

油气成藏动力学中的流体动力场

叶加仁 王连进 邵 荣
(中国地质大学石油系,湖北武汉 430074)

温度场、压力场、能量场和应力场是流体动力场研究的主要内容。现今温度场一般根据钻井实测地温及大地热流测试确定,古地温场主要依据包裹体均一温度确定。压力场的研究方法颇多,主要有声波测井、实测地层压力和地震层速度方法,前两种方法主要应用于已钻探区,后者则重点应用于非钻探区。在进行能量场分析时,应注重在三维烃源岩体和流体输导体系发育的格架下,恢复古流体势。通常情况下,应力值较大的地域,其流体压力值也较高,对某一具体地区而言,首先应划分单井纵向压实-压力带,然后划分压力系统,最后进行正演模拟,探讨压力形成机制。地下流体动力场之间存在着互相联系、彼此耦合的关系,因此,须用整体的观点系统研究。

关键词 油气成藏 动力学 动力场 研究
第一作者简介 叶加仁 男 32 岁 副教授(博士) 石油地质

地下流体动力场是油气成藏动力学系统研究的主体和核心,正日益成为油气地质科学新的生长点,已引起国内外广大油气地质工作者的普遍重视与关注^[1~5]。近几年兴起的油气成藏动力学对沉积盆地的温度、压力、势能、应力等多种动力学的研究取得了长足的进展,并向多种动力场耦合方向发展,但由于未与含油气系统连为一体,只限于纯动力场的研究,也未揭示烃类运移的运动学规律^{**},所以,目前流体动力学研究中的不少方面仍有待深化。宏观流体运动学的研究是当前成藏动力学的重要突破点,而温度、压力、势、应力等物理化学场的模拟则是成藏动力学研究的关键。

1 流体动力场研究的主要内容

地下流体动力场的研究应以先进的油气成藏动力学理论为指导,在综合分析区域钻探、地球物理、分析测试和地质地化等资料的基础上,采用静态描述和动态模拟相结合的方法,对指定研究区域的温度场、压力场、流体势能场和构造应力场及其对油气聚集成藏的影响等进行系统研究(图 1),以

正确认识研究区地下流体动力场的空间分布规律和展布模式,分析盆地流体系统的构成,掌握油气运移聚集规律,直接为油气勘探服务。

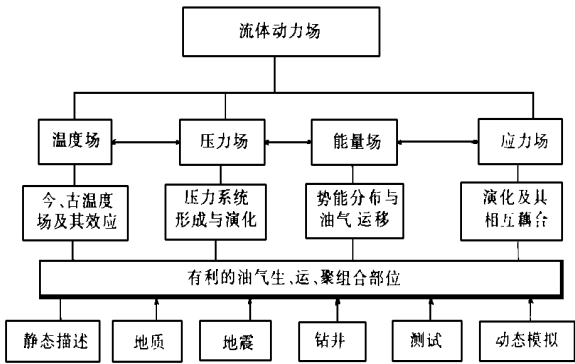


图 1 沉积盆地流体动力场研究的主要内容框图
Fig. 1 Block map showing the main research substances of fluid dynamic fields in sedimental basin

2 地温场

盆地内的油气富集本质上是由温度、压力和有效受热时间控制的化学动力学过程及由压力、浮力、水动力和流体势能联合控制的地下流体动力学过程综合作用的结果。沉积盆地的地温场主要受地幔热流、地层放射性热源、热传导、热对流、热辐射、岩石热导率、流体热导率、岩石组成等多种因素的综合影响,其中热传导是沉积盆地中热能传递的基本方式。传导热流的强弱主要取决于盆地形成演化的深部过程、动力学机制及沉积盖层非均质性

* 国家自然科学基金资助项目(49732005)和国家“九五”重点科技攻关项目(96-101-06-02)成果
** 龚再升,杨甲明. 油气成藏动力学与油气运移模型. 油气田成藏动力学研究技术研讨会论文. 1998
收稿日期: 1999 01 14

引起的基底热流的再分配。

盆地的今地温场一般根据钻井实测地温及大地热流测试资料确定。渤海湾盆地歧口凹陷的温度-深度综合剖面与对流热传导的理论地温剖面(左下角示意图)非常相似,可明显地分为上部斜率正常段和下部斜率陡立段两部分(图 2),其中正常段的斜率(3.55)与地层背景地温梯度相近,为受热传导影响的层段;下部陡立段反映高地温低地温梯度,为受强烈对流影响的层段。这反映歧口凹陷深部与浅部的热体制间存在着较大的差别。

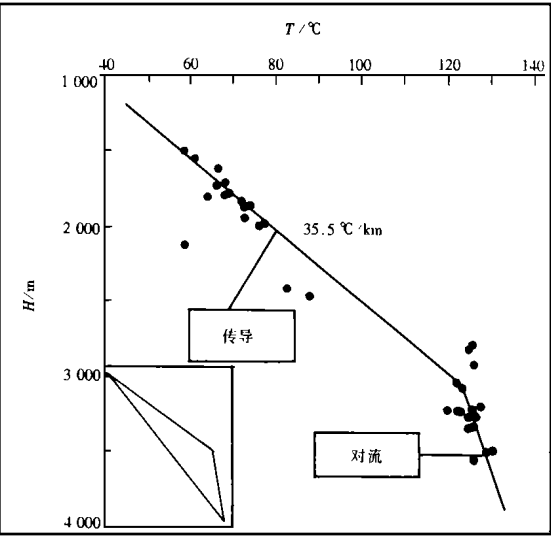


图 2 歧口凹陷钻井温度-深度综合剖面
Fig. 2 Synthetic section of drilling temperature- depth
in Qikou Depression

目前主要是应用镜质体反射率、自生成岩矿物、流体包裹体、同位素组成、矿物裂变径迹和牙形石色变指数等资料,指示地质作用过程中曾经历过的温度,或从盆地形成和演化的动力学机制以及地球内部热传播方式出发,建立热史模型,正演恢复沉积盆地的古地温。油气田有机包裹体研究近年来发展迅速,流体包裹体均一温度反映了砂岩在成岩作用过程中胶结物和自生矿物的结晶温度及当时介质的流体温度,其在沉积盆地古地温方面具有独特的功效。歧口凹陷 QK18-1-1 井的流体包裹体的均一温度总体上可划分出 98~ 116℃, 131~ 159℃及 170~ 210℃3 个温度段,分别反映了当时的成岩胶结温度、下部油源上侵温度和深部热流体温度,说明本区的古地温场受多种因素的制约与影响,经历了复杂的演化过程,存在多期复杂的热事件,且古地温梯度明显高于现今地温梯度。

3 压力场

异常流体压力研究是成藏动力学的主要研究内容之一,已成为现今一系列石油地质理论问题的生长点。据不完全统计,世界上超压盆地有 180 多个,其中 160 多个是富含油气的盆地,超压油气田约占全球油气田的三分之一左右^[6]。我国近海富含天然气的盆地(凹陷)都是超压的,如莺歌海盆地、琼东南盆地、珠三 A 凹陷、西湖凹陷、渤中凹陷及辽中北部凹陷等,因此,超压系统的区域分布状况和特征已成为目前油气勘探与评价以及油气运移地下流体动力学研究的基础之一。

迄今为止,可用于研究和预测地下流体压力场的方法很多,但就其应用的广泛性和重要性而言,以声波测井、实测地层压力(DST、RFT、FMT 等)和地震速度资料最为重要。其中前两种方法仅适用于已钻探地区,后者则应用于凹陷深部和未钻探地区的压力场研究和预测,为钻探提供钻前预测服务,并使压力场和超压系统的研究得以在盆地级规模上展开。

对一个具体工区的压力场研究,首先是根据钻井资料,利用声波测井和地层压力测试数据来定量标定单井压力场的特征,划分单井纵向压实-压力分带;然后根据地震资料,在剖面和平面的规模上研究压力场的展布特征,划分压力系统;最后,应用数值动态模拟的方法,正演恢复超压系统的时间序列演化史,并探讨超压系统的形成机制。

现今比较流行或基本得到确认的异常压力形成机制有快速沉积负荷、烃类生成、水热增压、粘土矿物转化、构造作用及化学渗析等,但除以孔隙度异常为基础的方法能够建立起相对确定性模型,较有效地定量预测地层压力外,其它因素对压力机制的影响十分复杂且具极大的不确定性。烃类生成(干酪根降解成烃和石油裂解成气)对异常压力的重要性愈来愈引起石油地质学家的重视,新生流体源的定量表述有望在近期得以突破。另外,不同地区、不同压力系统的主导成压机理往往各异,因此,在研究特定地区的压力场展布状况时,应结合具体的地质特征识别不同成因的压力系统,并对烃源岩系统与输导体系的空间配置、断层与不整合面的流体行为予以特别关注。

4 流体势能场

目前主要有两种方法应用于油气二次运移研

究: (1) 流体力学方法, 系将达西定律扩展到多相流动, 应用数值模拟技术在计算机上再现与时间有关的油气运聚过程, 如 Ungerer 等^[7]建立了一个考虑多孔介质中烃、水两相流动的二维运移模型, 模拟再现了弗里格剖面的天然气运移和成藏过程; (2) 流体势分析方法是应用渗流力学原理, 根据盆地内实测的地层压力、声波测井和地震层速度等资料, 来预测盆地内的地层异常压力及其分布, 然后将压力转化成流体势, 作出流体势剖面和平面对, 进而从平面和剖面上的油、气、水势的大小来分析油气二次运移方向、距离和范围, 再结合各种圈闭性质及其所在位置的地质条件, 预测可能的油气聚集的有利部位。该方法的最大优点在于能使已做地震勘探而未钻探的低勘探程度地区的流体压力、势分析和油气运移研究得以进行, 是一种切实可行、有效且简易的研究方法。

流体势的定义有多种, 目前大多采用 Hubbert^[1]提出的概念, 他将单位质量流体所具有的机械能的总和定义为势, 其由位能、压能和动能三大部分构成。由此可知, 处于地下某一空间位置的流体势大小主要取决于流体压力、高程、密度以及所在地区的重力加速度等因素。因此, 计算得出的流体势在整个空间要么是常数, 要么是连续变化的值, 前者构成一个等势空间, 单位质量的流体受到的合力为零, 该流体处于平衡状态; 后者可看作空间被一系列等势面所划分、分割, 单位质量的流体从高势面流向邻近的低势面, 所减少的势能为两个等势面间的差值, 其在充满流体的地层空间中存在着一个与等势面正交的力场。地下流体正是在这种力的作用下, 沿势梯度减小的方向运移, 而单位质量的流体在力场所受的力即为力场强度。油、气、水力场强度的差异实质上是由密度引起的, 它是浮力的表现, 所以当用油气的力场强度来分析油气的运移和聚集时, 浮力因素已包含在内。实际上, 上覆负荷压力已包括上覆的流体压力, 在地层空间中形成的一定势梯度就是由上覆负荷压力造成的。因此, 在分析流体受力运移时, 只要用流体势梯度即可, 流体势梯度变化的方向即为油气运移的主要方向。油、气、水在地层中的分布状态是由各自的势能分布所决定的, 在适当的条件下配合出现的油气相对低势区将构成有利的油气聚集区。

须指出的是, 在进行势能场分析时, 应注重在三维烃源岩体和流体输导体系发育的格架下, 流体

运移期古流体势的模拟恢复, 以确定与输导体系相连通的最有利的聚油构造。

5 构造应力场

构造应力场研究的主要内容是在确定各地点应力状态(时间、大小和方向)的基础上, 研究在一定区域范围内各个构造活动时期的构造应力分布^[9]。构造应力不仅形成了油气运移的通道与油气聚集的圈闭, 而且不连续状态的瞬间构造应力和连续状态的长期构造应力为油气运移提供了驱动力。从区域上看, 构造应力场控制了生油深凹陷、油气聚集带、沉降中心以及烃源岩系的展布; 而在局部上, 构造应力场则在一定程度上影响着含油气构造和油气田的分布。

盆地构造应力场分析可以从地质分析和模拟分析两个途径入手, 其中传统的地质分析方法是构造应力分析的基础, 主要是根据各种构造形变、岩石力学实验资料、生物化石、同位素资料及数学解析、物理模拟、井壁崩落法、凯赛效应法、振源机制解释、声发射法和水力压裂法等来对构造应力场进行定时、定向和定量。近年来, 随着电子计算机技术的迅速发展和广泛应用, 构造应力场的数值模拟研究取得了长足的进展, 为了解和模拟含油气盆地的古构造应力场及其发展演变特征提供了有效的途径。构造应力场的有限元法数值模拟就是其中的有效方法之一, 目前正成为构造应力场定量研究的一个最重要的手段。

地层流体压力除与所处地域的岩石物性有关外, 还与该处的应力状态有关, 地层流体压力与总应力成正相关关系^[10, 11]。通常情况下, 应力值较大的地域(应力集中区), 其流体压力值也相对较高。在构造应力作用下, 岩石和矿物将发生各种物理及化学变化, 产生压实、压溶、剪切、交代和重结晶等作用, 致使岩石和矿物释放出先期结晶或沉积时捕获或封存的流体或裂隙水, 形成构造运动中的流体或热流体, 并导致岩石中流体压力的增加, 形成异常高压; 而岩石体或岩层中流体压力的增大将大大降低岩石的强度, 从而有利于岩石发生变形, 即有利于构造变形的完成。一旦岩石中发生了构造变形(断裂或破裂), 则又反过来降低岩石中的流体压力。因此, 低压力区(低势能区)常常与低应力区相对应。

6 结语

不仅构成地下流体动力场的温度场、压力场、势能场和构造应力场内部的各因素间存在着相互联系、彼此耦合的关系, 而且各场之间也常常彼此影响、相互制约。因此, 在地下流体动力场研究时, 不仅要采用动态、定量的动力学方法, 而且必须应用整体、耦合的观点进行系统研究。

参 考 文 献

1 Hubbert M K. The theory of ground-water motion. *Journal of Geology*, 1940, 48: 783~ 944
2 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(8): 1954~ 2026
3 Doligez B. Migration of hydrocarbons in sedimentary basins. *IFP Exploration Research Conferences*, Paris: Technip. 1987

4 潘钟祥. 石油地质学. 北京: 地质出版社, 1986. 98~ 104
5 陶一川. 油气运移聚集的流体动力学机理问题. *石油与天然气地质*, 1983, 4(5): 254~ 268
6 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布. *地学前缘*, 1995, 2(3~ 4): 137~ 148
7 Ungerer P M, Burrus B, Doligez P Y. Basin evaluation by integrated twodimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(3): 309~ 335
8 刘斌, 沈昆. 包裹体流体势图在油气运聚方面的应用. *地质科技情报*, 1998, 17(增刊): 81~ 86
9 张明利, 万天丰. 含油气盆地构造应力场研究新进展. *地球科学进展*, 1998, 13(1): 38~ 43
10 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场在隐蔽性油气藏勘探中的应用. *现代地质*, 1998, 12(3): 401~ 405
11 真柄钦次. 石油圈闭的地质模型. 童晓光, 贾承造, 译. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 108~ 127

FLUID DYNAMIC FIELDS IN POOL- FORMING DYNAMICS
OF OIL AND GAS

Ye Jiaren Wang Lianjin Shao Rong

(*Department of Petroleum Geology, China University of Geosciences, Wuhan*)

Abstract

Temperature field, pressure field, energy field and stress field are the main contents in the study of fluid dynamic field. The present temperature field is determined by observed temperature in well drilling and the value of geothermal heat flow; palaeo-temperature field is principally determined by the uniform temperature of inclusions. The methods for studying pressure field are mainly acoustic log, observed formation pressure and seismic interval velocity. The first two methods are usually used in drilled areas, the last one is particularly used in undrilled areas. The energy field study should be stressed on the restoration of Palaeo-fluid potential in 3-D hydrocarbon source rock masses and fluid passage systems. In general, the places with higher stress usually have higher pressure. As for particular region, it is of the first importance to divide vertical compaction pressure belt of single well , then divide pressure system, and finally make forword modeling so as to probe pressure-forming mechanism . Underground fluid fields are connected and coupled with each other, one must consider the fluid dynamic fields as a whole.

Key words oil-gas pool forming dynamics dynamic field study