

MODERN FRACTURING
ENHANCING NATURAL GAS PRODUCTION

现代压裂技术

——提高天然气产量的有效方法

[美] Michael J. Economides 著
Tony Martin 著

卢拥军 邹洪岚等 译

石油工业出版社

现代压裂技术

——提高天然气产量的有效方法

(美) Michael J. Economides

Tony Martin

著

卢拥军 邹洪岚等 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从提高天然气产量出发,紧密结合现代完井工程、油气田开发,介绍了天然气工业在世界经济中的作用、天然气的开采、气井测试与评估,以及煤层气、页岩气等非常规天然气开采机理。书中还论述了水力压裂力学、压裂液化学与储层伤害、支撑剂与导流能力、压裂压力分析与裂缝诊断、水力(酸)压裂优化设计与现场实施,以及水平井压裂技术。同时该书也介绍了完井方式与井筒结构、气井固井、完井尺寸设计与分析、射孔新进展、近井筒裂缝复杂性分析、出砂与防砂技术、非常规天然气压裂、油田开发压裂技术和成熟油田的管理配套技术等。

本书可供从事油气田开发的研究人员和工程人员使用,也可供大、中院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代压裂技术:提高天然气产量的有效方法/(美)伊科诺米季斯
(Economides, M. J.), (美)马丁(Martin, T.)著. 卢拥军等译.

北京:石油工业出版社,2012.4

书名原文:Modern Fracturing——Enhancing Natural Gas Production

ISBN 978-7-5021-8789-7

I. 现…

II. ①伊…②马…③卢…

III. 油层水力压裂-技术-应用-采气

IV. TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第232535号

© BJ Services Company 2007

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, except under the expressed permission of BJ Services Company, Designs and Patents Act 1988. 本书经BJ服务公司(BJ Services Company)授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

[01-2010-2480]

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)64523536 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4月第1版 2012年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:38

字数:973千字 印数:1—3000册

定价:188.00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

译者前言

随着全球能源工业的快速发展和能源需求的与日俱增,越来越多的低渗透油气藏投入开发利用,低渗透致密砂岩油气藏和页岩气等非常规油气资源成为人们关注的热点。这些难新油气藏大多数都需要进行压裂改造,以提高单井产量和稳产有效期。压裂技术已经成为低渗透油气藏增储上产和经济有效开发的关键技术之一,并将提高最终经济采收率。

本书是继1991年《油藏增产措施》(M. J. 埃克诺米德斯等著,康德泉等译)、1995年《水力压裂技术新进展》(J. L. 吉德利等著,蒋阆等译)、2002年《油藏增产措施(第三版)》(M. J. 埃克诺米德斯等著,张保平等译)后的现代压裂技术专业书籍,在很大程度上反映了近10年来压裂酸化研究在理论、技术和现场应用上取得的最新进展和成果。本书由22位国际著名学者、教授和现场工程师合作完成,由美国BJ服务公司于2007年出版,是从事油气藏,特别是非常规天然气气藏增产措施研究和现场应用的工程师和地质学家的重要参考书。

本书从提高天然气产量出发,紧密结合现代完井工程、油气田开发,介绍了现代压裂技术。书中介绍了天然气工业在世界经济中的作用、天然气的开采、气井测试与评估,以及煤层气、页岩气等非常规天然气开采机理;论述了水力压裂力学、压裂液化学与储层伤害、支撑剂与导流能力、压裂压力分析与裂缝诊断、水力(酸)压裂优化设计与现场实施,以及水平井压裂技术;同时该书也介绍了完井方式与井筒结构、气井固井、完井尺寸设计与分析、射孔新进展、近井筒裂缝复杂性分析、出砂与防砂技术、非常规天然气压裂、油气田开发压裂技术和成熟油气田的管理配套技术等。书中强调了在气藏压裂措施研究方法上需采用多学科交叉渗透,同样也强调了气藏增产研究必须进行压裂与气藏地质和完井工程的组合研究,压裂后的裂缝网提供了改变油气藏流动的有利途径,同时压裂应成为油气藏管理的重要手段。

全书共分13章,书中附有大量的实例,更进一步地剖析了章节中的内容。同时每章最后附有重要的参考文献。全书分别由卢拥军翻译第1、第2、第7、第12章;由邹洪岚翻译序言,术语,索引,第3、第5章;由陈彦东翻译第6、第7、第9、第13章;由梁冲翻译第4、第8、第10、第13章;由王腾飞翻译第11章。全书由单文文、陈端忠、王永辉审校,鄢雪梅、黄丽宁、舒玉华参与部分图表和文字的校核工作。

本书出版得到了中国石油油气藏改造重点实验室、国家科技重大专项项目13和项目37的资助。中国石油勘探与生产公司副总经理吴奇、马新华给予了大力支持,张守良、丁云宏、王晓泉、丛连铸等给予了指导,在此一并致谢。

由于本书译者水平有限,加之时间紧,疏漏和错误之处在所难免,敬请读者见谅和指正。

序 一

非常高兴地欢迎您阅读《现代压裂技术——提高天然气产量的有效方法》一书。BJ 服务公司为能够编写和出版本书而自豪。衷心希望您觉得本书富有建设性、知识性和趣味性。

本书适用于所有石油工程技术专家,而不仅仅是已经熟悉水力压裂工程概念和现场经验的人员。我们在咨询了全世界相关领域工程专家的基础上,本书内容还包含了用于气藏水力压裂的计划、准备、施工和评估的工程指南。

水力压裂在北美地区已经作为大多数天然气井首选的完井方式。随着全球对天然气资源的依赖与日俱增,该技术作为完井技术的应用范围更加广泛和深入。本书中涵盖的技术可应用于所有气藏,而不仅仅应用于北美地区的典型的低渗透地层。我们坚信水力压裂技术将成为全球每一个气藏的最具潜力的完井技术。

本书的作者均是来自工程领域具有广泛知识的专家。我谨代表 BJ 服务公司,感谢这些作者与我们分享他们的知识和经验,感谢他们为本书付出的艰辛和对完井这一广阔领域的贡献。我们确信,每位作者将为他们参与编写本书而感到自豪。我们也坚信,本书的读者将在全球天然气资源的开发中从本书的视角出发,继续进行“最好的实践”。

Dave Dunlap

BJ 服务公司执行副总裁、作业总监

序 二

十分荣幸为我的朋友 Michael J. Economides 的新书作序。BJ 服务公司赞助本书并征集全世界顶级的专家编写。我认识其中的许多作者,我确信本书的技术对支持未来数年天然气的开发具有战略性的深远意义。

我为本书的编写和出版感到很高兴。这有三个原因,第一是天然气将很快成为世界经济的主要能源。第二,已经在油井中获得大幅度增产效果的水力压裂技术完全适用于天然气井。第三,现有的压裂原理和技术体系仍然很不完善,尤其是在管理方面。

石油行业中,压裂技术不再是一些激进的工程师用于反对那些保守的经理们的试验性行为,这些经理们依然坚信经济性就是节约成本,而忽略提高单井产量对整个产业的贡献。当增产和增注成为主要目标时,没有任何措施能与综合压裂配套技术相媲美。

人们常常对完井和增产措施技术的影响感到困惑。最常见的情况是,在压裂前对于提高单井产量的作业通常认为是成功的。事实上,我们通过使 J_d (无因次产液指数) 最大化求得单井压裂后的最大产量。只要低于这一产量,都应考虑是生产和管理的差距。我们必须提出这一极限目标,通过合理完井和执行体制来实现它。

公司的所有工作应该完全纳入水力压裂的轨道。我们是那些被认为“敢干”的人。因此,那些认为超高产量是“理论和不现实”的想法应当为开发和如何应用技术体系去达到最大的产量。

以下情况需要考虑:当我(包括 Michael)和我的助手在俄罗斯工作的 5 年期间,我们努力以每年递增 20% 的速度使公司的产量翻番,即达到每天约 2×10^6 bbl,同时把 50% 的油井关闭。尽管压裂增产取得了成功,但是我们仍不断地通过增加压裂材料,扩大压裂规模,力求获得计算的压后产量极限。我们建立了两条管理原则:

(1) 只要上级主管部门批准,所有新井和作业井必须进行压裂(完井)。

(2) 只要上级主管部门批准,所有压裂作业必须按最大净现值(NPV)进行设计和施工。

关键问题是许多公司需要获得批准(包括财务权威部门反复协商)才能进行压裂作业,批准后就是正确的。而一旦作业不被批准,那么,这样干就是错误的。在管理上,我们把它颠倒过来,即认为只要给予执行者足够的权力(即使没有上级主管部门批准)去干就是正确的,而需要获得上级主管部门批准后才干是错误的。

在其他地区实行相同的规则并非难事。只要看看目前世界上油气井的动态,人们就很容易发现巨大的差距,即使最大和最著名的综合性国际公司也是如此。要纠正这一明显的问题,压裂还有很长的路要走。这对公司的好处是及时和巨大的,关于“产油峰值”和“沙漠之光”的说法将一去不复返。

Joe Math

2007 年 2 月

作者名单

主编:

Michael J. Economides, 休斯敦大学

Tony Martin, BJ 服务公司

作者:

Bob Bachman, Taurus 油藏工程公司

David Mack, Marathon 石油公司

Steve Baumgartner, BJ 服务公司

Mark Malone, BJ 服务公司

Harold Brannon, BJ 服务公司

Tony Martin, BJ 服务公司

Andronikos Demarchos, Hess 股份公司

C. Mark Pearson, 金色能源公司

Michael J. Economides, 休斯敦大学

David Ross, 联合能源公司

John Ely, Ely 联合股份公司

Martin Rylance, BP 集团

Satya Gupta, BJ 服务公司

Gary Schein, BJ 服务公司

Robert Hawkes, BJ 服务公司

Peter Valkó, 得克萨斯 A&M 大学

Barry Hlidek, BJ 服务公司

Leen Weijers, Pinnacle 技术公司

George King, BP 集团

王秀丽, BP 集团

Randy Lafollette, BJ 服务公司

Don Wolcott, Aurora 油气公司

致 谢

首先,对 J. C. Mondelli 表示最诚挚的谢意,他是 BJ 服务公司最先提出编写本书的人。在编写本书的全过程中,包括完成打印和印刷,如果没有他的坚持和卓见,本书无法出版完成。我们还要感谢 BJ 服务公司的高层管理者,为本书提供了资金,而且尽管工作繁忙仍然允许本书的作者们抽出时间和精力来编写其中的章节。

我们感谢 Joe Math 为本书作序和提供支持,而且他还以独特的风格提醒我们本书最重要的问题所在。

编写这本书对于 BJ 服务公司的同事和来自于其他公司和机构的同事是额外的任务,并且是对他们贡献和专业的测试。组织多位作者编写一本内容十分广泛的书绝非易事,作者们应该予以表扬,他们持之以恒的精神和满足两位严格主编的要求,值得赞美和信任,没有他们卓越的贡献,工作是不可能完成的。

要特别感谢 Greg Salerno 对本书逻辑结构进行的大量工作和对项目坚持不懈的管理,也要感谢 Garth Gregory 和 Margaret Kirick 在组织和管理上的协助。

文案编辑 Stephanie Weiss 在本书定稿时起到了十分重要的作用。她是一位经验丰富和技术优秀的文案编辑,一位对待缺陷、疏漏和错误一丝不苟的“清道夫”。她提醒我们坚持细节和完美是提升专业书籍水平的根本。她是一个罕见的开拓者。

Alexander M. Economides 和他工作在 Energy Tribune 公司的团队,由 Jay Clark 领导及公共助手 Alex Lewis 和 George Song,均为本书的编写付出了巨大的工作。他们值得表扬。

Michael J. Economides

Tony Martin

2007 年 9 月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 内容简介	(3)
1.2 天然气工业在世界经济中的作用	(3)
1.3 俄罗斯:天然气资源的关键评价	(6)
1.4 阿拉斯加州的天然气资源及其对美国天然气进口的影响	(10)
1.5 卡塔尔天然气	(15)
1.6 压裂能够有效利用现有的资源并提高最终采收率	(17)
参考文献	(20)
第 2 章 天然气开采	(21)
2.1 引言	(23)
2.2 干气、湿气和凝析气的特性	(23)
2.3 天然气的流入动态关系	(24)
2.4 紊流效应	(28)
2.5 水力压裂气井的产量	(32)
2.6 气井的产能、流入动态与流出动态的关系	(42)
2.7 气井生产动态预测	(45)
2.8 天然气性质的相关表达式	(45)
参考文献	(48)
第 3 章 气井测试与评价	(51)
3.1 引言	(53)
3.2 理论基础	(54)
3.3 径向流的解	(56)
3.4 叠加法	(58)
3.5 (计算)模型的发展	(59)
3.6 水力压裂井	(60)
3.7 特殊曲线	(62)
3.8 特征曲线和双对数压力导数曲线	(62)
3.9 流态的判别	(66)

3.10	关于压力导数的几个注意事项	(68)
3.11	PTA 解释方法	(71)
3.12	高渗透与低渗透储层压力分析技术的差别	(72)
3.13	非达西流	(86)
3.14	生产(动态)分析	(91)
3.15	非均质性	(99)
3.16	多相流	(101)
3.17	裂缝闭合分析	(106)
3.18	反褶积技术	(113)
	参考文献	(114)
第4章	水力压裂设计	(121)
4.1	水力压裂介绍	(123)
4.2	压裂工艺描述	(125)
4.3	岩石力学特性	(150)
4.4	流体的流变特性	(174)
4.5	压裂优化设计	(180)
4.6	增产预测	(191)
4.7	特殊场合的压裂技术	(195)
	参考文献	(203)
第5章	完井	(211)
5.1	井筒结构	(213)
5.2	气井固井	(216)
5.3	鉴别产气层、渗透率和通道	(224)
5.4	完井尺寸设计分析	(229)
5.5	保证正常生产的完井设计	(235)
5.6	控制气井出砂	(239)
	参考文献	(242)
第6章	裂缝与井眼的连通性	(247)
6.1	引言	(249)
6.2	完井技术及对井眼连通性的影响	(250)
6.3	射孔概述	(254)
6.4	压裂井射孔	(254)

6.5	近井筒裂缝的复杂性	(262)
6.6	中场裂缝和远场裂缝的复杂性	(268)
	参考文献	(272)
第7章	压裂液及储层伤害	(277)
7.1	引言	(279)
7.2	压裂液的功能	(280)
7.3	压裂液的流变性	(282)
7.4	压裂液分类	(295)
7.5	水基压裂液添加剂	(310)
7.6	压裂液对裂缝的伤害及其对产能的影响	(317)
7.7	压裂液的选择	(324)
7.8	在气井中压裂液的选择	(329)
	参考文献	(331)
第8章	支撑剂和裂缝导流能力	(339)
8.1	引言	(341)
8.2	导流能力对压裂井产能的影响	(346)
8.3	支撑剂	(350)
8.4	支撑剂性能、测试标准以及性能考虑因素	(357)
8.5	支撑剂的铺置	(369)
8.6	裂缝导流能力	(374)
8.7	支撑剂的回流	(383)
8.8	支撑剂的选择	(386)
	参考文献	(388)
第9章	水力压裂现场实施	(393)
9.1	引言	(395)
9.2	设备功能	(396)
9.3	设备质量控制	(402)
9.4	压裂液的质量控制	(405)
9.5	支撑剂的质量控制	(411)
9.6	酸压裂的质量控制和实施	(413)
9.7	多段压裂及封隔方法	(418)
9.8	压前诊断和压裂评估测试	(423)

9.9	实时压力解释	(426)
9.10	压裂液的回收(返排)	(431)
	参考文献	(434)
第10章	水平井压裂	(437)
10.1	引言	(439)
10.2	横向压裂水平气井的开采	(441)
10.3	裸眼水平井完井	(448)
10.4	裸眼压裂	(450)
10.5	套管完井	(452)
10.6	下套管完井的压裂施工	(455)
10.7	天然气藏水平井压裂的合理性和条件	(456)
	参考文献	(457)
第11章	非常规天然气	(459)
11.1	引言	(461)
11.2	非常规气藏描述	(461)
11.3	开采机理	(463)
11.4	CBM 气藏	(465)
11.5	页岩气	(482)
11.6	页岩压裂设计与评估	(497)
	参考文献	(503)
第12章	油气田开发压裂技术	(511)
12.1	引言	(513)
12.2	压裂措施对油气藏产量或泄流区产量的影响	(514)
12.3	气井动态和采收率预测	(517)
12.4	裂缝方位角对井位设计的影响	(521)
12.5	数据处理技术	(529)
	参考文献	(536)
第13章	成熟油气田的配套技术	(539)
13.1	引言	(541)
13.2	备选井的选择	(550)
13.3	成熟油田的压裂设计	(554)
13.4	损耗考虑	(556)

13.5 重复压裂	(565)
参考文献	(570)
符号说明	(575)
附录 常用非法定计量单位与法定计量单位换算表	(589)

第1章

概 述



Michael J. Economides, 休斯敦大学
Tony Martin, BJ 服务公司



Michael J. Economides: 休斯敦大学卡伦学院石油工程系教授, 并且是石油工程和石油战略咨询公司的经营管理合伙人, 研究领域包括石油特别是天然气方面的生产和管理、天然气的运输、液化天然气、压缩天然气及处理、复杂作业过程设计进展, 以及经济和地缘政治学。他也是能源论坛的首席编辑。他曾是得克萨斯 A&M 大学石油工程 Samuel R. Noble(教育基金会)教授, 是全球石油研究所(GPRI)首席科学家。在进入得克萨斯 A&M 大学之前, Economides 教授是奥地利莱奥本矿业大学钻井和采油学院院长。他担任过多家以石油服务为主营业务公司的高级技术和管理职务, 独著或合著了 14 部专业教材和书籍, 例如《石油的色彩》等, 而且发表了 200 多篇期刊论文。Economides 从事过广泛的工业咨询, 服务对象包括国家石油公司和财富 500 强公司。他在 70 多个国家参加过专业活动。



Tony Martin: BJ 服务公司国际增产措施部门的事业部经理, 毕业于伦敦帝国理工学院, 拥有机械工程荣誉学位和石油工程硕士学位。Martin 在石油行业有 17 年的工作经历, 并且完成了世界范围内的工程指派。Martin 的主要研究领域是水力压裂增产措施, 他从事的提高油田产量的课题所涉及的地域超过 25 个国家。他从事压裂、酸化和防砂的室内和现场教学, 其目的是使水力压裂这项技术更易于让人理解与接受。他独自或与人合作撰写了多篇 SPE 论文, 并多次在 SPE 组委会中担任委员。他同样是 BJ 服务公司的《水力压裂手册》的作者之一。

1.1 引言

本书阐述的内容是,利用最重要和应用最广泛的完井技术——水力压裂来提高天然气产量。

本书第2章介绍了天然气储层的开采方式,第3章介绍了用于判断气井是否合理生产以及是否需要采取人工干预的诊断技术,这是本书的主题。

第4章指出了在天然气井与油井中水力压裂作为首选增产方案的特殊性。随后的两章介绍了能够等同甚至比水力压裂更能显著影响单井产能的重要的环节,包括第5章介绍的完井技术和第6章介绍的井(含裂缝)与储层的连通能力。

接下来的第7、第8两章介绍的是压裂材料(压裂液和支撑剂)方面的内容。他们的选择是影响水力压裂是否成功的关键,第9章的内容是水力压裂的现场实施,其中强调了实际问题的解决。

第10章和第11章介绍的是水力压裂技术的现代应用。第10章介绍的是水平井压裂,它的应用在目前油气开采中变得越来越重要。这不但体现在新井的开发中,而且也应用于新的油气藏的开发,以及对天然气的需求转向煤层气、页岩气等非常规资源。另外还包括特低渗透储层,技术的发展使得该类储层的开发成为可能,这正是第11章阐述的内容。

本书最后阐述了两方面的内容。第12章讲述的是压裂技术贯穿于整个储层的开采过程,它也是美国和欧洲等发达国家开发老油田的支柱技术。第13章讲述的正是该技术在美国和欧洲等发达国家开发老油气田中起到的支柱作用。

在对压裂技术进行详细的阐述之前,必须明确的是天然气行业对于世界经济的重要作用,为什么其变得越来越重要,是什么带来增产后的惊喜。

1.2 天然气工业在世界经济中的作用

虽然2005年全球对能源的需求中天然气已经占到23%,但仍落后于煤(25.5%)和作为世界第三大主要能源的石油(38%),但由于新兴贸易的出现,其比例正在稳步增长。经济合作与发展组织(OECD)成员国和美国的天然气消费量分别占到全球总量的51%和22%,大约每年为 $103 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($2.9 \times 10^9 \text{m}^3$) (数据来源于能源信息管理局,EIA,2007)。

使用天然气有几个明显的好处,首先,与石油或者煤相比,特别是煤,它是最清洁的燃料;其次,天然气资源正变得日益多样化。20世纪70年代初以来,世界天然气储量稳步上升,每年上升的比例约为5%。同样,拥有世界知名储层的国家数量也从1960年的40个左右上升到2005年的85个左右,这些国家主宰着全球探明的天然气储量,拥有的分配比例见图1-1和表1-1。

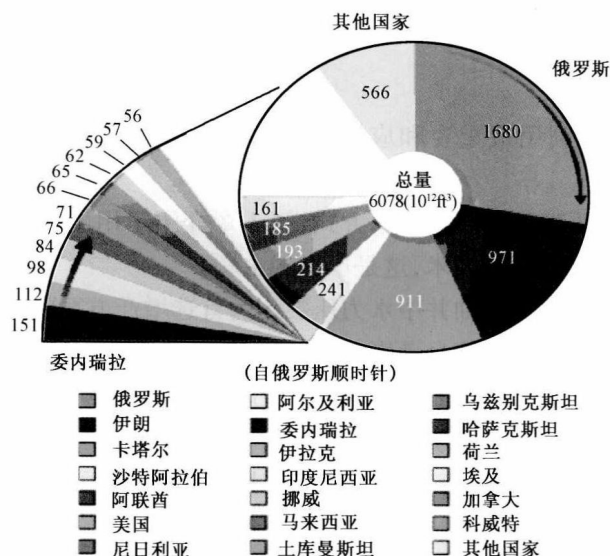


图 1-1 12 个天然气储量最大的国家:包括俄罗斯、伊朗、卡塔尔地区 (EIA,2006;BP Statistical Review,2006;ET,2007)

表 1-1 天然气探明储量和天然气探明可采储量排名前 25 位的国家 (截至 2006 年 1 月)

排名	国家	天然气探明储量				
		10 ¹² ft ³	10 ¹² m ³	总百分比 %	累计总百分比 %	储采比, a
1	俄罗斯联邦	1688	47.8	26.6	26.6	80.0
2	伊朗	944	26.7	14.9	41.5	> 100
3	卡塔尔	910	25.8	14.3	55.8	> 100
4	沙特阿拉伯	244	6.9	3.8	59.6	99.3
5	阿拉伯联合酋长国	213	6.0	3.4	63.0	> 100
6	美国	193	5.5	3.0	66.0	10.4
7	尼日利亚	185	5.2	2.9	68.9	> 100
8	阿尔及利亚	162	4.6	2.5	71.5	52.2
9	委内瑞拉	152	4.3	2.4	73.9	> 100
10	伊拉克	112	3.2	1.8	75.6	> 100
11	哈萨克斯坦	106	3.0	1.7	77.3	> 100
12	土库曼斯坦	102	2.9	1.6	78.9	49.3
13	印度尼西亚	97	2.8	1.5	80.5	36.3
14	澳大利亚	89	2.5	1.4	81.9	67.9
15	马来西亚	88	2.5	1.4	83.2	41.4
16	挪威	85	2.4	1.3	84.6	28.3
17	中国	83	2.4	1.3	85.9	47.0