

石油高职高专规划教材

保护油气层技术

廖作才 熊海灵 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油高职高专规划教材

保护油气层技术

廖作才 熊海灵 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从岩心分析技术入手,详细阐述了油气层损害的室内评价、油气层损害机理,系统介绍了钻井、完井和油田开发过程中的保护油气层技术,并在此基础上介绍了油气层损害的矿场评价技术和国外保护油气层技术发展新动向。本书在阐述机理的同时,力求理论联系实际,通过现场实例使读者更易理解。

本书可作为高职院校石油工程、油田应用化学等专业的教材,也可供现场科研技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

保护油气层技术/廖作才,熊海灵主编.

北京:石油工业出版社,2012.10

(石油高职高专规划教材)

ISBN 978-7-5021-9254-9

I. 保…

II. ①廖…②熊

III. ①油层保护-高等职业教育-教材

②气层保护-高等职业教育-教材

IV. TE258

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第203365号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:10

字数:253千字

定价:18.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

油田生产涉及众多密切相关的专业。一项具体的施工作业必须多部门通力协作,并进行有效监督和管理,才能防止事故的发生,进而取得良好的预期效果。保护油气层技术是一门涉及系统方案设计、试验技术、现场施工及评价、储层预测的综合技术学科。它综合运用了石油地质、油层物理、渗流力学、测井解释、油田化学、钻井工程、采油工程、提高采收率技术等方面的成果和专业知 识,应用现有技术手段对生产过程中典型的油层污染进行归类 and 机理剖析,寻求适当的作业方案 and 对策,以便获得最佳采收率与最大经济效益。

作为专业课,本教材在内容选取上,充分反映了现代油田生产的特点,包含了主要生产部门和环节,体现了现代生产工艺水平,突出了学生职业能力的培养。同时,本教材将理论与技能相结合,难易适度,符合先进性、科学性和实用性的设计理念。

本书由克拉玛依职业技术学院廖作才、天津工程职业技术学院熊海灵担任主编,辽河石油职业技术学院黄娅萍、大庆职业学院王岚担任副主编。渤海石油职业技术学院的崔树清和辽河石油职业技术学院张忠辉参与了部分章节的编写。具体分工情况如下:第一章、第四章由廖作才、熊海灵编写,第二章、第八章由黄娅萍编写,第三章由崔树清编写,第五章由张忠辉编写,第六章、第九章由熊海灵编写,第七章由王岚编写。

本书在编写过程中,得到了各参与院校教务处及院系相关领导的大力支持,在此表示感谢。教材中的一些章节引用了有关参考文献的部分内容和图表,在此也向这些作者表示诚挚的感谢。全书由廖作才统稿,熊海灵提供了所有章节的思考题。

由于编者的经验不足,水平有限,书中如有错误和不妥之处,敬请批评指正。

编者

2012年5月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 国内外保护油气层技术发展概况.....	1
第二节 保护油气层技术发展新动向.....	3
思考题.....	7
第二章 岩心分析	8
第一节 岩心分析概述.....	8
第二节 岩心分析技术及其应用	12
思考题	20
第三章 油气层损害的室内评价	21
第一节 室内评价理论及方案	21
第二节 常用油气层敏感性评价方法	23
第三节 工作液对油气层的损害评价	32
第四节 储层敏感性预测技术	38
思考题	41
第四章 油气层损害机理	42
第一节 油气层自身潜在的损害因素	42
第二节 外因作用下引起的油气层损害	47
思考题	53
第五章 钻井过程中的保护油气层技术	54
第一节 钻井过程中造成油气层损害原因分析	54
第二节 保护油气层的钻井液技术	57
第三节 保护油气层的钻井工艺技术	67
第四节 保护油气层的固井技术	72
思考题	75
第六章 完井过程中的保护油气层技术	76
第一节 完井方法及优选	76
第二节 射孔完井的保护油气层技术	87
第三节 防砂完井的保护油气层技术	97
第四节 试油过程中的保护油气层技术.....	101
思考题.....	107
第七章 油田开发过程中的保护油气层技术	109
第一节 采油中的保护油气层技术.....	109

第二节	注水中的保护油气层技术	111
第三节	增产措施中的保护油气层技术	114
第四节	提高采收率措施中的保护油气层技术	127
第五节	修井中的油气层保护技术	135
	思考题	138
第八章	油气层损害的矿场评价	139
第一节	试井评价	140
第二节	油气井产量递减曲线分析	141
第三节	油气层损害的测井评价	142
第四节	油气层损害的评价参数	148
	思考题	152
	参考文献	153

第一章 绪 论

油气井作业的目的是形成油气流动通道，然而在钻井、完井、井下作业和储层改造、提高采收率过程中，可能造成油气层渗透率下降。这种造成油气层渗透率下降的现象，通称为油气层损害。油气层损害一词来自英文“Formation Damage”，因此，油气层损害也可译为“地层损害”、“储层损害”或“地层伤害”。

在油气藏开采的各个阶段（开采、钻井、水力压裂和修井作业等）都可以发生。油气层损害往往使人们付出高昂的代价。Bennion（1999）指出：由于油气层损害的不可见性，会不可避免地且不可控制地导致油气产量难以估量的、不确切的下降。油气层损害评价、控制和补救是解决油气藏有效开采最重要的课题之一。油气层损害具体包括渗透率的损害、井壁堵塞和油井产能变差。Porter（1989）指出：油气层损害未必可逆；进入孔隙介质中的东西未必出得来，并称这种现象为反向漏斗效应。因此，最好是避免油气层损害发生而不是力求将其治好。实验和分析技术、建模及模拟方法有助于了解、诊断、评价、预防、治理和控制油气藏中的油气层损害问题。

油气层损害研究成果是认识和模拟油气层损害的有效手段，它可以用来对岩石、流体、颗粒间的相互作用以及岩石形变引起的各种作用进行模型辅助分析，并对制定控制油气藏油气层损害开采策略进行科学地指导。

过去所进行的很多实验和理论研究的目的是为了了解控制油气层损害的因素和机理。虽然从这些研究中得到了不同结论，但是还没有体现统一的理论和方法。

Civan（1996）的解释是：油气层损害模型表示遭受各种蚀变作用的孔隙介质与传输流体能力的动态关系。油气层损害建模一直受到人们的关注，虽然现在提出的模型很多，但这些模型不能普遍适用。然而，对各种建模方法的分析表明，这些模型都有共同的基础。虽然以井为基础的模拟一般所利用的理论分析是可取的和准确的，但是宏观油气层损害模拟通常依赖于实验研究得出的一些直觉和经验推断。

进行油气层损害研究目的是：（1）通过实验室和现场试验了解各种蚀变作用；（2）通过对基本理论和作用的描述建立数学模型；（3）对油气层潜在损害的预防和治理进行优化；（4）制定控制油气层损害的策略和补救方法。

第一节 国内外保护油气层技术发展概况

一、国外保护油气层技术发展概况

保护油气层工作在国外起步较早。20世纪30年代，油气层受损的问题就引起了美国等一些产油大国石油公司的注意。50年代开始机理研究，至70年代中期，保护油气层影响加大。1954年，美国石油工程师学会（SPE）召开了第一届控制地层损害国际会议，此后每

两年召开一次，国际保护油气层研究工作从此纳入了正规化的发展轨道。根据历届会议发表的论文内容和数量统计，国际保护油气层技术的发展大致可分为三个阶段。

(1) 20世纪70年代前，保护油气层技术以钻井液、完井液基本成分损害特征为主要研究内容。这个阶段的机理研究工作进展缓慢，只限于经验性和定性的阶段；评价油气层损害的方法主要以岩心流动试验为基础；钻井液、完井液技术发展较快。深井钻井液、石膏钻井液、氯化钾钻井液及乳化钻井液都是这个阶段发展起来的。

(2) 20世纪80年代是以机理性研究兴起为标志的发展阶段。这个阶段在储集层的测试技术和方法、损害机理以及预防和处理油气层损害的工艺技术等方面都取得了很大的进展，主要表现为：①对油气层损害机理作了较为系统、全面的研究，并开始从储集层本身的性质来研究油气层损害；②开始应用物理模型和数学模型研究损害机理；③研制了不同类型的动态模拟装置；④相继发展了近平衡压力钻井、负压钻井和负压射孔等新技术；⑤电镜扫描成为研究损害机理的重要手段。

(3) 20世纪90年代以来是各项保护油气层技术大发展阶段。这个阶段，机理性、智能性分析，预测、评价技术以及钻井、完井、采油各个作业环节中的保护油气层工作都得到了突飞猛进的发展，主要表现为：①机理分析已由定性、半定量向着完全定量发展；②逐步利用数值模拟和人工智能专家系统实现油气层损害的机理性预测和评价；③在岩相分析技术方面，发展和应用了矿物学分析技术、X—射线荧光分析技术、CT扫描技术、岩相图像分析等；④防止油气层损害的新措施不断出现；⑤三次采油和水平井油气层保护技术兴起。

目前，国外保护油气层主要进行以下几方面的研究：①模拟地层条件下的油气层损害程度和机理研究；②地层孔隙压力和破裂压力的准确预测与随钻监测研究；③储层岩性和物性的预测与随钻监测研究；④研究保护油气效果好、适用范围广、负面影响小的钻井液、完井液及相应的添加剂；⑤进一步完善和提高射孔、储层改造和测试联作技术；⑥计算机在保护油气层技术中的应用研究。

二、国内保护油气层技术发展状况

我国的保护油气层工作起步较晚。真正有意识地将保护油气层提到石油系统的工作日程上是在20世纪80年代。经过“七五”、“八五”的科技攻关，已取得了巨大进展，尤其是90年代以来发展很快，获得了明显的经济效益。

(1) 油气层损害分析评价技术。这项技术在“八五”和“九五”期间取得了很大进展，主要表现在：①室内评价技术更加符合油气藏实际条件；②多种评价资料的综合解释及评价方法进一步优化；③油气层损害微观机理的深化与量化；④宏观研究领域的拓宽；⑤机理性分析保护数据库和知识库的建立；⑥损害机理研究逐步向数值模拟和智能化软件技术方向发展；⑦机理分析为油气服务的趋势加强。

(2) 优化钻井液、完井液保护油气层技术。目前我国针对七种油气藏特点，已经形成水基、油基和气体三大类近百种配方，已基本满足了各类油气藏保护油气层的需要。

(3) 钻井屏蔽暂堵技术。钻井屏蔽暂堵技术20世纪90年代初由我国率先研制成功，现已在全国各油区推广应用，取得了较好的经济效益。

(4) 完井射孔作业中的保护油气层技术。20世纪90年代以来，我国射孔技术迅速发展，开展了负压射孔及优质射孔液的现场试验。目前，射孔优化设计、油管输送式射孔、射孔测试联作技术已大量应用并实现了国产化。

第二节 保护油气层技术发展新动向

保护油气层技术是提高石油勘探开发效益进程中带有战略意义的关键技术之一。国外油公司十分重视此项技术的发展，多年来投入大量资金从事此项技术深层次的研究。现将国外保护油气层技术发展的新动向归纳为以下十四个方面。

一、油气层损害机理的研究

近年来，外国专家对油气层损害机理进行了更为深入的系统研究。Giorgi 通过模拟条件装置来研究损害机理，确定损害油气层的定量指标。他把油气层损害机理归纳为 22 项：(1) 润湿性改变；(2) 水锁；(3) 凝析气层液锁；(4) 气锥或水柱；(5) 毛管压力的改变；(6) 粘土膨胀；(7) 微粒运移；(8) 伊利石云母破碎解体；(9) 无机盐沉淀；(10) 注CO₂ 导致无机盐沉淀；(11) 酸化引起的沉淀；(12) 碳酸盐溶解沉淀；(13) 外来固相的堵塞；(14) 油气层固相物堵塞；(15) 力学方面的损害；(16) 酸渣；(17) 蜡堵；(18) 乳状液堵塞；(19) 细菌损害；(20) 沥青沉淀；(21) 增加水的饱和度；(22) 气井增加油的饱和度。

Gray 等开始研究应力和变形对油气层损害的影响。其他学者还对润湿性、pH 值、含盐量等因素对油气层损害的影响进行了深入研究。

近年来，机理研究已向数值模拟技术方向发展，即根据物理模型实验得出的结果，建立数学模型来进行油气层损害机理的研究。应用此方法研究较多的是模拟微粒在孔隙中运移，利用斯托克动力学理论，分析微粒在不同流场和孔隙结构条件下的沉积规律，从而搞清楚微粒堵塞孔喉的机理。此外，在控砂、沥青和重质有机物沉淀、润湿性转变对油气层的损害、水—岩石界面损害地层、注水防垢预测等方面的研究工作也有新进展。

二、油气层损害评价方法的创新

近年来，国外已将油藏孔隙系统的图像分析、CT 扫描技术、X 射线照相扫描技术、红外光谱分析、傅里叶变换红外光谱分析、核磁共振成像技术、非晶态矿物和纳米矿物学研究、环境扫描电镜的应用等新技术用于研究油气层损害原因和损害程度，模拟井下状况的动态流动试验仪已广泛用来评价各种工作液对油气层的损害，并依据试验结果进行各种工作液的优选和设计。

三、致密气层保护技术

美国石油、能源部门和天然气研究所协作针对致密气层提出钻井、完井及增产措施中的保护气层系列配套技术 (DCS)，取得较好效果。此套系列技术包括以下三项技术：

(1) 钻井过程采用气体类流体 (包括空气、雾、泡沫和充气钻井液) 进行欠平衡压力钻井。钻进中，采用冲击式气锤和相应的钻头，可以在气体中测试的电磁式 MWD 仪，以及控制定向井与水平井轨迹的设备和工具。

(2) 采用注水泥射孔完井或裸眼完井，并采用跨式双封隔器。

(3) 增产措施中采用二氧化碳加砂和氮气加砂作为压裂液。

四、稠油油藏的油气层保护技术

稠油热采过程中的保护油气层问题从 20 世纪 90 年代开始得到人们更多的关注。目前，主要是利用实验室岩心试验和各种模拟试验，研究稠油热采过程中温度对油气层损害的影响以及损害机理、损害特征等。研究表明，矿物溶解、矿物转变、润湿性转变和乳化物形成是稠油热采过程中最主要的油气损害原因。同时，还提出了温敏这一新概念。如在一定温度下，高岭石和石英反应生成水敏性粘土矿物——蒙皂石，当溶解的矿物向油藏深处运移时，随温度下降可在油层沉淀，形成结垢。

模拟研究表明，颗粒为中性润湿时，地层损害最为严重。热采过程中，当热流体注入油藏驱替原油时，由于热分散作用，逐渐变热的流体将和地层微粒接触，润湿性发生转变。当经过中间润湿状态时，颗粒往往集中于界面，地层损害最为严重。因此，油藏内地温梯度前缘的推进会形成严重损害带。热采过程中，地层损害防护措施有以下六种：

(1) 蒸汽开采时，注入蒸汽的 pH 值控制在 8~9，温度控制在 50~200℃ 为最佳条件。此时粘土膨胀率最低，矿物溶解量最小。

(2) 注蒸汽之前，需要对凝析液与地层水的配伍性进行研究，另外必须对锅炉给水进行预处理。

(3) 向锅炉给水适当添加一些流动水源（井水、湖水、循环水等），有助于控制油藏中矿物的反应。

(4) 采用合理的防砂技术。因为大多数稠油油藏都是松散砂岩，所以稠油防砂技术显得尤为重要。

(5) 可将高干度蒸汽注入地层，使其部分焦化和就地固结砂层，又不致引起油气层渗透率的过分降低。

(6) 实施热采之前，必须进行模拟试验及岩心驱替试验，以帮助确定最佳注入浓度、最佳 pH 值和离子强度等。

五、低渗透油藏的油气层保护

低渗透油藏具有储层物性差、敏感性强等特点。其油气层保护技术除了优化钻井液与完井液以外，还有应用负压钻井技术降低过平衡压力钻井时钻井液对产层的各种损害，以及屏蔽暂堵技术和新型地层处理技术。新型地层处理技术主要有高砂比压裂、高能气体压裂、深度水力压裂、复合压裂和干式压裂等。

深度水力压裂是强化开发低渗透油气藏最具前景的工艺措施，目前在美国、加拿大和北美地区广泛采用，效果很好。干式压裂是国外采用的不伤害地层的新技术。这种技术关键是采用二氧化碳混砂机将支撑剂混入液态二氧化碳流，不需要任何传统的携砂液携砂，因而不会有伤害性流体进入产层，对水敏性地层几乎不会造成可能的伤害。美国对这项技术进行了对比试验，结果表明，用二氧化碳加砂处理，单井产量是用氮气处理井的两倍、是用泡沫处理井的四倍，增产效果相当明显。砂岩酸是美国近年开发的一种新型酸液，主要用于砂岩储集层酸化作业。它采用磷酸络合物取代盐酸水解氟化盐，这种络合物有五个氢离子，会在不同条件下分解成“Hv”酸，这种酸与氢氟化铵混合后便生成磷铵盐和氢氟酸，即砂岩酸。其特点是：反应速度慢，粘土溶解度小，石英溶解能力强，不利影响小，腐蚀性低，安全性

高，适于各种渗透性地层改造。目前，砂岩酸在国外已大量投入使用，并取得了较好的增产效果。我国低渗油气藏大多是砂岩油气藏，所以砂岩酸的应用有着广阔的前景。

六、保护裂缝性油气层的暂堵技术

裂缝性油气层与孔隙型油气层区别在于裂缝宽度远大于孔隙直径。一般固体颗粒（如膨润土）不易在裂缝进口处形成泥饼，造成油气层受到严重损害。根据裂缝性油气层的特点，国外发展起一种使用纤维状颗粒来防止裂缝性油层损害的新技术。由于纤维颗粒强度差，易变形，在泥浆中以十几个颗粒交织成絮凝团，一旦吸附在裂缝表面，一个纤维状絮凝团块与裂缝表面就有十几到几十个吸附点，它们很容易在裂缝表面架桥，从而有效地防止钻井液侵入。实验表明堵塞深度只有 1mm 深，其他深度的裂缝都保持原始状态。被堵塞部分，在油井投产时，利用反方向压差自动解堵。

七、水平井保护油气层技术

由于水平井与垂直井在钻井时所用的工艺不同，油层暴露的程度也不同，还由于油层本身的垂直和水平渗透率也不一样，这些都使得水平井的保护油气层技术措施与垂直井不完全一样。水平井的油气层损害分布和程度是研究的关键。因为损害分布既影响今后的酸化设计，也影响水平井的采油速度。国外在这方面已做了大量工作，特别是设计了模拟井下钻具转动和偏心的实验设备，试图搞清楚是什么因素在控制着水平井段的损害分布损害程度，从而提出有效的预防措施，其研究结果还可以为水平井酸化设计提供可靠的依据。

八、超平衡射孔技术

此项新型射孔技术使用射孔枪，在射孔前先对井中流体加压，使井筒压力等于或大于地层破裂压力。通常射孔瞬间井筒压力为 56.2MPa，加压液、气体以十分高的速率进入射孔孔眼，在地层中产生裂缝，使射孔效率达到 100%。此项技术采用射孔与解堵增产联作。其效果大大优于油管传输负压射孔。

九、硅酸盐钻井完井液

硅酸盐钻井完井液能够稳定各种复杂地层，具有类似于油基钻井液的优良抑制稳定性，但也须通过聚合醇和低价无机盐的复配等来强化其整体性能。普遍使用的硅酸钠产品溶液模数为 2.1。固相质量分数为 42%，密度为 1.5kg/L。典型的硅酸盐钻井完井液的 pH 值控制在 11.8 ~ 12.3 之间，硅酸盐钻井完井液替代了油包水钻井完井液和硫酸钾钻井完井液。有的科学工作者用 30% 硅酸钾溶液（有效质量分数为 30%，模数为 2.5，pH 值为 11.0）加入 3 ~ 6kg/m³ 黄原胶和 1 ~ 3kg/m³ CMC 配成无固相钻井完井液，其无毒且抑制性强，抗温性好，滤失量低。

硅酸盐尺寸分布宽，通过吸附扩散等途径可堵塞井壁裂缝、孔洞，从而可抑制泥页岩膨胀和分散，在 pH 值小于 9 时，硅酸根与孔隙水相遇立即变成硅酸盐凝胶堵塞裂缝孔隙。硅酸盐与粘土矿物表面有强烈的超分子化学吸附，可使粘土矿物颗粒胶结成牢固的整体。硅酸盐与多数处理剂具有良好的配伍性，如 PHP、SMP、XY-27 等。自 1998 年起，加拿大西部、英国和哥伦比亚在近 40 口大位移定向井和水平井、高温高压复杂深井中应用了强抑制

性硅酸钠或硅酸钾环保钻井液体系，效果良好。近来，有关人员做了大量的保护油气层试验，证实硅酸盐钻井完井液对岩心的损害主要发生在岩心的开端 5mm 处，对采油产量的影响可忽略不计。尽管有的科学工作者指出：该体系存在流变性较难调整，摩阻力较大、处理剂配伍差等缺陷。但笔者认为，可以从改善与调整配方、研制开发复合硅酸盐和硅磺聚合物等方面进行试验研究，以进一步优化该体系的整体性能。该体系整体成本不高，且具有保护油气层和环保的优点，应大力推广使用。

十、全油基钻井完井液

油基钻井完井液在防塌、防卡、防漏等方面能起到良好作用，可抗盐层粘土及粘土污染，高温 200℃ 以上，防止粘土膨胀保持井壁稳定，适用于水平井、大位移井钻井。目前油基钻井完井液已发展到全油基钻井完井液，其优点为：剪切稀释性能良好；不形成乳状液，乳化稳定性好，携屑能力强，井眼清洁；化学剂成本低，密度可保持在 0.8kg/L 左右，可提高钻速；有良好的润滑性；保护油气层；使用低毒矿物油原料（无芳香烃或低含芳香烃，无毒或低毒），保护环境，不存在水相，无活度问题；维护处理简单。全油基钻井完井液从环保考虑使用低毒矿物油，用低剪切和低温条件下起作用的有机土调整悬浮性能，也常采用少量聚合物提高屈服值，必要时，可用反絮凝剂大幅度降低粘度，常应用低粘的阴离子纤维素或胶体颗粒状的褐煤控制滤失。利用表面活性剂使体系中水乳化，并使体系中所有固相保持亲油状态，从而控制水的污染。全油基钻井完井液如果能够多口井重复使用，即可减少由于其成本较高与劳动条件较差所带来的一系列问题。

十一、合成基钻井完井液

合成基钻井完井液是以人工合成的有机物为连续相，盐水为分散相，加上乳化剂、降滤失剂、流型改性剂等形成的分散体系。

合成基流体共有两代产品，第一代酯基（Ester）、醚基（Ether）、聚 α -烯烃、缩醛（Acetal）；第二代为线型 α -烯烃、线型 α -烯烃同分异构体、线型石蜡（LP）。两代差异是：第二代流体成本低、环境配伍性略差，但还符合标准，粘度略低，其他技术指标与第一代相似。两代合成基的基本指导思想是将油基液中的基础油换成植物油或人工合成油，它与矿物油物理特点想似，配制的钻井完井液体系低毒或无毒，不论在喜氧或厌氧条件下都可以降解。

合成基钻井完井液的主要优点为：外相不含或含少量芳香烃，对环境无损害；其闪点较矿物油高，发生火灾和爆炸的可能性小；其凝固点比矿物油低，可在寒冷地区使用；其液相粘度比矿物油高；较高的热稳定性，在 200℃ 以下是稳定的，在升温时能满足携带岩屑的需要，低温时仍具有可泵性，易分散于海水中，钻屑清除容易，较强的抑制性和井眼稳定性，较好的润滑性，适用于水平井、大斜度井和多底井，具有较易控和稳定的常规钻井液性能，节省了应用油基钻井液要处理钻屑和环境污染的费用，也消除了因使用水基钻井液不满足性能要求而损失的钻机时间，保护油层效果良好。1994 年，Growcock 等指出，酯已通过毒性全面测试，达到环境要求。厌氧降解是酯基钻井液生物降解的主要方式，研究表明，酯基钻井液具有优良的厌氧降解能力。大部分合成基液挥发性比矿物油（0.026%，90℃）小得多，且对皮肤和眼睛无刺激作用，易被作业者接受。

十二、泥浆转化为水泥浆技术

泥浆转化为水泥浆技术是在钻井结束后，通过一定技术措施，直接把环空内的泥浆和井壁表面的泥饼转化为可封固井眼并能支撑套管的胶结材料。由于转化的泥浆与钻井液和泥饼的相容性好，不仅可以减少或消除顶替效率不充分等问题，而且还能降低固井成本，加强环境保护。因此，该技术已成为目前钻井和固井领域最具吸引力的研究方向之一。目前，泥浆转化为水泥浆的主要作法是，利用高炉矿渣作为胶结剂，通过向完井泥浆中加入磨细的高炉矿渣和激活剂，形成胶质的矿渣浆代替传统的波特兰水泥进行固井作业。高炉矿渣的主要组分是硅酸钙（镁）和硅铝酸钙（镁），化学成分属 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 系统，其物理结构主要由玻璃相组成，因此添加适量的化学激活或热激活物质，能发生水化反应形成胶凝体，增加抗压强度。实验表明，聚合物—铵盐泥浆、海水聚合物泥浆、正电胶泥浆等经处理后均可转化为水泥浆。其稠化时间、抗压强度等都能达到固井要求。

十三、新型轻质碳纤维复合钻杆

美国能源部研制开发出了新型轻质碳纤维复合钻杆，并在美国俄克拉荷马州的一口水平气井中完成了试验。该钻杆由石墨纤维制成，具体制造工艺是：在一个模具心轴的周围敷以环氧树脂。待钻杆成形后，抽出中间的模具心轴，进一步加工，最后在其表面涂敷耐磨材料。

该钻杆具有通用性和很高的强度，且比钢质钻杆柔性更强，非常适于老井侧钻、水平井钻进，能大幅度降低成本，延长气井寿命。该钻杆在非常坚硬的研磨性很强的地层，采用气动震击钻井，测试其疲劳寿命和机械强度，1周后，所有钻杆无磨损迹象。该钻杆在强研磨性地层的耐用性为相似地层的钻井增添了一种可选方案。

目前，碳纤维复合钻杆的价格是普通钻杆的3倍，但在水平井钻井时连续弯曲状态下，并不会像普通钻杆易出现裂纹或者磨损。下一代碳纤维复合钻杆的研制，将包括在177.8mm钻杆中嵌入一条数据传输线，实现井下数据的实时传送，从而形成智能钻井系统。

十四、油气层损害与控制智能化计算机软件系统的开发

钻井、固井、完井、射孔、试油、酸化、压裂等各项作业环节都涉及油气层损害，都要采取保护油气层技术。不同地区、不同层位、不同作业环节中不同油气层损害的诊断、预防、保护和处理措施也不相同。近几年来，国外已开始使用计算机处理和管理大量油气层信息。建立保护油气层模型，进行油气层损害的识别、诊断、评价、预防及处理，形成了油气层损害与控制智能化计算机软件系统。

思 考 题

1. 什么是地层损害？
2. 研究地层损害的目的是什么？
3. 全油基钻井完井液的优点是什么？
4. 什么叫合成基钻井完井液？其优点是什么？
5. 什么是新型轻质碳纤维复合钻杆？有何特点？

第二章 岩心分析

岩心分析是认识油气层地质特征的必要手段，油气层的敏感性评价、损害机理的研究、油气层损害的综合诊断、保护油气层技术方案的设计都必须建立在岩心分析基础之上。所以，岩心分析是保护油气层技术系列中不可缺少的重要组成部分，也是保护油气层技术这一系列工程的起始点。储层敏感性评价即预测储层潜在的损害因素，这是各类油井工程设计的基础。正确的作法是，在开发一个油田之前，从探井开始，就应该取得岩心，对储层敏感性进行系统评价，通过对油层损害机理的研究，提示关于损害的一般规律。首先要弄清油层潜在损害受哪些敏感性矿物的控制，地层损害的范围和类型取决于胶结物的性质和胶结程度以及粘土矿物的数量、所在位置和成因。因此了解粘土矿物的组成及膨胀机理是非常有必要的。

第一节 岩心分析概述

一、岩心分析的概念

岩心分析的方法很多，如使用偏光显微镜、阴极发光显微镜、电子显微镜、电子探针等仪器进行分析，利用岩心的差热及热重、紫外光谱，红外光谱进行分析，此外，还有核磁共振、薄片染色微化分析等等。但由于岩石是矿物的集合体，除了可以对矿物的组分进行鉴定外，还可以对矿物的形态、大小、相互排列关系以及孔隙类型、形态、大小、面孔率、孔喉配位关系等进行分析研究。总之，岩心分析就是对岩石的组成及结构进行分析。

二、岩心分析的目的意义

1. 岩心分析的目的

- (1) 全面认识油气层的岩石物理性质及岩石中敏感性矿物的类型、产状、含量及分布特点；
- (2) 确定油气层潜在损害类型、程度及原因；
- (3) 为各项作业中保护油气层工程方案设计提供依据和建议。

2. 岩心分析的意义

保护油气层技术的研究与实践表明，油气层地质研究是保护油气技术的基础工作，而岩心分析在油气地质研究中具有重要作用。

油气层地质研究的目的是，准确地认识油气层的初始状态及钻开油气层后油气层对环境变化的响应，即油气层潜在损害类型及程度。其内容包括六个方面：

- (1) 矿物性质，特别是敏感性矿物的类型、产状和含量；
- (2) 渗流多孔介质的性质，如孔隙度、渗透率、裂隙发育程度、孔隙及喉道的大小、形态、分布和连通性；
- (3) 岩石表面性质，如比表面、润湿性等；
- (4) 地层流体性质，包括油、气、水的组成，高压物性、析蜡点、凝固点、原油酸值等；
- (5) 油气层所处环境，考虑内部环境和外部环境两个方面；
- (6) 矿物、渗流介质、地层流体对环境变化的敏感性及可能的损害趋势和后果。

其中，矿物性质及渗流多孔介质的特性主要是通过岩心分析获得，从而体现了岩心分析在油气地质研究中的核心作用。图 2-1 说明了六项内容之间的相互联系，最终应指明潜在油气层损害因素、预测敏感性，并有针对性地提出施工建议。

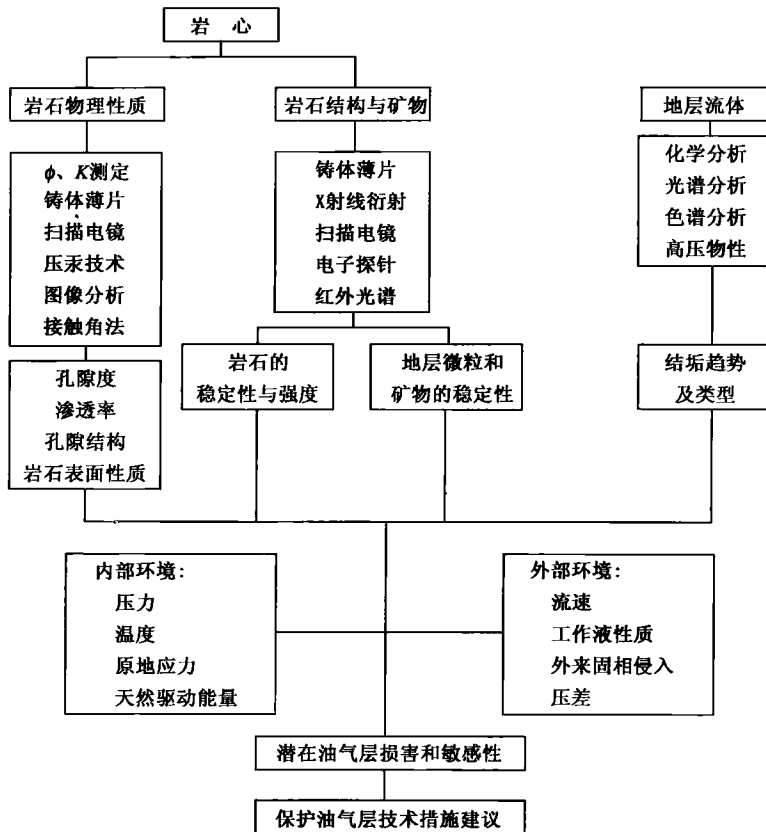


图 2-1 保护油气技术中油气层地质研究的内容及岩心分析的作用

岩心分析工作可以分为三个阶段：(1) 岩心、孔隙类型流体和流动性能表征；(2) 岩石物理模型的建立；(3) 用不同方法检验油层描述，如图 2-2 所示。

还应指出，室内敏感性评价和工作液筛选使用的岩心数量有限，不可能全部考虑油气层物性及敏感性矿物所表现出来的各种复杂情况，岩心分析则能够确定某一块实验岩样在整个油气层中的代表性，进而可通过为数不多的实验结果，建立油气层敏感性的整体轮廓，指导保护油气层工作液的研制和优选。

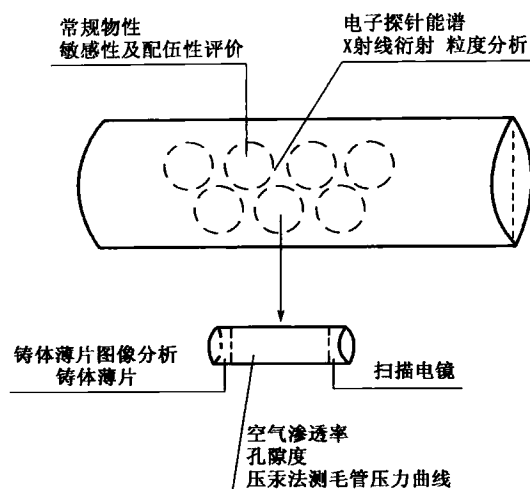


图 2-2 岩心分析取样示意图

三、岩心分析的内容

岩心分析是指利用各种仪器设备来观测和分析岩心一切特性的系列技术。岩心是地下岩石（层）的一部分，所以岩心分析是获取地下岩石信息的十分重要的手段。表 2-1 给出了保护油气层研究中岩心分析的内容及相应的技术方法。应用中要根据具体的油气层特点进行选择分析，做到既能抓住主要矛盾，解决实际问题，又要经济实用，注意发挥不同技术的优点，配套实施。

油层特征是油层伤害、解释实验室和现场结果的最基本的信息。代表地层信息的岩心一般可以从以下四个方面来进行确定：

- (1) 微观尺度数据，包括孔隙及颗粒的大小和分布、孔喉半径、岩性。
- (2) (宏观) 岩心尺度数据，包括渗透率、孔隙度、饱和度和润湿性。
- (3) (大型) 模拟软件网格块数据，包括电缆测井、地震数据等。
- (4) (巨型) 储层尺度数据，包括不稳定试井、地质模型等。

四、取样要求

岩心分析的样品可以来自全尺寸成形的岩心，也可以是井壁取心或钻屑。经验表明，钻屑的代表性很差，故通常使用成形岩心，而且多个实验项目可以进行配套分析，便于找出岩石各种参数之间的内在联系。

孔隙结构、岩石结构与矿物的测定要在了解油气层岩性、物性、含油气性、电性的基础上，有重点地进行选样分析。

铸体薄片的样品应能包括油气层剖面上所有岩石性质的基本情况，如粒度、颜色、胶结程度、结核、裂缝、针孔、含油级别等，样品间距 1~5 块/m，必要时加密。X 射线衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 分析样品的密度大约为铸体薄片的 1/3~1/2，对油气层要加密，水层及夹层进行控制性分析。压汞分析的岩样，对于一个油组（或厚油层），每个渗透率级别至少有 3~5 条毛管压力曲线，最后可根据物性分布求取该油组的平均毛管压力曲线。

表 2-1 岩心分析揭示的内容及所用的方法

		内 容		方 法	
岩石物理性质	常规物性	孔隙度	常规条件	总孔隙度、连通孔隙度	气测法、煤矿油饱和法和孔隙度仪
			模拟围压	总孔隙度	CMS-300 全自动岩心分析仪
		渗透率	空气渗透率、煤油渗透率、地层水渗透率；水平渗透率、垂直渗透率、径向渗透率、全直径岩心渗透率；模拟围压渗透率		渗透率仪、CMS-300 全自动岩心分析仪
		比表面			压汞或等温吸附法
		相渗透率	气—水、油—气、气—油—水		稳态法、不稳态法
		润湿性	油湿、水湿、中间润湿		接触角测量、阿莫特（自吸入）法、离心机法毛管压力曲线测定
	孔隙结构	孔隙—喉道	类型、大小、形态、连通性、分布		铸体薄片、图像分析、扫描电镜（SEM）、X 射线衍射（XRD）、CT 扫描、NMR
		孔喉	大小、分布		压汞法、离心机法测定毛管压力曲线
岩石结构与矿物	骨架颗粒	石英、长石岩屑、云母	粒度大小、分布		筛析法、薄片粒度图像分析
			接触关系、成分、含量、成岩变化		铸体薄片、阴极发光、XRD 全岩分析、红外光谱
	填隙物	粘土矿物	产状		铸体薄片、SEM
			类型、成分、含量		铸体薄片、XRD、红外光谱、沉降分离法、电子探针或能谱
		非粘土矿物	产状		岩石薄片、SEM
			类型、成分、含量		薄片染色、XRD 全岩分析、红外光谱、碳酸盐含量测定

如图 2-2 所示，最好在同一段岩心上取足配套分析的柱塞。铸体薄片、扫描电镜、压汞分样需在同一柱塞上进行，这有利于建立孔隙分布与孔喉分布参数间的关系，以及孔隙结构与岩性、物性、粘土矿物之间的联系。XRD 分析可以用碎样，但应清除被钻井液污染的部分，否则会干扰实验结果。电子探针分析可用其他柱塞端部，这样在所有分析项目完成后，就能指出潜在的损害类型及原因，预测不同渗透率级别（储层类型）的油气层的敏感程度，正确解释敏感性评价实验结果。