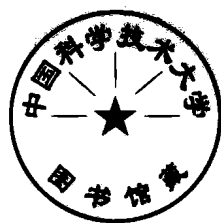


高等学校试用教材

钻孔护壁堵漏原理

曾祥熹 陈志超 主编



地质出版社

内 容 提 要

本书介绍了孔壁稳定、钻孔漏失、冲洗液流变性、泥浆材料及其作用原理、胶凝材料的固结原理等方面与钻孔护壁堵漏有关的内容。

本书内容丰富且比较全面，反映了国内外的成就与现状，对上述各方面内容进行了原理性的论述。本书可供探矿工程专业教学之用，也可作为从事钻井工程的研究与生产的科技人员参考之用。

高等学校试用教材

钻 孔 护 壁 堵 漏 原 理

曾祥熹 陈志超 主编

责任编辑：李世忠

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：850×1168¹/₃₂印张：15¹/₈ 字数：399,000

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数：1—4,965册 定价：2.60元

统一书号：13038·教250

前 言

随着我国“四化”建设发展的需要,培养具有一定理论水平又有实际工作能力的“探矿工程”专业高级科技人材已迫在眉睫。根据“探矿工程专业教学计划”规定,除完成必修课程学习外,多开选修课程是培养学生具有综合分析和独立工作能力的重要措施之一。《钻孔护壁堵漏原理》是“探矿工程”专业主要选修课程之一,是学完“钻探工艺学”主要专业课程之后的加深课程。我国现有探矿工程专业各院校已开始讲授本课程,并积累了一定的教学经验,但尚无一本合适的教材。为了适应教学的需要,根据探矿工程教材编审委员会的计划,我们四院校共同合编了本教材。本教材也可供生产与科研部门参考。

本教材是从1982年开始编写的,先后进行过三次提纲讨论、教材互审和定稿会议,做到了充分讨论与认真编写,完成了本教材的编写任务。

本书共分五章及十一个附录。编写分工如下:第一章孔壁稳定及附录一、二中南工业大学陈志超编写;第二章钻孔漏失及附录三、四长春地质学院李永信编写;第三章冲洗液流变性及附录五、六、十一中南工业大学曾祥熹编写;第四章泥浆材料及其作用原理,附录七、八、九武汉地质学院杨学涵编写;第五章胶凝材料的固结原理及附录十成都地质学院朱宗培编写。主编是中南工业大学曾祥熹、陈志超。探工教材编审委员会主任委员李世忠教授对本书初稿进行了详细审查。

本书取材于各种国内外资料。根据我国目前统一实行法定计量单位的具体要求,本书内采用了国际单位制。符号注角一般采用习惯用法。

编写过程中,我们得到了许多国内同行的大力支持,为本书

提供了宝贵资料和意见，参阅和引用了许多国外同行编写的书刊资料，这在本书第二章的内容取材上，尤为明显。对此，我们在这里向他们表示深切的谢意！由于本教材的编写系属初步尝试，且编者水平有限，有错误与不妥之处，望读者批评指正。

编 者

1984年8月

目 录

概 论	1
第一章 孔壁稳定	11
第一节 概述	11
一、研究孔壁稳定性的意义	11
二、不稳定岩层的分类及其特征	12
三、孔壁稳定的研究任务及方法	15
第二节 孔壁失稳过程的分析	91
一、在地层应力作用下孔壁的破坏	16
二、液动压力对孔壁稳定的影响	32
三、冲洗液对孔壁稳定性的影响	40
四、其他工艺因素及地质因素对孔壁稳定性的影响	44
第三节 不稳定岩层的稳定问题	45
一、页岩稳定问题	45
二、松散破碎层的稳定问题	68
第四节 稳定孔壁的综合措施	72
一、保持钻孔—地层间的压力平衡	72
二、关于防塌泥浆的性能要求	74
三、防塌泥浆的几种类型	74
四、水泥浆及其他材料的加固	81
五、坚持合理的钻进工艺措施	82
本章符号	83
参考文献	85
第二章 钻孔漏失	88
第一节 理论基础	88
一、冲洗液漏失的原因	88
二、漏失层的某些性质	90

三、岩石中冲洗液流动的特性	93
四、漏失层分类的分析	96
第二节 钻孔漏失层的研究方法	103
一、钻进中漏失层的研究方法	103
二、研究漏失层的物探方法	106
三、用测漏仪及流速流向仪研究漏失层	120
四、水动力法研究漏失层	124
第三节 堵漏主要参数的计算	130
一、堵漏浆液体积的计算和灌注参数的选择	130
二、漏失层裂隙张开量的计算	137
三、漏失层压力差的计算	140
第四节 钻孔漏失的防治	142
一、预防钻孔漏失的方法	142
二、采用充气液消除漏失	147
三、对堵漏浆液的要求及浆液分类	153
四、用水泥浆隔离漏失层	155
五、用粘土-水泥浆液隔离漏失层	156
六、聚丙烯酰胺絮凝物和交联物堵漏	161
七、速效混合物隔离漏失层	161
八、合成树脂浆液隔离漏失层	162
九、沥青隔离漏失层	162
十、用干粉状物质隔离漏失层	163
本章符号	172
参考文献	175
第三章 冲洗液流变性	177
第一节 概述	177
一、研究冲洗液流变性的意义	177
二、冲洗液流变性的研究任务	179
第二节 流体与流型	180
一、牛顿流体	181
二、非牛顿流体	183
第三节 流变性测量原理	197

一、旋转粘度计测量原理	197
二、毛细管粘度计测量原理	201
第四节 冲洗液流变性举例	205
一、处理剂水溶液的流变特性	205
二、泥浆的流变性	208
三、其他冲洗液的流变性	212
四、流变参数的影响因素及其调节	215
第五节 冲洗液流变性与钻井的关系	222
一、流变性对钻速的影响	222
二、流变性对清除孔内岩粉的影响	223
三、流变性对紊流减阻的影响	227
四、流变性对护壁与堵漏的影响	233
五、划分层流与紊流的准数— Re 与 Z 值	238
六、流变性在压力损失计算中的应用	240
符号与单位	255
参考文献	259
第四章 泥浆材料及其作用原理	263
第一节 粘土的鉴定、评价及造浆	263
一、粘土的鉴定	263
二、造浆膨润土的评价	274
三、膨润土造浆试验	282
四、粘土的增效	285
第二节 有机处理剂的作用原理	260
一、有机处理剂的种类和特点	290
二、不同有机处理剂作用原理的分析	292
第三节 特种泥浆	315
一、水包油乳化泥浆	315
二、泡沫泥浆	318
三、地热井泥浆	321
四、无粘土冲洗液	324
参考文献	331
第五章 胶凝材料的固结原理	333

第一节 特种水泥	333
一、硫铝酸盐水泥	333
二、油井水泥及高温水泥	344
三、低比重水泥	349
四、膨胀水泥	357
五、水泥—聚合物	360
第二节 水泥浆的流变性	362
一、新拌水泥浆的稳定机理	362
二、水泥浆的流变性	367
三、水泥浆的稠化时间及其测定	376
第三节 改善水泥浆性能的方法及原理	378
一、化学外加剂	378
二、物理方法	387
第四节 化学浆液的固化原理	389
一、概述	389
二、合成树脂固化原理及影响因素分析	390
三、提高物理—力学性能的途径	398
参考文献	401
附录一 孔内压力计及其应用	404
附录二 井壁稳定的模拟研究	414
附录三 井径测量仪	421
附录四 LSX-2型数字式钻孔流速流向仪	426
附录五 旋转粘度计的设计与计算	433
附录六 水力损失计算	442
附录七 50C型范氏粘度计简介	455
附录八 巴劳德(Baloid)282型毛细管粘度计简介	459
附录九 粘土标准	462
附录十 国产NCH-75型高温高压稠化时间测定仪	468
附录十一 单位换算	474
附录参考文献	476

概 论

(一)

为了把我国建设成为具有高度物质文明和精神文明、生产力高度发展、科学技术发达的社会主义强国，探明“四化”建设需要的矿产资源是地质工作者的光荣使命。钻探工程作为进行勘探工作的主要技术手段之一，就必须大力发展钻探先进技术和方法，以提高钻探工程的质量和效率，这是当前和今后的战略任务。

实践证明，复杂岩层护壁堵漏和钻孔冲洗技术是确保钻探工程优质、高速、安全、低耗的一个重要环节。在我国复杂岩层钻进的工作量，每年约占钻探总工作量百分之三十左右，多年来由于我国各部门的地质勘探单位的重视，在这方面进行了大量的研究工作，也取得了一定成效，但目前仍处于技术水平不高，深入研究不够的状态，因而大力加强孔壁稳定、漏失规律以及各种护堵材料作用机理的研究，以迅速提高与复杂岩层作斗争的技能，在今天仍然有着巨大的现实意义。

为了进一步明确当前的重要使命，让我们简略回顾一下这方面的发展史。解放初期，我国钻探工程在非常薄弱的基础上逐步得到发展。为了战胜复杂岩层，五十年代以来，国内地质勘探部门就开始重视泥浆护孔技术，把它作为处理孔内复杂问题的主要措施之一。利用各种无机盐和有机护胶剂的化学处理，大大改善了泥浆的性能，增强了泥浆的护壁能力。煤碱剂、丹宁酸钠、亚硫酸纸浆废液配制的细分散泥浆是这个时期的代表。随着化学工业的发展，钠—羧甲基纤维素，铁铬盐等新型泥浆处理剂的出现，使细分散泥浆又提高到一个新水平。以石灰低钙泥浆为代表的粗分散体系和以聚丙烯酰胺为代表的低固相泥浆，七十年代以来在

国内地质岩心钻探中几乎是相继或同时出现的，而且很快为后者所代替，目前以聚丙烯酰胺及其衍生物配制的分散低固相优质轻泥浆，在提高钻进效率和护壁效果方面发挥了巨大的作用。

随着优质轻泥浆的推广，过去很长一段时间采用的就地取材使用一般粘土配浆的作法，已不能适应技术发展的要求，于是粘土粉特别是膨润土粉应运而生，近七、八年来，在地质与石油部门的共同努力下，在全国各地相继发现了许多膨润土产地，如新疆夏子街和最近在吉林刘房子煤矿发现的钠基膨润土，以及山东的高阳土、安邱土、浙江的余杭土、临安土、长兴土，新疆托克逊土、河南的新乡土、内蒙古的兴安土等钙膨润土，经纯碱处理后都具有较高的造浆率。由于造浆土的大量发现和应用，使我国泥浆技术又提高到一个新的水平。

与此同时，在泥浆性能测量仪器方面在原有基础上也渐趋完善。如供现场使用配有旋转粘度计、气压失水仪、过滤式含砂量仪和固相含量测定仪的泥浆箱，以及供研究使用的六速旋转粘度计、高温高压失水仪、泥饼粘附系数测定仪、钻井液润滑性测定仪、粒度分析仪等等都已投入使用，使我国泥浆测试技术，又达到了一个新的高度。

八十年代以来，我国的泥浆技术又有新的突破。腐植酸钾、磺化沥青、羟乙基纤维素、速溶纤维素、生物聚合物等新型泥浆处理剂都相继研究成功。其中HAN型腐植酸类处理剂产品就有十多种。在继续用好优质轻泥浆的同时，近年来又发展了聚丙烯酰胺适度交联液、蒟蒻（魔芋）、田菁、生物聚合物、纤维素等无粘土冲洗液，并开始研究了能降泵压的无粘土冲洗液。一些单位还进行了泡沫泥浆的试验研究。为了配合人造金刚石钻进，各种乳状冲洗液和以松香酸钠、癸二酸下脚料、十二烷基苯磺酸钠及其他具有润滑性能的表面活性剂组成的润滑冲洗液，都得到迅速的推广。在固相含量控制方面，旋流除砂器的研制和应用，也有相应的发展。泥浆及其他冲洗液流变学的研究，也成为当前大家共同关心的课题。

在水泥护孔方面，在经历了一段停滞之后，近十年来又重新为人们所重视。为了克服水泥浆凝固时间长、早期强度低、可灌性差、成功率低等缺点，人们从各个方面进行了探索。其一是研制改变水泥性能的各种添加剂，如速凝早强剂、分散剂（减水剂）、降失水剂、抗污染剂、比重降低剂等，目前已研制出既保证有足够流动度，而凝固时间又相当短的复合速凝剂。它们已成功地用于生产实际，其中有显著降低水灰比又不延长凝固时间的高效分散剂如羧磺酸甲醛高缩合物类、水溶性古马隆树脂磺酸钠等，无论在硅酸盐型或硫铝酸盐型水泥方面都取得了较好的效果。目前，正在试用的FA水泥减重剂，可使水泥浆比重降低到1.25~1.40左右，它的推广使用既提高了堵漏效果，又降低水泥浆的消耗量。这些新型添加剂的使用，再配合水泥灌注工艺的改进，已使常用的硅酸盐型水泥浆堵漏的成功率显著提高，候凝期明显缩短。在不少地质勘探部门已把泥浆和水泥浆并列为对付复杂地层的两种常规武器。

在对普通水泥浆进行改性工作的同时，一些院校和生产单位与工厂协助，研制能更好地满足钻孔注浆要求的新型水泥，经过两三年的努力，终于研制成功了硫铝酸盐型地勘水泥。它具有速凝、早强、微膨胀和抗腐蚀性性能好等一系列优点，几年来经过国内几百个单位的使用证实，这种水泥是很有发展前途的。今后如能在稳定产品性能，降低生产成本和延长使用期限等方面加以提高，将会发挥更大的作用。

在改进注浆材料的同时，通过多年的实践，也成功地总结出一整套的水泥灌注方法。除常规的平衡注浆法以外，根据不同的地层条件，还分别采用分段注浆法、加压注浆法、充填注浆法、网袋注浆法、井口输入压力平衡注浆法、输送器注浆法等等，这些灌注工艺的成功使用，明显地扩大了水泥浆的应用范围，提高了使用成功率。

在测定水泥浆性能仪器的研制方面，近年来已推广使用了凝结时间测定仪、小型压力机和流动度盘等简易仪器外，同时正在

研制模拟孔内温度、压力条件适合于地质钻孔注浆的水泥浆稠化时间测定仪等。

七十年代以来，国内在化学注浆方面，曾使用过脲醛树脂、氰凝浆液、301聚酯等，这些注浆材料虽有不少优点，但由于原料来源不广、成本过高或具有毒性等条件的限制，除脲醛树脂仍然使用外，其余未得到推广。

当前的护壁堵漏工作，已向着综合治理和理论研究同时并重的方向发展。套管、泥浆、水泥、化学浆液，在各自有利的条件下取长补短综合使用，已为人们所采用。特别是粘土、水泥和高分子聚合物交叉使用，互相渗透配成的新型护堵材料，以其独特的优点为人们所重视。采用各种惰性的和活性的充填材料与泥浆、水泥的联合使用，在提高护堵效果方面已获得显著的效果。

为了进一步战胜漏失层，加强漏失层的地质状态、漏失机理、测漏方法的研究，已成为十分迫切的问题。国内一些科研单位、高等院校和从事护壁堵漏的工作者，近年来相继研究成功了多种钻孔测漏仪和流速流向仪，还对漏失层的分类方法及其相应的堵漏措施进行了探讨。

加强对地质勘探钻孔的孔壁稳定机理的研究，是全面搞好护壁工作不可缺少的重要基础。近年来一些部门已开始从总结现场经验入手，结合岩心钻探中既有大量的水敏性地层又有松散破碎无胶结地层的特点，对引起孔壁失稳的各种因素，进行了论证分析，在此基础上概括出一些稳定孔壁的有效措施，特别是把孔内冲洗液的循环压力与地层压力联系起来，利用与地层压力平衡原理有效地克服了漏失和涌水现象，或与岩层侧压力平衡原理，达到了稳定孔壁的目的，这是值得重视和推广的。

回顾建国三十五年来在护壁堵漏和冲洗液方面所取得的成就，是令人欢欣鼓舞的。这些成就为今后更快更好地发展我国的钻探事业，奠定了重要的基础。

但是，与国外一些先进的技术水平相比，我们仍然是有很大差距的。一些关键性问题我们还没有解决好，它会妨碍我国护壁

堵漏技术水平的继续提高。当前存在的主要问题有：

1. 对漏失层和不稳定层的状态与性质研究非常不够，国外常用的动水力学研究地层方法，我们进行得很差。用以研究的测试仪器、机具很少。一些已研制成功的测漏仪和小口径孔径仪还不能有效地指导生产。

2. 在多层漏失的长孔段中找漏辨况难，在既漏又塌的长孔段中处理难，大裂隙和溶洞层堵漏技术不过关。

3. 缺乏有效的防塌防漏的技术手段，特别是先期预告和随机预告手段差。

4. 堵漏剂和防塌剂品种少，局限性大，不能满足各种不同地层情况的需要。

在泥浆与其他冲洗液方面也存在许多需要解决的问题：

1. 增效搬土的研究生产与应用，在国内仍未大力进行；

2. 特别适用于金刚石钻进的无粘土冲洗液的类型仍不完善，生产上尚未大力推广使用；

3. 不分散低固相泥浆需要的选择性絮凝剂品种仍然缺乏，目前所用水解聚丙烯酰胺得不到最佳的选择性絮凝效果；

4. 充气水、充气泡沫泥浆及雾化液在岩心钻探中仍未得到广泛应用；

5. 岩心钻探中泥浆净化与固相控制装置仍然落后，不能满足生产需要；

6. 岩心钻探中泥浆流变学的研究仍有许多工作要做；

7. 结合岩心钻探、特别是金刚石钻进的要求来看，现有照搬石油钻井的泥浆性能测试仪器要作相应的改变；

8. 岩心钻探各种类型地层最合理的冲洗液类型，仍需要研究与探索。

所有这些问题，我们应该争取在较短的时间内加以解决，这是我们当前的使命，也是我们编写这本《钻孔护壁堵漏原理》教材的主要意图。

(二)

当前，国际上正在出现一场新的技术革命。地质勘探工作也是一样，一些技术先进的国家，已经把微型计算机、井下电子眼和弹性波全息术等最新技术应用到泥浆和护壁堵漏方面来。为了加快我国现代化建设的进程，缩短与发达国家在技术上的差距；为了使复杂岩层钻进不再成为钻探工作的障碍，我们应该本着“对外开放”和“洋为中用”的精神，积极引进先进技术，开展对外技术交流，为迎接新的技术革命和振兴我国经济作出应有的贡献。

国外石油钻井行业从五十年代开始就重视井漏机理、防漏方法、漏层测试方法、堵漏材料、堵漏工艺和工具的研究。到七十年代，已经基本解决了堵漏领域内的许多重大问题。在美国，近年来基本上都是采用“平衡钻井”原理来控制井漏或井涌问题，而且具备检测和预告地层压力的有效手段，避免了大量人为因素造成的井漏。对地质因素引起的井漏也能有效地处理。到六十年代末，美国因井漏而停钻五天的情况已属少见。美国现有混合浆液500多种，填料100多种，90%的漏层借助于惰性填料封堵。

近十来年，苏联在堵漏工艺和技术上的成就也相当大。全苏钻井技术科学研究所（ВНИИБТ）根据大量的工作实践，近年来已确定在钻井时与冲洗液漏失作斗争的基本方向：在石油钻井中，小漏地层（ $10-15\text{m}^3/\text{h}$ ）漏失的消除方法靠注入带充填剂的溶液或泥浆；中漏地层（ $40\sim 60\text{m}^3/\text{h}$ ）漏失的消除靠使用带充填剂的速凝混合物进行堵塞，大漏地层（ $>60\text{m}^3/\text{h}$ ）的漏失则由各种以水泥和粘土为主，并带充填剂的堵塞膏来消除，但在膏状物往井眼注入之前一般先注入一段《软塞》。为了隔离灾难性漏失层，ВНИИБТ研制成功一种特殊的弹性套（УПП）装置，它能承受大约5MPa的压力，在几乎所有的情况下成功率达100%。对于有地层水流动时的堵漏工作，他们用一种粘土乳胶液（ГЛС）可以进行成功的隔离，因为这种混合物具有憎水性能和抵抗地层

水的冲蚀能力，可以在井下形成类似橡胶的弹性体。

在地质勘探钻孔堵漏方面，近年来在苏联也进展很快。他们总结出—条经验教训：堵漏工作耗费大量时间是由于在处理各种复杂情况时缺乏可靠的方法和技术手段，而现有的技术手段最明显的缺点是缺乏能满足钻进时基本要求的堵塞材料。因此，他们不遗余力地致力于新型堵塞材料的研究。目前在苏联已经研制成功了多种具有快硬、高强及膨胀性能的特种水泥。这些水泥当水灰比为0.5时，它们的凝固时间是以分和秒来计算的。例如全苏勘探技术和方法研究所（ВИТР）研究成功的《Талцем》和《Та-югцем》两种速凝堵漏水泥，前者初凝时间为3 min，终凝为5 min，后者初凝时间为5min，终凝时间为8~10min。两者水灰比为0.5时，4h的抗压强度分别为42和52MPa，自由线膨胀率为0.3~0.5%，水泥石与砂岩、石灰岩、花岗岩的粘结应力可达4—5MPa。这些堵漏材料是用干粉形式通过输送器送入孔内，靠一套能够起到扫破、搅拌和挤抹作用的孔内工具压到漏失层中。从1980年开始试验以来，共试验了76个漏失段，试验工作是在不同孔径（ $\phi 59—132\text{mm}$ ），不同孔深（30—800m）、不同漏失强度（ $0.2\sim 18\text{m}^3/\text{h}$ ）的条件进行的，其中有69次获得了良好效果。

在研制新型堵漏材料的同时，他们还重视漏失机理、漏失规律和漏层参数计算等理论研究工作。

整个说来，目前国外对付冲洗液漏失的工艺技术有如下几个特点：

1. 着重于预防，特别致力于先期预告和随机预告漏失的研究与实践；
2. 重视漏层地质、漏失机理和测试手段的研究，重视有科学根据地选择堵漏的有效手段；
3. 趋向于综合治理和使用复合填料堵漏；

孔壁稳定问题，国外在石油钻井界一直是很重视的。六十年代以来，美国在控制页岩稳定方面，进行了大量的模拟试验工作，

阐明了页岩的破坏机理及相应的处理措施。近年来还出现一种有助于井眼设计并显示页岩特性的新试验方法。这种方法依靠毛细吮吸时间 (Capillary Suction time) (CST) 的测量和液体与岩屑或孔壁岩石的吸附分析以确定页岩的成分和性状。钻井工作者靠这种方法, 可以对页岩进行分类, 指示对所钻地层的泥浆设计和最优化钻井程序的设计。

在苏联对起下钻过快造成的激动压力对孔壁稳定的影响, 也进行了许多研究和测定工作, 利用数理统计的方法, 找出一些计算激动压力的公式, 通过地面和井下压力计的测量, 发现了激动压力的变化规律。对于影响孔壁稳定的其他因素, 他们也作了不少的分析论证。

国外钻井业泥浆与其他冲洗液的研究与发展规模也是很大的, 有几百家泥浆公司、化学公司或钻井公司为石油钻、水井钻、岩心钻、工程钻等提供大量的泥浆材料, 仅根据“World Oil”杂志定期刊登的世界各国主要泥浆有关公司的钻井液、完井液与修井液商品就有二千多种 (有几百类), 其中如粘土商品达 60 多种, 各种泥浆堵漏材料商品也有 60 多种, 说明其内容之丰富。走向商品化生产这一点也是值得我们学习的。

国外水井钻及金刚石钻探中普遍或较多采用空气钻进与气水混合 (包括泡沫泥浆) 钻进, 以对付漏失层、解决堵塞出水通道问题或为了提高钻进效率等目的, 这一特点也是值得我们重视的。

国外各种无粘土冲洗液、完井液、压裂液的应用比较广泛, 如采用瓜尔胶、生物聚合物、羟乙基纤维素, 海藻胶等作为基本原料。对紊流减阻液也进行了研究。

泥浆性能测试方面, 在石油钻也是比较先进的, 如各种类型的旋转粘度计 (多速至无级调速的粘度计、高温高压旋转粘度计)、高温高压失水仪、润滑仪等提供科研与生产使用。各种粘土、泥浆与泥浆滤液及处理剂的物理化学分析鉴定仪器也提供使用。

固控设备除泥浆筛、除砂器、除泥器外, 还使用了离心分离