

文章编号:1673-5005(2008)03-0019-04

超压盆地内剩余压力梯度与天然气成藏的关系

孙明亮¹, 柳广弟¹, 李 剑²

(1. 中国石油大学 国家油气成藏机理重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要:多种动力影响了天然气成藏过程,但不同地下环境中控制天然气运移聚集的主要动力不尽相同。对超压盆地内天然气成藏过程中的动力进行了分析,并对我国 30 个典型超压环境中的天然气藏进行了剩余压力梯度统计,在此基础上建立了剩余压力梯度与天然气聚集效率的关系。分析结果表明,超压盆地内天然气成藏过程中的动力可由浮力梯度及剩余压力梯度的和来表示,至少有 60% 的成藏动力来源于剩余压力梯度。超压盆地中,不同级别的天然气聚集效率具有相应的动力(梯度)标准,中效天然气成藏过程中,源-储间剩余压力梯度须达到 12 kPa/m;高效天然气成藏过程的动力界限为 18 kPa/m。我国大中型超压盆地中气藏成藏期间的剩余压力剖面可划分为散失型、弱压差汇聚型和强压差汇聚型 3 种类型。其中散失型不具备指向储集层的运移动力,无法形成天然气藏;汇聚型可能形成天然气藏,其剩余压力梯度控制了成藏效率。

关键词:超压盆地; 剩余压力梯度; 天然气成藏; 成藏动力

中图分类号:TE 122.1

文献标识码:A

Relationship between excess-pressure gradient and gas accumulation in overpressured basin

SUN Ming-liang¹, LIU Guang-di¹, LI Jian²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang 065007, Hebei Province, China)

Abstract: Gas migration and accumulation were controlled by several forces, but the significance of each force was considerable difference in different geologic environment. Dynamic of gas migration was analyzed in overpressured basin. The relationship between excess-pressure gradient and gas accumulation efficiency was established by statistics of excess-pressure gradient in over 30 basins in China. The results show that dynamic of gas migration can be divided into two components including buoyancy and excess-pressure gradient, and at least 60% of gas migration dynamic comes from excess-pressure-difference. In overpressured basin, gas accumulation efficiency correlates closely with excess-pressure gradient. It would take place moderately efficient gas accumulation event unless excess-pressure gradient is beyond 12 kPa/m. And only excess-pressure gradient was beyond 18 kPa/m, highly efficient gas accumulation would happen. In large and medium-sized overpressured basin of China, excess-pressure section in gas accumulation period can be divided into three types: scatter dynamic type, lower excess-pressure gradient afflux type and strong excess-pressure gradient afflux type. The excess-pressure section of scatter dynamic type does not have migration dynamic directing reservoir, and can not develop natural gas pool. The excess-pressure section of afflux type can develop natural gas pool, and the magnitude of excess-pressure gradient controls the efficiency of gas accumulation.

Key words: overpressured basin; excess-pressure gradient; gas accumulation; accumulation dynamic

作为一种“可迁移型”地下有机流体矿产,油气成藏过程遵循能量定律,能量场的分布决定了天然

收稿日期:2007-11-28

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2007CB209503)

作者简介:孙明亮(1978-),男(汉族),山东青岛人,博士研究生,从事油气成藏机理研究。

气运移方向、方式和聚集部位。因此,有关能量场与天然气运聚的关系倍受关注^[14]。在超压盆地中,压力场在油气成藏过程中的作用尤为明显^[5-10]。以往的研究中较多涉及到能量分布与油气藏分布之间的关系^[11-15],但甚少定量分析成藏动力的构成,或者说各部分动力在油气运聚过程中的相对贡献。这就造成在比较不同坳陷或盆地间的成藏动力强弱时存在一定困难。笔者从流体势分析入手,在对我国30余个典型气藏和部分失利圈闭的统计结果的基础上,讨论剩余压力梯度在天然气成藏过程中的作用。

1 成藏动力构成

尽管驱动地下流体运动的力包括浮力、水动力、毛细管力、构造力、热力以及超压(剩余压力)等,但在较大尺度(如盆地、区带)范围内流体势被认为是流体运动的机械能,其分布和相对大小决定了油气运移的方向和能力^[1-3]。

流体势中的界面通常被作为油气二次运移的阻力,可纳入输导体性能进行分析。故此处所指的成藏动力包括流体势概念中的位置势能和弹性势能两项。用单位体积油气的流体势梯度表示运移的动力,表达式为

$$\nabla \Phi = -g \int_0^p \rho_f(p) dp + \nabla p. \quad (1)$$

式中, Φ 为流体势梯度, J/m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_f 为烃类流体密度, kg/m^3 ; p 为流体压力, Pa 。

如将流体压力表示为静水压力与剩余压力(p')的和的形式,则式(1)变为

$$\begin{aligned} \nabla \Phi &= -g \int_0^p \rho_f(p) dp + \nabla p = \\ &= -g \int_0^p \rho_f(p) dp + \rho_w g + \nabla p' = \\ &= g \left(\rho_w - \int_0^p \rho_f(p) dp \right) + \nabla p'. \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ_w 为地层水密度, kg/m^3 。

可以看出,流体势梯度可以由浮力梯度(右式第1项)与剩余压力梯度(右式第2项)的和表示。

地下温度、压力条件下,气-水浮力梯度范围为 $4.6 \sim 11.6 \text{ kPa/m}$ ^[2,16],考虑到地层倾角的因素,最大浮力梯度不足 10 kPa/m 。因此,剩余压力才是盆地流体动力场分析的主要内容之一,故利用式(2)表示方法很容易分析不同动力在油气运移过程中的相对贡献。

式(2)表示方式符合一般的油气运移动力的认识。常压盆地中,剩余压力梯度为零,浮力控制流体

质点运动;超压盆地中,剩余压力与浮力的合力控制油气运移。尽管超压盆地中往往发育两个以上的水动力系统,但主成藏期间,断裂等高效输电体的周期性活动将导致不同水动力系统间的交流,短暂成为一个相对统一的水动力系统,式(2)的分析结果也可适用。

对我国30个超压盆地中常规天然气藏成藏期的源-储剩余压力梯度统计发现(图1),剩余压力梯度最小为 8 kPa/m ,90%以上的气藏源-储剩余压力梯度均超过了 12 kPa/m 。这一统计结果表明,绝大多数超压盆地中,剩余压力梯度占整个成藏动力的60%以上。剩余压力梯度在超压盆地天然气成藏过程中发挥重要作用。

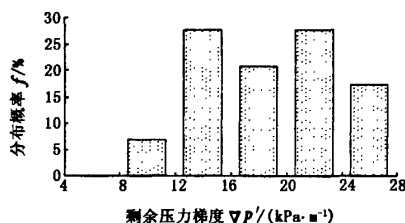


图1 我国超压盆地源-储剩余压力梯度分布概率

2 剩余压力梯度与天然气聚集效率

剩余压力梯度是超压盆地中天然气成藏的主要动力,剩余压力梯度与天然气聚集效率^[5]的关系体现了成藏动力对天然气成藏过程的影响。建立了我国30个常规天然气藏的聚集速率与源-储间剩余压力梯度交汇关系(图2)。剩余压力梯度与天然气聚集速率间存在明显的统计学关系。

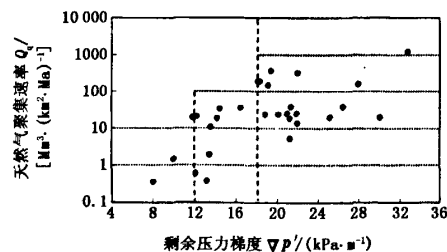


图2 天然气藏源-储剩余压力梯度与天然气聚集速率的关系

整体上,随着剩余压力梯度的增长,气藏聚集效率增高。剩余压力梯度与天然气聚集速率关系的外包络线呈阶梯状增长趋势,常规气藏数据均位于阶梯增长区域的右下半区。这一阶梯状增长趋势与天然气成藏过程^[5]的划分标准有较好的对应关系。这说明成藏动力与天然气成藏效率之间存在动力界

限,一定范围内的动力(剩余压力梯度)将造成一定幅度的聚集效率,导致发生一定类型的天然气成藏过程。

按照这一统计规律,初步建立了我国超压盆地中的天然气成藏动力划分标准(表 1)。

表 1 我国气藏成藏动力评价标准

类型	剩余压力梯度 $\nabla p'/(kPa \cdot m^{-1})$
高效气藏	>18
中效气藏	$12 \sim 18$
低效气藏	<12

上述评价标准的意义在于,建立了统一的成藏动力标准,有利于不同超压盆地或坳陷之间成藏动力的对比,为评价成藏动力在不同盆地成藏过程中的相对作用提供依据。

3 剩余压力梯度与天然气成藏

通过分析成藏期的剩余压力剖面,综合考虑剩余压力梯度的指向和数值,可将天然气成藏的动力环境分为散失型、弱压差汇聚型和强压差汇聚型 3 类。

3.1 散失型

散失型是指剩余压力梯度均未指向储集层(目标圈闭)。散失型又可分为两种情况:成藏期内储集层的剩余压力等于甚至高于烃源岩;储集层的剩余压力高于盖层。剩余压力是超压盆地中天然气最重要的成藏动力,剩余压力梯度的指向是天然气迁移的方向。因此,剩余压力梯度未指向储集层则表明天然气无法在储集层停留,或者根本无法到达储集层。统计表明,凡为散失型配置的圈闭无一成藏。

莺歌海盆地的崖 21-1 构造是储高源低散失型的代表(图 3)。该构造为一个形态较完整的背斜, Ey 是高效天然气灶,而 El₂ 砂体直接覆盖在 Ey 之上,形成下生上储的良好配置。Ey 发育 25 ~ 30 MPa 的剩余压力,El₂ 的剩余压力则由于断层沟通了高势水头区而高达 40 MPa。烃源岩的剩余压力远低于储集层。勘探证实,构造部位未见天然气聚集。

准噶尔盆地南缘的安集海构造是储高盖低的散失型(图 3)。储集层 E_{1,2}z 上直接覆盖了厚层泥岩盖层(E_{2,3}a),与深层水头的连通导致 E_{1,2}z 内剩余压力超过 20 MPa^[15],超压幅度远超过上覆盖层。勘探证实天然气经过 E_{2,3}a 时全部散失。

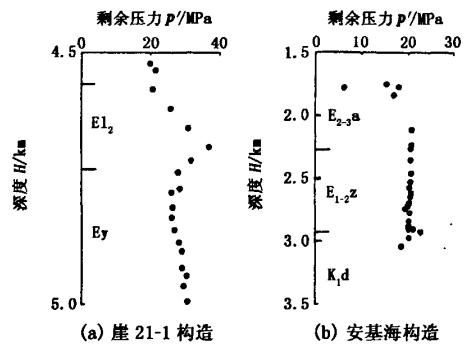


图 3 散失型剩余压力剖面(据文献[9],[11]改绘)

3.2 弱压差汇聚型

该种类型指储集层的剩余压力为整个剖面的最低部位,烃源岩和封盖层均存在指向储集层的剩余压力梯度,且烃源岩和储集层间剩余压力梯度低于 12 kPa/m。

该种类型的剩余压力梯度与最大浮力梯度相当,浮力和剩余压力的作用接近。统计发现,凡具备该类型气藏的聚集效率通常小于 10 Mm³/(km² · Ma),为中低效天然气藏,气藏运聚时期长、聚集效率低。平落坝气藏是该类型的代表。气藏剖面 T₃x 为主力烃源岩,与上覆的 J₂s 砂泥岩互层形成有利源储组合。实测压力显示(图 4),T₃x 存在指向 J₂s 的剩余压力梯度,剩余压力差约 5 MPa。成藏期(约 96 Ma)的压力恢复显示,晚白垩世平落坝构造的剩余压力以 T₃x⁵ 为中心向两侧逐渐降低,T₃x 与 J₂s 间剩余压力梯度约为 10.8 kPa/m,盖层剩余压力稳定。勘探证实,平落坝气田为中低效气田^[6]。

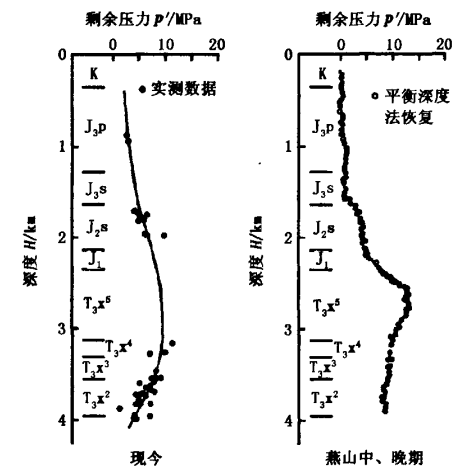


图 4 平落坝气田剩余压力剖面

3.3 强压差汇聚型

该种类型的储集层剩余压力最低,并且源-储间剩余压力梯度超过 12 kPa/m。这表明,储集层是天然气汇聚的指向,剩余压力在成藏动力中占绝对主导地位。在强大的成藏动力作用下,天然气聚集效率通常大于 $10 \text{ Mm}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$,运聚效率高,可形成高效天然气藏。

克拉 2 气藏是强压差汇聚型的代表。J 煤系为库车坳陷主要烃源岩,高丰度的天然气聚集在浅部的 K 中。以流体包裹体数据限定,对库车坳陷成藏期的地层压力模拟恢复显示^[6],气藏形成期间(5 ~ 1.8 Ma)烃源岩中的剩余压力远高于储集层,其间的剩余压力差在 20 MPa 以上,压力梯度高达 32 kPa/m。剩余压力梯度占整个成藏动力的 80%。勘探证实,克拉 2 气藏是聚集效率高达 $1180.99 \text{ Mm}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$ 的高效气藏。

4 结 论

(1) 油气成藏动力可由浮力梯度和剩余压力梯度的和表述。常压盆地中,浮力梯度为主要成藏动力;超压盆地中,至少有近 60% 的成藏动力来源于剩余压力梯度。剩余压力梯度在成藏过程中发挥了重要的作用。

(2) 天然气藏的聚集效率与剩余压力梯度存在统计学关系,不同级别的天然气聚集效率须具备相应的动力(梯度)标准。中效天然气成藏过程中,源-储间剩余压力梯度达到 12 kPa/m;高效天然气成藏过程的动力界限为 18 kPa/m。

(3) 我国大中型超压盆地中气藏成藏期间的剩余压力剖面可划分为散失型、弱压差汇聚型和强压差汇聚型 3 种类型。其中发散型不具备指向储集层的运移动力,无法形成天然气气藏;汇聚型可能形成天然气气藏,其剩余压力梯度控制了成藏效率。

参考文献:

- [1] 张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1999:143-147.
- [2] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 第三版. 北京:石油工业出版社,2004:10-49.
- [3] 宋岩,王毅,王震亮,等. 天然气运聚动力学与气藏形成[M]. 北京:石油工业出版社,2002:128-132.
- [4] 郝芳,邹华耀,姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘,2000,7(3):11-21.
- HAO Fang, ZOU Hua-yao, JIANG Jian-qun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11-21.
- [5] 谢习农,王增明. 盆地流体动力学及其研究进展[J]. 沉积学报,2003,21(3):19-23.
- XIE Xi-nong, WANG Zeng-ming. Fluid dynamical and its advances[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 19-23.
- [6] 柳广弟,李剑,李景明,等. 天然气成藏过程有效性的主控因素与评价方法[J]. 天然气地球科学,2005,16(1):1-6.
- LIU Guang-di, LI Jian, LI Jing-ming, et al. The controls and the assessment method for the effectiveness of natural gas migration and accumulation process[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 1-6.
- [7] 魏永佩. 中国大中型气田天然气的运聚特征[J]. 石油实验地质,2002(6):490-495.
- WEI Yong-pei. The feature of migration and accumulation for large and medium sized gas fields in China[J]. Experimental Petroleum Geology, 2002(6): 490-495.
- [8] 宋岩,夏新宇,王震亮,等. 天然气运移和聚集动力的耦合作用[J]. 科学通报,2001(22):1906-1910.
- SONG Yan, XIA Xin-yu, WANG Zhen-liang, et al. Couple of dynamical of natural gas migration and accumulation[J]. Chinese Science Bulletin, 2001(22): 1906-1910.
- [9] SURDAM R C. 怀俄明拉腊米盆地白垩系岩石中的异常天然气压力封存体:油气聚集的一种新类型[J]. 王晓清,刘捷,黄开敬,等,译. 天然气勘探与开发,2000(4):50-59.
- [10] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京:科学出版社,2005:28-29.
- [11] 隋风贵. 东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):17-21.
- SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 17-21.
- [12] 张卫海,查明,曲江秀. 准噶尔盆地南缘古近系-新近系异常高压系统与油气成藏机理[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(1):10-12.
- ZHANG Wei-hai, ZHA Ming, QU Jiang-xiu. Overpressure and mechanisms of hydrocarbon accumulation in Tertiary of southern Junggar Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(1): 10-12.

(下转第 29 页)

弛伸展的构造环境,火山喷发岩广泛发育,具有间歇性和幕式特点,间歇期发育了扇-湖体系与火山岩体系互相叠置穿插,构成了早二叠统巨厚的沉积地层由盆内向山前迅速增厚,似棱柱状,其原型盆地受到达尔布特断裂的明显控制。

(3)不同的盆地类型控制发育了风成组、乌尔禾组和三工河组3套烃源岩。主力烃源岩为南部的玛湖凹陷内二叠系烃源岩,为好的生油岩,后主要经历了4期油气充注过程,分别对应二叠纪末、三叠纪末、侏罗纪末和白垩纪晚期。最终受油气系统控制形成了环玛湖凹陷最有利的油气聚集区,而且油气呈环带状分布。

参考文献:

- [1] 蔚远江,何登发,雷振宇,等.准噶尔盆地西北缘前陆冲断带二叠纪逆冲断裂活动的沉积响应[J].地质学报,2004,78(5):612-619.
WEI Yuan-jiang, HE Deng-fa, LEI Zhen-yu, et al. Sedimentary response to the activity of the Permian thrusting fault in the foreland thrust belt of the northwestern Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2004,78(5):612-619.
- [2] 雷振宇,鲁兵,蔚远江,等.准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布[J].石油与天然气地质,2005,26(1):86-91.
LEI Zhen-yu, LU Bing, WEI Yuan-jiang, et al. Tectonic evolution and development and distribution of fans on northwestern edge of Junggar Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2005,26(1):86-91.
- [3] 何登发,尹成,杜社宽,等.前陆冲断带构造分段特征-以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J].地学前缘,2004,11(3):95-98.
HE Deng-fa, YIN Cheng, DU She-kuan, et al. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts—a case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2004,11(3):95-98.
- [4] 朱宝清,冯益民.新疆西准噶尔板块构造及演化[J].新疆地质,1994,12(2):95-104.
ZHU Bao-qing, FENG Yi-min. Plate tectonics and evolution in west Junggar of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1994,12(2):95-104.
- [5] MITRAS, MOUNTVS. Foreland basement-involved structures[J]. AAPG Bulletin, 1998,82:48-52.
- [6] COUZENS B A. The control of mechanical stratigraphy on the formation of triangle zones[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996,44(2):165-179.
- [7] 陈新,卢复华,舒良树,等.准噶尔盆地构造演化分析新进展[J].高校地质学报,2002,8(3):258-264.
CHEN Xin, LU Fu-hua, SHU Liang-shu, et al. Study on tectonic evolution of Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2002,8(3):258-264.
- [8] 陈业全,王伟锋.准噶尔盆地构造演化与油气成藏特征[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):5-7.
CHEN Ye-quan, WANG Wei-feng. Structural evolution and pool-forming in Junggar Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004,28(3):5-7.
- [9] 鲁兵,徐可强.准噶尔盆地断裂活动与油气运聚的关系[J].新疆石油地质,2003,24(6):502-504.
LU Bing, XU Ke-qiang. Relationship between faulting activities and hydrocarbon migration/accumulation in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003,24(6):502-504.
- [10] (编辑 刘艳荣)
- [11] (上接第22页)
- [12] 金之钧,谢方克.中国典型含油气盆地地层压力分布特征[J].石油大学学报:自然科学版,2002,26(6):1-6.
JIN Zhi-jun, XIE Fang-ke. Distribution features of formation pressure in typical petroliferous basin of China[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002,26(6):1-6.
- [13] 张敏强.莺歌海盆地底辟构造带天然气运聚特征[J].石油大学学报:自然科学版,2000,24(4):39-42.
ZHANG Min-qiang. Migration-accumulation characteristics of natural gas in the diapir structure belt of Yinggehai Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000,24(4):39-42.
- [14] 罗晓容,肖立新,李学义,等.准噶尔盆地南缘中段异常压力分布及影响因素[J].地球科学,2004,29(4):404-412.
LUO Xiao-rong, XIAO Li-xin, LI Xue-yi, et al. Overpressure distribution and affecting factors in southern margin of Junggar Basin[J]. Earth Science, 2004,29(4):404-412.
- [15] MATHIAS P M. A versatile phase equilibrium equation of state; industrial and engineering chemistry[J]. Process Design Development, 1983,22:385-391.
- [16] (编辑 刘艳荣)