

文章编号: 1000-0550(2010)01-0010-07

川东北普光气田鲕粒白云岩储层粒内溶孔的成因

王恕一 蒋小琼 管宏林 鲍云杰

(中国石油化工股份有限公司 勘探开发研究院无锡石油地质研究所 江苏无锡 214151)

摘要 普光2井下三叠统飞仙关组储层鲕粒白云岩中,常见铸模孔、新月形、半月形溶孔和环状溶孔,溶孔常具定向特征,前人多认为这些溶孔为早期成岩的大气淡水溶蚀。研究发现,这些溶孔常与压性缝、碎裂(粒)化伴生,而溶孔无明显变形,表明是形成于构造挤压之后的埋藏溶孔。埋藏溶孔有二期,一期中有沥青充填,另一期无沥青充填,前者形成于石油侵位之前,后者形成于侵位石油演化为沥青之后。研究认为:构造挤压作用于岩石时,应力首先使鲕粒中结构薄弱点—同心圈层之间产生裂缝,当应力集中于上端,使鲕粒上端优先沿同心圈层发育裂缝,随应力增大裂缝沿同心圈层向下延伸,乃至形成圆形“脱壳”裂缝,在后期酸性流体进入时沿这些裂缝优先产生溶蚀,形成偏于上端的定向溶孔,以及沿同心圈向下溶蚀形成新月形、环状溶孔,挤压和(或)溶蚀更强,则发育成铸模孔。

关键词 川东北 普光气田 鲕粒白云岩 储层 粒内溶孔

第一作者简介 王恕一 男 1941年出生 教授级高级工程师 石油地质 E-mail: wangsy@mail.wuxisuo.com

中图分类号 P618.130.2⁺1 TE122.2⁺22 **文献标识码** A

四川盆地东北部已发现了多个大中型气藏^[1-3],尤其近期普光气田的发现形成了四川盆地油气勘探的又一个新的高潮和储量增大高峰期^[4]。

普光气田位于川东北宣汉—达县地区黄金口构造双石庙—普光构造带(图1),为一个构造—岩性复合型气藏^[5,6],主要含气层位为下三叠统飞仙关组及上二叠统长兴组^[7-9]。飞仙关组主要为一套台地边缘高能鲕滩沉积,以大套溶孔型鲕粒白云岩和幻影鲕粒细—粗晶白云岩、细—粗粒结晶白云岩组合为主要储集层,后者溶孔发育时则成为俗称的糖粒状白云岩。飞一段至飞二段有效储层厚度普遍大于150 m,最厚达300 m,飞三段有效储层厚度大于30 m,最厚达70 m。孔隙度0.94%~28.86%,平均8.17%,主要分布于6%~12%,渗透率 $0.0112 \times 10^{-3} \sim 3354.6965 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以 $>1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主,总体特征为中孔中渗、高孔高渗的优质储层^[10]。储集空间以次生溶蚀孔隙为主,鲕粒白云岩中以粒内溶孔为主,幻影鲕粒细—粗晶白云岩(及结晶白云岩)中以晶间溶孔为主。

据蔡勋育等^[6]对飞仙关组白云岩储层孔隙演化分析及对鲕内溶孔的统计,现今有效的鲕内溶孔约3%~3.5%,占储层平均孔隙度的30%~35%。可见鲕内溶孔是飞仙关组储层中重要的孔隙类型之一。

前人认为飞仙关组储层的溶蚀孔隙形成于准同生—早期成岩的大气淡水溶蚀作用和埋藏溶蚀作用,

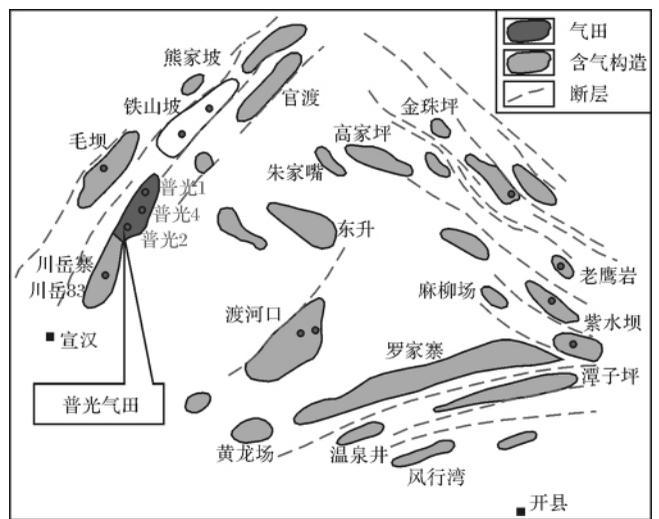


图1 川东北普光气田位置图

Fig. 1 Geographic location of Puguang gasfield in the northeastern Sichuan Basin

其中鲕粒内溶孔主要形成于准同生—早期成岩的大气淡水溶蚀^[6]。

通过对普光2井飞仙关组储层的研究(图2),我们认为这些鲕粒内溶孔与晶间溶孔一样,主要形成于两期埋藏溶蚀:一期形成于油侵位之前,溶孔中有沥青分布,另一期形成于侵位石油演化为沥青之后,溶孔中无沥青分布。相关的岩石学证据叙述如下,并对这些鲕粒内溶孔的定向特征和新月形形态的成因作进一步探讨。

收稿日期: 2008-07-01; 收修稿日期: 2009-01-01

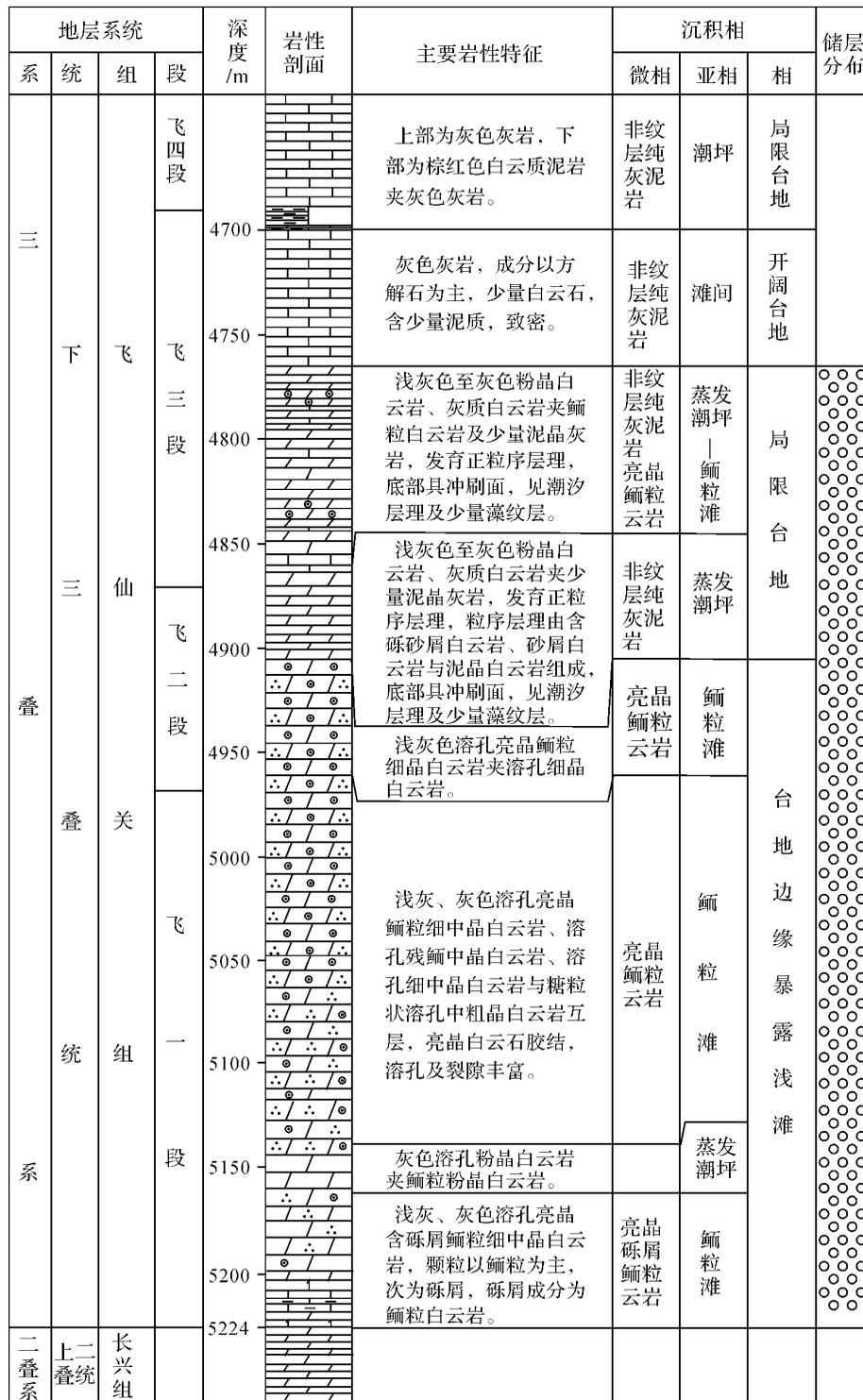


图 2 川东北普光 2 井综合柱状剖面图

Fig. 2 Strata column of Well Puguang 2 in the northeastern Sichuan Basin

1 鲕粒内溶孔的特征

(1) 鲕粒内溶孔形态多样, 常见有铸模孔、新月形孔、半月形孔、环状孔及其它不规则孔。

a. 铸模孔(负鲕): 鲕粒全部被溶蚀, 外缘的泥晶套大多已消失。有的溶孔边缘见衬边沥青和球状沥青。根据岩心中地层上下关系确定的定向薄片表明, 铸模孔中局部充填的结晶白云石, 大多分布于下部,

少量分布于上部(图3)。

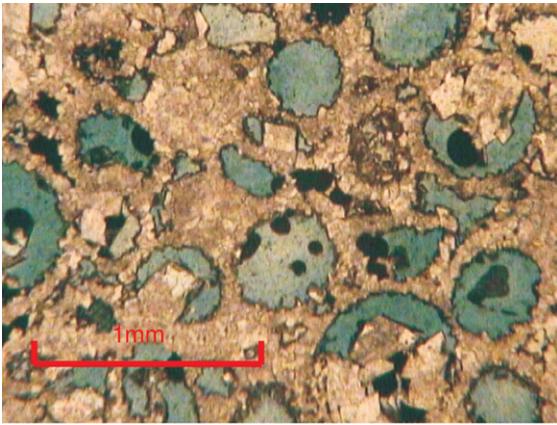


图3 铸模孔为主,未见泥晶套,孔中充填衬边沥青及球状沥青,有的溶孔上部或下部充填白云石。普光2井, $\rho g 2-16, T_{1f}$, 铸体片

Fig. 3 The most types of pores are moldic pores filling bitumen, without micrite envelope occurred. Some dissolution pores filling dolomites along the upper or lower part of the pores

溶孔中有的有沥青衬边,有的无沥青充填(图4、5)。

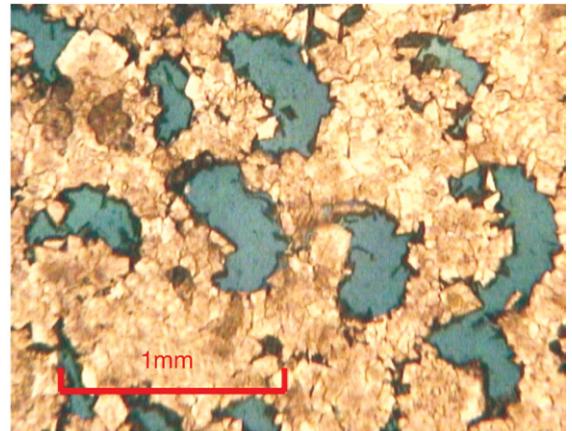


图5 溶孔鲕粒白云岩,新月形溶孔、溶孔中充填衬边沥青。普光2井, $\rho g 2-11, T_{1f}$

Fig. 5 Oolite dolomite with solution pores. Crescentiform dissolution pores filling bitumen

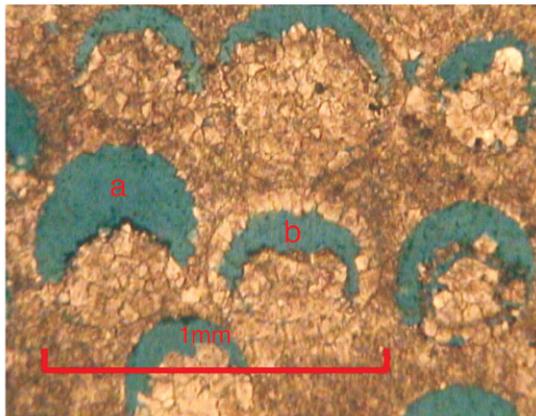


图4 溶孔鲕粒白云岩

a: 为沿溶孔外缘发育的新月形溶孔, 鲕粒外缘泥晶套已消失。b: 为沿鲕粒内同心层圈发育的新月形溶孔。普光2井, $\rho g 2-17, T_{1f}$, 铸体片

Fig. 4 Oolite dolomite with solution pores.

a: Crescentiform dissolution pores developing along the outer margin of the oolites without micrite envelope occurred; b: Crescentiform dissolution pores developing along the concentric layers of the oolites

b. 新月形、半月形溶孔: 定向薄片表明, 新月形、半月形溶孔多发育于鲕粒上部, 月牙向下, 溶蚀边界有的已超出原鲕粒, 未溶蚀部分仍可见鲕粒的同心层纹。有的新月形溶孔, 发育于鲕粒中部, 即鲕粒外圈没有溶蚀, 新月形溶孔沿鲕粒中部的同心层圈发育,

c. 环状溶孔: 溶蚀作用沿鲕粒同心层发育, 形成环状溶孔, 这些环状溶孔有的沿鲕粒外圈发育, 有的沿鲕粒内部同心层发育(图6A、B)。

d. 其它不规则溶孔

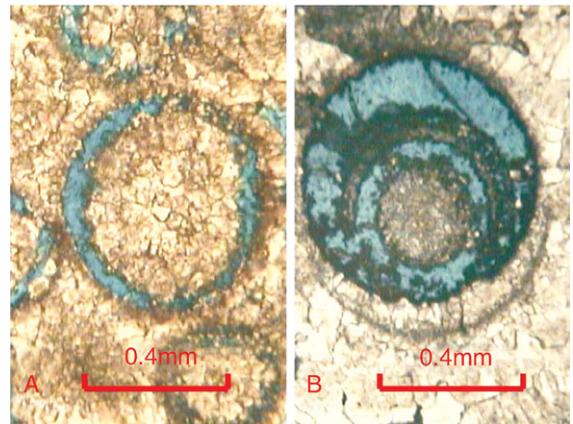


图6 A: 沿鲕粒外缘发育的环状溶孔。B: 沿鲕粒边缘发育的新月形溶孔和沿鲕粒内同心层发育的环状溶孔。普光2井, $\rho g 2-4, T_{1f}$, 铸体片

Fig. 6 A: Annular dissolution pores developing along outer margin of the oolites

(2) 溶孔具有定向发育的趋势, 除了铸模孔和环状溶孔外, 其他各种形态的溶孔, 优先发育于鲕粒上方, 新月形溶孔月牙向下, 形成定向发育的特征。

(3) 所有溶孔, 形态完整, 没有被挤压变形的迹象。

2 普光 2 井飞仙关组鲕粒白云岩中粒内溶孔的形成时期

前人认为鲕粒内溶孔是鲕滩早期暴露于大气淡水选择性溶蚀的结果,认为早期沉积物暴露期间在大气淡水渗流带中,水体自上向下流动,从颗粒上部向下渗透,上部容易被溶、下部不易溶蚀而保留,形成上部为孔隙、下部为结晶矿物的示底构造。并作为渗流带的明显特征。我们研究发现许多岩石学特征并不支持这种解释,理由如下:

(1) 相当一部分定向粒内孔下部残留部分为较粗的白云石晶体,而没有保留鲕粒圈层结构,这不是一期渗流水溶蚀所能形成的。

(2) 这些定向粒内溶孔,有的上部鲕粒外壳也已被溶蚀,并不像常见的负鲕那样,由于泥晶套发育而保留完整的鲕粒外壳。

(3) 从溶蚀流体化学特征分析,大气淡水渗流带是个开放系统,流体流经鲕粒时,在鲕粒上部和下部的短距离内,流体化学性质不会有太大的变化,流体向下渗流时鲕粒下部沿流体通道也应发生溶蚀。如果溶蚀了上部,造成渗流水对碳酸盐过饱和而停止溶解,那么该流体对下面其它鲕粒也不应再发生溶解。事实上我们见到的定向粒内溶孔并没有发育于同一水平线上,而是上下叠置,分布于一定厚度的层段中,但叠置的鲕粒下部很少溶蚀。

(4) 鲕粒内溶蚀,多是因为鲕粒内部成分、结构上的差异而造成的差异溶蚀。如果由于鲕粒早期溶蚀形成负鲕,而后渗流物进入形成示底构造,上部充填结晶方解石,造成鲕粒内上下部分成份的差异,在后期溶蚀中由于结构差异形成定向溶孔是可能的。但薄片具定向溶蚀孔的鲕粒,下部未溶部分,并不是粒度较细的渗流砂,而是鲕粒同心层的残余或者是结晶较粗的晶体。

(5) 这种定向溶蚀被称为示底构造,并被用来作为渗流带的证据,我们认为是不妥的。示底构造原是沉积成岩过程中渗流物进入,沉淀于孔隙底部,上部残留孔隙,或被后来胶结物充填,形成孔隙/渗流砂(或胶结物/渗流砂)式的上、下分明的结构,并且一般其间的界线是水平的。然而薄片,孔隙与下部未溶物之间界线大多不是水平的,甚至孔隙呈新月形,界线上凸,并非典型的示底构造。

研究表明普光 2 井下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩中,确实存在早期大气淡水环境形成的鲕模孔、粒内

溶孔。但这些早期溶孔多已被胶结物充填,如鲕粒内同心层圈消失,由较粗的白云石晶体充填形成的多晶鲕,鲕粒内局部溶蚀孔被结晶白云石充填。可能有少量早期粒内溶孔未被早期胶结充填,但这些孔隙在后期的构造挤压中已变形消失,岩石中零星分布的塌陷变形鲕粒就是这些残余早期溶孔曾经存在的证据(图 7A)。

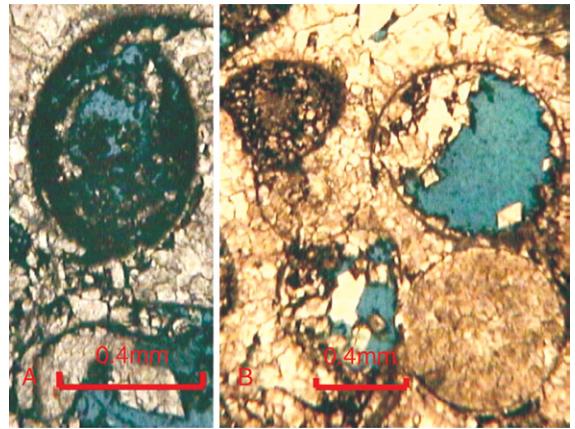


图 7 A: 鲕粒受压拖拽变形。B: 鲕粒受压变形而溶孔未变形。普光 2 井 $\rho g 2-4$ T_{1f} 铸体片

Fig. 7 A: The oolites were torn and deformed by tectonic compression. B: The oolites were deformed but the dissolution pores were not deformed by tectonic compression.



图 8 岩石中压性裂缝、溶孔发育,裂缝中充填沥青,而多数溶孔中无沥青充填,溶孔常呈半月形、新月形,具定向特征。普光 2 井 T_{1f} 岩心切面照片

Fig. 8 Extrusion fractures and dissolution pores. The fractures filling bitumen, the dissolution pores without bitumen occurred. The types of pores directionally arranged are lune and crescentiform dissolution pores.

我们认为,这些鲕粒内新月形、半月形等定向溶

孔,并非早期淡水溶蚀形成,而是后期埋藏溶蚀的产物,证据如下:

(1) 发育这些孔隙的薄片,常见同时发育强烈的挤压、碎裂和碎粒化,而孔隙仍较完整未受挤压变形,表明它们形成于构造挤压之后(图7、8、9)。

(2) 相当一部分定向孔、半月形孔中没有沥青充填,而附近有沥青分布,表明这些孔隙形成于进油之后(图8、9)。

(3) 这些鲕粒内溶孔与晶间溶孔大致可以分为两期。早期溶孔中,常见沥青充填,有的呈衬边或球

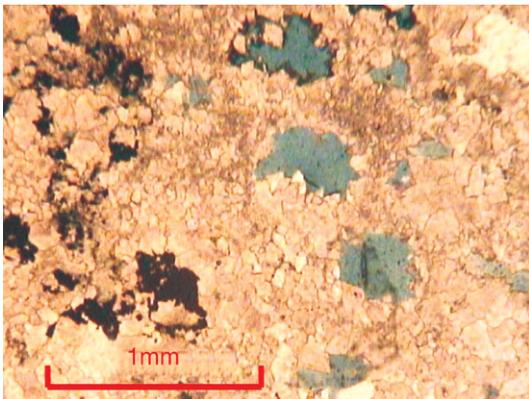


图9 岩石碎粒化,压性缝及早期溶孔中充填沥青,后期溶孔中无沥青充填。普光2井,pg2-12-1, T₁f,铸体片

Fig.9 The rock was crushed particles, the extrusion fractures and the early stage of dissolution pores filling bitumen, the late stage of dissolution pores without bitumen occurred

粒状。晚期溶孔则无沥青充填,表明前者形成于油侵位之前,溶蚀流体与有机质热演化产生的有机酸及CO₂有关,后者形成于油侵位后热演化成沥青之后,溶蚀流体可能与TSR反应产生的酸性流体有关^[11,12]。

3 新月形等粒内溶孔的形成机理

那么,这种特殊产状的溶孔是怎样形成的呢?薄片观察表明,这些溶孔常与压性缝、碎裂和碎粒物伴生,定向孔常与鲕粒内环状溶孔共生(沿鲕粒同心层发育的环状溶孔),这种环状孔有的被沥青充填,有的没有沥青充填。有的薄片中可以见到这类发育定向溶孔的鲕粒,与被构造应力撕裂的鲕粒共生,鲕粒撕裂端与溶孔一样多发育于鲕粒上部(图10)。因此,我们认为这些溶孔与构造挤压有关,其形成机理初步推断如下:

鲕粒白云岩继承了原岩鲕粒结构特征,鲕粒大多仍保持同心圈层结构,鲕粒间已为胶结物充填。鲕粒与胶结物之间以及鲕粒同心圈层由于结构差异存在较显著的结构薄弱点,当一定的构造挤压应力作用于岩石时,除少量保留了早期溶孔的鲕粒被压碎变形外,其它鲕粒没有变形,然而鲕粒边缘和鲕粒同心圈层之间这些结构薄弱处容易发育微裂缝,当应力集中于鲕粒一端,微裂缝优先发育于鲕粒该端,在后期酸性流体进入岩石时,沿这些裂缝产生溶蚀,形成鲕粒一端优先发育的定向溶孔。沿同心圈层发育的裂缝,向下溶蚀更多形成新月形溶孔,如果裂缝向下延伸,

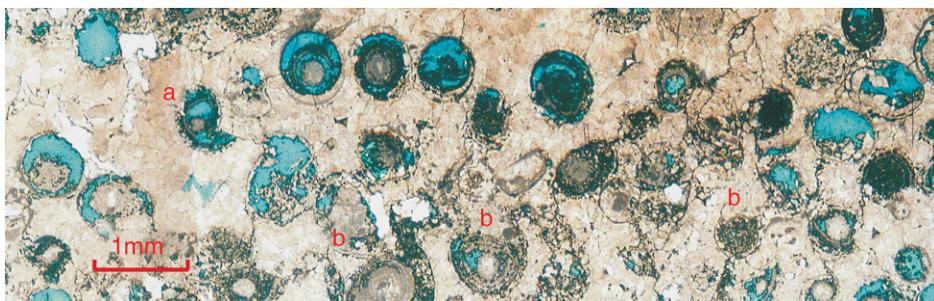


图10 鲕粒白云岩,岩石受构造挤压作用。压性缝较发育,局部碎粒化,个别鲕粒被挤压变形(a),有的鲕粒上部被撕裂(b)。粒内溶孔发育,具定向特征—发育于鲕粒上部,有的呈新月形、环状、半月形。普光2井,pg2-4, T₁f,铸体片

Fig.10 The oolite dolomite was subjected to tectonic compression where extrusion fractures developing and the rock crushed locally. A few of oolites were deformed(a). Some of the upper part of oolites were torn(b). The most common types of pores in the oolite dolomite are intra-granular dissolution pores developed in the oolites, which are directionally arranged, including crescentiform dissolution pores, annular dissolution pores and lunate dissolution pores

沿同心圈层形成“脱壳”裂缝,则形成沿同心圈层发育的环状溶孔。同心圈层之间产生更多的裂缝或溶蚀作用进一步加强,则可以形成铸模孔。

鲕粒之间的胶结物,晶粒普遍比组成鲕粒的白云石晶体粗大,结构相对均一,结构强度优于鲕粒,因而在相同的应力条件下,鲕粒更易产生裂缝,而胶结物中裂缝较少。另外胶结物中产生的裂缝多呈一个面,鲕粒中沿着圈层发育的裂缝则构成半球形或球形态势,加之组成鲕粒的白云石晶体更细,这些因素使鲕粒中水-岩接触面积更大,溶蚀更发育,形成以鲕粒内溶孔占优势的特征。图 10 所示,鲕粒之间也有一些裂缝发育,沿缝有溶蚀(大多已被沥青充填),但溶蚀孔(缝)远不如鲕粒内发育。

因此鲕粒内溶孔的形成是在一定的构造挤压应力(应力过大则岩石碎裂成角砾岩)下,沿鲕粒同心圈层优先产生微裂缝,在后期的酸性流体进入岩石,沿这些微裂缝溶蚀而形成的。

4 结论

(1) 普光 2 井飞仙关组储层鲕粒白云岩中的粒内溶孔并非形成于成岩早期大气淡水溶蚀,而是形成于构造挤压作用之后的埋藏环境。

(2) 埋藏溶孔有两期,早期埋藏溶蚀发生在石油侵位聚集之前,溶孔中有沥青充填,晚期埋藏溶蚀发生在侵位聚集的石油热演化为沥青之后。

(3) 早期大气淡水溶蚀曾经发生过,但形成的溶孔多已被胶结物堵塞,少量残留的粒内孔隙、在后来的构造挤压作用下已变形消失。

(4) 粒内溶孔的定向特征及新月形、环状等溶孔的特殊形态与构造挤压作用有关,构造挤压应力使鲕粒沿同心层圈间在应力集中端优先产生微裂缝,后期酸性流体沿这些微裂缝溶蚀,形成新月形、环状等特殊形态的溶孔。裂缝或溶蚀进一步发育至整个鲕粒,则形成铸模孔。

(5) 对溶蚀孔隙的成因及形成时期的正确认识,有助于对储层预测正确率的提高。普光 2 井定向粒内溶孔与构造挤压作用的密切关系,表明构造挤压作用对埋藏溶蚀的重要影响,为我们对储层预测提供了一个新思路。

参考文献(References)

1 王一刚,文应初,洪海涛,等. 川东北三叠系飞仙关组深层鲕滩气藏勘探目标[J]. 天然气工业,2004,24(12):5-9 [Wang Yigang,

Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Exploration target of the deep oolitic beach gas reservoir of the Triassic System Feixianguan Formation in northeast part of Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 5-9]

- 2 刘成川,向丹,黄大志. 川东北 PG 构造三叠系飞仙关组台缘鲕滩储层特征[J]. 天然气工业,2005,25(7):17-19 [Liu Chengchuan, Xiang Dan, Huang Dazhi. Reservoir characteristics of the platform-margin oolitic shoal of the Triassic Feixianguan Formation in PG structure, northeast Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 17-19]
- 3 朱光有,张水昌,梁英波,等. 川东北飞仙关组高含 H₂S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用[J]. 沉积学报,2006,24(2):300-308 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Characteristics of gas reservoirs with high content of H₂S in the northeastern Sichuan Basin and the consumption of hydrocarbons due to TSR [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 300-308]
- 4 马永生,郭旭升,郭彤楼,等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评,2005,51(4):477-480 [Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang Gas Field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. Geological Review, 2005, 51(4): 477-480]
- 5 Yongsheng Ma, Xusheng Guo, Tonglou Guo, et al. The Puguang gas field: New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(5): 627-643
- 6 Yongsheng Ma, Tonglou Guo, Xunyu Cai. Petroleum geology of the Northeastern Sichuan Basin and the characteristics of Puguang Gas Field, China [C]. AAPG International Conference (Perth, Australia, 11/5-8/2006) Technical Program, 2006
- 7 马永生,蔡勋育,李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报,2005,79(6):858-865 [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Guoxiong. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 858-865]
- 8 蔡勋育,马永生,李国雄,等. 普光气田下三叠统飞仙关组储层特征[J]. 石油天然气学报,2005,27(1):43-45 [Cai Xunyu, Ma Yongsheng, Li Guoxiong. Reservoir characteristics of the lower Triassic Feixianguan Formation in the Puguang Gas Field [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 43-45]
- 9 马永生,傅强,郭彤楼,等. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质,2005,27(5):455-460 [Ma Yongsheng, Fu Qiang, Guo Tonglou, et al. Pool forming pattern and process of the Upper Permian-Lower Triassic, the Puguang Gas Field, Northeast Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(5): 455-460]
- 10 马永生,郭旭升,凡睿. 川东北普光气田飞仙关组鲕滩储集层预测[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):60-64 [Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Fan Rui. Reservoir prediction of Feixianguan Formation in Puguang Gas Field, northeast Sichuan Province [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 60-64]
- 11 王一刚,文应初,洪海涛,等. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究拾零[J]. 沉积学报,2007,25(6):831-839 [Wang

- Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, *et al.* Diagenesis of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 831-839]
- 12 张水昌, 朱光有, 梁英波. 四川盆地大型气田 H₂S 及优质储层形成机理探讨—读马永生教授的“盆地普光大型气田的发现与勘探启示”有感 [J]. *地质论评*, 2006, 52(2): 230-235 [Zhang

Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo. Probe into formation mechanism of H₂S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan Basin —The new cognition after reading Professor Ma's Paper “Discovery of the large-scale gas field in the Sichuan Basin and its Enlightenment for Hydrocarbon Prospecting” [J]. *Geological Review*, 2006, 52(2): 230-235]

Origin of Intragranular Dissolution Pores of Oolite Dolomite Reservoirs in Puguang Gasfield, Northeastern Sichuan Province

WANG Shu-yi¹ JIANG Xiao-qiong¹ GUAN Hong-lin¹ BAO Yun-jie¹

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151)

Abstract The most common types of pores in the oolite dolomite reservoirs of the Lower Triassic Feixianguan Formation are moldic pores, crescentiform dissolution pores, lune dissolution pores and annular dissolution pores in Well Puguang 2 in Puguang Gasfield. The pores are directionally arranged. It was always believed that the pores were formed in early meteoric freshwater environments. However, the dissolution pores, with no clear deformation, are often associated with extrusion fractures, disintegration or crushed particles, indicating origin of burial dissolution after tectonic compression. The dissolution pores can be divided into two stages: the first one filling bitumen was formed before oil emplacement, the second one without bitumen occurred after oil turning into bitumen. It was considered that if structural compressional stress acted on the rocks, it could firstly cause cracks among the concentric layers of oolites where was the weak structural positions. When the stress was concentrated on the upper part of the oolites, it would develop cracks along the concentric layers by priority. The cracks were extended downward along the concentric layers as the stress increased, and which even circular and uncoating cracks could be formed. The late acidic fluids prefer to dissolve the oolites along the fractures, resulting in the formation of directional pores in the upper part of the concentric layers. With downwards dissolution along the fractures, the crescentiform pores and annular pores were developed and even moldic pores were formed as a result of increasing pressure and (or) stronger dissolution.

Key words Northeastern Sichuan Province; oolite dolomite; reservoir; intragranular dissolution pore