

颗粒包膜在深埋藏砂岩储层原生孔隙保存中的意义

胡作维, 李 云, 黄思静, 成欣怡, 黄 阳

成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 沉积地质研究院, 成都 610059

摘 要:埋藏条件下颗粒包膜对原生孔隙的保存机制是深埋藏砂岩储层原生孔隙演化的关键机制,但不同类型颗粒包膜的成因机制及其在深埋藏砂岩储层原生孔隙保存中的意义颇具争议。本文系统介绍了自生绿泥石包膜、微晶石英包膜和其它类型颗粒包膜的基本特征、成因机制及其对深埋藏砂岩储层质量的影响。目前,自生绿泥石包膜和微晶石英包膜对深埋藏砂岩储层原生孔隙的良好保存作用已经越来越被接受和认同,但自生伊利石、混层粘土、沥青和蛋白石等其它碎屑颗粒包膜的原生孔隙保存作用仍缺乏足够的说服力。对不同类型颗粒包膜本质的模糊认识是当前开展深入研究的现实瓶颈,尤其需要加深深埋藏储层砂岩原生孔隙保存过程中颗粒包膜形成和演化的理解,以提高油气勘探中钻前储层质量预测的准确性。

关 键 词:砂岩储层;颗粒包膜;原生孔隙;储层质量;成岩作用

中图分类号:P588.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)06-0640-09

The Significance of the Grain Coating in Preserving the Primary Porosity in Deeply Buried Sandstone Reservoirs

HU Zuo-wei, LI Yun, HUANG Si-jing, CHENG Xin-yi, HUANG Yang

State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The primary porosity preserving mechanism of grain coatings under deeply buried condition is a key to understand the porosity evolution of sandstone reservoirs. However, formation mechanisms of different type grain coatings and their implication for the primary porosity preservation of deeply buried sandstone reservoirs are still controversial. This paper systematically reviewed the characteristics and formation mechanism of authigenic chlorite coating, microcrystalline quartz coating and other types of grain coatings in deeply buried sandstones and their effects on the reservoir quality. Currently, the good effects of the authigenic chlorite coating and microcrystalline quartz grain coating have been increasingly accepted and recognized, but the primary porosity preservation by other clastic grain coatings, such as authigenic illite, mixed-layer clay, bitumen, and opal etc., still lacks convincing evidences. The vague understanding in natures of different grain coatings become the bottleneck for in-depth studies, especially need to deepen the understanding to the formation and evolution of grain coatings in the preserving process of primary porosity of deeply buried sandstone reservoirs. The further understanding will improve the accuracy of predicting predrill reservoir quality.

Key words: sandstone reservoir; grain coatings; primary porosity; reservoir quality; diagenesis

在通常情况下,砂岩孔隙度是随着埋藏深度的增加而减小,但在很多油气勘探实际工作中仍发现大量具有异常高孔隙度的深埋藏优质储层砂岩,如美国德克萨斯州海岸埋深大于 4000 m 的中新统砂岩中孔隙度高达 22%^[1]、巴基斯坦 Sawan 气田大于

3300 m 的白垩系火山碎屑砂岩孔隙度可达 27%^[2]、我国新疆塔里木盆地埋深近 6000 m 的东河砂岩孔隙度仍可达 20%左右^[3,4]。Bloch 等^[5]曾将“在统计学上具有比给定岩性(组成、结构)、时代、埋藏史、热史的典型砂岩储层要高的孔隙度或渗透率”定义为

异常高孔隙度或渗透率,它们往往超过了类似典型砂岩的最大孔隙度或渗透率。在深埋藏条件下,砂岩具有异常高孔隙度和渗透率的可能形成机制包括颗粒包膜、烃类早期占位、浅部超压和次生孔隙等,其中颗粒包膜胶结作用是原生孔隙得以保存的主要原因之一^[5]。目前,颗粒包膜发育与否及其可能的发育位置已经成为了深埋藏砂岩储层质量评价和预测的重要内容之一。

颗粒包膜是沉积期后沉积物成岩过程的埋藏产物,由碎屑颗粒表面(除颗粒接触处)向外生长而成^[6]。根据颗粒包膜不同的赋存状态,其可以有两种不同的表达方法,含义略有不同:如果自生胶结物围绕碎屑颗粒表面向外生长、并像薄膜一样包裹住整个碎屑颗粒时,通常称为颗粒包膜(grain coat 或 grain-coating);如果自生胶结物未将碎屑颗粒完全包裹,只生长在孔隙边缘的颗粒表面而未见于颗粒接触处时,通常称为孔隙衬里(pore-lining)。由于孔隙衬里与严格意义的颗粒包膜通常共存,因此本文统称为颗粒包膜。颗粒包膜的组成矿物通常包括富铁粘土(如磁绿泥石、钛云母)、蒙脱石、伊利石、氧化铁或氢氧化物、坡缕石、蛋白石和微晶石英等,其中最常见且对深埋藏砂岩储层原生孔隙保存最有意义的是自生绿泥石包膜和微晶石英包膜。

1 自生绿泥石包膜

自生绿泥石在砂岩中主要有颗粒包膜、充填孔隙和绿泥石化碎屑颗粒等三种产状,其中自生绿泥石包膜呈放射纤维状垂直碎屑颗粒生长、且像薄膜一样包裹着碎屑颗粒表面,通常形成于压实作用的初期阶段,这是因为在很多碎屑颗粒接触处自生绿泥石包膜往往不发育。在扫描电镜下,自生绿泥石

包膜呈薄层、连续、等厚的叶片状垂直颗粒生长,大小约 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ (图 1A),同时自生绿泥石从碎屑颗粒边缘到孔隙中心的生长可能具有世代性(图 1B),早期自生绿泥石的晶形差、体积小,晚期自生绿泥石的晶形较好、体积较大;同时,相对早期自生绿泥石的铁含量相对较高,而相对晚期自生绿泥石的铁含量相对较低^[2,7]。目前,尽管储层砂岩中自生绿泥石包膜已经获得人们越来越多的关注,但人们对自生绿泥石包膜的分类和成因仍然知之甚少。Bloch 等^[5]曾区分出四种不同形成方式的自生绿泥石包膜:①浅海砂岩中沉积控制的富铁绿泥石包膜、②浊积岩中沉积控制的绿泥石包膜、③物源控制的富铁绿泥石包膜、④先驱粘土/氧化铁颗粒环边与下伏蒸发岩富镁盐含盐卤水互相作用形成的富镁绿泥石,但上述总结更多的是对目前砂岩中自生绿泥石包膜几个典型例子的精要描述,并不足以从本质上归纳砂岩中自生绿泥石包膜的成因机制。实际上,自生绿泥石包膜成因研究中的一个核心内容是在于解决自生绿泥石形成过程中 Fe、Mg 等元素来源问题,但在漫长的复杂成岩过程中 Fe、Mg 等元素来源却是多种多样,故自生绿泥石包膜的成因解释也是种类繁多。然而,在较大程度上对储层原生孔隙具有保存意义的自生绿泥石包膜可能是在同生(准同生)或相对早期成岩过程中形成的,而后期形成的自生绿泥石包膜更多可能是起到充填原生孔隙的作用,因而从自生绿泥石包膜形成时间及其对储层原生孔隙演化影响的角度,可以总结两类自生绿泥石包膜:早期自生绿泥石包膜、晚期自生绿泥石包膜。

一般而言,砂岩中自生绿泥石包膜可能与以下三种具体成因有关:①先驱粘土矿物的转化或重结晶、②碎屑物质的交代、③孔隙流体的沉淀^[8];前一

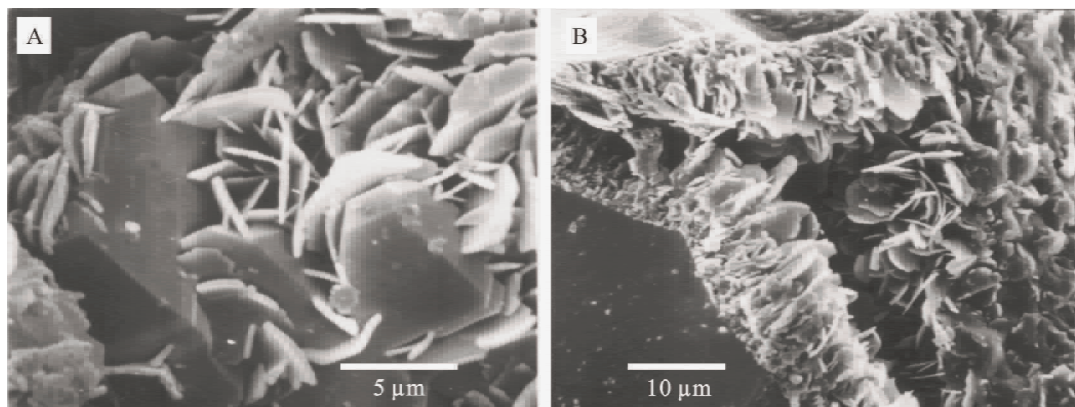


图 1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩中自生绿泥石包膜的扫描电镜照片(据文献[7])

Fig. 1 SEM graphs of authigenic chlorite coatings in the Triassic Yanchang Formation sandstones of the Ordos Basin(after ref. [7])

种显然形成早期成因的自生绿泥石包膜,目前较常见先驱粘土矿物是蒙皂石,这些蒙皂石主要来自于砂岩中先于自生绿泥石形成的颗粒环边或颗粒包膜,同时一些早期细结构绿泥石的新生变形^[9]、富铁钛云母和磁绿泥石粘土的重结晶^[10,11]也可形成后期出现的自生绿泥石包膜,其后实验结果也进一步证实:薄的、不连续的磁绿泥石包膜在大约 90℃ 时发生重结晶形成厚的、连续的富铁绿泥石包膜^[12];后两种则更多地形成晚期成因的自生绿泥石包膜(当然也可以形成一部分早期成因的自生绿泥石包膜),它们主要与火山岩岩屑、火山碎屑、黑云母和长石等碎屑物质的蚀变和溶解作用有直接关系^[12,13],这些碎屑物质可以为自生绿泥石的形成提供大量的铁、镁、硅和铝离子来源,尤其是铁镁暗色矿物。除了需要必要的物质条件外,自生绿泥石包膜的形成还需要一个相对高孔渗、开放的砂体,这通常表现为自生绿泥石包膜的出现与沉积环境密切相关,如巴基斯坦 Sawan 气田白垩系 Goru 组下部自生绿泥石包膜只分布在近源三角洲前缘的浅海环境沉积物中,而临滨-远滨的浅海环境沉积物中则缺乏自生绿泥石包膜^[2];加拿大东部 Scotian 盆地下白垩统自生绿泥石包膜在分选好的三角洲前缘砂岩中发育最好、在具有薄层泥质纹层或强烈生物扰动的三角洲前缘砂岩中发育较差、在河流-河口湾砂岩中不发育,同时发育好的自生绿泥石包膜在海侵沟蚀面之下的生物扰动泥质砂岩中也常见^[14];我国南海珠江口盆地古近系珠江组中富自生绿泥石砂岩也与三角洲前缘分流河道直接相关^[15]。虽然目前世界上自生绿泥石包膜保存砂岩储层原生孔隙的几个典型例子均来自海相三角洲和近岸海相砂岩^[10,13],其它也可与蒸发岩沉积^[16]、火山岩屑和火山玻璃蚀变^[9,17]有关,但在我国一些沉积盆地的陆相储层砂岩中自生绿泥石包膜却与具有一定盐度的大型湖泊三角洲有密切关系,如鄂尔多斯盆地三叠系延长组(当然,这些砂岩中也出现较多的中基性火山物质)^[7,18,19]、四川盆地三叠系须家河组^[20,21]、塔里木盆地三叠系^[22]、准噶尔盆地侏罗系^[23]、渤海湾盆地古近系^[24]等。

目前,自生绿泥石包膜作为石英胶结作用抑制剂的有效性已经得到了大量经验数据和最近实验结果的支持^[1]。在发育自生绿泥石包膜的深埋藏砂岩中,碎屑颗粒之间往往以点接触和线接触为主,砂岩经受的压实程度较弱,但在相同深度、不发育自生绿泥石包膜的砂岩中,碎屑颗粒之间往往表现为凹凸接触、甚至部分可以达到缝合线接触,砂岩所受的压

实程度往往非常强烈,两者形成鲜明对比,因而自生绿泥石包膜在很大程度上可以增强砂岩的抗机械压实能力、抑制诸如充填原生孔隙的自生石英的成核作用从而对砂岩原生孔隙具有保存作用^[5,25],其中最为明显的例子为美国阿拉巴马州侏罗系 Norphlet 组风成砂岩:自生绿泥石包膜连续性好、深埋藏、分选好的石英砂岩有超过 20% 的粒间孔隙度,而自生绿泥石包膜连续性差的类似石英砂岩却只有少于 2% 的粒间孔隙度^[26]。但值得注意的是,人们对自生绿泥石包膜是如何保存砂岩原生孔隙仍然存有较多争议,目前至少有三种不同的物理和化学机制观点^[27]:①自生绿泥石包膜抑制了砂岩中石英压溶作用^[28]、②自生绿泥石包膜明显抑制了自生石英生长^[29,30]、③自生绿泥石包膜阻止了自生石英在碎屑石英的表面成核^[7,10,12,31]。不过,目前有关研究更多地倾向于自生绿泥石包膜明显抑制了自生石英生长,Billault 等^[27]通过扫描电镜和透射电子显微镜观察发现:自生绿泥石包膜晶体之间存在大量晶间孔隙,不能真正地将孔隙流体与碎屑石英颗粒表面分开,自生绿泥石包膜并不能阻止自生石英在碎屑石英的表面成核,但由于自生石英的生长需要相对充分的空间,因而自生绿泥石包膜的大量形成很可能限制了自生石英晶体从基底石英向粒间孔隙生长的自由空间。

2 微晶石英包膜

自生石英晶体在碎屑石英表面成核,当晶体方位与碎屑石英颗粒相同时即为石英次生加大^[17],当晶体方位随机、且像包膜一样包裹了碎屑石英颗粒时即为微晶石英包膜^[29]。微晶石英包膜与自生绿泥石包膜相似,覆盖在碎屑石英颗粒表面上(图 2A)。微晶石英包膜由一层大约 1~15 μm 、棱柱状石英晶体构成,其中晶体 c 轴方向任意(图 2B)^[1]。由于微晶石英晶粒很小—多在微米级,其在岩石薄片很难使用标准光学显微镜进行观察,因而需要使用标准扫描电镜二次电子像进行识别。这些覆盖在碎屑石英颗粒表面上的微晶石英包膜已经被越来越多的经验、理论和实验证实是深埋藏储层砂岩中异常低含量石英次生加大的一个重要原因^[32],但人们对这些深埋藏储层砂岩中微晶石英包膜本质的理解仍然模糊不清。目前,这些微晶石英抑制充填孔隙的石英次生加大生长的表观能力可能与其晶体生长机制有关^[32]:微晶石英晶体的随机 c 轴方向可能会阻止它们结合成更大的共轴石英加大^[33],而且一旦微晶石英晶体形成自形形状,其生长速度就会大

幅度变慢^[34],从而使得微晶石英基底上的石英成核及其生长速度要明显慢于单晶石英宿主上的石英成核及其生长速度^[32,35,36];但也有学者认为微晶石英包膜对石英次生加大的抑制作用在于微晶石英具有更大的溶解度使得孔隙水中硅的饱和度增加,从而抑制了缝合线中石英的溶解、且限制了微晶石英的进一步生长^[37,38]。

一般情况下,这些微晶石英的细小晶粒形态被认为是硅离子在过饱和溶液中快速结晶的结果,海相砂岩中硅质海绵骨针的溶解、海相或其它砂岩中非晶质富硅火山玻璃的溶解都是在相对低温条件下形成和保持溶解硅浓度升高和过饱和的可能机制^[1,37],如在出现大量微晶石英包膜的北海侏罗系和白垩系浅海砂岩中经常可以看到丰度不同的硅质海绵骨针^[37,38],但也有一些学者认为微晶石英包膜的硅来源是邻近页岩脱水作用的结果^[39]。由于微晶石英包膜的形成依赖于大量的成核点,因而其形成过程需要高浓度的溶解硅,但并非必然与沉淀过程中溶解硅的总量有关,砂岩内部溶解硅的快速释放速率或溶解硅进入砂岩的高通量速率只会有利于蛋白石胶结物的形成,而在较慢释放速率或较低通量速率的情况下,类似数量的溶解硅则可以形成微

晶石英^[40]。不过,在很多情况下,瞬时高浓度溶解硅的出现会导致在大量微晶石英晶体沉淀之前,碎屑石英颗粒表面上往往会先沉淀一层厚度不定的蛋白石包膜,其厚度则控制了后来的流体接近碎屑石英晶格的通道,而在具有不同厚度蛋白石包膜的碎屑石英上可以形成不同类型的微晶石英^[40]:薄的蛋白石包膜可以允许蛋白石重结晶成为隐晶质石英,而这些隐晶质石英具有与碎屑宿主一样的晶体连续性,并导致每一个碎屑颗粒上的绝大多数微晶石英晶体后来都具有同一方位,而这些规则的微晶石英晶体容易融合成为更大的晶体单元,这是向大晶体石英次生加大的一个步骤,并最终阻塞绝大多数的原生孔隙;厚的蛋白石包膜将不允许生长的石英晶体具有与碎屑宿主一样的晶体连续性,从而形成晶体方位随机的微晶石英,其随机的晶体方位可以防止或抑制了许多细小晶体单元集中生长、融合成为更大的生长单元,并最终保存绝大多数的原生孔隙。当然,微晶石英包膜厚度的增加也可使晶体方位随机的微晶石英出现的可能性增加,且新的微晶石英晶体的持续成核作用会导致微晶石英晶体相对于下方的碎屑石英颗粒发生细小错位或者结晶学控制下的c轴旋转^[33]。

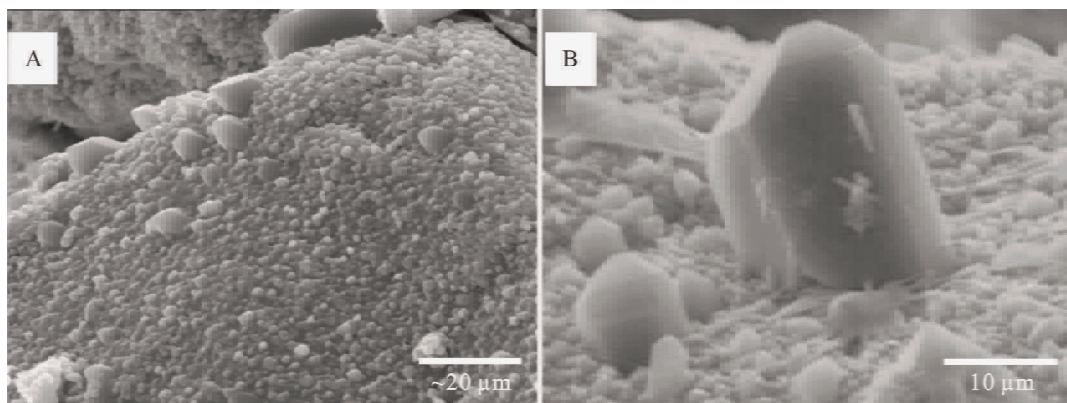


图2 北海侏罗系砂岩中微晶石英包膜的扫描电镜照片(据文献[1])

Fig. 2 SEM graphs of microcrystalline quartz coatings in the Jurassic sandstones of the North Sea(after ref. [1])

在北海侏罗系和白垩系^[37,38,41,42]、巴西西部泥盆系^[43]的深埋藏储层砂岩中,微晶石英包膜发育较好的砂岩具有明显较低的石英次生加大含量和较高的粒间孔隙度,而缺乏良好微晶石英包膜的砂岩则具有较高的石英次生加大含量和较低的粒间孔隙度,如在北海 Graben 中部 3500~4300 m 深的上侏罗统发育微晶石英包膜砂岩中孔隙度均维持在 20% 附近,而同一层位 4200 m 深、未出现微晶石英包膜的砂岩中孔隙度仅为 11%^[37,41],因而越来越多的学者肯定和重视微晶石英包膜通过抑制充填孔隙

的石英加大形成而保存砂岩原生孔隙的积极意义^[37,41,42]。但值得注意的是,近来一些研究认为并非所有的微晶石英包膜都可以保存储层原生孔隙:当微晶石英晶体相对碎屑石英颗粒发生随机错位时,微晶石英包膜可以阻碍后期的次生石英加大、并对砂岩储层原生孔隙具有保存意义,而当微晶石英晶体方位未出现错位时,微晶石英包膜之上可能会继续出现后期的石英次生加大而对砂岩储层原生孔隙保存无效^[44];甚至还有学者认为微晶石英包膜对砂岩储层性质并没有实质性影响^[45]。

3 其它颗粒包膜

除了上述最常见且对深埋藏砂岩储层原生孔隙保存最有意义的自生绿泥石包膜和微晶石英包膜外,砂岩中其它比较常见的碎屑颗粒包膜包括自生伊利石、混层粘土、沥青和蛋白石等包膜^[46]。目前,沥青等烃类物质对深埋藏条件下砂岩储层原生孔隙保存作用的报道比较多,这些研究也列举了烃类占位保存砂岩储层原生孔隙的很多证据^[45],但其中具有说服力的实例比较罕见^[47],因而烃类占位是否可以保存砂岩储层原生孔隙仍需要更深入的研究。自生伊利石包膜在以往的一些研究中长期被认为对储层性质具有严重的破坏性影响,特别是当束缚水饱和度和毛细管压力增大时,伊利石纤维的高表面积、孔桥结构以及与微孔隙的重要关联使得砂岩渗透率大幅降低^[48,49];同时,伊利石纤维趋向于单缕状生长、并可以在原生孔隙空间中很好地延伸,从而明显增加流动路径的弯曲度^[50,51]、占据更大比例的大孔隙体积^[46]。不过,近年已经有学者逐渐开始怀

疑自生伊利石包膜对储层性质破坏的绝对性,自生伊利石包膜对深埋藏砂岩储层原生孔隙的保存也可能具有建设性意义^[46,52],它们同样具有抑制石英次生加大而保存原生孔隙的作用(图 3A),如在挪威中部海岸 Kristin 和 Lavrans 油田侏罗系 Garn 组储层砂岩中自生伊利石包膜和伊利石/绿泥石混层包膜对原生孔隙具有很好的保存作用,其孔隙度可高达 18%~20%^[46]。对于蛋白石而言,它们似乎很难在古老的深埋藏砂岩中得以保存,涉及对砂岩碎屑颗粒表面上蛋白石包膜的研究少之又少,但近年已经有学者注意到蛋白石包膜的独特性,如 Stokkendal 等^[53]和 Weibel 等^[40]曾对丹麦北海 Siri 峡谷地区古近系砂岩中早期成岩二氧化硅和石英的形态进行了系统研究,他们发现蛋白石包膜既可以很厚、且覆盖在所有碎屑颗粒表面,又可以很薄、仅出现于碎屑石英颗粒表面,并观察到厚层蛋白石包膜具有稳定骨架颗粒和保存大量原生孔隙的作用,而且孔隙流体中溶解硅浓度的持续下降会导致后来的微晶石英晶体沉淀在蛋白石包膜之上(图 3B)。

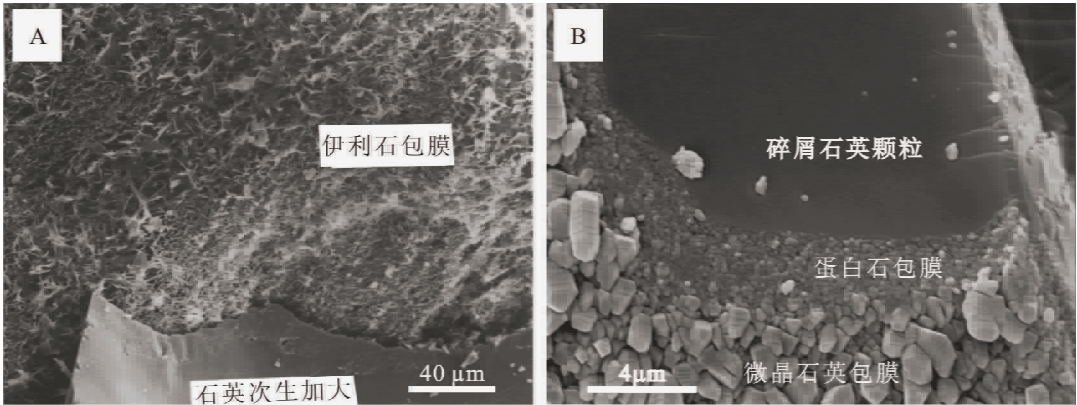


图 3 (A)挪威中部海岸侏罗系砂岩中伊利石包膜的扫描电镜照片(据文献[46]);
(B)北海古近系砂岩中蛋白石包膜的扫描电镜照片(据文献[40])

Fig. 3 (A) SEM graphs of illite coatings in Jurassic sandstones of the offshore Mid-Norway(after ref. [46])
(B)SEM graphs of opal coatings in Paleogene sandstones of the North Sea(after ref. [40])

4 颗粒包膜对砂岩储层质量的影响

目前,碎屑颗粒表面上的自生绿泥石包膜、微晶石英包膜或其它颗粒包膜作为石英次生加大胶结作用抑制剂的有效性已经得到了大量经验数据和最近实验结果的支持^[1],但值得注意的是:颗粒包膜仅仅可以抑制石英次生加大,而对其它胶结物的沉淀作用没有直接影响,因而在砂岩埋藏过程中颗粒包膜对主要由碳酸盐、硫酸盐或者沸石等胶结物控制储层质量的砂岩的原生孔隙保存没有直接影响^[17];同时,颗粒包膜对矿物成分上不成熟砂岩的原生孔隙

保存也很少有明显影响,这是因为这些砂岩的石英胶结物沉淀作用通常可以忽略不计^[5]。尽管颗粒包膜只是通过抑制砂岩储层中石英次生加大的生长来实现原生孔隙的保存,但这一机制却往往十分有效,深埋藏砂岩储层中保存的大量原生孔隙大多与早成岩期间形成的颗粒包膜有着密切的关系,如北海挪威大陆架侏罗系砂岩中石英次生加大胶结物含量与自生绿泥石包膜覆盖率呈明显的负相关关系(图 4A)、粒间孔隙体积与自生绿泥石包膜覆盖率呈较明显的正相关关系(图 4B)^[5]。

尽管颗粒包膜可以为原生孔隙的保存提供重要

支撑,但并不是在任意情况下颗粒包膜都可以发挥原生孔隙保存的作用。由于深埋藏条件下砂岩中颗粒包膜对原生孔隙保存作用的大小往往是颗粒包膜出现时间和完整性、碎屑粒径、碎屑石英丰度、区域热史的函数^[47,54],因而判断颗粒包膜对原生孔隙保存作用的大小是一个的需要考虑很多不同参数的复杂过程。当然,如果人们可以假定是在相同的碎屑粒径、碎屑石英丰度、区域热史情况下,那么上述过程则可以大大简化,只需要考虑颗粒包膜本身因素就可以为判断颗粒包膜对原生孔隙保存作用大小提供重要参考。颗粒包膜对砂岩原生孔隙保存作用大小的具体控制因素可能包括以下几个方面:

(1)颗粒包膜的形成时间。颗粒包膜形成的时间早晚对砂岩的储层质量有着重要影响,颗粒包膜的形成时间越早,它们抑制石英次生加大发育的能力就越有效;而如果颗粒包膜形成于大量石英次生加大出现之后,那么它们对原生孔隙的保存作用就

基本没有直接贡献。

(2)颗粒包膜的产状。颗粒包膜的产状对深埋藏砂岩储层原生孔隙保存作用影响最大的可能是微晶石英包膜,相对碎屑石英颗粒的晶体方位一致性或者随机性对微晶石英晶体抑制后来石英次生加大发育与否至关重要。如果微晶石英晶体方位随机,则可以抑制石英次生加大的发育、保存砂岩储层原生孔隙,反之则无效。

(3)颗粒包膜的含量、厚度及完整性。如果颗粒包膜的含量太少、厚度太薄或完整性差,那么颗粒包膜将不能有效地占据结晶基底或充当保护屏障而无法有效抑制石英次生加大的发育,大量石英次生加大占据砂岩储层原生孔隙。当然,颗粒包膜的含量不能过多或厚度不能过厚,否则不断膨胀的颗粒包膜体积也会占据大量砂岩储层原生孔隙,也不利于后期次生孔隙的发育。

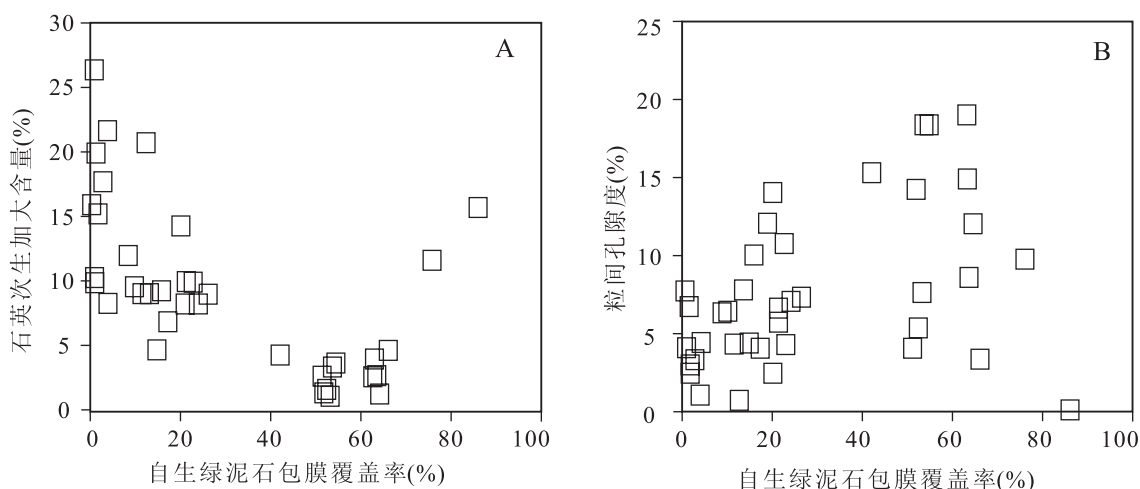


图4 挪威大陆架侏罗系砂岩中自生绿泥石包膜覆盖率与石英次生加大含量、粒间孔隙度关系图(据文献[5])

Fig. 4 Cross plots of quartz overgrowth cement, intergranular porosity versus chlorite coatings coverage in the Jurassic sandstones of the Norwegian continental shelf(after ref. [5])

5 结 语

颗粒包膜对深埋藏砂岩储层原生孔隙所具有的重要保存作用越来越为大家所接受,尤其是自生绿泥石包膜和微晶石英包膜已得到了国内外沉积地质学家和石油地质学家的重视,寻找和预测被颗粒包膜保存下来的异常高孔隙度、高渗透率深埋藏砂岩储层已经成为了油气勘探工作的重要内容之一。但目前人们对深埋藏储层砂岩中颗粒包膜及其原生孔隙保存机制的认识更多地是处于定性一半定量的过渡阶段、很少有真正意义上的定量研究,尤其是对深埋藏储层砂岩中颗粒包膜及其原生孔隙保存

机制的成因、过程和影响仍然一知半解、甚至知之甚少,即使是自生绿泥石包膜、微晶石英包膜等人们已经熟知的颗粒包膜类型及其原生孔隙保存机制也仍然存在很多问题没有解决。对深埋藏储层砂岩中颗粒包膜本质的清晰认识和深入理解是人们难以实现深埋藏储层砂岩中颗粒包膜类型、数量和作用等方面准确钻前预测的一个难题,这也直接影响到了人们更为关注的钻前储层质量的准确预测。事实上,尽管目前与颗粒包膜有关的高孔隙度、高渗透率深埋藏砂岩储层预测需要依赖于经验数据的可用性,但越来越多的学者开始利用沉积学模型和成岩作用模型评估某些特定油气田或远景区的地质条件对保

存经济上可行的孔隙度和渗透率所需颗粒包膜产状和完整性的影响,因而从孔隙尺度到盆地尺度的不同尺度数值模拟越来越成为沉积地质学家和油气地质学家研究深埋藏储层砂岩中颗粒包膜及其原生孔隙保存机制不可多得的手段之一,也将是今后砂岩储层质量风险评估的主要挑战之一。

参考文献 (References):

[1] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, Diggs T N, Braunsdorf N R, Birbiglia G V, Kittridge M G, Macaulay C I, Espejo I S. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94: 1093—1132.

[2] Berger A, Gier S, Krois P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: Evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan gas field, Pakistan [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93: 595—615.

[3] 顾家裕, 张兴阳, 郭彬程. 塔里木盆地东河砂岩沉积和储层特征及综合分析[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 285—294.

Gu Jiayu, Zhang Xingyang, Guo Bincheng. Characteristics of sedimentation and reservoir of the Donghe Sandstone in Tarim Basin and their synthetic analysis[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 285—294. (in Chinese with English abstract)

[4] 郭建华, 石媛媛, 刘辰生, 朱锐. 塔里木盆地阿克库勒凸起西缘东河砂岩储集物性非均质性研究[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 406—411.

Guo Jianhua, Shi Yuanyuan, Liu Chensheng, Zhu Rui. Heterogeneity of Donghe sandstone on the western margin of Akekule uplift[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 406—411. (in Chinese with English abstract)

[5] Bloch S, Lander R H, Bonnell L M. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 301—328.

[6] Wilson M D, Pittman E D. Authigenic clays in sandstones: Recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1977, 47: 1—31.

[7] 黄思静, 谢连文, 张萌, 武文慧, 沈立成, 刘洁. 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, Wu Wenhui, Shen Licheng, Liu Jie. Formation mechanism of authigenic chlorite and 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. (in Chinese with English abstract)

[8] 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 李平平, 宋立军. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律[J]. 矿物岩石地球化学通

报, 2008, 27(2): 200—205.

Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, Li Pingping, Song Lijun. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2): 200—205. (in Chinese with English abstract)

[9] Anjos S M C, De Ros L F, Silva C M A. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore eastern Brazil[A]. Worden R H, Morad S, eds. Clay mineral cements in sandstones[M]. Oxford: Blackwell Science, 2003: 291—316.

[10] Ehrenberg 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: 1260—1286.

[11] Ryan P C, Reynolds Jr R C. The origin and diagenesis of grain-coating serpentine-chlorite in Tuscaloosa Formation sandstone, U. S. Gulf Coast[J]. The American Mineralogist, 1996, 81: 213—225.

[12] Aagaard P, Jahren J S, Harstad A O, Nilsen O, Ramm M. Formation of grain-coating chlorite in sandstones: Laboratory synthesized vs. natural occurrences [J]. Clay Minerals, 2000, 35: 261—269.

[13] 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: 27—36.

[14] Gould K, Pe-Piper G, Piper D J W. Relationship of diagenetic chlorite rims to depositional facies in Lower Cretaceous reservoir sandstones of the Scotian Basin[J]. Sedimentology, 2010, 57: 587—610.

[15] Chen G J, Du G C, Zhang G C, Wang Q, Lv C F, Chen J. Chlorite cement and its effect on the reservoir quality of sandstones from the Panyu low-uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Science, 2011, 8: 143—150.

[16] Hillier S, Fallick A E, Matter A. Origin of pore-lining chlorite in the eolian Rotliegend of northern Germany[J]. Clay Minerals, 1996, 31: 153—173.

[17] Pittman E D, Larese R E, Heald M T. Clay coats: Occurrence and relevance to preservation of porosity in sandstones [A]. Houseknecht D W, Pittman E D. Origin, diagenesis, and petrophysics of clay minerals in sandstones[M]. Tulsa: SEPM Special Publication 47, 1992: 241—264.

[18] 兰叶芳, 黄思静, 吕杰. 储层砂岩中自生绿泥石对孔隙结构的影响—来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组的研究结果[J]. 地质通报, 2011, 30(1): 134—140.

Lan Yefang, Huang Sijing, Lü Jie. Influences of authigenic chlorite on pore structure in sandstone reservoir: A case study from Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(1): 134—140. (in Chinese with English abstract)

[19] 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. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙治雷, 黄思静, 张玉修, 王庆东, 包申旭, 孙致学. 四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化[J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 459—468.
Sun Zhilei, Huang Sijing, Zhang Yuxiu, Wang Qingdong, Bao Shenxu, Sun Zhixue. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 459—468. (in Chinese with English abstract)
- [21] 谢武仁, 杨威, 赵杏媛, 魏国齐, 谢增业, 金惠, 陈刚. 川中地区须家河组绿泥石对储集层物性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 674—679.
Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, Wei Guoqi, Xie Zengye, Jin Hui, Chen Gang. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe Formation in the central part of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 674—679. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘辰生, 田永强, 郭建华. 阿克库勒地区三叠系储集层成岩作用[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(1): 62—64.
Liu Chensheng, Tian Yongqiang, Guo Jianhua. Diagenesis of Triassic reservoir in Arkekule area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(1): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王芙蓉, 何生, 何治亮, 张福顺. 准噶尔盆地腹部永进地区深埋侏罗系砂岩内绿泥石包膜对储层物性的影响[J]. *大庆石油学院学报*, 2007, 31(2): 24—27, 124.
Wang Furong, He Sheng, He Zhiliang, Zhang Fushun. Effect of gain-coating chlorite on reservoir property of Yongjin area in the centre of Junggar Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2007, 31(2): 24—27, 124. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵明, 陈小明, 季峻峰, 张哲, 张耘. 济阳坳陷古近系原型盆地中绿泥石的成分演化特征及其盆地古地温梯度[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(9): 1141—1149.
Zhao Ming, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, Zhang Zhe, Zhang Yun. Evolution of chlorite composition in the Paleogene prototype basin of Jiyang Depression, Shandong, China, and its implication for paleogeothermal gradient[J]. *Science in China (D)*, 2007, 50(11): 1645—1654.
- [25] 黄思静, 黄培培, 王庆东, 刘昊年, 吴萌, 邹明亮. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(3): 7—13.
Huang Sijing, Huang Peipei, Wang Qingdong, Liu Haonian, Wu Meng, Zou Mingliang. The significance of cementation in porosity preservation in deep-buried sandstones[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(3): 7—13. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ajdukiewicz J M, Lander R H. Sandstone reservoir quality prediction: The state of the art[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94: 1083—1091.
- [27] Billault V, Beautort D, Baronnet A, Lacharpagne J C. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs[J]. *Clay Minerals*, 2003, 38: 315—328.
- [28] Pittman E D, Lumsden D N. Relationship between chlorite coatings on quartz grains and porosity, Spiro Sand, Oklahoma[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38: 668—670.
- [29] Heald M T, Larese R E. Influence of coatings on quartz cementation[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, 44: 1269—1274.
- [30] Imam M B. Scanning electron microscopy study of the quartz overgrowths within Neogene sandstones of Bengal Basin, Bangladesh[J]. *Journal of Geological Society of India*, 1986, 28: 407—413.
- [31] 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. (in Chinese with English abstract)
- [32] Lander R H, Bonnell L M, Larese R E. Why do microquartz coatings preserve sandstone reservoir quality? [A]. Houston: AAPG Annual Convention Abstracts[C]. 2006, 15: 60.
- [33] Haddad S C, Worden R H, Prior D J, Smalley P C. Quartz cement in the Fontainebleau sandstone, Paris Basin, France: Crystallography and implication for mechanisms of cement growth[J]. *J. Sedimentary Res.*, 2006, 76: 244—256.
- [34] Lander R H, Larese R E, Bonnell L M. Toward more accurate quartz cement models: The importance of euhedral versus noneuhedral growth rates[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92: 1537—1563.
- [35] Bonnell L, Larese R E, Lander R H. Hydrocarbon versus microquartz inhibition of quartz cementation in North Sea sandstones: Empirical and experimental evidence[A]. Houston: AAPG Annual Convention Abstracts[C]. 2006, 15: 12.
- [36] Bonnell L, Lander R H, Larese R E. Porosity preservation by inhibition of quartz cementation: Microquartz versus hydrocarbons [EB/OL]. AAPG Search and Discovery, [http://www. Searchanddiscovery. com/abstracts/pdf/2006/intl _ perth/abstracts /ndx_bonnell. pdf](http://www.Searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2006/intl_perth/abstracts/ndx_bonnell.pdf), 2006.
- [37] Aase N E, Bjorkum A, Nadeau P H. The effect of grain-coating microquartz on preservation of reservoir porosity[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80: 1654—1673.
- [38] Aase N E, Walderhaug O. The effect of hydrocarbons on quartz cementation: Diagenesis in the Upper Jurassic sandstones of the Miller field, North Sea, revisited[J]. *Petrole-*

- um Geoscience, 2005, 11: 215—223.
- [39] Spark I S C, Trewin N H. Facies related diagenesis in the main Claymore oilfield sandstones[J]. Clay Minerals, 1986, 21: 479—496.
- [40] Weibel R, Friis H, Kazerouni A M, Svendsen J B, Stokkendal J, Poulsen M L K. Development of early diagenetic silica and quartz morphologies-Examples from the Siri Canyon, Danish North Sea[J]. Sedimentary Geology, 2010, 228: 151—170.
- [41] Ramm M, Forsberg A W, Jahren J J. Porosity-depth trends in deeply buried Upper Jurassic reservoirs in Norwegian Central Graben: An example of porosity preservation beneath the normal economic basement by grain coating microquartz[A]. Kupecz J A, Gluyas J, Bloch S, eds. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates [M]. Tulsa: AAPG Memoir 69, 1997: 177—199.
- [42] Jahren J, Ramm M. The porosity-preserving effects of microcrystalline quartz coatings in arenitic sandstones: Examples from the Norwegian continental shelf[A]. In: Worden R H, Morad S, eds. Quartz cementation in sandstones [M]. Oxford: Blackwell Science, 2000: 271—280.
- [43] Lima R D, De Ros L R. The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimões Basin, Brazil Amazonia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 1047—1071.
- [44] Worden R H, Haddad S C, Prior D J, Smalley P C. Microquartz grain coatings and inhibited quartz cementation: An EBSD study of the way microquartz cement grows[A]. Long Beach: AAPG Annual Convention & Exhibition [C]. 2007, 16: 152.
- [45] Marchand A M E, Haszeldine R S, Macaulay C I, Swennen R, Fallick A E. Quartz cementation inhibited by crestal oil charge: Miller deep water sandstone, UK North Sea[J]. Clay Minerals, 2000, 35: 201—210.
- [46] Storvoll V, Bjørlykke K, Karlsen D, Saigal G. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: A study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 767—781.
- [47] Walderhaug O. Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80: 732—745.
- [48] Kantorowicz J D. The influence of variations in illite morphology on the permeability of Middle Jurassic Brent Group sandstones, Cormorant field, U. K. North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 1990, 7: 66—74.
- [49] Bjørlykke K, Nedkvitne T, Ramm M, Saigal G C. Diagenetic processes in the Brent group[A]. Morton A C, Haszeldine R S, Giles M R, Brown S. Geology of the Brent Group [M]. London: Geological Society Special Publication 61, 1992: 263—288.
- [50] Cocker J D. Authigenic illite morphology: Appearances can be deceiving[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70: 575.
- [51] Panda M N, Lake L W. A physical model of cementation and its effects on single-phase permeability[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 431—443.
- [52] Ajdukiewicz J M, Nicholson P H, Esch W L. Prediction of deep reservoir quality from early diagenetic process models in the Jurassic eolian Norphlet Formation, Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94: 1189—1227.
- [53] Stokkendal J, Friis H, Svendsen J B, Poulsen M L K, Hamberg L. Predictive permeability variations in a Hermod sand reservoir, Stine Segments, Siri Field, Danish North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 397—415.
- [54] Bonnell L M, Lander R H, Sundhaug C. Grain coatings and reservoir quality preservation: Role of coating completeness, grain size and thermal history[A]. Salt Lake City: AAPG Annual Convention Program with Abstracts [C]. 1998, 7: A81.