

文章编号: 1001-1986(2001) 05-0043-03

多孔介质中悬浮质的淤塞作用对悬浮液渗流动态的影响

成春奇,张 丹 (淮南工业学院资源与环境工程系,安徽 淮南 232001)
郑高升 (国投新集能源股份有限公司,安徽 淮南 232024)

摘要: 定量地预测悬浮质在导水介质里流动过程中的淤塞作用 及其对浆液流动动态的影响有助于合理地设计注浆工艺和控制注浆过程。表述悬浮质在多孔介质中的淤塞作用及其对流动状态影响的数学模型由三个微分方程组成,即:悬浮质运移方程、悬浮质沉淀动态方程和悬浮液流动方程。用有限差分法对定流量和定边界水位差二种条件下多孔介质中一维流悬浮质淤塞问题的求解结果证明:由于淤塞作用,悬浮液在多孔介质中的流动总是呈非稳定流,并且随着时间的变化,在定流量条件下,流场中水力梯度逐渐增大;在定边界水位差条件下,流场中的流量则逐渐减小。
关键词: 淤塞;多孔介质;悬浮液渗流
中图分类号: TV139.11 **文献标识码:** A

1 引言

目前,水泥、粉煤灰和粘性土等非水溶性材料作为注浆主体材料已广泛地应用于矿井注浆堵水工程。由这些材料配制成的浆液具有典型的悬浮液特征。当浆液被注入岩、土体后,伴随着浆液中固体颗粒的沉淀,岩、土体的空隙性质将发生变化,岩、土体的渗透率也随之变化。显然,岩、土体的渗透率的变化必然导致浆液流动状态的改变。如果能够定量地预测在固相的沉淀亦即淤塞作用下浆液的渗流动态,我们就可以很好地控制注浆过程,以较低的能耗和材料消耗代价取得良好的注浆效果。

定量预测悬浮液流动状态伴随介质空隙的淤塞所发生的变化对土工过滤结构设计也有着重要的意义。例如,采用渗滤法处理含悬浮质的污水时,悬浮质造成的渗滤柱的淤塞会影响其处理污水的能力;抽水井的井壁反滤层被水中砂、土粒淤塞可造成水井生产能力的降低。此外,由于淤塞可视为潜蚀的反问题,因此研究悬浮质的淤塞影响对潜蚀可能性评价也有一定的意义。

以下以均质、各向同性多孔介质为例讨论悬浮质的淤塞对悬浮液渗流动态的影响

2 淤塞影响的基本数学模型

悬浮质的淤塞作用可归结为悬浮质在介质中的运移和沉淀,其对悬浮液流动状态的影响则表现为对流量与压力关系的影响。从影响机理角度分析,淤塞作用之所以影响悬浮液的流动状态是因为淤塞导

致了多孔介质的空隙性质的改变,从而使多孔介质的渗透性发生变化。因此,这种淤塞影响可用以下 3 个数学方程来表述,即:悬浮质运移方程、悬浮质沉淀动态方程和悬浮液渗流方程

2.1 悬浮质的运移方程

设悬浮质的密度函数为 $\rho = \rho(x, y, z, t)$,多孔介质的孔隙度为 $n = n(x, y, z, t)$,且悬浮液符合牛顿流体的性质。根据多孔介质流体力学的理论,在饱和的多孔介质中流动的悬浮液渗流满足以下连续性方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n), \quad (1)$$

式中 V_x, V_y, V_z 分别为悬浮液在 x, y, z 方向上的渗透速度分量。

令 $c = c(x, y, z, t)$ 为悬浮液的体积浓度,即单位体积悬浮液所含的悬浮质重量。根据悬浮液的液—固二相体性质,可得:

$$\rho = \rho_w + c(1 - \rho_w / \rho_s), \quad (2)$$

式中 ρ_w —— 悬浮液的液相密度;
 ρ_s —— 悬浮液的固相即悬浮质的密度

假设 ρ_w 和 ρ_s 在流动过程中是恒定的,将式(2)代入式(1)后得:

$$\frac{\partial}{\partial x}(c^* V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(c^* V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(c^* V_z) = \frac{\partial}{\partial t}(c^* n), \quad (3)$$

式(3)即为悬浮质在多孔介质中的运移方程。

2.2 悬浮质沉淀动态方程

对于细颗粒状的悬浮质,如水泥、粘土、粉煤灰等,其在通常的流速范围内的沉淀作用与胶体被介

质的吸附作用相似,亦即沉淀量与介质的固相相对含量及悬浮质浓度成正比,因此可用下式表示:

$$M_s = M_s(x, y, z, t) = K_v \cdot \Delta v \cdot (1 - n) \cdot K_d \cdot c, \quad (4)$$

式中 M_s ——单位时间内沉淀下来的悬浮质的质量;

K_v ——介质影响系数;

K_d ——浓度影响系数;

Δv ——流场中任取的单元体的体积。

由于沉淀下来的悬浮质的体积 V_s 与介质孔隙体积的改变量是相等的,因此有:

$$M_s = d_s \cdot V_s = d_s \cdot \Delta v \cdot \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5)$$

将(5)代入(4)并令 $K = K_v \cdot K_d$,便得到反映悬浮质沉淀动态的方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = K \cdot (1 - n) \cdot c$$

2.3 悬浮液的渗流方程

前面已假设所讨论的悬浮液为牛顿流体。对于通常的多孔介质,由于介质渗透性的限制和悬浮液的高粘滞性,即使在较高的水头梯度或压力梯度下渗流的 Reynolds 数仍处于 Darcy 流的范围。因此,悬浮液在多孔介质中的渗流速度可用 Darcy 定律表示,即:

$$V = -K \frac{dh}{dl} = -\frac{d}{g} \cdot g \cdot k \cdot \frac{dh}{dl}, \quad (7)$$

式中 h ——液位高度;

l ——流经长度;

g ——悬浮液的动力粘滞性系数;

k ——多孔介质的渗透率;

g ——重力加速度

一般而言,悬浮液的密度沿流动方向的变化梯度造成的压力梯度是可以忽略不计的,故式(7)又可写成以下形式:

$$V = -\frac{k}{g} \cdot \frac{dp}{dl}, \quad (8)$$

式中 p 为悬浮液的压力分布函数。

与水的渗流过程不同,在悬浮液的渗透过程中由于悬浮质的淤塞作用,多孔介质的渗透率 k 也是个变量。据 Carman 和 Trzaska 等人的研究,多孔介质的渗透率主要取决于介质的孔隙度 n 和介质固相的比表面积 T ,并可用下式表示^[2,3]:

$$k = a_0 \cdot \frac{n^3}{T}, \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)即得到悬浮液在多孔介质中

的渗流方程: $V = -a_0 \cdot \frac{n^3}{gT} \cdot \frac{dp}{dl}$

3 淤塞影响数学模型解与实验结果的对比分析

为了检验已建立的淤塞影响数学模型的实用性,特进行了二次一维渗透试验。其中一次为定流量变水位试验,另一次为定边界水位变流量试验。试验所用介质材料为平均粒径 $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$ 不均匀系数 $C_u = 2.5$ 的河沙,悬浮液为粉煤灰—水混合液,其中的粉煤灰的粒径均小于 0.074 mm 。悬浮液的体积浓度为 80 g/L 。为防止悬浮液絮凝造成过早沉淀,在悬浮液中加入适量的浓度为 4% 的六偏磷酸钠溶液。由于试样是均质、各向同性的,试样柱的初始孔隙度 n_0 可视为与位置无关的常数,因此可以用容重差法求得。介质固相的比表面积 T 可根据平均粒径、初始孔隙度和砂粒的平均比重求得。通过无离子水渗透试验可以测出试样柱的初始渗透率 k_0 。已知 k_0 、 n_0 和 T 后,便可用式(9)计算出 Trzaska 系数 a_0 。表 1 列出了试样柱的有关初始参数值。

在一维渗流条件下,淤塞影响问题的基本模型为:

$$\frac{\partial}{\partial x} [c(x, t) \cdot V(x, t)] = \frac{\partial}{\partial t} [c(x, t) \cdot n(x, t)];$$

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = K \cdot [1 - n(x, t)] \cdot c(x, t);$$

$$V(x, t) = -a_0 \cdot \frac{n^3(x, t)}{gT} \cdot \frac{dp(x, t)}{dx}.$$

定流量条件下的定解条件有:

初始条件: $n(x, 0) = n_0$, $p(0, 0) = p_0$ 和 $c(x, 0) = 0$;

边界条件: $c(0, t) = c_0$, $c(1, t) = c_1$ 以及 $V(0, t) = V(1, t) = 0$;

定边界水位条件下的定解条件有:

初始条件: $n(x, 0) = n_0$ 和 $c(x, 0) = 0$;

边界条件: $c(0, t) = c_0$, $c(1, t) = c_1$, $p(0, t) = p_0$ 以及 $p(1, t) = p_1$;

图 1 所示为用有限差分法计算所得的定流量条件下悬浮液压力在渗流方向上的分布曲线和不同位置、不同时刻的压力实测值。其中,曲线 1 为纯水的压力分布曲线,曲线 2 为 $t = 180 \text{ min}$ 时的悬浮液压力分布曲线,曲线 3 为 $t = 480 \text{ min}$ 时的悬浮液压力分布曲线。比较不同时刻的压力分布曲线及实测值可以看出,由于悬浮液的淤塞影响,使得在流量不变的条件下游试样柱的入流端的压力逐渐增长,亦即压力梯度伴随着淤塞过程呈不断增长的趋势,压力梯度的增长趋势在试样柱的前半端尤为明显。

表 1 试样柱的介质参数值

截面积 A_0	长度 l	k_0	n_0	T	a_0
315 cm ²	100 cm	4.4 × 10 ⁻⁶ cm ²	35%	38.1 cm ⁻¹	0.12

若将图 1 中同一时刻的压力计算分布曲线与实测的压力分布相比较, 可以发现在试样柱的入流区 ($x \leq 20$ cm) 实测压力的下降梯度要明显地高于理论计算值。这种差异现象可能是悬浮液中的粗、细颗粒的差异沉降造成的。悬浮液进入试样柱后, 其所携带的粗粒径悬浮质首先发生沉淀。由于粗粒径悬浮质的体积大, 其沉淀造成的介质空隙度的下降幅度也大, 从而导致介质的渗透性大幅度下降, 在定流量条件下其结果必然是使压力梯度大幅度上升, 因此在入流区, 实际压力梯度要大于理论计算值。随着渗流距离的增加, 悬浮液中的细颗粒悬浮质所占的比例逐渐增大, 其沉淀规律也愈接近胶体被介质固相吸附的规律 (亦即式 (12) 所表达的规律), 所以实际压力梯度与计算压力梯度也逐渐趋于一致。

图 2 为根据计算结果绘制的悬浮液压力与时间的关系曲线和不同时刻的压力实测值。其中, 曲线 1 为 $x = 10$ cm 处的压力—时间关系曲线, 曲线 2 为 $x = 30$ cm 处的压力—时间关系曲线。从图中可见, 前者的斜率明显高于后者。

图 3 所示为定边界压差条件下悬浮液渗流量随时间的变化, 从图中可以看出, 在悬浮液渗流初期流量实测值要低于理论计算值, 在后期实测值则略高于理论计算值。这一现象也可以用粗、细粒径悬浮质的差异沉淀加以解释。

4 结论

通过求解本文所建立的悬浮质淤塞影响数学模型可以较好地预测在定流量条件下渗流场中的悬浮液的液位动态或在定边界液位条件下悬浮液的流量动态。数学模型的求解结果及实测结果都证明当悬浮液在多孔介质中渗流时, 由于悬浮质的淤塞作用, 介质的渗透系数实际上是随时间变化的变量。因此对悬浮液而言, 在多孔介质中其渗流状态通常是非稳定的。

在悬浮液的入流区, 实测的悬浮液压降梯度和

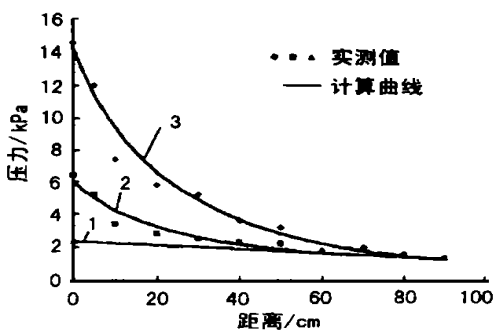


图 1 试样柱中的悬浮液压力分布

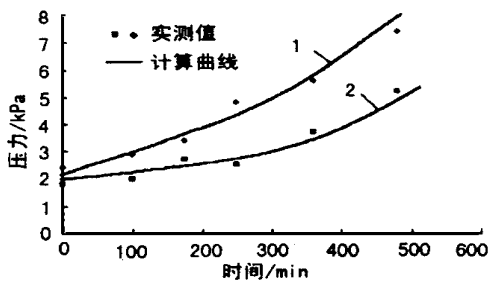


图 2 悬浮液压力随时间的变化曲线

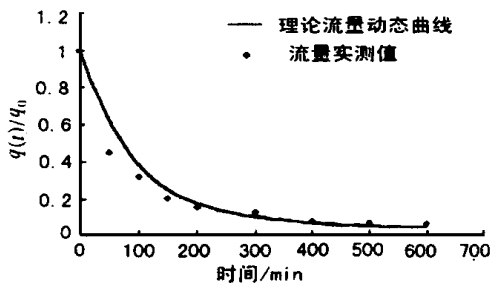


图 3 边界压差为定值条件下流量比随时间的变化
流量随时间的变化梯度都高于求解数学模型所得到的相应梯度值。这种差异现象似乎可用粗、细粒径悬浮质的差异沉淀来解释。

参考文献

[1] 薛禹群. 地下水动力学原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1986 17—20.
[2] Trzaska A. The effect of colmatage on the magnitude of the discharge of flow during bore-hole exploration of water [J]. Archiwum Gornictwa, 1988, 33(1): 34—38.

On colmatage of suspensoid and its influence upon flowing states of suspensions in porous media

CHEN G Chun-qi, ZHANG Dan (Huainan Institute of Technology, Huainan 232001, China)

ZHENG Gao-sheng (National Investigating Xinji Coal and Energy LTD., Huainan 232024, China)

Abstract A correct quantitative estimation of the influence of suspensoid colmatage upon the seeping progress of suspensions in the media is helpful for the reasonable designation of injection technology and for controlling the injecting process. The mathematical model describing the colmatage and its influence on seeping behavior of suspensions consists of the three differential equations presented in this paper: transportation equation of suspensoids, kinetic sedimentation equation of suspensoids and flow equation of suspension. The theoretical solution of one-dimensional model for suspensions flowing in porous media resulted by finite difference method respectively at constant flow discharge and constant boundary pressure difference demonstrated that due to colmatage the flowing state of suspensions is always unsteady, and with the change of seeping time the hydraulic gradient increases gradually at constant discharge conditions or the discharge rate decreases gradually at constant boundary pressure difference conditions in the flow field.

Key words colmatage; porous medium; seepage of suspension