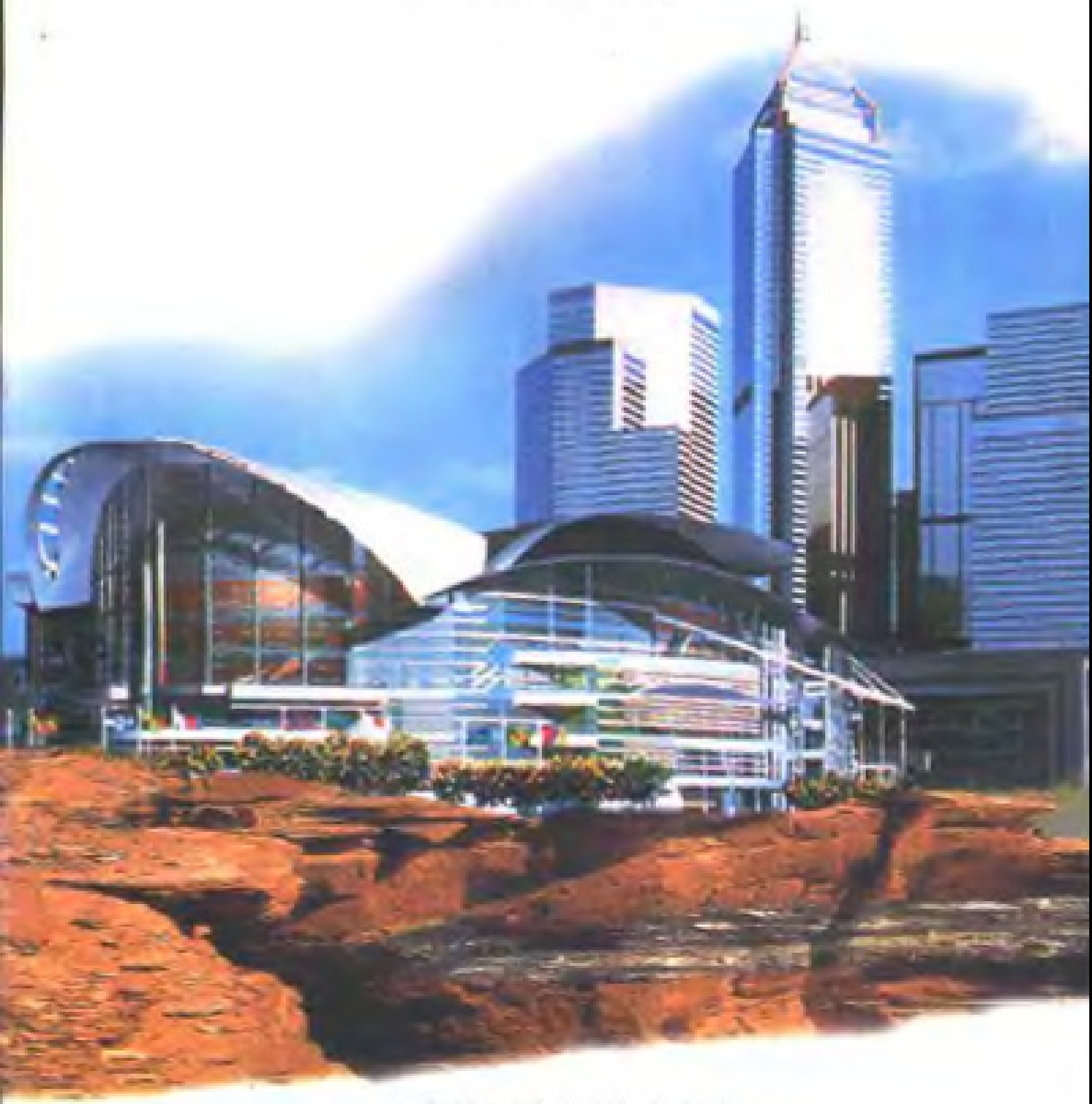
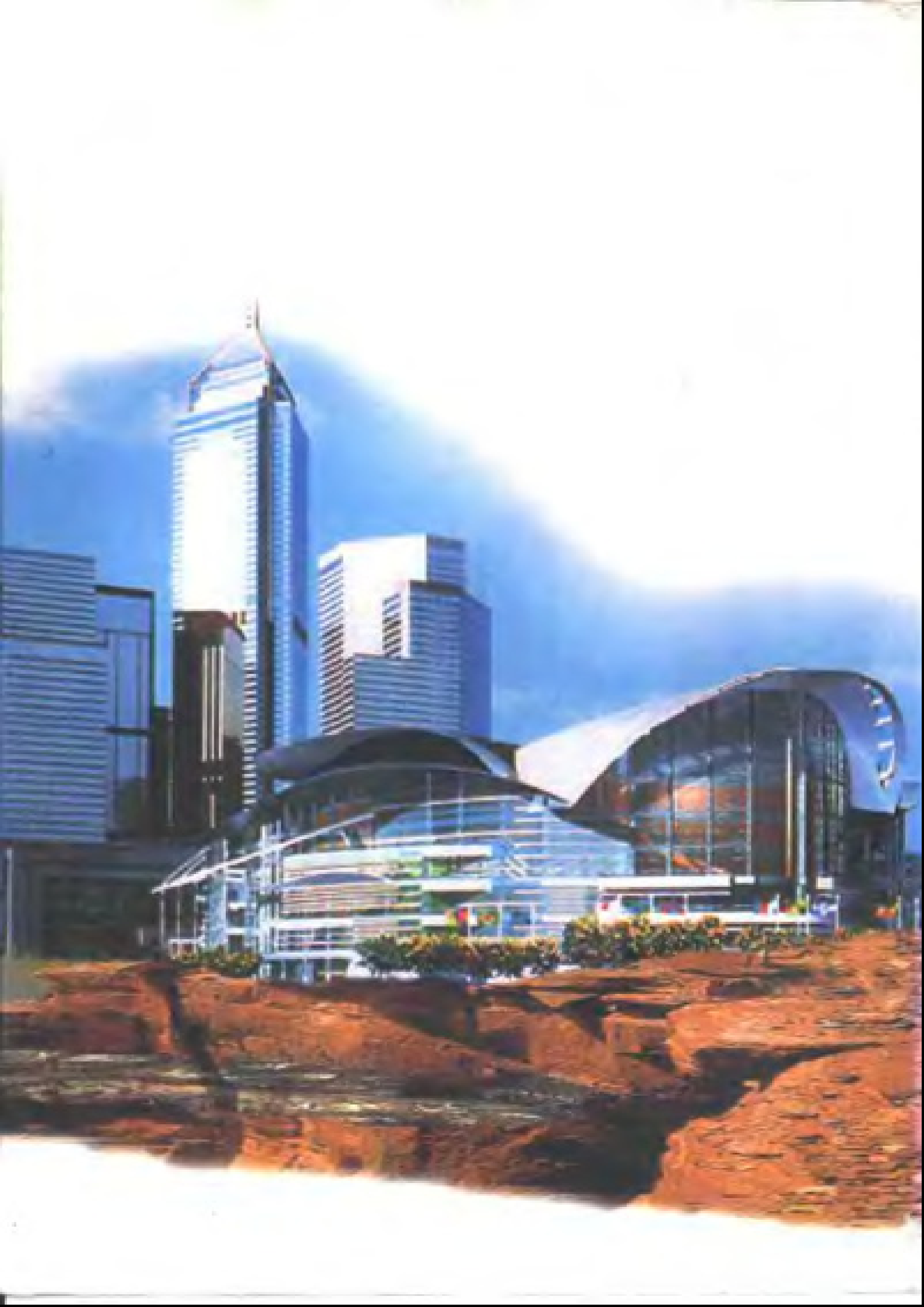
岩土工程设计计算与施工丛书 2

注浆工程设计计算与施工

彭振斌 主编



中国地质大学出版社



TU4-51
P-972
2

岩土工程设计计算与施工丛书 2

注浆工程设计计算与施工

主编 彭振斌
编者 彭振斌 胡焕校 许宏武

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

注浆工程设计计算与施工/彭振斌主编.一武汉:中国地质大学出版社:1997.8
(岩土工程设计计算与施工丛书 2)
ISBN 7-5625-1144-6

Ⅰ.注…
Ⅱ.彭…
Ⅲ.①注浆工程-技术设计②注浆工程-施工监测
中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 11718 号
Ⅳ.TU473

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山·邮政编码 430074)
责任编辑 贾晓青 **责任校对** 杨 森
印 刷 武汉测绘院印刷厂
经 销 湖北省新华书店

开本 850×1168 1/32 印张 9.125 字数 240 千字
1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷 印数 1—5000 册
定价:13.50 元

岩土工程设计计算与施工丛书编写委员会

主　编：彭振斌

副主编：张可能　陈昌富

委　员：彭振斌　张可能　陈昌富　隆　威

王殿江　许宏武　胡焕校

ABE89/10 08

编 者 的 话

近几年来，随着国民经济的高速增长，建筑工程、铁路公路工程、水利水电工程、桥涵码头工程等建设项目如雨后春笋般蓬勃兴起，迅速发展。岩土工程作为各种建设工程的前期和基础性工作，经过广大科技工作者和工程人员进行理论上的探讨、设计方面的创新、先进技术的推广和应用、施工经验的总结等，从勘察、设计到施工、监理和监测技术均已达到一个新的水平，工程质量也不断提高。但由于我们国家地域辽阔，地质条件复杂，建设工程多、分布面积广，施工队伍的素质、技术参差不齐，以及岩土工程本身具有多样性的特点，在工程实践中，仍然存在不少技术和质量问题，有的甚至造成了重大事故。因此，如何更好地总结已有的科研成果、总结施工经验、推广先进技术、提高工程质量，仍是摆在岩土工程工作者面前的一项艰巨任务。为此我们组织编写了岩土工程设计计算与施工丛书。

该丛书主要读者对象是从事岩土工程勘察、设计、施工、监理和监测的工程技术人员，也可作为相近专业人员和有关院校师生的参考书。

岩土工程设计计算与施工丛书共分六册，包括《灌注桩工程设计计算与施工》、《托换工程设计计算与施工》、《锚固工程设计计算与施工》、《深基坑开挖与支护工程设计计算与施工》、《注浆工程设计计算与施工》、《地基处理工程设计计算与施工》。其中：《灌注桩工程设计计算与施工》和《托换工程设计计算与施工》由中南工业

大学资源环境与建筑工程学院彭振斌同志编写;《锚固工程设计计算与施工》一书由中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所陈昌富同志编写;《深基坑开挖与支护工程设计计算与施工》一书由中南工业大学张可能同志（现为湖南大学土木工程系土木·水利学科博士后科研流动站博士后）编写;《注浆工程设计计算与施工》一书的第一章“绪论”、第四章“注浆设计计算”和第五章“注浆施工工艺”和第六章“质量检查”由彭振斌同志编写，第二章“注浆材料”由中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所胡焕校同志编写，第三章“注浆设备及器具”由中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所许宏武同志编写;《地基处理工程设计计算与施工》一书的第一章“绪论”和第四章“桩基处理”由彭振斌同志编写，第二章“换填法处理”、第三章“强夯法处理”和第六章“排水固结处理”由中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所王殿江同志编写，第五章“深层搅拌法”由许宏武同志编写，第七章“土的加筋技术——加筋土挡墙”由张可能同志编写，第八章“地下连续墙”由中南工业大学资源环境与建筑工程学院勘察与基础工程研究所隆威同志编写，该册由王殿江同志负责编审。该套丛书由彭振斌同志任主编。

该套丛书得到了全国各有关专家的大力支持，并提供了许多资料和宝贵的意见，特别是中国地质大学出版社、中南工业大学出版社均给予了很多帮助。在编写过程中也参阅了许多书刊杂志。编者借此向所有为本套丛书做出贡献的同志致以衷心的感谢。

由于各册书各章节是分头编写，为了适应工程上的需要，争取早日与读者见面，难免有不足之处，诚恳希望读者提出宝贵意见，谢谢。

岩土工程设计计算与施工丛书编写委员会

1996. 9.

主编简介

彭振斌，男，1952年8月生。1981年毕业于中南矿冶学院（现为中南工业大学）探矿工程专业硕士研究生并留校任教，1991年破格晋升为教授，现为中南工业大学资源环境与建筑工程学院副院长，博士生导师。长期以来从事探矿工程、岩土工程方面的教学和科研，已发表论文58篇、教材两部，主持和参与科研34项，获得过9次省部级以上的奖励，1992年被评为湖南省优秀科技工作者，1993年获得国务院政府特殊津贴。

目　录

第一章　绪论 …… (1)
第一节　定义及目的 …… (1)
一、静压注浆 …… (1)
二、高压喷射注浆 …… (2)
第二节　注浆对象及特点 …… (2)
一、静压注浆 …… (2)
二、高压喷射注浆 …… (3)
第三节　注浆工程分类 …… (5)
一、静压注浆 …… (5)
二、高压喷射注浆 …… (7)
第四节　注浆工程适用范围 …… (11)
一、静压注浆适用范围 …… (11)
二、高压喷射注浆法的适用范围 …… (11)
第二章　注浆材料 …… (16)
第一节　概况 …… (16)
一、注浆材料及其特点 …… (16)
二、注浆材料的分类 …… (18)
第二节　无机系列注浆材料 …… (19)
一、单液水泥类浆液 …… (19)
二、水泥粘土类浆液 …… (27)
三、可控域粘土固化浆液 …… (30)
四、水泥-水玻璃类浆液 …… (31)
五、水玻璃类浆液 …… (38)

第三节　有机系列注浆材料 …… (42)
一、丙烯酰胺类浆液 …… (42)
二、木质素类浆液 …… (48)
三、脲醛树脂类浆液 …… (51)
四、聚氨酯类浆液 …… (55)
五、其他有机类浆液 …… (59)
第四节　注浆材料的性能及其测试方法 …… (64)
一、密度与相对密度 …… (64)
二、粘度 …… (65)
三、pH 值 …… (67)
四、凝胶时间 …… (68)
五、结石率 …… (69)
六、抗压强度和抗折强度 …… (69)
七、渗透性 …… (70)
八、粘结强度 …… (72)
第三章　注浆设备及器具 …… (74)
第一节　概述 …… (74)
一、静压注浆设备及器具 …… (74)
二、高压旋喷注浆设备及器具 …… (76)
第二节　钻孔设备 …… (80)
一、钻机的选择 …… (80)
二、钻头 …… (84)
第三节　注浆泵 …… (99)
一、静压注浆用泵 …… (100)
二、高压旋喷注浆用泵 …… (121)
第四节　止浆塞 …… (123)
一、机械式止浆塞 …… (124)
二、水力膨胀式止浆塞 …… (128)

第五节　混合器 …… (134)
一、孔口球阀混合器 …… (134)
二、叶片式和半球式混合器 …… (134)
三、方盒式球阀混合器 …… (136)
四、混合器装置 …… (137)
第六节　其他注浆设备 …… (138)
一、搅拌机 …… (138)
二、注浆流量计 …… (141)
三、空压机 …… (142)
四、管路材料 …… (143)
第四章　注浆设计计算 …… (151)
第一节　静压注浆设计计算 …… (151)
一、注浆理论 …… (151)
二、灌浆设计计算 …… (158)
第二节　高压喷射注浆设计计算 …… (168)
一、高压水喷射流性质 …… (168)
二、加固地基的机理 …… (172)
三、加固土的基本性质 …… (175)
四、设计计算 …… (176)
第三节　劈裂灌浆设计计算 …… (182)
一、堤坝地基劈裂灌浆 …… (182)
二、土坝坝体劈裂灌浆 …… (196)
第五章　注浆施工工艺 …… (213)
第一节　概述 …… (213)
一、注浆施工方法的分类 …… (213)
二、注浆施工的机械设备的选择 …… (220)
三、灌浆 …… (220)
第二节　高压喷射注浆施工工艺 …… (224)

一、施工机具 …… (224)
二、施工顺序 …… (226)
第三节 劈裂灌浆施工 …… (229)
一、灌浆机械的选择 …… (229)
二、施工技术 …… (240)
三、灌浆期间出现问题的处理 …… (261)
四、施工记录与整理 …… (270)
第六章 质量检查 …… (278)
第一节 静压注浆质量检验 …… (278)
第二节 高压喷射注浆质量检验 …… (279)
一、检验内容 …… (279)
二、检验方法 …… (280)
第三节 劈裂灌浆质量检验 …… (281)
一、渗流检查 …… (281)
二、探井检查 …… (281)
主要参考文献 …… (282)

第一章　绪　论

第一节　定义及目的

一、静压注浆

静压注浆的实质是指利用液压、气压和电化学原理，通过注浆管把浆液均匀地注入地层中，浆液以填充、渗透和挤密等方式，赶走土颗粒间或岩石裂隙中的水分和空气后占据其位置，经人工控制一定时间后，浆液将原来松散的土粒或裂隙胶结成一个整体，形成一个结构新、强度大、防水性能高和化学稳定性良好的“结石体”。

静压注浆在我国煤炭、冶金、水电、建筑、交通和铁道等部门都得到了广泛使用，并取得了良好的效果。其加固目的有以下几个方面：

(1)增加地基土的不透水性，防止流砂、钢板桩渗水、坝基漏水和隧道开挖时涌水，以及改善地下工程的开挖条件。

(2)防止桥墩和边坡护岸的冲刷。

(3)整治坍方滑坡，处理路基病害。

(4)提高地基土的承载力，减少地基的沉降和不均匀沉降。

(5)进行托换技术，加固各种地基。

二、高压喷射注浆

高压喷射注浆，就是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至土层的预定位置后，以高压设备使浆液或水成为 20MPa 左右的高压流从喷嘴中喷射出来，冲击破坏土体。当能量大、速度快和呈脉动状的喷射流的动压超过土体结构强度时，土粒便从土体剥落下来。一部分细小的土粒随着浆液冒出水面，其余土粒在喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下，与浆液搅拌混合，并按一定的浆土比例和质量大小有规律地重新排列。浆液凝固后，便在土中形成一个固结体。固结体的形状和喷射流移动方向有关。该方法主要用于加固地基，提高地基的抗剪强度，改善土的变形性质，使其在上部荷载直接作用下，不产生破坏或过大的变形；也可以组成闭合的帷幕，用于截阻地下水流和治理流砂。定喷时，喷嘴一边喷射一边提升，喷射的方向固定不变，固结体形如壁状，通常用于基础防渗，改善地基土的水流性质和稳定边坡等工程。

作为地基加固，通常采用旋喷注浆形式，使加固体在土中成为均匀的圆柱体或异形圆柱体。

第二节　注浆对象及特点

一、静压注浆

静压注浆的主要对象是砂及砂砾石、软粘土和湿陷性黄土。其突出特点：

(1)不仅水电建设中几乎每个坝址都要进行大规模防渗和加固灌浆，在其他土木工程建设中，如铁道、矿井、市政和地下工程等，静压注浆也占有十分重要的地位。它不仅在新建工程，而且在改建和扩建工程中都有其广泛的应用领域。实践证明：静压注浆确实是一门重

要且颇有发展潜力的地基加固技术。

(2)可用的浆材品种越来越多，尤其在我国对浆材性能和应用问题较系统和深入地研究后，有些浆材通过改性使其缺点消除，正向理想浆材的方向演变。

(3)为解决特殊工程问题，化学浆材的发展提供了更加有效的手段，使静压注浆的总体水平得到提高。然而由于造价、毒性和环境等原因，国内外各类注浆工程中仍是水泥系和水玻璃系浆材占主导地位，高阶的有机化学浆材一般仅在特别重要的工程中，以及上述两类浆材不能可靠地解决问题的特殊条件下才使用。

(4)劈裂灌浆在国外已有30多年的历史，我国自70年代末在乌江渡坝基采用这类注浆工艺建成有效的防渗帷幕后，也已取得明显的发展，尤其在软弱地基中，劈裂灌浆技术已越来越多用作提高地基承载力和消除(或减少)沉降的手段。

(5)在一些比较发达的国家中，已较普遍地在注浆施工中设立电子计算机监测系统，用来专门收集和处理诸如注浆压力、浆液稠度和进浆量等重要数据，这不仅可使工作效率大大提高，还能更好地控制注浆工序和了解注浆过程本身。在勘探和注浆施工中广泛地应用电子技术，正使静压注浆从一门"艺术"转变为一门科学。

(6)由于注浆施工属隐蔽性作业，复杂的地层构造和裂隙系统难于模拟，故开展理论研究实为不易。与浆材品种的研究相比，国内外在注浆理论方面都仍属比较薄弱的环节。

二、高压喷射注浆

以高压喷射流直接冲击破坏土体，浆液与土以半置换或全置换凝固为固结体的高压喷射注浆法，从施工方法、加固质量到适用范围，不但与静压注浆法有所不同，而且与其他地基处理方法相比，亦有独到之处。高压喷射注浆的主要特点如下：

1. 适应的范围较广

旋喷注浆法以高压喷射流直接破坏并加固土体，固结体的质量明显提高。它既可用于工程新建之前，也可用于工程修建之中，特别是用于工程落成之后，显示出不损坏建筑物的上部结构和不影响运营使用的长处。

2. 施工简便

施工时，只需在土层中钻一个孔径为 50～300mm 的小孔，便可在土中喷射成直径为 0.4～4m 的固结体，因而能贴近已有建筑物基础建设新建筑物。此外能灵活地成型，它既可在钻孔的全长成柱型固结体，也可仅作其中一段，如在钻孔的中间任何部位。

3. 可控制固结体形状

为满足工程的需要，在旋喷过程中，可调整旋喷速度和提升速度，增减喷射压力或更换喷嘴孔径改变流量，使固结体成为设计所需要的形状。

4. 可垂直、倾斜和水平喷射

一般情况下，采用在地面进行垂直喷射注浆，但在隧道、矿山井巷工程、地下铁道等建设中，亦可采用倾斜和水平喷射注浆。

5. 耐久性较好

在一般的软弱地基中加固，能预期得到稳定的加固效果，并有较好的耐久性能，可用于永久性工程。

6. 浆材来源广阔，价格低廉

高压喷射注浆的浆液是以水泥为主，化学材料为辅。除了在要求速凝超早强时使用化学材料以外，一般的地基工程均使用材料广阔价格低廉的 425 号普通硅酸盐水泥。若处于地下水流速快或含有腐蚀性元素、土的含水率或固结强度要求高的场合下，则可根据工程需要，在水泥中掺入适量的外加剂，以达到速凝、高强、抗冻、耐蚀和浆液不沉淀等效果。此外，还可以在水泥中加入一定数量的粉煤灰，这不但利用了废材，又降低了注浆材料的成本。

7. 设备简单，管理方便

高压喷射注浆全套设备结构紧凑，体积小，机动性强，占地少，能在狭窄和低矮的现场施工。

施工管理简便，在单管、二重管、三重管喷射过程中，通过对喷射的压力、吸浆量和冒浆情况的量测，即可间接地了解旋喷的效果和存在的问题，以便及时调整旋喷参数或改变工艺，保证固结质量。在多重管喷射时，更可以从屏幕上了解空间形状和尺寸后再以浆材填充之，施工管理十分有效。

8. 浆液集中，流失较少

喷浆时，除一小部分浆液由于采用的喷射参数不合适等原因，沿着管壁冒出地面外，大部分浆液均聚集在喷射流的破坏范围内，很少出现在土中流窜到很远地方的现象。

9. 施工时无公害，比较安全

施工时机具的振动小，噪音也较低，不会对周围建筑物带来振动的影响和产生噪音、公害，更不存在污染水域、毒化饮用水源的问题。尽管是高压设备，在这些高压设备上有安全阀门或自动停机装置，当压力超过规定时，阀门便自动开启泄浆降压或自动停机，不会因堵孔升压造成爆破事故。此外，高压胶管（ϕ19mm 的三层钢丝裹绕高压胶管安全使用压力达 46MPa，爆破压力为 120MPa）是不易损坏的，只要按规定进行维护管理，可以说是安全的。

第三节　注浆工程分类

目前按常规的分类可以分为两大类，即静压注浆（或称为灌浆法）和高压喷射注浆。

一、静压注浆

1. 按浆液分类

静压注浆工程中按浆液可分为粒状浆液和化学浆液两大类。每

类浆液按各自的特点与灌注对象不同还可分为若干种。

粒状浆液又可分为不稳定粒状浆液[包括水泥浆液和水泥砂浆等。水泥浆液是最常用的一种浆液，由于它具有结石强度高、材料来源广、价格低、灌浆工艺比较简单的特点，除广泛用于渗透系数大于$(5\sim6)\times10^{-2}$cm/s的砂砾层灌浆（如防渗墙工程）外，在水工建筑物的接缝灌浆、混凝土补强灌浆、隧洞、回填灌浆，以及在用浆量大的地段等方面也大量被采用]和稳定粒状浆液（包括粘土浆液和水泥粘土浆液）。

化学浆液又可分为无机浆液（主要指硅酸盐类）和有机浆液（包括环氧树脂类、甲基丙烯酸酯类、聚氨酯类、丙烯酰胺类、木质素类以及其他有机物类）。化学灌浆是由化学材料配成的溶液作灌浆材料。特点是可灌性好，胶凝时间可按工程需要进行调节，对某些细微裂隙的处理和有一定流速的漏水地段的处理有其特殊的灌浆效果。

2. 按静压注浆施工分类

静压注浆施工按其作用不同分为固结灌浆、帷幕灌浆和接触灌浆3种。

固结灌浆是在岩土表层中钻孔，加固浅层地基常见的灌浆方法。如锚固灌浆就属此类，作用是增强地基的承载能力，提高地基的抗滑稳定性能和防渗能力。特点是钻孔浅、孔多，灌浆孔在地基内呈面状分布。当岩石裂隙中充填有粘土等杂质时，常常将锚固孔划分成组，使用风或水进行群孔冲洗，而后再进行群孔灌浆。

帷幕灌浆是为增强各种基础抗渗能力而被广泛采用的一种处理方法。如在坝基内，平行于坝轴线布置钻孔，在钻孔中灌浆，使浆液压入岩石裂隙或砂砾石层的空隙中去，形成一道类似帷幕的混凝土防渗墙，以此截断基础渗流和防止集中渗流，达到坝体设计的水头高度和避免基础被冲刷等目的。其特点是一般钻孔较深，呈多排线形组合，灌浆压力也较大。

接触灌浆通常是指在岩石基础上修建重力坝时，在坝体混凝土

与岩石接触面之间，特别是坝体两端与两岸陡峭（大于45°）的岩壁之间常采用的一种方法。目的在于使两者结合紧密，保持整体性，达到提高岩体抗滑稳定、增进岩石固结与防渗的目的。

3. 按注浆理论分类

按注浆理论可分为渗透灌浆、劈裂灌浆、压密灌浆、电动化学灌浆4种。

二、高压喷射注浆

当前，高压喷射注浆法的基本种类有单管法、二重管法、三重管法和多重管法等多种方法。它们各有特点，可根据工程要求和土质条件选用。

1. 单管法

单管旋喷注浆法是利用钻机等设备，把安装在注浆管（单管）底部侧面的特殊喷嘴，置入土层预定深度后，用高压泥浆泵等装置，以20MPa左右的压力，把浆液从喷嘴中喷射出去冲击破坏土体，同时借助注浆管的旋转和提升运动，使浆液与从土体上崩落下来的土搅拌混合，经过一定时间凝固，便在土中形成圆柱状的固结体（如图1-1所示），日本称为CCP_2法。

2. 二重管法

二重管旋喷注浆法是使用双通道的二重注浆管。当二重注浆管钻进到土层的预定深度后，通过在管底部侧面的一个同轴双重喷嘴，同时喷射出高压浆液和空气两种介质的喷射流冲击破坏土体。即以高压泥浆泵等高压发生装置喷射出20MPa左右压力的浆液，从内喷嘴中高速喷出，并用0.7MPa左右压力，把压缩空气从外喷嘴中喷出。在高压浆液流和它外圈环绕气流的共同作用下，破坏土体的能量显著增大，喷嘴一面喷射一面旋转和提升，最后在土中形成圆柱状固结体（如图1-2所示），日本称为JSG_2法。

3. 三重管法

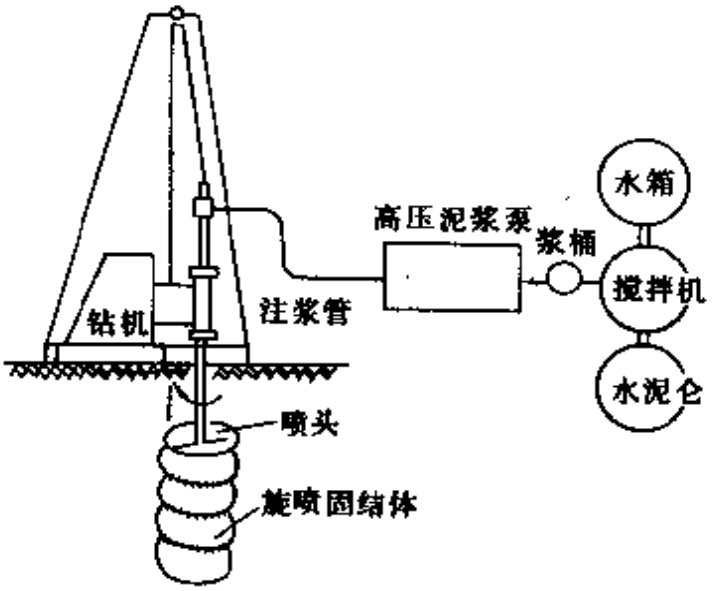


图 1-1　单管旋喷注浆示意图

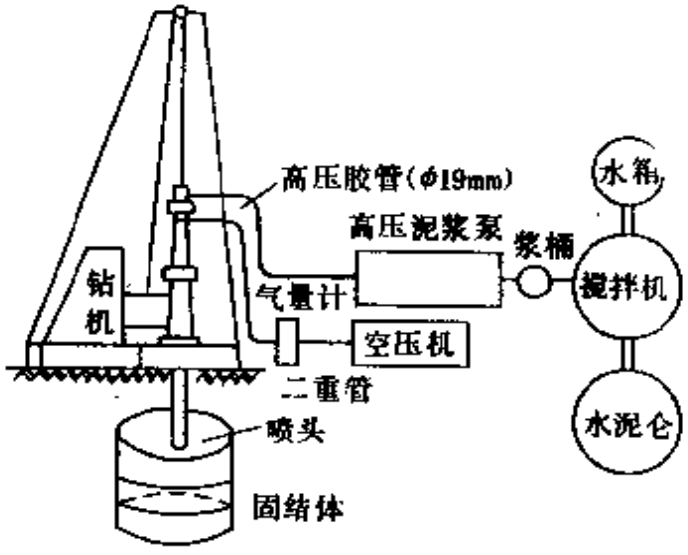


图 1-2　二重管旋喷注浆示意图

三重管旋喷注浆法是使用分别输送水、气、浆3种介质的三重注浆管。在以高压泵等高压发生装置产生20MPa左右的高压水喷射流的周围，环绕一股0.7MPa左右的圆筒状气流，进行高压水喷射流和气流同轴喷射冲切土体，形成较大的空隙，再另由泥浆泵注入压力为2～5MPa的浆液填充，当喷嘴作旋转和提升运动，最后便在土中凝固为直径较大的圆柱状固结体（如图1-3所示），日本称CJP_2法。

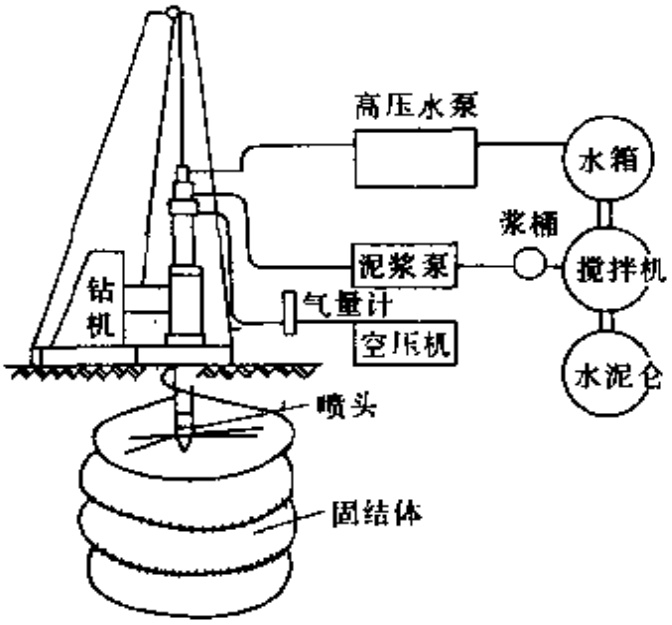


图1-3　三重管旋喷注浆示意图

4. 多重管法

这种方法首先要在地面钻一个导孔，然后置入多重管，用逐渐向下运动的旋转超高压水射流（压力约40MPa），切削破坏四周的土体，经高压水冲击下来的土和石，随着泥浆立即用真空泵从多重管中抽出。如此反复地冲和抽，便在地层中形成一个较大的空间。装在喷嘴附近的超声波传感器及时测出空间的直径和形状，最后根据工程要求选用浆液、砂浆、砾石等材料填充之。于是在地层中形成一个大直径的柱状固结体，在砂性土中最大直径可达4m（如图1-4所示），日本称之为SSS-MAN法。

以上4种高压喷射注浆法中，前3种属于半置换法，即高压水（浆）携带一部分土颗粒流出地面，余下的土和浆液搅拌混合凝固，成为半置换状态。后一种属于全置换法，即高压水冲击下来的土，全部

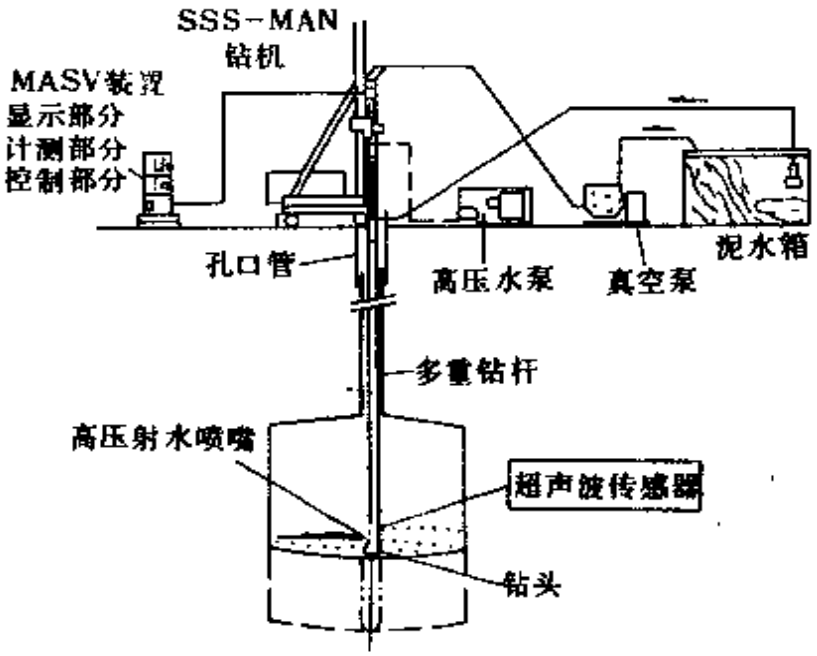


图 1-4　多重管旋喷注浆示意图

被抽出地面而在地层中形成一个空洞(空间),以其他材料充填,成为全置换状态。

5. 分喷法

近年来在单管法的基础上进行了某些改进而形成了一种新型高压喷射注浆法——分喷法。此法首先用小型钻机钻一个导孔,然后用高压泵(压力为 30～50MPa)高压喷射水流扩孔,高压水携带出土颗粒而成为全置换法,再用常规泥浆喷射水泥浆液充填而形成固结桩体,该桩体承载力高。

高压喷射注浆还可以分为定喷、摆喷和旋喷 3 种。定喷时,喷嘴在喷射时只提升而不旋转,所以其固结体呈板壁状或扇壁状;摆喷实际上也是一种定喷,而不同的是喷嘴在喷射时,提升过程中稍作一定角度的摆动,使固结体呈扇壁状;旋喷时,喷嘴在喷射时一面提升一面旋转,固结体呈圆柱状。高压喷射注浆固结体的形状和作用如图 1-5 所示。

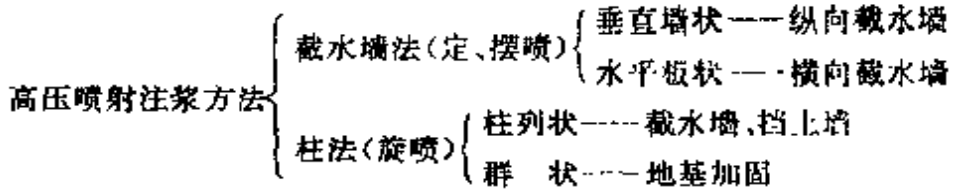


图 1-5　高压喷射注浆固结体形状和作用

第四节　注浆工程适用范围

注浆技术是与地下水作斗争的一门关键技术，主要包括堵水和加固两个方面。注浆工程其应用范围较广，分述如下。

一、静压注浆适用范围

静压注浆主要适用于以下范围：

(1)地铁的灌浆加固。通过静压注浆用以减少施工时地面位移，限制地下水的流动和控制施工现场土体的位移等。

(2)坝基砂砾石灌浆。静压注浆可作为坝基的有效防渗措施。

(3)对钻孔灌注桩的两侧和底部进行灌浆。以提高桩与土间的表面摩阻力和桩端土体的力学强度。

(4)后拉锚杆灌浆。在深基坑开挖过程中，用静压注浆做成锚头。

(5)竖井灌浆。用以处理流砂和不稳定地层。

(6)隧洞大塌方灌浆加固。

(7)用静压注浆纠偏。回升和加固建(构)筑物地基。

(8)加固桥索支座岩石。

二、高压喷射注浆法的适用范围

(一)土质条件适用范围

高压喷射注浆法加固地基技术，主要适用于处理淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基。软弱土层

〔如第四纪的冲(洪)积层、残积层等〕采用高压喷射加固，效果较好，它解决了小颗粒土不易注浆加固的难题。但对于砾石直径过大、砾石含量过多及有大量纤维质的腐植土，喷射质量稍差，有时甚至还不如静压注浆的效果，所以当土中含有较多的大粒径块石、坚硬粘性土、卵砾石、大量植物根茎或有过多的有机质时，应根据现场试验结果确定其适用程度。

对地下水流速过大，浆液无法在注浆管周围凝固的情况，对无填充物的岩溶地段，永冻土以及对水泥有严重腐蚀的地基，均不宜采用高压喷射注浆。

(二)工程使用范围

1. 增加地基强度

(1)提高地基承载力，整治已有建筑物沉降和不均匀沉降的托换工程；

(2)减少建筑物沉降，加固持力层或软弱下卧层；

(3)加强质构法和顶管法的后座，形成反力后座基础；

(4)施工作为桩基础的工程；

(5)要求应力扩散的工程。

2. 挡土围堰及地下工程建设

(1)保护邻近构筑物，如图 1-6 所示；

(2)保护地下工程建设，如图 1-7 所示；

(3)防止基坑底部隆起，如图 1-8 所示；

(4)市政排水管道工程。

3. 增大土的摩擦力和粘聚力

(1)防止小型坍方滑坡，如图 1-9 所示；

(2)锚固基础。

4. 减少振动，防止液化

(1)减少设备基础振动；

(2)防止砂土地基液化。

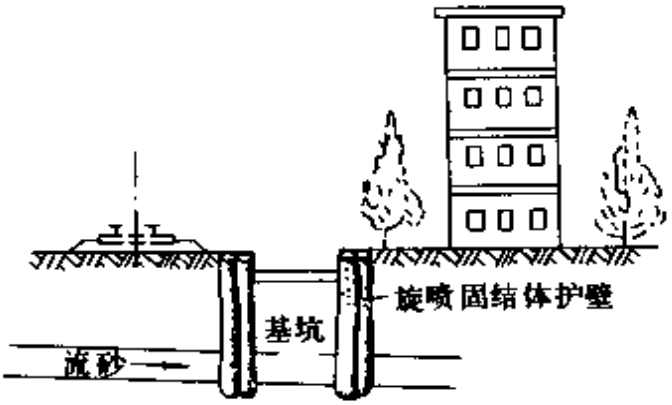


图 1-6　保护邻近建筑物

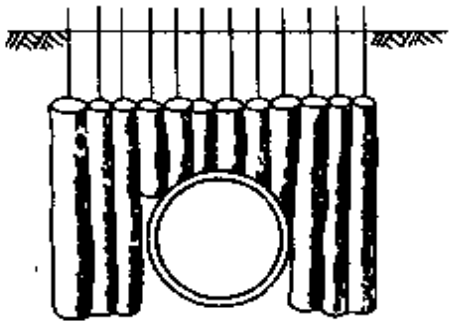
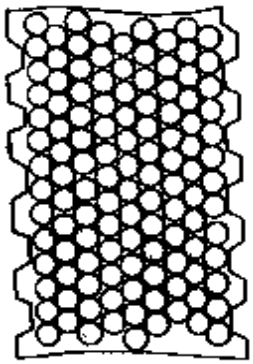


图 1-7　保护地下工程建设
（地下管道或涵洞护拱）



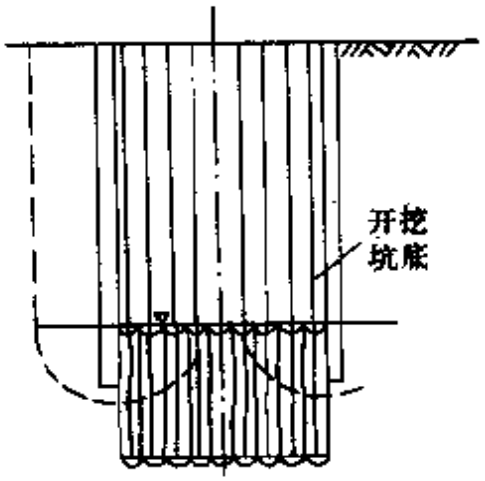


图 1-8　防止基坑底部隆起

5. 降低土的含水量

(1)整治路基翻浆冒浆；

(2)防止地基冻胀。

6. 防渗帷幕

(1)河堤、水池的防漏及坝基防渗，如图 1-10 所示；

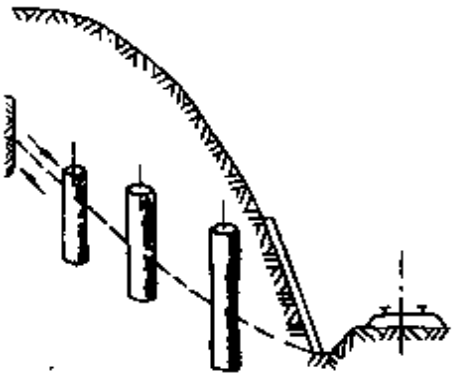


图 1-9　防止小型坍方滑坡

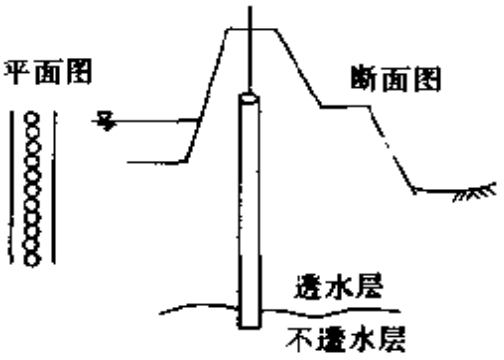


图 1-10　坝基防渗

(2)矿山井巷、井筒帷幕，如图 1-11 所示；

(3)防止盾构和地下管道漏水、漏气，如图 1-12 所示；

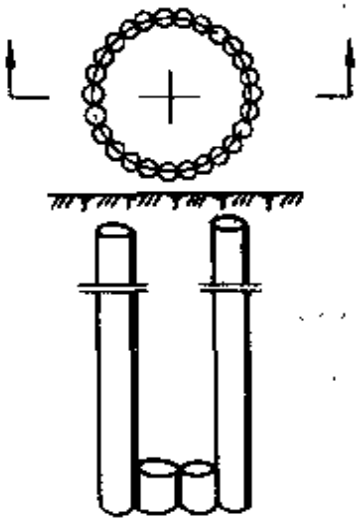


图 1-11　井筒帷幕

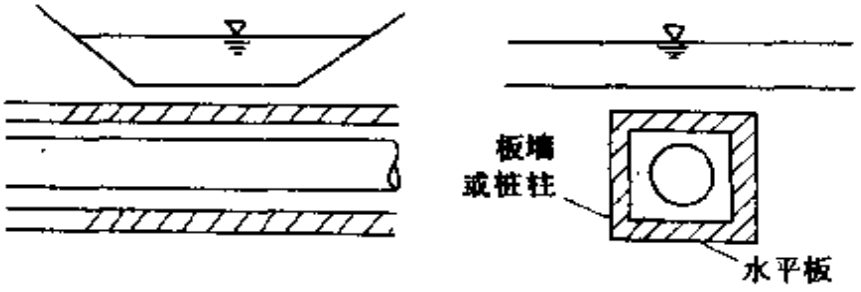


图 1-12　防止盾构和地下管道漏水、漏气

(4)地下连续墙补缺，如图 1-13 所示；

(5)防止涌砂冒水，如图 1-14 所示。

7. 防止洪水冲刷

(1)防止桥渡建筑物基础的冲刷；

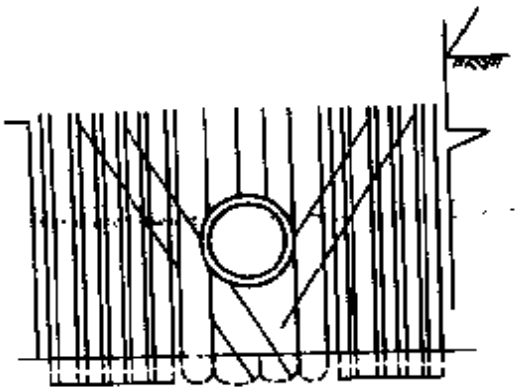


图 1-13　地下连续墙补缺

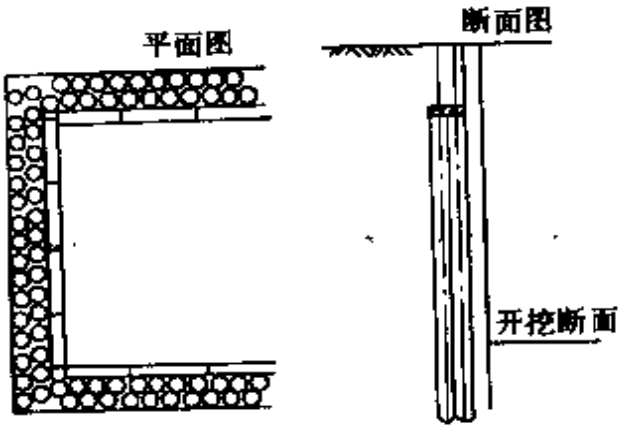


图 1-14　防止涌砂冒水

(2)防止河堤建筑物基础的冲刷；

(3)防止水工建筑物基础的冲刷。

第二章　注浆材料

第一节　概　况

一、注浆材料及特点

(一)注浆材料

以改良地基为目的，在地基中注入的材料称为注浆材料。此外，在建筑物和地基的界面，如隧道的壁后充填等使用的材料也被称为注浆材料。

注浆材料是注浆技术中不可缺少的一个组成部分，注浆之所以能起到堵水和加固的作用，主要是由于注浆材料在注浆过程中发生由液相到固相再转变成结石体的结果。因此，凡是一种液体在一定条件下可以变成固体的物质，一般来讲都可以当作注浆材料，由原材料变为结石体的过程如图 2-1 所示。

1. 原材料

原材料包括主剂(可能是一种或几种)和助剂(可能没有，也可能是一种或几种)，助剂可根据它在浆液中的作用，分为固化剂、催化剂、速凝剂、缓凝剂和悬浮剂等。

2. 浆液

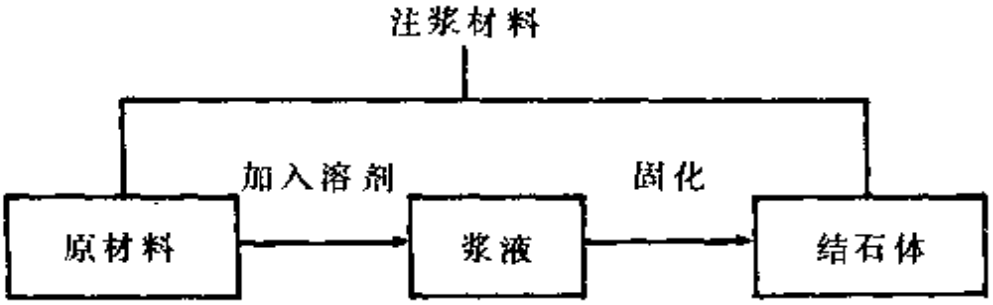


图 2-1　原材料变为结石体的过程

它是原材料用水或其他溶剂混合后所配制的液体，也是注浆时所用的材料。

3. 结石体

它是浆液经过一定的化学或物理反应之后所形成的固体，用于充填、堵塞地层中的裂隙或孔隙，达到堵水或加固的目的。

(二)对注浆材料的一般要求

注浆材料品种很多，性能也各不相同，但是作为注浆材料，应有一些共同的性质，一种理想的注浆材料，应该满足以下要求：

(1)浆液粘度低、流动性好、可注性好，能够进入细小隙缝和粉细砂层；

(2)浆液凝固时间能够在几秒至几小时内任意调节，并能准确地控制；

(3)浆液的稳定性好，常温、常压下较长时间存放不改变其基本性质，不发生强烈的化学反应；

(4)浆液无毒、无臭，不污染环境，对人体无害，属非易燃、易爆物品；

(5)浆液对注浆设备、管路、混凝土建筑物及橡胶制品无腐蚀性，并且容易清洗；

(6)浆液固化时，无收缩现象，固化后有一定的粘结性，能牢固地

与岩石、混凝土及砂子等粘结；

(7)浆液结石率高，结石体有一定的抗压强度和抗拉强度，不龟裂，抗渗性好；

(8)结石体耐老化性能好，能长期耐酸、碱、盐、生物细菌等腐蚀，并且不受温度、湿度的影响；

(9)注浆材料的粒度越细，注浆效果越好，但浆液成本也就越高；

(10)浆液配制方便，操作容易掌握，原材料来源丰富，价格便宜，能够大规模使用。

一种注浆材料同时满足上述要求是比较困难的，现有的注浆材料都或多或少地存在着这样或那样的缺点。因此，一种浆液只要符合其中的几项要求即可，在施工中根据具体情况和要求，选择最合适的一种或几种浆液配合使用，以达到预期的效果。

二、注浆材料的分类

注浆材料分类方法很多，按浆液所处的状态可分为真溶液、悬浮液和乳化液；按工艺性质可分为单浆液和双浆液；按浆液颗粒可分为粒状浆液和化学浆液；按浆液主剂性质分为无机系列和有机系列两大类(见图 2-2)。

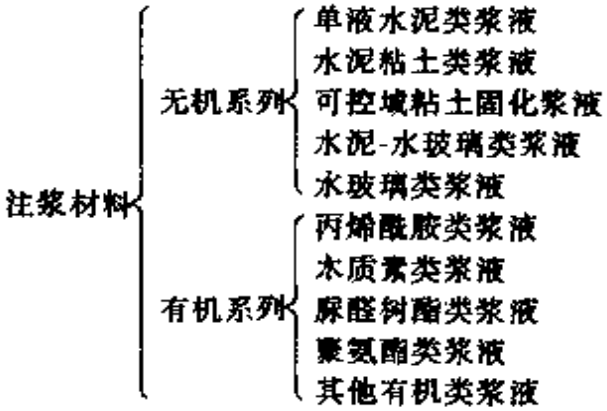


图 2-2　注浆材料按浆液主剂的性质分类

第二节　无机系列注浆材料

一、单液水泥类浆液

以水泥为主包括添加一定量的附加剂，用水配制成浆液，采用单液方式注入，这样的浆液称为单液水泥浆。所谓附加剂，系指水泥的速凝剂、早强剂、塑化剂、悬浮剂等。

(一)水泥浆的基本性能

1. 纯水泥浆的基本性能

所谓纯水泥浆是指不包括附加剂，只有水泥和水调制而成的浆液，在室内做了有关纯水泥浆性能的试验，其结果见表 2-1。

表 2-1　纯水泥浆的基本性能

水灰比(重量比)	粘度 ($\times10^{-3}$Pa·s)	密度 (g/cm³)	凝胶时间		结石率(%)	抗压强度(0.1MPa)			
			初　凝	终　凝		3d	7d	14d	28d
0.5∶1	139	1.86	7h41min	12h36min	99	41.4	64.6	153.0	220.0
0.75∶1	33	1.62	10h47min	20h33min	97	24.3	26.0	55.4	112.7
1∶1	18	1.49	14h56min	24h27min	85	20.0	24.0	24.2	89.0
1.5∶1	17	1.37	16h52min	34h47min	67	20.4	23.3	17.8	22.2
2∶1	16	1.30	17h7min	48h15min	56	16.6	25.6	21.0	28.0

注：1. 采用普通硅酸盐水泥；

2. 各种测定数据均采取平均值。

从试验结果可以看出，随着水灰比的增大，水泥浆的粘度、密度、结石率、抗压强度等都有十分明显的降低，初凝、终凝时间逐渐延长。

2. 单液水泥浆的基本性能

为了满足实际工程需要，一般都要加入附加剂来调节水泥浆的性能。附加剂按其作用不同分为以下几类：

(1)水泥的速凝剂　它是一种能够缩短水泥凝固时间的化学药剂。我国速凝剂种类很多，如"711"型、红星一型、阳泉一型、氯化钙、苏打等，其性能效果见表 2-2 至表 2-7 所示。

表 2-2　"711"型速凝剂与凝胶时间关系

速凝剂掺量(占水泥重量(%)	普通水泥		普通水泥		矿渣硅酸盐水泥		矿渣硅酸盐水泥	
	初　凝	终　凝	初　凝	终　凝	初　凝	终　凝	初　凝	终　凝
0	490min0s	570min0s	—	—	—	—	—	—
2.5	2min40s	3min48s	3min30s	4min40s	3min15s	4min5s	2min35s	3min30s
3	1min25s	2min0s	2min10s	2min55s	2min55s	3min50s	2min5s	2min52s
3.5	1min12s	1min15s	1min46s	2min40s	2min5s	3min15s	3min25s	4min5s
4	2min20s	2min57s	1min15s	1min40s	1min30s	2min30s	7min0s	8min40s
5	4min15s	4min58s	4min40s	5min20s	0min55s	1min3s	—	—

表 2-3　"711"型速凝剂掺量与强度关系

速凝剂掺量(%)	抗压强度(0.1MPa)		
	1d	7d	28d
0	27	281	508
2	69	321	482
3	151	309	473
4	178	334	442
5	198	359	471

注：试验条件为纯水泥浆，水灰比 0.4，室温 20±5 C。

表 2-4　红星一型速凝剂掺量对水泥速凝效果影响

掺量（占水泥重量）（%）	掺入方式	水灰比	室温（℃）	湿度（%）	凝胶时间	
					初凝	终凝
0	干拌	0.4	23～26	75	29min0s	413min0s
2	干拌	0.4	23～26	75	1min18s	7min12s
4	干拌	0.4	23～26	75	2min12s	3min9s
6	干拌	0.4	23～26	75	2min11s	5min0s
8	干拌	0.4	23～26	75	2min54s	8min29s

表 2-5　红星一型掺量对混凝土强度的影响

速凝剂掺量（%）	水灰比	养护条件	抗压强度(0.1MPa)			
			4h	2d	3d	28d
0	0.4	雾	0	24	82	456
2.5	0.4	雾	11	77	168	350
0	0.4	水	0	21	105	377
2.5	0.4	水	11	72	175	326

注：水泥。

表 2-6　阳泉一型速凝剂掺量对水泥凝胶时间的影响

速凝剂掺量（%）	水灰比	室温与水温（℃）	相对湿度（%）	凝胶时间	
				初凝	终凝
0	0.4	20	98		
2	0.4	20	98	3min20s	5min40s
3	0.4	20	98	1min15s	3min15s
4	0.4	20	98	1min18s	1min55s
5	0.4	20	98	1min10s	1min45s
6	0.4	20	98	1min8s	1min32s

注：普通水泥。

表 2-7　阳泉一型速凝剂掺量对水泥抗压强度的影响

速凝剂掺量（%）	水灰比	养护条件	抗压强度（0.1MPa）			
			4h	1d	3d	28d
0	0.4	潮　湿		19	185	476
2	0.4	潮　湿	3.5	6	138	341
3	0.4	潮　湿	6.0	32	236	382
4	0.4	潮　湿	9.0	89	222	399
5	0.4	潮　湿	11.0	93	197	380
6	0.4	潮　湿	12.5	90	186	378

在一般情况下，单液水泥浆还是采用古老的办法，即是在水泥浆中加入占水泥重量 5%以下的氯化钙或占水泥重量 3%以下的水玻璃，其性能如表 2-8 所示。

表 2-8　单液水泥浆基本性能

水灰比	附　加　剂		初凝时间	终凝时间	抗压强度（0.1MPa）			
	名　称	用量（%）			1d	2d	7d	28d
1∶1	0	0	14h15min	25h00min	8	16	59	92
1∶1	水玻璃	3	7h20min	14h30min	10	18	55	—
1∶1	氯化钙	2	7h10min	15h04min	10	19	61	95
1∶1	氯化钙	3	6h50min	13h08min	11	20	65	98

注：水泥为普通硅酸盐水泥。

（2）水泥的速凝早强剂　为了控制水泥浆的扩散范围，缩短注浆工程的时间和提高注浆堵水效果，加入速凝早强剂起到很好的效果。一般水泥的速凝早强剂是复合附加剂，品种如水玻璃、三乙醇胺加氯化钠及二水石膏加氯化钙等，其对浆液的影响见表 2-9 所示。

表 2-9　水泥速凝早强剂对初、终凝及抗压强度的影响

水灰比	附加剂		初凝时间	终凝时间	抗压强度(0.1MPa)				
	名称	用量(%)			1d	2d	7d	14d	28d
1∶1	0	0	14h15min	25h00min	8	16	59	—	92
1∶1	水玻璃	3	7h20min	14h30min	10	18	55	—	—
1∶1	三乙醇胺 氯化钠	0.05 0.5	6h45min	12h35min	24	39	72	130	143
1∶1	三乙醇胺 氯化钠	0.1 1.0	7h23min	12h58min	23	46	98	126	152
1∶1	三异丙醇胺 氯化钠	0.05 0.5	11h03min	18h22min	14	27	74	77	120
1∶1	三异丙醇胺 氯化钠	0.1 1.0	9h36min	14h12min	18	35	82	75	131
1∶1	二水石膏 氯化钙	1.0 2.0	7h15min	14h15min	18	28	56	—	89

(3)水泥的分散剂和悬浮剂　因单液水泥浆易沉淀析水，为了使水泥颗粒能较长时间悬浮于水中，就需要加入悬浮剂。为了降低水泥浆的粘度，提高浆液的流动性，增加浆液的可注性，往往要加入分散剂。实际上分散剂跟悬浮剂很难严格区别开来，有些药剂加入水泥浆之后，既能起到分散作用，又能起到悬浮作用。分散剂、悬浮剂对水泥浆的影响见表 2-10。

(4)水泥的其他附加剂　根据工程需要，往往在水泥浆中加入其他的一些附加剂。如缓凝剂、流动剂、加气剂、膨胀剂、防析水剂等，以满足注浆工程的特殊需要。其试剂、加量如表 2-11 所示。

表 2-10　分散剂、悬浮剂对水泥浆稳定性的影响

附加剂		水灰比	最终析水率(%)	全析水时间(min)	备注
名称	用量(%)				
			42.8	60	
$FeSO_4$	1		23.5	50	水泥为 425 号矿渣硅酸盐水泥，加水搅拌 5min 后，置于 250mL 量筒中，每隔 10min 观测 1 次析水率，稳定为止
$FeSO_4$	3		15.1	50	
$FeSO_4$	5		12.6	30	
膨润土	3		27.05	50	
膨润土	5	1∶1	24.58	70	
膨润土	8		20.4	50	
纸浆废液	1		34.41	120	
纸浆废液	5		32.58	120	
Na_3PO_4	1		31.55	70	
Na_3PO_4	3		28.2	70	

表 2-11　水泥浆的附加剂及掺量

名称	试剂	掺量占水泥重量(%)	说明
缓凝剂	木质磺酸钙	0.2～0.5	亦增加流动性
	酒石酸	0.1～0.5	
	糖	0.1～0.5	
流动剂	木质磺酸钙	0.2～0.3	
	去垢剂	0.05	产生空气
加气剂	松香树脂	0.1～0.2	产生约 10%的空气
膨胀剂	铝粉	0.005～0.02	约膨胀 15%
	饱和盐水	30～60	约膨胀 1%
防析水剂	纤维素	0.2～0.3	
	硫酸铝	约 20	产生空气

（二）单液水泥浆的配制

配制水泥浆时，力求加料严格准确，加料顺序一定要在加完水后，在搅拌的情况下方能加入水泥，以免搅拌机卡住，待搅拌均匀后，再加入附加剂，为了现场配制方便，现将一定体积中各物料的用量分别列于表 2-12 至表 2-15 中，以供参考。

表 2-12　纯水泥浆（不加附加剂）现场配制表

水灰比	水泥（袋）	水（L）	制成浆量（m^3）	备　　注
0.5∶1	24	600	1.000	每袋水泥 50kg
0.6∶1	22	660	1.026	
0.75∶1	19	712	1.029	
1∶1	15	750	1.000	
1.25∶1	13	812	1.029	
1.5∶1	11	825	1.008	
2∶1	9	900	1.050	

表 2-13　水泥浆（加 3%氯化钙）现场配制表

水灰比	水泥（袋）	50%氯化钙溶液（桶）	水（L）	制成浆量（m^3）	备　　注
0.5∶1	25	5	525	1.000	1. 水泥每袋 50kg； 2. 氯化钙溶液每桶 15L
0.6∶1	22	4.5	593	1.026	
0.75∶1	19	4	652	1.029	
1∶1	15	3	705	1.000	
1.25∶1	13	2.5	774	1.029	
1.5∶1	11	2	795	1.008	
2∶1	9	2	870	1.050	

表 2-14　水泥浆(加 4.5%水玻璃)现场配制表

水灰比	水泥(袋)	40°Be′水玻璃(桶)	水(L)	制成浆量(m^3)	备　　注
0.5∶1	24	2.5	563	1.000	1. 水泥每袋 50kg； 2. 水玻璃每桶 15L； 3. 水泥浆加入水玻璃后有变浊现象，影响可注性
0.6∶1	22	2	630	1.026	
0.75∶1	19	2	682	1.029	
1∶1	15	1.5	727	1.000	
1.25∶1	13	1.5	790	1.029	
1.5∶1	11	1	810	1.008	
2∶1	9	1	885	1.005	

表 2-15　水泥浆(加三乙醇胺与氯化钠混合溶液)现场配制表

水灰比	水泥(袋)	三乙醇胺与氯化钠混合液(L)	水(L)	制成浆量(m^3)	备　　注
0.5∶1	24	30	570	1.000	1. 水泥每袋 50kg； 2. 混合液浓度为 20%氯化钠与 2%三乙醇胺
0.6∶1	22	28	632	1.026	
0.75∶1	19	24	688	1.029	
1∶1	15	19	731	1.000	
1.25∶1	13	16	796	1.029	
1.5∶1	11	14	811	1.008	
2∶1	9	11	889	1.050	

(三)单液水泥浆的特点

单液水泥浆具有如下特点：

(1)水泥作为注浆材料，来源丰富，价格低廉；

(2)浆液结石体强度高，抗渗性能好；

(3)采用单液方式注入，工艺及设备简单，操作方便；

(4)由于水泥是颗粒材料，可注性差，难以注入中细粉砂层及裂隙岩层；

(5)水泥浆液初、终凝时间长，不能准确控制，容易流失，结石率低。

二、水泥粘土类浆液

在单液水泥浆液中，根据施工目的和要求不同，有时需加入一定量的粘土，虽可以将粘土看作水泥的附加剂，但由于粘土的加入量有时比水泥的量还多，故单列为一类，称为水泥粘土类浆液。

(一)水泥粘土类浆液的性能

水泥粘土类浆液的配比、用量及性能如表 2-16 所示。

表 2-16　粘土用量对浆液性能的影响

水灰比	粘土用量(占水泥%)	粘度($\times10^{-3}$Pa·s)	密度(g/cm³)	凝胶时间		结石率(%)	抗压强度(MPa)			
				初凝	终凝		3d	9d	14d	28d
0.5∶1	5	滴流	1.84	2h42min	5h52min	99	11.85	—	33.2	13.6
0.75∶1	5	40	1.65	7h50min	13h1min	93	4.05	6.96	7.94	7.89
1∶1	5	19	1.52	8h30min	14h30min	87	2.41	5.17	4.28	8.12
1.5∶1	5	16.5	1.37	11h5min	23h50min	66	1.29	3.45	3.24	7.30
2∶1	5	15.8	1.28	13h53min	51h52min	57	1.25	2.58	2.58	7.85
0.5∶1	10	不流动	—	2h24min	5h29min	100	—	—	20.3	—
0.75∶1	10	65	1.68	5h15min	9h38min	99	2.93	6.96	5.12	—
1∶1	10	21	1.56	7h24min	14h10min	91	1.68	4.55	2.88	—
1.5∶1	10	17	1.43	8h12min	20h25min	79	1.56	2.79	3.30	—
2∶1	10	16	1.32	9h16min	30h24min	58	1.25	1.58	2.52	—
0.5∶1	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.75∶1	15	71	1.70	4h35min	8h50min	99	0.40	2.40	2.95	—
1∶1	15	23	1.62	6h20min	14h13min	95	1.30	1.56	2.18	—
1.5∶1	15	19	1.51	7h45min	24h5min	80	0.85	0.97	1.40	—
2∶1	15	16	1.34	9h50min	29h16min	60	0.73	1.13	2.24	—

注：采用 425 号普通硅酸盐水泥，采用峰峰粘土配成 50%浓度粘土浆使用。

为了改善水泥粘土类浆液的性能，也可加入其他附加剂，其性能影响见表 2-17、表 2-18。

表 2-17　水玻璃用量对水泥粘土浆性能的影响

水灰比	粘土用量（占水泥重量）（%）	水玻璃用量（占水泥重量）（%）	凝胶时间		抗压强度(MPa)		
			初凝	终凝	3d	7d	14d
1∶1	50	10	6h30min	26h40min	0.31	0.71	0.85
1∶1	50	15	4h6min	11h52min	0.86	1.47	1.70
1∶1	50	20	3h18min	6h36min	1.55	1.94	2.19
1∶1	50	25	2h55min	5h	1.77	1.97	2.64
1∶1	50	30	1h43min	3h42min	2.04	3.12	3.76

表 2-18　“711”速凝剂对水泥粘土浆性能的影响

水灰比	粘土用量（占水泥重量）（%）	“711”用量（占水泥重量）（%）	凝胶时间		抗压强度(MPa)	
			初凝	终凝	3d	7d
1.5∶1	100	4	6h33min	28h33min	0.232	0.38
1.5∶1	75	4	5h58min	25h50min	0.318	0.58
1.5∶1	50	4	5h55min	18h46min	0.248	0.50
1.5∶1	0	4	4h58min	18h37min	0.194	0.38

注：采用 425 号普通硅酸盐水泥；粘土为蜂蜂粘土。

（二）水泥粘土类浆液的配制

配制水泥粘土类浆液时，其搅拌时间不应该超过半小时，如果再延长搅拌时间，会使结构强度下降，塑性强度降低。

（三）水泥粘土类浆液的特点

水泥粘土类浆液有如下特点：

（1）水泥粘土类浆液较单液水泥浆液成本低，流动性好，抗渗性

强，结石率高；

(2)水泥粘土类浆液其抗压强度因配方不同有所差异，一般情况下为 5～10MPa，相比单液水泥浆有所下降，只适用于充填注浆；

(3)浆液材料来源丰富，价格低廉，采用单液注入工艺，设备简单，操作方便；

(4)浆液无毒性，对地下水和环境无污染，较之使用化学药剂为添加剂的浆液更安全。

(四)水泥粘土类浆液应用例举

中国煤炭科学研究院在 ASHC 型单液水泥浆的基础上，将 A 型、S 型、H 型添加剂用于粘土浆，取得了好的效果，形成了 QCE 型系列单液水泥粘土浆类浆液。由于该系列配方复杂多变，其性能差异很大，当粘土用量为零时，则变成 ASHC 型浆液，这里介绍没有水泥的纯粘土 QE-S 型浆液的性能，其他配方的性能均介于 ASHC 型与 QE-S 型之间。QE-S 型浆液性能见表 2-19 所示。

表 2-19 QE-S 型浆液性能

序号	泥浆		S 添加剂用量(g)	粘度 ($\times10^{-3}$Pa·s)	结石率 (%)	密度 (g/cm³)	初凝时间	终凝时间
	密度 (g/cm³)	用量 (mL)						
1	1.11	200	50	19	99	1.25	6h	24h
2	1.11	200	60	19.5	99	1.27	4h	16h
3	1.11	200	70	19.5	100	1.29	3h	10h10min
4	1.15	200	60	29	100	1.31	7h35min	24h
5	1.15	200	70	31.5	100	1.35	5h15min	13h
6	1.15	200	80	32.5	100	1.37	4h10min	8h
7	1.17	200	70	32	100	1.37	5h50min	10h50min
8	1.17	200	80	35	100	1.40	5h50min	7h30min
9	1.17	200	90	33	100	1.42	4h00min	6h

三、可控域粘土固化浆液

可控域粘土固化浆液是以粘土为主剂加入一定量的添加固化剂而成的浆液，由于对粘土的要求低，一般都就地取材，因此具有浆液成本低、来源广、应用范围大等特点。

(一)可控域粘土固化浆液的性能

该浆液其粘土一般就地取材，下面介绍一种中南工业大学研制的湖泥粘土浆液，其配方及固结体力学性质如表 2-20 所示，其中 A、B 是结构剂，该浆液粘土取于湖中淤泥，粘土成本极低，其性能虽不及某些特好粘土，但能满足注浆要求，并在半工业试验中取得了明显的效果，注浆材料费为水泥浆的 1/4～1/6，并完全满足了堵水要求。

表 2-20 固结体物理-力学性能

配方	配方						塑性强度 ($\times 10^5$Pa)		抗压强度 ($\times 10^5$Pa)
序号	湖泥		水泥	A	B	水			
	种类	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	5d	10d	28d
105	A#	230	100	30		640	0.52	0.52	3.35
110	A#	300	100	10	25	590	0.10	0.18	
112	A#	300	100	5		600	0.81	1.46	3.25
113	A#	300	100	10		600	1.51	5.45	
63	G-333 3-5	300	100	70		510	70.56	70.56	4.26
67	G-333 3-5	250	100	30		620	6.93	8.50	2.03
68	G-333 3-5	300	100	10		590	9.92	11.3	4.57
70	G-333 0-3	350	100	10		650	3.13	4.38	2.03
71	G-333 0-3	500	100	10		500	5.44	6.12	2.5
73	G-333 0-3	400	80	8		512	4.17	15.67	3.65

(二)可控域粘土固化浆液的特点

可控域粘土固化浆液具有如下特点：

(1)浆液以粘土为主要成分，占 80%～85%，粘土可就地取材，浆液成本低，相当于水泥浆液的 1/3 左右；

(2)浆液具有高分散性和高可控流变性，且其结石体不收缩，因而，浆液可轻易地渗入岩石或土层的细微裂隙孔隙中，加上其结石不收缩，堵水率可达 90%以上；

(3)浆液可泵性好，扩散半径可控，这样就大大降低了注浆钻孔费用，避免了浆液流失；

(4)浆液具有抗水稀释性、流变可控制等特点，因而它能在动水状态下(甚至高速流水)，以及大溶洞条件下进行注浆，可避免水泥浆液在此状态下无法避免的浆液损耗；

(5)浆液结石体塑性强度高(一般可达 0.1～2MPa)，化学稳定性好，具有良好的抗震性和抗化学侵蚀能力。

四、水泥-水玻璃类浆液

水泥-水玻璃浆液亦称 CS 浆液(C 代表水泥，S 代表水玻璃)，是以水泥和水玻璃为主剂，两者按一定的比例采用双液方式注入，必要时加入附加剂所形成的注浆材料。水泥-水玻璃类浆液是一种用途极其广泛、使用效果良好的注浆材料。

(一)水泥-水玻璃浆液的性能

水泥-水玻璃类浆液的组成及配方、性能效果见表 2-21 和表 2-22。

根据注浆工程的需要及水泥-水玻璃浆液的特点，一般都注重浆液的凝胶时间和抗压强度这两种性能。影响这两种性能的因素很多，下面分别讨论。

表 2-21　水泥-水玻璃浆液组成及配方

原　料	规格要求	作　用	用　量	主　要　性　能
水　泥	普通或矿渣硅酸盐水泥	主　剂	1	1. 凝胶时间可控制在几秒至几十分钟范围内； 2. 抗压强度为 5～20MPa
水玻璃	模数：2.4～3.4 浓度：30～45°Be′	主　剂	0.5～1	
氢氧化钙	工业品	速凝剂	0.05～0.20	
磷酸氢二钠	工业品	缓凝剂	0.01～0.03	

表 2-22　实用水泥-水玻璃复合浆液配方

浆液名称	材料和配方	地质条件	加固目的	应用效果
水玻璃＋水泥浆	水玻璃：45°Be′ 水泥浆：W/C＝1∶1 两者体积比 1∶1.3	土粒组成： 0.25mm，60.1%～61.5%； 0.25～0.1mm，29.5%～32.2%； 0.01～0.05mm，9.8%～6.3%	提高承载力	桥基原下沉量达 4～5mm，加固后停止下沉
	水玻璃：40°Be′ 水泥浆：W/C＝1∶1 两者体积比 1∶1	泥石流	堵水	其隧道注浆堵水效果良好
	水玻璃：37°Be′ 水泥浆：W/C＝1∶1 两者体积比 1∶0.5～1∶1	粗砂夹卵石孔隙率 40%	防冲刷及抗侧压	桥墩沿沉井周围加了 3～5m 深加固体，整体性良好，抗压强度为 5.41MPa
	水玻璃：40°Be′ 水泥浆：W/C＝1∶1 两者体积比 1∶0.5	砂夹卵石层含泥	纠正沉井倾斜工作中防止钢板桩围堰漏水	桥墩钢板桩围堰筑岛，堵水效果显著
水玻璃＋水泥浆＋氯化钙	水玻璃∶水泥浆∶氯化钙＝1∶1.3∶1.0 （水泥浆：W/C＝1∶1）	土粒组成： 0.6mm 以上 75%，0.25～0.6mm 占 25%	防冲刷提高承载力	大桥墩沉井底部加固体具良好的均匀性、整体性，抗压强度为 4～6MPa
	水玻璃∶水泥浆∶氯化钙＝1∶1.3∶1.0 （水玻璃：45°Be′，水泥浆，W/C＝1.1）	中砂（大于 0.25mm 颗粒占 50%以上）	防冲刷	整体性好，桥墩基础防冲刷性试验良好

(1)凝胶时间　凝胶时间是指水泥浆与水玻璃相混合时起至浆液不能流动为止的这段时间，水泥 水玻璃类浆液的凝固时间可以从几秒钟到几十分钟内准确控制，影响其凝胶时间的因素有水泥品种、水泥浆浓度、水玻璃浓度、水泥浆与水玻璃体积比及浆液温度等，其性能见图 2-3 至图 2-5 及表 2-23、表 2 24。

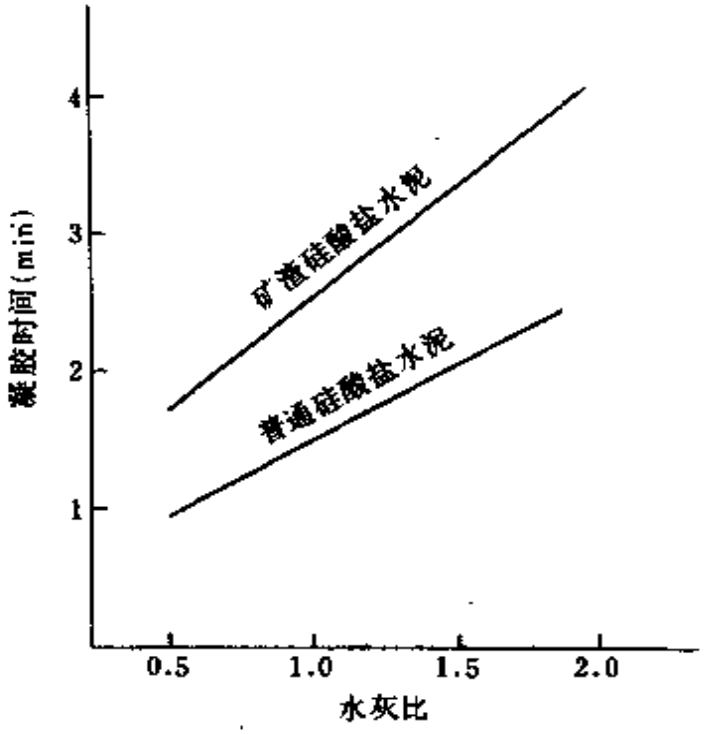


图 2-3　水泥品种对凝胶时间的影响

水玻璃 35°Be′；C：S＝1：1(体积比)；温度 24℃

表 2-23　水泥浆浓度对水泥-水玻璃浆液凝胶时间的影响

水灰比	凝胶时间			说明
	35°Be′	40°Be′	45°Be′	
1.5∶1	2min0s	2min55s	3min44s	普通 425 号硅酸盐水泥、水泥浆与水玻璃体积比为 1
1.25∶1	1min31s	2min21s	3min17s	
1∶1	1min18s	1min51s	2min30s	
0.75∶1	0min58s	1min38s	2min18s	
0.5∶1	0min55s	1min4s	1min41s	

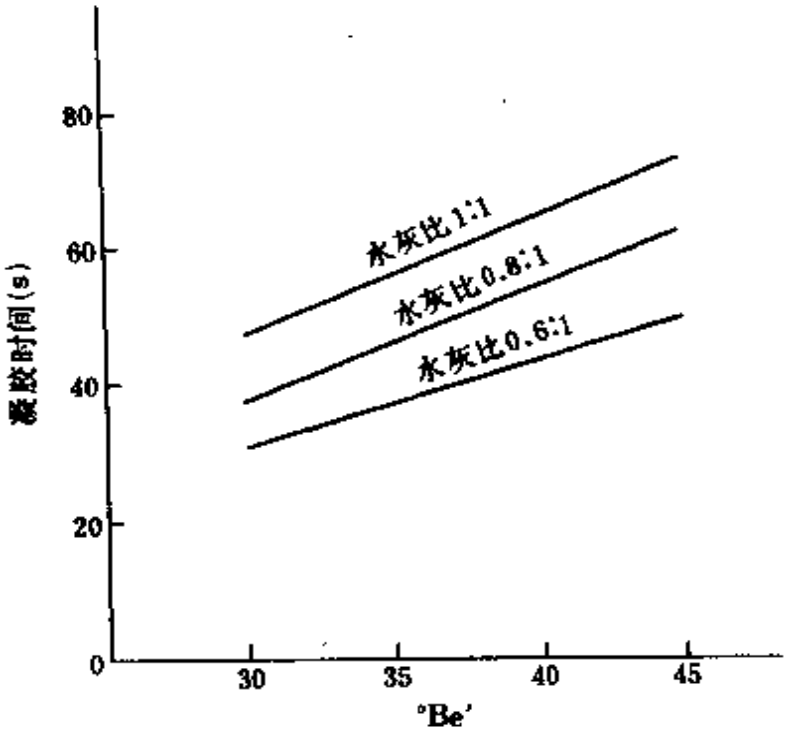


图 2-4　水玻璃浓度对凝胶时间的影响

C：S=1：0.6(体积比)；温度 23℃；普通硅酸盐水泥

表 2-24　水泥浆与水玻璃体积比对水泥-水玻璃浆液凝胶时间的影响

C：S	凝　胶　时　间			
	30°Be'	35°Be'	40°Be'	45°Be'
1：0.3	0min20s	0min20.5s	0min22s	0min25.5s
1：0.35	0min22.7s	0min21s	0min24.5s	0min28.3s
1：0.4	0min24.4s	0min24.5s	0min29.8s	0min31.6s
1：0.45	0min26.4s	0min27.5s	0min31s	0min34.5s
1：0.5	0min27.6s	0min29.2s	0min34s	0min42.4s
1：0.55	0min29.9s	0min32s	0min36.9s	0min45s
1：0.6	0min30.6s	0min37.5s	0min41.5s	0min48.4s
1：0.7	0min35.9s	0min41.2s	0min48.1s	0min56.7s
1：0.8	0min50.9s	0min56.4s	1min8s	1min17s

注：试验条件：室温 23℃，水泥为普通硅酸盐水泥；水泥浆水灰比为 0.6：1。

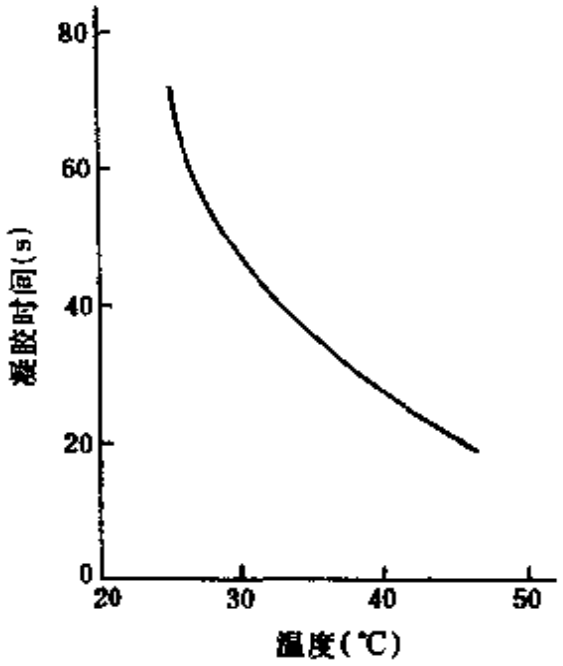


图 2-5　温度对凝胶时间的影响

水灰比 0.75∶1;水玻璃 30°Be',C∶S=1∶1(体积比),普通硅酸盐水泥

(2)抗压强度　水泥-水玻璃浆液结石体抗压强度较高,特别是早期强度较高,并且增长速度很快。影响水泥-水玻璃浆液的抗压强度因素主要有水泥浆浓度、水玻璃浓度、水泥浆与水玻璃体积比等,其性能如表 2-25 至表 2-27。

表 2-25　水泥浆浓度对水泥-水玻璃浆液结石体抗压强度的影响

水玻璃浓度 (°Be')	水泥浆浓度 (水灰比)	水泥浆与水玻璃体积比	抗压强度(0.1MPa)		
			7d	14d	28d
40	0.5∶1	1∶1	204	244	248
40	0.75∶1	1∶1	116	177	185
40	1∶1	1∶1	44	106	113
40	1.25∶1	1∶1	9	44	90
40	1.5∶1	1∶1	5	9	23

表 2-26　水玻璃浓度对水泥-水玻璃浆液结石体抗压强度的影响

水玻璃浓度 (°Be′)	水泥浆浓度 (水灰比)	水泥浆与水玻璃体积比	抗压强度(0.1MPa)		
			7d	14d	28d
35	0.5∶1	1∶1	174	200	202
35	0.75∶1	1∶1	144	132	148
35	1∶1	1∶1	73	85	104
35	1.25∶1	1∶1	32	40	58
35	1.5∶1	1∶1	12	20	28
40	0.5∶1	1∶1	204	244	248
40	0.75∶1	1∶1	110	177	185
40	1∶1	1∶1	44	106	113
40	1.25∶1	1∶1	9	44	90
40	1.5∶1	1∶1	5	9	23
45	0.5∶1	1∶1	245	250	253
45	0.75∶1	1∶1	82	169	192
45	1∶1	1∶1	29	69	113
45	1.25∶1	1∶1	5	26	58
45	1.5∶1	1∶1	3	6	8

表 2-27　水泥浆与水玻璃体积比对抗压强度的影响

水玻璃浓度 (°Be′)	水泥浆浓度 (水灰比)	水泥浆与水玻璃体积比	28d 抗压强度 (0.1MPa)
40	0.6∶1	1∶0.3	156
40	0.6∶1	1∶0.4	224
40	0.6∶1	1∶0.5	235
40	0.6∶1	1∶0.6	220
40	0.6∶1	1∶0.8	172
40	0.8∶1	1∶0.3	135
40	0.8∶1	1∶0.4	143
40	0.8∶1	1∶0.5	168
40	0.8∶1	1∶0.6	180
40	0.8∶1	1∶0.8	130
40	1∶1	1∶0.3	99
40	1∶1	1∶0.4	119
40	1∶1	1∶0.5	179
40	1∶1	1∶0.6	130
40	1∶1	1∶0.8	110

注：1. 普通硅酸盐水泥；2. 试验温度为 23℃；3. 试块在室温水中养护。

(二)水泥-水玻璃浆液的配制

配制水泥-水玻璃浆液时，应分别进行水泥浆的配制和水玻璃的稀释，特别当使用缓凝剂时，必须注意加料顺序和搅拌及放置时间。加料顺序为：水——→缓凝剂溶液——→水泥，搅拌时间应不少于 5min，放置时间不宜超过 3min，搅拌时间及放置时间对缓凝效果的影响见表 2-28 及表 2-29。

表 2-28 放置时间对缓凝效果的影响

水玻璃浓度 (°Be')	水泥浆 (水灰比)	水泥浆与水玻璃体积比	浆液放置时间 (min)	凝胶时间
40	1∶1	1∶1	15	13min48s
40	1∶1	1∶1	30	12min20s
40	1∶1	1∶1	60	8min0s
40	1∶1	1∶1	90	6min13s

注：1. 水泥浆中加入 2%的缓凝剂；2. 浆液温度为 27～29℃。

表 2-29 搅拌时间对缓凝效果的影响

水玻璃浓度 (°Be')	水泥浆 (水灰比)	磷酸氢二钠用量 (%)	凝胶时间	
			搅拌 30s	搅拌 5min
40	0.75∶1	0	1min28s	1min30s
40	0.75∶1	2	6min36s	9min41s
40	0.75∶1	2.25	9min0s	13min39s
40	0.75∶1	2.5	10min53s	18min27s
40	1∶1	0	2min0s	2min8s
40	1∶1	2	4min08s	5min35s
40	1∶1	2.25	8min01s	12min3s
40	1∶1	2.5	13min25s	29min15s

（三）水泥-水玻璃浆液的特点

水泥-水玻璃浆液具有如下特点：

（1）浆液可控性好，凝胶时间可准确控制在几秒至几十分钟的范围内；

（2）浆液结石体强度高，可达 10.0～20.0MPa；

（3）浆液的结石率高，可达 100%；

（4）结石体的渗透系数小，为 10^{-3}cm/s；

（5）该浆液适宜于 0.2mm 以上裂隙及 1mm 以上粒径的砂层使用；

（6）材料来源丰富，价格便宜，浆液对地下水和环境无污染。

五、水玻璃类浆液

水玻璃类浆液是指水玻璃在固化剂作用下产生凝胶的一种注浆材料。水玻璃是一种水溶性的碱金属硅酸盐，其分子式为 $Na_2O \cdot nSiO_2$。

水玻璃类浆液由于水玻璃本身来源丰富，价格低廉，污染较小，再加上各种新型固化剂的不断出现，使水玻璃浆液性能不断改善。水玻璃类浆液有很多种，下面介绍几种比较成熟的水玻璃类浆液。

（一）水玻璃-氯化钙浆液

水玻璃与氯化钙两种液体在地下土壤中相遇，立即发生化学反应，生成二氧化硅胶体，并将土粒包围起来凝成整体，不仅起到防渗作用，更主要的起到加固作用。水玻璃-氯化钙浆液其组成、性能及主要用途见表 2-30。

（二）水玻璃-铝酸钠浆液

水玻璃与铝酸钠反应，生成凝胶物质——硅胶及硅酸铝盐，胶结砂和土壤，起到加固和堵水作用。其组成、性能及主要用途如表 2-31 所示。

表 2-30　水玻璃-氯化钙浆液组成、性能及主要用途

原　料	规　格　要　求	用量（体积比）	凝胶时间	注入方式	抗压强度（MPa）	主要用途	备　注
水玻璃	模数：2.5～3.0 浓度：43～45°Be′	45%	瞬间	单管或双管	<3.0	加固基础	注浆效果受操作技术影响较大
氯化钙	密度：1.26～1.28g/cm³ 浓度：30～32°Be′	55%					

表 2-31　水玻璃-铝酸钠浆液的组成、性能及主要用途

原料	规格要求	用　量（体积比）	凝胶时间	注入方式	抗压强度（MPa）	主要用途	备　注
水玻璃	模数：2.3～2.4 浓度：40°Be′	1	几十秒至几十分钟	双液	<3.0	堵水或加固	1. 改变水玻璃模数、浓度、铝酸钠含铝量和温度，可调节凝胶时间； 2. 铝酸钠含铝量多少会影响抗压强度
铝酸钠	含铝量： 160～190g/L	1					

（三）水玻璃-硅氟酸浆液

水玻璃和硅氟酸两种药液一经相遇便产生絮状沉淀物，在性能上是一种比较好的水玻璃浆液，其组成、性能及主要用途如表 2-32 所示。

表 2-32　水玻璃-硅氟酸浆液的组成、性能及主要用途

原料	规格要求	用　量（体积比）	凝胶时间	注入方式	抗压强度（MPa）	主要用途	备　注
水玻璃	模数：2.4～3.4 浓度：30～45°Be′	1	几秒至几十分钟	双液	<1.0	堵水或加固	1. 两液等体积注浆、硅氟酸不足部分加入水补充； 2. 两液相遇有絮状沉淀产生
硅氟酸	浓度：28%～80%	0.1～0.4					

水玻璃-硅氟酸浆液的胶凝时间主要受水玻璃、硅氟酸用量的多少而影响，其性能影响如表 2-33 所示。

表 2-33 水玻璃、硅氟酸用量对凝胶时间的影响

水玻璃浓度 (°Be')	水玻璃用量 (mL)	硅氟酸用量 (mL)	水用量 (mL)	凝胶时间
40	100	20	30	8min25s
	80	20	30	5min40s
	70	20	30	3min17s
	60	20	30	1min15s
	100	15	35	24min50s
	80	15	35	9min40s
	70	15	35	6min5s
	60	15	35	4min26s
	100	10	40	33min20s
	80	10	40	17min46s
	70	10	40	14min13s
	60	10	40	13min14s
35	100	20	30	5min20s
	80	20	30	2min12s
	70	20	30	1min25s
	60	20	30	0min40s
	100	15	35	8min50s
	80	15	35	5min0s
	70	15	35	3min26s
	60	15	35	2min40s
	100	10	40	17min18s
	80	10	40	14min53s
	70	10	40	9min40s
	60	10	40	8min17s
30	100	20	30	1min38s
	80	20	30	0min41s
	70	20	30	0min28s
	60	20	30	0min25s
	100	15	35	3min50s
	80	15	35	2min35s
	70	15	35	1min34s

（四）其他类水玻璃浆液

（1）水玻璃-磷酸类　用磷酸作为胶凝剂，先将磷酸稀释成密度为 1.025g/cm³ 的溶液，然后在剧烈搅拌下，加入一定量的水玻璃溶液而成。此外，还可以将磷酸与磷酸氢钠、氯化镁先配成混合胶凝剂，以水玻璃溶液为甲液，混合胶凝剂为乙液，进行双液注浆。

（2）水玻璃-草酸硫酸铝类　将硫酸铝溶液与草酸配制成草酸、硫酸铝混合胶凝剂，由于水玻璃溶液中的碱成分被草酸中和，产生硅酸凝胶，引起硫酸铝水解而成硅酸盐凝胶体。

（3）水玻璃-二氧化碳类　水玻璃溶液与二氧化碳在被灌体内能生成硅酸凝胶而起到防渗堵水作用。在实际应用中，在水玻璃溶液灌入前，先从灌浆管压入每立方米土 1～2kg 的二氧化碳，将土活化，然后注入水玻璃溶液，之后，每立方米土中再压入 3～4kg 二氧化碳，使水玻璃得到充分反应，用气硅化法加固地层的扩散范围，通常比一般硅化法增加 50%～60%。

（4）水玻璃-有机胶凝剂类　水玻璃除了应用无机盐作胶凝剂外，还可以同某些有机物一起使用作注浆材料。如醋酸、酸性有机酸酯、醛类（乙二醛等）、聚乙烯醇等，这类有机胶凝剂不会立即与水玻璃发生反应，因而胶凝时间可在较大范围内控制调节，浆液粘度低、扩散性能好。水玻璃-乙二醛浆液的组成、性能等如表 2-34 所示。

表 2-34　水玻璃-乙二醛浆液组成、性能及主要用途

原料	规格要求	用量（体积比）	粘度（MPa·s）	凝胶时间	注入方式	抗压强度（MPa）	主要用途	备注
水玻璃	模数：3.2 浓度：42°Be′	1	2～4	几秒至几十分钟	双液	<2	堵水或加固	1. 两液等体积注入，乙二醛不足部分加水； 2. 乙酸为速凝剂
乙二醛	浓度：35%	0.2～0.6						
乙　酸	浓度：90%	0～0.02						

第三节　有机系列注浆材料

一、丙烯酰胺类浆液

丙烯酰胺类浆液（简称丙凝浆液），是以有机化合物丙烯酰胺为主剂，配合其他交联剂、促进剂和引发剂等材料而制成的液体，其以水溶液状态注入地层，在地层中发生聚合反应而形成具有弹性、不溶于水的聚合体。丙烯酰胺浆液是一种性能优良、用途广泛的化学注浆材料。

（一）丙烯酰胺类浆液的性能

丙烯酰胺类浆液要求双液系统注入，主剂、交联剂、还原剂（或强还原剂）及缓凝剂溶解在水中单独存放，简称甲液；氧化剂也溶解在水中单独存放，简称乙液。它们的组成、配方及性能如表 2-35 所示。

表 2-35　丙凝浆液的组成、配方及性能

体系	原料名称	简称	分子式	作用	配方（重量%）	主要性能		
						粘度（MPa·s）	凝胶时间	抗压强度（MPa）
甲液	丙烯酰胺	AAM	$CH_2=CHCONH_2$	主剂	9.5	1.2	十几秒至几十分钟	0.1～0.6
	N、N'-亚甲基双丙烯酰胺	MBAM	$(CH_2=CHCONH)_2CH_2$	交联剂	0.5			
	β-二甲氨基丙腈	DMAPN	$(CH_3)_2NCH_2CH_2CN$	还原剂	0.3～1.2			
	硫酸亚铁	Fe	$FeSO_4\cdot 7H_2O$	强还原剂	0～0.16			
	铁氰化钾	KFe	$K_3Fe(CN)_6$	缓凝剂	0～0.05			
		MG-646						
乙液	过硫酸铵	AP	$(NH_4)_2S_2O_3$	氧化剂	0.3～1.2			

注：甲、乙液等体积注入；配方其余部分为水；MBAM 应先用温水溶解，后加入 AAM。

丙烯酰胺类浆液的性能主要是指其凝胶时间和抗压强度，而它的抗压强度一般来讲是比较低的，改变配方对抗压强度的影响不大，而其凝胶时间则可以控制在几秒到几个小时之间，影响凝胶时间的因素主要有：温度、过硫酸铵(AP)、β-二甲氨基丙腈(DMAPN)、硫酸亚铁、pH值、铁氰化钾及水中离子等影响因素。它们与凝胶时间的关系如图2-6至图2-11及表2-36所示。

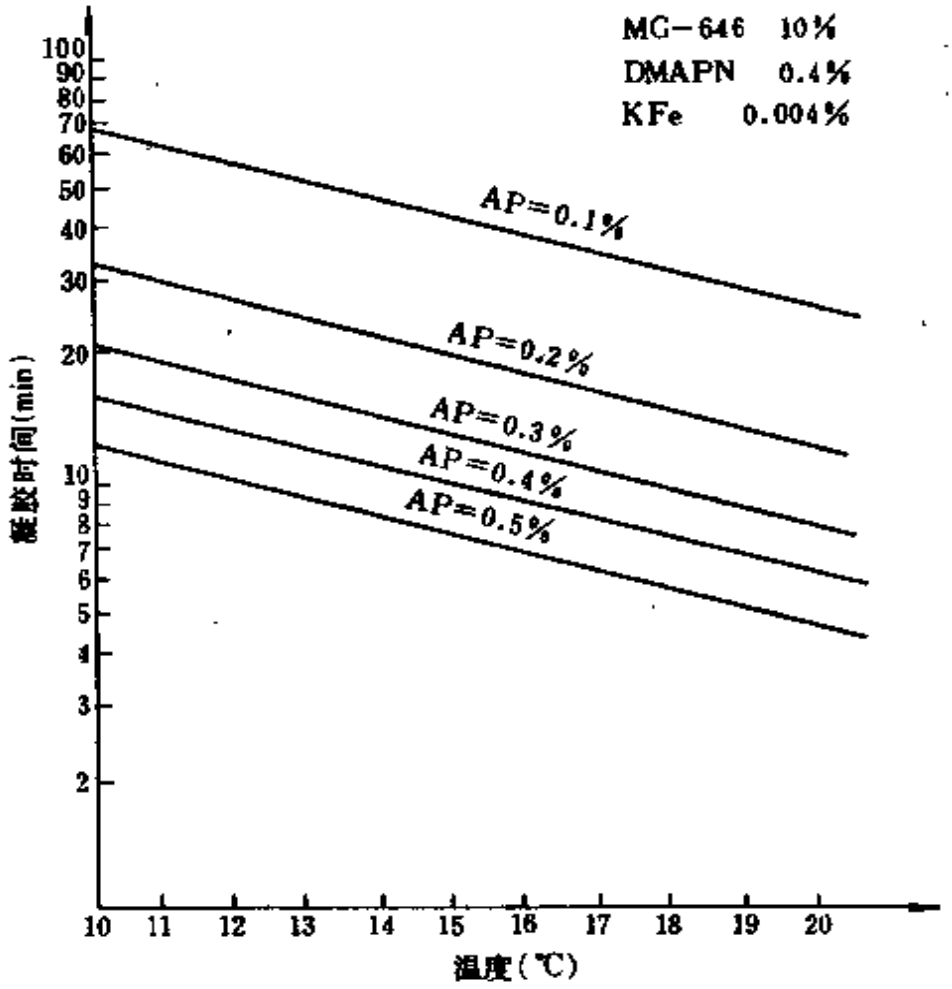


图 2-6 温度对凝胶时间的影响

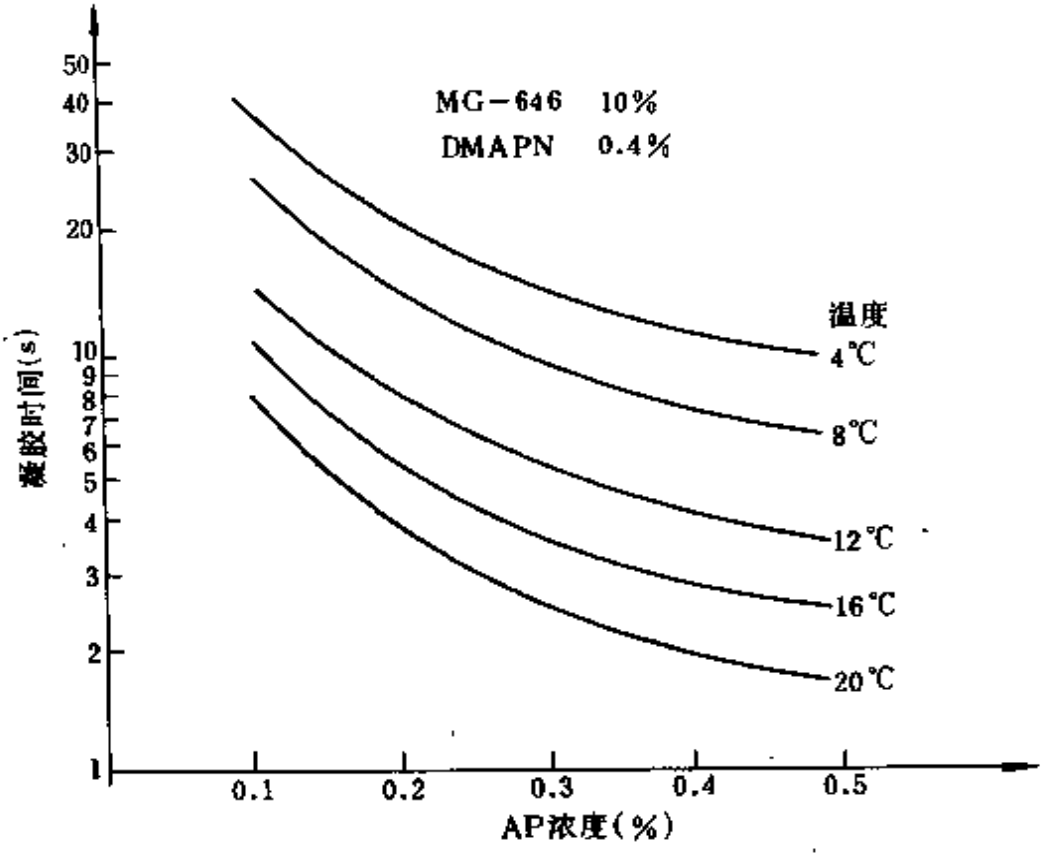


图 2-7　AP 浓度对凝胶时间的影响

表 2-36　一些离子对凝胶时间的影响

试验条件	离子浓度	试　剂	pH 值	凝胶时间
MG-646=10%； AP=0.3%； DMAPN=0.4%； 温度:16℃	167mg/L	H_2O	8.42	4min35s
		$MgSO_4$	8.44	4min40s
		$MgCl_2$	8.42	4min60s
		KCl	8.44	4min50s
		K_2CO_3	8.61	4min30s
		$CaCl_2$	8.43	4min60s
		Na_2CO_3	8.63	4min20s
		$NaHCO_3$	8.45	4min50s
		Na_2SO_4	8.45	4min60s
		NaCl	8.45	4min30s
		$CuCl_2$	7.56	6min05s
		$CuSO_4$	7.47	7min50s

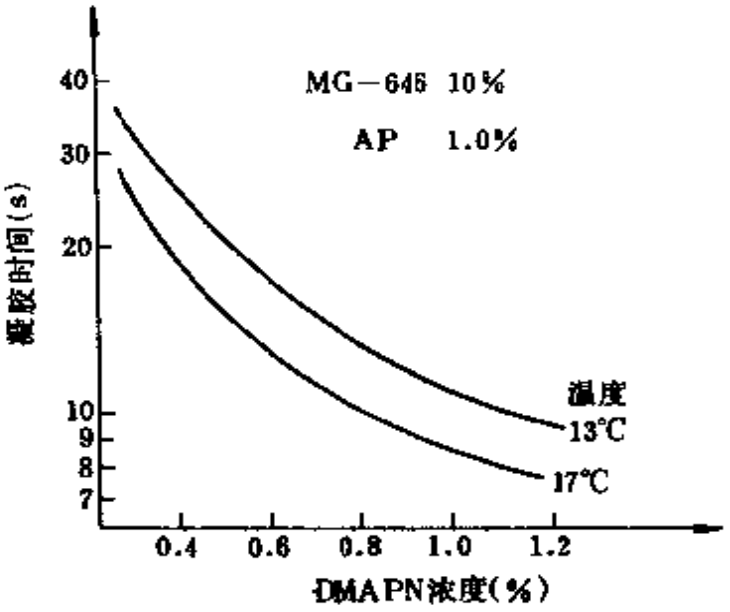


图 2-8 DMAPN 浓度对凝胶时间的影响

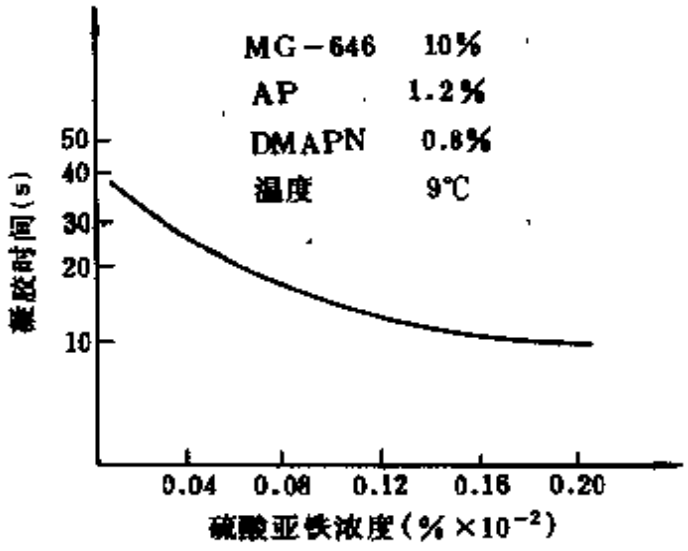


图 2-9 Fe 浓度对凝胶时间的影响

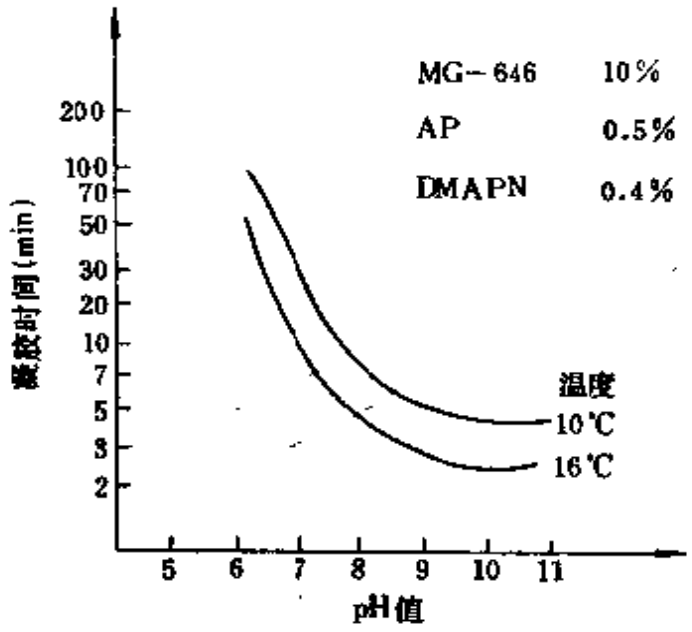


图 2-10 pH 值与凝胶时间的关系

(二)丙烯酰胺浆液的配制

丙烯酰胺类浆液由于丙烯酰胺单体具有毒性，日本、美国等现在已不再使用，而我国由于在施工工艺上对其严格要求，未发现严重污染问题，故目前仍在使用，其现场配制浆液比例如表 2-37 所示。

表 2-37 丙凝化学浆液现场配制实例

甲 液	(50L)	乙 液	(50L)
丙烯酰胺	9.5kg	过硫酸铵	1.2kg
N,N'-亚甲基双丙烯酰胺	0.5kg	水	50L
β-二甲氨基丙腈	0.8kg		
水	加至 50L		

(三)丙烯酰胺类浆液的特点

丙烯酰胺类浆液具有以下特点：

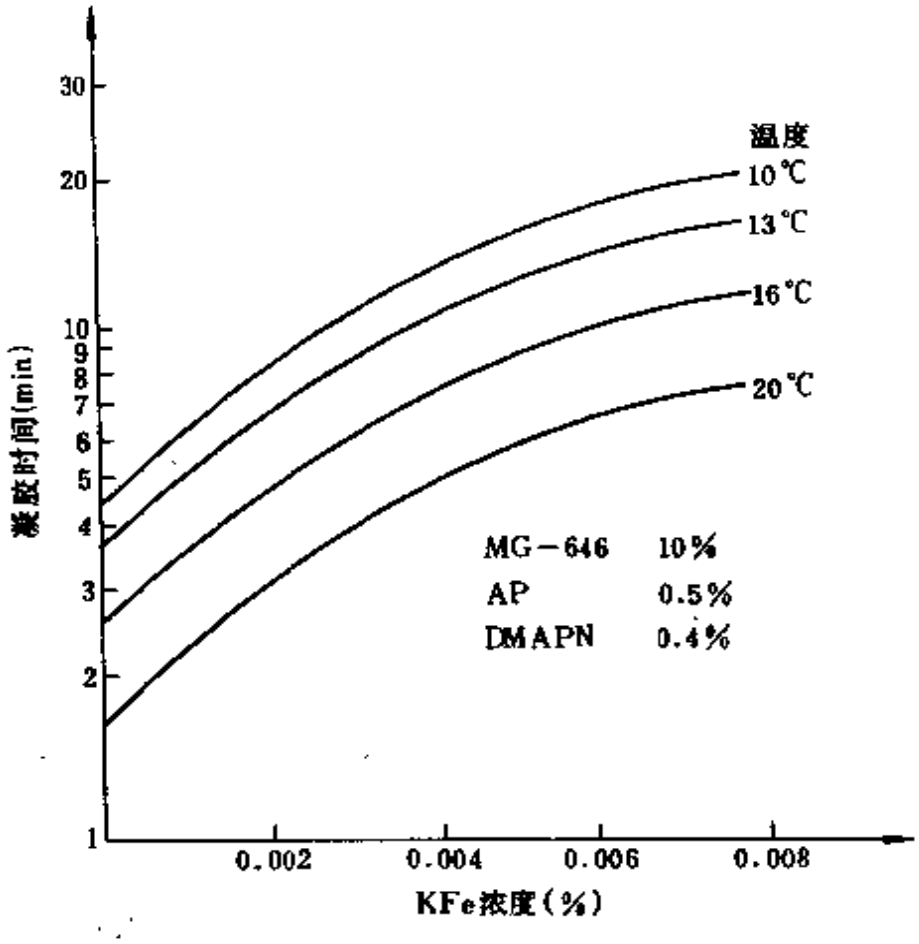


图 2-11 KFe 浓度对凝胶时间的影响

(1)浆液粘度小,且在凝胶前一直保持不变,因此具有良好的渗透性;

(2)凝胶时间可以准确地控制在几秒至几十分钟的范围内,并且浆液凝胶是在瞬间发生并完成的;

(3)凝胶体抗渗性能好,渗透系数为 10^{-9}～10^{-10}cm/s;

(4)凝胶体抗压强度低,一般不受配方的影响,其值约为 0.4～0.6MPa。

二、木质素类浆液

木质素类浆液是以纸浆废液为主剂，加入一定量的固化剂所组成的浆液，由于目前仅有重铬酸钠和过硫酸铵两种固化剂能使纸浆废液固化，因此目前木质素类浆液包括铬木质素浆液和硫木质素浆液两种。

(一)铬木质素浆液

铬木质素浆液是一种双液系统注入的注浆材料，浆液由三部分组成，甲液是亚硫酸钙纸浆废液(简称废液)，乙液包括固化剂和促进剂，固化剂目前国内外均采用重铬酸钠，促进剂有三氯化铁、硫酸铝、硫酸铜、氯化铜等。

1. 铬木质素浆液的性能

铬木质素浆液根据促进剂不同，其性能也不一样，下面介绍几种常用铬木质素浆液的性能。

(1)纸浆废液-重铬酸钠浆液　其组成、配方及主要性能如表 2-38 所示。

表 2-38　纸浆废液-重铬酸钠浆液组成、配方及主要性能

体系	原　料	作　用	分子式	浓度(%)	用量(体积比)	注入方式	凝胶时间	抗压强度(MPa)
甲液	纸浆废液	主　剂		20～45	1	双液	几分至几小时	0.4
乙液	重铬酸钠	固化剂	$Na_2Cr_2O_7$	100	0.1～1			

注：甲、乙两液等体积注入；重铬酸钠用量不足部分加水。

(2)纸浆废液-三氯化铁-重铬酸钠浆液　其组成、配方及主要性能如表 2-39 所示。

表 2-39　纸浆废液-三氯化铁-重铬酸钠浆液组成、配方及主要性能

体系	原　料	作　用	分子式	浓度（%）	用量（体积比）	注入方式	凝胶时间	抗压强度（MPa）
甲液	纸浆废液	主　剂		20～45	1	双液	十几秒至几十分钟	0.4
乙液	重铬酸钠	固化剂	$Na_2Cr_2O_7$	100	0.1～0.5			
	三氯化铁	促进剂	$FeCl_3$	100	0.1～0.5			

注：甲、乙两液等体积注入，乙液不足部分加水；$FeCl_3$ 量增加会降低强度。

(3)纸浆废液-铝盐及铜盐-重铬酸钠浆液　其组成、配方及主要性能如表 2-40 所示。

表 2-40　纸浆废液-铝盐及铜盐-重铬酸钠浆液组成、配方及主要性能

体系	原　料	作　用	分子式	浓度（%）	用量（体积比）	注入方式	凝胶时间	抗压强度（MPa）
甲液	纸浆废液	主　剂		40～50	1	双液	几分钟至几十分钟	<2.0
乙液	重铬酸钠	固化剂	$Na_2Cr_2O_7$	100	0.15～0.20			
	硫酸铝	促进剂	$Al_2(SO_4)_3$	50	0.20～0.40			
	硫酸铜	促进剂	$CuSO_4$	20	0.10～0.25			

注：甲、乙液等体积注入，不足部分用水代替；采用氯化铝、硫酸铜亦可。

(4)硼砂铬木素浆液　硼砂的加入可以提高结石体的抗压强度，

对粘度影响不大，其配方及性能见表 2-41 及表 2-42。

表 2-41　硼砂铬木素配方

组　　成	用　量(%)
废　　液	34
重铬酸钠	8
三氯化铁	0.5～4
硫酸亚铁	2
硼　　砂	0～24

表 2-42　硼砂用量与抗压强度的关系

硼砂用量(%)	0	2	4	6	8	10	14	16	20	22
抗压强度(MPa)	1.06	1.39	18.9	1.85	1.99	2.13	2.19	2.45	2.2	1.9
配　　方	废液 34%，重铬酸钠 8%，三氧化铁 2%，硫酸亚铁 2%									

2. 铬木质素浆液的特点

(1)浆液的粘度较小，可灌性好，渗透系数为 10^{-3}～10^{-1}cm/s 的基础均可适于灌浆。

(2)防渗性能好，用铬木质素浆液处理后的基础，其渗透系数达 10^{-7}～10^{-8}cm/s。

(3)浆液的胶凝时间可在几秒钟至数十分钟范围内调节。

(4)新老凝胶体之间的胶结较好，结石体的强度达 0.4～0.9MPa。

(5)原材料来源广，价格低廉。

(二)硫木质素浆液

由于重铬酸钠是一种剧毒药品，在地层中注浆存在着铬离子

(Cr^{6+})污染地下水的问题，因此铬木质素浆液的广泛应用受到了一定的限制，以过硫酸铵完全代替重铬酸钠，成为无毒的硫木质素浆液。

1. 硫木质素浆液的性能

硫木质素浆液的配方、性能如表 2-43 所示。

表 2-43 硫木质素浆液配方及主要性能

材料	性状及规格	配比	用途	基本性能
酸性废液	黑色粘液，固体物含量 40%	50mL	主剂	1. 凝胶时间可控制在几十秒至几十分钟范围内； 2. 粘度 4s； 3. 固砂强度 0.5MPa 左右
过硫酸铵	白色粉末，化学纯或工业品	7g	固化剂	
氯化锌	白色粉末，浓度 0.5g/mL	4mL	催化剂	
氯化铵	白色结晶，浓度 0.2g/mL	16mL	催化剂	
氯化铜	绿色结晶浓度 0.1g/mL	2～3mL	催化剂	
氨水	无色透明液体，含氨 25%	4mL	催化剂	
水		加至 100mL	溶剂	

2. 硫木质素浆液的特点

(1)浆液粘度与铬木质素相似，可灌性能好。

(2)胶凝时间随浆液中木质素、氯化铁、氨水等含量的增加而缩短，一般可在几十秒至几十分钟之间控制。

(3)凝胶体不溶于水、酸及碱溶液中，化学性能较稳定。

(4)结石体抗压强度在 0.5MPa 以上。

三、脲醛树脂类浆液

脲醛树脂是由脲素和甲醛缩合而成的一种高分子聚合物。脲醛树脂在固化前是一种水溶性树脂，用水配制成水溶液，这种溶液在酸性条件下，在常温、常压下就能迅速固化，并且具有一定的强度，因

此，它可作为注浆材料使用。

脲醛树脂类浆液根据其工艺分为三类，现将其性能分别介绍如下：

(1)脲醛树脂浆液　用市售固体含量为55%左右的脲醛树脂为主剂，注浆时加水稀释至40%，然后加入酸或强酸弱碱盐作固化剂，其组成及配方如表2-44所示。该浆液的特点：①材料来源丰富，价格便宜；②浆液结石体的强度较高，达40～80MPa，但较脆；③浆液粘度较大，并且在酸性条件下，对设备有腐蚀性，在含碳酸盐地层注浆时其结石体强度会下降；④凝胶体抗渗性差，长期存放会变质固化，并且浆液的刺激性气味很大。

表2-44　脲醛树脂浆液的组成、配方及主要性能

体系	原料	作用	分子式	浓度(%)	用量(体积比)	注入方式	凝胶时间	抗压强度(MPa)
甲液	脲醛树脂	主剂	$\left[CH_2-N(-C(=O)-N-)-CH_2-O\right]_n$	40	1	双液或单液	十几秒至几十分钟	40～80
乙液	硫酸	固化剂	H_2SO_4	3～10	0.1～1			

注：甲、乙液等体积注入，硫酸不足部分加水；其他酸、酸性盐均可作固化剂。

(2)脲素-甲醛浆液　该浆液不使用脲醛树脂，而直接用脲素和甲醛作注浆材料的甲液，固化剂作乙液的一种浆液，脲素-甲醛的配比及基本性能如表2-45及表2-46所示。与脲醛树脂浆液相比，脲素-甲醛浆液有以下特点：①浆液的流动性好，粘度低；②解决了浆液长期存放的问题，但浆液配制后必须立即使用；③材料来源广泛，成本

下降。

表 2-45　脲素和甲醛配比及配制方法

原　料	分子式	状　　态	用量（重量比）	配制方法
脲	$H_2N-\overset{\overset{O}{\|\|}}{C}-NH_2$	白色晶体	1	将脲加在甲醛中溶解后，即为甲液，要立即使用
甲　醛	HCHO	36%水溶液	2	

表 2-46　脲素-甲醛浆液基本性能

甲液：乙液（体积比）		6：1	5：1	4：1	3：1	2：1	1：1	备　注
凝胶时间（s）		12	10	8	6	10	14	
抗压强度（MPa）	4h	4.42	4.27	4.73	4.73	4.27	0.40	甲液为脲素-甲醛溶液，乙液为 5%硫酸水溶液
	1d	3.89	4.61	5.14	5.94	3.58	0.59	
	2d	4.39	4.30	4.76	5.00	3.35	0.81	
	3d	5.10	4.61	5.86	6.56	4.32	0.74	

（3）改性脲醛树脂浆液　脲醛树脂浆液虽有价格低廉、使用广泛等优点，但仍有许多不足之处对注浆不利，如质脆易碎，抗渗性差，与岩石胶结力不强，并有收缩现象，有效期短等，因此，有时在脲醛树脂生产过程中，加入一种或几种能参与反应的化合物或在脲醛树脂浆液中加入另一种注浆材料混合使用，以取长补短，达到改善性能的目的，几种改性的脲醛树脂浆液的组成、配方及性能如表 2-47 及表 2-48、表 2-49 所示。改性脲醛树脂的特点：①浆液结石体强度大，胶结

力强，固砂强度可达 10.0MPa；②浆液粘度低，为 2～5MPa·s，可注性好，可注入含泥量为 20%的细砂中；③浆液凝胶时间可控范围宽，可从几十秒至几十分钟调节；④凝胶及其固砂体耐久性好，可抗 5%浓度的强酸、强碱和盐的腐蚀；⑤材料来源丰富，成本较低。

表 2-47　苯酚改性脲醛树脂配方表

原　料	纯度（%）	摩尔比	配料比（重量比）	备　注
甲　醛	37	2.2	1.1	将甲醛和六次甲基四胺放入反应锅，调 pH 为 6.5～7.0，加入脲在 60～70℃保持 15min，再升温 90～94℃，在突变点（B 点）加入苯酚继续反应 30min 即可
脲	98	1.0	1.0	
苯　酚	90	0.45	0.22	
六次甲基四胺	98	—	0.05	
氢氧化钠	40	—	适量	

表 2-48　丙烯酰胺改性脲醛树脂的组成、配方及主要性能

体系	原　料	浓度（%）	用　量（重量比）	粘　度（MPa·s）	密　度（g/cm³）	凝胶时间	抗压强度（MPa）	渗透系数（cm/s）
甲液	脲醛树脂	40	1	5～6	1.19	几十秒至几十分钟	8.0～10.0	10^{-6}
	丙烯酰胺	固体	0.1～0.15					
	N,N'-亚甲基双丙烯酰胺	固体						
乙液	硫　酸	8～12	1					
	过硫酸铵	固体	0.01～0.012					

注：丙烯酰胺与 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺之比为 95∶5；甲、乙两液等体积或不等体积注入。

表 2-49　纸浆废液改性脲醛树脂的一般用法及主要性能

体系	原　料	浓度（%）	配　比　说　明	粘　　度（×10⁻³Pa·s）	凝胶时间	抗压强度（MPa）
甲液	纸浆废液 甲　醛	50 37	脲：甲醛＝1：2（重量比） 脲甲醛：50%纸浆废液＝1：1～1：2（体积比） 脲甲醛＋50%纸浆废液：50%～80%（占总浆体积） 固化剂：2%～10%（占总浆体积） 常用固化剂为 NH_4NO_3、$FeCl_3$，必要时加 H_2SO_4，其余为水 纸浆废液要考虑两液粘度相近，体积相等分布在甲、乙液中	2～5	几十秒至几十分钟	3.0～12.8
乙液	纸浆废液 脲 固化剂 水	50 固体				

四、聚氨酯类浆液

聚氨酯类浆液是一种防渗堵漏能力较强、固结强度较高的注浆材料，它属于聚氨基甲酸酯类的高聚物，是由异氰酸酯和多羟基化合物反应而成。由于浆液中含有未反应的异氰酸基团，遇水发生化学反应，交联生成不溶于水的聚合体，因此能达到防渗、堵漏和固结的目的。另外反应过程中产生二氧化碳，使体积膨胀而增加固结体积比，并产生较大的膨胀压力，促使浆液二次扩散，从而加大了扩散范围。

聚氨酯类浆液可分为水溶性和非水溶性浆液两大类，它们的区别在于：前者与水能混溶，后者只溶于有机溶剂。

（一）非水溶性聚氨酯浆液

非水溶性聚氨酯是由多异氰酸酯和多羟基化合物聚合而成。当该浆液制备时可分为“一步法”和“二步法”两种。“一步法”就是在灌浆时，将主剂的组分和外加剂直接一次混合成浆液。“二步法”又称预聚法，是把主剂先合成为聚氨酯的低聚物（预聚体），然后，再把预聚体和外加剂按需要配成浆液，这样可以缓和反应，减少放热，便于控

制胶凝时间。

1.“一步法”浆液

“一步法”浆液的组成、配比及性能如表 2-50 所示。

表 2-50 “一步法”浆液的组成(重量比)及其性能

编号		1	2
组分	PAPI	100	100
	N-303 聚醚树脂	18	67
	N-204 聚醚树脂	72	0
	丙 酮	10	83
	有机锡	0.2	0
	三乙醇胺	1	2
	发泡灵	0	1
性能	粘度(MPa·s)	1.56	7.4
	抗压强度(MPa)	>10.0	19.4
	抗渗性能	6～12(抗渗标号)	10^{-6}～10^{-7}cm/s
	初凝时间(分-秒)	4min35s	22min0s
	粘结强度(MPa)	—	3.29

注：1. 初凝时间系指浆液混合后至能拉丝这段时间；

2. 粘结强度系用 8 字形干燥试件测定，空气养护 7d。

该浆液从组分混合后，就开始反应，粘度逐渐增大，生成具有一定抗渗性能的、强度较高的固结体，胶凝时间较短，特别适用于堵漏注浆。

2. 预聚法(即“二步法”)浆液

该浆液是将多异氰酸酯和聚醚树脂，先预聚成低聚物，再将这预聚体与一定的外加剂相混合而成，几种预聚体的配比如表 2-51 所

示。

表 2-51　几种预聚体的配比(重量比)

材　　料		1	2	3	4	5
甲苯二异氰酸酯		34.8	34.8	30.0	82.8	51.0
聚醚树脂	204	20.0		10.0		
	303		10.0	10.0		20.4
	604				36.0	
邻苯二甲酸二丁酯				10.0	27.0	
丙　　酮				10.0	6.0	14.3
二　甲　苯					21.0	14.3

预聚体浆液反应缓慢，容易控制，适用于疏松地基的加固，建筑物的防渗、堵漏、补强，挡土墙、桥墩、滑坡区的锚固等。

3. 非水溶性浆液的特点

(1)浆液是非水溶性的，遇水开始反应，因此不易被地下水冲稀或冲失；

(2)浆液遇水反应时发泡膨胀，进行二次渗透，扩散均匀，注浆效果好；

(3)结石体抗压强度高；

(4)采用单液系统注浆，工艺设备简单。

(二)水溶性聚氨酯浆液

水溶性聚氨酯浆液由预聚体和其他外加剂所组成。预聚体也是由聚醚树脂和多异氰酸酯反应而成，外加剂与非水溶性聚氨酯所用的基本相同，目前国内所用的预聚体主要有两种，即高强度浆液的预聚体及低强度浆液的预聚体，其组成如表 2-52 及表 2-53 所示。

水溶性聚氨酯浆液的组成、配方及主要性能如表 2-54 所示。

表 2-52　高强度预聚体的组成

材　　料	作　　用
甲苯二异氰酸酯(80/20)	主　剂
环氧丙烷聚醚(604)	主　剂
环氧乙烷聚醚(分子量 1 500)	主　剂
邻苯二甲酸二丁酯	溶　剂
二甲苯	溶　剂
硫　酸	阻　聚

表 2-53　低强度预聚体的组成

材　　料	作　　用
甲苯二异氰酸酯(80/20)	主　剂
环氧丙烷、环氧乙烷混合聚醚(分子量 1 000～4 000)	主　剂

表 2-54　水溶性聚氨酯(SPM)浆液的组成、配方及主要性能

原　　料	作　用	用量(重量比)	凝胶时间	抗压强度(MPa)	备　　注
甲苯二异氰酸酯 聚　醚	制成预聚体为主剂	1	<2min 可调节	<1.0	SPM 与 PM 的主要区别在于聚醚，SPM 中的聚醚以环氧乙烷为开始剂，分子量控制在 3 000～4 000
邻苯二甲酸二丁酯	溶　剂	0.15～0.5			
丙　酮	溶　剂	0.5～1			
2,4-二氨基甲苯	催化剂	适　量			
水	反应剂 兼溶剂	5～10			

该浆液的特点：

(1)浆液能均匀地分散或溶解在大量水中，凝胶后形成包有水的弹性体；

(2)结石体的抗渗性能好，一般在 10^{-6}～10^{-8}cm/s 之间；

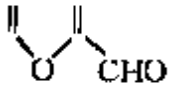
(3)浆液的凝胶时间可以根据催化剂或缓凝剂的用量在数秒到数十分钟之间调节。

五、其他有机类浆液

(一)糠醛树脂浆液

糠醛树脂浆液的组成、配方及主要性能如表 2-55 所示。

表 2-55　糠醛树脂浆液组成、配方及主要性能

原料	状　态	分　子　式	浓度（%）	用　量（体积比）	粘　度（MPa·s）	凝胶时间	抗压强度（MPa）
糠醛	浅黄色油状液体		100	15%～35%	<2	几十秒至几十分钟	1.0～6.0
脲	白色晶体	$H_2N-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-NH_2$	50 水溶液	45%～55%			
硫酸	无色透明液体	H_2SO_4	20 水溶液	2%～15%			

糠醛树脂浆液的特点：

(1)糠醛是非水溶性油式液体，微溶于水，加表面活性剂便产生稳定的乳浊液，在酸性催化剂作用下，与脲发生反应生成树脂状固体；

(2)浆液粘度低，可注性好；

(3)浆液原材料来源丰富，价格便宜；

(4)浆液固化时间长，不能准确控制，是一个很大的缺点；

(5)糠醛有刺激性气味。

(二)环氧树脂浆液

环氧树脂浆液的配方如表 2-56 所示，该浆液配方的力学性质如表 2-57 所示。

表 2-56 环氧树脂浆液配方

材料	作用	配方 1-1	配方 2-2	配方 13-2	配方 15-2	配方 22-1	配方 23-1	配方 24-1
501 号环氧树脂	主剂	100	100	100	100	100	100	100
501 号环氧丙烷丁基醚	稀释剂	30	40	40	40	30	—	25
662 号甘油环氧树脂	亲水剂	—	—	30	30	30	—	50
丙酮	稀释剂 增韧剂	—	—	—	—	20	35	50
糠醛	稀释剂 增韧剂	—	—	—	—	20	35	—
651# 聚酰胺	固化剂 亲水剂	40	50	20	—	—	—	—
二乙烯三胺	固化剂	—	—	16	18	15	15	20
三乙胺	固化剂	—	—	—	—	—	5	—
六次甲基四胺	固化剂	—	—	—	—	—	—	2
DMP-30	固化剂	—	—	—	—	10	—	—

注：DMP-30 为 2,3,5-三(二甲氨基甲基)苯酚；除二乙烯三胺、三乙胺外，均按重量计。

环氧树脂浆液的特点：

(1)浆液粘结力强，其结石体强度高，收缩小；

(2)浆液可在室温固化，其化学稳定性好；

(3)浆液的缺点主要是粘度偏大，固化时间长。

表 2-57　环氧树脂浆液结石体力学性能

配　方	抗冲击强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	粘结强度(MPa)		备　注
				干　缝	湿　缝	
1-1	3.83	8.82	25.5	1.85	1.51	
2-2	4.08	8.72	34.4	1.84	—	
13-2	6.20	12.15	50.5	1.67	1.07	
16-2	5.61	6.75	41.5	2.03	1.16	抗压变形较大
22-1	—	8.15	—	1.97	1.90	
23-1	—	—	—	1.68	1.59	聚合物较软
24-1	—	—	—	1.52	1.42	聚合物较软

(三)丙烯酸盐浆液

丙烯酸盐作为注浆材料主要是丙烯酸的一价、二价、三价金属盐，其性质如表 2-58 所示。丙烯酸盐浆液基本组成及主要性能如表 2-59 所示。

表 2-58　丙烯酸盐浆液的种类和性质

丙烯酸盐种类		单体水溶液性质				聚合体性质				
		浓度 (%)	pH 值	相对密度	粘度 (MPa·s)	外　观	可溶性		稳定性	
							水	有机溶剂	酸	碱
一价	丙烯酸钠	30	7.0～7.5	1.15	3.9	透明凝胶	溶解	不溶	溶解	溶解
	丙烯酸钾	30	5.5～6.0	1.14	2.0	透明凝胶				
二价	丙烯酸钙	30	6.0～6.5	1.11	4.0	白色凝胶	不溶	不溶	在强酸中稍溶 在弱酸中稳定	稳定
	丙烯酸镁	30	5.5～6.0	1.19	6.2	半透明凝胶				
	丙烯酸锌	30	4.5～5.0	1.20	3.7	白色凝胶				
	丙烯酸钡	30	5.0～5.5	1.27	2.6	白色凝胶				
	丙烯酸铅	30	3.5～4.0	1.07	1.2	白色凝胶				
	丙烯酸镍	30	4.0～4.5	1.18	2.6	绿色凝胶				
三价	丙烯酸铝	10	4.0～4.5	1.06	1.5	白色凝胶	不溶	不溶	同上	稳定
	丙烯酸铬	10	2.5～3.0	1.07	2.0	绿黑色凝胶				

表 2-59　丙烯酸盐浆液基本组成及主要性能

材料名称	作　用	配方浓度（%）	主　要　性　能
丙烯酸盐	主　剂	10～15	1. 浆液：外观为淡蓝色溶液；密度为 1.05～1.08g/cm³；粘度为 0.001 5～0.002 8Pa·s，pH 为 7～8；胶凝时间为几秒至几十分钟（可以控制）； 2. 凝胶：外观为白色可弯曲的凝胶；不溶于水、煤油、汽油，在水中微胀；耐抗性良好；渗透系数 $(1.7\sim2.2)\times10^{-7}$cm/s；固砂体抗压强度 0.21～0.3MPa
甲撑双丙烯酰胺	交联剂	1～2	
三乙醇胺	促进剂	1	
过硫酸铵	引发剂	1	
水	溶　剂	81～87	

注：丙烯酸盐为丙烯酸钙与丙烯酸镁混合液，其配比为 1∶(3～7)，另加少量阻聚剂。

丙烯酸盐浆液的特点：

(1)浆液的粘度低，可注性好，能注入到粒度为 0.01～0.05mm、渗透系数为 10^{-5}cm/s 的土壤中；

(2)浆液的凝胶时间可控制在几秒到几个小时的范围内，并且浆液在固化前粘度一直保持不变，固化时粘度突然增加形成凝胶；

(3)浆液化学稳定性好，凝胶体不溶于水和有机溶剂，可在高、低温条件下使用，并无药物影响。

(四)甲凝浆液

甲凝类浆液是以甲基丙烯酸甲酯为主剂的注浆材料，其组成及配方如表 2-60 所示。其浆液固化后的力学性质见表 2-61。

该浆液的特点：

(1)浆液粘度低，可注性好；

(2)浆液固化后，其结石体抗压强度及抗拉强度高；

(3)该浆液有水的条件下难以聚合，粘结力大大下降，所以适用于混凝土干细裂缝的补强注浆。

表 2-60　甲凝浆液组成及配方

名　　称	简称	作　　用	配方 02	配方 03	配方 04	配方 05	配方 06
甲基丙烯酸甲酯	MMA	主剂	100	100	100	100	100
过氧化苯甲酰	BPO	引发剂	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
二甲基苯胺	DMA	促进剂	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5
水杨酸		防止亚磺酸被碱中和	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
对甲苯亚磺酸(盐酸法)	TSA	促进剂(有引发作用)	0.5	—	—	0.5	0.6
对甲苯亚磺酸(硫酸法)	TSA	促进剂(有引发作用)	—	0.5	0.5	—	—
甲基丙烯酸丁脂		增韧剂	25	25	25	—	—
乙酸乙烯酯		增韧剂	—	—	—	10	15
铁氰化钾	KF	抑制剂	0.03	—	—	0.03	0.03
焦性没食子酸	PA	抑制剂	—	—	0.04	—	—

表 2-61　甲凝力学性能表

力　学　性　能		配方 02	配方 03	配方 04	配方 05	配方 06
抗压强度(MPa)		84.1	89.8		74.2	57.8
抗拉强度(MPa)		13.8	13.0		14.1	15.8
粘结抗拉强度(MPa)	干缝	2.0	2.15	2.06	2.62	2.80
	湿缝	1.70	1.68		2.19	—
抗拉弹性模量(10^3MPa)		0.294	0.295		0.320	0.275

第四节　注浆材料的性能及其测试方法

一、密度与相对密度

浆液或聚合体的密度是指单位体积的浆液或聚合体所具有的质量，密度的单位是 g/cm^3，计算公式如下：

$$\rho=\frac{W}{V} \tag{2-1}$$

式中：ρ 为密度(g/cm^3)；W 为物体质量(g)；V 为物体体积(cm^3)。

相对密度是指浆液或聚合体在空气中的质量与同体积 4℃的蒸馏水在空气中的质量之比值。密度与相对密度的关系：

$$\rho_t=\gamma\cdot\rho_{水} \tag{2-2}$$

式中：ρ_t 为浆液或聚合体在 t℃的密度；γ 为浆液或聚合体在 t℃的相对密度；$\rho_{水}$ 为水在 4℃时的密度。

由于 $\rho_{水}=1g/cm^3$，因此相对密度与密度在数值上是相等的。

测定浆液密度时最好是将该浆液所有组分混合后，在凝胶之前测定完毕。如果凝胶时间太快，也可对各组分分别测定，然后按其在配方中用量多少计算密度。

测定相对密度的方式有比重计法与比重瓶法，测定聚合体密度可采用排水法。下面介绍一下液体比重计法和排水法。

(一)液体比重计法

(1)试样　浆液必须充分搅拌均匀。

(2)试验设备　液体比重计一套；恒温水槽，温度波动小于±5℃玻璃量筒、温度计等。

(3)试验条件　测定时温度控制在 20±5℃。

(4)试验步骤　①将浆液倒入玻璃量筒内，其体积应能使比重计浮起，量筒放在 20±5℃的恒温水槽中恒温 30min；②将比重计轻轻

放入浆液中，勿使其和筒壁接触，以免影响读数精度；③比重计在浆液中稳定后，进行读数，重复 3 次，取平均值。

（二）聚合体密度测定排水法

（1）试样　试样必须清洁，无裂纹和气泡，样品取 1～30g。

（2）试验设备　分析天平，感量≤0.001g。直径小于 0.15mm 的金属丝用作悬丝，温度计等。

（3）试验步骤　①先称悬丝重量，然后用悬丝将试样悬挂在天平一端，再称重。②将悬丝挂着的试样全部浸入蒸馏水中，（试样顶端距液面不小于 1cm，试样表面不应附有气泡），再称重。

（4）试验结果计算

$$\rho_{聚}=\frac{W_2-W_1}{W_2-W_3}\cdot\rho_{水} \tag{2-3}$$

式中：$\rho_{聚}$为聚合体在 t℃时的密度（g/cm³）；W_2 为金属丝和试样在空气中的质量（g）；W_1 为金属丝在空气中的质量（g）；W_3 为金属丝和试样在水中的质量（g）；$\rho_{水}$为水在 t℃时的密度（g/cm³）。

测定结果，以每组试样的算术平均值表示，取三位有效数字。

二、粘度

粘度是度量流体粘滞性大小的物理量，浆液的绝对粘度是指浆液流动时，具有不同流速的各层面间的内摩擦力，以 η 表示，单位为 Pa·s，它等于层与层间相距 1cm、速度相差 1cm/s 时，在 1cm² 面积上的摩擦力。在实际运用中，常用厘泊（0.01Pa·s）表示。有时也用运动粘度 υ 来表示粘度，它是绝对粘度 η 与液体密度之比，单位为 m²/s。

浆液粘度一般都是指所有组分混合后的初始粘度，所以，为了获得准确数据，一定要在浆液所有组分混合好之后立即测定，否则，有些浆液的粘度会随时间发生变化。

浆液的粘度大小直接影响浆液的扩散半径，同时决定着注浆的

压力、流量等参数的确定，从而关系到注浆效果。粘度越小，扩散半径越大，越有利于注浆，但有时为了防止浆液扩散太远，耗浆量太大造成浪费，还要增加粘度，控制扩散半径，因此，对一种浆液既要求粘度低又最好做到粘度可调，这才是最理想的。

测定真溶液粘度可选用 NXS-11 型旋转式粘度计，测定悬浊液可选用 ZNN 型泥浆粘度计。下面介绍国产 NXS-11 型旋转式粘度计的性能、参数及操作方式。

1. 主要技术参数

测量范围(MPa·s)：2.8×10^{4}～1.78×10^{4}

剪切速率 $D(s^{-1})$：1.23～996

剪切应力 τ(MPa)：276.7～219 700

物料温度范围(℃)：室温～95℃

试样容量(mL)：7～55

仪器最大尺寸(mm)：360×360×360

仪器重量(kg)：11.2

使用电源(V)：220±10%

2. 工作原理

NXS-11 型旋转粘度计系采用同心筒粘度测量原理，用同步电机作驱动。固定外筒、内筒旋转，被测液体充满在两个圆筒间的环形间隙，当同步电机带动转子旋转时，转子表面便受到被测液体内分子摩擦的阻力，使转子上端的转轴产生一扭矩。而转轴是由电机带动的，就使电机转子也相应受到一个相同的扭力，电机转子所受的扭力负荷必然要反映到电机定子上，使定子作一定角度的偏转。此偏转角度被与定子相连成一体的测量盘弹簧所平衡，其值由与测量弹簧连在一起的刻度盘指示出来，两者同步变化，从偏转扭力的大小又可用转筒原理计算出粘度的大小来，测得的精值与粘度成正比，该仪器采用变频的同步电机，获得 5 种转速，再加上一个三级变速齿轮的变速

位置，从而使仪器可得 15 种转速。

3. 操作步骤

(1)检查保温筒接恒温水浴的管子以及温度计是否安装好。

(2)按要求选定所用测量系统，将转子外筒清洗干净，并将外筒底密封固紧，然后放在保温筒的接口处密封垫上，旋紧大螺母，使外筒紧固。

(3)接通恒温水浴，观察外筒内有无漏水现象，并校正底座水平。

(4)小心地将转子与测量头连接好，并放入外筒内，安放时，必须缓慢放入，勿使转子扭弯。

(5)连接测量头电缆与测量头。

(6)将旋钮转到“工作”位置。量测完毕，再将旋钮转向“制动”位置，使内部升起固定。

(7)接通电源，预热 30min，即可按事先选定的 D 值，在转子转动约 30s 后，进行读数。

三、pH 值

溶液的酸碱度常用 pH 值表示。测定 pH 值时，最好是将浆液所有组分混合后，在凝胶前测定完毕，由于浆液配方不同，pH 值会有一个变化范围，故要测定最大和最小值。

测定溶液 pH 值采用酸度计法，下面介绍一下酸度计法的试验设备及试验步骤。

1. 试验设备

酸度计及玻璃电极、甘汞电极等附件；邻苯二甲酸盐、中性磷酸盐和硼酸盐等标准溶液，饱和氯化钾溶液；温度计等。

2. 试验步骤

按酸度计说明书安装仪器，用标准溶液校正仪器。被测浆液的温度须与标准溶液的温度相同，否则需调节温度补偿器。测定时，应调节好零点，如浆液 pH 值大于 7 时，可将量程选择开关置于“7～14”

的位置上，然后重新调整好零点，再行测定浆液的 pH 值。测定结束，应清洗电极。

四、凝胶时间

凝胶时间一般是指从参加反应的全部组分混合时起，直到凝胶发生、浆液不再流动为止的一段时间。

凝胶时间是浆液的一项很重要的性能，为了得到较理想的扩散半径和较好的注浆效果，凝胶时间应该能够准确调节和控制。

测定凝胶时间是研究注浆材料不可缺少的一项工作，由于浆液不同，其凝胶过程所发生的现象也不相同，因此根据具体情况，采用不同的方法测定凝胶时间，下面分三种情况分别介绍。

（一）单液水泥浆

由于水泥浆是缓慢固化的，强度逐步增加，其凝胶时间较长，因此，一般都测定水泥浆的初凝和终凝时间。目前，可采用圆锥稠度仪来测定水泥浆的初凝和终凝时间，并将初凝时间作为凝胶时间。

（二）聚氨酯浆液（非水溶性）

这种浆液在凝胶过程中体积膨胀，因此，根据这一特点自制了测定凝胶时间的方法，其测定方法如下：

先将浆液加入到特制的容器中，待加入水后，迅速搅拌，并马上插入玻璃管，浆液开始反应，发泡膨胀直至浆液在玻璃管内停止上升为止的一段时间为凝胶时间。

（三）其他浆液

记录刚配制好浆液时的时间 t_0，将浆液连同试管放入与被灌体温度相同的水浴中，每隔 2～5min 用玻璃棒试插入浆液中，测试浆液是否凝固，当ϕ4×20mm 的玻璃棒自重不能插到浆液底部时，认为已经凝固，记录时间 t_1。t_1～t_0 可认为是浆液的凝固或凝胶时间。

五、结石率

浆液体积与结石体体积之比称为结石率(β)，其表达式为：

$$\beta=\frac{V_2}{V_1} \tag{2-4}$$

式中：V_1 为浆液的体积，(m^3)；V_2 为结石体的体积，(m^3)。

如 $\beta<1$ 时，则结石体收缩，其收缩率为$(V_1-V_2)\cdot V_1$。

如 $\beta>1$ 时，则结石体膨胀，其膨胀率为$(V_2-V_1)\cdot V_1$。

对于注浆材料来说，一般都要求有较高的结石率以起到良好的加固、防渗等作用，浆液结石率的测定方法如下：

用一支 50mL 的碱式滴定管，注入约 30mL 浆液至某一刻度，记下读数(V_1)，待浆液凝固后，再观察体积有无变化，记下读数(V_2)，即可求得结石率 β。

六、抗压强度和抗折强度

抗压强度是指在试件上施加压缩载荷至破坏(脆性材料)或产生屈服现象(非脆性材料)时，原单位横截面上所承受的载荷。测定抗压强度是研究注浆材料的一项重要工作，抗压强度的大小决定了这种材料的使用范围。抗压强度大者可以起到加固的作用，抗压强度小者只能达到堵水的作用。有些材料也可以根据施工需要来改变抗压强度。影响抗压强度的因素很多，如材料的品种、浆液的浓度、配比、外加剂等。

测定注浆材料的抗压强度和抗折强度采用测定水泥胶砂强度所用的设备和方法，该方法一次成型试块，同时测定抗压、抗折两种强度。具体试验方法如下。

(一)试块成型

(1)凡浆液结石体为脆性材料，均采用纯浆液(如水泥浆、脲醛树脂浆、环氧树脂浆等)一次成型试块，其尺寸为 $4\times4\times16cm^3$。

(2)凡浆液结石体为塑性材料，均采用浆液加标准砂方法成型试块，即先将标准砂装满试模，在捣固下慢慢加入浆液(如丙烯酰胺-水玻璃浆、铬木素浆等)，直至饱和，表面与试模取平，待固化后脱模，试块尺寸为 $4\times4\times16cm^3$。

(3)非水溶性聚氨酯由于其发泡膨胀，拟采用直径 40mm 有机玻璃管成型试块，即在管内装入标准砂，用水饱和，压紧上盖，然后从下面压入浆液，使其自由膨胀，待固化后脱模，做成径高比为 1:1 的试块。

(二)养护条件

待浆液凝胶后脱模，试块放在 20±5℃水中养护，测 1d、3d 及 28d 的抗压强度和抗折强度，每组取三块测其平均值。

(三)测试仪器

采用高分子材料万能试验机或 0.1～0.5MPa 压力机测定试块的抗压强度和抗折强度，具体操作按有关规定进行。

七、渗透性

(一)渗透能力

渗透能力亦称可注性，系指对受注地层浆液注入的难易程度。作为注浆材料，要求其渗透能力越强越好。对于砂层，一般采用砂层渗透能力试验装置测定各种浆液所能注入砂层的最小粒径。

该仪器主要有 10 个直径为 100mm、高 300mm 的有机玻璃管(管两端有花孔板)，按号装在可转动的圆盘上，管内分别按顺序，从粗到细装满 10 种不同粒径的砂子，然后用水饱和，上部接出一段有机玻璃管，以备接收注入过的浆液和水等，浆液从管的下端压入(采用风压注入)，初步确定压力为 0.3MPa。如果在 20min 内能流过 100mL 浆液，则认为这种浆液对于这种砂层是可注入的，试验要逐步升级直至不能注入为止，将最后通过的有机玻璃管的编号作为可注性大小的标志。

(二)渗透系数

渗透系数是表示土壤或岩石透水性大小的指标，用符号 K 表示，单位为 cm/s 或 m/d。渗透系数越小，抗渗性越高，水越难以通过，作为堵水材料，当然固化后结石体的渗透系数越小越好。在进行防渗性注浆时，对浆液结石体的渗透系数有一定的要求。目前采用测定粘性土渗透系数的仪器——南 55 型渗透仪测定浆液结石体的渗透系数。下面介绍南 55 型渗透仪测定方法。

1. 试件

将浆液在南 55 型渗透仪的环刀内胶凝或固化成型，每组试件不少于 3 个。

2. 试验设备

南 55 型渗透仪，备用环刀 2～3 个；变水头装置。

3. 试验步骤

(1)将带有环刀的试件，装入渗透仪。

(2)渗透仪与变水头装置相接，在一定水头压力下，使水由下而上渗过试件，经出水管流出。

(3)记录测压管水位读数 h_1 以及开始时间 t_1，经过时间 t 后，再记录水位读数 h_2 及时间 t_2、出水管口的水温 T。如此重复两次。

(4)变更测压管水位于两个不同高程，重复测定。

4. 试验结果计算

可用下式计算渗透系数：

$$K=2.30\frac{a\cdot L}{F\cdot t}\cdot\lg\frac{h_1}{h_2} \qquad (2\text{-}5)$$

式中：K 为水温 T℃时试件的渗透系数(cm/s)；a 为测压管的横截面积(cm²)；L 为试件的高度(cm)；F 为试件的横截面积(cm²)；t 为水头 h_1 至 h_2 经过的时间，即 t_2-t_1(s)；h_1 为测压管中开始水头(cm)；h_2 为测压管中终了水头(cm)。

在同一试件的多次测定中，将数值相接近的，取其算术平均值。

在同一配方中，将数值接近的结果，亦取其算术平均值作为平均渗透系数。

八、粘结强度

粘结强度是指灌浆材料在被灌体的缝隙中聚合后，聚合体与被灌体的粘结能力。作为补强或加固用的灌浆材料，要求聚合体有较高的粘结强度，以恢复被灌体的整体性和提高被灌体的承载能力。

粘结强度的测定方法是用水泥砂浆"8"字形试件粘结试验，其过程如下。

1. 试件

按照水泥胶砂试验的方法，在"8"字形铁模中制成所需数量的"8"字形试件，在水中养护，试件的抗拉强度应适当高于浆材的粘结强度，每组试件 6 块。

2. 试验设备

水泥抗拉抗折试验机；"8"定形铁模等。

3. 试验步骤

先将准备进行粘结试验的水泥砂浆"8"字形试件拉断，勿损伤断裂面。试验前，在试样断裂面满入浆液，并迅速将试件按原状在断裂处对接好，外用橡皮圈箍紧，养护到达龄期后，取出试件，擦干表面，做抗拉试验。

4. 结果计算

如用双杠杆抗拉试验机测定，可按下式计算抗拉强度：

$$C_t=\frac{50p}{F} \tag{2-6}$$

如用单杠杆抗拉试验机测定，则按下式计算：

$$C_t=\frac{10p}{F} \tag{2-7}$$

式中：C_t 为粘结抗拉强度(MPa)；p 为试件拉断时的最大载荷(N)；F

为“8”字形试件的截面积(cm^2)。

试验结果以每组试件的算术平均值表示，取三位有效数字。

第三章　注浆设备及器具

第一节　概　述

注浆设备及器具，主要包括钻机、钻具、注浆泵、搅拌机、注浆管线总成、止浆塞和混合器等，其中钻机与钻具是成孔设备，而注浆泵、搅拌机等其他设备、器具则是制备、输送浆液，并将浆液注入地层裂隙或孔隙或软土地层中的机具。在当今的注浆工程施工中，注浆技术主要分为两类：一类是静压注浆，主要用于矿山及水利工程；另一类是高压旋喷注浆，主要用于加固软土地基。不同的注浆方法及目的，对设备及器具的选型亦有所不同。

一、静压注浆设备及器具

在静压注浆中，灌注粘土水泥浆等粒状浆液时，国内目前多采用活塞式灌浆泵或泥浆泵，浆中掺砂时则采用专用砂浆泵。若进行化学灌浆，则按单液法和双液法分为两类设备系统。

（一）单液系统

由于浆液的凝固时间较长，故浆液的各种成分可置于同一搅拌机内搅拌，然后用一台注浆泵注入孔内，这类系统较简单，如图 3-1 所示。如注浆压力和耗浆量不太大，也可用手摇泵替代机动泵，这种

简单设备已在不少注浆工程中应用过，效果很好。

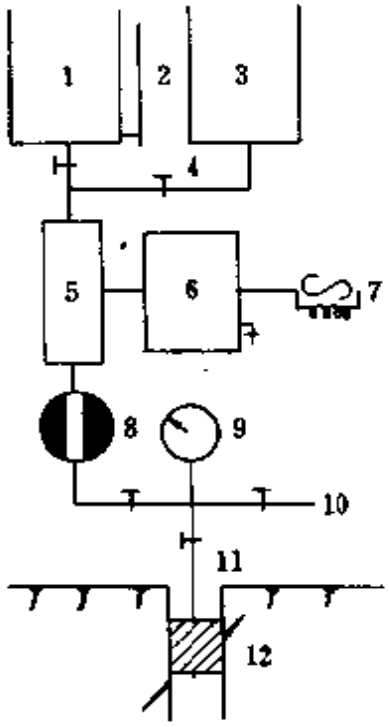


图 3-1　单液灌浆设备系统

1—浆槽；2—液面管；3—水槽；4—阀门；5—注浆泵；6—电机；7—电源；8—流量计；9—压力表；10—排气回浆管；11—灌浆管；12—胶塞

(二)双液系统

如图 3-2，这种系统是把主剂和速凝剂等分盛于两个搅拌槽内，用两台泵分别压送至混合器内，混合均匀后再注入注浆孔中。混合器根据浆液胶凝时间的长短，可放在孔外，或孔内注浆段上部。当浆液胶凝时间较短时，必须使用这种系统。

静压注浆的钻孔施工中，钻机可选用现有的回转式、冲击式或振动式钻机；在矿山及水利工程中的竖井或巷道及工作面施工中，也可使用凿岩机凿孔。钻机的选择需根据所钻进地层岩性、钻进孔深、孔径以及工作场地来进行选择。

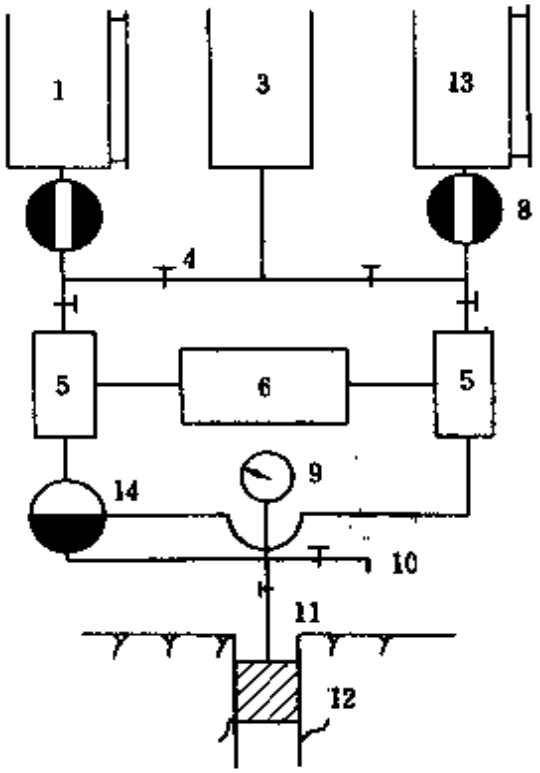


图 3-2　双液灌浆设备系统

13—乙液浆槽；14—混合器；其余符号同图 3-1

表 3-1、表 3-2、表 3-3 分别为某井壁注浆、地面注浆及工作面注浆工程的主要设备及器具一览表。

二、高压旋喷注浆设备及器具

高压旋喷注浆机器及器具，主要由高压发生装置、钻机、特种钻杆、高压管路及注浆设备等组成。因喷射种类不同，所使用的机器设备和数量也不同，表 3-4 为不同喷射法所用主要设备及器具一览表。从表 3-4 中可见，进行高压喷射注浆施工机具的组配是比较简单的，其中有一些设备是一般施工单位常备的机具，只要适当选购或作局部修改即可配套。

表 3-1 井壁注浆设备与机具

类型	名称	型号	规格特征	备注
钻孔机具	钻机	凿岩机	轻型	注浆孔直径35、40mm
	钻头	一字或十字型	硬质合金，直径33、38mm	
注浆泵	专用泵	2MJ-3/40隔膜泵 2TGZ-60/210注浆泵	流量0～3m³/h，压力4MPa；流量16～60L/min，压力2.1～6MPa	1. 双液注浆时最好选用专用泵，如用两台代用泵时，应选用两台型号相同的泵； 2. 当注浆孔涌水量很小时，可选用手压泵
	代用泵	TBW-50/15泥浆泵	流量50L/min，压力1.5MPa	
		1DSJ-3/30定量往复泵	流量0～1.5m³/h，压力3.0MPa	
		2DSJ-3/30定量往复泵	流量0～3m³/h，压力3.0MPa	
		M2-80/15泥浆泵	流量80L/min，压力1.5MPa	
		手压泵	最大流量5L/min，最大压力2MPa，往复次数0～40次/min	
搅拌设备	浆液搅拌机	一般选立式圆型	有效容积可按 $V_1 \geqslant \frac{Q}{N}$ [V_1为有效容积(m³)，Q为注浆泵流量(m³/h)，N为搅拌机1h搅拌次数]计算，一般为0.2～0.6m³，转数不小于60～70r/min	
	贮浆桶	一般为圆筒型	容积可按 $V_2=(1.3-1.5)V_1$ [V_1为搅拌机有效容积(m³)；V_2为贮浆桶容积(m³)]计算	
输浆管道	注浆管	无缝或有缝钢管	外径33、38mm	
		钢管或胶管	输送水泥浆可选直径25.4～31.75mm，输送化学浆可选用直径19.05～25.4mm	

表 3-2　地面注浆施工所需设备器具一览表

序号	名称	规格型号	数量	备注
1	钻机	TXB-1000A	2台	包括钻塔、钻具等配套
2	泥浆机	TBW-250/40	4台	其中一台搅拌水玻璃浆液
3	注浆泵	HFV-C 或 YSB-250/120	2台	缸套、活塞和拉杆备用
4	搅拌机	容积 1.5m³	2套	自制，包括计量水桶
5	异径止浆塞		10套	自制，胶塞有备用
6	三爪止浆塞		10套	自　制
7	混合室		3个	自制(单液浆不需要)
8	快速接头		10个	自　制
9	逆止阀		5个	自　制
10	泄压阀		5个	自　制
11	高压胶管接头	与泵连接配套	5个	自　制
12	输浆管	φ63.5×6mm	m	视需要确定
13	套管	φ159mm，φ127mm	m	视需要确定
14	水管		m	视需要确定
15	轴流式抽风机		2台	除尘用
16	测斜仪	JJX-3	1套	
17	压风机	W9/7-1	1台	抽水用
18	气水分离器		1个	抽水用
19	三角堰箱		1个	抽水用
20	抗震压力表	YK-1，0～160	2块	
21	车床	普通	1台	
22	砂轮机		1台	
23	电气焊		1套	
24	钳工台		1张	
25	高压阀门	φ50mm	3个	
26	电铃		2个	
27	开口滑轮	3t	2个	
28	记录台		1张	

表 3-3　工作面注浆施工所需设备器具一览表

序号	名　称	规　格　型　号	单位	数量
1	注浆泵	YSB-250/120(备用 1 台)	台	2
2	泥浆泵	TBW-250/40	台	1
3	搅拌机	有效容积 $1m^3$	套	2
4	止浆塞	双管式	套	12
5	混合器	T 形	个	2
6	轴流式抽风机		个	2
7	高压球阀	ϕ100mm,耐压 16.0MPa	个	12
		ϕ50mm,耐压 16.0MPa	个	16
8	抗震压力表	YK-0.1～16.0MPa	块	5
9	高压胶管	ϕ25mm,耐压 16.0MPa	根	6
10	无缝钢管	ϕ50×4mm	m	800
11	导向管	ϕ108×6mm 无缝钢管	m	46
12	电话	防爆型	个	2
13	电铃		个	2
14	法兰盘			
15	快速接头			
16	导向管闷盖法兰	与导向管配作	个	12
17	钻机	TXU-200	台	3
18	钻杆	ϕ42mm	m	150
19	钻杆接头	ϕ42mm(与钻杆配套)	个	75
20	岩芯管	ϕ89mm,1.5m/节	根	5
		ϕ75mm,1.5m/节	根	4
		ϕ58mm,1.5m/节	根	4
21	钻头	筒状		
		ϕ89mm	个	20

续表 3-3

序号	名　称	规　格　型　号	单位	数量
21	钻头	ϕ75mm	个	20
		ϕ58mm	个	20
		三翼状		
		ϕ89mm	个	10
		ϕ75mm	个	10
		ϕ58mm	个	10
22	套管	ϕ89mm	m	156
23	套管接头	与 ϕ89mm 套管配作	个	86
24	螺丝头	ϕ89mm	个	4
		ϕ75mm	个	4
		ϕ58mm	个	4
25	水胡芦	ϕ42mm	个	4～6
26	输水胶管	ϕ25mm，长 10m	根	3
27	供水管	ϕ50mm	m	350
28	公锥	ϕ42mm 钻杆用	个	2
29	母锥	ϕ42mm 钻杆用	个	2
30	垫圈	配 ϕ42mm 钻杆接头	个	3

第二节　钻孔设备

一、钻机的选择

静压注浆中钻孔的施工主要有两种方法：一是回转钻进法；二是冲击钻进法。前者主要用于地层较深或土、岩层较硬或含有较大卵石的地层；后者主要用于较松软且深度较小的工地。因此，常用的地质

表 3-4　各种高压喷射注浆施工机器及设备一览表

序号	机器设备名称	型号举例	主要性能	所用机具				机器设备作用
				单管法	二重管法	三重管法	多重管法	
1	高压泥浆泵	SNC-H300 水泥车 Y-2 型液压泵	30MPa 20MPa	✓	✓			高压注浆或水射流
2	高压水泵	3XB 型、3W6B 3W7B	35MPa 20MPa			✓	✓	高压水射流
3	钻机	SH-30 工程钻机 76 型振动钻	钻进能力 依工程定	✓	✓	✓	✓	钻孔、旋喷
4	泥浆泵	BW-150 型	7MPa			✓	✓	泥浆注入、冲孔
5	真空泵						✓	抽吸泥浆
6	空压机	YV-3/8	3～10m³/min		✓	✓		空气射流
7	泥浆搅拌机	自制	0.7～0.8MPa	✓	✓	✓	✓	制浆
8	单管			✓				旋喷注浆
9	双重管				✓			旋喷注浆
10	三重管					✓		旋喷注浆
11	多重管						✓	旋喷注浆
12	高压胶管		ϕ19～22mm	✓	✓	✓	✓	输送浆液

表 3-5　地面常用钻机及其主要技术规格一览表

钻机型号	钻进深度(m)	给进方式	开孔直径(m)	终孔直径(mm)	钻井直径(mm)	钻孔倾斜角率(%)	钻机重量(kg)	外型尺寸	主要用途	动力机		配套泥浆泵	生产厂家
								长×宽×高(mm)		电动机	柴油机		
TXB-100 型钻机	1 000	主动	146	56	50.6	90 ±45	2 385	1 763×1 651×1 280	地质水文孔	$JO_2$32-1 55kW	4135T 型 58kW	TBW250/40	石家庄煤矿机械厂
1 500m 油压钻机	1 500	油压	168	91	80.5		6 00		勘探孔	$JO_2$82-4 55kW	4135T 型 58kW	TBW250/40	石家庄煤矿机械厂
红旗-700 型钻机	700	油压	146	73	50.6	90 ±45		3 200×1 350×1 500	地质水文孔	$JO_2$91-4 55kW	4135T 型 58kW	TBW250/40	石家庄煤矿机械厂
中型钻机	500	油压	150	73	50 68		1 300	2 450×1 020×1 240	地质水文孔	$JO_2$72-4 30kW	4115TD 40kW	BW250/50	郑州煤矿机械厂
MZ-300 型油压钻机	300	油压	146	76	42 50	0 360	1 100	2 250×900×1 350	水文、水井及其他工程	$JO_2$62-4 17kW	2105I 型 147kW		兰州探矿机械厂
SPJ-300 型 A 水文水井钻机	300	主动	500				2 300	7 700×5 300×1 350	普查、物探及抽放瓦斯孔	$JO_2$81-4 40kW	4115L」型 47kW	BW600/30	上海探矿机械厂
XJ-100 型钻　机	100	手把	110	75	42	90 75	720	1 790×810×1 110	物探、地质、水文、工程孔	$JO_2$51-4 40kW	1105 型 7.3kW	60/15	北京
DPP-100 型汽车钻机	70 100	主动	150～200				6 500 (包括汽车)	9 000×2 250×3 400	物探、地质、水文、工程孔			TBW200/40	镇江 北京
SH-30 型工程钻机	30	主动冲击	142	110	42		60	1 780×1 010×900	工程地质勘探	$JO_2$51-2 4.5kW	汽油机 7.3kW		无锡探矿机械厂
WT-2 型物探钻机	30	主动	114				310	1 350×960×1 260	物探	13.4kW 汽油机	汽油机 7.3kW	100/10	无锡探矿机械厂
取样钻机	10	手把	46～58.5		24		18	380×400×600	钻孔取样工程地质孔	1.98～2.9 kW 地质汽油机	1.98～2.9 kW 地质汽油机	10/10	天津探矿机械厂

钻机、工程钻机或其他类型的钻机均适用于静压注浆钻孔的施工。但钻机必须能牢固地固定在地面上，使得钻孔不会出现偏移而影响精度。具体注浆工程中，钻机的选择需根据工程所要求的孔深、孔径等参数来确定。钻进深度一般在矿山注浆中较深，在水利及其他基础工程中较浅；孔径一般要求在80～100mm，甚至更大一些的范围内。目前，在地面注浆工程中常用的几种钻机及其性能参数见表3-5。

在矿山、交通、水利等工程的地下建筑注浆工程中，如在井筒、巷道壁内、壁后以及工作面注浆中，也常用凿岩机施工注浆孔，常用的凿岩机性能见表3-6。

表3-6 常用风动凿岩机性能参数

项目	型号					
	01—17 手持轻型	01—30 手持重型	01—38 自动推进	01—45 自动推进	01—23 手持式	YQ-100 自动推进
机重(N)	210	300	380	450	230	295
活塞冲击频率(次/min)	1700	1700	1800	1650～1750	1700	1900
空气消耗量(m^3/min)	1.8～2.0	2.4	4	2.8～3.6	2.5	6
空气压力(100kPa)	5	5	5～7	4.5～5.5	5	5～6
活塞冲击功(J)	25	40～45	70～80	58～76	45	75
钻头回转力矩(N·m)	3.6	7～8.5	25	25～28	8～8.5	—
自动推进长度(mm)	—	—	1000	615	—	400
推进力(N)	—	—	1000	—	—	6000
最大钻孔深度(m)	4	4	10	10	4	50
风管内径(mm)	16	19	25	25	19	32
水管内径(mm)	13	13	13	13	13	16
钻头直径(mm)	22	25	32	25	25	—
转速(r/min)	—	160	200	—	140	83
钻机功率(kW)		2.1	2.94	1.99	1.62	—
适应条件	中等以下坚硬岩石、水平或下斜孔	中等以上坚硬岩石，水平或下斜孔	坚硬岩石，水平方向孔	中等以上坚硬岩石，60°～90°上斜孔	中等以上坚硬岩石，水平或下斜	中等以上坚硬直径100mm的水平孔

高压旋喷注浆中，在标准贯入度小于 40 的砂类土、粘性土、淤泥质土中用单管旋喷作业时，多用 70 型或 76 改进型(见表 3-7)旋转振动钻机。这种钻机不仅钻进效率高，而且随即可进行高喷注浆作业，比先用普通钻机钻出导孔，然后换用注浆管进行喷注作业的方法既节省了工序又加快了工程进度，同时还节省了专用注浆管材费用。但当地层标准贯入值大于 40 或在原有混凝土层中，70 改进型或 76 型钻机则不适用，需换用其他钻机。因此在地层较硬或用二、三、多重管喷射作业时，常用一般地质或工程钻机施工，但常需做一定的改进。一般要求达到：转速 5～20r/min，提升速度 5～20cm/min。目前可用于高压旋喷注浆工程的钻机有 XY-1 型、SH-30 型、争光-10 型、GYC-150 型及 GJD-2 型等钻机，有关技术性能可参看其他书籍或本书有关章节。

表 3-7　70 改进型和 76 型振动钻机的技术性能

技　术　性　能	70 改进型钻机	76 型振动钻机
激振力(kN)	14	24
振动频率(Hz)	23.3	18
钻杆转速(r/min)	23	20
电机功率(kW)	5.5	10
提升速度(cm/min)	20(旋喷时)	14.4～720(6 级)
提升电机功率(kW)	8.5	7.5
钻孔深度(m)	25	25～33
钻机总重(t)	0.6	1.5
适用注浆管类型	单　管	单管或二重管

二、钻头

注浆孔施工中，常用合金钻头与金刚石钻头钻进。

(一)合金钻头

合金钻头按其结构与使用范围不同分为取芯式和不取芯式两大类，磨锐式和自磨式两种。合金钻头按所钻岩层岩性进行选择，其适用范围如表 3-8 所示。

表 3-8　合金钻头及其适用范围表

类别	钻头型式	岩石可钻性级别									岩　石
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
不取芯钻进	闪电式钻头	▨	▨	▨							覆盖层，粘土，细砂岩
	矛式钻头		▨	▨	▨						覆盖层，粘土，细砂岩
	三翼阶梯钻头			▨	▨	▨					泥质页岩，砂页岩
	环翼钻头				▨	▨	▨	▨			泥岩，粉砂页，石灰岩
磨锐式钻头	螺旋肋骨钻头		▨	▨	▨						松软可塑性岩层
	阶梯肋骨钻头			▨	▨	▨					页岩，砂页岩
	菱形薄片钻头	▨	▨	▨							可塑性岩层，粘土层
	斜角薄片钻头			▨	▨						砂页岩，细砂岩，大理岩
	内外镶钻头		▨	▨	▨	▨					均质大理岩，灰岩，松软砂岩，页岩
	单双粒钻头				▨	▨	▨	▨			中研磨性铁质及钙质砂岩
	晶字形钻头				▨	▨	▨	▨			灰岩，大理岩，细砂岩
	大八角钻头						▨	▨	▨	▨	软硬不均夹层，裂隙研磨性岩层
	三八式钻头					▨	▨	▨	▨		多裂隙研磨性灰岩，硅化灰岩
	负前角阶梯钻头					▨	▨	▨	▨		辉长岩，玄武岩，砂岩，灰岩
	破扩式钻头		▨	▨	▨	▨					大理岩，砂砾岩，砾岩
	小切削具钻头					▨	▨	▨	▨	▨	致密弱研磨性中硬岩层
自磨式钻头	胎块针状合金钻头						▨	▨	▨	▨	中硬及中研磨性岩层，片麻岩闪长岩
	钢柱针状合金钻头						▨	▨	▨	▨	中硬及研磨性岩层，石英砂岩，混合岩
	薄片合金钻头					▨	▨	▨	▨		中研磨性岩层，粉砂岩，砂页岩
	碎粒合金钻头					▨	▨	▨	▨		中研磨性岩层，硅化灰岩

1. 肋骨式钻头

一般在松软、遇水膨胀、粘性大的软岩土层(岩石分级 2～5 级)，如较软岩层、覆盖层、粘土层、风化砂岩及铝土页岩等岩层多用螺旋肋骨钻头(图 3-3)，其规格、尺寸如表 3-9 所示。在页岩、砂页岩和胶

结不紧密的砂岩等3～5级岩层中，多用阶梯肋骨钻头(图3-4)，其规格、尺寸如表3-10所示。前者切削具用K572硬合金，后者用K531硬合金。肋骨式合金钻头的特点是肋骨片厚，水口宽，水流阻力小，钻进时孔底呈阶梯状，钻进效率高。

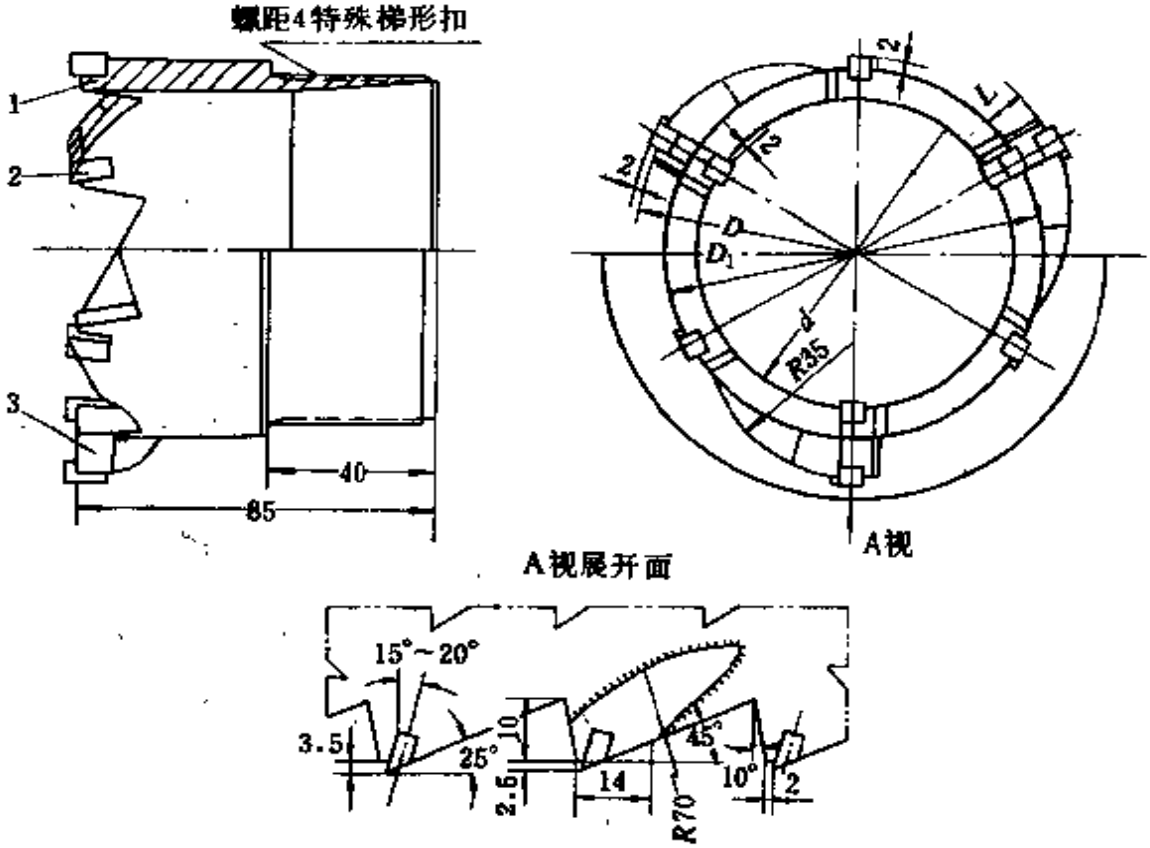


图3-3 螺旋肋骨钻头(单位：mm)

1—钻头体；2—肋骨；3—切削具

表3-9 螺旋肋骨式钻头规格、尺寸表

钻头直径* (mm)	主要尺寸(mm)				肋骨数	硬合金数
	D	D_1	d	L		
152/112	150	130	116	10	4	14
132/92	130	110	96	10	3～4	11～15
112/73	110	91	77	9.5	3	11
93/57	91	75	61	8	3	11

*“钻头直径”：其分子表示包括切削具外出刃的外径；其分母表示包括切削具内出刃的内径。一般通称钻头直径是指不包括切削具出刃的钻头体的外径，即表中的“D”。

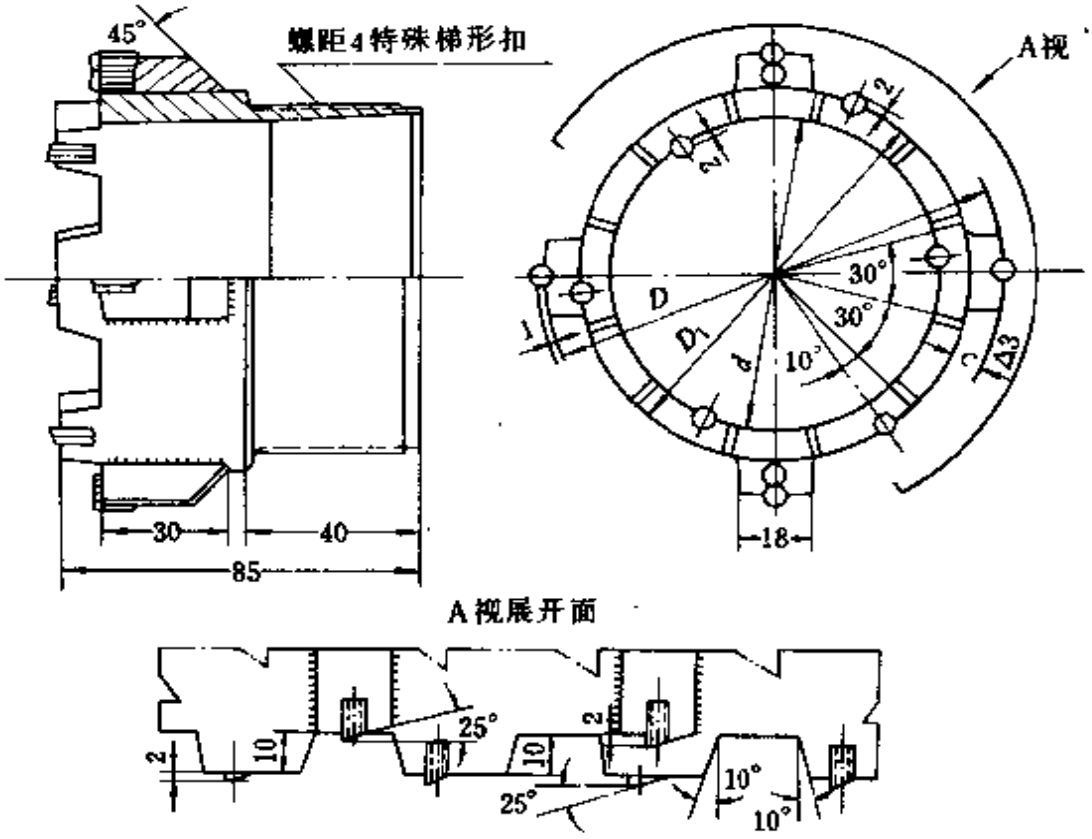


图 3-4　阶梯肋骨钻头(单位:mm)

表 3-10　阶梯肋骨钻头规格、尺寸表

钻头直径 (mm)	主　要　尺　寸(mm)				肋骨数	硬合金数
	D	D_1	d	L		
152/112	150	130	116	10	4	14
132/92	130	110	96	10	4	14
112/73	110	91	77	9.5	4	12
93/57	91	75	61	8	4	12

2. 薄片硬合金钻头(图 3-5)

该类钻头主要用以钻进 1～4 级粘结性较小的软岩。其特点是底出刃较大,适合于切入深度大的钻进条件。内、外出刃一般也大,保证有较大的间隙来冲洗岩粉。这类钻头多用掏槽刃的结构。图 3-5(a)为菱形薄片合金钻头,图 3-5(b)为斜角薄片钻头。前者比后者更适于较软的地层。

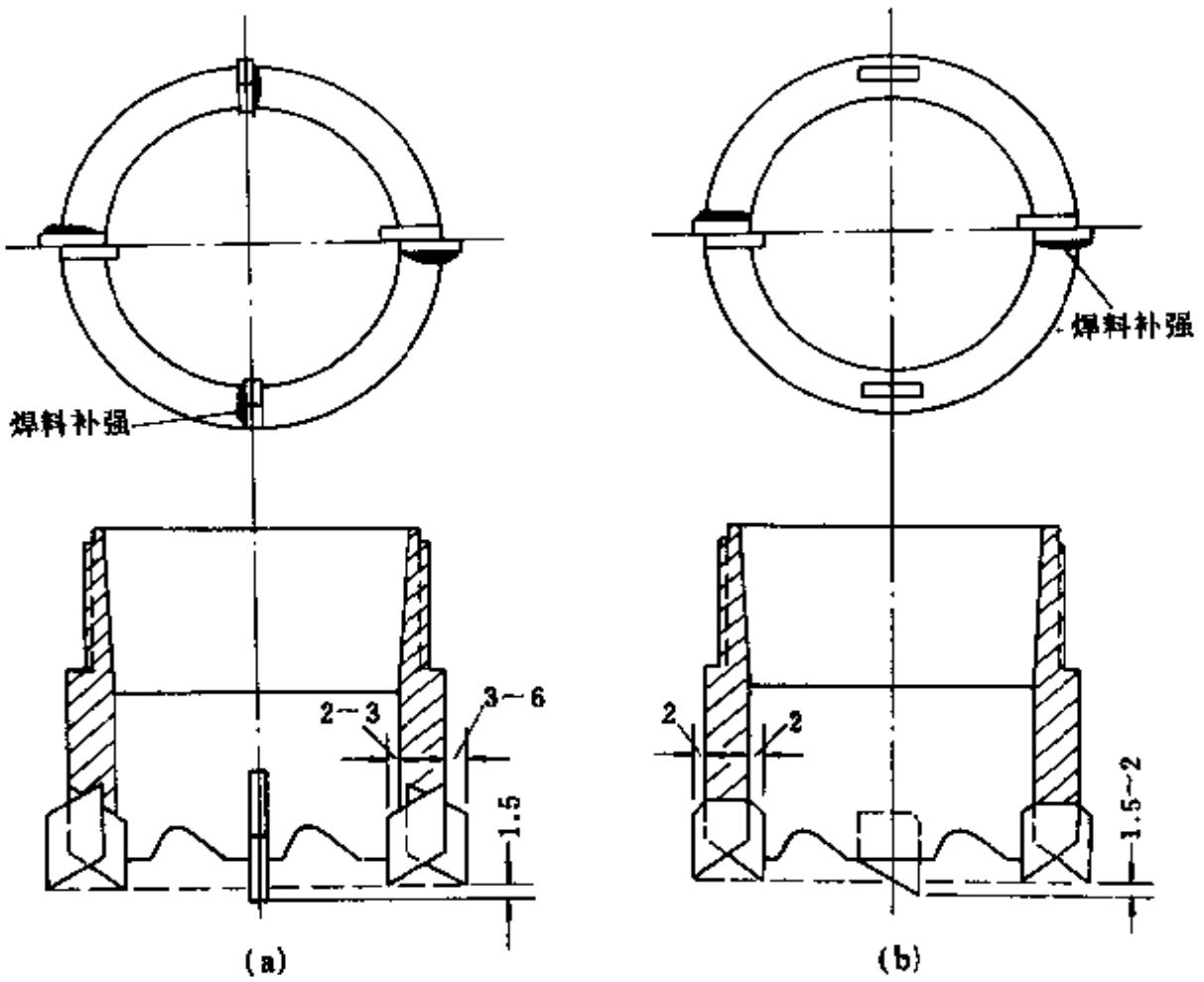


图 3-5　薄片硬合金钻头(单位:mm)

3. 分环式合金钻头

分环式合金钻头主要用于中硬及较硬地层。该类钻头主要有:

(1)内外镶硬合金钻头(图 3-6)　适用于 3～5 级岩层,如均质石灰岩、大理岩、较松散的砂岩及页岩等。钻头上镶 K573 硬合金或 K531 硬合金,K531 合金主要用于较坚硬地层。内外出刃一般为 1～2mm,底出刃为 2～3mm。切削具可斜镶也可直镶,孔底呈二环槽形式。

(2)大八角硬合金钻头(图 3-7)　钻头壁厚 10mm,镶 K534 合金,可斜镶或直镶,主要用于钻进 5～7 级和部分 8 级不均质页岩,如长兴灰岩、大理岩和凝灰岩等。

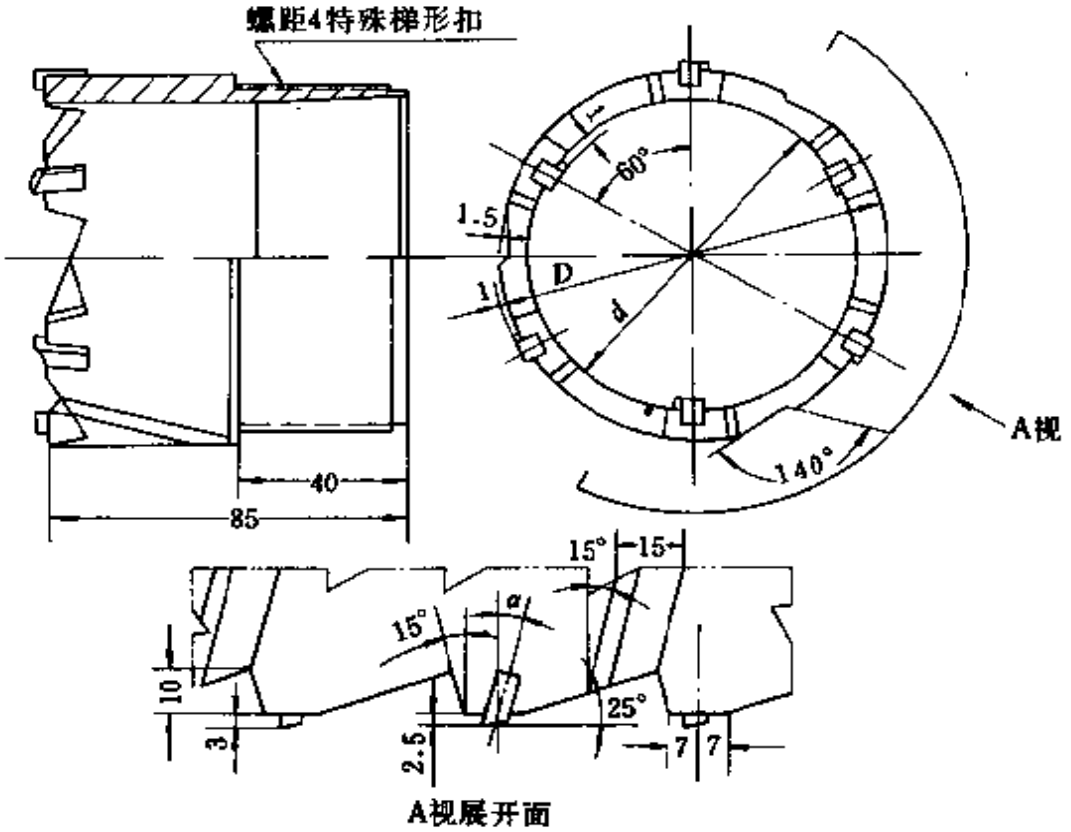


图 3-6　内外镶硬合金钻头(单位:mm)

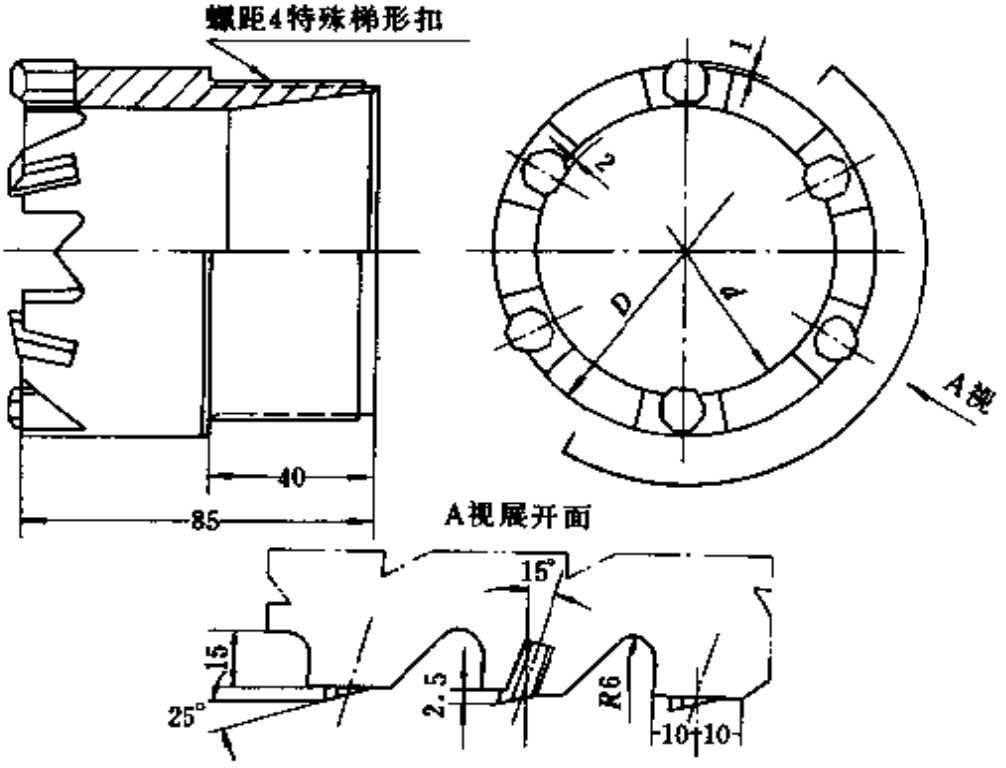


图 3-7　大八角硬合金钻头(单位:mm)

(3)扭方柱硬合金钻头(图 3-8)　即负前角阶梯钻头。该钻头镶K572 合金,方柱切削具扭转 45°,分内、中、外三环分布,并把切削具呈 10°～15°负前角斜镶。三环的底出刃不同,呈阶梯状。可钻进 5～7 级及部分 8 级中硬岩层,特别适用于研磨性大、均匀性差的岩层,如辉长岩、玄武岩、砂岩、风化辉绿岩、闪长岩、石灰岩及硅化页岩等。

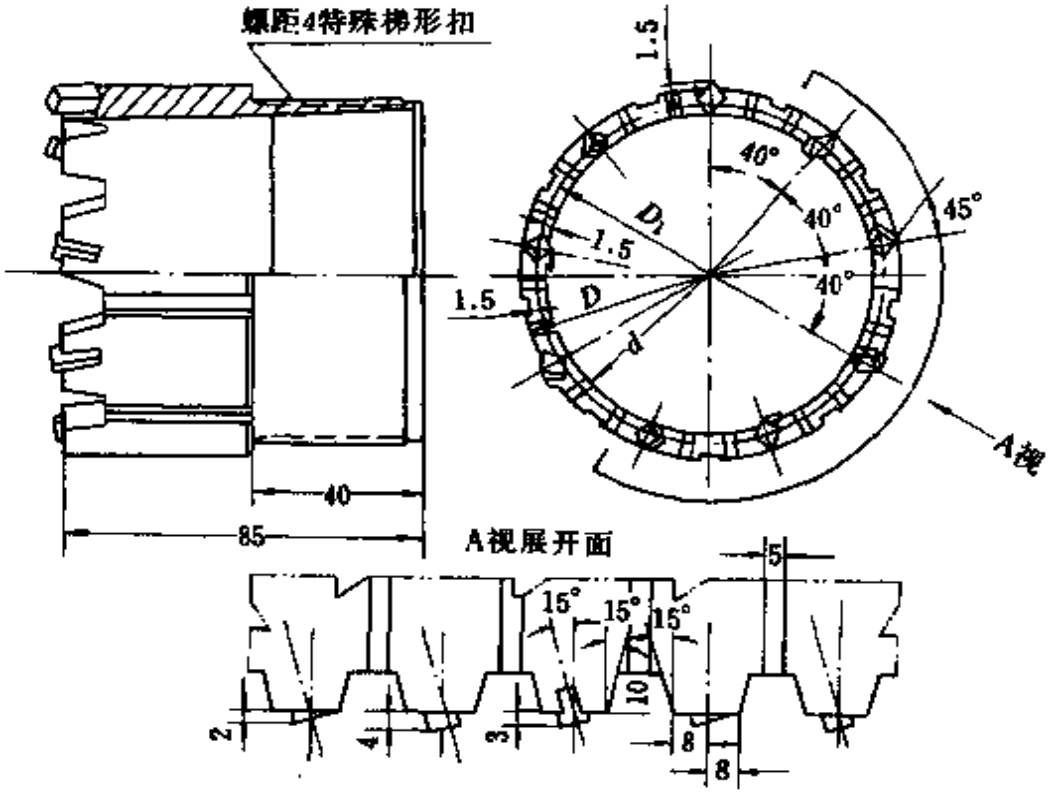


图 3-8　扭方柱硬合金钻头(单位:mm)

4. 掏槽式钻头

掏槽式钻头特征是中环切刃掏槽,再用内、外切刃扩槽,这种方式有利于碎岩,特别是在较硬的岩层中钻进,可获得很好的效果。掏槽式钻头有:

(1)单双粒硬合金钻头(图 3-9)　钻头上镶焊 K531 合金,主要

用于具有研磨性的 4～5 级及部分 6 级铁质及钙质砂岩。

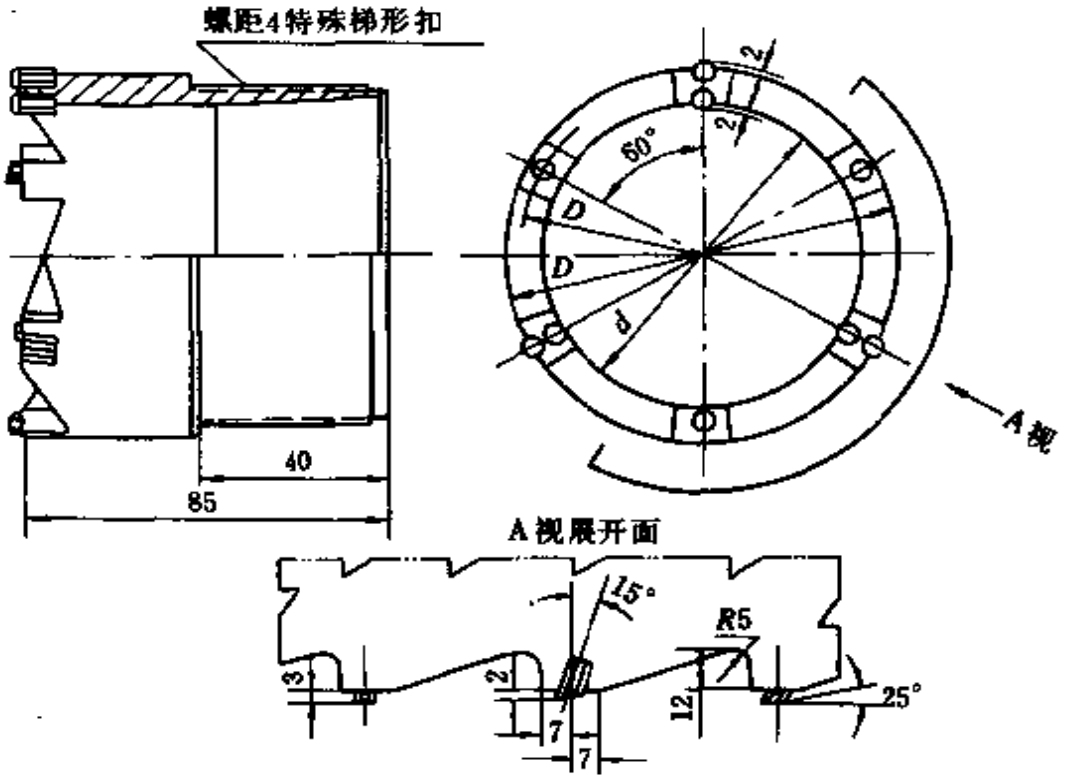


图 3-9　单双粒硬合金钻头(单位:mm)

(2)品字形合金钻头(图 3-10)　该钻头把三颗硬合金切削具焊成一组,呈品字形,中间镶 K531 合金,两边镶 K573 硬合金。该钻头可用于钻进 4～6 级中硬岩层,如石灰岩及大理岩等。

(3)"三八式"钻头(图 3-11)　该钻头用 K531、K532、K534 型小、中、大八角柱状合金顺序排列成一组,形成连续掏槽、扩槽的碎岩作用。主要用于 5～7 级裂隙性的地层。

(4)破扩式钻头(图 3-12)　该类钻头切削具出刃值由后向前分别为 2、3、4、5,按顺序排列。镶焊经修磨过的 K533 合金。该钻头适用于钻进 4～5 级大理岩、砂砾岩、砾岩等地层。

5. 自磨式钻头

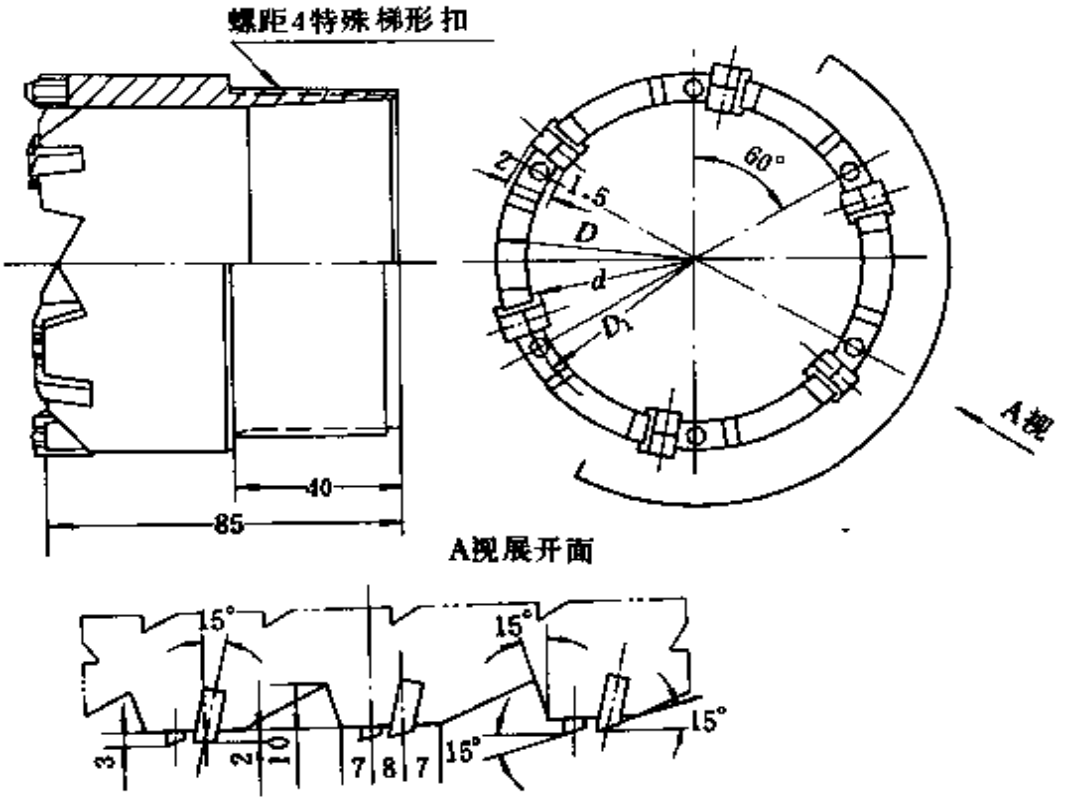


图 3-10　品字形硬合金钻头(单位:mm)

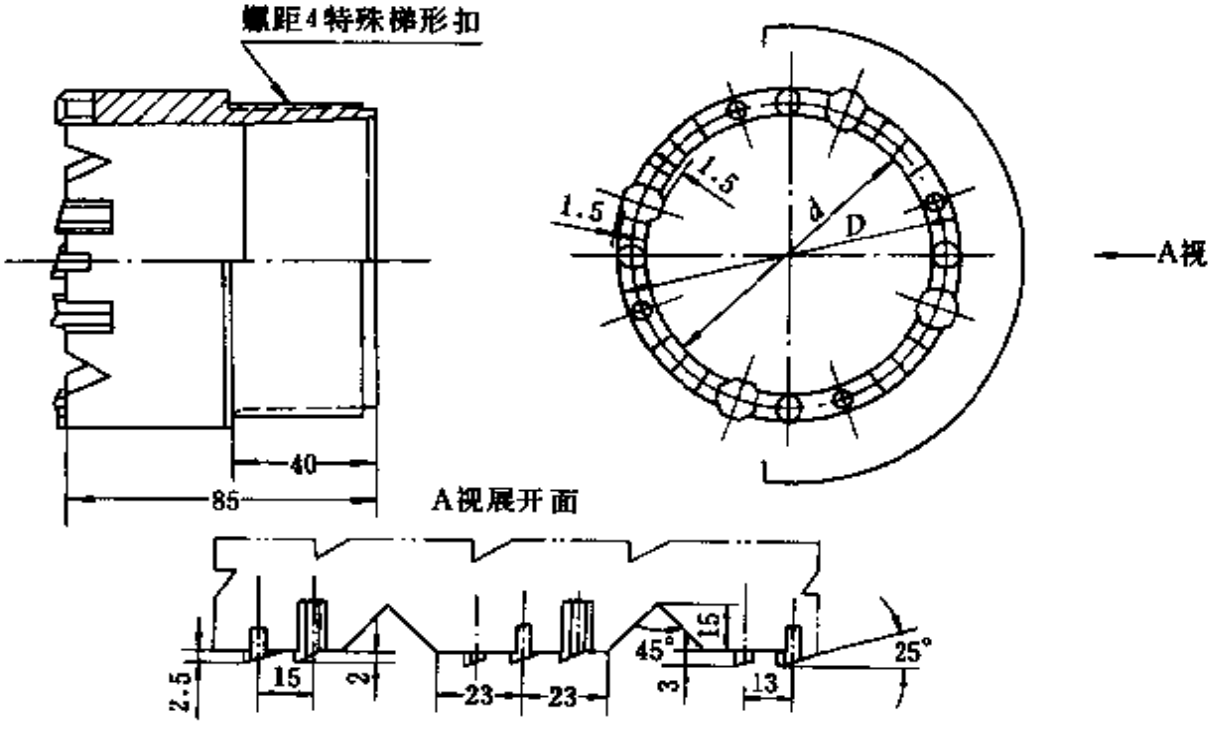


图 3-11　"三八式"硬合金钻头(单位:mm)

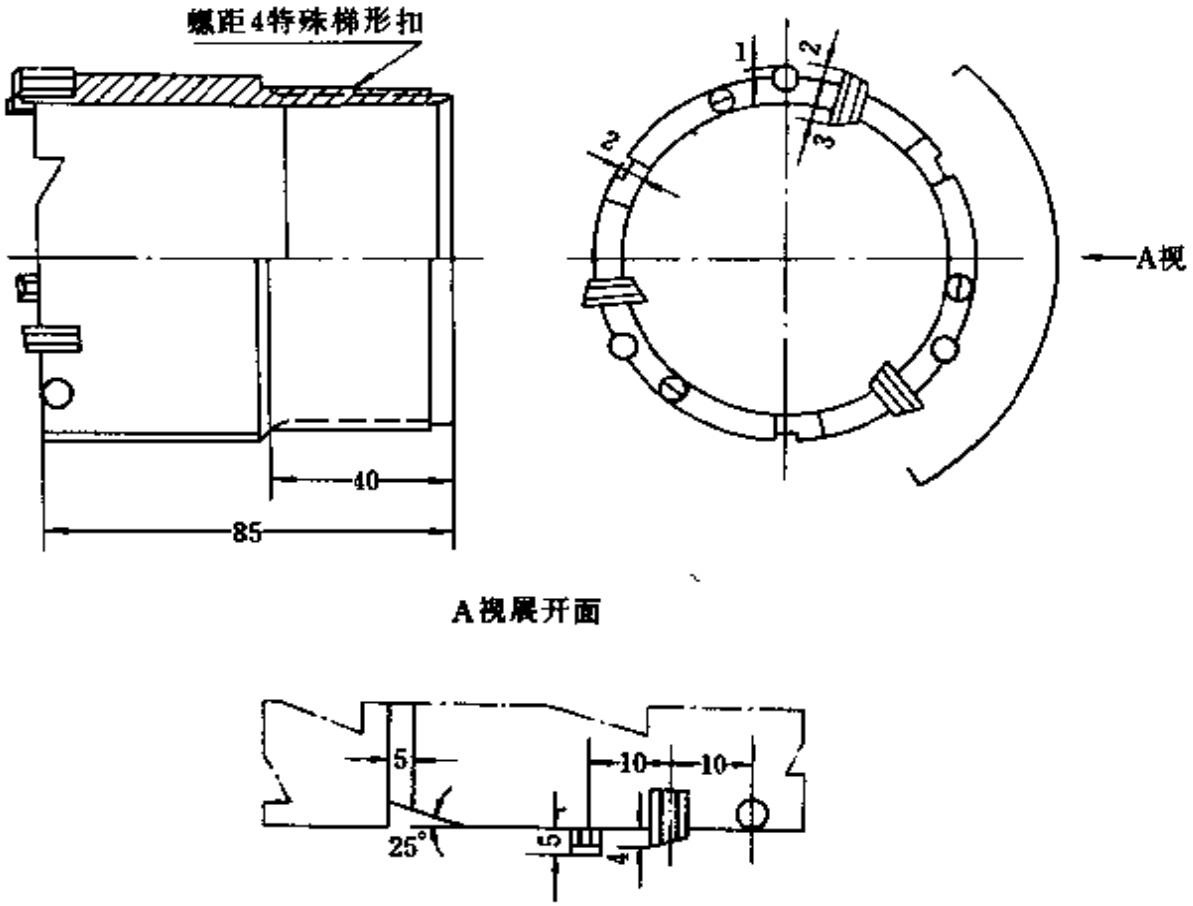


图 3-12　破扩式硬合金钻头(单位:mm)

自磨式合金钻头的切削具由硬质点和支撑体组成。硬质点常采用针状、薄片状或碎合金;支撑体有软钢片、软钢柱或粉末冶金等几种。目前较多使用的是胎块式针状钻头,如图 3-13 所示。实践表明,针状合金直径以 1.8～2.2mm 为好,它可钻进 6～7 级及部分 8 级岩层,钻速高,寿命长。

6. 全面硬合金钻头

在注浆孔施工中,常常不需要采取岩芯,故施工中,可采用全面钻进方式。目前,全面钻进可用牙轮钻头和全面硬合金钻头施工。牙轮钻头可参阅有关书籍,全面硬合金钻头大体上可分为翼片钻头、矛式钻头和环翼钻头三类.

(1)翼片钻头(图 3-14)　钻头体制成圆锥炮弹状,翼片用电焊

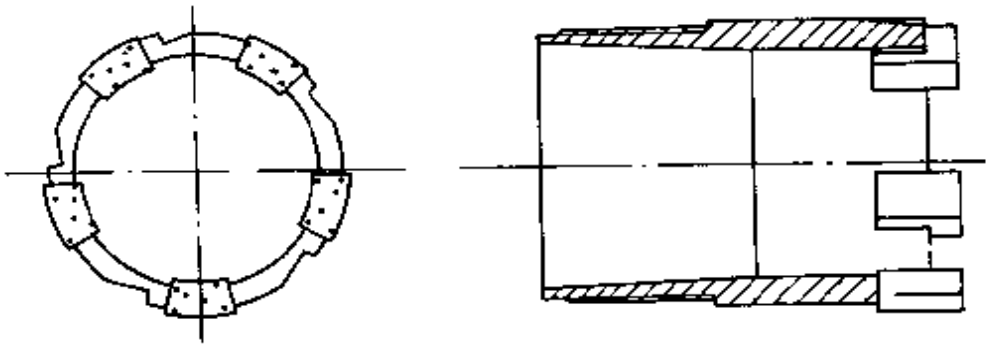


图 3-13　胎块式针状合金钻头(单位:mm)

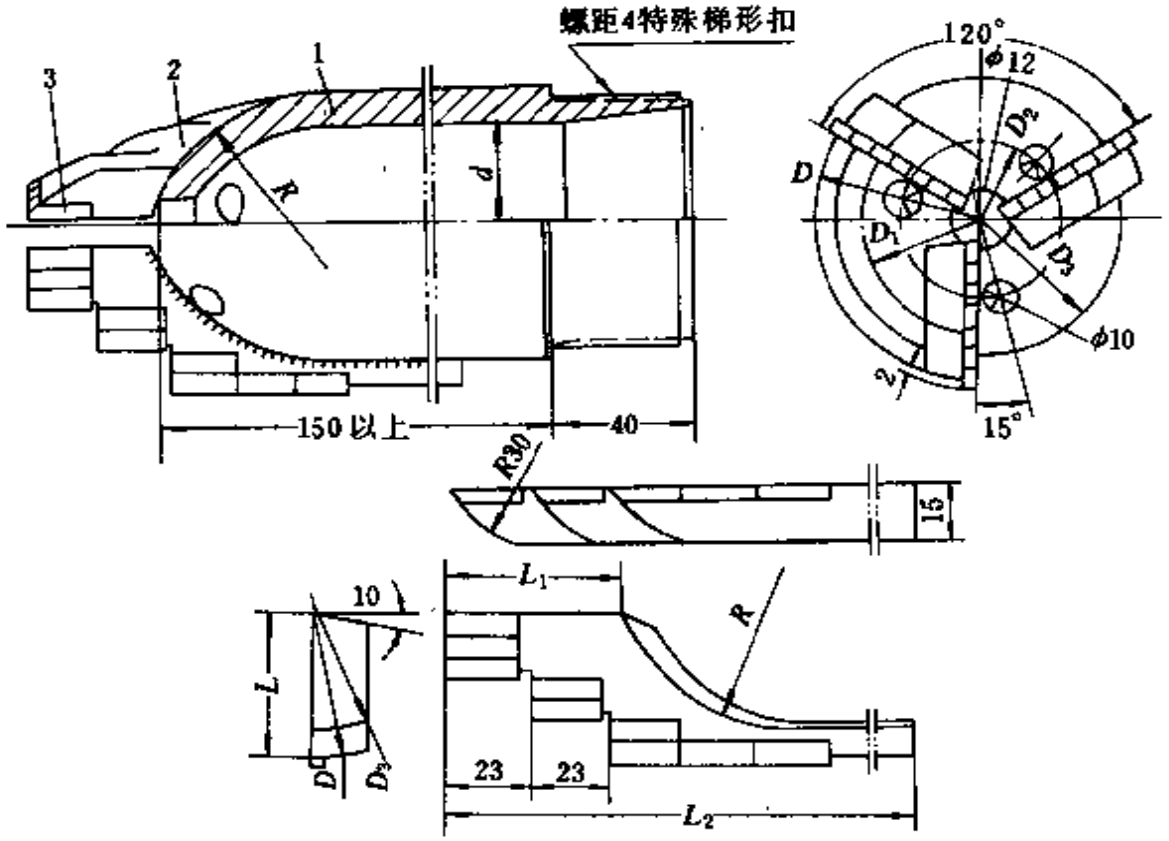


图 3-14　翼片钻头(单位:mm)

1—钻头体;2—翼片;3—硬合金切削具

法焊于钻头体上，翼片边缘焊 K413 合金，有时在翼片磨损最严重的外侧也焊硬合金块以补强。在翼片之间开 ϕ10mm，并与轴线呈 15°的水眼。三翼片钻头适于钻进 3～4 级页岩，部分 5 级砂页岩及灰岩。

(2)矛式钻头(图 3-15)　矛式钻头主翼前端呈锥形，副翼较短，起划眼和保径作用，翼边缘焊 K572 合金。该钻头适合于钻进 2～4 级红色粘土、疏松砂岩以及塑性较强的地层。

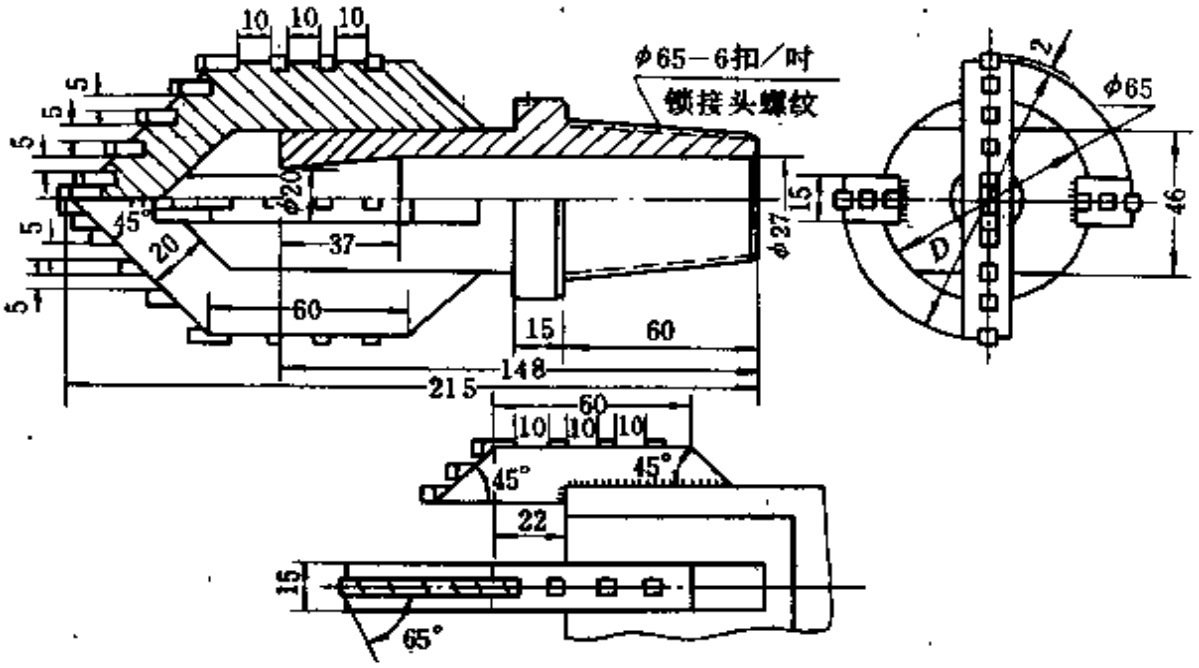


图 3-15　矛式钻头(单位：mm)

(3)环翼钻头(图 3-16)　在圆环钻头内焊有 3 或 4 个翼片则成为全面钻头，翼片上交错焊有 K571 合金，圆环底部焊 K531 和 K571 合金。这种钻头适合于 4～6 级及部分 7 级岩层，如粉砂岩及石灰岩。实践表明，此种钻头是中硬岩层中全面钻进较好的一种钻头。

(二)金刚石钻头

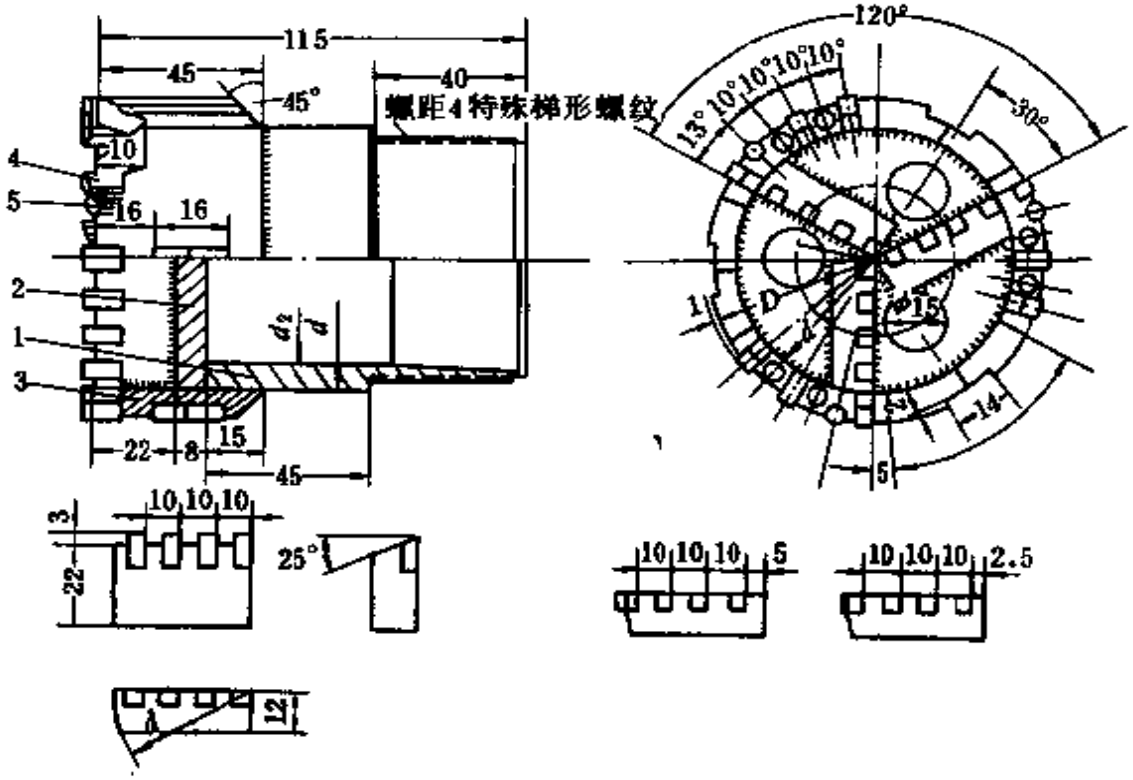


图 3-16　环鳞钻头(单位:mm)

1—钻头体;2—隔板;3—钻头外环;4、5—切削具

金刚石钻头是目前钻进坚硬岩层最有效的工具之一。钻头与扩孔器的选择直接关系到钻孔效率的高低,钻具级配如图 3-17 所示。一般岩石可钻性级别越高,所用钻头的金刚石品级应越好,粒度越小;岩层研磨性越强,钻头胎体耐磨性应越高,金刚石的浓度、粒度越大,保径性能应越好。孕镶金刚石钻头金刚石粒度及胎体硬度和耐磨性分别见表 3-11、表 3-12。钻进同一种岩石,金刚石品级越好,其胎体耐磨性也应相应提高。

表 3-11　孕镶用金刚石粒度

粒度(目)	人　造	>46	46～60	60～80	80～100
	天　然	20～30	30～40	40～60	60～80
岩　层		中硬—硬		硬—坚硬	

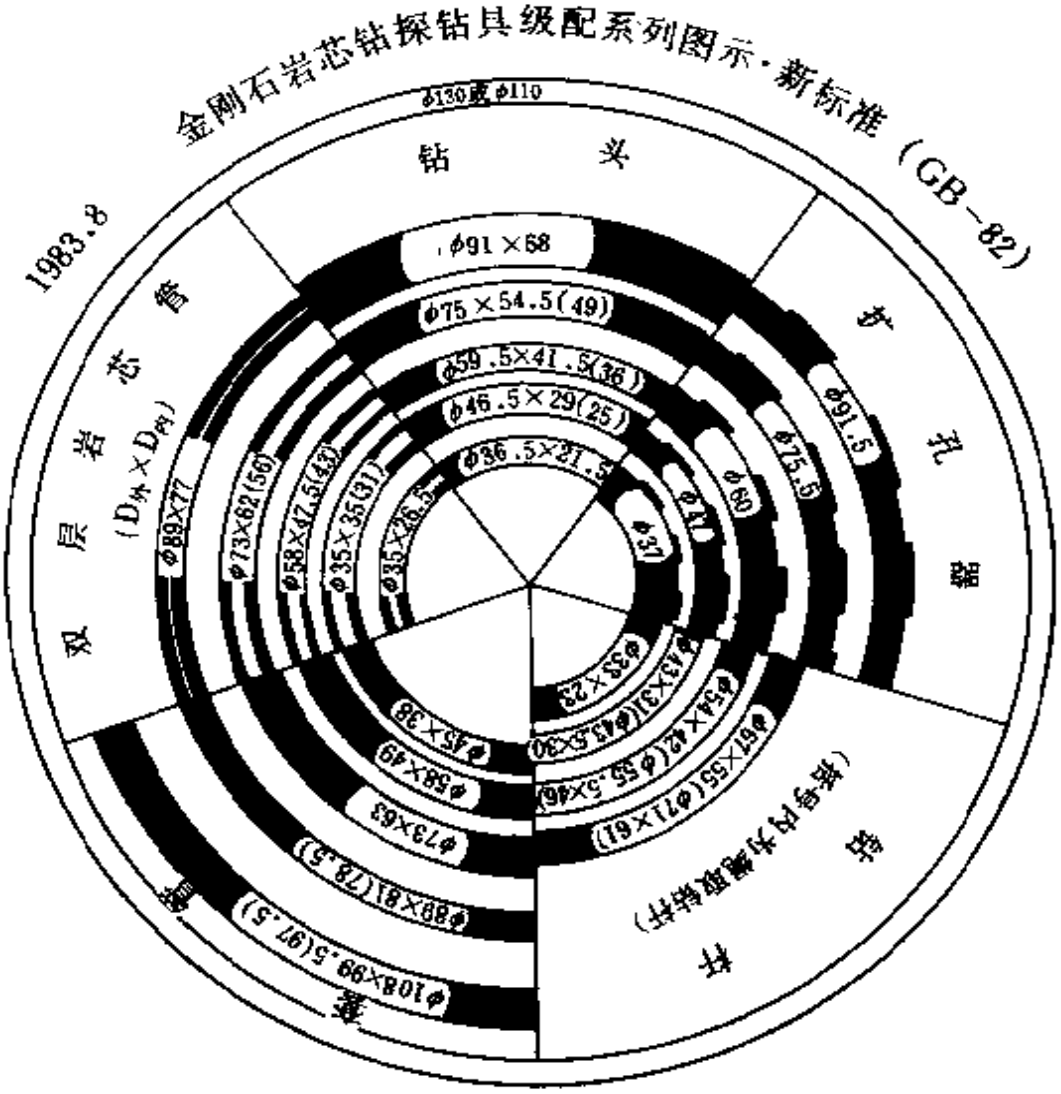


图 3-17　金刚石钻具级配系列图(单位:mm)

表 3-12　孕镶金刚石钻头胎体的硬度和耐磨性

代号	级别	胎体硬度(HRC)	耐磨性	适　用　岩　层
1	软	20～30	低	坚硬弱研磨性岩层
			中	坚硬中等研磨性岩层
2	中软	30～35	低	硬的弱研磨性岩层
			中	硬的中等研磨性岩层
3	中硬	35～40	中	中硬的中等研磨性岩层
			高	中硬的强研磨性岩层
4	硬	40～45	高	硬的强研磨性岩层

金刚石钻头常用唇面形状如图 3-18 所示。通常多为平底形，也有制成带圆弧的唇面的。如钻头壁较厚或钻进坚硬、弱研磨性岩层时容易打滑，则常把唇面做成锯齿状；为了克服钻进坚硬岩层时钻头内、外环呈不同的磨耗状态（常表现为内环过度磨损），可以把钻头做成梯齿唇面，内、外环分别采用不同性能的金刚石和不同性能的胎体，以便分别碎岩钻进。

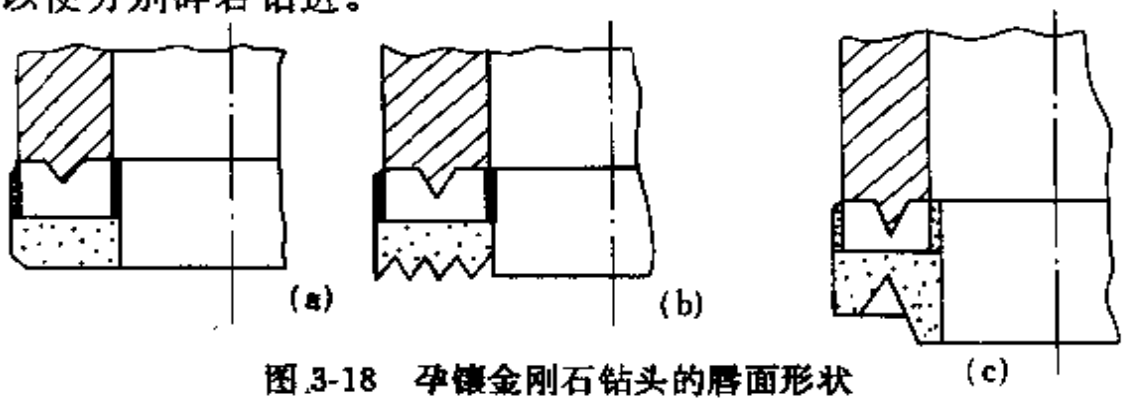


图 3-18　孕镶金刚石钻头的唇面形状

(a)平底式；(b)锯齿式；(c)梯齿式

根据目前国内金刚石钻头的使用经验，可按表 3-13 进行选择。

表 3-13　孕镶金刚石钻头选用参考表

岩层分类		软　岩	中硬岩			硬　岩			特硬岩		
岩石名称举例		泥灰岩、页岩、碳质片岩、绿泥石片岩、砂质灰岩、泥质砂岩、千枚岩	石灰岩、大理岩、白云岩、辉绿岩、辉长岩、硬砂岩、凝灰岩、安山岩、片岩			片麻岩、闪长岩、花岗岩、混合岩、流纹岩、玄武岩、伟晶岩、矽卡岩、角闪岩、斑岩、片岩			高硅化灰岩、石英岩、霏细岩、坚硬花岗岩、石英斑岩、碧玉岩、含铁石英岩、燧石角岩、石英脉		
可钻性级别		1～3	4～6			7～9			10～12		
研磨性		弱	弱	中	强	中	强	弱	弱	中	强
胎体硬度(HRC)	15～25					⊙			●		
	25～30	⊙	⊙			●			▲		
	30～35		●	⊙		●			△	⊙	
	35～45		●	●	⊙	▲	●			●	
	45～50			●	●		▲	⊙		△	⊙
	50～60				●			▲			●
金刚石粒度(目)	36～46		●	●	●			▲			△
	60～80		⊙	●	●	▲	▲	●	▲	▲	●
	100					●	●	⊙	▲	●	⊙

注："●"代表适合采用；"▲"代表适合采用，最好用高强度金刚石；"⊙"代表亦可采用；"△"代表也可采用，最好用高强度金刚石。

第三节　注浆泵

注浆泵是注浆施工中最重要的设备之一，注浆泵应有足够的排浆量，泵压应大于最大注浆压力的 1/4～1/5 倍，以保证注浆工作的顺利进行。

就静压注浆而言，由于浆液对地层裂隙或孔隙的充塞作用，裂隙或孔隙将逐渐变小，吸浆量也逐渐变低，相应的注浆压力呈递增趋势。尤其在不同的注浆深度、不同的岩层条件下，要求采用不同的注浆流量和压力。特别是在双液注浆施工中，为了能准确控制浆液的凝固时间，两液的吸浆量应满足一定的比例关系，要求注浆泵在注浆过程中，能随时调节流量、压力，而且供液要均匀稳定，以满足注浆工艺和保证注浆质量的要求。

对于高压旋喷注浆，它是通过泵的作用，把低压吸入的浆液或水，以高压排出，从而使喷嘴处液流压力升高。喷嘴处液流压力愈高，喷射流的破坏力愈大，固结体的尺寸也愈大。因此高压旋喷注浆法要求的泵压要比静压注浆大，一般要求注浆泵额定压力为 20～34MPa，额定流量为 85L/min 左右。

目前国内专用注浆泵有 YSB-250/120 型液力调速注浆泵、2MJ-3/40 型隔膜计量泵等，另外还有各种型号的泥浆泵，如 300 型电动水泥泵、2DN-25/80 型泥浆泵和 TBN 系列、BN 系列泥浆泵，以及小型的手压泵、动力泵等，还有石油化工用的计量泵，如 1DB-1.5/30、2DB-1.5/30 型柱塞泵等。目前水泥灌浆多以泥浆泵或砂浆泵替代，化学灌浆多用计量泵。在高压旋喷注浆中，一般单管法和二重管法使用的是高压泥浆泵，而三重管法和多重管法使用的多是高压水泵，我国常用的高压泵有 SNC-H300 型水泥注浆车的高压泥浆泵、3XB 型小机座三柱塞泵、3W-6B、3W-TB 型高压水泵、3DS 型高压水泵等。

一、静压注浆用泵

(一)YSB-250/120 型液力调速注浆泵

YSB-250/120 型液力调速注浆泵，是为适应我国当前静压注浆工艺的要求而设计的。泵的调速系统采用了可调式液力变矩器的调速传动装置，由于变矩器功率可调，且具有相对稳定的恒功率运转特性，使泵具备当压力稳定时可无级变速调节流量和压力增高、流量自动降低的特性，从而满足了注浆工艺的要求。YSB 型注浆泵，为卧式高压双缸双作用泵，输送介质为水泥-水玻璃浆液，适于深井地面预注浆或井下高压注浆。

泵的工作机构采用往复泵型式，可承受较高的压力，它由涡轮涡杆、曲柄连杆机构、滑块带动拉杆，最后使活塞作往复运动。泵缸采用双缸双作用式，可输送较大的流量。优点是易损件磨损后可就地更换，便于维护使用。调速机构采用先进的液力变矩器，能够满足注浆过程中大幅度的无级调量要求。传动机构采用涡轮涡杆、曲柄连杆机构，安全可靠，承载力高，整台机器沿轴线布置，紧凑合理，整体性强。

1. 技术规格

YSB-250/120 型注浆泵设计压力、流量和变矩器转速、活塞往复次数的对应关系见表 3-14。

表 3-14　YSB-250/120 型注浆泵压力、流量、变矩器转速、活塞往复次数关系

变矩器输出转数 (r/min)	300	660	770	900	950	1070	1190	1310	1440	1490
活塞往复次数 (次/min)	22	48	57	66	70	79	87	96	105	109
流量(L/min)	50	110	130	150	160	180	200	220	240	250
压力(MPa)	12.0	12.0	11.0	10.3	9.8	9.1	8.0	7.6	6.9	6.7

其主要技术参数如表 3-15 所示。

表 3-15　YSB-250/120 型液力调速注浆泵主要技术参数

最大工作压力(MPa)	12	蜗轮蜗杆传动比	13.66
最大排量(L/min)	250	电机型号	BJO_2-92-4
缸套直径(mm)	80	电机功率(kW)	75
活塞行程(mm)	150	电机转速(r/min)	1480
缸数(个)	2	外形尺寸(mm)	3 900×800×1 600
吸浆管直径(mm)	75	重量(包括自动补偿器,kg)	3 000
排浆管直径(mm)	45		

2. 工作原理

YSB-250/120 注浆泵的工作原理除可调式液力变矩器外,与普通双作用往复式泵是相同的。因此,主要介绍一下变矩器的工作原理。液力变矩器主要由液压泵、泵轮、涡轮、导轮(包括固定导轮和可调导轮)、冷却器等构件组成(图 3-19)。

(1)液压泵　YBC-45/80 型齿轮泵,经主动轴 1、齿轮 2、3 带动液压泵轴 4 转动,液压泵 5 将箱体内的工作油液经液压管 6 输送到循环圆内,使泵轮 7、涡轮 8、导轮之间及间隙部分都充满工作油液,供液力传动用。

(2)泵轮　由主动轴 1(泵轮轴)和泵轮 7 用螺钉连接而成。泵轮是由轮毂和 25 个叶片呈径向倾斜均布镶焊而成的刚性构件。在电机带动下,泵轮将机械能变成液体能。泵轮轴两端分别支承在进油壳 16 和涡轮轴 9 左端的内孔里。

(3)涡轮　由从动轴 9(涡轮轴)和涡轮 8 用螺钉连接而成。涡轮是轮毂和 36 个叶片呈经向倾斜均布镶焊成的刚性构件。它接受泵轮输出的液体能,并将液体能转变为机械能,即以转速和扭矩输出。

(4)导轮　分固定导轮和可调导轮。固定导轮 12 由 42 个轴向倾

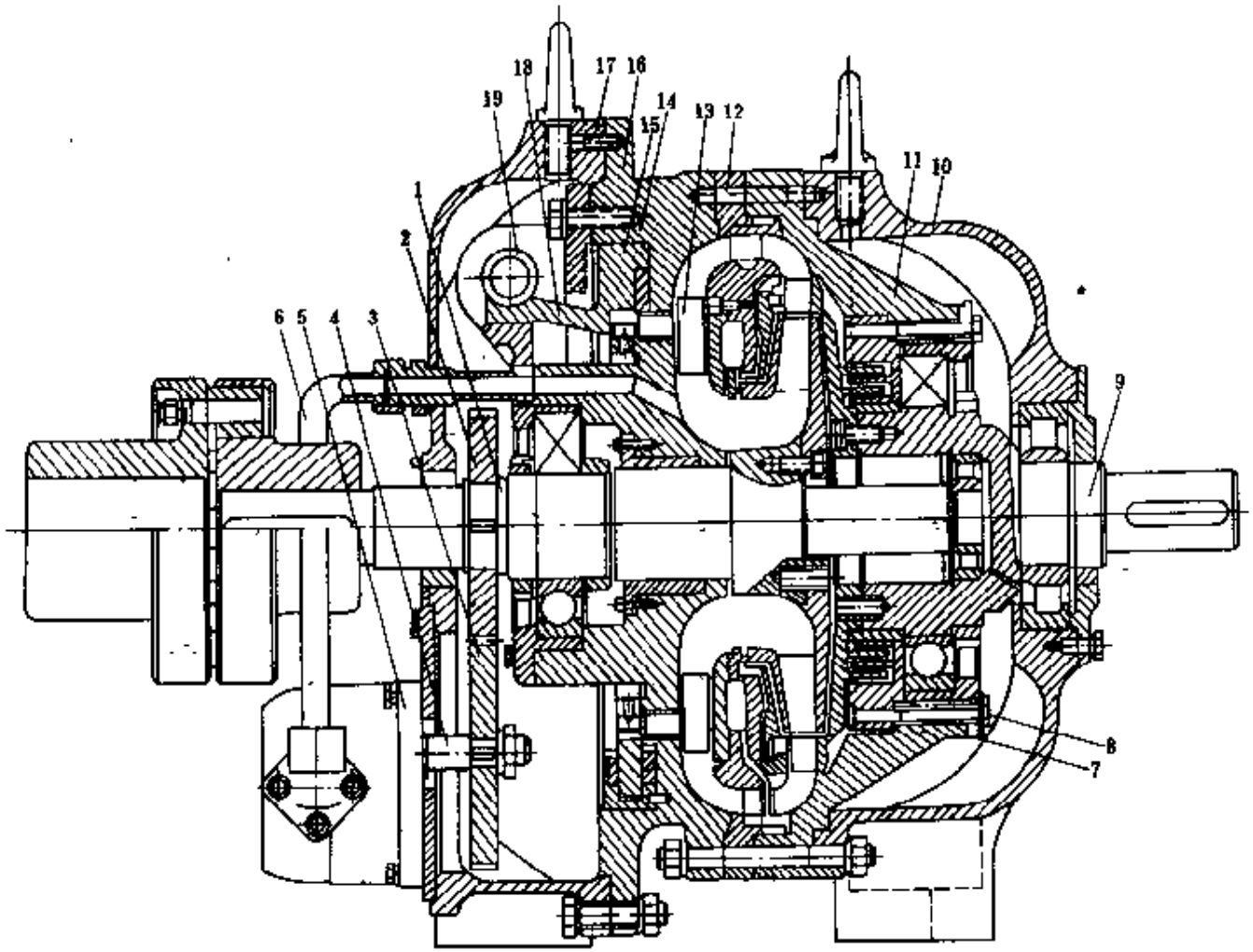


图 3-19　液力变矩器总装配图

1—主动轴(泵轮轴)；2、3—齿轮；4—液压泵轴；5—液压泵；6—油管；7—泵轮；8—涡轮；9—从动轴(涡轮轴)；10—右壳体；11—出油壳；12—固定导轮；13—可导叶片；14—拨叉；15—拨叉齿圈；16—进油壳；17—左壳体；18—扇形涡轮；19—手轮涡杆

斜均布的叶片，同箱体连接的轮毂和端盖组成。叶片与轮毂为一浇铸整体，并用螺钉与端盖连接。轮毂和端盖包容的环形槽，即循环圆，沿其内圆有径向均布的 6 个溢流槽通向循环圆；沿其外圆径向均布 6 根油管；循环圆内工作过的热油，经出油壳流入右箱体，热油靠自身压力进入冷却器，冷却油回左箱体，供液压泵输送到循环圆内继续工作。

可调导轮由 24 个可导叶片 13、拨叉 14、拨叉齿圈 15、进油壳（轮毂）16、扇形涡轮 18 和手轮涡杆 19 组成。进油壳沿径向均布 24 个叶片轴孔，其左侧固定手轮涡杆支承。拨叉齿圈上沿径向均布 24 个滑柱，其右侧固定扇形涡轮 18。可导叶片轴穿过进油壳轴孔和拨叉以弹性销铰接为一体，拨叉插入其齿圈上的滑柱槽孔中，齿圈借助于扇形蜗轮的转动，可相对于箱体、轮毂转动，从而调节可导叶片的张开度，通过可导叶片张开度的变化，调节循环圆内通油截面的大小，以调节高能油液的能量，实现输出轴（涡轮轴）的无级调速。

（5）冷却器　为 6135 型机油冷却器。从箱体左壳体内，经液压泵输送至循环圆的工作油液，经过液力传动后油温升高至 70～100℃，通过固定导轮溢流腔和出油壳泄入油箱右壳体内，再经出口管进入冷却器。冷却后的油液流入油箱的左壳体中，供液压泵继续使用。

液力变矩器的工作原理如图 3-20 所示。主动轴 1 高速旋转，带动齿轮 2、3 和齿轮泵 4 工作。液压泵 4 排出的油液经液压管 5 送入循环圆 6 中。泵轮 7 随主动轴高速旋转释放出机械能，循环圆内的油液在泵轮叶片的作用下把机构能再转变为液体能。高能油液立即喷射到涡轮叶片上，再将液体能转变为机械能经从动轴 9 以转速和扭矩输出。当调节手轮涡杆时，扇形涡轮带动拨叉齿圈回转，通过滑柱公转和滑柱与拨叉间的移动，使 24 个可导叶片沿其轴心自转一个角度，即调节可导叶片的张开度，以控制直接参与循环圆内运动油液流量的大小。张开度越大，通过工作油液量越多，转化为机械能就越大，输出的扭矩也越大，转速也越高。

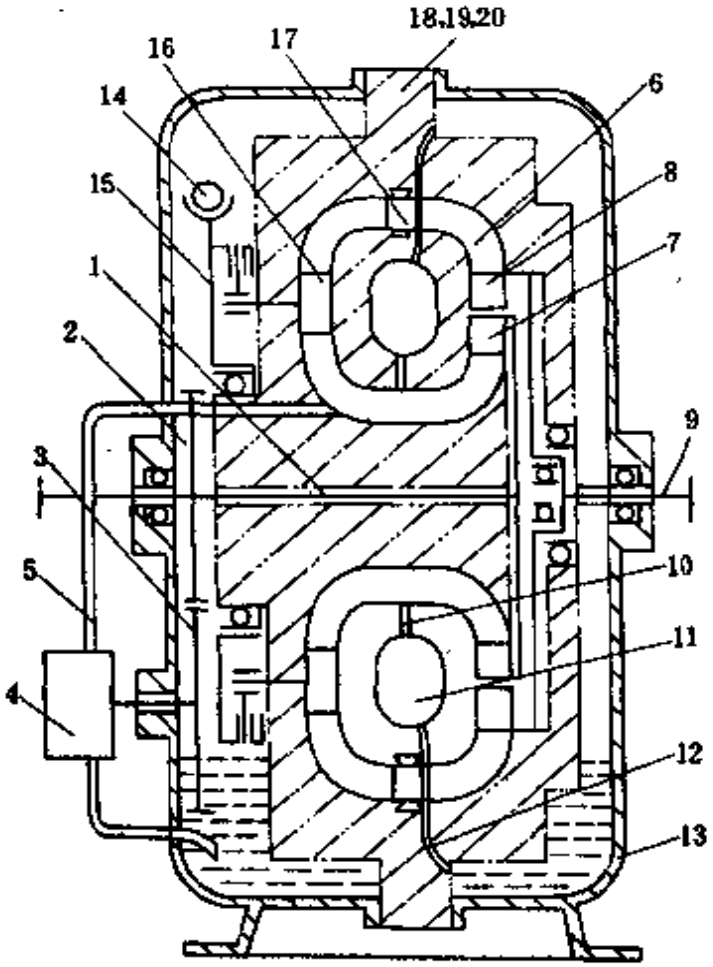


图 3-20　液力调速变矩器结构原理图

1—主动轴(泵轮轴)；2—主动齿轮；3—从动齿轮；4—齿轮液压泵；5—输油管；6—循环圈；7—泵轮；8—涡轮；9—从动轴(涡轮轴)；10—溢流孔；11—溢流腔；12—出油孔；13—壳体；14—涡轮涡杆；15—拨叉齿圈；16—可调导轮叶片；17—固定导轮叶片；18、19、20—进油壳、固定导轮、出油壳

由此可见，油液流经导轮叶片，改变从涡轮出口到泵轮进口之间的液流环量，从而保证液力变矩器具有涡轮力矩不等于泵轮力矩的性能。同时液流经过导轮叶片时，会产生压力和速度大小与方向的变化，从而避免冲击和形成涡流，造成能量损失，使液体在势能降低时

动能增加，以保持总能量不变。可调导轮除上述作用外，还可通过调节其叶片过流张开度，控制循环圆内工作油流量的多少，从而保证液力变矩器具有变矩和无级调速的性能。

3. YSB 250/120 型注浆泵的使用与维护

开泵前要做到：

(1)检查泵的各部件有无异常现象；

(2)打开四浆阀，以排出空气；

(3)油杯调至每 4～5s 一滴；

(4)减速箱内 50 号机械油不低于油管口，使用期不超过 300h；

(5)变矩器手轮调至零，冷却器放气至正常出水。

开泵后要注意：

(1)变矩器用专用锭子油，油位应保持于中线位置，容量 13kg，使用油期 300h，油压 0.1～0.2MPa，油温 30～50℃；

(2)电流表应稳定，空车低于 40A，如发现电流过大、电机发热，立即检查起动补偿器的接点是否已烧坏，每周应检查 1 次，限速继电器调至使活塞往复不超过 120r/min；

(3)水泥浆须过滤处理，注浆中途如停注超过 5min，必须改阀门打循环或换成清水，防止浆液在泵体、管道内凝固；

(4)经常测试活塞往复次数与排量的关系，一般防震压力表摆动在 0.5MPa 以内，如摆动超过 1.0MPa，且测试容积效率低于 90%，则很可能是球阀被卡死或进浆管及笼头被堵死，也可能活塞被损坏，如果这样，会有串浆声，要及时加以处理；

(5)如果完全不上浆，可能是进浆管或笼头被堵，如出浆管有压力，可能是泵内空气未排干净，也可能是进浆管漏气，此时须逐一检查，加以排除；

(6)注浆结束后应及时打清水冲洗，洗泵时间不少于 30min，然后拆下阀盖检查各通道中浆液是否被清除干净，拆下进浆管，检查进浆管路是否有浆液淤塞并清理干净；

(7)严格做好运行记录,交接班时应提出预防性检修建议。

(二)2MJ-3/40 型隔膜计量泵

2MJ-3/40 型隔膜计量泵是为适应双液注浆工艺的需要而设计的,它有两个泵缸头,可以输送同一种浆液或同时输送两种浆液,以隔膜的方式把液体过流部分和柱塞运动部分分开,以利于机器的正常运转,减少故障的发生,延长易损件的使用寿命。调节机构的手轮可任意改变柱塞行程,以调节流量,流量调节可在停机或运转中进行,每个缸都能在零到最大流量中无级调节。因此,可以精确地按比例输送浆液。泵缸头采用铸铁材料,可以输送一般水泥浆液和腐蚀性较低的化学浆液。适用于井筒壁后注浆和地面注浆。

2MJ-3/40 隔膜计量泵主要技术参数如表 3-16 所示,结构及工作原理见图 3-21。

表 3-16 2MJ-3/30 隔膜计量泵主要技术参数

最大工作压力(MPa)	4	计量精度(%)	±2
最大排量(L/min)	50	电机型号	AJO_2-51-4
柱塞直径(mm)	75	电机功率(kW)	7.5
柱塞数目(个)	2	电机转速(r/min)	1500
柱塞最大行程(mm)	45	外形尺寸(长×宽×高)(mm)	1 130×1 000×1 050
柱塞往复次数(次/min)	144	重量(kg)	1 000
进排管直径(mm)	30		

对 2MJ-3/40 型计量泵的使用与维护主要有:

(1)启动前,对隔膜头柱塞腔内注满 7 号高速机油,注油和中间限制板腔中注水同时进行;

(2)运转时,依注浆量的大小调好调量表并锁定;

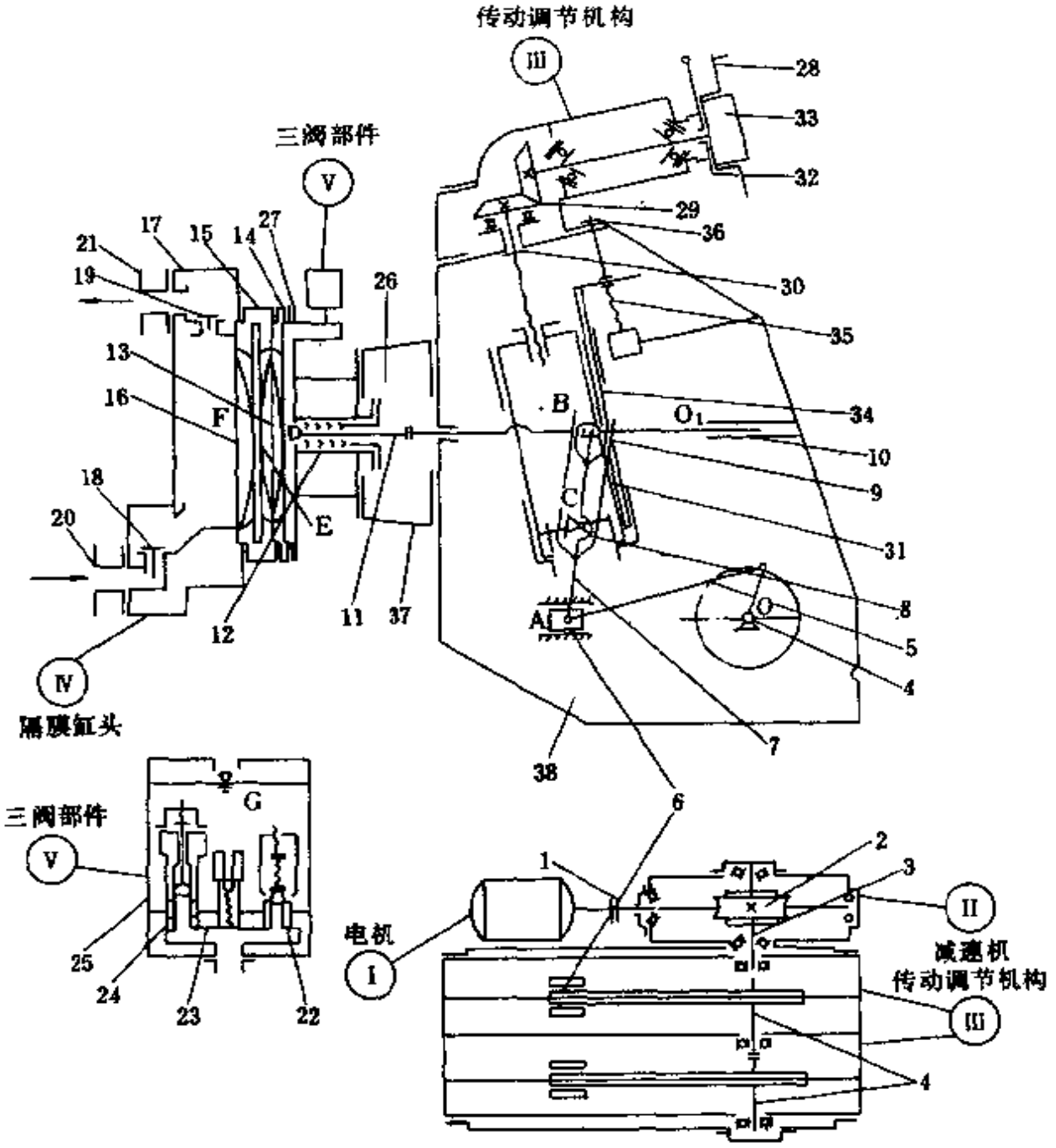


图 3-21 2MJ-3/40 隔膜计量泵结构及工作原理示意图

Ⅰ. 电动机；Ⅱ. 减速机；Ⅲ. 传动调节机构；Ⅳ. 隔膜缸头；Ⅴ. 三阀部件

1—联轴器；2—涡轮副；3—涡轮轴；4—凸轮曲轴；5—连杆；6—滑块；7—摇杆；8、9—滑块；10—柱塞杆；11—柱塞；12—填料函；13—后隔膜；14—后隔膜限制板；15—中间隔膜限制板；16—前隔膜；17—泵缸头；18—吸入阀；19—排出球阀；20—吸入法兰；21—出口法兰；22—安全阀；23—补油阀；24—放气阀；25—三阀箱体；26—填料压盖；27—泵缸体；28—手轮；29—伞齿轮副；30—调节丝杠；31—调节滑块；32—锁紧手轮；33—调量表；34—阻滞斜块；35—调节杆；36—螺母；37—托架；38—箱体

(3)注完后，务必立即清洗泵的有关部件，严防沉积浆液。

(三)DSJ 系列柱塞式计量泵

DSJ 系列计量泵，是一种行程可调的单作用式柱塞泵，可以按比例输送弱酸性或碱性化学浆液及水泥浆液，其结构原理如图 3-22。该系列泵主要由电机、蜗轮减速器和泵体等部分组成。该泵在蜗轮箱两端有曲柄将动力传到两个单独泵体时，可同时输送两种不同浆液的为双缸泵；仅有一个曲柄时，为单缸泵。其柱塞行程的调节通过手轮 19 实现，当滑块的中心距 A 点为零时，柱塞行程为零，泵的流量也为零。安全阀 13 的作用是：当输送浆液压力超过工作压力 10%～20%时，立即打开而卸压。

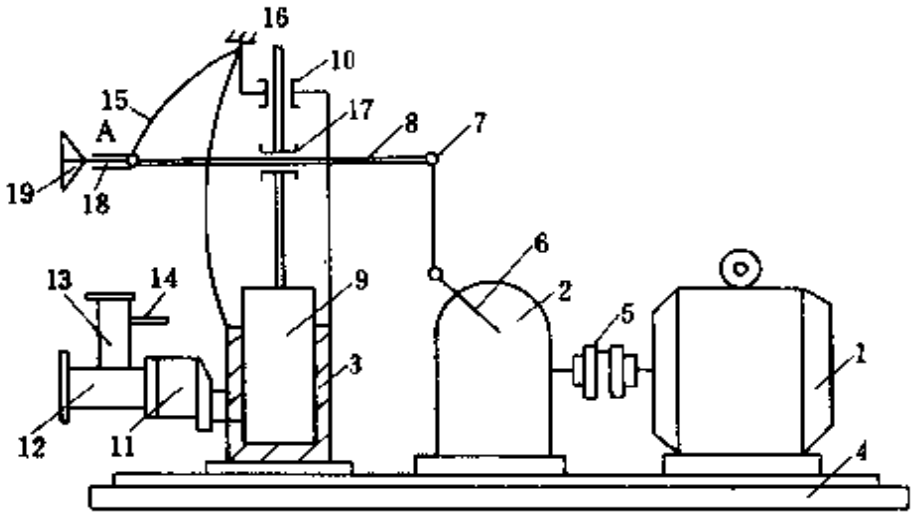


图 3-22　DSJ 型计量泵结构及工作原理示意图

1—电机；2—蜗轮减速器；3—泵体；4—底座；5—联轴器；6—曲柄；7—连杆；8—摇杆；9、10—柱塞；11—排出阀；12—三通管；13—安全阀；14—回流管；15—连板支架；16—轴；17—滑块；18—转动丝杆；19—手轮

DSJ 型计量泵的主要性能如表 3-17 所示。

表 3-17　DSJ 型计量泵性能参数表

型号	流量 (L/min)	压力 (MPa)	柱塞直径 (mm)	行程 (mm)	往复次数 (次/min)	缸数 (个)	电机型号	功率 (kW)	转速 (r/min)
1DSJ-1.5/30	0～12.5 0～25	3 2	70	0～116	62	1	1JBS22-4	2.7	1450
2DSJ-3/30	0～25 0～50	3 1.5	70	0～116	62	2	1JBS31-4 JBS32-4	2.7	1450

(四)NSB-100/30 泥浆泵

NSB-100/30 泥浆泵结构如图 3-23 所示。主要由变速箱、泵头、安全阀与空气室、引水及滤水装置和机架等组成，为卧室三缸单作用柱塞泵，泵头部分有彼此隔开的 3 个缸套，有共同的吸水室，吸水室一端装引水装置，另一端用盖板堵死。排水管一端接三通及软管接头，分别与钻机水龙头或灌浆管接通，另一端装安全阀及空气室。空气室内充有 300～600kPa 的压缩空气。其流量调节通过调节三通阀上的手柄拨动阀塞实现。

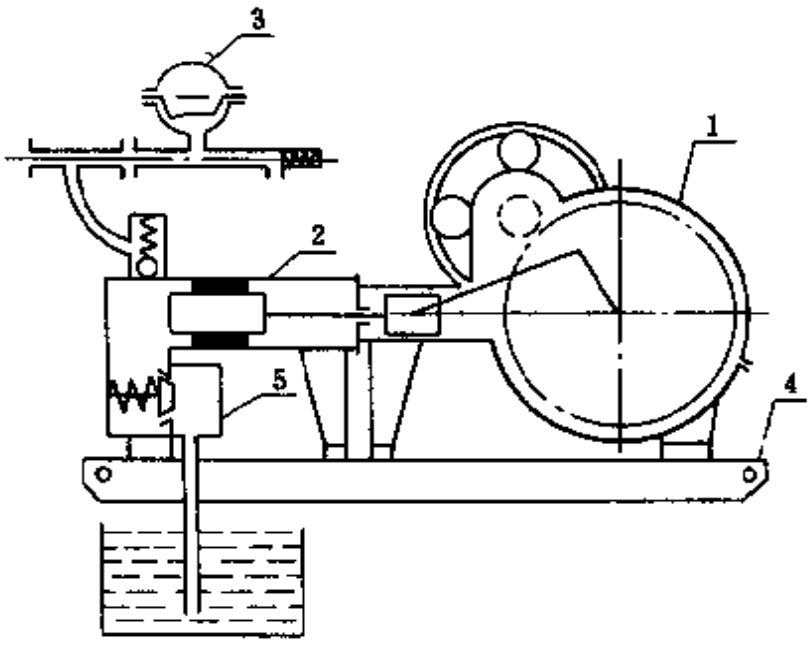


图 3-23　NSB-100/30 泥浆泵结构示意图

1—变速箱；2—泵头；3—安全阀与空气室；4—机架；5—引水及滤水装置

NSB-100/30 泥浆泵的主要性能参数如表 3-18 所示。

表 3-18　NSB-100/30 泥浆泵主要性能参数

缸数(个)	3	吸水管直径(mm)	65
缸径(mm)	70	排水管直径(mm)	51
往复次数(次/min)	250	需用功率(kW)	7.5
流量(L/min)	100	重量(kg)	210
压力(MPa)	30	外形尺寸(长×宽×高)(mm)	730×816×610
带轮直径(mm)	274 或 368		

(五)100/15(C-232)型砂浆泵(图 3-24)

100/15 型砂浆泵主要作为输送粒度小于 2mm 的细粒料压力灌浆用，为隔膜式单缸单作用泵。由拌合桶、水力部分、安全灌水装置、

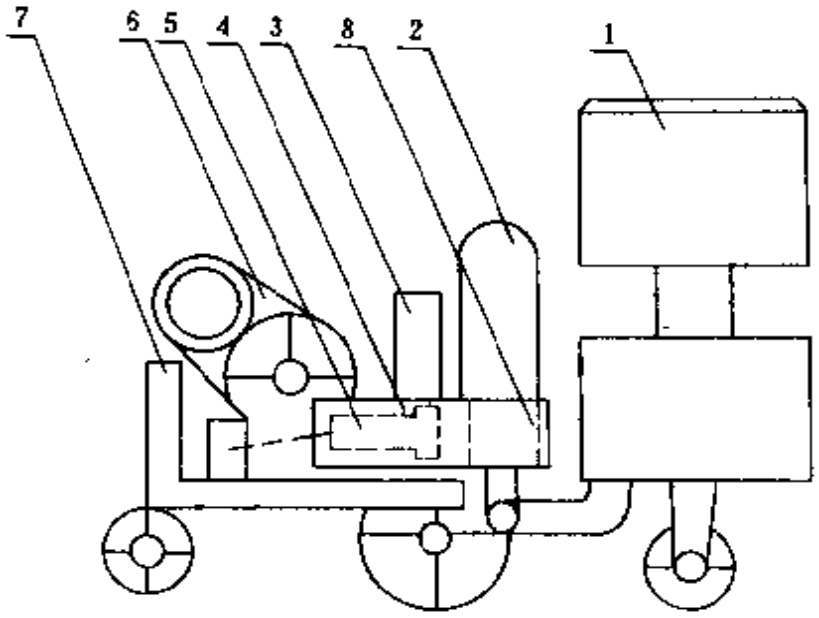


图 3-24　100/15 砂浆泵结构示意图

1—拌合桶；2—泥浆室；3—安全灌水装置；4—缸体；5—活塞；6—传动系统；7—机架；8—橡皮膜

传动系统等部分组成。其拌合桶包括上、下桶，两桶容积为 0.2～0.15m³。水力部分包括缸体、橡皮膜、调整回浆装置。橡皮膜装在缸体的竖孔内，使活塞不接触砂浆，而砂浆则依靠橡皮膜的胀缩产生吸入和排出。通过调节回浆装置以调节浆液流量和压力。

100/15 砂浆泵主要性能参数如表 3-19 所示。

表 3-19　100/15(C-232)型砂浆泵主要性能参数

缸数(个)	1	压力(MPa)	15
缸径(mm)	110	排水管直径(mm)	45
活塞行程(mm)	110	动力功率(kW)	7
往复次数(次/min)	170	重量(kg)	1050
流量(L/min)	100	外形尺寸(长×宽×高)(mm)	2325×925×1561

(六)HFV 系列注浆泵

HFV 系列注浆泵是由日本大和钻探公司生产的双缸双作用往复式泵，其总体及结构图如图 3-25 所示，主要由动力装置及泵体两大部分组成。动力装置为全液压驱动机构，有变量液压泵、液压控制阀体、液压缸及测量仪表等组件。注浆缸直接由主动液压缸带动，进行往复运动。HFV 系列注浆泵的主要特点是：由于采用全液压驱动，装有超压保护装置，运行稳定，安全性较高；动力装置采用轴向柱塞恒功率变量液压泵，调速方便，有自动及手动调速机构，能自动适应注浆工艺要求，随注浆压力的增加，自动降低浆液的流量；装有压力、流量自动记录装置，检测方便；注浆活塞行程较一般注浆泵活塞行程长约 1 倍，故在相同排量量，活塞往复次数少，易损件寿命较长，浆液压力波动也小。

HFV 型注浆泵液压系统如图 3-26 所示，主要技术性能参数如表 3-20 所示。

(七)其他专用注浆泵

除上述常用的注浆泵外，各个部门在注浆时自行设计了一些其他专用注浆泵，现将一些专用注浆泵的资料列于表 3-21，以供参考。

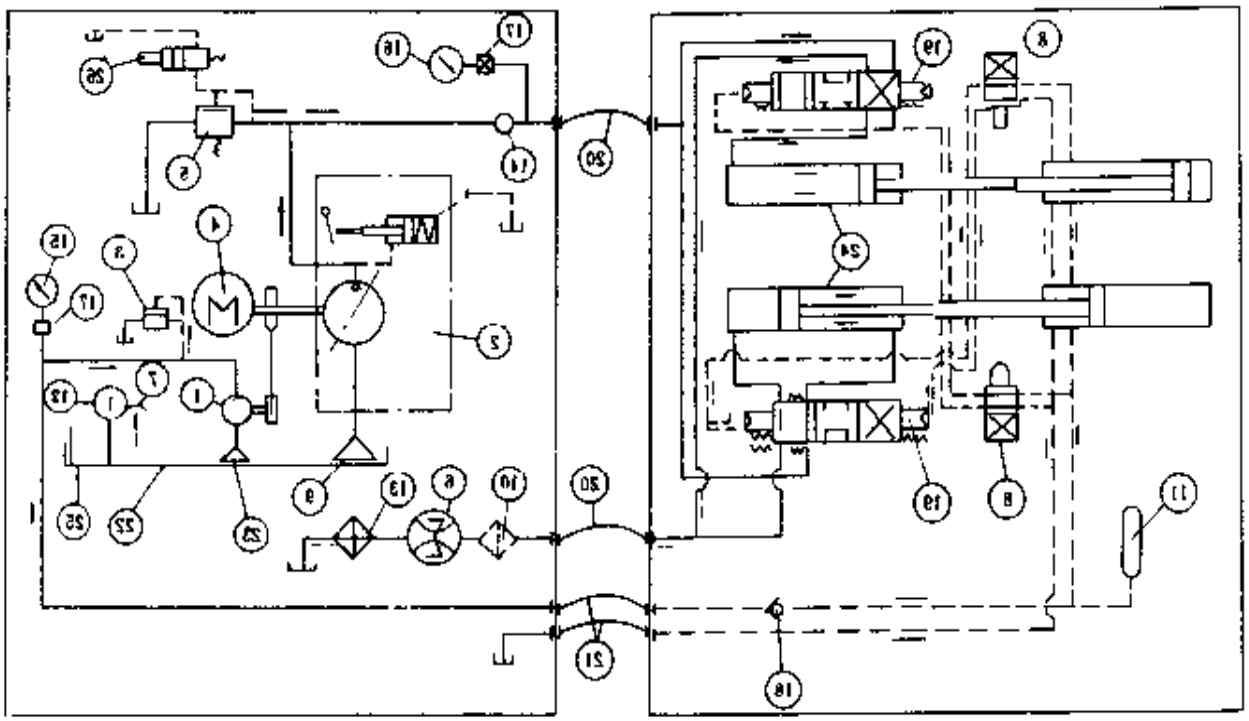


图 3-25　HFV 型注浆泵液压系统图

1—齿轮液压泵；2—柱塞变量液压泵；3—安全阀；4—电动机；5—安全阀；6—流量计；7—通气孔；8—旋转换向阀；9—过滤器；10—过滤器；11—蓄能器；12—温度计；13—冷油器；14—单向阀；15、16—压力表；17—压力表开关；18—单向阀；19—三位四通换向阀；20 -胶管；21—胶管；22—油箱；23—吸油过滤器；24—液压缸；25—加热器；26- 电磁换向阀

表 3-20　几种HFV型注浆泵主要性能参数

泵体								动力装置							
项目	单位	HFV-2A	HFV-2B	HFV-2AB	HFV-2D	HFV-C	HFV-2F	项目	单位	HFV-2A	HFV-2B	HFV-2AB	HFV-2D	HFV-C	HFV-2F
压力	MPa	0.5~6	0.5~12	0.5~11.8	5~20	3~13	3	液泵型式		变量	变量	变量	变量	变量	定量
排量	L/min	0~100	0~45	0~71	20~100	0~200	120	压力	MPa	7	7	7	5.5~21	5~21	21
缸径	mm	65	57	57	75	100	120	排量	L/min	100	100	133	25~105	0~140	27
往复次数	次/min	0~30	0~20	0~26	4.5~23	0~27	15	转速	r/min	1 000	1 000	1 000	1 500	950	1 450
行程	mm	300	300	300	300	300	200	电机	kW	11	11	15	15	22	20
排浆管径	mm	32A	32A	32A	25A	40A	30A	油箱	L	185	185	250	170	360	150
吸入管径	mm	40A	40A	40A	40A	65A	40A	高度	mm	920	920	11 000	1 000	1 100	125
液压缸径	mm	65	74	74	75	80	120	宽度	mm	770	770	900	750	1 100	730
高度	mm	920	920	1 000	1 100	1 100	700	长度	mm	1 400	1 400	1 530	1 600	2 200	1 250
宽度	mm	550	550	620	850	900	600								
长度	mm	2 000	2 000	2 000	2 200	2 200	1 550	重量	kg	700	700	910	790	1 470	500
重量	kg	290	290	400	1 110	1 045	350								

表 3-21　其他专用注浆泵型号及技术参数

型　号	流量 (L/min)	压力 (MPa)	进浆管径 (mm)	出浆管径 (mm)	外型尺寸 (mm)	电机功率 (kW)	重量 (kg)	生产厂家
HGB 化学灌浆计量泵	25～50	3～6	25	20	1 300×600×680	4(直流)	378	水电部华东设计院
JN-4 化学灌浆泵	0～2.8	1.5	6	4	540×410×320	0.6	30	水电部三工程局
HG20-12 立式双缸化学灌浆泵	12	2	20	20	750×430×700	3(直流)	120	00639 部队
可控硅调速齿轮泵	0～4.4 0～6.4	1.5 0.1	19	19	850×250×400	1.1	120	长江水电科学院
多级流量泵	2.5～26	2	—	—	—	3	130	水电部二十局、长江规划办
丰收 3 型灌浆泵	1.5～3	8.6	20	20	700×250×350	1.5(直流)	300	水电科学院

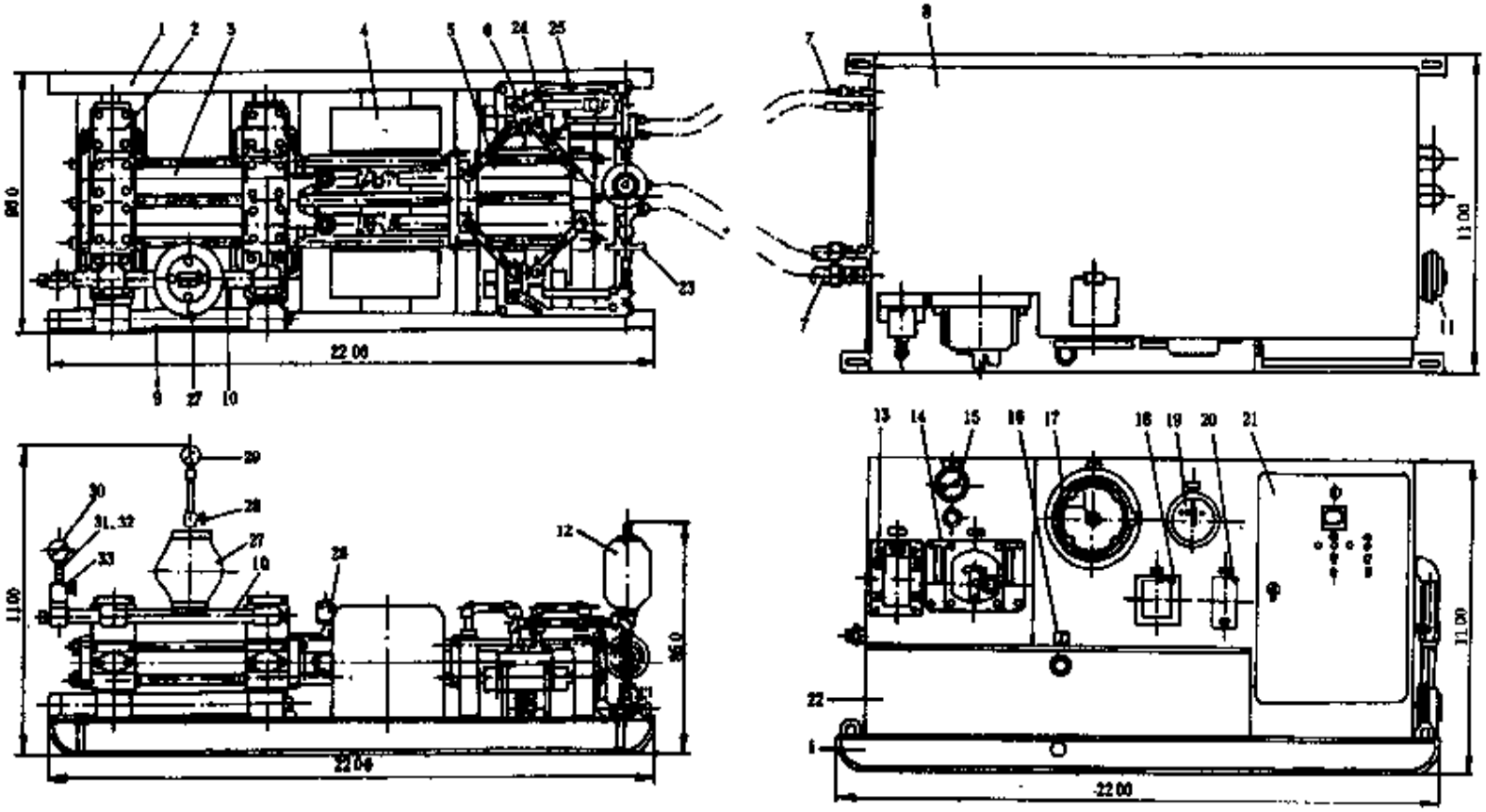


图 3-26　HFV 型注浆泵总体图

1—底盘；2—阀体；3—注浆缸；4—转换夹头部；5—液压缸；6—四通阀；7—液压管；8—动力装置；9—吸浆管；10—排浆管；11—冷油器；12—减震器；13—溢流阀；14—流量控制阀；15—压力表；16—注油孔；17—压力记录仪；18—流量记录仪；19—流量计；20—变换器；21—配电箱；22—油箱；23—阀门；24　高压油管；25　低压油管；26　加油室；27—气罐；28—阀门；29、30—压力表；31、32—管接头；33—压力检出器

(八)代用注浆泵

施工中,施工单位如没有专用注浆泵,也可以用其他泵种代替,选择时要注意泵的参数是否与设计参数相符,泵的耐磨、耐蚀性等能否满足所注浆的要求。下面介绍几种可用于注浆的其他泵种。

1. TBW 型电动往复泵

该泵为石家庄煤机厂产品,该产品满足一般注浆的需要。其主要性能参数见表 3-22。TBW-50/15 双塞型为立式双缸单作用泵,另两种为卧式双缸双作用泵。TBW 系列泵因其压力和排量不高,使用范围受限制。但是,这种泵国内生产厂家较多,现场容易解决,所以在注浆压力不高的条件下,应用较多。

表 3-22 TBW 型电动往复泵主要性能参数

项　　目	TBW-50/15	TBW-200/40	TBW-250/40
最大排量(L/min)	50	200	250
最大压力(MPa)	1.5	4	4
缸套直径(mm)	60	85	89
往复次数(次/min)	380	81	70
活塞行程(mm)	50	140	150
吸水管直径(mm)	27	89	89
排水管直径(mm)	23	38	38
齿轮传动比	1∶5	71∶19	1∶6
外型尺寸(长×宽×高)(mm)	1 054×353×645	1 670×890×1 600	2 170×820×1 770
重量(kg)	192	680	1120

2. 300 型电动水泥泵

该泵为兰州通用机械厂生产的双作用泵,由于该泵具有压力高、排量大的特点,在需要高泵压大排量的注浆工程中而缺乏专用设备的条件下,可以该泵代用。该泵另一个特点是:将该泵吸浆口的连通管去掉,改成单缸双作用,就可以用一台泵注两种浆液,或一缸注浆(单液),另一缸打循环水。这样,一台变"两台",满足注浆工艺的要

求。但是，这种代用对机器运转的稳定性和构件的寿命有影响，特别在单缸注单液时，一定要以另一缸打循环水同时进行。

300 型泵的活塞行程为 250mm，吸排管径分别为 100mm、50 mm，总机外形尺寸为（长 × 宽 × 高）4 950mm×1 050mm×2 300mm，总重量 6 500kg，其变量方式采用更换缸套内径与变速联合方式进行。300 型泵的主要性能参数如表 3-23 所示。

表 3-23　300 型电动水泥泵主要性能参数

变速箱排档	曲柄转速 (r/min)	缸径 100mm		缸径 115mm		缸径 127mm	
		最大排量 (L/min)	最大压力 (MPa)	最大排量 (L/min)	最大压力 (MPa)	最大排量 (L/min)	最大压力 (MPa)
Ⅰ	25.34	152	30.0	206	22.1	256	17.9
Ⅱ	37.51	225	20.0	306	14.9	378	12.1
Ⅲ	58.13	348	13.1	474	9.6	586	7.8
Ⅳ	86.04	617	8.8	702	6.5	868	5.3
Ⅴ	119.1	715	6.4	972	4.7	1203	3.8

3. 高压往复泵

主要性能参数如表 3-24 所示。

表 3-24　高压往复泵主要性能参数

参　数	CB5-540	2DN-25/80	9MrP
最大压力(MPa)	6～3.5	8	16
最大排量(L/min)	180～540	420	219～1 000
缸径(mm)	90,100,115	85	80,90,100,115,127
活塞行程(mm)	150	140	—
往复次数(次/min)	50～90	170	55～90
电机功率(kW)	40	70	75
外形尺寸(长×宽×高)(mm)	1 940×950×1 390	2 150×2 075×950	2 630×1 040×1 630
重量(kg)	1 200	4 270	2 760
生产厂家	上海力生机械厂	本溪水泵厂	原苏联

4. 手压注浆泵

手压注浆泵结构原理如图 3-27，工作原理和柱塞泵一样。泵量的大小，可由缸径、活塞行程和往复次数来决定。一般注浆用手压泵的流量为 6～10L/min，压力 3～4MPa，其特点是：体积小，结构简单，加工容易；液体过流部分材质用不锈钢，耐磨、耐蚀性较好，可用于输送水灰比不超过 0.75∶1 的水泥浆液和化学浆液；适于井壁淋水小的条件下注浆。因此，在小型注浆工程中得到了广泛应用。

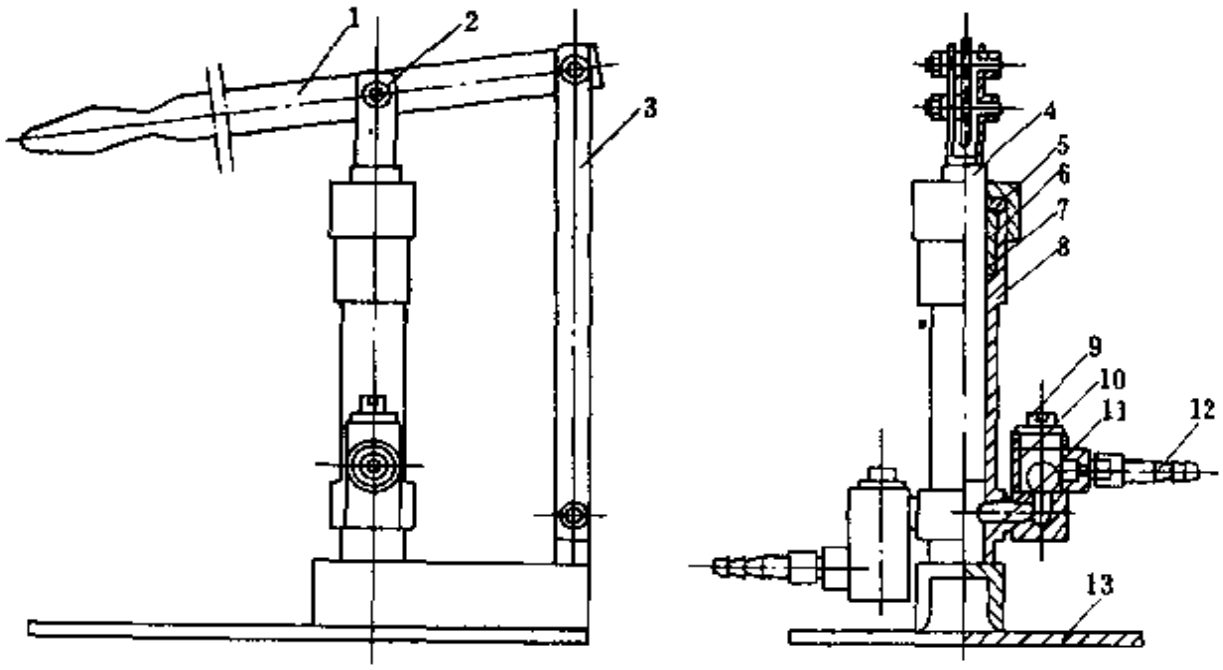


图 3-27　手压泵结构图

1—手柄；2—销轴；3—支撑摇杆；4—柱塞；5—压环；6—螺母；7—盘根；8—缸套；9—阀盖；10—阀体；11—球阀；12—连接管；13—底盘

5. 贮能差步注浆器

安徽省人防设计科研所研制的贮能差步注浆器，其最大特点是可以使用胶凝时间为 1s 的速凝浆液，可快速堵漏。其结构示意图见图 3-28、图 3-29。

6. 其他代用泵

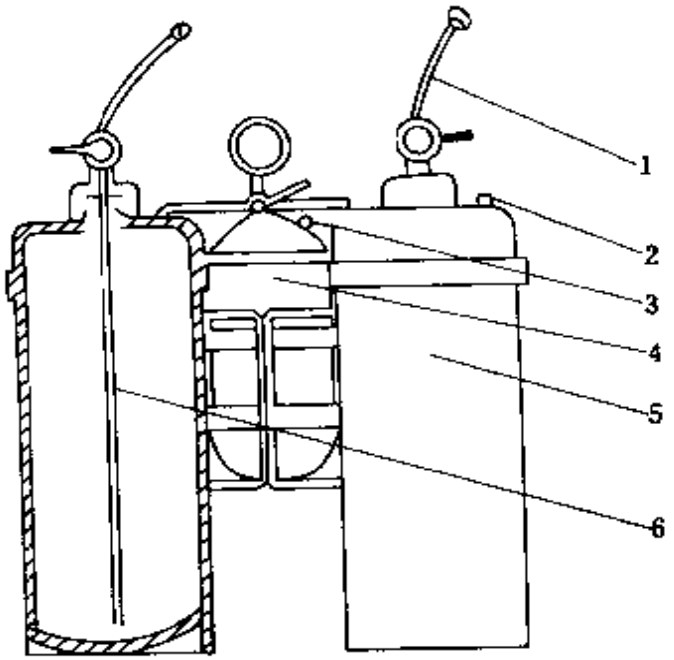


图 3-28　贮能注浆桶

1—输浆管；2—安全阀；3—气门；4—贮气室；5—贮浆桶；6—吸浆管

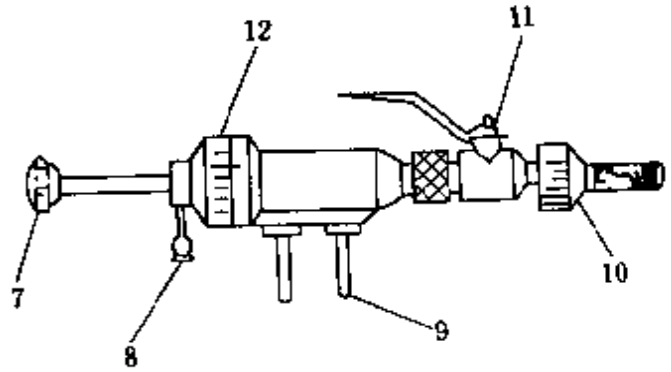


图 3-29　比例注浆枪

7—手柄；8—止动键；9—进浆管；10—注浆嘴；11—球阀；12—刻度盘

除上述几种代用注浆泵外，还有如表 3-25 所示的其他代用泵可供选择。

表 3-25　其他代用泵型及主要性能参数

型　号	流　量 (L/min)	压　力 (MPa)	柱塞直径 (mm)	缸数 (个)	往复次数 (次/min)	电机功率 (kW)	重量 (kg)	生产厂家
BW250-50 型泥浆泵	250(一档) 150(二档)	2.5(一档) 5(二档)	75	3	250(一档) 150(二档)	—	400	衡阳探矿厂
BW200-40 型泥浆泵	200	4	85	2	81	—	800	衡阳探矿厂
2DN-6/30 型泥浆泵	100	3	70	2	84	10	—	本溪水泵厂
2DN-15/40 型泥浆泵	250	4	90	2	76	30	1 400	本溪水泵厂
HB-3 型灰浆泵	50	1.2	—	1	—	2.8	200	济南风机厂
HP-013 型灰浆泵	50	1.5	—	1	—	7	520.5	济南风机厂
1DB-0.75/30 型比例泵	0～12.5 0～25	3 1.5	70	1	62	2.2	490	本溪水泵厂
2DB-3/37 型比例泵	0～50	3.7	70	2	62	7.5	1 155	本溪水泵厂
100/20 型隔膜砂浆泵	100	2	110	1	110	7	—	吉林水工机械厂
LGB-200/30 型螺杆泵	200	3.5	—	—	—	—	—	北京探矿厂
环形活塞计量泵	25～50	8.6				1	35	浙江创新厂

二、高压旋喷注浆用泵

(一)SNC-H300 型水泥浆注浆车

SNC-H300 型注浆车，是在黄河牌 8t 载重汽车上安装高压泥浆泵、水泵、水泥水力混合器和水箱等设备所组成的注浆车。利用它产生高压脉动浆液喷射流，适于注射水、水泥浆或其他浆液。泵的动力是利用汽车发动机，由本车的变速箱和专门的功率选择器，传动泵的球面涡杆机构，带动泵的活塞作往复运动，它的活塞用耐磨耐蚀的合成橡胶制成，缸套用特种钢热处理制成，是我国当前常用的高压旋喷注浆设备之一。

SNC-H300 型注浆车主要技术性能参数为：

动力　黄河 JN-150 型汽车发动机

型号　6135 柴油机

额定功率　1 800r/min 时　118kW

最大功率　2 200r/min 时　132.5kW

高压泵的主要性能参数如表 3-26 所示。

表 3-26　SNC-H300 型注浆车高压泥浆泵主要性能参数

工作状态	发动机变速档位	曲轴转速 (r/min)	缸径为 100mm 时		缸径为 115mm 时	
			排量 (L/min)	压力 (MPa)	排量 (L/min)	压力 (MPa))
排量最大	V	117	762	6.1	1040	4.47
压力最大	I	26	154	30.0	230	20.1
活塞行程(mm)		250	外形尺寸(长×宽×高)(mm)		2 380×945×1 895	
球面涡杆传动速比		1∶20.5	泵体和传动机构总重(kg)		2 775.0	

（二）高压水泵

国内高压水泵种类较多，输送的介质为水、油和乳化液，一般要求工作介质温度不超过55℃。目前在高喷注浆中，常用3XD型、3W-6B、3W-7B等三柱塞泵，其主要性能参数分别如表3-27、表3-28所示。

表3-27　3XB小机座三柱塞泵技术性能表

曲轴转数为400r/min时						曲轴转数为500r/min时				
泵　量（L/min）	额定泵压（MPa）				柱塞直径（mm）	额定泵压（MPa）				泵　量（L/min）
40	50				22	40	55			50
50	40	55			25	32	45	60	75	63
63	32	45			28	25	35	50	65	80
75	30	40	50		30	22	30	40	55	90
80	25	35	45	55	32	20	25	35	50	100
100	20	30	40	50	35	16	20	30	40	125
130	16	20	30	40	40	12.5	16	25	30	160
160	12.5	16	25	30	45	10	12.5	20	25	200
200	10	12.5	20	25	50	8	10	16	20	250
电机型号	JO_2-82-4	JO_2 91-4	JO_2 92-4	JO_2 93-4		JO_2 82-4	JO_2-91 4	JO_2 92-4	JO_2-93-4	
功率(kW)	40	55	75	100		40	55	75	100	

表 3-28　3W-6B 及 3W-7B 高压泵技术性能表

技术性能 \ 型号	$3W-6B_1$	$3W-6B_2$	$3W-6B_3$	$3W-6B_4$	$3W-7B_4$	$3W-7B_5$
泵压(MPa)	40	32	25	20	25	20
泵量(L/min)	60	75	100	120	60	75
柱塞直径(mm)	25	28	32	35	25	28
柱塞行程(mm)	120				100	
往复次数(次/min)	380				470	
电机型号	JO_2-91-4				JO_2-82-4	
电机功率(kW)	55				40	
进口管直径(mm)	100				89	
出口管直径(mm)	32				44	
外形尺寸(mm)	3040×1530×1130				2 680×1 360×1 130	
泵重(kg)	2 300				1 900	

第四节　止浆塞

止浆塞是在静压注浆中，实现分段注浆，合理使用注浆压力和有效控制浆液分布范围，保证注浆质量的重要设备。它在注浆孔中的安设位置，应选择在孔壁围岩稳定、岩性完整、无纵向(70°～90°)裂隙(或有纵向裂隙，但已注浆封堵)和孔径规则的孔段。目前常用的止浆塞主要有机械式、水力膨胀式两种。常用止浆塞类型及主要技术参数如表 3 29 所示。

表 3-29　常用止浆塞类型及主要技术参数

技术特性	机械式					水力膨胀式	
	单管三爪式	单管异径式	孔内双管式	小型双管式	卡瓦式	单管式	双管式
胶塞直径（mm）	90,110,120,130	90,110,120,130	110,120,130	42,75,90,110	90～170	110,120,130	110,120,130
胶塞长度（mm）	150～200	150～200	200	150～200	800	1000	1000
最大压力（MPa）	6～10	6～10	6	3	0.78	10	6～8
胶塞个数（个）	2～4	2～4	2～4	1～3	1	1	1

一、机械式止浆塞

机械式止浆塞在注浆孔中，靠机械压力使胶塞（密封件）产生横向膨胀，与孔壁挤紧，将注浆孔分为上下两段，以便下段注浆时能把浆液压入裂隙含水岩层中，而不致从胶塞密封处返至上段孔内，甚至流出地表，保证正常进行分段注浆。胶塞的外形有直线形和弧形两种，前者受压变形后，与孔壁接触面大，承压力高，止浆效果好，已广泛使用；后者受压变形后与孔壁接触面小，承压力低，较少使用。对于胶塞所用材料的性能要求，应满足：

（1）天然胶合量不低于 70%，保证胶塞具有良好的恢复变形功能；

（2）抗张强度大于 20MPa，永久变形不大于 10%，伸长率不小于 40%；

（3）在 10%NaOH 溶液中浸泡 24h，膨胀率小于 5%；

（4）耐磨性好，硬度高，邵氏硬度达 70～75。

（一）单管止浆塞

分三爪式和异径式两种，它们的工作原理和封隔结构相同，仅是

支承方式不同。单管止浆塞的结构及使用方法如图 3-30。使用单管止浆塞时，先把止浆塞下到注浆孔内预定位置，如为三爪式，用钻机的泥浆泵压水使三爪脱开三爪收拢器，牢固地支承在内孔壁上；若为异径式，利用异径卡环支承在注浆孔变径的台阶处，然后钻机提升绞车拉紧反绳轮，使胶塞受压而横向膨胀，与孔壁挤紧。压缩胶塞的压力，一般以钻机液压表指针指示压力为 0.5～0.8MPa 为宜。

单管三爪止浆塞的适用条件及特点是：

(1)可分段上行或下行式注浆；

(2)在套管内或岩石较硬、孔壁完整的裸孔内止浆；

(3)三爪张开后最大直径 150mm；

(4)孔深小于 500m。

而单管异径式止浆塞与三爪式相比，它只适于下行式注浆，因为它靠变径台阶支承，要求变径处岩层坚硬、抗剪强度高，且注浆后需扩孔，因而难以推广应用。

(二)双管止浆塞

双管止浆塞主要由内、外管和胶塞组成。如两液需于孔内混合时，在其下部装有混合器，称之为双管孔内混合止浆塞(图 3-31)。使用时，将外管、胶塞及胶塞段的芯管组装成一体，下到孔内预定位置，在孔口用卡环固定外管后，把内管下到芯管锁接头处，从孔口将内管和芯管的螺纹对好旋紧，然后，钻机提升内管，使胶塞纵向受压产生横向膨胀而封隔注浆孔，以实现分段注浆。这种止浆塞的特点是：

(1)可进行分段上行式或下行式注浆；

(2)用于套管内或较硬岩石、孔壁完整的裸眼；

(3)孔深一般不大于 200m；

(4)由于止浆塞与混合器合二为一，故可用于注浆凝固时间小于 1min 的浆液；

(5)可用于处理特大涌水或地下水流速很大的场合。

另一种双管止浆塞是浅孔注浆止浆塞，即小型双管止浆塞，其结

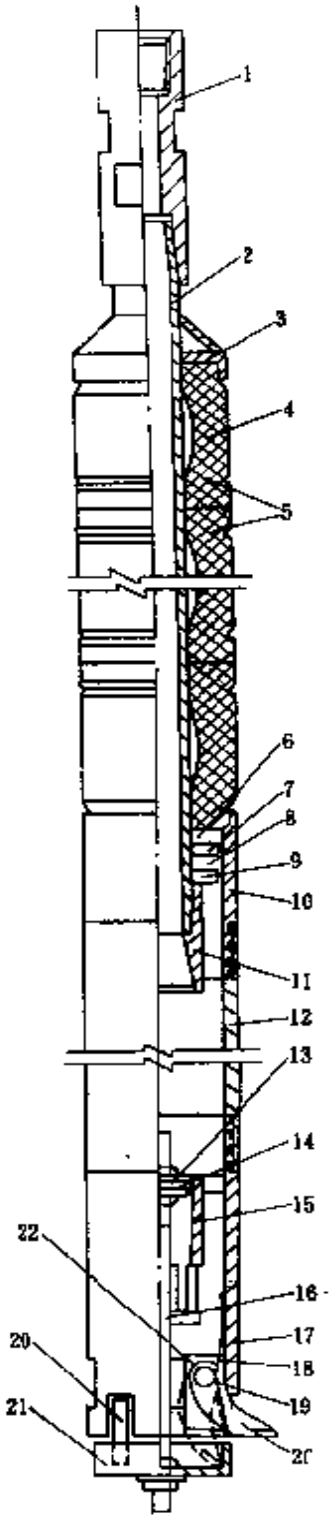


图 3-30　三爪式止浆塞

1—锁接头；2—芯管；3—上托盘；4—胶塞；5—铅丝；6—限位卡环；7—卡环；8—胶垫；9—卡环；10—下托盘接头；11—厚壁接头；12—中部套管；13—垫圈；14—胶垫活塞；15—活塞筒；16—连杆；17—三爪头；18—弹簧；19—三爪轴销；20—三爪块；21—三爪收拢座；22—支块

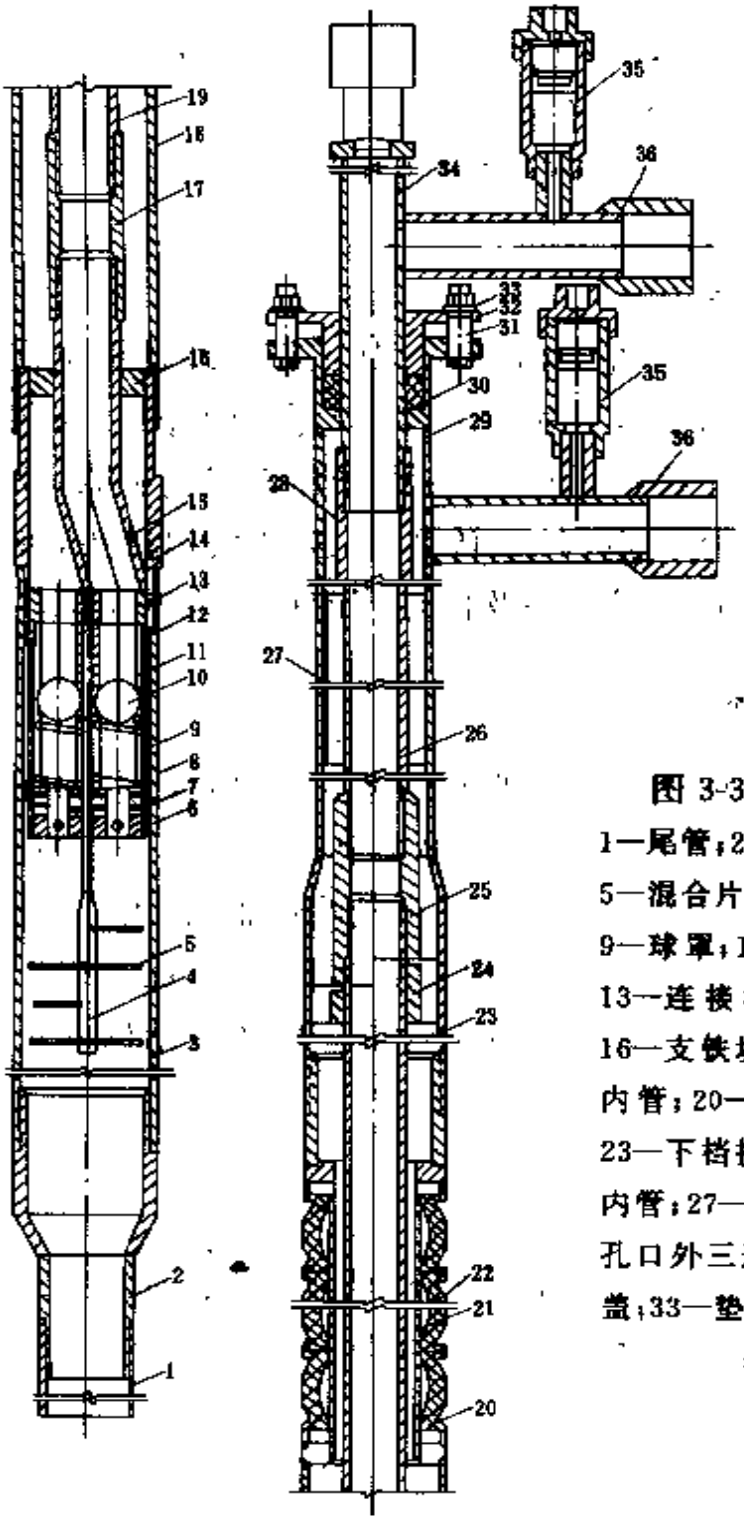


图 3-31　双管孔内混合止浆塞

1—尾管；2—变径接头；3—混合器外管；4、5—混合片；6—弹簧座；7—销钉；8—弹簧；9—球罩；10—钢球；11—球座；12—隔板；13—连接板；14—主体接头；15—弯管；16—支铁块；17—接头；18—托盘管；19—内管；20—铁丝圈；21—芯管；22—胶塞；23—下档接头；24—下档；25—上档；26—内管；27—外管接头；28—内管接头；29—孔口外三通；30—盘根；31—螺钉；32—压盖；33—垫圈；34—孔口内三通；35—压力表缓冲器；36—活接头

构如图3-32所示。它是依靠旋进螺母推进外管，压缩胶塞使之横向膨胀实现止浆。在工作面预注浆施工中，可以用这种止浆塞代替孔口管。用于孔内止浆的深度一般不超过30～40m。其适用条件是：

(1)适于井筒工作面或巷道工作面注浆；

(2)用于套管内或岩层稳定，孔壁完整的裸眼孔段；

(3)亦可用于井筒壁后注浆；

(三)卡瓦式注浆止浆塞

卡瓦式注浆止浆塞结构如图3-33所示。其工作原理是将止浆塞下到预定位置后，轻提钻具，使锥体相对上移，卡瓦径向外移，与孔壁卡紧，固定止浆塞，然后上拉钻杆，使胶塞纵向受压而横向膨胀；注浆完毕，通过放松钻杆，胶塞横向退回，正转钻杆，松开反扣接头，锥体下移面实现止浆塞回收。其适用条件及特点与前述止浆塞相似。

二、水力膨胀式止浆塞

水力膨胀式止浆塞是依靠具有膨胀性的密封元件(橡胶筒)在其膨胀限度内与注浆孔壁挤紧，而将钻孔封隔为上、下两段。该种止浆塞是借助于密封元件内的高压水来实现密封元件膨胀的，因此，它不需要支点，能在注浆孔的任意深度内实现多次封隔止浆，而且操作方便，使用灵活，设计承受注浆压力为10MPa，是一种新型结构的止浆塞。

(一)单管水力膨胀式止浆塞

1. 结构原理

单管水力膨胀式止浆塞的结构如图3-34所示，可分为两部分：

(1)固定外壳　主要由膨胀橡皮筒17、单向阀、花篮螺母8和顶帽6等组成。

膨胀胶皮筒17两端同胶筒上、下铁芯16、20硫化成一体，并设置胶筒上、下铁箍13、19保护胶筒在膨胀过程中不至从两端受到破坏。下铁芯内设两道O形密封圈3，以保证高压密封液在胶筒内侧不

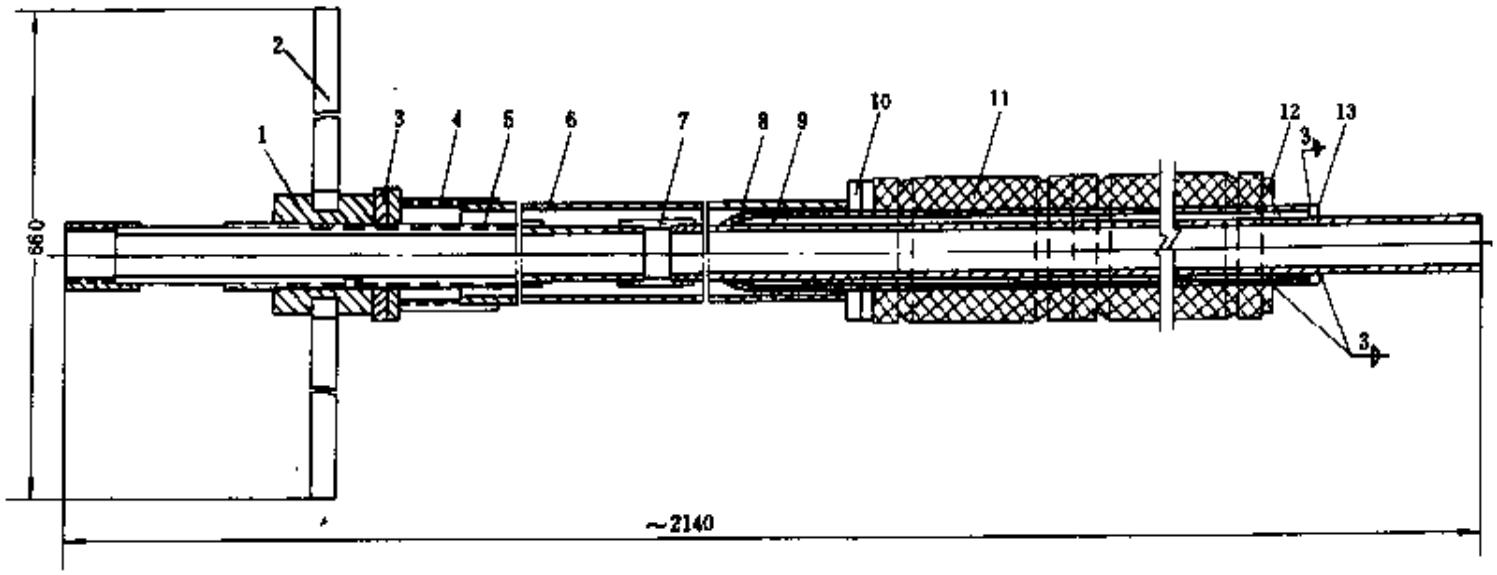


图 3-32　浅孔双管止浆塞

1—圆形螺母；2—手柄；3—垫圈；4—管箍；5—梯形螺纹管；6—带螺纹钢管；7—管接头；8—注浆管；9· 芯管；10—垫圈；11—胶塞；12—托盘；13—管堵

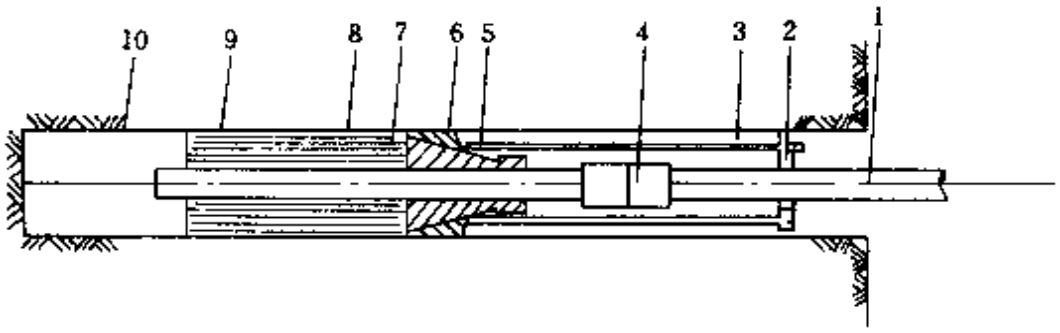


图 3 33　卡瓦式止浆塞

1—钻杆；2—滑动法兰；3—拉杆；4—反扣接头；5—锥体；6　卡瓦；7—上托盘；8—胶筒；9　下托盘；10—钻孔

会从下端泄漏而泄压。单向阀由活动阀门 12、弹簧 14、弹簧座 15、阀口座 11 和阀壳 10 组成，其作用是在胶筒膨胀过程中，高压水只能通过单向阀进入胶筒内，当下中心管 18 与钻孔沟通后，活动阀门在弹簧作用下自行关闭，以防止灌注浆液进入胶筒内，并阻止胶筒内高压水返流出去。花篮螺母 8 是左旋梯形扣，对称剖开成四瓣，由片式弹簧圈 24 箍紧为一体的开口螺母，它可沿径向伸缩并与中心管的连接锁栓 7 啮合，是外壳与中心管相互定位的控制机构。中心管右旋时，花篮螺母 8 和连接锁栓 7 脱扣，使胶筒中的高压水泄放，胶筒即可恢复而回收止浆塞。

(2)活动中心管　由上、下中心管 2、18，铅球 22 和泄压控制环组成。上、下中心管 2、18 由连接锁栓 7 连成一体，它和外壳之间靠连接锁栓 7 和花篮螺母 8 用梯形扣连接，中间用高压 O 形密封圈 3 密封，铅球控制阀由直径 25mm 的铅球 22、球阀体 21 和球口座 23 组成；泄压控制环由销环 4 用销钉 5 固定在上、中心管 2 上，如注浆过程发生堵管事故，胶筒内的高压水不能通过中心管泄压时，提升注浆管，切断销钉，使胶筒内的水泄入钻孔上部。

2. 使用方法

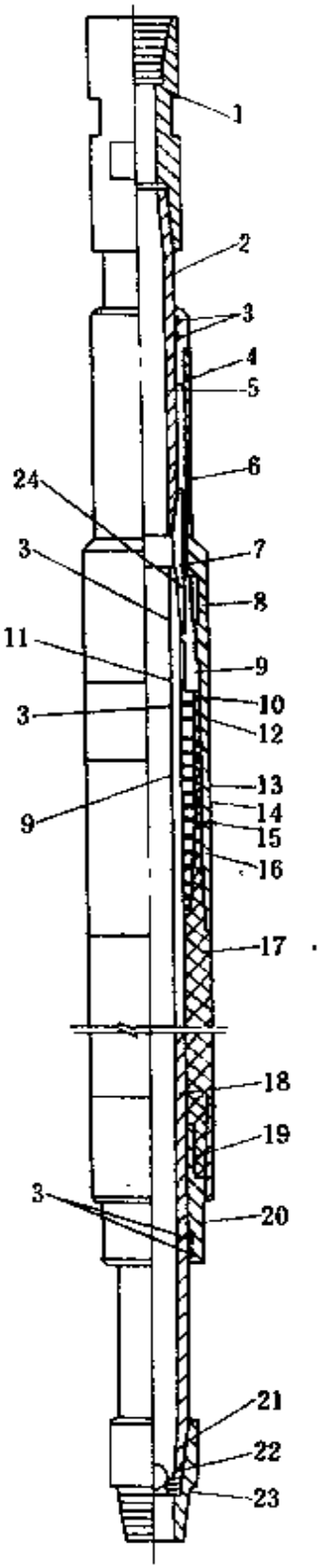


图 3-34　单管水力膨胀式止浆塞

1—接头；2—上中心管；3—O 形密封圈；4—销环；5—销钉；6—顶帽；7—连接锁栓；8—花篮螺母；9—O 形密封圈；10—阀壳；11—阀口座；12—活动阀门；13—胶筒上铁箍；14—弹簧；15—弹簧座；16—胶筒上铁芯；17—膨胀胶皮筒；18—下中心管；19—胶筒下铁箍；20—胶筒下铁芯；21—球阀体；22—铅球；23—球口座；24—片式弹簧圈

(1)膨胀止浆　向孔内下放止浆塞之前，先检查花篮螺母 8 与连接锁栓 7 是否已旋紧？铅球是否已装入？下入孔内到预定位置后，用水泵向注浆管内泵清水，使胶筒膨胀与孔壁挤紧，当水压升高到一定值(约 10～11MPa)时，铅球推出，中心管与钻孔连通，压力急骤下降为止，此时，由于单向阀的作用，使胶筒始终处于膨胀状态。注浆过程中，一定要保证最大注浆压力不超过推出铅球时的压力值，以保证胶筒内高压水高于注浆压力，这样单向阀不会重新被打开而使浆液进入胶筒，从而出现事故。

(2)回收止浆塞　注浆结束后，用钻机提起注浆管的悬重，右转 5 圈，使花篮螺母 8 与连接锁栓 7 脱扣，此时中心管与外壳之间产生 40mm 相对位移，同时下中心管 18 外侧上的三道沟槽上端移至活动阀门 12 以上，使胶筒内高压水与中心管沟通而泄压，胶筒即可收缩，此时可上提或下放止浆塞。如果在注浆过程中出现堵管事故，胶筒内高压水无法通过中心管释放时，可增加钻机的提升能力(约 1000kg 左右)，将泄压控制环的销钉 5 切断，中心管与外壳之间的相对位移增加 100mm，使胶筒内高压水泄入钻孔而使胶筒收缩。

(3)重复膨胀止浆　止浆塞在注浆孔内膨胀后，由于纵向裂隙造成上、下沟通，止浆失效时，或注浆结束需在注浆孔内另一位置止浆时(如采用分段上行式注浆)，可不必提出止浆塞，只需变更止浆塞位置，即可使胶筒再次膨胀而封隔钻孔。具体做法是将止浆塞置于预定位置，向注浆管内投入铅球，开泵压水至一定压力时(约 4～5MPa)，下放注浆管，靠注浆管重力使花篮螺母与连接锁栓的丝扣重新合紧。提高泵压推出铅球，即可实现再次膨胀而封隔钻孔。

(二)双管水力膨胀式止浆塞

其结构见图 3-35 所示，使胶筒膨胀、封隔钻孔的高压水由直径 8mm 的钢编胶管 1 输送到胶管内侧，高压胶管 1 用活接头 3 与胶管上托盘连接在一起，并同止浆塞、注浆管一起从地面下放到孔内预定位置。下放止浆塞时，每隔 5～10m 用胶带或管卡把胶管固定在注浆

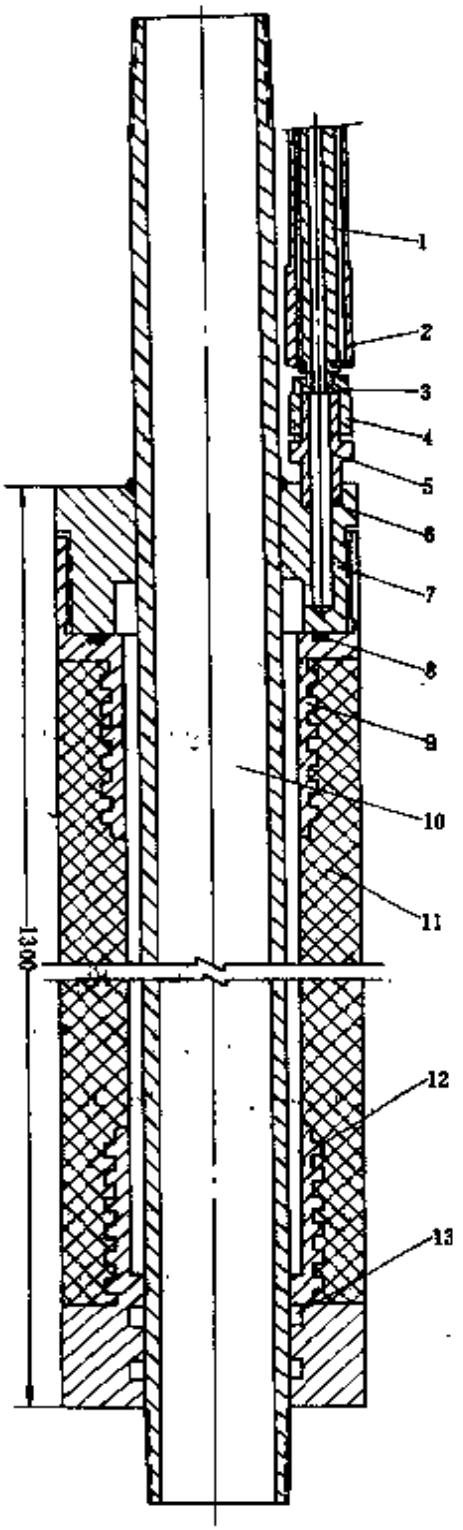


图 3-35　双管水力膨胀式止浆塞

1—直径 8mm 钢编胶管；2—接头外套；3—接头芯子；4—螺母；5—中间接头；6—O 形密封圈；7—托盘；8—O 形密封圈；9—胶筒上芯头；10—中心管；11—胶筒；12—胶筒下芯头；13—O 形密封圈

管上。胶管连接在地面的压力泵上，靠压力泵升高、泄压来控制止浆塞的膨胀和收缩。双管水力膨胀式止浆塞与单管式相比结构简单，便于加工制造，但由于为双套管路，操作不方便。

第五节　混合器

混合器是针对两种浆液混合注浆用的一种专用器具。混合时，浆液将发生一系列物理、化学反应，因此对混合器的技术要求是：

(1)混合器保证两种浆液能充分混合均匀，并保证浆液在预定的时间凝固；

(2)两种浆液的注浆压力要求不同时，保证不会窜浆，以保证浆液不在管路内凝固；

(3)有足够的过流断面，并能承受最大注浆压力。

按上述要求，根据不同的施工条件，混合器可分为两类，即孔口混合器和孔内混合器。

一、孔口球阀混合器

孔口球阀混合器结构如图 3-36 所示。主要由两个逆止阀和人字形混合管 13 组成。逆止阀钢球 8 用压缩弹簧 6 复位，防止两液窜动，钢球开度用调节轴杆 1 控制。注浆时打开调节轴杆，使两液通过逆止阀进入人字形混合管相遇而混合，并经注浆管继续混合。注浆结束后，为防止孔内高压浆液返流，可用调节轴杆将钢球压紧在球座上。该类混合器主要用于地面注浆，效果较好。其主要技术参数为：进、出口内径为 30、39mm；钢球直径 46mm；浆液流量小于 250L/min，承受压力 13MPa。

二、叶片式和半球式混合器

这种混合器直接安装在注浆孔口上。叶片式混合器是一种地面

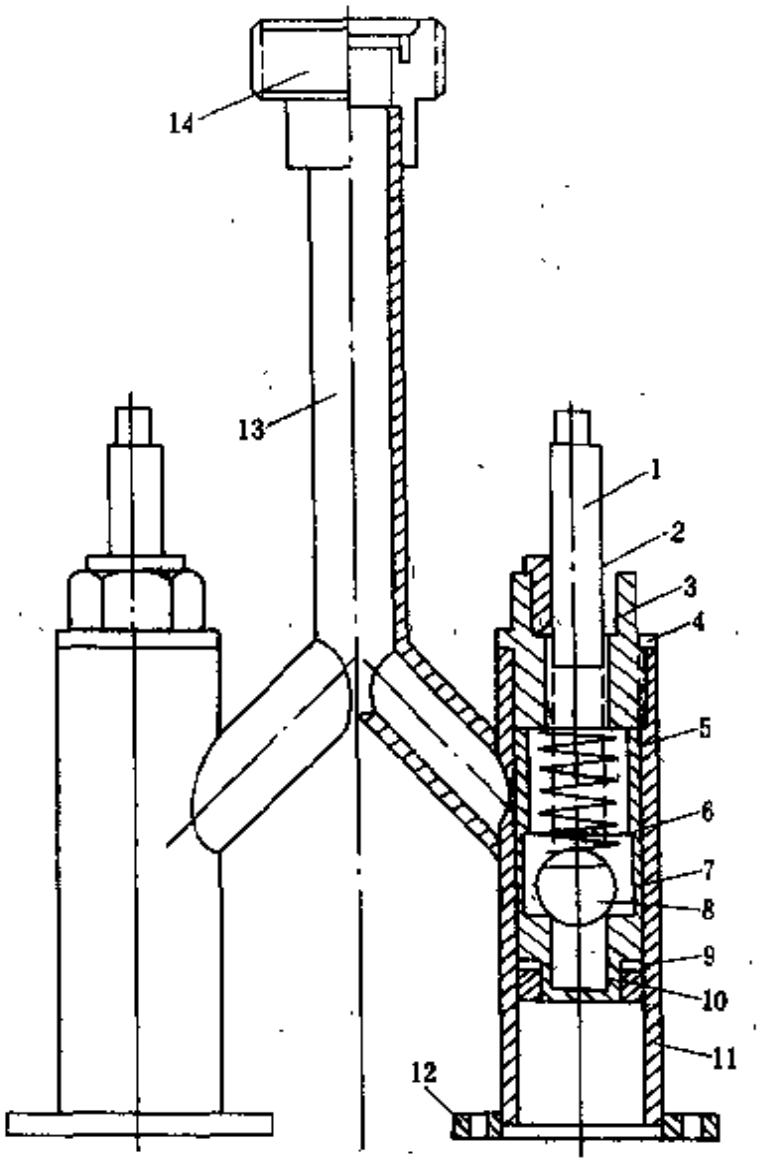


图 3-36　孔口球阀混合器

1—调节轴杆；2—密封盖；3—密封圈；4—阀帽；5—阀套；6—压缩弹簧；7—阀座；8—逆止阀钢球；9—密封垫；10—阀座支撑；11—阀体；12—法兰盘；13—人字形混合管；14—活接头

注浆孔口混合器，结构如图 3-37 所示。它利用弹簧球阀防止两液互窜，注浆时，两液顶开钢球 10 进入带螺旋叶片 5 的混合室经钻孔到达注浆区。叶片式混合器多用于动水条件下具有自吸功能的钻孔的

注浆，其主要性能参数为：

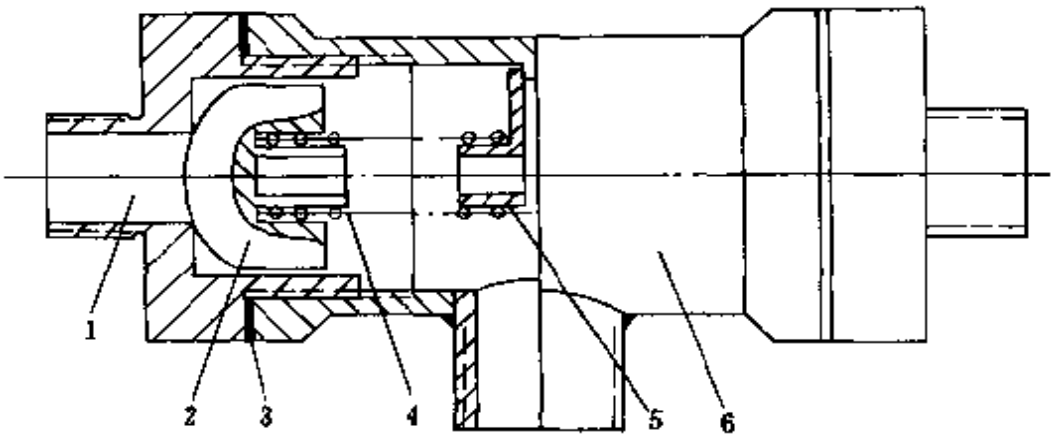


图 3-37　弹簧半球式混合器

1—球阀座；2—半球阀；3—垫圈；4—弹簧；5—弹簧座；6—混合室主体

进口内径　39mm

出口内径　65mm

钢球直径　36mm

浆液流量　<250L/min

耐　　压　8MPa

半球式混合器结构如图 3-37 所示。主要用于工作面和井壁注浆。

半球式混合器的主要性能参数为：

进口内径　20mm

出口内径　25mm

浆液流量　<20L/min

耐　　压　2MPa

三、方盒式球阀混合器

方盒式球阀混合器结构如图 3-38 所示，主要用于井壁式工作面注浆。其技术性能参数为：

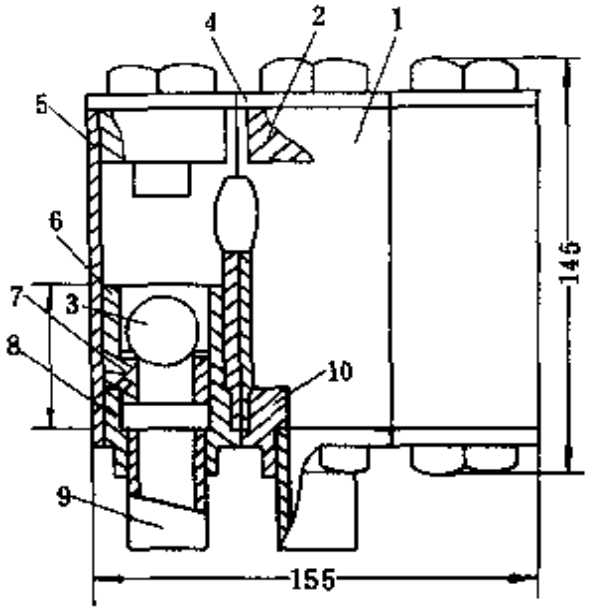


图 3-38　方盒式球阀混合器

1—混合室；2—塞堵；3—直径 2.5 钢球；4—阀盖；5—阀室；6—挡圈；7—阀座；8—底盖；9—短管（有缝钢管）；10—底盖

进口内径	20mm
出口内径	20mm
钢球直径	25mm
浆液流量	<50L/min
耐　　压	3MPa

四、混合器装置

混合器装置结构如图 3-39 所示，主要由球阀、混合室 3、压力表 8、三通转芯阀 7、进浆管 1、混合管 4 等组成。这种组装形式的混合器，便于掌握注浆情况，并具有良好的混合效果，缺点是结构比较复杂。主要用于工作面预注浆和井壁注浆。

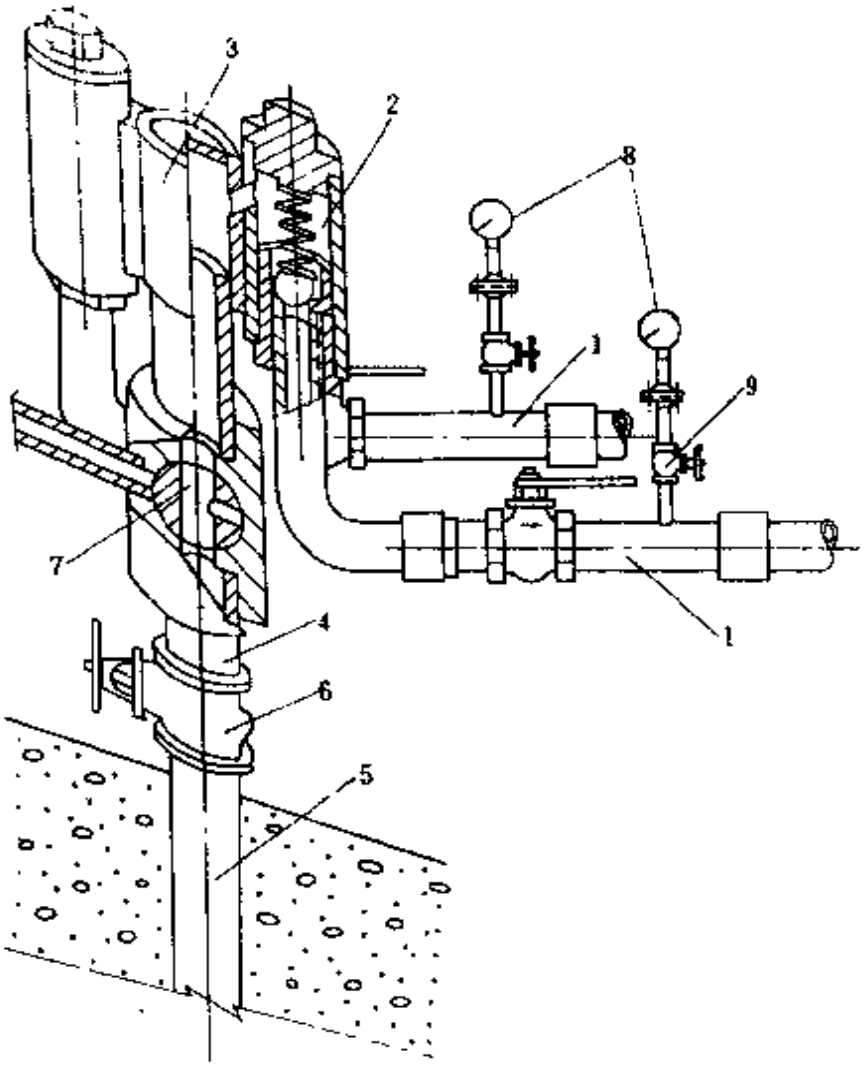


图 3-39　混合器装置

1- 进浆管；2- 阀室；3 -混合室；4—混合管；5—注浆管；6—截止阀；7- 三通转芯阀；8-- 压力表；9 - 截止阀

第六节　其他注浆设备

一、搅拌机

搅拌机(组)是注浆工程中的造浆设备。机械化的搅拌机组，包括

上灰、拆袋和灰浆拌合等工序。但目前用于注浆专用的搅拌机，国内尚无定型产品，大多为施工单位自制，多为人工上灰、拆袋、搅拌机制浆的方式。采用水泥注浆时，为防止浆液沉淀和保证连续供浆，常采用两次拌合的方式。无论运用哪种搅拌装置，都应保证迅速拌合及制成均匀的浆液，其生产能力要和注浆泵的单位注浆量相适应，以保证不间断地供浆。

目前工程中常用的搅拌机(组)有以下几种。

(一)立式水泥搅拌机

立式水泥搅拌机结构如图 3-40 所示。一般搅拌机主轴转速为 40～60r/min，转速大小需根据搅拌叶轮直径选定；搅拌能力为 10～15m³/h。为保证注浆连续性，需用两台搅拌机进行一二次搅拌。搅拌机的搅拌池可以使用钢板制作，也可在地面用砖砌并抹灰或用混凝土浇筑，搅拌机可选用 11 型溜子减速器进行减速。立式搅拌机主要适于地面注浆。

(二)水力喷射式水泥搅拌机

水力喷射式水泥搅拌机系统原理见图 3-41。配制水泥浆时，将水泥装入漏斗 6，漏斗下部设有混合室 5，其一端装喷嘴 4。水流以高速由喷嘴喷出时，形成负压，并在水泥自重作用下进入混合室与水混合，然后经出浆管 7 流入贮浆池 8 内。用这种方式造浆的优点是效率高，可连续制浆。但不易控制浆液的水灰比，需采用计量装置来调节浆液；其次须备有储灰仓和放灰漏斗；为防止水泥漏斗下部产生堵塞，需使用新鲜水泥。

(三)水力旋流式搅拌机

水力旋流式搅拌机也是一种以高速水流为动力的水泥注浆设备，旋流式搅拌筒的有效容积为 0.6m³ 左右，一次造浆需时间 2～3min。这种搅拌机的优点是劳动强度低，适于地面注浆及工作面、壁后注浆，缺点是一次搅浆量较小。

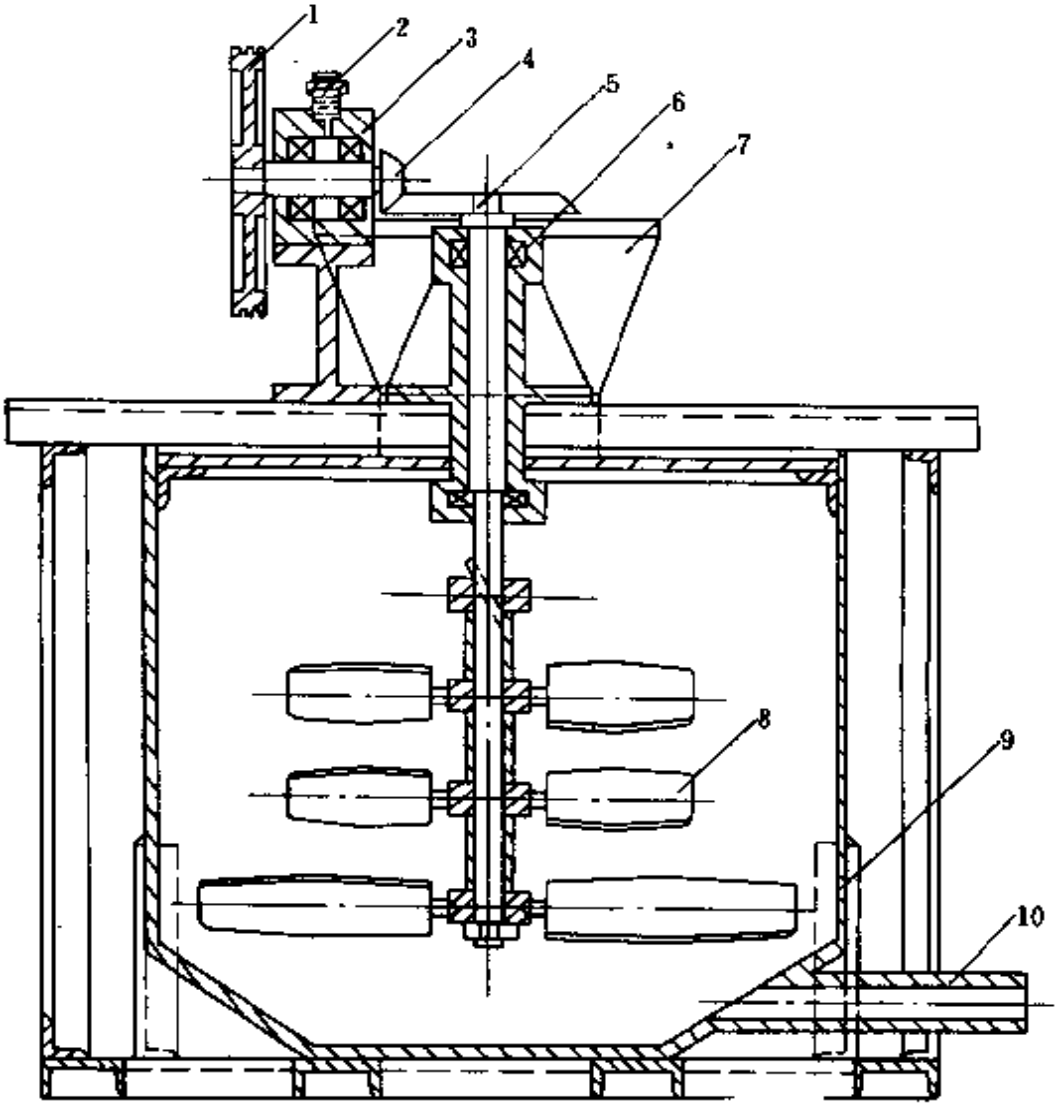


图 3-40　立式水泥搅拌机结构示意图

1—皮带轮；2—油杯；3—轴伞齿轮轴承；4—伞齿轮对；5—搅拌轴；6—搅拌轴轴承；7—进料口；8—叶轮；9—搅拌筒；10—排浆管

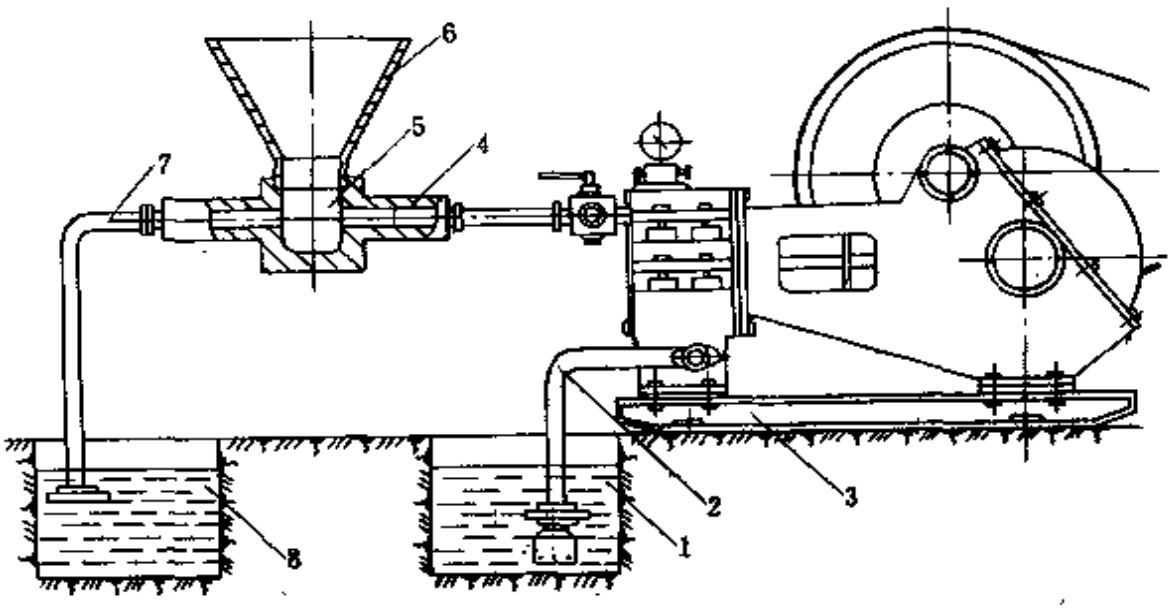


图 3-41　水力喷射式水泥搅拌机原理图

1—水池；2—吸水管；3—泥浆泵；4—喷嘴；5—混合室；6—漏斗；7—出浆管；8—贮浆池

(四)风动水泥搅拌系统

为使工人劳动强度降低，改善工作环境，煤炭部地质勘探所和焦作矿务局水文地质队共同研制出一套风动散装水泥造浆系统，其系统工艺流程如图 3-42 所示。该套系统主要由散装水泥计量器 1、水泥储存仓 2、汽车运输罐 3、移动式空气压缩机 4、风动搅拌机 7、油水分离器 5 和操纵台 6 组成。其优点是以压风为动力搅拌浆液劳动强度低，粉尘小；同时采用散装水泥，降低了材料成本，减少水泥损耗。缺点是风动搅拌机容积稍小；一次注浆量大时需多台汽车运输罐运送水泥，才能保证连续注浆；另外系统较复杂，所占场地较大。

二、注浆流量计

注浆流量计是测量注浆过程中浆液流量大小的仪器。尤其水泥

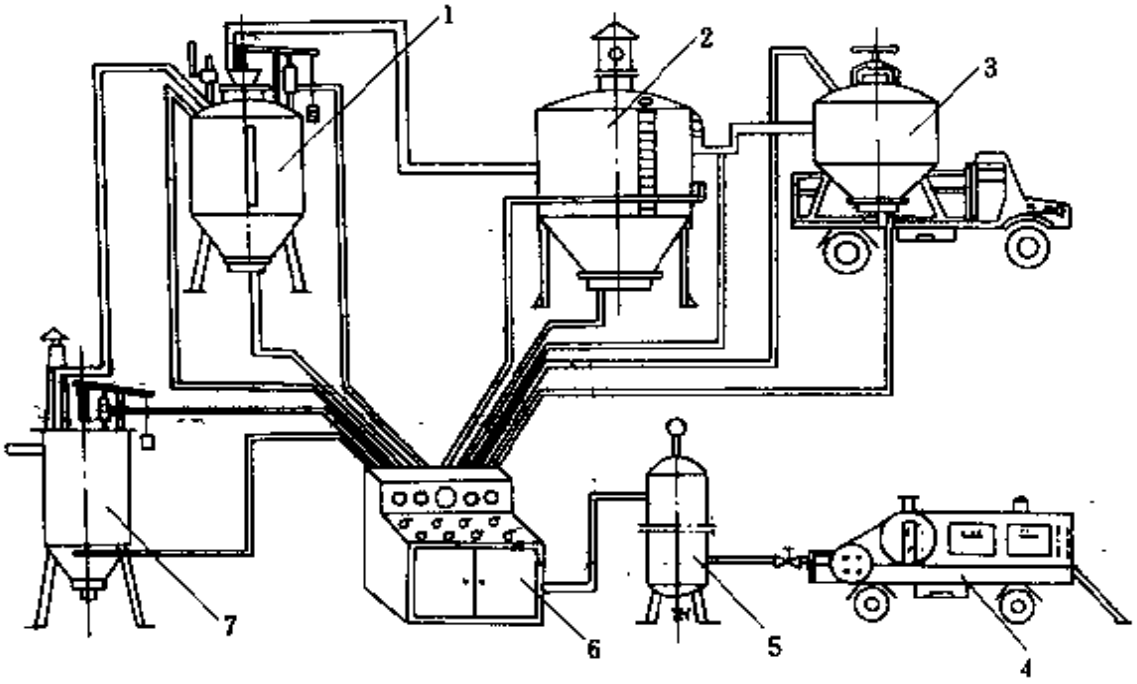


图 3-42　风动散装水泥造浆系统工艺流程示意图

1—水泥计量器；2—水泥储存仓；3—汽车运输罐；4—移动式空气压缩机；5—油水分离机；6—操纵台；7—风动搅拌机

-水玻璃及化学双液注浆，要求两种浆液按一定比例注入，才能准确控制浆液的凝固时间。因此，需要通过流量计随时测定浆液的流量，以满足注浆工程的要求，目前常采用 LM 型涡轮流量计及 LD 型电磁流量计。其技术参数及特点如表 3-30 所示。

三、空压机

高压旋喷注浆中，采用二重管法或三重管法施工时，需配备空压机。根据旋喷工艺的要求，一般压风机的压缩空气压力为 0.6～1MPa，风量为 3～5m^3/min，所以适宜用容积式压风机。容积式压风机包括往复式和回转式两大类。常用的往复式空压机的型号有 YV-3/8、VY-6/7、YV-6/8、2WY-6/7、W-9/7和VY-9/7等，均为移动

表 3-30 流量计类型及特征

规格＼型号	LM 型涡轮流量计	LD 型电磁流量计
通径(mm)	10,25,32,50	25,50
最大流量(L/min)	25.4,144,300,540	200,250
最大工作压力(MPa)	6.4	1.6
工作温度(℃)	--20～80	0—40
电源电压	220V(±10%)；50Hz(±5%)	$220V\begin{pmatrix}+5\%\\-10\%\end{pmatrix}$ 50Hz
最大积算值(m^3)	999.999×10^2	—
特点及用途	1. 流量变送器与 XSJ-461 型积算频率仪配套使用，可以指示瞬时流量； 2. 仪表累积值绝对误差＜1L； 3. XSJ-461 型仪表工作温度 0～45℃； 4. 变送器的材料为 1Cr18Ni19Ti； 5. 适于测量水玻璃浆液或液体粘度小于 5×10^{-3}Pa·s 的化学浆液	1. 电磁流量计由变送器和转换器组成； 2. 成套仪表的精度为±1%； 3. 适于测量水玻璃和水泥浆液； 4. 变送器应安装在注浆泵的进浆口位置

式空压机。另外，也常用回转式空压机，应用较多的是滑片式和螺杆式两类。常用国产移动容积式空压机的主要技术性能如表 3-31 所示。上海英格索兰压缩机有限公司生产了一系列螺杆式空压机。从高压旋喷注浆工艺来看，主要有表 3-32 所列几种产品较适合，该公司产品质量较好，但价格相对较高。

四、管路材料

(一)压力表

常用压力表型号与规格如表 3-33 所示。

表 3-31　常用移动容积式空压机技术性能表

类型	型　　号	冷却方式	排气量 (m^3/min)	排气压力 (MPa)	动力机型式	功率 (kW)	重量(t)	制造厂
移动往复式	YV-3/8	风	3	0.8	JO_2-72-6	22	1.84	沈阳空压机厂
	VY-6/7	风	6	0.7	JO_2-82-4	40	1.8	许昌通风机械厂
	YV-6/8	风	6	0.8	JO_2-82-6	40	2.15	沈阳空压机厂
	2WY-6/7	风	6	0.7	4135C-1 柴油机	58.8	2.5	柳州第二空压机厂
	W-9/7	风	9	0.7	6135K 柴油机	88.26	3.5	蚌埠空压机厂
	VY-9/7	风	9.2	0.7	6135C-1 柴油机	88.26	2.8	柳州空压机
螺杆式	LGY20-10/7	风	10	0.7	6135C-1 柴油机	88.26	3.0	柳州第二空压机厂
滑片式	BH-6/7(移)	喷油	6	0.7	4135AK-2 柴油机	58.8	3.2	蚌埠空压机厂
	BH-12/7(移)	内冷	12	0.7	6135K-3 柴油机	88.26	≈3	

表 3-32　部分英格索兰压缩机型号及主要技术参数

类型	型　号	排气量 (m^3/min)	排气压力 (MPa)	冷却方式	动力机型式	功率 (kW)	重量 (t)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
移动式	P375	10.5	0.7	喷油,风冷	F6L912 柴油机	82.4	2.5	3 035×1 900×1 800
	XHP350	10	1.4	喷油,风冷	BF6L913C 柴油机	131	2.7	3 035×1 900×1 800
	VHP400	11.5	1.2	喷油,风冷	BF6L913C 柴油机	131	2.7	3 035×1 900×1 800
	P600	17	0.7	喷油,风冷	BF6L913C 柴油机	131	2.7	3 035×1 900×1 800
	VHP600E	17	1.2	喷油,风冷	Y315-4 电动机	160	4.3	4 100×1 900×1 950
	VHP700	20	1.2	喷油,风冷	CAT3306 柴油机	209	4.1	4 100×1 900×1 950
	XF100	12	0.7	风冷	电动机	75	1.85	3 023×1 320×1 359
	EP100	10	0.86	风冷	电动机	75	1.85	3 023×1 320×1 359
	HP100	9	1.0	风冷	电动机	75	1.85	3 023×1 320×1 359
	EP200	20.0	0.86	风冷	电动机	138	3.2	2 840×1 752×1 912
	HP200	18.0	1.0	风冷	电动机	138	3.2	2 840×1 752×1 912
	VP200	16	1.2	风冷	电动机	138	3.2	2 840×1 752×1 912

表 3-33　常用压力表型号与规格

名称	型号	测量范围（MPa）	接头螺纹	精度等级	特点及用途	生产厂
弹簧管压力表	Y-100 Y-150 Y-100T Y-150T	0～1.0,2.5,4.0 6.0，10.0，16.0，25.0,40.0 0～1.0，1.6，2.5，4.0 6.0，10.0，16.0，25.0,40.0	M20×1.5	2.5	1. Y-100，Y-150 为径向无边压力表，Y-100T，Y-150T 为径向有边压力表； 2. 测量气体或液体用	上海官川仪表厂，宝鸡仪表厂
抗震压力表	YK-1	10.0，16.0，25.0，40.0	ZCϕ40mm	2.5	1. 测量粘度大、粒度大且易结晶的液体，如水泥浆，油砂混合液等； 2. 防震性能好	宝鸡仪表厂

（二）阀门

高压阀门一般可自己加工，低压阀门可选标准产品，可按表 3-34 选择。

表 3-34　低压阀门

型　号	公称通径 D_g（mm）	公称压力 P_g（MPa）	型　号	公称通径 D_g（mm）	公称压力 P_g（MPa）
Q11SA-16	15	1.6	Z15W-10	20	1
Q11SA-16	20	1.6	Z15W 10	25	1
Q11SA-16	25	1.6	Z15W-10	32	1
Q11SA-16	32	1.6	Z15W-10	40	1
Q11SA-16	40	1.6	Z15W-10	50	1
Q11SA-16	50	1.6	Z15W 10	65	1
Z15W-10	15	1.0	Z15W-10	80	1

(三)高压胶管

它是高压泵与导流器之间的软性连接管路。一般采用钢丝缠绕液压胶管。其工作压力不低于喷射作业的压力，一般为 20MPa 以上；根据流量、软管允许流速和工作压力来计算高压胶管内径，计算式为：

$$d=4.6\sqrt{Q/v} \tag{3-1}$$

式中：d 为胶管内径(mm)；Q 为流量(L/min)；v 为软管允许流速(m/s)，一般为 6m/s，选择计算时，v 可按(4～6)m/s 计算。

胶管内径的选择也可按图 3-43 来选择。再根据表 3-35 选出标准胶管。

高压胶管的连接形式很多，常用卡口式活接头和嵌入丝扣式活接头。卡口式活接头其密封性能可靠，拆卸方便。每根胶管可以转动，避免发生软管扭曲、打硬弯，其结构如图 3-44 所示；后者密封性能也很好，但拆卸较麻烦，管路易扭曲，其结构如图 3-45 所示。

(四)气压胶管

主要在二层管法和三层管法中用于输送空气，一般用 3～8 层帆布缠裹浸胶 制。其内径有 16mm、19mm、25mm、32mm 等，工作压力可达 1MPa。其连接可采用牙口式及三爪接扣式快速接头，如图 3-46 所示。

表 3-35　钢丝缠绕液压胶管(单丝)

胶管代号	内径(mm)		钢丝层外径(mm)		胶管外径(mm)		工作压力(MPa)	最低爆破压力(MPa)	最小弯曲半径(mm)
	尺寸	公差	尺寸	公差	尺寸	公差			
B16×2S-210	16	±0.5	25.1	±0.8	28.5	+1.2 −1.0	21.0	84.0	225
B16×4S-380			28.3		32		38.0	152.0	265
B16×6S-480			31.5		35.5		48.0	192.0	310
B19×2S-180	19	±0.5	28.1	±0.8	31.5	+1.2 −1.0	18.0	72.0	265
B19×4S-345			31.3		35		34.5	138.0	310
B19×6S-430			34.5		38.5		43.0	172.0	330
B22×2S-170	22	±0.5	31.1	±0.8	34.5	+1.2 −1.0	17.0	68.0	280
B22×4S-300			34.3		39		30.0	120.0	330
B22×6S-400			37.5		41.5		40.0	160.0	360
B25×2S-160	25	±0.5	34.1	±0.8	37.5	+1.2 −1.0	16.0	64.0	310
B25×4S-275			37.3		41		27.5	110.0	350
B25×6S-345			40.5		44.5		34.5	138.0	400
B32×4S-210	32	±0.7	45.4	±0.8	50	+1.5 −1.2	21.0	84..0	420
B32×6S-260			49.2		53.8		26.0	104.0	490

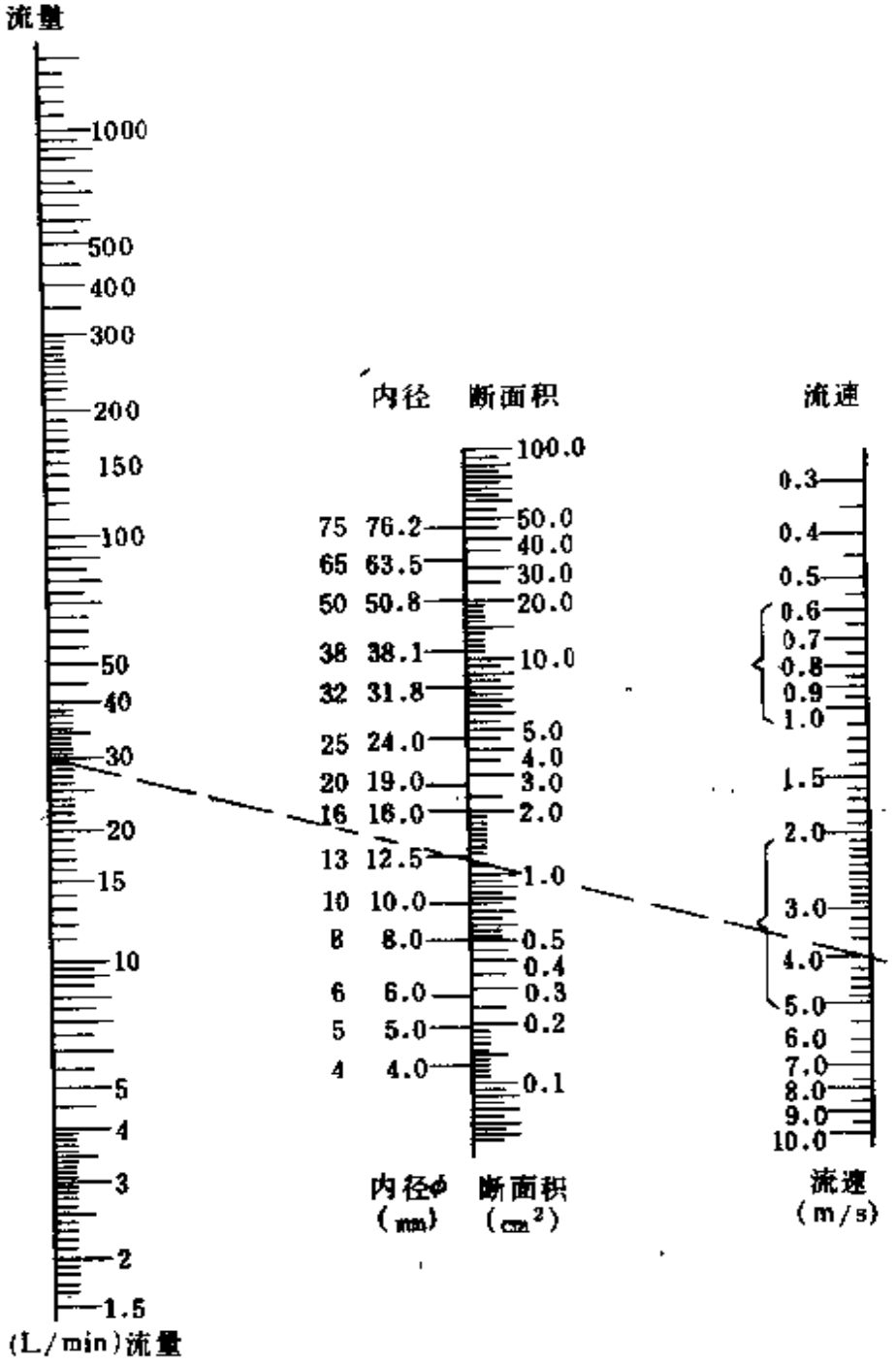


图 3-43　高压胶管流量、流速与内径的选择

软管内径应根据流量的大小进行选择。通常软管的允许流速是每秒不超过 6m，图示，虚线为例，如流量需要 30L/min，流速为 4m/s 时，则软管规格内径应选用 ϕ13mm 为最适宜。公式断面积$(cm^2)=\frac{流量(L/min)}{流速(m/s)\times 60}\times 10$

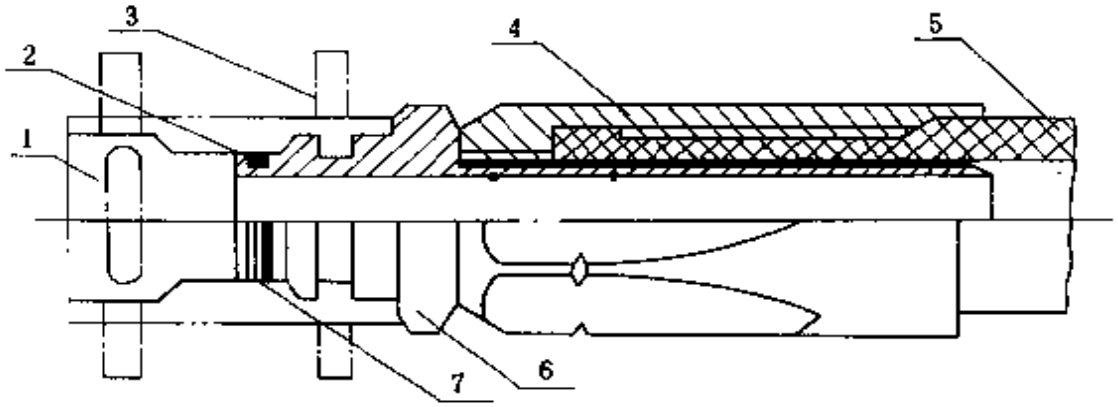


图 3-44　卡口式活接头结构

1—接头；2—O 型圈；3—U 型卡(弹簧钢)；4—接头外套；5—高压软管；6—接头芯子；7—垫口圈(塑料)

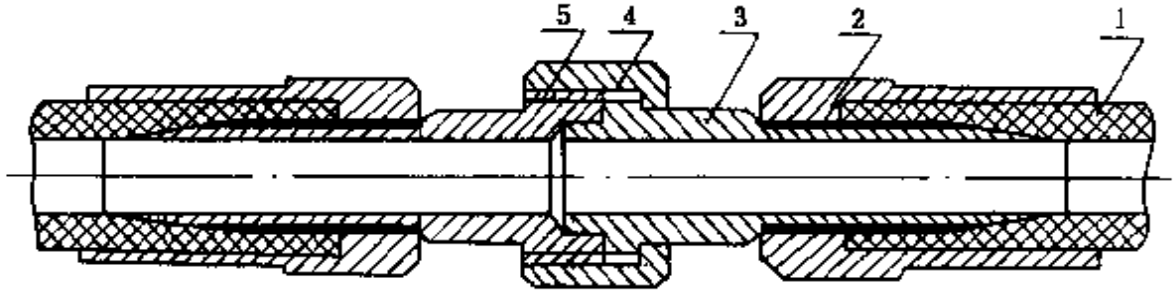


图 3-45　嵌入丝扣式活接头结构

1—胶管；2—接头外套；3—接头芯子 A；4—接头螺母；；5—接头芯子 B；

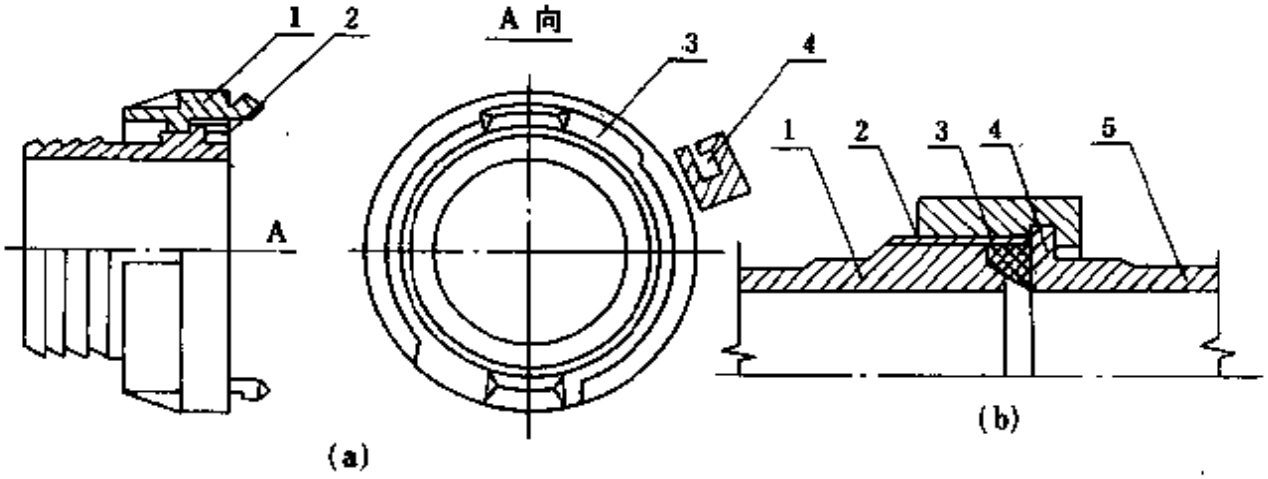


图 3-46　气压胶管快速接头

(a)牙扣式快速接头：1—牙扣；2—橡胶密封圈；3—缺口；4—凹槽

(b)三爪接扣式快速接头：1—内接头；2—锁母；3—橡胶圈；4—牙扣；5—外接头

第四章　注浆设计计算

第一节　静压注浆设计计算

一、注浆理论

在地基处理中，灌浆工艺所依据的理论主要可归纳为以下四类。

(一)渗透灌浆

渗透灌浆是指在压力作用下使浆液充填土的孔隙和岩石的裂隙，排挤出孔隙中存在的自由水和气体，而基本上不改变原状土的结构和体积(砂性土灌浆的结构原理)，所用灌浆压力相对较小。这类灌浆一般只适用于中砂以上的砂性土和有裂隙的岩石。代表性的渗透灌浆理论有球形扩散理论、柱形扩散理论和袖套管法理论。

1. 球形扩散理论

Maag(1938)的简化计算模式(图 4-1)假定是：①被灌砂土为均质的和各向同性的；②浆液为牛顿体；③浆液从注浆管底端注入地基土内；④浆液在地层中呈球状扩散。

根据达西定律：

$$Q=K_sAt=4\pi r^2K_st(-\mathrm{d}h/\mathrm{d}r) \qquad (4\text{-}1)$$

$$-\mathrm{d}h=\frac{Q\beta}{4\pi r^2Kt}\cdot\mathrm{d}r$$

积分后得：

$$h=\frac{Q\beta}{4\pi Kt\cdot 100}\cdot\frac{1}{r}+C$$

当 $r=r_0$ 时，$h=H$；$r=r_1$ 时，$h=h_0$，代入上式得：

$$H-h_0=\frac{Q\beta}{4\pi Kt}\left(\frac{1}{r_0}-\frac{1}{r_1}\right)$$

已知：$Q=4/3\times\pi r_1^3 n$，$h_1=H-h_0$，代入上式得：

$$h_1=\frac{r_1^3\beta\left(\frac{1}{r_0}-\frac{1}{r_1}\right)n}{3Kt\cdot 100}$$

由于 r_1 比 r_0 大得多，故考虑 $\frac{1}{r_0}-\frac{1}{r_1}\approx\frac{1}{r_0}$，则：

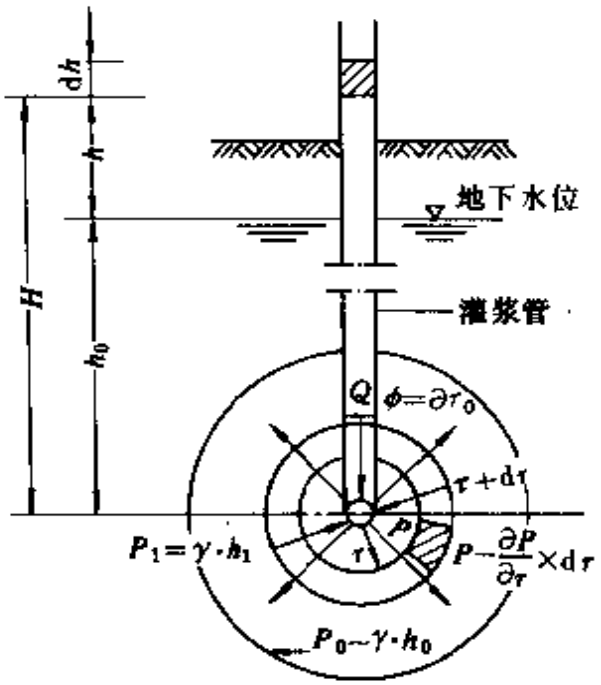


图 4-1　注浆管底端注浆球形扩散

$$h_1=\frac{r_1^3\beta n}{3Ktr_0\cdot 100}$$

$$\therefore t=\frac{r_1^3\beta n}{3Kh_1r_0}\tag{4-2}$$

或

$$r_1=\sqrt[3]{\frac{3Kh_1r_0t}{\beta\cdot n}}\tag{4-3}$$

式中：K 为砂土的渗透系数(cm/s)；Q 为注浆量(cm^3)；K_g 为浆液在地层中的渗透系数(cm/s)，$K_g=\frac{K}{\beta}$；β 为浆液粘度对水的粘度比；A 为渗透面积(cm^2)；r、r_1 为浆液的扩散半径(cm)；h、h_1 为灌浆压力(MPa)；h_0 为注浆点以上的地下承压水头，(MPa)；H 为地下水压头和灌浆压力之和(cm)；r_0 为灌浆管半径(cm)；t 为灌浆时间(s)；n 为砂土的孔隙率。

2. 柱形扩散理论

图 4-2 为柱形扩散理论的模型。当牛顿流体作柱形扩散时：

$$t = \frac{n\beta r_1^2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{2Kh} \qquad (4\text{-}4)$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{2Kh_1 t}{n\beta \ln \frac{r_1}{r_0}}} \qquad (4\text{-}5)$$

3. 袖套管法理论

假定浆液在砂砾中作紊流运动，则其扩散半径 r_1 为：

$$r_1 = 2\sqrt{\frac{t}{n}\sqrt{\frac{Kvh_1 r_0}{d_e}}} \qquad (4\text{-}6)$$

式中：d_e 为被灌土体的有效粒径；v 为浆液的运动粘滞系数；其余符号如前述。

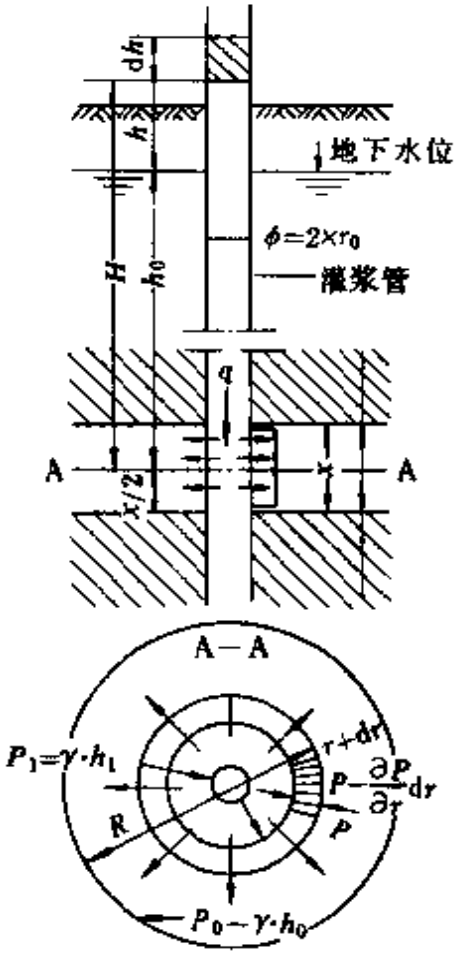


图 4-2 浆液柱状扩散

(二)劈裂灌浆

劈裂灌浆是指压力作用下，浆液克服地层的初始应力和抗拉强度，引起岩石和土体结构的破坏和扰动，使其沿垂直于小主应力平面上发生劈裂，使地层中原有的裂隙或孔隙、浆液的可灌性和扩散距离增大，而所用的灌浆压力相对较高。

1. 砂和砂砾石地层

可按照有效应力的库仑-莫尔破坏标准进行计算：

$$\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{1} \cdot \sin\varphi = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} - \cos\varphi \cdot C' \qquad (4\text{-}7)$$

式中：σ_1' 为有效大主应力(Pa)；σ_3' 为有效小主应力(Pa)；φ 为有效内摩擦角；C' 为有效粘聚力(Pa)。

由于灌浆压力的作用，使砂砾石土的有效应力减小。当灌浆压力 p_0 达到式(4-8)时，就会导致地层的破坏：

$$p_0 = \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1 + k)}{2} - \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1 - k)}{2\sin\varphi'} + C' \cdot \cot\varphi' \quad (4\text{-}8)$$

式中：γ 为砂或砂砾石的重度(cm^3/g)；γ_w 为水的重度，(cm^3/g)；h 为灌浆段深度，(m)；h_w 为地下水位高度，(m)；k 为主应力比。

图 4-3 为上述公式所代表破坏机理，从图中可见，随着孔隙水压力的增加，有效应力就逐渐减小而至与破坏包线相切，此时表明砂砾土已开始劈裂。

2. 粘性土层

在粘性土层中，水力劈裂将引起土体固结及挤出现象，在只有固结作用的条件时，可用下式计算注入浆液的体积 V 及单位土体所需的浆液量 Q：

$$V = \int_0^a (p_0 - u) m_v \cdot 4\pi r^2 \mathrm{d}r \quad (4\text{-}9)$$

$$Q = p \cdot m_v \quad (4\text{-}10)$$

式中：a 为浆液的扩散半径(m)；p_0 为灌浆压力(MPa)；u 为孔隙水压力(MPa)；m_v 为土的压缩系数；p 为有效灌浆压力(MPa)。

在存在多种劈裂现象的条件下，则可用式(4-11)确定土层被固结的程度 C：

$$C = \frac{(1 - V)(n_0 - n_1)}{(1 - n_0)} \times 100\% \quad (4\text{-}11)$$

式中：V 为灌入土中的水泥结石总体积(m^3)；n_0 为土的天然孔隙率；n_1 为灌浆后土的孔隙率。

(三)压密灌浆

压密灌浆是指通过钻孔在土中灌入极浓的浆液，在注浆点使土体压密，在注浆管端部附近形成浆泡，如图 4-4 所示。

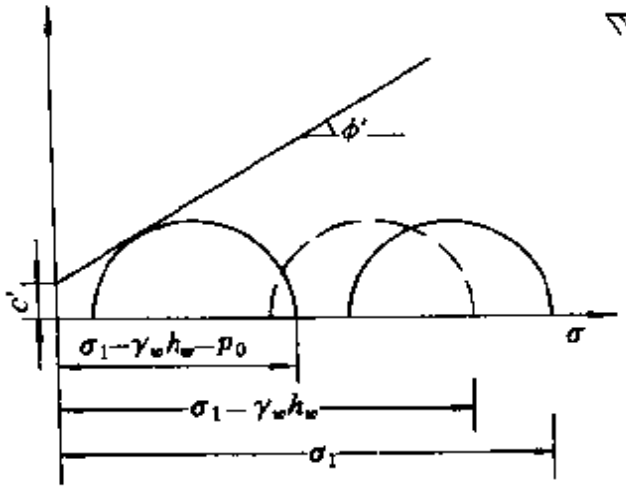


图 4-3　假想的水力破坏机理

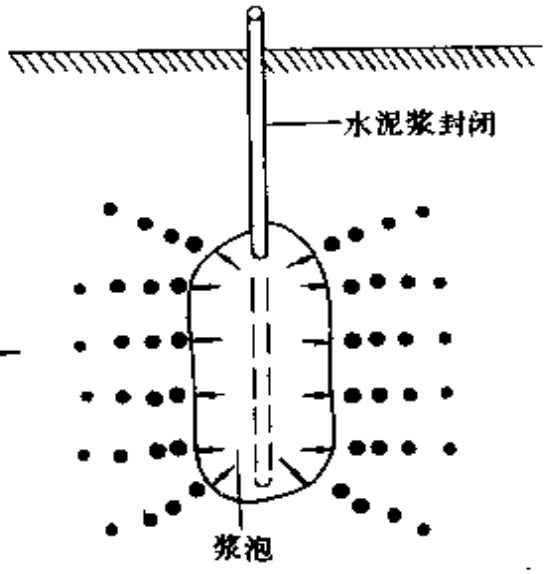


图 4-4　压密灌浆原理示意图

当浆泡的直径较小时，灌浆压力基本上沿钻孔的径向扩展。随着浆泡尺寸的逐渐增大，便产生较大的上抬力而使地面抬动。

经研究证明，向外扩张的浆泡将在土体中引起复杂的径向和切向应力体系。紧靠浆泡处土体遭到严重破坏和剪切，并形成塑性变形区，在此区土体的密度可能因扰动而减小；离浆泡较远的土则基本上发生弹性变形，因而土的密度有明显的增加。

浆泡的形成一般为球形或圆柱形。在均匀土中的浆泡形状相当规则，而在非均质土中则很不规则。浆泡的最后尺寸取决于很多因素，如土的密度、湿度、力学性质、地表约束条件，灌浆压力和注浆速率等。有时浆泡的横截面直径可达 1m 或更大，实践证明，离浆泡界面 0.3～2.0m 内的土体都能受到明显的加密。

压密灌浆常用于中砂地基，粘土地基中若有适宜的排水条件也可采用。如遇排水困难可能在土体中引起高孔隙水压力时，这就必须采取很低的注浆速率。压密灌浆可用于非饱和的土体，以调整不均匀沉降进行托换技术以及在大开挖或隧道开挖时对邻近土进行加固。

(四)电动化学灌浆

如地基土的渗透系数 K 小于 10^{-4}cm/s，只靠一般静压力难于使浆液注入土的孔隙，此时需用电渗透的作用使浆液进入土中。

电动化学灌浆是指在施工时将带孔的注浆管作为阳极，滤水管作为阴极，将溶液由阳极压入土中，并通以直流电(两电极间电压梯度一般采用 0.3～1.0V/cm)，在电渗作用下，孔隙水由阳极流向阴极，促使通电区域中土的含水量降低，并形成渗浆通路，化学浆液也随之流入土的孔隙中，并在土中硬结。因而电动化学灌浆是在电渗排水和灌浆法的基础上发展起来的一种加固方法。但由于电渗排水的作用，可能会引起邻近既有建筑物基础的附加下沉，这一情况应予慎重对待。

灌浆法的加固机理主要是：①化学胶结作用；②惰性填充作用；③离子交换作用。

根据灌浆实践经验及室内试验可知，加固后强度增强是一种受多种因素制约的复杂物理化学过程，除灌浆材料外，还有以下 3 个因素对上述三种作用的发挥起着重要作用。

1. 浆液与界面的结合形式

灌浆时除了要采用强度较高的浆材外，还要求浆液与介质接触面具有良好的接触条件。图 4-5 为浆液与界面结合的 4 种典型的形式。图 4-5(a)为浆液完全充填孔隙或裂隙，浆液与界面能牢固地结合；图 4-5(b)为浆液虽填满孔隙或裂隙，但两者间存在着一层连续的水膜，使浆液未能与岩土界面牢固地结合；图 4-5(c)为浆液虽也充满了孔隙或裂隙，但两者被一层软土隔开，且浆液未曾渗入到土孔隙内，从而使整体加固强度大为降低；图 4-5(d)为介质仅受到局部的胶结作用，地基的强度、透水性、压缩性等方面都无多大改善。由此可知，提高浆液对孔隙或裂隙的冲填程度及对界面的结合能力，也是使介质强度增长的重要因素。

2. 浆液饱和度

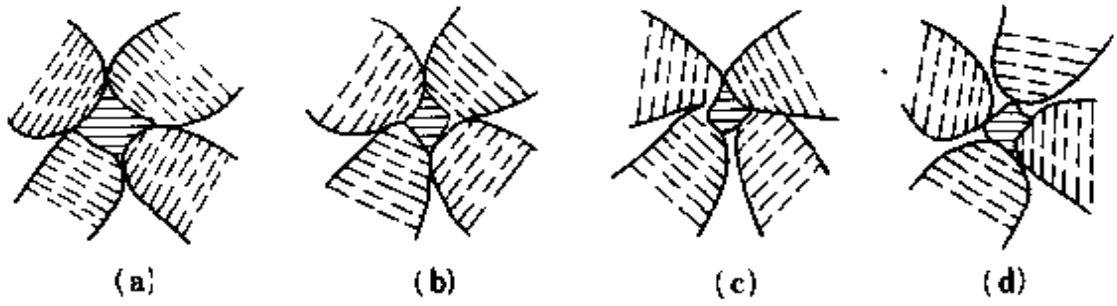


图 4-5　浆液与界面的结合形式

裂隙或孔隙被浆液填满的程度称为浆液饱和度。一般饱和度越大，被灌介质的强度也越高。不饱和充填可能在饱水孔隙、潮湿孔隙或干燥孔隙中形成，原因则可能多种，灌浆工艺欠妥可能是关键的因素，例如用不同的灌浆压力和不同的灌浆延续时间，所得灌浆结果就不一样。

灌浆一般采用定量灌注方法，而不是灌至不吃浆为止。灌浆结束后，地层中的浆液往往仍具有一定的流动性，因而在重力作用下，浆液可能向前沿继续流失，使本来已被填灌的孔隙重新出现空洞，使灌浆体的整体强度削弱。不饱和充填的另一个原因是采用不稳定的粒状浆液，如这类浆液太稀，且在灌浆结束后浆中的多余水不能排除，则浆液将沉淀析水而在孔隙中形成空洞。可采用以下措施防止上述现象：①当浆液充满孔隙后，继续通过钻孔施加最大灌浆压力；②采用稳定性较好的浓度；③待已灌浆液达到初凝后，设法在原孔段内进行复灌。

3. 时间效应

许多浆液的凝结时间都较长，被灌介质的力学强度将随时间而增长。但有时为了使加固体尽快发挥作用而必须缩短凝结时间；但为了维持浆液的可灌性则要求适当延长浆液的凝结时间。

许多浆材都具有明显的徐变性质，浆材和被灌介质的强度都将

受加荷速率和外力作用时间的影响。

浆液搅拌时间过长或同一批浆液灌浆时间太久，都将使加固体的强度削弱。

二、灌浆设计计算

(一)设计程序和内容

地基灌浆设计一般遵循以下几个程序：

(1)地质调查　查明地基的工程地质特性和水文地质条件；

(2)方案选择　根据工程性质、灌浆目的及地质条件，初步选定灌浆方案；

(3)灌浆试验　除进行室内灌浆试验外，对较重要的工程，还应选择有代表性的地段进行现场灌浆试验，以便为确定灌浆技术参数及灌浆施工方法提供依据；

(4)设计和计算　确定各项灌浆参数和技术措施；

(5)补充和修改设计　在施工期间和竣工后的运用过程中，根据观测所得的异常情况，对原设计进行必要的调整。

设计内容主要包括以下几方面：

(1)灌浆标准　通过灌浆要求达到的效果和质量指标；

(2)施工范围　包括灌浆程度、长度和宽度；

(3)灌浆材料　包括浆材种类和浆液配方；

(4)浆液影响半径　指浆液在设计压力下所能达到的有效扩散距离；

(5)钻孔布置　根据浆液影响半径和灌浆体设计厚度，确定合理的孔距、排距、孔数和排数；

(6)灌浆压力　规定不同地区和不同程度的允许最大灌浆压力；

(7)灌浆效果评估　用各种方法和手段检测灌浆效果。

(二)方案选择

灌浆方案的选择一般应遵循下述原则：

(1)灌浆目的如为提高地基强度和变形模量，一般可选用以水泥为基本材料的水泥浆、水泥砂浆和水泥-水玻璃浆等，或采用高强度化学浆材，如环氧树脂、聚氨酯以及有机物为固化剂的硅酸盐浆材等。

(2)灌浆目的　如为防渗堵漏时，可采用粘土水泥浆、粘土水玻璃浆、水泥粉煤灰混合物、丙凝、AC-MS、铬木素以及无机试剂为固化剂的硅酸盐浆液等。

(3)在裂隙岩层中灌浆一般采用纯水泥浆以及在其中或在水泥砂浆中掺入少量膨润土；在砂砾石层中或在溶洞中采用粘土水泥浆；在砂层中一般只采用化学浆液，在黄土中采用单液硅化法或碱液法。

(4)对孔隙较大的砂砾石层或裂隙岩层中采用渗入性注浆法，在砂层灌注粒状浆材宜采用水力劈裂法；在粘性土层中采用水力劈裂法或电动硅化法；矫正建筑物的不均匀沉降则采用压密灌浆法。

有时在考虑浆材选用上，还需考虑浆材对人体的危害或对环境的污染问题。

(三)灌浆标准

1. 防渗标准

防渗标准不是绝对的，应根据每个工程各自的特点，通过技术经济比较确定一个相对合理的指标。对重要的防渗工程，都要求将地基土的渗透系数降低至 $10^{-4}\sim10^{-5}$cm/s 以下；对临时性工程或允许出现较大渗漏量而又不致发生渗透破坏地层，也有采用 10^{-3}cm/s 数量级的工程实例。

2. 强度和变形标准

根据灌浆的目的，强度和变形的标准将随各工程的具体要求而不同。如：①为了增加摩擦柱的承载力，主要应沿桩的周边灌浆，以提高桩侧界面间的粘聚力，对支承桩则在柱底灌浆以提高桩端土的抗压强度和变形模量；②为了减少坝基础的不均匀变形，仅需在坝下游基础受压部分进行固结灌浆，以提高地基土的变形模量，而无需在整

个坝基灌浆；③对振动基础，有时灌浆目的只是为了改变地基的自然频率以消除共振条件，因而不一定需用强度较高的浆材；④为了减小挡土墙的土压力，则应在墙背至滑动面附近的土体中灌浆，以提高地基土的重度和滑动面的抗剪强度。

3. 施工控制标准

灌浆后的质量指标只能在施工结束后通过现场检测来确定。有些灌浆工程甚至不能进行现场检测，因此必须制定一个能保证获得最佳灌浆效果的施工控制标准。

在正常情况下注入理论耗量 Q 为：

$$Q=V\cdot n\cdot m \tag{4-12}$$

式中：V 为设计灌浆体积(m^3)；n 为土的孔隙率；m 为无效注浆量(m^3)。

按耗浆量降低率进行控制。由于灌浆是按逐渐加密原则进行的，孔段耗浆量应随加密次序的增加而逐渐减少。若起始孔距布置正确，则第二序孔的耗量将比第一序孔大为减少，这是灌浆取得成功的标志。

(四)浆材及配方设计原则

根据土质和注灌目的的不同，可将注浆的选择列于表 4-1 和表 4-2 中，其他详见第二章。

表 4-1　按土质不同对注浆材料的选择

土质名称		注浆材料
粘性土和粉土	粉　土 粘　土 粘质粉土	水泥类注浆材料及 水玻璃悬浊型浆液
砂质土	砂 粉　砂	渗透性溶液型浆液 (但在预处理时，使用水玻璃悬浊型)
砂　砾 层界面		水玻璃悬浊型浆液(大孔隙) 渗透性溶液型浆液(小孔隙) 水泥类及水玻璃悬浊型浆液

表 4-2　按注浆目的的不同对注浆材料选择

项　　目		基　本　条　件
改良目的	堵水注浆	渗透性好粘度低的注浆(作为预注浆使用最浊型)
	渗透注浆	渗透性好有一定强度,即粘度低的溶液型浆液
	脉状注浆	凝胶时间短的均质凝胶,强度大的悬浊型浆液
	渗透脉状注浆并用	均质凝胶强度大且渗透性好的浆液
	防止漏水注浆	凝胶时间不受地下水稀释而延缓的浆液,瞬时凝固的浆液(溶液或悬浊型的)(使用双层管)
综合注浆	预处理注浆	凝胶时间短,均质凝胶强度比较大的悬浊型浆液
	正式注浆	和预处理材料性质相似的渗透性好的浆液
特殊地基处理注浆		对酸性、碱性地基、泥炭应事前进行试验校核后选择注浆材料
其他注浆		研究环境保护(毒性、地下水污染、水质污染等)

(五)确定扩散半径

浆液扩散半径 r 是一个重要参数,它对灌浆工程量及造价具有重要的影响。r 值可按上节的理论公式进行估算;当地质条件较复杂或计算参数不易选准时,就应通过现场灌浆试验来确定。

现场灌浆试验时,常采用三角形(图 4-6)及矩形(图 4-7)布孔方法。

灌浆试验结束后,需对浆液扩散半径进行评价:

(1)钻孔压水或注水,求出灌浆体的渗透性;

(2)钻孔取样品,检查孔隙充浆情况;

(3)用大口径钻井或人工开挖竖井,用肉眼检查地层充浆情况,采取样品进行室内试验。

由于地基多数是不均匀的,尤其是在深度方向上,不论是理论计算或现场灌浆试验都难求得整个地层具有代表性 r 值,实际工程中

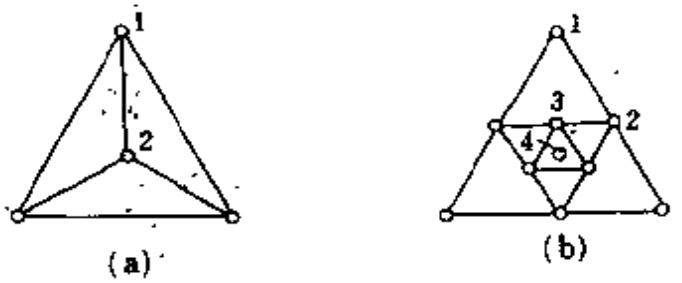


图 4-6　三角形布孔

(a)1—灌浆孔，2—检查孔；(b)1—第Ⅰ序孔，2—第Ⅱ序孔，3—第Ⅲ序孔，4—检查孔

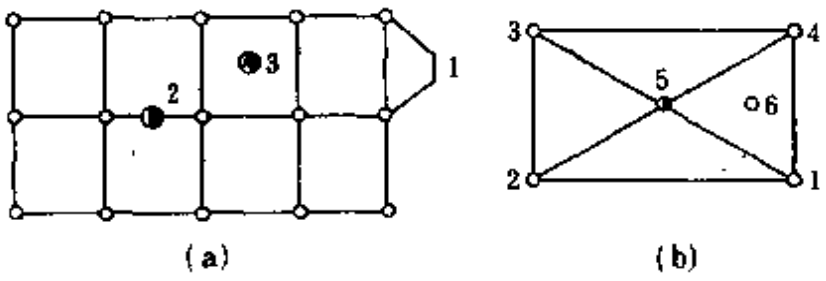


图 4-7　矩形或方形布孔

(a)1—灌浆孔，2—试井，3—检查孔；(b)1～4—第Ⅰ序孔，5—第Ⅱ序孔，6—检查孔

又往往只能是采用均匀布孔的方法，为此，设计时应注意以下几点：

(1)在现场进行试验时，要选择不同特点的地基，用不同的灌浆方法，以求不同条件下的浆液的 r 值；

(2)所谓扩散半径并非是最远距离，而是能符合设计要求的扩散距离；

(3)在确定扩散半径时，要选择多数条件下可达到的数值，而不是取平均值；

(4)当有些地层因渗透性较小而不能达到 r 值时，可提高灌浆压力或浆液的流动性，必要时还可在局部地区增加钻孔以缩小孔距。

(六)孔位布置

注浆孔的布置是根据浆液有效范围，且应相互重叠，使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体的原则决定的。

1. 单排孔的布置

如图 4-8 所示，l 为灌浆孔距，r 为浆液扩散半径，则灌浆体的厚度 b 为：

$$b = 2\sqrt{r^2 - \left[(l-r) + \frac{r-(l-r)}{2}\right]^2} \tag{4-13}$$

$$= 2\sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$$

当 $l=2r$ 时，两圆相切，b 值为零。

如灌浆体的设计厚度为 T，则灌浆孔距为：

$$l = 2 \cdot \sqrt{r^2 - \frac{T^2}{4}} \tag{4-14}$$

在按上式进行孔距设计时，可能出现以下几种情况：

(1)当 l 值接近零、b 值仍不能满足设计厚度时，应考虑采用多排灌浆孔；

(2)虽单排孔能满足设计要求，但若孔距太小，钻孔数太多，就应进行两排孔的方案比较；

(3)从图 4-9 中可见，设 T 为设计帷幕厚度，h 为弓形高，L 为弓长，则每个灌浆孔的无效面积为：

$$S_n = 2 \times \frac{2}{3} \cdot L \cdot h \tag{4-15}$$

式中：$L=l$，$h=r-T/2$，设土的孔隙率为 n，且浆液填满整个孔隙，则浆液的浪费量为：

$$m = S_n \cdot n = \frac{4}{3} L \cdot h \cdot n \tag{4-16}$$

由此可见，当 l 值较大，对减少钻孔数是有利的，但可能造成的

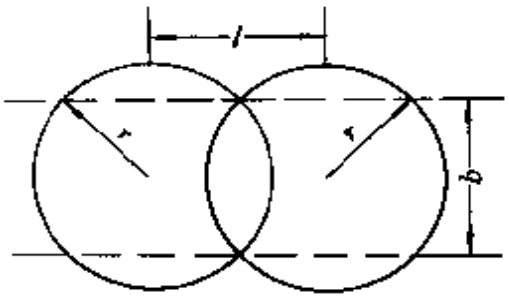


图 4-8　单排孔的布置

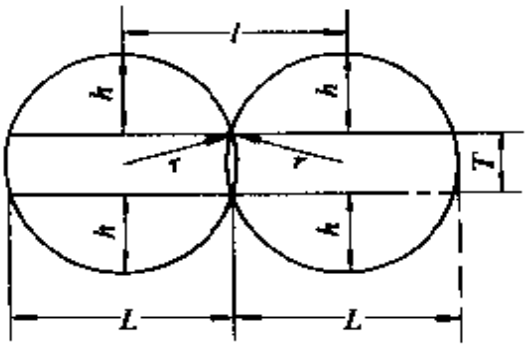


图 4-9　无效面积计算图

浆液浪费量也越大，故设计时应对钻孔费用和浆液费用进行比较。

2. 多排孔布置

当单排孔不能满足设计厚度的要求时，就要采用两排以上的多排孔。而多排孔的设计原则是要充分发挥灌浆孔的潜力，以获得最大的灌浆体厚度，不允许出现两排孔间的搭接不紧密的“窗口”，也不要求搭接过多出现浪费。

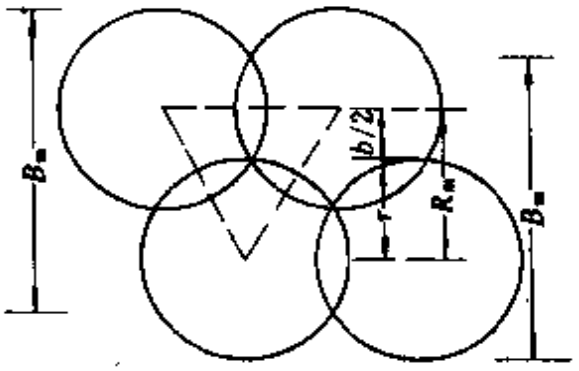


图 4-10　孔排间的最优搭接

图 4-10 为两排孔正好紧密搭接的最优设计布孔方案。

根据上述分析，可推导出最优排距 R_m 和最大灌浆有效厚度 B_m 的计算式。

(1)两排孔：

$$R_m = r + \frac{b}{2} = r - \sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}} \tag{4-17}$$

$$B_m = 2r + b = 2\left[r + \sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}}\right] \tag{4-18a}$$

(2)三排孔：

R_m 与式(4-17)相同

$$B_m = 2r + 2b = 2\left[r + 2\sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}}\right] \tag{4-18b}$$

(3)五排孔：

R_m 与式(4-17)相同

$$B_m = 4r + 3b = 4\left[r + 1.5\sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}}\right] \tag{4-18c}$$

综上所述，可得出多排孔的最优排距为式(4-17)，最优厚度则为：

①奇数排

$$B_m = (n-1)\left[r + \frac{(n+1)}{(n-1)} \cdot \frac{b}{2}\right]$$

$$= (n-1)\left[r + \frac{(n+1)}{(n-1)}\sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}}\right] \tag{4-19}$$

②偶数排

$$B_m = n(r + b/2) = n\left[r + \sqrt{r^2 - \frac{l_2}{4}}\right] \tag{4-20}$$

上述公式中 n 为灌浆孔排数。

在设计工作中，常遇到几排孔厚度不够，但(n+1)排孔厚度又偏大的情况，如有必要，可用放大孔距的办法来调整，但也应按上节所述方法，对钻孔费和浆材费进行比较，以确定合理的孔距。灌浆体的无效面积 S_n 仍可用式(4-15)计算，但式中 T 值仅为边排孔的厚度。

(七)灌浆压力

灌浆压力是指不会使地表面产生变化和邻近建筑物受到影响的

前提下可能采用的最大压力。

由于浆液的扩散能力与灌浆压力的大小密切相关，有人倾向于采用较高的灌浆压力，在保证灌浆质量的前提下，使钻孔数尽可能减少。高的灌浆压力还能使一些微细孔隙张开，有助于提高可灌性。当孔隙中被某种软弱材料充填时，高灌浆压力能在充填物中造成劈裂灌注，使软弱材料的密度、强度和不透性等得到改善。此外，高灌浆压力还有助于挤出浆液中的多余水分，使浆液结石的强度提高。

灌浆压力值与地层土的密度、强度和初始应力、钻孔深度、位置及灌浆次序等因素有关，而这些因素又难于准确地预知，因而宜通过现场灌浆试验来确定。

《上海市地基处理技术规范》中规定："对劈裂注浆，在浆液注浆的范围内应尽量减少注浆压力。注浆压力的选用应根据土质的性质及其埋深确定。在砂土中的经验数值是 0.2～0.5MPa；在粘性土中的经验数值是 0.2～0.3MPa。注浆压力因地基条件、环境条件和注浆目的等不同而不能确定时，可参考类似条件下的成功工程实例决定。一般情况下，当深埋浅于 10m 时，可取较小的注浆压力值"。"对压密注浆，注浆压力主要取决于浆液材料的调度。如采取用水泥-砂浆的浆液，坍落度一般在 25～75mm，注浆压力应选定在 1～7MPa 范围内，坍落度较小时，注浆压力可取上限值，如采用水泥-水玻璃双液快凝浆液，则注浆压力应小于 1MPa"。

（八）其他

1. 灌浆量

灌浆量的体积应为土的孔隙体积，但在灌浆过程中，浆液并不可能完全充满土的孔隙体积，而土中水分亦占据孔隙的部分体积。所以，在计算浆液用量时，通常应乘以小于 1 的灌注系数，但考虑到浆液容易流到设计范围以外，所以灌注所需的浆液总用量 Q 可参照下式计算：

$$Q=K\cdot V\cdot n\cdot 1000 \tag{4-21}$$

式中：Q 为浆液总用量(L)；V 为注浆对象的土量(m^3)；n 为土的孔隙率；K 为经验系数。

软土、粘性土、细砂	$K=0.3\sim0.5$
中砂、粗　砂	$K=0.5\sim0.7$
砾、砂	$K=0.7\sim1.0$
湿陷性黄土	$K=0.5\sim0.8$

一般情况下，粘性土地基中的浆液注入率为15%～20%。

2. 注浆顺序

注浆顺序必须采用适合于地基条件、现场环境及注浆目的的方式进行，一般不宜采用自注浆地带某一端单向推进压注方式，应按跳孔间隔注浆方式进行，以防止串浆，提高注浆孔内浆液的强度与时俱增的约束性。对有地下动水流的特殊情况，应考虑浆液在动水流下的迁移效应，从水头高的一端开始注浆。

对加固渗透系数相同的土层，首先应完成最上层封顶注浆，然后再按由下而上的原则进行注浆，以防浆液上冒。如土层的渗透系数随深度而增大，则应自下而上进行注浆。

注浆时应采用先外围，后内部的注浆顺序；若注浆范围以外有边界约束条件(能阻挡浆液流动的障碍物)时，也可采用自内侧开始顺次往外侧的注浆方法。

3. 初凝时间

初凝时间必须根据灌浆土层的体积、渗透性、孔隙尺寸和孔隙率、浆液的流变性和地下水流速等实际情况而定。总之，浆液的初凝时间应足够长，以便计划注浆量能渗入到预定的影响半径内。当在地下水中灌浆时，除应按控制注浆速率以防浆液过分稀释或冲走外，还应设法使浆液能在灌注过程中凝结。浆液的凝结时间可分以下4种：

(1)极限灌浆时间　到达极限灌浆时间后，浆液已具有相当的结构强度，其阻力已达到使注浆速率极慢或等于零的程度。

(2)零变位时间　在此时间内，浆液已具有足够的结构强度，以

便在停止灌浆后能有效地抵抗地下水的冲蚀和推移时间。

(3)初凝时间　规定出适用于不同浆液的标准试验方法，测出初凝时间，供研究配方时参考。

(4)终凝时间　它代表浆液的最终强度性质，在此时间内材料的化学反应实际已终止。

在一般防渗灌浆工程中，前两种凝结时间具有特别重要的意义。但在某些特殊条件下，例如在粉细砂层中开挖隧道或基坑时，为了缩短工期和确保安全，终凝时间就成为重要的控制指标。

第二节　高压喷射注浆设计计算

一、高压水喷射流性质

高压水喷射流是通过高压发生设备，使它获得巨大能量后，从一定形状的喷嘴，用一种特定的流体运动方式，以很高的速度连续喷射出来的、能量高度集中的一般液流。

在高压、高速的条件下，喷射流具有很大的功率，即在单位时间内从喷嘴中射出的喷射流具有很大的能量，其功率与速度和喷射流的压力的关系如表 4-3 所示。

表 4-3　喷射流的速度与功率

喷嘴压力 p_n(Pa)	喷嘴出口孔径 d_0(cm)	流速系数 φ	流量系数 μ	射流速度 v_0(m/s)	喷射功率 N(kW)
10×10^6	0.30	0.963	0.946	136	8.5
20×10^6	0.30	0.963	0.946	192	24.1
30×10^6	0.30	0.963	0.946	243	44.1
40×10^6	0.30	0.963	0.946	280	68.3
50×10^6	0.30	0.963	0.946	313	95.4

注：流量系数和流速系数为收敛圆锥 13°24′ 角喷嘴的水力试验值。

从表 4-3 可见，虽喷嘴的出口孔径只有 3mm，由于喷射压力为

10MPa、20MPa、30MPa、40MPa和50MPa，它们是以136m/s、192m/s、243m/s、280m/s 和 313m/s 的速度连续不断地从喷嘴中喷射出来，它们携带了 8.5kW、24kW、44kW、68kW 和 95kW 的巨大能量 。

高压喷射注浆所用的喷射流共有以下 4 种：

(1)单管喷射流为单一的高压水泥浆喷射流；

(2)二重管喷射流为高压浆液喷射流与其外部环绕的压缩空气喷射流，组成为复合式高压喷射流；

(3)三重管喷射流由高压水喷射流与其外环绕的压缩空气喷射流组成，亦为复合式高压喷射流；

(4)多重管喷射流为高压水喷射流。

以上 4 种喷射流破坏土体的效果不同，但其构造可划分为单液高压喷射流和水(浆)、气同轴喷射流两种类型。

(一)单液高压喷射流的构造

单管旋喷注浆使用高压喷射水泥浆流和多重管的高压水喷射流，它们的射流构造可用高压水连续喷射流在空气中的模式(图 4-11)予以说明。高压喷射流可由 3 个区域所组成，即保持出口压力 p_0 的初期区域 A、紊流发达的主要区域 B 和喷射水变成不连续喷流的终期区域 C 三部分。

在初期区域中，喷射出口处速度分布是均匀的，轴向动压是常数，保持速度均匀的部分向前面逐渐愈来愈小，当达到某一位置后，断面上的流速分布不再是均匀的了。速度分布保持均匀的这一部分称为喷射核(即 E 区段)，喷射核末端扩散宽度稍有增加，轴向动压有所减小的过渡部分称为迁移区(即 D 区段)。初期区域的长度是喷射流的一个重要参数，可据此判断破碎土体和搅拌效果。

在初期区域后为主要区域，在这一区域内，轴向动压陡然减弱，喷射扩散宽度和距离平方根成正比，扩散率为常数，喷射流的混合搅拌在这一部分内进行。

在主要区域为终期区域，到此喷射流能量衰减很大，末端呈雾状

态，这一区域的喷射能量较小。

喷射加固的有效喷射长度为初期区域长度和主要区域长度之和，若有效喷射长度愈长，则搅拌土的距离愈大，喷射加固体的直径也愈大。

（二）高压喷射流的压力衰减

在空气中和水中喷射得到的压力与距离的关系曲线如图 4-12 所示。

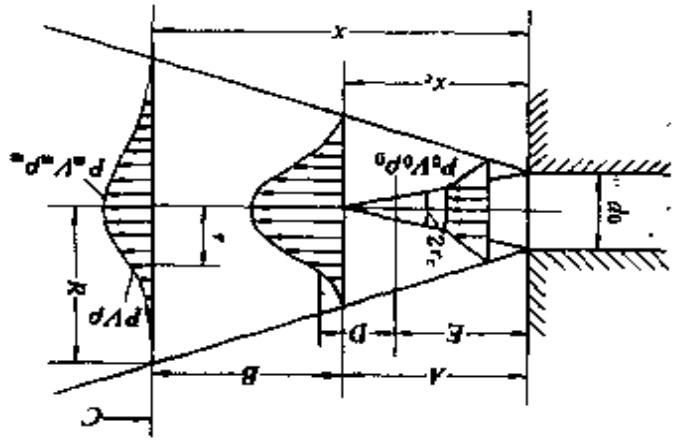


图 4-11　高压喷射流构造

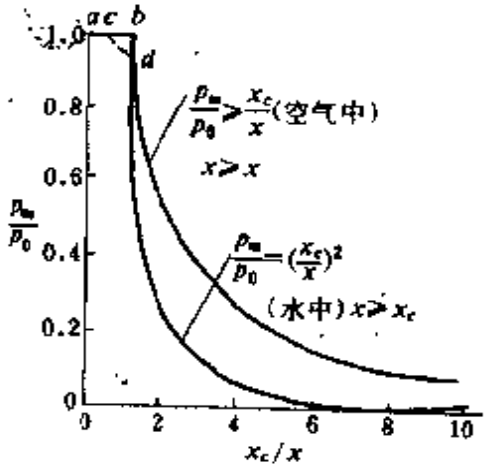


图 4-12　喷射流在中心轴上的压力分布曲线

喷射流在空气中喷射水时：

$$\frac{p_m}{p_0}=\frac{x_c}{x} \tag{4-22}$$

喷射流在水中喷射水时：

$$\frac{p_m}{p_0}=(\frac{x_c}{x})^2 \tag{4-23}$$

式中：x_c 为初期区域的长度（m）；x 为喷射流中心轴距离喷嘴距离（m）；p_0 为喷嘴出口压力（kPa）；p_m 为喷流中心轴上距离喷嘴 x 距离的压力（kPa）。

根据实验结果：

在空气中喷射时，$x_c=(75\sim100)d_0$

在水中喷射时，$x_c=(6\sim6.5)d_0$

式中：d_0 为喷嘴直径。

当压力高达 10～40MPa 的喷射流在介质中喷射时，压力的衰减规律也可近似地采用下列经验公式：

$$p_m=K\cdot d_0^{6.5}\frac{p_0}{x^n} \tag{4-24}$$

式中：K、n 为系数(适用于 $x=50\sim300d_0$)。

(三)水(浆)、气同轴喷射流的构造

二重管旋喷注浆的浆、气同轴射喷流，与三重管旋喷注浆的水、气同轴喷射流除喷射介质不同外，都是在喷射流的外围同轴喷射圆筒状气流，它们的构造基本相同。现以水、气同轴喷射流为代表，分析其构造。

在初期区域 A 内，水喷流的速度保持喷嘴出口的速度，但由于水喷射与空气流相冲撞及喷嘴内部表面不够光滑，以至从喷嘴喷射出的水流中形成气泡，喷射流受到干扰，在初期区域的末端，气泡与水喷流的宽度一样。

在迁移区域 D 内，高压水喷射流与空气开始混合，出现较多的气泡。

在主要区域 B 内，高压水喷射衰减，内部含有大量气泡，气泡逐渐分裂破坏，成为不连续的细水滴状，同轴喷射流的宽度迅速扩大。

水(浆)、气同轴喷射流的初期区域长度可用以下经验公式表示：

$$x_c=0.048v_0 \tag{4-25}$$

式中：v_0 为初期流速(m/s)。

旋喷时，若高压水、气同轴喷射流的初期速度为 20m/s，则其初期区域长度 $x_c=0.10$m，而以高压水喷射流单独喷射时，x_c 仅为 0.015m，可见，水、气同轴射的初期区域长度增加了近 6 倍。

二、加固地基的机理

(一)高压喷射流对土体的破坏作用

破坏土体的结构强度的最主要因素是喷射动压，根据动量定律，在空气中喷射时的破坏力为：

$$P = \rho \cdot Q \cdot v_m \tag{4-26}$$

式中：P 为破坏力(N)；ρ 为密度(kg/m³)；Q 为流量(m³/s)，$Q = v_m \cdot A$；v_m 为喷射流的平均速度(m/s)。

$$P = \rho \cdot A \cdot v_m^2 \tag{4-27}$$

式中：A 为喷嘴断面积(m²)。

亦即破坏力对于某一种密度的液体而言，是与该射流的流量(Q)、流速 v_m 的乘积成正比。而流量(Q)又为喷嘴断面积 A 与流速 v_m 的乘积。所以在一定的喷嘴面积 A 的条件下，为了取得更大的破坏力，需要增加平均流速，也就是需要增加旋喷压力，一般要求高压脉冲泵的工作压力在 20MPa 以上，这样就使射流像刚体一样，冲击破坏土体，使土与浆液搅拌混合，凝固成圆柱状的固结体。

喷射流在终期区域，能量衰减很大，不能直接冲击土体使土颗粒剥落，但能对有效射程的边界土产生挤压力，对四周土有压密作用，并使部分浆液进入土粒之间的空隙里，使固结体与四周土紧密相依，不产生脱离现象。

(二)水(浆)、气同轴喷射流对土的破坏作用

单射流虽具有巨大的能量，但由于压力在土中急剧衰减，因此破坏土的有效射程较短，致使旋喷固结体的直径较小。

当在喷射出口的高压水喷流的周围加上圆筒状空气射流，进行水、气同轴喷射时，空气流使水或浆的高压喷射流从破坏土体上将土粒迅速吹散，使高压喷射流的喷射破坏条件得到改善，阻力大大减少，能量消耗降低，因而增大了高压喷射流的破坏能力，形成的旋喷固结体直径较大，图 4-13 为不同类喷射流轴上动水压力与距离的关

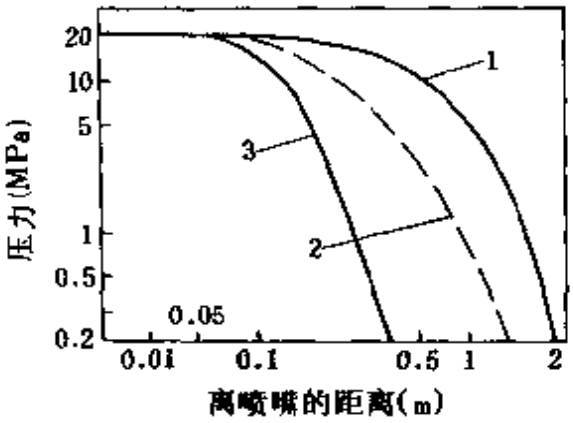


图 4-13　喷射流轴上动水压力与距离的关系
1—高压喷射流在空中单独喷射；2—水、气同轴喷射流在水中喷射；3—高压喷射流在水中单独喷射

系，表明高速空气具有防止高速水射流动压急剧衰减的作用。

旋喷时，高压喷射流在地基中，把土体切削破坏，其加固范围就是喷射距离加上渗透部分或压缩部分的长度为半径的圆柱体。一部分细小的土粒被喷射的浆液所置换，随着液流被带到地面上（俗称冒浆），其余的土粒与浆液搅拌混合。在喷射动压力、离心力和重力的共同作用下，在横断面上土粒按质量大小有规律地排列起来，小颗粒在中部居多，大颗粒多数在外侧或边缘部分，形成了浆液主体搅拌混合，压缩和渗透等部分，经过一定时间便凝固成强度较渗透系数较小的固结体。随着土质的不同，横断面结构也多少有些不同，如图 4-14 所示。由于旋喷体不是等颗粒的单体结构，固结质量也不均匀，通常是中心部分强度低，边缘部分强度高。

定喷时，高压喷射注浆的喷嘴不旋转，只作水平的固定方向喷射，并逐渐向上提升，便在土中冲成一条沟槽，并把浆液灌进槽中，最后形成一个板状固结体。固结体，在砂性土中有部分渗透层；而粘性土却无这一部分渗透层，如图 4-15 所示。

（三）水泥与土的固结机理

水泥与水拌合后，首先产生铝酸三钙水化物和氢氧化钙，它们可溶于水，但溶解度不高，很快就达到饱和，这种化学反应连续不断地进行，就析出一种胶质物体。这种胶质物体有一部分混在水中悬浮，后来就包围在水泥微粒的表面，形成一层胶凝薄膜。所生成的硅酸二

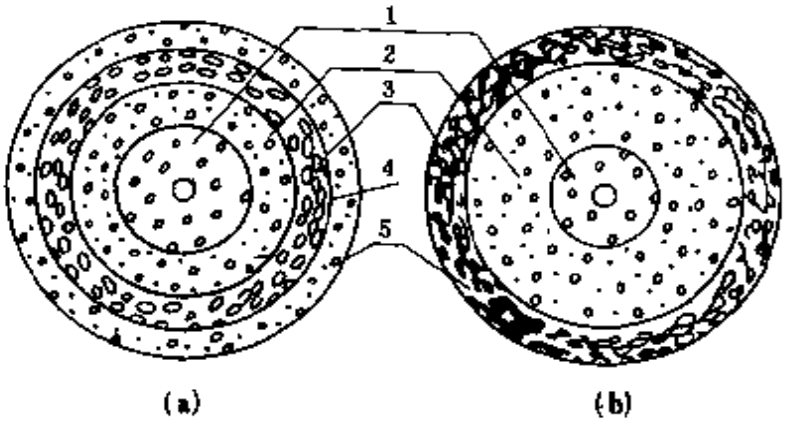


图 4-14　旋喷固结体横断面示意图

(a)砂土中；(b)粘性土中。

1—浆液主体部分；2—搅拌混合部分；3—压缩部分；4—渗透部分；5—硬壳

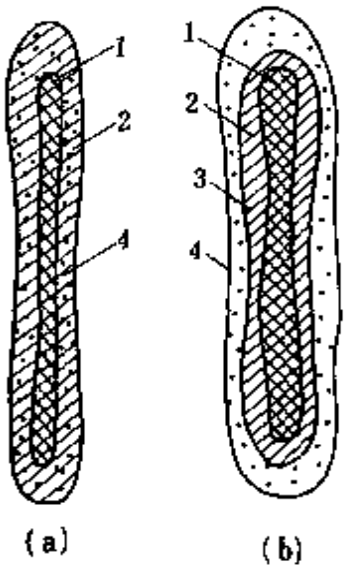


图 4-15　定喷固结体横断面结构示意图

(a)砂类土中；(b)粘性土中

1—浆液主体部分；2—搅拌混合部分；3—渗透部分；4—硬壳

钙水化物几乎不溶于水，只能以无定形体的胶质包围在水泥微粒的表层，另一部分渗入水中。由水泥各种成分所生成的胶凝膜，逐渐发展起来成为胶凝体，此时表现为水泥的初凝状态，开始有胶粘的性质。此后，水泥各成分在不缺水、不干涸的情况下，继续不断地按上述水化程序发展、增强和扩大，从而产生下列现象：①胶凝体增大并吸收水分，使凝固加速，结合更密；②由于微晶(结晶核)的产生进而产生出结晶体，结晶体与胶凝体相互包围渗透并达到一种稳定状态，这就是硬化的开始；③水化作用继续深入到水泥微粒内部，使未水化部分再充盈为止。但无论水化时间持续多久，很难将水泥微粒内核全部水化完了，所以水化过程是一个长久的过程。

三、加固土的基本性质

1. 直径较大

旋喷固结体的直径大小与土的种类和密实程度有密切的关系。对粘性土地基加固，单管旋喷注浆加固体直径一般为 0.3～0.8m；三重管旋喷注浆加固体直径可达 0.7～1.8m；二重管旋喷注浆加固体直径介于以上两者之间。多重管旋喷直径为 2.0～4.0m，旋喷桩的设计直径见表 4-4。定喷和摆喷的有效长度约为旋喷桩直径的 1.0～1.5 倍。

表 4-4 旋喷桩的设计直径(m)

土质 \ 方法		单管法	二重管法	三重管法
粘性土	$0<N<5$	0.5～0.8	0.8～1.2	1.2～1.8
	$5<N<10$	0.4～0.7	0.7～1.1	1.0～1.6
	$11<N<20$	0.3～0.6	0.6～0.9	0.7～1.2
砂性土	$0<N<10$	0.6～1.0	1.0～1.4	1.5～2.0
	$11<N<20$	0.5～0.9	0.9～1.3	1.2～1.8
	$21<N<30$	0.4～0.8	0.8～1.2	0.9～1.5

注：N 值为标准贯入击数。

2. 固结体形状可不同

在均质土中，旋喷的圆柱体比较匀称；而在非均质土或有裂隙土中，旋喷的圆柱体不匀称，甚至在圆柱体旁长出翼片。由于喷射流脉动和提升速度不均匀，固结体的外表很粗糙。三重管旋喷固结体受气流影响，在粉质砂土中外表格外粗糙。

固结体的形状可通过喷射参数来控制，大致可喷成均匀圆柱状、非均匀圆柱状、圆盘状、板墙状及扇形状。

在深度大的土中，如果不采用其他措施，旋喷圆柱固结体可能出现上粗、下细似胡萝卜的形状。

3. 重量轻

固结体内部土粒少并含有一定数量的气泡。因此，固结体的重量较轻，轻于或接近于原状土的密度。粘性土固结体比原状土轻约10%，但砂类土固结体也可能比原状土重10%。

4. 渗透系数小

固结体内虽有一定的孔隙，但这些孔隙并不贯通，而且固结体有一层较致密的硬壳，其渗透系数达 10^{-6}cm/s 或更小，故具有一定的防渗性能。

5. 固结强度高

土体经过喷射后，土粒重新排列，水泥等浆液含量大。由于一般外侧土颗粒直径大，数量多，浆液成分也多，因此在横断面上中心强度低，外侧强度高，与土交换的边缘处有一圈坚硬的外壳。

影响固结强度的主要因素是土质和浆材，有的使用同一浆材配方，软粘土的固结强度成倍地小于砂土固结强度。

6. 单桩承载力高

旋喷柱状固结体有较高的强度，外形凸凹不平，因此有较大的承载力，固结体直径愈大，承载力愈高。

固结体的基本性质如表 4-5 所示。

四、设计计算

(一)旋喷直径确定

通常应根据估计直径来选用喷射注浆的种类和喷射方式。对于大型的或重要的工程，估计直径应在现场通过试验确定。在无试验资料的情况下，对小型的或不太重要的工程，可根据经验选用表 4-5 所列数值。可采用矩形或梅花形布桩型式。

表 4-5　高压喷射注浆固结体性质一览表

固结体性质 \ 喷注种类		单管法	二重管法	三重管法
单桩垂直极限荷载(kN)		500～600	1000～1200	200
单桩水平极限荷载(kN)		30～40		
最大抗压强度(MPa)		砂类土 10～20，粘性土 5～10，黄土 5～10，砂砾 8～20		
平均抗剪强度/平均抗压强度		1/5～1/10		
弹性模量(MPa)				
干密度(g/cm³)		砂类土 1.6～2.0	粘性土 1.4～1.5	黄土 1.3～1.5
渗透系数(cm/s)		砂类土 10^{-5}～10^{-6}	粘性土 10^{-6}～10^{-7}	砂砾土 10^{-5}～10^{-7}
C(MPa)		砂类土 0.4～0.5	粘性土 0.9～1.0	
φ(°)		砂类土 30～40	粘性土 20～30	
N(击数)		砂类土 30～50	粘性土 20～30	
弹性波速 (km/s)	P 波	砂类土 2～3	粘性土 1.5～20	
	S 波	砂类土 1.0～1.5	粘性土 0.8～1.0	
化学稳定性能		较　好		

(二)地基承载力计算

用旋喷桩处理的地基，应按复合地基计算。旋喷桩复合地基承载力标准值应通过现场复合地基荷载试验确定，也可按下式计算或结合当地情况与其土质相似工程的经验确定。即：

$$f_{sp,k}=\frac{1}{A}[R_k^d+\beta f_s,K(A_e-A_p)] \tag{4-28}$$

式中：$f_{sp,k}$为复合地基承载力标准值(kPa)；A_e为一根桩承担的处理面积(m²)；A_p为桩的平均截面积(m²)；β为桩间天然地基土承载力折减系数，可根据试验确定，在无试验资料时，可取 0.2～0.6，当不考虑桩间软土的作用时，可取零；R_k^d为单桩竖向承载力标准值(kN)，可通过现场载荷试验确定，也可按下列两式计算，并取其中较

小值：

$$R_a^d = \eta \cdot f_{cu,k} \cdot A_p \tag{4-29}$$

$$R_a^d = \pi d \sum_{i=1}^{n} h_i \cdot q_{si} + A_p \cdot q_p \tag{4-30}$$

式中：$f_{cu,k}$为桩身试块(边长为 70.7mm 的立方体)的无侧限抗压强度平均值(kPa)；η 为强度折减系数，可取 0.35～0.50；n 为桩长范围内所划分的土层数；h_i 为桩周第 i 层土的厚度(m)；q_{si}为桩周第 i 层土的摩擦力标准值，可采用钻孔灌注桩侧壁摩擦力标准值(kPa)；q_p 为桩端天然地基土的承载力标准值(kPa)，可按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)第三章第二节的有关规定确定。

旋喷桩单桩承载力的规定，基本出发点是与钻孔灌注桩相同，但在以下方面有所差异。

1. 桩径与桩的面积

由于旋喷桩桩身的均匀性较差，因此选用比灌注桩更高的安全度；另外桩径与土层性质及喷射压力有关，而这两个因素并非固定不变，所以在计算中规定选用平均值。

2. 桩身强度

设计规定按 28d 强度计算。试验证明，在粘性土中，由于水泥水化物与粘土矿物继续发生作用，故 28d 后的强度将会继续增长，这种强度的增长为安全储备。

3. 综合判断

由于影响旋喷单桩承载力的因素较多，因此除了依据现场试验和规范所提供的数据外，尚需结合本地区或相似土质条件下的经验作出综合判断。

采用复合地基的模式进行承载力计算的出发点，是考虑到旋喷桩的强度较低(与混凝土桩相比)和经济性两方面。如果桩的强度较高，并接近于混凝土桩身强度，以及当建筑物对沉降要求很严格时，则可以不计桩间土的承载力，全部外荷载由旋喷桩承担，即 $\beta=0$，在

这种情况下，则与混凝土桩计算相同。

（三）地基变形计算

旋喷桩的沉降计算应为桩长范围内复合土层以及下卧层地基变形值之和，计算时应按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)的有关规定进行计算。其中复合土层的压缩模量可按下式确定：

$$B_{sp}=\frac{E_s(A_s-A_p)+E_p\cdot A_p}{A_s} \tag{4-31}$$

式中：B_{sp}为旋喷桩复合土层的压缩模量(kPa)；E_s为桩间土的压缩模量，可用天然地基土的压缩模量代替(kPa)；E_p为桩体的压缩模量，可采用测定混凝土割线模量的方法确定(kPa)。

由于旋喷桩迄今积累的沉降观测及分析资料很少，因此，复合地基变形计算的模式均以土力学和混凝土材料性质的有关理论为基础。

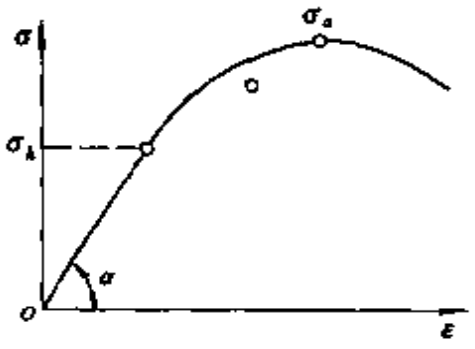


图 4-16　σ-ε 曲线

由于旋喷桩的强度远远高于土的强度，因此确定旋喷桩压缩模量采用混凝土确定割线弹性模量的方法，就是在试块的应力-应变曲线(σ-ε)中，连接 o 点至某一应力 σ_h 处割线的正切值(图 4-16)。即：

$$E_p=\mathrm{tg}\alpha \tag{4-32}$$

σ_h 值取 0.4 倍破坏强度 σ_a，做割线模量的试块边长为 100mm 的立方体。

由于旋喷桩的性质接近混凝土的性质，同时采用 0.4 的折减系数与旋喷桩强度折减值也相近，故在《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91)中规定了采用这种计算方法。

(四)防渗堵水设计

防渗堵水工程设计时，最好按双排或三排布孔形成帷幕(图 4-17)。孔距应为 $1.73R_0$(R_0 为旋喷设计半径)、排距为 $1.5R_0$ 最经济。

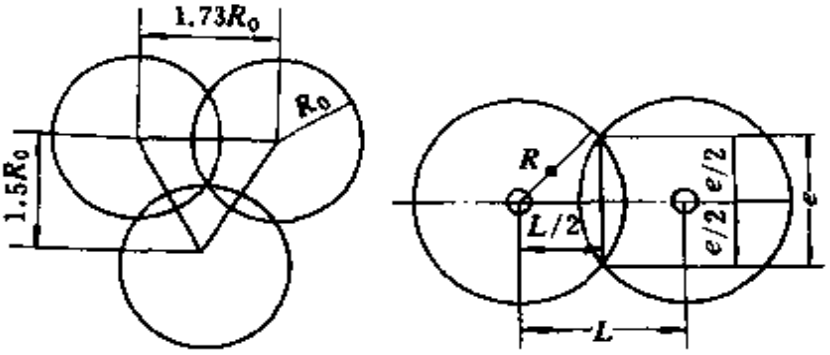


图 4-17　布孔孔距和旋喷注浆固结体交联图

若想增加每排旋喷桩的交圈厚度，可适当缩小孔距，按下式计算孔距：

$$e=2\sqrt{R_0^2-(\frac{L}{2})^2} \tag{4-33}$$

式中：e 为旋喷桩的交圈厚度(m)；R_0 为旋喷桩的半径(m)；L 为旋喷桩孔位的间距(m)。

定喷和摆喷是一种常用的防渗堵水的方法，由于喷射出的板墙壁长，不但成本较旋喷低，而且整体连续性亦高。

相邻孔定喷连接型式如图 4-18 所示。摆喷防渗帷幕型式如图 4-19 所示。

(五)浆量计算

浆量计算有两种方法，即体积法和喷量法，取其大者作为设计喷射浆量。

1. 体积法

体积法的计算公式为：

$$Q=\frac{\pi}{4}D_e K_1 h_1(1+\beta)+\frac{\pi}{4}D_e K_2 h_2 \tag{4-34}$$

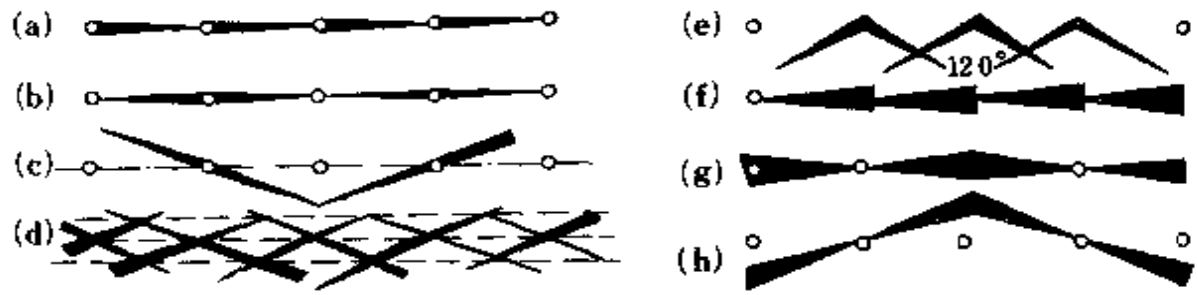


图 4-18　定喷帷幕型式示意图

(a)单喷嘴单墙首尾连接；(b)双喷嘴单墙前后对接；(c)双喷嘴单墙折线连接；(d)双喷嘴双墙折线连接；(e)双喷嘴夹角单墙连接；(f)单喷嘴扇形单墙首尾连接；(g)双喷嘴扇形单墙前后连接；(h)双喷嘴扇形单墙折线连接

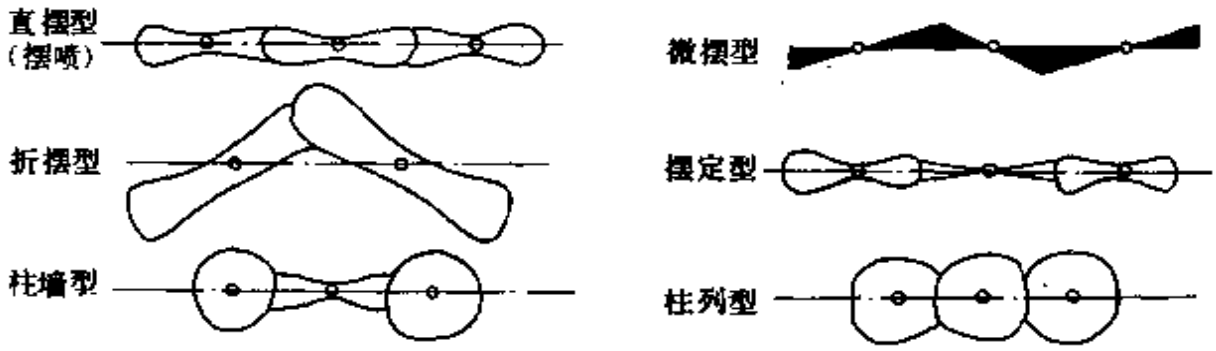


图 4-19　摆喷防渗帷幕型式示意图

式中：Q 为需要用的浆量(m^3)；D_e 为旋喷体直径(m)；D_0 为注浆管直径(m)；K_1 为填充率(0.75～0.9)；h_1 为旋喷长度(m)；K_2 为未旋喷范围土的填充率(0.5～0.75)；h_2 为未旋喷长度(m)；β 为损失系数(0.1～0.2)。

2. 喷量法

以单位时间喷射的浆量及喷射持续时间计算出浆量，计算公式为：

$$Q=\frac{H}{v}q(1+\beta) \tag{4-35}$$

式中：Q 为浆量(m^3)；v 为提升速度(m/min)；q 为单位时间喷浆量(m^3/min)；H 为喷射长度(m)；β 为损失系数，通常取 0.1～0.2。

根据计算所需的喷浆量和设计的水灰比，即可确定水泥的使用数量。

(六)浆液材料与配方

喷射注浆是靠高压液流的冲击力破坏土层并与土体混合构成新的固结体，而静压注浆主要靠液流的渗透、压密和劈裂填充土体的空隙。因此，喷射注浆对浆液的要求与静压注浆有所不同，对材料种类、粘度与颗粒大小要求不再像静压注浆那样严密。详细参见第二章。

第三节　劈裂灌浆设计计算

一、堤坝地基劈裂灌浆

堤坝地基劈裂灌浆防渗技术是 1980 年以后发展起来的一项新技术。它的研究成功，是继“土堤坝体劈裂灌浆”技术之后，在土坝灌浆史上又一项具有深远影响的灌浆技术。它打破了长期以来认为中细砂层不可灌的传统观念，在一定范围内以新的灌浆理论解决了粉细砂及土砂夹层堤坝透水地基的渗漏问题。该项技术具有设备简单、容易操作、效果好、工程造价低等优点，主要适用于堤坝软基附加应力场主要影响范围以内的土砂夹层或粉细砂层地基的防渗问题，尤其是对由于地下水位下降引起的堤坝地基裂缝尤为适用。对于砾卵石堤坝地基或防渗深度超过堤坝地基应力场主要影响范围以外的防渗问题则不宜采用。

(一)堤坝地基劈裂灌浆机理

1. 堤坝地基定向劈裂的必要条件

(1)钻孔的起裂压力

在受垂直方向主应力 σ_1、水平方向主应力 σ_2 和 σ_3 作用的地层钻

孔(相当于堤坝对称轴线上钻孔),并在孔内下套管,孔口设阻塞器进行压力灌浆时,根据弹性理论,在主应力 σ_2 和 σ_3 的平面上,孔壁面最小切线方向的应力 σ_T 为:

$$\sigma_T = 3\sigma_3 - \sigma_2 - p_1 \tag{4-36}$$

式中:σ_3 为最小水平应力(MPa);σ_2 为最大水平应力(MPa),相当于三向应力状态的第二主应力,对于平面应变问题,$\sigma_2=\mu(\sigma_1+\sigma_3)$;$p_1$ 为灌浆压力(MPa)。

由上式可看出,当 $p_1>3\sigma_3-\sigma_2$ 时,σ_T 为负值,即出现拉应力,当 $p_1>3\sigma_3-\sigma_2+\sigma_T$ 时,即发生纵向劈裂,所以在堤坝地基附加应力场内,堤坝地基定向劈裂的起裂压力公式应为:

$$p_b=a\cdot\sigma_3-\sigma_2+\sigma_t \tag{4-37}$$

式中:σ_t 为土的抗拉强度(MPa);a 为圆孔的应力集中系数,对于线弹性体 $a=3.0$,对于坝体或坝基,由于它们本身的物理力学性质和受力条件不同,所以 a 值亦不相同,由厚型试验测得,在坝体 $a=2.5\sim3.0$,在坝基中 $a=3\sim4.0$。

(2)裂缝扩展压力

圆孔起裂后成为带有裂纹的圆孔,根据一般断裂力学理论,裂缝的扩展压力满足下面关系式:

$$p_c=\frac{G(l/a)}{F(l/a)}\sigma_3+\left(1-\frac{G(l/a)}{F(l/a)}\right)\sigma_2+\frac{K_{Ic}}{F(l/a)\sqrt{\pi l}} \tag{4-38}$$

式中:l 为裂缝长度(m);a 为圆孔半径(m);K_{Ic} 为裂缝扩展时临界强度因子。

根据有关文献可知,当 $l/a\geqslant10$ 时,$F(l/a)=G(l/a)=1$,这时公式(4-43)将变为:

$$p_c=\frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi l}}+\sigma_3 \tag{4-39}$$

当 $l\to\infty$ 时,则 $p_c\to\sigma_3$,所以这时的 p_c 即为裂缝的关闭压力 p_s,也就是裂缝扩展中止时的压力,这样 K_{Ic} 应由裂缝中止时的临界强度

因子 K_{Ic} 代替，这时公式(4-39)变为：

$$p_s=\frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi l}}+\sigma_3 \tag{4-40}$$

当裂缝扩展很长时，p_s 近似为 σ_3，所以有人建议利用关闭压力测试土体中的小主应力。

(3)浆液的劈裂压力

浆液通过注浆管传递给堤坝本身或地基的压力，可用下式计算：

$$P_1=\Delta p+\gamma_{浆}\cdot h'\cdot g-\eta\cdot h' \tag{4-41}$$

式中：p_1 为注浆管下端出口处的浆液压力(kPa)；Δp 为孔口压力(kPa)；$\gamma_{浆}$ 为浆液密度(t/m³)；h' 为注浆管深度(m)；η 为注浆管摩阻系数。

如果在地下水位以下，式(4-37)至式(4-41)还应减去孔隙水压力。

由式(4-37)至式(4-41)还可以看出，在堤坝地基附加应力场内，当 $p_1>p_0$ 时钻孔起裂；当 $p_1>p_c$ 时，裂缝扩展。

(4)砂层地基劈裂的有效应力分析

为了论证砂层地基的可劈性，有人利用库伦-莫尔破坏准则分析了堤坝地基灌浆时的有效应力状态。假设堤坝地基中点处深度为 h 点的大、小总应力为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1&=\gamma h\\ \sigma_3&=\xi\gamma h\end{aligned}\right\} \tag{4-42}$$

该点的有效大小主应力则表示为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1'&=\gamma h-\gamma_w h_w\\ \sigma_3'&=\xi(\gamma h-\gamma_w h_w)\end{aligned}\right\} \tag{4-43}$$

式中：γ 为土的天然密度(t/m³)；γ_w 为水的密度(t/m³)；h_w 为计算点的孔隙水压力水头(m)。

当施加一定的灌浆压力 p 后，该点的有效应力表示形式则有：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1' &= \gamma h - \gamma_w h_w - p \\ \sigma_3' &= \xi(\gamma h - \gamma_w h_w) - p\end{aligned}\right\} \tag{4-44}$$

如果利用上述三式，绘制莫尔圆则可以看出，随着计算点孔隙水压力的增加，有效应力的莫尔圆逐渐向原点靠近，如图 4-20 所示。当有效应力圆与莫尔-库仑强度包线相切时，土体将发生水力劈裂现象，这时的灌浆压力可用下式表示：

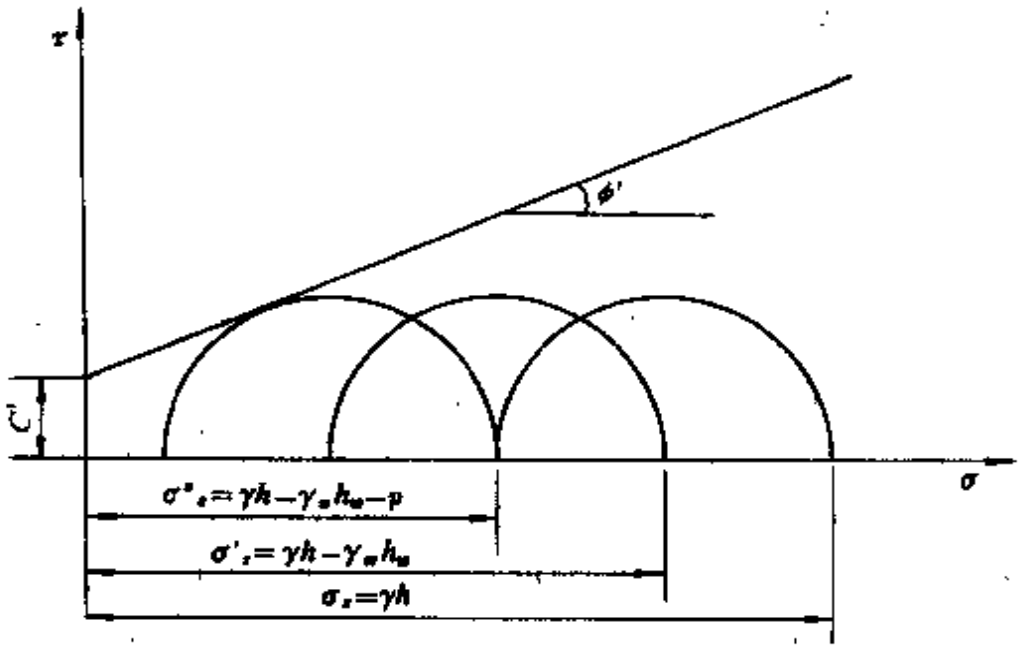


图 4-20　灌浆压力引起的莫尔圆移动

$$p=\frac{(\gamma h-\gamma_w h_w)(1+\xi)}{2}-\frac{(\gamma h-\gamma_w h_w)(1-\xi)}{2\sin\varphi}+C'\cot\varphi \tag{4-45}$$

式中：C'、φ' 为有效应力抗剪强度指标。

工程实践证明，上述公式适用于颗粒级配良好的中细砂不可灌地层，对于颗粒级配不好的可灌砂砾石层地基则不宜适用。

2. 堤坝地基定向劈裂的基本规律

由前述可知，堤坝地基应力场，在一定深度范围内属平面问题，在地基中有一个明显的铅直小主应力面。为此，浆液劈裂堤坝地基具有如下规律：

(1)堤坝地基的定向劈裂，主要发生在附近荷载对地基内小主应力的主要影响范围内，超过这个范围，就不能实现定向劈裂。

(2)根据有关学者对带有任意方位裂隙的圆孔研究，在拉力场中，所有裂隙尖端的开裂方向为垂直于最大拉应力方向；若在压力场中裂隙开裂的初始方向则垂直于最小主应力方向。

(3)定向劈裂堤坝地基的灌浆轴线，只有设在堤坝轴线附近构筑的浆体防渗帷幕才是铅直的，因为堤坝地基轴线以外的小主应力面已不再是铅直的了。在这些地方布孔，所形成的帷幕很容易发生偏斜。

(二)堤坝地基劈裂灌浆设计

1. 浆液选择

堤坝地基劈裂灌浆所用浆液不同于土坝坝体和土堤的灌浆，因为堤坝地基劈裂灌浆是解决堤坝透水砂层的渗漏问题。所以，它所用的浆液一般是粘土水泥浆或以粘土、水泥、膨润土为主的其他自凝浆液，也可是粘土固化浆液(即粘土加固化剂)，对浆液要求具有良好的流动性和稳定性，并在一定的时间内达到凝固，对于所形成的浆液结石应具有一定的强度和抗渗性能。各种配比、浆液性能、选择原则等参见本册浆液材料一节，这样可根据不同工程要求选择合适的浆液。

2. 灌浆帷幕设计

(1)帷幕设计深度

灌浆帷幕的深度，一般是根据工程对渗流控制的要求来确定。例如，有的工程要求控制渗透坡降或流速，使之不发生渗透变形，以保

证地基和坝体的渗透稳定性；也有的工程要求控制渗流量，使渗漏水尽量降低到最小。由于不同工程对渗流控制的目的要求不同，所以对帷幕的深度要求亦不相同。从帷幕封堵整个透水砂层的程度来看，可分为两种，即接地式帷幕和悬挂式帷幕。

对穿过整个透水砂砾石层，直接到基岩或相对不透水层的帷幕叫接地式帷幕，这种帷幕具有全部封闭渗流通道的作用，如图 4-21 所示。一般在砂砾石层上修建大坝，大坝采用这种形式的帷幕。帷幕深入基岩或相对不透水层的深度，根据地质条件与工程的具体情况而定，一般不少于 2～5m。如果透水层很深，远远超出堤坝地基附加应力场以外，这时用堤坝地基劈裂灌浆技术构造接地式帷幕是不能奏效的。

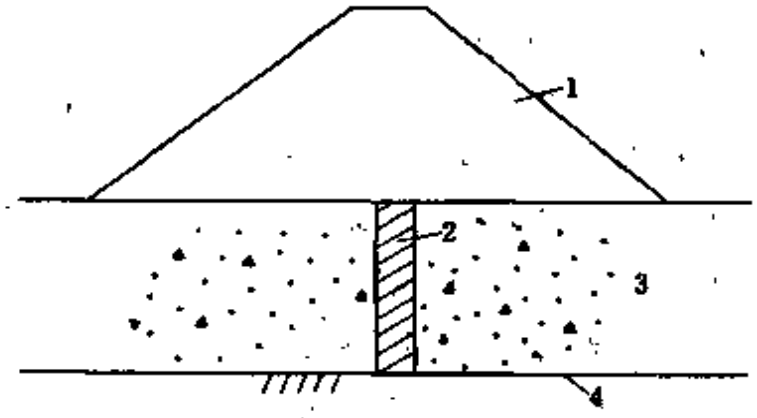


图 4-21　接地式帷幕

1—坝体；2—帷幕；3—覆盖层；4—不透水岩层

未穿过整个透水砂砾石层的帷幕叫悬挂式帷幕，如图 4-22 所示。在砂砾石层很厚、基岩或相对不透水层埋藏很深的情况下，为满足基础防渗或工程安全的要求，也可采用悬挂式防渗帷幕。

目前确定悬挂式帷幕深度的方法通常有以下几种方法：

①以防渗效果来确定帷幕深度　就是根据已知透水地基的渗透系数 K、覆盖层厚度 c 和上下游水位差 H 等已知条件，参考计算绘制的防渗效果$(1-q/q_0)$与相对深度(d/c)的关系曲线，如图 4-23 所

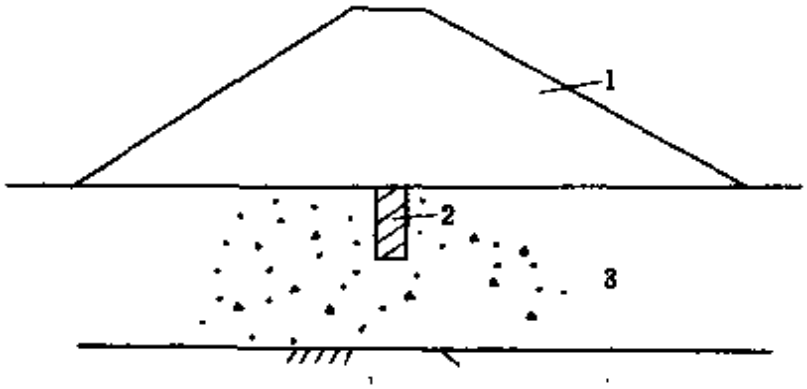


图 4-22　悬挂式帷幕

1—坝体；2—帷幕；3—覆盖层；4—不透水岩层

示（q_0 为不设防渗墙，即 $d=0$ 时的单宽渗流量；q 为防渗墙为某一深度 d 时的渗流量）。然后根据工程对防渗效果的要求，可以直接从图上查出所对应的 d/c 比值，由此可以得出对应于防渗效果时所应该设置的悬挂式防渗墙深度 d 值。

②以下游出逸渗透坡降来确定悬挂式帷幕深度　以除险加固为目的的河道堤基的渗流控制，通常采用此法。也就是使所设悬挂式帷幕后的堤坝基础渗流的下游出逸坡降，等于或小于下游土层的允许渗透坡降时的悬挂式帷幕深度即为所求深度。确定堤坝下游出逸坡降的方法较多，现就常用的几种方法介绍如下：③堤坝地基透水层为无限深的情况，见图 4-24。坝基透水层无限厚情况，H. H. 巴甫洛夫斯基曾给出下述解答。沿底板上游部分地基的水头为：

$$h=H\left\{1-\frac{1}{n}\arccos\left[-\frac{1}{a}\left(b+\sqrt{1+\left(\frac{x}{s}\right)^2}\right)\right]\right\} \tag{4-46}$$

式中：$a=0.5\times\left[\sqrt{1+\left(\frac{b_1}{s}\right)^2}+\sqrt{1+\left(\frac{b_2}{s}\right)^2}\right]$；$b=0.5\times\left[\sqrt{1+\left(\frac{b_2}{s}\right)^2}-\sqrt{1+\left(\frac{b_1}{s}\right)^2}\right]$

$$-b_1\leqslant x\leqslant 0$$

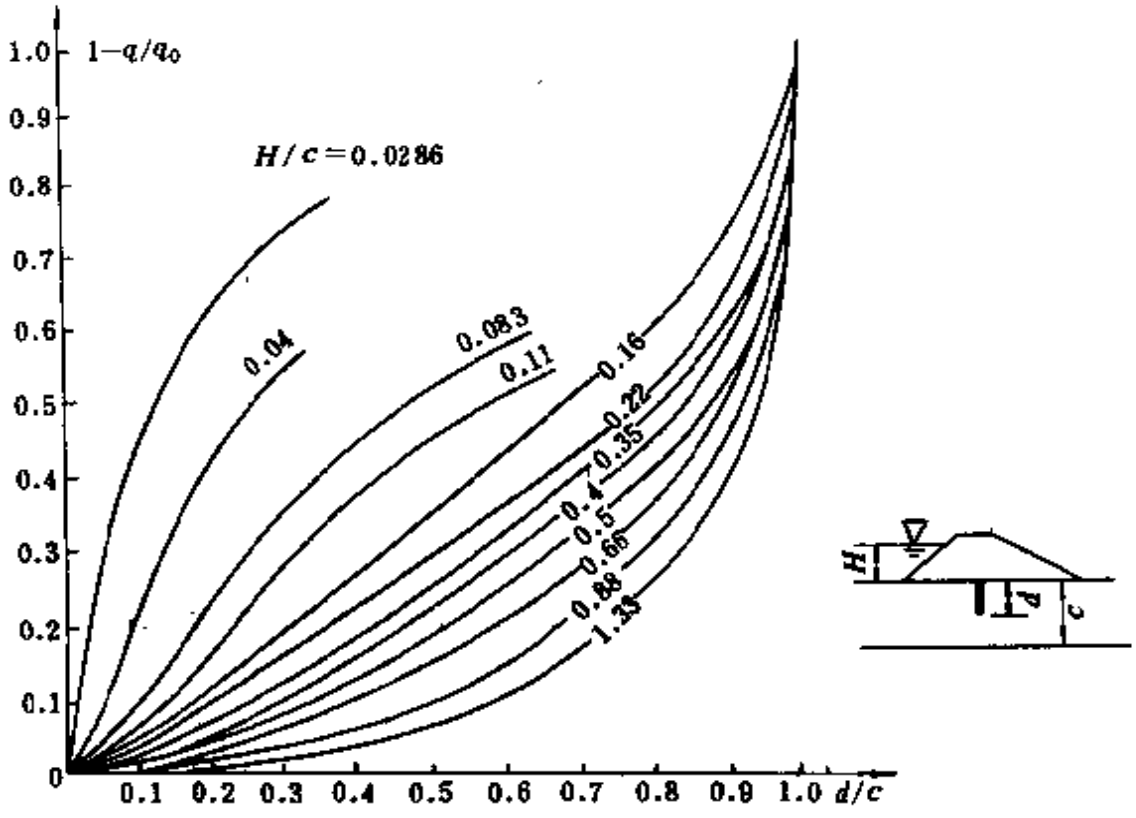


图 4-23　防渗帷幕或板墙的相对深度与防渗效果关系曲线图

($K_{地}=1\times10^{-2}$cm/s)

沿底板下游部分地基的水头为：

$$h=\frac{H}{\pi}\arccos\left\{\frac{1}{a}\left[\sqrt{1+(\frac{x}{s})^2}-b\right]\right\} \tag{4-47}$$

式中：$0\leqslant x\leqslant b_2$。

沿悬挂墙面上的水头分布计算公式为：

$$h=\frac{H}{\pi}\arccos\left\{\frac{1}{a}\left[b\pm\sqrt{1+(\frac{y}{s})^2}\right]\right\} \tag{4-48}$$

式中：在帷幕或板墙的上游面取负号，下游面取正号，由上游流入的渗流量为：

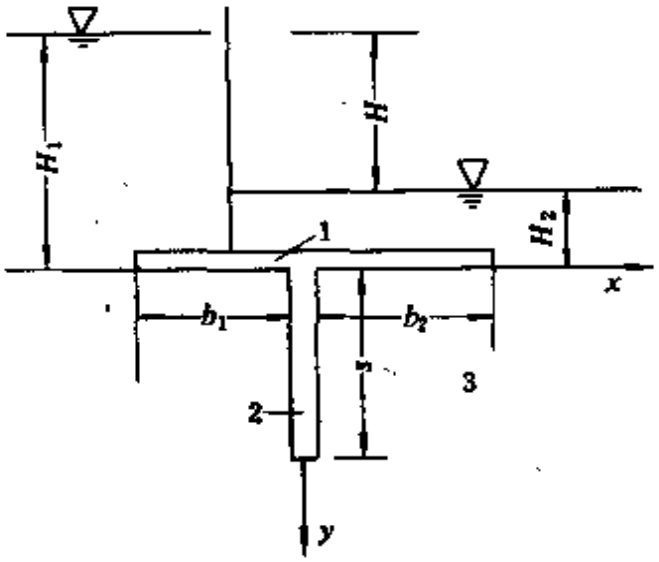


图 4-24　坝基透水层无限厚时坝体与坝基不透水轮廓简图

1—坝底不透水轮廓；2—悬挂式防渗帷幕或板墙；3—砂砾石层

$$q=K\cdot H\,\frac{1}{\pi}\arccos\left\{\frac{1}{a}\left[\sqrt{1+\left(\frac{x}{s}\right)^2}+b\right]\right\} \tag{4-49}$$

$$-\infty\leqslant x\leqslant -b_1$$

式中：K 为坝基渗透系数。

下游出逸坡降为：

$$J=\frac{H}{\pi s}\cdot\frac{x}{\sqrt{s^2+x^2}\cdot\sqrt{\left[\sqrt{1+\left(\frac{x}{s}\right)^2}-a\right]^2-b^2}} \tag{4-50}$$

$$b_2\leqslant x\leqslant\infty$$

⑥堤坝地基透水层有限厚情况。当堤坝水层为有限深时悬挂防渗墙深度与地基深度之比为一个任意数的情况，此时可在比例尺较大的坝体剖面图上直接绘制流网图，见图 4-25。位于透水轮廓末端，邻接下游地基最后两根等势线所求出渗透坡降 J，即为下游出逸坡降。当下游出逸坡降等于或小于下游土层的允许渗透坡降时的帷幕悬挂深

度即为所求悬挂深度，或在出口出逸坡降较大处辅以反滤排水保护，直至小于允许渗透坡降区。

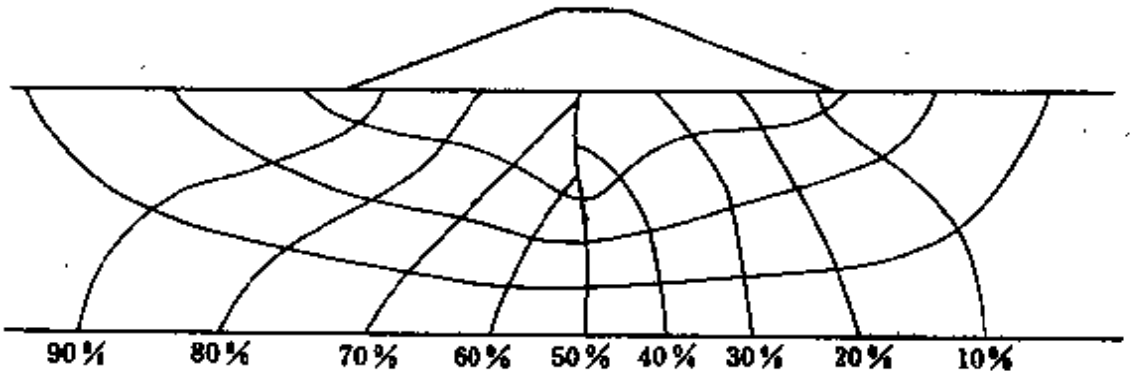


图 4-25　大沽河堤流网图

③莱恩(Lane)统计法　莱恩通过对数百座建在不同地基上的巧工建筑物进行研究和统计后，认为水平和垂重方向的渗径不应该起着相同的作用，1m 垂直方向渗径，约相当于 3m 长水平方向渗径的效用，他假定基础轮廓的有效长为：

$$L_0 = L_{垂直} + 1/3L_{水平} \qquad (4\text{-}51)$$

L_0 必须比壅高水头大 C_0 倍，即：

$$L_0 = C_0 H \qquad (4\text{-}51')$$

式中：H 为水头(见图 4-26)；C_0 称为加权爬比，基值在 1.6～8.5 之间，视坝基土的种类而定。

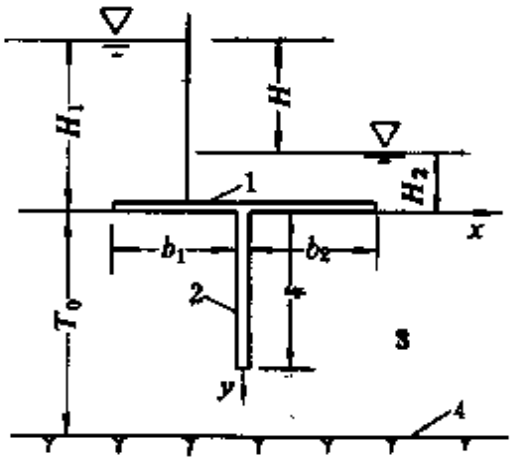


图 4-26　坝体和坝基不透水轮廓简图
1—坝底不透水轮廓；2—悬挂式防渗帷幕或板墙；3—砂砾石层；4—不透水基岩

根据莱恩所统计的成果，不同坝基土类的 C_0 值及平均坡降列入表 4-8。由图 4-26 所

示轮廓，即：

$$L_0 = \frac{b}{3} + 2s = C_0 H \tag{4-52}$$

式中：b 为水头轮廓长度(m)；$b=b_1+b_2$；s 为悬挂墙深度(m)。

由不同坝基土类查出 C_0 后，便可求出 L_0，由式(4-53)转换后得悬挂墙深度为：

$$s = \frac{L_0 - \frac{b}{3}}{2} \tag{4-53}$$

式中：符号意义同前。

莱恩还认为，当坝下设有板桩和反滤层或排水孔时，加权爬比 C_0 值可降低 30%，降低后的 C_0' 值及 J' 平均值同样列入表 4-6 中。

近几年来通过对莱恩法研究，发现此法还存在某些缺点，但是由于该法简单，故较广泛用于均质地基上的低坝初步计算。

表 4-6　坝基土类与 C_0 值及 J 平均值的关系表

编号	坝基土类	C_0	J 平均	C_0'	J' 平均
1	极细的砂、淤泥	8.5	0.12	6.0	0.17
2	细　砂	7.0	0.14	4.9	0.20
3	中粒砂	6.0	0.17	4.2	0.24
4	粗　砂	5.0	0.20	3.5	0.29
5	细砾石	4.0	0.25	2.8	0.36
6	中砾石	3.5	0.29	2.5	0.40
7	含砾石的粗砂	3.0	0.33	2.1	0.48
8	软粘土	3.0	0.33	2.1	0.48
9	含卵石和砾石漂石	2.5	0.40	1.8	0.56
10	中等密实粘土	2.0	0.50	1.5	0.67
11	密实粘土	1.8	0.55	1.5	0.67
12	极密实粘土	1.6	0.67	1.5	0.67

(2)帷幕厚度设计

灌浆帷幕厚度的设计是一个复杂问题，很难用一个简单的公式

表示出来，在以往的有关大坝基础灌浆书中，帷幕厚度的设计，主要依靠帷幕体内的允许渗透坡降值来确定，并规定其允许坡降值一般采用 2.3～3，个别工程最大采用到 6。但许多工程实际帷幕并没有达到上述设计的厚度，也都安然无恙。经过大量浆体的渗透破坏实验证明，上述一些规定与实际情况不符，经试验，一般浆体的渗透破坏坡降在粗砾的保护条件下，在数百以上，其允许渗透坡降也都在 100 以上。所以在进行灌浆帷幕厚度设计时，建议应首先对所用浆液不同龄期的结石进行渗透破坏试验，来确定所用浆液形成的浆体帷幕的允许渗透坡降。帷幕厚度可用下列公式计算。

①均质土坝(图 4-27)　首先修建帷幕的厚度应使下游出逸渗透坡降等于下游土层的允许渗透坡降。即令：

$$\frac{H_0-H_1}{L+\frac{K_0}{K}b}=J_{允} \tag{4-54}$$

所以

$$b=\frac{H_0-H_1}{J_{允}\frac{K_0}{K}}-\frac{L}{\frac{K_0}{K}} \tag{4-55}$$

$$L=L_0+L_1$$

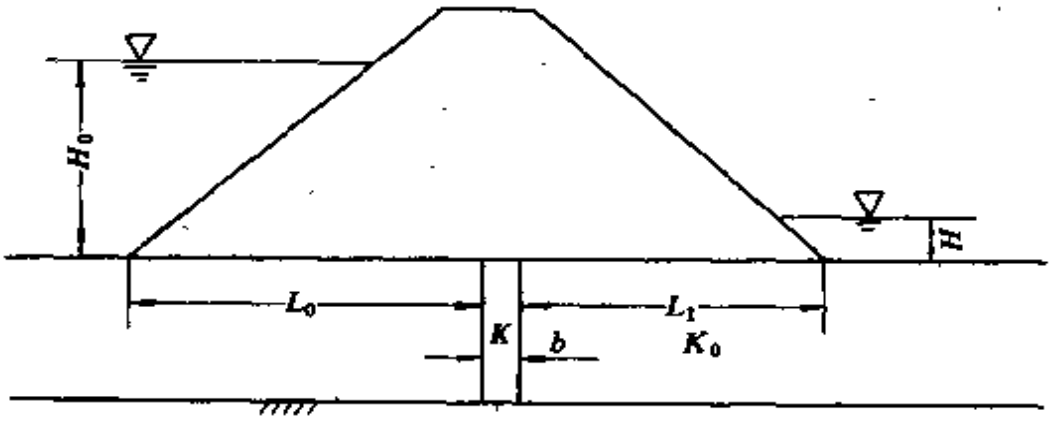


图 4-27　均质土坝有限透水深地基防渗帷幕轮廓示意图

式中：H_0 为上游水深(m)；H_1 为下游水深(m)；K_0 为透水坝基渗透系数；K 为帷幕宽度(m)；$J_{允}$ 为下游土层允许渗透坡降；L_0 为帷幕前渗径(m)；L_1 为帷幕后渗径(m)；b 为为满足下游允许渗透坡降时的所需帷幕厚度。

然后再求防渗帷幕所承受的水头 Δh：

$$\Delta h = b\frac{K_0}{K}\cdot\frac{H_0-H_1}{L} \tag{4-56}$$

由式(4-56)可求出防渗帷幕所承受的渗透坡降 J_1，即：

$$J_1 = \frac{b\dfrac{K_0}{K}\cdot\dfrac{H_0-H_1}{L}}{b} = \frac{K_0}{K}\cdot\frac{H_0-H_1}{L} \tag{4-57}$$

然后再用帷幕实际承受的坡降 J_1 和帷幕的允许渗透坡降 J_2 的比值，修正求出的帷幕厚度 b 得帷幕应有的厚度 b'，即：

$$b' = b\frac{J_1}{J_2} \tag{4-58}$$

式中：b' 为修正后的帷幕厚度(m)；b 为修正前的帷幕厚度(m)；J_1 为修正前帷幕承受的渗透坡降；J_2 为幕体的允许渗透坡降。

②砂壳心墙坝 （图 4-28） 该类型坝的帷幕厚度可按下式计算：

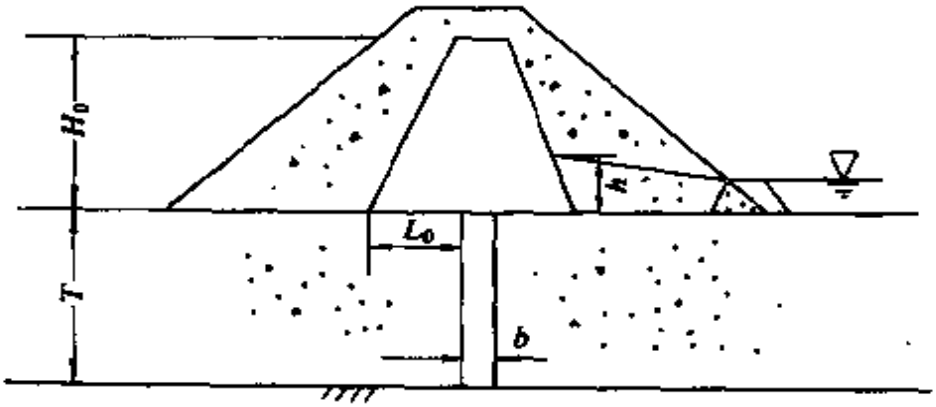


图 4-28 砂壳心墙坝有限深透水地基防渗帷幕轮廓示意图

$$b=\frac{H_0-h}{J\left(1-\frac{K_1}{K_0}\right)}-\frac{L_0}{\frac{K_0}{K_1}-1} \tag{4-59}$$

式中：b 为帷幕厚度(m)；H_0 为坝前水深(m)；h 为心墙下游浸润线起端处的水深(m)；J 为帷幕允许坡降；L_0 为帷幕前透水岩层(m)；K_0 为砂砾石层的渗透系数；K_1 为帷幕体的渗透系数。

3. 灌浆压力设计

灌浆压力是堤坝灌浆设计中一个重要参数，它直接关系着灌浆期堤坝的安全与灌浆质量的好坏，所以在灌浆设计中都很重视。灌浆压力的大小不仅与堤坝的断面尺寸、地质条件等因素有关，而且还与有无蓄水情况有关，所以不能用一个公式准确地表达出来，应根据不同情况通过灌浆试验和理论计算合理确定。

(1)堤坝地基的抗劈力 p_2，可用下式计算：

$$p_2=\sigma_1\pm\sigma_3 \tag{4-60}$$

式中：σ_3 为堤坝地基附加应力场内的小主应力，在受拉区取负；在受压区取正值；σ 为土的抗拉强度。

(2)浆液的劈裂压力 p_1 可用式(4-42)计算，如果忽略浆液在管路中的摩阻力，可简化为：

$$p_1=h'\gamma_{浆}\,g+\Delta p \tag{4-61}$$

式中：符号意义同前。

(3)钻孔的起裂压力 p_b 可用以下方法计算：在堤坝地基附加应力场内，即符合 $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ 的条件下，钻孔进行压力灌浆时，钻孔的起裂压力 p_b 可用式(4-38)计算。

(4)裂缝的扩展压力 p_c 可用式(4-39)或式(4-40)计算。

(5)最大控制灌浆压力 p_{max} 可用下式计算，即：

$$p_{max}=\gamma gh+\sigma_1 \tag{4-62}$$

式中：h 为被劈点以上土柱高度(m)；γ 为被劈地层土的天然重度

(kN/m³)。

(6)最大控制孔口压力 Δp_{max}，此时注意到 $\Delta p=\Delta p_{max}$，$p'=p_{max}$，由式(4-61)和式(4-62)即可得：

$$\Delta p_{max}=h\gamma g+\sigma_1-h'\gamma_{浆}g \tag{4-63}$$

当 $h=h'$ 时，式(4-63)变为：

$$\Delta p_{max}=h(\gamma-\gamma_{浆})g+\sigma \tag{4-64}$$

式中：符号意义同前。

4. 孔位、孔深及孔距的设计

钻孔应设在堤坝轴线附近。为了提高防渗效果，灌浆轴线一般设在堤坝轴线稍偏上游的地方，偏离堤坝轴线的距离应视堤坝顶宽而定，一般是堤坝顶越宽偏离就越大，堤坝顶窄偏离就越小。

钻孔深度，一般设在堤坝地基附加应力场范围以内隐患以下 1～2m。

孔距比坝体劈裂灌浆要小，一般不大于 5m，视堤坝的高低和边坡的陡缓而定。一般是堤坝愈矮，边坡愈缓，孔距愈小，反之孔距应适当放大，一般变化在 2～5m 之间。

二、土坝坝体劈裂灌浆

在对工程概况进行充分调查和计算分析的基础上，应对坝体灌浆提出设计，并报请上级单位对设计内容进行单项审查。在灌浆设计时，根据隐患所在部位、严重程度、坝型、坝体质量、填筑土的性质等，首先应确定灌浆目的，即帷幕灌浆还是补强灌浆。因为灌浆目的不同，设计和施工工艺也不同。帷幕灌浆，一般用劈裂式灌浆处理；补强灌浆，可用劈裂式灌浆亦可用充填式灌浆处理。如果整个防渗体都比较疏松，最好是用劈裂式灌浆处理，因为劈裂式灌浆所用灌浆压力比较大，浆缝宽，吃浆量大，通过浆坝的互压作用和坝体的湿化变形可使坝体土压密得到加固，而又能形成防渗帷幕。若防渗体整个质量都比较好，只有局部地出现裂缝和渗漏，可用充填式灌浆处理，但也应

适当增大灌浆压力，以保证泥浆固结后的强度和加速排水固结。劈裂式灌浆目前还只是应用于坝高 50m 以下的均质坝和宽心墙坝，对于 50m 以上的均质和宽心墙坝或 50m 以下的窄心墙坝，现在还缺乏实践经验。如果把劈裂式灌浆也应用到这些坝上来，要经过灌浆试验和充分论证后进行。劈裂式灌浆在设计理论和施工工艺上都要求比较严格，故在灌浆设计以前，对工程的原始资料应尽可能全面地搜集，在确定灌浆方案的时候，更应做到细致慎重（尤其是对一些大型水库土坝）。劈裂式灌浆设计内容一般应包括坝体应力-应变的理论计算、帷幕设计、灌浆压力设计、浆体的固结、浆料设计、复灌次数、时间间隔和每次灌浆历时的确定、大概预算等。

搞好灌浆设计是灌浆施工重要的一环，是搞好施工的依据，也是施工的前提。没有正确的设计，就不会有正确的施工。目前对灌浆设计有一些不正确的认识。认为土坝灌浆是一个施工问题，不需要费太大的力量去搞设计，实际上这些看法都是片面的。当然对一些边界条件比较简单的中、小型水库土坝，但位置重要，情况复杂，也不能简化。一般不论大、中、小型水库的土坝灌浆，都需要按正常的设计程序，认真地搞设计，提出设计书，报有关部门审批后，才能进行正常的灌浆施工。在施工中发现新问题，如造孔中发现坝体各部位的质量变化情况，灌浆中根据压力大小、冒浆情况发现隐患部位、危害程度等，与原设计方案不尽相同时，根据具体情况修改原设计，也是必要的。但要慎重分析后，经过一定审批手续，才能对原灌浆设计方案进行修改。下面就灌浆设计中的主要内容进行一般论述，而不是按照一般设计程序逐项排列。在进行灌浆设计时可根据工程情况对设计内容有所增减修改。

（一）土坝心墙隐患的验算

这是灌浆设计中一个不可缺少的部分，只有通过必要的理论计算，才能更深入地了解坝体的全部情况，避免灌浆的盲目性。因为有些土坝虽然出现了局部破坏，但不一定用灌浆的办法去处理，尤其不

一定用劈裂式灌浆办法处理。不应灌浆的工程而灌了，会造成浪费；该灌浆的工程而没有去灌，可能留下隐患。所以通过论证计算，掌握一个合适的标准，可为灌浆方案的确定和编制预算等提供依据，也为灌浆设计提供参数。

劈裂式灌浆的主要任务是解决土坝心墙部的变形稳定和渗透稳定问题。对于变形稳定，一般是处理坝体内部的变形破坏，而且在破坏区域比较大的情况下更为合适；对于心墙的渗透破坏，如浸润线出逸点过高，坝后大面积淹湿或有的已形成集中渗流等，其渗透破坏的验算，可用土坝渗流理论进行，也可用变形稳定破坏进行验算。

(二)灌浆压力的确定

灌浆压力是劈裂式灌浆施工中一个重要控制指标。如果控制得好，对于坝体的压密和回弹，浆体的压密和补充坝体的小主应力不足，保证防渗帷幕的作用等，都能起到好的效果；若不能进行科学控制，不仅不能达到预想的效果，还有可能破坏坝体的某些结构，甚至出现险情。灌浆压力设计一般分为三级来确定。即起始劈裂压力、单孔最大压力和屈服压力。

灌浆压力设计

(1)起始劈裂压力

劈裂式灌浆的工艺要求是孔底注浆、全孔灌注，故一般注浆孔下部坝体先劈裂。

图 4-29 所示泥浆处于流体状态时，灌浆压力 p 沿孔深有如下关系：

$$p=\Delta p+\gamma' h'-p_h \tag{4-65}$$

式中：Δp 为孔口压力表读数(kPa)；p_h 为泥浆在注浆管中(长度 h')流动时和沿孔壁或缝壁上升(高度 h)流动时所产生的摩阻力(kPa)；γ' 为泥浆密度(t/m³)；h' 为注浆管深度(m)。

坝体下部抗劈裂压力如图 4-30 所示，可用式(4-66)近似计算：

$$p_1=\sigma_3+|\sigma_3| \tag{4-66}$$

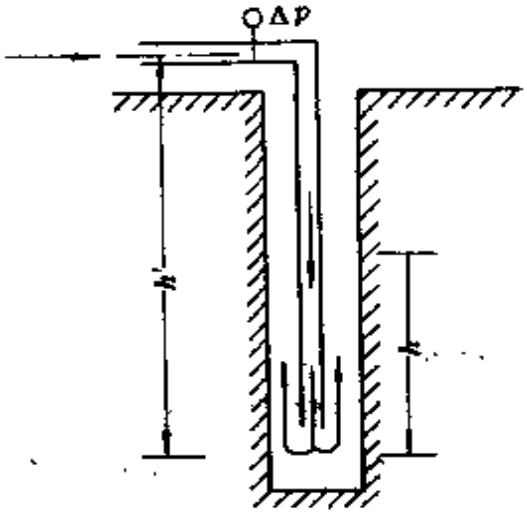


图 4-29　泥浆流动示意图

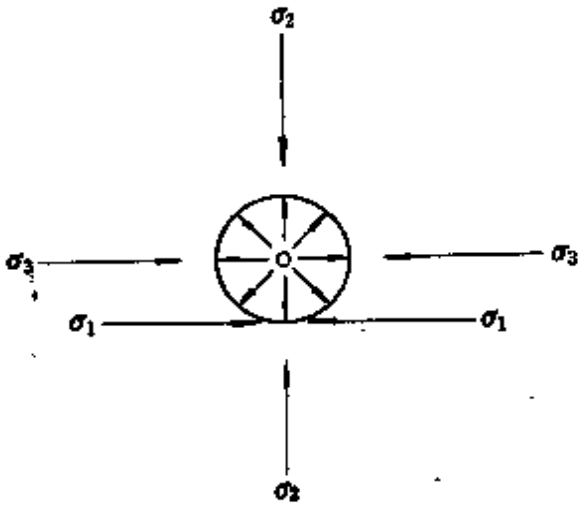


图 4-30　灌浆孔应力示意图

令 $p=p_1$，将式(4-66)代入式(4-65)后得式(4-67)，即：

$$\Delta p=\sigma_3+|\sigma_t|-\gamma' h'+p_h \tag{4-67}$$

式中：符号意义同前。

当 $\Delta p>\sigma_3+|\sigma_t|-\gamma' h'+p_h$ 时，坝体即被劈裂。由于一般土坝上部沿坝轴线的 σ_3 较小，所以泥浆坝体是比较容易的。

(2)单孔最大压力

单孔最大压力尚无合适公式表示。在孔底注浆情况下，根据试验，建议按 1.5 倍左右的坝体下部起始劈裂压力控制。

(3)屈服压力

即坝体全部或大部分被劈开之后，抗劈裂的能力已经很低，一般都是在灌浆压力远小于单孔最大允许压力的情况下，坝体在水平方向可能产生大幅度位移，处于屈服状态，这是在灌浆施工期应当特别注意的。根据西埠水库土坝灌浆试验，可以近似地采用式(4-93)控制，即

$$p\leqslant 0.98\gamma' h' \tag{4-68}$$

式中：γ'为 1.6g/cm³；其余符号意义同前。

（三）浆体帷幕设计

劈裂式灌浆帷幕位置一般是沿坝轴线位置。因为小主应力面基本沿坝轴线分布，处于平面应变状态，在劈裂式灌浆形成帷幕的时候，不易出现横向裂缝，所形成的浆体帷幕比较整齐。同时，坝顶施工场地较宽敞，运输、机械操作等较方便。

裂缝式灌浆一般布置一道帷幕，但对填土特别疏松、变形裂缝破坏比较严重的土坝，除沿坝轴线布置主浆体帷幕以外，为了更好地满足防渗和使坝体均匀湿化变形的需要，可在主浆体帷幕的两边，靠近前后坝肩布置两排副浆体帷幕。主副帷幕的间距应视坝顶的宽窄而定。为避免浆脉之间互相穿透，应尽量加大排距。在河槽的岸坡段的地形突起段，坝体出现纵向拉应力区，在容易出现横向缝的部位，可按梅花形布孔，先进行灌浆处理，在施工设计中可比一般帷幕灌浆压力适当大一些。以利尽量释放纵向应变位能。一般要求停灌 1 个月以后再进行正常的劈裂灌浆施工。

帷幕深度：主浆体帷幕一般应深至坝基，副浆体帷幕可适当浅一些，但也应深入坝体拉应力区以下。一般情况帷幕上端不要至坝顶，为此，沿帷幕线坝顶应设置阻浆盖。阻浆盖一般可开挖深 1m、宽 0.5m 的矩形沟槽，回填土夯实。要求在灌浆开始坝顶出现微小裂缝时即停止灌浆，然后开挖回填夯实。对一些特别疏松的坝，亦可以不加阻浆盖，使浆体帷幕直至坝顶。

浆体帷幕的厚度（指泥浆固结硬化以后的厚度），主要从防渗和坝体的变形稳定来考虑。如果浆体帷幕设计太厚，所需灌浆和固结时间都太长，形成在坝体中一定时间内的薄弱带，遇上特大洪水或地震等情况，可能出现险情。所以在设计浆体厚度时，应当在保证防渗和变形稳定要求的条件下，尽量减小厚度，以缩短固结时间。同时浆体厚度太大，坝坡位移量也会增大，是否能保证坝体的坝坡稳定，事先也需要经过计算。但帷幕设计太薄，一则对防渗不能保证，还可能形

不成连续的防渗帷幕；二则对一些松散坝体，应变能不能充分释放，还可能出现新的变形裂缝；同时坝体的回弹量也较小，对保证浆体强度，加速浆体固结也不利。因此在设计帷幕厚度时，应首先保证防渗要求；其次保证坝体的变形稳定要求；第三考虑浆体的固结时间。

1. 按防渗要求设计帷幕厚度

由于劈裂灌浆构造的防渗帷幕主要是解决坝体渗漏问题，所以在进行浆体帷幕厚度的计算时，可按不透水地基条件下土坝心墙的计算公式求得，但是该式计算繁杂，需经反复试算后才能得到真正的渗流量(q)和心墙后的浸润线出逸点高度(h)。上述计算方法主要是考虑了心墙不等厚度的影响，通过对已灌浆土坝的开挖检查得知，浆体帷幕厚度一般是上下较窄、中部稍宽。由于帷幕的厚度平均比较窄，计算时可以假定为平均宽度而使计算简单化。可根据坝体与浆体渗透系数的比值 K/K' 将浆体厚度折算成与坝体相同渗透系数的厚度，从而得到均质土坝的计算图形，见图 4-31。经计算后整个坝体的计算厚度为：

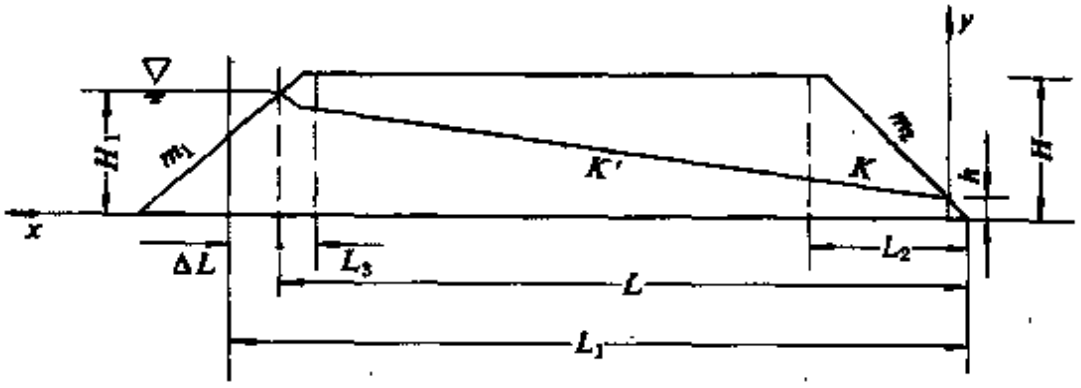


图 4-31　浆体帷幕厚度设计计算简图

$$L=L_3+\frac{K}{K'}\delta_{cp}+L_2$$

$$L_3=\frac{b}{2}+(H-H_1)m_1$$

式中：b 为坝顶宽窄(m)；H 为最大坝高(m)；H_1 为坝的最高设计水

位(m)；m_1 为上游边坡系数；K 为坝体土渗透系数(cm/s)；K_1 为浆体帷幕渗透系数(cm/s)；δ_{cp} 为浆体帷幕平均厚度(m)；L_2 为下游半坝宽度(m)。

均质土坝的渗流计算，可用分段法分别建立各段的渗流方程式并联立求解。如果中间段考虑到上游虚拟矩形体的并入，则由下式计算，即：

$$\frac{q}{K}=\frac{H_1^2-h_0^2}{2(L_1-m_2h_0)} \tag{4-69}$$

$$\Delta L=\frac{m_1}{2m_1+1}H_1 \tag{4-70}$$

式中：L_1 如图 4-33，$L_1=\Delta L+L$；ΔL 为上游等效虚拟矩形宽度(m)；h_0 为下游特征水深，下游无水时为出逸点高度，有水时为 $a_0=h_0-H_2$；H_2 为下游水深(m)；其余符号意义同上。

下游楔体渗流量的计算可用式(4-71)，即：

$$\frac{q}{K}=\frac{h_0-H_2}{m_2+0.5}\left[1+\frac{H_2}{h_0-H_2+\dfrac{m_2H_2}{2(m_2+0.5)^2}}\right] \tag{4-71}$$

当下游无水时，即 $H_2=0$ 时，上式变为：

$$\frac{q}{K}=\frac{h_0}{m_2+0.5} \tag{4-72}$$

式中：H_2 为下游水深(m)；m_2 为下游边坡系数；

由式(4-69)与式(4-71)联立，即可求得渗流量 q 和特征水深 h_0，浸润线可用下式计算，即：

$$y=\sqrt{h_0^2+\left(H_1^2-h_0^2\frac{x}{L_1-m_2h_0}\right)} \tag{4-73}$$

在渗流量 q 和特征水深 h_0 的实际计算中，为了避免解联立方程而又确保计算精度，通常以下游水面线将坝体分为上下两部分来计算，最后得渗流量的计算公式为：

$$\frac{q}{K}=\frac{(H_1-H_2)^2}{L_1-m_2H_2+\sqrt{(L_1-m_2H_2)^2-m_2^2(H_1-H_2)}}+\frac{(H_1-H_2)H_2}{L_1-0.5m_2H_2} \tag{4-74}$$

当 $H_2=0$ 时，式(4-74)即为：

$$\frac{q}{K}=\frac{H_1^2}{L_1+\sqrt{L_1^2-(m_2H_1)^2}} \tag{4-75}$$

在实际计算时，可由式(4-74)求出渗流量，再将式(4-72)写成式(4-76)、式(4-77)形式，求 h_0。

$$h_0=\frac{[2(m_2+0.5)^2(h_0-H_2)+m_2H_2](m_2+0.5)}{2(m_2+0.5)^2h_0+m_2H_2}\frac{q}{K}+H_2 \tag{4-76}$$

当 $H_2=0$ 时，则有：

$$h_0=\frac{q}{K}(m_2+0.5) \tag{4-77}$$

浸润线仍按式(4-73)计算。

由上述计算公式可知，当 H_1 和 K、K' 一定时，变化浆体帷幕厚度 δ_{cp}，则得到不同的 q 和 h_0，最后可以绘制 δ_{cp}-q 和 δ_{cp}-h_0 关系曲线，根据实际工程对流量 q 和特征水深 h_0 的要求，可由图 4-32 定出所需的浆体帷幕厚度 δ_{cp}，在确定 δ_{cp} 值时，必须满足下列条件：①达到了所需要的防渗标准，即使坝体渗漏量降低到要求的流量以下；②使下游浸润线出逸点高度小于或等于原设计高度；③由帷幕所形成的渗透坡降在浆体允许坡降以内，由帷幕所造成的渗透坡降一般为：

$$I=\frac{H_1-h_1}{\delta_{cp}}$$

(式中：H_1 和 h_1 分别为浆体帷幕上下游浸润线高度；δ_{cp} 为帷幕平均厚度)。如果按照常规的计算方法，所得出的 I 值往往为几十到一百以上，这样就远远超过了粘性土的允许渗透坡降。尽管如此，灌浆实践证明它是安全的。主要原因有二：一是通过泥浆对坝体内部隐患的充填挤压和坝体的湿陷固结，使浆体与坝体成为一个整体，从而使该

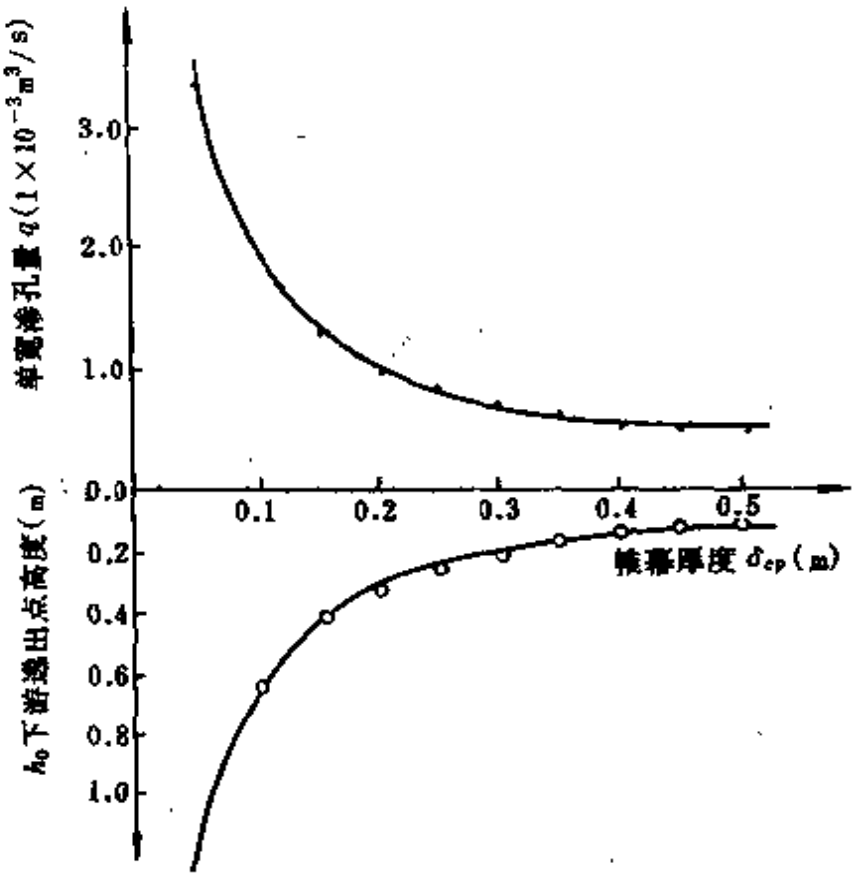


图 4-32　δ_{cp}-q 和 δ_{cp}-h_0 关系曲线图

部位的坝体的防渗各项指标都得到提高。在进行渗透破坏计算时，不仅要考虑浆体的防渗作用，而且还应考虑灌浆后所引起的原坝体防渗性能的改善，否则是不切实际的。二是通常所说的允许渗透坡降，一般是指某种土料在渗流出口或两种填料的粒径相差很大的接触面附近，不致发生渗透破坏而又有一定安全程度的最大坡降，劈裂灌浆所形成的帷幕是在粘性土内所形成，浆体和坝体（或心墙）两种土的物理力学性能相近，在外力作用下变形协调，所以尽管在较大的渗透压力下，浆体帷幕仍安然。故上述计算只是定量地说明坝内增加了一层浆体之后所提高的抗渗能力，而决不是说浆体前的整个水头压力完全由浆体来承担，否则会得出错误的结论。

根据上述计算方法的原理，同样亦可计算质量不好的砂壳心墙坝所需要的灌浆帷幕厚度。在计算时，首先把心墙的梯形断面近似地简化为矩形断面，并取其平均宽度 τ 作为心墙的计算宽度，即：$\tau=(b_0+b)/2$，b_0 和 b_1 分别为心墙顶和底的宽度，详见图 4-33(a)。如果沿坝轴线构筑的垂直浆体帷幕厚度为 δ_{cp}，并把 δ_{cp} 和 t 分别按渗透系数的比值 K/K'、K/K_1 将浆体和心墙的厚度化为与下游坝体相同渗透系数的厚度，则得均质土坝的计算图形，如图 4-33(b)所示。折算后的均质坝体计算宽度为：

$$\Delta=\frac{K}{K_1}\delta_{cp}$$

$$T=\frac{K}{K_1}t$$

$$L_2=(Hm_2+\frac{b}{2})-\frac{1}{2}$$

$$L_3=(H-H_1)m_1$$

$$L=L_3+L_2+T+\Delta \tag{4-78}$$

$$L_1=L+\Delta L$$

式中：K_1 为心墙土的渗透系数；Δ 为折算为均质坝后的浆体帷幕宽度；T 为折算为均质坝后心墙平均宽度；其他符号意义同前。

求解渗流量 q 和下游浸润线出逸点高度 h_0 的计算方法和步骤同前。

2. 渗透破坏验算

灌浆帷幕厚度的渗透破坏可用下式验算：

$$J\leqslant J_{允} \tag{4-79}$$

式中：J 为浆体帷幕中的渗透坡降，$J=\Delta H/\delta$（ΔH 为帷幕上下游水位差）；$J_{允}$ 为固结后的浆体在有保护条件下的允许渗透坡降，由试验确定，经有关单位试验可达 100 以上。

3. 按泥浆固结速度设计帷幕厚度

泥浆的析水浓缩时间加固结时间等于泥浆总的析水固结时间，

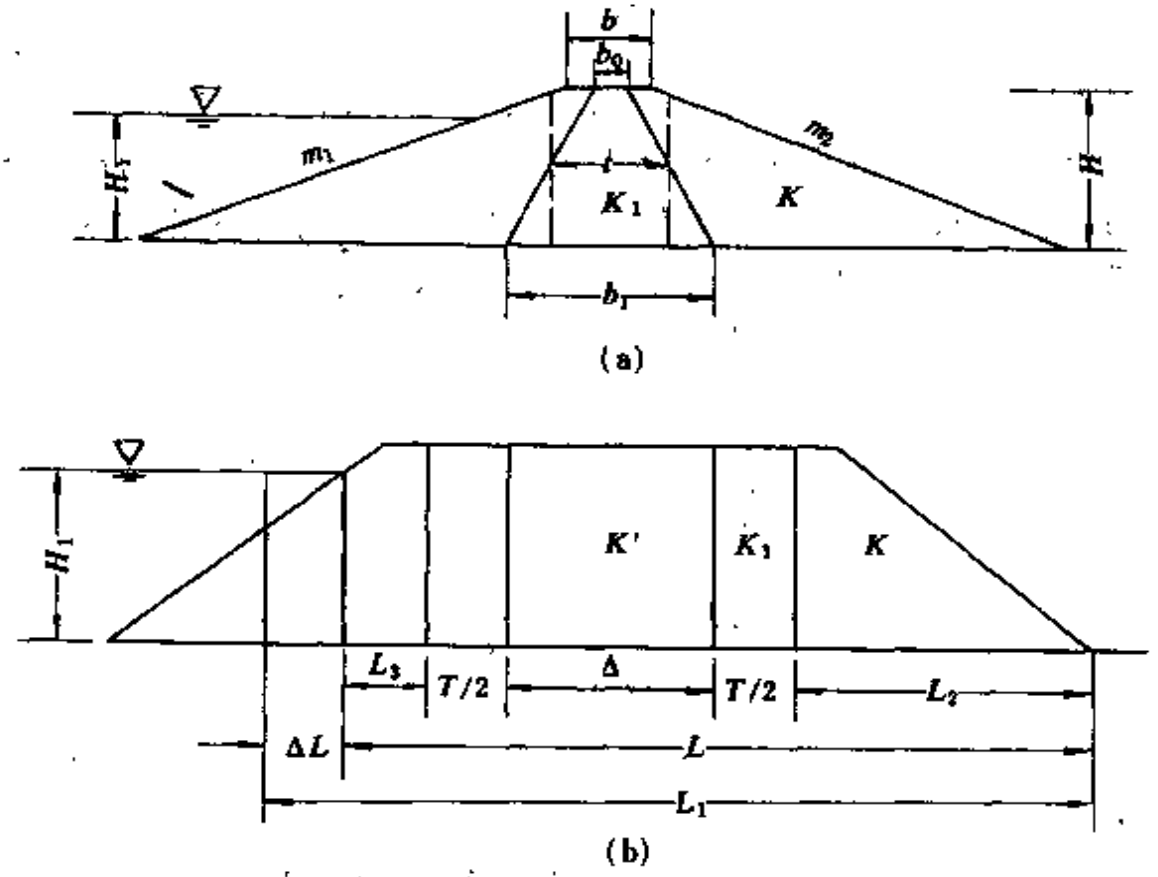


图 4-33　砂壳心墙坝简化后的计算图

(a)砂壳心墙坝简化后的帷幕厚度计算简图；(b)将帷幕、心墙、砂壳折算成相同渗透系数时的计算简图

即 $t_1+t_2=T_0$。而泥浆总的析水固结时间 T_0，综合考虑得出 $\delta_{cp}=f(T_0)$。如果限定浆体的固结时间，综合考虑调整 δ_{cp}-$f(T_0)$关系，以达到确定一个较为合理的技术指标。

对一般中、小型水库也可以不经过计算，凭经验确定泥浆帷幕的厚度。对疏松坝体(重粉质壤土干密度小于 1.5g/cm³)，浆体厚度掌握在 30cm 左右，对质量较好的坝(重粉质壤土干密度在 1.6g/cm³以上)，固结后的浆体帷幕可掌握在 20cm 左右。

4. 按剔应力破坏设计浆体帷幕厚度

如果单纯从增加强度性灌浆考虑，则可从这一点出发对弱应力破坏区进行灌浆，或对坝体某一受拉松土区进行灌浆。考虑到坝体出现裂缝和拉松土区的原因，是由于某一方向的小主应力不足，或出现负压区（即拉力区），以致把某一土区拉断，出现裂缝。此时的灌浆目的，主要是通过灌浆压力弥补某一方向的小主应力使之恢复原有的应力平衡，达到稳定坝体的目的。因此，最好地控制灌浆压力或稍大于原来坝体正常状态时的小主应力值，在理论上可按式(4-91)来控制。

如沿坝轴线横向水平应力不足，或由于砂壳的顶托，在心墙中形成拱效应垂直方向的应力不足或已形成裂缝等都应用式(4-90)来控制，同时考虑到泥浆固结以后横向压力减小，为了保证泥浆固结以后仍能满足小主应力的补充值，故由3种设计灌浆压力和施工时的劈裂宽度来控制，根据一般经验，停灌后坝体的坝顶部分要回弹原缝宽的30%左右，所以在灌浆施工时实际用的灌浆压力，使之回弹固结后的浆体干密度应等于或接近于原坝体的干密度。实际施工时的劈裂宽度应用式(4-59)控制。

(四)浆体的析水浓缩和排水固结计算

如上述灌入坝体裂缝中的泥浆，在没有固结以前呈一薄弱带，如遇高水位或地震等情况，有可能影响土坝的安全，所以对掌握沿裂缝深度各点泥浆的固结速率以控制裂缝宽度和固结时间，保证土坝的正常运用是至关重要的。下面以山东省贺庄和西埠试验坝裂缝中泥浆的析水固结规律为例进行计算分析。

泥浆的析水固结过程与土体的固结过程是不同的，主要表现在土的主要固结阶段，土体的固结过程也就是由孔隙水压力转为有效应力的过程。而泥浆析水固结初期则不同，它的水分减少并没有引起有效应力的增加，所以在泥浆整个析水固结中，不能均按土的固结理论去计算。为此，把这一过程分为两个阶段来考虑，并以泥浆的流限含水量为界线，把泥浆的整个析水固结过程分为析水浓缩和排水固

结两个阶段来计算。

假定泥浆析水浓缩阶段符合如下规律：

(1)泥浆水分的减少不会引起有效应力的增加；

(2)泥浆抗剪强度等于零；

(3)泥浆的析水速度远远大于坝体的排水速度；

(4)土中水分的运动规律符合达西定律。

基于上述假定，在此阶段泥浆水分的排出完全决定于坝体的透水性能。为此，在析水浓缩阶段按渗流理论来考虑，并用下式计算：

$$q=v_0A \tag{4-80}$$

$$v_0=K\left(\frac{\partial H}{\partial s}-I_0\right) \tag{4-81}$$

式中：v_0 为渗透流速(m/s)；K 为渗透系数(m/s)；$\partial H/\partial s$ 为水头梯度(即渗透坡降)；I_0 为起始渗透坡降；A 为渗流过水断面(m²)。

由式(4-81)可看出：$\partial H/\partial s\leqslant I_0$ 时，$v_0=0$，则出现不排水，不固结区，只有当 $\partial H/\partial s>0$ 时，$v_0>0$，坝体中的水分才能排出。

对于同一土质和密度的坝体来讲，其渗透系数和起始渗透坡降可以近似为常数，这样渗透流速 v_0 就只是水头梯度 $\partial H/\partial s$ 的函数。由于水头梯度是沿坝的各点高程变化的，所以渗透速度和单位渗流量 q 也随坝的各点高程面异。为此在做泥浆析水浓缩计算时，应算出沿缝各点高程的浓缩时间。

泥浆的固结阶段：随着泥浆水分的排出，有效应力开始增加，并且外荷一定时，固结速率取决于浆体本身的透水性能，当单向饱和土体孔隙水压力消散时，符合单向渗透固结理论的基本假定，其计算公式为：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=C\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{4-82}$$

对均质土坝和宽心墙坝，灌浆孔一般沿坝轴线布置，浆缝所经过的部位多为粘性土，为此坝体对于泥浆传递来的孔隙水压力不能及

时消散。所以泥浆固结的边界条件一般是：

$$x=0,\quad u_0=u_n$$

$$x=b_1,\quad u_0=u_n$$

$$t=0,\quad 0<x<b_1,\quad u_0=\sigma_0$$

目前，由于受测试技术所限，泥浆和坝体接触面的孔隙压力还难测出，所以在进行泥浆固结计算时，应首先将未知的边界条件化为已知，为了达到这一目的，我们试将计算点在坝体中的排水距离乘以折算系数，化为与浆体固结性能相同的排水距离，即

$$L_b'=L_b\beta \tag{4-83}$$

式中：L_b' 为换算后的排水距离；L_b 为计算点在坝体中的排水距离；β 为坝体折算系数，$\beta=C_v'/C_v$；C_v' 为浆体固结系数；C_v 为坝体的固结系数。

折算后，计算点的排水距离，即

$$b=\frac{b_1}{2}+L_b'$$

计算点排水距离见图 4-34。

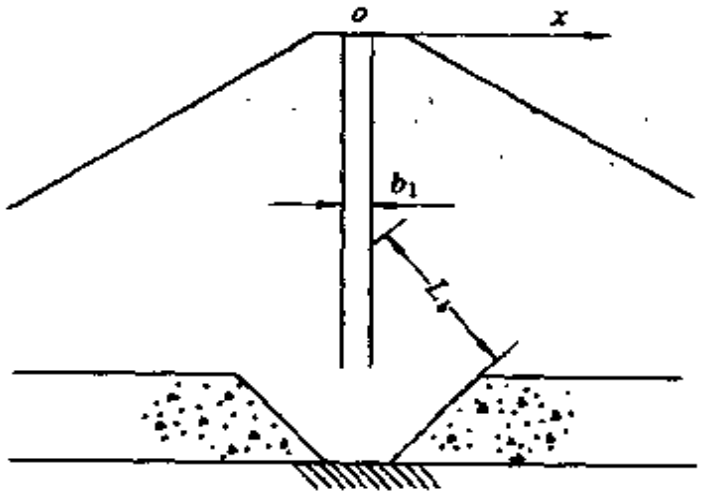


图 4-34　计算点的排水距离示意图

经折算后方程式的边界条件即可化为：

$$x=0,\quad u_0=0$$

$$x=2b,\quad u_0=0$$

$$t=0,\quad 0<x<2b,\quad u_0=\sigma_0$$

解方程式得一收敛级数：

$$u=\frac{4\sigma}{\pi}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\frac{n\pi x}{2b}e^{-n^2M} \tag{4-84}$$

$$M=\frac{\pi^2C_2}{4b^2}$$

式中：e′为自然对数之底；C_2 为坝体土的固结系数 $C_v=\frac{K(1+e_0)}{a\Delta_0}$ (cm^2/a)；a 为坝体土的压缩系数(MPa^{-1})；e_0 为坝体土的起始孔隙比；n 为1，3，5，……；其余符号意义同前。

为了计算上的方便，在式(4-84)中，一般假设固结系数 C_v 值为常数。但在土体的实际固结过程中 C_v 值是变化的。因为随着土体的固结过程土体密度 γ_d 或孔隙比 e 都在发生变化。γ_d 和 e 的变化引起了渗透系数 K 和压缩系数 a 值的变化。经初步试验有如下关系：

$$K=e'^{\frac{e-m}{N}} \tag{4-85}$$

$$a=G-F\lg\gamma_d \tag{4-86}$$

式中：e 为土壤孔隙比；γ_d 为土的干密度；m、N、G、F 为土质常数，随土质不同而变(由试验得到)。

由式(4-85)、式(4-86)可知，K 和 a 分别是 e 和 d 的函数。因为

$$C_v=\frac{K(1+e)}{a\gamma_w}$$

所以在确定 C_v 值时，对 e、K、a 分别取从固结开始到固结终了的平均值。

泥浆的固结标准，就是泥浆在自重和坝体回弹压力的作用下，其内部超孔隙力等于零或者接近于零的时间，即为泥浆的固结时间，表示为：

示为：

$$u_t=\frac{i-\int_0^b u'\mathrm{d}x}{\int_0^b p_t\mathrm{d}x} \tag{4-87}$$

积分后化简得：

$$u_t=1-\frac{8}{\pi^2}(e'-N+\frac{1}{9}e'-9N+\frac{1}{25}e'-25N+\cdots)$$

由于上式括号内的级数收敛很快，故可取 $e'-N$ 为近似值，即：

$$u_t=1-\frac{8}{\pi^2}e'-N$$

$$N=M_t=\frac{\pi^2 c}{4b^2}t$$

式中：u_t 为平均固结度；e' 为自然对数的底；u' 为泥浆的孔隙压力。

计算时已知 $t\rightarrow N\rightarrow u_t$ 或假定 $u_t\rightarrow N\rightarrow t$，一般用计算法或代入法。

(五)灌浆历时、复灌次数、复灌时间间隔的确定

1. 最优灌浆历时的选择

在进行劈裂灌浆时，必须在所规定的时间内按照设计的裂缝宽度由小到大逐步劈开。据试验和实践证明，灌浆历史太短，一则不能充分发挥泥浆压缩坝体的作用，也不能发挥坝体对浆体的反复回弹压缩，坝体得不到压密，浆体析水固结慢，强度低，甚至会出现浆、坝结合不牢，重新张开裂缝或在浆体的某一部位出现水平缝；二则停灌后泥浆体缩，缝顶部容易出现空洞，所以灌浆历史太短，会影响灌浆质量，甚至留下隐患。太长又拖延了工期，增加投资，延长了浆体和坝体的固结时间，故应当选择一个比较合适的灌浆历时。

影响灌浆历时的因素比较多，如裂缝内泥浆的固结速率，一次允许的灌浆量，灌浆设备的效率，工程量的大小等。由于目前试验资料不足，尚不能定量分级确定灌浆历时，只能大体限制范围。

如对于排水条件比较好的土地，采用劈裂式灌浆，帷幕面积 2 万

平方米左右，浆体厚度 20～30cm，泥浆泵的输浆率 80L/min 左右，灌浆历时约用 1 年半时间合适，同样情况当帷幕面积 1 万平方米时，灌浆历时可定为 1 年左右。帷幕面积大于或小于以上数值，可酌情确定灌浆历时。

2. 复灌次数和复灌时间间隔的确定

因为劈裂式灌浆的浆体帷幕是由薄逐步加厚的，所以浆体的固结速率也是由快到慢变化的。灌浆施工中复灌间隔时间和复灌次数主要以灌入的泥浆基本固结之后，再进行复灌。其程序应当是灌浆—固结，再灌浆—再固结，反复进行。应以上述理论计算确定不同泥浆缝厚度固结时间为每次复灌间隔时间。对于不具备固结计算条件的土坝灌浆，可参考表 4-7 经验数字确定。

表 4-7　复灌间隔时间参考表

浆体厚度(cm)	3	4	12	21	36
间隔时间(d)	5	6	20	40	50

以泥浆缝停灌时间的厚度 30cm、距坝顶 10m 的点为例说明，详见表 4-7。

复灌次数应以泥浆对坝体的压缩效果、一次注浆允许增加的厚度、浆体总的厚度为根据，一般不少于 5 次。

3. 开灌和停灌时间的确定

开灌时间以大汛过后的秋季为好，大冻前最好能灌完第一序孔，翌年春天灌完第二序孔。尽量在大汛到来前一个月停灌，汛后完成扫尾工程。若在春天开灌也可以，但必须在大汛前一个月完成第一序孔，大汛期间停止灌浆，当年秋天完成第二序孔，第二年春天完成尾工。

第五章　注浆施工工艺

第一节　概　述

一、注浆施工方法的分类

注浆施工方法的分类主要有两种：①按注浆管设置方法的种类分类；②按注浆材料混合方法或灌浆方法的分类。如表 5-1 所示。

表 5-1　注浆施工方法分类表

注浆管设置方法			凝胶时间	混合方法
单层管注浆法	钻杆注浆法		中等	双液单系统
	过滤管(花管)注浆法			
双层管注浆法	双栓塞注浆法	套管法	长	单液单系统
		泥浆稳定土层法		
		双过滤器法		
	双层管钻杆法	DDS 法	短	双液双系统
		LAG 法		
		MT 法		

(一)按注浆管设置方法分类

1. 用钻孔方法

主要用于基岩或砂砾层，或已经压实过的地基。这种方法与其他方法相比，具有不使地基土扰动和可使用填塞器等优点，但一般工程费用较高。

2. 用打入方法

当灌浆深度较浅时，可用打入方法。即在注浆管顶端安装柱塞，将注浆管或有效注浆管用桩锤或振动机打进地层中的方法。前者为了拆卸桩塞，而将打进后的注浆管拉起，所以就不能从上向下灌注，而后者在打进过程中，孔眼堵塞较多，洗净费时间。

3. 用灌注方法

在比较均质的砂层或注浆管打进困难的地层等采用的方法。这种方法利用泥浆泵，设置用水喷射的注浆管，因容易把地基扰动，所以不是理想的方法。

(二)按灌注方法分类

1. 一种溶液一个系统的方法

将所有的材料放进同一箱子中，预先做好混合准备，再进行注浆，这适用于凝胶时间较长的浆液。

2. 两种溶液一个系统的方式

将A溶液和B溶液预先分别装在各自准备的不同容器中，分别用泵输送，在注浆管的头部使两种溶液会合。这种在注浆管中混合进行灌注的方法，适用于凝胶较短的浆液。对于两种溶液，可按等量配合或按比例配合。

作为这种方式的变化，有的方法分别将准备在不同容器中的A溶液和B溶液送往泵中使之混合，再用一台泵灌注。另外，也有采用Y字管，而仍只用上述一个系统方式将A溶液和B溶液交替注浆的方式。

3. 两种溶液两个系统的方式

将 A 溶液和 B 溶液分别准备放在不同的容器中，用不同的泵输送，在注浆管（并列管、双层管）顶端流出的瞬间，两种溶液就汇合而注浆。这种方法适用于凝胶时间是瞬间的情况。

也有采用在灌注 A 溶液后，继续灌注 B 溶液的方法。

（三）按注浆方法分类

1. 钻杆注浆法

钻杆注浆施工法是把注浆用的钻杆（单管），由钻孔钻到所规定的深度后，把注浆材料通过内管送入地层中的一种方法。钻孔达到规定深度后的注浆点称为注浆起点。在这种情况下，注浆材料在进入钻孔前，先将 A、B 两种溶液混合，随着化学反应的进行，粘度逐渐升高，并在地基内凝胶（图 5-1）。

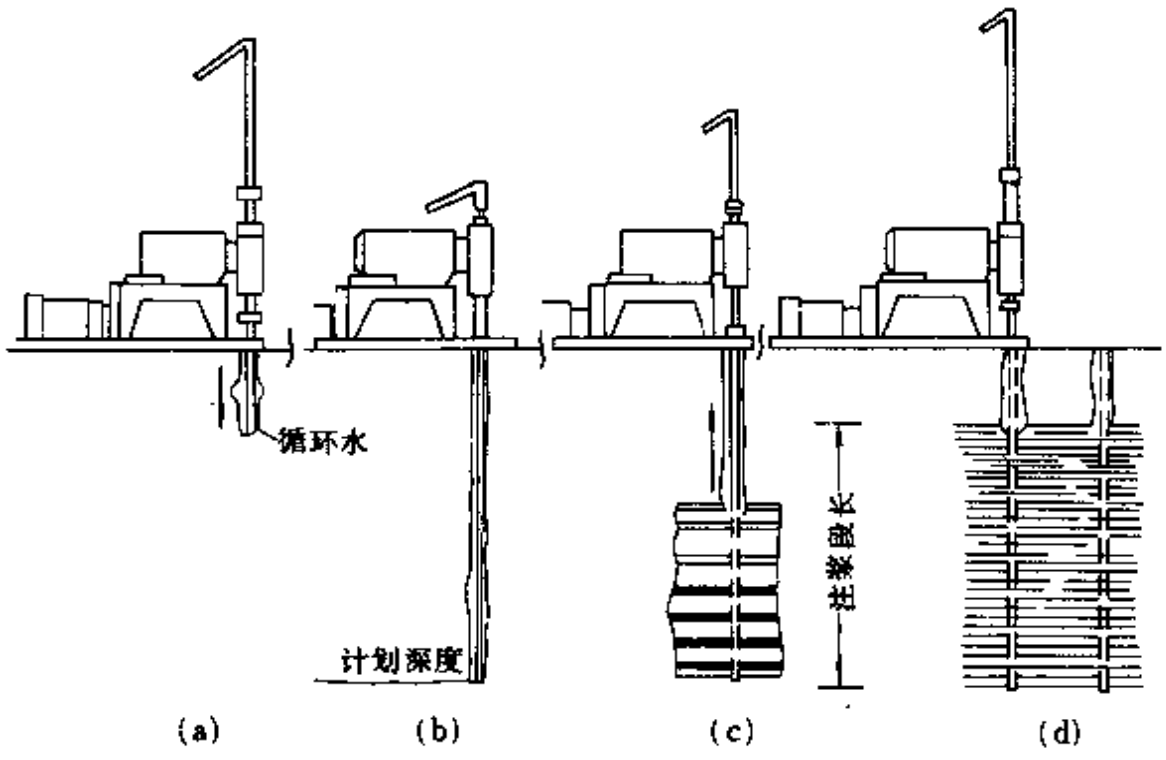


图 5-1　钻杆注浆施工方法

(a)安装机械，开始钻孔；(b)打钻完毕，注浆开始；(c)阶段注浆；(d)注浆结束，水洗，移动

钻杆注浆法的优点是：与其他注浆法比较，容易操作，施工费用较低。其缺点是：浆液沿钻杆和钻孔的间隙容易往地表喷浆；浆液喷射方向受到限制，即为垂直单一的方向。

2. 单过滤管注浆法

单过滤管（花管）注浆法如图 5-2 所示。把过滤管先设置在钻好的地层中，并填以砂，管与地层间所产生的间隙（从地表到注浆位置）用填充物（粘性土或注浆材料等）封闭，不使浆液溢出地表。一般从上往下依次进行注浆。每注完一段，用水将管内的砂冲洗出后，重复上

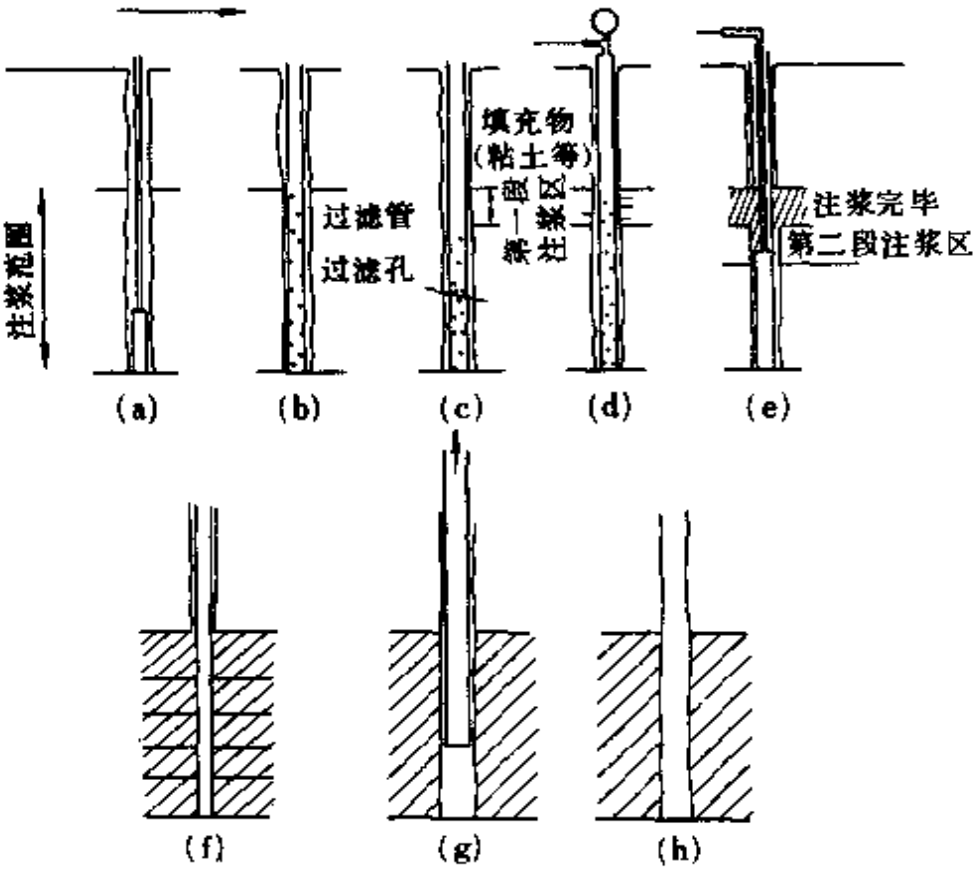


图 5-2　单过滤管注浆法施工顺序

(a)利用岩芯管等钻孔；(b)插入过滤管；(c)管内外填砂及粘土；(d)第一阶段在注浆；(e)第二阶段注浆，第一阶段砂洗出；(f)反复(d)、(e)直到注浆完毕；(g)提升过滤管；(h)过滤管孔回填或注浆

述操作。这样逐段往下注浆的方法，比钻杆注浆方法的可靠性高。

若有许多注浆孔时，注完各个孔的第一段后，第二段、第三段依次采用下行的方式进行注浆。

过滤管直径大多是 $\phi=20\sim50$mm。过滤管壁上的孔数 N（见图5-3）与注浆效果关系密切，其计算公式如下：

$$N=\frac{A'}{a}=\frac{A\alpha}{a}=\frac{\alpha\pi D^2/4}{\pi d^2/4}=\frac{\alpha\cdot D^2}{d^2} \tag{5-1}$$

式中：A'为过滤孔面积(m²)；A 为管内断面面积(m²)；α 为过滤孔面积比；a 为过滤孔断面积(m²)；N 为孔数；d 为过滤孔直径(m)；D 为过滤管直径(m)。

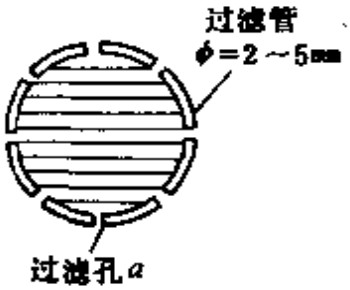


图 5-3　过滤管壁平面

单过滤管注浆的优点为：

(1)在较大平面内，可得到同样的注浆深度，注浆施工顺序是自上而下的进行，注浆效果可靠；

(2)化学浆液从多孔扩散，且水平喷射渗透易均匀；

(3)注浆管设置和注浆工作分开，注浆容易管理；

(4)化学浆液喷出的开口面积比钻杆注浆的大，所以一般只采用较小的注浆压力，而且注浆压力很少出现急剧性变化。

其缺点是：

(1)注浆管加工及注浆管的设置麻烦，造价高。

(2)注浆结束后，回收注浆管困难，且有时可能成为施工障碍。

3. 双层管双栓塞注浆法

该法是沿着注浆管轴限在一定范围内进行注浆的一种方法。具体地说，就是在注浆管中有两处设有两个栓塞，使注浆材料从栓塞中间向管外渗出。这种方法是法国 Soletanche 公开研制的，因此又称 Soletanche注浆法（图 5-4）。目前，有代表性的方法还有双层过滤管

注浆法(图 5-5)和套筒注浆法(图 5-6)。其施工顺序如图 5-7 所示。

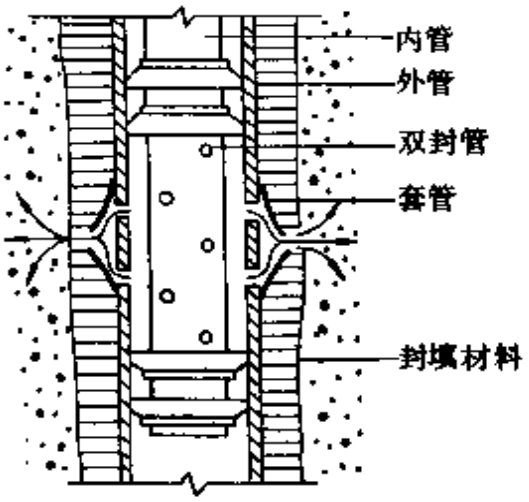


图 5-4　Soletanche 注浆法

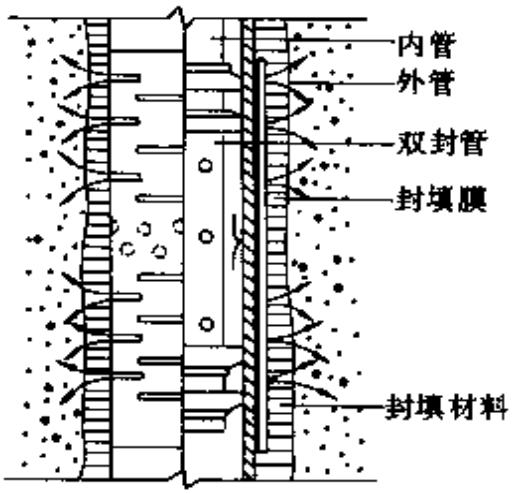


图 5-5　双层过滤管注浆法

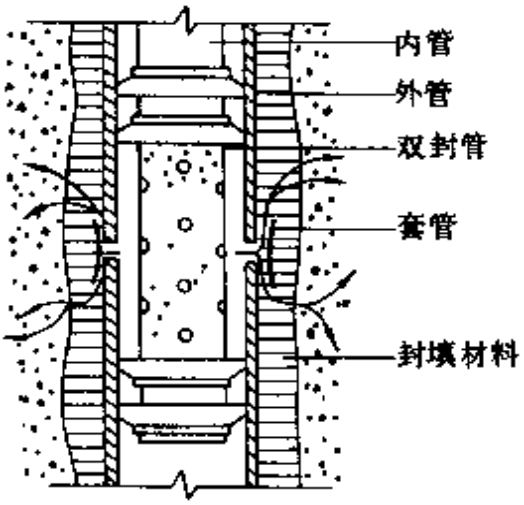


图 5-6　套筒注浆法

双层管双栓塞注浆法以 Soletanche 注浆法(又称袖阀管法)最为先进,于 50 年代开始广泛用于国际土木工程界,其施工方法分以下 4 个步骤:

(1)钻孔　通常用优质泥浆(如膨润土浆)进行固壁,很少用套管护壁;

(2)插入袖阀管　为使套壳料的厚度均匀,应设法使袖阀管位于钻孔的中心;

(3)浇注套壳料　用套壳料置换孔内泥浆,浇注时应避免套壳料进入袖阀管内,并严防孔内泥浆进入套壳料中;

(4)灌浆　待套壳料具有一定强度后,在袖阀管内放入带双塞的

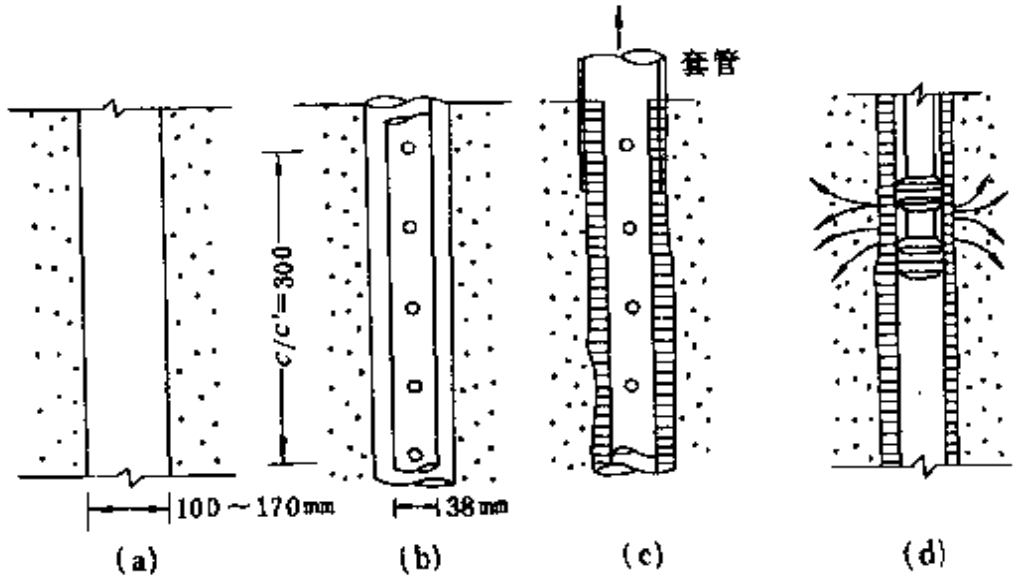


图 5-7　双层管双栓塞注浆法施工顺序

(a)钻孔后插入套管;(b)插入外管;(c)注入封填材料,提升套管;
(d)插入带双止浆塞的注浆管,开始注浆

灌浆管进行灌浆。

Soletanche 注浆法的主要优点为:

(1)可根据需要灌注任何一个灌浆段,还可以进行重复灌浆;

(2)可使用较高的灌浆压力,灌浆时冒浆和串浆的可能性小;

(3)钻孔和灌浆作业可以分开,提高钻孔的利用率。

其缺点主要有:

(1)袖阀管被具有一定强度的套壳料所胶结,因而难于拔出重复使用,耗费管材较多。

(2)每个灌浆段长固定为 33～50mm,不能根据地层的实际情况调整灌浆段长度。

4. 双层管钻杆注浆法

双层管钻杆注浆法的使用特点如下:

(1)注浆时使用凝胶时间非常短的浆液,所以浆液不会向远处流

失；

(2)土中的凝胶体容易压密实，可得到强度较高的凝胶体；

(3)由于是双液法，若不能完全混合时，可能出现不凝胶的现象。

双层管钻杆注浆法是将A、B溶液分别送到钻杆的端头，浆液在端头所安装的喷枪里或从喷枪中喷出之后就混合而注入地基。

双层管钻杆注浆法的注浆设备及其施工原理与钻杆法基本相同，不同的是双层管钻杆法的钻杆在注浆时为旋转注浆，同时在端头增加了喷枪。注浆顺序等也与钻杆法注浆相同，但段长较短，注浆密实。注入的浆液集中，不会向其他部位扩散，所以原则上可采用定量注浆方式。

双层管的端头前的喷枪是在钻孔中垂直向下喷出循环水，而在注浆时喷枪是横向喷出浆液的，其A、B两种浆液有的在喷枪内混合，有的是在喷枪外混合的。图5-8所示为喷枪在各种方法(DDS注浆法、LAG注浆法)在注浆中的状态。

二、注浆施工的机械设备的选择

注浆施工机械及其性能如表5-2所示。现在的注浆泵是采用双液等量泵，所以检查时要检查两液能否等量排出是非常重要的。此外，搅拌器和混合器，根据不同的化学浆液和不同的厂家而有独自的型号。在城市的房屋建筑中，通常注浆深度在40m以内，而且是小孔径钻孔，所以钻机一直使用主轴回转式的油压机，性能较好。但此机若不能牢固地固牢在地面上，则随着注浆深度的加大，钻孔孔向的精度就会产生误差，钻头就会出现偏离。固定的办法是在地面上铺上枕木用大钉固定，其轨距为钻机底座的宽度，然后把钻机的底座锚在两根钢轨上使钻机稳定。

三、灌浆

注浆孔的钻孔孔径一般为70～110mm，垂直偏差应小于1%。注

表 5-2　注浆机械设备的种类和性能

设备种类	型　　号	性　　能	重量(kg)	备　　注
钻探机	主轴旋转式 D-2 型	340 给油式 旋转速度:160、300、600、1000r/min 功率:5.5kW(7.5 马力) 钻杆外径:40.5mm 轮周外径:41.0mm	500	钻孔用
注浆泵	卧式二连单管复动活塞式 BGW 型	容量:16～60L/min 最大压力:3.628MPa 功率:3.7kW(5 马力)	350	注浆用
水泥搅拌机	立式上下两槽式 MVM5 型	容量:上下槽各 250L 叶片旋转数:160r/min 功率:2.2kW(3 马力)	340	不含有水泥时的化学浆液不用
化学浆液混合器	立式上下两槽式	容量:上下槽各 220L 搅拌量:20L 手动式搅拌	80	化学浆液的配制和混合
齿轮泵	KJ-6 型 齿轮旋转式	排出量:40L/min 排出压力:0.1MPa 功率:2.2kW(3 马力)	40	从化学浆液槽往混合器送入化学浆液
流量、压力仪表	附有自动记录 仪电磁式浆液 EP	流量计测定范围:40L/min 压力计:3MPa(布尔登管式记录仪双色 流量:蓝色 压力:红色	120	

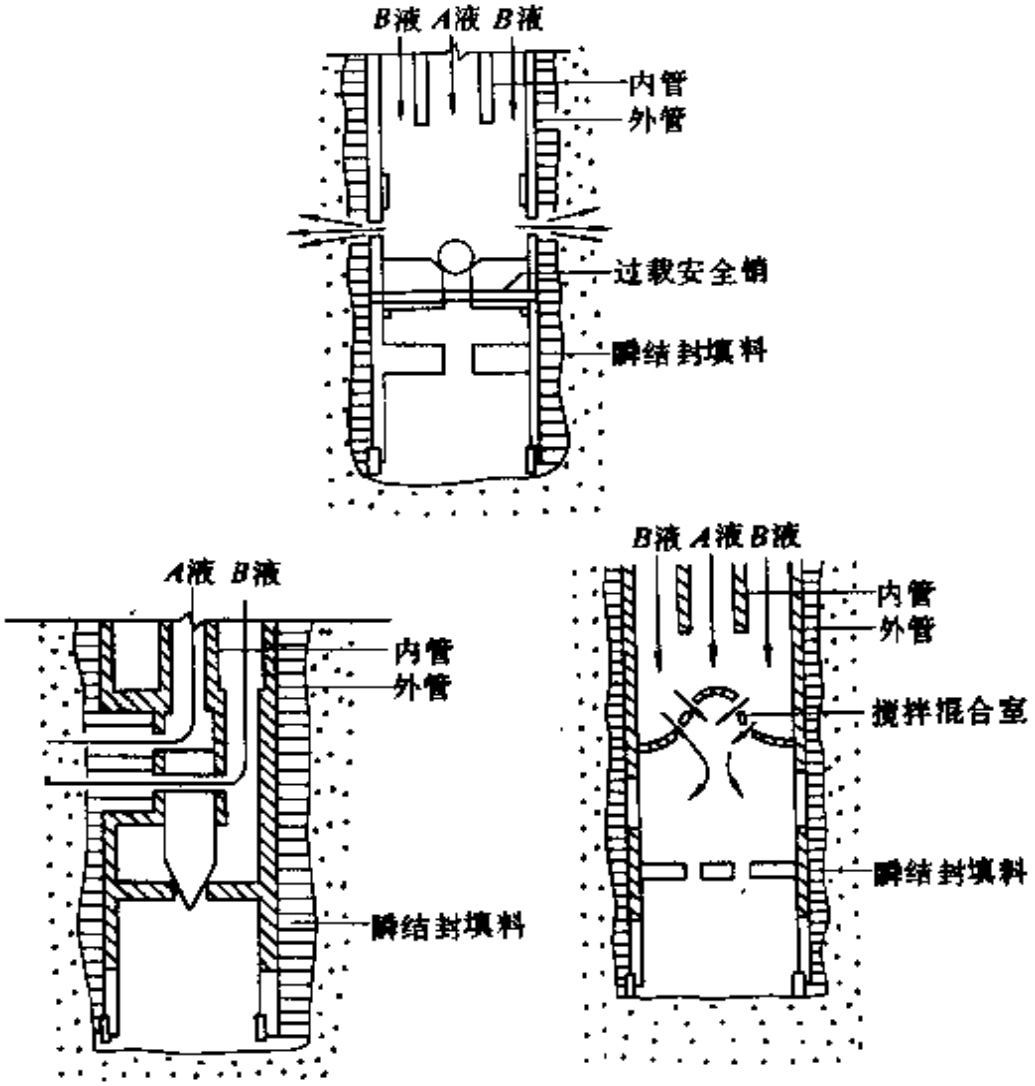


图 5-8　双层管钻杆注浆法端头喷枪

(a)DDS 注浆法;(b)LAC 注浆法;(c)MT 注浆法

浆孔有设计角度时应预先调节钻杆角度,倾角偏差不得大于 20″。

当钻孔钻至设计深度后,必须通过钻杆注入封闭泥浆,直到孔口溢出泥浆方可提杆,当提杆至中间深度时,应再次注入封闭泥浆,最后完全提出钻杆,封闭泥浆的 7d 无限抗压强度宜为 0.3～0.5MPa。浆液粘度 0.08～0.09Pa·s。

注浆压力一般与加固深度的覆盖压力、建筑物的荷载、浆液粘

度、灌注速度和灌浆量等因素有关。注浆过程中压力是变化的，初始压力小，最终压力高，在一般情况下每深 1m 压力增加 20～50kPa。

若进行第二次注浆，化学浆液的粘度应较小，不宜采用自行密封式密封圈装置，宜采用两端用水加压的膨胀密封型注浆芯管。

灌浆完后就要拔管，若不及时拔管，浆液会把管子凝住而将增加拔管困难。拔管时宜使用拔管机。用塑料阀管注浆时，注浆芯管每次上拔高度应为 330mm；花管注浆时，花管每次上拔或下钻高度宜为 500mm。拔出管后，及时洗刷注浆管等，以便保持通畅洁净。拔出管后在土中留下的孔洞，应用水泥砂浆或土料填塞。

灌浆的流量一般为 7～10L/min，对充填型灌浆，流量可适当加快，但也不宜大于 20L/min；

在满足强度要求的前提下，可用磨细粉煤灰或粗灰或粗灰部分替代水泥，掺入量应通过试验测定，一般掺入量约为水泥重量的 20%～50%；

为了改善浆液性能，可在水泥浆液拌制时加入如下外加剂：

(1)加速浆体凝固的水玻璃，其模数应为 3.0～3.3。水玻璃掺量应通过试验确定，一般为 0.5%～3%。

(2)提高浆液扩散能力和可泵性的表面活性剂(或减水剂)，如三乙醇胺等，其掺量为水泥用量的 0.3%～0.5%。

(3)提高浆液的均匀性和稳定性，防止固体颗粒离析和沉淀而掺加的膨润土，其掺加量不宜大于水泥用量的 5%。

浆体必须经过搅拌机充分搅拌均匀后，才能开始压住，并应在注浆过程中不停地缓缓搅拌，浆体在泵送前应经过筛网过滤。

冒浆处理：土层的上部压力小，下部压力大，浆液就有向上抬高的趋势。灌注深度大，上抬不明显，而灌注深度浅，浆液上抬较多，甚至会溢到地面上来，此时可采用间歇灌注法，亦即让一定数量的浆液注入上层孔隙大的土中后，暂停工作，让浆液凝固，几次反复，就可把上抬的通道堵死。或者加快浆液的凝固时间，使浆液出注浆管就凝

固，工作实践证明，需加固的土层之上，应有不少于 1m 厚的土层，否则应采取措施防止浆液上冒。

第二节　高压喷射注浆施工工艺

一、施工机具

施工机具主要由钻机和高压发生设备两大部分组成。由于喷射种类不同，所使用的机器设备和数量均不同，示于表 5-3 和图 5-9、图 5-10 和图 5-11 中。

表 5-3　各种高压喷射注浆法主要施工机器及设备一览表

序号	机器设备名称	型　　号	规　　格	所用的机具			
				单管法	二重管法	三重管法	多重管法
1	高压泥浆泵	SNS-H300 水流 Y-2 型液压泵	30.0MPa 20.0MPa	✓	✓		
2	高压水泵	3XB 型、3W6B 3W7B	35.0MPa 20.0MPa			✓	✓
3	钻机	工程地质钻机 振动钻机		✓	✓	✓	✓
4	泥浆泵	BW-150 型	7.0MPa			✓	✓
5	真空泵						✓
6	空压机		0.8MPa 3m²/min		✓	✓	
7	泥浆搅拌机			✓	✓	✓	✓
8	单　　管			✓			
9	二重管				✓		
10	三重管					✓	
11	多重管						✓
12	超声波传感器						✓
13	高压胶管		φ19～22mm	✓	✓	✓	✓

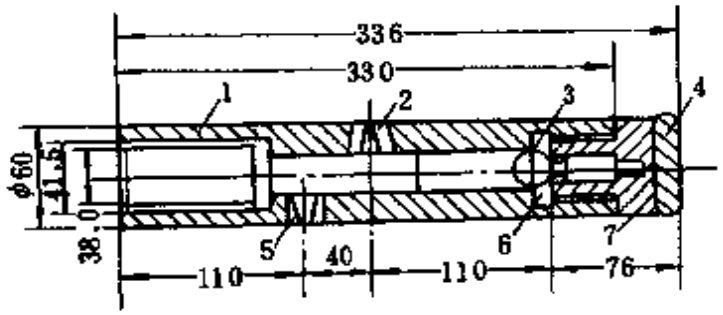


图 5-9　单旋喷管喷头结构图

1—喷嘴杆；2—喷嘴；3—钢球 φ18；4—钨合金钢块；5—喷嘴；6—球座；7—钻头

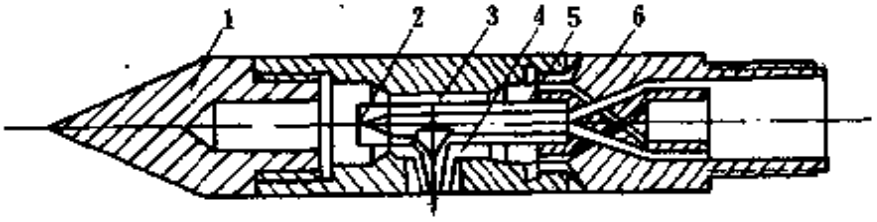


图 5-10　TY-201 型二重旋喷管喷头结构图

1—管尖；2—内管；3—内喷嘴；4—外喷嘴；5—外管；6—外管公接头

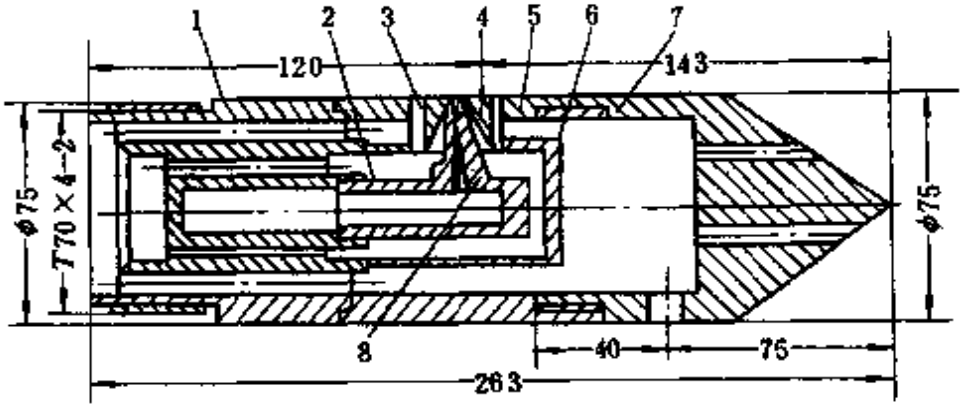


图 5-11　TY-301 型三重旋喷管喷头结构图

1—内母接头；2—内管总成；3—内管喷嘴；4—中管喷嘴；5—外管；6—中管总成；7—尖锥钻头；8—内喷嘴座

多重管的功能，不但可输送高压水，而且还同时将冲下来的土、石抽出地面。因此管子的外径较大，达到 ϕ300mm。它由导流器、钻杆和喷头组成。在喷嘴的上方设置了一个超声波传感器，电缆线装在多重管内。此管系日本的新研究成果，目前我国有关单位还在研制中。

喷嘴是直接明显影响喷射质量的主要因素之一。喷嘴通常有圆柱形、收敛圆锥形和流线形 3 种(图 5-12)。为了保证喷嘴内高压喷射流的巨大能量较集中在一定距离内有效破坏土体，一般都用收敛圆锥形的喷嘴。流线形喷嘴的射流特性最好，喷射流的压力脉冲经过流线形状的喷嘴时，不存在反射波，因而使喷嘴具有聚能的效能。但这种喷嘴极难加工，在实际工作中很少采用。

除了喷嘴的形状影响射流特性值外，喷嘴的内圆锥角的大小对射流的影响也是比较明显的，试验表明：当圆锥角 θ 为 13°～14°时，由于收敛断面直径等于出口断面直径，流量损失很小，喷嘴的流速量值较大。在实际应用中，圆锥形喷嘴的进口端增加了一个渐变的喇叭口形的圆弧角 ϕ，使其更接近于流线形喷嘴，出口端增加一段圆柱形导流孔，通过试验，其射流收敛性较好，见图 5-13。

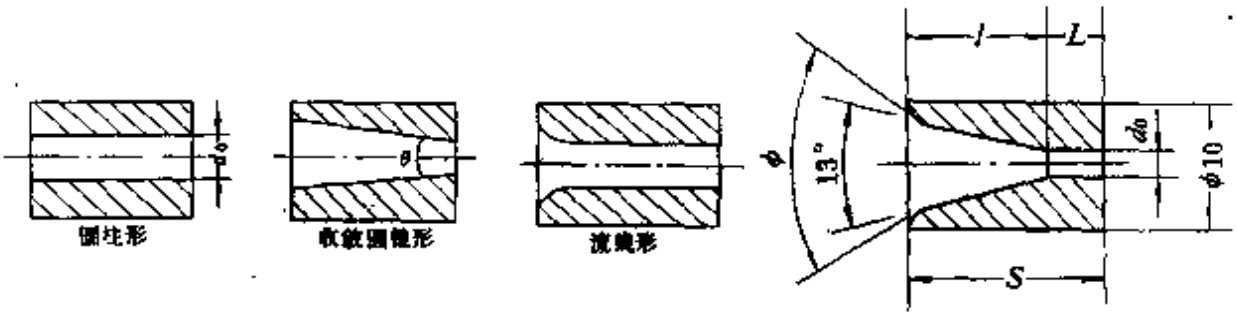


图 5-12　喷嘴形状图　　图 5-13　实际应用的喷射结构

根据不同的工程要求可按图 5-14 选择不同喷头形式。

二、施工顺序

1. 钻机就位

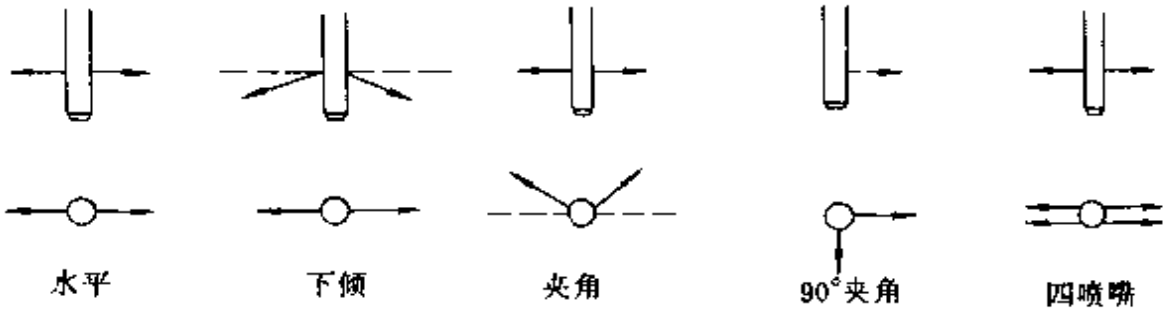


图 5-14　不同形式的喷头

钻机安放在设计的孔位上并应保持垂直，施工时旋喷管的允许倾斜度不得大于 1.5%。

2. 钻孔

单管旋喷常使用 76 型旋转振动钻机，钻进深度可达 30m 以上，适用于标准贯入度小于 40 的砂土和粘性土层。当遇到比较坚硬的地层时宜用地质钻机钻孔。一般在二重管和三管重旋喷法施工中都采用地质钻机钻孔。钻孔的位置与设计位置的偏差不得大于 50mm。

3. 插管

插管是将喷管插入地层预定的深度。使用 76 型振动钻机钻孔时，插管与钻孔两道工序合二为一，即钻孔完成时插管作业同时完成。如使用地质钻机钻孔完毕，必须拔出岩芯管，并换上旋喷管插入到预定深度。在插管过程中，为防止泥砂堵塞喷嘴，可边射水，边插管，水压力一般不超过 1MPa。若压力过高，则易将孔壁射塌。

4. 喷射作业

当喷管插入预定深度后，由下而上进行喷射作业，使用的参数见表 5-4。值班技术人员必须时刻注意检查浆液初凝时间、注浆流量、风量、压力、旋转提升速度等参数是否符合设计要求，并随时做好记录，绘制作业过程曲线。

当浆液初凝时间超过 20h，应及时停止使用该水泥浆液（正常水

表 5-4　常用高压喷射注浆参数

高压喷射注浆种类			单管法	二重管法	三重管法
适用的土质			砂土、粘性土、黄土、杂填土、小粒径砂砾		
浆液材料及其配方			以水泥为主要材料，加入不同外加剂后可具有速凝、早强、抗蚀、防冻等性能，常用水灰比 1∶1，亦可用化学材料。		
高压喷射注浆参数值	水	压力(MPa)	—	—	20
		流量(L/min)	—	—	80～20
		喷嘴孔径(mm)及个数	—	—	φ2～φ3（1 或 2 个）
	空气	压力(MPa)	—	0.7	0.7
		流量(m^3/min)	—	1～2	1～2
		喷嘴间隙(mm)及个数	—	1～2（1 个或 2 个）	1～2（1 个或 2 个）
	浆液	压力(MPa)	20	20	1～3
		流量(L/min)	80～120	80～120	100～150
		喷嘴孔径(mm)及个数	φ2～φ3（2 个）	φ2～φ3（1 个或 2 个）	φ10(2 个)～φ14(1 个)
	注浆管外径(mm)		φ42 或 φ45	φ42、φ50、φ75	φ75 或 φ90
	提升速度(cm/min)		20～25	约 10	约 10
	旋转速度(r/min)		约 20	约 10	约 10

灰比 1∶1，初凝时间为 15h 左右）。

5. 冲洗

喷射施工完毕后，应把注浆管等机具设备冲洗干净，管内机内不得残存水泥浆。通常把浆液换成水，在地面上喷射，以便把泥浆泵、注浆管和软管内的浆液全部排除。

6. 移动机具

将钻机等机具设备移到新孔位上。

第三节　劈裂灌浆施工

一、灌浆机械的选择

土坝灌浆整套设备大体可分为造孔、制浆、灌浆和其他附属设备 4 个部分，各种设备型号繁多，如何结合工程具体情况，选择合适的灌浆机械设备，是保证施工进度和灌浆质量的重要条件。各种灌浆设备技术指标和工作性能，在有关书中已有详细介绍，不再重述，现将目前我国通用的几种灌浆机械作一简单介绍。

（一）造孔设备

造孔机械的种类较多，坝体灌浆常用的有锤击造孔机械、XJ100-A 型钻机等。

1. 锤击造孔机

锤击造孔机由塔架、吊锤、锤箍、钻杆和卷扬机 5 部分组成，见图 5-15。吊锤的重量根据坝体土质的坚硬程度和造孔的深度而定，一般重约 100～200kg。钻杆直径为 50mm，击锤钻头的直径一般比钻杆粗 2～5mm，以减少钻杆与孔壁的摩阻力，为了缩短钻杆拆装的时间，提高钻进效率，图 5-16 所示为钻杆快速连接装置。进行锤击时，卷扬机通过钢丝绳牵引吊锤，沿导杆提升约 0.5～2.0m 高度，操作离合器，使吊锤自由下落击进钻杆。吊锤的起落可用 10kN 卷扬机，

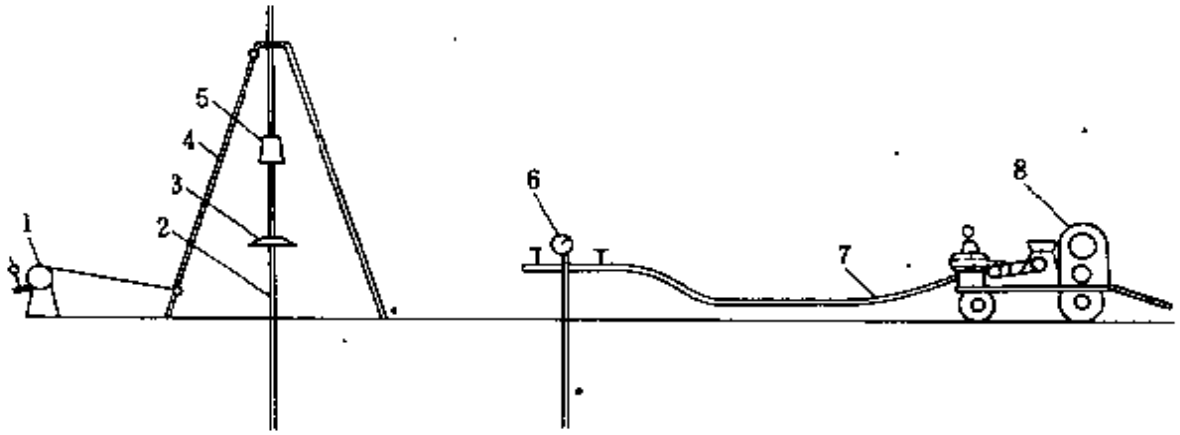


图 5-15　坝体劈裂灌浆设备组装示意图

1—卷扬机；2—钻杆；3—锤罐；4—塔架；5—吊锤；6—孔口压力三通装置；7—胶管；8—联合搅灌机

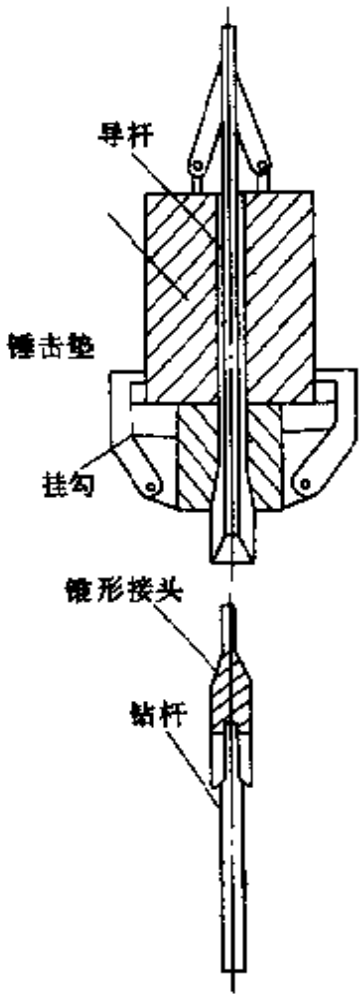


图 5-16　钻杆快速连接装置图

也可用 100m 岩芯钻机的卷扬机。在孔深大于 20m 的情况下，钻杆起拔比较困难，可使用图 5-17活钻头，以减少起拔阻力。当锤进尺达设计孔深后，提升钻杆约 20cm 左右，将钻头弃于坝内，利用钻杆作注浆管进行灌浆，也可考虑使用图 5-18 所示的开合式锤击钻头。这种钻头在锤击结束后，将钻杆稍微上提即可灌浆，最后钻头可随着钻杆提上来，避免了舍弃钻头造成的浪费。但是这种钻头，使出浆口断面缩小，增大了浆液的阻力，不利于坝体的劈裂。

锤击造孔机不仅造孔速度快，占用劳力少，而且比较容易操作，安全可靠。一般一个台班2～3

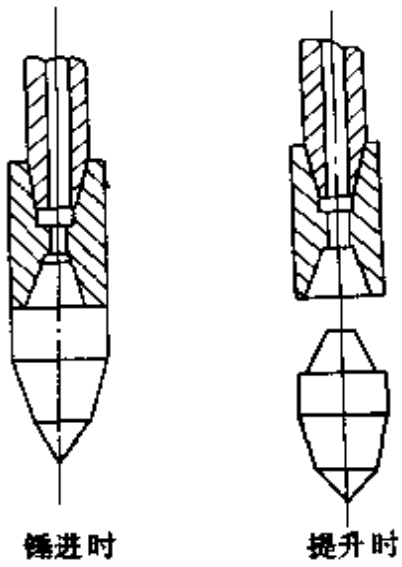


图 5-17　锤击活钻头

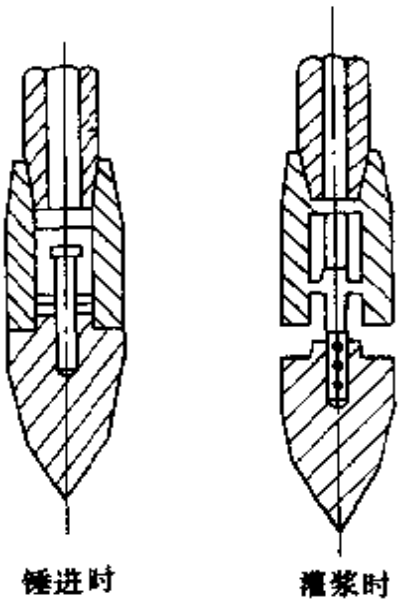


图 5-18　开合式锤击钻头

人即可施工，每台班进尺约 50m 左右。山东省土坝坝体劈裂灌浆大多采用这种机械造孔。

2. C_{30}锤击钻

C_{30}锤击钻是山东省泰安市黄前水利机械厂为适应土坝坝体劈裂灌浆工程需要而研制的配套打孔机械，经省内外灌浆工程应用，效果良好，经不断改进的同类型设备双导杆锤击钻的性能更为稳定，且操作方便，已被广泛采用。

C_{30}锤击钻的主要规格参数有：

锤孔深度 30m；

锤孔直径 ϕ75mm；

钻杆直径 ϕ50mm；

吊锤重量 300kg；

卷扬能力 20kN；

配用动力 7.5kW；

钻进速度 100～250m/(台班)(粘性坝体)。

(二)WJ 型搅拌机

1. 结构形式

搅拌机的种类虽然较多，但其结构形式和原理是一致的。一般由机架、搅拌、拌浆、筛浆机构和动力部分组成。

2. 主要技术规格

WJ 型搅拌机的主要技术参数见表 5-5 所示。

表 5-5 WJ 型搅拌机的主要技术参数

技术参数	WJ60 型	WJ100 型
搅浆量	60L/min	100L/min
最大浆液相对密度	1.5～1.7	1.5～1.7
所需动力		10kW
小出浆口胶管内径		64mm
搅浆筒直径	φ500mm	φ600mm
搅浆轴转速	530r/min	530r/min
重 量	700kg	750kg

3. 性能特点

WJ 型搅拌机可以搅制各种粘土浆、粘土水泥浆和水泥浆等。该机可同时进行搅浆、筛浆、拌浆、连续作业，搅拌效率高，搅制的浆液稳定性好，可以搅制粗稠浆液。

4. 使用与维修

(1)机架要固定在地架木上，放置要水平；

(2)各润滑部位要经常上油；

(3)所用浆料若含有较大石块时，应用 0.25～0.5 孔/cm² 的筛

子过筛，以免发生卡住和扭坏搅臂事故；

(4)搅臂、夹板、筛布、盘根易损件，应经常检查适时维修或更换。

(三)HB 型灌浆泵(见前述)

1. 工作性能和特点

HB 型灌浆泵，是专门为土坝灌浆而设计的一种泥浆泵。该泵能够灌注密度大、泥浆稠的浆液，工作性能好，灌浆效率高。灌浆泵的活塞采用镀铬，用盘根密封。因此，使用寿命长，维修方便，体积小，重量轻，便于移动和操作。

2. 主要技术参数

HB 型灌浆泵分为 HB50/15 型和 HB80/10 型两种结构型式。其技术参数见表 5-6 所示。

表 5-6 灌浆泵技术参数

技术参数	HB50/15 型	HB80/10 型
输浆量(L/min)	50	80
最高工作压力(kPa)	1500	1000
活塞往复次数(次/min)	150	150
最大浆液粒度(mm)	<5	<5
活塞直径(mm)	85	100
冲程(mm)	75	75
重量(kg)	260	270

(四)WJG80 型搅灌机

1. 结构型式

WJG80 型搅灌机由搅浆系统、灌浆泵、动力机、行车系统 4 部分组成。根据所配的动力型式不同，又分为 WJG80-1 型和 WJG80-2 型搅灌机，其结构型式分别见图 5-19、图 5-20。

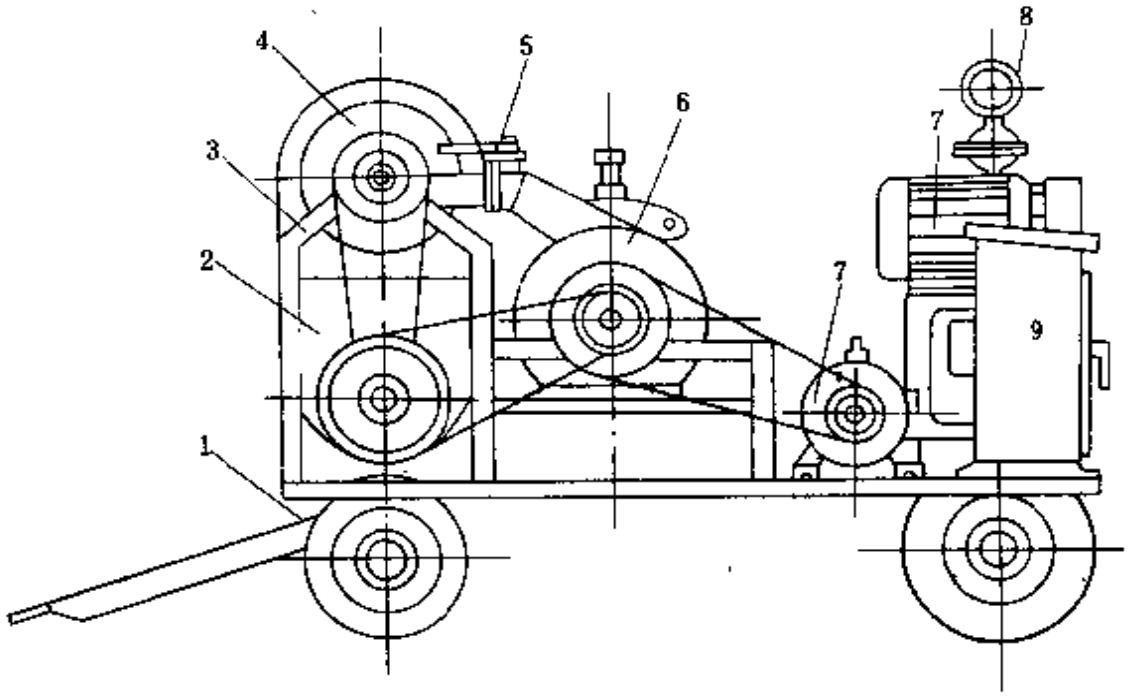


图 5-19　WJG80-1 型搅灌机结构图

1—车轮；2—拌浆机构；3—机架；4—筛浆机构；5—闸门；
6—搅浆机构；7—电动机；8—灌浆泵；9—控制箱

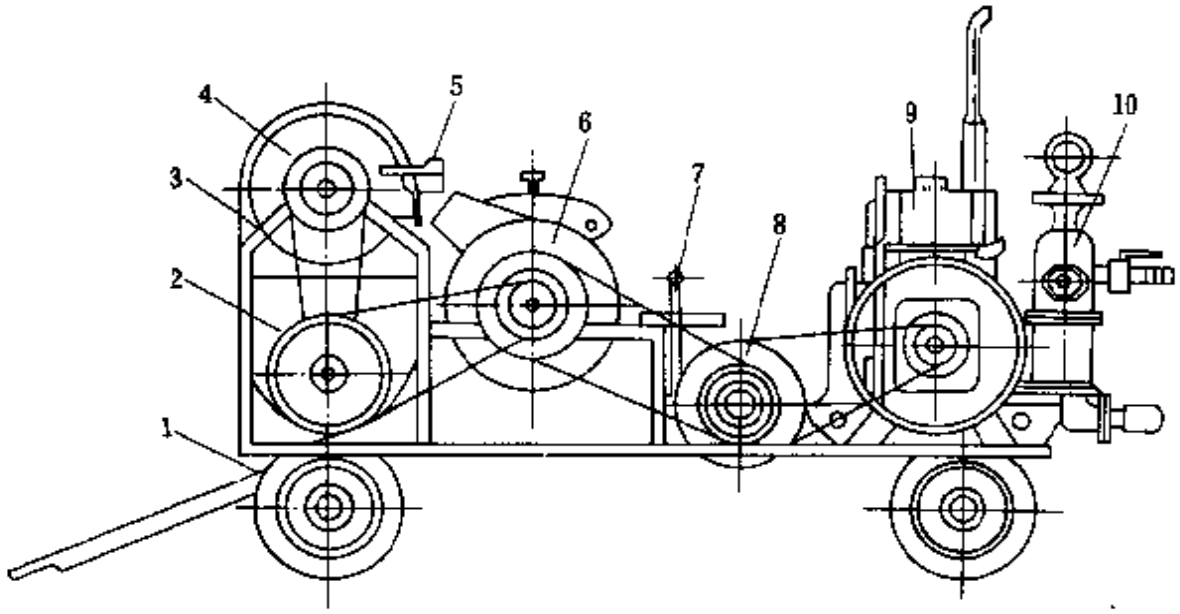


图 5-20　WJG80-2 型搅灌机结构图

1—车轮；2—搅浆机构；3—机架；4—筛浆机构；5—闸门；
6—搅灌机构；7—离合把手；8—大带轮；9—柴油机；10—灌浆泵

2. 主要技术规格

WJG80 型搅拌机主要技术规格见表 5-7 所示。

表 5-7　WJG80 型搅灌机的主要技术规格表

类别	序号	项目	规格	
			WJG80-1 型	WJG80-2 型
搅浆系统	1	型　式	双筒卧式	
	2	搅制浆量	100L/min	
	3	最大浆液相对密度	1.5g/cm³	
	4	浆筛规格	4 孔/cm²	
	5	搅浆轴转速	520r/min	
	6	拌浆轴转速	128r/min	
	7	筛浆轴转速	42.7r/min	
	8	搅浆筒容积	280L	
	9	拌浆筒容积	220L	
	10	最大土料粒径	700mm	
	11	允许最大石块粒径	30mm	
	12	所需动力	130kW	
	13	电机型号	JO₂-61-4	
	14	电机转速	1 460r/min	
灌浆泵	1	型　式	单位用卧式	
	2	缸　数	1	
	3	输浆量	80L/min	
	4	活塞直径	100mm	
	5	活塞行程	75mm	
	6	活塞往复次数	150 次/min	
	7	最高工作压力	1 000kPa	
	8	最大浆液密度	1.8g/cm³	
	9	最大浆液粒径	5mm	
	10	铅直输送高度	20m	
	11	水平输送距离	150～200m	
	12	大带轮转速	468r/min	
	13	输浆胶管内径	51/mm	
	14	泄浆胶管内径	32/mm	

续表 5-7

类别	序号	项目	规格	
			WJG80-1 型	WJG80-2 型
灌浆泵	15	所需动力	4kW	
	16	电机型号	JO_2-41-4	
	17	电机转速	1 440r/min	
全机	1	柴油机型号		
	2	柴油机功率		
	3	柴油机轮转速		
	4	重量	1 400kg	
	5	前轮转向角	<30°	
	6	牵引行驶速度	<4km/h	
	7	外形尺寸(长×宽×高)	2 250mm×1 750mm ×1 500mm	2 600mm×1 750mm ×1 600mm

3. 工作性能特点

WJG80 型搅灌机的特点是:具有搅浆、筛浆、拌浆防沉自动化,全机可自动连续性搅灌作业。对粒状或块状土料,不论其含水量多少,均可直接搅灌作业,而不必进行先期粉碎、筛选。

本机结构紧凑,工作效率高,能进行机动牵引慢速行驶,也可以人工推拉,移动方便。

本机主要用于土坝和地基灌浆工程中浆液的搅拌与灌注。可搅灌符合灌浆工艺要求的均质泥浆、土与砂混合浆、粘土水泥浆、水泥浆、水泥砂浆及其他多种混合浆液。

4. 使用与维护

(1)搅浆系统　开车前,对搅浆系统应做好如下准备:①检查各部机件有否松动;②检查搅灌机是否呈水平放置状态;③检查所有干料是否有超过 30mm 以上的大石块,受潮变硬水泥块,有则予以清除,以免产生扭坏搅臂及筒壁事故。

运转和操作时，要注意下列几方面的问题：①开车后要先搅制一段时间的稀浆，使浆液通道得到冲洗和润滑，然后逐步提高浆液所需稠度；②停机前应停止加干料，以清水冲洗通道；③按照浆液稠度要求，随时将拌浆筒内的浆液进行质量判断或用密度计测定，有不符合要求时，应调整加入干料及水的比例；④根据当地干料特性，调节闸门启闭大小，以控制搅浆的效果和浆液质量；⑤干料含有砂、石的多少不同，对搅筒内零件的磨损程度也不同，应经常打开顶盖，检查搅臂及甩浆板的松紧情况，并及时修配以免搅臂松脱造成事故；⑥筛网容易磨损，应经常检查和更新，以免大量粗料进入灌注系统，产生堵塞事故；⑦密封填料应经常压紧和更新，不能在漏浆情况下工作，以免浆液中的砂料过早磨坏塞套。

故障与排除方法见表 5-8 所示。

表 5-8　故障与排除方法表

故　障	发　生　原　因	排　除　方　法
1. 搅浆量降低	1. 搅浆轴转速不足； 2. 搅浆零件磨损严重； 3. 增多了难于粉碎的干料； 4. 干料中混入柴草大石块堵塞了出浆口	1. 检查动力机转速及皮带松紧； 2. 更换已损零件； 3. 尽量选取适宜干料； 4. 打开闸门的法兰清除障碍
2. 启动困难	1. 皮带松弛或过紧； 2. 搅浆筒内预先加料太多； 3. 搅浆筒内有沉积砂石； 4. 电源电压不足	1. 调整皮带张紧度； 2. 启动时搅浆筒内料水低于筒容积的 1/3； 3. 将泥砂清除或冲起后再启动； 4. 根据输变电线路情况处理
3. 排除生料多	1. 硬质粘土难于粉碎，闸门开的太大； 2. 使用筛网太密不符合规定。	1. 调整闸门开关，选用适宜土料； 2. 尽量选用规定的筛网
4. 振动较大	搅臂长短宽厚差别太大，产生偏重，转动不平衡。	将搅臂制成长短宽厚统一
5. 填料漏水	1. 填料太松或磨损； 2. 塞套磨损	1. 压紧或更换填料； 2. 更换塞套

(2)灌浆系统　开车前应做好以下准备工作：①检查各机件是否有松动；②检查油标尺，判断齿轮箱内是否有足够的机油及清洁度（一般用 40 号机油，也可根据当地气候特点选用）；③检查各管道连接是否完好，如果装有分浆控制阀不应全部关闭；④安装压力表时，先检查油室内是否装满机油。运转和操作时，应做好下面几点：①开泵时，先用清水或稀浆冲洗和润滑浆液通道，特别是新装的胶管更应注意先用稀浆冲洗后，再压注所需稠度的浆液；②开泵时先观察拌浆筒内是否储存了足够的浆液；③本泵无安全限压装置，工作时应随时注意压力表的反应，如有超压反应，即停车查其原因，进行检修处理。故障与排除方法详见表 5-9。

表 5-9　故障与排除方法表

故　障	发　生　原　因	排　除　方　法
1. 不吸浆	①泵缸或吸浆管道漏气； ②进浆管道堵塞	①检查漏气情况，设法排除； ②清除异物或砂石沉积等
2. 出浆减少或停止	①阀球被异物或阀网卡住； ②填料密封不严空气进入泵缸； ③球或法兰盘磨损严重，产生间隙后大量回浆	①清除异物或更换阀网； ②压紧或更换填料； ③更换已换件
3. 活塞填料漏浆	①填料密封不严； ②活塞磨损严重； ③如原橡胶填料缺油脂时易磨损	①压紧或更换填料； ②更换活塞； ③经过一段时间后应向橡胶中添加适量润滑脂
4. 传动部分响声异常	①连杆大端瓦磨损使铜瓦与曲轴配合间隙增大； ②滚动曲轴损坏； ③齿轮严重磨损或其键松动	①调整连杆铜瓦垫片厚度，并根据情况重新研合铜瓦； ②更换已损轴承； ③更换已损件
5. 压力突然下降	①输浆管路突然被脱开； ②浆液突然冲破阻碍，灌入坝体中大型洞穴或坝体冒浆	①修复管道； ②根据具体情况处理
6. 压力表指针不动或达不到规定值	①压力表可能损坏； ②可能产生上述 1、2、5 等故障	①更换压力表； ②参见表 1、2、5 排除方法

(3)动力机 WJG80-1 型搅灌机　配用动力机(电动机)时，应注意如下几点：①启动时先检查各机组的旋转方向是否符合要求，如不符合应调整电动机的接线；②经常检查各部分电器的紧固和绝缘情况，发现器件松动和绝缘不良造成的器件发热或氧化，应及时修理和更换；③交流接触器如发生不正常的噪音，应立即进行检修；④电源电压应不低于额定电压的 5%；⑤电器箱应经常保持清洁干燥，避免泥水溅入。

WJG80-2 型搅灌机一般配用柴油机作动力。柴油机启动前应先打开离合器，启动后再合上，使机组开始运转。使用灌浆泵牙嵌式离合器时，一定要先使用柴油机离合器，将转动轴减为低速时再用，否则，在高速时合用会撞坏嵌牙。

(五)附属设备

坝体劈裂灌浆，除了上述介绍的一些主要灌浆机械设备外，还需要一些附属设备，如抽水泵、储水箱、输浆管、快速接头、孔口装置和泥浆比重秤等。

1. 抽水泵和储水箱

先由水泵将水抽入储水箱，再由储水箱不断地向搅浆机供水。

2. 输浆管

它是使浆液由灌浆泵输送到注浆管的连接部分。所以对输浆管的要求，既满足灌浆所需的压力，又使浆液在管内流动通畅。

3. 快速接头

它是两条输浆胶管的连接装置，为装拆输浆管路节约了时间。

4. 孔口装置

灌浆孔安装三通管测压器，主要是为装压力表测试灌浆正负压力，并装有进浆和排浆阀门。

5. 泥浆比重秤

它是测量泥浆相对密度的仪器，借以满足灌入适宜的泥浆，同时为换算干土灌入量提供依据。

二、施工技术

自 70 年代起，我国各地通过大量灌浆工程实践，总结出了不少施工经验，对指导当时的灌浆施工起到过积极的作用。但是由于当时灌浆机理不清，其灌浆工艺多属充填式灌浆，充填式灌浆虽然也能够取得一定的效果，但是仍不够十分理想。

到了 70 年代后期，山东省水利科学研究所提出了土坝坝体劈裂灌浆机理，给提高灌浆施工方法和工艺奠定了理论基础，并进而在劈裂灌浆工程实践和理论上产生了飞跃，总结出一整套合理的施工工艺。因此，克服了施工的盲目性，保证了在各条件下的灌浆质量，使施工进度加快，造价降低。实践证明，在进行灌浆施工时，应针对坝体质量或几何形状、坝料土质物理力学性质和主要化学成分不同，采用不同的灌浆方法和施工工艺，才能取得满意的效果。

灌浆施工是处理好土石坝隐患的关键，施工工艺合理与否，涉及灌浆工程的成败。为此，在灌浆施工前应做好充分准备，诸如资料搜集，施工设计，观测仪器准备与安装，料物准备，机械选择，施工能源准备等。

(一)施工前的准备工作

为了搞好施工设计，必须首先了解和搜集被灌土坝的有关技术资料，分施工期和运行期两个阶段进行。

1. 施工期

应摸清水文地质和清基情况，筑坝土料的物理力学性质和主要化学成分，施工季节，每层铺土厚度，碾压机械和碾压遍数，干密度合格率，施工接头位置、数量、处理办法和质量，土坝合拢口的位置，合拢时的具体情况及质量；施工期间坝体有无出现裂缝，裂缝的平面位置、走向、宽度及处理方法；防渗体内有无不合格的土料土坝，位置、数量及高程；以及与施工设计有关的坝体渗透稳定和变形稳定方面的资料等都应搜集。

2. 运行期

自水库蓄水后历年来坝体沉降、水平位移情况；浸润线水位与水库水位的变化关系，各断面浸润线出逸点高程；孔隙压力变化过程；坝面裂缝位置、长度、宽度、深度及处理方法；塌坑的位置，原因及处理方法；坝体坝基漏水位置及渗漏量与库水位的变化关系。必要时还需用钻探、井探或电法查明土坝隐患位置。

在上述资料调查了解基础上，进行综合分析研究，确定是否在灌浆适用范围之内。

(二)施工设计

施工设计与灌浆工程设计内容是不同的。灌浆工程设计内容较多，涉及面广，诸如工程问题分析，设计方案对比，坝体应力-应变验算，灌浆压力设计，浆体帷幕厚度设计，浆体析水浓缩和排水固结计算，灌浆期坝体稳定验算，工程概算和预算等。而施工设计要求较简单，是施工经验和研究成果的应用，起到直接指导施工人员行动守则的作用。所以，有的工地将施工设计中的有关内容写进守则或施工技术要点中去。施工设计主要内容有如下几个方面：

(1)施工设计图表　参考本节施工记录与整理内容，此处不再陈述。

(2)压力控制　灌浆压力系指孔口压力表读数，精度要求±10kPa。控制灌浆压力“以内劈，外不劈”为原则，在正常工艺下按下列原则控制。对于初灌和复灌时不起压的钻孔，控制压力为：

$$p_0 \leqslant 50\text{kPa} \tag{5-2}$$

一般坝体灌浆压力不超过钻孔起裂压力和土柱自重力加土的抗拉强度折算为控制压力，即：

$$\left.\begin{aligned} p_0 &\leqslant (2.5-\mu)\sigma_3-(\mu\gamma_{\pm}+\gamma_{浆})gh+\sigma_t \\ p_0 &\leqslant (\gamma_{\pm}-\gamma_{浆})gh+\sigma(\text{适用于 } h>10\text{m}) \end{aligned}\right\} \tag{5-3}$$

两者取较小者。根据国内经验，控制压力一般为50～300kPa。在缺少资料情况下，可取式(5-3)中的第二式估算。

(3)灌浆方法和对泥浆要求　灌浆方法一般要求先稀后浓，即灌浆开始用稀浆，待坝体劈开后用浓浆。泥浆密度在1.2～1.6g/cm³之间。泥浆含粘量20%～30%，含砂量10%～30%，含粉量50%左右，上述泥浆流动性和析水性都能满足灌浆要求。

(4)位移控制　泥浆灌入坝体内，将使坝体产生压缩和位移。每次灌浆时，一般坝肩位移量应控制在1～2cm范围内。坝体质量差的位移量可适当放宽，但停灌后必须有回弹量；位移比$\eta<m$（m为坝坡坡度；η为坝肩处的横向水平位移量与该点铅直位移量之比值）。

(5)裂缝控制　劈裂灌浆在孔内下3～5m深的护壁管，以控制坝顶裂缝和发展。一旦坝顶出现裂缝，其宽度应控制在1～3cm内，长度在20m内，每次停灌后12h内能回弹闭合为宜，不能回弹闭合者作阻浆盖。

(6)一次灌浆量和灌浆次数控制　每次灌浆量和灌浆次数应根据坝高和吃浆量的大小确定，一般第一次孔初次灌浆量控制在10～30m³。复灌次数一般不少于5次，间隔时间5h左右。每次复灌量10m³左右。

(7)观测要求　为灌浆施工服务设置的沉降位移、土压力和孔隙水压力装置，每天定时观测1次，灌浆坝段灌浆时临时加测。灌浆时孔口压力的变化随时由专人观测记录。

(8)灌浆设施　灌浆设施主要有造孔机、搅灌机、电机或柴油机等。根据工地条件和施工工程量的大小来选择合适的机械型号。如土坝较高、钻孔深，需准备100型钻机；钻孔浅、数量少，锤击管就可解决问题，为了降低工程费用，C_{10}锤击钻较为经济，在一般情况下购置HB型灌浆泵即可满足灌浆需要；如坝体质量差，吃浆量大，可选择2DN-6/30双缸泥浆泵。动力机械应选择与被动机相适应的型号，以避免"小马拉大车"损坏动力机，也应避免"大马拉小车"造成浪费。搅浆机的选择，同样是根据吃浆量的大小确定，吃浆量大的可购置WJ80型搅灌机；灌浆工程量很小，可人工制浆。

(9)附属设备　有钻杆、套管、穿心胶球、孔口三通装置器、输浆胶管、快速接头、管钳、活扳手等。这些设施应有足够的数量，不能因短缺而窝工。

(10)浆料　坝体劈裂灌浆一般采用粘性土料，所以在施工前应选好料场。对每个料场的土料都应分别做其物理力学性质及化学成分试验，根据试验结果确定理想的料场。

坝体灌浆用水，可用库水或河水，但我国北方地区有时遇到干旱年份和季节，水库和河流枯竭，则需引水或打井解决水源问题。而南方地区存在白蚁危害坝体，所以在浆液中需加入适量的杀虫剂，将白蚁杀死。选择杀虫剂应本着对人畜毒性小，而对白蚁杀伤力强的药物。

(11)能源　灌浆需要能源，施工工地如有电源，并在坝顶上有电源线最理想，可引到坝面安装配电盘。如电源较远，引电源或用柴油发电机作能源，两者应通过经济比较择其一。若用柴油机作能源，油库应布置在合理位置，其原则一是注意安全，二是使用方便。

(三)原型观测准备

1. 原型观测仪器

在一般情况下观测仪器应有水准仪、经纬仪、水平位移计、压力表、钢卷尺；如有特殊要求或大型水库土坝，尚需增设土压力盒、孔隙水压力计、渗压计、接收器、集线箱、稳压器等。仪器在埋设前应进行率定和调试。埋设后将线路引入观测房内。

2. 观测桩

原有坝体沉降、位移观测基点和后观点。临时观测桩应设在河谷坝段最大坝高处，或有纵向裂缝严重的部位，以监视灌浆期坝体位移状态，确保灌浆期安全。

(四)施工工艺流程

1. 场地布置和劳力组合

(1)场地布置　土坝灌浆场地布置应根据地形、料场、水源位置

和灌浆泵的扬程高低等条件而定。其原则是保证灌浆质量，便利施工，节约能源，减少运距，提高效率。在土坝下游或上游附近有充足的灌浆土料和水源，灌浆泵的扬程又能送到坝顶的情况下，可考虑搅拌机布置在坝下，这样可大大节省运送土料的劳力。若料场在坝端附近，其高程与坝顶相近，搅灌机可布置在坝顶，以利土料运输。土料在坝顶的堆放位置，应根据灌浆泵的输浆距离，有计划堆存，避免两次运输。如灌浆泵最大输浆距离 150m，堆存土料的最大距离可在 300m。图 5-21 为土坝坝体劈裂灌浆流程图。此图看来较简单，但包括的内容较多，劈裂灌浆的要点可基本概括，可谓多年来灌浆经验的总结，对劈裂灌浆施工有较大的实用价值。

(2)劳力组合　人员配备与劳力组合适当与否，直接影响施工进度、工程造价。如人员配备和劳力组合基本合理，施工有条不紊，可加快速度，节省开支。劳力组合要根据土坝质量好坏、隐患多少、吃浆量大小、机械化程度和机组组合形成等因素来考虑。在具体安排上，要分工明确，密切配合，人员编制略有余数，但要尽量减少后勤人员。土坝坝体灌浆在劳力组合上，要考虑以下两点：①作业组划分。目前大中型水库土坝灌浆施工，一般分运土、钻孔、搅灌、后勤、观测试验 5 个组。各组应协调一致，互相配合，以提高工作效率。各组的任务：运土组将指定料场的土料，运至指定的集土区；钻孔组负责钻孔，下注浆管、护壁管及起拔注浆管等；搅灌组担任制浆、灌浆、机械维修；后勤组负责易损件的采购、仓库保管，收发灌浆附属设备、零部件、工具和劳动保护用品，生活、安全保卫工作等；观测组负责坝体沉降位移、应力、裂缝、渗流、孔口压力等观测，并随时对资料进行整理分析，指导现场施工，确保灌浆工程在施工期的安全和施工质量。②作业组定员，由于所用的钻、灌设备不同，各地在作业组划分和人员数额上都有一定差别。运土组的人数，可根据料场的远近、运土工具的机械程度临时确定；钻孔组 3～5 人(锤击管钻孔若用机械启动一般 3 人，用旋转钻孔需 5 人)；搅灌组 7 人；后勤组 5 人；观测组的人数按工程的

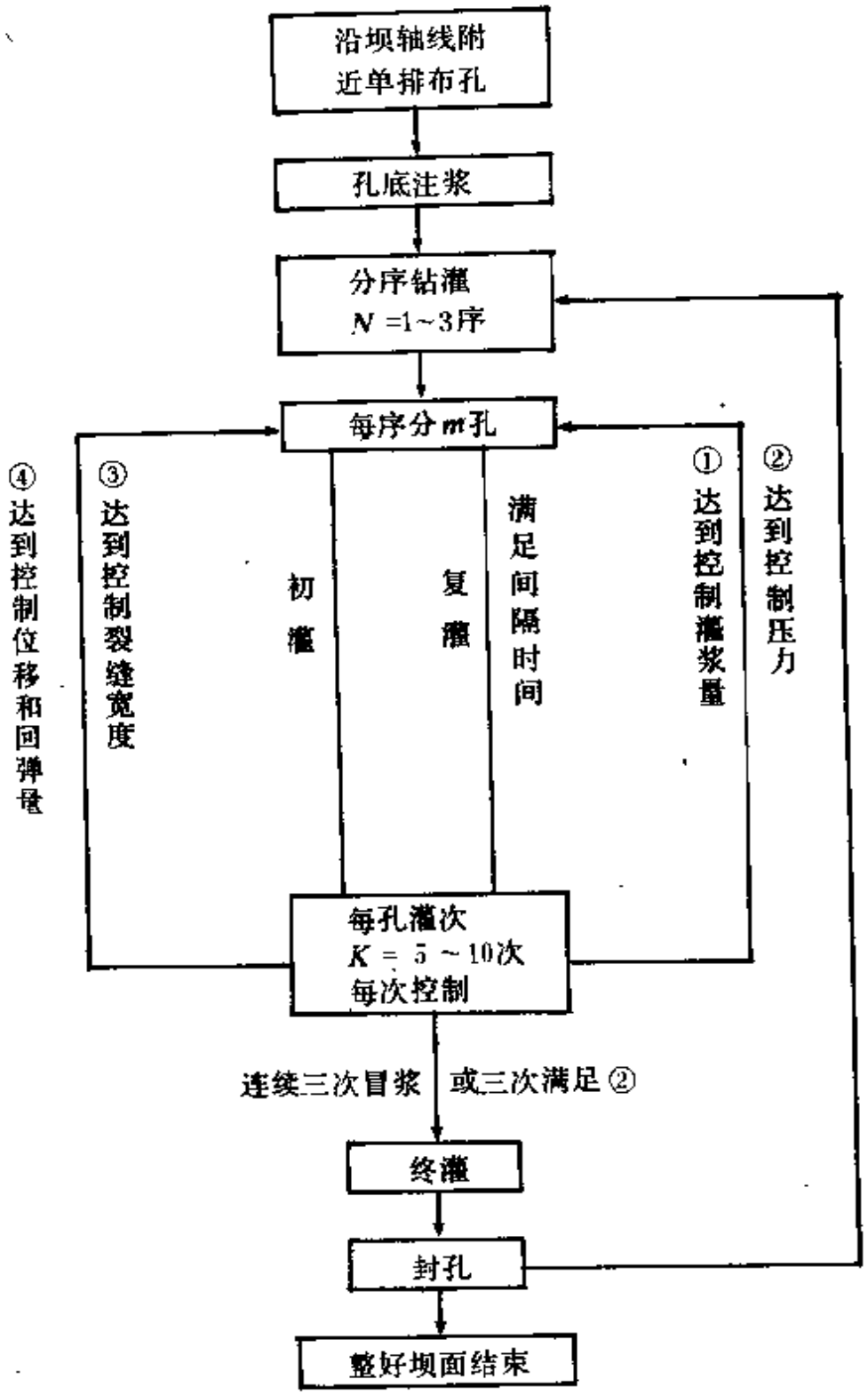


图 5-21　土坝坝体劈裂灌浆流程图

类型和重要性而定(大型水库的土坝一般需 15 人左右,中小型水库的土坝一般 3 人左右)。不计运土组,每套机组大体需 20～30 人。有的工地只有灌浆、钻孔和运土组,共需 20 人左右,观测人员临时确定。作业组的划分和人员编制,应因地制宜,其原则是不窝工不忙乱,使各组工作量基本平衡,有利提高工作效率。

2. 灌浆孔的布置

采用劈裂式灌浆,以在坝轴线上单排布孔为好:其一,灌浆施工方便;其二,坝轴线附近的小主应方面基本上是铅直的,有利于劈裂,便于形成竖直连续的坝体防渗帷幕。

如水库控制运用,水位较低,坝顶较宽,施工方便,灌浆孔还可以在坝轴线稍偏上游。这样灌浆后形成的帷幕偏上游,就可降低帷幕下游坝体内的孔隙水压力,增加坝体稳定性。

在重要的土坝中,是否要布置多排孔,有的土坝上部含水量很低,或者防渗体土料混杂,夹有石块或土块架空等,除布置主排除外,再布置多排浅密孔进行辅助性的充填式灌浆也是必要的。因为通过多排浅孔的灌浆,可以引起上部含水量低的土区能均匀湿化变形,增加土密实度;同时,架空的孔得到泥浆的充填,石块也能被泥浆包裹,从面改善坝体结构,增加土体强度和防渗效果。

3. 钻孔

钻孔的方法和孔径的大小应根据各地条件和坝体的高低、成孔的深浅而定。

(1)钻孔方法　因钻进的形式不同,钻孔分为冲击式钻孔(锤击钻孔)和钻机钻孔两种方法。①锤击钻造孔适用于坝高在 25m 以内的坝体,所以设备有三脚架、ϕ50mm 钻杆、锥形钻头、锤箍和 100～200kg 重的穿心吊锤组成。进行锤击时,卷扬通过钢丝绳牵引吊锤沿导杆上升到约 0.5～4m 的高度,这时立即放松钢丝绳,让吊锤自由落下,对钻杆箍进行猛烈锤击,使钻头克服土体阻力向深处钻进。这种钻孔方法,当钻孔深度超过 25m 后拔起钻杆比较困难。近年来将

提升吊锤改为提升钻杆，使钻杆带着吊锤提升到一定高度后突然放下，让钻杆及吊锤靠着自重落下冲击钻孔，克服了起拔钻杆的困难。②钻机钻孔适用于较高的坝体。常选用的型号有XJ100-A型钻机、DPP-100型汽车钻探机、XJ300型钻机。XJ100-A型和XJ300型钻机，使用时应牢固地固定在基台木上，呈水平状态，塔架天车垂直提升线和主轴中心应在同一垂线上，动力机与钻机的最佳距离为3.5m，使两机的皮带轮相平行。DPP-100型汽车钻探机是一种装在解放牌汽车上的自动推进的钻孔设备，钻机和灌浆泵都装在汽车上，可成套运输不需拆卸和安装，可节省劳力。使用时将钻头装置在需钻孔的位置，调整轮胎的高低位置整平，将轮胎卡牢，即可工作。

(2)钻孔工艺　低坝用锤击钻进较合适，高坝用钻机泥浆循环钻进已较普遍。近几年来，据灌浆实践和试验，认为粘土坝也可以清水钻进，用劈裂灌浆处理的土坝，多用清水循环钻进，如在四川安县曹家堰坝开挖检查清水循环钻进钻孔，含水量影响范围仅10cm左右。若水柱压力劈裂坝体，大量注进清水，是很不利的。山西省汾河水库，总库容7亿立方米，为水力冲填黄土均质坝，高60m，右坝端裂缝灌浆处理时，用泥浆循环钻进，泥浆密度1.15～1.22g/cm³(即水土比3.8∶1～2.5∶1)较合适，而且进尺快，带入坝体内的水分也不多，起到固壁作用，又对细小裂缝有足够的充填能力。国内还有不少高坝，如甘肃省巴家嘴水库土坝，高74m，也用泥浆循环钻进效果较好。目前认为坝体灌浆用泥浆循环钻进是可取的。

(3)孔径大小　各地灌浆所采用的钻具不统一，钻孔直径大小也不一致，多在25～130mm之间。小直径钻孔比大直径钻孔要施加较大的灌浆压力才能劈裂坝体。一旦坝体被劈开之后，总进浆量并不受孔径大小的限制，而往往受坝体内部应力大小和注浆管粗细长短的限制(将在下面论述)。小直径钻头钻进时磨阻力小，进尺快，工作效率高。

(4)钻孔深度　钻孔的深度，主要取决于坝体存在隐患部位的深

浅，对于高坝，应在施工前探明隐患的深度才能决定孔深，方可取得预期效果；一般孔深应大于隐患深度 1～2m。对于低坝，一般孔深要穿透坝身，达到彻底解决隐患的目的。

（五）制浆和泥浆选择

1. 制浆机械

坝体劈裂式灌浆主要是灌注泥浆，目前国内制造泥浆的机械，多用 WJG80-1 型和 WJ100 型联合搅浆机制浆，这两种搅浆机的结构型式完全一样，于 1976 年由山东省黄前水利机械厂研制成功，主要特点是泥浆可自动过滤，有一储浆筒自动拌浆防沉，灌浆泵和储浆筒直接相连，制出的泥浆质量高，能控制较高的含砂量。

2. 制浆方法

将干土料及清水按适当比例，以适当速度连续均匀地从搅浆筒的一端进料口加入，土料从搅浆筒内经过 6×2 个搅臂，连续高速搅打后，由于泥浆的旋转离心作用，经过另一端的粗浆排浆口排至转筛内，筛选过的细浆便流入拌浆筒内，拌浆轴上有 5×2 个拌浆臂，可以拌动细浆以防沉淀。

粗浆出口可调闸门调节泥浆流量，以控制搅浆质量。

该机在国内土坝灌浆中已普遍应用，并用在援外工程上，普遍认为具有便于移动、轻便、省力、省工的优点。每台班可搅制 20～30t 干土的泥浆。上水、上土、排渣和开车共需 6～8 人。可用 13～17kW 电机带动，也可用 17.6kW（24 马力）柴油机带动。安有 4 个胶轮，可用拖拉机或吉普车慢速带动，也可人力推移，使用方便。

3. 泥浆选用

（1）先稀后浓　各地采用的泥浆密度约在 1.2～1.6g/cm^3 之间。一般在灌浆初始阶段用稀浆，待坝体被劈裂后改用浓浆。坝体被劈裂的标志是孔压力由上升到突然下降，甚至产生负压，输浆胶管被压扁。实践证明，这种先稀后浓的用浆方法，效果比较好。

（2）根据土的性质选用泥浆　坝体土料的物理力学性质不同，应

选用不同物理性质的泥浆，才能获得较理想的灌浆效果。①土坝防渗体系粉质壤土或重粉壤土，库水位不高，含水量又较低，宜用密度在1.2～1.4g/cm³的较稀泥浆，泥浆以含砂量在20%左右，含泥量在20%～30%为宜，其余为粉粒含量。因为泥浆较稀，析出的水分较多，可增加部分坝体土质的含水量，加速湿陷，缩短坝体固结时间。山东省岳庄土坝，为重粉质壤土均质坝，全长857m，最大坝高33.3m，坝顶高程143m，顶宽6m，总库容1 188万立方米。该坝于1968年始建，1969年竣工。由于冬季施工，冻土块上坝，碾压不实，质量很差。据1974年取样试验坝体土质的干密度仅在1.32～1.48g/cm³之间。建坝以来，连年出现纵向裂缝，缝宽约5～15cm，缝长约500～600m。历年曾顺缝做过一般性灌浆，用土总量2 514m³。虽有细小横向裂缝，但坝面征象不明显，随着时间的推移，从1969～1973年，纵向裂缝由坝前肩逐渐向坝后肩发展。历年出现的裂缝见图5-22。由图5-22可见，1973年8月水位达到建坝以来最高水位132.57m时，出现裂缝最大，其位置偏顶后肩，长约250m，宽约20～40cm，且上下错动15cm，同时坝前护坡石随土体沉降，底部裂缝也较过去更为严重。通过坝体沉降观测，1968年10月～1973年1月，一般沉降量为40cm，0＋160（最大坝高）处沉降量达86cm。灌浆前土体含水量为

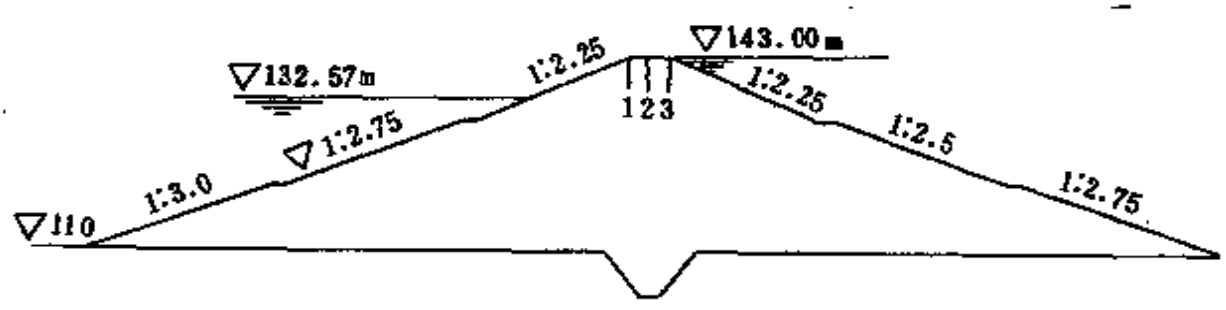


图5-22　山东岳庄土坝历年裂缝情况

1—1969年产生的裂缝；2—1970～1972年产生的裂缝；

3—1973年产生的裂缝

14.16%，较最优含水量为低。1975年进行了裂缝灌浆处理，采用泥浆密度多为1.3g/cm³左右，灌浆期大大加速了坝体的沉降固结(图5-23)，促使坝体向变形稳定方面发展。该坝灌浆结束后11个月开挖

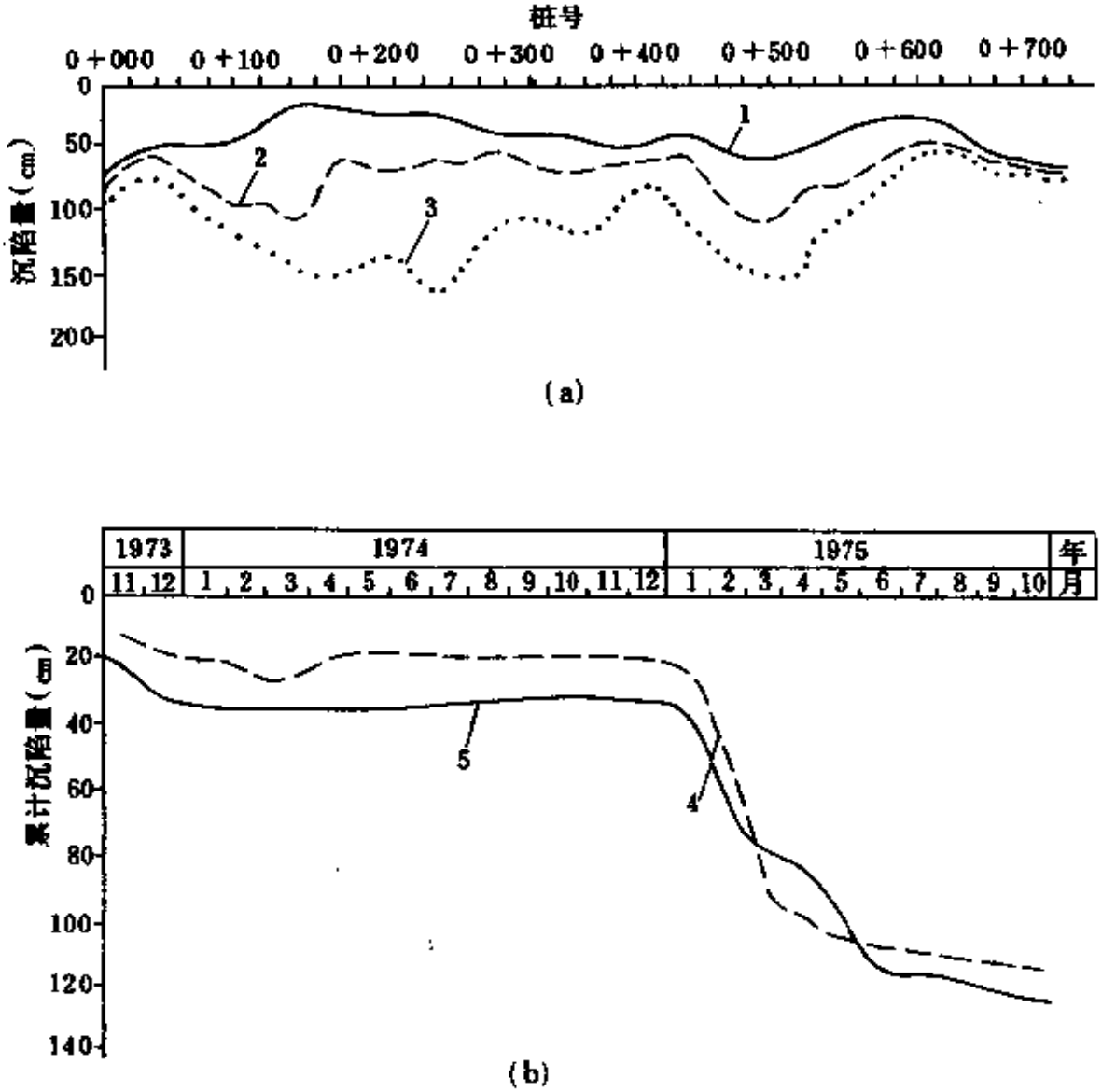


图5-23　岳庄土坝灌浆期沉降固结图

(a)历年沉降量与灌浆期沉降量对比；(b)累计沉降量过程线

1—土坝竣工后坝顶纵断面沉降情况；2—灌浆前坝顶沉降情况；3—灌浆后坝顶沉降情况；4—27号桩灌浆前后累计沉降量；5—31号桩灌浆前后累计沉降量

检查，浆体呈木纹构造，粗细颗粒在浆体横剖面上相间排列，防渗效果良好。灌浆前的1973年当水库水位132.57m时，主坝下游坡大面积润湿，局部渗水；灌浆后的1978年水位达136.8m，原润湿和渗水部位呈现干燥状态，浆体与原坝土结合紧密。浆体和坝体土的物理力学性质见表5-10。表5-10表明，在上述条件下用稀浆灌注，含砂量在20%左右，浆体干密度较大，接近坝体土质，而渗透系数比原坝体土小，抗剪强度等均能满足要求。②若土坝防渗体系含少量砾石的粉质粘土，透水性能较差，也采用劈裂式灌浆，则泥浆密度要大一些，以1.4～1.6g/cm³为宜。因泥浆浓度较大，相应浆液含砂量可适当多一些，流动性和稳定性能仍较好。如山东省张家沟水库土坝，高18.6m，系宽心墙坝，所用泥浆密度为1.6g/cm³，砂粒含量占干土重的45%左右，达1.6g/cm³，渗透系数为2.1×10^{-6}cm/s，效果较好。近20年来，美国水土保持局对俄克拉何马、得克萨斯、犹他和怀俄明等州的12座小型土坝的裂缝进行了灌浆处理。所要求的土料含有相当数量的中、细颗粒的砂子，其塑性指数小于10，砂土比多选用1∶3。最后拌制的泥浆应尽量多掺砂子，以保证泥浆具有足够的流动性和浆性强度。这与上述岳庄坝和张家沟坝所用的泥浆含砂量是相近的。实践证明，含砂量高的泥浆流动性和析水性是好的，干密度和强度比较大。由于泥浆在裂缝中，粘粒随着泥浆析水渗透而集中，形成极薄的防渗能力很强的泥皮，每复灌1次，通过渗水都将形成这种泥皮，所以浆体的渗透系数也较小。③在一般情况下，土坝坝体所灌泥浆是不掺加水泥的，只有在特殊情况下才掺加少量水泥。因为掺加水泥，一是增加工程费用；二是水泥粘土浆固结后干密度太小。如山东生花庵土坝，坝高19m，系宽心墙坝。灌浆时因库水位较高，当时担心浸润线以下泥浆长期不固结，所以采用了粘性土水泥浆灌注，浆液密度1.3～1.5g/cm³，水泥掺量7%左右。灌浆结束一年后开挖检查，结果浆体内孔隙很多，密度低，重量轻，质量不好。浆体的物理性质如表5-11所示。灌水泥粘土浆密度小的原因是水泥硬化快，形成骨架后影

表 5-10　岳庄坝土的物理力学性质

土样	取土深度(m)	含水量(%)	容量(g/cm³)		孔隙比	土粒密度(g/cm³)	流性限度(%)	塑性限度(%)	塑性指数	土粗组成(%)			渗透系数(cm/s)	压缩系数(cm²/kg)	抗剪强度	
			干	湿						砂粒	粉粒	粘粒			C(kPa)	φ(°)
浆体	5	28.2	1.52	1.95	0.8	2.73	30	19	10	8.2	65.9	25.9	2.7×10^{-7}	0.025	10	16.9
	8	23.5	1.50	1.85	0.81	2.72	27	17	10	21.3	56.4	22.3	6×10^{-5}	0.023	50	26.1
	15	24.3	1.63	2.03	0.69	2.74				12.8	53.5	33.7	2.1×10^{-6}	0.023	48	13.5
	20	22.3	1.58	1.93	0.74	2.74				18.8	50.4	30.8	1.85×10^{-5}	0.020		
原坝体土质	5	16.9	1.60	1.87	0.69	2.71	24	16	8	37.0	11.2	21.8	2.4×10^{-4}	0.035	35	26.6
	8	26.2	1.60	2.02	0.71	2.74				13.5	55.7	30.8	2.1×10^{-7}	0.023	13	15.1
	15	23.1	1.55	1.91	0.73	2.74				13.5	54.5	32.0	6×10^{-5}	0.033	101	25.0
	20	20.1	1.62	1.94	0.69	2.73	27	17	10	26.4	18.3	25.3	2.5×10^{-5}	0.023	30	27.5

注：浆体渗透系数大小是有方向性的。平行渗流方向小，垂直渗流方向大，测试时因方向弄乱，6×10^{-5}cm/s 和 1.85×10^{-5}cm/s 可能是垂直渗流方向的测试值。

响坝体回弹压缩，妨碍浆液进一步排水固结。只有在灌浆过程中，如发生了上游或下游水位以下有冒浆，用纯泥浆封堵不住时，或土石结合都漏水需要灌浆时，才考虑掺加部分水泥，以便尽快发挥堵漏作用。④云南省宜威电厂土坝用红土筑成，坝高 37.2m，坝体土质的孔隙比一般大于 1.5，呈大孔隙结构，但湿陷性很小，红土含铁锰结核，胶结物质难溶于水，因而水稳性好，强度较高（$\phi=20°$以上），压缩性低。该坝填筑比较松散，1982 年 2～6 月作劈裂灌浆处理。开始时先用稀浆试灌，旨在使坝体湿陷固结，但效果好。灌浆结束后，随即于 0＋149.9m 处挖探井检查，泥浆已经固结硬化，浆体含水量为 47%，与塑性含水量相同。固结快，剪强度为 $C=14kPa$，$\phi=32°$。

表 5-11　生花庵坝浆体物理性质

采土深度 (m)	含水量 (%)	干密度 (g/cm^3)	湿密度 (g/cm^3)	体　缩 (%)	土粒组成(%)		
					砂粒	粉粒	粘粒
3	94.2	0.74	1.41	9.3	3.4	44.1	52.5
6	83.5	0.8	1.47	22.3	3.4	53.7	42.9
8	83.0	0.82	1.79	9.3	6.4	53.9	39.7

（六）灌浆

1. 灌浆方法

劈裂式灌浆多采用全孔灌注法。全孔灌注法分孔口注浆和孔底注浆两种。实践证明，孔口注浆全孔灌注法吃浆量小，不能保证灌浆质量，因为孔口注浆会使浆液冲刷孔壁。孔壁塌落淤堵钻孔的下部，其实质使钻孔变浅；而钻孔下部因泥浆不流动造成沉淀，导致钻孔下部不能吃浆或吃浆量很小。采用孔底注浆全孔灌注的方法则避免了上述缺点，使孔内泥浆由孔底反向全孔，处于半循环状态，钻孔底部先被劈裂，裂缝逐渐沿小主应力面自下而上的发展，吃浆量较大，浆压坝效果好；同时，停灌后坝体产生的回弹量也大，坝压浆也能取得

良好的效果。

2. 灌浆工艺

(1)孔口下套管　凡钻孔直径超过 70mm 的较大孔径，一般应选适当直径的套管作壁管，在灌浆前将它下至孔口下 3～5m 深处，以防止孔口塌落，减少孔口冒浆，而且更重要的是坝的顶部泥浆压力由护壁管承担，以推迟或防止坝顶表面劈裂，起到“内劈外不劈”的作用，使泥浆在坝体内处于封闭状态，因而可施加较大的灌浆压力，促使泥浆析水固结；当孔口压力消失后，坝体所产生的回弹压力较大，有利于提高泥浆的固结速率和浆体的密实度。实践证明，下护壁管可使浆体防渗帷幕上下厚度基本一致，否则，坝顶表面很快就被劈裂，孔口压力则无法施加。停灌后虽然坝体也产生回弹，但因泥浆表面是自由面，浆坝互压效果则较差，降低了浆体密度，而且形成的浆体防渗帷幕上宽下窄，相差悬殊，与工程防渗要求不一致。

如上述的岳庄土坝(下了护壁管)和西埠土坝(未下护壁管)，浆体产状各不相同，见图 5-24 和表 5-12。

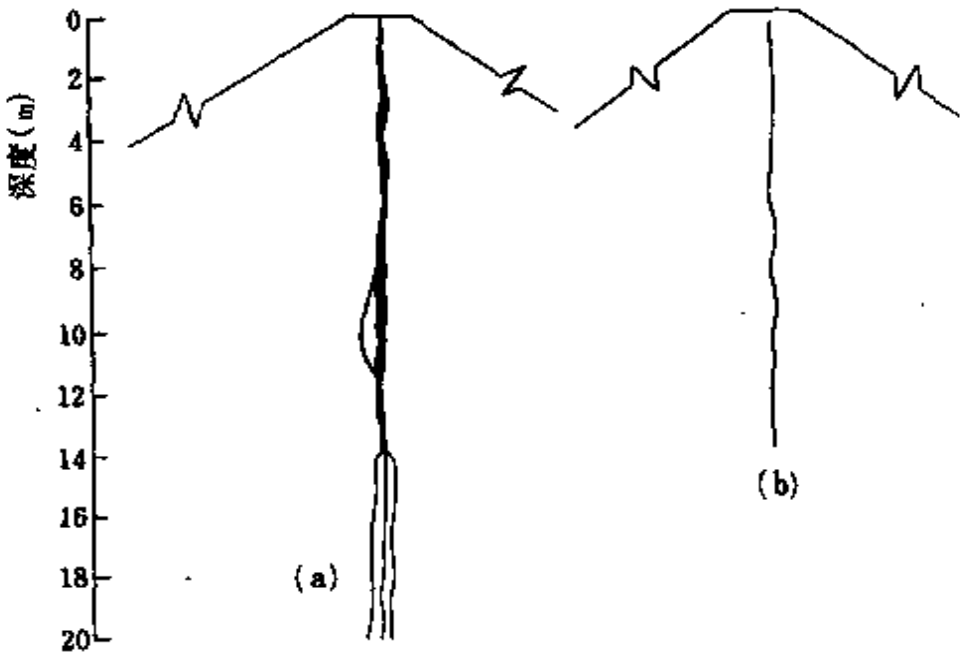


图 5-24　浆体产状示意图

(a)岳庄坝 0＋170 桩号；(b)西埠坝 0＋050 桩号

表 5-12　浆体物理性质表

坝名	取土深度 (m)	浆体厚 (cm)	含水量 (%)	湿密度 (g/cm³)	干密度 (g/cm³)	含砂量 (%)	含粘粒 (%)
西埠坝灌浆后19个月	0	30	22.8	1.89	1.54		
	1	34					
	2	31	32.8	18.5	1.40		
	3	34	34.8	20.1	1.49	31.2	29.0
	4	30	34.8		1.49	31.5	27.2
	5	28				27.8	28.7
	6	25	31.4	1.95	1.48	35.8	34.9
	7	20					
	8	24				30.8	32.6
	9	18	27.9	20.1	1.53		
	10	14	36.2	1.85	1.36	27.8	35.9
	11	11					
	12	8	25.9	1.95	1.55	27.0	30.8
	13	4				28.0	28.9
	14	0.5					
	15	0.2					
岳庄坝灌浆后11个月	0	0					
	1	7					
	2	5					
	3	20	26.6	1.98	1.56		
	4	30	29.9	1.98	1.53		
	5	45	28.2	1.98	1.54	8.2	23.9
	6	60	25.0	2.01	1.61		
	7	55	23.5	2.03	1.64		
	8	40	20.5	2.02	1.68	21.3	22.3
	9	36	23.5	1.98	1.61		
	10	60	25.0	1.99	1.59		
	11	40	21.9	2.02	1.66		
	12	35	25.0	2.03	1.62		
	13	50	25.5	1.97	1.58		
	14	40	21.9	1.98	1.62		
	15	40	25.0	1.99	1.59	12.8	33.7
	16	40	25.0	1.98	1.54		
	17	37	22.0	2.04	1.67		
	18	35	25.0	2.00	1.60		
	19	34	23.5	2.03	1.65		
	20	32	22.0	2.03	1.66	18.8	30.8

(2)单排布孔　沿坝轴线(或稍偏上游)单排布孔，是劈裂灌浆区别于充填灌浆的突出特点和独有的灌浆工艺。因为坝轴线附近是小主应力面，最容易被劈裂，想不劈裂是不可能的。例如，湖北省白莲河水库坝，于 1959 年 10 月动工兴建，1960 年 10 月建成。主坝系粘土性墙坝，高 55m，长 259m，坝顶高 111m，总库容 12.5 亿立方米。工程在运用过程中，发现坝顶灯柱向上、下游显著倾斜，防浪墙及下游坝肩栏杆破裂等现象。用"倾度法"对坝体内部裂缝问题进行了计算，计算分析了某些坝段有发生横向和纵向裂缝的可能。为了验证计算隐蔽裂缝是否存在，于 1977 年 1 月开始，在全坝段先后开挖了 5 眼探井，发现的主要纵缝有 20 余条，还有少量没有贯通心墙的横缝及水平缝，断断续续分布在轴线附近。纵缝最大宽度 30mm，长 70cm，位于 0+130m 处，在井深 20.5m 的井壁上，缝长 1.3m，向上游倾斜 69°。由于心墙内存在裂缝，1977～1978 年控制蓄水运用，采用沿坝轴线单排布孔的方法，进行了一般灌浆处理。原希望不要因为灌浆而扩大裂缝，更不允许出现新的裂缝，所以对灌浆压力进行了严格控制。在灌浆施工中先后采用过 3 种孔口压力值：初期采用原设计压力 50～100kPa；中期将压力降至 20～50kPa；后期压力再次降至 0～20kPa。尽管控制灌浆压力，经过灌浆后又重新开挖 0+178m 探井进行检查，结果如图 5-25 所示。灌浆前的裂缝与灌浆后的浆体并列在一起，以资对比，上述资料表明，灌浆前的裂缝与灌浆后的浆体宽度对比来看，差别悬殊。0+178m 探井灌浆前在 95.79～89.15m 高程上，裂缝虽有 5 条之多，但缝宽一般不足 2mm，因灌浆劈裂使浆体的最大宽度达 300mm，这足以说明，单排布孔虽控制灌浆压力，如适当加大灌浆压力，使原有裂缝适当加宽和延长，促使内部应力调整有益无害，已被大量工程实践所证明。因为只有使原有裂缝加宽才能充分释放出所积累的拉应变能，促使坝体变形稳定。所以单排孔灌浆使原有裂缝适当加宽和出现新的劈裂，验证了我们多年所研究的劈裂灌浆工艺的成功。

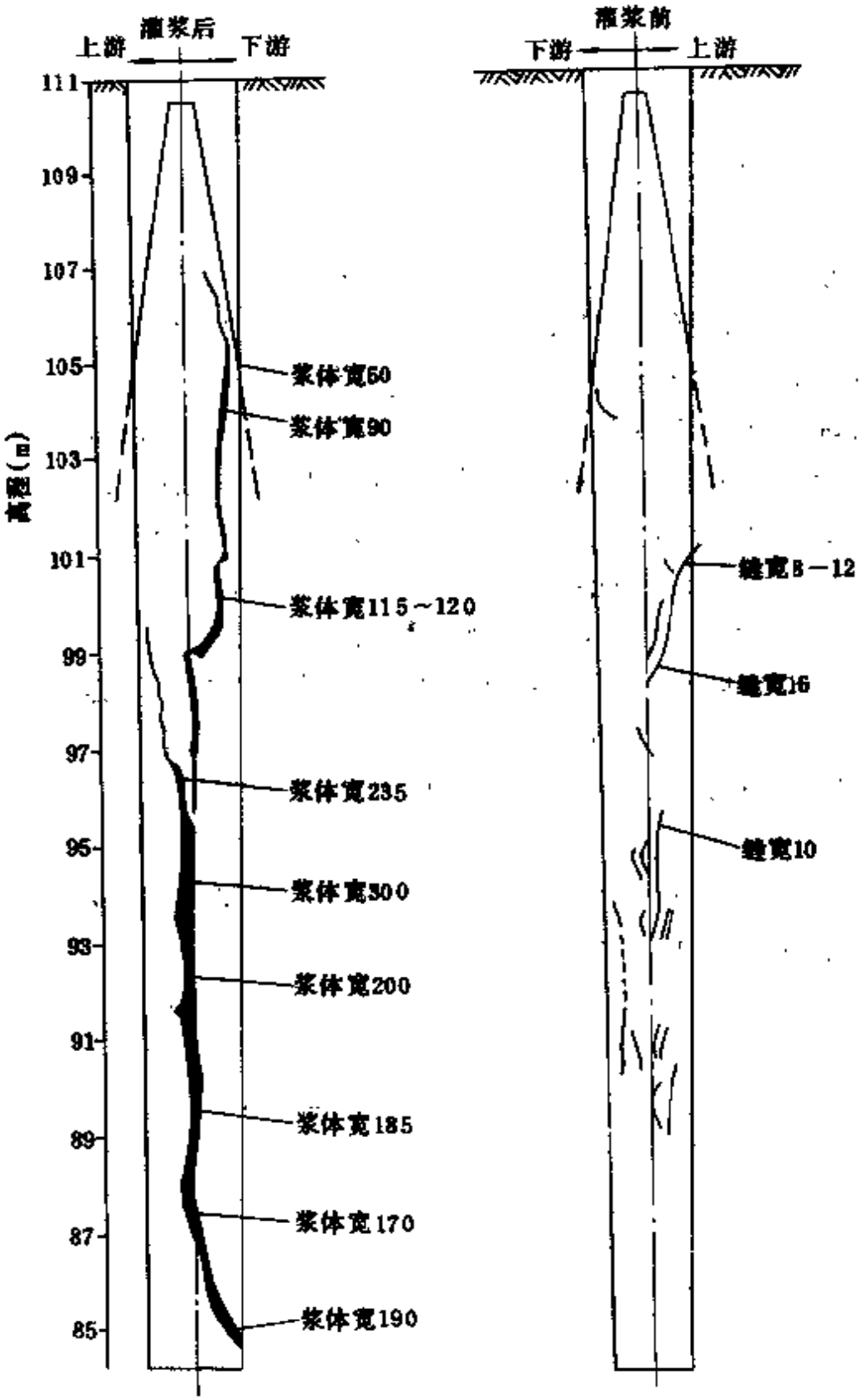


图 5-25　白莲河水库土坝 0＋178m 探井灌浆前裂缝与浆体剖面图(单位:mm)

(3)弯曲坝段的灌浆工艺　弯曲坝段的小主应力面，可能与坝轴线相切，故劈裂灌浆工艺应和一般坝段不同，才能获得沿坝轴线形成连续的浆体防渗帷幕。具体灌浆工艺有两种：①随机钻灌法，即钻一孔灌一孔，孔距不定。当灌浆孔口劈开细小裂缝后并开始偏离坝轴线时，则停灌。在偏离坝轴线较近处的轴线上钻孔灌浆，使其劈裂重新接近到坝轴线的位置，这样循序渐进钻灌，引伸裂缝发展，使其接近沿轴线的方向，最终沿坝轴线方向形成竖直连续的浆体防渗帷幕。坝轴线曲率越大，钻孔应越密。②一次成孔轮灌法，在弯曲坝段轴线上，将设计灌浆孔连续钻完，然后逐孔轮流灌浆。单孔每次灌浆量要少，力争在短时间内循环一遍，旨在使浆柱合力劈开坝体。发现孔口有小裂缝时就停灌，改灌另孔。当每个钻孔都形成小的裂缝，而且互相交接，灌浆量才可以逐渐增加，直至灌完。若弯曲坝段不太长，钻孔不多，还可同时灌浆，亦能获得较理想的效果。必须指出：在弯曲坝段采用上述两种灌浆方法，当沿轴线坝面出现贯通的细小裂缝后，要及时做阻浆盖，一般应控制坝顶表面再次劈裂。弯曲坝段设计的钻孔越密，最后形成的浆体防渗帷幕就越接近弯曲坝轴线，连续性越好。

(4)低水位期灌浆　在库水位低时进行灌浆，有利于泥浆排水固结。图 5-26 所示西埠坝 0+050m 断面灌浆期和停灌后浸润线管水位和库水位过程线。此图说明，灌浆期浸润线管水位的变化非常敏感，离主浆缝愈近管水位上升愈高，反之则低。例如，1、2 号管距主浆缝 1.45m，水位上升 4～5m，远属于库水位；3 号管距主浆缝 9.8m，水位仅上升 1.7m，对其影响并不大。停灌后 20 多天管水位到达峰值，这时可能是管水位高于库水位，可以双边排水，以后是一边排水，故回落渐慢。1979 年 6 月以后，库水位迅速降落，第二次出现管水位高于库水位，又出现双边排水，管水位回落仍较快，表现为曲线变陡。由此可见，低水位期灌浆，有利于泥浆在坝内的排水固结。

(5)吃浆量大的钻孔灌浆工艺　对进浆量大的钻孔，限制每次灌浆量，延长灌浆期是有益的。如单孔进浆量达数百立方米，若不加限

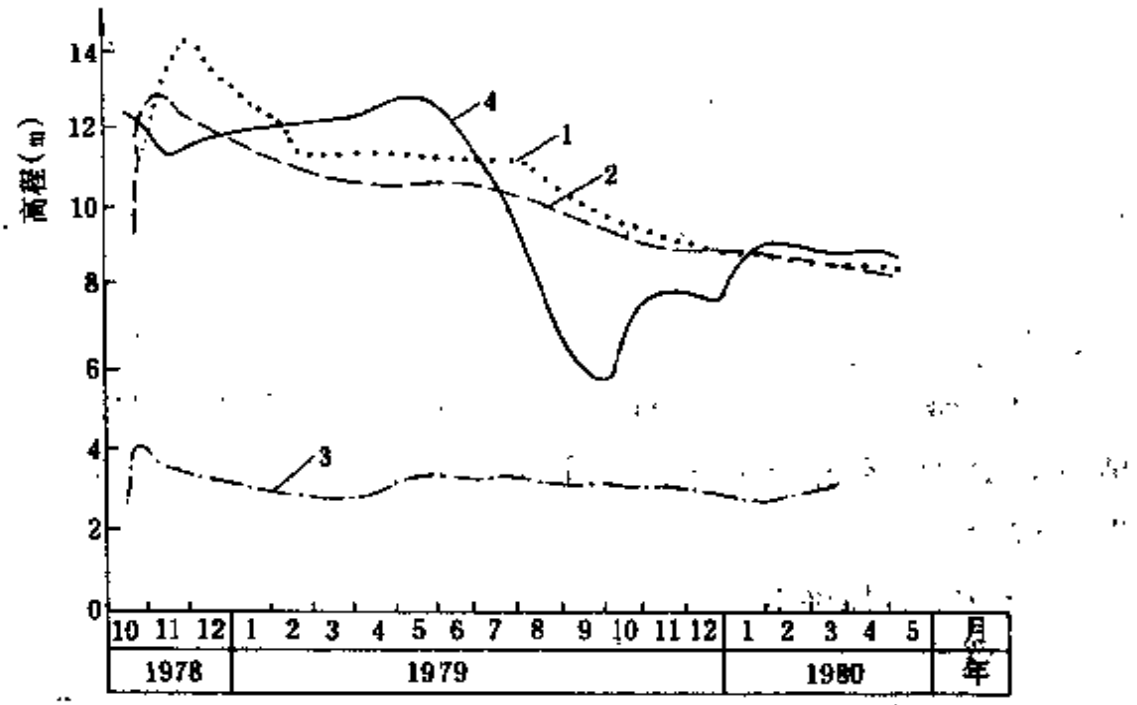


图 5-26　西埠坝灌浆期和停灌后浸润线管水位和库水位过程线

1—1 号管水位；2—2 号管水位；3—3 号管水位；4—库水位

制地一次灌满，泥浆过于集中，不但影响泥浆在坝体内的排水固结，而且往往导致坝体不均匀沉降，发生横向裂缝。但每孔总的灌浆量不应限制，能吃多少供多少，因为浆液面是自下而上升高的，随着泥浆柱的升高，压力增大，裂缝将延伸和加宽。如加限制必然造成坝体下部灌实上部留下裂缝，内部应力得不到充分合理的调整，留下变形隐患。单孔灌浆量大的原因多是因坝体疏松质量很差，如果限制灌浆量，则疏松土体得不到压密，隐患难以排除。

(6)岸坡坝段灌浆工艺　土坝岸坡段本身应力条件比较复杂，加之岸坡的坡度和坡面不同，应力状态更是千差万别。岸坡坝段的弱应力面一般不沿坝轴线分布，有的垂直坝轴线，有的斜交坝轴线，这是岸坡段的共同特点。由此，灌浆工艺可掌握如下几个要点：①首先调

整弱应力面，当河谷地段灌浆后，岸坡段已出现横向裂缝一条或数条，表明弱应力面基本垂直坝轴线，需用灌浆的方法补足应力。若系砂壳坝，在坝顶横缝上做阻浆盖，缝内打孔灌注密度 1.4～1.6g/cm³ 的浓浆，灌浆压力可大些，一般采用 100～200kPa 左右，每条横缝都如此灌注。若系均质土坝，坝坡坝顶均做阻浆盖，亦按上述要求灌浆，补足应力。②岸坡段沿坝轴线布孔，孔距 5m 左右，一次成孔采取轮灌，或由河谷坝段向岸坡推进，钻一孔灌一孔。灌浆压力要比弱应力面补足应力时小些，一般采用 50～100kPa，最后形成沿坝轴线分布的与河谷段连接的灌浆帷幕。③岸坡段出现斜缝时，先对斜缝进行充填灌浆处理，灌浆压力采用 50kPa 左右，然后用上述方法进行劈裂灌浆构造帷幕。

（七）终灌标准和封孔

1. 终灌标准

劈裂式灌浆目前各地比较通用的终灌标准为：当启动灌浆泵后，几分钟的时间，坝顶表面即冒浆，说明裂缝里的泥浆从下到上已灌满，这时应在各孔无压的情况下反复轮灌，至少要轮灌 3 次，使灌浆孔内的泥浆液面基本上不下降，表明“灌饱”，即可终灌。山东、安徽等省几百座土坝灌浆证明，这种终灌标准既好控制，效果又较好。

2. 封孔

各地封孔的方法较多，劈裂灌浆封孔方法有以下两种，并将其优缺点分述如下。

（1）用稠泥浆封孔　劈裂式灌浆多用稠泥浆封孔，因为坝体内部的劈裂宽度（裂缝宽度）比较大，一般大于钻孔直径，有的因控制不好或坝体质量太差，甚至坝顶也被劈开相当的宽度，因此用其他方法封孔就没有意义，只有用稠浆封孔。具体做法是：若坝顶表面不被劈开，灌浆结束后，把灌浆孔内析出的清水首先排出，然后将护壁套管拔出，随即用最大稠度的泥浆充填，其密度可达 1.6g/cm³ 以上。待稠泥浆充满孔后，停一段时间（1 周左右），孔内若有清水析出，应再次

抽出清水注入稠浆，直至浆液面基本齐坝顶，再用干土封堵孔内口并捣实。这种封孔方法简单，容易做到，用工少，投资低，同时能满足防渗要求，缺点是钻孔内的泥浆排水慢，强度低。

(2)用混合土封孔　混合土的组成有石子、砂、粘性土水泥浆等。混合土的性能较好，据《美国土木工程师学会会刊》(土力学分册)1980年4月报道，混合土料的组成，按重量百分比为：卵石20%，砂45%，粘性土料20%～30%。回填料的含水量25%～35%，湿密度1.65～1.86t/m³，膨润土含量约占拌和土料总量的0.5%～1.5%。近年来美国有70多座工程采用了混合土防渗墙。山西省汾河坝1994年第一期灌浆工程，已用黄土水泥浆加石子封孔，与孔壁结合较好。其方法是在灌浆完了改用黄土水泥浆循环，待孔内泥浆全部换成黄土水泥浆时，用2～4cm粒径的石子回填，连续填满全孔，为防止有架空现象，用单位孔深填入的石子重量来控制，少于控制值，则扫孔重新回填。

三、灌浆期间出现问题的处理

在土坝灌浆施工过程中，由于泥浆和坝体应力之间的相互作用，使坝体失去了原来的平衡状态，所以会经常出现一些异常现象。例如：裂缝、冒浆、串浆、塌坑、隆起、单孔吃浆量很大以及弯曲坝段的切线劈裂等。下面综述这些问题产生的原因、控制措施及处理办法等。

(一)裂缝

灌浆期间坝体表面常出现裂缝，如云南省宣威贮灰土坝灌浆期间产生裂缝，见图5-27，并以此说明产生的原因及处理措施。

1. 纵向裂缝

(1)劈开裂缝的控制和处理　在灌浆过程中为了避免裂缝很快延伸到坝体表面，一般采用孔内下护壁管的办法处理。若土坝质量太差，护壁管控制表面劈裂无效，或因钻孔直径大小(如锤击管法造孔)无法下护壁管时，裂缝会由下至上很快发展到坝顶的表面，当缝宽小

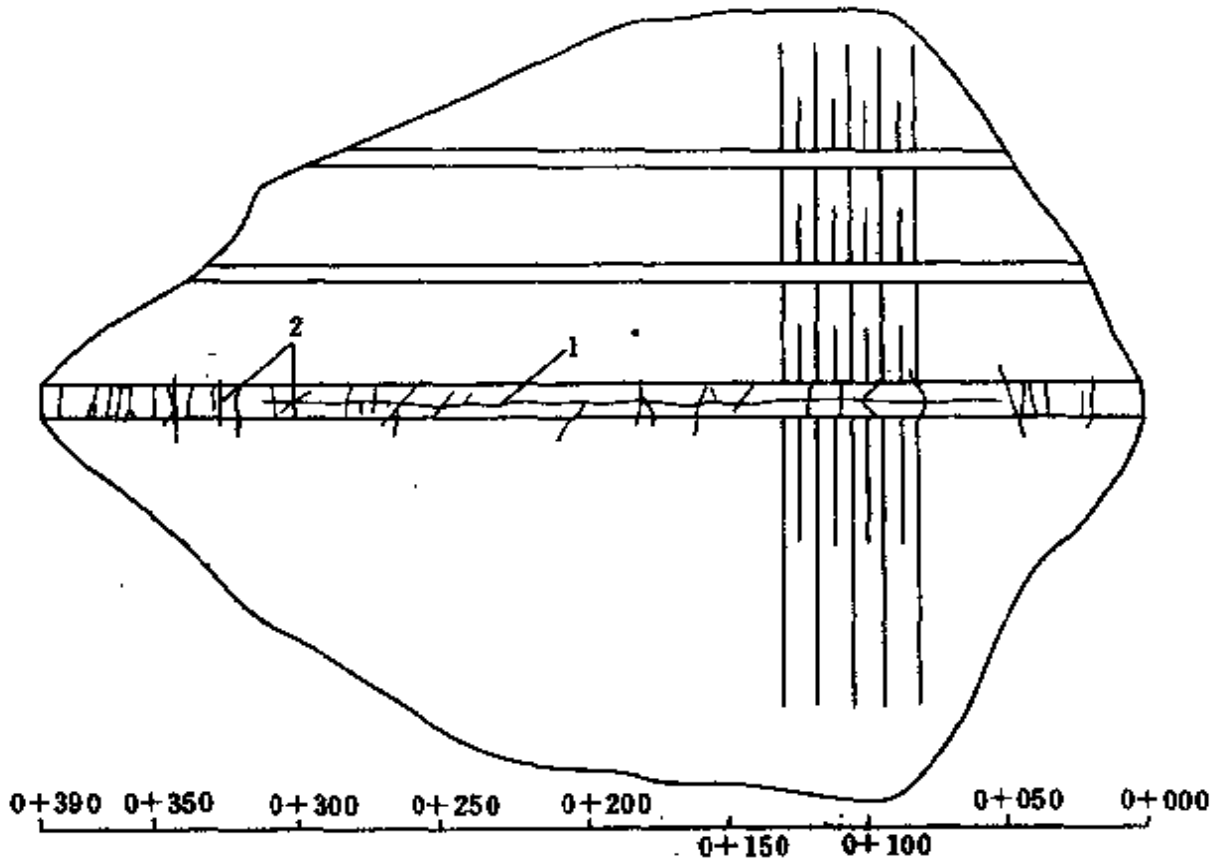


图 5-27　宣威贮灰土坝灌浆期裂缝平面分布图

1—坝顶；2—裂缝

于 122mm 时，可顺缝开挖回填夯实，以形成阻浆盖，或适当降低孔口压力，采取“少灌多复”的办法，也可收到预期效果。

(2)坝轴线两侧一些小纵向裂缝的形成及处理　除沿坝轴线被灌浆压力劈开的主缝外，两侧还往往会形成一些细小的不连续的纵向裂缝。其形成多因土体张拉产生的。当主浆缝先在坝体下部沿灌浆轴线形成后，由于泥浆渗水向坝体内的浸透，使主浆缝两侧土体含水量有差异，造成湿陷差，产生拉应变。这种拉应变超过土体允许值时，即会在坝顶上游和下游坝肩附近造成裂缝，这种现象对坝体稳定是有利的。这些小的纵向裂缝，一般深 1～3m，处理方法可沿裂缝打

浅孔进行灌浆，使裂缝灌饱满为止。

2. 横向裂缝

灌浆期间，坝体也经常出现横向裂缝，其部位一般多在岸坡段和坝基突起处，有的质量很差或土体比较干燥的土坝，任何部位都可能出现横缝。横缝一般都不太深，但横向裂缝贯通坝体上下游，特别是高水位时是危险的，应认真处理。

如系均质土坝，可直接灌浆处理，有冒浆就封堵；当裂缝稳定后，可在上游坡清除护坡石和垫层及滤料，开挖回填充实。开挖时应垂直坡度挖深 1m，且成阶梯形，口宽 2～3m，底宽 1m，顺坡挖至缝的尖灭为止。回填时，要分层夯实，确保回填质量，以形成阻浆盖。并自坝顶在缝内插注浆管并适当加大压力进行灌浆，使其充分释放拉应变能，使岸坡段的受力状态得到调整。同时，使缝内充满泥浆。

如系心墙砂壳坝，因砂壳本身对泥浆就起到反滤作用，所以可直接在坝顶做阻浆盖，采用在裂缝内灌浆的作法时，也需适当加大灌浆压力，一般应掌握在 100～150kPa 左右。

(二)冒浆

坝体灌浆冒浆因部位、原因程度不同，处理的措施也应不同。冒浆常见的部位多在坝坡(坝均质)、坝顶、孔口和放水洞内。

1. 坝坡冒浆

坝坡冒浆一般是均质土坝(因砂壳坝本身就是反滤体，不会冒浆)，其冒浆的规律，多产生在坝高的 2/3 以上的部位。随着灌浆的进展，浆液面在坝体的裂缝内逐渐升高，冒浆的部位也由下至上逐渐抬高，最后坝顶出现冒浆。坝坡出现冒浆的原因较为复杂，据许多工程的观察和分析，可归纳为以下几种：

(1)坝坡轻微冒浆　其原因是：存在裂缝，还可能有鼠、蛇、獾和白蚁洞穴等与灌浆孔直接连通；筑坝时，施工接头处碾压不实，有大土块堆积的缝隙连通；铺土层过厚，未压实，有松散的水平土层等。在灌浆压力下，泥浆集中穿透土体导致冒浆。处理上述冒浆的方法是：

如在上游坡冒浆，因有护坡石，可采用浓浆灌—停—灌的间歇性灌浆方法进行处理。如在下游坡冒浆，可做阻浆盖解决；也可以在冒浆出口处压砂做反滤层，使其清水不冒浆，省工省时，效果好。

(2)坝坡底部严重冒浆　有的土坝在坝坡底部发生严重冒浆，无论灌稀浆还是灌浓浆都冒浆，甚至灌多少冒多少，说明坝内有与灌浆孔相连的大通道。这种情况出现在松散坝体里。这种大的冒浆通道，在不少土坝灌浆时都曾遇到过；如山东省的东北冲土坝等。处理方法大致有3种：①把灌浆孔口用木塞堵住，孔口周围用土围成堰，堰里先注些泥浆，再加土料拌和成体积达0.5～1.0m³的浓浆(容重在1.7g/cm³左右)，然后拔去堵孔木塞，将这些浓浆连续灌入孔内，堵住冒浆通道。停3～5d后，再继续灌浆就可能不冒浆了。②在冒浆孔开动回转钻机，同时往孔内连续不断的抛撒干土粉，搅成塑性泥，封堵冒浆通道。山西文峪河坝灌浆工地采用这种方法效果较好。③用灌浆时间来控制冒浆，并用式(5-4)表示：

$$t_2 < t_1 \tag{5-4}$$

式中：t_1为从开始灌浆到泥浆开始冒出所需的时间(min)；t_2为下次灌浆时应控制的时间(min)。

从式(5-4)看出，不等浆液冒出即可停灌。所用的泥浆要稠，应适当掺加一些粗颗粒和膨润土。冒浆的间隙时间可适当延长，给泥浆留有析水浓缩的过程，下次灌浆不致使其流动。这样重复灌几次，即不再冒浆。

(3)上游或下游水位以下冒浆　若因灌浆压力导致水下冒浆，应立即降低灌浆压力。若因本来有裂缝，洞穴灌浆孔相连通，孔口并无压力而冒浆，因水下无法做阻浆盖和压砂反滤处理，仍应首先采用浓浆间歇性灌注，等灌入泥浆初凝后再继续灌注；或者在泥浆中掺加适量的水泥，以加速浆液初凝，达到封堵冒浆通道的目的。

2. 放水洞内冒浆

砌石放水洞在坝体灌浆时常出现冒浆，多因放水洞侧墙砌石之

间的缝隙没灌好砂浆或坝体土与侧墙结合不好，存在接触淘刷；有的是空洞等与灌浆孔连通，灌浆时容易引起冒浆。例如：山东省的薛家夼、张家沟、生花庵等坝灌浆时，放水洞内都曾发生过冒浆。其处理方法是：发现冒浆即停灌，在冒浆出口处，用木塞或棉纱堵塞后再灌，所用泥浆浓度要大，一般水土比不低于1∶1.5，复灌次数多一些，灌浆压力适当加大些。等泥浆初凝后或灌浆全部结束后，把木塞或棉纱从冒浆口取出，进行剔缝，用高标号水泥砂浆重新勾缝以防冲刷。如有的放水洞用上述方法解决了冒浆问题之后，但缺少重新剔缝和勾缝这一程序，一两年后又有漏水现象发生，所以最后的剔缝和勾缝是不可缺少的工序。

3. 坝顶冒浆

坝顶冒浆分为灌浆初期和灌浆后期两种情况。在灌浆初期冒浆，主要是因为浆泵容量大，而坝体内的原有裂缝或新劈开的裂缝小，发展慢，一时容纳不下灌入的浆液而造成冒浆。处理的办法是调整输浆泵的回浆阀门，减少输浆量。若因浆液浓，灌浆压力大，应当调整泥浆浓度，降低灌浆压力。灌浆后期坝顶冒浆是必然现象，表示灌浆已接近结束，坝体内已灌满。这种情况的冒浆进行封堵一般是没有必要的，应停灌本孔，改灌另外钻孔，直至达到终灌标准。

4. 孔口冒浆

孔口冒浆多因钻孔期间钻头与孔壁产生摩擦和挤压作用，增加了孔壁土体强度不易劈裂所致，引起初灌时不进浆，出现孔口冒浆。处理办法是：在孔口处挖50cm×50cm的坑，回填适宜含水量的粘性土，并夯实做阻浆盖；在孔口冒浆处的缝隙内充填细砂，用钢筋棒捣实作反滤；然后先用稀浆（容重1.1～1.2g/cm³），灌浆冲孔，等进浆顺畅后，再逐渐灌入浓灌。

（三）串浆

串浆系指正在灌浆的钻孔的邻孔（尚未灌浆的孔）或附近测压管中有泥浆出现，或已灌浆的邻孔内泥浆液面升高以至冒出，称为串

浆。

串浆现象在一般灌浆工程中是比较普遍的，也是正常的。但在观测串浆的同时，要加强坝体位移回弹的观测，认真分析对坝体的整体和局部安全是否有影响。如果确认是安全的，灌浆孔和串浆孔可同时灌注，如果不能同时灌注时，可用木塞堵住串浆孔，然后再继续灌注。

测压管内串浆，是浆缝与之连通，同时测压管本身的反滤失去作用所致，泥浆进入测压管后，首先要用清水冲洗，洗后如符合精度要求则可继续采用。否则，应报废拔出并作为灌浆孔进行灌浆。灌浆结束后重新补设测压管。

（四）塌坑

所谓塌坑，是指在坝的表面形成小面积的塌陷，出现的位置多在放水洞的上方坝顶和施工接头处。灌浆期间形成的塌陷，其面积和深度不等，小的面积不到 $1m^2$，深也不足 1m，大的面积可达 $1\sim3m^2$，深度也达 2m 左右。塌坑产生的原因，大都因灌浆前坝体内已有较大的空洞或大土块架空，灌浆期内坝体自下部湿陷而引起上部土体的塌陷，随着灌浆工作的进展，泥浆液面在坝体内升高，架空土体的塌陷随泥浆液面升高面上升，最后塌陷至坝顶成为塌坑。

处理塌坑时，首先将塌坑表面析出的水提出，等塌坑里的泥浆浓缩后，回填粘性土料，分层夯实，或往塌坑内灌注浓浆，初凝后用干土封口夯实。再在塌坑周围布孔灌注浓浆，并适当加大灌浆压力，以彻底根除塌坑附近坝体的弱应力区和隐患。

（五）隆起

灌浆期的隆起，系指护坡石和坝坡排水沟彻石的松动架空现象。产生的原因多是坝体土密度小，含水量低，经过灌浆，造成坝体大量湿陷，此时土坝坡面线变短，坝坡面积减小；而护坡石又不能伴随土体湿陷产生相应变形，故造成局部隆起。如果发生隆起现象，应暂停灌浆，组织有关人员分析研究隆起的原因。首先应查阅灌浆期的坝面沉降观测资料，是否是湿陷大造成隆起；同时，应细心观察坝面有无

滑坡裂缝。若确认是前者应继续灌浆，待灌浆结束后，将隆起的护坡石翻修重护。若属后者，应根据具体情况找出原因，采取相应处理措施后再继续灌浆。

但有的土坝在灌浆期间，坝顶表面局部也存在隆起现象。图 5-28 所示为上述岳庄坝 1975 年 5 月 9 日和 5 月 24 日两次观测沉陷结果对比，发现 31～35 号沉降桩以南和 27 号沉降桩以北至 20 号沉降桩，均有不同程度的上升(1～2cm，最大 3cm)。再如图 5-29 所示为河南省少林土坝 1980 年 10 月 14 日和 11 月 4 日两次观测结果对比，位于上游坝肩的二排 2 号桩沉降量最大，为 8.4cm，下游坝肩三排 2 号桩沉降 4.3cm，3 号和 1 号桩距灌浆孔相对较远，沉降量也较小。更远一点的 4 号和 5 号桩则出现隆起。

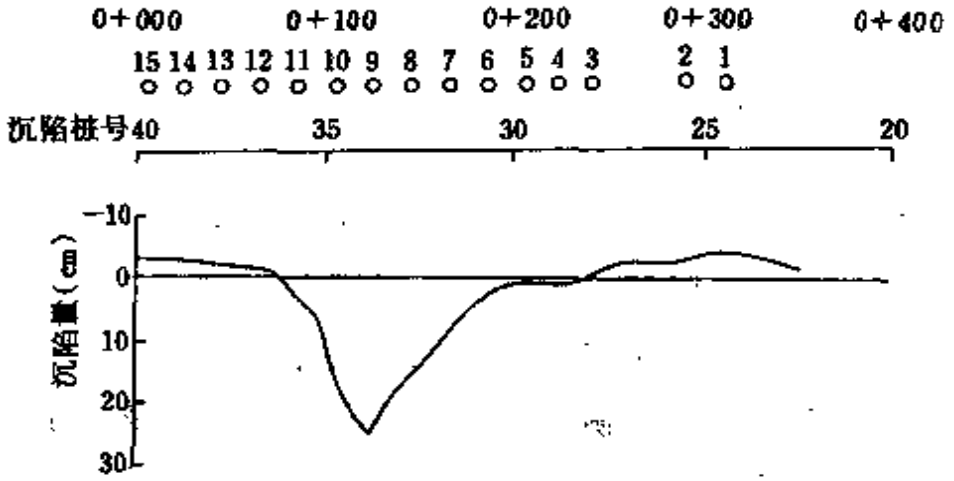


图 5-28　岳庄坝 5 月 9 日～24 日坝顶沉降与隆起

上述两侧，无疑是灌浆引起的。据观测资料分析，1975 年 4 月下旬至 5 月底，岳庄坝在 6～11 号钻孔集中灌浆(31～35 号沉降桩之间)，灌入干土料达 2717t，注进水量 3500m³，造成这段坝体集中沉降。而少林坝自 1980 年 10 月 24 日造孔，10 月 29 日和 11 月 1 日起先后灌 0+037m 及 0+057m 号孔，到 11 月 4 日，灌入泥浆 166m³，

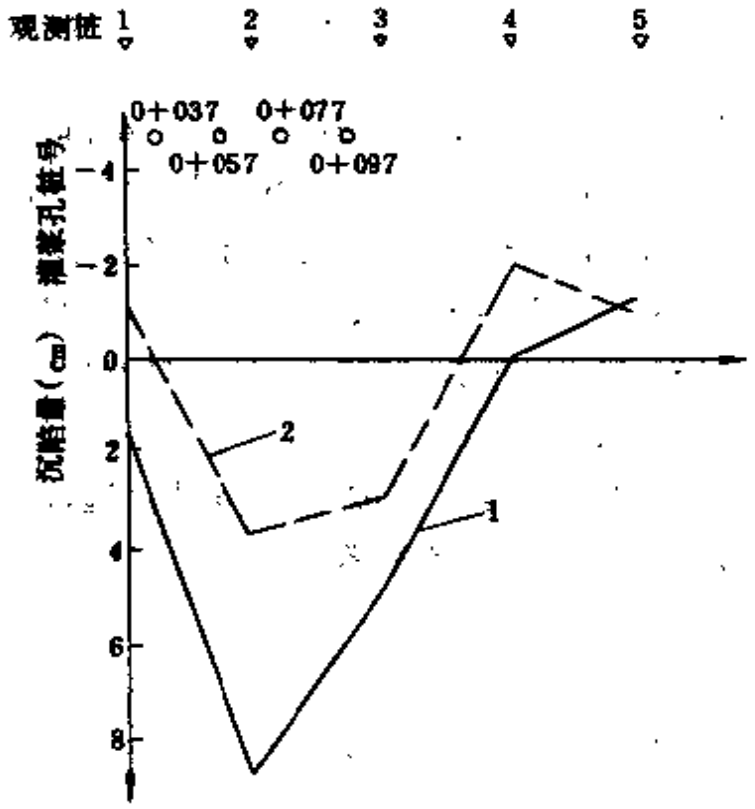


图 5-29　少林坝 10 月 14 日～11 月 4 日坝顶沉降与隆起

1—上游坝肩二排桩；2—下游坝肩三排桩

其中干土料约 80t，也造成了 2 号桩两侧湿陷。

在集中湿陷变形的两侧所引起局部隆起，可能是由于灌浆压力和坝体湿化变形过程中内部应力调整的结果。在集中灌浆的坝段三向主应力都应当得到调整，两侧坝段（未灌浆）应力尚未变化，受到已灌坝段下部主应力（σ_2），即 $\sigma_2 > \sigma_2'$ 时，就迫使其上升隆起。这说明，通过灌浆压力对坝体的挤压和土体的湿化变形，不但主应力 σ_3 得到了加强，而主应力 σ_2 也相应得到加强，这对密实坝体和促使坝体稳定是有益的。据观测，局部隆起随着灌浆进展，很快会转为下降。如少林坝三排 8 号桩的上升量达 2.9cm，只过了 14d 就恢复了原高程，以后由于灌浆则转为下降。这说明未灌坝段在灌浆坝段的影响下的隆

起，只是在坝体灌浆过程中的一种暂时现象，不需要处理。

（六）单孔吃浆量过大

土坝坝体灌浆，常遇到单孔吃浆量达数百立方米的情况。这些孔多数发生在较松散坝体的河谷段或放水洞附近，而且往往出现在应力调整阶段的灌浆初期。因坝体过于疏松，沿坝轴线的小应力太小，因而要求较大的应力补充，伴随着出现较大的土体压缩变形，使裂缝加宽，吃浆量增大，如岳庄坝在 0＋110m 处的 10 号孔灌入泥浆达 200m³，这多因放水洞侧墙与土体存在接触淘刷，形成空洞所致。

对吃浆量大的钻孔，可采用少灌多复的办法，即每次灌浆量要少，复灌次数要多，直至灌饱灌好。不能灌而不饱，留下隐患。在具体掌握上，一般每次每米孔深灌浆量不超过 1 m³，间隔时间 5～10d 或更长，这样使坝体内的孔隙水压力有个消散过程，使泥浆加速固结。在泥浆的选择上，若原坝体土料含水量较高，或是不易压缩的土料，可选用水土比为 1∶1～1∶1.5 的浓浆。

（七）弯曲坝段的切线劈裂问题

有的土坝坝轴线为弯曲形线段，灌浆压力或一次灌浆量控制不当，往往形成图 5-30 所示的切线劈裂，裂缝通到坝坡。这时应在坝坡的上部裂缝上，先钻灌一入孔，将裂缝封堵住，然后再按第五节提及的施工工艺钻灌。

特别是弯曲形土坝在高水位的情况下灌浆，应严格按照上述灌浆工艺进行，绝不允许切线裂缝穿透坝体。

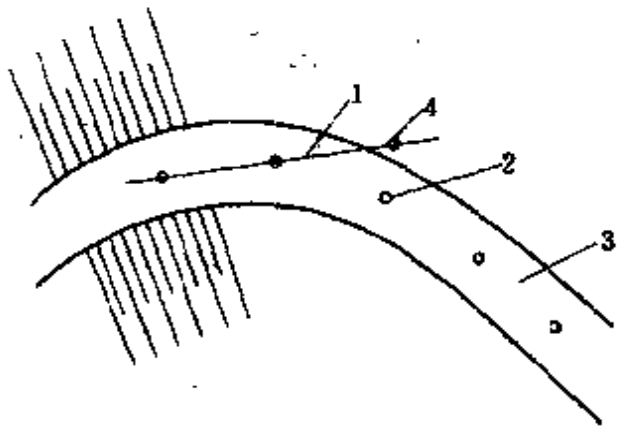


图 5-30　弯曲形土坝切线劈裂示意图
1—轴线的切线；2—钻孔；3—坝顶；
4—处理切线劈裂灌浆孔

(八)压力表失灵

灌浆压力的大小是通过压力表反映出现的，一旦失灵，直接影响灌浆质量，甚至引起机械事故。压力表失灵的主要原因是泥浆冲破橡皮隔膜进入压力表中，因此，应安装保护装置。图 5-31 所示压力表的油保护装置，使用效果较好，各地可以根据具体情况选用。

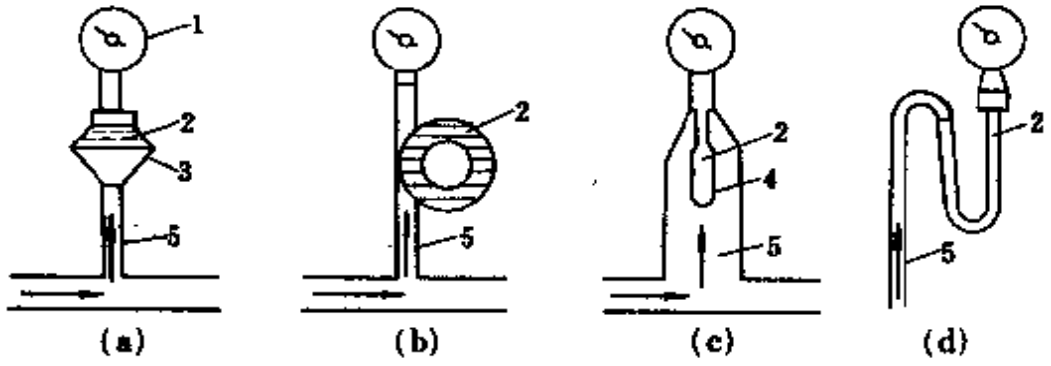


图 5-31　压力表油保护装置

(a)皮碗油保护；(b)弯管油保护；(c)皮指油保护；(d)U 形油保护

1—压力表；2—机油；3—胶皮膜；4—皮指；5—泥浆

四、施工记录与整理

灌浆资料的记录与整理，是灌浆施工的重要组成部分。因为土坝灌浆是一种特殊的隐蔽性工程的施工，施工时将大量的泥浆灌到坝体中去，其泥浆对坝体的劈裂挤压和对裂缝充填、泥浆固结度等情况，均无法直接观察。因此灌浆施工人员是否依据规定的技术要求及施工工艺进行操作，质量如何，灌浆过程中出现了什么问题，如何处理等均需详细记录。灌浆结束后的检查验收和效果评价等，均需通过灌浆记录资料整理和分析后才能论证。同时，通过记录资料的整理分析，可以随时发现灌浆施工中出现的问题，便于及时纠正或采取补救措施。若发现灌浆设计中有不妥或不符合实际情况之处，可及时修

定、补充，所以在施工中的各种原始记录与技术资料的整理是十分重要的工作。

坝体灌浆的基本资料是钻孔与灌浆原始记录。为保证原始资料的可靠性，必须做到资料填记准确、详细，否则资料就失去了真实意义，灌浆效果的评价与质量鉴定也将受到影响。为了对资料进行分析，应根据资料进行汇总、整理，并绘出分析表。

(一)钻孔记录与整理

钻孔是灌浆施工的第一道工序，通过钻孔可以了解坝身土料及填筑质量情况，可以了解坝身浸润线的高低及存在的问题。

钻孔记录如表 5-13 所示，其主要内容有：不同深度、高程的土料名称、松硬程度、湿度、颜色等项，对孔内出现裂缝、孔洞、夹石、土质松散等情况应在备注栏中加以说明，在钻孔过程中应测定孔内初见及水位灌浆前水位。如果钻孔时不取土，上述一些项目内容测不出，则只记录能测得的项目，如每个钻孔不同深度的进尺速度、有无卡钻及处理等。

表 5-13　土坝灌浆钻孔记录

工程名称____钻孔编号____孔口高程____钻探日期____年__月__日

变层		土料名称	颜色	硬度	湿度	备注
深度	高程					

注：1. 钻孔编号一般由两组数字组成，第一组数字代序数，第二组数字为孔号，如 2-9，表示第 2 序第 9 孔；
2. 变层深度栏记载土层土质发生变化的深度；
3. 硬度分坚硬、硬、中等，松，极松几类；
4. 湿度可分为干、潮、湿、很湿、饱和等；
5. 钻孔内初见水位和稳定水位高程，可记在备注栏内；
6. 根据施工情况，本表内容还可以调整补充。

根据钻孔记录资料中的土质分层情况，可绘制土坝土质纵剖面图 5-32。该图应能表明土坝土质分布、坚硬或松散情况，坝内裂缝、孔洞、夹石等位置，原地面线及孔内初见灌浆前水位。这对于了解土坝不同部位质量情况是很重要的资料。绘制该图时最好在施工过程中随着施工面的进展及时绘出，先按一序孔资料绘制，再按二、三序孔绘制。通过后序的资料补充验证和校对前序资料。为了使该图能真实地反映土坝质量情况，要求钻孔施工人员要能掌握野外鉴定土质的知识，能准确地鉴定土质。

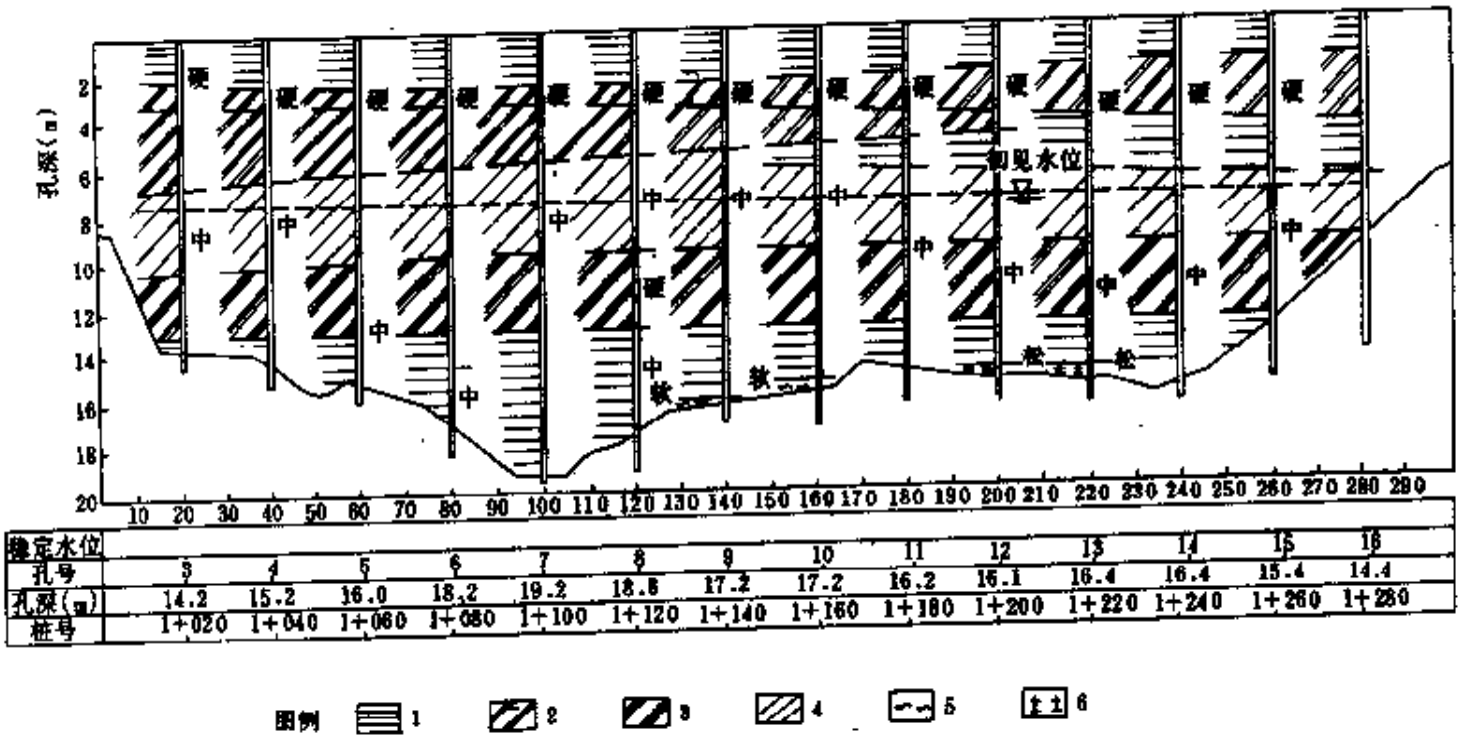
(二)灌浆的记录与整理

土坝灌浆期的记录与整理，是为灌浆工程最后检查验收提供依据的，所以必须搞好，否则，管理单位是不接受的。灌浆工程是否达到设计要求和预期目标，只有以资料数据为准则。

土坝灌浆记录如表 5-14 所示，其主要内容包括：灌前复测孔深，开始及终止灌浆时间，复灌次数，泥浆密度，水玻璃掺量(%)，粘度、孔口压力及单位时间灌浆量等。当每孔灌完后(包括复灌)应分孔按土坝灌浆汇总表 5-15 进行汇总，汇总内容包括孔深、孔口压力、泥浆密度、(加权平均)、泥浆灌入量、单位时间吸浆量、干土灌入量、单位孔深灌入干土量等，再根据汇总表 5-16 将坝长分成若干段，分序按汇总表 5-16 汇总。该表内容包括：各段分序的钻孔度数、钻孔深、泥浆、干土灌人量，单位孔深与单位坝长灌入干土及单位孔深灌入干土的序孔递减百分数。

为使土坝的灌浆情况能直观地反映出来，可绘制土坝灌浆综合图 5-33。该图分成上、下两部分，下部分为土坝纵剖面及孔深柱状图(图标明孔号、桩号)；其上部为干土灌入量柱状图，图上还应标出渗水部位(注明灌前灌后的渗漏量或散浸渗漏范围)。该图设计合理，直观性强，能直接了解土坝的纵剖面、各孔的钻孔深度、每孔的干土灌入量，能反映渗漏部位的高程及灌浆前后渗漏情况的变化。

为了反映灌浆孔在平面上的位置，可将灌浆孔绘于大坝平面图



稳定水位														
孔号	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
孔深(m)	14.2	15.2	16.0	18.2	19.2	18.8	17.2	17.2	16.2	16.1	16.4	16.4	15.4	14.4
桩号	1+020	1+040	1+060	1+080	1+100	1+120	1+140	1+160	1+180	1+200	1+220	1+240	1+260	1+280

图 5-32　土坝灌浆段土质纵剖面图

1—粉质粘土；2—重粉质壤土；3—中粉质壤土；4—软粉质壤土；5—淤泥；6—腐植质

注　①5 号孔深 3.6m 处有一直径为 10cm 的空洞；②9、10 号孔原地面以上 10cm 为淤泥；

③12、13 号孔原地面以上 10～20cm 为腐植质

表 5-14　土坝灌浆记录表

工程名称_____钻孔桩号_____始灌日期_____年____月____日

钻孔编号_____复灌孔深_____复灌次数_____终灌日期_____年____月____日

日期		灌浆时间					泥浆			泥浆灌入量	单位时间吸浆量 (m^3/h)	孔口压力(kPa)			备注
月	日	开始		终止		纯灌 (min)	相对密度	水玻璃掺量 (%)	粘度 (MPa·s)	(m^3)		最大	最小	一般	
		(h)	(min)	(h)	(min)										

注：1. 灌浆的开始、终止时间应准确记载，终止时间减去开始时间即为纯灌时间；

2. 水玻璃掺量为干土重的百分数；

3. 单位时间吸浆量＝泥浆灌入量/纯灌时间；

4. 一般孔口压力系指大部分时间的孔口压力；

5. 何时封孔和封孔方法应在备注栏中说明。

表 5-15　土坝灌浆汇总表

工程名称_____

孔　号	桩　号	孔　深	孔口压力(kPa)		泥浆浓度		泥浆灌入量 (m^3)	单位时间灌浆量 (L/min)	干土灌入量 (t)	单位孔深灌入干土量 (t/m)	备　注
			最　大	一　般	相对密度	水土比					

注：1. 当每孔灌浆结束后，分孔汇总；

2. 泥浆密度一栏，应采用加权平均数，不要用算术平均数；

3. 干土灌入量系由泥浆相对密度与泥浆灌入量计算得来，或预先制成曲线表格查得；

4. 单位孔深灌入干土＝干土灌入量/孔深。

表 5-16　土坝灌浆汇总表

工程名称_____

坝段起止桩号	孔　号	钻　孔		灌入量		坝段长 (m)	平均灌入干土(t/m)		单位孔深灌干土序孔递减率 (%)
		孔　数 (个)	孔　深 (m)	泥　浆 (m^3)	干　土 (t)		单位孔深	单位坝长	
合　计									

校核_____　制表_____

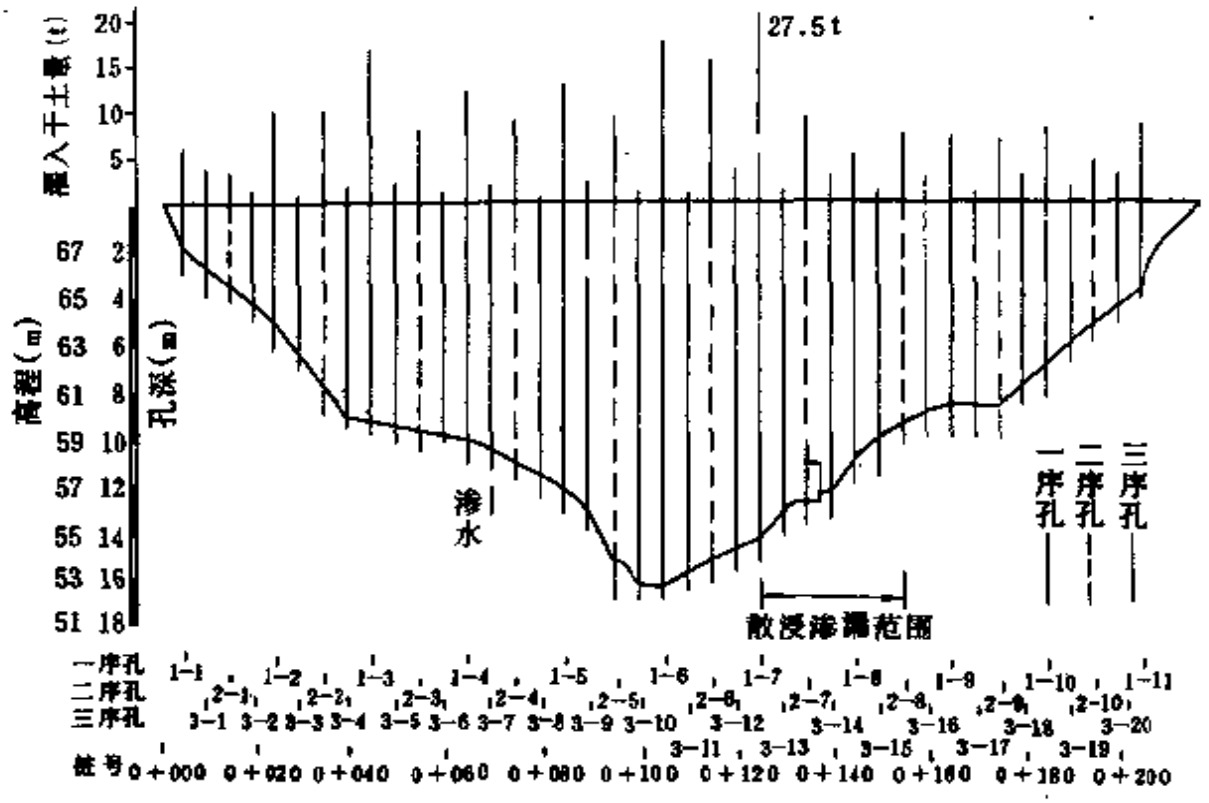


图 5-33　土坝灌浆综合图

5-34 上，并在此图上标明桩号、孔序、坝面主要裂缝分布、冒浆、隆起塌坑部位等情况。

中南工业大学特种注浆工程设计研究所开发了一套灌浆图表自动生成系统，并已投入了实际应用。

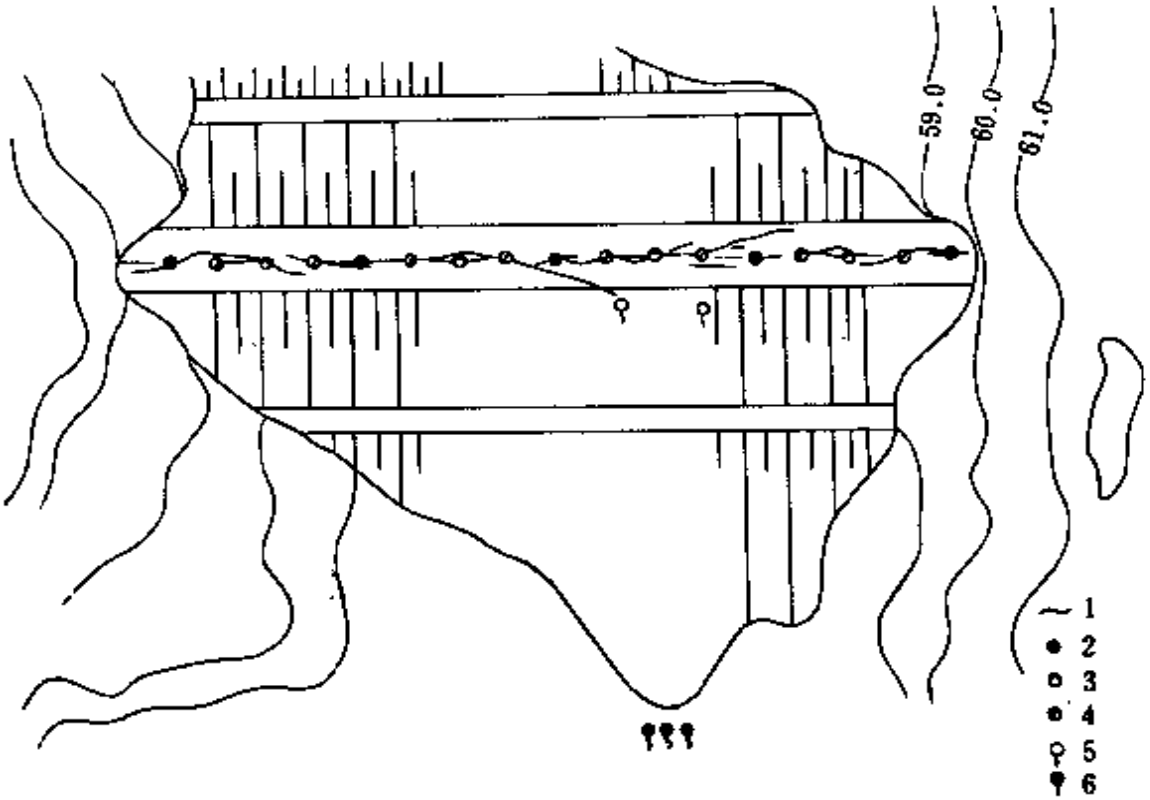


图 5-34　西埠土坝灌浆钻孔平面布置及裂缝分布图

1—裂缝；2——序孔；3—二序孔；4—三序孔；5—冒浆点；6—渗水点

第六章　质量检查

第一节　静压注浆质量检验

灌浆效果与灌浆质量的概念不完全相同，灌浆质量一般是指灌浆施工是否严格按设计和施工规范进行，例如灌浆材料的品种规格、浆液的性能、钻孔角度、灌浆压力等，都要求符合规范的要求，不然则应根据具体情况采取适当的补充措施；灌浆效果则指灌浆后能将地基土的物理力学性质提高的程度。

灌浆效果的检验，通常在注浆结束后 28d 才可进行，检验方法如下：

(1)统计计算灌浆量，可利用灌浆过程中的流量和压力自动曲线进行分析，从而判断灌浆效果。

(2)利用静力触探测试加固前后土体力学指标的变化，用以了解加固效果。

(3)在现场进行抽水试验，测定加固土体的渗透系数。

(4)采用现场静载荷试验，测定加固土体的承载力和变形模量。

(5)采用钻孔弹性波试验测定加固土体的动弹性模量和剪切模量。

(6)采用标准贯入试验或轻便触探等动力触探方法测定加固土

体的力学性能，此法可直接得到灌浆前后原位上的强度，进行对比。

(7)进行室内试验。通过室内加固前后土的物理力学指标的对比试验，判定加固效果。

(8)采用γ射线密度计法。它属于物理探测方法的一种，在现场可测定土的密度，用以说明灌浆效果。

(9)使用电阻率法。将灌浆前后对土所测定的电阻率进行比较，根据电阻率差说明土体孔隙中浆液的存在情况。

在以上方法中，动力触探试验和静力触探试验最为简便实用。检验点一般为灌浆孔数的2%～5%，如检验点的不合格率等于或大于20%，或虽小20%但检验点的平均值达不到设计要求，在确认设计原则正确后应对不合格的注浆实施重复注浆。

第二节　高压喷射注浆质量检验

一、检验内容

高压喷射注浆质量检验内容有：

(1)固结体的整体性和均匀性；

(2)固结体的有效直径；

(3)固结体的垂直度；

(4)固结体的强度特性(包括桩的轴向压力、水平力、抗酸碱性、抗冻性和抗渗性等)；

(5)固结体的溶蚀和耐久性能；

(6)喷射质量的检验：①施工前，主要通过现场旋喷试验，了解设计采用的旋喷参数、浆液配方和选用的外加材料是否合适，固结体质量能否达到设计要求。如某些指标达不到设计要求时，则可采取相应措施，使喷射质量达到设计要求。②施工后，对喷射施工质量的鉴定，一般在喷射施工过程中或施工告一段落时进行。检查数量应为施工

总数的 2%～5%，少于 20 个孔的工程，至少要检验两个点。检验对象应选择地质条件较复杂的地区及喷射时有异常现象的固结体。

凡检验不合格者，应在不合格的点位附近进行补喷或采取有效补救措施，然后再进行质量检验。

高压喷射注浆处理地基的强度较低，28d 的强度在 1～10MPa 间，强度增长速度较慢。检验时间应在喷射注浆后 4 周进行，以防在固结强度不高时，因检验而受到破坏，影响检验的可靠性。

二、检验方法

1. 开挖检验

待浆液凝固具有一定强度后，即可开挖检查固结体垂直度和固结形状。

2. 钻孔取芯

在已旋喷好的固体中钻取岩芯，并将岩芯做成标准试件进行室内物理力学性能试验。

根据工程要求亦可在现场进行钻孔，做压力注水和抽水两种渗透试验，测定其抗渗能力。

3. 标准贯入试验

在旋喷固结体的中部可进行标准贯入试验。

4. 载荷试验

静载荷试验分垂直推力和水平推力载荷试验两种。做垂直载荷试验时，需在顶部 0.5～1.0m 范围内浇筑 0.2～0.3m 厚的钢筋混凝土桩帽；做水平推力载荷试验时，在固结体的加载受力部位，浇筑 0.2～0.3m 厚的钢筋混凝土加荷载面，混凝土的标号不低于 C_{20}。

载荷试验是检验建筑地基处理质量的良好方法，有条件的地方应尽量采用。虽载荷试验设备等较复杂，但对重要建筑物仍以做载荷试验为宜。

第三节　劈裂灌浆质量检验

一、渗流检查

渗流检查主要包括：

(1)首先检查坝后渗流是否已有明显地减小，或者是否消失，在高水位期坝后是否还有管涌、流土或沙涌现象。

(2)对测压管或浸润线观测资料进行整理分析，检查帷幕前后测压管水位和浸润线管水位有无明显变化。一般是建立起防渗帷幕后，幕后水位明显降低，幕前水位明显升高。

二、探井检查

在灌浆轴线上开挖直径1.6m左右的探井，深入到地基，检查帷幕的分布及连接情况，是否完整竖直，帷幕厚度是否满足设计要求等。其他和上述检查内容相同。

学会图书室

主 要 参 考 文 献

白永年等，1992 年，土石坝加固。北京：水利电力出版社。

白永年等，1987 年，土坝坝体劈裂灌浆技术。北京：水利电力出版社。

杜嘉鸿等，1992 年，地下建筑注浆工程简明手册。北京：科学出版社。

电力工业部华东勘测设计院科学研究所等，1984 年，化学灌浆技术，北京：水利电力出版社。

龚主华等，1990 年，岩土工程施工方法，辽宁：辽宁科技出版社。

关德斌等，1984 年，土坝坝体劈裂灌浆防渗加固技术的研究。水利学报，第 3 期。

黄宝玉，1985 年，漳卫河堤防劈裂灌浆试验。水利工程管理技术，第 1 期。

李茂芳等，1980 年，大坝基础灌浆。北京：水利电力出版社。

煤科院建井所注浆室，1978 年，煤矿注浆技术。北京：煤炭工业出版社。

铁道部旋喷注浆科研协作组，1984 年，旋喷注浆加固地基技术。北京：中国铁道出版社。

王洪恩，1982 年，土坝坝体劈裂灌浆技术构造浆体防渗帷幕的研究。水利工程管理技术，第 4 期。

王洪恩，1982 年，土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定。山东水利科技，第 1 期。

王洪恩，1987 年，堤坝地基劈裂灌浆防渗技术的研究。水利工程管理技术，第 3 期。

王吉望等，1981 年，高压喷射桩改良软土地基。建筑结构学报。

叶书麟等，1994 年，地基处理与托换技术，北京：中国建筑工业出版社。

曾国熙等，1988 年，地基处理手册。北京：中国建筑工业出版社。

张作瑞，1984 年，国外基浆岩灌浆近况及发展趋势。水利水电技术，第 2,3 期。

Bustamante, M. Gouvenot, D. 1982, Grouting: A method improving the bearing Capcity of deep foundation. Proc. of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Clarke, W. J. 1982, Performance Characteristics of acrylate Polymer Drout, Proc. of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE.

Little, G. S. 1982, Design of Cement besed grouts. Proc. of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.

Shiroda, M. H. Ohmori, 1982, Vitra fine grouting material Proc. of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.

Stocker, M. 1983, The influence of Post-grouting on the load-bearing Capacity, Proc. of the Eighth European Conference on Soil Mechemics and Foundation Engineering.

99 年 2 月 28 日
865478