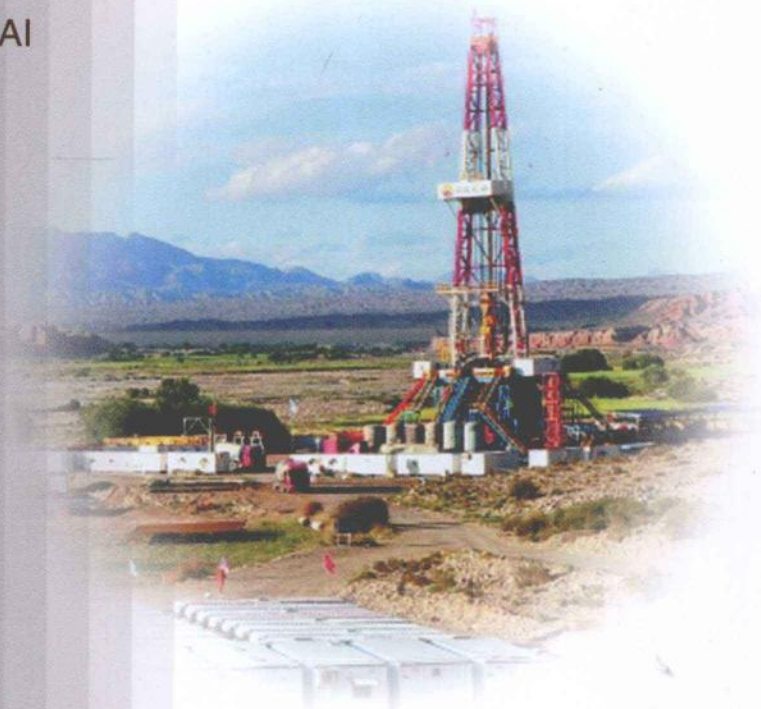


低渗透油田 强脉冲加载压裂技术

○ 吴晋军 著



DISHENTOU YOUTIAN
QIANGMAICHONG JIAZAI
YALIE JISHU



石油工业出版社

西安石油大学优秀学术著作出版基金资助出版

低渗透油田 强脉冲加载压裂技术

吴晋军 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合我国低渗透油田储层特征及开发现状,简要介绍了高能气体压裂技术在低渗透油田压裂开发中研究与应用的部分技术成果,重点介绍了以固体火药实现在地层较长时间压裂作用的多级强脉冲加载压裂技术研究与工艺设计;此外还介绍了高能气体压裂与射孔复合技术、水力压裂、酸化等复合工艺,液体火药压裂技术,水平井高能气体压裂技术,液体炸药层内爆炸技术作用机理与工艺设计研究,高能气体压裂技术在煤层气的试验研究,以及应用于页岩气开发的可行性研究等。

本书可作为从事相关技术研究与应用石油科技人员、教学人员和石油工程专业学生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油田强脉冲加载压裂技术/吴晋军著.

北京:石油工业出版社,2012.9

ISBN 978-7-5021-9239-6

I. 低…

II. 吴…

III. 低渗透油层-高能气体压裂-油田开发

IV. ①TE348②TE357.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 197915 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: pip. cnpc. com. cn

编辑部: (010) 64523693 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 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15

字数: 380 千字

定价: 60.00 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

低渗透油田是石油勘探开发的重点和难点。我国在低渗透油田开发方面取得了举世瞩目的成就，已形成了一系列整体开发及储层压裂改造的配套技术与工艺。但随着石油勘探工作的不断深入，新探明的油气资源储量中低渗、特低渗油田所占比例越来越大，一些地层地应力异常高、岩石致密、温度高、强水敏、强酸敏等更为复杂的低渗油田不断出现，常规的油层压裂技术与措施在老油层单井使用的频率越来越多，在复杂油气层新油层压裂开发的使用难度加大或作业成本高，甚至出现难以压开地层、施工效果及有效率下降等问题。由此可见，仅依赖单项技术已很难合理、有效地解决低渗油田尤其是复杂低渗、特低渗油层储层压裂开发存在的现实问题。目前，低渗油田开发已向油层更深层次的储层改造技术如重复压裂技术、缝内转向压裂技术、多级分段压裂技术以及多种工艺复合技术等研究与应用方向发展，需要多方面技术的交叉结合研究与系统优化组织来实现。高能气体压裂（High Energy Gas Fracturing, HEGF）技术在我国研究与应用已有近 30 年的历史，目前在国内已形成了固体火药高能气体压裂技术、高能气体压裂—射孔复合技术、液体火药压裂技术等多项、多系列技术成果，成为应用于油气田储层近井解堵、压裂开发、辅助压裂等油气田特种增产、增注技术，在油田现场得到较广泛的应用及推广。针对低渗复杂油层的开发应用高能气体压裂技术也面临提高其技术与工艺的适应性及有效性的深入研究问题。要充分利用与发挥高能气体压裂的技术优势与特点，必须开展多学科交叉融合、优势互补的油气田增产新技术与工艺的深层次开发研究及试验，以丰富低渗、特低渗储层压裂开发技术，并为此类复杂特殊岩层的更有效开发发挥重要的增效作用或技术补充与辅助作用。

笔者长期从事相关的油气田特种增产技术的开发与研究、现场试验及应用推广，高能气体压裂技术多年研究的积累与油田现场应用研究的实践总结，构成了本书的主要内容。本书分为十章，首先结合我国低渗特、低渗油田储层特征及开发现状进行研究分析，概括性地介绍了高能气体压裂技术在低渗油田压裂开发应用的部分技术成果与研究发展方向，重点介绍了以固体火药实现在地层较长时间压裂作用的多级强脉冲加载压裂技术的作用机理与工艺设计研究；介绍了高能气体压裂与射孔复合技术、液体火药压裂技术、水平井高能气体压裂技术等工艺研究与应用，液体炸药层内深度爆炸技术试验研究与进展及其工艺设计方法；高能气体压裂技术在煤层气开发的工艺设计与试验研究，以及在应用于页岩气开发的可行性研究；简要介绍了高能气体压裂工艺及其与射孔复合压裂工艺施工操作基本规程。各章节之间内容相互独立，部分内容又相互交叉。为避免有些章节相关研究内容叙述中的重复，部分研究内容进行了简化与调整，在一些涉及具体技术研究参数及工艺设计方面为保护知识产权进行了技术处理或省略简化，望读者理解。

本书由西安石油大学吴晋军编写。本书编写的主要内容基于承担的中国石油天然气股份有限公司相关科研项目的一部分研究成果，以及辽河、大庆、中原等油田科研课题现场试验及应用的部分研究成果。参加相关项目的有西安石油大学廖红伟、张杰、蔡文斌、王爱华等全体研究人员及相关油田的专家与技术人员等，他们为本书编写提供了支持与帮助。编写本书的目的是希望增加相关石油科技人员对高能气体压裂技术进一步的了解及众多相关专业人员

的参与和认识，促进其技术与工艺研究的不断深入发展及其技术成果的转化。本书可作为从事相关技术研究与应用石油科技人员、教学人员和石油工程专业学生的参考资料。

本书由西安石油大学优秀学术著作出版基金资助出版。本书的编写得到西安石油大学有关领导、专家的支持与帮助，在此表示真诚感谢！特别向为高能气体压裂研究奠定基础的各位专家同仁表示衷心感谢，还要真诚感谢为本项目研究提供大力支持的中国石油天然气股份有限公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、相关油田企业与西安石油大学的各级领导、专家与科研人员，以及课题组全体人员。本书编写过程中，研究生刘立才、赵国华、储小三参与了部分资料的收集与文字的整理、编排等大量工作，对他们付出的辛勤努力表示真诚感谢！

由于作者水平与认识有限，本书不足之处欢迎批评指正。

著 者
2012 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 低渗透油田开发基本现状	1
第二节 高能气体压裂技术的研究与发展	4
第三节 应用于低渗油田开发的意义	19
第二章 低渗透油田储层特征及开发现状	24
第一节 资源分布及地质特征	24
第二节 鄂尔多斯盆地演化历史	25
第三节 低渗透油田储层特征分析	27
第四节 低渗透油田开发现状分析	32
第三章 低渗透油田开发工艺技术	36
第一节 国内外低渗透油田开发技术现状	36
第二节 低渗透油田储层改造工艺技术	42
第三节 低渗透油田水平井钻井工艺技术	53
第四节 提高采收率技术及应用	55
第四章 低渗特殊岩层岩石力学试验与高能气体压裂机理研究	60
第一节 复杂特殊岩性油藏岩石力学与地应力测定试验	60
第二节 高能气体压裂作用机理研究	64
第五章 多级强脉冲加载压裂技术	77
第一节 研究目的及总体设计思想	77
第二节 总装药结构装置设计	77
第三节 多级强脉冲加载压裂药室内实验研究	80
第四节 控制系统及点火药试验研究	95
第五节 多级强脉冲加载压裂的作用机理	98
第六节 多级强脉冲压裂设计方法	100
第七节 多级强脉冲压裂装药工艺设计	101
第八节 多级强脉冲压裂与射孔复合设计研究	102
第九节 脉冲压力参数测试方法	102
第十节 多级强脉冲加载压裂工艺地面试验研究	105
第十一节 现场工艺应用试验及效果分析	109
第十二节 应用推广及效果	113
第十三节 研究总结及展望	118
第六章 高能气体压裂与射孔复合工艺技术	119
第一节 国内外研究与发展概况	119
第二节 射孔技术与工艺	120
第三节 高能气体压裂复合射孔技术	131

第四节	几种典型的高能气体压裂复合射孔技术·····	138
第七章	液体药高能气体压裂技术·····	151
第一节	基本作用机理·····	151
第二节	液体火药压裂工艺研究·····	153
第三节	液体火药安全性能研究·····	156
第四节	点火工艺设计及条件·····	157
第五节	施工工艺优化设计研究·····	157
第六节	现场试验与应用·····	157
第八章	水平井高能气体压裂工艺技术研究·····	161
第一节	水平井开发及应用现状研究·····	161
第二节	水平井液体火药压裂工艺研究·····	162
第三节	水平井油层固体药高能气体压裂技术研究·····	168
第四节	水平井液体炸药爆炸技术研究·····	171
第五节	水平井液体炸药爆炸压裂裂缝模型计算方法研究·····	172
第九章	低渗油层层内深度爆炸技术研究·····	177
第一节	研究目的及设计思想·····	177
第二节	国内外研究及应用现状·····	178
第三节	层内爆炸技术研究与进展·····	180
第四节	层内爆炸工艺设计与方法研究·····	182
第五节	水力压裂与液体药缝内爆炸压裂工艺设计研究·····	182
第六节	点火起爆工艺设计研究·····	189
第七节	层内爆炸作用机理及多裂缝体系研究·····	192
第八节	爆炸作用区域计算·····	197
第九节	层内深度爆炸裂缝模型计算研究·····	199
第十章	非常规天然气高能气体压裂开发试验及可行性研究·····	202
第一节	煤层气高能气体压裂试验研究·····	202
第二节	页岩气高能气体压裂开发技术可行性研究·····	208
附录	·····	213
附录一	高能气体压裂无壳压裂弹施工操作规程、施工流程图·····	213
附录二	射孔—高能气体压裂复合管柱施工操作规程、施工流程图·····	215
附录三	液体药高能气体压裂施工操作规程、施工流程图·····	217
附录四	SY 5436—2008 石油射孔、井壁取心民用爆炸物品安全规程·····	221
参考文献	·····	227

第一章 绪 论

第一节 低渗透油田开发基本现状

一、低渗透油田已成为油田开发的重点

低渗透油田已成为世界现在和未来时期油气田勘探开发的重点和难点,美国、俄罗斯、加拿大等都相继发现了大量的低渗透油田^[1,2]。美国的文图拉油田可采储量达到 $1.0 \times 10^8 \text{t}$; 加拿大的帕宾那油田石油地质储量为 $11.0 \times 10^8 \text{t}$, 可采储量为 $3.0 \times 10^8 \text{t}$ 。该类油田具有地质特征复杂、开采难度大、产能低和经济效益差等特点。如俄罗斯难以开采的石油储量占剩余可采储量的 40% 以上, 从低渗透油藏中采出的石油占全部产量的 25%, 美国在二叠盆地 (Permian Basin) 开采渗透率在 1.0mD 左右的油藏, 单井平均产油量约为 0.5 ~ 1.0t/d。纵观近十几年来世界范围油田开发现状与趋势, 油气勘探的难度和风险日益加大, 成本越来越高, 石油勘探区域和领域逐渐转向低渗与特低渗、深地层与超深地层、难动用的复杂地表和复杂地下情况发展^[3,4], 由此面临的能源危机与安全问题日益突出。能源安全问题已成为制约国家经济持续稳定发展甚至社会稳定的重要因素。石油、天然气依然居于能源安全的核心战略地位, 世界各国高度重视, 甚至不惜动用战争手段。

随着我国国民经济的快速发展, 我国同样面临能源需求较大矛盾的战略性问题, 石油和天然气的勘探形式十分严峻。我国油气资源分布十分广泛, 储量较为丰富, 石油工业历经半个多世纪的石油勘探开发取得了巨大成就。然而, 随着大庆、长庆、辽河等油田近几十年来石油资源的大量开采及勘探工作的不断深入, 主要勘探对象已经从以往构造背斜比较大、油气藏类型比较简单、地面条件比较好的领域和地区转向了地面以山地、沙漠、黄土源、滩海为特征, 地下以高陡构造、低渗透、复杂油气藏类型、特殊储层类型为特征的地区和领域。这些地区和领域的油气田目标中岩性地层多期成藏、多油水系统, 油气聚集规律及油气层纵横向展布规律复杂; 储层多套砂体叠置, 粗、细碎屑岩分布不均, 并伴有高温、高压; 有的领域和地区油气田储层为孔洞及裂缝发育的碳酸盐岩、火山岩及变质岩或是次生孔隙发育的碎屑岩。油气储层条件优越、开采难度较易或适中的常规油气所占比例逐年降低, 剩余油气资源中大多为开采难度大、成本高的低渗、特低渗复杂油气资源, 石油工业发展面临形势日益严峻。一方面, 石油资源短缺, 而石油需求量逐年大幅增加, 供需矛盾极为突出。1993 年开始我国由石油出口国转为进口国, 当年石油净进口量近千万吨, 以后逐年快速增加。2008 年我国石油净进口超过 $2.0 \times 10^8 \text{t}$, 石油对外依存度突破 50%。2011 年中国石油需求量为 $4.54 \times 10^8 \text{t}$, 产量仅为 $2.01 \times 10^8 \text{t}$, 对外依存度 55.7%。“十二五”期间, 预计石油需求年均增长 4% 左右, 至 2015 年中国石油对外依存度将上升至 60% 以上。另一方面, 石油采收率不高, 难动用的低渗复杂油层所占比例加大, 我国油气储量探明程度较低。陆上油田采用常规的注水方式开发, 平均采收率一般 33% 左右, 大约有 2/3 的储量仍留在地下, 至于低渗油田采收率则更低; 我国又面临探明储量众多的低渗、特低渗油田开发高峰期, 大多数

老油田又处于生产中后期,产量递减,含水率上升很快。2007年的统计数据则显示^[5],全国新老油田一起统计分析,平均含水率已经高达86%,其中大庆、胜利等很多老油田都超过90%,而且新区块开发产量增加综合计算盈余不多,进一步加大了石油供需的矛盾。

我国专家20世纪末就预言,21世纪能源接替的决定因素就是能否有效地对低渗透油气资源进行工业性开发和利用,这就必须在包括勘探、钻井、完井、驱替开发、井网规划、增产改造等一系列技术上取得重大突破与进展^[6]。我国低渗透油气田的勘探开发历史经历了三个阶段:1907—1949年,1907年中国第一口油井延长1号井(鄂尔多斯盆地)发现延长油矿,开始低渗透勘探开发探索;1950—1980年,以鄂尔多斯、松辽盆地为代表,仅发现中小规模的油气藏,“磨刀石”、“井井有油、井井不流”是人们对低渗透勘探开发早期的基本认识;1980年至今,陆续在鄂尔多斯、松辽等盆地发现一大批地质储量超过亿吨级、千亿立方米级和万亿立方米以上的低渗透油气田,为油气探明储量快速增长发挥了重要作用。

目前我国已发现和探明的低渗透复杂油气藏主要集中在中生代和新生代陆相沉积盆地中,其中砂岩油藏约占70%。在全国陆上动用的石油地质储量中,低渗透油层储量占11%左右;在探明未动用的石油地质储量中,低渗透复杂油层储量占50%以上;而在近几年探明的石油地质储量中,低渗透油层储量占70%~80%。根据中华人民共和国国土资源部与中华人民共和国国家发展和改革委员会2004年油气资源评价,低渗透油气资源广泛分布在各大盆地,全国石油资源量为 $1086 \times 10^8 \text{ t}$ (不含台湾和南海),其中低渗透资源为 $537 \times 10^8 \text{ t}$,占总资源量的49%^[1,2];全国累计探明石油地质储量 $287 \times 10^8 \text{ t}$,其中低渗透 $141 \times 10^8 \text{ t}$,占49.2%。全国天然气资源量 $56 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中低渗透 $24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总资源量的42.8%;全国累计探明天然气 $6.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中低渗透 $4.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占63.6%。全国已探明的低渗透石油资源约占80%以上分布在中生代、新生代陆相沉积中;天然气资源的60%以上分布在古生界及三叠系的海相地层中^[1,2]。低渗透石油、天然气远景资源量分别为 $537 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占全国油气远景资源总量的49%和42.8%。截止到2010年年底,我国探明的低渗透油藏的地质储量达到 $120 \times 10^8 \text{ t}$ 。据不完全统计^[5],2009年、2010年、2011年的石油新增储量中,低渗透和特低渗透分别占78%、63%、78%,低渗、特低渗天然气储量分别为92.4%、68%、97%。由此可见,低渗、特低渗油田开发已是未来石油勘探开发的主流。研究低渗储层及其开发技术,降低开发成本,有效利用低渗油气资源,是保障我国油气资源稳步发展的关键。

近几年我国加强了海上油气田的勘探与开发,取得较大进展,已建立了一系列近海油气田。2011年中国海洋石油总公司原油产量 $4661 \times 10^4 \text{ t}$,天然气 $167 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占石油总产量的20%。我国海域辽阔,蕴藏着十分丰富的油气资源亟待开发,目前中国海洋石油总公司的低渗探明储量约占总探明储量的6%,低渗油田产量约占海洋石油总产量的1%,未开发储量中低渗透难开采储量所占比例已达20%左右^[7]。这一比例虽与陆地上相比还相距甚远,但海上低渗透油田的开发更具有挑战性。合理开采海上低渗油气资源,对于将来油气开采从陆地向深海的战略转移具有重要意义。

综上所述,随着勘探程度的提高和对油气资源需求的不断增长,无论从开发趋势分析,还是剩余油气资源或油气分布,低渗透油气都无疑是我国未来油气勘探开发的主攻方向,研究开发适用于低渗透油气田开发的专项技术对保持我国油气产量稳定增长至关重要。

二、低渗油田开发面临的突出问题

低渗、特低渗油田储层特征复杂、渗透率低、岩石致密、开发难度大，是目前油气田开发的重点和难点，尤其面对地层应力异常高、井温高、强酸敏、强水敏等油层，单靠常规水力压裂、酸化压裂等已难以取得效果或成本加大。低渗油层主要特征有：渗透率低，如长庆安塞油田储层渗透率仅为 $1 \sim 2.8 \text{ mD}$ ，大庆扶余油田储层渗透率主要集中在 $1 \sim 2 \text{ mD}$ ；流量低，为 $0.02 \sim 0.4 \text{ mD}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ；储量丰度低，平均 $36 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ [3,8]。我国东部各油田主力油层深度一般均在 $1000 \sim 3000 \text{ m}$ 范围内，因此，参照 E. 罗伯逊的实验，这些油层的破裂极限是相当高的；而在西部新区，油层深达 $4000 \sim 5000 \text{ m}$ ，且有许多是石灰岩或白云岩储层，因而其塑性将更为增强，破裂极限更高。辽河油田近年来在粗面岩、花岗岩等特殊岩性油藏的勘探方面取得较大突破，相继发现了小龙湾、大民屯、雷家、欧利坨、黄沙坨等低潜山高储量的特殊岩性油藏，但这类油藏一般埋藏较深，岩性致密坚硬，天然裂缝较发育，渗透率仅为 $2 \sim 3 \text{ mD}$ ，粗面岩抗压强度达到 101.75 MPa 。由于该类储层的特殊性，实施水力压裂、酸化压裂施工泵压高、起裂泵压高、储层温度高、流体滤失大，导致压裂难度较大，施工中经常出现砂堵现象，且加砂量较小，因此仅依靠常规开采方式一般难以获得较好的产能 [9,10]，必须进行针对性的油层改造措施研究。

目前我国对低渗、低孔油田开发主要采用水力压裂和酸化技术改造油层，但在一些低渗老油田生产实际应用中随着使用频率的增多，其增产效果也越来越低。20 世纪 90 年代，长庆安塞油田开展了重复压裂试验以期达到注水引效的目的，重复压裂由最初的一般规模重复压裂发展到大规模重复压裂，均没有取得理想效果。研究分析认为，水力压裂在渗透率很低的油气藏只能形成垂直于最小主应力的两翼对开的一条垂直裂缝，老油层改造中的重复水力压裂也往往只是沿老裂缝延伸，重复压裂工艺是以原裂缝二次充填和延伸为主，不能充分挖潜油井“死油区”储量。由于不能形成新方位的裂缝，油气只能通过原有的微小孔隙流入主裂缝产出，而离主裂缝较远的油气仍难以采出。经过针对低渗透储层的压裂地质和开发特征分析、裂缝成因分析、压裂工艺优化设计、重复压裂工艺配套研究，在施工现场凭借裂缝监测技术确认了重复压裂工艺可以形成新的裂缝。在大规模试验研究的基础上，经过工艺优化配套，建立了以缝内转向压裂工艺为主导的低渗透重复压裂新模式 [11]，依靠缝内转向剂技术实现了裂缝延伸的暂时停止，达到在缝内某一位置实现裂缝转向的目的，形成了新的支裂缝，沟通了“死油区”，进一步扩大了油井泄油面积。对比不同的主裂缝长度、次裂缝长度和增产效果，主裂缝长度对于增产效果没有明确的相关性，而次裂缝长度和增产效果具有一定的正相关性。从效果分析看，新裂缝的产生具有明显的增产作用，次裂缝的产生与否以及次裂缝的长度优化对于增产效果具有重要意义。由此可见，低渗油田开发的重要难点之一就是在地层建立新的缝网沟通体系，不断扩大体积改造范围，依靠先进技术提高油田采收率。

低渗透油藏储层产能较低甚至无自然产能、地层渗流能力较差的特点决定了必须依靠通过进行油藏储层改造技术才能维持正常生产的基本开发模式。目前常用的储层改造技术主要有水力压裂、酸化压裂、注水、注气、化学调剖等方法，以及高能气体压裂、复合射孔、人工地震、声波采油等物理法采油技术。近几年来新探明的油气资源储量绝大多数为低渗、特低渗油田，并伴随着难动用高难度一系列复杂低渗、特低渗油气层的油田勘探开发的不断出现，常规的油层改造技术如水力压裂、酸化压裂等面临地层破裂压力异常高、温度高、强水敏、强酸敏等更为复杂的新油层甚至遇到难以压开地层的问题，大大提高了作业成本，甚至

形成投资很大、产出很少的困难局面。要使这些数量不断增加的复杂油气田开发取得良好效果、开发成本降低和在储层改造关键技术上取得新突破，就必须结合低渗油田储层特征及开发特点进一步开展多学科交叉结合、优势互补的油气田新技术与工艺研究及试验，丰富低渗、特低渗改造技术，增强适应性、实用性及有效性，提供新的有效技术支撑和储备，促进低渗油田勘探开发的不断深入和可持续发展。多年油田现场试验及推广应用实践表明，高能气体压裂具有压力可控、可在地层产生多条裂缝体系、沟通更多的天然裂缝、不污染油层、工艺简单且成本低、适应性强等特点，已成为我国低渗、特低渗油田重要的特种油气田增产、增注技术。其技术开发与研究层次的进一步深入及工艺水平的不断提高，将为低渗油层及复杂特殊岩层的有效开发发挥更重要的技术补充作用。

第二节 高能气体压裂技术的研究与发展

一、高能气体压裂技术

高能气体压裂（High Energy Gas Fracturing，简称 HEGF）技术^[12]是利用火炸药等火工手段在油气层爆燃的作用机理，以提高油气井产量的油气田特种增产技术，在世界油田上的应用研究与发展应用已有 150 余年历程。高能气体压裂在前苏联称为热气化学处理，在美国称为脉冲压裂、多裂缝压裂、可控脉冲、应力压裂等。早在 1860 年，美国 H. H. Dennis^[13]就把爆炸方法应用于油气井的增产的油层处理，但由于爆炸对井筒可能产生的破坏，这一方法未能得到广泛应用。直到 20 世纪 70 年代，在经过大量试验和理论研究的基础上，高能气体压裂技术研究和应用得到较大的发展，在前苏联和美国率先得到较为广泛的应用与推广，并形成了一系列较成熟的工艺技术。我国开展此项研究工作较晚，直到 1985 年中国石油天然气总公司批准在西安石油学院成立爆燃压裂研究室，与西安近代化学研究所等多家军工单位合作，在延长、长庆等油田率先开展了高能气体压裂技术研究与开发，并先后邀请俄罗斯、乌克兰、美国等学者专家前来交流与合作，广泛吸收和借鉴国外先进的技术经验，开展一系列室内室外研究与现场试验，取得了有壳弹、无壳弹等多项较成熟且具有自己特色的技术成果，先后在延长、长庆、辽河等油田进行现场试验和推广应用，取得了较好的经济效益和社会效益，为促进我国油气田勘探开发增添了一条新的技术途径。

（一）作用原理

高能气体压裂技术的作用原理是利用固体、液体火药在油气井目的地层燃烧产生大量的

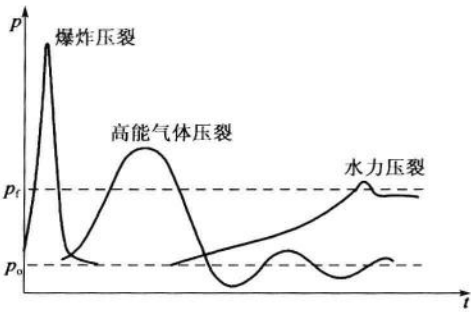
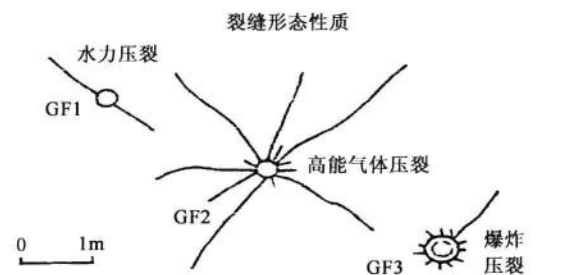


图 1-1 三种压裂 $p-t$ 过程

高温、高压气体快速膨胀压裂地层，以脉冲加载作用使地层产生多条径向垂直裂缝体系，并沟通更多天然裂缝，扩大泄油半径，提高和改善地层渗透性，达到增产、增注的目的。其特点是升压迅速，压力高，在有足够外压的条件下，能保证有效快速地压开地层产生裂缝，而且成本低。从图 1-1、表 1-1 分析可以看出^[12,13]：爆炸压裂产生峰值压力很高，作用时间瞬间完成，由于炸药爆炸速度很快，如 TNT 爆速可达 7000km/s，会

破坏井筒，使井眼周围岩石产生破碎带，形成无数短裂纹，并在破碎带之外形成压实带，降低渗透率甚至难以增产，油井损坏代价太大，所以早期爆炸压裂很快被淘汰；水力压裂峰值压力不高，通过泵入压裂液压裂地层，压力上升较为缓慢，压力达到地层破裂压力后开始下降继续延伸，作用时间可以很长，但由于加载速率低，只能沿垂直最小主应力自井筒形成对翼的一条裂缝；高能气体压裂产生峰值压力较高，由于火药燃烧速度较低并可控，动态压裂作用时间比爆炸压裂长得多，在适当的加载速率控制下，可形成3~8条径向垂直裂缝，并且在产生裂缝初期不受地应力约束随机产生多裂缝体系。

表 1-1 三种压裂方法压力特性与裂缝形态性质

实验名称	峰压 MPa	升压速率 MPa/ms	脉冲时间 ms	裂缝形态性质
GF1	13	0.6	900	
GF2	95	140	9	
GF3	>200	>10.000	1	

注：此表为1980年美国人 Schmidt 在内华达核试验基地坑道内水平套管井模拟实验^[13]。

高能气体压裂与爆炸压裂虽然都是用高温、高压气体作为介质，但其作用的性质和原理有着本质上的不同。爆炸压裂用的是炸药，由于爆炸冲击波的增压速度极快，瞬间能井筒附近形成大量的短缝，地层裂隙来不及扩张和延伸，大部分能量消耗在井壁岩石破碎上而造成破碎带，并破坏井筒；爆炸的高压也可能超过岩石的屈服应力，并产生压实带，渗透率反而更低。高能气体压裂采用火药爆燃的爆生气体压裂地层，其燃速较缓慢，可实现压力可控，虽然裂缝长度有限，但为油层多裂缝改善渗透性提供了有利的技术途径，所以在爆炸压裂几乎停止使用后，研究人员探索成功了以火药推进剂为主的高能气体压裂技术，并迅速发展起来，成为油气田储层压裂开发的特种增产技术。

(二) 增产机理

1. 机械作用

火药燃烧产生的高温、高压气体快速膨胀，在井筒内形成高压区，在脉冲压力（峰值压力）超过岩石破裂压力的条件下地层出现裂缝。较高的加载速率促使地层随机形成辐射状的径向多条裂缝体系，不仅穿透了近井地带污染区，使导流能力大大提高，而且增加了沟通地层天然裂隙的概率。由于裂缝不都是在垂直于地层的最小主应力方向，裂缝面上的切应力不为零，一旦裂开就会错动而不会闭合；此外，压力超过一定限度后，岩石会产生塑性变形，所以当压力下降后仍有残余裂缝。高能气体压裂造缝作用的关键技术在于通过储层岩石性质和施工参数匹配来控制合适的压力脉冲，使其具有合适的压力上升速率和峰值压力。高能气体压裂脉冲压力作用过程如图 1-2 所示。

2. 热效应作用

高能气体压裂过程中，火药燃烧释放出大量的热量。燃烧区内燃烧产物的最高温度接近 2500℃，将在井中和近井地带引起相当大的温度变化。根据前苏联研究测试，压裂弹燃烧作用完成后井内温度的变化如图 1-3 所示。研究认为，处理后地层温度上升 20~50℃，能保

持 1~2h^[13]。井温上升将产生两方面的作用效应：一方面，燃气热量汽化部分压井液体，并在液相中传导建立不均匀分布的温度场；另一方面，燃气通过套管及射孔炮眼将热量传递给地层，使其温度升高。压井液及地层温度的升高，对清除蜡质、胶质及沥青质的堵塞起了重要的作用。

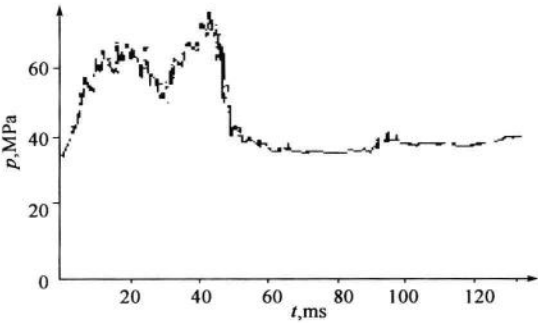


图 1-2 大港 B835 井实测 $p-t$ 曲线

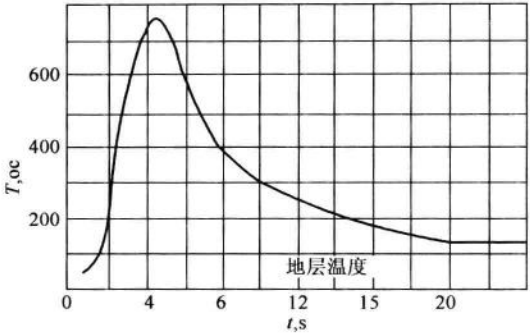


图 1-3 压裂过程中井内温度与时间关系曲线

3. 化学作用

高能气体压裂化学作用是指燃气产物中的 CO 、 CO_2 、 HCl 及 H_2S 成分遇水形成酸液对岩层的弱酸化处理作用。根据配方的不同，高能气体压裂形成的酸浓度可达 10%~20%，在燃气的高温条件下，其化学作用是不可忽视的，但有时这种化学作用也会产生不利的影响，所以，针对酸敏性地层，应结合具体油层特性选择合理的火药配方类型，分析燃气产物的影响程度，在工艺设计上进行优化。

4. 水力振荡作用

高能气体压裂本身属于压力脉冲的作用过程，必然会使井筒中的液体产生振荡及与其伴随的脉冲压力波的传播、反射、叠加所造成的压力脉动对地层的水力冲击作用，可以破坏或松动油层堵塞颗粒与油层之间的结合力，解除地层堵塞，甚至还可以克服毛管效应，有利于油气渗流。

（三）作用特点

通过与爆炸压裂、水力压裂工艺技术对比分析，高能气体压裂技术具有以下作用特点与优势：

- （1）起裂压力高，所形成的裂缝不受地应力的影响，可瞬间随机压出多方位的径向裂缝，沟通更多地层的原生天然裂缝，增大了油气储层的导流能力；
- （2）能量的释放过程可以实现控制，并且不会导致套管的破坏；
- （3）对地层与环境无污染，有利于储层保护；
- （4）施工周期短，成本低，设备及施工简便，且不受地形与水源的限制；
- （5）适应常规增产措施无法使用的地层，如水敏、酸敏性地层等；
- （6）适应性强，可适用于岩石致密、地应力高、地温高等异常复杂地层处理；
- （7）可与射孔、水力压裂、酸化等技术复合应用，产生更深的射孔通道，在产生较长的多裂缝同时，也有利于产生更长的主裂缝；
- （8）综合成本低，有利于现场推广应用。

二、国内外研究与应用

(一) 国外研究与应用情况

高能气体压裂技术最早在美国、前苏联应用于油田开发,形成了固体火药、液体火药两大系列技术。随着世界石油勘探开发的不断深入与低渗复杂油层的不断出现,油田企业经济效益与生产成本的矛盾日益突出,对新的油气田增产技术需求日益迫切。高能气体压裂技术在油田现场的应用试验及取得的效果,引起越来越多的油田企业重视,促进了高能气体压裂技术研究的发展,美国迅速出现了许多技术专利,后来又发展了高能气体压裂与射孔、水力压裂等多项复合工艺技术研究,以及早期的液体药层内爆炸技术的试验等。随着技术水平研究及工艺研究不断提高,应用的地域也逐步扩大,以俄罗斯为中心扩大到土库曼斯坦、越南、乌克兰、乌兹别克斯坦、哈萨克等国,以美国为中心扩大到加拿大、委内瑞拉等国,并出现了多种工艺与复合技术的应用。

1. 高能气体压裂与射孔复合技术

20 世纪末期, Halliburton 公司介绍了一种先进的射孔技术^[14],认为仅根据 API 标准选择诸如穿透深度和孔眼大小是不够的,必须考虑以下因素:

- (1) 射孔枪,如药型、药量;
- (2) 井眼是大孔眼还是好孔眼;
- (3) 符合完井要求的相位角;
- (4) 不伤害油气层、流动效率最大的孔密;
- (5) 射孔状态,如穿深、地应力条件下孔眼欠平衡、平衡或远超平衡(即负压、正压、超正压射孔);
- (6) 根据完井要求(增产措施、防砂)定向射孔;
- (7) 油层性质,包括渗透率、孔隙度、颗粒尺寸、压缩系数、单轴抗压强度、流体类型、完井液、孔隙压力与油层温度。

经实验证明,优化射孔后,液流通过能力提高了 82%,如图 1-4 所示。

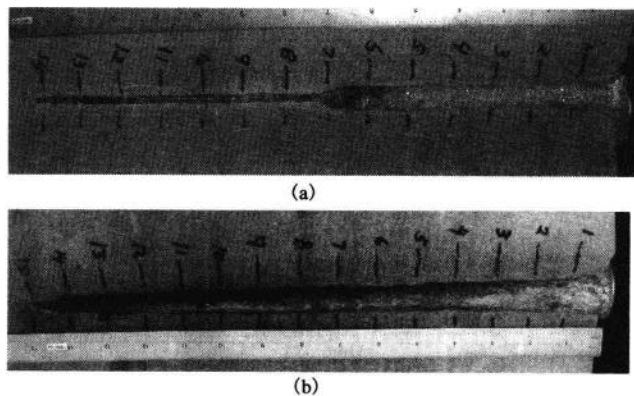


图 1-4 优化前后射孔形态对比

(a) 优化前; (b) 优化后

1993 年, Schlumberger 和 Arco 公司在美国阿拉斯加的 Prudhoe Bay 油田进行了以氮气加压的超压射孔,取得了良好效果^[15],克服了水力压裂时井筒附近压力损失过大和早期脱砂

的问题，使得前置液用量由 1990 年占总液量 70% 降到 1994 年仅占 12%，同时加砂量由 8.16t 提高到 24.49t，平均增油量 1994 年比 1990 年增加 80%，如图 1-5、图 1-6 所示。他们还利用自己研究成功的流体驱动裂缝传播模型对超正压射孔过程进行了模拟，四口井的模拟结果证明计算和实测的井口、井底压力几乎完全符合，因此由这一模型求出的缝长、缝宽是可信的，如表 1-2、图 1-7、图 1-8 所示。他们还提出，高能快速超压射孔比普通的超压射孔的缝长高一倍，可作为一种独立的增产技术。后来 Halliburton 和 Shell 公司的 K. C Fdse R. L. Dupont 等人介绍了在墨西哥湾加拿大 Calgary 的一个公司利用推进剂与负压射孔大大提高了 Albert 油井的压裂效果，推进剂—射孔联作就是所谓的高能气体压裂复合射孔。实践证明，推进剂辅助射孔能有效地射开孔眼，采用补孔办法打开原来未射开或射开了遭堵塞的孔眼，在平衡条件下射孔与推进剂联作的效果与负压射孔相当，显然减少了作业时间，降低了成本。

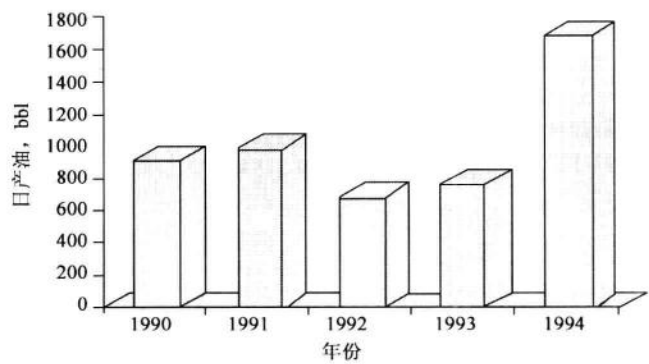


图 1-5 产量比较图

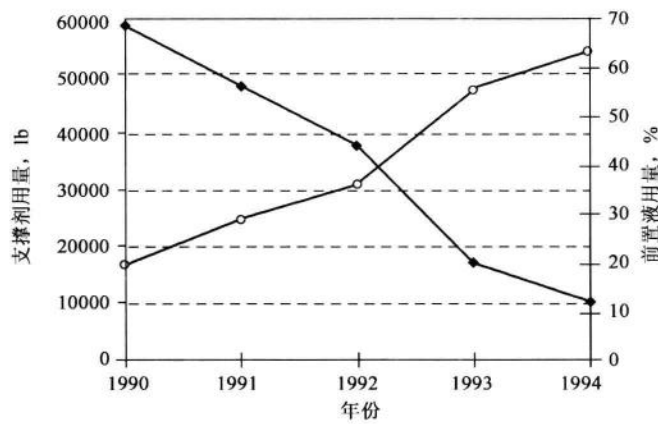


图 1-6 加砂量和前置液用量比较

表 1-2 五口井储层基本参数

井号	井 A	井 B	井 C	井 D	井 E
参数项目					
措施工艺	常规射孔	超压射孔	超压射孔	超压射孔	超压射孔
井斜, (°)	15	27	19	17	30
油管外径, in	4.5	3.5	4.5	4.5	4.5

续表

井号		井 A	井 B	井 C	井 D	井 E
参数项目						
垂深, ft		8955	8852	8792	8815	8698
渗透率, mD		100	20	20	20	20
孔隙度		0. 25	0. 25	0. 25	0. 25	0. 25
杨氏模量, psi		2.0×10^6	2.0×10^6	2.0×10^6	1.6×10^6	1.6×10^6
泊松比		0. 23	0. 23	0. 23	0. 23	0. 23
原地压力, psi		5800	5800	5858	6162	6452
地层压力, psi		4150	3596	3628	3667	3683
射孔段, ft		20	34	20	22	20
初始井口压力, psi		4600	6386	7665	6834	7570
初始井底压力, psi		7447	8982	8787	7287	8197
破裂梯度, psi/ft		0. 83	1. 01	1. 00	0. 83	0. 94
从上到下 井筒注入, ft	油管	2600 (气体)	4084 (液体)	8766 (气体)	7000 (气体)	9100 (气体)
		6453 (液体)	5472 (气体)		2040 (液体)	701 (液体)
	套管	256 (液体)	987 (液体)	562 (液体)	450 (液体)	506 (液体)
气体体积, bbl		40	48	133	106	138

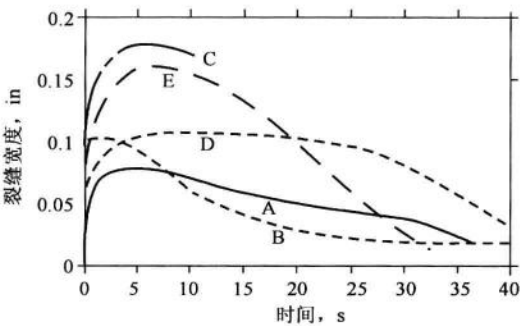


图 1-7 裂缝宽度

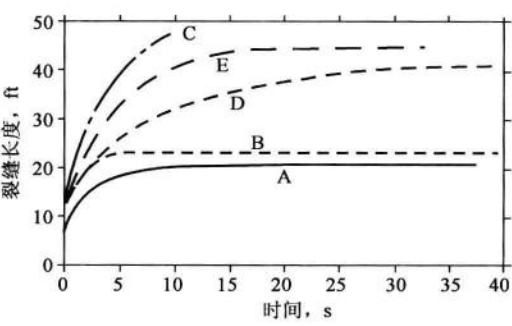


图 1-8 裂缝长度

加拿大 Calgary 公司利用推进剂与负压射孔结合大大提高了 Albert 油井的压裂效果。以前用氮气加压超压射孔，由于在处理段之上有射孔段，加拿大 Completion Service 公司不得不使用从 Marathon 公司租借来的 Stingun 且射孔与压裂为一趟管柱，结果发现 6~20 井地层破裂压力减小了 30%，破裂压力与计算基本相符，比以前降低了 20.7~27.6MPa。

阿尔及利亚的 Hassi Messaend 油田是一个原砂岩油层，早期采用水力压裂，由于供给方面的矛盾，曾采用该技术进行了局部试验。结果证明，此技术能有效地降低破裂压力，有助于裂缝起裂，在多个层射孔时推进剂激励技术可以控制裂缝起裂点。其次，推进剂压裂技术与射孔技术相结合可以解决控砂问题，墨西哥湾的两个案例就对该功能予以证实。

2. 超正压射孔技术

超正压射孔技术 (EOP) 也称强超压射孔冲击法^[16] (EOBS)，是 20 世纪 80 年代末 90 年代初开发研究成功的一种在射孔瞬间促使储层增产的技术。该技术采用井眼压力远高于使

地层产生裂缝所需的压力（即岩层破裂压力）的条件下射孔。其作用原理主要是：射孔枪下至目的层位置后，在射孔前首先在油管中灌注入一定量与地层岩性配伍的工作液体，再注入氮气加压至高于储层的破裂压力时进行射孔作业。其作用特点是：气体的快速膨胀会直接转换为作用于地层的动力，促使工作液挤进射孔孔眼；由于液体的几乎不可压缩性，其作用相当于诱发裂缝的楔状物，大大增强了对地层的破裂能力；在地层产生多条径向裂缝，并快速延伸，有效地提高和改善了地层的渗透导流能力；与常规射孔相比，增产处理地层效果十分明显。

该技术是美国 Oryx 公司于 1990 年开始研究的，取得了令人可喜的进展。1993 年在 SPE 年度大会上，“超正压射孔”的概念被 Oryx 公司首次提出^[17,18]。在此之后，越来越多的公司开始用不同的方式在各类地层中进行了此项技术的使用，大部分采用地面泵气工艺产生高压，但作业费用高。至 1996 年世界范围内已进行了近千次的超正压射孔作业。1997 年后开始采用火药在井底燃烧升压替代地面泵气工艺，被美国各公司研究和采用，施工井次逐步增加。表 1-3 给出了 Oryx 公司进行超正压射孔施工作业部分井的应用结果。在 16 口井中，88% 的井表现出负的表皮系数，充分表明超正压射孔技术是非常成功的，大大提高了油井的产能，甚至在某些条件下可增加可采储量，这是因为超正压射孔降低了近井地带压力损耗和表皮因数。

表 1-3 超正压射孔处理井的压力恢复分析结果

位 置	地 层	处理类型	射孔段中部 深度, m	射孔段 厚度, m	井底压力 MPa	压力梯度 MPa/m	Kh $D \cdot m$	表皮 系数
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1758.4	5.2	13.65	0.031	0.217	-0.6
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1756.6	13.72	10	0.031	1.023	-2.2
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1756.6	1.52	11.38	0.031	0.018	-2.3
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1758.4	8.53	13.04	0.031	0.0024	-2.3
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1763	98.1	14.2	0.032	0.0024	-2.0
美国新墨西哥州	Atoka 灰岩	射孔压裂	4360	20.7	75.9	0.02	0.038	-2.3
美国俄克拉何马州	Ist Spiro 砂岩	射孔压裂	3299	21.3	55.2	0.028	0.013	-1.4
美国新墨西哥州	Morrow 砂岩	射孔压裂	2893.5	13.4	30	0.025	4.21	-5.0
美国新墨西哥州	Atoka 砂岩	射孔压裂	3968.8	3.05	32.9	0.025	0.072	-3.3
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	射孔压裂	1798	41.1	15.2	0.029	0.44	-3.6
美国新墨西哥州	Morrow 砂岩	射孔压裂	3287	13.4	30	0.029	10.5	-5.0
美国新墨西哥州	Svn Rvrs 砂岩	冲洗	921.1	6.1	4.41	0.038	12.03	10.0
美国密歇根州	PDC 砂岩	射孔压裂	3118.5	11.6	32.1	0.03	0.044	-0.4
美国俄克拉何马州	Red Fork 砂岩	冲洗	3849.6	12.2	40.2	0.027	0.007	-1.5
美国得克萨斯州	Strawn 砂岩	冲洗	1805	39	12.2	0.023	0.31	-1.1
美国俄克拉何马州	Skinner 砂岩	冲洗	3450.6	9.1	32.08	0.028	0.046	-1.5

3. 液体药的研究与发展

液体高能燃料即液体发射药，是一种国内外研究人员不断在研究探索的主要用于火箭发射、巡航导弹等航天、军工领域的新能源。而液态高能燃料用于油气井压裂早在 20 世纪 50 年代苏联、美国都已经开始，尤其是苏联当时已经作为油田增产改造的一种新技术，进行油田现场的推广应用，并称为“小型水力压裂”^[12]，主要使用氧化燃烧混合物进行高能气体