页岩气井水力压裂技术及环境问题探讨

钱伯章[1] 李武广[2]

1.上海擎督信息科技公司金秋能源石化工作室，上海 200127；

2.中国石油大学(北京)石油工程学院，北京 102249

摘 要：水力压裂法开采天然气时，用高压将混有化学物质和沙子的水注入到地下页岩层，在高压下用水压裂岩石，同时用沙或其他物质支撑裂口，使页岩破碎释放出气体。国内外页岩气井水压裂增产技术，主要包括清水压裂、同步压裂、重复压裂和水平井压裂技术；深度研究页岩气井水力压裂带来的环境污染问题，主要包括甲烷污染和其他化学物质污染；分析目前在页岩气水力压裂开发中解决环境污染问题的具体补救措施，主要包括压裂返排废水的控制、对空气污染的控制和非常规气清洁开发的黄金准则。

关键词：页岩气；水力压裂；环境污染；补救措施；黄金准侧

DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2013.01.013

0 前言

高油价时代，页岩气作为一种新的绿色能源，正在被世界各国所追捧。美国页岩气开发始于 1821 年，是世界上页岩气勘探开发最早的国家。近几年，页岩气大规模商业性开发改变了美国能源格局[1-2]。它的快速发展，一靠竞争的市场机制，二靠竞争所带来的技术创新。页岩气最主要的开采方式是水力压裂技术，水力压裂技术需要大量的水资源，容易带来严重的环境污染和生态破坏问题。相反，也有一些环保主义者肯定了页岩气开发的正面影响，因为页岩气相比石油和煤炭更为低碳。对此，不同学者有不同意见，然而个人认为水力压裂开发页岩气技术的关键在于寻找环保与开发的黄金结点，在环保忧虑之下，采取一些具体的补救措施，使页岩气开发技术更为成熟环保，此项研究具有重要的现实意义。

1 页岩气压裂增产技术

在页岩气开发方面，美国主要采用了水平井和水力压裂技术，后者还包括清水压裂技术、多段压裂技术、同步压裂技术、重复压裂技术等，同时，还可结合先进的储层预测评估技术、裂缝监测技术以及随钻测量技术等进行应用分析[3]。

1.1 清水压裂技术

目前美国页岩气开发最主要的增产措施是清水压裂技术，即将添加了减阻剂的清水作为压裂液。这种压裂液主要成分是水、少量的减阻剂、黏土稳定剂和表面活性剂。主要使用这种低成本压裂液，那是因为水是一种低黏度流体，更容易产生一些复杂的裂缝网络，而且很少需要清理，是一种清洁压裂技术，可提供更长的裂缝，并将压裂支撑剂运到远处裂缝网络，在 Barnett 等低渗透油气藏储层改造中可取得很好的压裂效果。

1.2 重复压裂技术

重复压裂技术用于在不同方向上诱导产生新的一些裂缝，从而增加裂缝网络，以便提高生产能力。如果初次压裂已经没有效果，或现有的支撑剂已经损坏，那么对该井进行二次压裂将重建储层线性流，最终采收率估

收稿日期：2012-11-08

基金项目：国家自然科学基金项目(50874114)和国土资源部国家油气专项(2009GYXQ15)联合资助

作者简介：钱伯章(1939-)，男，教授级高级工程师，1963~1995年任职于中国石化上海高桥分公司，2001年创立金秋石化科技传播工作室，从事石油化工技术和经济信息调研及传播工作。

计提高 9 %左右，可采储量增加 60 %左右，是一种低成本增产技术。如果能使得二次压裂获得成功，必须评估二次压裂前、后的平均储层压力、渗透率厚度乘积、有效裂缝长度和导流能力等等。所以重复压裂必须以室内实验为基础进行实施。Barnett 的大部分页岩气井都进行了二次压裂，二次压裂后可接近甚至超过初次压裂时的页岩气产量[4]。

1.3　同步压裂技术

该技术是同时进行配对井的压裂，也就是同时对两口甚至更多的井进行压裂。它可使压裂液和支撑剂在高压下从一口井向另一口井运移距离达到最短，能增加裂缝网络的密度及表面积。该技术曾在 Barnett 页岩气田使用，在相隔 150~300 m 范围内钻两口平行的水平井同时进行压裂，目前已发展到多口井间同时压裂。该技术在未来页岩气开采方面将有很大应用前景[4]。

1.4　水平井压裂技术

水平井也需要压裂，如果不压裂则不能产气。通过对 Newark 东油气田进行水平井压裂，发现其初始产气速度一般比直井快 2~3 倍。对 Newark 气田进行水平井分段压裂，可使其核心区域产量大幅度提高，并且在那些缺少遮挡或遮挡层很薄的区域，水平井压裂比直井压裂更能使裂缝保持在 Barnett 储层的目的段中。最初水平井的压裂阶段一般采用单段或 2 段，目前已增至 7 段甚至更多。中国石油天然气集团公司西南油气田有限公司已计划建设威远气田作为全国首个页岩气开发的试验田。至 2011 年 9 月，已完成 5 个页岩气勘探试验井。中国的第一个水平页岩气井威 201–H1 井在威远气田，已采用分段压裂。水平井 10 级以上分段压裂技术是最关键的核心技术，但是，目前我们对这两项技术的掌握还不是很成熟。

2　水力压裂引起的环境问题

水力压裂技术，是目前唯一可以开启页岩气矿藏的金钥匙。它主要使用含砂的水，其中砂作为支撑剂，此外还有 2%或更少的化学增强剂。当高压液体注入钻井并使岩层裂开后，高压液体中的支撑剂可以保持住裂缝，使其成为油气导向钻井的高速渗透通道。循环压裂液的净化不妥可能会造成严重的环境问题，因为水力压裂技术应用于工业，众所周知，会使用大量水和造成水污染问题，水污染对居住地区甚为敏感[5-7]。

2.1　水力压裂需要消耗大量水

水力压裂技术需要消耗大量水资源且不可回收。水力压裂井比传统的井需要更多的水。在美国密歇根的 Antrim 页岩气田，一个传统的井一次需要 190 m^3 的水。然而据估计如果是水平钻井，一个水力压裂井一次需要 1.9×10^4 m^3 水，大约是一个 1×10^9 W 煤电站 12h 的水用量。据介绍，2.6 km^2 干旱土地需 1.5×10^6 m^3 水，可收获价值 2×10^5 $的玉米。等量的水，如果用于水力压裂技术钻井，可获得价值 2.5×10^9 $的石油。由于钻井所使用的水要注入比地下蓄水层深得多的页岩层，大量水主要被岩石吸收，而不能再回收利用。环保人士担心水力压裂过程中会消耗大量水资源。据德国地球科学研究中心的霍斯菲尔德教授介绍，每口页岩气井需耗费 1.5×10^4 m^3 的水才能使页岩断裂，具体数据见表 1。

表1　页岩气生产不同井的水需求量

地区	每口井总量 /m^3	仅压裂用量 /m^3
Barnett(巴尼特)页岩	17 000	4 500~13 250
Barnett(巴尼特)页岩	14 000	
Barnett(巴尼特)页岩	无数据	
Barnett(巴尼特)页岩	22 500	
Horn 河盆地(加拿大)	40 000	
塞勒斯(Marcellus)页岩	15 000	
塞勒斯(Marcellus)页岩	1 500~45 000	1 135~34 000
Utica 页岩(加拿大魁北克)	13 000	12 000

2.2　水力压裂可能污染地下水

水力压裂技术也是一柄双刃剑，不仅消耗大量水资源，还可能污染地下水。循环后的水典型地含有用于水力压裂处理的化学浓聚物和自然产生的浓盐水，有时候有少量的放射物质，比如镭。循环后的水必须要妥善处理才能避免对公共健康和环境的危害。美国 14 家油气公司过去 5 年中使用了约 2.95×10^6 m^3 压裂添加剂，包括 750 种化学产品和苯及铅等有毒物质。回流的压裂液如果未及时处理或造成泄漏，对生态环境的影响将不可低估。环保人士和当地居民长期以来都认为，此举会使地下水受到甲烷和其他化学物质的污染。

2.2.1　甲烷的污染

在气体和压裂液体的流动方面，主要的担忧是气体和水力压裂过程中使用的化学物质污染提供饮用水的蓄水层。蓄水层在大约地下 600 m 或者以上。压裂是水平的，因为石头自然的压力使气体流向气体储存器。在更深的底层，压裂可能垂直地发生但是受被压在上方的气体储存器限制。如果某处地下水受水力压裂液体污染，多数情况可能是不合理施工而不是水力压裂技术本身造成。美国杜克大学的研究者在《美国国家科学院院刊》表示，在宾夕法尼亚州使用水力压裂开采页岩气的地区，地下水中甲烷含量比其它未钻探区域高出大约 17 倍。研究者分析了宾夕法尼亚州和纽约州五个郡范围内

68 个私有水井中的甲烷含量，报告称，饮用水受甲烷污染的现象与用水力压裂法开采页岩气密切有关[8-9]。

地球正义组织的数据显示，美国目前有 32 个州采用水力压裂法开采页岩气。杜克大学的研究人员表示，甲烷气体的释放可能是由于钻探设备缺陷导致的，而研究并未发现注入页岩层的化学物质会向上流动影响浅层地下水。研究人员还表示，水力压裂法注入的液体会慢慢自地下深处向上层运动，几十年后可能才产生影响[9]。例如，2010 年 4 月，由于 Exco 能源公司的钻井机无意中造成了浅层天然气泄漏，导致大约 150 户迪索托居民被迫疏散到邻近的卡多县。当时，Exco 公司承认甲烷已经渗入当地的饮用水中，并且表示会监测是否有气体逸出。也发生了卡波特公司被指控在开采天然气时，造成了甲烷渗透进居民水井的严重后果见表 2。

表2 美国页岩气井返流液体中的甲烷排放量

盆地	返流时的排放量 /g	井的生命生产期量 /10^6 m^3	返流排放占生命生产期的百分比 /(%)	CO_2 当量 /10^4 m^3
Haynesville	6 800	210	3.2	7.6
Barnet	370	35	1.1	2.5
Piceance	710	55	1.3	2.9
Utica	255	40	0.6	1.4

2.2.2 化学物质污染

页岩气开采导致另一个重要的环境污染问题是化学物质污染。在开采过程中要经过地下蓄水层，这时，所使用的化学添加剂会对蓄水层中的水造成严重污染，表现为化学物质的泄漏。地表溢出——化学物质和开采使用水的溢出给公众健康和环境造成负面影响。2009 年，在切萨皮克能源公司的钻井平台附近，发现了 16 头牛的尸体。调查显示，这些牛是食用了钻井机使用的化学制品后死亡。然而这些化学制品则是在一次暴风雨中发生泄漏的。在宾夕法尼亚州，由于饮用水安全和其他环境问题的诉讼让钻探工作遇到了很大的麻烦，间接地导致了能源产品成本增加。同时，政府也在当时中止了在国有林区内发放新的钻井许可证[10]。

2.3 臭氧标准可能产生潜在的负面影响

据美国《油气杂志》2011 年 8 月 26 日报道，美国空气控制中心(ACC)技术和法规事务副总裁 Mike Walls 表示，考虑到页岩气资源的重要性，目前更加严格的空气中臭氧标准对该行业可能产生潜在的负面影响。大多数与页岩气开发相关的工业均位于美国人口较少的地区，这些地区目前为空气清洁法的达标地区。但是，更加严格的臭氧标准将使整个美国变成“不达标”，有关许可要求的更改将使企业获得许可证的成本大幅增加且获得难度更大。需要利用页岩气带来的新的竞争优势，而在更加严格的臭氧标准监管下，越来越多的页岩气资源将处于臭氧不达标地区，这将使这些地区的页岩气生产停止，从而使其拥有页岩气资源却不能利用[11]。

美国环保局(EPA)未能在 2011 年 7 月 31 日前如期完成臭氧标准的修订，而工业界人士和共和党议员却希望说服 EPA 将新标准推迟到 2013 年。双方的争议源于 2008 年 EPA 决定将 8h 臭氧标准从 0.084×10^{-6} 减少到 0.075×10^{-6}，为其提供建议的 EPA 清洁空气科学顾问委员会甚至表示不应超过 0.070×10^{-6}。2011 年 9 月 2 日，美国总统奥巴马要求 EPA 撤回有关空气中臭氧标准的监管提案，政府表示关于保护公众健康和环境的承诺仍然不会动摇，但在经济持续复苏的情况下，仍需要强调减少企业界面临的监管负担和监管不确定性的重要性。但是，油气工业界认为取消臭氧排放条例只是暂时性地缓解了未来可能更加严格的监管负担，因为美国环保局要求最大限度地使用减排技术的提议仍在研究日程内。可以预见，业内将持续关注臭氧标准变化对水力压裂的影响[12]。

3 环境污染的补救措施

3.1 对压裂返排废水污染的控制

为了减少水力压裂带来的环境破坏，在每次压裂完成之后，对水进行获取和重新利用，是一项比较重要的补救措施。美国许多页岩气钻井就建在传统天然气生产场所附近，因此，压裂后的水能够被捕获、处理，并回收利用到下次水力压裂中。据估计，美国页岩气钻探中，大约有 70 %的水来自水力压裂回收的水。

每口井需要消耗 $(7.5\sim19)\times10^3$ m^3 的水，其中的 25 %~100 %需要回流到地面，这些水必须进行回收和处理。对于美国西部各州，特别是新鲜水供应已经非常紧张的地区，水力压裂会使现有水资源进一步紧张。巴尼特页岩区钻井和压裂过程的耗水量相当于当地 18.5 万户家庭的耗水量。根据美国地质调查的资料报道，得克萨斯州正密切关注钻井过程中水的用量，由巴尼特页岩钻探公司组成的一个财团开发了节约用水的最佳管理措施。马塞勒斯页岩气生产区也采用了类似的方法。

水力压裂形成的废水通常有以下三种典型的处理方法：运输到厂区外的污水处理装置进行处理，其后将其封存在地下井中。运输到厂区外的污水处理装置进行处理，再排放到地表水。原地处理后重新用于水力压裂或钻井操作。不同页岩气产区的水力压裂回流废水(含不同的化学试剂)要求有不同的水处理解决方案。如在美国东部马塞勒斯页岩区一定要有处理极高含盐量压裂废水的能力[13]。

据美国《烃加工》2011 年 7 月 1 日报道，为了解决水处理相关问题，一些领先的水技术公司推出了移动式水处理装置解决方案。这些移动式装置用来处理和回收水力压裂回流液和钻井过程及其他工业操作过程中产生的含盐废水，这样可以减缓新鲜水供应紧张的问题。另外，美国一些大学，如得克萨斯 A&M 大学、卡耐基梅隆大学和西弗吉尼亚州立大学也开始了该项目的研究工作，旨在开发新的、更有效的油气钻探和水力压裂过程中的废水处理技术。一些公司，包括西门子水技术公司及 GE 电力和水处理公司，都推出了应用不同技术的移动式水处理装置，能在原地进行水处理并回用，不仅能减缓当地水资源紧缺、降低成本，还可以降低将废水输送到远处的封存井或水处理装置过程中产生的温室气体排放。西门子的解决方案采用浮选/过滤技术，而 GE 的解决方案则采用蒸发技术。每种技术各有利弊。

中国延长石油集团研究院通过对微界面絮凝、催化氧化、定向脱色、强化固液分离等技术进行重点攻关与配套技术研究，2012 年 6 月中旬开发出集化学处理剂体系与设备为一体的高效污染物无害化处理技术，并自主研发成功 YC-FC01 模块化页岩气压裂作业废液回用处理设备。该设备采用模块化设计思路，使用时可根据压裂废液性质通过调节阀实现各模块之间的任意切换与组合。它能针对不同压裂体系的作业废液采用相应的化学调制剂处理，处理后的水质可满足压裂液配液用水指标，实现了节能减排及废液循环利用。该技术已在国内率先用于解决陆相页岩气开发中压裂作业废液的处理难题。YC-FC01 设备是一套室内小试装置，目前延长集团正在设计中试处理设备，扩展后的橇装式模块化废液处理设备可推广应用。该技术可有效解决页岩气开发中压裂作业废液的处理问题，节能减排、保护环境、节约水资源，对实现页岩气绿色开发、清洁生产与可持续发展具有重大意义。

3.2　对空气污染的控制

美国环保局 2012 年 4 月 18 日发布一项新法规，将对页岩气开采中，因使用水力压裂技术所造成的空气污染加以控制，这也是美国控制页岩气开采造成环境污染的首个法规。该法规要求到 2015 年，所有采用水力压裂技术进行开采的页岩气井都必须安装相关的设备，以便减少可挥发性有机化合物及其他有害空气污染物的排放，例如像苯和正己烷等。环保局空气和辐射办公室副主管 Gina McCarthy 在发布该项法规时表示，在页岩气田必须要安装相关设备的同时，还可以捕集到具有较强温室效应的甲烷。目前大气环境中的甲烷主要是由于油气开采泄漏造成的。该项法规将对目前美国约 13 000 口天然气井产生影响。

美国环保局早在 2011 年 7 月就提出了对水力压裂法气井进行控制的初步建议，当时美国石油协会和其他行业协会都认为这项计划实施的时间进度太紧。因此美国环保署在最终颁布这项法规时，将具体实施时间推迟了两年多，在此期间，这些气井在生产中可以通过燃烧的方法减少甲烷和其他污染物的排放。这项修改后的法规得到了美国天然气协会和美国石油协会的赞扬。他们称时间等方面的修改“能够让相关公司在生产国家急需的石油和天然气的同时，又能减少污染物的排放”。这项法规同时也得到美国环保组织的支持。野生地球守护者的气候变化和能源方案主任杰里米·尼科尔斯表示：“虽然未来两年多，这些气井还将继续燃烧甲烷而不是捕集，但从另一方面来说，将这些物质通过燃烧等方法除去毕竟也减少了向空气中的排放。”他强调，现在该是工业界行动起来，加紧安装新设备捕集这些物质的时候了。据了解，目前美国新气井中约有一半已安装了相关设备，以便在进行页岩气开采时能够根除可挥发性有机化合物的排放，捕集空气污染物及甲烷。

2012 年 5 月 15 日，美国环保局发布了新的天然气开采排放标准，要求运营商使用天然气捕捉技术，以避免有害气体逃逸到大气中，威胁公众健康。这些气体包括化学混合物、沙子和水在高压下注入岩石中进行压裂释放出来的碳氢化合物。美国环保局局长丽莎·杰克逊表示，过去逃逸出来的气体污染了空气。新标准将通过捕获这些气体来保护人们的健康，也将把更多针对燃料供应商的产品推向市场。政府希望继续扩大全美天然气等重要资源的生产。新标准在支持这一目标的同时，确保燃料生产不会威胁民众健康。美国环保局已更新了两项清洁空气法案，以控制天然气井压裂、钻井和抽水等环节释放的气体。

美国每年大约有 1.3 万口天然气井进行压裂或再次压裂。在开采准备阶段，这些天然气井会释放出挥发性的有机化合物，形成烟雾、苯和正己烷等有毒物质，可能严重威胁人类健康。《清洁空气法案》要求环保局为引起空气污染、危及公众健康的行业设立标准，每 8 年更新一次。现行标准发布于 1985 年。更新后的《新能源性能标准》和《有害空气污染物标准》要求，相关行业要捕捉天然气的主要成分甲烷。甲烷吸收的太阳热量是大气中二氧化碳的 20 倍以上。新标准既可以通过成熟且具成本效益的技术来实现，又能降低实施成本，同时确保其可行性。美国约有一半的压裂式天然气井已经应用。这些技术不仅能减少天然气井排放 95 %的有害气体，还能令企业收集到更多的天然气，通过再次销售抵消成本。美国环保局预计，新标准在 2015 年全面实施后，相关行业每年将节省 1.1×10^7~$1.9\times10^7$$。

美国石油学会和美国天然气联盟于 2012 年 6 月 4 日共同宣布，对美国来自水力压裂甲烷排放量新的调查发现，它们比美国环保局的估计要低 50 %。他们调查了广阔的地理区域 20 多家公司作业的 91 000 口井，许多数据来源是环保局最近估算的主要来源的 10 倍。由 URS 公司和 LEVON 集团所作的调查发现，来自两个重要区域的排放比美国环保局的估计要低得多。在液体石油卸货过程中甲烷进入大气的排量要低 86 %，修井作业的排放量要少 72 %。荷兰皇家壳牌公司行政总裁 Peter Voser 于 2012 年 6 月 5 日在马来西亚吉隆坡举行的第 25 届世界天然气大会的讲话中表示，虽然已无疑问，在世界各地可以挖掘出页岩气这些丰富的天然气储藏，但社会不应低估重大的投资和高度复杂的技术，需要采取安全和负责任的方式去做。沃瑟指出，一些环保团体对这些资源开发潜在的安全和环境影响口诛笔伐。这导致对水力压裂影响的一些误解。沃瑟称，压裂是一个已经试用多年的技术。最近引起更多关注的是温室气体排放，尤其是甲烷，它从页岩气生产中逸出。沃瑟称，使用成熟的技术可以显著减少甲烷排放。在美国怀俄明州的 Pinedale 作业中，壳牌公司已安装了一个系统，可用红外摄像机检测以帮助阻止甲烷泄漏。但显然仍需要更多的研究来了解天然气行业甲烷排放的真实程度[14]。

3.3 国际能源局的评论

国际能源局于 2012 年 5 月 29 日表示，只有负责任地应对相关问题，页岩气产业才会“加快发展”。如果页岩气这种非传统的燃料要走向兴旺，开发者必须解决页岩气开采的社会和环境问题。国际能源局执行主任 Maria van der Hoeven 表示，技术应能应对非常规天然气生产与环境有关的问题。然而，她警告说：“如果不妥善解决对社会和环境的影响，则一个非常现实的可能性，是公众反对页岩气和其它类型非常规天然气的钻探，这将使进入轨道的非常规天然气革命停止。”行业必须通过展示出色的表现，以赢得公众的信赖，政府必须确保适当的政策和监管制度落实到位。这些措施包括：充分的透明度，对环境影响的测量和监测；当地社区的参与；谨慎选择钻探地点和措施，以防止从井内发生任何泄漏而进入附近的含水层；严格评估和监测对水的需求和废水达零排放与最小的天然气放向火矩的措施；以及改进项目的规划和监管。据称，国际能源局的提法已获得八国集团领导人最近在戴维营召开的首脑会议的赞同[15]。

国际能源局首席经济学家 Fatih Birol，在其报告中表示，该机构估计，额外的措施，可望使单一的页岩井成本再增加 7 %，不过，对于较大型的开发其成本增加会低得多。提赫·比罗尔表示，如果遵循这些规则，非常规天然气生产量将可望到 2035 年增加 2 倍至 $1.6\times10^{12}\ m^3$，但是，全球范围内，如果不生产页岩气，未来可能会保持静态，则天然气在全球能源结构中将会削弱，价格将会上涨。

3.4 非常规气清洁开发的黄金准则

页岩气开发需要采用特殊的技术，由此会带来新的环境风险和挑战。根据美国净化空气任务组织的研究成果，具体的环境表现为：温室效应、地面臭氧烟雾污染、地下水污染、地表水污染、局部地区水资源短缺。必须对这些污染采取必要黄金准则，具体内容包括：采用全风险管理框架和最先进技术刻画地质构造；在完井期间及完井后，启动地下水监测体制，以确保第一时间发现地下水污染情况；采用严格的返排液处理标准，确保正常作业和意外泄漏导致的压裂液和压裂返排液及烃类排放与自然环境和地下水层隔绝；确保地表作业不影响浅部含水层；在非页岩气开发过程中，应该在现有环境法案框架基础上，有针对性地制定环境保护政策[16]。

以上这些政策法规应该在推动上述标准实施过程中起重要作用。美国已通过修改法律关闭了著名的“哈里伯顿漏洞”；允许环境保护局依据《安全饮用水法》监督页岩气开采活动；也颁布《FRAC》法案，要求披露水力压裂中使用的化学药剂情况等。这些经验表明，页岩气开发对环境的影响从一开始就应该考虑充分。我国目前处于页岩气开采的初期阶段，具有很好的环境和社会协调发展的基础，因此，现在就必须把甲烷、有毒化学物质及水污染问题纳入管理体系。总之，在一定程度上，页岩气监督管理水平决定页岩气资源发展的未来。

4 结论

a)页岩气水力压裂开采技术带来了严重的环境污染和生态破坏问题。开采过程中甲烷和使用水中大量化学物质的溢出将会严重危及公众健康。

b)在页岩气勘探开发中，通过技术改进减少作业用水量，同时采取措施处置含有污染物的钻探回收水，并防止有毒气体泄漏。国家层面必须建立符合国家实际的页岩气勘探开发规范。

c)美国页岩气发展经验表明，中国在页岩气开发初期就应该把环境污染问题纳入管理体系。加强页岩气开发过程中的环保技术，并制定相应的法律规范，使页岩气开发技术更成熟环保。

参考文献：

[1] Scott L，Daniel M，Kent A，et.al.Mississippian Barnett Shale，Fort Worth basin north-central Texas：Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potentia[J]. AAPG Bulletin，2005，89(2)：155-175.

[2] 李武广，杨胜来，殷丹丹，等. 页岩气开发技术与策略综述[J]. 天然气与石油，2011，29(1)：34-37.

[4] 钱伯章，朱建芳.页岩气开发的现状与前景[J]. 天然气技术，2010，4(2)：11-14.

[5] 潘仁芳，黄晓松.页岩气及国内勘探前景展望[J]. 中国石油勘探，2009，19(2)：1-5.

[6] 蒲泊伶，包书景，王毅.页岩气成藏条件分析[J]. 石油地质与工程，2008，22(3)：33-39.

[7] Javadpour F. Fisher D，Unsworth M. Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments[J]. JCPT，2007，46(10)：55-61.

[8] Zelenev A S，Zhou H，Linda B.Microemulsion Assisted Fluid Recovery and Improved Permeability to Gas in Shale Formations[C]. SPE 127922，2010.

[9] 闫存章，黄玉珍，葛春梅，等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]，天然气工业，2009，33(5)：67-71.

[10]《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京：石油工业出版社，2009. 1-100.

[11] Bowker K A.Barnett shale gas production Fort Worth basin：Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin，2007，55(1)：523-53.

[12] Macqusker J，Davies S.Lithofacies variability in finegrained mixed clastic carbonate successions：implications for identifying shale gas reservoirs [C]. San Antonio，Texas：AAPG Aannual Convention，2008.

[13] Hill L，Ross J，Zhang E，et al.Modeling of gasgeneration from the Barnett Shale，Fort Worth Basin：Tex -as [J].AAPG Bulletin，2007，91(4)：501-521.

[14] 黄玉珍，黄金亮，葛春梅，等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键[J]. 天然气工业，2009，29(5)：7-10.

[15] 刘洪林，王　莉，王红岩，等.中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试，2009，18(4)：68-78.

[16] Gale，Julia F W. Natural fractures in the Barnett Shale and their important for hydraulic fracture treatment [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 2007，91 (4)：603-622.