

千米立井动水注浆特性研究

秦庆新, 张 彬

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 壁后注浆是治理煤矿立井突水最行之有效的手段,而注浆的最主要对象就是壁后岩层中的裂隙,为研究岩层裂隙中浆液的扩散规律,根据牛顿摩擦阻力定律及力的平衡定律推导出裂隙动水注浆模型。分析研究了水流对浆液扩散的影响,分别得出了顺水流方向与逆水方向浆液的扩散模型,通过模型得知顺水水流有利于提高注浆效果,逆水水流对浆液扩散半径的影响程度比顺水水流大,得出不同水流方向条件下浆液的扩散半径与注浆压力之间的关系及扩散半径与注浆时间的关系。

关键词: 壁后注浆; 动水; 注浆模型; 扩散规律

中图分类号: TV223.34; TD313

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0115-04

Research on grouting characteristics for km vertical shaft

QIN Qingxin, ZHANG Bin

(College of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Grouting behind the wall is the best means to control the water burst, in coal mine vertical shaft, and the main grouting object is the fracture in wall rock. In order to study the slurry diffusion rule, according to Newton's law of friction resistance and the force's balance rule, the paper derived the model of fracture's grouting in dynamic water. Through analyzing the influence of flow on slurry diffusion, respectively concluded the slurry diffusion model in the flow and contrary directions. From the model we can know that the flow direction is helpful to improve the grouting effect, The influence degree of contrary water flow on the radius of slurry diffusion is bigger than that of the flow direction. Obtained the relationship between the slurry diffusion radius and grouting pressure and the slurry diffusion radius with grouting time under the condition of different direction of flow.

Key words: grouting after wall; dynamic water; grouting model; diffusion rule

0 引 言

黑龙江鸟山矿风井井筒设计深度 940 m,净直径 7 m,掘进直径 8 m。永久支护结构为 C30 素混凝土,支护厚度为 500 mm。在井筒掘进过程中出现突水情况,突水段主要集中在 450~597 m 段,根据井筒地质柱状图及实际揭示状况分析,井筒穿过岩层整体稳定性较好,井深 450~597 m 段所穿围岩大部分为砂岩,围岩以粗砂岩为主,含少量裂隙,除局部岩体破碎外,整体性较好。涌水段 530.5~538.5 m,主要为灰色砂岩,围岩较破碎,涌水量增加;538.5~579.5 m,灰色粗砂岩,局部破碎,水量较大;579.5~580.5 m,围岩较坚硬;580.5~593.5 m,岩石较破碎,涌水量少量增加。最大突水达到 66.8 m³/h,严重影响到掘进质量及施工安全,因此对此

段进行壁后注浆堵水以期达到安全掘进的目的。

壁后注浆堵漏技术是 20 世纪 50 年代在我国兴起的一项新技术。注浆作为一种特殊施工方法,它工期短、见效快、适用面广、设备简单、易于控制,因此在土木、水利、矿山、交通等许多领域中得到了广泛的应用^[1-5],杨坪等^[6]将注浆应用于既有村庄不均匀沉降的加固处理中;娄吉宏等^[7]介绍了袖阀管灌浆法的施工工艺并证明此方法值得运用于地基处理。注浆的实质是把浆液注入到岩体裂隙中,使岩体形成整体性好、强度高、抗渗性能好的新结构体,从而达到改善岩土体的物理力学性质^[8]。裂隙是注浆的主要对象,浆液在裂隙中的扩散与许多因素有关,大体说有三方面,即地质条件,注浆技术和浆液特性,其中以地质条件这一特性最为复杂^[9]。岩体中的裂隙错从复杂、相互交叉、具有隐蔽性,因此

收稿日期:2011-10-15; 修回日期:2011-11-20

基金项目:国家安监总局项目(05-079); 辽宁省教育厅高校科学研究项目(L2011048)资助

作者简介:秦庆新(1987-),男,山东临沂人,在读研究生,研究方向:桥梁与隧道专业。

通讯作者:张 彬(1960-),男,辽宁丹东人,博士,教授,博士生导师,主要从事桥梁与隧道方面的研究。

裂隙注浆理论发展缓慢。为确保立井注浆一次性成功,达到最优的扩散效果,通过建立注浆模型来对浆液扩散规律进行研究,以此来明确各注浆因素之间的相互关系。针对乌山矿千米风井壁后注浆堵水实践,通过理论推导建立了裂隙在动水条件下的注浆模型,是对注浆领域研究的一个有益补充。

1 牛顿浆液在裂隙中的压力分布模型

1.1 基本假设

①浆液是均质流体具有不可压缩性且在扩散时处于层流状态;②浆液在裂隙上下表面处的流速为0;③浆液只沿裂隙扩散不会渗透到岩体的孔隙中;④

不考虑流动工程中流速的变化⑤浆液在压力作用下从注浆孔进入裂隙作平行于裂隙面的平面径向流动。

1.2 压力分布模型

此次壁后注浆所用浆液为牛顿流体,浆液的黏度为 η ,在水流流速 u ,裂隙开度 b ,注浆孔半径 r_0 ,注浆孔压力 p_0 时注浆,水流流动对浆液的冲刷力为 p_s 。如图1所示,浆液从注浆孔注入裂隙,作平行于裂隙面的平面径向流动。浆液在动水条件下的扩散及受力变化示意图如图2所示。如图3所示,从浆液流场中取任一微元体,流体微元体所受外力有法向应力 p 和剪应力 τ ,在以上假设条件下,沿流体单元中心径向轴方向的各分力之和应等于零。

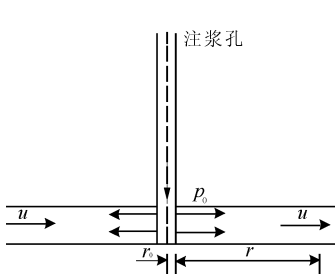


图1 动水注浆示意图

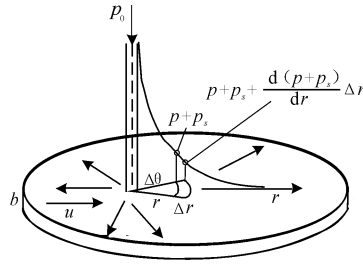


图2 动水注浆浆液扩散及受力变化示意图

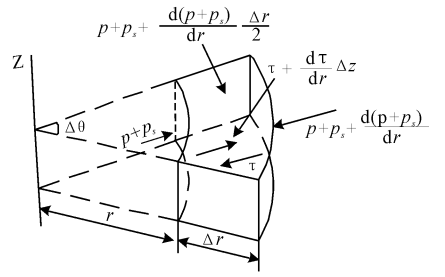


图3 流体微元体受力示意图

$$\begin{aligned} & \text{即:} \left\{ (p + p_s) r \Delta \theta \Delta z - \left[(p + p_s) + \frac{d(p + p_s)}{dr} \Delta r \right] \cdot \right. \\ & \quad \left. (r + \Delta r) \Delta \theta \Delta z \right\} + \left[(p + p_s) + \frac{d(p + p_s)}{dr} \Delta r \right] \cdot \\ & \quad \Delta r \Delta z \Delta \theta + \left(\frac{d\tau}{dz} \right) \Delta z \frac{r \Delta \theta + (r + \Delta r) \Delta \theta}{2} \Delta r \end{aligned} \quad (1)$$

式中: r 为浆液任意时刻的扩散半径; p 为裂隙内 r 处的注浆压力; $\Delta \theta$ 为单位时间内扩散半径的增量形成的微元体角度; Δr 为单位时间内扩散半径的增量。

整理化简,略去高阶微量得:

$$\frac{d(p + p_s)}{dr} - \frac{d\tau}{dz} = 0 \quad (2)$$

牛顿流体的流变曲线是通过原点的直线^[10],方程表达式为:

$$\tau = \eta \gamma \quad (3)$$

式中: γ 为剪切速率; $\gamma = -\frac{du}{dz}$ 代入(3)式得:

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (4)$$

由(2)、(4)式积分得:

$$\eta \frac{du}{dz} = \frac{d(p + p_s)}{dr} (z + C_1) \quad (5)$$

将边界条件 $z = 0$ 时 $\frac{du}{dz} = 0$ 代入(5)式,得 $C_1 = 0$,再将 $C_1 = 0$ 代入(5)并对 z 积分得:

$$u = \frac{d(p + p_s)}{2\eta dr} (z^2 + C_2) \quad (6)$$

将边界条件 $z = \pm \frac{b}{2}$ 时 $u = 0$ 代入(6)得 $C_2 = -\frac{b^2}{4}$,

再将 C_2 代入(5)式可得:

$$u = \frac{d(p + p_s)}{2\eta dr} \left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right) \quad (7)$$

浆液在裂隙中呈半圆形扩散,则可得浆液单位流量为:

$$\begin{aligned} q &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \pi r u dz = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \pi r \frac{d(p + p_s)}{2\eta dr} \left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right) dz \\ &= -\frac{\pi b^3 r}{12\eta} \frac{d(p + p_s)}{dr} \end{aligned} \quad (8)$$

对(8)式积分得:

$$p + p_s = -\frac{12\eta q}{\pi b^3} \ln r + C_3 \quad (9)$$

将边界条件当 $r = r_0$ 时 $p = p_0$,代入(9)式得,

$$C_3 = p_0 + p_s + \frac{12\eta q}{\pi b^3} \ln r_0, \text{ 再将 } C_3 \text{ 代入(9) 得:}$$

$$p = p_0 - \frac{12\eta q}{\pi b^3} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (10)$$

式中: p 即为距注浆孔轴线距离为 r 的任一点处的压力值。它与扩散半径的对数及浆液黏度成正比,裂隙宽度的三次方与其成反比。且由(10)式知,裂隙越

窄压力消减越快。

2 不同水流条件下裂隙注浆扩散半径的研究

浆液在裂隙内的流动有两种方向:顺水方向和逆水方向。当动水时,顺水方向相当于一个开阔的系统,达到最大扩散半径的边界条件是 $p = 0$,逆水方向相当于一个封闭系统,存在静水压力 p_J ,达到最大扩散半径的边界条件是 $p = p_J$ 。

2.1 浆液沿顺水方向扩散时

由(10)式及边界条件当 $r = r_{\max}$ 时, $p = 0, p_s = 0$ 可得注浆孔的注浆量为:

$$q = \pi b^3 p_0 / \left[12 \eta \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right) \right] \quad (11)$$

由单位时间内注浆量等于该段时间内增大扩散半径所需的浆液量得:

$$\int_0^t q dt = \int_{r_0}^r \pi r b dr \quad (12)$$

(11)式代入(12)式整理积分得:

$$t = \frac{\pi b}{2q} (r^2 - r_0^2) \quad (13)$$

式中: t 为浆液扩散至半径为 r 时所需时间,将(11)式代入(13)并整理变换得 r 的表达式为:

$$r = \sqrt{\frac{p_0 b^2 t}{6 \eta \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right)} + r_0^2} \quad (14)$$

将达到最大扩散半径 $r_{\max}$ 时所用注浆时间记为 T ,代入(14)式并整理得:

$$\left[\left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right) = \frac{p_0 T b^2}{6 \eta r_0^2} \quad (15)$$

式中: T 为注浆时间; $r_{\max}$ 为浆液最大扩散半径。

2.2 浆液沿逆水方向扩散时

由(10)式及边界条件当 $r = r_{\max}$ 时, $p = p_J, p_s = 0$ 得:

$$q = (p_0 - p_J) \pi b^3 / \left[12 \eta \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right) \right] \quad (16)$$

将(16)式代入(13)式并整理变换得 r 的表达式为:

$$r = \sqrt{\frac{(p_0 - p_J) t b^2}{6 \eta \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right)} + r_0^2} \quad (17)$$

将达到最大扩散半径 $r_{\max}$ 时所用注浆时间记为 T ,代入(14)式并整理得:

$$\left[\left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_0} \right) = \frac{(p_0 - p_J) T b^2}{6 \eta r_0^2} \quad (18)$$

式中: p_J 为降水压力。

3 注浆效果影响因素分析

在注浆工程中达到理想的注浆效果是最重要的目标,而注浆效果主要由浆液扩散半径决定,因此对浆液扩散半径的研究显得格外重要。除水流对扩散半径有很大影响外,注浆压力、注浆时间对扩散半径的影响也很大。

3.1 水流及注浆时间对扩散半径的影响分析

在实际注浆工程中有一个非常重要的问题就是确定需要多长时间才能使扩散半径达到需求的距离。工程中, $p_0 = 35 \text{ kg/cm}^2$, $p_J = 5 \text{ kg/cm}^2$, $\eta = 20 \text{ Pa}$, $r_0 = 5 \text{ cm}$, $b = 0.005 \text{ cm}$ 分别绘制不同注浆时间对应的顺水方向和逆水方向的扩散半径曲线图如图4。

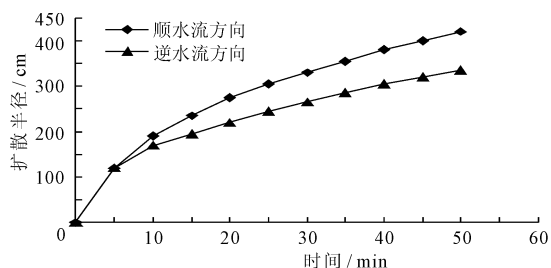


图4 动水条件下浆液扩散半径与时间关系示意图

由图4可知,注浆初期,浆液在两个方向的扩散半径基本相等;注浆后期顺水流方向的扩散半径比逆水流方向扩散半径大,且二者差值越来越大,说明顺水流方向有利于浆液扩散,逆水流方向对扩散半径的影响程度较大。确定注浆时间与扩散半径的关系之后,在实际工程中就可以通过控制注浆时间来控制扩散半径。

3.2 压力对扩散半径的影响分析

注浆时,注浆压力是判断扩散半径变化情况的一个重要标准,注浆压力发生变化对应的扩散半径也会发生变化,掌握好注浆压力与扩散半径的关系对实际工程注浆具有很重要的作用。工程中注浆持续时间 $T = 60 \text{ min}$, $\eta = 20 \text{ Pa}$, $r_0 = 5 \text{ cm}$, $b = 0.01 \text{ cm}$,由公式(15)与(18)分别计算绘制不同水流方向条件下注浆压力与扩散半径的关系图(图5)。由图5知,同一裂隙中,当注浆压力增大时,扩散半径随之增大、随着压力的升高扩散半径的增长速率逐渐减慢。在动水条件下,达到同一扩散半径时,逆水流方向的浆液所需注浆压力要大于顺水流方向的浆液所需注浆压力,这也说明顺水流方向有利于浆液的扩散。

3 结 语

根据牛顿摩擦阻力定律及力的平衡定律推导出

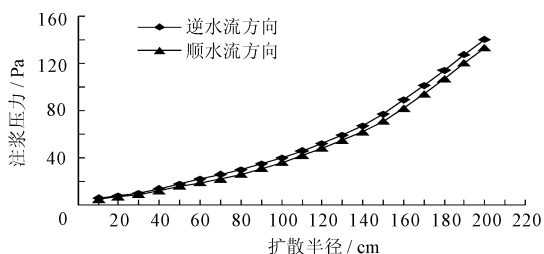


图5 动水条件下浆液扩散半径与注浆压力关系示意图

裂隙动水注浆模型,通过动水注浆模型研究分析得出在动水条件下浆液的扩散半径与注浆时间及注浆压力之间的关系,研究发现注浆压力与扩散半径的对数及浆液黏度成正比,裂隙宽度的三次方与其成反比即裂隙越窄压力消减越快。对于不同的裂隙水流流动方向,当扩散半径相同时,顺水水流方向所需的注浆压力比逆水水流方向小,顺水水流有利于浆液扩散。推导出壁后注浆浆液的扩散规律,为实际注浆堵水工程提供了有利的理论依据,具有很好的指导意义。

参考文献:

- [1] In-Molee, Jae-Sung Lee, Seok-Woo Nam. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunneling and underground Space Technology, 2004, 19: 551 – 565.
- [2] Sembenelli Groppo P, Sembenelli G. Deep jet-grouted cut-

offs in riverine alluvia for ertan coffer dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (2): 142 – 153.

- [3] Ing Hieng wong, Teoh Yaw poh. Effects of jet grouting on adjacent ground and structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(3): 247 – 256.
- [4] Anthony F Stirbys, Radwanski Z Richard, Richard J Proctor. Los angeles metro rail project-geologic and geotechnical design and construction constraints[J]. Engineering Geology, 1999, 51: 203 – 224.
- [5] Shimada H, Sasaoka T, Kubota S. The application of fly-ash cement in mining backfill material[M]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 2003 (1): 199 – 204.
- [6] 杨坪,唐益群,王建秀. 地基不均匀沉降对既有村镇住宅的危害及注浆加固处理[J]. 灾害学, 2010, 25(S1): 388.
- [7] 娄吉宏,于森,胡桂娟. 袖阀管注浆法在广州白云国际机场飞行区溶洞处理工程中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2005, 30(1): 17 – 21.
- [8] Takao Ueda. Acoustic Emission Monitoring on Foundation Grouting for Rock masses[C]//. Proc 6th int. isrm, 1987.
- [9] 窦铁生,赵国赢. 裂隙岩体灌浆特性的研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1997, 18(2): 53 – 57.
- [10] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社, 2001.

(上接第 114 页)

4 结 语

地下水水位动态受到诸多因素的影响,在对其预测的过程中,一般要求出各个水文地质参数,这使得传统的方法在实际应用过程中较为复杂,不易操作。本文用 BP 神经网络的方法对地下水水位进行预测分析,在对于数据呈近似线性的例 1 中选择 purelin 作为输出函数,而对于非线性的例 2 中选择 logsig 作为输出函数;在对未来数据的预测中,采用滚动模型,不断更新训练样本,剔除最早的数据,这使得模型也随着时间及时更新,由此得到的模型更加准确。BP 神经网络在对地下水埋深预测中具有很好的适用性,而且通过增加循环次数和训练精度,可以进一步减小误差。因此, BP 神经网络理论是研究地下水水位动态变化规律的一种有效方法。

参考文献:

- [1] 张向飞,周维博,云涛,等. 渭北旱塬区地下水动态研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 89 – 93.

- [2] 周维博,云涛,张向飞,等. “十一五”渭北旱塬区地下水动态研究[R]. 西安:长安大学, 2011-08.
- [3] 李贺丽. 地下水动态预测方法分析[J]. 河南水利与南水北调, 2011, 9(7): 54 – 55.
- [4] 张兴明,王爱玲. BP 神经网络在企业绩效评价中的应用[J]. 价值工程, 2011(3): 105 – 106.
- [5] 张忠永,王明涛,贾惠艳. 人工神经网络在地下水动态预测中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(4): 504 – 506.
- [6] 周永进,蔡慧华,尹逊震,等. 改进的 BP 网络及其在数据预测中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(9-3): 150 – 151.
- [7] 李清华,张美凤. 基于改进 BP 网络的染色合格率预测[J]. 微计算机信息, 2006, 23(4-3): 93 – 95.
- [8] 王永生,王杰,李保刚,等. 变参数混沌时间序列的神经网络滚动预测研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 34(3): 456 – 459.
- [9] 周维博. 人工神经网络理论在井渠结合灌区地下水动态预报中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(2): 5 – 9.
- [10] 焦淑华,夏冰,徐海静,等. BP 神经网络的 MATLAB 实现[J]. 哈尔滨金融高等专科学校学报, 2009, 3(1): 55 – 56.