



中国石油勘探工程技术攻关丛书

ZHONGGUO SHIYOU KANTAN GONGCHENG JISHU GONGGUAN CONGSHU

火山岩和碳酸盐岩储层 试油配套技术

○ 中国石油勘探与生产分公司 著



石油工业出版社

中国石油勘探工程技术攻关丛书

火山岩和碳酸盐岩储层 试油配套技术

中国石油勘探与生产分公司 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是中国石油 2006—2008 年对火山岩和碳酸盐岩储层试油配套技术（含储层改造）攻关成果的总结，介绍了耐高温射孔测试联作技术，含 CO₂ 储层试气防水合物（冰堵）和防腐技术，压裂改造的优化设计方法和现场控制技术，气井中长期产能预测及评价技术，管柱力学分析和配置为核心的高压深井测试技术，现场地表高矿化度水配制压裂液技术，高温高压低滤失压井液、压裂液体系、压裂工具与管柱和三种深度改造酸液体系（GCA 地面交联酸、TCA 温控变黏酸、DCA 转向酸），针对不同储层和工况的测试管柱系列等特色试油配套技术。

本书适合从事试油、试气、储层改造的技术人员、管理人员及院校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

火山岩和碳酸盐岩储层试油配套技术/中国石油勘探与生产分公司著.
北京：石油工业出版社，2010.6

（中国石油勘探工程技术攻关丛书）

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7766 - 9

I. 火…

II. 中…

III. ①火山岩 - 试油 - 技术

②碳酸盐岩 - 试油 - 技术

IV. TE273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 073097 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）64523562

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 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：15

字数：320 千字

定价：75.00 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

《中国石油勘探工程技术攻关丛书》

编 委 会

主 任：周吉平

副主任：赵政璋 贾承造

委 员：（按姓氏笔画排序）

马新华	王元基	王玉华	王招明	付锁堂	冯志强
匡立春	孙 宁	孙龙德	杨 华	杜金虎	吴 枚
吴 奇	吴永平	吴国干	何江川	邹才能	张 玮
张国珍	陈建军	周明春	周海民	周家尧	周新源
郑新权	孟卫工	赵文智	赵邦六	赵志魁	赵贤正
袁士义	贾 东	夏义平	徐凤银	徐春春	梁世君
董月霞	董焕忠	魏顶民			

《火山岩和碳酸盐岩储层试油配套技术》

编 写 组

主 编：吴 奇

副 主 编：魏顶民 张绍礼 丁云宏 张福祥

刘 合 王 峰 何 冶

主要成员：许显志 戴平生 胥 云 李元斌 郑有成

张大伟 王永辉 杨振周 于振东 杨向同

贾永禄 陈 勉 崔明月 窦益华 金 衍

周福建 王维君 杨 东 彭建新 岳湘刚

张玉广 朱礼斌 雷胜林 秦世勇 朱饶云

张永平 冯程滨 张有才 李建波 林玉玺

程晓刚 高 萍 朱宝峰 张伟菊 韩 松

程兴生 牛丽娟 姜学海 刘长宇 张应安

蒋凯军 韩志强 张广华 范学军 王文军

徐 贵 吕文忠 谢建华 高 飞 侯景龙

唐鹏飞 张 浩 刘 宇 许志赫 李 阳

杨立峰 钱春江 李永平 车明光 刘雄飞

汪道斌 张德平 胥会成 王 林 张明友

贺秋云 李钦道 于志光

顾 问：陈元千 庄惠农 蒋 夔 单文文 刘同斌

刘能强

序

中国石油作为我国能源行业的特大型骨干企业，在保障国家能源安全方面具有义不容辞的光荣使命。经过半个多世纪的大规模勘探开发，国内油气勘探已进入一个新的发展阶段，特别是随着勘探开发的不断深入，勘探领域发生了很大变化。从地面条件看，勘探对象已从平原向山地、沙漠、滩海大幅度延伸；从地质条件看，低渗透、复杂碳酸盐岩、火山岩等复杂储层和稠油等复杂油藏所占比例大幅度增加。在这种情况下，如何继续大幅度增加储量以满足油气产量持续增长的需要成了摆在我们面前的迫切问题。

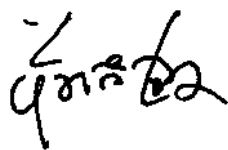
为了积极应对这种挑战，2005 年我们明确提出了“油气勘探必须走技术发展之路”的要求，并按照“突出重点探区、依托重点项目、注重实际效果”的思路，设立专项投资，发挥中国石油整体优势，分物探、钻井、测井、试油四个专业，重点在塔里木、四川、准噶尔、渤海湾、柴达木、松辽、鄂尔多斯等盆地组织了以现场为主体的工程技术攻关。通过几年的不懈努力，一大批制约油气勘探的瓶颈技术得以攻克，针对复杂地表和高陡构造的地震采集、处理和解释一体化技术取得明显突破，发现了一批具有战略意义的勘探目标；以欠平衡钻井、垂直钻井等为主的低压储层保护和高陡构造防斜打快技术极大地提升了钻井能力，保障了勘探发现；以成像测井为主的采集技术和以复杂油气藏饱和度研究为主的解释技术研发成功，较好地保障了火山岩、低渗透等复杂储层识别与评价的需要；以大型酸化和压裂改造为主的增产技术，提升了低渗透油气层的商业价值。一大批工程技术的突破不仅提高了其在油气勘探中的保障能力，也增长了工程技术服务队伍的竞争能力，更为重要的是拓展了新的油气勘探领域，开阔了找油找气的视野，进一步坚定了我们不断寻找大油气田的信心和决心。

伴随着工程技术的进步，近年来我们已经进入新的油气储量增长高峰期，连续六年探明石油地质储量大于 5 亿吨，连续三年探明天然气地质储量大于 3000 亿立方米。新发现并落实了长庆苏里格、塔里木库车等储量规模万亿立方米的气田和目标区，发现并落实了长庆姬塬和西峰、塔里木塔北、

准噶尔西北缘等一批储量规模 5 至 10 亿吨的规模储量区。由于勘探的快速发展，油气资源基础不断夯实，油气田开发也进入了快速发展的新阶段，原油产量从 2006 年开始连续三年创历史新高，天然气产量从 2005 年开始连续五年换“百”字头。

《中国石油勘探工程技术攻关丛书》系统总结了这几年来技术攻关的丰硕成果，凝聚了攻关单位数百名科技工作者的辛勤劳动。相信这套《丛书》的出版，必将对提高技术人员的业务素质和管理人员的驾驭能力、提升勘探技术应用水平起到带动和促进作用，也必将为推动中国石油上游业务的发展起到重要作用。

认识没有止境，攻关永不停步。随着勘探难度的增加，许多新的问题需要解决，大量技术难题有待攻克。我们必须继续坚定走技术发展之路不动摇，继续狠抓技术攻关不松劲。只有这样，才能持续推动工程技术进步，才能更好地为“储量增长高峰期工程”和“稳定并提高单井日产量工程”提供技术保障。

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Zou Taofu' (Zou Taofu), written in a cursive style.

2009 年 11 月 2 日

前言

近年来,油气勘探快速发展,勘探领域不断扩大,勘探目标愈来愈复杂,难度愈来愈大。随着火山岩天然气勘探的突破和碳酸盐岩油气勘探的快速发展,试油难度不断加大,试油工作面临严峻挑战。

试油是油气勘探获得突破和发现、取全取准资料、认识和评价储层、证实油气储量存在和经济性的直接技术手段,是油气勘探中的重要环节。根据2005年勘探年会上蒋洁敏总经理提出的“油气勘探必须走技术发展之路”的总体要求,勘探与生产分公司以“立足重大领域,依托重点项目,攻克关键问题,形成配套技术”的原则,组织了油气勘探重点工程技术攻关,2006年设立了“火山岩、碳酸盐岩等特殊储层试油(含措施改造)配套技术研究”项目,依托松辽盆地深层火山岩、塔里木塔中I号坡折带和四川龙岗碳酸盐岩油气重点勘探项目开展攻关。采取大庆、吉林、塔里木、西南油气田和中国石油勘探开发研究院廊坊分院联合攻关的组织方式,发挥中国石油整体优势,在集成原有试油技术的基础上,针对火山岩和碳酸盐岩储层试油中存在的问题进行了持续攻关,攻关过程中紧密与依托的重点勘探项目试油生产相结合,取得的研究成果及时用于试油生产实践,解决了勘探过程中的试油难题,实现了“一年初见成效,三年基本配套”的攻关总目标。

攻关前火山岩储层试油(气)面临的主要技术难题是储层温度高达 $170\sim 180^{\circ}\text{C}$,储层裂缝发育,有腐蚀性较强的 CO_2 气体;射孔测试联作技术和压井液不能适应高温条件(大于 150°C)储层测试要求; 100m^3 陶粒以上大规模压裂工艺尚不完善配套;没有适应储层温度大于 170°C 的压裂液体系;高含 CO_2 储层尚没有成熟的试油(气)工艺技术,对试油(气)装备和井下工具性能要求较高。

攻关前碳酸盐岩储层试油面临的主要技术难题是储层埋藏深($5000\sim 6500\text{m}$)、地层压力和温度较高、非均质性强、储层类型复杂、普遍含 H_2S ;储层深度改造工艺不配套,改造工作液不能适应储层深度改造的需要,储层改造措施针对性不强;测试管柱功能较单一,不能完全适应缝洞型碳酸盐岩储层试油要求;安全试油难度大;对试油装备和井下工具性能要求高。

经过从2006年到2008年的持续攻关,形成了适应火山岩和碳酸盐岩储层试油的配套技术。在火山岩储层试油方面:形成了适应 170°C 储层的射孔测试联作技术;研制配套了试油(气)资料自动采集和远程无线实时传输系统及软件;开发了 170°C 低滤失压井液;形成气井中长期产能预测及评价技术;形成含 CO_2 储层试气防水合物(防冰堵)和防腐技术;研发了 180°C 高温压裂液体系;形成了火山岩储层压裂改造的优化设计方法和现场控制技术;研制配套了耐温 180°C 、耐压差 80MPa 的压裂工具和管柱;形成了深层火山岩储层安全试油(气)生产系统。在碳酸盐岩储层试油(气)方面:探索了裂缝型碳酸盐岩储层损害和垮塌及人工裂缝延伸机理,建立了碳酸盐岩储层损害评价方法及规范;建立了试井及地质综合评估方法;形成了针对不同储层和工况的测试管柱系列;形成了以井筒评价、管柱力学分析和配置为核心的高压深井测试技术;研发了一种深度改造酸液体系(GCA地面交联酸、TCA温控变黏酸、DCA转向酸),研发了现场地表高矿化度水配制压裂液技术,制定了《易漏易

喷试油层压井、换装井口技术方案及安全管理》规定，建立了碳酸盐岩储层安全试油（气）生产系统。

这些成果在松辽盆地深层火山岩天然气勘探、塔里木塔中 I 号坡折带碳酸盐岩油气勘探、四川龙岗碳酸盐岩天然气勘探试油生产中 247 口井 496 层中应用，确保了松辽盆地深层火山岩、塔中 I 号坡折带和四川龙岗碳酸盐岩重点勘探项目试油任务的安全顺利完成，为完成这些重点勘探项目近三年的油气储量任务做出了重大贡献。

三年持续攻关的实践证明，由中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司针对重点勘探领域和目标中存在的试油瓶颈难题设立油气勘探重点工程技术攻关项目，以重点勘探项目为依托，发挥中国石油的整体优势，组织油田和研究院联合攻关，解决试油生产的实际问题，是行之有效的攻关模式，保证了勘探任务的顺利完成。

本书由中国石油勘探与生产分公司组织编写，编写过程中得到了攻关各参加单位的大力支持，勘探与生产分公司多次到廊坊分院、大庆油田、塔里木油田组织相关人员，就本书的框架结构、编写内容进行了充分细致的讨论。在三年研究成果总结报告的基础上，组织相关人员先后赴大庆油田、塔里木油田，认真编写了各章节的内容。

本书分为火山岩储层试油配套技术和碳酸盐岩储层试油配套技术上下两篇，是三年来火山岩和碳酸盐岩储层试油主要攻关成果的提炼。从基础理论到实用技术、工艺流程到工具装备和应用方法，并附有大量应用实例，有利于试油技术人员借鉴和参考应用。其中前言由张绍礼编写，上篇的第一章由戴平生、丁云宏、杨振周编写，第二章由许显志、张绍礼、杨振周、李建波、林玉玺、程晓刚、唐鹏飞、韩志强编写，第三章由张绍礼、许显志、于振东、牛丽娟、张大伟、林玉玺、范学军、徐贵、蒋凯军、张广华、韩志强、张伟菊、高萍、张德平、胥会成编写，第四章由戴平生、杨振周、丁云宏、张玉广、张永平、岳湘刚、张有才、王文军、刘长宇、张应安、吕文忠、冯程滨、李阳、韩松、许志赫、谢建华、高飞、侯景龙、唐鹏飞、张浩、刘宇、杨立峰、刘萍、邱晓慧编写，第五章由许显志、于振东、杨东、林玉玺、范学军、徐贵编写。下篇的第六章由张福祥、胥云、何冶编写，第七章由陈勉、金衍、周福建、刘雄飞、汪道斌编写，第八章由贾永禄、朱宝峰、李元斌、朱礼斌、郑有成、王维君、雷胜林编写，第九章由张福祥、张绍礼、杨向同、窦益华、秦世勇、朱饶云、姜学海、王维君、张明友、贺秋云、李钦道、于志光编写，第十章由王永辉、胥云、何冶、周福建、彭建新、程兴生、崔明月、李永平、车明光、钱江春、王林、杨艳丽、徐敏杰、朱文编写。全书由张绍礼、王永辉、杨振周统稿。

在项目攻关和本书的编写过程中，得到了中国石油天然气股份有限公司赵政璋副总裁和贾承造院士的指导和大力支持，并得到了魏顶民、丁云宏、张福祥、胥云、许显志、戴平生、李元斌、何冶等领导和中国石油勘探开发研究院廊坊分院的鼎力相助，还得到了中国石油勘探与生产分公司有关处室的密切配合，采油采气工艺处做了大量的具体组织、技术指导和编写工作，石油工业出版社对出版样稿进行了详细的校对与修改，对本书补益很大。值此书出版之际，谨向他们表示衷心的感谢。

限于笔者水平有限，本书难以全面反映三年攻关的全部成果，书中难免有不足之处，敬请读者提出宝贵意见。

目 录

上篇 火山岩储层试油配套技术

第一章 概述	(3)
第二章 深层火山岩储层试油技术现状	(5)
第一节 深层火山岩储层试气工艺技术现状	(5)
第二节 深层火山岩储层压裂工艺技术现状	(6)
第三节 深层火山岩储层试气安全生产系统现状	(6)
第三章 深层火山岩储层试气工艺技术应用	(8)
第一节 适应储层温度 170℃ 射孔测试及联作工艺技术	(8)
第二节 高产气层压后排液求产试气工艺方法和工作制度	(10)
第三节 适应储层温度 170℃ 压井液及应用	(16)
第四节 试气资料自动采集和远程无线实时传输系统	(21)
第五节 气井中长期产能预测及评价技术	(23)
第六节 含 CO ₂ 储层试气防水合物(冰堵)技术	(24)
第七节 含 CO ₂ 储层试气防腐技术	(37)
第四章 深层火山岩储层压裂工艺技术应用	(41)
第一节 火山岩岩心实验	(41)
第二节 火山岩岩板长期导流能力和气体导流能力测试	(49)
第三节 火山岩储层压裂优化设计	(53)
第四节 耐温 180℃ 的高温压裂液体系	(65)
第五节 耐高温、大规模压裂工具、管柱	(68)
第六节 压裂现场实施和分析	(73)
第五章 火山岩试气安全生产系统及应用	(76)
第一节 井口试气设备优选配套	(76)
第二节 地面工艺流程安全	(79)
第三节 高温深井试气管柱力学分析及应用	(81)

下篇 碳酸盐岩储层试油配套技术

第六章 概述	(95)
第七章 裂缝性碳酸盐岩储层损害和坍塌及人工裂缝延伸机理	(99)
第一节 储层损害机理	(99)
第二节 碳酸盐岩储层井壁垮塌机理	(114)
第三节 裂缝性储层人工裂缝延伸机理	(119)

第八章 试井及地质综合评估方法 (129)

 第一节 试井评价方法 (129)

 第二节 塔里木盆地碳酸盐岩地质综合评估方法 (146)

 第三节 四川龙岗碳酸盐岩地质综合评估技术 (153)

第九章 碳酸盐岩储层试油技术 (156)

 第一节 测试管柱校核和配置技术 (156)

 第二节 多功能地面流程 (171)

 第三节 安全试油（气）生产系统 (175)

第十章 碳酸盐岩储层改造技术 (190)

 第一节 碳酸盐岩储层改造方式优选 (190)

 第二节 碳酸盐岩储层酸化（压裂）技术 (198)

 第三节 碳酸盐岩储层加砂压裂技术 (222)

参考文献 (230)

上篇 火山岩储层 试油配套技术

第一章 概述

我国火山岩油气资源量潜力巨大，松辽盆地、准噶尔盆地、三塘湖盆地、渤海湾等都有火山岩油气藏发现，今后的勘探开发将更多地面临火山岩油气藏。可以预见，火山岩有着广阔的油气勘探和开发前景，是我国石油工业增储上产的一个重要领域。

2006 年火山岩储层试油（气）技术存在的主要难点：裂缝性储层，有腐蚀性较强的 CO_2 气体；地层温度高达 $170 \sim 180^\circ\text{C}$ ；射孔测试联作技术和压井液不能适应高温条件（大于 150°C ）储层测试要求； 100m^3 陶粒以上大规模压裂工艺尚不完善配套；没有适应储层温度大于 170°C 的压裂液体系；高含 CO_2 储层尚没有成熟的试油（气）工艺技术，对试油（气）装备和井下工具性能要求较高。

以松辽盆地深层火山岩勘探为依托，通过 3 年技术攻关，到 2008 年年底，形成了火山岩储层试油（含措施改造）配套技术，满足了火山岩天然气勘探生产的需要。

在火山岩储层试油攻关方面取得了以下成果和认识：

（1）形成深层火山岩储层试气工艺技术。

①设计配套了适应 170°C 储层的射孔测试联作工艺，现场试验的最高温度为 184.8°C （DYS1 井），最高压差为 62MPa 。通过耐高温井下测试工具、压井液和压井方法的研究，在 DXS 气田 DXS13 等井上应用 167 井次深层射孔测试及联作施工，深层应用覆盖率 85%，工艺一次成功率 96.1%，形成了火山岩储层试油（气）技术。

②建立了适用于庆深气田试气的“一点法”公式，与系统试气二项式计算的无阻流量对比，相对误差在 11% 以内，满足了生产需求。

③形成适合火山岩储层的中长期产能预测方法，应用 30 井次，预测符合率 86.7%。

④研制配套了 DST1000 试油（气）资料自动采集和远程无线实时传输系统及软件，试验应用 92 井次。

⑤开发了 170°C 低滤失压井液配方，密度可达 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ ，耐温 170°C ，pH 值在 $8 \sim 10$ 之间，与地层的配伍性良好，渗透率恢复率达到 85.94%，有效地保护了储层。

⑥完成不同体系下水合物生成室内实验，建立了预测模型，并形成了地面管线防冰堵技术，现场应用 5 口井。

（2）形成深层火山岩储层改造技术。

①进行了火山岩储层的岩石力学参数、可动流体等测试。火山岩储层杨氏模量、抗压强度和储层的岩性有很大的关系，变化较大。

②研发了 180°C 高温压裂液体系，压裂液体系具有很好的耐温耐剪切性能和破胶性能，可以满足储层改造的要求。

③通过对天然裂缝、地应力计算方法、构造应力对人工裂缝影响的研究，形成了火山岩储层压裂改造的优化设计方法和现场控制技术。

④形成了耐温 180°C ，压差 80MPa 压裂管柱并在现场应用。完成 90 口井 122 层段现场试验，其中单压管柱 93 个层段，加砂超过 100m^3 有 7 口井；采用插入式分层管柱 29 个层

段，加砂超过 100m^3 有 8 口井，一次施工工艺成功率达到 100%，满足了大规模加砂和高温高压施工的需要。

(3) 形成深层火山岩储层安全试油（气）生产系统。

①形成了高温深井试气（压裂）井下管柱力学分析及强度校核技术。在松辽盆地 DXS 井、JCS1 井等进行了 25 井次应用。

②优选配套液控剪切双闸板防喷器及环型防喷器，保证了试油（气）安全。

③规范配套了地面试气流程、压裂流程、压井流程。

④制定了《深层试气压井施工管理暂行规定》、《井控工作七项管理制度》，修改、完善了安全试油（气）操作规程，这些规定、制度和规程的制定与完善能更好地指导现场施工，确保井控安全。

第二章 深层火山岩储层试油技术现状

攻关前进行了国外深层火山岩试气技术的文献调研和国内实际试气技术水平的调研，了解了国内外在深层火山岩试气工艺方面的技术现状，明确了深层火山岩试气技术存在的问题，并对攻关前国内外深层火山岩试气技术现状进行了总结”。

第一节 深层火山岩储层试气工艺技术现状

一、射孔测试联作工艺技术

射孔测试联作技术是集油管输送射孔、地层测试于一体的联作技术，可以实现一趟管柱下井完成射孔、测试两项作业，具有负压射孔、录取地层资料准确和安全环保等特点。2006年已形成了较完善的常规射孔测试联作技术，但还没有适应高温条件下的射孔测试联作工艺技术。

2006年国内各气田都高度重视气井的射孔测试联作技术，可以进行耐温 150°C 和压差 35MPa 油气井的射孔测试。大庆油田初步形成了适应温度低于 150°C ，压差小于 35MPa 的射孔测试联作工艺技术，在火山岩储层应用覆盖率达到了90%，具有年施工50层次的生产能力。

二、深层试气工艺技术

国外在砂岩、碳酸盐岩储层等高压高产油（气）井已形成了井下工具、管柱结构、地面流程和地面计量等配套技术；尤其重视气层保护工作，已形成了系列化的压井工艺技术。压井液主要有气体型、水基型和油基型，但还没有关于高温、高压火山岩储层压井工艺技术的文献报道。

在深井压井液方面，20世纪90年代以来，国内各油田在围绕稳定黏土、防止固相侵入、降滤失、降低伤害和低腐蚀等方面开展了深入的研究。无固相清洁盐水压井液、无固相聚合物类压井液、有机聚合物类压井液及其配套技术都得到了发展和完善，但还没有形成耐温 170°C 火山岩储层的压井液。

在试井方面，近几年国内一些油田根据技术发展和解决现场实际问题的需要，引进了多套数值试井解释系统，处于推广应用阶段。大庆油田通过多年来的试井理论研究和现代试井软件开发，初步形成了一套适合于砂泥岩储层的试井设计、资料解释及产能预测于一体的试油评价系统，但还不适应火山岩储层的试气分析评价要求。

在试气资料自动采集和远程无线实时传输方面，针对试油（气）作业施工点多、面广和战线长的特点，大庆油田开发了简单的现场地面自动采集设备，初步实现了部分数据的现场自动采集。

大庆油田针对新发现的火山岩天然气储层，试气工艺技术在压井工艺、井控、试气工作制度、地面分离计量等方面还处于探索阶段。

第二节 深层火山岩储层压裂工艺技术现状

国外关于开展火山岩储层压裂技术研究并成功实施的报道,只有日本 Minami - Nagaoka 气田,从该气田测试压裂及加砂压裂施工的压力变化特征分析,与庆深气田有较大区别。荷兰 Delft 大学和美国 UT 及国家实验室大多通过建立大尺寸的岩心实验模拟装置对裂缝起裂进行模拟研究,同时能够通过真三轴的水力裂缝起裂与扩展的模拟实验实现对储层真实状况的实时模拟。揭示了裂缝的延伸不是单一的、平面的和对称于井眼的,与想象的和目前设计的裂缝存在很大差异,揭示的裂缝形状有 T 型裂缝、水平裂缝、非单一裂缝(多裂缝),裂缝可能转向等。这些对裂缝起裂和延伸机理的认识促进了对模型的改进与提高。

中国石油勘探开发研究院在 20 世纪八九十年代对水力裂缝扩展进行了部分物理模拟实验,因为采用的岩样尺寸小($<30\text{cm}$),无法监测裂缝的实时扩展,另外也没有考虑天然裂缝的影响。石油大学在“九五”期间对水力裂缝的扩展机理进行了实验研究。研究中采用 $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的试样,因为试样小,另外声发射探头少,不能实时监测裂缝的扩展情况。

从压裂液体系上看,国内外应用的仍然是以水基压裂液为主体,泡沫压裂液和油基压裂液体系为补充。国内外在压裂液体系方面的重要进展是:(1)针对常规植物胶聚合物压裂液存在残渣和残胶状况,发展了表面活性剂压裂液(“无聚合物”或“清污压裂液”);(2)针对高稠化剂浓度导致高伤害和高成本的特点,研究提出了低浓度超级瓜胶压裂液、超低浓度瓜胶压裂液;(3)利用低分子缔合与“治愈”的复合效应,提出了瓜胶可控制降解和低分子瓜胶压裂液;(4)适应国内低渗透低压油气藏改造的需要,发展了酸性交联的 CO_2 泡沫压裂液;(5)针对低渗透的边际油层,研究提出了低成本清水压裂技术。

国内外针对裂缝性储层的特点,主要采用:(1)油气藏工程技术,特别是地应力场及地层滤失性的精细评估,包括天然裂缝性质的研究,对潜在性与张开性两种不同类型的天然裂缝,采取截然相反的两种设计思路;(2)与裂缝方位匹配的优化射孔技术;(3)防止近井筒砂堵的支撑剂段塞技术和冻胶段塞技术;(4)三轴岩石力学参数的实验研究,包括泊松比、杨氏模量、断裂韧性的测试等;(5)排量的优化技术;(6)小粒径支撑剂及树脂包裹支撑剂的评价与优选技术;(7)加砂程序的优化。在裂缝性储层的现场增产改造中,该项技术在四川川中充西构造香四气藏(裂缝性砂岩)、新疆小拐(裂缝性砂岩)、塔里木碳酸盐岩储层和国外的哈萨克斯坦(裂缝性碳酸盐岩)等油田进行了现场试验应用,获得了成功,有的还取得了明显的效果。

2002 年大庆油田 DXS1 井试气压裂获得成功,在徐家围子发现了大型火山岩气藏,随后进行了火山岩储层压裂工艺及设计方法的探索研究及现场试验,但由于对裂缝延伸机理认识不清,造成深层火山岩压裂方案制定目的性不强,测试压裂结论可靠性不高,控制措施针对性不强,施工规模与压后增产效果之间不匹配等问题,使得火山岩储层压裂改造施工风险仍然较高。

第三节 深层火山岩储层试气安全生产系统现状

国外井控及配套技术十分完善,能够满足压力 105MPa ,日产气量数百万立方米的高压