

文章编号:0253-9985(2012)04-0497-09

中国中西部四大盆地碎屑岩油气地质与勘探技术新进展

郑和荣

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:晚古生代以来,中西部四大盆地成盆演化具有“同序异时”特征,碎屑岩层系具有自生自储和海生陆储两大勘探领域。压性构造背景下碎屑岩沉积充填层序具有“二元”体系域结构,决定了碎屑岩层系具有良好的生储盖组合。碎屑岩层系可划分内源、外源和混源3大类6个亚类成藏体系。四大盆地构造变形的差异性决定了成藏体系分布的差异性。针对裂缝性储层预测,形成了三维三分量地震采集、处理和解释技术系列;针对致密储层和隐蔽圈闭识别,形成了实用的黄土塬地震采集处理技术等;针对川西坳陷致密裂缝性储层,形成了一系列压裂改造技术;针对鄂南致密砂岩储层,形成了补偿压裂技术方法。油气地质理论新认识与技术新进展推动了该领域大中型油气田(如川西须二气田、塔河碎屑岩油气藏和鄂南镇泾油田)和规模储量的发现。

关键词:储层预测技术;储层改造技术;成藏体系;碎屑岩层系;中国中西部

中图分类号:TE112.3

文献标识码:A

New advances in petroleum geology and exploration techniques of clastic reservoirs in the four large-sized basins in central-western China

Zheng Herong

(SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Since Late Paleozoic, the four large-sized petroliferous basins (i. e. Ordos, Sichuan, Junggar and Tarim) in central-western China have experienced similar evolution processes during different geologic time, and have two kinds of petroleum exploration plays in clastic strata, i. e. self-source and self-reservoir type and marine-source continental-reservoir type. The clastic sequences deposited in compressional environments have “dual system tract structure”, which determines the high quality of the exploration plays. Three types (inner-sourcing, out-sourcing and hybrid-sourcing) and six subtypes of petroleum accumulation systems can be identified in the clastic sequences. The differences in tectonic deformation among these four basins result in the differences in their petroleum accumulation system distributions. A technique series consisting of 3D 3C seismic acquisition, processing and interpretation has been developed for fractured reservoir prediction. Seismic acquisition and processing techniques for loess tableland are developed to identify tight reservoirs and subtle traps. Fracturing techniques are developed for stimulation of the fractured tight reservoirs in western Sichuan depression. Compensation fracturing techniques are developed for stimulation of the tight sands in southern Ordos Basin. The advances in petroleum geologic theories and exploration techniques have promoted the discovery of the large- to medium-sized oil and gas fields (such as gas reservoirs in the 2nd member of Upper Triassic Xujiahe Formation, the classic oil reservoirs in Tahe area, the Zhenjing oil field in southern Ordos Basin).

Key words: reservoir prediction, reservoir stimulation, petroleum accumulation system, clastic strata, central-western China

收稿日期:2012-04-15;修订日期:2012-07-11。

作者简介:郑和荣(1962—),男,博士、教授级高级工程师,油气地质与勘探。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05002)。

1 概况

中国中西部地区四大盆地(鄂尔多斯、四川、准噶尔和塔里木)的碎屑岩层系具有丰富的油气资源。鄂尔多斯盆地碎屑岩勘探层系包括上古生界和中生界,盆地总资源量为 195.37×10^8 t 油当量,其中古生界天然气资源量为 11.2×10^{12} m³,中生界石油总资源量 83.37×10^8 t。四川盆地碎屑岩勘探层系指上三叠统须家河组及其以上层系,盆地总资源量为 57.76×10^8 t 油当量,其中石油资源量为 4.26×10^8 t,天然气资源量为 5.35×10^{12} m³(海相和陆相未分)。准噶尔盆地碎屑岩层系为石炭系以上,总资源量为 106.6×10^8 t 油当量,其中石油资源量为 85.6×10^8 t,天然气资源量为 2.1×10^{12} m³。塔里木盆地碎屑岩勘探层系为志留系及其以上层系,总资源量为 229.41×10^8 t 油当量,其中石油资源量为 115.72×10^8 t,天然气资源量为 11.37×10^{12} m³(据三次资评,2000)。中石化在中西部四大盆地碎屑岩领域共拥有石油资源量 37.68×10^8 t,天然气资源量 97.33×10^8 t 油当量,总资源量达到 135×10^8 t 油当量(三次资评,2000),表明该领域具有良好的资源基础。

中西部四大盆地均为叠合盆地,受多旋回构造演化和盆地叠合作用控制,碎屑岩层系成烃-成藏期次多、油气运聚方向复杂,油气富集层系、区带和目标预测难度大。因此,在地质规律研究上需加强油气成藏与富集规律研究,以确定勘探方向,优选勘探区带。

中西部碎屑岩层系以地层、岩性和裂缝等隐蔽性圈闭为主,优质砂体、高孔渗带、裂缝发育带是勘探的“甜点”。因此,需加强地球物理储层预测与油气识别研究,寻找有利的勘探目标。同时,中西部碎屑岩储层成岩演化历史长、埋深大,以致密、裂缝性储层为特色,需在储层伤害成因机理和压裂试验的基础上,优化储层保护和改造技术体系,以寻求油气发现。

2 中西部碎屑岩油气地质理论新认识

针对中西部四大盆地碎屑岩领域,围绕大中型油气田的形成分布规律,按照统一研究思路、统一理论体系、统一评价流程的要求,开展成盆-成

烃-成藏的动态研究,形成了中西部碎屑岩成藏和富集规律的新认识,以确定大中型油气田勘探领域和方向。

2.1 成盆演化的“同序异时”特征

早古生代,中西部四大盆地基本都以海相沉积为主,主要发育台内坳陷或被动大陆边缘的海相烃源岩^[1-4]。在逐次加强的构造作用下,沿断裂、不整合面和储集体共同构成的立体输导体系,早期形成的海相油气田破坏或调整向上覆的碎屑岩层系形成次生油气藏,有的海相层系烃源岩晚期仍具有生烃能力,油气直接运移至上覆碎屑岩层系中成藏,从而形成源自海相烃源岩的“海生陆储”油气藏,是碎屑岩层系的一大勘探领域。

晚古生代以来,中西部四大盆地基本都经历了陆内坳陷-类前陆盆地的演化序列^[1-4]。而在陆内坳陷发育阶段,往往发育大面积广覆式、厚度和品质均较稳定的碎屑岩层系烃源岩,如鄂尔多斯盆地的上古生界和三叠系、准噶尔盆地的二叠系、四川盆地的三叠系等,从而奠定了碎屑岩层系丰富的油气资源基础。在随后的类前陆盆地演化阶段,在前陆坳陷区,往往形成巨厚的、品质良好的烃源岩,如塔里木盆地库车坳陷的侏罗系、准噶尔盆地南部的侏罗系等。碎屑岩层系形成的油气在碎屑岩层系中形成自生自储油气藏^[5-7],是碎屑岩层系最为重要的勘探领域。

虽然中西部四大盆地经历了大致相同的构造-成盆演化序列,但经历各个演化阶段的起始和终止时间、持续的时间长短都存在着明显的差异,这决定了四大盆地碎屑岩成藏组合在纵向层系上的差异。陆内坳陷和类前陆盆地发育的时间长短和规模的不同决定了资源基础的差异^[8-9]。如四川盆地海相层系一直持续到中三叠世,晚三叠世开始进入碎屑岩沉积旋回,发育上三叠统自生自储、上三叠统生-上覆层系储、侏罗系自生自储等成藏组合,同时还发育海相层系生-碎屑岩层系储的成藏组合。鄂尔多斯盆地发育上古生界(石炭系-二叠系)自生自储、上三叠统自生自储和上三叠统生-侏罗系储等3套成藏组合。塔里木盆地台盆区碎屑岩层系烃源岩条件相对较差,台盆区以发育海相层系生-碎屑岩层系储的成藏组合,但在库车前陆区发育三叠系-侏罗系生-上覆层系储的成藏组合。准噶尔盆地主要发育二叠系生-

上覆层系储、侏罗系自生自储和石炭系自生自储等成藏组合。

2.2 沉积充填具有“二元体系域”结构

“二元体系域”的概念最早在准噶尔盆地侏罗系提出^[10],从各层序的内部体系域和充填特征均可以看出:每个层序基本仅可划分出低位粗碎屑、湖扩细碎屑两个体系域。进而在四川盆地的三叠系和侏罗系、鄂尔多斯盆地的上古生界和三叠系、塔里木盆地的三叠系、侏罗系、白垩系、古近系,都发现层序结构具有明显的“二元体系域”特征。

对于准噶尔盆地等中西部大型压性盆地,可容空间变化主要受控于各阶段压性盆地的幕式冲断作用,多幕逆冲挤压和松弛后稳定沉降是形成“二元体系域”的主要原因,幕式过程导致其湖平面和基准面变化不具备周期渐变旋回,使层序构成出现“二元”的突变特征。在逆冲挤压期,应力缓慢集中,可容空间逐渐收缩,导致湖平面渐渐上升,滨岸退积上超,当应力集中到最大时,突然释放进入到松弛期,湖平面或基准面快速下降,低位粗碎屑体系(如下切谷和扇三角洲)复活。从而形成下部低位、上部湖扩的“二元体系域”结构。形成机制揭示了陆内压性盆地层序形成的构造主控特征,并明显不同于由海平面周期升降、气候周期变化、构造沉降和物源补给渐变为主控的基准面或相对海平面周期旋回变化的“三元”体系域结构模式。

碎屑岩层系易于形成大范围分布的、粗细交互的“二元体系域”结构,由于粗粒沉积一般为储层,细粒沉积一般为烃源岩或盖层,十分有利于形成生储、储盖、储盖(生)、生储盖、生储盖(生)等有利的成藏组合。在靠近烃源岩系的储集层段易于形成岩性油气藏或致密砂岩油气藏,甚至页岩油气藏。在远离烃源岩系的储层段,由于具有良好的储盖组合,可形成来自于下伏海相层系或碎屑岩层系的构造油气藏或次生油气藏。

2.3 中西部碎屑岩层系的油气成藏体系

2.3.1 油气成藏体系划分

根据油气来源,将中西部四大盆地碎屑岩含油层系划分为3大类6个亚类成藏体系^[11-12],3

大类分别是内源型、外源型和混源型成藏体系。

内源型成藏体系是指碎屑岩层系内油气来源于碎屑岩层系烃源岩的成藏组合,又细分为内源近源型(如川西坳陷须家河组、鄂尔多斯盆地南部延长组、鄂尔多斯盆地北部上古生界)和内源远源型(如准噶尔盆地二叠系生成的油气到侏罗系-白垩系成藏)成藏体系两个亚类。

外源型成藏体系是指碎屑岩层系油气来源于海相碳酸盐岩层系烃源岩或海相碳酸盐岩油气藏的成藏组合,细分为外源次生成藏体系(如塔里木盆地塔河油田的三叠系-古近系)和外源原生(如塔里木盆地的志留系-泥盆系)成藏体系两个亚类。

混源成藏体系是指碎屑岩层系油气来源于碎屑岩层系烃源岩和海相碳酸盐岩层系油气藏(烃源岩)混源的成藏组合。外源型成藏体系混源成藏体系细分为混源陆相为主(如川东北地区的须家河组)和混源海相为主(塔里木盆地巴麦地区的碎屑岩)成藏体系两个亚类。

2.3.2 评价方法

将中西部四大盆地碎屑岩层系作为一个单元的“整体”分不同的成藏体系类型进行评价,评价依据方面是突出不同成藏体系油气成藏和富集的“关键因素”。

由于内源近源成藏体系和混源陆相为主成藏体系具有相似的成藏与富集主控因素,因此,可以采用相同的评价思路和依据。首先评价该成藏体系是否存在碎屑岩强生烃灶,其次围绕强生烃灶分析优质储层的发育条件,最后分析大型岩性圈闭的发育条件。

针对内源远源成藏体系,首先分析下伏碎屑岩层系是否存在强生烃灶或大油气田,再分析其上是否具有油气垂向输导条件,最后分析各类复合圈闭的发育条件。

对于外源次生成藏体系和混源海相为主成藏体系,首先分析下伏海相层系是否具有大油气田,再分析其上是否具有油气垂向输导条件,最后分析是否存在以构造为主的圈闭群。

针对外源原生成藏体系,首先要评价是其否邻近海相强生烃灶,其次分析是否存在优质储层,最后分析大型地层圈闭的发育条件。

2.4 有效生烃潜力决定了内源成藏体系的资源前景

2.4.1 成烃时间与内源成藏体系成藏时间的一致性

中西部四大盆地碎屑岩层系各成藏体系内典型油气藏的动态解剖结果表明,内源成藏体系油气成藏期次主要受控于烃源岩高峰生排烃期,关键成藏期与主力生烃期基本一致。如川西坳陷须家河组一段、须三段、须五段烃源岩分别在侏罗纪末至早白垩世末期达到生烃高峰,基本与主成藏期一致。如鄂尔多斯盆地南部镇泾地区的上三叠统延长组,烃源岩在早白垩世中晚期达到成熟,与岩性油气藏的早期成藏时间基本一致。烃源岩成熟并经历明显生烃,当时储层条件优越,生储良好,配置有利于内源成藏体系形成岩性油气藏。

2.4.2 生烃潜力控制了油气资源潜力的平面分布

川西坳陷上三叠统须家河组大气田基本都分布于生烃强度大于 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域;鄂尔多斯盆地南部的上三叠统延长组大油田基本都分布在烃源岩厚度大于 20 m 的地区;鄂尔多斯盆地上古生界大型的气田基本都分布于生烃强度大于 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区域。

从总生烃量对比来看,鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系最大,鄂尔多斯盆地上三叠统次之,川西坳陷须家河组烃源岩最低,这与目前 3 个领域的资源量、储量发现是一致的。

从生烃强度对比来看,川西坳陷须家河组烃源岩最高,鄂尔多斯盆地上古生界和上三叠统烃源岩相当。这与近年来川西发现整装大气田相吻合,而鄂尔多斯盆地以发育较大面积、低丰度的油气藏也是符合的。

2.5 流体动力演化控制了油气成藏演化与富集

地下水动力场的形成演化控制了地下水化学场的形成分布和油气生、运、聚与成藏、保存过程。含油气盆地一般由内向外存在 3 个流体动力分带,内带为压实水离心流区,泥岩压实排水离心流是油气运移的主要动力,通常发育在盆地坳陷区,地层水以淡化为特征;外带为大气水下渗向心流区,分布于盆地边缘或构造高部位剥蚀区,通常缺

乏封盖条件而保存差,可局部形成水动力和岩性油气藏;二者之间为越流泄水浓缩区(带),有利于油气大量聚集,是大油气田形成的重要场所,通常分布在隆起或斜坡区,具高矿化度特征。

准噶尔盆地侏罗系油气运聚成藏的流体动力过程分侏罗纪和白垩纪—现今两个阶段。侏罗纪是车莫古隆起油气聚集的重要时期,油气由南部的昌吉凹陷和北部的盆 1 井西—玛湖凹陷两个压实水离心流区向车莫古隆起越流泄水区作相向运移。白垩纪及其以后,在构造北抬南降过程中,逐步演化为油气由南部的昌吉凹陷向北部大面积的越流泄水区运移。两期地下水动力场演变过程中,越流泄水区的往返迁移使得流体越流带与油气聚集带较宽,油气分布较分散,古隆起及其围斜区是地下流体(油气)运移聚集的有利指向区。

鄂尔多斯盆地上古生界现今地下水动力场属典型不对称型,坳陷内滞流区利于天然气保存。天然气现今集中富集在地下水越流—蒸发浓缩带内。大气水下渗—向心流区为产水区,天然气聚集滞流区为含气区,天然气越流漏失区为气水共存过渡区。三叠纪末,上古生天然气运聚的方向为由南向北,早白垩世末以后,逐步转变为向东北方向。

鄂尔多斯盆地南部中生界延长组在早白垩世存在由两个压实水离心流区(烃源灶)向其间的越流泄水带(砂岩发育区)运聚的特征;喜马拉雅期,伴随着南部掀斜,油气向南、向东作微弱调整。

2.6 构造变形的差异性控制了成藏体系分布的差异性

中西部四大盆地构造变形的差异性决定了成藏体系和油气藏类型分布的差异性,在不同的构造带,碎屑岩层系形成的成藏体系和油气藏类型、多少、大小都存在一定的规律。

2.6.1 沉积斜坡

指碎屑岩层系的沉积斜坡,是沉积水体快速加深的沉积区域,易发育半深湖—深湖烃源岩与三角洲前缘储集砂体互层的有利生储盖组合,主要为内源近源成藏体系,以发育大面积较大型岩性油气藏(群)为特点。典型代表有四川盆地川西坳

陷-斜坡上三叠统,鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上古生界和上三叠统。

2.6.2 构造斜坡

由于构造抬升或掀斜形成的斜坡。抬升和掀斜作用常导致海相碳酸盐岩层系的差异剥蚀,同时在不整合面之上存在碎屑岩层系的超覆。海相烃源岩形成的油气向上倾方向或沿不整合面向盆地四周运移,在碎屑岩层系地层尖灭带形成外源原生油气藏,以发育大型地层油气藏为主。典型代表是塔里木盆地环塔北隆起、塔中隆起斜坡区的志留系和泥盆系油气藏。

2.6.3 古隆起

主要指在海相碳酸盐岩层系发育的隆起,但在碎屑岩层系中已不具备明显的隆起形态。古隆起是下伏海相碳酸盐岩层系最有利的油气聚集和富集场所,常形成大型-超大型的海相油气田,这为上覆碎屑岩层系形成外源次生油气藏提供了充足的油气源。一般古隆起两侧都发育一些深大断裂,沟通海相大油气田与上覆碎屑岩储层之间的联系,油气沿断裂向上运移至碎屑岩输导层,然后沿输导层作横向运移,在遇到圈闭时形成油气藏。该类油气藏主要为较小型的构造油气藏,但常沿断裂成群成带出现,具有层系多、数量多、单个规模较小的特点。典型代表是塔河地区的碎屑岩层系油气藏。

2.6.4 隆起

指碎屑岩层系发育的隆起。在靠近烃源岩系的储层中直接形成内源近源油气成藏体系,以较大型的构造油气藏为主。在隆起上常发育断裂和低序次的断层,甚至裂缝,形成垂向输导通道,在上覆层系中形成次生的内源远源油气藏,规模相对较小。典型代表有川西坳陷孝泉-丰谷背斜构造带侏罗系、白垩系油气藏。

2.6.5 山前冲断带

主要分布于盆地挤压边缘,形成一系列的逆冲推覆断块或断片。盆地深部碎屑岩层系烃源岩形成的油气向逆冲带运移,遇同层断块圈闭先充注形成内源近源油气藏,同时油气继续沿断层和

输导层向盆地周缘和上覆层系运移,形成内源远源油气藏,两类油气藏均以构造油气藏为主。典型代表有准噶尔盆地西北缘、川西坳陷龙门山前冲断带、库车坳陷山前冲断带等。

2.6.6 断裂带

指在盆地内部相对稳定区发育的断裂带。早期的深大断裂沟通海相烃源岩或古油藏与碎屑岩,可形成外源次生成藏体系或混源成藏体系,典型代表是川东北和塔里木盆地的巴麦地区碎屑岩层系。碎屑岩内部的断裂常常沟通碎屑岩烃源岩与上覆碎屑岩储层,形成内源远源成藏体系,同时在邻近烃源岩的储层中形成内源近源成藏体系,典型代表是准噶尔盆地腹部中生界。

3 勘探关键技术新进展

3.1 三维三分量地震技术应用于裂缝性储层预测

针对四川盆地致密碎屑岩裂缝性储层勘探难点,建立了三维三分量(3D3C)地震勘探采集、处理和解释技术系列^[13],并取得了良好应用效果。

在三维三分量地震资料采集方面,建立了全方位束状分散式复合模板3D3C采集观测系统,实现了大规模高效工业化采集。PP波和PS波全方位成像结果信噪比较高,较好地满足了各向异性裂缝检测的实际需要。在三维三分量地震资料处理方面,建立了方位各向异性和各向同性工业化处理流程,有效地保护了各向异性和横波分裂信息,满足了纵横波联合裂缝检测和含气性预测的要求。

在裂缝预测方面,形成了多波多尺度裂缝预测和评价技术,主要包括精细构造及断层解释识别超大尺度断裂和破裂系统技术,基于曲率、相干和倾角的地震属性预测大尺度裂缝技术,基于纵波各向异性和横波分裂的中小尺度裂缝方位和密度量化预测技术,基于地史成因的构造应力场演化分析技术,基于离散网络裂缝建模的裂缝表征技术。这些预测和评价技术的成功应用使深层探井成功率从50%提高到85%。

在储层含气性预测方面,对低频、强反射为主的地震含气响应特征与薄层响应储层,利用吸收

滤波、频谱分解、多子波重构、多尺度频率、吸收属性提取与叠前弹性参数反演等技术,取得了良好的致密碎屑岩储层含气性检测效果。

3.2 针对致密储层和隐蔽圈闭的评价预测技术

针对鄂南地区黄土塬探区、鄂北地区上古生界致密砂岩与煤系储层^[14]、准噶尔盆地薄储层、塔里木盆地微构造圈闭等特殊勘探对象,通过“十一五”攻关形成了部分实用的评价预测技术。

3.2.1 黄土塬地震技术

针对鄂南黄土塬地区巨厚的黄土层对采集造成的不利影响,通过多井、小药量组合激发、优选激发岩性等激发技术的组合,采用压电检波器与特殊耦合检波器接收及相应的匹配滤波处理方法,改善接收效果,主频提高 5 Hz、频宽拓宽 10 Hz 以上,改善了主要目的层(延安组、延长组)的成像效果。

在黄土塬地震资料处理方面,通过层析静校正解决了地震反射的长波长及部分短波长静校正问题。通过分频迭代剩余静校正技术,使有效信号实现同相叠加,从而达到了提高地震资料信噪比和分辨率的目的。通过相关技术组合,初步建立了一套适合黄土塬探区的高分辨率处理流程,提高了黄土塬探区地震资料的成像效果。

3.2.2 煤系储层地震预测技术

针对鄂北上古生界煤系地层储层砂体地震响应微弱,单一属性分析和地震参数反演技术不能有效地刻画煤系储层空间分布非均质性的问题,探索使用多种属性优化预测技术。该技术将概率神经网络优化和地质统计学随机反演相结合,以测井曲线作为学习目标,进行多种地震属性优化,用神经网络地震反演得到的数据体为约束,以测井数据作为条件数据(硬数据)进行储层参数地质统计学随机反演-模拟,进而得到较为精细、同时侧向分布较为符合地质规律的煤系地层的储层参数反演成果。

3.2.3 薄储层预测技术

针对塔河油区石炭系卡拉沙依组^[15]、准噶尔盆地莫西庄区块三工河组薄储层预测难点,形成

了包括等时地层格架建立、90°相位转换、等时地层切片、地震时频的分析、相控地震反演在内的薄储层相控地震属性综合预测技术,准确地刻画了控制薄储层发育的沉积微相展布范围、有效地描述了薄储层岩性、物性、含油气性的空间分布上的非均质性,圈定了有利的勘探目标。

3.2.4 微构造识别技术

利用相干数据体、方差数据体,在断裂系统解释中,利用沿层相干切片、偏移体时间切片进行断裂系统综合解释,在小断层识别中综合应用相干、体属性相干+倾角方位角检测、高分辨率本征值相干、“智能”蚂蚁追踪技术、可视化等多种方法识别断层技术^[16],有效地解决了与断裂相关的微构造圈闭的识别问题。通过技术应用,在塔河油田南部阿克亚苏地区三叠系落实了多个与断层有关的微构造圈闭。

3.3 多层结构协同增效储层保护技术

3.3.1 多层结构协同增效油气层保护机理

屏蔽暂堵技术在保护油气层中得到了广泛的应用,取得了良好的效果。其难度和关键是各种粒子的直径与孔喉直径的匹配,由于油气层的非均质性,这种匹配关系很难把握好,影响了保护油气层的效果。在综合分析目前钻井液体系特点的基础上,根据中西部碎屑岩油气层潜在伤害因素分析,提出了多层结构协同增效的保护油气层机理。

镶嵌屏蔽技术设计一种内刚外柔的材料,其直径大于地层的孔隙直径,在压差的作用下,其外面弹性部分镶嵌入孔隙入口处,将孔隙封堵住,其余部分仍在孔隙外面,起到单向封堵的作用。膜屏蔽剂具有油溶和水溶两亲特性,能够在井壁岩石表面迅速大量吸附,达到临界浓度时,在岩石表面发生缔合,从而在岩石表面形成封闭膜。通过镶嵌屏蔽-膜屏蔽的复合作用,达到多层结构协同增效的保护油气层效果。

3.3.2 可视化入井流体伤害模拟评价系统及方法

多功能可视化入井流体仿真模拟评价系统以计算机系统平台为中心,与外围多功能可视化入井流体模拟评价装置、注排系统、宏观微观高

清成像系统、配套注入泵系统等配合构成,具有动态可视化仿真性能,配合可高度仿真物理模拟技术及计算机图形处理和量化技术,可实现入井流体的全过程可视化模拟评价,分析入井流体的作用机理及对地层孔隙结构的影响等微观可视化;定量评价仿真或真实岩心流体滤失、反排解堵效果。

3.3.3 多层结构协同增效储层保护液体系

以多层结构协同增效油层保护机理为设计依据,研制出新型的镶嵌屏蔽剂和膜屏蔽剂储层保护剂。室内岩心动态模拟试验表明,与常用的固体颗粒类暂堵剂相比,暂堵率提高了8%~17%,岩心渗透率恢复值提高了15%~18%;对7口井的现场试验取得了较好的井壁稳定作用和增油效果。某试验井井径变化范围是同区块同层位相邻井井径变化范围的38%,投产初期日产油量是相邻井日产油量的2.3倍。

3.4 压裂改造技术在四川盆地和鄂尔多斯盆地取得显著应用效果

3.4.1 直井多层、水平井分段压裂技术

针对四川盆地储层物性条件差;多层系叠置,单层开发效益低;低压气藏易伤害,压裂液返排困难等储层改造技术难题。研究采用低伤害压裂液体系、大规模加砂压裂工艺、高效强返排技术^[17],运用自主研发的压裂滑套喷砂器、石油、天然气气井多层压裂管柱技术,实施多层压裂、合层套采的压裂开采方式,解决了直井三层以上分层压裂及水平井三段以上分段压裂增产技术的关键问题。形成了直井多层压裂-水平井分段压裂技术。应用于川西低渗透致密多层系气藏,取得了直井三、四层压裂30井次,平均单井增产 $9.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水平井三、四段压裂6井次,平均单井增产 $11.87 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的效果。

3.4.2 深层超高压大型压裂和复合压裂改造技术

准噶尔盆地腹部深层及川西深层须家河组具有埋藏深度大(5 000~6 000 m)、高温(100~150℃)、超高压(地应力>70 MPa)等特点。压裂施工泵压高、对压裂液性能和支撑剂强度要求高、施工排量和砂比难以提高、人工排液困难,使得储层

改造实施难度和风险大大提高。

通过储层地应力剖面分析及破裂压力预测,对高破裂压力储层采取燃爆诱导压裂加酸处理技术,有效降低储层破裂压力;对天然裂缝发育储层采取综合降滤失关键技术。配套了140 MPa超高压装备(2500型压裂车、140 MPa井口和管汇),通过集中射孔(5 m)、大管柱(41/2")、大排量施工,取得超深、超致密、超高压储层大型压裂与复合压裂改造技术突破^[18]。新11井须二段经超高压大型压裂施工,在油压10.6 MPa下测试产量 $12.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。川高561井经燃爆诱导压裂和83 m³酸化后,测试无阻流量为 $21.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在该构造须二段首获工业气流。深层气藏储层压裂改造技术的突破为2009年新场须家河须二段气藏超千亿方储量整体探明提供了重要的技术支撑。

3.4.3 补偿压裂技术

最新的三维裂缝监测结果表明,低渗致密储层的水力压裂人工裂缝主缝是介于单一裂缝和不规则网络裂缝之间的裂缝簇,且支撑裂缝极不均匀,导流通道存在很多薄弱点。

通过理论研究和现场实践,探索形成了低渗透油气藏低伤害、饱填砂、多连通、少节流的补偿压裂技术方法^[19]。其机理是:在保护储层的前提下,力求沟通更多的天然裂缝,减少裂缝导流能力薄弱带的节流效应。具体做法是:降低前置液比例,减少压裂液对储层的伤害;多级粒径加砂实现对天然微裂缝的保护和对人工裂缝的合理均匀支撑;注气增能达到快速返排的目的。

统计镇泾油田长8油层共压裂施工78层,压后放喷返排率从实施前的37.1%提高到69.4%;压裂后日产油从0.42t提高到3.7t。定北区块上古生界单井压裂后测试多口井获工业气流,其中定北10井获日产36 677 m³天然气。麻黄山区块压裂15口井,单井最大日产油7.18 t。大牛地气田共压裂探井54层,施工成功率大于90%,探井平均单层无阻流量 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 地质理论与技术进展推动了四大盆地碎屑岩大中型油气田的发现

在内源近源成藏体系“近源成藏、裂缝储层

富集”的认识指导下,通过3D3C裂缝储层预测与压裂改造技术的进步,在四川盆地须家河组发现了大中型气田。2009年在川西坳陷须二段探明1个储量超千亿方的大气田,同时,在川东北地区碎屑岩勘探获新发现。通南巴地区马路背构造在须家河组一段获高产天然气流,在元坝、达县-宣汉地区也有多口井获工业气流,展示了川西-川东北地区须家河组大面积含气的局面。

针对鄂尔多斯盆地中生界石油和上古生界天然气内源、近源成藏体系中近源成藏、储层甜点富集的地质规律,通过精细砂体描述、地震储层预测与改造技术的进步,在鄂尔多斯盆地的碎屑岩油气勘探取得进展,其中南部镇泾地区延长组石油勘探获得突破,发现了规模储量,彬-长、旬-宜、富县等地区也相继取得勘探进展,展示了鄂尔多斯盆地南部中生界良好的勘探前景。鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界勘探获新发现,是继大牛地气田之后重要的天然气增储地区。

塔里木盆地在外源次生成藏体系晚期成藏、输导控聚的认识指导下,通过圈闭识别和油气检测技术的应用,在塔河油田三叠系及其以上层系发现了一系列的小型圈闭群,实现了塔河油田碎屑岩层系储量规模不断扩大,巴楚-麦盖提地区泥盆系勘探取得重要发现,巴开8井获工业油流。在三顺地区志留系获勘探突破,顺9井获工业油流。展示了塔里木盆地碎屑岩层系多层系、多地区、多类型的油气成藏特色,并预示着该盆地碎屑岩油气勘探进入新的增长期。

准噶尔盆地在内源远源成藏体系输导控藏的认识指导下,通过运聚规律研究和砂体预测技术应用,带来准噶尔盆地西北缘和腹部隐蔽油气藏勘探新发现,在西缘车排子地区油气勘探储量持续增长,在西北缘哈山地区浅层实现了勘探突破,在腹部也发现了一批岩性油气藏勘探目标。

5 结论

1) 中西部碎屑岩成盆-成烃-成藏取得理论新认识,指明了大中型油气田的勘探方向。

中西部四大盆地晚古生代以来构造成盆演化具有同序异时的特征,奠定了碎屑岩领域丰富的油气资源基础。沉积充填具有二元体系域特征,

决定了碎屑岩良好的成藏组合,具有多样式的成藏体系,决定了其勘探领域广阔。

2) 储层预测技术进展为寻找勘探目标提供了有力的支撑。

针对裂缝性储层预测,形成了三维三分量地震采集、处理、解释技术系列;针对致密储层预测和隐蔽圈闭识别,形成了黄土塬地震采集、处理技术,煤系储层地震多属性优化预测技术,薄储层相控地震属性综合预测技术,精细相干识别微构造技术等。

3) 储层保护与改造技术为中西部碎屑岩取得油气发现发挥了重要作用。

针对致密裂缝性储层,初步形成了多层结构协同增效储层保护技术,形成了直井多层、水平井分段压裂技术,深层超高压大型压裂和复合压裂改造技术;针对鄂南致密砂岩,初步形成了补偿压裂技术方法。

4) 油气地质理论新认识与技术新进展推动了四大盆地碎屑岩大中型油气田和规模储量的发现,“十五”以来,年平均探明油气储量约1亿吨油当量,进入快速发现阶段。

本文是国家科技重大专项(2008ZX05002)项目的研究成果。该项目由中国石化石油勘探开发研究院、西北油田分公司、西南油气分公司、华北分公司和胜利油田分公司共同承担完成。

参 考 文 献

- [1] 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等.四川盆地形成与演化[M].北京:地质出版社,1996.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The formation and evolution of SiChuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [2] 杨俊杰.鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M].北京:石油工业出版社,2002.
Yang Junjie. The tectonic evolution and petroleum distribution of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [3] 贾承造,魏国齐.塔里木盆地构造特征与含油性[J].科学通报,2002,47(增刊):1-8.
Jia Chenzao, Wei Guoqi. Tectonic characteristics and its petro-liferous in Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(sup): 1-8.
- [4] 陈发景,汪新文,汪新伟.准噶尔盆地的原型和构造演化[J].地学前缘[中国地质大学(北京);北京大学],2005,12(3):77-89.
Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 77-89.

- [5] 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 786-793.
Yang Keming. Gas reservoiring mode in Xujiahe Formation of western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 786-803.
- [6] 赵文智, 卞从胜, 徐春春, 等. 四川盆地须家河组须一、三和五段天然气源内成藏潜力与有利区评价[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 385-393.
Zhao Wenzhi, Bian Gongsheng, Xu Chunchun, et al. Assessment on gas accumulation potential and favorable plays within the Xu-1, 3 and 5 Members of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 385-393.
- [7] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 等. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布: 以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 307-319.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: a case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 307-319.
- [8] 张水昌, 米敬奎, 刘柳红, 等. 中国致密砂岩煤成气藏地质特征及成藏过程: 以鄂尔多斯盆地古生界与四川盆地须家河组气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 320-330.
Zhang Shuichang, Mi Jingkui, Liu Lihong, et al. Geological features and formation of coal-formed tight sandstone gas pools in China: cases from Upper Paleozoic gas pools, Ordos Basin and Xujiahe Formation gas pools, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 320-330.
- [9] 杨华, 刘显阳, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透岩性油藏主控因素及其分布规律[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 1-6.
Yang Hua, Liu Xianyan, Zhang Caili, et al. The main controlling factors and distribution of low permeability lithologic reservoirs of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 1-6.
- [10] 刘传虎, 王学忠. 准噶尔盆地车排子地区层序地层结构及有利储集相带[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(1): 1-5.
Liu Chuanhu, Wang Xuezhong. Stratigraphic sequence structure and favorable facies belt in Chepaizi area of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(1): 1-5.
- [11] 郑和荣, 尹伟, 胡宗全, 等. 中国中西部碎屑岩领域油气富集主控因素与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 753-762.
Zheng Herong, Yin Wei, Hu Zongquan, et al. Main controlling factors for hydrocarbon accumulation and potential exploration targets in clastic sequences in western-central China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 753-762.
- [12] 金之钧. 叠合盆地油气成藏体系研究思路与方法—以准噶尔盆地中部地区油气藏为例[J]. 高等地质教育, 2011, 17(2): 161-169.
Jin Zhijun. Methods in studying petroleum accumulation systems in a superimposed basin: a case study of petroleum reservoirs in the Central Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 161-169.
- [13] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术—以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714.
Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.
- [14] Yang Hua, Fu Jinhua, Wang Daxing. Prediction of subtle thin gas reservoir in the loess desert area in the North of Ordos Basin[J]. Applied Geophysics, 2004, 1(2): 122-128.
- [15] 漆立新. 塔河油田深层碎屑岩非构造圈闭地震勘探技术[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 515-518.
Qi Lixin. The seismic prospecting technology for deep clastic non-structural trap in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4): 515-518.
- [16] 石玉, 李宗杰. 塔河油田三叠系岩性圈闭识别与评价技术[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(3): 375-378.
Shi Yu, Li Zongjie. Identification and Evaluation Technologies of lithologic trap of Triassic in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 375-378.
- [17] 黄小军, 杨永华, 董海亮. 新场沙溪庙组气藏大型压裂工艺技术研究与应[J]. 天然气勘探与开发, 2011, 34(1): 46-50.
Huang Xiaojun, Yang Yonghua, Dong Hailiang. Large-scale fracturing technology of Shaximiao Formation in Xinchang gasfield and its application[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34(1): 46-50.
- [18] 李华昌, 熊昕东, 青炳, 等. 川西深层裂缝孔隙型气藏水平井完井方式及参数优化[J]. 钻采工艺, 2011, 34(4): 21-24.
Li Huachang, Xiong Xindong, Qin Bing, et al. Completion design and parameter optimization of horizontal well in Chuanxi fracture-pore type gas reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(4): 21-24.
- [19] 李公让, 蓝强, 张敬辉. 低渗透储层水平井伤害机理及保护技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 60-64.
Li Gongrang, Lan Qiang, Zhang Jinghui, et al. Low permeability reservoir horizontal well formation damage mechanism and formation protection[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 60-64.

(编辑 高岩)