

一种新的煤系砂岩成岩模式^{*}

——以北山盆地侏罗系为例

周劲松 赵澄林

韩春元

(石油大学地球科学系, 北京昌平 102200) (华北油田研究院, 河北任丘 062552)

压实作用强烈是北山地区侏罗系煤系砂岩最具特色的成岩现象,也是使孔隙减少的最主要因素。远离煤层的粗碎屑岩以广泛的方解石胶结和交代为特征,而与煤层共生的细碎屑岩则表现出强烈的压实作用。这种差别与原始沉积环境和构造位置有关,决定于煤层的存在、演化以及压实内循环流体。压实作用使煤系砂岩的孔隙度和渗透率均偏低,但以溶解作用为主的过渡带压实和胶结适中,物性最佳,具最好的生储配置。

关键词 北山盆地 煤系 成岩作用 成岩模式

第一作者简介 周劲松 男 25岁 博士生 沉积学

1 地质概况

北山盆地位于甘肃省西部,属天山东端的北山优地槽褶皱带,是侏罗纪时发展起来的中、新生代盆地(图1)。基底为元古界和古生界变质岩,侏罗-白垩纪盆地基本上是在海西期近东西向褶皱带上于早、中燕山期形成的拗陷,沉积盖层为侏罗系-下白垩统、上第三系和第四系,局部地区可能有三叠系沉积。

早侏罗世时气候较湿润,北山地区为多个分隔的山间洼地,无大型湖泊,以砾岩发育为特征。沉积物因地而异,极不稳定,以近源堆积为主。沉积相主要为冲积扇、河流相,反映了盆地形成早期的填平补齐式沉积特点。

中侏罗世早期,山间洼地连成一片,北山地区首次成为统一的湖泊区。该时期气候湿润,植物茂盛,形成煤系地层。中侏罗世晚期,气候转为干旱,钙质砂岩、泥灰岩增多,并出现膏盐层。

晚侏罗世湖泊北移至金庙沟一带,以冲积扇为主。由于中侏罗世末期的抬升剥蚀作用,上侏罗统不整合在中侏罗统之上。

北山盆地侏罗系从下而上包括下侏罗统茈茈沟组,中侏罗统水西沟组、头屯河组以及上侏罗统沙枣河组。煤层主要发育在中侏罗统水西沟组中,下侏罗统茈茈沟组也含少量煤层和煤线。总体上看,北山盆地煤产在下侏罗统和中侏罗统下段,而中侏罗统上段及上侏罗统不产煤,为便于对比,仍将整个侏罗系视为含煤层系。

^{*} 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目

收稿日期: 1996-05-22 改回日期: 1996-11-20

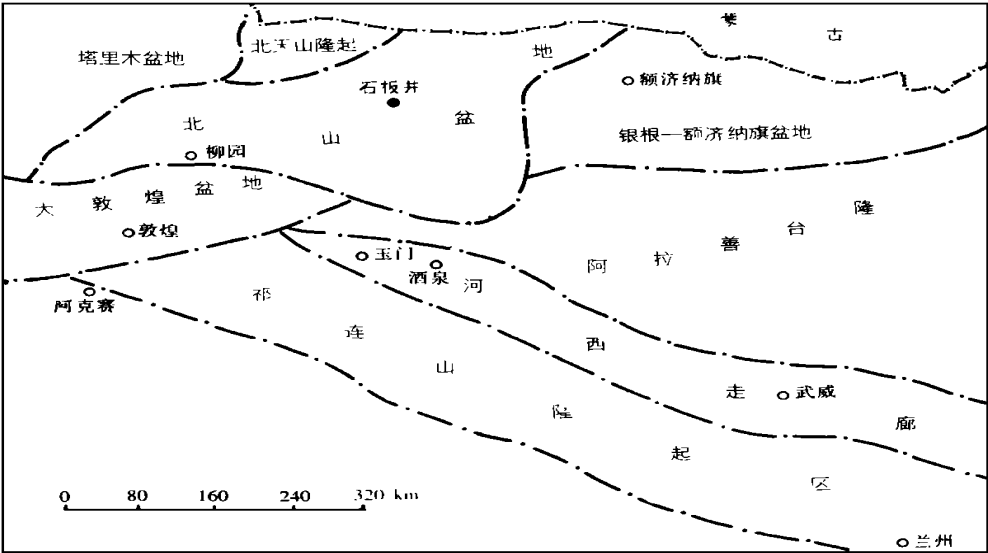


图 1 北山盆地位置图

2 成岩作用

北山盆地侏罗系的砂岩以岩屑砂岩为主, 其次为长石岩屑砂岩。大部分岩屑是不易变形的硬岩屑, 尤以变质石英岩屑占主导地位(图版I-1), 另外还有燧石、变质花岗岩、板岩、片岩、千枚岩、泥岩、粉砂岩、白云岩、灰岩等。胶结物主要为碳酸盐及硅质, 次为高岭石等粘土矿物。胶结物的分布很有规律, 含铁方解石多见于细砾岩、粗砂岩、中砂岩及部分细砂岩中, 岩性偏粗, 其他胶结物少见。而硅质则是细砂岩及粉砂岩的主要胶结物, 岩性偏细, 其中高岭石等粘土矿物与硅质胶结关系密切, 二者同时存在。

2.1 成岩现象

2.1.1 压实作用

北山盆地侏罗系砂岩的压实作用具有明显的两分性, 这种两分性与胶结物的类型有密切的关系。以硅质为主要胶结物的砂岩中, 压溶作用表现为骨架颗粒的压溶胶结以及软屑和片状矿物的变形, 颗粒之间多为线接触-凹凸接触, 粒间界线不清楚(为后述方便起见, 我们称此类现象为Ⅰ类成岩现象, 具备该类现象的砂岩称Ⅰ类砂岩), 其岩性偏细, 主要为粉砂岩和细砂岩, 中侏罗统水西沟组及头屯河组的绝大部分砂岩具有此类特征。以含铁方解石为主要胶结物的砂岩中, 压实作用表现不明显, 仅见少量刚性颗粒的破碎及少量软屑的变形(我们将这种成岩现象称为Ⅱ类成岩现象, 具备该成岩现象的砂岩称Ⅱ类砂岩), 其岩性偏粗, 主要见于上侏罗统沙枣河组及下侏罗统茆茆沟组粗粒级的砂岩和细砾岩中。Ⅰ类砂岩中强烈的压实作用是北山盆地煤系砂岩成岩作用最显著的特点之一。

2.1.2 胶结作用

在Ⅰ类砂岩中, 碳酸盐胶结物含量低, 主要胶结物为硅质, 多以压溶缝合胶结的形式存在(图版I-2), 石英颗粒具明显的次生加大边。在溶解作用较发育的样品中, 常可见到孔隙中

充填着自生高岭石等粘土矿物和自生的微晶石英(图版I-3),另有铁方解石和铁白云石胶结物存在(图版I-4)。胶结物的出现顺序是:菱铁矿 $\rightarrow$ 早期石英加大 $\rightarrow$ 高岭石及晚期石英加大 $\rightarrow$ 铁方解石及铁白云石。铁方解石和铁白云石出现在成岩序列的晚期,主要是充填次生孔隙。在II类砂岩中,方解石多呈块状或粗粒状胶结(图版I-5),反映其形成速度较快,流体条件有利于方解石的沉淀。包裹体分析表明,其形成温度为80~120℃,为晚期碳酸盐岩胶结物。这类岩石中其他胶结物少见,若方解石部分溶解,可在其溶解部分见到少量硅质胶结物和自生粘土矿物。

2.1.3 交代作用

I类砂岩中的交代作用很普遍,镜下常见含铁方解石对骨架颗粒的交代,粘土矿物交代碎屑颗粒边缘及内部,晚期还有铁方解石和铁白云石交代颗粒,交代的规模往往不大,一般限于碎屑颗粒的边缘。II类砂岩中的交代作用则构成了可与I类砂岩的压实作用相媲美的另一特别的成岩景观,即含铁方解石对碎屑颗粒的交代十分强烈(图版I-6),甚至可使颗粒“漂浮”于胶结物之中或只剩下原颗粒幻影。这类砂岩多为冲积扇相和辫状河相,应普遍含有泥质杂基,而镜下却没有观察到,说明泥质杂基被含铁方解石交代了。

2.1.4 溶解作用

溶解作用在I类砂岩中相当发育,主要表现为碎屑颗粒的被溶蚀(图版I-2),胶结物的溶解不多见,见于中侏罗统水西沟组和头屯河组中;而II类砂岩中溶解作用不发育,为下侏罗统和上侏罗统粗粒砂岩和细砾岩的特征。介于I类和II类砂岩之间的部分细-粗粒砂岩中溶解作用较发育,但与I类砂岩的颗粒溶解不同,主要表现为含铁方解石的溶解,即胶结物的溶解。可以认为这种砂岩是一种过渡型,主要见于上侏罗统中粗粒砂岩中,常具有很高的孔隙度。

2.1.5 充填作用

孔隙充填作用主要见于I类砂岩中,表现为自生粘土矿物高岭石(图版I-3)、绿泥石和伊利石以及与之共生的自生微晶石英的充填,另外还有晚期铁方解石及铁白云石的充填(图版I-4)。

从以上主要成岩现象可以看出,不同岩性之间的成岩作用差别巨大,这种差别应与沉积环境有密切的关系。

2.2 成岩序列

I类砂岩中早期的碳酸盐(多为菱铁矿)胶结物最早溶解,随之导致早期的压实作用,随煤系有机质的演化和地层埋深的增加,弱酸性地层流体环境有利于自生粘土矿物的充填和早期的石英次生加大,压实作用的逐渐加强又使得骨架颗粒间产生了硅质的压溶式胶结,接下来晚期溶解使长石等部分骨架颗粒溶解,同时伴随着粘土矿物的充填及晚期的石英加大;成岩晚期随流体介质环境的突变为碱性,部分石英溶解,铁方解石、白云石和铁白云石最终充填孔隙。II类砂岩的成岩序列很简单,早期的岩石为其中的泥质及少量方解石胶结,随后大量含铁方解石交代了泥质杂基和部分颗粒,此后可见含铁方解石的局部溶解及少量自生粘土矿物的充填。

2.3 成岩阶段

I类砂岩的成岩阶段多处于早成岩B亚期至晚成岩A_I亚期,部分处于晚成岩A_{II}亚期,镜质体反射率 R_o 介于0.41%~0.90%之间。中、下侏罗统泥岩中伊/蒙混层矿物中蒙皂石含量占15%~50%,一般在15%~20%之间变化,处于伊/蒙混层第二迅速转化带,对应于晚成岩期的有序混层带和超点阵混层带的过渡带;上侏罗统泥岩样品中伊/蒙混层矿物中的蒙皂石含

量为 20%~70%, 表明处于早成岩期—晚成岩期过渡阶段。溶解作用主要发育于早成岩 B 亚期晚时至晚成岩 A_I 亚期早时, 比普通碎屑岩要略早一些, 这与后者的溶解作用主要发育于晚成岩 A_I 亚期^[1,2] 似乎不符。II 类砂岩中铁方解石包裹体测温为 80~120℃, 表明其处于晚成岩 A 亚期, 其特殊的成岩现象也与普通碎屑岩不符。造成这些异常的原因将在成岩模式中加以解释。

2.4 成岩模式

上述煤系砂岩与普通碎屑岩的成岩作用之所以有如此大的差别, 主要归因于煤的存在。煤的热演化较普通有机质早, 大约在褐煤阶段, 即相当于普通碎屑岩的早成岩期 B 亚期的早时, 煤的部分显微组分就开始成熟^[3,4,5,6]。这一阶段煤层主要是排出大量的 CO₂, CO₂ 溶于地层水中使其呈弱酸性, 因而地层中的早期碳酸盐胶结物(煤系地层中多为菱铁矿^[7]) 被溶解或者早期碳酸盐的胶结作用受到抑制, 又因 I 类砂岩杂基含量低, 岩石颗粒间在缺乏支撑的早期压实情况下, 上覆地层的压力或者同时伴随有构造挤压力使颗粒间变得紧密接触, 塑性岩屑及易变形的矿物亦被挤入原生孔隙中, 并随埋深的增加, 压实作用表现得更为明显。由于研究区内岩石中的岩屑成分以刚性的变质石英岩为主, 这些硅质刚性颗粒在压实作用下产生压溶式的致密胶结。

地层流体的弱酸性环境还有利于长石的溶蚀以及高岭石的充填。次生孔隙主要由长石溶蚀形成, 其中充填了自生的蠕虫状高岭石及少量微晶自生石英。煤系地层中泥岩和有机物含量很高, 在其演化过程中, 蒙脱石向高岭石、伊利石、绿泥石的转化, 释放出大量 SiO₂; 长石在弱酸性环境下向高岭石转化亦释放出 SiO₂, 再加上石英的压溶使地层流体中富含硅质。硅质沉淀多表现为石英的次生加大以及自生微晶石英的沉淀, 而煤系地层的高有机质含量及高泥岩含量在成岩过程中亦可提供大量来自于植物的可溶性阳离子, 如 K⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ 等, 使自生粘土矿物的沉淀有充足的物质来源。

随煤系有机质热演化程度的加深, 至晚成岩 A_{II} 亚期 ($R_o > 0.75\%$), 有机质进入生烃排烃阶段, 液态烃开始大量生成, 此时生成气以烃类为主, CO₂ 含量明显减少。随着煤化程度的加深, 有机酸被破坏, CO₂ 急剧减少, 生成水的性质由酸性突变为碱性^[8]。此时石英部分溶解, 铁方解石、白云石和铁白云石沉淀并充填孔隙。

在盆地的边缘部分, 主要发育冲积扇、辫状河等粗粒级的砂、砾岩, 其地层内部缺少泥岩层及煤层, 在其被埋藏后首先发育了早期胶结物, 如粘土矿物的重结晶以及少量方解石。由于与盆地中心富含有机质的部分相隔较远, 煤系有机质在成岩早期生成的弱酸性地层水对其影响不大, 故其早期胶结物得到保存, 并抑制了压实作用。另外粗粒级岩石抗压实的能力也要强于细粒级的岩石。仅凭这类岩石内部的地层流体的演化, 是难以形成像 II 类砂岩那样大规模的碳酸盐交代及胶结的, 关键原因是煤系中的酸性地层水在压实驱动力及浮力等流体驱动力因素作用下向盆地斜坡方向运移, 在其运移过程中不断地溶解易溶碳酸盐, 形成富钙的流体; 随着距离的增加, 钙质越来越富集, 并在一定位置溶解作用与沉淀作用达到平衡, 通过该平衡点, 流体在继续向上运移过程中, 钙质将变得过饱和, 于是在盆地边缘部分的粗粒岩石中沉淀下来, 并交代了岩石中的杂基和部分颗粒。

从以上分析可以看出, 由于流体的运移, 在 I 类砂岩和 II 类砂岩之间必然存在着一个过渡带, 在这个带中, 向斜坡方向碳酸盐胶结、交代作用增强, 或者从陆向湖碳酸盐的溶解作用增强。上述上侏罗统砂岩中块状含铁方解石的溶解形成高孔隙度便是其典型的例子。

沿湖盆中心作一横剖面,若中心处的成岩作用以压实作用为主,则向斜坡方向将依次出现以溶解作用为主的带、以充填胶结作用为主的带、过渡带和碳酸盐沉淀带(图 2),这即是北山盆地煤系砂岩横向上的成岩模式。当然,以上各带的划分不是绝对的,以一种成岩作用为主的带同时也包含另外的稍弱些的几种成岩作用。

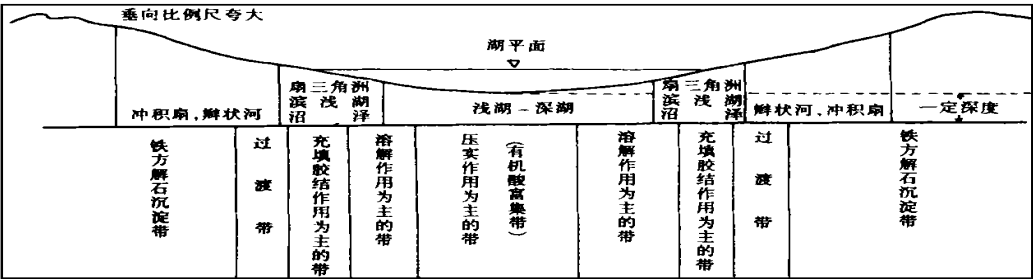


图 2 北山盆地侏罗系煤系砂岩横向成岩模式

3 成岩作用对储层物性的影响

从表 1 可以看出,研究区储层多为特低渗型,渗透率大多小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,孔隙度变化较大,高孔、低孔均有,但以低孔型为主。导致储层物性偏差的主要原因是成岩作用:

表 1 北山盆地物性分布统计表

参 数	孔 隙 度/ $\%$								渗 透 率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$					
范 围	< 5	5~ 10	10~ 15	15~ 20	20~ 25	25~ 30	30~ 35	> 35	< 1	1~ 5	5~ 10	10~ 20	20~ 100	> 100
统计数	39	27	15	14	2	5	4	1	44	9	2	3	3	2
百分比	36.4	25.2	14.0	13.1	1.9	4.7	3.7	0.9	41.1	8.4	1.9	2.8	2.8	1.9

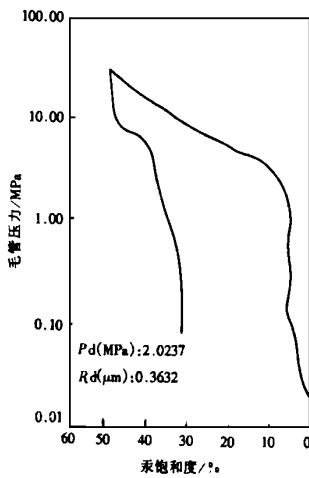


图 3 北山盆地侏罗系砂岩典型孔隙结构

(1) 强烈的压实压溶作用是导致Ⅰ类砂岩孔隙度减少的最主要因素。Ⅰ类砂岩含杂基不多,在缺乏早期碳酸盐胶结物的情况下,压实作用显得最为突出,使得颗粒之间接触紧密,原生孔隙急剧减少。因刚性颗粒随压实而产生的压溶使剩下的孔隙之间连通性变得较差,尽管部分石英、长石颗粒的溶解能增加不少次生孔隙度,但伴生的自生粘土矿物充填在孔隙及喉道中,虽然对孔隙度造成的影响不大,但却大大地降低了渗透率。

(2) 强烈的含铁方解石胶结是导致Ⅱ类砂岩孔隙度和渗透率均很低的原因。

(3) 由于煤系组分成熟早,使煤系砂岩中经受溶解作用的时间较长,因而地层内次生孔隙发育带在纵向上变得较宽。

(4) 成岩作用所形成的孔隙结构大多为细喉型(图 3),与低渗型储层类型相匹配。但Ⅰ类和Ⅱ类的过渡型砂岩中的含铁方解石溶解,则往往形成较高的孔隙度和中喉型的孔隙结构,辫状河相和扇三角洲相砂体的孔隙,即为这类过渡型砂岩中含铁方解石溶解造成的。

4 结论

北山盆地侏罗系砂岩成岩作用表现出明显的两分性, 即含煤的细粒地层经受强烈压实和硅质胶结, 而不含煤的粗粒地层压实相对较弱且为含铁方解石胶结。这种两分性与原始沉积环境和构造位置有关, 决定于煤层的存在和演化以及压实内循环流体。煤系砂岩的成岩演化与普通碎屑岩的成岩演化有着明显的差别。

成岩作用的改造使煤系砂岩的孔隙度和渗透率均偏低。细粒砂岩经受溶解作用, 孔隙度要高于粗粒砂岩, 但强烈的压实和胶结限制了孔隙度的进一步提高。过渡带的中-粗粒砂岩处于这两类砂岩之间, 压实和胶结适中, 物性最佳。

过渡带的辫状河和扇三角洲相砂体是最佳的勘探目标。这些相带砂岩含量高, 成岩作用导致物性相对较好, 离煤系及湖相烃源岩距离较近, 是最佳的生储配置。

参 考 文 献

- 1 刘孟慧, 赵澄林. 碎屑岩成岩演化模式. 东营: 石油大学出版社, 1993. 34
- 2 中华人民共和国能源部. 碎屑岩成岩阶段划分规范. 北京: 石油工业出版社, 1992. 1~ 4
- 3 黄第藩, 华阿新, 王铁冠等. 煤成油地球化学新进展. 北京: 石油工业出版社, 1992. 7~ 8
- 4 新疆石油管理局, 中国科学院资源环境科学局. 准噶尔盆地油气地质综合研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1992. 88~ 96
- 5 Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic inorganic interactions and sandstone diagenesis. AAPG Bulletin, 1989, 73 (1): 1~ 23
- 6 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一). 北京: 石油工业出版社, 1992. 133
- 7 冯增昭, 王英华, 刘焕杰等. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1994. 31
- 8 朱国华, 章卫平. 煤系地层砂岩成岩作用——以长广地区龙潭组为例. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 39~ 47

A NEW MODEL OF SANDSTONE DIAGENESIS IN COAL-MEASURES: A CASE OF JURASSIC IN BEISHAN BASIN

Zhou Jingsong, Zhao Chenglin

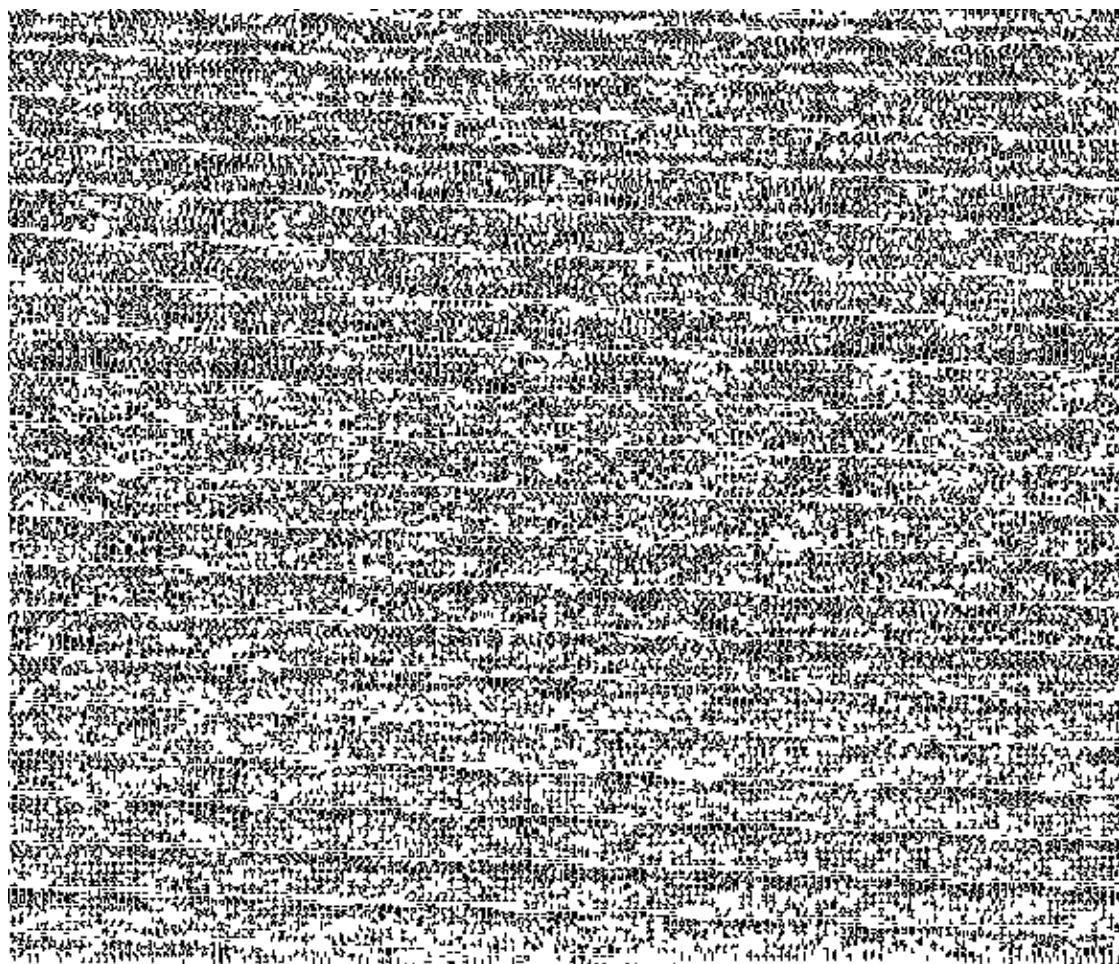
(*Department of Geosciences, Petroleum University, Beijing*)

Han Chunyuan

(*Research Institute, Huabei Petroleum Administration, Renqui, Hebei*)

Abstract

Strong compaction is the most typical diagenesis as well as the principal factor of reducing porosity. Coarse clastic rocks far from coalbed are characterized by extensive cementation and replacement of calcite, while fine sandstones and siltstones interlayered by coalbeds or carbon-rich shales show strong compaction. This is related to original sedimental environment structural position, coal measure evolution and internal circulating fluid under compaction.



1. 砂岩中富含石英岩屑(A)。正交光, $\times 40$, 802 井, 上侏罗统。
2. I 类细砂岩中颗粒的紧密接触, 接触处普见硅质加大(A), 长石颗粒(B)被溶蚀, 见溶孔(C)。正交光, $\times 100$, 802 井, 中侏罗统。
3. I 类细砂岩中见弱石英加大(A), 粒间溶孔(B)中充填自形高岭石(C)。单偏光, $\times 200$, 802 井, 中侏罗统。
4. I 类细砂岩压实及胶结作用强烈, 粒间孔中充填铁白云石(A)和铁方解石(B)。单偏光, 染色片, $\times 200$, 野马泉, 中侏罗统。
5. II 类中砂岩中含铁方解石(A)呈块状胶结, 局部溶解成孔(B)。正交光, $\times 40$, 1202 井, 上侏罗统。
6. II 类中砂岩中含铁方解石(A)的强烈交代作用, 石英加大边(B)被取代, 部分颗粒残缺不全。正交光, $\times 200$, 1202 井, 上侏罗统。