

流体包裹体在古压力模拟研究中的应用*

陈红汉¹, 董伟良², 张树林¹, 杨计海²

(1. 中国地质大学, 湖北武汉 430074; 2. 南海西部石油公司, 广东湛江 524057)

摘要: 烃类流体包裹体的最小捕获压力可以通过其在 $P-T$ 空间投影的等容线单值变化和等容线的物理特性来确定。南海琼东南盆地 YC21-1 构造崖城组砂岩中的方解石脉、石英次生加大边和颗粒裂纹中的流体包裹体反映, 地史时期该区曾经发育过 4 期流体包裹体, 盖层在第三期热流体活动时期, 曾发生过破裂, 但稍后又快速愈合, 从而未形成大量游离型天然气藏。

关键词: 流体包裹体; 古压力; 等容线; 盖层破裂; 琼东南

第一作者简介: 陈红汉, 男, 40 岁, 副教授(博士), 成藏动力学

中图分类号: TE122

文献标识码: A

1 原理

沉积盆地中的油气是从高势区向低势区运移, 并在低势区合适的圈闭中聚集成藏^[1,2]。盆地凹陷中心常常是烃源岩和异常超压系统发育的“重叠”区域。它向四周的隆起区都存在势差。然而, 油气并非漫无边际地沿着所有流体势递减的方向运移, 而往往是沿着某些特定的疏导系统(例如, 孔隙性储层、断层损伤带、不整合面等)发生汇聚式流动^[3]。因此, 追踪这些运移路径中油气运移的动力^[4,5], 是油气成藏动力学研究的关键内容之一。

然而, 确定地质历史时期地层流体压力(古压力)并非易事。尽管考虑到负载、粘土脱水、生烃和水热增压因素的地层压力正演模拟能够在盆地尺度上粗略地再现盆地流体压力演化景观^[6], 但受到众多先验性参数选择、地质数据密度等因素的制约, 还难以满足当前生产评价的精度要求; 况且, 以今压力系统分布作为边界条件, 模拟的压力演化中间过程似乎不是唯一的, 因而, 它本身并不能独立地证实模拟压力结果的可靠性。

成岩矿物中的流体包裹体是矿物结晶过程中因晶体生长机制、生长速度或某(些)组分浓度发生变化, 亦或多相界面相互作用等因素的影响而捕获于晶体缺陷中的成岩成矿流体, 是保存至今的成岩成矿原始样品。因此, 国外学者首先提出用包裹体

来测定压力^[7]。然而, 由于成岩矿物中的流体包裹体成分复杂、温度低, 难以直接引用单一体系、高温相图进行压力计算。国内学者从 1977 年起也开始进行这方面的探索^[8]。最新研究成果^[9,10]表明, 尽管成岩矿物中的流体包裹体记录下被捕获时期的流体压力不能直接测量, 但可根据其共生的盐水和烃类包裹体 $P-T$ 相图来估算最小捕获压力。

2 方法

目前, 利用流体包裹体来估算古流体压力的方法有 3 种: (1) CO_2 容度法^[11]; (2) 盐度-温度法; (3) 流体包裹体 PVT 模拟法。前两种方法, 已有较多论述^[7], 故笔者重点介绍后一方法。

如果流体化学成分已知, 那么就可以运用适当的状态方程构筑被包裹流体的 $P-T$ 相图和等容线。然而, 目前还不能定量分析单个成岩包裹体的成分, 显微光谱数据也不能生成精确的 PVT 模型。运用共焦荧光扫描显微镜(confocal laser scanning microscopy)能够生成单个烃类包裹体假三维图像, 从而精确地测定单个烃类包裹体的气液比和油水比^[12]; 爆裂仪法或真空研磨仪外接四极质谱仪能够获得群体包裹体化学成分^[13], 并以此作为与某期盐水包裹体共生烃类包裹体成分的近似代表, 来构筑该烃类包裹体的 $P-T$ 相图和等容线。另外, 还需要系统测定共生盐水和烃类流体包裹体的均一温度。运用同期盐水包裹体和含烃或烃类包裹体化学体系在 $P-T$ 空间投影的等容线单值变化和不同组成流体包裹体等容线在此 $P-T$ 空间只相交一次的物理特性, 即可确定烃类流体包裹体最

* 本文获国家自然科学基金(No.49572126)和国家“九五”攻关项目(99-110-05-02-01)联合资助。

收稿日期: 2002-03-12

小捕获压力。根据流体包裹体化学组成、同期盐水和含烃包裹体均一温度和室内温压条件下的气液比等参数,美国 CALSEP 公司发展了运用流体包裹体模拟其捕获最小压力的方法——“共生盐水和含烃流体包裹体等容线交汇法”、以及相应的 *PVT* 模拟软件——VTFLINC。

运用该方法虽可直接获得烃类包裹体的最小古压力,但前提是准确确定共生的盐水包裹体与烃类包裹体是否同期。

3 应用

3.1 地质背景

琼东南盆地处于南海北部大陆架西区、海南大陆南部。它是自晚白垩世(?)—古新世开始发育起来的呈近 E—W 向分布的伸展性盆地(图1)。早第三纪沉降中心位于盆地北部的松涛凹陷。受晚



图1 琼东南盆地构造单元分布

Fig. 1 Distribution of structural units in Qiongdongnan basin

1—构造单元;2—盆地世界;3—钻孔;4—断层

第三纪南海拉张影响,盆地沉降中心迁移到崖城凸起南部的崖南凹陷、乐东凹陷、松南凹陷和宝岛凹陷,并接受了巨厚的晚第三纪沉积。盆地的这种“跷跷板”式的构造格局和迁移式充填演化控制了盆地流体压力分布,在南部凹陷内以及低凸起(例如, YC21-1, YC26-1 等构造)上均发育异常超压^[14, 15]。

YC21-1 构造为处于崖南凹陷与乐东凹陷之间的低凸起,是早第三纪断陷期的古隆起,南侧以断阶与乐东凹陷相邻,北侧向崖南凹陷倾伏,总体表现为向南倾斜的斜坡。已钻井4口,仅在三亚组和梅山组发现多个含气层,但没有发现具有商业价值的油气藏。主要目的层渐新世陵水组和崖城组砂岩储集层一般埋藏在4 600 m 强超压界面以下,但储集物性良好。在崖城凸起正常压力系统中已发现迄今最大的 YA13-1 气田^[15];而在储层和圈闭形成与 YA13-1 气田相似的、但发育异常超压的 YC21-1 构造钻探4口井均落空(图2)。因此,

从古流体压力演化角度来研究 YC21-1 构造的成藏动力学条件显得尤为重要。

声波时差测井、地震层速度和钻杆测试(DST)以及地层破裂压力测量结果显示 YC21-1 构造自下而上发育“强超压—压力过渡带—传递超压—正常压力”的今压力系统结构,4 600 m 以下为强超压,在3 000~3 600 m 存在传递性超压囊。其中,目的层陵水—崖城组位于强超压系统之中,且今流体压力接近盖层的破裂压力(图2)。

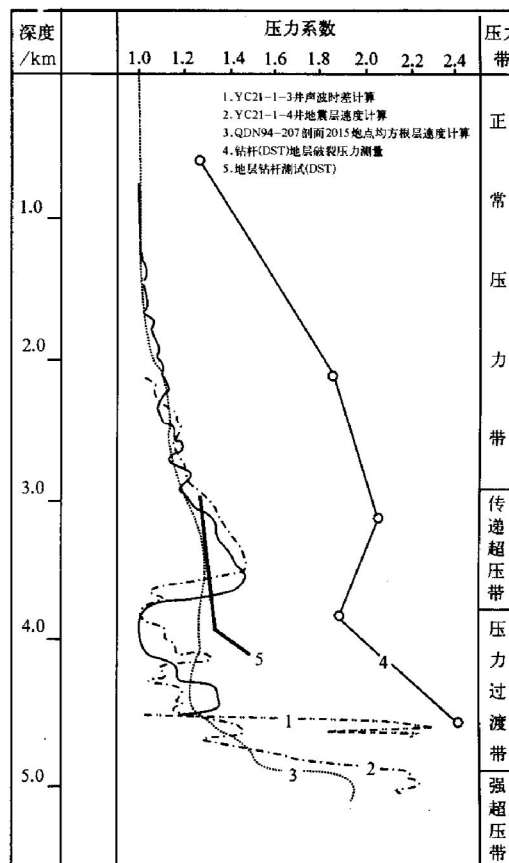


图2 YC21-1 构造钻井、测井和地震数据计算地层流体压力系数剖面

Fig. 2 Fluid pressure factors profile calculated by data of drilling, logging and seismic in YC21-1 structure

3.2 模拟结果

3.2.1 古流体压力

在 YC21-1 构造陵水组采集了11块样品,系统测定了其方解石脉、石英次生加大边和穿过石英颗粒裂隙中的盐水、含烃盐水、气态烃和含 CO₂ 流体包裹体的均一温度,结果表明该构造存在4期热流体,其均值温区分别为:132.7~135.6℃, 145.6~168.5℃, 170.8~186.8℃和201.3~204.5℃。在第一、第二和第三期热流体中均观测到“CH₄+ 盐水”、“CO₂+ 盐水”和“CH₄+ CO₂+ 盐水”包裹体,在第四期热流体中仅观测到“CO₂+ 盐水”包裹体。

选择其中的“CH₄+ 盐水”、“CO₂+ 盐水”和“CH₄+ CO₂+ 盐水”包裹体, 用来模拟古流体压力。

根据爆裂法获得群包裹体成分(表 1)、室温压条件下测定的气液比以及均一温度(表 2), 两口模

表 1 400℃爆裂温度下成岩矿物包裹体气相成分

井号	井深/m	成分质量分数/10 ⁻⁶						
		CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂ O	H ₂	N ₂	CH ₄	CO
YC21- 1- 1	4 279.39	296.80	2.53	934.16	0.60	17.08	1.38	27.79
YC21- 1- 4	4 326	123.83	2.27	948.04	0.17	18.24	1.63	17.84

表 2 流体包裹体显微测温(℃)及室内温压条件下气液比

井号	井深/m	流体包裹体均一温度(℃)及气液比								
		第一期			第二期			第三期		
		Th _{aq-1}	Th _{H₂O-1}	G/L	Th _{aq-2}	Th _{H₂O-2}	G/L	Th _{aq-3}	Th _{H₂O-3}	G/L
YC21- 1- 1	4 279.39	155	153.9	5	185.5	176.3	8	204.5	201.3	12
YC21- 1- 4	4 326	161	157	6	—	—	—	—	—	—

拟井中, YC21- 1- 1 井的 4 279.39 m 深度处的第二期盐水包裹体均一温度为 155℃, “CH₄+ 盐水”包裹体均一温度为 153.9℃, 经模拟获得其最小捕获压力为 60 MPa, 换算压力系数为 1.40, 表明这种含烃热流体为低压超压流体, 不会使盖层破裂(图 3a); 同一深度处, 第三期盐水包裹体均一温度为 185.5℃, “CO₂+ 盐水”包裹体均一温度为 176.3℃; 经模拟获得其最小捕获压力为 82 MPa, 换算压力系数为 1.92, 表明

这种 CO₂ 热流体为高压流体, 有可能就是这期热流体使得盖层破裂(图 3b); 同一深度处, 第四期盐水包裹体均一温度为 204.5℃, “CO₂+ 盐水”包裹体均一温度为 201.3℃; 经模拟获得其最小捕获压力的 42 MPa, 换算压力系数为 0.99, 表明先期 CO₂ 为高压流体使盖层破裂而泄压之后, 捕获了这期高温且压力正常的热流体(图 3c)。随着压力的释放, 盖层愈合, 又演化成现今的超压状态(压力系数为 2.2)。

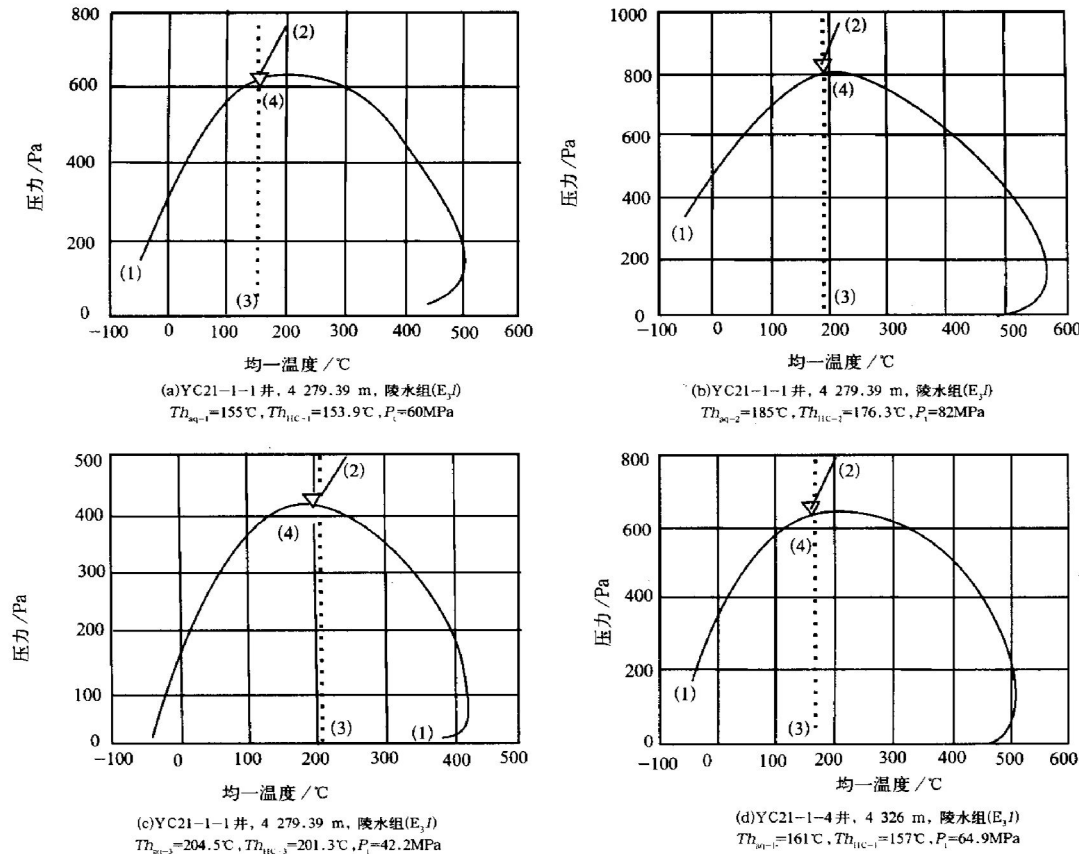


图 3 YC21- 1 构造流体包裹体古流体压力模拟结果

Fig. 3 Modeling result of palaeofluid - pressure for fluid inclusions in YC21- 1 structure
1-含烃包裹体相包络线; 2-含烃包裹体等容线; 3-共生盐水包裹体等容线; 4-等容线交点

YC21-1-4井4326 m处第二期盐水包裹体均一温度为161℃,“CO₂+盐水”包裹体均一温度为157℃;经模拟获得其最小捕获压力为64.9 MPa,换算压力系数为1.50,与YC21-1-1井类似(图3d)。

因此,古压力模拟结果支持“YC21-1构造盖层曾破裂”的认识。

3.2.2 成藏动力学过程

上述流体包裹体古流体压力模拟结果表明,第二期捕获的流体包裹体记录反映YC21-1构造开始发育中低幅异常超压;第三期记录反映该构造曾经为异常超压高势区,并可能导致其盖层流力破裂(图4),但盖层随后很快愈合;第四期(晚期)记录说明该构造在晚期再度形成超压封存箱,使得南面的乐东凹陷和北面的崖南凹陷中的烃类不太可能向这个高势区运移。

YC21-1构造未能形成游离气藏的主要原因是因为它本身是一个高势区,本身II型烃源岩干酪根丰度偏低,造成游离气量不足而难以聚集成藏。在北部崖南凹陷和南部乐东凹陷超压的影响下,侧向传递的流体量和温压差都有限,难以出溶大量的游离气。盖层的破裂会使得“自源”流体以水溶气形式排出。因此,无论从游离气量还是盖层破裂这两个控制异常超压系统烃类聚集关键要素来看,YC21-1构造都难以成为有利勘探目标。

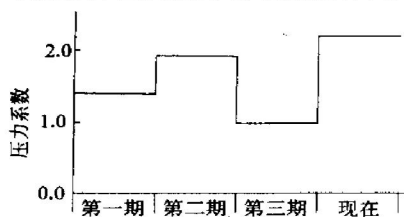


图4 YC21-1-1井4279.39 m流体包裹体记录的古压力系数旋回性演化

Fig. 4 Cyclic evolution of Palaeo- pressure factors recorded by fluid inclusion in 4279.39 m section of YC21-1-1 well

总之,通过流体包裹体古压力模拟认为,YC21-1构造盖层在第三期热流体活动时期曾发生过破裂,但盖层很快愈合,在晚期形成异常超压封存箱,从而未能形成大量游离型天然气藏。

尽管运用流体包裹体模拟古流体压力,能够直接获得含烃流体包裹体最小捕获压力,从“动力”角度分析油气成藏过程,并且根据流体包裹体产状也能够确定包裹体的相对次序,但流体包裹体本身不

能确定时间,因而,现在还不知道超压是何时开始形成的。如果将这种技术与二维盆地模拟技术结合起来,并作为其约束条件(另文),就能够在时间轴上讨论古压力演化与油气成藏动力学的关系。

致谢:本研究是作者赴英国Aberdeen大学做合作研究期间完成的,对该大学John Parnell博士无偿提供VTFLINC模拟软件表示感谢!

参考文献

- 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京:石油工业出版社,1994
- Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I. Abnormal pressures in hydrocarbon environments[J]. AAPG Memoir, 1998, 70: 183~ 210
- Parnell J, Carey P F, Green P, et al. Hydrocarbon migration history, West of Shetland: integrated fluid inclusion and fission track studies [A]. In: Fleet A J, Boldy S A R(eds). Petroleum geology of Northwest Europe: preceedings of the 5th conference [C]. London: Publication by the Geological Society, 1999. 1~ 3
- Mathews M D. Migration— a view from the top [A]. In: Schumacher D, Abrams M A. Hydrocarbon migration and its near— surface expression [C]. AAPG Memoir, 1994, 66: 139~ 155
- Chen Honghan, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Two petroleum systems charge YA13— 1 gas field in Qiongdongnan and Yinggehai Basins, South China Sea[J]. AAPG Bull, 1998, 82(5A): 757~ 772
- 龚再升, 陈红汉, 孙永传. 莺歌海盆地流体压力自振荡与天然气幕式成藏的耦合特征[J]. 中国科学, 1999, 29(1): 68~ 73
- Crawford M L. Phase equilibria in aqueous fluid inclusions[A]. In: Hollister L S, Crawford M L. Short course in fluid inclusions: applications to petrology[C]. Canada: Mineral Assessment Canada Short Course Handbook, 1981, 6: 75~ 100
- 施继锡. 有机包裹体与油气的关系[J]. 中国科学(D), 1987, 3: 318~ 325
- Pedersen K S, Fredenslund A, Thomassen P. Properties of oil and natural gases[J]. Petroleum Geology and Engineering, 1989, 5(5): 252
- Aplin A C, Larter S R, Bigge M A, et al. PVTX history of the North Sea's Judy oilfield[A]. In: Pueyo J J, Cardellach E, Bitzer K, et al. Proceedings of geofluids III[C]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69~ 70: 641~ 644
- Roedder E, Bodnor R J. Geological pressure determining from fluid inclusion studies[J]. Annual Review of Earth Planetary Science, 1980, 8: 263~ 301
- Pironon J, Thiéry R, Teinturier S, et al. Water in petroleum inclusions: evidence from Roman and FT-IR measurements, PVT consequences [A]. In: Pueyo J J, Cardellach E, Bitzer K, et al. Proceedings of geofluids III[C]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69~ 70: 663 ~ 668
- Benedetto D V, Frezzotti M L. Fluid inclusions in minerals: methods and application[M]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and University Publication, 1994
- 董伟良. 南海西部莺-琼盆地天然气勘探领域分析[J]. 天然气

工业, 1999, 19(1): 7~ 11

业, 1999, 19(1): 39~ 43

15 杨计海. 莺-琼盆地温压场与天然气运聚关系[J]. 天然气工

APPLICATION OF FLUID INCLUSION IN PALAEOPRESSURE MODELLING RESEARCH

Chen Honghan¹ Dong Weiliang² Zhang Shulin¹ Yang Jihai²

(1. China University of Geosciences, Wuhan; 2. Nanhai Western Oil Company, Zhanjiang, Guangdong)

Abstract: The minimum trapping pressure ratio of hydrocarbon fluid inclusions can be defined by their isochore single value variations in P- T space projection and physical property of their isochore. Calcite veins, quartz secondary enlarged margins and fluid inclusions in particle cracks in sandstones of Yancheng Formation of YC21- 1 structure in Qiongdongnan(southeastern Hainan) basin of the South China Sea indicate in geologic history that four phases of fluid inclusions were developed in that region; the capping bed was once burst during the third mobile phase of thermo- fluid inclusions which would be healed soon after. Therefore, no many free- state natural gas reservoirs could be formed there.

Key words: fluid inclusion; palaeopressure; isochore; capping bed burst; Qiongdongnan

迁 址 启 事

根据上级主办单位、主管部门的指示,从 2003 年第 1 期开始,《石油与天然气地质》的办刊地由湖北省荆州市迁往北京市。新办刊地联系方式为:

地 址: 北京市学院路 31 号中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院

邮政编码: 100083

电 话: (010) - 82312982

传 真: (010) - 82312089

电子信箱: oil- gasgeology@pepris.com

联系人: 陈会鑫, 黄兰

热忱欢迎广大作者、读者一如既往地关注和支持本刊。

《石油与天然气地质》编辑部

2002 年 9 月