

文章编号:1673-5005(2010)01-007-05

塔河油田奥陶系缝合线特征及石油地质意义

艾合买提江·阿不都热和曼¹, 钟建华¹, 李 阳², 陈 鑫¹

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营, 257061; 2. 中石化油田勘探开发事业部, 北京 100029)

摘要:利用岩心观察、薄片鉴定、电子探针和拉曼光谱等分析手段,从缝合线特征描述入手,分析塔河油田缝合线的成因及其油气意义。结果表明:研究区缝合线可分为3种,即顺层缝合线、倾斜缝合线和垂直缝合线;研究区缝合线有压实、压裂和压溶3种成因类型,其中顺层缝合线以压实成因为主,倾斜缝合线和垂直缝合线以压裂成因为主;压实缝合线或压裂缝合线是形成压溶缝合线的基础,而压溶缝合线是压实或压裂缝合线的延续;塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝合线比基质有较高的有机质丰度,为油气生成的有利场所,同时为油气的运移提供了有利通道,也有利于提高储层物性。

关键词:塔河油田;缝合线;储层;成因类型;碳酸盐岩

中图分类号:P 583 文献标志码:A

Stylolite characteristics and petroleum geology significance of Ordovician carbonate rocks in Tahe Oilfield

AHMATJAN Abdurahman¹, ZHONG Jian-hua¹, LI Yang², CHEN Xin¹

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Business Unit of Oilfield Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100029, China)

Abstract: By using methods of core observation, thin-section analysis, electron probe and Raman spectrum analysis, the stylolite genesis and its petroleum significance in Tahe Oilfield were described based on stylolite characteristics. The results show that there are three kinds of stylolites including bedding, inclined and vertical stylolite. There are three kinds of genetic types for stylolites including compaction, fracturing and pressolution. Compaction is main contribution factor for bedding stylolite, and fracturing is main genetic type for inclined and vertical stylolite. Compaction stylolite or fracturing stylolite are the prerequisite of forming pressolutional stylolite, and pressolutional stylolite is the continuation of compaction stylolite or fracturing stylolite. In Ordovician carbonate rocks of Tahe Oilfield, the stylolites have higher organic matter abundance than matrix, which are also the favorable structure for hydrocarbon generation, migration pathway and advantage to improve physical properties of reservoir.

Key words: Tahe Oilfield; stylolite; reservoir; genetic type; carbonate rocks

缝合线构造(stylolites)是碳酸盐岩中广泛发育的一种压溶构造^[1-3],缝合线的形成是和压应力驱动下的岩石溶解联系在一起的^[3-5],但有人认为碎裂变形也能形成特定的缝合线^[6]。关于缝合线的石油地质意义,前人的主要观点有:①随着缝合线数量的增加,储层物性变差^[7];②缝合线能够改

善储层物性,是油气运移的重要通道和储集空间^[8];③缝合线对储层物性没有影响^[9];④虽然缝合线本身对储层物性没有贡献,但由于缝合线具有塑性特征,在一定条件下能转化为储渗空间^[10]。可以看出,前人的观点存在较大分歧。钻井及野外勘察揭示塔河油田北部隆起区下奥陶统碳酸盐

收稿日期:2009-06-18

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2006CB202401);国家油气重大专项课题(2008ZX05014)

作者简介:艾合买提江·阿不都热和曼(1979-),男(维吾尔族),新疆阿克苏人,博士研究生,主要从事构造地质学与储层沉积学研究。

岩中发育大量缝合线构造,但前人对其缝合线鲜有涉及。笔者在大量野外露头、钻井岩心和分析化验资料研究基础上,对该区缝合线特征、成因机制及油气意义进行深入系统的研究。

1 区域地质概况

塔河油田主体位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起西南部(图1)^[11]。受加里东中晚期区域性构造抬升的影响,塔北阿克库勒地区快速隆升,于中奥陶世末开始形成一个向北抬升、向南倾没的鼻状凸起。

图1 塔河油田区域位置图
Fig.1 Location of Tahe Oilfield

2 缝合线采样和测试方法

对塔河油田32口井的岩心进行精细观察与描述,以塔河油田四区奥陶系碳酸盐岩为主,选取有代表性缝合线样品150块,磨制薄片169个。其中,上奥陶统54个,中下奥陶统115个。薄片观察在中国石油大学(华东)沉积学实验室中完成。电子探针和阴极发光测试在德国弗赖堡大学(University of Freiburg)完成;拉曼光谱分析在瑞士宝石家协会(Swiss gemmological institute)实验室完成。通过电子探针测试,获得了缝合线内充填物的相对含量。电子探针型号为Cameca SX100,在加速电压15 kV、束流4.9 nA、束斑直径1 μm的工作条件下进行定量分析。将用分光器测定获得的X射线波长、强度与标准样品对比,或根据不同强度校正值,间接计算出缝合线充填物的组分的质量分数。结果表明,研究区缝合线中充填物主要是Ca, Mg的氧化物,基质溶解释放的Fe²⁺与S²⁻结合而形成的黄铁矿与富集的Fe, Mn等重矿物残留物,且黄铁矿在缝合线当中呈星散立方体

和小结核状分布(图2)。用拉曼光谱测定缝合线内充填物的拉曼光谱特征,发现有机质在缝合线内已相对富集。研究结果与研究区下奥陶统缝合线中普遍发育储层沥青和次生黄铁矿现象吻合。

图2 黄铁矿在缝合线中的赋存特征
(T402井,5.5226 km)
Fig.2 Characteristics of pyrite in stylolites
(well T402, 5.5226 km)

3 缝合线分类及其特征

3.1 缝合线与层理面的关系分类

根据缝合线与层理面的关系,研究区的缝合线可分为3种:①平行或近于平行层理面(与层理面的夹角小于15°)的“顺层缝合线”(图3(a)),这是一种主要的缝合线,占整个缝合线的70%以上;②与层理面夹角为15°~75°的“倾斜缝合线”(图3(b)),这是一种次要的缝合线,占整个缝合线的20%左右,在TK404,TK407,TK409,S65,S80等13口井中普遍发育,以TK404井为代表;③与层理面夹角大于75°的“竖直缝合线”(图3(c)),在研究区奥陶系地层中最不发育,不超过缝合线总数的5%,以S47,T415井为代表。具体缝合线特征见表1。

3.2 几何学分类

塔河油田奥陶系碳酸盐岩中的缝合线从几何学特征角度出发,可以将它们分为简单型和复杂型两种。简单型缝合线的几何学特征就是几何形态比较简单,亦可叫单一型缝合线。主要包括平缓型、碎浪型、城墙状和锯齿状。复合型缝合线总体上以某一种类型缝合线为主体,局部可见另一种类型的缝合线寄生在主体部分上,如四区T415井5.5709 km段,可见单条平缓型缝合线过渡到城墙状缝合线,继而过渡到锯齿状缝合线(图3(d))。

表1 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝合线特征

Table 1 Characteristics of stylolites in Ordovician carbonate rocks, Tahe Oilfield

特征	顺层缝合线	倾斜缝合线	竖直缝合线
产状	与层理面交角小于15°	与层面交角为15°~75°	与层理面夹角75°~90°
延伸长度	一般贯穿岩心,长度大于65 mm	贯穿岩心,被顺层缝合线或垂直缝合线切断、限制	贯穿岩心,被顺层、倾斜缝合线切断、限制
缝合线面间宽度	0.1~0.5 mm	0.1~2 mm	0.1~2 mm
缝合线齿间宽度	0.5~5 mm	1~3 mm	1~3 mm
密度	发育不均衡,一般为30~50 m ⁻¹	发育不均衡,时有时无	发育不均衡,时有时无
是否穿过泥晶灰岩颗粒	不穿过或偶有穿过	绕过或穿过	大部分穿过
充填性	大部分被有机质残余物充填	未被充填,偶见灰绿色钙质泥充填	未被充填,偶见被灰绿色钙质泥充填
稳定性	极好到较好	较差,有时彼此交织成网状	较差,有时彼此交织成网状
剥裂性	容易	较易	较难
与裂缝的连通性	好	中等	较差
易发育的岩性	均质泥晶灰(白云)岩	均质泥晶灰岩或含粉砂斑片泥晶灰岩	均质泥晶灰岩或含粉砂斑片泥晶灰岩

图3 塔河油田奥陶系储层缝合线岩心特征
(岩心直径65 mm)

Fig. 3 Core characteristics of stylolite in Ordovician carbonate rocks, Tahe Oilfield (core diameter 65 mm)

3.3 缝合线的组合关系

研究区缝合线组合关系有下列几种:①单一型,缝合线的间距超过缝合线齿高或波高的10倍;②平行型,由多条彼此平行的缝合线组成,缝合线的间距小于缝合线齿高的10倍(图3(e));③重合型,多条缝合线彼此重叠组成;④网状型,多条缝合线彼此相交成网状,网眼较大,网眼直径是缝合线齿高的10倍以上;⑤辫状型,多条缝合线彼此相交成辫(图3(f)),多为顺层缝合线彼此相交;⑥复杂型,多条缝合线彼此相交成非网、非辫系统,且多与垂直裂缝和倾斜裂缝相交(图3(g)),组合成复杂的网状系统。

4 成因分析

前人有关缝合线的成因主要有压实^[1,2]和压

溶^[1-7]2种观点。诸多缝合线成因机制的论述既反映了当时人们的认识水平,又从侧面反映了一种科学的进步过程。笔者认为,研究区缝合线成因有压实、压裂和压溶3种。由于缝合线的形成源自多种因素间复杂的相互作用,如岩石成分、外部应力、流体参与、构造作用和物理化学条件等等。在分析缝合线成因时,不同阶段各主控因素的作用特点和作用地位也不尽相同。

4.1 压实缝合线

压实缝合线是由上覆地层产生的压应力、灰岩泥质含量和温度共同作用的结果。其形成过程具有阶段性:①碳酸盐岩岩块(图4(a))受上覆地层的重力作用,使碳酸盐岩颗粒的长轴顺着岩层(理)面优

图4 压实缝合线形成过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of compaction stylolites forming processes

选排列,形成了水平方向的“缝隙”(图4(b))。②由于持续的垂向静压力作用,加之岩石的物性差异,易于在最大主应力平面上使被作用岩层中的矿物或颗粒产生调整,并形成定向排列^[2],在岩心上呈微弱起伏,并伴随岩层的微弱消减(图4(c))。如S65, S80, TK417和TK427井中,许多缝合线沿泥晶

灰岩团块之间的水平边界或沿泥晶灰岩团块与粉砂白云岩斑片的结合边界发育。

4.2 压裂缝合线

压裂缝合线是一种受压剪形成的纯物理破裂。压剪应力由上覆地层产生的静压力与侧向构造挤压应力共同提供^[10]。在 S85, S86, T401, T402, T417, TK406 等井均有普遍发育,与岩层面呈高角度(大于 75°)相交。高角度压裂缝合线形成也具有阶段性。首先碳酸盐岩颗粒周围的物质,在剪压应力作用下提前屈服,使颗粒受到周围剪压应力的集中作用,而导致碳酸盐岩岩块沿着颗粒之间的应力薄弱点被“压断”,形成与最大主应力垂直的压断面;在上覆岩层静压力与持续的侧向构造挤压应力的共同作用下,被作用在岩层中的矿物或其他物质产生调整并形成定向排列,加之岩石物性差异的影响,在岩心上呈现微弱起伏并伴随岩层的微弱消减。经岩心及薄片观察,其走向以 NE(30°~40°和 60°~70°)为主,其次为 NW(280°~300°)和 NEE(10°~15°),还有少量近 EW 走向和近 SN 走向,其缝宽小于 2 mm。在 T417 井 5.5965 m 处可见大于 2 mm(图 3(h)),但含油和过油性较差。

4.3 压溶缝合线

塔河油田奥陶系碳酸盐岩中的缝合线的成因可能很难有纯粹的“压溶”。研究区内的溶蚀缝合线主要是在压实缝合线和压裂缝合线基础上改造形成的,可以认为压溶缝合线是压实缝合线和压裂缝合线的延续,也是不成熟型缝合线向成熟型缝合线的过渡。

研究区有诸多因素促使压实、压裂缝合线向压溶缝合线过渡。首先,缝合线的形成始终离不开压应力的作用,因为它贯穿缝合线形成的全过程。塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层的埋藏多在 5.0~6.0 km,上覆岩层产生的静压力较大,流体温度也较高,下奥陶统地层温度为 110~129 °C,地温梯度平均为 2.3 °C/100 m,地层压力为 57.38~59.24 MPa。其次,岩石中有机质的脱羟作用、黏土矿物蒙脱石转变为伊利石过程中提供的大量不饱和水都可促使缝合线(面)两侧可溶物质溶解,加速压溶缝合线的形成。溶蚀作用使压溶缝合线在岩心上表现为锯齿形态发育,但齿尖不尖锐,多数比较浑圆的特征。从缝合线的成因机制分析,无论压实缝合线、压裂缝合线,还是压溶缝合线,其形成过程都具有阶段性。压溶缝合线作为一种成熟的缝合线类型,是压实、压裂缝合线在诸多岩溶影响因素改造下的最终体现。在野外观察及岩心描述过程中,由于压溶缝合线具有

几何学特征明显、充填物质普遍含有有机质、储层发育段压溶缝合线内富含石油和残留的重质沥青等特点,往往作为研究重点,而压实及压裂缝合线在岩心及野外观察中不易识别,且充填物不发育,研究区内只有少量压裂缝合线被灰绿色泥质充填。

5 缝合线的油气意义

5.1 缝合线是良好的生油场所

笔者用拉曼光谱仪测得了塔河油田 T402 井奥陶系缝合线内黑色有机质充填物的拉曼光谱特征。其主峰峰值分别为 1384 cm^{-1} 和 1644 cm^{-1} ,与饱和烃中环丁烷(Cyclobutane)拉曼光谱曲线中的主峰值拟合完好。反映了缝合线中的有机质已相对富集。纯基质的有机碳含量(TOC)均小于 0.20%,最高 0.19%,最低仅 0.03%,平均为 0.10%;缝合线物质的有机碳含量高,其值为 0.11%~1.51%,平均值为 0.57%,高出基质相应值近 5 倍,就某些单样则可为 10~20 倍以上。由此可见,缝合线中的有机质要高于周围碳酸盐岩基质的,且区内奥陶系地层平均溶蚀量为缝合线锯齿高差的 2.3 倍^[12]。由于基岩可溶组分的溶解,使不溶有机质在缝合线中富集,也可证明缝合线生烃能力要优于基质。

5.2 缝合线是重要的油气运移通道

本区奥陶系灰岩基质孔隙度为 0.045%~2.0%,渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,反映基质孔、渗性总体较差的特征。缝合线的形成,实际上是碳酸盐岩基质不断消失、地层厚度不断减小的过程,并在这一过程中伴随着流体的排出。由基质消失而伴随产生的流体可以加剧溶蚀作用的进行,生成的油气会随着由基质消失而产生的流体一同排出。油气可沿着灰岩内部发育的缝合线运移(图 5(a)),也有油气沿着泥晶灰岩与白云质粉砂斑片之间形成的缝合线运移(图 5(b))。研究区下奥陶统地层中缝合线几乎均是“黑色”(图 3(g)),缝合线内部为沥

图 5 镜下含油缝合线(T433 井,5.57453 km)

Fig. 5 Oil-bearing stylolites

(well T433, 5.57453 km)

青充填物,油味较重,反映了石油曾沿缝合线运移,

只因轻烃组分的“蒸发”而留下了沥青残渣。

在观察中发现岩心多沿缝合线(面)裂开,如S77井5.541 01 km井段,由于岩心在上提的过程中,缝合线所受垂向压力剧减,造成水平或顺层的缝合线沿着缝合线(面)裂开(图6)。这表明缝合线是一种易于剥裂的弱结构界面,在压裂过程中,缝合线易被压开,成为输导油气的有利通道。

图6 沿缝合线(面)裂开的岩心

Fig.6 Drilling core splitted along stylolites

5.3 缝合线有利于提高储层物性

埋藏溶蚀作用发育区内形成的溶孔、溶缝进一步增加了原储集体的储集和渗透能力,使其成为更好的储集层。如S80井埋深5.477 1~5.478 1 km处,开度大于0.1 mm的缝合线,最大密度为 45 m^{-1} ,薄片开度直径多为0.01~0.2 mm,少数为1~2 mm,面缝率为4%~7%,且溶解作用形成的缝合线无选择性,粒内、泥晶基质及亮晶胶结物内均有溶蚀作用发生。在岩心观察中发现,压实缝合线的含油性明显优于压裂缝合线,顺层缝合线含油性优于高角度缝合线。此外,与缝合线相比岩心中的构造裂缝大多被方解石充填,只有少数裂缝面上有油迹或油斑显示,缝合线比裂缝更加细密,且网络化程度高,说明缝合线的三维连通性好于构造裂缝,有利于提高储层内部的连通性和渗透性。

6 结论

(1)据缝合线与层面的关系,塔河油田奥陶系碳酸盐岩中的缝合线可分为顺层缝合线、倾斜缝合线和竖直缝合线3种;据几何学分类,研究区内的缝合线可分为简单缝合线与复杂缝合线。

(2)本区缝合线主要是由压实、压裂和压溶作用产生。溶蚀缝合线在压实缝合线或压裂缝合线基础上改造形成,压溶缝合线是压实缝合线和压裂缝合线的延续,成因及形态上是不成熟型缝合线向成熟型缝合线的过渡。

(3)缝合线是本区碳酸盐岩储层生成油气的良好场所和油气运移的有利通道,且缝合线易于改善

储层的连通性和渗透性,提高了储层物性。

致谢 中石化西北石油分公司为岩心观察及采样提供了便利;样品分析由笔者在德弗莱堡大学矿物与地球化学学院及瑞士 Gemmological 研究所完成;成文过程中得到 Dr. Kurt Bucher 教授、Dr. Michael S. Krzemnicki 和 Dr. Hiltrud M. Sigmund 的指导和帮助。在此,对以上单位及个人谨表谢意!

参考文献:

- [1] SINHA R S. Kinetics of differentiated stylolite formation [J]. *Current Science*, 2002,82(8):1038-1046.
- [2] DANIEL K, FRANCOIS R, RENAUD T, et al. Growth of stylolite teeth patterns depending on normal stress and finite compaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007,257(3):582-595.
- [3] JOHN V S. Three-dimensional morphology and connectivity of stylolites hyperactivated during veining [J]. *Journal of Structural Geology*, 2000,22(1):59-64.
- [4] ALEXANDRE B, FRANCOIS R, JEAN P G, et al. Variety of stylolites morphologies and statistical characterization of the amount of heterogeneities in the rock [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007,29(3):422-434.
- [5] 任怀强,刘金华,杨少春,等.吐哈盆地红台地区辫状河三角洲砂岩储层微观特征[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2008,32(5):12-17.
REN Huai-qiang, LIU Jin-hua, YANG Shao-chun, et al. Sandstone reservoir microscopic characteristics of braid delta of Hongtai area in Tuha Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008,32(2):12-17.
- [6] DEELMAN J C. Lithification analysis: experimental observations [J]. *Geologische Rundschau*, 1976,65:1055-1078.
- [7] 张荫本.缝合线[J].*石油知识*,2003(3):15-16.
ZHANG Yin-ben. Stylolites [J]. *Knowledge of Petroleum*, 2003(3):15-16.
- [8] 高岗.缝合线对碳酸盐岩油气生排运聚的作用[J].*西安石油学院学报:自然科学版*,2000,15(4):32-34.
GAO Gang. Effects of stylolites on the generation, discharge, migration and accumulation of hydrocarbon in carbonate rock [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2000,15(4):32-34.
- [9] 周书欣.我国湖相碳酸盐岩研究现状[J].*石油与天然气地质*,1992,13(4):337-411.
ZHOU Shu-xin. Study of carbon hydrochloride lacustrine rock in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 1992,13(4):337-411.

(下转第17页)