



# 探井保护油气层技术

● 罗平亚 张彦平 王永清 等编著

# DRILLING

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

“九五”钻井新技术丛书

# 探井保护油气层技术

罗平亚 张彦平 王永清 等编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书以中国石油天然气集团“九五”重大科技工程项目研究成果为基本素材编写而成,系统反映了“探井油气层保护技术”的关键内容及其研究进展。全书分九章,主要内容包  
括:探井岩性物性敏感性钻前预测技术、探井地层孔隙压力破裂压力钻前预测技术、探井随  
钻检测技术、裂缝性油气藏伤害机理及评价技术、裂缝油气藏的屏蔽暂堵技术、探井油气层  
保护的入井流体研发与应用技术、欠平衡钻井保护储层、裂缝性油气藏射孔保护储层技术、  
探井储层保护的矿场评价技术等内容。

本书适用于从事钻井、钻井液技术的工程技术人员阅读,也可供高等院校石油工程专业  
师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

探井保护油气层技术/罗平亚等编著.

北京:石油工业出版社,2006.11

(“九五”钻井新技术丛书)

ISBN 7-5021-5526-0

I. 探…

II. 罗…

III. ①油层-保护②气层-保护

IV. TE258

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第045020号

探井保护油气层技术

罗平亚 张彦平 王永清等编著

---

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:www.petropub.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:17.25

字数:440千字 印数:1—2000册

---

定价:65.00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

# 《“九五”钻井新技术丛书》 编委会

主任 孙 宁

副主任 钟树德 张福祥 罗平亚

成 员 (按姓氏笔画为序)

马宗金	王永清	王瑞和	付鑫生	石 凯	孙振纯
刘希圣	许树谦	刘乃震	刘硕琼	刘长生	刘延平
孙建成	沈忠厚	李克向	李鹤林	李相方	苏义脑
陈 平	杨 龙	杨 杰	何新民	邱正松	张 镇
张彦平	张嵇南	张春光	张育慈	杜晓瑞	陈生官
李雪辉	林 建	周国强	金维一	周英操	屈建省
柳贡慧	俞新永	胡世杰	施太和	高德利	徐惠峰
郭小阳	夏述明	黄荣樽	谢熙池	鄢捷年	廖润康
潘卫国					

# 《探井油气层保护技术》编写组

主 编：罗平亚

副主编：张彦平 王永清

成 员 （以姓氏笔画为序）：

王永清	王振昌	王益清	邓传光	吕金刚
杨 龙	杨宪民	李建忠	李海涛	李道芬
肖承文	何湘清	张 琰	张彦平	张恒晨
陈 伟	林安春	罗平亚	周志世	胡世杰
俞新永	徐良才	谢又新	强卫东	鄢捷年

## 序 言

《“九五”钻井新技术丛书》重点反映了“九五”期间中国石油天然气集团公司所属钻井系统承担的国家重点科技攻关项目和中国石油天然气集团公司（原中国石油天然气总公司）重点科技攻关项目的研究成果。

国家重点科技攻关计划最早始于1982年五届人大第五次会议通过了国家计委、国家经贸委、国家科委共同编制的《“九五”国家科技攻关计划》，其特点是面向国民经济主战场，集中力量攻克产业升级和社会发展急需解决的关键技术和共性技术。从“六五”开始，中国石油天然气集团公司始终积极参与国家科技攻关计划，本丛书中的《侧钻水平井钻井配套技术》分册就是集中反映了这一攻关过程中所取得了各项科技成果。中国石油天然气集团在积极参与国家重点科技攻关计划的同时，也针对中国石油天然气集团公司不同时期（五年）在海内外勘探开发生产中所面临的一系列技术难题和生产技术瓶颈制定了相应的五年科技攻关计划。

春华秋实数载，科技攻关历经了四个国家和中国石油天然气集团公司五年科技发展计划。我国石油钻井科学技术在这四个五年计划攻关中，一步一个台阶，取得了长足的发展和进步。回首当年，我们再来评估“稳定东部，发展西部，走油气并举之路与合理利用国外油气资源”这一“九五”期间我国陆上油气勘探的发展方向，确实具有很强的前瞻性和科学性。以两项应用基础技术（石油管柱与管线力学研究、强化井壁稳定机理研究）、三项前沿技术（井下增压、径向水平井、井眼轨迹控制技术）五项重大技术攻关（侧钻水平井钻井配套技术、复杂条件下深井超深井钻井配套技术、探井保护油气层技术、深井测试技术、小井眼钻井配套技术）项目构成了“九五”期间我国钻井科技工作的主体。这些研究项目历经五年攻关和多年现场试验，已经取得累累硕果，为了更好地推广这些技术，使科研与生产更好地结合，中国石油天然气集团公司科技发展部和石油工业出版社决定根据集团公司“九五”钻井重点技术科研项目出版一套《“九五”钻井新技术丛书》，具体分册如下：

1. 复杂地质条件下深井超深井钻井技术；
2. 侧钻水平井钻井配套技术；
3. 高温高压气井测试技术；
4. 探井保护油气层技术；
5. 小井眼钻井技术；
6. 强化井壁稳定技术；
7. 油井管与管柱技术及应用；
8. 特殊固井技术；
9. 径向水平井钻井配套技术。

这套丛书就侧钻水平井钻井技术、复杂地质条件下深井超深井钻井技术等九个方面的科技成果进行总结、分析、提炼、集成后汇编成册，力求较为全面真实地反映这一时期我国钻井技术的发展概况。

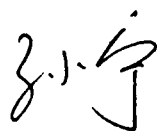
“九五”期间国家共安排了251个项目，5100多个课题，投入资金53亿元，1000多个

研究院所，700 多个大专院校的 7 万多人参加了科研项目的实施，取得直接经济效益 950 亿元。为实现国民经济翻两番的最终目标铸就了一座历史丰碑。

攻关是一种精神，攻关也是一面旗帜。在这面今天依然高高飘扬的旗帜下所集聚的一大批为我国石油工业科技发展而奋斗的仁人志士，他们当年焕发出的激情和奋斗精神仍然需要我们继承和发扬。

我有幸直接参与了“九五”石油钻井科技攻关，回首当年令人奋发的激情岁月，我谨代表“丛书”的所有作者和编辑，愿把这套丛书作为礼物，奉献给所有参与我国“九五”钻井科技攻关的同行，并向他们表示衷心的感谢。

科学技术对石油工业发展的影响是巨大的，利用新技术已取得的进步也是人们难以想象的。我国海内外石油勘探技术发展和需求，为广大石油科技工作者提供了一个大展宏图的黄金时期，我相信本丛书的出版发行必将对钻井技术的学术交流起到推陈出新、承前启后的作用。

Handwritten signature in black ink, consisting of the characters '孙宁' (Sun Ning) in a cursive style.

2006 年 5 月

# 前 言

科学研究和生产实践表明，油气储集层在钻井、完井、采油等各个工艺环节中都可能受到不同程度的伤害。为了保护储层不受伤害，必须全面认识储集层的性质和特征，联系各工艺环节，研究储集层受到伤害的因素和可能受到的伤害程度，寻找减少或避免油气层伤害的技术措施和工艺。保护油气层技术就是围绕油气层的伤害机理与保护措施这一主线，开展的科学研究和工艺实验，而逐渐形成和发展起来的油气田勘探开发的关键技术。

国外油气层保护技术大致可分为三个阶段：20世纪70年代前的起步阶段，以钻井、完井钻井液基本成分的伤害机理、射孔伤害机理研究为主要特征，开始研制新型钻井液和黏土稳定剂。20世纪80年代为发展阶段，以油气层伤害机理，特别是孔隙性油气层的伤害机理研究为主要特征，开始运用物理模型和数学模型来研究地层伤害，提出了流体临界流速准则、临界盐浓度准则；“桥堵”概念得以确定，建立和推广应用了钻井、完井过程中保护油层的屏蔽式暂堵技术；动态模拟装置不断完善；不同类型的增黏剂、降滤失剂和黏土稳定剂得以开发；提出了气基型钻井液、完井液。射孔参数对产能影响的电模拟和数值模拟方法日趋成熟，强调了储层孔喉结构和敏感性矿物空间分布等潜在因素的重要性，提出了伤害储层的10项指标。微粒运移、乳状液/水锁堵塞、润湿反转及结垢等问题引起足够重视。20世纪90年代为钻井、完井过程中的储层保护深入发展和开发过程中的储层保护技术得以建立的新阶段。随着岩心分析和计算机技术的发展，X衍射荧光分析技术、CT扫描技术、核磁共振和岩相图像分析技术为油气层保护技术的发展提供了许多新的机遇，孔隙性储层的伤害机理得以强化，多数指标实现了从定性到定量的突破。综合各种模拟特征参数，系统地、科学地预测、评价孔隙性储层伤害的人工智能专家系统等技术日趋成熟。在此期间，水平井的油气层保护、增产措施中的储层保护、注采过程中的储层保护、稠油热采中的储层保护得以重视，储层保护技术的外延不断扩大。

中国石油天然气集团在“九五”期间组织吐哈石油勘探开发指挥部、新疆石油管理局、塔里木石油勘探开发指挥部、四川石油管理局、西南石油学院、石油大学（北京）、石油大学（华东）、北京石油勘探开发研究院、江汉石油学院等近380余名科技人员针对特殊复杂探井油气层的保护，围绕油气层的伤害机理与保护措施，开展了大规模的科学研究与现场试验，完成了四个课题十九个专题的专项研究、技术开发，并在各课题工业试验区块、试验井进行了大量的应用与推广，在一系列技术上取得了重大突破：

- (1) 探井岩性、物性、敏感性钻前预测技术；
- (2) 探井地层孔隙压力、破裂压力钻前预测技术；
- (3) 探井地层压力、物性、岩性及流体性质随钻监测技术；
- (4) 裂缝性油气藏伤害机理及评价技术；
- (5) 裂缝油气藏的屏蔽暂堵技术；
- (6) 探井油气层保护的人井流体研发与应用技术；
- (7) 欠平衡钻井技术；
- (8) 裂缝性油气藏射孔技术；



#### (9) 探井储层保护的矿场评价技术。

在重大技术与理论实现重大突破的基础上,研发出一系列新产品和计算机软件,发展了与之配套的新工艺。取得主要专项技术成果 68 项,新技术突破或创新纪录 82 项,研制实验装置 6 台套,开发新型钻井液处理剂、储层保护暂堵剂、水泥浆添加剂 36 种,优选优配新型完井液、水泥浆配方 19 个,开发计算机软件 45 个,各研究成果先后在 58 井次进行现场试验及应用。

探井油气层保护技术是我国保护储集层技术在“七五”攻关、“八五”推广应用之后的重大技术进步。探井钻前岩性、物性、敏感性预测技术;裂缝性油气层压力伤害理论及屏蔽暂堵技术、地层压力预测与随钻监测技术;双重介质储层的射孔测试设计等技术水平处于同期国际领先,整体技术达到同期国际先进水平。

本书是以“探井保护油气层技术”项目的课题、专题、子专题成果为蓝本,分别由参加项目攻关研究的主要科研人员负责编写,此书的编辑出版是全体研究人员集体智慧的结晶。

本书共九章,第一章由张彦平、安彦东编写,第二章由吕金钢、李建忠编写,第三章由杨仕会、王建毅编写,第四章由熊开俊、李丽红编写,第五章由雍富华、夏廷波、曾权先编写,第六章由余丽彬、王学良、张荣志编写,第七章由田军、张克明、段保平编写,第八章由李海涛、王永清、陈伟编写,第九章由王永清、陈伟、李海涛编写。全书由吕金钢、李建忠、王永清统稿,罗平亚院士审定完成。

借此机会,衷心感谢参与本项目组织管理和研究工作的全体人员,并向参加立项论证、阶段评估的相关领导、专家学者致以崇高的敬礼。

由于编者水平有限,对其科研成果的理解可能出现偏差,加之时间仓促,书中错误和不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

# 目 录

<b>第一章 探井岩性、物性、敏感性钻前预测技术</b> .....	( 1 )
<b>第一节 碳酸盐岩储层地质模型的建立与储层分布预测技术</b> .....	( 1 )
一、石炭系储层地质模型及储层分布预测技术.....	( 1 )
二、二叠系长兴组生物礁滩储层地质模型及储层分布预测技术.....	( 3 )
三、飞仙关组鲕滩储层地质模型及储层分布预测技术.....	( 7 )
<b>第二节 非连续沉积盆地岩性、物性和敏感性预测方法探索</b> .....	( 11 )
一、地质基础研究.....	( 11 )
二、岩性连续自动识别方法预测技术.....	( 15 )
三、物性、敏感性预测方法研究.....	( 20 )
四、测井与地震结合平面预测技术.....	( 26 )
五、以数据库为基础的预测方法软件.....	( 28 )
六、应用检验分析.....	( 28 )
<b>第三节 储层孔隙度和渗透率预测技术</b> .....	( 32 )
一、分形和地质统计学预测储层孔隙度和渗透率技术.....	( 32 )
二、岩石力学和计算机模拟技术预测原地裂缝宽度.....	( 39 )
<b>第四节 成岩作用和地球化学理论预测敏感性矿物及潜在伤害因素</b> .....	( 46 )
一、地质概况.....	( 46 )
二、主要成岩作用特征及成岩序列.....	( 46 )
三、敏感性矿物描述.....	( 48 )
四、预测模式.....	( 49 )
<b>第二章 探井地层孔隙压力、破裂压力钻前预测技术</b> .....	( 52 )
<b>第一节 利用地震资料预测地层孔隙压力和破裂压力</b> .....	( 52 )
一、地震资料预测地层孔隙压力的原理.....	( 52 )
二、提高地层层速度求取精度的方法.....	( 52 )
三、异常压力成因分析.....	( 55 )
四、地层孔隙压力预测.....	( 56 )
五、地层破裂压力预测.....	( 57 )
<b>第二节 利用地震层速度、VSP 测井资料预测地层孔隙压力和破裂压力</b> .....	( 57 )
一、地震层速度、VSP 测井资料预测地层孔隙压力模型.....	( 57 )
二、影响预测精度的相关参数及合理确定方法.....	( 58 )
三、地层孔隙压力检测预测综合应用软件.....	( 59 )
四、利用地震层速度预测破裂压力.....	( 59 )
<b>第三节 利用大地电磁资料预测地层孔隙压力和破裂压力</b> .....	( 61 )
一、大地电磁法预测地层特性原理.....	( 61 )
二、CYT 资料与测井电阻率的关系.....	( 61 )

三、大地电场资料与声波、密度关系及模式的建立·····	( 62 )
四、地层孔隙压力预测·····	( 64 )
五、地层破裂压力预测·····	( 65 )
第四节 利用地质统计学方法预测地层孔隙压力·····	( 66 )
一、利用声波测井资料建立地层孔隙压力剖面·····	( 66 )
二、塔北和库车地区地层压力综合数据库的建立·····	( 68 )
三、塔北隆起和库车前陆盆地压力系统划分·····	( 68 )
四、压力预测的地质统计建模及应用软件开发·····	( 70 )
五、地层压力分布及地质统计法压力预测效果分析·····	( 73 )
<b>第三章 探井随钻检测技术·····</b>	<b>( 78 )</b>
第一节 随钻地层压力监测技术·····	( 78 )
一、岩石强度法地层孔隙压力随钻监测原理·····	( 78 )
二、现场应用效果·····	( 81 )
三、地层压力随钻监测计算机软件·····	( 82 )
第二节 随钻地层岩性监测技术·····	( 83 )
一、牙轮钻头地层岩性随钻监测方法·····	( 83 )
二、PDC 钻头地层岩性随钻监测方法·····	( 85 )
三、地层物性随钻监测方法·····	( 86 )
四、室内岩心试验·····	( 86 )
五、现场应用效果·····	( 87 )
第三节 溢流早期检测技术·····	( 87 )
一、体积法早期溢流检测·····	( 87 )
二、压力波气侵早期检测法·····	( 90 )
三、参数法溢流早期检测·····	( 91 )
四、溢流早期检测仪器研制·····	( 93 )
<b>第四章 裂缝性油气藏伤害机理及评价技术·····</b>	<b>( 94 )</b>
第一节 裂缝性油藏伤害的室内评价方法·····	( 94 )
一、模拟实验装置的设计·····	( 94 )
二、裂缝性油藏岩样的选取与制备·····	( 94 )
三、室内评价实验程序、方法及结果·····	( 95 )
第二节 裂缝性油藏伤害机理·····	( 105 )
一、裂缝性油藏力学伤害机理的模拟试验和动态预测·····	( 105 )
二、裂缝性油藏物理化学伤害机理·····	( 106 )
三、钻井液对裂缝性油藏储层伤害机理·····	( 107 )
四、砂砾性气藏伤害机理·····	( 111 )
五、砂砾岩气藏伤害室内评价方法和推荐标准·····	( 112 )
<b>第五章 裂缝油气藏的屏蔽暂堵技术·····</b>	<b>( 116 )</b>
第一节 裂缝储层的暂堵规律·····	( 116 )
一、纤维状粒子在裂缝中的形态特征及其作用机理·····	( 116 )
二、粒子在裂缝中的架桥规律·····	( 118 )

第二节	新型暂堵剂的研制	(123)
一、	吐哈裂缝—孔隙型油藏新型暂堵剂的研制开发	(123)
二、	塔里木盆地低荧光暂堵剂的筛选及研制	(128)
三、	桥塞暂堵剂 ZC6-1 的研制	(132)
第六章	探井油气层保护的入井流体研发与应用技术	(138)
第一节	钻井液添加剂及体系室内定量荧光评价新方法	(138)
一、	钻井液添加剂及体系室内定量荧光评价新方法的建立	(138)
二、	对常用钻井液添加剂的定量荧光评价	(139)
三、	“荧光干扰度”概念的提出及高温对评价结果的影响	(141)
第二节	新型钻井液处理剂的研制	(142)
一、	新型两性树脂沥青防塌剂 FJ938 的研制	(142)
二、	新型水基润滑剂 LB100 的研制	(143)
三、	两性树脂沥青 FJ938 的工业化生产和应用	(144)
四、	高承压堵漏剂 (ZC6-6) 的研制及工艺技术	(144)
第三节	探井保护储层的钻井完井液技术	(147)
一、	吐哈裂缝—孔隙型油藏钻井完井液技术	(147)
二、	塔里木油田具有广普暂堵效果的新型钻井完井液技术	(155)
三、	新型合成基、仿油基钻井完井液技术	(160)
四、	四川碳酸盐岩多压力系统产层钻井完井液技术	(166)
五、	新疆裂缝性油藏保护油气层的钻井完井液技术	(174)
六、	新疆裂缝性砂砾性气藏保护气层的钻井完井液技术	(175)
第四节	多层长封固段不同水泥浆体系及水泥浆分级注技术	(181)
一、	水泥浆体系伤害储层的机理研究	(181)
二、	高温高压条件下水泥石强度衰减机理研究	(183)
三、	多套储层、长封固段不同水泥浆体系技术研究	(183)
四、	水泥浆分注技术研究	(184)
第五节	深探井保护油气层的压井液技术	(184)
一、	塔北、库车地区储层敏感性分析	(184)
二、	塔北、库东地区压井液地层伤害机理研究	(185)
三、	塔北、库车地区的试油压井液体系配方研究	(191)
四、	塔里木深探井完井液 (压井液) 设计软件研制	(197)
五、	深探井保护油气层试油压井液现场试验	(198)
第七章	欠平衡钻井保护储层	(201)
第一节	适合欠平衡钻井的油藏条件及钻井压差确定	(201)
一、	适合欠平衡钻井的油藏条件研究	(201)
二、	储层渗透率与应力状态的相关关系	(201)
三、	欠平衡钻井压差的确定	(201)
第二节	欠平衡钻井井筒气液两相流理论研究与模型建立	(202)
一、	环空内的两相流流型判别方法	(202)
二、	欠平衡钻井气液两相流数学模型建立	(203)

第三节	欠平衡钻井完井技术研究与应用	(204)
一、	欠平衡钻井常用完井方式	(204)
二、	完井方式的选择	(204)
第四节	欠平衡钻井参数采集与控制系统的研制	(205)
一、	理论方面研究	(205)
二、	软件开发	(205)
第五节	欠平衡钻井钻井液技术研究	(205)
一、	欠平衡钻井钻井液选择依据及设计原则	(205)
二、	欠平衡钻井钻井液的密度确定原则及方法	(206)
三、	欠平衡泡沫型钻井液技术研究及应用	(208)
第六节	欠平衡钻井现场试验实例	(211)
一、	新疆 GD1179 井欠平衡钻井现场试验	(211)
二、	青海南 12 井欠平衡钻井现场试验	(211)
三、	吐哈牛 102 井欠平衡水平井钻井现场试验	(211)
<b>第八章</b>	<b>裂缝性油气藏射孔保护储层技术</b>	<b>(213)</b>
第一节	裂缝性油气藏射孔优化设计技术	(213)
一、	射孔完井三维渗流物理模型	(213)
二、	裂缝孔隙性藏射孔完井产能的有限元法	(215)
三、	裂缝孔隙性油藏射孔完井产能影响的单因素敏感分析	(219)
四、	射孔设计方法及射孔优化设计软件	(222)
第二节	裂缝孔隙性油藏负压射孔设计方法	(227)
一、	裂缝孔隙性地层应力敏感对施工压差的限制	(227)
二、	油套管安全压力	(229)
三、	有效性测试工作压力要求	(230)
四、	避免地层坍塌的最大负压	(231)
五、	形成清洁无伤害孔眼最小负压 ( $p_{\min}$ )	(234)
六、	射孔、测试或联作管柱的安全压力	(237)
第三节	超正压射孔技术	(237)
一、	超正压射孔的机理	(237)
二、	超正压射孔裂缝扩展模拟与产能分析	(238)
三、	超正压射孔工艺设计	(243)
四、	超正压射孔工艺技术与应用	(245)
<b>第九章</b>	<b>探井储层保护的矿场评价技术</b>	<b>(247)</b>
第一节	完井测试与解释	(247)
一、	测试工作制度的优化设计	(247)
二、	裂缝—孔隙型油藏测试解释新方法	(256)
第二节	钻井完井液伤害测井评价及钻屑分析	(261)
一、	钻井完井液伤害测井评价	(261)
二、	钻屑渗透率测试分析	(263)

# 第一章 探井岩性、物性、敏感性钻前预测技术

通过收集前人研究成果进行资料总结和地质基础研究获得宏观地质模型,以关键井的岩心分析资料和测井资料为基础建立岩性、物性、敏感性数值模型。对地震资料进行高分辨率处理,达到平面预测,实现对非关键井和目标井的预测分析。三性建模、敏感性矿物与测井响应标定、测井与地震相互标定是技术关键。此外利用分形和地质统计学预测储层孔隙度和渗透率,岩石力学和计算机模拟技术预测原地裂缝宽度、成岩作用和地球化学预测敏感性矿物及潜在伤害因素是该项技术的补充和完善。

储层岩性、物性及敏感性的预测,可以使我们在钻前勾画出保护对象的基本轮廓,缩小目标范围,做到有的放矢。如果探井目的层的地质参数像开发井那样清晰,那么探井的问题就会迎刃而解,现有的保护技术只需在处理剂上加以改进适应探井地质录井的要求即可。探井诸多地质因素的不确定性要求加快发展预测技术,提高地质—工程参数的可靠性和精度,满足工程的基本要求。

## 第一节 碳酸盐岩储层地质模型的建立与储层分布预测技术

采用地震模式识别、连续频带分析、道积分等地震储层预测技术,对四川开江黄龙场、渡口河重点勘探地区的石炭系储层、二叠系储层和飞仙关组进行了预测评价;开展了储层特征微观、宏观的研究,建立了开江地区三套主要储层基于探井气层保护的地质模型,并进行了储层伤害的潜在地质因素分析,为储层伤害的机理研究、优选与保护储层相适应的钻井工艺技术提供了重要的地质依据,为探井气层保护奠定了坚实的地质基础。

### 一、石炭系储层地质模型及储层分布预测技术

#### 1. 石炭系储层岩石学特征

储层岩石学特征是储层特征研究的基础,是引起储层伤害的潜在地质因素,也是油气层保护研究的基础。

石炭系储层岩性主要为碳酸盐岩,岩石类型主要为白云岩和灰岩。白云岩占碳酸盐岩的91%,是主要的储集岩,以颗粒云岩和角砾云岩最为发育,分别占白云岩的38.7%和38.1%。

岩石主要矿物成分除常见的方解石和白云石外,还有铁方解石、铁白云石、杂卤石、盐类自生石英等。白云石含量75.72%~96.85%,方解石含量0.20%~16.71%,酸不溶物含量为0.24%~24.80%,平均2%。化学成分以Ca、Mg、C、O等元素为主。其中CaO含量为25.21%~34.8%,MgO含量15.94%~21.3%。

开江地区石炭系储层的岩石组构以粒屑(颗粒)结构为主,次为晶粒结构,以及少量残余结构。

#### 2. 储层性质及特征

储集空间研究是油气层伤害机理研究与采取桥塞暂堵技术保护措施的前提。据薄片观察、铸体扫描电镜、图像分析,开江地区石炭系储层的储集空间按形态可分为孔隙、洞穴和

裂缝三大类。孔隙以溶孔、晶间溶孔为主，是油气储集的主要空间。孔喉平均半径  $0.257\sim 4.349\mu\text{m}$ ，平均  $1.323\mu\text{m}$ ；最大连通半径  $2.173\sim 4.029\mu\text{m}$ ，平均  $1.27\mu\text{m}$ ；喉道中值半径  $0.05\sim 1.5\mu\text{m}$ ，多集中在  $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$  之间，平均  $0.358\mu\text{m}$ ；80%以上的孔径小于  $10\mu\text{m}$ 。喉道以片状喉道为主，管状和收缩状次之，连通中等，配位数  $2\sim 3$ 。总之，孔隙结构形态不规则、孔径较小、孔喉体系分选差、连通差一中等，片状喉道为主，具低孔小喉特点。

石炭系储层洞穴发育。云岩洞穴比灰岩的发育，且相差较大。平均洞密度  $10.2$  个/m，最高达  $29.7$  个/m。类型包括砾间孔洞、裂缝型溶洞和孔隙型溶洞三种。以孔隙型溶洞为主，约占 90%，孔径一般  $2\sim 5\text{mm}$ ，洞壁较粗糙；砾间孔洞相对较大，直径  $30\sim 500\text{mm}$ 。

石炭系储层裂缝发育。岩心上平均总缝密度  $11.2$  条/m，平均张缝密度  $8.42$  条/m。裂缝宽度多在  $0.08\sim 0.12\text{mm}$ ，平均  $0.02\text{mm}$ ；渗透率在  $1\times 10^{-3}\sim 100\text{mD}$  之间，远大于基质渗透率。

总之，石炭系储层的储集空间类型复杂，空间分布颇具特色，孔、洞、缝三位一体，为典型的裂缝—孔隙型储集体。

充填物有胶结物和自身充填矿物。胶结物主要为方解石和白云石。自身充填矿物有盐类矿物、杂卤石、硬石膏、自生石英、黄铁矿、铁方解石、铁白云石等。盐类、杂卤石及石膏或硬石膏较普通。盐类、杂卤石呈多种形态充填于孔、缝中。

石炭系储层储集空间中充填物结构复杂。晶粒充填结构、栉壳状充填结构、纤维状充填结构、放射状充填结构是最普遍、最主要的充填结构，由盐类矿物、杂卤石构成的纤维状、放射状充填结构是开江地区石炭系储层中较为独特的充填结构。从充填结构看，晶粒充填结构及杂卤石、盐类形成的纤维状充填结构易产生微粒运移和新的沉淀物，减少或堵塞喉道，造成储层伤害。

根据石炭系物性统计分析表明：石炭系储集岩非均质性极强，主要表现在孔、渗大小相差悬殊，不同岩类储、渗性相差较大，不同井、同一井的不同层段相差较大；此外还具低孔、低渗和含气范围内含水饱和度低的“三低”特征。

### 3. 储层含流体特征

石炭系气藏天然气的总体特征为高  $\text{CH}_4$ 、低硫、低  $\text{CO}_2$ 、高  $\text{N}_2$  的干气，密度平均为  $0.573\text{g}/\text{cm}^3$ 。成分以甲烷为主，含量为  $93.43\%\sim 98.06\%$ ，还含少量乙烷、丙烷、二氧化碳、硫化氢及氦、氩、氮等。

石炭系地层水 pH 值表现为中性—偏酸性，平均密度为  $1.0588\text{g}/\text{cm}^3$ 。地层水矿化度变化大，为  $21.59\sim 175.10\text{mg}/\text{L}$ ，含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等离子。水型为高钙镁、高氯、低硫的中酸性  $\text{CaCl}_2$  型， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  可对储层形成新生沉淀物伤害。

### 4. 石炭系储层地质模型及特征

储层地质模型即储层岩石类型、结构特征、物化性质等及其参数相互关系的综合描述。基本要素包括岩性、岩类及其组构、岩化、孔缝结构、充填状况等。不同的应用研究领域所建立的模型在要素上各有侧重，在气层保护领域着重研究各种钻井液及颗粒是否堵塞或污染油气的储、渗通道，导致储层伤害。孔缝结构是储层地质模型最重要的内容，包括孔隙结构类型、裂缝、喉道形态等微观结构特征。用孔隙度、渗透率、裂缝宽度、喉道宽度等进行定量描述，其中孔隙度、裂缝宽度、喉道宽度又直观体现在渗透性能上，因此，渗透率是建立基于储层保护为目的的储层地质模型的基础。本书结合开江地区近年来的勘探实际，以渗透

率为主线,综合考虑岩石学、孔隙度、孔隙结构、裂缝宽度、孔缝充填状况等因素,针对开江地区石炭系气藏的特点,建立了储层地质模型,包括四种类型: I 型——高孔粗喉宽缝高渗型; II 型——中孔中喉中缝中渗型; III 型——低孔细喉细缝低渗型; IV 型——微孔微喉微缝微渗型。具体特征参见表 1-1-1。

开江地区石炭系以 III 型模型为主, II 型次之。其纵向上无明显的厚层同类型储层的叠合体。

#### 5. 石炭系储层伤害的潜在地质因素

储层本身的地质特征如颗粒分散、松脱运移、黏土水化膨胀、地层水性质、岩石化学性质及孔、喉、缝特征是研究储层伤害的重要地质基础。关于储层的伤害机理及评价在后面将会论述,在这里首先仅从地质学角度,从储层本身地质特征及含流体特征出发,分析潜在伤害的地质因素(见表 1-1-2)。

分析表明,固相颗粒伤害可能是四川开江地区石炭系储层最主要的伤害因素。石炭系有效储层的三种模型中(I 型~III 型),中值喉道半径大于  $0.04\mu\text{m}$ ,喉道宽度集中在  $0.1\sim 2.5\mu\text{m}$ ,因此,外来液或储层本身松散脱落的粒径小于  $2.5\mu\text{m}$  的颗粒都可能对储层造成伤害,特别是 II 型、III 型模型,其孔喉最易被固相颗粒堵塞。

微粒运移伤害是开江地区石炭系储层伤害因素之一。石炭系储层中常见纤维状、放射状的杂卤石、盐类充填以及一些方解石、白云石晶粒的镶嵌状充填。这些充填物的充填结构不紧密,钻井液等外来流体的冲刷或本身流体流动过快,易造成充填颗粒疏松、脱落并随流体运移至孔喉部位,造成喉道变窄或堵塞,形成储层伤害。

与地层流体不配伍引起的伤害。石炭系地层水性质为高钙镁的中酸性  $\text{CaCl}_2$  型水,外来液的侵入,可使  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  形成新的沉淀物,造成储层伤害。

综上所述,在研究制定四川开江地区石炭系储层保护气层的工艺技术时着重考虑固相颗粒伤害,杂卤石、盐类等微粒运移伤害以及与岩石反应、与地层水不配伍产生新生沉淀物伤害等主要因素。

#### 6. 石炭系储层分布预测

在微观上,我们对开江地区石炭系储层的岩性、岩石结构、物性、孔隙结构、岩石成分、含流体性质等进行了分析研究,为储层伤害的机理研究和采取保护储层的技术提供了地质基础。同时,在宏观上,我们用地震模型正演技术、地震模式识别技术、地震道积分技术对石炭系储层的分布及厚度进行了预测,并对石炭系的厚度变化进行了预测,绘制了厚度分布图。

总的来看:云安厂石炭系厚度较大,有效储集层段厚,储渗性能好。马槽坝构造带石炭系遭受强烈侵蚀,多呈“孤岛”状,仅构造东端阳底构造白果寺高点附近连片。温泉井构造带石炭系的分布总体上是连片分布,特别是温西区域石炭系横向连续性好,厚度大,但由于处于剥蚀区以及剥蚀程度的差异,石炭系剥蚀边界多呈港湾状,石炭系分布区内又存在侵蚀窗,局部有“孤岛”。

### 二、二叠系长兴组生物礁滩储层地质模型及储层分布预测技术

#### 1. 储层岩石学特征

二叠系长兴组属碳酸盐岩。除泥微晶灰岩外还包括礁灰岩、粉细晶白云岩、溶孔细晶白云岩、粒屑云岩。白云岩是储集岩,占礁组合总厚的 22.7%。

储集岩主要矿物仍为方解石和白云石。白云石含量平均 92%,方解石含量平均 7.5%,酸不溶物含量平均 0.57%。



表 1-1-1 石炭系层地质模型及特征

类型	渗透率 (D)			裂缝宽度 (μm)	孔隙度 (%)	孔隙类型	喉道宽度 (μm)	喉道形态	孔洞缝充填状况		岩石类型	矿物及化学成分	地层流体特征	储层评价
	总渗透率	基质	裂缝						成分	充填结构				
高孔 粗喉 宽缝 高渗型 (I)	$> 2 \times 10^{-2}$	$> 1 \times 10^{-2}$	$> 1 \times 10^{-2}$	$> 17.9$	$> 14.5$	粒间溶孔、窗格孔	8.37 ~ 5.06	片状为主管状次之	镶嵌状 晶粒状 纤维状	藻云岩 角粒云岩	矿物成分以白云石、方解石为主。其中：白云石含量为 75.72%~96.85%；方解石为 0.2%~16.71%；酸不溶物为 0.24%~24.8%。	地层水为高钙镁、低高氯、低硫酸的中酸性 CaCl <sub>2</sub> 型水。	好的裂缝—孔隙型储层 (较少)	
中孔 中喉 中缝 中渗型 (II)	$2 \times 10^{-2}$ ~ $2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$ ~ $1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$ ~ $1 \times 10^{-3}$	$> 17.9$ ~ 6.03	14.5 ~ 10.5	粒间溶孔、窗格孔、晶间溶孔	3.80 ~ 1.93	片状为主管状次之	以方解石、白云石为主，次为盐类、杂卤石、石膏和硬石膏以及黄铁矿、黏土矿物和有机质等，其中盐类和杂卤石较为普遍	纤维状 晶粒状 栉壳状	藻云岩 角粒云岩 粒屑云岩	天然气为高 CH <sub>4</sub> 、低 H <sub>2</sub> S、低 CO <sub>2</sub> 、高 N <sub>2</sub> 的干气	较好的裂缝—孔隙型储层 (次要)	
低孔 细喉 细缝 低渗型 (III)	$2 \times 10^{-3}$ ~ $2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$ ~ $1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$ ~ $1 \times 10^{-5}$	6.03 ~ 0.68	10.5 ~ 2.5	晶间溶孔、晶间孔及少量粒间溶孔	1.28 ~ 0.44	管状为主片状次之	纤维状 晶粒状 栉壳状	粒屑云岩 粉晶云岩 细晶云岩	化学成分以 Ca、Mg、C、O 等元素为主。其中 CaO 为 25.1% ~ 34.8%；MgO 为 15.94%~21.3%。另外还有少量的 Fe、Sr 等微量元素	水。	一般的裂缝—孔隙型储层 (主要)	
微孔 微喉 微缝 微渗型 (IV)	$< 2 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 0.68$	$< 2.5$	晶间微孔	0.48 ~ 0.02	偶见片状或管状	连晶状 晶粒状 栉壳状	泥云岩 微晶云岩 灰岩类			非储层	