

注浆扩散与浆液若干基本性能研究

Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts

阮文军^{1, 2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 长春工程学院 岩土与道桥工程系, 吉林 长春 130021)

摘要: 浆液流型、流变参数的时变性、可灌性、塑性强度和可重复注浆性是影响浆液扩散的基本性能。试验表明, 各种浆液分别属于三种不同流型; 水泥基浆液在注浆过程中流型不变; 浆液粘度的时变性规律符合指数函数。研制了平板裂隙注浆装置进行试验, 结果表明, 普通水泥浆的最小可灌裂隙宽度并非 0.18 mm 或 0.2 mm。在重复注浆时, 后注浆液克服先注浆液的粘聚力, 在流道中间冲开新通道继续注入, 而不是推动先注浆液向前整体移动。“塑性强度”概念可以推广到一般浆液, 用这一指标可以预知浆液的可注期。基于以上试验研究成果, 尤其是粘度时变性规律, 建立了稳定性浆液注浆扩散模型。

关键词: 注浆扩散模型; 浆液性能; 流型; 时变性; 塑性强度; 可注性

中图分类号: TV 543⁺.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)01-0069-05

作者简介: 阮文军(1969-), 男, 辽宁建平人, 副教授, 同济大学土木工程博士后。主要研究注浆理论与工艺。

RUAN Wen-jun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical & Road and Bridge Engineering, Changchun 130021, China)

Abstract: Flow pattern, time-varying behavior of rheological parameters, groutability, plastic strength and re-groutability of grouts are properties influencing the diffusion of grouts. Test result indicates that the flow pattern of grouts can be classified into three types, namely Newtonian fluid, Bingham fluid and Power law fluid. The time-varying behavior of grouts conforms to exponential function, and the flow pattern of cement-based grouts does not change during grouting. Grouting and back grouting tests are conducted with a simulation grouting device, verifying that the minimal groutable breadth of fissures are not 0.18mm or 0.20mm but changeable with different water-cement ratio, and the grouts can force a new way in the flow path during back grouting as long as the pressure of back grouting is larger than the cohesion of grouts previously injected into the fissures, rather than push them forward as a whole. In addition, the concept of plastic strength is proposed to predict groutability period of grouts. Based on these achievements, especially on time-varying behavior of viscosity of grouts, the author develops a grout diffusion model.

Key words: grout diffusion model; property of grout; flow pattern; time-varying behavior; plastic strength; groutability

0 前言

利用有限的已知条件(地质条件和施工工艺参数)预测注浆范围, 对指导注浆施工意义重大。鉴于这些条件的复杂性, 人们将某些条件简化后进行研究, 建立了若干注浆扩散模型。这些注浆扩散理论可以分为两大类, 即未考虑时变性的注浆扩散理论和考虑时变性的注浆扩散理论。Baker^[1]和 Lombardi G 分别推导出了牛顿流体和宾汉流体在裂隙中注浆的最大扩散半径^[2]。Wittke W^[3], Wallner 和 ДИПАК Э Я 的公式^[4]与隆巴迪公式相似。杨晓东^[5], 刘嘉材^[6]也分别推导了未考虑时变性的注浆扩散公式。Hassler, 葛家良, 郑长成等人则得到了时变性流体的流动规律^[7-9]。从这些理论可以看出: 浆液流型、流变参数的时变性、可灌性、浆液的可重复注入性(可注性)对浆液扩散半径有重大影响。

目前研究中存在的问题是: ①对浆液流型的判定

不够准确。浆液流型是建立注浆扩散模型的前提, 有些注浆理论把各种浆液划归到了某一种单一流型的做法值得商榷; ②流变参数时变性还需深入研究。浆液粘度和动切力有无时变性对计算注浆扩散半径影响很大。若考虑时变性, 则浆液扩散半径会小得多。但有些注浆扩散理论恰恰忽略了浆液粘度的时变性, 在建立注浆扩散模型时采用的粘度固定为初始粘度值。这样计算出的理论扩散半径显然远大于实际值, 与之相关的注浆孔距和排距也不合理, 用于指导施工时很难保证注浆效果; ③对于浆液可灌性和可重复注入性, 仍有值得深入研究的内容。

1 浆液的流变性

对以下浆液进行了流型判定和时变性研究: 水泥浆(水灰比 $W/C=0.5\sim 10.0$)、水泥粘土浆、水泥复合

浆液、丙凝、丙烯酸盐浆液、木质素浆液、环氧树脂浆液、聚合物水泥浆。

1.1 浆液的流型

文献^[5, 10~12]对浆液流型进行了研究,但在浆液流型判定上看法不一。有的认为水泥浆属于牛顿流体,有的认为符合宾汉流体,还有的认为符合幂律模型。笔者对此进行了比较系统的试验,以便深入探索和加以澄清。试验结果见图 1, 2。通过流变曲线拟合出流变方程,并判定出浆液流型。结果见表 1。

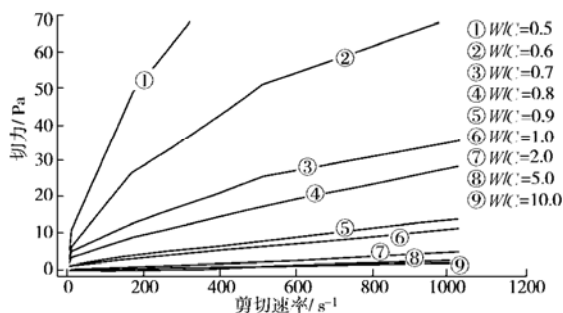


图 1 各种水灰比水泥浆的流变曲线

Fig. 1 Rheological behavior of cement grouts with different water-cement ratios

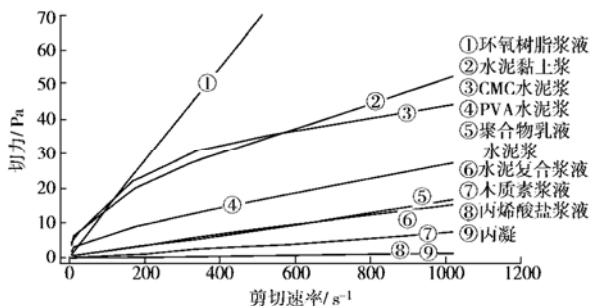


图 2 水泥基浆液和化学浆液的流变曲线

Fig. 2 Rheological behavior of cement-based grouts and chemical grouts

试验结果表明:①纯水泥浆的流型分属 3 种不同流型,而不是某种单一流型。水灰比为 0.5~0.7 的水泥浆是幂律流体, $W/C=0.8\sim1.0$ 的水泥浆是宾汉流体, $W/C=2.0\sim10.0$ 的水泥浆是牛顿流体;②水泥粘土浆液和水泥复合浆液是宾汉流体;③水泥浆由幂律流体向宾汉流体转化的临界水灰比是 0.7,由宾汉流体向牛顿流体转化的临界水灰比为 1.0。

试验还发现:①当减水剂加量超过 2%时,水灰比大于 0.5 的纯水泥浆全部变为牛顿流体;②对水泥粘土浆液而言,随减水剂或水灰比的增加,浆液将向牛顿流体转化;随着粘土加量的增加,浆液向宾汉流体方向发展。

1.2 浆液流型随时间的变化情况

前人在建立注浆扩散模型时将“流型不变”作为一个重要假设提出来,却大多未加验证。本文进行了大量试验,其中一个试验结果见图 3。经函数拟合后发现,虽然在注浆过程中浆液粘度逐渐增大,但流型却保持不变。这就证实了“流型不变”假设的正确性。

经本文试验证明“流型不变”的浆液有:水泥浆(水灰比为 0.5~10)、水泥粘土浆、水泥复合浆液、丙凝、丙烯酸盐浆液、木质素浆液、环氧树脂浆液。

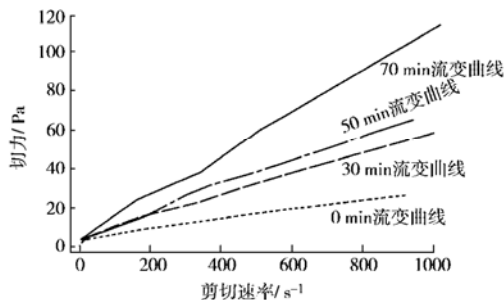


图 3 水泥浆 (W/C=0.8) 在不同时刻的流变曲线

Fig. 3 Rheological behavior of cement grout at different time (W/C=0.8)

表 1 浆液流变方程和所属流型

Table 1 Rheological equations and flow patterns of grouts

浆液名称		流变方程	浆液所属流型
水泥浆	$W/C=0.5$	$\tau=14.43 \gamma^{0.0027}$	幂律流体
	$W/C=0.6$	$\tau=8.632 \gamma^{0.0026}$	
	$W/C=0.7$	$\tau=5.826 \gamma^{0.0022}$	
	$W/C=0.8$	$\tau=5.321+0.0229 \gamma$	宾汉流体
	$W/C=0.9$	$\tau=1.884+0.0119 \gamma$	
	$W/C=1.0$	$\tau=1.563+0.0096 \gamma$	
	$W/C=2.0$	$\tau=0.0372+0.0047 \gamma$	牛顿流体
	$W/C=5.0$	$\tau=0.088+0.0027 \gamma$	
	$W/C=10.0$	$\tau=0.0454+0.0019 \gamma$	
水泥基浆液	水泥粘土浆液	$\tau=6.126+0.0478 \gamma$	宾汉流体
	水泥复合浆液	$\tau=0.666+0.0146 \gamma$	

1.3 流变参数的时变性

很多注浆扩散理论忽略了流变参数的时变性。为将时变性规律用于建立注浆扩散模型，本文在文献[5，13~16]的研究基础上，对各种典型浆液进行了试验，结果见图 4，5（只列出部分试验结果）。

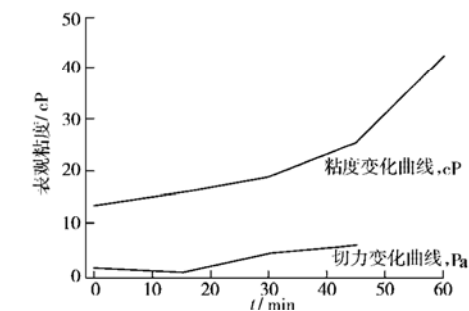


图 4 水泥复合浆液粘度和切力时变曲线
Fig. 4 Development of viscosity and shear of composite cement grout

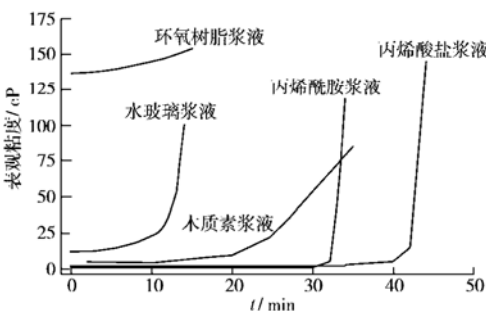


图 5 化学浆液粘度时变性
Fig. 5 Time-varying behavior of viscosity of chemical grouts

将各种浆液的时变曲线进行函数拟合后，得到如下结果，见表 2。

从上述试验结果得到两个重要结论：①浆液在凝

固前其粘度存在时变性，变化规律符合指数函数 $\eta(t)=\eta_{p0}e^{kt}$ ；②水泥基浆液的动切力随时间变化不大，可认为 $\tau_0(t)\approx\tau_0(0)$ 。

2 浆液的可灌性

研制了平板裂隙注浆装置，对水泥浆最小可灌裂隙宽度、地下水稀释、裂隙倾角的影响等问题进行了试验研究。部分试验结果见表 3。从中可知：①普通水泥浆最小可灌裂隙宽度并非定值，而与水灰比密切相关。当水灰比为 0.8 以上时，最小可灌裂隙宽度为 0.1 mm；而当水灰比为 0.5 时，最小可灌裂隙宽度只有 0.4 mm，即使加大注浆压力也无法注入；②虽然裂隙中的静水压力在注浆初期对浆液有短暂稀释作用，但在注浆过程中的稀释作用较小；③裂隙倾角对注浆有重要影响，在注浆模型中应予考虑。

3 浆液的可注性（可重复注浆性）

注浆实践还表明，很多浆液（除了水泥水玻璃等速凝浆液外）可以重复注入，重复注浆甚至成了常用注浆工艺。这是因为，注入裂隙内的浆液凝结体受到足够大外界压力的推动后仍可流动变形。但是工程中对可注性的定量研究不够。

浆液的可注性可用塑性强度和可注期来描述。文献[21]针对粘土固化浆液提出可重复注浆的两个度量指标塑性强度（Plastic Strength, P_s ）和可注期。塑性强度（ P_s ）表征的是浆液在凝固过程中塑性凝结体的抗剪切能力。可注期是自浆液配好到浆液塑性强度达到临界值这段时间。

表 2 各种浆液的粘度时变性函数

Table 2 Functions of time-varying behavior of the viscosity of the grouts

序号	浆液名称	粘度时变性方程	序号	浆液名称	粘度时变性方程
1	水泥浆（W/C=0.5）	$\eta_{05}(t)=70.2e^{0.00874t}$	8	水泥粘土浆	$\eta_{smt}(t)=32.27e^{0.017t}$
2	水泥浆（W/C=0.6）	$\eta_{06}(t)=36.53e^{0.0151t}$	9	水泥复合浆液	$\eta_{snh}(t)=12.33e^{0.018t}$
3	水泥浆（W/C=0.7）	$\eta_{07}(t)=19.67e^{0.0178t}$	10	环氧树脂浆液	$\eta_{hysz}(t)=135.5e^{0.0079t}$
4	水泥浆（W/C=0.8）	$\eta_{08}(t)=19.9e^{0.0233t}$	11	木质素浆液	$\eta_{mu}(t)=2.581e^{0.0894t}$
5	水泥浆（W/C=0.9）	$\eta_{09}(t)=13.51e^{0.0332t}$	12	丙凝	$\eta_{bn}(t)=0.737e^{0.0885t}$
6	水泥浆（W/C=1.0）	$\eta_{1}(t)=11.37e^{0.0138t}$	13	丙烯酸盐浆液	$\eta_{bx}(t)=1.101e^{0.0604t}$
7	水泥浆（W/C=2.0）	$\eta_{2}(t)=10.24e^{0.0178t}$	14	水玻璃浆液	$\eta_{sbl}(t)=8.271e^{0.1256t}$

表 3 最小可灌裂隙宽度试验结果

Table 3 Test result of minimal breadth of groutable fracture			
水泥浆水灰比	W/C=0.5	W/C=0.8	W/C=1.0
裂隙宽度 0.1 mm	不进浆, 水泥颗粒堆积在注浆口周围	可灌时间 1.5 min, 灌浆流量为 0.053 l/min	完全可灌, 灌浆流量为 0.125~0.35 l/min
裂隙宽度 0.4 mm	可灌时间 0.8 min, 灌注距离 1.9 m	—	完全可灌, 灌浆流量为 1.19~1.82 l/min

注: 采用吉林亚泰 32.5R 普硅水泥, 灌注压力为 0.1 MPa。

笔者认为, 可将这一概念推广到一般浆液中。本文试验证明, 可注期在数值上介于浆液可泵期和初凝时间之间, 对一般浆液(速凝浆液除外)均可测试出这一指标。实验室临界值可定为 50 kPa。当浆液塑性强度超过临界值时, 在后注浆液的压力作用下裂隙中先注浆液凝结体的剪切变形很小, 就不能重复注浆了。

塑性强度的测定没有专用仪器。笔者参考文献 [17], 采用了 GB/T1346-2001 中的试锥维卡仪。测试结果见图 6。可以看出, 随着水灰比增大, 水泥浆 P_s 增长速度显著变慢。

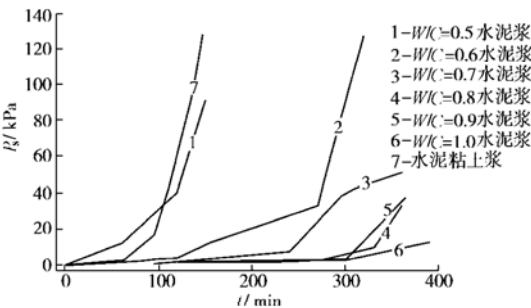


图 6 水泥浆和水泥粘土浆液塑性强度曲线

Fig. 6 P_s of cement grouts and cement-bentonite grout

研究了减水剂对水泥浆塑性强度的影响。由图 7 可知, 在减水剂加量范围内 (0~1%), 随减水剂加量增加, 浆液塑性强度增长变快。

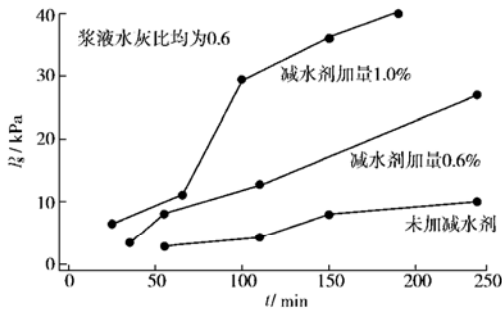


图 7 减水剂对水泥浆 P_s 的影响

Fig. 7 The effect of water-reducing agent on P_s

笔者还研究了浆液在注浆过程和重复注浆过程中的流动形态。试验发现, 在注浆过程中, 随着注浆时间的延长, 流道逐渐变窄, 流道两侧出现一定宽度的沉积区。注浆结束间隔一段时间后进行重复注浆时, 后注浆液可在注浆流道中间冲开一条较窄的新流道向

前流动。这说明, 在重复注浆时, 后注的浆液不是推动先注浆液整体前移, 而是克服裂隙中先注浆液的内聚力, 在流道中间阻力较小处流动。见图 8。

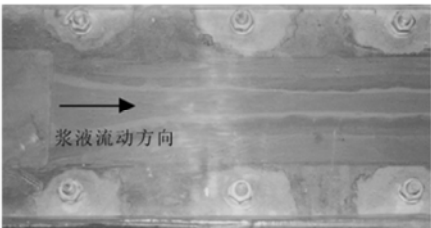


图 8 重复注浆试验中流道内的浆液形态

Fig.8 Cement grout in the flow path during back grouting

试验表明, 不同类型或配方的浆液其可注期不同。由于现有注浆工程尚未利用这一指标指导施工, 因此这一指标的意义在于, 工程中可将这一指标设定为必测指标, 通过现场试验便可预先了解浆液的可注期限和重复注浆间隔时间。这对施工是很有意义的。

4 基于粘度时变性的注浆扩散模型

基于以上研究, 并考虑裂隙等效宽度、裂隙角度、注浆压力、地下静水压力等因素, 建立了稳定性浆液注浆扩散模型。曾用于两个水利注浆工程, 预测的注浆半径与实际值接近。理论建模和工程应用情况见文献[18]。注浆扩散公式如下:

$$T = -\frac{1}{k} \ln \left\{ 1 - \frac{\eta(0)k[\Phi(R) - \Phi(r_c) + \Psi(R) - \Psi(r_c)]}{\frac{\tau_0 b A}{2}(R - r_c) - \frac{b^2}{12} - \frac{8\tau_0^3 A}{3b}(R - r_c)} \right\},$$

式中
$$\Phi(R) = \frac{A \ln r_c}{B^2} [(1 + BR) - \ln(1 + BR)] - \frac{AR(\ln R - 1)}{B} + \frac{A}{B^2} \ln R \ln(1 + BR);$$

$$\Phi(r_c) = \frac{A \ln r_c}{B^2} [(1 + Br_c) - \ln(1 + Br_c)] - \frac{Ar_c(\ln r_c - 1)}{B} + \frac{A}{B^2} \ln r_c \ln(1 + Br_c);$$

$$\Psi(R) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{AB^{n-2}}{n^2} R^n;$$

$$\Psi(r_c) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{AB^{n-2}}{n^2} r_c^n; \quad A = \frac{1}{p_c - p_w};$$

$$B = \frac{\rho g \sin \alpha \cos \theta}{p_c - p_w};$$

R 为浆液最大扩散半径; T 为注浆时间; b 为裂隙等效水力开度; r_c 为钻孔半径; η , τ_0 为浆液初始粘度和动切力; k 为粘度增长指数; α , θ 为裂隙倾角和方位角; p_c 为裂隙入口处的有效注浆压力; p_w 为地下静水压力。

5 结 语

试验和分析表明, 各种浆液分属三种不同流型; 水泥基浆液在注浆过程中流型不变; 浆液粘度的时变性规律符合指数函数: $\eta(t) = \eta_{p0} e^{kt}$; 水泥基浆液的动切力无明显时变性; 室内可灌性试验表明, 普通水泥浆的最小可灌裂隙宽度受水灰比影响, 是一个变量; 塑性强度指标可推广到一般浆液, 在浆液塑性强度达到临界值前可重复注浆。应用该指标的意义在于预知浆液可灌期。

参考文献:

- [1] Baker C. Comments on paper 'Rock Stabilization in Rock Mechanics'[A]. Muler, Springer-Verlag NY, 1974.
- [2] Lombardi G. 水泥灌浆浆液是稠好还是稀好[A]. 现代灌浆技术译文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 76 - 81.
- [3] Wittke W. 采用膏状稠水泥浆灌浆新技术[A]. 现代灌浆技术译文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 48 - 58.
- [4] 基帕科 Д Я, 等. 大喀斯特溶洞的注浆堵水[J]. 剑万禧译. 世界煤炭技术, 1986, (2).
- [5] 杨晓东, 刘嘉材. 水泥浆材灌入能力研究[A]. 中国水利水电科学院科学研究论文集 (第 27 集) [C]. 北京: 水利电力出版社, 1987, 184 - 191.
- [6] 刘嘉材. 裂缝灌浆扩散半径研究[A]. 中国水利水电科学院科学研究论文集 (第 8 集) [C]. 北京: 水利出版社, 1982, 186-195.
- [7] Hassler L, et al. Simulation of grouting in jointed rock[A]. Proc 6th Int Conf on Rock Mech[C]. 1987.
- [8] 葛家良, 等. 基岩结构面特征及其注浆浆液扩散的 GJL 二维模型[A]. 广州化学增刊: 全国基岩与混凝土裂缝化学灌浆处理学术研讨会论文集[C]. 2002, 27.
- [9] 郑长成. 裂隙岩体灌浆的模拟研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1999.
- [10] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.
- [11] Charles E. Rheological evaluation of cement slurries methods and models[A]. S P E 9284[C]. 1980.
- [12] Ivan Odler. Oil Cemento[M]. 1978, 303 - 309.
- [13] Ish-shalom M, Greenberg S A. The Rheology of Fresh Portland Cement Pastes[A]. Proceedings of 4th International Symposium Chemistry Cement[C]. 1960, 721.
- [14] 杜嘉鸿, 秦明武, 肖荣久. 国外化学注浆教程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [15] 坪井直道. 化学注浆法的实际应用[M]. 吴永宽译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.
- [16] 广州化学研究所. 大坝化学灌浆技术经验选编[M]. 北京: 水利电力出版社, 1997: 187 - 199.
- [17] 王星华. 粘土固化浆液在地下工程中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [18] 阮文军. 浆液基本性能与岩体裂隙注浆扩散研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003.