

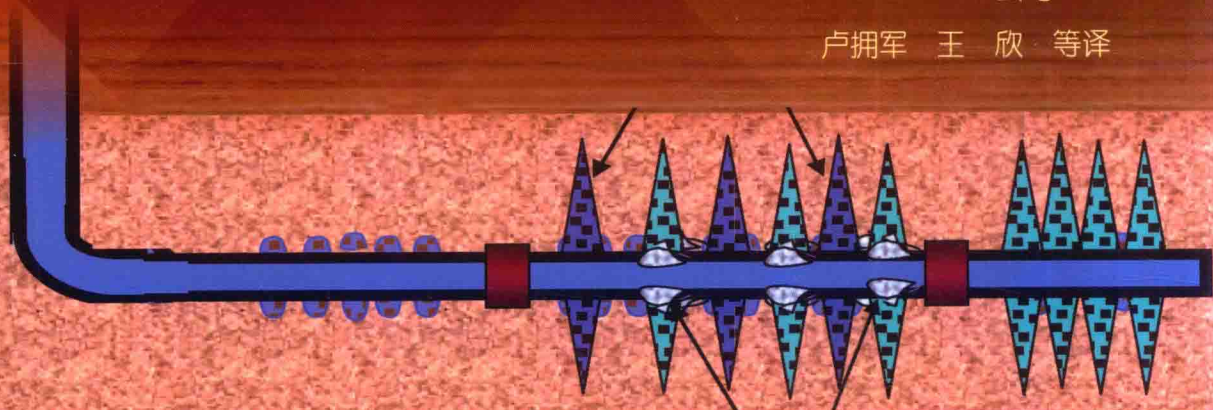
HYDRAULIC FRACTURING EXPLAINED EVALUATION, IMPLEMENTATION AND CHALLENGES

水力压裂解释 ——评估、实施和挑战

【美】Erle C. Donaldson Waqi Alam Nasrin Begum

Tetrahedron 公司 著

卢拥军 王欣 等译



石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(十四)

水力压裂解释

——评估、实施和挑战

[美] Erle C. Donaldson Waqi Alam Nasrin Begum

Tetrahedron 公司 著

卢拥军 王欣 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书对水力压裂技术及其相关的前评估和后处理等环节进行了简洁而又系统的描述。从完成烃类产量以满足需求的角度引出水力压裂技术的产生和近期的发展,尤其是页岩水力压裂工艺和与水力压裂有关的环境问题;介绍了含气页岩储层评价,包括页岩的沉积特征和经济开采的流动条件,储层特征、测井响应、压裂设计、井筒设计、微地震数据的使用等;给出了有助于理解水力压裂的岩石力学基础知识,岩石力学参数对裂缝扩展的影响等;描述了水基、油基、醇基等不同的压裂液体系和一些关键添加剂的作用和使用方法;论述了水力压裂的用水管理、施工过程控制、废水管理等环节,介绍了水力压裂成功实施的一些技术条件和控制措施,并给出了实例,还讨论了水力压裂技术的环境影响与解决方案。

本书可供从事水力压裂的研究人员、工程技术人员和对水力压裂技术感兴趣的其他专业人员使用,也可供大、中院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力压裂解释:评估、实施和挑战/(美)厄尔 C. 康纳森(Erle C. Donaldson)等著;卢拥军等译.—北京:石油工业出版社,2017.6

(国外油气勘探开发新进展丛书.十四)

书名原文:Hydraulic Fracturing Explained Evaluation, Implementation and Challenges
ISBN 978-7-5183-1855-1

I. ①水… II. ①厄…②卢… III. ①油层水力压裂 IV. ①TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 099859 号

Hydraulic Fracturing Explained: Evaluation, Implementation and Challenges

Erle C. Donaldson, Waqi Alam and Nasrin Begum

ISBN: 978-1-933762-40-1

Copyright© 2013 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore)

Pte Ltd and Petroleum Industry Press.

Copyright© 2017 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved.

Published in China by Petroleum Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd..

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予石油工业出版社有限公司在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2015-6808

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

编辑部:(010) 64523562 图书营销中心:(010) 64523633

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

2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8.5

字数:200 千字

定价:60.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《国外油气勘探开发新进展丛书（十四）》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

卢拥军 朱道义 向建华

刘德来 余维初 周家尧

钦东科 章卫兵 董绍华

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从2001年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了13辑70多本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟须。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大科研管理人员和师生的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关技术人员的手中。同时中国石油天然气集团公司也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“千万图书下基层，百万员工品书香”书目，配发到中国石油所属的4万余个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，获得了很好的社会效益。

2016年，在前13辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的6本专著，即《实用油藏工程（第三版）》《石油工程师指南——油田化学品与流体》《水力压裂解释——评估、实施和挑战》《管道完整性手册——风险管理与评估》《非常规页岩气有效开发》《油井生产手册》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校工作，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气集团公司副总经理

译者前言

水力压裂技术开启了油气增产之门，从 1947 年美国堪萨斯州第一口井的水力压裂试验记录以来，水力压裂有超过 70 年的发展历史，对油气勘探开发起到了不可替代的作用。特别是 2000 年以来，水力压裂技术成功用于页岩气与致密油开发，并由此触发北美“页岩革命”，使美国天然气产量跃居世界首位，致密油年产量超过 2 亿吨，这项技术更为公众关注和熟知。随着低渗透致密砂岩油气藏和页岩油气等非常规油气资源逐渐成为资源领域的热点和投资的重点，水力压裂技术的重要性和不可替代性将更为突出，使得越来越多的人对这项技术本身和与技术关联的前期评估、力学机理、关键材料、过程控制等产生兴趣。

本书是 Erle C. Donaldson 等于 2012 年编撰的水力压裂技术的专业书籍，是对水力压裂技术及其相关的前评估和后处理等环节的简洁而又系统的描述，并特别关注了近期页岩储层水力压裂技术的最新发展、认识和成果。是从事水力压裂的专业技术人员、现场应用的工程师和对水力压裂技术感兴趣的其他专业人员的重要参考书。

本书从完成烃类产量以满足需求的角度引出水力压裂技术的产生和近期的发展，尤其是页岩水力压裂工艺和与水力压裂有关的环境问题；介绍了含气页岩储层评价，包括页岩的沉积特征和经济开采的流动条件，储层特征、测井响应、压裂设计、井筒设计、微地震数据的使用等；介绍了有助于理解水力压裂技术的岩石力学基础知识，分析了水力裂缝扩展和支撑的影响因素等；系统描述了水基、油基、醇基、酸性、泡沫、滑溜水等不同类型的压裂液体系，黏土膨胀抑制剂、高温稳定剂、抗微生物剂、缓冲剂等关键添加剂的作用和使用方法；论述了水力压裂的用水管理、施工过程控制、废水管理等环节，介绍了水力压裂成功实施的一些技术条件和控制措施，并给出了实例，还讨论了水力压裂技术的环境影响与解决方案。本书用一种更容易让人理解的方式，帮助读者了解水力压裂的地质因素、水力压裂技术、压裂中使用的流体以及环境问题。

全书共分为 6 章。序、前言、第 4 章、第 6 章由卢拥军翻译；术语、符号、第 1 章由王欣翻译；第 3 章和索引由梁天成翻译；第 2 章和第 5 章由易新斌翻译。全书由卢拥军和王欣审核校对，田国荣、段贵府、黄立宁参与部分图表和文字的校核工作。

本书出版得到了国家重大科技专项 13 项目（2011ZX05013）和中国石油油气藏改造重点实验室的资助。中国石油勘探与生产分公司吴奇教授、中国石油勘探开发研究院雷群教授和邹才能教授给予了大力支持，刘合、丁云宏、张守良等给予了指导，在此一并致谢。

由于本书译者水平有限，加之时间较紧，疏漏和错误之处在所难免，敬请读者指正。

作者的话

本书献给 George V. Chilingar 博士，他一生致力于教育事业，培养的一批批学生都已从南加州大学毕业。Chilingar 博士也通过一些好的技术书帮助全世界无数的工程师和科学家增强知识，这些书中有多本合著技术书籍，得力于他对大量合作者的坚持不懈的鼓励和支持，还有一些他亲自创作和编辑的书。我个人对他在我整个职业生涯中的指导和耐心建议表示真挚的感谢。

——Erle C. Donaldson

本书也献给所有致力于能源开发方法研究的工程师和科学家，这些方法支撑和助推了我国经济的稳步增长。也献给我们的父母、老师、家人以及朋友，他们鼓舞我们在生活中做正确的事。

——Waqi Alam and Nasrin Begum

原书序

以前被忽视的页岩气开发在过去 20 年内飞速发展起来。这种发展是水平钻井和水力压裂技术进步的结果。在一些没有受产油量影响的地方，这种新烃类资源的开发实践已经增强了人们对水力压裂技术的认识，并关注着这项技术带来的一系列问题，如地表环境影响以及压裂施工带来的淡水污染。值得注意的是，水力压裂的实施需要大量的专门设备。

页岩气作为一种天然烃类资源，其重要性逐年增加，现在已经具有替代很高比例的石油产品的大需求量。事实上，几个大的天然气生产公司已经考虑沿着汽车高速路网络建立液化天然气站，以便于装载天然气发动机的车辆使用。因此，将来有一天天然气可以满足大部分的汽车能源需求，缓解未来由于依赖进口烃类能源而带来的经济波动。

地表附近的淡水层受到州、联邦法规以及技术进步的保护。地下应力状态的准确评估以及岩石力学的数学运算能以准确的精度预测裂缝的尺寸和延伸状况。裂缝扩展期间，微地震监测可实时准确地跟踪诱导裂缝实际扩展及延伸，增加了技术的精准性。此外，保持正在利用的页岩层及近地表淡水层的上覆地层的完整性是一种额外的保护。

压裂改造用水量多达 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ gal，在压裂后期，并在生产时，有相当数量的压裂液（约 30%）返排到地面。这种流体包含了一些源自压裂液与地层盐水混合液的特殊化学药剂。经州和联邦许可，这种返排压裂液和地层水可收集起来并进行适当处理。一些情况下，流体注入到地下深部盐水层，从而被永久隔离。如果返排液可被收集并重复用于另一个附近压裂增产项目，那么就会以罐装形式收集并运移到新的井场，因为对于这个公司来说这是最经济的。在任何情况下，水都会被恰当地处理或重复利用，正在进行的一个研究项目就是开发页岩气产水处理后重复利用的新方法。

本书旨在用易于理解的方式解释水力压裂的地质因素（岩石力学）、水力压裂技术、压裂中使用的流体以及随之带来的环境问题（已发展成为压裂过程中的一部分）。相关理论解释中的数学概念将以最简单的形式表示。一些理论问题已经从正文中移除，但在附录里会做更全面的解释。几个实例计算也被合并并在附录 C 里做进一步分析。特殊的专业术语以及文中所有的缩写解释都在术语中。

原书前言

水力压裂技术及其应用由于下列因素得到了飞速增长：(1) 水平定向钻井；(2) 钻井和裂缝扩展的微地震监测；(3) 数字成像软件的发展；(4) 滑溜水的发现（压裂液中添加聚合物，从而减少导管内注入流体的压力损失）。前三项在 20 世纪 90 年代就已经蓬勃发展，并在页岩气压裂引入滑溜水之后的十年经历了快速细化。

页岩气经济有效开发技术的出现激起了全世界对快速开发页岩气的兴趣，水力压裂技术也随之快速发展。这项极其复杂技术的突然应用，使公众对此充满了疑虑，公共出版物也开始广泛刊载诸如疏忽或不恰当主张和应用会导致液体和气体污染浅层淡水的内容。其中部分问题看起来是缺乏对施工过程的误解，如为了控制摩阻、获得携带支撑剂（一般是级配砂）的增黏和控制腐蚀的化学添加剂以及长水平井压裂中的大量用水。《Reservoir Stimulation》和《Recent Advances in Hydraulic Fracturing》是由石油工程师学会出版的非常专业的两本书，在很多针对水力压裂的论文会议中都可以看到。但是，这些书是针对具有一定专业知识的工程师的。很明显，用通俗易懂的方式来解释水力压裂这门技术中的重点问题，让真正对学习这项惊人技术进步感兴趣的任何人都能真正理解，这就是本书的宗旨和目的。

致 谢

作者感谢来自 Tetrahedron 公司的支持，特别是丹尼尔·埃瓦尔德先生和安德莉亚·布坎普女士在文献搜索和画图方面的帮助。我们也感谢罗伯特 A. 赫夫纳四世先生在这本书写作过程中的鼓励和建议。

术 语

缩略词/缩写

BHP	井底压力
BHT	井底温度
BMDL	基准剂量
CMC	临界胶束浓度
EDT	乙二胺四乙酸
EPA	美国环境保护局
HEC	羟乙基纤维素
HPC	羟丙基纤维素
HPG	羟丙基瓜尔胶
NMR	核磁共振
NTIS	国家技术信息服务公司，华盛顿特区
RfD	慢性口腔接触的参考剂量
SPE	石油工程师学会
TDS	总溶解固体
TOC	总有机质含量

符 号

A ——面积;

A ——典型地层 (砂、砂岩、碳酸盐岩) 公式的经验常数;

Btu ——英国热量单位 (在 1atm 下, 将 1lb 水升高 1°F 需要的热量);

C ——与泊松比相关的常数 (常常等于 1.91);

C_b ——总压缩系数;

C_{eq} ——黏土阳离子交换的当量电导率, $(\Omega/\text{cm}^2) / \text{meq}^{-1}$;

C_o ——地层的整体导电率 $(1/R_t)$;

C_r ——岩石基质压缩系数;

C_w ——水的压缩性 $(1/R_w)$;

D ——时间, d;

E ——弹性杨氏模量, $(\text{lbf}/\text{in}^2) / (\text{in}/\text{in})$;

F ——力, lbf;

F_r ——地下岩层总的或总体电阻率;

F^* ——Waxman-Smit 公式中地层电阻率校正因子;

G ——剪切模量, $(\text{lbf}/\text{in}^2) / \text{radians}$;

GR_{clay} ——100% 页岩区的最大伽马强度, 或岩心实验室测试值;

GR_{cs} ——干净砂的伽马强度;

GR_z ——目的层的伽马强度;

K_B ——体积模量, $(\text{lbf}/\text{in}^2) / (\text{in}^3/\text{in}^3)$;

L ——长度;

L_o ——初始长度;

m ——Archie 公式中孔隙度指数, 也可以认为是胶结指数 (默认值 2.0);

n ——Archie 公式中饱和度指数 (默认值 2.0);

p ——压力, lbf/in^2 ;

p_{BH} ——井底压力;

p_c ——毛细管压力, lbf/in^2 , Pa;

p_{cl} ——裂缝闭合压力;

p_{col} ——井中液柱压力；

p_{fr} ——压裂液压力；

p_{fric} ——摩阻压力损失；

p_{LO} ——压裂液滤失进岩石基质的压力损失；

p_{m} ——井筒水力压力（钻井液压力）；

p_{p} ——岩石样品或地层孔隙流体压力；

p_{prop} ——裂缝延伸压力（井底压力）；

p_{res} ——储层静压力；

Q ——注入排量，bbl/min；

R ——半径；

R_{sh} ——页岩的总电阻率；

R_{w} ——地下岩层饱和水后的电阻率；

R_{t} ——地下岩层总（整体）电阻率；

r ——以裂缝起裂点为中心的径向距离；

r_0 ——初始半径；

Δt ——地震波 P 波和 S 波到达的时间差；

u_{c} ——压缩波速度；

u_{s} ——剪切波速度；

V ——体积；

V_{b} ——总体积；

V_{o} ——初始体积；

V_{sh} ——页岩的体积百分比（实际应该用 V_{clay} 来表示页岩中黏土的体积百分比，但是 V_{clay} 用来表示了导电性）；

v_{p} ——地震波 P 波的速度；

v_{s} ——地震波 S 波的速度；

W ——裂缝的宽度。

希腊字母

α ——孔隙弹性常数;

ε ——应变, in/in;

μ ——黏度;

μ_a ——视黏度;

ν ——泊松比 $\frac{du_x}{dy}$ (长度的改变与宽度的改变比值);

ρ ——密度, g/cm³;

ρ_b ——总密度;

ρ_f ——地层孔隙流体平均密度;

ρ_m ——地层基质密度 (实验室);

ρ_z ——目的层记录的总密度;

σ ——应力, lbf/in²;

σ_{if} ——界面张力, 10⁻³N/m;

σ_d ——作用在圆柱岩石样品外边界上的应力;

σ_n ——正应力;

σ_r^* ——有效径向应力;

σ_T ——张应力;

σ_x, σ_y ——水平应力;

σ_θ^* ——井筒有效切向应力;

ϕ_d ——密度测井获得的孔隙度。

目 录

第 1 章 水力压裂技术解释	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 石油烃类	(1)
1.3 页岩中的石油储量	(3)
1.4 油气需求	(6)
1.5 完成烃类产量以满足需求	(7)
1.6 水力压裂	(10)
1.7 与水力压裂有关的环境问题	(12)
第 2 章 含气页岩储层评价	(14)
2.1 沉积储层	(14)
2.2 页岩储层	(16)
2.3 多级压裂	(18)
2.4 压裂设计 (压裂实施)	(18)
2.5 从地表到油藏的井设计	(19)
2.6 页岩气储层特征	(22)
2.7 伽马射线测井	(23)
2.8 密度/中子测井	(24)
2.9 微地震数据的使用	(24)
第 3 章 水力压裂岩石力学	(27)
3.1 简介	(27)
3.2 杨氏模量 (E)	(27)
3.3 泊松比 (ν)	(28)
3.4 体积模量 (K_B)	(29)
3.5 剪切模量 (G)	(29)
3.6 有效应力	(30)
3.7 摩尔应力圆	(33)
3.8 裂缝的起裂	(37)

3.9 支撑裂缝张开 (40)

第 4 章 压裂液 (43)

4.1 简介 (43)

4.2 油基压裂液 (45)

4.3 水基压裂液 (46)

4.4 醇基压裂液 (48)

4.5 酸性压裂液 (49)

4.6 泡沫压裂液 (49)

4.7 滑溜水 (49)

4.8 表面活性剂 (50)

4.9 黏土膨胀抑制剂 (50)

4.10 高温稳定剂 (51)

4.11 防漏失剂 (51)

4.12 降黏剂 (51)

4.13 抗微生物剂 (52)

4.14 缓冲剂 (52)

4.15 压裂液的制备 (52)

4.16 结论 (53)

第 5 章 水力压裂现场应用 (54)

5.1 简介 (54)

5.2 保护地下水 (54)

5.3 水力压裂废水管理 (56)

5.4 水力压裂淡水管理 (57)

5.5 减少地面干扰 (58)

5.6 压裂施工平台的噪声、光线及交通控制 (58)

5.7 水力压裂成功实施的技术考虑 (59)

5.8 水力压裂实例 (60)

第 6 章 水力压裂技术的环境影响 (67)

6.1 对地表和地下环境的影响 (67)

6.2 取水 (67)

6.3 地表溢散 (69)

6.4 污水管理 (69)

6.5 废气排放 (70)

6.6 蓄水池 (71)

6.7 对人体健康的影响 (71)

6.8 从何处获取毒性信息 (72)

6.9 水力压裂液中存在的化学物质 (73)

6.10 返排液中存在的化学物质 (75)

6.11 保护环境规程 (87)

6.12 目前适用的规程 (87)

附录 A 黏度 (91)

附件 B 表面活性剂、乳化液、泡沫 (96)

 B.1 表面活性剂 (96)

 B.2 乳化液 (97)

 B.3 泡沫 (97)

附录 C 计算 (98)

 C.1 地下上覆和水平应力 (98)

 C.2 裂缝起裂压力 (99)

 C.3 裂缝延伸压力 (99)

 C.4 骨架渗透性 (100)

 C.5 裂缝尺寸 (101)

 C.6 岩石基质力学属性 (102)

 C.7 总结 (104)

专业术语 (106)

参考文献 (108)

第 1 章 水力压裂技术解释

1.1 简介

水力压裂技术正在受到越来越多的关注，水力压裂是一种利用压力在岩石结构中压开新的或现有的裂缝用于生产石油和天然气的工艺过程。在岩石中产生的裂缝充当让石油和天然气从岩石流向井眼，从而实现开采的通道(图 1.1)。水力压裂，也称为“压裂”，已有超过 50 年的历史；然而，在过去 10 年，由于人们设法从一种称为含气页岩的新储层中开采石油和天然气，压裂技术的应用已经显著扩展了。在以前，石油和天然气的供应充足，供应链中断的风险很小，这些商品的价格相对较低，而通过页岩的压裂来生产石油和天然气在经济上则被认为是不可行的。由于全世界人民生活水平的提高，伴随着供应出现持续的不确定性以及人们对能源不断增长的需求，石油价格随之显著提高。除了世界上有丰富天然气资源的某些区域外，天然气的价格也提高了。用于石油运输的基础设施十分发达，其分布几乎遍布世界各个角落；而在大多数情况下，天然气仍然只限在本地使用，因为在没有输送管线的地方运输成本很高，因此其价格依赖于本地或区域市场而并非全球市场。

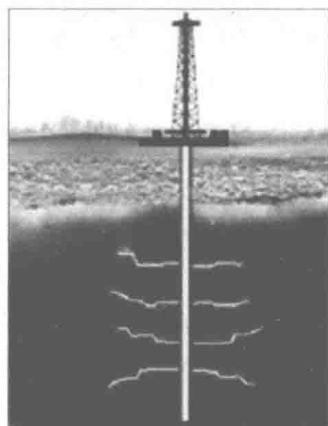


图 1.1 压裂用于生产的岩层

对能源的高需求已经使人们开始对能源的成本进行严格的控制，并研发能够高效生产传统和非传统能源的方法。目前，在总能源消耗中生产比例最大的石油工业已经开发并改进了几种用于生产更多的石油和天然气的技术。多年来，水力压裂工艺有了实质性的改善，从而可以生产出更多的石油和天然气。与以往不同，现在水力压裂的应用更加广泛，有时会在人口稠密和环境敏感区域附近进行作业，因此会遇到更大的挑战。

1.2 石油烃类

由石油和天然气组成的石油烃类已经被当作能源使用了数千年。它们作为一种热源来使用，由于点燃时发出光和热，所以有些人将它们看得很神圣。据说在基督教出现数百年前，中国人就已经使用天然气了。已成为人们崇拜对象的“永恒之火”可能就是由于闪电通过地下裂缝引燃天然气渗流物引起的。直到 19 世纪，天然气才获得了商业上的应用并造福于社会。在 1821 年，威廉·A. 哈特在纽约州的弗里多尼亚钻了第一口井，通过地面生产天然气。这才开始了可能利用这种能源的时期。正是在这个时候，路灯照明转变为使用天然气，