

构造成岩作用及其油气地质意义

曾联波^{1*}, 朱如凯², 高志勇², 巩磊³, 刘国平¹

1 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3 东北石油大学, 大庆 163318

* 通信作者, lbzeng@sina.com

收稿日期: 2016-07-05

国家自然科学基金石油化工联合基金项目(U1663203)和国家科技重大专项(2011ZX05003-002)资助

摘要 沉积储层的形成演化受沉积作用、构造作用和成岩作用共同的影响, 其中沉积作用是基础, 构造作用和成岩作用是关键。根据控制沉积储层形成演化的主要地质因素, 本文提出了构造成岩作用概念及其内涵, 分析了构造成岩作用在致密低渗透储层及其天然裂缝有效性定量评价中的应用。构造成岩作用是指沉积岩层从松散沉积物到固结形成沉积岩石及之后的过程中所发生的构造和成岩相互作用, 它主要研究沉积物沉积以后构造变形与沉积物物理、化学变化的相互作用关系, 既包括构造变形方式和变形强度对沉积储层成岩作用及流体的影响, 还包括成岩作用和流体对构造变形的影响。构造成岩作用控制了含油气盆地沉积储层的形成演化过程以及有效储层的分布规律, 利用构造成岩作用研究可以为致密低渗透油气储层质量评价、天然裂缝及其有效性评价提供有效的途径。

关键词 构造作用; 成岩作用; 储层演化; 天然裂缝; 储层评价; 油气地质意义

0 引言

含油气盆地沉积储层的形成演化与沉积作用、成岩作用和后期构造作用密切相关^[1-3], 其中, 沉积作用是储层形成的基础, 而沉积以后的成岩作用和构造作用是储层形成演化的关键, 它们共同控制了沉积储层的形成及其物性演变规律。对沉积储层, 过去主要侧重从沉积作用和成岩作用的角度研究, 而对构造作用的研究相对比较薄弱。实际上, 在沉积储层的形成演化过程中, 构造作用起着十分重要而又复杂的影响。一方面, 不同构造背景和构造变形影响沉积速率及成岩作用的发生^[4-5]; 另一方面, 成岩作用又通过影响岩石力学性质而影响构造变形。因此, 开展构造成岩作

用的相互关系研究, 对揭示沉积储层的形成机理及其演化规律具有重要意义。

对构造成岩作用相互关系的研究, 过去主要在高温变质领域开展了较多的工作。例如, 杨开庆^[6-7]将构造动力作用引起岩石、矿物的物质调整而产生的岩相和建造过程称为构造动力成岩成矿作用, 强调了在高温条件下岩石变形或者岩浆结晶时的地球化学作用, 并将矿物中元素的调整与应力有机地结合起来, 对指导金属矿藏的形成和勘探具有重要意义。而对沉积盆地低温领域(<300 °C)的构造成岩作用研究相对较晚、较薄弱, 近十多年来才开始从不同的侧面开展一些探讨。例如, 寿建峰^[8-9]、张荣虎等^[10]研究了构造侧向作用对砂岩成岩作用和孔隙演化的影响, 在此基础上提

引用格式: 曾联波, 朱如凯, 高志勇, 巩磊, 刘国平. 构造成岩作用及其油气地质意义. 石油科学通报, 2016, 02: 191-197

ZENG Lianbo, ZHU Rukai, GAO Zhiyong, GONG Lei, LIU Guoping. Structural diagenesis and its petroleum geological significance. Petroleum Science Bulletin, 2016, 02: 191-197. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.015

出了“砂岩动力成岩作用”的研究思路,认为构造作用通过构造应力和构造变形方式对成岩作用产生重要的影响,从而影响储层的物性变化^[8-10]。Laubach^[11]认为构造成岩作用主要研究变形作用和变形构造与沉积物化学变化之间的相互关系,并用构造成岩作用的思路来研究和评价储层天然裂缝的孔隙度演化过程。天然裂缝是构造成岩作用的典型产物^[12-13],其孔隙演化及有效性主要取决于构造作用形成裂缝以后发生的成岩胶结及溶蚀作用。

近年来对前陆盆地致密低渗透储层的研究表明,在沉积储层的形成演化过程中,构造作用和成岩作用的相互关系十分重要而又复杂,构造变形的差异性是导致一个地区成岩演化和储层物性差异的重要因素^[4],单一的沉积成岩作用或者构造作用研究都难以满足研究需求。开展构造成岩作用研究,可为沉积盆地储层形成机理研究及其科学评价提供新的视野。

1 构造成岩作用的内涵

构造成岩作用是指沉积岩层从松散沉积物到固结形成沉积岩石及之后的过程中所发生的构造和成岩相互作用。构造成岩作用主要研究沉积物沉积以后构造变形与沉积物的物理、化学变化的相互作用关系,这种相互作用既可以发生在从松软沉积物到固结成岩过程中,还可以发生在沉积物固结形成沉积岩石以后。例如,沉积岩层形成以后在构造作用下产生的构造裂缝以及流体在构造裂缝中发生的成岩胶结和后期的溶蚀过程就是属于构造成岩作用的范畴。因此,构造成

岩作用比传统的成岩作用的研究范围更广,是沉积岩石学和构造地质学的交叉融合与延伸拓展。

压实作用是松散沉积物受到机械力学导致孔隙水排出和孔隙度减少的一种物理作用。目前的压实作用主要是考虑了上覆地层产生的静岩压力对沉积物的影响,而没有考虑其它因素。实际上,在沉积盆地地层中任何一个部位除了受到上覆地层压力以外,还有水平构造挤压应力、热应力和孔隙流体压力的作用,其中水平构造挤压应力同样可以产生压实效应导致岩石孔隙减小,而热应力和孔隙流体压力可以产生抗压实效应从而有利于岩石孔隙的保存。尤其在我国西部前陆盆地的地质历史时期,水平构造挤压应力可达100 MPa以上^[15],其作用强度甚至超过了上覆地层的静岩压力的强度,对沉积物的压实效应和储层成岩演化的影响十分重要。

构造作用(包括构造变形时间、变形方式和变形强度)对沉积储层的成岩作用效应是多方面的和不均匀的。例如,同样是在前陆盆地,水平构造挤压应力在一些部位造成压实作用加强的同时,在另一些部位(如冲起构造或断层相关褶皱转折端等部位)由于岩石变形产生的局部拉张应力也可以减缓上覆静岩压力的压实影响,从而有利于储层孔隙体积的保存。在一些高孔隙砂岩储层中,高孔隙流体可以使岩石的韧性增强,当岩石受到水平构造挤压作用时,高孔隙砂岩并不一定以脆性破裂的方式产生破裂面,而可能是在一些部位产生局部化变形,形成一些变形条带^[16-17],包括压缩条带、剪切条带和膨胀条带等(图1),影响储层中流体活动及成岩作用的非均质性,从而影响储层

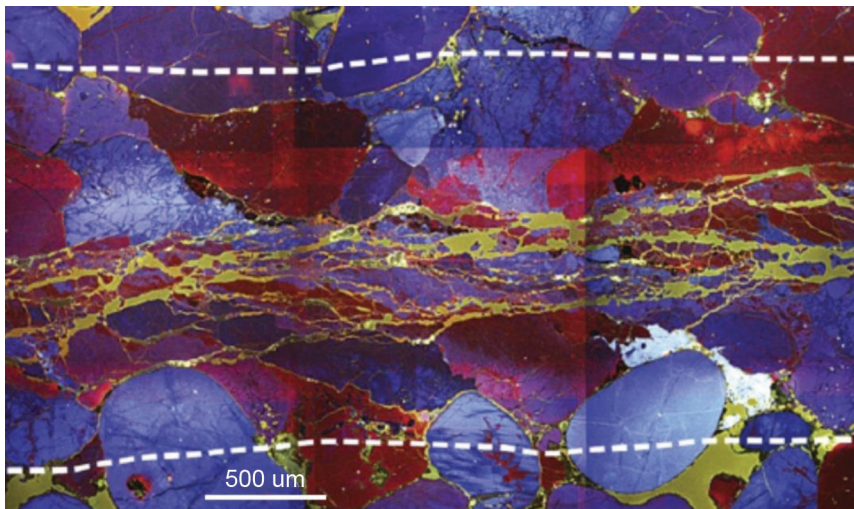


图1 砂岩中的剪切变形条带^[16]

Fig. 1 A shear deformation band in sandstones^[16]

的物性^[18]。

断裂带的断层核及其损伤带的形成演化过程实际上也是一种构造成岩作用(即断层成岩作用)发生的过程。首先,在构造挤压作用下形成断层及其相关裂缝发育带;然后,断裂带中的充填物发生压实作用和胶结作用等成岩作用。当流体进入断裂破碎带以后,随着压力和温度的变化,含有矿物的热液流体发生结晶作用,逐渐胶结断层核及其损伤带中的裂缝和断层角砾^[19-20],之后的溶蚀作用还可以进一步改造被方解石或石英等矿物胶结的断裂带,从而影响断裂带的渗透性和封闭性。这种构造成岩作用研究可为断层的封闭性评价及其演变规律分析提供理论依据。

2 油气地质意义

2.1 评价致密储层的质量

常规沉积储层的形成与分布主要受沉积微相的控制,而致密低渗透储层的形成演化受沉积作用、成岩作用和构造作用等多种因素的控制,其中,沉积作用是基础,而成岩作用和构造作用是决定储层质量的关键。利用构造成岩作用研究可以为致密低渗透储层质量评价提供新的途径。

构造作用对储层储集性能的影响既有不利的一面,也有有利的一面。在沉积物固结成岩之前,水平构造挤压作用使岩石的压实作用增强,造成孔隙体积的减少和物性的降低。水平构造挤压强度越大,岩石的构造压实造成的减孔量越大,储层的物性变得越差。例如,在塔里木盆地库车和塔西南地区,水平构造挤压应力每增加 1.0 MPa,会导致砂岩孔隙度的减小量增加 0.11%左右(图 2)。在沉积物固结成岩以后,水平构造作用还可以形成大量的天然裂缝,成为储层的有效储集空间和流体流动的重要通道,并为酸性流体活动提供了渗流通道的作用,有利于溶蚀作用的发生和次生孔隙的发育,可以有效地提高储层的储集和渗流性能。因此,根据构造成岩作用对储层物性的影响,在储层孔隙度的原始沉积组构模型的基础上,通过孔隙度的压实模型和构造应力模型建立,可以有效地评价储层物性的分布^[10,21],综合地反映沉积、压实、胶结、构造应力、溶蚀和裂缝发育等地质因素对致密储层质量的控制作用。

2.2 评价天然裂缝的分布

随着沉积岩层的成岩作用加强,物性变差,储层

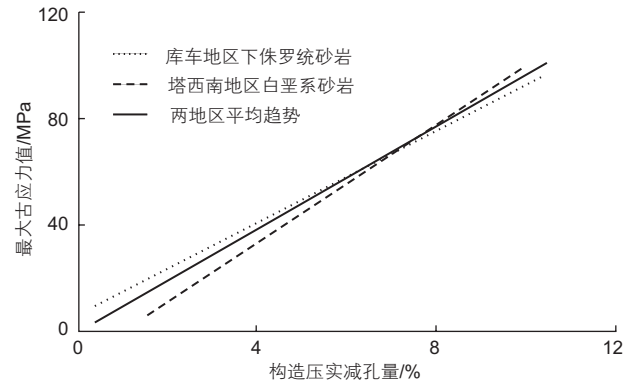


图 2 塔里木盆地库车和塔西南地区水平构造挤压应力与砂岩孔隙度减小量关系图^[22]

Fig. 2 The relationship between horizontal tectonic stress and porosity reduction of sandstones in Kuqa and southwestern Tarim Basin^[22].

的脆性程度增加,越有利于岩石脆性破裂的发生和裂缝的形成。根据地质成因,沉积储层中主要以构造裂缝和成岩裂缝为主^[23]。其中,构造裂缝的形成与发育程度除了受构造应力控制以外,还受沉积和成岩作用的影响^[24]。成岩作用主要是通过影响岩石的力学性质来影响构造裂缝的发育程度,成岩作用越强,物性越差,岩石脆性程度越高,构造裂缝密度越大。因而,一般是强压实强胶结型成岩相的岩石脆性程度高,在相同构造应力作用下构造裂缝的发育程度明显大于弱胶结强溶蚀型成岩相(图 3)。成岩裂缝是指岩石在成岩过程中由于压实压溶等地质作用形成的裂缝,顺微层理面分布的层理缝就是一种典型的成岩裂缝,成岩作用越强,成岩裂缝的发育程度越高。在致密低渗透储层中,除了构造裂缝和成岩裂缝以外,还发育一类与矿物颗粒相关的粒内缝和粒缘缝。粒内缝主要表现为沿石英裂纹和长石解理裂开形成的微裂缝,发育在石英或方解石颗粒内部,不切割矿物颗粒;粒缘缝主要分布在呈线状相互接触的矿物颗粒之间,沿着矿物颗粒边缘分布,常与粒内缝伴生。粒内缝与粒缘缝的形成主要与强烈的机械压实和构造挤压联合作用有关,是构造成岩作用的产物^[23]。根据裂缝的地质成因,可以利用构造成岩作用有效地评价储层裂缝的分布。

2.3 评价裂缝的有效性

储层中天然裂缝在张开扩展过程中或形成以后,常被石英、方解石等矿物胶结成岩充填而变成无效裂缝,之后的溶蚀作用还可以使这些无效裂缝再变成有效裂缝,使得裂缝的有效性评价变得复杂和困难。因此,了解裂缝中矿物胶结时间、结晶速度及充填程度

对裂缝有效性评价十分关键，尤其对碳酸盐岩和泥页岩储层比砂岩储层更加重要。

裂缝的开启程度可以看成是裂缝张开速率与同生胶结物沉积速率之间的竞争^[25]。胶结物竞争的结果可能导致裂缝的完全充填而无效，也可能仅仅在裂缝壁之间形成一薄层，或者在裂缝壁之间搭起岩桥^[26]。因

此，储层中裂缝的有效性主要取决于成岩作用状态，裂缝力学机制和成岩历史的相互作用是裂缝的有效孔隙度与张开裂缝的持续时间、连通性和流体活动的决定因素。根据裂缝中石英或方解石胶结物增长过程中的结构切割关系和流体包裹体分析(图4)，可以有效地确定胶结物生长期次，重建裂缝张开过程中流体温

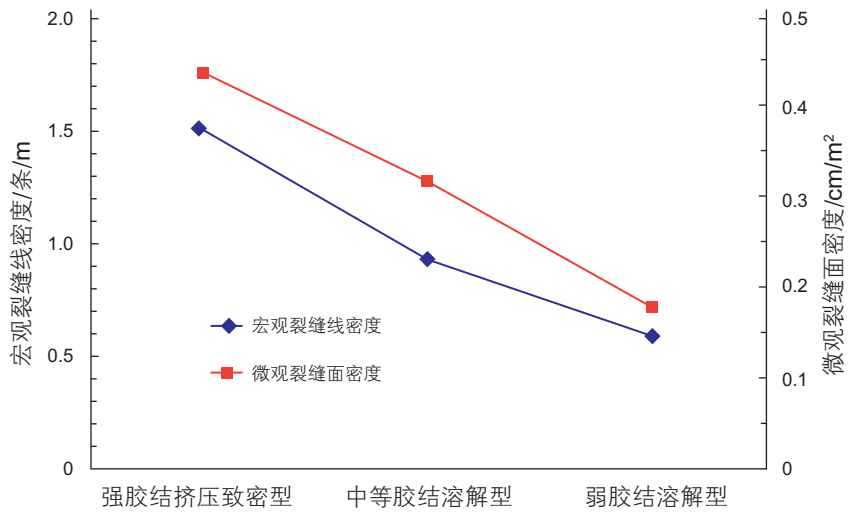


图3 库车前陆盆地白垩系砂岩不同成岩相裂缝密度分布图

Fig. 3 Fracture density in different diagenetic facies of the Cretaceous sandstone in the Kuqa Foreland Basin.

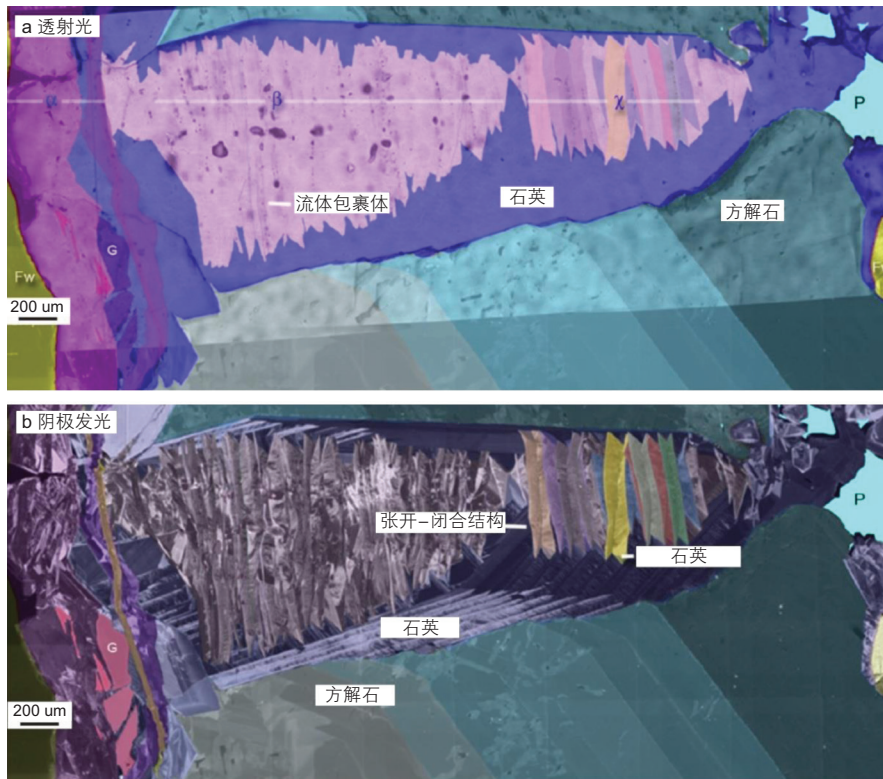


图4 裂缝中充填物结构及流体包裹体图^[11]

Fig. 4 Structure of quartz-cement deposit and fluid inclusions in fractures^[11]

度和孔隙流体压力演化史,结合盆地埋藏史和流体的运移史,可以判断成藏过程中裂缝在输导和储存油气中的有效性^[1]。并通过对裂缝张开-愈合史分析,建立裂缝孔隙度的演化模型,评价地下裂缝的有效性,预测裂缝孔隙度分布,为裂缝性油气藏和致密油气藏的勘探开发提供依据。

3 结论

(1)含油气盆地沉积储层的形成与演化受沉积作用、构造作用和成岩作用的共同影响,其中沉积作用是基础,构造作用和成岩作用是影响储层最终质量的关键。目前,沉积作用和成岩作用对沉积储层的影响研究较多,而对构造作用的影响研究较为薄弱。

(2)构造成岩作用是指沉积岩层从松散沉积物到固结成沉积岩石及之后的过程中所发生的构造和成岩相互作用,它主要研究沉积物沉积以后构造变形与沉积物的物理、化学变化的相互作用关系,既包括构造变形方式和变形强度对沉积储层成岩作用及流体的影响,还包括成岩作用和流体对构造变形的影响。

(3)研究含油气盆地沉积储层形成演化过程中构造作用和成岩作用及其相互关系,阐明构造成岩作用对沉积储层形成演化的控制作用,不仅可为致密低渗透储层形成机理研究提供地质理论基础,还可为储层质量评价、天然裂缝及其有效性评价提供有效的途径,可以广泛应用于含油气盆地致密低渗透储层和深部储层的科学评价中。

参考文献

- [1] 于兴河,郑浚茂,宋立衡,等.构造、沉积与成岩综合一体化模式的建立—以松南梨树地区后五家户气田为例[J].沉积学报,1997,15(3):8-13.[YU X H, ZHENG J M, SONG L H, et al. The establishment of integrated model on structure, deposition and diagenesis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(3): 8-13.]
- [2] 钟大康,朱筱敏,王红军.中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析[J].中国科学(D)辑,2008,35(S1):11-18.[ZHONG D K, ZHU X M, WANG H J. Characteristics and formation mechanism of deep quality clastic rock reservoirs in China[J]. Science in China Ser.D Earth Sciences, 2008,35(S1):11-18.]
- [3] 李忠,张丽娟,寿建峰,等.构造应变与砂岩成岩的构造非均质性—以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J].岩石学报,2009,25(10):2320-2330.[LI Z, ZHANG L J, SHOU J F, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: A case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2320-2330.]
- [4] 钟大康,朱筱敏,周新源,等.构造对砂岩孔隙演化的控制—以塔里木中部地区东河砂岩为例[J].地质科学,2004,39(2):214-222.[ZHANG D K, ZHU X M, ZHOU X Y, et al. Effect of structure on sandstone porosity evolution: A case study from the Donghe sandstone in central Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2004,39(2): 214-222.]
- [5] 刘成林,朱筱敏,朱玉新,等.不同构造背景天然气储层成岩作用及孔隙演化特点[J].石油与天然气地质,2005,26(6):746-753.[LIU C L, ZHU X M, ZHU Y X, et al. Characteristics of diagenesis and pore evolution of gas reservoirs formed in different tectonic settings[J]. Oil and Gas Geology, 2005,26(6): 746-753.]
- [6] 杨开庆.动力成岩成矿理论的研究内容和方向[J].中国地质科学院地质力学研究所刊,1986,第7号:1-14.[YANG K Q. Research subjects and orientations on the theory of tectono-petrogenesis and tectono-metallogenesis[J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics Caga, 1986, 7: 1-14.]
- [7] 邱小平.构造动力成岩成矿模拟实验成果分析及其地质意义[J].地球化学,1993,22(3):237-240.[QIU X P. Analysis of the achievements in tectonic dynamo-petrologic and dynamo-metallogenic simulating experiments and their geological significance[J]. Geochimica, 1993, 22(3): 237-240.]
- [8] 寿建峰,朱国华,张惠良,等.构造侧向挤压与砂岩成岩作用—以塔里木盆地为例[J].沉积学报,2003,21(1):90-96.[SHOU J F, ZHU G H, ZHANG H L, et al. Lateral structure compression and its influence on sandstone diagenesis — A Case study from the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 90-96.]
- [9] 寿建峰,张惠良,斯春松,等.砂岩动力成岩作用[M].北京:石油工业出版社,2005.[SHOU J F, ZHANG H L, SI C S, et al. Dynamic diagenesis of sandstone[M]. Beijing: Petroleum Press,2005]
- [10] 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等.沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J].石油勘探与开发,2011,38(2):145-151.[ZHANG R H, YAO G S, SHOU J F, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38(2): 145-151.]
- [11] LAUBACH S E, EICHHUBL P, HILGERS C, et al. Structural diagenesis[J]. Journal of Structural Geology,2010,32 (12): 1866-1872.
- [12] LANDER R H, LAUBACH S E. Insights into rates of fracture growth and sealing from a model for quartz cementation in fractured sandstones[J]. Geological Society of America Bulletin, 2015, 127(3-4): 516-538.

- [13] 巩磊, 曾联波, 杜宜静, 等. 构造成岩作用对裂缝有效性的影响—以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例[J]. 中国矿业大学学报, 2015,44(3): 540-545. [GONG L, ZENG L B, DU Y J, et al. Influences of structural diagenesis on fracture effectiveness: A case study of the Cretaceous tight sandstone reservoirs of Kuqa foreland basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015,44(3): 540-545.]
- [14] 韩志锐, 曾联波, 巩磊, 等. 库车坳陷不同构造带沉降差异性及其对储层孔隙度的影响[J]. 地质科学, 2014,49(1): 104-113. [HAN Z R, ZENG L B, GONG L, et al. Difference of subsidence history and its influence on reservoir porosity in Kuqa Depression. Chinese Journal of Geology, 2014,49(1): 104-113.]
- [15] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学(D辑), 2004,47(S1): 98-106. [ZENG L B, TAN C X, ZHANG M L. Tectonic stress field and its effect on hydrocarbon migration and accumulation in Mesozoic and Cenozoic in Kuqa Depression, Tarim basin[J]. SCIENCE IN CHINA Ser.D Earth Sciences, 2004, 47(S1): 98-106.]
- [16] EICHHUBL P, HOOKER J N, LAUBACH S E. Pure and shear-enhanced compaction bands in Aztec Sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1873-1886.
- [17] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstone: a review[J]. Journal of the Geological Society, 2007,164 (4): 755-769.
- [18] 李忠, 刘嘉庆. 沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向[J]. 沉积学报, 2009,27(5): 837-848. [LI Z, LIU J Q. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatial and temporal distribution in sedimentary basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009,27(5): 837-848.]
- [19] LAUBACH, S E, EICHHUBL P, HARGROVE P, et al. Fault core and damage zone fracture attributes vary along strike owing to interaction of fracture growth, quartz accumulation, and differing sandstone composition[J]. Journal of Structural Geology, 2014, v.68, Part A: 207-226.
- [20] SOLUM J G, DAVATZES N C, LOCKNER D A. Fault-related clay authigenesis along the Moab Fault: Implications for calculations of fault rock composition and mechanical and hydrologic fault zone properties[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1899-1911.
- [21] 韩志锐, 曾联波, 高志勇. 库车前陆盆地秋里塔格构造带东、西段构造变形与储层物性的差异性[J]. 天然气地球科学, 2014,25(4): 508-515. [HAN Z R, ZENG L B, GAO Z Y. Difference of structural deformation and reservoir physical property in Qiulitage Structural Belt of Kuqa Foreland Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(4): 508-515.]
- [22] 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 等. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2165-2170. [SHOU J F, ZHANG H L, SONG Y, et al. Diagenetic mechanism of sandstone reservoirs in China oil and gas-bearing basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2165-2170.]
- [23] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008. [ZENG L B. Formation and distribution of fractures in low-permeability sandstone reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2008.]
- [24] 唐小梅, 曾联波, 何永宏, 等. 沉积与成岩作用对姬塬油田超低渗透油层构造裂缝发育的控制作用[J]. 石油天然气学报, 2012,34(4): 21-25. [TANG X M, ZENG L B, HE Y H, et al. Effect of deposition and diagenesis on tectonic fracture of sandstone reservoirs with ultra-low permeability in Jiyuan Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012,34(4): 21-25.]
- [25] GALE J F, LANDER R H, REED R M, et al. Modeling fracture porosity evolution in dolostone[J]. Journal of Structural Geology, 2009,31(4): 1-11.
- [26] LAUBACH S E, WARD M E. Diagenesis in porosity evolution of opening-mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico[J]. Tectonophysics, 2006, 419: 75-97.

Structural diagenesis and its petroleum geological significance

ZENG Lianbo¹, ZHU Rukai², GAO Zhiyong², GONG Lei³, LIU Guoping¹

¹ China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

² China Petroleum Exploration and Development Research Institute, CNPC, Beijing 100083, China

³ Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

Abstract The formation and evolution of sedimentary reservoirs is controlled by sedimentation, tectonism and diagenesis, of which sedimentation is the foundation, and tectonism and diagenesis are the keys. Based on the main geological factors controlling formation and evolution of sedimentary reservoirs, the concept of structural diagenesis and its implications are

put forward in the paper. Then the application of structural diagenesis in quantitative evaluation of tight and low-permeability reservoirs and effectiveness of natural fractures is analyzed. Structural diagenesis is referred to structural and diagenetic interaction occurring in the process of change from loose sediments to the formation of consolidated sedimentary rocks. Structural diagenesis is the study of the relationships between structural deformation and physical and chemical changes to sediments, including both the influences of structural deformation mode and deformation intensity on diagenesis and fluid, and the influences of diagenesis and fluid on structural deformation in sedimentary reservoirs. Structural diagenesis controls the formation and evolution processes of sedimentary reservoirs and distribution of effective reservoirs in petroliferous basins. So the study of the structural diagenesis can provide an effective way for evaluation of reservoir quality, natural fractures and fracture effectiveness in tight and low-permeability reservoirs.

Keywords tectonism; diagenesis; reservoir evolution; natural fracture; reservoir evaluation; petroleum geological significance

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.015

(编辑 付娟娟)