

页岩气井压裂技术及其效果评价

马超群¹, 黄磊², 范虎¹, 曾俊峰¹, 侯明明¹, 刘涛³

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北荆州 434023; 2. 中国石油渤海钻探第二钻井分公司, 天津 300000;

3. 中国石化中原油田第三钻井公司, 河南濮阳 457001)

摘要:页岩气作为一种重要的非常规能源, 目前只有美国和加拿大取得商业开发成功。页岩气商业开发成功主要取决于水平钻井和压裂技术的突破。目前页岩气井常用的压裂技术有多级压裂、清水压裂、缝网压裂、重复压裂和同步压裂等。此外 CO₂ 和 N₂ 泡沫压裂也日益得到人们的重视。从压裂液、压裂方式和裂缝监测技术及效果评价方面对页岩气压裂技术进行了介绍。

关键词:页岩气; 压裂; 压裂液; 裂缝监测; 压裂效果评价

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-5285(2011)05-0001-03

Fracture in shale gas play and the evaluation of its effects

MA Chaoqun¹, HUANG Lei², FAN Hu¹, ZENG Junfeng¹, HOU Mingming¹, LIU Tao³

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. CNPC Bohai Drilling Engineering Company the Second branch of Drilling, Tianjing 300000, China)

Abstract: As an important non-conventional energy, shale gas achieved a successful business exploit only in the United States and Canada. Successful commercial exploit of shale gas depends primarily on the development of horizontal drilling and fracturing technology breakthrough. Currently, multistage fracturing, riverfrac treatment, "fracture network" fracturing, re-fracturing and synchronous fracturing are the main method that used in the shale gas play. Besides CO₂, N₂ foam fracturing is also gaining increasing attention. From the fracturing fluid, fracturing techniques and monitoring methods and evaluation of fracture effects, fracturing in shale gas was introduced in this article.

Key words: shale gas; fracturing; fracturing fluid; crack monitoring; evaluation of fracturing effects

页岩气是主体上以吸附或游离状态存在于泥岩、高碳泥岩、页岩及粉砂质岩类夹层中的天然气。页岩气主要采用排气降压的开发方式。随着页岩中游离相天然气的采出,页岩气藏内部压力降低,吸附相及少量溶解相天然气的游离化^[1-3],从而提高天然气产能并长期稳产。页岩气储层致密,孔隙度一般为4%~6%,渗透率一般在0.0001~0.000001 mD之间,页岩气采收率比

常规天然气低,仅为5%~60%。因此页岩气的最终采收率依赖于有效的压裂措施,压裂技术和开采工艺直接影响着页岩气井的经济效益^[4,5]。

1 压裂液

根据含气页岩矿物质含量的不同,页岩气井压裂

* 收稿日期:2011-03-27

作者简介:马超群,男(1986-),长江大学石油工程专业在读硕士研究生,主要从事油气田开发研究,邮箱:15827759337@163.com。

使用的压裂液主要有氮气泡沫、凝胶和添加适当减阻剂、杀菌剂等化学药剂的减阻水。减阻水压裂液可以在不减产的前提下节约 30 % 的成本,在很多低渗透致密气、页岩气、煤层气储层改造中取得很好的效果。碳酸盐含量较高的页岩常选择减阻水为压裂液,粘土含量较高的页岩选择减阻水和凝胶混合压裂方式。

2 压裂技术简介

2.1 清水压裂

目前美国页岩气开发最主要的增产措施是清水压裂,即:使用添加了一定减阻剂的清水作为压裂液。这种压裂液主要成分是水,以及很少量的减阻剂、黏土稳定剂和表面活性剂^[6]。使用这种低成本压裂液是因为水是一种低粘度流体,更容易产生复杂的裂缝网络,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至裂缝网络。清水压裂在 Barnett 等低渗透油气藏储层改造中取得很好的效果。

2.2 重复压裂

重复压裂是指当页岩气井初始压裂处理已经无效、现有的支撑剂因时间关系损坏或质量下降,导致气体产量大幅下降时,采用压裂工艺对气井进行重新压裂增产的工艺。

重复压力能重建储层到井眼的线性流,恢复或增加产量,使最终采收率增加 8 %~10 %,可采储量增加 60 %^[7],是一种低成本增产方法。美国天然气研究所(GRI)研究证实:重复压裂能够以 0.1 \$/Mcf 的成本增加储量,远低于收购天然气储量 0.54 \$/Mcf 或发现和开发天然气储量 0.75 \$/Mcf 的平均成本^[8]。

2.3 同步压裂

同步压裂技术是近期使用的最新压裂技术。该技术的理论依据是:同时对相邻且平行的水平井交互作业,在压裂过程中,压裂时产生的高应力所造成的两口井之间的相互影响,最大限度地减少压裂流体和支撑剂从一口井流向另外一口井。同步压裂可以增加水力压裂网络的密度,增加压裂作业产生的表面积。

2006 年,同步压裂技术开始在 Barnett 页岩气井完井中实施,作业者在相隔 152~305 m 范围内钻两口平行的水平井同时进行压裂^[9],从增产效果来看,该技术显示出广阔的发展前景。目前已发展成三口井同时压裂,甚至四口井同时压裂,采用该技术的页岩气井短期内增产非常明显。

2.4 多级压裂

多级压裂是利用封堵球或限流技术分隔储层不同层位进行分段压裂的技术。多级压裂能够根据储层的

含气性特点对同一井眼中不同位置地层进行分段压裂,其主要作业方式有连续油管压裂和滑套完井两种。多级压裂的特点是分段压裂和分段压裂,它可以在同一口井中对不同的产层进行单独压裂。多级压裂增产效率高,技术成熟,适用于产层较多,水平井段较长的井。页岩储层不同层位含气性差异大,多级压裂能够充分利用储层的含气性特点使压裂层位最优化。

多级压裂技术是页岩气水力压裂的主要技术,在美国页岩气生产井中,有 85 % 的井是采用水平井和多级压裂技术结合的方式开采,增产效果显著^[10]。

2.5 缝网压裂技术

由于裂缝破裂与扩展总沿垂直于最小水平主应力,因此在水力压裂过程中,当裂缝延伸净压力大于两个水平主应力的差值与岩石的抗张强度之和时,容易产生分叉缝,多个分叉缝就会形成“缝网”系统;其中,以主裂缝为“缝网”系统的主干,分叉缝可能在距离主缝延伸一定长度后,又恢复到原来的裂缝方位,最终形成以主裂缝为主干的纵横“网状缝”系统,这种实现“网状”裂缝系统效果的压裂技术称为“缝网压裂”技术(见图 1)^[11]。

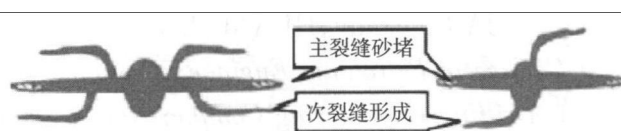


图 1 “缝网”系统形成示意图

Fig. 1 The formation of “fracture network” system

缝网压裂的改造对象是低—特低渗透砂岩及泥岩油气藏。这类油气藏的压裂裂缝仅扩大了井控面积,但由于垂直于人工裂缝壁面方向的渗透性差,不足以提供有效的垂向渗流能力,导致压裂产量低或压后产量递减快等问题。通过“缝网”压裂在垂直于主裂缝方向形成“人工多裂缝”,改善了储层的渗流特征,提高了储层改造效果和增产有效期。目前,进行“缝网压裂”的切实可行方法是主缝净压力控制方法、端部脱砂压裂方法及水平井横切缝多段压裂技术等,缺点是没有切实可行的检测方法,有待进一步加强。

2.6 泡沫压裂

CO₂、N₂ 泡沫压裂是由液态 CO₂、N₂ 和增稠剂及多种化学添加剂组成的液—液混合物,携带支撑剂迅速进入地层,随着液体在井筒和地层中温度的升高,当温度达到临界点以后,液态的 CO₂、N₂ 开始汽化,形成以 CO₂、N₂ 为内相、高分子聚合物的水基压裂液为外相的气液两相分散体系。由于泡沫两相体系的出现使流体粘度显著增加,通过起泡剂和高分子聚合物的作用,大大增加了泡沫流体的稳定性,形成了低滤失、低密度和易反排的压裂液特

性。因此,泡沫压裂液流体具备了压裂液的必要条件,并拥有常规水基压裂液不能相比的多种优势^[12]。

上述的各种压裂技术,都有自身独特的技术特点,及适用性(见表1)。

表1 压裂技术特点及适用性表^[13]

Table1 Fracturing characteristics and applicability

压裂方式	压裂特点	适用条件
清水压裂	压裂液配方简单,施工简单,成本低,地层污染小但,携砂能力有限	适用于天然裂缝系统发育的井
重复压裂	重新打开裂缝或裂缝重新取向增产,成本低	对老井和产能下降的井均可使用
同步压裂	多口井同时作业,节省作业时间且效果好于依次压裂	井眼密度大,井位距离近
多级压裂	多段压裂,分段压裂,技术成熟,使用广泛	产层较多,水平井段长的井
缝网压裂	形成以主裂缝为主干的纵横"网状缝"系统	天然裂缝不发育、特低渗砂岩及泥页岩油气藏井均可使用
CO ₂ , N ₂ 泡沫压裂	地层伤害小、滤失低、携砂能力强、地层污染小、利于页岩气解附	水敏性地层和埋深较浅的井

3 裂缝监测及压裂效果评价技术

页岩气井实施压裂改造措施后,需要有效的方法来确定压裂作业效果,获取压裂诱导裂缝导流能力、几何形态、复杂性及其方位等诸多信息,改善页岩气藏压裂增产作业效果以及气井产能,提高天然气采收率。推断压裂裂缝几何形态和产能的常规方法主要包括利用净压力分析进行裂缝模拟,试井以及生产动态分析等间接的井响应方法。此外利用电阻率测井、成像测井识别裂缝以及地震裂缝预测技术^[14-15]都可直接地测量因裂缝间距超过裂缝长度而造成的变形来表征所产生裂缝网络,评价压裂作业效果,实现页岩气藏管理的最佳化。

4 结论及建议

据估算,中国主要盆地和地区的页岩气资源总量约为 $(15\sim30)\times10^{12}\text{m}^3$,与美国 $28.3\times10^{12}\text{m}^3$ 的储量大致相当,经济价值巨大。目前,我国页岩气资源的勘探开发才刚刚起步,还未得到大规模商业化开采^[16]。页岩气勘探开发面临成本较高等诸多难题,美国页岩气开发的成功经验和先进技术非常值得我们借鉴和参考。相信伴随着页岩气的开发,我们也可以在压裂技术上取得重大突破。

参考文献:

[1] 张金川,薛会,张德明,等.页岩气及其成藏机理[J].现代地质,2003,17(4):466-466.
 [2] 张金川,金之均,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
 [3] 张金川,聂海宽,薛会,等.中国西部复杂油气藏地质与勘探技术研讨会论文集[D].中南大学学报(自然科学版),2006.

[4] 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.
 [5] Daniel J. K. Ross and R. Marc Bustin, Characterizing the shale gas resource potential of Devonian Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, v. 92, no. 1 (January 2008), pp.87-125.
 [6] 陈远林.清水压裂技术增注机理及现场应用[J].断块油气田, 2008, 15(2):116-117.
 [7] 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.
 [8] John B. Curtis¹, David G. Hill², and Paul G. Lillis³. Classic and Emerging Plays, the Resource Pyramid and a Perspective on Future E&P*. San Antonio, AAPG Bulletin, April 20-23, 2008.
 [9] JOHN WHITE, ROGER READ. The Shale Shaker [J]. Oil and Gas Investor, 2007, Jan.:229.
 [10] J. Paktinat, J.A. Pinkhouse, and J. Fontaine. Investigation of Methods To Improve Utica Shale Hydraulic Fracturing in the Appalachian. SPE111063.
 [11] 雷群, 胥云, 蒋廷学, 等.用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J].石油学报, 2009, 30(2):237-241.
 [12] 王东烁, 金业权. CO₂ 泡沫压裂技术在低渗透油藏的应用实践[J].西部探矿工程, 2005, (10):46-48.
 [13] 唐颖, 张金川, 张琴.页岩气井水力压裂技术及其应用分析[J].开发工程, 2010, (10):33-38.
 [14] 王崇孝, 田多文, 魏军, 等.酒泉盆地窟窿山油藏裂缝分布特征[J].岩性油气藏, 2008, 20(4):20-25.
 [15] 张向林, 刘新茹.裸眼井测井新技术进展[J].岩性油气藏, 2008, 20(2):91-96.
 [16] 黄籍中.四川盆地页岩气与煤层气勘探前景分析[J].岩性油气藏, 2009, 21(2):116-120.