



关于注浆压力

及扩散半径计算方法的讨论

何 修 仁

有关注浆技术在矿山建设中的地位,应用及发展在以往的论著中已做过详尽的阐述。但是,有些理论问题研究得还不够透彻。本文拟就注浆压力和扩散半径问题进行讨论。

注浆压力除了与有关文献中所提出的地下水的静水压力,覆盖岩层的地质条件和厚度,注浆深度,注浆岩层的地质条件,注浆方式以及浆液粘度等因素有关外,还与注浆扩散半径有直接关系。浆液在岩体裂隙中先是发生扩散流动的机械运动,然后又发生凝结硬化的物化作用。通常把以钻孔中心为原点的浆液充填范围叫扩散半径。由于浆液在裂隙中的扩散实际上是不规则的,所以从理论上精确的计算扩散半径是很困难的。在注浆工程中常常采用经验数据,譬如我国矿山建设注浆中就采用下列经验值:当裂隙宽度在5毫米以下时浆液扩散半径取2米;裂隙宽度在5~30毫米时取4米;宽度

在30毫米以上时取6米。它们在不同程度上给注浆工程提示了具有一定参考价值的参数,然而从注浆理论研究的发展来看,这是不够的。

(一) 将注浆材料假定为牛顿流体的计算 这一假定的实质是把浆液材料视为服从牛顿粘度定律的均质真实液体,即:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn}$$

式中: τ ——液体剪切应力;

$\frac{du}{dn}$ ——速度梯度;

μ ——液体的动力粘度。

应用地下水动力学的达西定律推导注浆扩散半径和注浆压力计算公式时,有人认为浆液呈层流,有人认为浆液呈紊流。因此,公式各有不同,详见下表:

流 态	注浆方法	灌注方式	单位时间内的 注浆量公式	注浆扩散半径 计算公式	注浆压力计算公式
层流 当 $i = -\frac{dP}{dr}$ $V = K_f \cdot i$	定量注浆 $Q = \text{const}$ 压力逐渐 升高;	将注浆孔视为完整孔,呈柱面注入	$Q = \frac{2\pi \cdot K \cdot h \cdot (P_0 - P_R)}{\mu \ln \frac{R}{r_0}}$	$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot h \cdot n}}$	$P_0 - P_R = \frac{\mu \cdot Q \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi \cdot K \cdot h}$
		孔底点注浆	$Q = \frac{4\pi K \zeta (P_0 - P_R)}{\mu \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right)}$	$R = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{Q t}{\pi \cdot n \cdot \zeta}}$	$P_0 - P_R = \frac{\mu \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right) Q}{4\pi \cdot K \cdot \zeta}$
		将注浆孔视为不完整孔	$Q = \frac{2\pi \cdot K \cdot (P_0 - P_R)}{\left(\frac{h}{\ln \frac{R}{r_0}} + \frac{2\zeta}{r_0 - R} \right)}$	解方程 $R^3 + \frac{3h}{4\zeta} R^2 - \frac{3Qt}{4\pi \cdot n \cdot \zeta} = 0$	$P_0 - P_R = \frac{\mu \cdot Q}{2\pi K \left(\frac{h}{\ln \frac{R}{r_0}} + \frac{2\zeta}{r_0 - R} \right)}$

表中所列公式中的各符号意义为:

n ——岩层孔隙率;

ζ ——考虑注浆孔与不透水岩层或与井壁连通时的系数,取0.5~1;

h ——一次注入的岩层厚度;

R ——注浆扩散半径;

Q ——单位时间内的注浆量;

t ——注浆持续时间;

P_0 ——注浆孔内的注浆压力；

P_R ——当浆液扩散至 R 时的压力；

K ——岩层渗透系数，它只表征岩层的渗透能力；

i ——压力梯度。

如果认为浆液是以紊流状态向岩层中注入时，就要用达西定律的非线性法则： $V = K\sqrt{i}$ 或普洛恩法则：

$$i = \frac{V}{K_f} + \eta \left(\frac{V}{K_f} \right)^2$$

式中： V ——渗透速度；

K_f ——速度渗透系数，它既表征岩层也表征浆液的渗透特性；

$$K_f = \frac{K \cdot \gamma}{\mu}$$

式中： γ ——浆液的容量；

η ——非线性渗透系数；

$$\eta = \frac{\Delta P - \frac{Q}{2\pi K_f \cdot h} \ln \frac{r}{r_0}}{\left(\frac{Q}{2\pi K_f h} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right)}$$

上式中的 ΔP 表示注浆时半径 R 与 r_0 之间的压差， r 为观测孔与注浆孔之间距。则紊流时的计算公式为：

柱面注浆：

$$P_0 - P_R = \frac{Q \cdot \mu \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi \cdot K \cdot h} + \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{Q\mu}{2\pi Kh} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right)$$

点注浆：

$$P_0 - P_R = \frac{Q\mu}{4\pi \xi K} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right) + \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{Q \cdot \mu}{4\pi K \xi} \right)^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right)$$

不完整孔注浆：

$$P_0 - P_R = \frac{Q\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{(h + 2\xi r_0)R}{(h + 2\xi R)r_0} + \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{Q\mu}{2\pi Kh} \right)^2 \times \left[\frac{R - r_0}{Rr_0} - \frac{4\xi}{h} \ln \frac{(h + 2\xi r_0)R}{(h + 2\xi R)r_0} + \frac{4\xi^2(R - r_0)}{h^2 + 2\xi h(R + r_0) + 4\xi^2 Rr_0} \right]$$

当已知压力时便可计算扩散半径 R 值。这类公式适用于在一定时间内粘度实际上不改变，而在某一瞬间却突然改变的化学浆液，如丙烯酸胺类浆液。对

粘度逐渐改变的化学浆液如铝酸钠-水玻璃浆液就不适用了。1973年河南舞阳八台铁矿王道行出风井的铝酸钠-水玻璃化学注浆工程实践证明，砾石层扩散半径为 3 米，中粗砂层为 1.0~1.5 米，而细砂层才 0.4~0.5 米，如按上述公式计算在中粗砂中扩散半径为 6 米左右。因此，为采用这类公式对化学浆液要用平均粘度。至于水泥注浆扩散半径计算应用这类公式更脱离实际，因为，只有在流速为某确定值时才能将水泥浆视为牛顿液体。

(二) 将注浆材料假定为非牛顿液体的计算 这一假定的实质是，认为水泥浆是多相的悬浮液。当剪切应力未达到极限应力时，流体并不流动，一旦超过极限应力时液体便发生流动。称为什维多夫-宾厄姆塑性流动，流动方程为：

$$\tau = \mu_0 \frac{du}{dn} + \tau_0$$

式中： τ ——剪切应力；

μ_0 ——浆液的塑性粘度；

τ_0 ——极限剪切应力（近似的）。

在注浆过程中渗透系数 K_f 值是随时间反液流长度不同而不断变化的。因为浆液在裂隙中的流速及粘度在不断变化着， K_f 值如下式：

$$K_f = K \cdot \frac{\gamma}{\mu_0}$$

式中： μ_0 ——流体的有效粘度；其它符号同前。

$$\mu_0 = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\frac{du}{dn}}$$

利用这一方程推导出稳定性水泥浆在裂隙岩层注浆压力，扩散半径和流量之间的关系式。

层流柱面注浆，当 $Q = \text{const}$ ，

$$P_0 - P_R = \frac{\mu_0}{\alpha \cdot K} \left[\frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{R}{r_0} + BC_1 (R - r_0) \right]$$

层流孔底点注浆， $Q = \text{const}$ ，

$$P_0 - P_R = \frac{\mu_0}{\alpha \cdot K} \left(\frac{Q}{4\pi \xi R r_0} + BC_1 \right) (R - r_0)$$

式中： α ——无量纲系数， $\alpha = \frac{81.6}{A}$ ，

A ——实验系数；

$$110 \leq A \leq 115$$

$$B = \frac{\tau_0}{\mu_0}, C_1 = \frac{n \cdot b_0}{2}$$

b_0 ——裂隙的平均开裂度；

紊流柱面注浆， $Q = \text{const}$ ；

$$P_0 - P_R = \frac{\mu_0}{a \cdot K} \left[\frac{1Q}{2\pi h} \ln \frac{R}{r_0} + BC_1 (R - r_0) \right] + \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{1Q \cdot \mu_\infty}{2\pi a K h} \right)^2 \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right)$$

紊流孔底点注浆, $Q = \text{const}$,

$$P_0 - P_R = \frac{\mu_0}{a \cdot K} \left(\frac{Q}{4\pi \xi R r_0} + BC_1 \right) (R - r_0) + \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{Q \cdot \mu_\infty}{4\pi \xi a K} \right)^2 \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \right)$$

式中: μ_∞ ——当速度梯度非常大时的粘度, 其它符号均同前。

将这些公式与前述牛顿液体计算公式对比, 不难看出注浆压力消耗是由两部分组成的: 第一部分是为了克服浆液的粘性阻力的, 第二部分则是为克服塑性阻力的。第一部分与浆液消耗量有关, 第二部分与多相液体的流变性有关。公式既考虑了因流速变化而引起的粒度变化, 也考虑了粘度随时间的变化。这一计算方法针对水泥浆, 粘土浆假定条件符合实际, 推导也较严密。当浆液浓度在某确定范围内计算结果也符合实际。因而对注浆理论的发展有重要意义^[9]。存在的问题是: 1. 计算扩散半径时, 将其它已知数据代入公式后将得到 $aR^2 \ln R + bR - c = 0$ 的函数方程, 式中: a 、 b 、 c ——均为常数, 须用近似法求解; 2. 仍把岩层裂隙假定为均匀分布, 使计算结果有偏差; 3. 推导公式时没有考虑因水泥浆的两相性和水泥颗粒的不均匀性而引起的在注入过程中浆液的沉淀现象, 致使该公式只能在某确定的浓度范围内才适用, 影响了它的适用范围。

(三) 将注浆材料假定为不稳定悬浮液的计算 水泥浆中悬浮的固体颗粒直接影响浆液粘度及流动规律, 所以在计算扩散半径时要考虑固体颗粒的沉淀现象。把这种现象称为浆液的非稳定性。图1表明了当剪切应力和速度梯度不大时(即 $\tau < \tau_1$) 非稳定悬浮液为粘塑性液体, 随其流速的增快, 又可将粘塑性液体视为牛顿流体来讨论。图2为杜达充填模型。裂隙的被充填, 实际上是水力输送水泥颗粒的过程。把水力输送时液流不发生沉淀现象的最小流速称临界速度 V_{kp} 。随着裂隙中水泥颗粒的沉淀和液流有效断面的减小, 悬浮液的流速亦随着改变。当裂隙中非稳定水泥浆悬浮液的流态是由层流向紊流过渡或已呈紊流状态时并对应于流变曲线的 $\tau > \tau_1$ 段, 假定水泥浆并未发生沉

淀时, 则这个非稳定悬浮液仍可视作牛顿流体。

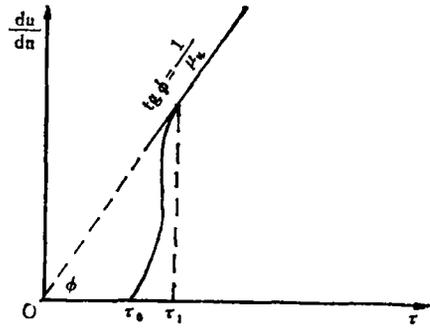


图1 非稳定水泥浆悬浮液的流变特性

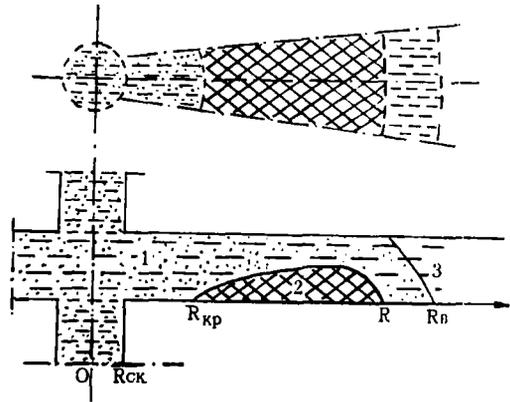


图2 杜达充填模型图

1—水泥浆悬浮液; 2—沉淀的固体颗粒;
3—滤过的液体。

浆液在裂隙中流动时水泥颗粒的沉淀现象由岩层渗透系数的变化来表示。为了描述在岩层裂隙中的非稳定水泥浆悬浮液的流动引用渗透理论的基本方程:

$$\begin{cases} \bar{V} = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dr} \\ \text{div} \bar{V} = 0 \end{cases}$$

式中: \bar{V} ——渗透速度;
 K ——渗透系数;
 μ ——动力粘度;
 P ——注浆压力。

渗透系数随 r 值的变化规律为:

$$K_f(r) = \begin{cases} K & \text{当 } R_{ck} \leq r \leq R_{kp}; \\ K \frac{R_{kp}}{r} & \text{当 } R_{kp} < r < R; \\ K & \text{当 } r > R \end{cases}$$

式中: K_f , K ——同前;
 R_{ck} ——注浆孔半径;

R_{kp} —— 开始沉淀时边缘线的半径;
 R —— 注浆扩散半径;
 r —— 半径的变量值。

注浆压力方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{K_f(r)}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr} \right) = 0$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_a & R_{ck} \leq r \leq R; \\ \mu_b & R < r \leq R_{kp}; \end{cases}$$

式中, μ_a 和 μ_b —— 分别为悬浮液和滤过后液体的动力粘度;

R_b —— 滤过后液体达到的边缘线半径。

由于 K_f 是分段函数, 压力值也应分段求解。它们

的解是:

$$\text{当 } R_{ck} \leq r \leq R_{kp}, \quad P_1 = P_{ck} + (A - P_{ck}) \frac{\ln \frac{r}{R_{ck}}}{\ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}}},$$

$$\text{当 } R_{kp} < r \leq R, \quad P_2 = A_1 + (A_2 - A_1) \frac{r - R_{kp}}{R - R_{kp}},$$

$$\text{当 } R < r \leq R_b, \quad P_3 = A_2 + (P_k - A_2) \frac{\ln \frac{r}{R}}{\ln \frac{R_b}{R}},$$

式中, P_{ck} , P_k —— 分别为注浆孔和周围的压力;
 A_1 , A_2 —— 待定常数;

$$A_1 = \frac{P_{ck} \cdot R \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \frac{R_b}{R} + P_{ck}(R - R_{kp}) + P_k \cdot P_{kp} \ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}}}{R \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \frac{R_b}{R} + R_{kp} \ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}} + R - R_{kp}}$$

$$A_2 = \frac{P_{ck} \cdot R \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \frac{R_b}{R} + P_k(R - R_{kp}) + P_k \cdot R_{kp} \cdot \ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}}}{R \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \frac{R_b}{R} + R_{kp} \cdot \ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}} + R - R_{kp}}$$

扩散半径可从解方程 $dP = -\frac{\mu Q}{2\pi h} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{r} dr$ 后得

$$R = \begin{cases} R_{kp} \left(1 + \frac{2\pi \cdot h \cdot K \cdot \Delta P}{\mu_a \cdot Q} + \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \sqrt{C} - \ln \frac{R_{kp}}{R_{ck}} \right); & \text{当 } R_{kp} \geq R_{ck} \\ R_{ck} \left[1 + \frac{R_{kp}}{R_{ck}} \left(\frac{2\pi h \cdot K \cdot \Delta P}{\mu_c \cdot Q} + \frac{\mu_b}{\mu_a} \ln \sqrt{C} \right) \right]; & \text{当 } R_{kp} < R_{ck} \end{cases}$$

式中, ΔP —— 沿液流长度的压差;

$$C = (\gamma_a - \gamma_b)(\gamma_0 - \gamma_b)$$

$\gamma_a, \gamma_b, \gamma_0$ —— 分别是岩层裂隙中悬浮液、水和沉淀物的容重; 其它符号同前。最后经简化得适于注浆工程用的计算公式:

$$R = R_{ck} + \frac{K \cdot \Delta P \cdot \gamma_b}{b \cdot \gamma_a \cdot \mu_b \sqrt{b_0 m_T}}$$

式中, b —— 试验系数, 灰水比为 1:1, 1:3 和 1:8 时, b 值分别为 8.5、5.1 和 3.1, 中间浓度用内插法确定 b 。

b_0 —— 裂隙平均开裂度;

m_T —— 岩层裂隙率。其它符号同前。

例: 某矿山井筒工作面预注浆工程, 已知裂隙渗透系数 $K = 50$ 达西 $\approx 50 \cdot 10^{-12} \text{米}^2$, 裂隙率 $m_T = 0.06$, 裂隙平均开裂度 $b_0 = 0.005$ 米, 钻孔中最终注浆压力 $P_{ck} = 40$ (公斤/厘米²) $\approx 4 \times 10^6$ (牛顿/米²), 岩层

中静水压力 $P_k = 10$ (公斤/厘米²) $\approx 10^6$ (牛顿/米²), 水泥浆悬浮液的灰水比 = 1:3, 浆液容重 $\gamma_a = 1.2$ (吨/米³), 搅拌水泥浆用水的动力粘度系数 $\mu_b = 0.00117$ (牛顿/厘米²), 水容重 $\gamma_b = 1$ (吨/米³), 注浆孔半径为 $R_{ck} = 0.05$ 米, 求浆液扩散半径 R 值。按上述公式将已知数据代入后得:

$$R = 0.05 + \frac{50 \times 10^{-12} \cdot 3 \times 10^6 \times 1}{5.1 \times 1.2 \times 0.00117 \times \sqrt{0.005 \times 0.06}} = 5.03 \text{米}$$

这一结果是接近实际的。它说明在水泥注浆时, 采用这种计算方法可以较准确的, 并符合实际的确定压力与注浆扩散半径的数值, 在确定的浆液浓度范围内用这种方法计算与用第二种方法计算结果非常接近。而这一方法可适用于任何浓度的水泥注浆工程。存在的问题是在推导公式时也把岩层裂隙视为均匀分布。另外, 该计算方法不适于化学注浆工程, 只适于水泥注浆。 (下转第34页)

压轴承的油腔，避免在工作时，活塞受径向力而拉缸。

6. 空打油垫（困油区）。在活塞中有一宽21毫米的突肩。当活塞向前冲击至死点位置，或后退至死点位置时，在中间缸套与后缸套处，均设有一个4毫米深的困油区，以防止凿岩机在空打时，活塞由于惯性力而超出限定行程，致使机器零件受到损坏。

7. 配合间隙。间隙与内泄是成立方比的。间隙大会降低凿岩机的效率，间隙虽小效率高，但会因油液中微小的污物而粘死。所以液压凿岩机的间隙是一关键而又互相矛盾的问题。

（1）缸套与缸体：FYYG-20 凿岩机采用以缸体孔为基准，缸套与缸体采用过渡配合。这在装卸缸套时，往往容易拉坏缸体。而AD-101的缸体与缸套采用一级精度动配合，其间隙为0.04毫米，其定位基准不在缸体而在缸套的止口上，这样易于加工、装卸，并能保证精度。

（2）活塞与缸套：活塞与前缸套的间隙是0.045毫米，与中间缸套的间隙为0.05毫米，与后缸套的间隙为0.085~0.09毫米。因后缸套的间隙较大，可以看作只是前、中两缸套支撑活塞的运动，避免产生静不定的问题。

（3）阀套与缸套的间隙是0.04毫米。

（4）阀套与活塞的间隙是5毫米，内孔只作为高低压油液的通道。这种结构的换向阀，尺寸精度要求不高，易于加工。

（三）凿岩机的技术参数

冲击频率	3400 (次/分)
冲击功	19.4(公斤·米)
钎柄转数	0~240(转/分)
最大扭矩	24.5 (公斤·米)
冲击压力	127.5(公斤/厘米 ²)
冲击流量	127(升/分)
回转压力	127.5(公斤/厘米 ²)
回转流量	32 (升/分)
冲洗水压力	8~12(公斤/厘米 ²)
冲洗水流量	30 (升/分)
电动机总功率	43.26 (千瓦)
钻头直径	38~42 (毫米)
全长	869 (毫米)
宽度	277 (毫米)
总高	224 (毫米)
重量	115 (公斤)

上述结构特点，只是对AD-101凿岩机的粗浅分析，如结合具体情况，采用它的一些特点，将对我们在设计新型液压凿岩机时，会有所启发的。

（上接第53页）

参 考 资 料

〔1〕王玲等：“竖井合理注浆压力计算方法的探讨”，《有色金属》（矿山部分），1981，1。

〔2〕赫亚米雅利言：“关于裂隙岩层中用非稳定悬浮液注浆参数的流体计算问题”（苏），《矿井建设》，1977，8。

〔3〕瓦赫拉梅也夫：“在岩层中水泥及粘土注浆计算的新方法”（苏），《高校学报》（采矿杂志），1960，4。

〔4〕坪井直道：“化学注浆法的实际应用”

（日），1976出版。

〔5〕鲁高夫斯基：“论岩层水泥注浆的理论问题”（苏），《高校学报》（采矿杂志），1959，8。

〔6〕叶尔绍夫：《岩层的化学加固》（苏），1965出版。

〔7〕卡尔梅克夫：《竖井建设时与突然涌水的斗争》（苏），1968出版。

〔8〕马克西莫夫等：《岩层注浆》（苏），1978年版。

〔9〕鲍沃洛夫等：“论注浆扩散半径的计算”（苏），《高校学报》（采矿杂志），1966，11。