



白永年 关德斌 王洪恩 刘宪奎 编著

土坝坝体劈裂灌浆技术



SHUILI KEJI CHENGGUO CONGSHU

——《水利科技成果》丛书——

土坝坝体劈裂灌浆技术

——白永年 关德斌 王洪恩 刘宪奎 编著——

水利电力出版社

369248

内 容 提 要

利用劈裂灌浆技术治理土坝、堤防隐患是水利水电施工和管理的一项新成果，具有很广阔的发展前景。本书主要介绍了劈裂灌浆技术的理论、应用和实践。

书中内容包括：土坝劈裂灌浆加固机理、土坝勘察与灌浆试验、灌浆设计、灌浆机械、浆液材料、施工技术、灌浆中常出现的问题及处理方法、效果检查与验收等。

本书主要供具有高中以上文化程度的水利水电工程技术人员和技术工人阅读，也可供岩土工程和堤防工程等有关科技人员参考。

《水利科技成果》丛书

土坝坝体劈裂灌浆技术

白永年 关德斌 王洪恩 刘宪奎 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 4.5印张 95千字

1987年3月第一版 1987年3月北京第一次印刷

印数0001—2820册 定价0.96元

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书，包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员：史梦熊

副主任委员：董其林

委 员：

丁联臻	王万治	史梦熊	田 国
李文治	酃凤山	杨启声	张宏全
张林祥	沈坤卿	陈祖安	陈春槐
汪景琦	郑连第	郭之章	赵珂经
茹 智	陶芳轩	谈国良	徐曾衍
蒋元驹	曹述互	曹松润	董其林
颜振元	(以姓氏笔划为序)		

前 言

我国土坝灌浆的历史较早。五十年代末、六十年代初，河南、广东、山西、山东等省，针对土坝坝体出现裂缝和渗漏等问题，对坝体进行了灌浆。虽然已取得一定的效果，但由于灌浆机理不明确，基本上搬用地基灌浆方法，因此发展较慢，走了一段曲折的道路。七十年代中期山东省水利科学研究所总结以往土坝坝体灌浆的经验，提出劈裂式灌浆技术方案，经过近几年来试验研究和工程实践，总结出较为完善和系统的劈裂式灌浆方法。

为了总结这项技术，水利电力部于1977年、1980年在山东省召开了土坝灌浆技术经验交流会。1983年10月对“土坝坝体劈裂灌浆防渗加固技术”进行鉴定，认为土坝劈裂灌浆是灌浆技术的一个创新。它具有机理明确、工艺合理、工期短、见效快、经济效益显著等优点，可以在中、低水头的均质土坝和宽心墙坝中推广应用。1984年水利电力部正式推荐在全国范围内应用。目前国内估计已有600座以上土坝使用该项技术，都取得较好的灌浆效果。

解放以来，我国修建了86000余座水库和17万km的堤防，其中绝大部分采用土坝（堤）坝型。由于设计、施工和管理上的原因，很大一部分坝体（堤）存在着渗透和变形稳定问题，严重影响工程的安全和正常运行。处理这些问题的方法有垂直防渗墙、坝体灌浆、增设或补强防渗斜墙等。防渗墙技术，五十年代末我国从国外引进，经过几十年工程实践，在我国有了新的发展。在机械方面除了用乌卡斯钻机造孔，

还可用抓铲、反向铲造孔。与此同时，人工造防渗墙技术也取得不少好的经验，例如，倒挂井开挖回填等已收到一定的效果。但由于防渗墙造价高，施工机械复杂，发展较慢，施工技术和工程效果还存在一定问题，因此，仍不是处理大量土坝的实际有效的方法。

土坝坝体劈裂灌浆技术克服了防渗墙存在的问题。它的基本原理就是利用坝体小主应力面基本沿坝轴线分布这一规律，用灌浆压力沿坝轴线劈裂坝体，灌入泥浆构造浆体防渗帷幕，解决坝体的渗透稳定问题；同时利用坝体的湿陷固结和浆坝互压，使坝体内部的应力得到改善，解决坝体的变形稳定问题。

对土坝坝体进行灌浆，如前所述并不是最近几年的事情，发现土坝劈裂也早有报道，但利用劈裂原理进行灌浆则是近几年的事情。目前不仅土坝坝体灌浆，就是地基灌浆也有人主张用较大的压力，使地基劈裂，取得其它灌浆方法所达不到的效果。劈裂灌浆从技术上有以下优点：利用较大的压力注入较多的浆料；浆液能进入更细小的裂隙；灌浆停止后，坝体回弹，压密了浆体和坝体；劈裂造成的灌浆帷幕与隐患连通，事半功倍；有一定规律可循，方法简单易行。

土坝坝体劈裂灌浆技术，目前多用于50m以下的均质坝和宽心墙坝，并适用以下几种情况：①施工质量比较差的土坝；②坝体内、外部有较多裂缝或大面积的弱应力区；③坝体浸润线过高，坝后大面积阴湿、散浸或集中渗漏；④分期施工的土坝分层和分段接头有薄弱带和透水层；⑤土坝内存在较多的生物洞穴等。利用劈裂灌浆技术进行土坝隐患的处理，符合多快好省的要求。

劈裂式灌浆技术，不仅在土坝坝体灌浆实践方面是个创

新，在加快危险土坝的治理方面也发挥了巨大的作用，而且为土力学、土坝设计理论增添了新的内容。但是，它同其它技术一样，由于研究时间较短和其它条件的限制，还有一些不足和需要继续研究的地方。例如，目前对50m以上土坝和窄心墙坝尚缺实践经验；用泥浆构造防渗帷幕，完全固结和压密尚需一年左右的时间等。进一步在理论上提高和廉价速凝的浆液的研究，是该项技术发展的方向。

本书前言、第二章，由白永年编写；第一、五、六章，由关德斌编写；第三、四、八、九章，由王洪恩编写；第七章，由刘宪奎编写。全书由水利电力部水利管理司牛运光同志审阅，并承蒙水利电力部的大力支持和国内各方面专家的指导，在此一并致谢。限于我们的水平，难免有错误和不足之处，欢迎批评指正。

目 录

序

前 言

第一章	土坝坝体劈裂灌浆的机理	1
一、	灌浆方法的分类.....	1
二、	水力劈裂与劈裂灌浆.....	3
三、	土坝坝体弱应力面的位置.....	4
四、	泥浆劈裂坝体的判断条件.....	4
五、	泥浆劈裂坝体的规律.....	7
六、	泥浆对坝体的充填作用.....	8
七、	浆坝互压作用机理.....	10
八、	湿陷作用.....	11
九、	灌浆的固结和压密作用.....	12
第二章	土坝勘察与灌浆试验	14
一、	勘察的目的和方法.....	14
二、	工程资料的调查分析.....	14
三、	灌浆试验的内容和方法.....	18
第三章	灌浆设计	30
一、	钻孔的设计.....	30
二、	灌浆压力的确定.....	32
三、	灌浆帷幕厚度的确定.....	35
四、	浆液选择.....	39
五、	泥浆的析水固结计算.....	40

六、坝体整体稳定验算·····	44
七、坝体劈裂灌浆概预算·····	45
第四章 灌浆机械·····	47
一、造孔设备·····	47
二、WJ型搅浆机·····	53
三、HB型灌浆泵·····	56
四、WJG80型搅灌机·····	56
五、附属设备·····	64
第五章 灌浆浆液和材料·····	65
一、对灌浆浆液的基本要求·····	65
二、浆液基本性质指标与试验·····	65
三、灌浆材料·····	70
四、粘性土浆·····	73
五、水泥浆·····	76
六、水泥粘土浆·····	77
七、自凝灰浆·····	77
第六章 土坝劈裂灌浆的施工技术·····	79
一、施工前的准备工作·····	79
二、劈裂灌浆工艺流程·····	81
三、土坝岸坡段和曲线段的灌浆技术·····	89
第七章 土坝劈裂灌浆中常出现的问题及处理方法·····	92
一、裂缝·····	92
二、冒浆·····	93
三、串浆·····	94
四、塌坑·····	94
五、隆起·····	95
六、单孔吃浆量过大·····	95

七、缩孔卡钻	95
第八章 灌浆效果检查和验收	97
一、检查内容	97
二、验收标准	101
第九章 土坝劈裂灌浆实例（黄前水库）	103
一、黄前水库工程概况	103
二、灌浆设计	107
三、灌浆施工	109
四、效果检查	114
五、经济分析	117
附 录	
附表 1 灌浆钻孔记录表	126
附表 2 土坝灌浆记录表	127
附表 3 土坝灌浆汇总表	128
参考资料	131

第一章 土坝坝体劈裂灌浆的机理

一、灌浆方法的分类

为弄清劈裂灌浆的机理和工艺与其它灌浆方法的区别，扼要的说明灌浆方法的分类是必要的。

(一) 按灌浆用途分类

可分为固结灌浆和防渗灌浆（帷幕灌浆）。当地基的强度及承载力不能满足建筑物要求时，可在建筑物基础范围内进行固结灌浆，其目的是为了加固和改善地基条件，其特点是灌浆面积较大，采用多排布孔，孔浅而密，所用灌浆材料多为水泥浆。当砂砾石地基或有裂隙岩石地基不能满足建筑物防渗要求时，可采用防渗灌浆，其特点是形成一道或几道防渗帷幕，以防止渗透，布孔为单排或几排（分主副排），孔深要穿过透水层，有时达上百米，灌浆材料可以是水泥浆、粘土水泥浆、水泥粘土浆、化学材料浆及其它特殊浆液。

(二) 按灌浆部位分类

可分为坝基灌浆、坝体灌浆、接触灌浆（如坝与地基、坝与岸坡、坝与建筑物等接触部位结合不好，影响坝体安全或防渗效果，而进行灌浆处理称作接触灌浆）以及建筑物裂隙灌浆。

坝基灌浆又可分为岩石地基灌浆和砂砾石层地基灌浆。砂砾石层地基灌浆，其目的主要是防渗，一般多采用水泥粘土浆，施工技术比较复杂。岩石裂隙灌浆一般采用水泥浆，

如是更细小的裂隙可以用化学材料灌浆。建筑物裂隙灌浆，如放水洞裂隙，常采用环氧树脂灌浆等。

（三）按灌浆材料分类

主要可分为水泥灌浆、水泥粘土灌浆、纯粘土灌浆、化学灌浆及特殊浆液（如自凝灰浆等）灌浆等。化学工业和新材料的发展使灌浆材料性能有很大提高。纯粘土浆造价比较低，便于因地制宜，就地取材，是一种经济实用的灌浆材料。

（四）按灌浆机理分类

可分为渗透灌浆、充填灌浆及劈裂灌浆。几十年灌浆实践和不断总结经验，促使人们对灌浆机理的认识的深化和发展。目前人们对灌浆机理的认识大致分三种类型：①渗透灌浆。当浆液较稀时，浆液在压力作用下流入岩石裂缝和砂砾孔隙，然后浆液凝固，堵塞裂隙和孔隙。②充填灌浆。当裂缝和洞穴较大时，浆料将直接充填。在灌浆过程中需保持裂缝不扩大，因此使用压力较低。③劈裂灌浆。在掌握劈裂规律的情况下，对被灌体人为地加以控制，压入适当的浆液对坝体进行劈裂，达到防渗和加固的目的。目前不但土坝坝体可用劈裂灌浆法，地基灌浆（包括岩石地基）也可用劈裂灌浆法，取得其它灌浆方法所达不到的良好效果。在以上三种灌浆机理指导下，灌浆方法不同，采用的灌浆材料和适用条件也有所不同。特别应指出，在一定条件下，这三种灌浆机理可能同时存在，但其中有主要的和次要的。目前对灌浆机理在某些方面还存在不同的看法。

对于一个具体工程而言，可能地基与坝体都存在问题，也可能只有其中某一方面存在问题，因此要针对不同的问题，分别选用不同的灌浆方法，或者几种方法结合起来。

使用。

本书着重介绍土坝坝体劈裂灌浆技术。长期以来，土坝坝体灌浆仅被理解为渗透和充填两种机能，把对地基灌浆的认识和工艺用于土坝坝体灌浆，虽然也取得一定的灌浆效果，但由于未抓住土坝的特点，而达不到理想的目的。其实，土坝坝体作为被灌体，应充分注意它与地基的几个本质上的区别：①土坝是个长条形建筑物，而地基是半无限体；②土坝为规则的梯形断面，而地基是轴对称形面，因此土坝坝体有个非常明显的薄弱面，这个面一般就在坝轴线附近，而地基则没有明显的薄弱面；③土坝是经过设计由人工堆筑压实而成，而地基则是自然形成的，作为被灌体需要灌浆的理由，前者比后者更为明确。因此，土坝坝体灌浆应与地基灌浆有所不同。土坝的以上特点，必然反映在灌浆方法中。

二、水力劈裂与劈裂灌浆

所谓水力劈裂就是在水压力作用下使原物体产生裂缝或使原有裂隙扩大的过程。早在三十多年前，水力劈裂（水压致裂）在石油开采、地应力测定方面就已成为一种新技术，而提出水压力劈裂坝体还是最近十年的事情。当初，人们认为这是一种应该绝对避免的现象。这对土坝设计和施工无疑是正确的，但对于土坝坝体灌浆施工却是很难避免的。山东省水利科学研究所从1970年以来对生花庵（小型）、石店（中型）、贺庄（大型）水库土坝进行灌浆，经开挖探井检查，上述几座土坝均发现在坝轴线附近形成一条或几条垂直连续的浆体帷幕。浆脉的宽度一般为20~30cm，最大可达86cm，单孔最大灌浆量近1000m³。这些情况用渗透和充填机理是不能解释的，而许多土坝灌浆的实践却表明，这些

土坝坝体是被泥浆劈裂的。一九七八年我们总结出劈裂灌浆工艺，在山东省西埠土坝进行试验获得成功，引起国内学者和工程界的重视。一些早在五十到六十年代进行土坝灌浆的同志也逐步认识到土坝坝体灌浆的机理主要为劈裂式，其中包括了充填。分析国内外土坝灌浆大量实例，其结果也基本如此。为什么土坝坝体灌浆很早就有实践，而最近才提出较完整的劈裂灌浆工艺方法呢？原因是没有把地基灌浆与土坝坝体灌浆很好的加以区别，一直用渗透机理和充填机理解释土坝坝体灌浆，有的虽然发现了灌浆注水试验时土坝被劈裂，但不能因势利导地利用这一规律达到提高灌浆效果的目的。

三、土坝坝体弱应力面的位置

土坝是具有梯形断面用土料堆筑而成的长条体建筑物。比较顺直的河槽段的土坝，其坝轴线附近是挤压力最小（最小主应力作用面）甚至出现拉应力的区域，土的抗拉强度很小，所以很容易沿坝轴线劈裂。另一方面，如果施工质量不好，河槽段土坝就容易沿坝轴线发生纵向裂缝，在这种情况下，灌浆也容易沿坝轴产生裂缝并扩展。

在土坝断面不规则的岸坡段，弱应力面可能垂直或斜交于坝轴线，因而容易产生横向或斜向裂缝，尤其是在地形突变的地方。土坝坝体灌浆劈裂面与弱应力面基本一致。土坝中弱应力面的存在，使灌浆时裂缝的产生和扩展很难避免，也很有规律，这就为劈裂灌浆提供了内在依据。

四、泥浆劈裂坝体的判断条件

灌浆时泥浆通过钻孔或裂缝（洞穴）作用于坝体，见

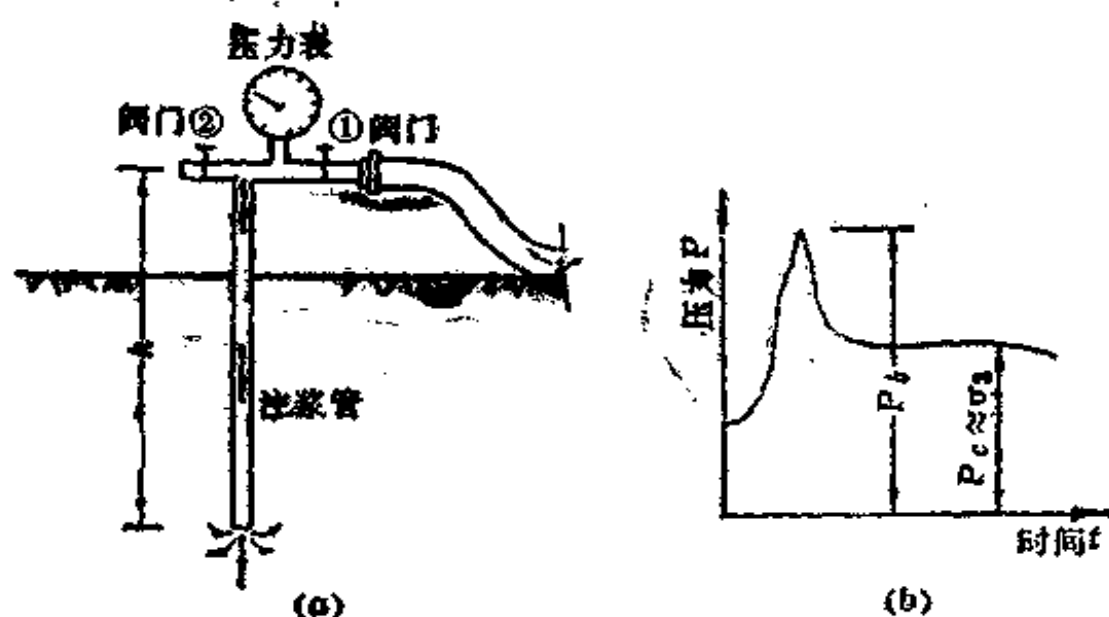


图 1 灌浆示意图
(a) 试验装置; (b) 压力过程线

图 1.

当坝体无裂缝时, 浆液通过钻孔劈裂坝体, 见图 1(a)。钻孔起裂所需要的孔口压力 p_0 , 可通过理论计算及试验得到, 而试验是通过压力表读数反映的, 其压力过程线如图 1(b)。

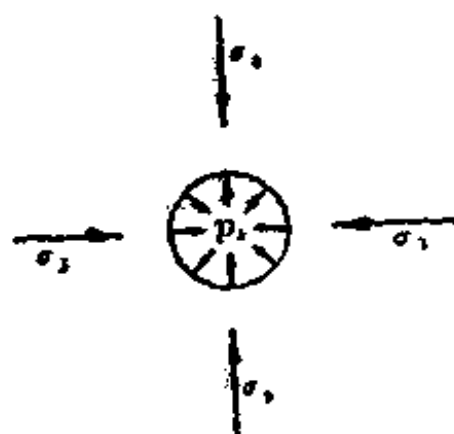


图 2 钻孔受力图

图 2 钻孔受力图中, σ_3 为钻孔平面的小主应力; σ_2 为与 σ_3 垂直方向的第二主应力。对于土坝河槽段, σ_2 等于 $\mu(\sigma_1 + \sigma_3)$, μ 为泊松比, 取 0.4; σ_1 为第一主应力, 近似采用土

柱重 γgh , 所以钻孔起裂时的孔口压力为:

$$p_0 = (2.5 - \mu)\sigma_3 - (\mu\gamma_{\pm} + \gamma_{\text{浆}})gh + \sigma_1 \quad (1)$$

式中 h ——注浆管长度，可近似取钻孔深度；

$\gamma_{\pm}$ 、 $\gamma_{\text{浆}}$ ——土坝坝体密度和泥浆密度；

σ_t ——土的抗拉强度。

从式(1)可知钻孔起裂时所需孔口压力除与土坝应力 σ_t 和土的抗拉强度 σ_t 有关外，还与钻孔深度、泥浆密度有关。我们把 σ_t 与土柱重 $\gamma_{\pm}gh$ 比值用 k 表示，则对于 $K=0.5, 0.6, 0.7$ ； $\gamma_{\text{浆}}=1.0, 1.2, 1.4\text{g/cm}^3$ 时， $p_0 \sim h$ 关系如图3。

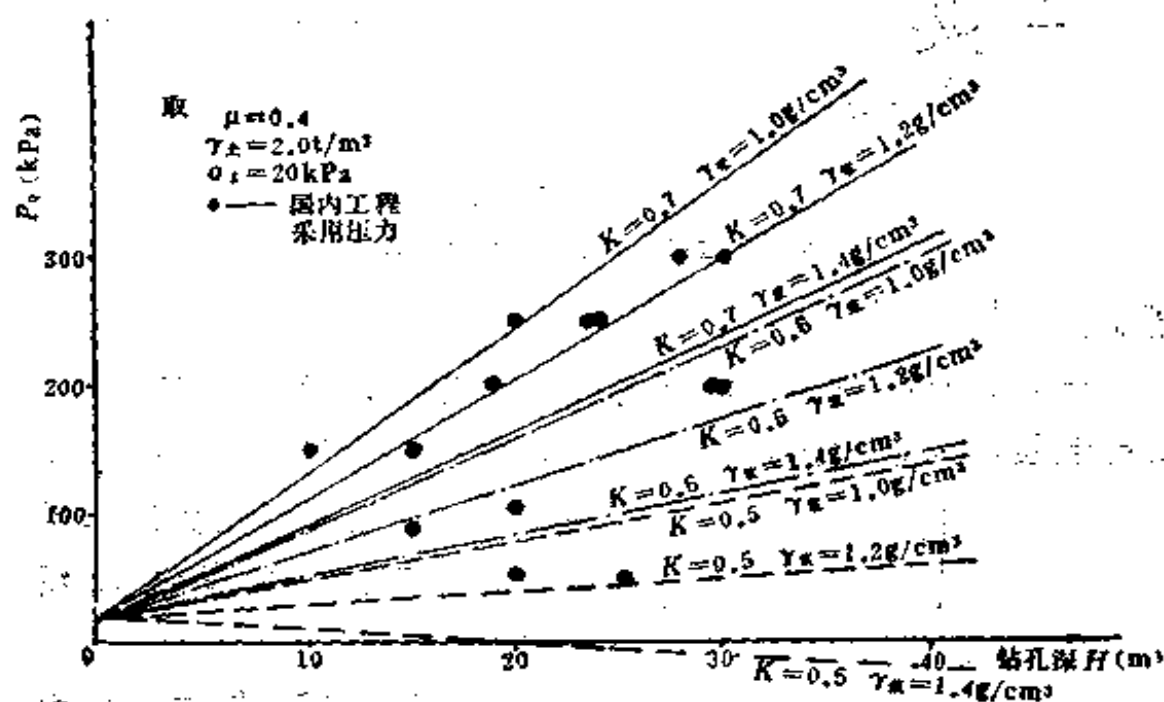


图 3 钻孔起裂时的孔口压力值

分析图3可知，在泥浆压力作用下钻孔是容易被劈裂的。例如 $K=0.5$ ，孔口压力为 10N/cm^2 ，甚至为0，钻孔也被劈裂。目前国内土坝坝体灌浆采用的孔口压力一般为 $5 \sim 30\text{N/cm}^2$ （仍属低压）。在这样的压力下，不论是作为劈裂式灌浆，还是作为充填式灌浆，这些坝体均被有意或无意地劈裂了（反映在图3中即黑点平均在某条 K 值线以上）。

钻孔起裂时压力变化情况如上所述，那么出现裂缝以后或坝体有原始裂缝时，劈裂压力又如何呢？理论与实践证明：裂缝扩展所需的孔口压力（压力表读数）比钻孔起裂所需的孔口压力要小，近似为 σ_s 。所以在泥浆压力作用下，裂缝扩展比钻孔起裂还容易。

综上所述，灌浆时坝体是容易被劈裂的。目前除特殊情况（坝体中有很多大洞穴）外，一般都难免被劈裂。问题是如何在土坝坝体灌浆时利用劈裂原理，掌握其规律，控制其发展，组织一套更科学更合理的灌浆工艺。

五、泥浆劈裂坝体的规律

（一）沿弱应力面发展

坝体在泥浆压力作用下，不论是钻孔起裂还是裂缝扩展总是沿弱应力作用面进行的。即使原来有一裂缝不在这个面上，发展一定距离后总要回到弱应力作用面上。对土坝坝体来讲，如前所述，弱应力作用面基本与河槽段土坝坝轴线一致，在岸坡段基本与岸坡走向一致，两者之间有个过渡段。如原坝体已发生裂缝或施工时遗留有薄弱面，这些地方都易被劈裂。所以土坝坝体劈裂方向有一定规律性。

（二）向低应力区发展

裂缝由弱应力区向高压应力区发展，要克服高压应力的阻挡作用，即裂缝发展受阻挡或发展缓慢；反之由较高应力区向低（弱）应力区扩展比较容易和迅速。由弱应力区向更弱的应力区发展更是如此。一般土坝下部应力高上部应力低，所以灌浆时向下发展不容易，也不太快，向上发展比较容易和迅速。

（三）向坝体质量差的地方发展

当土坝坝体质量不同，劈裂缝在较差土质中扩展，若遇到较好的土质时，裂缝发展将受阻挡；反之，劈裂缝在较好的土质中扩展，附近有较差的土质，裂缝很容易扩展到较差的土质中去。同理，劈裂缝扩展与坝体原来裂缝（有一定深度）相交，将沿原裂缝扩展，如原来裂缝很浅，则不一定如此。

（四）孔底注浆裂缝发展模式

由于土坝坝体灌浆采用孔底注浆方式，浆液由下向上，压力减小，裂缝沿坝轴线（弱应力面）发展比向上还容易。因此就裂缝扩展快慢而言，其模式为“左、右、上、下”。

（五）坝体劈裂宽度的影响因素

实践和理论证明，裂缝近似为长条椭圆形，裂缝最大宽度一般在注浆管出口附近质量较差的地方（注浆管太浅则例外）。坝体的质量差，弹性模量小，劈裂宽度大。例如山东省的松堆土坝裂缝宽度可达80cm以上。坝体质量好，弹性模量大或粘结性强，劈裂宽度小。例如我国南方的红粘土坝，一般只有5cm左右。坝体劈裂宽度还与灌浆压力的大小成正比，与裂缝长度成正比。

劈裂灌浆浆脉是多次灌浆形成的，裂缝扩展也是多次进行的。一般单孔灌浆次数不少于5次，个别有时可达10次。每次劈裂宽度较小，这样可确保坝体安全。

土坝坝体灌浆很容易劈裂，这是不以人的意志为转移的。我们应利用这些规律实现人为控制性劈裂灌浆。

六、泥浆对坝体的充填作用

（一）泥浆对坝体的充填作用

劈裂式灌浆对坝体有很大充填能力，它在坝体的内部劈

开一条灌浆通道，这个通道又可能把坝体内的各种隐患连通起来，压入更多更稠的浆液，达到处理隐患、充填坝体和构造防渗帷幕的目的。这种充填作用与劈裂作用是同时进行的，随灌随劈随充填，达到缝开浆到料满，劈裂灌浆能按预定的位置和厚度构造防渗帷幕，并控制劈裂宽度和灌入的土方量。山东省五座土坝灌入的土方量如表1。

表 1 山东省五座土坝灌入土方量统计表

序 号	土坝名称	坝 高 (m)	坝 长 (m)	灌入总 干土重 (t)	单孔最大 灌入干土重 (t)	平 均 充填厚度 (cm)
1	石店土坝	33	857	9035	500	35
2	贾庄土坝	25.5	1043	2934	220	19
3	黄前土坝	33	1530	5400	107	14
4	西埠土坝	16	170	350	全线劈开 不易统计	18
5	生花庵土坝	18.5	286	2230	255	55

(二) 浆体防渗帷幕厚度的估算

由于浆脉的渗透系数 $K=10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ ，计算与实践结果表明，浆脉只需5~20cm即可满足防渗要求。如坝体内有水平砂层，可取较大的数值。还应指出，劈裂灌浆使原来坝体防渗体的裂缝和洞穴得到充填和挤压，使坝体密度提高，所以浆脉与经过处理后的坝体共同发挥防渗作用，使土坝防渗效果大大增强。因此，浆脉不需很厚，一般可根据经验确定。

劈裂灌浆采用分序施灌（图4），每孔灌浆所用的干土重可用下式估算：

$$W_{\text{干}} = \gamma_0 \delta_0 H L \quad (2)$$

式中 γ_0 ——浆脉设计干容重，一般为 $1.45 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ ；

δ_0 ——浆脉设计平均厚度（cm）；

H ——钻孔深度（cm）；

L ——两序孔间距（cm）。

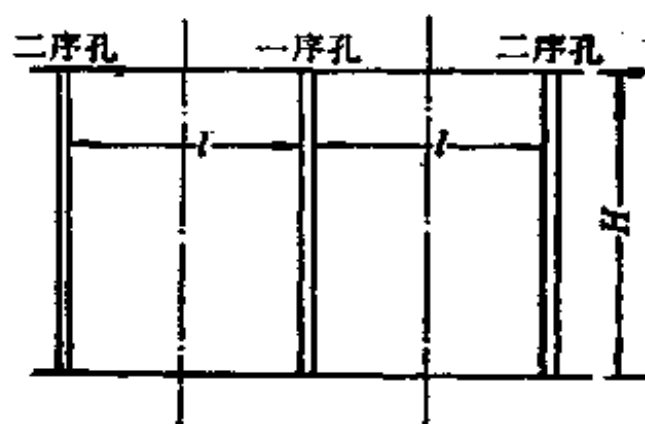


图4 单孔控制简图

若已知每孔灌入总干土重 $W_{\text{干}}$ ，可反求平均厚度。山东省黄前土坝灌浆后开挖检查结果与由上式估算结果基本相符，见表1。

七、浆坝互压作用机理

劈裂式灌浆把大量浆液压入坝体，通过浆液和坝体互压、坝体湿陷、浆液固结作用，使浆液和坝体都发生质量的变化。这里先说明浆液和坝体互压作用。它可分为灌浆时浆压坝和停灌后的坝压浆两个阶段。作用的结果是在一定范围内压密了坝体，使水平压应力增加；同时泥浆波压密固结，达到一定的密度要求。劈裂灌浆利用这一规律达到提高灌浆质

量的目的。

这种浆坝互压表现在灌浆时坝体变形。劈裂灌浆每次灌浆都有压缩和回弹变形，后者可达总变形量的11%~20%。从而压密了部分坝体，克服了弱应力区，浆脉附近的原有裂隙被挤进浆液或被挤压闭合，浆液压缩固结排出多余水分而形成了浆脉。这些有利作用和效果是别的灌浆方法不易达到的。

八、湿陷作用

泥浆进入坝体时，大量的水也随之进入坝体。水除了产生孔隙水压力（根据观测可达 $8\sim 10\text{N/cm}^2$ ，但还不会危及土坝的安全）外，还对坝体产生湿陷作用。湿陷作用的大小与土坝质量和土料性质有关，对有些土坝可能起重要作用。而对有些土坝湿陷作用可能很小。

一般需灌浆的土坝，都存在坝体质量不好，干容重较低等问题，所以灌浆后都产生了湿陷。山东省统计湿陷量约占坝高的0.5%~3%，绝对湿陷量 $10\sim 100\text{cm}$ ，国内有的土坝湿陷达一米以上。

灌浆引起的坝体沉陷，主要是湿陷造成的。这种人为的湿陷作用对坝体一般是有利的。它增加了坝体密度、应力比和坝体变形稳定性，减少了弱应力区范围。

湿陷作用在灌浆期间变化较快，停灌后变化则很缓慢，以后每次复灌都有湿陷，但湿陷比率越来越小。湿陷作用主要产生在无水坝段，在灌浆轴线产生凹陷，使坝高有所降低。在坝顶出现湿陷裂缝，其宽度达 $0.5\sim 2\text{cm}$ ，深度一般为 $1\sim 3\text{m}$ 。因此，在灌浆时会出现“假劈裂”和“意外的裂缝”。这些裂缝经过多次复灌后有的闭合，有的不能闭合，

需及时处理。

九、灌浆的固结和压密作用

浆液进入坝体后并不是总保持高含水量和流体状态，经过一系列物理化学作用后，多余水分被排走，浆体固结并有一定强度，这是我们所要求的。使泥浆固结的因素有析水作用、物理化学作用和渗透作用。如果浆液中有化学物质和凝结材料时，还会产生凝结作用。

（一）析水作用

泥浆在裂缝或孔洞中，流速逐渐减慢直至停止，经过一段时间后，大量自由水析出。澄清的水在浆液上部，再经过其它作用进入坝体或用吸管吸出坝体。析出作用大小与浆液中的颗粒大小和成分有关，与水中的离子性质有关。

（二）物理化学作用

包括土颗粒的电分子引力作用、水中的离子水化作用和孔隙中的毛细管作用。土对水的物理化学作用表现为土对水的吸力。不同质的土，吸力不一样。例如：含水量为20%的砂壤土，其吸力在33kPa左右，而同样含水量的粘土其吸力可达1500kPa。同一类土其含水量越小，坝体越干燥，吸力越大。

物理化学作用主要表现在浸润线以上的非饱和土中。所以，在坝体干燥或在浸润线低的情况下灌浆，对固结有利。

（三）渗透作用

水在重力和压力作用下产生渗流，不论在浸润线上或下均起重要作用。所以劈裂灌浆采用一定灌浆压力提高压力水头，再利用坝体回弹造成压力水头，加速水分排出，使泥浆固结和压密。

(四) 凝结作用

如果浆液中有某些化学物质和凝结材料，则这些物质将产生化学、凝结作用，使浆液中的水分由自由水变成结晶水，使浆液由流体变成固体或半固体。例如：水泥、水玻璃、膨润土及其它凝结材料混合而成的浆液，其凝结作用是主要的。

人们关心的是，经过多长时间泥浆方能固结，密度达到多少。通过观测泥浆孔隙水压力和开挖检查表明，灌浆后第一个月泥浆固结80%左右，十个月后即可接近固结。山东省黄前水库土坝灌浆十个月后取样试验，泥浆干容重可达 $1.5\sim 1.65\text{g/cm}^3$ ，含水量一般在20%~30%之间，比坝体稍高。浆脉的密度沿垂直方向分布，下部密度大，上部则小些。由此可知，劈裂灌浆浆液受坝体的回弹压力和吸力作用，使水分排出而达到压密，效果是很明显的。

综上所述，土坝坝体劈裂灌浆是基于土坝极易被浆液劈裂的客观实际及其规律性的认识的基础上产生的。劈裂的目的在于沿坝轴线附近构造浆体防渗帷幕，截堵坝体渗漏带，充填裂缝和洞穴。浆液的固结和凝结是水的物理化学作用结果，其中坝体劈裂的回弹压力是固结的重要条件。灌浆的结果，形成了防渗帷幕与原坝体共同起防渗作用。浆脉附近的坝体被压密，改善了坝体的应力状态，有利于坝体的变形稳定性。劈裂灌浆有实践和科学的依据，掌握了它的规律性和作用机理，在灌浆中就可控制其灌浆压力、灌浆量、位移、裂缝扩展方向和宽度、浆脉的质量和密度等，达到保持坝体安全和提高灌浆效果的目的。

第二章 土坝勘查与灌浆试验

为了论证土坝处理的必要性和土坝灌浆方案的可行性，并为设计、施工提供可靠的参数，在土坝灌浆前必须进行勘查和灌浆试验。

一、勘查的目的和方法

凡需要进行灌浆处理的土坝，多表现为土坝的变形稳定或渗透稳定遭到破坏，土坝一些部位有裂缝、浸润线出逸点过高或集中渗漏等。对隐患的危害程度、破坏面积的大小必须在灌浆设计以前做好调查分析和必要的勘探。调查内容包括坝址的水文地质情况、土坝施工期间所用土料性质、压实情况、坝基坝头和合拢口的处理、施工程序、运用期的变形、裂缝及渗漏等。勘探方法包括电探、钻探、井探、坑探和注水试验等。这些勘探方法比较成熟，一般有关的参考书上都能找到，这里不再介绍。

二、工程资料的调查分析

土坝隐患的产生与坝型、防渗体形式、坝址河谷形状、施工条件（防渗体材料和压实程度）、地基条件、蓄水过程及运行条件等有关；此外和气候条件、坝体稳定性条件等因素也有关。因此在灌浆前必须进行全面的调查研究，弄清原因，才能搞好灌浆设计，做到有的放矢。

（一）对施工期有关情况的调查分析

在全面了解坝址水文地质状况的基础上，再进行以下几方面的调查分析。

1. 坝体和坝址衔接部分的处理

在施工中衔接部分处理不当，或未作处理，因此造成漏水、冲刷、管涌及基础沉陷等现象，应查明原因，找出隐患部位。

2. 施工季节对土料含水量的影响

由于在施工中质量掌握不严，在不同的施工季节出现一些不同性质的隐患。如冬、春季施工，容易出现土料含水量过低或冻土块上坝，这不仅使碾压不实，而且还容易产生脆性破坏，出现裂缝；而雨季施工，又容易出现土料含水量过高，形成橡皮土的现象。上述因素都可能造成坝体变形稳定和渗透稳定破坏等隐患。

3. 碾压工具与碾压质量

我国所建土坝多为碾压坝，大都为人工上土，用履带拖拉机碾压，如果铺土层过厚，碾压质量没有保证，会出现水平疏松层。有的在施工中由于上坝土料控制不严，还会造成水平砂层，抬高浸润线，形成隐患。

4. 施工组织情况与坝段接合质量

由于施工单元过小，分段过短，接头过多，以及接合坡过陡等，质量不易掌握，在沉陷差过大处出现横向裂缝。如果各施工段进度相差太大，接头处理不好，容易产生集中漏水。有的坝在施工中由于某种原因不能连续上土，甚至相隔几年再上土，新旧结合面未作处理，变形不均；或原坝表面存在某种形式的破坏，未作处理即上土料掩埋起来等，容易形成坝内薄弱环节。

5. 坝料土物理力学性质指标的收集

包括施工期间和灌浆前坝体土料的野外和室内试验的各种主要物理力学性质指标。试验仪器、试验方法亦须弄清。

(二) 对水库土坝运用期间有关情况的调查分析

1. 对历年蓄水情况的分析

有些土坝由于填土疏松，随着水位的逐年提高出现坝体前后湿陷，因湿陷而出现的纵向裂缝也随之由前向后发展。蓄水位酌超落控制不当，也会对坝体的垂直和水平位移产生影响。

2. 裂缝、塌陷的调查分析

土坝坝体的裂缝，从发生部位上可分为表面缝和内部缝；从产生的原因上可分为由于不均匀变形而产生的张拉缝、剪切缝、湿陷缝、干缩缝和由于坝体局部失去稳定而产生的滑坡缝等；从走向上可分为纵向缝、横向缝、斜缝和水平缝。最好结合坝体应力、应变的分析计算，找出各种裂缝产生的原因，危害程度。对内部缝要用钻探、电探或开挖探坑弄清裂缝位置、走向和深度等，为灌浆方案的确定提供依据。土坝的塌陷多数由湿陷引起，一般多从坝前开始，但要具体分析，查明原因和危害程度。

3. 对坝体渗透破坏的调查分析

由观测资料去分析渗漏部位、渗流量、带出的固体物质以及历年浸润线的变化情况，有时渗漏部位需要用钻探、井探，或物理探测仪器查找。

4. 对土坝在运用期间一些破坏性灾害的调查分析

土坝在运用期间破坏性灾害较严重的有滑坡和地震等。对滑坡，要调查滑坡位置、原因及土方量等；对地震，要调查其烈度、震后坝体出现的各种情况及各部位沉降、位移、滑坡及裂缝等。

土坝运用期间是否作过事故处理。如滑坡、裂缝、塌陷和坝体的加高培厚等，处理措施、位置和处理前后的变

化等。

5. 生物洞穴的危害

由白蚁、獾狐、老鼠，以及坝后坡植物等动植物而产生的蚁穴、獾鼠洞等也要尽量查明位置，危害程度等。

(三) 对观测资料的分析

1. 沉降资料

根据坝体沉降量纵横断面分布图、沉降量等值线图、沉降过程线图等，计算出沉降比和沉降差。有条件时再通过计算，分析裂缝的可能位置及发展趋向。

2. 水平位移资料

包括纵向和横向水平位移。根据纵横向水平位移分布图、纵横向位移过程线图及位移量统计表，分析历年和有突出变化的年份，位移量的规律和变化的原因以及对工程的影响等。对缺乏这种观测资料的土坝，可根据原设计断面和现有断面的变化进行粗略估算或根据沉降资料加以推算。

3. 浸润线和渗流量观测资料的分析

测压管和明暗流量的观测资料，包括渗水压力坡降线，测压管水位过程线，测压管水位与水库水位关系线，渗流量与库水位关系线，以及明流量与暗流量过程线等。特别是特定水位时测压管水位与时间关系线，坝基渗流等值线等异常现象的发展状况，必须认真分析，查明原因，藉以确定隐患的位置及危害程度等。

4. 坝体固结和孔隙水压力观测资料分析

根据各个时期坝体各部位的沉降量沿高程的分布图、各观测点的固结过程线，结合孔隙压力过程线、孔隙压力等值线图、固结量与孔隙水压力关系曲线图，分析坝体各部位的固结度，找出不同固结度产生的原因，分析坝体不同区域的稳

定状态、坝体孔隙水压力观测资料，在国内还为数不多。

调查分析的结果，要对坝体的安全、隐患性质和部位、坝体质量、发展趋势作出如实而恰当的结论。这些都要用事实、图表、数据加以说明。最后在调查分析的基础上提出处理的方案。如采用灌浆法就要进一步作好灌浆试验和灌浆设计。

三、灌浆试验的内容和方法

为了搞好灌浆设计和施工，灌浆试验是必不可少的，因为堤坝产生破坏的原因不同，填筑土料的性质千差万别，用一组相同的参数进行任意一座灌浆堤坝的设计和施工都是不妥当的。尤其是一些心墙比较薄，坝又比较高的土坝，在选择劈裂式灌浆技术时，在灌浆设计以前，必须进行试验。但在一些特殊地区，在填土性质较单一而施工技术又有保障前提下，可以免除试验。如山东省一些比较低的宽心墙土坝，破坏的原因比较明显，填土的物理力学性质比较单一，加之灌浆队伍技术比较熟练，在灌浆设计和施工中采用了有关资料并参考类似的已灌土坝的实测参数作为依据，而未做灌浆试验。但是在灌浆施工中，他们仍加强了观测，用实测数据来调整修正原来采取的一些参数，也取得了预想的灌浆效果。

根据堤坝破坏的原因，填土的物理力学性质差异，灌浆机械以及灌浆形式等的不同，灌浆试验的内容也是不相同的。一般的都应包括室内和室外原型试验。室内试验，包括坝体回填土料和浆体土料物理力学性质的试验及浆液材料的试验等。原型试验，一般包括灌浆压力、位移、裂缝、冒浆、孔距及一次灌浆量等。坝体内部要进行土压力、位移、

孔隙水压力等的试验。这里主要介绍现场灌浆试验。

(一) 试验段的选择

土坝灌浆试验孔位一般布置在最大坝高处，或存在隐患的部位。通过钻灌试验，可以了解造孔进度，制定造孔定额；了解单位最大灌浆量，为设计灌浆所需的总土方量提供依据。因为最大坝高处或隐患严重部位，在灌浆时变形往往最大，从而提供变形（裂缝、位移、沉陷等）及与变形有关的（孔口压力、泥浆容重、一次单位灌浆量等）控制指标。

一般低坝试验孔深至坝基，孔距5~10m，灌3~5个试验孔，试验坝段长20m。

堤坝灌浆试验段，一般应选在最大堤高和填筑质量有代表性的堤段处。堤防灌浆试验段长度、孔距和排数应根据灌浆的目的来确定。若为了解决渗透稳定问题，建议采用单排布置灌浆孔，以形成浆体防渗帷幕为原则；若为了解决变形稳定，增加堤身强度，可布置多排灌浆孔，排距和孔距建议由大到小逐渐试验确定。

(二) 试验内容和方法

1. 沉陷位移试验

(1) 观测桩布置。在试验之前，试灌坝段应埋设沉陷位移观测桩，埋设的平面位置和横断位置如图5所示。一般坝体上部在灌浆期水平位移量大，桩距要小一些，中部桩距可大些，下部可不设观测桩，但应注意桩号1和6、2和5、3和4的高程相等，便于观测资料的整理分析。

(2) 观测方法和要求。位移观测用视准线法，沉陷观测用水准仪测量。试灌前每个测点应测出起始高程和起始位移偏差。试灌期要求每二小时观测一次，最少每天观测不得少于二次，目的是测出位移量的峰值，停灌后测次可适当延

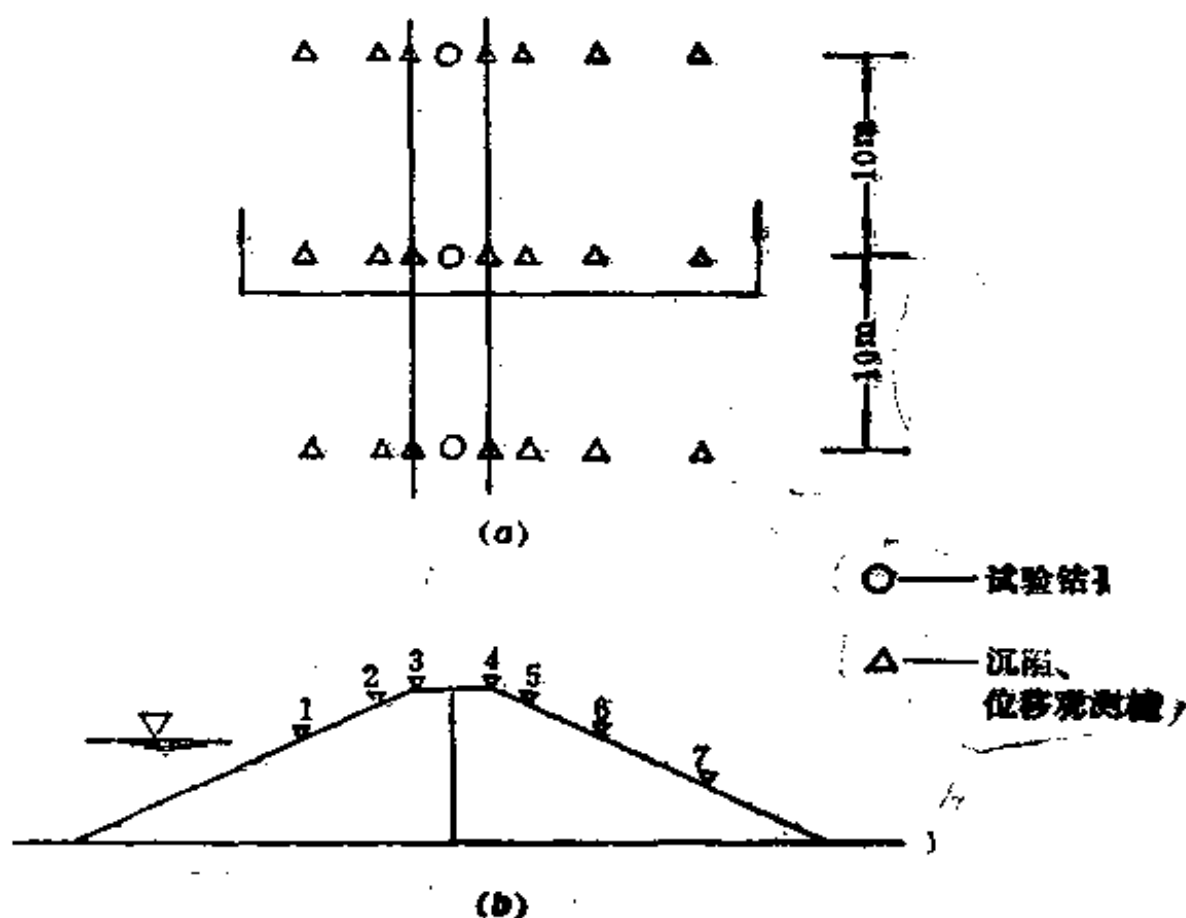


图 5 沉陷、位移桩和试验孔布置示意图
(a)平面布置; (b)横断面布置

长, 以测出停灌后的回弹过程。沉陷和位移应同时观测。沉陷观测精度要求, 误差 $|\delta| < 1.4\sqrt{N}$ (N 为测站数); 位移观测重复两次, 误差在 1mm 之内。

(3) 沉陷量和位移量的控制。对高压缩性土和中压缩性土, 灌浆期多用位移比来控制, 用式子表示为:

$$\eta = \frac{V}{W} < m \quad (3)$$

式中 η ——灌浆期间位移比;
 V ——灌浆横向水平位移量 (mm);
 W ——灌浆期沉陷量 (mm);

m ——被灌堤坝边坡比。

当 $\eta < m$ 时，表明灌期堤坝断面变小，密度增加，可认为这种控制方法是合理的，否则是不合理的。

对低压缩性土，因为灌浆期沉陷量 W 很小，而横向水平位移量却往往较大，所以式 (3) 不适用。位移 η 值应放宽，可能大于 m 值也是容许的，但位移后必须有回弹量，否则是绝对不容许的。

2. 回弹比试验

在堤坝劈裂式灌浆中，沿轴线（或灌浆轴线）坝顶表面常被泥浆压力劈裂，裂缝的宽度应加以控制。至于坝体内部的劈裂宽度，应根据坝体的渗透稳定和变形稳定，通过计算来确定。

裂缝试验，系对劈裂式灌浆沿轴线形成的表面裂缝而言，常用停灌后的回弹比值来控制，表示式为：

$$n = \frac{V'}{V} \times 100 \quad (4)$$

式中 n ——停灌后的回弹比（%）；

V' ——停灌后的回弹量（mm）；

V ——灌期横向水平位移量（mm）。

因每座堤坝的应力状态不同，实践证明 n 值的大小是不一样的，其控制范围大致可分为两种情况：

坝顶横向受拉 $50\% > n > 25\%$

坝顶横向受压 $n > 50\%$

n 值越大，对灌入的泥浆排水固结越有利，坝压浆的效果越好，所以我们尽量采用合理的灌浆工艺，取得较大的回弹比。经验证明，在第一次灌浆劈裂时，如控制得当，在停灌后的12小时内回弹量加湿化变形量，一般与位移量相

等，所以 n 值可达100%，以后每次劈裂， n 值越来越小，灌浆试验全部结束后，按上述两种指标控制。

顺便指出，若灌浆时产生横向水平位移量，而停灌后没有回弹量，即 $n=0$ ，这是非常危险的，可能是滑坡的征象，应引起高度重视。这种现象说明灌浆工艺和参数选择不合理。

堤坝采用低压灌浆，不可避免的也有轻度劈裂，但位移量很小，难以测出。停灌后短时间内，一般均能全部回弹。

3. 灌浆压力试验

(1) 灌浆压力试验装置。试验灌浆孔口压力时，压力表必须安装在注浆管的上端，如图6所示。

这是目前国内常用的一种方法。但有的灌浆工地，利用灌浆泵上的压力表，或者把压力表安装在输浆管路的任意部

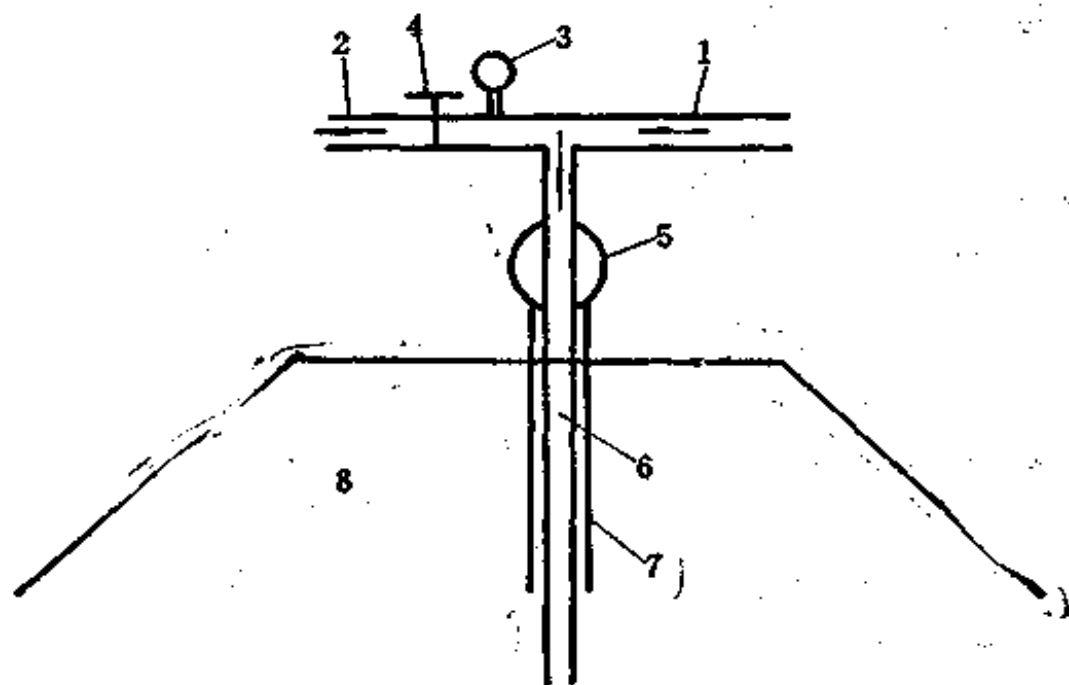


图6 灌浆压力测定装置简图

1—进浆管，2—回浆管，3—压力表，4—回浆阀门，5—阻浆器，6—注浆管，7—护浆管，8—坝体

位，都是符合要求的，测出的压力比通常所说的灌浆压力要大得多。灌浆压力表应选用压力真空表，最大量程 $60\text{N}/\text{cm}^2$ ，既能量测正压，也能量测负压，正负压力精度均为 $1\text{N}/\text{cm}^2$ ，可估读 $0.5\text{N}/\text{cm}^2$ ，能满足各种堤坝灌浆压力的量测要求。

(2) 试验方法和步骤。在灌浆压力试验时，试验孔灌浆的整个过程，压力只要有变化，都要随时记在观测记录表内，并记下相应的观测时间。灌浆时由于压力表指针来回摆动，应观测指针摆动时的中间值。

每个试验孔灌浆结束后，将灌浆压力过程线绘在米厘纸上。每个试验孔都按上述方法和步骤去作，全部试验孔灌浆结束后，将每个试验孔的灌浆压力过程线作对比，找出最大灌浆孔口压力峰值，作为劈裂式灌浆施工时的压力控制指标。一般灌浆压力不得超过此峰值，若大于这一峰值，则应停灌，分析原因，是因坝体质量不均匀，或因注浆管被堵塞。若是前者应打开回浆阀门降低压力；若是后者应予排除，再进行灌浆。

(3) 灌浆压力的变化规律。堤坝灌浆压力变化过程线的线形较多，每座坝有每座坝的特点。经常遇到的坝体灌浆孔口压力变化规律有如下几种：

①多峰值：多峰值的孔口压力变化规律是，开始灌浆时压力逐渐上升，时间较短，一般在几分钟内压力到达峰值，后又突然下降，出现一低压过程。这一过程的灌浆历时长短，主要取决堤坝质量的好坏，质量差时间长，否则时间短。随着灌浆的进展，压力又逐渐升高，出现第二个峰值，以后压力又迅速下降，出现第二次低压阶段，这意味着出现新的劈裂。

②单峰值：图7所示的孔口压力过程线只出现一个峰

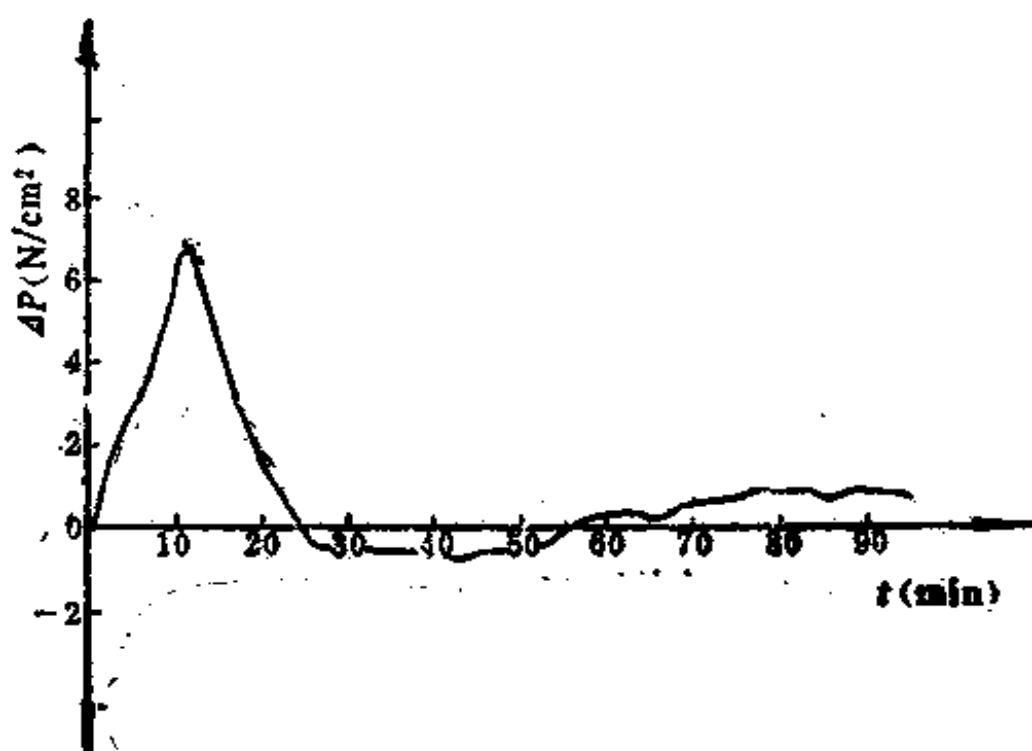


图 7 单峰值孔口压力过程线图

值，峰值过后一直处于低压阶段，并有负压出现。

③无峰值：有的堤坝在灌浆时，始终不起压，孔口压力等于或小于零。

第①种情况，表明坝体质量较好，一次劈开的裂缝范围不大，当裂缝内灌满泥浆后，又出现新的劈裂，同时出现新的压力峰值，且峰值都比较大。

第②种情况，表明坝体质量较差，土体较松散，小主应力较小，只要辅以灌浆孔口压力劈开预裂缝，以后单靠泥浆柱自重即可顺利劈裂，所以不再出现峰值。

第③种情况，往往是填筑质量很不好的土，质量很差，小主应力和土的抗拉强度都很小，所以泥浆自重即可将坝体劈裂。如某座土坝共灌了50个孔，只有三个钻孔出现孔口压力，其余47个钻孔始终没有孔口压力，全靠泥浆自重劈裂

的，想施加孔口压力，也是施加不上的。

（4）灌浆压力影响因素。

①堤坝内部应力：内部应力越大，需施加的孔口压力则越大才能将坝体劈裂，否则，用较小的孔口压力即可将坝体劈裂。堤坝内部应力的与灌浆孔口压力成正相关关系。

②灌浆泵量：孔口压力的大小，与灌浆泵量的大小密切相关。在堤坝内部应力相同的情况下，用小泵量输浆，孔口压力表读数可能是零或负压，若用大泵量输浆，孔口压力表就可能是正压。这是因为泥浆劈裂坝体后，小泵量输送泥浆量少，显得裂缝发展快，泥浆供不应求，所以表现为负压或零压；而大泵量输送泥浆，泥浆供应有余，所以表现为正压，且泵量越大压力越大。

③钻孔直径：钻孔直径的大小直接影响灌浆孔口压力大小，钻孔直径小，灌浆孔口压力则大，反之压力则小。因为坝体的抗劈力一定时，劈裂坝体的外力有两部分组成，一是泥浆柱压力，二是灌浆孔口压力。孔径越小，泥浆柱传给孔壁的总压力越小，所以只有施加较大的孔口压力才能把坝体劈裂。与此相反，孔径越大，泥浆柱传递给孔壁的总压力越大，施加的孔口压力就小，或不用施加孔口压力也能把坝体劈裂。

④输浆系统：在此系指输浆管、输浆管接头及注浆管。输浆管内径尺寸的大小直接影响着灌浆孔口压力。一般在灌浆试验和灌浆施工时，输浆管内径尺寸的大小，应等于或大于灌浆泵的输出（排浆）口尺寸，不应小于这个尺寸。若输浆管内径尺寸小于灌浆泵出口，测出的灌浆孔口压力则大，这种灌浆压力不能代表真实的灌浆孔口压力——泥浆传给灌浆孔壁上的压力，而是输浆管内的泥浆流速增大所形成

的压力。

4. 一次灌浆量的试验

堤坝灌浆时常遇到单孔进浆量多达数百立方米，若不加以限制地连续施灌，往往导致灌浆孔附近坝顶沉陷量过大，发生横向裂缝，灌浆孔附近边坡位移量过大，不安全，影响坝体回弹，使回弹比变小，还可能导致浆缝一次劈宽过大，影响泥浆在坝体内排水固结速度，降低浆体强度。为了避免上述缺点，对一次灌浆量应加控制。

目前，对一次灌浆量确定的原则是：灌孔与相临孔处坝顶的沉陷差不能过大，以防导致产生横缝；在前2~3次的灌浆过程中边坡产生的位移，停灌后均能很快的产生回弹，且回弹比较大；坝面被劈裂后即停灌。上述原则要综合考虑，通过试验来确定一次灌浆量。

根据土体重复压缩回弹规律，控制每次灌浆量，进行多次复灌，即相当于给浆缝两侧的土体多次重复加荷卸荷，促使坝体土压密。每次停灌后坝体产生回弹，压缩泥浆，促使泥浆充分析水固结。

在实践中，应贯彻少灌多复的原则。每次单位灌浆量在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{m}$ 之间，间隔时间一般 $5 \sim 10 \text{ d}$ 。当然间隔时间越长对泥浆固结越有利，但会使施工期拖长，往往是不容许的。具体数值，应由试验后再定。

5. 土压力和孔隙水压力试验

堤坝灌浆，尤其是在高水位情况下的劈裂式灌浆，由于泥浆压力的作用，堤坝应力状态发生改变，孔隙水压力增加很快。为了监视灌浆期堤坝的安全，有条件的工程应埋设土压力盒和孔隙水压力测头，进行试验。通过试验，取得土压力和孔隙水压力控制指标，确保灌期堤坝安全。

(1) 土压力盒和孔隙水压力测头的布置和埋设方法。

①布置：土压力盒和孔隙水压力测头的布置，应本着埋设数量要尽量减少，而又能满足观测的原则。一般是在河槽坝段选1~2个断面，作为平面问题试验；在较陡的岸坡段选一断面，作为三向问题试验。仪器一般布置在灌浆轴线的上下游两侧，见图8。

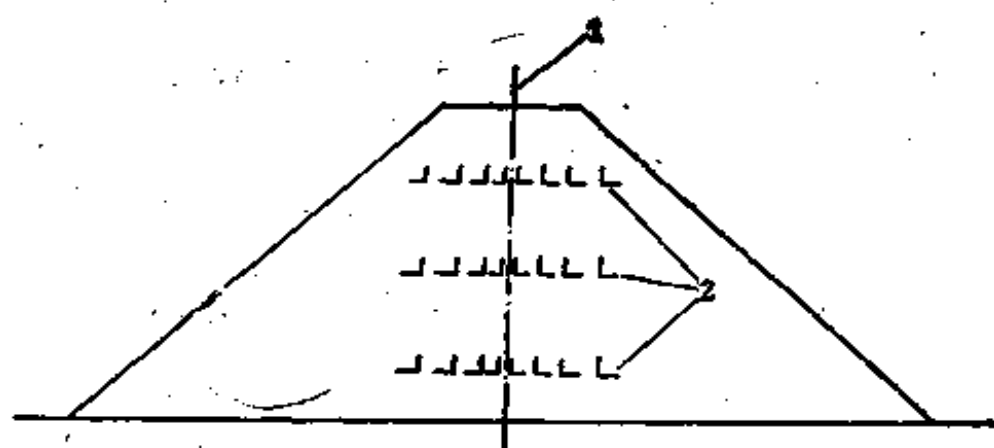


图8 土压力盒布置示意图

1—灌浆孔布置轴线；2—土压力盒

在层次上一般布置上、中、下三层，测其不同深度的应力和孔隙水压力的变化，便于资料整理分析。

每层仪器的布置，应从灌浆轴线向两侧，间距逐渐加大。离轴线最远的一组测头一般4m为宜。每组土压力盒附近均应埋设孔隙水压力测头，以便换算有效应力。

②埋设方法：在已建成的堤坝上埋设土压力盒，一般在设计的断面位置上进行挖井埋设，一次把井挖到设计深度，由下至上分层埋设土压力盒和孔隙压力测头。待最后一层埋好后进行回填，到上一层的设计深度后，再埋第二次，直至埋设完毕。回填井时，要求回填的土料物理力学性质，保持与原堤坝土相同。

具体埋设方法是：将井壁切成垂直灌浆轴线的平面，在平面上量测埋设位置，用土刀精心挖出较土压力盒的厚和直径均小 2 mm 的洞，将压力盒用力塞入，必要时用锤柄轻轻捣进，使之与土紧密结合。

每次土压力盒埋好后，将屏蔽线拢在一起，用塑料管导出坝面观测房。屏蔽线编号与测头编号要一致，并经再三校核，不得有差错。同时，将每层孔隙水压力导管（或孔隙水压力盒导线）成束铅直导出坝面，并加保护装置，以便观测。

（2）观测方法和要求。JD-W-6 钢弦式土压力盒，配 JD-5 钢弦频率测试仪，为晶体管数字式，用起来很方便，较受欢迎。

量测土压力时，所用电源 220V。将所有土压力盒按编号顺序与集线箱连接。因电压的高低变化，直接影响到量测精度，所以集线箱应与稳压器连接，接收器通过稳压进行量测钢弦频率。灌浆前应测试一段时间，目的在于确定灌浆前的起始土体压力。测出钢弦频率 μS 后，在率定曲线上查出应力 σ 。

钢弦式孔隙水压力盒的测试方法与土压力盒的测试相同。如埋设差动电阻式渗压计，则用比例电桥测试。

在灌浆期间，为了不漏测土压力和孔隙水压力的峰值，要求每 2 h 观测一次。停灌后测次可适当延长。

（3）指标控制。灌浆期坝体是否因孔隙水压力大而出现滑动，目前多用孔隙压力比这一指标来控制，并用下式表示：

$$\bar{B} = \frac{u}{\gamma_s h g} \times 100 \quad (5)$$

式中 $\bar{B}$ ——孔隙压力比（%）；

u ——实测孔隙水压力 (kN/m^2)；

γ_s ——坝料的密度 (t/m^3)；

h ——从坝面到孔隙压力测头的垂直高度 (m)。

当 $\bar{B} > 60\%$ 时，除低坝以外都是危险的，为使安全率 $F \geq 1.5$ ，必须使 $\bar{B} < 40\% \sim 50\%$ 。为保证灌浆期坝体安全，须 $\bar{B} < 60\%$ ，安全率 $F > 1$ 。

第三章 灌 浆 设 计

灌浆设计是在充分分析设计任务书中提出的坝体隐患的基础上，经过科学的论证和反复的经济比较后，为解决这些问题提出的最优方案和必须达到的各项技术经济指标。所以做好灌浆设计是保证灌浆质量，做到有计划施工不可缺少的一步，也是上级主管部门审批灌浆工程的重要依据。设计部门必须认真把该项工作做好。灌浆设计的内容一般包括：钻孔布置、灌浆压力设计、帷幕厚度确定、浆液的选择、浆液的析水固结计算、灌浆期坝坡稳定验算和概预算七个部分组成。现分述如下。

一、钻 孔 的 设 计

（一）灌浆孔的布置

灌浆孔的布置应根据坝体隐患的部位、性质和坝体内部应力的分布状况来确定。一般分为河槽段和岸坡段（或坝下埋管段）等。由于这些部位的坝体内部应力状况不同，所以布孔的方式也不一样。

（1）在河槽段，由于所解决问题的性质不同，布孔方式也不完全一样。如果解决的问题主要是坝体渗漏问题，而且坝体碾压质量尚好，可以采用沿坝轴线进行单排布孔，以便构造浆体防渗帷幕；如果坝体碾压质量很差，除沿坝轴线布孔构造防渗帷幕以外，还需在灌浆轴线上下游布置副排孔，以便促使坝体更好地湿陷固结和改善坝体内部应力状况。副排孔的具体位置和排数，应视坝顶的宽窄和隐患的程

度而定。

(2) 在岸坡或坝下埋管(洞)的坝段, 由于坝体内部应力复杂, 灌浆初期一般采用多排梅花形布孔, 并采用“少吃多餐”的灌浆方法, 以利调整坝体应力。灌浆后期, 再沿坝轴线布孔, 构造帷幕连接起来。

(二) 钻孔深度

为了保证隐患部位得到充分处理, 孔深一般不应小于隐患部位以下 $1 \sim 2\text{m}$ 。对于碾压质量很差, 而且渗水又比较严重的坝, 可以将钻孔打到坝底。

(三) 孔距的确定

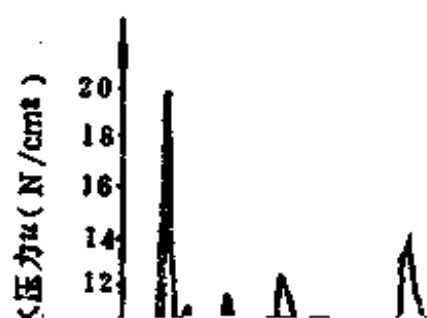
在保证帷幕连续和厚度均匀的前提下, 孔距可以适当放大, 以便减少钻孔数目, 降低工程造价。经灌浆试验, 单侧劈裂浆缝可达几十到百米以上。尽管如此, 终孔间距亦不宜过大。孔距过大, 势必造成单孔注浆时间过长, 灌浆量过大, 帷幕厚度不均, 高低不齐, 同时, 两注浆孔所形成的主浆脉不易衔接。所以, 必须经过技术经济比较, 求出合理的灌浆孔距。最优孔距依据坝体质量和坝型不同而异。经实践和试验得出, 坝高在 $30 \sim 40\text{m}$, 终孔间距以 10m 为宜, 所形成的帷幕比较整齐, 厚度较为均匀。

(四) 孔序

在最终孔距确定以后, 在灌浆施工中往往要分序灌浆。分序灌浆的目的主要是使浆液在坝体中有充分的析水固结时间。所以, 灌浆的序数, 应根据被灌坝段的长短而定, 一般要求序数不要过多, 以免灌浆机械过多的搬迁, 影响工效。如果灌浆坝段较长, 灌浆机组又少, 一般分为二序孔即可; 如果灌浆坝段较短, 可以分为三序或四序孔。

(五) 单孔灌浆间隔时间的确定

间隔时间应由坝体内部孔隙水压力的消散速度来确定。灌浆后往往引起坝体内部的孔隙水压力升高。据有关资料统计，当大坝防渗体内部的孔隙水压力比 $\bar{P} > 60\%$ 时，其安全系数小于 1，所以必须使坝体内的孔隙水压力控制在一定的范围之内。由灌浆试验得知，灌浆后坝体内部孔隙水压力迅速上升，停灌后又迅速下降，下降的幅度与停灌后的时间长短有关。所以，两次灌浆的间隔时间，应使坝体中的孔隙水压力控制在不致危害坝体安全的范围以内，如图 9 所示。控制孔隙水压力的时间，即可定为两次灌浆的间隔时间。



据不同情况通过灌浆试验和理论计算合理确定。

(1) 钻孔的起裂压力 P_0 ，可用下式来计算：

$$P_0 = \alpha\sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_t \quad (6)$$

式中 σ_3 ——坝体钻孔平面的小主应力；

σ_2 ——坝体钻孔平面的大主应力，相当于三向应力状态的第二主应力，对平面应变问题

$$\sigma_2 = \mu(\sigma_1 + \sigma_3)；$$

μ ——泊松比，取0.4；

σ_1 ——三向应力状态下的大主应力，近似等于土柱压力；

σ_t ——土的单轴抗拉强度；

α ——圆孔应力集中系数，经试验一般在2.25~2.5。

(2) 最大控制灌浆压力 P_{max} ，可用下式计算：

$$P_{max} = \gamma gh + \sigma_t \quad (7)$$

式中 h ——被劈点以上土柱高度；

γ ——坝体密度。

(3) 坝体的抗劈力 P_1 ，可用下式计算：

$$P_1 = \sigma_t \pm \sigma_3 \quad (8)$$

式中 σ_3 ——坝体内小主应力，在受拉区取“-”值；在受压区取“+”值。

(4) 泥浆的劈裂压力 P' ，计算公式为：

$$P' = h' \gamma_{\text{浆}} g + \Delta P \quad (9)$$

式中 h' ——注浆管高度；

$\gamma_{\text{浆}}$ ——浆液密度；

ΔP ——孔口压力。

当坝体被劈裂后，泥浆在裂缝中任意点压力的理论公

式为:

$$P' = h(\gamma_{\text{浆}} - \eta_1)g + 4P - \eta_2\sqrt{L^2 + \Delta h^2}g - \Delta h\gamma_{\text{浆}}g \quad (10)$$

式中 η_1, η_2 ——分别为泥浆与注浆管、泥浆与坝体裂缝的动摩擦系数, 其数值可参考有关资料选取;

L ——注浆管下口至裂缝尖端的垂直距离;

Δh ——裂缝尖端到注浆管下口水平面的垂直距离。

(5) 最终设计灌浆压力 P'_1 , 计算公式为:

$$P'_1 = f\bar{\sigma}_1 \quad (11)$$

式中 $\bar{\sigma}_1$ ——计算点坝体原有的有效小主应力, $\bar{\sigma}_1 = Kh_r$ (K 为土的侧压力系数, 一般可取 $0.6 \sim 0.7$);

f ——考虑到由于泥浆的析水固结和坝体的回弹而引起 σ_1 减小的保证系数, 它与浆液稠度有关, 黄前水库取 $f = 1.43$ 。

(6) 最大控制孔口压力 ΔP_{max} , 此时注意到 $\Delta P = \Delta P_{\text{max}}$, $P' = P_{\text{max}}$, 由公式 (7) 和 (9) 即可求得:

$$\Delta P_{\text{max}} = h\gamma g + \sigma_1 - h'\gamma_{\text{浆}}g \quad (12)$$

当 $h = h'$ 时, 式 (12) 变为:

$$\Delta P_{\text{max}} = h(\gamma - \gamma_{\text{浆}})g + \sigma_1 \quad (12')$$

(7) 最终设计控制孔口压力 $\Delta P_{\text{设计}}$, 此时注意到 $\Delta P = \Delta P_{\text{设计}}$, $P' = P'_1$, 可由公式 (9) 和公式 (11) 求得:

$$\Delta P_{\text{设计}} = f\bar{\sigma}_1 - h'\gamma_{\text{浆}}g \quad (13)$$

三、灌浆帷幕厚度的确定

在一般情况下坝体充填、挤压灌浆，对帷幕厚度的要求是不严格的，只要是在坝体中能够形成帷幕浆路，而泥浆通过浆路对坝体中的裂缝、洞穴等隐患能够充填和挤压密实，就基本上达到了灌浆的目的。但是在具有水平沙层或新老坝接触面并严重漏水的土坝，对帷幕厚度的要求是严格的，必须进行理论计算。

(一) 计算方法

由于坝体劈裂灌浆主要是解决坝体的漏水问题，所以帷幕厚度的确定可按不透水地基条件下土坝心墙的计算公式求得。但是这一计算方法比较繁琐，需要经过反复试算后，才能得到真正的单宽渗透量 q 和下游浸润线高 h_1 。为了使计算简化，对均质土坝可根据坝与浆体渗透系数的比值 $\frac{K}{K_0}$ ，将浆体厚度化为与坝体相同渗透系数的厚度，计算图形见图10。经折算后整个坝体的计算宽度为：

$$L = L_1 + \frac{K}{K_0} \delta + L_2 \quad (14)$$

$$L_2 = \frac{b}{2} + (H - H_1)m_1$$

均质土坝坝体渗流的基本计算公式为：

$$\frac{q}{K} = \frac{H_1^2}{L_1 + \sqrt{L_1^2 - (m_2 H_1)^2}} \quad (15)$$

$$h_0 = \frac{q}{K} (m_2 + 0.5) \quad (16)$$

$$y = \sqrt{h_0^2 + (H_1^2 - h_0^2) \frac{x}{L_1 - m_2 h_0}} \quad (17)$$

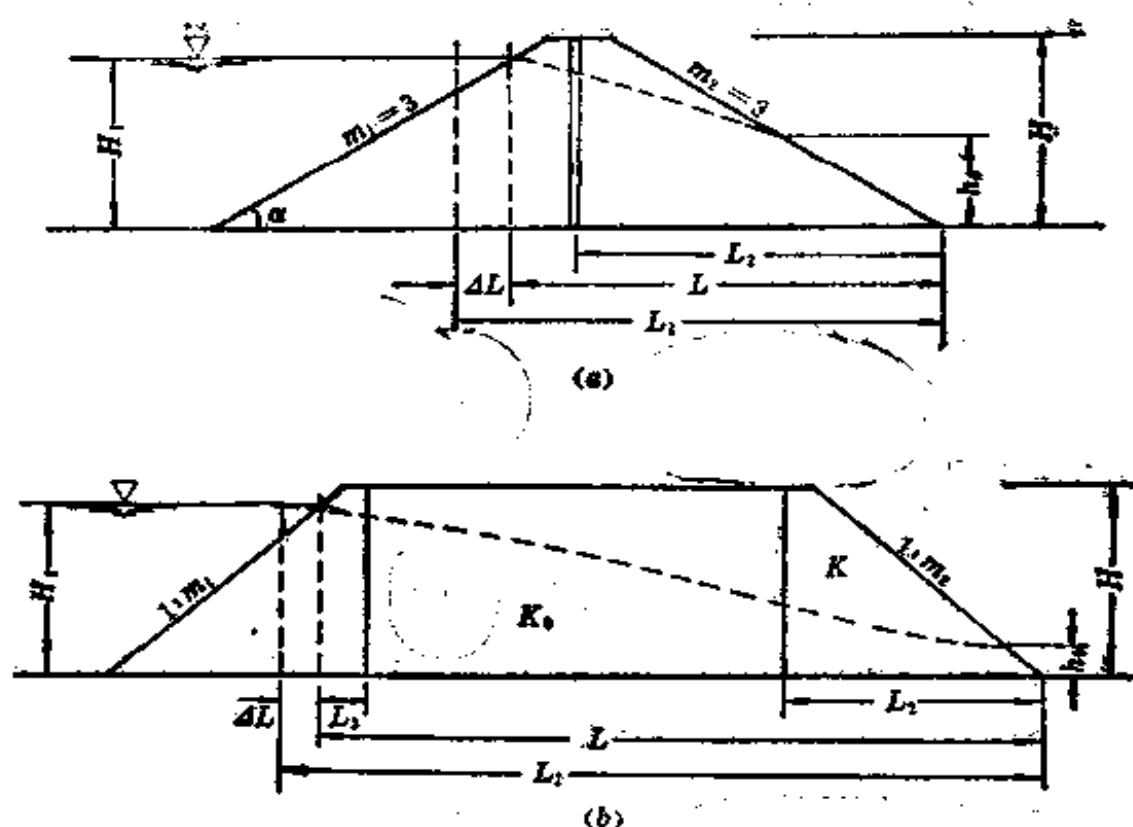


图 10 均质坝
(a)折算前; (b)折算为均质坝后

- 上列式中 b —— 坝顶宽 (m);
- H —— 最大坝高 (m);
- H_1 —— 上游设计最高水头 (m);
- m_1 、 m_2 —— 分别为上、下游边坡系数;
- K_0 —— 浆体帷幕渗透系数 (m/s);
- K —— 坝体土渗透系数 (m/s);
- δ —— 浆体帷幕的平均厚度 (m);
- y 、 x —— 浸润线的计算参数;
- h_0 —— 特征水深 (即下游浸润线出逸高度);
- L_1 —— 下游半坝宽度 (m);

L_1 ——如图10所示, $L_1 = \Delta L + L$ (ΔL 为上游等效虚拟矩形宽度, $\Delta L = \frac{m_1}{2m_1 + 1} H_1$)。

由公式(15)、(16)可知, 当 H_1 和 K 、 K_0 一定时, 改变浆体帷幕厚度 δ , 则得到不同的 q 和 h_0 , 最后可以绘制 $\delta \sim q$ 和 $\delta \sim h_0$ 关系曲线, 如图11所示。根据实际工程对单宽渗流量 q 和浸润线下游出逸点高度 h_0 的要求, 可由图10定出所需要的浆体帷幕厚度 δ 。

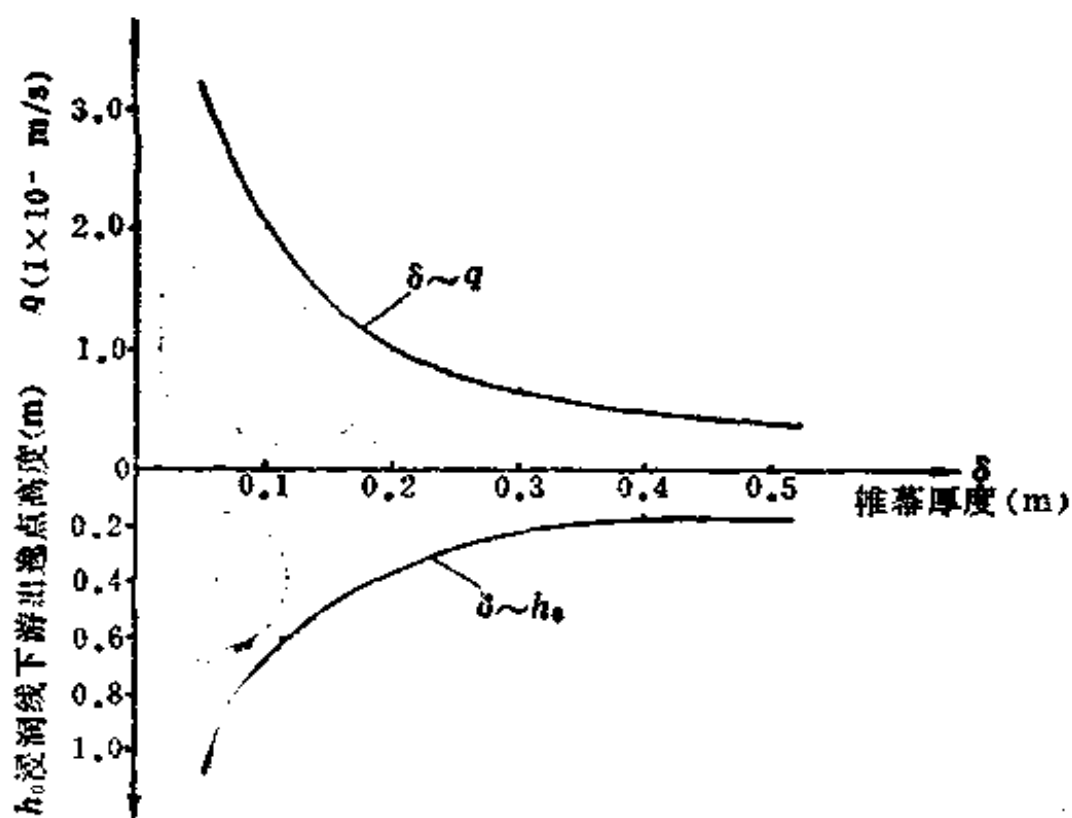


图 11 渗流量、浸润线出逸高度与帷幕厚度的关系

根据上述计算方法的原理, 同样也可以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的简化为矩形断面, 并取其平均宽度 t 做为

心墙的计算宽度，即 $t = \frac{b_0 + b_1}{2}$ ，式中 b_0 和 b_1 分别为心墙顶和底的宽度，详见图12(a)。如果沿坝轴线构筑的垂直浆体帷幕厚度为 δ ，并把 δ 和 t 分别按渗透系数的比值 $\frac{K}{K_0}$ 和 $\frac{K}{K_1}$ ，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，见图12(b)。心墙和浆体折算为均质坝体的计算宽度为：

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{K}{K_1} t \\ \Delta &= \frac{K}{K_0} \delta \\ L_2 &= \left(H m_2 + \frac{b}{2} \right) - \frac{t}{2} \\ L_3 &= (H - H_1) m_1 + \frac{b - t}{2} \\ L &= L_1 + L_2 + T + \Delta \\ L_1 &= L + \Delta L \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中 K_1 ——心墙土的渗透系数；
 Δ ——折算为均质坝后的浆体帷幕宽度；
 T ——折算为均质坝后的心墙平均宽度；
 其它符号的意义同前。

(二) 渗透破坏验算

灌浆帷幕厚度的渗透破坏可用下式验算：

$$J < J_{\lambda} \quad (19)$$

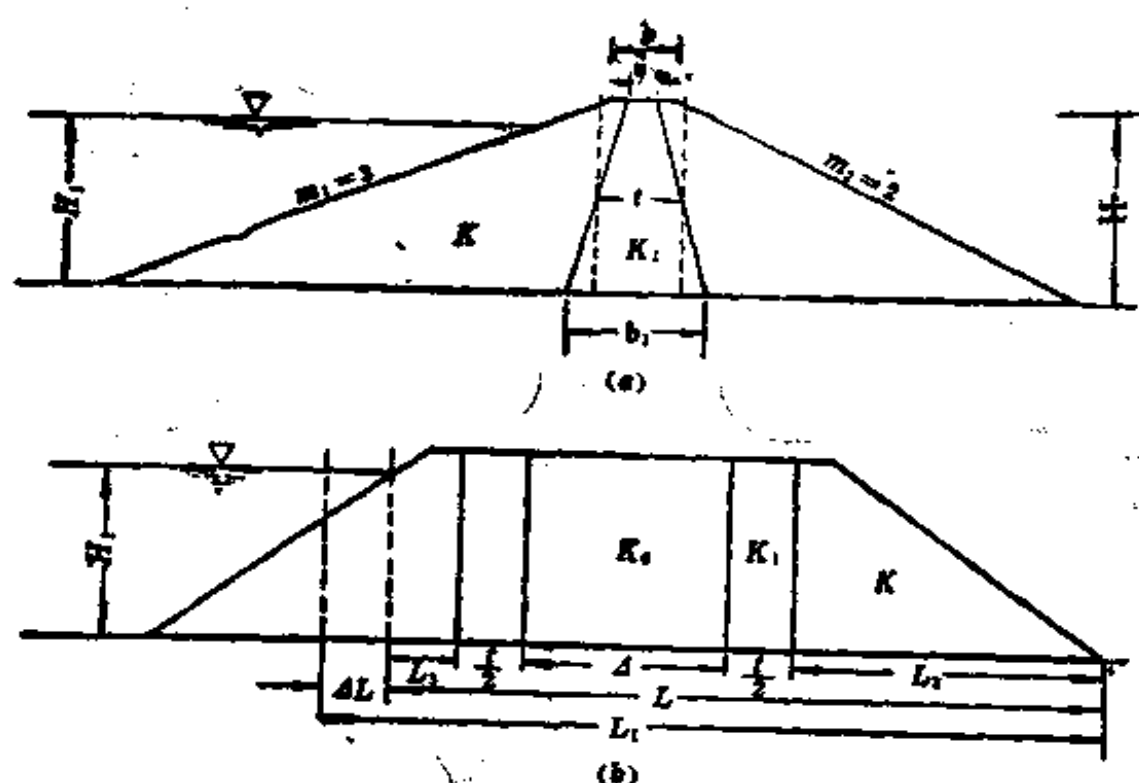


图 12 沙壳坝
(a)折算前; (b)折算为均质坝的图形

式中 J ——浆体帷幕中的渗透坡降, $J = \frac{\Delta H}{\delta}$ (ΔH 为帷幕上下游水位差);

J_R ——粘性土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 100~300。

四、浆液选择

在坝体灌浆中, 选用合适的泥浆, 是保证灌浆质量的重要条件。不同的浆液直接影响泥浆的固结速率和所形成浆体帷幕的防渗效果。所以在灌浆前应对本地粘性土料制成的不同稠度的泥浆进行物理力学性能试验, 以便掌握各种浆液的

物理力学性质，在灌浆施工中选用合适的泥浆。泥浆的试验内容，一般有流动性（粘度）、自由析水率和稳定性等试验。在有条件的情况下，还可做泥浆孔隙水消散和静切力试验。坝体劈裂灌浆对泥浆的一般要求是：可灌性好，稳定性高，析水固结快，形成的浆体防渗性能强，弹性模数和坝体土的相近。但是这些指标相互之间往往是矛盾的，所以在选用浆液时，应统一考虑泥浆各种性能的相互关系，不能过分的强调某一方面。通过试验来配制一种固结硬化快，弹性模数接近坝体的适宜材料。

五、泥浆的析水固结计算

泥浆的析水固结过程与饱和土的固结过程不同，主要表现在泥浆的析水阶段。饱和土的固结过程是孔隙水压力转化为有效应力的过程，而浆液的析水固结前期阶段则不同，它的水分减少并没有引起有效应力的增加。所以，在泥浆的整个析水固结过程中，不能均按土的固结理论去计算，应以浆体的流限含水量为分界，把浆液的整个析水过程分为析水浓缩和排水固结两个阶段来计算。

（一）浆液的析水浓缩阶段

假定浆液的析水浓缩阶段符合如下规律：

- （1）浆液水分的减少不会引起有效应力的增加；
- （2）浆液的抗剪强度等于零；
- （3）浆液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，在析水浓缩阶段泥浆水的析出完全决定于坝体的透水性能。为此，可按渗流理论来考虑，并以如下公式计算：

$$q = VA \quad (20)$$

$$V = K \frac{\partial H}{\partial S} \quad (21)$$

式中 q ——坝体水的渗流量 (cm³/s 或 m³/d) ;

V ——渗流速度 (cm/s 或 m/d) ;

K ——坝体土的渗透系数 (cm/s 或 m/d) ;

$\frac{\partial H}{\partial S}$ ——水头梯度 (即渗透坡降) ;

A ——渗流过水断面 (cm² 或 m²) .

对于同一土质和密度的坝体土来讲, 其渗透系数可以近似视为常数, 这样渗透流速就只是水头梯度 $\frac{\partial H}{\partial S}$ 的函数。由于水头梯度是沿坝深变化的, 所以渗透速度和单宽渗流量也随坝深而变化。为此, 在作浆液析水浓缩计算时, 应算出沿缝深各点的浓缩时间。

(二) 泥浆固结阶段

在此阶段, 浆体随着水分的排出, 有效应力开始增加, 并且在外荷一定时, 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压力消散时, 符合单向渗透固结理论的基本假定及其计算公式为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

均质土坝和心墙坝, 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, 坝体或心墙对于泥浆传来的孔隙水压力不能及时消散。所以, 泥浆固结的边界条件是:

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

$$x=2h, \quad u=u_n,$$

$$t=0, \quad 0 < x < 2h, \quad u=\sigma.$$

目前由于受测试技术的限制，泥浆和坝体接触面的孔隙压力还很难测出。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的边界条件。为此，可以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

$$B' = B\eta \quad (23)$$

$$\eta = \frac{c_1}{c_2}$$

式中 B ——计算点在坝体中排水距离；

η ——坝体折算系数；

c_1 ——浆体的固结系数；

c_2 ——坝体的固结系数；

B' ——折算后的排水距离。

折算后计算点的排水距离为：

$$b = h + B'$$

式中 h —— $1/2$ 浆缝宽度，见图13。

经折算后，方程式(22)的边界条件可化为：

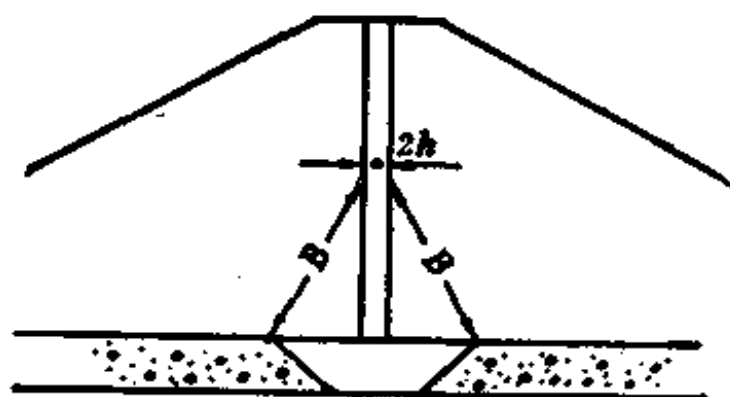


图 13 浆体帷幕中任意点的析水固结边界条件示意图

$$\dot{x} = 0, \quad \mu = 0;$$

$$x = 2b, \quad \mu = 0;$$

$$t = 0, \quad 0 < x < 2b, \quad \mu = \sigma.$$

解上述方程式得一收敛级数:

$$\mu = \frac{4\sigma}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{2b} e^{-n^2 m t} \quad (24)$$

$$m = \frac{\pi^2 c}{4b}$$

式中 c ——土的固结系数, $c = \frac{K(1+\varepsilon_0)}{d\gamma_w}$;

d ——土的压缩系数 (cm^2/kg);

ε_0 ——土的起始孔隙比;

γ_w ——水的容重。

为了计算上的方便, 在式(22)中, 一般假设固结系数 c 值为常数。但在土体的实际固结过程中, c 值是变化的。因为随着土体的固结, 土体密度 γ_s 和孔隙比 ε 都在发生变化, γ_s 和 ε 的变化引起土的渗透系数 K 和压缩系数 a 的变化。所以在确定 c 值时, 对 ε 、 K 、 a 应分别取从固结开始到固结終了的平均值。

(三) 浆体的固结标准

浆液在自重和坝体回弹压力的作用下, 其内部超孔隙水压力等于或接近于零的时间, 即为浆体的固结时间。也就是固结度等于或接近于 1 的时间, 用公式表示即为:

$$u = 1 - \frac{\int_0^b u dx}{\int_0^b p dx} \quad (25)$$

式中 u ——浆体中心的孔隙水压力;
 p ——浆体中的固结压力。

六、坝体整体稳定验算

在劈裂灌浆后期，坝体内部沿灌浆轴线已经基本形成垂直连续的浆体帷幕，并把坝体大部或全部劈开，这时由于浆液还没有得到充分析水固结，所以强度很低，几乎等于零。这时灌浆一般是大坝最危险的时期，为防止整体滑动，必须进行稳定验算。假设劈裂后土坝棱形体是连续的，在灌浆压力作用下，可能产生两个滑动面，见图14。

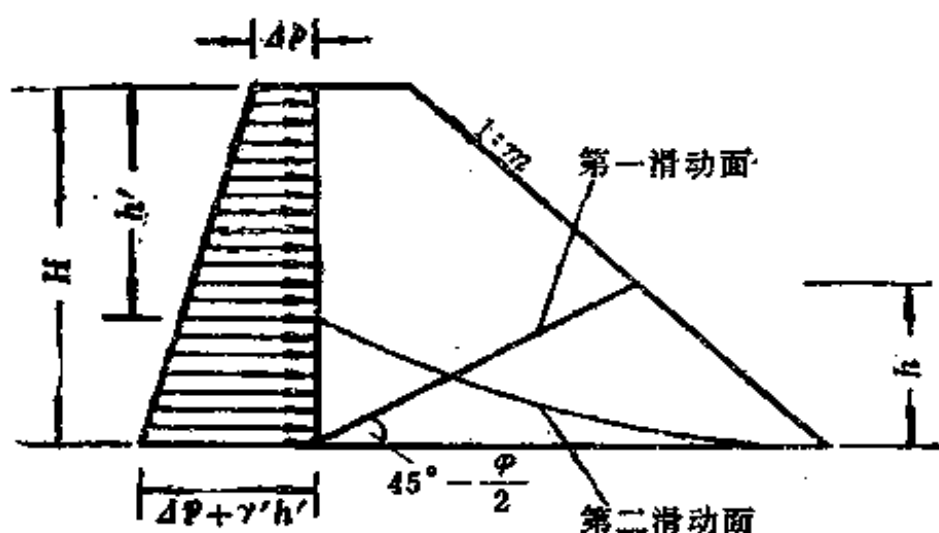


图 14 稳定计算简图

第一滑动面近似按朗肯极限土压力计算：

$$\begin{aligned} \Delta p = & \frac{1}{2} \gamma (H + h) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \\ & + 2c \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - \gamma' h' \end{aligned} \quad (26)$$

式中各项意义如图14所示。

第二滑动面按圆弧滑动法计算，并考虑浆柱压力，计算的最小安全系数为：

$$K = \frac{R \left[\sum (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi' + c' l_i \right]}{R \sum W_i \sin \alpha_i + R' E} \quad (27)$$

式中 R ——滑动半径 (m)；

γ_i, γ' ——分别为坝体土和泥浆的密度 (t/m^3)；

φ', c' ——坝体土有效抗剪强度指标；

l_i ——土条宽度所对应的弧长 (m)， $l_i = b_i \sec \alpha_i$ ；

b_i ——土条宽度；

α_i ——土条重力和法向分力的夹角；

E_i ——滑动面以上泥浆柱压力图面积， $E = \frac{\gamma' h_i^2}{2}$ ；

h_i ——滑弧内的浆柱计算高度 (m)；

W_i ——土条重量， $W_i = \gamma_i b_i H_i$ ；

H_i ——土条高度 (m)；

R' ——滑动圆心到泥浆压力线的垂距；

u_i ——每一条块滑弧面上单位面积的孔隙压力。

七、坝体劈裂灌浆概预算

概预算是根据灌浆设计要求对工程所需要的材料、设备、劳动工日和总投资进行计算和编制，是上级主管部门审批工程的重要依据。所以，必须使该项工作尽量做到切合实际。为此，编制概预算时，必须参照国家制定的有关定额、地区差价、各种设备和材料的单价等文件来制定。同时，也可以参考已灌浆工程的决算和当地的具体情况来编制。

(一) 概算

概算是工程管理部门向上级主管部门申请大坝灌浆加固报告中的组成部分。它的编制一般是在发现坝体隐患之后、进行灌浆设计之前进行的。在概算中应首先将坝体隐患的大小、危害程度和解决该项问题的必要性，以及经济效益等问题论述清楚。同时，也要把坝体隐患的处理方案、所需物资、设备和总投资等进行粗略的框算，以便为上级主管部门审批该项工程提供比较可靠的依据。

(二) 预算

预算是在确立灌浆工程项目和处理方案之后，根据灌浆设计的要求，详细地编制完成该项工程所需要的物资、设备、劳动工日和总投资。预算总表参见表2，或参见附表15黄前水库坝体灌浆第一期灌浆工程决算表。

表 2 ××水库大坝灌浆工程预算总表

项 目 名 称	每 年 工 程 预 算 (元)			备 注
	1981	1982	1983	
合 计	133880	158000	88120	
1.设备部分	69520			灌浆试验坝 观测仪器较多
2.动力机械费	14381	25058	10749	
3.施工材料费	6425	40700	14350	
4.观测试验费	30454	24500		
5.工 资	6260	59760	15660	
6.灌浆效果检查费			11120	
7.灌浆善后处理费			28121	
8.其它工作费用	6480	4500	3800	
9.不可预见费		3482	4320	
总 计	380000			

第四章 灌 浆 机 械

土坝灌浆整套设备大体可分为造孔、制浆、灌注和其他附属设备四个部分。各类设备型号繁多，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。各种灌浆设备的技术指标和工作性能，在有关书中已有详细介绍，在此不再重述，现就目前我国通用的几种灌浆机械作一简单的介绍。

一、造 孔 设 备

造孔机械的种类较多，应当根据钻孔的深浅和难易程度，选用合适的造孔机械。一般钻孔的深度小于11m时，可选用锥探机造孔；当孔深大于11m小于35m时，可选用锤击造孔机械；当孔深大于35m时，可选用钻机造孔。

（一）锥探造孔机

锥探造孔机结构合理，移动方便，容易操作，成孔速度快，是堤防和低坝灌浆造孔的理想设备。目前黄委会河南省黄河河务局生产的黄河744型打锥机，山东省泰安市黄前水利机械厂生产的Z₁₅型锥探机都是定型产品，在我国堤坝灌浆工程中已被广泛应用，工作性能良好。

1. 外形尺寸及主要技术参数

以黄河744型打锥机为例，其构造如图15。

该机主要技术参数有：锥杆直径 $\phi 22\text{mm}$ ；动力皮带轮直径 $\phi 90\text{mm}$ ；锥杆长13m；被动皮带轮直径 $\phi 220\text{mm}$ ；锥头直径30mm；前后轮轴距1.83m；锥孔直径30mm；轮距1.0m；锥孔深度11m。

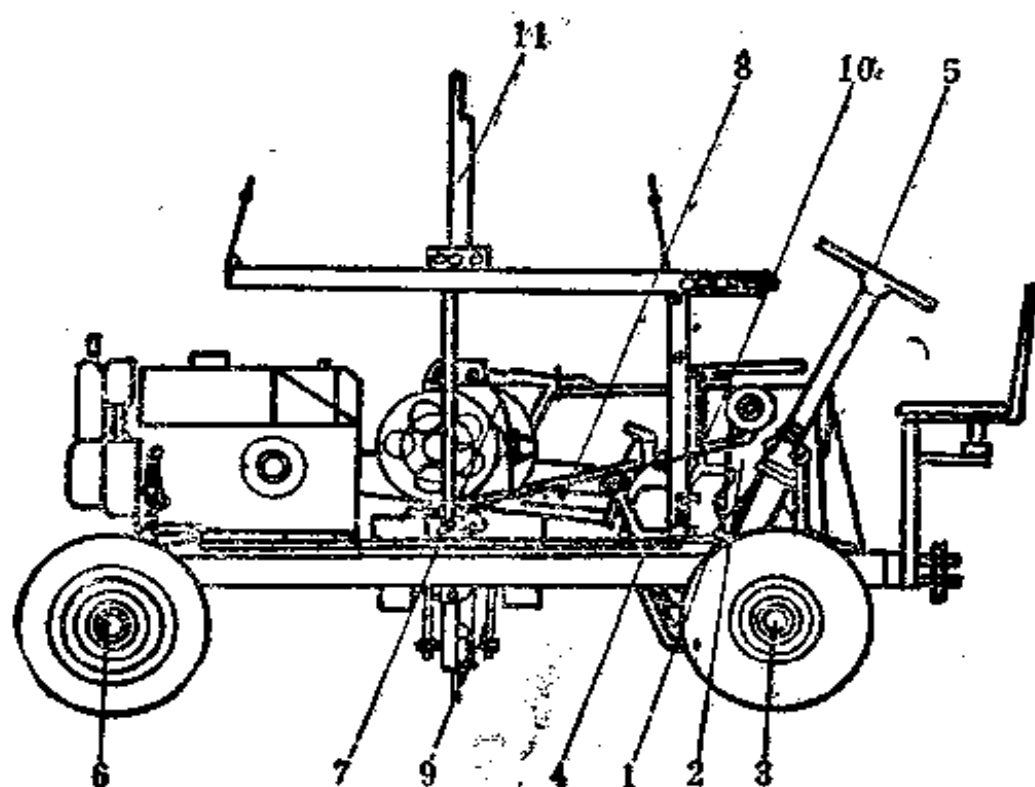


图 15 打锥机构造图

1—离合器；2—变速箱；3—后桥；4—机架；5—方向器；6—前桥；
7—挤打系统；8—控制系统；9—卡子；10—油门；11—扶锥管

主要外形尺寸有：机身高1.3m，宽1.2m，长2.8m；扶锥管高8m，管直径40mm；锤组总重250kg；全机重1100kg。

2. 主要结构与性能

黄河 744 型打锥机是用柴油机作动力的自动打锥机。其主要结构由轮、底盘、立杆、驾驶座等组成一整体机架。在机架上装有柴油机、锥、锥卡子、活动锤、离合器、变速箱、操纵杆、方向器、扶锥管、自动锤机件等十大部件。

自动打锥机的工作原理：主要利用一对滚轮中间夹持锥杆，滚轮转动时，挤压摩擦力将锥压入土内。当土内阻力过大，超过最大挤压摩擦力(9kN)锥不下时，旋转着的滚轮带动250kg大锤及锤下连带的锥卡子自动升起，升至0.2m高度

后，由自动落锤机件操纵的偏心加压杆便松开一个滚轮，使旋转着的两滚轮与锥杆间出现间隙，锤自动落下，击在卡子上，卡子卡紧锥杆，实现锤击进锥。当锤击穿过硬土层时，偏心加压杆又自动压紧滚轮进行挤压进锥。这两种进锥方式连续不断地轮流自动调换，实现打锥自动化。当一孔锥完后，操作起锥档杆，使夹锥的滚轮反方向旋转，利用摩擦力的作用将锥拔出，完成一孔打锥任务。

打锥机主要性能是：最大挤压力9kN，配带动力为8~12马力^①柴油机，柴油机转速1500~2000r/min；挤压进锥速度（理论值）0.96m/s；拨锥速度（理论值）1.24m/s；前进高档速度13km/h，低档速度4.4km/h；倒退高档速度10km/h，低档速度3km/h。

锥孔深度最大可达11m，对小于11m的浅孔因锥杆为螺接，可以任意调节。锥头与锥杆为螺接，当锥头磨损后可更换。

打锥机的工效：当操作技术比较熟练，作业场地开阔时，每台班可锥打500孔左右。在正常情况下一个单孔的打锥、起锥、移孔（移孔距离1至2m）的全作业过程约需一分钟。

当打锥工地需迁移较远时，可将机上锥杆、扶锥系统去掉，利用尾端拖挂装置挂上拖斗或平车，可以运输一定数量的货物或灌浆机具等，拖运重量约一吨。

（二）锤击造孔机

锤击造孔机由塔架、吊锤、锤击钻杆、钻杆快接装置和卷扬机五部分组成，见图16。

① 马力为非法定计量单位，仅按习惯沿用。

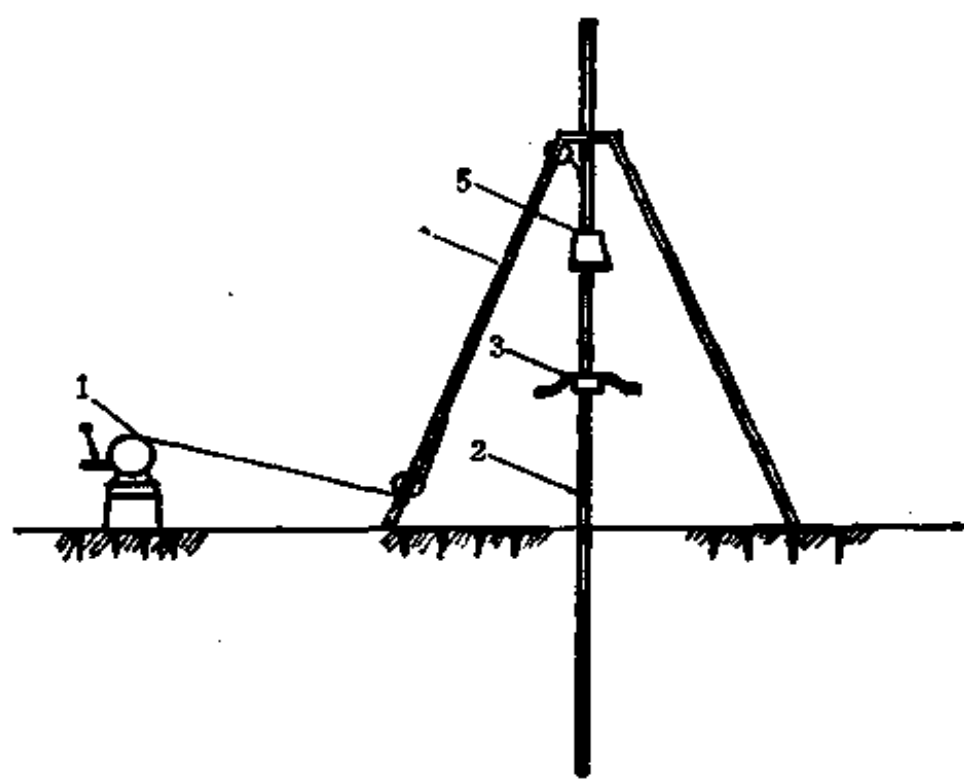


图 16 锤击造孔机构造图

1—卷扬机；2—锤击钻杆；3—钻杆快接装置；4—塔架；5—吊锤

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，锤击钻头的直径一般比钻杆粗2~5mm，以减少钻杆与孔壁的摩擦阻力。为了缩短钻杆的拆装时间，提高钻进效率，装设了钻杆快速连接装置，见图17。进行锤击时，卷扬机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，对钻杆进行猛烈锤击，使钻头克服土体阻力向深处钻进。钻锤的起落可用一吨卷扬机，也可以利用100m岩心钻机的卷扬装置承担，在孔深大于20m的情况下，钻杆起拔比较困难，可使用活接钻头（图18），当锤击钻进到规定孔深后，提升钻杆约10mm左右，将钻头弃于坝内利用钻杆做注浆管进行灌浆。另外，也可以考虑使用开合式锤

击钻头，见图19。使用这种钻头，在锤击结束后，只要将钻杆稍微上提即可进行灌浆，最后钻头可以随着钻杆提上来，避免了舍弃钻头所造成的浪费。

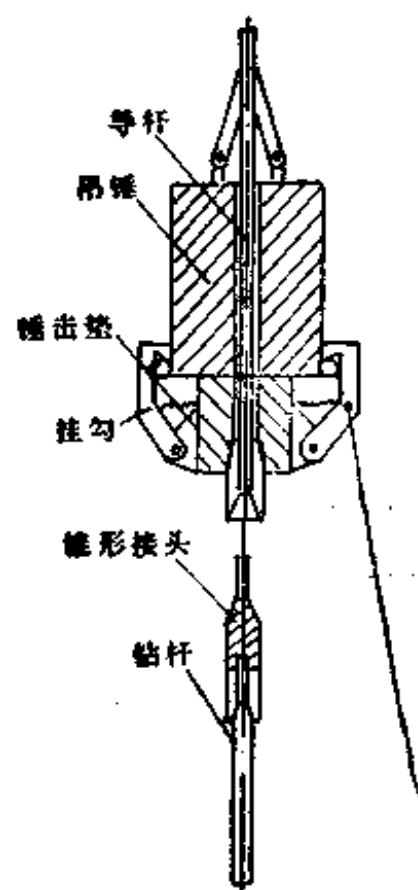


图 17 钻杆快速连接装置图

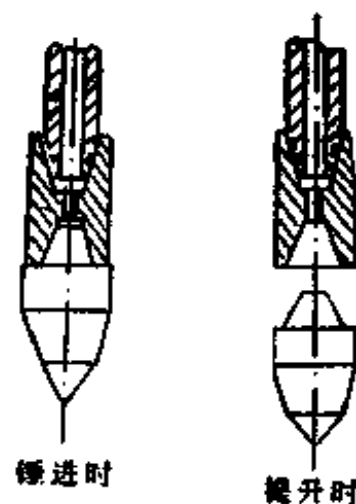


图 18 锤击活钻头图

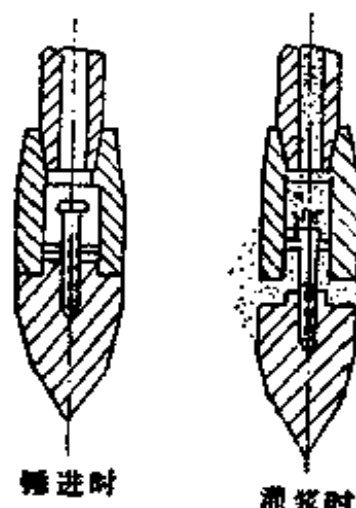


图 19 开合式锤击钻头图

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人即可施工，每个台班进尺约50m左右。山东省土坝坝体灌浆大多采用这种机械造孔。

(三) C30锤击钻

C30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，性能更为稳定，且操作方便，已被广泛采用。

C30锤击钻的主要规格参数有：

锤孔深度30m；

锤孔直径 $\phi 75\text{mm}$ ；

锤杆直径 $\phi 50\text{mm}$ ；

吊锤重量300kg；

卷扬能力2t；

配用动力7.5kW，960r/min；

钻进速度100~250m/台班

(四) XJ100A型钻机

如前所述，当钻孔深度超过35m以后，可用钻机造孔，钻机型号较多，在此不作一一介绍，现将常用的XJ100A型钻机的工作性能介绍如下。

XJ100A型钻机由塔架、钻机、钻杆、水龙头等部分组成，其结构详见图20。

主要技术指标有：

钻进深度100m；

开孔直径110mm；

终孔直径75mm；

钻杆直径42mm；

主轴允许倾角 $90^\circ \sim 75^\circ$ ；

卷扬能力9kN；

钢丝绳直径10mm；

钢丝绳卷扬速度0.4m/s；

所需动力7.5kW；



图 20 XJ100A型钻机

钻机重量380kg。

XJ100A型钻机具有结构紧凑合理、工作性能较稳定、操作方便、体积小、重量轻、易于搬迁等特点。有机械自动给进与手把给进两种方式，工作效率高，回转器与卷扬机都有三种速度，功率利用合理，适应性较强，是我国目前小型钻机中性能较好的一种。其钻深、钻孔直径和提升能力等都比较适用于土坝坝体或坝基灌浆钻孔。目前，该钻机已成为北京探矿机械厂和山东省泰安市黄前水利机械厂的定型产品。

二、WJ 型 搅 浆 机

(一)结构型式

搅浆机的种类虽然较多，但其结构型式和原理是一致

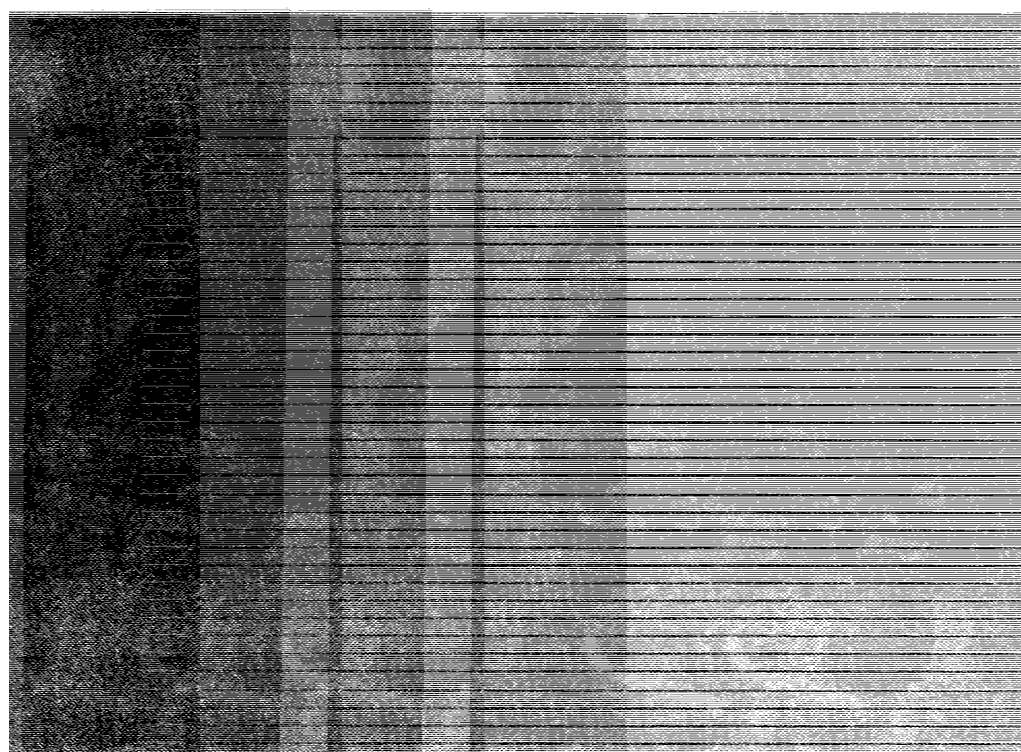


图 21 WJ100型搅浆机

的。主要由机架、搅浆、拌浆、筛浆机构和动力部分组成，见图21。

(二)主要技术参数

WJ型搅浆机的主要技术参数见下表。

技 术 参 数	WJ60型	WJ100型
搅 浆 量	60L/min	100L/min
最大浆液比重	1.5~1.7	1.5~1.7
所需动力		10kW
大出浆口胶管内径		64mm
小出浆口胶管内径		64mm
搅浆筒直径	φ 500mm	φ 600mm
搅浆轴转速	530min	530r/min
重 量	700kg	750kg

(三)性能特点

WJ型搅浆机可以拌制各种粘土浆、粘土水泥浆和水泥浆，也可以拌制其他浆液。该机将搅浆、筛浆、拌浆和灌浆等工序连成一体，可以进行连续作业，搅浆效率高，搅制的浆液稳定性好。

(四)使用与维护

WJ型搅浆机的使用和维护，要注意如下几点：

- (1) 机架要固定在地梁木上，放置要水平；
- (2) 各润滑部位要经常上油润滑；
- (3) 所用浆料若含有较大石块，应用0.25~0.5孔/cm²筛子过筛，以免发生卡壳和扭坏搅臂等事故；



图 22 HB型灌浆泵

(4) 搅臂、夹板、筛布、盘根等易损部件, 应经常检查, 适时维修更换。

三、HB 型 灌 浆 泵

(一) 工作性能 and 特点

HB型灌浆泵是山东省泰安市黄前水利机械厂专门为土坝灌浆设计的一种泥浆泵。该泵能搅拌粗颗粒、大比重的浆液, 工作性能好, 灌浆效率高。灌浆泵的活塞采用了镀硬铬加盘根的构造形式, 使用寿命长, 维修方便、体积小, 重量轻, 便于移动和操作。其结构型式见图22。

(二) 主要技术参数

HB型灌浆泵分为 HB50/15 型和 HB80/10 型两种结构形式。其技术规格参数如下表:

技 术 参 数	HB50/15型	HB80/10型
输 浆 量	50L/min	80L/min
最高工作压力	150N/cm ²	100N/cm ²
活塞往复次数	150次/min	150次/min
最大浆液粒度	≤5mm	≤5mm
活塞直径	φ 85mm	φ 100mm
冲 程	75mm	75mm
重 量	260kg	270kg

四、WJG80型搅灌机

(一) 结构型式

WJG80型搅灌机由搅浆系统、灌浆泵、动力机和行车系统四部分组成。根据所配的动力形式不同, 又分为 WJG80-1型和 WJG80-2型搅灌机, 其结构型式分别见图23、

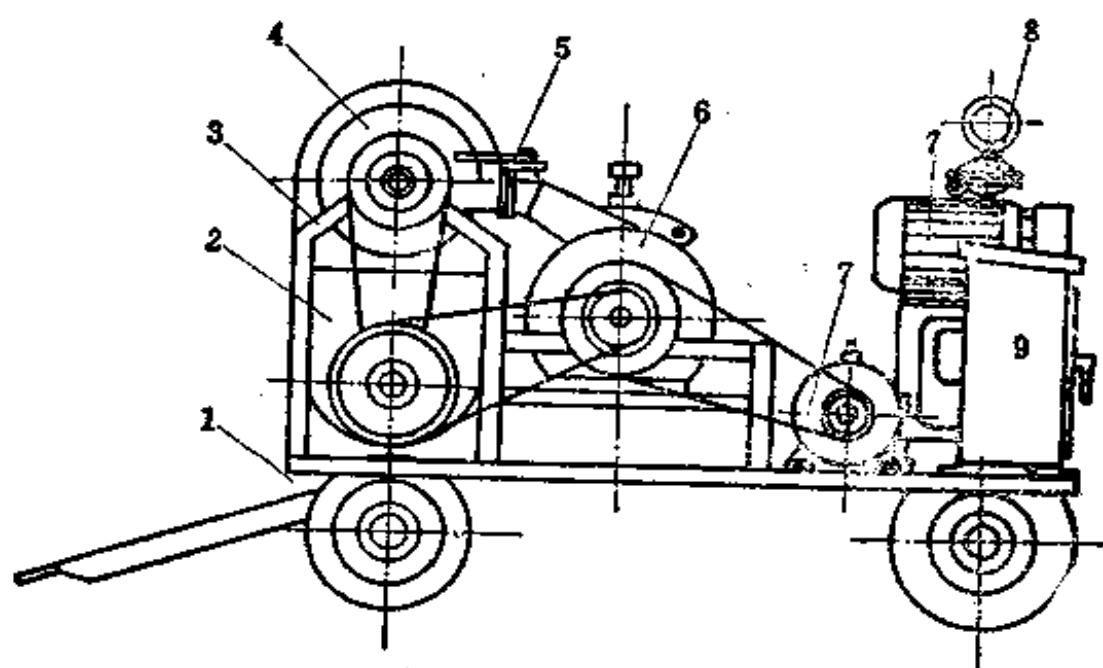


图 23 WJG80-1型搅灌机结构图

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

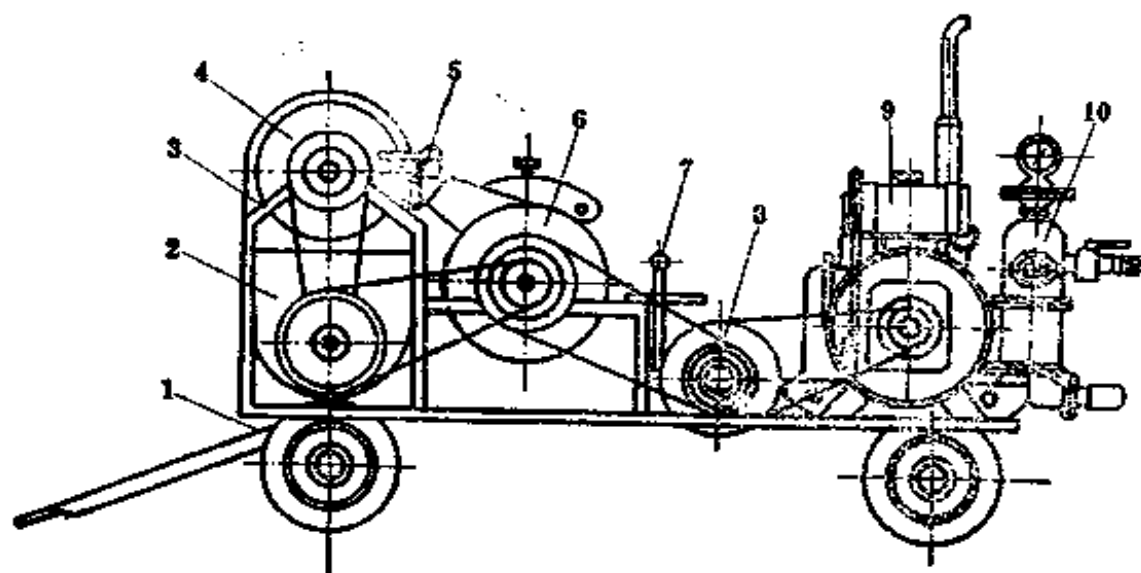


图 24 WJG80-2型搅灌

1—车轮，2—拌浆机构，3—机架，4—筛浆机构，5—闸门，6—搅浆机，7—离合把手，8—大带轮，9—柴油机，10—灌浆泵

表 3

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	最大浆液密度	1.5g/cm ³	
	4	浆筛规格	4孔/cm ² (5目)	
	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	70mm	
	11	允许最大石块粒径	30mm	
	12	所需动力	13kW	
	13	电机型号	JO ₂ -61-4	
	14	电机转速	1460r/min	
灌 浆 泵	1	型 式	单 作 用 卧 式	
	2	缸 数	1	
	3	输 浆 量	80L/min	
	4	活塞直径	φ100mm	
	5	活塞行程	75mm	
	6	活塞往复次数	150次/min	

续表

类别	序号	项 目	规 格	
			WJG80—1型	WJG80—2型
搅 灌 泵	7	最高工作压力	100N/cm ²	
	8	最大浆液密度	1.8g/cm ³	
	9	最大浆液粒径	5mm	
	10	垂直输送高程	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	φ51mm	
	14	泄浆胶管内径	φ32mm	
	15	所需动力	4kW	
	16	电机型号	JO ₂ -41-4	
	17	电机转速	1440r/min	
全 机	1	柴油机型号		295G型
	2	柴油机功率		24马力
	3	柴油机轮转速		2000r/min
	4	重 量	1400kg	1750kg
	5	前轮转向角	<30°	
	6	牵引行驶速度	<4km/h	
	7	外形尺寸(长×宽×高)	2250×1750×1500mm	2600×1750×1600mm

图24。

(二) 主要技术规格

WJG80型搅灌机的主要技术规格见表3。

（三）工作性能特点

WJG80型搅灌机的特点是：具有高速搅浆、自动筛浆、自动拌浆、防沉淀储浆和压力灌浆等性能，可进行全机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，均可直接进行搅灌作业，而不需进行粉碎、筛选等先期加工。

本机工作效率高，结构紧凑，占用场地小，节省劳力，能进行机动牵引慢速行驶，也可以人工推拉，移动灵活。

主要用于水库、河道堤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匀泥浆、土与砂混合浆、粘土水泥浆，也可搅灌水泥浆、水泥砂浆及其他多种混合浆液。

（四）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）检查搅灌机是否放置水平；
- （3）检查所用干料是否有超过30mm以上的大石块、受潮变硬水泥块，如有应予以清除，以免发生扭坏搅臂及筒壁事故。

运转与操作时，要注意下列几方面：

- （1）开车后要先搅拌一段时间的稀浆，使整体浆液通道得到冲洗和润滑，然后逐步提高浆液稠度；
- （2）停机前应停止加干料，并用清水冲洗整体浆液通道；
- （3）按照浆液的稠度要求，随时对拌浆筒内的浆液进行检验或用比重称测定，如有不符合要求的，应调整加放干

料比例；

(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，以免搅臂松脱而造成事故；

(6) 筛网容易磨损，应经常检查，随时修补和更换，以免大量粗料进入灌注系统，发生堵塞事故；

(7) 密封填料应经常压紧和更换，不能在漏浆情况下工作，以免砂浆过早磨坏塞套。

一般故障发生的原因及排除方法见表4。

2. 灌浆泵

开车前应做好如下准备工作：

(1) 检查各部机件是否有松动；

(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，先检查油室内是否已装满机油。运转及操作时，应做好下面几点：

(1) 开泵时，先用清水或稀浆冲洗润滑浆液通道，特别是新装胶管更应注意稀浆冲洗后，再压注所需稠度的浆液；

(2) 开泵前，先观察拌浆筒内是否已储存足够的浆液；

(3) 该泵无安全限压装置，工作时要随时注意压力表的反应，如有超压反应，即停车检修。

故障与排除的方法见表5。

表 4

搅浆系统故障分析与排除方法表

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. 难于粉碎的干料过多 4. 干料中混入柴草、大石块堵塞出浆口	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. 搅浆筒内预先加料水太多 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应低于筒容积1/3 3. 将泥砂清除或冲起后再启动 4. 根据输变电路情况处理
3. 排出生料多	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. 调整闸门的开关选用适宜土料 2. 尽量选购规定的筛网
4. 震动较大	搅臂长短宽厚差别太大产生偏重，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

3. 动力机

WJG80-1型搅灌机在配用动力机（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）经常检查各电器部件的紧固和绝缘状况，发现器

表 5

灌浆泵故障与排除方法表

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. 更换已损件
3. 活塞填料漏浆	1. 填料密封不严 2. 活塞磨损严重 3. 橡胶填料缺油脂造成磨损	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油
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. 滚动轴承损坏 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. 输浆管路突然破裂脱开 2. 浆液突然冲破阻浆突入基体中大型洞穴或溢出坝体外	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 1、2、5 点等故障	1. 更换压力表 2. 参看 1、2、5 点故障排除方法

件松动和由于绝缘不良造成的器件发热或氧化，应及时修理更换；

(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，将传动轴减为低速后再合用，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称等。

(1) 抽水泵和储水箱：先由水泵将水抽入储水箱内，再由储水箱不断地向搅浆机供水。

(2) 输水管：是使浆液由灌浆泵输送到注浆管的连接部件。所以对输浆管的要求是，满足灌浆所需的压力，浆液在管内流动顺畅。

(3) 快速接头：是两输浆管之间的连接装置。

(4) 孔口装置：是输浆管与注浆管的连接部件。多为三通管，上面装有可以测量正负压的压力表[见图 1(a)]，可以测出孔口压力的大小。

(5) 泥浆比重称：是测量泥浆密度的仪器。

第五章 灌浆浆液和材料

在水库土坝和堤防灌浆处理中，浆液的选择和使用是非常重要的，它直接影响到土坝灌浆的质量和效果。

一、对灌浆浆液的基本要求

对一般土坝和堤防灌浆所用浆液，必须满足下列要求：

（1）灌浆初期4～6h内要求有一定的流动性，以便使浆液流入和充填缝隙中；

（2）一定时间内要保持稳定性，即灌浆时水与浆料及粗细颗粒不会离析，从而保证浆体凝结和固结时的均匀性；

（3）灌浆后1～2月内能基本凝结和固结，有一定的抗渗性能和强度，并有一定适应变形的能力，浆脉不要太强太脆；

（4）灌浆材料及浆液的制备费用低廉；

（5）不同的隐患应选择不同性质的浆液或材料。

劈裂灌浆所用的浆液与一般岩石地基灌浆有所不同，在满足流动性条件下，浆液一般比较稠，并允许有一定比例的粗颗粒或易崩解土团料。劈裂灌浆也较其它灌浆法所用的浆液量多。其对浆液的要求，与岩石地基灌浆、充填式灌浆和钻井固壁式灌浆都有所不同。

二、浆液基本性质指标与试验

浆液性质优劣不能用直观方法来确定，而应有明确的科学试验指标。劈裂灌浆浆液试验指标不象钻井固壁泥浆试验

那样繁锁，要求那样高。主要试验指标有以下几种。

(一) 浆液密度试验

通常所说的浆液密度，是指单位体积内浆液的质量，用 g/cm^3 表示。它是反映浆液中材料多少的最重要指标，也反映了浆液的稠度和间接反映流动性大小。在施工现场可用比重称^①测定（见图25）。比重称杠杆标尺上有比重刻度，它的一端联接一个杯子，另一端联接平衡圆柱，中间为支点及支座，横杆上有游码。使用时将浆液盛入杯子然后从横杆刻度上读出浆液的密度值，方法如小磅称。在工地上更简便的方法是用已知体积的罐头瓶，装进浆液称重就可算出浆液密度。

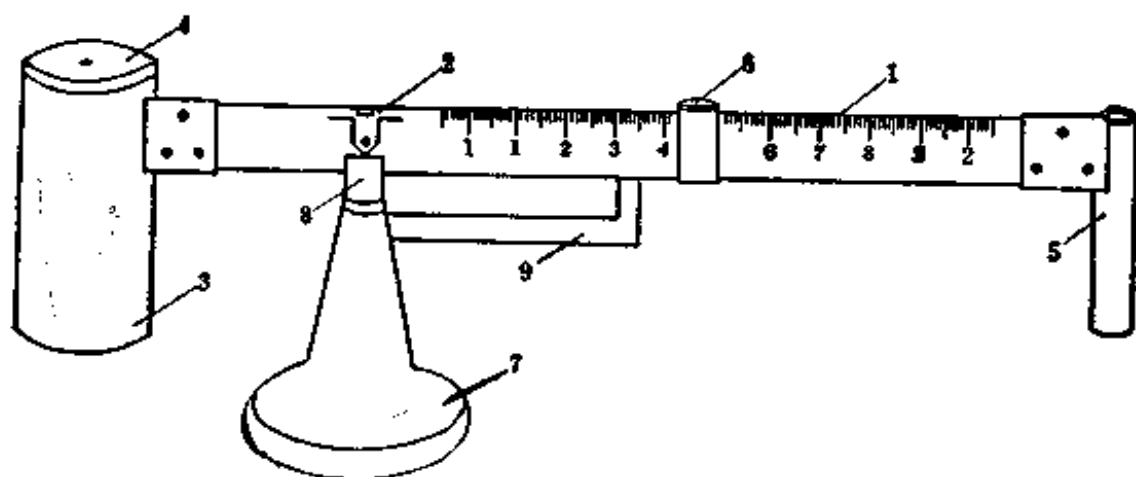


图 25 1002型泥浆比重称

1—杠杆标尺；2—主刀口；3—泥浆杯；4—杯盖；5—平衡圆柱；6—游码；7—底座；8—主刀垫；9—挡臂

(二) 水与固体颗粒比例试验

浆液中固体颗粒所占比例多少是反映浆液稠度的指标。如果是粘性土浆液，反映稠度指标的就是水土比，计算公

① “比重称”仅是习惯称呼，所测定的仍应理解为密度。

式即

$$\lambda = \frac{W_s}{W_w}$$

式中 λ ——水土比，泥浆中的含土量，

W_s ——泥浆中的干土重，

W_w ——泥浆中的水重。

水土比与含水量定义成倒数关系，其试验方法可用烘干法。将拌好的泥浆，取数十克放在小铝盒内，用感量为百分之一的天平称出泥浆质量，然后烘干（具体操作按土工试验规程）称重，用上式计算水土比。当已知泥浆密度和土颗粒密度时，也可由图26查得水土比。

（三）浆液的流动性指标

浆液的流动性一般用粘度反映。浆液的粘度是胶体悬浊液内部阻碍其相对流动的一种特性。为了保证浆液的流动性，粘度不宜过高。

浆液的粘度用一定容量的容器中浆液全部流出所耗时间表示（s），时间越长则粘度大，流动性不好；时间短反映流动性好。土坝灌浆一般控制在20~100s范围内。对于土坝的小裂缝，粘度可采用20s左右；大的裂缝可用50~100s；对于劈裂灌浆可采用大于100s的浆液。泥浆流动性试验用泥浆粘度计，见图27。

（四）浆液的稳定性

浆液在重力和分子力作用下可能产生沉淀和聚凝，极大地影响灌浆质量、均匀性和防渗性能等。浆液的这种特性用稳定性来衡量。浆液稳定性以浆液静止一昼夜后上半部和下半部的密度差值来表示。在通常情况下，土坝劈裂灌浆稳定性可为0.1~0.16g/cm³；坝体内由于裂隙很小，泥浆稳定

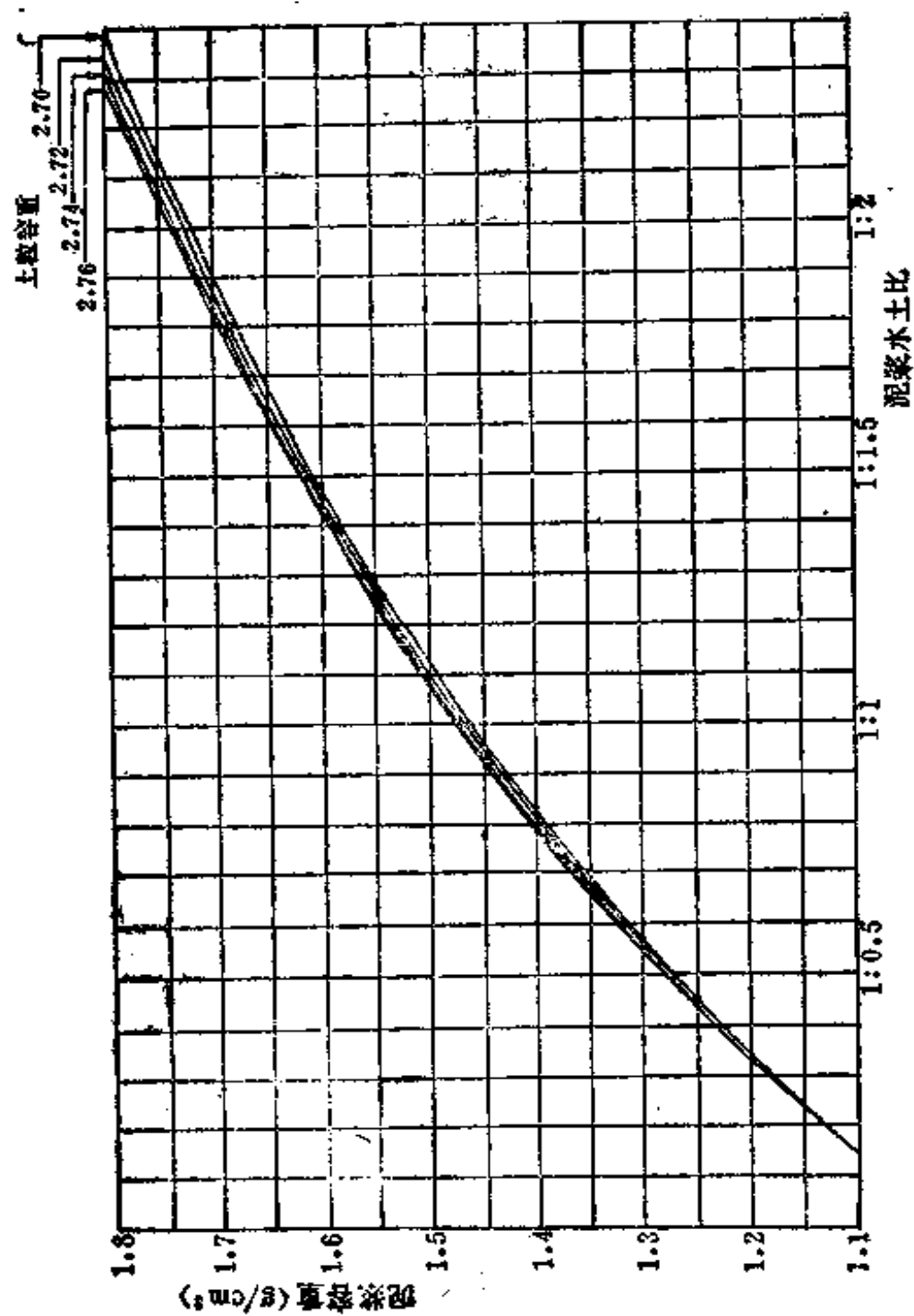


图 26 泥漿密度与泥漿水土比关系曲线图

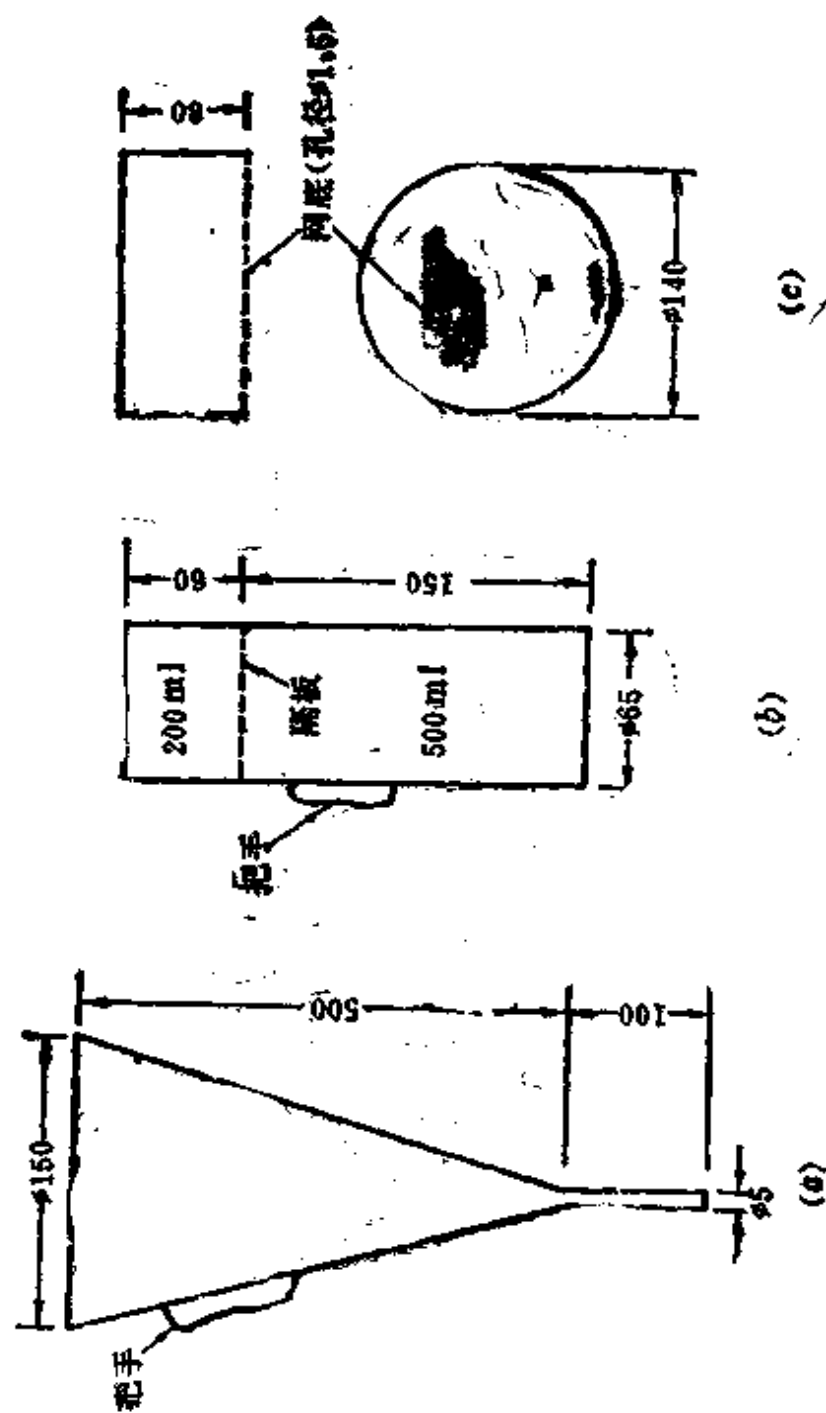


图 27 泥浆粘度计构造图
(a)漏斗, (b)量杯, (c)滤网

性应小于 0.05g/cm^3 。

泥浆稠，稳定性可能好一些；泥浆稀，稳定性可能差一些。劈裂灌浆可将较稠的泥浆压入坝体。因此流动性和稳定性指标的确定应根据具体实际分析确定。

稳定性试验用普通量筒进行。将 250cm^3 的浆液装入量筒内，静置一昼夜，然后用移液管取出一半，将两部分浆液分别作比重试验，进行比较检验是否合乎要求。

（五）泥浆胶体率

泥浆胶体率系指泥浆在静止时，把水分分离到泥浆表面的能力。用泥浆静止24h所沉淀的泥浆体积与原来泥浆体积之比表示。试验时，取100ml的浆液装入100ml的量筒内，记下时间，盖好以免水分蒸发，经过24h，观测量筒内泥浆表面分离出来水量的体积，用百分比表示。一般要求胶体率大于80%，劈裂灌浆可以降低至70%。

三、灌 浆 材 料

土坝灌浆大多数采用粘土浆液，其材料主要是土料和水。特殊情况也可采用水泥粘土浆、纯水泥浆以及自凝灰浆。劈裂灌浆与其它灌浆材料要求有所不同，它不强调用纯粘土，而以粉质粘土和重、中粉质壤土为好。另外，劈裂灌浆比一般灌浆法用量为多，强调不同的隐患采用不同的浆液。

（一）土料

土料选择一般要求满足以下条件：

（1）造浆稳定性和流动性能满足要求；粘粒含量不宜太少，也不宜太高，太高了固结慢，密度低；浆液固结凝固后能满足坝体防渗要求。

(2) 拌制浆液比较容易；土料自身的粉碎不困难，能拌制比较均匀的浆液。

(3) 应就地取材，尽量在土坝附近找到足够数量（2~3 倍用量）和合乎质量要求的土料。

以往土坝灌浆多采用粘粒（大于0.005mm）含量较高（大于50%以上）的土料，实践证明，这种土料造浆困难，泥浆析水固结时间长，并不是理想的浆液材料。各地采用的土料指标见表6和表7。

如果土料性质和成分不能满足要求，可以用掺合的办法使其合乎要求。足够数量的粉粒对提高浆液质量是有好

表 6 土料物理性质指标

名 称	项 目	指 标	注
土 料	液 限	30%左右	以细、中砂粒为主，并可用矿渣
	塑 限	20%左右	
	粘粒含量	(25~35)%	
	粉粒含量	(30~50)%	
	砂粒含量	(20~30)%	
	有机质含量	< 2 %	

表 7 泥浆物理力学性质指标

名 称	项 目	指 标
泥 浆	密 度	1.4~1.6g/cm ³
	粘 度	30~60s
	稳 定 性	0.1~0.15g/cm ³
	胶 体 率	> 80%
	失 水 量	10~30cm ³ /半小时
	浆脉干容重	> 1.55g/cm ³
	浆脉渗透系数	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁸ cm/s

处的。

砂土的含量也应有一定比例，适宜含量可以加速浆液固结。不同的隐患和不同的土坝土料要采用不同的粘土浆液。如孔隙很大，可先灌粗浆液，然后再灌较细的浆液。容易劈裂和劈缝比较宽的土坝可用较粗较稠的浆液。对土料还要求作常规土工试验，其中包括颗粒分析试验。

（二）水

在浆液中，水对固体颗粒有溶解、载运、化合等作用。对浆液本身，水使其具有流动性，便于灌浆。浆液中的水一部分排入坝体，一部分留在浆脉中，成为薄膜水和附着水，有时成为结晶水（如与水泥作用）。因此，适宜比例的水，是既保持浆液有一定的流动性，又不致使水分太多，在施工中要严格掌握。

对于水质的要求，通常采用自来水，而清洁不浊，又无显著酸性反应的天然水，也可作为制浆用水。

（三）水泥

水泥是一种粉状水硬性胶凝材料。它与水拌合后成为流动和可塑性物质，并能逐渐凝结硬化成象石头一样坚硬的固体，称为水泥结石。

水泥是岩石地基灌浆最主要的材料。最初的土坝坝体灌浆也曾用它与土混合做成水泥粘土浆灌入坝体，其优点是凝固快，并有一定强度，但适应土坝变形能力差。

对水泥质量的要求，一般是颗粒要细，强度要达到一定标号。水泥细度一般用筛余量表示，规定通不过4900孔/cm²标准筛孔的水泥粉粒不大于10%~15%；水泥标号一般不低于400号，过期或失效水泥不能采用。

（四）水玻璃

水玻璃为硅酸钠的水溶液。它是水泥的速凝剂，特别是遇水时也能凝结；对于粘土，它又是一种塑化剂，能改善浆液的流动性能，一般含量为1%左右。水玻璃浓度用波美度表示，一般采用30~40波美度。

（五）膨润土

膨润土是一种颗粒非常细小的粘土矿物，密度 $1.4\sim 1.6\text{g/cm}^3$ 之间，主要成分为蒙脱土，流限可达100，塑性指数50以上。它能吸附大量自由水而变成结合水。浆液含有膨润土，含水量虽很高，但能凝结成固态或半固态，这是一种很好的特性。

其它速凝、塑化、药用材料（如白蚁灵等）可参考有关资料。总之，在浆液中掺入适量的附加材料，可大大改善浆液性能。

四、粘 性 土 浆

粘土浆为土坝劈裂灌浆最常用的浆液。它具有取材方便，费用低廉，施工容易和流动性、稳定性好等优点，是土坝劈裂灌浆最常用的浆液，又称泥浆。其缺点是固结时间较长，强度较低，自凝性差等。

泥浆是由水和粘性土混合拌制而成。所以，控制泥浆中的水与干土质量比（即水土比）是十分重要的。在土坝灌浆中，要针对坝体存在的不同问题，采用不同浓度的泥浆。因此，要准确而又方便地配制泥浆。在工地上，配制泥浆的方法主要有干法制浆和湿法制浆两种。

（一）干法制浆

即把灌浆选用的土料从料场运回，在日光下晒干储存于棚内，然后用粉碎机加工成干土粉，储藏好备用。对于粘土

成块不易成浆的土料，可采用这种方法备料。

泥浆的配制可以按单位体积泥浆所需的干土重和水重计算，可用两种方法控制浓度。

1. 用泥浆水土比（ λ ）来控制

每立方米泥浆所需的干土重和水重，可按下式计算：

$$W_s = \frac{\lambda}{1 + \frac{\lambda}{\gamma_s}} \quad (28)$$

$$W_w = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\gamma_s}} \quad (29)$$

式中 W_s ——每立方米泥浆所需的干土重（ t/m^3 ）；

W_w ——每立方米泥浆所需的水重（ t/m^3 ）；

γ_s ——土粒密度，可用 $2.7 \sim 2.74 t/m^3$ ；

λ ——欲配泥浆的水土比。

2. 用泥浆密度控制泥浆浓度

每立方米泥浆所需干土重和水重用下式计算：

$$W_s = \frac{\gamma_s(\gamma - \gamma_w)}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (30)$$

$$W_w = \gamma - \frac{\gamma_s(\gamma - \gamma_w)}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (31)$$

式中 γ ——欲配泥浆的密度（ t/m^3 ）；

γ_w ——水的密度，一般取 $1 t/m^3$ ；

W_s 、 W_w 、 γ_s 意义同上式。

在计算中，如果干土粉的含水量很小，可以忽略不计；如果含水量不能忽略，则应把干土粉的含水量计入加水量内，配制泥浆的比例和用量可参考表 8，

表 8 泥浆密度、水土比、含水量及每立方米泥浆中干土重与水重的对照表

密 度 (t/m ³)	水 土 比 (以水为 1)	水 土 比 (以土为 1)	含 水 量 (%)	一 立 方 米 泥 浆 干 料 重 (t)	一 立 方 米 泥 浆 水 重 (t)
1.20	1:0.357	2.80 :1	280	0.316	0.884
1.30	1:0.573	1.745:1	175	0.473	0.827
1.40	1:0.821	1.22 :1	122	0.631	0.769
1.50	1:1.11	0.90 :1	90	0.789	0.711
1.60	1:1.45	0.69 :1	69	0.947	0.653
1.70	1:1.856	0.539:1	53.9	1.104	0.596
1.80	1:2.345	0.427:1	42.7	1.260	0.540
1.90	1:2.96	0.338:1	33.8	1.42	0.480

注 土粒密度 $\gamma_s = 2.72\text{t/m}^3$ 。

(二) 湿法制浆

目前在堤坝灌浆中大都采用把湿土直接放入搅浆机中拌制泥浆。这种方法就是把具有天然含水量的土料，经初步破碎后，放入搅浆机中进行拌制泥浆。湿法制浆比干法制浆方便得多。

对于这种制浆方法，泥浆浓度可按下列式计算来控制：

$$G_w = KG \quad (32)$$

$$K = \frac{1}{\lambda(1+\omega)} + \frac{1}{1+\omega} - 1 \quad (33)$$

式中 G_w ——欲配泥浆的加水量 (kg)；

G ——用来搅浆的湿土重 (kg)；

K ——加水系数，也可查表 9 而得；

λ ——欲配制泥浆的水土比；

ω ——湿土含水量，由试验测出。

有时需要泥浆由稀变稠，或由稠变稀，可以调节干土重

表 9

加水系数 K 值表

水土比 λ	含 水 量 $\omega(\%)$												
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
1:0.3	2.94	2.87	2.80	2.73	2.67	2.61	2.55	2.50	2.44	2.38	2.33	2.28	2.24
1:0.4	2.18	2.12	2.07	2.02	1.97	1.92	1.87	1.82	1.78	1.73	1.69	1.65	1.61
1:0.5	1.73	1.68	1.63	1.59	1.54	1.50	1.46	1.42	1.38	1.34	1.31	1.27	1.24
1:0.6	1.42	1.38	1.34	1.30	1.26	1.21	1.19	1.15	1.12	1.08	1.05	1.02	0.99
1:0.7	1.21	1.17	1.13	1.09	1.06	1.02	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.84	0.81
1:0.8	1.05	1.01	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.81	0.79	0.76	0.73	0.71	0.68
1:0.9	0.92	0.89	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.70	0.68	0.65	0.62	0.60	0.58
1:1.0	0.82	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.61	0.59	0.56	0.54	0.52	0.49
1:1.1	0.74	0.70	0.67	0.65	0.62	0.59	0.57	0.54	0.52	0.49	0.47	0.45	0.43
1:1.2	0.67	0.64	0.61	0.58	0.55	0.53	0.50	0.48	0.46	0.43	0.41	0.40	0.37
1:1.3	0.61	0.58	0.55	0.53	0.50	0.47	0.45	0.43	0.40	0.39	0.36	0.34	0.32
1:1.4	0.56	0.53	0.50	0.48	0.45	0.43	0.41	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28
1:1.5	0.52	0.49	0.46	0.44	0.41	0.39	0.37	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24
1:1.6	0.48	0.45	0.43	0.40	0.38	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21
1:1.7	0.44	0.42	0.39	0.37	0.35	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.22	0.19
1:1.8	0.42	0.39	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.25	0.24	0.21	0.20	0.18	0.16
1:1.9	0.39	0.36	0.34	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16	0.14
1:2.0	0.36	0.34	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.12

和水重。灌浆中应经常用泥浆比重称或比重瓶检查，如边检查边调配则方法更为简便。

五、水 泥 浆

比较重大的工程、特殊部位和特殊情况，如水库放水洞身附近、坝身中有严重渗漏部位、土坝与水闸边墩结合处、土坝与地基结合部位，以及防汛中碰到的一些特殊问题等，这些部位要求有很高的强度和较快的凝结时间，可采用水泥

浆。但土坝劈裂灌浆并不提倡用水泥浆，因为它用量太大，造价高。

六、水泥粘土浆

纯水泥浆除造价高外，其稳定性、流动性并不如水泥粘土浆好。另外，水泥浆析水凝结太快，不适应土坝变形。因此，土坝灌浆用水泥粘土浆效果更好。但是，较之粘性土浆造价要高，工艺也麻烦。一般土坝还是尽可能用粘性土浆。

水泥粘土浆配合比如何选择是非常重要的问题。根据各地的实践经验，配合比以水泥占干土重的10%~30%比较适宜。这种浆液析水后4~24h便可初凝，28天的胶凝强度可达30~200N/cm²，有较好的抗渗能力，渗透系数一般为10⁻⁶cm/s。但是，对于土坝劈裂灌浆，水泥初凝后形成不易压缩的骨架，阻止了坝体的回弹变形对浆液的压缩固结。所以水泥粘土浆，并不是土坝劈裂灌浆最理想的灌浆材料。

七、自凝灰浆

自凝灰浆是一种新型材料。它是蒙脱土、水泥和水按5:20:100或3:10:100配制的混合物。凝固后，以上两种配合比的防渗材料实际上并没有什么区别。这种混合浆液初始含水量400%左右，90天后含水量也有300%左右，比重1.2g/cm³。值得注意的是这种含水量300%的材料，表现出一定的脆性，用力挤压即可从半固态和脆性状态变软。尤其可贵的是其力学性能，3天抗压强度达1360N/cm²，7天达2130N/cm²，21天达5100N/cm²；抗渗比降可达100；渗透系数小于10⁻⁸cm/s。

粘性土、水泥、蒙脱土、水玻璃及其它附加剂可以混合

而成各种用途的灌浆浆液。目前这类混合物还在不断发展中。

劈裂灌浆如能合理采用灌浆材料，其应用范围则更为广泛。

灌浆过程中，应注意所使用灌浆材料的变化，随时作好记录，以便及时分析研究。

第六章 土坝劈裂灌浆的施工技术

灌浆工程的施工技术，一般包括施工组织、施工管理及灌浆技术等问题，在施工中必须全面考虑。应做到灌浆前准备充分，材料、机具、人员齐备，灌浆工作要有条不紊，熟练操作，对可能出现的问题要心中有数，善始善终地完成各道工序，严格把住灌浆质量关，确保安全施工。下面仅就劈裂灌浆中一些关键技术作重点说明。

一、施工前的准备工作

施工前灌浆设计是不可缺少的工作。对需灌浆的土坝，应从土坝外部出现的问题（如渗漏、裂缝、塌陷、洞穴等）及通过内部勘探（电测法、探井法、钻孔取样法等），论证土坝坝体处理的必要性；根据土坝隐患的性质、部位、施工技术等方面论证灌浆方法的可行性。对设计工作的要求是，合理确定灌浆方案，对孔位、孔距、灌浆压力、灌浆材料、每孔总灌浆量和每次灌浆量、间隔时间、特别问题的处理、坝体分段及灌浆进度、定额与预算等，都要进行周密考虑和计算。

要求设计部门提出必要的设计文件有：①设计说明书；②灌浆纵剖面布置图；③平面布置图；④概预算。这些问题在前面已论述，不再赘述。

灌浆前的准备工作还有：动力、机具和材料的准备、场地布置与劳力的组合等。场地布置应根据地形、料场、水源、能源和灌浆机械等条件而定，其布置原则是便利施工、

保证工程质量和人员安全、节省能源及减少运输费用。例如，在土坝下游有充足的材料和水源，灌浆泵的扬程又能送到坝顶的情况下，可考虑将搅灌机布置在坝下，这样可以节省运送材料的劳动力。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。一般机械化程度较好、坝顶较宽的，以布置在坝顶为好。土料在坝顶堆放位置，应根据灌浆泵的输浆距离，有计划的堆存，避免二次运输。水泥的存放应做好防雨防潮，随运随用。

劳力组合，基本上分成钻孔、制浆、灌浆、后勤运输、维修管理等作业组，分别完成其各自承担的责任，参考表10。

正式灌浆前要把土坝坝体划分成几段。即根据坝体质量、应力分布情况、裂缝及洞穴位置、地形条件等，把坝体分为河槽段、岸坡段、曲线段及其它质量不好的坝段（裂缝集中、洞穴、塌陷、施工结合等部位，以及与其他建筑联结段等）。要注意明确划分需要灌浆的坝段和不需要灌浆的坝段。

灌浆前要做必要的灌浆试验，如第三章所述。灌浆试验目的，是为了了解坝体情况，验证设计参数，为正式灌浆提供可靠数据及经验，特别是灌浆压力和劈裂试验。值得指出的是，试验时不起压或起压很低的现象，仅能作为判断应力较低的重要依据，而不能作为坝体是否存在隐患的主要依据。如怀疑坝体内部存在隐患，还需采用更可靠的勘探手段。目前国内外有的在土坝上作注水试验，如果注入大量的水坝体内仍未起压，则断言土坝坝内有隐患，我们认为这种做法根据不够充分。在第二章中已说明钻孔时水力劈裂坝体是很容易发生的，因此注水试验不能作唯一的判据。

表 10

机械化灌浆台班劳力组合表

人 员		岗 位 责 任	人 数
队 长		安排任务, 跟班生产, 质量检查, 巡视坝体, 施工记录, 统计进度	2
施工观测员		沉陷、位移观测, 裂缝观测, 施工控制, 观测记录	2
试 验 员		压力表读数, 泥浆比重试验, 试验记录	1
机 械	机 长	接受台班任务, 开机前准备和检查控制机械运转及进浆量	1
	搅 灌 工	机械操作	2
	钻 工	钻孔(锤击打孔), 并有 1 名钻机长	4
	电 工	电源、水源、线路、维修	2
	普 工	装土、清理场地	4
技术负责人		工程师、助理工程师, 灌浆设计, 制订计划, 组织施工, 事故处理决定	不 计
机 动 工		机 动 用	2
合 计			20

注 土料运输另计 5 人。

二、劈裂灌浆工艺流程

土坝坝体劈裂灌浆施工工艺流程见图28。

(一) 布孔

劈裂灌浆一般采用坝顶单排布孔。对重要的土坝或隐患较多土坝, 单排布孔无把握时, 可考虑采用两排布孔。对于土坝表面已见裂缝和洞穴以及土坝岸坡段可布置密孔, 呈多排梅花形布置, 有时也可沿裂缝布孔。

(二) 钻孔

钻孔可用旋转式, 而其它钻孔方式如冲击式和挤压式见

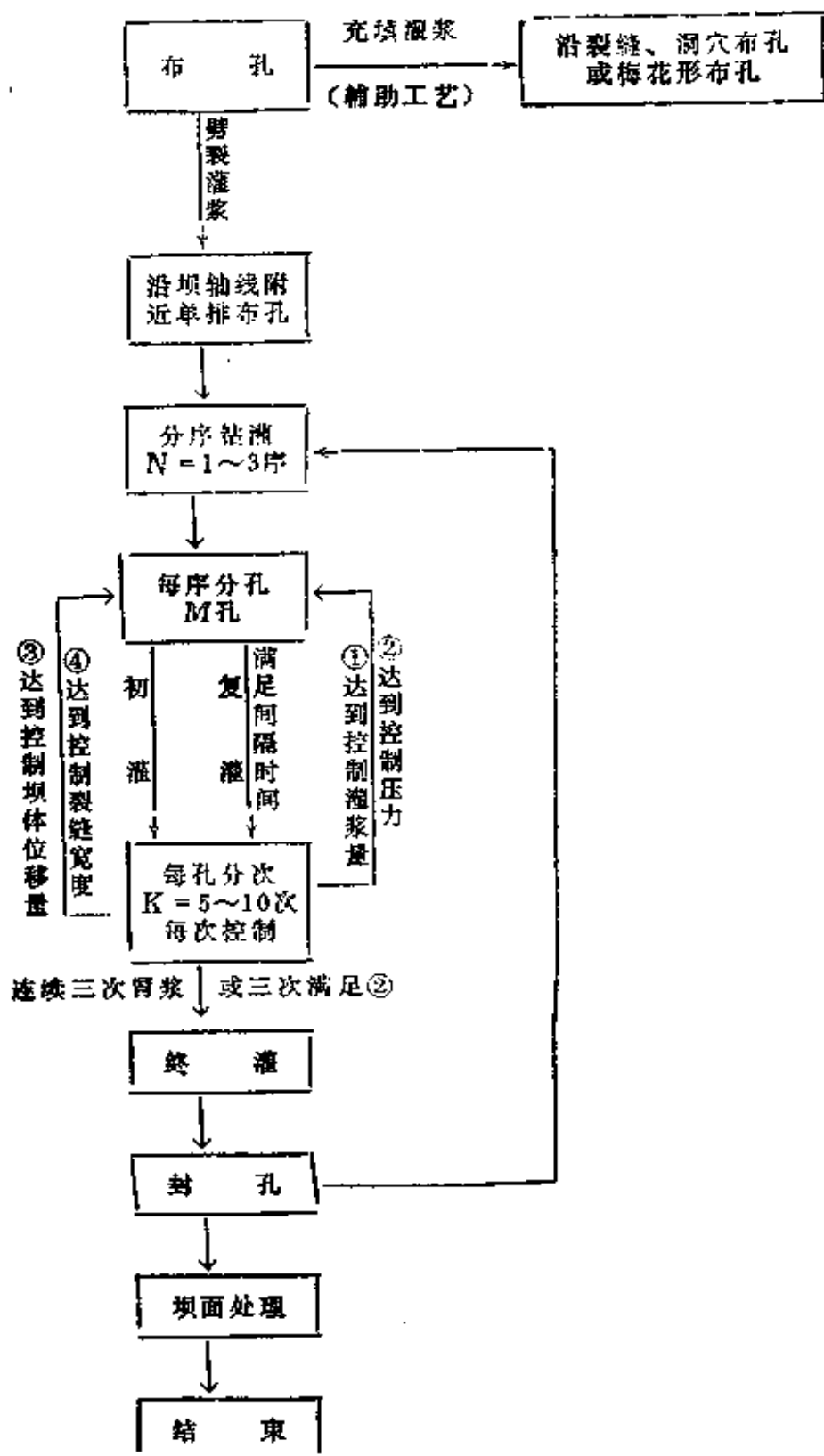


图 28 劈裂灌浆工艺流程框图

第五章。土坝坝体比较容易钻进，不要求很大的钻孔机械，目前多用锤击钻造孔，比较高的土坝可用汽车钻和一般钻机造孔。

钻孔需分序钻进，在布孔线上应先疏后密地施工。例如第一工序每隔20m钻孔，而第二工序孔可在20m中间钻，孔距变为10m，第三序孔又在10m中间，这样孔与孔的间距为5m。一般三序孔即可，有时两序孔也可达到要求。第一序孔间距一般等于或为三分之二坝高。但当坝体土粘性较大时，可以采用较小的间距；粘性较差或质量较差可用较大的间距。施工时要按设计要求待第一序孔钻完后，再进行第二序孔施工。

钻孔可以干钻，也可以湿钻，但加水不要太多。孔径多在25~130mm之间。高坝和质量差的坝可用较粗的孔径。劈裂灌浆不要求大的孔径，劈裂后孔径大小与总进浆量关系不大，钻孔50~60mm比较好。钻孔太小，泥浆阻力大，不易钻深，影响施工。

钻孔深度视坝体隐患深度而定，一般超过隐患处1~2m。如果坝体质量普遍较差，孔深可接近坝高。待一个孔钻完后，便可下注浆管至孔底一米处，注浆管直径略小于钻孔。

（三）灌浆

接通灌浆机泵与注浆管便可进行灌浆。劈裂灌浆一般采用孔底注浆全孔灌注法，同时控制灌浆压力和一次灌浆量。孔底注浆全孔灌注是劈裂灌浆提高灌浆质量和保证坝体安全的重要技术措施。灌浆机以一定压力将泥浆压入注浆管，并从注浆管底流出，从管底流出的浆液具有一定压力而劈裂坝体，劈裂开始于注浆管底部或附近质量差的地方，然后沿薄

弱面向左右上下发展。孔底注浆法可以施加较大的压力劈裂坝体，把较多的泥浆压入坝体内，使坝体产生挤压变形，待达到控制灌浆量或达到控制压力时即停灌，坝体产生回弹变形使浆液压缩。这就实现了“内劈外不劈”，“回弹压密”的目的。此外，也有采用分层分段灌注法，但由于劈裂作用，这种分层分段作用不明显，反而使施工困难。全孔灌注方法比较简单，浆液从注浆管底涌出向四周扩展，从压力较大处向压力较小处，从坝体质量较好的部分向质量较差的部分，从已充填部分向未充填部分，从裂缝中间向裂缝边缘流动和充填。这是自然调整压力过程，所以灌浆压力虽较大，但过程缓慢，外部反映不大，施工容易控制。

孔底注浆法每次只灌一定数量的浆液，一般要5~10次才能将孔灌满。每次灌浆前都要提一提注浆管，以免孔底堵塞和孔口冒浆，灌1~2次后把注浆管提升1~2m，但最后一次灌浆留下的注浆管不宜太短。

为增加灌浆压力和不冒浆，有时在坝顶钻孔周围做阻浆盖，其方法是在坝顶面开挖一个槽，然后用质量好的土夯实。有时在钻孔顶部加护壁管，同样可以达到目的。

灌浆的浆液如第五章所述。在开灌前先灌10min容重约 $1.2\sim 1.3\text{g/cm}^3$ 的稀浆，待劈裂后再灌稠浆，并逐渐加稠，直至达到稠度要求。

(四) 综合控制

劈裂灌浆采用五项控制即：①控制每次灌浆量；②控制最大灌浆压力；③坝肩水平位移不超过允许值；④坝顶出现裂缝宽度不超过允许值；⑤复灌时间不得少于规定天数。这就是劈裂灌浆工艺流程图23中指出的每孔分次 $K=5\sim 10$ 次，每次控制①②③④等的含义。满足其中一项即为一次。

1. 灌浆控制压力的确定

劈裂灌浆的控制压力，即灌浆时限制的最大压力，一般用孔口压力表读数表示，精度 $\pm 1\text{N/cm}^2$ ，所以在注浆管顶安装压力表是必要的。灌浆控制压力与土坝质量、坝高、孔深、泥浆密度、坝体稳患情况及土坝安全稳定性等有关。按照劈裂灌浆技术特点，在理论与实践上没有劈不开的土坝，所以限制最大灌浆压力是至关重要的。

在确定灌浆控制压力时，应指出灌浆压力还与灌浆方法有关。例如：在土坝坝体劈开缝很长，短时间灌入很多泥浆时，坝肩位移、坝顶裂缝发展很快，此时孔口压力却很小，甚至为零。因此，灌浆控制压力与允许劈裂的形式有密切关系。在劈裂灌浆时，绝对不允许一次劈裂很长及坝顶全线劈开的情况，也不允许一次灌浆量很大很快以至坝顶劈开很长很宽而不能闭合的情况。这里指出，控制灌浆压力以“内劈外不劈”（坝顶表面劈裂也能闭合）为原则，即在正常工艺下的控制灌浆压力，按下列原则控制：

（1）对于初灌和复灌时不起压的钻孔，控制压力为：

$$P_0 \leq 5\text{N/cm}^2 \quad (34)$$

（2）一般坝体灌浆压力不超过钻孔起裂压力和土柱自重，折算为控制压力（用孔口压力表读数表示）即

$$\left. \begin{aligned} P_0 &\leq (2.5 - \mu)\sigma_3 - (\mu\gamma_{\pm} + \gamma_{\text{浆}})gh + \sigma_t \\ P_0 &\leq (\gamma_{\pm} - \gamma_{\text{浆}})gh + \sigma_t (\text{适用} h \text{ 大于 } 10\text{m}) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

两者取较小者。根据国内经验，控制压力一般为 $5 \sim 30\text{N/cm}^2$ ，可参考图3。在缺少资料情况下，可用式（35）中的第二式估算。

在一次灌浆中，钻孔起裂时，即劈裂开始时，灌浆压力

为最大值，劈裂以后压力下降，直至为零。但有时 P_0 为零时坝体也能劈裂。

还应指出，灌浆压力因孔而变，不要一视同仁。钻孔深度越深，控制压力也将增大。随着复灌次数的增加，坝体质量变好，灌浆控制压力可能提高。

2. 每次控制灌浆量的估算

为提高灌浆效果，加快泥浆固结，保证灌浆时坝体安全，劈裂灌浆不但要控制灌浆压力，而且要控制每次灌浆量。灌浆量确定的方法为：①确定防渗帷幕厚度，其中包括估计隐患所占体积。②由单孔控制的深度、距离和浆体密度，按式（23）计算每孔灌入总干土重（ W_T ）。③根据孔深及灌浆序号确定每孔灌浆次数。第一序孔灌浆量占总灌浆量的60%以上，灌浆次数也相应多一些，一般为8~10次；第二、三序孔主要起均匀帷幕厚度作用，灌浆次数少一些，一般为5~6次。④每孔每次平均灌浆量按下式计算：

$$V_n = \frac{W_T \left(1 + \frac{1}{R} \right)}{\gamma_{浆} n} \times 1000 \quad (36)$$

式中 W_T ——每孔需灌入总干土重（t）；

R ——以水量为1单位的浆液的水土比，参考表8；

$\gamma_{浆}$ ——浆液密度（t/m³）；

n ——每孔灌浆次数；

V_n ——每孔每次平均灌浆量（L/次）。

实际灌浆中，因坝体质量不均匀，不能按平均灌浆量控制，一般初灌时吃浆量大，孔深时吃浆量也大，但随复灌次数和序号增加而减少。一般规定控制最大灌浆量为平均灌浆量的两倍，最小灌浆量根据压力变化及坝顶冒浆情况而定，

不要一概而论。

坝体劈裂与灌浆机械性能关系较大。单位时间输浆量大的机械，坝体易产生劈裂，坝顶易冒浆；输浆量小的机械，不易起压，压力表可能一直为零。所以，选择适当的泥浆泵也是很重要的，一般用 $50\sim 100\text{L}/\text{min}$ 泵量的泵比较合适。如灌浆时发现泵量与劈裂灌浆搭配不好，可用灌浆泵上的回浆阀调整。一次灌浆量也不要超过一个台班的灌注量，可用灌注次数调整。如果遇到大的洞穴吃浆量很大，一次吃浆量也不要增加，而应提高次数和稠度。

3. 坝肩位移和坝顶裂缝宽度的控制

大量泥浆压入坝体，使坝体产生压缩和位移。灌浆时，坝肩位移最明显，应加以控制，以保证灌浆时坝体安全。一般应控制位移在 $1\sim 2\text{cm}$ 范围内。虽然采用“内劈外不劈”的原则，但经过数次灌浆后，坝顶一般还将产生裂缝。劈裂灌浆不允许这种裂缝发展，裂缝长度控制在一序孔间距内，裂缝宽度控制在 $1\sim 3\text{cm}$ 内，以每次停灌 12h 后回弹闭合为宜。位移和裂缝控制方法，可用钢筋相对位移计，简单易行，见图29。

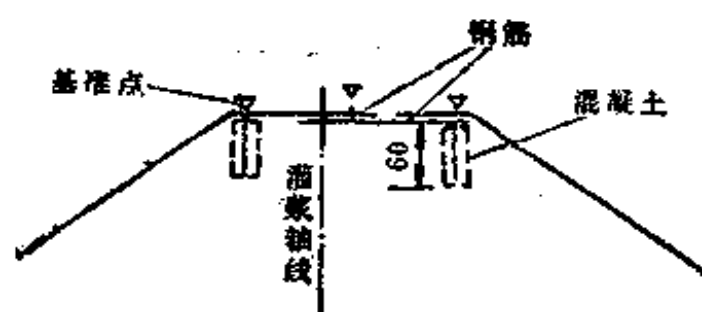


图 29 钢筋位移计简图

4. 控制灌浆时间

为安全起见，灌浆时间应选在低水位时，库水位应低于

坝体主要隐患部位。对于存在内部裂缝的中、小型土坝可以在浸润线以下灌浆，并采用稠一些的泥浆或附加掺合速凝剂。每次复灌间隔时间，浸润线以上坝体灌浆应不少于5d，浸润线以下则不少于10d。如将钻好的孔分组轮番灌浆，则以上间隔时间是容易满足的，这样灌好一个孔需一个月左右。如采用自凝浆液，灌浆时间可以大大缩短。

五项综合控制是保证灌浆时坝体安全和灌浆质量的主要措施。具体控制如下：达到一次控制灌浆量即停灌，拔掉灌浆胶管灌另一孔；没有达到控制灌浆量，但达到控制灌浆压力时，待其稳定半小时或超过控制灌浆压力即停灌；虽然没有达到上述指标，但坝肩位移、坝顶裂缝长度和宽度均达到限定值时也要停止灌浆，并算作一次灌浆；复灌时间应满足要求，如发生其它意外情况可暂停，待找出原因进行处理后再继续灌浆。

（五）终灌标准

地基灌浆的终灌标准，采用单位吸浆量小于 $0.2\sim 0.4\text{L}/\text{min}$ 并延续30min。但这是土坝劈裂灌浆办不到也无法控制的。因此，土坝劈裂灌浆不采用这样的终孔标准。

土坝坝体劈裂灌浆的终灌标准，以直观上饱、满、实为度，规定坝顶连续三次冒浆或连续三次超过控制压力、位移和裂缝宽度时，即可认为达到终灌。对于只需灌坝体某一深度，坝顶不开裂时，可在注浆管上部设护壁管或阻浆盖，终孔标准可以用单孔总灌浆量和灌浆压力控制。这样待第一序孔终灌后，就可以灌第二序孔。有时坝段太长，第一序还可分几段，逐段灌浆，这样灌浆机械移动的少。有时也可两部机械同时进行。

（六）封孔

一般用稠泥浆封孔，最好的办法是用泥球封孔。封孔时间可在灌浆结束后，把孔内清水抽出，然后倒入稠浆和泥球，最后表面用混合土夯实。

(七) 坝面处理

土坝灌浆后，坝顶有凸凹不平的地方和表面裂缝，另外坝高也可能比以前有所降低，需要处理。处理的方法是在坝顶铺土夯实和碾压。

以上灌浆工艺基本上都是针对河槽段土坝而言的，其它坝段的灌浆方法有所不同。

三、土坝岸坡段和曲线段的灌浆技术

土坝岸坡段、曲线段的应力分布及劈裂规律与河槽段不同，灌浆技术要求也有区别。

(一) 岸坡段

从岸坡底脚到河槽段的第一序孔间距及灌浆方法，按以下方法进行：

(1) 沿河槽段灌浆轴线缩短孔距向岸坡段钻灌，间距为5~10m或更小些。

(2) 孔口压力，一般应小于 $5\text{N}/\text{cm}^2$ 。每次进浆量为控制灌浆量的一半以下。

(3) 采用轮流灌注法，先用较稠的浆液，控制较慢的灌浆速度，一遍一遍的轮灌，一般不采用分序钻灌工艺。如果坝面有可见裂缝，要先处理裂缝再进行灌浆。

(4) 经过几次轮灌后，坝顶或坝坡可能出现横向和斜向的裂缝，应及时停灌，改在裂缝尖端钻灌，深度不超过裂缝的深度，用较稠的浆液注灌，充填或截住裂缝，然后在缝中间用稠浆灌堵。接着再在主排孔按更小的孔距逐次逼近和

轮流灌注，即可穿过斜向缝并与河槽段形成连续防渗帷幕。必要时用水泥粘土浆及其它特殊浆液处理横缝。

(5) 为改善岸坡段土坝应力状态，可在处理好的较大裂缝两边增加 2~3 排副孔，间距为 2~3m，按梅花形布孔，不分序的进行轮灌，设法灌进较多的泥浆，挤压坝体，以达消除隐患的目的。

(二) 曲线坝段

有的土坝因地形地质条件限制，坝轴线中有曲线段。在这种情况下，弱应力面将偏离坝轴线。曲线段长度加上两端一序孔间距的坝段，可采用一次成孔轮灌法灌浆。即在弧形坝段轴线上，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，控制灌浆量为 5 m^3 左右，控制压力应小于 5 N/cm^2 。轮灌几次后，每孔都发生微小裂缝。当这些裂缝互相连接时，灌浆量可以逐渐增加，直到灌完形成与弯曲坝轴线一致的泥浆防渗帷幕为止。钻孔间距与曲率半径有关，一般为 2~4m，曲率半径小的可密一些。如果出现偏离轴线的较大裂缝，则停灌，待裂缝处理后，再从另一方向轮灌接近裂缝，直到形成帷幕。

(三) 其它特殊坝段

特殊坝段可参考以上原则进行。坝体如有大的洞穴，可在隐患范围内灌入稠浆，每次不要灌的太多。如果一次非灌很多，则应采用特殊浆液。我国南方土坝，有的有白蚂蚁洞，如果洞少而大，可以用充填式灌浆，浆液中掺入适量的药物，如灭蚁灵等。如果蚂蚁洞很多，并且相互连通，则可用劈裂灌浆法灌入具有药物的浆液，简便地处理大量的蚁洞，效果很好。

综上所述，灌浆施工的一般要点是：土坝分段，区别对

待；不同坝段，不同方法；劈裂灌浆，单排布孔，分序钻灌；孔底注浆，全孔灌注；综合控制，少灌多复。

附灌浆施工时，要记录的各种表格：

（1）土坝钻孔记录表，见附表1；

（2）土坝灌浆记录表，见附表2；

（3）土坝灌浆汇总表，见附表3；

（4）土坝灌浆钻孔平面布置及裂缝分布图，见附图1；

（5）土坝灌浆综合图，见附图2。

第七章 土坝劈裂灌浆中常出现 的问题及处理方法

在灌浆施工中，经常遇到坝体冒浆、裂缝、塌陷、隆起和单孔吃浆量过大等现象。对于上述问题只要认真分析原因，采取正确的处理措施，都会得到比较好的结果。现就出现上述问题的原因和处理方法分述如下。

一、裂 缝

在灌浆期间坝面经常出现裂缝。按裂缝的走向，可分为纵向缝和横向缝。

（一）纵向缝

纵向缝系指顺坝轴线方向的裂缝。根据裂缝的成因又分为浆液劈裂缝和湿陷缝两种。

（1）劈裂缝：一般发生在灌浆后期的灌浆轴线附近，即坝体内部裂缝中的浆液面上升到接近坝顶时产生。在灌浆初期，有时一次灌浆量过大也会产生纵向裂缝。为了保证灌浆的质量，每次灌浆应使裂缝的长度和宽度控制在所规定的范围之内。当裂缝的宽度或长度达到或超过规定的范围时，应立即停止灌浆使裂缝自行闭合。

（2）湿陷缝：多发生在坝体土碾压质量差的坝段，是由于泥浆析水而引起坝体土湿化变形的结果。这种裂缝较浅，一般深2～3m，缝中没有泥浆。在灌浆施工中，可不予考虑，等灌浆后期再和坝面一起处理。但遇雨季要尽早

处理。

（二）横向缝

横向缝多发生在坝头、弧形坝段或坝下埋有刚性建筑物的地方。因为这些部位小主应力面的方向已经发生了改变，所以当一次灌浆量过大或灌浆压力过高时，就很容易产生斜缝或横向裂缝。防止的方法是：加密灌浆孔，增加灌浆次数，严格控制灌浆压力和每次的灌浆量。当出现横向缝或斜缝时，应立即停止该孔的灌浆，处理好裂缝后，改灌相邻孔。

二、冒 浆

（一）坝坡冒浆

坝坡冒浆多由横向裂缝或动物（如鼠、獾、蛇、白蚁等）洞穴与灌浆缝连通，在灌浆压力作用下，泥浆穿透坝体而冒浆。处理的方法是：在水上部分，只要在冒浆的部位，压沙做反滤即可解决；如果冒浆部位在水下，可以灌注稠浆并采用“灌—停—灌”的间歇灌浆方法解决，间隔时间一般为2~3d，通常经过一两次间歇灌浆，即可堵住。

（二）坝顶冒浆

一般分为灌浆前期冒浆和后期冒浆。灌浆前期冒浆，主要是因一次输浆量过大，坝体内裂缝小，一时容纳不下而造成的冒浆。处理的方法是：打开输浆泵的回浆阀门，减少输浆量。灌浆后期坝顶冒浆，说明坝内已经灌饱，灌浆接近结束，发现冒浆即停灌，改灌他孔。

（三）孔口冒浆

孔口冒浆主要由于注浆管与钻孔壁之间的间隙过大而引起。处理的办法是：在孔口挖坑，回填细砂捣实，然后用稀

浆冲孔开路，等进浆顺畅后再换浓浆。

（四）放水洞内冒浆

放水洞内冒浆多发生在砌石放水洞内。由于放水洞侧墙与坝体土结合不好，或存在接触冲刷，有空洞与灌浆缝连通而引起冒浆。处理的方法是：在冒浆出口用木塞或碎布塞堵后，灌注粘土水泥浆，水泥含量一般为40%左右（粘土占60%），灌浆次数适当增多，灌浆压力适当加大。灌浆结束后，拿去木塞或碎布，进行剔缝后，用高标号水泥砂浆勾缝。

三、串 浆

串浆系指正在灌浆孔向相邻孔冒浆的现象。多因灌浆工艺不合理所造成。在灌浆后期出现串浆，说明各注浆孔所形成的浆脉已经连通，一个垂直连续的浆体防渗帷幕已经基本形成。在灌浆前期，如果孔距太小，相邻两孔或两序孔灌浆相隔时间太短，都会发生串浆现象。处理的方法是：适当加大灌浆孔距，相邻两孔或两序孔的灌浆间隔时间适当放长，单孔每次灌浆量适当减少。

四、塌 坑

塌坑多发生在施工质量特别差的坝段。在灌浆前坝体内部就存在裂缝或空洞，浆液进入这些裂缝或空洞后，由于浆液的析水引起上部土体的塌陷而造成塌坑。处理方法是：先将塌坑中积水抽出，如果塌坑较深，可以分次灌注稠浆，直至灌到接近坝顶，待泥浆凝固后，回填粘土夯实。

五、隆 起

灌浆期的隆起系指坝坡护坡石或坝坡排水沟砌石的抬起凌空现象。产生的原因是坝体土密度小，在灌浆时坝体土大量湿陷，表面积减少，而护坡石（不可压缩）伴随土体沉陷，并受到底部护坡石的顶托，造成隆起。有时也可能因滑坡造成。如果发生坝坡隆起现象，应暂时停灌，组织有关人员分析研究隆起的原因。首先应查阅灌浆期坝面沉降观测资料，是否因湿陷量过大而造成。同时，应细心观测坝面有无滑坡裂缝特征。若确认是前者可继续灌浆，若是后者则应将滑坡裂缝开挖回填处理好后，再继续灌浆。等灌浆结束后，将隆起的护坡石翻拆重砌。

六、单孔吃浆量过大

单孔吃浆量过大，往往是由于灌浆工艺不当所致，有时也因放水洞侧墙与土体存在接触淘刷，形成空洞所引起。前者多发生在疏松坝体的河槽段。在这些部位，往往小主应力偏低，甚至出现横向受拉，存在纵向裂缝。在灌浆时，这些地方极易被泥浆劈裂，并且长期不起压或出现负压。如果不采取控制措施，势必造成单孔吃浆量大，促进两坝肩向外移动，影响相邻两孔的吃浆量。处理的方法是：前者应有计划的提升注浆管；而对后者的处理方法与放水洞冒浆处理方法相同。

七、缩 孔 卡 钻

缩孔卡钻的原因多是由于坝体土含水量过高，孔壁不能自立所造成。处理方法是：浅孔出现抱钻，可用倒链或打倒

锤的办法拔出。深孔抱钻，钻具不易拔出，应以预防为主，具体处理方法是：①将大钻头改为钻杆钻头，钻杆采用内套丝的 $\phi 42\text{mm}$ 钻杆，避免了钻杆接头与钻头的起拔阻力；②如果是采用锤击造孔，可采用活钻头或离合钻头，以钻杆做注浆管，待坝体被劈开后再拔出钻杆下注浆管，如出现缩孔注浆管下不去时，可以采取边灌边下注浆管的办法。

第八章 灌浆效果检查和验收

灌浆结束后，应及时组织有关人员进行效果检查和验收。只有各项指标都基本达到灌浆设计要求后，该坝才可允许投入使用。如果发现还有达不到的地方，应分析原因，提出补救措施，待处理后再进行验收。

一、检查内容

灌浆效果的检查工作，施工技术人员应在施工过程中经常进行，以便随时发现问题，及时处理。灌浆工程结束后，由施工部门组织有关人员对整个灌浆工程进行全面检查。检查人员应有设计、施工、管理和上级主管部门等各方面有经验的技术干部。检查的内容，一般有以下几个方面。

（一）现场勘察

检查人员应沿整个坝顶、坝坡、坝址进行全面察看，尤其应对照灌浆前的隐患部位仔细察看。主要检查坝后渗流量、下游坝坡渗水出逸点的高低和湿润面积的大小；在相同库水位的情况下，对比灌浆前后的变化情况，判断灌浆的效果。

（二）分析原体观测资料

原体观测设施是大坝的听诊器和耳目，是监测大坝的重要手段之一。所以，对原体观测资料应当及时进行分析。

（1）整理分析灌浆期和灌浆前后测压管、浸润线观测管和水库水位资料，并绘制坝体浸润线、测压管水位和水库水位过程线，对比在相同库水位情况下，灌浆前后的变化。

(2) 整理分析灌浆期和灌浆前后的坝面沉降位移资料，并绘制成过程线图。检查坝体变形，通过灌浆是否已经基本稳定。

(3) 在埋有土压力盒和孔隙水压力计的土坝，要分析灌浆前后坝体内部有较小主应力的变化情况，有条件的还可以绘制坝体内部有效小主应力增量等值线图，分析坝体内部应力的改善情况。

(三) 整理分析灌浆记录

灌浆工作结束后，应及时对原始灌浆记录进行分析整理，并将各灌浆孔的吃浆量、孔口压力变化和相应坝段的变形、裂缝，以及有无冒浆等情况编制成下列几种图表：

(1) 坝体裂缝和冒浆位置平面图，见附图1；

(2) 各序钻孔深度和注浆深度在坝体纵断面上的分布图，见附图2；

(3) 单孔注浆历时、灌浆量和孔口压力变化统计表，见附表2；

(4) 各序孔每次灌浆成果汇总表，见附表3。

根据上述资料，对照灌浆设计和各坝段的隐患进行全面分析，检验是否都已达到了设计标准。如果发现有异常现象或有不符合要求的地方，应分析原因，及时处理。

(四) 探井检查

1. 探井开挖时间

应根据浆液在坝体中的析水固结情况而定。一般坝体（或心墙）为红粘土，所用浆料又比较细时，开挖时间应在停灌一年以后进行。如果坝体为重粉质壤土或粉质粘土，所用浆料也为中等粘性土料时，开挖时间可在停灌半年以后进行。但一般要求不要过早的开挖，否则，坝体中的浆液得不

到充分的析水固结，会成半流动状态，达不到开挖检查的目的。

2. 探井的位置

应分别选在具有代表性和怀疑灌浆质量存在问题坝段的两注浆孔中间和灌浆孔附近，以及灌浆前曾经开挖检查过的地方附近，以便对比灌浆前后坝体质量的变化。探井的深度应挖到隐患部位以下。

3. 探井的开挖方法

多为人工开挖。在开挖前，应做好施工各种准备工作。施工时，井下作业人员要带安全帽，照明用低压灯泡，同时要有专门技术人员跟班指导，并随时记录和描绘浆脉的分布和取样试验。探井中心应位于灌浆轴线上。为使探井在开挖过程中保持垂直，可通过井心作灌浆轴线的垂线，并在井的四周两垂线上埋设固定桩，以便随时检查探井的垂直度和浆脉的走向。如图30所示，井壁用木板和钢筋圈支撑（一般木板长1.5m左右，厚约3~4cm，钢筋直径 $\phi 18\sim 20\text{mm}$ ），木板的疏密要由坝体的质量而定，但一般间距不要超过15cm，钢筋圈间距0.5m左右，并要用铁丝盘牢。

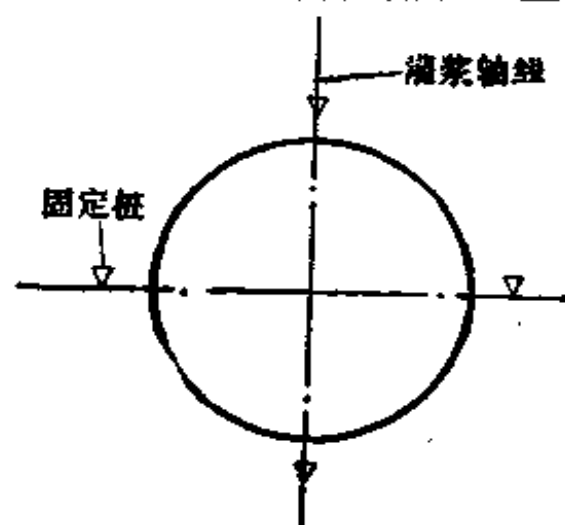


图 30 探井平面布置图

4. 检查内容

(1) 要分层检查浆脉的分布、厚度情况和浆体中是否有集中沙层，并绘制浆脉分布图，如图37；

(2) 要分层对浆体和浆体两侧不同距离的坝体土取样做含水量和干容重试验，并绘制含水量和干容重沿深度的变化曲线；

(3) 检查泥浆对浆脉两侧裂缝、洞穴、水平沙层等坝体隐患的充填情况，浆体与两侧坝体的结合情况。

5. 取样进行室内试验

(1) 取样方法：结合探井开挖，分别对浆体、坝体和浆体带坝体分层取样进行土的物理力学性试验。试样的大小和多少，应根据试验的内容而定。只做常规试验，试样取 $20 \times 20 \times 20\text{cm}^3$ ，如果还需要做三轴压缩和拉伸试验，可以多取几块试样。一般取样不宜过大，否则不好包装和搬运。取样层次应根据探井深浅和土质变化情况而定。探井可行时

用钻机取样。

根据上述检查和试验资料，由施工单位编写灌浆施工技术总结，通过对检查和试验资料的分析，认为基本达到了灌浆设计要求后，即可呈报上级主管部门组织验收。

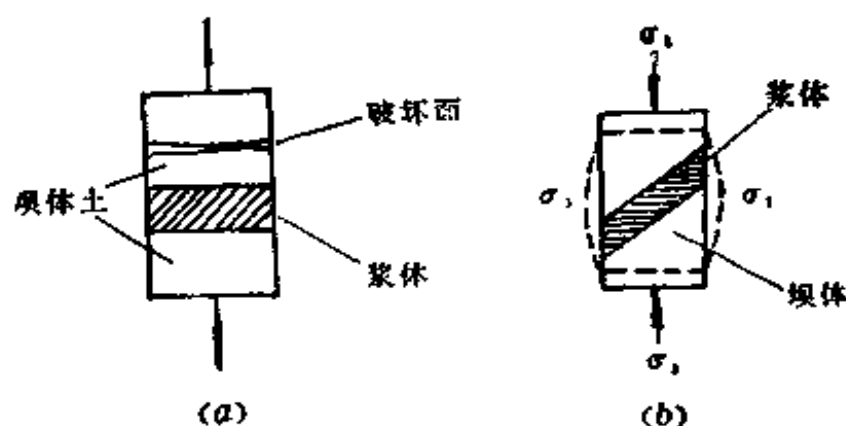


图 31 土样室内试验简图
(a)单轴抗拉试验；(b)三轴压缩试验

二、验收标准

验收是灌浆工程的最后一道工序，只有被灌土坝在检查合格验收后，才允许投入使用。现将验收的程序和标准分述如下。

(一) 验收程序

验收工作应有主管部门主持召开专门会议，由设计、施工、管理和试验单位派有关人员参加验收。先由管理部门向验收小组介绍土坝在灌浆前的运行和隐患情况，并提供有关方面的资料；由设计部门提交灌浆设计书，并介绍当时考虑设计的根据；由施工部门提供灌浆施工技术总结、原体观测资料、土工试验报告和灌浆效果检查报告，并介绍灌浆的施工情况、在灌浆中出现的问题、处理方法以及效果检查结果。

果，并对灌浆效果作出评价，提出验收意见。最后，验收小组通过对各单位提供的资料审查和现场勘察，审定已经基本达到了灌浆设计的要求后，即可验收立案，并通知水库管理部门开始投入使用。

（二）验收标准

通过灌浆，土坝一般应达到如下标准：

（1）坝坡不再有渗水和阴湿现象，由坝体引起的坝后渗水基本断流或显著减少；

（2）帷幕后测压管水位和浸润线有明显降低或帷幕上下游侧压管水位差有显著增加；

（3）坝体变形基本趋于稳定，坝体不再有新的裂缝产生；

（4）坝体内部有效小主应力明显增加，应力状况得到显著改善；

（5）按设计要求在坝体内形成厚度比较均匀、垂直、连续的浆体防渗帷幕，并且与浆体连通的所有裂缝、洞穴和水平沙层等坝体隐患均被泥浆充填挤压密实；

（6）浆体中没有集中沙层，浆体与坝体结合牢固，浆体干容重和渗透系数等物理力学性能指标达到了设计要求；

（7）浆脉两侧一定范围内的坝体土干容重有所增加，渗透系数有明显的减少；

被灌坝体如果能够满足上述标准，一般即认为已经达到了灌浆的目的，应给予验收。

第九章 土坝劈裂灌浆实例

（黄前水库）

用土坝劈裂灌浆技术处理坝体隐患，已被大量工程实践证明是成功的。但是由于坝体隐患的性质不同，具体处理措施也不尽相同，否则就得不到应有的效果。为了使读者看后便于掌握该项技术，现以黄前水库工程实例加以说明。

一、黄前水库工程概况

（一）工程概况

黄前水库总库容8248万 m^3 ，大坝系粘土心墙砂壳坝，坝顶高程213.3m，最大坝高33.3m，坝长1530m，顶宽6m，分三次施工完成。

在第一次施工后期，碾压质量较差，干容重达不到设计标准。1961年蓄水后，大坝沉降1.6m左右，同时坝顶顺坝轴线方向，出现了断断续续的裂缝，缝宽一般在10~15cm，缝深约5m左右，当时进行了充填式灌浆处理，共灌进干土约300 m^3 。在以后两次大坝加高培厚中，对新老坝的结合部位未做处理。

（二）坝体隐患分析

1981年5月，在安装测压管施工中，在0+350断面处钻孔，钻到7~10m时，提钻困难，出现缩孔现象，后来改为湿钻，又出现漏浆现象，移钻到0+500、0+800处时，均出现了上述现象。为此引起各级管理部门的重视，并组织有关单位对该坝进行了勘探分析。

(1) 物探：经电测，该坝从0+250至1+100段在埋深7~10m处，普遍有一层高含水量的疏松土层，详见图32。

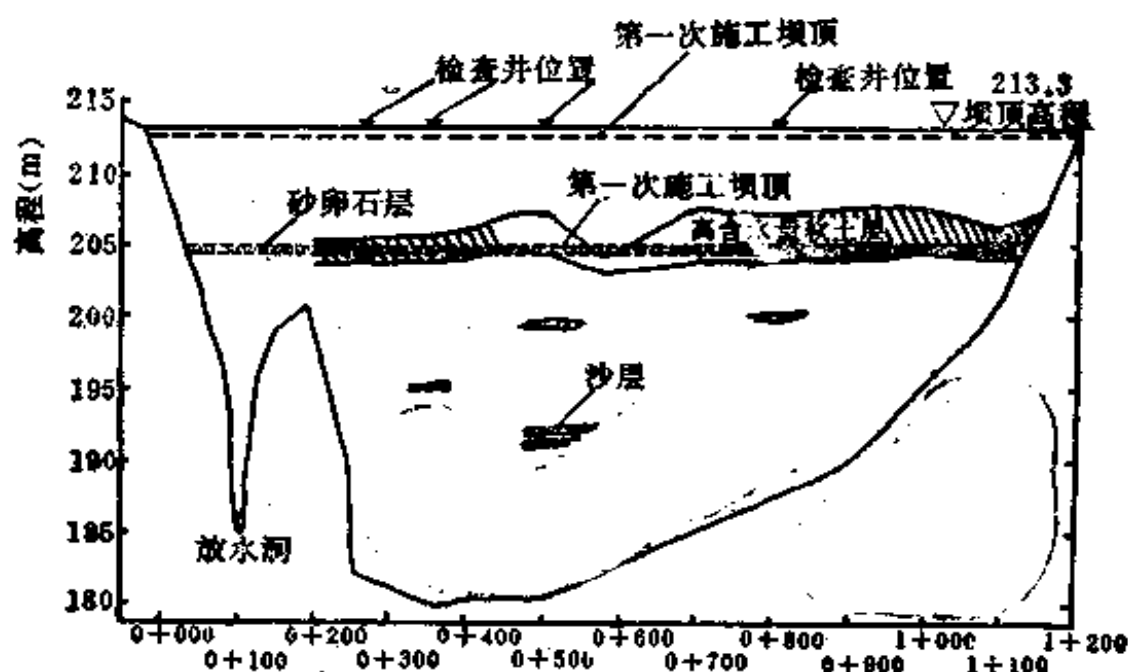


图 32 黄前水库大坝纵断面图

(2) 注水试验：在0+485处用锥探机打孔深约12m，孔径30mm，下注浆管6m，往孔内灌注白石灰水，有明显漏水现象。经开挖检查，在埋深6.5m处坝体被石灰水劈裂，缝宽20mm左右。

(3) 探井检查：为了进一步探明坝体隐患的性质，首先在0+498处挖30m深探井进行了检查，发现在埋深8.4~8.8m段有一水平砂卵石层，并且上下游贯通。在埋深7~10m范围内，坝体土的含水量在23%~24%，接近流限。土体干容重 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，达不到设计要求（设计为 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ）。埋深13m处有一水平砂层，厚约15cm，渗水严重，在1.6m直径的井内，渗水量约为1L/h。在以下19.5m和20m深处又有两层砂层，亦有明显渗水现象，为查明水平砂层在纵断面

上的分布，又在0+265、0+345和0+818处进行探井检查，发现在埋深8.5m左右均有厚约30~40cm的砂卵石强透土层。经分析该层系第一次施工的坝顶，在加高培厚时未进行清理而形成的。在坝体的其他部位，也多处存有局部水平砂层，渗水严重。

(4) 现场观察：在0+200~0+250岸坡段和0+100放水洞处，由于坝体变形不均，出现了纵向受拉现象，防浪墙多处断裂，在0+255处坝体出现横向裂缝，经开挖检查缝深2~3m，缝宽1~2mm。

(5) 土工试验：为了进一步查明坝体情况，先后于1981年7月和10月对坝体土取样进行试验。坝体心墙土的干容重约 1.5g/cm^3 左右，渗透系数为 $1.7 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ ，均达不到原设计要求。

(三) 原体观测布置

为了保证大坝在灌浆期的安全和掌握灌浆的效果，分别在大坝的河槽段和岸坡段埋设了观测仪器设备（对一般土坝不一定要埋设）。

在河槽段的0+485和0+498处分别开挖深为20m和30m的仪器埋设井各一个，共埋设了土压力盒67支，钢弦式孔隙水压力针8支，渗压计4支，双管式孔隙水压力仪一套，测压管21支。

在岸坡段的0+265处开挖深12m仪器埋设井2个，共埋设土压力盒46支，钢弦式孔隙水压力计12支，同时在灌浆轴线的上下游1m处各埋设测斜仪导管1根。

在0+350、0+500、0+700处设立三个标准断面，埋设了永久性沉陷位移桩。在0+100~1+100段每隔20m设一临时观测断面，进行沉陷位移观测，见图33。

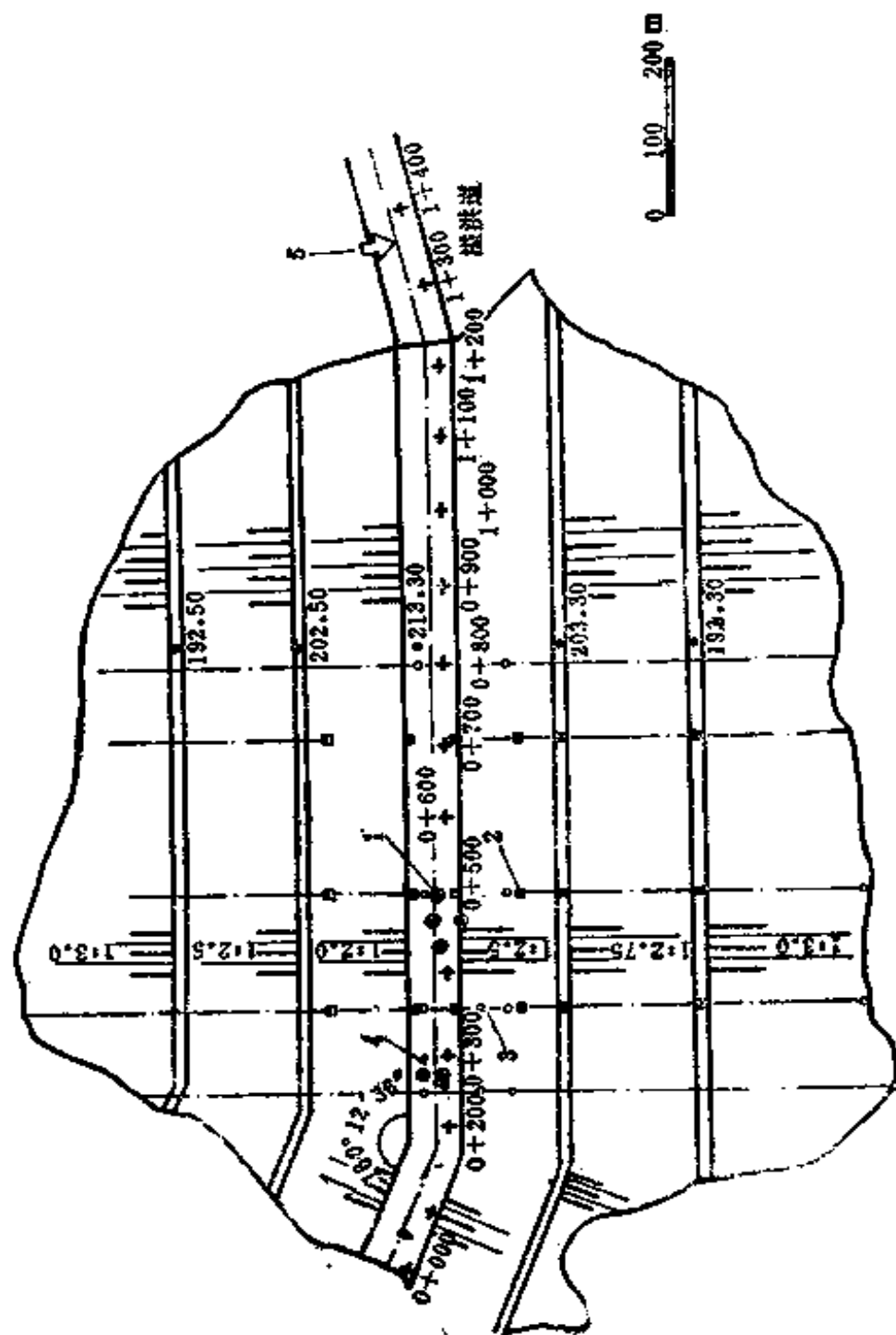


图 33 黄前水库大坝原体观测设备平面布置图

1—仪器埋设井, 2—永久性沉降观测点, 3—渗观测点, 4—测斜仪

在0+400、0+480、0+500、0+520、0+800、0+900和1+000处各埋设相对位移计一套，测试大坝在灌浆期间的变形和裂缝的张合情况。

在0+100、0+250、0+350、0+500、0+800处安设浸润线管5排，共20根。

二、灌 浆 设 计

根据黄前土坝隐患的性质，在河槽段沿坝轴稍偏上游1.2m处，单排布孔构筑浆体防渗泥墙，以解决坝体的渗透稳定问题。同时利用泥浆的析水性，使浆缝两侧坝体土产生湿陷固结，调整坝体内部的应力状态，补充小主应力之不足，解决坝体的变形稳定问题。在岸坡段和放水洞处，由于受力复杂，采用双排交错布孔的方式进行灌注，对灌浆压力和单孔吃浆量等，也根据灌浆试验所确定的数值严格控制。

（一）灌浆压力的确定

目前确定灌浆压力的经验公式较多，但是不管采用哪种计算公式，往往都与实际情况有一定差距。为了便于施工控制，又尽量与实际情况相符合，黄前水库土坝灌浆孔口最大控制压力采用了灌浆试验数值与式（12）计算来控制。经试验黄前水库坝体土的单轴抗拉强度 $\sigma_t = 1.5 \text{ N/cm}^2$ 。

终灌标准不是采用最终设计灌浆压力来控制，而是采用坝顶裂缝冒浆，经过三次以上的复灌，最后基本不再吃浆和满足设计的帷幕厚度 δ_R 两条标准来控制。灌浆帷幕厚度 δ 可用下式估算：

$$\delta = \frac{W}{H_{cp} L \gamma_d} \quad (37)$$

式中 δ ——固结后的浆体帷幕厚度；

W ——灌进坝体的干土总重；

γ_s ——浆体固结后的干容重；

H_{op} ——帷幕平均高度；

L ——该坝灌浆段的长度。

(二) 灌浆帷幕厚度的确定

帷幕厚度按不透水地基条件下土坝心墙的计算公式求得。为简化计算，可将浆体和心墙厚度按渗透系数的比值化为与下游坝体相同渗透系数的均质坝宽，这样即可用均质坝的渗流公式计算。

黄前坝外部尺寸和坝体土的基本物理力学性能参数为(详见图34)；

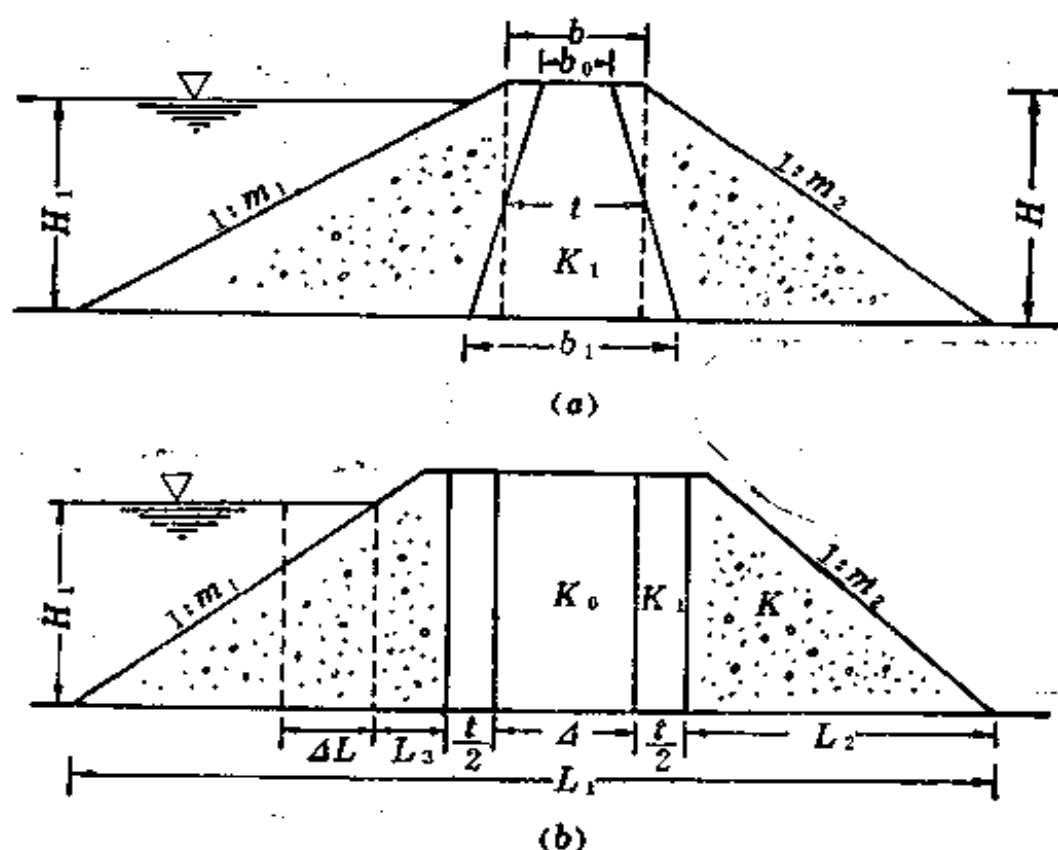


图 34 黄前水库土坝断面图

(a) 折算前原坝断面图, (b) 折算为均质坝断面图

$$K_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s} \quad m_1 = 2.5$$

$$K_1 = 2.3 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \quad m_2 = 2.75$$

$$K = 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s} \quad b = 6 \text{ m}$$

$$H_1 = 29 \text{ m}$$

经计算, 当上游最大挡水高度 $H_1 = 29 \text{ m}$ 时, 帷幕厚度 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 即可满足防渗要求。

帷幕厚度的渗透破坏验算可用公式 (19) 计算。

经试验, 黄前坝体土在有保护条件下的允许渗透坡降采用 $J_{\text{允}} = 250$ 。如果取帷幕上下游水位差 $\Delta H = 20 \text{ m}$, 当浆体帷幕厚度 $\delta = 0.1 \text{ m}$ 时进行验算, 其结果为:

$$J = \frac{\Delta H}{\delta} = \frac{20}{0.1} = 200 < J_{\text{允}} = 250$$

满足要求。

(三) 浆液选择

在坝体灌浆中, 选用合适的泥浆, 是保证灌浆质量, 降低工程造价的重要条件。所以在灌浆前, 对由黄前水库附近的几种粘性土料制成的泥浆分别进行了物理力学性能试验, 最后根据当地土料的来源和灌浆对泥浆各种物理力学性能的要求, 选用重粉质壤土作为浆料, 泥浆密度采用 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 。水与干土比 (质量比) 约为 $1:1 \sim 0.8:1$ 。

三、灌 浆 施 工

(一) 施工概况

本项灌浆工程共分两期施工, 第一期工程从1981年9月7日试灌到1982年5月24日结束, 历时260d, 扣除冬季停灌时间, 实际灌浆为173d。灌浆坝段从 $0+260$ 至 $1+100$, 共打孔85个, 总进尺2305.5m, 总吃浆量 5896 m^3 , 折合干土

9935m³。第二期工程从1983年5月4日开始，到6月底停灌，灌浆坝段分别为0+200至0+280的岸坡段和0+100处放水洞，共打孔28个，总进尺290m，总吃浆量250m³，折合干土121.4m³。

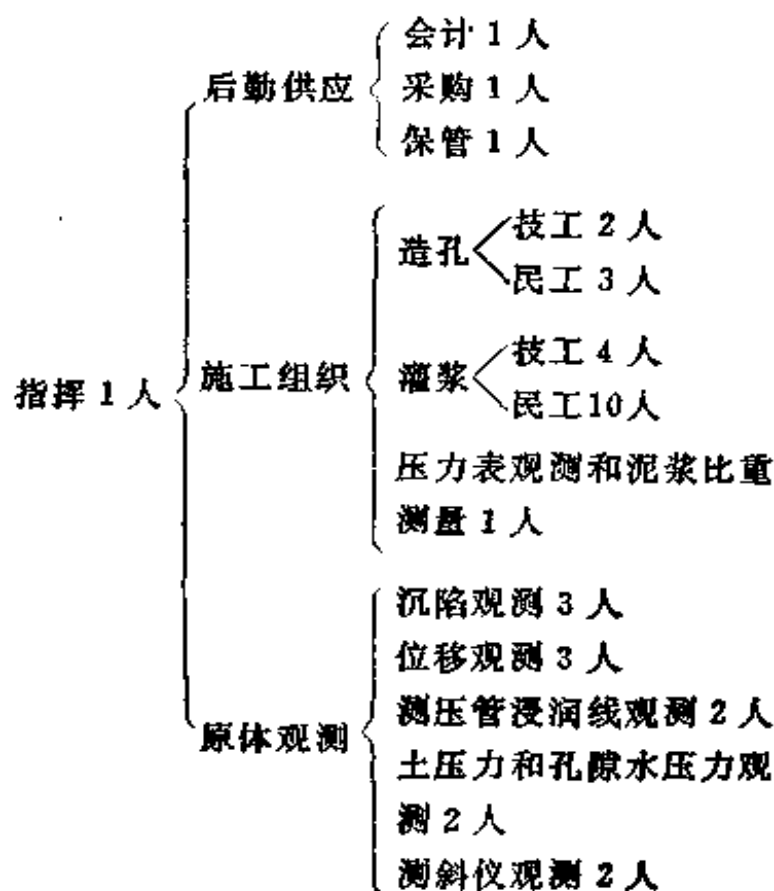
在河槽段灌浆过程中，坝前坡有四处冒浆，分别在0+260、0+480、0+600和0+840处；坝后坡有一处冒浆，位置在0+760处。冒浆多数在第一序孔的第一次灌浆中即被泥浆充填堵死。

（二）工艺流程

灌浆工艺流程如下图35所示。

（三）劳力组合

施工中的劳力组合和人员配备情况如下：



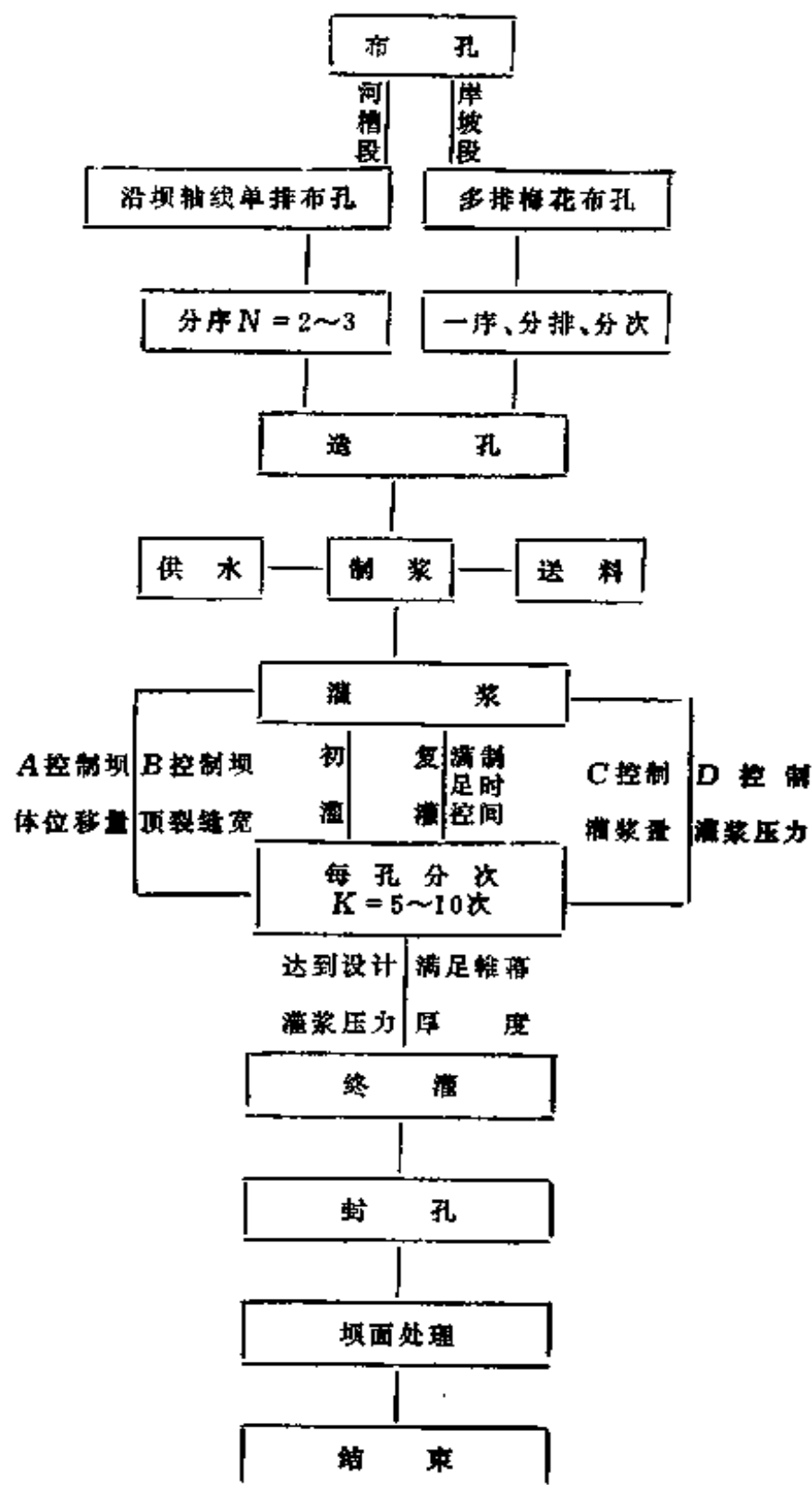


图 35 黄前坝体劈裂灌浆工艺流程图

(四) 灌浆机械设备

选择合适的钻灌机械设备，是提高施工速度和保证灌浆质量的重要前提。在选择灌浆机械设备时，应本着施工场面小，占用劳力少，工作效率高，移动方便的原则。在黄前水库土坝灌浆工程中，造孔和灌浆分别采用黄前水利机械厂生产的锤击打管机和WJG80-1型联合搅灌机。

(五) 施工技术要点

1. 布孔

在河槽段，主要是构筑浆体防渗帷幕，解决坝体中的水平砂层和新老坝接触面的渗水问题。因此，灌浆轴线设在坝轴线偏上游1.2m处，以增加坝体的稳定性。最后终孔距由单孔每次灌浆单侧控制劈裂长度来定，经试验黄前坝体灌浆最后终孔距采用10m。

在岸坡段和放水洞处，由于该处坝体应力分布状态复杂，是最容易发生问题的部位，故采用双排交错布孔，孔位分别设在坝轴线上下游的1.2m处，每排最后终孔距10m。

2. 造孔

钻孔深度，一般打到隐患部位以下1~2m，以保证泥浆对坝体隐患部位的充分浸透、充填和挤压密实。钻孔要尽量保持垂直，因为它是保证浆体帷幕垂直和两注浆孔间所形成的浆体帷幕能够很好衔接的关键条件。所以对于钻孔的要求是：孔深超过40m倾斜度不应大于 1° ；孔深小于40m倾斜度不应大于 1.5° 。

3. 分序分次施灌

分序分次施灌能使灌入坝体中的泥浆得以尽快析水固结，强度及时上升。同时，能迅速消除由于灌浆引起坝体中局部孔隙水压力升高的威胁，保证大坝施工期的安全，并能

促使灌入坝体内的泥浆粘粒向两侧移动，使粘粒在坝体与泥浆交接处进行定向排列，形成一层防渗性能很强的泥浆层。如此反复轮灌，即可形成一道粗细颗粒相间、木纹纸状的浆体防渗泥墙。用这种方法形成的浆体帷幕与坝体胶结牢固，防渗性能良好。

4. 注浆方法

一般采用孔底注浆全孔灌注的方法。注浆管下到孔底以上0.5~1m处，泥浆从注浆管下口压出。不设阻浆塞，使坝体由下部逐渐向上劈开。但是，在头几次灌浆中尽量不使裂缝劈到坝顶，以便增加坝体的回弹力，加速泥浆的析水固结。经过几次灌注，基本不大吃浆或帷幕厚度达到或接近设计要求时，立即停灌，然后提升注浆管3~4m，继续灌注到设计要求。如此反复灌注，直至该孔灌饱并达到设计标准为止。采用孔底注浆是保证坝体下部形成的浆体帷幕有足够厚度的重要措施。应避免钻孔过深，而注浆管下得过浅，使形成的浆体帷幕上宽下窄，达不到设计要求。

5. 质量控制

为了保证灌浆质量和大坝在施工中的安全，施工前先在大坝上进行灌浆试验。根据试灌所取得的经验和有关数据，在灌浆施工中采取了如下控制措施：

- (1) 孔口压力控制在设计最大允许灌浆压力以内；
- (2) 单孔每次吃浆量，在河槽段不超过20m³，在岸坡段和放水洞附近不超过10m³；
- (3) 单孔灌浆次数5次以上，两次间隔时间不少于5d；
- (4) 每次灌浆坝顶水平位移量不超过2cm；
- (5) 坝顶裂缝宽度不超过3cm；

(6) 浆料和泥浆稠度严格达到设计要求。

6. 终灌标准

经过分序分次反复轮灌以后，坝体基本不吃浆和浆体帷幕厚度达到灌浆设计要求时，就可终灌。

浆体帷幕厚度用公式(37)计算，具体计算过程如下：

已知参数 $w=5200t$

$$\gamma_d=1.5t/m^3$$

$$L=850m$$

$$H_{cp}=27m$$

$$\text{则 } \delta = \frac{5200}{27 \times 850 \times 1.5} = 0.151m > 0.1 \sim 0.15.$$

7. 封孔

终灌后，注浆孔用泥浆密度大于 $1.7g/cm^3$ 的稠浆灌满，浆面下沉后再灌，直至浆面不再下沉为止，最后填土夯实封孔。

8. 坝面处理

灌浆结束后，由于坝体在施工过程中湿化变形不均，造成坝面高低不平，或局部出现张拉裂缝。为了防止坝面积水和雨水浸入坝体产生水力劈裂，在产生张拉缝的部位，用钢钎打深 $2 \sim 3m$ 的浅孔进行反复灌浆，直到坝顶多次冒浆和所有裂缝灌满灌饱为止，最后整平坝面，并使坝面里高外低，以利于及时排出坝面积水。

四、效 果 检 查

(一) 探井检查

探井开挖是在停灌后10个月进行的，检查井的中心位置分别选在距灌浆孔2m的 $0+482$ 及 $0+818$ 处和两注浆孔中间

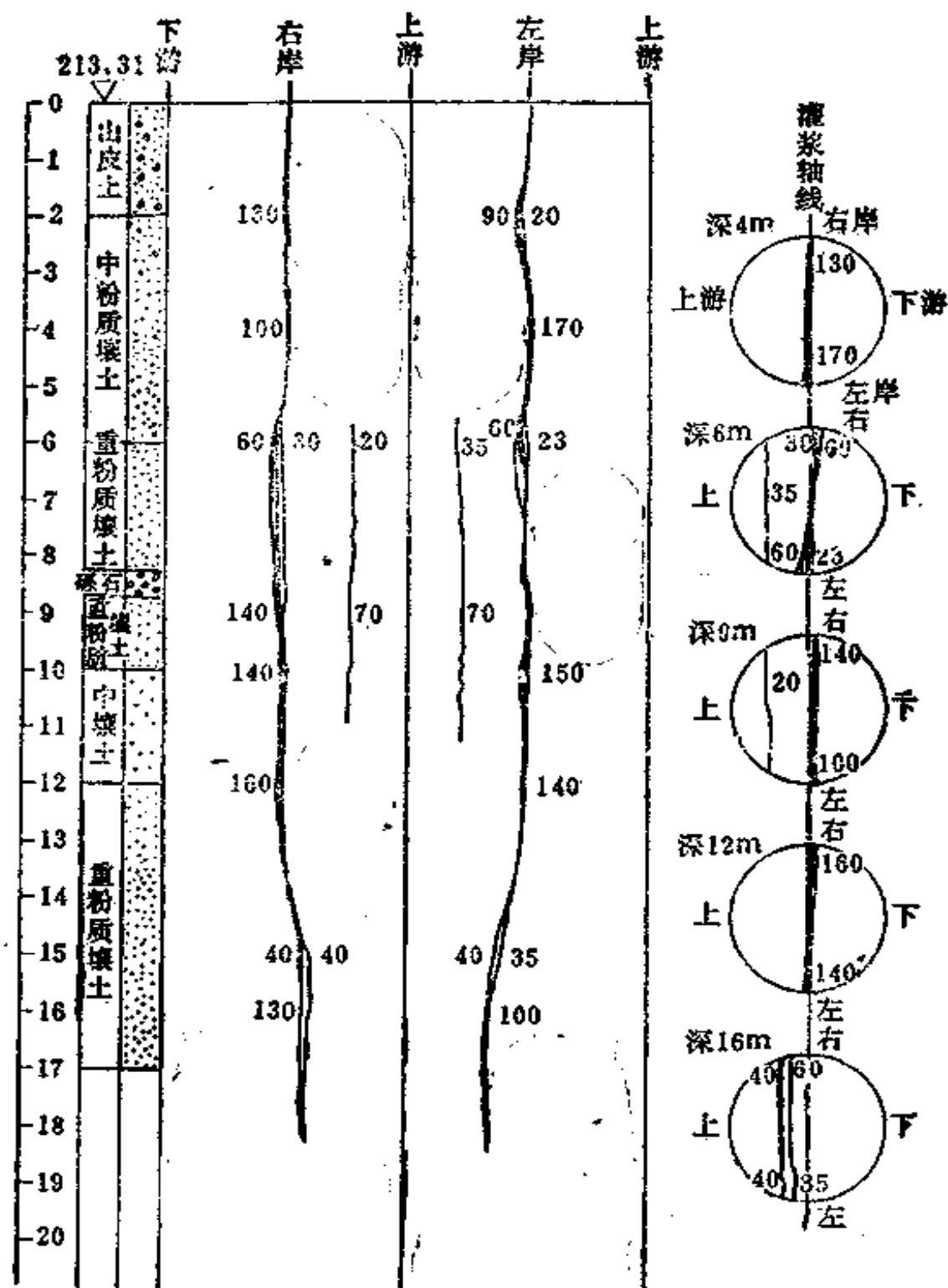


图 36 0+345检查井浆脉分布图

位置的0+345处。通过开挖检验，不管是在注浆孔附近，还是在两注浆孔中间，均形成了厚度比较均匀、垂直连续的浆体防渗帷幕，详见图36。从图36可以看出，原坝体结构比较疏松小主应力又较小的部位，浆体比较厚或形成多道密集浆脉，坝体中的裂缝和洞穴均被泥浆充填密实，浆体与坝体结合牢固。从图还可以看出，浆体成木纹结构，防渗性能强。经试验，垂直木纹方向渗透系数为 $2.1 \times 10^{-8} \sim 4.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，顺木纹方向渗透系数为 $1.1 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。现场实测浆体干容重一般为 $1.4 \sim 1.7 \text{g/cm}^3$ ，并有从上至下逐渐增大的趋势。坝体干容重比灌浆前普遍提高 $0.05 \sim 0.2 \text{g/cm}^3$ ，详见表11。

(二) 室内试验

灌浆后开挖探井检查，并分别对坝体和浆体取样进行了

表11 灌浆后坝体和浆体干容重现场试验成果

桩号 埋深(m)	平均	0+482		0+818		0+345		备 注
	灌前坝体	坝体	浆体	坝体	浆体	坝体	浆体	
2		1.71	1.37	1.62	1.36	1.60	1.23	干容重 单位为 g/cm^3
4	1.54		1.51	1.63	1.54	1.79	1.53	
6	1.47	1.59	1.50	1.67	1.51	1.59	1.53	
8	1.52			1.70	1.56	1.63	1.34	
10	1.57	1.68	1.49	1.71	1.49	1.75	1.54	
12	1.58			1.75	1.75	1.76	1.70	
14	1.73	1.78	1.59	1.63	1.73	1.75	1.66	
16	1.68	1.69	1.71	1.78	1.68	1.78	1.65	
18	1.66	1.67	1.62	1.69	1.68	1.80	1.74	
20	1.66	1.89	1.64	1.76	1.68			
平 均	1.60	1.72	1.55	1.69	1.59	1.71	1.54	

物理力学性能试验，同时取两端为坝体、中间为浆体的试样，多次进行单轴拉伸试验，其破坏面均发生在坝体土中，在浆体或浆体与坝体结合处没有任何破坏现象。另外取浆体与坝体成 45° 角的试样进行三轴压缩试验，其破坏形式均为塑性破坏，没有沿浆体与坝体交接面破坏的迹象。

（三）原体观测

（1）改善了坝体内部应力状况。为了资料分析上的方便，我们取灌前一次土压力盒的读数做为零点，以后土压力的增量认为是由灌浆压力作用的结果。经分析黄前坝灌浆后20d坝体内部各点小主应力的变化如图37。从图可看出，灌浆后坝体内部有效小主应力有了明显的增加，尤其在坝体上、中部弱应力区。这对于大坝的变形稳定是有利的。

（2）加速了坝体的变形稳定。由于泥浆的析水作用引起坝体进一步湿陷固结，经过灌浆坝体最大沉降量约300mm，一般为50~100mm，如图38。从图可看出，在灌浆初期坝体迅速沉降，到灌浆后期，变形基本趋于稳定。

（3）灌浆后坝体浸润线发生变化。灌浆后改变了原坝体的渗流状态，从0+500和0+800断面浸润线管中的水位变化看，在库水位相同的情况下，灌浆后帷幕前浸润线管中的水位，比灌浆前升高约4~6m，而帷幕后浸润线管中的水位比灌浆前下降约2~3m，见图39。从图可看出，浆体帷幕的防渗效果是显著的。

五、经济分析

根据黄前水库土坝坝体劈裂灌浆工程及山东省其他水库坝体劈裂灌浆工程施工的经验，对利用劈裂灌浆技术构造浆

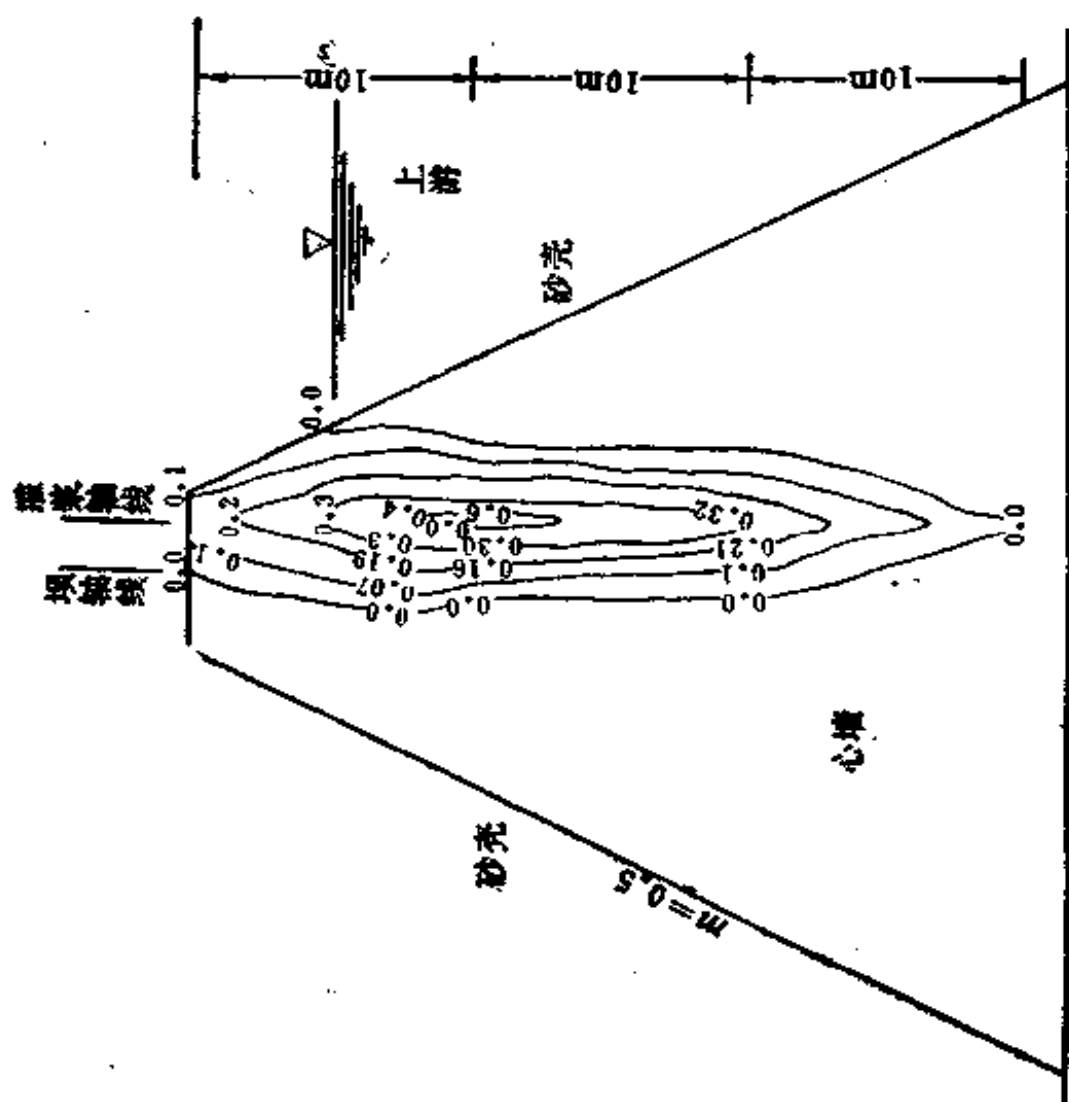


图 37 黄前坝灌浆后20d坝体内有效小主应力增量分布图

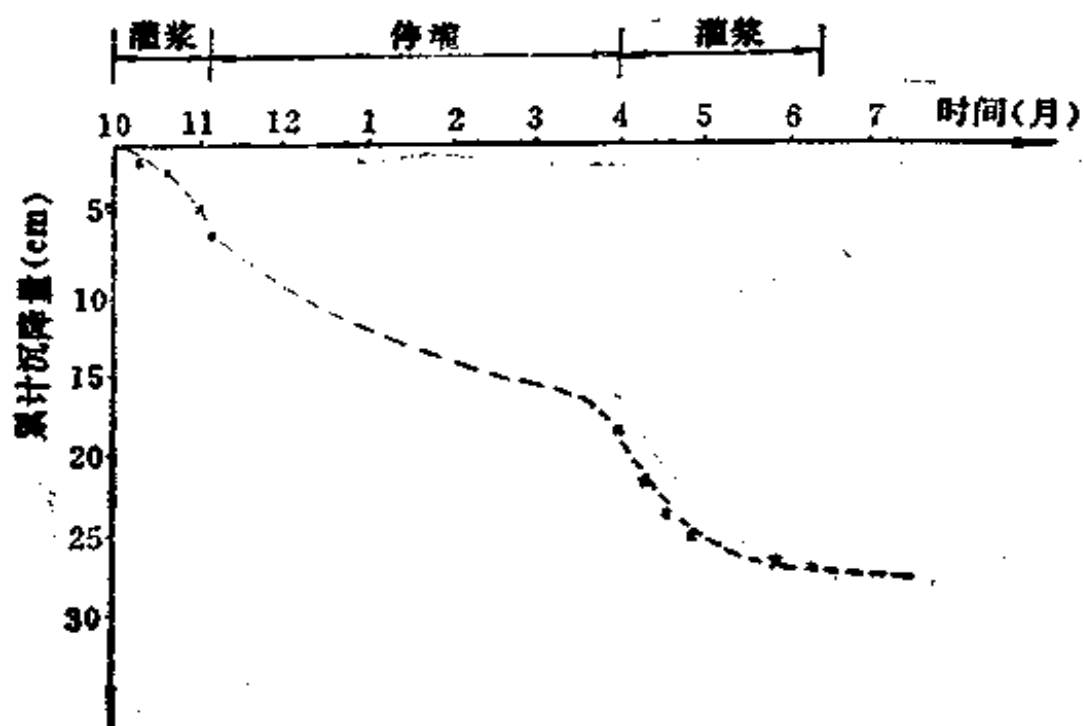


图 38 0+740断面沉降过程线

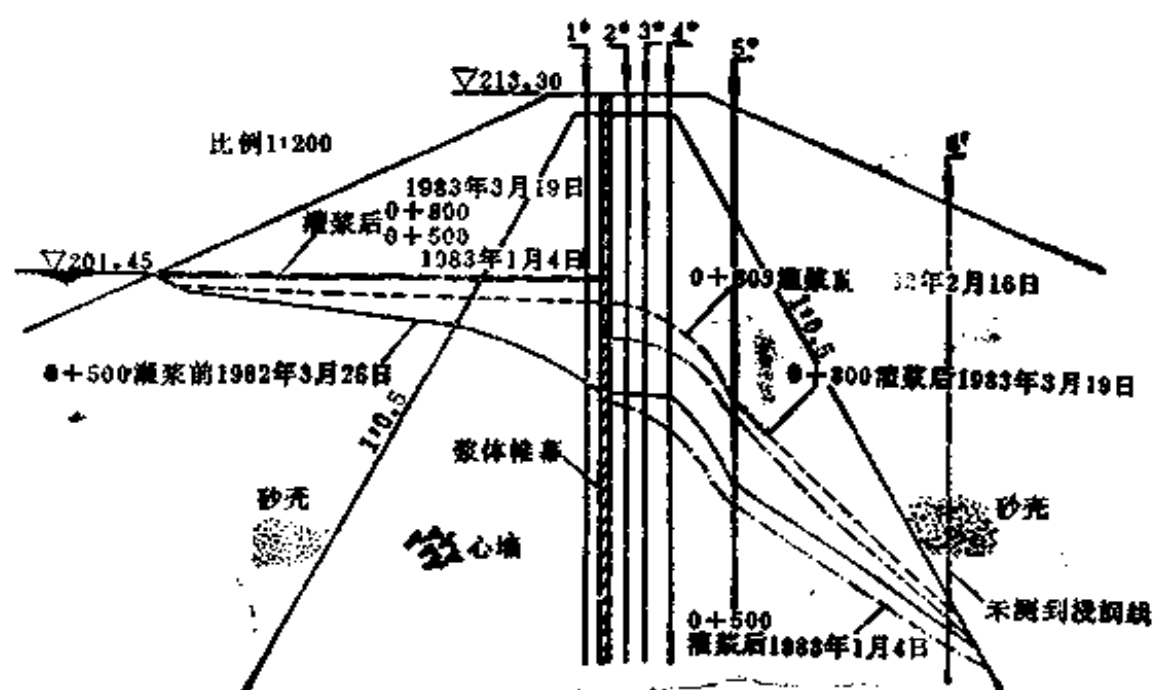


图 39 黄前水库土坝坝体灌浆前后浸润线变化图

体防渗帷幕加固坝体的经济指标分析, 其一般结果有: 工时利用率按6.5%计算, 造孔, 每个台班完成17.7m, 平均每米耗费8.39元, 见表12; 灌浆, 每个台班灌入坝体浆量 22.4m^3 , 折合干土 15.0m^3 , 平均每灌入坝体 1m^3 浆液耗费28.81元(灌入 1m^3 干料43.03元), 详见表13; 每个台班构造浆体防渗帷幕(厚度约10~15cm) 87.68m^2 , 平均构造厚为

表 12 造孔单价分析表

项 目	单 位	单 价 (元)	数 量	计 价 (元)	备 注
合 计			17.7m/台班	148.43	
1.人工费				26.85	
技 工	工日	4.0	3.15	12.60	
民 工	工日	2.5	5.70	14.25	
2.设备购置费	台班	77.27	1	77.27	
3.动力机械费	台班	9.77	1	9.77	
4.施工材料费	台班	9.80	1	9.80	
5.间接费	元			24.74	占直接费20%
平 均	元/m			8.39	

表 13

灌浆单价分析表

项 目	单 位	单 价 (元)	数 量 (22.42 m ³ /台班)	计 价 (元)	备 注
合 计			1	645.95	
1.人工费				86.54	
民 工	工 日	2.5	14.30	35.75	
技 工	工 日	4.0	4.14	16.56	
观 测 工	工 日	2.5	13.69	34.23	
2.设备购置费	台 班	137.52	1	137.52	
3.观测试验费	台 班	130.42	1	130.42	
4.动力机械费	台 班	91.74	1	91.74	
5.施工材料费	台 班	92.07	1	92.07	
6.间接费	元			107.66	占直接费的 20%
平 均	元/m ³ (浆液)			28.81	每立方浆液
	元/m ³ (干土)			43.03	

表 14

防渗帷幕单价分析表

项 目	单 位	单 价 (元)	数 量 (87.68m ³ / 台班)	复 价 (元)	备 注
合 计				733.37	
1.人工费				101.50	
技 工	工日	4.0	6.0	24.00	
民 工	工日	2.5	31.0	77.50	
2.设备购置费	台班	175.72	1	175.72	
3.观测仪器费	台班	32.32	1	32.32	
4.试验费	台班	57.03	1	57.03	
5.动力机械费	台班	96.57	1	96.57	
6.开挖探井费	台班	41.06	1	41.06	
7.施工材料费	台班	96.92	1	96.92	
8.管理费				132.25	占直接费的22%
平 均	元/m ²			8.36	

表 15

黄前水库土坝第一期灌浆工程决算表

项 目	单 位	数 量	单 价 (元)	复 价 (元)	备 注
合 计				236800	
一、设备部分				66620	
1. 灌浆设备				32300	
联合搅灌机	台	2	9500	19000	
13kW电机	台	2	600	12000	
5.5kW电机	台	2	300	600	
三芯电缆线	m	400	4	1600	
胶管(50.8mm)	m	400	15	6000	
二芯电缆线	m	200	2	400	
φ2注浆管	m	550	5	2750	
4kW电机	台	2	200	400	
其它设备				350	
2. 造孔设备				14350	
塔 架	台	2	1000	2000	
吊锤(120kg)	台	2	1000	2000	包括提升设备
50 钻 杆	m	250	35	8750	包括接头、钻头等
條 探 机	台	1	1600	1600	
3. 电器设备				14120	
50mm ² 裸铝线	kg	2000	6	12000	施工坝段长850m, 两条供电线路
横 担	套	40	20	800	
小型电器	元			1000	

续表

项 目	单 位	数 量	单 价 (元)	复 价 (元)	备 注
1号瓷壶	个	120	1	120	
配 电 盘	个	2	100	200	
4.供水设备				7000	
潜 水 泵	台	2	2500	5000	
水 箱	个	2	1000	2000	
二、观测仪器及 设备				32350	
土压力盒	支	67	100	6700	
渗 压 计	支	8	150	1200	
孔隙水压力计	支	4	100	400	
双管式孔隙水 压力计	支	21	150	3150	
屏 蔽 线	m	2000	1.5	3000	
晶体管接收器	台	2	3500	7000	
水准仪 ^①	架	1	1000	1000	
经纬仪 ^①	架	1	1500	1500	
观 测 房	间	2	1200	2400	
沉陷位移装置 ^①	元			4500	
其它用品	元			1500	
三、试验费				15000	
土工试验	元			8000	
泥浆试验	元			7000	
四、动力机械费				25398	

续表

项 目	单 位	数 量	单 价 (元)	复 价 (元)	备 注
机械维修费				9903	占设备购置费的15%
电 费	度	28800	0.18	5184	
135马力柴油机发电	班/台	150	68.74	10311	供电不正常需自己发电
五、挖井费				10800	
仪器埋设井	个	3	1800	5400	
检 查 井	个	3	1800	5400	
六、工资				26250	
技 工	工日	1500	4	6000	
民 工	工日	4500	2.5	11250	
观测人员工资	工日	3600	2.5	9000	
七、施工材料费				25490	
粘 土	m ³	4500	4.5	20250	
木 材	m ³	6	450	2700	
水 泥	t	6	90	540	
帆布蓬	块	3	500	1500	
其它材料				500	
八、施工管理费				35492	占工程费的20%，跨年度施工，工期拖长

① 为灌浆时原体观测必备仪器和内容。

0.15~0.2m的1m²浆体帷幕需要经费8.36元，见表14。

黄前水库河槽段坝体灌浆共构造防渗帷幕 23060m²，总投资23.7万元，扣除灌浆机械设备折旧费（按70%折旧）和

灌浆试验研究仪器费4.4万元，实际用于灌浆的费用为19.3万元。

从上述各项经济指标分析来看，用劈裂式灌浆技术处理坝体隐患，仅为其它技术措施处理同类问题造价的 $1/30 \sim 1/80$ 。黄前水库第一期工程决算表见表15。

附表 2

土坝灌浆记录表

工程名称 钻孔桩号 灌浆复测 孔深 注浆深 注浆日期 始灌日期 终灌日期 年 月 日 年 月 日

日期	灌浆时间			泥 浆			泥浆灌入量		单位时间 吸浆量	孔口压力(N/cm ²)		备 注
	开	始	止	密 度	水玻璃 含量	粘 度	桶数	灌入量		最大	最小	
月 日	h	min	h min	(g/cm ³)	(%)	(s)	(桶)	(L)	(L/min)			一般

填表说明:

1. 灌浆时间一栏中开始、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. 水玻璃含量为干土的百分数;
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. 何时封孔及封孔方法, 应在备注栏中说明。

记 录

2 集行

卷四 目錄

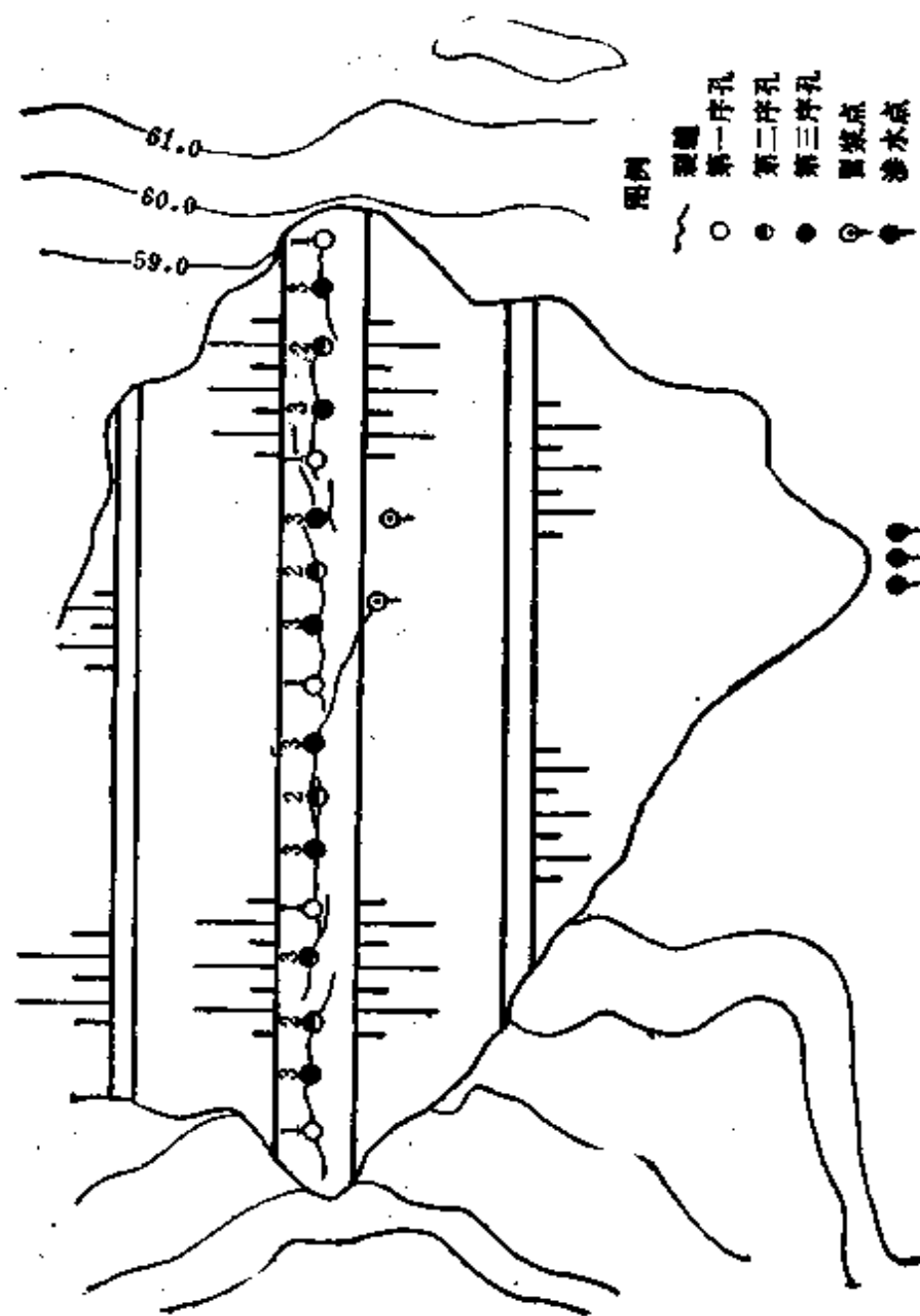
工程名称:

[illegible]

一、**財政政策**

1. 当每孔灌浆结束后，分孔汇总，
2. 观察密实度一栏，应采用加权平均值，不要计算平均值，
3. 干土灌入量系由观察密实度与灌浆灌入量计算得来，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。

100



附图 1 $\times \times$ 水库大坝灌浆钻孔平面布置及裂缝分布图

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。

参 考 资 料

- [1] 韩耀祖译、赵淑子校：“土石坝的安全管理”译自《ダム日本》NO419/9/1979。
- [2] 黄文熙：“对土石坝科研工作的几点看法”，《水利水电技术》，1982年第4期。
- [3] 陈理中、邹永言等译《美国钻井手册》，石油工业出版社，1980年2月。
- [4] 王洪恩：“土坝坝体劈裂灌浆防渗帷幕厚度的确定”，《山东省水利科技》，1982年第一期。
- [5] 刘杰、缪良娟：“一般粘性土抗渗强度影响因素的研究”，《水利学报》，1984年第四期。
- [6] 水电部、交通部南京水利科学研究所《渗流译文汇编》第十二辑。