

文章编号: 1001-6791(2001)04-0445-05

$AlCl_3$ 对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响*

陈洪松, 邵明安

中国科学院
(水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)
水 利 部

摘要: 铝类絮凝剂对细颗粒泥沙絮凝沉降有重要作用, 常应用于浑水澄清、农业污水处理等研究中。在 $AlCl_3$ 浓度为 $0 \sim 1.7 \text{ mmol/L}$, 泥沙浓度为 10 g/L 时, 用吸管法研究了 $AlCl_3$ 对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响, 结果表明: 在液面下同一深度, 泥沙浓度随时间呈指数衰减; 悬液经多次搅拌后再沉降, 其沉速减缓; 当 $AlCl_3$ 浓度为 $0.9 \sim 1.7 \text{ mmol/L}$ 时, 出现明显的清浑水交界面, 交界面随时间等速下降, 平均沉速为 4.756 cm/min , 对应的絮团平均粒径为 0.0315 mm ; 土土絮凝临界粒径为 0.027 mm 。

关键词: $AlCl_3$; 细颗粒泥沙; 絮凝沉降; 浑水澄清

中图分类号: TV 142; S 157 **文献标识码:** A

黄土高原是我国, 也是世界上水土流失最严重的地区。强烈的水土流失不仅造成土壤养分大量流失, 导致土壤退化、土地生产力降低, 而且还带来了一系列的农业和生态环境问题: 如泥沙沉降淤积河道, 增加洪涝灾害发生频率; 浑水灌溉、饮用, 增加投资成本; 土壤中大部分农用化合物随径流及侵蚀泥沙迁入水体, 引起水体富营养化或污染; 大量污染物以细颗粒泥沙为载体在水中不断迁移转化, 增加治理的难度等^[1~4], 严重制约了该地区农业和经济的可持续发展。

给水和废(污)水处理中, 常用铝系和铁系混凝剂为代表的无机高分子类絮凝剂来絮凝沉降细颗粒泥沙及其吸附的污染物, $AlCl_3$ 是最普遍采用的无机絮凝剂之一^[5]。过去在水处理研究中, 曾认为水中高含量的生物毒性铝主要是由于使用铝系絮凝剂引起的, 从而限制了铝系絮凝剂的应用。近来研究表明, 自来水中高含量高生化活性单体形态铝主要是由于使用铝锅等铝制器皿进行二次加工过程(如煮沸)所造成的^[6], 这必将进一步促进铝系絮凝剂在水处理中的应用。最近, 芬兰农业研究中心就成功地利用氢氧化铝聚合物絮凝沉降土壤颗粒和磷, 从而达到了净化农业废水、防治非点源污染的目的, 每公斤氢氧化铝聚合物可净化 $10 \sim 30 \text{ m}^3$ 农用废水^[7]。随着人口—资源—粮食—环境问题的日益尖锐, 如何有效防治水土流失以及由此产生的泥沙问题就显得越来越迫切。本文以天然细颗粒泥沙(土)为研究对象, 探讨 $AlCl_3$ 对细颗粒泥沙静水絮凝及沉降特性的影响, 以期推动铝系絮凝剂在浑水澄清、农业污水处理等水处理研究中的应用。

* 收稿日期: 2000-08-21; 修订日期: 2000-10-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-411); 国家自然科学基金项目(59879026)资助。

作者简介: 陈洪松(1973-), 男, 湖北通山人, 在读博士生, 主要从事土壤物理与水土保持等研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试沙样采自垆土耕层(0~20 cm),剔除根系、风干后过0.1 mm筛,装袋备用。垆土粘土矿物以伊利石为主,有机质含量为11.8 g/kg, CaCO₃含量为92.5 g/kg,阳离子交换量为8.61 cmol/kg,泥沙吸湿含水量为2.44%。

1.2 试验方法

为了不影响土壤的化学性质,将沙样10.000 g置于250 mL高筒烧杯中去离子水浸泡过夜(土水比约为1:10),采用XL2005-300型超声波(220kHz,50W)振荡分散。对比超声分散与加(NaPO₃)₆分散^[8]的结果后发现,超声振荡分散20min即可获得满意的效果(表1)。

表1 垆土几种分散方法对比

Table 1. Comparisons of several dispersing methods for loess soil

分散方法	颗粒级配/%				
	<0.1 mm	<0.05 mm	<0.01 mm	<0.005 mm	<0.002 mm
加(NaPO ₃) ₆ 煮沸分散	100	99.0	49.1	37.4	27.8
超声 20 min	100	98.3	46.3	35.9	24.3
分散 30 min	100	98.6	47.4	36.2	25.6
分散 40 min	100	98.8	48.0	36.7	25.8

试验在高40 cm、内径6 cm的1000 mL量筒中进行,泥沙浓度用吸管法测定^[8]。AlCl₃(分析纯,AlCl₃·6H₂O)浓度为0~1.7 mmol/L,泥沙初始浓度为10 g/L,取样深度为液面下20 cm。AlCl₃浓度为0~0.1 mmol/L时,取样时间分别间隔0、5、10、20、30、40、40、60、60 min,共265 min; AlCl₃浓度为0.3~1.7 mmol/L时,取样时间分别间隔0、1、3、5、7、10、15、20、40 min,共101 min。沙样超声分散冷却后,再与一定浓度AlCl₃溶液混合,使液面与1000 mL刻度线齐平。然后先用搅拌器将整个悬液剧烈搅拌(触底)10 s,再上下匀速搅拌1 min,使泥沙分布均匀。停止搅拌的同时,立即用20 mL吸管按规定时间取样。含沙量用烘干称重法测定,所得结果换算为泥沙初始浓度的相对值,相当于小于某粒径的重量百分比。温度控制在15℃,最大温差<±1℃。每次试验重复三次。

2 结果与分析

2.1 细颗粒泥沙絮凝沉降特性

AlCl₃浓度为0~1.7 mmol/L,泥沙初始浓度为10 g/L时,液面下20 cm处取样的试验结果见图1。由图1可知,泥沙浓度开始时下降较快,随后逐渐趋于平缓。AlCl₃浓度越大,浑液澄清越快。当AlCl₃浓度为0~0.1 mmol/L时,浑液265 min后还未澄清;而当AlCl₃浓度为0.3~1.7 mmol/L时,浑液26 min后就基本澄清(泥沙相对浓度<5%)。

为了说明细颗粒泥沙的絮凝沉降特性,以泥沙相对浓度为纵坐标,沉降时间为横坐标,在

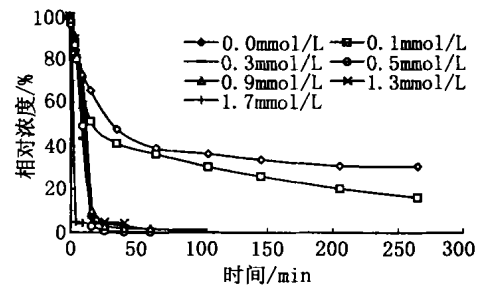


图1 AlCl₃对泥沙相对浓度随时间变化规律的影响

Fig.1 Effects of AlCl₃ on the change of relative sediment concentration with time

半对数纸上所得曲线如图 2 所示。由图 2 可知，细颗粒泥沙沉降可分为两个阶段：分选沉降段和絮凝沉降段。每一阶段都近似为一条直线，即含沙浓度随时间基本呈指数衰减。0~4min 时，AlCl₃ 对细颗粒泥沙沉降影响很小，此时泥沙以分选沉降为主；随后，AlCl₃ 浓度越大，泥沙浓度衰减越快，此时泥沙以絮凝沉降为主。在絮凝沉降段，泥沙相对浓度随时间的变化出现折线，表明较粗颗粒沉降后，沉降逐渐减缓。在试验中还发现，当悬液多次搅拌—沉降—搅拌后再测量，其沉降速度明显变慢。这表明，多次搅拌后，电解质对细颗粒泥沙絮凝沉降的作用逐渐减弱，以至细颗粒泥沙絮凝沉降速度减缓。AlCl₃ 浓度为 0.9mmol/L 时的试验结果见图 3。

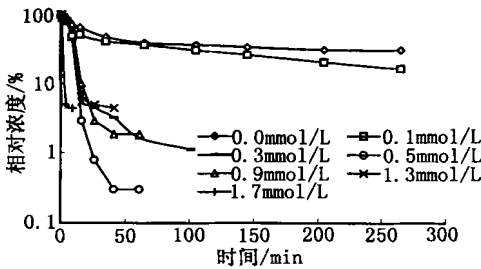


图 2 细颗粒泥沙絮凝沉降特性

Fig.2 Flocculation and settling properties of fine sediment

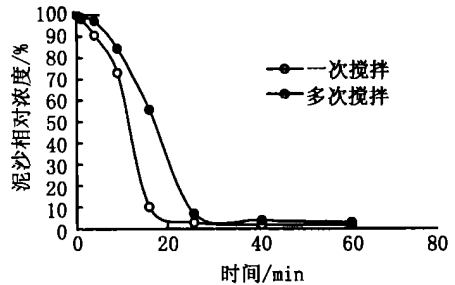


图 3 搅拌对泥沙絮凝沉降的影响

Fig.3 Effects of agitation on sediment flocculation and settling

2.2 清浑水交界面

清浑水交界面的形成与泥沙初始浓度、泥沙粒度、电解质浓度有关。当絮凝发育使絮团的直径趋于相同的极限值时，出现清浑水交界面。此时，悬液沉降曲线由四段组成：加速段、等速段、过渡段和压缩段^[9]。当 AlCl₃ 浓度大于 0.9mmol/L 时，已出现明显的清浑水交界面。当悬液沉降 30s 后，立即在量筒外壁记录清浑水交界面的位置，并逐步观测清浑水交界面随时间的变化过程。由于观测手段的限制，只观测了等速段清浑水交界面随时间的变化情况(图 4)。由图 4 可知，等速段清浑水交界面随时间的变化符合线性关系(表 2)。AlCl₃ 浓度为 0.9、1.3、1.7mmol/L 时，细颗粒泥沙平均沉降分别为 4.115、4.751、5.401cm/min。显然，AlCl₃ 浓度越大，清浑水交界面沉降越快。

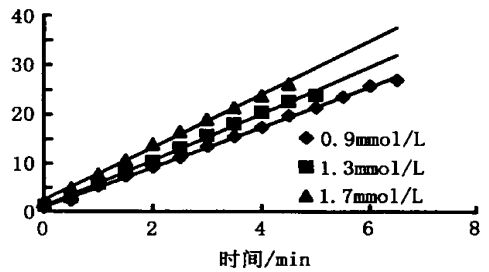


图 4 清浑水交界面随时间的变化规律

Fig.4 The change of the interface with time

当悬液呈清浑水交界面等速沉降时，沉速表达式为^[9]

$$v = (1 - C_v) (\rho_s - \rho_w) g d^2 / (18 \mu_m) \tag{1}$$

式中 v 为浑液面沉速； C_v 为体积比含沙浓度； ρ_s 为絮团密度，小于泥沙密度 ρ_s ； ρ_w 为清水密度； μ_m 为悬液动

表 2 清浑水交界面随时间的变化关系线

Table 2. Relationship between the interface and the settling time

AlCl ₃ 浓度 / mmol/L	函数关系式	R ²	样本点
0.9	Y = 4.115t + 0.92	0.9987	14
1.3	Y = 4.751t + 1.1045	0.9973	11
1.7	Y = 5.401t + 2.4673	0.9975	10

力粘滞系数; d 为絮团直径, 如把它化为密度为 ρ_s 的直径 d , 则有

$$\bar{\mu} = (1 - C_v)(\rho_s - \rho)gd^2 / (18\mu_m) \quad (2)$$

即

$$d = (18\bar{\mu}_m / ((1 - C_v)(\rho_s - \rho)g))^{0.5} \quad (3)$$

在黄土区, 浑液运动粘滞系数 μ_m 以及同温度下清水的运动粘滞系数 μ_0 为^[10]:

$$\mu_m = \mu_0 / (1 - 0.88(C_w / (1 - C_w))^{0.81}) \quad (4)$$

$$\mu_0 = 0.0178 / (1 + 0.0337T + 0.00022T^2) \quad (5)$$

式中 C_w 为重量比含沙浓度; T 为水温。本试验中 $T = 15$, 由(5)式得 $\mu_0 = 0.011022 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

由 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $C = 9.756 \text{ kg/m}^3$ 可知: $C_v = C / \rho_s = 0.368\%$, 浑液密度为 $\rho_m = \rho + (\rho_s - \rho)C_v$, $C_v = 1.0062 \text{ g/cm}^3$, $C_w = \rho_s C_v / (\rho + C_v(\rho_s - \rho)) = 0.607\%$, 由式(4)得 $\mu_m = 0.01118 \text{ cm}^2/\text{s}$, 则 $\mu_m = \mu_m = 0.01125 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}$ 。

所以, 由式(3)可求得 $\bar{\mu}$ 为 4.115、4.751、5.401 cm/min 时对应的 d 分别为 0.0293、0.0315、0.0336 mm, 平均为 0.0315 mm, 对应的沉速为 4.756 cm/min。

2.3 絮凝临界粒径

絮凝临界粒径即发生絮凝的临界粒径, 只有小于临界粒径的泥沙才会发生絮凝。粒径愈细, 颗粒表面的物理化学作用愈强, 絮凝现象愈明显。一般认为, 絮凝的临界粒径为 0.01 mm^[4], 但也有研究建议将絮凝的临界粒径定为 0.03 mm^[11,12]。由图 1、2 可知, 泥沙沉降 4min 时, 泥沙相对浓度由变化缓慢(分选沉降)突然转快(絮凝沉降), 该相对浓度对应的粒径可近似为絮凝的临界粒径。依照 Stokes 定律, 单个颗粒在静水中的沉降速度 s 为^[4,8]

$$s = (\rho_s - \rho)gD^2 / 18\mu \quad (6)$$

式中 ρ_s 、 ρ 分别是泥沙密度和水的密度; D 是颗粒粒径; μ 是动力粘滞系数。将 $s = h/t$ 代入(6)式得:

$$D = (18\mu h / ((\rho_s - \rho)gt))^{1/2} \quad (7)$$

式中 h 为沉降距离; t 为沉降时间。忽略电解质对 μ 的影响^[13], 利用(7)式求得絮凝临界粒径为 0.027 mm。

3 结 论

(1) 在液面下同一深度, 含沙浓度随时间呈指数衰减。细颗粒泥沙沉降可划分为两个阶段: 分选沉降段和絮凝沉降段;

(2) 浑液经多次搅拌—沉降—搅拌后, 电解质对细颗粒泥沙絮凝沉降的作用逐渐减弱, 细颗粒泥沙平均沉速 \bar{v} 减缓;

(3) 在一定的泥沙浓度下, 清浑水交界面的出现与电解质的种类和浓度有关。当 AlCl_3 浓度大于 0.9 mmol/L 时, 已出现明显的清浑水交界面。此时, 整个浑液呈等速沉降, 平均沉速为 4.756 cm/min, 对应的絮团平均直径为 0.0315 mm;

(4) 黄土细颗粒絮凝的临界粒径为 0.027 mm。

参考文献:

- [1] 黄岁樑, Onyx W H Wai. 水环境污染物质迁移转化研究与泥沙运动[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 205 - 210.
- [2] 黄岁樑, Onyx W H Wai. 泥沙运动引起的环境问题及环境泥沙学[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 313 - 318.

- [3] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 60 - 67.
- [4] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [5] 冯利, 汤鸿霄. 铝盐最佳混凝形态及最佳 pH 范围研究[J]. 环境化学, 1998, 17(2): 163 - 169.
- [6] 刘文新, 栾兆坤, 李莉莉, 等. 天然水体及生活用水中铝的含量及形态分布[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 167 - 173.
- [7] 鄒霜涛. 芬兰发明农用废水净化新方法[N]. 科学时报, 2000年7-28(2).
- [8] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 474 - 490.
- [9] 费祥俊. 泥沙的群体沉降—两种典型情况下非均匀沙沉速计算[J]. 泥沙研究, 1992, (3): 11 - 14.
- [10] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社(第2版), 1996. 27, 73.
- [11] 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981, (2): 30 - 41.
- [12] 张志忠. 长江口细颗粒泥沙基本特性研究[J]. 泥沙研究, 1996, (1): 67 - 73.
- [13] Einstein H A, Krone R B. Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(4): 1 452 - 1 461.

Effects of AlCl_3 on Fine Sediment Flocculation and Settling^{*}

CHEN Hong-song, SHAO Ming-an

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Aluminum flocculants have an important role in the flocculation and settling of fine sediment, and are often used to clear muddy water and treat agricultural waste water. In this paper, sediment concentration of 10 g/L is prepared in 1 000mL cylinder which contained AlCl_3 solutions with concentration ranging from 0 to 1.7mmol/L. The relative sediment concentration at the depth of 20cm below suspension surface is measured with a 20mL pipette. The results show that the sediment concentration decreases exponentially with time at the same depth below suspension surface. Effects of electrolyte on fine sediment flocculation and settling become small and the mean velocity decreases obviously after the suspension is mixed completely for several times. At the given sediment concentration, the emergence of the interface between supernatant and sediment suspension depends on the electrolyte and its concentration. When AlCl_3 concentration is higher than 0.9mmol/L, the obvious interface will appear. At the same time, the interface settles uniformly with time, and the mean particle size is 0.0315mm with the mean velocity of 4.756cm/min. The critical particle size to flocculate is 0.027mm.

Key words: AlCl_3 ; fine sediment; flocculation and settling; muddy water settlement

* The project is supported by National Natural Science Fund of China(No. 59879026).