

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^{*}

李忠¹ 张丽娟² 寿建峰³ 韩登林⁴ 沈杨³ 张惠良³

Li Zhong¹, ZHANG LiJuan², SHOU JianFeng³, HAN DengLin⁴, SHEN Yang³ and ZHANG HuiLiang³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

3. 中国石油杭州石油地质研究院, 杭州 310023

4. 长江大学, 荆州 434023

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Tarim Petroleum Company, CNPC, Kule 841000, China

3. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, CNPC, Hangzhou 310023, China

4. Yangtze University, Jingzhou 434023, China

2008-12-05 收稿, 2009-07-15 改回.

Li Z, Zhang LJ, Shou JF, Han DL, Shen Y and Zhang HL. 2009. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: A case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10):2320-2330

Abstract Structural strain of porous sandstones, evidently different from that of low porous limestones, will preferentially produce strain localization and form microscopic deformation bands. A case study shows that late structural deformation developed in the Kuqa subbasin in the northern Tarim basin, the southern foot of the Tianshan mountain and were characterized by north-southern zonation with east-western differentiation since Cretaceous. Based on structural deformation framework and sandstone physical features (porosity and permeability), six types of structural deformation patterns, controlling structural heterogeneity of sandstone reservoirs, are presented in this paper. The deep involved structural patterns (three types) and the shallow involved structural patterns principally occur in the western and eastern Kuqa subbasin respectively, which is controlled by basement blocks, salt-coal detachment beds, north-southern adjusting faults and basin-range boundary types as well as stress distribution. Except deformation bands of porous sandstones, the study also shows that structural strain properties of the Cretaceous tight sandstones buried bigger than 6500 ~ 7000m in depth are similar to that of limestones, which will easily produce more effective fractures accompanying late uplift and/or intense structural strain. This consideration is important for prediction of deep buried sandstone reservoirs in the study area.

Key words Sandstone reservoir; Diagenesis; Structural strain; Deformation band; Structural heterogeneity; Kuqa subbasin

摘 要 孔隙性砂岩在应变过程中首先发生应变局域化并形成肉眼不易识别的变形条带(deformation band),这与低孔隙性的碳酸盐岩的应变效应迥然不同。实例分析说明,天山南缘库车坳陷后期构造变形强烈,自白垩纪以来构造应变具有南北分带、东西分异的显著特征。结合盆地构造格架以及砂岩物性分布特征,本文提出了该区六类砂岩储层改造的构造样式,并描述了其中砂岩的构造非均质性。其中深层卷入型(3类)主要发育于盆地西部,而浅层卷入型发育于盆地东部,其分布受基底构造、盐煤等滑脱层、近南北向的调节断裂、盆山边界接触方式的控制。除变形条带外,研究发现本区最大埋深大于6500~7000m的白垩系致密砂岩的应变属性亲近灰岩,其由于后期抬升或深层次构造应变将容易导致裂隙的发育,这一点在有效储层预测中值得重视。

^{*} 国家973项目(2006CB202304)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-147)资助。

第一作者简介: 李忠,男,1964年生,研究员,博士生导师,从事沉积学与盆地动力学研究, E-mail: lizhong@mail.igcas.ac.cn

关键词 砂岩储层; 成岩作用; 构造应变; 变形条带; 构造非均质性; 库车坳陷

中图法分类号 P588.212.3; P618.130.21

1 引言

对于含油气盆地砂岩储层,以往在勘探研究中主要注重其沉积作用和埋藏成岩作用机理的分析,即沉积非均质性和成岩非均质性,而疏于对构造应变作用和效应的研究,这与在碳酸盐岩储层中关注破裂作用的研究格局显然不同。这一现状在以往建立的理论基础上似乎并不难理解,因为大多数的观察认为碳酸盐岩一般具有刚性、低孔隙性特征,其在盆地(埋深)尺度上的变形比较容易以破裂(fracturing)形式产出,并形成所谓的“双介质储层,其中裂缝在改善碳酸盐岩储集性方面具有至关重要的作用;而高孔隙性的砂岩在应变过程中则不易通过破裂或滑移面的大规模发育来调整,或者说后者在调整过程中分布范围有限。对于砂岩的应变作用和效应尽管早期也有学者研究(Pittman, 1981; Jamison and Stearns, 1982; Gabrielsen and Koestler, 1987),但并不为多数储层地质研究者关注。不过随着砂岩应变局域化(localization)现象的揭示,特别是欧美学者一系列有关构造应变与砂岩储层物性及其中流体活动关系的精细描述和分析(Antonellini and Aydin, 1994, 1995; Beach *et al.*, 1997; Gibson, 1998; Antonellini *et al.*, 1999; Heynekamp *et al.*, 1999; Taylor and Pollard, 2000; Lothe *et al.*, 2002; Shipton *et al.*, 2002; Sample *et al.*, 2006; Fossen and Bale, 2007),已经或正在改变我们以往对砂岩成岩演化的认识。中国尤其中国西北部叠合盆地众多,其形成演化以多期构造作用制约为特征,但目前有关构造与砂岩储层关系的研究主要限于现象观测和机理推测层次(寿建峰等, 2006, 2007),而针对不同尺度构造应变与碎屑岩储层改造动力学机理的研究尚待开展(李忠等, 2006)。

2 构造应变与砂岩储层物性改造的基本特征及研究思路

2.1 砂岩应变作用的基本特征

与刚性、致密岩石的应变不同,对于孔隙性砂岩应变作用的特殊性早已有研究关注。孔隙性砂岩应变最初并不以张性破裂或滑移面的发育来调整,而是首先发生应变局域化(localization),并形成所谓变形条带(deformation band,以下简称D条带)。D条带大多丛生或成带产出,单条肉眼多难于辨认,它们进一步破裂后将发育形成高位移的断层。

D条带是孔隙性砂岩和沉积物最普遍的和独特的应变特征,其概念应用最早由Aydin及其合作者(Aydin, 1978; Aydin *et al.*, 1978)从材料科学中引入。根据前人(如Fossen *et al.*, 2007)的研究,D条带的特征可以归纳如下:

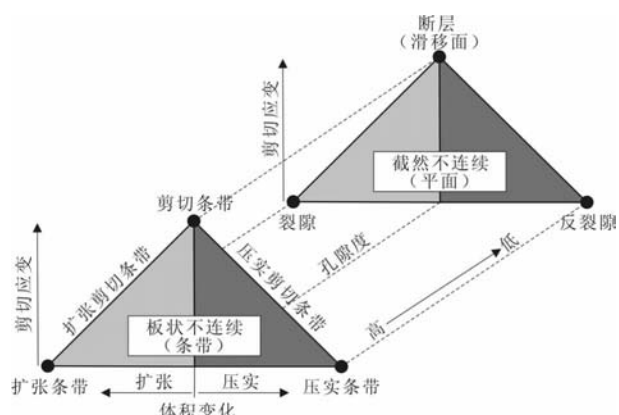


图1 与岩石孔隙度有关的构造破裂(或不连续性)分类(据Schultz *et al.*, 2008, 修订)

Fig. 1 Classification of structural discontinuities in relation to the porosity of the host rock (revised from Schultz *et al.*, 2008)

(1) D条带主要发育于砂和砂岩等孔隙性的具有颗粒结构的介质中,其形成过程主要卷入了颗粒的旋转和转换,而具备一定数量的孔隙是必要的,它也决定了颗粒调整过程是否经历压碎变形或仅仅是旋转和沿颗粒边界的摩擦滑动。显然,如果孔隙度太低就将导致张性裂隙、反裂隙(anticrack)(如缝合线)或断裂滑动面的优先形成(图1)。

(2) D条带以单一条带(individual bands)、丛生条带(zones of bands)或与滑动面组合的条带(也称断裂D条带, faulted deformation bands)等形式从低级到高级演化,分级产出。对于单一D条带来说,即便自身延长100m,其位移量一般也很少大于几厘米。

(3) D条带不代表滑动面,但是滑动面可以在D条带演化的成熟阶段于D条带(常常为丛生D条带)中或沿着这些带发育形成。在孔隙性岩石中,局域高位移的断裂作用通常是由沿滑动面分布的先存丛生D条带的进一步破裂而形成。

(4) D条带与其他破裂对渗透率的影响相差很大。对于10条(实际丛生的D条带数量要大得多)1mm厚度的D条带,它与基质渗透率的比值可以达到 10^{-6} 。

(5) D条带多产出于上地壳构造体制,但也可以发育于非构造体制(冰川、软沉积物重力变形)。

D条带可以分别从运动学和动力学角度加以分类。图1左下角三角图表示了D条带的运动学分类,即三种端员类型(扩张、剪切、压实条带)和两种过渡类型(扩张剪切、压实剪切条带)。而从动力学或主变形机理角度,D条带可以划分为解聚(disaggregation)或颗粒流(granular flow)条带、层状硅酸盐涂抹条带、碎裂(cataclastic)条带、溶蚀-胶结条带等四类(Fossen *et al.*, 2007)。

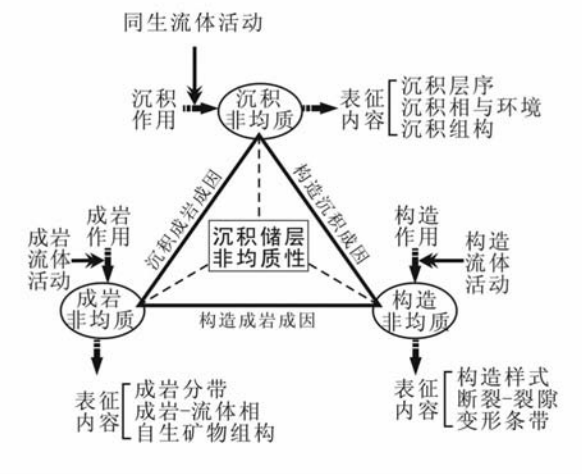


图2 沉积储层非均质性的成因类型与参数表征内容
Fig. 2 Genetic types and characterizing parameters for sedimentary reservoir heterogeneity

2.2 构造非均质性的概念及研究思路

对于砂岩储层,显然除了沉积非均质性和成岩(流体-岩石相互作用)非均质性外,构造应变对砂岩物性的改造不容忽视。为此,作者提出沉积储层非均质性的三大成因类型(图2),其中构造非均质性是指由于构造应变作用所形成的一系列构造不连续性以及相关构造-流体叠加改造而导致的岩石物性的非均质特征,换句话说,构造不连续性的类型、组合与分布直接决定了构造非均质性。沉积作用、成岩作用和构造作用既是独立机制,又可以相互叠加,形成沉积储层非均质性的完整含义;沉积非均质性、成岩非均质性和构造非均质性,构成了沉积储层非均质性的三大基本内容或研究领域。

显然不同岩石、不同刚性、不同应变行为所导致的物性改造具有很大差别,因此开展构造应变与孔隙性岩石物性改造或构造非均质性研究,应切实注意如下研究思路:

①不同组构、不同刚性、不同成岩阶段的岩石类型,其应变差异极大,应注意分类、区别对待;对于层状硅酸盐矿物含量或者说层状硅酸盐矿物与刚性矿物的含量比例,虽然其对孔隙性岩石应变的控制明显,但多因素相互作用的机理尚未深入认识,值得进一步研究。

②对同一类岩石,其物性(特别是孔隙度大小)将极大左右应变效应(图1),但目前定量性的分析仍显不足,是否存在一些决定应变特征(样式)的孔隙度临界值也不得而知,因此在利用已有机理和模式对有关构造应变进行解析时应谨慎甄别。

③不同的构造破裂(不连续性)对岩石物性以及流体活动具有影响,而D条带与经典的张性破裂相比,其渗透率相差会更大。因此区分和评价不同类型的构造破裂(不连续性)对储层物性以及其中流体活动的意义极为重要。

④对于构造破裂(不连续性)与岩石物性改造以及流体活动的关系,必须将微观分析与宏观构造组合样式以及岩石(相)组合配制研究密切结合,这样才能在一定时空尺度甚至盆地尺度上开展预测,这对指导油气勘探至关重要。

3 库车坳陷构造格架和区域应力场特征

盆山构造、沉积和地质结构分析(卢华复等,1999,2000; Li *et al.*, 2004; 王清晨和李忠,2007),初步揭示天山南缘库车坳陷(图3)自白垩纪特别是古近纪以来构造变形南北分带、东西分异显著,总体表现为:构造变形北部较南部早、北部较南部强,东部较西部早、东部较西部弱的趋势。与东

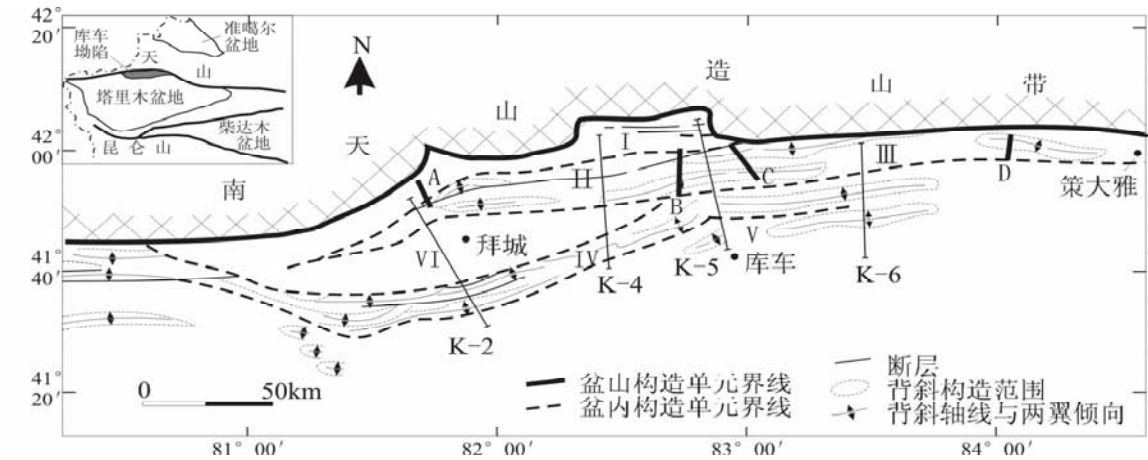


图3 库车坳陷区域构造单元与研究剖面分布位置
A-卡普沙良河剖面,B-库车河沉积剖面,C-克孜勒努尔沟剖面,D-阳霞地区吐格勒明背斜剖面。I. 山前单斜构造带,II. 克拉苏-依奇克里克构造带,III. 吐格勒明构造带,IV. 秋里塔格构造带,V. 库车-亚肯构造带,VI. 拜城凹陷。K-2,4,5,6为地震综合解释剖面位置(详见图4)
Fig. 3 Tectonic units and study profiles location in the Kuqa subbasin

表1 库车坳陷砂岩构造应力测试数据*

Table 1 An analysis data sheet for structural stress on sandstones in the Kuqa subbasin

类型	采样地点	测点深度(m)	测点层位	测点岩性	测试方法	构造应力值(MPa)
露头	吐格尔明北翼	0	E ₂₋₃ s	暗褐色粗砂岩	声发射	45.90, 72.75
	库车河	0	E ₁₊₂ km	褐色细砂岩	声发射	49.24, 56.92, 65.59
	库车河	0	K	褐色粉细砂岩	声发射	35.22, 50.02, 67.63, 83.24
	库车河	0	J ₁	灰色含砾粗砂岩	声发射	67.56, 79.67, 96.88
	库车河	0	J ₁	深灰色细砂岩	声发射	25.80, 47.10, 64.90, 73.9
	吐格尔明北翼	0	J ₁ y	灰白色中粗砂岩	声发射	49.00, 55.49, 63.56, 68.99, 76.41
	克孜勒努尔沟	0	J ₁ a	灰色砂岩	声发射	20.38, 46.75, 93.50, 133.46
	克孜勒努尔沟	0	J ₁ a	灰色砂岩	透射电镜	119.98
	吐格尔明南翼	0	J ₁ a	灰色粗砂岩	声发射	30.95, 37.66, 49.63, 67.15
	吐格尔明南翼	0	J ₁ a	深灰色粗砂岩	声发射	7.11, 21.74, 28.21, 31.35
井下	东秋5井	4844.65	E ₁₋₂ km	褐红色细砂岩	声发射	51.4
	东秋8井	4720.30	E ₁₋₂ km	浅褐色粉砂岩	声发射	73.0
	克拉3	3620.00	K ₁ bs	褐红色细砂岩	透射电镜	88.76
	大北1	5573.00	K ₁ bs	褐红色细砂岩	透射电镜	118.34
	克拉201	3730.00	K ₁ bs	褐红色细砂岩	透射电镜	84.15
	克拉204	3922.06	K ₁ bs	褐红色细砂岩	透射电镜	89.17
	克拉203	3857.20	K ₁ bs	褐红色细砂岩	透射电镜	91.35
	吐北1	4506.00	K ₁ b	褐红色粉砂岩	透射电镜	121.86
	神木1	5142.50	K ₁ s	浅灰色细砂岩	透射电镜	115.67
	依南2井	4702.20	J ₁ y	浅灰色细砂岩	声发射	105.4
	依西1井(上盘)	411.65	J ₁ y	灰白色粗砂岩	声发射	17.5, 37.3, 57.3
	依西1井(下盘)	3687.68	J ₁ y	灰色细砂岩	声发射	32.6, 36.8, 53.6, 68.2, 98.1
	克孜1井(下盘)	3380.20	J ₁ a	灰色中砂岩	声发射	69.8

* 分别由中国地质科学院地质力学研究所岩石声发射实验仪(DZLX-15)电子显微镜(HITACHI-700)检测

部相比,西部显示出隆升幅度、剥蚀深度、沉积速率以及构造变形卷入深度大等趋势,这一现象与基底构造样式不同有关,可能也受盐、煤等滑脱层的控制;但因为盆地内一系列近南北向的调节断裂带的影响,可能也与复杂的盆山边界接触关系(方式)有关,库车坳陷区域应变强度和样式又具有间隔分布和交叉的特点。这种分异不仅控制了库车坳陷区域沉积体系的分布,也对储层物性的演化以及油气分布具有重要影响。

根据研究(王清晨和李忠,2007),库车坳陷中、新生界发育的节理与剪切破裂有两个明显的方位,即 NEE-SWW 方向和 NNW-SSE 方向,另外还有两个并不明显的区间,即 NE-SW 和 NW-SE。在层位上,NEE-SWW 向系统节理仅出现在中生界各层内,而其它的节理在中、新生界各层位均有出现。研究认为,NEE-SWW 向系统节理和其正交横节理的形成是该地区在白垩纪晚期区域隆升引起的侧向弱伸展作用的产物,属于隆升之后形成的卸载节理或隆升节理,古近纪的盆地伸展作用更有利于这些节理的扩展与再活动;而 NNW-SSE 向和 NW-SE 向的节理及其横节理则是同构造期形成的,属于构造节理,与新近纪近 N-S 的挤压变形造成的近 E-W 向伸展作用有关;而方向不一的共轭剪切破裂则可能与和 N-S 向强烈挤压变形同时或之后的左行走滑作用有关。

分别利用声发射(丁原辰等,1991,2001;孙宝珊等,1996)与透射电镜(McCormick,1977;万天丰等,1997)测试方法,对库车坳陷开展了进一步的地表及钻井岩芯古应力测试(表1)。结果表明该区岩石古构造应力的时空变化较大,从区域层次上分析有以下变化特点:(1)由北向南,岩石古构造应力快速减小(图4),北缘山前冲断-单斜带的古构造应力总体上要大于100MPa,实测最大古构造应力达156.2MPa。凹陷变形带(或秋立塔格逆冲断褶带)的古构造应力总体上在40~100MPa之间。如最靠近山前的地表剖面下侏罗统实测最大古构造应力达156.2MPa,稍往南的克孜勒努尔沟变为133.46MPa;库车河地表剖面为96.88MPa,至轮台附近减为61.4MPa。(2)东西方向上岩石古构造应力的分段性明显,总体上大致以库车河为界,西部较东部构造变形卷入深、应变强(图4);但实际要复杂得多,如吐格尔明地表剖面(背斜南翼)下侏罗统的实测古构造应力为23.5~31.35MPa,往西至克孜勒努尔地表剖面为84.3~133.46MPa,克孜勒努尔剖面往西约8km的地表剖面增至156.2MPa,而再向西到库车河剖面则又有所降低(为96.88MPa)。(3)递进变形,时间上由早到晚构造变形强度增大;在层位上,从老至新,构造变形叠加期次减少、古构造应力降低。

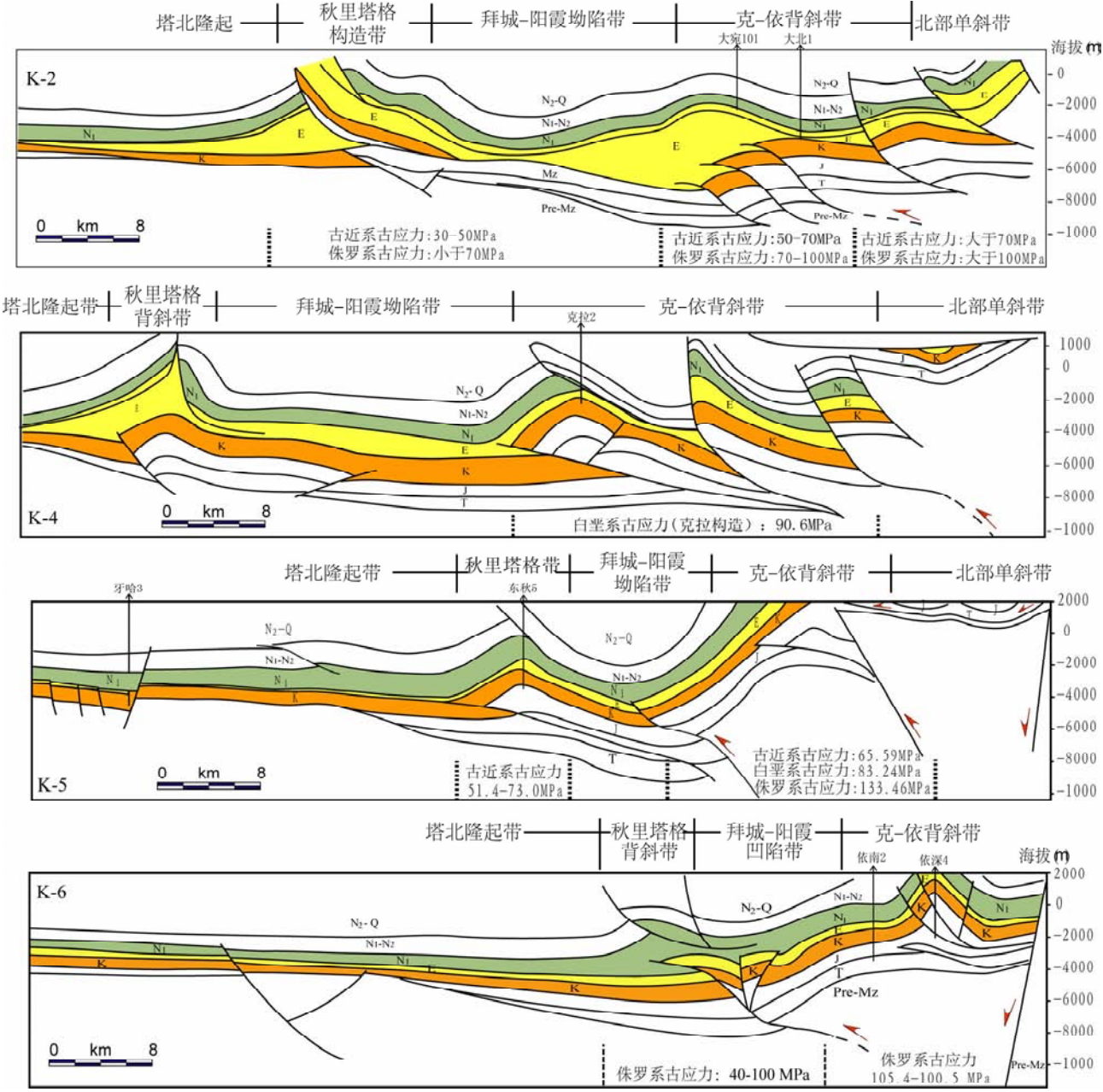


图4 库车坳陷南-北向构造剖面上实测岩石古构造应力的变化趋势
剖面位置见图3,图中古应力值依据表1整理,带箭头垂线指示勘探井位;构造解释据王清晨和李忠(2007)修改
Fig.4 Paleotectonic stress change trend of the North-South structural sections in the Kuqa subbasin

基于 Surper SAP 有限元软件的构造应力数值模拟^①也显示与实测结果有较好的一致性(图5):侏罗系和白垩系具有相似的构造变形特征,即在南北方向的变形分带性外,东西分块性也很显著,后者应该主要是新近纪近 N-S 向强烈挤压变形的结果。古近系(另文论述)的构造变形特征不同于前两者,即主要表现为南北分带,而东西分块性明显变弱,这可能与古近系下部的盐层滑脱和应力消减作用有关。事实上,岩石物理属性(如变形模量、抗压强度等)的不同,使得在相同的应力场方向和强度下,不同部位的变形程度有强弱分

异。除此之外,库车坳陷不仅发育了一系列低角度顺层滑脱断层(构造形态上呈“宽向斜、窄背斜”特点),而且天山-库车坳陷从东向西还发育一系列贯穿盆山的近南北向的高角度“调节”断裂(adjusting fault)。这些因素的存在,使得盆地东西构造变形强度、样式和组合有很大变化,也控制了构造作用对不同层段储层演变的差异改造效应。不同时代地层(侏

① 李忠等. 2008. 中国西部典型叠合盆地有效储集体形成演化与主控因素. 国家973课题中期进展报告.

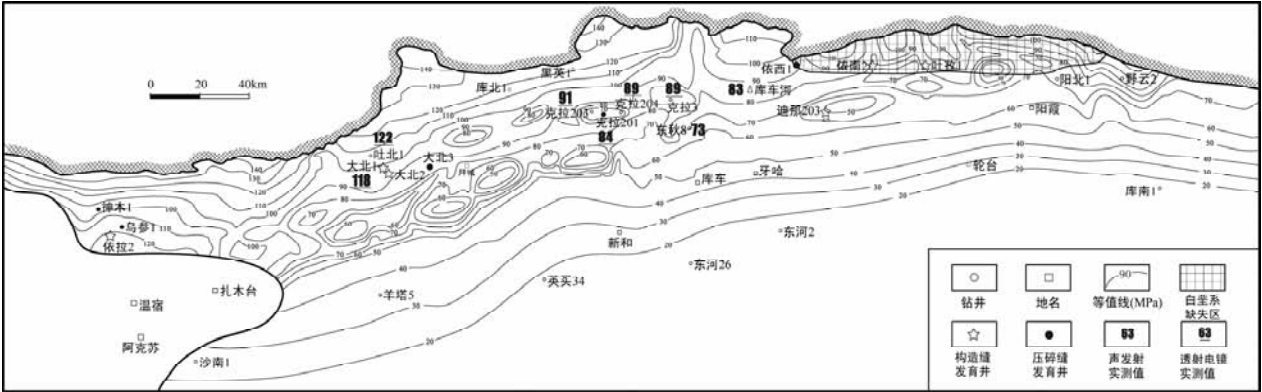


图5 库车坳陷白垩系古构造应力分布有限元模拟
图中标注的应力实测数据与表1对应,在模拟时需经过埋深校正,即采用地表标准
Fig.5 Structural stress distribution based on finite element modeling in the Kuqa subbasin

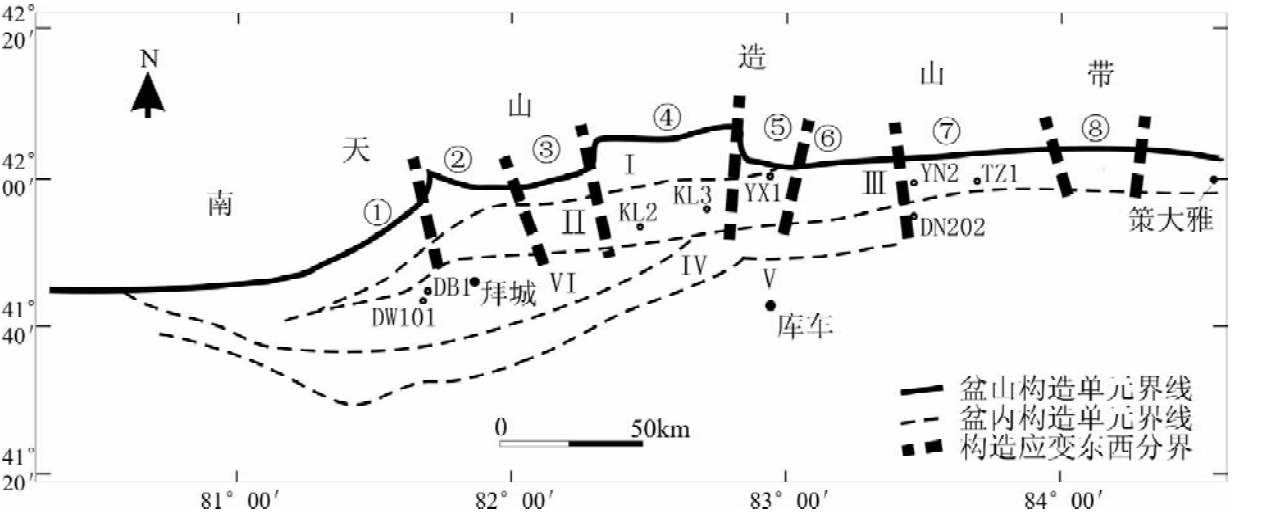


图6 库车坳陷白垩系古构造应变强度分区
图中标注的井下样品的声发射与透射电镜最大实测值与表1对应,即未经静水校正;
①~⑧为构造应变强弱交替分区,①③⑤⑦对应强构造应变分区;标示井号的字母 DW、DB、KL、YX、YN、DN、TZ 含义分别为:
大宛齐、大北、克拉、依西、依南、迪那、吐孜构造;构造单元 I ~ VI 含义同图 1

Fig.6 Structural strain subareas of the Cretaceous strata in the Kuqa subbasin

罗系、白垩系和古近系)的区域构造应力场及变形不一,并导致储层孔隙保存条件的分异。

4 库车坳陷构造应变强度分区与可能的砂岩储层改造的构造样式

库车坳陷构造作用对砂岩压实的制约曾经受到关注(寿建峰等,2006),但还主要限于孔隙度等物性变化的描述及分析层面。前已述及,孔隙性砂岩应变作用的最显著特性就是应变局域化(localization),形成丛生或成带产出的D条带,并对砂岩储层物性产生重要影响。因此从应变角度认识D条带的复杂制约因素,无疑是很好认识砂岩储层形成分布与演

化规律的重要途径。

基于库车坳陷东、中、西不同区域应变特征的两条南北向野外剖面、五条南北向地震剖面(图2)观测解释,以及构造应变强度分区(图6),初步分析了区域构造格架与局域应变作用的关系。认为研究区存在两大类(深层卷入、浅层卷入)六种砂岩储层改造的构造样式:即深层卷入基底(隆起)阻挡型、深层卷入低角度滑脱型、深层卷入高角度逆冲型(统一变形)、浅层卷入低角度滑脱型、浅层卷入高角度逆冲型、浅层卷入基底(隆起)阻挡型。大致以库车河为界,深层卷入类型主要发育于盆地西部,而浅层卷入类型则主要发育于盆地东部,具体展布则受盆地基底构造、盆山关系、调节断裂和盐、煤等滑脱层的控制。

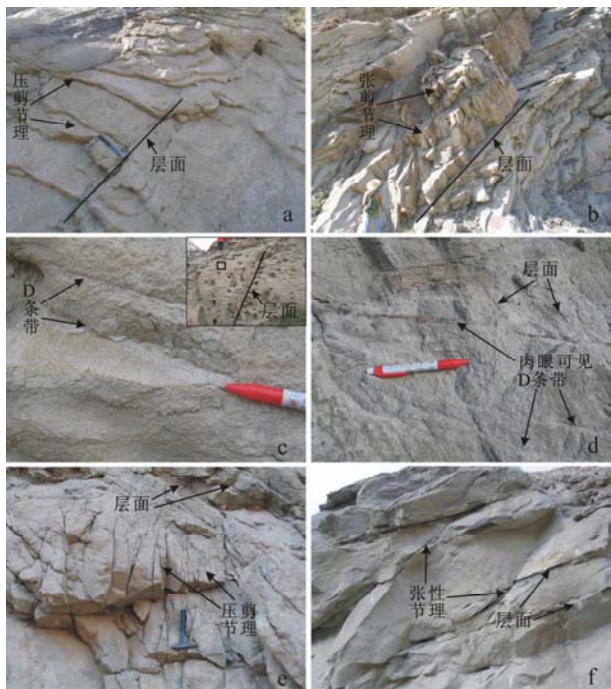


图7 不同构造带砂岩储层在露头观测尺度的局域应变特征

a-卡普沙良河下侏罗统砂岩压剪节理与D条带发育,压剪节理与层面(地质锤柄指示地层向上法线方向)近乎正交;b-卡普沙良河下侏罗统砂岩后期发育的张节理,节理与层面近乎正交;c-库车河以西剖面北部单斜构造带下侏罗统砂岩中的压剪性碎裂D条带,右上角小图为剖面露头景观和压剪节理;d-库车河以西剖面依奇克里克-吐格勒明背斜构造带南翼下侏罗统砂岩D条带,岩石相对疏松,笔尖指示地层向上法线方向;e-阳霞地区吐格勒明背斜北翼下侏罗统砂岩中的压剪节理;f-阳霞地区吐格勒明背斜南翼较疏松的下侏罗统砂岩

Fig. 7 Strain localization characteristics in sandstone outcrops of the different structural belts, Kuqa subbasin

4.1 深层卷入盆内基底(隆起)阻挡型

广泛发育于库车河以西地区。由于盆地强烈挤压作用,加之依奇克里克-吐格勒明构造带基底(隆起)阻挡,总体应变强,但盆内基底隆起南北应变差异极大(特别是对盐下构造层)。以拜城地区卡普沙良河下侏罗统剖面为例,在位于北部单斜构造带的砂岩压剪D条带(碎裂条带)非常发育(图7(a)),构造非均质性强,物性差;但局部由于后期调整其张性破裂也相应发育(图7(b))。

4.2 深层卷入低角度滑脱型

低角度滑脱型中逆冲断层倾角一般小于 45° ,多 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。该类型见于西部如图5中位置①~④(参见K-2剖面,图4),坳陷东部一般不发育。而由于下第三系底部盐层滑脱作用及其对应变的部分吸收,浅层应变弱,滑脱层以上可

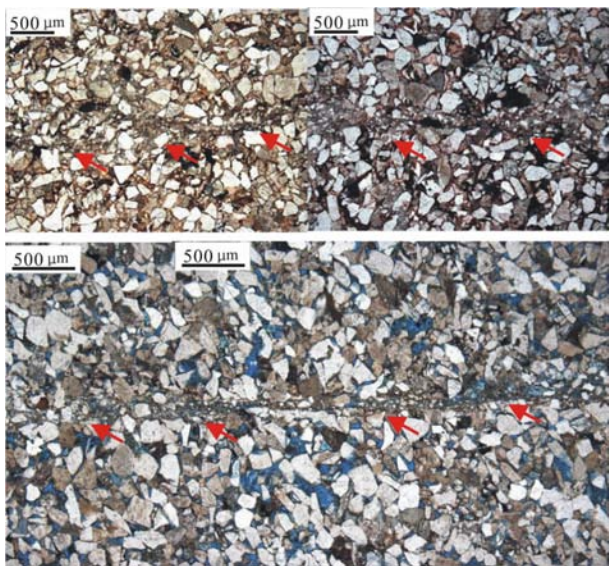


图8 砂岩储层在显微镜观测尺度的局域应变特征(变形条带)

上图:碎裂D条带与胶结D条带(红色箭头指示),DB1井白垩系巴什基奇克组,5573.60m;下图:孔隙性砂岩中的碎裂D条带(红色箭头指示),蓝色为孔隙胶体,指示K12井白垩系巴什基奇克组,3830.50m,井位见图6

Fig. 8 Microscopic strain localization characteristics (deformation band) in sandstone reservoirs of the Kuqa subbasin

能发育压实较弱的储层(参见图10)。但深层盐下地区可能应变较强,井下可见近拜城凹陷的DB1井(图5)下白垩统砂岩也发育碎裂和胶结叠合的D条带(图8(a))。

4.3 深层卷入高角度逆冲(断褶)型

该类型发育于库车河以西,总体应变强(参见K-4剖面,图4),逆冲断裂角度多大于 45° ,具有上下统一变形特征,但在由北而南传递中可分段调整;总体断层上盘应变较大,但下盘可存在保存较好储集体的条件,而且由于断层输导作用有利于浅层成藏。

该类型以大北地区为例,该区由北往南由多条倾向北的高角度逆断层组成,大北1井、大北102井和大北2井均位于逆断层的上盘(图9)。根据前面关于构造样式与成岩效应关系分析,该组合类型的每条逆断层两侧的构造应力接近一致。其主要变化是离构造应力源距离的增大,构造应力会减小。从这个认识可以判断由北往南构造应力会以 $1.3 \sim 2.0 \text{ MPa/km}$ 的递减率变小。从该区获得的构造应力的实测资料表明,大北1井的构造应力为 $90 \sim 95 \text{ MPa}$ 之间,大北2井介于 $75 \sim 85 \text{ MPa}$ (图5),在埋深增加的情况下其同类型砂岩的构造压实减孔量仍然小于大北1井,物性相对较好。

从库车河以西剖面观察,可见位于北部单斜构造带的下侏罗统砂岩中压剪节理与碎裂D条带非常发育,构造非均质

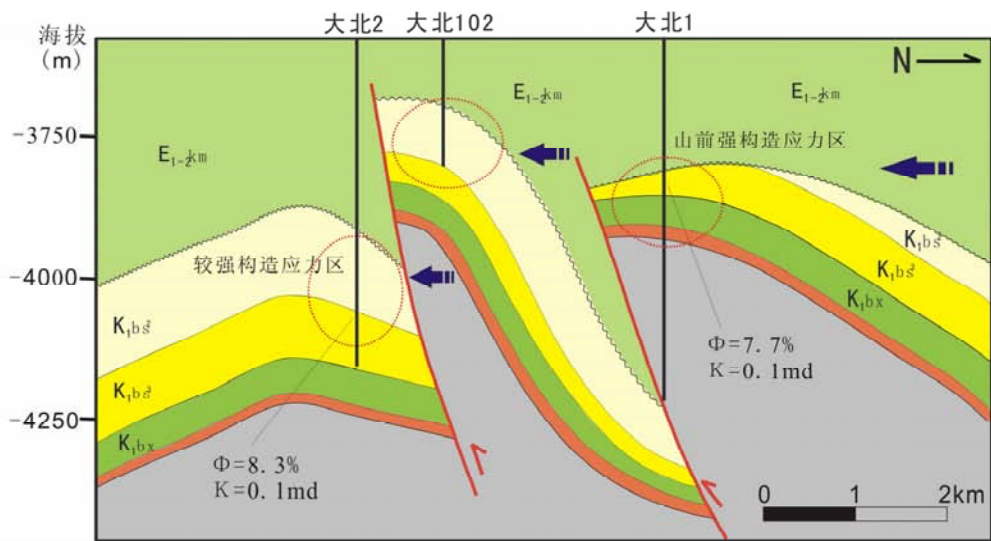


图9 高角度逆断层逆冲构造样式的古构造应力与砂岩物性(孔隙度和渗透率)分布(井位及剖面位置参见图5)
Fig.9 Paleotectonic stress trend and sandstone physical feature (porosity and permeability) change for the high-angle thrusting fault strain pattern (wells and section location referring to Fig. 5)

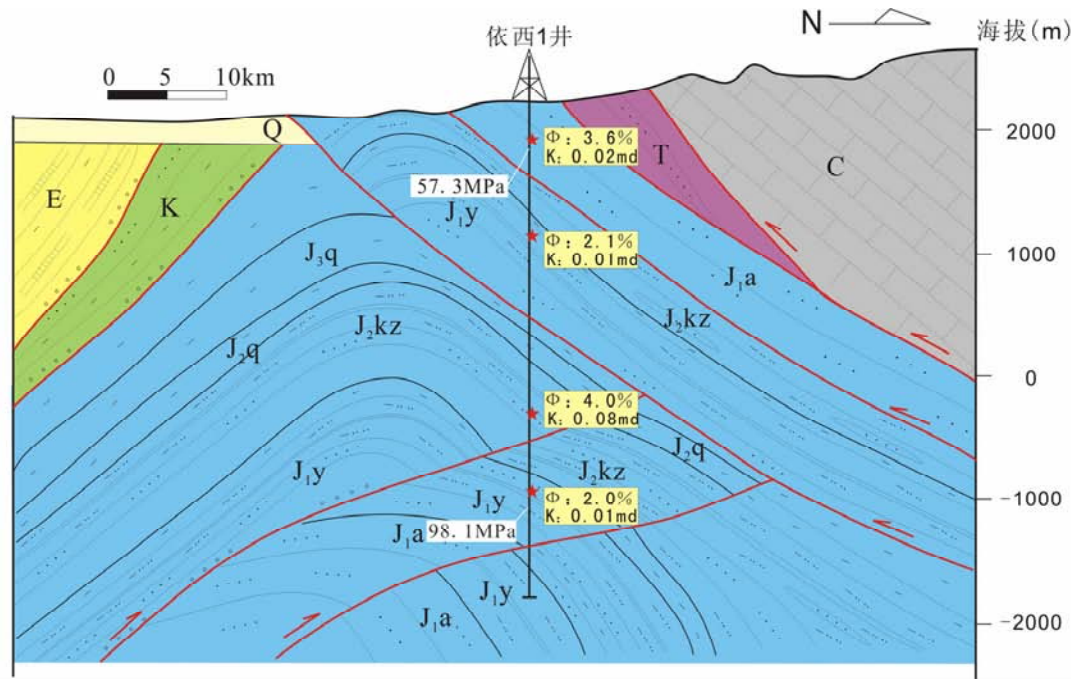


图10 低角度逆断层构造样式的古构造应力与砂岩物性(孔隙度和渗透率)分布(井位及剖面位置参见图5)
Fig. 10 Paleotectonic stress trend and sandstone physical feature (porosity and permeability) change for the high-angle thrusting fault strain pattern (wells and section location referring to Fig. 5)

性强,岩石致密(图7(c));而位于依奇克里克-吐格爾明背斜构造带南翼的下侏罗统砂岩则碎裂D条带并不发育,主要见解聚D条带,也影响了砂岩的各向异性,岩石相对疏松(图7(d))。

克拉2号构造与高角度对冲构造有关。该构造样式上、下盘构造应力分布状态存在较大变化,上盘的叠瓦扇为强构

造应力分布区,古构造应力为68~75MPa;下盘宽缓背斜为较弱构造应力分布区,古构造应力为28~42MPa,这使对冲断层下盘砂岩多保护孔隙度约3.2%~3.5%(寿建峰等,未刊资料)。即便如此,在下盘中也可以观察到极细的碎裂D条带,它们对储层非均质性(构造非均质性)的影响不容忽视(图8(b))。

4.4 浅层卷入低角度滑脱型

该类型发育于库车河以东(如图5中位置⑥⑦)。由于下第三系中上部盐膏层滑脱作用,总体应变弱,特别是滑脱层以上可能存在保存较好储集体的条件。

库车坳陷依南地区就发育叠瓦状低角度滑脱型逆断层(图10),该断层的上、下盘发育下侏罗统原始沉积组构较好的岩屑砂岩,该区处于很强的区域构造挤压带,目前测得的古构造应力普遍在75.0MPa以上,是砂岩压实作用很重要的控制因素。该断层上、下盘岩石的古构造活动期次及应力大小存在明显变化,上盘岩石记录了3期古构造应力,而下盘记录了5期(表1),下盘与上盘岩石经受的最大古构造应力差值为40.8MPa,相应上盘经受的构造压实量较下盘小约5.0%。究其原因,就是由于逆冲滑脱,上盘地层整体向前推进,应力耗散,压应变主要作用于断层下盘。

4.5 浅层卷入高角度逆冲(断褶)型

该类型见于依南-迪那-吐孜构造一带,吐格尔明构造以西,相对坳陷西部而言一般不发育。总体应变弱(参见K-6剖面,图4),但在由北而南传递中可分段调整,局部(断层上盘)应变较大,但下盘可存在保存较好储集体的条件,应变分异情况类似前述4.3节。

4.6 浅层卷入盆内基底(隆起)阻挡型

该类型发育于图5中位置⑧:总体应变弱,但由于盆内依奇克里克-吐格尔明构造带基底(隆起)阻挡,隆起南北应变差异极大,并导致较强的构造非均质性,如对库车坳陷东部阳霞地区吐格尔明背斜两翼侏罗系剖面的精细解剖给出了较充分说明。该背斜南、北翼下侏罗统砂岩的成岩作用存在显著差异,经过沉积组构(主要是粒径)和热成熟度校正,说明压实作用是导致该差异的主要控制作用(寿建峰等,2007)。其中背斜北翼下侏罗统的古构造应力为95.7MPa,岩石致密、压剪应变强(图7(e));南翼为23.5~31.4MPa,主要见解聚D条带,岩石疏松(图7(f)),南、北翼之间最大侧向构造应力的差值为72.2MPa,其减孔量差值达7.6%,占了南、北翼砂岩总压实量差异的82.6%,即构造应力是南、北翼砂岩显著成岩差异的主控因素。

5 讨论与主要结论

5.1 砂岩沉积期后改造的构造作用机理

对于砂岩沉积期后流体-岩石作用,以往对其在单纯地温梯度和重力负载控制下的作用机理认识较深,而对山前推覆和强侧向构造应变影响下的作用机理则疏于研究;在岩石(层)物理改造作用方面,以往在油气盆地中比较多的是关注重力负载对砂岩的机械压实效应,而疏于对构造应变作用

机理的研究,或者说只是将构造应变的研究落脚到与断裂格架和圈闭形态的关系方面,而忽视其对砂岩(层)孔隙度、渗透率等物理性质的改造。

由前述可知,高孔隙性的砂岩在应变过程中不易通过破裂或滑移面的大规模发育来调整,而是首先发生应变局域化并形成肉眼不易识别的变形条带(D条带),并对砂岩储层物性及其中流体活动产生重要影响。中国叠合盆地众多,也不乏山前强变形盆地,其形成演化以多期构造作用制约为特征,因此针对构造应变与碎屑岩储层改造问题开展研究值得进一步关注。另一方面,不同组构、不同刚性、不同成岩阶段的岩石类型,其应变差异极大;对于层状硅酸盐矿物与刚性矿物的含量比例、物性(特别是孔隙度大小)等多因素相互作用对孔隙性岩石应变的控制机理尚未深入认识,对决定应变特征(样式)的参数临界值仍然不清楚,分类深入研究任重道远。

5.2 构造应变与砂岩储层构造非均质性及其建设性效应

本文所提出的若干迹象说明,构造应变是库车坳陷砂岩(特别是盐下中生界砂岩)储层沉积期后改造的主控因素之一,而且强度不容忽视。由于天山南缘库车坳陷后期构造变形强烈,自白垩纪特别是古近纪以来构造应变具有南北分带、东西分异显著特征。从区域分布上看,构造应变与砂岩储层改造的南北分带特征已经有了一定认识,但东西分异的细节和产物表征还很不深入。为此本文结合盆地构造格架和砂岩局域应变特征以及岩石物理特征,初步提出了六类可能的砂岩储层改造的构造样式,并认识到受基底构造、盐煤等滑脱层、近南北向的调节断裂、盆山边界接触方式的控制,不同的构造应变样式间隔出现,即便同一构造带其构造非均质性也非常明显。对于克拉苏-依奇克里克构造带白垩系砂岩层而言,深层卷入低角度滑脱型上盘、深层卷入高角度逆冲型下盘可能更有利于有效储层发育。应该说,这在某种意义上推进了该地区构造应变作用机理与储层时空效应方面的认识。

现在的问题是构造应变的作用机理和时空效应以及构造非均质性可预测的模式还认识不多,对其中所包容的构造-流体叠加作用机理更是知之甚少。但近期 Braathen *et al.* (2009)对砂岩储层构造相、Torabi *et al.* (2009)对D条带显微构造和岩石物理特征的研究值得关注,这是一个好的开端,但还有待更多实际观测数据的分析和完善。

另一方面,砂岩在埋藏压实到一定程度后,由于原始孔隙急剧减少甚至消失,其在应变过程中将不再以“变形条带”来调整,而更易以破裂或滑移面的大规模发育来调整。就本区白垩系砂岩来说,统计数据显示①最大埋深大于6500~7000m时孔隙度一般已经达到极小值(面孔率近等于零),此

① 库车-塔北地区白垩系-古近系沉积储层深化研究. 中国石油塔里木油田分公司科研报告. 2009.

后由于抬升和深层次构造应变就容易导致裂隙的形成,原来对砂岩物性构成破坏的“变形条带”及相关构造,就可能演变为新生的、具有建设性作用的张性裂隙的发育。特别是本区砂岩具有碳酸盐骨架颗粒及胶结物较高的特点^①,因此其压实致密后的岩石应变物理属性将亲近灰岩,这一点在有效储层预测中值得重视;本区大北3井的勘探发现,也说明埋深7000余米的低孔-中高渗储层类型与构造应变碎裂作用有关。显然,对于山前强变形区的砂岩储层沉积期后改造机理,需要加强有关构造应变与砂岩储层改造机理的基础观测和实验模拟工作,以期更加客观地评价砂岩储层的时空演变和非均质性。

致谢 本研究受国家973课题(2006CB202304)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-147)资助。研究工作得到周新源、杨海军、杨文静等高工的支持,成文过程中曾与王国灿教授等就构造应变作过有益讨论,在此一并表示衷心感谢。

References

- Antonellini M, Aydin A and Orr L. 1999. Outcrop aided characterization of a faulted hydrocarbon reservoir: Arroyo Grande oil field, California, USA. In: Haneberg WC, Mozley PS, Moore CJ and Goodwin LB (eds). *Faults and Subsurface Fluid Flow*. Geophysical Monograph, American Geophysical Union, 113: 7–26
- Antonellini M and Aydin A. 1994. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties. *AAPG Bulletin*, 78: 355–377
- Antonellini M and Aydin A. 1995. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Geometry and spatial distribution. *AAPG Bulletin*, 79: 642–671
- Aydin A and Johnson AM. 1978. Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstones. *Pure and Applied Geophysics*, 116: 931–942
- Aydin A. 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116: 913–930
- Beach A, Brown JL, Wellon AI, McCallum JE, Brockbank P and Knott S. 1997. Characteristics of fault zones in sandstones from NW England: Application to fault transmissibility. In: Meadows NS, Trueblood SP, Hardman M and Cowan G (eds). *Petroleum Geology of the Irish Sea and Adjacent Areas*. Geological Society, London, Special Publications, 124: 315–324
- Braathen A, Tveranger J, Fossen H, Skar T, Cardozo N, Semshaug SE, Bastesen E and Sverdrup E. 2009. Fault facies and its application to sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 93(7): 891–917
- Ding Y and Shao Z. 2001. An experimental research into determination of highest paleotectonic stress state experienced by rock through geological ages. *Earth Science*, 26(1): 99–104 (in Chinese with English abstract)
- Ding Y and Zhang D. 1991. Application of the incomplete erosion phenomenon in acoustic emission activities to the measurement of geostress. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 10(4): 326–331 (in Chinese with English abstract)
- Fossen H and Bale A. 2007. Deformation bands and their influence on fluid flow. *AAPG Bulletin*, 91: 1685–1700
- Fossen H, Schultz RA, Shipton ZK, Mair K. 2007. Deformation bands in sandstone: A review. *Journal of the Geological Society (London)*, 164: 755–769
- Gabrielsen RH and Koestler AG. 1987. Description and structural implications of fractures in late Jurassic sandstones of the Troll Field, northern North Sea. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 67: 371–381
- Gibson RG. 1998. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. In: Coward MP, Johnson H and Daltaban TS (eds). *Structural Geology in Reservoir Characterization*. Geological Society, London, Special Publications, 127: 83–97
- Heynekamp MR, Goodwin LB, Mozley PS and Haneberg WC. 1999. Controls on fault zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: Implications for fault zone permeability and fluid flow. In: Haneberg WC, Mozley PS, Moore CJ and Goodwin LB (eds). *Faults and Subsurface Fluid Flow*. Geophysical Monograph, American Geophysical Union, 113: 27–49
- Jamison WR and Stearns DW. 1982. Tectonic deformation of Wingate Sandstone, Colorado National Monument. *AAPG Bulletin*, 66: 2584–2608
- Li Z, Cheng JS and Guan P. 2006. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 1745–1754 (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Song W, Peng S, Wang D and Zhang Z. 2004. Mesozoic-Cenozoic tectonic relationships between the Kuqa subbasin and Tian Shan, northwest China: Constraints from depositional records. *Sedimentary Geology*, 172(3–4): 223–249
- Lothe AE, Gabrielsen RH, Bjørnevoll-Hagen N and Larsen BT. 2002. An experimental study of the texture of deformation bands: Effects on the porosity and permeability of sandstones. *Petroleum Geoscience*, 8: 195–207
- Lu H, Chen C, Liu Z, Jia D, Wang G and Jia C. 2000. Structural characteristics and genesis of Kuqa foreland thrust belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 18–24 (in Chinese with English abstract)
- Lu H, Jia D, Chen C, Liu Z and Wang G. 1999. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 215–221 (in Chinese with English abstract)
- McComick JM. 1977. Transmission electron microscopy of experimentally deformed synthetic quartz. Ph. D. Dissertation. Los Angeles: University of California
- Pittman ED. 1981. Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones, Simpson Group (Ordovician) Oklahoma. *AAPG Bulletin*, 65: 2381–2387
- Sample JC, Woods S, Bender E and Lovell M. 2006. Relationship between deformation bands and petroleum migration in an exhumed reservoir rock, Los Angeles Basin, California, USA. *Geofluids*, 6: 105–112
- Schultz RA and Fossen H. 2008. Terminology for structural discontinuities. *AAPG*, 92(7): 853–867
- Shipton ZK, Evans JP, Robeson K, Forster CB and Snelgrove S. 2002. Structural heterogeneity and permeability in faulted eolian sandstone: Implications for subsurface modelling of faults. *AAPG Bulletin*, 86: 863–883
- Shou J, Shen Y and Zhang H. 2007. The Analysis of Controlling Factors on Sandstone Diagenesis and Porosity Preservation of Lower Jurassic in Tugerming Anticline, Kuqa Forland Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(6): 869–875 (in Chinese with English abstract)
- Shou J, Zhang H, Shen Y, Wang X, Zhu G and Si C. 2006. Diagenetic mechanisms of sandstone reservoirs in China oil and gas-bearing basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2165–2170 (in Chinese with English abstract)
- Sun B, Ding Y and Shao Z. 1996. Application of acoustic emission technique in determination of fossil and present-day stresses in oil fields. *Journal of Geomechanics*, 2(2): 11–17 (in Chinese with English abstract)
- Taylor WL and Pollard DD. 2000. Estimation of in situ permeability of deformation bands in porous sandstone, Valley of Fire, Nevada. *Water Resources Research*, 36: 2595–2606
- Torabi A and Fossen H. 2009. Spatial variation of microstructure and petrophysical properties along deformation bands in reservoir sandstones. *AAPG Bulletin*, 93(7): 919–938

Wang Q and Li Z. 2007. Basin-range system and oil-gas distribution. Beijing: Science Press, 99 – 141 (in Chinese)

Wang T and Cao X. 1997. estimation of differential stress magnitude in Middle-Late Triassic to Early Pleistocene for China. Earth Science, 22(1): 145 – 152 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

丁原辰, 邵兆刚. 2001. 测量岩石经历的最高古应力状态实验研究. 地球科学, 26(1): 99 – 104

丁原辰, 张大伦. 1991. 声发射涂抹不净现象在地应力测量中的应用. 岩石力学与工程学报, 10(4): 326 – 331

李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿. 岩石学报, 2006, 22(8): 1745 – 1754

卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 贾东, 王国强, 贾承造. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因, 石油学报, 21(3): 18 – 24

卢华复, 贾东, 陈楚铭, 刘志宏, 王国强, 贾承造. 1999. 库车新生代构造性质和变形时间. 地学前缘, 6(4): 215 – 221

寿建峰, 沈扬, 张惠良. 2007. 库车前陆地区吐格爾明背斜下侏罗统砂岩成岩作用及孔隙发育的控制因素分析. 沉积学报, 25(6): 869 – 875

寿建峰, 张惠良, 沈扬, 王鑫, 朱国华, 斯春松. 2006. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析. 岩石学报, 22(8): 2165 – 2170

孙宝珊, 丁原辰, 邵兆刚. 1996. 声发射测量古今应力在油田中的应用. 地质力学学报, 2(2): 11 – 17

万天丰, 曹秀华. 1997. 中国三叠纪中晚期-早更新世构造应力值估算. 地球科学, 22(1): 145 – 152

王清晨, 李忠. 2007. 库车-天山盆山系统与油气. 北京: 科学出版社, 99 – 141