

# 高压环境条件下注浆模型试验系统设计\*

郭密文<sup>1</sup> 隋旺华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国矿业大学资源与地球科学学院 徐州 221008)

(<sup>④</sup>北京航天勘察设计院 北京 100071)

**摘要** 注浆工程常常在高地层压力、高水压力的地质环境条件下进行(如煤矿堵水或注浆加固工程)。为了研究高压环境条件下注浆浆液的渗流扩散特征,作者研制了可形成5MPa以上高压环境的注浆试验系统。该试验系统由四个功能模块组成,并可分为四个设备子系统。该试验系统的核心设备高压注浆模型试验装置中应用压力传导管解决了高压罐体内部监测设计所遇到的尺寸效应、传感器防腐、高压密封等难题。

**关键词** 试验模型设计 高压环境下注浆 压力监测 压力传导管

中图分类号: TD265.4 文献标识码: A

## DESIGN OF MODEL TEST SYSTEM FOR GROUTING UNDER HIGH PRESSURE CONDITIONS

GUO M iwen<sup>1</sup> SU I W anghua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

(<sup>④</sup>The Geotechnical Institute of Beijing Aerospace, Beijing 100071)

**Abstract** Grouting works are often executed under the geological environment of high formation pressure and high water pressure (such as water shutoff or rock reinforcement in coal mine). In order to study the flow characteristics of grouting slurry spreading under high pressure conditions, a grouting test system which can create a high-pressure environment of over 5MPa has been developed. The test system consists of four functional modules and can be divided into four equipment subsystems. The core equipment of the test system is the patented product entitled Test Set-up for Simulating High Pressure Grouting, in which pressure transmission pipes are used as the solution to problems such as size effect, sensor corrosion-preventing and high-pressure sealing which are encountered in designing the monitor program inside the high-pressure tank.

**Key words** Design of model test system, Grouting under high pressure conditions, Pressure monitoring, Pressure transmission pipe

\* 收稿日期: 2010-07-09 收到修改稿日期: 2010-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(40772192).

第一作者简介: 郭密文, 主要从事岩土工程设计施工与研究工作. Email: guomwen@sohu.com

## 1 引言

目前, 注浆渗流理论的研究以理论分析和数值模拟居多, 研究中不可避免地要对浆液、受注体以及浆液运动方式等进行一定的假设和简化, 不能完全反映浆液和受注地层的物理特征, 也难以真实地反映浆液在地层中的渗流运动过程。对注浆过程进行物理模拟, 即进行注浆模型试验可以在一定程度上用来检验理论分析和数值计算结果的正确性和可靠性, 并为简化理论模型和建立运动规律提供依据。因此, 注浆模型试验是研究岩体注浆的必不可少的重要手段。很多学者和单位在研究中都使用了注浆模型。如, 杨米加研制了平板型单裂隙和裂隙网络注浆模型, 进行单裂隙和裂隙网络模拟注浆试验<sup>[1]</sup>; 阮文军研制了平板裂隙注浆模型, 试验模拟水泥基浆液在裂隙岩体中的注浆渗流过程<sup>[2]</sup>; 杨坪、唐益群等结合实际研制配比砂卵石注浆模型, 进行了砂卵石地层中的注浆模拟试验<sup>[3]</sup>; 王档良、隋旺华等研制了岩体注浆管状模型, 对岩体注浆压力的变化规律进行研究<sup>[4]</sup>; 中国水利水电科学院研制开发了平板型注浆试验台, 建立了非牛顿流体在水平光滑裂隙面内的扩散方程<sup>[1]</sup>, 东北大学研制了槽形反扁圆柱状试验台, 并用它研究了多孔介质中注浆渗流过程<sup>[1]</sup>。Silas C. Nichols and Deborah J. Goodings设计了应用于岩土离心机的小尺寸压密注浆试验模型, 并用该模型进行了在均匀干砂中注入水泥基浆液的试验<sup>[5]</sup>; Adam Bezuijen设计了砂层补偿注浆的试验模型, 对砂层中注浆劈裂的发展进行了研究<sup>[6]</sup>。

考察文献报道的模型试验<sup>[1~5]</sup>, 在试验研究中选用的注浆压力及选用的试验环境压力多数较低, 一般几十~几百 kPa 高压环境(压力大于 1MPa)注浆试验的较少。本文介绍可形成高压试验环境并进行模拟注浆的试验系统。

## 2 模拟注浆试验系统的概念设计

在不同研究中, 注浆模型试验的具体目的不同, 但其根本目的是发现浆液在一定的动力条件下、一定的环境条件下(地层压力、水压力和温度等)在某特征空间的运动规律。从这个角度, 试验系统所具有的功能应是相似的, 应由如下几部分功能系统(模块)组成:

### 2.1 动力供浆系统

主要为浆液创造一定的动力条件, 使浆液以一定的压力或流量进入受注体。这一功能系统是模拟注浆工艺条件的控制环节。

### 2.2 浆液渗流系统

主要由一定尺寸和一定数量的注浆渗流通道组成, 渗流通道的设计反应了研究者结合要研究的内容对工程原型特征的认识和概化。这是大多数注浆模型设计的重心, 具体设计方案取决于要研究的内容。这一系统是浆液在受注体中渗流运动的模拟体现, 通常也是注浆渗流理论和数值模拟的试验依托对象。

### 2.3 边界条件、初始条件系统

主要模拟原型中与浆液运动相关的环境条件, 在试验时形成一定的温度条件、外力条件(如地层压力)、孔隙水压条件、水动力条件等, 也要考虑模拟渗流场的物理边界与原型在影响浆液运动方面是否相似。

### 2.4 监测系统

是试验现象、试验过程的记录监控系统。主要指浆液渗流系统中对流动状态、浆液压力、孔隙水压、流量、速度等所关心数据的测试采集, 也包在括动力供浆系统和边界条件系统中对设定试验参数(如温度、压力、流量等)的监控测试。

## 3 模拟注浆试验系统的设备组成

设备组成设计是概念设计的具体化, 某一个功能系统可能需要在多个设备系统中体现, 某一个设备系统在考虑其主要功能外, 都需考虑压力、边界条件、监测等多项功能的实现。试验系统主要由四方面设备组成, 压力注浆设备系统、加压稳压设备系统、高压注浆模型装置和图像数据采集与处理设备系统, 各部分的关系见图 1。

### 3.1 压力注浆系统

包括浆液(或其配制原料)的配制与盛放容器, 加压油泵、稳压罐等浆液加压设备, 注浆泵、浆液混合器、注浆管路和阀门等注入设备。是注浆工艺环节的模拟。

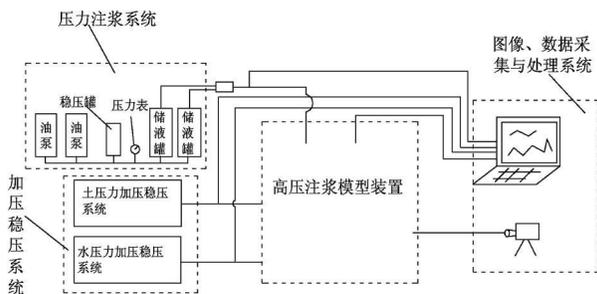


图 1 试验系统设备组成概要图

Fig 1 Schematic experimental system

### 3.2 加压稳压系统

本设计主要考虑地层压力和孔隙水压力的模拟,地层压力的模拟采用伺服压力机实现,孔隙水压条件采用具有伺服功能的高压稳压泵实现。

### 3.3 高压注浆模型装置

是高压注浆模拟试验的核心设备,需综合考虑对岩土体(渗流通道)、高压环境条件以及边界条件的模拟,同时应满足数据监测的要求。

### 3.4 图像、数据采集与处理系统

图像采集由主要由照相、摄像机器完成,数据采集主要由传感器、仪表、数据采集分析系统完成。图像、数据的采集仪器根据需要分布在其他三个设备系统中。

根据上述设计完成了试验系统(图 2)。



图 2 试验装配图

Fig 2 Test set-up

## 4 高压注浆模型装置

如前所述,高压注浆模型装置是高压注浆模拟试验的核心设备,该设备应该具有以下特点:耐高

压,密封性好;可以分别或同时施加土压力和水压力,数据易于采集。为此,开发并使用了专利产品“高压注浆模型试验装置”<sup>[7]</sup>。

### 4.1 高压注浆模型装置的结构

高压注浆模型装置整体为圆柱形罐体(图 3),用优质无缝钢管制作而成,耐压在 10MPa 以上。考虑高压环境的试验要求,罐体体积不宜太大,设计钢桶内径为 380mm,内净高为 510mm,两端均采用密封法兰。土压力通过设于顶盖板的活塞柱施加,水压力通过设于顶盖的注水孔并透过钢桶内透水活塞施加。底板中心设注浆孔。高压罐体内部根据研究内容设计不同的岩土体(渗流通道)。

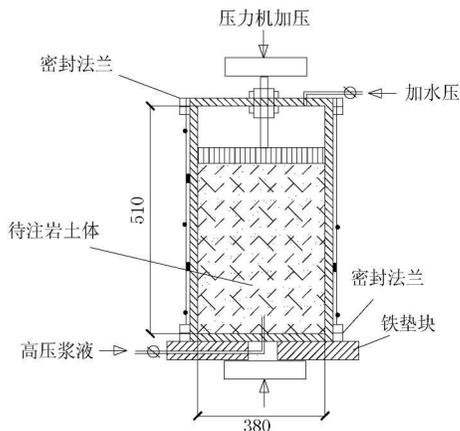


图 3 高压注浆模拟装置结构示意图

Fig 3 Schematic diagram of test set-up for simulating high pressure grouting

### 4.2 内部监测设计

显然,在模拟岩土体装置内部进行监测是十分重要和必要的。但需特别考虑的问题是:1)高压罐体内部空间不大,埋设的传感器及导线必然占据一定的空间,而且,如果尺寸较大或数量较多时,会对岩土体的渗流通道特征产生过大影响,改变浆液渗流扩散的特征,从而影响试验的结果。因此需在监测点布置及监测方式方面考虑对试验结果所造成的尺寸效应影响;2)若传感器置于罐体内部,浆液固结时必然将岩土体和传感器凝固在一起,浆液对传感器具有一定的腐蚀作用,而且浆液凝固可使孔压传感器损坏失效。需要采取措施防止浆液对传感器的破坏;3)传感器导线引出罐体需考虑高压条件下的密封要求,罐体壁上的每一个洞口都是强度弱点和密封弱点,在高压状态下,应特别防止在引出位置渗漏及渗漏引起的次生问题(如射流伤害等)。设

计中采用如下措施: 1)对于土压力传感器,在其表面涂抹一薄层黄油可有效防止腐蚀并利于清理; 2)对于孔压传感器,根据压力传导原理,将耐压尼龙细管端部布置于罐体内需要测试的位置,然后将尼龙管引出罐体之外,引出后再用专门设计的压力接头接上水压力传感器;可有效减小传感器占用空间的尺寸效应,完全防止浆液的固结和腐蚀对传感器的破坏影响; 3)底板上预留电缆和尼龙管的引出孔,采用专门设计的单向高压密封螺丝密封。由于采取了转换措施,为了减小黄油及尼龙管等的影响,需要对连接之后的传感器进行标定。

试验中孔隙压力监测位置如图 4 所示。

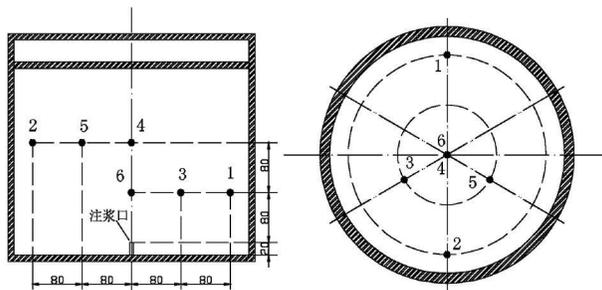


图 4 高压罐体内孔压监测位置

Fig 4 Monitoring position of the pore pressure in high-pressure tank

## 5 试验流程及功能验证

### 5.1 试验流程

试验主要流程顺序为:

(1)试验系统组装调试、标定或归零、装样密封; (2)岩土样饱和、预压、固结,施加地层压力和孔隙水压并稳定; (3)配制浆液,施加注浆压力至设定值并稳定; (4)开启阀门注浆,稳定注浆压力在设定水平波动; (5)预配制的浆液注完后关闭阀门,维持试验条件一段时间(1~2min)后停止各系统工作; (6)全程数据监测; (7)静置养护达设定时间后,排水,卸样观察、采取图像等。(8)样品、图像及数据的后续分析处理。

### 5.2 试验系统功能验证

根据上述设计方案组成试验系统,进行饱和孔隙介质(砂层)高压环境条件下的化学注浆模拟试验,在试验压力、数据监测、图像采集等方面均可达到预定的试验要求,显示前述模型试验设计是合理可行的。注浆过程中孔隙压力的典型监测结果如图

5 所示,注浆后固结体形状如图 6 所示。

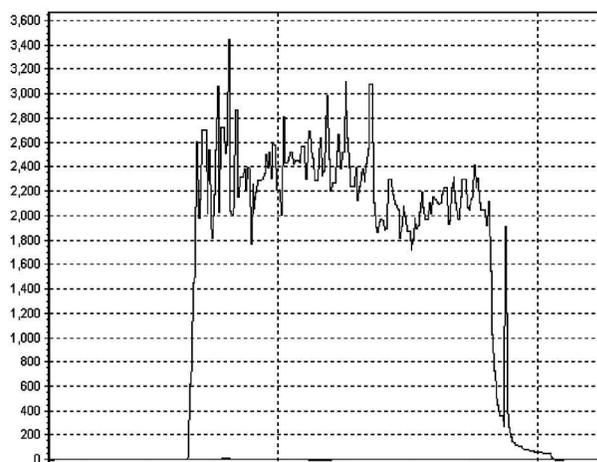


图 5 注浆过程中的孔隙压力变化

Fig 5 Fluctuation of pore pressure during grouting



图 6 注浆后的固结体

Fig 6 Grout body after grouting

## 6 结 语

(1)本文对高压注浆模型试验系统进行了概念设计,认为应具备四个功能模块;以该概念设计为基础,论述了高压注浆模拟试验的设备子系统。

(2)高压注浆模型试验装置的结构设计原理。

(3)对于高压罐体内部监测设计所遇到的尺寸效应、传感器防腐、高压密封等问题,给出了有效的解决方案。试验结果显示,所设计的试验模型可以达到高压环境下注浆试验的目的。

## 参 考 文 献

- [1] 杨米加. 随机裂隙岩体注浆渗流机理及其加固后稳定性分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 1999

Yang Mijia. Mechanism of Grout Penetrating in Stochastic Frac-

- ured Rockmass and Its Stability Analysis after Reinforcement  
Xuzhou Doctoral thesis of China University of Mining and Technology 1999.
- [ 2 ] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究 [ J ]. 岩土工程学报, 2005, 27( 1 ): 69~ 73  
Ruan Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2005, 27( 1 ): 69~ 73
- [ 3 ] 杨坪, 唐益群等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究 [ J ]. 岩土工程学报, 2006, 28( 12 ): 2134~ 2138  
Yang Ping Tang Yiqun etc. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2006 28( 12 ): 2134~ 2138
- [ 4 ] 王档良, 隋旺华, 等. 岩体中灌浆压力变化规律试验研究 [ J ]. 金属矿山, 2008 ( 1 ): 53~ 56  
Wang Dangliang, Sui Wanghua et al. Research on law of grouting pressure change in rock mass Metal Mine 2008 ( 1 ): 53~ 56
- [ 5 ] Sikas C. Nichols and Deborah J Goodings. Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [ J ]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2000 126( 9 ): 848~ 852
- [ 6 ] Adam Bezuijen. Compensation Grouting in Sand-Experiments Field Experiences and Mechanisms [ D ]. Delft Doctoral thesis of Delft University of Technology, 2010
- [ 7 ] 郭密文, 隋旺华, 董青红. 高压注浆模型试验装置 [ P ]. 中国: ZL 2007 20310235. 6 2008. 10. 08.  
Guo Miwen, Sui Wanghua Dong Qinghong. Test Set-up for Simulating High Pressure Grouting China ZL 2007 20310235. 6 2008. 10. 08

## 2010城市地质环境与可持续发展论坛在上海召开

“2010城市地质环境与可持续发展论坛”于2010年8月23—26日在上海同济大学胜利召开。本次论坛充分体现上海世博会主题“城市，让生活更美好”，旨在针对自然的演化规律，寻求不同地质环境的有效保护与发展的途径，使城市能针对不同的地质环境而更合理地开发，从而有效地防治和减轻地质灾害。会议参会代表分别来自全国地质、水利、建筑、能源、铁道、交通与环境等领域共308人。

本次会议主要围绕城市水资源的合理开发与安全及防治洪、旱灾害、城市水资源的信息化管理系统、城市供水应急水源的保障、城市环境地质的主要研究内容与质量评估、城市地质灾害的评价与预警系统建设、城市地质灾害的防灾与减灾措施研究、城市气候—地质等灾害链与预警系统、城市发展规划地质环境综合效应、地下空间利用及岩土工程与地质环境问题、城市发展与旅游资源的保护与开发、地震高烈度区城市环境与可持续发展11个议题展开讨论交流。大会论文集共收录论文133篇。大家首先肯定了我国城市迅速发展的骄人成就，但另一方面也深感到，需要从地质环境上重拳出击，以保障今后城市安全与可持续发展。会议期间顾问指导组及有关专家代表讨论了今后城市发展及重大工程设中地质环境相关建议，并起草了《关于加强城市地质环境工作以保障安全与可持续发展的建议》(上海宣言)。

卢耀如院士在闭幕式上对大会进行总结并宣读相关建议。他首先指出地质环境影响城市安全与可持续发展，接着从地质环境上分别对水资源安全、新能源开发与能源安全、自然灾害的防灾减灾、城市交通安全、地质生态系统的安全和人民健康五个方面进行分析讨论，并针对上述五个方面的城市环境问题，对城市地质环境工作提出了几点重要建议。最后卢耀如院士呼吁有关城市地质环境方面的各个有关部门、学科科技工作者，密切协作，为我国城市的可持续发展，共同努力做出应有的新贡献。

在会议期间，与会专家认为本次会议应成为系列会议，每两年举办一次，香港大学、贵州师范大学等单位都表示想承办2012年会议，经过院士、专家讨论，2012年的城市地质环境与可持续发展会议拟由香港大学具体承办。

(同济大学 石振明供稿)