

[文章编号] 1005-9539(2001) 03-0255-05

深部储层储集空间类型划分方案探讨 ——以胜利油区渤南洼陷沙四段为例^{*}

刘家铎¹, 吴富强²

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059; 2. 重庆大学)

[摘要] 通过对胜利油区渤南洼陷深部储层特征的研究, 提出了深部储层孔隙类型划分方案, 将孔隙划分为原生孔隙、次生孔隙和混生孔隙三大类; 将裂缝划分为构造缝、重力滑移缝、异常压力缝、成岩缝、原生缝、塑性变形面、溶蚀裂缝七大类, 把裂缝型储层提到了与孔隙型储层同等重要的位置, 强调了泥岩裂缝型储层的重要性。

[关键词] 深部储层; 原生孔隙; 次生孔隙; 混生孔隙; 泥岩裂缝

[分类号] TE122.23

[文献标识码] A

分类问题是自然科学中极其重要的研究课题之一, 孔隙类型划分也不例外, 它是储层这个多方位、多层次学科研究的基础, 取决于人们对错综复杂孔隙类型的认识程度和技术水平, 直接影响着油气田的勘探开发。关于孔隙类型的划分, 前人曾从不同角度提出过很多方案, 归纳起来, 大致有四类:

a. 按成因可划分为原生、次生和混生, 每一类型又进一步划分为若干次一级类型, 这是目前国内外较流行的一种分类, 如 Schmidt 等的分类。成因分类尽管反映了事物的本质, 但有些孔隙类型的成因不易确定, 应用起来有一定困难。

b. 按大小可分为超毛管孔隙(孔隙直径 $> 500 \mu\text{m}$)、毛管孔隙($0.2 \sim 500 \mu\text{m}$)、微毛管孔隙($< 0.2 \mu\text{m}$)。这种分类着重强调了孔隙几何形状对渗流作用的物理意义, 但未考虑其成因。

c. 既考虑成因, 又考虑大小可分为: 粒间孔、溶蚀孔、微孔($< 0.2 \mu\text{m}$)及裂缝, 如 E. D. Pittman 的分类。其中的微孔隙是按大小划分的, 其他则是从成因角度划分的。

d. 以孔隙产状为主, 可分为粒间、粒内、填隙物内孔隙及裂缝; 再考虑溶蚀作用, 进一步可划分为溶蚀粒间、溶蚀粒内、溶蚀填隙物内孔隙及溶蚀裂缝^[1]。

笔者在胜利油区渤南洼陷深部储层研究过程中, 深感上述分类方案都有各自的分类依据, 理论上

似乎也都可以区分开来, 但在实际判别上仍有许多困难; 更为重要的是深部储层与中浅部储层有着质的差别。人们一般将埋深大于 3500 m 的储层称为深部储层, 其在形成环境和成岩阶段上都与中浅部储层有很大不同; 因此, 有必要提出一种适合深部储层特色的孔隙结构分类方案。

1 深部储层与中浅部储层有着质的差别

深部储层与中浅部储层有着质的差别: 在环境上, 深层温度高、盐度高、应力复杂、异常压力普遍。浅部一般以水平应力场为主, 纵弯褶皱发育; 深部一般以垂直应力场为主, 横弯褶皱发育。深层成岩作用强烈, 多已进入成岩晚期; 有机质演化程度高, 多已达到成熟甚至过成熟阶段。油的粘度、密度、表面张力大大下降、重力特性接近、相界面消失, 油气藏可存在于压力达 100 MPa(可能更高, 高压延迟了油气的生成和成熟、抑制 C_{15}^+ 烃的热破坏性)、温度达 $350 \sim 400^\circ\text{C}$ 的环境, 以轻质挥发性油藏、凝析油气藏、气藏为特征; Price(1993) 从数口深井和模拟实验的研究得出, 在 R_o 为 $2.0\% \sim 5.0\%$ 的范围内, C_{15}^+ 烃类能保持中等到较高浓度; 当 R_o 为 $7.0\% \sim 8.0\%$ 时, 仍有微量可检验的 C_{15}^+ 烃。Burass(1993) 指出甲烷不存在其稳定性的温度上限。最近美国联邦地质调查局的一份报告指出, 甲烷在 R_o 大于 4%

^{*} [收稿日期] 2001-02-08

[作者简介] 刘家铎(1949—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 沉积学专业。(E-mail: lj@cdut.edu.cn)

时,还能稳定存在,并有形成商业性气藏的可能,因此油气消亡界限有待重新认识。深部储层储集性能主要受地球动力学、热力学控制,而不像中浅部储层那样主要受重力作用、大气降水作用控制。某些储层由于强烈的成岩作用和次生变化,会全然失去自身的渗透性;而粘土层由于失水、固化,加上非均匀温度场、应力场、地球化学场使其发生自组织,形成由断裂、次生变化带限制的不同尺寸、不同材料的“砖块”结构,每一“砖块”结构可形成独立圈闭,即区块型层状储集层(硬石膏、钙质泥岩、粉细砂岩)。在深部储层中裂隙对油气不仅起着输导作用,而且起着储集作用,是重要的储集空间和渗流通道^[2]。

2 深部储层储集空间类型划分方案探讨

根据笔者对深部大量碎屑岩储集层铸体薄片、扫描电镜、阴极发光以及岩芯的观察,通过宏观、显微、超显微多层次、多尺度的研究,提出了渤南洼陷深部储层储集空间类型划分方案(表 1)。

表 1 深部碎屑岩储集空间类型划分方案
The classification scheme of the pore types
of the deep reservoir

孔 隙 型	裂 缝 型
(一) 原生孔隙 1. 粒间原生孔 ①完整粒间原生孔 ②充填剩余粒间孔 2. 粒内原生孔 3. 粘土矿物杂基、灰泥基质内微孔隙 (二) 次生孔隙 1. 粒间溶孔 ①部分溶蚀粒间孔 ②港湾状溶蚀粒间孔 ③伸长状溶蚀粒间孔 ④铸模孔 ⑤超大孔 ⑥贴粒孔 2. 粒内溶孔 3. 易溶胶结物溶孔 4. 自生矿物晶间微孔 (三) 混生型	(一) 原生缝 1. 矿物解理 2. 纹理及层理缝 3. 缝状粒间孔 (二) 成岩缝 1. 差异压实缝 2. 网状收缩缝 3. 压溶缝 (三) 构造动力缝 (四) 重力滑移缝 (五) 异常压力缝 1. 水热增压缝 2. 气体炸裂缝 (六) 塑性变形面 1. 破劈理 2. 各种位错滑移面 七、溶蚀裂缝 上述各种裂缝的再溶蚀

值得一提的是,由于在济阳坳陷已有数百口井在深层泥岩裂缝地层中发现了良好的油气显示,其中数十口井获工业油流或高产工业油流,如罗 19 井、罗 20 井、罗 42 井、罗 48 井、新义深 9 井、郭 7 井、新郭 3 井、大 93 井等,这些裂缝型油气藏的储量

和数量在中国都占有相当大的比例,在盆地深部分布广泛,且随着各盆地勘探程度的提高,这类储层所占比重还将会逐年增大,因此有必要把裂缝型储层提到与孔隙型储层同等重要的位置。这便是作者把深部碎屑岩储集空间划分为孔隙和裂缝型两大类的原因所在。当然这两大类并不是单独出现,而是常常同时出现,但在泥岩储层中以裂缝为主,而在砂岩储层中以孔隙为主^{[3],[4]}。

2.1 深部孔隙型储层储集空间类型

根据成因可进一步分为三大类:原生孔隙、次生孔隙和混生孔隙。

2.1.1 原生孔隙

原生孔隙是指岩石在沉积过程中形成的孔隙,形成后没有遭受过溶蚀、交代等重大成岩作用的改造。

a. 粒间孔隙以其中充填杂基及胶结物的多少,可进一步划分为完整粒间原生孔和充填胶结剩余粒间原生孔。完整粒间孔是指粒间孔隙中基本无充填物;剩余粒间孔是指粒间孔隙中有部分充填物,是岩石经受了机械压实、石英或长石再生长以及其他胶结物的充填作用之后所剩余的粒间孔隙。

b. 粒内原生孔是指碎屑颗粒内部没有溶蚀、交代迹象,如玄武岩气孔等,这类孔隙大都是孤立或基本不连通的,因而对油气的聚集作用不大。

c. 另外粘土矿物杂基、灰泥基质内的微孔隙也隶属于原生孔隙。

d. 原生孔隙的共同特点是:颗粒、充填物或孔隙均看不到溶蚀、交代迹象,一般形状较规则,几乎没有犬牙状、港湾状、不均匀堆积等现象。例如在义 170 井 3820.87 m 井段,在灰色含砾粗粒岩屑长石砂岩中可见呈三角形的原生孔隙。这类孔隙在渤南洼陷沙四段中很少见,据统计在孔隙类型中所占比例不到 15%,这说明渤南洼陷沙四段已经历了很强的成岩作用,原生孔隙已被改造得面目全非,所剩无几。

2.1.2 次生孔隙

次生孔隙是指岩石经成岩作用改造后形成的,最主要的类型是溶蚀孔,还有少数交代、胶结作用形成的晶间孔,这类孔隙除少数具有原沉积物组构特征外,绝大部分为非组构孔隙。溶蚀孔隙是指成岩过程中由于溶解作用而形成的孔隙,溶解作用的强度控制次生孔隙发育的丰度与类型,可将其进一步划分为:粒间溶蚀孔隙、粒内溶蚀孔隙和充填物内溶蚀孔隙。

a. 粒间溶孔是指粒间物质遭受溶蚀后所形成的,这类孔隙位于碎屑颗粒间,根据溶蚀部位产状及程度的不同可进一步分为:部分溶蚀粒间孔、港湾状溶蚀粒间孔、伸长状溶蚀粒间孔、铸模孔、超大孔等。

(1) 部分溶蚀粒间孔是指粒间孔隙周围的颗粒,如石英、长石、岩屑以及填隙物部分被溶蚀并保留有溶蚀痕迹者。

(2) 港湾状溶蚀粒间孔是指碎屑颗粒或填隙物被溶蚀成港湾状的粒间孔隙。如义160井3582.20 m井段深灰色粉砂质灰岩中碎屑颗粒间被溶蚀成港湾状。

(3) 伸长孔是指相邻粒间孔隙的喉道同时受到溶蚀,导致多个粒间孔隙连成长条状孔隙者,有利于油气的运移聚集。

(4) 贴粒孔:围绕着长石、石英等碎屑颗粒溶蚀形成的环形孔。

(5) 铸模孔是指一些碎屑颗粒或填隙物晶粒被溶蚀而残留的印模孔隙,即仍保留颗粒外形的孔隙。

(6) 超大粒间孔隙是指岩石受到了强烈的溶蚀作用,导致多个颗粒及周围填隙物都被溶蚀而形成的明显大于孔隙周围最大颗粒的次生孔隙。

b. 粒内溶蚀孔隙是指不稳定碎屑颗粒、岩屑内部,或沿颗粒解理等易溶部位,局部发生选择性溶解形成的孔隙。例如沿斜长石解理常发生选择性溶蚀,形成串珠状溶蚀粒内孔隙以及岩屑溶蚀后形成蜂窝状粒内溶孔,这两类孔隙虽然个体直径比较大,但由于溶蚀颗粒零星分布,因而连通性较差。

c. 胶结物溶孔主要是指可溶胶结物,如碳酸盐类、石膏等,经溶蚀所形成的孔隙;当溶蚀作用强烈时,此类孔隙即可转化为粒间溶孔。

由于交代作用与溶蚀胶结作用所形成的孔隙很难区分,故由矿物的交代所引起体积的缩小所形成的孔隙,暂归入溶孔。

d. 自生矿物晶间微孔。值得一提的是,笔者把自生粘土矿物晶间微孔归入次生孔隙范畴,理由是自生粘土矿物是在成岩过程中形成的,因此理应归入次生孔隙范畴。而通常所说的微孔隙既包括自生粘土矿物晶体之间的微孔隙,又包括陆源粘土杂基中的细小孔隙,也可以是填隙物局部被溶蚀而形成的细小溶蚀孔隙。这类孔隙均质性差、孔隙小(一般在1~10 μm),所以连通性最差;但填隙物内晶间微孔隙在深部储层中比较重要,特别对天然气来讲是不容忽视的储集空间。

在扫描电镜(SEM)下常见到自生高岭石、伊利石、绿泥石晶间微孔隙,其中高岭石多呈分散状,即孔隙充填式分布。因其比较分散,对孔隙的破坏作用相对小些;而蒙脱石、伊/蒙混层、绿泥石主要以薄膜式分布,使孔、渗性变差。如义160井3594 m处岩性为灰黑色长石砂岩,面孔率高达15%,扫描电镜下观察自生矿物以高岭石为主,多呈书页状,对储层孔渗性破坏不大,形成高岭石晶间微孔。义160井3601.4 m处岩性为灰绿色粉细砂岩,方解石胶结物占7%,而伊利石高达10%以上,呈搭桥式堵塞孔隙,孔隙不均匀,均质性差,致使储层孔渗性较差。

另外自生石英、碳酸盐胶结物间的晶间微孔隙也隶属于次生孔隙范畴。

e. 溶蚀孔隙的识别标志有:胶结物部分溶解,颗粒部分溶解,铸模孔、超大孔、伸长孔、贴粒孔、晶内孔、粒内溶孔,颗粒和孔隙形态各异:锯齿状、漂浮状、孤岛状、港湾状、犬牙状、蜂窝状等,不均一排列、不均匀填集(紧密域表明经过压实,稀疏域表明经过溶解),各种裂隙等溶蚀交代痕迹;还可以通过一些宏观标志识别次生孔隙,在测井深度剖面上分析电测孔隙度或岩石实测孔隙度也可以发现次生孔隙发育带。

在砂岩储层研究中,识别次生孔隙极其重要,沙穆甘总结了世界上若干较大砂岩油田的储集空间类型,发现其中多数油田以次生孔隙为主要储集空间。这类孔隙是渤南洼陷沙四段储层主要储集空间类型,据统计在孔隙型中所占比例高达85%。

2.1.3 混生孔隙

从理论上讲,次生孔隙是在原生孔隙基础上发育起来的,而且目前次生孔隙大都包含有原生孔隙的剩余部分,确切地说,它们应当是原生与次生孔隙的混合。如在成岩早期原生孔隙部分被胶结,形成充填剩余粒间孔;在成岩晚期胶结物又被溶解形成部分溶蚀孔,因此目前的孔隙应当由充填剩余粒间孔和部分溶蚀孔组成。又例如原生孔与次生孔有时很难区分,如有些粒间孔在早成岩阶段,即有机质未成熟期被自生矿物充填胶结;而在晚成岩A期即有机质成熟期,这些胶结物又被强烈溶解,但颗粒却未受到任何损害,因而孔隙中看不到任何溶蚀痕迹。若按V·Schmidt等的成因分类,它应属于次生孔隙;但在实际操作中,却很难把它与原生孔隙区分开来。对于这类孔隙,目前由于认识能力,尤其是仪器分辨率有限,暂且把它归入次生孔隙类。

2.2 深部裂缝型储层储集空间类型

根据成因可分为七大类:

2.2.1 原生缝

原生缝是指在沉积作用过程中及其以前已形成的裂缝,形成后没有遭受过溶蚀、交代等重大成岩作用的改造。如沉积作用过程中形成的纹理、层理、页理缝,沉积以前形成的矿物解理、火成岩岩屑的节理以及粒间孔隙基本被填隙物充填形成的缝状粒间孔。

2.2.2 成岩缝

成岩缝是指在成岩过程中形成的微裂缝。由于压实程度的差异,在局部产生垂向上的剪应力而形成差异压实缝,包括由于碎屑与填隙物的差异收缩压实而在砾(粒)缘形成的砾(粒)缘缝,常包围或半包围颗粒并多有溶蚀。差异压实裂缝产生的最有利部位是不同沉积相的过渡带以及大型三角洲砂体、水下浊积砂体、近源浊积扇砂体相的前缘与泥岩过渡带的突出、急弯、内凹等部位。压实作用、脱水收缩作用、重结晶作用,使泥页岩固结、坚硬性增强,在脱水过程中形成的网状、放射状裂缝,称之为网状收缩缝。进一步压实,发生力-化学反应,颗粒发生不均匀的溶解,形成含有不溶残余物的压溶缝。例如义 170 井 3815.37 m 铸体薄片为灰绿色粉砂质泥岩,烃类及黄铁矿沿泥岩成岩裂隙呈星点状、团块状分布。又如义 17 井 3430.90 m 铸体薄片最为典型,石膏脱水形成硬石膏,形成成岩裂隙系统,即无规则的网络状、树枝状裂隙系统,而后被烃类侵入充填,形成硬石膏型储层。

2.2.3 构造缝

构造缝是指岩石在构造应力作用下形成的裂缝,其特点是裂隙分布较规则,常呈等间距排列,有些裂缝局部或全部被方解石、石英等矿物(有的为矿物膜)充填。构造缝是本区泥岩、泥灰岩中最主要的一种裂缝,在岩芯中看到的各种产状的宏观裂缝,多数为构造裂缝。根据力学性质的不同,可分为张性缝、剪性缝及张扭、压扭性缝等。例如义 161 井 3480.10 m 灰绿色含砾粗粒长石砂岩中,见到左行排列的雁行状张扭裂隙,也见到黑云母挠曲成 S 形,甚至假杂基化。义 161 井 3484.50 m 粉砂质泥岩中发育两期方解石脉。义 160 井 3609.12 m 井段灰黑色岩屑长石砂岩,扫描电镜下见沥青不规则破裂,说明成藏后又受到应力改造作用。

2.2.4 重力滑移缝

重力滑移缝是指由于重力作用沿泥页岩等软弱面发生的层间滑动,这种现象在渤南洼陷沙四段岩芯中较常见,有顺层的、也有切层的,滑脱面上常见不同期次的镜面擦痕、绿泥石薄膜等。

2.2.5 异常压力缝

异常压力缝是指由于水热增压、排烃作用等形成的异常高压,致使泥页岩破裂而形成的裂缝。Lerche (1990) 提出当流体压力(P)达到上覆负荷压力的 85% 时,水压破裂作用即可发生。Meissner (1978) 和 Du Rouchet (1981) 提出,若流体压力超过了最小压应力和岩石抗张强度,则有利于发生石油排出的张裂作用。Ungerer (1987) 和 Wang (1993) 提出当流体压力超过最小主应力,且接近最大主应力时,页岩渗透率呈指数增加。流体压力系数介于 1.4 ~ 1.8 左右时就可使裂缝张开,微破裂大小超过正常岩石通道的许多倍,渗透率增加几个数量级。渤南洼陷沙四段压力系数高达 1.67,因此异常压力缝也应该存在。

2.2.6 塑性变质变形

塑性变质变形是深部高温高压环境下常见的构造现象^[5]。这次通过观察研究渤南洼陷沙四段 70 个铸体薄片、19 个扫描电镜样品,发现深部储层具流变性特征,由于介质的非均质性、温度场及应力场的非均质性,通过晶内、晶间滑动形成非均质性的位错、滑移面以及物质的流动、扰曲,再加上二次地球化学作用,通过自组织(总能量来自于深部脉动性的热流体)最终形成独具特色的区块型层状储集体。

主要的塑性变质变形有:

a. 糜棱面理:糜棱岩的一个重要特征是矿物经受了塑性变形、明显重结晶以及具强优选方位的页理、面理和线理,且粒度较细。如义 170 井 3818.37 m 井段铸体薄片灰绿色岩屑长石砂岩中见一条 1.5 mm 左右的强应变带,应变带的面理、线理化显著,石英、黄铁矿略压扁拉长,石英亚颗粒现象异常发育,可定义为“初糜棱岩”。

b. 位错蠕变:石英亚颗粒现象异常普遍,在显微镜单偏光下观察仍表现为一个晶粒形态;而在正交偏光下观察可看到相邻亚晶粒间消光位不同,表现为多个颗粒特征。它是高温环境下的一种塑性变形机制,即温度大于 $0.3 T_m$ (为石英熔融温度),恢复作用显得重要起来,位错可以自由地扩展,符号相同的位错叠加形成位错壁,将一个颗粒分隔为几个亚

颗粒,似多边形化。石英的核幔构造也可见到,它是一种动态重结晶作用,即在温度高的条件下,形成新的重结晶颗粒,使初始变形的大晶粒分解为许多无位错的细小新晶粒,如果大颗粒还没完全分解,就形成核幔结构。

c. 扩散蠕变:是一种通过扩散物质的转移而达到颗粒形态改变的作用,即力-化学作用,物质在高应力的边界处溶解,在低应力边界处沉淀,也称压溶作用,是浅变质区的一种重要变形机制。

d. 破劈理:义 160 井 3680.09 m 浅紫色长石砂岩,镜下见到 6 条近平行的、等间距排列的破劈理,即不连续劈理类中的间隔劈理。劈理域(0.3~0.6 mm)中充填着具定向排列的粘土、云母等不溶残余物,实质上是由压溶作用产生的不溶残余物堆积而成;微劈石由石英、长石等浅色矿物集合体组成,也称 QF 域。

2.2.7 溶蚀裂缝

本区泥岩裂缝的溶蚀作用不太发育,岩芯上见到的裂缝多数被充填,充填物以钙质为主,也见泥质、硅质等,沿裂缝见到局部的溶蚀现象。

[参 考 文 献]

- [1] 邸世祥. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构[M]. 西安: 西北大学出版社, 1991.
- [2] Еременко Н. А., Ботнева Т. А. 深部油气藏[J]. Геология Нефти и Газа, 1998, (1): 6-11.
- [3] 吴富强. 页岩中微裂隙的形成机制[J]. 石油地质信息, 1997, 18(2): 126-128.
- [4] 吴富强. 孔隙砂岩中断层带岩石物理性质[J]. 天然气勘探与开发, 1997, 20(2): 35-45.
- [5] 钟增球, 郭宝罗. 构造岩与显微构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.

DISCUSSION ON CLASSIFICATION SCHEME OF THE PORE TYPES OF THE DEEP RESERVOIR

—— Taking the upper part of the Member ⁴, Shahejie Formation, in Bonan Subsag, Shengli Petroleum Province for example

LIU Jia-duo¹, WU Fu-qiang²

(¹. Chengdu University of Technology, China; ². Chongqing University)

Abstract: Through studying the petrology characteristics, the author puts forward the classification scheme of the pore-fissure types of the deep reservoir and emphasizes the fissure reservoir. The pore types of the deep reservoir are divided into three types, namely, the primary pore, secondary pore, and mixing pore. The fissure types of the deep reservoir are classified as seven types, namely, the structure fissure, gravity fissure, abnormal fissure, diagenetic fissure, primary fissure, plastic fissure as well as solution fissure.

Key words: deep reservoir; primary pore; secondary pore; mixing pore; argillite fissure