

珠江口盆地惠州凹陷深部储层成岩作用与孔隙演化

龙更生¹, 施和生¹, 郑荣才², 杜家元¹, 刘 军¹, 张晓宇¹

(1. 中海油深圳分公司, 广东 广州 510240; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 惠州凹陷是珠江口盆地重要的油气富集区, 但深层古近系的勘探尚未突破, 主要是束缚勘探的储层问题没有得到解决。对于深部储层而言, 孔隙的发育状况与储层的岩石成分、结构密切相关, 成岩作用及孔隙演化对储层的储集性能有重要的影响。本文在对大量薄片和岩芯进行分析的基础上, 运用扫描电镜、X射线分析、有机酸测试等手段, 对惠州凹陷深层砂岩储层的成岩作用和孔隙演化进行了详细研究。结果表明, 压实作用、胶结作用等使砂岩孔隙度降低, 不稳定矿物和部分填隙物的溶蚀作用导致孔隙度增大。各井数据揭示珠海组及恩平组深层储集砂岩的成岩强度大部分达到了中成岩阶段 B 期, 有机酸被释放出来, 参与溶解作用, 次生溶蚀孔隙的大量形成, 改善了深部储层的物性, 增添了深层的勘探潜力。

关键词: 惠州凹陷; 古近系; 储层; 成岩作用; 次生孔隙

中图分类号: P618.130.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0665-09

Diagenesis and porosity evolution of deep reservoirs in Huizhou depression, Pearl River Mouth basin

LONG Geng-sheng¹, SHI He-sheng¹, ZHENG Rong-cai², DU Jia-yuan¹, LIU Jun¹ and ZHANG Xiao-yu¹

(1. Shenzhen Branch of CNOOC Co., Ltd., Guangzhou 510240, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Huizhou depression is one of the most prolific hydrocarbon areas in Pearl River Mouth basin. Plentiful Neogene oil and gas have been found, but no breakthrough has been made in Paleogene sediments. Reservoir porosity and permeability are thought very low in Paleogene, and this inhibits the exploration progress. As to the deep reservoir, the factor of porosity is in connection with petrographic composition and architecture. The skeleton components and matrix components of the sandstone are basic substances participating in diagenesis. Feldspar sandstone, feldspathic quartz sandstone and lithic arkose are main rock types in Zhuhai and Enping Formations, which are characterized by coarse grains, poor grading, subangularity, low compositional maturity, and moderate to bad textural maturity. The storage capability is considerably impacted by diagenesis and porosity evolution. Based on slices observation and cores analysis and using such means as scanning electron microscope (SEM), X-diffraction, cathodoluminescence and organic acid test, the authors studied diagenesis and porosity evolution. The results show that the sandstone porosity is decreased mainly by compaction and cementation and subordinately by quartz overgrowth and authigenic mineral filling. Abundant secondary pores are produced by the denudation of such unstable components as feldspar, matrix and cuttings, and this leads to the increase of the percentage of voids. Researches reveal that the deep reservoir has experienced four diagenesis evolution phases, i. e., syngenetic stage, eogenetic stage (composed of A-stage and B-stage), anadiagenetic stage (comprising A-stage

收稿日期: 2010-10-25; 修订日期: 2011-05-17

基金项目: 国家十一五重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”资助项目(2008ZX05023-002)

作者简介: 龙更生(1970-), 男, 硕士, 勘探地质工程师, 主要从事层序地层学与沉积学研究, E-mail: longgsh@cnooc.com.cn.

& B-stage) and late diagenetic stage. Well data show that most of the reservoirs have attained the eogenetic stage, whereas segmental sandstone (under 4 000 m) has entered into the late diagenetic stage. Primary porosity was decreased quickly by compaction at the eogenetic stage (A→B) because of the increasing overlying load. Linear contact occurred at the B-eogenetic stage. Hydrothermal fluid of organic acid was discharged to fastigium with most kerogen being transformed into hydrocarbon at the anadiagenetic stage (A→B). Due to increasing acidity, the unstable components of aluminosilicate framework ingredients such as feldspar, matrix and cuttings were dissolved, so a lot of secondary pores were generated, and the physical property of reservoir was improved. At the late diagenetic stage, organic material was changed from mature to highly mature, organic acid concentration was decreased to the lowest and destroyed by thermal activity, stratigraphic water was gradually turned into alkaline, authigenic minerals were developed generally, and the reservoir physical property was changed to bad by the cementation of anhydrite. Just because lots of secondary pores were generated at the eogenetic stage, it improved the physical property and increased the potential of deep reservoir exploration.

Key words: Huizhou depression; Paleogene; reservoir; diagenesis; secondary pores

惠州凹陷是珠江口盆地的一个富生烃凹陷,浅层新近系勘探取得了巨大的经济效益,但深层古近系勘探尚未突破,主要受制于古近系地层的埋深和储层的风险(陈长民等,2003)。随着勘探工作的深入、勘探难度的加大以及社会对原油需求的不断增长,向深层进军是全世界油气勘探的必然(妥进才等,1999;吴富强等,2006)。

研究区深层古近系从下而上依次发育文昌组、恩平组和珠海组3套地层,再往上分别是新近系的珠江组、韩江组、粤海组以及万山组4套地层和第四系的现代沉积。其中文昌组和恩平组是珠江口盆地的主力生油层系。深层古近系的勘探,油源不成问题,关键是要解决束缚勘探的储层问题。本文以深部储集砂体最为发育的恩平组-珠海组作为研究对象,对储层的岩石学特征、成岩后生作用及孔隙变化进行研究,以期揭示深部储层的发育规律,为在富油气区率先打开深层勘探局面,作出积极的应对策略。

目前,惠州凹陷钻遇深层古近系的探井有10余口,主要分布在惠西半地堑、惠北半地堑、惠南半地堑及惠东半地堑(图1)。深部储层的研究主要借助区内钻井的岩芯(或井壁取芯)、录井、岩矿、物性测试数据和测井等资料。

1 岩石学特征及岩石类型

对于深部储层而言,孔隙的发育状况与储层的岩石成分、结构密切相关,砂岩中的骨架组分和杂基组分是直接参与成岩演化的物质基础。

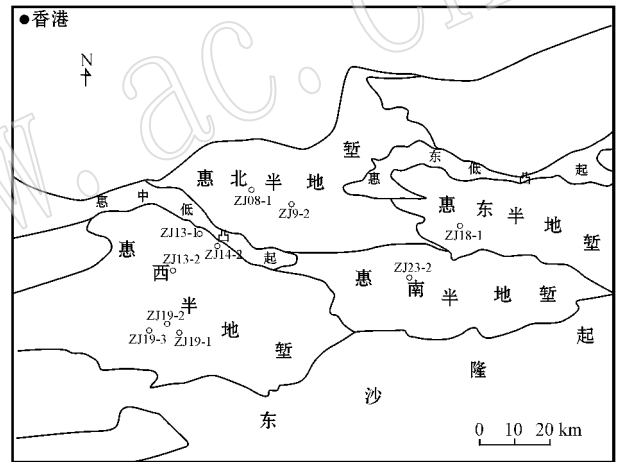


图1 惠州凹陷构造单元及位置

Fig. 1 Tectonic unit and location of Huizhou depression

1.1 岩石中的碎屑成分特征

本区深部储层的岩石碎屑成分主要有石英、长石和岩屑3类。

岩石中的碎屑石英主要由单晶石英组成,石英颗粒一般呈次圆状-次棱角状,分选中等偏差,常具次生加大边。

岩石中的长石多为钾长石类,斜长石较少。长石在不同的岩石类型中含量有所差异,平均含量在17.95%,但在长石砂岩和岩屑长石砂岩中的含量普遍较高,一般在20%~26%,最高可达35%。

砂岩中的岩屑以沉积岩岩屑和变质岩岩屑为主,少量为火山岩岩屑。沉积岩岩屑多为泥岩、粉砂岩屑,受成岩作用影响,泥岩岩屑常受挤压变形呈假

杂基。在变质岩岩屑中,以浅变质的千枚岩、变质石英岩岩屑及片岩岩屑较常见,其中尤以变质石英岩岩屑最为常见,含量一般在1%~8%之间,最高可达35%,因而构成岩屑砂岩。火山岩岩屑普遍含量较低,但较稳定,主要为酸性火山岩岩屑,少量中-基性火山岩岩屑。

1.2 储集砂岩结构特征

据3口岩芯取样井(ZJ19-1、ZJ23-2及ZJ19-2)的岩石薄片粒度分析(表1)珠海组和恩平组的砂岩颗粒中的中-粗砂均比较发育,珠海组砂岩中的细砂比恩平组更发育,而两个组的砾石和粉砂相差不大,砂岩粒度的这种分布主要受物源和沉积相两个因素控制。

区内砂岩颗粒分选普遍较差,少量中等分选,个别分选较好。磨圆度多以次棱角状为主,少数砂岩为次圆状次棱角状。岩石组构特征显示惠州凹陷的

珠海组、恩平组储层砂岩具较差的成分成熟度以及中等偏差的结构成熟度。

1.3 储集砂岩填隙物特征

填隙物包括机械成因的杂基和化学成因的胶结物。杂基是碎屑岩中细小的机械成因组分,粒度细,以泥为主,也包括一些细粉砂组成。胶结物是碎屑岩中以化学沉淀方式形成于粒间孔隙的自生矿物,它们或形成于沉积同生期,或形成于成岩后生期,但以后者常见(冯增昭,1993)。

1.3.1 粘土矿物

碎屑岩中最重要的杂基成分是粘土矿物,包括陆源沉积与成岩自生两类。显微镜观察显示,珠海组和恩平组深部砂岩中都常见陆源泥质杂基(表2、表3),由于压实造成碎屑紧密接触,泥质杂基多充填于细小的粒间孔中,通常含量10%以内。在早-中成岩阶段,由于遭受成岩改造,泥质杂基多向伊利石、

表1 惠州凹陷 ZJ19-1、ZJ19-2 和 ZJ23-2 井碎屑岩的粒度分析数据
Table 1 Granularity data of boreholes ZJ19-1, ZJ19-2 and ZJ23-2 in Huizhou depression

	井深/m	样号	砾石	巨砂	粗砂	中砂	细砂	微粒砂	粉砂
珠海组 ZJ19-1	3 906.05	19-131	0	2.33	47.01	45.34	4.66	0.33	0.33
	3 913.1	63-131	0	9.67	56.33	29	4.67	0.33	0
	3 914.65	72-131	0	0	0.33	17.67	71.33	9.33	1.33
	3 916.2	85-131	0	0	0.67	19.33	69.67	8.66	1.66
	3 918	97-131	0	7	46	38.25	8.25	0.5	0
	3 920.4	112-131	0	11.99	29.33	22.66	30.33	5.34	0.33
	3 921.1	115-131	0	1.66	13.66	32	42.01	8.34	2.32
	平均值			0.00	4.66	27.62	29.18	32.99	4.69
珠海组 ZJ19-2	3 684.5	99-150	0	0	0.5	7.75	49.75	35.25	6.75
	3 686.1	110-150	0	0.67	23.34	56	16.67	3	0.33
	3 686.3	112-150	0.33	6.01	44.66	37	12	0	0
	3 686.9	116-150	0.81	10.52	45.28	39.62	3.78	0	0
	3 687.7	123-150	6.62	41.32	36.36	14.82	0	0	0.83
	3 688.5	128-150	1.3	14.29	55.06	26.24	2.34	0.78	0
	3 689.3	135-160	2.82	24.86	49.15	20.34	1.97	0.28	0.56
	3 689.5	137-150	0	0	5.5	22.75	56.5	17.5	2.25
平均值			1.49	12.21	32.48	28.07	17.88	7.10	1.34
恩平组 ZJ23-2	3 985.2	85-160	0	0	0	4.99	62.67	30.33	1.99
	3 981.8	134-160	9.6	26	27.2	31.2	6	0	0
	3 978.05	23-160	1.67	6.32	35	47	8.33	1	0.67
	3 974.6	60-160	0.33	6	27	49.33	16	0.99	0.33
	3 977.64	94-160	0	0.33	6.32	46	44.34	3	0
	3 978.4	107-160	3.67	35.32	39.45	19.27	2.3	0	0
	3 979.2	114-160	0.33	6.33	48.66	40.99	3.66	0	0
	3 980.05	121-160	3.67	33.34	39.34	21.66	1.66	0	0.33
	3 983.3	145-160	3.33	26.99	42.66	22.34	4.33	0.33	0
	3 980.4	150-160	3	18.66	29.33	39	10	0	0
	3 980.4	150-160	6.66	52.01	33.67	6.67	0.99	0	0
	3 985.32	157-160	0.67	21.99	58.66	16.32	2	0	0.33
平均值			2.74	19.44	32.27	28.73	13.52	2.97	0.30

表2 惠州凹陷珠海组砂岩填隙物平均含量统计
Table 2 Mean content of filling matter in Zhuhai Formation

%

井号	样品数	泥质	高岭石	伊利石	白云石	方解石	黄铁矿	硅质	有机质	硬石膏	菱铁矿
ZJ19-1	37	2.15	0.60	0.54	0.37	0.00	0.04	0.65	0.23	2.44	0.00
ZJ26-3	34	10.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZJ19-2	7	2.16	0.17	0.15	0.01	0.00	0.10	0.07	0.66	0.00	0.00
ZJ23-2	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.40	0.00	0.00	0.00
ZJ08-1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	26.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总平均值		2.90	0.15	0.14	0.08	5.20	0.27	0.22	0.18	0.49	0.00

表3 惠州凹陷恩平组砂岩填隙物平均含量统计
Table 3 Mean content of filling matter in Enpin Formation

%

井号	样品数	泥质	高岭石	伊利石	白云石	方解石	黄铁矿	铁/硅质胶结	残留有机质	硬石膏	菱铁矿
ZJ23-2	31	1.65	0.00	0.00	0.23	0.00	0.30	0.74	0.00	0.19	0.13
ZJ08-1	13	0.00	0.00	0.00	0.00	1.55	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
总平均值		0.82	0.00	0.00	0.11	0.78	0.15	0.38	0.00	0.10	0.06

绿泥石及伊蒙混层粘土矿物转化,其中伊利石质杂基常见,扫描电镜下可见到鳞片状的伊利石和部分伊/蒙混层粘土。

另一部分粘土矿物是由孔隙水中沉淀的绿泥石、高岭石及伊利石组成,它们是化学成因的粘土矿物,自生高岭石粘土晶体粗大、干净,充填于次生粒间孔或长石溶孔中,扫描电镜下呈六边形晶片,集合体呈书页状或蠕虫状,含量在0.15%~0.6%。绿泥石通常在扫描电镜下才能看到,呈叶片状附着于碎屑表面或与伊利石共生。

1.3.2 胶结物

砂岩中分布较广的胶结物成分主要为二氧化硅,在整个目的层段均有分布;此外,还有方解石、白云石、黄铁矿及硬石膏等胶结物,但仅见于局部层段的砂岩中。

(1) 硅质:主要以石英加大边存在于砂岩孔隙中,平均含量0.3%。当孔隙水为酸性时,硅质组分则以自形的六方双锥晶体生长于粒间孔中,形成典型的自生石英晶体。无论是次生加大的石英还是自生石英,在压实致密的砂岩中通常都起堵塞粒间孔的作用。

(2) 方解石及铁白云石:储集砂岩中较常见,方解石多呈粒状或连晶状,阴极发光呈橙黄色,平均含量为4.0%,最高达26%。白云石多为含铁白云石,平均含量0.1%,因此白云石的出现不会对储层质量造成显著影响。

(3) 黄铁矿:为一种自生金属矿物,黑色,呈细小草莓状晶体,可见立方体或四角三八面体晶形,呈零星状不均匀分布于砂岩之中,含量较少,一般在

0.1%~1.2%,平均为0.23%,黄铁矿形成于早期成岩阶段。

(4) 硬石膏:在ZJ19-1井岩石中较常见,此外在ZJ13-2井、ZJ14-2井、ZJ17-3井也都见到。硬石膏在砂岩中多呈斑块状出现,平均含量0.3%。薄片观察显示其形成时间较晚。

1.4 深部储层岩石类型

通过对钻井(ZJ19-1、ZJ19-1A、ZJ23-1、ZJ18-1、ZJ13-1、ZJ08-1)岩芯观察及薄片分析,采用石油系统内“三角投点”分类法进行投点。结果显示,投点数据主要落在长石砂岩、长石石英砂岩、岩屑长石砂岩区的范围,少量落在岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩区。从图2来看,珠海组和恩平组在岩石类型上没有明显的差异。

1.4.1 珠海组储层岩石类型

据ZJ19-1、ZJ19-2井岩芯薄片镜下观察,珠海组岩石类型主要为(含砾)细-粗粒、(含砾)粗-巨粒、细-中粒及双众数长石石英砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑石英砂岩及长石岩屑砂岩,少量长石砂岩。

1.4.2 恩平组储层岩石类型

据ZJ23-2井岩芯薄片镜下观察,恩平组岩石类型与珠海组相似,主要以含砾巨粒、含砾(中)粗-巨粒不等粒长石石英砂岩,少量细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑石英砂岩等,也可见到少量砂质细砾岩。

2 主要成岩作用

成岩作用的研究主要是为了查明储层从沉积到成藏之前所经历的一系列成岩事件及其发生过程、

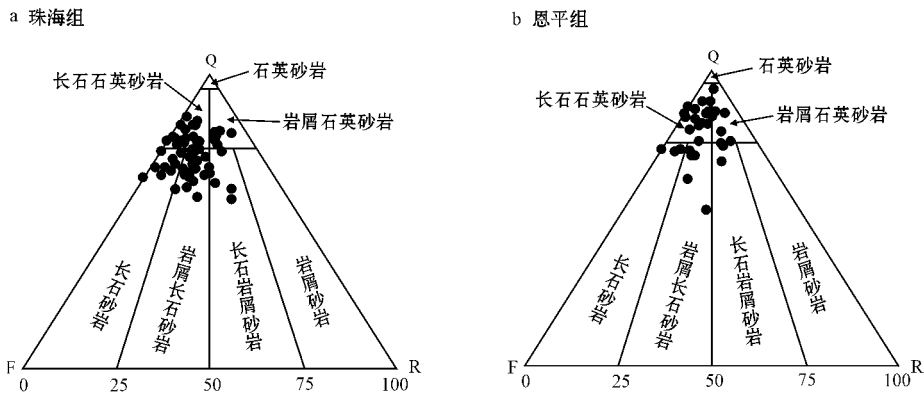


图 2 碎屑组分三角图

Fig. 2 Triangular diagram of petroclastic components

先后次序以及每个成岩阶段对储层形成的影响,最终是为弄清楚储层在沉积-成岩过程中孔隙的形成、演化和分布规律(郑荣才等,2007)。根据成岩作用对储层有利与否,将其分为破坏性成岩作用和建设性成岩作用(王伟等,2009)。

2.1 破坏性成岩作用

2.1.1 压实作用

本区深部储集砂岩井深在 3 710~4 620 m,普遍存在中-强和强的压实作用(表 4)。碎屑多呈点线接触,在含有较多塑性碎屑的砂岩中,碎屑以线接触为主,大多数砂岩中的粒间孔减少、减小,呈现出细小粒间孔的特征(图 3a),其内充填的少量泥质杂基溶蚀后可形成次生粒间孔,这些特点在 ZJ19-2、ZJ19-1、ZJ23-2 井区范围的部分层段内普遍存在,砂体内因受强烈压实作用的影响而形成的无孔无缝致密层段较少出现。从总体上看,研究区珠海组和恩平组储集砂岩都属于中-强压实强度,其中恩平组储集砂岩的压实作用更强一些。

表 4 机械压实作用强度分级

Table 4 Intensity grades of mechanical compaction

压实比例	压实减孔量	压实强度
25%~30%	5%~10%	弱压实
30%~70%	10%~25%	中-强压实
>70%	>25%	强压实

2.1.2 胶结作用

胶结作用是影响该区储层物性好坏的重要因素之一,在很大程度上因占据了较多的粒间孔隙空间而明显减小了储层的原始孔隙度和渗透率。在各种

胶结物类型中,除了杂基对岩石起胶结作用外,还有较多的自生矿物先后出现,如自生高岭石、自生伊利石、硬石膏、硅质、铁白云石、方解石等碳酸盐矿物,此外还可见有少量的自生菱铁矿、黄铁矿和少量的自生绿泥石,这些粘土矿物和自生矿物在成岩作用和孔隙演化过程中起着非常重要的作用。图 3b 反映在恩平组地层中由于白云石的孔隙式胶结和交代,占据整个粒间孔隙,孔隙大量减少,孔隙结构变差。

2.1.3 石英加大作用

惠州凹陷深部储集砂岩中的硅质胶结物平均含量为 0.3%,尽管含量不高,但硅质仍然是研究区砂岩储层中最为常见的胶结物之一,尤其是当砂岩中粘土含量较低时,硅质沉淀作用会造成孔隙的局部封堵,部分岩石中硅质胶结物的含量相对较高,当压实较强时,岩石的粒间孔隙体积已减小,硅质的沉淀作用也成为部分砂岩致密化的主要原因之一。从图 3c 可以看出,石英颗粒边缘石英次生加大普遍,占据孔隙,导致孔隙空间减小和堵塞,孔隙结构变差,渗透率变差。图 3d 左下方可以看出,石英颗粒呈凹凸状接触,显示有石英的压溶作用,提供了石英次生加大的物质来源。

2.1.4 自生矿物

狭义自生矿物是表征成岩微物化环境的标志,研究区具有这种指示作用的自生矿物有两类:自生粘土矿物与非粘土矿物。常见自生粘土矿物见有伊利石、高岭石;非粘土矿物有自生菱铁矿、自生黄铁矿、自生白云石、自生石英,由于充填各种孔隙中的自生矿物占据一定的空间(图 3d),可将其归为胶结物或显示独立矿物形态组分。

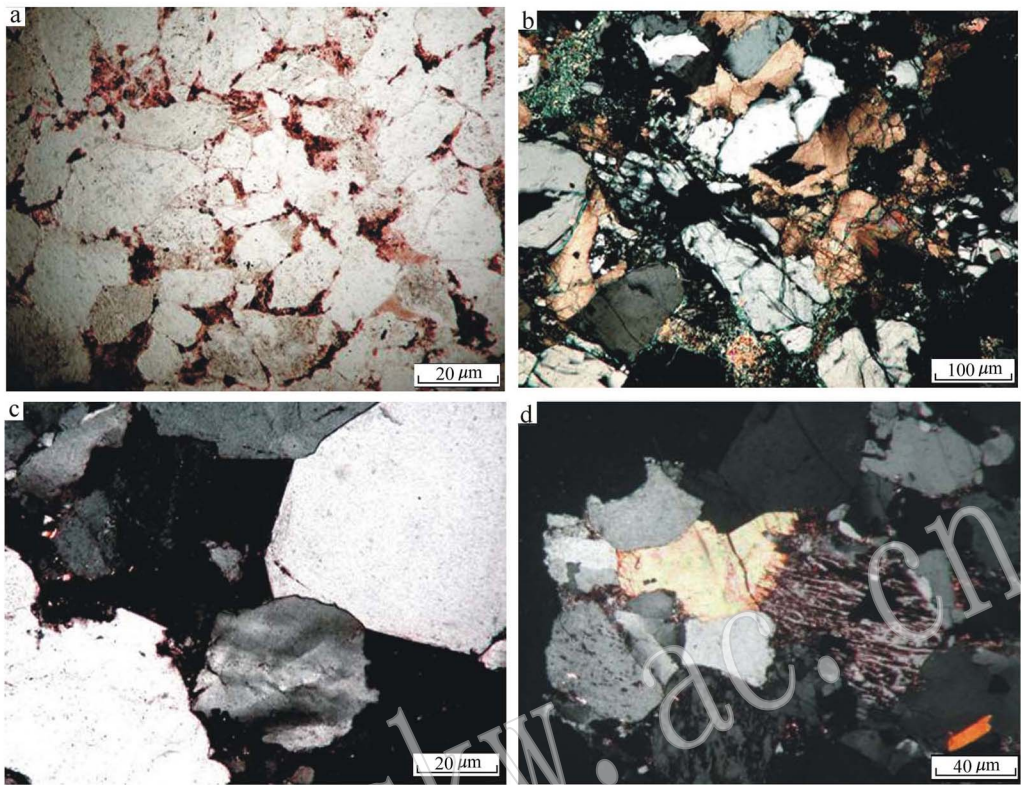


图3 深层砂岩的破坏性成岩作用的岩石薄片照片

Fig. 3 Devastating diagenesis of deep reservoir sandstone

a—碎屑经压实成岩后呈线接触, 粒间孔减小, 珠海组, ZJ19-1 井, 3 914.65 m(-); b—局部粒间孔内有白云石充填胶结, 恩平组, ZJ08-1 井, 3 726 m(+); c—少数石英边缘见有石英次生加大边, 珠海组, ZJ19-2 井, 3 686.9 m(+); d—局部孔隙中见有自生白云石充填, 恩平组, ZJ23-2 井, 3 978.05 m(+)

a—linear-contact due to compaction and diagenesis, interparticle pores diminished, Zhuhai Formation, well ZJ19-1, 3 914.65 m(-); b—local interparticle porosity filled and cemented by dolomite, Enping Formation, well ZJ08-1, 3 726 m(+); c—secondary outgrowth cementation appearing on the edge of a few quartz grains, Zhuhai Formation, well ZJ19-2, 3 686.9 m(+); d—authigenic dolomite filling appearing in local pores, Enping Formation, well ZJ23-2, 3 978.05 m(+)

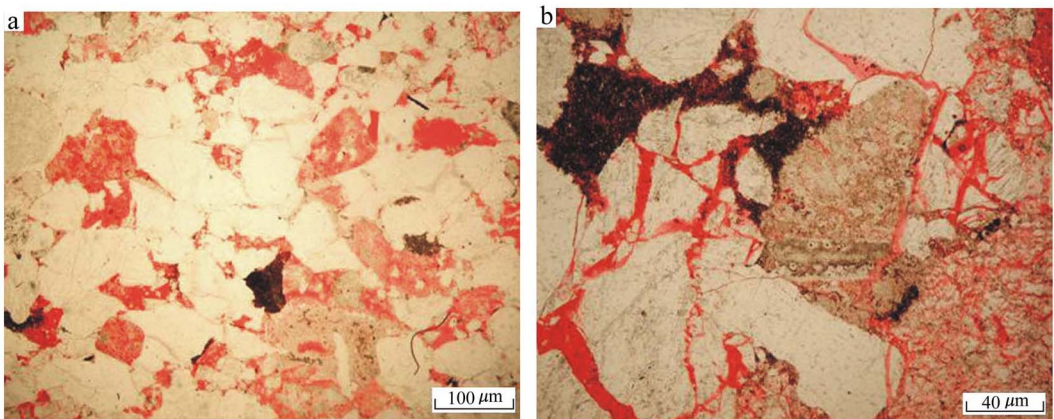


图4 深层砂岩的建设性成岩作用的岩石薄片照片

Fig. 4 Constructive diagenesis of deep reservoir sandstone

a—岩石中孔隙较发育, 长石粒内溶孔为主, 兼有铸模孔, 恩平组, ZJ23-2 井, 3 977.64 m(-); b—岩石局部见有碎屑破裂纹呈网状分布, 恩平组, ZJ23-2 井, 3 978.4 m(-)

a—fairly well-developed pores, solution pores mainly in feldspar grains, concurrently with casting pores, Enping Formation, well ZJ23-2, 3 977.64 m(-); b—petroclastic cracked veins distributed in stockwork in some rocks, Enping Formation, well ZJ23-2, 3 978.4 m(-)

2.2 建设性成岩作用

2.2.1 溶蚀作用

溶蚀作用是产生次生溶蚀孔隙,使储集层孔隙结构得到改善的一种重要作用。深层碎屑中的易溶组分主要是钾长石、杂基、泥岩及干枚岩屑等,它们在酸性水作用下会发生溶蚀(游国庆等,2006),但它们之间存在被溶蚀的难易差异,所以被溶蚀的强度差异大。如图4a所示,ZJ23-2井恩平组地层孔隙发育,孔隙类型主要为长石和岩屑粒内溶孔,溶蚀孔多呈蜂窝状,少量溶蚀较强呈铸模孔。另外,ZJ19-1井的几十个铸体薄片观察显示,珠海组和恩平组的溶解作用的差异性大,埋深相对较浅的海相珠海组砂岩的溶解作用明显强于埋深相对较深的陆相恩平组砂岩。总的来说,砂岩储层中的溶解作用中等偏强,与溶解作用有关的储层孔隙类型以溶蚀孔为主。

2.2.2 破裂作用

破裂作用恩平组强于珠海组,沿裂缝往往进一步发育溶解作用,从而形成溶蚀裂缝-孔隙型储层。裂缝对改善砂岩储层的孔渗性有重要贡献,如在ZJ23-2井3978.4 m样品中碎屑颗粒的破裂较强(图4b)呈网状分布,裂缝宽度较大,沟通粒内溶孔,显著提高渗透率。

3 成岩阶段与孔隙演化

惠州凹陷深层成岩阶段的划分主要依据以下几点:①自生矿物类型及其形成温度;②I/S混层粘土矿物的演变;③有机质热成熟度有关指标;④储集层物性、孔隙结构及类型的演化等多方面的标志综合分析(郑浚茂等,1989)。本文通过钻井的岩石薄片鉴定、X射线分析、阴极发光、扫描电镜、有机酸测试、物性资料等分析数据,为惠州凹陷深部储集砂岩经历的成岩演化及阶段划分提供了较为准确的定量和定性依据。

通过对岩石的镜下观察分析,惠州凹陷深部储集砂岩经历了同生期、早成岩阶段A期、B期,中成岩阶段A期、B期和晚成岩等成岩演化阶段。各井的数据指标非常明显地指示了珠海组及恩平组的深层储集砂岩的成岩强度大部分达到了中成岩阶段B期,部分大于4000 m的砂岩已进入晚成岩阶段。表5综合了惠州凹陷深部储集砂岩的成岩作用方式、成岩阶段划分和成岩模式。

3.1 早期成岩阶段

各井分析数据显示,惠州凹陷早成岩阶段A期→B期的底界深度位于2800 m左右,包括新近系的韩江组下部和珠江组上部,镜质体 R_0 小于0.6,流体平均温度低于80℃,最大热解温度大于435℃,I/S混层中的蒙皂石含量递减到50%左右,有机质演化处于半成熟-低成熟状态。

在早成岩阶段A期→B期,珠海组及恩平组随着上覆载荷的逐渐增加,压实作用造成原生孔隙度迅速降低,于B期出现碎屑间的线接触,从而使原生粒间孔大大降低。在细小的粒间孔内见有少量泥质杂基充填,大多数砂岩中杂基开始重结晶,局部砂岩原生粒间孔中见有环边伊利石。在孔隙水中的溶解组分 SiO_2 沉淀在石英碎屑边缘,形成早期的石英次生加大边。此阶段有机质逐渐趋于成熟,伴随干酪根开始向烃类转化和有机酸热液的排出,砂岩中长石及铝硅酸盐岩屑等易溶组分的溶解开始发生,引起溶解作用的流体主要来自下伏已进入中成岩阶段A期的地层。由少量的杂基被溶蚀形成次生粒间溶孔,部分长石碎屑被弱溶蚀而形成少量粒内溶孔。

3.2 中成岩阶段A期→B期

此阶段发育于3500~4000 m深度,相当于珠海组及恩平组的上部地层。 R_0 值在1.3%~2.0%之间,最大热降解温度在430~480℃之间,流体平均温度低于120℃,主要在85~100℃之间,I/S混层粘土中蒙皂石的含量由50%向20%递减,局部小于20%,并由无序混层向有序混层强烈转化,此阶段有机质演化开始进入低成熟-成熟阶段。

该阶段伴随泥岩中大部分干酪根向烃类化合物的大规模转化和进入有机酸热液的排出高峰期,参与成岩反应的水介质酸度大幅度升高,由于羧酸阴离子对铝离子的络合作用,使铝硅酸盐骨架组长石、岩屑及杂基等易溶组分发生溶解,次生孔隙也大量形成。同时在原生粒间孔的基础上,随着颗粒的溶解造成次生孔隙扩大,构成了由原生粒间孔、次生粒间孔、粒内溶孔组成的孔隙结构。长石的溶解造成部分孔隙内高岭石沉淀的同时孔隙介质中 K^+ 浓度增加。加之成岩温度的升高,使蒙皂石向混层伊利石/蒙皂石转化速度加快,成岩流体中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Si^{4+} 离子的浓度进一步升高,化学反应式为: $KAlSi_3O_8$ (钾长石) $\rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_2$ (高岭石) $+ K^+ + Si^{4+}$ 。

高岭石在次生粒间孔中沉淀,局部可见交代早

表5 惠州凹陷深层成岩作用阶段划分

Table 5 Diagenetic phases of deep reservoir in Huizhou depression

成岩作用 成岩阶段 划分	最高 古地温 (°C)	I/S中的 蒙皂石 (%)	镜质体 反射率 R_0	有机质 演化阶段	最大热解 峰温度 (°C)	埋藏深度 (m)	粘土矿物					石英加大	硬石膏	方解石	铁白云石	溶解作用		自生石英	孔隙类型
							蒙皂石	I/S混层	伊利石	高岭石	绿泥石					粘土杂基	长石岩屑		
同生期	①海绿石形成; ②同生结核形成; ③平行层面分布的微晶菱铁矿交代千枚岩; ④分布于粒间和表面的自生菱铁矿; ⑤烃类未成熟																		
早成岩阶段	A期	常温 65	> 70	< 0.35	未成熟	< 430					环边				泥晶				原生孔隙为主
	B期	65 85	70~50	0.35 0.5	半成熟	430 435	2500		无序			I级				泥晶			原生粒间孔及少量次生孔隙
中成岩阶段	A期	85 140	50~30	0.5 1.3	低成熟 成熟	435 460	3500		部分有序			II级			含铁晶				次生孔发育, 可保留少量原生粒间孔
	B期	140 175	< 20	1.3 2.0	高成熟	460 490	4000		有序										原生粒间孔
晚成岩阶段	175 200	< 15	> 2.0	过成熟	> 490	> 4500		伊利石											次生孔隙减少并出现裂缝
表生成岩阶段	古常温 或常温	混层 消失带	含铁矿物铁白云石、泥晶菱铁矿的褐铁矿化, 烃类氧化降解, 裂缝发育																

先结晶的伊利石,对储层发育不利,自生石英的沉淀作用也在该阶段发生,部分次生孔隙壁生长出自形程度高的自生石英随处可见。由于这个阶段有机质处于低成熟—成熟阶段,是主要的液态烃排出期,观察岩石薄片可见长石裂缝、剩余原生粒间孔、次生粒间孔、粒内溶孔、伊利石晶间孔等被少量的油和沥青浸染和充填。

3.3 晚成岩阶段

该阶段发育在4000 m至大于4500 m的深度,主要为恩平组地层(包括少数井的珠海组下部)。该阶段 R_0 大于2.0%,最大热降解温度大于490°C,流体温度为175~200°C。伊/蒙混层中的蒙皂石含量小于15%,有机质演化进入高成熟阶段。

该阶段伴随有机质由成熟向高成熟阶段的演化,含氧化合物多官能团的羰基和羧基的脱落已明显减少,地层产生有机酸的能力已大幅度减弱,有机酸浓度降至极低,并被热作用破坏,致使此阶段的地层水由酸性逐渐向碱性转化。在碱性介质条件下,富含钙、镁、铁离子的碱性水开始沉淀出含铁方解石和含铁白云石。因此,该阶段以自生矿物广泛发育

为特征,常被称为晚期胶结成岩带。主要的自生矿物包括自生纤维状伊利石、铁白云石、硬石膏、少量的自生钠长石和绿泥石、绿/蒙混层等自生矿物,尤其是硬石膏胶结,是导致该阶段储层质量变差的主要原因。

该阶段粘土矿物伊/蒙混层已由部分有序混层发育形成有序混层。在扫描电镜中观察到的自生粘土矿物包括自生高岭石、绿泥石和绿/蒙混层,其中以伊利石中微孔最高。发育在各种自生粘土矿物中的微孔孔径多在0.1~10 μm 。由于砂岩微孔中的结合水不容易流动,这就影响了储层的渗透性、含水饱和度和岩石电阻率。该阶段结束时,珠海组及恩平组储层砂岩的平均孔隙度已降低至6%~12%。

4 结论

(1)惠州地区深层储集岩主要为长石砂岩、长石石英砂岩以及岩屑长石砂岩,岩石粒度以中粗粒为主,分选较差,成熟度较低。

(2)成岩作用直接影响着孔隙类型及演化。破

坏性成岩作用以压实及胶结作用为主,使得砂岩中的粒间孔减少、减小,原始孔隙度和渗透率明显降低。建设性成岩作用以溶蚀作用最为重要,次为破裂作用,大量次生溶蚀孔隙的发育改善了储层的孔隙结构及孔渗性。

(3)深部储层经历了多期成岩阶段,大部分达到了中成岩阶段B期,部分进入晚成岩阶段。早成岩阶段,压实作用造成原生孔隙度迅速降低;中成岩阶段,有机酸热液进入排出的高峰期,长石、岩屑及杂基等易溶组分发生溶解,次生孔隙大量形成,晚成岩阶段有机酸浓度降至极低,地层水逐渐碱化,自生矿物的胶结作用导致储层质量变差。

References

- Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, *et al.* 2003. The Conditions of Hydrocarbon Accumulation of Tertiary Petroleum System in Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Science Press, 147~170 (in Chinese).
- Feng Zengzhao. 1993. Sedimentary Petrology (II) [M]. Beijing: Petroleum industry Press, 58~66 (in Chinese).
- Tuo Jincan, Wang Xianbin, Zhou Shixin, *et al.* 1999. Current state and research evolution of deep reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 10 (6): 1~7 (in Chinese).
- Wang Wei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, *et al.* 2009. Diagenesis and porosity evolution of reservoir in the 2th member of Xujiahe Formation of Guang'an Structure in central Sichuan region [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2(3): 14~19 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuqiang and Xian Xuefu. 2006. Current state and countermeasure of

deep reservoirs exploration [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(2): 68~71 (in Chinese with English abstract).

- You Guoqing, Pan Jiahua, Liu Shuqin, *et al.* 2006. Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(3): 237~242 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Junmao and Pang Ming. 1989. Study on Clastic Diagenesis [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 110~120 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Geng Wei, Zhou Gang, *et al.* 2007. Diagenesis and diagenetic facies of Chang 6 sandstone of Yanchang Formation in Baibao area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 19(2): 1~7 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件 [M]. 北京: 科学出版社, 147~170.
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学(第二版)上册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 58~66.
- 妥进才, 王先彬, 周世新, 等. 1999. 深层油气勘探现状与研究进展 [J]. 天然气地球科学, 10(6): 1~7.
- 王伟, 王兴志, 张帆, 等. 2009. 川中广安构造须家河组须二段储层成岩作用与孔隙演化 [J]. 复杂油气藏, 2(3): 14~19.
- 吴富强, 鲜学福. 2006. 深部储层勘探、研究现状及对策 [J]. 沉积与特提斯地质, 2(2): 68~71.
- 游国庆, 潘家华, 刘淑琴, 等. 2006. 东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 237~242.
- 郑浚茂, 庞明. 1989. 碎屑储集岩的成岩作用研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 110~120.
- 郑荣才, 耿威, 周刚, 等. 2007. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6砂岩成岩作用与成岩相研究 [J]. 岩性油气藏, 19(2): 1~7.