

## 灌浆强度数值数学模型初步研究

彭环云 黄树华 贺茉莉

**摘要：**通过对灌浆试验情况的分析，得出了影响灌浆强度数值的各种因素，并在此基础上，经过多元线性回归，推出了该值与影响因素之间的经验回归公式，供进一步研究和工程实践参考。

**关键词：**灌浆强度数法 灌浆强度数值 灌浆参数 线性回归

### A Primary Study on the Mathematical Model of GIN

Peng Huanyun , Huang Shuhua

(Central South University of Technology, Changsha, 410083)

He Moli

(Hunan Survey & Design Research Institute of Water & Electricity, Changsha, 410007)

**Abstract :** Various factors affecting the GIN parameters were found out through grouting testing result analyses. Based on the influence elements, the experiential regression formula which describes the relations between influence and GIN was derived out through plurality linear regression. The regression formula can be references to further studies and practices.

**Key words :** grouting intensity number method, GIN, grouting parameter, linear regression

#### 1 概述

自80年代以来，灌浆技术在理论及经验总结上都有了较大的突破。国外提出了灌浆强度数法(即 Grouting Intensity Number Method，简称GIN法)，以避免或减少常规灌浆方法在控制灌浆时的缺点。国内1994年由湖南省水电勘测设计研究院引进这一技术，在湖南娄水江垭大坝中进行了2次灌浆试验。

根据GIN法的理论，灌浆过程消耗的能量只与灌浆压力及总灌浆量有关(在浆液水灰比一定时)。并且，在一给定的灌浆段内，能量的消耗近似地同最终灌浆压力 $P$ 和单位灌浆段吸浆量 $V$ 的乘积成正比。 $PV$ 就定义为灌浆强度指数，即 $PV=GIN$ 值。GIN值、地层所能承受的最大灌浆压力 $P_{max}$ 和每米地层所需的浆液量 $V_{max}$ 等3个参数就构成了控制灌浆过程的3大指标。实际应用时，将工程所选择的 $P_{max}$ 、 $V_{max}$ 和GIN双曲线(即 $GIN值=P \cdot V=常数$ )一起绘制在灌浆压力和灌浆量( $PV$ )坐标系中，组成GIN灌浆限制包络线。然而，这3大参数目前还只能通过灌浆试验来确定。

由于地质情况的复杂性，每一工程的地层类型、地质构造及地层的渗漏性等特征都不同，因此一般都要在工程有代表性的岩层和地质条件不好的地段做1~2次灌浆试验，以确定适宜的灌浆参数及灌浆工艺。如江垭工程，曾做了2次现场灌浆试验。第一次为初步设计阶段灌浆试验，主要论证GIN法对该工程灌浆工作的适宜性及找出适宜的灌浆参数。第二次为施工阶段灌浆试验，主要论证第一次试验推荐的灌浆参数的适宜性及具体的施工工艺、特殊地段的处理措施等。然而，灌浆试验需耗费大量的人力、物力和财力，并延长了工期。本文力图根据工程地质、水文情况及其它因素提出GIN参数的经验计算公式，为灌浆时选取灌浆参数提供参考，以少做或不做灌浆试验，从而节省资金、提高效率。尽管GIN值的影响因素非常复杂，难以准确地确定各因素的影响强度，但利用数学工具来确定GIN值这一研究，仍具有很大的现实意义。

## 2 GIN参数的影响因素

### 2.1 最高灌浆压力 $P_{max}$

灌浆时采用较高的灌浆压力有许多优点。由于浆液的扩散能力与灌浆压力的大小密切相关，在保证灌浆质量的前提下，采用较高的灌浆压力，可使钻孔数尽可能减少。高灌浆压力还能使一些微细孔隙张开，有利于提高可灌性。当孔隙被某种软弱材料充填时，高灌浆压力能在充填物中造成劈裂灌注，使软弱材料的密度、强度和不透水性等得到改善。此外，高灌浆压力还有助于挤出浆液中的多余水分，使浆液结石的强度提高。

但是当灌浆压力超过地层的压重和强度时，将可能导致地基的破坏。因此，一般都以不使地层结构破坏或仅发生局部和少量的破坏作为确定地基最高灌浆压力的基本原则。研究表明，在岩基中，发生水力劈裂的临界压力在很大程度上取决于岩石的抗拉强度( $S_T$ )、泊松比( $\mu$ )、侧压力系数( $K_0$ )以及孔隙率( $n$ )、透水性( $K$ )和浆液的粘度( $\eta$ )等。若用参数 $N$ 综合地表示 $K$ 和 $\eta$ ，则在钻孔孔壁处开始发生垂直劈裂的条件为：

$$P_0/(h) = \{ (1 - \mu) / (1 - N) \} \{ 2K_0 + S_T / (\eta h) \} \quad (1)$$

式中： $P_0$ ——灌浆压力，MPa； $\gamma$ ——岩石容重， $kN/m^3$ ； $h$ ——灌浆段深度，m； $\eta$ ——浆液运动粘滞系数。

水平劈裂的开始条件为：

$$P_0/(h) = \{ (1 - \mu) / [ \mu (1 - N) ] \} \{ 1 + S_T / (\eta h) \} \quad (2)$$

对于含节理裂隙的岩层，水力劈裂应包括原有裂隙的扩张和新鲜岩体的破裂。根据弹性理论，目前国内灌浆工程所用的灌浆压力，尚不能使新鲜岩体发生破裂，但仅用较小的灌浆压力就足以引起岩石现有裂隙的类弹性扩张。

另据研究表明，临界压力大多数情况下并不取决于覆盖层的压力，而是取决于岩石的强度。在松软岩石的近地表层以下部位(一般为5~10m)，强度通常不随深度而变化，临界压力也同样如此。因此，当 $h > 10$  m时，可将 $h=10$  m代入上述公式，求得各岩层垂直、水平方向上的 $P_0$ 值。强度相近的岩层，可取 $P_0$ 的最小值作为共同的最高灌浆压力 $P_{max}$ 。

### 2.2 最大灌浆量 $V_{max}$

灌浆量取决于地层裂隙的大小、多少、设计帷幕宽度以及浆液的稠度。GIN法提倡采用较浓的稳定浆液进行灌注(水灰比0.67~1)。实践观测表明，浓稠水泥浆液凝固后，一般都有一些膨胀。因此可以认为，灌入与裂隙体积相等的浆液，就可以把裂隙完全填满，凝固后不留空隙。最大灌浆量可用下式计算：

$$V_{max} = Vnm \quad (3)$$

式中： $V$ ——设计灌浆体积， $V = (4/3) R^3$ ， $m^3$ ； $R$ ——浆液最大扩散半径， $R = P_{max} t / C$ ，m； $t$ ——裂隙宽度的1/2，m； $C$ ——浆液粘聚力，MPa； $n$ ——地层的孔隙率； $m$ ——无效注浆量， $m = (4/3) Lhn$ ，符号见图1； $h = R - T/2$ ； $T$ ——设计帷幕厚度，m。

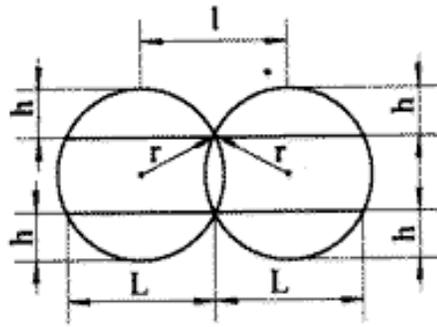


图1 无效面积计算图

所以： $V_{\max} = (4/3) R^3 n (4/3) L h n = (16/9) n^2 L (P_{\max} t / C - T/2) (P_{\max} t / C)^3$

上式计算出的最大灌浆量，考虑了在最高灌浆压力下浆液扩散达到最大距离范围内的岩体灌浆，一般比实际施工时所需的灌浆量大。最大灌浆量应是指扣除了管路、钻机等占浆后灌入岩体的浆液量。

### 2.3 GIN值的影响因素

根据定义，GIN值是表征灌浆时所消耗能量的一个参数，其值等于终灌时最终灌浆压力 $P$ 和累计灌浆量 $V$ 的乘积，即 $GIN = PV$ 。然而，终灌时的灌浆压力和累计灌浆量随地质条件和施工工艺的不同而不同，因此难以根据上述定义式来确定GIN值。

国内进行的有关试验，对影响GIN数取值的有关因素进行了有益的探索。主要对如下因素进行了分析。

#### 2.3.1 地质条件

需灌浆地区的地质条件，特别是岩体不连续面的物理特征(类型、频度、裂隙张开度、糙率、蚀变、填充情况、延伸范围等)是GIN参数的决定因素。这一点，不论是从理论上，还是实践中都已得到证实。

在江垭工程初设阶段帷幕灌浆试验中，分别对2种典型的地质条件地段(相对隔水层和岩溶含水层)进行了试验，以得出符合地层条件的GIN数。第 组为相对隔水层，共5个灌浆孔；第 组为岩溶含水层，共布置8个灌浆孔。为节约试验工作量，将每一灌浆孔分为几段，每段取不同的GIN参数进行灌注。同一组的各孔，GIN参数分段情况相同，以便进行对比。试验结果表明，江垭大坝坝基底部隔水层内以 $GIN = 150 \text{ MPa} \cdot \text{L/m}$ 、 $P_{\max} = 4 \text{ MPa}$ 、 $V_{\max} = 250 \text{ L/m}$ 以上的参数灌注时，灌浆效果好，帷幕能有效地搭接。层间溶蚀带的抗渗能力可达 $1.9 \text{ MPa}$ ，极限值为 $3.1 \text{ MPa}$ 。坝基上部岩溶地层以 $GIN = 350 \text{ MPa} \cdot \text{L/m}$ 、 $P_{\max} = 4 \text{ MPa}$ 、 $V_{\max} = 550 \text{ L/m}$ 以上的参数灌注并对层间溶蚀带辅以特殊处理时，效果较佳。在随后进行的江垭大坝施工阶段帷幕灌浆试验中，就利用了上述成果来选取GIN参数值。

#### 2.3.2 灌浆段深度及灌浆次序

在同一地层中，处于不同深度的灌浆段，灌浆时所需的能量是否不同呢？国内在进行试验时考虑到了这个问题。三峡工程在PIII试区进行灌浆试验时，明确指出将孔深作为选择GIN参数的一个重要因素，并考虑了灌浆次序。一般认为，随着孔深的增加，覆盖层厚度也增加，灌浆压力应该增大。但是，理论分析表明，灌浆段应施加的最高灌浆压力并不取决于覆盖层厚度，而是决定于所灌岩层的抗拉强度。因此，最高灌浆压力不应随深度而变化。江垭工程施工阶段帷幕灌浆试验结果证实了上述结论。在这次试验中，对于GIN参数，原则上按地质条件进行选取，同时考虑了灌浆次序的影响。在地质条件相似的地段，维持GIN参数为常数。试验结果表明，按上述原则选取的参数能满足要求。因此，灌浆段深度对GIN参数几乎无影响，而随着孔的加密，GIN参数应有相应的提高。

除上述因素之外，影响GIN参数选取的因素还有很多。如：浆液的浓度、灌浆施工方法等等。众多因素的影响，使GIN值的确定十分复杂。

## 3 GIN值数学模型初探

G·隆巴迪指出，GIN值、压力上限 $P_{\max}$ 和灌浆量上限 $V_{\max}$ 三者之间并不要求互相联系。但根据GIN值的定义及其影响因素与 $P_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 的影响的一致性表明，GIN值与 $P_{\max}$ 和 $V_{\max}$ 之间存在某种联系。表1所列数据为G·隆巴迪在灌浆工程实践的基础上建议采用的灌浆参数值，每一组参数适用于不同的地质条件。令 $X_1=P_{\max}$ ， $X_2=V_{\max}$ ， $Y=GIN$ 值，然后对表中数据进行多元线性回归。

表1 灌浆参数表

GIN值 /(MPa·L·m <sup>-1</sup> )	$P_{\max}$ /MPa	$V_{\max}$ /(L·m <sup>-1</sup> )
300	3.5	450
250	5	300
200	4	250
150	3	200
100	2.25	150
50	1.5	100

### 3.1 求估计量的值

取线性回归模型：

$$Y = \mu + \beta_1(X_1 - \bar{X}_1) + \beta_2(X_2 - \bar{X}_2) + \varepsilon \quad (4)$$

式中： $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 待确定常数，即回归系数； $\varepsilon$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机变量； $\mu$ 待确定常数。

$$\bar{X}_1 = (1/6) \sum_{i=1}^6 X_{i1}, \quad \bar{X}_2 = (1/6) \sum_{i=1}^6 X_{i2}$$

经计算得 $\mu$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 的估计量分别为：

$$\hat{\mu} = 175, \quad \hat{\beta}_1 = 24.40, \quad \hat{\beta}_2 = 0.57$$

$$\text{同时算得：}\bar{X}_1 = 3.21, \quad \bar{X}_2 = 241.67$$

代入式(4)得经验回归平面方程：

$$\hat{Y} = 175 + 24.40(X_1 - 3.21) + 0.57(X_2 - 241.67) \quad (5)$$

### 3.2 线性回归的显著性检验

取显著水平 $\alpha = 5\%$ 。算得：总离差平方和 $Q_T = 43750$ ，剩余离差平方和 $Q_{\text{剩}} = 27.19$ ，回归离差平方和 $Q_{\text{回}} = 43723$ 。

下面用方差分析表(表2)算得F值〔F为服从自由度为(2, 3)的F分布〕，这里 $n=6$ ， $p=2$ 。查表(F分布上侧分位数表)可得 $F_{0.05}(2, 3) = 9.55$ ，显然 $F > F_{0.05}(2, 3)$ ，所以线性回归显著。

表2 方差分析表

来源	离差	自由度	均方离差	F值

回归	43723	2	24861	2429
剩余	27	3	9	
总和	43750	5		

### 3.3 回归系数的显著性检验

取显著水平  $\alpha=5\%$ 。

系数矩阵A的逆矩阵C经计算得：

$$C = \begin{bmatrix} 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.030458072 & -0.001494953 \\ 0 & -0.001494953 & 0.000022864 \end{bmatrix}$$

( $C_{jj}$ 为矩阵C中第j行第j列上的值, j均从0起算)

$$\hat{\sigma}^2 = 9 \quad \hat{\sigma} = 3$$

$$T_1 = \hat{\beta}_1 / (\sqrt{C_{11}} \hat{\sigma}) = 46.6$$

$$T_2 = \hat{\beta}_2 / (\sqrt{C_{22}} \hat{\sigma}) = 39.7$$

查表(t分布上侧分位数表)得  $t_{0.025}(3) = 3.1824$

$T_1$ 、 $T_2$ 都大于  $t_{0.025}(3)$ ，所以2个回归系数都不显著地等于0。

所以上述经验回归平面方程是合适的。

将  $X_1 = P_{\max}$ ， $X_2 = V_{\max}$ ， $Y = \text{GIN}$  值代入，则得：

$$\text{GIN值} = -41.08 + 24.40P_{\max} + 0.57V_{\max} \quad (6)$$

上式即为所求的GIN值数学模型。

## 4 结语

前面在对灌浆试验情况进行分析，得出GIN值的各种影响因素的基础之上，利用多元线性回归，推出了GIN值与最大灌浆压力  $P_{\max}$  和最大灌浆量  $V_{\max}$  之间的经验回归公式。但是，由于缺乏足够的实际灌浆资料，上述公式只能在小样本上建立，还无法直接应用于工程实践，因此所得结果仅供进一步研究参考。本文只对此作了初步的探讨，但利用数学工具来确定GIN值这一研究思路，仍具有一定的现实意义。

致谢：笔者在现场期间，得到了湖南省水电勘测设计研究院的大力帮助，在此表示衷心的感谢！

作者简介：彭环云：女，1974年生，中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所；1998年毕业于中南工业大学地质系，获硕士学位。

黄树华：男，1945年生，中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所副教授。

贺茉莉：男，1971年生，湖南省水电勘测设计研究院；1994年毕业于中南工业大学地质系(410007长沙市)。

作者单位：410083长沙市岳麓山。

## 参考文献

[1] G·Lombard, D·Deere. Grouting design and control using the GIN principle. Water Power & Dam

Construction, 1993,(6).

[ 2 ] E·农维勒.灌浆的理论与实践.顾柏林译.沈阳：东北工学院出版社，1991.

[ 3 ] 汪荣鑫.数理统计.西安：西安交通大学出版社，1986.

[ 4 ] 彭环云.GIN灌浆方法应用研究〔硕士论文〕.长沙：中南工业大学，1998.

收稿日期：1998-11-02 改回日期：1999-04-14