

现代石油地质学理论研究取得新突破

幔源油气理论和技术支撑大庆油田产量重上5000万吨



崔永强 1965年2月生,博士,高级工程师。工作单位:大庆油田勘探开发研究院。2001年于中国石油大学(北京)完成博士学位论文《松辽盆地无成因气成藏机理与模式研究》,2004年于北京大学完成博士后出站报告《松辽盆地深源油气地质背景研究》,2018年发表《现代石油地质学——幔源油气理论》。

□ 崔永强 文/图

自然科学理论、实验、宇宙探测、石油勘探开发实践的进步及其取得的成就,使传统石油地质学由科学假说提升为现代石油地质学科学理论成为可能。

由于对石油生成问题的不同认识,人们提出石油有机成因和无机成因两种假说。有机成因假说即石油来自沉积有机质,该富含沉积有机质的细粒沉积层即生油层。根据生油层的差别,以有机成因为核心的传统石油地质学又派生出陆相成油理论和海相成油理论。

基岩油气藏的发现既挑战了陆相生油理论,又挑战了海相生油理论。基岩即发育于盆地基底的变质岩和火山岩,它们不具备有机成因所要求的沉积有机质。全球已超过30个盆地中发现了基岩油气。全球基岩油气藏石油储量为 248×10^4 t,天然气储量为 2681×10^4 m³。因此,基岩油气藏存在本身否定了石油有机成因假说,包括陆相生油理论和海相生油理论。

前人已经在通往石油无机成因的道路上取得了丰硕的研究成果,石油来自地幔的概念已经取得越来越多的共识。

认识幔源油气

门捷列夫在1876年最早提出“碳化铁生烃说”。他认为地球深部的碳化铁化合物遇到水之后,“铁或者其他金属与水中的氧反应生成氧化物,水中的氢分离出来,一部分是游离的,在氧化过程中,原来与铁结合在一起的碳也分离出来,与氢结合起来,生成碳化氢化合物,这就是石油,它们一边上升一边冷却,在接受它们的地层中冷凝成液并聚集成矿”。

索柯洛夫在1889年也注意到石油和岩浆的成因联系并提出石油生成的“宇宙说”,其依据是太阳系中行星天体光谱分析发现有甲烷,以及烃类化合物可由费-托合成反应无机合成。他认为碳化氢化合物是在地球尚处于熔融状态时就已存在于大气圈中,后随着地球冷却收缩凝结于地壳上部,并沿裂隙分离出来,当有孔隙性地层和其上被非渗透层覆盖时则可聚集成油气藏。

库德梁采夫在1951年继承了门捷列夫和索柯洛夫的思想,提出“岩浆说”,认为碳化氢化合物的是那些不只在行星和太阳上有,而且在地球的岩浆中也有的碳和氢形成的。在岩浆上升过程中,温度逐渐降低,活性很强的甲烷基团发生聚合作用,依次变为亚甲基(CH₂)、甲基(CH₃)、甲烷(CH₄),最后形成烃类物质;一氧化碳也能直接合成烃类物质,且在高温高压下形成氢和其他元素参与的烃类化合物。

克鲁泡特金在1955年认为石油天然气与烃类岩浆起源,其实并无关系,提出固态地球是由行星冷的宇宙尘和气体组成的,这些气体是指参加到组成地球和其他行星的原始物质中

的氢、氮、碳氢化合物。由克鲁泡特金本人主持的1976年、1985年、1991年全苏《地球排气作用与大地构造》学术会议,以及由德米特里耶夫斯基主持的2002年、2006年、2008年、2010年全俄和独联体国家《地球排气作用:地球动力学、地球流体、石油与天然气(碳氢化合物及生命)》学术会议,都强调了地球是冷球的思想。

上述关于烃类是否来源于岩浆的分歧,在杜乐天1996年提出的“烃碱流体地球化学”中得到统一。地幔流体是烃碱流体,烃类和碱类是烃碱流体的两大组成部分。烃碱流体既可以交代地幔岩形成玄武岩岩浆,又可以交代地壳岩石和沉积岩形成中酸性火山岩。以超临界态存在的地幔烃碱流体在上升过程中,不断与围岩发生交代作用,不断从围岩获得金属和硅质组分。在临界温度(水的临界温度是374.2℃)烃碱流体将转化为含烃、含金属、非金属、稀土元素的热液,这些热液组分将在合适的温压和地层条件下分异形成金属、非金属、油气矿藏。所以,金属、非金属矿床中伴生烃类,而石油中则富含大量的金属、非金属、稀土等不相容元素。

石油和岩浆是地幔流体作用的不同产物,从深部断裂上来的石油、从泥火山上来的石油和岩浆喷发通道上来的石油,它们都是源于烃碱流体。烃碱流体地球化学理论既支持了克鲁泡特金地球是冷球的思想,又解释了门捷列夫、索柯洛夫和库德梁采夫观察到的石油与岩浆的关系问题。从这个意义上说,烃碱流体地球化学原理就是中国版的石油无机成因理论。烃碱流体中的烃类组分就是幔源油气的源头。

幔源油气概念是现代石油地质学的核心。为了明确现代石油地质学与陆相生油理论、海相生油理论和以往无机成因理论的区别,本文提议用“幔源油气理论”或“幔源油气地质理论”来概括现代石油地质学。

必须指出,来自铀矿地质的地幔烃碱流体的概念已经为地幔与软流层地球化学研究、铀矿地质研究和其他金属非金属矿产地质研究所证实。

幔源油气的生成和演化

天然石油作为H-C体系的成员,由具有高还原性的烃类分子混合物组成,并且这些烃类分子具有高的化学势,大部分呈液态,因而天然石油处在明显的非平衡状态。关于组成石油的烃类分子存在和起源的首要科学问题是:在什么样的热力学条件下,具有高化学势和高还原性的分子是如何演化的?

这是一个化学热力学稳定性问题。这个问题与石油可能存在的岩石特征无关,也与在石油中发现的微生物的特性无关。

建立在近代原子和分子理论、量子统计力学和众数理论基础之上的化学热力学研究对上述问题给予回答。石油分子是C-H体系分子,而生物分

子是C-H-O体系分子。所有C-H-O体系生物分子(以葡萄糖为代表,其分子式是C₆H₁₂O₆)的化学势(化学位、吉布斯自由能)都小于CH₄的化学势。C-H-O体系生物分子的质量越大其化学势越低,而C-H体系烃类分子与之相反,质量越大其化学势越高。热力学第二定律禁止低化学势分子向高化学势分子发生自然演化。

甲烷是唯一一种在标准温压条件下稳定的碳氢化合物。从甲烷形成正常烷属烃只有在压力大于3万个大气压、温度大于700℃时(相当于地下深度约100km)才有可能。因此,从氧化的有机分子,如碳水化合物(C₆H₁₂O₆)形成较重的碳氢化合物在任何条件下都是不可能的。

现代烃类起源的高压实验证明了门捷列夫的思想。所用的材料也是地球上最普通的大理石CaCO₃、氧化亚铁FeO和蒸馏水。与地幔条件相比,实验中采用碳化物CaCO₃是氧化的、低化学势的,所有这些使得系统更不容易将碳演化重烃烷。实验结果发现,当压力低于1万个大气压时,没有重于CH₄的烃类分子存在。当压力大于3万个大气压时,烃类分子开始演化。当压力达到5万个大气压同时温度达到1500℃时,系统自发地产生具有天然石油分布特征的甲烷、乙烷、正丙烷等,直到正癸烷、乙烯、正丙烯、正丁烯、正戊烯。

化学热力学和高压实验研究是石油无机成因从假说迈向科学理论的重要转折。热力学第二定律指出C-H体系分子向C-H-O分子进化的不可逆性,从而彻底否定了石油来自生命的假设。同时也否定了费-托合成反应(包括在低压下生命物质加氢)生成天然石油的可能性。因为低压下完成的费-托合成高度受控,有用中间产物需要不断移除,而在地层条件下,并不存在这样的过程。

幔源油气的运移和聚集

克鲁泡特金在1958年指出,“有机成因说除了说明应该在沉积岩中寻找石油以外,就别无所有了”。“它不能给出适用于任何油区的找油原则”。由此可见,有机成因说把以往石油勘探成果归功于自己,并以此证明有机成因的正确性,这种说法并没有遵循实事求是的原则。传统石油地质学的核心工作是优选圈闭。有机成因理论无法回答圈闭中是否有油。从而把科学勘探降级为简单的试错行为。世界石油勘探成功率为10%~30%,是通过试错获得的。

“世界上99%以上的油气田都分布在沉积岩区,这些沉积岩中都存在富含有机质的细粒沉积物”,这一地质事实曾经是石油有机成因的三个立论依据之一。现已查明,沉积盆地对应上地幔软流层隆起,上地幔软流层隆起越高,沉积盆地含油气丰度越大。

因为沉积盆地的形成不是孤立的沉积现象,它是地壳构造运动的结果。盆地中所发育巨厚的沉积体需要由下伏地层提供相应的沉积空间。由于上地壳的刚性性质,相应沉积空间只能通过中地壳塑性层的侧向流动来提供。而中地壳和沉积层之间的密度差又必然导致重力失衡,这一重力亏空须由上地幔软流层隆起加以弥补。所以,上地幔软流层隆起与沉积盆地的形成是相辅相成的事件,是重力均衡作用的必然结果。上地幔软流层隆起必然导致地幔烃碱流体向软流层隆起顶部富集,同时上地幔软流层隆起又会造地上地幔刚性岩石圈的张性破裂,软流层中的地幔烃碱流体将会通过这些张性破裂进入地壳和沉积层,其中烃类组分或被地层捕获形成油气藏,或上升到盆地地表,进入盆地水体或者逸散到大气中。

门捷列夫于140年前正确指出:石油矿床的分布均与山脉的山脊走向平行。现代盆地勘探中,人们也总结出“一条裂缝一个矿”的正确结论,并识别出“油源断裂”和“气源断裂”。

遗憾的是,由于以往缺乏构造理论的支持,人们无法进一步把断裂控制油气的现象作为油气来源于深部的直接地质证据。大陆层构造理论的创立解决了这个问题,它证明与深部缺乏沟通的盆地缺乏油气。例如,南秦岭前陆盆地,由于南秦岭上地壳底部刚硬的结晶基底向北秦岭中地壳塑性层快速顺层俯冲,造成盆地底部形成双层刚性上地壳,阻碍了深部流体上升到沉积盆地,导致沉积盆地油气缺乏。大陆层构造理论针对中国大陆东部、中部、西部的不同构造特点,提出控制幔源油气的构造地质模式,即中国大陆东部断陷盆地—山系控油模式,以松辽盆地、渤海湾盆地为例,油气藏定位于压剪性正断层附近;中国大陆中部断陷盆地—山系控油模式,以鄂尔多斯盆地为例,油气藏定位于逆冲断层附近;中国大陆西部断陷盆地—山系控油模式,以准噶尔盆地、塔里木盆地、四川盆地为例,油气藏定位于逆冲断层附近。厚皮纵弯隆起的真空抽吸作用是断陷盆地富集油气的动力源泉。随着盆地构造活动的不断发生,深部油气资源源源不断地向沉积盆地和已开发油气藏供给。

大陆层构造理论(李扬鉴等,1996)比较完整地阐述了地幔构造、地壳构造与沉积层构造的形成和演化关系。在把构造地质学由几何学和运动学层次提升到动力学和流变学层次的同时,对推动石油地质学发展做出重要贡献。完成油气藏在断陷盆地沉积层花状断裂体系内精确定位研究的是俄罗斯中央地球物理研究院齐穆尔基耶夫和他领导的团队。他们利用三维地震技术在西西伯利亚盆地叶特-普罗夫油田侏罗系勘探中获得了探井成功率100%的实践成果。他们于2005年~2008年间相继部署37口探井并全部获得工业油流,其中239号井获得日产油700t、日产气 49×10^4 m³的最高产量。

齐穆尔基耶夫等人开发的小断距基底走滑断层控制油气模型,明确油气分布在走滑断裂带1.5公里以内,储层应力应变状态不同决定其油气产量不同。为石油勘探开发提供了强大的技术支持。如果说实践是检验真理的唯一标准,那么,100%的探井成功率则证明了幔源油气理论的真理性。

幔源油气上升的动力

杜乐天(1987)结合铀矿地质实际,把地球排气理论进一步深化提高,终于发展成为幔汁(HACONS)理论。把地球排气作用定义为超临界态地幔烃碱流体自地球深部自发向上、向外的辐射排放。

幔汁在地球内部是垂直分带的,自深向浅顺次如下:地核中储存有巨量的氢;内核中有固态FeH存在;外核液态Fe中又可以溶解大量H₂,这在冶金学上早已熟知。内外地核的强大氢流是地幔流体的发源地及后盾。氢流向上辐射的驱动力是压力差、温度差、黏度差、质量差、密度差、浓度差。当氢流向上穿透下、中地幔时,会把大量分散的活性很大的阳离子(在高压下它们从镁氧化物和硅酸盐晶格中被挤出并处于活化态)萃取并携带向上,其中最重要的萃取组分是Li, Na, K, Rb, Cs(呈氢化物形式),故称此时的幔汁为氢型幔汁(H-HACONS);当H-HACONS继续上穿到上地幔时,由于一路上萃取大量碱金属而演化成碱型幔汁(A-HACONS)。上地幔软流层(体)、异常地幔及玄武岩、金伯利岩等的成因皆取决于A-HACONS的渗入、富化和交代。当此幔流继续向上进入地壳后则进一步演化为氧型幔汁(O-HACONS)。地壳中的低速体和酸性岩浆就是由它造成的。

幔汁理论较为完整地解释了地球排气的物质来源、动力来源和及其所引起的各种地质作用。这个理论所涉

及的各个细节将对地球形成和演化研究产生重大推动作用。众所周知,大洋没有一块前侏罗纪洋壳,地球正在经历大规模不对称膨胀。对大洋开裂和地球膨胀过程中物质和能量来源的深入探索,将有助于对地球排气和地球形成与演化的理解。

已发现油气藏的储量供给

地球排气或幔汁辐射是地球演化的必然过程,在这个过程中幔源油气对沉积盆地和已发现油气藏储量进行源源不断地补充。

在门捷列夫时代,人们已经注意到了各油田产量递减的事实,有人提出所有油田最终都会枯竭的看法。门捷列夫根据自己的研究提出:“至今在巴库周围的地下深处,仍在持续生成石油,这些石油起源于渗入地球内部深处的水,以气态的形式通过地球深部所具有的裂缝到达上部地层,蓄积在石油储层中”。“在很长一段时间里,巴库油田存在着找到新的巨大的石油矿床的可能性”。他敏锐地观察到,宾夕法尼亚的油田是向平面扩展的,从1859年起,扩展长度超过200俄里(约合200km);而和宾夕法尼亚产量相当的巴库油田(年产量约50万普特,约合8190t),则表现为油井的深度不断加深,1880年时该油井深80俄丈(约合171m),到1902年已经达到150俄丈(约合320m)。

库德梁采夫在1951年指出,因为岩浆中形成石油的过程在不断进行着,古老的油气通过扩散作用早已逸散消失,所以,所有的油藏,包括寒武纪地层中的油藏,都是年轻的油藏。并且,依靠石油才在地球上产生了生物,石油中含有生物所需要的一切化学元素,因此,石油不是来自有机物质,恰好相反,有机物质却是来源于石油。

加利福尼亚海湾中部的Guaymas盆地热液喷口石油¹⁴C年龄平均仅为4692a,证明石油正在生成。中国近海的PL19-3油田的天然气沿垂直断裂在不断地逸散,而PL19-3油田却仍有巨大储量,表明自有机成因以来一直有深部油气补给。老油田产量超过储量的例子如美国墨西哥湾尤金岛330区块油田于1971年发现,到1997年底已采出原油 1.59×10^6 m³,而当时计算的可采储量仅 4880×10^4 m³,表明原油一直有新的补给,油气组分也有变化;俄罗斯伏尔加—乌拉尔盆地的罗马什金油田可采储量 20×10^4 t,到2002年已累计产油 30×10^4 t。另外,格罗兹尼油区的一些油田(如老格罗兹尼、十月、马尔戈别克等油田)累计采油量早已超过了可采储量。

烃类的高压起源研究否定了煤和天然气水合物生物成因。从煤和石油的化学成分来看,二者并无本质的区别。由此可以得到煤来自石油的基本结论。该结论基于大家公认的石油沥青化和沥青煤化的基本事实。详细论证请参见本文作者《论煤的无机成因》。

为大庆油田产量重上5000万吨提供支撑

现代科学理论和实验、航天探测和勘探开发实践已经证明石油的大规模存在不以生命物质的存在为前提;石油于地球100km以下的深部由先

存的碳氢元素合成;热力学第二定律禁止C-H-O体系的生物分子在任何条件下向C-H体系烃类分子发生自然演化;烃类在地幔条件下是地幔烃碱流体的组成部分;在地幔烃碱流体上升的过程中,由于流体与围岩发生交代作用,并在临界温度转化成富含金属、非金属和稀土元素的石油热液;石油热液在上升通道中将发生分异,形成金属、非金属、稀土和油气矿藏;断陷盆地油气上升通道是小断距基底走滑断层,成藏于该断层控制的花状断裂体系内部;油气分布距离花状断裂不超过2km;压陷盆地油气上升通道是仰冲型冲叠造山带内部的逆冲断层,并成藏于逆冲断层附近;进入断陷盆地水体的剩余石油热液将经历分异作用形成化学沉积层和油层,油层将由水化和氧化作用进一步转化为石油沥青;石油沥青经历埋藏和热解将转化为煤层。进入大洋水体和陆地冻土带的天然气将在合适的温压条件下形成天然气水合物。大洋热液喷口、大洋和陆地泥火山是地球现代排气的窗口,其强大的供给能力证明盆地和油气藏正在接受深部油气的供给。

传统石油地质学基本要素——生、储、盖、运、圈、保已经发生了变化。沉积盆地中的“生油层”已经不存在了,这里的“生”应定义为“石油生成”或“生油”,讨论石油如何在地幔条件下生成的问题。储量可再生性应列为生油研究的重要内容。沉积盆地中的“储集层”也已发生变化,不是沉积盆地所有的孔隙发育层位都能富集油气,而是局限于“气源断裂”和“油源断裂”附近且不超过2km的地方。这里的储集空间无论发育程度如何都要经历深部烃碱流体的改造,并且油气富集的程度受控于储层本身的应力应变条件。储层研究需要增加至少三项内容:碱交代作用、应力应变状态、在断裂体系中的位置。关于“盖”,以往特指盖层,即沉积盆地的致密层,如泥页岩、膏岩和盐岩,现在更应注意油气藏封盖的相对性。

构造地质学在石油地质学各要素研究中占有特殊重要的地位。垂向断层对油气藏的控制作用,要求石油运移问题研究必须由以往的侧向运移问题转向垂向运移问题。而优选圈闭的工作需由静态的圈闭研究转向特殊构造位置与圈闭关系研究。

总之,俄国、苏联、俄罗斯和乌克兰的无机成因研究、我国烃碱流体地球化学研究、我国大陆层构造研究、美俄化学热力学理论和高压实验研究、俄罗斯小断距基底走滑断层控制油气的研究、美欧航天探测和国内外大量石油勘探开发实践所取得的成就已经为建立现代石油地质学理论——幔源油气地质理论做好了理论、技术、实验和实践准备。

综上所述,幔源油气理论和技术为大庆油田产量重上5000万吨提供了支撑。理论基础:所有工业油气均来自地幔,且源源不断向上供给,大庆油田仍然具有巨大的生产潜力。2015年大庆长垣中部北2-丁5-斜25井获日产油70方的自喷井,2021年大庆长垣南部南斜4347井获日产油102方的自喷井。技术路线:断陷盆地油气藏控制因素已经研究清楚,即小断距基底走滑断裂控制油气藏。走滑断层本身即供油通道,工业油气藏主要分布在距走滑断裂1.5公里的范围内。具体措施:在油田综合含水97%大庆长垣上,部署2000口、深度2000米~3000米、日产100吨的高产井。



该尖晶石二辉橄辉岩来自《松辽盆地幔源油气理论评价研究》课题组,为大庆油田产量重上5000万吨提供了理论与技术依据。