

地应力在油气地质研究中的作用、意义和研究现状

马寅生

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 本文从地应力与含油气盆地形成演化、地应力与盆内构造、地应力与油气运移和地应力与油气开采工艺 4 个方面论述了地应力在油气地质研究中的作用和意义。对油气地质研究中地应力的研究现状作了系统的阐述。在油气地质研究中,现今地应力可以通过实测和震源机制解确定其大小和方向。古地应力的大小和方向只能通过构造变形和显微组构来确定。

关键词 地应力 盆地 油气运移

地壳表层的一切构造变形,包括褶皱、断裂、片理等等,都是地应力作用的结果。地应力也是造成岩石圈板块运动的基本动力因素。

石油和天然气作为地壳表层岩石孔隙中的一种流体,其生成、运移和聚集过程就是流体在地应力作用下在岩石孔隙中的渗流和聚集过程。因此,地应力研究是油气研究中的一个重要方面,是解决含油气盆地演化和油气运移聚集动力的一条主要途径,具有重要的理论意义和实际意义。

1 地应力在油气地质研究中的作用和意义

概括起来,地应力在油气地质研究中的作用和意义包括 4 方面。(1)地应力对含油气盆地形成演化的影响;(2)地应力对盆地构造的影响;(3)地应力对油气运移的影响;(4)地应力对油气开采工艺的影响。

1.1 岩石圈内地应力的时空变化控制着含油气盆地的类型和演化过程

岩石圈内地应力(简称岩石圈应力)与沉积盆地动力学关系密切。岩石圈应力作用引起岩石圈变形、岩石圈板块运动,岩石圈深部热结构和深部作用过程发生变化,造成上地幔隆起,岩浆活动,岩石圈表层的褶皱作用和冲断作用,控制着沉积盆地演化的动力学过程。在岩石圈受引张应力作用地区,会造成岩石圈伸展减薄^[1]。相反,岩石圈受挤压应力作用地区,会造成岩石圈缩短,导致岩石圈板块俯冲,碰撞或岩石圈的缩短挠曲,形成各种聚敛型盆地^[2-4]或挤压挠曲型盆地^[5,6]。岩石圈内剪应力的作用会形成走滑型盆地。

岩石圈应力作用会造成岩石圈变形和板块运动,而岩石圈应力的大小和方向在地质历史上也会由于岩石圈的变形和板块运动随时间发生变化,岩石圈应力的时空变化,应力随时间的松弛和集中,都会对岩石圈变形,岩石圈板块运动,岩石圈表层沉积盆地的动力学演化产生至关重要的影响。

1.2 地应力控制着盆地构造的产生、发育及组合规律

地应力对盆地构造的影响包括两方面,一方面是对盆地沉积时期同沉积构造的影响,另一方面是对盆地沉积之后构造变形的影响。

盆地沉积阶段,地应力影响着盆地内凹陷和凸起的分布,凸起和沉降中心的迁移,同沉积断裂,同沉积褶皱的发生和发展。如果盆地沉积过程中受引张应力作用,引张应力就会在盆地沉积过程中形成一系列走向与引张应力方向垂直的正断层。这些断层将以同沉积断层的方式发育,控制着盆地内二级或三级构造带的形成和发展,控制着盆地内次级凹陷和凸起的分布及基底潜山的分布。如果引张应力的大小和方向在盆地沉积过程中发生变化,就会影响到这些同沉积断层的活动性,进而影响到沉降中心和凸起的迁移。如果引张应力被同方向的挤压应力所取代,就会造成沉积盆地的反转,形成正反转盆地。相反,如果盆地沉积过程中受挤压应力作用,且挤压应力超过岩石的屈服极限,但又不很大,就会造成盆地基底屈服挠曲,在盆内形成次级拗陷和隆起。这些次级拗陷和隆起的发育进一步控制盆地内沉降中心和同沉积褶皱的分布和发展。在这些同沉积背斜和隆起上,由于沉积物粒度较粗,又距生油凹陷比较近,油气运移时间长,往往是油气聚集的有利部位。如果挤压应力较大,就会在盆地边缘形成褶皱和逆冲断裂,造成盆缘隆起,且在盆地内部形成逆断层或滑脱构造。如果挤压应力很大,挤压应力作用将会使整个盆地褶皱隆起,盆地随之消亡。

盆地沉积之后,地应力作用一方面会使盆地内地层发生褶皱和断裂,形成各种构造变形和构造圈闭。另一方面,地应力作用会使原有同沉积断层以新的方式重新活动。新生褶皱和断裂的发育强度、分布和组合规律,原有断裂重新活动的强度和方式,受盆地沉积之后地应力的大小和方向所控制。

1.3 地应力影响着油气的运移和聚集

石油和天然气是岩石孔隙中的一种液态流体和气态流体,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。描述流体在孔隙介质中渗流规律的公式是达西定律:

$$\vec{V} = -KJ = -K \text{grad} H = \frac{k}{\mu} \text{grad} \left(-\frac{P}{\rho} + i_0 \right)$$

式中: \vec{V} 为渗流速度; K 为流体传导系数; J 为水力梯度; H 为水头势; k 为介质渗透率; μ 为流体粘度; P 为流体压力; ρ 为流体密度; i_0 为初始水头。

由此可见,地下流体的渗流需要压力降,渗流的强度取决于岩层的渗透率和流体的粘度。地应力作为地球内部客观存在的一种应力,既作用于岩石,引起岩石变形和岩石孔隙度的变化,影响油气渗流的强度,又作用于岩石孔隙中的流体。地应力的不均匀分布产生的压力降是引起岩石孔隙内流体渗流和聚集的基本驱动力。

1.4 现今地应力影响着油气田的开采和开发

现今地应力以及在开发过程中油田地下应力场的变化影响着油气田的开采和开发。油气藏的开发工程是地下岩层中渗流场、应力场、温度场等的耦合问题,其中地应力的作用占有重要地位。在油气田开发过程中,地应力对采注井网的布置,对水力压裂的设计、水压裂缝的延伸扩展规律,开采过程中的出沙问题,钻井套管的变形问题,对井壁的稳定等方面都有重要影响。

现今应力场也是决定油田排驱压力的主要因素。

2 研究现状分析

地应力包括地质历史时期的地应力(称为古地应力)和现今地应力。地应力的研究长期以来就是人们关注的研究领域之一。早期的研究主要侧重于构造应力,把构造应力与构造应变作为孤立的、单纯的现象来解释。40年代起,李四光^[7]与格佐夫斯基^[8]等把构造应力场同统一的地球物理场联系起来,是一个重大的发展。随后,构造应力场的研究有了很大发展,许多学者采用不同的方法对构造应力的方向和大小进行了大量研究,发展了许多确定构造应力大小和方向的方法和技术,特别是测定现今构造应力大小和方向的方法、技术发展较快。

80年代末,90年代初世界应力图工程以5700个以上的现场地应力观测点资料为依据,确定了全球各板块的最大主应力方向与应力相对大小^[9-13],集中地表现了全球现今构造应力方向和大小最新研究成果。

古构造应力场的研究,几十年来许多学者已经做了大量工作,取得了很大进展,积累了大量地方性或区域性的研究成果^[7,8,14-22]。然而,结合盆地构造应力场的研究,至今仍存在着不少问题和分歧意见。

2.1 构造应力方向的确定

构造应力方向的确定包括现今构造应力方向的确定和古构造应力方向的确定。

2.1.1 古构造应力方向的确定 古构造应力方向的确定,目前主要是利用各种地质构造变形痕迹反推变形作用发生时期的构造应力方向。对于地质历史时期构造应力方向的确定来说,这是唯一可行的方法。目前经常用来确定古构造应力方向的构造形迹有:

(1)用断裂构造确定构造应力方向 断裂是指在构造应力作用超过岩石强度极限后使岩石发生的破坏。在这个概念中没有考虑破坏后位移的大小。根据破坏后的位移量,断裂被分为节理和断层两类。它们都是构造应力的结果,都可以用来确定古构造应力的方向。

节理是一种常见的小构造。张节理与最小主压应力方向垂直,与最大主压应力、中间主应力方向平行^[7,14,16,17,18,23,24]。共轭的两组剪节理的角等分线与最大主压应力轴和最小主压应力轴平行^[7,20,25-27]。利用共轭剪切破裂面互相切错关系,来确定位于压缩象限角平分线的最大主压应力轴或位于伸张象限角平分线的最小主压应力轴的方法已逐渐被大家所接受。

关于断层与主应力方向之间关系的最著名分析是由 Anderson^[15]提出来的,他对脆性破裂条件下3种类型主要断层的应力状态作了概略的分析。最小主压应力轴与正断层、阶梯状正断层系的走向垂直。逆断层、叠瓦状逆断层走向与最大主压应力方向垂直。平移断层,特别是共轭平移断层与主应力方向的关系与共轭剪节理相同。

(2)用褶皱构造确定主应力方向 纵弯褶皱的轴面与最大主压应力方向垂直,褶皱的枢纽线即相当于中间主应力轴。横弯褶皱的最大主压应力方向垂直于原始岩层层面,一般其长轴方向为中间主应力轴方位,短轴方向为最小主压应力轴方位。

(3)用小构造和显微构造确定主应力方向 流劈理、片理、片麻理的面状构造与最大主压应力方向垂直。缝合线峰的锥轴(即峰线的角等分线)与最大主压应力轴平行。此外,构造透镜体、香肠构造、窗棂构造、杆状构造等小构造和岩石的显微组构都可以用来确定主应力轴的方向。

上述利用构造变形痕迹恢复古构造应力方向的方法,已被证明是行之有效的。但对含油气

盆地古构造应力场的研究来讲,还存在一些问题:

① 对于沉积盆地,除盆地边缘以外,盆地内部由于上覆岩层和沉积物的覆盖,我们无法通过节理、小构造以及显微构造来确定古构造应力方向。

② 由于沉积盆地往往都经历过多次构造运动,而我们对盆地内部的了解只能通过钻井和各种地球物理资料来实现。因此,通过褶皱、断裂确定构造应力方向的关键问题是如何区分不同时期的构造变形,以及确定不同时期构造变形的几何特征和力学性质。

2.1.2 现今构造应力方向的确定 现今构造应力方向可以直接用各种物理的或地球物理的方法来测定。目前用来测量现今构造应力方向的方法很多,如震源机制解法、原地应力测量法、跨断层位移测量法、地形变测量法、井壁崩落法、水压致裂法、地面电测法、波速各向异性法、天然地震反演法等等。这些方法各有各的特点,各有各的适应环境

考虑到资料来源、方法的成本、结果的可靠性等因素,在含油气盆地内确定现今构造应力方向可采用井壁崩落法和震源机制解法。

井壁崩落法是用四臂地层倾角测井资料分析钻孔近场应力方向的一种方法。该方法资料来源丰富,可靠性也较好,用来确定含油气盆地沉积盖层中的现今应力方向是目前较为理想的一种方法。

震源机制解法是利用多个地震台记录到的天然地震 P波初动讯号来判别震源节面,进而给出 P轴出地点,该出地点的方位和倾角就是应力释放轴的方位和倾角,即最大主压应力轴的方位和倾角。该方法对于确定地壳深部构造应力方向是行之有效的,也是确定岩石圈内现今构造应力方向唯一可行的方法。

2.2 构造应力大小的确定

构造应力大小的确定也有古构造应力大小的确定和现今构造应力大小的确定。

2.2.1 古构造应力大小的确定 古构造应力大小的研究是构造应力场研究中的一个难点。60年代以前基本上只能根据岩石力学试验资料来进行推断,但估算的数据经常偏大。70年代采用一些数学解析与显微构造的估算方法,但效果不十分理想^[28-32]。70年代后期以来,利用超显微构造中的晶体位错密度、重结晶颗粒大小以及亚颗粒大小确定古构造应力大小,经过最近十几年的实践证明是一种行之有效的估算方法^[33-36]。然而所有这些方法在含油气盆地内部都无法使用。首先,含油气盆地内的古构造应力作用很难达到产生动力重结晶的韧性变形条件。其次,沉积盆地内,沉积岩矿物晶体的位错密度难以代表盆地内古构造应力产生的位错密度。甚至盆地内古构造应力的大小不足以产生晶格位错。因此,上述估算古构造应力大小的方法只适用于盆地边缘造山带,不适用于沉积盆地内古构造应力大小的估算。

近年来国内一些学者^[37-39]用岩石的声发射方法确定沉积盆地内的古构造应力大小,给沉积盆地古构造应力大小的研究带来了希望。

2.2.2 现今构造应力大小的确定 现今构造应力大小主要通过现场地应力测量来获得,主要有应力解除法^[40]、水压致裂法^[39]、声发射法^{[37][41]}等。应力解除法主要用来测量浅部应力值,常用于工程领域的应力测量,难于反映油层深度的应力状态。水压致裂法和声发射法可以较好地反映油层深度的应力大小。至于现今地壳或岩石圈深度构造应力的大小,目前尚无可靠的测量方法。

2.3 构造应力场的模拟

通过地质方法、地球物理方法等手段研究构造应力的大小和方向是十分重要的,也是构造应力场研究的基础。但是,为了更深刻地认识构造应力场还应该采用各种模拟方法来反演应力

作用的过程 目前构造应力场的模拟主要有两类方法,一类是物理模拟;另一类是数学模拟。

物理模拟是以相似理论为依据,在人工条件下,用适当的材料来模拟某些构造变形在自然界的形成过程。最常用的有泥巴模拟和光弹模拟^[42-43]。

数学模拟是用数学力学的解析方法进行构造应力场模拟计算的。最常用的是有限单元法。

目前这两种模拟方法都有一定的局限性,且大部分模拟只能进行弹性状态下的模拟。在模拟的过程中使用各种方法进行比较,常常会取得比较好的效果。

泥料模拟可以在比较简单的条件下,在短时间内,通过直观形象展示构造变形的过程,给人以启示。但该方法在定量化和了解内部变形方向有一定的局限性。

光弹实验方法,可以在模型几何形状、大小及量化方向达到相当高的精度。但目前主要是在弹性范围内进行的。光塑性实验进行的不多。

有限单元法快速、方便,也能考虑较多的影响因素,但目前计算所用软件大都是弹性的,为数不多的粘弹性软件质量也不十分理想,而且有限单元法本身对边界条件的限制、单元划分的要求、计算所需材料参数的确定,也限制了这一方法在地质问题中的应用。

参 考 文 献

- 1 McKenzie D P, Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1978, 40, 25- 32.
- 2 Stockmal G S, Beaumont C and Boutelier R, Geodynamic models of convergent margin tectonics: the transition from rifted margin to overthrust belt and the consequences for foreland basin development. *AAPG Bull*, 1986, 70 180- 190.
- 3 Sinclair H D, Coakley B J, Allen P A and Watts A B, Simulation of foreland basin stratigraphy using a diffusion model of mountain belt uplift and erosion: an example from the central Alps, Switzerland. *Tectonics*, 1991, 10 539- 620.
- 4 Beaumont C, Foreland basins. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1981, 65 291- 329.
- 5 Cloetingh S and Sassi W, The origin of sedimentary basins: a status report from the task force of the International Lithosphere Program. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11 659- 683.
- 6 Watts A B, Lithospheric flexure due to prograding sediment loads: implication for the origin of offlap/onlap patterns in sedimentary basins. *Basin Res.*, 1989, 2 133- 144.
- 7 李四光,地质力学方法。北京:科学出版社,1976
- 8 格佐夫斯基,构造应力场。中译本“地质专辑”,第六辑,构造地质,北京:地质出版社,1957
- 9 Zoback M L, First and second order patterns of stress in the lithosphere. *J Geophys Res*, 1992, 92 11703- 11728.
- 10 Zoback M D, Zoback M L, Tectonic stress field of North America and relative plate motions. *J. G. R.*, 1991, 339- 366.
- 11 Gowd T N, Srirama R S V and Gaur V K, Tectonic stress field in the Indian subcontinent. *J. G. R.*, 1992, 11879- 11888.
- 12 Xu Zhonghuai, Wang Suyun, Huang Yurui and Gao Ajia, Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes. *J. G. R.*, 1992, 11867- 11877.
- 13 Mueller B, Zoback M L, Fuchs K and Mastin L G, Regional patterns of tectonic stress in Europe. *J. G. R.*, 1992, 11783- 11803.
- 14 张文佑、钟嘉猷,锯齿状断裂的力学形成机制。构造地质问题,北京:科学出版社,1965
- 15 Anderson E M, The dynamics of faulting. Oliver and Boyd, Edinburgh, 2nd ed, 1951.
- 16 马宗晋、邓起东,节理力学性质的判别及其分期配套的初步研究。构造地质问题,北京:科学出版社,1965
- 17 宋鸿林,共轭雁形脉列分析。地震地质,1983, 5, (2)
- 18 万天丰,张节理及其形成机制。地球科学,1983, 22, (3)
- 19 万天丰,关于共轭断裂剪切角的讨论。地质论评,1984, 30, (2)
- 20 万天丰,古构造应力场。北京:地质出版社,1988
- 21 Price J G, Henry C D, Stress orientations during Oligocene volcanism in Trans-Pecos Texas; timing the transition from Laramide compression to Basin and Range tension. *Geology (Boulder)*, 1984, 12(4): 238- 241.
- 22 马杏垣,中国岩石圈动力学纲要——1: 400万中国及邻区海域岩石圈动力学图说明书。北京:地质出版社,1987
- 23 Spencer E W, 1977, Introduction to the structure of the Earth. McGraw-Hill. 640p.中译本,北京:地质出版社,1981
- 24 徐开礼、朱志澄,构造地质学。北京:地质出版社,1984
- 25 Casey M, Mechanics of shear zones in isotropic dilatant materials. *J. G. R.*, 1980, 2(1/2): 143- 147.
- 26 Ramsay J G, Folding and fracturing of rock. McGraw-Hill. New York, 1967.

- 27 Ramsay J G, Shear zone geometry: a review. *J. Structural Geology*, 1980, 2 83- 99.
- 28 王维襄、韩玉英, 棋盘格式构造的力学分析. *地质力学论丛*, 第 4 号, 北京: 地质出版社, 1977
- 29 Nicolas A, Bouchez J L, Blaise J, Poirier J P, Geological aspects of deformation in continental shear zones. *Tectonophysics*, 1977, 42 53- 73.
- 30 Scholz C H, Shear heating and the state of stress on faults. *J. G. R.*, 1980, 85(B11): 6174- 6184.
- 31 Jamison W R, Spang J H. *组构和显微构造*. 北京: 科学出版社, 1976
- 32 Tullis T E, The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitudes. *J. G. R.*, 1980, 85(B. 11): 6263- 6268.
- 33 Durham W B, Goetze C and Blake B. Plastic flow of oriented single crystals of olivine. Part II, Observations and interpretations of the dislocation structures. *J. G. R.*, 1977, 82(B6): 5755- 5770.
- 34 Nuttal J, Nutting J, Structure and properties of heavily coldworked for metals and alloys. *Met. Sci.*, 1978, 12 430- 437
- 35 White S, Difficulties associated with paleo-stress estimates. *Bull. of Mineral.*, 1979, 102 210- 215. 中译本, *地震地质译丛*, 1981, 3, (5).
- 36 Takeuchi S, Argon A S, Review: Steady state creep of single phase crystalline matter of high temperatures. *J. Mater. Sci.*, 1976, 11: 1542- 1566.
- 37 丁原辰, 声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用. *岩石力学与工程学报*, 1991, 10, (4)
- 38 祁英男、刘健中、毛吉震, 用声发射法测定唐山地区历史地壳应力. *华北地震科学*, 1987, 增刊.
- 39 刘建中、张金珠、张雪, 油田应力测量. 北京: 地震出版社, 1993
- 40 王连捷、潘立宙, 地应力测量及其在工程中的应用. 北京: 地震出版社, 1991
- 41 修森, D. R., 克劳福特, A. M., 凯塞效应测量: 根据钻取岩芯用声发射确定原地应力的一种新方法. *地壳应力研究的新进展*, 北京: 地质出版社, 1990
- 42 黄庆华、马寅生、李永贤、王砚庆, 阜新一义县盆地构造演化及应力场光弹性模拟分析. *中国地质科学院院报*, 1991, 22
- 43 黄汉纯、黄庆华、马寅生, 柴达木盆地地质与油气预测. 北京: 地质出版社, 1996

THE ROLE AND SIGNIFICANCE OF CRUSTAL STRESS IN PETROLEUM GEOLOGY AND ITS PRESENT SITUATION

Ma Yinsheng

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

Abstract The author discusses the role of crustal stress and its significance in petroleum geology from four aspects: crustal stress and the formation and evolution of oil-bearing basins, crustal stress and the structures of the basins, crustal stress and the migration of oil and gas, and crustal stress and the oil development. A systematic exposition of the study situation of the crustal stress is made. The magnitude and direction of present crustal stress can be obtained by stress measurement and focal mechanism solution. The magnitude and direction of fossil crustal stress can be determined only by the analysis of structure deformations and microfabrics.

Key words crustal stress, basin, migration of oil and gas

作者简介

马寅生, 男, 生于 1962 年, 1982 年西安地质学院普查勘探系毕业, 1987 年获硕士学位, 副研究员。主要从事构造地质、石油地质、地应力和区域稳定性等方面的研究。通信地址: 北京市海淀区民族学院南路 11 号地质力学研究所。邮政编码: 100081