

渗透注浆浆液扩散半径计算方法研究及应用*

钱自卫 姜振泉 曹丽文

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了解决工程实践中渗透注浆浆液扩散半径计算公式相对缺乏及应用性差的问题, 在相关假设的基础上, 根据达西定律推导出新的渗透注浆浆液扩散半径的计算公式。推导分为注浆孔穿越及未穿越被注岩层两种情况, 综合考虑了注浆孔与被注岩层面夹角及浆液的黏度时变性因素。公式在宁夏某煤矿立井工作面预注化学浆工程中试用, 通过在现场工程实践检验, 公式具有较好的实用价值。研究对渗透注浆的设计及质量评价具有应用价值。

关键词: 渗透注浆; 扩散半径; 注浆设计; 质量评价

RESEARCH AND APPLICATION OF PENETRATION RADIUS CALCULATION METHOD FOR PERMEATION GROUTING

Qian Ziwei Jiang Zhenquan Cao Liwen

(School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problem which permeation radius calculation formula was rare and its application was relatively poor in engineering practice, on the basis of the related assumptions, according to Darcy fixed-rate, new formula of penetration radius was derived. In the derivation, the grouting holes were divided into the ones crossing and not crossing the rock stratum, the angle between the grouting hole and grouting rock stratum, and the viscosity time-varying of the slurry were taken into comprehensive consideration. The formula was applied for the first time to a coal mine in Ningxia, the formula had a good practical value through the engineering practice test. This research may be a reference to permeation grouting design and quality evaluation.

Keywords: permeation grouting; penetration radius; grouting design; quality evaluation

注浆法是井巷过含水层的主要治理方法, 通过在被注岩体空隙中压入浆液, 来改善岩体的渗透性及强度特征, 保证井巷在含水层中掘进的安全, 确定浆液扩散半径是进行注浆设计及质量评价的重要环节, 决定着注浆效果的优劣^[1-5]。国内外学者在渗透理论的研究中取得了一系列重要结论^[3-6], 有Magg理论(球形扩散理论)、柱形扩散理论、袖阀管理论、卡罗尔理论、Baker公式等, 其中以球形扩散理论及柱形扩散理论的应用相对较多。

Maag于1938年首次发表牛顿型浆液球形扩散计算公式, 其理论推导基于达西定律, 至今仍广泛应用; 之后Raffle和Greenwood进一步考虑了地下静水的作用, 推导出了注浆点源的球形扩散半径、浆液流量与浆液压力之间的关系式; 潘志强、张金顺等分别在考虑浆液黏度对扩散规律的影响情况下, 对浆液在均匀砂层中的渗透规律进行研究, 得出了相应的球形扩散的理论公式^[4-5]。关于柱面注浆理论同样根据达西定律推导出, 其假设条件与球形扩散理

论一样。

尽管国内外学者推导出一些渗透注浆浆液扩散半径的计算公式, 但这些公式往往是在假设注浆孔与被注岩层面呈垂直状态下推导的, 且公式中往往需要一些工程上很难获得的参数, 这样也就严重影响了公式的应用性。在实际的工程实践中工程技术专家一般只是凭借自己的工程实践经验进行设计和质量评价, 这样就带有很大的盲目性。本文研究的目的是推导出考虑注浆孔与被注岩层夹角及浆液黏度时变性的渗透注浆浆液扩散半径的计算公式, 最后在工程实践中对公式的实用性进行初步检验。

* 国家自然科学基金项目(41072236); 国家自然科学基金青年基金项目(41102201)。

第一作者: 钱自卫, 男, 1986年出生, 博士研究生。

E-mail: ziweidav@163.com

收稿日期: 2011-09-28

1 理论分析

简化计算模型的假定: 1) 被注孔隙-微裂隙含水岩层为均质的和各向同性的, 注浆过程中其渗透性不变; 2) 浆液为不可压缩的牛顿流体, 其黏度具有时变性; 3) 浆液扩散范围内浆液充满岩石空隙; 4) 浆液在岩石孔裂隙中的渗透符合达西定律, 浆液呈球-柱形扩散。

1.1 注浆孔未穿透被注岩层

注浆孔未穿透被注岩层浆液扩散半径公式推导的理论扩散模型如图 1 所示。假设浆液扩散半径为 r_1 , 注浆孔与岩层顶面的夹角为 θ_1 , 被注岩层渗透系数为 k 。

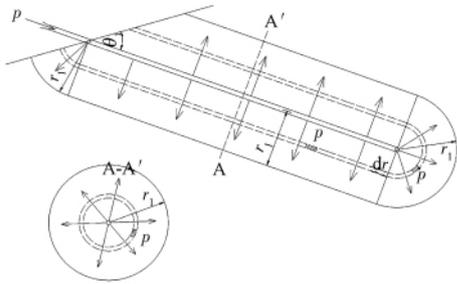


图 1 注浆孔未穿透被注岩层的浆液扩散模型

Fig. 1 Slurry diffusion model of grouting holes without crossing the rock stratum

根据达西定律:

$$Q = k_g A i t \quad (1)$$

其中

$$i = \frac{dh}{dr}$$

$$k_g = \frac{k}{\beta}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_w}$$

$$A = \pi r \left(3r + 2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r \theta_1}{90} \right)$$

式中: Q 为浆液用量, cm^3 ; i 为浆液的水力坡降; k_g 为浆液在岩层中的渗透系数, cm/s ; A 为渗透断面面积, cm^2 ; t 为注浆持续时间, s ; β 为浆液黏滞度与水的黏滞度之比; μ_w 为水的动力黏滞度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$, 20°C 时水的动力黏滞度为 $1.005 \text{ MPa} \cdot \text{s}$; μ_s 为浆液的动力黏滞度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; l 为注浆管在被注岩层中的长度, cm ; r 为浆液的扩散半径, cm ; θ_1 为注浆孔与岩层顶面的夹角, $(^\circ)$ 。

整理式(1)可得:

$$dh = \frac{\beta Q}{\pi r t k \left(3r + 2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r \theta_1}{90} \right)} dr \quad (2)$$

根据边界条件: $r = r_0$ 时 $h = H$; 当 $r = r_1$ 时 $h =$

h_0 , 对式(2)积分, 则有:

$$\int_{h_0}^H dh = \int_{r_0}^{r_1} \frac{\beta Q}{\pi r t k \left(3r + 2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r \theta_1}{90} \right)} dr \quad (3)$$

式中: r_0 为注浆管半径, cm ; h_0 为被注浆岩层的地下水压力水头, cm ; r_1 为浆液的扩散半径, cm ; H 为注浆压力水头之和, cm 。

令:

$$c_1 = 3 - \frac{1}{2 \tan \theta_1} - \frac{\theta_1}{90} \quad (4)$$

可得:

$$\ln \left(\frac{c_1 r_0 + 2l}{c_1 r_1 + 2l} \right) \frac{r_1}{r_0} = \frac{2 \pi k l t (H - h_0)}{Q \beta} \quad (5)$$

令:

$$m = \frac{2 \pi k l t (H - h_0)}{Q \beta} \quad (6)$$

则浆液扩散半径 r_1 为:

$$r_1 = \frac{2 e^m l r_0}{c_1 r_0 + 2l - c_1 e^m r_0} \quad (7)$$

1.2 注浆孔穿透被注岩层

注浆孔穿透被注岩层浆液扩散半径公式推导的理论扩散模型如图 2 所示。假设注浆孔与被注岩层顶面夹角为 θ_1 , 与底面夹角为 θ_2 , 浆液扩散半径为 r_1 , 被注岩层渗透系数为 k 。

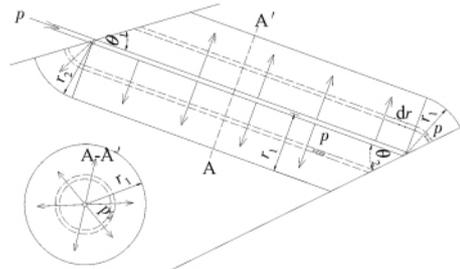


图 2 注浆孔穿透被注岩层的浆液扩散模型

Fig. 2 Slurry diffusion model of grouting holes crossing the rock

根据达西定律:

$$Q = k_g A i t \quad (8)$$

其中

$$i = \frac{dh}{dr}$$

$$k_g = \frac{k}{\beta}$$

$$A = \pi r \left[2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r}{2 \tan \theta_2} + 2r - \frac{r(\theta_1 + \theta_2)}{90} \right]$$

整理式(8)可得:

$$dh = \frac{\beta Q}{\pi r t k \left[2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r}{2 \tan \theta_2} + 2r - \frac{r(\theta_1 + \theta_2)}{90} \right]} dr \quad (9)$$

式中: θ_2 为注浆孔与岩层底面的夹角, ($^\circ$)。

根据边界条件: $r = r_0$ 时, $h = H$; 当 $r = r_1$ 时, $h = h_0$, 对式(9)积分, 可得:

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{\beta Q}{\pi r t k \left[2l - \frac{r}{2 \tan \theta_1} - \frac{r}{2 \tan \theta_2} + 2r - \frac{r(\theta_1 + \theta_2)}{90} \right]} dr = \int_{h_0}^H dh = \quad (10)$$

令:

$$c_2 = 2 - \frac{1}{2 \tan \theta_1} - \frac{1}{2 \tan \theta_2} - \frac{\theta_1 + \theta_2}{90} \quad (11)$$

则可得浆液扩散半径 r_1 为:

$$\ln \frac{(c_2 r_0 + 2l) r_1}{(c_2 r_1 + 2l) r_0} = \frac{2 \pi k l t (H - h_0)}{Q \beta} \quad (12)$$

令:

$$m = \frac{2 \pi k l t (H - h_0)}{Q \beta} \quad (13)$$

则浆液扩散半径 r_1 为:

$$r_1 = \frac{2 e^m l r_0}{c_2 r_0 + 2l - c_2 e^m r_0} \quad (14)$$

1.3 浆液扩散半径的统一表达式

综合式(7)、式(14)可知, 注浆孔与被注岩层呈夹角时, 浆液扩散半径 r_1 的统一表达式为:

$$r = \frac{2 e^m l r_0}{c r_0 + 2l - c e^m r_0} \quad (15)$$

注浆孔未穿透被注岩层时:

$$c = c_1 = 3 - \frac{1}{2 \tan \theta_1} - \frac{\theta_1}{90}$$

注浆孔穿透被注岩层时:

$$c = c_2 = 2 - \frac{1}{2 \tan \theta_1} - \frac{1}{2 \tan \theta_2} - \frac{\theta_1 + \theta_2}{90}$$

1.4 浆液黏滞度时变性因素

在实际注浆过程中浆液黏滞度是不断变化的, 文献[4-5]研究认为, 采用浆液各时刻的黏滞度的平均值作为注浆参数可以更好地反映实际。下面从这一点出发, 利用积分的方法求出浆液黏滞度的平均值 $\bar{\mu}$, 即:

$$\bar{\mu} = \frac{\int_0^t \mu(t) dt}{t} \quad (16)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为浆液黏滞度的平均值, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; $\mu(t)$ 为浆液黏滞度与时间的函数关系, $\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。

由公式:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\mu_w} \quad (17)$$

可得:

$$\beta = \frac{\int_0^t \mu(t) dt}{\mu_w t} \quad (18)$$

2 工程应用实例

2.1 工程概况

宁夏某煤矿回风立井设计深度为 782.5 m, 井筒直径为 6.0 m。自井深 618.7 ~ 637.6 m 为一侏罗系中统延安组(J2y)砂岩含水层, 总厚为 18.9 m, 由上层 15.5 m 厚粗粒砂岩及下层 3.4 m 厚中粒砂岩组成。粗粒砂岩为浅紫红色, 孔隙胶结, 孔-微裂隙发育; 中粒砂岩为灰白色, 泥质胶结, 孔-微裂隙发育。根据检查孔地质报告该含水层渗透率约为 $2.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 静水头压力达 4.5 MPa, 该含水层段井筒预计涌水量 40 ~ 50 m^3/h 。

为了使立井掘进安全通过该含水岩层, 井筒施工至井深 610 m 停头, 距侏罗系砂岩含水层 8.7 m, 决定采用工作面预注浆法对该含水层进行改造治理。

2.2 浆液材料

注浆选用 ZK-III 型改性脲醛树脂化学浆液, 该浆液为双液注浆材料, 分 A 液和 B 液, A 液为主剂, 为添加剂脲醛树脂浆液, B 液为固化剂, 为草酸水溶液。注浆材料配制及反应关系如图 3 所示。

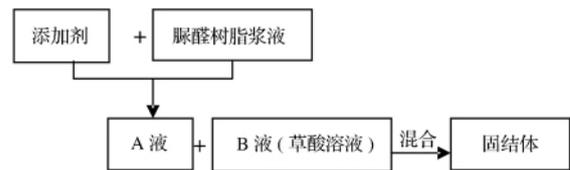
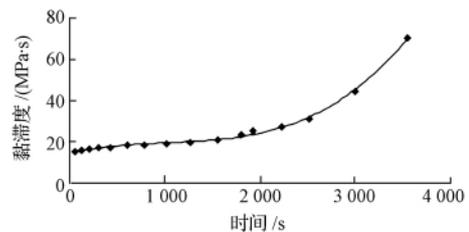


图 3 改性脲醛树脂注浆材料关系示意^[1-3]

Fig. 3 Schematic diagram of relationships among grouting materials of modified UF resin^[1-3]

根据以往施工经验选用 A 液(质量百分数 52%)与 B 液(质量百分数 1.5%)体积比为 10:1 的浆液, 该浆液黏滞度时变曲线如图 4 所示。



◆ 测试值; — 拟合曲线

图 4 A、B 液体积比为 10:1 浆液黏滞度试验结果

Fig. 4 Result of the test on viscosity of slurry with A:B = 10:1

采用 3 次多项式对 A、B 液体积比为 10:1 浆液

黏滞度时变关系进行拟合,其相关系数 R^2 达到 0.997 6,说明其拟合曲线能较好地反映浆液黏滞度的时变性,拟合方程为:

$$\mu(t) = 3 \times 10^{-9}t^3 - 9 \times 10^{-6}t^2 + 0.0108t + 14.354 \quad (19)$$

水温按 20 °C 考虑,水的动力黏滞度 $\mu_w = 1.005$ MPa·s,把式(19)代入式(18)则有:

$$\beta = 7.5 \times 10^{-10}t^3 - 3.0 \times 10^{-6}t^2 + 5.4 \times 10^{-3}t + 14.2 \quad (20)$$

2.3 现场注浆试验

在进行注浆孔设计前先进行现场注浆试验,注浆试验共设计注浆钻孔三个(图 5),各孔距井壁 0.2 m,均穿过被注砂岩层,试验孔按照以井筒中心

垂线为轴 5° 的角度向外倾斜。表 1 统计了试验注浆孔设计及施工过程中相关参数。

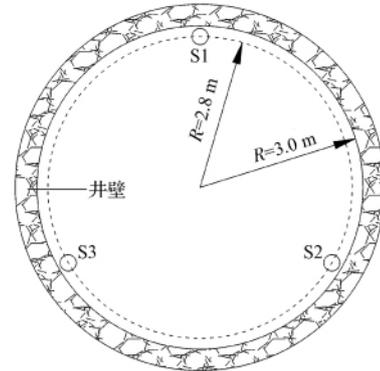


图 5 试验注浆孔布孔示意

Fig. 5 Test grouting holes layout diagram

表 1 试验注浆孔基本参数

Table 1 The basic parameters of test grouting holes

孔号	$\theta_1 /$ (°)	$\theta_2 /$ (°)	$k /$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q^1 /$ cm^3	$l /$ cm	$h_0 /$ cm	$H /$ cm	$r_0 /$ cm	$t /$ s	β
S1	85	85	0.000 26	11 320 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	3 300	26.303
S2	85	85	0.000 26	10 256 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 200	19.546
S3	85	85	0.000 26	11 542 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	3 000	23.650

注 1) 注入被注岩层的浆液体积,已去除相关损耗。

把表 1 数据代入式(14) 求出 S1、S2、S3 孔浆液扩散半径分别为 107.1,103.6,104.1 cm。

2.4 注浆孔设计及注浆效果评价

根据注浆试验计算出的各试验注浆孔的浆液扩散范围均大于 100 cm,进行注浆设计安全系数按 1.2 考虑,取浆液扩散半径 80 cm 为设计值,共布设注浆孔 18 个(包括 3 个试验孔),各孔距井壁 0.2 m,均穿过被注砂岩层,以井筒中心垂线为轴 5° 的角度倾斜,各孔的开孔位置见图 6 所示。

此次注浆分两轮进行,先施工 4~9 号孔,在这 6 个孔施工结束后,利用式(15)对其浆液扩散半径进行计算,然后对剩余的 10~18 号孔的开孔位置进行适当调整。各孔注浆均采用与试验孔同样的施工工艺。各孔实际施工布孔如图 6 所示,各孔布设、施工基本参数及浆液扩散半径计算成果如表 2 所示。

图 6 是根据表 2 的计算成果所绘制的注浆目的砂岩层底面浆液扩散效果示意,从图 6 可以看出,各孔浆液扩散半径均形成“交圈”。在注浆后井筒恢复掘进,过该注浆目的砂岩层段井筒涌水约为

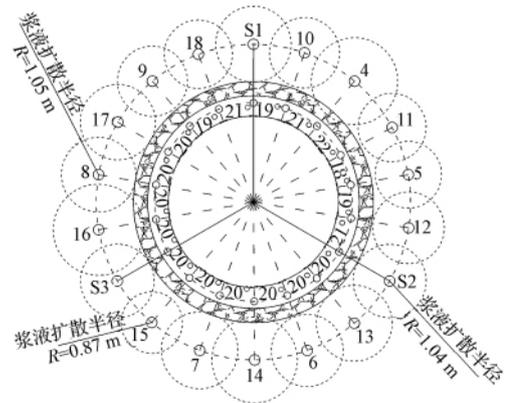


图 6 注浆孔布设及注浆质量评价示意(以被注岩层底面为准)

Fig. 6 The diagram of grouting holes layout and quality evaluation

3 m³/h,注浆的成功率达到 90% 以上,说明注浆效果较好,同时也说明推导的浆液扩散半径的计算式具有较好的应用价值。对于残余的井筒渗水,在井壁成型后采用壁后补注化学浆的方法进行治理,渗水已被完全控制。

表 2 注浆孔基本参数及扩散半径计算

Table 2 Basic parameters of grouting holes and calculation of permeation radius

孔号	$\theta_1 /$ ($^\circ$)	$\theta_2 /$ ($^\circ$)	$k /$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$Q /$ cm^3	$l /$ cm	$h_0 /$ cm	$H /$ cm	$r_0 /$ cm	$t /$ s	β	$r_1 /$ cm
4	85	85	0.000 26	11 000 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	3 000	23.65	122.6
5	85	85	0.000 26	11 800 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 800	22.26	94.2
6	85	85	0.000 26	10 600 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 300	19.88	101.9
7	85	85	0.000 26	10 400 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 300	19.88	108.5
8	85	85	0.000 26	11 400 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 800	22.26	105.5
9	85	85	0.000 26	10 945 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 400	20.25	99.2
10	85	85	0.000 26	7 200 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 400	17.94	99.5
11	85	85	0.000 26	6 800 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 300	17.80	96.6
12	85	85	0.000 26	8 054 200	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 600	18.23	101.2
13	85	85	0.000 26	8 000 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 620	18.26	107.2
14	85	85	0.000 26	9 021 030	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 960	18.91	121.1
15	85	85	0.000 26	6 045 200	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 100	17.51	87.0
16	85	85	0.000 26	9 000 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	2 000	19.00	128.8
17	85	85	0.000 26	7 500 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 500	18.08	106.4
18	85	85	0.000 26	6 800 000	1 897.2	45 000	140 000	3.8	1 300	17.80	96.6

3 结 语

1) 在相关假设的基础上,根据达西定律推导出渗透注浆浆液扩散半径的计算公式,公式推导分为注浆孔穿越及未穿越被注岩层两种情况,考虑了注浆孔与被注岩层面夹角及浆液滞黏度时变性因素。

2) 公式在宁夏某煤矿立井工作面预注化学浆中试用,通过在现场工程实践检验,公式具有较好的实用价值。

公式是在一定假设的基础上推导的,且在实际应用检验时也没有考虑注浆孔之间的相互影响,这是与实际不相符的地方,另外,应用该公式要求较为准确地采集注浆过程的相关参数,给公式的应用带来不便,也是要进一步研究的方向。

参考文献

[1] 郭密文. 高压封闭环境孔隙介质中化学浆液扩散机制试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
 [2] 韩羽. 破碎媒体化学注浆加固模拟试验研究[D]. 徐州: 中国

矿业大学, 2006.

[3] 王档良. 破壁化学注浆模拟试验研究及工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
 [4] 潘志强. 粗砂层中水泥渗透注浆渗透理论与计算机仿真研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
 [5] 张金顺. 砂砾地层渗透注浆的可注性及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
 [6] 杨坪. 砂卵(砾)石层模拟注浆试验及渗透注浆机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
 [7] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2709-2714.
 [8] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806.
 [10] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69-73.
 [11] 马海龙, 杨敏, 夏群. 对基于渗透注浆理论公式的探讨[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 47-50.
 [12] 孙斌堂, 凌贤长, 凌晨, 等. 渗透注浆浆液扩散与注浆压力分布数值模拟[J]. 水力学报, 2007, 37(11): 1401-1407.
 [13] 张淑同, 杨志恒, 汪华君, 等. 采场破碎媒体注浆加固渗流规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 358-361.

• 书讯 •

新编钢结构数据速查手册(上、下册)

本书由中国电力出版社出版,手册中参考了 GB 50017-2003《钢结构设计规范》及其他国家现行规范编制而成,内容丰富、实用,包括钢结构用钢材的基本知识和选用方法,钢结构设计,钢结构构件的制作与安装以及钢结构计算和构造有关的图表及资料等。该书可供从事钢结构设计、施工工作的技术人员学习和查询使用,并对大专院校相关专业师生具有较大参考价值。