

构造应力与油气藏生成及分布^{*}

孙 檣, 谢鸿森, 郭 捷, 苏根利, 丁东业

(中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550002)

摘要: 构造应力在油气藏生成及分布过程中发挥了重要作用。一方面构造应力通过产生机械能及力化学作用促进了干酪根热降解, 促进了油气的生成。另一方面构造应力通过影响油气的流体势, 使油气从高势区向低势区运移, 并同时使油气得到富集。此外, 构造应力还为油气聚集成藏提供了场所, 并对其分布有很强的控制作用。

关键词: 构造应力; 油气生成; 流体势; 油气运移; 油气藏分布

第一作者简介: 孙檣, 男, 29 岁, 博士, 流体地球化学

中图分类号: TE122. 1 文献标识码: A

1 构造应力与油气生成

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的作用。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^[1]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。据钟建华等^[2]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, 促使有机质转化为烃类。

另外, 构造应力还产生了力化学作用, 从而加快了有机质的热演化^[3]。所谓力化学作用, 即在机械外力作用下, 由于反应物质化学活性急剧增长, 从而使化学反应速率加快的现象。一方面, 力作用

于聚合物时常伴生有一系列物理现象, 如发光、电子发射、显色、红外谱变化、产生自由基等, 从而可以导致聚合物的裂解、结构化、聚合、生成新官能团、离子化、环化、异构化、解聚、分解等化学反应; 另一方面, 聚合物在外力作用下, 由于内应力分布不均匀和冲击能量集中在个别链段上而产生临界应力, 使化学键断裂, 并生成活性粒子, 从而加快聚合物降解。此外, 索洛维耶夫等^[1]还提出了由岩石构造动力激发的冲击作用和电磁作用是影响有机质演化性质的最重要衍生现象的观点。由上述可以看出, 仅从埋深条件来讨论沉积盆地中有机质热演化显得不够全面, 应将油气生成从地球动力场的研究纳入到地球构造动力场的研究环境中来探讨。

2 构造应力与油气运移

油气运移是石油地质学的重要内容, 是贯穿整个生运、聚过程的纽带^[4]。石油和天然气是岩石孔隙中的一种流体, 因而其运移和聚集过程是流体在孔隙介质中的运移和聚集过程, 必须遵循达西定律

$$V = \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dL} = \frac{K}{\mu} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (1)$$

式中 V 为流速; K 为岩石渗透率; μ 为流体粘度; dP/dL 为流向压力梯度。

由此可见, 地下流体的渗流需要压力梯度, 渗流的强度取决于岩层的渗透率和流体的粘度。

油气作为一种流体, 其运动并不是简单地由高压区向低压区流动, 而应遵循一般流体的基本运动规律, 即自发地从能量高处向能量低处运移, 即流

^{*} 本文是在国家自然科学基金(49772111)资助下完成

收稿日期: 1999- 08- 28

体总是从流体势高的地区向流体势低的地区运动。

流体势的概念是由 Hubber^[5] 早在 50 年代初引入至油气运移和聚集研究中的, 但是他所定义的流体势主要考虑了流体的位能和压能, 而没有考虑毛细管阻力的作用。England 等^[6] 在考虑了毛细管阻力作用的条件下, 将流体势定义为: 从基准面传递单位体积的流体至研究点所必需做的功。

$$\Phi = \rho g z + \rho \int_0^P \frac{dP}{\rho(P)} + \frac{2\delta \cos\theta}{r} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度; g 为重力加速度; z 为相对高程; δ 为界面张力; r 为毛细管半径, 即岩石孔隙半径; θ 为可湿性, 用界面与管壁间夹角表示; P 为高程 Z 处孔隙流体的压力。

由上可见, 流体势由三部分组成, 其一为由重力产生的势能; 其二为由构造应力作用于岩石孔隙中的流体而产生的孔隙压力; 其三为运移中毛细管壁对流体产生的毛管阻力。

当前, 普遍认为深部流体运移的动力有 4 种来源, 即: (1) 浮力; (2) 水动力; (3) 热力; (4) 构造应力。康永尚等^[7,8] 根据不同流体动力系统的流体动力特征, 划分出 4 种类型, 即: 压实驱动型、重力驱动型、流体封存型和滞流型, 此外还论述了不同类型流体动力系统中各驱动力的相对重要性。

现代超深钻探、火山喷气、地幔质镁铁质和超镁铁质岩石包体成分分析及金刚石包裹体分析研究表明, 流体不仅存在于地球表层及上地壳, 而且也大量存在于下地壳及地幔中。在综合各种资料的基础上, 我们认为深部流体是以 H_2O 和 CO_2 为主要组分的体系, 并含有 F, Cl, S 等挥发份以及一些常量、微量元素和熔体。深部流体不仅是良好的物质传输介质, 而且也是有效的热载体和热传输体。Spera^[9,10] 指出幔源 C-H-O 流体为近似的等温运移, 虽然流体与围岩的化学反应及热散失等会导致流体有降温的趋势, 但流体与通道壁的摩擦、流体的 Joule-Thompson 效应等又使其有生温的趋势, 流体的这种高温特征便会在围岩中产生热应力。Turcott^[11] 指出, 温度升高 100°C , 会产生 450 MPa 的热应力。这种应力便会使岩石发生相应的构造变形。

构造应力使岩石中产生断裂和裂隙, 早就为地质学家所一致认可。近年来, 许多地质学家强调地球深部流体异常压力对岩石破裂的作用。因而, 全面认识岩石破裂机制, 对于解释盆地应力场类型和

石油地质背景下的油气运移问题是非常重要的。

用莫尔圆和破裂包络理论可以清楚地说明岩石破裂机制(图 1), 公式为

$$\tau = \frac{4}{\sqrt{3}} K + \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma \quad (3)$$

式中 K 为岩石抗张强度; τ 和 σ 为平面上的剪切应力和正应力。

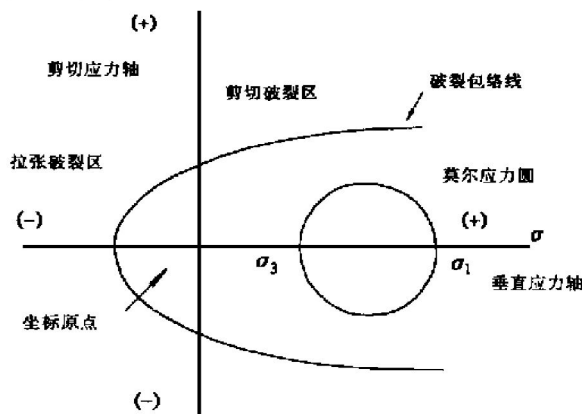


图 1 用莫尔圆和破裂包络线表示的应力场

Fig1 Stress field represented by mohr's circle and failure envelope

考虑到孔隙流体的压力, 根据 Terzaghi^[12] 的有效应力原理, 在饱和的岩层中, 应力可表示为

$$\sigma = \sigma' + P \quad (4)$$

式中 σ 为总应力; σ' 为有效应力。可以看出, 岩层受到应力作用后, 一部分由岩层孔隙中的流体承受, 即孔隙压力; 另一部分则由岩层骨架承受, 即有效应力。

图 2 简单示出在压性应力和抗张应力条件下岩石产生破裂的 4 种情况:

(1) 最大主应力与最小主应力之差增大, 从而莫尔圆与破裂包络线相切, 导致岩石产生以剪切破裂为主的裂隙;

(2) 最大主应力与最小主应力之差较小, 而且最小主应力为张力, 从而莫尔圆与破裂包络线左端和横坐标相交处相切, 导致岩石产生以张性破裂为主的裂隙;

(3) 流体异常压力发育, 有效应力减小, 莫尔圆与破裂包络线相切, 岩石中产生以剪切破裂为主的裂隙;

(4) 流体异常压力发育, 有效应力减小, 而且最大主应力与最小主应力之差较小, 莫尔圆与破裂包络线左端和横坐标相交处相切, 导致岩石中产生以张性破裂为主的裂隙。

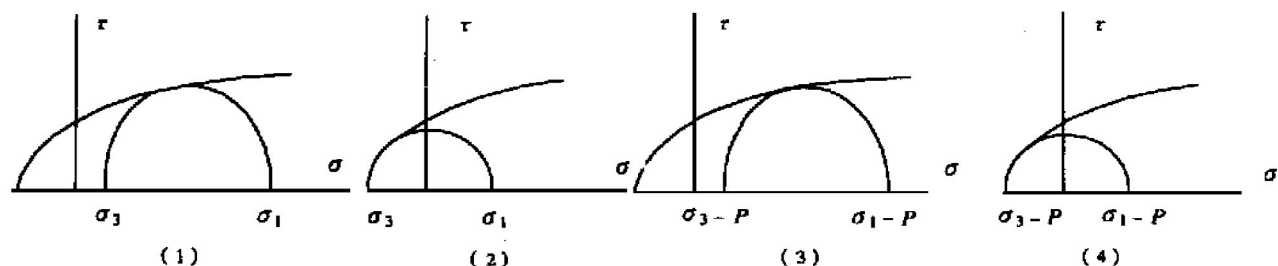


图2 岩石产生破裂的4种应力场条件

Fig. 2 Four situations of stress field leading to rock fracture

由此可见, 流体异常压力只是造成岩石破裂的应力条件之一。事实上, 断裂构造的产生应为构造应力、流体异常压力及其它作用力联合作用的结果, 而且在不同沉积盆地由于构造应力场特征的差异, 岩石产生破裂的机理也各不相同。如我国的大陆边缘海盆地——莺歌海盆地, 其流体异常压力对于岩石产生破裂就起着重要作用。

岩层在构造应力作用下, 其内流体将朝3个方向运动。根据连续性方程和达西定律可以得出三维流体流动的微分方程^[13~15]

$$\frac{\partial}{\partial x}(Kx \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ky \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(Kz \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + A = C \frac{\partial \Phi}{\partial t} + G \frac{\partial \sigma}{\partial y} \quad (5)$$

式中 Φ 为流体势; σ 为构造应力; K 为介质渗透系数; C 为储集系数; G 为与岩石压缩率有关的系数; A 表示有源存在。

从以上可以看出, 构造应力对油气运移的影响与以下因素有关。

(1) 与岩石渗透率有关。在构造应力、流体异常压力及其它作用力联合作用下, 岩石可以产生各种微裂隙, 从而改善岩石的渗透性, 提高岩石的渗透率, 促进油气运移。在相对封闭的体系中, 其流体异常压力对于岩石产生破裂就起着重要作用。随着源岩不断深埋, 地层流体压力不断升高, 从而岩石产生破裂、流体流出; 由于压力释放、裂隙闭合, 流体停止流出。这样周而复始的周期性变化, 从而使油气呈周期性的非连续运移。这对于解释处于相对封闭条件下油气运移过程中所表现出的幕式排烃现象尤为重要。

(2) 与构造应力变化速率有关。这反映在方程(5)中等号右方第一项中, 可以看出构造应力大小的快速变化将有利于油气的运移, 这可以从与地震伴生的一系列现象得到证实。如: 我国唐山大地震、宁河6.9级地震, 前苏联塔吉克斯坦6.7级地震都观察到有大量 CO_2 , N_2 , CH_4 等的排放, 以及震

时天空中出现自地面呈扇状展开的地光(可燃气体的燃烧)等^[16]。

(3) 与构造应力状态有关。也即与构造应力的尺寸及空间分布有关。这可从方程(1)、(2)和(4)看出, 即: 孔隙压力及梯度的大小影响着流体势及渗流速率。

此外, 我们还应认识到构造应力驱使油气运移的过程, 同时也是油气的聚集与富集的过程。由于在同一构造应力场作用下, 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也即油气运移的主要方向, 因而低势区也就成为油气聚集的最有利区域。

3 构造应力与油气分布

构造应力场对油气的分布有明显的控制作用。这表现在两方面, 其一构造应力场控制着含油气盆地的产生及其演化, 为油气提供了宏观的聚集部位; 其二盆地内构造应力场的分布及构造样式具体地控制了油气藏的分布。

人类对于盆地在油气聚集过程中所起作用的认识是不断发展的^[17~18]。从早期对油气的流动与燃烧的本能认识, 至19世纪对构造控制油气的直观分析, 到现在已充分认识到油气与盆地的密切关系。Perrodon^[19]在其所著《石油地球动力学》一书中更是直接提出“没有盆地就没有石油”的观点。

对沉积盆地的分类同样是随着人们对其认识的不断深化而发展的。60年代, 以固定论为基础的地槽学说将盆地划分为三大类, 即: 地台平原盆地、山前盆地和山间盆地^[20]。70年代, 伴随着板块构造学说的发展, 人们根据沉积盆地形成时的板块构造环境, 将其划分为: 离散环境、会聚环境、转换环境和混合环境^[21]。此外, 以地球动力学为基础的盆地分类是近年来的一种新的趋势。根据盆地形成的地球动力学背景将盆地分成张性、压性和扭性或者是与伸展、缩短挠曲和走滑作用有关的盆

地^[22, 23]。

目前,对于沉积盆地的形成机制——沉积盆地动力学的研究,越来越引起地质学家的重视,这也是当代地质学家的前沿课题之一,同时也是地球动力学研究的重要组成部分^[24~26]。Dickinson^[27]曾指出,盆地研究的集中点应从盆地类型转向盆地的基本形成过程;动力学分析必然是过程分析;盆地演化常常是多重的作用和过程,盆地类型是这种混合过程的复杂函数。当前学者们已经普遍认识到沉积盆地的形成是岩石圈深部构造背景作用力、周围构造环境作用力及沉积物载荷重力等综合作用的结果,因此应将盆地放到地球系统中进行研究才能真正揭示其成因。

岩石圈由地壳和岩石圈地幔组成,是沉积盆地的依托。近年来,随着研究工作的深入特别是一些国家超深钻探计划的实施,以往认为的岩石圈成分分层的观点不断受到冲击,从而岩石圈的流变学分层在沉积盆地动力学研究中愈来愈成为热点。因为岩石圈的流变性质直接影响了岩石圈的强度。一般认为,岩石圈上部(厚度一般在25~50 km之间)是坚硬的,能在较长的地质时期内存贮和传递应力,可称为弹性岩石圈。弹性岩石圈下部为半脆性或塑性变形区,温度、应变率、岩石类型等对其都有影响,而塑性变形则与流体压力、化学效应、粒径、形态及微构造不稳定性(如相变、重结晶与颗粒生长)等有关。

地球历史演化的动力来自地核和地幔,通过地幔将地核产生的热量传递到地表^[28]。在这一过程中,深部物质将发生物理化学性质的变化,并通过物质与能量的对流来达到地球内部的总体平衡,而且这已为当前的地震波层析成像所证实^[29]。在上述过程中,由于地球深部物质、能量的不均一分布,从而会在地幔或软流圈产生区域性隆升并传递到岩石圈。除了花岗岩浆侵入、剥蚀作用、轻物质俯冲使地壳加厚等的均衡响应引起隆升外,热膨胀作用、相变作用、水化或脱水反应等引起隆升的假说也具一定代表性^[30]。另外,岩石圈深部活动还导致了板块运动,从而产生的板块相互作用也影响着沉积盆地的形成。板内作用力的结果一方面取决于应力的方向、作用时间等,另一方面则与岩石圈的流变性质有关。此外,沉积物载荷在盆地形成中也起了重要的作用。因而,基于研究地球系统的整体思想,现在普遍将造山作用与成盆作用作为

大陆动力学研究不可分割的两个组成部分,并认为它们具有统一的动力学机制^[24, 31]。如中国西部和中部造山带演化与盆地中记录的构造事件有清晰的对比关系,特别是大陆碰撞过程与前陆盆地的形成是同一成因序列。如秦岭—大巴山造山带与其南北两侧鄂尔多斯和四川中生代盆地的演化过程就显示出了良好的对应关系。

事实上,中国和世界许多大型盆地多数是叠合盆地。Dickinson^[27]指出,许多盆地在演化过程中其控制机制是混合的,在不同阶段是变化的,因此,应将叠合盆地分解为不同的原型分别进行研究,因为不同原型是在不同的地球动力学背景中产生和演化的,并由此具有全然不同的特征^[32]。

从上述论述可以看出,对沉积盆地形成机制的研究应将盆地放在区域大地构造格架中进行。应充分利用地球物理资料,如地震解释、速度参数、地电和密度剖面特征等,从而对研究区地球深部特征具有一定的了解。其次,应与盆地形成时构造应力场分析及其它地质观测相结合,形成对沉积盆地的地球动力学模式的解释。

此外,构造应力还为油气最终聚集成藏提供了圈闭场所,这一点已为人们所普遍共识,在此不再赘述。

综上所述,构造应力对油气藏生成及分布具有重要作用,特别是对于油气运移特性的认识,将对我们油气勘探工作具有重要的指导作用。

本文是在国家自然科学基金(项目号:49772111)资助下完成的,特此致谢。

参 考 文 献

1. Соловьев Н. И., Амурский Г. И. Тектонодинамика и нефтегазоносность [J]. Геотектоника, 1984, (1): 34~45
2. 钟建华, 李自安, 张琴华, 等. 剪切作用及剪切构造与生、储油[J]. 石油勘探与开发, 1996, (2): 21~23
3. 刘文汇. 值得重视的有机质演化营力——成烃的力化学作用[J]. 天然气地球科学, 1995, 6(4): 1~7
4. 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994
5. Hubbert M. K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG Bull, 1953, 37: 1954~2026
6. England W. A. The movement of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327~347
7. 康永尚, 郭黔杰. 论油气藏流体动力系统[J]. 地球科学, 1998, 23(3): 281~283
8. 康永尚, 庞雄奇. 油气成藏流体动力系统分析原理及应用[J]. 沉积学报, 1998, (3): 80~84

- 9 Spera F J. Dynamics of translithospheric migration of metasomatic fluid and alkaline magma[A]. In: Menzies M A, Hawksworth C J, eds. *Mantle Metasomatism*[C]. Calif: San Diego Academic, 1987. 1~ 20
- 10 Spera F J. Carbon dioxide in igneous petrogenesis: II fluid dynamics of mantle metasomatism[J]. *Contrib Miner Petrol*, 1981, 71: 56~ 65
- 11 Turcott D L. Rthology of the oceanic and continental lithosphere[A]. In: Fuchs K, ed. *Composition, structure and dynamics of the lithosphere-asthenosphere system* [C]. Washington: Am Geophys union, 1987. 61~ 68
- 12 Terzaghi K, Peck R B. *Soil mechanics in engineering practice*[M]. New York: Wiley, 1948. 556
- 13 肖树方, 杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987
- 14 科林斯 R E. 流体通过多孔材料的流动[M]. 陈钟祥, 译. 北京: 石油工业出版社, 1984
- 15 陶一川. 石油地质流体力学分析基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
- 16 刘若新, 樊祺诚. 流体地球化学[A]. 见: 欧阳自远, 编. *地学化学: 历史 现状和发展趋势* [C]. 北京: 原子出版社, 1996. 27~ 32
- 17 赵重远. 石油地质学发展: 反思和展望[J]. *石油与天然气地质*, 1998, 19(1): 8~ 14
- 18 Chapman R E. *Petroleum geology — a concise study*[M]. New York: Elsevier, 1973. 1~ 22
- 19 佩罗东 A. 石油地质动力学[M]. 冯增模, 邬立言, 王殿凯, 译. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 20 潘钟祥. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986. 216~ 218
- 21 Ingersoll R V. Tectonics of sedimentary basins[J]. *Geological Society of American Bulltin*, 1988, 100: 1 704~ 1 719
- 22 Allen P A, Allen J R. *Basin analysis principles and application*[M]. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 1990. 464
- 23 刘和甫. 沉积盆地动力学分类及构造样式分布[J]. *地球科学*, 1993, 18(6): 699~ 724
- 24 李思田. 沉积盆地的动力学分析[J]. *地学前缘*, 1995, (3): 1~ 7
- 25 何登发, 李德生. 沉积盆地动力学研究新进展[J]. *地学前缘*, 1995, (3): 53~ 58
- 26 李德威. 大陆构造与动力学研究的若干重要方向[J]. *地学前缘*, 1995, (2): 141~ 146
- 27 Dickison W R. Basin Geodynamics[J]. *Basin Research*, 1993, 5: 195~ 196
- 28 王东坡, 薛林福, 刘立, 等. 沉积盆地的地球动力学[J]. *石油与天然气地质*, 1998, 19(3): 181~ 185
- 29 Richard Y, Vigny C. Mantle dynamics with induced plate tectonics[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1989, 94: 17 543~ 17 559
- 30 马昌前. 大陆岩石圈与软流圈之间的耦合关系[J]. *地学前缘*, 1995, (2): 159~ 165
- 31 邓乃恭, 任希飞. 造山与成盆作用形成与统一的动力学机制[J]. *地质评论*, 1996, (4): 300~ 303
- 32 朱夏. 板块构造与中国石油地质[A]. 见: 朱夏. *论中国含油气盆地构造* [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 71~ 79

TECTONIC STRESS AND OIL-GAS POOL FORMATION AND DISTRIBUTION

Sun Qiang Xie Hongsen Guo Jie Su Genli Ding Dongye

(*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou*)

Abstract: Tectonic stress plays an important role in the process of oil-gas pool formation and distribution. On one hand, tectonic stress produces mechanical energy and strength chemical action which improve the thermal degradation of kero-gen and oil generation; on the other hand, tectonic stress can influence the fluid potential which results in oil and gas migration from higher potential zone to lower potential zone. In addition, the stress also produces tectonic traps for oil and gas accumulation and enrichment and controls their distribution.

Key Words: tectonic stress; oil-gas generation; fluid potential; oil-gas migration; oil-gas pool distribution