

松软地层高压灌浆封孔浆体研制及应用论证

张贵金¹, 曾柳絮¹, 陈安重², 杨松林³, 彭春雷⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014;
3. 五凌电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 4. 湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 在松软地层进行防渗工程施工时, 存在钻孔易塌孔, 灌浆难起压易导致垂向挤密抬动, 灌浆易漏浆串浆导致耗浆量大, 灌浆过程难控制等技术难题。传统的“袖阀管灌浆法”、“预埋花管法”、“孔口封闭灌浆法”等工法在深厚松软地层的施工中很难达到设计要求。为降低成本、提高工效, 研究提出一种“自下而上, 浆体封闭, 高压脉动灌浆”新工法, 介绍其中的“浆体封闭技术”成果。针对施工工艺要求, 研制出低强度快凝硬塑状封孔浆体, 通过实验得到性能参数; 基于浆体封闭力学机理, 对封孔效果进行论证, 结果表明, 在灌浆过程中, 封孔浆体材料具备足够的止浆、耗能作用; 对灌浆所需的最低注浆压力进行了计算, 为选择注浆设备提供依据; 另外, 对自下而上灌浆施工中, 提管所需的拔管力进行了计算, 为提高工效、避免灌浆管出现抱死事故, 提出边灌边转工艺方法, 可使灌浆管顺利提升, 即使在深孔情况下也无需使用拔管机。通过在怀化托口水电站河湾地块深厚松软红层进行原型试验, 验证研制的封孔浆体的应用效果, 分别在浅孔全段注入、深孔(最大达120 m)孔底以上20 m深注入封孔浆体材料, 实施“自下而上, 浆体封闭, 高压脉动灌浆”。试验中8 m深松软层达到1.5 MPa以上的灌浆压力, 120 m深可达到近8 MPa的灌浆压力(均为孔口压力), 地层抬动仅为12 mm, 灌后效果达到设计要求, 表明在高压灌浆情况下, 封孔浆体使用效果良好; 建议在深孔注浆过程中, 灌浆管边灌边转, 无需使用拔管机, 工艺更便捷、高效。理论研究和工程实践表明, 在松软地层实施高压灌浆, 采用浆体封闭技术是可行的, 研制的封孔浆体性能能满足施工工艺要求。

关键词: 松软地层; 封孔浆体; 封孔机理; 拔管力

中图分类号: TV41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)06-1109-08

作者简介: 张贵金(1964-), 男, 湖南张家界人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、水利水电工程风险评价, 基础处理技术研究。E-mail: gjzhang98@yahoo.com.cn。

Development and application demonstration of stemming slurry materials for high-pressure grouting in soft stratum

ZHANG Gui-jin¹, ZENG Liu-xu¹, CHEN An-zhong², YANG Song-lin³, PENG Chun-lei⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China; 3. Wu Ling Power Corporation, Changsha 410004, China; 4. Hongyu Engineering, Changsha 410007, China)

Abstract: For the impervious construction in soft stratum, there are various technical problems, such as easy collapse of boreholes, vertical lift induced by difficultly pressed grouting, large waste led by easy grouting leakage, and difficult grouting control. The traditional methods of "sleeve valve pipe grouting", "embedded screen pipe tube" and "orifice closed grouting" are difficult to meet the design requirements in deep soft ground. To reduce cost and to improve efficiency, a new construction method, high pulsating pressure grouting from below with stemming slurry materials, is put forward, and one of the key techniques, slurry sealing technique, is described. For the construction requirements, a kind of low-intensity, rapidly solidified and hard plastic-like sealing slurry is developed, and its performance parameters are obtained. It is enough to stem grouting and to consume energy by filling slurry materials between grouting pipe and bore hole pipe wall based on the grouting mechanism. The bottom-up pulling force which provides the basis for choosing pulling machines for construction is calculated. In addition, if you turn the grouting pipe continuously during the process of grouting, the work efficiency can be improved and the grouting pipe can be smoothly promoted to avoid locking accidents even in deep borehole cases without pipe drawing machines.

基金项目: 中国电力投资集团公司重大科技计划项目(2011-036-WLD-KJ-X)

收稿日期: 2011-09-26

Through the tests on the deep soft stratum in the bay area of Tuokou Hydropower Station, the slurry materials achieve the desired effect. Theoretical study and engineering practice show that it's feasible to adopt slurry sealing technology and to implement high-pressure grouting in soft stratum, and that the construction techniques by means of stemming slurry material can meet requirements.

Key words: soft stratum; stemming slurry material; borehole plugs mechanism; pipe drawing force

0 引言

松软地层分布广泛, 常见于河流沿岸、河漫滩阶地及 I 级阶地堆积、开发区新近人工搬运堆积场地^[1]。这类地层岩土结构松散, 颗粒间空隙度大, 易破坏、易水化, 稳定性差。对于松软地层进行防渗工程施工时, 存在钻孔易塌孔, 灌浆难起压易导致垂向挤密抬动, 灌浆易漏、串浆导致耗浆量大, 灌浆过程难控制等技术难题。目前常用的工法有“袖阀管灌浆法”、“预埋花管法”、“孔口封闭灌浆法”等, 其中“袖阀管灌浆法”、“预埋花管法”仅适合浅部, 难起压且灌浆不易均匀密实, “孔口封闭灌浆法”由于灌浆全孔受压灌注, 浅层或局部弱面容易产生低压重复劈裂, 一方面无效灌注造成材料浪费, 另一方面全孔段仅局部低压受灌, 灌浆加固或防渗整体效果很难达到工程设计要求^[2-4]。因此, 研究提出一种新工法“自下而上, 浆体封闭, 高压脉动灌浆”, 期望解决这些技术难题。本文介绍其中的“浆体封闭技术”研究成果。

目前, 在石油、煤矿等行业中, 常采用止浆塞、混凝土止浆垫、止浆岩帽等固态封孔法用于防止工程实践中空气、水、浆液的泄漏^[5-7]; 采用液体为封孔物质, 解决固体物质不能严密封闭孔口管周边的裂隙、空隙^[8-11], 但尚未见灌浆工程中采用浆体封闭的研究报道。针对研究提出的新工法, 研制一种低强度高凝硬塑状的封孔浆体材料, 注入灌浆管与钻孔孔壁之间, 在灌浆过程中, 起到封孔阻浆的作用, 达到“以浆止浆”的效果, 为实现钻灌段自下而上连续灌注, 提高工效, 节约成本创造条件。

1 封孔浆体研制及性能

1.1 封孔浆体研制

封孔浆体在灌浆施工过程中具有护壁、止浆、耗能的作用, 要求其具有初始流动性大、可泵性好、凝固时间可调的性能, 且在可泵期后黏度与强度迅速增长, 强度变化如图 1 所示。

封孔浆体材料研制的关键是协调好浆体的可灌性与硬化体早期强度的关系, 具备凝结时间可调与较大的流动性, 以满足施工可注性要求。以黏土泥浆为基材, 通过加入石膏、膨润土、水泥与复合外加剂, 进

行大样本正交试验, 得到满足施工工艺要求的封孔浆体材料配比。

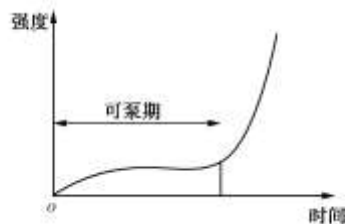


图 1 封孔浆体强度时间变化图

Fig. 1 Variation of strength of stemming slurry materials with time

1.2 封孔浆体材料性能

通过室内实验与现场试验比较研究, 得到满足工艺要求的封孔浆体配比, 其各项性能指标如下:

(1) 凝结时间: 采用砂浆稠度仪, 定义坠入深度 76 ± 1 mm 时为初凝时间, 坠入深度 2 ± 1 mm 时为终凝时间。测定的封孔浆体的初凝时间为 15~25 min, 终凝时间约 35 min。

(2) 稠度: 以砂浆稠度仪测定。15 min 内的稠度值维持在 120 mm 左右, 15 min 后稠度值迅速下降, 约 30 min 趋于平缓, 如图 2 示。

(3) 黏度: 以泥浆黏度计测定。15 min 内的黏度值维持在 30 s 左右, 15 min 后黏度值迅速上升, 约 16 min 材料黏度值无法测量, 如图 3 示。

(4) 塑性强度: 以液塑联合测定仪测定。27 min 内的塑性强度值无明显增长, 至 45 min 出现较大增长, 如图 4 示。

(5) 剪切强度: 以直剪仪测定。测得浆体 40 min, 4, 12, 24 h 不同时间的剪切强度值, 见表 1。

(6) 抗压强度: 以混凝土压力试验机测定。试件尺寸: $70 \times 70 \times 70$ mm, 测得 30, 40, 50 min 不同时间的抗压强度, 见表 2。

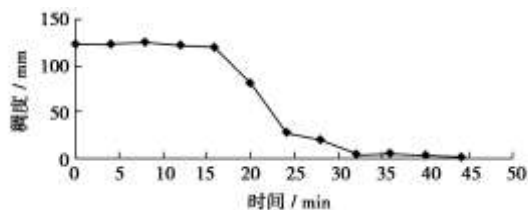


图 2 浆体稠度随时间变化

Fig. 2 Variation of consistency of stemming slurry materials with time

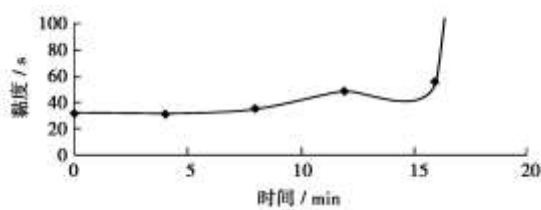


图 3 浆体黏度随时间变化

Fig. 3 Variation of viscosity of stemming slurry materials with time

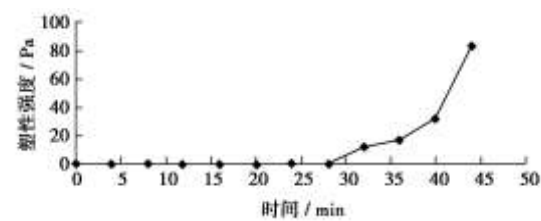


图 4 浆体塑性强度变化图

Fig. 4 Variation of plastic strength of stemming slurry materials with time

表 1 浆体不同时间的黏聚力与摩擦角

Table 1 Variation of cohesion and internal friction angle of stemming slurry materials with time

| 时间/h | 黏聚力/kPa | 摩擦角/(°) |
|------|---------|---------|
| 2/3 | 25.84 | 19.26 |
| 4 | 21.75 | 21.29 |
| 12 | 34.26 | 23.14 |
| 24 | 49.18 | 17.14 |

表 2 浆体不同时间的抗压强度

Table 2 Variation in compressive strength of material with time

| 时间/min | 抗压强度/MPa | | | |
|--------|----------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
| 30 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.087 |
| 40 | 0.21 | 0.19 | 0.16 | 0.190 |
| 50 | 0.29 | 0.31 | 0.27 | 0.290 |

上述性能指标表明：研制的封孔浆体具有约 15 min 的可泵期，之后的强度、黏度迅速增长，40min 左右可进行灌浆施工。

2 浆体封孔机理及效果论证

2.1 浆体封孔机理

封孔浆体通过自身、及与土层、注浆管壁的黏结力实现对灌浆浆液的封堵，灌浆时，浆液需先穿透封孔浆体，再进入地层。为论证灌浆过程中采用浆体封闭的效果，研究一定管段长的封孔浆体能够承受的最大灌浆压力和注浆所需最低注浆压力。

(1) 封孔浆体承载的最大灌浆压力计算

如图 5 所示，在灌浆过程中，封孔浆体受到来自灌浆管射浆眼向上的灌浆压力 P ，当灌浆压力足够

大，超过封孔浆体内聚力、及其与孔周岩土体和灌浆管壁黏滞力与浆体自重之和，灌浆浆液击穿封孔浆体，则封孔浆体失效。对封孔浆体所能承受的最大灌浆压力 P_{\max} 进行分析。

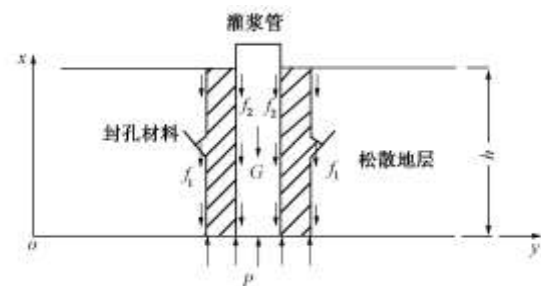


图 5 浅层全孔段封孔浆体受力

Fig. 5 Force balance of stemming slurry materials in full shallow hole

为简化模拟，作如下假定：①灌浆管射浆眼处的压力均匀的作用在封孔浆体底部；②封孔浆体在轴向力的作用下仅产生轴向变形，且同一承载面上的变形相同，而无径向变形；③不考虑浆液可能沿封孔浆体材料内部劈裂冒浆引起的浆体内聚力。

如图 6 所示，在 x 处取微段 dx 进行受力分析，封孔浆体微段受力包括：封孔浆体与孔周岩土体之间的黏滞力 τ_1 ，封孔浆体与灌浆管壁之间的黏滞力 τ_2 ，封孔浆体自重 dG ，灌浆压力 P 作用在封孔浆体上的应力 σ_b ($d\sigma_b$ 为应力增量)。

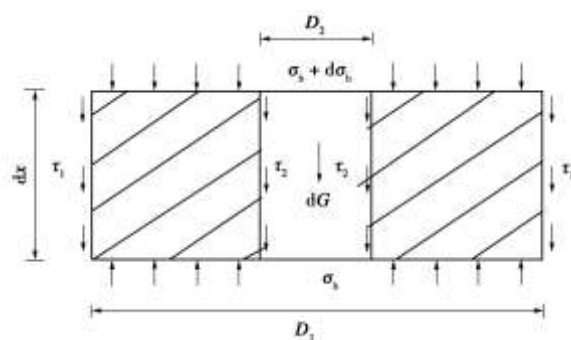


图 6 封孔浆体受力单元

Fig. 6 Force unit of stemming slurry materials

根据垂直方向力的平衡得到

$$Ad\sigma_b = \tau_1(x)\pi D_1 dx + \tau_2(x)\pi D_2 dx + dG \quad (1)$$

式中 D_1 、 D_2 分别为注入灌浆管与钻孔孔壁之间的封孔浆体材料的外径、内径； $A = \pi(D_1^2 - D_2^2)/4$ ；封孔浆体微段自重 $dG = \gamma A dx$ 。

定义 x 处封孔浆体承受的灌浆压力为 $P(x)$ ，对式 (1) 左右积分，得到 $P(x)$ 的表达式为

$$P(x) = \int_h^x \tau_1(x)\pi D_1 dx + \int_h^x \tau_2(x)\pi D_2 dx + \int_h^x \gamma A dx \quad (2)$$

根据虎克定律，轴向应变的表达式为

$$\varepsilon(x) = P(x)/AE \quad (3)$$

式中, E 为封孔浆体的弹性模量。

由于同一承载面上的轴向变形相同, 因此封孔浆体、灌浆管间的相对位移与封孔浆体、地层间的相对位移相同, 而黏滞力与相对位移成正比^[12], 故有

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(x) &= K_1 \int_h^x \varepsilon(x) dx / B = K_1 \int_h^x \frac{P(x)}{AE} dx / B, \\ \tau_2(x) &= K_2 \int_h^x \varepsilon(x) dx / B = K_2 \int_h^x \frac{P(x)}{AE} dx / B_o \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, K_1 、 K_2 分别为两接触面的剪移比例系数, B 为内、外半径之差, $B = (D_1 - D_2)/2$ 。

将式(4)带入式(1)得

$$P(x) = \frac{\pi D_1 K_1}{B} \int_h^x \int_h^x \frac{P(x)}{AE} dx dx + \frac{\pi D_2 K_2}{B} \int_h^x \int_h^x \frac{P(x)}{AE} dx dx + \int_h^x \gamma A dx \quad (5)$$

对式(5)两边分别求两阶导, 得

$$P''(x) = \frac{\pi D_1 K_1}{B} \frac{P(x)}{AE} + \frac{\pi D_2 K_2}{B} \frac{P(x)}{AE} \quad (6)$$

将式(2)求导代入式(6)得

$$(\pi D_1 \tau_1(x) + \pi D_2 \tau_2(x) + \gamma A)' = \frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2) P(x) \quad (7)$$

对式(7)求导得出

$$(D_1 \tau_1(x) + D_2 \tau_2(x) + \gamma A / \pi)'' = \frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2) [D_1 \tau_1(x) + D_2 \tau_2(x) + \frac{\gamma A}{\pi}] \quad (8)$$

求解方程(8), 得

$$D_1 \tau_1(x) + D_2 \tau_2(x) + \frac{\gamma A}{\pi} = C \exp(-x \sqrt{\frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2)}) \quad (9)$$

式中, C 为积分常数。

由式(9)可知, 当 $\tau_1(0)$, $\tau_2(0)$ 均达到破坏剪切强度 τ_{p1} , τ_{p2} 时, 灌浆管射浆眼处的封孔浆体与两接触面发生破坏, 且逐渐向上部破坏, 此时 $P(0)$ 达到最大值, 积分常数 $C = D_1 \tau_{p1} + D_2 \tau_{p2} + \gamma A / \pi$, 其中 τ_p 的计算如下:

$$\tau_p = (\sigma_z - \sigma_x) \sin(45^\circ + \varphi/2) / 2 \quad (10)$$

$$\sigma_z = \gamma h \quad (11)$$

$$\sigma_x = \sigma_z \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (12)$$

式中 σ_z , σ_x 分别为材料的竖向压力与材料破坏时的侧向压力; γ 为材料重度; h 为封孔浆体材料的注入深度; c , φ 分别为封孔浆体材料的黏聚力与摩擦角。

封孔浆体两接触面在灌浆管射浆眼处发生破坏, 此时封孔浆体承受的最大灌浆压力为

$$P_{\max} = \pi \int_h^0 (D_1 \tau_1(x) + D_2 \tau_2(x) + \gamma A / \pi) dx$$

$$= \frac{\pi(D_1 \tau_{p1} + D_2 \tau_{p2}) + \gamma A}{\sqrt{\frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2)}} (1 - \exp(-h \sqrt{\frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2)})) \quad (13)$$

$$P_{\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{\pi(D_1 \tau_{p1} + D_2 \tau_{p2}) + \gamma A}{\sqrt{\frac{\pi A}{EB} (D_1 K_1 + D_2 K_2)}} (1 - \exp(-h \sqrt{\frac{\pi}{AEB} (D_1 K_1 + D_2 K_2)})) \quad (14)$$

式中, τ_{p1} , τ_{p2} 为封孔浆体与两接触面间的峰值剪强度。

(2) 最低注浆压力计算

实际灌浆施工过程中, 浆液需先穿透封孔浆体, 再进入地层, 因此, 有必要研究浆液穿透封孔浆体的最低注浆压力, 为注浆设备提供选择参数。

封孔浆材在施工过程中受力分析^[13]如图7示。外半径 r_1 , 内半径 r_2 的封孔浆材, 受内压力 p_2 作用, 半径 r 处的周向应力和径向 σ_r 的计算公式如下:

$$\sigma_t = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} + \frac{(p_2 - p_1) r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)} \quad (15)$$

$$\sigma_r = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} - \frac{(p_2 - p_1) r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)} \quad (16)$$

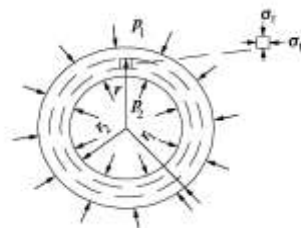


图7 封孔浆材截面受力

Fig. 7 Sectional force of stemming slurry materials

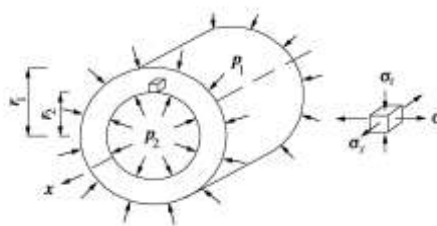


图8 封孔浆材应力分析

Fig. 8 Stress analysis of stemming slurry materials

由于封孔浆材两端开放, 所以

$$\sigma_x = 0 \quad (17)$$

以 $r = r_1$, $r = r_2$ 代入式(15), 得出主应力:

$$\sigma_1 = (\sigma_t)_{r=r_1} = \frac{2p_2 r_2^2 - p_1 (r_1^2 + r_2^2)}{r_1^2 - r_2^2} \quad (18)$$

$$\sigma_1 = (\sigma_r)_{r=r_2} = \frac{(p_2 - 2p_1)r_1^2 + p_2r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \quad , \quad (19)$$

$$\sigma_2 = (\sigma_x)_{r=r_1,r_2} = 0 \quad , \quad (20)$$

$$\sigma_3 = (\sigma_\varphi)_{r=r_1} = -p \quad , \quad (21)$$

$$\sigma_3 = (\sigma_r)_{r=r_2} = -p_2 \quad \circ \quad (22)$$

封孔浆体为硬塑性材料，但破坏时没有明显的塑性变形，所以按脆性材料应用第一强度理论进行计算，其强度条件为

$$\sigma_1 = \sigma_b \quad , \quad (23)$$

σ_b 为封孔浆体强度极限。

当 $r = r_1$ 时，

$$p_2 = \frac{p_1(r_1^2 + r_2^2) + \sigma_b(r_1^2 - r_2^2)}{2r_2^2} \quad , \quad (24)$$

即当 $p_2 \geq \frac{p_1(r_1^2 + r_2^2) + \sigma_b(r_1^2 - r_2^2)}{2r_2^2}$ 时，封孔浆材发生破坏。

当 $r = r_2$ 时，

$$p_2 = \frac{\sigma_b(r_1^2 - r_2^2) + 2p_1r_1^2}{r_1^2 + r_2^2} \quad , \quad (25)$$

即，当 $p_2 \geq \frac{\sigma_b(r_1^2 - r_2^2) + 2p_1r_1^2}{r_1^2 + r_2^2}$ 时，封孔浆材发生破坏，

取两种情况中大值作为最低破坏压力值。式中， r_1 ， r_2 分别封孔浆体材料的外半径、内半径，分别等于 $D_1/2$ ， $D_2/2$ ； σ_b 为封孔浆体强度极限； p_1 为地层对封孔浆体产生的压力， $p_1 = K_0\gamma h$ ， $K_0 = \nu/1-\nu$ ，其中 K_0 为土层测压系数， ν 为土层泊松比， γ 为土层重度， h 为封孔浆体深度。

2.2 效果论证算例

以怀化托口水电站河湾地块防渗技术试验研究的封孔浆体材料为例，通过室内模拟和现场实验取得的参数进行计算，具体数值为 $D_1=0.075\text{ m}$ ， $D_2=0.05\text{ m}$ ， $K_1=1.2\text{ MPa}$ ， $K_2=0.02\text{ MPa}$ ， $\gamma_{\text{封}}=15.1\text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_{\text{土}}=26.6\text{ kN/m}^3$ ； $C_{\text{封}}=25.84\text{ kPa}$ ， $C_{\text{土}}=10\text{ kPa}$ ， $\varphi_{\text{封}}=19.26^\circ$ ， $\varphi_{\text{土}}=35^\circ$ ， $E_{\text{封}}=1.6\text{ GPa}$ ， $\nu=0.25$ 。

当孔深为0~20 m，全孔注入封孔浆体；当孔深大于20 m时，从灌浆管射浆眼出口处以上注入20 m深的封孔浆体。计算结果如表3所示。

表 3 各灌浆段承载的最大灌浆压力和最低注浆压力

Table 3 Calculated values of maximum and minimum grouting pressures for various sections

| 灌浆孔深/m | 封孔距离/m | 封孔长度/m | 最大承载灌浆压力*/MPa | 最低注浆压力*/MPa |
|--------|--------|--------|---------------|-------------|
| 5 | 0~5 | 5 | 1.397 | 0.252 |
| 10 | 0~10 | 10 | 2.372 | 0.323 |
| 15 | 0~15 | 15 | 3.347 | 0.393 |
| 20 | 0~20 | 20 | 4.323 | 0.464 |

| | | | | |
|-----|---------|----|-------|-------|
| 40 | 20~40 | 20 | 4.323 | 0.747 |
| 60 | 40~60 | 20 | 4.323 | 1.029 |
| 80 | 60~80 | 20 | 4.323 | 1.312 |
| 100 | 80~100 | 20 | 4.323 | 1.595 |
| 120 | 100~120 | 20 | 4.323 | 1.877 |

注：*均为有效灌浆压力，即灌浆管射浆眼处的压力。

3 拔管力计算

为防止在灌浆施工过程中出现封孔浆体“抱死”灌浆管，造成灌浆管难以起拔甚至埋管，需要计算拔管力，为选择合适的拔管机提供依据。

3.1 方法一

影响灌浆管与封孔浆体间黏结力的因素非常复杂，结合试验研究，主要考虑与灌浆管直接接触的封孔浆体的影响，暂不考虑地下水水位影响。

(1) 理论公式

灌浆管的起拔阻力主要源自封孔浆体的抗剪强度，影响因素主要有封孔浆体的黏聚力、内摩擦角以及灌浆过程中浆体所受的扰动。拔管时，实际剪切面为管与浆的黏结面，结合拔管试验，提出采用修正系数的封孔浆体抗剪强度计算方法来计算拔管力。修正后的管与浆胶结面的抗剪强度计算公式为

$$\tau = \sigma \tan(\xi_{\text{修正}}\varphi) + \xi_{\text{黏合}}c \quad \circ \quad (26)$$

封孔浆体与管壁的摩擦和胶结不同于浆体自身的内摩擦和黏结，通过试验参数来描述胶结面的剪切破坏规律，从而计算出拔管力。封孔浆体在灌浆过程中受扰动的影响通过扰动系数来衡量，通过扰动试验合理选取一般施工状态下的扰动系数。拔管力计算公式为

$$F = \int_0^{2\pi rh} \xi_{\text{扰动}} \tau dA \quad \circ \quad (27)$$

计算式 (27)，可得

$$F = \int_0^h \xi_{\text{扰动}} (\sigma \tan(\xi_{\text{修正}}\varphi) + \xi_{\text{黏合}}c) 2\pi r dx$$
$$= 2\pi^2 r^2 \gamma \xi_{\text{扰动}} \tan(\xi_{\text{修正}}\varphi) h^2 + 2\pi r \xi_{\text{扰动}} \xi_{\text{黏合}} ch \quad \circ \quad (28)$$

式中 $dA = 2\pi r dx$ ； $\sigma = \int_0^{2\pi r} \gamma x dy$ ； $\gamma = \rho g$ ； τ 为浆材抗剪强度； σ 为法向应力； γ 为浆体重度； φ 为摩擦角； c 为黏聚力； A 为柱面积； h 为管长； r 为管半径； $\xi_{\text{修正}}$ 为摩擦角修正系数； $\xi_{\text{黏合}}$ 为黏聚力修正系数； $\xi_{\text{扰动}}$ 为扰动系数。

(2) 试验确定参数

通过拔管试验确定 $\xi_{\text{黏合}}$ ， $\xi_{\text{修正}}$ 。试验通过小铁管模拟灌浆管，用弹簧秤测力。将管垂直放置，浆体倒至试验管指定深度，待浆体凝固后，均匀缓速竖直拔管，并测得拔管力，试验结果如图 9，10 所示。根据试验结果， $\xi_{\text{黏合}}$ 取 0.85 和 $\xi_{\text{修正}}$ 取 2.49。

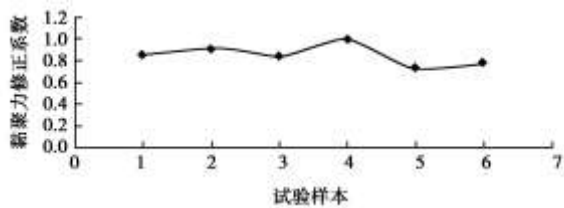


图 9 黏聚力修正系数试验结果

Fig. 9 Measured results of coherence correction factor

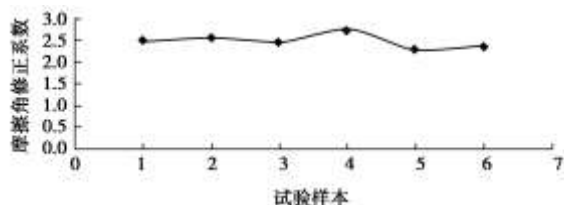


图 10 摩擦角修正系数实验结果

Fig. 10 Measured results of friction angle correction factor

通过扰动拔管试验确定扰动系数 $\xi_{扰动}$ 。实验方法与拔管试验相同，但在浆体凝固过程中，每隔一段时间轻微松动、旋转试验管。待浆体凝固后，测出拔管力，试验结果如图 11 所示。根据试验结果， $\xi_{扰动}$ 取 0.83。

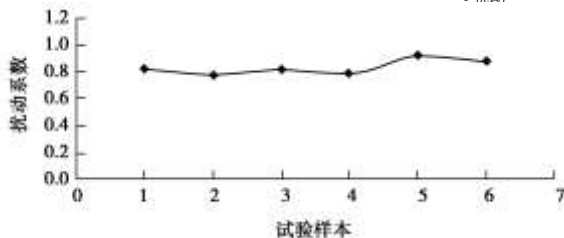


图 11 抗扰动系数试验结果

Fig. 11 Measured results of disturbance-rejection factor

根据浆体实际抗剪强度等参数，合理选取各项修正系数后，可以推求出不同深度下拔管力的大小。

3.2 方法二

参照抗拔桩承载力的计算方法，估算起拔灌浆管的拔管力^[14]，采用复合剪切面破坏形态，仅考虑侧壁界面上发生的圆柱形浆体剪切破坏。极限承载力 P_u 计算公式为

$$P_u = P_s + W_p \quad (29)$$

其中， W_p 为有效自重， P_s 为侧黏滞力。

$$P_s = \lambda_1 \pi d \left(\int_0^{L_1} \lambda_2 q_s dz + \int_{L_1}^L q_s dz \right) \quad (30)$$

式中 d 为有效直径； L_1 为端阻阻影响区的长度； L 为孔内灌浆管长； λ_1 为侧阻折减系数，取 0.8； λ_2 为端阻对侧阻的影响系数，取 1/2 ~ 2/3； q_s 为单位极限侧黏滞力。

3.3 计算结果比较

当孔深为 0~20 m 时，全孔注入封孔浆体；当孔深大于 20 m 时，从灌浆管眼出口处以上注入 20 m 深封孔浆体，进行拔管力计算，结果如表 4 所示。

表 4 不同深度下的拔管力

Table 4 Calculated values of pulling force at different depths

| 孔深/m | 封孔长度/m | 拔管力/t | |
|------|--------|-------|-------|
| | | 方法一 | 方法二 |
| 1 | 1 | 0.43 | 0.37 |
| 5 | 5 | 2.57 | 1.83 |
| 10 | 10 | 6.18 | 3.65 |
| 20 | 20 | 10.87 | 7.31 |
| 40 | 20 | 19.77 | 14.62 |
| 60 | 20 | 28.67 | 21.93 |
| 80 | 20 | 37.57 | 29.24 |
| 100 | 20 | 46.47 | 36.55 |
| 120 | 20 | 55.36 | 43.86 |

两种方法计算得出的拔管力相差较小，取大值做为工程依据，即在灌浆施工中，可以使用 60 t 的拔管机，或者采用边灌浆边旋转灌浆管工艺，消除封孔浆体对灌浆管的胶结力，使施工过程更加简捷、高效。

4 封孔浆体应用原型试验

4.1 原型试验场地

原型试验研究场地选在怀化托口水电站河湾地块白土冲靠近上层灌浆平洞洞口区域（以红层为主的松软地层），采用“自下而上，浆体封闭，高压脉动灌浆”新工法进行试验。其中浅层灌浆试验设 5 孔（包括 I 序 2 孔，II 序 1 孔，III 序 2 孔），孔深 8 m，脉动压力灌注膏浆或稀浆；深层灌浆试验设 3 孔（包括 I 序 2 孔，II 序 1 孔），孔深 120 m，脉动压力灌注膏浆，灌浆孔布置如图 12 所示。记录孔口处灌浆压力（非有效灌浆压力），深孔取其中二序孔 2-II-1 数据进行分析。

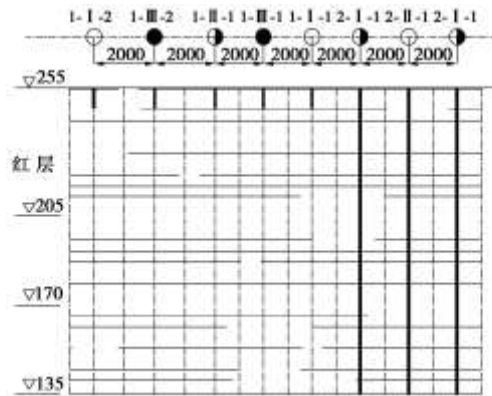


图 12 托口水电站河湾地块灌浆试验布置图

Fig. 12 Layout of grouting in bay area of Tuokou Hydropower Station

4.2 封孔工艺

钻孔→下灌浆管→封孔浆体搅拌、泵送至灌浆孔内→泵送风或灌浆材料，防止灌浆管内多余的封孔浆体堵塞灌浆管（深孔灌浆中可在封孔浆体待凝过程中实施灌浆管旋转工艺）→待凝→浆体达到强度后开始灌浆，边灌边转→达到控制标准，提管进行下一段灌浆。见图 13，14。

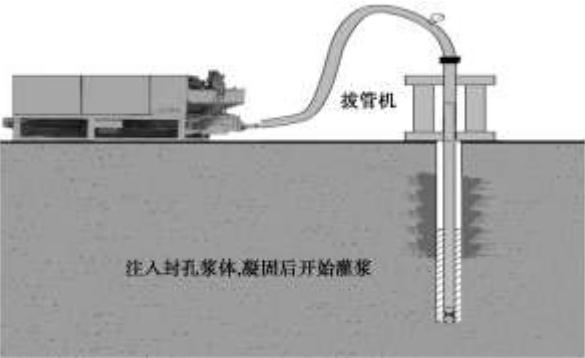


图 13 灌浆示意图

Fig. 13 Schematic diagram of grouting

4.3 应用效果

(1) 浅层灌浆封孔浆体应用效果

从表 5 可以看出, 封孔浆体在浅层灌浆中能承受 1.5 MPa 以上的孔口灌浆压力, 达到 2.5 MPa 时出现孔口冒浆, 如图 15 所示, 说明该材料在浅层灌浆中能承受高压、止浆效果好。

表 5 封孔浆体浅层灌浆现场实验记录

Table 5 Records of field tests on stemming slurry materials in shallow hole

| 孔序 | 孔深/m | 灌浆段长/m | 浆液类型 | 脉动灌浆压力/MPa | 单位灌入量/(L m ⁻¹) |
|---------|------|--------|------|------------|----------------------------|
| 1-I-1 | 8 | 7 | 膏浆 | 1.8 | 400 |
| 1-I-2 | 8 | 7 | 膏浆 | 1.7 | 400 |
| 1-II-1 | 8 | 7 | 稀浆 | 1.5 | 600 |
| 1-III-1 | 8 | 7 | 稀浆 | 1.6 | 550 |
| 1-III-2 | 8 | 7 | 稀、膏 | 2.5 | 350 |



图 14 施工中的封孔浆体

Fig. 14 Stemming slurry materials in construction



图 15 地面冒浆

Fig. 15 Slurry migration from land-surface

(2) 深层灌浆封孔浆体应用效果

从表 6 可以看出, 相比常规工艺在松散地层深孔灌浆中出现的不起压、耗浆大的情况, 现场试验中的封孔浆体在深层灌浆各灌段最大压力达到 5.2 MPa 以

上, 灌浆压力达到 8.0 MPa 时出现孔口冒浆一次, 且灌浆量可控。证明该工艺在深孔灌浆中可代替袖阀管, 并能自下而上连续灌浆, 提高工效, 节约成本。

表 6 封孔浆体深层灌浆现场实验记录 (2-II-1 孔)

Table 6 Records of field tests on stemming slurry materials in deep area (2-II-1)

| 孔深/m | 灌浆段长/m | 脉动灌浆压力/MPa | 单位灌入量/(L m ⁻¹) |
|------|--------|------------|----------------------------|
| 40 | 20 | 6.0 | 400 |
| 60 | 20 | 5.2 | 450 |
| 80 | 20 | 6.2 | 400 |
| 100 | 20 | 7.2 | 350 |
| 120 | 20 | 8.0 | 300 |

经使用本研究介绍的新工艺灌浆, 灌前最大吕荣值达 23 LU 的地层, 灌后全部降至 5 LU 以下, 地面抬动仅为 12 mm, 灌浆质量达到设计要求。

5 结 语

本文针对研究提出的新工艺“自下而上, 浆体封闭, 高压脉动灌浆”, 就其中的“浆体封闭技术”展开研究, 在封孔浆体材料研制及其性能研究的基础上, 通过封孔机理分析、效果论证及施工所需拔管力计算, 从理论上论证浆体封闭技术的可行性。通过怀化托口水电站河湾地块浅部松软红层原型灌浆试验, 表明该技术达到了预期效果。

理论研究和工程实践表明, 在松软地层实施高压灌浆, 采用浆体封闭技术是可行的, 研制的封孔浆体性能能满足施工工艺要求。下一步将在其他地层展开推广应用研究。

致 谢: 本研究成果是五凌电力有限公司、中国水电顾问集团中南勘测设计研究院、长沙理工大学、湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司共同完成取得的, 感谢所有参加研究的课题组成员和现场施工的技术工人。

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 - 61. (ZHOU Shi-jin. Casing pipe wall protection solving the problem of looses strata drilling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999(4): 59 - 61. (in Chinese))

[2] 彭 振, 杜世长, 罗伟峰. 用打管灌浆法处理桥基沉降[J]. 水利天地, 1998(3): 36 - 37. (PENG Zheng, DU Shi-chang, LOU Wei-feng. Treat subsidence of bridge foundation by method of beating tube grouting[J]. Water World, 1998(3): 36 - 37. (in Chinese))

[3] 张民庆, 黄平先, 常记春. 袖阀管注浆工法在国内工程施工中的应用[J]. 探矿工程, 1999, 15(5): 19 - 21. (ZHANG

- Min-qing, HUANG Ping-xian, HANG Ji-chun. Application of sleeve valve barrel grouting in construction in domestic foundation engineering[J]. Exploration Engineering, 1999, 15(5): 19 - 21. (in Chinese))
- [4] 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. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (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. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 赵顺升. 高压灌浆的止浆措施[J]. 水利水电技术, 1983, 12(7): 45. (ZHAO Shun-sheng. High pressure grouting for grouting measures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1983, 12(7): 45. (in Chinese))
- [6] 赵晓明, 韩贵雷, 于同超. 帷幕注浆工程中止浆塞的应用[J]. 矿业工程, 2010, 8(6): 60 - 61. (ZHAO Xiao-ming, HAN Gui-lei, YU Tong-chao. Application of grouting plug in super curtain grouting project[J]. Mining Engineering, 2010, 8(6): 60 - 61. (in Chinese))
- [7] 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): 28 - 29. (FENG Hai-ming. Application of grouting plug in covered karst grouting project[J]. Geotechnical Engineering Technology, 1998, 2(1): 28 - 29. (in Chinese))
- [8] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997. (ZHOU Shi-ning, LIN Bo-quan. Coal seam gas occurrence and flow theory [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [9] 何书建. 新庄煤矿二煤层瓦斯赋存规律及瓦斯灾害防治研究科研报告[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2002. (HE Shu-jian. Tow coal seam gas of Xinzhuang coal mine occurrence regularity and gas hazard prevention research scientific research report[R]. Xuzhou: China Mining University, 2002. (in Chinese))
- [10] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992. (YU Qi-xiang. Prevention and control of main gas[M]. Xuzhou: China Mining University Press, 1992. (in Chinese))
- [11] 顾新宇, 刘建宇, 马尚权, 等. 钻孔质量及黏液性质对主动式封孔测压效果的影响[J]. 煤炭工程, 2010, 4(1): 69 - 71. (GU Xin-yu, LIU Jian-yu, MA Shang-quan, et al. Quality of drilling and mucus property influence on active sealing pressure[J]. Coal Project, 2010, 4(1): 69 - 71. (in Chinese))
- [12] 张顶立, 李治国, 张民庆. 圆梁山隧道高压富水区帷幕注浆及止浆技术[J]. 中国铁道科学, 2004, 3(6): 27 - 31. (ZHANG Dind-li, LI Zhi-guo, ZHANG Ming-qing. High pressure and rich water zone in yuanliangshan tunnel curtain grouting and occluding technique[J]. China Railway Science, 2004, 3(6): 27 - 31. (in Chinese))
- [13] 蒋斗寅. 厚壁圆筒强度计算问题的探讨[J]. 机械设计, 1990(1): 47 - 50. (JIANG Dou-yan. Discussion of computatipn of strength for thick walled cylinder[J]. Journal of Machine Design, 1990(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [14] 张正雨, 尹 晔. 抗拔桩和抗压桩的机理分析及承载力计算[J]. 山西建筑, 2009, 5(9): 118 - 119. (ZHANG Zheng-yu, YIN Ye. Mechanism analysis and bearing capacity calculation of uplift resistance of piles and pile[J]. Shanxi Building, 2009, 5(9): 118 - 119. (in Chinese))

第五届中日岩土工程会议二号通知

主办单位

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 日本地盘工学
会。

承办单位

北京航空航天大学; 清华大学; 成都理工大学

会议主题

岩土工程新进展

会议专题

①地下空间技术; ②环境岩土工程; ③地基处理; ④防灾
减灾; ⑤桩基工程; ⑥隧道工程; ⑦地震工程; ⑧土的特性及
其模拟; ⑨数值模拟; ⑩“3.11”日本大地震引发的岩土工程
问题。

重要日期

提交摘要截止日期: 2012 年 3 月 31 日, 摘要录用通知日
期: 2012 年 4 月 30 日, 提交全文截止日期: 2012 年 7 月 31
日, 论文录用通知日期: 2012 年 8 月 15 日, 修改稿提交截止
日期: 2012 年 08 月 31 日, 会议时间: 2012 年 10 月 11~12
日, 会议地点: 成都(峨眉山, 峨眉山温泉饭店, 峨眉山市报
国寺风景区)。

(1) 尚未提交摘要的作者可直接提交全文(.Doc 和.PDF
文件)

(2) 论文格式按照本次会议版式排版, 会议论文版式请
在会议网站下载([Http://hw030052.chinaw3.com/symposium/
important_detas.html](http://hw030052.chinaw3.com/symposium/important_detas.html))。

(3)所有论文将正式出版,第三届中日工程会议已被 ISTP 检索,本次会议争取 ISTP 检索。

论文投稿及其他事宜

联系人: 胡伟 (电话: 18628195933, E-mail: huwei1999@

gmail.com); 投稿邮箱: sinojapanconf5@163.com; 地址: 成都市成华区二仙桥东三路一号成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室; 邮编: 610059。

(大会组委会 供稿)