

文章编号 :1000-0550(2001)02-0239-06

砂岩早期核心式碳酸盐胶结作用的成像测井证据

钟广法 马在田

(同济大学海洋地质教育部重点实验室 上海 200092)

摘要 早期碳酸盐胶结作用是库车坳陷新生界浅埋藏河流相砂岩内除机械压实外目前正在进行的主要成岩作用,高分辨率电阻率成像测井资料为研究其特征及成因提供了重要的地球物理证据。在电阻率成像测井图像上,早期碳酸盐胶结物呈圆形、椭圆形或不规则斑块状、葡萄状等形态出现,多数顺层理方向分布,其产状有孤立状或分散状斑块、断续胶结纹层和连续胶结纹层等。它们可以发育于砂岩层顶部或底部,也可以与疏松未胶结或弱胶结砂岩呈互层或夹层状交替分布。早期碳酸盐胶结物的沉淀采取核心式胶结模式,即胶结物首先围绕少数核心沉淀,呈斑块状逐渐向外增生,直至从各个核心生长出来的碳酸盐胶结斑块相互靠近和连生导致砂岩层被完全胶结为止。砂体或砂层被碳酸盐胶结的过程遵循由外向内(由砂体边缘向砂体中心)、由高渗透纹层向低渗透纹层、由局部胶结核心向周围孔隙增生的规律。

关键词 砂岩 胶结作用 碳酸盐矿物 电阻率成像测井 塔里木盆地

第一作者简介 钟广法 男 1964 年出生 副教授 博士研究生 沉积学与固体地球物理

中图分类号 P631.8⁺11 P588.2 文献标识码 A

砂岩早期碳酸盐胶结作用的研究具有重要意义,因为早期碳酸盐胶结物可以使砂岩颗粒填集保持稳定,免遭压实作用的进一步破坏;更重要的是,在深埋藏阶段,早期碳酸盐胶结物被酸性孔隙水溶解,导致孔隙空间重新释放(形成次生孔隙),可以有效地改善砂岩的储集条件^[1]。但是,以往关于砂岩碳酸盐胶结作用的研究大多以油气勘探开发的实际需要为背景,研究重点放在深部砂岩储层内碳酸盐胶结物对储集性能、孔隙演化、流体渗滤及非均质性等的影 响方面,对砂岩早期碳酸盐胶结作用的研究则关注较少,有限的关于砂岩早期碳酸盐胶结作用的认识主要是根据薄片和露头观察得到的岩石学结构特征及地球化学方法推断得出的^[1~4]。本文利用高分辨率电阻率成像测井资料,对库车坳陷新生界埋深仅数百米的河流相砂岩内早期碳酸盐胶结物的特征及形成机理予以探讨。电阻率成像测井技术是 20 世纪 80 年代中期以来在传统的地质倾向测井技术基础上发展起来的、目前分辨率最高的地球物理测井技术,已成功地应用于裂缝识别、油藏描述、沉积构造分析等地下地质研究中^[5~8],但迄今未见用于成岩作用研究的先例。

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,是叠合在古生代塔里木克拉通盆地基础之上的一个中生代以陆相沉积为主的大型前陆坳陷。本文研究材料取自该坳陷西

北部某背斜构造上的 DWX 井,该井钻探深度为 672 m,自下而上钻揭第四系(深度 0~290 m)和上第三系康村组(深度 >290 m)。根据录井资料及岩心观察(录井深度始于 180 m),第四系和康村组岩性特征相似,均由褐色泥岩与灰色—浅灰色砂岩、含砾砂岩交互组成,砂岩自然伽玛曲线(GR)呈钟形或箱形,泥岩 GR 较高,呈平直形,分别解释为河道充填和泛滥平原沉积。砂岩类型为岩屑砂岩,其平均碎屑组成为:石英 31%,长石 10%,岩屑 59%。由于形成时间短且埋藏浅,故砂岩成岩作用弱,除机械压实外,主要是碳酸盐的胶结作用。据 69 块砂岩薄片鉴定资料统计,碳酸盐胶结物含量变化大,从 0~32% 不等,但多数(53.6%)在 5% 以下,平均含量为 6.7%;以粒状亮晶方解石为主,含少量泥—微晶方解石及白云石,胶结类型主要为孔隙充填式,但碳酸盐胶结物分布不匀,常局部富集,构成连晶式胶结(特别是在碳酸盐胶结物含量较高的薄片 中)。

2 成像测井资料处理与解释

2.1 成像测井资料采集与处理方法简介

电阻率成像测井仪探测的是井壁深度约 1.4 cm 范围内地层的电阻率变化^[5],它们一般由两个到六个极板组成,每个极板上安装有等量的“纽扣”电极(button electrodes)。测量时极板被推靠紧贴井壁,每个电极记录下它所掠过地层之电阻率随深度的变化,所有

电极同时记录便得到多条曲线;这些曲线共同构成一个庞大的数字矩阵,经过数据恢复、图像生成和图像增强等一系列处理后,转换为能够揭示井壁地层微细结构特征的二维电阻率图像^[5-6]。不同的仪器由于极板个数和电极个数的差异,测井时所能探测的井壁范围(覆盖率)各不相同,一般在20%~80%之间。经过处理后得到的电阻率成像测井图像用彩色色标或灰度系列表示地层电阻率的相对大小,图像颜色或灰度愈深,表示电阻率愈低,反之,则愈高。图像的显示方式一般为井壁二维展开图,即沿井轴方向“剖开”,从左到右按北(0°)—东(90°)—南(180°)—西(270°)—北(360°)的方位顺序,将井壁电阻率图像展开在平面图上。解释中常用的图像有两种类型:静态图像和动态图像。前者为全井段统一配色作归一化处理,每一种颜色或灰度代表固定的电阻率变化范围,它反映的是整个测量井段电阻率的相对变化;后者则是在小范围内(例如每隔0.5 m)采用动态图像增强算法作归一化处理,以使地层的微细结构特征得以更清晰的显示出来^[5-6]。

电阻率成像测井仪各“纽扣”电极的分辨率为5 mm。由于仪器测量时在井轴及井周方向上的采样间隔均为2.5 mm,故所生成图像的像素大小为2.5 mm×2.5 mm,尺寸小于一个像素的特征因在图像上无法分开而作为一个像素显示^[5-6]。实际图像的分辨率与“纽扣”电极的分辨率有一定的出入。经验表明,厚度大于2.5 cm的薄纹层及直径大于1.3 cm不规则斑块或砾石等地质体在电阻率成像测井图像上能够被清晰地分辨出来^[5]。

本文所使用的成像测井资料是用 Schlumberger 公司1991年推出的全井眼地层微电阻率成像测井仪(Fullbore Formation MicroImager,简称FMI)采集的,它是一种四极板仪器,总共安装有192个电极,在8.5英寸井眼中覆盖率达80%。资料的处理与解释工作是在交互式解释工作站上利用 Schlumberger 公司的 GeoFrame 软件包完成的。

2.2 碳酸盐胶结物的成像测井解释

常规测井与成像测井相结合,可以确定砂岩内部非均质碳酸盐胶结物的分布。常规测井解释可以用于划分岩性。在常规测井解释提供的岩性框架约束下,根据成像测井图像上灰度的变化,可以识别砂岩层内部结构特征的微细变化。在相同砂岩层内,沉积特征相同或相近,电阻率图像灰度的变化主要与胶结程度、胶结物成分及含流体性质等的差异有关。碳酸盐胶结砂岩在图像上一般呈醒目的白色高阻特征^[6-7],而疏松未胶结或弱胶结含水砂岩则呈黑色低阻显示(图

1)。需要说明的是,在静态图像上碳酸盐胶结砂岩容易与砾岩或砂砾岩混淆,后者在静态图像上通常也呈白色或浅色高阻显示;此时,可以结合动态图像加以区分,在动态图像上碳酸盐胶结砂岩通常仍然呈白色高阻显示,而砾岩或砂砾岩颜色或灰度要偏深一些(如浅黄色),且呈斑块或斑点状显示,这些斑块或斑点即是陆源砾石。在非均质胶结情况下,砂岩中被碳酸盐胶结部分与弱胶结或未胶结部分相间分布,此时碳酸盐胶结带在图像上亦呈斑块或斑点状分布,它们在成像测井图像上区别于陆源砾石的特征除了上述的颜色或灰度外,还可以根据斑块的大小、形态及产状等特征区分,碳酸盐胶结斑块一般大小不等,形态不规则,且分布无规律,不象砾石一般大小、形态、产状等规律性那么明显(图2)^[6-7]。

根据碳酸盐胶结物在静态和动态图像上均呈白色高阻显示这一特点,可以对其形态、产状及分布特征进行识别和分析。图像研究表明,DWX井河流相砂岩内碳酸盐胶结物大多呈斑块状产出,其形态以圆形、椭圆形居多(图1),也可呈不规则团块状、葡萄状等(图2)。斑块大小从1 cm到50 cm不等。在下粗上细的钟形河道砂岩序列下部粗粒段中,碳酸盐胶结物斑块直径较大,但分布稀疏(图1);上部细粒段中,斑块直径相对较小,但分布却较为密集(图3)。

碳酸盐胶结物斑块多数平行于层理方向排列。其产状主要有以下三种类型:(1)呈孤立状斑块随机地散布于宿主砂岩层内,直径较大,一般在10~50 cm之间(图1、2);(2)胶结物斑块成群产出,其大小近等,直径不大,一般为数厘米级,顺层理面方向断续排列,构成不连续胶结纹层(图3、4);(3)斑块成群产出,顺层理面方向排列,横向相互连接,构成连续胶结纹层(图3、4)。

碳酸盐胶结物在砂岩层内的分布具有明显的非均质性,主要有以下三种模式:(1)呈孤立或分散状斑块分布于钟形砂岩序列下部或底部粗粒段中(图1、2);(2)呈断续或连续胶结纹层分布于钟形砂岩序列上部或顶部细粒段内(图3);(3)呈互层或夹层形式与未胶结砂岩交互产出,在序列上部、中部和下部均可出现,在箱形砂岩序列中比较常见(图4)。

3 讨论

3.1 砂岩早期碳酸盐胶结作用的选择性

从成像测井图像所揭示的碳酸盐胶结物分布特征分析,DWX井新生界河流相砂岩内早期碳酸盐胶结

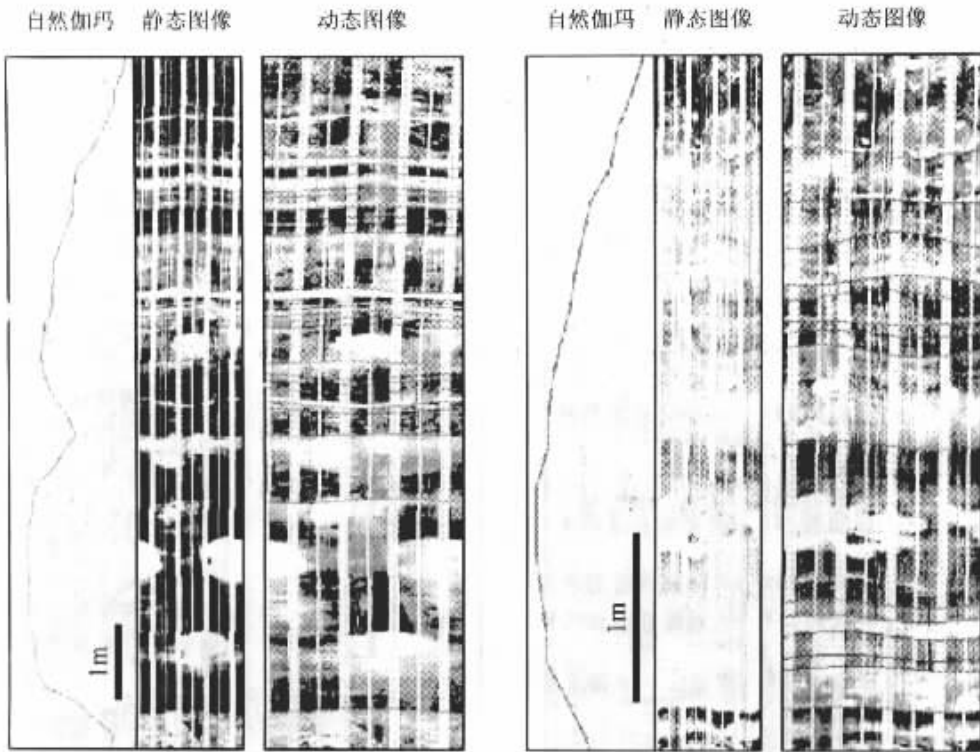


图1 钟形砂岩序列下部粗粒段中,圆形白色高阻碳酸盐胶结物斑块状散布于黑色低阻疏松含水砂岩内;上部细粒段层理细密,碳酸盐胶结薄纹层呈夹层状分布

Fig.1 Carbonate concretions as white (high-resistive), round patches scattered in dark water-saturated sandstone at the lower part of the bell-shaped sandstone sequence

图2 分布于钟形砂岩序列下部粗粒段中的斑块状、葡萄状碳酸盐胶结物

Fig.2 Patchy and racemose carbonate concretions developed in the lower coarse-grained section of the bell-shaped sandstone sequence

作用表现出明显的不同级次的结构选择性。在砂层(或砂体)规模上,碳酸盐胶结带优先沿砂层上部或下部(砂体边缘)发育(图1、2、3)。在层理规模上,碳酸盐胶结物多数平行于层理方向排列,并选择性地沿若干纹层发育,碳酸盐胶结纹层与疏松未胶结或弱胶结纹层常呈互层或夹层形式交替分布(图3、4)。在纹层规模上,胶结物选择性地围绕若干核心沉淀,以斑块状方式向外增生,当从相邻成核点生长出来的斑块在横向上相互靠近或连生时,便形成断续或连续胶结纹层。

碳酸盐胶结物选择性沿砂体边缘或砂层的上部和下部发育,通常认为与这些部位毗邻泥质沉积物,因而离子物质来源丰富有关。离子物质从细粒泥质沉积物扩散到砂岩中可以造成碳酸钙过饱和,导致与泥质沉积物接触部位附近的砂岩优先被胶结^[9]。砂、泥岩接触界面附近,孔隙结构存在突然变化,泥岩孔隙小,砂岩孔隙大,离子物质从泥岩小孔隙中排出进入砂岩大孔隙时,压力释放,碳酸盐容易过饱和和沉淀,也可能是胶结物优先在砂岩层边缘部位发育的一个重要原因。

层理规模上碳酸盐胶结物的选择性可能与渗透率和孔隙水流动速度有关。早期碳酸盐胶结物通常沿砂体内部高渗透层或高流速层发育^[2~3,10~11],或沿地下水流动方向排列^[4]。由于砂质沉积物的渗透率主要取决于粒度大小和分选性^[12],故碳酸盐胶结物将优先沿粒度较粗、分选较好因而原始渗透性较好的砂岩纹层发育。砂岩序列中不同纹层之间结构成熟度的微细变化导致孔隙水渗流速度存在差异,可能是DWX井新生界砂岩内部碳酸盐胶结纹层与疏松未胶结或弱胶结纹层呈互层或夹层形式交替产出的主要原因。

碳酸盐胶结物在纹层规模上的选择性主要表现为成核点的选择性。一般认为,早期碳酸盐胶结作用容易选择性发生在富含生物介壳或碳酸盐岩屑的砂岩中^[13~18]。DWX井新生界砂岩属于后一种情况,薄片鉴定资料表明,这些砂岩的主要碎屑组分——岩屑中,碳酸盐岩屑的平均含量高达42%(变化范围为13%~76%)。滨、浅海相生物介壳砂岩研究表明,早期碳酸盐胶结作用通常选择性地围绕具有相同底质的生物介

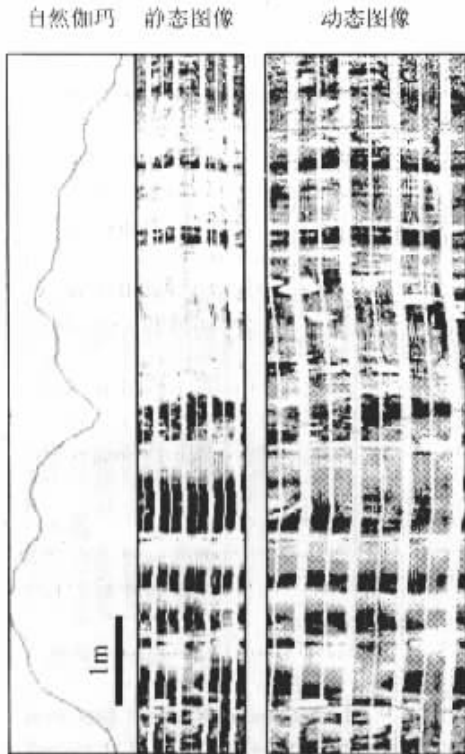


图3 碳酸盐胶结物呈断续或连续

胶结纹层分布于钟形砂岩序列上部细粒段内

Fig.3 Spiccatto or continuous carbonate-cemented

laminae intercalated in poor-cemented laminae at the

upper fine-grained interval of the bell-shaped sandstone sequence

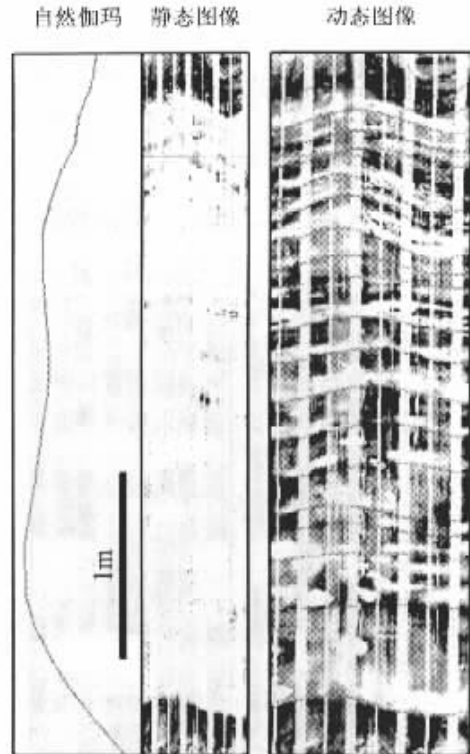


图4 箱形砂岩序列中断续或连续碳酸盐胶结

纹层与未胶结或弱胶结纹层呈互层或夹层状交替分布

Fig.4 Spiccatto or continuous carbonate-cemented

laminae interbedded with poor-cemented

laminae in the cylindrical sandstone sequence

壳成核^[14~18],据此推测,DWX井新生界河流相砂岩中,早期碳酸盐胶结物成核作用的选择性亦可能与碳酸盐岩屑的分布有关。成核点的发育程度直接影响碳酸盐胶结物的产状,成核点越发育,成核点间的间距越小,则从相邻成核点生长出来的胶结物斑块在横向上越容易彼此靠近或连生,形成断续的或连续的胶结纹层。成像测井图像表明,在下粗上细的钟形河道砂岩序列上部细粒段中,成核点数量多,间距小,胶结物斑块直径小,更容易形成断续的或连续的胶结纹层(图1、4);下部粗粒砂岩段内成核点较少,斑块多呈孤立状产出,但斑块直径往往较大(图1、3)。造成这种差异的原因尚不清楚。但是笔者注意到,钟形砂岩序列细粒段内纹层薄而细密,而粗粒段纹层厚度则大而均匀(图1、4),因此渗透性纹层的厚度差异可能是早期碳酸盐胶结物斑块大小及分布间距的一个控制因素。

3.2 砂岩早期碳酸盐胶结作用模式

迄今为止,对砂岩早期碳酸盐胶结物的生长过程这一最基本的问题尚缺乏应有的了解。可能的胶结模式有以下两种:一种是碳酸盐胶结物以近乎均匀沉淀的方式从几乎所有孔隙中同步析出,充填孔隙,暂且称

为均匀胶结模式;另一种是胶结物首先选择性地从若干个局部核心(或中心)开始成核,然后逐步向周围孔隙空间延伸,最终导致所有孔隙被充填,称为核心式胶结模式。有几篇文献曾提到,完全被碳酸盐胶结的砂岩实际上是由早期碳酸盐胶结物斑块或结核不断向外增生直至横向上彼此连生融合而形成的^[13,17~19]。Bjørkum等^[20]在对英格兰下侏罗统Bridport砂岩碳酸盐胶结物氧同位素值进行分析后发现,碳酸盐胶结砂岩层内 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值围绕少数核心呈放射状向四周减少,从而证实砂岩层内方解石的胶结作用首先是从若干个局部成核点处开始并逐渐向外生长而形成的,亦即采取的是核心式胶结模式。他们还根据不同成核点处 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值绝对值及其变化趋势的相似性推断砂岩层内不同成核点处方解石胶结作用是同步发生的,并具有相同的生长机制。本文在高分辨率成像测井图像上观察到了早期碳酸盐胶结物的各种生长形态,包括孤立或分散的斑块,及由若干斑块相互靠近或连生而形成的断续或连续胶结纹层,从地球物理角度证实DWX井河流相砂岩中早期碳酸盐胶结作用遵循核心式胶结模式。早期碳酸盐胶结作用不同级次的选

择性表明,砂体或砂层被碳酸盐胶结的过程遵循如下的规律(1)由外向内,即碳酸盐胶结作用优先从砂体边缘或砂层顶、底部位开始,并逐步向砂体(砂层)内部延伸(2)由高渗透纹层扩展到低渗透纹层(3)由若干局部核心开始,并逐步向周围孔隙空间增生,直至从相邻成核点发展出来的胶结物斑块相互连接愈合,导致砂岩层完全胶结。

参 考 文 献

- 1 刘宝珺,张锦泉主编. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社,1992. 65~92,237~257
- 2 James W C. Early diagenesis, Atherton Formation(Quaternary): a guide for understanding early cement distribution and grain modifications in non-marine deposits[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55: 135~146
- 3 Wilkinson M. The concretions of the Bearerraig Sandstone Formation: geometry and geochemistry[J]. *Sedimentology*, 1991, 38(5): 899~912
- 4 McBride E F, Picard M D, Fork R L. Oriented concretions, Ionian coast, Italy: evidence of groundwater flow direction[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 535~540
- 5 Rider M H. The geological interpretation of well logs (2nd edition) [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1996. 199~225
- 6 Serra O. Schlumberger Formation MicroScanner image interpretation[M]. Houston: Schlumberger Educational Services, 1989. 15~96
- 7 Harker S D, McGann G J, Bourke L T, Adams J T. Methodology of Formation MicroScanner image interpretation in Claymore and Scapa fields (North Sea) [A]. In: Hurst A, Lovell M A, Morton A C, eds. Geological applications of wireline logs. Geological Society of London Special Publication, No. 48: 11~25
- 8 Carr D L, Johns R A. High-resolution reservoir characterization of Midcontinent sandstones using wireline resistivity imaging, Boonsville (Bend conglomerate) gas field, Fort Worth Basin, Texas [J]. *The Log Analyst*, 1997, 38(6): 54~70
- 9 恩格尔哈特. 沉积物和沉积岩成因[M]. 王东坡,何起祥,汪碧华译. 北京:地质出版社,1982. 170~187
- 10 Berner R A. Early diagenesis: a theoretical approach. Princeton [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1980. 241
- 11 F J 佩蒂庄, P E 波特, R 西弗. 砂和砂岩[M]. 北京:科学出版社, 1977. 38~40, 99~100, 303~306, 318~319
- 12 Beard D C, Weyl D K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57: 349~369
- 13 Fuchtbauer H. 沉积相对砂岩成岩作用的控制 [A]. 见: 贾振远, 万静萍, 袁柄存等译. 沉积物的成岩作用 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 141~149
- 14 Fürsich F T. Rhythmic bedding and shell bed formation in the Upper Jurassic of Greenland [A]. In: Einsele G, Seilacher A, eds. Cyclic and event stratification [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1982, 208~222
- 15 Bryant I D, Kantorowicz J D, Love C F. The origin and recognition of laterally continuous carbonate-cemented horizons in the Upper Lias Sands of southern England [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(2): 108~133
- 16 Bjørkum P A, Walderhaug O. Geometrical arrangement of calcite cementation within shallow marine sandstones [J]. *Earth-Science Reviews*, 1990, 29: 145~161
- 17 Kantorowicz J D, Bryant I D, Dawans J M. Controls on the geometry and distribution of carbonate cements in Jurassic sandstones: Bridport Sands, southern England and Virking Group, Troll Field, Norway [A]. In: Marshal J M, ed. Diagenesis of sedimentary sequences. Blackwell Scientific Publications, 1987, 103~118
- 18 McBride E F. Contrasting diagenetic histories of concretions and host rock, Lion Mountain Sandstone (Cambrian), Texas [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1988, 100(11): 1803~1810
- 19 McBride E F, Milliken K L, Cavazza W, et al. Heterogeneous distribution of calcite cement at the outcrop scale in Tertiary Sandstones, northern Apennines, Italy [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(7): 1044~1063
- 20 Bjørkum P A, Walderhaug O. Isotopic composition of a calcite-cemented layer in the Lower Jurassic Bridport Sands, southern England: implications for formation of laterally extensive calcite-cemented layers [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(4): 678~682

Early-diagenetic Carbonate Nucleation Cementation in Cenozoic Sandstones , Northern Tarim Basin : Evidences from High-resolution Electric Borehole Images

ZHONG Guang-fa MA Zai-tian

(Laboratory of Marine Geology of China Ministry of Education , Tongji University , Shanghai 200092)

Abstract

Carbonate cementation is the main diagenetic process except for compaction in shallow-burial (shallower than 700 meters) Neogene-Quaternary fluvial sandstones of northern Tarim Basin. High-resolution electric borehole images provide valuable information on the geometry and occurrence of carbonate concretions in these sandstones.

Carbonate concretions in the sandstones are characterized with white , high-resistive features in both static and dynamic images. The shape of these concretions is round , ellipsoid or irregular. They may occur as isolate patches scattered in poor-cemented sandstones , or appear in group as spiccato or continuous carbonate-cemented laminae interbedded with poor-cemented sandstone laminae.

Strong selectivity of carbonate cementation at different scales is observed on the images of these sandstones. On scale of sandstone beds , carbonate concretions preferentially developed at the upper and/or lower parts , where ion materials needed for carbonate cement precipitation are believed to be more easily available from adjacent clay sediments. On scale of beddings , carbonate concretions usually aligned parallel to bedding surfaces. In most cases , they interbedded with poor-cemented sandstone laminae as spiccato or continuous carbonate-cemented laminae , which may be resulted from the texture and hence permeability differences between laminae. On laminae scale , carbonate cements selectively precipitate around some nuclei , then enlarge outwards as cemented patches. When the patches grow closer or merge together , spiccato or continuous cemented laminae form. The selectivity of cementation nuclei may have some relation to the distribution of clastic carbonate fragments , which are the common grain components in these sandstones.

Based on interpretation of electric images , this paper concluded a growth model of early-diagenetic carbonate cements in these sandstones. They were developed following the sequences from the top and/or bottom to the middle of the sandstone beds , from high-permeable laminae to low-permeable laminae , and from some local nuclei to their vicinity.

Key words sandstone cementation carbonate mineral electric borehole imaging Tarim basin