

DOI: 10.11779/CJGE201410007

# 考虑时间因素的岩体灌浆参数设计研究

符平, 秦鹏飞, 王春, 杨晓东

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 水泥灌浆常被用来提高岩体的完整性和降低其渗透性, 其工艺参数的设计目前主要依赖于灌浆工程师的经验和类似工程的类比, 灌浆时间一般不包括在灌浆设计参数中。根据水泥浆液在光滑顺直裂隙中的扩散运动方程, 考虑水泥浆液的宾汉体流变性质和其颗粒特性, 并在给出灌浆特征时间概念的基础上推导出灌浆过程中浆液扩散比与灌浆时间比的关系, 提出了基于灌浆时间的灌浆结束标准, 并结合岩体裂隙开度分布规律对其在灌浆设计和施工中的运用进行了分析, 可为灌浆工程的设计和施工提供有益的参考。

**关键词:** 水泥灌浆; 岩体裂隙; 扩散距离比; 灌浆时间比; 灌浆参数设计

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1808-06

**作者简介:** 符平(1975-), 男, 土家族, 湖南永顺人, 博士, 高级工程师, 主要从事地基处理及灌浆技术研究。

E-mail: fuping@iwhr.com。

## Design of grouting parameters in rock based on grouting time

FU Ping, QIN Peng-fei, WANG Chun, YANG Xiao-dong

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Cement grouting is used to improve the integrity and to reduce the permeability of rock mass. The design of grouting parameters depends mainly on the engineer's experience and engineering analogy, and the grouting time is generally not included in the design parameters. Based on the diffusing equation for cement grouting in a smooth and straight fracture, the relationship between that of penetration length and the ratio of grouting time is derived considering the Bingham rheological properties of cement grouting and the properties of cement particles. The grouting criterion based on the grouting time is proposed and analyzed in the grouting design and construction considering the distribution of rock fracture aperture. It may provide a reference for the grouting design and construction in similar projects.

**Key words:** cement grouting; fracture of rock mass; ratio of penetration length; ratio of grouting time; design of grouting parameter

## 0 引言

灌浆技术已经有了 200 多年的历史, 在水利水电、交通运输、矿产等多个地下工程中发挥了重要作用, 尤其是采用水泥浆液对裂隙岩体进行灌浆以改善岩体的防渗性能和力学性能, 更是岩体基础处理工程中首选的技术手段。就施工工程量和灌浆效果而言, 中国水泥灌浆的技术水平已处于世界前列<sup>[1]</sup>。在灌浆工程的实际设计中, 灌浆工艺参数, 如孔排距、浆液配比、压力、注入率等, 更多地依赖于灌浆工程师的经验结合类似工程确定。灌浆压力的选择是灌浆设计中最主要的因素, 通常根据被灌区域的水文地质条件、坝高、被灌体的埋深和所需要达到的灌浆效果加上经验确定, 并没有一个确切的方法或公式, 且越来越倾向于使用较高的灌浆压力; 孔(排)距主要在 1.5, 2, 2.5, 3 m 等几个有限数值中根据经验选择<sup>[2]</sup>; 灌浆结束标

准一般要求注入率 $<1 \text{ L/min}$ <sup>[2]</sup>, 在实际施工中, 由于注入率 $<1 \text{ L/min}$ 很难达到, 施工中或者采用低压循环灌注, 满足 $<1 \text{ L/min}$ 要求后再升压结束, 或者灌注时间很长, 长达 5~6 h 以上的灌注, 导致浆液扩散范围很广, 浪费严重, 工效较低。这种过严的灌浆结束标准对于灌浆质量的保证起到了积极作用, 但也导致防渗标准越来越高, 对于一些防渗标准不高或者需要快速有效地完成灌浆施工的工程来说, 是不适宜的, 但其灌浆参数如何选取, 目前国内外尚没有明确的方法; 同时, 在目前国内灌浆施工技术规范和设计方法中, 一般都不包括灌浆时间, 灌浆时间的长短取决于何时能达到结束标准。Gustafson 等<sup>[3]</sup>、Still 等<sup>[4]</sup>提出了时间控制灌浆法, 通过控制浆液的扩散范围进行灌浆参

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279217)

收稿日期: 2013-10-22

数的优化设计,但在研究中没有考虑裂隙的开展分布特征,并忽略了水泥浆液具有颗粒性的特点。本文根据水泥浆液在光滑顺直裂隙中的扩散运动方程,考虑水泥浆液的宾汉体流变性质和颗粒特性,推导出灌浆过程中浆液扩散距离比与灌浆时间比的关系,并结合裂隙的开展分布特征,对该法在灌浆设计和施工中的运用进行了分析,可为类似灌浆工程的设计和施工提供有益的参考。

## 1 水泥浆液扩散

### 1.1 浆液运动方程

灌浆孔位在岩体中布置及浆液在裂隙中的扩散如图1所示。浆液从钻孔孔壁处进入裂隙后,在灌浆压力作用下沿着裂隙方向作径向辐射状运动。灌浆压力需大于地下水的压力,浆液前锋面在压力差的作用下将不断地向外推移,随着浆液扩散距离越来越远,前锋面处灌浆压力不断衰减,驱动浆液向前运动的压力梯度会越来越小,浆液的运动速度会越来越慢,最终浆液前锋面的灌浆压力与地下水的压力相等,此时前锋面的压力梯度为0,浆液流动速度将为0,浆液扩散将会停止下来。浆液在裂隙中运动形式如图2所示。

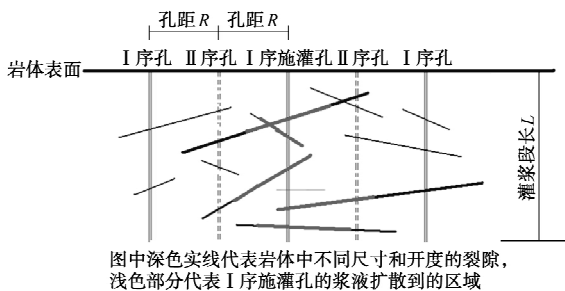


图1 水泥浆液在岩体裂隙网络中的扩散示意图

Fig. 1 Penetration of cement grouting in fracture-net of rock mass

本文将纯水泥浆液作为研究对象。普通硅酸盐水泥颗粒组成中,  $D_{\max} \leq 100 \mu\text{m}$ , 平均粒径  $\bar{D} \leq 40 \mu\text{m}$  或  $D_{50} \leq 40 \mu\text{m}$ , 因此在我国工程实践中认为开度小于  $0.2 \text{ mm}$  裂隙对于普硅水泥是不可灌的。水泥浆液是典型的悬浮液,属于宾汉姆流体,其流变模型可用式(1)来描述<sup>[5]</sup>,其在单宽矩形裂隙中的扩散过程如图2所示。

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中  $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$  分别表示浆液的剪切应力和剪应变速率;  $\tau_0$ ,  $\eta$  分别为浆液的剪切屈服强度和塑性黏滞系数。

岩体水泥灌浆实质上是颗粒状浆液在裂隙中的两相渗流过程,根据流量守恒和平衡方程,可以推导出浆液前锋面在裂隙中的压力衰减规律,即浆液在裂隙中某截面上的运动速度分布如图2所示,并可由下式表示<sup>[6-9]</sup>:

$$u = -\frac{Jb^2}{2\eta} \left[ 1 - \left( \frac{z}{b} \right)^2 - 2 \frac{z_b}{b} \left( 1 - \frac{z}{b} \right) \right] \quad (2)$$

式中  $u$  为计算断面上某点的浆液运动速度;  $J$  为压力坡度,  $J = -\frac{dP}{dr}$ ;  $2b$  为裂隙开度;  $z$ ,  $z_b$  分别为计算断面上某点距中心的距离和塞流高度。

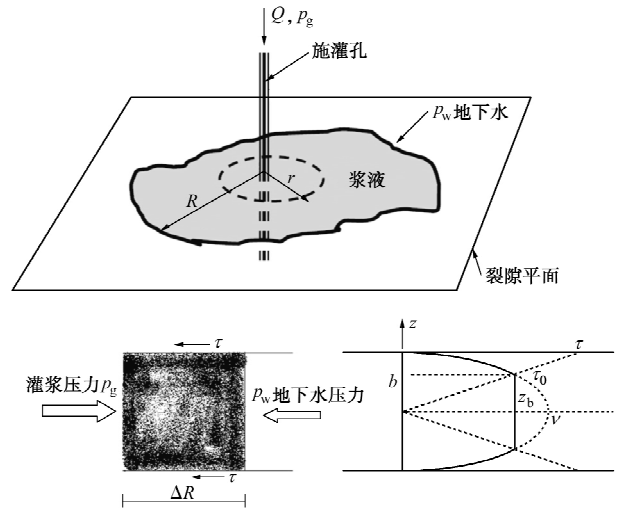


图2 水泥浆液在单宽矩形裂隙中的扩散示意图

Fig. 2 Penetration of cement grouting in a single-wide rectangular fracture

将该速度曲线沿着计算截面进行积分,即可得到通过该断面的浆液流量:

$$q = \int_{-b}^b u dz = \frac{2Jb^3}{3\eta} \left[ 1 - \frac{3z_b}{2b} + \frac{1}{2} \left( \frac{z_b}{b} \right)^3 \right] \quad (3)$$

将浆液流量除以断面面积,可得到该断面的平均流速为

$$\bar{u} = \frac{q}{2b} = \frac{Jb^2}{3\eta} \left[ 1 - \frac{3z_b}{2b} + \frac{1}{2} \left( \frac{z_b}{b} \right)^3 \right] \quad (4)$$

### 1.2 单裂隙灌浆参数

水泥浆液等宾汉体在裂隙流动过程中存在流核,流核的高度(即塞流高度)为  $2Z_b$ , 当  $z = Z_b$  时, 有  $\frac{du}{dz} = 0$ , 可得到

$$\tau_0 = Jz_b \quad (5)$$

根据式(1)、式(3)和式(4),整理后可得

$$J + \frac{\tau_0^3}{2b^3} J^{-2} = \frac{3\tau_0}{2b} - \frac{3\eta \bar{u}}{2b^2} \quad (6)$$

特别地,当  $z_b = b$  时,即塞流高度等于  $b$ ,过流断面全部被塞流占据后,由于裂隙壁面无滑移,塞流速度等于壁面速度,即  $\bar{u} = 0$ ,浆液将停止运动,此时浆液的扩散距离  $R$  为最大。将  $\bar{u} = 0$  代入式(5),得

$$\left( J - \frac{\tau_0}{2b} \right) \cdot \left( J + \frac{\tau_0}{b} \right)^2 = 0 \quad (7)$$

可以得出灌浆结束时, 灌浆压力沿裂隙径向分布为直线分布:

$$J = \frac{\Delta p}{R} = -\frac{\tau_0}{b} \quad (6)$$

故浆液最大扩散距离 $R$ 满足下式

$$R = -\frac{b}{\tau_0} \cdot \Delta p \quad (7)$$

式(7)与HasesLer等<sup>[10]</sup>、Lombardi<sup>[11]</sup>以及杨晓东等<sup>[12]</sup>提出的浆液扩散理论公式一致。

根据式(3)、(4)和(5), 可得

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Jb^2}{3\eta} \left[ 1 - \frac{3z_b}{2b} + \frac{1}{2} \left( \frac{z_b}{b} \right)^3 \right] = \frac{b^2 \cdot \Delta p}{3\eta \cdot r} \left[ 1 - \frac{3z_b}{2b} + \frac{1}{2} \left( \frac{z_b}{b} \right)^3 \right]$$

假设: 浆液扩散比 $r_c = \frac{r}{R} = \frac{Z_b}{b}$ , 则有

$$\frac{dr_c}{dt} = \frac{\tau_0^2}{6\eta \cdot \Delta p} \times \frac{2 - 3r_c + r_c^3}{r_c}$$

按式(8)定义 $t_0$ 为灌浆特征时间:

$$t_0 = \frac{6\eta \cdot \Delta p}{\tau_0^2} \quad (8)$$

假设灌浆时间比 $t_c = \frac{t}{t_0}$ , 则有

$$\frac{dt_c}{dr_c} = \frac{r_c}{2 - 3r_c + r_c^3} \quad (9)$$

显然, 当 $t_c = 0$ 时,  $r_c = 0$ , 为式(9)的初始条件。对式(9)进行积分求解后, 可得

$$t_c = f(r_c) = \frac{r_c}{3(1-r_c)} + \frac{2}{9} \cdot \ln \left[ \frac{2(1-r_c)}{2+r_c} \right] \quad (10)$$

式(10)为式(9)的一个解,  $t_c$ 与 $r_c$ 的理论关系曲线如图4所示。

### 1.3 灌浆参数设计

从式(8)、(10)和图4中可以得到以下结论:

(1) 灌浆特征时间 $t_0$ 与浆液的流变性质(剪切屈服强度 $\tau_0$ 和塑性黏滞系数 $\eta$ )和灌浆压力( $\Delta p$ )有关, 而与岩体中裂隙无关。浆液的流变性质和灌浆压力是灌浆设计中的主要参数, 在设计时选取。

(2) 浆液的最大扩散距离 $R$ 与浆液的剪切屈服强度 $\tau_0$ 、灌浆压力 $\Delta p$ 和裂隙的开度 $2b$ 有关。浆液在裂隙中的扩散距离比 $r_c$ 可直接表征为灌浆时间 $t_c$ 的单变量函数, 而与岩体中的裂隙性质无关, 如裂隙开度。这意味着, 浆液在不同的裂隙开度中扩散时, 在相同的灌浆时间内, 浆液扩散比相同, 即在灌浆所有的裂隙中浆液在某裂隙中扩散距离与浆液在该裂隙中最终扩散距离的比值相等。

(3) 灌浆特征时间 $t_0$ 可以在灌浆前由设计者确定, 不同灌浆时间比对应的裂隙扩散比如表1所示。

表1 不同的灌浆时间比与浆液扩散比对应表

Table 1 Conversion for ratios of gouting time and grouting

	penetration							
灌浆时间比	0.003	0.130	0.901	1.0	2.406	5.581	7.198	15.375
浆液扩散比	0.1	0.5	0.8	0.813	0.9	0.95	0.96	0.98

当灌浆时间 $t$ 等于灌浆特征时间 $t_0$ 时, 浆液在不同裂隙中的扩散距离可以达到该裂隙最终扩散长度的81.3%; 若要达到90%的浆液扩散比, 灌浆时间需要 $2.4t_0$ , 达到95%时, 灌浆时间大幅增加到 $5.58t_0$ 。这意味着, 浆液扩散过程中当灌浆时间超过 $2.4t_0$ 后, 浆液的扩散比增长缓慢, 灌浆效率大幅下降。灌浆时间越长, 扩散距离增加幅度越慢。

(4) 灌浆设计主要包括孔距的确定、灌浆压力的选择和灌浆效果的评价, 利用灌浆时间比 $t_c$ 与浆液扩散比 $r_c$ 的关系, 可以为灌浆参数的选取提供参考:

a) 设计时根据类似经验确定灌浆孔距, 那么可以根据浆液所能灌的最细裂隙(普通硅酸盐水泥所能灌的最细开度为0.2 mm)所需要达到的距离为灌浆孔距, 以此作为浆液扩散距离, 与浆液在此裂隙的最终扩散距离相比, 推导出灌浆施工时间和灌浆压力的关系。

若能根据灌浆效果的要求, 分析多细的裂隙在此孔距上需要完全封堵, 也可以采用同样的方法, 确定灌浆施工时间和灌浆压力的关系。

b) 设计时根据岩体力学性能和类似经验, 确定了灌浆压力, 那么可以计算浆液所能灌的不同开度裂隙的扩散距离和最终扩散距离, 分析不同的灌浆施工时间在不同距离上的灌浆效果, 为设计根据灌浆效果选择孔距提供参考。

c) 设计时根据工程需要, 确定了灌后岩体的灌浆效果, 那么可以计算不同的灌浆时间和灌浆压力作用后, 灌后岩体透水率在空间上的分布规律, 从而选择出合适的灌浆时间、灌浆压力和灌浆孔排距。

## 2 室内实验与模拟计算

### 2.1 室内实验

为验证以上的结论, 设计了不同裂隙开度的室内模拟实验, 实验装置如图3所示。两块厚2 cm的平整钢化玻璃模拟裂隙的两壁, 在两块玻璃之间塞不同直径的铅/钢丝模拟裂隙的不同开度。通过在一侧灌注水泥浆, 模拟浆液在裂隙的扩散过程。

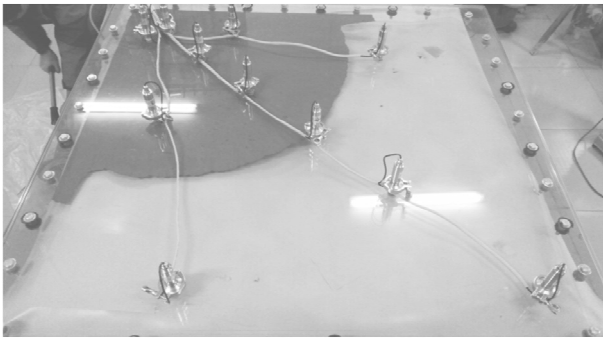


图 3 水泥浆液在钢化玻璃缝隙中的扩散

Fig. 3 Penetration of cement grouting in fissure with toughened glass

以灌浆中常采用的 0.7 : 1 稳定性水泥浆液进行室内实验 (浆液中添加了 3% 的膨润土和 2% 的高效减水剂), 选择 0.5 mm 和 1 mm 的开度进行室内模拟实验, 实验参数如表 2 所示, 灌浆时间比  $t_c$  与浆液扩散比  $r_c$  的实验关系成果如图 4 所示。

表 2 室内实验基本参数表

Table 2 Parameters of laboratory experiments

编号	水灰比	屈服强度 $\tau_0$ /Pa	塑性黏度 $\eta$ /(mPa.s)	压力 $\Delta p$ /kPa	裂隙开度 $2b$ /mm	最终扩散距离 $R$ /m	特征时间 $t_0$ /s
1	0.7 : 1	5.78	21.5	20	0.5	0.74	77.23
2	0.7 : 1	5.78	21.5	20	1	1.47	77.23

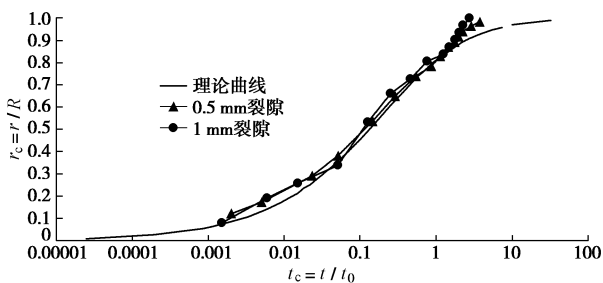


图 4 灌浆时间比和浆液扩散距离比的理论与实验关系曲线

Fig. 4 Theoretical and experimental relation curves between ratios of grouting time and grouting penetration

从图 4 中可以看出, 浆液扩散过程中, 扩散距离比  $r_c$  和灌浆时间比  $t_c$  的关系与理论曲线吻合较好。当灌浆时间  $t$  超过  $2t_0$  时, 浆液的扩散距离已达到最大扩散距离的 90% 以上, 其后增长缓慢。当  $t > 3t_0$  时, 灌浆时间比  $t_c$  与浆液扩散比  $r_c$  关系曲线与理论曲线出现了一定程度的偏离, 其原因可能是采用式 (7) 计算浆液最大扩散距离  $R$  时, 没有考虑水泥浆液流变参数的时效性和水泥颗粒沉淀的影响, 其计算值偏大。当  $t > 5t_0$  时, 注浆量减少, 注入率接近 0, 可以结束灌浆。

2.2 模拟计算

以自主开发的岩体裂隙灌浆模拟程序 GSP, 根据

实际工程中某一灌浆段的施工数据, 进行模拟计算<sup>[4]</sup>。计算区域岩体为花岗岩, 孔段埋深 40.5~45.5 m, 设计要求灌后透水率  $< 1$  Lu, 其基本参数如表 3 所示。进行模拟计算时, 先利用 Monte-Carlo 法产生随机数, 根据裂隙分布规律, 生成分别代表裂隙的中心位置和裂隙长度、开度的裂隙参数。利用岩体声波波速和岩块声波波速计算灌浆段长的裂隙开度之和, 对模拟出的裂隙系统进行开度之和验证。利用灌前压水实验和水的立方定律, 模拟岩体裂隙的压水实验, 计算出灌前压水透水率, 与灌前实际透水率进行比较, 通过调整裂隙开度的中间值进行试算, 使计算压水透水率和灌前实际透水率相一致, 从而获得与现场尽量一致的裂隙网络。以时间为计算步长, 计算浆液在所形成的裂隙网络中按照浆液运动方程扩散的距离, 直至所有裂隙中的浆液满足浆液扩散停止条件。图 5~8 中显示了利用灌浆时间比和浆液扩散比的关系, 根据不同的设计条件, 获取的灌浆参数规律, 包括灌浆压力、灌浆孔排距、灌浆时间和灌后透水率等。

表 3 岩体模拟计算参数表

Table 3 Parameters for simulation and computation

灌浆段长/m	岩体波速 $v$ /(m·s <sup>-1</sup> )	岩块波速 $v_b$ /(m·s <sup>-1</sup> )	灌前透水率 /Lu	裂隙最大开度 /mm	裂隙开度分布函数
5	4816	6500	9.2	3.5	负指数
裂隙平均开度 /mm	浆液配比	浆液屈服强度 /Pa	浆液塑性黏度 /(mPa.s)	裂隙粗糙度系数	
0.8	0.5 : 1	26.5	87.25	0.25	

注: 不考虑浆液流变参数的时效性。

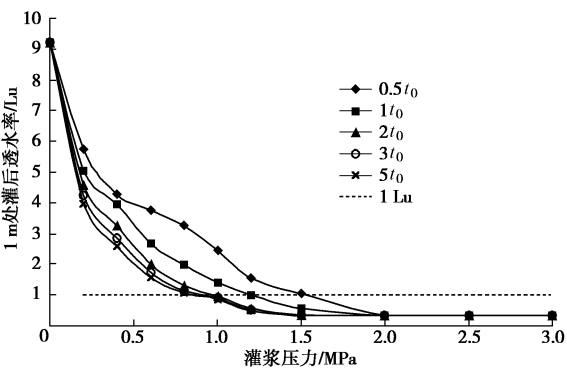


图 5 1 m 处灌后透水率与灌浆压力关系

Fig. 5 Relation between permeability after grouting and grouting pressure at depth of 1 m

图 5 中确定了灌浆孔距为 2 m, 分析计算中间位置 1 m 处的灌后透水率与灌浆压力和灌浆时间的关系, 采用不同的灌浆压力可以用不同的灌浆时间比  $t_c$  满足 1 m 处的灌后透水率  $< 1$  Lu 的要求。当灌浆时间  $t = 0.5t_0$  时, 至少需要 1.5 MPa 的灌浆压力才能满足要

求, 若  $t=1t_0$  时, 需要 1.2 MPa 的灌浆压力, 当  $t=2t_0$ ,  $3t_0$ ,  $5t_0$  时, 灌浆压力分别在 1.0~0.8 MPa 之间, 递减速度降低, 因此为提高灌浆压力的灌浆效果, 灌浆时间可选择在  $2t_0$  以上。

图 6 中确定了灌浆压力为 1 MPa, 分析不同的灌浆时间下不同距离处透水率与灌浆时间比的关系。当灌浆时间  $t=0.5t_0$  时, 距离 0.7 m 处的灌后透水率为 1 Lu。当  $t=1t_0$ ,  $2t_0$ ,  $3t_0$ ,  $5t_0$  时, 灌后透水率为 1 Lu 的扩散距离分别为 0.81, 0.93, 1.04 m 和 1.12 m, 即使灌浆时间延长到  $5t_0$ , 浆液的有效扩散距离才延长 0.08 m。从满足灌浆效果要求和灌浆效率分析, 灌浆时间比在  $3t_0$  以上比较合适。

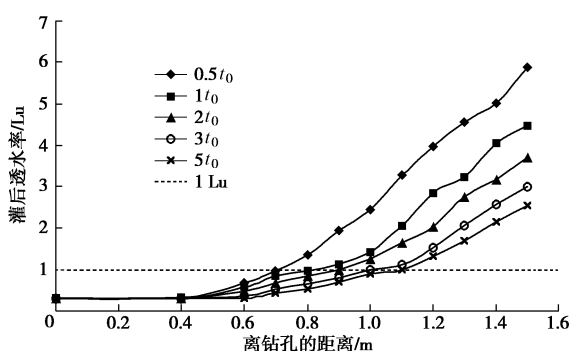


图 6 1 MPa 作用下不同距离处透水率与灌浆时间比关系

Fig. 6 Relation between permeability after grouting and ratio of grouting time at different sites under grouting pressure of 1 MPa

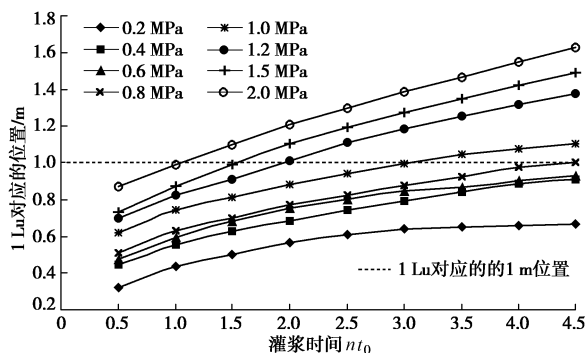


图 7 不同压力作用下 1 Lu 位置与灌浆时间比关系

Fig. 7 Relation between site of 1 Lu and ratio of grouting time under different grouting pressures

图 7, 8 确定了在扩散距离 1 m 位置处灌后透水率要 < 1 Lu, 计算分析不同的灌浆时间和灌浆压力作用下灌后岩体透水率在空间上的分布规律, 从中可以根据现场施工情况和设计要求, 选择合适的灌浆压力和灌浆时间比以获得满意的灌浆效果。显然, 采用 1.0 MPa 的灌浆压力和  $3t_0$  的灌浆时间, 或者采用 1.2 MPa 的灌浆压力和  $2.5t_0$  的灌浆时间, 均可以比较好地满足 1 m 位置处灌后透水率 < 1 Lu 的设计要求。

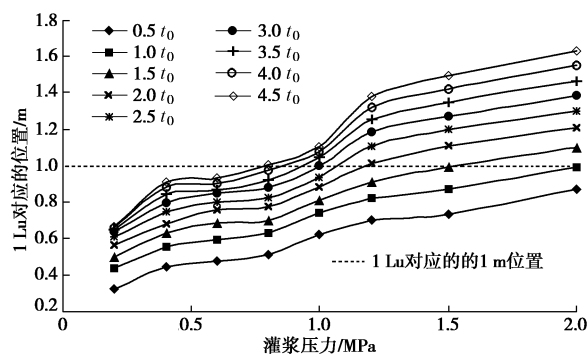


图 8 不同灌浆时间下 1 Lu 位置与灌浆压力的关系

Fig. 8 Relation between site of 1 Lu and grouting pressure with different grouting time

### 3 结 论

根据水泥浆液在光滑顺直裂隙中的扩散运动方程, 推导出浆液扩散比  $r_c = \frac{r}{R}$  和灌浆时间比  $t_c = \frac{t}{t_0}$  的

关系, 其中最大扩散距离  $R = \frac{b}{\tau_0} \cdot \Delta p$ , 灌浆特征时间

$t_0 = \frac{6\eta \cdot \Delta p}{\tau_0^2}$ , 得出以下结论:

(1) 灌浆特征时间  $t_0$  只与浆液的性质和灌浆压力有关, 可以在灌前由设计确定, 而与裂隙的性质无关, 如裂隙开度。浆液在裂隙中的扩散距离比  $r_c$  可直接表征为灌浆时间  $t_c$  的单变量函数, 在相同的灌浆时间  $t$  内, 其浆液的扩散距离比  $r_c$  是一样的。

(2) 当灌浆时间  $t$  大于  $3t_0$  之后, 浆液的扩散距离比增长缓慢, 灌浆效率降低, 因此灌浆时间宜在  $3t_0$  左右, 可将其作为灌浆结束标准的参考指标, 代替以注入率为指标的结束标准, 可以在防渗要求不高或者要求施工快速高效的灌浆工程中运用, 如低压引水隧洞的回填、固结灌浆、开挖过程中围岩的临时封堵等。

(3) 利用灌浆时间比与浆液扩散距离比的关系, 可以分析计算灌浆压力、孔距和灌后透水率的空间分布, 为灌浆设计提供有益参考。

(4) 以上推导过程没有考虑浆液流变参数的时效性和水泥颗粒的沉淀, 以及裂隙在灌浆过程中的开度变化, 与实际灌浆过程存在一定差异。

### 参考文献:

- [1] 杨晓东, 张金接. 灌浆技术及其发展[C]// 第四届中国岩石锚固与注浆学术会议论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 3 - 8. (YANG Xiao-dong, ZHANG Jin-jie. The grouting technology and its development[C]// The Fourth Rock Anchoring and Grouting Conference of China. Beijing:

- China Water Power Press, 2007: 3 - 8. (in Chinese))
- [2] DL/T5148—2012 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012. (DL/T5148—2012 Technology specification for cement grouting construction of hydraulic structures[S]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2012. (in Chinese))
- [3] GASTAFSON G, HERNQVIST L, et al. The use of proxy parameters in pre-investigation, design and construction of tunnels with application to grouting[C]// Proceedings of the Rock Mechanics in the Nordic Countries 2010. Kongsberg, 2010.
- [4] STILLE H, GASTAFSON G, et al. Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock[J]. Geotech Geol Eng, 2012, **30**: 603 - 624.
- [5] GASTAFSON G, STILLE H. Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, **11**(3): 325 - 332.
- [6] RENSHAW C E. On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fracture[J]. J Geophys Res, 1995, **100**(B12): 24629 - 24636.
- [7] 符 平, 杨晓东. 裂隙岩体水泥灌浆效果评价及数值模拟研究[C]// 第十一次全国水利水电地基与基础工程技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 9 - 17. (FU Ping, YANG Xiao-dong. Evaluation and numerical simulation study on cement grouting of fractured rock mass[C]// Eleventh China Symposium of Foundation and Foundation Engineering and Technology National Water Resources and Hydropower Sets. Beijing: China Water Power Press, 2011: 9 - 17. (in Chinese))
- [8] ERIKSSON M, STILLE H, et al. Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, **15**(4): 353 - 364.
- [9] 罗平平, 朱岳明. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 918 - 921. (LUO Ping-ping, ZHU Yue-ming. Numerical simulation of grouting in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 918 - 921. (in Chinese))
- [10] HASSLER L. Simulation of grouting in jointed rock[C]// Proc 6th Int Conf on Rock Mech. VZ, 1987.
- [11] LOMBARDI G. The role of cohesion in cement grouting of rock[C]// 15th ICOLD Congress. Lausanne, III: 235 - 261.
- [12] 杨晓东, 刘嘉材. 水泥浆体灌入能力研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1985. (YANG Xiao-dong, LIU Jia-cai. Study on cement grouting ability[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1985. (in Chinese))