

# 水泥浆的流变性及其对浆液运动的影响

曾祥熹 郑长成

(中南工业大学, 湖南省长沙市, 410083)

**摘要** 概括地分析了现有水泥浆流变性的研究成果, 采用模拟计算方法, 就浆液流变性对灌浆的影响程度作了定量评价。认为新拌水泥浆, 可近似看作是 1 种与时间有关的粘塑性流体, 浆液的动切力、塑性粘度和水化速度对其扩散距离都有着不同程度的影响。

**关键词** 灌浆; 时变性浆液; 流变性

**分类号** TU 502<sup>+</sup>. 3; TU 502<sup>+</sup>. 4

浆液在受注地层内的扩散距离, 决定着灌浆工程的质量和成本, 因而是灌浆施工中需要准确控制的重要参数。而浆液的运动除了受地质和工艺因素影响外, 还与浆液本身的流变特征有着密切的关系。浆液的流变性又因浆液的类型不同而有所差异。对于使用最广泛的水泥浆而言, 目前大多是将其视为宾汉流体。Lombardi 曾讨论过宾汉流体的内聚力在灌浆中的作用<sup>[1]</sup>。近 10 多年来, 对水泥浆流变性的研究有了一些新的进展。越来越多的证据表明, 宾汉流型忽略了水泥浆的时变性这一重要特征。本文拟对这些研究成果作一概括性的分析, 以加深对水泥浆流变规律的认识, 然后用模拟计算方法, 就浆液流变性可能对灌浆结果的影响程度作出评价。

## 1 水泥浆的流变模型

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(内聚力), 只有当剪切应力超过其屈服应力时, 悬浊液才能流动。水泥浆不仅是悬浊液, 而且还具有化学活性, 水泥颗粒的水化过程对浆液的流变性有较明显的影响。

Umlauf 曾利用锥-板粘度仪, 测得一种水灰比为 0.8 的超细水泥浆(MC-500) 在拌制后立即作出 30 min 和 60 min 的流变曲线<sup>[2]</sup>。曲线的形状反映了超细水泥浆是一种带屈服值的剪切稀释流体。不同时刻测得的流变曲线不重合, 在相同的剪切速率下, 剪切应力随时间的延长而增大, 说明超细水泥浆具有明显的振凝性。但在拌制后的一个小时内, 对应于不同时刻的流变曲线的形状没有大的差别, 即浆液的流变模型没有改变。

许多研究者的测试结果表明, 水泥浆流变曲线的形状与浆液的含水量密切相关<sup>[3,6]</sup>。水灰

比( $W/C < 0.5$ )的浓稠普硅水泥浆是一种具有较高内聚力的剪切稀释流体,而稀浆( $W/C > 2$ )却近似为牛顿流体。当 $0.55 < W/C < 2$ 时,新拌普硅水泥浆仍具有一定的内聚力,但剪切稀释现象已不明显。由于 $0.6 \sim 2$ 的水灰比是灌浆中最常采用的,因此可以认为,就某一特定的时刻而言,新拌普硅水泥浆具有粘塑性流体的特征。

Shroff 等人曾测得过含有速凝剂的普硅水泥浆和含有塑化剂的超细水泥浆的流变曲线<sup>[4,5]</sup>。据他们的测试结果,速凝剂除了增大浆液的内聚力和表观粘度、加速水泥的水化进程外,还能明显地加强浆液的剪切稀释性。塑化剂虽显著降低浆液的内聚力,但流变曲线的形状没有大的改变。Umlauf 的测试结果也说明了这一点。

不同品种的水泥具有不同的比表面积和矿物成分,因而具有不同的水化反应速度,其浆液所表现出的流变特征也有所差异。从现有研究成果看,超细水泥浆通常具有一定程度的剪切稀释现象,而对于灌浆中可能用到的普硅水泥、矿渣水泥和抗硫酸盐水泥等的新拌浆液,当水灰比大于 $0.5$ 时,剪切稀释现象都不明显<sup>[6]</sup>。

从以上分析可以看出,在灌浆中用的常规水灰比范围内,新拌水泥浆最显著的流变特征是具有结构强度和时间的依赖性,而剪切稀释现象仅在部分浆液中存在。鉴于目前对同一浆液在不同时刻测得的流变曲线的形状基本相同,故可假定在可灌期内,水泥浆的流变模型保持不变,其流变特征的时变性仅仅表现为流变参数随时间而变化。这样,可以用下列线性方程来近似描述水泥浆的流变模型:

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

式中 $\tau$ 和 $\dot{\gamma}$ 分别表示剪切应力和应变率; $\tau_0(t)$ 和 $\mu_p(t)$ 分别定义为随水化时间 $t$ 而变化的动切力和塑性粘度,这两个参数在某一特定时刻的取值方法,与粘塑性流体的动切力和塑性粘度的确定方法相同。

## 2 流变参数与水化时间的关系

由式(1)可知,要确定某种浆液的流变方程,还必须确定其流变参数 $\tau_0(t)$ 和 $\mu_p(t)$ 随时间的变化规律。由于一个灌段的施工时间一般只有 $2 \sim 3$  h,故就研究浆液扩散过程的角度而言,只需考察浆液在拌制后 $2 \sim 3$  h内,在持续剪切条件下,流变参数随时间的变化情况。

很明显,流变参数与时间的关系、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有关。而水化反应速度又取决于水泥的品种、水灰比、外加剂和拌和水温等多种因素。因此,浆液的配比不同,其流变参数的时变规律也不同。

杨晓东等人曾利用旋转粘度计对一种普硅水泥浆作过测试,得到了水灰比为 $0.5$ 和 $0.75$ 的浆液在拌制后 $6$  h内的动切力和塑性粘度<sup>[7]</sup>。根据他们测试的结果,动切力和塑性粘度都大致与水化时间呈幂函数关系。Shalom 和 Greenberg 也测得过相似的变化曲线<sup>[6]</sup>。

对于超细水泥浆,Hakansson 等人曾利用不同的水泥品种和不同的外加剂,对 $W/C = 1$ 的浆液作过详细测试,得到了大量的动切力和塑性粘度随水化时间的变化曲线<sup>[8]</sup>。这些曲线的形状,大体可分为直线型、幂函数型和指数函数型三类。Jenkins 等人对另一种超细水泥浆的流变参数作过大量测试<sup>[9]</sup>,若将他们所发表的实验数据绘成曲线,也都大致呈直线或幂律型。

此外,Shroff 等人也测得过多种水灰比和外加剂的普硅和超细水泥浆的流变参数随时间的变化曲线<sup>[5]</sup>,他们测得的曲线大都呈指数型。

从现有研究成果看, 浆液的流变参数随水化时间的延长而增大的现象, 并非都是从拌制后开始的, 有些中、高水灰比的水泥净浆, 往往要经过几十分钟至 2 小时后流变参数才开始变化。而一些加有塑化剂的浆液常常在拌制后流变参数就开始增大, 且初期的增大速率较快。

基于以上分析, 可以将水泥浆的流变参数与水化时间的关系归纳为两类: 幂函数关系(包括线性关系)和指数函数关系。

如果将浆液拌制后其塑性粘度和动切力开始变化的时间, 分别记为  $t_{01}$  和  $t_{02}$ , 则幂函数关系可用下式表达:

$$\begin{cases} \mu_p(t) = \mu_p(0) & (t \leq t_{01}) \\ \mu_p(t) = \mu_p(0) [1 + d_1(t - t_{01})^{\lambda_1}] & (t > t_{01}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau_0(t) = \tau_0(0) & (t \leq t_{02}) \\ \tau_0(t) = \tau_0(0) [1 + d_2(t - t_{02})^{\lambda_2}] & (t > t_{02}) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\mu_p(0)$  和  $\tau_0(0)$  分别为塑性粘度和动切力的初值;  $d_1$ ,  $d_2$  和  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  均为实验常数, 其大小与时间的单位有关。

对于指数函数关系, 塑性粘度和动切力与时间的关系可表达为:

$$\begin{cases} \mu_p(t) = \mu_p(0) & (t \leq t_{01}) \\ \mu_p(t) = \mu_p(0) e^{\lambda_1(t - t_{01})} & (t > t_{01}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tau_0(t) = \tau_0(0) & (t \leq t_{02}) \\ \tau_0(t) = \tau_0(0) e^{\lambda_2(t - t_{02})} & (t > t_{02}) \end{cases} \quad (5)$$

式中符号意义同前。

### 3 流变性对灌浆过程和结果的影响

由于水泥浆的时间依赖性, 决定了浆液的物性在灌浆过程中的不断变化。笔者曾以裂隙岩体灌浆为例, 推导了时变性、粘塑性流体在裂隙中的锋面运移方程<sup>[10]</sup>, 并编制了模拟这种流体运动的通用程序<sup>[11]</sup>。下面利用该程序, 对具有不同流变特征浆液的运动过程进行实时模拟。模拟中取裂隙的等效水力开度为 0.5 mm, 闭浆标准为: 灌浆压力达到闭浆压力、进浆量小于闭浆流量后, 持续 15 min 结束。

#### 3.1 动切力和塑性粘度的影响

为了从理论上分别评价动切力和塑性粘度在灌浆中的作用, 现分别取如下两组浆液: 第一组浆液具有相同的塑性粘度  $\mu_p = 10 \text{ cP}$  ( $1\text{P} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{S}$ ), 而动切力分别为 3, 4.5 和 6 MPa; 第二组浆液具有相同的动切力  $\tau_0 = 4.5 \text{ Pa}$ , 塑性粘度分别为 5, 10, 15 cP ( $1\text{P} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{S}$ )。假定在灌浆期内这两组浆液的流变参数均不随时间变化。取闭浆压力为 1 MPa, 闭浆流量为 20 L/min。模拟结果绘于图 1 和图 2。

从图 1 和图 2 可以看出, 浆液的动切力和塑性粘度对扩散距离均有明显的影响, 其中动切力的影响尤为显著。随着动切力或塑性粘度的降低, 浆液的最终扩散距离加大, 但灌浆历时相应延长。这一结果表明, 目前关于“动切力决定着浆液的扩散距离, 而塑性粘度决定灌浆所需的时间”的认识是片面的。事实上, 扩散距离和灌浆历时主要取决于动切力的高低, 同时也与浆液的塑性粘度有关。因此, 降低浆液的动切力, 可以显著地改善浆液的可灌性。相反, 提高浆液的动切力, 可以有效地避免浆液的大量流失。

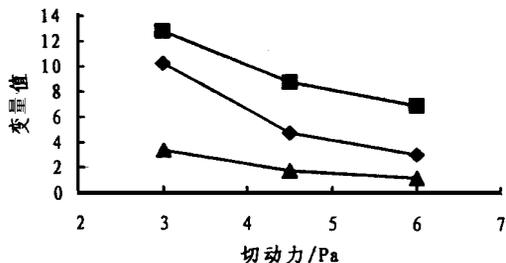


图1 动切力对灌浆结果的影响

Figure 1 The effect of yield stress on grouting results.

· 灌浆历时/10 min; · 扩散距离/m; · 注入体积

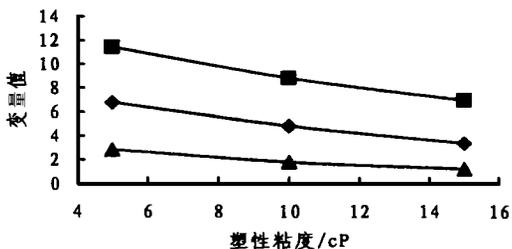


图2 塑性粘度对灌浆结果的影响

Figure 2 The effect of plastic viscosity on grouting results.

· 灌浆历时/10 min; · 扩散距离/m; · 注入体积

### 3.2 水化反应速度的影响

取某种水灰比分别为 1 和 0.75 的超细水泥浆(编号分别为①和②),在拌制后各时刻所测得的流变参数,分别列于表 1 和表 2 中<sup>[9]</sup>。

表 1 ①号浆液的流变参数

Table 1 The rheology parameter for grout No. 1

时间/min	15~30	60	120	180
塑性粘度/cP	20	20	20	20
动切力/Pa	2	5	5	6

表 2 ②号浆液的流变参数

Table 2 The rheology parameter for grout No. 2

时间/min	15~30	60	120	180
塑性粘度/cP	20	40	50	60
动切力/Pa	8	17	22	26

表 1 和表 2 的流变参数与水化时间的关系近似呈幂律型(除①号浆液的塑性粘度不变外)。将测试数据输入计算机后,计算程序按选定的幂函数关系作回归分析,确定式(2)和式(3)中的  $d_1, d_2$  和  $\lambda_1, \lambda_2$ , 然后作浆液物性变化与锋面运移的耦合模拟。为反映浆液的时变性和对扩散距离的影响程度,对每种浆液都作了不考虑时变性的对比计算。模拟结果见表 3。表中的结果是在闭浆压力分别为 1 MPa(①号浆液)和 3 MPa(②号浆液)、闭浆流量均为 20 L/min 的工艺参数下求得的。

表 3 流变参数的时变性对灌浆结果的影响

Table 3 The effect of Time-dependent of rheology parameter on grouting results.

浆液编号	流变特征	扩散距离/m	吸浆量/m <sup>3</sup>	灌浆历时/min
①	时变	8.415	1.64	50.6
	恒定	9.569	2.01	67.6
②	时变	14.243	3.954	96.2
	恒定	16.362	5.125	137.2

就表 3 中的数据而言,考虑浆液的时变性所计算出的扩散距离,比不考虑这一因素的计算值小 14% 左右,而吸浆量则减小了 22.6% 和 29.6%。很明显,忽略浆液的时变性所引起的扩

散距离和吸浆量的计算误差的大小, 与浆液的水化速度和灌浆时间有关。对于某些流变参数变化较快的浆液, 在灌浆设计时, 必须考虑浆液时变性的影响。

## 4 结论

从现有研究成果看, 水泥浆是一种随着时间延长, 内聚力不断增大的剪切稀释流体, 在拌制后的一个小时内, 其流变模型没有本质的改变。模拟计算表明, 动切力是决定浆液扩散距离的主要因素, 而塑性粘度以及浆液的水化速度, 对扩散距离也有不可忽视的影响, 在配浆时应予综合考虑。

## 参 考 文 献

- 1 Lombardi G. The role of cohesion in cement grouting of rock. Fifteenth Cong. Large Dams. 1985, 3( Q58, R13)
- 2 Unlauf R. Rheological characterization of microfine cement suspension – Examination with a shear stress controller rheometer. Grouting in Rock and Concrete, Widmann(ed), Balkema, Rotterdam, 1993
- 3 Littlejohn G S. Design of cement based grouts. Pro. Conf. on Grouting in Geotechnical Engineering. ASCE. 1982
- 4 Stroff A V and Shah D L. Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction. Balkema. Rotterdam, 1993
- 5 Stroff A V et al. Rheological properties of microfine cement dust grouts. Grouting and Deep Mixing, Balkema, 1996
- 6 曾祥熹, 陈志超主编. 钻孔护壁堵漏原理. 北京: 地质出版社, 1986
- 7 杨晓东等. 水泥浆材灌入能力的研究. 水利水电科学研究院科学研究论文集第 27 集, 1985
- 8 Hakansson U et al. Rheological properties of microfine cement grouts. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, 7(4)
- 9 Jenkins S J et al. The rheology and bleed properties of Blue Circle H900 Microfine cement for grouting purposes. Grouting in the Ground, Thomas Telford, London, 1994
- 10 郑长成, 曾祥熹, 黄树勋. 时变性浆液径向扩散流的模拟研究. 矿业研究与开发, 1999, 19(1)
- 11 郑长成. 裂隙岩体灌浆的模拟研究: [学位论文]. 长沙: 中南工业大学, 1999

# The Rheology of Cement Grouts and It's Effect on Grout Penetrating

Zeng Xiangxi      Zheng Changcheng

(Central South University of Technology, Changsha, Hunan, 410083)

**Abstract** The current research results on rheology of cement grouts is generally analyzed. And by computer simulating, the effect of grout rheology on grouting is evaluated. The authors consider that cement grouts can be approximately regarded as time-dependent viscoplastic fluids, and their penetrating radii in rock mass are related to the yield stress, plastic viscosity and hydraulic speed.

**Key Words** grouting; time-dependent grout; rheology