

异波折板絮凝池单元水头损失的计算公式

孙友勋, 谭章荣, 范瑾初

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 异波折板絮凝池的水头损失在设计中均采用明渠渐放和渐缩公式来计算, 本研究在模型试验中发现利用给排水设计手册计算值与实测值相差较大。根据模型试验数据, 通过量纲分析, 用最小二乘法拟合得出异波折板单元的半经验半理论水头损失计算公式。

关键词: 异波折板絮凝池; 水头损失; 絮凝

中图分类号: TU991.22 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(1999)10-0029-04

异波折板絮凝池是在隔板絮凝工艺的基础上由我国研究发展起来的净水新工艺, 具有结构紧凑、絮凝时间短、效果好、维护管理方便等优点, 自 80 年代以来在新建及改造水厂中得到了广泛应用, 然而折板单元水头损失计算还存在许多问题。

1 量纲分析

异波折板单元如图 1 所示。

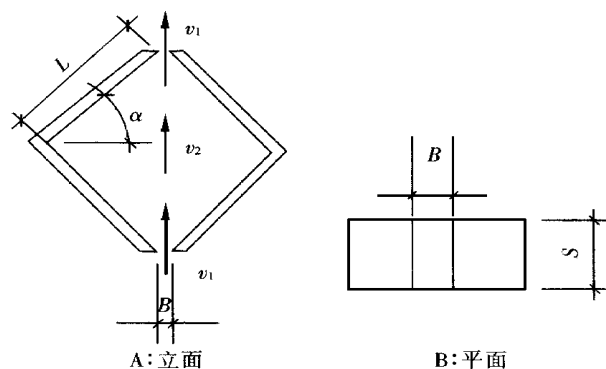


图 1 异波折板单元示意图

假定折板单元是光滑的, 即忽略粗糙度的影响, 则折板单元的压力损失(ΔP)是表 1 中各变量的函数。

写成函数形式:

$$\Delta P = f(\mu, L, B, R, \rho, v, \alpha) \quad (1)$$

式中 ΔP ——因变量

$\mu, L, B, R, \rho, v, \alpha$ ——自变量

根据 π 定理^[1], $Z=8, r=3$

$$N(\pi) = Z - r = 5 \quad (2)$$

式中 Z ——所有变量的总数

r ——基本量纲的数目

$N(\pi)$ ——独立的无量纲数的最大数目

表 1 压力损失变量表

变量名称	符号	量纲
流体粘度	μ	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$
流体密度	ρ	ML^{-3}
波峰流速	v	LT^{-1}
折板板长	L	L
波峰间距	B	L
波峰水力半径	R	L
转折角度	α	无
压力损失	ΔP	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$

无量纲数 π 的一般表达式可以写为:

$$\pi = (\Delta P)^a \mu^b L^c B^d R^e \rho^f v^g \alpha^h \quad (3)$$

式中 a, b, c, d, e, f, g, h ——各变量的量纲幂

它们的组合应使 π 成为无量纲数 (由于 α 本身无量纲, 可将 α 视作无量纲数)。

将各变量的相应量纲代入并整理得:

$$\pi = M^{a+b+f} L^{-a-b+c+d+e-3f+g} T^{-2a-b-g} \quad (4)$$

于是:

$$\begin{cases} a + b + f = 0 \\ -a - b + c + d + e - 3f + g = 0 \\ -2a - b - g = 0 \end{cases} \quad (5)$$

因变量是 7 个, 方程只有 3 个, 所以有 4 个变量可以任意选择。选择 4 组 a, b, c, d 的值代入方程组

$$(a, b, c, d) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

① $a=1, b=0, c=0, d=0$, 得 $e=0, f=-1$,
 $g=-2$, 于是:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad (7)$$

② $a=0, b=1, c=0, d=0$, 得 $e=-1, f=-1, g=-1$, 于是:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho v} \quad (8)$$

③ $a=0, b=0, c=1, d=0$, 得 $e=-1, f=0, g=0$, 于是:

$$\pi_3 = \frac{L}{R} \quad (9)$$

④ $a=0, b=0, c=0, d=1$, 得 $e=-1, f=0, g=0$, 于是:

$$\pi_4 = \frac{B}{R} \quad (10)$$

再加上无量纲数 $\pi_5 = \alpha^h$, 因此存在一函数关系
 $f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0$, 即

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho v}, \frac{L}{R}, \frac{B}{R}, \alpha\right) \quad (11)$$

这样, 问题便简化为求解五个无量纲数之间的关系。

参照管道水头损失公式的形式, 假定折板单元压力损失公式是以下形式:

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = K \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^{a_1} \left(\frac{L}{R}\right)^{a_2} \left(\frac{B}{R}\right)^{a_3} \alpha^{a_4} \quad (12)$$

式中 K ——无量纲常数

a_1, a_2, a_3, a_4 ——幂次, 待定

无量纲数 α 也有可能是 $\sin \alpha, \cos \alpha$ 的形式。

表 3 实测水头损失与手册计算值比较

波峰流速 (m/s)	实测水头损失			手册计算值		
	渐扩段 (mm)	渐缩段 (mm)	总水头损失 (mm)	渐扩段 (mm)	渐缩段 (mm)	总水头损失 (mm)
0.3	4	1	5	2.3	5.0	7.3
0.4	8	2	10	4.1	8.9	13.0
0.445	11	2	13	5.0	11.0	16.0
0.556	17	2	19	7.8	17.2	25.0

由表 3 可见, 折板单元实测水头损失总是渐扩段大于渐缩段, 这与文献[2]中的阐述相符。而手册计算则正相反。关于总水头损失, 手册计算所得值略大于实测值, 这可能是因壁面粗糙及水头损失系数取值太大所致。从模型试验数据来看, 手册中渐扩与渐缩段水头损失计算公式值得商榷。实测渐扩

两边取对数:

$$\ln \frac{\Delta P}{\rho v^2} = \ln K + a_1 \ln \frac{\mu}{\rho v} + a_2 \ln \frac{L}{R} +$$

$$a_3 \ln \frac{B}{R} + a_4 \ln \alpha \quad (13)$$

$$\text{令 } y = \ln \frac{\Delta P}{\rho v^2}, a_0 = \ln K, x_1 = \ln \frac{\mu}{\rho v}, x_2 = \ln \frac{L}{R},$$

$$x_3 = \ln \frac{B}{R}, x_4 = \ln \alpha \quad (14)$$

则公式变为:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \quad (15)$$

式(15)是多元变量线性方程。这样, 可以根据水力试验数据计算所得的 N 组数据 ($y_i, x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}$) ($i=1, \dots, N$) 利用最小二乘法拟合解出 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 得到水头损失计算公式。

2 试验结果

2.1 模型试验设计

由于进行生产性试验比较困难, 故设计了一组异波折板单元模型, 材料采用平板玻璃, 符合壁面光滑的假定。设计模型参数见表 2。

表 2 模型参数

模型编号	板长 L (mm)	夹角 α	波峰间距 B (mm)
M ₁	100	90°	10
M ₂	100	120°	10
M ₃	150	90°	20
M ₄	150	120°	10

2.2 实测结果与给排水设计手册计算结果对比

模型单元水头损失用特制的测压板测量, 实测水头损失与给排水设计手册计算值的比较见表 3。

与渐缩水头损失值与手册计算值相差较大可能是以下原因:

① 手册计算系将明渠渐扩及渐缩段简单相加。实际上折板单元内渐扩和渐缩段组成一个整体, 其中流态较为复杂 (见图 2), 与两者简单相加时流态不同。

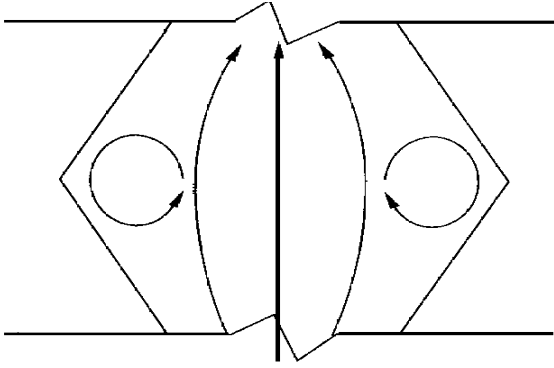


图2 折板单元流态分布

② 波谷流速的计算取值影响。手册计算波谷流速采用流量除以面积来确定,而折板单元中由于存在较强的紊流涡旋,故以断面平均流速来计算流速水头便存在一定的误差。折板单元波谷断面流速分布如图3所示。

以上分析可见,目前异波折板絮凝单元的水头损失计算公式在理论和实际中都存在重大的缺陷。

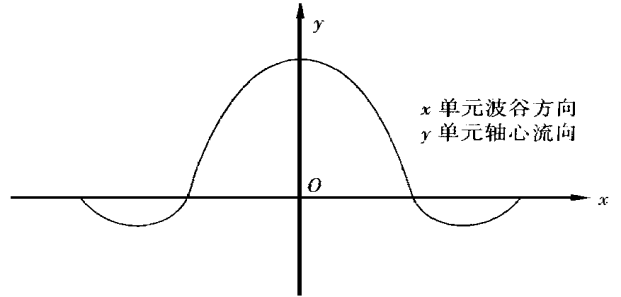


图3 波谷断面平均流速分布

根据量纲分析,我们将渐扩与渐缩段视为一个单元,由于两端流速相同,由流速计算引起的误差可以抵消,通过对模型水力试验数据的拟合,可以得出一个针对异波折板絮凝单元的水头损失计算公式。

2.3 最小二乘法拟合水头损失计算公式

四组模型各进行四种流速的试验,共得16组数据如表4。

表4 试验结果

模型编号	流量 (m ³ /h)	折板长度 L (mm)	折板夹角 α	粘度 μ (Pa·s)	波峰流速 v (m/s)	波峰间距 B (mm)	水的密度 ρ (kg/m ³)	波峰水力半径 R (mm)	总水头损失 ΔP (mm)
M1	0.54	100	45°	0.001 13	0.3	10	1 000	4.17	5
	0.72	100	45°	0.001 13	0.4	10	1 000	4.17	10
	0.8	100	45°	0.001 13	0.445	10	1 000	4.17	13
	1	100	45°	0.001 13	0.556	10	1 000	4.17	19
M2	0.54	100	60°	0.001 13	0.3	10	1 000	4.17	6.5
	0.72	100	60°	0.001 13	0.4	10	1 000	4.17	11.5
	0.8	100	60°	0.001 13	0.445	10	1 000	4.17	15
	1	100	60°	0.001 13	0.556	10	1 000	4.17	23
M3	0.54	150	45°	0.001 13	0.15	20	1 000	7.14	1.5
	0.72	150	45°	0.001 13	0.2	20	1 000	7.14	2.5
	0.8	150	45°	0.001 13	0.222	20	1 000	7.14	3.3
	1	150	45°	0.001 13	0.278	20	1 000	7.14	4.5
M4	0.54	150	60°	0.001 13	0.3	10	1 000	4.17	7.5
	0.72	150	60°	0.001 13	0.4	10	1 000	4.17	13
	0.8	150	60°	0.001 13	0.445	10	1 000	4.17	17
	1	150	60°	0.001 13	0.556	10	1 000	4.17	24

依据公式(14)计算出16组($x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, y_i$)。利用计算程序计算各系数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 得(当角度以 α° 形式出现时):

$a_0 = -1.502\ 64, a_1 = 0.007\ 3, a_2 = 0.27, a_3 = 0.46, a_4 = 0.64$,代入式(12)得:

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = 0.223 \left(\frac{\mu}{\rho \nu} \right)^{0.007\ 3} \left(\frac{L}{R} \right)^{0.27} \left(\frac{B}{R} \right)^{0.46} \alpha^{0.64} \quad (16)$$

以 $\Delta P = \rho g \Delta h, \rho = 1\ 000$ 代入, Δh 为水头损失,得:

$$\Delta h = 0.424 \frac{\mu^{0.007\ 3} L^{0.27} B^{0.46} \alpha^{0.64}}{R^{0.733}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (17)$$

由式(17)可以看出,异波折板单元水头损失受 L, μ, B, R, α 及 v 的共同影响,且水头损失为流速的1.99次方。对于一定的折板单元,受 μ 的影响较

小。以水温 20 °C 时粘度 $\mu = 1.01 \times 10^{-3}$ 代入式 (17) 得:

$$\Delta h = 0.400 \frac{L^{0.27} B^{0.46} \alpha^{0.64}}{R^{0.733}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (18)$$

同理,当角度以 $(\sin \alpha)^h$ 形式出现时,计算可得: $a_0 = 1.34253$, $a_1 = 0.0073$, $a_2 = 0.27$, $a_3 = 0.46$, $a_4 = 0.91$, 代入式 (12) 得:

$$\Delta h = 0.472 \frac{L^{0.27} B^{0.46} (\sin \alpha)^{0.91}}{R^{0.733}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (19)$$

当角度以 $(\cos \alpha)^h$ 形式出现时,计算可得: $a_0 = -1.84128$, $a_1 = 0.0073$, $a_2 = 0.27$, $a_3 = 0.46$, $a_4 = -0.53$, 代入式 (12) 得:

$$\Delta h = 0.286 \frac{L^{0.27} B^{0.46}}{R^{0.733} (\cos \alpha)^{0.53}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (20)$$

式 (18) ~ (20) 即为异波折板单元的水头损失计算公式。

2.4 公式的推广

上述水头损失公式是在假定壁面光滑的情况下得出的,而实际生产中,折板单元壁面粗糙度不应忽略。故而可考虑加上一个修正系数 K , 即公式变为:

$$\Delta h = K \frac{L^{0.27} B^{0.46} (\sin \alpha)^{0.91}}{R^{0.733}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (21)$$

或:

$$\Delta h = K \frac{L^{0.27} B^{0.46}}{R^{0.733} (\cos \alpha)^{0.53}} \cdot \frac{v^{1.99}}{2g} \quad (22)$$

式中 K ——由试验确定的系数

由于折板单元高度与角度是 $\sin \alpha$ 关系,而波谷宽度与角度是 $\cos \alpha$ 关系,因此式 (20)、(22) 都是合理的,建议实际计算中采用。因它们是利用试验数据解出的理论公式,故而可称之为半经验半理论公式。在絮凝试验中用此公式计算的水头损失与实测值符合得较好。

3 结论

① 通过模型水力试验,得出了异波折板絮凝单元的水头损失计算公式。公式虽然在模型试验中得到了较好的验证,但由于壁面粗糙度等因素的影响,应用于生产实践中尚待进一步研究。

② 试验中发现异波折板絮凝单元的水头损失渐扩段大于渐缩段,与手册计算公式相反。因此,研究异波折板絮凝单元的水头损失计算公式,具有理论及实践的双重意义。

参考文献:

- [1] 李士豪. 流体力学[M]. 高等教育出版社, 1990.
- [2] 康士坦丁诺夫 M. 水力学[M]. 钟用升译. 江西高校出版社, 1990.

电话: (0) 13901720712 (021) 65017139

收稿日期: 1999 - 02 - 11