

高邮凹陷阜一段油气充注对储层物性演化的影响

纪友亮¹, 高崇龙¹, 刘玉瑞², 卢 欢³

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化江苏油田地质研究院, 江苏 扬州 225000;

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要: 通过对高邮凹陷阜一段储层各种成岩现象的镜下观测与物性统计分析发现储层物性演化受到油气充注的影响。油气充注通过影响储层演化过程中各种成岩作用的进程和强度使得含油储层和非含油储层物性特征出现明显差异, 造成含油层物性条件优越而非含油层物性条件相对较差。其具体影响主要表现在促进储层演化过程中各种溶解作用的进行、抑制晚期碳酸盐胶结并弱化石英的次生加大, 但在压实作用的影响上需要考虑超压、常压及石油沥青化 3 种条件。整体上, 油气充注对于储层的物性演化起到积极作用。

关键词: 高邮凹陷; 阜一段; 油气充注; 储层物性

中图分类号: P624.6

文献标志码: A

Influence of Hydrocarbon Charging to the Reservoir Property in 1st Member of Funning Formation in Gaoyou Depression

Ji Youliang¹, Gao Chonglong¹, Liu Yurui², Lu Huan³

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Geological Research Institute, Jiangsu Oilfield Branch of Sinopec Corp., Yangzhou 225000, China; 3. Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corp, Tianjin 300452, China)

Abstract: Through the microscopic observation of reservoir diagenetic phenomenon and statistical analysis of reservoir property for 1st Member of Funning Formation in Gaoyou Depression, it is found that the evolution of reservoir property is influenced by hydrocarbon charging. To have an effect on the processes and intensity of diagenesis, hydrocarbon charging made the reservoir property different between oil layer and non-oil layer. Generally speaking, oil layer's property is better than non-oil layer's. For the specific influences of hydrocarbon charging, it can promote dissolution, suppress the late carbonate cementation and weaken quartz overgrowth, while when it comes to compaction, three conditions should be taken into

consideration: overpressure, normal pressure and transformation from oil to asphalt. Overall, hydrocarbon charging plays an active role in reservoir property evolution.

Key words: Gaoyou Depression; 1st Member of Funning Formation; hydrocarbon charging; reservoir property

有关油气充注对储层成岩作用和物性演化的影响已经在不少文章中进行过论述^[1-7], 但就其各自研究成果而言, 仍存在较大争议。多数观点认为油气充注对储层的胶结作用、压实作用以及储层物性演化有较大的影响, 不过也有观点认为油气充注对储层的胶结作用没有影响, 或者影响程度很小。笔者在查阅国内外有关文献的基础上针对高邮凹陷阜一段储层开展了油气充注对储层成岩作用和物性演化影响的研究, 通过大量镜下薄片观察、分析化验数据对比, 并结合储层所处的油藏部位综合分析油气充注对储层演化的影响作用。

1 阜一段储层成岩演化与油气充注时限

1.1 阜一段储层成岩演化特点

综合地层埋深、镜质体反射率(R_o)、古地温及各种成岩自生矿物发育特征、颗粒接触关系、石英次生加大等成岩现象, 确定高邮凹陷阜一段储层演化主体处于中成岩 A 期及中成岩 B 期, 同时中成岩 A 期又可进一步划分出 A_1 、 A_2 两个亚期(图 1)。

其中中成岩 A 期, R_o 在 0.5~1.3 之间, 石英次生加大达 II 级, 碳酸盐早期发育方解石, 后期开始出现铁方解石和铁白云石, 同时, 自生黏土矿物中高岭石呈蠕虫状或书页状, 并出现针状伊利石和绒球状、

收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(41272157); 国家重大科技专项(2011ZX05003-002, 2011ZX05009-003)。

第一作者: 纪友亮(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为沉积学、储层地质学和层序地层学。

E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn

叶片状绿泥石,除此,早期碳酸盐胶结物及长石、岩屑颗粒出现溶蚀现象,该期是溶蚀作用和胶结作用并存的时期。中成岩 B 期, R_o 在 1.3~2.0 之间,相较于中成岩 A 期,该成岩期的岩石经历的温度和压力要更大,成岩作用也更为强烈,石英次生加大最大可达 II—III 级,铁方解石和铁白云石发育,但伴随着二者溶解作用的增强。同时,自生黏土矿物中高岭石

含量开始降低直至消失,伊利石呈丝发状,绿泥石更多为叶片状。在储层成岩演化过程中,相比于胶结作用和溶蚀作用,压实作用贯穿于储层演化的全过程,但在埋藏深度达 3 500 m 时,压实作用基本停止,取而代之的是压溶作用,使得颗粒排列紧密,呈缝合—凹凸接触,而局部的应力高值也可能使刚性颗粒出现微裂缝。

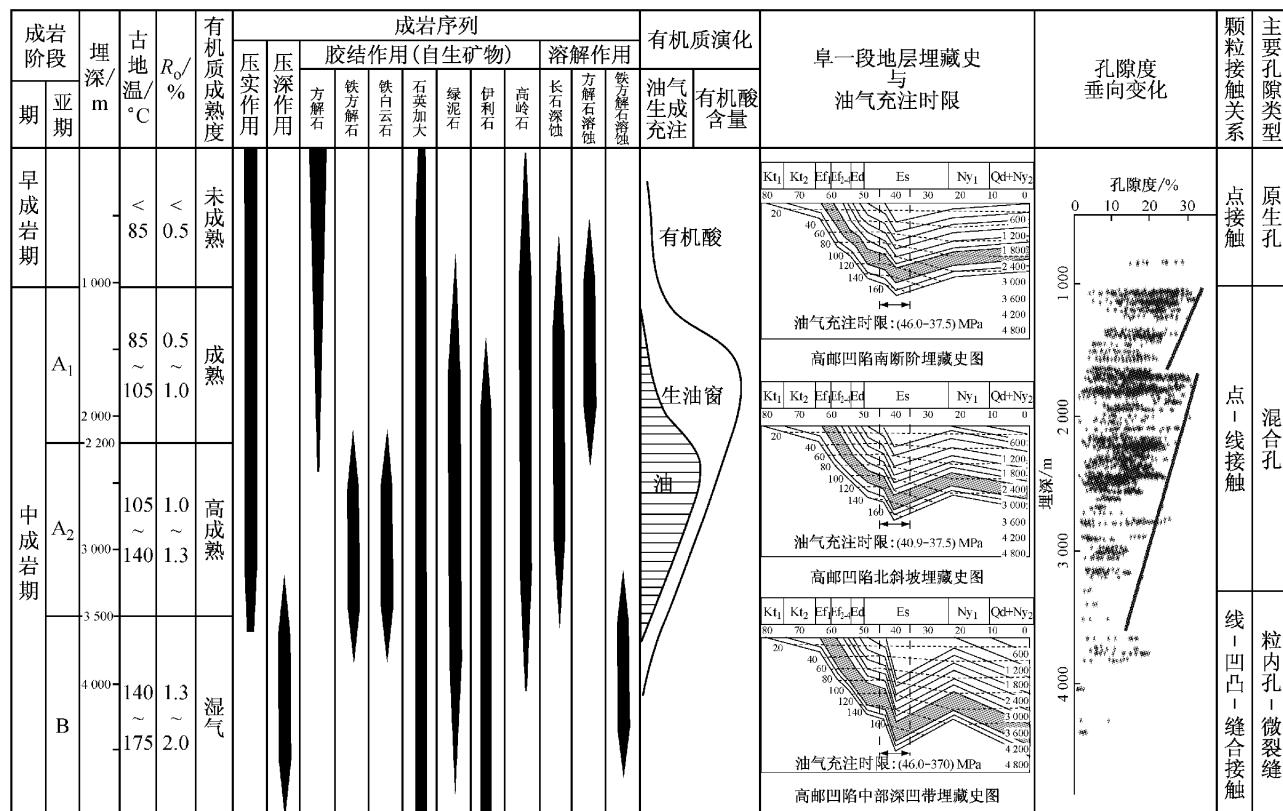


图 1 高邮凹陷阜一段储层成岩演化与油气充注时限综合分析

Fig.1 Comprehensive analysis chart of diagenetic evolution and hydrocarbon charging time of 1st Member of Funning Formation in Gaoyou Depression

从储层孔隙度垂向演化来看(图 1),孔隙度整体随埋深增大而降低,但在 1 700~2 000 m 处,大致对应于中成岩 A₁ 期时的地层埋藏深度,出现物性优越的“台阶”段,从镜下及分析数据来看,该段对应于溶蚀发育带,而整个凹陷内阜一段储层的溶蚀作用也主要发生于中成岩 A₁ 期。

1.2 阜一段储层油气充注时限

利用储层演化过程中自生矿物内部烃类包裹体均一温度测量结果并结合地层时间-温度埋藏史曲线就可以估算出烃类包裹体形成时的温度、时间,进而推断油气充注储层的时限和成藏期次。

高邮凹陷阜一段储层内所测烃类包裹体均一温度范围为 60~140 ℃,其中有 2 个主峰值,即 80 ℃ 左右和 120℃ 左右^[8],反映储层经历过 2 期油气充注

时期,但以第 2 期为主。结合储层埋藏史曲线及热史综合分析,深凹带成藏期在 46.0 Ma—37.0 Ma,而北部斜坡带相对稍晚,时限在 40.9 Ma—37.5 Ma,整体上油气充注时限大致相当于三垛期^[9]。

对应于成藏期时限,从地层埋藏史曲线来看(图 1),油气充注储层时,阜一段储层大多埋深在 1 800~3 200 m 之间,深凹带可达 3 800 m,储层演化整体处于中成岩 A 期。油气充注期储层压实作用持续进行,但早期方解石胶结已基本停止,开始出现铁方解石和铁白云石。而在油气大量生成和充注之前,由于有机质向烃类转变会产生大量的酸性流体(图 1),因此溶蚀作用较为强烈,使得储层发育早期溶蚀带,而对应于前述的 1 700~2 000 m 处的物性优越“台阶”段。由此看出阜一段储层物性演化受油

气充注影响较为明显。

2 油气充注对碎屑颗粒及早期碳酸盐胶结物的影响

在高邮凹陷阜一段储层内部可见到大量长石、岩屑颗粒和碳酸盐胶结物的溶蚀现象,使得次生孔异常发育(图2)。造成这一现象的原因是由于石油具有酸性,可对储层产生很强的溶蚀作用,进而改善了

储层的储集空间。在对研究区阜一段储层的薄片观察中发现:其长石和岩屑的溶蚀作用强,次生孔隙较为发育,溶蚀作用改善了储层物性。同时,凡是含油砂岩,这种溶蚀现象保存得很完整;而不含油砂岩,其矿物溶解及次生孔隙发育一般较差,一种原因是储层没有发生过溶解作用,另一种原因是储层发生溶解作用后,由于没有油气的充注,次生孔隙又被胶结物充填,因而识别不出次生孔隙的存在。

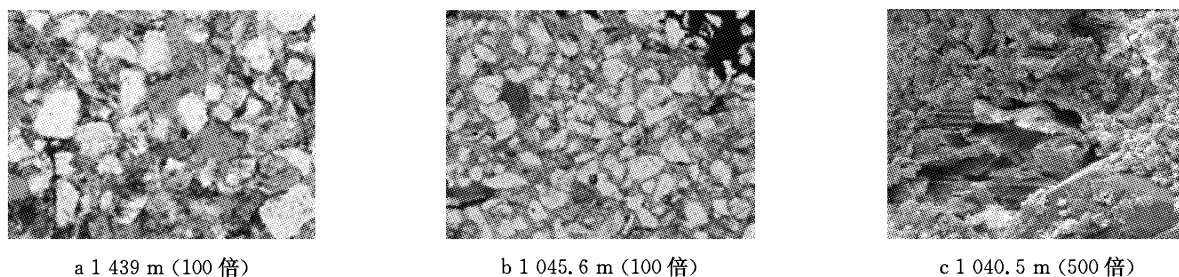


图2 韦庄地区韦5井阜一段油气充注砂岩储层镜下溶蚀特征

Fig.2 Microscopic corrosion phenomenon characteristics of hydrocarbon charging sandstone reservoir of 1st Member of Funning Formation in well Wei5, Wei Zhuang area

如在韦庄地区的韦5井中,油气充注对储层的影响十分明显。通过岩心观察、薄片鉴定发现,韦5井1 439 m,1 045.6 m与1 040.5 m处的岩芯为含油岩心,孔隙度达27%,渗透率为 $5.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过镜下分析发现,碳酸盐胶结物含量很低,并且长石及岩屑颗粒的溶蚀现象明显,方解石和菱铁矿也存在溶蚀现象,而方解石和菱铁矿在研究区被认为是早期或同生期的碳酸盐胶结物。研究区其他井中也存在同样的现象,这说明油气充注对储层早期的溶蚀作用影响十分显著(图2),进而改善了储层的储集空间,对储层物性演化起到积极作用。

3 油气充注抑制晚期碳酸盐胶结物的产生

孔隙中的油气占据储集空间进而可抑制晚期碳酸盐胶结物的充填有利于孔隙的保存。这是由于油气充注一方面限制了地层水的流动,另一方面造成地层水pH值降低,不利于方解石和白云石等碳酸盐胶结物的沉淀。通过阜一段储层物性分析等试验数据研究发现,物性和含油性具有明显的相关关系。油层(含油饱和度 $S_o > 40\%$)的孔隙度和渗透率值均很高,孔隙度平均值为20.1%,渗透率平均为 $149 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碳酸盐质量分数平均为14.3%。而水层或

者干层的孔渗性差于油层,其平均孔隙度为16%,平均渗透率为 $49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碳酸盐质量分数平均为19.1%(图2、图3)。由此可认为质量分数4.8%的碳酸盐是在油气聚集抑制了晚期碳酸盐胶结后的再沉淀。说明油气充注对储层碳酸盐胶结作用的影响十分显著(图3、图4),通过抑制碳酸盐胶结作用的进行而有效保存了储层的孔隙。

如陈庄地区的陈2井,洼槽中的富深X1井和庄13井等井中油气充注对储层的影响均十分明显,主要表现为油层内碳酸盐胶结物少而且多存在溶蚀现象(图4)。通过岩心观察、薄片鉴定发现,陈2井2 498.2 m,2 501.5 m及2 511.5 m处的岩芯为含油岩心,孔隙度为26%~28%,渗透率为 $15.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。镜下分析发现,碳酸盐胶结物含量很低,且成分为方解石,有溶蚀痕迹,并且颗粒的溶蚀现象明显,未见自形的碳酸盐胶结物。而陈2井2 521~2 527 m的非含油岩心,宏观呈白色,致密坚硬,薄片鉴定发现,碳酸盐胶结物中晚期胶结的铁方解石含量很高,同时也见铁白云石,碳酸盐胶结物充满粒间孔隙,且呈自形产出,未见溶蚀现象,孔隙度为5%~8%,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究区其他井阜一段储层也存在同样的现象,这说明油气充注可以通过抑制晚期碳酸盐胶结作用而使储层孔隙得以保存,对物性演化同样起到积极作用。

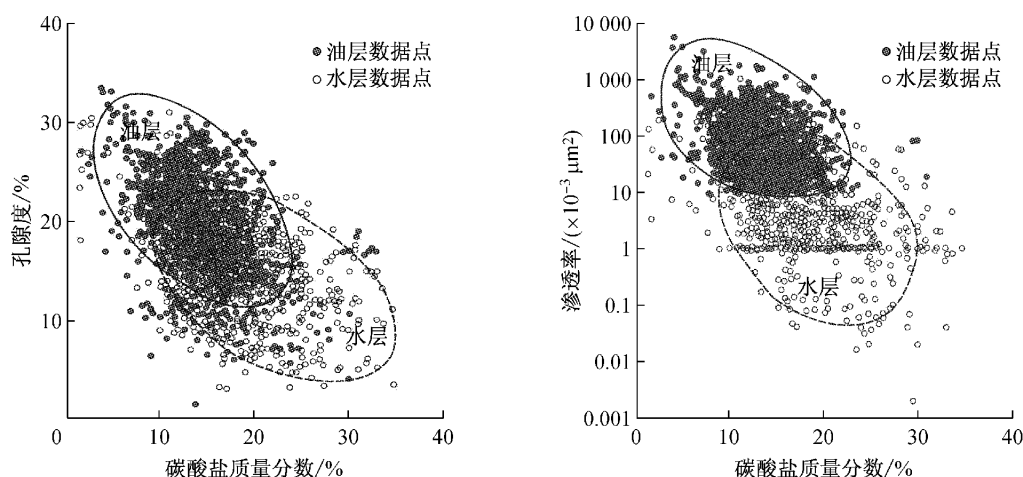
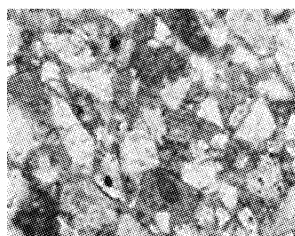
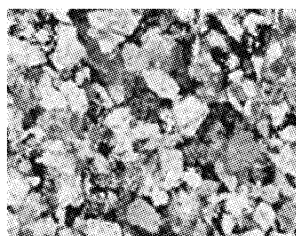


图 3 阜一段油层及水层的孔隙度、渗透率与碳酸盐质量分数交会图

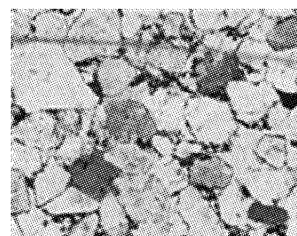
Fig.3 Crossplot of porosity and permeability with carbonate content in oil layer and water layer, 1st Member of Funning Formation



a 陈 2 井, 2 498.2 m(100 倍)



b 富深 X1 井, 4 043.21 m(100 倍)



c 庄 13 井, 2 223.83 m(100 倍)

图 4 阜一段油层内部碳酸盐胶结物成分及产出状态

Fig.4 Composition and occurrence characteristics of carbonate cements in oil layer of 1st Member of Funning Formation reservoir

对于某一油藏来说, 由于油气的充注而使得储层面貌在油层和水层中大有不同. 如在沙 19 断块阜一段油藏储层内部(图 5), 沙 19 井顶部饱含油层段, 储层内未见晚期碳酸盐胶结物, 储层孔隙基本完全被油气充填(2 457.61 m), 而处于油-水过渡带内的储层, 虽开始发育晚期碳酸盐胶结物并造成一部分孔隙损失, 但胶结物分布零星, 局部存在溶蚀, 使得储层仍保留有相当数量的孔隙, 且一部分充填有油气(2 546.24 m). 反观油藏下部的水层, 储层受到强烈的晚期碳酸盐胶结作用, 胶结物呈连片覆盖, 孔隙基本被充填殆尽(2 553.4 m, 2 562.71 m). 由此, 可以看出油气的充注在整个油藏尺度上同样会对储层物性演化起到积极的作用, 不仅抑制了晚期碳酸盐胶结作用的进行, 同时使得油-水过渡带内储层物性得到一定程度的保存.

4 油气充注对石英次生加大的影响

从高邮凹陷阜一段储层的扫描电子显微镜照片

可以发现, 在油层、水层中石英的次生加大边均发育, 但油层、水层中石英的胶结作用存在着一定的差别.

石英次生加大由于从早成岩阶段就开始形成, 到储层演化进入油气生成阶段已达到了一定的级别, 而油气进入储层对石英不会产生溶蚀作用, 因此储层中见到石英次生加大是很正常的. 但油气进入储层之后是否会影响石英加大的继续生长存在较大的争议. 本文在对高邮凹陷阜一段储层的研究中, 见到石英加大边内部含有油-水两相包裹体, 说明含油级别较低时石英次生加大仍在进行. 只有当饱含油或富含油时石英的次生加大才会停止. 同时研究区流体包裹体资料显示, 在石英或长石的次生加大边和解理缝中均含有大量的烃类和地层水包裹体, 并且在部分样品中烃类包裹体外部还存在较宽的加大边(图 6, 沙 19 井, 2 544.7 m, 100 倍), 表明油气充注初期仍然有 SiO_2 沉淀或长石矿物的再沉淀作用(图 6、图 7).

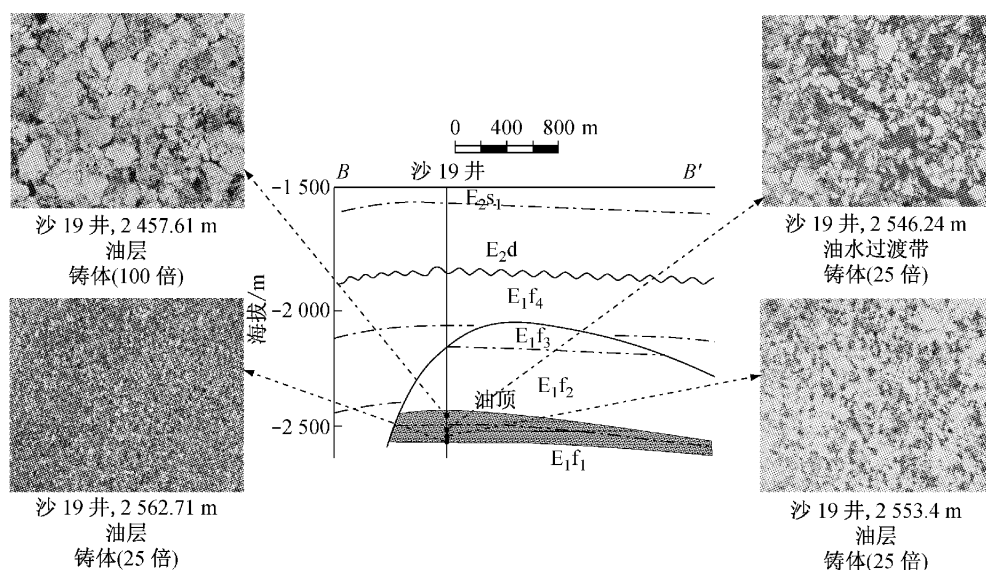
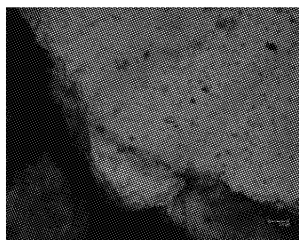
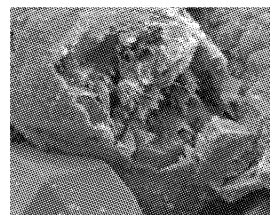
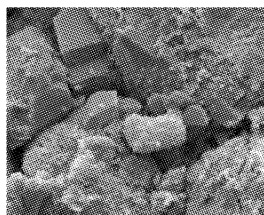
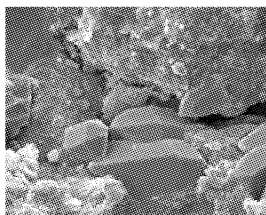


图5 沙19井断块油藏剖面内油层与水层储层物性特征差异

Fig.5 Differences of reservoir property characteristics between oil layer and water layer within Sha19 well fault block reservoir section

图6 石英次生加大边内部
烃类包裹体图Fig.6 Hydrocarbon inclusion within the
quartz overgrowth boundary

a 马3井,2457 m(500倍) b 陈2-14井,2413 m(500倍) c 方4-1井,2027 m(1000倍)

图7 阜一段油层内石英次生加大边显微图

Fig.7 Quarze overgrowth edge in oil layers of 1st Member
of Funning Formation

但是与水层相比,油层中的石英次生加大程度较低,因此有利于孔隙的保存。在深层的水层中,石英次生加大较为发育,导致石英颗粒间呈缝合接触,扫描电子显微镜下仅看到致密的断面和石英的端口,已经看不到石英加大边的形状,由于压溶作用的存在,石英加大沿着水平方向发育。而在深部的油层,虽然颗粒接触关系也比较紧密,但石英加大边的宽度明显小得多,粒间孔隙仍然发育,孔隙中仍可见到自形的石英晶体。因此认为阜一段早期油气充注抵制了石英胶结物的沉淀,这一结论从油层中石英加大边普遍很小也可得到很好证实。

5 油气充注对长石在成岩演化过程中的影响

从高邮凹陷阜一段含油储层和水层的铸体薄片和扫描电子显微镜下观察发现,油层中见到长石发

生的成岩作用主要是溶解作用,长石颗粒边缘呈港湾状,颗粒内部成蜂窝状,甚至变成铸模孔隙。而水层中的长石颗粒溶蚀现象少得多,偶尔见到长石的加大边。这是由于油气进入储层之前或进入之后有机酸也随之进入储层,且溶解于地层水中,导致与石油伴生的孔隙水酸性增强,促进了长石的溶解(图7c),有利于次生孔隙的发育。不过当长石进一步溶解形成的 SiO_2 在酸性水中不易迁移而就近形成“石英加大边”沉淀时,就减少了孔隙空间。但如果此时含油饱和度继续增大,含油级别达到富含油或油浸时,孔隙水的流动受到抑制,从而阻碍了溶解-沉淀等成岩作用的继续进行,使得储层物性得到改善。由于有机质演化过程中产生的有机酸并不多,仅在油气运移通道或有利于石油聚集部位的储层中浓度高,而水层中有机酸的浓度很低,甚至没有有机酸,因此水层中长石的溶解现象相对匮乏。

6 油气充注对储层压实作用和物性演化的影响

油气充注对储层压实作用的影响比较复杂,一种观点认为油气充注可以抑制压实作用的进行,另一种观点则认为,油气是流体,对压实作用不会产生影响.根据对高邮凹陷阜一段储层的研究,可以分成以下 3 种情况进行讨论.

6.1 超压状态

高邮凹陷存在上、下含油气系统的超压与压力封闭层,使得整个阜宁组垂向上多个压力系统叠置,侧向上多个超压系统并列^[10],即所谓的超压封存箱或压力舱模式的存在.

在具有超压的层段,由于超压降低了岩石的有

效应力,阻止了岩石的进一步机械压实并抑制压溶作用的发生,从而使孔隙得以保存,使油气得以聚集.同时,在超压状态下,因超压系统对生烃的抑制或延迟作用,使得地层在埋藏较深的条件下有机质仍可转变成油气而产生大量酸性流体,当油气充注时,形成深部的次生孔隙发育带,如阜一段在 3 000 多米的埋藏深度(花瓦地区)或在底部储层(韦庄、陈堡、沙埕地区)相对高孔隙度发育带仍然存在(图 8, ϕ 为孔隙度),从而改善了深部储层物性.

反过来,油气充注也会使超压得以保存,同样会减缓压实作用的进行,这是由于有机质在生成油气时,流体体积增加,可大大增加孔隙流体压力,产生超压,并可传递到储集层,进而大大增加对压实作用的抵抗能力.

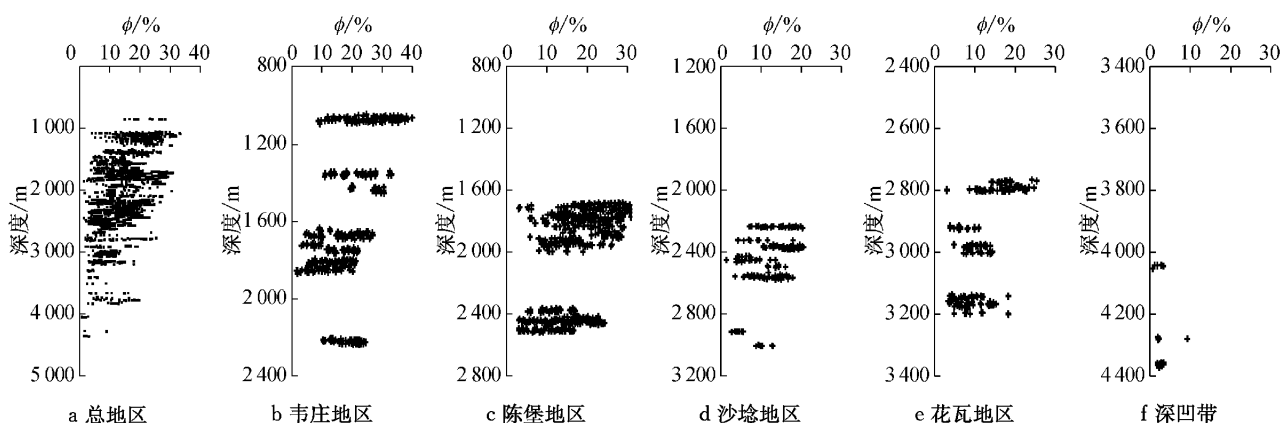


图 8 高邮凹陷不同地区阜一段储层孔隙度垂向变化特征

Fig. 8 Vertical variation of reservoir porosity in Gaoyou Depression's different areas of 1st Member of Funing Formation

6.2 常压状态

在断层附近,超压带往往不存在,如庄 2 井在 2 100 m 处,油气层处于常压状态,其孔隙度比韦 5 井 1 200 m 深处的孔隙度小 7%,说明压实作用在起作用.在常压状态下,由于石油是流体,不能抵抗上覆地层的压力,因此,在深部含油气的储层中,储层

的压实和压溶作用仍然很强,可见到颗粒间线接触或缝合接触,粒间孔隙受到了强烈的压缩,仅粒内溶孔得到了较好的保存(图 4b, 4c).相反,对于水层,由于含有大量的碳酸盐胶结物,使得抗压实能力强,颗粒仍然呈点接触及漂浮状(图 9).

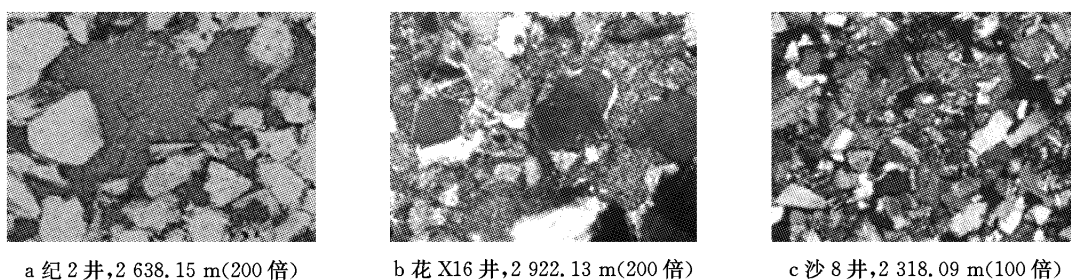


图 9 水层强碳酸盐胶结下颗粒接触关系

Fig. 9 Particle contact relationship in Strong carbonate cementations reservoir of water layers

6.3 石油沥青化以后储层的抗压实能力

在高邮凹陷北斜坡、南断阶的深洼槽阜一段中,存在沥青砂,如富深 X1-4 043.21 m(图 4b)、庄 13 井 2 223.83 m 处(图 4c). 沥青砂的成因是由于早期的油层经过岩浆热烘烤作用而形成. 镜下观察到颗

粒漂浮于沥青中,与相近深度下的油层相比,其颗粒的接触程度明显偏低,说明沥青作为固体,有一定的抗张强度,进而抑制了压实作用的进行. 但是沥青砂的孔隙度很低,与致密砂岩类似(图 10).

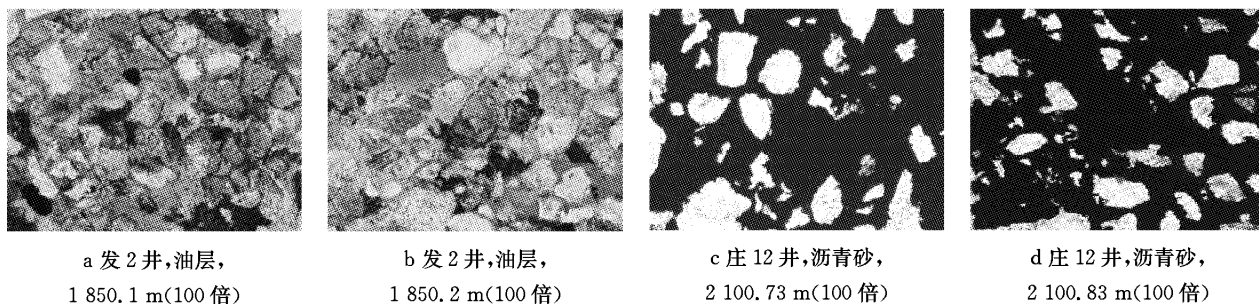


图 10 相近深度下油层与沥青砂中颗粒接触关系

Fig.10 Particles contact relationship in oil layers and tar sandstones within similar depth

7 结论

(1) 油气具有腐蚀性,且油气的注入常伴随着有机酸和二氧化碳的注入,因此油气的充注溶解了早期碳酸盐胶结物和碎屑颗粒,为油气聚集增加了储集空间.

(2) 油气的充注占据了孔隙中储集空间,可抑制晚期碳酸盐胶结物的充填,有利于孔隙的保存,水层中晚期碳酸盐胶结物含量高,油层中晚期碳酸盐胶结物含量低.

(3) 在油层、水层中石英的胶结作用存在着一定差别. 含油级别较低时,石英次生加大仍在进行,只有饱含油或富含油时石英的次生加大才会停止.

(4) 油气充注在超压状态下抑制储层压实作用,在常压状态下对储层的压实作用无影响. 石油的沥青化对压实作用有影响.

致谢:感谢江苏油田分公司地质研究院陆梅娟高级工程师在研究中给予的指导和帮助.

参考文献:

- [1] Saigal G C, Bjorlykke K, Larter S R. The effects of oil emplacement on diagenetic processes: Examples from the Fulmar Reservoir sandstones, Central North Sea[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 1992, 76(7): 1024.
- [2] Nedkvitne T, Karlsen D A. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula Field, North Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10(6): 255.
- [3] Surdam R C, Crossey L J, MacGowan Donald B. Redox reaction involving hydrocarbons and mineral oxidant's: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones [J]. AAPG Bull, 1993, 77(9):1509.
- [4] Worden R H, N H Oxtoby, P C Smalley. Can oil emplacement prevent quartz cementation in sandstones? [J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4(2):129.
- [5] Marchand A M E, Smalley P C, Haseldine R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9): 1561.
- [6] 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[J]. 岩石学报,2006,22(8):2113.
LI Zhong, CHEN Jingshan, GUAN Ping. Scientific issues and research fronts of diagenesis in basin containing hydrocarbon [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006,22(8):2113.
- [7] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2009.
JI Youliang. Petroleum reservoir geology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press,2009.
- [8] 戴祉平,陈勇,于雯泉. 高邮凹陷阜宁组一段储层成岩环境演化的流体包裹体证据[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2013,32(5):53.
DAI Zhiping, CHEN Yong, YU Wenquan. Evolution of diagenesis environment of the 1st member Funing Formation in Gaoyou Sag. Evidence from fluid inclusions [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2013,32(5):53.
- [9] 吴向阳,高德群. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组油气成藏期研究[J]. 中国石油勘探,2011,16(4):37.
WU Xiangyang, GAO Dequn. Analysis on hydrocarbon accumulation period of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. China Petroleum Exploration,2011,16(4):37.
- [10] 傅强,纪友亮,刘玉瑞,等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组储层动力学特征[J]. 天然气工业,2007,27(7):31.
FU Qiang, JI Youliang, LIU Yurui, et al. Dynamic characteristics of the Paleogene Funing Formation Reservoir in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(7):31.