

述评与讨论

31-34

纤维球——砂过滤水头损失方程的研究

周北海 王占生^① 全浩
(中日友好环境保护中心)

TU 991.24

1 水头损失方程回顾

水流经滤床,就会产生水头损失。在低孔隙率(40~50%)的滤床中,水流经过时产生的水头损失可用水力半径理论(hydraulic radius theory)计算;对高孔隙滤床则用渗透曳力理论(drag force theory of permeability)计算。现存两种特别形式的曳力理论,它们取决于所观察的障碍物的几何形状——“纤维”和球体。这里主要谈前一种情况——纤维理论(fibre theory)。

将想像中的“拖曳”障碍物看作纤维状,作用在“纤维”上的力 F 等于三个相互垂直方向上作用力的简单加和或线性叠加,而每一方向上的作用力可用 Navier-Stokes 方程计算。

自本世纪五十年代后期,纤维理论受到人们的重视。在 Navier-Stokes 方程的基础上, Happel^[1] 求出了圆形单元综合方程

$$\frac{K}{d^2} = -\frac{3}{32(1-\epsilon)} \{ [2 \ln(1-\epsilon) + 3 - 4(1-\epsilon) + (1-\epsilon)^2]^{-1} + 2[\ln(1-\epsilon) + \frac{1-(1-\epsilon)^2}{1+(1-\epsilon)^2}]^{-1} \} \quad (1)$$

Drummond & Tahir^[2] 求出了正方形单元综合方程

$$\frac{K}{d^2} = \frac{3}{80(1-\epsilon)} [-\ln(1-\epsilon) - 1.476 + 2(1-\epsilon)] \quad (2)$$

张锡辉^[3] 通过实验得到了纤维球的综合方程

$$\frac{K}{d^2} = -7.5(1-\epsilon) + 0.93 \quad (3)$$

此外,还有其他一些学者也提出了数学方程^[4~8]。

2 实验方法

本文实验所用滤料有纤维球(球径 D_c : 2.5cm, 球重 W_f : 0.53g/个, 丝径 d : 15 μ m)、砂(0.5~1.0mm)和它们组成的双层滤料纤维球——砂。由这三种滤料组成的滤床规格见图1。

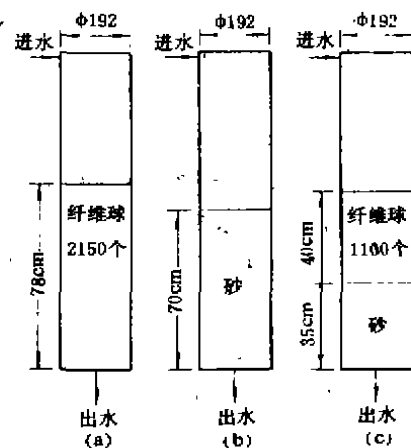


图1 滤床的结构示意

通过多次观察发现,2150(1100)个纤维球在滤柱内人为分成23层,即每层共有46~47个球。实验时由上至下观察10(或5)层纤维球的高度,所得数据为该10(或5)层球中间处的孔隙率,计算公式可用

① 清华大学环境工程系,北京 100084

$$\epsilon_f = 1 - 4 \frac{2150 \times \text{层数} \times W_f}{46 P_f} \frac{1}{\pi D_c^2 \Delta H} \quad (4)$$

通过从滤柱内直接取球计算相比,结果相近。

3 ϵ 、 σ_v 和 d 的计算

3.1 纤维球滤床

设滤床的孔隙率为 ϵ , 比沉量为 σ_v , 则滤床有效孔隙率 ϵ_e :

$$\epsilon_e = \epsilon - \sigma_v \quad (5)$$

对重为 W_f 的纤维球, 截留真比重为 P_f 重为 W_s 的泥, 则滤床积泥的比沉量 σ_v :

$$\sigma_v = \frac{P_f(1 - \epsilon_f)W_f}{P_s(1 - \epsilon_s)W_s} \quad (6)$$

过滤时由于积泥的存在, 纤维丝的直径由 d_s 增加到 d , d 的计算公式:

$$d = d_s \left(1 + \frac{\sigma_v}{1 - \epsilon_f}\right)^{1/2} \quad (7)$$

3.2 砂滤床

设砂滤床的孔隙率为 ϵ_s (≈ 0.423), 比沉量为 σ_{vs} , 则滤床有效孔隙率 ϵ_e :

$$\epsilon_e = \epsilon_s - \sigma_{vs} \quad (8)$$

对重为 W_s 的砂 (比重为 P_s) 截留泥重为 W_f' , 则滤床的比沉量 σ_{vs} :

$$\sigma_{vs} = \frac{P_s(1 - \epsilon_s)W_s'}{P_f(1 - \epsilon_f)W_f} \quad (9)$$

4 实验结果及讨论

4.1 积泥孔隙率 ϵ_d 和真比重 P_f

收集反冲洗出水, 静置 24h 后取出一定体积的积泥, 置于称量好的带刻度的烧杯中称重, 之后将烧杯放到 105℃ 烘箱中烘干, 恒重称量。蒸发掉的水即为积泥孔隙中的水, 由此可计算出积泥的 ϵ_d 和 P_f 分别为 0.825 和 2.64。

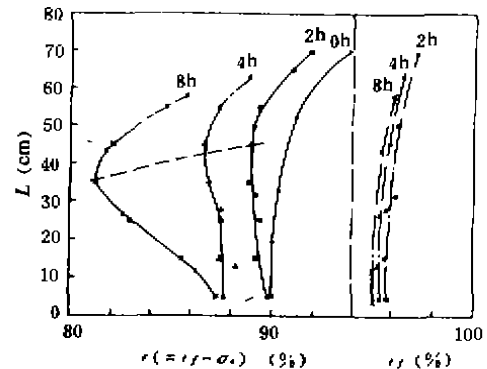
4.2 滤床有效孔隙率 ϵ_e

过滤时滤床积泥的增加和滤床高度的压缩, 都会减少滤床的 ϵ_e 。前者的作用体现到 σ_v 中, 而後者的作用结果反映到 ϵ_f 里。由图 2(a、b) 可看出, 纤维球滤层 ϵ_e 的减少是 ϵ_f 和 σ_v 变化的共同作用结果, 且以 σ_v 的作用为主。纤维球滤床 ϵ_e 的分布是中间小, 上、下大, 随着过滤的进行, ϵ_e 的峰值 (最小孔隙率) 逐渐下移 (图中虚线)。

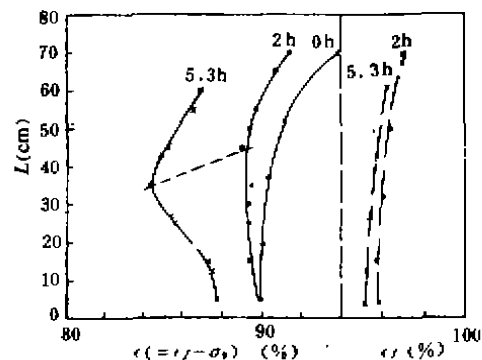
对于砂滤床过滤, 积泥主要集中于表层, 砂子的 ϵ_s 几乎不随过滤而变化, 造成砂层 ϵ_e 减

少只是 σ_v 作用的结果 (图 3)。

双层滤料的纤维球层沿滤床自上至下逐渐减小, 造成的原因主要是在过滤时整个纤维球层充分发挥了截泥作用, 下面的砂层主要起防穿透作用 (图 4)。



(a) $C_{\text{cos}} 0.1 \text{ mg/L}$



(b) $C_{\text{cos}} 0.4 \text{ mg/L}$

图 2 纤维球过滤时 $\epsilon_e(\epsilon_f) \sim L$ 的关系

+ C_{cos} 系聚胺类高聚物 (下同)

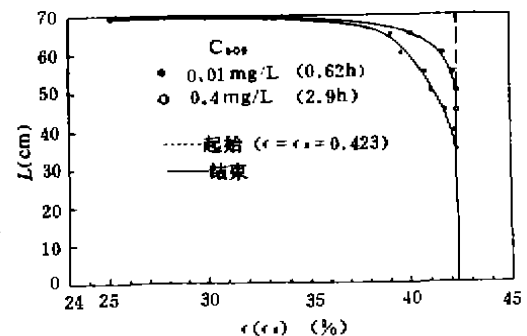
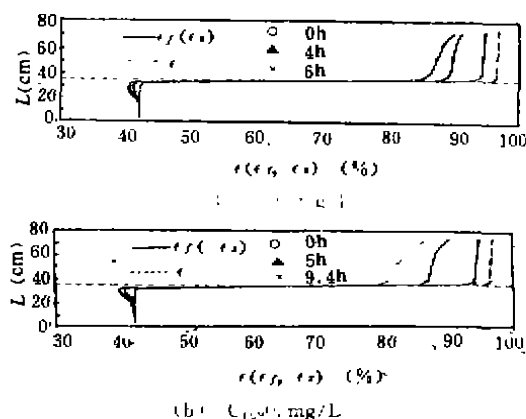


图 3 砂过滤时 $\epsilon_e(\epsilon_s) \sim L$ 的关系

4.3 水头损失方程

4.3.1 纤维球层

对于纤维 (球) 滤料主要存在 Happel 等人

图4 纤维球-砂过滤时 $\epsilon(\epsilon_f, \epsilon_s) \sim L$ 的关系

提出的方程, 现把 Happel 等人的理论方程和本文实验数据绘于图 5。通过计算得到纤维球层的 K/d^2 与 ϵ 的关系, 可表示:

$$K/d^2 = 1.62 \times 10^4 - 5.58 \times 10^5 (1 - \epsilon) + 4.78 \times 10^6 (1 - \epsilon)^2 \quad (10)$$

则

$$dP/dL = [1.62 \times 10^4 - 5.58 \times 10^5 (1 - \epsilon) + 4.78 \times 10^6 (1 - \epsilon)^2]^{-1} \mu u / d^2 \quad (11)$$

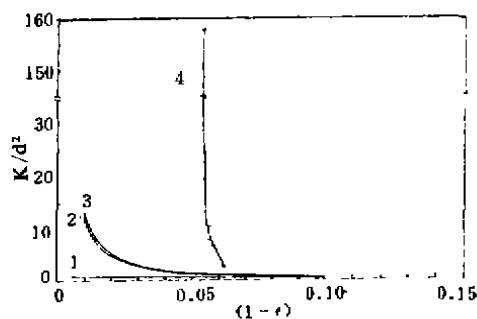


图5 实验数据与理论模型的对比

1. 张锡辉(纤维球)^[3] 2. Happel(纤维)^[1]
3. Drummond(纤维)^[2] 4. 本文作者(纤维球)

由图 5 亦可看出, 实验值与前人的研究结果相差甚大, 主要是纤维球由纤维丝粘接而成, 它具有球和丝的双重特点, 同时积泥使相邻纤维丝相互交叉和粘接, 使得纤维丝直径 d 与计算值有较大差别, 故而出现实验值 K/d^2 高于其它数学模型的理论值。因此, 对于不同规格的纤维球滤床, K/d^2 与 ϵ 的关系必须由实验确定。

4.3.2 砂滤层

对于砂滤料, 水头损失方程常可写成^[9,10]:

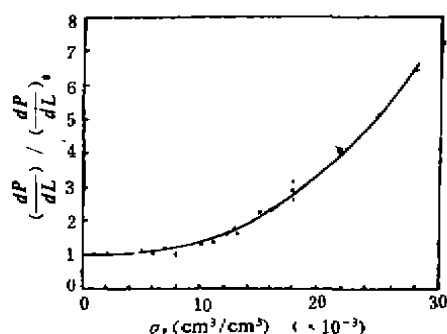
$$\frac{dP/dL}{(dP/dL)_0} = 1 + a\sigma_s + b\sigma_s^2 + c\sigma_s^3 \quad (12)$$

(略去 σ_s 的高次项)

其中 a, b, c 均为常数, 为方便, 以 $(dP/dL)_p$ 表示 (dP/dL) 和 $(dP/dL)_0$ 的比值。

对不同规格的砂滤料, 以 $(dP/dL)_p$ 对 σ_s 作图(图 6)后发现, 除表层砂因积泥形成滤饼的实验点外, 距表层 5cm 以下滤层的实验点均在一条曲线附近, 通过拟合, 可得:

$$(dP/dL)_p = 1 + 1.42 \times 10^{-3} \sigma_s + 2.35 \times 10^{-3} \sigma_s^2 + 1.72 \times 10^{-4} \sigma_s^3 \quad (13)$$

图6 砂过滤时 $(dP/dL)_p - \sigma_s$ 的关系

C ₆₀₃ 滤料	
(0.62h)	0.01 砂
(2.5h)	0.4 砂
(4h)	0.05 纤维球-砂
(6h)	
(5h)	0.1 纤维球-砂
(9.4h)	

由于 $(dP/dL)_0$ 和任一过滤时刻的 (dP/dL) 均可由测压管直接读出, 再利用方程(13)即可计算出滤料的比沉积量。在使用上式时, σ_s 的值是实际值的 10^3 倍。

5 结论

① 过滤时, 纤维球滤床有效孔隙率由于积泥和滤床不断压缩而逐渐减小, ϵ 沿滤床高度呈波谷状, 即中间小, 上、下大, 且 ϵ 的峰值逐渐下移。 ϵ 的减小主要是 σ_s 的作用结果, ϵ_f 的变化仅处于次要地位。

② 对双层滤床, 过滤初期上部纤维球层的水头损失方程可表示成方程(11); 对下部砂

34-37

周边进水沉淀池配水槽的水力设计

熊国立

(西北建筑工程学院)

Tu PP1.23

周边进水是将幅流沉淀池中心进水改为周边进水。水流流量 Q 进入配水槽后,分别以 $Q/2$ 的流量在两个半圆周方向上沿程配水,通过布水孔沿程渲泄,最终两股流量在半圆周汇合,汇合点流量为零、流速也为零。配水槽设计的关键是均匀性,它的好坏将影响周边进水池运行的效果,所以周边进水配水槽就成为这种沉淀池的关键部位。沿程渲泄流量不断减少,又要保持配水的均匀性,这与配水槽的断面、水深、孔距、底坡等因素有关。

本文从水力学观点分析配水槽的水流性质,运用动量方程推导出配水槽末端宽度与水深的计算公式。

1 配水槽的水流性质

周边进水沉淀池的配水,一种是采用两侧分流配水,另一种采用单向流动配水,通常认为前者较有利。两侧分流配水可以减少流程的一半即 $\pi D/2$,降低配水槽的深度,有利于施工,降低工程造价,沿程短可以不考虑边界阻力等因素。以水流的动能与势能的变化,来判断配水槽内壅水还是降水,若水流动能沿程减少,势能必然增加,其增加的速率比机械能损失量为快,出现水面曲线上壅,这就是缓流;反之,若出现水面曲线下降, $Fr = \frac{V^2}{gh} > 1$,就是急流。前苏联索可洛夫斯基根据动量定理,研究证明了这一规

层而言,水头损失与 σ_c 的关系可用方程(13)表示。

文中符号说明

a, b, c ——常数

d_o, d ——纤维丝直径

t ——过滤时间

u ——滤速

D_c ——滤床直径

ΔH ——滤层高度

$K, K/d^2$ ——渗透系数,渗透率

L ——滤床高度

$(dP/dl)_o, (dP/dL)$ ——水头损失

$W_f, W_s, (W_s'), W_z$ ——纤维球,积泥,砂子的重量

μ ——流体粘度

σ_o ——积泥比沉积量

P_f, P_s ——纤维丝,积泥的真比重

$\epsilon_o, \epsilon_f, \epsilon_s, \epsilon$ ——孔隙率

6 参考文献

1. Happel, J., AICHE J., 5, 2, 174 (1959)
2. Drummond, J. E., & M. I. Tahir, ibid., 10, 515 (1984)
3. 张锡辉, "纤维球过滤机理的研究", 博士学位论文, 清华大学, 北京 (1991)
4. Brinkman, H. C., App l. Sci. Res., A1, 27 (1947)
5. Brinkman, H. C., ibid., A1, 81 (1948)
6. Brinkman, H. C., Research, Lond., 2, 190 (1949)
7. Iberall, A. S., J. Res. Nat. Bur. Stand., 45, 398 (1950)
8. Mott, R. A., "In Some Aspects of Fluid Flow", Edward Arnold, Lond. (1951)
9. Tien, C., R. M. Turian, & H. Pendse, AICHE J., 25, 385 (1979)
10. Tien, C., & A. C. Payatakes, ibid., 25, 737 (1979)

作者通讯处: 100029 北京市北四环路慧忠庵村