

页岩气勘探开发关键技术综述

蒋国盛, 王荣璟

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:在当前国际能源供需矛盾日益突出的形势下,页岩气资源勘探开发备受世界瞩目。页岩气是一种超低渗透非常规天然气,在页岩气勘探开发中有许多关键技术。介绍了页岩气勘探开发中的相关关键技术,包括密闭取心和保压密闭取心技术、水平井技术和压裂技术,并提出了发展我国页岩气勘探开发相关技术的建议。

关键词:页岩气;密闭取心;保压密闭取心;水平井技术;压裂技术

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)01-0003-06

Review of Key Technology for Shale Gas Exploration and Development/JIANG Guo-sheng, WANG Rong-jing (Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In the current situation, the imbalance between supply and demand of international energy is increasingly prominent, the exploration and development of shale gas resources becomes the focus of world attention. Shale gas is an ultra-low permeability unconventional gas; there are many key technologies in its exploration and development. The paper introduced the related sealed coring and the hold pressure sealed coring technologies, horizontal well technology and fracturing technology, and put forward the suggestion of developing related technologies for shale gas exploration and development in China.

Key words: shale gas; sealed coring; hold pressure sealed coring; horizontal well technology; fracturing technology

1 概述

能源安全影响到国家经济的发展和社稷稳定,世界各国通过各种渠道解决自身的能源问题,其中最重要的就是寻找替代能源。非常规油气资源已经在全球能源结构中扮演着重要角色。页岩气是赋存于富有机质泥页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气,成分以甲烷为主,是一种清洁、高效的能源资源。页岩气作为非常规油气资源的一种,具有广泛的开发前景。目前,页岩气在美国、加拿大等地已是重要的替代能源。近几年,美国页岩气产量以超过2位数的速度激增,从2006年的283亿 m^3 增至2010年的1380亿 m^3 。随着诸如中国、印度、澳大利亚等国家逐渐掌握页岩气开发技术并进行开发,世界页岩气的产量将会迅速增长。据SBI Energy预测,未来十年,全球页岩气产量将会翻一番。

但是,页岩气藏储层具有典型低孔低渗的物性特征,气流的阻力比常规天然气大,使得页岩气开发面临藏存隐蔽、采收率不稳定、开发技术要求高的不利因素,决定了必须对页岩气的勘查和开发关键技术进行攻关和突破。然而,相对于美国和加拿大等国在页岩气方面的研究,我国在这方面研究处于起步阶段,在裂缝性泥页岩油气藏特点的勘查和开发

配套技术和理论方面的研究较少,至今还没有形成成熟的技术。

页岩气的勘探和开发必须采取现代钻进技术和特殊的固完井方法,才能确保增产,达到工业开采价值。国外这方面的研究主要有:(1)页岩气钻进技术(主要是水平井),包括密闭取心技术、井身结构和井眼轨迹优化设计、钻井工艺参数的优化设计、井眼轨迹控制技术、钻井液工艺技术、欠平衡钻井/控制压力钻井技术、快速钻进工艺技术等;(2)页岩气开采压裂增产技术,包括水力压裂\分段压裂\重复压裂\同步压裂技术、压裂液技术、压裂效果的数值和计算机模拟预测等。

2 密闭取心技术

密闭取心是指在水基钻井液中取得的岩心基本不受钻井液的污染,能真实再现地层原始地质孔隙度、含油饱和度及水侵和含水率等资料。它是通过专用密闭取心工具和密闭液的共同作用来实现的一种特殊钻井取心工艺。比起一般的常规取心,它工艺上复杂,操作要求严格,而且涉及面广。它不仅要求合理地使用取心工具,而且要求准确的地质预告、优良密闭液的配制、及时的现场地质化验以及精确的室内地质分析等。在页岩气勘探开发中需要获取

收稿日期:2013-01-13

基金项目:“863”计划项目课题(2013AA064503);湖北省自然科学基金创新群体项目(2012FFA047)

作者简介:蒋国盛(1965-),男(汉族),江苏泰兴人,中国地质大学(武汉)工程学院院长、教授、博士生导师,探矿工程专业,从事探矿工程和油气井方面的教学、科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号。

页岩岩心来进行岩心分析,为制定合理的页岩气勘探开发方案提供依据。

早在20世纪60年代,我国大庆油田就已经开始并成功地使用了传统的密闭取心技术。后来,又经过其它油田的不断改进并推广到全国范围。随着我国石油工业的不断发展,勘探开发领域的扩展,

我国密闭取心工具的研制取得了很大进展。下面介绍几种常用的密闭取心工具。

2.1 机械加压式密闭取心工具

2.1.1 工具的结构特点

该工具由密闭堵头、取心钻头、岩心爪、岩心筒组合、机械加压接头等5部分组成,如图1所示。

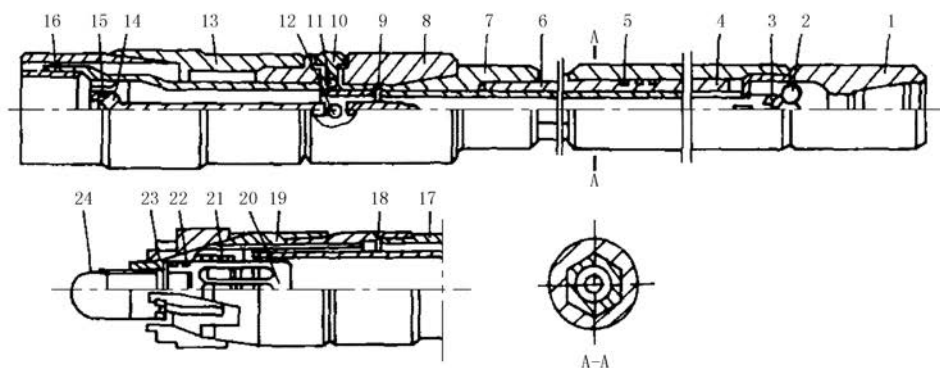


图1 机械加压式密闭取心工具结构示意图

1—加压上接头;2—钢球;3—加压杆;4—四方套;5—密封圈;6—四方杆;7—加压下接头;8—悬挂接头;9—承压帽;10—丝堵;11—钢球;12—销钉;13—外筒上接头;14—堵头;15—密封圈;16—内筒接头;17—外筒;18—钻头接头;19—钻头;20—活塞体;21—岩心爪;22—密封圈;23—销钉;24—触压头

与加压式常规取心工具结构相比具有如下特点:(1)整个内筒是密封的,里面装满密闭液,上端由丝堵密封,下端由密闭堵头及内筒插入钻头腔的盘根密封,密闭堵头通过3个销钉固定在钻头进口处;(2)内筒的悬挂总成中无轴承,无单流凡尔,因此工具的岩心筒为“双筒双动”结构;(3)取心钻头采用斜水眼且偏向井壁。

2.1.2 工作原理

取心钻进前闭头伸出钻头一段距离,所以当钻头接触井底之前,密闭头固定销钉先被剪断,整个密闭头上行,筒内的密闭液开始排出并在井底逐渐形成保护区,从而为密取做好了准备。取心时岩心不断形成,推动密闭堵头上行。因为内筒上端是密封的,所以筒内的密闭液就被入筒的岩心挤压,从内筒和岩心爪之间的环形间隙向下作等体积排出,连续不断地均匀地涂抹在岩心表面形成保护膜,从而达到保护岩心免遭钻井液自由水污染的目的。由于内筒悬挂总成无轴承,所以在钻进过程中内外岩心筒一起转动而无相对运动,这就使得内筒组合与钻头配合面成为很可靠的静密封,有效地克服了钻井液浸入内筒的可能性。取心钻头的水眼偏向井壁,使射流不直接冲刷岩心根部,有利于护心。取心完上提钻具投球加压割心,借住钻具的重力,将承压帽销子剪断,悬挂钢球失去悬挂作用,使内筒压在岩心爪上,迫使岩心爪沿钻头体内斜坡滑行使岩心爪收拢

变形,卡紧岩心,上提钻具将岩心拔断。取出的岩心按规定取样,及时在现场化验分析。当岩心受钻井液污染时,示踪剂也必然浸入岩心,因此利用显色剂可鉴别岩样中是否有示踪剂存在,通过比色法确定岩样示踪剂的含量多少,再根据已知钻井液里示踪剂含量,便可换算出钻井液自由水对岩心的浸入量,岩心的密闭率为合格样品数与总样品数的百分比。

2.2 大庆自锁式密闭取心工具

大庆钻井工程技术研究院从1964年开始,经过25年的研究探索,在1988年研制并推广了第三代自锁式密闭取心工具。

2.2.1 工具特点

(1)适用于中深井、深井800~5500m井段密闭取心;(2)岩心爪采用整体式,并且稳坐于钻头内腔锥面,割心时卡心牢靠,可使用3次;(3)内外筒悬挂装置简单,工具组装、拆卸方便;(4)操作容易,省去复杂的投球加压法割心工艺;(5)配有多种类型取心钻头,能满足不同地层取心要求。

2.2.2 结构

Ø215mm自锁式密闭取心工具为双筒双动式取心工具,主要由大接头、丝堵、外筒上接头、内外岩心筒、外筒下接头、内筒密封圈、卡箍岩心爪、密闭头、剪销和取心钻头组成,如图2所示。

2.2.3 工作原理

取心钻进时,内外筒同时随钻具旋转。内筒里

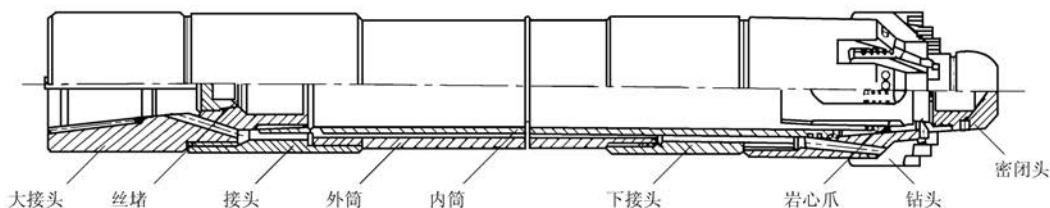


图2 机械加压式密闭取心工具结构示意图

注满密闭液。当密闭头通过岩心爪进入内筒,密闭液则从其间隙流出,并均匀地涂在岩心表面上,形成一层保护膜,防止钻井液浸入岩心。而所钻取的岩心,克服了岩心爪的摩擦力进入内筒。割心时,上提钻具,岩心爪沿钻头内锥面下行,产生径向锁紧力,将岩心卡紧。当上提拉力达到岩心断面极限拉断力时,岩心即被割断。

3 保压密闭取心技术

保压密闭取心与常规取心不同。它能取出地层原始压力的含油含水饱和度的岩心。常规取心主要受2种不利因素影响:一是钻井液浸入并冲刷岩心,因而驱走了岩心中所含油气水成分;二是当岩心出筒后,因环境压力降低和温度下降影响,使岩心中的气体和原油中的轻质组分剧烈膨胀而散逸。而保压密闭取心能保持岩心中的压力状态,对于定量分析页岩资料更加精确。

美国 Christensen 公司最先在 1939 年提出了保压取心技术,1982 年投入生产使用。大庆钻井工程技术研究院从 1979 年开始研制取心工具压力补偿装置,2003 年对该项技术的地面设备进行了改造,使之国产化、标准化,从而完善了该项技术。

保压取样器 Christensen - PCB (见图 3) 和大庆

MY - 215 由钻头卡心部分、球阀机构、内外岩心筒总成、压力补偿系统、轴承悬挂总成及上部差动机构等 6 部分组成。外筒与取心钻头连接,传递钻压和扭矩。内筒是非旋转的薄壁管,悬挂在用钻井液润滑的轴承上,它不但是容纳岩心的容器,同时也是作为岩心切割后的壳体,其长度适合于运输。工具上部差动装置具有伸缩功能,并带有锁闭和释放机构,内外六方传递扭矩。工具下部是球阀总成,这是工具下部密封系统。当钻完进尺后,上提钻具割断岩心,然后投入一个钢球,使之坐于滑套球座上,待钻井液返出且泵压正常,说明滑套到位。此时在外筒重力作用下,内外六方脱开,外筒下移,其重力作用在球阀半滑环上,半滑环使球体产生一定扭矩并旋转 90° 而关闭球阀,使岩心密封在内筒中。压力补偿系统包括高压氮气储气室和一个可调节的压力调节器,以及相关的供给氮气阀门组机构,阀门机构可预先调节到规定压力,提钻过程中可恒定地向内筒补充压力,直到与地层压力平衡为止。工具下井前,在内筒中预先填充一种非浸蚀性的胶体密闭液(如碳酸钙、溴化钙、羟乙基纤维素 HEC),在钻进过程中不断把岩心包封起来,保护岩心免遭钻井液污染。卡断岩心时,上提钻具,岩心爪卡断岩心,并把岩心扶正到球阀内。

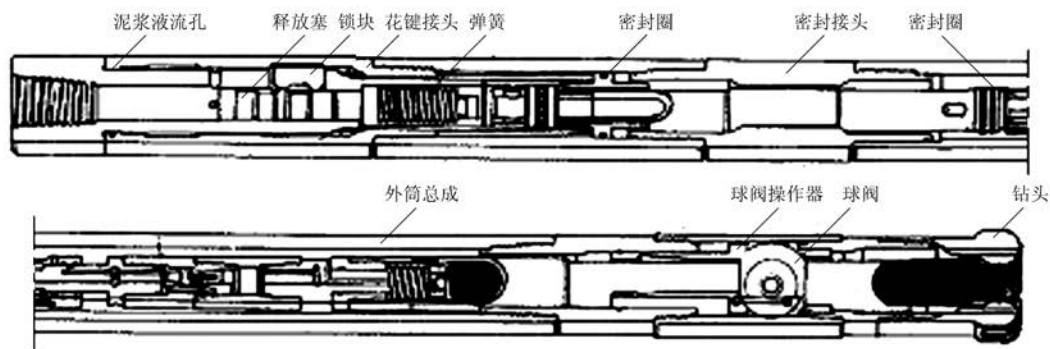


图3 双功能密闭取心工具结构示意图

Christensen - PCB、大庆 MY - 215 有在卡断岩心后能密封内筒或外筒保持地层压力的球阀关闭机构。同时还有能够保持内筒压力恒定的压力自动补偿机构,有充压、测压与泄压的阀门组机构,有能释

放外筒、关闭球阀、打开气室调节阀并能自锁的差动机构,有能保证取心钻进时内筒不旋转的轴承悬挂总成,有包括对岩心进行清洗、冷冻、切割、分析化验等功能在内的一整套专用地面处理设备。

Christensen - PCB 与大庆 MY - 215 的不同之处:大庆 MY - 215 采用密封内筒的办法,压力能直接向内筒补偿,工具从井口起出后,可直接抽出内筒进行岩心冷冻与切割,省去了地面冲洗程序和所需要的复杂设备与冲洗液材料,适用于软~中硬地层;Christensen - PCB 采用密封外筒的办法,从井口起出工具后需要在服务车间内用专门仪器设备和冲洗液进行高压冲洗,之后才能进行冷冻与切割,适用于软~硬地层的保压密闭取心。

岩心冷冻材料一般选用固体一氧化碳(干冰),每筒岩心用量不少于 250 kg,保压用充气材料选用惰性气体,一般选用氮气,每筒岩心需用压力达 12 MPa 的气瓶一瓶。

大庆 MY - 215 的取心钻进参数一般为:钻压 60~80 kN,转速 60~80 r/min,泵量 15~20 L/s。

Christensen - PCB 的取心钻进参数一般为:钻压 20~30 kN,转速 60~80 r/min,泵量 7~10 L/s。

4 水平井技术

水平井技术和压裂技术促进了页岩气的开发,带来了天然气产量的上升。其中水平井技术使得生产商能够获得相对更多的天然气。在全美国开发最成熟的德州 Barnett 页岩,水平生产井数量从 2004 年的不到 400 口增长到 2010 年的超过 10000 口。第一次水平井天然气年产量超过竖直井天然气年产量是在 2006 年,目前在 Barnett 地区,用水平井开采出来的天然气量占整个地区产量的约 90%。

自从美国 1821 年完钻世界上第一口页岩气井以来,页岩气钻井先后经历了直井、单支水平井、多分支水平井、丛式井、PAD 水平井钻井(丛式水平井)的发展历程。直井主要目的用于试验,了解页岩气藏特性,获得钻井、压裂和投产经验,并优化水平井钻井方案。2002 年以前,直井是美国页岩气开发的主要钻井方式。水平井技术在石油工程领域已发展了近 80 年,近年来智能化测量、井下动力钻具、旋转导向控制、地质导向技术的进步促进了该技术的成熟。相对直井而言,水平井能使更多的生产区域和井筒接触并和裂缝相交,改善储层流动状况和获得较大的排泄区域,能将直井中 20~40 m 的页岩泄气厚度在水平井中提高到 3000 m。随着 2002 年 Devon 能源公司 7 口 Barnett 页岩气实验水平井取得成功,水平井、丛式井、PAD 水平井钻井已成为页岩气开发的主要钻井方式。PAD 水平井钻井是利用一个钻井平台作为钻井点钻多口水平井,可以降低

成本、节约时间,是比较新的页岩气钻井技术。

目前,应用于页岩气水平井钻井的技术主要有欠平衡钻井、控制压力钻井及旋转导向钻井技术。

(1)欠平衡钻井以空气作为循环介质,能够克服井壁坍塌和液体钻井液对储层的伤害,很好地克服钻井作业过程中的卡钻、井漏、井塌等问题,提高钻井速度,减轻地层伤害,提高油气井产能,节省作业成本。例如,国内正试验开发的长宁、威远页岩气区块,上部井段多处出现了恶性井漏、机械钻速偏低等难题,如宁 201 井等,改用充气钻井技术后,有效解决了以上难题,快速顺利钻至固井井深。

(2)控制压力钻井是通过控制钻进过程的压力使得钻井作业最优化,缩短非生产时间和减少钻井事故,有效控制地层流体侵入井眼,减少井涌、井漏、卡钻等多种钻井复杂情况,特别适用于当钻遇含气量较大且裂缝发育的页岩地层时,避免气体溢出量剧增带来的安全隐患。目前国内外应用的控制压力钻井技术主要有 3 种:控制泥浆帽压力钻井技术,双梯度钻井技术和钻井液微流量控制钻井技术。Weatherford、Halliburton 等公司是该技术的代表,已进行过页岩气井的控制压力钻井技术研究和现场试验应用,取得了较好的应用效果。

(3)旋转导向钻井技术是基于旋转导向系统的钻井技术,它能够从地面连续导向钻井,根据作业者的要求实时调整井眼轨迹,具有摩阻与扭阻小、机械钻速高、钻井成本低、井眼轨迹平滑,压差卡钻风险低等优点。自 20 世纪 90 年代中期以来,国外多家公司相继推出了旋转导向系统,为精确控制井眼轨迹,钻达靶区,提高水平井、多分支井、多目标井及大位移井等复杂结构井的钻井速度和效率,提供了一种高效实用的技术手段,掀起了一场定向钻井技术的革命。旋转导向钻井技术是目前页岩气井水平井技术的前沿技术,也是水平井技术的发展方向。

5 压裂技术

页岩气是一种特殊的非常规天然气,赋存于泥岩或页岩中,具有自生自储、无气水界面、大面积连续成藏、低孔、低渗等特征,一般无自然产能或低产,需要实施储层压裂改造才能开采。曾用于页岩气压裂作业的增产措施有多种,包括氮气泡沫压裂、凝胶压裂、多级压裂、清水压裂、同步压裂、水力喷射压裂和重复压裂等。水力压裂从 1985 年开始用于页岩储层增产作业中,多级压裂、清水压裂、同步压裂、水力喷射压裂和重复压裂是目前页岩气水力压裂的常用技术。

对于水平井段长、产层多的井,常根据储层的含气性特点进行多级压裂。多级压裂技术是页岩气井水力压裂应用最广泛的技术,它适用于水平井段较长,页岩层段较多的井。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。多级压裂能够针对储层特点进行有针对性的施工,目标准确,压裂效果明显。多级压裂有以下3种方式。

(1)水平井多级可钻式桥塞封隔分段压裂技术。该技术特点是套管压裂、多段分簇射孔和可钻式桥塞封隔。它是射孔和坐封桥塞联作,压裂结束后可短时间钻掉所有桥塞,节省了作业时间和成本,从而减小液体在地层的滞留时间和对地层的伤害。

(2)水平井多级滑套封隔器分段压裂技术。该技术采用与投球压差式封隔器原理相同,通过井口落球系统操控滑套,具有作业时间短和成本低的优点。它采用工具或压力坐封的机械式封隔器,因此具有工艺复杂、风险大和多次下入工具串的优点。

(3)水平井膨胀式封隔器分段压裂技术。该技术原理是遇油/水膨胀封隔器被下入井底预定位置后,遇油气或水后快速膨胀至井壁后继续膨胀而产生接触应力,紧贴井壁密封,从而实现分层分段。该技术优点有可靠性高、成本和作业风险低、压裂后能很快转入试油投产,目前已广泛应用于国外页岩气压裂开发中。目前,在美国页岩气生产井中,有85%的井是采用水平井和多级分段压裂技术结合的方式开采,增产效果显著。2006年,Newfield公司在Woodford页岩中的部分开发井采用5~7段式的分段压裂,压裂结果表明,由于压裂井段增加,与早期压裂的水平井相比,新压裂的井取得了较大的成功。

清水压裂是在清水中加入少量的减阻剂、稳定剂、表面活性剂等添加剂作为压裂液进行的压裂作业,又叫做减阻水压裂。之所以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。清水压裂早期只使用清水作为压裂液,产生的裂缝导流能力较差,实验表明,添加了支撑剂的清水压裂效果明显好于不加支撑剂时的效果,支撑剂能够让裂缝在压裂液返回后仍保持开启状态。清水压裂技术用清水添加微量添加剂作为压裂液来替代以往使用的凝胶压裂液,不但能够减小地层伤害,降低压裂成本,而且还能获得更高的产量,是目前页岩气开发最主要的压裂技术。1997年,Mitchell能源公司首次将清水压裂应用在Barnett页岩的开发

中,在此之前,清水压裂工艺已成功用于Cotton峡谷致密砂岩的开发。根据Barnett页岩的位置,周围的石灰石的发育状况,以及Barnett页岩的有效层厚度,形成了一种典型的Barnett页岩增产措施:2.84×10⁶L减阻水和3.63×10⁴kg的支撑剂,9.54m³/min的泵注排量。在整个压裂过程中支撑剂的浓度平均为12~60kg/m³。压裂液中没有瓜胶固体颗粒,可以使人工裂缝更长、更复杂,不会有瓜胶残留物或滤饼,避免了压裂液对裂缝导流能力的伤害。2010年5月,中石化使用清水压裂技术对方深1井页岩层段进行压裂,历时5h,共注入压裂液2121m³,加砂270t,压裂作业成功。

同步压裂技术是指2口或2口以上的相邻平行井(一般水平距离不超过600m,距离太远的话,无法起到相互干扰的作用)同时进行压裂,每口井配备一套压裂机组,压裂过程中通过裂缝的起裂改变就地应力场,利用应力的相互干扰形成复杂三维缝网,进而提高改造体积和最终采收率。目前已发展到最多5口井进行同步压裂。同步压裂技术在短期内增产效果明显,作业时间短,节省成本,适用于页岩气开发中后期井眼密集时压裂作业。2006年,同步压裂技术首次用在Barnett页岩中并获得成功,并成为Barnett页岩开发中后期常用的水力压裂技术。

水力喷射压裂技术是综合射孔、压裂、封隔为一体的新型增产改造技术。它利用水力喷射工具来分段压裂,无需封隔器和桥塞等封隔工具,自动封堵且准确。它可实现多级压裂,具有施工时间少、成本低、射孔定位准、压裂针对性强和对改造层段控制性高等优点。水力喷射压裂技术的应用不受完井方式的限制,可在裸眼及各种完井结构水平井实现压裂,缺点是受到压裂井深和加砂规模的限制且技术要求高。

重复压裂技术用于在不同方向上诱导产生新的裂缝,从而增加裂缝网络,提高生产能力。如果初始压裂已经无效,或现有的支撑剂因时间关系已经损坏或质量下降,那么对该井进行重复压裂将重建储层到经验的线性流,最终采收率估计提高8%~10%,可采储量增加60%,是一种低成本增产方法。如果要使得重复压裂获得成功,必须评估重复压裂前、后的平均储层压力,渗透率厚度乘积和有效裂缝长度与导流能力等。所以重复压裂的实施离不开室内试验的帮助。Barnett的大部分页岩气井都进行了二次压裂,二次压裂后可接近或超过初次压裂时的产量。

在页岩气开采所使用的压裂液中,98%都是水,剩下2%的成分是化学添加剂。在压裂结束后,约

有30%~70%的压裂液会被抽回地面,称之为“返排水”。这些返排水通常会有4种处理方式:循环利用、处理后排放到河流中、注入地下水以及储存在露天的蓄水池中。一些环境保护主义者认为水力压裂会造成压裂液中的化学物质和页岩气(主要是甲烷)混入地下水中,返排液处置不当也会污染地表水。随着人们对水资源和环境问题的重视,国内外各公司都加大了水力压裂替代技术的投入。加拿大Gas Frac公司开发了LPG(液化石油气)压裂技术。LPG压裂在地下的表现完全与水力压裂不同。LPG在压裂过程中会因为压力和高温而气化,因此会与天然气一起被重新抽回地面,进行分离并最终做到重复利用。这种压裂手段相比于传统的水力压裂技术来说基本不需要水,也无需投入成本处理废水,极大地缓解了对环境和水资源的压力。但这项技术的推广现在还存在难度,首先是LPG比水的成本要高,而且美国工业界已经建立了较为完善的水力压裂作业体系,生产商缺乏技术替换的动力。其次是该技术尚不成熟,其安全性还有待检验。中国石油大学沈忠厚院士开创性地提出了超临界CO₂系统开发非常规油气技术,特别是利用CO₂在超临界状态的独特物理化学性质系统开发页岩气和非常规油气资源。这项技术对我国来说非常重要,超临界CO₂压裂能够降低油气增产对水资源的需求,同时还能将CO₂注入储层,实现温室气体减排。目前,沈忠厚院士正率领着一个课题组进行这项技术研究。

6 结论

(1)美国页岩气已进入商业化勘探开发,相关地质理论与勘探开发技术先进。我国页岩气地质储量丰富,但是页岩气藏处于勘探评价阶段,对其开发的工艺技术研究还处于单井(先导性)试验阶段,勘探开发技术尚在探索起步阶段,基本照搬国外经验。

(2)在页岩气勘探开发中需要获取页岩岩心来进行岩心分析,为制定合理的页岩气勘探开发方案提供依据。密闭取心和保压密闭取心技术是获取页岩岩心的关键技术。

(3)水平井技术是页岩气开发的关键技术之一。水平井能使更多的生产区域和井筒接触并和裂缝相交,改善储层流动状况和获得较大的排泄区域,提高页岩气产量,已成为页岩气开发的主要钻井方式。

(4)水力压裂技术也是页岩气开发的关键技术之一,现已广泛应用在页岩气井的增产作业中。目前常用的水力压裂技术有多级压裂、清水压裂、同步

压裂、水力喷射压裂和重复压裂。多级压裂技术是目前页岩气水力压裂作业中应用最广泛的技术。

(5)我国页岩气开发目前处于起步阶段,应整合现有技术力量,根据我国现有的水平井和压裂技术现状,加强攻关,同时加强与国外先进技术交流合作,尽快掌握适合我国页岩气勘探开发的水平井和压裂核心技术。

参考文献:

- [1] Energy S. Global Shale Gas Technologies and Markets[R]. 2011.
- [2] Eia. Annual Energy Outlook 2013[R]. 2013.
- [3] 米华英,胡明,冯振东,等.我国页岩气资源现状及勘探前景[J].复杂油气藏,2010,(4):10-13.
- [4] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,(S1):324-336.
- [5] 郭凯,秦大伟,张洪亮,等.页岩气钻井和储层改造技术综述[J].内蒙古石油化工,2012,(4):93-94.
- [6] 李欣,段胜楷,孙扬,等.美国页岩气勘探开发最新进展[J].天然气工业,2011,(8):124-126.
- [7] 吴迪,孙英伟.大庆油田密闭取心钻井技术及问题研究[J].中国石油和化工标准与质量,2012,(2):114-115.
- [8] 邓胜聪,张孟,李瑞营.树35-平27水平井密闭取心技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):25-27.
- [9] 易贵华,易明,谢勇,等.密闭取心技术[J].新疆石油天然气,2008,(4):46-50.
- [10] 李开荣,薄万顺.密闭取心技术的新发展[J].石油钻采工艺,1998,(2):36-38.
- [11] 范文星.密闭取心井钻井技术及其问题探讨[J].石油天然气学报,2007,(2):129-131.
- [12] 卢予北,吴焯,陈莹.页岩气钻探关键技术问题分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S1):27-31.
- [13] 鲁文婷,谢希,汪敏,等.页岩气开发的关键技术[J].石油化工应用,2012,(6):17-19.
- [14] 王海柱,沈忠厚,李根生.超临界CO₂开发页岩气技术[J].石油钻探技术,2011,(3):30-35.
- [15] 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,(S1):393-399.
- [16] 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(3):511-517.
- [17] 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,(4):72-75.
- [18] 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,2011,(1):119-123.
- [19] 董曼蓉,陈钢,王莉萍.页岩气开采技术与开发现状分析[J].科技创新与生产力,2012,(8):96-98.
- [20] 赵杰,罗森曼,张斌.页岩气水平井完井压裂技术综述[J].天然气与石油,2012,(1):48-51.
- [21] 鲁文婷,谢希,汪敏,等.页岩气开发的关键技术[J].石油化工应用,2012,(6):17-19.
- [22] 杨登科,王勇,刘权胜,等.国内外页岩气勘探开发技术研究现状及进展[J].石油化工应用,2012,(2):1-4.
- [23] 叶静,胡永全,叶生林,等.页岩气藏水力压裂技术进展[J].天然气勘探与开发,2012,(4):64-68.
- [24] 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,(S1):393-399.