

碳酸盐岩断裂相分类特征

——以新疆塔里木盆地柯坪露头为例

屈泰来¹⁾, 邬光辉¹⁾, 刘加良²⁾, 李浩武¹⁾, 陈志勇¹⁾, 高力¹⁾

1) 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2) 北京石油机械厂, 北京 100083

摘要: 断裂相的概念为断裂带的内部结构研究提供了新的思路与建模方法, 通过塔里木盆地柯坪露头断裂带的分析, 碳酸盐岩断裂相特征有别于碎屑岩。柯坪露头碳酸盐岩断裂带不连续构造以滑动面、裂缝带和变形带发育为特征。根据形态识别出平直截切型、弯曲起伏型、渐变条带型三种类型滑动面。破碎带中裂缝带发育, 裂缝充填少, 是良好输导通道; 断层核部存在多充填的裂缝带。该区具有脆性破裂作用、褶皱作用与塑性变形作用形成的三种类型变形带。碳酸盐岩断裂带隔层主要由大小不一的破裂岩、角砾岩组成, 多呈断续型或破碎型展布, 少量隔层发育渗流缝隙。碳酸盐岩断裂核部与破碎带透镜体发育, 主要有未变形的透镜体、变形的透镜体、成岩作用影响的透镜体三种类型。柯坪露头断裂相分析表明, 碳酸盐岩断层核部多致密, 破碎带中的裂缝带是油气输导的优势通道。不同级次的断裂相对储层与流体具有不同影响作用, 需要区别对待。

关键词: 碳酸盐岩; 断裂相; 类型; 储层; 塔里木盆地

中图分类号: P588.245; P542; P588.33 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.05.04

The Classification and Characteristics of Carbonate Fault Facies: A Case Study of the Outcrop of Kalpin Area, Tarim Basin in Xinjiang

QU Tai-lai¹⁾, WU Guang-hui¹⁾, LIU Jia-liang²⁾, LI Hao-wu¹⁾, CHEN Zhi-yong¹⁾, GAO Li¹⁾

1) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083;*

2) *Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd., China National Petroleum Corporation, Beijing 100083*

Abstract: Fault facies is a novel concept for the internal structure description and reservoir modeling of faults. Characteristics of carbonate fault facies are different from those of clastic rocks, as evidenced by the analysis of the Ordovician carbonate outcrop in Kalpin area, Tarim basin. In this paper, the fault facies of discrete structures, membranes and lenses are divided into different subtypes in the carbonate outcrop. The discrete structures of the carbonate outcrop are characterized by the development of slip surface, fracture band, and deformation band. There exist three types of slip surface, i.e., straight intercept type, curved fluctuate type and gradation band type. Fracture bands, developed in the damage zone with insignificant filling, are ideal migration channels. However, most of the fracture bands and fault cores are filled with lenses. There are three types of deformation band, i.e., cataclastic deformation band, folding deformation band, and ductile deformation band. Carbonate membranes mainly consist of different sizes of cataclasite or breccias of semi-continuous or ruptured types, with a small part of them formed by siliceous belt of continuous type or filled with sand and mud of continuous type. Many carbonate lenses are distributed in the fault cores and damage zones. There are three types of lenses, namely, un-deformed cataclasite lenses, low-deformed lenses, and deformed lenses affected by diagenesis. It is indicated

本文由国家油气专项“四川、塔里木等盆地及邻区海相碳酸盐岩大油气田形成条件、关键技术及目标评价”(编号: 2008ZX05004-04)资助。

收稿日期: 2011-07-27; 改回日期: 2011-08-30。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 屈泰来, 男, 1983年生。在读博士研究生。主要从事石油地质专业研究。E-mail: collens4@163.com。

that most of the fault cores are tight, but the fracture bands in the damage zone are favorable channels of hydrocarbon migration. It is necessary to deal with them separately because different grades of fault facies exert different effects on the reservoir and fluids.

Key words: carbonate; fault facies; type; reservoir; Tarim basin

断裂带具有复杂的三维空间结构, 断裂带油气的输导与封堵特征远比一维或二维的地质模型复杂, 断裂内部结构及其流体作用是研究热点与难点 (Alexander et al., 1998; Aydin, 2000; Perez et al., 2004; Graham Wall et al., 2006; Childs et al., 2009; Eichhubl et al., 2009)。由于断裂带强烈非均质性, 以及孔-缝-洞三重运载介质空间组合的多样性与差异性, 造成流体流动横向变化的非均质性与复杂性 (Peacock et al., 1998; Perez et al., 2004; Graham Wall et al., 2006; Peter et al., 2009), 塔里木盆地碳酸盐岩在油气运移方向上、油气聚集有利区也出现复杂性 (周新源等, 2006; 翟晓先等, 2008), 开展碳酸盐岩断裂带内部结构的研究对油气勘探开发具有重要的意义。

为了有效建立断裂带的储层地质模型, Tveranger 等 (2005) 提出了断裂相的新概念, 断裂相是指具有相同构造变形特征的构造或岩体。每个断裂相

具有特定组合序列, 断裂带是变形岩体的集合, 内部结构和岩石物性是随构造变形而变化的三维体, 可划分为不连续构造、隔层、透镜体三类断裂相, 断裂带是一系列断裂相的集合。断裂相可以不同级别和不同尺度的结构要素、岩相组合进行划分, 为断裂带的内部结构研究提供了新的思路与定量建模方法, 并在碎屑岩油藏中取得很好应用效果 (Fredman et al., 2008; Braathen et al., 2009)。目前关于断裂相的研究主要集中在碎屑岩中。

塔里木盆地柯坪地区奥陶系碳酸盐岩广泛出露, 发育多种类型与特征的断裂带 (何文渊等, 2002), 通过一系列典型剖面的考察 (图 1), 发现奥陶系碳酸盐岩发育多种类型、多种特征的断裂相。因此, 本文通过柯坪奥陶系碳酸盐岩野外露头资料综合分析, 进行碳酸盐岩不连续构造、隔层、透镜体三类断裂

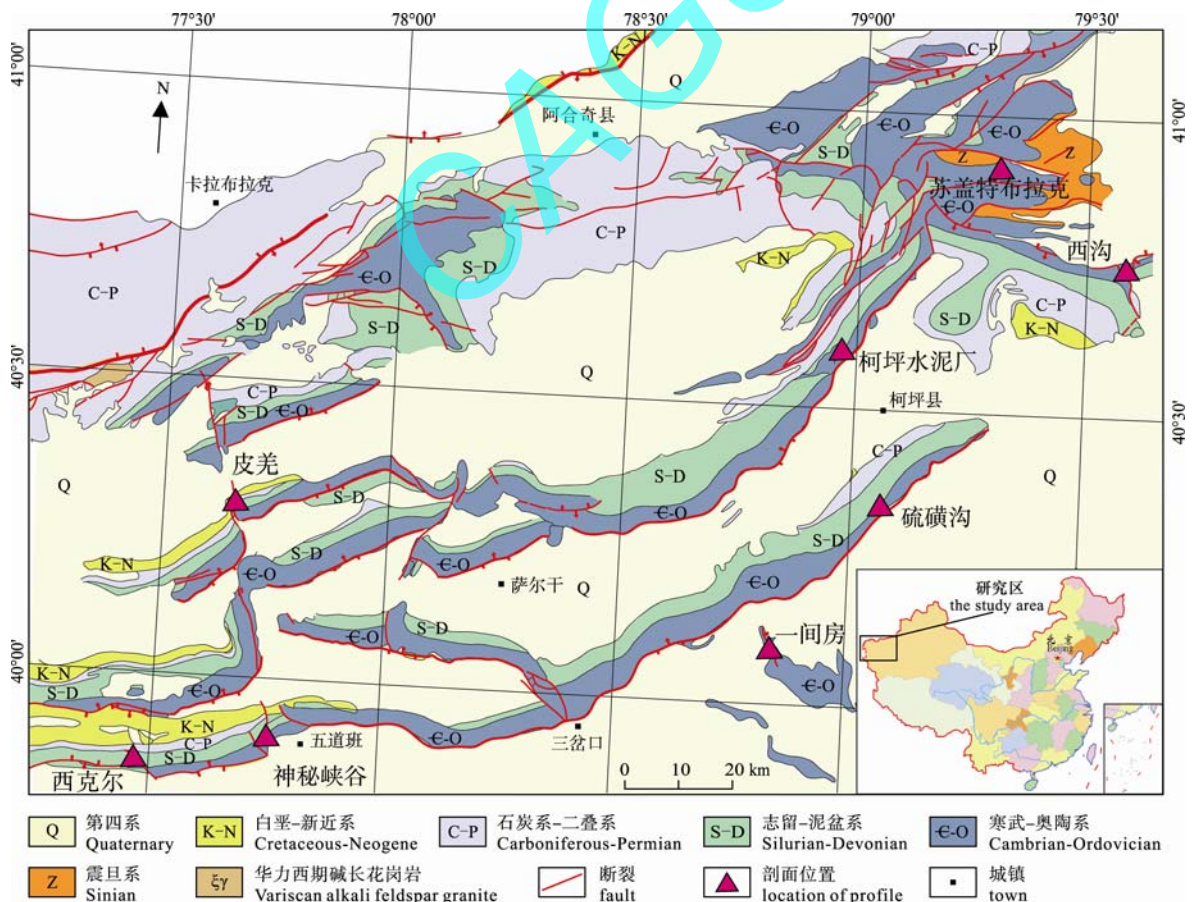


图 1 新疆塔里木盆地柯坪露头构造分区与剖面位置
Fig. 1 Tectonic map and location of sections of Kalpin outcrop, Tarim Basin in Xinjiang

相的进一步分类, 分析其基本结构、分布及其储层特征, 为断裂带内部结构的研究与建模提供认识基础。

1 不连续构造

碎屑岩中不连续构造具有滑动面、剪切裂缝与张性裂缝, 以及具有挤压特征的劈理、缝合线等 (Braathen et al., 2009)。柯坪地区断裂发育, 寒武-奥陶系碳酸盐岩沿断裂带大面积出露, 不连续构造发育, 分析主要形成滑动面、裂缝带、变形带三种断裂相。

1.1 滑动面

碎屑岩断裂带中, 呈现为剪切特征的滑动面通常为连续性变形围岩的分界, 多为 μm - mm 级薄层的破裂岩或断层泥 (Braathen et al., 2009)。柯坪碳酸盐岩滑动面常见于断层核与破碎带的衔接部位 (图 2), 不同于碎屑岩的是断层泥的充填少, 而且滑动面胶结作用较弱, 出现半充填、未充填的缝隙, 局部区段具有一定渗流性能。根据滑动面的形态, 柯坪地区碳酸盐岩滑动面可以分为平直截切型、弯曲起伏型、渐变条带型 3 种类型。

平直截切型滑动面平直 (图 2A), 两侧界面清晰, 滑动面狭窄, 呈明显的破裂面, 断层核部分布较多。多为砂泥、碎裂岩充填, 致密缺少孔隙。由于本区胶结作用较弱, 擦痕面发育且连续, 可能形成局部的渗流通道。

大多滑动面为弯曲起伏型 (图 2B), 这种类型滑动面为明显的不连续界面, 但界面有锯齿状、波状起伏变化。碎裂岩与裂缝发育, 滑动面的宽度较大, 充填变化大, 多有未充填的缝隙, 具有一定的孔渗性能。

渐变条带型多出现在断层核与破碎带的过渡部位 (图 2C), 其间断裂带不是单一的破裂面与围岩分隔, 而是呈裂缝带、破碎带的形式逐渐过渡, 从而出现一系列滑动面, 形成滑动带。滑动面大多狭窄紧闭, 局部有细粒碎裂岩充填, 横向变化大, 延伸短, 不利于流体的运移。

1.2 裂缝带

相对碎屑岩, 柯坪地区碳酸盐岩断裂带中裂缝带更发育, 而且裂缝的类型、方向、特征更为复杂, 主要分布在断裂边缘的破碎带, 断层核也有分布。

断层核附近的破碎带通常发育 2~4 组网状裂缝 (图 3), 以高角度裂缝发育为特征。规模较大的裂缝延伸长度大, 缝宽达 5~60 mm, 缝间距在 20~100 cm。小型裂缝延伸长度一般在米级范围内, 缝宽在 0.5~10 mm 范围内, 裂缝间距在 2~30 cm, 裂缝

密度达 5~30 条/米。裂缝多开启, 充填少, 胶结作用弱, 网状交错, 形成良好的连通性。

破碎带中裂缝带有裂缝型、裂缝-孔洞型两种储层发育 (图 3)。由于柯坪地区奥陶系碳酸盐岩以喜玛拉雅晚期抬升暴露为主, 在气候干旱、岩溶淋滤作用差的条件下, 大多裂缝带溶蚀孔洞欠发育, 以裂缝发育为主 (图 3A), 面孔率可达 0.5%~3%。在西克尔、一间房、苏盖特等地区的裂缝带局部见溶蚀孔洞发育 (图 3B、图 3C), 以沿大型垂直缝溶蚀为主, 同时也有顺层溶蚀孔洞的发育, 以及沿水平裂缝的局部溶蚀作用。溶蚀扩大裂缝的缝宽通常是原始裂缝的几倍甚至几十倍, 其分带性和方向性受原始裂缝发育特征控制, 溶蚀孔洞的规模为 2~200 mm。破碎带中的裂缝带不仅具有良好的渗流性能, 是油气运移的优势通道, 而且可能形成局部缝-洞发育带, 在封盖条件好的部位, 可能形成有效的非构造圈闭。

碎屑岩断层核部透镜体、碎裂岩、泥岩涂抹的隔层发育, 而柯坪地区碳酸盐岩断层核碎裂岩、裂缝发育, 在很多较宽的断层核都发育以高角度剪切缝为特征的裂缝带 (图 2C)。通常发育 2~3 组网状裂缝, 形成一系列的碎裂岩, 裂缝带可以横穿整个断层核, 也可能是局部发育。裂缝发育程度通常高于周缘破碎带, 微小缝尤为发育, 裂缝密度达 10~50 条/米, 将断层核切割为大小不一的角砾, 裂缝的延伸形迹保存较好。由于断层核碳酸盐岩构造挤压作用、成岩胶结作用发育, 裂缝多为破碎的角砾、泥质、方解石充填, 开启性较差, 溶蚀作用也较弱, 孔渗低, 仅存在局部渗流性较好的裂缝带。

1.3 变形带

在多孔岩石和沉积物中, 脆性变形多数表现为小型、断层状结构, 被称之为变形带 (Fossen et al., 2007; Braathen et al., 2009), 变形带通常为局部应变的薄层带, 与一般的断裂相比, 缺少独立、连续的滑脱面。柯坪地区碳酸盐岩发育多种成因变形带, 多分布在断层核周围破碎带, 具有脆性破裂作用、褶皱作用, 以及塑性变形作用形成的三种类型变形带 (图 4)。

柯坪碳酸盐岩构造作用强烈, 脆性破裂作用造成变形带与裂缝发育, 变形带多发生在邻近断层核的脆性灰岩内 (图 2A、图 4A), 灰岩层间出现局部层间滑动或是破裂错动, 以剪切位移为主, 形成一系列薄层变形带。变形带可能为方解石、泥质、碎裂岩充填或半充填。变形带周围通常有裂缝发育, 可

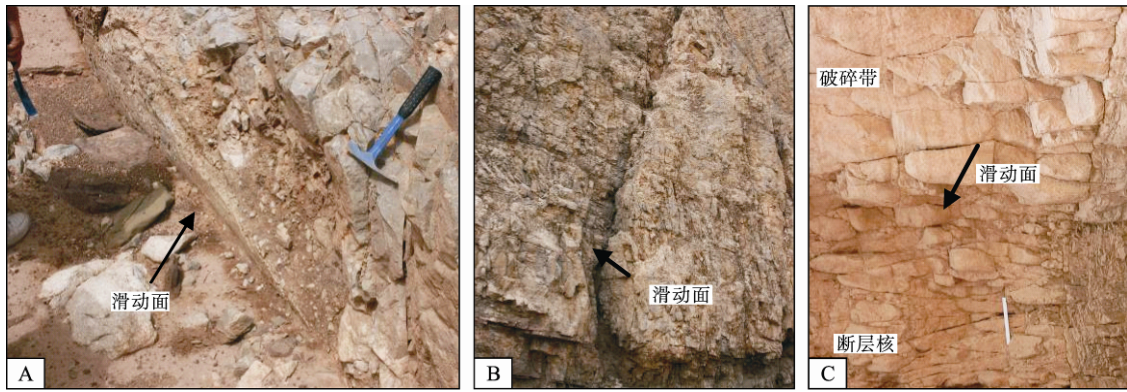


图 2 柯坪露头碳酸盐岩滑动面与断层核
Fig. 2 Carbonate slip surfaces and fault cores in Kalpin outcrop, Tarim basin

A-西克尔露头剖面; B-硫磺沟剖面; C-神秘大峡谷剖面
A-Xikeer section; B-Sulfur valley section; C-Mystery canyon section

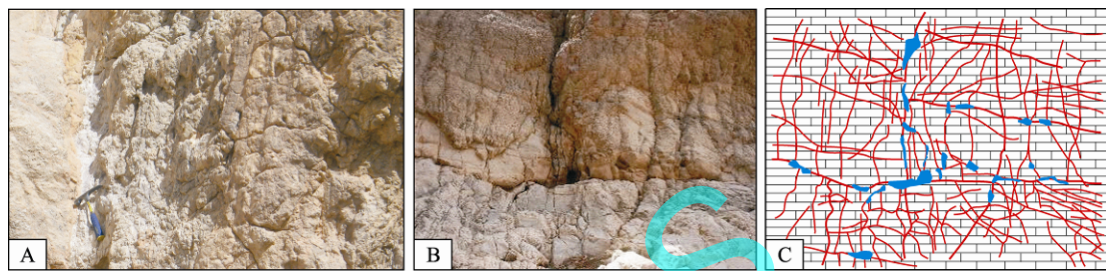


图 3 柯坪露头碳酸盐岩裂缝带
Fig. 3 Carbonate fracture bands in Kalpin outcrop, Tarim basin

A-柯坪水泥厂露头剖面; B-神秘大峡谷剖面; C-剖面 B 素描图
A-Kalpin Cement Plant section; B-Mystery canyon section; C-sketch map of Fig. B

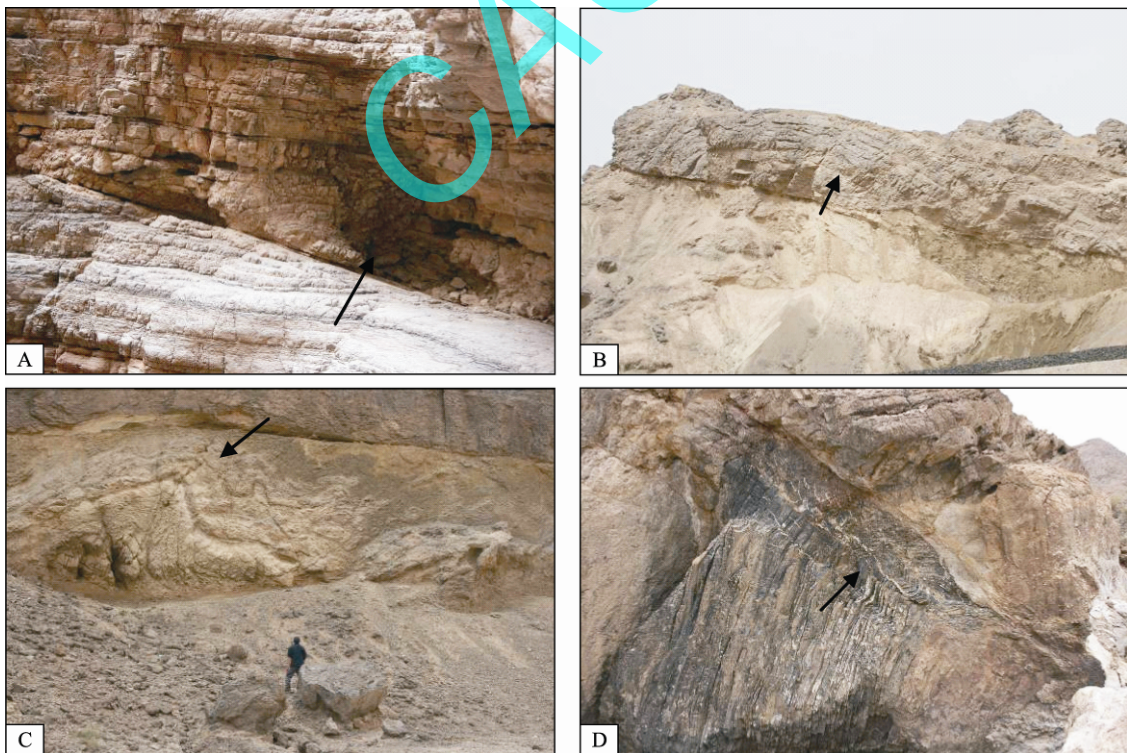


图 4 柯坪露头碳酸盐岩变形带

Fig. 4 Carbonate deformation bands in Kalpin outcrop, Tarim basin

A-神秘大峡谷变形带角砾充填溶洞; B-一间房断裂上盘褶皱变形带; C-一间房断裂下盘褶皱变形带; D-苏盖特剖面断层核部变形带
A-cave filled with breccia along the deformation band in Mystery canyon section; B-folded deformation band in the hanging wall of Yijianfang fault; C-folded deformation band in the foot wall of Yijianfang fault; D-deformation band in the fault core of Sugaite section

以形成沿层溶蚀作用,或是裂缝发育形成碎裂带,沿变形带周围产生角砾充填的洞穴(图 4A)。

褶皱作用形成的变形带多位于破碎带(图 4B、图 4C),多以局部的断层相关褶皱为主,可以发生在断裂的上盘,也可以出现在断裂的下盘。褶皱作用造成不同岩层的剪切变形,形成一系列沿层面变形错动的变形带,多不规则,断续延伸,为碎裂岩或胶结物充填,局部有溶蚀作用形成的孔洞。变形带多有不同方向的剪切缝发育,以高角度缝为主,多位于层间,增加了变形带的渗透性。

断层核部多有泥质充填形成的塑性变形,其中复杂的塑性揉皱作用也可能形成小型的变形带,多短小不规则,为方解石或泥质充填,致密缺乏缝隙,主要起封隔作用。

碎屑岩储层中变形带的存在可导致渗透率降低 1~6 个数量级,主要是阻碍流体的流动,形成致密封隔层(Fossen et al., 2007)。柯坪露头碳酸盐岩破碎带中的变形带除少部分胶结充填外,大多变形带有裂缝发育,也有溶蚀作用形成的扩溶孔洞,增强了储层的渗透性,对储层有一定建设性作用。

2 隔层

碎屑岩中大多断层含有稳定层或沿断层核的隔层,其中发育破裂岩、角砾岩、断层泥和涂抹层等(Braathen et al., 2009)。破裂岩、角砾岩以及断层泥都是与岩层破碎有关的断裂岩层,涂抹层为塑性旋转并沿断层核涂抹。隔层在孔隙性砂岩中沿滑动面展布,或者是以围岩为边界的毫米级宽的破碎层(Shipton et al., 2001)。

柯坪露头碳酸盐岩断裂带抬升高,上覆碎屑岩层少,在干旱气候下雨水淋滤少,断裂带中砂泥岩充填的断层泥与泥岩涂抹层很少。本区奥陶系碳酸盐岩断裂带隔层多为破裂岩经过一定程度的胶结作用形成的薄层条带隔层(图 5A),主要由大小不一的破裂岩组成,多呈断续型或破碎型展布,其间砂泥成分主要为碳酸盐岩,胶结作用较强,主要起渗流阻碍屏蔽作用,在断裂核与破碎带均有分布。有的地区为小型的角砾岩层形成的隔层(图 5B),具有不规则的形态,横向变化大,多为不规则型、断续型展布,部分隔层内部存在缝隙,有利于流体运移。在下奥陶统蓬莱坝组地层中有硅质条带形成的隔层(图 5C),呈连续的条带状展布。在有砂泥碎屑影响的断裂上,可以看到砂泥充填形成的致密隔层(图 5D),通常为连续型分布在断层核与破碎带的缝隙中,对流体的流动起阻碍作用。

由此可见,碳酸盐岩隔层形态多样,既有断续型、不规则型,也有连续型、碎裂型分布。隔层多为碎裂岩、角砾岩充填,也有砂泥质、硅质充填的,形成致密的封隔带。隔层主要在断层核部发育,对流体流动主要起阻碍作用,造成断层核部总体致密。

3 透镜体

相对于碎屑岩而言,柯坪地区碳酸盐岩不仅断裂核部透镜体发育,而且在破碎带也有大量的透镜体发育(图 5、图 2、图 3)。碳酸盐岩透镜体形状多样,不规则的四边形、菱形较多,为滑动面、裂缝面所分隔,隔层周边通常有不同形态透镜体发育(图 5)。透镜体的大小差异较大,直径在数十 cm 至数 mm 级别,在断层核部表现的差别最为明显。根据透镜体变形特征分析主要发育未变形的透镜体、变形的透镜体、成岩作用影响的透镜体等三种类型。

未变形的透镜体主要为碎裂岩所形成(图 5A、图 5B),以脆性碳酸盐岩破裂形成的透镜体为主,由于露头透镜体位于开放的空间中,不再经受较高的温压作用,后期未发生内部的变形,透镜体可能保持原有的棱角,或是经历一定程度机械磨圆作用,透镜体之间为裂缝或滑动面连接,其间可能发育较大的缝隙。

碳酸盐岩透镜体在断裂带强烈变形的围岩作用下发生内部变形(图 5C),透镜体原始的形态有所改变,透镜体边部也有一定的磨圆剪切作用,以微弱变形的透镜体为主。这类透镜体多为隔层所包围,虽然内部可能有一定的孔渗,但储层连通性差,难以形成有效储层。

成岩作用形成的透镜体经过强烈的改造与重组(图 5D),多位于断层核部,其成分比较复杂,由破裂的角砾岩、碎裂岩、砂泥充填物、胶结物等组成的混合物,具有复杂的内部褶皱、塑性流动等变形特征。这类透镜体致密,缺乏孔隙。

透镜体在碳酸盐岩断裂带普遍发育,多不具有良好的储集空间。但相对碎屑岩而言,其间的网状裂缝以碎裂岩、方解石胶结为主,缺少泥岩涂抹,断层泥欠发育,裂缝网络没有完全充填,在未变形的透镜体中可能形成局部良好的运移通道。

4 结论与讨论

塔里木盆地柯坪露头下古生界碳酸盐岩不连续构造、隔层、透镜体等断裂相发育,其次级类型和特征与碎屑岩有较多差异。不连续构造发育三种类型滑动面、两种类型裂缝带与三种类型变形带,识

别出四种类型隔层与三种类型透镜体，不同类型的断裂相特征各异，对储层与流体影响作用不同，储层建模需要区别对待。

柯坪露头碳酸盐岩断裂核部发育透镜体、隔层、滑动面、裂缝带等断裂相，破碎带发育裂缝带、变形带与透镜体等(图 6)。碳酸盐岩断层核部多致密，破碎带中裂缝带发育，裂缝充填少，是流体输导的

优势通道。变形带、滑动面对流体渗流性具有建设性作用，隔层的发育特征对断裂带储层与渗流作用评价具有重要意义，值得高度关注。塔里木盆地下古生界碳酸盐岩断裂在油气运聚与成藏中具有重要作用，研究表明不同断裂部位储层与油气分布有差异性(罗春树等, 2007; 王招明等, 2007; 吕修祥等, 2009; 邬光辉等, 2010)，可能与断裂相的横向变化

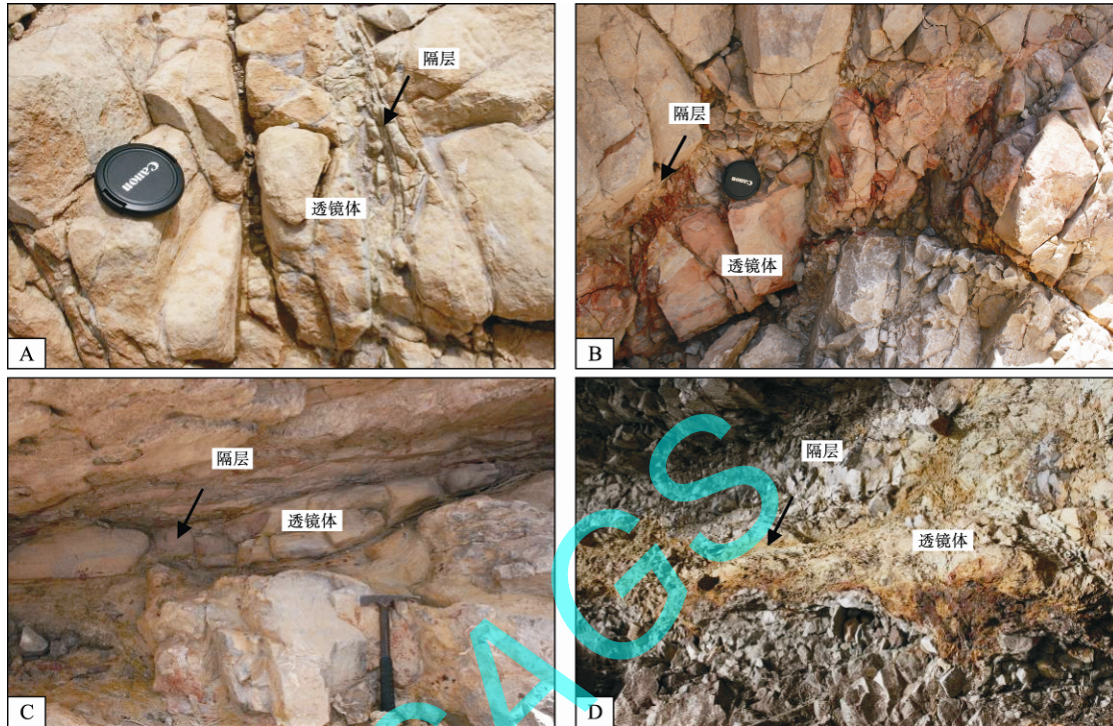


图 5 柯坪露头碳酸盐岩透镜体与隔层

Fig. 5 Carbonate lenses and membranes in Kalpin outcrop, Tarim basin

A-硫磺沟剖面; B-柯坪水泥厂剖面; C-西沟剖面; D-西克尔剖面

A-sulfur valley section; B-Kalpin Cement Plant section; C-Xigou section; D-Xikeer section

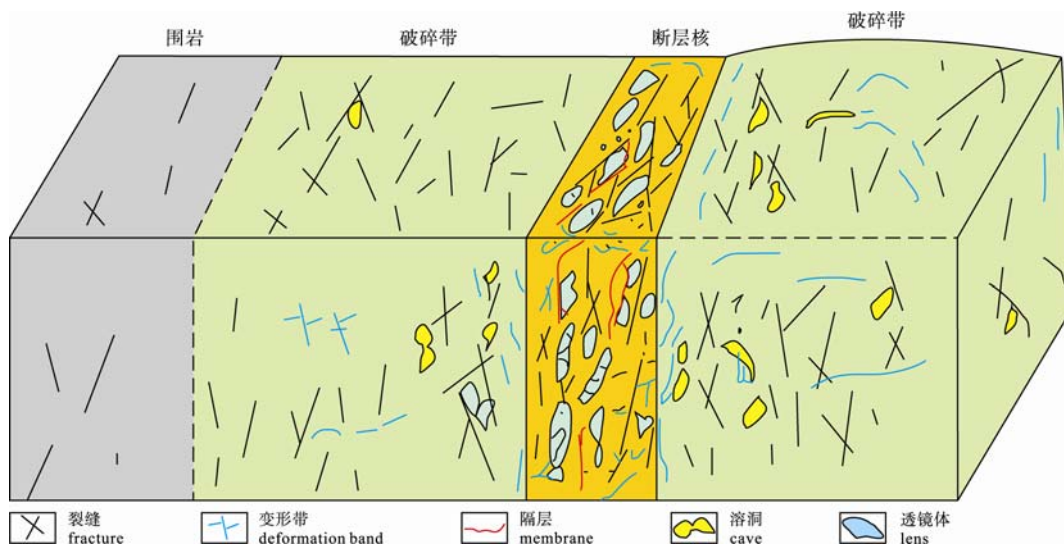


图 6 柯坪露头碳酸盐岩断裂相模式

Fig. 6 Carbonate fault facies model in Kalpin area, Tarim Basin

及其输导作用有关, 断裂周边高渗透性的裂缝带是油气运聚的有利部位, 其输导与遮挡条件因断裂相的空间分布而有差异, 有待精细的地质模型研究。

断裂相的新概念为断裂带内部结构研究提供了新的思路与定量建模方法, 碳酸盐岩溶蚀作用、破裂作用、胶结作用发育, 断裂相特征不同于砂岩, 碳酸盐岩断裂变形带内部结构模型、断裂相模型建立与划分、定量描述值得深入研究。

致谢: 感谢审稿专家与编辑的精心指导!

参考文献:

- 何文渊, 李江海, 钱祥麟, 郑多明. 2002. 塔里木盆地柯坪断隆断裂构造分析[J]. 中国地质, 29(1): 37-43.
- 罗春树, 杨海军, 蔡振忠, 邬光辉, 董立胜. 2007. 塔中 82 井区优质储集层的控制因素[J]. 新疆石油地质, 28(5): 589-591.
- 吕修祥, 李建交, 汪伟光. 2009. 海相碳酸盐岩储层对断裂活动的响应[J]. 地质科技情报, 28(3): 1-5.
- 王招明, 赵宽志, 邬光辉, 张丽娟, 王振宇, 罗春树, 李新生. 2007. 塔中 I 号坡折带上奥陶统礁滩型储层发育特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 28(6): 797-801.
- 邬光辉, 琚岩, 杨仓, 赵宽志. 2010. 构造对塔中奥陶系礁滩型储集层的控制作用[J]. 新疆石油地质, 31(5): 467-470.
- 翟晓先, 云露. 2008. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 29(5): 565-573.
- 周新源, 王招明, 杨海军, 王清华, 邬光辉. 2006. 中国海相油气田勘探实例之五: 塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J]. 海相油气地质, 11(1): 45-51.

References:

- ALEXANDER L L, HANDSCHY J W. 1998. Fluid Flow in a Faulted Reservoir System: Fault Trap Analysis for the Block 330 Field in Eugene Island, South Addition, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 82(3): 387-411.
- AYDIN A. 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow[J]. Marine and Petroleum Geology, 17(7): 797-814.
- BRAATHEN A, TVERANGER J, FOSSEN H, SKAR T, CARDOZO N, SEMSHAUG S E, BASTESSEN E, SVERDRUP E. 2009. Fault facies and its application to sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 93(7): 891-917.
- CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, BONSON C G, NICOLA A, SCHÖPFER M P J. 2009. A geometric model of fault zone

and fault rock thickness variations[J]. Journal of Structural Geology, 31(2): 117-127.

- EICHHUBL P, DAVATZ N C, BECKER S P. 2009. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah[J]. AAPG Bulletin, 93(5): 653-681.
- FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, MAIR K. 2007. Deformation bands in sandstones: a review[J]. Journal of Geological Society (London), 164(4): 755-769.
- FREDMAN N, TVERANGER J, CARDOZO N, BRAATHEN A, SOLENG H, RØE P, SKORSTAD A, SYVERSVEEN A R. 2008. Fault facies modeling: Technique and approach for 3-D conditioning and modeling of faulted grids[J]. AAPG Bulletin, 92(11): 1457-1478.
- GRAHAM WALL B R, GIRBACEA R, MESONJESI A, AYDIN A. 2006. Evolution of fracture and fault-controlled fluid pathways in carbonates of the Albanides fold-thrust belt[J]. AAPG Bulletin, 90(8): 1227-1249.
- HE Wen-yuan, LI Jiang-hai, QIAN Xiang-lin, ZHENG Duo-ming. 2002. Analysis of fault structures in the Kalpin fault uplift, Tarim basin[J]. Chinese Geology, 29(1): 37-43(in Chinese with English abstract).
- LUO Chun-shu, YANG Hai-jun, CAI Zhen-zhong, WU Guang-hui, DONG Li-sheng. 2007. Controlling Factors of Premium Reservoir Rock in Tazhong Wellblock-82[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 28(5): 589-591(in Chinese with English abstract).
- LŪ Xiu-xiang, LI Jian-jiao, WANG Wei-guang. 2009. Responses of Marine Carbonate Reservoirs to Fault Activities[J]. Geological Science and Technology Information, 28(3): 1-5(in Chinese with English abstract).
- PEACOCK D C P, FISHER Q J, WILLEMSE E J M, AYDIN A. 1998. The relationship between faults and pressure solution seams in carbonate rocks and the implications for fluid flow[J]. Geological Society (London) Special Publication, 147: 105-115.
- PETER E, NICHOLAS C D, STEPHEN P B. 2009. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah[J]. AAPG Bulletin, 93(5): 653-681.
- PEREZ R J, BOLES J R. 2004. Mineralization, fluid flow, and sealing properties associated with an active thrust fault: San Joaquin basin, California[J]. AAPG Bulletin, 88(9): 1295-1314.
- SHIPTON Z K, COWIE P A. 2001. Damage zone and slip-surface evolution over μm to km scales in high porosity Navajo sand-

- stone, Utah[J]. Journal of Structural Geology, 23: 1825-1844.
- TVERANGER J, BRAATHEN A, SKAR T, SKAUGE A. 2005. Center for Integrated Petroleum Research—Research activities with emphasis on fluid flow in fault zones[J]. Norwegian Journal of Geology, 85: 63-72.
- WANG Zhao-ming, ZHAO Kuan-zhi, WU Guang-hui, ZHANG Li-juan, WANG Zhen-yu, LUO Chun-shu, LI Xin-sheng. 2007. Characteristics and main controlling factors of the upper Ordovician reef-bank reservoir development in the Tazhong I slope-break zone[J]. Oil & Gas Geology, 28(6): 797-801(in Chinese with English abstract).
- WU Guang-hui, JU Yan, YANG Cang, ZHAO Kuan-zhi. 2010. Tectonic Controlling Factors of Ordovician Reef and Bank Reservoir in Tazhong Uplift[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 31(5): 467-470(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Xiao-xian, YUN Lu. 2008. Geology of giant Tahe oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 29(5): 565-573(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xin-yuan, WANG Zhao-ming, YANG Hai-jun, WANG Qing-hua, WU Guang-hui. 2006. Cases of discovery and exploration of marine fields in china(part 5): Tazhong Ordovician condensate field in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 11(1): 45-51(in Chinese with English abstract).

我国跻身海绵骨针矿化研究世界前列

2011年7月23日,受科技部国际合作司委托,国土资源部科技与国际合作司组织专家组在京召开“硅质海绵骨针矿化机制及仿生研究”项目验收会。专家组认为,项目完成了任务书规定的所有研究内容,达到了预期的目标,使我国在该学科领域研究跻身世界前列。

硅质海绵骨针矿化机制及仿生研究是科技部的国际科技合作计划项目,由中国国家地质实验测试中心与德国美因茨大学合作,开展六放海绵骨针结构、特征、矿化与调控机制研究,寻求新的纳米硅仿生合成应用途径。首席科学家是王晓红研究员和Müller教授。项目始于2008年6月,经费111万元。

项目获得了创新性的研究成果:对六放海绵骨针的结构、组成和性能进行了系统研究,明确了其矿化机制,并初步仿生合成了新型的具有优良性能的骨骼和牙齿生物矿物修复材料;将传统的矿物学与生命科学、仿生学、材料科学等学科研究相结合,开辟了我国生物-硅化医学材料研究的前沿性新领域,以多学科交叉的方式实现了地质科学的延伸。

通过国际合作,我国在该学科领域研究水平迅速提高,发表国际SCI收录论文40篇,参与多个欧盟第七框架计划项目。

本刊编辑部 采编