

DOI: 10.11779/CJGE201807021

劈裂灌浆扩散机理研究

欧阳进武^{1, 2}, 张贵金^{*1, 2}, 刘杰^{1, 2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 劈裂灌浆在实际工程中应用相当广泛。由于影响浆液扩散的因素众多, 劈裂灌浆扩散机理尚不明确, 尤其是不同给压方式(稳压和脉动)对浆液扩散的影响研究很少, 对这两种方式下的劈裂灌浆机理进行了探讨。对于稳压灌浆方式, 基于水力劈裂缝的扩展形态来考虑浆液的运动, 视劈裂注浆扩散形态为平面辐射椭圆, 采用恒缝高矩形断面模型, 推导出宾汉流体的劈裂灌浆扩散方程, 并分析了灌浆压力、浆材黏度、土体弹性模数、劈裂通道宽度对浆液扩散范围的影响。对于脉动灌浆方式, 由于施加给受灌体荷载的延滞效应和脉动叠加作用, 多次脉动灌入的浆液会使劈裂通道宽度逐渐增大, 采用扁球体的劈裂灌浆模型, 推导出脉动方式时的浆液扩散方程, 分析了脉动灌浆频率等与浆液扩散距离的相互关系; 结果表明, 浆液的扩散距离与脉动频率的关系曲线存在一个极小值, 发生在脉动频率为10 min次时, 这一参数可作为脉动灌浆方式的控制参数。最后将前人的稳压灌浆模型与本文的脉动模型与相互比较, 研究两种灌浆方式劈裂扩散机理的差异, 得到脉动灌浆时浆液扩散距离要远短于稳压方式的, 表明通过采用脉动灌浆, 调节相关参数能有效控制浆材扩散范围, 相关规律可为工程实际提供理论依据。

关键词: 劈裂灌浆; 稳压灌浆; 扩散距离; 脉动灌浆

中图分类号: TU472.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)07-1328-08

作者简介: 欧阳进武(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程基础处理研究。E-mail: 1018492171@qq.com。

Diffusion mechanism of split grouting

OUYANG Jin-wu^{1, 2}, ZHANG Gui-jin^{1, 2}, LIU Jie^{1, 2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: Splitting grouting is widely used in practical engineering. Due to the many factors influencing the diffusion of slurry, the mechanism of splitting grouting is not clear, especially the researches about effects of different pressure modes (regulation and pulsation) on the diffusion of slurry are scarce. The mechanism of splitting grouting of the above 2 pressure modes is discussed. As for the regulatory grouting, based on the expansion form of splitting cracks to consider the movement of slurry, the diffusion process is described as elliptical planar radiation using hydraulic fracturing model, and the equation for diffusion of splitting grouting under stable-pressure grouting is deduced. The influences of grouting pressure, slurry viscosity, elastic modulus and splitting channel width on diffusion area are analyzed. As for the pulsating grouting, slurry will make the split channel width gradually increase on account of the delay effect of the load applied to the filling and pulsating superposition. The grouting model for oblate ellipsoid is adopted, and the diffusion law of slurry of pulsating grouting is deduced. The results show that there is a minimum on the curve of relationship between the dispersion distance of slurry and the fluctuation frequency, occurring when the frequency is 10 times per minute. The parameter can be used as a control parameter for pulsating grouting. Finally, the difference between the grouting methods is studied by comparing the regulator grouting mode and the pulsation model. The diffusion distance of the latter is far shorter than that of the former. It is shown by using the pulsating grouting and adjusting the parameters can effectively control the diffusion range of slurry. The rules can provide a theoretical basis for engineering practice.

Key words: split grouting; stable-pressure grouting; diffusion radius; pulse grouting

0 引言

灌浆作为一种防渗加固地基的手段, 应用相当广

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279019); 湖南省重大水利科技项目(湘财农指(2015)245号)
收稿日期: 2017-04-12
*通讯作者(E-mail: gjzhang84@126.com)

泛。剥裂灌浆时, 浆液携带的能量不大, 会先聚集在出浆口附近, 形成椭球形浆泡挤压土体, 当注浆压力超过土体的启剥压力时, 浆液将在地层中阻力最小的主应力面以剥裂的方式流动^[1]。剥裂灌浆会在注浆孔附近形成浆脉, 通过浆脉挤压受灌体和浆脉的骨架作用加固受灌体, 从而达到防渗加固的效果。工程实践中, 剥裂灌浆可采用稳压和脉动两种给压方式。

目前, 已有部分学者对稳压剥裂注浆浆液扩散机理进行了一定的研究。视浆液扩散的平面形态为矩形, 采用平板窄缝的剥裂灌浆模型, 张忠苗等^[2]研究了幂律流体浆液剥裂注浆的规律; 孙峰等^[3]推导了宾汉流体浆液剥裂灌浆的扩散规律, 并讨论了浆液时变性给注浆扩散带来的影响^[4]。视浆液扩散的平面形态为圆形, 采用平面径向辐射圆形裂缝面的扩散模型, 邹金锋等^[5]探讨了牛顿流体的剥裂扩散机理; 章敏等^[6]增加考虑了重力、裂缝倾角的影响, 探讨了 Herschel-Bulkley 流体的扩散机理; 李术才等^[7]基于广义宾汉流体, 增加考虑了浆液扩散方向对注浆扩散范围的影响; 张庆松等^[8]则考虑浆液与土体的界面应力耦合效应, 研究了牛顿流体的剥裂灌浆规律。视浆液扩散的平面形态为椭圆, 采用了恒缝高矩形断面模型^[9], 刘强等^[10]研究了不同土体中水泥-水玻璃浆液的扩散规律。相比稳压的给压方式, 脉动灌浆则是利用脉动泵所提供的瞬间压力, 输出具有周期可控的脉冲浆液, 浆液以振动的流量方式形成周期性的张压应力冲击受灌体^[11]。当前脉动灌浆, 多在实践阶段, 于光海^[12]、张贵金属^[13]、田素川^[14]通过脉动灌浆获得较好的灌浆效果。至于脉动剥裂灌浆扩散机理, 研究不多。

然而, 现有的稳压灌浆剥裂模型都是仅从浆液在剥裂通道内的运动规律来研究浆液扩散的。实际上, 在稳压剥裂过程中, 浆液的运动和剥裂缝的扩展是同步进行的, 一方面要遵循浆液的运动规律, 另一方面浆液扩散还要满足剥裂缝的扩散规律。本文结合水力压裂剥裂缝的扩展形态规律, 采用横缝高矩形模型, 将浆液的运动和剥裂缝的扩展结合起来, 探讨浆液的扩散情况。对于脉动灌浆方式, 由于施加给受灌体荷载的延滞效应和脉动叠加作用, 使得灌浆压力与地应力之间总是存在或大或小、时正时负的压力差^[13], 多次脉动灌入的浆液会使剥裂通道宽度逐渐增大。建立扁球体脉动剥裂注浆扩散模型, 认为浆液在沿程扩散时流量沿程变化, 推导出脉动剥裂灌浆扩散方程。比较分析两种灌浆方式剥裂扩散机理的差异, 寻求能够控制剥裂扩散范围的灌浆方式和相关参数。

1 稳压剥裂灌浆机理

1.1 稳压灌浆基本假定

稳压灌浆基本假定有: ①受灌体为各向均匀同性体; ②视浆液为不可压缩的宾汉流体, 且不考虑浆液流体时变性的影响; ③假定剥裂灌浆中浆液流动属于层流; ④不考虑浆液渗透到剥裂通道以外的土体所引起的浆液流失; ⑤剥裂通道上下侧壁处浆液流动速度为零; ⑥浆脉高度沿程不变; ⑦剥裂过程中不管裂缝内的净压力分布如何, 裂缝的横断面形态恒为细长椭圆。

剥裂通道的模型如图 1 所示, 剥裂缝沿水平长度方向发展, 缝横断面为矩形, 缝的平面形态为以浆脉扩散距离为长轴的椭圆, 即横缝高矩形模型。在浆液灌注过程中, 裂缝的扩散距离是动态变化的, 裂缝的平面形态时刻保持椭圆形式。注: w_0 为初始剥裂缝宽度, r 为浆液扩散距离, r_0 为注浆孔半径, h 为剥裂通道宽度。

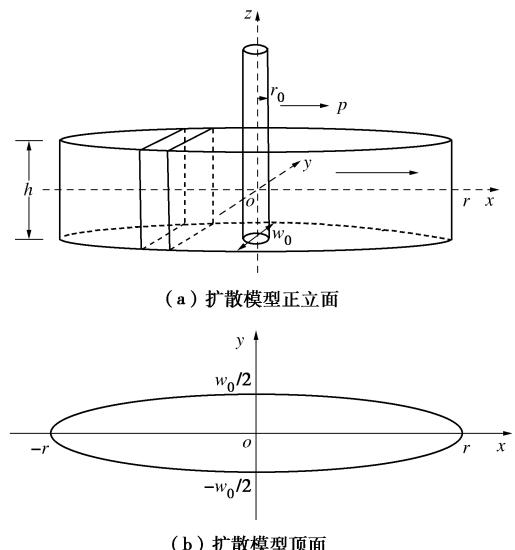


图 1 剥裂灌浆扩散模型

Fig. 1 Model of fracture grouting

1.2 稳压灌浆的扩散规律

(1) 剥裂缝的扩展规律

剥裂灌浆形成的通道平面形态可用椭圆方程描述:

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad , \quad (1)$$

式中, a , r 分别为任意时刻椭圆的半轴和长轴, r 为浆液扩散距离, r 是关于时间的函数, $r = r(t)$, $a = w_0/2$ 。

初始剥裂缝宽度^[15]为

$$w_0 = \frac{4}{E} K_1 \sqrt{\frac{r}{\pi}} \quad , \quad (2)$$

式中, K_1 为 I 型裂纹断裂韧度, E 为受灌体弹性模数。

根据剥裂通道体积和注入的浆液体积相等, 剥裂通道宽度 h 沿程不变, 可导出以下关系式:

$$Q = 2h \int_0^r w(r) dx = qt \quad , \quad (3)$$

$$r = \left(\frac{qEt}{2hK_1 \sqrt{\pi}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad , \quad (4)$$

式中, q 为流量, t 为注浆时间。

故劈裂通道末端的裂缝扩张速度即为

$$u = \frac{dr}{dt} = \frac{qE}{3hK_1 \sqrt{\pi r}} \quad . \quad (5)$$

(2) 浆液的运动方程

视浆液为宾汉流体, 通过对流体微元柱进行受力分析, 忽略通道内的内摩擦力、重力的影响。令劈裂通道宽度为 h , 流体微元段上两端压力为 $p + dp$ 和 p , 段上压差为 dp 。流体柱表面所受剪切应力为 τ , 其方向向左, 与流速方向相反。由水力平衡条件, 可得剪应力和流变方程为

$$\tau = z \frac{dp}{dx} \quad , \quad (6)$$

$$\tau = \tau_s + \mu_B \gamma \quad . \quad (7)$$

式中 μ_B 为塑性黏度; τ_s 流体的剪切屈服强度; γ 为剪切速率, 且 $\gamma = du/dy$,

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\mu_B} \left(z \frac{dp}{dx} - \tau_s \right) \quad . \quad (8)$$

假定流核高度为 z_0 , 对 $z_0 \leq z \leq 0.5h$ 或 $-0.5h \leq z \leq -z_0$, 对流核区外, 浆液流速分布呈抛物线形式, 见图 (2)。

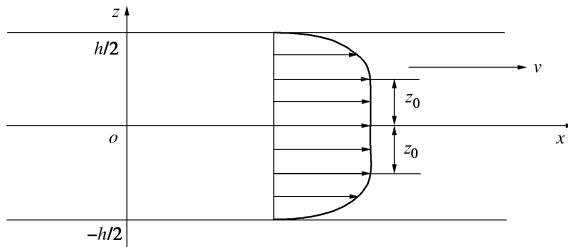


图 2 浆液流速分布

Fig. 2 Distribution of lurry velocity

对式 (8) 沿 z 方向进行积分, 且结合边界条件 $z = 0.5h$ 时, $v = 0$ 。则有

$$v = \frac{2}{\mu_B} \left[\frac{1}{8} \frac{dp}{dr} (4z^2 - h^2) + \tau_s \left(\frac{h}{2} - z \right) \right] \quad . \quad (9)$$

对 $-z_0 \leq z \leq z_0$, 流核区内浆液流动不受剪切力作用, 则有

$$v = \frac{2}{\mu_B} \left[\frac{1}{8} \frac{dp}{dr} (4z_0^2 - h^2) + \tau_s \left(\frac{h}{2} - z_0 \right) \right] \quad . \quad (10)$$

对断面积分, 得平均流速公式为

$$u = \frac{2}{\mu_B h} \left[\frac{1}{8} \frac{dp}{dr} \left(\frac{8z_0^3 - h^3}{3} \right) + \tau_s \left(\frac{h^2 - 4z_0^2}{8} \right) \right] \quad . \quad (11)$$

(3) 浆液的扩散方程

注浆过程中, 始终满足浆液末端断面平均流速和劈裂通道末端扩张速度相等, 联立式 (5) 和式 (11), 并积分可得

$$\frac{dp}{dr} = \frac{4qE\mu_B}{K_1(8z_0^3 - h^3)\sqrt{\pi r}} - \frac{3\tau_s(h^2 - 4z_0^2)}{8z_0^3 - h^3} \quad , \quad (12)$$

$$p = \frac{8qE\mu_B}{K_1(8z_0^3 - h^3)\sqrt{\pi}} \sqrt{r} - \frac{3\tau_s(h^2 - 4z_0^2)}{8z_0^3 - h^3} r + C \quad . \quad (13)$$

代入边界条件 $r = r_0$ 时, $p = p_0$; 当劈裂缝前端注浆压力值与受灌体的启裂压力 p_s 相等时, 浆液劈裂扩散至最大半径 R 。由此可得劈裂灌浆时的浆液扩散方程:

$$\Delta p = \frac{8qE\mu_B}{K_1(8z_0^3 - h^3)\sqrt{\pi}} (\sqrt{r_0} - \sqrt{R}) - \frac{3\tau_s(h^2 - 4z_0^2)}{8z_0^3 - h^3} (r_0 - R) \quad , \quad (14)$$

$$\Delta p = p_0 - p_s \quad , \quad (15)$$

式中, p_s 为受灌体的启裂压力, Δp 为注浆压力差。

2 脉动劈裂灌浆机理

2.1 脉动灌浆基本假定

脉动灌浆基本假定: ①受灌体为均匀的各向同性体; ②不考虑浆液流体时变性的影响; ③假定劈裂灌浆中浆液流动属于层流, 劈裂通道上下侧壁处浆液流动速度为零; ④劈裂通道宽度沿程不断减小, 且流量沿程分布也是变化的。

2.2 脉动灌浆规律

采用扁球体的劈裂通道模型, 且劈裂通道的横截面为椭圆。脉动灌浆压力与时间的关系如图 3 示, 其中脉动持续时间和脉动间隔时间相等, 即脉动周期为 $2T$, 脉动持续时间和间隔时间都为 T 。脉动灌浆过程中, 周期性的压力反复作用于受灌体, 类似对其进行重复的加载和卸载。每发生一次脉动, 劈裂通道内注浆量也会相应增加; 增加的注浆量会迫使前次脉动形成的劈裂通道继续扩展, 这种扩展不仅发生在长度方向上, 也发生在宽度方向上。重复的加载和卸载, 会使得每次脉动后劈裂通道宽度较上一次要大。为描述到每次脉动后, 劈裂通道的宽度的增加量, 引入了增加率 ε , 且有 $\varepsilon = (b_n - b_{n-1})/b_{n-1}$ 。 b_1 为第一次脉动时初始劈裂通道宽度, 经过 n 次脉动后初始劈裂通道宽度用 b_n 表示。由上述假定有 $b_n = b_{n-1}(1 + \varepsilon)$ 。 p_0 为初始灌浆压力, 经过 1 次脉动后灌浆压力变为 p_1 , 此时对应的浆液扩散距离为 r_1 ; 经过 n 次脉动后灌浆压力变为 p_n , 此时对应的浆液扩散距离为 r_n 。当 p_n 与土体的启裂压力 p_s 相等时, 视浆液达到最远的扩散距离。劈裂通道沿程宽度与扩散距离的关系^[16]可表示为

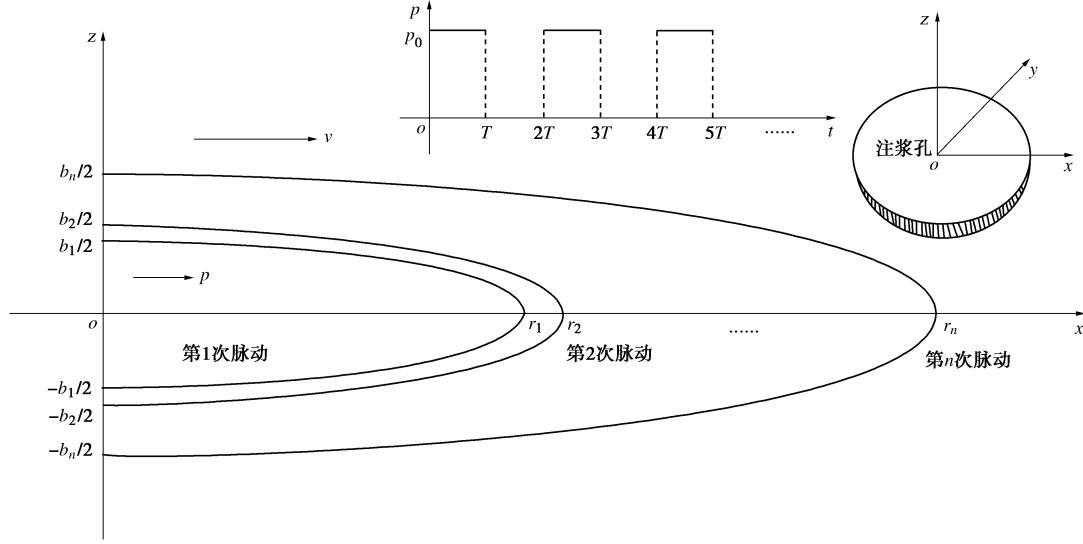


图3 脉动灌浆扩散模型

Fig. 3 Model of pulse grouting

$$b = \frac{8p(1-\mu^2)}{\pi E} \sqrt{r_n^2 - x^2} \quad , \quad (16)$$

每次脉动形成的劈裂通道体积为

$$V = 2\pi \int_0^r x b dx = \frac{16(1-\mu^2)pr^3}{3E} \quad . \quad (17)$$

(1) 脉动方程推导

浆液在劈裂通道内流动时, 由于浆液的渗透损失, 劈裂通道内的注浆速率 q 沿程并不是均匀分布的, 而是沿着扩散方向由大变小。为计算每次脉动时段的流量, 通过取椭圆剖面的等效高度来处理, 见图 4。

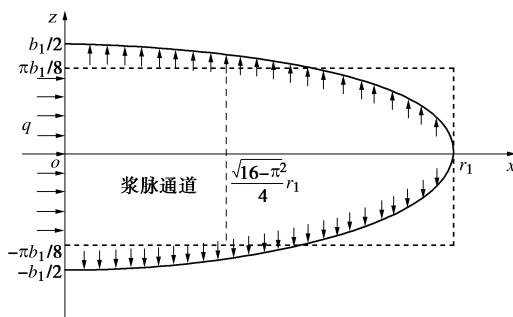


图4 劈裂通道剖面

Fig. 4 Sectional view of pulp vein

得第 1 次脉动后, 劈裂通道宽度的等效宽度和为对应的横坐标为

$$h_{\text{等效}} = \frac{1}{4}\pi b_1 \quad , \quad (18)$$

$$x = \frac{\sqrt{16-\pi^2}}{4} r \quad , \quad (19)$$

故等效断面面积应为

$$A = \frac{\pi^2 b_1 r \sqrt{16-\pi^2}}{8} \quad . \quad (20)$$

另一方面, 浆液在劈裂通道内的雷诺数较小, 属于层流, 且不考虑流核区存在, 取浆液为宾汉流体, 通过对流体微元柱进行受力分析, 忽略通道内内摩擦力、重力的影响。劈裂通道宽度上的断面平均流速为

$$u = \frac{b}{4\mu_B} \left[\tau_s - \frac{b}{3} \frac{dp}{dr} \right] \quad , \quad (21)$$

断面平均流速和流量的关系为

$$Q = uAT \quad . \quad (22)$$

联立式 (18) ~ (22), 故浆液断面的平均流速、流量变为

$$u = \frac{\pi b_1}{16\mu_B} \left[\tau_s - \frac{\pi b_1}{12} \frac{dp}{dr} \right] \quad , \quad (23)$$

$$Q = \frac{\pi^3 b_1^2 r T \sqrt{16-\pi^2}}{128\mu_B} \left(\tau_s - \frac{\pi b_1}{12} \frac{dp}{dr} \right) \quad . \quad (24)$$

由此可推出

$$\frac{dp}{dr} = \frac{12}{\pi b_1} \left(\tau_s - \frac{16(1-\mu^2)pr^2}{3E} \frac{128\mu_B}{\pi^3 b_1^2 t \sqrt{16-\pi^2}} \right) \quad . \quad (25)$$

式 (25) 可化为一阶线性微分方程

$$\frac{dp}{dr} + \frac{8192(1-\mu^2)\mu_B r^2}{\pi^4 b_1^3 E t \sqrt{16-\pi^2}} p = \frac{12\tau_s}{\pi b_1} \quad . \quad (26)$$

做如下简化处理:

$$M_1 = \frac{8192(1-\mu^2)\mu_B}{\pi^4 b_1^3 E T \sqrt{16-\pi^2}} \quad , \quad (27)$$

$$N_1 = \frac{12\tau_s}{\pi b_1} \quad , \quad (28)$$

$$\frac{dp}{dr} + M_1 r^2 p = N_1 \quad . \quad (29)$$

由一阶线性线性微分方程的通解, 可得上述微分方程的解为

$$p(r) = e^{-\frac{1}{3}M_1 r^3} \left(N \int e^{\frac{1}{3}M_1 r^3} dr + C \right) , \quad (30)$$

式中, C 为常数。

(2) 脉动方程求解

实际上 e^{x^n} 为不可积函数, 为求其积分, 利用 e^x 的麦克劳林展开式求之, 故原方程解可写成

$$p(r) = e^{-\frac{1}{3}M_1 r^3} \left[N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r^{3n+1}}{3n+1} + C \right] , \quad (31)$$

$$p_1 - p_0 = e^{-\frac{1}{3}M_1 r_1^3} \left[N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r_1^{3n+1}}{3n+1} + C \right] - e^{-\frac{1}{3}M_1 r_0^3} \left[N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r_0^{3n+1}}{3n+1} + C \right] , \quad (32)$$

并代入边界条件 $r = r_0$, $p = p_0$; $r = r_1$, $p = p_1$, 可得式 (32)。同理可得, 第 2 次脉动后有

$$p_2 - p_1 = e^{-\frac{1}{3}M_2 r_2^3} \left[N_2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_2\right)^n}{n!} \frac{r_2^{3n+1}}{3n+1} + C \right] - e^{-\frac{1}{3}M_1 r_1^3} \left[N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r_1^{3n+1}}{3n+1} + C \right] . \quad (33)$$

经过 n 次脉动后, 可得

$$p_n - p_{n-1} = e^{-\frac{1}{3}M_n r_n^3} \left[N_n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_n\right)^n}{n!} \frac{r_n^{3n+1}}{3n+1} + C \right] - e^{-\frac{1}{3}M_{n-1} r_{n-1}^3} \left[N_{n-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_{n-1}\right)^n}{n!} \frac{r_{n-1}^{3n+1}}{3n+1} + C \right] . \quad (34)$$

上式累加可得

$$p_n - p_0 = e^{-\frac{1}{3}M_n r_n^3} \left[N_n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_n\right)^n}{n!} \frac{r_n^{3n+1}}{3n+1} + C \right] - e^{-\frac{1}{3}M_1 r_0^3} \left[N_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{3}M_1\right)^n}{n!} \frac{r_0^{3n+1}}{3n+1} + C \right] , \quad (35)$$

$$M_n = \frac{8192(1-\mu^2)\mu_B}{\pi^4 b_n^3 ET \sqrt{16-\pi^2}} , \quad (36)$$

$$N_n = \frac{12\tau_s}{\pi b_n} . \quad (37)$$

式 (35) ~ (37) 即为经过 n 次脉动后, 浆液扩散方程。当 p_n 与土体的启裂压力 p_s 相等时, 视浆液达到最远的扩散距离, 可通过 Matlab 软件编程解出。

3 稳压劈裂灌浆案例分析

3.1 注浆压力差对劈裂通道宽度的影响

对前述稳压灌浆浆液扩散模型, 取受灌体的断裂韧度 $K_1 = 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 浆液的塑性黏度 $\mu_B = 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 剪切屈服强度 $\tau_s = 6 \text{ Pa}$; 在浆液扩散距离 $r = 2 \text{ m}$, 注浆孔半径 $r_0 = 0.025 \text{ m}$ 且流核高度 z_0 取为 $h/3$ 的情况下, 根据式 (14) 计算出不同劈裂通道宽度 h 在不同弹性模数 E 时与注浆压力差 Δp 关系, 如图 5。由图可知, 随着劈裂通道宽度 h 增大, 达到同样的扩散距离所需注浆压力差 Δp 迅速减小, 注浆压力对劈裂通道宽度 h 的影响明显, 减小注浆压力能显著减小劈裂通道宽度 h 。同时随着土的弹性模数 E 的增大, 达到相同的劈裂通道宽度 h , 所需的注浆压力也越大。

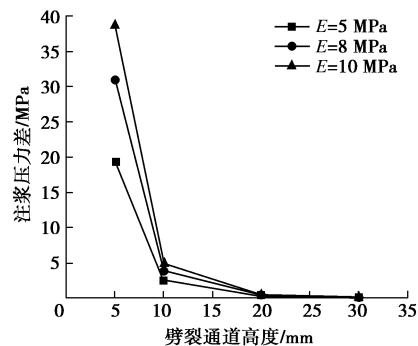


图 5 注浆压力差与劈裂通道宽度的关系

Fig. 5 Relationship between difference of grouting pressure and gap width

3.2 注浆压力差对浆液扩散距离的影响

取受灌体的断裂韧度 $K_1 = 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 浆液的塑性黏度 $\mu_B = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 剪切屈服强度 $\tau_s = 6 \text{ Pa}$; 在注浆孔半径 $r_0 = 0.025 \text{ m}$, 且流核高度 z_0 取为 $h/3$ 的情况下, 根据浆液扩散公式 (14) 可计算出不同注浆压力差 Δp 和不同劈裂通道宽度 h 时的浆液扩散距离 r 的值, 见图 6。同样选取以上数据, 令劈裂通道宽度取 $h = 0.02 \text{ m}$, 计算出不同注浆压力差 Δp 和不同塑性黏度 μ_B 时的浆液扩散距离的值, 见图 7。

由图 6, 7 可知, 随着注浆压力差越大, 浆液的扩散距离也就越远。在相同的注浆压力差条件下, 劈裂通道宽度越大, 浆液的扩散距离越大; 在相同的注浆压力差条件下, 浆液黏度增大时浆液的扩散距离变短。

3.3 劈裂通道宽度与浆液扩散距离的关系

取受灌体的断裂韧度 $K_1 = 0.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 浆液黏度 $\mu_B = 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 剪切屈服强度 $\tau_s = 6 \text{ Pa}$; 在注浆

压力差 $\Delta p = 1$ MPa, 注浆孔半径 $r_0 = 0.025$ m 且流核高度 z_0 取为 $h/3$ 的情况下, 根据浆液扩散公式可计算出在不同弹性模数时剥裂通道宽度 h 和浆液扩散距离的关系, 见图 8。

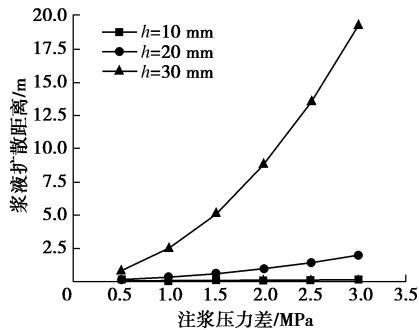


图 6 不同剥裂通道宽度扩散距离与注浆压力差的关系

Fig. 6 Relationship between diffusion radius and difference of grouting pressure under different gap widths

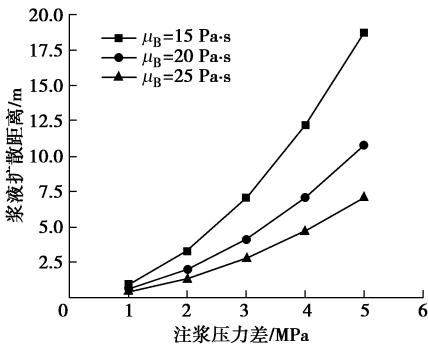


图 7 不同黏度时扩散距离与注浆压力差的关系

Fig. 7 Relationship between diffusion radius and grouting pressure under different viscosities

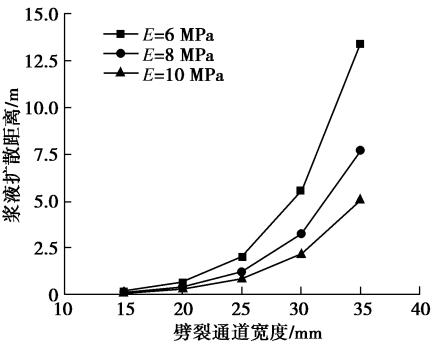


图 8 不同弹模时剥裂通道宽度与浆液扩散距离的关系

Fig. 8 Relationship between gap width and diffusion radius under different elastic moduli

分析图 8 可知, 在剥裂通道宽度相同的情况下, 受灌体的弹性模数越大, 浆液的扩散距离越小。

4 脉动剥裂灌浆案例分析

4.1 脉动灌浆规律

取脉动灌浆总时间为 20 min, 脉动持续时间和脉动间隔时间相等。探究脉动灌浆频率对浆液扩散距离的影响。取受灌体的启剥压力 $p_s = 0.1$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.25$, 弹性模量 $E = 6$ MPa, 浆液的剪切屈服强度 $\tau_s = 6$ Pa, 初始剥裂通道宽度 $b_1 = 0.02$ m, 增加率 $\varepsilon = 0.002$, 注浆孔半径 $r_0 = 0.025$ m, 灌浆压力 $p_0 = 1$ MPa。图 9 为不同塑性黏度时脉动灌浆周期和浆液扩散距离的相互关系。另外取浆液黏度为定值, 得到不同脉动周期时脉动灌浆压力和浆液扩散距离的相互关系, 如图 10 所示。

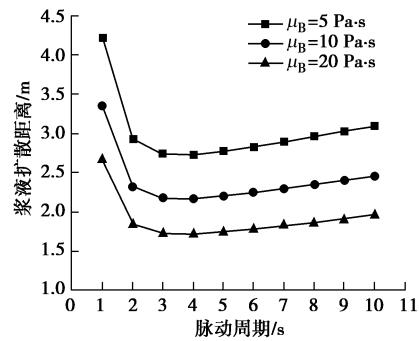


图 9 不同黏度时脉动周期与浆液扩散距离的关系

Fig. 9 Relationship between diffusion radius and pulsation period under different viscosities

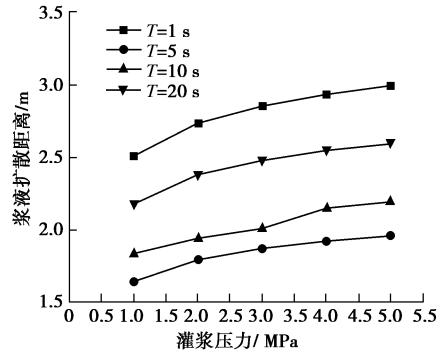


图 10 不同脉动周期时灌浆压力与浆液扩散距离的关系

Fig. 10 Relationship between grouting pressure and diffusion radius under different pulsation periods

从图 9 中可以看出, 随着浆液黏度的增加, 浆液的扩散距离反而减小。另外脉动灌浆时, 存在一个拐点, 发生在脉动周期 $2T = 6$ s, 即脉动灌浆频率为每 10/min 次时, 在其右侧, 随着周期的增加 (即脉动频率减小) 浆液扩散距离相应增加; 而在其左侧, 随着周期增加 (即脉动频率减小), 浆液的扩散距离反而减小。图 10 也能说明这一点。当脉动持续时间过长或过短, 灌浆的工法都越来越趋近于稳压灌浆的方式, 扩散距离反而增大。

4.2 宾汉流体和牛顿流体脉动灌浆比较

对牛顿流体 (大水灰比的纯水泥浆、水泥水玻璃浆、环氧化学浆材等) 和宾汉流体 (高黏性的黏土水泥膏浆、小水灰比的纯水泥浆等) 的浆液扩散距离进

行比较。取牛顿流体的剪切屈服强度 $\tau_s = 0 \text{ Pa}$ ，浆液黏度 $\mu_B = 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ；宾汉流体取剪切屈服强度 $\tau_s = 6 \text{ Pa}$ ，浆液黏度 $\mu_B = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。受灌体参数一致，弹性模数 $E = 4 \text{ MPa}$ ，启劈压力 $p_s = 0.1 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.25$ ，注浆孔半径 $r_0 = 0.025 \text{ m}$ ，在脉动周期 $2T = 16 \text{ s}$ ，探究两者扩散规律，得到图 11。

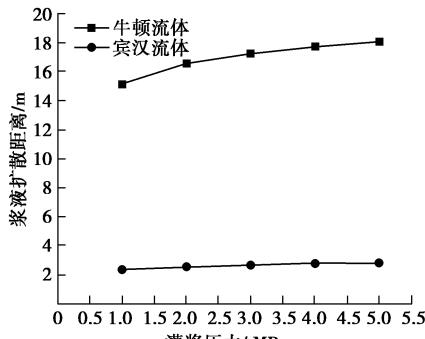


图 11 牛顿流体和宾汉流体的比较

Fig. 11 Comparison between Newtonian fluid and Bingham fluid

由图 11 可知，脉动灌浆中牛顿流体的浆液扩散距离大于宾汉流体的。相比宾汉流体而言，牛顿流体不存在剪切屈服强度，其黏度也较小，在受灌体中扩散时受到的摩擦阻力更小，因而会扩散更远。

5 稳压和脉动灌浆时的扩散规律比较

取宾汉流体剪切屈服强度 $\tau_s = 6 \text{ Pa}$ ，浆液黏度 $\mu_B = 15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ；受灌体的断裂韧度 $K_I = 0.25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ，启劈压力 $p_s = 0.1 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.25$ ，弹性模量 $E = 6 \text{ MPa}$ ；在注浆孔半径 $r_0 = 0.025 \text{ m}$ ，流量 $q = 120 \text{ L/min}$ ，劈裂通道宽度 $h = 0.02 \text{ m}$ ，流核高度 z_0 取为 $h/3$ 的情况下，根据本文的稳压和脉动扩散公式，并和孙峰等^[3]、刘强等^[10]的稳压扩散公式进行比较，计算出注浆压力 p 与浆液扩散距离 r 的关系。由表 1 知，总体上，脉动灌浆相对稳压灌浆而言，浆液的扩散距离更短。另外，脉动的频率也会对浆液的扩散范围有影响。

表 1 稳压灌浆和脉动灌浆的比较

Table 1 Comparison between stable-pressure grouting and pulse grouting

灌浆方式	扩散距离/m				
	1.500 MPa	2.000 MPa	2.500 MPa	3.000 MPa	
脉动	2.006	2.075	2.125	2.164	
周期 $T=3 \text{ s}$	2.167	2.241	2.296	2.338	
周期 $T=10 \text{ s}$	2.266	2.343	2.400	2.444	
本文稳压公式	3.923	6.933	10.800	15.526	
稳压	刘强公式	1.623	2.989	4.769	6.962
	孙峰公式	51.046	69.277	87.507	105.738

6 结 论

(1) 将浆液运动和劈裂缝的扩展规律相结合，采

用横缝高矩形模型，得到稳压条件下的劈裂灌浆扩散规律；采用扁球体的劈裂扩散模型，推导了脉动劈裂灌浆时的浆液扩散方程。研究成果可为稳压和脉动劈裂注浆的设计和施工提供理论指导。

(2) 根据建立的理论模型分析扩散规律，并与前人的稳压灌浆模型比较分析。表明劈裂灌浆时浆液扩散距离随浆液黏度增大而减小，随注浆压力差增加而增加；特别地，相比稳压劈裂灌浆，脉动劈裂灌浆扩散距离短得多。灌浆中通过采用脉动的给压方式，调节脉动的相关参数，可以有效控制浆材扩散范围。

(3) 采用脉动灌浆时，脉动频率和浆液的扩散距离的关系曲线图存在一个极小值，这一频率参数可作为脉动灌浆的控制参数。

由于劈裂注浆过程的力学机理非常复杂，文中的脉动灌浆模型尚未考虑浆液流变参数的时变性、灌浆孔深的影响。另外脉动压力随时间变化的形式较为单一，其他类型受灌体灌浆还可能同时存在渗透、挤压等复合机理，这些问题有待继续深入研究。

参 考 文 献：

- [1] 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: 75 - 77. (Cooperative Group of Theory and Engineering Example of Rock and Soil Grouting. Theory and engineering example of rock and soil grouting[M]. Beijing: Science Press, 2001: 75 - 77. (in Chinese))
- [2] 张忠苗, 邹 健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 181 - 184. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian. Penetration radius and grouting pressure in fracture grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 181 - 184. (in Chinese))
- [3] 孙 峰, 陈铁林, 张顶立, 等. 基于宾汉体浆液的海底隧道劈裂注浆机理研究[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 1 - 6. (SUN Feng, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li, et al. Study on fracture grouting mechanism in subsea tunnel based on bingham fluids[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [4] 孙 峰, 陈铁林, 张顶立, 等. 基于流体时变性的隧道劈裂注浆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 88 - 93. (SUN Feng, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li, et al. Fracture grouting mechanism in tunnels based on time-dependent behaviors of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 88 - 93. (in Chinese))
- [5] 邹金锋, 李 亮, 杨小礼, 等. 劈裂注浆扩散半径及压力衰

减分析[J]. 水利学报, 2006, **37**(3): 314 – 319. (ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, et al. Penetration radius and pressure attenuation law in fracturing grouting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(3): 314 – 319. (in Chinese))

[6] 章 敏, 王星华, 汪 优, 等. Herschel–Bulkley 浆液在裂隙中的扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 815 – 820. (ZHANG Min, WANG Xing-hua, WANG You, et al. Diffusion of Herschel–Bulkley slurry in fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 815 – 820. (in Chinese))

[7] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 744 – 751. (LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, ZHANG Qing-song, et al. Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 744 – 751. (in Chinese))

[8] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆–土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 323 – 330. (ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, LIU Ren-tai, et al. Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 323 – 330. (in Chinese))

[9] 乌效鸣, 屠厚泽. 煤层水力压裂典型裂缝形态分析与基本尺寸确定[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1995, **20**(1): 112 – 116. (WU Xiao-ming, TU Hou-ze. Morphological analysis and geometrical size determination of representative hydraulic fractures in coal seam[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1995, **20**(1): 112 – 116. (in Chinese))

[10] 刘 强, 张可能, 陈 宾, 等. 不同土体中水泥–水玻璃浆液的扩散规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(1): 255 – 260. (LIU Qiang, ZHANG Ke-neng, CHEN Bin, et al. Diffusion law of cement-sodium silicate grout in different soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(1): 255 – 260. (in Chinese))

[11] 张贵金属, 肖 通, 张 聪, 等. 松散地层脉动与稳压灌浆室内试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(5): 87 – 93. (ZHANG Gui-jin, XIAO Tong, ZHANG Cong, et al. An indoor experimental study of loose soil strata pulsating and regulated filling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, **43**(5): 87 – 93. (in Chinese))

[12] 于光海. 不规则脉动压力灌浆技术在砌石坝防渗治漏中的应用[J]. 山东水利科技, 1994(1): 11 – 12. (YU Guang-hai. Irregular pulse pressure grouting technology in the application of the masonry dam anti-seepage leakage cure[J]. Water Resources Science and Technology of Shandong, 1994(1): 11 – 12. (in Chinese))

[13] 张贵金属, 许毓才, 陈安重, 等. 一种适合松软地层高效控制灌浆的新工法——自下而上、浆体封闭、高压脉动灌浆[J]. 水利水电技术, 2012, **43**(3): 38 – 41. (ZHANG Gui-jin, XU Yu-cai, CHEN An-zhong, et al. A new technical method for efficient and control grouting for loose ground——high pulsating pressure grouting from bottom to up stemming with slurry[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, **43**(3): 38 – 41. (in Chinese))

[14] 田素川. 裂隙岩体注浆浆液扩散规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. (TIAN Su-chuan. Study on flow law of grout diffusion in fractured rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))

[15] 阳友奎, 肖长富, 邱贤德, 等. 水力压裂裂缝形态与缝内压力分布[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1995, **18**(3): 20 – 26. (YANG You-kui, XIAO Chang-fu, QIU Xian-de, et al. Fracture geometry and pressure distribution in fracture for hydrofracturing[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1995, **18**(3): 20 – 26. (in Chinese))

[16] SNEDDON I N. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1946: 229 – 260.