的沉降规律进行研究。目前针对非球形物体在液体中运动规律研究主要服务于泥沙输运等问题,流化床反应器、颗粒分离器、分级器、结晶器的设计和运行问题^[11]。现有非球形物体沉降规律主要集中在非球形颗粒的沉降规律研究,这些颗粒的直径多为毫米级甚至更小^[12-14],对于本文提出的这种尺寸较大的片状物体沉降过程鲜有研究,因此片状材料沉降规律需要进一步研究。

片状材料与球体存在许多的不同点,球体是一个全对称的形状,在自由沉降过程中不会出现横向位移,且没有入切角这一概念;而方体片状材料是轴对称形状,其沉降规律应该与其初始姿态有关,同时方体片状材料形状(指厚薄及长宽变化)对沉降应该也会有所影响。因此本文针对片状材料在水中自由沉降规律,尤其是材料最终稳定时的速度如何求解这一问题,开展了大量的片状材料沉降试验,针对片状材料入切角、材料性质对材料沉降影响的规律进行探究,同时给出了求解材料沉降稳定时的速度的参考方法。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

选用太湖堆场淤泥及珍珠岩粉末来制作片状材料,根据国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)测定了太湖堆场淤泥的基本物理性质(表1),珍珠岩粉末密度为 0.525 g/cm^3 。片状材料主要成分为堆场淤泥,珍珠岩粉末的加入用以调节片状材料的密度,得到不同密度的材料。

片状材料的制作首先把一定质量比例的堆场淤泥和珍珠岩粉末混合均匀,得到满足试验要求的密度,随后将混合好的材料放入尺寸固定的模

具得到所需尺寸的片状材料。片状材料的实物图见图1,材料尺寸的示意图见图2。

表1 太湖堆场淤泥基本性质

Tab. 1 Basic properties of silt in Taihu yard

密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	液限 W_L /%	塑限 W_P /%
1.15	70.5	61	25

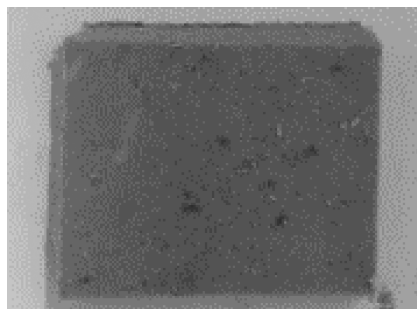


图1 片状材料实物图

Fig. 1 Physical image of sheet material

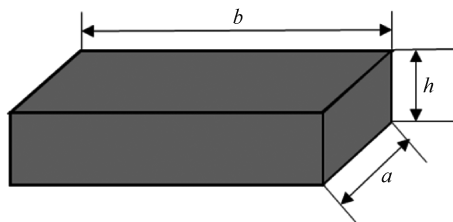


图2 片状材料尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sheet material size

1.2 试验装置

试验在如图3所示装置中进行,装置由沉降水柱及观测记录部分组成。沉降水柱为高2 m、内径0.25 m的圆柱形有机玻璃柱,自水面沿竖直方向每隔10 cm进行刻度标记。试验过程中,有机玻璃柱装水至1.8 m高,水温保持在20℃,随后放入片状材料进行沉降试验。观测记录系统由高速摄像机和数据处理系统构成,高速摄像机记录材料从入水到沉底的过程,处理系统用来处理分析录像并输出相关参数。

1.3 试验方案

试验从入切角、材料密度、材料尺寸三个方面研究片状材料的沉降规律。本文中材料的入切角定义为片状材料最大面积与水平面夹角,见图4。实验表明,这三个因素都会对材料沉降过程产生一定影响,具体的影响通过以下试验方案探究。

探究入切角对材料沉降影响的试验所用材料性质见表2,选取了0°、45°、90°三种入切角进行试验。

用于探究材料密度、材料尺寸对沉降的影响

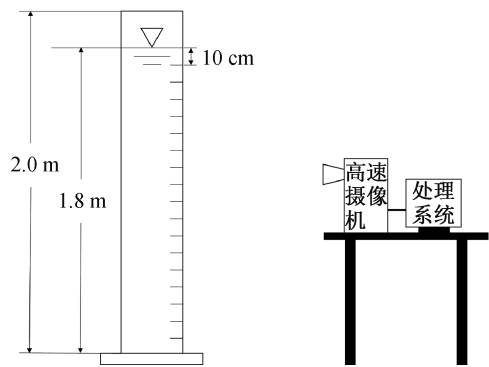


图3 试验装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of test device

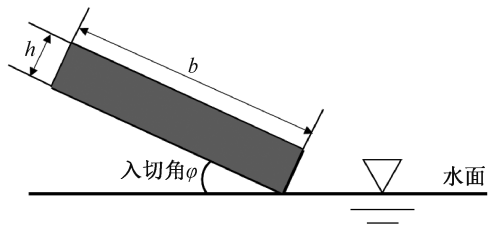


图4 入切角示意图
Fig. 4 Cut-in angle diagram

及分析材料最终沉降速度公式的试验所用材料性质见表3。该部分试验选取了1.10、1.45 g/cm³两种密度用以探究密度对沉降的影响;选取不同尺寸的材料用以探究材料尺寸对沉降的影响。

表2 入切角试验所用材料性质

Tab. 2 Material properties used in the cut-in angle test

入切角/(°)	密度/(g·cm ⁻³)	h/cm	a×b/cm×cm
0			
45	1.45	0.5	3×3
90			

表3 片状材料性质

Tab. 3 Sheet material properties

入切角/(°)	密度/(g·cm ⁻³)	h/cm	a×b/cm×cm
			1×1、1×2、1×3、1×4; 2×2、2×3、2×4; 3×3、3×4、3×5、 4×4、4×5;
0	1.10、1.45	0.5、1.0	

1.4 试验数据处理

实验中需要记录的量为片状材料从水面开始每通过10 cm(即每两个标记之间)的时间 T_i , i 取1到18。由此可以得到材料在每段标记之间的平均速度 ω_i ,材料在沉降到一定时间达到最大速度 ω ,并保持该速度到最后触底。当材料达到最大速度时,重力、阻力和浮力达到平衡,平衡公式为:

$$F_D = F_g - F_b = abhg(\rho_p - \rho_f) \quad (1)$$
其中 F_D 为阻力, F_g 为重力, F_b 为浮力, a 、 b 、 h 为土块尺寸,尺寸示意图见图2, g 为重力加速度,本文取值10 m/s², ρ_p 、 ρ_f 分别为材料密度和水的密度,其中 ρ_f 取值为1.0 g/cm³。阻力的一般公式为 $F_D = \frac{1}{2}C_d\rho_f S\omega^2$,其中 C_d 为阻力系数, S 为投影面积, ω 为最终沉降速度。

2 结果与讨论

2.1 入切角对沉降的影响

在水中运动的物体,其姿态会影响受力状态,进而对运动产生影响。因此在不能受力平衡的姿态下,运动方向也可能发生改变(球体除外)。本文对片状材料入水时的入切角对其沉降过程影响进行了探究。

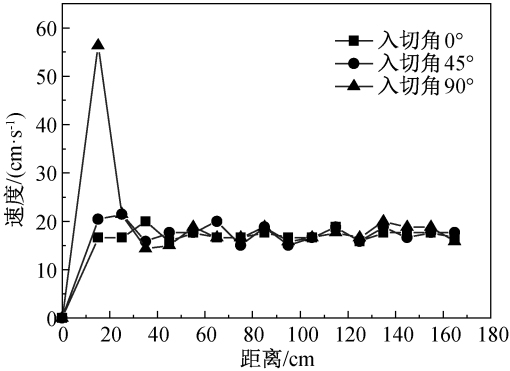


图5 速度随沉降距离变化的关系
Fig. 5 Velocity with the relationship between settlement distance

图5显示了材料以0°、45°、90°入切角入水后沉降速度随沉降距离变化的关系。可以发现,沉降前35 cm三者的速度变化明显不同,入切角越大的实验组加速度越大,距水面20 cm时的速度也越大。这是因为,入水时入切角越大的片状材料,其在竖直方向上的投影面积越小,由阻力公式可知,其他条件相同时其阻力也越小。在重力和浮力不改变的情况下,阻力越小的片状材料在水中受合力越大,加速度也越大。随着沉降的进行,三个实验组的最终稳定沉降速度几乎相同,即入切角并不会对片状材料沉降的影响表现在入水一段距离内,对最终的稳定沉降基本没有影响。

图6—图8显示了材料以三种入切角沉降在开始至一段时间后的位置和姿态。通过分析发现,片状材料入水后,在开始一段时间内运动姿态

不断改变,这种改变均朝着最大面积垂直于重力方向进行,不同入切角的实验组在一段时间后均能够达到相同的状态,即以最大面积垂直重力的方向继续沉降。因此,在其他条件一样的情况下不同入切角的片状材料最终沉降速度相等。

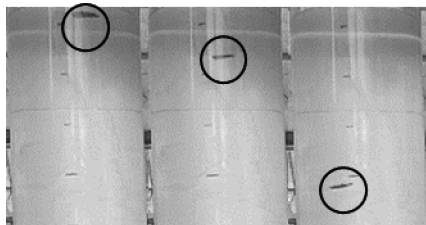


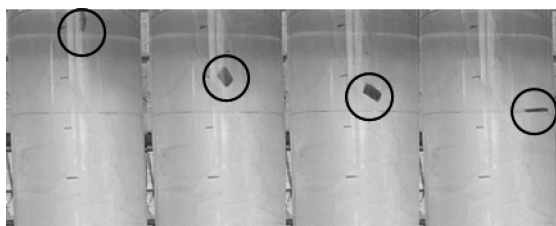
图6 入切角 0° 的沉降过程

Fig. 6 Settlement process with 0° cut-in angle



图7 入切角 45° 的沉降过程

Fig. 7 Settlement process with 45° cut-in angle



注:○中为材料。

图8 入切角 90° 的沉降过程

Fig. 8 Settlement process with 90° cut-in angle

图9显示了入切角为 0°、45°、90° 三种情况下材料沉降达到稳定时所用时间和沉降距离。由图可知,入切角越大,材料沉降达到稳定需要的时间增大,达到稳定时的沉降距离也增大。但即使是入切角为 90°,沉降达到稳定时的时间和距离也很小,时间为 1.5 s,距离不超过 40 cm。即入切角对片状材料的沉降影响有限,施工过程中不同入切角的片状材料最终都能平稳的盖在沉积物表面。

上述试验证明了材料入切角不会影响材料沉降稳定时的速度,同时沉降达到稳定的过程也很短,在后续实验中均采用 0° 入切角进行沉降试验研究。

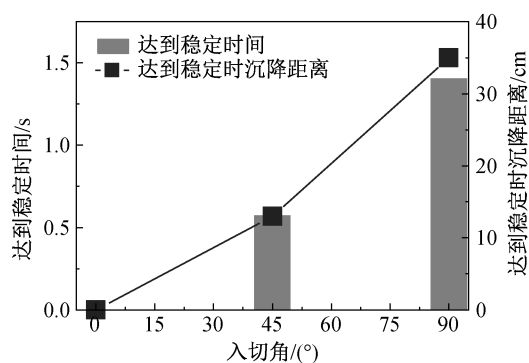


图9 不同入切角达到稳定时间和距离

Fig. 9 Stable time and distance for different entry angles

2.2 材料性质对最终稳定速度的影响

材料的性质也会影响其沉降规律,图10到图13显示了材料最终速度与材料密度、厚度、投影面尺寸之间的关系。

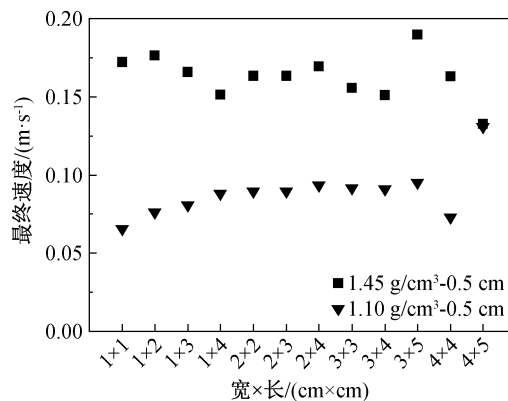


图10 $h=0.5$ cm 最终沉降速度与投影面尺寸关系

Fig. 10 The relationship between the final settlement velocity and the size of the projection surface when $h=0.5$ cm

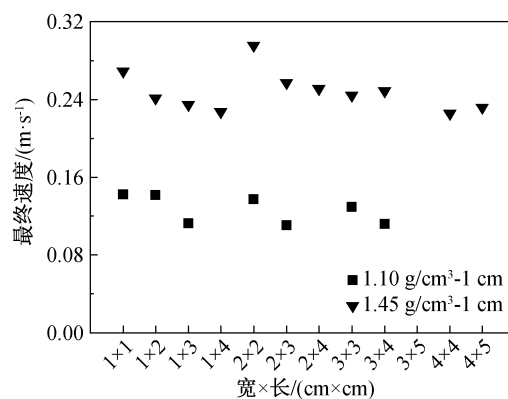


图11 $h=1.0$ cm 最终沉降速度与投影面尺寸关系

Fig. 11 The relationship between the final settlement velocity and the size of the projection surface when $h=1.0$ cm

如图10和图11,其他条件相同的情况下,材料密度越大其最终速度越大。材料密度的增大能够显著地增大最终沉降速度,因为材料密度增加

使材料的重力增加,需要更大的阻力才能平衡向下的力,再根据阻力公式,其中投影面积不变,因此材料会有更大的沉降速度。

如图12和图13,其他条件相同的情况下,材料厚度越大其最终速度越大。材料厚度增加虽然会同时增大重力和浮力,但是两者的差值依然增大,需要更大的阻力平衡,厚度增大也没有改变投影面积,所以材料最终速度也会增大。

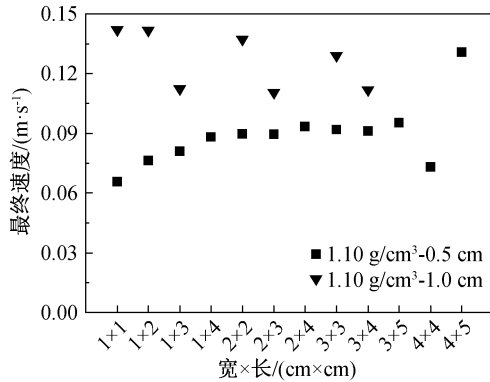


图12 $\rho = 1.10 \text{ g/cm}^3$ 最终沉降速度与投影面尺寸关系

Fig. 12 The relationship between the final settlement velocity and the size of the projection surface when $\rho = 1.10 \text{ g/cm}^3$

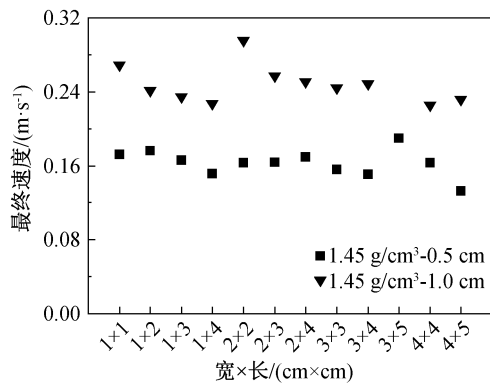


图13 $\rho = 1.45 \text{ g/cm}^3$ 最终沉降速度与投影面尺寸关系

Fig. 13 The relationship between the final settlement velocity and the size of the projection surface when $\rho = 1.45 \text{ g/cm}^3$

分析图10—图13,在固定高度、固定密度的情况下,最终速度随投影面尺寸变化都没有表现出明显的规律。但可以发现,在其他因素固定的条件下,改变材料投影面积,最终沉降速度都在某个值附近上下波动。根据公式(1)可推导出稳定沉降速度 ω 与投影面积 S 之间关系:

$$\omega = \sqrt{\frac{2abhg(\rho_p - \rho_f)}{C_d \rho_f}} \times \frac{1}{S} \quad (2)$$

2.1 部分证明了不论以何种入切角入水的片状材料最终均能以近似最大面积垂直重力的方向稳定

沉降,此时投影面积 S 可认为近似等于 $a \times b$,则公式(2)可以简化为:

$$\omega = \sqrt{\frac{2hg(\rho_p - \rho_f)}{C_d \rho_f}} \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,片状材料的稳定沉降速度与其投影面积无关,也证实了实验的正确性。

2.3 速度的求解

由材料性质与最终沉降速度之间关系的分析,发现并没有明显的规律,因为材料尺寸在变化的同时投影面积和质量是同时在变化的。因此考虑将单位质量速度与材料面积进行分析,绘制图14和图15。

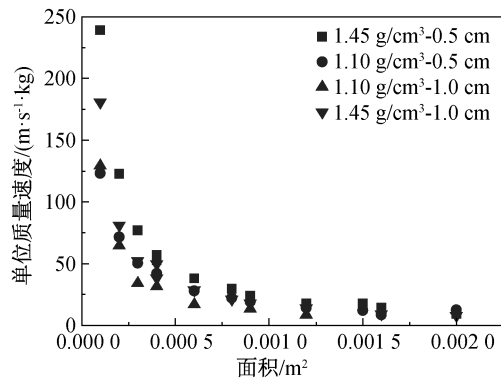


图14 单位质量速度与面积的关系

Fig. 14 The relationship between unit mass speed and area

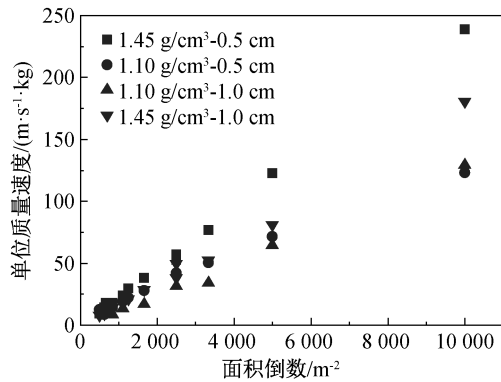


图15 单位质量速度与面积倒数的关系

Fig. 15 The relationship between unit mass velocity and area reciprocal

如图14和图15所示,材料单位质量速度与材料面积成反比例关系,即材料单位质量速度与材料面积的倒数是成正比的。根据这一结果可以得出公式: $\frac{\omega}{abh\rho_p} = \frac{k}{ab}$, 从而得到材料最终沉降速度的显示方程 $\omega = kh\rho_p$ 。根据公式,材料最终沉降速度与材料厚度和材料密度成正比,而 k 是关于材料

密度和厚度的一个常数,即说明实验中这种长方体片状材料厚度和密度确定的条件下,改变它的投影尺寸不会改变其最终速度。

对实验中的四组数据进行正比例函数拟合,得到四个函数分别为 $y=0.0237x$, $y=0.01338x$, $y=0.01261x$, $y=0.01751x$, R^2 都大于 0.98, 分别对应土块厚度、密度为 $(1.45\text{ g/cm}^3-0.5\text{ cm})$ 、 $(1.10\text{ g/cm}^3-0.5\text{ cm})$ 、 $(1.10\text{ g/cm}^3-1.0\text{ cm})$ 、 $(1.45\text{ g/cm}^3-1.0\text{ cm})$ 。可以发现密度越大斜率越大,厚度越小斜率越大。因此当使用已知的厚度和密度土块需通过至少一组实验就可以预测该密度、厚度下土块在其余尺寸下的稳定沉降速度。

3 结论

1)材料入切角的不同会导致材料向着使材料最大面积的面与重力方向成直角的方向滑移,滑移的距离与入切角的大小、材料性质有关;但是材料入切角不同不会改变材料最终沉降的速度和方向。

2)材料最终沉降速度随着密度增加明显增加,随着厚度增加明显增加。

3)最终沉降速度的显示方程为: $\omega = khp_p$, k 是一个与材料厚度和密度有关的常数,可以通过一组本文中进行的入切角为 0° 的沉降试验进行确定。

参考文献:

- [1]高丽,周健民.磷在富营养化湖泊沉积物-水界面的循环[J].土壤通报,2004,35(4):512-515.
- [2]KLEEBERG A, DUDEI G E. Changes in Extent of Phosphorus Release in a Shallow Lake (Lake GroDer Müggelsee, Germany, Berlin) Due to Climatic Factors and Load [J]. Marine Geology, 139 (1997): 61-75.
- [3]回进,张凤君,李亚东,等.水库底泥污染物释放模拟研究[J].辽宁科技大学学报,2011,34(5):486-489.
- [4]胡小贞,金相灿,卢少勇,等.湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨[J].中国工程科学,2009,11(9):28-33.
- [5]唐艳,胡小贞,卢少勇.污染底泥原位覆盖技术综述[J].生态学杂志,2007,26(7):1125-1128.
- [6]USEPA. Use of Amendments for In Situ Remediation at Superfund Sediment Sites [J]. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2013, 4.
- [7]KAREN A Merritt, JASON Conder, VICTORIA Kirtay, et al. Review of Thin-Layer Placement Applications to Enhance Natural Recovery of Contaminated Sediment [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2010, 6(4): 749-760.
- [8]YANG Hongli, FAN Minqiang, LIU Airong, et al. General Formulas for Drag Coefficient and Settling Velocity of Sphere Based on Theoretical Law [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25: 219-223.
- [9]BREAKEY D E S, FARID Vaezi G, MASLIYAH J H, et al. Side-view-only Determination of Drag Coefficient and Settling Velocity for Non-spherical Particles [J]. Powder Technology, 2018, 339: 182-191.
- [10]BROWN Phillip P, LAWLER Desmond F. Sphere Drag and Settling Velocity Revisited [J]. Environ. Eng, 2003, 129: 222-231.
- [11]CLIFT R, GRACE J R, WEBBER M E. Bubbles, Drops and Particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [12]ASHISH Goenka, KAMALENDU Bhunia, SATISH Chandra Shukla, et al. Effect of Particle Shape on Settling Characteristics [C]//Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010), Dec 2010, NML Jamshedpur, India. 1262-1268.
- [13]MILOSLAV Hartman, OTAKAR Trnka, KAREL Svoboda. Free Settling of Nonspherical Particles [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1994, 33: 1979-1983.
- [14]JOHN D Hottovy, NICHOLAS D Sylvester. Drag Coefficients for Irregularly Shaped Particles [J]. American Chemical Society, 2004, 139: 21-32.

(责任编辑 王利君)