

四川石油普查

1987年第2期总第22期

緻密砂岩储集性能

專 輯

國家“五·三五”重点攻关项目情报研究系列

75—54—01 之一

地质矿产部西南石油地质局

前 言

我国油气普查勘探向新地区、新领域、新类型和新深度的延伸，已经展示出良好的前景，也提出了严峻的挑战。对于我们所面临的大量科学技术难题，必须根据不同的区域地质结构特征归纳出系统的找矿目标，慎重地选择适应性的配套技术方法，组织多学科联合攻关。

在这种形势下，人们的知识更新是极为迫切的任务。

我们不仅要总结自己的实践，也应当吸收和消化国内外一切有益的经验。在宏大的科技攻关队伍中，情报研究是一支重要的方面军。近几年来，根据四川盆地的特点及勘探的需要，针对致密砂岩和海相碳酸盐岩两大含气领域，围绕储集岩评价所进行的情报监视和专题情报研究，是卓有成效的。这些情报资料为科研工作及时提供了宝贵的信息，为研究水平的提高发挥了应有的作用。根据国家七·五期间重点攻关项目的需要，现在把分散在国内外文献中的重要资料经过整理，作为情报研究系列，编成专辑陆续刊印。

对非常规储集岩的研究和评价方法，是有别于常规储集岩的；目前，与成岩作用相关的孔隙发育史的研究已把储集岩的研究引向深入；对裂缝性储集岩的研究已出现系统的方法。总之，新的观念、新的理论正在形成。这套专辑可供从事勘探实践、科学研究和教学工作的广大科技人员参考，是一套有价值的好资料。

衷心地希望情报研究工作能有更大的发展，今后还要进一步加强油气藏形成规律与综合性勘探技术方法等方面的情报监视和专题情报研究，不断适应和推动勘探的需要，为发现更多的油气资源做出贡献。

在这个专题情报系列的组织、编辑和刊印过程中，中心情报室付出了辛勤的劳动，由多学科多单位联合攻关所相应组织起来的专题情报网发挥了很好的作用。子项负责人和子项情报网也给予了积极支持和帮助。

谨在专题情报系列刊印之际聊表数语，以表欣喜之情。

郭 正 吾

1987.6.15日

本期责任编辑：王洪生

四川石油普查

1987年 第2期 总22期

情报研究系列

75—54—01 之一

编辑 《四川石油普查》编辑部

地址 成都市青龙场地质综合研究大队

出版 地矿部西南石油地质局

印刷 地质综合研究大队印刷所

四川石油普查

情报研究系列

75—54—01 之一

1987年 第2期 总22期

1987年 7月 6日 出版

目 录

低渗透性含气砂岩的实验室研究.....F.O.Jones等 (1)

低渗透性含气砂岩的孔隙结构及流体

在缝隙中的流量.....K.R.Brower等 (15)

致密含气砂岩渗透率与孔隙结构及粘土的关系.....J.D.Walls (28)

致密砂岩的孔隙度与渗透率.....P.L.Randolph等 (37)

低渗透砂岩渗透率与封闭压力的关系.....J.B.Jennings等 (50)

致密含气砂岩渗透率和毛细管压力的关系.....J.D.Walls等 (60)

妨碍致密含气砂岩储层测井解释精度的

关键问题.....G.C.Kukul等 (73)

致密含气砂岩的有效测井系列.....G.C.Kukul (86)

超低渗透性砂岩储层渗透率的定量测井

分析技术.....G.C.Kukul等 (94)

低渗透性含气砂岩的实验室研究

F.O.Jones W.W.Owens

美洲天然气协会编写的美国石油与天然气储量年鉴指出：美国天然气储量在1967年达最高水平，接近 $8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。自那以后，除1970年普鲁德霍湾储量有所增加外，就一直以每年近 $2.8 \times 10^{11} \text{m}^3$ 的速度稳定下降。为缓和或扭转这种趋势，石油工业就把其勘探与开发的尝试伸进了那些渗透性象普通胶结物一样，比如只有微达西的地层中。在这种低渗透岩石中想要获得工业产率，就得拟订强化措施；想要可靠的评价其远景储量，就得准确地了解其渗透性、孔隙度和流动特性。目前已有的文献资料虽然很少，但是，足以说明这些低渗透岩石的某些流动特性与较渗透岩石有着显著的不同，是需要更进一步研究的。

关于低渗透性天然气产层的特性，在以前已发表过一些从不同方面研究的结果。Thomas和Ward的研究指出：皮克彻德克利弗层和联合堡层的岩心渗透率受封闭压力的影响很严重，但孔隙度却无大的变化。他们还指出，当模拟原生水饱和度（约50%）时，气体渗透率会减少到只有该气体渗透率的10%—20%。Vairogs等人的结论是：渗透性极低的岩石受应力的影响要比渗透性较高的岩石大得多。这种意见与McLatchie早期所报导的研究结果一致。

Tannich用数学方法研究过低渗透地层中压裂气井的液体流动，并认为：在渗透性极低的岩石中清除侵入液的时间会长一些，但不见得有永久性的产层损坏。不过，这个研究没有提供低渗透岩石流动特性的实验测量资料。

美国石油公司在联结太平洋铁路租借区科罗拉多州瓦登伯格油气田的早期钻井和岩心资料表明：致密含气砂岩尚需进一步的实验室研究。比如，从岩心分析推导的地层渗透率和从压力累计分析的地层渗透率差别很大，现有的文献资料就还不能完全给予解释。此外，改进强化设计，防止大规模水力压裂措施的大储备计算（和费用），也需要可靠的储层渗透率值。再有，合理选择钻井液和强化液，尽量减少对产层的损害，也是涉及到这个值的。本文将要叙述的就是美国石油公司为解决有关提高致密含气砂岩储量的某些问题而进行的一项研究的部分成果。

本文介绍的这部分，是针对下列问题的实验室测试结果：1、研究引起常规岩心分析的渗透率值与储层实际渗透率值不同的因素；2、研究在美国石油公司感兴趣的地区内，这些因素对低渗透产层的影响范围；3、如有可能，要推导一些相关关系，以便根据岩心分析成果预测储层的渗透率值；4、评价各种矿化度的流体侵入对气体渗透率恢复速度的影响。

仪器与实验过程

取平行层面的柱样（直径1.9cm，长2.5cm）置于Hassler压力器中试验，压力器的封闭压力可达10000psi（70MPa），并呈各向均匀的状态（即所谓“流体静力学的”试验状态）。气体或水的渗透率可在封闭压力达到1000psi（7MPa），流速低到不会产生紊

流的条件下测出。液体,是在真空脱气后,通过管线滤器,由氮驱传送筒—专为防止氮气扩散到被驱液体中去而设计的一送进在恒压下的岩心的。气体的流动压力用Bourdon仪测量,液体的流动压力,用可变磁阻膜变换器和指示仪测量。封闭压力用油控制,并对平均孔隙压力进行补偿校正,以达到给定的封闭压力。

液体的流速是通过确定其在试管中流过的时间来测量。要能测出低于 $10^{-6}\text{cm}^3/\text{sec}$ 的流速,才能测量低到 10^{-6}md 的渗透率。气体的低流速是用确定经过弯管的时间,即石油从一个末端向下弯曲的水平试管流进,到下面石油流出的时间来测量。这种装置有稳定的、轻微的负油头,能保证气体及时排驱石油,避免在弯管或试管末端由于界面张力引起复杂化。关于弯管水平操作这一点是很重要的,假如在流动测量时油头变化了,在岩心和弯管间的气体就会明显地改变体积,这对于小径试管测试就会造成重大误差。不过,如果岩心和试管间的体积小于 5cm^3 ,就可垂直操作 10cm^3 的试管,而误差不超过1%。岩样的液体饱和,是在压力器中,在低于1mm汞柱(130Pa)的压力下经四小时把岩样抽空后,注入脱过气的液体,又在1000psi(7MPa)的压力下经16小时散尽残余气体的情况下达到的。孔隙体积的压缩系数是用Hassler压力器和测量随时间(能使每步达到平衡)流进标准管(0.001cm^3)的液体来确定。

封闭压力对渗透率的影响,一般用干岩心的气流试验来测量,渗透率是在封闭压力增到储层净覆盖压力的条件下测出的(净覆盖压力等于总覆盖压力与储层流体压力之差。总覆盖压力按每米假定增加22.6KPa来计算)。最高封闭压力下的克氏(Klinkenberg)渗透率(无气体排出)是用常规方法在一个以上的平均流体压力下测出的渗透率来确定。初步调查表明:用两个封闭压力下的测量结果就够了。气驱试验是用已为地层水饱和,并已知其对水渗透率的岩心来进行的。鉴于某些原因(将讨论于后),氮气通常是在1000psi(7MPa)(有时,为避免紊流,还要低一些)压力下注入,直到下端放出 3500cm^3 (在大气压力下)为止。在整个测试中对渗透率都是监视着的。不过,要测量水流出的速率,支承体积就太大了,所以除最后结果外,没有得到确定有关渗透率所需要的饱和度和资料。

实验研究结果

封闭压力对渗透率的影响

本研究和早已证明的一样,认为:封闭压力对致密含气砂岩的渗透率有很大影响。在封闭压力等于储层净覆盖压力(5000—6000psi)的流体静力学状态下的渗透率会减少至地面条件(相当于封闭压力为150—250psi)下测出的常规值的十分之一左右。通常可减少至 $1/3$ — $1/20$ 。典型的实验结果示于图1。封闭压力对致密砂岩的影响大于对较渗透的地层,其原因还不很确定。普遍的看法是:致密砂岩孔隙空间较小,而岩石压缩引起变化的部分却相对较大,这种影响还由于支配流动的孔隙容积能量的增高而进一步增强(圆形毛细管的能量为容积的 $1/4$,窄缝为容积的立方)。

这些实验资料按几种方式成图,以便寻求其中的线性关系,使资料的处理和相关关系

能得到简化,最终达到简化实验的目的。鉴于在1000psi和储层净覆盖压力之间所显示的特性,采用渗透率的立方根与封闭压力的对数编图,是较为合适的。图2就是用图1的资料编绘的渗透率立方根对封闭压力对数的关系图,它展示了上述关系的线性特点。图中的渗透率值是已经用1000psi净封闭压力下测得的渗透率标准化了的,可用以直接比较封闭压力对不同渗透性岩石的影响;线条的斜率就是衡量这个影响的尺度。表达这一关系的方程式是:

$$k = k_{1000} \left(1 - S \log \frac{P}{1000} \right)^3 \quad (1)$$

其中S,表示负斜率的数字,由下式算出:

$$S = \frac{1 - \left(\frac{k}{k_{1000}} \right)^{1/3}}{\log \frac{P}{1000}} \quad (2)$$

应用这种直线关系,资料的测试与处理就得到了简化。一般只需要在两个封闭压力下测出渗透率,算出方程的斜率系数,就足够大部分工程的需要了。通常是在1000psi (6.9 MPa) 压力和储层净覆盖压力两个压力下测量。“S”系数是斜率的绝对值,体现封闭压力的影响,使用这个单独的数对有关的概念和相关关系都比较方便。“S”值的增加意味着封闭压力影响的增加。中等的应力影响,比如在测试高渗透岩石所见,其S系数在0.1—0.2左右。重大影响,比如大部分致密砂岩的测试结果, S系数在0.3—0.6的范围内,如果系数超过0.7,表明渗透率有很大减少。

一般来说,岩心渗透率越低,封闭压力的影响越大。这种关系表示于图3—a。该图是边缘组岩样的“S”系数与1000psi净封闭压力下渗透率对数的关系图。请注意:这些资料虽然分散,但其线性趋势却是存在的。与这些资料吻合最好的直线当是集中地体现了封闭压力对这类地层岩心渗透率的平均影响。图3—b是用梅萨弗德组与棉花谷组资料编的一个类似图型,图中的资料点都分布在边缘组资料之下,表明受封闭压力的影响要小一些。

渗透率与封闭应力引起的减少之间没有发现相关关系,当封闭压力减到150—250psi时,通常就是常规测试的条件了。显然,这种相关关系必须在个别地层的基础上来取得。通常1000psi净封闭压力下的渗透率是常规渗透率的0.4—0.75倍。

在2000psi (14MPa) 净封闭压力以上,渗透率的对数与封闭压力对数的关系完全呈直线,也许,这可能就是预测封闭压力对衰竭层渗透率影响的最好的相关关系图。

气体的滑脱

气体滑脱或克氏效应在致密含气砂岩中是很大的。举例来说,一个具0.001md真渗透率或克氏渗透率的样品,在100psig (0.6895MPa) 压力下注入气体,在大气压下排出气体,就会表现出0.003md±;如果上端是15psig (103kPa),表现出的渗透率就会超过0.007md。渗透率小于0.1md的砂岩,其有效孔隙半径,据注汞资料及气体滑脱理论,是

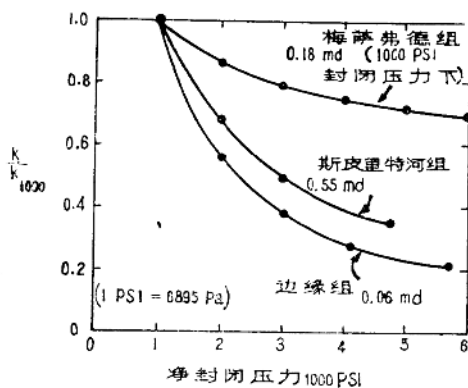


图1 封闭压力对致密含气砂岩渗透率的影响

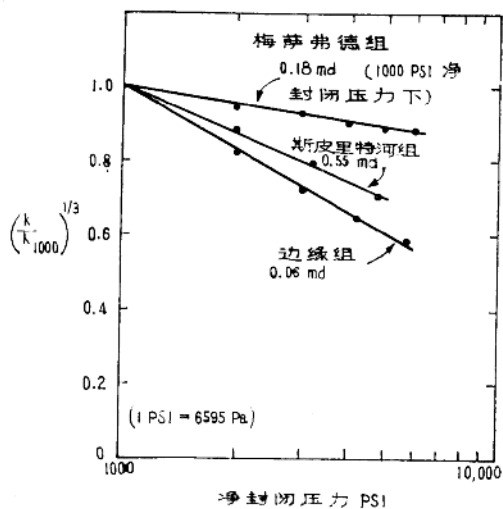


图2 渗透率的立方根为封闭压力对数的线性函数

在1 μ m至气体分子的平均自由行程的范围以下。)为此,担心在确定渗透率极低的致密含气砂岩的克氏渗透率时,用传统的外推法(把渗透率对算术平均压力倒数的函数线外推到压力倒数为0值求出的)可能不会得到直线关系。这是因为Warburg模式(按照他的理论,克氏又有所发展)所假定的平均自由行程的长度是小于毛细管半径的。克氏认为,压力降低时确定的“b”系数(上图中,一资料点与克氏渗透率联线的斜率)会偏小,从而造成与Warburg模式的这种偏差。不过,在本研究中,已经为克氏渗透率小到不足0.0001md的岩石获得了极好的克氏直线图。图4就是一个例子,展示一个渗透率为0.000688md的样品在上端压力为50—1000psig(0.34—6.9MPa)的范围内的测试结果。还测试了一套渗透率为0.001—0.01md的岩心,测量了它们的干岩心克氏渗透率及其对1.3cp(MPa·s)精炼石油(Soltrol 130)的渗透率,其结果列于表1。在所列各种情况下。石油渗透率都等于或低于克氏渗透率,平均低25%。不过,这种符合程度说明,用外推法获得的克氏渗透率对于实际应用的需要已是足够精确的了。至于哪一个“正确”的,还不了解。可能油的渗透率偏低一些,因为石油和岩石有相互作用,或者克氏渗透率偏高一些,因为与Warburg模式有些偏差。

在本研究中,克氏渗透率和“b”系数通常是根据上端压力为100psig(0.7MPa)和1000psig(7MPa),以及下端压力为大气压的情况下测出的渗透率来推算的。在测试较渗透的样品时,为避免出现紊流,使用的压力还应低一些。这些测量都是在净封闭压力等于储层净覆盖压力下进行的。在确定克氏渗透率期间,为保持净封闭压力的基本稳定,要适当增加封闭压力,以补偿孔隙压力的平均增量。克氏的“b”系数就是根据这些资料用克氏方程算出来的。

$$K_a = K_{\infty} \left(1 + \frac{b}{P} \right) \quad (3)$$

如方程所示,系数“b”是气体滑脱效应的一个数量标志。经常被当作视渗透率的部分增量看待,当用气体在大气压下测量渗透率时可以观察到。

把100多个致密含气砂岩样品的测量结果,按系数“b”的对数与克氏渗透率的对数关系画成图5,这种方法Heid等人曾用来整理Penn State为美国石油学会提供的1950年的研究成果。从图上可以看出:致密含气砂岩的资料点紧紧地分布在一条直线的附近,这条直线与Penn State 1950年较渗透岩石资料的最吻合直线的外推线差别不大。Penn State线的方程为:

$$b = 0.777k_{\infty}^{-0.39} \quad (4)$$

由本研究得出的穿过致密含气砂岩资料的最佳线的方程是:

$$b = 0.86k_{\infty}^{-0.33} \quad (5)$$

按照1950年Penn State对于平行毛细管束理想情况研究的讨论,“b”应与渗透率的平方根成反比,它们产生的斜率当为-0.5周/周。一般认为-0.39的斜率与这个理想认

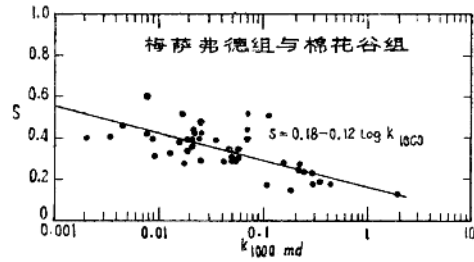
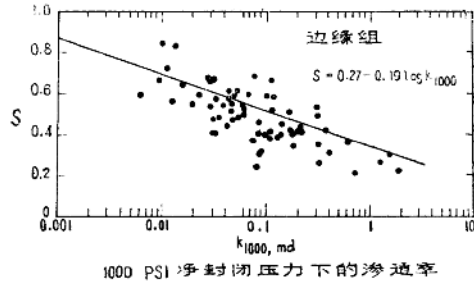


图3 渗透率应力系数“S”与渗透率的关系

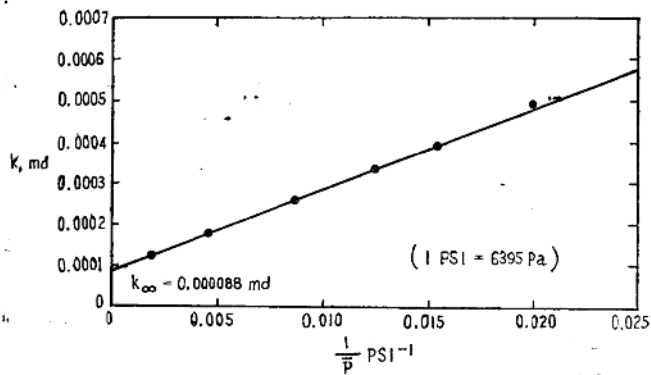


图4 克氏渗透率的确定

识是接近一致的。而由致密含气砂岩得出的 -0.33 的斜率却令人想起了Lamb的管道流表达式中的立方根关系并认为致密砂层中控制流动的孔隙更可能是窄缝状而不是圆形。

致密含气砂岩的相关关系式，方程5，提供的“b”系数值，其精度是足以满足许多实际需要的。将这个能量函数代入克氏方程中，即得：

$$K_a = K_{\infty} \left(1 + \frac{0.86 K_{\infty}^{-0.33}}{P} \right) \quad (6)$$

这个表达式，在已知测量所用压力的情况下，可作为根据普通渗透率资料计算克氏渗透率或“b”系数的数字解或编图的起点。由上述方程进一步推导，就可根据在100psig (0.7 MPa) 上端压力下的渗透率 (K_a) 来估算 K_{∞} ，其表达式为：

$$K_{\infty} = 10^{(-0.0398 \log^2 K_a + 1.067 \log K_a^{-0.0826})} \quad (7)$$

$$0.0001 \text{md} < K_a < 1 \text{md}$$

它与方程(6)基本一致，在 K_a 为0.0001—1md范围内误差不超过百分之几。

孔隙体积的压缩系数

测量孔隙体积压缩系数的主要原因是要确定常规测试的孔隙度值是否要比储层条件下测出的大得多。测量结果发现：致密含气砂岩的特性与较渗透的坚硬岩石是相似的；地表测出的孔隙度也不比深处大得多。通常孔隙体积只减少5%—10%，比如一种岩石，在地表条件下孔隙度为10%，在储层条件下就会是9—9.5%。对于许多实际需要来说，覆盖压力对孔隙度的这点影响是可以忽略不计的。一般，把在地表放大的孔隙度乘上一个0.95的系数，大部分资料也就校正到储层条件下的孔隙度了，除了最精确的用途外，这就足够准确的了。孔隙体积压缩系数平均为 6×10^{-6} 体积/体积/psi (体积/体积/6895 Pa) 左右。

图6是一个典型实验的结果。可以看出：孔隙体积减少的百分数是封闭压力增加的函数。储层应力下的孔隙体积压缩系数是用储层净覆盖压力点上曲线的斜率来计算，也可用孔隙体积减少所达到的那个点来计算。表2列出的是多次这种试验的资料，说明孔隙体积压缩系数及对孔隙体积的总影响。

水对岩心渗透率的影响

水会严重减少致密含气砂岩的渗透率，同时其影响的方式又与对较渗透砂岩有所不同。盐水和淡水引起的渗透率减少差不多一样大。比如，60000ppm的NaCl溶液，一般会使渗透率比干岩心渗透率减少85%，注入蒸馏水，还会引起进一步的减少，不过只再减少10%，因为总减少为95%左右。这类例子的测试结果列于表3。对于较渗透的水敏(Water-sensitive)砂岩，比如贝雷亚砂岩，在总减少为99%以上的情况下，上述盐水会使渗透率损失50%左右，而注入蒸馏水就还会再损失49%以上。总的来说，淡水对致密含气砂岩的影响相对要小一些，这可能是因为细粒岩石中孔隙较小，那些易分散的粘土或矿物细粒在原处往往处于力学稳定状态，从而抑制了它们的不利性活动。不过，就连高盐度溶液严重减少渗透率的原因也还是不容易说清楚的。目前有几种可以提供解释的理

论。其中最流行的(尽管在涉及影响的大小方面还有许多争论)认为:是邻接高能表面的水,形成层次,导致粘度增加,甚至固化,从而严重地减少了有效孔隙直径。把根据Poiseuille和Lamb定律的计算值应用到根据克氏“b”系数计算的孔隙半径值上,就可以看出:凝固层厚度必需达到 $0.01\mu\text{m}$ (100埃)左右或更多一些,才能解释在研究中对 $0.001-0.1\text{md}$ 的样品所观察到的最小减少值。

蒙脱石剥落碎片、大部分粘土,以及许多其它矿物细粒与流动状态的水结合,从干燥变成潮湿状态(在盐水中同),造成团粒体积的增加。这种机理也可以使孔隙空间减少到足以妨碍流动的程度。

对致密含气砂岩的100多个样品作了地层水渗透率测量。在水流试验之前用干岩样作了克氏渗透率测量。全部测量都是在净封闭压力等于储层净覆盖压力的条件下进行的。测试结果按地层水渗透率对数与克氏渗透率对数的关系绘成图7。从图上可以看出两个明显的特点:1、具线性趋势;2、渗透率越低,水引起的渗透率减少越大。穿过中心的线表示能量函数。

$$K_w = K_{\infty}^{1.32} \quad (8)$$

$$K < 1\text{md}$$

这个函数关系可用来计算水对渗透率的平均影响。如果图上资料点(比如单一地层或岩石的资料)不太分散就意味着在特殊情况下,从一定渗透率范围选择的样品,其实验室资料可用来确定该地层的水效应能量方程中的指数。研究图7还可以看出:最小效应的边界似乎比较清楚,这条边界线的斜率大致为 $1.13\text{周}/\text{周}$;在最大效应这边,大部分干岩心的克氏渗透率都低于 0.1md ,这条边界线的斜率为 $1.5\text{周}/\text{周}$ 左右。通过这个函数式还可以把应力效应与气体滑脱效应的关系联结起来,再根据常规渗透率值就可以对地层气体渗透率作出评价了。这一点还将在后面给予讨论。

在本研究中,没有发现粘土含量与水对渗透率影响的相关关系。通常粘土含量大,水的影响也大,但是粘土含量低却不能说水的影响就一定小。高粘土含量的岩心受影响大的原因,可能是粘土造成的低渗透性,而不是粘土本身的影响。

不过,高盐度水虽能严重影响致密含气砂岩的渗透率,但是相比之下,还是淡水的相对较小的追加效应更具有明显的实际意义。在钻井或强化处理中,有限侵入的水是有利于储层渗透性的保存的,并能减少从地层中清除侵入液的时间(减少泥浆滤液侵入,可采用保持泥浆比重与储层压力平衡或低于平衡的办法。减少压裂液的侵入可用最大限度减少压裂后的关井时间的办法,并已证明是有效的)。还有一点,因为淡水不比盐水更有害得多,所以,关于压裂液或泥浆滤液的化学成分就无需过多地考虑。

不同含水饱和度对气体渗透率的影响

致密含气砂岩不仅对水的渗透率比干岩心的克氏渗透率低得多,而且当模拟原生水时,对气体的渗透率也相应较低。一般,在储层条件下的气体有效渗透率可取其等于储层应力条件下水的渗透率来作一个初步的近似值。证明这一结果的实验将在后面讨论。

在此项研究的初期,还没有适合于测试致密含气砂岩渗透率的仪器。不过,勘探气驱

实验表明了：一般在1000psi的压力下注入柱样（2.5cm长×1.9cm直径）的气体，待从处在大气压下的下端放出3500cm³时，含水饱和度平均要减少40%。在这种情况下，大部分水分是被替换排除，蒸发掉的不到10%（不打算测量或解释可能存在的饱和度梯度）。图8展示的是，在这种气驱试验中渗透率随时间变化的实例。表4为22个气驱试验的结果，它比较了干岩心的克氏渗透率、水渗透率以及在所指出的含水饱和度下的气体有效渗透率（在测试受欢迎的高渗透性样品时有某种程度的偏差，因为测试渗透率不到0.001md的样品所需要的时间太长了）。研究这些资料可以看出：在各种情况下，气体有效渗透率都是接近水渗透率的，其中大部分往往与干岩样的克氏渗透率有一个较大的差距。在75%以上的情况中，气体有效渗透率不超过地层水渗透率的2倍，平均起来高出水渗透率的35%左右。这说明（如前所述）：可以用比较容易获得的水渗透率值来估算地层气体渗透率。气驱试验是费时而又必须密切注意的，不过从另一方面考虑，它可以一个人同时做几个水渗透率测试，一般来说，这又比一人一天一个样要快一些。

封闭压力，气体滑脱和水对渗透率的联合效应

前面分别叙述了应力、气体滑脱和水对致密含气砂岩渗透性的影响，还提出了在储层应力条件下对地层水渗透率的测量可作为估算储层条件下气体有效渗透率的一种岩心测试。本部分将讨论用常规岩心分析资料估算储层条件下气体渗透率的方法。

常规渗透率费钱少，用得多，但是它是用干岩心在低应力、低流动气压下测出的，很难代表地下致密层的气体渗透率。其差距可高达10—1000倍以上。再有，由于响应的多变性，常规值不能用来进行比较。比如，边缘砂岩与梅萨弗德砂岩的样品相比，通常是常规值越高，在储层的应力、含水饱和度，以及气体滑脱减少的条件下，其气体有效渗透率反而越低，因此，要把常规渗透率值校正为储层条件下的渗透率值，不仅要补偿条件的巨大差距，还必须要补偿岩性变化的巨大差距。

现提出两种估算储层条件下气体渗透率的方法。第一种方法是：逐一校正应力、气体滑脱和原生水存在的影响。这种方法也是两种方法中较能多方适应的方法，因为它对各个影响都进行了校正。第二种方法，是从第一种方法推导出来的，它把全部效应合并成一个总的“观察”方程（在规定的区间内）。方程中有两个参数，它们同时在应力、水和气体滑脱的最小—最大效应的范围内变化。这两个方法，至少在目前看来，不仅能有高的精度，而且，的确为储层提供了较常规值更为合理的气体渗透率值。

第一种方法，要求五个步骤：把常规渗透率值校正为1000psi封闭压力下的渗透率值；计算“S”系数（压力影响），用“S”系数计算覆盖压力的影响，校正气体滑脱；最后，计算水的影响。用各种岩类在一定渗透率范围内的岩心测试计算出必要的参数，之后，就可以用到现有的常规结果中去了。鉴于研究的范围，这些必要的参数值还可以假定；只有三个是必须估算的：把常规渗透率校正到1000psi封闭压力下（其系数通常为0.4—0.75）；在已确定的上、下限之间选择一个“S”系数方程， $S = (0.1 - 0.3) - (0.1 - 0.23) \log K_{1000}$ ；再为方程（8）选择一个水—效应指数，它的常用值为1.13—1.5；最后，假定 $K_w = K_g$ 。

假定大部分岩石既受应力的影响，又受水的影响，用上述方法，从应力和水的微小效

应到最大效应, 编制一套曲线。这些计算值在常规渗透率对数与计算的储层条件下气体渗透率对数的关系图上, 全部形成弯曲平缓、几乎是直线的曲线。在常规渗透率值为0.02—0.55md的范围内, 用肉眼使直线与这些曲线吻合, 其误差不超过计算值的百分之几。这些直线的截距与斜率就是观察方程中的系数与指数。

$$K_g = aK^b \quad (9)$$

$$0.02\text{md} < K < 0.55\text{md}$$

式中的 K_g 为储层条件下的气体有效渗透率, K 为常规渗透率。系数“a”的变化范围为1/5—1/20, 指数“b”的范围为1.5—2.7, 它们表示应力和水增加的效应。

应力与水效应较低的地层是洁净的梅萨弗德砂岩与棉花谷砂岩。受中等影响的是页岩状棉花谷砂岩和较洁净的边缘砂岩。研究过的大部分边缘砂岩都受有较大的影响, 其中一些还受有极大的影响。往往固结较好的岩石受影响较小, 而粘土含量增加则似乎伴有较大的影响。对于缺乏其它资料的地层, 可取 $a = 7.5$, $b = 1.9$ 作为初步的近似值。

结 论

对五个层段100多个致密含气砂岩样品进行压缩性与流动试验的结果表明:

1. 模拟储层净覆盖压力的封闭压力会使致密含气砂岩的渗透率, 按岩石类型与渗透率的不同, 减少至1/2—1/10以下。经研究发现, 渗透率的立方根为封闭压力对数的线性函数; 线的斜率, 反映应力作用的强度, 并与随岩石类型而变化的渗透率相关。一般低渗透岩石受应力的影响大于高渗透岩石。

2. 如所预料, 低渗透岩石的气体滑脱(克氏)效应是很大的。其相关表达式与早期根据较渗透岩石推导的表达式没有重大差别。

3. 水(包括盐水)会严重减少渗透率, 并且在低渗透岩石中更为明显。这种情况表明: 在钻井与压裂过程中, 最少量的侵入水有助于储层侵入带中渗透性的保存。并发现水渗透率与克氏渗透率之间存在相关关系。

4. 在相当于储层净覆盖压力的封闭压力下测出的水渗透率可作为储层应力、气体滑脱和不同含水饱和度条件下气体有效渗透率的近似值。

5. 无论盐水已使渗透率减少了多少, 降低盐度后还会引起相对较小的追加影响, 这说明泥浆滤液和压裂液的化学成分, 对于防止渗透率的降低, 一般都不是主要的。

6. 致密含气砂岩的孔隙体积压缩系数与较渗透砂岩相近。从测试的样品看, 储层覆盖条件下的孔隙体积平均是无应力条件下的孔隙体积的93%。

7. 应力、气体滑脱与水, 三种效应都与渗透率相关, 但与粘土含量无直接关系。低

渗透岩石，无论粘土含量高低，受到的影响都很大。据观察，粘土质岩石受影响大的原因是高粘土含量伴随的低渗透性，而不是因为细矿物是粘土这个事实本身。

8. 找到了根据常规岩心分析资料，通过分别计算应力、气体滑脱和不同含水饱和度三种效应，计算出地层气体有效渗透率的相关关系式。

符 号 注 释

b = 克氏“ b ”系数，在大气压下

K = 渗透率，md

K_a = 视气体渗透率，md

K_g = 气体有效渗透率，md，在不同含水饱和度情况下

K_o = 原油渗透率，md

K_w = 水渗透率，md

K_∞ = 克氏（无气体滑脱）渗透率，md

K_{1000} = 干岩心在1000psi（6.895MPa）的净封闭压力下的渗透率，md

$\bar{P}$ = 岩心中流动气压的算术平均值，atm

P_k = 封闭压力，psi

克氏渗透率与原油渗透率的比较

表 1

地 层	净封闭压力, psi	K_∞ , md	K_o , md
梅萨弗德组	5100	0.0092	0.0092
梅萨弗德组	5200	0.0040	0.0032
边 缘 组	5400	0.0018	0.0013
边 缘 组	5500	0.0018	0.0010
边 缘 组	5500	0.0039	0.0037
边 缘 组	5500	0.0026	0.0023
边 缘 组	5700	0.0066	0.0050

孔隙体积压缩系数

表 2

地 层	孔隙度 %	净 封 闭 压,力psi	水 渗 透 率,md	孔隙体积 减少 %	孔隙体积压缩 系数 Vol/Vol/ psi $\times 10^8$
梅萨弗德组	12.8	5200	—	5.7	5.4
梅萨弗德组	12.1	5200	0.00057	5.8	5.0
梅萨弗德组	10.6	5200	0.0025	6.6	6.0
梅萨弗德组	13.6	5200	—	3.8	5.1
梅萨弗德组	13.4	5200	0.0015	5.6	4.3
边 缘 组	13.2	5400	0.0073	7.8	5.7
边 缘 组	14.3	5700	0.00029	9.5	5.7
边 缘 组	11.6	5700	0.012	10.4	3.5
边 缘 组	7.0	5500	0.00091	4.3	2.7
边 缘 组	10.0	5500	—	8.5	6.1
边 缘 组	11.1	5500	—	10.4	9.0
边 缘 组	10.8	5500	0.000069	9.8	9.1
边 缘 组	12.1	5500	0.00041	4.6	3.2
边 缘 组	13.6	5500	—	9.6	7.7
边 缘 组	13.8	5500	—	7.1	5.9
边 缘 组	13.5	6700	—	8.1	3.3
边 缘 组	14.0	5700	0.00052	7.0	5.5
姆迪“J”层	10.8	4000	0.0012	8.3	9.2
斯皮里特河组	10.2	4000	0.0099	8.1	15.7

淡水对渗透率的影响

表 3

地 层	净封闭压力,psi	K_{∞}^1 ,md	K_w^2 ,md	$K_{H_2O}^3$,md
刘 易 斯 组	2000	0.0077	0.00094	0.00027
刘 易 斯 组	2000	0.0070	0.00094	0.00034
梅萨弗德组	5300	0.0031	0.00032	0.00010
梅萨弗德组	5300	0.0063	0.0021	0.00080
梅萨弗德组	5300	0.014	0.0040	0.00064
梅萨弗德组	6000	0.0039	0.00055	0.00036
梅萨弗德组	6000	0.091	0.076	0.041
梅萨弗德组	6000	0.0040	0.0011	0.00037
边 缘 组	2000	—	0.0026	0.0009
边 缘 组	2000	0.092	0.016	0.0047

边缘组	2000	0.089	0.033	0.0090
边缘组	2000	0.0090	0.00029	0.00013
边缘组	6700	0.010	0.00084	0.00051
边缘组	5700	0.0065	0.0010	0.00026
斯皮里特河组	4000	0.033	0.011	0.0037
斯皮里特河组	4000	0.0068	0.0010	0.00091
斯皮里特河组	4000	0.0011	0.000031	0.000022

1、干岩心克氏渗透率，在指定的封闭压力下。

2、地层水渗透率，在指定的封闭压力下。

3、蒸馏水渗透率，在指定的封闭压力下，在60000 ppm NaCl 溶液激化粘土之后。

气体有效渗透率与水渗透率的比较

表 4

地 层	净封闭压力, psi	K_{∞}, md	K_w, md	K_g, md	$S_w, \%$
梅萨弗德组	5100	0.0092	0.0050	0.0028	40
梅萨弗德组	5200	0.0032	0.00057	0.00079	29
梅萨弗德组	5200	0.0035	0.00041	0.00010	29
梅萨弗德组	5200	0.0096	0.0025	0.0033	34
梅萨弗德组	5200	0.0068	0.0015	0.0020	34
边缘组	5100	0.0067	0.000065	0.000054	44
边缘组	5400	0.0017	0.00010	0.000070	47
边缘组	5400	0.024	0.0073	0.0083	60
边缘组	5700	0.0039	0.00029	0.00071	33
边缘组	5700	0.047	0.012	0.029	60
边缘组	5500	0.0027	0.00091	0.00075	43
边缘组	5500	0.0012	0.000069	0.000073	49
边缘组	5500	0.0043	0.00041	0.0011	33
边缘组	6700	0.016	0.0011	0.0028	40
边缘组	5700	0.010	0.00052	0.0015	52
姆迪“J”层	4000	0.0050	0.0012	0.0015	38
棉花谷组	4900	0.0014	0.00040	0.00026	45
棉花谷组	4900	0.044	0.022	0.018	32
斯皮里特河组	4000	0.030	0.011	0.010	41
斯皮里特河组	4000	0.023	0.011	0.010	38
斯皮里特河组	4000	0.033	0.0037*	0.0063	40
斯皮里特河组	4000	0.0068	0.00091*	0.0011	39

* 经60000 ppm NaCl溶液激化粘土后的蒸馏水渗透率。