

鄂尔多斯盆地延长组绿泥石膜的形成机制

周晓峰, 王建国, 兰朝利, 代金友

(中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:通过包裹体、铸体薄片、带有能谱仪的扫描电镜技术对鄂尔多斯盆地延长组长 8 砂岩中的绿泥石膜进行分析测试,研究其形成机制和过程及其与物性的关系。研究表明:绿泥石膜具有双层膜结构,由骨架颗粒向孔隙方向依次为里层膜和外层膜;等厚的外层膜发育在压实作用之后,由孔隙水中析出的绿泥石晶体聚集在骨架颗粒表面形成,由于原生孔隙提供了充足的生长空间,致使生成的绿泥石晶粒大,晶形好,集合体有规律地排列;在外层膜的双向阻滞作用下,里层膜开始在骨架颗粒边缘溶蚀产生的小孔隙中生长,因空间狭小造成绿泥石晶体小,晶形差,集合体杂乱堆积;随成岩环境的变化,碎屑石英表面在外层膜形成后,经历了里、外层膜同时生长和停止的反复交替,而碎屑长石表面的里、外层膜则表现为此长彼停的循环过程;绿泥石膜胶结是一种破坏性成岩作用,其发育的砂岩物性好仅仅是表象,本质是物性好的砂岩有助于绿泥石膜发育。

关键词:鄂尔多斯盆地;长 8 砂岩;绿泥石膜;双层结构;破坏性成岩作用

中图分类号:P571 **文献标志码:**A

引用格式:周晓峰,王建国,兰朝利,等. 鄂尔多斯盆地延长组绿泥石膜的形成机制 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(4):20-28.

ZHOU Xiaofeng, WANG Jianguo, LAN Chaoli, et al. Forming mechanisms of chlorite films in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(4):20-28.

Forming mechanisms of chlorite films in Yanchang Formation, Ordos Basin

ZHOU Xiaofeng, WANG Jianguo, LAN Chaoli, DAI Jinyou

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Using inclusion analysis, casting slice, scanning electron microscope analysis with energy disperse spectroscopy, the chlorite films in Chang 8 sandstones of the Yanchang Formation in the Ordos Basin were observed and probed, in order to analyze the forming mechanisms and processes of the films and the relationship between the films and the physical property. The results show that the chlorite films have double layers, referred to as the inside layer film and the outside layer film from the surface of the grain to the pore, respectively. The outside layer film with the isopachous feature was developed after the compaction, whose chlorite crystals precipitated from the pore fluid and densely cover the grain. The primary porosity provides enough space for the outside layer film, which leads to large chlorite crystals with uniform shape and regular accumulation. Owing to bi-directional blocking of the outside layer film, the inside layer film was developed in the small cavity formed by the dissolution of the framework grain. The cavity is narrow which leads to small chlorite crystals of the inside layer with irregular shape and chaotic mélange. With the change of the diagenetic environment, the inside and outside films around the quartz fragment simultaneously grow and cease repeatedly after the first formation of the outer layer, but the growth of the inside layer alternates with the growth of the outside layer around the feldspar fragment. The cementation of the chlorite films is a destructive diagenesis process, such that the formation of the chlorite films does not lead to good physical properties in sandstones; on the contrary the good physical properties of sandstones facilitate formation of chlorite films.

Keywords: Ordos Basin; Chang 8 sandstone; chlorite film; double layer structure; destructive diagenesis

绿泥石膜是指砂岩中围绕颗粒的绿泥石黏土矿物薄膜,又常称之为颗粒包膜绿泥石、孔隙衬里绿泥石、绿泥石环边或环边绿泥石^[1]。鉴于绿泥石膜的普遍性及绿泥石膜发育的砂岩物性较好,长期以来诸多学者致力于研究其形成的机制和过程以及其与物性的关系^[1-11]。笔者通过细致地显微观察,发现了具有双层结构的绿泥石膜,以往的研究成果中少见对这种绿泥石膜的相关报道。选取研究程度较高的长 8 油层组砂岩(长 8 砂岩)为对象,采用包裹体分析技术、铸体薄片分析技术和带有能谱仪的扫描电镜分析技术对绿泥石膜的赋存状态、化学组成、物质来源、形成条件等进行系统分析,结合砂岩的基本特征,从一个新视角研究鄂尔多斯盆地延长组绿泥石膜形成的机制和过程,进而探讨其与物性的关系。

1 长 8 砂岩的基本特征

鄂尔多斯盆地是中国重要的含油气沉积盆地,三叠系延长组是其主要产油层位。根据沉积旋回,前人将延长组自上而下划分为长 1—长 10 等 10 个

油层组,反映了晚三叠世鄂尔多斯湖形成、发展和消亡的全过程,形成了一套厚度约 1 000 m 的河流—三角洲—重力流沉积体系^[12]。长 8 沉积期,鄂尔多斯湖面积大(约 $4\times 10^4\text{ km}^2$)、水体浅(水深一般小于 5 m),发育大型浅水三角洲沉积^[13-14]。与之对应发育一系列三角洲前缘水下分流河道砂体,长 25~100 km,宽 5~20 km,厚 15~40 m,形成大面积叠合连片的储集岩。长 8 储集岩与长 7 油源岩均稳定分布,源、储大面积广覆式接触,构成了极佳的成藏组合^[15]。

1.1 岩性特征

581 个铸体薄片鉴定结果表明,长 8 砂岩主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,碎屑组分成熟度低。碎屑组分统计分析(表 1),石英、长石、岩屑、云母的岩石体积分数依次为 32.1%、26.2%、24.0%、7.6%;岩屑主要为火山岩岩屑(10.2%)和石英岩岩屑(8.3%),其次为千枚岩岩屑(4.7%)和板岩岩屑(1.8%)。

表 1 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩铸体薄片鉴定结果统计

Table 1 Identification results of casting thin sections of Chang 8 sandstone, Ordos Basin

碎屑组分的体积分数/%							胶结物的体积分数/%			孔隙面孔率/%
石英	长石	火山岩岩屑	石英岩岩屑	千枚岩岩屑	板岩岩屑	云母	绿泥石膜	碳酸盐	硅质	
32.1	26.2	10.2	8.3	4.7	1.8	7.6	3.6	2.6	1.0	2.9

根据物理化学性质,大致可以把碎屑组分划归为 3 类。石英颗粒和石英岩岩屑归为一类,硬度大,化学性质较为稳定,为砂岩的骨架颗粒,但在较强的碱性流体作用下可以发生溶解^[16-17]。长石颗粒自成一类,硬度较大,为砂岩的骨架颗粒;在大气水或酸性流体环境中易于溶解,产生溶蚀孔隙,改善砂岩物性^[18]。云母、火山岩岩屑、千枚岩岩屑、板岩岩屑等归为柔性组分,在岩石中通常表现为假杂基,地层水作用下极易发生水解产生 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子^[19]。成岩过程中,骨架颗粒是绿泥石膜的寄主,而柔性组分水解则为绿泥石膜的形成提供主要物质来源。

1.2 成岩环境

应用显微观察,结合前人的研究成果^[20-22],根据最新的《碎屑岩成岩阶段划分规范》^[23],确定鄂尔多斯盆地长 8 砂岩主要处在中成岩阶段 A 期,部分砂岩已进入中成岩阶段 B 期;其最大埋藏深度达到 4 000 m,最大古地温达到 140 ℃, R_o 为 0.8%~1.2%,伊蒙混层比为 20%,绿泥石膜发育,长石溶

蚀作用强烈。绿泥石膜和长石溶蚀现象共存于岩石中,指示了长 8 砂岩是在酸、碱性成岩环境叠加效应下的产物。在富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的碱性成岩流体作用下,绿泥石晶体析出,逐渐地聚集在碎屑颗粒表面形成黏土矿物薄膜;在酸性孔隙水环境中,长石发生溶蚀的同时,绿泥石膜生长停止并遭受破坏^[24],可见成岩环境演化对研究绿泥石膜的形成机制至关重要。

已有的成岩作用研究^[20-22,25]表明,油气充注过程对鄂尔多斯盆地延长组砂岩的成岩环境演化具有里程碑意义。中成岩阶段,油气携带短链有机酸和碳酸流体充注长 8 砂岩,一方面使孔隙的水溶液转化为水和烃类两相溶液,成岩作用受到一定的抑制作用^[26-27];另一方面使孔隙的碱性流体环境逐渐转化为酸性流体环境,导致形成绿泥石膜的成岩环境消失,取而代之以长石溶蚀。这说明油气充注致使砂岩的成岩环境发生了质变,从而改变了成岩作用的方向和强度。

包裹体分析技术是目前国内外迅速发展起来的一项研究油气充注期次及时间的新技术^[28]。根据

鄂尔多斯盆地延长组长 8 砂岩中包裹体的产状,在石英和长石颗粒的微裂隙中识别出早、晚 2 期与油气充注有关的包裹体;早期包裹体荧光显示一般为黄色、黄绿色、绿色,晚期包裹体则为蓝绿色、蓝色、蓝白色。从 2 期包裹体均一温度统计看,早期包裹体均一温度主频在 60 ~ 90 ℃,晚期包裹体均一温度主频在 90 ~ 120 ℃(图 1)。将包裹体均一温度数据与沉积埋藏史、热史结合可确定油气充注的时间^[29]。参考前人在鄂尔多斯盆地地层剥蚀厚度^[30]和古地温方面^[31]的研究结果,编制长 8 地层的沉积埋藏史-热史剖面图,将包裹体均一温度投影到埋藏史-热史剖面图上,求取石油的充注时间(图 2)。由图 2 可以看出,早期石油充注的时间对应中侏罗世末—晚侏罗世,晚期油气充注的时间为早白垩世,2 期油气充注结束均由地层抬升所致。

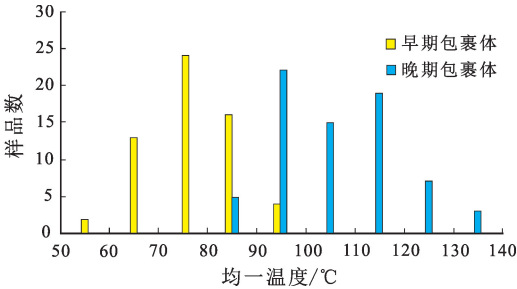
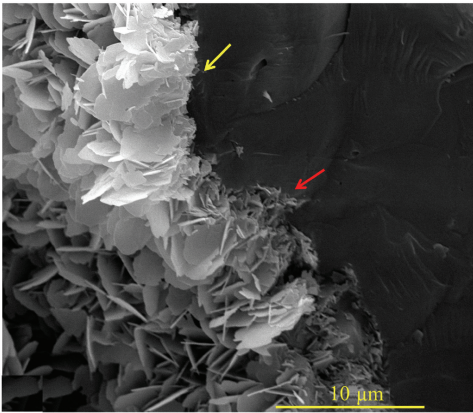
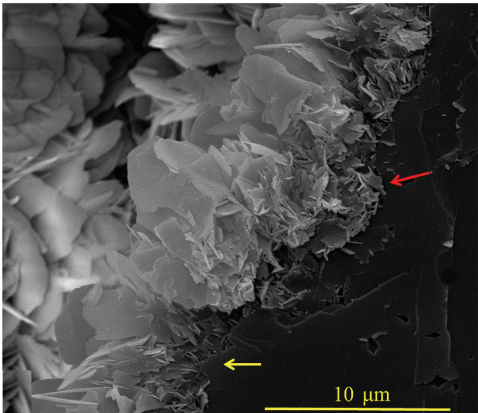


图 1 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩中包裹体均一温度直方图
Fig. 1 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in Chang 8 sandstone, Ordos Basin

每期油气充注停止,砂岩中便失去了酸性流体来源,孔隙水再次转化为碱性,为绿泥石沉淀创造了



(a) 碎屑石英表面具有双层结构的绿泥石膜, X210井, 2 024.73 m



(b) 碎屑长石表面具有双层结构的绿泥石膜, X269井, 1 878.32 m

图 3 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩中绿泥石膜的双层结构特征

Fig. 3 Characteristics of double-layer structures of chlorite films in Chang 8 sandstone, Ordos Basin

表 2 为应用带有能谱仪的扫描电镜技术测试碎屑石英和长石表面的里、外层膜化学组分的质量分数数据。由表 2 可知,碎屑石英颗粒表面的绿泥石

有利成岩环境。

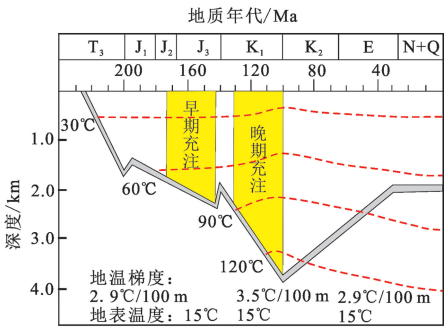


图 2 鄂尔多斯盆地长 8 地层埋藏史-热史与油气充注史
Fig. 2 Hydrocarbon charging ages projecting on geothermal-burial historical chart in Chang 8 formation, Ordos Basin

2 绿泥石膜的赋存特征

2.1 绿泥石膜具有双层结构

鄂尔多斯盆地延长组长 8 砂岩骨架颗粒(石英、长石等)表面的绿泥石膜具有双层结构:里层膜和外层膜(图 3)。

里层膜中,绿泥石晶体的大小一般不足 2 μm,晶形差,集合体以杂乱堆积方式产出;外层膜中,绿泥石晶体普遍大于 3 μm,晶形好,呈叶片状,晶体之间近平行排列,集合体垂直于骨架颗粒表面向孔隙中心方向伸展。外层膜近似等厚,膜厚一般大于 5 μm;里层膜的厚度小于 2 μm 且变化大,通常情况下,骨架颗粒边缘溶蚀强的区域膜的厚度较大,而溶蚀弱的地方膜的厚度较小甚至缺失。

膜中,里层膜的 SiO₂ 质量分数明显高于外层膜,而外层膜的 FeO、MgO、Al₂O₃ 质量分数则高于里层膜;钾长石颗粒表面的绿泥石膜中,里层膜的 K₂O、

Al₂O₃、SiO₂ 质量分数明显高于外层膜,而外层膜的 FeO、MgO 质量分数则高于里层膜;钾长石颗粒和石英颗粒的里层膜的化学组分质量分数差异大,而外层膜的化学组分质量分数相近。结合石英和长石颗

粒的化学组分,认为里层膜的形成有所依附的骨架颗粒提供的物质来源,而外层膜的化学组分则受孔隙流体组分的控制。

表 2 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩骨架颗粒表面绿泥石膜的化学组分的质量分数

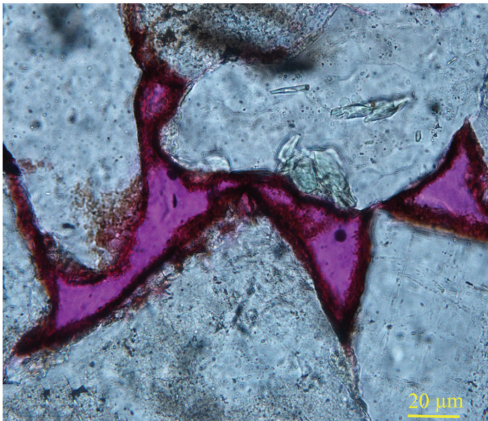
类型			化学组成				
			w(K ₂ O)/%	w(MgO)/%	w(FeO)/%	w(SiO ₂)/%	w(Al ₂ O ₃)/%
石英颗粒表面的绿泥石膜	1	里层	—	4. 2	26. 8	53. 7	15. 4
		外层	—	7. 0	44. 5	29. 2	19. 3
	2	里层	—	5. 9	22. 7	54. 9	16. 5
		外层	—	6. 3	36. 8	37. 5	19. 4
	3	里层	—	5. 7	22. 8	55. 8	15. 8
		外层	—	7. 3	36. 3	36. 6	19. 9
钾长石颗粒表面的绿泥石膜	1	里层	4. 6	4. 8	18. 9	47. 9	28. 4
		外层	—	8. 9	29. 5	36. 8	24. 9
	2	里层	2. 5	6. 8	23. 3	45. 6	24. 3
		外层	—	7. 4	38. 3	32. 9	21. 5
	3	里层	2. 5	6. 2	22. 9	45. 9	25. 0
		外层	—	8. 6	35. 0	33. 6	22. 8

2.2 绿泥石膜的形成

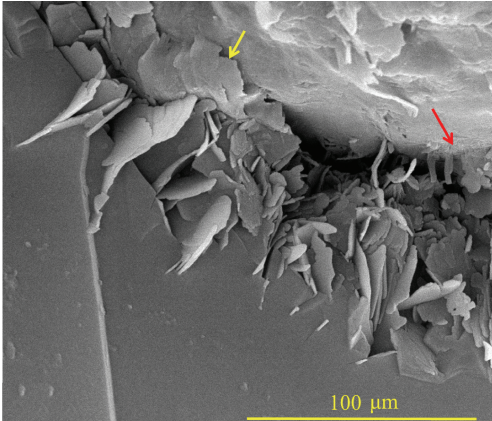
光学显微镜下,绿泥石膜因遭受沥青质浸染呈原生孔隙的黑褐色或黑色环边,而在颗粒相互接触的位置缺乏绿泥石膜(图 4(a))。电子显微镜下,在骨架颗粒相互接触的位置,可以观察到零星分布着平行于颗粒表面的绿泥石晶体(图 4(b)(黄色箭头所指处));由颗粒相互接触的位置向孔隙方向,则转化为绿泥石膜垂直生长在颗粒表面(图 4(b)(红色箭头所指处))。

根据不同位置的绿泥石的赋存方式变化规律,

可以推断绿泥石膜形成于压实作用之后。在压实作用初期,颗粒之间为点接触,少量绿泥石晶体从孔隙流体中析出,零星地散布在颗粒表面并向着孔隙方向生长。压实过程中,颗粒之间的接触关系由点接触发展为点—线接触甚至线接触,造成部分孔隙空间消失,致使生长在该部分孔隙中的绿泥石晶体受到挤压力,相应地其产状被迫由垂直于颗粒变为平行于(紧贴)颗粒。压实作用之后,在残留的原生孔隙中绿泥石晶体继续生长,逐渐地在颗粒表面聚集成膜。



(a) 颗粒之间点—线状接触, Z300井, 2 370. 93 m



(b) 骨架颗粒相互接触位置可见平行于颗粒表面分布的绿泥石晶体, X210井, 2 024. 73 m

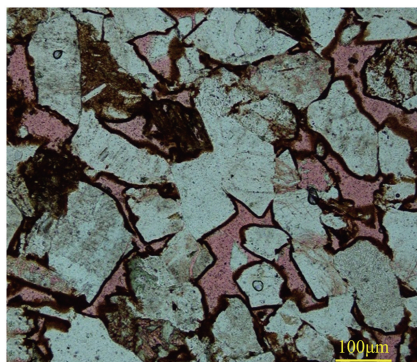
图 4 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩中绿泥石膜与压实作用的关系

Fig. 4 Relationship between chlorite films and compaction in Chang 8 sandstone, Ordos Basin

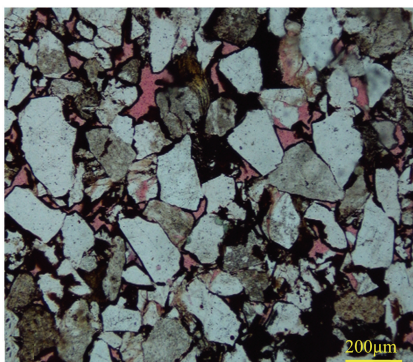
2.3 原生孔隙数量对绿泥石膜含量的影响

鄂尔多斯盆地延长组长8砂岩中,每一个原生孔隙都伴生着一个绿泥石环边(绿泥石膜)。颗粒粗、分选好的砂岩原生孔隙数量多,绿泥石环边的数量就多,相应地绿泥石膜所占的岩石体积分数就高

(图5(a))。颗粒大小混杂、分选较差的砂岩,原生孔隙数量相对较少,绿泥石环边的数量就少,绿泥石膜的岩石体积分数就偏低(图5(b))。颗粒分选差、塑性组分含量高的砂岩,原生孔隙欠发育,则不存在绿泥石膜(图5(c))。



(a) Z58井, 2 030.01 m, 粒度粗, 分选好, 颗粒之间点-线状接触, 原生孔隙多, 绿泥石膜含量高



(b) Z505井, 2 079.35 m, 颗粒大小混杂, 分选差, 颗粒间线-凹凸状接触, 原生孔隙较少, 绿泥石膜含量较低



(c) C86井, 2 734.78 m, 颗粒分选差, 塑性组分多, 压实致密, 缺乏绿泥石膜

图5 鄂尔多斯盆地长8砂岩中绿泥石膜与原生孔隙的关系

Fig.5 Relationship between chlorite films and primary pores in Chang 8 sandstone, Ordos Basin

3 绿泥石膜形成机制

3.1 外层膜形成机制

外层膜为前人描述的绿泥石膜。综观前人研究,鄂尔多斯盆地延长组砂岩的外层膜形成机制存在较大争议。黄思静等^[7]和张霞等^[8]认为,绿泥石膜为同沉积黏土膜转化而来,由颗粒表面向孔隙方向逐渐转化,至早成岩阶段B期完成转化。田建锋等^[9]认为,绿泥石从孔隙水中直接结晶,在颗粒表面聚集成膜的时间为早成岩阶段A期。姚涇利等^[10]则认为,绿泥石膜具有“里层膜”和“外层膜”双层结构,“里层膜”为同沉积黏土膜在早成岩阶段转化而来,“外层膜”是中成岩阶段由孔隙水中结晶的绿泥石形成。这几种观点普遍认为,绿泥石膜或其前身形成于早成岩阶段A期或之前,即压实作用之前,那么目前的压实作用状态下颗粒接触处应该发育绿泥石膜,但镜下观察并未发现颗粒接触处发育绿泥石膜(图4)。对这种现象有两种解释:①黏土矿物是柔性组分,在挤压受力的地方绿泥石晶体发生流动,导致颗粒接触处黏土膜缺失^[10];②绿泥石膜中相对小的晶粒热力学稳定性差,溶解度比大晶粒大,随着埋深和温度的增加,自发地发生小晶粒溶解和大晶粒长大,导致颗粒间相互接触的位置缺乏绿泥石膜^[4-5]。

如果第一种解释真实地发生在砂岩中,流动的黏土膜会在颗粒接触位置的前端汇集和增厚,由颗

粒向孔隙方向就会依次出现垂直于颗粒表面生长的原地绿泥石膜、流动而来的杂乱堆积的异地绿泥石膜,但镜下并未观察到这种微观现象。这说明绿泥石膜形成于早成岩阶段A期或之前的假设从理论上来说成立,但与实际情况不符合。

第二种解释所需要的条件更为苛刻。如果自发地发生小晶粒溶解和大晶粒长大,笔者观察到的里层膜就会发生溶解而已经消失,颗粒接触位置附近的小晶粒也会发生溶解而消失,但事实并非如此。这也说明绿泥石膜形成于早成岩阶段A期或之前的假设缺乏说服力。

通过镜下系统地观察和分析,在梳理各种可能的形成机制的基础上,给出较为可信的外层膜形成机制:早成岩阶段A期,砂岩中丰富的柔性组分(火山岩、云母、千枚岩、板岩等岩屑)持续水解形成大量的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,使孔隙水逐渐转化为碱性,并为绿泥石的形成提供了充足的物质来源;绿泥石从孔隙水中沉淀,依附在颗粒表面生长;由于原生孔隙提供了充足的空间,致使形成的绿泥石晶粒粗大,晶形好,集合体有规律地排列;随着时间推移至早成岩阶段B期,绿泥石在骨架颗粒表面聚集成外层膜,此时压实作用已进行到导致颗粒间目前的接触关系,外层膜则表现为原生孔隙的环边。这一形成机制合理地解释了镜下观察到的各种微观现象。

3.2 里层膜形成机制

中成岩阶段伊始,油气携带酸性物质进入砂岩,

大、连通性好,为外层膜生长提供了足够的空间和畅通的物质供应通道。绿泥石膜形成后,每一个孔隙的部分体积被绿泥石膜占据,造成绿泥石膜所占的岩石体积分数相对较高,但对于原生孔隙的孔径,绿泥石膜较薄,占据的孔隙空间较小,对孔隙度的负面影响较弱,砂岩物性依然较好(图5(a))。

随着水下分流河道向前推进,在湖水的顶托作用下,水动力减弱,形成的砂岩分选较差,柔性组分增多,原始粒间孔隙较少。压实作用下,柔性组分挤压变形成为假杂基,占据了大量的粒间孔隙,致使原生孔隙数量锐减,且保留下来的孔隙的孔径较小,为绿泥石膜生长提供的空间减小,相应地形成的绿泥石膜所占岩石体积分数相对偏低(图5(b))。但对原生孔隙的孔径来说,绿泥石膜占据孔隙空间的比例增加,使物性明显变差。

在三角洲前缘水下分流河道末梢或前三角洲,水动力弱,沉积下来的砂岩颗粒细,柔性组分含量高,原始粒间孔隙欠发育。压实作用下,原生孔隙丧失殆尽,绿泥石来不及淀出砂岩就已经致密(图5(c))。

通过以沉积和成岩作用为主线对外层膜形成的正演,还原绿泥石膜发育的砂岩物性好的成因机制,即沉积时的水动力条件好是砂岩物性好的最根本原因。原始物质组成是水动力环境的沉积记录,原生孔隙的数量、外层膜的含量等仅仅是原始物质组成的内在特征制约成岩强度和成岩作用进程的外在表现形式。压实作用后保留下来的原生孔隙是外层膜的主要生长空间,原生孔隙数量多、孔径大、物性好的砂岩,则外层膜含量高。但是从每一个孔隙的角度看,外层膜较薄,占据的孔隙体积较小,对物性的负面影响有限。由此可见,绿泥石膜发育的砂岩物性好仅仅是表象,本质是物性好的砂岩发育绿泥石膜。

5.2 里层膜与砂岩物性的关系

研究表明,绿泥石膜通过抑制石英胶结来保护原生孔隙,但对抑制机制认识不清。有些学者^[2,4,5,7-8]认为,绿泥石膜阻止了碎屑石英的压溶,减少了硅质来源,导致石英胶结欠发育。部分学者^[3,6]认为,绿泥石膜隔绝了碎屑石英颗粒与孔隙流体,一是造成颗粒表面缺乏成岩流体,二是导致富含 SiO_2 的孔隙流体缺少结晶基底,从而抑制石英胶结。田建峰等^[32]认为,绿泥石膜晶间微区的碱性环境抑制了石英胶结。也有学者^[10-11]认为,绿泥石膜不能保护原生孔隙。

里层膜的发现提供了一个研究绿泥石膜抑制石英胶结的新视角。里层膜的生长空间为颗粒溶蚀产生的小孔隙,形成时间为外层膜形成之后。外层膜横亘在原生孔隙和溶蚀小孔隙之间,成为二者间流体交换的阻滞带。在外层膜的双向阻滞作用下,颗粒溶蚀产生的富 SiO_2 流体滞留在了小孔隙中,为里层膜形成提供了物质来源。里层膜的形成消耗了这些富 SiO_2 的滞留流体,引起原生孔隙中 SiO_2 的供给量不足而难以形成大量的石英胶结。即鄂尔多斯盆地延长组绿泥石膜通过自身对 SiO_2 流体的“自产自销”来抑制石英胶结,从而保护原生孔隙。但是里层膜的形成也有不利的一面,其填塞了溶蚀小孔隙,减少了次生孔隙。由此可见,里层膜的形成是一种保持性成岩作用,对砂岩的物性影响不大。

综合分析里层膜和外层膜与砂岩物性的关系,认为绿泥石膜胶结是破坏性成岩作用。

6 结 论

(1)鄂尔多斯盆地延长组长8砂岩中发现了具有双层结构的绿泥石膜。里层膜晶粒小,晶形差,集合体杂乱堆积;其厚度变化大,在颗粒边缘溶蚀强度大的区域厚度也大,在溶蚀强度弱的地方厚度小甚至缺失。等厚的外层膜中,晶体大,晶形好,集合体垂直颗粒表面。

(2)骨架颗粒是绿泥石膜的寄主,柔性组分水解为绿泥石膜的形成提供了主要物质来源。外层膜发育在压实作用之后,由孔隙水中析出的绿泥石晶体聚集在骨架颗粒表面形成;在外层膜的双向阻滞作用下,里层膜开始在骨架颗粒边缘溶蚀产生的小孔隙中生长。随成岩环境的变化,碎屑石英表面在外层膜形成后,经历了里、外层膜同时生长和停止的反复交替,而碎屑长石表面的里、外层膜则表现为此长彼停的循环过程。

(3)绿泥石膜胶结是一种破坏性成岩作用,其外层膜占据原生孔隙,里层膜充塞溶蚀小孔隙,导致砂岩物性变差。绿泥石膜发育的砂岩物性好仅仅是表象,本质是物性好的砂岩有助于绿泥石膜发育。

参考文献:

- [1] DOWEY P J, HODGSON D M, WORDEN R H. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: a review of subsurface examples [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 32 (1): 63-75.

- [2] HEALD M T, ANDEREGG R C. Differential cementation in the Tuscarora sandstone [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1960, 30(4): 568-577.
- [3] EHREBERG S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: examples from the Norwegian Continental Shelf [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(7): 1260-1286.
- [4] GRIGSBY J D. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg Formation, south Texas [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 27-36.
- [5] BILLAULT V, BEAUFORT D, BARONNET A, et al. A nanometrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs [J]. *Clay Minerals*, 2003, 38(3): 315-328.
- [6] 柳益群, 李文厚. 陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化 [J]. *沉积学报*, 1996, 14(3): 87-96.
LIU Yiqun, LI Wenhui. Diagenetic characteristics and porosity evolution of the oil-bearing arkoses in the Upper Triassic in the eastern Shaan-Gan-Ning Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(3): 87-96.
- [7] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(3): 273-281.
HUANG Sijing, XIE Lianwen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and its relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(3): 273-281.
- [8] 张霞, 林春明, 陈召佑. 鄂尔多斯盆地镇泾区块上三叠统延长组砂岩中绿泥石矿物特征 [J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1659-1671.
ZHANG Xia, LIN Chunming, CHEN Zhaoyou. Characteristics of chlorite minerals from Upper Triassic Yanchang Formation in the Zhenjing area, Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1659-1671.
- [9] 田建锋, 刘池洋, 王桂成, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩的碱性溶蚀作用 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2011, 36(1): 103-110.
TIAN Jianfeng, LIU Chiyang, WANG Guicheng, et al. Alkaline dissolution of sandstone in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(1): 103-110.
- [10] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长6砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 72-79.
- [11] 杨威, 魏国齐, 赵杏媛, 等. 碎屑岩储层中自生绿泥石衬边能抑制石英次生加大吗? 以四川盆地须家河组砂岩储层为例 [J]. *石油学报*, 2013, 34(增1): 128-135.
YANG Wei, WEI Guoqi, ZHAO Xingyuan, et al. Can authigenic pore-lining chlorite restrain quartz overgrowth in clastic reservoir? a case study of sandstone reservoir in Xujiahe formation, Sichuan basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013, 34(sup1): 128-135.
- [12] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 50-56.
- [13] 刘化清, 李相博, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地长8油层组古地理环境与沉积特征 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(6): 86-95.
LIU Huaqing, LI Xiangbo, WAN Yanrong, et al. Ancient geographical environment and sedimentary characteristics in the Chang 8 reservoir area in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 86-95.
- [14] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 19-28.
ZHOU Xiaomin, DENG Xiuqin, LIU Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in lacustrine: an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 19-28.
- [15] 郭彦如, 刘俊榜, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 417-425.
GUO Yanru, LIU Junbang, YANG Hua, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoir in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 417-425.
- [16] 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学. 一种新的储层孔隙成因类型: 石英溶解型次生孔隙 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 621-627.
QIU Longwei, JIANG Zaixing, CHEN Wenxue. A new type reservoir dissolved pore types-quartz secondary porosity [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 621-627.
- [17] 陈忠, 罗蜚潭, 沈明道, 等. 由储层矿物在碱性驱替剂中的化学行为到砂岩储层次生孔隙的形成 [J]. 西

- 南石油学院学报,1996,18(2):15-19.
- CHEN Zhong, LUO Zhetan, SHEN Mingdao, et al. Study of secondary pore formation on the basis of chemical behavior of minerals in alkaline-flooding agents [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(2): 15-19.
- [18] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220-223.
- LI Wenguo, ZHANG Xiaopeng, ZHONG Yumei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose [J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(2): 220-223.
- [19] WHETTEN J T, HAWKINS J W. Diagenetic origin of graywacke matrix minerals [J]. Sedimentology, 1970, 15(3): 347-361.
- [20] 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6-8段储层砂岩成岩作用研究 [J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 373-379.
- SHI Ji'an, WANG Jinpeng, MAO Minglu, et al. Reservoir sandstone diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 373-379.
- [21] 张金亮, 司学强, 梁杰, 等. 陕甘宁盆地庆阳地区长8油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响 [J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 225-233.
- ZHANG Jinliang, SI Xueqiang, LIANG Jie, et al. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 225-233.
- [22] 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长₈低渗透储层成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 209-217.
- LI Hong, LIU Yiqun, LIU Linyu. Diagenesis of Chang 8₁ reservoir with low permeability in Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(2): 209-217.
- [23] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. 碎屑岩成岩阶段划分: SY/T5477-2003 [S]. 北京: 国家经济贸易委员会, 2003.
- [24] 杨国栋, 李义连, 马鑫, 等. 绿泥石对CO₂-水-岩石相互作用的影响 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2014, 39(4): 462-472.
- YANG Guodong, LI Yilian, MA Xin, et al. Effect of chlorite on CO₂-water-rock interaction [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(4): 462-472.
- [25] 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(5): 664-671.
- LUO Jinglan, LIU Xiaohong, LIN Tong, et al. Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang Formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 664-671.
- [26] 葛云锦, 陈勇, 周瑶琪. 不同成岩条件下油气充注对碳酸盐岩成岩作用的影响 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 18-22.
- GE Yunjin, CHEN Yong, ZHOU Yaoqi. Effects of hydrocarbon emplacement to diagenesis of carbonatite in different conditions: evidences from synthetic oil (hydrocarbon)-bearing inclusions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(1): 18-22.
- [27] 李茹, 葛云锦, 陈勇, 等. 储层石英生长影响因素的实验证据 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 13-18.
- LI Ru, GE Yunjin, CHEN Yong, et al. Experimental evidence of influential factor of quartz growth in reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(2): 13-18.
- [28] 侯建国, 任丽华, 董春梅. 有机包裹体技术在油气运移与聚集中的应用研究 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 409-413.
- HOU Jianguo, REN Lihua, DONG Chunmei. Application of organic inclusions technology to the study of oil-gas migration and accumulation [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(4): 409-413.
- [29] 陈红汉, 吴悠, 肖秋苟, 等. 昌都盆地古油藏的流体包裹体证据 [J]. 地质学报, 2010, 84(1): 1457-1469.
- CHEN Honghan, WU You, XIAO Qiugou, et al. Fluid inclusion evidence of paleo-oil reservoir in the Changdu Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1): 1457-1469.
- [30] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 88-173.
- [31] 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 503-506.
- REN Zhanli, LIU Li, CUI Junping, et al. Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins [J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(4): 503-506.
- [32] 田建锋, 陈振林, 杨友运. 自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理 [J]. 地质科技情报, 2008, 27(4): 49-54.
- TIAN Jianfeng, CHEN Zhenlin, YANG Youyun. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(4): 49-54.