

# 淤泥絮凝脱水试验研究及水铰链假说的提出

王党伟<sup>1</sup>, 杨国录<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 武汉大学 污淤泥研究中心, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 针对江河湖泊清淤产生的高含水率淤泥的絮凝脱水问题进行了试验研究, 试验结果表明: 絮凝剂加入比例与淤泥初始含水量之间存在一定的联系, 初始含水量越高, 絮凝剂加入比例的下临界值越低, 且两者之间呈非线性关系。据此试验现象和结果, 并在已有研究的基础上提出了水铰链假说, 阐述了淤泥颗粒的结合过程和原理, 解析了淤泥在高含水率下仍保持稳定的原因, 通过水铰链密度解释了淤泥难以自然脱水的原因以及采用絮凝剂时淤泥含水率和絮凝剂下临界的关系, 进一步说明了淤泥颗粒在絮凝过程中絮团的形成过程。

**关键词:** 絮凝剂; 水铰链; 淤泥脱水

**中图分类号:** TV141+.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2011)04-0069-05

泥水环境健康的关键在于雨污分流、截污减排、水质修复和环保清淤, 其中雨污分流和截污减排是泥水环境健康的可持续决策性措施, 而水质修复和环保清淤是泥水环境健康快速发展的根本, 其主体内容包括底泥的清除和底泥的处理与处置。就底泥清淤而言, 目前国内挖泥船在清淤中得到的淤泥含水量通常在80%以上, 多为液限含水量的1.2~2.0倍, 这样大的含水量在通过管道输送到指定位置时, 能耗大且效率低<sup>[1]</sup>; 自然状态下淤泥中细颗粒泥沙难以形成大的絮团<sup>[2-3]</sup>, 如果不对淤泥体系中极细颗粒的淤泥内部特性进行调理, 营造脱水环境, 淤泥的自然或者机械脱水都是极度困难的<sup>[4]</sup>。因此, 一方面必须深入研究泥水环境系统中的絮凝机理和沉降特性; 另一方面, 通过物理化学方法研究絮凝尺度、沉降效率以及泥水分离的可能性。目前, 国内外对于淤泥脱水研究还处于试验观察阶段<sup>[5-7]</sup>, 大量的试验结果仍未得到合理的理论解释。近年来的研究热点集中在淤泥固化时水分转化机理<sup>[8-9]</sup>和絮凝剂絮凝特性<sup>[10-11]</sup>等方面, 对于淤泥絮凝脱水时的淤泥颗粒和水分子变化状态以及淤泥在高含水率情况下仍保持稳定的原因, 国内外还很少有文献报道。

淤泥中自由水最多, 结合水最少, 但并非一成不变, 与淤泥含水率有关<sup>[11]</sup>。当淤泥含水率较大时, 固体(含胶质)颗粒相距较远, 此时仅有颗粒残缺毛细结合水, 故淤泥以自由水为主, 其次为表面吸附水, 毛细管水和结合水; 随着含水量减少, 自由水被完全脱离, 主要存在表面吸附水和毛细结合水, 内部结合水; 淤泥含水量继续减少, 弱结合水和颗粒间的毛细结合水被脱离, 主要有强结合水和颗粒残缺毛细结合水, 内部结合水; 尽管淤泥内部水分分类和状态已较清楚, 但淤泥在高含水率情况下仍能保持稳定的原因, 以及淤泥脱水过程中淤泥颗粒与水分子相互作用原理, 本文将通过试验进行探讨。

## 1 淤泥絮凝脱水试验

### 1.1 试验材料

**1.1.1 淤泥来源** 本试验淤泥来自武汉市南湖清淤后所产生的淤泥, 通过在水中筛分后取其中粒径小

收稿日期: 2011-07-10

基金项目: 水利部公益性行业专项(200901014); 中国水利水电科学研究院科研专项经费(泥集1130)

作者简介: 王党伟(1982-), 男, 陕西乾县人, 工程师, 博士, 主要从事河流泥沙基本理论及数值模拟方面研究。

E-mail: wangku-03@163.com

于0.1 mm的淤泥进行试验研究,这部分淤泥在自然状态下沉降脱水存在极大的困难.淤泥颗粒级配为:所有颗粒粒径均小于0.100 mm,其中小于0.069 mm的占92.9%,小于0.047 mm的占78.0%,小于0.038 mm的占72.3%,小于0.027 mm的占60.9%,小于0.014 mm的占36.9%,小于0.006 mm的占1.5%,小于0.004 mm的占1.1%,小于0.003 mm的占0.8%.

**1.1.2 试验器材** 试验分别在1 000 mL的量筒中和高1 m直径0.37 m的有机玻璃筒中进行.采用电子天平称量絮凝剂,精度为0.1 mg,在250 mL烧杯中配制絮凝剂(PAM)溶液.采用移液管法测量加入絮凝剂前后的颗粒级配和沉降速度.

## 1.2 试验过程

絮凝试验主要是以淤泥中的含水量为参考,比较分析不同含水量淤泥沉降速度与加入絮凝剂比例之间的关系.试验过程为:(1)将筛选过后的淤泥按照95%,90%和80%的含水量(体积比)进行配置,絮凝剂按照1:1 000(质量比)进行稀释;(2)对各组不同含水量的淤泥分别加入一定量的絮凝剂,充分搅拌均匀后,对比不同含水量的淤泥絮凝状态与絮凝剂加入量之间的关系.

## 2 试验结果分析

在一定含水量的淤泥中按照不同的比例加入絮凝剂,并通过水析法测定絮凝后的絮团粒径,测定结果如图1所示(图中絮凝剂加入量单位为1/10 000,按照稀释前絮凝剂的质量与泥水中固体颗粒质量之比).

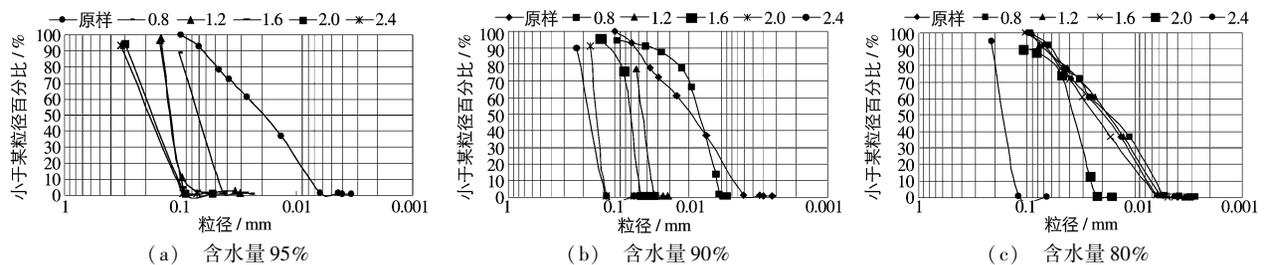


图1 不同含水量淤泥絮凝状态与絮凝剂加入量之间的关系

Fig.1 Relationship between proportion of flocculant and water content in sludge

从图1可见,相同含水量的淤泥中,在一定的剂量(絮凝剂加入比例)范围之内,随着絮凝剂加入量的增加,絮团颗粒的当量粒径呈增大趋势,且对于一定含水量的淤泥存在特定的上下临界剂量,当加入比例小于下临界值时,淤泥不发生絮凝,大于此临界值后,明显的絮团才会出现,当絮凝剂加入量大于上临界值时,絮体粒径不再增大,高建磊等人采用多种絮凝剂研究污泥脱水性能时也证实了絮凝剂加入量上临界值的存在<sup>[12]</sup>.

同时经比较也可看出,不同的淤泥含水量对于絮凝剂的加入比例有明显影响.初始含水量为95%的淤泥中絮凝剂加入的下临界值为0.8,而初始含水量为90%和80%的淤泥中相应的絮凝剂加入的下临界值分别为1.2和2.0.由此可见,絮凝剂的加入比例的下临界值与淤泥初始含水量呈非线性反比关系.通过大量试验得到淤泥初始含水量与絮凝剂下临界加入量的关系如图2所示.

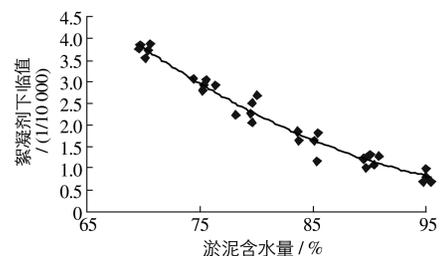


图2 淤泥含水量与絮凝剂最佳加入量关系

Fig.2 Relationship between the optimal proportion of flocculant and water content

## 3 水铰链假说

### 3.1 水铰链假说的提出

从以上试验中可以得出一个重要的结论:对于一定浓度的淤泥,絮凝剂加入比例存在一个下临界值,超

过这个值才能出现絮凝现象,且这个下临界值与淤泥的含水量成反比.小于下临界剂量的这部分絮凝剂既然没有产生絮凝作用,那么必然被其他的力或者结构所消耗,由此本文设想提出水铰链假说,即淤泥中颗粒之间并非相互独立,而是以一定的概率通过水铰链联系在一起(见图3).

极性水分子在固体颗粒水化膜周围发生定向排列形成链状体臂,相邻颗粒的链状体臂连接将颗粒结合在一起.由于此种假设下水分子的排列呈链条状,因此被称为水铰链假说.在水铰链的作用下,不同淤泥颗粒相互靠近、链接,多个方向水铰链的形成使淤泥逐渐呈现稳定状态,并使淤泥在自然状态下脱水产生困难.

通过水铰链假说的设想,进一步可以得到水铰链的存在状态如下:淤泥处于高含水量状态时,淤泥颗粒表面吸附水分子和内部结合水分子处于较为自由状态,相互不接触较少,溶质颗粒相距较远,颗粒运动较为自由,相互影响较小,水铰链在颗粒间不易形成,即使形成,其结合也较弱,容易被破坏(见图4).

随着淤泥含水量降低,单位水体中淤泥颗粒数量增加,部分弱吸附结合水区域水分子和颗粒间自由水分子逐渐从不接触变化到接触状态,极性水分子围绕着离子发生定向排列,定向链状体臂产生,并在电荷力作用下发生连接,形成大量水铰链.溶质颗粒相距仍较远,但由于水铰链的产生,两颗粒形成一个整体,淤泥颗粒开始相互影响,并且影响程度随着含水率的降低而逐渐增加(图5).

### 3.2 水铰链假说对试验现象的解释

**3.2.1 下临界剂量的存在** 从水铰链假说可得,淤泥颗粒间存在一定量的水铰链,因而限制了淤泥中部分水分的脱离,使原始淤泥脱水较难.假如加入絮凝剂后,由于新的絮团要形成,因而水铰链必然先要受到破坏,而这部分破坏力必然来自絮凝剂,因而在这一过程中絮凝剂被消耗而并没有产生絮凝现象.直到水铰链的破坏过程完成,再加入絮凝剂才会出现絮团,在试验过程则表现为絮凝剂的加入比例存在特定的下临界值.

**3.2.2 下临界剂量与含水量的关系** 从图3可见,水铰链的数量和强度与单位水体中的固体颗粒数量成正比,假设单位水体中存在淤泥固体颗粒数为  $n$ ,则单位水体中水铰链数量  $\rho$  为

$$\rho = \sum_{i=1}^n C_i^1 p_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i p_{ij} \quad (1)$$

式中:  $p_{ij}$  为淤泥颗粒间通过水铰链结合的概率,与单位水体中存在淤泥固体颗粒数  $n$  有关.

从式(1)可见,当淤泥级配确定时,淤泥中含水量越大,单位体积浑水中所含颗粒数量越多,则形成水铰链的数量相应增大,且成非线性关系.从而在试验中表现为图2所示的絮凝剂加入量下限随淤泥中含水量减小而非线性上升的趋势.

本文中由于试验采用的淤泥级配已确定,因而可将淤泥含水量与加入絮凝剂比例直接联系起来.但通过对式(1)的分析可预期,对于不同级配或原始颗粒粒径的淤泥,即使在相同初始含水量状态下,其需加入的絮凝剂比例的下临界值也会呈现一定的差别;在水铰链起作用的范围内(即颗粒运动受到水铰链一定的束

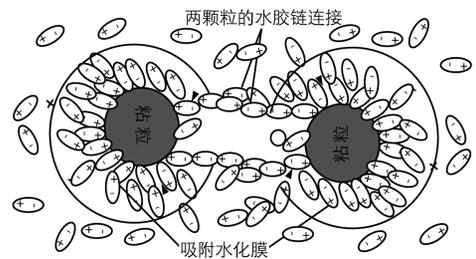


图3 颗粒间水铰链

Fig. 3 Hydrogel chain

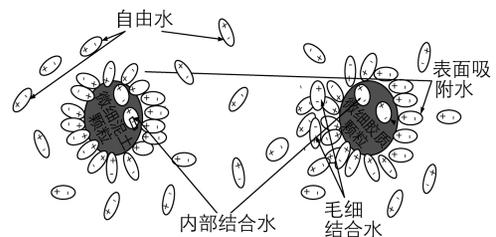


图4 高含水率时水分子状态

Fig. 4 Status of water molecules in sludge with high water content

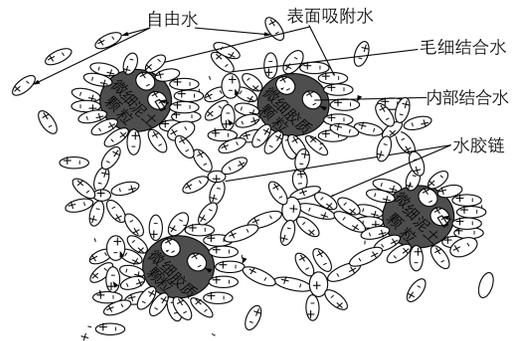


图5 多颗粒的平面水分子状态

Fig. 5 Hydrogel chains among multiparticles

缚),对于较细颗粒的淤泥,与相同含水量下较粗颗粒的淤泥相比,产生絮凝所需加入的絮凝剂比例将更大,关于这一点将在进一步的试验中进行检验.

## 4 结 语

通过试验研究絮凝剂加入量与淤泥颗粒絮凝状态的关系,分析试验结果并提出水铰链假说,对于淤泥的絮凝和脱水过程给出了较为合理的解释,得出以下主要结论:

(1)试验发现对于特定级配、一定含水量的淤泥存在特定的上下临界剂量和最佳剂量,当加入絮凝剂比例小于下临界值时,无絮凝现象出现;当絮凝剂加入量超过下临界值时,出现明显的絮凝现象,且在一定的加入比例范围内,絮体直径随着絮凝剂加入量的增加而增大;当絮凝剂加入量超过上临界剂量,淤泥絮凝效率不再增加.

(2)絮凝剂加入比例下临界值与淤泥初始含水量成反比,且两者呈现非线性的关系.

(3)通过对试验结果的分析,尤其是对絮凝剂加入下临界值与含水量关系的分析提出淤泥中颗粒之间存在水铰链的假设,用水铰链假说较为合理地解释了絮凝剂下临界值的存在及其与含水量之间的关系等试验现象,由此说明了水铰链假说的合理性.

(4)水铰链假说是对淤泥絮凝脱水过程中水分存在状态和转化的进一步探讨,为淤泥絮凝脱水研究提供了一种新思路.

## 参 考 文 献:

- [1] 刘立新,黄鹤鸣. 长江“百船工程”船舶选型研究[J]. 人民长江, 1999, 30(8): 37-38. (LIU Li-xin, HUANG He-ming. Type selection of dredging craft for Yangtze river channel harnessment[J]. Yangtze River, 1999, 30(8): 37-38. (in Chinese))
- [2] 王党伟,杨国录,余明辉. 静水中粘性细颗粒泥沙絮凝临界粒径的确定及其影响因素分析[J]. 泥沙研究, 2009(1): 74-80. (WANG Dang-wei, YANG Guo-lu, YU Ming-hui. Method to determine the maximal diameter of fine sediment aggregation and influence factors analysis[J]. Journal of Sediment Research, 2009(1): 74-80. (in Chinese))
- [3] 杨铁笙,熊祥忠,詹秀玲,等. 粘性细颗粒泥沙絮凝研究概述[J]. 水利水运工程学报, 2003(2): 65-77. (YANG Tie-sheng, XIONG Xiang-zhong, ZHAN Xiu-ling, et al. On flocculation of cohesive fine sediment [J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(2): 65-77. (in Chinese))
- [4] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (ZHANG Chun-lei. Study of dredged sediments solidification mechanism based on water transfer model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [5] 刘林双,杨国录,王党伟. 絮凝剂比例以及淤泥浓度对淤泥脱水速率的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 57-59. (LIU Lin-shuang, YANG Guo-lu, WANG Dang-wei. Effects of silt density and flocculent proportion on flocculent silt dehydration[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(4): 57-59. (in Chinese))
- [6] BESRA L, SENGUPTA D K, ROY S K, et al. Studies of flocculation and dewatering of kaolin suspensions by anionic polyacrylamide flocculants in the presence of some surfactants[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 66: 1-28.
- [7] GAO J L, LUAN Y X, WU J P. Sullage dewatering property in municipal wastewater treatment plant[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31: 108-111.
- [8] 杨云芳,陈萍,施萍萍. 化学固化对淤泥颗粒粒径及含水率影响的试验研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(1): 38-40. (YANG Yun-fang, CHEN Ping, SHI Ping-ping. Experimental study on the influence on size distribution and water content of chemical solidified dredged sediment[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(1): 38-40. (in Chinese))
- [9] 张跃军,黄娟凤,周莉,等. 不同离子性质絮凝剂在淤泥脱水中的脱水作用特征[J]. 精细化工, 2007, 20(9): 903-909. (ZHANG Yue-jun, HUANG Feng-juan, ZHOU Li, et al. Dehydration characteristics of flocculants with different ionic properties and molecular weights in the processes of sludge dehydration[J]. Fine Chemicals, 2007, 20(9): 903-909. (in Chinese))
- [10] 何晶晶. 城市污泥处理与利用[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (HE Pin-jing. Treatment and disposal of municipal sewage [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))

- [11] 刘启贞,李九发,李为华,等.  $AlCl_3$ 、 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$  和腐殖酸对高浊度体系细颗粒泥沙絮凝的影响[J]. 泥沙研究, 2006, 6: 18-23. (LIU Qi-zhen, LI Jiu-fa, LI Wei-hua, et al. Effects of  $AlCl_3$ ,  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$  and humus on the flocculation of fine sediments in the high turbid system of the Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2006, 6: 18-23. (in Chinese))
- [12] 高健磊,闫怡新,吴建平,等. 城市污水处理厂污泥脱水性能研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 108-111. (GAO Jian-lei, YAN Yi-xin, WU Jian-ping, et al. Sludge dewatering property in municipal wastewater treatment plant[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 108-111. (in Chinese))

## Research on hydrogel chain theory in sillage dehydrating by flocculating

WANG Dang-wei<sup>1</sup>, YANG Guo-lu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Sewage Sludge & Silt Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aiming at the flocculation and dehydration of sillage in high moisture content, an experiment is executed and it is found that the proportion of flocculant added into the sillage is related to moisture content of the sillage and the least proportion of flocculant decreases when the water content of the sillage gets higher and they are in non-linear inverse proportion. According to the results of the experiment, a new theory named water molecule chain is proposed based on the existing studies. By this theory the combining process of sillage grain and the reason of sillage keeping steady in high moisture content are explained. All these show that the theory of water molecule chain put forward in this paper is reasonable and can be used in research on dehydration of sillage.

**Key words:** sludge; hydrogel chain; dehydration

### 水利部“948”项目“化学追踪方法及污染源模拟集成技术”通过验收

2011年8月30日,南京水利科学研究院水文水资源所和长江委水保所共同完成的引进国外先进技术项目(简称“948”项目)“化学追踪方法及污染源模拟集成技术”在南京通过了水利部“948”项目管理办公室组织的验收,来自水利部科技推广中心、江苏省水利厅、南京大学、河海大学、教育部湖泊重点实验室、污染控制资源化研究国家重点实验室等单位的专家组成的验收专家组认为该项目全面完成了任务书规定的内容,达到了考核指标要求,一致同意通过验收。

验收专家认为:该项目引进了化学追踪仪、ADP声学多普勒流速测定仪、便携式毒性检测仪和多参数水质监测仪等设备以及污染源模拟集成模型软件包;在技术引进的基础上,开展了CST三维荧光示踪技术应用研究,实现了非点源污染来源的成功识别;进行了BASIN系统二次开发,并以嫩江那金河小流域为示范区,建立了污染源数据库,搭建了污染源模拟集成系统平台。该技术在非点源污染控制技术领域提出了新的思路和方法,能够实现流域非点源污染物来源的追踪鉴别和定量模拟,先进性明显,推广应用前景广阔。

摘自南京水利科学研究院网站