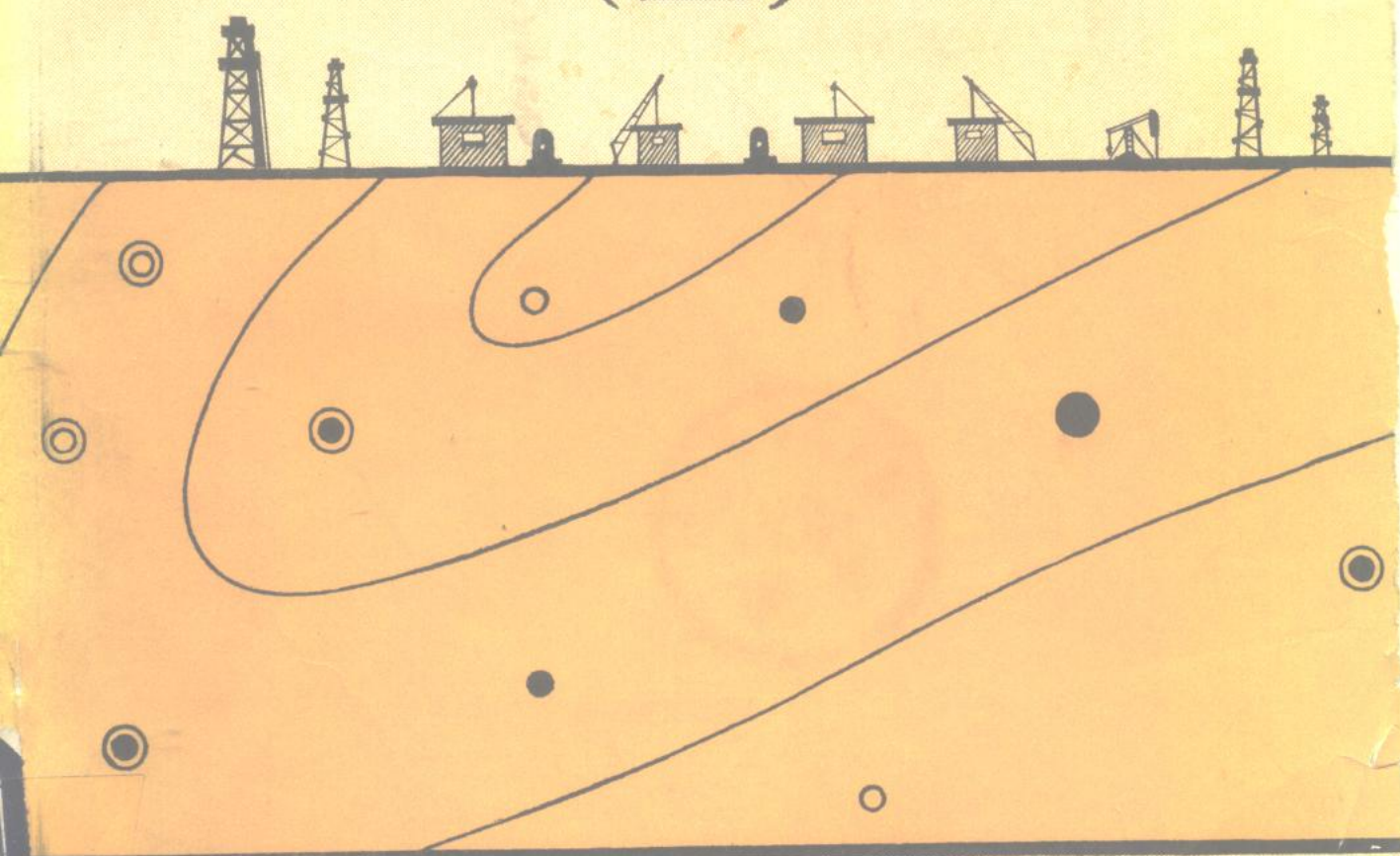


开发地质学

(二)



中国石油天然气总公司情报研究所

一九九〇年十月

出 版 说 明

根据中国石油天然气总公司李天相副总经理的指示,我们继续翻译和编辑出版《AAPG》每年的“开发地质学”专辑。这是“开发地质学”第二册,是《AAPG》1989年的第11期“开发地质学”专辑的译文。

中国石油天然气总公司

情报研究所

一九九〇年十月

目 录

碳酸盐岩岩相分析：俄克拉何马州和得克萨斯州下古生界	
Hunton 群的实例研究	(1)
新墨西哥州 Chaves、Lincoln、Roosevelt 郡，地下的	
下圣安德列斯组及其露头相应层位的地层和沉积环境	(23)
亚拉巴马州，莫比尔郡锡特罗内尔油田岩心注水效应的实验室研究	(45)
北海贝尔根隆起区布伦特砂岩(侏罗纪)的成岩作用和油气聚集	(62)
加拿大阿尔伯塔 Little Bow 油田下白垩统海绿石层	
海清河谷充填中的砂岩储集体	(88)
新斯科舍海上 Venture 气田——低速沉积区超压地层实例研究	(114)
尼日利亚 Nun 河油田三维地震解释和断层封闭研究	(131)
挪威中部海岸海德伦油田范格斯特群(中侏罗统)储层地质学研究	(144)
用于模拟研究的地质模拟法	(166)

碳酸盐岩岩相分析: 俄克拉何马州和 得克萨斯州下古生界Hunton 群的实例研究

David C. Kopaska-Merkel 著
Gerald M. Friedman

陈明霜 译
陈冬晴 校

摘 要

俄克拉何马州和得克萨斯州的阿纳达科盆地中 Hunton 群白云岩化碳酸盐岩(下古生界)的岩石物理学分类,是根据孔隙度、水银采收率、孔喉大小中值、归一化孔喉大小、毛细管压力曲线形态和岩性参数进行的。五个岩石物理相(岩相)包括(I)孔渗性白云岩,(II)膏粒灰岩和泥粒灰岩,(III)低孔隙度、低渗透率白云岩化鲕穴状鲕粒灰岩,(IV)胶结的鲕粒灰岩、燧石和燧石质碳酸盐岩,(V)灰泥岩和致密细粒白云岩。岩相 I (多孔白云岩)的变化是最大的。这种变化反映了白云岩内在固有的易变性,也说明 Hunton 群可能不只发生过一幕白云岩化作用。四个亚岩相包括(IA)结晶和砂糖状白云岩,(IB)晶洞白云岩,(IVA)胶结的鲕粒灰岩,(IVB)燧石、燧石质泥灰岩和粒泥灰岩。按岩相建立的可绘图的地下地层单位,能够用来预测油气储集层(例如岩相 I 和 II)和潜在盖层(岩相 III、IV 和 V)的分布,并寻找潜在的地层圈闭。岩相(Petrofacies)和沉积岩性相(depositional lithofacies)不一致,说明成岩作用与岩性相界限没有关系。

最佳储集岩(亚岩相 IA 的含化石砂糖状白云岩和岩相 II 的海百合颗粒灰岩)具有高孔隙度(平均=5.2-6.9%)、高水银采收率(平均=30.7-36.1%)。这些岩石的特征是孔喉大小为中等(中值=2.6-8.8 微米),孔喉大小分布曲线呈中一低峰态,累积毛细管注水银压力曲线呈过渡型或缓坡型。孔隙度较高而水银采收率低的岩石(平均孔隙度=11.8%;采收率≤25%;例如亚岩相 IB 的孔洞和溶模白云岩),其一次采油效果不会太好,但进行强化采油则大有希望。对于亲油储集岩,其毛细管压力曲线数据的解释必须有别于本文介绍的解释方法。

大部分岩相只根据毛细管压力曲线形状就能辨别。但岩石物性参数的二维交汇图也是一种判别岩相的方法。孔喉大小中值的负对数与孔隙度或水银采收率的交汇图,是划分样品岩相的最简单图象解释法。这种交汇图尤其适用于区别那些岩性相似、岩石物性不同的特殊岩相的样品。

引 言

碳酸盐岩储集层是世界上最复杂、也是产油气最丰富的储集层之一。然而,若对这类复

杂的储层采用不合适的开采方法,可能使大量可采油气得不到开采。如一些世界上最高产的油气藏评价和开发实例表明,可利用水银孔隙度测量,结合岩石、扫描电子显微镜(SEM)、能散X射线和岩相分析,对多孔生产性碳酸盐岩进行岩石物性描述。

储层评价的一个重要组成部分是描述孔隙体系,包括孔隙的几何形态、结构、有效体积。这些因素控制着油气藏的生产潜力。研究孔隙系统的方法统称为岩石物性分析法,其中之一便是孔隙度仪法。根据这种方法,在一定条件下将某种流体(通常为水银,有时也用氮和空气)注入样品的孔隙系统中。用这种方法所得的毛细管压力数据可用于计算孔喉(或喉道)

体积分布、油柱高度、水银采收率、孔隙度、渗透率以及其它重要参数。孔喉控制了储层中流体的运动,水银孔隙度仪是定量研究孔喉的唯一有效方法。把这些参数与地质、地化和地球物理资料结合起来,建立孔隙演化和储层成岩变化的模式,设计提高采收率(EOR)方案。本文中我们根据岩相分析,着重讨论了孔隙度、水银采收率、孔喉大小分布、毛细管压力曲线形状和岩性资料间的相互关系,从而确定岩石物理相即岩相。

我们用上奥陶统至下泥盆统的 Hunton 群(阿纳达科盆地,图1)部分白云岩化碳酸盐岩来说明水银孔隙度仪法在储层评价中的应用。在阿纳达科盆地中的 Hunton 群产出了商业性天然气,产层深度超过 7.6 公里,它包括了一些世界上最深的气藏。

我们对 Hunton 群进行岩相分类,并将这种分类与其它两种最近发表的碳酸盐岩储集岩分类做了比较。三种分类之差别是因为所研究的各地层各具特色,而其分类之相似则是因为各个深层白云岩化碳酸盐岩储层具有共性。

地质背景

阿纳达科盆地(图1)是走向为北西西—南东东的南俄克拉何马不对称拗拉槽(南翼陡)的残余部分(Hoffman 等人,1974; Pruatt, 1975; Sternbach 和 Friedman, 1986)(图2)。盆地南部明显地以阿马里洛山脉为界,山脉形成于宾夕法尼亚纪(莫罗期—阿托坎期)的威奇托造山期(Ham 等人, 1964; Ham, 1969)。在阿纳达科盆地中, Hunton 群为一套晚奥陶世至早泥盆世的灰岩、白云岩和少量的硅质碎屑岩(图2)(Amsden, 1960, 1975, 1980; Beardall, 1983; Way, 1983; Medlock, 1984),厚度可达 396 米。Hunton 沉积盆地范围超过了现代阿纳达科盆地的南缘。然而,由于泥盆纪和宾夕法尼亚纪抬升时期的复合剥蚀作用,阿马里洛—威奇托山脉南部 Hunton 群岩石的大部分已完全被剥蚀掉(Maxwell, 1959)。与此相似,在盆地的北部、东部和西部, Hunton 地层的沉积范围也受到剥蚀作用的严重改造。

Hunton 群整合地覆于 Sylvan 页岩(上奥陶统)之上(图2),在盆地的大部分地区

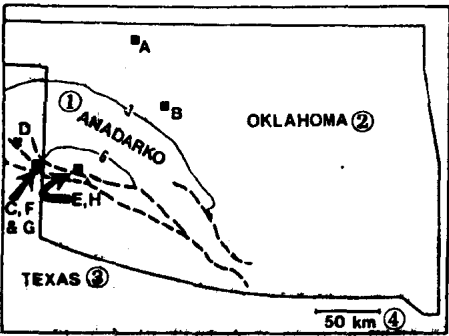


图1 阿纳达科盆地位置图。虚线代表北落的主要边界正断层,实线代表 Hunton 群顶面 3 和 6 公里等高线,研究中所用的 A—F 井的名称见表 1。此外对另外 2 口井作了薄片分析:井 G, Chevron 1 James, 和井 H, Mesa 1—32 Crook。
①阿纳达科盆地; ②俄克拉何马州; ③得克萨斯州; ④公里

Hunton 群又不整合地被 Woodford 页岩(上泥盆统一下密西西比统)所覆盖,局部地区被 Misener 砂岩(中泥盆—上泥盆统)覆盖(图 2)。Hunton 群沉积时期,各阶段尤其是在早泥盆世的剥蚀作用严重改造了 Hunton 地层的沉积范围。在中泥盆世 Misener 砂岩和 Woodford 页岩沉积之前,也发生了广泛的剥蚀。Woodford 页岩可能不整合地覆盖在整个 Hunton 地层之上;某些地区在 Woodford 页岩沉积之前, Hunton 群地层已被全部剥蚀掉了。

在北部露头带, Hunton 群分为 6 个组,地下地层中可能分辨不出这 6 个组。通常在地下地层中可识别出 Hunton 群的下部即 Chimneyhill 亚群和 Hunton 群底部的 Keel 组(图 2)。Keel 组是整合地上覆于海相 Sylvan 页岩的薄层鲕粒灰岩(0.3—10 米),在整个阿纳达科盆地中其特征都很明显(Amsden, 1960, 1975, 1980)。由于研究区内 Keel 组岩性均匀、分布广泛,故为很好的标准层。在 9050 米以下的 Keel 组一般都有白云岩化,孔隙主要是晶间孔隙(Sternback 和 Friedman, 1984, 1986)。深度较浅时, Keel 组只有轻度的白云岩化,其特征是微孔隙达 2—3%。在地下剖面中 Chimneyhill 亚群上部没有细分,它沉积于 Keel 组之后的不整合面之上(Amsden, 1960; Manni, 1985)。在底部 Keel 组之上, Chimneyhill 亚群由海百合粒泥灰岩、泥粒灰岩和颗粒灰岩组成,可含燧石、海绿石或泥质。在一些地区, Chimneyhill 亚群上部的白云岩化(通常与地层中的不整合有关)和化石印模孔隙的形成,使它发展为极好的储集层。其它地区,结核型和弥漫型燧石化作用几乎破坏了所有孔隙(Amsden, 1960, 1975, 1980; Manni, 1985)。

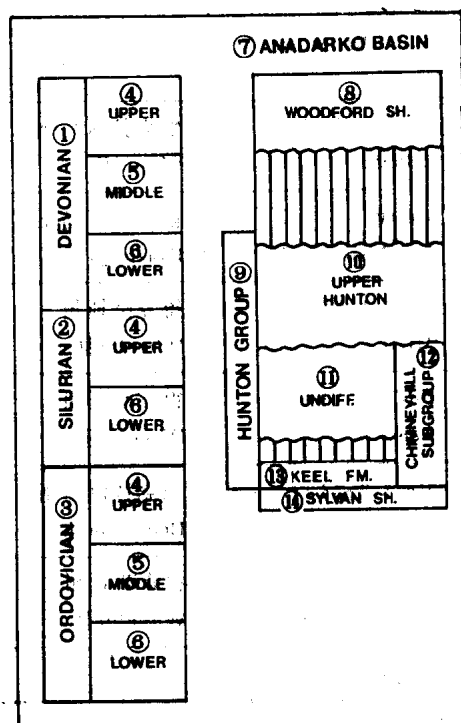


图 2 Hunton 群岩性地层柱状示意图(据 Amsden, 1960)。Chimneyhill 亚群通常在地下地层中不再进一步划分,因为缺少详细的地层资料,但至少 Keel 组易在岩屑中鉴定出来。

- ①泥盆系; ②志留系; ③奥陶系; ④上统;
⑤中统; ⑥下统; ⑦阿纳达科盆地; ⑧Woodford 页岩; ⑨Hunton 群; ⑩上 Hunton 亚群;
⑪未划分; ⑫Chimneyhill 亚群; ⑬Keel 组;
⑭Sylvan 页岩

分析的样品和方法

从 6 口井中获取 87 个样品(表 1), 这些样品的 Hunton 群埋深范围大约为 1890—7470 米。用 9305 型微粒学孔径仪(Micromeritics Pore Sizer 9305)对这些样品进行了分析。这一仪器可在 1.5 到 30000 绝对磅/英寸²(0.01—207 兆帕)的空气—汞柱(换算系数=绝对磅/英寸²×0.006895=兆帕)的压力范围内测量水银注入量。样品承受的最大压力为 138 兆帕, 此时对应的孔喉大小为 0.003 微米。这种仪器的操作方法见其手册(微粒学仪表公司, 1983), Kopaska-Merkel 等人(1987)及 Kopaska-Merkel 和 Amthor(1988)的文章中也有介绍。除专门说明以外, 本文所有毛细管压力的单位均为绝对磅/英寸²空气—汞柱。

表 1

本研究所用的 Hunton 群的井

所用 井 名	井 的 名 称	州 和 县	Hunton 顶面,米	样 品 类 型	取样井段,米	样 品 数 量
A	Calvert Mid-Am.* 2Bloyd	俄克拉何马州 Woods县	1876	岩心	1892—1902	20
B	Getty 1 Leutkemeyer U.	俄克拉何马州 Blaine县	2690	岩心	2690—2819	28
C	Pray 1-37 Mills	得克萨斯州 Wheeler县	—	岩心碎片	4922—4924	4
D	Phillips 1-C Lee	得克萨斯州 Wheeler县	4564	岩心	4636—4640	12
E	Mesa 2-34 Cox	俄克拉何马州 Beckham县	7294	岩屑	7294—7496	1
F	Am. Quasar* 1-22 Bryant	得克萨斯州 Wheeler县	5846	岩屑	5846—6068	22
样品总数						87

* Am. = 美国

本研究中所用的岩样包括 64 个岩心塞和 23 个钻井岩屑样品。通过对人造岩屑和天然岩屑进行对比实验,说明岩屑所产生的毛细管压力数据在大多数情况下可与岩心塞产生的毛细管压力数据对比 (Purcell, 1949; Ghosh 等人, 1987; Kopaska-Merkel, 1988)。根据渗流理论进行理论推算以及用球形玻璃珠进行水银孔隙度仪实验证明了这一结论 (Larson 和 Morrow, 1981)。实验表明,“样品”(玻璃珠集合体,其中每一集合体相当于一个岩石碎屑)厚度如果大于孔喉直径的 30 倍,那么样品大小对实验之影响最小。

岩石物性分析

岩石中的孔隙系统由二部分组成:主要开放空间(孔隙)和连接孔隙的较小通道(孔喉)。定义虽然很简单,但由于孔隙系统的复杂性,其总特征是难以掌握的(见附录 1 本文所用术语定义)。孔隙系统的几何形态和结构控制了油气藏这样的多孔介质中流体的运动和分布。利用从水银孔隙度仪测得的毛细管压力曲线,人们可以推算出岩石物性参数,如孔喉大小分布、表面积/体积的关系、有效孔隙度以及油柱高度 (Purcell, 1949; Smith, 1966; Dullien 和 Dhawan, 1974; Wardlaw, 1976; Schowalter, 1979; Jennings, 1987)。从毛细管压力数据可以估算渗透率 (Jennings, 1987),但条件必须是喉道大、分选好、微孔隙可忽略不计、渗透率大于约 1 毫达西。本次研究中所分析的 Hunton 群样品大多数不符合这些条件中的一条或几条。有 16 个白云岩样品符合渗透率估算条件,其数据示于“亚岩相 IB”一节中。

水银孔隙度仪:水银孔隙度仪用于测量孔喉的体积分布。孔喉在整个孔隙系统中只占一小部分。可是,用水银孔隙度仪研究所得到的资料大部分只是关于孔喉的 (Wardlaw, 1976),

因为这种方法取决于把水银压入岩石小孔洞中的力。最小的孔洞（喉道）控制了较大孔洞（孔隙）的连通，水银或其它非润湿相流体要压入的孔隙空间越小，所需要的压力就越大（毛细管原理，见 Durcell, 1949）。孔喉是孔隙系统的瓶颈；压力必须超过临界毛细管压力，才能使水银或其它非润湿相流体进入它们所包围的孔隙中。对于一个孔隙系统空间分布均匀的无限大样品来说，在一定压力下水银注入的总体积精确地与相应大小的喉道数量有关。因此，累积水银注入的体积与毛细管压力的关系图相当于累积水银注入体积与孔喉大小的关系图。水银孔隙度仪是获得孔喉大小分布的精确和定量数据的唯一分析方法。如果孔喉较大，通过图象分析不仅可获得有关孔隙形状和大小的定量数据，也可得到有关孔喉的可靠资料。

一定孔喉大小（计算的）对应于一个给定压力（测得），孔喉大小值取决于所采用的孔喉几何模型（Wardlaw 和 Taylor, 1976; Dullien, 1979），也取决于水银接触角和水银与空气间的界面张力。本文采用了 Wardlaw (1976; Wardlaw 和 Taylor, 1976) 的结晶白云岩之模型。在这种模型中，假设喉道为片状，孔隙为四面体或多面体，这种多面体在进一步白云岩化过程中可发展为四面体（Wardlaw, 1976, 其图 12）。这种模型比较适合 Hunton 群白云岩（图 3），可能也适合 Hunton 群灰岩中的晶间孔隙，因为有的结晶灰岩含有片状喉道，与沙糖状白云岩的喉道相似（图 4）（Kopaska-Merkel, 1987, 其图 3-4, 3-5, 3-6）。在我们的模型中，喉道大小（d）可根据下列公式算出：

$$d = \frac{-2\gamma \cos\theta}{p} \quad (1)$$

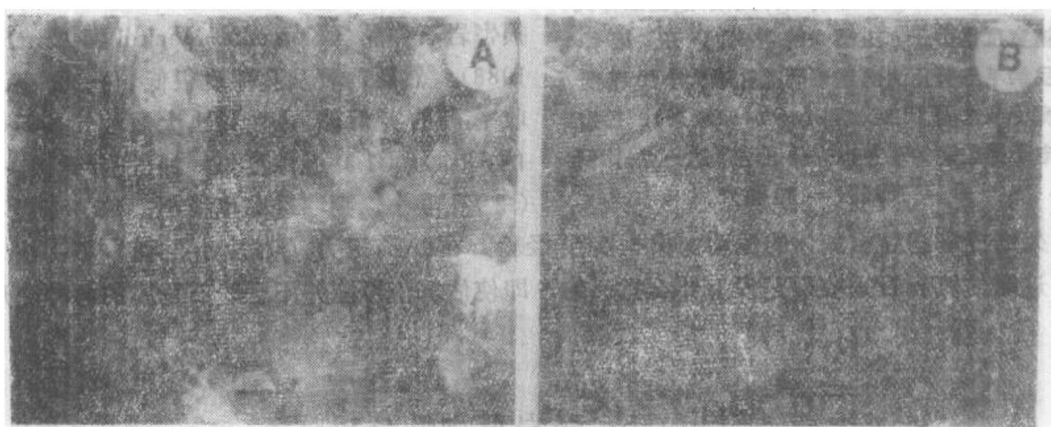


图 3 亚岩相 IB 的白云岩化鲕粒灰岩的扫描电子显微镜照片（海底下 2695 米，B 井）。

(A) 多孔白云石结构（根据能散 X 射线确定矿物成分），可能由相对非孔隙颗粒和原生（？）粒间孔洞组成，孔洞局部被 e 面状（Sibley 和 Gregg 的命名，1987）白云石胶结物填充。该样品的孔隙度为 14.6%；孔喉大小的中值为 9.47 微米。注意孔隙形状复杂，孔壁为白云石胶结物的晶面。孔喉大小的中值大，说明连通清晰可见的大孔隙的孔喉较大，流体在不可透颗粒内的流动不取决于非常小的孔喉。比例尺线段 = 100 微米。(B) 太原生孔隙中白云石胶结物晶体的特摄图，反映片状孔喉形状。比例尺线段 = 100 微米。

式中 γ 为界面张力（水银/真空的界面张力为 485 达因/厘米）， θ 为接触角（水银/真空的接触角，在水银中测得为 130° ）， p 为压力，单位是绝对磅/英寸²。我们使用接触角 130° ，因为这是水银最常引用的接触角之一（Van Brakel 等人，1981）。但也有人曾公布接触角高

达 180° (Wardlaw 等人, 1988), 对于水银—固体间的接触角还没有一个公认值 (Good 和



图 4 岩相 I 的钙质骨粒灰岩(?)样品的扫描电子显微镜照片(水下 1899 米, 井 A)。

“基质”中的微孔隙(原始结构不详); 该样品约 75% 都呈这种结构。注意孔喉近于片状。当然孔喉壁既不平也不直。样品的孔隙度为 8.9%。孔喉大小的中值为 0.14 微米。被宽度在 0.1—1 微米的孔喉分开的单个方解石晶体由亚微米级的晶体组成, 这些晶体又被宽度远小于 0.1 微米的孔喉分开。该样品的毛细管压力曲线表明其孔喉大小的范围宽(从大于 10 微米到小于 0.01 微米), 扫描电子显微镜的观察也充分证明了这一点。比例尺线段 = 100 微米。

能长久维持非润湿相流体的流动。根据实践经验, 在极高压力(对应小孔喉)下, 注入量大, 这时估算岩石采收率是没有什么意义的, 即使估算值可能并不受岩石基质的各种变形影响。

Mikhail, 1981)。用较低的接触角进行估算, 意味着在一定毛细管压力下, 孔喉大小的估算值偏低(用 130° 和 140° 作接触角时, 估算值相差约 16%)。

我们实验的压力范围为 0.01—138 兆帕, 比所有文章中作者引用的压力都大得多。我们在高压下做岩石实验, 从而 (1) 为油气生产和提高采收率重现了真实深度的地下条件, (2) 评价我们研究岩石的有效孔隙度的全部变化范围。许多岩石的孔隙系统体积大, 压力过小时则可能测不出来 (Kopaska-Merkel 和 Amthor, 1988, 其 56—60 页, 其图 2B, 3B)。

138 兆帕空气—汞柱压力大致等于 28 兆帕的盐水—空气压力, 相当于深度为 2.8 公里或更浅时的静水压力 (Purcell, 1949; Smith, 1966; Schowalter, 1979)。这个深度是在提高采收率工程的可行深度范围之内。

用高达 138 兆帕的水银毛细管压力并不会损害岩石样品 (Kopaska-Merkel 和 Amthor, 1988)。然而, 要从孔隙度很低、孔喉小、采收率高的实际储层中采出大量油气是不可能的, 因为 (1) 孔隙度低, 油气储量则小; (2) 孔喉小, 则渗透率也很小; (3) 储层不恒

Hunton 群岩石物性分析

孔隙度与采收率的关系

用水银孔隙度仪对 A 井和 B 井 (表 1) 样品进行分析的初步结果 (Amthor 等人, 1988) 说明, Hunton 群碳酸盐岩样品的采收率与孔隙度成反比 ($r^2 = -0.23$, $P = 0.000$)。其相关性不明显, 但最大采收率与孔隙度的反比关系很明显 (图 5)。在 Ellenburger 白云岩样品中也发现最大采收率与孔隙度成同样的反比关系 (Amthor 等人, 1988)。相反, Wardlaw (1976, 1980) 在两组碳酸盐岩样品中发现采收率与孔隙度成正比。Wardlaw (1976) 认为采收率与孔隙度之间的正比关系可能是由孔隙系统几何形态和孔隙度之间的相关性造成的。在二叠系 San Andres 组样品中也发现了这种正比关系 (Ghosh 和 Friedman, 1989, 其 69 页, 图 2-9, 及 97 页, 图 4-18)。显然, 对于碳酸盐岩来说, 孔隙度与采收率之间的关系并不是一成不变的。

Hunton 群样品中观察到采收率与孔隙度之间的反比关系, 具有鉴别最佳储集岩的意义。一次开采方法对高孔隙度岩石的油气生产不一定是最好的方法。对于许多高孔隙度岩石, 提高采收率方法是开采岩石中大量油气的基本方法。相反, 孔隙度较低的岩石, 如果含有大量油气, 则一次采收率可能较高; 对这类低孔隙度岩石采用耗资昂贵的提高采收率方法, 可能就不合算了。

为了更好地预测 Hunton 群碳酸盐岩采收率, 我们进行了多元回归分析。然而, 在回归方程中, 补充了孔喉大小的中值、归一化孔喉大小和岩相数据对孔隙度的数字编码之后, 仅使 r^2 增加到 0.27;

$$RE(\text{采收率}) = (-1.932)\text{孔隙度} + (0.001)$$

$$\text{孔喉大小中值} - (0.003)\text{岩相} + 0.363$$

+ 误差

(2)

在这一方程中, 归一化孔喉大小的系数不到 0.001。采收率和孔隙度用 0 到 1.0 之间的十进制小数表示; 孔喉大小中值的测量单位是微米。

用多变量预测采收率的 r^2 低, 说明碳酸盐岩中孔隙系统复杂, 影响采收率的因素多。降低 r^2 预测采收率的一个重要因素是, 即使是在看来均质的岩石层序中, 采收率的变化也很大; 例如, 从 C 井的一个 2.4 米井段中采集了 4 个燧石碳酸盐岩样品, 采收率的变化范围是 12—46%。

岩性与岩石物性的关系

对一组岩样进行岩石物理分析, 可以找出各变量之间的相互关系, 从而可根据易测得的参数如岩性, 来预测储层性质。对于 Hunton 群碳酸盐岩, 正如大多数岩层一样, 最大孔隙度可能与深度成反比。然而, 碳酸盐岩对白云岩化和溶解这两种强的成岩作用的敏感性, 是由其原始结构和矿物成分所控制的, 这就使得岩石类型与包括采收率的岩石物性特征之间的相关性更大 (Kopaska-Merkel 和 Friedman, 1988a, b)。因此, 了解了岩性相自然导致确定了岩相。

由于这里我们所研究的 Hunton 群碳酸盐岩的岩性与岩石物性参数的相关性很大, 岩石物性参数的双变量交汇图, 如孔喉大小中值与孔隙度、或者采收率与孔隙度的交汇图, 可以划分 Hunton 群的大部分岩性。反过来, 岩性鉴定又可以预测岩石物理特征。例如, Chimneyhill 亚群上部的样品 (包括其底部的鲕粒 Keel 组) 在孔喉大小中值与孔隙度的交汇图上可形成三个明显的组 (图 6)。图 6 上, 原点 (零) 附近的正方形代表的样品为 燧石 或不含燧石的泥灰岩和骨粒泥灰岩, 样品的孔喉大小中值和孔隙度相当于 Keel 组样品的特征 (Keel 组的样品见图 7)。这三种非渗透性岩石 (燧石、泥灰岩和胶结的鲕粒灰岩) 可形成有效的封闭层。图 6 上的小圆代表了骨粒灰岩和结晶白云岩样品, 其孔隙性比致密燧石和泥灰岩要好得多, 孔喉大小中值也略大一点。这些孔渗性较好的颗粒灰岩和白云岩将成为高产的储集岩。图 6 的第三组样品用三角表示, 由 Chimneyhill 亚群上部的孔洞型化石溶模白云岩组成; 这类白云岩以孔隙度变化、孔喉大小的中值大为特征。这些孔洞化石溶模白云岩的孔

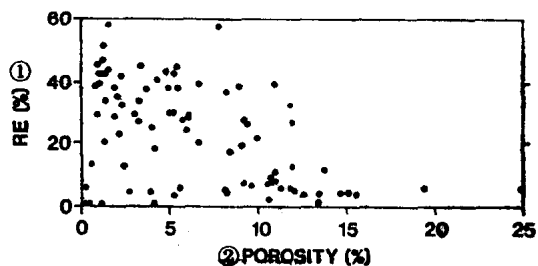


图 5 所有样品中采收率 (RE) 和孔隙度双变量交汇图。采收率与孔隙度之间的反比关系较弱, 但具有统计意义 ($r^2 = -0.23$, $P = 0.0000$), 但是最大采收率与孔隙度之间的反比关系非常明显。

①采收率 (%); ②孔隙度 (%)

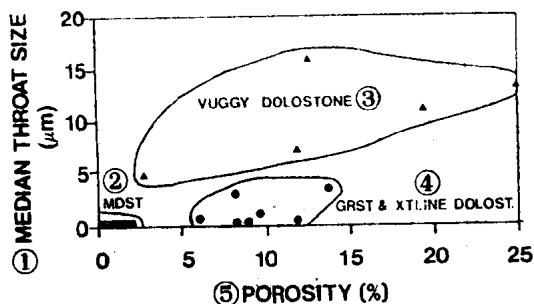


图 6 A 井和 B 井 Chimneyhill 亚群 (除 keel 组以外) 样品的孔喉大小中值与孔隙度的双变量交汇图。方块=燧石泥灰岩或不含燧石的泥灰岩和骨粒泥灰岩 (MDST); 圆点=骨粒灰岩 (GRST) 和结晶白云岩 (XTLINE DOLOST); 三角=孔洞溶模白云岩。进一步说明见正文。

① 孔喉大小中值 (微米); ② 燧石或非燧石泥灰岩和骨粒泥灰岩; ③ 孔洞白云岩; ④ 骨粒灰岩和结晶白云岩; ⑤ 孔隙度 (%)

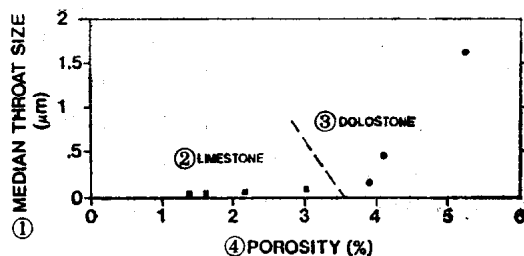


图 7 A 井和 B 井 keel 组样品的孔喉大小中值和孔隙度的双变量交汇图。方块=B 井的灰岩样品; 圆点=A 井的白云岩样品。注意这些数据中孔喉大小中值与孔隙度的直线关系。白云岩化样品最初可能与未白云岩化样品非常相似, 但白云岩化以后孔隙明显增加, 孔喉也变大。进一步说明见正文。

① 孔喉大小中值 (微米); ② 灰岩; ③ 白云岩; ④ 孔隙度 (%)

喉大小中值和孔隙度值与上 Hunton 亚群鲕穴状白云岩化的鲕粒灰岩的值 (图 8) 一致。这两种多孔岩石 (孔洞化石溶模白云岩和鲕穴状白云岩化鲕粒灰岩) 的储集性能不及骨粒灰岩和结晶白云岩, 因为前者孔洞和溶模孔的长宽比值较高, 从而引起非润湿相流体的吸附, 阻碍其开采。这些岩石的一次开采或注水开采效果不会太好。

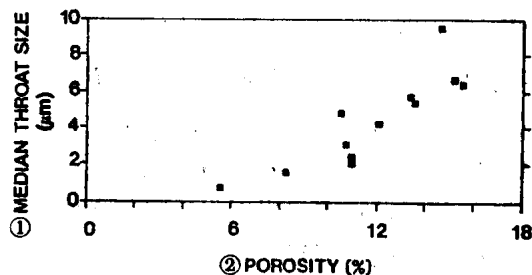


图 8 B 井上 Hunton 亚群白云岩化鲕穴状鲕粒灰岩的孔喉大小中值与孔隙度的双变量交汇图。注意这些数据中孔喉大小的中值与孔隙度之间的直线关系。进一步说明见正文。

① 孔喉大小中值 (微米); ② 孔隙度 (%)

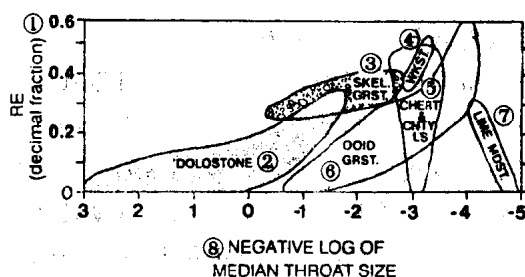


图 9 采收率与孔喉大小中值负对数的双变量交汇图。三种孔隙渗透性岩石 (白云岩、骨粒灰岩和鲕粒灰岩) 在图中非常突出。六种岩石中有四种总的变化趋势是最大采收率随孔喉大小中值负对数的减小而增大。灰泥岩和燧石及燧石碳酸盐岩则不同, 可能是由于这两种岩石 (1) 孔隙和孔喉的几何形态不同, 以及/或者 (2) 孔隙系统的结构, 即: 裂隙分布不同。SKEL GRST=骨粒灰岩; OOID GRST=鲕粒灰岩; Wkst=粒泥灰岩; CHTYLS=燧石灰岩; LIME MDST=灰泥岩。

① 采收率 (十进制小数); ② 白云岩; ③ 骨粒灰岩; ④ 粒泥灰岩; ⑤ 燧石和燧石质灰岩; ⑥ 鲕粒灰岩; ⑦ 灰泥岩; ⑧ 孔喉大小中值的负对数

最有效的划分 Hunton 群岩性相的方法是，在采收率与孔喉大小中值的负对数值交汇图（图 9）上将其划分成各个小组。骨粒灰岩的采收率与孔喉大小中值的乘积最大，因此，是最佳储集岩。这套数据总的说来，最大采收率与孔喉大小中值成反比。单独考虑孔渗性好的岩石，这种趋势也很明显。较致密的岩石（燧石碳酸盐岩和灰泥岩）上没有见到这种变化趋势。不同岩性的采收率与孔喉大小中值之间的相关性不同，这可能是由于其孔隙几何形态不同造成的。例如，致密岩石中裂隙比较丰富，而大的晶间和粒间孔隙却比较少，这与孔渗性岩石正好相反。Wardlaw (1976, 1980) 用同一种推理方法解释了另一套碳酸盐岩的采收率与孔隙度相关性不稳定的原因。

综合研究各种参数之间的复杂关系，我们便能划分出 Hunton 群的岩相。

Hunton 群的岩相

Hunton 群碳酸盐岩可确定五个岩相和四个亚岩相（表 2）。累积和增量毛细管压力曲线的形状（图 10）、孔喉大小中值、归一化孔喉大小、有效孔隙度和水银采收率与岩性数据相结合，可以确定岩相、划分岩层。

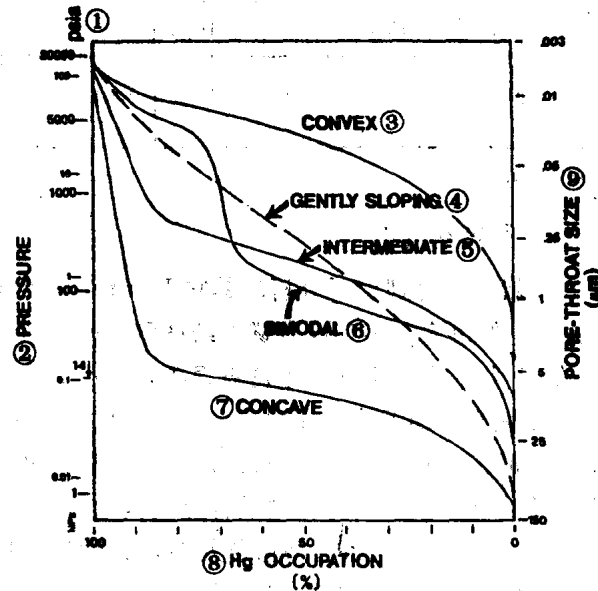


图 10 毛细管压力示意图，反映五种不同形状的毛细管压力曲线。

①绝对磅/英寸²；②压力；③凸形；④缓坡形；⑤过渡型；⑥双峰形；⑦凹形；⑧水银占位（%）；⑨孔喉大小（微米）

五个岩相和四个亚岩相组成了可绘图的地下地层单位（图 11），可用于 Hunton 群的勘探和开发战略部署。西得克萨斯的 Mabes 油田 San Andres 组也建立了类似的岩相图表（Ghosh 和 Friedman, 1989）。San Andres 岩相分析也得到可绘图的地下岩石物性单位。

表 2 和图 12 中总结了各种岩相的特征。选择一些毛细管压力曲线（图 14、15、17、18、20—22）来代表各自的岩相。

岩相 I。——这一岩相变化较大，Hunton 群的大部分白云岩都属于这一岩相（在所分析的样品中占 50% 以上）。该岩相的岩石主要为白云岩化、颗粒支撑的骨粒和鲕粒碳酸盐

表 2 得克萨斯州和俄克拉何马州阿纳达科盆地地下古生界 Hunton 群碳酸盐岩岩相*

岩相及 亚岩相	岩 性	孔隙度 %	毛细管压力 线曲形状**	采 收 率 (%)	孔喉大小中 值(微米)	归一化孔 喉 大 小	样 品 数 量†
I	结晶、孔洞白云岩	9.6 ± 4.4	凹形为主	16.8 ± 14.5	6.6 ± 6.6	10.9 ± 32.3	47
IA	结晶白云岩	6.9 ± 2.9	变化	30.7 ± 10.5	8.8 ± 8.5	21.6 ± 46.6	21
IB	孔洞白云岩	11.8 ± 4.2	变化	5.6 ± 2.5	4.7 ± 3.9	2.29 ± 1.8	26
I	骨粒灰岩和粒泥灰岩	5.2 ± 2.4	缓坡形 双峰形	36.1 ± 6.1	2.6 ± 4.0	29.7 ± 39.2	9
I	白云岩化鲕状 鲕穴粒灰岩	4.2 ± 0.7	双峰形	10.9 ± 17.5	0.6 ± 0.7	24.1 ± 16.9	4
IV	鲕粒灰岩和燧 石碳酸盐岩	1.6 ± 0.7	凸形	34.5 ± 15.3	0.04 ± 0.02	4.2 ± 5.8	19
IVA	鲕粒灰岩	2.1 ± 0.7	凸形	35.9 ± 15.7	0.04 ± 0.03	1.8 ± 0.9	5
IVB	燧石碳酸盐岩	1.6 ± 0.5	凸形	39.0 ± 10.0	0.04 ± 0.01	4.1 ± 6.5	14
V	灰泥岩和致密 白云岩	0.7 ± 0.4	凸形	12.4 ± 12.6	0.01 ± 0.01	707.9 ± 610.9	5

* 所有数字变量均列为平均值±标准偏差。

** 累积毛细管压力曲线形状。

† 有四个砂岩样品除外，它们不属于这些岩相。

岩。D 井（表 1）的白云岩在岩性上有别于所分析的其它 Hunton 群白云岩。D 井的 Chimneyhill 亚群上部有白云岩化，但也富含早期成岩燧石结核和岩脉。该地层的局部地区燧石可占岩石的 40% 以上。虽然 D 井的白云岩样品中燧石很丰富，但这些岩石在岩石物性上与岩相 I 的其它白云岩没有什么区别。属于岩相 I 的白云岩样品的特征是，累积注入毛细管压力曲线为凹形（个别曲线为双峰形、过渡型或缓坡形），常与累积排出曲线接近平行，增量注入曲线为低峰态（极少为尖峰态）或多峰态。这些样品的其它特征有，孔喉大小中值大，并且（常常）是变化的（平均=7 微米），归一化孔喉太小为中到大（平均=11），孔隙度为中到高（平均=10%），采收率为高到低（平均=17%）。这类岩石样品的采收率与孔隙度之间略成反比（ $r^2 = -0.29$, $P = 0.0001$ ）。这种相关性对油气生产的意义见下一节。

岩相 I 比所有其它岩相的变化都大，部分原因可能是由于原始沉积环境不稳定造成，还有部分原因可能是由于成岩作用的结果。对 Hunton 群白云岩孔隙系统几何形态研究甚少，但我们知道，埋藏较深的 Hunton 群白云岩中的孔隙以四面体和多面体晶间孔隙为主（图 3、13）（Sternbach 和 Friedman, 1986, 其图 8）。至少在两个地质幕中有 Hunton 白云岩形成：一个是与不整合发育有关的近地表成岩环境，一个是与下伏 Sylvan 页岩中释放镁离子（ Mg^{2+} ）有关的深层环境（Sternbach 和 Friedman, 1986）。属于岩相 I 的白云岩样品按岩石物性不同可分为两组。这两个组即命名为亚岩相 IA（结晶和沙糖状白云岩）和 IB（孔洞白云岩）。

亚岩相 IA 在 5 个岩心样品和 F 井（岩屑）所有 16 个白云岩样品中进行了观察（图 14）

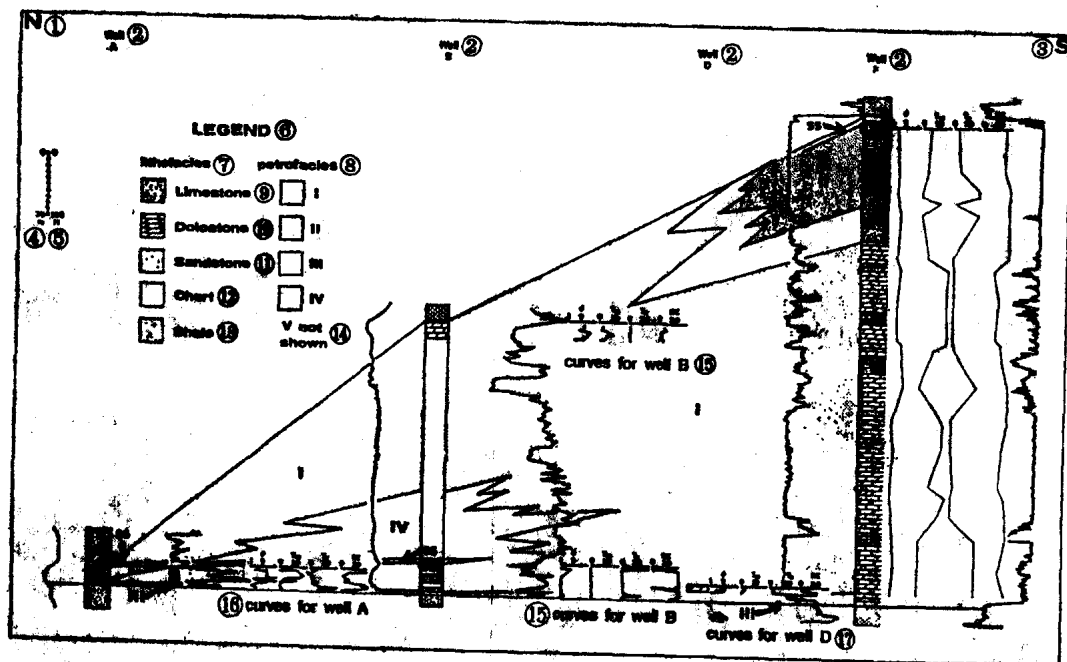


图 1) 根据对各井的研究建立的由浅到深(从北到南)的盆地横剖面示意图。图中 A、B、D 和 F 井(见图 1 注释)的位置没有按一定的横向比例尺。只有四口井的柱状图中标出了岩性;岩相由柱状图之间的罗马数字和图形表示。岩相 V 在井段中太薄,用这一比例尺无法显示。“SS”代表薄而少的砂岩。四口井有三口录了自然电位曲线(柱状图左侧)和感应测井曲线(柱状图的右侧)。其它资料从左到右有孔隙度曲线(ϕ)、孔喉大小中值曲线(T_m)、归一化孔喉大小曲线(T_n)和采收率曲线,这是根据横剖面上的四口井样品分析作出来的。孔隙度为百分数,孔喉大小中值的单位是微米,归一化孔喉大小无量纲,采收率为百分数。A 井中这四个参数的大小与岩相的关系很明显,其下部岩心的岩相 I 和 II 与上部岩心的岩相 I 明显不同。进一步说明见正文。

①北;②井;③南;④米;⑤英尺;⑥图例;⑦岩性相;⑧岩相;⑨灰岩;⑩白云岩;⑪砂岩;⑫燧石;⑬页岩;⑭岩相 V 未表示;⑮B 井的曲线;⑯A 井的曲线;⑰D 井的曲线

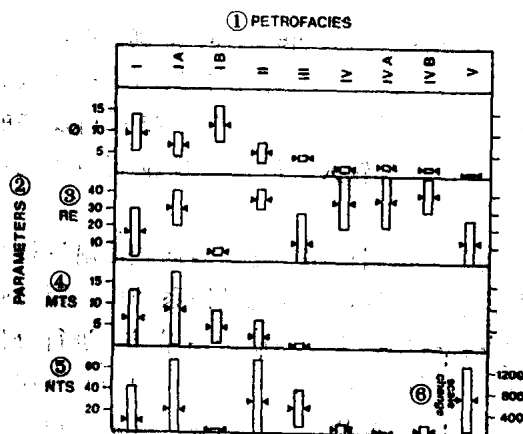


图 12 各岩相和亚岩相的孔隙度(%)、采收率(%)、孔喉大小中值(MTS)(微米)和归一化孔喉大小(NTS)(无量纲)的平均值和标准偏差。注意岩相 V 的归一化孔喉大小的比例尺是不同的。

①岩相;②参数;③采收率;④孔喉大小中值;⑤归一化孔喉大小;⑥比例尺变化

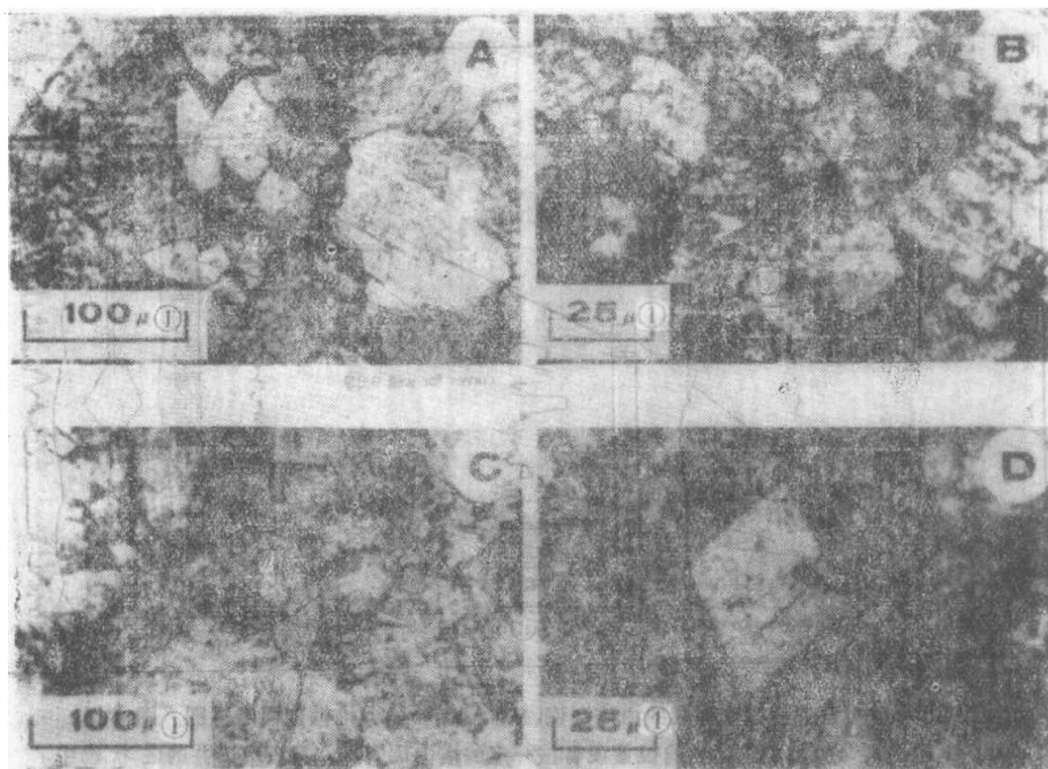


图 13 Winton 群白云岩和含少量白云石的灰泥岩薄片显微镜照片。(A—C) 亚岩相 IA, (D) 岩相 V。采用 Friedman(1965) 和 Sibley 和 Gregg (1987) 的术语。(A) 亚岩相 IA 的粗晶非面状(他形)白云岩, 照片中央的原有孔隙中充填了细晶 e 面状(自形)白云石胶结物。黑色固态烃充填在片状孔喉和四面体至多面体的孔隙中, 尤其是胶结物晶体之间的残留晶间孔隙。G 井岩屑取自海底下 6474—6477 米。(B) 亚岩相 IA 的 e 面状(自形)白云岩, 黑色固态烃充填在晶间孔隙中。孔隙为简单的多面体, 接近端员四面体, 孔喉为片状。左下部的大圆环是空气泡。H 井岩屑取自海底下 7846—7849 米。(C) 亚岩相 IA 的 S 面状(半自形)白云岩, 黑色固态烃充填于晶间孔隙。孔隙及孔喉的几何形态同 (B)。G 井岩屑取自海底下 6474—6477 米。(D) 岩相 V 的灰泥岩中自形晶白云岩菱面体。注意照片中央白云岩晶体中的包裹体, 以及该晶体中的大包裹体溶解所产生的清晰溶孔。G 井岩屑取自海底下 6471—6474 米。

①微米

(属于这一亚岩相的其它样品的毛细管压力曲线见 Kopaska—Merkel, 1988, 其图6B-F)。这些样品的累积注入曲线为凹形到双峰形、缓坡形、或过渡型。累积排出曲线与累积注入曲线近于平行, 增量注入曲线呈双峰态或低峰态。与亚岩相 IB 的样品相比, 这些样品所反映的采收率较高, 变化也较大 (平均=31%), 孔隙大小中值变化较大, 但孔隙度较低 (平均=7%)。归一化孔喉大小较高, 变化大 (平均=22)。

用岩屑数据来估算采收率可能过高, 因为岩屑与较大的岩心塞相比, 岩屑表面附近样品孔隙体积的比例高得多。压力下降时, 水银最先吸附在远离碎屑表面的孔隙系统中, 因为碎屑深内部的非润湿相流体更可能在其到达表面之前就被吸附起来。因此, 用岩屑进行分析时, 吸附水银量减少, 采收率变高; 这并不是该亚岩相采收率高的全部原因, 因为有五次分析是根据岩心塞而不是岩屑。五个样品都由均质的结晶和沙糖状白云岩组成。该亚岩相的岩

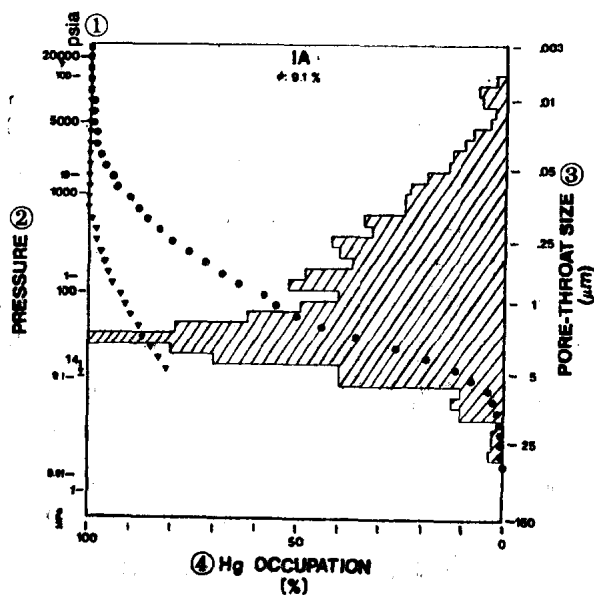


图 14 亚岩相 IA (结晶或砂糖状白云岩) 代表样品的毛细管压力 (CP) 曲线, 样品取自 G 井 4639 米。毛细管压力向上增大, 实心圆代表累积注入曲线, 小三角代表累积排出曲线, 方块代表累积注入曲线与累积排出曲线的重叠部分, 影线直方图代表增量注入曲线。当压力约为 0.01 兆帕时开始注入, 一直到压力为 138 兆帕, 接着是排出, 直到压力降回到 0.10 兆帕 (空气压力)。这一亚岩相的特征是孔喉大小变化为中等大, 孔喉大小的中值为中等, 采收率 (排出量) 为低到中等。该样品所谓排管压力已很好确定, 压力值很低, 约为 0.04 兆帕。虽然我们在分类时并没有用到排管压力 (原因说明见正文), 但我们把它列出来, 以便与其它提到排管压力或驱管压力的文章作比较。

① 绝对磅/英寸²; ② 压力; ③ 孔喉大小 (微米); ④ 水银占位

石具有较高的孔隙度和采收率, 但其开采效果是难以预测的, 因为它的岩石物性变化大, 而且与亚岩相 IB 的岩石互层。

来自三口不同井的 26 个样品可对亚岩相 IB 进行分析, 其特点是孔隙度高 (平均 = 12%), 孔喉径中值大或是变化的 (平均 = 5 微米), 归一化孔喉大小较小 (平均 = 2), 孔喉大小分布呈尖峰态, 采收率低 (平均 = 6%) (图 15) (Amthor 等人, 1988, 其图 10C;

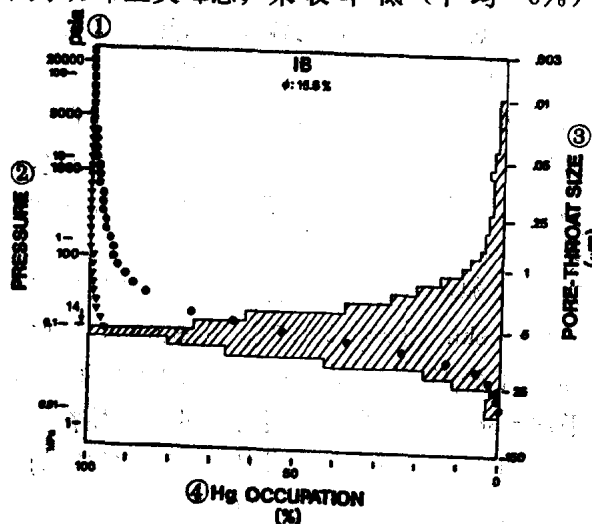


图 15 亚岩相 IB (孔洞白云岩) 典型样品的毛细管压力曲线, 样品取自 B 井, 2694 米。孔喉大小分布呈尖峰态, 孔喉大小中值较大; 采收率很小。排管压力明显, 压力值很低, 约为 0.20 兆帕。

① 绝对磅/英寸²; ② 压力; ③ 孔喉大小 (微米); ④ 水银占位

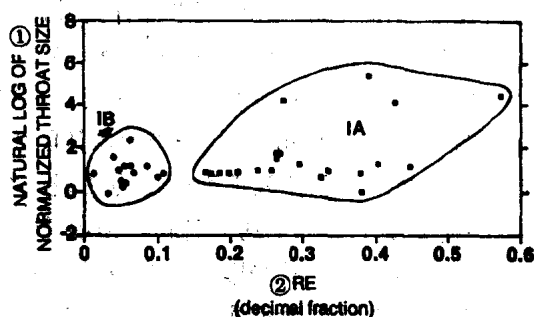


图 16 岩相 I 的结晶、砂糖状和孔洞白云岩的归一化孔喉大小自然对数与采收率的双变量交汇图。图上可以轻易地区分亚岩相 IA 和 IB 的白云岩 (图上用圈表示, 圈内的所有样品属于同一种亚岩相)。从这对参数上看, 亚岩相 IB 比 IA 均匀。

① 归一化孔喉大小的自然对数; ② 采收率 (十进制小数)

Kopaska-Merkel 和 Amthor, 1988, 其图 1; Kopaska-Merkel, 1988, 其图 7)。累积注入曲线呈凹形、过渡型或双峰形; 累积排出曲线与注入曲线明显发散; 增量注入曲线呈尖峰态。在归一化孔喉大小的自然对数与采收率的交汇图上, 这些岩石形成了紧密的点群 (图 16)。

三口井属于这一亚岩相的样品中, 有 16 个样品符合 Jennings(1987)估算渗透率的条件。估算结果是渗透率为 64 到 9000 毫达西左右, 平均渗透率近 2000 毫达西。其它样品大多数渗透率都不到 1 毫达西, 因此不能用这种方法精确估算。还有一些样品的渗透性好, 但孔喉大小分布呈多峰态或宽峰态, 同样也不能用这种方法估算其准确的渗透率值。

亚岩相 IB 还有一个显著特征, 即孔隙不均匀——许多样品含有大量裂缝性燧石或大于 1 毫米的晶洞和溶模, 或两者都有。在具有晶洞和溶模的岩石中, 大孔隙并不影响注入曲线的形态, 曲线形态由孔喉控制, 因为大孔隙是孤立的。也就是说, 这些大孔隙被比它们小得多的孔喉所包围, 并靠这些孔喉连通, 孔喉的大小具有大孔隙里基质中的小孔隙系统的特征。由于这种原因, 大孔隙如化石溶模、晶洞、溶孔等, 对流体流动很少有大影响 (例如, James 和 Bone, 1989, 其 193—194 页)。孤立的晶洞、溶模和裂缝的孔喉比值高, 采收率则降低 (Wardlaw, 1980)。由于孔隙系统中毛细管压力压迫着流体, 孔隙系统的直径突变处毛细管压力突变, 因此直径突变处即为非润湿相流体 (例如水银, 或多数情况下如油) 的分裂处 (例如, Wardlaw 和 McKellar, 1981; Yu 和 Wardlaw, 1986a, b; Yu 等人, 1986)。因此, 出现大的孔隙空间如晶洞、溶模或孔穴时, 会引起非润湿相的分裂, 如果是在润湿相正驱替非润湿相的储集层中, 那么大孔隙的出现会吸附大量非润湿相流体 (Wardlaw, 1980; Wardlaw 和 McKellar, 1981)。在亲水储层中, 非润湿相流体为油; 这时, 实验时吸附水银就相当于地下地层中吸附油。由于其采收率低, 这一亚岩相即使有较高的孔隙度和渗透率, 也不可能形成很好的储集层 (至少当地下储集层为亲水储层时是这样的)。

Hunton 群有两种白云岩不属于亚岩相 I。A 井见到的白云岩化鲕粒灰岩孔隙度低, 采收率极低, 孔喉大小中值小, 岩石物性不同于其它 Hunton 群白云岩, 划为岩相 II。

D 井的三个样品由极细晶白云岩组成, 视孔隙度不到 1%, 孔喉很小, 采收率极低。这三个样品划为岩相 V, 因为它们岩石物性更接近于岩相 V 的灰泥岩。事实上, 鲕粒灰岩可由菱形晶体组成, 这些菱形晶体的孔隙和喉道形状几乎与 e 面状白云岩中见到的孔隙和喉道形状完全一致 (Kopaska-Merkel, 1987, 其图 3-4, 3-5 和 3-6)。

岩相 I。——从海百合颗粒灰岩、泥粒灰岩和粒泥灰岩的 9 个样品中对岩相 I 进行了研究 (图 17) (Amthor 等人, 1988, 其图 10D; Kopaska-Merkel, 1988, 其图 6A)。这些岩石的特征是, 累积注入毛细管压力曲线为缓坡形或双峰形, 孔喉大小中值中到大 (平均=3 微米), 孔隙度中等 (平均=5%), 采收率高 (平均=36%), 采收率与孔隙度的相关性在统计上难以与零区分。累积排出曲线与累积注入曲线近于平行, 增量注入曲线表明, 在较宽的压力 (孔喉大小) 范围里注入量很高。归一化孔喉大小为中到高 (平均=30), 说明水银饱和度和为 50% 和 80% 时对应的孔喉大小相差很大。与岩相 I 相比, 岩相 II 样品在横截面上的孔隙更为等径, 但孔喉接近片状 (图 4), 因此, 用于从毛细管压力计算孔喉大小的模式可能是正确的。这些岩石包括我们所分析的全部样品中最有生产潜力的一些储层, 即孔隙度和采收率均较高的骨粒灰岩。有 2 个颗粒灰岩样品的孔隙性较差, 孔喉大小中值较小, 但采收率仍然很高, 并具有该岩相典型的归一化孔喉大小和毛细管压力曲线。

岩相 II。——从 A 井和 F 井的 Keel 组白云岩化鲕粒灰岩的四个样品对岩相 II 进行了研