

苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层 次生孔隙成因探讨

毕明威¹, 陈世悦¹, 周兆华², 刘金¹, 郑国强², 张满郎²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要:利用岩石薄片、扫描电镜、电子探针、能谱分析、包裹体测温及拉曼光谱分析等方法,对苏里格气田苏6区块下石盒子组8段储层的孔隙发育特征进行研究。结果表明:储层残余原生粒间孔占现今孔隙的3.0%,次生孔隙中溶蚀孔隙占67.5%,黏土矿物晶间孔占29.5%;储层次生孔隙的形成主要经历两期溶蚀作用,I期溶蚀为酸性环境下长石、岩屑等的溶蚀,形成的次生孔隙多在后期成岩过程中损失,II期溶蚀为偏碱性环境长石、高岭石等的溶蚀,形成的次生孔隙对现今储层起到主要的贡献;偏碱性环境下钾长石的溶解为高岭石的伊利石化反应提供K⁺,促进了高岭石的转化,而高岭石的伊利石化使得孔隙流体中K⁺的浓度降低,促进了长石的溶解,两者的协同反应是次生孔隙形成的主要原因;I期溶蚀作用的强弱直接关系到II期溶蚀反应的程度,I期溶蚀反应强烈,能够保证II期溶蚀协同反应的充分进行。

关键词:致密砂岩储层;次生孔隙;偏碱性环境;苏里格气田

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:毕明威,陈世悦,周兆华,等. 苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层次生孔隙成因探讨[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):8-16.

BI Mingwei, CHEN Shiyue, ZHOU Zhaohua, et al. Genesis of secondary pores of tight sandstone reservoir in He 8th Member in Su 6 area of Sulige gas field[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 8-16.

Genesis of secondary pores of tight sandstone reservoir in He 8th Member in Su 6 area of Sulige gas field

BI Mingwei¹, CHEN Shiyue¹, ZHOU Zhaohua², LIU Jin¹, ZHENG Guoqiang², ZHANG Manlang²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China)

Abstract: Pore characteristics of the tight sandstone reservoir of the 8th Member of the Lower Shihezi Formation in Su 6 area of Sulige gas field were analyzed using a series of techniques, including thin section identification, scan electron microscope, electron probe micro-analysis and energy spectrum, homogenization temperatures and Raman microprobe method of fluid inclusions. The results show that primary remained intergranular pores account for 3.0% of total pores, and the secondary pores which contain dissolved pores and intercrystalline pores in clay minerals, account for 67.5% and 29.5% respectively. There are two stages of dissolution to form the secondary pores. The first dissolution is the dissolution of feldspar and debris dissolution under acid condition, and the early dissolution pores are usually damaged and disappeared after the later compaction and cementation. The second dissolution under mild alkaline condition dissolves feldspar and kaolinite to form secondary pores and illite, which has a main contribution to reservoir. Dissolution of potassium feldspar provides K⁺ to the transforma-

tion of kaolinite to illite to promote the transformation of kaolinite, and the transformation of kaolinite results in reducing K^+ concentration to promote the dissolution of potassium feldspar. The two processes (cooperative reaction) cooperating with each other are the dominant reasons of generation of secondary pores. The extent of first dissolution directly affects the second dissolution, and the strong dissolution reaction of first dissolution should be helpful in finishing the cooperative reaction of second dissolution.

Keywords: tight sandstone reservoir; secondary pore; mild alkaline condition; Sulige gas field

20世纪70年代以来,次生孔隙的成因研究成为石油地质学家研究的重点问题,进而提出了一系列的成因机制,主要包括:①有机酸溶蚀成因^[1];②碳酸水溶液溶蚀成因^[2];③大气淡水淋滤成因^[3];④黏土矿物转化成因^[4];⑤碱性环境溶蚀成因^[5]。因沉积环境及成岩环境的差异,导致不同地区、不同层位砂岩储层次生孔隙的成因机制不尽相同。下石盒子组8段为苏里格气田主力产气层之一。针对盒8段砂岩前人主要侧重于沉积作用及成岩作用方面的研究^[6-7],然而单纯的沉积作用和成岩作用的研究并不能有效地确定砂岩孔隙的发育特征,直接制约着苏里格气田的储层评价和有利开发区块的优选。通过对苏6区块盒8段储层的研究发现,储层孔隙以次生孔隙为主,成岩演化过程中主要经历两期明显的溶蚀作用,并且形成与之相应的不同特征的次生孔隙及溶蚀产物。研究过程中发现长石直接溶蚀形成伊利石的现象,而伊利石的形成表明当时的成岩环境应该为偏碱性环境,并且该阶段溶蚀作用形成的次生孔隙对现今孔隙起主要的贡献,然而前人研究认为盒8段储层次生孔隙多由有机酸参与下长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀产生^[8-9],因此有必要进行盒8段储层次生孔隙成因机制的研究,为该区致密砂岩气藏勘探提供理论依据。

1 地质概况

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡北部中带(图1(a)),构造形态为一由东北向西南倾斜的单斜,坡降大致为3~10 m/km。苏6区块位于苏里格气田中部,总面积为484 km²,是苏里格气田最有利的天然气富集区及重点开发区块之一,下石盒子组8段为苏6区块主力产气层,其埋深为3180~3380 m,厚度平均60 m,为典型的河流相储层(图1(b)),气藏气源层为下伏二叠系太原组及山西组海陆交互的含煤层系,有机质类型为腐植型,丰度较高^[10]。

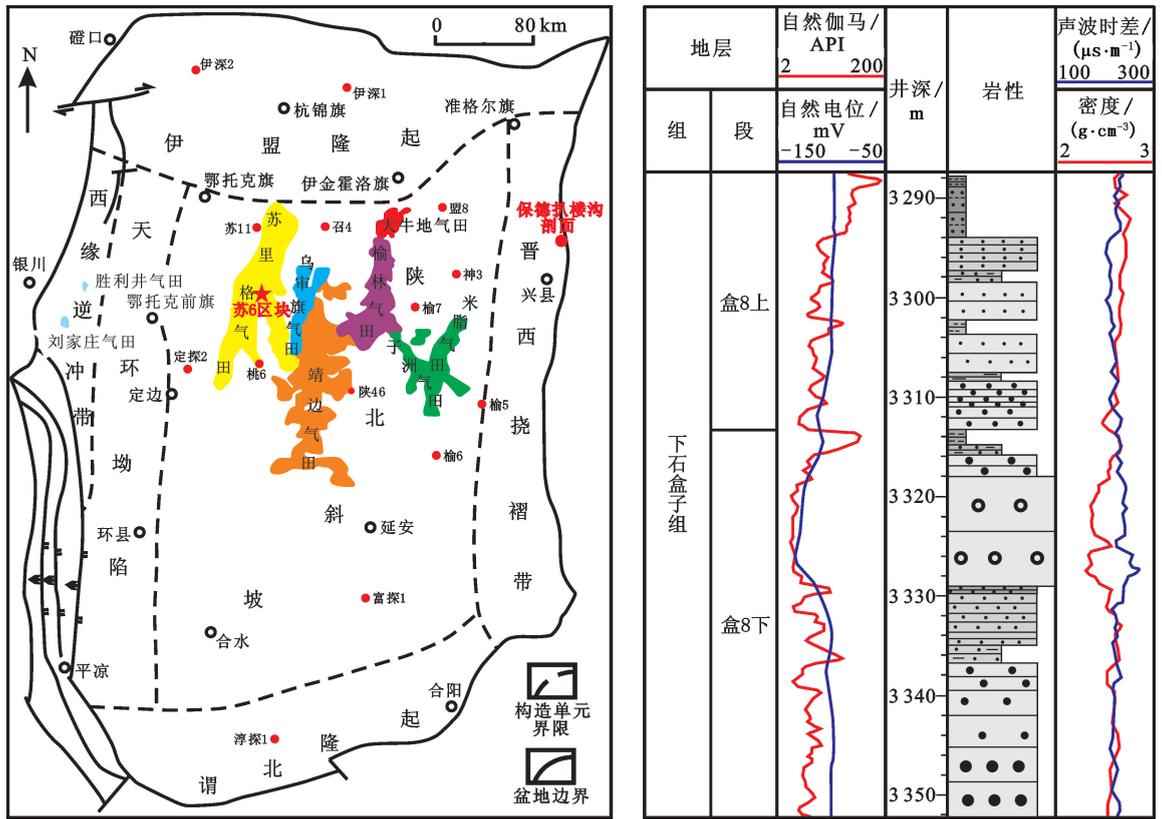
通过岩心薄片观察,结合扫描电镜、电子探针及能谱分析等测试结果,盒8段储层以中粗粒岩屑砂

岩和中粗粒岩屑石英砂岩为主,可见少量细粒(长石)岩屑砂岩(图1(c)),结构成熟度和成分成熟度中等偏低;岩屑成分以塑性的泥板岩和千枚岩为主,约占岩屑总量的80%。胶结物主要为黏土矿物、二氧化硅以及少量碳酸盐等,其中伊利石含量为0.1%~10%,高岭石含量为0.1%~16%,绿泥石含量小于7%;二氧化硅胶结物在不同类型砂岩中的含量差异较大,在岩屑石英砂岩中含量可达30%,在岩屑砂岩、长石岩屑砂岩中含量为8%~15%。根据岩心样品常规物性测试及41.6 MPa(约埋深3200 m的地层压力)的覆压物性测试结果,储层孔隙度为4%~10%,覆压渗透率主要分布在 $(0.001 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图1(d)),为典型的致密砂岩储层。

2 盒8段致密砂岩储层次生孔隙发育特征

2.1 砂岩孔隙类型

根据岩石薄片、扫描电镜及电子探针资料,盒8段砂岩的孔隙类型主要包括以下几种:①残余原生粒间孔,盒8段埋深大于3180 m,塑性岩屑含量高、压实作用强烈,且遭受强烈的物理化学作用,砂岩原生孔隙几乎损失殆尽,只保存少量的残余粒间孔隙,孔径一般为20~100 μm ,形态相对规则(图2(a));②岩屑溶孔、长石溶孔,为岩屑、长石颗粒遭受选择性溶蚀形成的孔隙,多为溶蚀粒内孔隙,当溶蚀作用比较强烈时可以形成印模孔,岩屑溶孔及长石溶孔孔径一般为十几微米,直径最大超过100 μm ,是盒8段主要的次生孔隙类型(图2(b)、(i)、(j));③高岭石溶孔,为高岭石胶结物被后期溶蚀形成的孔隙,可见少量以杂基形式的高岭石溶孔,孔隙孔径变化较大,一般为几微米到几十微米(图2(c));④晶间微孔,该类孔隙分布比较普遍,是高岭石、伊利石、绿泥石等自生黏土矿物晶粒之间的孔隙,是盒8段储层重要的储集空间类型,孔径一般小于1 μm (图2(d)、(e)、(f))。



(a) 鄂尔多斯盆地构造单元划分

(b) 苏6区块盒8段综合地层柱状图

(c) 苏6区盒8段砂岩岩石成分三角图

(d) 覆压41.6 MPa校正渗透率分布柱状图

图1 鄂尔多斯盆地综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geologic maps of Ordos Basin

2.2 原生孔隙与次生孔隙含量计算

(1) 原始孔隙度根据 Scherer 提出的湿砂原始孔隙度计算公式^[11]求取:

$$\varphi_0 = 20.91 + (22.9/S_0)$$

式中, φ_0 为原始孔隙度; S_0 为 Trask 分选系数。

(2) 长石溶孔、岩屑溶孔及高岭石溶孔的含量主要通过面积百分比求取, 黏土矿物晶间孔通过面积百分比乘以晶间孔占黏土矿物的体积分数求取。具体计算过程为: ① 成岩产物的面积百分比均采用 Image-pro plus 6.0 软件进行求取; ② 利用扫描电镜及背散射电子显微镜求取晶间孔占黏土矿物的体积

分数, 盒8段储层高岭石、绿泥石和伊利石的晶间孔占黏土矿物的体积分数平均值分别为 31%、48% 和 59%, 与前人对黏土矿物晶间孔的计算结果相比较 (高岭石的晶间孔隙为 43%、绿泥石为 51%、伊利石为 63%^[12]), 高岭石晶间孔隙含量相差较大, 其原因为研究区高岭石多经过强烈的压实定向, 晶间孔隙有部分损失。

通过对 83 块次样品的各类孔隙进行计算, 盒8段储层残余原生粒间孔占总孔隙度的 3.0%, 次生孔隙占 97.0%, 其中溶蚀孔隙占 67.5%, 黏土矿物晶间孔隙占 29.5%; 溶蚀孔隙中, 岩屑溶孔占

30.3%、长石溶孔占 27.8%、高岭石溶孔占 9.4%； 14.6%、绿泥石晶间孔占 6.6%。
晶间孔中,高岭石晶间孔占 8.3%、伊利石晶间孔占

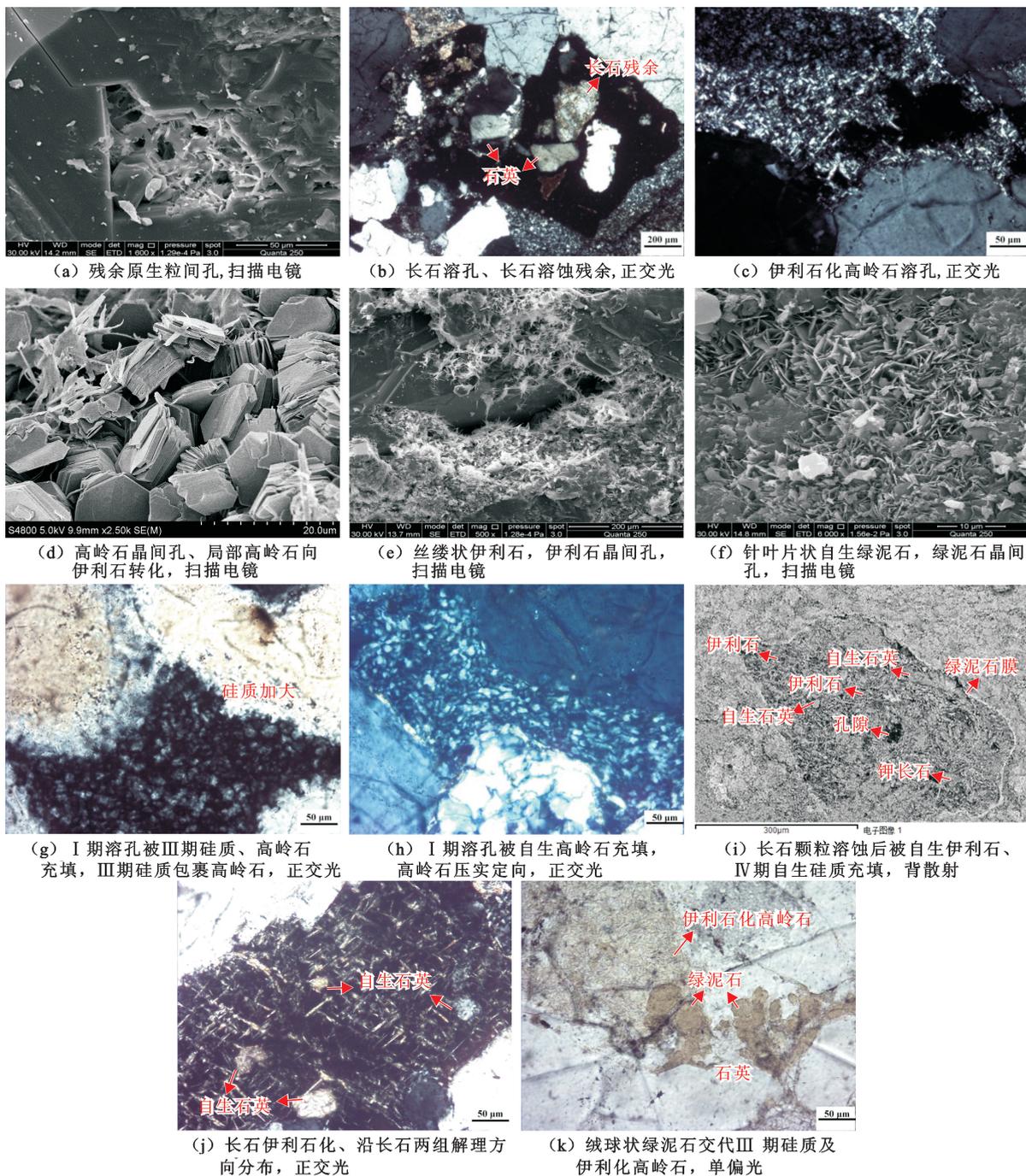


图 2 苏 6 区块盒 8 段致密储层孔隙特征

Fig. 2 Pores characteristics of tight sandstone of He 8th Member in Su 6 area

3 次生孔隙形成机制

3.1 与有机质热演化有关的次生孔隙

根据现今溶蚀产物及次生的孔隙特征,盒 8 段储层主要经历 I 期溶蚀和 II 期溶蚀两期主要的溶蚀作用。I 期溶蚀主要为塑性岩屑及长石的溶蚀,溶蚀生成的矿物组合为自生高岭石和 III 期硅质加大

(图 2(g))。III 期硅质加大边中流体包裹体的激光拉曼光谱分析显示包裹体气相成分主要为 CO₂ 和 CH₄(图 3(a)), CH₄ 代表着烃类流体的充注(有机质在成熟过程中产生大量的 CO₂ 和有机酸,对长石等铝硅酸盐矿物具有较强的溶蚀)、CO₂ 则代表着酸性流体环境;包裹体的均一温度为 124.6 ~ 139.1 °C (图 3(c)),该温度区间与有机酸大量产出的温度

区间吻合^[13];自生高岭石是典型的酸性溶蚀环境的产物,并具有充填长石及岩屑溶孔的产状。通过上述的成岩矿物特征、包裹体测温及激光拉曼光谱分析等测试分析,认为 I 期溶蚀作用有机质热演化到成熟阶段,溶蚀孔隙为有机酸充注形成的酸性环境下的产物。

I 期溶蚀形成的孔隙多在后期压实、胶结过程中损失殆尽,表现在溶蚀孔隙经压实变形严重,充填于溶孔内的自生高岭石具有明显的压实定向(图 2(h)),现今保存下来的 I 期溶蚀孔隙主要为高岭石晶间孔。

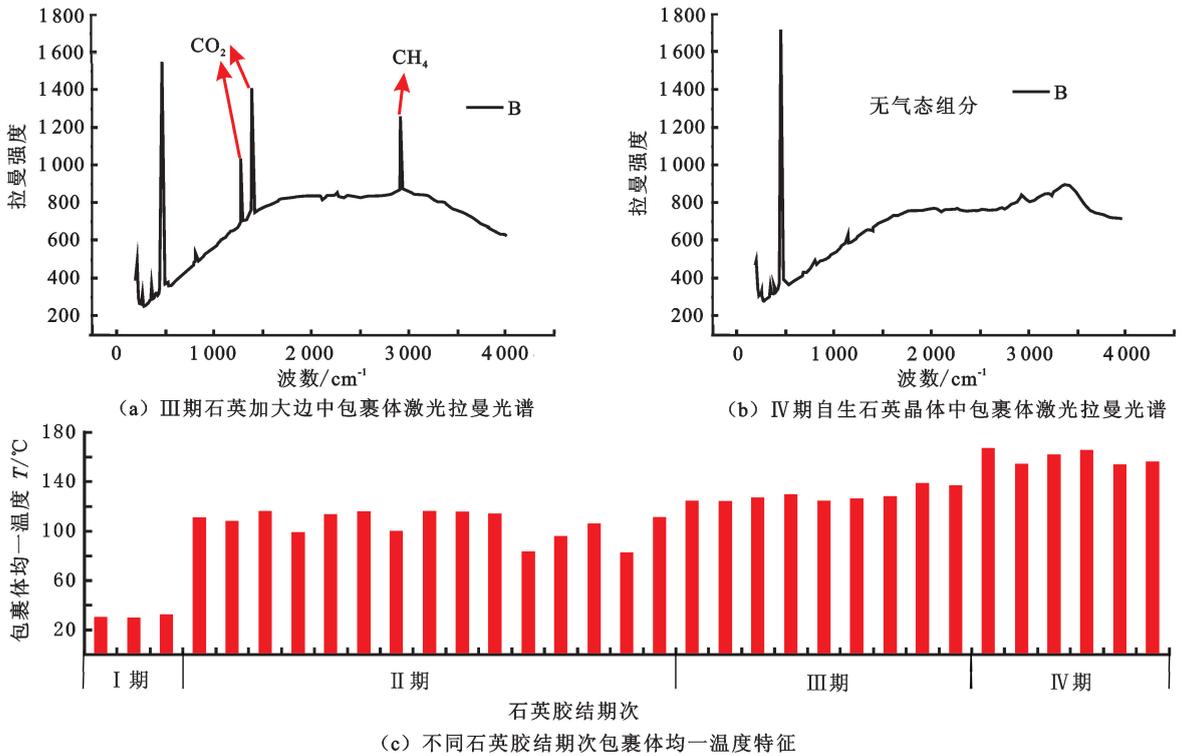


图3 苏6区块盒8段致密储层石英胶结物包裹体均一温度及拉曼光谱特征
Fig.3 Characteristics of homogenization temperatures and Raman microprobe of fluid inclusions of tight reservoir of He 8th Member in Su 6 area

3.2 与碱性环境溶蚀有关的次生孔隙

碱性环境溶蚀形成的次生孔隙类型可以分为两大类:一是II期溶蚀作用产生的孔隙,即长石、岩屑溶孔,高岭石溶孔及伊利石晶间孔;二是II期溶蚀作用后,绿泥石化作用形成的绿泥石晶间孔。

3.2.1 II期溶蚀形成的次生孔隙

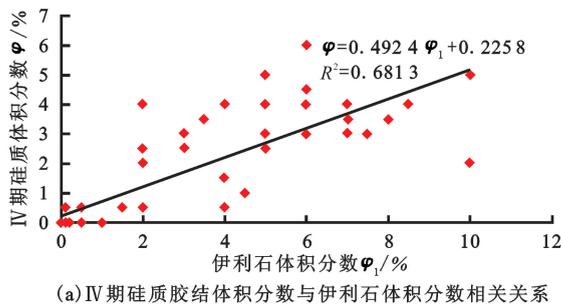
II期溶蚀主要为长石、高岭石胶结物及少量塑性岩屑的溶蚀,溶蚀生成的矿物组合为伊利石和IV期自形硅质(图2(i)、(j))。II期溶孔边缘相对平直、保留着颗粒的形态,溶孔内可见长石残余(图2(b)),伊利石大都沿长石解理方向分布(图2(j)),溶蚀高岭石多具有向伊利石转化的特征(图2(c))。

溶蚀产物IV期自形硅质中流体包裹体的激光拉曼光谱分析无气体显示(图3(b)),包裹体的均一温度为154.3~167.2℃(图3(c)),而当温度大于

160℃时,有机酸基本全部转化为CO₂,因此II期溶蚀时期储层流体中基本不含有有机酸;I酸性溶蚀阶段有机酸已大量消耗,并伴随着K⁺、Na⁺等碱性阳离子大量富集,加之有机酸根、碳酸根等的水解,流体将向偏碱性转化;IV期硅质多与伊利石伴生(伊利石为偏碱性和碱性环境的产物),图4(a)显示IV期硅质含量和伊利石含量之间具有良好的正相关关系,具有充填长石及岩屑溶孔的产状,证明IV期硅质是长石及塑性岩屑溶蚀的产物;砂岩未见到IV期自形硅质被溶蚀或交代的现象(石英溶解所需的pH值大于8.5)。综合上述特征表明,II期溶蚀是在pH值小于8.5的偏碱性环境下进行的。

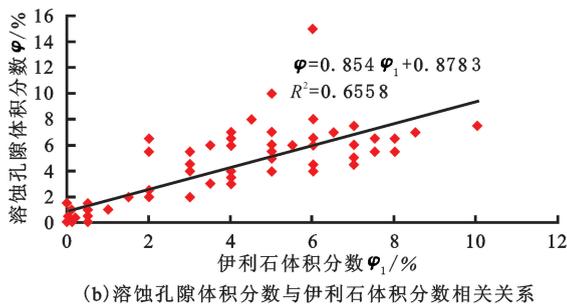
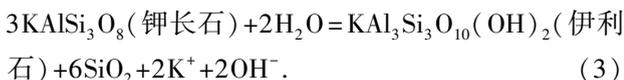
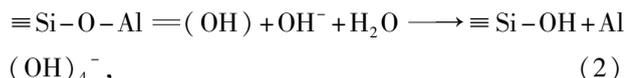
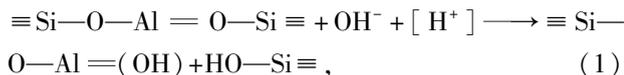
(1)长石在偏碱性环境中的溶解机制。长石和岩屑(溶蚀部分主要为长石、高岭石等)在偏碱性环境下的溶解可以划分为3个过程:①扩散淋滤反应,即H⁺与长石表面碱性阳离子的交换反应;②表面控

制反应,通过两步(反应(1)、(2)), $[H^+]$ 表示经过离子交换反应而进入长石架状结构的 H^+ 水解反应的进行 $Al-O$ 键逐步断裂并生成 Al 离子水解产物,而使 Al 离子脱离长石结构,溶出至溶液中,长石表面则形成富 Si 的络合物;③次生矿物相形成,表现为新生石英的结晶析出以及颗粒表面 K 离子以某种形式富集(次生矿物)^[14-15]。通过以上3个过程的循环进行,长石最终得以进一步溶蚀(反应(3))。



(a) IV期硅质胶结体积分数与伊利石体积分数相关关系

反应如下:

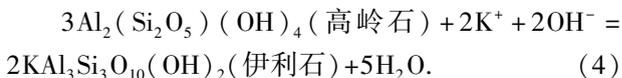


(b) 溶蚀孔隙体积分数与伊利石体积分数相关关系

图4 盒8段致密储层II期溶蚀产物相关关系

Fig. 4 Correlation of dissolution product of secondary dissolution of tight reservoir of He 8th Member in Su 6 area

(2) 偏碱性环境下高岭石的伊利石化反应。在富含 K^+ 的偏碱性溶液中,高岭石会逐渐转变为伊利石(反应(4)),显微镜下片状高岭石具伊利石的一级黄干涉色,扫描电镜下高岭石假六方片状晶体向丝状伊利石转化。高岭石向伊利石转化过程中, K^+ 的主要来源由钾长石、塑性变质岩岩屑(绢云母)的溶蚀提供。



(3) 偏碱性环境下协同反应。长石在偏碱性环境下的溶解会导致孔隙流体中 K^+ 、 Na^+ 等离子的富集,阻碍长石的进一步溶解(反应(3));高岭石在偏碱性环境中向伊利石的转化是消耗 K^+ 的反应(反应(4)), K^+ 浓度的高低是反应能否继续进行的重要因素^[16]。盒8段储层这两个反应是在同一环境下、同期进行的,钾长石的溶解为高岭石的伊利石化反应提供 K^+ ,促进了高岭石的转化,而高岭石的伊利石化消耗 K^+ ,使得孔隙流体中 K^+ 的浓度降低,促进了长石的溶解。针对这种现象,笔者提出协同反应的概念,认为协同反应是指储层成岩演化过程中,存在两种及两种以上矿物的溶蚀,这些溶蚀反应之间相互促进、相互协同,使得溶蚀过程得以持续进行。由图4(b)可以看出,协同反应的产物伊利石的含量与储层II期溶蚀产生的孔隙含量具有很好的正相关关系($R^2=0.67$),说明协同反应是II期溶蚀顺利进行的主要原因。

3.2.2 绿泥石晶间孔隙

绿泥石在大量伊利石形成之后出现,其单晶形态主要呈针片状(图2(f)),集合体呈不规则条带状、绒球状(图2(k)),并且多见绿泥石交代伊利石和自生硅质的现象($pH>8.5$),因此推断绿泥石应该形成于温度大于 $160^\circ C$ 的碱性环境下,属于中成岩晚期阶段的产物。

4 次生孔隙的发育规律

研究区盒8段砂岩I期溶蚀孔隙在后期压实、胶结过程中几乎损失殆尽,现今保存下来的主要为高岭石晶间孔,占现今孔隙总量的9.4%;II期溶蚀作用产生次生孔隙包括长石及岩屑溶孔、高岭石溶孔及伊利石晶间孔,占现今孔隙总量的81.0%;绿泥石晶间孔占孔隙总量的6.6%,储层现今孔隙度的大小主要取决于II期溶蚀产生的次生孔隙量。

通过研究发现,I期溶蚀作用的强弱直接关系到II期溶蚀反应的程度,I期溶蚀作用越强烈、生成的自生高岭石含量越高、高岭石向伊利石转化的转化率也就越高,而高岭石向伊利石转化能够促进长石等颗粒的溶解,保证II期溶蚀协同反应的进行,相应的溶蚀孔隙越发育;相反,I期溶蚀作用很弱,生成的自生高岭石含量过少,长石等颗粒的溶蚀受到抑制,II期溶蚀孔隙不发育(图5)。盒8段现今储层中,中粗粒砂岩主要的孔隙类型包括溶蚀孔隙及黏土矿物晶间孔隙(图6)。中粗粒岩屑石英砂岩的

石英颗粒含量高,石英加大发育,压实作用相对较弱,有机酸充注前原生孔隙保存较好,使得有机酸能够顺利进入储层,导致I期溶蚀反应强烈,产生的自生高岭石含量高(7%~16%),进而促使其II期溶蚀反应能够有效进行;中粗粒岩屑砂岩的II期硅质加大及III期硅质胶结物之间发育薄膜状绿泥石,形成的绿泥石包壳对抑制压实胶结、保护孔隙具有明显的作用,有机酸同样能够顺利进入储层,致使I期溶蚀反应强烈,生成的自生高岭石含量高(5%~

15%),II期溶蚀反应同样能够充分进行。细粒(长石)岩屑砂岩的绿泥石膜不发育,早期压实导致砂岩孔隙损失严重,I期酸性溶蚀很弱(自生高岭石含量低于2%),直接制约着II期溶蚀反应的进行(现今细粒岩屑砂岩中长石含量可达到15%,而中粗粒砂岩的长石含量低于3.0%,这与细粒砂岩对长石等颗粒的溶蚀较弱有关),导致其溶蚀孔隙不发育,孔隙主要为黏土矿物晶间孔隙(图6)。

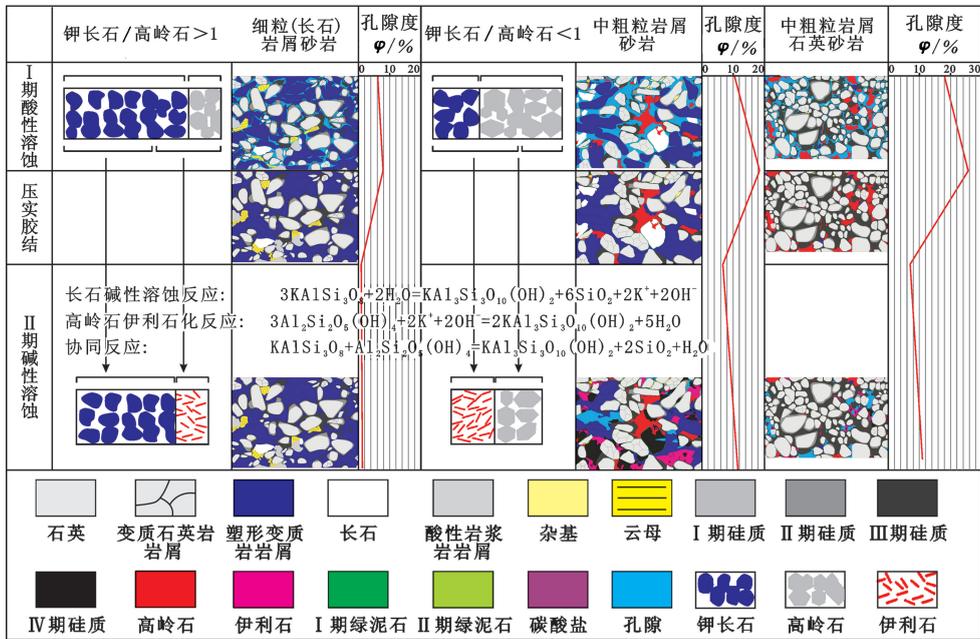


图5 苏6区块盒8段致密储层不同类型砂岩次生孔隙发育特征

Fig.5 Characteristics of secondary pores for different types sand of tight reservoir of He 8th Member in Su 6 area

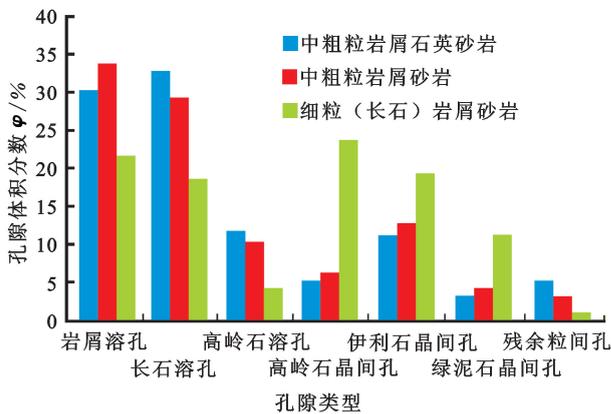


图6 苏6区块盒8段致密储层不同类型砂岩孔隙分布

Fig.6 Pore distribution of different types sand of tight reservoir of He 8th Member in Su 6 area

图7为盒8段砂岩岩心样品孔隙度(覆压41.6 MPa孔隙度校正)分布,中粗粒岩屑石英砂岩孔隙度一般为2%~10%,中粗粒岩屑砂岩孔隙度一般为2%~8%,而细粒(长石)岩屑砂岩孔隙度一般小

于4%,中粗粒砂岩孔隙度明显高于细粒砂岩。上述对于次生孔隙发育特征的分析,就是造成盒8段储层不同粒度砂岩孔隙度分布特征差异的原因。

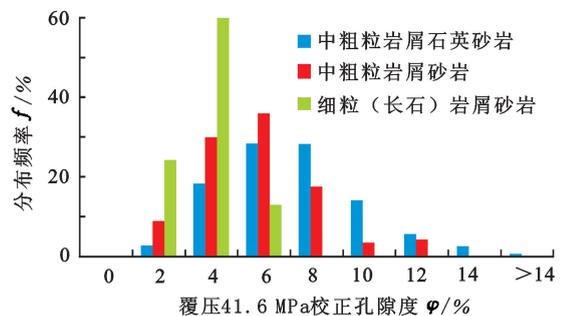


图7 苏6区块盒8段致密储层孔隙度分布特征
Fig.7 Distribution characteristics of porosity of tight reservoir of He 8th Member in Su 6 area

5 结论

(1) 苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层

孔隙类型主要包括残余粒间孔、(颗粒、胶结物)溶孔以及自生黏土矿物晶间孔,残余粒间孔占总孔隙度的3.0%,次生孔隙占97.0%,次生孔隙中溶蚀孔隙占67.5%,黏土矿物晶间孔隙占29.5%。

(2)盒8段储层次生孔隙的形成主要经历两期溶蚀作用,I期溶蚀为酸性环境下长石、岩屑等的溶蚀,产物主要为高岭石,形成的次生孔隙多在后期压实、胶结过程中损失;II期溶蚀为偏碱性环境长石、高岭石等的溶蚀,产物主要为伊利石,形成的次生孔隙占现今孔隙的81.0%,对现今储层起主要的贡献。

(3)偏碱性环境下钾长石的溶解为高岭石的伊利石化反应提供 K^+ ,促进了高岭石的转化,而高岭石的伊利石化消耗 K^+ ,使得孔隙流体中 K^+ 的浓度降低,促进了长石的溶解,两者相辅相成、相互协同(协同反应)是次生孔隙(II期溶蚀孔隙)形成的主要原因;I期溶蚀作用的强弱直接关系到II期溶蚀反应的程度,I期溶蚀作用越强烈、生成的自生高岭石含量越高、高岭石向伊利石转化的转化率也就越高,高岭石向伊利石转化能够促进长石等颗粒的溶解,保证II期溶蚀协同反应的充分进行。

参考文献:

[1] 孟万斌,吕正祥,刘家铎,等.川西中侏罗统致密砂岩次生孔隙成因分析[J].岩石学报,2011,27(8):2371-2380.
MENG Wanbin, LÜ Zhengxiang, LIU Jiaduo, et al. Genesis of secondary porosity in Middle Jurassic tight sandstone in western Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2371-2380.

[2] 任拥军,陈勇.东营坳陷民丰洼陷深部天然气储层酸性溶蚀作用的流体包裹体证据[J].地质学报,2010,84(2):258-262.
REN Yongjun, CHEN Yong. Acid dissolution of deep natural gas reservoir in the Minfeng Sag in the Dongying Depression: evidence from fluid inclusions[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 258-262.

[3] 黄思静,武文慧,刘洁,等.大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J].地球科学——中国地质大学学报,2003,28(4):419-424.
HUANG Sijing, WU Wenhui, LIU Jie, et al. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(4):

419-424.

[4] GEOFFREY T, BERNARD P B, MOGENS R, et al. Simulation of potassium feldspar dissolution and illitization in the Statfjord Formation, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 621-635.

[5] 邱隆伟,姜在兴,操应长,等.泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J].中国科学:D辑,2001,31(9):752-759.
QIU Longwei, JIANG Zaixing, CAO Yingchang, et al. The alkaline diagenesis and effect of reservoir in Biyang Depression [J]. Science in China (ser D), 2001, 31(9): 752-759.

[6] 文华国,郑荣才,高红灿,等.苏里格气田苏6井区下石盒子组盒8段沉积相特征[J].沉积学报,2007,25(1):90-96.
WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, GAO Hongcan, et al. Sedimentary facies of the 8th Member of lower Shihezi Formation in Su6 area, Sulige gas field [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 90-96.

[7] 侯明才,窦伟坦,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地苏里格气田北部盒8、山1段成岩作用及有利储层分布[J].矿物岩石,2009,29(4):66-74.
HOU Mingcai, DOU Weitan, CHEN Hongde, et al. Study on diagenesis of the He8 Member in Sulige gas field Ordos Basin [J]. Mineral Petrol, 2009, 29(4): 66-74.

[8] 刘锐娥,孙粉锦,拜文华,等.苏里格庙盒8气层次生孔隙成因及孔隙演化模式探讨[J].石油勘探与开发,2002,29(4):47-49.
LIU Ruie, SUN Fenjin, BAI Wenhua, et al. An approach to the generating mechanism of secondary pores and pore evolution model of He 8 gas layer in Suligemiao gas field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 47-49.

[9] 赵国泉,李凯明,赵海玲,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成[J].石油勘探与开发,2005,32(1):53-55.
ZHAO Guoquan, LI Kaiming, ZHAO Hailing, et al. Feldspar corrosion and secondary pore formation in the Upper Paleozoic gas reservoir, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 53-55.

[10] 冉新权,李安琪.苏里格气田开发论[M].北京:石油工业出版社,2008.

[11] 袁静,袁凌荣,杨学君,等.济阳坳陷古近系深部储层成岩演化模式[J].沉积学报,2012,30(2):231-239.
YUAN Jing, YUAN Lingrong, YANG Xuejun, et al. Diagenetic evolution modes of the deep formation of Jiyang sub-basin, Paleogene [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 231-239.

- [12] HURST A, NADEAU H P. Clay microporosity in reservoir sandstones: an application of quantitative electron microscopy in petrophysical evaluation[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4):563-573.
- [13] 王秀平, 牟传龙. 苏里格气田东二区盒8段储层成岩作用与成岩相研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4):678-689.
WANG Xiuping, MOU Chuanlong. Diagenesis and diagenetic facies of reservoir in He 8 section of Shihezi Formation in east II part of Sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4):678-689.
- [14] 肖奕, 王汝成, 陆现彩, 等. 低温碱性溶液中微纹长石溶解性质研究[J]. 矿物学报, 2003, 23(4):333-340.
XIAO Yi, WANG Rucheng, LU Xiancai, et al. Experimental study on the low-temperature dissolution of microporthite in alkaline solution[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(4):333-340.
- [15] OELKERS E H, SCHOTT J. Experimental study of anorthite dissolution and the relative mechanism of feldspar hydrolysis[J]. Geochimica Acta, 1995, 59:5039-5053.
- [16] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5):498-506.
HUANG Sijing, HUANG Keke, FENG Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Geochimica, 2009, 38(5):498-506.

(编辑 徐会永)