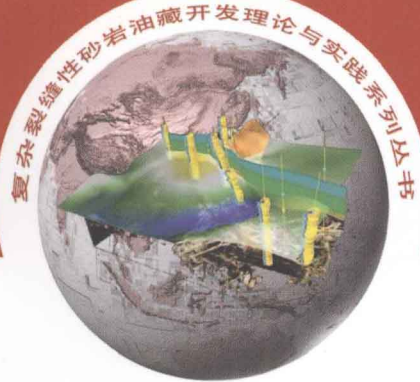




FUZA LIEFENGXING SHAYAN YOUKANG KAIFA LILUN YU SHIJIAN XILIE CONGSHU

火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏 采油工艺技术

李 斌 刘卫东 王国先 王志章 编著
蔡 毅 石 颜 钟权锋 谢建勇



石油工业出版社

复杂裂缝性砂岩油藏开发理论与实践系列丛书

火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏 采油工艺技术

李 斌 刘卫东 王国先 王志章
蔡 毅 石 颜 钟权锋 谢建勇 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要以新疆准噶尔盆地东部火烧山油田为例,系统阐述了针对复杂裂缝性砂岩油藏所进行的室内试验、现场注水试验,为高效长期稳产所采用的调剖技术、堵水工艺技术、酸化压裂技术、固井及油层保护技术、综合配套技术及一体化采油工艺技术。

本书可供从事现场实际工作的科研人员使用,也可作为石油院校油气地质工程、石油工程专业的本科生、硕士生、博士生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏采油工艺技术/李斌等编著.

北京:石油工业出版社,2010.11

(复杂裂缝性砂岩油藏开发理论与实践系列丛书)

ISBN 978-7-5021-7080-6

I. 火…

II. 李…

III. 复杂地层-裂隙油气藏-油田开发-技术-新疆

IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 043735 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: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523524

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11

字数: 278 千字 印数: 1—2000 册

定价: 38.00 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

序

《复杂裂缝性砂岩油藏开发理论与实践系列丛书》是新疆油田公司准东采油厂与中国石油大学（北京）油藏描述与预测研究所 20 多年来围绕火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏深化研究、综合治理、长期稳产开发的主要研究成果。包括《储层裂缝识别方法与技术》、《复杂裂缝性砂岩油藏开发历程回顾与思考》、《复杂裂缝性砂岩油藏特征描述及预测》、《复杂裂缝性砂岩油藏数值模拟及开发调整方案研究》、《复杂裂缝性砂岩油藏地质工程评价》、《复杂裂缝性砂岩油藏采油工艺技术研究》、《复杂裂缝性砂岩油藏综合治理及稳产对策》、《复杂裂缝性砂岩油藏开发理论、方法与技术》八个分册。该套丛书以油藏地质理论为基础，以系统思考观念为指导，紧紧抓住火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏的特点，在进行了系统的油藏地质研究、多期油藏描述基础上，通过多轮次大规模调剖、堵水、隔水、扩边、停注、间注、行列注水等具体措施，历经四次综合治理，保证了油田稳产二十多年这条主线、利用类比的科学分析方法和全新的观点与思路，综合对比国内外类似油藏，从静动两个方面系统归纳总结了火烧山油田开发的特殊性，形成了适合复杂裂缝性砂岩油藏开发的裂缝性储层质量评价、油藏渗流、视储集空间构成、分阶段模拟、系统思考新观点；建立了多时空注水、多期次调堵水、多循环压裂酸化、分阶段开采的高效稳产开发模式；发展并完善了复杂裂缝性砂岩油藏识别评价、实验室模拟及先导开发实验、油藏定量表征、三维可视化建模、分阶段分单元数值模拟、剩余油形成机理及分布预测、低压易漏地层配套钻井工艺等技术。

在火烧山油田成功稳产二十周年之际，深化对火烧山复杂裂缝性砂岩油藏二十多年成功开发的认识，系统归纳总结适合复杂裂缝性砂岩油藏的开发新理论、新方法，形成适合复杂裂缝性砂岩油藏开发的稳产管理模式，研制确保复杂裂缝性砂岩油藏开发稳产的油藏地质、油藏工程、注采工艺、钻井工艺等方面的配套技术，分析对比历次油田综合治理方案、措施及其效果，不同阶段油田开发战略和对策，对类似油田的开发提供借鉴，具有重大的指导意义。

前 言

火烧山油田位于准噶尔盆地东部，发现于20世纪80年代中期，是目前新疆油田公司最偏远的整装油田，自然条件恶劣，极端温度 42°C ，是我国陆上首次采用“海洋模式”开发的油田。该油田探明地质储量 $5443 \times 10^4 \text{t}$ ，含油面积 35.2km^2 。

火烧山油田的油藏是油层多、单层薄、特低渗、裂缝发育的多层砂岩油藏。压力系数仅0.957，地层原油黏度高达 $8.9 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ，是流度低[流度小于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$]、自喷能力弱的油藏。

1988年，火烧山油田分四套(H_2 、 H_3 、 H_4^1 、 H_4^2)开发层系，以350m的反九点井网投入全面开发，初期认为火烧山油田属层状砂岩油藏，各套层系间都发育有一套沉积上很稳定的泥质白云岩和白云质泥岩间互的隔层，虽然岩心、试油中已经发现高角度裂缝，但对这些裂缝一直存在不同的认识：即这些裂缝是机械诱导缝还是天然构造缝，在地下是有效缝还是无效缝。开发方案是基于层状砂岩油藏的认识设计的。

投入注水开发以后，表现出油田开发初期产量不到位，水淹、水窜严重，产量递减大的特点，生产十分被动。火烧山油田的油藏被称为“世界级难题油藏”，列为中国石油天然气总公司20世纪90年代“七个老大难油田之首”。

为搞清火烧山油田油藏地质特征，1990年2月，原中国石油天然气总公司（以下简称总公司）专家组裘怿楠等对火烧山油田进行了细致的现场调查研究，认为火烧山油田属于层状裂缝性砂岩油藏。并明确指出：（1）火烧山油田 H_1 — H_4 油组裂缝普遍发育，绝大多数裂缝属背斜褶皱控制的高角度张性潜在缝，在原地应力条件下并未张开，只是在钻井、注水、压裂等人工诱导后才张开成为有效缝。（2）不同岩石类型裂缝发育强度和产状有明显差别、泥岩类裂缝极少，含油砂岩随粒度变粗、层厚增大而裂缝发育强度减弱，不含油粉砂岩类夹层及白云岩类裂缝发育强度最大。（3） H_1 — H_4 油层从沉积上可以分为三套； H_4 — H_3^1 属典型浅湖相沉积，储油砂岩相对均匀，裂缝发育程度也较均匀； H_3^1 — H_2 属扇三角洲扇缘扇中过渡带，储油砂岩非均质严重，裂缝更加剧了它的非均质性。（4）油层组内有十多层泥质白云岩，白云质泥岩和黑色泥岩夹层，局部因裂缝发育而窜通。这些夹层仍然起着隔层的作用，只是连续性受到不同程度的破坏。因此，火烧山油田的油藏应属于层状裂缝性砂岩油藏，或者说是受裂缝复杂化的层状砂岩油藏。油田水窜严重，大多数与裂缝有关。因此，火烧山油田应按层系、井组建立各自的地质模型，具体井组进行具体开发分析，采取相应的开发措施；需要加深裂缝地质规律研究，并在现有四套开发层系的基础上，分四种不同地质模式，开展先导性开发试验、数值模拟机理研究和现场试验，探索治理裂缝的办法。

1991年，全国油气田开发工作会议将“改善火烧山油田开发效果”列为“八五”期间

全国油田重点“阵地仗”之一。1992年4月，中国石油天然气总公司科技司又将“改善火烧山油田开发效果”列为总公司的科研项目。项目内容分为油田地质、油藏工程、钻采工艺三个部分，共列23个二级课题。采用5类20种方法从不同的侧面对裂缝进行了直接和间接的、定量和半定量的描述，进行了5个井组的示踪剂试验、3种开采方式的试验；打密闭取心井2口。

1995年至今，在进行精细油藏描述、开发机理研究、油藏数值模拟、剩余油形成机理及分布规律研究的基础上，进行了先导性开发实验及四期整体综合治理，开展了多种开采方式实验，先后进行了10多种堵剂的工艺现场实验，编制并实施了四期油田综合治理方案，共钻各类新井76口，累计建产能 $17.5 \times 10^4 \text{t}$ ，实施油水井各类措施1400多井次，累计增油 $43.4 \times 10^4 \text{t}$ ，年产油能力由1994年的 $33.9 \times 10^4 \text{t}$ 恢复到 $40 \times 10^4 \text{t}$ ，含水率由55%下降到52.7%，含水上升率控制在5%以内，可采储量增加了 $600 \times 10^4 \text{t}$ 。油田开发形势发生了根本性改变。

通过上述一系列工作，储层的渗流类型发生改变，储层有效渗透率（主要反映裂缝）与储层渗透率比由开发初期的500下降为10，油田的注水量由 $59.2 \times 10^4 \text{t/m}^3$ 提高到 $127.5 \times 10^4 \text{t/m}^3$ ，各套开发层系的地层压力都有不同程度的上升，油田的自然递减、综合递减大幅度下降，含水上升率小于4%，年产油量保持在 $31.6 \times 10^4 \text{t}$ 以上。

寒来暑往，岁月更替，火烧山油田人，经大喜、历小悲，卧薪尝胆，风磨雨难；他们胜不骄，败不馁，忍辱负重，志存高远。他们熟谙科学技术是第一生产力，深化复杂裂缝性砂岩油藏成功开发之认识，提出复杂裂缝性砂岩油藏开发新理论、新方法，创火烧山油田开发、管理模式，形成火烧山综合治理配套技术，立火烧山油田开发稳产十年经验之丰碑。他们弘扬以厂为主的主人翁精神、奋发向上的拼搏精神、艰苦创业的献身精神，坚持以人为本，实行HSE管理，开展“四查一整改”工作，二十余年如一日，荣获总公司“稳油控水典型油田”称号。我们怀着崇敬、自豪和激动的心情，撰写这套系列丛书，旨在通过对火烧山油田依靠科技进步，加强综合治理，实现油田长期稳产的经验进行总结和回顾。我们相信，它的陆续出版必将对高效指导类似油田的开发起到积极作用，同时也有助于广大石油科技工作者科学地认识、管理复杂裂缝性砂岩油藏，为类似油田的开发提供思路和借鉴。

李 斌 王志章

目 录

第一章 总 论	(1)
第一节 火烧山低渗裂缝性砂岩油藏开采技术研究	(1)
一、开采技术矿场试验	(1)
二、稳油控水的主要开采技术研究	(2)
三、开采技术效果评价	(2)
四、结论	(3)
第二节 火烧山油田调剖工艺发展历程	(3)
一、初期探索试验阶段(1989—1993 年)	(5)
二、对应调堵阶段(1993—1997 年)	(6)
三、整体治理阶段(1998—2001 年)	(6)
第二章 复杂裂缝性砂岩油藏室内及现场试验技术	(8)
第一节 注水方式现场试验及效果	(8)
一、间注试验	(8)
二、停注试验	(9)
三、行列注水试验	(9)
四、区域控水稳油试验	(9)
第二节 火烧山油田 H ₃ 层行列注水试验研究	(10)
一、开发简况及行列注水试验的依据	(10)
二、行列注水试验实施阶段及特征效果	(13)
三、确定试验区开发技术界限及合理调整压力系统	(19)
四、行列注水试验效果评价	(20)
五、经济效益评价	(22)
六、结论和建议	(22)
第三节 准东油田分注工艺及提高分注级别研究	(23)
一、分层注水技术发展简介	(23)
二、提高分注级别方案优选	(27)
三、效果分析	(29)
四、认识与建议	(30)
第四节 火烧山油田间注试验研究	(31)
一、试验的必要性	(31)
二、试验区的选择及其简况	(31)
三、试验的实施和效果	(36)
四、间注的地质基础和技术界限的确定	(46)
五、结论和建议	(47)

第三章 复杂裂缝性砂岩油藏调剖技术	(49)
第一节 火烧山裂缝性油藏深调技术	(49)
一、深调技术研究	(49)
二、调剖施工工艺改进	(54)
三、经济效益	(54)
四、结论	(55)
第二节 裂缝性低渗透储层调剖工艺技术及其效果评价	(55)
一、裂缝型	(55)
二、双渗型	(59)
三、孔隙型	(59)
四、结论与建议	(61)
第三节 裂缝性低渗透储层调剖施工工艺技术	(61)
一、分层调剖工艺技术	(61)
二、深部调剖工艺技术	(62)
三、段塞式注入工艺技术	(63)
四、多种堵剂联合注入工艺技术	(63)
五、注入工艺技术	(63)
六、结论	(63)
第四节 黏土双液法调剖技术	(64)
一、室内研究	(64)
二、现场试验	(71)
三、经济效益	(76)
四、结论及建议	(76)
第五节 火烧山油田硅土聚合物调剖试验与应用	(76)
一、概况	(77)
二、硅土聚合物 (SJ-2) 调剖剂及其机理	(77)
三、SJ-2 调剖施工工艺	(78)
四、SJ-2 调剖效果	(79)
五、经济效益	(84)
六、结论	(84)
第六节 火烧山大裂缝储层调剖技术综合研究	(84)
一、目前油田调剖存在问题	(85)
二、整体调剖技术研究	(86)
三、细分层调剖技术	(88)
四、分注全面改善剖面动用程度	(88)
五、调堵工艺改进	(92)
六、综合效果评价	(92)
七、结论及下步建议	(94)
第四章 复杂裂缝性砂岩油藏调堵水工艺技术	(95)
第一节 火烧山油田 H ₃ 层整体调剖堵水技术研究	(95)

一、H ₃ 层整体调堵技术研究	(95)
二、现场试验情况	(97)
三、效果评价	(98)
四、H ₃ 层整体调堵技术的经济效益	(107)
五、结论与认识	(107)
第二节 火烧山油田封堵大孔道技术研究	(107)
一、堵剂的性能及封堵机理	(108)
二、施工工艺	(108)
三、效果分析	(108)
四、经济和社会效益	(109)
五、结论及认识	(109)
第三节 FSE-1 调堵矿场应用研究	(109)
一、堵剂的选择	(109)
二、堵剂的主要性能指标	(110)
三、堵剂基本配方及堵水机理	(110)
四、施工工艺	(111)
五、现场施工	(112)
六、结论	(120)
第四节 火烧山油田防漏注灰新技术的研究与应用	(120)
一、概述	(120)
二、问题的提出	(120)
三、研究过程	(121)
四、效益和应用前景	(121)
第五章 复杂裂缝性砂岩油藏压裂酸化技术研究	(123)
第一节 火烧山油田复杂裂缝性砂岩油藏压裂工艺技术研究	(123)
一、火烧山油田概况	(123)
二、历年新投井回顾	(123)
三、调整井压裂工艺研究	(124)
四、调整井压裂效果	(125)
五、经济效益评价	(126)
六、结论与认识	(126)
第二节 复杂裂缝性砂岩油藏酸化工艺技术	(126)
一、压力场分布与增油量的关系	(127)
二、基质对酸化效果的影响	(128)
三、后期污染对酸化效果的影响	(129)
四、酸类型对酸化效果的影响	(129)
五、结论	(130)
第六章 复杂裂缝性砂岩油藏固井及油层保护技术	(131)
第一节 火烧山油田低温低压易漏调整井平均压力固井技术	(131)
一、引言	(131)

二、火烧山油田特点及固井施工难点	(132)
三、解决问题的方法	(132)
四、控制施工中环空压力平衡	(133)
五、施工效果及生产状况	(135)
六、结论	(136)
第二节 水泥浆在固井过程中油层保护的研究与应用	(136)
一、固井作业中的地层损害	(136)
二、保护油气层的固井技术	(137)
三、现场应用评价	(139)
四、结论	(140)
第七章 复杂裂缝性砂岩油藏配套开采技术	(141)
第一节 区块整体调剖堵水的 PI 决策技术	(141)
一、概述	(141)
二、注水井井口压降曲线与 PI 值	(142)
三、PI 值的理论基础	(142)
四、PI 决策技术	(144)
五、PI 决策技术的专家系统	(147)
六、对区块整体调剖堵水工作的一些认识	(148)
第二节 火烧山油田优化注水措施研究	(148)
一、注水开发历史回顾	(149)
二、火烧山油田注水开发效果分析	(150)
第三节 复杂裂缝性砂岩油藏一体化采油工艺技术研究	(156)
一、封堵、分注一体化采油工艺技术研究	(156)
二、压裂、堵水一体化采油工艺技术研究	(157)
三、分注和调剖相结合	(157)
四、堵水、酸化一体化采油工艺技术	(158)
五、调剖堵水、放大生产压差一体化工艺技术	(159)
六、优化注水效果评价	(160)
七、存在问题	(162)
八、治理对策	(163)

第一章 总 论

第一节 火烧山低渗裂缝性砂岩油藏开采技术研究

火烧山油田的油藏是低渗裂缝性砂岩油藏,开采难度大,水淹、水窜严重。当采出程度还不到5%时,含水已达到52.2%。多年来,为了寻找与油田配套的开采技术,开展了3种开采方式的试验,打密闭取心井2口,进行了10多种堵剂的调堵水实验,试验了2种压裂液、2种分注管柱、3种酸化技术,进行了高能气体压裂、复合射孔等现场实验,实施压、挤、堵、酸化等措施281井次,累计年度措施增产油 7.28×10^4 t,综合含水由治理前的64.5%下降到40.3%,目前稳定在53.4%,水驱控制程度由51.1%提高到68.2%。经过几年来的综合治理,基本上扭转了开采的被动局面,改善了开发效果,取得了良好的经济效益。

一、开采技术矿场试验

(一) 储层流动系统分类

火烧山油田分四套层系开发,储层在纵向上差异较大,在平面上非均质程度严重。据试井、动态分析和测井裂缝解释,将储层分为三类:(1)高导流裂缝发育区,裂缝发育,基质砂岩孔隙度和渗透率低,高导流的裂缝是流体的主要流动通道;(2)低导流系统发育区,以孔隙流动为主的特低渗砂岩储层裂缝不发育,流动通道以砂岩基质孔隙为主,其特征是低渗、低能、低产;(3)双导流系统发育区,它是介于上述两者之间的双渗流动系统储层,这类储层基质孔隙有一定的渗流能力,裂缝也较发育,但每条裂缝规模较小,密度较大。对储层分类的目的是为了有针对性地探索适合不同开采特点的开采方针和开采技术。

(二) 稳油控水的开采试验

最初为了探索适合油田特点的最佳开采模式,针对不同储层类型开展了间注、停注和行列注水试验。

1. 间注试验

间注试验分别在 H_2 和 H_3 层各选1个试验区,其中在 H_2 层进行了3个半周期,各轮停复注生产特征相似,在停注期间的液量、含水、压力下降,油量稳定或略上升;复注时,液量、含水、压力上升,油量下降。 H_2 层取得了一定的效果; H_3 层只进行了一个周期的试验,基本上没有效果。

2. 停注试验

在 H_2 层南部开辟了停注试验区。停注前,综合含水54.7%,地层压力12.43MPa。停注后,试验区产液量下降,含水下降,油量上升,地层压力小幅度下降,气油比稳定,水平自然递减保持稳定,水驱控制程度增加。

3. 行列注水试验

为了探索沿裂缝主方向注水改善开发效果的可能性,在 H_3 层东部开辟了二排注水井夹

五排采油井的行列注水试验区。试验前，综合含水 88.0%。试验后，产液量、含水和液面变化均不明显。

二、稳油控水的主要开采技术研究

火烧山油田经过间注、停注和行列注水试验后，油田开发效果并未得到根本的改善。为了探索出一套适合火烧山油田低渗裂缝性砂岩储层的配套开采技术，分别在 H_2 、 H_3 层选储层特征和注采动态反应具有代表性的区域进行控水稳油试验，实行整体治理。

（一）调剖技术研究

在油田开发的前 8 年中，共进行了 354 井次调剖，成功率为 75.4%，累计增油 7.23×10^4 t，累计降水 4.92×10^4 m³。调剖前后平均井次井口注入压力提高 0.76 MPa，剖面层数和厚度动用程度分别提高了 8.8% 和 20.9%，水平自然递减和水平综合递减分别下降了 10% 和 0.8%。尤其是 H_2 层在停注区调剖后复注效果更加明显。在调剖的基础上，实行低强度温和注水，取得了明显效果，具体表现为：日产油上升了 50.3%，综合含水由 70.9% 下降到 62.5%，地层压力由 9.3 MPa 上升到 11.74 MPa，复注前后年水平自然递减由 43.9% 下降到 4.2%，年油量自然递减由 27.4% 下降到 10.6%。

（二）堵水技术研究

在油田开发的前 8 年（1989—1997 年）中，进行了 10 多种堵剂的堵水试验。其中，HPAM 冻胶类和黏土冻胶双液是两种效果较好、应用广泛的堵剂，井均累计增油 1003 t。高导流裂缝发育区的高含水井则采用 DKD-1 堵水技术，有效率 100%，井均增油 189 t；SD-1 深部堵水有效率 66.7%，井均增油 319 t，虽增油幅度不大，但成功率较高，而且这些井都是前期堵剂措施后效果不明显的井，对油田的意义较大。

（三）压裂技术研究

油田共实施了田管和胍尔胶 2 种压裂液，采用大型压裂、限流压裂等方法共压裂 238 井次，成功率 57.6%，累计增油 12.5×10^4 t，平均井增油 526 t。三种不同渗流介质储层的措施井次和成功率从小到大排序依次是高导流系统、双导流系统、低导流系统发育的储层，这与三种储层水窜程度成反比；增油量和有效天数由从小到大排序依次是高导流系统、低导流系统、双导流系统发育的储层。

（四）酸化技术研究

在油田开发的前 8 年（1989—1997 年）中，共进行过 5 种酸型 31 井次酸化，成功率 64.5%，累计增油 21302 t，单井平均累计增油 677 t，单井平均有效天数 216。在 5 种类型的酸中，乳化酸、土酸和复合酸实施井次多，效果亦较好。三种酸型措施后成功率相差不大，从井累计增油和有效天数看，乳化酸最好，土酸次之，复合酸最差。

（五）分注技术研究

油田目前注水井总数 102 口，分注率为 84%，井下分注已达到分注井总数的 40%，从而极大地缓解了储层剖面上的矛盾，为细化注水、有效注水提供了有力的保障。

三、开采技术效果评价

经过多年的探索，针对低渗裂缝性油藏，火烧山油田已经形成了一套较为成熟的开采技术和开采方法，即针对不同性质、不同渗流特点的储层，分区、分类进行挤、压、堵一体化；分注、调剖相结合的综合治理。经过治理后，油田生产形势发生了显著变化，剖面层数

和厚度动用程度分别由 64.3% 和 67.5% 提高到 71.7% 和 76.6%，日产油水平回升了 23.6%，综合含水由治理前的 64.5% 下降到 40.3%，目前稳定在 53.4%，累计增油 $21.9 \times 10^4 \text{t}$ ，投入产出比为 1:1.93，含水和采出程度见图 1-1-1。

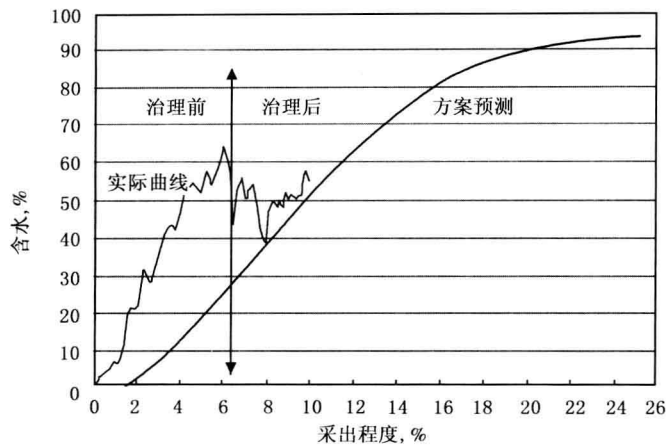


图 1-1-1 火烧山油田含水与采出成度关系图

水驱控制程度由 51.1% 提高到 68.2%，预测水驱动态采收率由 13.88% 提高到 17.80%，新增可采储量 $213 \times 10^4 \text{t}$ ，提高了油田的整体效益。

四、结论

(1) 裂缝发育的低渗砂岩油藏，在已有配套治水工艺技术的基础上，应立足于注水开发，即要有适应油藏不同发育级别裂缝的封堵技术，水井要分注、调剖相结合；在吸水剖面趋于均匀、控制裂缝水窜和油藏含水上升的基础上，适时提高注水强度，保持地层能量，使注入水进入低渗储层及次级裂缝中，有效地驱替其中的原油，提高注入水利用率和驱油效果；对水窜的高含水油井进行堵水，低液量的油井在分析产吸剖面的基础上进行选择压裂或酸化，可使油藏开发取得较好的开发效果。

(2) 裂缝发育的低渗砂岩油藏注水不宜过早，据不同区域、不同井的实际情况确定投注井。这一类储层也可以采取先利用裂缝高导流能力开采，采取压裂以加大裂缝导流能力，减小流动阻力，缩小生产压差，提高产量，增大采油指数。能利用裂缝高导流开采的，先不注水开发。应适时掌握注水时机，以达到效益最大化。

(3) 流体在储层中以孔隙流动为主的低渗砂岩油藏，开采井网密度不宜过大，注水要多井少注、温和注水。

(4) 裂缝发育的低渗砂岩油藏若有边底水，其布井范围和射孔底界应充分考虑油水界面，初期采油压差应严格控制，裂缝水淹后采取相应措施解放储层的产能是治理的主要措施之一。

第二节 火烧山油田调剖工艺发展历程

火烧山油田为注水开发油田，由于低渗透、裂缝发育的油藏特点，油藏非均质性严重，

注入水沿裂缝窜流、突进，导致油田含水大幅度上升。针对油田含水上升速度快、产量递减大等严重的生产问题，从1989年开始进行调堵水技术研究攻关。随着开发形势的变化，注水井调剖技术也在逐步发展，从最初的探索研究开始，经历了发展、应用和目前的区块整体治理的不断提高完善阶段，针对不同储层及流体渗流规律，形成了适应油田不同储层的堵剂系列，并在现场大规模的推广应用。不同时期的措施见图1-2-1。

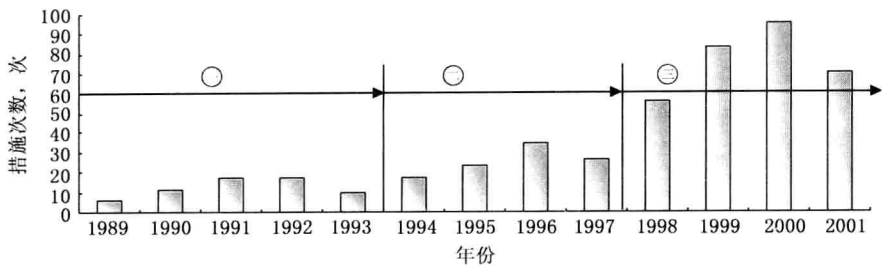


图1-2-1 火烧山油田调剖阶段分布图

调剖作为火烧山油田的主要稳产措施之一，在现场得到了大规模的推广应用。截至目前，注水井累计调剖465井次，见效油井486口，累计增油95086t，累计减水50101m³，取得显著增油效果（表1-2-1），为火烧山油田的稳定开发奠定了良好的基础，油田开发呈现出良好的稳产形势，有效控制了含水大幅度上升的局面，原油产量保持稳定态势，火烧山油田开发曲线直观地反映了油田的稳定。由于多年的调剖治理，保证了油田注水量逐年增加而综合含水保持稳定的局面，水驱油效率得以提高，开发效果变好。

表1-2-1 火烧山油田调剖效果总表

序号	年度	措施井次	可比井次	有效井次	见效油井	累计增油(t)	累计降水(m ³)	累计有效期(d)	井均增油(t)	井均有效天数(d)
1	1989	6	6	0	0	0	0	0	0	0
2	1990	11	11	11	12	3109	2310	1394.3	283	127
3	1991	17	17	10	21	4450	8961	3972.7	262	234
4	1992	17	17	8	12	4800	3085	2306.1	282	136
5	1993	10	10	7	9	1872	2468	744.1	187	74
6	1994	17	17	13	16	3831	1807	2240.7	225	132
7	1995	23	17	15	30	7211	2517	3541	424	154
8	1996	34	30	28	52	6959	6887	2584.2	209	76
9	1997	26	22	19	35	7669	5123	4615	299	178
10	1998	56	44	40	64	13439	5524	6200.3	305	111
11	1999	83	62	55	96	16913	2199	9214.8	273	111
12	2000	95	76	52	85	18831	5340	11134	248	117
13	2001	70	42	30	46	6002	3880	2711.4	143	39
合 计		465	371	288	478	95086	50101	50658.6	248	109

随着油田开发时间的推移，调剖技术也在不断的发展提高，在油田不同的开发阶段，形成了不同的堵剂技术和工艺技术。

一、初期探索试验阶段（1989—1993 年）

（一）封堵对象

因水窜主要是注入水沿裂缝窜流，故调剖主要是针对裂缝发育区域，封堵对象是注水井的水窜大孔道，以遏制水窜为目的。主要的试验区域选择在 H₂ 层和 H₃ 层水窜较为严重的油田北部。

（二）调剖剂技术

火烧山油田的油层裂缝极其发育，尤其是垂向裂缝，但基质渗透率极低，这类复杂的特殊油藏，国内外没有现成的开发经验可以借鉴。油田处于初期开发阶段，对裂缝的认识也处在探索时期，因而注水井的调剖工作处于先导性试验阶段，先后采用了多种调剖剂技术进行现场试验，主要试验了 SJ-2 硅土凝胶技术、TP-910 技术、黏土双液法技术、HR-HPAM 等多种封堵剂技术，封堵效果见表 1-2-2。

表 1-2-2 1989—1993 年封堵剂调剖效果统计表

序号	调剖技术	措施井次	有效井次	有效率（%）	累计增油（t）	累计降水（t）	累计有效天数（d）	井均增油（t）
1	GT-25	1	0	0	0	0	0	0
2	HR-HPAM	7	5	71.4	1466	727	715.1	209
3	LD-1	2	0	0	0	0	0	0
4	PSE-1	1	1	100	154	0	80	154
5	SJ-2 凝胶	22	16	72.7	6689	10073	5290	304
6	TP-910	7	7	71.4	1518	1101	564.5	217
7	TSE	4	1	25	394	555	151.7	99
8	UF-P	4	0	0	0	0	0	0
9	黏土双液	13	9	69	4010	4368	1615.9	308
合 计		61	39	63.9	14231	16824	8417.2	233

从现场试验中筛选出 SJ-2 硅土凝胶堵剂和黏土双液技术为主要的调剖剂技术。

（三）调剖机理

SJ-2 硅土凝胶堵剂是利用红土与部分水解聚丙烯酰胺产生絮凝形成高强度的絮状物封堵高渗透层而达到调剖的目的，这种堵剂具有强度较高、稳定性好、抗剪切的性能。黏土双液法与此原理类似，是将黏土悬浮液与高聚物溶液，交替注入大孔道窜流地层，由注入水将其推至地层深部相遇产生絮凝，起到封堵大孔道的作用。另外，黏土自身的粒径及膨胀堵塞孔道也起到封堵的作用。这种堵剂价格低廉，货源充足，耐温、耐盐、抗剪切、稳定性高，适合油田大规模的应用。由于 SJ-2 硅土凝胶堵剂现场配制难度较大，不易达到工艺设计要求，因而黏土双液法成为主要的调剖剂技术，具有很好的推广价值。

（四）实施效果

累计在现场试验 61 井次，累计增油 14231t，累计降水 16824t，平均单井增油 233t，调剖试验初见成效。

二、对应调堵阶段（1993—1997 年）

（一）封堵对象

在这一阶段，控水稳油以堵水为主、调剖为辅，注水井调剖的主要封堵对象仍为裂缝发育区域，封堵主要的水窜通道，以减少无效水的产出，扩大波及效率，对水窜的油井实施堵水，封堵高渗层，启动中低渗透层供液。

（二）调剖剂技术

此阶段的调剖剂技术主要采用了黏土双液法、CTG - 1 技术、HR - HPAM 技术对裂缝进行封堵，形成了以黏土双液法为主要调剖剂的封堵技术，并且对难以封堵的大裂缝大孔道水窜通道进行了多种堵剂技术的研究与试验，封堵剂技术调剖效果见表 1 - 2 - 3。

表 1 - 2 - 3 1994—1997 年封堵剂调剖效果表

序号	调剖技术	措施井次	有效井次	有效率（%）	累计增油（t）	累计降水（t）	累计有效天数（d）	井均增油（t）
1	HSE	1	0	0.0	0	0	0	0
2	ICT	2	0	0.0	0	0	0	0
3	胶质水泥	4	0	0.0	0	0	0	0
4	HR - HPAM	17	11	64.7	4251	3063	2544.1	250
5	黏土双液	38	29	76.3	10012	9553	4101.8	263
6	CTG - 1	38	28	73.7	11407	5061	6335	300
合 计		100	68	68.0	25670	17677	12980.9	257

（三）应用效果

实施调剖试验 100 井次，累计增油 25670t，累计降水 17677t，平均单井增油 257t，调堵水对应治理取得较好的效果。到 1997 年油田含水稳定在 50.8%，控水稳油取得显著成效。

三、整体治理阶段（1998—2001 年）

（一）封堵对象

随着开发时间的延长，注水井窜流由原来的以裂缝为主转为裂缝孔隙型，封堵对象也由单纯的裂缝转为对裂缝和孔隙。

（二）调剖剂技术

此阶段的调剖剂技术主要应用的调剖方法是冻胶复合堵剂，由于大部分水井都属于多次调剖，油层条件、调剖机理均发生了变化，注水井近井区域残余油饱和度相对减少，水驱前缘不断向油井延伸，井筒周围小剂量调剖后，注入水将重新绕流，回到高渗透部位，这就需要进行大剂量深部处理，调剖技术由单一向复合体系发展，由小剂量向大剂量发展。封堵效果见表 1 - 2 - 4。

表 1-2-4 1998—2001 年封堵剂调剖效果表

序号	调剖技术	措施井次	有效井次	有效率 (%)	累计增油 (t)	累计降水 (t)	累计有效天数 (d)	井均增油 (t)
1	DKD-1	1	0	0.0	0	0	0	0
2	反应型堵剂	1	0	0.0	0	0	0	0
3	复合胶	5	0	0.0	0	0	0	0
4	颗粒堵剂	13	2	15.4	218	57	117.4	17
5	XN-34	5	1	20.0	91	16	45	18
6	微粒凝胶	5	0	0.0	98	125.2	62	20
7	DKD-2	5	3	60.0	162	137	148.7	32
8	GDGH	21	5	23.8	4071	232	1477.3	194
9	复合堵剂	186	98	52.7	34502	12535	19217.8	185
10	M-1	2	1	50.0	428	0	150	214
11	CTG-1	29	17	58.6	6595	1035	4199.8	227
12	HR-HPAM	28	15	53.6	6988	813.8	2594.6	250
13	大剂量调剖	7	3	42.9	2032	1992	1247.9	290
合 计		308	145	47.1	55185	16943	29260.5	179

在这一阶段,各种调剖剂技术得到广泛应用并开展了多项研究试验:一是推广应用了大规模整体调堵水技术;二是形成了针对不同渗流类型的调堵剂技术;三是开辟了“2+3”试验区进行“2+3”技术研究;四是开始探索注水井深部调剖技术;五是开展调驱试验;六是注入工艺得到不断的提高和发展。由于调剖规模逐步变大,下一步需要开展大规模低成本堵剂技术的研究。

(三) 调剖机理

将各种调剖剂合理组合,堵剂各组分的协同作用可极大地提高封堵效果。

(四) 应用效果

在油藏地质、油藏工程研究的基础上,以裂缝发育的 H_3 层作为整体调堵水治理的试验区。实施后, H_3 层当年调剖累计增油 3635t,在此基础上对应堵水 7 井次,有效 6 井次,当年即增油 1607t,取得较好的措施效果。当年增加注水量 $8.3 \times 10^4 \text{m}^3$,油田含水稳定,地层压力由 11.16MPa 回升到 11.36MPa,压力保持程度由 73.6% 提高到 74.9%,通过调剖缓解了层间吸水不均的矛盾,使注入水得到合理分配,油水井剖面对应程度增加,达到了改善驱油效果的目的。

从 1998 年至 2001 年,开始在整个油田大规模的开展了整体调堵水技术的现场应用,累计注水井调剖 308 井次,增产原油 55185t,平均单井增油 179t。