



## 谈《混凝沉淀烧杯试验》标准的编制

武道吉<sup>1</sup> 李圭白<sup>1</sup> 谭风训<sup>2</sup> 张华<sup>2</sup>

(1.哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150009 2.山东建筑工程学院环境工程系, 济南 250014)

**摘要** 混凝沉淀试验是水的物化处理研究及进行实际生产指导的主要手段, 文章介绍混凝沉淀试验标准编制宗旨、主要内容及有关问题的说明。

**关键词** 混凝 沉淀 标准

### 1 前言

对混凝沉淀过程的研究和控制有混凝沉淀试验法、电泳和流动电流检测法、胶体滴定法、颗粒分析法、电泳法和 X 衍射法等, 其中混凝沉淀试验应用最为普遍。由于它能简便地模拟净水厂中混合、絮凝、沉淀等净水过程, 因而它广泛应用于净水厂的日常运行管理、技术改造、产品开发和科学研究。40 年代人们已认识到该试验能够模拟生产中的混凝沉淀过程, 并注意到对试验操作的要求, 1964 年美国材料试验学会 (ASTM) 把它列为暂行的标准试验, 从 1983 年的 ASTM 标准年鉴开始, 混凝沉淀试验已被正式列为一个标准试验。同时日本工业标准委员会 (JIS) 也已正式将其列为水处理标准试验方法。

混凝沉淀试验在设备和操作都很简单的条件下, 能够反映出混凝过程中很多因素间的错综复杂关系, 所以一直是用来研究或控制混凝沉淀过程的最重要方法, 例如, 美国调查的 45 个净水厂中, 42 个水厂单用改试验方法控制混凝过程, 3 个厂用改试验和电泳淌度试验结合控制混凝过程, 在单用烧杯试验的净水厂中, 由 22 个厂每班或每天作一次, 9 个厂每周作一次, 其余的则按需要不定期地进行试验。调查表明, 我国大多数水厂在日常生产管理中采用该方法指导混凝剂的投加和处理工况的判断。但由于试验不规范, 试验结果往往与生产实际相差甚远, 不能起到指导生产的作用。

为促进混凝沉淀试验技术的发展, 更好地指导净水厂工程建设及生产管理, 1997 年 6 月建设部中国工程建设标准化协会 (97) 建标协字第 16 号“关于下达 1997 年推荐性标准编制的涵”, 正式下达编制混凝沉淀试验标准 (简称标准) 的任务, 并于 2000 年 12 月通过了审查验收, 填补了国内空白, 达到国内领先水平, 近日将颁布实施, 标准号: CECS130:2001。标准全文共分: 总则、术语、技术要求和试验规程 4 章。

### 2 标准名称

该试验方法最初始于 1921 年, 称为搅拌试验, 定义为: 利用搅拌时间、搅拌速度的快慢档和转速都可变化的多叶片搅拌装置, 对两个以上的水样试验结果进行比较, 以确定混凝剂投加量的试验; 目前国内外现有的文献资料中一般称其为: 混凝试验、烧杯搅拌试验、烧杯试验或搅拌试验; 而 ASTM 规定其标准名称为《standard practice for coagulation-flocculation jar test of water》。在标准编制过程中考虑到该试验方法已是模拟混合、絮凝和沉淀三个净水工艺过程的试验手段, 因此在征求意见稿中将此标准名称定为《混凝沉淀试验标准》。有专家在对征求意见稿评议时指出, 虽然标准中所称盛水样的搅拌杯, 已非实验室常用的烧杯, 应考虑到标准名称与现行文献资料中的名称衔接, 因此将标准名称修订为定为《混凝沉淀烧杯试验》。

### 3 主要技术指标

主要就试验中所用搅拌器、搅拌杯的技术指标以及搅拌功率的计算方法进行了规定。

#### 3.1 搅拌器

搅拌器是混凝沉淀试验中的关键设备, 为使试验能够模拟实际的生产运行效果, 所谓混凝效果相似是指形成的絮体尺度和密度相同。絮体在形成过程中, 一方面受到颗粒间相互聚集的粘结作用, 另一方面也



受到流体紊动对絮体的破碎作用，限制了絮体继续增大。在一定的水流条件下，若输入水体的能耗不变，经过一定的絮凝时间就会达到絮体聚结与破碎的动态平衡，絮体粒径将保持不变。根据各国的大量研究，都得出了当相同的原水和凝聚条件下，达到絮凝平衡时，絮体粒径主要取决于速度梯度 $G$ ，根据这一原理，阿格曼等人提出了絮体平衡粒径 $d$ 与速度梯度 $G$ 的关系：

$$d=C/G \quad (1)$$

式中： $C$ 为与原水絮凝性质有关的系数。

丹保克仁利用沉降管和摄影的方法，对絮体粒径、有效密度和沉速进行了测定，并建立了絮体的密度公式为：

$$\rho_e = \rho_s - \rho = a/d_p^k \quad (2)$$

式中： $\rho_e$ 为絮体的有效密度， $g/cm^3$ ； $\rho_s$ 为絮体密度， $g/cm^3$ ； $\rho$ 为水的密度， $g/cm^3$ ； $a$ 为常速，随混凝剂品种和加药量而定， $g/cm^3$ ； $k_p$ 为指数常数，随混凝剂品种和加药量而定。

由此可以看出，絮体尺度及其密度取决于混凝过程中的速度梯度 $G$ ，因此要使混凝效果相似，速度梯度 $G$ 须对应相等。实际工程中混合阶段 $G=1000\sim 500s^{-1}$ ，絮凝阶段 $G=100\sim 20s^{-1}$ ，为使试验能够模拟实际生产中的混合、絮凝过程，标准规定搅拌器产生的速度梯度 $G$ 应在 $1000\sim 20s^{-1}$ 范围可调。

另外，实际生产工艺中混合强度大多为一档，絮凝强度一般为 $3\sim 4$ 档，所以标准规定搅拌器转速至少可预设置五档，并且应能够连续运行。

### 3.2 搅拌杯

目前在进行搅拌试验时一般均采用1L玻璃烧杯，由于无阻流装置，搅拌时在烧杯中心会产生漩涡，水体随桨叶旋转，影响搅拌效果，停止搅拌后，水体的旋转不能立即停止，从而影响沉淀。没有专门的取样装置，采用活动式玻璃虹吸管，取样时插入杯内，用吸球吸取水样，由于取样管不固定，在取样过程中宜晃动，扰动水样，致使已经沉淀的絮体重新浮起；另外，取样口高度也不易固定，致使每次取样高度不能完全一致，这些都影响试验结果。

由于实际混凝设施形式众多，要使搅拌杯和每种实际混凝设施几何相似是不可能的，为使搅拌杯具有较好的模拟作用、良好的阻流条件，借助国内外研究资料 and 实践经验，可将搅拌杯设计为方形杯，其中 $D:H=1:1$ （ $D$ 为搅拌杯的边长； $H$ 为搅拌杯中的有效水深）。

搅拌器形式虽然众多，混凝搅拌试验中一般采用平直叶单桨式搅拌器，搅拌强度计算式为：

$$G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}} = \sqrt{\frac{C_D \pi^3}{4\nu D^3} n^3 b d^4} \quad (3)$$

式中： $P$ 为搅拌功率； $d$ 为桨叶直径； $b$ 为桨叶高度； $V$ 为水样体积； $n$ 为桨叶转速； $\nu$ 为水的运动粘滞系数； $C_D$ 为阻力系数；其余符号意义同前。

令 $b/d=k_1$ 、 $d/D=k_2$ 代入(3)式得

$$n = \left( \frac{4\nu G^2}{C_D \pi^3 k_1 k_2^3 d^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

即：

根据相似原理，模型试验推广的前提是模型和原型现象相似即混凝效果相似，这种相似性除体现在模型和原型中某些无因次参数组合数相同外，还要求在模型和原型中某些初始条件必须相似，即，模型中的

流态必须和原型一致, 我们知道, 水流可分为层流运动和紊流运动, 两者有质的差别, 当水流的雷诺数  $R_e$  小于某一临界值( $R_{e_c}$  的下限)时, 水流在层流状态, 当水流的雷诺数 $R_e$  大于另一临界值(  $R_{e_c}$  的上限)时, 则水流在紊流状态, 由于实际絮凝池中水流多为紊流, 因此模型水流中相当于最小水流尺度(或水力半径)和最小流速时的雷诺数应大于上述临界值, 这就对模型设计加上了限制条件。关于雷诺数的临界值, 很多文献指出, 对于具备良好阻流条件的搅拌槽, 当雷诺数  $R_e \geq 10^3$  左右时, 就可按完全紊流处理, 即

$$R_e = nd^2/r \geq 10^3$$

(5)

为保证搅拌杯内的搅拌为紊流, 搅拌中就必须满足(5)式提出的限制条件, 则:

$$d \geq \left( \frac{10^9 C_D \pi^3 k_1 k_2^3 v^2}{4 G^2} \right)^{1/4}$$

(6)

$d/D = k_2$  代入(4)式, 得

$$D \geq \left( \frac{10^9 C_D \pi^3 k_1 v^2}{4 k_2 G^2} \right)^{1/4}$$

(7)

搅拌器一般  $K_1=0.1 \sim 1.0$ 、 $K_2=0.2 \sim 0.6$ 、 $C_D=0.2 \sim 0.5$ , 且在通常温度下, 水的粘滞性变化很小, 可大致视为一常数。在实际混凝工艺过程中,混合阶段 $G=700 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$ ,絮凝阶段  $G=20 \sim 70 \text{ s}^{-1}$  。为保证混合、絮凝阶段均处于紊流状态, 取最不利条件  $v=1.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $C_D=0.5$  、 $G=20 \text{ s}^{-1}$  代入(5)式, 计算不同  $K_1$  、 $K_2$  值时所需的最小  $D$  设计值, 见表 1。

表 1 最小 D 设计值      单位: m

| $K_2$ | $K_1$ |       |
|-------|-------|-------|
|       | 0.1   | 1.0   |
| 0.2   | 0.061 | 0.091 |
| 0.6   | 0.039 | 0.069 |

从表中可以看出,只要  $D$  大于 0.091m, 就能保证在最小搅拌强度  $G=20 \text{ s}^{-1}$  时, 搅拌杯内水流处于紊流。因此可将搅拌杯设计为有效容积 1L 方形杯, 断面 10cm×10cm, 高 15cm, 有效水深 10cm, 水面下 1/2 水深处设取样口。为验证设计的搅拌杯可行, 将该搅拌杯与较大容积的搅拌池进行了试验对比(见《环境污染与防治》2001(3)), 结果表明, 相似搅拌条件下混凝结果相似, 这说明用 1L 方形杯来模拟混凝工艺可行。

3.3 搅拌功率的确定

实际的混合、絮凝过程通常为紊流, 为使试验能够模拟生产过程, 试验中的混合和絮凝搅拌过程也须为紊流, 为此搅拌功率计算通式推荐为:

$$P = C_D \rho \omega^3 b d^4 / 32$$

(8)

式中:  $P$ —桨叶在搅拌杯中转动时消耗的功率, 即搅拌功率,  $W$ ;

$\omega$ —桨叶旋转角速度,  $\text{s}^{-1}$ ;

$d$ —桨叶直径,  $m$ ;

$b$ —桨叶高度,  $m$ ;



$\rho$ —水样的密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

$C_D$ —为阻力系数, 与桨叶、搅拌杯形式及在搅拌杯中的位置有关, 为此标准规定搅拌器和搅拌杯应为配套产品, 一般应通过测定后标定; 在无实测值时, 建议 $C_D$  取 0.3~0.5。

#### 4 试验规程

主要规定试验程序, 即如何设定试验操作参数和步骤: (1)设定混合搅拌转速和时间; (2)设定絮凝搅拌转速和时间; (3)设定沉淀时间。特别需要指出的是用于指导生产运行的混凝沉淀试验的操作参数, 不能任意选用, 应通过模拟试验确定, 标准阐述了模拟试验的操作方法和步骤。

#### 5 结语

混凝沉淀烧杯试验广泛应用于自来水厂、污水处理厂日常混凝沉淀工艺的模拟监控, 最佳混凝剂、助凝剂的优选和确定, 大专院校、科研院所的混凝沉淀研究, 水处理药剂生产厂的最佳药剂配方选择, 该标准的制定为其提供了指导。