

文章编号: 1000-0747(2007) 02-0239 07

# 中国致密砂岩气藏勘探开发关键 工程技术现状与展望

康毅力, 罗平亚

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技风险创新研究项目和四川省青年科技基金项目 (02ZQ026 042)

**摘要:** 中国致密砂岩气藏具有低孔低渗、裂缝发育、局部超低含水饱和度、高毛管压力、地层压力异常、高损害潜力等工程地质特征。经过 10 多年持续攻关, 已经形成了裂缝性致密砂岩气藏保护屏蔽暂堵技术系列、气体钻井及全过程欠平衡完井保护技术系列, 成功试验了  $\text{CO}_2$  泡沫压裂液体系、 $\text{N}_2$  增能压裂液体系和低摩阻高黏度瓜胶有机硼冻胶压裂液大排量套管注入的大型压裂工艺。实践证明, 贯彻储集层保护与改造并举的方针, 实现全过程储集层保护是致密砂岩气藏及时发现、准确评价和经济开发的重要保证。建议加强致密砂岩岩石物理学基础研究, 重视水平井及特殊工艺井的钻井及完井储集层保护配套技术应用, 大力提高增产改造技术的适应性, 形成针对不同类型致密砂岩气藏的配套技术系列。参 42

**关键词:** 致密砂岩; 气藏; 储集层保护; 储集层损害; 完井; 增产改造

中图分类号: T E34

文献标识码: A

## Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China

KANG Yili, LUO Ping-ya

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,  
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Tight sandstone gas (TSG) reservoirs in China display such characteristics as low porosity and permeability, naturally fractured, partially ultra low water saturation, high capillary pressure, abnormal formation pressure and high damage potential. Over 10 years, a set of protection technology of temporary shielding, gas drilling, and under balanced completion during entire well operation have been formed for fractured TSG reservoirs. The fracturing fluids include  $\text{CO}_2$  foam,  $\text{N}_2$  energized water based fluid, and guar organoborated gelling fluid with low frictional resistance and high viscosity. Massive hydraulic fracturing by high injection rate through casing has been applied in fields. Employing both damage control and stimulation and realizing protection technology are the important guarantee for pay zone detection, precise evaluation and economic development. It is proposed to strengthen fundamental research on petrophysics of tight sandstones, improve reservoir protection matching technology during drilling and completion, propagate horizontal wells and complex wells, enhance applicability of fracturing stimulation, and establish integrated technologies for different types of TSG reservoirs.

**Key words:** tight sandstone; gas reservoir; reservoir protection; formation damage; completion; stimulation

## 0 引言

致密砂岩气藏天然气在天然气储量增长和能源供应方面正在发挥越来越重要的作用。致密砂岩气藏存在于世界许多盆地中, 资源量巨大, 其开发活动主要集中于美国和加拿大, 例如 1994 年美国致密砂岩天然气产量就已达到  $705.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2003 年达  $1274 \times 10^8 \text{ m}^3$  (4.5 tcf)。美国落基山地区诸盆地、加拿大阿尔伯达盆地深盆地成藏理论、钻井完井及增产改造技术的成功

实践给中国致密砂岩气藏的勘探开发工作提供了宝贵的经验<sup>[1-8]</sup>。目前致密砂岩气藏天然气产量占中国天然气总年产量的 1/5 左右, 已成为天然气供应的一支重要力量, 并将继续成为储量和产量增长的亮点。就探明储量和实力而言, 致密砂岩气藏是中国最具现实勘探开发意义的非常规天然气领域。然而, 致密砂岩气藏赋存的地质条件复杂, 勘探开发所需的工程技术仍存在许多不适应方面, 亟待加大新技术研究与现场试验资金的投入, 着力解决制约勘探开发进程的

关键工程技术问题。

## 1 中国致密砂岩气藏勘探开发现状及工程地质特征

### 1.1 中国致密砂岩气藏勘探开发现状

中国致密砂岩气藏勘探领域广阔,四川、鄂尔多斯、柴达木、松辽、渤海湾、塔里木及准噶尔等10余个盆地都具有形成致密砂岩气藏的有利地质条件,远景资源量为 $12 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[9-14]</sup>。致密砂岩气藏在埋深小于1500 m的浅层到埋深超过4500 m的深层均有分布。经过30多年的探索,特别是近10年地质认识的飞跃和技术的快速发展,四川盆地和鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏的勘探开发已取得显著成效,堪称中国致密砂岩气藏勘探开发的典范。

四川盆地的致密砂岩气藏天然气资源量较为丰富,根据新近评价结果,川西坳陷侏罗系与上三叠统天然气资源量为 $1.8 \times 10^{12} \sim 2.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,而目前的探明储量约为 $2200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,主力气层是侏罗系蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组和上三叠统须家河组,探明储量仅占资源量的10%左右,已发现并开发中坝、平落坝、九龙山、合兴场、新场、洛带、新都、邛西、马蓬等气田,仍有大量的资源有待发现<sup>[15-16]</sup>。川中地区遂南、南充、八角场气田均在须家河组致密砂岩气藏生产工业天然气。此外,近年在川东北、川南、川西南地区也有新发现。

鄂尔多斯盆地北部已发现苏里格、榆林、长北、大牛地等气田<sup>[17]</sup>。苏里格气田是近年来发现的大气田,上古生界概率为50%的天然气资源量为 $8.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,2000至2001年探明苏里格气田山西组及石盒子组地质储量达 $6025 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,主力气层为盒8段,为中国最大的气田。

### 1.2 中国致密砂岩气藏工程地质特征

中国致密砂岩气藏不仅具有陆相碎屑岩储集层的一般特点,而且还表现为低孔低渗、裂缝发育、局部超低含水饱和度、高毛管压力、地层压力异常、高损害潜力等工程地质特征。①致密砂岩储集层孔隙度为2%~15%,原地渗透率主要为0.001~0.5mD。②裂缝在致密砂岩储集层中不同程度发育,对提高致密砂岩储集层渗透能力极为有利。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩发育的裂缝以高角度缝及垂直裂缝为主<sup>[18]</sup>;四川盆地致密砂岩裂缝形式多样,侏罗系以水平缝为主,上三叠统以斜缝、高角度缝为主。③致密砂岩气藏内部一些区域存在超低含水饱和度现象,对致密砂岩气藏储量增长、提高气相渗透率是有利因素。④致密砂岩毛管压力高,喉道半径一般小于0.5 $\mu\text{m}$ ,中值压力可达

3~50MPa,在高毛管压力作用下超低含水饱和度气藏很容易吸水,造成水相圈闭损害。⑤致密砂岩气藏压力系统异常,川西致密砂岩气藏的浅层(埋深小于1500m)具有低压或正常压力,中深层(埋深大于1500m)压力系数一般为1.2~2.45;鄂尔多斯盆地上古生界山西组及石盒子组气藏压力系数为0.85~0.98。⑥致密砂岩储集层孔喉细小、黏土矿物发育,极易给储集层带来损害,其中最为突出的损害是水敏、碱敏、水相圈闭损害和应力敏感损害。深层裂缝性致密砂岩还存在严重漏失性损害,如川西上三叠统须家河组致密气层<sup>[19-25]</sup>。

综上所述,致密砂岩气藏“先天发育不足”的特性决定了实施增产改造是其经济开发的必然选择,“后天易损害”特性又对各项工程作业的储集层保护能力提出了严格要求。毫无疑问,应以“全过程储集层保护”为指导思想,要在钻井、完井、中途测试、测井、固井、射孔、完井测试、增产改造和气藏开采中切实保护好气藏,并带动各项工程技术水平的全面提升,才能保证致密砂岩气藏的成功勘探开发。

## 2 致密砂岩气藏钻井及完井保护配套技术

### 2.1 裂缝性致密砂岩气藏屏蔽暂堵钻井及完井保护配套技术

川西坳陷致密砂岩天然裂缝比较发育,且当钻井、完井条件有利时就可以获得高产量气流,因而在钻井、完井中应采取有效措施保护天然裂缝,以屏蔽式暂堵技术思想作指导,研究地下裂缝参数变化规律,评价裂缝性致密砂岩的敏感性和损害规律,建立适用于裂缝性储集层特点的钻井、完井保护技术方案。大面积推广应用证明,这套技术路线是正确的,是行之有效的<sup>[8]</sup>。

经过“八五”以来的3轮国家项目攻关,深井钻井和钻井液工艺本身的技术难题基本得到解决,致密砂岩气层损害理论与保护技术研究成为钻井、完井技术工作重点。形成了潜在损害因素分析、室内评价、矿场评价、工作液制备和钻井、固井、完井配套保护技术系列,建立了川西致密砂岩气层保护钻井-完井-增产措施技术系统框架。对致密砂岩气层损害的特殊关键问题,如黏土矿物微结构稳定性、应力敏感性评价标准、水相圈闭损害、裂缝屏蔽暂堵数学和物理模型等方面认识得到深化,揭示了定向钻井致密气层损害特性。形成了原地裂缝宽度预测与评价技术系列、裂缝性储集层敏感性评价方法、裂缝性应力敏感储集层损害矿场评价技术、系列裂缝性储集层保护处理剂、裂缝性储集层屏蔽暂堵技术、裂缝性储集层优化射孔技术、保护裂缝性储集层射孔液及压井液技

术。形成了理论研究基地和新技术试验场所,造就了一批高素质技术攻关队伍。

“十五”期间,围绕鄂尔多斯盆地北部致密砂岩气田、川西深层致密砂岩气藏勘探开发中遇到的关键技术难题开展攻关。尤其在储集层应力敏感性、水相圈闭损害机理与防治、致密砂岩岩石物理学等领域取得重要进展,促进了川西深层致密砂岩气藏、鄂尔多斯盆地大牛地气田的勘探开发,取得了显著经济效益和社会效益。应用储集层保护配套技术在大牛地气田发现了盒 2+3 高产气层,中国石油化工股份有限公司(中国石化)华北分公司已在大牛地气田建设产能  $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。中国石化西南分公司川西致密砂岩气藏产气量超过  $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 2000 年以来又在深层须家河组取得新突破,相继获得新 851 井、新 856 井等一批高产气井。从川西致密砂岩气藏保护实践中概括出“保护与改造并举,二者相得益彰”的重要观点,并陆续在其他地区得到进一步验证<sup>[23-25]</sup>。

## 2.2 欠平衡钻井及完井致密砂岩气藏保护配套技术

根据致密砂岩气藏特性及损害机理,先进的钻井、完井、增产技术系统倡导采用气体型工作流体。欠平衡钻井,即利用自然或人工方法使钻井、完井作业中液柱当量循环压力低于地层压力,地层流体有控制地流入井筒,从而实现储集层保护的一种新方法。欠平衡钻井与屏蔽暂堵技术作为钻井、完井储集层保护的两条路径,互相支持、互为补充,大大提高了储集层保护的技术覆盖能力,成为近年来致密砂岩气藏保护的一种新途径<sup>[26]</sup>。代表欠平衡钻井技术最高水平的气体钻井技术在四川、鄂尔多斯盆地致密砂岩天然气勘探开发中发挥了独到的作用。

### 2.2.1 鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏欠平衡钻井及完井保护技术

针对鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏低压、低渗、低产的特点,中国石油天然气股份有限公司长庆油田公司研究并应用了保护储集层的钻井液技术。1986 年开始了以保护储集层为目的的欠平衡钻井技术的研究与应用,并先后在 1 口气井上应用了泡沫钻井技术,在 2 口气井上应用了天然气欠平衡钻井技术。2000 年开展了以保护储集层为目的的天然气欠平衡钻井技术研究,包括井眼稳定性评价、地层出水评价分析、井眼净化及参数计算研究、钻头选型及钻速预测、天然气钻井安全、空井带压起下钻技术、保护储集层的完井置换液、保护储集层的固井水泥浆体系。2000 年在陕 242 井进行了天然气欠平衡钻井,钻进地层为上古生界石盒子组盒 6 段、盒 7 段、盒 8 段,井深 3030~3190 m,进尺

157 m,平均机械钻速  $11.77 \text{ m/h}$ <sup>[27]</sup>。2002 年在苏 35-18 井进行了天然气欠平衡钻井,钻进井段 3230~3335 m,进尺 105 m,平均机械钻速  $18 \text{ m/h}$ 。天然气欠平衡钻井机械钻速是钻井液钻井的 9 倍多。

中国石化华北分公司也曾在大牛地气田 D7 井开展乳化柴油低密度钻井、完井液欠平衡钻井试验,但中途测试和完井测试都表明储集层保护效果不明显,从而将工作重点放在屏蔽暂堵储集层保护方向。

鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏天然裂缝发育程度比川西拗陷差,水力压裂是其气藏开发不可缺少的储集层改造措施,欠平衡钻井不能形成良好的滤饼,且固井、射孔作业后续损害在所难免,因此最终气层保护效果不甚理想。

### 2.2.2 四川盆地致密砂岩气藏欠平衡钻井及完井保护技术

四川盆地开展欠平衡钻井历史悠久,1950 年至 1970 年曾开展多种形式的欠平衡钻井技术攻关,分别在 100 多口井实施了欠平衡钻井,其中天然气钻井 7 口,空气钻井 3 口。但由于当时的总体技术特别是装备限制,井喷失控时有发生,后又因社会动荡而中断。1999 年以来,又组织开展欠平衡钻井工艺和配套装备的攻关,实现了欠平衡钻进、不压井起下钻、欠平衡取心、带压测井、带压下油管等<sup>[26]</sup>。在总结充深 1 井试验教训的基础上,邛西 3 井实现重要突破,又乘胜开展了气体钻水平井试验,取得技术进步和促进发现、增加产量的重大成果。

充深 1 井位于川中南充构造,在香四段至香二段采用密度为  $1.05 \text{ g/cm}^3$  钻井液钻进,钻至井深 2203.16 m 发现气侵,钻进中地层流体不断进入井筒,控制回压 3~5 MPa,近平衡压井后,中途测试 2200~2207 m 井段,地层压力当量密度  $1.60 \text{ g/cm}^3$ ,产气  $3.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、油  $0.55 \text{ t/d}$ 。中测后继续欠平衡钻进至完钻井深,下尾管固井射孔完井,完井测试仅产气  $0.30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,解堵酸化产量也仅为  $0.9834 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、油  $0.20 \text{ t/d}$ 。由此总结出,钻井、完井必须全过程欠平衡,建立欠平衡钻井及完井配套技术,否则将前功尽弃。

邛西构造是川西致密砂岩气藏的典型代表。1992 年采用传统过平衡钻井完成的邛西 1 井在须三段至须五段中途测试产气  $420 \text{ m}^3/\text{d}$ ,须一段至须二段完井试气产量  $70 \text{ m}^3/\text{d}$ ,须四段完井试气产量  $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,沙溪庙组完井试气产量  $800 \text{ m}^3/\text{d}$ 。1995 年钻探的邛西 2 井在须二段完井试气产量  $5200 \text{ m}^3/\text{d}$ ,1999 年美国德士古公司对邛西 2 井实施大型加砂压裂仅产微气。而采用全过程欠平衡钻井完成的邛西 3 井产量  $45.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,邛西 4 井产量  $84.47 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。之后连续

十多口全过程欠平衡钻井的井产量都在  $30 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。邛西构造全过程欠平衡钻井的成功,为川西致密砂岩气藏的开发开拓了全新的技术思路<sup>[28]</sup>。

川中潼南1井欠平衡钻井改写了以往该构造6口探井均无建树的历史。川南阳高寺构造群南井构造井浅2井采用天然气全过程欠平衡钻进,产气  $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,成为30年勘探的突破,以前12口井均有显示但仅获微气。2004年8月,采用柴油机尾气、气体钻井与水平井相结合的技术,完成中国第一口气体钻水平井白浅111H井,测试产量  $6.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (无阻流量  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),为四川浅层天然气的勘探开发开创了一条新路。

### 3 提高致密砂岩气藏产能的增产改造技术

致密砂岩气藏低孔低渗的地质特征使得开发这类气藏时一般需要进行压裂增产改造<sup>[29]</sup>。储集层增产改造可以解除、弱化钻井、完井及生产作业造成的损害,然而增产改造作业本身也有可能造成储集层损害,如何减小储集层损害是增产改造的重要发展方向。四川盆地致密砂岩改造以应用大型水力压裂为主,在川中八角场、川西新场、洛带气田等地取得了较好的效益。在鄂尔多斯盆地北部对压裂改造措施也进行了一系列的尝试,从简单的常规压裂逐渐过渡到伴注液氮压裂技术。应用表明,川西及鄂尔多斯盆地北部的致密砂岩储集层压裂改造措施增产效果明显,使得原本无自然产能或产能低的井层产量得到大幅度增加。

#### 3.1 四川盆地致密砂岩气藏增产改造技术

八角场气田香四段致密砂岩气藏大型水力压裂增产改造技术。自1981年以来,该气藏应用过酸化、一般压裂作业(平均加砂量  $25 \text{ m}^3$ ),单井产量一直未达到商业性生产水平,有的井还出现压后减产现象。气藏平均渗透率为  $0.507 \text{ mD}$ ,厚度为  $36.3 \sim 70.1 \text{ m}$ ,井深  $3000 \sim 3200 \text{ m}$ ,地应力梯度  $0.025 \text{ MPa/m}$ ,裂缝延伸压力梯度  $0.028 \text{ MPa/m}$ 。J58E井、J41井和J59E井采用套管注入方式、低摩阻高黏度瓜胶有机硼冻胶压裂液与中强的美国CARBOPROP陶粒支撑剂,同时采用配套的破胶剂加入技术,压后产量大幅度增加。八角场大型水力压裂较好地解决了黏度保持与快速破胶、降低滤失与减少滤饼损害、增加聚合物用量保证长时间施工携砂与减少残渣之间的矛盾。实现了大排量( $6.2 \sim 8.06 \text{ m}^3/\text{min}$ )、高黏度(室内剪切  $180 \text{ min}$ ,压裂液黏度达  $200 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  以上)、低滤失、高效率、低残渣,压裂液不乳化、不沉淀、不絮凝、与地层水配伍,快速彻底破胶,强制裂缝闭合排液。大排量、快速破胶、迅速排液减少了进入气层的液量,从而缓解了水相圈闭损害。

基于低损害压裂液的大型水力压裂在八角场气田的成功,证明了有效实施储集层保护和大型水力压裂是致密砂岩气藏增产的关键与出路<sup>[30-31]</sup>。

新场气田侏罗系致密砂岩气藏增产改造技术。通过改进压裂液配方、优化工艺设计来降低损害程度,实现较高的返排率。在浅层近致密砂岩气藏形成了“低前置液量、小排量、高砂比”水力压裂技术体系,对于中深层典型致密气藏形成了以“大排量、大砂量、中砂比”为特色的整体压裂工艺技术。水力压裂技术已经成为川西致密碎屑岩气藏开发的一项重要技术,从早期的射孔-酸化方式发展到普遍采用的射孔-加砂压裂方式。针对高破裂压力、强塑性地层,试验了射孔-高能气体压裂-加砂压裂方式。针对致密、高破裂压力地层或井身结构复杂的情况,又形成射孔-喷砂射孔-加砂压裂方式<sup>[32-33]</sup>。

川西致密砂岩气藏通过射孔-加砂压裂方式进行储集层改造的井约占90%,是主要的储集层改造方式,总体增产效果甚佳。采用射孔-喷砂射孔-加砂压裂方式进行储集层改造的约10余井次。以川孝164井为例,沙溪庙组2328.5~2355.5m段气层射孔后测试产量  $1207 \text{ m}^3/\text{d}$ ,喷砂射孔后测试产量  $3520 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产量增加1.9倍;加砂压裂后测试产量  $38039 \text{ m}^3/\text{d}$ ,是射孔测试产量的31.5倍,是喷砂射孔测试产量的10.8倍。采用射孔-高能气体压裂-加砂压裂进行储集层改造的井约30井次。以合3井蓬莱镇组气藏为例,1035~1045m井段射孔后测试产量  $1250 \text{ m}^3/\text{d}$ ,井口装置KQ25MPa,初次施工井口压力达28MPa,施加到地层的压力达36MPa,未压开地层。进行高能气体压裂后,地层的破裂压力仅为24.2MPa以上,使地层破裂压力降低了11.8MPa,在未换井口装置的情况下顺利完成施工,压后测试产量上升为  $5987 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[32]</sup>。

#### 3.2 鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏增产改造技术

鄂尔多斯盆地上古生界气藏是低孔、低渗、低压的致密砂岩气藏,具有气层多、厚度差异大、初产低的特点,不进行压裂改造很难达到工业生产标准。经过探索试验,形成了上古生界致密砂岩气藏增产改造配套技术,包括:选择性压裂技术,机械分隔分压、分试、分采技术,上、下古生界气层分试同采技术,CO<sub>2</sub>泡沫压裂技术,液氮伴注压裂技术,清洁压裂液技术,大砂量高砂比压裂技术,预前置液处理降温技术,高强度支撑剂压裂技术,建立了颇具特色的“压裂改造模式”。提高致密气藏改造效果的关键因素之一是降低压裂液损害,CO<sub>2</sub>泡沫压裂适用于低压、致密、严重潜在水敏及水相圈闭损害的储集层。在苏里格气田研发、试验了

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术体系(包括酸性交联剂、FL-36 起泡剂),同时形成了低泡沫质量和高泡沫质量的泡沫压裂液工艺设计方法。施工泡沫质量为 40%~50%,设计裂缝半长 100m 左右,导流能力 30D·cm 以上,压后返排 20h,返排率达 85% 以上。CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术在鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气藏应用近 20 井次,取得了明显的增产效果。如苏 6 井和陕 28 井,CO<sub>2</sub> 泡沫压裂以后无阻流量分别达到  $120.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  和  $56.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[34]</sup>。

大牛地气田上古生界气藏是典型的低压致密砂岩气藏,气井压裂前自然产能很低或基本无产能。水力加砂压裂是该地区进行气田勘探开发的关键技术之一。由于储集层存在严重的水相圈闭损害和其他敏感性损害,以往采用常规砂岩储集层的压裂改造方法在该地区不能达到满意的增产效果。针对低压致密砂岩气藏的储集层地质特点,通过 2001 年以来的攻关研究,提出了改进的压裂工艺技术方法,筛选出了低残渣、易返排的压裂液体系 N<sub>2</sub> 增能水基压裂液。现场实施表明,优质低损害 N<sub>2</sub> 增能压裂液体系具有起泡、稳泡能力强、流变性能、携砂能力好,低滤失、破胶快、低损害等特点。该压裂液体系能较好地满足压裂工艺要求及储集层的物性条件,提高了压后压裂液返排率,取得了显著的单井增产效果。从压裂液的返排看,各井均提高了自喷量,缩短了排液周期,且返排的压裂液破胶液黏度小于 3 mPa·s,压裂液平均返排率由原来的 60% 提高到 83% 以上,达到了少进液、快返排、低损害的设计要求,大大提高了压裂改造效果,压后平均单层气产量提高 2 倍以上。适于致密砂岩气层特点的低损害水力压裂改造技术和屏蔽暂堵储集层保护技术构成了大牛地气田开发的主体技术<sup>[35-36]</sup>。

## 4 致密砂岩气藏勘探开发关键工程技术展望

尽管致密砂岩气藏天然气勘探开发在四川盆地和鄂尔多斯盆地取得显著进展,但仍面临许多技术难题,现有理论和工程技术尚存在许多待完善和值得创新之处。主要表现在:①致密砂岩气藏工程地质基础研究薄弱,工作不到位,常常造成技术路线决策失误;②对先进技术的适用条件研究欠深入,针对性不强,集成配套能力差,未能充分发挥先进技术的优势,往往顾此失彼,前后矛盾,前功尽弃;③预防和解除增产改造中的损害还缺乏有效手段,时常发生技术效果与预期效果差距较大的情况;④低压、复杂相态和深层致密砂岩气藏的勘探开发是一个巨大的挑战,目前技术储备不足。

预计中国将迎来致密砂岩气藏天然气勘探开发的高潮,储量和产量将快速提升。以致密砂岩气藏天然气高效开发为指针,相应的工程技术也会有更大的需求、更高的要求,必然迎来工程技术发展的最佳机遇期<sup>[37]</sup>。针对存在的技术问题,提出如下几点建议。

### 4.1 加强基础研究,继续完善钻井及完井储集层保护配套技术能力

对于致密砂岩气藏是否需要在钻井、完井中加强保护,过去曾存在认识上的误区,以为储集层致密、孔喉细小,固相和液相侵入损害潜力降低,忽视了裂缝存在及其强应力敏感性、高毛管压力下水相自吸所带来的系列损害问题。不仅是国内,甚至美国在 1990 年以前也未对天然裂缝的“双刃剑”作用引起足够的重视。对天然裂缝的作用、应力敏感性和水相圈闭损害的深刻理解,是促进大牛地、新场、邛西等气田发现和经济开发的关键。就技术水平和未来需求来看,提高致密砂岩气藏潜在裂缝漏失性的钻井、完井保护能力、高温高压高产量致密气藏欠平衡钻井保护能力、测试及完井全过程欠平衡配套技术能力等是今后的发展方向。

### 4.2 重视水平井及特殊工艺井技术的应用,充分发挥技术潜力和技术优势

水平井技术在致密砂岩气藏天然气开发中的应用仍处于探索阶段。美国利用水平井开发致密砂岩气藏的经济成功率仅 50%,德国利用水平井压裂开发致密砂岩气藏的成功率也是 50% 左右<sup>[38]</sup>,加拿大则把水平井与气体欠平衡结合,走出了成功之路。中国针对致密砂岩气藏开发,钻了约 10 口水平井,长北气田 2 口水平井与 4 口直井压裂试验效果对比证明二者具有竞争性<sup>[39]</sup>;川西白浅 111H 气体钻水平井也获得了成功;其他井在经济上多数是失败的。

水平井及多分支井(类似开发煤层气的羽状井)可以增加气藏的供气面积,提高钻遇垂直裂缝的机会,采用气体钻井或实施屏蔽暂堵技术能够降低水平井段储集层损害程度,可以避免出现较大压差及阻止钻井液、完井液滤液进入储集层,对预防应力敏感及水相圈闭损害起到积极作用。致密砂岩气藏普遍低产,透镜状砂体规模较小时,应适当考虑加密钻井。即便是规模较大的砂体,因其本身的孔隙度及渗透率低,裂缝性储集层的各向异性和多尺度非均质性显著,也适合于加密井原则<sup>[40]</sup>。美国的经验证明,加密钻井具有扩大储量、提高储量动用程度、增加产量的优点<sup>[6]</sup>。

### 4.3 大力提高增产改造技术的适应性,形成针对不同类型气藏的技术系列

针对不同类型的致密砂岩气藏,要考虑天然裂缝

发育程度、砂体规模及多层性、地层压力、井深、岩石力学特性、储集层损害机理、多层合采性和气井水侵潜力,优化施工工艺和压裂液体系,提高技术的适应性。 $\text{CO}_2$  增能压裂或  $\text{N}_2$  增能压裂技术在提高地层渗透能力的同时,通过补充地层能量、促进压裂液返排、减缓天然裂缝闭合,实现稳产高产。研制低损害压裂液体系或者通过工艺优化降低现有体系的损害将是研究的热点。

#### 4.4 适时组织深层致密砂岩气藏天然气勘探开发关键技术攻关

中国的深层致密砂岩天然气勘探领域极为广阔,资源前景远超过现在的浅层和中深层<sup>[9-11, 41]</sup>。目前已有技术系列主要针对浅层和中深层致密砂岩气藏(井深小于 3500m)的勘探开发,但在适应日益复杂的工程地质对象(超深井、超高压、超高温、超致密)方面仍有不少局限性,如深井钻井周期长、深井钻井液及完井液漏失、异常高破裂压力导致压裂施工成功率低<sup>[42]</sup>、裸眼完井垂直裂缝诱导天然气开采过程中快速水侵问题等。根据中国天然气勘探开发形势需要,建议提前抓好勘探开发深层致密砂岩气藏的技术储备。应重视高温高压致密岩石物理性质的研究;规划发展快速钻井技术,提高深井坚硬地层的钻速,降低成本;加强抗高温高压深井工作液体系和处理剂的研制;重视高温高压深井测井、测试工具和储集层改造设备的自主研发和必要关键设备的引进。

## 5 结语

中国致密砂岩气藏天然气远景资源丰富,致密砂岩气藏储量丰度低、产量递减快,经济开发难度大。中国致密砂岩气藏不仅具有陆相碎屑岩储集层的一般特点,而且还表现为低孔低渗、裂缝发育、局部超低含水饱和度、高毛管压力、地层压力异常、高损害潜力等工程地质特征。

中国形成了裂缝性致密砂岩气藏保护屏蔽暂堵技术系列、气体钻井及全过程欠平衡完井保护技术系列。 $\text{CO}_2$  泡沫压裂液体系、 $\text{N}_2$  增能压裂液体系和低摩阻高黏度瓜胶有机硼冻胶压裂液等低损害压裂技术的应用,极大地挖掘了致密砂岩气藏的潜能。

贯彻保护与改造并举的方针,实现全过程储集层保护是致密砂岩气藏及时发现、准确评价和经济开发的重要保证。

今后宜加强致密砂岩岩石物理学基础研究,不断完善钻井及完井储集层保护配套技术能力,重视水平井及特殊工艺井技术的应用,大力提高增产改造技术

的适应性,形成针对不同类型致密砂岩气藏的配套技术系列,满足深层、复杂致密砂岩气藏天然气勘探开发的技术需求。

#### 参考文献:

- [1] Northrop D A, Frohne K H. The multiwell experiment: A field laboratory in tight gas sandstone reservoirs [J]. JPT, 1990, 46 (6): 772-779.
- [2] Bennion D B, Thomas F B, Bietz R F. Low permeability gas reservoirs: problems, opportunities and solutions for drilling, completion, stimulation and production [A]. SPE 35577, 1996.
- [3] Ammer J. Tight gas technologies for the Rocky Mountains [J]. Gas TIPS, 2002, 8 (2): 18-23.
- [4] Kuuskraa V A, Bank G C. Gas from tight sands, shales: a growing share of US supply [J]. Oil & Gas Journal, 2003, 101 (47): 34-43.
- [5] Kuuskraa V A, Ammer J. Tight gas sands development: how to dramatically improve recovery efficiency [J]. Gas TIPS, 2004, 10 (1): 15-20.
- [6] Teufel L W. Optimization of infill drilling in naturally fractured low permeability gas sandstone reservoirs [J]. Gas TIPS, 2004, 10 (2): 20-24.
- [7] Ammer J, Shama M. Unconventional gas: reserve opportunities and technology needs [J]. Gas TIPS, 2004, 10 (4): 22-26.
- [8] 罗平亚,康毅力,孟英峰.我国储集层保护技术实现跨越式发展 [J].天然气工业,2006,26(1): 84-87.
- [9] 康竹林.中国深层天然气勘探前景 [J].天然气工业,2000,20 (5): 1-4.
- [10] 戴金星.我国天然气资源及其前景 [J].天然气工业,1999,19 (1): 3-6.
- [11] 王涛.中国深盆地田 [M].北京:石油工业出版社,2002.
- [12] 戴金星.中国从贫气国正迈向产气大国 [J].石油勘探与开发,2005,32(1): 1-5.
- [13] 李景明,李剑,谢增业,等.中国天然气资源研究 [J].石油勘探与开发,2005,32(2): 15-18.
- [14] 王庭斌.中国大中型气田分布的地质特征及主控因素 [J].石油勘探与开发,2005,32(4): 1-8.
- [15] 安凤山,王信,叶军.川西坳陷中段须家河组天然气勘探开发战略 [J].天然气工业,2005,25(5): 1-5.
- [16] 唐立章,张晓鹏.四川盆地西部油气资源潜力 [J].天然气工业,2004,24(7): 5-8.
- [17] 马新华.鄂尔多斯盆地天然气勘探开发形势分析 [J].石油勘探与开发,2005,32(4): 50-53.
- [18] 张君峰,兰朝利.鄂尔多斯盆地榆林—神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响 [J].石油勘探与开发,2006,33(2): 172-177.
- [19] 张浩,康毅力,陈一健,等.致密砂岩气藏超低含水饱和度形成地质条件及实验模拟 [J].天然气地球科学,2005,16(2): 186-189.
- [20] Zhang H, Kang Y, You L, et al. Practices and countermeasures for exploration and exploitation of tight sandstone gas reservoirs in China [A]. Proceedings of the WPC 1<sup>st</sup> Youth Forum [C]. Beijing: Petroleum Industry & Beijing Kehai Electronic Press, 2004.

- [21] 游利军, 康毅力, 陈一键, 等. 考虑裂缝和水饱和度的致密砂岩应力敏感性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 59-63.
- [22] 游利军, 康毅力, 陈一键, 等. 致密砂岩气藏水相圈闭损害实验研究及应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(2): 4-7.
- [23] 康毅力, 罗平亚, 焦棣, 等. 川西致密含气砂岩钻井完井地层损害控制战略[J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 46-50.
- [24] 康毅力, 罗平亚, 徐进, 等. 川西致密砂岩气层保护技术: 进展与挑战[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(3): 1-5.
- [25] Kang Y, Luo P, Xu J, et al. Employing both damage control and stimulation: A way to successful development for tight gas sandstone reservoirs[A]. SPE 64707, 2000.
- [26] 郑有成. 欠平衡钻井完井技术在四川天然气勘探新领域的突破[J]. 中国石油勘探, 2003, 8(1): 52-57, 66.
- [27] 雷桐, 王崇军, 张汉林. 长庆天然气欠平衡钻井技术介绍[J]. 低渗透油气田, 2001, 6(1): 71-74.
- [28] 郑有成. 邛西 6 井全过程欠平衡钻井及特殊衬管完井技术试验[J]. 钻采工艺, 2004, 27(6): 12-13.
- [29] 杨丙秀, 蒋廷学, 丁云宏, 等. 低孔低渗储集层探井低伤害压裂技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 119-122.
- [30] 陈作, 丁云宏, 蒋阆, 等. 低渗透气藏增产改造技术在勘探开发中的应用[A]. 天然气勘探开发论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [31] 崔月明, 单文文, 丁云宏, 等. 八角场低渗气田大型水力压裂工作液优化设计[A]. 油气藏改造论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [32] 龙学, 宋艾玲. 川西致密砂岩气藏储集层改造技术方法选择及效果分析[J]. 钻采工艺, 2001, 24(5): 38-40.
- [33] 青永固. 川西致密碎屑岩气藏水力压裂工艺技术进展[J]. 天然气工业, 2002, 22(3): 21-24.
- [34] 雷群, 赵振峰, 李宪文, 等. 古生界气藏酸化压裂试验新成果[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 76-81.
- [35] 李志刚, 李子丰, 郝蜀民, 等. 低压致密气藏压裂工艺技术研究与应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 96-99.
- [36] 李志刚, 乌效鸣, 李子丰, 等. 低压低渗气藏低伤害压裂液研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 34-37.
- [37] 袁士义, 胡永乐, 罗凯. 天然气开发技术现状、挑战及对策[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 1-6.
- [38] Push G, Gaupp R, Liermann N. Integrated research contributions for screening the tight gas potential in the Rotliegendes Formation of North Germany[J]. Oil Gas European Magazine, 2005, 31(4): 187-193.
- [39] Wang S, Hui K. Hydraulic fracture stimulation in Changbei tight gas reservoir: challenges and achievements [A]. SPE 72165, 2001.
- [40] 李前贵, 康毅力, 罗平亚. 致密砂岩气藏多尺度效应及生产机理[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 111-113.
- [41] 王金琪. 中国大型致密砂岩含气区展望[J]. 天然气工业, 2000, 20(1): 10-16.
- [42] 黄辉, 谭明文, 张绍彬, 等. 川西深层须家河组气藏压裂改造难点和工艺技术对策[J]. 钻采工艺, 2004, 27(5): 27-30.

第一作者简介: 康毅力(1964), 男, 天津蓟县人, 博士, 西南石油大学教授、博士生导师, 主要从事储集层保护理论及技术、非常规天然气开发、油气田开发地质研究与教学工作。地址: 四川省成都市新都区, 西南石油大学油井完井技术中心, 邮政编码: 610500。E-mail: cwctkyl@vip.sina.com

收稿日期: 2006-07-10 修回日期: 2006-12-11

(编辑 宋立臣)

## (上接第 211 页)

- [8] 陈亮, 吴胜和, 刘宇红. 胡状集油田胡十二块注水开发过程中储集层动态变化研究[J]. 石油实验地质, 1999, 21(2): 49-53.
- [9] 陈亮, 彭仕宓, 葛昌谋. 胡状集油田胡十二块剩余油微观形成机理研究[J]. 断块油气田, 1997, 4(4): 43-45.
- [10] 陈亮, 黄述旺, 牛艳平. 胡十二块注水前后储集层参数模型的建立[J]. 断块油气田, 1999, 6(2): 26-29.
- [11] 曾流芳, 赵国景, 张子海, 等. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理及判别方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(3): 56-64.
- [12] 刘森, 熊廷柱, 刘俊霞, 等. 五参数注水剖面测井在中原油田的应用[J]. 测井技术, 2002, 26(6): 78-82.
- [13] 王端平, 柳强. 复杂断块油田精细油藏描述[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 111-117.
- [14] 何琰, 殷军, 吴念胜. 储集层非均质性描述的地质统计学方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3): 21-23.
- [15] 黄福堂, 蒋宗乐, 张宏志. 注水开发储集层水淹级别判断方法研究[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 62-65.
- [16] 赵澄林, 刘孟慧, 纪友亮. 东濮凹陷下第三系碎屑岩沉积体系与成岩作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [17] 朱筱敏, 信荃麟. 湖泊扇三角洲的重要特性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(3): 6-11.
- [18] 陈昊, 张洪波, 曹学良, 等. 东濮凹陷文东地区沙三中亚段沉积相及砂体类型分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 32-35.
- [19] 孟元林, 高建军, 牛嘉玉, 等. 扇三角洲体系沉积微相对成岩的控制作用——以辽河凹陷西部凹陷南段扇三角洲沉积体系为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 36-39.

第一作者简介: 钟大康(1961), 男, 四川资中人, 博士, 中国石油大学(北京)副教授, 主要从事储集层评价、沉积学和油气田开发地质方面的研究工作。地址: 北京市昌平区, 中国石油大学(北京)资源与信息学院, 邮政编码: 102249。E-mail: Zhongdakang@263.net

收稿日期: 2006-10-16 修回日期: 2006-12-14

(编辑 唐金华 绘图 付改荣)