

水泥浆主要流变参数的确定与分析

⑧

郝永真

TV421.3

32-34

(西北水电工程勘察研究院, 甘肃 兰州 730030)

TV543

摘要:介绍塑性流体水泥浆的流变性及确定水泥浆主要流变参数的一般方法;分析旋转式粘度计与漏斗式粘度计在测定水泥浆塑性粘度、表观粘度时的区别,说明漏斗式粘度计在使用上的局限性;针对粘聚力(动切力)的测定进行分析,认为粘聚力与动切力为不同的概念,通过对水泥浆流变性分析,提出水泥浆充填机理,并对影响水泥浆扩散的主要因素,即粘度影响水泥浆在节理裂隙中向前扩散的速度,动切力限制水泥浆扩散距离作了说明。

关键词:水泥浆;塑性粘度;动切力;表观粘度;流变性;流变参数

中图分类号: TU526.42

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2000)04-0032-03

在水电工程中,灌浆由于能对大坝的基础起到防渗与加固作用,已普遍受到人们的重视。近年来,灌浆工艺已向多样化发展,如国外的GIN灌浆法,已在我国某些大型水电工程中得到了成功应用;水泥浆方面,人们开始注重应用单一比级中等浓度水泥浆,并通过往水泥浆中掺入膨润土、减水剂等外加剂,使其成为具有流动性强、分散性好、析水率低的稳定性水泥浆,这种水泥浆在应用中已被证明,具有传统配合比水泥浆不可比拟的优越性。尽管稳定水泥浆在灌浆中已被推广,但测定水泥浆参数的方法却有所不同,因此,介绍水泥浆流变参数的确定方法,并对不同测定方法进行探讨与分析十分必要。

1 水泥浆的流变性能

1.1 水泥浆的流变性

在外力作用下流体流动时,各层间流速是不同的,如图1所示,用 dx 表示层间距离, dv 表示层间流速增量,则 dv/dx 为流速梯度(剪切速率),层间流速不同导致层间产生内摩擦力,以阻碍层间的相对运动,此时流体具有粘滞性,其中内摩擦力 F 与流体性质有关,并与剪切速率 dv/dx 及层间接触面积 S 成正比,用公式可推导出剪切应力与粘度的关系式:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

令

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2a)$$

$$\eta = \tau / \frac{dv}{dx} \quad (2b)$$

式中: η 为粘滞系数,称为粘度; τ 为单位面积上的内摩擦力,即剪应力,简称切力。

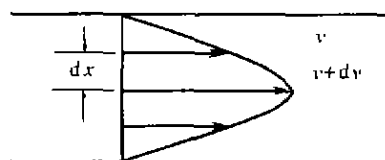


图1 流体流速分布

流体的流型有牛顿型、膨胀型、假塑性型、塑性型等,不同的流型流变性是不同的,一般认为,水泥浆是有结构的塑性流体(宾汉流体),图2是塑性流体的流变曲线和所代表的流态,现对其不同的流动阶段描述如下:

不流动段:当外切力 τ 小于 τ_c 时,水泥浆是不流动的;当外切力 τ 大于 τ_c 时,水泥浆才开始流动; τ_c 称为“静切力”或“凝胶强度”。

塞流段(ACB):表示粘度随外切力 τ 的增加而降低,水泥浆像圆塞一样移动。

层流段(BD):表示水泥浆粘度值不随外切力 τ 而变化,此时的粘度称为“塑性粘度”,用 η_p 表示,水泥浆呈层流态。 τ_d 为BD线的延长线与横坐标轴的交点,称为“动切力”或“屈服值”,由流变曲线BD段可得出宾汉公式:

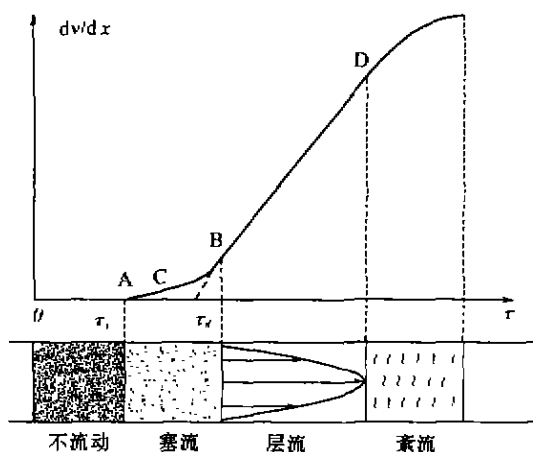


图2 塑性流型流变曲线和各种流动状态

$$\tau - \tau_d = \eta_p \frac{dv}{dx} \quad (3)$$

紊流段(D点后):流变曲线又变成曲线状,水泥浆呈紊流态^[1]。

1.2 影响水泥浆流变性的因素

以上是把水泥浆看作塑性流体,其流变曲线仅反映了水泥浆在外切力作用下,流体的流态及粘度的变化。但最近有关资料显示,把水泥浆统视为塑性流体是不妥的,同时发现流变性与水泥种类和水灰比有关,而且对于任何一种水泥来说,可能都有一个特性形态范围:对高早强水泥而言,水灰比大于或等于2.5:1的水泥浆可视为牛顿流体;水灰比在2.5:1至0.75:1范围内的水泥浆可视为塑性(宾汉)流体;而水灰比小于0.75:1的水泥浆表现为假塑性特征^①。试验证明,水灰比确实是影响水泥浆流变特征的主要因素。另外,影响水泥浆流变性的因素还有水泥浆的水化龄期、水泥熟料矿物中C₃A含量、水化温度、水泥外加剂等^[2]。

2 水泥浆流变性能主要参数的测量

水泥浆流变性能测量,主要是对水泥浆静切力、触变性、粘度、动切力、流性指数和稠度系数等的测量。一般测量的仪器有电动转筒式水泥浆静切力计、野外漏斗式粘度计、毛细管粘度计、旋转式粘度计等。以上多数仪器由于使用条件的不同,测量范围受到限制。

2.1 旋转式粘度计

旋转式粘度计有几十个不同的测量系统,适用范围广。测量水泥浆时,由于内筒或外筒的高速回转,能使水泥浆结构受到破坏,比较真实地反映水泥浆粘度变化,所以经常用它来测量水泥浆流变性。

测量水泥浆时,一般采用某一个测组,可连续记下不同转速的读数,在坐标纸上或双对数坐标纸上画出流变曲线。若用快速两点法(转速600 r/min及300 r/min)测量水泥浆时,以 φ_{600} 代表600 r/min时的读数, φ_{300} 代表300 r/min时的读数,则可得流变读数如下:

$$\eta_p = 0.001(\varphi_{600} - \varphi_{300})$$

$$\tau_d = 4.9(\varphi_{300} - \eta_p)$$

$$\eta_A = (0.001 \times \varphi_{600})/2$$

$$n = 3.321 \lg(\varphi_{600}/\varphi_{300})$$

$$k = 5\varphi_{300}/500^n$$

2.2 漏斗式粘度计

常用的漏斗式粘度计有马氏漏斗(Marsh Funnel)、梅开索漏斗(Mecasol Funnel)、普里帕克漏斗(Prepakt Funnel)等。测量水泥浆粘度时,用标准量杯(容积一般为1000 mL)把水泥浆倒入漏斗,其水泥浆流完所需时间,即为粘度。漏斗式粘度计测量水泥浆粘度方法大致相同,只是漏斗使用标准与外形尺寸不同而已,如使用马氏漏斗时,其规格应符合美国API标准规定,马氏漏斗在测量水泥浆粘度前应满足:加入1500 mL清水,流出时间须为(28 ± 0.5) s。若将式(3)代入式(2),可得出:

$$\eta = \eta_p + \tau_d / \frac{dv}{dx}$$

为区别于其它流体,将塑性流体粘度定义为 η_A ,并称为表观粘度(视粘度),即

$$\eta_A = \eta_p + \tau_d / \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

漏斗式粘度计的测量值是水泥浆的表观粘度 η_A ,由式(4)分析,在塑性流体 η_p 和 τ_d 为定值情况下, η_A 随 dv/dx 的增大而减小,在以往用旋转粘度计测试水泥浆时,也证实了这一规律,因此,塑性流体中,塑性粘度 η_p 为定值,而表观粘度 η_A 有多个数值,并受温度等其它外界因素影响。漏斗式粘度计结构简单,使用方便,仅适于现场应用,它只能反映某一条件下水泥浆的表观粘度,而不能反映主要水泥浆流变参数塑性粘度。另外,旋转粘度计和漏斗式粘度计测定水泥浆的表观粘度时区别在于:旋转粘度计在固定的流速梯度(600 r/min)下进行,测定不同水泥浆的表观粘度时有一个固定的基础,而漏斗式粘度计不能在固定的流速梯度下测定不同水泥浆的表观粘度。

2.3 粘聚力(动切力)的测量

粘聚力是1985年Deere和Lombardi提出并定义

①中国水利水电基础工程局编译,大坝基础灌浆,1995。

的,把它等同于动切力(隆巴迪.大坝水泥灌浆.中国水利水电基础工程局译.).

粘聚力的测试方法是:用 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的钢板,厚约 3.2 mm ,并在钢板表面上轻轻镂刻成条宽 1.6 mm 的交叉网格;在钢板的一侧边缘焊上一个钢棒或铜棒,以便将钢板浸入浆液试样中,在钢板浸入试样前后分别称量,以测定粘在板上浆液的重量,该重量除以钢板两面面积之和,即为粘聚力。

尽管粘聚力的测量受钢板光洁度、侵入水泥浆的时间及提出钢板速度的影响,误差较大;但粘聚力概念本身的提出,可以反映水泥浆粘附于具有糙度物体表面的能力,如果推理到灌浆裂隙表面上,这种粘聚力确实是影响水泥浆扩散的一个重要指标。但笔者认为,把粘聚力视为动切力是不妥的,因为动切力是水泥浆流变性中的一个理论值(假想值);从流变曲线上分析,它也是塞流向层流过渡时的一种切力,其结果是从流变曲线上求得,或从旋转粘度计的理论公式求得。因此,粘聚力与动切力在概念上是不相同的,而粘聚力、动切力的数值结果是否相近,有待通过实验进一步证实。

描述水泥浆参数的指标有多种,每一种指标都可以反映水泥浆的某一种特性。对塑性流体的水泥浆,至少应有塑性粘度、动切力两项指标;同样,对假塑性流体的水泥浆,应有稠度系数、流性指数指标。

3 研究水泥浆流变性的意义

对水泥浆的研究,在我国石油钻井中,由于水泥浆对固井、护壁与堵漏的作用,已从理论到实践形成了一套完整的体系;而在我国水电行业,对大坝基础灌浆的水泥浆研究还不够,通过对水泥浆的深入研究,有利于改进水泥浆配比和灌浆工艺。

3.1 提出水泥浆充填机理

以往,对水泥浆在裂隙中充填机理的解释,有两种学说,即“压迫滤水论”和“流动沉积论”。流动沉积论解释水泥浆充填机理的大意是:水泥浆在裂隙中流动时,随着水泥浆的不断扩散,由于沿途压力损失,水泥浆流态发生变化,水泥颗粒靠自重会沉积下来,进而凝结成水泥结石^[3]。显然,这种解释说明灌浆裂隙将永远不会填满,这与事实是不相符合的,也是违背灌浆初衷的。另外,近年来稳定水泥浆的成功应用,对“流动沉积论”也提出了质疑,因为稳定水泥浆是具有网状结构的分散性体系,有很好的沉降稳定性,其泌水率很低,水泥颗粒呈“拒绝沉积”特性。

通过分析水泥浆流变性,笔者认为,水泥浆充填机理其实就是水泥浆流变性的逆过程;对于塑性流体的水泥浆,其充填机理是水泥浆在裂隙中实现紊

流→层流→塞流→不流动的转变过程。参见图2,可以这样描述,当灌浆压力一定时,首先进入裂隙的水泥浆,由于外切力很大,水泥浆呈紊流态,并快速向外扩散,表现为裂隙吃浆量很大;随着水泥浆的扩散,外切力有所降低,水泥浆呈层流态,并继续向外扩散,表现为裂隙吃浆量较大;随着水泥浆的进一步扩散,当外切力小于水泥浆动切力 τ_d 时,水泥浆呈塞流状,并缓慢向外扩散,表现为裂隙吃浆量较小;扩散的水泥浆使得外切力继续下降,当外切力小于静切力 τ_s 时,水泥浆就不再流动,此时裂隙表现为不吃浆;不流动的水泥浆,在裂隙中将完成初凝、终凝等硬化过程,并充满整个裂隙通道。

3.2 确定影响水泥浆扩散的主要因素

近年来,国外灌浆工作者通过水泥浆流变性的研究,发现了影响水泥浆扩散的主要因素,即粘度影响水泥浆在节理裂隙中向前扩散的速度,动切力限制水泥浆扩散距离。粘度影响水泥浆扩散速度可通过公式得到证明,也就是说,粘度越大,其扩散速度越小,反之亦然;分析图2的流变曲线可知,限制水泥浆扩散距离的应该是静切力,而不是动切力,因为作用在水泥浆上的外切力必须克服水泥浆的静切力,否则,水泥浆将不会流动。水泥浆静切力越大,其扩散距离就越短。

3.3 为合理设计灌浆参数提供理论依据

了解与掌握水泥浆流变性,对灌浆设计者合理设计水泥浆参数、灌浆参数及灌浆工艺,可提供理论依据。如灌浆设计者可通过水泥浆参数,计算出灌浆管路沿程压力分布;掌握水泥浆在裂隙中的流态变化、水泥浆的扩散距离、水泥浆扩散速度、水泥浆的可泵性等;利用灌浆段的裂隙率、裂隙张开度、灌浆压力,可计算出灌浆帷幕厚度,水泥浆充填量等。设计者通过对不同参数的计算,可确定合理的设计参数,使灌浆施工在保证质量的前提下,最大程度地降低成本消耗,简化施工工艺。

参考文献:

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [2] 曾祥熹. 钻孔护壁堵漏原理[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [3] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京:水利电力出版社,1992.

(收稿日期:1999-01-12 编辑:张志琴)

