

辽河盆地西部凹陷未熟油的成藏条件

王 辉

(中石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

摘 要: 钻探结果表明,在辽河盆地西部凹陷北部及中南部沙河街组四段、三段中浅层储层中均见到了一定数量的未熟原油,探明储量也很可观。从原油生成、运移聚集成藏特征等几个方面进行了较为详细地分析。认为未熟油在成藏的整个过程中,主要受到源岩沉积环境、运移通道及构造活动所控制,是特定条件下的产物,其成藏规模受未熟源岩的排烃数量以及储集岩体物性条件所制约,与成熟油藏比较,既有相似之处又有一定的差异性。随着油区勘探程度的提高和研究的不断深入,岩性构造型未熟油藏才逐步被人们所认识。因此,开展此项研究无疑对拓宽油气勘探领域具有一定的指导意义。

关键词: 未熟油;成熟油;成熟度;甾萜烷;湖湾亚相;浊积扇砂体

中图分类号: TE122

文献标识码: A

未熟石油(immature oil),是一个与干酪根晚期成油理论中成熟油相对的概念,与低熟油没有根本性的差别,都是沉积岩中可溶有机质在其成烃演化达到干酪根热降解成烃门槛之前所生成的石油,其烃源岩的镜煤反射率(R_o)为 $0.3\% \sim 0.6\%$ ^[1]。未熟油具有低的源岩演化程度和不同于成熟油的有机地球化学特征^[2],国内学者常将其归成一类加以研究。未熟油是烃源岩中某些特定的有机质在低温条件下,通过生物化学反应生成并释放的液态烃,与经过干酪根热降解生成的成熟石油在生成的环境上存在差异性。国外学者认为源岩有机质中由细菌和浮游植物产生出的树脂—沥青质可溶络合物是液态烃的主要生源^[3]。目前,这类石油在国内渤海湾、江汉、苏北等诸多盆地相继被发现,模拟实验也证实未成熟—低成熟石油可以通过可溶有机质早期转化形成^[4],说明未熟油的生成相对成熟油而言无需经历较高的热演化过程。从成藏的角度看,岩性构造型未熟油

藏的形成,在成藏机理上应该同成熟油藏一致,没有本质上的不同。虽然,未熟油的生成与岩石沉积物中原始有机质的性质、富集条件以及早期向烃类物质转化的现象^[5]是分不开的,但其生成条件及成藏条件要较成熟油更为严格,因此,基于石油地质学基础理论研究出发,在生烃、排烃和运聚成藏几个方面对辽河盆地西部凹陷未熟油的成藏条件进行了探讨。

1 未熟油的分布

新生界是未熟油(气)分布的主要层系,这与未熟油形成早、深度浅、演化程度低有关^[1]。目前,辽河盆地所发现的未熟油主要集中分布在西部凹陷北部地区,这类油藏普遍埋深较浅,在 $1\,300 \sim 2\,700\text{ m}$ 之间,在牛心坨油田(张1块)、高81块、高升—雷家地区均能见到单一的未熟油藏,而位于中南部的冷东、曙光、大洼、马圈子一些地区等也能零星见有未熟油,但大多伴随成熟油产出。

1.1 未熟油特征

原油物性分析发现,未熟油密度($\rho_{20\text{ }^\circ\text{C}}$)普

收稿日期:2012-10-20

作者简介:王 辉(1960—),男,工程师,主要从事油气地质、地球化学方面的工作。E-mail:457787202@qq.com

遍要高于成熟油(原油均未遭受任何生物降解),在 $0.88 \sim 0.97 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ 之间,而且具有较高的胶质+沥青质含量,一般都超过 25%,高者甚至达到 50% 以上(如坨 5 井为 49.02%、雷 39 井为 53.24%)。原油中含硫量较低,为 $<0.4\%$,含蜡量在 $3.44\% \sim 14.74\%$ 之间。原油饱和烃色谱特征显示,未熟油正构烷烃谱峰形态多呈现双峰型,前峰为 $n\text{C}17$,后峰为 $n\text{C}23$ 或 $n\text{C}25$,奇偶优势明显,是低熟原油的典型特征。主峰碳数主要与有机质的生源组成有关^[6],姥鲛烷同植烷比值(Pr/Ph)一般 <1.1 ,说明未熟油形成于较强的还原环境。

生物标志物是地质体中保留和继承了原始有机质中生物骨架特征的有机化合物,具有继承效应的低熟油富含丰富的生物标志物^[2]。一般在浅层未成熟石油中环烷芳香烃^[6]甾萜类化合物、胶质+沥青质都比较丰富^[7],未熟油通常很重、多环、富含芳香族化合物和高分子杂原子化合物^[2],各种分子结构参数表明,低熟原油中脂肪碳与芳香碳之比总是低于成熟原油^[8]。

1.2 未熟油成熟度

利用生物标志物异构体的变化和异构化参数能够很好地判断原油的成熟度。从原油饱和烃色谱、色谱—质谱分析检测看出:未熟油姥植比(Pr/Ph)一般较低;正构烷烃谱峰形态呈双峰型特征, $n\text{C}23$ 以后正构烷烃奇偶优势明显;甾萜中 γ -蜡烷/ $\text{C}30$ 藿烷比值多数在 0.2 以上,但未熟油的甾萜烷成熟度指标普遍低于成熟油(图 1), $\text{C}_{29}20\text{S}/20(\text{S}+\text{R})$ 比值 <0.32 , $\text{C}_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta) < 0.26$, Ts/Tm 比值 <0.5 。所以, C_{29} 甾萜烷立体异构化参数是定量判识原有成熟度的有效指标^[9]。另外,在未熟油中均检测到丰度较高的 $13\alpha14\alpha$ 三环甾萜烷和 $8\alpha(\text{H})$ 升补身烷,以上生物指纹信息和色谱特征反映出未熟油的生成环境、热演化程度均有别于成熟油,较咸化的水介质条件、较强的还原环境及菌藻类等低等水生生物输入是影响源岩中有机质向未熟油转化的主导因素,低温演化是未熟油生成的主要特点。

高升雷家地区未熟油虽然都源于沙四段湖湾亚相油源岩,但不同区块原油的成熟度有所差异。

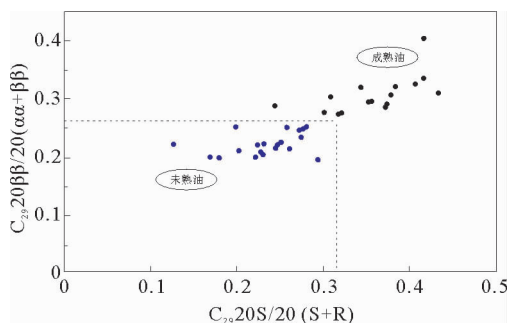


图 1 辽河盆地西部凹陷原油甾萜烷异构化参数关系

Fig. 1 Diagram showing the relation of sterane isomerization parameters, West Depression of Liaohe Basin

高一区高升油层段高部位原油的甾萜烷异构化指标 $\text{C}_{29}20\text{S}/20(\text{S}+\text{R})$ 比值为 $0.20 \sim 0.21$;而埋深较深的低部位杜家台油层段原油成熟度相对较高,甾萜烷异构化指标一般为 $0.26 \sim 0.31$;沙三段莲花砂体中未熟油成熟度指标与低部位杜家台油层段相似,尽管高二、三区莲花油层埋深相对较浅,但原油成熟度与杜家台油层段原油的成熟度基本相当。

1.3 未熟油源岩特征

生油岩中有机质丰度的高低不仅决定了向石油转化的数量,而且是油(气)形成的物质基础^[10]。源岩中有机质富集程度同其沉积环境密切相关。根据前人研究,认为辽河盆地西部凹陷存在 3 套生油岩,即沙四段、沙三段和沙一+沙二段,其中沙四段源岩有机质丰度各项指标最高(表 1),与国内陆相生油岩划分标准比较,大多达到极好生油岩的标准,通过油源对比分析已经证实沙四段生油岩是该凹陷主力油源岩,同时也是未熟油的主要贡献者。该类源岩沉积一般为封闭—半封闭咸化水介质条件下的湖湾环境,其次是半深湖—深湖相环境,岩性以白云质泥岩、泥质白云岩、钙质页岩等碳酸盐岩为主,干酪根类型多为 I 型—II A 型,显微组分中以菌藻类低等水生生物的输入成分最高。这些源岩中湖湾亚相生油岩有机质丰度值整体上明显要优于一般的湖相泥岩,说明不同相带源岩的丰度值也存在明显差异性。

表 1 辽河盆地西部凹陷生油岩有机质丰度统计

Table 1 Abundance of organic matters in source rocks, West Depression of Liaohe Basin

层位	有机碳含量 /%	氯仿沥青“A” 含量/%	总烃含量 /10 ⁻⁶
东营组	1.07	0.021 9	60
沙一十沙二段	1.85	0.110 3	358
沙三段	1.99	0.137 5	700
沙四段	2.83	0.216 7	1 142

2 未熟油藏基本特征

辽河盆地西部凹陷未熟油藏的基本特征(表 2)可以归纳为以下几个方面:

(1)埋深较浅,一般<2 500 m,少数埋深超过 2 500 m,岩性构造和构造岩性油藏占有较大比

例,一般裂缝性圈闭是未熟油聚集的有效场所;

(2)紧邻生油层,与优质生油岩相关联,如沙四段、沙三段源岩,该类生油岩不仅有有机质丰度高,而且类型好,是未熟油藏形成的物质基础;

(3)未熟油藏的形成大多与构造回返有关,如牛心坨、高升、曙光地区及冷东断裂带等,从构造发育史上来看都曾有过较为明显的地层抬升;

(4)储集层岩性控制了未熟油成藏的规模。实测结果表明,高升地区杜家台油层储集岩(白云岩体)孔隙度一般在 5%~10%之间,渗透率一般<1×10⁻³ μm²,而莲花油层储集岩(浊积砂体)孔隙度一般在 20%~30%之间,渗透率大多高于 1 μm²,相比之下,砂岩层的储集性能及输导能力要明显优于白云岩层,尽管白云岩、白云质泥岩能够捕获一定数量的未熟油,但受裂缝发育及非均质性影响,其疏导能力有限,相反莲花浊积砂体却弥补了这一缺陷。

表 2 辽河盆地西部凹陷未熟油藏基本地质特征

Table 2 Basic geological characteristics of immature oil, West Depression of Liaohe Basin

区块	埋深/m	层位	油藏类型	沉积相带	油源岩	储集层
张 1 块	1 500~2 500	S4Ar	岩性构造	冲积扇、扇三角洲		冲积扇、扇三角洲砂体、太古界潜山
高 81 块	1 800~1 950	S4	岩性构造	缓坡扇三角洲前缘	沙四段湖	扇三角洲砂体
高 1 区	1 300~1 400	S4	岩性构造	滨岸粒屑滩	湾亚相泥岩	粒屑灰岩体
高 2、3 区	1 500~1 800	S3	岩性构造	浊积扇		浊积扇砂体
雷家	2 100~2 800	S4	岩性、断块构造	白云岩		泥质白云岩体
冷东断裂带	1 800~2 500	S3	岩性构造	陡坡浊积扇	沙三段湖相泥岩	浊积扇砂体

3 未熟油成藏条件

沉积盆地内可供勘探和开发的油气资源,就其本身而言是油气生成—运移—聚集共同作用的结果。从成藏的角度看,未熟油成藏与成熟油成藏没有本质上的区别,但在成藏的各个环节上各自所处的地质及地球化学环境有所不同,因此,两者具有不同的规律性。

3.1 生烃条件

源岩有机质生烃(油、气)自始至终贯穿于热演化的全过程中,未熟阶段生烃是未熟油藏成藏

的基本条件。国外学者 Lane Jackson^[2]在 1980 年就提出了当干酪根尚处于未熟—低熟热演化阶段时,树脂体可能在低温条件下率先早期生烃的观点。国内曾对盐湖、半咸水及淡水湖相烃源岩进行了生烃模拟实验,结果表明,3 种沉积环境下的未熟或低熟烃源岩在低温(≤350 ℃)低压(≤20 MPa)都可以生成未熟、低熟油气^[1]。低熟条件下的源岩要形成丰富的油气,则要求源岩具有较高的有机质丰度和易于在低熟演化阶段生烃的有机母质^[4]。说明西部凹陷沙四段生油岩具备了在沉积—成岩作用阶段早期生烃^[9]的优势。一般认为有机质在细菌的作用下,可以通过脂肪酸的去羧基、不饱和烃的加氢和氨基酸的还原去氨等

作用转化形成烃类,还有人认为未熟油的形成过程是多机制的多种物理化学因素共同作用的结果^[2]。

3.2 排烃条件

生油岩中有机质转化成的烃类物质只有在在其有效排出后才有可能聚集成藏。生油岩在埋藏受热过程中所对应的不同演化阶段,它的生、排烃强度及油气之间的相对数量明显不同。一般来说,地层负荷压力是促使生油岩排烃的重要驱动力,这种压力(或压差)本身则作用在生油岩体和储集岩体之间。另外,生油岩有机质丰度高低也直接影响到它的生、排烃量,与成熟阶段排出的液态烃比较,尽管未熟阶段所排出液态烃规模远不如后一阶段,但未熟油生成与排出毕竟经历了地史条件下这样一个低温受热的过程,在条件适宜的情况下,仍能够排出一定数量的液态烃,并由生油层向储集层发生初次运移。

辽河盆地西部凹陷未熟生油岩排烃概括起来主要存在3种形式:①沥青汇聚成纹层状发生排烃;②黏土微层与碳酸盐岩微层的岩性界面汇聚沥青发生排烃;③有重力流砂体伴生的淡水半深湖—深湖相未熟生油岩在砂泥岩薄互层条件下排烃。

3.3 成藏条件

未熟油成藏,源岩排烃是控制的关键环节,未熟(或低熟)生油岩排烃对源岩有机质丰度、类型及岩性组合均有特殊的要求。由于未熟油原始能量较低,反映出的运移距离相对成熟油要短,疏导层(或运载层)控制了未熟油的成藏趋向和成藏规模,其优质源岩体与临近本身砂岩体组合是未熟油运聚成藏的最佳组合。构造抬升能有效促进未熟烃源岩排烃,一般来说,构造的抬升部位是未熟油二次运移的有利指向,地层抬升是未熟油成藏的重要条件。另外,构造对油气的富集也具有积极的作用^[11],生—储层二者之间的地层接触关系决定了烃源岩排出的油气能否被有效地捕获^[12]。如高升油田位于西部凹陷西斜坡北部,构造格局总体为一个由NW向SE方向倾没的鼻状构造。在这个背景下,沙四段高升油层、杜家台油层及沙三段莲花油层就构成了高升油田未熟油藏

的主体。

油源对比研究表明,高升、杜家台及莲花油层的未熟油均来自于沙四段湖湾亚相未熟油源岩,但由于构造岩相带不同,3类油藏的规模及分布有所差异。高升—雷家地区的高升和杜家台油层段普遍见到油气显示,说明曾发生过广泛的油(气)运移,那么古隆起区和斜坡带就很可能成为未熟油聚集的有利场所,特别是处于斜坡部位或低突起带的白云岩相能够优先捕获到未熟油,并通过与源岩相通的裂缝、断层作为通道,将其大量运入相邻的莲花浊积砂体中。由于古隆起区高升油层段具备未熟油运聚的有利条件,故得以捕获沙四段未熟油而成藏。早期开启的断层提供运移通道,晚期断层转为封闭形成遮挡,最终为未熟油成藏创造了条件。

4 结论与建议

通过未熟油成藏条件的综合分析,基本上已经确定了辽河盆地西部凹陷北部及中南部沙河街组四段、三段高升、杜家台及莲花油层存在未成熟油藏。研究表明,这类油藏具有独特的自身特征,首先,它的埋深较浅(一般 $<2\ 500\text{ m}$),其形成期大多与晚期构造回返、地层抬升有关;其次是临近油源区或油源层,石油聚集成藏能够借助断层、裂缝等通道不需要经过垂向或横向上长距离运移。另外,油源对比也证实了未熟油成熟度不高与未熟源岩(R_o 值 $<0.5\%$)具有密切的亲源关系,沙四段湖湾亚相源岩(有机质丰度高、类型好)是这类原油的直接贡献者。由于未熟油藏的形成要较正常的成熟油藏更为苛刻,与成熟油藏比较,既存在相似之处又有一定的差异性,成藏规模容易受到未熟源岩排烃数量以及储集岩体物性条件等各种复杂地质条件等多种因素的控制和制约。因此,搞清原油生成、运移的路径和储集层的优劣,对寻找此类非常规油藏具有一定的实际意义。建议在下步油气勘探工作中,加深对非常规油藏(如未熟油藏、页岩油藏)的形成机理研究,深入挖掘临近生油洼陷周边的浅层目标,相信未熟油藏在今后的不断地被发现,为辽河油田产量和储量的双增长提供新的亮点。

参考文献:

[1] 黄第藩. 中国未熟石油成藏机制和成藏条件[M]. 北京:石油工业出版社,2003:3-11,321,395-416.

[2] 刘文汇、黄第藩. 成烃理论的发展及国外未熟—低熟油气的分布与研究现状[J]. 天然气地球科学,1999,10(1/2):1-19.

[3] О. к. важенова, 史 斗, 译. 未熟油的早期生成及其条件[J]. 天然气地球科学,1999,10(1/2):37-41.

[4] 夏燕青,周凤英. 柴达木盆地未成熟—低成熟油形成实验模拟[J]. 天然气地球科学,1999,10(1/2):31-36.

[5] 石油勘探开发科学研究院地质研究所. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1982:88-97.

[6] 王启军、陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988:108-117.

[7] Tissot B P. Welte D H. Petroleum formation and occurrence. New York;Springer-verlag Berlin Heidelberg;1978. Immature Oil Accumulations in the West Depression of Liaohe Basin

[8] 王敏芳. 中国沉积盆地低熟油气形成机理与分布规律[J]. 江苏地质,2004,28(1):7-10.

[9] 侯读杰,曾凡刚. 低熟油气成因理论与勘探实践[J]. 勘探家,1997,2(3):5-8.

[10] 陈 荣. 滦潼凹陷低熟油生物标记物特征及成因机理探讨[J]. 内蒙古石油化工,2010(13):140-144.

[11] 王书宝,钟建华,王培俊. 东营凹陷中央构造带东部沙一段油气藏成藏规律研究[J]. 特种油气藏,2008,13(4):39-43.

[12] 刘 明,刘广东,王庆文,等. 大民屯静安堡西侧低潜山油气运移规律初探[J]. 特种油气藏,2012,9(z1):17-19.

IMMATURE OIL ACCUMULATIONS IN THE WEST DEPRESSION OF LIAOHE BASIN

WANG Hui

(Exploration and Development Research Institute, Liao Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China)

Abstract:Drilling results have revealed the occurrence of immature crude oil in the shallow reservoirs of the 3rd and 4th members of Shahejie Formation in the Western Depression of Liaohe basin. Proved reserves are impressive. We studied in this paper the process of oil generation,migration and accumulation, and believed that the formation of immature oil requires a specific combination of depositional environment of source rocks,availability of migration channels and tectonic activities. The scale of the accumulation depends upon the constraints of hydrocarbon from source rocks and the physical properties of the reservoir rocks. Compared with the mature accumulation, there are both similarities and differences. With the improvement of exploration technology, more lithology and structure controlled immature accumulations have been recognized. Further study of the oil accumulation of this type will doubtlessly broaden the scope of oil and gas exploration in the basin.

Key words: immature oil; mature oil; maturity; sterane and terpane; lake-bay subfacies; turbidite fan sand