

文章编号 :1000-0550(2001)02-0224-09

地下孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化及影响因素^①

黄思静 侯中健

(成都理工学院油气藏地质及开发工程国家重点实验室,沉积地质所 成都 610059)

摘要 地下岩石孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化受众多因素控制,总的说来,包括沉积与成岩两个最为主要的因素。沉积盆地的性质和沉积环境控制了沉积物的组成、岩石的结构和原生孔隙。沉积作用所经历的时间相对较短而进程较快,成岩作用所经历的时间相对较长而进程较慢。从对孔隙率和渗透率的控制作用来说,成岩作用的研究难度相对较大。近年来,一些传统的形成地下岩石次生孔隙的机制受到挑战,这些传统机制中最为主要的是有机酸对铝硅酸溶解形成次生孔隙,但这会造成介质 pH 值的升高,碳酸盐矿物和高岭石的沉淀。地下岩石中碳酸水溶解产生的次生孔隙也是有限的。新的机制如大气淡水的溶解作用,深部冷却地下水的溶解作用,硅酸盐的水解都得到了人们的普遍接受,这对于次生孔隙成因的解释及地下岩石孔隙率和渗透率的预测十分重要。对于碳酸盐岩来说,与不整合面附近的古喀斯特有关的油气藏得到了更多的关注。深埋藏过程中碳酸盐岩成岩作用的研究中,温度和压力的影响对不同碳酸盐矿物溶解及沉淀作用的差异性控制了地下碳酸盐岩孔隙率和渗透率分布。

关键词 地下岩石 孔隙率和渗透率 储层预测

第一作者简介 黄思静 男 1949 年出生 教授 博士生导师 沉积岩石学专业。

中图分类号 P618.130.2⁺1 TE122.2⁺3 **文献标识码** A

1 概述

沉积盆地中具有重要经济价值流体(包括烃类、液态矿产和成矿流体)的产生、运移和赋存,无一不涉及到地下物质的组成及其结构,尤其是地下的孔隙率和渗透率。研究地下孔隙率和渗透率随时间和空间的变化及其控制因素对于盆地内固体矿产和烃类资源的勘探,甚至对于在盆地中进行废物存放,都具有至关重要的意义。在盆地模拟中,孔隙率和渗透率是极为重要的参数^[1],孔隙率和渗透率受沉积盆地的构造因素、沉积因素、水动力学因素和地球化学因素的控制,对一个给定盆地而言,这些因素实际上影响了盆地演化的全部过程。在确定烃类和矿床的聚集中,对与孔隙率和渗透率密切相关的水动力学状态和流体流动方式的理解则显得尤为重要^[2~4]。

就过程而论,沉积盆地中地下沉积物的孔隙率和渗透率受沉积岩形成作用的两大过程控制:一是沉积岩形成的第一阶段,它包括了从风化、搬运、沉积,一直到沉积物埋藏前的各种地质作用,它们涉及了各种物理过程与化学过程;第二是沉积岩形成的第二阶段,包括了沉积物埋藏以后的各种地质作用,即所谓成岩作用,它们涉及了另一系列的化学过程与物理过程。从

时间与进程来说,第一阶段所经历的时间相对较短而进程较快,第二阶段所经历的时间相对较长而进程较慢,从其对孔隙率和渗透率的控制作用来说,第二阶段的研究难度相对较大。

2 沉积作用对孔隙率和渗透率的控制

沉积作用决定了盆地沉积物的原始性质,包括地下沉积物的原始孔隙率(即所谓原生孔隙)和可能的渗透率状况。原始孔隙率的主要构成部分是原始粒间孔隙,它将对岩石的最终孔隙率产生影响。岩石的粒间体积孔隙率可按如下公式^[5]计算:

$$\phi_{IG} = IGV - C_{em} - M_{ix}$$

ϕ_{IG} 粒间体积孔隙率; $I GV$ 粒间体积; C_{em} 粒间胶结物体积; M_{ix} 粒间杂基体积。

在沉积物进入沉积盆地以后,盆地的水动力状况控制了碎屑颗粒的形状、粒度、分选状况、排列方式、圆度,从而控制了岩石的初始孔隙率。在这些参数中,粒度和分选对孔隙率的影响最为重要(表 1)。

沉积盆地的性质在一定程度上控制了沉积物的性质。各种大陆裂谷盆地(包括陆内裂谷盆地、陆缘裂谷盆地以及陆间裂谷盆地)、拗拉槽盆地和被动大陆边缘盆地,其原始沉积物都是以大陆环境下的粗碎屑—细

^① 西南石油学院油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目

表 1 人工混合的湿填集砂中,其粒度和分选性与孔隙率(%)的关系*

Table 1 Porosities(percent) of artificially mixed and wet-packed sand

粒度	粗		中		细		极细		平均孔隙率	标准偏差/%
	高端	低端	高端	低端	高端	低端	高端	低端		
极好	43.1	42.8	41.7	41.3	41.3	43.5	42.3	43	42.4	0.8
非常好	40.8	41.5	40.2	40.2	39.8	40.8	41.2	41.8	40.8	0.6
好	38	38.4	38.1	38.8	39.1	39.7	40.2	39.8	39	0.8
中等	32.4	33.3	34.2	34.9	33.9	34.3	35.6	33.1	34	1
差	27.1	29.8	31.5	31.3	30.4	31	30.5	34.2	30.7	1.8
极差	28.6	25.2	25.8	23.4	28.5	29	30.1	32.6	27.9	2.8
平均孔隙率	35	35.2	35.3	35	35.5	36.4	36.7	37.4		
标准偏差/%	6	6.3	5.5	6.2	4.9	5.3	5	4.2		

* 据 Beard 和 Weyl,1973^[6]

碎屑沉积物为主,只是在其上部(即晚期沉积)可能形成碳酸盐岩及蒸发岩。在汇聚型板块边缘盆地(沟—弧—盆系)中,海沟盆地、弧前盆地、弧间盆地,甚至弧后盆地,其原始沉积物的主要成分是火山物质和细粒的海洋沉积物,而前陆盆地和残留洋盆是以海相、海陆交互相及磨拉石建造为特征,山前盆地、山间盆地则是典型的陆相沉积盆地。一般来说,对于克拉通盆地,由于其缓慢沉降幅度而导致沉积物厚度相对较小。沉积类型包括了浅海相的页岩、碳酸盐岩、蒸发岩,无深海沉积物和火山活动的产物。转换断层或走滑断层盆地的原始沉积物充填较为复杂。这些不同盆地中的沉积作用,奠定了盆地中孔隙率和渗透率在时间和空间上变化的基础,包括直接影响地下岩石最终孔隙率和相应渗透率的碎屑的成分、颗粒的大小、分选和磨圆程度。对于碳酸盐岩而言,除了“原生孔隙”以外,实际上还更多地地为成岩作用提供了更为重要的物质基础,也就是说,碳酸盐岩对成岩作用有着更强的敏感性,成岩作用对原生孔隙的改造和交代次生孔隙的发育起着比碎屑岩更为重要的作用。

在沉积盆地性质控制沉积物孔隙率、渗透率的实例中,我国东部发育的第三系的断陷盆地有着其独特的意义,这些盆地具有如下特征:1)规模小、发育时间短、分割性强、有较大的活动性,同时,盆地沉降速率很快;2)与断裂关系密切,尤其受北东向断裂的控制,由于边缘断裂的长期活动,使盆地内的相带与断裂平行,并沿边缘断裂形成巨厚的冲积扇带(包括水下扇和扇三角洲)。盆地的这种性质控制了包括风化、搬运作用在内的沉积作用全过程。快速的风化、快速且短距离的搬运(除牵引流外,还同时存在沉积物重力流),以及快速的埋藏作用使沉积岩形成的全过程都在短时间内完成,从而造就了一种在成分和结构上成熟度极低的

陆源碎屑岩。尽管由于缺乏强烈的压实作用而有较多的原生孔隙保存,但在结构与成分上的双重低成熟以及沉积物间掺合作用的缺乏使这类储集层在孔隙率和渗透率的分布上都具有极强的非均质性。

3 沉积物埋藏过程中地下孔隙的形成机制

沉积物埋藏过程中地下孔隙的形成机制远比沉积作用来得复杂。在沉积物埋藏过程中地下孔隙形成的必要条件包括:1)要有大量的淋滤流体的来源;2)要有流体从其产生地点向溶解层的迁移;3)要有大范围的不饱和流体的高速流动;4)地层中必须存在可淋滤矿物;5)必须有矿物溶解后孔隙率的净增长^[7]。若干物理和化学变量控制了沉积盆地中地下沉积物的孔隙率和渗透率在时间和空间上的变化,这些变量包括:1)成分;2)压力、时间、温度和湿度;3)系统的开放性和封闭性;4)烃类的侵位、粘土矿物含量和结构^[8~11]。沉积物埋藏过程中地下岩石的孔隙率和渗透率便是这些变量间复杂相互作用的结果。在下面要讨论的地下孔隙的各种形成机制都不同程度地涉及到了这些变量。

用以解释沉积物埋藏过程中地下矿物水—岩相互作用并形成孔隙的主要机制有:1)大气水的注入;2)有机质热演化产生 CO₂;3)有机质热演化释放羧酸;4)硅酸盐的水解;5)冷却地层水的流动造成碳酸盐矿物的溶解^[7]。

3.1 大气水的注入产生的孔隙

大气水对地下岩石发生影响的时间和地点包括:1)地下沉积物沉积或埋藏的初期;2)在因构造抬升或海平面下降造成的不整合面之下。

在合适的地质、水文、地球化学条件下,地下岩石

因遭受淋滤作用其孔隙将得到进一步发育^[12], 会由于以下的各种因素导致广泛的溶解作用:

(1) 大气水驱动的地下水垂向和侧向的大范围地侵入, 如在 Gulf Coast 地区, 这种侵入的深度可达到 2 km 的地下^[13]。地下水的大范围(指整个盆地范围)迁移是地下流体整体运动和热运动的重要机制^[14~15]。

(2) 大气水高的流速和相对低的温度, 不饱和水的高速注入以及低温条件下缓慢的反应速度促使了开放系统的成岩作用^[16~17]。

尽管大量的矿物遭受溶解已得到完全证实^[12, 17~21], 但该过程是极其复杂的。在岩性类似的同一砂体中, 其孔隙率可以呈现大范围的变化, 如美国南 San Joaquin 盆地埋藏深度 1 330 m 的地层中的渐新统砂岩, 由大气水对长石溶解形成的次生孔隙率的变化在 0 到 10% 之间(图 1)。当与长石溶解伴生的高岭石的沉淀不发育时, 孔隙发育得到加强, 但在更常见的情况下, 与大气水对长石溶解的同时, 还存在有高岭石的沉淀对孔隙的充填作用^[22]。

随着大气水流动路径的加长, 其淋滤能量降低^{[17][23]}, 开始对某些矿物不饱和的流体最终将因为不断与地层水的相互作用而处于饱和状态。所以, 尽管大气水的作用深度可以很深, 但大量孔隙的产生可能只限于大气水作用的上部。如我国陕甘宁盆地加里东不整合面之下的奥陶系碳酸盐地层中, 由大气水作用形成的高孔渗带的发育深度也只有 40 m 左右^[24]。尽管这些孔隙形成于近地表或浅埋藏地层中, 但岩石

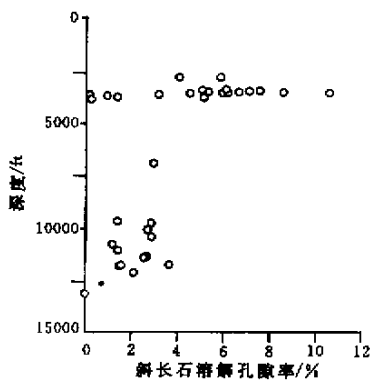


图 1 美国南 San Joaquin 盆地始新统一渐新统砂岩中, 由于大气水对斜长石溶解形成的次生孔隙, 在同一深度 3 900 ft (1 330 m) 的地层中, 孔隙率变化在 0% ~ 10% 的范围内(据 Bloch 和 Franks, 1993)^[21]。

Fig. 1 Porosities of Eocene-oligocen sandstone display a wider range of values (0 ~ 10%) at the same depth (3 900 ft) because of the plagioclase dissolution porosity (PDP) by fresh water, Southern San Joaquin basin, America (After Bloch and Franks, 1993)^[21]

在其经历二次埋藏之前就已经固结, 因而相当数量的孔隙在深埋过程中将得到继续保存。

3.2 碳酸水溶解产生的孔隙及其对碳酸盐溶解与沉淀的影响

有机质热成熟过程产生 CO_2 , 并由此形成碳酸, 它是参与地下沉积物孔隙形成的另一种重要介质^[25~28]。在约 100 °C 的温度条件下, 地下有机质分解产生 CO_2 , 形成碳酸并降低流体 pH 值, 从而导致地下碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物的溶解。如果利用产生 CO_2 的烃源岩中酸性流体与矿物的反应来考虑砂岩中次生孔隙的形成过程, 会夸大砂岩地层中 CO_2 对次生孔隙形成作用。质量平衡计算结果^[29~30]说明, 有机质的脱羧基作用所产生的 CO_2 还不足以使很多地层中砂岩发生溶解而产生大量的次生孔隙。对不同砂岩/页岩比和不同有机质丰度地层的计算也表明, 在大多数沉积盆地中, CO_2 作为溶解介质产生的溶解孔隙是有限的^[30]。

根据油页岩产生 CO_2 的动力学原理, 地层中 CO_2 丰度随温度的增加而增加可能是常见铝硅酸盐造岩矿物和碳酸盐矿物之间化学平衡的结果^[31~32]。这种新模式预测, 在大约 100 °C 的温度条件下, 过剩的 CO_2 不会使 pH 值降低, 反而被碳酸盐矿物的沉淀所消耗, 除非将这些多余的 CO_2 从系统中移走。简言之, 尽管在其它控制 pH 值的因素缺乏的条件下, CO_2 分压的增加可以引起地层中碳酸盐矿物的溶解, 但当 pH 值因硅酸盐的平衡(如长石的高岭石化作用)而受到缓冲时, CO_2 的增加不能降低 pH 值, 此时反而会造成碳酸盐矿物的沉淀。

3.3 有机酸作为产生地下孔隙的流体介质

在深埋藏地层中, 孔隙形成的另一重要过程是有机酸(羧酸)的溶解作用^[33~35]。在 80 年代末, 人们普遍认为有机酸在地下岩石孔隙形成过程中具有巨大的作用, 其原因有 3 个: 1) 沉积盆地中有机质热演化过程中因其脱羧基作用而有大量的有机酸生成, 其形成时间主要在液态烃形成前夕; 2) 与前边讨论的碳酸相比, 有机酸对各种矿物都有着更强的溶解能力; 3) 有机酸阴离子可以络合并迁移铝硅酸盐中的阳离子; 由于在地下条件下, 铝的溶解度通常极低, 因而有机酸阴离子的络合作用可以解决铝的迁移问题, 从而导致的铝硅酸盐的溶解和地下孔隙率的增加。大量碳酸盐和铝硅酸盐矿物溶解的理想温度是 80 °C 到 120 °C^[34~35], 大致相当于早成岩晚期到晚成岩早期。

较新的研究^[17, 36~37]对深埋藏地层中有机酸在孔隙形成中的作用提出了挑战。Bjørlykke 等, 1992 年^[36]的研究发现, 由长石溶解形成孔隙的过程有些发生在

较浅的地层中,同时远离产生有机酸的烃源岩。Hayes & Boles, 1992 年^[17]对美国 San Joaquin 盆地的 Stevens 油积岩的研究也发现,尽管在长石的溶解的同时也存在有机酸,但铝的含量或与有机酸阴离子的含量无关,或与长石的溶解体积无关。铝的含量比 Surdam 等^[38]和 Macgowan & Surdam^[39]的实验中预计的要低两到三个数量级;同时长石溶解的体积(平均体积 $0.9\% \pm 0.6\%$)基本上被与之伴随的高岭石的沉淀体积(平均体积 $0.7\% \pm 0.5\%$)所抵消。与之相反,在同一个沉积盆地中,处于大气水作用带的 Vedder 砂岩中,长石溶解形成的孔隙的体积显著大于沉淀高岭石的体积(分别是 $1.1\% \pm 0.7\%$ 和 $0.3\% \pm 0.4\%$)。

需要在此强调的是深埋藏地层中孔隙增加现象的存在并不能证明孔隙的产生和铝的迁移就是在深埋藏地层中发生的,孔隙的产生和铝的迁移可能发生在大气水作用带,在继续的深埋藏过程中,这些孔隙可以被保存下来,在塑性颗粒含量较低的岩石中更是如此^[21,40]。

3.4 硅酸盐的水解作用

硅酸盐的水解模式^[31,32]在某些方面与有机酸作为溶解介质的模式相矛盾,而与有机质热成熟过程产生 CO_2 作为溶解介质的模式完全矛盾。根据硅酸盐水解模式,在有铝硅酸盐存在的系统中,由于 pH 值受铝硅酸盐的平衡控制, CO_2 丰度的增加并不能降低 pH 值,与之相反,多余的 CO_2 将因碳酸盐矿物的沉淀而消耗掉。在温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,地层中有机酸的加入可以使碳酸盐溶解,但是,由于受铝硅酸盐系统中反应过程的影响,开始溶解的碳酸盐又将重新沉淀。

然而,硅酸盐的水解可以在温度超过 $100\text{ }^\circ\text{C} \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下成为碳酸盐矿物溶解的驱动力,高温条件下铝硅酸盐的平衡可以提高酸度,此时将发生碳酸盐的溶解以保持高的 CO_2 分压^[31]。硅酸盐水解模式预测碳酸盐矿物的沉淀发生在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,而当温度更高时,则发生碳酸盐矿物的溶解^[31~32]。

碳酸盐矿物在较高的温度和较大埋藏深度的条件下发生溶解已在美国得克萨斯 Gulf Coast 滨外的 Pica-roon 油田得到证实^[41]。方解石溶解之后可以建立一种“坚实地压”($> 0.85\text{ psi/ft}$),从而可防止孔隙垮塌,使高孔隙率得以保存。在 $5\ 000\text{ m}$ 到 $5\ 200\text{ m}$ 的地层中,实测孔隙率仍在 2.8% 到 28% 在范围内,空气渗透率也高达 $1\ 200\text{ md}$ ^[41]。

高盐度流体注入到含有低盐度流体的地下岩石中可导致次生孔隙的形成。高盐度流体的注入可以产生 H^+ 离子(当 a_{Na^+} 增加的时候,硅酸盐会努力维持常数

$a_{\text{Na}^+}/a_{\text{H}^+}$ 的稳定,从而引起 H^+ 离子的增加),酸度的增加可在靠近盐丘的地方或在不整合面附近(此处可发生不同盐度流体的层间混合)发生碳酸盐矿物的溶解^[42]。

3.5 冷却地层水对碳酸盐矿物的溶解作用

Giles 和 Boer 曾详细描述过这种机制^[43],其原理如图 2 所示。在初始状态下处于平衡并含有碳酸钙的孔隙水因遭受冷却作用而使其所含有的碳酸钙变得不饱和(冷却作用可使方解石的溶解度改变)。因压实作用从沉积物中释放出来的流体可以沿断层向上运移,从而在断层附近发生流体的冷却作用。在断层停止提供流体通道的部位,便可导致流体向与之相邻的岩石渗透。如果这种岩石含有方解石并具有一定的渗透率,碳酸盐矿物的溶解作用便可在在此发生。

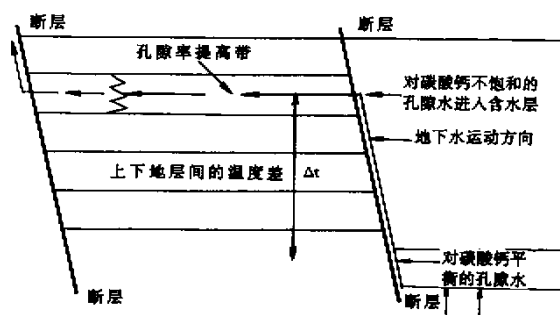


图 2 由于地下冷却地层水对碳酸盐胶结物的溶解形成次生孔隙(据 Giles 和 Boer, 1989)^[43]

Fig. 2 Creation of enhanced secondary porosities in the subsurface from the dissolution of carbonate cements as a result of cooling formation waters (After Giles and Boer, 1989)^[43]

在上面的讨论中,已埋藏的地下沉积物的孔隙由有机酸的溶解形成的理论受到了挑战,尽管这种理论是在 80 年才真正发展起来的。大气水的注入可能是沉积物孔隙增加的最有效机制,产生的孔隙在深埋藏过程中可以得到保存,尤其是当岩石中非变形颗粒含量较高的时候更是如此。在深埋的地下,硅酸盐的水解作用则是产生孔隙的另一个重要机制。

许许多多地下发生的机制并没有得到很好的认识,但它们可能与孔隙的产生密切相关。比如,Prezbindowski 和 Pittman^[44]曾经证明,埋藏沉积物孔隙的形成出现在深度 $1\ 234\text{ m}$ 到 $1\ 263\text{ m}$ 的地层中,其温度小于 $60\text{ }^\circ\text{C}$,从其地质背景可以排除大气水的影响。这种条件对于 CO_2 的淋滤作用和有机酸的形成来说,温度都显得太低,因而很难对发生溶解作用的流体作出合理的解释。这可能只是一种极少见的现象,但可能是在浅埋深度下,海相砂岩不遭受大气水流入影

响形成次生孔隙比我们通常所理解的更为常见,这应该是我们没有搞清楚的。

4 温度、压力和组成对埋藏过程中碳酸盐岩孔隙率和渗透率的影响

在碳酸盐地层中,碳酸盐矿物的溶解直接控制了碳酸盐岩的孔隙率和渗透率,碳酸盐岩的矿物组成、温度和压力三个变量和溶解速度之间的关系在近年来得到了普遍的关注,我们通过对地层条件下碳酸盐岩溶解的模拟实验研究^[45]来获取它们之间的定量关系。

在近地表的温度与压力条件下(40℃,常压)下,开放体系,以碳酸作为溶解介质时,碳酸盐岩中方解石含量越高,其溶解速率越快,即方解石的溶解速率大于白云石。

在70℃,20 MPa的埋藏温压条件下,封闭体系,以有机酸作为溶解介质时,碳酸盐的溶解过程与岩石中方解石和白云石的相对含量已无明显关系,方解石的溶解速率与白云石的溶解速率近于相等。

在温度70℃~130℃,压力20~30 MPa的温压条件下,封闭体系,以有机酸作为溶解介质时,碳酸盐岩中方解石含量越高,其溶解速率越低,即方解石溶解速率小于白云石,而且随着温度和压力的升高,白云石和方解石之间溶解速率的差值越来越大。换句话说,当温度和压力按地层增温和增压的条件同时增加时,白云石溶解速率的增加速度大于方解石。

上述实验结果的地质意义是,在近地表的浅埋藏成岩作用中,或因构造抬升或海平面下降造成的不整合面之下的碳酸盐地层中(它们经历过近地表的表生成岩作用)石灰岩中由溶解作用形成次生孔隙应比白云岩更为发育,石灰岩的孔渗性相对较好,但在相对高温高压的深埋藏地层中,白云岩中由溶解作用形成次生孔隙应比石灰岩更为发育,白云岩的孔渗性应比石灰岩更好,同时白云岩中在近地表条件下形成的孔隙在深埋藏条件下也更容易保存。这是在深埋藏地层中,白云岩油气储层大大多于石灰岩的重要原因,同时也是碳酸盐型层控贱金属矿床中,其母岩以白云岩为主的重要原因。

5 地下硅质胶结物的沉淀作用及其对孔隙率、渗透率的影响

在前边的讨论中,已涉及到了碳酸盐矿物的沉淀作用,但碎屑岩中另一最为常见的胶结物—硅质胶结物的沉淀机理尚未涉及,本节将讨论地下硅质胶结物的沉淀作用,它们对碎屑岩地层的孔隙率和渗透率会发生影响。

我们过去的研究通常认为,石英的沉淀通常发生在埋藏成岩作用的相对较晚期阶段,至少是有机酸大量生成(温度>80℃)的酸性条件下,这里除了石英需要在酸性条件下沉淀这一因素外,此阶段长石溶解(同时生成高岭石)和蒙皂石向伊利石转化提供硅质来源是第二个重要因素。通常的岩石学研究也表明,自生石英的沉淀(包括碎屑石英的次生加大)是与长石的溶解和粘土矿物的转化相伴的。

然而,新近从岩石学研究(如 Lynch,1996^[46])获得的成岩矿物间的关系也经常与上述关系不一致,石英的沉淀发生在较早的成岩阶段,然后才是方解石和高岭石的形成以及次生孔隙的发育。墨西哥湾盆地古新世的 Wilcox 砂岩^[47~48],渐新世的 Vicksburg 和 Frio 砂岩^[49~52]以及中新世的砂岩^{[41][53]}也有类似的现象。

这些砂岩的重要特征是缺乏象缝合线构造、石英间的相互穿插等表明岩石经历较强成岩作用的证据。阴极发光扫描电子显微镜分析显示:过去被认为是石英间穿插的结构,现在证实是在自生石英沉淀过程中石英的破碎裂隙及其以后恢复的结果^[54]。此外,新近的研究也说明,一些砂岩和页岩在成岩期间处于开放的化学系统中。

因而砂岩中石英胶结物可以在相对低的温度下,埋藏较浅的条件下,即成岩作用相对较早的阶段形成。Lynch^[46]用盆地地中热流体向上流动来解释这一现象,经历早期埋藏成岩作用、处于较浅地层中的砂岩中石英胶结物(包括碎屑石英的次生加大)的出现是携带硅质的深部热流体向上运移的结果。埋藏成岩阶段形成的胶结物的分布与地下流体流动和岩石的渗透率有关。如在墨西哥湾盆地中,渐新世的 Frio 砂岩,作为石英胶结物沉淀的硅质来源于其下深达中新世的地层中^[46],它们可以在垂向上通过热流体长距离(超过1 km)的迁移,从而造成浅部沉积物的胶结作用。相对深部的泥岩地层中发生的蒙皂石向伊利石转化反应产生的硅已足以造成石英的次生加大^[54,56~57]。Williams等^[58]的研究也表明,来源于相对深部蒸发盐地层的高温、高盐度压实水的侵入同样可以提供硅质来源,这些结论都已得到胶结物同位素资料的证实。

6 不整合面在次生孔隙形成中的作用

无论是碎屑岩还是碳酸盐岩地层,不整合面在其次生孔隙的形成中都具有十分重要的作用。目前我国最大的天然气田——陕甘宁盆地天然气储集岩的成因直接与加里东期不整合面有关,同时该盆地最重要的石油储层(分布于三叠系延长组和侏罗系富县组)也与印支期不整合面有关,四川盆地的一部分天然气储集

层(包括威远的震旦纪气田和川东石炭纪气田)也都直接受不整合面控制。

不整合面之下矿物的溶解受很多变量控制,包括时间、近地表暴露岩石的移走、古气候、岩性、暴露矿物的表面积、矿物表面特征(如晶体缺陷、错位和微裂隙)、流体化学、矿物表面的反应特性、有机质的活性以及可阻止溶解作用的离子抗氧化性等等^[7]。天然水中对许多矿物的溶解都受表面反应动力学的控制^[59]。在对次生孔隙的形成和对原生孔隙的改造方面,不整合面都具有极其复杂的控制作用。

在各种因素中,暴露于大气水中的岩石溶解前缘的推进速率和岩石侵蚀速率之间的关系是最为重要的。如果岩石的侵蚀速率比暴露岩石溶解前缘的推进速率快,那么,不整合面之下孔隙发育带将不能保存。同时,在近地表暴露表面之下的大气水成岩作用反而会使胶结作用加强而不是溶解作用增强^[60],从而导致孔隙率和渗透率以一种极其难以预测的方式分布^[61]。

新近大量的研究^{[12][62~63]}证明,地下不整合面对储层质量的有利影响在很多储层中都是肯定的。Giles & R. B. de-Boer^[62]的定量数据表明,在第三纪中新统的砂岩中不整合面之下孔隙率的增加达到 10%,孔隙的增加主要是由长石和岩屑的溶解造成的,更为重要的是,大气水的这种淋滤作用延续到了 1 500 m 到 2 300 m 的深度。

Emery 等^[63]的研究证明,在北海北部侏罗系 Magnus 砂岩段也存在大气水对钾长石的淋滤作用,砂岩在早白垩世的近地表条件下暴露。该研究的资料是从几个独立技术(岩石学、地层水成分、井下自然伽马和地震勘探)获得的。与之类似, Nedkvitne & Bjørlykke^[12]也证明了北海 Hudra 油田中侏罗统 Brent 群砂岩中由大气水对钾长石溶解形成的次生孔隙。大气水的影响发生在同沉积期间,这可能是晚侏罗世到早白垩世的抬升运动造成的。在渗透率相等的情况下,侧向延伸范围较大的砂岩淋滤作用较强。

上述的研究实例表明,不整合面对地下岩石孔隙率和渗透率的影响可以发生在碳酸盐地层中,如我国的大多数油气储层,它们是由近地表条件下碳酸盐矿物的溶解造成的。同时,与不整合面伴随的溶解作用同样可以发生在碎屑岩地层中,如北海和世界其它地方的一些储层,它们主要是由长石及岩屑的溶解造成的。从时间来说,与不整合面伴随的溶解作用可以发生在表生成岩作用阶段,如已在我国得到广泛重视的碳酸盐岩的古岩溶作用,但经常受到忽略的是发生在成岩作用的初期阶段—埋藏成岩作用的早期阶段甚至是同沉积阶段。从由不整合面溶解作用形成次生孔隙

保存条件来说,在表生成岩作用阶段对已固结岩石的溶解作用形成的孔隙得到较好保存,但发生在成岩作用早期阶段的情况下,如沉积物中含有较多的非变形颗粒时,溶解孔隙也可在一定程度上得到较好的保存。

在沉积盆地的类型中,多旋回的克拉通盆地可具有多个不整合面。如我国的陕甘宁盆地的多个不整合面中,就至少在两个不整合面附近的地层中都获得了工业油气。

7 地下孔隙率和渗透率的研究途径

沉积盆地的时空演化控制若干物理、化学以及物理化学变量,这些变量包括成分、压力、时间、温度、时间—温度、系统的开放性和封闭性、烃类的侵位和粘土矿物含量与结构等^[8~10]。在这里,成分的研究包括了三个相互作用的部分,一是由岩石的矿物组成所反映的岩石化学成分;二是流体的化学成分;三是岩石的结构,如颗粒的大小、分选、圆度、定向性和填集程度等^[8]。在压力中,最为重要的是流体压力,它们对与孔隙率和渗透率有关的地质反应极为重要。流体压力的控制因素包括:1)压实作用,非均衡的压实作用则将形成超压;2)水热压力,被捕获的地层水热膨胀产生压力,并可能形成超压;3)粘土的成岩作用,蒙皂石向伊利石或混层伊利石/蒙皂石转化并释放出层间水,导致流体压力增加;4)有机质热演化,支持上覆沉积物压力的油页岩生成液态或气态烃的时候,体积将剧烈增加并可导致超压;5)构造应力,构造作用可向岩石直接提供应力,并传递给岩石中的流体^[9]。对于温度和时间变量来说,大多数的地质现象和化学反应都是温度和时间相互作用的函数,具有地质意义的反应的反应速率常数都必须依赖于时间,但相对于所涉及的过程的时间周期来说,如果反应是在一个极短的时间中发生的,温度则可以看作是一个独立的变量^[9]。当然也有一些由温度控制的过程可以是独立于时间的。这是在对温度和时间变量进行考虑时所必须注意的。

由于上面这些变量在很大程度上都受沉积盆地的时空演化控制,因而应将地下孔隙率和渗透率的研究纳入沉积盆地动力学的综合研究中。在分析各种地质作用之间的相互联系和制约的基础上,提取尽可能多的相关因素来进行定量化分析和处理。然而,尽管地下岩石的孔隙率和渗透率是上述变量间复杂相互作用的结果,但要综合考虑这些变量间的相互作用实际是极其困难的事情。已有的数学和化学模型在一些方面做了有益的尝试,预测了孔隙率的发展和地下渗透率的变化规律。但这些都是由单因素进行的定量化分析,远远没能解决众多盆地类型和具体盆地中的复杂

问题。就一个盆地体系中孔隙率和渗透率变化的研究来说,盆地构造背景和演化、沉积作用及成岩作用、流体性质及运移、地热等诸多方面均应给予考虑,加上在某一具体方面(如成岩作用)中的诸多具体因素,因而构成的是一种“多元”问题。在进行孔隙率和渗透率定量研究的同时,引入和使用非线性与随机理论的数学物理方法,对解决地下非均质体中的资源问题至关重要。这种把地质学、地球化学和地球物理学等方面结合起来的定量化模式研究,对于进一步解决盆地演化、沉积成岩作用、地壳深层的流体循环、断层带的渗透率、油气、含矿建造甚至对环境问题的考虑和解决都具有十分重要意义。

参 考 文 献

- Bloch S P, Helmoold K. Approaches to predicting reservoir quality in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79 : 97 ~ 115
- Bethke C M. Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of gulf-coast-type geopressed zones[J]. Journal of Geophysical Research, B, 1986, 91 : 6 535 ~ 6 545
- Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75 : 925 ~ 945
- Bjørlykke K. Fluid flow in sedimentary basins[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86 : 137 ~ 158
- Wilson M D. Assessing the relative importance of diagenetic processes and controls[A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rock[C]. SEPM short Course, 1994, 30 : 259 ~ 275
- Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, United States, 1973, 57 : 349 ~ 369
- Bloch S. Secondary porosity in sandstones : Significance, origin, relationship to subaerial unconformities, and effect on predrill reservoir quality prediction [A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rock[C]. SEPM short Course No. 30, 1994, 136 ~ 159
- Stanton P T, Wilson M D. Measurement of independent variables-composition [A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rock[C]. SEPM short Course, 1994, 30 : 277 ~ 290
- Byrnes A P, Wilson M D. Measurement of independent variables-Pressure, time, temperature, time-temperature [A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rock[C]. SEPM short Course, 1994, 30 : 293 ~ 309
- Stanton P T, Byrnes A P. Measurement of independent variables-open-closed system variables[A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rock[C]. SEPM short Course, 1994, 30 : 311 ~ 319
- Wilson M D. Measurement of independent variables-hydrocarbon emplacement, clay content, textural measurements[A]. In : Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastics rocks[C]. SEPM short Course, 1994, 30 : 321 ~ 327
- Nedkvitne T, Bjørlykke K. Secondary porosity in the Brent Group (Middle Jurassic), Huldra Field, North Sea ; implication for predicting lateral continuity of sandstones[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62 : 23 ~ 34
- Galloway W E. Hydrogeologic regimes of sandstone diagenesis[C]. AAPG Memoir, 1984, 37 : 3 ~ 13
- Bethke C M, Marshak S. Brine migrations across North America ; the plate tectonics of groundwater[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1990, 18 : 287 ~ 315
- Deming D, Sass J H, Lachenbruch A H, De-Rito R F. Heat flow and subsurface temperature as evidence for basin-scale ground-water flow, North Slope of Alaska[J]. Geological Society of America Bulletin, 1992, 104 : 528 ~ 542
- Giles M R. Mass transfer and problems of secondary porosity creation in deeply buried hydrocarbon reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, 4 : 188 ~ 204
- Hayes M J, Boles J R. Volumetric relations between dissolved plagioclase and kaolinite in sandstones ; implications for aluminum mass transfer in the San Joaquin Basin, California[J]. Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1992, 47 : 111 ~ 123
- Plummer L N. Defining reactions and mass transfer in part of the Floridan Aquifer[J]. Water Resources Research, 1977, 13 : 801 ~ 812
- Edmunds W M, Bath A H, Miles D L. Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46 : 2 069 ~ 2 082
- Passaretti M L, Eslinger V E. Dissolution and relic textures in framework grains of Holocene sediments from the Brazos River and Gulf Coast of Texas [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57 : 94 ~ 97
- Bloch S, Franks S G. Preservation of shallow plagioclase dissolution porosity during burial ; implications for porosity prediction and aluminum mass balance[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77 : 1 488 ~ 1 501
- Keller W D. Kaolinization of feldspar as displayed in scanning electron micrograph[J]. Geology, 1978, 6 : 184 ~ 188
- Giles M R, Marshall J D. Constraints on the development of secondary porosity in the subsurface ; re-evaluation of processes[J]. Marine and Petroleum Geology, 1986, 3 : 243 ~ 255
- 谢庆邦, 黄思静, 杨承运. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系风化壳碳酸盐岩储层特征研究[J]. 天然气工业, 1994, 14(增刊) : 13 ~ 18
- Schmidt V, McDonald D A. Texture and recognition of secondary porosity in sandstones[A]. Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1979, 26 : 209 ~ 225
- Schmidt V, McDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis[A]. Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1979, 26 : 175 ~ 207
- Al-Shaieb Z, Shelton J W. Migration of hydrocarbons and secondary porosity in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65 : 2 433 ~ 2 436
- Franks S G, Forester R W. Relationships among secondary porosity, pore-fluid chemistry and carbon dioxide, Texas Gulf Coast[A]. AAPG Memoir, 1984, 37 : 63 ~ 79
- Lundegard P D, Land L S, Galloway W E. Problem of secondary porosity ; Frio Formation (Oligocene), Texas Gulf Coast[J]. Geology (Boulder), 1984, 12 : 399 ~ 402
- Lundegard P D, Land L S. Carbon dioxide and organic acids ; their role in porosity enhancement and cementation, Paleogene of the Texas Gulf Coast [A]. Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1986, 38 : 129 ~ 146
- Smith J T, Ehrenberg S N. Correlation of carbon dioxide abundance with temperature in clastic hydrocarbon reservoirs ; relationship to inorganic

- chemical equilibrium[J]. *Marine and Petroleum Geology* , 1989 , 6 : 129 ~ 135
- 32 Hutcheon I , Abercrombie H J . Carbon dioxide in clastic rocks and silicate hydrolysis[J]. *Geology (Boulder)* , 1990 , 18 : 541 ~ 544
- 33 Surdam , R. C , Boese S W , Crossey L G . The chemistry of secondary porosity[A]. *AAPG Memoir* , 1984 , 37 : 127 ~ 149
- 34 Surdam R C , Crossey L G . Integrated diagenetic modeling ; a process - oriented approach for clastic systems[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* , 1987 , 15 : 141 ~ 170
- 35 Surdam R C , Crossey L G , Hagen E S , Heasler H P . Organic-inorganic and sandstone diagenesis[J]. *AAPG Bulletin* , 1989 , 73 : 17 ~ 23
- 36 Bjørlykke K , Nedkvitne T , Ramm H , Saigal G C . Diagenetic processes in the Brent Group (Middle Jurassic) reservoirs of the North Sea ; an overview [J]. *Geological Society Special Publications* . 1992 , 61 : 263 ~ 287
- 37 Ehrenberg S N . Kaolinized , potassium-leached zones at the contacts of the Gorn Formation , Haltenbanken , mid-Norwegian continental shelf[J]. *Marine and Petroleum Geology* . 1991 , 8 : 250 ~ 269
- 38 Surdam R C , Crossey L G , Lahann R . Mineral oxidants and porosity enhancement[J]. *AAPG Bulletin* , 1984 , 68 : 532
- 39 MacGowan D B , Surdam R C . Difunctional carboxylic acid anions in infield waters[J]. *Organic Geochemistry* , 1988 , 12 : 245 ~ 259
- 40 Ramm M . Porosity-depth trends in reservoir sandstones ; theoretical models related to Jurassic sandstones offshore Norway[J]. *Marine and Petroleum Geology* . 1992 , 9 : 553 ~ 567
- 41 Taylor T T . The influence of calcite dissolution of reservoir porosity in Miocene Sandstones , Picaron Field , Offshore Texas Gulf Coast[J]. *Journal of Sedimentary Petrology* , 1990 , 60 : 322 ~ 334
- 42 Hutcheon I , Abercrombie H J . Fluid-rock interactions in thermal recovery of bitumen , Tucker Lake pilot , Cold Lake , Alberta[A]. *AAPG Memoir* , 1990 , 49 : 161 ~ 170
- 43 Giles M R , de-Boer R B . Secondary porosity , creation of enhanced porosities in the subsurface from the dissolution of carbonate cements as a result of cooling formation waters[J]. *Marine and Petroleum Geology* , 1989 , 6 : 261 ~ 269
- 44 Prezbindowski D R , Pittman E D . Petrology and geochemistry of sandstones in the Lower Cretaceous submarine fan complex , Deep Sea Drilling Project Hole 603B[R]. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* , 1987 , 93 : 961 ~ 976
- 45 黄思静 杨俊杰 张文正 黄月明 刘桂霞 肖林萍 . 表生和埋藏成岩作用的温压条件下 碳酸盐岩溶解过程的实验模拟[A]. *中国古大陆和大陆边缘沉积学* [C]. 成都 : 四川科学技术出版社 , 1996 . 92 ~ 104
- 46 Lynch F L . Mineral/Water interaction , fluid flow , and Frio sandstone diagenesis : evidence from the rocks[J]. *AAPG Bulletin* , 1996 , 80 : 486 ~ 504
- 47 Stanton C D . Secondary porosity in sandstones of the lower Wilcox (Eocene) , Karnes County , Texas[J]. *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies* , 1977 , 27 : 197 ~ 207
- 48 Fisher R S , Land L S . Diagenetic history of Eocene Wilcox sandstones , south-central Texas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1986 , 50 : 551 ~ 561
- 49 Klass M J , Kersey D G , Berg R R , Tieh T T . Diagenesis and secondary porosity in Vicksburg sandstones , McAllen Ranch Field , Hidalgo County , Texas[J]. *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies* , 1981 , 31 : 115 ~ 123
- 50 Langford R P , Lynch F L . Diagenesis and cement fabric of gas reservoirs in the Oligocene Vicksburg Formation , McAllen Ranch Field , Hidalgo County ; Texas[J]. *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies* , 1990 , 40 : 451 ~ 458
- 51 Landquist S J . Secondary porosity development and subsequent reduction , overpressured Frio Formation Sandstone (Oligocene) , South Texas[J]. *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies* , 1977 , 27 : 97 ~ 107
- 52 Milliken K L , Land L S , Loucks R G . History of burial diagenesis determined from isotopic geochemistry , Frio Formation , Brazoria County , Texas [J]. *AAPG Bulletin* , 1981 , 65 : 1397 ~ 1413
- 53 Gold P B . Diagenesis of middle and upper Miocene sandstones , Louisiana Gulf Coast . Master 's Thesis , University of Texas at Austin , Austin , Texas , 1984 . 160
- 54 Milliken K L , Mack L E , Land L S . Elemental mobility in sandstones during burial : whole-rock chemical and isotopic data , Frio Formation , South Texas[J]. *Journal of Sedimentary Research* , 1994 , 64 : 788 ~ 796
- 54 Lynch F L . Mineral/water interaction , fluid flow , and Frio sandstone diagenesis : evidence from the rocks[J]. *AAPG Bulletin* , 1996 , 80 : 486 ~ 504
- 56 Land L S , Mack L E , Milliken K L , Lynch F L . Burial metamorphism of argillaceous sediment , Gulf of Mexico Sedimentary Basin : a reexamination [J]. *Geological Society of America Bulletin* , 1997 , 109 : 2 ~ 15
- 57 Lynch F L , Mack L E , Land L S . Burial-diagenesis of illite/smectite in shales and the origins of authigenic quartz and secondary porosity in sandstones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1997 , 61 : 995 ~ 2 006
- 58 Williams L G , Hervig R L , Bjørlykke K . New evidence for the origin of quartz cements in hydrocarbon reservoirs revealed by oxygen isotope micro-analyses[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1997 , 61 : 2 529 ~ 2 538
- 59 Berner R A . Early diagenesis ; a theoretical approach . in the collection [A]. In : Holland H D , ed . *Princeton series in geochemistry* [C]. Princeton Univ . Press , 1984 . 237
- 60 Al-Gailani M B . Authigenic mineralizations at unconformities ; implication for reservoir characteristics[J]. *Sedimentary Geology* , 1981 , 29 : 89 ~ 115
- 61 Al-Gailani M B , Ala M A . Effects of epidiagenesis on reservoir rock characteristics beneath concealed unconformities in England and the western desert[J]. *Journal of Petroleum Geology* , 1984 , 7 : 189 ~ 212
- 62 Giles M R , de-Boer R B . Origin and significance of redistributional secondary porosity[J]. *Marine and Petroleum Geology* , 1990 , 7 : 378 ~ 397
- 63 Emery D , Myers K J , Young R . Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones[J]. *Geology* , 1990 , 18 : 178 ~ 181

Spatio-temporal Variation of Subsurface Porosity and Permeability and Its Influential Factors

HUANG Si-jing HOU Zhong-jian

(State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation Chengdu University of Technology ,Chengdu 610059)

Abstract

Spatio-temporal variation of subsurface porosity and permeability is controlled by various factors during sedimentation and diagenesis. The depositional environments and the types of sediment basin control the original composition before burial, texture and porosity of sediments. The sedimentary factors to control the porosity and permeability are mainly sedimentary facies, stratigraphy sequences and so on. The process of sedimentation was much shorter than the diagenesis, and relatively easy to study. Recently, some traditional mechanism of secondary porosity formation for subsurface sediment is challenged by new theories. The formation of secondary porosity from the aluminium-silicate solution by organic acid is the most important mechanism. However, it will result in the increase of pH value, precipitation of carbonate and kaolinite. The dissolution by carbonic water to form the secondary porosity in subsurface is also limited. New mechanism such as dissolution of sediment by the meteoric water, by the deep cooling formation water proves effective, and hydrolysis of the silicates is also accepted universally. In addition, the precipitation and material sources of some diagenetic authigenic minerals related to the secondary porosity also have new mode. These are several essentials to understand the formation of secondary porosity and estimate the porosity and the permeability of the reservoir. For the carbonate rocks, the oil/gas reservoir related to the paleo-carst nearby the unconformity have got more attention. During the deep burial diagenesis, the temperature and pressure control the difference of the habit of dissolution and precipitation for different carbonate minerals, leading to the difference of porosity and permeability distribution in subsurface carbonate rocks, which is very important for prediction of carbonate reservoir.

Key words subsurface rock porosity and permeability reservoir predication