

综述与评述

构造应力与油气成藏关系

张 乐^{1,2,3}, 姜在兴³, 郭振廷⁴

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市国土资源信息
开发研究重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;
4. 胜利油田弧岛采油厂地质所, 山东 东营 257231)

摘要:总结了构造应力对油气生成、运移、聚集及分布等方面的影响。指出构造应力与油气成藏关系密切,其不仅能形成断层和裂缝等油气运移通道,还能形成各种构造圈闭,同时也可直接引发油气运移,是油气运移的主要驱动力;构造应力与孔隙流体压力有相关性,油气从强压应力区向张应力区运移,张应力区是油气的最佳聚集区;构造应力对油气藏的形成既可以起到积极作用,也可以对其起破坏作用;构造应力还可为有机质向烃类转化提供能量。

关键词:构造应力;油气藏;油气运移聚集;油气分布

中图分类号:TE121

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2007)01-0032-05

传统的油气地质学理论认为,油气运移的动力主要是浮力、水动力以及异常地层压力;毛细管力一般为油气运移的阻力,其决定了油气二次运移的方向和聚集场所的流体势分布。人们也认识到构造应力对油气运聚有重要的影响,但对构造应力在油气生成、运聚成藏和分布等方面的作用机理尚认识不足。在许多情况下,油气运移聚集受构造应力场的控制^[1-5]。构造应力是形成异常高压的重要因素,构造应力产生的热效应对油气生成也有影响。构造应力是各种地质现象与地质过程形成发展的主要动力来源,构造应力场的发展演化不仅控制了含油气盆地的形成和盆地内构造的形成及分布,还影响生、储、盖层的发育及油气生成、运移、聚集过程。因此,构造应力与油气成藏、油气勘探开发有密切关系,许多学者在这方面进行了较深入的研究,并取得了丰硕的成果。

1 构造应力与油气生成的关系

构造应力通常是指导致构造运动、产生构造形变、形成各种构造形迹的应力。在油田应力场研究中,构造应力常指由于构造运动引起的地应力的增量^[6]。地应力主要由重力应力、构造应力和流体压力

等几种应力耦合而成。

1.1 概述

构造应力在油气形成过程中,可为有机质的热演化和转化提供能量,从而促进有机质向烃类转化。现代石油地质理论已经证实,热量在导致有机质发生热降解并生成石油范畴的烃类过程中具有决定性作用。构造应力是地壳中最为活跃的能量之一,其产生的能量已为地壳中岩层的各种变形所证实。索洛维耶夫等指出,由构造变形转变而来的机械能是构造变形过程中补充放热的主要原因。机械能可转化成热能,在强烈挤压带,这种热能特别大。其表现形式是:①沿断裂面的摩擦热;②可塑性变形时内部的摩擦热;③应力松弛时的弹性变形热。此外,在构造变形速率极快的情况下,放热发生得更快,并可使围岩的温度大幅度升高,这已被现代地震观测所证实^[7-9]。据钟建华等^[3]对我国湘西泸溪县白沙含油瘤状灰岩的研究发现在野外手标本和室内显微镜薄片,石油仅分布在剪切破碎带内瘤状灰岩中,而与其相邻的、未受剪切破碎的非瘤状灰岩中却未见石油,从而认为该区剪切作用导致矿物等固体颗粒旋转、位错或断裂,因彼此摩擦或晶格断裂而产生热量,为有机源岩生油提供了附加热能,促使有机质转化为

收稿日期:2006-09-19;修回日期:2006-12-11。

基金项目:国家“973”项目“高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究”(编号:2001CB209103)资助。

作者简介:张乐(1979-),男,新疆阜康人,在读博士,主要从事沉积学、层序地层学及油气成藏机理研究。E-mail: zhangleupc@163.com。

烃类。在含油气盆地中,应力集中区往往对应于断裂的端点和断层上下盘交汇部位以及背斜和向斜等质点位移和地层起伏较大的部位,断裂或断层的形成释放了大量应变能,而这些能量正是源岩进行成烃化学反应的重要能量来源。应力应变的作用过程表现为能量的聚集、释放、再聚集、再释放,一方面,导致断裂和变形的不断发展演化,另一方面,使得有机质发生脉冲式力化学成烃反应^[10]。

1.2 力化学作用

刘文汇等^[4,6]系统研究了力化学作用在有机质成烃过程中的作用,指出力化学(Mechanochemistry)是介于力学与化学之间研究物质在机械作用下的化学转化。从能量角度看,力学与化学的相互关系是机械能与化学能的相互转化。根据干酪根晚期成烃理论,干酪根埋深达到一定温度门限才能大量成烃,热能是化学反应最主要的能量类型之一,但是在沉积盆地有机质成烃演化中,只考虑热能还不够全面,其中机械能的参与在其演化过程中起不可低估的作用。有机质的转化、烃类的生成、油气的运移富集均是消耗巨大能量的物理—化学过程。因此,有机质的转化率也恰恰取决于能量的供给。而在有机质成烃演化的能量供给类型,除传统的热能外,构造动力产生的机械能是对烃类转化过程和生烃系统供给的又一主要能量。并且构造机械能可以在较短的时限内,促使有机质迅速向烃类转化,提高有机质的转化率,从而缩短了有机质向烃类的转化时间,提高了所形成烃类的运移聚集率。在低温条件下,机械作用对烃类形成起决定性作用。Амурский认为在构造活动区,构造作用的能量可与热能相比,并足以对有机质演化起积极作用^[10]。Соловьев对各种构造力属性的物理—机械因素与生油气过程最可能联系做了系统总结^[10],认为构造作用对有机质演化所起的力化学作用为:①源岩受非线性构造作用(剪切)时,含有机质及其转化产物的岩石物理性质周期性振动,使产物及时排出从而加速化学反应正向进行;②在构造应力场中,固相矿物晶格发生损伤,使反应体系中化学活性急剧提高(如催化作用),使有机质转化作用增强;③应力场引起的微观剪切作用直接使有机大分子发生裂解产生小分子烃类。油气生成的力化学作用与传统的干酪根晚期成烃理论的重要区别在于该理论考虑了机械能作为有机质成烃的能量来源,认为构造应力是有机质转化的一个重要条件。与热能相比,构造作用能在相对短的时限内供给能量,使有机质向烃类转化,提高有机质转化率,缩短有机

质向烃类转化时间,而这正是有机质成烃富集成藏的关键^[11]。沉积有机质在高温演化阶段,相同的应力作用远远不能使聚合物裂解。因此,在沉积有机质纵向演化过程中,力化学作用主要发生在较低温阶段,高温阶段温度引起的热解作用远大于构造作用力(机械能)对有机质裂解作用^[10]。

2 构造应力与油气运移的关系

2.1 构造应力与孔隙流体压力的关系

岩体所承受的总应力状态是重力应力、构造应力和流体压力等各种应力状态的总和。Terzaghi提出了有效应力原理^[12],利用模型实验方法表达了外力、多孔介质骨架承受的有效应力和流体压力之间的关系,将受外力后的多孔介质中的孔隙压力及流体势与外力之间互相联系起来。当岩石内部存在流体时,岩体变形取决于正应力与流体压力的差值^[13]。这个差值称为有效应力,即 $\sigma_e = \sigma - P$ 。岩石中应力状态影响多孔介质的有效应力,从而影响介质中的渗流场分布。当作用在含流体介质上的构造应力发生改变时,势必一部分转移到孔隙流体压力的变化上,从而改变某一瞬间渗流场来影响油气的运移和聚集。当岩石受到侧向构造挤压应力时,侧向挤压应力主要通过岩石或矿物颗粒弹性压缩形变,岩石孔隙度降低,若流体封闭条件好,孔隙流体压力将增加,即流体将承担一部分构造挤压应力,从而形成超压。这是一些挤压性盆地异常高压形成的重要原因。国外许多油藏实测资料表明,储层孔隙流体压力与最小水平主应力之间有一定的相关性^[1,9]。当储层压力衰减时,地层孔隙度减小,储层有发生收缩的趋势。但由于围岩的存在,这种变形受到限制,体积收缩的趋势转化为地应力减小。如北海Ekofisk油田,据水力压裂测试结果,油藏所受的有效应力随地层压力的衰减而线性增加,但总的水平应力线性减少,最小水平应力的改变量大约为孔隙压力改变的0.8倍(图1)^[6]。

2.2 构造应力对油气运移的作用机理

许多含油气盆地研究实例表明,油气运移、聚集与圈闭的形成主要是受构造应力驱动和构造应力场控制。如在1976年唐山地震前后,随着地壳的强烈活动,使邻近的环渤海地区许多油井的产量快速增加,地震结束一段时间后又恢复正常,说明构造应力对油气大规模运移起了直接驱动作用^[14]。油气水主要是依附于岩石的孔隙空间而存在的。当含油气盆地或含油气层的初始沉积层在构造应力场作用下产

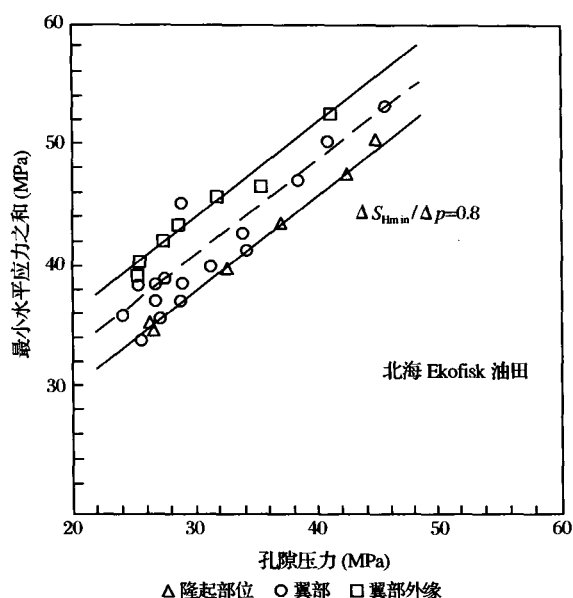


图1 最小水平地应力随孔隙压力的变化^[2]

生形变时,便开始了一系列强度不一的连续性褶曲构造变形,使含油气层的部分地带的孔隙空间逐渐变形或变小,进而对分散于其中的油气水产生挤压或推动作用。当这种挤压应力大于油气水体的表面张力、粘滞力、重力及孔隙空间对油气水的吸附力时,它们便会发生运移,并在孔隙空间相对变形较小所造成的低压带停留聚集起来,形成油气藏^[15]。因此,从微观机理来看,构造应力是通过作用于岩石骨架上使其发生弹性变形、塑性变形以及脆性破裂的同时,作用于岩石空隙中的流体上,使其通过毛细管、孔隙、破裂面等各种通道向流体势更低的部位运移。改变构造应力场的分布或状态必然引起油气的再次运移和重新分配。因此,构造运动期间是构造应力场急剧发生变化的时期,必然带来大规模的油气运移和聚集。油气在不考虑流体压缩性的条件下,总是从流体势高的地区向流体势低的地区运移。油气同时还是在地下多孔介质中随连续运动的地下水而运移的流体,并不是简单地由高压区向低压区或者由高处向低处流动。流体势只给出一个流体运移的趋势,油气在多孔介质中的实际运移还受介质的渗透性能的影响^[16]。孙雄等在讨论构造应力场对油气运移的影响时,通过理论模型和实例分析,提出介质的应力状态是影响油气运移的重要因素之一,主要表现为以下3方面:

(1) 同一种介质在不同的应力状态下渗透性能不相同,即应力状态影响介质的渗透系数,从而影响油气的运移。

(2) 应力状态的变化速率作为一个驱动力,影

响油气的运移。如在构造运动的平静期,地下流体的运移只受流场本身规律的支配,和应力大小无关;而在构造运动的强烈时期,如天然地震发生前后,由于构造应力的急剧变化,会引起地下流体流场动态的明显变化。

(3) 应力状态直接产生一个附加的孔隙压力,改变整个渗流场的定解条件,从而影响油气的运移。当作用在含流体介质上的外力发生变化时,这种外力的变化必然有一部分要转移到介质内的流体上,从而改变某一瞬间流场状态。

应力场对流体运移的影响是这3方面作用的总效果,它们往往是彼此消长的,例如:挤压环境应力状态下,在没有破裂之前,平均压应力愈大岩石的压缩性愈强,孔隙度愈小,愈不利于流体运移;同时应力的增大又会使孔隙压力相应增加,有利于运移。在拉张环境下正好相反。这是互相矛盾的两方面油气的运移取决于矛盾的主要一方。因此对于不同的问题应力状态对流体作用的效果可能完全不同,既有可能从高应力区向低压区运移也有可能从低应力区向高压区运移,这要根据具体地区的实际情况综合分析。

3 构造应力与油气聚集分布的关系

构造应力使岩石中产生断裂和裂隙,从而为油气运移提供通道。对一些较致密的储层,构造应力使其产生的裂缝,大大改善了储层物性,有利于油气的聚集^[17-19]。构造应力不仅形成各种圈闭,为油气最终聚集成藏提供了场所,而且不连续的瞬间构造应力和连续状态的长期构造应力成为油气运移的驱动力,并通过影响流体势场控制油气运移的方向和油气聚集分布。

研究表明^[15],构造应力场与油气的聚集分布有密切关系。主要可概括为3方面:

(1) 构造应力场叠次控油作用十分明显。区域应力场控制含油气区,主要控制生油深拗陷、油气聚集带、沉降中心以及生油岩系;局部应力场控制含油气构造和油气田分布。

(2) 不同期的构造应力场具不同的控油作用。油气移聚前区域应力场形成的大型拗陷控制生油区;油气移聚成藏期区域应力场决定油气及聚集带;油气移聚成藏期后的应力场影响油气的再迁移和再聚集。现今应力场直接影响油气的最后一次运移、聚集和分布,并对油气田开发有重要意义。

(3) 应力值大小与油气聚集密切相关。油气总

是从高势区向低势区运移,油势梯度变化最大的方向为油气运移的主要方向,低油势区是油气聚集的最有利区。油气运移势场与构造应力场密切相关,但高应力区并非是高势能区,因而油气的运移和聚集并不是简单的受构造应力值高低的控制。

因此,构造应力是油气运聚的主要动力之一,尤其是成藏期构造应力场直接控制油气的聚集和分布。地壳在构造应力作用下,发生构造运动和岩石变形,岩石的变形产生体积变化,使岩层内孔隙流体压力增加或减少,产生压力梯度或势差,推动流体在岩石中流动,在流动过程中遇到合适的部位,油气就会聚集成藏^[6]。按应力圈闭理论^[18-19],在靠近背斜或向斜核部及边缘拐点的主压应力集中区,即使砂岩体、生物礁再发育也难于保存大储量的油气;而越靠近背斜和向斜顶部的主拉应力集中地带,若再有高孔隙岩体和裂缝时,则油气可以超常富集;或造成油气产出位置不定和产量变化悬殊的现象^[20-21]。在油气藏形成条件的评价中,生烃是基础,圈闭是条件,而保存则是关键。构造应力除了能够对油气的生成、运移、聚集起积极作用外,油气藏形成后,由于强烈的构造运动对原有储油气圈闭进行改造,构造应力对已形成油气藏产生破坏作用。许多盆地在油气藏形成后经过多期构造运动的强烈改造,使含油气丰富程度明显降低。因此,保存条件的研究无论在理论上还是实际勘探中都具有重大意义,构造应力与油气藏保存的关系有待于深入探讨。

4 结论

(1) 构造应力场的发展演化控制了含油气盆地的形成并影响生、储、盖层的发育和展布。

(2) 构造应力可为有机质的热演化和转化过程提供能量,促进有机质向烃类转化,对低温条件下的油气生成作用有一定的影响。

(3) 构造应力使岩层变形和变位,形成各种圈闭构造,为油气提供聚集场所;在构造应力作用下形成断层、裂缝等油气运移的通道,构造应力还能改变岩石渗透率和断层的封闭性。

(4) 构造应力是油气运移的直接驱动力。在构造应力作用下,岩石的变形产生体积变化,使岩层内流体孔隙压力增大或减小,产生压力梯度或势差,推动流体在岩层内流动。

(5) 油气侧向运移沿着水平最小主压应力的方向。高地应力区一般为高势区,低应力区有利于油气的聚集。油气从强压应力区向弱压应力区或张应力

区运移,张应力区是油气的最佳聚集区。

(6) 构造应力在不同的地质时期表现出的作用不尽相同。在构造强烈活动期,构造应力起主导作用;而在构造运动相对平静期,不起主导作用。成藏期构造应力场直接控制油气聚集和分布。

参考文献:

- [1] 李传亮,杜文博. 油气藏岩石的应力和应变状态研究[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 351-352.
- [2] 张明利, 万天丰. 含油气盆地构造应力场研究新进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(1): 38-43.
- [3] 吴巧生, 王华, 吴冲龙. 沉积盆地构造应力场研究综述[J]. 地质科技情报, 1998, 17(1): 8-11.
- [4] 冯向阳. 应力驱动与油气运移势场的剖面研究[J]. 地质力学学报, 1996, 2(2): 26-30.
- [5] 马寅生. 地应力在油气地质研究中的作用、意义和研究现状[J]. 地质力学学报, 1997, 3(2): 41-45.
- [6] 李志明, 张金珠. 构造应力与油气田勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [7] 孙楷, 谢鸿森, 郭捷. 构造应力与油气藏生成及分布[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 99-103.
- [8] 王连捷, 张利容, 袁嘉音. 地应力与油气运移[J]. 地质力学学报, 1996, 2(2): 3-9.
- [9] Finkbeiner Thomas. Stress, pore pressure, and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Island 330 field, northern Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2001. 85(6): 1007-1031.
- [10] 刘文汇. 油气形成的力化学作用—油气地质理论思考之一[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 340-344.
- [11] 刘文汇, 徐永昌, 张守春. 一种新的成烃机制—力化学作用及其实验证据[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 317-317.
- [12] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice[J]. Third Edition, 1996.
- [13] 王平. 含油盆地构造力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [14] 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.
- [15] 祁林. 论油气的应力圈闭[J]. 四川地质学报, 1997, (1): 1-7.
- [16] 孙雄, 洪汉净. 构造应力场对油气运移的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 1-4.
- [17] 同伟鹏, 朱筱敏, 曾联波, 等. 青西油田构造应力场数值模拟及裂缝分布预测[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 305-307.
- [18] 杨伟利, 王毅, 李亚辉, 等. 准葛尔盆地燕山运动期构造应力场模拟[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(2): 124-126.
- [19] 张胜利, 夏斌. 丽水—椒江凹陷构造演化特征与油气聚集[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 324-328.
- [20] 施立志, 林铁锋, 王震亮, 等. 库车坳陷下白垩统天然气运聚系统与油气运移研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 78-83.
- [21] 苗继军, 贾承造, 戴金星, 等. 南天山前陆冲断带中段乌什—温宿地区构造分析与油气成藏[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 428-432.

RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL STRESS AND HYDROCARBON BEARING POOL FORMATION

ZHANG Le^{1,2,3}, JIANG Zai-xing³, GUO Zhen-ting⁴

(1. State Key Laboratory of Geologic Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Research and Exploration Information of Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. GuDao Geology Research Institute of Shengli Oil Field, Dongying, 257231, China)

Abstract: This paper discusses the influence of structural stress on the generation, migration, accumulation and distribution of petroleum. It points out that structural stress can result in faults, fractures and many kinds of structural traps, and is an important driving force for petroleum migration. There is a close relationship between structural stress and fluid pressure, and the tensional stress area is favorable to the accumulation of petroleum. Structural stress can also provide energy for the transformation from organic matter to oil and gas.

Key words: Structural stress; Hydrocarbon reservoir; Hydrocarbon migration and accumulation; Oil and gas distribution.

(上接第 31 页)

[8] 宋岩,王振亮,王毅,等.准噶尔盆地天然气成藏地质条件[M].北京:科学出版社,2000:151-178.

[9] 洪峰,余辉龙,宋岩,等.柴达木盆地盖层地质特点及封盖性评价[J].石油勘探与开发,2001,28(5):8-9.

A STUDY ON THE SOURCE-RESERVOIR-SEAL ASSOCIATIONS AND MATCHING OF HYDROCARBON ACCUMULATION FACTORS IN THE FORELAND BASINS IN CENTRAL-WESTERN CHINA

HONG Feng, SONG Yan, LIU Shao-bo, ZHAO Meng-jun, QIN Sheng-fei, FU Guo-you
(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Structures in foreland basins form a specific geologic condition of hydrocarbon accumulation. The source-reservoir-seal associations are controlled by tectonic and sedimentary evolution. Sedimentary series and source-reservoir-seal associations in the foreland basins in central-western China are various, affected by several times tectonization and the superposition of several types of original sedimentary basins. According to the sedimentary structure evolution, three types of source-reservoir-seal associations are divided: Lower source-reservoir-seal associations, Middle source-reservoir-seal associations and Upper reservoir-seal associations. The type of self-generating and self-preserving reservoir is mainly in the Lower and Middle source-reservoir-seal associations, because of the superposed source-reservoir-seal rocks, and the Lower and Middle source-reservoir-seal associations have the best matching of space. The type of lower-generating and upper-reservoiring is mainly in the Upper reservoir-seal associations, as it has the best matching of hydrocarbon generation stage, sandstone diagenesis stage and effective sealing time. The Upper reservoir-seal associations have the best matching of time, where a large number of oil-gas pools have been discovered presently.

Key words: Foreland basin; Source-reservoir-seal associations; Matching; Oil-gas pools.