

早期深成作用成油模式

О. К. Баженова (俄罗斯)

摘要 以西北太平洋带盆地新生界泥质硅岩为例探讨了早期深成作用的成油条件和规模。

关键词 未熟油 早期深成作用 新生界 泥质硅岩

关于早期一原生烃成油观点早已被许多学者认同。目前争论的焦点仅在于“早期”生成的规模上,当然还包括“早期油”形成条件和能否形成工业油藏等问题。本文以西北太平洋带盆地新生界泥质硅岩层为例来探讨早期深成作用成油的条件和规模。位于早期深成作用带(尚未达到主要生油带成熟度水平的)那些层位,在空间上与所谓的未熟油有关。萨哈林、堪察加、加利福尼亚、东地中海和中国的一些盆地以及非洲尼日尔三角洲的许多石油皆属此类。从本质上讲,广泛分布的未熟凝析油气亦属此类,如加拿大边缘盆地——波弗特盆地和马更些盆地、新西兰的新生代盆地和哥伦比亚、澳大利亚、印度尼西亚的凝析油气。在上述产油盆地查明了未熟油、凝析油气与油源层有机质之间的成因关系,未熟油气和凝析油的成熟度符合早期演化阶段的镜质反射率($R_o=0.4\%\sim 0.6\%$)。有一些这类油藏赋存在生油岩层本身,也就是说,这种岩层是同生或自生层含油。

约翰·洛乌奇在对北美页岩层地质史和含油性分析基础上(并未采取有机地球化学方法),作出了油页岩自生及其早期深成作用成因的结论^[4]。北美伊戈尔堡、斯普拉别里、弗里奥、克里尔弗里构造的这类油是由未成熟的粘土岩生成的。上述构造岩层的特点是: $C_{\text{有机}}$ 丰度高(2%~10%);缺少自生氧化硅。

根据对现有资料的分析,笔者将未熟油分成两类。一类是:未熟油在成因上与正常的较深海相地层有关,这种地层含有细菌—植物成因有机质。堪察加、萨哈林和加利福尼亚的生物成因硅质沉积岩的油以及伏尔加—乌拉尔地区多马尼油页岩层的一些油皆属此类。第二类包括未熟油和凝析油气,其油源岩在成因上与陆相环境沉积有关,油源岩有机质中富含树脂体和壳质组。在以上两类石油中,有的含硫量很高。第一类油,例如圣玛利亚盆地蒙切列伊构造的油,其虽由海相有机质生成,但含硫量却很高。第二类油,例如中国东部盆地的一些高含硫的油,当属高含盐的湖相油。

所有未熟油的特征是富含树脂—沥青成分。未熟油基本上是重油。即就是较轻的未熟油,例如环东萨哈林岛的油,其所含的树脂—沥青也占到了24%。

萨哈林和堪察加的许多剖面表明,在深成作用早期(早期3级),油源岩层的同生沥青富含树脂—沥青成分,到了深成作用早期末,树脂—沥青才大量减少^[1~3]。显然,早期深成作用中的烃源基本上是树脂—沥青和同生沥青,也就是含杂元素(氧、硫、氮)的那些成分。由于生

物成因硅质岩内原始有机质在沉积盆地深水水柱中氧化的缘故,故这种有机质事先就含有杂元素,这是因为当浮游生物的细胞死亡、其中部分被溶解后,剩余的脂类首先被氧化并从硅质的贝壳骨架上脱离出来。如果原始有机质尚未从食物链上消失并部分牢固地与硅质贝壳连系在一起,那么其中的大部分就会遭到活动细菌的处理。这样,脂类部分基本上得以保存,而且还加进了细菌的脂质成分(首先是细胞膜)。

石油和氯仿抽提物中广泛存在萜烷和 T 状异戊二烯类烷烃就证实了细菌生物质在成油中的突出贡献。许多研究人员还发现了微生物有机质比藻类组、壳质组和其他微组分有机质的稳定性要差。这一结论已被高温热解实验所证实。实验是这样进行的,在脱沥青(弹性沥青)过程中,除了稳定的生物聚合物外,还加入了在化学上和热力学上稳定性较差的成分(300℃热解产物)。实验分馏物的主要结构特征在成因上与细菌有关,属于不饱和端 $\text{CH}_2=\text{CHR}^{[5]}$ 。

旨在查明未熟油各种化合物的直接母质的一项实验,即对东萨哈林油源层有机质各种分馏物的热解实验表明,这里的油是皮林戈组的沥青类烃,在成因上与干酪根无关,准确地说与深成作用早期中的干酪根构成成分无关。未熟油的形成首先依靠被溶解的富含酸性成分的树脂—沥青,而酸性成分则包容了大量的杂元素。在成岩作用中,视结构、分子量和包裹方式的不同,小部分杂元素进入有机质—沥青的被溶部分,大部分杂元素参加干酪根的形成并使干酪根的结构很松散^[2]。

硅质岩干酪根有时高含硫(例如萤光层的干酪根)。在个别地区,蒙特雷层的干酪根也高含硫。萨哈林和堪察加硅质层的干酪根不同于蒙特雷层的有机质,前者贫硫、贫氮而富氧。沥青质也富含氧,其中大部分在深成作用早期末已损失掉。很显然,在深成作用早期 3 级阶段,由于内脂键断裂、羰基团和羧基团的断开,已由沥青质生成了第一批烃。到深成作用早期末,氧的份额已降到了 8%~12%,于是, CH_2 和 CH_3 便脱颖而出。这一结论的证据是:(1)沥青质元素组成的变化;(2)结构的变化,与早期深成作用开始时相比,凝析油气组分的数量由 15%~20% 增加到 40%。

伊西瓦塔利及其同事以捷涅尔盆地(南加利福尼亚滨海部)的粘土—硅藻土泥为实验对象,证明了有机质的不同成分在生烃中的不同作用。伊西瓦塔利还研究了沉积物三次分馏、热解后的气态、液态和固态产物,包括脂质(苯—甲醇萃取物)、腐殖酸(强碱萃取物)和干酪根(在不同温度——150~440℃和不同时间——5~16 h 里加热)。对干酪根热解产物的分析表明,液态产物始产于干酪根的 H/C 值为 1.4 时,当 H/C 值达 0.9~0.95 时,液态产物最多。对液态产物组成元素分析表明,200℃加热 20 h 时,C 占 57.3%,H/C 值为 1.51。350℃加热 5 h 时的液态产出最大^[6]。业已查明,液态成分生成的活化能为 22.572 J/mol。这一数值大大低于 B·提索所做的由成熟的图阿尔斯克泥质板岩生成液态烃实验所取得的活化能数据(62.6 J/mol)。曾经发现,当 H/C 达 1.1 时,正构烷烃可以形成。随着 H/C 值的减小,正构烷烃的数量剧增。当 H/C 值为 0.8 时,生成的正构烷数量最大。当 H/C 值为 0.58 时。正构烷烃的数量超过了评价范围。

上述实验中的挥发份主要是水和二氧化碳,其次是甲烷和氢。在加热干酪根的开始阶段,仅仅释放出了水和二氧化碳,而水的数量总是超过了二氧化碳的数量,水占原始干酪根全部重量的 20%。

在该实验中,笔者还对生成物作了定量研究。当温度不高且元素组成变化是在 1.37~

1.07 这样一个加热范围,干酪根按下列百分比损耗:6.5%的干酪根变为液态产物,19%的变为气态产物,75%变为不溶残余物。温度为 200℃时,从脂质中产出的液态物最多,占 70%;260℃时,液态产物占 64%,当温度升至 310℃时,液态产物剧减,只占 10%。由腐殖酸生成的液态产物不多,只占 3%。在总的烷烃平衡中,脂质产出的烷烃占 3%,干酪根产出的烷烃占 41%,腐殖酸产出的占 0.4%。

捷涅尔盆地沉积物的例证说明了一些分馏作用。R·伊西瓦塔利及其同事的实验提供了早期成油模式,并把脂质分馏物的首要作用搞得很清楚。捷涅尔盆地的树脂—硅藻泥有机质在成因上与萨哈林、堪察加新生界硅岩层的原始有机质接近,萨哈林和堪察加新生界主要是硅藻土层。

笔者将萨哈林和堪察加的硅质岩层有机质各种分馏物组分资料与上述实验结果作了对比。对应分馏物元素组成变化的相似性可以使我们将实验中油的产出动力学与早期深成演化带流体生成作用过程做比较。实验中,油的最大产出率(70%~65%)出现在温度为 200~260℃时。当 H/C 和 O/C 分别为 1.05~1.01 和 0.17~0.16 时,该两值的温度分别对应深成作用早期 2 级到早期 3 级这一演化等级,也就是说,在这一演化阶段,脂质分馏生成了 70%的液态产物,其中大部分为油;为了产出挥发份 CO₂ 和水,类脂质要消耗自身 15%的质量。现已查明,正构烷烃始产于 H/C 值为 1.1 时,也就是说,为了类脂质分馏,该比值出现在温度高于 200℃以上。对于硅岩层来说,这一碳、氢原子比记录在早期成岩作用 2 级阶段,即晚于液态物产出高峰期。从这里可以看出,最初产出物不是正构烷烃。烃的最初分馏物基本上是环烷烃和异构烷烃,其真正的前身是具有等置换作用或抗置换作用的细菌类脂质的脂肪酸,还有浮游植物的脂肪酸。有利于这一假设的证据还有这样一个现象,即早期演化带同生沥青中富含环烷烃和异构烷烃。

这样,在早期演化中,产生流体的主源是树脂—沥青质(脂质)络合体,在形成挥发份过程中,这种络合体自身消耗掉了 15%;在形成液态物(主要是烃)时,这种络合物消耗 70%。而在同一演化阶段,用于成烃的干酪根总共才消耗了 5%~6%,生成挥发份时,干酪根消耗了 20%。这就是说,在早期深成作用阶段,成油的数量取决于原始有机质中类脂质的份额。

生油同时生成的大量挥发份——水和二氧化碳有助于从烃源直接生成新的油,也有助于其在油源层内运移。由有机质固态组分(干酪根和沥青质)生烃是分段进行的,同时还生成了液态杂原子—烃产物,这种产物照样也可生成液态烃和(或)在形成未熟沥青藏的同时,保持自己的结构不变。根据约翰·汉特的意见,全世界 40%的已知沥青藏形成于成岩作用期(深成作用早期)。

表 1 给出了油源层内不同丰度有机质和含沥青组分在早期演化阶段生油量的简单计算结果(表 1)。

在计算中,选取了两组岩石有机质丰度值。一组是 1%——符合粘土质煤岩类型的克拉克值,另一组是 5%——多马尼油页岩中有机质丰度值下限。含沥青馏分的含量分别取 20%、30%和 50%。有机质属第一组丰度值的十分常见,在极值条件下是已知的、且是较高的值。甚至在有机质丰度为 1%的情况下,我们仍在油源岩层得到一定的烃的丰度,而且我们还将其看成是具有较高生油潜势的油源层。当有机质的丰度为 5%、有机质沥青组分为 50%时,岩石中烃的重量则为 2%,体积为 4%。如此,在异常高压层条件下就可以出现工业油流。

表 1 不同丰度有机质和沥青生油量计算

	沥青		生烃 kg/t 岩石			1 吨岩石中的烃	
	在有机质中占 %	kg/t 岩石	含沥青络合物	不溶有机质	有机质	重量 %	体积 %
1/10	20	2	1.4	0.4	1.8	0.18	0.36
	30	3	2	0.3	2.3	0.23	0.46
	50	5	3.5	0.25	3.75	0.375	0.75
5/50	20	10	7	2	9	0.9	1.8
	30	15	10	1.5	11.5	1.15	2.30
	50	25	17.5	1.25	18.25	1.875	3.75

显然,在大多数含有中等丰度有机质的油源层里,油藏在油源层原地是不可能形成的。但是,在同类的油源层里,当 $C_{\text{有机}}$ 丰度为 1% 且其中的沥青组分占 25%,同时有机质的堆集系数为 0.5 时,为了达到同样的丰度,油源层组合的总体积应大于圈闭内油源层的 20 倍。当有机质丰度为 1%,有机质中沥青组分占 20%,在沥青组分中烃占 25%,且堆集系数为 0.5 (东萨哈林皮林戈组之值),为了形成一个地质储量为 1 000 t (油源层体积为 5 km³) 的油田,保证该储量的油源层体积应超过油藏岩层体积的 4 倍。

总之,在早期演化阶段,显著数量烃的生成或未熟油的生成发生在这样一些地层里,其内有机质本来就富含脂质(沥青)组分,而脂质又富含杂元素。在新生界硅质层,这是一种含有相当份额沥青组分的细菌—植物成因有机质,这种有机质所含的沥青组分是由浮游植物和细菌脂类形成的。不是所有的有机质都能生成“早期”油,只有在结构上具备“早期生成”前提条件的有机质,才会有此能力。当运移损失不大,即在储层附近运移时,早期演化油本身可以形成工业油藏。油源性和储集性兼而有之即自生油藏的形成是工业油藏形成的最佳环境。

参 考 文 献

- 1 Баженова О. К. Сингенетично-нефтеносные глинисто-кремнистые отложения. Успехи в развитии осадочно-миграционной теории нефтегазообразования. М:1983,220~225.
- 2 Баженова О. К., Арефьев О. А. Раннекатагенетические углеводороды и их роль в нефтеобразовании. Модели нефтегазообразования. М:1992,30~36.
- 3 Баженова О. К., Бурлин М. К. Исходное органическое вещество раннекатагенетических нефтей. Накопление и преобразование органического вещества современных и ископаемых осадков. М:1990,76~82.
- 4 Роуч Дж. у. Возможности образования залежей биогенной нефти. Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1987, (6):15~22.
- 5 Derenne I, *et al.* Mechanism of formation and chemical structure of coorongite lotryococcenes during early diagenesis. Org. geochem. 1988, 13(4~6):965~971.
- 6 Ishiwatari R, *et al.* thermal alteration experiments organic matter from recent marine sediments in relation to petroleum genesis. geoch. et cosmoch. Acta, 1997, 10:531~536.
- 7 Orr W L. Kerogen(asphaltenene) sulfur relationships in sulfurrich Monterey oils. Org. Geochem. 1986, 10:499~529.

史斗. 译自 Источник нефти в осадочных бассейнах 一书(М:1994,27~35),原文由俄罗斯科学院西伯利亚分院分院图书馆提供.