

涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示

王志刚

(中国石油化工股份有限公司,北京 100029)

摘要:中国海相页岩气分布领域广,资源丰富,但与北美相比,具有页岩时代老、热演化程度高的特点;同时由于经历多期次的构造改造,具有保存条件和埋深差异大的特殊性。针对这些特点和特殊性,提出了生烃条件、储集条件和保存条件为核心的页岩气“三元富集”理论。以此为指导,中国石化集团公司的页岩气勘探向四川盆地及其近缘聚焦,确定川东南地区下志留统是首选的页岩气勘探突破领域。建立了海相页岩气区带和目标评价方法,优选涪陵焦石坝构造为页岩气突破目标,2012年部署钻探焦页1井,一举发现了中国首个大型页岩气田——焦石坝龙马溪组海相页岩气田。同时,借鉴、集成和研发关键技术,形成了中、浅层海相页岩气钻井技术和大井段分段压裂的海相页岩储层改造技术。在勘探开发一体化的工作思路指导下,通过精细高效的组织管理实现焦石坝大型页岩气田的快速高效开发。

关键词:三元富集;勘探开发一体化;海相地层;页岩气;志留系;焦石坝气田

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration

Wang Zhigang

(China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: China marine shale gas field is characterized by wide distribution and richness in resources. But compared with North America, because of suffering multi-stages tectonic reworking, China marine shale is older and more mature, as a result, it is unique in preservation condition and buried depth. Based on these features, the theory of ‘three-element enrichment’, whose cores include the conditions of hydrocarbon generation, reservoir conditions and shale gas preservation conditions, is put forward. On this basis, shale gas exploration is focused on Sichuan Basin and its peripheral regions, and the Lower Silurian of Southeast region of Sichuan Basin is chosen to be the preferred breakthrough field for shale gas exploration by China Petroleum & Chemical Corporation. Shale gas zone and the target evaluation method is set up, and Jiaoshiba Block of Fuling is as the target area. And in 2012, well Jiaoye 1 was drilled, and discovered the first large shale gas field in China, i. e. marine shale gas field of Longmaxi Formation in Jiaoshiba Block. Drilling technologies and multi-stage fracturing technologies were developed for the marine shale with shallow to moderate burial depths. The rapid and highly efficient development of the Jiaoshiba shale gas field was realized through effective management under the guidance of integrated exploration and development.

Key words: three-element enrichment, integrated exploration and development, marine layer, shale gas, Silurian, Jiaoshiba gas field

美国是页岩气大规模商业性开采最成功的国家,从2006年开始,页岩气产量呈“爆发式”增长^[1],在短时间内实现了美国的天然气基本自给。中国拥有丰富的页岩气资源,据2012年国土资源部评价,全国页岩气可采资源潜力为 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

中国石化高度重视非常规油气的勘探开发,2009年开始进行页岩气勘探,先后经历了选区评价、钻探评价和产能评价3个阶段,通过勘探实践和理论创新,在页岩气富集理论新认识的指导下,在较短时间内实现

了页岩气勘探由南方海相向四川盆地、再由四川盆地向川东南聚焦的“两大转移”,2012年在涪陵焦石坝构造部署钻探焦页1井,发现了中国首个大型页岩气田——焦石坝龙马溪组页岩气田。截止到2014年6月,共有产气井28口,日产气 $322 \times 10^4 \text{ m}^3$,产能达到 $11 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,初步建成我国第一个大型页岩气田,已经启动了一期 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设。

涪陵大型页岩气田的勘探突破与成功开发,是理论创新、技术创新、管理创新共同作用、相互融合的结果。

收稿日期:2014-09-04;修订日期:2014-10-16。

作者简介:王志刚(1957—),男,博士、教授级高级工程师,石油天然气勘探开发与生产经营管理。

基金项目:中国石化页岩气示范项目(FS13006)。

1 在地质理论新认识指导下,建立评价方法优选目标,实现勘探重大突破

1.1 中国海相页岩气地质条件的特殊性

在多旋回的构造与沉积过程中,中国发育了海相、陆相和过渡相三种类型的多套富有机质泥页岩。与北美页岩气主要形成于上古生界及侏罗系海相页岩不同^[2],我国发育的海相页岩纵向上主要分布于下古生界寒武系和志留系,平面上主要分布于扬子地区及塔里木盆地。具有时代老、盆地内部埋深大、热演化程度高的特点^[3-4]。以南方海相下寒武统黑色页岩为例,大部分地区的镜质体反射率(R_o)大于3%,处于过成熟晚期阶段,局部地区的 R_o 超过4%。下志留统龙马溪组页岩热演化程度相对较低,但也普遍进入了过成熟阶段, R_o 一般大于2.5%^[5]。

通过页岩地层发育状况、演化程度和埋藏深度等综合分析,认为南方地区海相层系是页岩气勘探的重要领域。由于我国下古生界海相页岩时代老,进入大量生气的时间早,页岩气大规模生成之后经历了长时间、多期次的构造运动,褶皱、断裂及隆升剥蚀作用频繁,致使地表、地貌和地质条件复杂,保存条件差异性大^[6-7]。盆地内部保存条件较好,但埋深大;盆地周缘埋深相对较浅,但构造复杂,同一个构造可能在深部具有较好的保存条件,而在浅部常由于上覆盖层的缺失或断裂的发育导致保存条件变差甚至失效,因此,保存条件是中国海相页岩气富集的关键因素。

1.2 提出了海相页岩气“三元富集”理论新认识,评价有利地区

我国海相页岩气的特殊性与美国页岩气的差异性不能说明我们的页岩气没有成藏与富集条件,而是需要具体情况具体分析,形成适合中国海相页岩气地质特点的理论认识和勘探思路。通过页岩气形成条件研究、富集主控因素分析及勘探实践,提出了南方海相页岩气富集高产的“三元富集”理论。一是深水陆棚相优质页岩是页岩气富集的基础,深水陆棚优质页岩具有高有机碳含量、高硅质含量特征,有机质是烃类生成的物质基础,也是有机孔发育的物质基础,而硅质含量是评价页岩可压性的基础地质参数;二是适中的热演化程度有利于海相页岩有机质孔的形成,为页岩气的富集提供了有利的储集空间,有机质热演化控制了有机孔的形成与演化,在主要的生烃阶段,有机孔生成率与有机质转化率呈明显的正相关关系,但热演化程度过高,会引起有机质孔隙度的降低;三是保存条件是海相页岩气富集

高产的关键,页岩气产量与压力系数正相关性明显,超压或超高压是页岩气井高产、高效的重要特征,而高压和超高压意味着良好的保存条件。四川盆地内部总体保存条件好,压力系数高,如涪陵焦石坝志留系气田的压力系数为1.55,页岩气单井日产量普遍达到 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上。四川盆地外部总体保存条件较盆地内部变差,如位于焦石坝气田东南120 km的彭水地区,其压力系数在0.9左右,页岩气产量较低,最高日产气 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右。

基于“三元富集”理论的提出,我们认识到并非有页岩就有页岩气,也不是有页岩气就能富集高产,而是要从生烃、储集、保存等多个要素进行综合分析,从而调整了勘探思路,南方海相页岩气勘探向四川盆地及其近缘聚焦,确定川东南地区下志留统是首选的页岩气勘探突破领域。

1.3 建立目标评价方法,优选有利目标,实现焦石坝页岩气勘探的重大突破

针对中国海相页岩气地质条件的特殊性,以区块和富含有机质的泥页岩层系为评价单元,建立了基于页岩气地质条件和工程技术条件的双因素评价模型和评价方法,开展了四川盆地及其周缘页岩气的选区评价。在选区评价的基础上,充分利用研究区的地质、钻井、录井、测井解释、地震解释及相关分析测试资料,从页岩的分布及地球化学特征、储集性能、页岩气的保存条件和页岩气资源量分级评价等方面^[8],进行页岩层段的含气性评价,从页岩的可压裂性、埋藏深度、地表条件和水源条件等方面进行优质页岩段的工程技术条件评价,结合经济评价,优选有利目标。

区域研究认为涪陵区块龙马溪组位于深水陆棚沉积相带,预测优质页岩厚度30~50 m,热演化程度适中,评价为I类勘探有利地区。位于该区块南部的焦石坝构造为一个宽缓的断背斜(图1),构造相对稳定,保存条件较好,高点埋深在2 500 m左右,具有较好的页岩气地质条件和工程技术条件,综合评价页岩气成藏富集条件优越,确定为页岩气的重点突破目标。

2012年2月部署实施了焦页1井,该井在五峰组-龙马溪组底部揭示38 m优质页岩(图2),含气量高达 $5.19 \text{ m}^3/\text{t}$,完钻井深3 653.99 m,水平段长1 007.9 m,在水平段中志留系龙马溪组页岩见良好显示,全烃最高达30.95%,2012年11月,对水平段分15段进行大型水力加砂压裂,获最高日产气 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了集团公司页岩气勘探重大战略突破。

焦石坝五峰组-龙马溪组主要产气段岩性为黑色、灰黑色硅质、炭质富有机质页岩,局部夹含粉砂质页岩。含气页岩横向分布稳定(图3),达83.5~102 m;

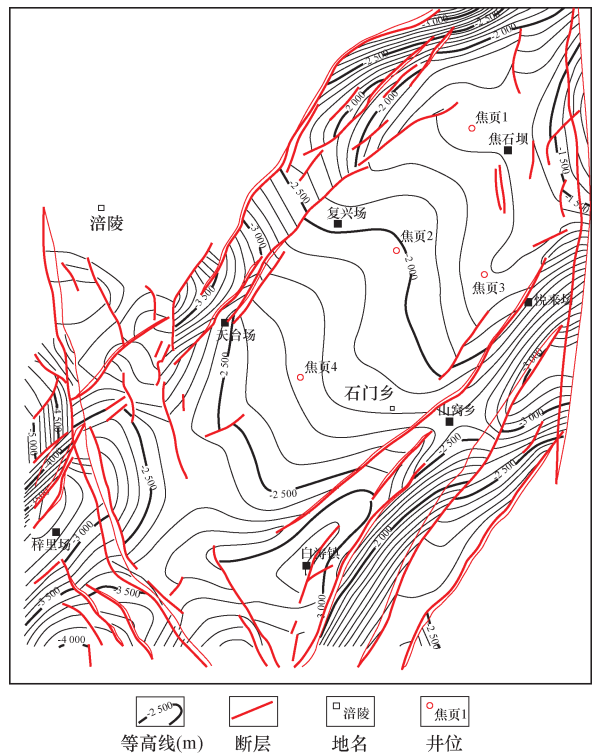


图 1 焦石坝构造形态
Fig. 1 Structural features of Jiaoshiba Block

其中,有机碳含量(*TOC*)大于 2% 的优质页岩厚 38 ~ 44 m,页岩有机质类型以 I 型为主,*R_o* 平均为 2.65% 左右,处于过成熟阶段,以生成干气为主;储集空间以有机质孔隙为主(图 4),孔径为 2 ~ 300 nm,即以纳米级孔隙为主,

孔隙度 3.4% ~ 6.98%。渗透率具有水平渗透率高,垂直渗透率低的特点,平均水平渗透率为 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,垂直渗透率为 $0.003 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。页岩脆性矿物含量高,石英含量大于 40%,具有较好的可压性。页岩气组分以甲烷占绝对优势,平均含量达到 98% 以上,不含硫化氢和一氧化碳。压力系数达 1.55,保存条件优越。综合气藏的生烃条件、储集条件、保存条件和构造、沉积特征,焦石坝志留系气藏是典型的海相页岩气藏。

2 集成创新与技术研发并重,突破有效开发页岩气的工程技术

借鉴北美页岩气的开发经验,同时考虑焦石坝地区龙马溪组页岩层与北美页岩层的差异,通过精心组织、大胆尝试,按照“对外引进与自主研发相结合”的思路,集中优势力量开展科技攻关。在对外技术引进方面,按照“积极引进”、“以我为主”原则加大了科研对外合作。在自主研发方面,针对急切解决的瓶颈技术,建立页岩气长水平井段优快钻井、页岩气储层水平井分段改造和页岩气开发等重点实验室,开展攻关以及重大装备研发,基本形成有效开发页岩气的工程技术。

2.1 形成适用性的中浅层海相页岩气钻井工程技术

针对焦石坝页岩气井钻遇地层的特点,开展钻井

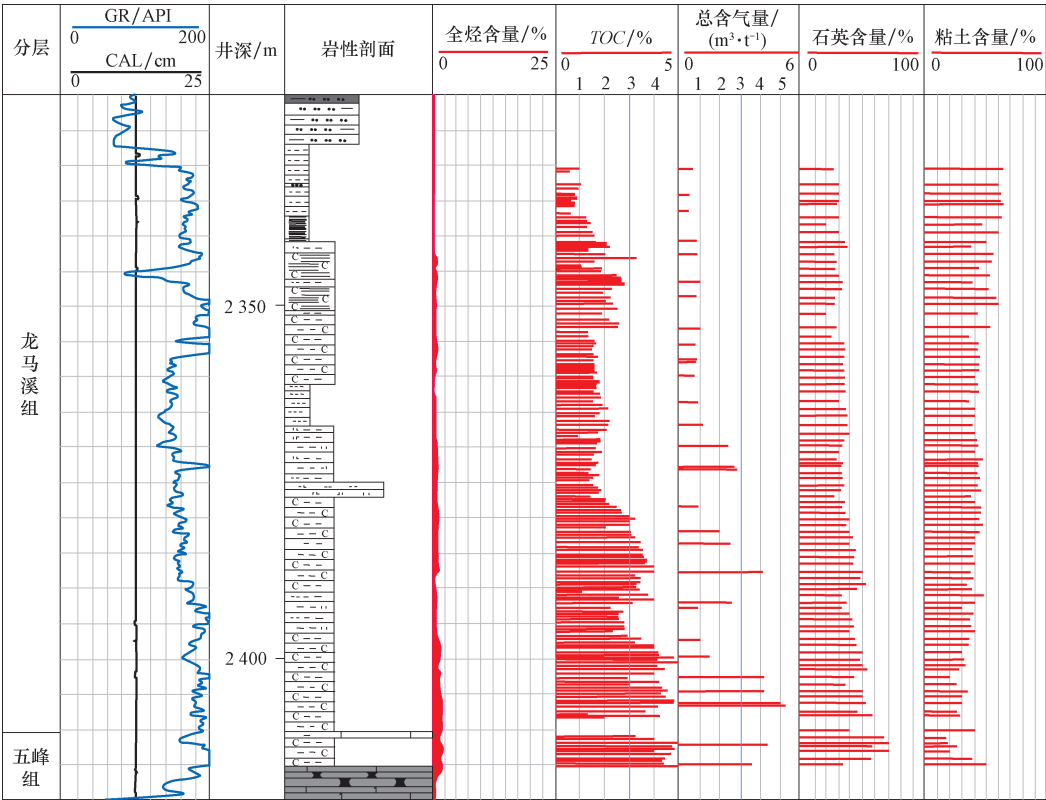


图 2 焦页 1 井形成条件综合评价柱状图
Fig. 2 Comprehensive evaluation histogram of the forming conditions of Well Jiaoye1

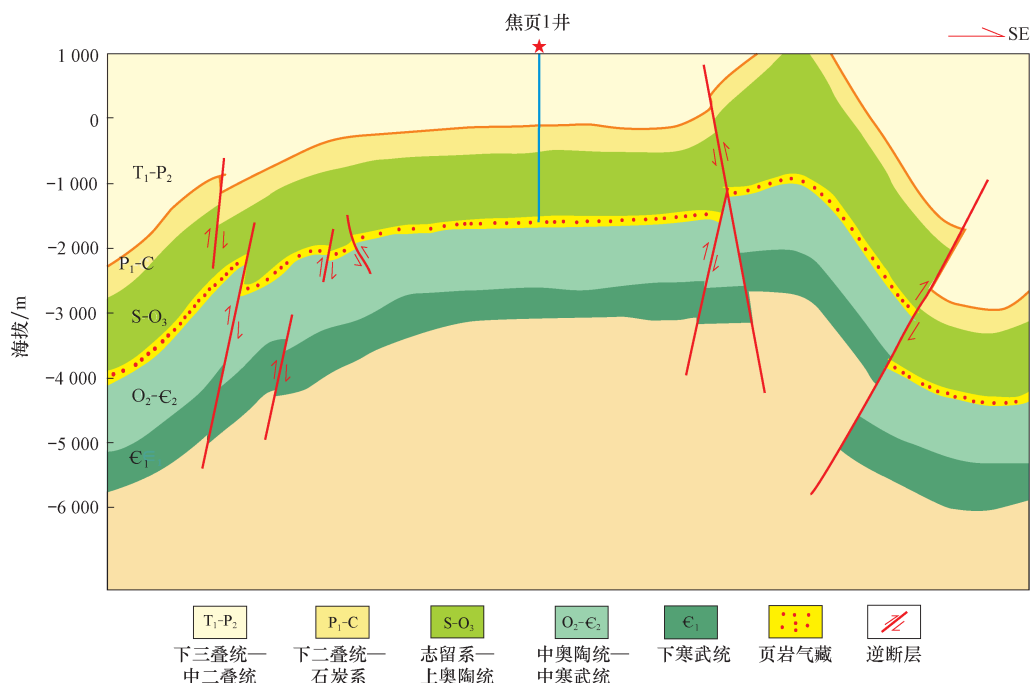


图3 焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩气藏剖面

Fig. 3 Shale gas reservoir profile of Wufeng -Longmaxi Formation in Jiaoshiba Block

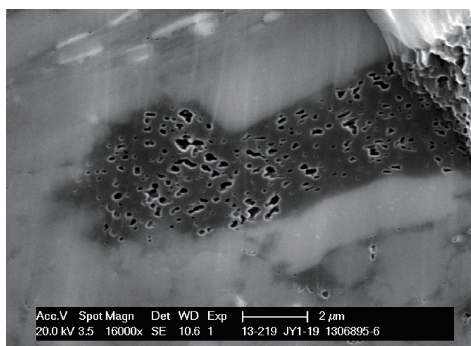


图4 焦页1井龙马溪组页岩有机孔分布

Fig. 4 Organic pore distribution of Longmaxi shale in Well Jiaoye1

(井深2 403.23 m, TOC = 3.79%)

工程技术攻关,形成了空气钻、泡沫钻、清水钻、PDC + 螺杆复合钻等水平井优快钻井技术系列,20口井的平均机械钻速比常规井大大提高,单井平均机械钻速为4.2 m/h;钻井周期也大大缩短,最短钻井周期为60天,平均钻井周期为80天。实现了1 500~2 000 m长水平井段钻井,焦石坝页岩气开发最长水平段达到2 130 m。

1) 优化井身结构设计,应对上部复杂的地质情况。在较浅层遇到溶洞的情况下,适当增加导管下深,用钻井液(或清水)抢钻,钻过溶洞后下入导管。如果预测溶洞较深,则增加一层导管,第二层导管采用空气钻,确认钻过溶洞后下入第二层导管。针对水平井段漏失,强化井漏的预防与处理措施,提高易漏地层的堵漏效率,优化钻井参数,提高钻井速度。

2) 采用油基钻井液,确定合理的钻井液安全密

度,保证井壁稳定。焦石坝页岩气富集的地层主要为硬脆性的页岩,层理、微裂隙较发育,易水化分散,在页岩气钻井过程中易发生剥蚀、掉块等严重的井壁失稳问题。通过确定页岩地层长水平段坍塌、漏失等段的地层压力,形成适应不同泥页岩地层的坍塌、漏失、破裂的压力分析方法,确定合理的钻井液安全密度窗口。水平段采用油基钻井液,不仅可保持井壁稳定,而且对页岩气层的损害小,能最大限度地保护油气层^[9]。

3) 采用地质导向技术,确保水平段轨迹穿行于五峰组—龙马溪组优质页岩气层。焦石坝页岩气富集的地层主要为龙马溪组的下部,通过将旋转导向钻井技术与地质导向钻井技术的结合,及时掌握井眼的井斜、方位及造斜率,确保实钻井眼轨迹在优质页岩气层,提高了开发效果^[10]。

2.2 形成长井段分段压裂的海相页岩储层改造技术

通过焦石坝开发试验井组的实践与研究,建立了水平井长度、段数和压裂簇数的优化设计方法,形成了3 500 m以浅水平井分段压裂配套技术。

1) 形成多段、多簇、大液量、大规模的缝网压裂技术。根据焦石坝龙马溪组页岩气层的脆性矿物、粘土矿物、地应力场以及岩石力学的综合分析,压裂过程中以形成主裂缝为主,天然裂缝发育的条件下形成复杂的体积裂缝。所以确定以“复杂网缝+支撑主缝”为主的压裂模式,以形成有效支撑的缝网体系^[11-12]。

通过开发试验证实,水平段长度及压裂段数对单井产能呈现明显正相关性^[13]。按照投入与产出收益

比最大化原则,优化形成焦石坝地区龙马溪组页岩气水平井分段方案,水平井长度1 500 m,分18~22段压裂。

综合地质和工程因素,优化射孔簇数、簇间距和段间距^[14-15]。采用高排量注入提高净压力,促进层理缝剪切、滑移,实现裂缝网络化,提升改造体积;采用减阻水+线性胶的混合压裂液体系促进裂缝系统复杂化;采用低密度支撑剂组合和段塞式加砂提高裂缝导流能力。形成3 500 m以浅水平井簇射孔、可钻式桥塞分段、电缆泵送桥塞、连续油管钻塞等配套水平井分段压裂技术系列,实现了最高26段压裂,最大压裂液量 $4.66 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大加砂量2 108 m^3 ;实现了压裂液国产化,降低了压裂施工成本;形成了地质分类,工艺分段,组合加砂,混合压裂,控近扩远,高导主缝,平衡顶替,快速控采的缝网压裂设计思路方法与工艺流程,形成了页岩气复杂裂缝压裂工艺技术。

2) 重大装备与关键完井工具研发取得突破性进展。成功研制出具有自主知识产权的3000型压裂车(图5),代表了世界压裂装备技术的最高水平,目前已有4台投入焦石坝现场应用;自主研发的裸眼封隔器、桥塞等井下压裂工具,实现了工业化批量生产,打破了国外专业化公司在该领域的技术垄断,使同类设备在国内价格降低了50%以上,有效降低了页岩气开发的成本。

3 创新组织管理模式,实现页岩气的快速、经济、高效开发

3.1 勘探开发一体化是实现页岩气田高效、快速开发的基础

焦石坝页岩气勘探获得重大突破后,按照勘探开发一体化工作思路,勘探上甩开部署三口评价井,揭示龙马溪组底部深水陆棚相优质页岩分布广泛而稳定和好的含气性,实现了对焦石坝构造主体页岩气分布的整体控制,落实了页岩气规模开发的资源基础。在钻井和压裂施工过程中,为了提高工作效率和降低成本,探索井工厂作业模式,目前已实现了同一井台两口

井同时施工、同一井台一口井钻井、一口井压裂等作业模式,尤其是研发了滑轨式钻井,实现了对同一井台、四口钻井-水平井-压裂的拉链式作业。开发上,建立开发先导试验区,通过不同水平段长度和压裂段数开发试验,采用定产、大压差两种生产制度,评价最佳的钻井水平段长度、方位、压裂工艺技术和压裂段数、压裂规模、单井产能等焦石坝页岩气规模有效开发的基本条件,为大规模页岩气开发积累经验,为形成相对成熟的配套工程工艺技术系列奠定基础。焦石坝页岩气在开发试验区取得成功后,迅速在全区进一步开展气藏规模及产能评价,实施产能建设,大大加快了页岩气勘探开发进度。在勘探开发的每个关键技术环节,均采用“学习曲线法”提高速度和效率,以前需要几年才能完成的工作,通过勘探开发一体化,可能用不到一年的时间就可完成。目前焦石坝气田页岩气资源和储量规模落实,开发实验效果良好,已确定了一期 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设方案并已有序实施,为实现焦石坝页岩气田的高效、快速开发奠定了坚实的基础。

3.2 精细高效的组织管理是实现页岩气可持续发展的关键

中国石化集团公司提出要按照高水平、高速度、高质量、高效益的“四高”要求建设涪陵焦石坝页岩气田。首先,加强组织机构建设,成立了页岩气公司,专门负责现场施工队伍组织与管理、生产运行管理及企地关系协调等,确保高效运行管理。其次,强化制度建设,围绕“勘探开发、生产组织、现场管理、投资成本、安全环保”等方面,系统制定或完善符合页岩气田建设的管理制度,实现了涪陵工区各项工作有章可循、有据可依、规范运转。同时,加强标准化建设,全力推进“标准化设计、标准化采购、标准化施工、信息化管理”的四化建设,全力打造国家级页岩气示范工程。另外,作为中国第一个商业开发的大型页岩气田,焦石坝气田的建设也在探索一条符合页岩气行业发展的机制,积极向国家提出产业发展和政策建议,注重页岩气在民众中的宣传,加强与地方合作、共谋发展,吸引包括民营企业在内的各方有技术优势企业参与到涪陵焦石坝页岩气田的开发中。

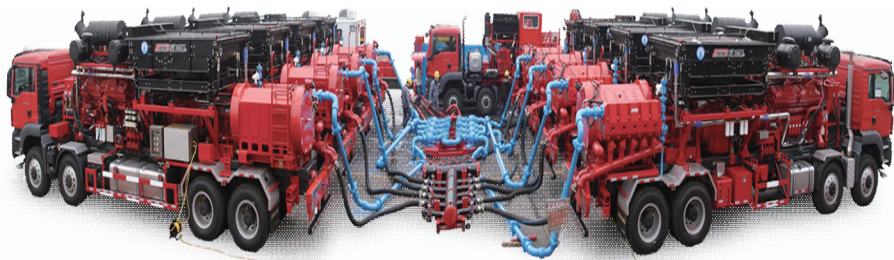


图5 3000型压裂车

Fig. 5 Model 3000 fracturing truck

4 启示

1) 与以美国为代表的北美地区相比,中国页岩气具有差异性、特殊性和复杂性,但这些都不能作为否定中国页岩气资源潜力和勘探开发前景的依据。要坚定信心、创新思路,树立每一种页岩都具有特殊性的理念,具体情况具体分析,要加强研究探索、勇于勘探实践,逐步建立中国海相、海陆交互相、陆相等领域的页岩气地质理论和勘探评价技术,争取中国页岩气勘探开发的全面突破。

2) 礁石坝页岩气藏主力产层位于上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组碳质页岩、硅质页岩中,页岩气产层是最优质的烃源层,是真正意义上的页岩气,说明海相页岩气具备经济规模有效开发资源条件。页岩气富集受控于烃源条件、储集条件和保存条件的优劣及相互的配置,在常规油气发现较多的大盆地中寻找较厚的、品质优的海相页岩是主要的勘探方向。

3) 长水平井、多段压裂技术是目前开发页岩气的主体技术,快速掌握技术是决定页岩气田开发成效的关键之一。通过借鉴、集成和研发,形成了适用性的中浅层海相页岩气钻井工程技术和长井段分段压裂的海相页岩储层改造技术。盆地深层蕴藏着丰富的页岩气资源,但目前来看,3 500 m 以深的地区对水平井分段压裂的技术要求很高,一旦突破技术瓶颈将解放一大批页岩气资源。

4) 与常规油气相比,页岩气是开发技术难度大、经济效益较差的资源,降本增效是页岩气勘探开发过程中的主旋律,需要在勘探开发一体化的工作思路指导下,统筹考虑勘探、开发、生产、市场等各个环节,通过精细化管理与科学组织,实现页岩气的快速、高效开发,并在勘探开发实践过程中通过不断学习使管理方法不断得到优化和完善。同时,页岩气产业的发展需要国家、地方政府、产业部门的支持配合乃至全社会的关心理解。

参 考 文 献

- [1] 《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.
Editorial Committee of "shale gas geology and exploration and development practice series". New progress of shale gas exploration and development in North American [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2009.
- [2] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂变性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4):392-400.
- [3] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,37(6):641-653.
Zhou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 37(6):641-653.
- [4] 张金川,姜生玲,唐玄,等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业,2009,29(12):109-114.
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12):109-114.
- [5] 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):289-299.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3):289-299.
- [6] 张金川,聂海宽,徐波,等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业,2008,28(2):151-156.
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2):151-156.
- [7] 聂海宽,包书景,高波,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统页岩气成藏体系研究[J]. 石油实验地质,2012,34(2):115-119.
Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, et al. Accumulation system for shale gas from Upper Ordovician to Lower Silurian in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2):115-119.
- [8] 董大忠,程克明,王世谦,等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. 天然气工业,2009,29(5):33-39.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):33-39.
- [9] 王俊良,吴先忠,杨金利,等. 高压含硫产层水平井旋转地质导向钻井技术实践[J]. 钻采工艺,2008,31(4):45-48.
Wang Junliang, Wu Xianzhong, Yang Jingli, et al. Application of PD X5 in the pay zone with high pressure gradient in MOXI gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4):45-48.
- [10] 刘继刚. 油基钻井液在泌页2HF井三开段的应用[J]. 科技资讯,2013,10(5):106-107.
Liu Jigang. Application of oil-based drilling fluid in third-open section of Qinye horizontal well [J]. Science & Technology Information, 2013, 10(5):106-107.
- [11] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [12] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2):155-175.
- [13] 孙海成,汤达祯,蒋廷学. 页岩气储层裂缝系统影响产量的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术,2011,39(5):63-67.
Sun Haicheng, Tang Dazhen, Jiang Tingxue. Numerical simulation of the impact of fracture system on well production in shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5):63-67.
- [14] Ketter A A, Daniels J, Heinze J R, et al. A field study optimizing completion strategies for fracture initiation in Barnett shale horizontal wells[J]. SPE, 2006, 103232-MS.
- [15] Warpinski N R, Mayerhofer M J, Vincent M C, et al. Stimulating unconventional reservoirs: maximizing network growth while optimizing fracture conductivity[J]. SPE, 2008, 114173.

(编辑 董立)