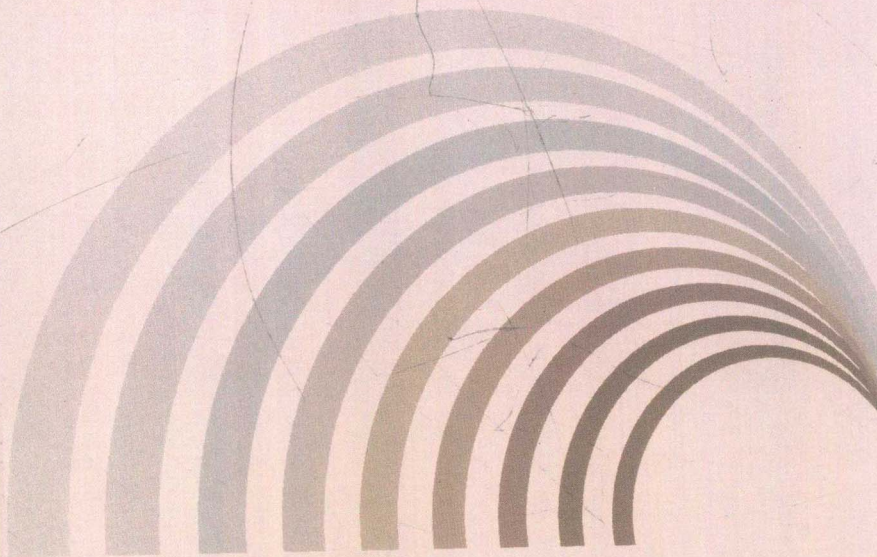


地下工程岩体涌突水注浆封堵机理 试验研究

胡巍 綦建峰 钟华 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

国家自然科学基金资助项目(批准号: 41472268)

地下工程岩体涌突水注浆封堵机理 试验研究

胡巍 綦建峰 钟华 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下工程岩体涌突水注浆封堵机理试验研究/胡巍, 綦建峰, 钟华著. —武汉: 武汉大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-307-19051-1

I. 地… II. ①胡… ②綦… ③钟… III. 地下工程—注浆堵水—研究 IV. TD743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 296549 号

责任编辑: 鲍 玲

责任校对: 李孟潇

版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 虎彩印艺股份有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 11.5 字数: 164 千字 插页: 1

版次: 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19051-1 定价: 39.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

序

涌突水问题是地下工程建设及地下资源开采中普遍存在的工程地质问题。涌突水事故的发生往往导致巨大的经济损失甚至人员伤亡。注浆技术作为现代岩土加固防渗处理的主要手段，已广泛应用于地下工程涌突水的预防和应急治理中。

铁路、公路隧道，水电站地下洞室群，采矿等人类地下工程活动空间主要为岩体环境。有关数据表明，90%以上的地下工程涌突水都与岩体裂隙或断层有关。目前岩体注浆工程的设计和施工，更多地依赖技术人员的经验，缺乏合理的理论指导。尤其是在涌突水已经发生的岩体裂隙动水环境，注浆过程中浆液在动水的作用影响下，其扩散及凝固封堵机理更加复杂。注浆是隐蔽工程，工程现场无法对浆液在岩土体内部的变化现象进行直接的监测，因此，对注浆的认识和研究往往只能通过室内模拟试验来进行。

基于此，中国矿业大学资源与地球科学学院注浆研究课题组针对岩土注浆技术进行了一系列研究，包括高压压密注浆、土体动水注浆、透明土模拟注浆等。其中，课题组成员胡巍、綦建峰、湛铠渝等对动水条件下裂隙岩体注浆浆液扩散封堵规模这一研究方向作了不少探索，并取得了一些成果。本书对地下工程涌突水特征进行了分析，对动水注浆进行了工程地质分类。以此为基础，采用透明介质模拟管道和裂隙，分别进行了管道和裂隙的动水注浆封堵试验，研究了不同水头、浆液配比、动水流速等因素影响下浆液的扩散规律，并获得了动水条件下管道和裂隙介质中注浆的封堵机理、封堵条件和判据。在试验中，也发现了诸多以前未曾发现和认识的现象，如浆液注入动水瞬间的水击现象、浆液注入裂隙时的动水绕流现象等。

本书所阐述的注浆试验方法、试验思路以及获得的认识成果，为同行专家学者进一步认识岩体动水注浆以及深入研究动水注浆提供了新的思路和参考。

陈阳华

2016年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景和意义	3
1.2 发展概况	4
1.2.1 注浆材料	5
1.2.2 注浆理论	7
1.2.3 岩体注浆模拟试验	10
1.3 注浆技术研究存在的问题及发展方向	11
第2章 岩体涌突水及注浆水力学特征	13
2.1 概述	15
2.2 地下水渗流研究发展概况	15
2.3 岩体涌水类型划分及基本要素	16
2.3.1 涌水类型划分	16
2.3.2 涌水构成的基本要素	19
2.4 岩体空隙结构及渗流特征	20
2.4.1 裂隙流基础问题分析	21
2.4.2 管道流基础问题分析	23
2.5 岩体可注性	24
2.6 常见动水注浆工程地质模型及特征	26
2.7 相似理论及相似判据	30
2.7.1 相似概念	30
2.7.2 相似准则	31

第3章 管道动水注浆模型试验研究	35
3.1 概述	37
3.2 管道注浆模型试验系统	37
3.2.1 注浆机	38
3.2.2 注浆管路及动水管路	39
3.2.3 定水头水源	40
3.2.4 数据监测采集设备	40
3.3 动水水泥注浆模型试验	43
3.3.1 试验设计	43
3.3.2 试验现象及结果分析	44
3.3.3 管道水泥注浆封堵原则与条件分析	54
3.4 动水化学注浆模型试验	58
3.4.1 脲醛树脂浆液工程性质	59
3.4.2 试验设计	61
3.4.3 试验现象及结果分析	62
3.4.4 脲醛树脂浆液管道封堵机理及条件分析	66
第4章 裂隙动水注浆模型试验研究	73
4.1 概述	75
4.2 裂隙动水注浆模型试验系统	75
4.2.1 功能要求	75
4.2.2 试验平台系统设计	76
4.2.3 裂隙模拟材料选择及可行性分析	76
4.3 试验设计	84
4.3.1 试验因素水平的确定	84
4.3.2 正交试验设计	85
4.4 裂隙动水注浆试验堵水效果分析	86
4.4.1 堵水效果评判标准	86
4.4.2 注浆堵水效果及动水流量变化过程分析	87
4.4.3 影响堵水效果因素分析	99

4.4.4 充填及非平直裂隙动水注浆堵水效应及影响因素分析	116
4.5 浆液扩散及留存封堵过程	121
4.5.1 光滑平直裂隙动水注浆扩散及封堵过程分析	122
4.5.2 光滑非平直裂隙动水注浆扩散及封堵过程	136
4.5.3 平直充填裂隙动水注浆扩散及封堵过程	139
4.6 注浆压力及裂隙渗流压力变化规律	142
4.6.1 注浆压力变化特征	142
4.6.2 裂隙渗流压力场变化特征	143
4.7 浆液扩散规律及封堵机理分析	147
4.7.1 非动水条件水平裂隙浆液扩散机理及规律分析	147
4.7.2 动水条件有限边界裂隙浆液扩散规律	150
4.7.3 浆液固结封堵机理分析	153
4.8 动水注浆浆液有效封堵原则及条件	155
4.8.1 基于浆液时变固化特性的动水裂隙注浆留存封堵机理	155
4.8.2 黏时变浆液裂隙动水注浆留存封堵原则及条件	156
第5章 结语	163
参考文献	168
后记	174

第1章 绪 论

1.1 背景和意义

随着我国国民经济建设的不断发展,能源开发与交通建设需求日益增加,工程项目日趋繁多复杂。在水利、采矿、公路、铁路等工程建设中,地下工程项目越来越多。而我国地域广阔,地质地貌条件丰富多样,各种不良工程地质条件为地下工程的正常施工和运营带来诸多棘手问题。其中,工程开挖后,地表水、地下水的渗、涌、突问题颇为常见,且危害较大。无论涌水量大小,均直接或间接带来无法估量的灾难或损失。涌水量较大时,可在瞬间冲毁机器甚至造成人员伤亡。如2007年宜万铁路野三关隧道^[1]工作面突水事故,一个半小时内突水量达15.1万立方米,洞内各类施工机械几近全部被冲出洞外,更导致3人死亡,7人失踪,损失惨重。当涌水量较小时,虽短期内无直接灾害性后果,但随着工程运营时间的持续,则致使地下水环境恶化,地层沉降变形,甚至进而引发工程结构的逐渐变形和破坏。如黄淮矿区众多煤矿立井井壁反复破裂、淋水,即为地层失水沉降后井筒所受竖向附加应力增加所致。突、涌水问题,频繁地出现在公路铁路隧道、矿山巷道、水电站地下厂房等各类工程建设中。面对此类工程地质灾害,岩土体注浆堵水技术可较为有效地解决该问题。

注浆,又称灌浆,是将浆液通过一定压力,注入到岩土体中,充填驱散空气、水体后凝固起来,以改善岩土体结构,起到加固、防渗的作用。在地下工程注浆堵水中,被注介质以岩体居多。与土体介质不同,岩体介质一般无法当作等效连续介质来处理。岩体中存在着多种多样的赋水通道,如孔隙、溶隙、管道、溶洞、裂隙等。如何合理、有效地在岩体中注浆,是长期以来尚未解决的技术难题,由于岩体内部构造的复杂性和多变性,给注浆理论的研究带来了很大困难。

目前,关于地下工程突涌水条件下的岩体注浆堵水研究开展得较少。在地下水不断涌入地下空间的动水条件下,注浆过程中浆液材料在岩体中的扩散和胶凝机制与静水或干燥条件相比有较大区

别。地下工程涌水具有各种各样的特点，注浆的动水条件复杂多样。在工程实践中对地下工程突涌水灾害进行治理时，浆材的选择、注浆参数的选取以及注浆工程的具体实施往往是根据工程类比法来确定的，难免带有一定的盲目性和随意性，致使一些工程花费了较大代价却未达到预期效果。因此，深入了解和研究认识浆液在岩体动水环境中的扩散及封堵机理对注浆加固防渗工程的设计、注浆堵水效果预测以及提高工程质量等有重大的指导意义。

1.2 发展概况

注浆是一项实用性很强、应用范围很广的工程技术，它是用液压、气压或电化学的方法，把某些能很好地和岩土体固结的浆液注入到岩土体的孔隙、裂隙等结构中去，使岩土体成为强度高、抗渗性能好、稳定性高的新结构体从而达到改善岩土体物理力学性质的目的。

注浆技术的发展已有上百年历史。注浆技术的发明者是法国土木工程师查理斯·贝里格尼。19世纪初，他采用注浆法修复被水流侵蚀的挡潮闸的砾砂土地基，这是在基础工程历史上第一次应用注浆技术。20世纪初，开始出现化学注浆。在随后的20世纪，注浆技术的研究和应用得到了迅速发展，各种注浆材料相继问世。特别是1960年以来，各国大力发展新型注浆材料，注浆工艺和设备得到了空前的发展，注浆技术的应用范围越来越广^[2-9]。

我国注浆技术的研究和应用较晚。20世纪50年代初我国才开始起步，60年代，我国开始研究和试用了有机高分子化学注浆材料，经过60年的发展，在科学研究和工程实践方面都取得了世界瞩目的丰硕成果。例如，软土地基加固、低渗透性介质的渗透注浆、高层建筑的加固纠偏、深基坑开挖的支护和防渗及大坝围堰深板桩墙帷幕技术等的广泛应用，注浆技术已遍及水利、建筑、交通、矿业、油田、文物保护等各个领域。与此同时，注浆基本理论、注浆材料和注浆工艺以及注浆设备等方面也相应地得到了较快发展。

1.2.1 注浆材料

理想的注浆材料通常应符合以下原则：①浆液黏度低、流动性好，能进入细小空隙；②浆液的凝固时间可以调节掌控，浆液一旦凝胶应在短时间内完成；③浆液无刺激性气味，不污染环境，对人体无害；④浆液对地层、注浆管路等无腐蚀性；⑤浆液黏结力强，固结后具有较好的抗拉和抗压强度；⑥浆液材料来源广泛。

(1) 注浆材料的发展^[10-14]

自注浆技术产生之日起，注浆材料便随着注浆技术的发展而不断变化。

1802年，法国人查理斯率先使用黏土浆液，开启了注浆的先河。此后的数十年里，浆液材料主要为黏土、火山灰、生石灰等一系列简单的材料。第一次将水泥作为注浆材料使用的是在1856年至1858年之间，由英国人基尼普尔率先使用。随后，水泥逐渐成为注浆的主要材料，并得到了广泛的应用。

化学注浆最早可以追溯到1884年，英国人Hosagood在印度利用化学药品来固砂。1920年，荷兰人尤思登开始使用水玻璃、氯化钙进行注浆，通常认为这是化学注浆的开始。在此后的二三十年内，水玻璃一直作为注浆材料在欧美各个国家得到了广泛应用。20世纪50年代，黏度接近于水、凝胶时间可以任意调控的丙烯酰胺(AM-9)在美国研制成功。随后注浆材料迎来了大发展时期，木质素类、酚醛树脂类、脲醛树脂类、丙烯酸盐类、聚氨酯类、呋喃树脂类、不饱和树脂、环氧树脂类等性能各异的化学注浆材料被不断研发出来。例如，1960年美国研制的硅酸盐和铬木素；1960年的酚醛塑料；20世纪60年代日本的丙烯酰胺类材料“东风-SS”。1974年日本福冈发生了因为注丙烯酰胺而导致的人类中毒事件，随后开始禁止使用有毒的化学注浆材料。我国化学注浆主要以水玻璃材料为主，其他化学注浆材料基本上都是20世纪50年代、60年代后开始研究，诸如丙烯酰胺、脲醛树脂、铬木素、中化-798等一系列材料。但这些材料一般都用于砂土的固结、岩基和结构裂

缝的防渗和补强。

(2) 注浆材料的分类及特点

经过两百多年时间的发展,注浆材料种类各异、品种繁多。总的可分为两大类,无机类注浆材料和有机类注浆材料^[15]。广泛应用的注浆材料分类如图 1-1 所示。



图 1-1 注浆材料分类

水泥类浆材是所有注浆材料中使用最广泛、用量最大的浆材。水泥浆材具有来源广泛、价格便宜、无毒无害、固结性能好等一系列优点。水泥分为普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥等,其中普通硅酸盐水泥在注浆工程中应用最多。纯水泥浆液水灰比(W/C)通常在 $0.6:1 \sim 2:1$ 之间。普通水泥颗粒较大,粒径可达 $20\mu\text{m}$,通常可注性不如化学浆液。实际使用时,可通过加入减阻剂、减水剂、分散剂等添加剂来改善浆液特性。

有机类化学浆液具有无机类浆液无法比拟的可注性。在注浆施工中,浆液黏度低,所需注浆压力小,浆液扩散半径大。可注入最

小隙宽或粒径可达 0.03mm 的裂隙或土体。且浆液凝固时间通常灵活可调,堵水效果好。但该类型浆液往往价格较高,且部分浆液存在一定的毒性,易造成地下水污染或危害人体健康。

1.2.2 注浆理论

注浆理论是在水力学、流体力学、固体力学等理论上发展而来,主要对浆液在地层中的流动形式进行分析,建立注浆压力、流量、扩散半径、注浆时间之间的关系,用以指导注浆工程的设计和施工。随着注浆技术的广泛应用和深入研究,注浆理论也在不断地发展。目前,注浆理论主要有:渗透注浆理论、岩体裂隙注浆理论、劈裂注浆理论、压密注浆理论、动水注浆理论等。

(1) 渗透注浆理论

最近几十年来,国内外学者根据地下水的动力学和流变学原理对渗透注浆进行了理论研究,发展了诸如马格理论(即球形扩散理论)、柱形扩散理论和袖套管法理论等渗透注浆理论^{[15][16]}。其中:马格理论假定被注浆的介质为各向同性体,浆液在介质中呈均匀球形扩散,虽然它给出了注浆压力、扩散半径、注浆时间和注浆量之间的关系,但不适用于复杂工程。柱形扩散理论假定浆液向四周呈柱形扩散,并且推导出注浆压力、注浆扩散半径、注浆时间和注浆量之间的关系,但它很难运用在复杂的岩体工程中。袖套管法理论把浆液简化为牛顿流体,没考虑浆液的性质随着时间的变化对渗透规律的影响。

(2) 压密注浆理论

压密注浆技术最早起源于美国,从 20 世纪 50 年代早期开始,压密注浆技术被应用于工程领域,但没有人对压密注浆的原理进行研究。1969 年, Graf^[17] 首次提出了与压密注浆相关的基本概念,并且描述了土体压密注浆的全过程。1973 年, Warner 和 Browns 研究了有关土体压密注浆的室内试验和工程应用情况,提出了在最弱的土层(或土体)中压密注浆的挤密效果最好。1983 年, Baker^[18]

等对软土地层进行压密注浆，有效控制了因隧道掘进施工引起的土体沉降变形。李向红^[19]从理论分析和数值模拟及现场试验等方面对软黏土中压密注浆进行了理论探索和试验研究，但其分析中没给出注浆压力与浆泡扩散距离之间的关系，将浆泡作为刚体进行处理也值得商榷。另外，对速凝型的浆液而言，其注入的方式是在某一注浆段注入而可能不在注浆管底端注入，这时如果仍将单个浆泡假设成球体是不太合适的。

(3) 劈裂注浆理论

劈裂注浆技术^[20-22]目前应用比较广泛，但对劈裂注浆理论的研究相对滞后于其工程应用。劈裂注浆就是指先在弱透水性的地基中钻孔，在钻孔中施加液体压力；液体压力逐渐上升，当其超过岩土体发生劈裂的压力时，在岩土体内阻力最小的主应力面上就会发生水力劈裂。劈裂注浆是通过钻孔附近所形成的网状浆脉来加固土体。根据劈裂注浆机理模型实验研究，浆液在岩土体中的流动大致可分为：鼓泡压密阶段、劈裂流动阶段和被动土压力阶段。劈裂注浆的过程通常为先压密后劈裂的过程。W. 法墨等人(1974)对土体劈裂注浆引起的地面抬升提出了计算方法。

(4) 岩体裂隙注浆理论

岩体裂隙注浆理论基本上分为牛顿浆液扩散理论和宾汉流体浆液扩散理论。对于经典的牛顿流体扩散理论研究，贝克^[23](Baker, 1974)将裂隙简化为平直、光滑、等开度的平行裂隙，并假设注浆压力水头 P 和流量 Q 恒定不变，推导出了牛顿流体在裂隙内作层流运动时的关系式。郝哲^[24]推导了牛顿浆液、非牛顿浆液在裂隙中的径向流、轴向流扩散公式，以及多孔注浆的相互作用关系。刘嘉材^[25]根据浆液的流变特性，研究了牛顿浆液在岩基裂缝中的运动规律。石达民^[26]对牛顿流体进行过实验研究，推导了浆液作一维层流时压力的变化规律。张良辉^[27]根据地下水黏性阻力的影响推导了牛顿流体灌浆时间与扩散半径关系的公式。

而对于宾汉流体扩散理论来讲,宾汉流体是典型的塑性流体,它比牛顿流体具有更高的流动阻力,只有提高注浆压力才能使宾汉流体达到更大的扩散距离。Wallner^[28]、Amadei^[29]等人相继推导了宾汉流体在裂隙中的流动规律。我国学者杨晓东^[30]等人也进行了宾汉流体的扩散研究并取得了一些成果。这些扩散理论能否可靠地指导工程实践,主要取决于对岩体中结构面调查的可靠程度,而结构面几何参数的密度概率模型难以准确确定。

(5) 动水注浆理论

动水是指水体在一定规模的含水地质构造中进行的不符合广义达西定律的流动。矿山、隧道的涌水治理中,多数为高压、高流速、大流量的动水注浆治理。在这种条件下,以前建立在达西定律基础上注浆理论与实际出入较大,所得出的结论无法为动水注浆的设计和施工提供可靠的理论依据。

动水注浆的研究主要是从孔隙介质注浆开始的, Karol^[31]发现地下水对土体化学注浆两个主要影响:一是地下水对浆液的替换作用,二是对浆液扩散形状的改变。任志昌^[32]从理论上推导了浆液在砂土中的扩散,认为动水作用下孔隙介质中浆液形成了一系列顺水流方向移动且半径增加的圆周扩散前缘。Krizek^[33]等人通过试验研究了给定地下动水条件下的最优浆液胶凝时间,同时研究了在多孔介质中化学注浆封堵耐久性,建立了渗流速度与胶凝时间的关系曲线。王档良^[34]通过试验和数值模拟研究了多孔介质动水条件下的浆液扩散和运移规律,建立了动水条件下砂土中化学注浆扩散模型。近年来,动水裂隙注浆的研究逐渐引起大家的关注。湛铠瑜^[35]等人建立了考虑动水流速的计算裂隙浆液扩散距离的数学公式,其可靠性得到了试验验证。张改玲^{[36][37]}对比研究了在静水和动水中化学注浆浆液的扩散规律,试验发现静水中浆液扩散为以注浆孔为中心逐渐扩大的圆形,而在动水中浆液扩散为不断变化着的椭圆形。李术才^[38]等人通过一系列动水条件下裂隙水泥注浆试验,发现浆液呈U形分层扩散现象。