

# 注浆模拟试验及其应用的研究\*

葛家良  
(淮南矿业学院采矿系, 232001)

陆士良  
(中国矿业大学采矿系, 徐州, 221008)

文 摘 本文介绍了一种实验室注浆模拟试验新技术。通过注浆模拟试验, 分析了被注浆介质的结构特征、浆液水灰比及其性质、注浆压力等因素对注浆量、浆液扩散半径和结石体强度的影响规律, 并将模拟试验结果应用于巷道注浆工程设计与施工中。

关键词 注浆, 模拟试验, 注浆参数, 注浆工程应用。

## 1 前 言

由于注浆工程的隐蔽性和巷道围岩结构的复杂性, 给注浆参数设计和注浆效果检验带来极大困难。但是, 实验室注浆模拟试验是确定注浆工程中注浆参数以及各因素对注浆效果影响规律的有效途径和方法之一。目前, 国内外注浆模拟试验技术和方法远远不能满足实际要求。本文试图提出一种注浆模拟试验新方法, 通过模拟试验确定注浆参数与其主要影响因素间的关系, 并且将试验结果应用于注浆工程实际。

## 2 试验装置和试验材料

### 2.1 试验装置

模具由 4 块钢板组成, 上下钢板厚度为 35mm, 两侧钢板厚度为 40mm, 为了增加模具的刚度, 在上下钢板上焊接加强槽钢。该模具内尺寸为 520mm × 400mm × 80mm, 外观尺寸为 600mm × 400mm × 234mm。注浆器由缸体和活塞组成, 装浆量为 1100mL。液压千斤顶的额定承载能力为 80kN。注浆花管总长为 200mm, 注浆段为 70mm, 内径 15mm, 外径 21.25mm, 射浆孔孔径为 8mm。液压稳压器提供模型致裂载荷和注浆压力。固定框架是用于固定模型加载、注浆的装置。

### 2.2 试验模型材料

模型材料由细砂、石膏经过水胶结而成, 通过 12 组不同配比确定了三种砂膏比材料为模型材料配比<sup>[1]</sup>, 模型材料配比及其性质如表 1 所示。

表 1 模型材料配比及性质

模型配比 (砂:石膏)	水 量	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	单轴抗压强度(MPa)				残余强度 (MPa)
			试块 1	试块 2	试块 3	平均值	
4:1	1/7	1.59	0.92	0.67	1.00	0.86	0.65
5:1	1/7	1.58	0.88	0.62	0.60	0.70	0.44
6:1	1/7	1.54	0.40	0.38	0.44	0.41	0.26

\* 煤炭部科学基金资助项目(编号 94-301)。

## 2.3 注浆材料

注浆材料采用普通硅酸盐水泥, 标号为 425<sup>#</sup>, 其水灰比  $W/C$  采用 0.75: 1, 1: 1, 1.2: 1 三种配比。试验后期采用磨细水泥加食糖塑化剂浆液。磨细水泥由粒径为 0.06~ 0.1mm、比表面积为 250~ 350m<sup>2</sup>/kg 的普通硅酸盐水泥经过球磨机磨碾而成, 其粒径为 0.01~ 0.05mm, 比表面积为 300~ 600m<sup>2</sup>/kg。

## 3 试验方法

首先, 按砂膏比 4: 1, 5: 1, 6: 1 分别在模具中浇铺成中央具有直径为 100mm 圆孔的模型, 待模型凉干和强度基本稳定后, 通过液压稳压器和千斤顶对模具中的模型实施人工致裂单面加载, 直至模型沿孔周围产生松动破坏为止, 必要时可继续加载, 扩展模型圆孔周围塑性区。模型致裂前, 其结构特征表现为孔隙率小、吸水率小、结构较致密; 致裂后, 模型圆孔周围进入塑性区, 裂隙发育、孔隙率大以及吸水率增大。接着, 对人工致裂后的模型进行吸水率测试, 在 1MPa 压力下, 通过 1m 长度的注浆孔, 测得每分钟模型吸水量的大小, 用此吸水率作为衡量模型结构特征的综合指标。

对模具中经过人工致裂后的模型实施注浆, 如图 1 所示。注浆压力采用 1, 2, 3MPa 三个不同级别。在致裂后的模型圆孔中安装注浆花管, 用输浆管通过注浆花管将注浆模型与注浆器连接起来。注浆器一端安装压力表检测注浆压力。注浆时将注浆器打开到最大容量, 灌输配制好的水泥浆液, 利用液压稳压器, 通过千斤顶向注浆器加载, 再将注浆器中的浆液强制压入模型中, 在一定注浆压力作用下, 直至模型不再吸浆时结束注浆。注浆量通过注浆器活塞杆收缩量大小来量测。

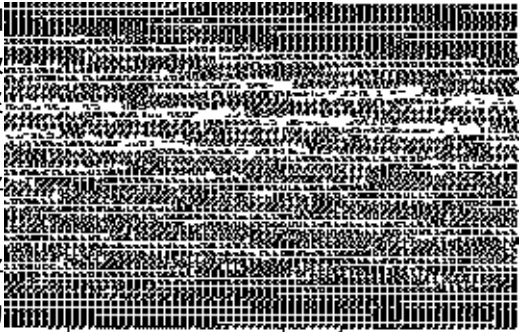


图 1 注浆模拟试验系统图

注浆结束后打开模型, 对浆液的充填、扩散、分布进行观察和量测, 并取试样进行力学性质测试, 分析比较结石体强度与注浆前模型材料残余强度。

## 4 试验结果分析

### 4.1 试验观察分析

注浆时注浆压力由低逐渐升到规定压力, 在压力升高过程中, 常常呈现出不稳定状态, 尤其是注浆压力较大时, 压力表指针升到一定值后突然下降, 然后压力又继续上升, 这种现象主要是由劈裂引起的。注浆过程中, 压力变化情况主要有直升型、缓升型和升—降—升型等三种, 如图 2 所示。

注浆过程中, 对浆液从四周泄漏的模型停注一段时间(5~ 10min), 然后实行复注浆, 模型不再有泄漏浆现象。打开注浆模型后发现, 被水泥浆液充填、胶结的范围有限, 但是, 几乎整个模型都被水所浸透, 尤其是水灰比较大、注浆压力较高时的注浆模型, 被水浸透现象更为显著, 这说明了水泥浆液析水性较强。

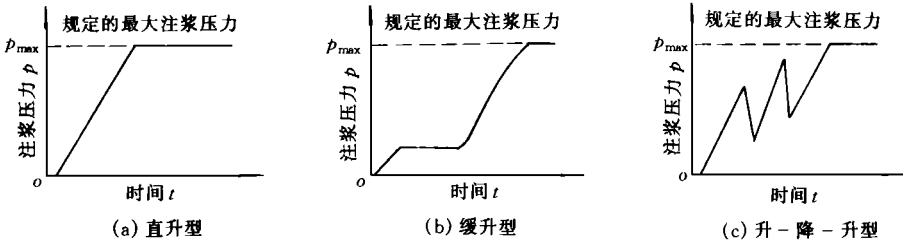


图2 注浆压力变化类型

被浆液充填、胶结的结石体大多数呈现圆柱体或圆台体, 砂膏比较小的注浆模型结石体明显较小。浆液在各种模型中扩散较均匀。试验后期, 为了增强水泥浆液的可注性和流动性, 采用经球磨机磨细的普通硅酸盐水泥掺入少量食糖。试验表明, 在相同条件下, 改进后的浆液扩散半径提高 10% ~ 15%。

浆液在注浆圆孔周围碎裂范围内呈脉状、网状形式分布, 其中以网状形式为主。

4.2 注浆模拟试验结果及其分析

(1) 注浆模拟试验结果

注浆量  $Q$ 、扩散半径  $R$  和结石体强度  $R_c$  的测试数据如表 2 所示。利用这些测试数据, 进行模型吸水率  $q$ 、浆液水灰比  $W/C$ 、注浆压力  $p$  等因素对注浆量  $Q$ 、扩散半径  $R$  和结石体强度  $R_c$  的影响规律的计算机优化回归, 得到三种影响因素  $q$ ,  $W/C$ ,  $p$  的单因素和多因素对  $Q$ ,  $R$ ,  $R_c$  的影响规律, 如式(1) ~ (3)和图 3~ 6 所示。

表 2 注浆参数测试结果一览表

模型编号	材料配比	成型加水量	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	致裂荷载 (kN)	致裂后吸水率 L min·m <sup>3</sup> ·m	浆液水灰比 (W/C)	注浆压力 (MPa)	注浆量 (mL)	模型注浆前强度		模型注浆后强度		扩散半径 (mm)
									抗压强度 (MPa)	残余强度 (MPa)	注浆后强度 (MPa)	增长率 (%)	
1	4 1	1/ 7	1.59	72	5.25	1.2 1	1.0	678	0.86	0.65	-	-	46
2	4 1	1/ 7				1.1	2.0	906			1.6	146	68
3	4 1	1/ 7				0.75 1	3.0	898			2.14	229	50
4	5 1	1/ 7	1.58	66	8.77	1.2 1	3.0	1932	0.70	0.44	0.8	82	115
5	5 1	1/ 7				1.1	1.0	1270			1.2	173	74
6	5 1	1/ 7				0.75 1	2.0	1095			1.6	264	80
7	6 1	1/ 7	1.54	54	10.21	1.2 1	2.0	1655	0.41	0.26	0.8	208	135
8	6 1	1/ 7				1.1	3.0	1584			0.84	223	100
9	6 1	1/ 7				0.75 1	1.0	908			0.6	154	70
10	4 1	1/ 7	1.59	72	5.25	1.2 1	2.0	926	0.86	0.65	1.0	54	58
11	4 1	1/ 7				0.75 1	2.0	646			-	-	32
12	5 1	1/ 7	1.58	66	8.77	1.2 1	2.0	1449	0.70	0.44	1.50	241	90
13	5 1	1/ 7				1.1	2.0	1320			-	-	66
14	6 1	1/ 7	1.54	54	10.21	1.1	2.0	1412	0.41	0.26	1.1	323	79
15	6 1	1/ 7				0.75 1	2.0	1246			0.9	246	52
16	5 1	1/ 7	1.58	66	8.77	1.1	1.0	1330	0.70	0.44	1.1	150	83
17	5 1	1/ 7				1.1	2.0	1375			1.4	218	75
18	6 1	1/ 7	1.54	54	10.21	1.1	2.0	1450	0.41	0.26	0.76	192	88
19	6 1	1/ 7				0.75 1	1.0	1100			0.55	112	80

注: 1~ 15号模型注浆材料为 425# 普通硅酸盐水泥浆液。

16~ 19号模型注浆材料为磨细后的普通硅酸盐水泥浆液, 掺入食糖。

注浆量  $Q$  与吸水率  $q$ 、注浆压力  $p$ 、水灰比  $W/C$  之间的关系为

$$Q = 161.5139q^{0.8500}p^{0.3678}(W/C)^{0.6614} \tag{1}$$

$$r(q) = 0.4836, r(p) = 0.2606, r(W/C) = 0.2558, r = 0.9628$$

显然,  $r(q) > r(p) > r(W/C)$ 。

浆液扩散半径  $R$  与  $q, p, W/C$  之间的关系为

$$R = 10.7145q^{0.8543}p^{0.2438}(W/C)^{0.9362} \tag{2}$$

$$r(q) = 0.4760, r(p) = 0.1673, r(W/C) = 0.3547, r = 0.8708$$

显然,  $r(q) > r(W/C) > r(p)$ 。

结石体强度增长率  $n$  与  $q, p, W/C$  之间的关系为

$$n = 0.1984q^{0.9256}p^{0.2885}(W/C)^{-1.1764} \tag{3}$$

$$r(q) = 0.4297, r(p) = 0.1744, r(W/C) = 0.3959, r = 0.8673$$

显然,  $r(q) > r(W/C) > r(p)$ 。

上述式中  $r$  为复相关系数;  $r(q), r(p), r(W/C)$  分别为模型吸水率  $q$ 、注浆压力  $p$ 、浆液水灰比  $W/C$  的权重。

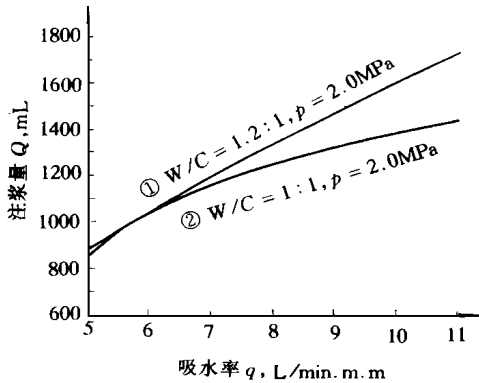


图3 注浆量  $Q$  与吸水率  $q$  的关系

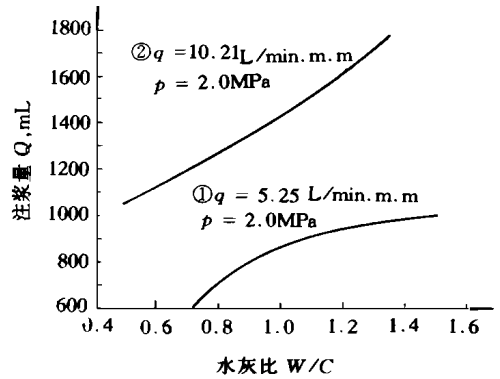


图4 注浆量  $Q$  与水灰比  $W/C$  的关系

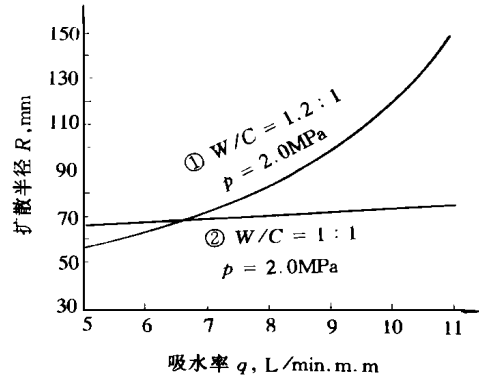


图5 扩散半径  $R$  与吸水率  $q$  的关系

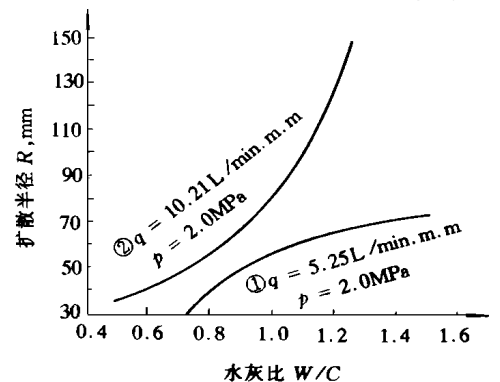


图6 扩散半径  $R$  与水灰比  $W/C$  的关系

### (2) 试验结果分析

由试验结果可得出下列结论:

a) 注浆介质结构(模型)的裂隙或孔隙越发育,孔隙率越高,吸水率越大,反之亦然。

b) 注浆量与吸水率成幂函数关系,而且随着注浆介质裂隙、孔隙发育程度和吸水率的增大注浆量也随之增加(图3)。但是,注浆量与水泥浆液水灰比成指数函数关系,它随水灰比的增

大而增加, 随水灰比的减小而降低(图4)。在注浆介质结构、水灰比和注浆压力共同作用下, 影响注浆量最显著的因素是注浆介质结构, 其次是注浆压力, 水灰比影响程度略次于注浆压力。

c) 随着注浆介质吸水率、水灰比的增加, 浆液扩散半径随之增大(图5、图6); 反之, 吸水率、水灰比减小, 扩散半径也减小。从式(2)中可见, 影响扩散半径最为显著的因素是注浆介质的吸水率, 其次是浆液性能, 注浆压力对浆液扩散半径影响相对较小。

d) 注浆后结石体强度增长非常明显, 大多数注浆模型结石体强度提高1~3倍。当浆液水灰比越大结石体强度增长率越小; 水灰比越小, 结石体强度增长率越大。注浆介质结构、浆液水灰比和注浆压力对结石体强度增长率均有较大的影响, 其中注浆介质结构的影响最为明显, 其次是浆液水灰比及注浆压力。

e) 注浆量、扩散半径和结石体强度增长率等均从不同角度反映注浆效果, 三者都受到注浆介质结构、浆液水灰比和注浆压力等不同程度的影响, 其中注浆介质结构对三者影响最为显著, 注浆压力对三者影响相对较小。除结石体强度增长率与浆液水灰比成反比关系外, 注浆量、扩散半径、结石体强度增长率等均与注浆介质结构吸水率、浆液水灰比和注浆压力成正比关系。

f) 改进后的水泥浆液可使浆液扩散半径提高10%~15%, 注浆量增加3%~21%, 但是, 结石体强度增长率略有降低, 这主要是浆液中的食糖塑化剂所致。试验初步表明, 掺入食糖塑化剂提高浆液流动性和可注性, 但是, 随着食糖掺入量的增加, 结石体强度增长率降低, 尤其当食糖掺入量超过浆液总量的0.1%时, 结石体强度增长率降低更为明显。与此同时, 食糖掺入量增加到一定值时(一般为0.08%), 提高浆液流动性和可注性的效果并不明显。因此, 食糖掺入量在0.03%~0.05%较为理想。

## 5 注浆模拟试验结果的应用

### 5.1 注浆孔排、间距布置设计

注浆孔排、间距布置的设计, 主要由给定条件下的浆液扩散半径大小决定, 浆液扩散半径又可根据注浆模拟试验而定。如旗山矿锚注支护, 巷道围岩表层吸水率为 $190\text{mL}/\text{min}\cdot\text{m}\cdot\text{m}$ , 注浆压力设计为4MPa, 水泥浆液水灰比1:1, 根据式(2)可估算出浆液扩散半径为1329mm, 考虑安全系数, 设计浆液扩散半径为1000mm, 由此, 确定注浆孔排距为1400mm, 孔底间距平均为 $1400\text{mm}^{[2]}$ , 确保浆液扩散有效地重叠交圈。

### 5.2 注浆量估算

根据注浆模拟试验结果, 可估算注浆工程材料消耗量, 即注浆量。例如, 旗山矿锚注支护中, 在给定围岩结构特征、注浆材料、注浆压力条件下, 根据式(1)估算出, 每孔注浆量为23.26L, 与实际注浆量相吻合<sup>[2]</sup>。

### 5.3 注浆材料确定

根据注浆模拟试验可知, 注浆材料对注浆参数以及注浆效果的影响起到决定性的作用, 因此, 在注浆设计中, 应根据围岩结构特征确定注浆材料类型及其性质。对于水泥浆液, 应在浆液中掺入适量的塑化剂或悬浮剂, 以降低浆液的析水性, 达到改善浆液流动性和可注性的目的<sup>[2]</sup>。

## 6 结 论

注浆模拟试验技术的落后,一直阻碍注浆技术及其理论的发展,本文的研究对推动国内外注浆模拟试验将起到积极作用。试验结果表明,注浆压力随时间延长,呈现直升型、缓升型和升—降—升型等三种类型。影响注浆量、浆液扩散半径、结石体强度以及注浆效果最为显著的因素是注浆介质结构特征,其次是浆液水灰比和注浆压力。利用试验所得出的注浆量、浆液扩散半径等与浆液水灰比、注浆介质结构特征、注浆压力等因素间的关系,可指导注浆工程设计和施工以满足实际需要。

### 参 考 文 献

- 1 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988. 93~ 100.
- 2 葛家良. 软岩巷道注浆加固机理及注浆技术若干问题的研究[博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 1995. 14~ 32, 47~ 58.

## Study on Grouting Simulation Experiment and Its Application

*Ge Jialiang*

(Mining Department of Huainan Mining Institute, 232001)

*lu Shiliang*

(Mining Department of China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008)

**Abstract** In this paper, a new technique and method of grouting simulation experiment is introduced. By the grouting simulation test in laboratory, the influences of the feature of grouted medium structure, water cement ratio and grouting pressure upon grouting amount, grout diffusion radius and injected medium strength are analysed. The results of the simulation experiment applied in the design of the tunnel grouting engineering are enumerated.

**Key words** grouting, simulating experiment, grouting parameter, engineering application.