

DOI: 10.11779/CJGE201508022

# 非水反应型材料灌浆堵漏模型研究

符平, 赵卫全, 张金接

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 灌浆是解决工程渗漏问题的重要手段, 堵漏材料是灌浆技术的核心。水泥浆液、水泥膏浆、速凝膏浆、改性沥青、低热沥青等非水反应型浆液是最常用的堵漏材料。根据浆液流变性质、在宽大孔(裂)隙中的扩散方式和封堵机理以及灌浆工艺参数建立了非水反应型灌浆材料的堵漏模型, 对不同浆液在不同开度、不同流速地层的堵漏效率和堵漏效果进行了计算分析, 可以为非水反应型浆液在堵漏工程中的选择使用提供依据。

**关键词:** 灌浆堵漏; 非水反应型材料; 动水堵漏模型; 地层; 堵漏效果

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2015)08-1509-08

**作者简介:** 符平(1975-), 男, 土家族, 湖南永顺人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地基处理及灌浆技术研究。E-mail: fuping@iwhr.com。

## Sealing model of grouting sealing using non-water reaction slurries

FU Ping, ZHAO Wei-quan, ZHANG Jin-jie

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

**Abstract:** Grouting is the important technical means to solve the leakage problem, and the grouting material is the core of sealing technology. The slurries which do not react with water are generally used, such as cement slurry, cement paste slurry, quick-setting paste slurry, hot asphalt and low-thermal asphalt. A flow-water sealing model with a single channel macro-pore for the grouting material which does not react with water is established, based on the rheological properties of grouting slurry, diffusion in the macro-pore, sealing mechanism and grouting parameters. And then the sealing effect and efficiency of different slurries for the stratum with different flow velocities and gap-openings are simulated and calculated. The results can be used in the choice of the grouting slurries which do not react with water for the sealing engineering.

**Key words:** grouting sealing; non-water reaction slurry; flow-water sealing model; stratum; sealing effect

## 0 引言

在建设堤坝、隧道(洞)、地下厂房、矿山井巷、地铁等工程时, 经常会遇到不同类型的渗漏水。渗漏对已建水库(大坝)不仅会带来经济损失, 而且可能会威胁到大坝的安全, 如西班牙蒙特热克坝和卡马拉扎坝、前南斯拉夫格兰查雷沃坝、美国哈拉斯巴坝和大瀑布坝、中国山东岸堤水库、湖南方元水库和广西拔贡水电站等水库大坝因大量漏水长期蓄不起水, 或在低水位下勉强蓄水运行; 对于堆(土)石围堰渗漏水会导致基坑不能闭气, 影响后续工作的施工, 如重庆彭水水电站上下游围堰、广西桥巩水电站二期围堰、重庆鱼洞长江大桥主桥墩围堰等曾因为围堰不能闭气而导致工期拖延; 对于隧道(洞)工程, 由于突涌水而迫使施工中断, 拖延工期, 甚至有些工程不得不改变施工线路, 如前苏联贝阿铁路北穆隧道, 涌水量高达  $6.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 锦屏二级水电站辅助洞施工涌水流量达  $4.32 \times 10 \sim 5.184 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ , 最高压力达 9 MPa;

渝怀线彭水隧道平导正洞最大涌水量达  $4.18 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。对于大多数工程而言, 漏水问题主要是由宽大孔(裂)隙形成的集中渗漏通道造成的, 如第四纪地层松散砂卵石层中的“块石架空”层、基岩地层中存在的断层破碎带和节理裂隙密集带、石灰岩地区发育的岩溶裂隙和岩溶通道、因爆破等造成的大裂隙及防渗结构遭到破坏的堆(土)石堰体等<sup>[1]</sup>。灌浆是解决这些宽大孔(裂)隙工程渗漏问题的首选和重要的技术手段。

灌浆材料是堵漏技术的核心, 要求其具有良好的抗水流稀释性能和抗水流冲击性能, 浆液的凝结时间在几分钟至数小时范围内可控、可调, 浆液在凝固之后具有一定的抗冲强度和黏结强度等<sup>[2]</sup>。目前常用的

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAB03B04); 国家自然科学基金项目(51279217); 中国水科院专项(监 1424)  
收稿日期: 2014-10-22

灌浆堵漏材料有水泥浆液、水泥-水玻璃双液浆液、普通膏浆<sup>[3]</sup>、速凝膏浆<sup>[4]</sup>、热沥青<sup>[5-6]</sup>、低热沥青<sup>[7-8]</sup>等非水反应型浆液和聚氨酯等与水反应浆液,其中非水反应型浆液因材料易得、价格便宜,在灌浆堵漏工程中得到了广泛应用,但灌浆堵漏作为实践性较强的施工技术,目前的研究主要是针对水泥浆液,将水泥浆液作为牛顿流体<sup>[9-10]</sup>和宾汉姆流体<sup>[11-12]</sup>推导其在单一裂隙中的扩散方程,多没有考虑地下水的的作用,郑玉辉<sup>[13]</sup>、湛铠瑜等<sup>[14]</sup>研究了考虑浆液黏度时变性和水流流速的动水注浆模型,在这些模型中将水流流速冲击力作为扩散的驱动力叠加在灌浆压力上,仅仅影响浆液的扩散速度和扩散范围,而默认浆液是能够抵抗得了水流的冲击,这与实际的灌浆堵漏中首先要解决灌入的浆液能否站得住的问题相差甚远,只适用于小流速小通道的地层灌浆;针对其他非水反应型材料的堵漏机理研究基本上处于空白,也没有对非水反应型材料应用范围进行研究的报道。在实际运用时,多根据工程师的经验和工程类比进行选择,有时甚至进行枚举试验,耽误了工期和增加了成本。本文拟根据非水反应型浆液本身的流变性质、在宽大孔(裂)隙中的扩散方式和封堵机理以及灌浆施工工艺参数建立非水反应型灌浆材料的堵漏模型,对不同浆液在不同开度、不同流速的宽大地层堵漏效率和堵漏效果进行分析,为非水反应型浆液在堵漏工程中的选择使用提供依据。

## 1 单通道灌浆堵漏模型

对于宽大孔(裂)隙的灌浆堵漏,浆液在压力作用下通过钻孔进入到动水地层中,首先在无上壁限制的情况下抵抗水流的冲刷作用,然后沉淀、堆积下来,并逐步向周围扩散,此时浆液处于自由扩散阶段。当浆液堆积、扩散到空隙通道上壁时,将受到空隙上壁的限制,浆液将在灌浆压力作用下在空隙中扩散,形成明显的扩散前沿,逐步达到堵漏所需的扩散半径,为孔隙扩散阶段,如图1所示。本文基于这一扩散方式建立适合不同地层的灌浆堵漏模型。

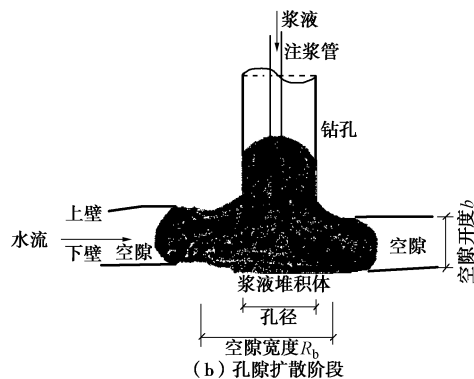
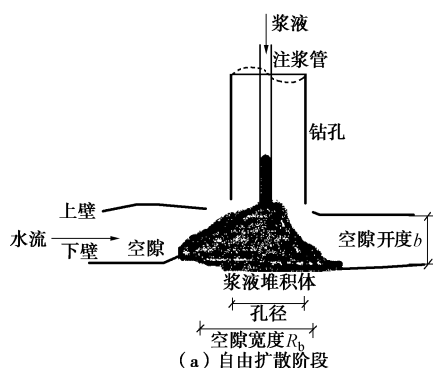


图1 浆液在宽大孔(裂)隙的扩散方式

Fig. 1 Diffusion mode of slurries in macro pore (crack)

### 1.1 基本假设

(1) 浆液在堵漏过程中作为整体抵抗水流的冲击,不考虑水流对浆液的稀释作用。

(2) 在自由扩散阶段,新灌入的浆液从堆积体上部不断加入,使堆积体半径不断增长,即新灌入的浆液在堆积体的外部;在孔隙扩散阶段,灌入的浆液从堆积体的中底部加入,推动浆液外部的堆积体在空隙中不断向外扩散,即新灌入的浆液在堆积体的中心位置。

(3) 堵漏过程不考虑灌浆压力的作用,即认为对于宽大孔(裂)隙堵漏来说灌浆压力足够大,能保证新灌入浆液到达其所占据的空间位置。灌浆压力的影响主要通过灌浆泵的排量来体现。

### 1.2 堵漏模型

灌浆堵漏的基本原理是保证灌入的材料量大于其被水流冲走的量。本文选取灌入浆液形成的堆积体为研究对象,计算其在水流冲击作用下的稳定性和冲刷流失情况,并进而分析浆液在整个空隙内的堆积、充填、封堵的全过程。

#### (1) 自由扩散阶段

灌入的堵漏浆液在灌浆泵的作用下,通过灌浆孔进入无限制空隙中进行扩散形成堆积体。在地下水水流的冲击下,首先应判断浆液堆积体的整体稳定性。

取整个堆积体作为研究对象,水流的拖曳力是促使浆液堆积体滑动的滑动力,即<sup>[15]</sup>

$$F_h = F_l = \frac{1}{2} C_d \cdot A \cdot \rho_0 \cdot v^2 \quad (1)$$

式中,  $F_l$  为水流拖曳力 (N),  $C_d$  为水流拖曳力系数,  $\rho_0$  为水的密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  为堆积体的迎水面面积 ( $\text{m}^2$ ),  $v$  为水流的流速 ( $\text{m/s}$ )。

不考虑水流的稀释作用,在水流冲击作用下堆积体将产生滑动,其中一个潜在滑动面为:堆积体与下卧的空隙下壁之间,另外一个就是堆积体内部之间产生相对滑动,因此堆积体抵抗滑动力为堆积体与空隙下壁的摩擦力和浆液内部的内聚力之间的小值,

$$F_k = \min(F_m, F_{n1}) \quad , \quad (2)$$

式中, 堆积体与空隙下壁摩擦力为

$$F_m = \gamma' \cdot Q \cdot f \quad , \quad (3)$$

其中,  $F_m$  为堆积体与下壁之间的摩擦力 (N),  $\gamma'$  为浆液的浮重度 ( $\text{N}/\text{m}^3$ ),  $Q$  为浆液堆积体的体积 ( $\text{m}^3$ ),  $f$  为浆液与下壁之间的摩擦系数。

浆液的黏聚力  $F_{n1}$  按下式计算:

$$F_{n1} = \tau \cdot A_1 \quad , \quad (4)$$

式中,  $F_{n1}$  为浆液的底部内聚力 (N),  $\tau$  为浆液的剪切屈服强度 (Pa),  $A_1$  为浆液的滑动面面积, 整体稳定性分析时, 为堆积体的底面积 ( $\text{m}^2$ )。

若堆积体的滑动力大于抗滑力, 堆积体将在水流冲击力的作用下, 产生整体滑动。此时分析在给定时间  $\Delta t$  中, 堆积体滑动的距离若大于堆积体的底半径, 即新灌入的浆液无法填充被冲走的体积, 则认为浆液无法形成有效的堆积体, 即认为浆液全部被水流冲走。若堆积体滑动的距离小于堆积体的底半径, 超过堆积体底半径的浆液部分也认为被水流冲走, 此时剩下的浆液将与新灌入的浆液 (由泵的排量和压力确定) 一起在下时刻  $t + \Delta t$  形成新的堆积体。对新的堆积体再进行整体稳定性分析, 直至浆液堆积体的滑动力小于抗滑力。若始终不能满足滑动力小于抗滑力的条件, 则认为浆液不能形成稳定的堆积体, 堵漏失败。

若堆积体的滑动力小于抗滑力, 则堆积体整体稳定, 堆积体将在水流冲击力的作用下, 其外缘将产生水力淘刷, 如图2所示。

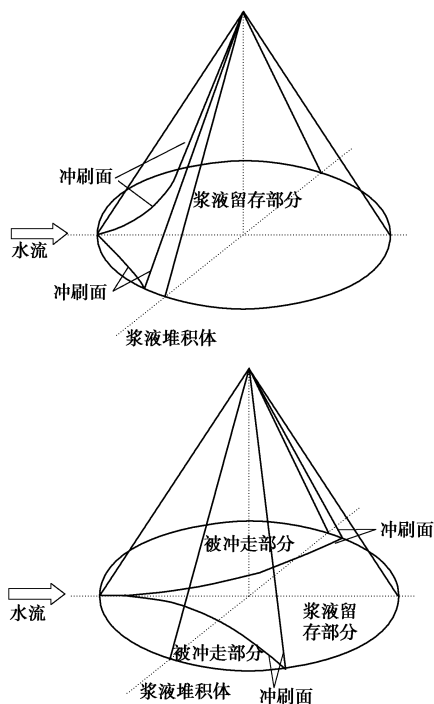


图2 自由扩散阶段浆液堆积体的水流冲刷示意图

Fig. 2 Flow scouring of slurry accumulation body at free diffusion stage

取浆液留存部分为研究对象分析其稳定性。滑动力为水流拖曳力, 可按式 (1) 计算, 不同的是浆液留存部分的迎水面。抗滑力包括两部分: 堆积体与空隙下壁的摩擦力和浆液自身的内聚力之间的小值, 再加上堆积体冲刷面上的黏聚力, 按下式进行计算:

$$F_k = \min(F_m, F_{n1}) + F_{n2} \quad , \quad (5)$$

式中, 摩擦力  $F_m$  按式 (3) 计算, 体积为浆液留存部分体积。  $F_{n1}$ ,  $F_{n2}$  按式 (4) 计算,  $F_{n1}$  采用浆液留存部分与下壁接触的底面积,  $F_{n2}$  采用浆液留存部分与堆积体冲刷面的侧面积。

假设堆积体的冲刷滑裂面为通过堆积体上部中轴点的圆弧, 即堆积体底部的不同滑出点和滑出圆弧的圆心, 形成一个冲刷体, 分别计算其抗滑力和滑动力, 并比较其大小, 借用岩石边坡稳定计算滑裂面的方法, 通过搜索圆心进行试算<sup>[16]</sup>, 直至找到滑动力等于抗滑力的滑裂体, 即为浆液留存部分。

计算浆液留存部分的体积, 此部分浆液与新灌入的浆液一起在下一时刻  $t + \Delta t$  形成新的堆积体, 再进行类似的计算, 直至浆液堆积体的半径扩散到全部进入空隙, 进入受限扩散阶段。

## (2) 孔隙扩散阶段

浆液进入孔隙扩散阶段后, 水流将对浆液堆积体进行淘刷, 如图3所示。同样的, 取浆液留存部分为研究对象, 采用如上所述的对冲刷滑裂面的试算方法, 找出滑动力等于抗滑力时的滑裂体, 计算出浆液留存部分的体积, 计算时需要考虑空隙上壁的摩擦力和内聚力的影响。

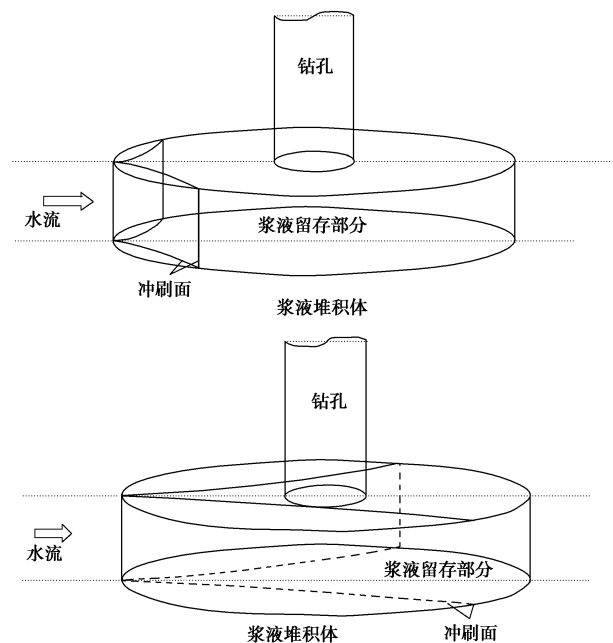


图3 孔隙扩散阶段浆液堆积体的水流冲刷示意图

Fig. 3 Flow scouring of slurry accumulation body at stage of diffusion in crack

浆液留存部分的浆液与新灌入的浆液一起在下一时刻  $t+\Delta t$  形成新的堆积体,堆积体按照其体积均匀地分布在钻孔周围,因此可计算出浆液的扩散距离。

再进行类似的计算,直至浆液堆积体的半径扩散到设定的要求值(如通常采用的扩散半径 1.0 m)。至此,这个单孔的扩散堵漏的过程就完成。

本文根据以上的堵漏过程和堵漏模型,编制了计算程序对堵漏过程进行模拟。

2 主要影响因素

2.1 堆积体尺寸

对于块石架空地层或者有明显空隙的岩体进行堵漏时,浆液在灌浆压力作用下落到地层的底部,受浆液本身的内聚力影响,浆液逐步堆积,堆积体的形状假设为圆锥体,不考虑水流等其他外部因素,该圆锥体的尺寸只与浆液本身特性(浆液的剪切屈服强度)有关。为获得浆液的剪切屈服强度与圆锥体尺寸的关系,假设一个上下口一样的开口圆柱体,将浆液倒入该圆柱体中并充满。在某一时刻,突然将圆柱体上拔起,浆液将在自身重力和浆液内聚力作用下向下塌落,假设塌落的浆液对圆柱体中剩余的浆液没有影响,则将形成一圆锥体,即为需要获取的堆积体的形状,如图 4 所示。

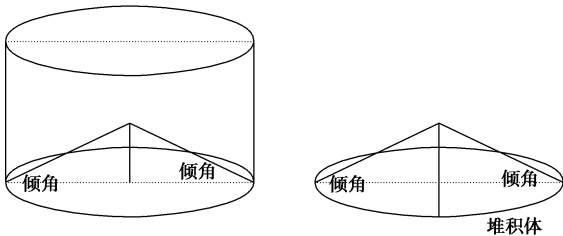


图 4 堆积体圆锥试验示意图

Fig. 4 Cone tests on slurry accumulation body

选取不同浆液的剪切屈服强度值,圆柱体高度  $h$  和圆底半径  $r$  的比值分别为 1, 2 和 3,计算不同浆液的屈服强度  $\tau$  所对应的圆锥体倾角,计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,不同圆柱体的长高比所计算出的倾角基本一致,最大误差不超过  $0.5^\circ$ ,因此圆柱体的长高比对倾角的计算影响不大。

2.2 浆液的剪切屈服强度时变性

(1) 流变模型

悬浊液的流变性与其固相和液相间一系列复杂的物理、化学作用过程有关,固体颗粒间的吸引力常使悬浊液表现出具有一定的屈服应力(黏聚力)。悬浊

液在发生流动时,只有当剪切应力超过其屈服应力时,悬浊液才能产生流动。在堵漏中常采用的非水反应型浆液均为典型的宾汉姆流体,其显著的流变特征是具有结构强度和时间依赖性。假定在灌浆堵漏的这段时间内,浆液流变模型保持不变,其时变性表现为流变参数随时间而变化可以用线性方程来近似描述灌浆浆液的流变模型<sup>[18]</sup>:

$$\tau = \tau_0(t) + \eta(t)\dot{\gamma} \quad , \quad (6)$$

式中,  $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$  为浆液的剪切应力和应变速率,  $\tau_0(t)$ ,  $\eta(t)$  分别为随时间变化的浆液屈服强度(动切力)和塑性黏度。

表 1 水下浆液屈服强度值  $\tau$  对应的堆积体的倾角<sup>[17]</sup>

Table 1 Dip angles of slurry accumulation body corresponding to yield strength values  $\tau$  of slurry under water

屈服强度 $\tau$ /Pa	堆积体的倾角 $\theta /(^{\circ})$				典型代表浆液
	$h/r=1$	$h/r=2$	$h/r=3$	最大误差	
2	2.19	1.93	2.19	0.26	1:1 浆液
5	3.72	3.97	3.72	0.25	0.8:1 浆液
10	6.14	5.78	6.14	0.36	0.6:1 浆液
20	9.65	9.98	9.65	0.33	2001 规范膏浆
22	10.05	10.32	10.18	0.27	0.5:1 浆液
30	12.75	12.30	12.75	0.45	—
50	17.76	17.27	17.76	0.49	2012 规范膏浆
75	23.00	23.39	23.00	0.39	—
100	29.15	28.66	29.15	0.49	
125	34.44	34.63	34.27	0.36	某普通膏浆
150	39.88	40.22	39.88	0.34	
175	—	46.66	46.36	0.3	120℃ 改性热沥青
200	—	55.41	55.69	0.28	某速凝膏浆
225	—	—	71.36	—	80℃ 低热沥青

(2) 流变参数的时变性

要确定某种浆液的流变方程,必须确定其流变参数  $\tau_0(t)$ ,  $\eta(t)$  随时间  $t$  的变化规律。流变参数与时间、浆液的水化反应速度以及持续的剪切作用对水化过程的影响程度等因素有关。Shalom 等<sup>[19]</sup>、阮文军<sup>[20]</sup>曾直接测得多种水灰比和外加剂的普硅和细水泥浆的流变参数随时间的变化曲线,非水反应型浆液可借用类似的规律。测试结果表明:动切力和塑性黏度大致与时间呈幂函数关系

$$\tau = \tau_0 e^{\alpha t} \quad , \quad (7)$$

$$\eta = \eta_0 e^{\beta t} \quad , \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为剪切屈服强度 (Pa),  $\tau_0$  为初始剪切屈服强度 (Pa),  $\eta$  为塑性黏度 (Pa·s),  $\eta_0$  为初始塑性黏度 (Pa·s),  $\alpha$ ,  $\beta$  为时间系数,  $t$  为时间 (s)。

2.3 下垫面影响

地层底部可能为平整岩石、起伏岩石、卵石、砂石等, 其与浆液之间的摩擦系数不同, 因此需要考虑不同浆液与不同下垫面的摩擦系数对浆液堆积体抵抗水流冲击力的影响, 摩擦系数应根据室内试验确定。

3 敏感性分析

3.1 基本参数

灌浆浆液在堵漏过程中, 从抵抗水流的冲刷开始到逐步扩散到达设计所要求的半径, 影响的因素很多, 在本文所建立的堵漏模型中, 主要包括以下参数: ①堵漏空隙的尺寸参数包括空隙宽度  $R_b$ , 空隙开度  $b$ ; ②浆液性能参数包括主要是浆液初始剪切屈服强度  $\tau_0$  及其随时间变化规律; ③其他参数包括水流流速  $v$ , 浆液与下垫层的摩擦系数  $f$ 。

对堵漏效果的评价可主要根据 3 个指标进行分析: 达到设计扩散半径的时间、总注入量和最后浆液的留存率。

3.2 敏感性分析

以自研发的水泥膏浆为例, 对灌浆堵漏过程进行分析。其基本参数为: 空隙宽度  $R_b=0.5\text{ m}$ , 空隙开度  $b=5\text{ cm}$ , 浆液初始剪切屈服强度  $\tau_0=125\text{ Pa}$ , 时间系数  $a=0.002$ , 水流流速  $v=0.5\text{ m/s}$ ,  $f=0.2$ 。敏感性分析结果如图 5 所示。

当空隙宽度较小时, 其对堵漏效果的影响比较小。在空隙宽度小于  $0.7\text{ m}$  时, 当空隙宽度变化  $100\%$  时, 堵漏时间变化为  $45.44\%$ , 注入量变化为  $45.42\%$ 。

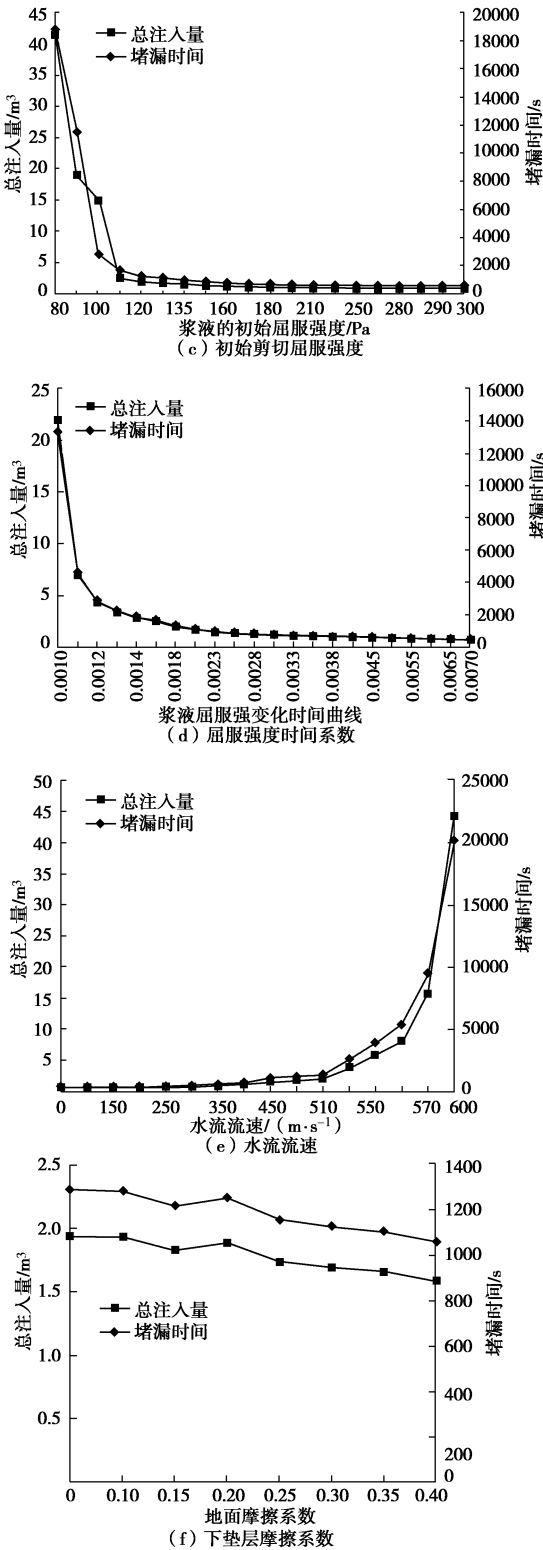
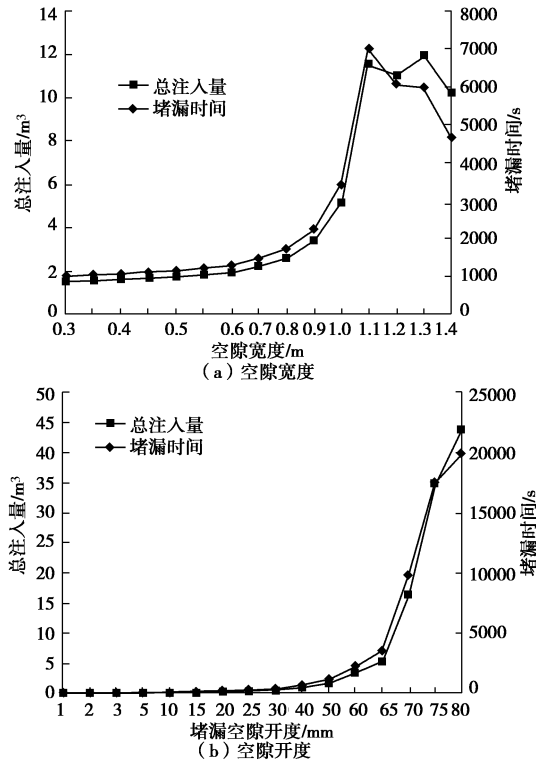


图 5 灌浆堵漏各影响因素对堵漏效果和效率的影响

Fig. 5 Influences of all factors on sealing effect and efficiency

空隙开度较小时, 堵漏灌浆比较容易, 随着开度的不断增加, 堵漏时间和总注入量将快速上升。在空隙开度小于  $65\text{ mm}$  时, 当空隙开度变化  $100\%$  时, 堵漏时间变化为  $206.39\%$ , 注入量变化为  $205.83\%$ 。空隙开度大于  $65\text{ mm}$  时, 其变化加快, 灌浆难度进一步加大, 当开度为  $80\text{ mm}$  时, 灌浆时间达到  $5.5\text{ h}$ , 注

浆量为 43.86 m<sup>3</sup>，留存率仅为 2.28%，堵漏效率极为低下，在开度大于 100 mm 时，甚至出现堵不住的情况，说明水泥膏浆在流速 0.5 m/s 的堵漏工程中，其有效堵漏开度要小于 80 mm。

当浆液初始剪切屈服强度大于 110 Pa 时，当剪切屈服强度变化 100%时，堵漏时间变化为 126.97%，注入量变化为 130.35%。在浆液初始剪切屈服强度小于 110 Pa 时，灌浆堵漏的效率低下，在浆液初始剪切屈服强度为 80 Pa 时灌浆时间达到 5.2 h，注浆量为 41.38 m<sup>3</sup>，留存率仅为 1.51%，堵漏效率极为低下。

当浆液初始剪切屈服强度时间系数变化 100%，堵漏时间变化为 130.99%，注入量变化为 132.46%。但当时间系数小于 0.002 时，堵漏所需的时间大为增加。

当水流速度小于 0.5 m/s 时，普通水泥膏浆的堵漏效率很高，当水流速度变化 100%时，堵漏时间变化为 107.67%，注入量变化为 107.59%。但水流速度大于 0.5 m/s 时，其对灌浆堵漏的影响很大，当水流速度变化 100%时，堵漏时间变化为 2898.7%，注入量变化为 3372.8%。在水流速度大于 0.6 m/s 后，水泥膏浆的堵漏效果极其有限，出现堵不住的情况。

浆液与下垫面的摩擦系数对堵漏效果、堵漏时间等影响不大，当下垫面的摩擦系数变化 100%时，堵漏时间变化为 73.83%，注入量变化为 73.8%。

通过敏感性分析，在实际堵漏工程中，堵漏效果与空隙的开度、水流速度和浆液的剪切屈服强度及其增长速度关系很大，其中在低水流地层中，空隙开度影响因子最大，其次为浆液的力学性能指标，而在高水流地层中，水流速度的影响因子最大，其次为空隙开度。在低水流、小开度地层中，常用普通水泥膏浆就能取得良好的堵漏效果，而在高水流、大开度地层中，普通水泥膏浆取得的效果和堵漏效率都比较差，应选用初始剪切屈服强度高及其增长速度快的浆液，如速凝膏浆、热沥青等。

4 典型堵漏材料堵漏计算分析

(1) 材料参数

灌浆材料是灌浆堵漏技术的核心。水泥-水玻璃等双液灌浆由于混合比例难以控制且其凝结时间受现场环境的影响较大，在堵漏施工中通常作为特殊手段使用。水泥砂浆、低级配混凝土在堵漏过程中易发生离析，水泥在动水地层中易于被冲走，使其使用范围受到限制。在此选取了在灌浆堵漏工程中最常用的几种非水反应型浆液，根据该堵漏模型进行了计算。浆液的性质指标如表 2 所示。

表 2 典型堵漏材料性能指标表				
Table 2 Performance indices of typical sealing materials				
序号	堵漏材料名称	初始屈服强度/Pa	时间系数	备注
1	0.5 : 1 水泥浆	20	0.001	—
2	普通膏浆	50	0.002	2012 规范规定
3	水泥膏浆	125	0.002	水科院开发
4	改性热沥青	175	0.02	120℃施工温度
5	速凝膏浆	200	0.01	水科院开发
6	低热沥青	225	0.02	80℃施工温度

(2) 计算结果

根据典型堵漏灌浆材料的物理力学性能指标，对其在不同地层（主要是开度）和不同流速下的地层堵漏效果（以浆液留存率为考核指标）进行了模拟计算。假设浆液留存率>30%认为堵漏有效果，浆液留存率>60%为堵漏效果高效可靠。

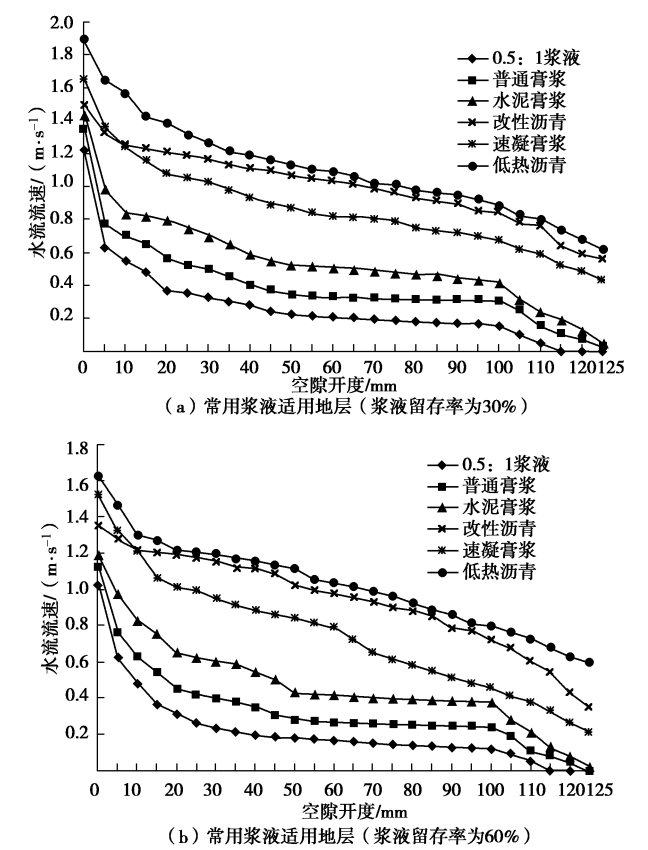


图 6 不同浆液在不同地层中的堵漏效果

Fig. 6 Sealing effect of different slurries in different formations

从图 6 中分析得出，不同灌浆材料对于一定开度、一定流速的地层堵漏，都有其一定的适应范围，应根据地层的实际情况，选用合适的材料进行灌浆施工，方可取得良好的效果。如在中等开度的渗透地层中(50 mm)，0.5 : 1 水泥浆液较适合水流速度小于 0.2 m/s 的堵漏灌浆，规范推荐的普通水泥膏浆较适合水流速

度 0.3 m/s 左右的堵漏灌浆, 水科院开发的普通水泥膏浆较适合水流速度 0.45 m/s 左右的堵漏灌浆, 水科院开发的速凝膏浆比较适合水流速度 0.85 m/s 左右的堵漏灌浆, 改性热沥青和热沥青适合水流速度大于 1.0 m/s 的堵漏灌浆。

## 5 结 论

本文根据非水反应型灌浆堵漏材料的流变性质、浆液的扩散方式、堵漏机理和工艺参数, 基于力的平衡方程, 建立了单通道大空隙地层的动水堵漏灌浆模型, 并进行了相应的数值模拟计算, 对影响灌浆堵漏效果的影响因素进行了敏感性分析, 对常用的灌浆堵漏材料的适用范围进行了计算分析。

(1) 根据力平衡的基本原理, 在假设浆液堆积体整体抗冲的假设基础上, 充分考虑了浆液堆积体的整体稳定性、冲刷稳定性, 以及浆液的力学性能指标随时间变化的规律, 提出了灌浆堵漏的模型, 并据此编制了相应的计算程序, 可对不同地层、不同流速和不同浆液的堵漏效率和堵漏效果进行模拟计算。

(2) 假设浆液堆积体为圆锥体, 设计了一种获取圆锥体倾角的试验模型, 并编制了相应的计算程序。根据模拟计算结果和以往的工程经验, 认为  $15^\circ \sim 20^\circ$  倾角时浆液具有良好的自堆积性能, 即膏浆的初始剪切屈服强度应大于 50 Pa。

(3) 对影响灌浆堵漏的各影响因素进行了敏感性分析, 结果表明, 在低水流流速地层 ( $<0.5$  m/s), 空隙开度影响因子最大, 其次为浆液的物理性能指标, 而在高水流地层中 ( $>0.5$  m/s), 水流速度的影响因子最大, 其次为空隙开度。

(4) 对目前堵漏灌浆施工中经常采用的浆液进行了堵漏模拟计算, 在中等开度的渗漏地层中 (50 mm), 0.5 : 1 水泥浆液较适合水流速度小于 0.2 m/s 的堵漏灌浆, 规范推荐的普通水泥膏浆较适合水流速度 0.3 m/s 左右的堵漏灌浆, 水科院开发的普通水泥膏浆较适合水流速度 0.45 m/s 左右的堵漏灌浆, 水科院开发的速凝膏浆比较适合水流速度 0.85 m/s 左右的堵漏灌浆, 改性热沥青和低热沥青适合水流速度大于 1.0 m/s 的堵漏灌浆。

## 参考文献:

[1] 赵卫全. 大孔(裂)隙地层动水堵漏灌浆技术研究与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学院, 2012. (ZHAO Wei-quan. Research and application of grouting technology for water blocking of macro pore (Crack) formation[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012.

(in Chinese))

- [2] 赵卫全, 郑亚平, 杨晓东, 等. 堵漏灌浆材料 AC-MS 的研究与应用[J]. 防渗技术, 2002, 8(4): 11 - 15. (ZHAO Wei-quan, ZHENG Ya-ping, YANG Xiao-dong, et al. Research and application of grouting Material AC-MS[J]. Technique of Seepage Control, 2002, 8(4): 11 - 15. (in Chinese))
- [3] 符平, 赵卫全, 张全接, 等. 水泥基速凝灌浆材料研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(4): 85 - 87. (FU Ping, ZHAO Wei-quan, ZHANG Quan-jie, et al. The research of the rapid-setting material for grouting based on the cement[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(4): 85 - 87. (in Chinese))
- [4] 符平, 张金接, 赵卫全, 等. 速凝膏浆技术研究与应用[J]. 水利水电技术, 2005, 36(1): 63 - 66. (FU Ping, ZHANG Jin-jie, ZHAO Wei-quan, et al. Practice and study of technique for quick coagulating paste-slurry[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(1): 63 - 66. (in Chinese))
- [5] 倪至宽, 翁祯祥, 纪家宏. 防止新永春隧道涌水的热沥青灌浆工法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 5200 - 5206. (NI Chin-kuan, WEN Zhen-xiang, JI Jia-hong. Hot bitumen grouting to reduce inflow in new yungchaug tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 5200 - 5206. (in Chinese))
- [6] DEANS G, Lukajic Use of asphalt in treatment of dam foundation leakage: Stewartville Dam[M]. Denver: ASCE Spring Convention, 1985.
- [7] 赵卫全, 张全接, 符平, 等. 改性沥青灌浆堵漏试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2011(9): 43 - 46. (ZHAO Wei-quan, ZHANG Quan-jie, FU Ping, et al. Test study on hot modified asphalt grouts for water leakage control[J]. Railway Construction Technology, 2011(9): 43 - 46. (in Chinese))
- [8] 符平, 王春, 杨晓东. 低热沥青灌浆堵漏技术研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 63 - 69. (FU Ping, WANG Chun, YANG Xiao-dong. Study on technology of leakage-blocking with low thermal asphalt[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 63 - 69. (in Chinese))
- [9] BAKER C. Comments on paper rock stabilization in rock mechanics[R]. Muler: Springer Verlag NY, 1974.
- [10] 刘嘉材. 裂隙注浆扩散半径的研究[M]//水利水电科学院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1988. (LIU Jia-cai. Study on diffusion radius of fracture grouting[M]//

- The Paper Collection of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Beijing, China Water & Power Press, 1988. (in Chinese))
- [11] ERIKSSON M, STILLE H. 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.
- [12] HASSLER L, HAKANSSON U, STILLE H. Computer simulated flow of grouting in jointed rock[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 1992, **7**(4).
- [13] 郑玉辉. 裂隙岩体注浆浆液与注浆控制方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005. (ZHENG Yu-hui. Research on grouts and controllable method of grouting in rock mass of the fissures[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese))
- [14] 湛铠瑜, 隋旺华, 高岳. 单一裂隙动水注浆扩散模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1659 - 1663. (ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua, GAO Yue. A model for grouting into single fracture with flowing water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1659 - 1663. (in Chinese))
- [15] 谢立全, 于玉贞. 渗流作用下的岸坡泥沙起动条件[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **26**(9): 1534 - 1537. (XIE Li-quan, Yu Yu-zhen. Incipient motion of riverbank sand subject to seepage[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006 **26**(9): 1534 - 1537. (in Chinese))
- [16] 方建瑞, 朱合华, 蔡永昌. 边坡稳定性研究方法进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(2): 343 - 349. (FANG Jian-rui, ZHU He-hua, CAI Yong-chang. Advancement and methods of the slope stability research[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(2): 343 - 349. (in Chinese))
- [17] DL/T5148—2012 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 2012. (DL/T5148—2012 Specification for cement grouting construction of hydraulic structures[S]. 2012. (in Chinese))
- [18] 符平. 裂隙岩体水泥灌浆效果评价及数值模拟研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010. (FU Ping. The research of evaluating the effect of cement grouting and simulating the grouting in fracture rock[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in Chinese))
- [19] ISH-SHALOM M, GREENBERG S A. The rheology of fresh Portland cement pastes[C]// Proceedings of the 4th International Symposium Chemistry Cement. Washington, 1960: 721 - 726.
- [20] 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**(15): 2709 - 2714. (RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2709 - 2714. (in Chinese))