

DOI: 10.11779/CJGE201602003

# 松软地层脉动灌浆封孔浆体止浆机制初步研究

张贵金<sup>1</sup>, 梁经纬<sup>2</sup>, 杨东升<sup>1</sup>, 潘 焱<sup>1</sup>, 彭春雷<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 400041; 2. 湖南省水利水电科学研究所, 湖南 长沙 410007;

3. 湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 浆体封闭脉动灌浆是松软地层防渗加固的有效手段, 但封孔浆体的止浆机制尚不明确。基于工程断裂力学以及宾汉姆流体同心环状劈裂流动模型, 对脉动灌浆封孔浆体的止浆机制进行了定性分析, 并基于能量守恒, 推导出了脉动灌浆封孔浆体止浆的控制方程。分析了脉动灌浆封孔浆体的止浆能力与浆液流变性能、封孔浆体性能以及脉动频率的关系, 封孔浆体的承载极限灌浆压力随浆液塑性黏度和屈服应力的增大而增大, 随封孔浆体塑性强度的增大呈线性增加, 随脉动持续时间的增加而减小, 随脉动间隔时间的增大而增大, 随封孔高度的增加不断增大。利用自制室内试验装置, 验证了脉动灌浆封孔浆体的止浆机制。在南水北调中线河南鹤壁段引水渠边坡防渗工程中, 针对松软地质条件, 采用封孔浆体止浆技术对边坡工程进行了自下而上分段脉动灌浆, 灌后抽水试验表明地层渗透系数达到  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/s, 对比传统灌浆工艺节省 20% 工作量。

**关键词:** 松软地层; 脉动灌浆; 封孔浆体; 止浆机制

**中图分类号:** TU41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)02-0210-09

**作者简介:** 张贵金(1964-), 男, 湖南张家界人, 博士, 教授, 主要从事基础处理技术, 岩土工程、水利工程风险评估研究。E-mail: gjzhang84@126.com。

## Mechanism of stemming slurry materials for pulsating grouting in soft strata

ZHANG Gui-jin<sup>1</sup>, LIANG Jing-wei<sup>2</sup>, YANG Dong-sheng<sup>1</sup>, PAN Ye<sup>1</sup>, PENG Chun-lei<sup>3</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Water

Resources and Hydropower Research Institute, Changsha 410007, China; 3. Hongyu Hydro-electric Geo-engineering Company Limited,

Changsha 410007, China)

**Abstract:** The pulsating grouting with slurry materials is an effective method for anti-seepage and reinforcement in soft strata, but the mechanism of stemming slurry materials is not clear. Based on the engineering fracture mechanics and Bingham fluid concentric annular narrow gap flow model, the mechanism of stemming slurry materials is analyzed qualitatively, and based on the conservation of energy, the governing equation for the stemming slurry materials is deduced. The relationship among the limit loading pressure of slurry materials in pulsating grouting, the rheological properties of grouting slurry, the performance of sealing slurry and the pulsating frequency is analyzed. The limit loading pressure of the slurry materials increases with the increase of plastic viscosity of slurry, yield stress plastic strength of sealing slurry and interval time of pulse, and decreases with the increase of duration time of pulse. The effect increases with the increase of the height of hole sealing. The mechanism of stemming slurry materials is verified by the self-made indoor experimental device. For the anti-seepage project in the slope of the diversion canal in Hebi of Henan, which is in the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion, in view of the soft geological conditions, the stemming slurry technology of slurry materials is applied to the slope project by means of segmented pulsating grouting from bottom to top. The pumping tests after grouting indicate that the permeability reaches  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/s, and the amount of work of 20% is saved compared to that of the traditional grouting technology.

**Key words:** soft stratum; pulsating grouting; slurry material; mechanism of stemming

## 0 引 言

在水利工程、矿山开采、地铁、垃圾填埋等地下工程中, 遇到的复杂地基防渗加固问题越来越多, 其中松软土石混合体的防渗加固问题尤为突出。松软土

石混合体主要由砾石或块石、细粒土(如黏土、砂)及孔隙构成, 具有一定含石量(50%左右)的不均匀松散岩土介质系统, 层状、带状和壳状3种渗透结构

并存, 兼有孔隙透水、裂隙透水和管道透水, 必须进行防渗加固<sup>[1]</sup>, 灌浆方法是一种重要手段。

目前常用的灌浆工艺主要有“袖阀管灌浆法”、“预埋花管法”、“套管灌浆法”、“孔口封闭灌浆法”等<sup>[2]</sup>, 都难以完成深厚松软地层灌浆处理, 为此张贵金等<sup>[3]</sup>提出了脉动(低频率)灌浆法, 通过特制的脉动灌浆泵实现连续间隔灌浆。针对深厚松软地层灌浆难以起压等问题, 张贵金等<sup>[4]</sup>研究发明了一种新的封孔工艺——“浆体封闭”, 利用自制封孔浆体的黏塑性, 实施自下而上分段脉动灌浆, 解决了松软地层难以孔内卡塞<sup>[5]</sup>和传统孔口封闭器止浆<sup>[2]</sup>易于低压劈裂等问题, 并已在托口水电站河湾地块防渗帷幕工程中成功应用, 但脉动灌浆封孔浆体的止浆机制尚不明确。

为探明脉动灌浆封孔浆体的止浆机制, 本文基于工程断裂力学以及宾汉姆流体同心环状劈裂<sup>[6]</sup>流动模型进行定性研究, 并基于能量守恒, 推导脉动灌浆封孔浆体止浆的控制方程。对封孔浆体的止浆能力与浆液流变性能、封孔浆体性能以及脉动频率的关系进行定量分析, 得到灌浆工艺相关参数; 利用自制试验装置进行验证试验, 进而指导工程实践。

## 1 脉动灌浆下封孔浆体的止浆机制

封孔浆体是一种低强度快凝硬塑状材料, 灌入灌浆管与钻孔壁之间, 在灌浆过程中, 起到封孔阻浆的作用。

根据工程断裂力学可知, 当孔内灌浆压力超过封孔浆体的启劈压力, 部分浆液就会沿着封孔浆体劈裂向上运动<sup>[7]</sup>, 封孔浆体内浆液上窜高度 $H$ 取决于脉动灌浆压力、封孔浆体的弹塑性和浆液自身黏滞性。当 $H$ 达到封孔高度 $H_0$ , 封孔浆体即被击穿, 对这一过程做如下假定。

### 1.1 基本假定

(1) 当封孔浆体内浆液劈裂上窜高度 $H$ 时, 灌浆管底出浆口的灌浆压力不断增大至 $P_H$ 。

(2) 沿封孔浆体中心劈裂产生裂隙, 假定裂隙壁面光滑, 窄缝平均开度为 $2a$ 。

(3) 浆液为宾汉姆流体, 其流动形式为同心环状层流, 且在扩散过程中流型不变<sup>[8]</sup>。

(4) 当浆液在封孔浆体内停止劈裂向上运动, 由于压滤效应<sup>[9-10]</sup>, 在封孔浆体内形成一定高度的滤饼, 假定浆液在封孔浆体内的滤饼形成系数为 $k_{bf}$ , 在灌浆过程中保持不变, 参考纯水泥浆液取 $k_{bf}=0.05\text{ s}^{-1/2}$ <sup>[11]</sup>。

基于以上假设建立同心环状劈裂封孔浆体扩散模型, 如图1所示。

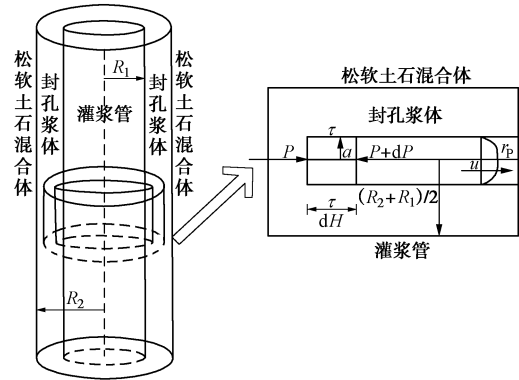


图1 同心环状劈裂封孔浆体扩散模型

Fig. 1 Diffusion model for stemming slurry materials due to concentric annular fracturing

### 1.2 浆液在封孔浆体内运动基本理论

#### (1) 灌浆浆液在封孔浆体内运动规律

灌浆浆液在灌浆压力作用下同心环状劈裂封孔浆体, 会向上运动, 可采用宾汉姆流体连续方程来描述其运动规律<sup>[12]</sup>:

$$\tau = Ar \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力,  $A = \frac{dP}{dH} + \gamma_g$ ,  $\gamma_g$  为浆液重度,  $r$  为到窄缝中心距离,  $P$  为出浆口灌浆压力,  $H$  为浆液在封孔浆体中高度。

根据假定(2)得浆液在劈裂缝中的平均速度<sup>[13]</sup>为

$$\bar{u} = -\frac{a\tau_0}{2\eta_p} - \frac{a^2 A}{3\eta_p} \quad (2)$$

式中,  $\bar{u}$  为浆液平均流速,  $\tau_0$  为浆液屈服应力,  $\eta_p$  为浆液塑性黏度。

根据同心环状劈裂封孔浆体扩散模型, 可得封孔浆体内灌浆流量 $q_{\text{封}}$ :

$$\begin{aligned} q_{\text{封}} &= \pi(R_1 + R_2) \int_{-a}^a \bar{u} dr = 2\pi(R_1 + R_2) \int_0^a \bar{u} dr \\ &= 2a\pi(R_1 + R_2) \bar{u} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $R_1$  为灌浆管外径,  $R_2$  为灌浆孔壁内径,  $(R_1 + R_2)/2$  为窄缝中心半径。

将式(2)代入式(3)则有

$$q_{\text{封}} = 2a\pi(R_1 + R_2) \left[ -\frac{a\tau_0}{2\eta_p} - \frac{a^2}{3\eta_p} \left( \frac{dP}{dH} + \gamma_g \right) \right] \quad (4)$$

#### (2) 封孔浆体内压力分布

对式(4)分离变量, 并利用边界条件: 当灌浆压力 $P$ 达到封孔浆体起裂压力 $P_0$ 时, 浆液在封孔浆体中劈裂流动。经过灌浆时间 $t$ 后, 浆液在封孔浆体内的上升高度达到 $H$ , 可得

$$\Delta P = P_H - P_0 = \frac{3\eta_p H}{a^3} \left( \frac{q_{\text{封}}}{2\pi(R_1 + R_2)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right) + \gamma_g H \quad (5)$$

$$P_H = P_0 + \gamma_g H + \frac{3\eta_p H}{a^3} \left( \frac{q_{\text{封}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right), \quad (6)$$

式中,  $P_H$  为封孔浆体内浆液达到  $H$  时出浆口灌浆压力。

### 1.3 稳压下封孔浆体的止浆能力

封孔浆体的止浆能力指封孔浆体的承载极限灌浆压力及其持续时间。若封孔浆体高度为  $H_0$ , 当封闭浆体内的浆液高度达到孔口时, 则相应的出浆口灌浆压力, 即为稳压下封孔浆体的承载极限灌浆压力  $P_{WH_0}$ :

$$P_{WH_0} = P_0 + \gamma_g H_0 + \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{封}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right). \quad (7)$$

根据假定(2)和(4), 由质量守恒可知, 封孔浆体承载极限灌浆压力的持续时间为

$$t_{\max} = \frac{2\pi a(R_2 + R_1)H_0}{q_{\text{封}}}. \quad (8)$$

联合式(7)、(8)即为稳压下封孔浆体止浆的控制方程。

### 1.4 稳压下封孔浆体在止浆过程中的灌浆能量耗散

当浆液在封孔浆体内劈裂向上运动时, 止浆过程中的能量耗散可分为4个部分: 封孔浆体的应变能、浆液流变消散能及势能和封孔浆体裂隙扩展功<sup>[13]</sup>。根据能量守恒得

$$P_H dQ_{\text{封}} - dU - \Delta P dQ - G_1 dS = 0, \quad (9)$$

式中,  $P_H$  为出浆口的灌浆压力,  $dQ_{\text{封}}$  为封孔浆体内的浆液量,  $dU$  为封孔浆体弹性应变能的增量, 取决于封孔浆体的体变量,  $G_1$  为裂隙扩展过程封孔浆体的弹性能释放率,  $dS$  为裂隙表面积增量。

联合式(7)、(9), 可得稳压下封孔浆体达到极限时的能量守恒方程:

$$P_{WH_0} dQ_{\text{封}0} - dU_0 - \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{封}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{\eta_p} \right) dQ_{\text{封}0} - G_1 dS_0 = 0, \quad (10)$$

式中,  $dQ_{\text{封}0}$ ,  $dS_0$ ,  $dU_0$  分别为封孔浆体达到承载极限时封孔浆体内的浆液量、裂隙表面积增量、弹性应变能的增量。

根据假定(3)可知

$$dQ_{\text{封}0} = 2\pi a(R_2 + R_1)H_0, \quad (11)$$

$$dS_0 = 2\pi(R_2 - R_1)H_0. \quad (12)$$

从式(9)可知, 增加劈裂封孔浆体裂隙的表面积, 能提高封孔浆体的承载极限灌浆压力。

### 1.5 脉动灌浆下封孔浆体的止浆能力

通过脉动泵控制脉动灌浆的频率, 脉动持续时间为  $t_1$ , 脉动间隔时间为  $t_2$ , 浆液进入封孔浆体的流量

为  $q_{\text{封}}$ , 每次脉动进入封孔浆体内的浆液量为  $q_{\text{封}}t_1$ , 脉动灌浆量时程曲线见图2。

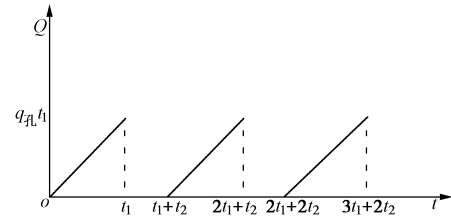
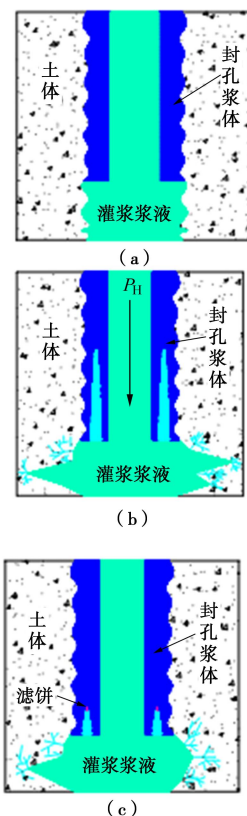


图2 脉动灌浆时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of pulsating grouting

$t_1$  时刻封孔浆体内浆液高度达到  $H_{t_1}$ , 若  $H_{t_1}$  等于  $H_0$ , 封孔浆体被击穿; 若  $H_0$  小于  $H_{t_1}$ , 由于浆液在封孔浆体内的压滤效应, 在间隔时间  $t_2$  内会形成高度为  $h_1$  的滤饼, 从而使封孔浆体一定程度自愈, 则  $t_2$  时刻浆体内浆液高度下降至  $H_{t_1} - h_1$ 。根据假定(2)可知, 进入封孔浆液内的流量和持续时间一定, 因此每次脉动封孔浆体内浆液上升的高度为  $H_{t_1}$ , 即  $2t_1 + t_2$  时刻封孔浆体内浆液高度为  $2H_{t_1} - h_1$ , 经过  $n$  次脉动劈裂后, 封孔浆体内浆液高度达到  $H_{t_n}$ , 若  $H_{t_n}$  刚好等于  $H_0$ , 此时出浆口的灌浆压力即为脉动下封孔浆体的承载极限灌浆压力, 而脉动次数  $n$  即为封孔浆体承载极限灌浆压力的脉动次数。据此可将脉动灌浆下封孔浆体的止浆行为概括为: ①封孔浆体形成; ②  $t_1$  时间内封孔浆体脉动劈裂; ③  $t_2$  时间内封孔浆体自愈; ④封孔浆体击穿, 如图3。



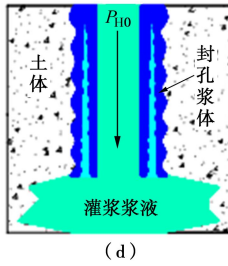


图3 脉动灌浆封孔浆体止浆简化模型

Fig. 3 Generalized model for stemming slurry materials of pulsating grouting

对脉动劈裂封孔浆体的全过程进行分析, 经过脉动灌浆持续时间  $t_1$  后, 浆液在封孔浆体内的高度上升至  $H_1$ , 裂隙表面面积的增量为  $dS_1$ , 根据假定 (2)、(4) 可得

$$H_1 = \frac{q_{\text{fl}} t_1}{2\pi a(R_2 + R_1)} \quad (13)$$

根据质量守恒可知, 当  $H_1 = H_0$  时, 封孔浆体击穿, 因此控制  $t_1 < t_{\text{max}}$ , 单次脉动过程可看作稳压, 每次脉动裂隙表面积增量为  $dS_1$ , 根据式 (12) 可得

$$dS_1 = 2\pi(R_2 - R_1)H_1 \quad (14)$$

当脉动灌浆进入间隔时间, 其灌浆压力为0, 由于浆液在封孔浆体内的压滤效应, 在间隔时间  $t_2$  内浆液在封孔浆体内形成高度为  $h_1$  的滤饼, 使封孔浆体一定程度自愈, 根据假定 (4) 可得

$$h_1 = t_2 k_{\text{bf}} H_1 \quad (15)$$

从  $t_1 + t_2$  时刻起, 进入第2次脉动, 在脉动灌浆持续时间  $t_1$  内, 封孔浆体内的浆液高度上升  $H_1$ , 达到  $H_2$ , 基于质量守恒得

$$H_2 = (1 - t_2 k_{\text{bf}})H_1 + H_1 \quad (16)$$

封孔浆体内的浆液高度达到  $H_2$ , 裂隙表面积总的增量为  $dS_2$ , 根据式 (14) 可知

$$dS_2 = dS_1 + dS_1 = 2dS_1 \quad (17)$$

在间隔时间  $t_2$  内浆液在封孔浆体内形成的滤饼高度为  $h_2$ , 根据式 (15) 可得

$$h_2 = t_2 k_{\text{bf}} H_2 \quad (18)$$

从  $2(t_1 + t_2)$  时刻起, 进入第3次脉动, 在脉动灌浆持续时间  $t_1$  内, 封孔浆体内的浆液高度上升  $H_1$ , 达到  $H_3$ , 根据式 (16) 得

$$H_3 = (1 - t_2 k_{\text{bf}})^2 H_1 + (1 - t_2 k_{\text{bf}})H_1 + H_1 \quad (19)$$

从式 (17) 可知, 此时裂隙表面面积的总增量为  $dS_3$ :

$$dS_3 = dS_1 + dS_2 = 3dS_1 \quad (20)$$

经过  $n$  次脉动后, 根据式 (16)、(19), 可得

$$H_{t_n} = (1 - t_2 k_{\text{bf}})^{n-1} H_1 + (1 - t_2 k_{\text{bf}})^{n-2} H_1 + \dots + (1 - t_2 k_{\text{bf}})H_1 + H_1 \quad (21)$$

此时裂隙表面面积的总增量为  $dS_n$ , 根据式 (20)

可得

$$dS_n = ndS_1 \quad (22)$$

当  $H_{t_n} = H_0$  时, 封孔浆体达到承载极限, 此时的出浆口灌浆压力, 即为脉动下封孔浆体的承载极限  $P_{MH_0}$ , 根据式 (9) 可知:

$$P_{MH_0} dQ_{\text{fl}} - dU_0 - \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{fl}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right) dQ_{\text{fl}} - G_1 dS_n = 0 \quad (23)$$

将式 (22) 代入式 (23) 并减去式 (10) 可得

$$P_{MH_0} dQ_{\text{fl}} - P_{WH_0} dQ_{\text{fl}} + G_1 dS_0 - G_1 ndS_1 = 0 \quad (24)$$

将式 (11)、(12) 和 (14) 分别代入式 (24) 可得

$$(P_{MH_0} - P_{WH_0})[2\pi a(R_2 + R_1)H_0] = 2nG_1\pi(R_2 - R_1)H_1 - 2G_1\pi(R_2 - R_1)H_0 \quad (25)$$

将式 (25) 变形, 可得脉动下封孔浆体的承载极限灌浆压力  $P_{MH_0}$ :

$$P_{MH_0} = \frac{2nG_1\pi(R_2 - R_1)H_1 - 2G_1\pi(R_2 - R_1)H_0}{2\pi a(R_2 + R_1)H_0} + P_0 + \gamma_g H_0 + \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{fl}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right) \quad (26)$$

从式 (21) 可得

$$H_{t_n} = H_0 = (1 - t_2 k_{\text{bf}})^{n-1} H_1 + (1 - t_2 k_{\text{bf}})^{n-2} H_1 + \dots + (1 - t_2 k_{\text{bf}})H_1 + H_1 \quad (27)$$

当  $t_2 = 0$  时,  $H_{t_n} = H_0 = nH_1$ , 则式 (26) 简化为

$$P_{MH_0} = P_0 + \gamma_g H_0 + \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{fl}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right) \quad (28)$$

即为稳压灌浆封孔浆体的承载极限灌浆压力计算公式。

当  $t_2 \neq 0$  时, 将式 (27) 变形得

$$H_{t_1} = \frac{1 - (1 - t_2 k_{\text{bf}})^n}{t_2 k_{\text{bf}}} H_0 \quad (29)$$

当  $t_2 \neq 0$  时, 将式 (29) 代入式 (26) 并化简, 可得脉动下封孔浆体的承载极限灌浆压力

$$P_{MH_0} = P_0 + \gamma_g H_0 + \frac{3\eta_p H_0}{a^3} \left( \frac{q_{\text{fl}}}{2\pi(R_2 + R_1)} + \frac{\tau_0 a^2}{2\eta_p} \right) + \frac{G_1(R_2 - R_1)}{a(R_2 + R_1)} \left( \frac{nt_2 k_{\text{bf}}}{1 - (1 - t_2 k_{\text{bf}})^n} - 1 \right) \quad (30)$$

将式 (13) 代入式 (30) 变形, 可得脉动下封孔浆体承载极限灌浆压力的脉动次数:

$$n = \lg_{(1 - t_2 k_{\text{bf}})} \left( 1 - \frac{q_{\text{fl}} t_1 t_2 k_{\text{bf}}}{2\pi a(R_2 + R_1)H_0} \right) \quad (31)$$

联合式 (30)、(31) 即为脉动下封孔浆体止浆的控制方程。

## 2 脉动灌浆封孔浆体的止浆能力定量分析

由于地层地质条件的复杂性和不可预测性, 灌浆时间随机性极大, 因此封孔浆体的止浆能力主要通过封孔浆体的承载极限灌浆压力来控制。从止浆控制方程可知, 脉动灌浆封孔浆体的承载极限灌浆压力与封孔浆体的高度、塑性强度、灌浆流量、裂隙开度和浆液的流变特性的关系与稳压灌浆基本一致, 但其还受脉动灌浆持续时间、脉动灌浆间隔时间以及滤饼形成系数和裂隙扩展过程中封孔浆体的弹性能释放率影响。本文着重分析灌浆浆液流变性能, 封孔浆体性能以及脉动灌浆频率对不同高度的封孔浆体承载极限灌浆压力的影响。考虑孔壁内径  $R_2=0.045\text{ m}$ , 灌浆管外径  $R_1=0.0325\text{ m}$ ; 并假定同心环状裂隙每秒灌浆量  $q_{\text{孔}}=0.10\text{ L/s}$ , 裂隙开度  $2a=0.004\text{ m}$ , 裂隙扩展过程封孔浆体的弹性能释放率  $G_1=40\text{ J/m}^2$ , 滤饼形成系数  $k_{\text{bf}}=0.05\text{ s}^{-1/2}$ , 浆液重度  $\gamma_g=15.1\text{ kN/m}^3$ 。不考虑因素变化的取值, 浆液屈服应力  $\tau_0=0.1233\text{ Pa}$ , 浆液塑性黏度  $\eta_p=25.45\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ; 脉动灌浆持续时间  $t_1=25\text{ s}$ , 脉动灌浆间隔时间  $t_2=5\text{ s}$ ; 封孔浆体塑性强度  $P_0=0.162\text{ MPa}$ 。

### 2.1 材料性能指标

#### (1) 不同配比封孔浆体的启劈压力

封孔浆体的启劈压力  $P_0$  很难通过理论分析或实测得到其精确值, 主要与封孔浆体的塑性强度相关, 为简化计算, 考虑以封孔浆体的塑性强度度量启劈压力。

封孔浆体以黏土泥浆为基材, 通过加入水泥与复合外加剂形成。以改进的维卡仪测定其塑性强度, 不同配比封孔浆体的 1 h 塑性强度如表 1 所示。40 min 无明显增长, 40 min 后形成具有一定塑性强度的软固体, 实验室测得其压缩系数为  $0.4\text{ MPa}^{-1}$ 。

表 1 不同配比封孔浆体的 1 h 塑性强度

Table 1 Plastic strength of stemming slurry materials for 1 h under different ratios

编号	水 /kg	水泥 /kg	黏土 /kg	外加剂 /kg	塑性强度 /MPa
1	4	2	2	0.01	0.043
2	4	2	2	0.02	0.084
3	4	2	3	0.01	0.065
4	4	2	3	0.02	0.162
5	4	2	3	0.03	0.194
6	4	2	3	0.04	0.218

#### (2) 不同配比灌浆材料的流变性能

以黏土水泥浆材为例, 利用软固体流变仪 BROOKFIELD-R/S+ Rheometer 对不同黏土掺量下浆液的流变特性进行研究。室内试验研究结果, 水固比取 0.6:1, 黏土掺量  $q$  从 0%~70% 的黏土水泥浆, 浆

液的比重约为 1.51, 流变曲线如图 4。

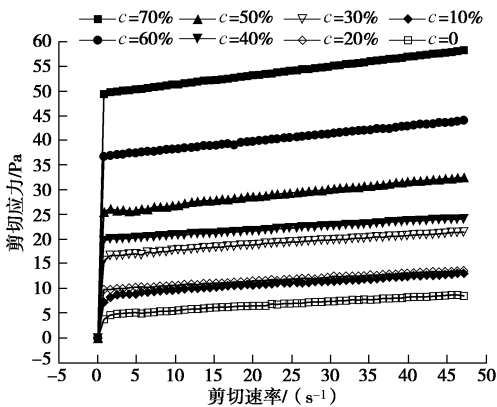


图 4 不同黏土掺量下黏土水泥浆液的流变曲线

Fig. 4 Rheological curves of clay cement slurry under different clay dosages

浆液为宾汉姆流体, 且随黏土掺量的增加, 浆液屈服应力  $\tau_0$  和塑性黏度  $\eta_p$  都逐渐增加, 且趋势一致, 故本文定量分析时取塑性黏度表征其流变性能。

### 2.2 灌浆浆液流变性能对不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的影响

由式 (30) 计算得到灌浆浆液的塑性黏度与不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的关系如图 5, 随着浆液塑性黏度的增加, 封孔浆体的承载极限灌浆压力迅速增大, 随封孔高度的增加, 浆液塑性黏度对封孔浆体的承载极限灌浆压力影响增大。为提高封孔浆体的承载极限灌浆压力, 应尽可能增加灌浆浆液的塑性黏度和屈服应力值。对于黏土水泥浆液来说, 主要是增加黏土掺量, 但随黏土掺量的增加, 浆液结石强度迅速减小, 黏土掺量不宜超过 50%<sup>[14]</sup>。

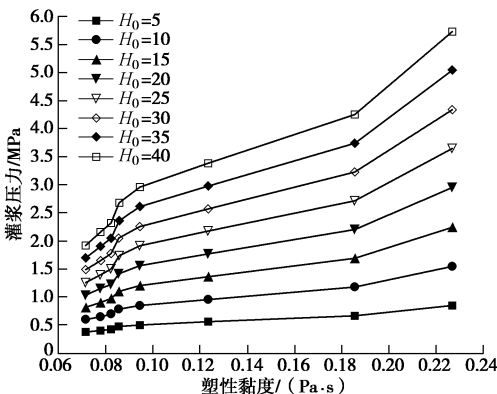


图 5 浆液塑性黏度对不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的影响

Fig. 5 Influence of plastic viscosity of slurry on limit grouting pressure of stemming slurry materials at different heights

### 2.3 封孔浆体性能对不同高度封孔浆体的止浆能力的影响

封孔浆体的塑性强度与不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的关系如图 6, 随着封孔浆体塑性强度

的增大, 其能承受的极限灌浆压力也不断增大。随封孔高度增加, 一定塑性强度的封孔浆体的极限灌浆压力迅速增大。但需要注意的是, 随着封孔浆体塑性强度增大, 灌浆管的拔管力也将迅速增大, 因此通常封孔浆体的塑性强度不宜超过 0.3 MPa。

#### 2.4 脉动灌浆频率对不同高度封孔浆体的止浆能力的影响

(1) 脉动灌浆持续时间对不同高度封孔浆体的止浆能力的影响

脉动灌浆持续时间与不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的关系如图 7, 随着脉动持续时间的增加, 封孔浆体的承载极限灌浆压力迅速减小, 随封孔高度的增加而增大。当脉动灌浆持续时间增加到 3 s, 出现拐点。减小脉动持续时间可大幅提高封孔浆体的承载极限灌浆压力, 但也减小了灌浆效率。

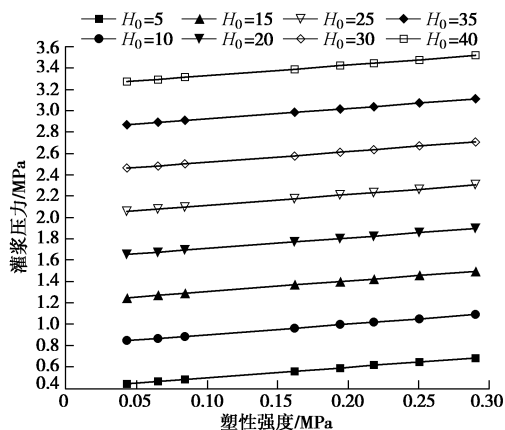


图 6 浆体塑性强度对不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的影响

Fig. 6 Influence of plastic strength of stemming slurry materials on limit grouting pressure at different heights

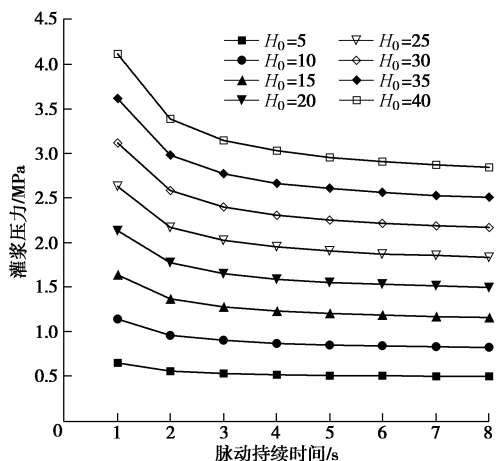


图 7 脉动持续时间对不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的影响

Fig. 7 Influence of pulse duration on limit grouting pressure of stemming slurry materials at different heights

(2) 脉动灌浆间隔时间对不同高度封孔浆体的止浆能力的影响

脉动灌浆间隔时间与不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的关系如图 8。

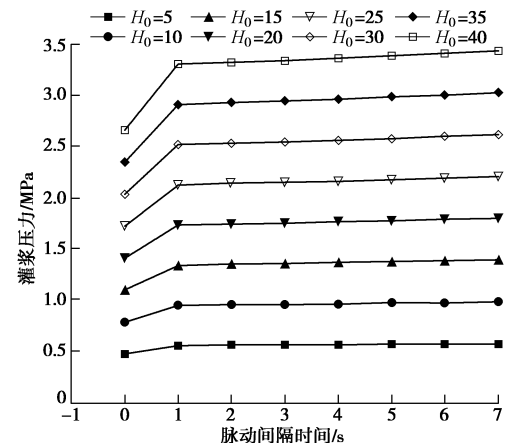


图 8 脉动间隔时间对不同高度封孔浆体的承载极限灌浆压力的影响

Fig. 8 Influence of pulse interval on limit grouting pressure of stemming slurry materials at different heights

可知, 随着脉动间隔时间的增加, 封孔浆体的承载极限灌浆压力增大, 随封孔高度的增加, 这种影响不断增大。当脉动间隔时间从 0 增加到 1 s 时, 封孔浆体的承载极限灌浆压力显著增加, 从理论推导可知间隔时间等于 0 时, 即为稳压灌浆。增加脉动间隔时间也可大幅提高封孔浆体的承载极限灌浆压力, 但也减小了出浆口的灌浆速率, 使灌浆工效降低, 因此脉动间隔时间不宜大于 5 s。

### 3 室内试验

由于现有脉动泵的出口流量很大, 难以满足室内试验要求。为此, 自行研制了封孔止浆机理模拟可视化装置, 主要包括脉动灌浆系统、孔口管试验平台和一定摩擦系数的有机玻璃圆管 3 部分, 如图 9, 10 所示。可控制灌浆压力、脉动频率、封孔高度。

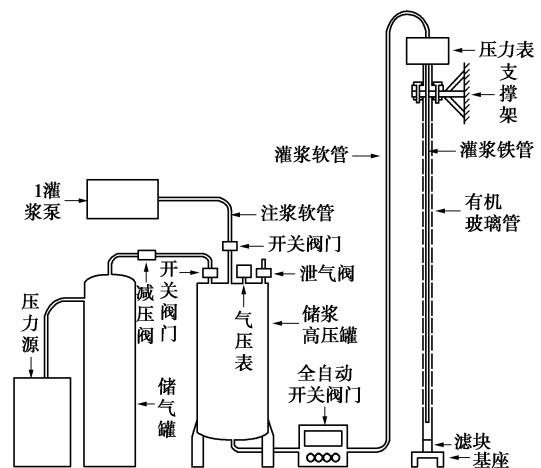


图 9 封孔机理模拟可视化装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation visualization device for mechanism of stemming slurry materials





图 10 机理模拟可视化装置实物图

Fig. 10 Photo of simulation visualization device for mechanism of stemming slurry materials

封孔浆体为可控黏土水泥膏浆，经室内试验测得其 30 min 左右的塑性强度为 0.162 MPa，弹性模量为 1.6 GPa。灌浆浆液采用水固比为 0.6，黏土掺量 50% 的黏土水泥浆液，控制灌浆压力 0.3 MPa，调节脉动频率，研究其对封孔浆体止浆能力的影响。

试验过程如下，先通过气压源装置以及附属灌浆软管将封孔浆体送入灌浆管与有机玻璃管的间隙，并待凝 30 min 同时清洗灌浆设备，控制灌浆压力，以一定脉动频率将灌浆浆液灌入有机玻璃管内，直至孔口冒浆，记录脉动次数。不同脉动频率下不同高度封孔浆体脉动次数见图 11，随脉动持续时间的增加，封孔

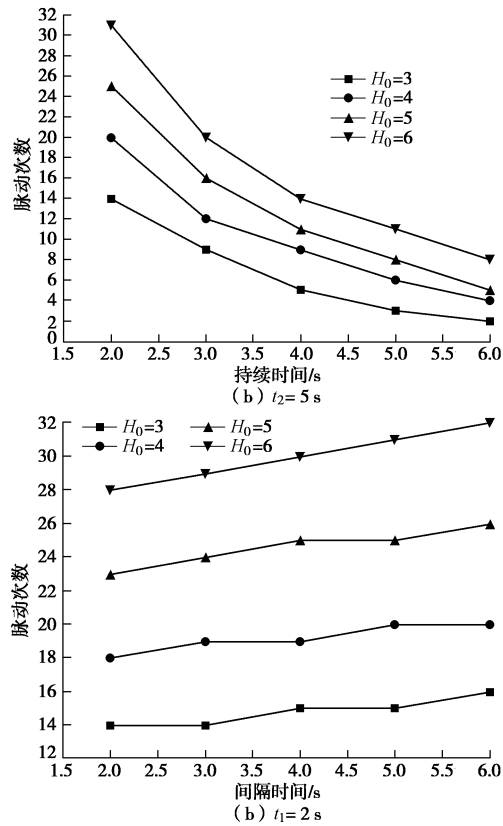


图 11 不同高度封孔浆体的承载脉动次数随脉动频率的变化规律

Fig. 11 Variation of pulse number at different heights of stemming slurry materials with pulsating frequency

浆体的承载脉动次数减小，随脉动间隔时间的增加，封孔浆体的承载脉动次数增加，随着封孔高度的增加，这种影响不断增大，与本文理论分析规律基本一致。

4 工程实践

南水北调中线鹤壁段引水渠穿过卵石地层，透水强烈，地下水位远高于渠道底板，渠道存在抗浮稳定问题，需对渠道边坡进行帷幕灌浆。若采用传统灌浆工艺，需 3~5 排 2 m 孔距，研究提出采用封孔浆体止浆，自下而上分段脉动灌浆。施工形象如图 12 所示。根据现场注水试验成果，设计最大灌浆压力取 0.8~1.5 MPa，结合理论分析成果，选取水灰（土）比 0.6，黏土掺量为 50% 的黏土水泥复合浆材作为灌浆材料，实验室测得其塑性黏度和屈服应力分别为 0.2131 Pa·s 和 44.38 Pa。封孔浆体采用掺加一定外加剂的黏土水泥复合膏浆，配比为水：黏土：水泥：外加剂=4：2：3：0.03，实验室测得其 1 h 塑性强度为 0.162 MPa。脉动频率采用脉动灌浆持续时间  $t_1=2$  s、脉动灌浆间隔时间  $t_2=5$  s，钻孔内径为 91 mm，灌浆管内径为 65 mm。假定裂隙扩展过程封孔浆体的弹性能释放率  $G_1=40$  J/m<sup>2</sup>，浆液进入封孔浆体的流量取 0.1 L/s，裂隙开度为 0.004 m，滤饼形成系数  $k_b=0.05$  s<sup>-1/2</sup>。设计最大灌浆压力和理论承载极限灌浆压力如表 2 所示。

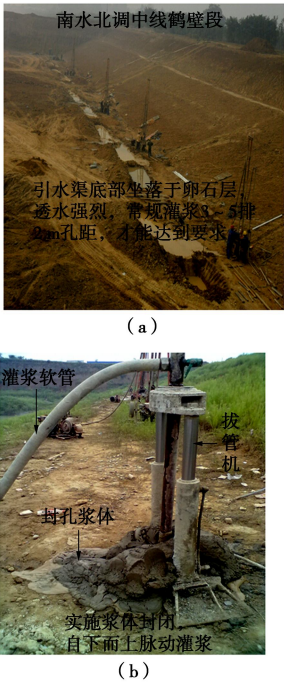


图 12 南水北调中线鹤壁段引水渠帷幕灌浆  
Fig. 12 Curtain grouting of Hebi section of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion

通过灌注可控性浆材，实施浆体封闭，自下而上分段脉动灌浆，实现控制抬动、控制扩散，按 2 排 2.5 m 孔距。完成全孔段灌浆，孔口未发生冒浆。从表 2





表 2 某孔段灌浆相关参数表

Table 2 Parameters of grouting of a hole section

段次	钻孔分层/m			灌浆孔段/m		段长 /m	孔径 /mm	封孔浆体的承载极限灌浆压力/MPa	设计最大灌浆压力 MPa
	土层	卵石层	泥灰岩	自	至				
1	1	10	2	11	13	2	91	1.439	1.5
2				9	11	2	91	1.207	1.2
3				7	9	2	91	0.975	0.9
4				5	7	2	91	0.742	0.8
5				3	5	2	91	0.510	0.6

注：设计最大灌浆压力为孔口灌浆压力值，封孔浆体的承载极限灌浆压力为灌浆管底出浆口灌浆压力。

可知，部分孔段封孔浆体的承载极限灌浆压力略小于设计最大灌浆压力，但孔口未冒浆，这是因为设计最大灌浆压力为孔口灌浆压力，一般要大于灌浆管底出浆口灌浆压力，且实际上劈裂裂隙表面是凹凸不平的，浆液沿裂隙流动的距离会增加，使得封孔浆体的实际承载极限灌浆压力增大。

灌后抽水试验表明地层渗透系数达到  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/s，对比传统灌浆工艺节省 20%工作量。

（6）还需对影响封孔止浆的因素进一步量化及工程控制进行研究，以达到工程应用便捷的目的。

5 结 论

本文对脉动灌浆封孔浆体的止浆机制进行了定性分析，并采用宾汉姆流体同心环状窄缝流动模型，基于能量守恒，推导出了脉动灌浆封孔浆体的止浆控制方程，其计算方法简单，物理意义明确，可用于指导灌浆封孔设计施工。主要结论如下：

- （1）脉动灌浆封孔浆体的止浆能力主要是指封孔浆体的承载极限灌浆压力，其主要影响因素有：灌浆浆液的流变性能，封孔浆体的高度、塑性强度、裂隙开度和脉动灌浆频率。论证了封孔浆体脉动灌浆比稳压灌浆具有更好的止浆能力。
- （2）脉动灌浆封孔浆体的极限灌浆压力，随灌浆浆液塑性黏度和屈服应力的增大而增大；随封孔浆体塑性强度的增大呈线性增大，随封孔高度的增加而增大；随脉动持续时间的增大而减小，随间隔时间的增大而增大。
- （3）研究成果可指导封孔浆体以及脉动灌浆控制参数设计。实际工程应尽可能选用塑性强度高的封孔材料，但应避免抱管，并根据需要调节脉动频率。
- （4）进行了脉动灌浆封孔机理室内模拟试验，结果表明：随脉动持续时间的增加，封孔浆体的承载脉动次数减小，随脉动间隔时间的增加，封孔浆体的承载脉动次数增加，随封孔高度的增加而增大，与理论分析基本一致。
- （5）针对南水北调中线鹤壁段引水渠边坡的松软

参考文献：

[1] 周石金. 套管护壁解决松散层钻进难题[J]. 水文地质工程, 1999(4): 59 - 62. (ZHOU Shi-jin. Casing pipe wall protection solving the problem of looses strata drilling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999(4): 59 - 62. (in Chinese))

[2] 夏可风. 孔口封闭灌浆法讨论[C]// 《水工建筑物水泥灌浆与边坡支护技术》暨第 9 次水利水电地基与基础工程学术会议. 贵阳, 2007: 10 - 20. (XIA Ke-feng. Grouting method for orifice closed discussions[C]// 《Hydraulic Structure Cement Grouting and Technology of Slopesupport》and Conference Foundation of Water Conservancy and Hydropower Engineering on 9th. Guiyang, 2007: 10 - 20. (in Chinese))

[3] 张贵金, 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))

[4] 张贵金, 增柳絮, 陈安重, 等. 松软地层高压灌浆封孔浆体研制及应用论证[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1110 - 1116. (ZHANG Gui-jin, ZENG Liu-xu, CHEN An-zhong, et al. Development and application demonstration of stemming slurry materials for high-pressure grouting in soft stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6):

- 1110 - 1116. (in Chinese))
- [5] 冯海明. 止浆塞在浅层覆盖型岩溶灌浆工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 1998, 2(1): 1 - 3. (FNEG Hai-ming. Application of grouting plug in covered karst grouting project[J]. Geotechnical Engineering Technology, 1998, 2(1): 1 - 3. (in Chinese))
- [6] 陈静惠, 钟鑫, 田继安, 等. 宾汉液体在偏心环空中的层流初探[J]. 大庆石油学院学报, 1987, 33(1): 18 - 22. (CHEN Jing-hui, ZHONG Xing, TIAN Ji-an, et al. Bingham fluid in eccentric annuli of laminar flow[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1987, 33(1): 18 - 22. (in Chinese))
- [7] 房凯. 桩端后注浆过程中浆土相互作用及其对桩基性状影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (FANG Kai. Grout-soil interaction during base grouting and its effects on the behavior of grouted piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [8] 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. (RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69 - 73. (in Chinese))
- [9] AMADEI B, SAVAGE W Z. An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures[J]. Int J Rock Mech Min, 2001, 38(38): 285 - 296.
- [10] Daniel Eklund a, Ha kan Stille. Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008(23): 389 - 398.
- [11] KENNETH D Weaver. Dam foundation grouting[M]. Amer Society of Civil Engineering, 2007.
- [12] 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): 746 - 748. (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): 746 - 748. (in Chinese))
- [13] 张忠苗, 邹建. 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 - 185. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian. Penetration radius and grouting pressure in fracture grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 181 - 185. (in Chinese))
- [14] 张贵金, 杨东升, 梁经纬, 等. 黏土水泥复合浆材强度研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 20 - 24. (ZHANG Gui-jin, YANG Dong-sheng, LIANG Jing-wei, et al. Study for the strength of clay-cement slurry[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 20 - 24. (in Chinese))

## 2016 年度第 19 讲黄文熙讲座学术报告会第 1 号通知

2016 年度第 19 讲黄文熙讲座学术报告会将于 2016 年 4 月 9 日(星期六)在南京举行, 会议由河海大学承办。2016 年黄文熙讲座主讲人为同济大学黄茂松教授, 讲座题目为“土体稳定与承载特性的分析方法”。讲座文稿已刊登在《岩土工程学报》2016 年第 1 期的黄文熙讲座栏目, 讲座论文分别从砂土与饱和软黏土两个方面阐述了在土体失稳与承载特性分析

方法方面的理论研究成果。4 月 8 日全天报到注册, 4 月 8 日晚召开《岩土工程学报》新一届编委会全体会议。黄文熙讲座学术报告会期间, 还将邀请有关学者专家做学术报告。热烈欢迎广大岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有关本次学术报告会的更多信息请关注本刊网站([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com))后续发布的第 2 号通知。

(本刊编辑部)