

文章编号:0253-9985(2004)04-0444-04

东营凹陷超压系统的幕式排烃

陈中红, 查明, 金强

(石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061)

摘要:东营凹陷烃源岩具有沉积速度快、连续沉积厚及高热流、高地温、高有机质含量的特征;同时,主力烃源岩段(沙河街组三段、四段)发育大套的泥岩,烃源岩主要以砂岩嵌入式、泥包砂及纯泥岩形式存在。这些条件导致在成熟的烃源岩段超压系统十分发育,同时也使得幕式排烃成为东营凹陷烃源岩一个重要的排烃方式。东营凹陷超压体系幕式排烃分为“构造幕”和“压力幕”两种方式。“构造幕”的机制是外部构造活动的破坏,其排烃方式主要是沿着断裂面及构造裂缝运移;“压力幕”的机制是超压体系内部“剩余”能量的积累和释放,其排烃方式主要是沿着压裂形成的微裂缝排放。在发生幕式排烃作用的超压体系内,排烃效率、烃指数分别较上下层段明显增大和减小。幕式排烃具有的高能量、快运移的特征,使得其在油气勘探中具有重要的意义。

关键词:东营凹陷;幕式排烃;超压系统;排烃机制

中图分类号:TE112.1

文献标识码:A

Episodic expulsion of hydrocarbons in overpressured systems in Dongying depression

Chen Zhonghong, Zha Ming, Jin Qiang

(University of Petroleum, Dongying, Shandong)

Abstract: Source rocks in Dongying depression are characterized by rapid and continuous deposition and large thickness, as well as high heat flow, high geotherm and high content of organic matters. Large thickness of mudstones are developed in the main source rock intervals (3rd and 4th members of Shahejie Formation). Source rocks are mainly deposited in the forms mudstone inlaid with sandstone, sandstone enclosed within mudstone and pure mudstones. As a result, overpressured systems are well developed in mature source rock intervals, and episodic expulsion becomes the fundamental mode of hydrocarbon expulsion in Dongying depression. The episodic expulsion of hydrocarbons in the overpressured systems in the depression can be classified into “tectonic episode” and “pressure episode”. The mechanism of “tectonic episode” is destruction caused by tectonic activities, and hydrocarbons migrate along fault planes and tectoclase, while the mechanism of “pressure episode” is the accumulation and release of the “residual energy” in the overpressured systems, and hydrocarbons migrate along microfissures induced from fracturing. Hydrocarbon expulsion efficiency and hydrocarbon index in the overpressured systems with episodic expulsion are remarkably higher than that in the upper source rock interval, and they are remarkably lower than that in the lower source rock interval. Episodic expulsion of hydrocarbon has important significance in petroleum exploration, due to its characteristics of high energy and rapid migration.

Key words: Dongying depression; episodic hydrocarbon expulsion; overpressured system; mechanism of hydrocarbon expulsion

幕式排液是沉积盆地超压系统内流体向外排放的一种方式^[1~12]。由于幕式排烃事件的突发性

及复杂性,目前还局限于定性的认识。东营凹陷作为陆相断陷盆地的典型代表,超压系统比较发

基金项目:国家“十五”重点科技攻关项目(2001BA605A-09-21)

第一作者简介:陈中红,男,36岁,博士生,油气地质与勘探

收稿日期:2004-04-16

育,并发育有成熟的烃源岩层^[13]。通过东营凹陷烃源岩幕式排烃的研究,有助于进一步认识烃源岩的幕式排烃特征及超压流体排放机制。

1 超压系统分布

东营凹陷压力系统在平面上呈环状结构分布,内环为超高压系统,中环为高压系统,外环为低压-常压系统。中环高压系统和内环超高压系统构成了封闭的巨型超压封存箱复合体。其内由压力分隔,形成了若干个由压力输导系统联系的次级超压封存箱^[14]。在东营凹陷的利津、牛庄、民丰洼陷的中央部位沙河街组三段下亚段(以下简称沙三下亚段)、沙河街组四段(以下简称沙四段)及孔店组属区域性超压,压力系数可达1.3~1.5;利津洼陷沙河街组三段中亚段(以下简称沙三中亚段)为局部超压,压力系数为1.2~1.4;在利津洼陷中央地带,沙三中亚段压力系数达1.7^[15]。在剖面上压力系统呈现“二段式”,上段为正常压力系统,下段为异常压力系统。东营凹陷“异常高压生烃泥岩体”包括沙三中、下亚段和沙河街组四段上、下亚段(以下分别简称沙四上亚段、沙四下亚段)灰色膏盐段及孔店组一段上部杂色膏盐段,压力系数多为1.5~1.7,最高可达1.9或更高^[16]。东营凹陷“超压”的分布与成熟烃源岩段关系密切,成熟烃源岩段基本为超压层段。生烃作用促进了“超压”的形成,而“超压”的分布及演化又控制着烃类的流动过程。

2 形成条件

幕式排烃形成于一定条件的超压烃源岩体,多数学者认为,除强挤压背景外,不平衡压实和生烃作用是形成超压的两种主要机制,其中前者是快速沉降的盆地超压发育的主要机制,而生烃作用尤其是生气作用是沉降速率较低的第三系盆地超压发育的主要机制^[17]。东营凹陷的烃源岩体具有沉积速度快、连续沉积厚的特征,易于在欠压实状态下形成超压。同时,东营凹陷的烃源岩具有较高的有机质含量,尤其在沙三下亚段和沙四上亚段,有机碳含量一般在2%~5%,有的甚至达到12%以上。丰富的有机质是烃源岩体中超压体系形成及破裂的有利条件。同时,作为裂谷盆地,东营凹陷具有高地温梯度、高热流的特点,东营凹陷沙三中亚段和下亚段地温达到106~148℃。这种

高地温条件对促进有机质的成熟及烃类的生成起了重要作用。因此,东营凹陷烃源岩具有压实不平衡和生烃作用的双重效应,这些条件为超压烃源岩体发生幕式排烃奠定了基础。

烃源岩的排烃行为与烃源岩的岩性结构(岩性组合模式)也有着十分密切的关系。普遍认为,单层泥岩厚度较薄、砂泥岩互层式的烃源岩体有利于烃类的充分排出。随着单层泥岩厚度的增大,靠近储层的泥岩可以正常进行排烃,而烃源岩中部因欠压实作用,具有较高的孔隙度,排烃受到一定阻碍,表现为相对“滞排”现象。陈发景等^[18]、朱芳冰等^[19]认为当泥岩厚度大于40 m时通常会形成滞排段。东营凹陷主力烃源岩层(沙三、沙四段)发育大套厚层泥岩,泥岩单层厚度通常大于50 m,其中,零星分布少量砂岩,烃源岩岩性结构主要为砂岩嵌入式、泥包砂及纯泥岩形式。同时,泥岩之间还夹有呈区域性分布的钙质泥岩及膏盐层。由于膏盐具有良好的韧性,可以成为良好的盖层,而钙质泥岩可能在排液压实过程中形成致密的“壳”,这些都为超压烃源岩体形成“封存箱”状态创造了条件。因此,东营凹陷烃源岩的岩性结构及区域性的分布特征也为幕式排烃提供了存在的空间条件。

3 驱动机制

郝芳等^[20]将地下流体的流动方式分为稳态和瞬态两种方式,稳态流指的是一种连续渗流过程,瞬态流指的是由于地层的破裂或断层、先存裂隙的突然开启引起地下流体突然开始快速流动并在短时间内终止的流动过程。幕式排烃作为一种超压盆地所具有的排烃方式,按照其定义属于一种瞬态流体流动方式。这种瞬态流是伴随着超压的积累和释放而产生的。超压封存“箱”的形成及演化是一个复杂的地球化学自组织过程^[21],它是一种在非平衡状态下矿物的成核、生长、增生、扩散、对流、溶解、沉淀和反应等过程与外界环境耦合的自组织现象,也是地下应力场、温度场、化学场、压力场综合作用的结果^[22]。超压体系是沉积盆地演化过程中不稳定的地质体。在超压体系内能量场时刻发生着变化,其内部流体也处于不平衡的流动状态,因此超压体系呈现不稳定-暂时稳定-不稳定演化方式。相对于超压体系外的地质体来说,超压体系可以在演化期间的某些时间处于相

对稳定状态,而这种相对稳定状态会受到内部能量场的变化及外界因素的影响而遭到破坏,具体表现方式是超压得到释放,能量暂时恢复均衡状态。

根据东营凹陷超压体系能量场的释放机制及方式,幕式排烃主要存在两种机制:一种是由于超压体系内部能量的积累,超过了其承受能力,从而超压体系的封闭层发生破裂,超压体系内部的“剩余”能量随裂缝或压裂面等得到释放,由于这种能量的释放方式与压力密切相关,故将其定义为“压力幕”方式。另一种是超压体系外部因素,主要是由于构造活动的影响,破坏了超压体系能量场的相对稳定状态,表现为超压体系内部的能量由于活动断裂等的卸压得到释放或转移,将其定义为“构造幕”方式。

“压力幕”来源于超压体系内的流体压裂,这种排烃方式的主要通道是水力破裂面或流体压裂面。大量研究成果表明,当超压体系内的流体压力超过一定的临界值时,就会形成微裂缝^[2,5,6,23],这在我国多个沉积盆地中得到体现^[9~12]。东营凹陷沙三段、沙四段高压致密钙质层的顶部附近发育大量垂直的微裂缝,是烃源岩幕式向上排烃的有力证据^[12]。刘晓峰等^[14]通过岩心和岩屑观察发现,超压带内泥岩与砂岩接触带多具水平或垂直的矿脉发育,并且埋藏越深越发育,这证明在超压带内水力破裂或流体压裂的裂隙式排液的普遍存在。

“构造幕”来源于构造活动对超压体系的破坏,其流体的排放方式主要是沿着断裂面迅速得到释放,或者沿着断裂活动引起的微裂隙等向外排出。断层的活动在流体运移过程中起着重要的作用。强烈的垂向构造运动可以使超压体系直接被断开,从而使油气沿垂向破裂面进行纵向运移。构造运动时期也可以形成强大的横向压力,一方面使超压体系形成褶皱,另一方面使超压体系中的孔隙流体压力急剧增高,在超压体系内的相对脆弱的构造高点产生张应力,导致裂缝和次级断层的形成。

阎福礼等^[24]将断裂活动对油气运移的控制作用看成是一种地震泵作用,并认为,东营凹陷复杂断块油气田中烃类的运移是构造稳定阶段流体势驱使的垂向运移和构造活动期地震泵作用驱使的垂向运移相互交替的运移过程。Sibson^[25]和 Hoop-

er^[26]及华保钦^[27]也都强调了活动断裂的这种地震泵作用。东营凹陷中生代强烈的燕山运动产生的北东向、北西向及东西向的三组基底断裂与渐新世东营末期的东营运动产生的大量的同生断层相沟通,构成超压系统的卸压渠道,也成为超压系统“构造幕”式排烃的重要通道。

4 地质地球化学特征

超压系统的幕式排烃具有一定的地质地球化学特征。笔者通过樊4井的计算,发现厚层泥岩靠近中部的超压体系内,排烃效率、烃指数并未按正常趋势相应减小和增大,相反排烃效率较上下层段呈明显增大,烃指数较上下层段明显减小(图1)。

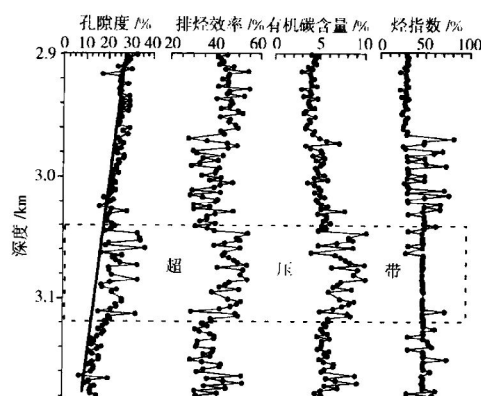


图1 樊4井发生幕式排烃作用的地质地球化学特征

Fig.1 Geological and geochemical features of episodic hydrocarbon expulsion in Fan-4 well

樊4井处于东营凹陷南部博兴洼陷的较深位置,于2 900~3 430 m井段发育大套泥岩,其中零星分布呈嵌入式薄层砂岩(多为0.5 m左右)。从该井段烃源岩的地球化学特征可以看出厚层泥岩的排烃特点,在靠近上覆储层的2 900~2 950 m内(2 860~2 890 m为砂岩段),泥岩孔隙度按压实规律减小,残余有机碳含量较少,排烃效率较高,烃指数(S_1/Toc ,单位质量有机碳中所测得的可溶烃的多少,随排烃系数增大而减小)较小,并呈直线分布,反映烃源岩的压实排烃作用得到正常进行。而在远离储层的2 950~3 040 m内,孔隙度虽然呈减小趋势,但残余有机碳含量呈升高趋势,排烃效率明显减小,烃指数呈现较高的波动状态,反映了向烃源岩内部,烃类的排出受到了一定阻碍。在

3 040 ~ 3 120 m内,其孔隙度的变化特征反映出此井段为异常超压带,厚层烃源岩排烃的这种非均质现象在其内得到更好体现。在该段内孔隙度明显偏离正常趋势线而增大,反映烃源岩的压实作用受到了严重阻碍,呈现欠压实状态。然而该井段内的排烃效率明显较上、下井段增大,烃指数也呈现直线分布,烃类并未呈现相对“滞排”现象,说明该欠压实段内在演化历史期间出现的“滞排”烃已经得到释放,并且能够反映该超压体系在盆地演化期间发生过幕式排烃。在幕式排烃时系统呈现开放性质,因此使得其排烃效率较上下层段增大,烃指数呈直线分布。但从孔隙度、有机碳含量及单位岩石排烃量异常增大情况看,其压裂状态现已闭合,整个系统呈现封存箱形式。

该超压段内地球化学参数变化也表明,超压带内这种幕式排烃与生烃作用造成的压裂有着密切的关系。Hedberg^[28]、Luo^[29]、解习农^[7]等学者都强调了生烃作用造成的流体压裂现象。根据王新洲对济阳坳陷沉积压实阶段的划分^[30],3 000 ~ 5 000 m属于气液压裂带,此时烃类的生成对压裂起了主要作用。该井段属于有机碳高含量井段(平均含量达到7.4%),而根据对该井段烃源岩成熟度的推算, R_o 大于5.5%,表明该超压体系中有有机质已经成熟,并达到大量排烃阶段。因此,在这种有机碳含量高的封闭系统内,当有机质成熟并达到大量排烃阶段时,生成的大量烃类增加了孔隙流体压力,当其突破围岩的抗张或抗压强度时,围岩发生破裂,烃类排出。当系统内的流体压力得到释放后,围岩就会闭合,系统再次呈现超压状态,之后进行下一次循环。伴随着系统内超压的积累和释放,烃源岩的排烃呈现间歇性的幕式特征。

5 勘探意义

东营凹陷的幕式排烃特征,具有重要的勘探意义。由于幕式成藏具有异常高的成藏速率,根据传统的缓慢渗流聚集模式难以形成商业性油气聚集的年轻圈闭在幕式成藏情况下可形成大-中型油气藏,从而成为有效的勘探目标。幕式排烃具有较稳态下排烃时更高的能量,这些能量能够促使油气发生远距离运移,或者进入稳态条件下无法进入的隐蔽圈闭内。超压体系构成准封闭的超压封存箱型自源油气成藏动力学系统,同时也

可以通过幕式排放为浅层的新近系、第四系及古近系的沙三上亚段至东营组常压开放性他源油气成藏动力学系统提供油源及成藏动力^[31]。断裂是超压体系卸压的重要渠道,也是幕式排放的主要途径,因此与断裂沟通的砂岩体及构造背斜等是有利的勘探目标,超压泥岩体周围的透镜状砂体是隐蔽油气藏的潜在目标^[31,32]。因此东营凹陷烃源岩幕式排烃现象的证实为进一步拓展隐蔽油气藏的开发以及新的油气勘探思路产生一定影响。

参 考 文 献

- Magara K. Mechanisms of natural fracturing in a sedimentary basin [J]. AAPG Bull, 1981, 65: 23 ~ 132
- Hunt J. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bull, 1990, 74: 1 ~ 12
- Capuano R M. Evidence of fluid flow in microfractures in geopressed shales [J]. AAPG Bull, 1993, 77: 1 304 ~ 1 314
- Cartwright J A. Episodic basin - wide fluid expulsion from geopressed shale sequences in the North Sea basin [J]. Geology, 1994, 22: 447 ~ 450
- Roberts S J, Nunn J A. Episodic fluid expulsion from geopressed sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 195 ~ 204
- Xie Xinong, Wang Chiyuen. Numerical modeling of episodic compaction and its affecting parameters in geopressed shales [J]. Journal of China University of Geosciences, 1997, 8(2): 128 ~ 132
- 解习农, 刘晓峰, 胡祥云, 等. 超压盆地中泥岩的流体压裂与幕式排烃作用 [J]. 地质科技情报, 1998, 17(4): 59 ~ 64
- 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压体系演化、流体流动与成藏机理 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 80 ~ 83
- 张金功, 王定一, 邸世祥, 等. 异常超压带内开启泥岩裂隙的分布与油气初次运移 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(1): 27 ~ 31
- 李捷, 王海云. 松辽盆地古龙凹陷青山口组泥岩异常高压与裂缝的关系 [J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(2): 138 ~ 145
- 慈兴华, 冀登武, 陈汉林, 等. 济阳凹陷四扣洼陷泥质岩裂缝储层预测研究 [J]. 高校地质学报, 2002, 8(1): 96 ~ 104
- 查明, 曲江秀, 张卫海. 异常高压与油气成藏机理 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 19 ~ 23
- 朱光有, 金强, 周建林, 等. 渤海湾盆地东营凹陷盆地充填模式研究 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 143 ~ 152
- 刘晓峰, 解习农. 东营凹陷流体压力系统研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(1): 78 ~ 85
- 解习农, 刘晓峰. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2): 103 ~ 107
- 胡济世. 异常高压、流体压裂与油气运移 [J]. 石油勘探与开发, 1989, 3(2): 16 ~ 23
- 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11 ~ 17

(下转第454页)

中、高渗透的沙一、沙二上¹油藏,选择Ⅱ类油层分布区,重新建立局部的注采井网,主力层尽快展开三采工作,提高采收率。

沙二上²⁺³油藏应加强厚层层内非均质精细描述及剩余油分布规律研究,以细划流动单元为基础,挖潜厚油层内部夹层遮挡形成的剩余油,同时规模调驱提高采收率。

沙二上⁴⁻⁷油藏应攻关研究低渗油藏剩余油识别及精确解释,重建与恢复西区、南区注采系统,利用分注及分层改造手段强化提高二、三类层水驱动用程度。沙二下及文51块应细化沉积微相研究,重建西区注采系统,重点挖潜断层滞留区及岩性相变带剩余油,由“分注合采”向“分注分采”过渡。

沙三段主要是重建注采系统,应用压裂改造与高压分注等工艺技术手段提高二、三类层水驱动用程度^[11]。

外围油藏应加强复杂断块构造精细解释,搞好滚动扩边增储、注采完善配套工作,对层间差异极大的文90、卫79、濮98等油藏细分开发层系,利用大砂比压裂技术提高特低渗层动用程度;应加强濮138、卫79-濮95沙河街组四段等难采储量评价,尽快投入动用接替。

5 效果

2002~2003年,实施了沙二下、沙三上⁵⁻¹⁰等5个油藏的调整治理方案,已取得较好效果。方案实施后,日产油增加129 t,综合含水下降0.7个百分点,

水驱控制程度提高10.1%,水驱动用程度提高10.8个百分点;产量自然递减和综合递减分别减缓9.3%和8.0%。

致谢:中原油田分公司勘探开发科学研究院的毛立华高级工程师、中国石化石油勘探开发研究院的赵庆飞工程师参与了研究工作,一并表示谢意。

参 考 文 献

- 纪永亮,赵澄林,刘孟慧.东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用与有机质演化的关系[J].石油与天然气地质,1995,16(2):148~154
- 张洪安,李继东.白庙构造油气成藏特征[J].石油与天然气地质,2003,24(1):45~49
- 冯建辉,谈玉明,罗小平,等.东濮凹陷白庙构造油气源与成藏史[J].石油与天然气地质,2003,24(2):130~135
- 王生朗,任来义,王洪斌,等.桥口构造沙三段气藏特征及其控制因素[J].石油与天然气地质,2002,23(2):186~199
- 韩大匡,万仁溥.多层砂岩油藏开发模式[M].北京:石油工业出版社,1999
- 李胜利,于兴河,高兴军,等.剩余油分布研究新方法——灰色关联法[J].石油与天然气地质,2003,24(2):175~179
- 胥菊珍,张孝义,张虹,等.东濮凹陷北部古近系与盐岩有关的油气藏类型[J].石油与天然气地质,2003,24(2):152~156
- 杨香华,陈开远,石万忠,等.东濮凹陷盐湖层序结构与隐蔽油气藏[J].石油与天然气地质,2002,23(2):139~142
- 陈元千,李肇.实用油气藏工程方法[M].北京:石油大学出版社,2004
- 陈元千.双曲线递减的简化及确定可采储量的截距法[J].天然气工业,1994,14(4):32~37
- 马新华.卢部寨地区沙河街组三段储层裂缝特征[J].石油与天然气地质,1996,17(1):48~52
- 陈发景,田世澄.压实与油气运移[M].武汉:中国地质大学出版社,1989.63~95
- 朱芳冰,田世澄.莺歌海盆地泥岩压实特征与油气初次排运[J].中国海上油气(地质),1998,12(5):307~311
- 郝芳,邹华耀,杨旭升,等.油气幕式成藏及其驱动机制和识别标志[J].地质科学,2003,38(3):403~412
- 梁卫,郭建华,曾凡刚.地学研究中的新思维——油气储层中的地球化学自组织[J].石油与天然气地质,1994,15(4):350~355
- 陈中红,查明,曲江秀.沉积盆地超压体系油气成藏条件及机理[J].天然气地球科学,2003,14(2):97~102
- Du Rouchets J. Stress field: a key to oil migration[J]. AAPG Bull, 1981,65(2):74~85
- 阎福礼,贾东,卢华复,等.东营凹陷油气运移的地震泵作用[J].石油与天然气地质,1999,20(4):295~298
- Hooper E D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 4(2):161~180
- Sibson R H. Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism[J]. Journal of Geology Science, 1975, (6):653~660
- 华保钦.构造应力场、地震泵和油气运移[J].沉积学报,1995,13(2):77~85
- Hedberg H D. Relationship of methane generation to undercompacted shales, shales diapirs and mud volcanics[J]. AAPG Bull, 1974, 58(4):661~679
- Luo Xiaorong, Vasseur G. Geopressuring mechanism of organic matter cracking: numerical modeling[J]. AAPG Bull, 1996, 80(6):856~874
- 王新洲,宋一涛,王学军.石油成因与排油物理模拟——方法、机理及应用[M].山东东营:石油大学出版社,1996.50~100
- 陈中红,查明.东营凹陷烃源岩超压体系特征及勘探意义[J].大庆石油勘探与开发,2004,23(3):11~13
- 曾戮辉,郑和荣,王宁.东营凹陷岩性油气藏成藏动力学特征[J].石油与天然气地质,1998,19(4):326~329

(上接第447页)