

济阳拗陷非生物成因气聚储的深层构造因素探讨

汤达祯¹, 刘鸿祥², 李小孟², 张君峰³, 刘大锰¹, 杜 刚¹

(1. 中国地质大学能源地质系, 北京 100083; 2. 胜利石油管理局, 山东东营 257000;

3. 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司, 北京 100027)

摘要: 通过综合分析深部人工地震探测资料和非生物成因天然气分布特征, 认为超塑性流动变形机制对于济阳拗陷地壳岩石流变和深部结构调整影响深刻。地幔物质上涌, 中、下地壳特别是低速性体的岩石流变以及表壳伸展破裂, 制约着含气构造按照表壳脆裂与深部流变的组合样式发展。岩浆活动受到韧性地壳分层的阻隔, 通过深熔作用同化岩石圈物质, 通过侵位地壳改造壳层性质。在低速体所在层位, 流体(包括二氧化碳)在聚集的同时促进了地壳岩层的变质、弱化。整个地壳层次上的深部顺层断裂、构造折离及断裂根部扩容是区内非生物成因气聚储的有利构造因素。

关键词: 济阳拗陷; 壳内低速体; 岩石流变; 含气构造; 非生物成因气。

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)01-0030-05

作者简介: 汤达祯(1957—), 男, 教授, 1991年毕业于中国地质大学, 获博士学位, 从事煤、油气地质与地球化学方面的研究。E-mail: tang@cugb.edu.cn

济阳拗陷富(纯)CO₂ 天然气资源不仅潜力可观, 而且具有明显的深源非生物成因特征^[1]。济阳拗陷地震勘测业已分辨出 10~20 km 深度范围内明显的层速衰减和变化, 而且所示分层在一定区域内稳定延伸。一般认为, 岩浆、流体和岩石蚀变弱化是形成壳内低速高导层的重要因素, 这有助于上、下地壳间韧性剪切带的形成, 被看作是某些新生代裂陷区产生的可能的力学机制^[2~4]。在济阳拗陷, 壳内低速性层不仅与拗陷发育空间及断裂构造发育相关, 还可能与岩石圈流变制约下的非生物成因天然气储聚存在联系。

1 地球动力学背景

华北、渤海地区位于东亚大陆东缘, 以太古—元古宇的变质岩系为主组成统一的基底。陆上华北区地壳速度结构复杂, 速度平均值较低, P 波平均速度 6.21 km/s, S 波平均速度 3.44~3.55 km/s。地壳具三分结构: 上、中、下地壳 P 波速度分别为 2.0~5.3

km/s, 5.7~6.3 km/s 和 7.1~7.4 km/s。多数地区的中地壳及上地幔含有规模不等的低速结构层^[5]。大地热流、莫霍面及软流圈埋深等值线形态相似, 高异常出现在渤海中部, 并以此为中心在面上展开, 这里壳层薄、莫霍面和软流层埋深浅, 呈明显的岩石圈上隆的裂谷式拉张状态, 并且是强震的发育区^[6]。华北、渤海地区从表层沉积到上地壳, 重力均衡控制的沉降过程仍在继续, 下地壳受挤压发生缓慢的水平运动。在脆性的上地壳与韧性的下地壳之间, 中地壳低速结构层与多震层相一致, 构成流变性质的过渡带, 在地壳内部对来自深部的水平拖拽作用作出反应。

2 济阳拗陷深部构造

2.1 地壳分层结构与壳内低速体

济阳拗陷地壳厚度变化于 28~38 km 之间, 在隆起处增厚、凹陷内减薄, 差值近达 10 km(图 1)。速度分层结构明显: (1) 结晶上地壳厚 6~7 km, P 波速度为 5.7~6.3 km/s, S 波速度为 3.0~3.7 km/s, 凹陷深处结晶上地壳仅厚 6~7 km, 底界埋深 14~15 km; 隆起深处结晶上地壳则厚达 14~17 km, 底界埋深 16~18 km。 (2) 中地壳厚 6~9 km, P 波速度

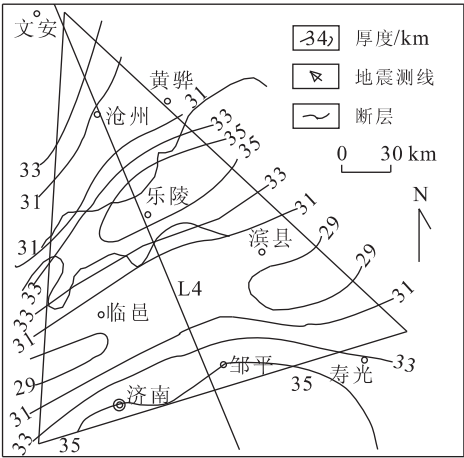


图 1 济阳拗陷地壳厚度等值线

Fig. 1 Thickness contour of earth crust of Jiyang depression

为 6.45~6.55 km/s, S 波速度为 3.8~3.9 km/s, 其底界在凹陷之下也略呈隆起。(3)下地壳厚 7.5~11.0 km, P 波速度为 6.6~7.3 km/s, S 波速度为 3.95~4.3 km/s。(4)隆起与凹陷处的上地壳厚度差值大致相当于凹陷内新生代最大沉积厚度, 凹陷的形成与地壳伸展变薄关系密切(图 2)。

在渤海湾地区莫霍面整体隆升的背景下, 济阳拗陷地幔及软流层抬升幅度还与次级拗陷发生联系, 凹陷之下莫霍面上隆幅度显著增大(惠民凹陷 5~6 km, 东营凹陷 4~5 km)。济阳拗陷软流层埋深仅为 50~70 km, 由陆向海呈抬高趋势。

壳内存在低速层并分化为顺层分布的透镜状低速体, P 波、S 波速度分别为 6.1~6.3 km/s 和 5.9~

6.1 km/s, 与围岩速度差小者为 0.1~0.2 km/s, 大者可达 0.3~0.4 km/s。惠民凹陷内低速体分别出现在上、中地壳, 其中上地壳低速体埋深 11.5~15.5 km, 中地壳低速体埋深 15.5~21.5 km, 合计厚度约 10 km。在东营凹陷西北, 低速体出现在中、下地壳, 其中中地壳低速体埋深 16~21 km, 下地壳低速体埋深 22~27 km。低速体向隆起方向尖灭。

2.2 断裂体系

济阳拗陷东侧为郯庐断裂带所限, 与郯庐断裂频繁活动及应力转换有关, 拗陷内不同级别的断裂异常发育。断裂走向大致呈近 EW、NE 及 NW 向三组。EW 向断层发生时间早, 常为后期断裂所截。有些成盆前活动性较强, 可切割太古界至中生界, 构成基底断裂; 有些是长期活动断层, 控制凸起与凹陷的对立发展。NE 及 NW 向两组断裂具有共轭性质, 始发于中生代末, 受郯庐断裂运动相匹配的区域构造应力场制约。NE 向断层活动可持续到第三纪甚至第四纪, 尤其在渐新世活动强烈, 对表壳油气聚集起主导控制作用。NW 向断层活动时间较短, 一般延续至渐新世。不难发现, 深达低速体的边界断裂明显限制了次级断层的深切发育(图 2)。

3 控气构造及其作用机制

3.1 表壳脆裂与深部流变样式

“北断南超”断陷格局是济阳拗陷的表壳含油气构造的典型特征, 深部的构造均衡调整则显示出塑

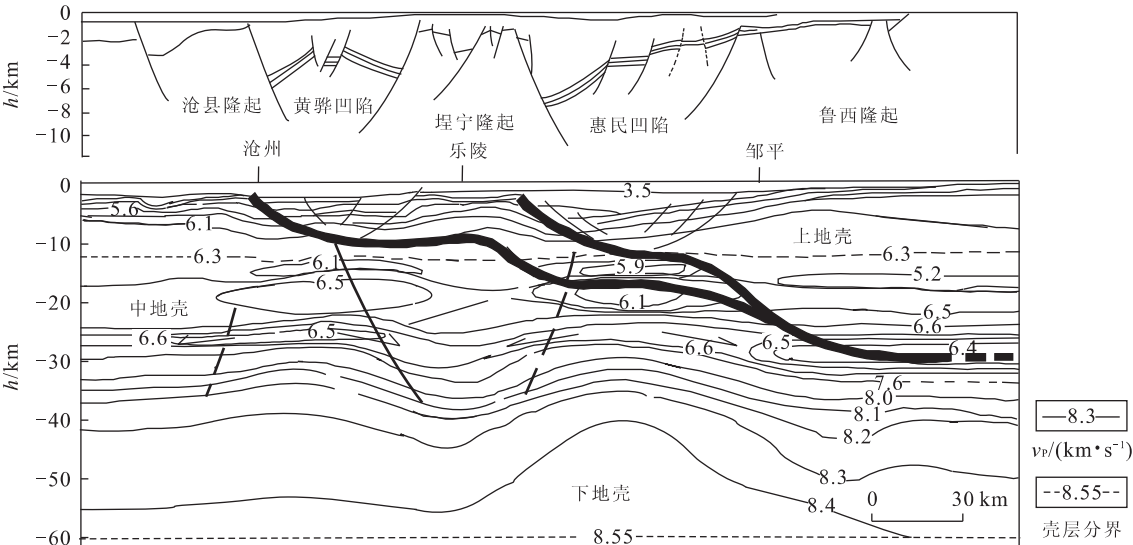


图 2 沂源—乐陵—大城(L4)剖面地壳及上地幔 vp 结构示意

Fig. 2 vp structural diagram of earth crust and upper mantle in Yiyuan-Leling-Dacheng (L4) profile

性流动的强烈趋势。Mattaueer 根据岩石主导宏观变形机制,提出了构造层的概念(据文献[7])。随后, Carter 等[8]、刘俊来[7]注意到物理(温度、压力、应变速率和应力等)、化学(物质成分、流体等)因素和大地构造背景对大陆岩石圈流变性的影响、岩石力学反应及其微观机制的重要性,将大陆岩石圈划分出 4 个流变域,即脆性域(0~10 km, 碎裂流动为主)、半脆性域(10~35 km, 碎裂与颗粒滑移相伴)、低温韧性域(35~50 km, 颗粒边界过程与位错蠕变)、高温韧性域(大于 50 km, 位错蠕变、扩散作用和分熔作用)。新的地质、地球物理和实验资料不断证实,无论是在上、中、下地壳或是在地幔上部都有一些薄弱带或强流变带存在,并且主要出现在 10~15 km, 20~28 km, 25~40 km 和 60~85 km 深度范围内,致使大陆岩石圈呈现出不同的圈层结构。在济阳拗陷,上地壳—中、下地壳—岩石圈下部,涵盖了类似由脆性域、半脆性—半韧性域及至韧性域的岩石圈力学性质的整体转化,而各个层圈物质分布的不均匀性,则进一步导致了运动学方面的差异。济阳拗陷之下地幔物质上涌,中、下地壳特别是低速物性体的岩石流变以及表壳伸展破裂,构成统一应力场中岩石变形、变位,按照表壳脆裂与深部流变的组合样式发展。

3.2 顺层断裂、折离及断裂根部扩容

Boullier 和 Gueguen 把岩石的超塑性及超塑性流动概念引进岩石变形的研究(据文献[9~12])。超塑性流动变形作用是陆壳下部岩石变形的重要机制,它直接导致岩石及其中矿物脱水、相变、弱化,在波速、强度和导电性等物性方面发生变化。薄弱带可能聚集了促使岩石圈流动或板块运移的主要应力,薄弱带本身也可能是地壳拆离和滑动的主要场所。研究区箕状拗陷的发育对应于郯庐断裂新生代左旋引张事件, NW—SE 向地壳拉伸减薄过程使表壳产生张性铲状断裂,受韧性剪切带的阻隔及低速体内岩石流变,使得应变在中、下地壳耗散。在济阳拗陷及相邻的黄骅拗陷,北侧盆缘伸展断裂产状在深部变缓,沿低速体顶部呈阶梯状顺层滑动,巨型破裂面切过中地壳,在鲁西隆起前合并,有继续向下地壳延伸的趋势。拗陷之下叠置的低速体随深度规模增大,说明岩石流变在控制断裂发生的同时,内部组构及其自身规模也在变化。低速体使构造产状及性质出现变化,在破裂产生初期,这里是断层根部扩容带;在顺层滑移过程,这里极有利于产生滑脱、折离,成为构造薄弱带,产生虚脱空间。由于滑动面产状平

缓,表壳铲状断层根部在此交汇,基底断裂也在此被截,规模宏大的连通体系得以产生。

3.3 非生物气成藏响应

济阳拗陷典型的深源非生物天然气田(藏)主要分布于东营断陷西部高青—平南断裂附近,其次是惠民断陷东北部的阳信次级凹陷中,常与第三纪火成岩相伴生。平方王、阳信、青城凸起西部及花沟二氧化碳可占天然气成分的 60% 以上,气中 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 比值不仅显示壳幔混合成因特点,而且显著高于区内背景值,都在 3.00×10^{-6} 以上。玉皇庙、临南曲古、青城凸起东部气藏位于火成岩分布区,天然气中虽然贫二氧化碳,但其同位素显示亦系非生物成因[1]。沿 NE 向断裂或在其与 NW 向断裂的交汇处,为各类岩浆活动地带,同时也是深源非生物天然气聚集的有利区段。

4 岩石圈流变的构造储聚模式

岩浆、流体的存在和岩石强烈位错和蚀变是对壳内低速体的基本地质解释。地质作用过程中,综合营力往往交织在一起,如构造薄弱带有利于岩浆、流体活动,反过来促进岩石形变、破碎和蚀变,产生断裂、缝隙、孔洞、劈理、虚脱等外来及新生物质赋存空间。济阳拗陷地幔高隆,壳内低速结构层地震活跃,地质构造仍然处于积极调整过程。深源物质的介入可能通过多种机制影响表壳油气格局,其中非生物气的产生和储聚不可忽视岩浆活动的激发作用。岩石矿物脱水弱化、壳内流体活动是岩石圈流变的重要内容,岩浆作用正好能激化这一过程[13]。

德国 Schwarzwald 中部变质事件与 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 地壳流体作用及低速层发育直接有关[14]。如图 3 所示,在深部麻粒岩和榴辉岩形成伊始,富含 CO_2 等挥发分的流体已经存在。高温变质场(B)中,随着流动体系 F_1 的发展,渗透剪切带既有塑性变形、脆性—韧性透镜体和流体包裹体存在、深熔作用发生;又有流体释放、新的包裹体产生。至流动体系 F_2 止,开放的孔隙空间体积可达 8% 以上。强烈的纤维岩化出现在新老剪切面,深度 7~12 km,脱水与脱碱相伴并导致夕线石—石英针状体的形成,同时岩石硅化、长石变晶出现,地质体波速降低。在 Schwarzwald 地区,造山运动之后变质岩中新的流动体系(F_3 、 F_4)对于岩石水热变化和断层活动仍然具有影响。济阳拗陷岩浆活动具有长期及阶段性特

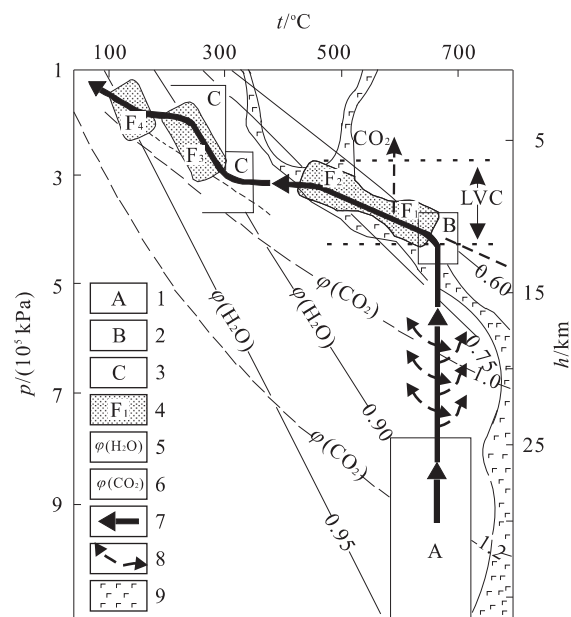


图 3 壳内变质、流体作用 $p-t$ 相及低速通道(扩展自文献[14])

Fig. 3 Metamorphism, $p-t$ phase of fluid action and low-velocity channel (LVC)

1. 中高压变质带; 2. 高温变质带; 3. 热液矿化带; 4. 流动体系; 5. 水分体积分数; 6. 二氧化碳体积分数; 7. 流体迁移轨迹; 8. 流体扩散轨迹; 9. 岩浆岩

点,而且与岩浆活动有关的潜在影响还在继续。在地壳层次上,岩浆活动与流体作用伴随,不仅导致相关资源如二氧化碳、氦等的产生,更在岩石脱水、弱化流变及容留空间上产生深刻影响。

5 结论

(1) 济阳拗陷之下地幔物质上涌,中、下地壳特别是低速物性体的岩石流变以及表壳伸展破裂,构成了统一应力场中岩石的变形、变位,含气构造按照表壳脆裂与深部流变组合样式发展。

(2) 流变是中地壳层次上主要应变行为,脆性的上地壳与韧性的下地壳之间,中地壳低速结构层与多震层相一致,构成流变性质的过渡带,在地壳内部对来自深部的水平拖拽作用作出反应。在整体塑性变形背景下,局部强硬介质的刚体转动或脆性破裂,以及韧性流动过程的弱化现象,是中地壳层次上应变行为的主要原因。超塑性流动变形机制对于济阳拗陷地壳岩石流变和深部结构调整影响深刻。

(3) 岩浆侵入喷发激活强化流体作用,流体—岩石的内在反应是决定地壳动力学过程的关键因素之

一。济阳拗陷中生代岩浆活动受到韧性地壳阻隔,通过深熔作用同化岩石圈物质,通过侵位地壳改造壳层性质。

(4) 对应于新生代区域性岩石圈拉张过程,表壳张性破裂受阻于韧性剪切带,岩石圈流变导致应变在中、下地壳耗散。壳内低速体在控制构造发展方面表现为,破裂产生初期,这里是断层根部扩容带;在破裂顺层穿透过程,极有利于产生滑脱、拆离。基底卷入表明断裂活动有关的结晶基底岩石弱化带亦将是扩大区内油气勘探的新领域。

(5) 新生代特别是老第三纪,与大陆边缘活化和区域性拉张过程相呼应,相对开放的断裂系统有利于幔源岩浆通达表壳,岩浆气体出溶、发泡,导致火山强烈喷发,岩石圈流变和壳内容气系统(深部压力条件下的流体赋存空间)得到加强,被流体饱和的壳内低速体成为真正意义上的深源物质的聚集场所和向表壳供气的中继站。

参考文献:

- [1] 戴金星,宋岩,戴春森,等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995. 131—150.
Dai J X, Song Y, Dai C S, et al. Abiogenic gases and their accumulation in the eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1995. 131—150.
- [2] Behrmann J H, Mainprice D. Deformation mechanism in a high temperature quartz-feldspar mylonite: evidences for superplastic flow in the lower continental crust [J]. Tectonophysics, 1987, 140: 297—305.
- [3] David B. Fluid movements—element transport and the composition of the deep crust [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1989. 90—121.
- [4] 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理——重论热液作用和岩浆作用[M]. 北京:科学出版社,1996. 1—212.
Du L T. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids: reconstruction of hydrothermalism and magmatism theory [M]. Beijing: Science Press, 1996. 1—212.
- [5] 宋仲和,安昌强,陈国英,等. 中国东部及其相邻海域 S 波三维速度结构[J]. 地球物理学报,1992, 35(3): 316—330.
Song Z H, An C Q, Chen G Y, et al. The 3-D shear wave velocity structure beneath the eastern China and its adjacent seas [J]. Acta Geophysica Sinica, 1992, 35 (3): 316—330.
- [6] 刘国栋. 华北地区壳内高导层及其与地壳构造活动性的

- 关系[J]. 中国科学(D辑), 1984, (9): 839—848.
- Liu G D. The high conducting layers of crust and their related to the crustal tectonic activities in North China [J]. Science in China (Series D), 1984, (9): 839—848.
- [7] 刘俊来. 大陆岩石圈流变学研究动向[A]. 见: 中国地质矿产部科学技术司、中国地质矿产部信息研究院. 当代地质科学技术进展[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 105—111.
- Liu J L. Trend of theoretical research on the flow deformation of continental lithosphere [A]. In: Science and technology department of geology and mineral ministry, PRC and information institute of geology and mineral ministry, PRC, eds. Advances in modern science and technology of geology [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991. 105—111.
- [8] Carter N L, Tsenn M C. Flow properties of continental lithosphere [J]. Tectonophysics, 1987, 136: 27—63.
- [9] Hubral P. Geophysical aspects of recent deep seismic soundings of the German crust [A]. In: Bodén A, Eriksson K G, eds. Deep drilling in crystalline bedrock [C]. New York: Springer-Verlag, 1988. 401—416.
- [10] Sibson R H. Earthquakes faulting as a structural process [J]. J Struct Geol, 1989, 11: 1—14.
- [11] Ziegler P A. Plate tectonics, plate moving mechanisms and rifting [J]. Tectonophysics, 1992(b), 215: 9—34.
- [12] Kremenetsky A A, Ovchinnikov L N. The Precambrian continental crust: its structure, composition and evolution as revealed by deep drilling in the U. S. S. R [J]. Precamb Res, 1986, 33: 11—43.
- [13] Frost B R, Frost C D. CO₂, melts, and granulite metamorphism [J]. Nature, 1987, 327: 503—506.
- [14] Behr H J, Frentzel-Beyme K. Permeability and porosity in crystalline bedrocks of the Central European basement — studies of cathodoluminescence [A]. In: Bodén A, Eriksson K G, eds. Deep drilling in crystalline bedrock [C]. New York: Springer-Verlag, 1988. 477—497.

Probe into Deep-Seated Structural Factors of Abiogenic Gas Accumulation and Storage in Jiyang Depression

Tang Dazhen¹, Liu Hongxiang², Li Xiaomeng², Zhang Junfeng³, Liu Dameng¹, Du Gang¹

(1. *Department of Energy Resources Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Shengli Petroleum Bureau, Dongying 257000, China*; 3. *Exploration and Production Branch, China Petrol Com Lt, Beijing 100027, China*)

Abstract: A synthetic analysis of deep seismic prospecting data and abiogenic gas distribution preliminarily reveals that superplastic rheological mechanism affects significantly the flow deformation of rocks and adjustment of deep structures of the earth crust in the Jiyang depression. Mantle substance upwelling and flow deformation of rocks in middle and lower crusts, especially in low-velocity body, along with stretching breach within the surface crust, restrict the development of the gas-bearing structures according to a knockdown style of brittle split in surface crust and flow deformation in depth. Magma function was obstructed by tenacity layer of the crust, and assimilated lithospheric substance through anatexis and transformed the layer nature by virtue of emplacement in the crust. In the layer containing low-velocity body, metamorphism and weakness of crust rocks have been promoted as the fluid including gathered CO₂. Deep bedding fault, structural dismantling and expansion of fault root among whole crust arrangement constitute beneficial structural factors for the abiogenic gas accumulation and storage in the study area.

Key words: Jiyang depression; low-velocity body of crust; flow deformation of rock; gas-bearing structure; abiogenic gas.