

高等学校教材

# 注浆加固与堵水

何修仁 等 编著

东北工学院出版社

TD265.4

6

3

# 注浆加固与堵水

何修仁 等编著

东北工学院出版社



653910

### 内 容 简 介

本书论述了注浆加固土体与岩石的物理化学、物理力学过程，并介绍了加固土体与岩石的主要力学参数计算方法。书中较详细地讨论了浆液在岩石中渗透时的几何学问题；给出了不同方式注浆时的理论计算；论述了主要注浆参数（扩散半径、压力、流量等）的计算与研究方法；最后列举了我国近十年来注浆加固与堵水工程的实例。

本书可作为高等学校采矿专业研究生教材，采矿专业大学生选修课教材；也可供铁路、水力水电、矿山建设、基础与地基、各种地下工程等部门从事注浆工程的工程技术人员、研究与设计工作者使用参考。

### 注 浆 加 固 与 堵 水

何修仁 等编著

东北工学院出版社出版 (沈阳·南湖)	东北工学院出版社发行 东北工学院印刷厂印刷
开本：850×1168 1/32	印张：10 字数：259千字
1990年3月第1版	1990年3月第1次印刷
印数：0~1200册	
责任编辑：翟柱林	责任校对：张德喜
插 图：冯 伟 张淑萍	
ISBN 7-81006-166-2/TD·8	定价：2.58元

## 前 言

本书根据作者在教学与科研工作中所积累的资料和成果编著而成。第一至第十三章由何修仁执笔；第十四章由石达民执笔；第十五、第十六章由刘斌执笔。全书由何修仁统稿。

由于作者理论水平有限，实践经验不足，书中难免有误，敬请同行批评指正。

作 者

# 目 录

前 言	
绪 论 .....	( 1 )
第一章 注浆法加固土体与岩石的特征和分类 .....	( 9 )
第一节 注浆法加固土体与岩石的特征 .....	( 9 )
第二节 注浆方法的分类 .....	( 14 )
第二章 注浆加固土体的物理化学基础 .....	( 17 )
第一节 砂土加固 .....	( 17 )
第二节 黄土加固 .....	( 54 )
第三章 注浆加固土体的强度与稳定性 .....	( 57 )
第一节 砂的双液硅化注浆 .....	( 57 )
第二节 单液硅化注浆 .....	( 60 )
第三节 树脂注浆加固 .....	( 62 )
第四节 硅化注浆加固黄土 .....	( 65 )
第四章 注浆过程对加固效果的影响 .....	( 67 )
第一节 概述 .....	( 67 )
第二节 土的渗透性与化学注浆加固的适用性 .....	( 69 )
第三节 均质土中加固体的形状 .....	( 69 )
第四节 非均质土中加固体的形状 .....	( 70 )
第五节 加固半径 .....	( 71 )
第六节 主要注浆参数 .....	( 74 )
第五章 注浆帷幕计算 .....	( 75 )
第一节 孔隙性岩石注浆堵水加固帷幕计算 .....	( 75 )
第二节 注浆裂隙岩层的强度计算 .....	( 80 )
第六章 巷道周围坚硬裂隙岩石注浆加固参数计算 .....	( 86 )

第一节	注浆加固巷道围岩的力学过程及其参数的估算 .....	(86)
第二节	注浆加固参数的理论分析 .....	(87)
第三节	现场实测结果整理实例 .....	(96)
第四节	理论解的修正、分析-实测综合计算方法的可信度 .....	(100)
第五节	注浆加固岩石力学参数计算 .....	(101)
<b>第七章</b>	<b>注浆堵水理论中应用的流体力学知识 .....</b>	<b>(105)</b>
第一节	滤流方程 .....	(105)
第二节	线性源函数 .....	(108)
第三节	点源的函数 .....	(113)
第四节	不完整源的函数 .....	(116)
<b>第八章</b>	<b>浆液渗透时的几何参数问题 .....</b>	<b>(124)</b>
第一节	颗粒土的有效直径 .....	(124)
第二节	非粘性土的渗透系数 .....	(129)
第三节	孔隙直径 .....	(131)
第四节	裂隙的几何参数 .....	(135)
<b>第九章</b>	<b>渗透系数为常数的柱面注浆 .....</b>	<b>(142)</b>
第一节	向夹在密实岩石中渗透岩层的多孔注浆 .....	(142)
第二节	注浆的时间因素、注浆扩散半径 .....	(154)
<b>第十章</b>	<b>渗透系数为常数时的底部注浆 .....</b>	<b>(158)</b>
第一节	底部注浆时渗流方程的特殊解 .....	(158)
第二节	沿圆周布置注浆孔时源的相互作用 .....	(165)
<b>第十一章</b>	<b>渗透系数为变量的流动场 .....</b>	<b>(169)</b>
第一节	不同渗透系数的球面区域内具有空间源的渗流场 .....	(170)
第二节	渗透系数连续变化时空间源的渗流场 .....	(175)
第三节	渗透系数为变量时直线源的渗流场 .....	(176)
<b>第十二章</b>	<b>渗透系数沿流头长变化时的注浆 .....</b>	<b>(184)</b>

第一节	塑性液体的渗透系数·····	(185)
第二节	考虑液体塑性应力时的柱面注浆·····	(188)
<b>第十三章</b>	<b>渗透系数随时间变化的注浆·····</b>	<b>(194)</b>
第一节	分散液与岩石的接触过程·····	(194)
第二节	土层注浆的非稳定过程·····	(199)
<b>第十四章</b>	<b>注浆参数的实验研究·····</b>	<b>(202)</b>
第一节	注浆参数研究的模拟试验及其结论·····	(202)
第二节	实际注浆过程中渗流压力的变化 与参数变异·····	(221)
第三节	驱水注浆过程中浆液的运动规律及其 对参数计算的影响·····	(235)
<b>第十五章</b>	<b>注浆堵水工程·····</b>	<b>(247)</b>
第一节	复州湾粘土矿大溶洞动水双液注浆堵水·····	(247)
第二节	流沙层中化学注浆凿井·····	(255)
第三节	聚氨酯浆材在整治涵洞砂害中的应用·····	(265)
第四节	竖井壁后驱水外泄注浆·····	(273)
<b>第十六章</b>	<b>注浆加固工程·····</b>	<b>(281)</b>
第一节	吉林三家子发电厂引水涵洞加固注浆·····	(281)
第二节	金川二矿散碎结构岩层中巷道注浆加固·····	(289)
第三节	隧道支护严重破损后的围岩注浆加固·····	(295)
第四节	高层建筑物粘土砂地基硅化加固·····	(301)

## 绪 论

注浆就是将一定的材料配制成浆液,利用泵压将其注入到地层的裂隙、孔隙和空洞之中,浆液扩散、凝固、硬化,以达到加固地层或堵水的目的。

采用注浆法形成堵水或加固岩石的帷幕,必须完成两个主要过程,即物理化学和水力学过程。物理化学过程包括注浆材料的凝结和硬化机理,浆液配方的优化设计。浆液压注时的水力学过程包括浆液沿注浆管路及在地下沿孔隙、裂隙或空洞的流动过程。

采用注浆法堵水或加固岩石时,无论是自地表还是自地下工作面,无论是预注浆还是后注浆,浆液材料都是经过注浆孔压注到地层的孔隙或裂隙中去。而由注浆孔向岩石或土壤的压注方式基本上有三种:沿注浆孔柱面;由注浆孔底面方式注浆;按不完整井方式压注(见图 0-1)。

实践表明,在大多数情况下,在均匀的孔隙介质中按以上注浆方式压注将形成空间对称液流。为了分析和讨论空间系,这里运用水力学中源与汇的理论。

### 1. 注浆的应用范围

如果在矿山巷道或露天矿采场附近有河流、湖泊、崩落带洼地,既使在正常水位条件下,水也会沿岩层裂隙或松散岩石的孔隙渗透到巷道或露天采场,给采掘工作造成困难。为了与渗透水作斗争,不仅用水泵排水,而且常常采用堵水的方法。如图 0-2 所示,透水层接近地表,并且透水介质为松散土,其中大多为粗颗粒松散土。这时在水源附近设置一个防渗帷幕便可将渗水截住。

另外,当矿体恰恰位于河床下面,如我国河北的邯郸矿区、江



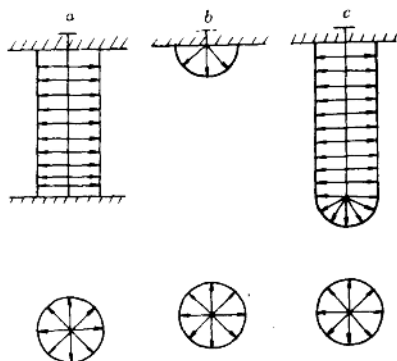


图 0-1 主要注浆方式

a—沿柱面注入；b—底部注入；c—按不完整井方式注入

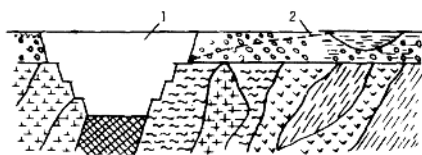


图 0-2 地面设帷幕防水

1—露天采场；2—注浆隔水帷幕

苏的梅山铁矿。为了开采时不受水的威胁，往往须将河流改道，如图 0-3。改道后为了避免新河道的水向采区渗流，有时将河底、河床用混凝土或钢筋混凝土贴面。但是，这种方法造价高。为了节省投资，在改道后的河流附近也可以设置注浆帷幕。

还有一种情况是矿山巷道围岩有含水裂隙或含水喀斯特溶洞。这些裂隙和溶洞有的与地表有水力联系，有的没有联系。这时要采用地面或工作面预注浆。

设计注浆帷幕时要注意两种情况：一种是裂隙断面很小、分布均匀。在这种裂隙中浆液流动时基本保持连续性渗透的特点，这时可按水力学方法进行计算。另一种情况是遇到大溶洞（洞穴），此时

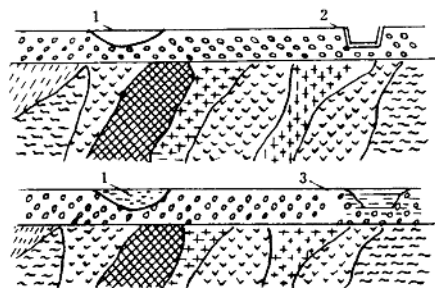


图 0-3 河床附近的防渗帷幕

1—旧河道,2—钢筋混凝土河床,3—注浆帷幕

注浆类似向大体积结构中浇灌。当然再不能采用水力学方法。在很深的含水岩层开凿地下结构物时,采用注浆法,从经济效益和技术上都是合理的。

目前注浆法不仅应用于堵水,而且用于加固巷道及采场围岩。如在我国金川镍矿用后注浆法加固巷道围岩取得了良好效果。苏联对后注浆加固围岩的力学过程进行了理论分析和现场测试。结果表明,注浆后岩石的粘结力增加 40~70%,平均增加 50%,从而提高了巷道的稳定性。注浆技术还可以应用于结构物的基础工程、露天矿边坡加固、采场顶板加固、自然发火矿床的防火等工程。

## 2. 注浆方法

大家都知道,常用的注浆材料有水泥、粘土、沥青及其它化学材料。水泥浆和化学浆液不仅可以充填岩层中的空隙,而且可以将岩石中的部分碎屑胶结在一起,使它们胶结成为统一而密实的整体,从而使岩层强度提高。沥青的粘结作用并不大,但做为密封材料来说其抗渗性很好。

由于采用的浆液材料物理化学性质不同,在岩石裂隙或孔隙中的流动规律也不同。譬如沥青虽然也是高分散系胶体溶液,但是

在高温条件下,它非常接近均匀的液体,并遵循牛顿内摩擦定律。而水泥浆、泥浆及其混合物具有塑性,不遵循牛顿定律,所以熔化的沥青在其它条件相同时渗透系数只与粘度有关,而水泥浆悬浮液的渗透系数除了与粘度有关,还与其流动速度有关,这将使我们要讨论的计算问题更加复杂。不过在某种情况下这两种浆液材料的流动方程很相似,这就有可能得到统一的方程式用来描绘粘性液体经注浆孔向土层注入时的简图并按这一简图计算注浆参数。

注浆法可以用于坚硬含裂隙的岩石(砂岩、页岩、石灰岩、花岗岩、花岗片麻岩)也可用于含碎屑、碎石及砾石的土层。当然土层必须有足够的裂隙和孔隙宽度以便浆液能注入。分散系液体能否渗透到裂隙或孔隙中去决定于裂隙、孔隙的最小尺寸与浆液内固相颗粒尺寸的比例关系。根据多年施工及试验经验得知,裂隙开裂宽度不小于 $(0.15\sim 0.25)\times 10^{-3}\text{m}$ 时,水泥颗粒才能注入。在松散土层注浆时要求土的最小粒径应大于 $4\times 10^{-3}\text{m}$ 。如果采用细颗粒水泥浆,当土壤颗粒粒径小于 $2\times 10^{-3}\text{m}$ 时也能注入。用沥青注浆时,粘度是决定性因素,冷却后粘度立即增大,在狭小的裂隙和孔隙中很难注入。

岩层中的含水量大小也影响浆液材料的选择,水泥浆不能用于具有很大流速的地下水,一般情况下流速不得大于 $200\text{m/d}$ 。水利工程中将该值定为 $600\text{m/d}$ 。

在大裂隙岩层中注浆时,不仅须浓度大的悬浮液,而且要掺加大量的廉价的充填材料,如砂、亚砂土和亚粘土。为了节省水泥,也可先用粘土注浆,然后再用水泥注浆。

注浆时形成隔水帷幕的条件很不相同,所以用数学方法描述浆液的压注过程及裂隙或孔隙中的流动规律是非常困难的。只有当介质的几何结构是均匀的,譬如碎屑、碎石、卵石(砾石)、土层及裂隙分布均匀的坚硬岩层的情况下才有可能用数学方程来描述。

任何天然的松散土壤都是由许多大小不同的颗粒组合而成的。为了运用数学方法研究注浆过程,我们可以人为地规定所谓土

颗粒的有效直径。浆液流束沿着这些具有有效直径的土颗粒堆积成的孔隙流动。通过这种方法将非均匀土壤变换到假定的均匀土壤。土壤的有效直径确定方法将在以后介绍。

所以,研究土壤物理力学性质(孔隙率、粒度测定)是进行注浆施工时首先要遇到的问题。

研究非粘结性土壤比较容易。利用探井采样,钻孔取试样都比较可靠。相反,研究岩石裂隙则比较困难。因为取得的岩芯往往不能揭示裂隙的发育程度,当然更难确定裂隙岩石的吸收能力了。可是象裂隙的分布及其特征、裂隙的大小及其相互联系、裂隙的主导方向等恰恰是极其重要的参数。在这种情况下要参看根据大规格勘探巷道(平峒、探井、井筒)编制的勘探报告以及描述裂隙的图纸。为了确定岩石的吸水性可应用水力学及电动力学方法。

### 3. 注浆方式

注浆施工普遍用柱面压注方式。在中高压作用下钻孔内的浆液通过孔的侧面注入岩石的裂隙和孔隙。这种注浆方式有两种方案,即挤压式与循环式。挤压注浆时浆液不再从钻孔返回贮浆池。在微小裂隙岩石注浆时必须采用挤压式注浆。而循环式注浆时,岩石未吸收的一部分浆液返回到贮浆池,然后反复向钻孔压注。这样,在注浆孔内形成浆液循环流动,避免水泥沉淀。在大裂隙岩石注浆时常采用循环注浆方案。

柱面注浆方式须完成下列工序:①孔口的准备,以便安设导向管;②用胶结材料固定导向管;③通过导向管钻注浆孔;④经压盖在每个导向管的上端下注浆管;⑤沿注浆管注浆。

挤压式注浆可自地表、矿井井筒工作面或其它巷道工作面进行。这时每次注浆段高,视注浆材料及岩石中裂隙大小不同而有区别。用水泥注浆时一般取 10~20m;沥青注浆取 30~40m;化学注浆变化范围很大,一般在 0.5~10m。当注浆孔壁不稳定时要用套管加固。套管上钻有圆形或缝形孔眼,以便浆液通过。

无论在任何条件下,注浆的上部边界都要有牢固的保护岩柱以免注浆时向地面或巷道跑浆。如果没有坚固的岩柱,须砌筑砖石、混凝土或钢筋混凝土的止浆垫。

井巷壁后注浆时可采用底部注入方式(点注浆)。

所谓后注浆系指在地下工程已经施工完毕后,为了加固支架后的围岩或堵水而进行的注浆工程。砌体本身加固或防渗时也采用后注浆。注浆管可以预埋也可以现安装。

底部注浆的效率比柱面注浆低,但工序却相当简单。

#### 4. 注浆材料的发展

注浆材料是注浆工程中重要的组成部分。能否正确合理地选择注浆材料将直接影响注浆工程的成败与技术经济指标。

最早使用的注浆材料是石灰和粘土。1864年开始用水泥注浆。粘土与水泥均属于颗粒性材料,其粒径为 $5\sim 85\mu\text{m}$ ,因此,用它们在砂、土(粒径小于 $1.1\text{mm}$ )和细裂隙(宽度小于 $0.1\text{mm}$ )渗透系数低于 $10^{-2}\text{cm/s}$ 岩层中注浆非常困难。但是,由于水泥注浆具有结石体强度高,材料来源广,价格低,运输、贮存方便,以及注浆工艺比较简单等优点,迄今水泥仍是应用最广泛的主要注浆材料。70年代中期自从在苏联开始应用综合注浆法以来,粘土浆液又被重新重视起来。这种浆液的主要配方是:粘土 $23\sim 26\%$ 、水泥 $10\sim 12\%$ 、水玻璃 $1\sim 1.2\%$ ,工业用水等。这样的浆液与传统的水泥浆相比,它具有较高的触变性、较好的浸入性与较好的塑性。

为了提高注浆加固岩石、砂、土与堵水效果,20世纪初出现了化学注浆材料。这种注浆材料比水泥可灌性好,凝胶时间容易调整,某些化学浆材固砂强度也不低,所以近百年来发展很快。我国在化学注浆方面的研究与应用是从使用水玻璃开始的。50年代末逐步开始使用环氧树脂、甲基丙烯酸酯,60年代开始使用丙烯酰胺。后来脲醛树脂、铬木素、聚氨酯均相继被应用并取得了成功。

注浆材料的分类方法很多,既使在同一个国家,不同的部门对

注浆材料的分类也不尽相同。根据注浆目的可分为以加固为主的注浆材料和以堵水为主的注浆材料。但是,有时很难区分开,有些浆液既能用于加固,也能用于堵水。所以,一般还是按浆材种类与组成来划分。这样可分为水泥浆、粘土浆和化学浆三种,见表 0-1。

表 0-1 注浆材料分类表

浆材分类	水泥浆	单液水泥浆 水泥-水玻璃双液浆
	粘土浆	粘土-水泥浆
	化学浆	水玻璃类 脲醛树脂类 铬木素类 丙烯酰胺类 聚氨酯类 其他

对理想注浆材料的要求:

(1)浆液是真溶液,而不是悬浊液。浆液粘度低,流动性能好,能渗到细小裂隙与细粉砂层。

(2)凝胶时间可从几秒至几小时范围内调节,并能准确地控制,浆液凝胶在瞬间完成。

(3)浆液的稳定性好,在常温常压下,长期存放不改变性质,不发生任何化学反应。

(4)浆液应无毒无嗅,对环境不污染,对人体无害,非易燃易爆物品。

(5)浆液对注浆设备、管路、混凝土结构物、橡胶制品等无腐蚀性,并且容易清洗。

(6)浆液固化时无收缩现象,固化后与岩石、混凝土、砂子等有一定粘结性。

(7)浆液结石体有一定抗压、抗拉强度、不龟裂,抗渗性能好、防冲刷性能好。

(8)结石体耐老化,能长期耐酸、碱、盐、生物细菌等腐蚀,并且不受温度、湿度变化的影响。

(9)材料来源丰富,价格便宜。

(10)浆液配制方便,操作容易。

迄今为止,注浆加固与堵水技术在地下工程领域中已经取得相当大的成功,但是,目前很多注浆工程还是凭经验施工,缺少理论指导与科学分析,因而影响了注浆加固与堵水效果和技术经济指标的提高,甚至造成人力物力的许多浪费。其中对注浆加固体的力学性质,浆液流动时的力学过程以及为工程所设计的注浆参数等理论问题,尤其缺少系统完整的研究与论述。本书作者根据国内外现有的资料和自己的研究成果,力图侧重论述这方面的基本理论,以促进我国注浆技术水平的提高。并介绍国内近十年来注浆工程一些实例。由于注浆材料、注浆设备与注浆工艺方面的专著已为数不少,本书不再重述。

# 第一章 注浆法加固土体与岩石的特征和分类

## 第一节 注浆法加固土体与岩石的特征

本章主要介绍水泥注浆,粘土注浆,沥青注浆,硅化注浆,树脂注浆等加固方法的特征。

### 1. 水泥注浆

作为注浆材料的水泥,于19世纪首先在法国开始被人们所重视。1802年伯林伊工程师最先使用水泥于注浆法中。1864年在矿山竖井施工中首次应用水泥注浆技术,并取得成功。

水泥注浆可用于地下工程的堵水,也可用于加固破碎岩石和松散土体。在岩土的空洞、裂隙与大孔隙中,水泥浆逐渐充填,逐渐硬化,形成了水泥石。显而易见,经过水泥注浆处理,建筑物的地基承载能力可以得到提高,地下工程的围岩条件可以得到改善。

有时在进行化学注浆时,需用水泥注浆作辅助手段,以便使化学浆液顺利地注入岩土的细小孔隙中,发挥堵水和加固的作用,而不致流失。

水泥注浆时可使用纯水泥浆,水泥-粘土浆以及水泥-水玻璃浆。在每种情况下都应合理选择浆液配方与水灰比。根据现有经验水灰比一般在 $1\sim 0.4$ 之间。除此之外,浆液还应具有以下性质:流动性在 $10\sim 14\text{cm}$ 以上,2小时之内的析水率在 $0\sim 2\%$ 之间,28天的抗压强度不小于 $1\sim 2\text{MPa}$ 。这种浆液的密度一般为 $1.6\sim$



1.85g/cm<sup>3</sup>。所有技术特征都应根据设计计算确定。

实践表明,水泥注浆用于堵水时,因为岩石裂隙细微,渗水现象往往不能完全消除。其中由于水泥磨碎颗粒大(一般为50μm),使0.2mm以下的微裂隙得不到充塞是一个原因,除此而外水泥注浆的结石率也很难达到百分之百,这也是有残余渗水的另一个原因。但掺加具有膨润土成份的粘土可以改善水泥注浆质量。因此,目前许多水泥注浆工程中一般都要向水泥浆中掺加5%左右的粘土。

50年代以来苏联研究并提出了水泥-粘土浆配方。水泥-粘土浆比水泥砂浆有一系列优点:节省水泥用量(粘土掺加量达25~40%);浆液不离层;结石率可达到百分之百;抗水性能好;硬化期间不被水冲刷;与岩石、混凝土接触好;流动性好;可注性好;渗散值可达18~22cm;固结体强度达1.5~3.0MPa。

近年来又出现发泡性水泥浆液,可用于含喀斯特溶洞与裂隙岩层。这种浆液掺加表面活性物质的加气剂,所以能形成发泡性悬浮液。丙烯硫酸盐,磺酸环烷可做为表面活性物质。掺加水泥重量1%的活性物质便可使发泡量成倍增加。活性物质继续增加,发泡量也随之增加。浆液密度可达到0.3~1.7g/cm<sup>3</sup>。发泡浆液也具有较好的泵抽吸性,在静力与动力条件下都很稳定,在水中也不破坏,并且具有一定的结构强度。因浆液密度不同,结石体强度也随之变化,一般可达0.5~4.5MPa。时间愈长强度愈高。透水性不大,一般在0.08~0.06m/d之间。

## 2. 粘土注浆

粘土注浆包括纯粘土注浆与以粘土为主的粘土-水泥注浆。

纯粘土注浆用于喀斯特溶洞或大裂隙岩层。干燥岩层的喀斯特溶洞与大裂隙内被粘土浆充填后,浆液的水份被岩层吸收。为了使粘土浆的水份子不致很快蒸发,注浆后几天之内需要保持一定的静水压力。