

3

17-33

# 缺角正方形斜管沉淀技术的试验研究

罗辉荣      廖足良      刘荣光  
 许向东      张洪波      陈  静  
 (重庆建筑大学)  
 罗先贵<sup>√</sup>      魏忠健      周世海  
 (重庆市自来水公司)

TU991.23

**摘 要** 试验证明,缺角正方形斜管具有水力条件好、处理原水浊度范围较广、沉淀效果较好等优点。另外还做了缺角正方形斜管与蜂窝形斜管的对比试验研究;推导出了缺角正方形斜管的水力特性参数公式,为实际应用提供了计算公式。

**关键词** 斜管沉淀, 沉淀技术, 缺角正方形斜管

试验

**中图法分类号** TU991.23

通过改变斜管断面形状来进一步提高沉淀效率,降低斜管造价,是国内外学者一直在不断地进行探索的课题。本文提出了一种新型斜管——缺角正方形斜管,如图1和图2所示。这种缺角正方形斜管与蜂窝形(即正六边形)斜管相比,它的雷诺数  $Re$  更小,弗劳德数  $Fr$  更大,因此,管中水力条件更好;斜管沉淀池的单位池表面积的沉淀面积更大,故它的沉淀效率更高;它的V形槽更有利于斜管中污泥的下滑。因而,它的沉淀性能优于国内目前普遍采用的蜂窝形斜管。但从单位体积斜管体的制作材料来看,缺角正方形斜管比蜂窝形斜管少6%左右,可降低斜管造价。为了使这种沉淀性能良好、且较经济的新型斜管在生产实践中应用,我们在重庆高家花园水厂进行了小型试验,现将实验情况和结果简述如下。

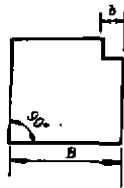


图1 缺角正方形斜管单管断面

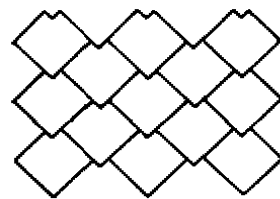


图2 缺角正方形斜管体横断面示意

\* 收稿日期:1994-02-27.

罗辉荣,男,1936年生,教授,重庆建筑大学城市建设学院(630045).

## 1 缺角正方形斜管沉淀性能试验

为了更好地了解缺角正方形斜管的沉淀性能,我们于 1991 年和 1992 年的二个洪水季节(6 月~10 月),在重庆高家花园水厂进行了小型试验。试验的目的是验证缺角正方形斜管处理嘉陵江高浊度水的可行性,探索缺角正方形斜管的设计参数,并对缺角正方形和蜂窝形两种斜管的沉淀性能作了对比试验。我们作了两种断面形状、四种断面尺寸的斜管(即缺角-30、缺角-35、蜂窝  $\Phi 30$ 、蜂窝  $\Phi 35$  四种,相应的边长  $B$  或内切圆直径  $\Phi$  为 30 和 35,见图 3),斜管倾角均为 60 度,斜管长度均为 1 米。试验期间,嘉陵江原水浊度为 70~10000 度,斜管的液面负荷率为  $8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ,  $12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ,投加的混凝剂为三氯化铁,采用跌水混合加管道混合,机械搅拌反应,搅拌叶轮直径分为三挡,相应的速度梯度  $G$  值为  $192 \text{ s}^{-1}$ ,  $76 \text{ s}^{-1}$ ,  $13 \text{ s}^{-1}$ ,反应时间为  $11 \text{ min} \sim 16 \text{ min}$ 。实验装置如图 4 所示。每次试验测定项目包括原水浊度、水温和 pH 值,斜管的液面负荷率,投药量,出水浊度等。实验期间共取得 1 万多个实验数据,经过数据处理,将其有代表性的数据列于表 1 和表 2。

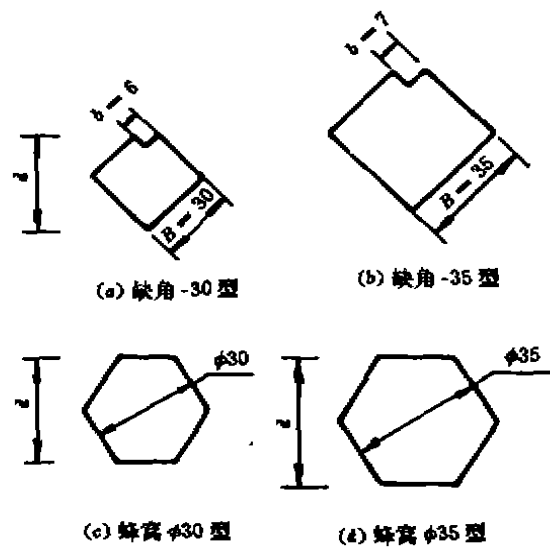


图 3 试验装置的断面尺寸

实验装置如图 4 所示。每次试验测定项目包括原水浊度、水温和 pH 值,斜管的液面负荷率,投药量,出水浊度等。实验期间共取得 1 万多个实验数据,经过数据处理,将其有代表性的数据列于表 1 和表 2。

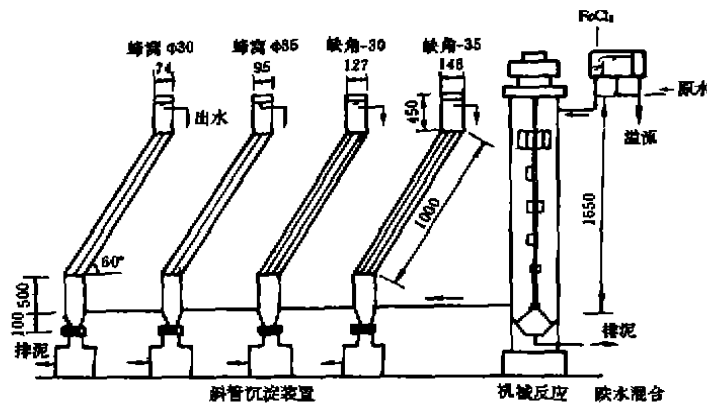


图 4 试验装置流程示意图

从表 1 可以看出:

1) 当原水浊度为 70~10000 度,液面负荷率  $q$  为  $8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  时,缺角-30 和缺角-35 斜管的出水浊度均可达到 10 度左右,说明缺角正方形斜管处理嘉陵江高浊度水是可行的。缺角-30 比缺角-35 斜管有明显良好的处理效果。当  $q$  为  $8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  时,缺角-30 比缺角-35 的出水浊度低 0.2~2.0 度。但缺角-30 斜管的材料用量却比缺角-35 增加很多。如

以缺角-35斜管的单位体积材料用量为100%,则缺角-30斜管为117%。我们认为:沉淀池出水水质要求较高的城市自来水厂,宜采用边长较小( $B=30, b=6$ )的缺角正方形斜管;出水水质要求较低的生产用水,可用边长较大的缺角正方形斜管,以节省投资。

2) 当出水浊度均控制在10度左右时,缺角正方形斜管在不同的液面负荷率 $q$ 时,所处理的原水最大浊度是不同的。即当 $q$ 为 $8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 时,处理的原水最大浊度为1万度;当 $q$ 为 $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 时,处理的原水最大浊度为6千度;当 $q$ 为 $12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 时,处理的原水最大浊度为4千度。我们认为,在斜管沉淀池的设计中,当原水浊度较高时, $q$ 宜取较小的值;当原水浊度较低时, $q$ 可取较大的值。

表1 缺角正方形斜管处理嘉陵江水的实验数据

分组数	$q=8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$			分组数	$q=10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$		
	原水浊度 (度)	平均出水浊度(度)			原水浊度 (度)	平均出水浊度(度)	
		缺角-30	缺角-35			缺角-30	缺角-35
1	83	8.66	8.80	1	70~85	10.81	11.15
2	100~120	8.48	8.72	2	100~150	9.87	10.63
3	300~350	10.00	10.99	3	260~290	9.80	10.83
4	560~700	11.80	12.37	4	400~500	9.65	10.47
5	900~1200	9.16	9.57	5	750~800	10.00	11.48
6	1300~1500	10.43	10.80	6	900~1200	9.34	10.16
7	2600~3000	8.63	9.54	7	1500~1800	10.18	11.47
8	4400~6000	7.37	7.88	8	2000~2200	9.52	10.14
9	6000~7500	8.33	8.20	9	2400~2600	9.37	9.95
10	8000~10000	8.79	10.81	10	5800~6000	9.50	11.20
$q=12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$							
1	70~79	9.89	10.87	6	1600~1700	8.86	9.87
2	200~245	9.85	10.75	7	2000~2400	9.49	10.10
3	260~340	9.95	10.69	8	2800~3100	8.62	9.85
4	550~680	10.13	10.95	9	3200~3500	9.83	10.39
5	1100~1200	9.49	10.39	10	3600~4100	9.74	11.24

从表2可以看出,缺角-30斜管与蜂窝 $\Phi 30$ 斜管相比,在液面负荷率为 $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 和 $12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 时,两者水处理能力相差不大,从实测结果来看,相对而言,缺角正方形斜管稍好些。即缺角-30比蜂窝 $\Phi 30$ 斜管的出水浊度平均低0.26度。这可能是由于两者雷诺数 $Re$ 相近,且缺角正方形斜管的 $Re$ 比蜂窝形斜管稍小的缘故。实验证明,缺角正方形斜管是一种沉淀性能良好的新型斜管。此外,经计算得到制作缺角正方形斜管的材料用量,仅为相同尺寸的蜂窝形斜管的94%。因而,缺角正方形斜管更为经济。

表 2 缺角正方形斜管与蜂窝形斜管对比实验数据

分组数	$q=10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$			$q=10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$		
	原水浊度	平均出水浊度(度)		原水浊度	平均出水浊度(度)	
	(度)	缺角-30	蜂窝 $\Phi 30$	(度)	缺角-30	蜂窝 $\Phi 30$
1	70~85	10.81	11.06	70~79	9.89	10.17
2	100~150	9.87	10.46	120~156	10.26	10.48
3	180~210	9.54	9.10	200~245	9.85	10.08
4	260~290	9.80	10.14	260~340	9.95	10.43
5	400~500	9.65	9.98	550~680	10.13	10.26
6	600~650	11.34	11.47	700~800	9.33	9.68
7	750~800	10.00	10.38	900~1000	9.63	9.72
8	900~1200	9.34	9.68	1100~1200	9.49	9.63
9	1500~1800	10.18	10.71	1600~1900	8.86	9.20
10	2000~2200	9.52	9.68	2000~2400	9.49	9.78

## 2 缺角正方形斜管的水力特性参数公式

为了给缺角正方形斜管的实际应用提供计算公式,我们推导了缺角正方形斜管的水力特性参数公式。即根据水流在管中处于层流状态,假定水中悬浮杂质为离散颗粒(即在沉淀过程中颗粒不再凝聚),管中水的流速分布不均等条件,根据牛顿内摩擦定律和流体力学理论,由上向流斜管中悬浮杂质颗粒沉降轨迹微分方程经数学推导,得出斜管内水流平均流速、杂质颗粒的沉降速度、斜管长度、缺角正方形斜管断面的边长  $B$  和斜管倾角  $\theta$  等五个物理量之间的函数关系式。

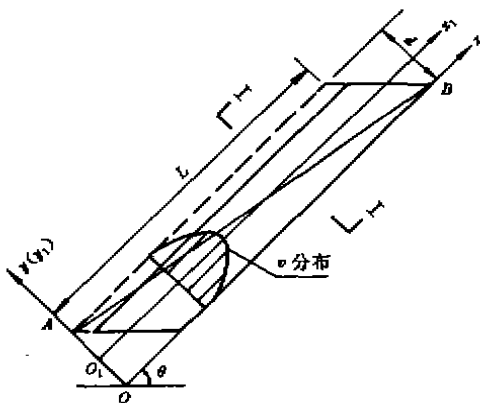


图 5 上向流缺角正方形斜管剖面

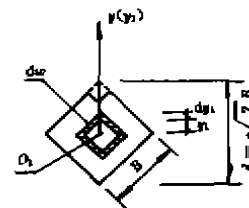


图 6 上向流缺角正方形斜管 I-I 断面

考虑到缺角正方形斜管中缺角部分仅占斜管体积的很少一部分(如缺角-35 斜管的缺

角部分仅占总体积的4.1%)，它对斜管内水流的水力条件和斜管沉淀效果影响甚微。为了简化推导过程，在公式推导中首先忽略缺角的影响，按正方形斜管断面形状进行推导，得出水力特性参数公式后再进行修正。其简要推导过程如下：

设有一离散颗粒从进口端A点开始下沉，最终恰好到达出口端B点。以斜管的外缘为 $x$ 轴，以斜管中心线为 $x_1$ 轴，与 $x_1$ 轴相垂直的为 $y(y_1)$ 轴，建立 $(x, y)$ 和 $(x_1, y_1)$ 直角坐标系，如图5示。图6为缺角正方形斜管的横断面图。图中 $B$ 为正方形斜管的边长， $d$ 为其对角线长。虚线部分表示被忽略的缺角。我们知道，上向流斜管中悬浮杂质颗粒沉降轨迹微分方程为：

$$\int \frac{v}{\bar{v}} dy - \frac{u}{\bar{v}} y \sin \theta + \frac{u}{\bar{v}} x \cos \theta = C \quad (1)$$

式中  $v$ ——斜管中某点的水流速度  
 $\bar{v}$ ——斜管中水流平均流速  
 $u$ ——斜管内杂质颗粒的沉速  
 $C$ ——积分常数

要想求解微分方程(1)，必须先求出 $v$ 和 $\bar{v}$ 。

### 2.1 求缺角正方形斜管中水流速度 $v$

根据牛顿内摩擦定律，当水流为层流时，两相邻水层之间的摩擦剪应力 $\tau$ 为：

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy_1} \quad (2)$$

式中  $\mu$ ——水的动力粘滞系数  
 $\frac{dv}{dy_1}$ ——相邻两水层间的速度梯度

从水力学可知，层流时水的摩擦剪应力 $\tau$ 为： $\tau = \gamma Ri$  (3)

式中  $\gamma$ ——水的容重  
 $R$ ——水力半径  
 $i$ ——水力坡度

对 $(x_1, y_1)$ 坐标系任意点 $y_1$ 而言，

$$R = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{2y_1^2}{4\sqrt{2}y_1} = (\sqrt{2}/4)y_1 \quad (4)$$

由(2)、(3)、(4)式得

$$dv = \frac{\gamma Ri}{\mu} dy_1 = -(\sqrt{2}\gamma i/4\mu)y_1 dy_1 \quad (5)$$

积分得  $v = -\frac{\sqrt{2}\gamma i}{8\mu} y_1^2 + C_1$  (6)

当 $y_1 = \frac{1}{2}d$ 时， $v = 0$ ，代入(6)式得： $C_1 = \frac{\sqrt{2}\gamma i}{32\mu} d^2$

于是  $v = \frac{\sqrt{2}\gamma i}{8\mu} \left( \frac{1}{4}d^2 - y_1^2 \right)$  (7)

将 $(x_1, y_1)$ 直角坐标系变换为 $(x, y)$ 直角坐标系，则有： $y_1 = y - \frac{d}{2}$  (8)

将(8)式代入(7)式得到

$$v = \frac{\sqrt{2}\gamma i}{8\mu} (yd - y^2) \quad (9)$$

## 2.2 求缺角正方形斜管的管内平均流速 $\bar{v}$

$$\bar{v} = \frac{\int v \cdot d\omega}{\omega} \quad (10)$$

从图 6 可以得到  $\omega = \frac{1}{2}d^2$

$$d\omega = 2(y_1 + dy_1)^2 - 2y_1^2 = 4y_1 dy_1 + 2(dy_1)^2$$

省略  $(dy_1)^2$  项得  $d\omega = 4y_1 dy_1$

将  $\omega, d\omega$  和 (9) 式代入 (10) 式得

$$\bar{v} = \frac{2}{d^2} \int_0^{\frac{1}{2}d} \frac{\sqrt{2} \gamma_i}{8\mu} \left( \frac{1}{4}d^2 - y_1^2 \right) 4y_1 dy_1$$

对上式积分并化简得  $\bar{v} = \frac{\sqrt{2}}{64} \frac{\gamma_i}{\mu} d^2$  (11)

## 2.3 求 $v/\bar{v}$

由 (9) 和 (11) 式可得  $v/\bar{v} = \frac{8}{d^2}(yd - y^2)$  (12)

## 2.4 求上向流缺角正方形斜管水力特性参数公式

将 (12) 式代入上向流斜管中悬浮杂质颗粒沉降轨迹微分方程 (1) 式得

$$\int \frac{8}{d^2}(yd - y^2)dy - \frac{u}{v}y\sin\theta + \frac{u}{v}x\cos\theta = C \quad (13)$$

(13) 式第一项积分后得

$$\frac{4}{d}y^2 - \frac{8}{3d^2}y^3 - \frac{u}{v}y\sin\theta + \frac{u}{v}x\cos\theta = C_2 \quad (14)$$

由图 5 可知, 颗粒沉降轨迹  $AB$  在  $B$  点的边界条件为:  $x = L + d\text{ctg}\theta, y = 0$ , 将其代入 (14) 式得

$$\frac{u}{v}L\cos\theta + \frac{u}{v}d \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} = C_2$$

将  $C_2$  的值代入 (14) 式得

$$\frac{4}{d}y^2 - \frac{8}{3d^2}y^3 - \frac{u}{v}y\sin\theta + \frac{u}{v}x\cos\theta = \frac{u}{v}L\cos\theta + \frac{u}{v}d \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta} \quad (15)$$

同时,  $A$  点的边界条件为  $x = 0, y = d$ , 将它代入 (15) 式得

$$S = \frac{u}{v} \left( \frac{L}{d}\cos\theta + \frac{1}{\sin\theta} \right) = \frac{4}{3} \quad (16)$$

由图 6 知,  $d$  为正方形对角线长, 其值为  $\sqrt{2}B$ .

(16) 式可改写成

$$S = \frac{u}{v} \left( \frac{L}{\sqrt{2}B}\cos\theta + \frac{1}{\sin\theta} \right) = \frac{4}{3} \quad (17)$$

(17) 式即为忽略缺角影响的缺角正方形斜管的水力特性参数方式。

考虑到实验中采用的缺角正方形斜管, 其缺角部分边长  $b$  为正方形边长  $B$  的  $1/5$ , 即  $b = (1/5)B$ . 在 (16) 式中, 正方形断面的斜管,  $d = \sqrt{2}B$ ; 而缺角正方形断面的斜管,  $d = \left( \sqrt{2} - \frac{\sqrt{2}}{5} \right) B = 1.13B$ . 虽然缺角正方形比正方形斜管面积略有减少, 但湿周并未减小。

对层流条件有利,综合考虑修正为  $d = 1.1B$ . 因而,修正后的缺角正方形斜管水力特性参数公式为:

$$S = \frac{u}{v} \left( \frac{L}{1.1B} \cos\theta + \frac{1}{\sin\theta} \right) = \frac{4}{3} \quad (18)$$

(18) 式可作为上向流缺角正方形斜管的设计计算公式。

### 3 结 论

- 1) 缺角正方形斜管是一种比蜂窝形斜管水力条件更好的断面形状。
- 2) 小试实验证明,缺角正方形斜管具有处理原水浊度范围较广、沉淀效果较好等优点;在原水浊度、水温、pH 值,投药量,混合反应条件和出水水质相同的情况下,与蜂窝形斜管相比,缺角正方形斜管可节省斜管制作材料约 6%,因而,它有较好的实用价值。
- 3) 从理论上推导出了缺角正方形斜管的水力特性参数公式,该公式可作为设计计算公式。

#### 参 考 文 献

- 1 同济大学主编,给水工程.北京:中国建筑工业出版社,1980,9
- 2 周善生主编,水力学.北京:人民教育出版社,1980,7

(编辑:刘家凯)

## RESEARCH ON SEDIMENTATION TECHNOLOGY OF SQUARE-WITH-GAP TUBE

*Luo Huirong      Liao Zuliang      Liu Rongguang*

*Xu Xiangdong      Zhang Hongbo      Chen Jing*

(Chongqing University of Architecture)

*Luo xianguai      Wei Zhongjian      Zhou Shihai*

(Chongqing Company of Water Supply)

**ABSTRACT** Researches show that square-with-gap tube has advantages of better hydraulic conditions, broad adaptability for treatment of various raw waters and high sedimentation efficiency. A contrast experiment is carried out between square-with-gap tube and hexagonal tube. The formula of hydraulic character parameter is deduced for square-with-gap tube provides to theoretical base for practical application of square-with-gap tube.

**KEY WORDS** tube settling, sedimentation technology, square-with-gap tube