

岩土工程 湿磨细水泥灌浆技术

WET GRINDING CEMENT GROUTING TECHNOLOGY IN
GEOTECHNICAL ENGINEER

陈 昊 尹作仿 魏 涛 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩土工程 湿磨细水泥灌浆技术

陈 昊 尹作仿 魏 涛 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水利部长江水利委员会长江科学院历时 30 多年,围绕三峡工程水工裂隙岩体防渗与加固问题,系统研究了湿磨细水泥灌浆的制备、材料性能、颗粒细度检测与灌浆工艺等关键技术,涉及岩石力学、机械设计及制造、无机材料、光电仪器及软件开发和水利水电施工等多个学科,取得了一系列卓有成效的综合性研究成果,形成了湿磨细水泥灌浆技术。为展现三峡工程的部分科研成就,本书是以作者所在单位和从事三峡等大型岩土工程基础处理研究与应用的工作为基础,力求从湿磨细水泥灌浆的相关理论、灌浆对象特性、灌浆材料的制备及性能研究、灌浆工艺、现场灌浆试验、工程应用和施工技术标准等多个方面,对湿磨细水泥灌浆技术进行系统的阐述。

本书内容丰富,有很强的实用性,可供从事土木工程和水工混凝土材料研究的技术与管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程湿磨细水泥灌浆技术 / 陈昊, 尹作仿, 魏涛编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5170-1521-5

I. ①岩… II. ①陈… ②尹… ③魏… III. ①水利工程—岩土工程—湿磨—微珠水泥—水泥灌浆—研究 IV. ①TV543

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第302439号

书 名	岩土工程湿磨细水泥灌浆技术
作 者	陈昊 尹作仿 魏涛 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 10.5 印张 249 千字
版 次	2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

为试验研究长江三峡水利枢纽岩体力学和相关的工程技术问题,1958年10月6日国家在水利部长江水利委员会长江科学院正式成立由主持单位和协作单位组成的“三峡岩基专题研究组”,下设有灌浆专题试验研究小组。为解决三峡工程主体建筑物基础岩体微细裂隙水泥灌浆处理难题,以陈旭荣教授为首的科研团队提出了研发细水泥浆材灌浆新技术的课题,先后开展干法制备和湿法制备两条技术路线的研究。在“七五”攻关中,长江科学院在湿磨细水泥灌浆新技术研究方面取得了一系列研究和应用成果。特别是以长江科学院岩基研究所为主的湿磨细水泥灌浆技术研究,至今已有30多年的历程。围绕三峡工程水工裂隙岩体防渗透与加固问题,系统研究了湿磨细水泥浆材的制备、材料性能、颗粒细度检测与灌浆工艺等关键技术,涉及岩石力学、机械设计及制造、无机材料、光电仪器及软件开发和水利水电施工等多个学科,取得了一系列卓有成效的综合性研究成果。先后研制定型GSM立式水泥湿磨机,GSW卧式水泥湿磨机,NSKC系列光透沉降粒度仪等高科技产品。在集成以上研究成果基础上,形成了拥有自主知识产权的湿磨细水泥灌浆技术。

为展现三峡工程的部分科研成就,本书是以笔者所在单位和笔者从事三峡等大型水工建筑物基础处理研究和应用的工作为基础,整理总结多年来的研究成果和实践经验而编写的,力求从湿磨细水泥灌浆的基本理论、灌浆对象特性、灌浆材料的制备及质量控制技术、浆材性能研究、灌浆工艺研发、现场灌浆试验、工程应用和施工技术标准等多个方面,系统的阐述湿磨细水泥灌浆技术。希望能为读者提供一定的实际帮助和指导。

本书共8章,其中第1章为湿磨细水泥灌浆理论概述,由尹作仿、陈旭荣教授编写完成;第2章湿磨细水泥灌浆材料的制备、第3章湿磨细水泥浆材中颗粒细度的检测、第4章湿磨细水泥灌浆材料的性能研究和第8章湿磨细水泥灌浆技术规范等内容,由陈昊编写完成;第5章三峡工程湿磨细水泥灌浆试验研究,由董建军教授、陈昊编写完成;第6章湿磨细水泥化学复合灌浆试验研

究与应用和第7章湿磨细水泥灌浆技术的工程应用，由魏涛教授、陈昊编写完成。全书以集体讨论与分工合作方式编著，陈昊统稿。

本书在编著中引用了长江科学院岩基研究所和材料研究所多年以来在灌浆材料方面的研究成果，部分研究成果系首次公开披露，部分工程应用资料源于长江水利委员会设计、地质单位、中国水利水电第七工程局基础分局、葛洲坝集团和小湾水电站等单位的信息和有关文献，本书的出版得到了水利部科技推广中心水利重点推广项目“湿磨细水泥浆材制备和灌浆新技术”(TG1009)的支持。

本书的编写得到了长江勘测规划设计研究院陈珙新教授、中国水利水电基础局(天津)张良秀教授的大力支持和指导。此外，长江科学院韩晓玉高级工程师、长江水利委员会工程建设监理中心陈义斌教授和南京工业大学简森夫教授等同志，对本书的完成都提供了非常宝贵的意见与资料，特此一并向上述单位和人员致谢。

特别要说明的是，本书编写的主要目的是总结长江科学院30多年来依托三峡工程研发的湿磨细水泥灌浆技术所涉及的一系列成果，力求展现研究成果的历史性和完整性。借此书出版的机会，谨向为长江水利委员会长江科学院岩土工程基础加固处理学科发展作出贡献及给予支持的各级领导、同事和学术同行表示衷心的感谢！

鉴于笔者水平有限，书中难免有不当之处，祈盼读者不吝指正。

编著者

2013年7月

目 录

前言

第 1 章 湿磨细水泥灌浆理论概述	1
1.1 湿磨细水泥灌浆介质体的类型及可灌性理论	1
1.1.1 湿磨细水泥灌浆介质体类型和特征	1
1.1.2 湿磨细水泥灌浆介质体的可灌性理论	3
1.2 湿磨细水泥浆液的特性	6
1.2.1 湿磨细水泥浆液的流变性	6
1.2.2 湿磨细水泥浆液的黏性	6
1.2.3 湿磨细水泥浆液的析水性	7
1.2.4 湿磨细水泥浆液的沉积取向性	8
1.2.5 湿磨细水泥颗粒的吸附作用	9
1.3 裂隙岩体的渗透灌浆理论	11
1.3.1 牛顿流体渗透公式	12
1.3.2 牛顿流体减速运动渗透公式	13
1.3.3 宾汉姆流体渗透公式	15
1.3.4 黏性浆液渗透公式	15
1.4 浆液在岩体裂隙中的流动机理	16
1.4.1 牛顿型浆液的流动公式	16
1.4.2 宾汉姆浆液扩散公式	17
1.5 水泥浆液充填理论	18
1.5.1 压迫滤水理论	19
1.5.2 流动沉积理论	20
1.5.3 水泥灌浆的充填过程	20
第 2 章 湿磨细水泥灌浆材料的制备	23
2.1 概述	23
2.2 湿磨细水泥的制备设备——水泥湿磨机	26
2.2.1 水泥湿磨机的研制原则	26
2.2.2 水泥湿磨机的工作原理	26
2.2.3 水泥湿磨机的基本结构	27

2.2.4	GSM 系列水泥湿磨机制造关键技术研究	27
2.2.5	GSM、GSW 水泥湿磨机的系统集成	28
2.2.6	GSW 水泥湿磨机的调试与维护	30
2.3	湿磨细水泥浆材的制备工艺	31
2.3.1	湿磨细水泥制备的主要设备	31
2.3.2	湿磨细水泥浆材单机制备工艺	32
2.3.3	湿磨细水泥浆材多机组制备工艺	33
2.3.4	湿磨细水泥制浆工艺的特点	33
2.3.5	湿磨细水泥制浆系统	33
2.4	浆材制备过程中的主要影响因素研究	36
2.4.1	低速拌制时间对水泥浆材性能的影响研究	36
2.4.2	制浆过程中浆液温度对性能的影响研究	37
第 3 章	湿磨细水泥浆材中颗粒细度的检测	40
3.1	概述	40
3.2	浆液中水泥颗粒细度的主要检测方法	40
3.2.1	光学显微镜检测法	41
3.2.2	光透沉降法	41
3.2.3	激光衍射法	42
3.3	NSKC 光透沉降式颗粒细度检测仪	43
3.3.1	NSKC 粒度仪的特点	43
3.3.2	NSKC 粒度仪的工作原理	44
3.3.3	NSKC 粒度仪的基本结构	45
3.3.4	湿磨细水泥颗粒细度的测试	46
3.4	工程现场湿磨细水泥的细度检测	52
3.4.1	工程现场进行湿磨细水泥细度控制的意义	52
3.4.2	工程现场湿磨细水泥细度检测的一般要求	52
3.4.3	三峡工程中湿磨细水泥的细度检测	53
第 4 章	湿磨细水泥灌浆材料的性能研究	55
4.1	湿磨细水泥浆材的基本特性研究	55
4.1.1	普通水泥与湿磨细水泥浆材的基本特性比较	55
4.1.2	湿磨细水泥浆材的性能研究	58
4.2	水泥灌浆材料的抗硫酸盐侵蚀性能研究	60
4.2.1	抗硫酸盐侵蚀模拟试验研究	61
4.2.2	试验成果及分析	61
4.3	湿磨细水泥浆材性能的调控	65
4.3.1	外加剂对湿磨细水泥浆材性能的影响研究	65
4.3.2	湿磨细水泥浆材掺硅粉的试验研究	69
4.4	灌浆压力对湿磨细水泥浆材性能的影响研究	73

4.4.1	湿磨细水泥浆材模拟高压灌浆试验研究	73
4.4.2	试验研究成果及分析	74
4.5	湿磨细水泥浆材的稳定性研究	76
4.5.1	稳定性水泥浆液	76
4.5.2	湿磨细水泥浆材稳定性试验	77
4.6	干磨超细水泥浆材的性能研究	78
4.6.1	干磨超细水泥的基本性能研究	78
4.6.2	干磨超细水泥浆材性能研究	79
4.6.3	浆材的可灌性模拟试验	80
第5章	三峡工程湿磨细水泥灌浆试验研究	82
5.1	三峡工程灌浆设计简介	83
5.1.1	三峡工程帷幕灌浆设计	83
5.1.2	三峡工程固结灌浆设计简介	83
5.2	三峡工程灌浆岩体的基本特性	84
5.2.1	三峡工程主体建筑物基础灌浆岩体的基本特性	84
5.2.2	三峡工程基础岩体断层破碎带软弱泥化夹层的基本特性	85
5.3	三峡工程湿磨细水泥固结灌浆现场试验研究	86
5.3.1	三峡工程现场灌浆试验主要历程	86
5.3.2	三峡工程湿磨细水泥固结灌浆试验研究	87
5.4	三峡工程湿磨细水泥帷幕灌浆现场试验研究	91
5.4.1	三峡工程湿磨细水泥帷幕灌浆试验设计	91
5.4.2	三峡工程湿磨细水泥帷幕灌浆试验地质条件	92
5.4.3	三峡工程湿磨细水泥帷幕灌浆试验	94
第6章	湿磨细水泥化学复合灌浆试验研究与应用	98
6.1	三峡工程断层破碎带处理中的湿磨细水泥化学复合灌浆试验研究	98
6.1.1	F215 断层破碎带地质条件	98
6.1.2	室内模拟灌浆试验研究	100
6.1.3	F215 断层湿磨细水泥化学复合灌浆现场试验	102
6.1.4	复合灌浆效果检测	105
6.2	湿磨细水泥化学复合灌浆技术在三峡工程 F1050 断层加固处理的应用	107
6.2.1	F1050 断层处理方案设计	107
6.2.2	F1050 断层加固灌浆处理	108
6.2.3	水泥化学复合灌浆加固效果检测	109
6.3	丹江口水库大坝坝基防渗帷幕湿磨细水泥化学复合灌浆试验研究	110
6.3.1	帷幕复合补强灌浆试验方案设计	110
6.3.2	湿磨细水泥化学复合灌浆工艺	111
6.3.3	灌浆质量检查成果及分析	114
6.4	金沙江向家坝水电站不良地质体湿磨细水泥化学复合灌浆处理试验研究	116

6.4.1 坝基不良地质体复合灌浆试验区地质条件	116
6.4.2 水泥化学复合灌浆试验设计	117
6.4.3 化学灌浆材料室内试验	118
6.4.4 湿磨细水泥化学复合灌浆	119
6.4.5 复合灌浆试验成果及分析	123
第7章 湿磨细水泥灌浆技术的工程应用	130
7.1 湖南五强溪水电站坝基帷幕灌浆工程	130
7.1.1 工程概况	130
7.1.2 坝基防渗帷幕设计	130
7.1.3 帷幕灌浆施工	131
7.2 江西万安水电站坝基帷幕灌浆工程	132
7.2.1 工程概况	132
7.2.2 基岩微裂隙帷幕灌浆	133
7.2.3 湿磨细水泥灌浆效果及分析	134
7.3 湖北院基寺水库大坝防渗帷幕灌浆工程	137
7.3.1 工程概况	137
7.3.2 灌浆设计	137
7.3.3 湿磨细水泥灌浆	138
7.3.4 灌浆效果及分析	139
7.4 三峡一期围堰基础湿磨细水泥灌浆工程	142
7.4.1 工程概况	142
7.4.2 土石围堰防渗帷幕灌浆	142
7.4.3 湿磨细水泥灌浆效果及分析	143
7.5 云南小湾水电站基础处理及混凝土接缝灌浆工程	145
7.5.1 右岸基础湿磨细水泥固结灌浆工程	145
7.5.2 大坝混凝土湿磨细水泥接缝灌浆工程	149
第8章 湿磨细水泥灌浆技术规范	152
8.1 概述	152
8.2 《规程》的制定	153
8.3 《规程》的适用范围和主要技术内容	154
8.3.1 《规程》的适用范围	154
8.3.2 主要技术内容	154
附表	156
参考文献	158

第 1 章 湿磨细水泥灌浆理论概述

灌浆，是将某种浆液，一般是具有流动性、凝固后具有胶结力的浆液，注入地层或结构物的裂隙、空隙或孔洞内，以提高其整体性和密实性，改善其力学和抗渗性能的一种工程手段。灌浆技术是一门实用性强、应用范围广的工程技术，它的产生和发展是伴随着工程建设中不断出现问题、不断解决问题的交替过程进行的，它广泛地应用于地铁、隧道、码头、矿山、铁道、交通、水利、土木工程等各个领域。随着灌浆技术的广泛应用，新的灌浆理论、施工工艺、灌浆材料、灌浆专用设备及灌浆效果检测手段被不断地开发和研制出来，从而进一步扩大了灌浆技术的应用范围，并显著地提高了灌浆效果。

灌浆理论是灌浆技术实践的指导与前提，反过来，成功的灌浆技术实践又推动与发展了灌浆理论，两者相辅相成，缺一不可。只有不断地创新，灌浆理论与技术才能持续与时俱进。灌浆前首先要考虑灌浆的对象——介质体能否有效容纳灌进的各种浆液，浆液在灌浆过程中的流变性有何变化，这些变化是如何影响灌浆效果的。湿磨细水泥灌浆理论是在水泥灌浆理论基础上发展的一种基于湿磨细水泥灌浆材料灌浆的理论，它主要包括：作为湿磨细水泥主要灌浆对象的介质体特征；湿磨细水泥浆液的特性；微细裂隙岩体灌浆理论模型和灌浆参数的计算公式等。湿磨细水泥灌浆理论（技术）主要研究灌浆介质体能否灌浆，灌注的湿磨细水泥浆液是否合适，采用何种工艺灌浆和灌浆后会达到怎样的效果，即其内容包括：灌浆对象的可灌性；灌浆浆液及其特性；浆液在介质体内流变特性及流动规律等。

1.1 湿磨细水泥灌浆介质体的类型及可灌性理论

1.1.1 湿磨细水泥灌浆介质体类型和特征

湿磨细水泥灌浆的主要对象通常是岩体和混凝土中的空（裂）隙。将介质体中的空隙进行分类，并研究其灌浆的特点，对于弄清问题是很有帮助的。介质体中的空隙通常可划分为以下三类。

1.1.1.1 片状空隙

片状空隙是指一种夹在两块岩石之间、分布面较广的薄片状空隙，如图 1-1 所示。此类空隙在各类岩石中都可能存在，它是地壳中岩体在地壳构造运动中，受到挤压、剪切、扭曲等应力的作用，或应力解除后由于岩石断裂、层面或节理的脱开而成的。此外，混凝土坝体间的伸缩缝、陡坡段的接触缝以及钢

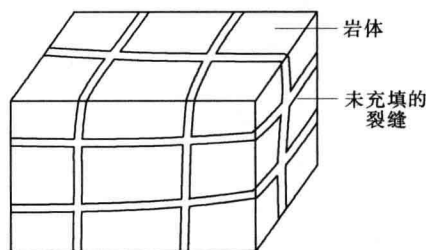


图 1-1 片状空隙

板与混凝土之间的施工缝等，也都可归为片状空隙。在岩层中的此种裂隙，往往是纵横交错、互相连接且经常与地面空间沟通的，因此它们大多都能成为浆液活动和水库渗漏的主要通道。

在具有片状空隙的介质体中钻孔，孔眼对它的切割，只能是一个很小的环形断面，其断面积等于 $2\pi r\delta$ (r 为钻孔半径， δ 为裂隙宽度)。湿磨细水泥浆液通过孔眼进入裂隙以后，必定会沿着裂隙所展布的空间，按“径向辐射形”向外流动。由于浆液每向外流动 Δr 距离，控制液流的环形断面就要扩大 $2\pi\Delta r\delta$ 的面积，因此，浆液的前进速度和压力将按照反比例迅速地减小。这就决定了灌浆只能堵塞靠近孔眼的一段有限局部范围，而不能堵塞整个裂隙系统。

1.1.1.2 网状管道与洞穴空隙

网状管道与洞穴空隙主要发生在可溶性岩类中（石灰岩中最多、白云岩中较少）。它埋藏于地下的一些“暗管”、“沟槽”和容积有时很大的“洞穴”。在溶蚀程度较严重的石灰岩中，它们经常彼此沟通成一个复杂的网络系统，如图 1-2 所示，成为水库的主要漏水通道。在一些熔岩中也会有此种空隙，那是由于熔岩岩浆在冒出地壳时内部气体和液体溶出后而遗留下来的空隙。此外，在具有片状裂隙的各类岩石中，如果这种裂隙的大部分已被次生物质所充填，则大多也还会遗留下一些可供浆液活动的管道状空隙。钻孔对此种空隙的切割，经常表现出偶然性。只有当孔眼遇到这种空隙系统时，才能表现出强烈的透水 and 吃浆。

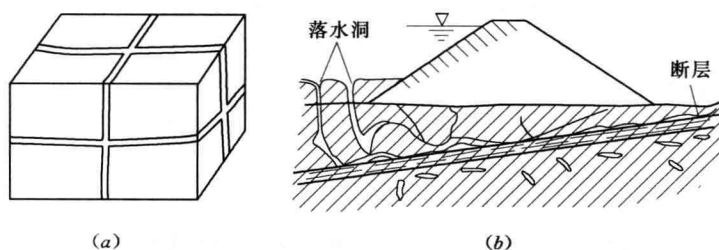


图 1-2 网状管道与洞穴空隙

浆液自某一切口进入这种管道型的空隙以后，在前进的道路上，如果没有遇到与此相连的其他较大洞穴或“管道”，则控制浆液的断面不会扩展得很大，流速也不会显著减小。这样，就像在输浆管内流动一样，浆液将流窜得很远而不得沉积。但多数情况是，浆液进入网状管道或洞穴系统，断面逐渐扩大，流速不断降低，从而发生沉积。不过，一般说来，这种灌浆的充填距离比在同等大小片状空隙里远得多。

1.1.1.3 蜂窝状空隙

蜂窝状空隙是各种土层、砂层、砾卵石层及混合层中的典型空隙。在大裂隙和溶洞里充填的泥沙和砾石中一般都包含此种空隙，如图 1-3 所示。此外，在各种岩石中产生的断层带和强烈挤压破碎带中也有大量的蜂窝状孔隙。

此种孔隙的尺寸及透水性，取决于组成介质（岩土）颗粒的大小、级配及紧密程度。一般来说，介质的颗粒愈大、级配愈差、愈松散，则其孔隙尺寸和透水性就愈大。在具有此种孔隙的介质体中作“渗透扩散”型灌浆，控制浆液的总孔隙断面面积在钻孔孔壁上为

$2\pi rL\eta$ (r 为钻孔半径, L 为灌浆段长度, η 为孔隙率)。假定浆液只作“径向辐射型”运动, 那么, 当浆液每向外流出 Δr 距离后, 控制浆液的孔隙断面面积就要扩大 $2\pi\Delta rL\eta$ 数值。很明显, 浆液的前进速度和压力随着离开钻孔的距离逐渐增大而迅速下降, 这就决定了每个钻孔只能充填有限的范围。

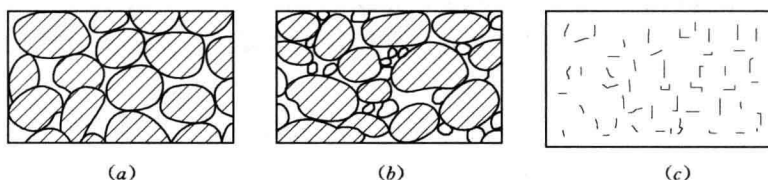


图 1-3 蜂窝状空隙

1.1.2 湿磨细水泥灌浆介质体的可灌性理论

岩土介质体的可灌性是指岩土介质能否让湿磨细水泥浆液渗入其孔隙和裂隙的可能性, 它既取决于岩体介质的渗透性, 又取决于湿磨细水泥浆液的细度和流变性, 还与渗径结构有关。不同的渗径结构具有不同的渗透几何参数 (粒状介质的颗粒有效直径、孔隙直径和裂隙介质的节理组数、宽度、密度等)。一般来说, 当介质体裂隙宽度大于灌浆材料最大颗粒直径的 3 倍以上时, 认为该介质体是可灌的。

湿磨细水泥浆液属于颗粒悬浊型浆液, 当浆材颗粒直径大于土颗粒间孔隙的有效直径或岩层裂隙宽度时, 在灌浆过程中, 浆液中的粗颗粒在灌浆管口附近或岩缝口形成滤层, 使其他较小的颗粒无法进入介质体, 因而在使用湿磨细水泥灌浆时存在其对相应介质体的可灌性问题。一般岩土介质可灌性理论主要研究渗透灌浆的岩土介质渗透几何参数与浆液粒度的比值满足的基本条件。

1.1.2.1 灌浆介质体的渗透参数

裂隙岩体的渗流模型可归结为两类: 一类是双重介质模型, 岩体由孔隙性差而透水性强的裂隙系统和孔隙性好而透水性弱的岩块系统组成, 如图 1-4 所示; 另一类为非连续裂隙介质模型, 如图 1-5 所示, 裂隙介质的主要几何参数有节理裂隙的组数、平均厚度或平均体积开裂度 δ 等。

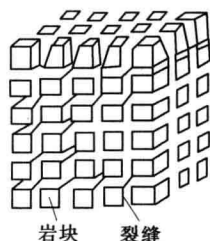


图 1-4 双重介质模型

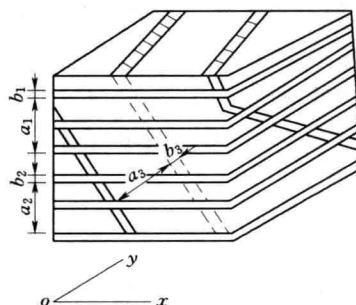


图 1-5 非连续介质的裂隙介质模型

研究节理裂隙的方法有地质学方法和水力学方法。地质学方法是对露头的岩体节理裂隙的产状、间距、频率和裂隙的宽度、粗糙度、密集度进行量测和统计；在没有露头时，采用钻孔取样和钻孔物探调查。在不具备地质调查的条件下，可采用水力学方法。水力学方法是用裂隙岩体的渗透性来计算裂隙的宽度。岩体的渗透性与裂隙组数、裂隙宽度、间距、连通状况、裂隙内的填充物、裂隙面的粗糙度等因素有关。因此岩体的透水性是一个多种因素的函数，用水力学方法计算裂隙的宽度存在多解性。在地质学方法的基础上，采用水力学方法，可以取得较好的近似值。

裂隙岩体渗透性的各向异性与裂隙组数有关：组数越少，各向异性越强；组数愈多，愈趋向各向同性。反映裂隙岩体渗透性的指标有渗透系数和单位吸水率等。裂隙岩体渗透系数是表征裂隙岩体透水性大小的一种物理量，用 m/s 或 cm/s 表示水在岩层内渗透的快慢，通常要用抽水试验方法来测定。用抽水试验方法来测定渗透系数，不仅费时而且费用较高，因而工程上多采用既简单又方便的压水试验来确定裂隙岩体渗透性的“数量型”物理量，即单位吸水率和单位吸水量。

(1) 单位吸水率和单位吸水量。我国早期对压水试验成果多采用单位吸水率即 ω 来表示，其定义为每米水头作用下，单位钻孔长度内单位时间内的吸水量，表示式为：

$$\omega = \frac{Q}{PL} \quad (1-1)$$

式中： ω 为单位吸水率， $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ ； Q 为平均或选择的灌入流量， L/min ； P 为用水柱高度计量的压水水头， m ； L 为试验段长度， m 。

(2) 吕荣值。压水试验的国际标准是吕荣压水试验方法和吕荣表示方法。我国现已采用这一国际标准。吕荣压水试验方法是法国地质工程师吕荣为评定坝基岩层进行灌浆的必要性而提出来的，即采用 10bar （约 1MPa ）压力，将水压入 5m 长的试验段内，当求得每米钻孔压入流量为 $1\text{L}/\text{min}$ 时即为 1 吕荣（ 1Lu ）。吕荣试验方法后来又经过多次修订，目前标准试验方法是，试验段的长度取 5m ，用 3 个压力点 p_1 、 p_2 、 p_3 （ $p_1 < p_2 < p_3$ ， p_3 为最大压力； p_2 、 p_1 分别为 p_3 的 $2/3$ 和 $1/3$ ），按 $p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3 \rightarrow p_2 \rightarrow p_1$ 的顺序做 5 次压水试验，每次持续时间不少于 10min ，按下式计算出 5 次的吕荣值为：

$$\text{Lu} = \frac{\text{压入流量}(\text{L}/\text{min})}{\text{试验用压力}(\text{MPa}) \times \text{试验段长度}} \quad (1-2)$$

1) 吕荣值与吸水率之间的关系为 $\text{Lu} = 100\omega$ 。试验成果表明，当透水率较小时，岩缝内的流态属于层流， $P \sim Q$ 曲线关系多为直线关系，式（1-2）才成立；当透水率较大时，流态开始呈现紊流， $P \sim Q$ 曲线关系多为曲线型，式（1-2）计算误差较大。

2) 当 $\text{Lu} < 20$ 时，用压水试验来估算渗透系数时，可用下式计算：

$$K = \frac{Q}{2\pi PL} \cdot \ln \frac{L}{r_0} \quad (1-3)$$

式中： K 为渗透系数； r_0 为钻孔半径。

此外，也可以依据经验曲线法来估算。 K 与 Lu 的有如下近似关系：当 $\text{Lu} > 30$ 时， $K = 1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ；当 $\text{Lu} = 5 \sim 20$ ， $K = 5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ；当 $\text{Lu} = 1 \sim 3$ ， $K = 1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。

(3) 单一裂隙介质体的渗透系数可用下式计算：

$$K_f = \frac{v\delta^2}{12\mu} = \frac{Ag\delta^2}{12\gamma_w} \quad (1-4)$$

式中: K_f 为单个裂隙的层流渗透系数; δ 为裂隙张开度; A 为裂隙的连续性程度; μ 为液体动力黏性系数; γ_w 为液体的重度。

(4) 连续裂隙介质体的渗透系数可按下式计算:

$$K = \frac{\delta}{b} K_f + K_m \quad (1-5)$$

式中: K_f 为单个裂隙的层流渗透系数; K_m 为岩石的渗透系数; b 为裂隙间距。

(5) 断续裂隙介质体的渗透系数。沿裂隙方向的渗透系数可按下式计算:

$$K = K_m \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L-l} - \frac{l}{L} \right) \right] \quad (1-6)$$

式中: K_m 为岩石的渗透系数; l 为裂隙长度; L 为沿裂隙方向上相邻裂隙中间的间距。

(6) 根据岩体的裂隙成因确定岩体裂隙参数。根据岩石类型和裂隙成因也可以推测裂隙岩体的渗透系数和单位厚度裂隙率。裂隙成因与渗透系数及孔隙的关系见表 1-1。

表 1-1 裂隙成因与渗透系数及孔隙的关系

岩石类型	裂隙带的成因性质	渗透系数/(m/s)	孔隙率
泥质岩、粉质岩、砂岩、结晶页岩、花岗岩、斑岩及其他结晶岩石	造岩的(原生的)裂隙带、变质作用裂隙	$1.16 \times 10^{-9} \sim 1.16 \times 10^{-6}$	0.001~0.003
泥质岩、粉质岩、砂岩结晶页岩、花岗岩、斑岩及其他结晶岩石	外生裂隙带(减压受压、风化),其中包括人为的作用	$1.16 \times 10^{-7} \sim 5.8 \times 10^{-5}$	0.003~0.01
斑岩、花岗岩、砂岩、石英岩、坚硬石灰岩及其他结晶岩石	构造破坏带、古风化壳	$1.16 \times 10^{-6} \sim 1.16 \times 10^{-3}$	0.01~0.03
石灰岩、白云岩、白垩土、石膏、硬石膏及其他各种含盐岩石及盐类	在喀斯特形成过程中产生的破碎带和古风化带(溶解、淋滤作用)	$1.16 \times 10^{-4} \sim 5.8 \times 10^{-3}$	0.03~0.07
石灰岩、白云岩、白垩土、石膏、硬石膏及其他各种含盐岩石及盐类	接近地表及水塘	$5.8 \times 10^{-3} \sim 5.8 \times 10^{-2}$	0.07~0.1

1.1.2.2 灌浆介质体可灌性的基本条件

灌浆介质体可灌性的基本条件是其孔隙直径应大于灌浆材料的颗粒直径。粒状介质孔隙直径与粒状介质的颗粒直径存在一定的关系,因此,可灌性又可用介质的颗粒直径来定义。对于粒状介质,可灌性用可灌比来表示:

$$D_{10}/G_{95} \geq 8 \quad (1-7)$$

式中: D_{10} 为颗粒在粒度分析曲线上占 10% 的对应直径; G_{95} 为灌浆材料在粒度分析曲线上占 95% 的对应直径。

实际上可灌比并不是一项普遍适用的准则,灌浆材料中颗粒级配及细粒含量对灌浆效果的影响更大。因此,对于像湿磨细水泥灌浆材料的细度评价,使用颗粒比表面积为参考条件的准确性较差,而采用颗粒粒度分布为参考条件的准确性更高。

1.2 湿磨细水泥浆液的特性

1.2.1 湿磨细水泥浆液的流变性

浆液在介质体中流动时按其流线形态一般可分为层流和紊流两种。当浆液流速较小时, 流线相互平行, 称为层流; 当流速较大时, 流线相互混掺, 称为紊流。区分两种流态

表 1-2 灌浆浆液流变性分类表

与时间无 关的流体	黏性 流体	牛 顿 流 体		非牛顿 流体
		假塑流体		
		膨胀流体		
	塑性 流体	带屈服值假塑流体	非宾汉 姆流体	
		带屈服值膨胀流体		
宾汉姆（Bingham）流体				
与时间有 关的流体	黏时流 变体	触变流体、振凝流体		

的指标是雷诺数。试验证明, 雷诺数在 10 附近时, 层流状态开始破坏。一般条件下浆液和浆液的运动均属于层流。一般情况水在介质体中的运动规律和浆液的运动规律非常相似, 不同之处是浆液具有黏度, 不像水那样容易流动。浆液的流变性反映了浆液在外力作用下的流动性, 浆液的流动性越好, 浆液流动过程中压力损失越小, 浆液在岩体中扩散得越远。反之, 浆液流动过程中压力损失大, 浆液不易扩散。

根据不同灌浆材料浆液的流变性按时间效应和其力学特性曲线分类如表 1-2 所示。各种与时间无关的流体的流变曲线参见图 1-6。

从图 1-6 中可以看出牛顿流体和宾汉姆流体的流变曲线是比较简单的直线, 也是灌浆常用的两种流体。牛顿流体是单相的均匀体系, 水和多数化学浆液以及比较稀的水泥浆液属于牛顿流体。宾汉姆流体是具有固相颗粒的非均匀流体 (泥浆、水泥浆), 它是悬浮液的典型特征, 湿磨细水泥浆液属于宾汉姆流体。其他的非线性流体, 随着剪切速率增大, 表观黏度下降, 称为假塑性流体, 流动过程中表现为剪切稀释; 当随着剪切速率的升高, 其表观黏度增大, 称为膨胀流体, 流动过程中表现为剪切稠化。

1.2.2 湿磨细水泥浆液的黏性

湿磨细水泥浆液的黏度是指水与水泥混合好后的静态黏性。由于湿磨细水泥浆液不是以一定的黏度向地层渗透。浆液在凝结之前, 其黏度随外力和时间变化。一般用浆液的流变方程及曲线描述浆液的流动变形特性, 并将其用于渗透性理论公式, 考虑对灌浆参数的影响。

湿磨细水泥浆液是典型的宾汉姆塑性流体, 其流变曲线是不通过原点的直线, 流体具有这种性质是由于流体含有一定的颗粒浓度, 在静止状态下形成颗粒之间的内部结构。在外部施加的剪切力很小时, 浆液只会产生类似于固体的弹性。当剪切

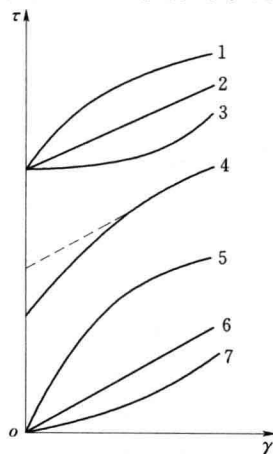


图 1-6 各种与时间无关的流体的流变曲线

- 1—带屈服值假塑性流体;
- 2—宾汉姆流体; 3—带屈服值膨胀流体; 4—黏塑性流体; 5—假塑流体; 6—牛顿流体;
- 7—膨胀流体

力达到破坏结构后（超过凝聚力），浆体才会发生类似于牛顿流体的流动，浆液的这种性质被称为塑性。宾汉姆流体的流变方程表达式为：

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (1-8)$$

式中： τ 为剪切应力，Pa； τ_0 为静剪切应力，Pa； γ 为剪切速率或流速梯度， S^{-1} ； μ_p 为塑性黏度， $Pa \cdot s$ 。

所以，宾汉姆流体比牛顿流体具有较高的流动阻力，灌注湿磨细水泥浆液时需要较大的压力，浆液才能扩散较远。对于湿磨细水泥浆液，当水灰比大于1时，属于牛顿流体；当水灰比小于1时，属于宾汉姆流体。

1.2.3 湿磨细水泥浆液的析水性

人们知道，水泥浆是由液体的水和固体的水泥颗粒混合起来的悬浮液体，属粗分散体系，水泥浆的流动属两相流。由于水泥的比重为水的3倍以上，水泥颗粒只是暂时的悬浮在其中，它时时刻刻保持着“挣脱”趋势。它之所以能暂时地悬浮，是因为在搅拌机中浆液受到机械地“搅混”，在输浆管道中则是被高流速紊流中的垂直脉动流速所卷起，一旦对水泥浆停止搅拌，或当它的流动速度降低到一定程度（譬如层流状态）后，水泥颗粒便会从浆液中挣脱出来，向底部沉积。这是水泥浆以及其他悬浮型浆液的特点。实际上，正是水泥浆的这一特点，才导致了浆体中多余水分的被排除，使这种材料的灌浆工作能取得成功。

在不同流动状态下水泥浆液的沉淀速度是不一样的，静止状态和层流时速度最快，过渡流态次之，紊流时速度最慢。通常湿磨细水泥浆液在管道中输送和在大裂隙中作高流速流动时，多表现为紊流；而在细裂隙中和其他慢速流动中，主要表现为层流。紊流的最主要特征就是脉动现象，产生脉动速度。在垂直向脉动速度作用下，固粒受到一个垂直方向上的冲力，当这个冲力大于颗粒在水中的重量时，固粒就会浮起。浆液流动速度愈大，产生的垂直脉动速度也愈大，它所具有的悬浮力也就愈大。因此，可以说决定水泥浆颗粒是处于悬浮还是下沉状态的最主要因素是浆液流动速度的大小。另外，比较重要的因素还有水泥比重、颗粒大小、水泥浆的浓度和是否有外加剂的加入等。

一般来说，在相同浆液流动速度和相同浓度条件下，水泥的比重和颗粒越大，则越易下沉。当水泥颗粒直径 $D_R < 0.001mm$ 时，通常表现为较稳定的均匀流体；当 $0.001mm \leq D_R < 0.05mm$ 时，流体只有在紊流条件下才较均匀；当 $D_R \geq 0.05mm$ 时，就需要更高的流速才能把它卷起。对于湿磨细水泥浆液，其中的水泥颗粒愈小（愈细），单位体积内的颗粒数目愈多，所具有的总表面积愈大，下沉时彼此碰撞和摩擦的机会就愈多，因而下沉就愈困难，则浆液就愈稳定。这就是湿磨细水泥浆液比普通水泥浆液更稳定的原因。

在其他条件相同时，水泥浆液愈稀（即水灰比愈大），水泥颗粒的沉降速度愈快。随着浆液浓度的加大，颗粒之间相互碰撞，摩擦的机会增多，因而下沉阻力增大，速度减慢。此外，超过一定浓度的水泥浆开始呈现出宾汉姆流体特征，只有在克服了浆液的凝聚力 c 值以后，水泥颗粒或其集团才能下沉。相关试验资料表明，当水灰比小于0.4时，水泥浆基本上不析水或析水很少。然而，在同样流速下，浓浆先于稀浆发生沉积。因为挟带能力相等时，总是浓浆中的水泥含量先超过浆液的挟带能力。通过在水泥浆液中掺入一定

数量的分散性外加剂，可以延缓水泥的下沉和析水速率。

以上的讨论仅适用于在无限流体中单个颗粒的沉降。在水泥浆这种两相流中，实际上是同时包含着许多大小、形状不等的水泥颗粒及其聚成的絮凝集团。在相同速度的流体中，它们的沉降流速各不相同，大的颗粒或集团较早期地沉降，而后才是细小的颗粒沉降。

1.2.4 湿磨细水泥浆液的沉积取向性

在水泥灌浆的充填过程中，常常会伴随发生一个对水泥粒度乃至成分的选择问题。因为水泥颗粒的沉积有个先后次序，一般是粒径大的先于粒径小的，比重大的先于比重小的，活性高的先于活性低的。于是，在不同地点上沉积下来的水泥，其颗粒大小与矿物成分，都与原来的级配有所不同。此种情况的产生，将会导致水泥结石的性质与强度差异。这就是水泥灌浆中特有的浆液沉积过程中的取向性问题。

湿磨细水泥浆液沉积的取向性与灌浆所用水泥的种类密切相关。目前，在我国常用于灌浆的水泥有硅酸盐水泥、抗硫酸盐水泥、矿渣水泥和火山灰水泥等，上述几种水泥的矿物组成中， C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 是水泥的基本熟料，而矿渣和火山灰等是在对熟料粉磨时作为活性材料后添加进去的。矿渣或火山灰掺量的不同，可引起水泥性质和名称的改变。按我国相关水泥规范规定：在普通硅酸盐水泥中，活性材料与非活性材料的添加总量不超过 15%；在矿渣水泥中可添加有 20%~70% 的粒化矿渣；在火山灰水泥中可添加 20%~50% 的火山灰质混合材料。因各种水泥的矿物组成不同，在灌浆中所产生的分选程度和对结束性能的影响也不一样，现将这几种水泥中通常包含的矿物成分及其比重列入表 1-3。

表 1-3 水泥中包含的矿物成分及其比重表

矿物名称	化学式	缩写	比重
硅酸二钙	$2CaOSiO_2$	C_2S	3.0~3.58
硅酸三钙	$3CaOSiO_2$	C_3S	3.15
铝酸三钙	$3CaOAl_2O_3$	C_3A	3.04
铁铝酸四钙	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF	3.71
氧化钙	CaO	—	3.22
硫酸钙（石膏）	$CaSO_4$	—	2.5~2.94
氧化镁	MgO	—	3.58
矿渣	—	—	2.8
火山灰	—	—	2.3~3.6

水泥结石的物理力学性能首先取决于水泥的原始矿物组成，若其中一种矿物的配比发生了变化，就会引起水泥性质的改变。以硅酸盐水泥为例，如把四种熟料的总和作为 100，前两种矿物按重量一般占总和的 75%~80%，而后两种只占 20%~25%。在每一对矿物的范围之内，它们的相对含量又可在很大幅度内变动。变换这些矿物的组成，就可获得各种具有独特性能的水泥品种。例如 C_2S 含量高，便是低热水泥； C_3S 含量多，便是高强度水泥； C_3A 含量少的则是抗硫酸盐水泥。