

涡旋絮凝低脉动沉淀 理论及应用

王 淼 艾恒雨 著
王绍文 主审

Theory and Application of Vortex Flocculation and
Low Pulsation Precipitation



中国建筑工业出版社

涡旋絮凝低脉动沉淀理论及应用

王 淼 艾恒雨 著
王绍文 主审



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

涡旋絮凝低脉动沉淀理论及应用/王森, 艾恒雨
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-112-21561-4

I. ① 涡… II. ① 王… ② 艾… III. ① 水絮凝-
理论② 水沉淀-理论 IV. ① TU991. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 291122 号

本书在絮凝与沉淀基本理论的基础上, 详细阐述了惯性效应絮凝与低脉动沉淀理论的机理与应用。絮凝方面着重讨论了如何利用微涡旋的离心惯性效应有效促进脱稳胶体间的相互碰撞, 并在絮凝剂的作用下如何进行絮凝、长大, 通过理论计算与工程实践讨论了小孔眼网格这一微涡旋絮凝设备的应用效能; 沉淀方面着重讨论了如何利用湍流低脉动沉淀理论实现沉淀池中固液非均相物系的分离, 并讨论了在浅池理论与低脉动沉淀理论基础上开发的小间距斜板的沉淀性能。通过选取新建、扩建、改造等具有代表性的水处理工程实例, 详细阐明了微涡旋絮凝与低脉动沉淀理论在工程中的应用情况。本书内容专业性与理论性强, 并具有一定的广度和深度, 适合从事水处理工程工作的科技人员选用和参考。

责任编辑: 王 磊 田启铭
责任设计: 王国羽
责任校对: 李美娜 芦欣甜

涡旋絮凝低脉动沉淀理论及应用

王 森 艾恒雨 著
王绍文 主审

中国工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京中科印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9½ 字数: 173 千字
2018 年 2 月第一版 2018 年 2 月第一次印刷
定价: 38.00 元
ISBN 978-7-112-21561-4
(31097)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

序

絮凝沉淀作为给水常规处理过程的核心环节，一直备受关注。在近二十年的理论研究与实践应用中，作者矢志探究絮凝与沉淀的全过程，深入思考水质净化过程中存在的问题，日臻完善了颗粒的微涡旋絮凝与低脉动沉淀理论。以本书作者为带头人的技术团队提出了水质净化领域中两项未被广泛认知的规律：（1）多相流动物系物相接触与颗粒碰撞的动力学致因；（2）多相流动物系亚微观传质规律及其动力学致因。在此发现的基础之上，通过大量卓有成效的研发工作，在多年的科研攻关和工程建设实践中，建立了“涡旋混凝低脉动沉淀”理论系统，并开发了一整套适合处理江河水、水库水和海水的给水混凝沉淀处理工艺与再生水回用工艺，配合该工艺开发的设备已在国内外 300 多家水厂得到应用，获得了良好的经济效益和社会效益，为推动我国给水处理事业的建设与发展做出了积极贡献。作者通过对多相流动物系碰撞理论、多相流动物系亚微观传质规律、涡旋混凝低脉动沉淀理论的总结，融合多年的工程经验，完成了本书的编著。本书通过深层次、专业化的讲解和大量的工程案例，详细阐明了原水净化的本质机理和工程应用方法，这将对推进给排水基础设施建设、强化管理、提升服务水平产生深远影响，具有重要的借鉴意义。

本书在组织、编写和出版过程中，得到了许多专家、教授和同行们的大力支持和热心帮助，在此，对他们所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢！

2017 年 9 月

目录

第 1 章 絮凝机理与絮凝工艺 1

1.1 絮凝机理 1

1.1.1 胶体的动力学稳定与聚集稳定 1

1.1.2 混凝剂的三种混凝机理 2

1.2 絮凝过程 4

1.2.1 容积絮凝与接触絮凝 4

1.2.2 絮体的增长过程 6

1.3 絮凝动力学 10

1.3.1 异向絮凝 10

1.3.2 同向絮凝 12

1.3.3 差降絮凝 17

1.3.4 接触絮凝 18

1.4 典型絮凝池工艺原理 21

1.4.1 机械絮凝池 22

1.4.2 隔板絮凝池 24

1.4.3 折板絮凝池 25

1.4.4 网格、栅条絮凝池 27

1.4.5 传统澄清池 28

1.4.6 高密度澄清池 30

1.4.7 各种絮凝池的技术对比 32

第 2 章 涡旋絮凝理论 33

2.1 涡旋及涡旋动力学 33

2.1.1 涡旋运动概述 33

2.1.2 涡线、涡管、涡束和涡旋强度 36

2.1.3 涡旋的基本定理 37

2.1.4 涡旋速度和压强的分布 38

2.1.5 涡旋的拉伸 39

2.1.6 涡旋的级串 39

2.2 絮凝的涡旋理论 40

2.2.1 涡旋剪切絮凝 41

2.2.2 涡旋离心惯性絮凝 41

2.3 涡旋絮凝动力学	42
2.3.1 絮凝动力学研究现状	42
2.3.2 旋转水流的运动规律	44
2.3.3 有序涡旋絮凝动力学	47
2.3.4 混合长度与微涡旋尺度	48
2.3.5 关于速度梯度公式的讨论	51
2.3.6 紊流涡旋絮凝动力学	53
2.4 絮凝的动力致因与涡旋絮凝相似准则数	55
2.4.1 絮凝的动力致因	55
2.4.2 涡旋絮凝的相似准则数	57
2.5 小孔眼网格絮凝理论	59
2.5.1 网格絮凝工作原理	59
2.5.2 小孔眼网格絮凝池的结构	59
2.5.3 小孔眼网格絮凝原理	60
2.5.4 特殊水质的絮凝原理	62
2.5.5 小孔眼网格絮凝池的发展沿革	63
第3章 沉降过程与低脉动沉淀理论	65
3.1 颗粒和颗粒群的特性	65
3.1.1 颗粒的大小及形状	65
3.1.2 颗粒群的特性	66
3.2 重力沉降	68
3.2.1 球形颗粒的自由沉降	68
3.2.2 阻力系数	69
3.2.3 影响沉降速度的因素	71
3.2.4 沉降速度的计算	72
3.3 脉动沉淀理论	74
3.3.1 湍流的涡量脉动方程	75
3.3.2 流体沿二元槽、半平板与圆管的流动	77
3.3.3 沉淀颗粒的湍性尾流与涡量脉动	83
3.4 平流沉淀与浅层沉淀	89
3.4.1 沉降速度的计算	89
3.4.2 平流沉淀池设计	92
3.4.3 浅层沉淀设备	98
3.5 低脉动沉淀理论在浅层沉淀池中的应用	106
3.5.1 小间距斜板沉淀设备的结构与外形	106
3.5.2 小间距斜板沉淀设备的优势	106

第4章 涡旋絮凝低脉动沉淀工艺设计	109
4.1 混合器设计及设备选型	109
4.1.1 微涡混合器的工作原理	109
4.1.2 微涡混合器的设计	110
4.2 小孔眼网格絮凝池设计及设备选型	111
4.2.1 小孔眼网格絮凝池设计	112
4.2.2 絮凝设备选型	112
4.3 小间距斜板沉淀池设计及设备选型	114
第5章 涡旋絮凝低脉动工艺工程实例	116
5.1 长沙引水及水质环境工程	116
5.1.1 项目背景	116
5.1.2 工艺设计	117
5.1.3 工艺图纸	117
5.1.4 项目运行情况	117
5.2 新疆石河子北工业园区供水工程	124
5.2.1 工程概况	124
5.2.2 工艺简介	124
5.2.3 工艺设计参数	124
5.2.4 工艺图纸	125
5.2.5 运行状况	127
5.3 石家庄市西北地表水厂工程	127
5.3.1 工程概况	127
5.3.2 工艺简介	128
5.3.3 工艺设计参数	128
5.3.4 工艺设计图纸	128
5.3.5 运行状况	130
5.4 大庆中引水厂改造工程	130
5.4.1 项目背景	130
5.4.2 工艺设计	131
5.4.3 工艺图纸	132
5.4.4 项目运行情况	132
5.5 长春市北郊污水处理厂二期工程设计	135
5.5.1 工程概况	135
5.5.2 水质要求	135
5.5.3 工艺简介	135
5.5.4 工艺设计参数	135
5.5.5 运行状况	136

5.6 印度尼西亚燃煤电站工程	137
5.6.1 项目背景	137
5.6.2 工艺设计	137
5.6.3 项目运行情况	137
5.6.4 工艺图纸	137
参考文献	140

第 1 章 絮凝机理与絮凝工艺

关于“混凝”的概念，目前尚无统一规范的定义。“混凝”有时与“凝聚”和“絮凝”相互通用。一般认为，水中胶体失去稳定性的过程称“凝聚”；脱稳胶体相互聚集称“絮凝”；“混凝”是凝聚和絮凝的总称。工程界中所讲的“混凝”是指胶体粒子以及微小悬浮物的聚集过程，这一过程涉及三方面问题：①水中胶体粒子的性质；②混凝剂的水解特性及絮凝性能；③脱稳胶体的凝并作用。本书中有关絮凝的讨论仅考虑第三方面的问题，即如何有效地促进脱稳胶体间的相互絮凝、长大。

1.1 絮凝机理

1.1.1 胶体的动力学稳定与聚集稳定

水处理领域内，凡沉降速度十分缓慢的粒子及微小悬浮物均被认为是“稳定”的。如水中的黏土胶体粒子等。胶体稳定性可分为“动力学稳定”和“聚集稳定”两种。

动力学稳定是指颗粒布朗运动对抗重力影响的能力。在稳定体系中，胶体粒子很小，布朗运动激烈，本身质量小而所受重力作用小，布朗运动足以抵抗重力影响，因而能长期稳定悬浮于水中，具有动力学稳定性。粒子越小，动力学稳定性越高。

聚集稳定性指胶体粒子之间不能相互聚集的特性。胶体粒子由于粒径小，比表面积大，从而表面能很大，在布朗运动作用下，有自发地相互聚集的倾向，但由于粒子表面同性电荷的斥力作用或水化膜的阻碍使这种自发聚集不能发生，从而存在聚集稳定性。胶体稳定性，关键在于聚集稳定性。

对憎水胶体而言，聚集稳定性主要决定于胶体颗粒表面的动电位，即 ζ 电位。 ζ 电位越高，同性电荷斥力越大。德加根（Derjaguin）、兰道（Landon）、伏维（Verwey）和奥贝克（Overbeek）各自从胶粒之间相互作用能量的角度阐明胶粒相互作用理论，简称 DLVO 理论。该理论认为，当两个胶粒相互接近以至双电层发生重叠时，便产生静电斥力。静电斥力与两胶粒表面间距 x 有关，用排斥势能 E_R 表示， E_R 随着 x 增大而按指数关系减小。若两胶粒间的范德华引力产生的吸引势能用 E_A 表示，则排斥势能 E_R 和吸引势能

E_A 相加即为总势能 E 。两个带有相同电荷的胶粒间存在着排斥能峰 $E_{\max}$ ，所对应的胶粒间距为 $x_{\min}$ ，由于胶体布朗运动的动能远小于 $E_{\max}$ ，两胶粒间的距离无法靠近到小于 $x_{\min}$ ，从而使胶体处于分散稳定状态。

胶体的聚集稳定并非都是由于静电斥力引起的，胶体表面的水化作用往往也是重要因素。某些胶体（如黏土胶体）的水化作用一般是由胶粒表面电荷引起的，且水化作用较弱。因而，黏土胶体的水化作用对聚集稳定性的影响不大。因为，当水体中存在带异性电荷的电解质时， ζ 电位便会降低至一定程度或完全消失，水化膜也随之消失。但对于亲水胶体（如有机物或高分子物质）而言，水分子的强烈吸附，使粒子周围包裹一层较厚的水化膜，阻碍胶粒相互靠近，因而使范德华力不能发挥作用。实践证明，虽然憎水胶体也存在双电层结构，但 ζ 电位对胶体稳定性的影响远小于水化膜的影响。因此，亲水胶体的稳定性尚不能用 DLVO 理论解释。

1.1.2 混凝剂的三种混凝机理

混凝剂的混凝机理尚无准确、全面的解释。目前，水处理领域较为一致的看法是，混凝剂对水中胶体粒子的混凝作用分为三种：电性中和、吸附架桥和卷扫作用。这三种作用以何者为主，取决于混凝剂的种类和投加量、水中胶体粒子的性质、含量以及水的 pH 值等。这三种作用有时同时存在，有时仅存在其中的某一种或某两种。

1. 吸附-电性中和

水处理过程中向原水中投加混凝剂时，在水体内最初发生的混凝机理即是电性中和。水体中存在的多是带负电的胶体电荷，投入的混凝剂是带正电荷的离子或聚合离子，如果混凝剂仅是简单的离子，如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等，其作用是压缩胶体双电层（为保持胶体电性中和所要求的扩散层厚度），从而使胶体滑动面上的 ζ 电位降低，使排斥能峰 $E_{\max}$ 降低到可以使胶粒相互凝聚的程度。

当水中聚合混凝剂投量过大时，水中原来的负电荷胶体可变成带正电荷的胶体。这是压缩双电层理论不能解释的，近代理论认为，这是由于带负电荷胶核直接吸附了过多的正电荷聚合离子的结果。这种吸附力包括静电引力、范德华力、氢键及共价键等。以铝盐为例，当 pH 值 < 3 时，铝盐混凝剂的水解产物多为 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ，它可起压缩双电层作用；当 pH 值 > 3 时，铝盐混凝剂的水解产物多为多核羟基配合物，这些物质往往会吸附在胶核表面，分子量越大，吸附作用越强。如 $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}]^{7+}$ 与胶核表面的吸附强度大于 $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}]^{5+}$ 或 $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$ 与胶核表面的吸附强度。这不仅由于前者正电价数高于后者，主要还是由于分子量远大

于后者。带正电的高分子物质与负电荷胶粒吸附性更强，并可在水中慢慢置换分子量低的物质并与胶核吸附在一起。天然水体的 pH 值通常大于 3，因此水的混凝过程中通常发生的是吸附-电性中和，而压缩双电层-电性中和作用甚微。

2. 吸附架桥

不仅带异性电荷的高分子物质与胶粒具有强烈吸附作用，不带电甚至带有与胶粒同性电荷的高分子物质与胶粒也有吸附作用。拉曼（Lamer）等通过对高分子物质吸附架桥作用的研究认为：当高分子链的一端吸附了某一胶粒后，另一端又吸附另一胶粒，形成“胶粒—高分子—胶粒”的絮凝体，如图 1-1 所示。高分子物质在这里起了胶粒与胶粒之间相互结合的桥梁作用，故称吸附架桥作用。当高分子物质投量过多时，将产生“胶体保护”作用，如图 1-2 所示。胶体保护可理解为：当全部胶粒的吸附面均被高

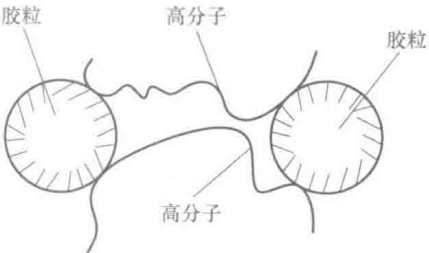


图 1-1 架桥模型示意图

分子覆盖以后，两胶粒接近时，就受到高分子的阻碍而不能聚集。这种阻碍来源于高分子之间的相互排斥（见图 1-2）。排斥力可能来源于“胶粒—胶粒”之间高分子受到压缩变形（像弹簧被压缩一样）而具有排斥势能，也可能由于高分子之间的电性斥力（对带电高分子而言）或水化膜。因此，高分子物质投量过少不足以将胶粒架桥连接起来，投量过多又会产生胶体保护作用。最佳投量应是既能把胶粒快速絮凝起来，又可使絮凝起来的最大胶粒不易脱落。根据吸附原理，胶粒表面高分子覆盖率为 1/2 时絮凝效果最好。但在实际水处理中，胶粒表面覆盖率无法测定，故高分子混凝剂投量通常由试验决定。

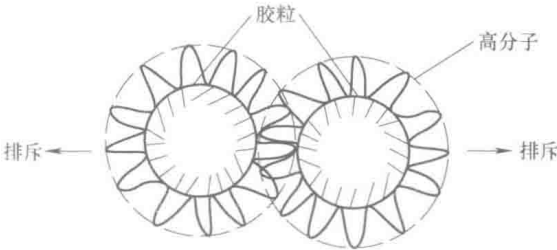


图 1-2 胶体保护示意图

起架桥作用的高分子都是线性分子且需要一定长度。长度不够不能起架间架桥作用，只能被单个分子吸附。所需起码长度，取决于水中胶粒尺寸、高分子基团数目、分子的分枝程度等。显然，铝

盐的多核水解产物，分子尺寸都不足以起粒间架桥作用。它们只能被单个分子吸附从而起电性中和作用。而中性氢氧化铝聚合物 $[\text{Al}(\text{OH})_3]_n$ 则可起架桥作用，不过对此目前尚有争议。

不言而喻，若高分子物质为阳离子型聚合电解质，它具有电性中和和吸框架桥双重作用；若为非离子型（不带电荷）或阴离子型（带负电荷）聚合电解质，只能起粒间架桥作用。

3. 网捕或卷扫

当铝盐或铁盐混凝剂投量很大而形成大量氢氧化物沉淀时，可以网捕、卷扫水中胶粒以至产生沉淀分离，称卷扫或网捕作用。这种作用，基本上是一种机械作用，所需混凝剂量与原水杂质含量成反比，即原水胶体杂质含量少时，所需混凝剂多，反之亦然。

概括以上几种混凝机理，可作如下判断：

(1) 对铝盐混凝剂（铁盐类似）而言，当 pH 值 < 3 时，简单水合铝离子 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 可起压缩胶体双电层作用，但在给水处理中，这种情况少见；在 pH 值 $= 4.5 \sim 6.0$ 范围内（视混凝剂投量不同而异），主要是多核羟基配合物对负电荷胶体起电性中和作用，凝聚体比较密实；在 pH 值 $= 7 \sim 7.5$ 范围内，电中性氢氧化铝聚合物 $[\text{Al}(\text{OH})_3]_n$ 可起吸框架桥作用，同时也存在某些羟基配合物的电性中和作用。天然水的 pH 值一般在 $6.5 \sim 7.8$ 之间，铝盐的混凝作用主要是吸框架桥和电性中和，两者以何为主，决定于铝盐投加量；当铝盐投加量超过一定限度时，会产生“胶体保护”作用，使脱稳胶粒电荷变号或使胶粒被包卷而重新稳定（常称“再稳”现象）；当铝盐投加量再次增大、超过氢氧化铝溶解度产生大量氢氧化铝沉淀物时，则起网捕和卷扫作用。实际上，在一定的 pH 值下，几种作用都可能同时存在，只是程度不同，这与铝盐投加量和水中的胶粒含量有关。如果水中胶粒含量过低，往往需投加大量铝盐混凝剂使之产生卷扫作用才能发生混凝作用。

(2) 阳离子型高分子混凝剂可对负电荷胶粒起电性中和与吸框架桥双重作用，絮凝体一般比较密实。非离子型和阴离子型高分子混凝剂只能起吸框架桥作用。当高分子物质投量过多时，也产生“胶体保护”作用使颗粒重新悬浮。

1.2 絮凝过程

1.2.1 容积絮凝与接触絮凝

根据混凝剂的混凝原理，当水中的电解质对于胶体双电层所起的作用，足以使水中两个胶体颗粒碰撞所需的引力克服掉彼此间的斥力和扩散能量时，两个胶体即可结合在一起，于是出现絮凝过

程。随着这种絮凝过程的进行,水中原来存在的胶体颗粒将逐渐消失,同时出现越来越大的颗粒。当颗粒大到不再具有布朗运动的性能,而失去相互碰撞的推动力时,则可继续采用适当的促进絮凝的手段,如搅拌器、折板或网格等絮凝设备,使这些颗粒继续相碰长大,使胶体微粒结构成长为宏观尺寸的絮体,直到絮体粒度不能承受絮凝过程所产生的剪切力为止。

水处理中把上述絮凝过程称为容积絮凝(volume flocculation)。这种絮凝所产生的絮体,其沉速足以使之在沉淀设备或沉淀池中下沉到底,从而达到将胶体从水中分离出去的目的。这种具有宏观体积的絮体由许多固体微粒聚集而成,其微粒间的孔隙充满水,大粒的絮体中甚至出现空洞,因此称为“容积”絮凝而不称为“体积”絮凝。

接触絮凝(contact flocculation)是与容积絮凝同时出现的术语。俄语1950年代的文献中首先出现接触絮凝和容积絮凝两条术语,英语文献则在1970年代初出现这两条术语。当带胶体的水通过宏观固体物的表面,而水中电解质的浓度足以使胶体接触固体表面时不致相斥,则胶体能附着在固体表面上。这种胶体因通过与宏观固体的表面接触从水中分离出来的过程,相当于微观颗粒与宏观固体间的“絮凝”,所以称为接触絮凝。可以看出,接触絮凝与容积絮凝都需要电解质来降低胶体和与它所接触的固体表面的斥力,但接触絮凝却不需要胶体颗粒间的直接聚集过程。

接触絮凝的现象首先是从快滤池的工作过程启发来的,相应地出现接触过滤这一术语。对于接触过滤来说,胶体所接触的可以是砂粒的表面本身,也可以是原先吸附在砂粒表面的其他微粒的表面。按这样的理解,胶体与宏观的非实体絮体颗粒间同样会发生接触絮凝现象,因为胶体所接触的同样都是微粒的表面,与接触过滤一样。

水中两种不同离子对同一种胶体所起的絮凝作用可能是加成的,也可能是消减的,前者加强了絮凝过程,后者削弱了絮凝过程。

当电解质的浓度从低浓度开始逐渐增加时,水中氧化物等胶体可能出现稳定—絮凝—再稳定三个区;对某些憎水胶体来说,当再稳定区的电解质浓度继续增加时,最后还可能再出现一个絮凝区。

以上所讨论的絮凝现象都是借助于电解质对同一种胶体所起的作用。但是,当带正电荷的憎水胶体与带负电荷的憎水胶体混合在一起时,由于异号电荷间的吸引和中和作用,两种胶体颗粒就会自动结合在一起,而无需借助于电解质的作用。这种现象称为互絮凝或异絮凝(hetero flocculation)。当两种胶体的总电荷彼此相等时,两种胶体的电荷恰好对消掉,互絮凝的作用能得到最好的发挥。当

一种胶体的电荷大大超过另一种胶体时，后者将被前者完全包围，因而出现在一种带电荷为前者的稳定混合胶体系统。

当水中有少量亲水胶体时，可以降低憎水胶体絮凝所需的电解质正常用量，这种现象称为敏化作用。发生敏化作用的亲水胶体，当所带电荷与憎水胶体的电荷符号相反时，可用互絮凝来解释敏化现象。少量的蛋白质对憎水胶体的敏化作用即为例子。但是，与憎水胶体的带电荷完全相同的亲水胶体也有产生敏化作用的情况。水中憎水胶体的电泳现象和布朗运动都不会因加入敏化胶体而发生变化。水中存在大量的亲水胶体时，憎水胶体将完全被亲水胶体所包围，因而成为被护胶体。

1.2.2 絮体的增长过程

1. 参与絮凝过程的微粒

有关胶体絮凝过程的理论研究，一般只涉及一种电解质和一种胶体颗粒所组成的体系。但水处理的絮凝过程，情况则复杂得多，这表现在参与絮凝过程的微粒有多种成分，微粒大小悬殊。这些微粒可分为两类：①水中常见的微粒，主要指黏土、细菌、病毒、腐殖质等天然成分，以及由于污染等原因带入的无机物和有机物微粒；②絮凝剂所产生的水解聚合物离子、氢氧化物沉淀物等微粒。属于①类的微粒有时还包括粉砂，粒度小于 $10\sim20\mu\text{m}$ 的粉砂还具有微弱的布朗运动现象。这些微粒在絮凝过程中同样也参与构成絮体的运动，该类微粒的尺寸下限为胶体的下限 1 nm ，上限有时为黏土的上限 $4\mu\text{m}$ ，甚至可达粉砂的下限 $20\sim200\mu\text{m}$ 。而高分子的聚合物展开长度有时可达 $10\mu\text{m}$ 以上。只有充分考虑了参与絮凝过程中的各种微粒的形状和大小，才能研究真实的絮体形成过程和絮体的结构形态，这就是提出絮凝形态学的最基本观点。

此外，水中极微颗粒的数量是极大的。例如，对浊度 0.1 NTU 含有 $\text{Al } 0.1\text{ mg/L}$ 的水，其颗粒物浓度可进行简化估算：假定 0.1 NTU 浊度相当于 0.1 mg/L 黏土的含量，按相对密度 2.5 、面积为 $1\mu\text{m}^2$ （宽约 $1\mu\text{m}$ ）、厚 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒估算，微粒浓度为 4×10^8 个/L。假定相当于 Al 的 0.1 mg/L 的铝盐混凝剂在水中产生水解胶体物的分子量为 1000 ， Al 在胶体颗粒中的含量以 35% 计（例如 13 个 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分子组成的颗粒或 $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ 中 Al 的含量），则 0.1 mg/L 的 Al 约相当于分子量为 1000 的颗粒 0.3 mg/L ，按 1 mol 含 6×10^{23} 个颗粒计，则每升水中的个数为：

$$\frac{0.3}{1000\times1000}\times6\times10^{23}\text{ 个}=1.8\times10^{17}\text{ 个}$$

因此，每个黏土颗粒平均可吸附 $1.8\times10^{17}/4\times10^8\text{ 个}\approx4.5\times10^8$ 个混凝剂颗粒。另据试验，在浓度为 0.11 NTU 的过滤水中，相应的

残余铝量为 0.06mg/L，每升水含有 0.59~1.0 μm 的颗粒约 3.4×10^8 个。上述用黏土颗粒的估算浓度与这一数据近似一致。只考虑黏土颗粒的原因是由于含铝的混凝剂颗粒，其粒度比黏土小 2~3 个数量级，吸附在每个黏土颗粒的表面后，不会影响黏土的粒度，未被吸附的即使聚集成更大的颗粒，也远达不到所测定的粒度。因此，只有黏土才是决定水中颗粒浓度的因素。

2. 絮体粒度的增长

絮体的长大过程是一个具有实际意义的问题。图 1-3 描述了絮体粒度的增长过程。絮体是用纽约的自来水为原水（浊度小于 5NTU），进行混凝杯罐试验产生的。混凝剂用量为 24mg/L 的硫酸铝，这一剂量使水中产生浊度的石英微粒的 ζ 电位降为零。从图中可以看出，当絮凝时间达到 35min 时，此时的粒度达到极限值 0.6mm，在絮凝时间 0~10min 内，絮体粒度的增长很快，10min 时已达到 0.5mm，接近了极限值。

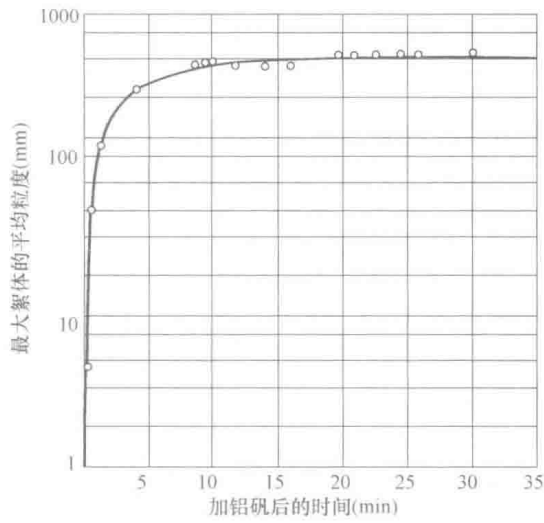


图 1-3 絮体粒度的增长曲线

图 1-4 是图 1-3 的另一表达方式，图中的实线表示粒度与絮凝时间的实测数据，而虚线则由实线外延得出。由于这个试验是用自来水做的，水中的微粒在 1 μm 以下，因此，外延约至粒度 0.1 μm 的虚线可能仍然代表实际情况，这个粒度的相应时间为数毫秒。由于从 1s 作为絮体结算点，可推知凝聚过程必然在数微秒

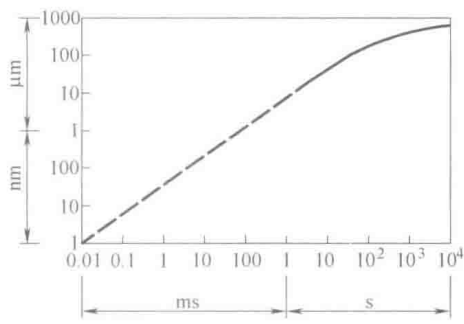


图 1-4 图 1-3 的数据表达式

至 1s 内即已完成。图中外延的其余部分虽然只有理论上的价值，但外延末端所对应的 1~10nm 的粒度，也可理解为代表了铝盐水解物的大小。图 1-3 和图 1-4 可作为低浊度水在常规过程中絮体长大的一般模式。

图 1-3 可用下列关系进行大致描述：

$$\frac{d(\ln D)}{dt}=\mu \tag{1-1}$$

式中 D ——絮体的粒径；

t ——时间；

μ ——曲线斜率。

μ 虽然表现为随时间变化，但实际可能只是絮体粒度、絮体浓度、絮体结构和搅拌强度的函数。上式可改写为以 μ 为速率常数的一级反应的表达式：

$$\frac{dD}{dt}=\mu D \tag{1-2}$$

上述微分方程的一般解为

$$D=D_0 e^{\mu t} \tag{1-3}$$

D_0 为 $t=0$ 时的 D 值。

式 (1-3) 是按 μ 为常值时得出的，此时 $\ln D$ 对 t 的值应成一条直线，斜率为 μ 。当 $\ln D$ 对 t 的图不是一条直线，但把它大致分解成几条折线时，对每条折线可仿照式 (1-3) 得出下列表达式：

$$D=D_a e^{\mu_a(t-t_a)} \tag{1-4}$$

式中，下标 a 为每段折线的起点顺序编号。当分成 3 段折线时， a 分别为 0、1 和 2，相当于这 3 个起点的粒径 D_a 为 D_0 、 D_1 和 D_2 ，3 段折线的斜率 μ_a 分别为 μ_0 、 μ_1 和 μ_2 3 个常值，3 段折线的时间范围分别为 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 和大于 t_2 。

从式 (1-4) 可知，当第一段折线的时间 $t - t_0 = 0$ 时， $D = D_0$ ，为原始颗粒的粒度，因而最小，但在 $t_0 \sim t_1$ 时间内，颗粒长大最快，因而 μ_0 值最大，当 $t = t_{\max}$ ， D_a 达极限值 $D_{\max}$ 时，这最后一段折线的斜率 μ_a 应为 0。

3. 絮体的粒度分布和结构

混凝过程中产生了各种大小的絮体。这些絮体颗粒一般不呈球形。在最优混凝剂剂量的条件下，大颗粒呈不规则形状，内部有不连续构造；当剂量小于或大于最优剂量时，一般颗粒小一些，但呈球状或扁球状。最优混凝剂剂量指产生总的絮体沉淀速度最快或水质最清的剂量。

对不规则形状的絮体，可采用不同的方法来求它们的计算粒径。对于絮体悬浮体，则需计算它的平均粒径。平均粒径有三种计算法，分别按颗粒的数目、颗粒的表面积和颗粒的体积计算，相应

得出颗粒的平均直径、面积平均直径和体积平均直径。最优剂量与非最优剂量的效果相比，具有下列特点：①水中悬浮颗粒物数量少；②3种平均粒径都达最大值；③颗粒大小接近正态分布；④沉淀水中的小颗粒数（粒径 $<70\mu\text{m}$ ）最小，浊度也最小。

絮体悬浮液的絮体平均直径 d 和与之平衡的搅拌速度梯度 G 之间存在下列关系：

$$d = \beta G^{-\gamma} \quad (1-5)$$

式中， β 和 γ 为常数。在双对数坐标轴上， d 与 G 之间呈直线关系， γ 为直线的斜率。直线表示出在平衡条件下的平均粒度 d 与它所能承受的剪力大小间的关系，因而是絮体强度的一个度量。絮体强度取决于它的大小和结构已被公认。

目前认为絮体的结构有原颗粒、原絮粒、絮体和聚集絮体四个层次。由原颗粒构成原絮粒，由原絮粒构成絮体，由絮体构成聚集絮体。原颗粒是水中在絮凝开始时原有的颗粒，一般是浊度的颗粒。原絮粒由少数原颗粒构成，能承受过程中的最大剪力，是较密实的结构，是絮体的基本结构单元。聚集絮体则为絮体的松散结合体。

絮体结构的特点也可以从絮体的密度和破碎机理得到反映。

絮体在水中的密度可表示为：

$$\rho_s - \rho = kA^{-a} \quad (1-6)$$

式中 ρ_s ——絮体密度；
 ρ ——水的密度；
 A ——絮体的投影面积；
 k ——常数；
 a ——常数。

式中， k 和 a 的大小取决于颗粒的性质，粒度、浓度，混凝剂种类、剂量以及水质成分，但与絮凝搅拌的速度梯度无关。由式（1-6）可知 $\rho_s - \rho$ 与 A 在双对数坐标轴上呈直线关系，由直线的斜率和截距可求出 a 及 k 值。硫酸铁在无浊度微粒的水中所作的絮凝试验数据说明，粒度越小的絮体，密度越大；大于或小于 1.5mm^2 的絮体，可能是相应于上述聚集絮体的松散结构，因而密度较小。

在混凝过程中由浊度颗粒参加构成的絮体，原颗粒为浊度颗粒，比起单由混凝剂所产生的絮体来，由于浊度颗粒比混凝剂絮体的原颗粒大几个数量级，两类絮体的结构必然不同。由浊度颗粒所产生的絮体，含有大颗粒，使絮体中的含水量相对减小，因而具有较大的密度，如表 1-1 的实测资料所示。

絮体的破碎是有关絮体结构的另一重要问题。絮体的破碎有两种机理，一个是裂碎，另一个是表面侵蚀。裂碎指整个絮体分裂成碎块。表面侵蚀指从絮体表面剥落一些小颗粒下来。当絮体粒度大