

一项混凝沉淀设施选择与设计中的水动力学

马光春^①

高念东

(中国农业大学水利与土木工程学院) (北京市海淀区水利局)

摘要 根据地形和水利工程现状,通过水动力学的分析和计算,将旧水库改建为给水系统的混凝沉淀设施。恰当选择水深和水面面积,合理确定供水口的位置高度,可使水中杂质的去除率达80%以上,使水质浊度达到滤前要求,提高净水厂的水质标准,而水库仍不失原有功能。使农田水利工程与农村给水工程相结合,是农业供水的一项新措施。

关键词 给水工程;絮凝沉淀;水动力学

中图分类号 TU 991.23

Water Dynamics in Choice and Design of Mixing and Precipitation Equipment

Ma Guangchun

Gao Niandong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU) (Water Hydraulic Bureau, Haidian District, Beijing)

Abstract After water dynamics analysing and calculating, an old water reservoir is rebuilt into a precipitating equipment combining with the terrain and the present condition of water project. Correct choicing of water depth and area, reasonable determining the elevation of water intake, the impurity removing rate can be increased to 80% to meet the requirements of muddy degree of water before filtering and improve the water quality standard of water purification plant, yet the water reservoir still keep its original functions. It is a new method of farming water supply, in which the irrigation and water conservancy engineering are combined with water service.

Key words water service; flocculent precipitate; water dynamics

为解决京西山区部分农村的缺水问题,北京市海淀区将兴建1座供用水工程作为“九五”期间的一项重点项目。该工程给水系统全部建在山区,地形复杂、地势高差大。其水源分为地表水和地下水;地表水有山区雨洪集流,外域水库引水;地下水多在富水区凿井开采。给水系统采用全自动化控制,高水高用、低水低用的措施。本文中主要探讨该工程中混凝和沉淀设施的选择与设计时的有关水动力学问题。

1 混凝与沉淀设施形式的确定

一般情况下,混凝与沉淀设施在整个净水系统中要求去除80%~90%的悬浮固体,排出固体的质量分数为5%以上。现根据地形特点和水利工程现状,确定改造1座小型旧水库,作

收稿日期:1998-01-07

①马光春,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)54信箱,100083

为混凝沉淀的工程设施。

2 混凝沉淀池的设计

考虑地形因素,水库的蓄水表面积与蓄水深度有关。按 Hazen 理论,悬浮物的去除率取决于水池的表面积。在用水过程中,随着水库水位的不断变化沉淀率也会发生变化。改造水库为的是使库内水流形成各种特殊的流动形态,从而发挥高效混凝沉淀的作用。

2.1 设计原理及要求

沉淀池的设计,除了需要研究颗粒沉降速度的规律,还应考虑水流特性对颗粒沉降的影响。在实际的悬浮液中,悬浮颗粒的平均沉降速度 \bar{u} 可表示为

$$\bar{u} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^{\infty} u_i c_i$$

式中: c 为悬浮液中颗粒的质量浓度; c_i 为 i 级颗粒的质量浓度; u_i 为 i 级颗粒的沉降速度。沉淀池中各点悬浮颗粒的质量浓度 c 随空间和时间而改变,即 $c = f(x, y, z, t)$,它是扩散质的移流扩散连续方程。当池中水流只作水平运动,液体又不存在紊动扩散,其质量浓度在池宽方向上一致时,池内颗粒的质量浓度分布为稳定状态,用下式表示:

$$u_x \frac{\partial c}{\partial x} - \bar{u} \frac{\partial c}{\partial z} = 0$$

而 $c = f(x, z)$; u_x 为流速在 x 方向的分量。

进入水库中的水含有较多的杂质,尤其在雨季汇流水的浊度可超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在平时来自引渠的水,其浊度也在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。对于饮用水,为了不使过滤成本太高,要求滤前水质浊度不应超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [1]。

2.2 设计方法与指标

设计方法多为根据现行规范或其他准则并参照类似实际运行沉淀池的指标来选取设计数据。设计的主要指标是,在一定水平流速和池深情况下颗粒的停留时间和截留速度(表面负荷率)。对于非絮凝颗粒,其沉降速度变化不大,可以截留速度为控制指标;对于絮凝颗粒,还须考虑停留时间。为达到相同的沉淀效率,停留时间与池深的关系可表示为

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n \quad (n = 0.2 \sim 0.5)$$

式中: h_1, h_2 为水深; t_1, t_2 为相应池深中的絮粒停留时间。

3 混凝与沉淀中的水动力学

水流中杂质的沉淀形式有如下 3 种: 1) 山洪集水,杂质以平流形式沉淀; 2) 压力供水,通过跌水、射流和环流混凝后呈絮粒状沉淀; 3) 排放淤积物时形成势涡流动,引起部分悬浮颗粒的沉淀。通过对各种沉淀形式的水流特性的分析来确定沉淀池是否能满足滤前要求。

3.1 集水平流沉淀

在集水汇流中,多含有分散的土颗粒,呈自由沉淀。颗粒受重力的作用而下沉,同时又受到液体的浮力和颗粒下沉时液体颗粒的绕流阻力的作用 [2]。当作用力达到平衡时,颗粒等速下沉,其沉降速度为

$$u_s = \left[\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) d \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: u_s 为颗粒沉降速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; g 为重力加速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$; ρ_s, ρ 分别为颗粒和液体的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; d 为颗粒直径, cm ; C_D 为阻力系数, 与雷诺数 $Re (= d\rho u_s/\mu)$ 有关, 当 $Re < 10^4$ 时, C_D 的近似公式为

$$C_D = \frac{64}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (2)$$

设砂粒的相对密度为 2.65, 水温 20 °C, 由式(1)和(2)可得不同粒径颗粒的沉降速度, 如表 1 所示。

表 1 颗粒的沉降速度

$d/\mu\text{m}$	50	60	80	100	200	300
$u_s/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.25	0.32	0.56	0.81	2.07	4.03

颗粒在沉淀区的沉降轨迹为池内水体的水平流速 v 与颗粒沉降速度 u_s 合成方向的一直线。具有同一沉降速度的颗粒的轨迹互相平行。对于从进水区水面进入, 而在出水区正好到达池底的颗粒, 其沉降速度称为截留速度, 用 u_i 表示。 $u_s > u_i$ 的颗粒在沉降区全部被除去, 而 $u_s < u_i$ 的颗粒在沉降区只能部分被除去。设沉降区的截留时间为 t_i , 有

$$u_0 = \frac{h}{t_i} = \frac{h}{L/v} = \frac{h}{L} \frac{q_v}{Bh} = \frac{q_v}{LB} = \frac{q_v}{A}$$

式中: A 为库内水的表面积; q_v 为库区流量; L, B, h 分别为库区长、宽、深。可见 u_0 与水深无关, 仅取决于来流量与库水表面积。库区来流量按京西山区暴雨洪峰流量经验公式计算, 有

$$q_v = \alpha t^{0.4} S^{0.65}$$

取因数 $\alpha = 9$, 暴雨重现时间 $t = 20 \text{ a}$, 流域面积 $S = 1.5 \text{ km}^2$, 算得 $q_v = 38.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着水深的增大, 水面积也加大。

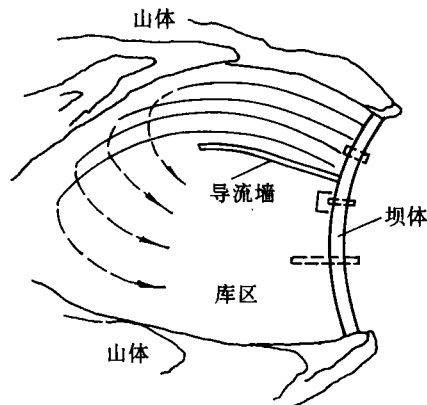
表 2 水深与截流速度的关系

h/m	28	24	20	16	12	8	7	6	5	4
A/m^2	52 500	46 144	36 432	27 520	19 110	13 794	1 108	922	792	693
$u_i/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.07	0.08	1.06	1.41	2.03	2.80	3.50	4.21	4.91	5.61

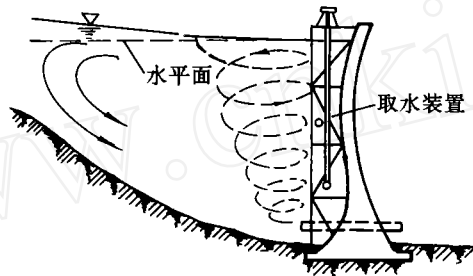
由表 1 及表 2 可得: 当 $h = 20 \text{ m}$ 时, $u_i = 1.06 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 粒径为 $100 \mu\text{m}$ 以上的砂粒能截留; 当 $t = 10 \text{ a}$, $q_v = 29.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $h = 8 \text{ m}$ 时, $50 \mu\text{m}$ 的砂粒都能被除去。所以取水口不能设在 8 m 以下, 但在一般情况下, 不是暴雨季节, 水深为 4 m 以上的水是可以引用的。为此, 可在不同高度处分设引水口, 供供水情况不同时选用。

3.2 供水絮凝沉淀

在枯水季节, 由京密引渠供水, 水体经长距离输送, 多含有胶体絮状物。在入口处投入铝盐, 经过跌水或射流混合, 使胶体形成絮粒, 在直流段内, 部分絮粒沉淀。未形成絮粒的胶体仍继续碰撞结合, 到水库的另一端进入环流区(图 1(a)), 絮状颗粒在压力差的作用下随环流潜入水下, 接触水库底部而被除去(图 1(b)), 剩余部分将散布在整个断面上, 趋于平流沉淀。絮粒沉降速度可用下式计算:



(a) 环流平面图



(b) 环流与势涡流剖面图

图1 库区水流形态

$$u'_s = 0.03 \frac{g}{\mu} a d^{2-k_p}$$

式中： μ 为液体的粘滞系数， $g \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ； a 为常量， $g \cdot \text{cm}^{-3}$ ； d 为絮粒粒径， cm ； k_p 为指数常数。当铝离子的质量浓度达 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，悬浮颗粒浊度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， a 取 $6 \times 10^{-4} g \cdot \text{cm}^{-3}$ ， k_p 取 1.2，絮粒直径取 0.05 cm 时，算得 $u'_s = 0.16 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于采用导流形式，流段长为 230 m ，进入平流段絮粒下沉 1 m 需 10 min 。在水深为 8 m ，供水量为 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，平流速度为 $0.45 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，絮粒到出口所用时间为 5 h ，这时絮粒下沉深度可达 30 m ，已到库底。

3.3 势涡流絮凝沉淀

水库运行中由于水深较大，下层水絮粒的质量浓度会加大，因此，当水厂靠库内蓄水供水时，下层水的水质需作处理。在排出底部污水时，水流形成势涡流动，同时加入铝盐使絮粒沉降。其水流特性如同点汇与势涡流的叠加。其流速势函数与流函数分别为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = m\theta - \frac{Q}{2\pi} \ln r$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = m \ln r - \frac{Q}{2\pi} \theta$$

式中： φ_1, φ_2 分别为汇、势涡流速势函数； ψ_1, ψ_2 分别为汇、势涡流函数； Q 为排污量； r 为质点距排污口的水平距离。流速分量为

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi r}; \quad u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{m}{r}$$

其流动图形如图2。势涡的切向速度矢量与半径正交,其大小与半径成反比,与汇的径向分速叠加后,其水流特性不变^[3],距排放出口距离越小流速越大,其动水头 $u^2/2g$ 也越大。在同一高度上任一点的外侧压力大于内侧压力^[4],絮粒在压差的作用下向中心移动,排出速度加快。由于下部絮粒的质量浓度降低,也使得上部絮粒的下沉速度加快。

3.4 在多种水流形态综合作用下的沉淀

整个供水系统运行中,水库内几种水流形态有时会同时出现,因而也会同时存在几种沉淀形式。对于任何一种沉淀形式,水库的尺度范围和形成的水面都能满足要求,所以综合运行时,沉淀不会受到不利影响。

4 结束语

此项供用水工程是根据地形条件并利用现有农田水利工程而兴建的。在净水系统中利用水流原理,除去水中的杂质,既能为农田灌溉提供水源,又能满足自来水管厂的供水要求,设施运行经济合理,不失为山区给水工程所借鉴。这项将农业水利工程与城郊农村给水设施相结合的工程措施,避免了农业用水与市政供水管理中的矛盾,提高了经济效益和社会效益。

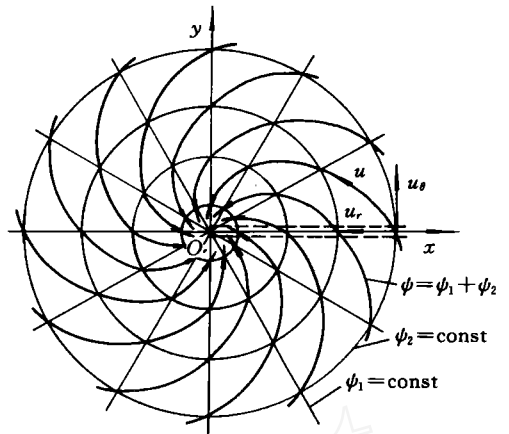


图2 排放沉淀的水流形态

参 考 文 献

- 1 钟淳昌. 净水厂设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 87~90
- 2 同济大学. 给水工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 280~284
- 3 清华大学水力学教研组. 水力学. 北京: 人民教育出版社, 1983. 169~175
- 4 戴莱 J W, 哈里曼 D R F 著. 流体动力学. 郭子中, 陈玉朴, 等译. 北京: 人民教育出版社, 1983. 145~146