

页岩气开发关键技术与环境问题研究现状

杨德敏^{1,2,3}, 夏宏^{1,2,3}, 袁建梅⁴, 程方平^{1,2,3}

1. 国土资源部页岩气资源勘查重点实验室(重庆地质矿产研究院), 重庆 400042;
2. 重庆市页岩气资源与勘查工程技术研究中心(重庆地质矿产研究院), 重庆 400042;
3. 油气资源与探测国家重点实验室重庆页岩气研究中心, 重庆 400042;
4. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500

摘要:重点介绍了国外页岩气开发关键技术的研究进展, 主要包括水平钻井技术和水力压裂技术。同时指出了页岩气开发过程中存在的主要环境问题, 如引发微地震、水资源消耗、水环境污染、温室效应等。最后结合我国页岩气开发实际情况, 提出了未来页岩气开发领域的研究重点。

关键词:页岩气; 水平钻井; 水力压裂; 环境问题
中图分类号: X741 **文献标志码:** A

文章编号: 0253-4320(2014)07-0001-03

Research status of key exploitation technologies and environment problem of shale gas

YANG De-min^{1,2,3}, XIA Hong^{1,2,3}, YUAN Jian-mei⁴, CHENG Fang-ping^{1,2,3}

1. Key Laboratory for Shale Gas Resource & Exploration, Ministry of Land and Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;
2. Chongqing Engineering Research Center for Shale Gas Resource & Exploration, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;
3. Chongqing Shale gas Research Center of State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Chongqing 400042, China;
4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: The developments of key technologies for the exploration and production of shale gas at abroad is focused on, including the horizontal drilling technology and hydraulic fracturing technology. Moreover, the main environment problems in shale gas developing process, such as micro-seismic, water resource consumption, water environment pollution and greenhouse effect are pointed out. The research emphasis in the future is also put forward based on the practical situation of shale gas development in China.

Key words: shale gas; horizontal drilling; hydraulic fracturing; environment problem

随着全球工业化进程和社会经济的快速发展, 各行业对油气资源的需求量不断增加, 常规油气资源可开采量越来越少, 这无疑给社会发展带来了严峻挑战。页岩气是一种重要的清洁能源, 是当前石油天然气行业关注的热点^[1]。据美国能源信息署(EIA)调查评估, 全球页岩气资源总风险气藏量为 $716.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中我国页岩气资源风险气藏量为 $144.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 技术可采量为 $36.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2]。

目前, 美国和加拿大的页岩气已实现商业化开发, 并取得了丰富的成果^[3]。我国页岩气资源丰富, 可开采量大, 开发前景广阔, 近年来开展了大量页岩气勘探开发工作, 但我国页岩气开发才刚刚起步, 还缺乏相关勘探开发技术经验^[4-5]。本文中拟通过对国内外页岩气开发现状及存在的环境问题进

行深入调研分析, 指出未来页岩气开发领域的发展趋势和研究重点, 以期能为我国页岩气规模开发提供参考。

1 国内外页岩气开发现状

美国的页岩气开发起源于1821年, 在20世纪20年代开始现代化工业开采, 经过100多年的不懈努力, 已成为世界上唯一实现大规模商业性开采页岩气的国家^[6]。目前美国有Antrim页岩、Ohio页岩、New Albany页岩、Barnett页岩和Lewis页岩5大商业性页岩气生产区, 页岩气资源总量为 $12.85 \times 10^{12} \sim 25.14 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 探明储量为 $6994.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中尤以Barnett页岩气发展最为迅猛^[7]。根据EIA预测, 到2035年, 美国页岩气产量占天然

气总量的比重将持续上升至 49%，超过 $3\ 681 \times 10^8\ \text{m}^3$ ^[8]。

加拿大是继美国之后第二个勘探开发页岩气的国家。根据加拿大非常规天然气协会 (CSUG) 报道,加拿大页岩气开发主要集中在不列颠哥伦比亚省 Montney 页岩, Montney 页岩早在 2000 年开始页岩气的商业性开采,同时也是目前加拿大真正达到商业开发阶段的页岩气区,在 2009 年, Montney 页岩气产量达到 $1\ 689\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$ ^[9]。 Horn River 盆地页岩气处于先导生产试验阶段,部分还处于早期资源评价或先导钻探阶段。

我国页岩气资源丰富,可开采量高达 $36.1 \times 10^{12}\ \text{m}^3$ 。中国石油在 2006 年与美国新田石油公司联合开展了四川盆地威远气田页岩气资源评价;2009 年,我国与美国签署了《中美关于在页岩气领域开展合作的谅解备忘录》;紧接着,我国首个专门从事页岩气开发的科研机构[国家能源页岩气研发(实验)中心]于 2010 年 8 月在中国石油勘探开发研究院廊坊分院揭牌成立;国务院于 2011 年 12 月批准页岩气为第 172 个独立矿种;国家能源局在 2012 年 3 月公开发布的《页岩气发展规划》(2011—2015 年)表明,将在全国重点建设 19 个页岩气勘探开发区,到 2015 年页岩气产量 65 亿 m^3 ^[1,3]。同时,我国也放宽了页岩气勘探开发准入政策。目前,中国石油在彭水镇开发的页岩气已进入彭水、酉阳、武隆等地居民家中,中国石油长宁—威远国家级页岩气示范区已开建国内首条页岩气专用输送管道,全长 92.8 km,设计压力 6.3 MPa,设计输量 $450\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$;中石化涪陵页岩气产能建设示范区实现管网外输,焦页 1HF 井和焦页 1-3HF 井所产页岩气($12\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$)开始输往涪陵白涛工业园。截至 2012 年底,全国累计完成 129 口页岩气相关钻井,2012 年产气量约为 $3\ 000\ \text{万}\ \text{m}^3$ 。

2 水平钻井技术

美国页岩气勘探开发钻井技术主要是垂直钻井和水平钻井,其中垂直钻井多用于勘探评价井,水平钻井是目前页岩气开发最核心的核心技术^[10]。水平井的推广应用加速了页岩气规模化商业开发的进程。

研究表明^[11-14],与垂直井相比较,水平井具有以下几方面优势:①能减少对地表环境的扰动,减少道路和公用设施的使用,降低对社区的影响。②可明显改善储层流体的流动状况,增加水平井与页岩层中裂缝相交的机会,获得更大储层泄流面积和更

高的页岩气产量;据统计,水平井的日均产气量和总产气量是垂直井的 3~5 倍,产气速率提高了 10 倍。③在直井收效甚微的地区,水平井开采效果良好。例如在美国 Barnett 页岩外围开采区内,水平井不仅克服了 Barnett 页岩上、下石灰岩层的限制,还避免了 Ellenburger 组白云岩层的水侵,显著降低了压裂风险,提高了页岩气产量,在外围页岩气生产区得到了广泛的运用。④水平井的成本约为垂直井的 1.5~2.5 倍,但水平井的初始开采速度、控制储量和最终评价可采储量却可达垂直井的 3~4 倍。截至 2011 年,美国有 5 万口左右的页岩气井,其中 Barnett 页岩气井数量为 15 870 口,水平井为 10 860 口,约占总井数的 70%,其页岩气产量比高达 90% 左右。根据美国公布的数据,最有效的水平井进尺包括造斜井段一般为 $914 \sim 1\ 219\ \text{m}$ ^[11]。

3 水力压裂技术

目前,水力压裂技术是页岩气开采应用最广泛、最成熟的技术,其实质是将砂、水和化学剂注入到页岩层来提取天然气的过程。目前常用的水力压裂技术主要有多级压裂、清水压裂、水力喷射压裂、重复压裂和同步压裂等,其中最主要的是多级压裂和清水压裂 2 种。

多级压裂是页岩气水力压裂的主要技术,它利用封堵球或限流技术分隔储层不同层位进行分段压裂。多级压裂具有多段压裂、分段压裂、不同产层单独压裂、技术成熟、增产效率高等优点,适用于页岩气产层较多和水平井段较长的井^[15]。在美国,有 85% 的页岩气生产井采用水平钻井和多级压裂相结合的方式开采,增产效果较显著^[16]。

清水压裂是目前美国页岩气开发最主要的压裂技术,又称为减阻水压裂,是指在清水中加入少量降阻剂、稳定剂、支撑剂、表面活性剂等添加剂(为压裂液总量的 0.5%~2.0%)作为压裂液进行的压裂作业^[17]。清水压裂利用在清水中添加少量添加剂作为压裂液来替代凝胶压裂液,不但能够减小对地层的伤害和降低压裂作业成本,还能获得更高的页岩气产量。

4 页岩气开发过程中存在的环境问题

在页岩气开发带来的巨大油气资源前景和经济效益的同时,也带来了一系列的环境问题,尤其是水力压裂技术的广泛应用,不仅带来了水资源挑战,还引发了环境污染问题,比如在 2008 年以来,在目前

世界上最大的非常规天然气田,即美国 Marcellus 页岩气田,因其消耗了大量的水资源(单井平均用水量约为 1.5 万 m^3 ,其中用于水力压裂的水量占 98%,而其中有 50%~70%的水会在这些过程中被消耗)及潜在的环境危害(如页岩气开发过程中产生噪声、废水、废气及其开发事故灾害等引起的环境污染),引发了美国全国性的关于页岩气开发的环境影响大讨论^[18]。

据报道,压裂每口页岩气井大约需耗费 $15\ 142 \text{ m}^3$ 水^[19]。另有报告指出,在美国密歇根 Antrim 页岩气田,一个传统的页岩气井压裂一次需要 189 m^3 水,如果是水平井,则压裂一次需要约 $18\ 927 \text{ m}^3$ 水,相当于一个 $1\ 000 \text{ MW}$ 煤电站 12 h 的用水总量。研究表明,灌溉 2.6 km^2 的旱地大约需要 154 万 m^3 水,可收获价值 20 万美元的玉米。等量的水用于水力压裂钻井,则可获得价值高达 25 亿美元的石油。由于大部分水将在水力压裂钻井过程中被岩石吸收,而不能被回收循环利用,这给水资源和水环境带来了严峻挑战。

页岩气开发是否会引发地震一直存在较大争议。有报告在 2012 年 3 月指出,页岩气废水因注入地下引发美国俄亥俄州东北部发生了十几次地震。美国地质调查局在 2012 年地质年会上的调查报告指出,页岩气水力压裂及其废水处理井是近 10 年来美国中西部地区(从阿拉巴马州到北方落基山脉)地震频发的主因。另有专家解释说:“这项研究并没有表明页岩气的水力压裂法本身是地震的元凶,但是,废水处理井应该负主要责任。”

水环境污染是页岩气生产的另一负面因素,已引起了人们对当前页岩生产方法的强烈抵制。据美国麻省理工学院 2011 年天然气回顾研究报告指出,在 2001 年至 2010 年期间,美国大约钻探了 20 000 口页岩气井,几乎均为水力压裂井,然而由天然气井钻探引发的水体污染事件仅有 43 起。报告还指出,与天然气或钻井液有关的地下水污染事件约占 48%。

甲烷是一种比二氧化碳更强大的温室气体,甲烷会对气候造成比天然气更大的危害,其危害程度或许超过煤炭对气候的影响。甲烷逃逸到大气中会加剧全球变暖,甲烷渗入地下蓄水层,会造成地下水污染。页岩气以甲烷为主要成分,页岩气井泄漏的甲烷比常规天然气井要多,泄漏量可占到整个气井预测总产量的 1.7%~6.0%^[20]。研究发现,甲烷泄漏可能来自页岩气开发过程中的故意排气、设备泄漏或者水力压裂过程。美国康奈大学的研究学者认

为^[21],高强度水力压裂开采的页岩气温室气体排放非常严重,数据指出至少有页岩气产量的 3.6%~7%的甲烷被泄露到大气中,比天然气高出 30%~100%。报告认为甲烷的温室气体作用远高于二氧化碳,尤其是在排放后的最初几十年中更为突出。

以上是页岩气开发过程中存在的主要环境问题,此外还存在噪声、土壤、固体废弃物污染等问题,其中最为突出的是页岩气开发废水处理问题,据美国 EPA 调查显示,目前还没有非常行之有效的处理方法来去除页岩气压裂返排废水的盐度和其他污染物质。

5 结论

(1)目前全球已有多个国家投入到了页岩气开发领域,但对于才刚刚起步的中国,其首要任务是进行早期资源勘探评价,而不是急于商业化开采。

(2)加大科研投入,结合我国页岩气藏开发实际情况,在引进、消化和吸收国外先进技术经验的基础上,加强理论研究,开拓创新,形成具有我国自主知识产权的页岩气开发关键技术,构建示范基地。

(3)开展页岩气资源、水资源、生态环境的综合评估和整体统一规划,加强页岩气开发环境保护技术研究,切实做到在有效保护生态环境和水资源的大前提下开采页岩气清洁能源。

参考文献

- [1] 郑军卫,孙德强,李小燕,等.页岩气勘探开发技术进展[J].天然气地球科学,2011,22(3):511-517.
- [2] EIA. World shale gas resources: An initial assessment of 14 regions outside the United States[R]. 2011.
- [3] 杨挺,孙小涛.世界页岩气开发进展及存在问题[J].现代化工,2013,33(1):1-4.
- [4] 王兰生,廖仕孟,陈更生,等.中国页岩气勘探开发面临的问题与对策[J].天然气工业,2011,31(12):119-122.
- [5] 滕吉文,刘有山.中国页岩气成藏和潜在产能与对环境的污染分析[J].中国地质,2013,40(1):1-30.
- [6] 蒲伯伶,包书景,王毅,等.页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J].石油地质与工程,2008,23(3):33-36.
- [7] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [8] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2009 [R]. Washington D C: EIA, 2009.
- [9] 赵靖舟,方朝强,张杰,等.由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(2):1-7.
- [10] 刘德华,肖佳林,关富佳.页岩气开发技术现状及研究方向[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2011,33(1):119-123.

目前已建成年产4 000 t乙炔的试验装置。

(2)氯乙烯合成无汞触媒。国内多家单位在研究^[9-10],无汞触媒连续试验运行周期已达到3 000 h。

(3)二氯乙烷-乙炔法合成氯乙烯。以乙炔和二氯乙烷为原料,在活性炭负载钡盐催化剂作用下合成氯乙烯,该技术开辟了聚氯乙烯树脂生产的节能环保新路线,综合成本降低1 000元/t,且消除了汞污染,目前已建成年产5 000 t氯乙烯中试装置^[11]。

(4)MTO(methanol to olefins)生产氯乙烯^[12]。国内正在建设第一套年产30万t甲醇制烯烃-氧氯化法聚氯乙烯装置,采用的是美国环球油品有限公司(UOP)、惠生工程公司的MTO技术和美国西方化学的氧氯化法技术^[13]。

2.3 环保治理方面

(1)乙炔净化废水回用技术。国内多家企业实现了部分回用,已有全部回用的装置在试运行^[14-15]。

(2)电石渣制碳酸钙。近几年国内研究非常活跃,但目前都是小规模实验研究,个别企业已有建设万吨级试验装置的安排。技术路线主要有2个方向:电石渣溶解-碳化工艺和电石渣煅烧-碳化工艺。前者工艺优点是产品纯度、白度高,纯度可达99%以上,白度可达98%以上,明显高于传统工艺产品纯度98%、白度93%的指标,而且产品可做到不返碱,缺点是流程长、工艺过程的水平衡较难解决、加工费用较高。后者工艺优点是流程短、加工费用较低,缺点是产品质量仅和传统工艺的碳酸钙产品相当。

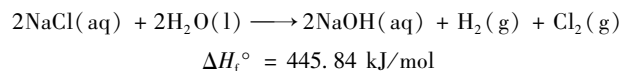
(3)MVR(mechanical vapor recompression)废水回收。与传统蒸发技术相比,每吨水分的蒸发能耗显著降低,目前最新的MVR技术可使含盐废水每吨水的蒸发电耗由80 kWh降至40 kWh。

3 节能降耗潜力分析

国内氯碱行业近年来技术进步取得的节能降耗成就是巨大的,然而技术进步是无止境的,氯碱行业的节能降耗仍然有巨大的潜力可以挖掘。除了前面介绍的正在开发新技术以外,这里探讨一些其他节能降耗技术途径。

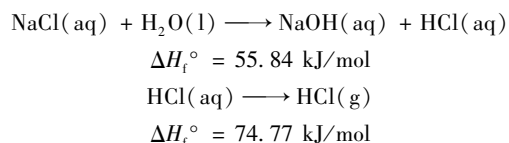
3.1 烧碱生产方面

(1)盐水电解热量回收。电解盐水制烧碱是电能转化为化学能的过程,目前膜极距电解槽制烧碱的直流电耗可降至2 100 kWh/t,电流效率可达95%以上,但是电能转变为化学能的转化率并不算高。盐水转化烧碱、氢气和氯气的焓变:



以此计算每吨烧碱理论能耗是 5.57×10^6 kJ。而2 100 kWh电能为 7.56×10^6 kJ,电解的能量利用率仅73.7%,即每生产1 t烧碱会有 1.99×10^6 kJ能量以热能形式随电解产物带走或辐射散失掉了。如果能把这部分热能加以利用,每吨烧碱生产过程节能量相当于0.7 t蒸汽消耗。

(2)盐水制酸碱。对于只需要提供烧碱、盐酸或氯化氢的生产装置,开发出由盐水直接制烧碱、盐酸或氯化氢的技术将是能耗非常低的工艺。有关转化过程的焓变:



由上述数据可以估算,盐水转化为烧碱和盐酸理论能耗仅相当于现有盐水析氢电解技术理论能耗的25%,即使是氯化氢转变为气体其理论能耗也仅

(上接第3页)

[11] Frant Z J H, Joch EN V J R. White paper-shale gas[R]. [S. l.]: Schlumberger, 2005.

[12] Martineau D F. History of the Newark east field and the Barnett shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399-403.

[13] Randy Lafollette, Gary Schein. Understanding the Barnett shale[J]. Oil and Gas Investor, 2007, Jan: 12-15.

[14] 崔思华, 班凡生, 袁光杰. 页岩气钻完井技术现状及难点分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 72-75.

[15] John White, Rofer Read. The shale shaker[J]. Oil and Gas Investor, 2007, Jan: 2-9.

[16] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 393-399.

[17] 钱伯章, 李武广. 页岩气井水力压裂技术及环境问题探讨[J]. 天然气与石油, 2013, 31(1): 48-53.

[18] 夏玉强. Marcellus页岩气开采的水资源挑战与环境影响[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 103-110.

[19] Andrew Burnham, Jeongwoo Han, Corrie E Clark, et al. Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 619-627.

[20] Temple University Summit. Marcellus shale natural gas stewardship: Understanding the environmental impact[D]. Philadelphia: Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, 2010.

[21] Matt Ridley. The shale gas shock. The global warming policy foundation[M]. US, 2011. ■