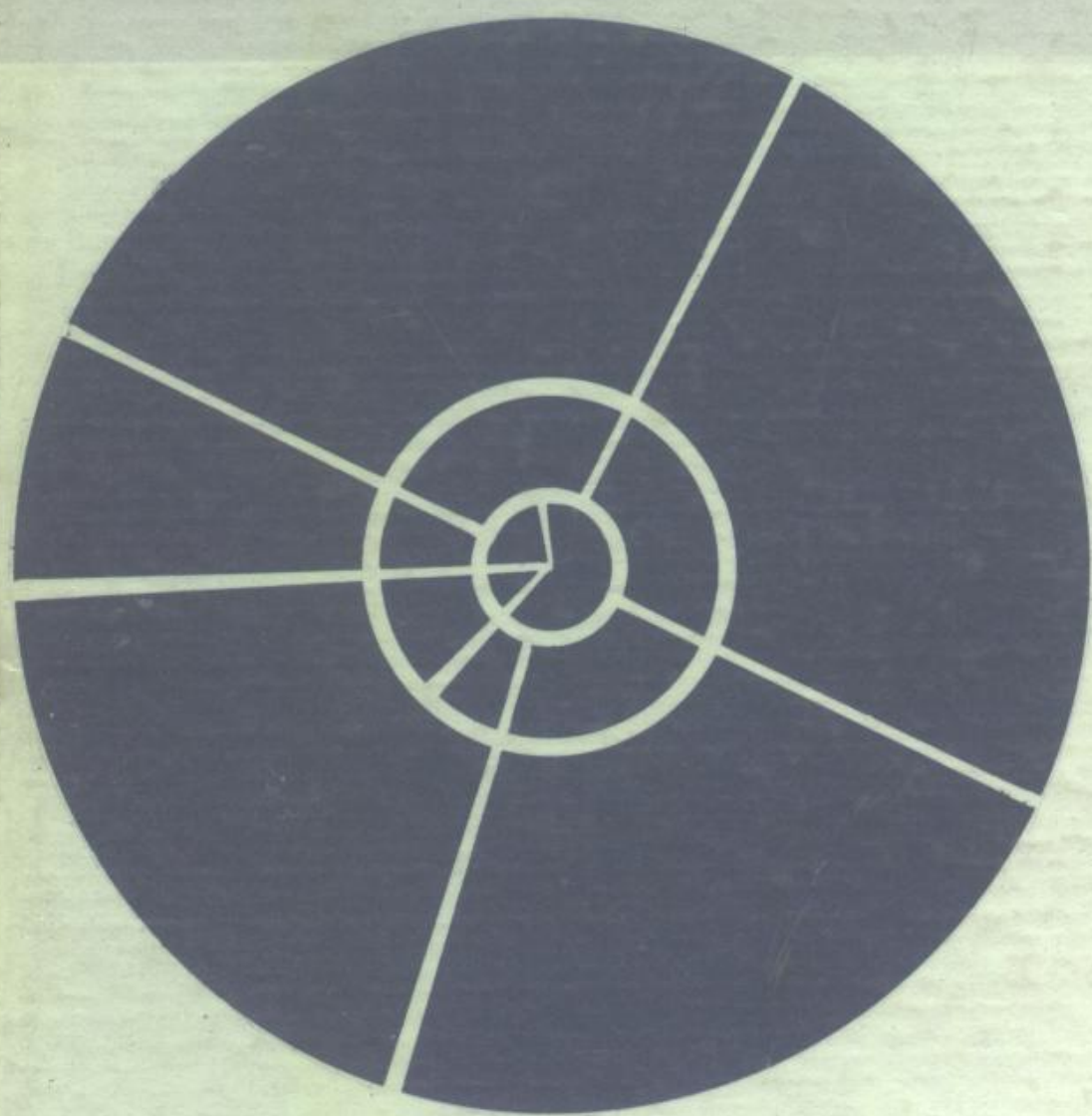


保护油气层钻井完井 技术

李克向 主编



石油工业出版社

保护油气层钻井完井技术

李克向 主编



200395820



SY62/10

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书在全面总结我国各主要油气田“七·五”期间保护油气层钻井完井技术攻关科研成果的基础上,系统地介绍了这一技术。主要内容包括:油气层损害评价方法,油气层损害机理,平衡压力钻井,保护油气层钻井完井液、固井、射孔及酸化压裂技术等。此外,还介绍了国外保护油气层钻井完井新技术。

本书一方面介绍有关理论,另一方面更注重介绍实用技术,可供现场领导干部、技术人员和科研人员学习参考。

保护油气层钻井完井技术

李 克 向 主 编

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油物探局制图印刷厂排版
石油物探局制图印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 53 3/4 印张 1 插页 1349 千字 印 1—10,000

1993 年 10 月北京第 1 版 1993 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1048-8/TE·975

定价: 40.00 元

《保护油气层钻井完井技术》这本书总结了华北、辽河、中原、四川、长庆五个油气田石油钻井完井过程中保护油气层的经验，同时，也介绍了国外保护油气层钻井完井新技术。因此，该书的出版将有助于各油田进一步推广保护油气层钻井完井技术、减少油气层损害，提高勘探、开发效果。希望各油田领导干部、技术人员，努力掌握和推广这项新技术，并在实践中不断完善。

王清:

1982年2月11日

《保护油气层钻井完井技术》

作者名单（按姓氏笔划为序）

王 欣	王宝玲	王福昌	方坤贤	叶秀芳	孙金睦
李丕训	李世放	李克向	李志伦	成绥民	吴邦国
余金海	张志贤	张瑞生	周志华	胡 旺	徐成才
黄爱慈	程时清	董善华	樊世忠		

审定人名单（按姓氏笔划为序）

王允良	王宝元	云大铭	尹立柱	任书泉	刘顺生
庄惠农	杜晓瑞	李丕训	李克向	李秉智	李国才
陈乐亮	金时懋	赵凯民	侯世俊	徐辅琛	高锡武
游静裕	樊世忠				

编审组名单

主 编：李克向
成 员：樊世忠 李丕训 赵凯民
责任编辑：张 镇

序

根据中国石油天然气总公司领导指示,从1992年6月开始组织编写这本《保护油气层钻井完井技术》。编写此书的目的是总结和推广华北石油管理局、辽河石油勘探局、中原石油勘探局、四川石油管理局和长庆石油勘探局在“七·五”期间“保护油气层钻井完井技术”攻关的科研成果,总结近几年来其他油田保护油气层的钻井完井技术,并介绍国外保护油气层的钻井完井最新技术。这本书的出版,将有助于各油田进一步学习和推广保护油气层钻井完井技术,有助于保护油气层,减少油气层损害,最终将会提高勘探开发效益。

本书既讲理论也介绍实际应用技术,且以实际应用技术为主,书中特别注重理论与实际应用技术相结合。由于保护油气层钻井完井技术是一门新兴技术,因此,在本书的介绍中,力求概念清楚、逻辑合理、技术配套、应用方便。

书中重点介绍五个局的低压中渗透油田、低压低渗透油田、超低渗透油田、古潜山油田、含岩盐油田、碳酸盐岩气田和稠油油田等七种类型油气藏保护油气层的钻井、完井技术。这些技术有油气层损害室内评价技术,油气层损害机理,油气层损害现场评价技术,钻井液、完井液、射孔液技术,平衡压力钻井与井控技术,保护油气层固井技术、射孔技术、酸化压裂技术。通过介绍七种类型储层特征与结构特点、油气层损害机理,找出与不同类型油气层特点相配伍的钻井液(射孔液、压裂液等),以及适合油气层特点的固井技术、完井方法、射孔技术、压裂酸化技术。以上技术在每种类型油气藏应用时,不仅从理论上、机理上进行了分析,而且在具体应用时介绍了大量的实例,特别着重介绍了在每种类型油气藏应用时遇到的问题、解决办法和经验,以便各油田推广应用。

参加本书编写的作者有23人,他们大多是油田、研究单位、石油院校亲自参加“七·五”国家科技攻关项目的高级工程师、教授、副教授和工程师,有丰富的实践经验和理论知识。参加审查的有18人,他们多是熟悉这一专业的知名的高级工程师、教授。这本书从确定全书结构及每章的编写提纲,到每章的编写内容,都是经过作者、有关专家、编写组多次讨论确定的,从确定提纲到编写定稿,共开大小审查会12次,其中大型审查会3次。在本书编写过程中,先后得到大庆石油管理局、华北石油管理局、北京石油勘探开发科学研究院、辽河石油勘探局、中原石油勘探局、四川石油管理局、长庆石油勘探局、胜利石油管理局、新疆石油管理局、大港石油管理局、塔里木石油勘探开发指挥部、塘沽施工技术研究所、石油大学、西南石油学院,以及中国石油天然气总公司勘探局、财务局、科技发展局、钻井工程局等单位的大力支持,在石油工业出版社的大力协作下才得以早日出版,我代表编写组向以上单位表示衷心的感谢。

本书第一章油气层损害的实验室评价方法由黄爱慈编写,李秉智、李丕训审定;第二章油气层损害机理由王欣(第一、二、三节)、王宝玲(第四、五、六节)编写,樊世忠、李克向审定;第三章油气层损害的现场评价由成绥民(第一、三、四、五、六、七、九、十节)、徐成才(第二节)、叶秀芳(第八节)、程时清(第十一、十二节)编写,庄惠农、李克向审定;第四章保护油气层的钻井液完井液由董善华(第一节)、王福昌(第二、三、四节)、樊世忠、余金海、张志贤(第五节)编写,陈乐亮、王允良审定;第五章平衡压力钻井与井控

技术由李克向（第一、三、四节）吴邦国（第二节）、李世放（第五节）编写，游静裕、徐辅琛、杜晓瑞审定；第六章固井技术由胡旺（第一、三、六、七节）、李克向（第四、五节）、李丕训（第二节）、方坤贤（第一节、第五节）编写，云大铭、赵凯民、王宝元审定；第七章射孔技术由张瑞生（第一、三、四、五、六节）、周志华（第二节）编写，高锡武、侯世俊、刘顺生、金时懋审定；第八章压裂酸化技术由孙金睦（第一、二、三、四、五节）、李志伦（第六、七、八、九、十、十一、十二节）编写，李国才、任书泉、尹立柱审定。

这本书主要为现场领导干部、技术人员阅读使用，也可供研究单位研究人员参考，也可做培训教材。

保护油气层的钻井完井技术内容较多，油气藏类型、储层变化大，加之我们水平的限制，书中难免有错误和不妥之处，恳切希望读者给予批评指正。

李克向

1993年4月

目 录

第一章 油气层损害的实验室评价方法	(1)
第一节 油气层损害的基本概念.....	(2)
一、油气层岩石渗透率的概念	(2)
二、油气层损害的类型.....	(12)
第二节 评价油气层损害的实验方法	(16)
一、评价实验的目的.....	(16)
二、评价程序.....	(17)
三、常用的评价实验方法.....	(18)
四、实验方法的合理选择.....	(72)
第三节 油气层损害室内评价方法的应用	(73)
一、系统评价储层敏感性.....	(73)
二、分析和治理已经发生的油气层损害.....	(94)
第四节 油气层损害室内评价技术新进展	(97)
一、X—射线 CT 扫描技术	(97)
二、微观模型技术.....	(99)
三、高速离心法测毛管压力评价油层损害	(103)
四、数值模拟技术的应用	(106)
主要参考文献.....	(111)
第二章 油气层损害机理	(113)
第一节 概述.....	(113)
一、问题的提出	(113)
二、国内外发展状况	(113)
第二节 油气井作业过程中可能造成的油气层损害.....	(115)
第三节 油气层损害机理.....	(116)
一、储层本身潜在的损害因素	(117)
二、外界因素作用下引起的储层损害	(126)
第四节 我国五个油田砂岩储层的损害机理.....	(144)
一、储层特征	(144)
二、储层敏感性及综合分析	(155)
三、钻井完井液的损害机理	(180)
四、固井水泥浆的损害机理	(200)
第五节 碳酸盐岩储层的损害机理.....	(212)
一、川东石炭系碳酸盐岩的储层特征	(212)
二、川东石炭系碳酸盐岩储层的敏感性实验及综合分析	(219)
三、川东碳酸盐岩储层的完井模拟实验	(222)

四、结论	(233)
第六节 预防储层损害原则及进一步研究方向	(233)
一、保护储层预防损害的措施	(233)
二、进一步研究方向	(235)
参考文献	(236)
第三章 油气层损害的现场评价	(239)
第一节 概述	(239)
一、现场评价的作用和目的	(239)
二、现场试井评价的意义	(239)
三、现场试井评价发展概况	(240)
第二节 现场测试技术	(241)
一、测井技术	(241)
二、RFT 重复地层测试技术	(242)
三、DST 钻杆测试技术	(246)
第三节 试井解释理论基础	(269)
一、渗流方式	(270)
二、试井分析的数学模型	(271)
三、不稳定试井分析基本方程	(272)
四、开发试井分析的基本方程	(272)
五、稳定试井分析的基本方程	(273)
六、双重介质油藏试井分析数学模型和解	(275)
七、气井试井分析基本方程	(276)
八、试井解释系统分析原理	(279)
第四节 油气井稳定试井解释方法	(280)
一、系统试井解释方法(常规回压测试)	(280)
二、低渗油气藏稳定试井解释方法(等时试井)	(281)
三、特低渗油气藏稳定试井解释方法(改进的等时试井)	(282)
四、表皮系数估算方法	(283)
五、地层损害产能分析方法(IPR 曲线和方程的应用)	(284)
第五节 均质油层试井解释方法	(286)
一、试井解释的一些基本概念	(286)
二、无量纲变量	(286)
三、单(半)对数试井分析方法	(287)
四、双对数曲线拟合分析方法	(290)
五、单、双对数结合试井分析方法	(292)
第六节 双重介质油藏试井解释方法	(293)
一、双重介质油层试井的一些基本概念	(293)
二、单对数试井分析方法	(294)
三、双对数曲线拟合分析方法	(296)
四、单、双对数结合分析方法	(297)

第七节 气井试井解释方法	(298)
一、物性参数计算方法	(298)
二、拟压力计算方法	(298)
三、曲线拟合法	(298)
四、气井试井解释参数方法	(299)
五、气井拟函数分析法(新方法)	(300)
第八节 压裂井试井解释方法	(300)
一、垂直裂缝井不稳定试井分析方法	(301)
二、水平裂缝井的不稳定试井解释方法	(308)
第九节 试井早期资料解释方法	(310)
一、压力恢复续流段的经验校正法	(310)
二、压力恢复曲线续流段半理论法	(311)
三、压力恢复续流段的解析校正法	(312)
四、曲线拟合分析法	(313)
五、分析井例	(314)
六、非自喷井 DST 解释方法	(316)
第十节 油气层损害现场评价方法	(321)
一、表皮系数与拟表皮系数	(321)
二、流动效率和堵塞比	(325)
三、附加压降	(326)
四、有效半径和损害深度	(326)
五、完善指数	(326)
六、各类评价方法的应用性	(327)
七、现场评价中常见错误	(328)
第十一节 油气层物性参数计算方法	(328)
一、天然气的压缩因子	(328)
二、地层流体的密度	(331)
三、地层流体及岩石的压缩系数	(332)
四、地层流体的粘度	(337)
五、地层流体的体积系数	(342)
第十二节 试井解释软件	(344)
一、SSI 软件	(345)
二、四院校软件	(346)
三、WTC 软件	(346)
四、GSWT 软件	(346)
主要参考文献	(347)
第四章 保护油气层的钻井液完井液	(349)
第一节 钻井液完井液对油气层损害的基本概念	(352)
一、钻井液完井液损害油气层的类型及预防措施	(352)
二、我国七种类型油气层损害的基本特点及预防措施	(362)

第二节 钻井液完井液处理剂.....	(366)
一、钻井液完井液处理剂应具有的特性	(366)
二、钻井液完井液处理剂的评价方法	(367)
三、结论	(370)
第三节 水基钻井液完井液.....	(371)
一、改性钻井液完井液	(371)
二、低膨润土聚合物钻井液完井液	(373)
三、无膨润土聚合物钻井液完井液	(380)
四、水包油钻井液完井液	(386)
五、无固相钻井液完井液	(387)
六、阳离子聚合物钻井液完井液	(389)
第四节 油基钻井液完井液.....	(391)
一、原理	(391)
二、处理剂的选择	(392)
三、配方、性能及应用.....	(393)
第五节 气体型钻井完井液.....	(395)
一、空气、雾化钻井.....	(395)
二、泡沫流体钻井	(396)
三、充气钻井液钻井	(438)
主要参考文献.....	(448)
第五章 平衡压力钻井与井控技术.....	(449)
第一节 概述.....	(449)
第二节 几种压力的确定	(450)
一、地层孔隙压力	(450)
二、地层破裂压力	(469)
三、地层坍塌压力	(481)
第三节 合理钻井液密度的确定.....	(487)
一、一般情况下合理钻井液密度的确定	(488)
二、钻岩盐层井合理钻井液密度的确定	(493)
三、钻调整井合理钻井液密度的确定	(497)
第四节 不同压力系数地层的钻井技术.....	(507)
一、不同压力系数地层钻井遇到的复杂情况	(507)
二、不同压力系数地层的钻井技术	(509)
第五节 井控技术.....	(527)
一、井控概念	(527)
二、溢流	(529)
三、溢流的处理	(531)
四、溢流、井喷处理中常见的错误作法.....	(544)
五、附录	(546)
主要参考文献.....	(557)

第六章 固井技术	(558)
第一节 概述.....	(558)
第二节 完井方法.....	(558)
一、完井方法分类	(558)
二、两类完井方法的特点	(558)
三、完井方法的选择	(561)
四、各类油气藏的完井方法	(562)
第三节 注水泥技术.....	(565)
一、水泥浆可能引起的油气层损害	(566)
二、减少油气层损害的注水泥技术	(571)
第四节 油井水泥外加剂.....	(599)
一、国外油井水泥外加剂发展状况	(599)
二、国内油井水泥外加剂发展状况	(602)
第五节 固井技术.....	(613)
一、低密度水泥固井技术	(613)
二、尾管固井技术	(633)
三、分级注水泥技术	(639)
四、套管外封隔器注水泥技术	(641)
五、应用实例	(645)
第六节 不同类型油气藏的固井技术.....	(647)
一、稠油油藏(辽河)	(647)
二、古潜山油藏(辽河)	(660)
三、碳酸盐岩气藏(四川)	(661)
四、含岩盐层的高压油气藏(中原)	(665)
五、低压低渗透油藏	(669)
六、特低渗透油气藏(长庆安塞)	(670)
第七节 大斜度井、水平井固井技术	(673)
一、水平井的特点及对固井的要求	(673)
二、水平井的主要完井方法	(674)
三、水平井套管设计	(675)
四、水平井固井技术	(677)
五、固井实例	(684)
主要参考文献.....	(687)
第七章 射孔技术	(688)
第一节 射孔技术发展概况.....	(688)
一、国外射孔技术发展概况	(688)
二、国内射孔技术发展及应用	(688)
第二节 射孔弹和射孔器.....	(689)
一、射孔弹	(689)
二、射孔器概述	(691)

三、有枪身射孔器	(694)
四、无枪身射孔器	(695)
五、油管传输式射孔器及专用射孔器简介	(697)
六、射孔器性能测试方法	(698)
第三节 射孔方法	(701)
一、电缆输送式套管射孔	(701)
二、电缆输送式过油管射孔	(701)
三、油管输送式射孔	(703)
四、射孔测试联作	(705)
五、其它射孔方法介绍	(705)
第四节 射孔液	(706)
一、射孔液对射孔效率的影响	(707)
二、射孔液的作用及要求	(708)
三、射孔液类型及处理剂	(708)
四、国内主要射孔液简介	(710)
第五节 影响射孔效率的主要因素及评价方法	(712)
一、储层性质对射孔效率的影响	(712)
二、射孔参数对射孔效率的影响	(714)
三、影响射孔弹穿孔的环境因素	(719)
四、射孔压差及射孔液对射孔效率的影响	(720)
五、射孔效率的评价方法	(721)
第六节 射孔优化设计	(722)
一、射孔参数优选	(722)
二、射孔方法优化	(725)
三、部分参数确定法的探讨	(726)
第八章 压裂酸化技术	(730)
第一节 概述	(730)
第二节 酸化机理	(731)
一、碳酸盐岩油气层酸化机理	(731)
二、酸化压裂(酸压)机理	(733)
三、砂岩油气层酸化机理	(734)
第三节 影响砂岩油气层酸化效果的主要因素及预防措施	(734)
一、影响砂岩油气层酸化效果的主要因素	(734)
二、预防措施	(736)
第四节 不同岩性油气层的酸化	(737)
一、碳酸盐岩油气层酸化	(737)
二、砂岩油气层的酸化	(743)
三、酸液添加剂	(762)
第五节 酸化施工及酸化效果评价	(772)
一、酸化设计	(772)

二、现场施工	(779)
三、酸化效果评价	(780)
四、酸化效果评价举例	(780)
第六节 压裂机理与应用	(781)
一、压裂机理	(781)
二、压裂作用	(781)
第七节 压裂液	(786)
一、水基压裂液	(787)
二、油基压裂液	(790)
三、乳化压裂液	(792)
四、泡沫压裂液	(793)
五、其它类型压裂液	(795)
第八节 压裂液添加剂	(796)
一、稠化剂	(796)
二、交联剂	(799)
三、破胶剂	(800)
四、pH 值控制剂	(800)
五、冻胶粘度稳定剂	(800)
六、粘土稳定剂	(801)
七、润湿剂	(801)
八、降滤失剂	(807)
九、助排剂	(810)
十、破乳剂	(811)
十一、消泡剂	(813)
十二、杀菌剂	(814)
十三、降阻剂	(815)
第九节 压裂液性能测定	(818)
一、渗透率恢复值测定	(820)
二、流变性测定	(820)
三、残渣测定	(821)
四、压裂液主要技术指标	(823)
第十节 裂缝支撑技术	(824)
一、支撑物种类及其物理性能	(825)
二、支撑物试验	(825)
三、裂缝导流能力	(827)
四、支撑带的优化设计	(828)
第十一节 压裂工艺	(829)
一、施工准备	(829)
二、压裂优化设计	(833)
三、压裂施工	(834)

四、安全施工	(837)
五、压裂效果评价	(837)
第十二节 影响压裂效果的主要因素.....	(838)
一、选井选层对压裂效果的影响	(838)
二、压裂液性能影响	(838)
三、支撑带影响	(840)
四、施工参数影响	(841)
五、施工工艺影响	(841)
六、压裂后油气井管理	(842)
主要参考文献.....	(843)

第一章 油气层损害的实验室评价方法

在长期生产实践中人们发现, 钻开油层后的整个生产过程都容易产生油层损害, 它可使储油层的产能降低, 甚至完全丧失产油能力, 还影响发现新的油气层, 给油田造成巨大的经济损失。国内外大量实验研究结果表明, 油层损害的主要原因是固相物质堵塞岩石孔道以及岩石性质和油层液体性质的改变; 而油层损害程度往往取决于油层岩石和流体特性以及钻井、完井、强化措施、采油生产方式等工程程序的设计和实施的合理性。为了防止损害油层, 在开发一个油田或实施一项油井工程之前, 首先应该弄清: 油层岩石和流体特性怎样? 当油层原始的化学、水动力和热动力条件失去平衡时是否会造成损害? 发生损害的类型和原因? 采用什么措施才能减少油气层损害等问题。这就需要有一套科学的方法对储层潜在的损害因素及各种类型的损害进行评价。

认识油层损害需要应用多方面的知识, 这些知识涉及无机和有机化学、胶体化学、物理化学、界面化学、化学动力学、矿物学、岩石学, 以及流体在多孔介质中的渗流力学等; 也需要应用先进的实验技术, 在实验室内首先进行损害机理研究, 弄清损害类型和损害程度, 以及防止和有效处理地层损害的措施。

为了探索评价油层损害的方法和技术, 人们进行了长期不懈的努力。国外早在四五十年代就开始了油层损害的室内实验研究, 主要是以岩心流动实验为基础, 用渗透率的变化情况来判断发生损害的问题。70 年代以来, 世界各主要产油国和大石油公司投入大量资金对保护油气层问题进行了广泛深入的研究, 取得了重大的进展, 并获得了显著的经济效益。同时, 由于电子技术的发展, X-射线衍射仪、电子扫描显微镜、图像分析系统等电子仪器广泛应用于储集层岩石的研究; 借助微电脑技术采用物理模拟和数学模拟手段来研究地层孔隙中固体微粒的运移、微粒的侵入深度、地层中流体运动状态、地层渗透率随时间、流速及温度的变化等。到了 80 年代, 逐步形成了采用多种方法进行系列试验的实验程序。如“识别水敏性地层”实验程序、“储层敏感性评价”实验程序等。并且出现了一些实验条件更加接近矿场实际施工条件的工程模拟实验。目前, 国外已能通过开展室内实验对特定的油气层发生地层损害的原因进行预测, 并提出相应的防止或减轻损害的措施。我国对油层损害问题的研究起步较晚, 80 年代初仍处于初级阶段。但在近几年中发展很快。随着全国石油生产的发展, 一大批现代化的仪器设备和先进测试技术进入各油田实验室, 使得这一领域的研究工作能在较高的水准上起步, 并迅速得到发展。近几年来, 辽河、华北、中原、长庆、四川等油田针对钻井完井中的油层保护问题, 较系统地研究了评价油层损害的各种实验方法, 基本上形成了一套能适用于不同类型油藏的评价实验程序, 为我国深入进行油层损害机理研究, 指导工程设计中完善保护油层的措施奠定了基础。

油层一旦发生损害, 补救是很困难的, 需要付出昂贵的代价, 因此, 保护油层应该实行以预防为主方针。实验室评价油层损害的方法具有经济、快速、能进行微观研究等优点, 它可以在短期内对油层损害规律作出预见性判断。因此, 已经成为保护油层的重要手段。目前, 各种实验室评价方法也越来越广泛地应用于研究钻井、完井、强化措施、注水采油、三次采油等各生产环节中的保护油层措施, 并逐渐向多种测试技术的综合分析方向发展。

第一节 油气层损害的基本概念

油气层损害是指在油井完井及生产阶段,在储层中造成的减少油气层产能或降低注气、注液效果的各种阻碍。

根据多孔介质中流体渗流理论,油气从地层流向井底,进而形成产能,其流动规律遵从达西定律。在控制油井产能的众多因素中,岩石渗透性属于油层自身物性。当油层受到损害时,宏观上表现为油层渗透率下降。因此,保护油层的核心问题就是保护油层的渗透性。掌握油层岩石渗透率的概念及其影响因素是实验室进行油层损害评价实验的基础。同时,了解不同作业条件下损害油层的类型和特点,有助于准确判断损害原因,寻求有效的预防或补救措施。

一、油气层岩石渗透率的概念

(一) 岩石的渗透性与渗透率

储油气层岩石均为多孔介质,而且,其中多数孔隙(裂隙)是互相连通的。因此,在一定的压差作用下,流体可以通过岩石中的连通孔隙而产生流动。这种在压差作用下岩石允许流体通过的性质称为岩石的渗透性。表示岩石渗透性大小的量,称为岩石的渗透率。

渗透性是储油气层岩石重要的物理性质,是储油气层能否形成产油气能力的重要条件。

(二) 达西定律

法国工程师达西(Henri Darcy),利用均匀的人工砂体研究了水的渗滤规律(图1-1)。达西的试验表明,人工砂体单位面积水流的体积流量与砂体进出口两端的水头差成正比,而与砂体的长度成反比。即

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta H}{L} \quad (1-1)$$

式中 Q ——水的体积流量;
 A ——水流通过的横切面积;
 ΔH ——砂体两端水头差, $\Delta H = h_1 - h_2$;
 L ——砂体长度;
 K ——比例常数。

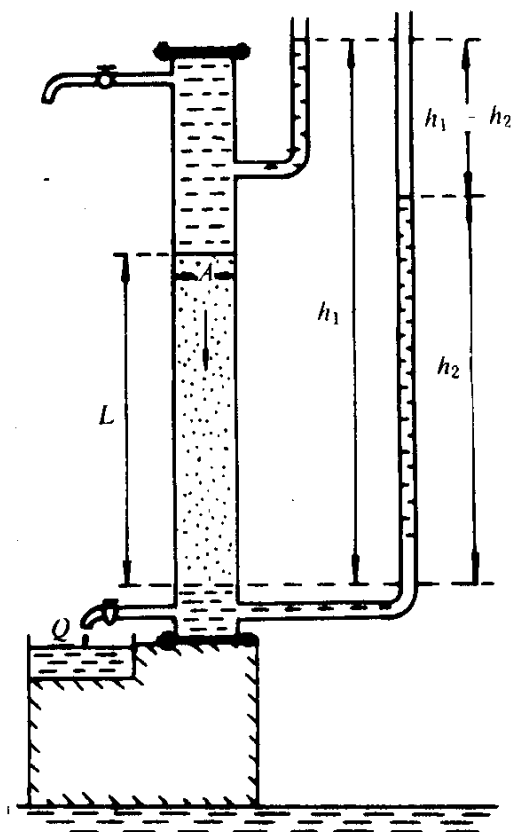


图 1-1 达西的实验装置

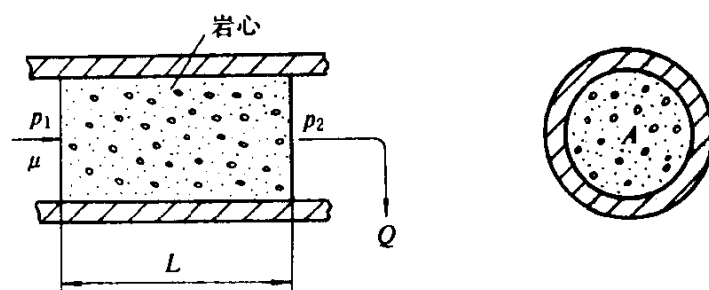


图 1-2 岩心渗透实验示意图