

稳定性

水泥浆体

岩体

裂隙

流动性

69-74

# 稳定性水泥浆体在岩体裂隙中的流动性能及其灌浆技术\*

TVS43.1

张金接

(水利水电科学研究院岩土所)

## 提 要

本文根据对浆体在裂隙中的运动规律理论分析,并结合室内试验成果,对稳定性水泥浆体的流动能力(流动性及流动性维持能力)进行了研讨,掌握这类浆体的特殊灌浆性能对于灌浆技术的控制尤为重要,所得结论已经数例工程应用验证。

## 一、前 言

随着水电建设事业的发展,坝基灌浆无论是灌浆材料还是灌浆工艺都有了较大发展。工程实践中不断认识到,对于中等透水性以上的裂隙岩体(如 $\omega > 0.1L/min.m$ ),采用8:1开灌的常规水泥灌浆方法,由于浆液的不稳定、析水分层而影响对裂隙的灌注及效果;压力析水增加灌浆时间、浆材往往流失较远均影响灌浆经济性。相对而言,水泥基稳定性浆液研究和在岩基灌浆中的应用是近期才开始的<sup>[1]</sup>。稳定性水泥浆体在一般概念上是指浆液析水率不超过2—5%。文献[1]中对普通水泥浆体的改性手段进行了试验研究,并论证了稳定性浆体对裂隙岩体的可灌性,指出在一定的制浆手段前提下,低含水稳定性水泥浆体具备大水灰比浆液相当的可灌性。据此,稳定性水泥浆体在一定类型的工程中有着广阔的应用前景。为充分利用稳定性水泥浆体的良好灌浆性能,对灌浆控制技术的研究显得尤为重要。本文就这类浆体在裂隙中的流动性能进行了探讨,以指导灌浆施工。

## 二、稳定性水泥浆体的流动能力

对于粒状材料组成的浆液悬浮体系,其流动能力包括浆体的流动性和流动性维持能力。流动性指浆体在一定压力梯度作用下流动的难易,流动性维持能力是指浆体在运动过程中其特性(稳定性、流动性)维持不变的能力。

(一)流动性 浆体的流动性愈高,则浆体在流动过程中的压力损失愈小,浆体在裂隙中扩散愈容易。浆体的流动性本质上取决于其流变特性,即在灌浆过程中浆体内部及浆体与裂隙面之间产生的阻力的性质(大小、类型)。常规灌浆材料的流动型式可粗略地分为牛顿

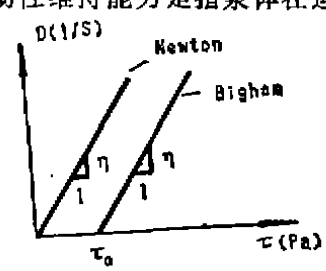


图1 流变曲线

\* 本文于1991年9月5日收到。

(Newton)型和宾汉(Bingham)型,图1表示了两大类浆液的流变曲线。

式(1)及式(2)表示了两大类浆体的流变(本构)方程:

牛顿体: 
$$\tau = \eta \frac{dv}{dz}, \quad (1)$$

宾汉体: 
$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dz}. \quad (2)$$

溶液型浆体,如化学浆液,属于牛顿型,其流动性由浆体的粘度( $\eta$ )决定,粘度愈小,在裂隙中的渗透性愈好.文献[2]对于这类浆液在裂隙中的运动规律已进行了研究.粒状悬浮体系浆体,如泥浆、稳定性水泥浆属于宾汉型,其流动性由流变曲线上的两个参数:屈服强度( $\tau_0$ )和粘度( $\eta$ )决定,表1为不同配比的稳定性水泥浆液的流动性.

表1 浆液的流动性

配比编号	1	2	3	4	5	6	7	8	
水灰比	0.4				0.6				
掺合料(%)	—				3				
外加剂(%)	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5	
流变参数	$\tau_0$ (Pa)	25.9	17.1	8.2	4.8	39.4	14.3	8.4	2.4
	$\eta$ (Pa·s)	0.221	0.073	0.043	0.037	0.133	0.022	0.020	0.014

由浆体流变曲线可知,当作用于稳定性水泥浆体上剪切力小于屈服强度 $\tau_0$ 时,浆体静止不动,只有当剪切力超过屈服强度之后浆体才开始运动,并表现出类似于(在后面详细讨论)溶液型浆体的特性:剪切力越大,运动速率越大.与此同时,浆体流动性反映在 $\tau_0$ 及 $\eta$ 值的大小上,数值越小,浆体在流动过程中压力损失越小,扩散愈容易.如表1中8\*配比浆体较5\*浆体易于流动.

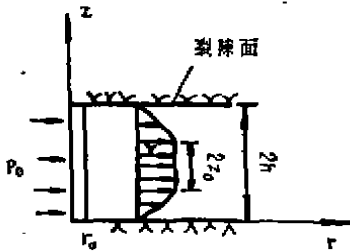


图2 浆体在裂隙中的流动

在二维平面等厚光滑裂隙中,宾汉型浆体在压力作用下产生流动,如图2示.

平衡方程: 
$$\frac{dp}{dr} - \frac{d\tau}{dz} = 0, \quad (3)$$

边界条件: 
$$z=h \text{ 时 } \tau=0,$$

$$z=h-z_0 \text{ 时 } \tau=\tau_0 \text{ (} 2z_0 \text{ 为塞流高度).}$$

引入边界条件和流变方程(2)对式(3)积分得:

$$\tau_0 = -\frac{dp}{dr} z_0. \quad (4)$$

浆体在裂隙中的压力分布及最终扩散范围理论上由式(5)求得.

$$P = P_0 - \frac{\tau_0}{h}(r-r_0), \quad (5a)$$

$$R = \frac{P_0 h}{\tau_0} + r_0 \quad (5b)$$

式中：P<sub>0</sub>为孔内裂隙面处压力；r<sub>0</sub>为钻孔半径；2h为裂隙宽度。

可见，屈服强度决定了浆体在裂隙中的流动范围。在一定的压力作用下，不同性能的浆体会有不同的扩散距离。在地质条件及灌浆工艺类同前提下，表1中3#及7#两种配比浆体有近似的扩散距离，室内钢平板二维等厚裂隙模型灌浆试验证明了这一结论。

表2为膨润土掺合料对浆体流动性的影响试验结果。可见，膨润土的掺入对浆体屈服强度τ<sub>0</sub>及粘度η有很大影响，其中屈服强度的改变更为可观。由式(5)可知，膨润土的掺入可较大地改变水泥基浆液在裂隙中的扩散范围，在实际工程中膨润土的应用主要是为此目的。

表2 掺合料对浆体性能的影响

水灰比	0.5					
分散剂掺量(%)	1.0					
膨润土掺量(%)	0	1.0	1.5	2.0	3.0	
流变参数	τ <sub>0</sub> (pa)	2.4	3.4	4.0	7.8	26.8
	η(pa.s)	0.0189	0.0181	0.0195	0.0320	0.0744

表1为分散剂对浆体流动性能的影响试验结果。同样地，分散剂的掺入对浆体屈服强度τ<sub>0</sub>和粘度η有较大改变。从试验结果可知，分散剂的掺入对浆体的τ<sub>0</sub>和η的改变幅度。当掺量小于0.5%时，对η影响更大，而当掺量超出0.5%时，对τ<sub>0</sub>的影响要大。不同配比浆体的这一临界掺量是有变化的。

综上所述，稳定性水泥浆体的流动性可以通过改变浆体配比来加以调节，膨润土及分散剂的掺入是有效手段，掺量应根据对浆体性能需要而进行试验选取。

(二) 流动性维持能力 非稳定性水泥浆体易于沉降析水分层，在灌注过程中浆液流动性能有较大变化，运动规律复杂，稳定性水泥浆体则克服了颗粒的沉降分层，完全可以按悬浮体系考虑。浆体流变性能试验曲线表明，同一材料配比的浆体在不同时间内的试验曲线不重合，在两曲线间存在一个环状带，这就是浆体所特有的一种性质——触变性。触变性是这样一种性质：随着剪切作用除去后时间的延长，粘度得到恢复，从本质而言触变指材料的“结构”破坏后再生的能力。

稳定性水泥浆体固有的这种特性在灌浆过程中表现为：

1. 提高了浆体的稳定性 在灌浆过程中，当浆体的运动速率减慢或停止运动时，浆体结构的恢复使得水泥颗粒不致分层沉淀，形成一悬浮体系。

2. 利于灌浆过程的控制 稳定性水泥浆体从灌浆泵到灌入裂隙的过程是如图3所示进行的，通过对触变性能的改变可控制浆体在裂隙中的运动。

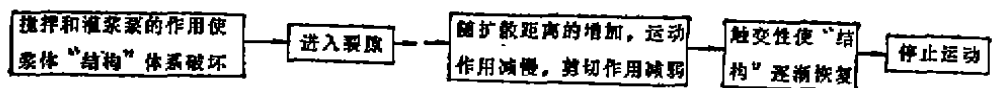


图3 浆体运动过程

3.特殊地层中的灌浆 在大裂隙或孔洞中灌浆,触变性可防止浆体流失过远,减少浆材的浪费;在地下水流速较大的地段灌浆,触变性可提高浆体的抗冲蚀能力。

已有试验结果表明,素水泥浆体的触变性较小,而以膨润土为掺合料的水泥基稳定性浆体则具备一定的触变性,并随掺量的增加触变性增强,分散剂则可减弱浆体固有的触变性能,实际工程中可调节材料配比而针对性地使浆体具有足够的触变性能。

(三)流动性控制理论分析和灌浆技术 由牛顿型浆液的流变方程式(1)可推得浆液在裂隙(2h)内流动时:

$$\text{流动速率} \quad v_N = \frac{I_r}{2\eta} (2hZ - Z^2), \quad (6)$$

$$\text{及单位流量} \quad q_N = \frac{\pi r (2h)^3}{6\eta} I_r, \quad (7)$$

式中:  $I_r$  为压力梯度,  $I_r = -\text{grad}\varphi = -\text{grad}(Z+P)$ , 其中:  $Z$  为位置势;  $P$  为压力势。

对于宾汉型浆体,如图2所示:

$$\text{当 } 2z_0 < 2h \text{ 时} \quad \bar{v}_B = \frac{(2h)^3}{12\eta} I_r \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{z_0}{h} + \frac{1}{2} \frac{z_0^3}{h^3} \right), \quad (8)$$

$$q_B = \frac{\pi r (2h)^3}{6\eta} I_r \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{z_0}{h} + \frac{1}{2} \frac{z_0^3}{h^3} \right); \quad (9)$$

当  $2z_0 = 2h$  时  $\bar{v}_B, q_B = 0$  浆体停止运动,

$$\text{由式(4)推得} \quad z_0 = \frac{\tau_0}{I_r}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)、(9)得:

$$\bar{v}_B = \frac{(2h)^3}{12\eta} \left( I_r - \frac{3}{2} \frac{\tau_0}{h} + \frac{1}{2} \frac{\tau_0^3}{h^3 I_r^2} \right), \quad (11)$$

$$q_B = \frac{\pi r (2h)^3}{6\eta} \left( I_r - \frac{3}{2} \frac{\tau_0}{h} + \frac{1}{2} \frac{\tau_0^3}{h^3 I_r^2} \right). \quad (12)$$

分析式(6)、(7)、(11)、(12),可知:

(1)对于牛顿型浆液,粘度 $\eta$ 影响浆液在裂隙中的运动速率,或者说 $\eta$ 影响灌浆过程的历时长短。对于宾汉型浆体,塑性粘度 $\eta$ 和屈服强度 $\tau_0$ 均影响浆体在裂隙中的平均运动速率,也就是说 $\eta$ 和 $\tau_0$ 都影响灌浆过程的历时长短。分别将以上诸等式进行对 $\eta$ 和(或) $\tau_0$ 的微分可知, $\eta$ 和(或) $\tau_0$ 的增加均会降低进浆速率,延长灌浆历时。

(2)对于牛顿型浆液,进浆速率与压力梯度 $I_r$ 呈线性关系,而对宾汉型浆体,进浆速率与压力梯度呈非线性关系。可见,宾汉型浆体在裂隙中的运动速率对于灌浆压力的控制更为敏感(较牛顿型浆液)。

综合前文所述,对于宾汉型稳定性水泥浆体在裂隙岩体中灌浆,我们应注意到:

(1)压力利用值偏高 由于稳定性水泥浆体相对非稳定性水泥浆体 $\eta$ 和 $\tau_0$ 值较大,假设两类浆体在某一范围的裂隙中具有同等充填能力,为了节省灌浆工时,并考虑到稳定性水泥浆体的抬动效应相对偏低<sup>[1]</sup>,以及尽量避免触变性的不利作用,所以稳定性水泥浆体灌浆压力利用值较常规水泥灌浆压力确定准则所规定的压力值应高些。进行压力设计时可参考式(5b)进行,并考虑浆体较大的触变性能所带来的不利流动的影

响。

(2) 压力控制技术更严格 稳定性水泥浆体具备图 3 所示的运动过程, 触变性对浆体在裂隙中的扩散有较大影响, 而且进浆速率与压力梯度间呈非线性关系, 所以为保证合格的灌浆质量, 应采用一次升压法, 在短时间内达到设计灌浆压力, 绝对保证灌浆的连续性。

(3) 结束过程快 由于浆体稳定性强、胶体率高, 在灌浆过程中不存在固结析水(或称压力析水)过程; 由于浆体对裂隙进行的是挤密堵塞, 并且触变性在充填过程中发挥较大的作用, 而不同非稳定性水泥浆体的颗粒沉淀充填机制, 所以说, 稳定性水泥浆体对裂隙的充填是“实实在在”的, 一旦达到最大扩散范围即刻拒浆, 显示出结束过程很快, 对于水泥灌浆规范提出的“灌浆结束延续时间”限制则可尽量减短, 甚至免除。

### 三、稳定性水泥浆体的灌浆

**实例一** 坝基岩体为正长岩, 风化不深, 但卸荷松弛现象显著。钻孔压水资料表明, 岩芯较为完整, 但存在相当数量的宽大裂隙。用常规水泥灌浆方法, 则浆材流失较远, 灌浆工效低。所以采用了稳定性较好的低水灰浆体, 并采用特殊的制浆手段, 即掺用外加剂和高效机械分散手段。

灌浆材料组成: 水灰比 $\leq 0.5$ ; 分散剂掺量 $0.5\sim 1.0\%$ 。灌浆成果如表 3 所示。

表 3 灌浆成果

孔段号	灌浆长 (m)	单位吸水率 (L/min·m)	灌浆压力 (Mpa)	耗浆量 (L)	耗灰量 (kg)	单位耗灰量 (kg/m)	灌浆历时 (min)
1-3	4.98	0.112	0.6	1754	1496	300.4	57
2-3	4.93	0.308	0.80	910	848	172.0	90
3-2	3.08	0.429	0.60	9247	10274	3335.7	300 (停灌 3 次)

分析原始灌浆记录可知:

(1) 2—3 孔段由于压力控制不当, 灌浆连续性不强, 导致后期(后 50min 内)的升压(0.2→0.8MPa)对灌浆过程几乎无改变(灌入量 $Q_{0.2}\sim Q_{0.8}=40L$ ), 灌浆量与压水试验值离差异性较大。

(2) 对 3—2 孔段, 若用触变性更强的浆体灌注, 则浆体不会流失过远, 灌浆工效会提高, 灌浆设计更趋合理。

(3) 在 1—3 孔段, 裂隙漏浆量虽较大, 但由于浆体对裂隙的适合性较好, 触变性及粘性作用发挥得当, 所以裂隙能在较短时间内得到充填。

**实例二** 岩石基础表层为强风化砂岩, 透水性较大。压水试验过程中, 当压力达 0.5MPa 时即产生劈裂破坏, 以往所进行的常规水泥灌浆, 最大设计灌浆压力仅用 0.2—0.3MPa, 本次灌浆试验用到 0.5—0.8MPa。

灌浆材料组成: 水灰比 0.5, 膨润土掺量 1—2%, 分散剂掺量 0.25—0.5%。灌浆成果如表 4 示。

表 4 灌 浆 成 果

孔段号	灌段长 (m)	单位吸水率 (L/min·m·m)	灌浆压力 (Mpa)	耗浆量 (L)	耗灰量 (kg)	单位耗灰量 (kg/m)	纯灌时间 (min)
5-1	1.00	1.643	0.50	198	238	238.0	78
3-1	1.43	2.384	0.60	440	530	370.6	50
9-2	3.50	0.067	0.70	470	475	135.7	101
9-3	5.00	0.237	0.85	1851	1022	204.4	100

在施工过程中,针对地层情况,所选用的灌浆材料可控性强,灌浆压力控制技术均采用一次升压法,保证灌浆的连续性,所以灌浆质量很好,材料浪费少。另外,实际工程中“灌浆结束”的延续时间较短,一般采用10—15min。对于透水性如此大的地层均在较短时间内达到灌浆结束标准而且质量合格,整个施工工效较高。

#### 四、结 语

1. 表现为宾汉体的稳定性水泥浆体在岩体裂隙中的运动规律不同于牛顿型浆液。屈服强度 $\tau$ , 决定被灌裂隙的最终灌入量, 塑性粘度 $\eta$ 和 $\tau$ , 均影响灌浆过程的历时长短, 进浆速率与压力梯度间呈非线性关系, 灌浆的结束过程很快, 所以, 对灌浆过程的分析和设计应采用新的概念。

2. 稳定性水泥浆体的灌浆压力利用值要高于常规水泥灌浆所采用值, 尽快达到设计灌浆压力, 绝对保证灌浆的连续性是确保灌浆质量的重要前提。

3. 稳定性水泥浆体的流动性和触变性可通过浆体配比的改变来加以调整, 针对地层情况来选择浆体配比可达到灌浆技术上和经济上的合理性。

#### 参 考 文 献

- [1] 张金接、刘嘉材, 低含水稳定性水泥浆体灌浆性能研究. 水利电力技术, 1991年第4期。
- [2] 刘嘉材, 裂隙灌浆扩散半径研究. 水利水电科学研究院科学研究论文集, 第8集, 1982年。
- [3] Deere, Don V. Lombardi, G, Grout slurries—thick or thin, issues in dam grouting. Proceedings of the Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the ASCE in Conjunction with the ASCE Convention in Denver, Colorado, April 30, 1985.

#### 本 刊 启 事

本刊自1980年复刊以来, 尚有少量库存, 读者如有需要, 请向本刊编辑部(100044 北京市车公庄西路20号)联系邮购, 价格优惠。