

浆液的非稳定渗流过程分析

张良辉 熊厚全

张清

(中国科学院广州化学研究所 广州 510650)

(北方交通大学土建系 北京 100044)

摘要 应用两相渗流原理分析了非水溶性浆液在饱和岩土介质中的渗流特点。引入相对渗透率概念,建立了能反映浆液灌入动态过程及饱和度变化的非稳定渗流力学模型及浆液自动吸渗过程的微分方程。通过试验对理论计算进行了检验。

关键词 非水溶性浆液, 相对渗透率, 非稳定渗流力学模型, 吸渗, 试验检验

1 前言

化学灌浆作为一种经济有效的岩土加固及防渗技术已广泛应用于土木、水利及采矿工程中。化学灌浆的研究虽有较大进展,但总体看来,主要是试验性研究。理论研究,尤其是有关浆液渗流过程的研究进展缓慢。

目前关于浆液渗透的理论^[1, 2]都是建立在单相渗流的达西定律基础上,浆液在压力作用下活塞式地驱替地层中的孔隙水,浆液的渗透系数是由水的渗透系数及浆与水粘度比间接获得,即: $\frac{K_g}{K} = \frac{k_g \gamma_g / \mu_g}{k \gamma / \mu} = \frac{\mu}{\mu_g}$, ($\gamma \approx \gamma_g$)。其中 K_g , K 分别为浆液和水的渗透系数, k_g , k 分别为当流体为浆液和水时,介质的渗透率。显然当浆或水的饱和度为1时, $k_g = k$, 此式等价于上式。当液体为非饱和渗流时,介质渗透率不仅与其孔隙特征相关,同时与其饱和度相关^[3]。当非水溶性浆液在压力作用下灌入含水地层时,其渗流过程实际上是一种非饱和渗流,因同时有水的渗流,因此称为两相渗流。本文将基于两相渗流理论,引入有效渗透率及相对渗透率概念,建立非水溶性浆液渗流的动力学模型。

2 不混溶流体两相渗流原理

此处所谓两相渗流是指多孔介质中同时存在两种彼此不混溶的流体同时流动,相互作用,相互影响,具有不同于单相流体渗流规律的一种流动形式。在两相流中存在3种界面,即流体之间和流体与固体介质表面之间的界面。界面是一种只有几个分子厚的过度层,沿其切线方向存在一定的张力,即界面张力。以能量概念定义为:在一定温度和压力下增加单位面积界面所需的 Gibbs 自由能,即界面张力 $\delta = \left(\frac{\partial G}{\partial A}\right)_{T, P}$ 。

孔隙空间内,介质与各相流体及流体之间由于界面张力的存在而相互作用,因而影响

1995年8月25日收到初稿,1995年11月18日收到修改稿。

着各相流体的分布和渗流特性。岩土介质对流体的亲和能力往往不同，与介质亲和能力强的一相为润湿相，而另一相为非润湿相。前者一般优先占据较小孔隙通道，而后者存在于较大的孔隙中。根据一些微观试验^[5]观察的结果，当渗流速度较低时，各相沿着自己特有的迂回曲折的渠网流动，流线异常弯曲。随着某一相饱和度降低，其流网变窄，当低于某一临界值时，停止流动。两相渗流时各相渗透率并不等于单相渗流时介质固有渗透率，而取决于饱和度值及流体间界面张力等因素。当流速较高时，非润湿相被截成孤立的段塞或块状流动。由于两相流各相渗透率小于介质固有的渗透率^[3]，故称其为有效渗透率，其值与介质固有渗透率之比称为相对渗透率。

3 灌浆过程的两相渗流

对于饱和介质，在浆液灌入之前已充满了孔隙水，因此，灌浆驱水的过程与注水驱油过程具有相似的初始条件和作用机制。当浆液在压力作用下渗入地层时，由于介质孔隙的不均匀性造成渗透速率的差异，部分孔隙水被圈俘于浆体中，浆-水界面作用的结果产生了阻碍水珠运动的毛细力。如果浆液对水珠的粘滞力不能克服毛细力的作用，水珠就会停止运动，同时阻塞浆液渗流的通道。把这部分水的饱和度记为 S_{wi} 。此外尚有部分水随同浆液一起渗流，形成两相流。图 1 为浆液渗流时其饱和度随位置变化的非稳定渗流模型。

对图 1 的模型，只要是两相流都可用下列方程表述，其推导仅利用了流体的不互溶性。

3.1 连续方程

$$\text{对于孔隙水: } \frac{\partial q_w}{\partial x} = -A \eta \frac{\partial S_w}{\partial x} \quad (1)$$

$$\text{对于浆液: } \frac{\partial q_g}{\partial x} = -A \eta \frac{\partial S_g}{\partial x} \quad (2)$$

$$\text{饱和度: } S_w + S_g = 1 \quad (3)$$

$$\text{总流量: } q_w + q_g = q_t \quad (4)$$

式中： q_w ， q_g ， S_w ， S_g 分别为水和浆的流量及饱和度， A 为总过流断面积， η 为介质孔隙率。

3.2 达西定律

分别对水和浆液应用达西定律，忽略毛细管压力得

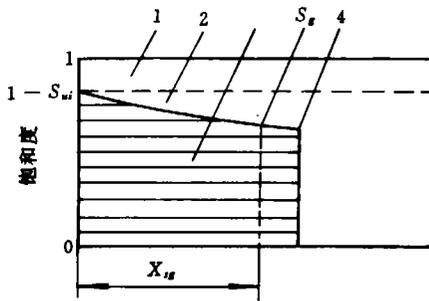
$$q_w = - \frac{k_{ew} A}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial x} = -A \frac{k k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial x} \quad (5)$$

$$q_g = - \frac{k_{eg} A}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} = -A \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} \quad (6)$$

式中： k_e 表示有效渗透率， k_r 表示相对渗透率，下标 g ， w 分别代表浆和水。

引入浆液分流量概念 f_g ：

$$f_g = \frac{q_g}{q_t} \quad (7)$$



1: 残余水; 2: 可动水; 3: 灌浆区; 4: 浆液前峰
图 1 浆液渗流模型

Fig. 1 Seepage model of grout

同时将式(7)代入式(2)中得

$$\frac{\partial f_g}{\partial x} = -\frac{\eta A}{q_t} \frac{\partial S_g}{\partial x} \tag{8}$$

设浆液饱和度只与时间及位置相关, 则有

$$S_g = S_g(x, t) \tag{9}$$

$$dS_g = \frac{\partial S_g}{\partial x} dx + \frac{\partial S_g}{\partial t} dt \tag{10}$$

对于某一特定饱和度, $dS_g = 0$, 故式(10)变为

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{S_g} = -\frac{\partial S_g/\partial t}{\partial S_g/\partial x} \tag{11}$$

假设浆液分流量仅为其饱和度的函数 $f_g = f_g(S_g)$, 那么根据链式法则则有

$$\frac{\partial f_g}{\partial x} = \frac{\partial f_g}{\partial S_g} \frac{\partial S_g}{\partial x} \tag{12}$$

将式(11), (12)代入式(9)可得

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{S_g} = \frac{q_t}{\eta A} \frac{\partial f_g}{\partial S_g} \tag{13}$$

对式(13)积分并利用初始条件 $t = 0, x = 0$, 可以得到任意时刻某一特定饱和度所处的位置:

$$X_{S_g} = \int_0^t \frac{q_t}{\eta A} \frac{\partial f_g}{\partial S_g} dt \tag{14}$$

同理可获得浆液呈柱形扩散及球形扩散时关系式:

$$r_{S_g}^2 = \frac{\int_0^t q_t dt}{\pi \eta h} \frac{\partial f_g}{\partial S_g} \tag{15}$$

$$r_{S_g}^3 = \frac{3 \int_0^t q_t dt}{4 \eta \pi} \frac{\partial f_g}{\partial S_g} \tag{16}$$

利用式(3)~(6), 有

$$f_g = \frac{1}{1 + \frac{k_{ew} \mu_g}{k_{eg} \mu_w}} = \frac{1}{1 + \frac{k_{rw} \mu_g}{k_{rg} \mu_w}} \tag{17}$$

因此只要获得相对渗透率与饱和度之间的关系便可由式(14), (15)或(16)计算出饱和度的分布情况。上述推导适应于驱替相与被驱替相相比其粘度不算太小的情况^[3]。

4 浆液自动吸渗过程数学表述

当浆液与介质的亲和力强于水与介质的亲和力时, 浆液为润湿相。在毛细力的作用下, 润湿相自动渗入岩土介质中并驱替非润湿相, 此种现象称为浆液自动吸渗过程。由中国科学院广州化学研究所研制的中化 798 及 YDS 系列环氧树脂浆材具有较好的吸渗性能,

且成功地灌入渗透系数低于 10^{-6}cm/s 的泥化夹层中。文献[6]认为低渗透介质中，吸渗机制是浆液渗透的主导作用。尽管这种观点并不具有多少说服力，但浆液的吸渗作用在低渗透介质的灌浆中确是一种重要的作用力。本文将基于图 2 所示的三面封闭，一面开口的模型进行理论分析，并利用已知条件进行饱和度分布的数值计算。

因任意截面处浆液的流入与水的排出量相等，总流量 $q_t = 0$ ，即 $q_w + q_g = 0$ 。

两相压力与毛细压力有如下关系

$$P_w - P_g = P_c \quad (18)$$

根据以上两条件及方程(5)，(6)，连续方程(1)~(3)可得下列微分方程组：

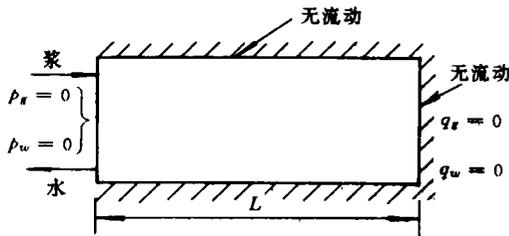


图 2 自动吸渗模型

Fig. 2 Grout imbibition model

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(M \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial V}{\partial x} \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(M \frac{\partial V}{\partial x} \right) &= 4\eta \frac{dS_g}{dP_c} \frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} P(0, t) = V(0, t) &= 0 \\ \frac{\partial P(L, t)}{\partial x} = \frac{\partial V(L, t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{k_{ew}}{\mu_w} + \frac{k_{eg}}{\mu_g} \\ N &= \frac{k_{ew}}{\mu_w} - \frac{k_{eg}}{\mu_g} \\ P &= \frac{1}{2}(P_w + P_g) \\ V &= \frac{1}{2}P_c \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

利用相对渗透率曲线、毛细压力曲线及边界条件(20)，采用有限差分法对式(19)求解可获得任一时刻浆液吸入介质中的饱和度分布及压力分布。

5 试验结果与理论计算的比较

5.1 试验目的

- (1) 获得相对渗透率、毛细压力与浆液饱和度的关系；
- (2) 测定压力灌注和自由吸渗时浆液饱和度的分布。

5.2 试验材料

(1) 浆材，采用非水溶性环氧树脂浆液。粘度为 2 cp，并且保证在试验过程中基本不变。比重 1.05，表面张力 $31.6 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。该浆材对岩土介质具有很强的亲水性，具有自

由吸渗的特性。

(2) 渗透介质，灌注试验采用普通砂经风干筛分后按粗、中、细砂的粒径要求重新配制，渗透系数分别为 1.57×10^{-3} , 8.53×10^{-4} , 9.8×10^{-5} cm/s。孔隙率为 0.38, 0.34, 0.30。吸渗试验采用粉土 ($K = 5.5 \times 10^{-6}$ cm/s)。

5.3 试验装置

采用 PSU 法^[6]测定相对渗透率曲线，试验装置如图 3 所示。浆液和水同时通过各自压力系统灌入装置内经充分混和后进入测试样品；量测各自流量及压力可计算各自相对渗透率；采用多孔隔板法量测毛细压力^[3]。

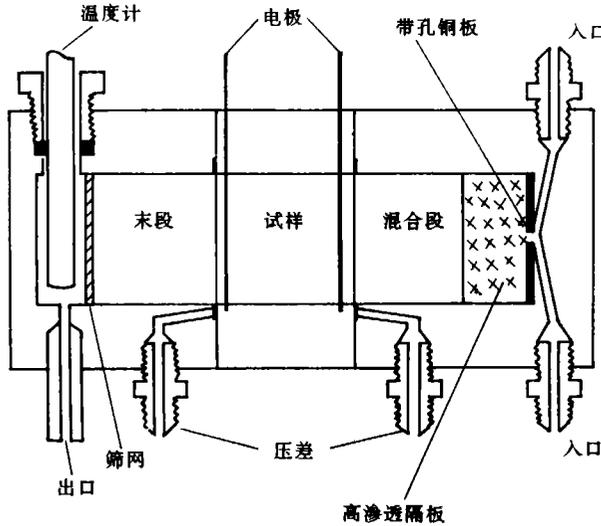


图 3 测定相对渗透率的 PSU 法

Fig. 3 PSU method for measuring permeability

灌注试验采用一维灌浆试验装置，为长 1 m、直径 5 cm 的有机玻璃管。在试样装入前，于管内壁涂一层凡士林以防在管壁与试样接触面产生大的漏浆通道。使用长颈漏斗将砂缓缓装入玻璃管中，分层击实并饱和试样。先测量其渗透系数，然后灌入环氧树脂浆液，直至浆液达到出口端为止。待试样固结后分段截取试样用称重法计算浆液饱和度。吸渗试验采用一端开口的玻璃管，长 10 cm，直径 3 cm，水平放置，开口端与浆液接触，液面与玻璃管顶面持平，基本消除了外加压力。

5.4 试验结果及计算值

相对渗透率及毛细压力测量结果如图 4 曲线所示。浆液沿渗透方向饱和度分布的测量值与计算值如图 5 所示。自由吸渗时实测值与数值计算示于图 6。用图 4 所示的细砂相对渗透率作出近似计算。

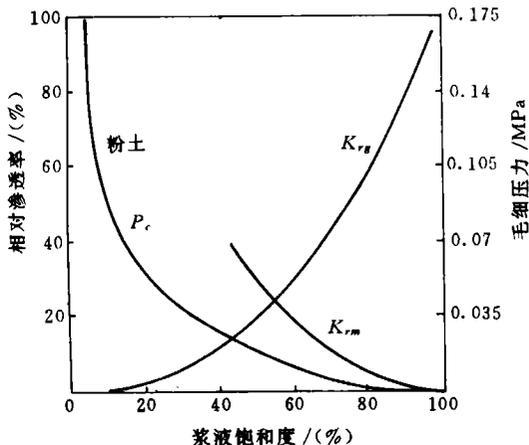


图4 细砂相对渗透率曲线

Fig. 4 Relative permeabilities of fine sand

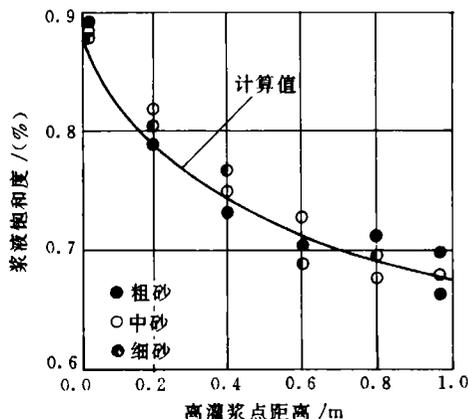


图5 浆液饱和度分布的实测值与理论值

Fig. 5 Measured and calculated grout saturations

6 工程实例

具有优良渗透性能的特种环氧树脂浆液——中化-798 已应用于龙羊峡、陈村和二滩等大坝软弱破碎岩体的加固并取得了重要突破。此处仅简要介绍一下龙羊峡大坝软弱破碎带的灌浆加固情况^[7]。

6.1 地质条件概述

龙羊峡大坝为混凝土重力坝。坝基地质条件较差，一条北东构造的伟晶岩劈理带 G4 贯穿重力拱坝左坝肩上游一侧。劈理带有不连续夹泥，厚 3~5 cm。结构实验表明大坝蓄水后 G4 劈理带会被拉裂，危及大坝安全，需作加固。

6.2 灌浆施工

1983 年采用中化-798 浆液对坝基进行灌浆补强加固。首先用单液法灌完计划浆液量，然后闭孔待凝。待凝又分有压待凝阶段(24 h)及无压待凝(4~5 d)。

6.3 灌浆效果

从宏观上看，用钻孔方法从孔深 20.0 m 以下地层中取出了完整、质地坚硬的夹泥层样品；电镜微观分析表明，不但夹泥样内的微裂隙大部分已被充填，而且没有产生新的裂隙。宏观和微观两方面表明中化-798 浆液对粘土夹泥层具有固结改良能力。

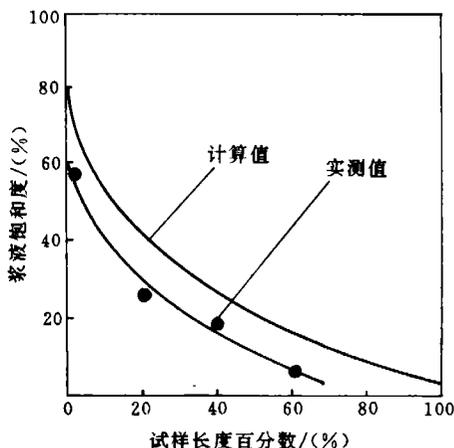


图6 吸渗试样浆液饱和度的实测与计算值

Fig. 6 Measured and calculated grout saturations of imbibition sample

化学浆液成功地灌入渗透系数为 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ 的粘土夹泥层这一事实已难以用压力渗透理论进行解释。在灌浆压力梯度衰减极快的低渗介质中, 吸渗作用无疑是浆液渗透的重要因素之一。

7 结论

- (1) 实测了浆液相对渗透率及毛细压力与饱和度关系曲线, 为理论计算提供基本数据;
- (2) 理论计算及试验测定表明, 非水溶性浆液在被灌介质中饱和度随灌浆距离的增大而降低;
- (3) 相对渗透率曲线表明, 两相渗流中各相渗透率与其饱和度相关且均小于介质固有渗透率, 即 $k_{eg} < k$, 因此以往的灌浆理论不再适应;
- (4) 建立了浆液吸渗过程的微分方程, 吸渗试验样品饱和度的理论预测和实测相近。

参 考 文 献

- 1 曾国熙等. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- 2 何修仁等. 注浆加固与堵水. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990
- 3 Dullien F A L 著, 杨富民, 黎用启译. 多孔介质——流体渗移与孔隙结构. 北京: 石油工业出版社, 1990
- 4 沈钟, 王果庭. 胶体与表面化学. 北京: 化学工业出版社, 1991
- 5 威尔海特 G 鲍尔[美]著, 刘发中译. 注水. 北京: 石油工业出版社, 1992
- 6 叶林宏等. 论化灌浆液与被灌岩石的相互作用. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 47~55
- 7 中国科学院广州化学研究所, 武警二总队. 陈村、龙羊峡、二滩水电站坝基软弱岩体灌注中化-798 浆材试验研究综合报告. 1985

ANALYSES OF THE UNSTEADY PERMEATION PROCESS OF GROUT

Zhang Lianghai¹ Xiong Houjin¹ Zhang Qing²

(¹ Guangzhou Institute of Chemistry, Academia Sinica, Guangzhou 510650)

(² Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract The permeation characteristics of immiscible grout in saturated media is analysed based on the two-phase fluid flow theory. The concept of relative permeability is introduced. The dynamic permeation models are well established, which can represent imbibition and be used to predict the distributions of grout saturation. Experiments are conducted to verify the validity of the models.

Key words immiscible grout, relative permeability, dynamic permeation model, imbibition model, saturation, test checking