

油藏开发地球化学技术研究的新动态

——石油开采过程的地球化学*

侯读杰^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室江汉石油学院研究室; 湖北荆州 434102;

2. 江汉石油学院分析测试研究中心, 湖北荆州 434102)

摘要: 对注水开发的油田, 由于向油层内大量注水, 使地层原油粘度增加; 注入水在与原油接触时, 将溶解一部分地层原油中的轻质组分; 注入水使油水乳化。随着注水井开始注水, 造成地层的压力升高, 从而使原油中轻分子量化合物的含量增加, 原油的产量增加; 原油可以重新溶解蜡质, 使得原油的蜡含量升高; 一部分沉淀在大孔隙中的沥青质与一些可溶的沥青质松散地连接, 在注入水驱替的过程中, 也可以流出, 造成生产过程中沥青质含量的增加。火烧油层则与原油的化学组成密切相关: 饱和烃在火烧油层中首先燃烧, 在低温阶段释放出大量的热能, 影响火烧层的前沿面; 到了高温氧化阶段, 沥青质发生反应, 并释放大量的热能, 影响火烧油层的持续性。二氧化碳驱则可能导致沥青质从原油中分离并沉积在油藏中。

关键词: 地球化学; 油藏开发; 注入水; 火烧油层; 气驱

作者简介: 侯读杰, 男, 38 岁, 教授(博士), 石油地质化学

中图分类号: P59

文献标识码: A

油藏和开发地球化学因紧密地结合石油开发和生产, 能够解决开发过程中的实际问题而显示出旺盛的生命力^[1], 必将给油气田的勘探与开发带来显著的效益。目前油藏及开发地球化学在油气田勘探开发中主要应用于油田的评价及监测等领域^[1]。但笔者认为并不仅仅限于此, 随着今后研究工作的深入, 其研究领域将会进一步拓宽。

1 注水开发

在油田注水开发过程中, 由于注入水与地层原油长期接触, 引起原油性质发生变化。前苏联在谢尔盖耶夫油田 81 号井进行了饱和压力和气油比随含水变化规律的研究, 认为油水混合物的饱和压力和气油比随含水率的增加而降低。大庆石油管理局研究院对杏树岗油田南部和太平屯油田北部地区油井含水后地层原油性质的变化进行了测试, 也得出了类似的结论。

大庆石油管理局研究院对 25 口含水油井的样品进行了原油物性资料的对比分析^[2], 其结果表明:

(1) 饱和压力和气油比的下降幅度随含水量的增加

而增加(图 1), 这就意味着随原油含水量增加, 油中溶解的气体量降低; (2) 随原油含水量增加, 原油粘度增大, 流动性变差; (3) 注水后, 地层原油密度、含胶量明显增加; 甲烷含量、体积系数和溶解系数明显下降, 对原油中蜡质、沥青质含量有明显影响。

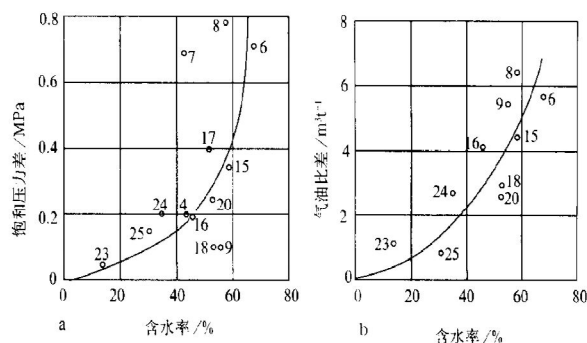


图 1 饱和压力差值(a)和气油比(b)与含水量的关系^[2]

Fig. 1 Relationship between saturated pressures (a), oil/gas ratios (b) and water contents

1.1 饱和压力

引起注水开发油田饱和压力变化的因素很多, 在原油性质大体相近的同一地区, 对饱和压力的影响主要是注入水。由于注入水与原油相互作用, 原油中的一部分轻质组分溶解于水, 使气油比和饱和压力下降; 水与原油相互作用使原油性质变差, 使油、气不易互溶, 因而使饱和压力上升; 随注入水进入的空气, 使原油发生氧化, 天然气中增加了氮气,

* 本文得到了中国石油天然气集团公司“九五”攻关项目“油气勘探中的油藏地球化学储备技术”的支持。

收稿日期: 2001-12-09

饱和压力上升。由于以上3个因素的相互影响,造成了原油含水后饱和压力变化的复杂性。原油含水后饱和压力下降、上升、还是维持不变,取决于上述3个因素的综合影响程度。

1.2 原油粘度

注水开发直接影响原油粘度,使地层原油粘度增加。例如大庆油田注入水温度一般为10~15℃,进入油层后因吸收油层热量,造成油层温度降低;注入水中溶解了一定数量的空气,在与原油接触过程中,空气中的氧使原油氧化,造成原油性质变差;注入水在与原油接触时,将溶解一部分轻质组分;注入水使油水乳化。所有这些因素,均造成地层原油粘度增加。

1.3 蜡质和沥青质

Whelan^[3]发现,在4年的原油原始开采(primary production)过程中,原油的汽油馏分化学组成发生了较大的改变,而Holba^[4]则报道在6年的原油原始开采过程中,汽油馏分的分子参数没有发生显著变化,Korneva则报道,在原油初次开采的12年中,蜡质、胶质、沥青质的含量均发生了较大的变化^{*}。由此可见,水驱油对原油蜡质和沥青质的影响程度众说纷云,笔者以Prairie Gem油田的研究为例^[5],进行简要的讨论。

Prairie Gem油田Paschall2井,1992年12月份开始采油,1993年12月份开始水驱,1994年11月份原油产量开始大幅增加(图2)。原油中的蜡含量和沥青质含量在开采过程中发生较大的变化(图3)。I号样品的蜡含量由18%升高到20%,然后逐渐降低到11%,开采后期又升高到33.8%。沥青质的含量变化趋势与之相反,由1.5%降到1.2%,再升高至5.2%,然后逐渐降低。产生这种变化的原因目前尚不完全清楚,但这种变化仍有一定的规律可循。该井在开采初期(1979年11月到1980年12月),原油压力从12.9 MPa降低到4.1 MPa,在以后开发的13年,油藏压力一直呈缓慢下降趋势,同时出现了一个比较小的气顶,说明油藏的压力低于泡点压力,从而造成气体溢出,使得油藏由单一的油相变为油气两相,降低了原油的渗透率。气体的溢出还造成了原油的密度和粘度增大,也造成原油对沥青质溶解度的增大,同时使得沥青质的浓度增加,在生产流动的过程中,岩石吸附沥青质的含量也会相

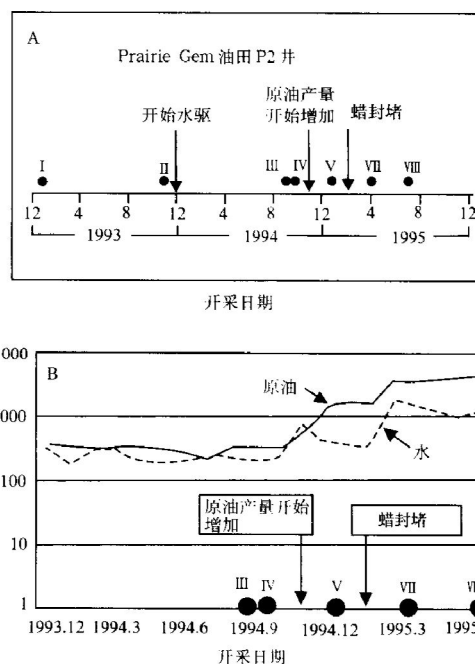


图2 采集原油的时间(A)及原油的产量(B)和出水量的关系^[5]

Fig. 2 Relationship between recovery time(A), production of oils(B) and water outting contents

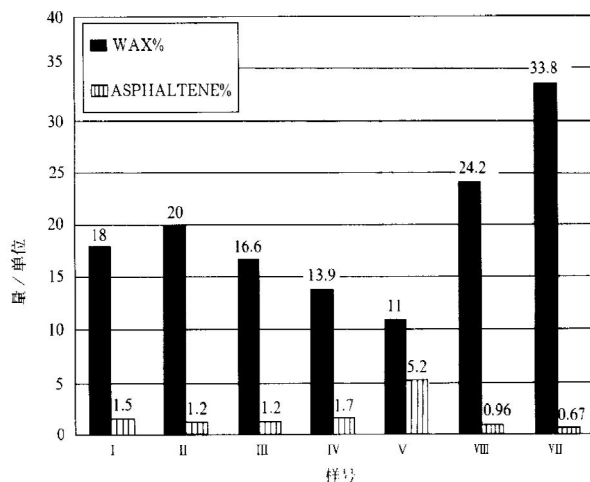


图3 原油生产过程中(从原始采油到水驱)原油的沥青质及蜡质含量的变化^[7]

Fig. 3 Variation of asphaltene and wax contents during recovery process of oils

应增加。随着这些气体的溢出,原油的粘度增大,采出原油的气油比增大,油藏的温度降低,致使原油对蜡质的溶解度变小,从而造成蜡质的沉淀(precipitation)。当注水井开始注水后,地层压力升高,从而使得原油中轻分子量化合物的含量增加,原油的产量增加,原油可以重新溶解蜡质,使得原油的蜡含量升高,同时,部分沉淀的沥青质分布在大空隙中,并与一些可溶的沥青质松散连接,在注入水驱替的过程中,也可以流出,造成生产

* Korneva T N, Abila E A, Guseva A N. Changes in oil composition during production. 1997

过程中沥青质含量的增加。另外,在储层孔隙中,存在一些粘土,它们可以吸附极性化合物而变成油性的,这些粘土很可能成为流体流动过程中的阻力,并不断吸附沥青质和高分子量的蜡质,随出水量增加,水的热容量(heat capacity)是原油的两倍。温度的升高增大了流体对蜡质和沥青质的溶解性。非烃(resins)在蜡质和沥青质的流动过程中也起了重要的作用,这是因为它们可以吸附蜡质和沥青质。

2 火烧油层

原地火烧油层技术(in situ combustion)不仅对重油,而且对正常原油都是一项有效的技术。它是通过在地下点燃原油,然后连续的注入空气使其燃烧,从而靠热力作用来提高原油采收率的一项技术。该技术的成功与否主要取决于原油和岩石性质以及操作条件。笔者在此重点讨论火烧油层对原油的族组成的影响。

原油在火烧过程中的演化行为可以用热失重(thermogravimetry, TG/DTG)来进行研究。

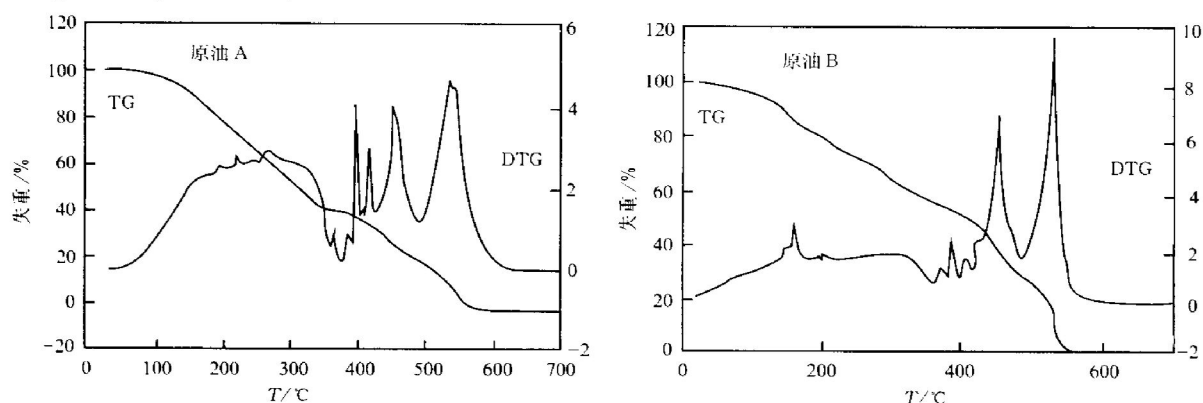


图 4 原油的热失重曲线

Fig. 4 Thermogravimetric curve of crude oils

不同族组分在火烧过程中的变化是完全不同的,其中饱和烃和芳烃为两个极端。饱和烃是原油中最轻的组分,沥青质是最重的组分。以原油 A 为例,饱和烃在低温演化阶段结束时,损失量达到 89.4% (包括分馏阶段)。脂肪烃的氧化稳定地发生在 300~390°C 区间。而在中温和高温阶段逐步变弱。沥青质在低温演化阶段重量几乎没有多少损失(损失量仅为 1.2%),在中温阶段,损失量达到 29.5%,主要的损失量在高温演化阶段。换言之,即沥青质主要是在高温氧化阶段发生反应,从而对火烧油层起作用。芳烃和非烃介于二者之间。

综上所述,饱和烃在火烧油层中首先燃烧,在

一般而言,原油的热演化行为可分为分馏阶段和氧化阶段^[3]。分馏阶段(distillation)温度范围大约从 25~300°C;氧化阶段原油的氧化行为可分为 3 个阶段:低温氧化阶段(LTO—low temperature oxidation)、中温氧化阶段(MTO—middle temperature oxidation)或者称为提供燃料阶段(fuel deposition)及高温氧化阶段(HTO—high temperature oxidation)。

从原油的热失重曲线中可以看出,原油 A 在 25~377°C,原油 B 在 25~367°C 为分馏和低温氧化阶段,DTG 曲线表现为一驮峰及 TG 曲线上急剧降低,原油 A 和 B 的损失分别为 60% 和 42% (图 4)。此阶段的化学反应为非均一化的反应,可以形成部分氧化的化合物,如醛、酮、醇等。应该注意的是,正常原油 A 较重油 B 开始低温化学演化的温度略低;同时重油 B 的损失量也较原油 A 低。在中温阶段,反应为均一化的气相,包括有裂解产物的氧化,形成的产物为下一步高温氧化提供燃料,热失重曲线 DTG 曲线上表现为峰幅较窄的尖峰。在高温氧化阶段,中温演化阶段的产物进一步氧化,并形成较大的热流值,提高原油的采收率。

低温阶段释放出大量的热能,此时,沥青质的作用是微不足道的,芳烃和非烃的作用中等;中温演化阶段,饱和烃的作用逐渐减弱,沥青质和芳烃开始发生作用;高温氧化阶段,沥青质发生反应,并释放大量的热能。考虑到地层的实际情况,饱和烃具有较早的和较高的反应活性(early reactivity, high reactivity),可以作为火烧油层的点火器(ignitor),从而影响着燃烧的前沿面(combustion front),沥青质组分影响着火烧油层的持续性,在高温氧化阶段,燃烧的热能主要是沥青质燃烧释放的。应该注意的是,在热力作用下,非烃和沥青质也可以形成部分饱和烃,从而影响火烧油层的二次燃烧过程。

3 二氧化碳驱

二氧化碳驱是一项比较经济的提高采收率 (enhanced oil recovery EOR) 的技术, 但是, 整个过程是相当复杂的。Hwang R J 对 Texas 西部的 McElroy 油田的研究表明^[6], 在进行二氧化碳驱之前, 原油当中包含大约 1% 的沥青质, 而在气驱之后的两个月, 沥青质的含量降低到 0.5%, 相当于原来的一半。这种结果说明在二氧化碳气驱过程中, 导致了沥青质从原油中分离并沉积在油藏中。另外, 在气驱之后, 某些原油中存在着大量的似沥青质的大块也证明了这一观点。由于二氧化碳和沥青质的不相溶性 (incompatibility), 因而二氧化碳不是一种沥青质的溶剂。在原油中存在着高分子量的芳烃和非烃, 沥青质就可以以胶状分散在原油中。这些高分子量的芳烃和非烃可以吸附沥青质, 从而充当沥青质的保护层。二氧化碳可以溶解到原油中从而打破原油中原有的平衡, 造成沥青质的聚集和沉淀, 二氧化碳在原油中溶解量的多少则与注气井的

位置和注气的压力有关。因而也可以利用沥青质含量变化的等值线图 (a contour map) 来确定注入气体的运移方向。

参 考 文 献

- 1 丘比特 J M, 英格兰 W A. 油藏地球化学[M]. 王铁冠, 张枝焕, 译. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 2 郑俊德, 张洪亮. 油气田开发与开采[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 3 Whelan J K, Kennicutt M C KK, Brooks J M, et al. Organic geochemical indicators of dynamic fluid flow processes in petroleum basins[J]. Org. Geochem, 1994, 22: 587~ 615
- 4 Holba A G, Dzou L I P, Hickey J J, et al. Reservoir geochemistry of South Pass 61 field, Gulf of Mexico: compositional heterogeneities reflecting filling history and biodegradation [J]. Org Geochem, 1996, 24: 1 179~ 1 198
- 5 Chouparova Elli, Philp R P. Geochemical monitoring of waxes and asphaltenes in oils produced during the transition from primary to secondary water flood recovery[J]. Org Geochem, 1998, 29(1~ 3): 449~ 461
- 6 Hwang R J, Ortiz J. Effect of CO₂ flood on geochemistry of McElroy oil [J]. Org Geochem, 1998, 29(1~ 3): 485~ 504

NEW DEVELOPMENTS ON GEOCHEMICAL TECHNIQUE OF OIL EXPLOIT: GEOCHEMISTRY OF OIL PRODUCTION

Hou Dujie

(1. Jiangnan Petroleum Institute Branch of The Key Lab. of Geochemistry, Jingzhou, Hubei;

2. Center of Analysis and Test, Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei)

Abstract: The physical and chemical properties of oil will change as oil production increases. Water flooding is a technique used most for oil production, the miscosity of oil increases because a lots of water enter into strata which contact with oil and bring some light crude oil components. At the same time, the water flooding will also cause emulsification of oil. As the water flooding increases, formation pressure will go up and lead to the enrichment of light components. As a result, the yield of oil also increases. The oil can also dissolve wax and cause the increase of wax content. Some asphaltene components in the pore which loosely contact with rock can be expelled during water flooding process. This increases the asphaltene content of oil production. Combustion is another important technique for heavy oil production. The combustion behavior is closely related to the SARA fraction of oil. Saturated hydrocarbon begin to burn first, release some energy in low temperature stage and affect the combustion front. In high temperature stage, asphaltene begin to react and release large amounts of heat, affect the succession of combustion bed. The third technique is CO₂ flood used in some oil fields. These processes will increase in oil API gravity with precipitation of heavy components from oil phase due to CO₂ injection.

Key Words: geochemistry; oil reservoir; development; water flooding; combustion oil horizon; gas drive