

开采多油层的油井的动态

R. Raghavan
U. of Tulsa

王福松 译
刘慰宁 校

摘 要

本文研究开采多油层或多分层油层油井的产能,综述在认识多分层油藏方面所取得的最新进展,说明综合应用压力和流量数据确定某一分层的流动能力(即 kh 的乘积)、表皮系数和平均压力的方法,还谈到有关增产处理的一些问题。

一、引 言

本文的课题是简要综述开采多层油藏的油井的生产特征。在这种油藏中,在层理面 (bedding planes) 上下的各油层 (分层) 具有显著不同的特性。对于这一类油藏,需要了解和确定其非均质性、设计恰当的增产处理措施并预测油井的产能,是显而易见的。已经肯定了各分层之间连通 (或不连通) 的经济后果。在本文作进一步介绍之前,先确定文中将广泛应用的两种概念,可能是合适的。我们所说的油藏,一种系指多层不连通油藏 (Commingled reservoir) 或层状非均质油藏,在这种油藏中流体只能通过井筒才能由这一层流到另一层,也就是说,只有当有井筒存在时各层才能发生连通。在这种情况下,实质上,通过各分层边界的垂直有效渗透率为零。另一方面,如果流体由这一层流到另一层不需要通过井筒,那么我们将把这种油藏视为越流 (crossflow) 系统或层间连通系统,也就是说,流体可以通过各分层之间共有的层面流动。当然,在这种情况下,流体也可以通过井筒由这一层流到另一层。(某些作者把流体通过井筒的流动称作回流,而用越流代表各层流体在油藏内部的流动。)应当指出,这种连通的概念适合于从地质角度研究分层油藏的动态,而从统计学方面深入描述油藏特性的概念则不适用于本文。

下面讨论确定分层特性的方法,研究选择性处理油藏各分层 (油井产能) 的效果,然后讨论预测油井动态的方法。其中每一个问题都对多层不连通油藏和层间连通油藏分别予以介绍。这样做,我们还可以考虑层间连通的影响。

二、讨 论

在文章的这一部分,我们首先介绍开采多层不连通油藏的油井的动态和产能,然后把我们的研究的结果扩大应用于存在层间直接连通的油藏。

(一) 开采多层不连通油藏的油井的动态

1. 背景

早期的著作^[1,3]研究了开采多层不连通油藏的油井的动态,在这种油藏中有两个或两个以上油层为粘度不变的微可压缩的流体所充满。研究结果表明,许多通常用来分析单层油藏压力数据的技术^[4-6]都可用于分析多层不连通油藏的压力数据。这些著作主要研究分层性质的差别对井底压力反映的影响,以及不同的降压对压力恢复曲线形态的影响。在七十年代,有三篇著作^[7-9]发展了参考文献^[1]中研究的结果,并且相当详细地研究了某些特殊情况。参考文献^[7]在假设其他特性不变的情况下,对大范围变化的生产条件,研究了渗透率差别对压力反映(压降和压力恢复)的影响。参考文献^[8]又把这些解扩大到包括厚度差别影响在内的情况。而参考文献^[9]考虑了孔隙度-压缩系数差别对油井反映的影响。几乎在同时,Earlougher等^[10]研究了多分层油藏压力反映曲线的一般特征。他们得出结论说,在一定的条件下,多分层油藏的动态将与单层系统的动态相同。(我们将说明多分层油藏动态将类似于单层油藏动态的条件。)对大多数情况来讲,参考文献^[1,7-10]都是假设以下条件是有用的:两分层系统;原始压力相等;表皮系数等于零;产量不变。这些假设条件对于我们认识分层油藏的压力反映有重要作用。然而,参考文献^[1]和^[10]研究了多分层的影响,参考文献^[1]建议,表皮系数的影响可以通过有效井眼半径概念来加以考虑,而参考文献^[3]考虑了原始压力不相等的影响。下面,我们研究这些假设条件对我们认识多层不连通油藏动态的影响;然而,参考文献^[1,7-9]所综合的结果仍然是有效的(只要我们的讨论将限于两个分层的油藏)。

(1) 压降反映的一般特征类似于开采单层油藏的油井的特征。一般说来,对于以恒定流量生产的情况来讲,将明显地分成三个流动阶段:早期不稳定阶段;晚期不稳定阶段;准稳态阶段。按厚度平均的流动能力可以根据早期不稳定阶段的数据确定。(这些特征与互不连通的分层数目无关。)单层与多分层系统之间的主要差别,是多分层情况下的晚期不稳定阶段可能比等效单层系统的晚期不稳定阶段长很多(在某些情况下可能长几百倍)^[1,7,8]。这一结论表明,出现准稳态阶段的时间,可能比文献中谈到的单层系统出现准稳态的时间长很多很多^[11]。

(2) 常规的半对数方法^[4-6]可以用来确定按厚度平均的流动能力以及“平均的”表皮系数(关于这一点都是暗示,但从来都没有明确地说过)。如果有合适的函数可用,还能够确定平均的油藏压力。例如,为恰当确定分层特性必须确定Matthews-Brons-Hazebroek函数(MBH函数)^[12]。

(3) 如果不同的降压是明显的,则Horner^[6]曲线能表现出可用作诊断目的的特征。在表观压力变平段(这时的压力不应误认为是油层静压)之后,不同的压降应该是明显的。在压力恢复试井之前,油藏应当生产足够长的时间。这一条件可以保证各分层平均压力之间有明显的差别。此外,根据参考文献^[7,8和9]研究两个分层系统所得出的结果,我们认为,只有当扩散系数比率 $\eta_r(\eta_1/\eta_2)$ 显著不同于1并且 $V_{pr} \approx 1$ 时不同的压降才能是明显的。在这里 η_j 是分层 j ($j=1,2$)的扩散系数, V_{pr} 是孔隙度-厚度-压缩系数比率:

$$V_{pr} = \frac{\phi_1 c_{t1} h_1}{\phi_2 c_{t2} h_2} \quad (1)$$

(4) 对于分层特性的许多组合来讲,Matthews-Brons-Hazebroek函数都是负的。同

样, 根据参考文献[7, 8和9]的结果, 我们认为, 如果扩散系数比率 η_r 显著不同于1, MBH函数将是负的。

虽然参考文献[1, 7—9]研究了大范围变化的生产条件下的压力数据, 想推论得出通用的结论, 但由于以下原因他们得出的结论仍然是受限制的。首先, 根据Larsen^[13]和Yeh等^[14]的研究结果, 看来没有必要通过渗透率比、孔隙度比等这些专门的数据来研究压力反映。如果我们假设分层表皮系数为零, 那么根据参考文献[13和14], 我们就能够得出结论说, 油井的反映可以表示为 η_r 和 V_{pr} 的函数。其次, 参考文献[7—9]忽视污染带的影响。现在看来, 主要的参数是各分层的表皮系数, 因为它们对油井的反映有重大影响。为了适应综合讨论的阶段, 我们考虑了构成上述结论基础的典型反映。

图1是开采有两个分层的多层不连通油藏的油井压降反映的半对数曲线。无量纲压力降 p_{wn} 和无量纲时间 t_D , 用如下公式定义:

$$p_{wn} = \frac{\bar{k}h}{141.2qB\mu} (p_i - p_{wf}) \quad (2)$$

和

$$t_D = \frac{0.0002637 \bar{k}ht}{\phi c_t h \mu r_w^2} \quad (3)$$

式中 $\bar{k}$ 是按厚度平均的渗透率

$$\bar{k} = \frac{\sum_{j=1}^n k_j h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} = \frac{\sum_{j=1}^n k_j h_j}{h} \quad (4)$$

式中 n 是分层的总数目, 而

$$\bar{\phi c_t} = \frac{\sum_{j=1}^n \phi_j c_{tj} h_j}{h} \quad (5)$$

符号 k_j 、 ϕ_j 、 c_{tj} 、 p_i 、 p_{wf} 、 q 、 B 、 μ 、 r_w 和 t , 分别代表分层渗透率、分层孔隙度、分层压缩系数、原始压力、井底流压、流量、地层体积系数、粘度、井眼半径和生产时间。扩散系数比率 η_r 是令人感兴趣的参数, 图中对 $V_{pr} = 5$ 给出了 η_r 值。 $\eta_r = 1$ 的底部曲线是单层解的油井反映。如果各分层表皮系数为零, 那么对于油藏特性的任何组合来讲, 只要 $\eta_r = 1$, 多层不连通油藏 ($n \geq 2$) 的动态将与单层油藏的相同。当扩散系数比率不同于1时, 无量纲压降增加; 也就是说, 随着 η_r 的减小 ($\eta_r < 1$) 或随着 η_r 的增加 ($\eta_r > 1$), p_{wn} 增加。这对于所有的 V_{pr} 值来讲都是正确的。(如果 V_{pr} 很大或很小, 那就不可能区分出单层油藏和双分层油藏 p_{wn} 值之间的差别。) 这种情况的发生, 是因为某一分层的特性看来对油井反映起着主导作用。在早期, 无量纲压力降 p_{wn} 与无量纲时间 t_D 的对数大约成直线函数关系, 并且对于所有的目的而言, 斜率为1.151 (2.303/2)。在早期不稳定阶段, 扩散系数比率的影响很小, 并且早期不稳定阶段的时间长短略受扩散系数比率 η_r 的影响。在每条曲线上的字母x表示早期不稳定阶段结束。在过了早期不稳定阶段以后, η_r 的影响变得起主导作用。最终, 准稳态流动起主导作用时, 无量纲压力降即与无量纲时间成直线函数关系。图1中注明的时间是达到准稳态的时间。在这一阶段要指出的关键点是, 反映曲线在形状上没有任何东西可以说明油井是在开采多层不连通油藏。

图2是一多层不连通油藏油井反映的Horner曲线, 这口井已经生产了相当长的时间, 并且分层性质的差别足以使各分层不同的压降在关井之前是明显的。这里, p_{ns} 是Horner压力降, 由下式定义为:

$$p_{ns} = \frac{\bar{k}h}{141.2qB\mu} (p_i - p_{ws}) \quad (6)$$

式中 p_{ws} 是关井压力。图中符号 t 和 Δt 分别代表生产时间和关井时间。在早期, 很明显地有一段很好的直线, 其斜率等于1.151。随着关井时间的增加, 初期的直线段以后出现变平阶段, 最后很快上升到油藏静压。由这一曲线可以清楚地看出, 要使反映不同压降的最后上升段明显, 必须关井很长时间。同样, 如果压力恢复试井过早结束, 那么就没有什么东西能够区分这里的反映与单层系统的反映。(据我所知, 对于与曲线平缓部分相应的压力, 尚没有能够给出具体的物理解释。例如, 如果曲线的后期线段代表不同压降的影响起主导作用的阶段, 那么人们就可以认为曲线的变平部分代表压降更多的分层的平均压力。)

实例应用: 上述讨论清楚地表明, 要仅仅通过压力数据来成功地识别多层不连通油藏, 除其他因素外, 取决于以下因素: 1) 有一个分层的压力要比其他分层降低得很多; 2) 关井时间长。(其他因素将在下面讨论。) 这里举的例子说明与识别多层不连通油藏动态有关的某些问题。如同在上述理论研究所做的那样, 它还说明用无量纲坐标研究反映曲线特征的优点。所考虑的试井是在一口探井中进行的, 并且主要的课题是证实地质研究中所指明的断层的存在。原始油藏压力大约是1,778磅/英寸²。这口井除试井前作过土酸处理外, 过去没有进行过增产处理。这口井大约生产了2天, 然后大约关井11.5天。压力恢复反映的分析表明了储存效应(续流影响)可以忽略不计。图3是这次试井的Horner曲线。这里我们遵循Scott法^[15]并用标准化时间(normalized time)把数据绘成曲线。压力比例用实际的气体拟压力^[16]绘图。为方便起见, 还记录了关井时间。数据中向上弯曲的部分可能是边界的反映, 但是并未出现斜率一般加倍的情况。关于这一点, 并不是没有预料到的, 因为生产时间很短。已经有了可用来确定向上弯曲部分是否反映断层的方法; 关于这方面的讨论已超出本文的范围。这次试井最令人费解的特点是, 在关井11天之后压力大约比原始油藏压力约低10磅/英寸²。其动态可用下面的因素中一个或两个来说明: 首先, 如果所有其他边界都离这口井很远(按照原来的预计)并且向上弯曲是由于断层的关系, 那么达到平均油藏压力(在这种情况下是原始油藏压力)的时间应当非常长。其次, 在大约76小时之后压力曲线明显上升, 表明可能存在一个以上的分层。如果这一假设是正确的, 那么由我们的讨论中可以清楚看出, 根据至今提供的结果, 有一个分层的流动能力与其他分层相比非常小, 否则就不应当发生不同的压降。总之, 这次试井表明将来应当进行井下测井, 以检测井筒中的液流(在生产之前或者在压力恢复试井期间进行), 并且需要补充进行地质研究以确定可采储量和识别具有不同特性的分层的存在。

2. 分层表皮系数的影响

虽然Lefkovits等提出了包括污染带影响在内的解, 并简要地指出了分层表皮系数对油井反映的影响, 但Tariq^[17]显然是第一个定量研究污染带影响的。他表明, 有效的或等效的表皮系数随着压力降落而变化。他还表明, 在早期不稳定阶段, 开采具有不同分层表皮系数的分层油藏的油井, 其等效表皮系数 s_e 可用下式近似求得:

$$s_t = \frac{\sum_{j=1}^n k_j h_j s_j}{kh} \quad (7)$$

这一结果表明, 由压降或压力恢复试井估算的表皮系数将是 s_t 。对于准稳态流来讲, Tariq 建议用 s_{ps} 求出有效表皮系数:

$$s_{ps} = \frac{\sum_{j=1}^n \phi_j h_j c_{tj} s_j}{\phi c_t h} \quad (8)$$

应当指出, 用常规的压力恢复试井不可能求得 s_{ps} 。如果我们希望预测油井产能, 那么 s_p 是我们感兴趣的表皮系数。Tariq 研究了分层表皮系数差别不大的受损害井的动态, 并确定了方程 (7) 和 (8) 的可靠性。Tariq 表明, 如果 $s_j \approx 0$, 可以应用常规半对数方法分析开采分层油藏的油井动态。遗憾的是, 这一看法并不总是正确的。

关于各分层表皮系数对多层不连通油藏油井反映的影响, 在参考文献[13]和[18]中进行了综合研究。(对多层不连通油藏动态感兴趣的读者, 应当阅读Larsen的文章。)根据Larsen[13]的研究, 以恒定产量生产的双分层油藏的油井, 其无量纲井底压力降由下式求出:

$$\begin{aligned} p_{wD}(t_D) = & 0.5 [\ln t_D + 0.80907] + 0.5 \sum_{j=1}^2 \frac{k_j h_j}{kh} \ln \frac{\eta_j}{\eta} + \sum_{j=1}^2 \frac{s_j k_j h_j}{kh} \\ & + \frac{1.023 E_2}{0.5 \left[(\ln t_D + 1.247) + \sum_{j=1}^2 \left(1 - \frac{k_j h_j}{kh} \right) \left(\ln \frac{\eta_j}{\eta} + 2s_j \right) \right]} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\bar{\eta}$ 和 E_2 用下式求出:

和

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{k}}{\phi c_t \mu} \quad (10)$$

$$E_2 = - \frac{(k_1 h_1)(k_2 h_2)}{(kh)^2} \ln^2 \left(\sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \frac{\exp(s_1)}{\exp(s_2)} \right) \quad (11)$$

在参考文献[13]中给出了分层数目为 n 的求 p_{wD} 的通用表达式。方程 (9) 具有指导性。首先, 它为Tariq关于在早期不稳定阶段各分层表皮系数作用的经验性观察提供了理论证明。如果合适的半对数直线是明显的, 那么对于所有实际目的而言, 等效表皮系数[我们将它定义为 $s_j \neq 0$ 双分层解(对于所有的 j) 与 $s_j = 0$ 双分层解(对于所有的 j) 之间的差]可用方程 (7) 求出。也就是说, “平均”表皮系数 $\bar{s}$ 将等于 s_t 。其次, 方程 (9) 表明, 如果

$$\hat{\eta}_r = \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} \frac{\exp(s_1)}{\exp(s_2)} \quad (12)$$

约等于 1, 则双分层油藏的动态将无法与单层油藏的动态区别开, 因为在这种情况下 $E_2 \approx 0$, 并且方程 (9) 右边第一个和项通常将小得可以忽略不计。(这一观察说明, Earlougher等[10]的观察结果, 即多分层油藏的动态无法与单层系统区分开, 在什么条件下是可靠的。)第三, 如果我们将方程 (9) 对 t_D 求导数, 那么就可以提高我们对分层油藏动态的认识。让我们来研究 $dp_{wD}/d \log t_D$ 值。完成求导之后, 我们求得以下结果:

$$\frac{dp_{WD}}{d\log t_D} = 1.151 \left[1 - \frac{1.023 E_2}{\left\{ [1.1511 \log t_D + 0.5416] + \sum_{j=1}^2 \left(1 - \frac{k_j h_j}{kh} \right) \left(\ln \sqrt{\frac{\eta_j}{\eta}} + s_j \right) \right\}^2} \right] \quad (13)$$

方程 (13) 表明, 即使 $s_1 = s_2 = 0$, 半对数直线的斜率也是时间的函数。(这一事实在参考文献 [1, 7—9] 中也认识到了。) 方程 (13) 还表明, 各分层表皮系数对于压力反映曲线的斜率可能具有决定性影响, 因为仅在 $E_2 = 0$ 时斜率才与时间无关。第四, 由于 $E_2 \leq 0$, 斜率总是大于 1.151。因此, 即使表观直线存在, 并且确实存在, 地层的流动能力将被估计过低。这一观察是重要的, 因为, 如果具有合适斜率的直线在早期不稳定阶段不明显, 那么在压力恢复试井期间这些直线也将不明显。第五, 如果我们承认函数 E_2 控制油井的反映, 那么很清楚, 是各分层的表皮系数而不是扩散系数比率 η , 控制函数 E_2 的大小。

虽然上述讨论对多层不连通油藏在早期不稳定阶段的动态提供了定性资料 (并且不管在关井时存在什么样的流动方式, 这些观察在压力恢复试井早期也将是可靠的), 但是关于获得合适斜率直线的条件范围的定量资料还没有充分地讨论。同样, 应当指出, 如果 j 是负值, 或者如果各分层特性之间的差别和各分层表皮系数之间的差别都很大, 方程 (9) 也可能是不可靠的。参考文献 [1, 7—9 和 18] 中所得结果的研究表明, 对于 $\hat{\eta}_r$ 的值, 最大为 75, 都将求得具有合适斜率的半对数直线。在这里, 我们假设 $j = 1$ 代表流动能力高一些的分层。Priyambodo^[18] 表明, 只有当能满足下面条件之一时, 将能求得斜率约等于 1.151 的直线: 1) $s_1 \leq s_2$; 2) s_1 和 s_2 大于或等于零, 并且各表皮系数之间的差别小; 3) $s_1 = s_2$ (损害或增产处理)。在这里, 下角 1 系指流动能力高一些的分层。(注: Priyambodo 研究过 $h_1/h_2 = \phi_1/\phi_2 = c_{t1}/c_{t2} = 1$ 的系统。) 如果低流动能力分层中的表皮系数 s_2 比高流动能力分层中的表皮系数 s_1 小很多, 并且 s_1 和 s_2 均大于 0, 或者, 如果 $s_1 > s_2$ 并且 $s_2 < 0$, 则早期的油井反映对于图 4 所示的反映来讲是典型的。这一曲线图引自 Priyambodo 的文章^[18], 只作了很小的修改。在这里, 分层 2 中的表皮系数假设是固定不变的, 而分层 1 中的表皮系数是感兴趣的参数。这里所示的各斜率, 是应用字母 x 所指出的时间以后的 p_{WD} 值, 用最小二乘法回归分析程序求得的。如果我们应用字母 x 所指出的时间前面的数据, 那么斜率将大于这里给出的数值。还应当指出, 实际上, 半对数直线的斜率是变化的, 并且随着 t_D 的增加而减小。因此, 这里指出的斜率值仅对于在这里所考虑的时间具有代表性。除了 $s_1 = s_2 = -2$ 这一情况外, 正如用方程 (13) 所预测的, 所有斜率都大于 1.151 (参看评述的第四)。即使对于如 $s_1 = 5$, $s_2 = -2$ 差别小的情况来讲, 斜率与 1.151 的差别也达 5% 以上。

图 5 的一部分曲线引自 Priyambodo 的文章, 是为进一步说明上述各点的某些点。这些结果是想证明各分层表皮系数对压力曲线特征的决定性影响, 并且 Priyambodo 这样做时系假设, 除了表皮系数以外, 所有各分层的性质是相同的。在这里, 我们考虑无限作用油藏和有边界油藏两种油藏的反映。分层表皮系数的决定性影响是显而易见的。即使对于 $s_1 = 5$, $s_2 = 0$ 的情况来讲, 直线的斜率与一般公认的斜率也相差 9% 以上。该图的目的还为了证明外部边界和流动时间对表观半对数直线斜率的影响。对于 $r_{De} = 2,000$ 的情况估算出的斜率 (标出了有关的值) 要比对于无限作用油藏估算的大得多, 这主要是因为直线是在不同的时间选取的。总之, 这里所示的结果是想提醒读者, 如果要确定地层流动能力的代表性数值, 对完井和增产处理作业必须予以考虑。Larsen 和 Priyambodo 两人都举例说明, 渗透率-厚

度的估算值有50%的误差就算很好了。平均表皮系数的误差要更大些。Larsen报告说, 如果 E_2 与零的差别很大(或者, 如果Priambodo提出的条件得不到满足的话), $\bar{k}h$ 和 $\bar{s}$ 的估算值将是偏低的。

即使在最有利的情况下, 各分层表皮系数的影响也是不能忽视的。与单层系统不同, 各分层的表皮系数对于多层不连通油藏油井的压力恢复动态总是起着重要的作用, 因为流体会通过井筒由压力降少的层流入压力降大一些的分层。(在多层不连通油藏中进行干扰试井也是如此, 当然两口井的分层表皮系数都对油井的反映有影响。) 这一点可用图6中的例子加以说明。用来求得图6中数据所用的油藏特征, 除分层表皮系数以外, 与图2中所考虑的相同。开始, 所有的直线都具有大约等于1.151的斜率。然后, 显而易见, 在整个压力恢复期间, P_{Dj} 都是 s_1 和 s_2 的函数。这里所示的结果提出了一些关于确定平均油藏压力的严重问题, 因为很显然, Horner拟压力 p^* 决定于各分层的表皮系数(即使 $s_1 = s_2$)。因此, 必须谨慎地使用MBH函数数据^[12]。类似的意见对于应用变平部分以后的数据计算分层参数^[8]的方法也是适用的。根据这里提出的结果, 看来利用扩展的Muskat法^[4]可能是确定油藏压力的最好方法。

从实际观点来看, 如果我们希望应用压力恢复曲线的特征来确定分层或油藏的性质, 上述关于分层表皮系数的讨论是很重要的。在我们研究边界控制流动以后, 将考虑各分层的生产特征。

3. 边界控制流动

至此, 我们主要集中讨论了短期的效应, 因为我们确定地层特性和油层产能的能力取决于我们对压力恢复曲线的认识。油井以恒定产量生产时, 其在边界控制流动期间的反映, 在参考文献[1, 7—9, 13, 14和18]中都讨论过。根据参考文献[1和13]中概括的结果, 油井在准稳态生产期间的反映将由下式给出:

$$P_{WD}(t_{DA}) = 2\pi t_{DA} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\phi_j c_{tj} h_j}{\phi c_t h} \right)^2 \left(\frac{\bar{k}h}{k_j h_j} \right) \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4A}{e^{\gamma} C_A r_w^2} + s_j \right) \quad (14)$$

式中 A 是排油面积, 假设在所有分层中都是相等的; C_A 是Dietz形状系数^[11]; γ 是Euler常数(0.5772...); t_{DA} 是以排油面积 A 为基础的无量纲时间:

$$t_{DA} = \frac{0.0002637 \bar{k} t}{\phi c_t \mu A} = t_D \frac{r_w^2}{A} \quad (15)$$

由方程(14)我们可以认为, 对于分层系统来讲, 准稳态流动期间的等效表皮系数可由 $s_{p,,}$ 给出。求 $s_{p,,}$ 的方程如下:

$$s_{p,,} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\phi_j c_{tj} h_j}{\phi c_t h} \right)^2 \frac{\bar{k}h}{k_j h_j} s_j \quad (16)$$

这一关系式不同于Tariq给出的关系式^[17], 虽然很明显, Tariq意识到了方程(16)。实际上, 在参考文献[17]中已发现方程(16)可以应用于互不相等的分层排油面积。认识到 $s_{p,,}$ 不能从常规压力恢复试井中确定是重要的。

虽然以恒定流量生产的解的特征对于研究油井压力恢复特征是有用的, 但产能预测要求我们研究以恒定压力生产的情况。很遗憾, 对于多层不连通油藏生产来讲, 如果油井以恒定压力生产, 问题对所有时间可能解耦(decoupled)^[21—23]。如果油井以恒定压力生产, 那么每

一分层的产能都与其他分层的产能无关。因此,多层不连通油藏的无量纲流量 q_D 由下式给出:

$$q_D = \sum_{j=1}^n q_{Dj} \quad (17)$$

式中 q_D 是以按厚度平均的产能为基础的,也就是说:

$$q_D(t_D) = \frac{141.2\mu Bq(t)}{kh(p_i - p_{wf})} \quad (18)$$

和

$$q_{Dj} = \frac{141.2\mu Bq_j(t)}{kh(p_i - p_{wf})} \quad (19)$$

式中 $q(t)$ 是总产量, q_j 是分层 j 的产量;也就是说 $q(t) = \sum q_j(t)$ 。对于边界控制的流动, q_{Dj} 用下式求得[24]:

$$q_{Dj} = \frac{k_j h_j}{kh} \frac{2}{\left(\ln \frac{4A}{e^{\gamma} C_A r_w^2} + s_j \right)} \exp \left[\frac{-4\pi t_{DAj}}{\left(\ln \frac{4A}{e^{\gamma} C_A r_w^2} + s_j \right)} \right] \quad (20)$$

式中 t_{DAj} 是以分层 j 性质为基础的无量纲时间。因此,如果我们想预测将来的动态,所需要的就是审慎地综合各分层的动态。

举例应用——产能预测:这里所考虑的例子引自Fetkovich的文章[22],是关于东边 Coalinga 油田的动态。有关的细节在参考文献[25和26]中有介绍。(对任何从事石油生产的人来讲,参考文献[26]对他们都是有益的。)正如参考文献[25]中图 27 所示的,这一油田的横剖面表明,上部砂岩和下部砂岩被一连续分布的黑色页岩所分隔。Fetkovich 指出,后期生产的特征曲线遵循指数递减。如果多层不连通油藏模式对于这一油田是可靠的,并且,如果我们假设油藏由两个分层组成,那么由方程(20)我们可以写出总产量的表达式如下(还可参考文献[22]):

$$q(t) = \sum_{j=1}^2 q_j = \sum_{j=1}^2 q_{1j} \exp \left(- \frac{q_{1j} t}{N_{p1j}} \right) \quad (21)$$

式中 q_{1j} ($j=1,2$) 代表在边界控制流动开始之后任一时刻的各分层的产量; N_{p1j} 代表产量为 q_{1j} 时开始到极限油藏关井压力(0表压)为止可能生产的原油; t 是生产时间,因为 $q_j = q_{1j}$ 。方程(21)还假设 $p_{wf} = 0$ 。如果方程(21)所给出的多层不连通油藏的模式对这个油田适用,并且产量的递减遵循指数方式,那么这一观察表明,除非 $q_{11}/N_{p11} = q_{12}/N_{p12}$,则仅有一个分层出油。当然这一般是不真实的。因此,Fetkovich 得出如下结论:1)把该油田的后期反映与 Fetkovich 的递减型曲线拟合,用来计算边界控制阶段分层1的产量(按时间往回外推);2)油田总产量与分层1计算产量之差应为分层2的产量;3)如果假定后期的产量只采自一个分层,并且如果方程(21)也是可靠的,那么计算所得的分层2的产量也应表明,产量递减遵循指数方式,当然,除非两个分层的生产机理和流体性质等截然不同。

图 7 是这一油田的数据与 Fetkovich 递减样板曲线的样板曲线拟合(参看参考文献[22]的表1)。图中 q_{dD} 和 t_{dD} 分别为递减曲线的无量纲产量和无量纲时间,并且用以下方程确定:

$$q_{dD} = \frac{q(t)}{q_1} \quad (22)$$

和

$$t_{dD} = D_1 t \quad (23)$$

式中 t 是产量等于 q_i 以后的时间, q_i 是出现边界控制流动后的任一产量, 而 D_i 是初期递减率 [$D_i = q_{i,j}/N_{p,i,j}$, 参看方程 (21)]。所感兴趣的参数是递减曲线指数的倒数 ($b=0$ 是指数递减; $b=1$ 是调和递减; $0 < b < 1$ 是双曲线递减)。注意 $b > 1$; 如果资料表明 $b > 1$, 则数据不代表边界控制流动^[22]。

图 7 上用圆圈表示的数据点代表总产量随时间而变的关系曲线。从图 7 可以看出, 在后期与 $b=0$ 的解拟合得很好。正如已经指出的, 这样的结果应表明, 在早先提出的假设条件下, 在后期仅有一个分层生产。图 7 中方框表示的数据点代表分层 1 的产量值, 是按 $b=0$ 曲线回推确定的。计算圆圈和方框值之差, 即可求得分层 2 的产量。Fetkovich 已经表明, 这些数据也遵循 Fetkovich 样板曲线的 $b=0$ 线。图 8 是分层 2 数据在半对数坐标上的曲线, 表明产量递减是指数递减。为了进行对比图中还给出了总产量曲线。

根据以上求得的结果, Fetkovich得出结论, 这一油藏的预测方程可给出如下:

$$q(t) = 58,824 \exp(-0.2t) + 50,000 \exp(-0.535t) \quad (24)$$

式中 t 用年表示, q 用桶(油)/年表示。

关于以上分析有几点评论是恰当的。首先, 只有当每一分层的生产机理相同时, 每一分层的 b 值才是相同的。Fetkovich 表明, b 值取决于生产机理: $b=0$, 为高度欠饱和油藏, 或没有自由界面的重力驱油; $b=0.5$, 带有自由界面的重力驱油; $b=0.667$, 为溶解气驱油藏, 平均油藏压力 $\bar{p}$ 是累计产油量 N_p 的线性函数; $b=0.333$, 为溶解气驱, $\bar{p}^2$ 与 N_p 接近线性关系。以上 b 值适用于单层系统; 也就是说, 在本文它们适用于油藏中各单个分层的动态。其次, 如果各层合采, 那么应用总产量绘制曲线, 有可能获得一个与 Fetkovich 递减曲线相拟合的结果。然而, 现场曲线的 b 值将不同于每一分层的 b 值。一般说来, 现场曲线将显示出一个较大的 b 值。例如, 上面讨论的现场曲线可能与 Fetkovich 样板曲线的 $b=0.2$ 解拟合。

Fetkovich 等^[27]在最近的文章中应用过相同的思路。他们在这篇文章中研究了 School Creek 油田低渗透挥发性油藏。图 9 是这一油藏河道砂岩生产井数据的样板曲线拟合。这口井曾关井 3 个月, 当重新投产时合采两个砂层 (河道砂岩和砂坝砂岩)。图 9 中用三角表示的数据点代表合采产量。根据这里所示的拟合, 不可能对河道砂岩明确地确定出 b 值。Fetkovich 等指出, 其他油井的数据符合 $b=0.3$ 曲线。据此, 应用了 $b=0.3$ 曲线, 预测了河道砂岩的未来产量。(在作预测时假设河道砂岩以前的产量可以忽略不计; 而图 9 所示的拟合则假设代表合采以后的河道砂岩的产量。根据这口井曾关井 3 个月可证明这一假设是正确的。)如果我们的假设条件是正确的, 那么测量的和对河道砂岩预测的两种产量的差额就应当是砂坝砂岩的产量。图 10 是这一砂岩的产量数据的样板曲线拟合。这些数据遵循 $b=0$ 曲线。砂坝砂岩的未来产量可按 $b=0$ 曲线外推而求得, 而这口井的产量预报可把这两种预报相加而求得。因为砂坝砂岩显然遵循 $b=0$ 曲线, 我们假设河道砂岩产量也将遵循 $b=0$ 曲线, 研究了结果的敏感性。图 11 是假设河道砂岩数据遵循 $b=0$ 曲线 (而不是 $b=0.3$ 曲线) 而求得的砂坝砂岩数据的拟合结果。这里所示的拟合比图 10 所示的好一些。但是这两种拟合结果的差别很小。

4. 表皮系数对分层产能的影响

与上面讨论的压力数据分析有关的许多问题, 都是由于分层产量受分层表皮系数控制这一事实造成的。对于以恒定产量生产的情况来说, 通常认为, 在早期不稳定阶段分层的产量可由下式给出:

$$\frac{q_j}{q} = \frac{k_j h_j}{kh} \quad (25)$$

$j = 1, 2, \dots, n$ 。在准稳态流动阶段, 分层的产量由下式给出:

$$\frac{q_j}{q} = \frac{\phi_j c_{tj} h_j}{\phi c_t h} \quad (26)$$

$j = 1, 2, \dots, n$ 。很遗憾, 正如Larsen^[13]和Priyambodo^[18]所表明的, 只有当 $s_j = 0$ ($j = 1, 2$) 或 $s_1 = s_2$ 时, 方程 (25) 在早期不稳定阶段才是可靠的。如果我们考虑图12和图13中的结果, 我们就能看出分层表皮系数的严重影响。在这里, 分层1的产量 (渗透率较高分层) 以总产量的分数表示, 作出了这一分流量与无量纲时间的函数关系曲线。我们感兴趣的参数是分层表皮系数。对图12曲线的研究表明, 如果 $s_1 < s_2$ (仍遵守前面用的术语), 则分层1的分流量 (流动能力较高的分层) 由大于 $k_1 h_1 / kh$ 的值不断减小, 直到达到准稳态流为止; 此时方程 (26) 对于所有的 s 值都是可靠的。如果 $s_1 > s_2$ (我们前面讨论的大部分问题都发生在这种情况下), 则分流量增加, 直到达到最大值。因为对我们所考虑的情况来讲 $V_{Pr} = 1$, 所以 q_1/q 值要一直减小到方程 (26) 给出的数值为止。注意, 当生产时间达到准稳态流动时间时, 分层1的产量可能达不到最大值。如果我们考虑图13中的结果, 这一点就显而易见了。这对 $\eta_r = 1$ 来说是一个很有意义的情况。应当指出, 对于我们在这里考虑的两种情况来说, 各分层的产量在准稳态流动情况下与各分层的表皮系数无关。得出这一结果的原因是对于以恒定流量生产来说, 在边界控制流动期间, 各分层的产量纯粹受物质平衡条件的控制, 并且在油藏中任何一点的压力随时间的变化与渗透率 (和表皮系数) 无关。如果油井以恒定的压力生产, 则这一结果将是不正确的。根据图12和图13所示的结果, 显然, 如果 $s_1 \leq s_2$, 各分层的流量可由方程 (25) 近似求得。Priyambodo等^[28]认为, 只有当各分层的产量大致上与各层的流动能力成正比时, 在不稳定流动阶段, 具有适当斜率的半对数直线才是明显的。对于我们在这里所考虑的结果来说, 至少对于多层不连通油藏, 油藏的边界必须离得很远, 才能使具有适当斜率的直线是明显的。关于这一点, 当我们考虑分层之间连通的油藏的动态时, 将更详细地加以探讨。

在这里必须指出的重要一点是, 完井和增产处理作业对各分层和油藏的产能有很大影响。谁也不能事先就作出结论: 产量高的层段就反映流动能力高的层段。人们只能作出这样的结论: 如果多层不连通油藏的描述是可靠的, 那么砂层面的流量确实反映特定分层的流量。显然, 谁也不能仅仅根据对于砂层面流量的观察谈出很多有关分层特性和表皮系数的情况。这一点在注入井情况下特别重要, 因为流体注入某一特定分层中之后它就不可能在分层之间流动。

油藏工程师必须考虑的另一个重要问题是, 同时处理高流动能力分层和低流动能力分层是否有利, 或者仅处理高流动能力分层够不够。这一点在文献中不可能考虑得很细。直观地说来, 如果同时也处理低渗透分层, 应该能改善产能。产能改善的大小, 将取决于分层之间 kh 差别的大小和 ϕh 差别的大小。图14对 V_{Pr} 的两个值 (5和0.2) 和 $(kh)_1 / (kh)_2 = 10$ 简要地研究了这一点。假设这口井以恒定压力生产, 因而绘制了 $1/q_D$ 与 t_D 曲线。我们仅考虑无限作用的油藏。这里所给出的结果系假设 kh 和 $\phi c_t h$ 是固定不变的。(这一假设对于我们的讨论来说并不是必需的; 然而, 因为 q_D 和 t_D 是以整个系统的参数为基础的, 因此, 如果这两个参数不是固定不变的, 就需要按时间比例加以变换以便对比所得结果。) 实线为 $V_{Pr} = 0.2$ 的

曲线, 虚线为 $V_{Pr} = 5$ 的曲线。对于每一个 V_{Pr} 值, 我们都考虑以下情况: 两个分层都进行了处理 ($s_1 = s_2 = -2$); 高 kh 分层进行了处理 ($s_1 = -2, s_2 = 0$); 低 kh 分层进行了处理 ($s_1 = 0, s_2 = -2$)。不出所料, $s_1 = s_2 = -2$ 这种情况下的产能最大。我们还应指出, 对于这一 kh 比率来讲, 在 $s_1 = s_2 = -2$ 与 $s_1 = -2, s_2 = 0$ 两种情况之间油藏产能的差别可以忽略不计。当然, 这一结果对于其他的 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2)$ 值将是不适用的。正如所预料的, 对于 $V_{Pr} = 5$ 的情况, 油藏的产能高一些。这一点, 正如下面将要指出的, 是多层不连通油藏和层间连通油藏之间的一个重要差别。前面已经指出, 在油藏工程的这一领域做的工作还不多。对于通常的情况要定量确定产能的改善程度, 还需要继续做工作。(对于分层间相互连通的系统, 关于这方面研究得还细些, 请参看文献[29]。)

5. 分层性质的确定

正如已经指出的, 早期的著作认为, 由压力恢复和压降试井所得的数据, 应能确定地层的流动能力、平均表皮系数和平均油藏压力。近期的著作则认为, 初期得出的结论仅对于受限制的一些情况是正确的, 并由 Larsen^[13]和 Prijambodo^[18]对这些情况作了说明。根据我们的讨论, 显然, 只有当知道了分层表皮系数和分层性质, 才能用文献中谈到的方法确定平均油藏压力。比较理想的是应该知道各分层的性质 ($k_j h_j, s_j$ 和 $\bar{p}_j$)。这对于设计处理作业特别重要。早期的研究企图用不同压降现象来确定分层的性质。特别是 Raghavan 等^[8]把 Horner 曲线上明显的后期上升与分层流动能力相关为函数关系。很遗憾, 正如已经指出的, 这一方法受以下事实的限制: 即 Horner 压力恢复曲线上的后期上升受分层表皮系数的控制 (见图 6)。Larsen 建议, 我们应当应用类似于图 2 所示的 Horner 曲线, 来确定分层流动能力。正如他所指出的, 这一方法要求知道分层孔隙体积并且设各分层表皮系数等于零。这些要求类似于应用后期上升相关式所提出的要求。还有其他的作者建议, 对各分层进行分层试井。毫无疑问, 对各层进行分层试井, 或者在压力恢复试井时隔离各分层, 然后测量每一分层的反映^[18], 是取得分层性质最简单的办法。当然, 这在很多情况下是一个难以实现的建议。好在目前在技术上的进步, 看来允许我们综合应用产量和压力测量资料来确定分层的性质。下面, 我们将考虑当有压力和产量数据可用时压力恢复数据的分析。同时, 我们将仅仅应用最简单的可能的分析方法, 因为我们的课题主要是证明以综合应用产量和压力测量数据为基础的方法的潜力。我们将应用产量标准化方法, 该方法是 Winestock 和 Colpitts^[30]建议用于压降试井数据的, 并且最近由 Fetkovich 和 Vienot^[31]用于压力恢复试井分析。(把这一方法应用于压力恢复数据分析应当归功于 Gladfelter, Tracy 和 Wilsey^[32]。)还有更为复杂精确的方法, 关于这些方法的应用, Kucuk 和 Ayestaran^[33]以及 Thompson 和 Reynolds^[34]都作过详细的讨论。对于本文的讨论来讲, 这些方法并没有特别的优越性。

对于单层系统来说, 正如 Fetkovich 和 Vienot 所指出的, 产量标准化方法要求我们绘制 $(\Delta p)_{bu}/\Delta q$ 与 Δt 的关系曲线, 其中 $(\Delta p)_{bu} = (p_{wf} - p_{wf,i})$, $\Delta q = q(\Delta t = 0) - q(\Delta t)$ 。如果我们把这一观察扩展应用于双分层系统, 那么我们应当绘制 $(\Delta p)_{bu}/\Delta q_j$ 曲线, 其中 $\Delta q_j = q_j(\Delta t = 0) - q_j(\Delta t)$ 。应当指出, 在这种情况下, 在进行压力恢复试井时各分层是连通的。然后可以应用这一曲线象分析单层系统那样分析压力恢复数据。适用于单层系统的分析方法, 应能得出分层的流动能力和分层的表皮系数。我们来考虑一个实例应用。

为了将这一讨论分阶段进行, 我们用以下方程定义压力恢复阶段分层 j 的无量纲压力变化:

$$\tilde{p}_{Ds,j} = \frac{k_j h_j}{141.2 \Delta q_j B \mu} (p_{ws} - p_{wf,s}) \quad (27)$$

用下式定义分层j的无量纲关井时间:

$$\Delta t_{Dj} = \frac{0.0002637 k_j h_j \Delta t}{\phi_j c_{t,j} h_j \mu r_w^2} \quad (28)$$

下面, 我们考虑把产量标准化方法应用于双分层系统, 其特性如下: $p_i = 4,000$ 磅/英寸², $r_{De} = 5,000$, $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) = 4$, $V_{Pr} = 1$, $s_1 = 20$, $s_2 = 0$ 。应当指出, 对于这一油藏性质组合, 在压降阶段不存在具有适合斜率的半对数直线。我们对三个生产时间值考虑了压力恢复反映: $t_D = 10^7$, 10^9 和 10^{11} 。分层1相对于总流量的砂层面流量, 在上述关井时刻分别为0.5242, 0.5004和0.5000。类似于下面讨论的结果可于早期阶段求出。

图15表示双分层系统的产量标准化压力恢复数据。黑点、白圈和方框分别为每一生产时间的产量标准化压力恢复数据。显然通过这些早期关井时间的数据点的直线, 是相应于线源解的(对适当的表皮系数值求解, 分层1的 $s = 20$, 分层2的 $s = 0$) 反映。也就是说, 相应于实线的反映是由 $0.5(\ln \Delta t_D + 0.80907) + s$ 给出的。我们可以看出, 在所有三种情况下, 在适当线源解(带表及系数)之间的符合情况是良好的。这些结果表明, 综合应用压力和产量数据计算分层流动能力和分层表皮系数是可能的。在后期出现的明显偏差, 是由于在生产阶段发生的不同压降造成的。

确定每一分层中的平均油藏压力, 要求在超出 $\tilde{p}_{D,j}$ 与 $(t + \Delta t)/\Delta t$ 函数关系曲线——Horner 曲线^[6]之外进行计算。就我所知, 通过产量标准化方法(或任何等效方法)确定平均油藏压力, 即使对于单层系统在文献中也没有讨论过。下面, 我们将介绍一种方法, 应用产量标准化数据, 能够很好地估算分层j中的平均油藏压力 $\bar{p}_j$ 。这一方法的基础如下。在图15中我们已经表明, 在早期, 产量标准化压力恢复数据的曲线与线源解符合良好。同时已经很好地确定, 如果两个分层在压力恢复阶段是隔开的, 那么每一分层的关井压力在早期关井期间也将遵循图15所示的实线^[18]。然而, 在这一情况下, 我们将根据 $\Delta t = 0$ 时的分层流量计算无量纲压力的变化^[35,36]; 也就是说, 我们得应用 $q_j(\Delta t = 0)$ 。为了方便起见, 我们用 $\hat{p}_{ws}$ 代表在这种情况下测量的压力, 而用 $\hat{p}_{D,j}$ 代表相应的无量纲压力上升; 也就是说:

$$\hat{p}_{D,j} = \frac{k_j h_j}{141.2 q_j(\Delta t = 0) B \mu} (\hat{p}_{ws} - p_{wf,s}) \quad (29)$$

因此, 如果我们把Horner曲线上的直线外推到无限关井时间求出 $\tilde{p}_{D,j}^*$, 这一数值也应等于 $\hat{p}_{D,j}^*$ 。根据以上观察, 有可能预测出如果在压力恢复试井期间各分层被隔开而能求得的Horner假压力。一旦 $\hat{p}_j^*$ 确定以后, 计算 $\bar{p}_j$ 就比较简单了。单层系统的 Matthews-Brons-Hazebroek^[12] 函数, 即 p_{DMBH} , 如果我们用 $k_j h_j$ 和 $q_j(\Delta t = 0)$ 分别代替其定义式中的 kh 和 q , 就可用来计算 $\bar{p}_j$ ^[35]。图16是图15所示压力曲线之一(分层1的数据, $t_D = 10^9$) 的Horner曲线。根据Larsen^[37], 我们取 t_{DA1} (以排油面积和分层j为依据的无量纲时间) 等于0.08。由这一曲线我们求得 $\tilde{p}_{D,1}^*$ 为28.3。因此 $\hat{p}_{D,1}^* = 28.3$ 。同时对于这一 t_{DA1} 值, $p_{DMBH} = 1.05$ 。数值模拟表明, 在关井时间的无量纲压力降 $\bar{p}_{wD1}$ 等于157.35, 而分层1的无量纲平均压力降 $\bar{p}_{D1}$ 为129.48。在这里, $\bar{p}_{wD1}$ 和 $\bar{p}_{D1}$ 都是以分层j的性质和 $q_j(\Delta t = 0)$ 为依据的。因为

$$p_i - \bar{p}_j = (p_i - p_{wf,s}) + (\hat{p}_j^* - \bar{p}_j) - (\hat{p}_j^* - p_{wf,s}) \quad (30)$$

我们得：

$$\bar{p}_{Dj} = p_{WDj} + 0.5 p_{DMBH} - \hat{p}_{D,j}^* \quad (31)$$

代入适当的 p_{WD1} , p_{DMBH} 和 $\hat{p}_{D,1}^*$ 值, 我们求得 $\bar{p}_{D1} = 129.6$ 。这一估算值与模拟所得的值 129.48 对比性很好。在其他情况下求得了类似的结果。上述计算完成了我们关于确定分层 j 平均压力 $\bar{p}_j$ 的讨论。如果其他油藏性质是已知的, 估算出 $k_j h_j$, s_j 和 $\bar{p}_j$, 就能预测油井的产能。应当指出, 并不是对于所有的情况都能应用产量标准化方法。在这种情况下, 参考文献[34]给出的资料可能是有用的; 然而, 这里提出的基本想法是可靠的。原则上讲, 上面提出的方法可以扩大应用于两个分层以上的油藏。要说问题, 据我看, 会出现机械方面的问题, 这些问题人们在进行适当的测量和解释测量结果中都会碰到。关于思路的正确性, 上面已经提供了现场的证据, 虽然如在参考文献[33和34]中那样扩大一些进行讨论是有益的。

在本文中还应当指出, 如果各分层中的原始压力是不相等的, 那么只要能够确定每一分层中的原始压力 (这一压力可以用重复式地层测试器求得), 用监测生产前的压力就可能确定分层的流动能力 (参看 Larsen^[13])。只要记住前面指出的关于函数 E_2 的有关限制条件, 也可以应用常规的半对数方法来分析压力数据, 求得 $\bar{k}h$ 。再次指出, 如果综合应用产量和压力测量数据, 与压力数据分析有关的许多问题都是可以避免的^[34]。

(二) 层间连通 (越流) 油藏的动态

1. 背景

关于分层间连通油藏动态的早期研究表明, 其早期的油井反映与类似的层状非均质系统相同^[21,38,39]。因此, 只要是考虑早期不稳定阶段数据的分析, 那么能用于分析多层不连通油藏的方法, 也能用于分析分层间连通油藏的数据。同时已经确定, 分层间连通的多层油藏, 其最终的动态与单层油藏的相同, 这一单层油藏具有与其等效的孔隙体积, 类似的井眼半径, 排油半径, 而且其总流动能力等于多层油藏各分层流动能力的总合^[21]。参考文献[21]也认为, 如果各分层是连通的, 从而越流是一个重要的经济因素, 那么降压时间就会大大减少。图17是引自参考文献[18]的一个图, 用来说明这一动态。图中下面的曲线是单层油藏的反映曲线。感兴趣的参数是渗透率比 k_1/k_2 。所有其他的性质假设是相同的。如果多层不连通油藏的描述是可靠的, 虚线则表明 $k_1/k_2 = 100$ 的压力反映曲线的趋势。这里所示的结果证实了参考文献[21, 38和39]的结论。根据这一观察, 我们可以认为, 在与多层不连通油藏动态相应的时间阶段半对数直线将取决于 E_2 值 [见方程 (11)] 或 $\hat{\eta}_r$ 。在与反映单层均质油藏动态的流动阶段相应的直线段是否存在, 取决于 k_1/k_2 和 k_{2j} ($j = 1, 2$) 的值以及油藏的大小。例如, 对于图17中所考虑的专门解来说, 显然, 在 $k_1/k_2 = 100$ 情况下, 在很长的时间阶段内都不存在第二条直线段。如果 k_1/k_2 比较大 (或者 k_{2j}/k_1 比较小), 那么, 对于这里所考虑的 r_D 值来说, 第二条半对数直线将是不明显的^[28]。如果油藏足够大, 并且 $k_{2j}/k_1 \leq 1$ ($j = 1, 2$), Prijambodo等^[28]人则认为, 只要 $k_1/k_2 \geq 5$, 在早期著作中报道的动态应该是明显的。

由于已经指出了上述结果, 没有必要再重复早先列出的结论和方程。如果应用符合多层不连通油藏的直线确定表皮系数, 则估算出的值应反映 s_t (图7)。如果应用相应于均质油藏动态的直线, 则表皮系数估算值应反映 $\hat{s}_t, s_t$ 由下式给出^[28]

$$\hat{s}_t = \sum_{j=1}^n s_j q_j / q \quad (32)$$

式中 q_j 代表分层 j 的砂层面流量, q 是总流量。这一结果, 对所有的情况, 包括下面指出的例外的情况, 都是可靠的。因此, 如果能够识别出相应于均质油藏动态的直线, 则表皮系数估算值应反映 $\hat{s}_i$ 。应指出, 在一定的情况下 $q_j/q \approx (k_j h_j)/(\bar{k}h)$, 并因而 $\hat{s}_i = s_i$ [28]。

实例应用: 图18是现场试井的Horner^[6]曲线, 用来说明上面讨论的某些特征。试井结果是用拟压力^[16]和标准化时间^[15]绘成曲线的。这次试井是初期试井, 油井生产了198小时, 然后关井175小时。双对数曲线表明, 储存效应(续流影响)很小并且可以忽略不计。两条质量很好的平行半对数直线是明显的。流动能力可由任何一条直线的斜率确定。流动能力估算值为102毫达西-英尺。如果我们应用第二条半对数直线, 则表皮系数的估算值为1.92。如果应用第一条直线估算表皮系数, 则得出的估算值略高一些(2.20)。在后期数据出现向上弯是由于断层造成的(已为地质研究所证明)。参考文献[29]中讨论的分析方法表明, 断层离井筒大约200英尺。

2. 分层表皮系数的影响

最近关于分层连通油藏动态的研究^[18]表明, 在参考文献[21、38和39]中讨论并绘于图17中的比较紧凑的动态, 对于所有的表皮系数组合将不是明显的。特别是, 如果 $s_1 \gg s_2$ ($s_j > 0$) 或者 $s_1 > s_2$ 并 $s_2 < 0$, 那么反映多层不连通油藏动态的直线可能是不明显的。在这里, 下脚1系指流动能力高些的分层。这一点已在图19中说明。所示的结果符合 $s_2 = -2$ 和 s_1 是感兴趣参数的情况。虚线代表多层不连通油藏情况($k_{2j} = 0$)的反映, 而实线表明分层连通系统的反映。图17中所示的所有结果均假设边界影响可以忽略不计。关于这里所表示的反映, 有几点值得我们注意。首先, 如果分层间连通存在, 那么在油藏足够大的情况下, 具有适当斜率的半对数直线将是明显的。适当直线的起点用字母 x 表示。其次, 对于这里所考虑的情况来讲, 在这里所考虑的所有时间内, 多层不连通情况的井底压降都大于层间连通情况的压降。这是因为分层间连通允许流体在离井眼很远的地方由低流动能力分层(较高压力带)流入高流动能力分层(低压带), 从而流体可以通过阻力比较小的通道流入井眼。当我们讨论图21中的结果时这一点将变得更加明显。第三, 层间连通系统和多层不连通系统的反映在早期是不相同的, 也就是说, 由于污染带的存在, 分层间的连通几乎立即起主导作用。应当指出, 半对数直线起点的时间还是取决于 k_2/k 。第四, 对于这里所考虑的所有时间来讲, 多层不连通油藏的表观直线的斜率都大于1.151。

在层间连通情况下, 半对数直线(具有适当斜率)存在的原因, 如果我们研究砂层面流量就能够理解。图20表示在图19中所考虑的情况下砂层面流量随时间的变化。对于层间连通的情况来讲, 如果油藏生产的时间足够长, 砂层面的流量是稳定的。在多层不连通油藏的情况下, 在这里所考虑的所有时间内砂层面的流量是不断增加的, 并且由于不存在边界效应将最终可由方程(25)确定。在后一种情况下, 如果油藏受边界限制, 那么分层流量将受 V_{Pr} 控制, 因而必须考虑其他的变化(参看图12和图13)。应当指出, 对于层间连通系统来说, 砂层面流量与 $(k_1 h_1)/\bar{k}h$ 差别很大。Priambodo等^[28]指出, 砂层面流量受 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2)$ 、 $(k_{s1} h_1)/(k_{s2} h_2)$ 、 k_{2j}/k_j ($j = 1, 2$) 和 r_s/r_w 的控制(见参考文献[28]的表1和表4)。这里, k_{s1} 是分层 j 污染带的渗透率, r_s 是污染带的半径。正如Priambodo等所讨论的, 在以下情况下将存在具有适当斜率的直线, 即: (1) 砂层面流量(各分层流量)可以认为是不变的; (2) 在油藏区域内的分层间连通对油井反映的影响很小, 可以不考虑。基本上说来(对于无限作用系统), 要求 $q_j(r_1, t)/q_j(r_w, t) \approx \exp[-r_1^2/(4\eta_j t)]$ 。式中 r_1 是探测半径。很可能, 在层间连通情况下满足这一条件要比在多层不连通情况下快得多, 这是因为由于流体

在垂直方向运动更易于使压力与 $r = r_i$ 处的深度无关。指出下面一点也是很重要的,即自分层 2 砂层面产出的流体,原本就存在于分层 2 中,在远离井眼的地方流入分层 1, 并通过分层 1 流动了相当远的距离, 然后由于污染带的存在又转回分层 2。关于这一点, 如果我们考虑到图 20, 就能够理解了。图 20 是油藏中的压力分布随径向距离 $r_D (r/r_w)$ 而变的关系曲线。压力剖面的相交清楚地描绘了分层间流动方向上的变化。出现方向上的变化是因为这里的特殊条件, 即 $k_{s,1} < k_{s,2} = k_2$ 。因此, 原本存在于分层 2 中的流体进入分层 1, 后来在流出砂层面以前, 有一部分流体又流回到分层 2 中。

虽然分层间的连通对砂层面流量有很大影响, 但指出这样一点也是重要的, 即有效表皮系数在很长一段时间可由方程 (32) 求出。即使相应于均质油藏动态的半对数直线不明显, 这一结果也是可靠的, 也就是说, 在边界控制流动期间, 对于所有的条件来讲, 有效表皮系数都是 $\hat{s}_t$ 。如果相应于均质油藏动态的直线在压降或压力恢复试井曲线上能够识别出来, 那么 Prijambodo 等人认为, 可以近似地使 $\hat{s}_t \approx s_1$ ——高流动能力分层的表皮系数 (见参考文献 [28] 的表 4)。这是一个重要结果, 并且对于设计增产处理作业可能是有用的。

3. 增产处理的考虑

如同在多层不连通油藏中一样, 是否处理所有的层段, 是应当考虑的问题。在这里, 我们研究处理低流动能力分层应大大改善油井产能的条件。关于这一点, 在参考文献 [29] 中作了探讨。下面的讨论排除存在垂向裂缝的情况。参考文献 [29] 中综合的结果表明, 比值 $k_{s,2}/k_2$ 和污染带半径 r_s , 是严重影响总表皮系数的参数。参考文献 [29] 还表明, 污染带半径必须达到大约 25 英尺以后, 对于适当的 $k_{s,2}/k_2$ 值才可望大大增加产能 (见表 1)。 q_2/q 值表明, 有相当一部分流体是通过低流动能力分层采出的。如果我们限制 r_s 值仅约为 25 英尺, 那么计算表明, $k_{s,2}/k_2$ 要比其他渗透率比值 $k_{s,2}/k_{s,1}$ 和 k_2/k_1 更为重要。例如, 如果我们希望达到总表皮系数 $\hat{s}_t$ 为 -2 和 $s_1 = 0$, 那么参考文献 [29] 中的计算表明, 比值 $k_{s,2}/k_2$ 必须大约为 100。

表 1 污染带半径对产能的影响^[29]

$k_1 h_1 / k_2 h_2 = 100, V_{Dr} = 100, k_{s,2}/k_2 = 100, k_{s,1}/k_1 = 1, s_1 = 0, k_{s,2}/k_{s,1} = 10^{-1}, r_w = 0.25$ 英尺

r_s (英尺)	13.3	25.8	40.1	50.0
s_2	-3.93	-4.59	-5.03	-5.25
$k_{s,2}/k_{s,1}$	0.1	0.1	0.1	0.1
q_1/q	0.719	0.589	0.535	0.520
q_2/q	0.281	0.411	0.465	0.480
s_t	-1.02	-1.75	-2.20	-2.38

表 2 低流动能力分层处理对总表皮系数的影响^[29]

$k_{s,2}/k_2 = 100, s_1 = 0, k_{s,1}/k_1 = 1, r_s = 25.8$ 英尺, $r_{Ds} = 103.1, s_2 = -4.59$

$\frac{k_1 h_1}{k_2 h_2}$	1000	100	10
$k_{s,2}/k_{s,1}$	10^{-3}	0.1	1.0
q_1/q	0.911	0.589	0.117
q_2/q	0.089	0.411	0.883
s_t	-0.394	-1.75	-3.87

严重影响表皮系数估算值的第二个参数是比值 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2)$ 。如果我们考虑表 2 中的结果, 这一点就变得很明显。在所有情况下, s_2 都假设为 -4.59 。在这里我们看到, 在大体相同的条件下, 如果 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) = 1,000$, 则处理低流动能力分层的效果很小。如果 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2)$ 减小到 10, $\hat{s}_t$ 值则急剧减小。Raghavan 和 Reynolds 表明, 如果 $k_{1,2}/k_2 \leq 100$, $r_i \leq 50$ 英尺, 那么除非 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) \leq 100$, 我们处理低流动能力分层不可能指望产能有很大改善。在结束这一部分之前, 还应指出其他两点。首先, 对 $\hat{s}_t$ 起控制作用的是比值 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2)$, 而不是比值 k_1/k_2 和 k_1/h_2 。其次, V_{Pr} 值对 $\hat{s}_t$ 值影响很小。而在前面我们曾指出, 对于多层不连通油藏情况来讲, 产能与 V_{Pr} 成函数关系 (见图 14)。

4. 讨论

上面讨论的结果清楚表明, 表皮系数对各分层的产能有重要影响。近来, 某些著作假设油藏各分层具有无限大垂直渗透率并且各个生产分层被具有零储存能力的半透壁 (分层) 所隔开, 来模拟研究分层间连通的油藏^[40]。参考文献 [40] 中提出了在什么样的条件下, 多分层连通油藏的反映将与流动能力与其各分层流动能力总合相等的均质油藏的反映等效。半透壁模型的优点是可以比较容易地获得解析解。这种模型的特点也在地下水文学文献中^[41]讨论过。参考文献 [40] 中结果的主要不足处是没有考虑表皮系数的影响。更为重要的是, 应用这一模型并从中导出结论的分析工作者的责任, 是确定这一模型的解将与文献中考虑的精确解相一致的条件。类似的问题在 Bourdet^[42] 提出的模型中也存在。他的模型, 都知道叫双重渗透率模型, 系假设流体可以从两个分层产出。流体在分层之间的流动, 类似于 Warren 和 Root 的天然裂缝油藏模型^[43], 是通过一种准稳态流动发生的。再次指出, 他也没有专门考虑垂直渗透率和不相等表皮系数的影响。

5. 与天然裂缝油藏的对比

在文献中常常提到分层油藏在某些方面类似于天然裂缝油藏, 而在其他方面又有别于天然裂缝油藏, 并且提出, 用对比压力恢复试井期间估算的井筒储存体积与实际井筒的体积, 来区分这两种不同类型的油藏。由于很明显的原因这不是一个有吸引力的方法。直观来说, 如果流动能力差别很大, 可望获得类似的压力反映。然而, 现在仍然缺少有关在什么条件下两类油藏应该相似的定量资料。如果想了解分析方法的限制, 确定这些条件是很重要的。下面, 我们研究在什么情况下层间连通的双分层模型服从于天然裂缝油藏的解, 这种解是用于 deSwaan-O^[44] 和 Kazemi^[45] 板状模型的。这个问题本身就很重。例如, 在加利福尼亚 Monterey 燧石上面有一层渗透率很低的厚泥岩, 并且现场有证据说明在泥岩与燧石层之间存在连通^[46]。在这些条件下, 由 deSwaan-O^[44] 模型推导出的分析方法变得非常有用, 并且控制油井产能的参数与早先描述的特征可能差别很大 (见 Chen 等的著作^[47])。在对各解进行对比之前, 我们简单地介绍一下与我们的讨论有关的天然裂缝油藏解的特征。deSwaan-O^[44] 模型假设如下条件: (1) 所有的产量均产自裂缝系统 (高渗透性分层); (2) 在高渗透性分层中流动是一维的, 也就是说说是径向流动; (3) 在基质系统中 (低渗透性分层) 流动也是一维的 (在 z 方向流动)。Serra 等^[48] 表明, 天然裂缝油藏的反映受两个参数的制约, 即无量纲基质储存系数 ω' 和无量纲裂缝传送系数 λ' 。 ω' 和 λ' 由下式定义如下:

$$\omega' = \frac{\phi_m c_m h_m}{\phi_f c_f h_f} \quad (33)$$

和

$$\lambda' = 12 \left(\frac{k_m h_m}{k_f h_f} \right) \left(\frac{r_w^2}{h_m^2} \right) \quad (34)$$

式中下角m系指基质系统,下角f系指裂缝系统。在Serra等文章的术语中 $f=1$, $m=2$,并且 $\omega' = 1/V_{pr}$ 。我们将尽可能地遵循这篇文章的术语。

如果我们把deSwaan-0模型的假设条件与一般双分层模型相对比,那么直观来说,只要 $q_2 \ll q_1$,双分层的解将与天然裂缝油藏的解相一致。因此,基本任务是定量确定低渗透基质分层的产量能够不予考虑的条件。如果 $(k_2 h_2) \ll (k_1 h_1)$ 并且 $q_1/q \simeq (k_1 h_1)/(\bar{k}h)$,可望 $q_2 \gg q_1$;然而,已经证明,一般说来,这一结果将并非总是可靠的。

根据大量的计算,Reynolds和Raghavan^[29](也可参看Chang的文章^[49])认为,当只有约3%甚至少于2%或更少的流体产自低kh分层时,裂缝油藏的解与分层油藏的解将是一致的。他们还表明,参数 $V_{pr}(\omega')$ 对出现 $q_2/q(q_m/q)$ 可以不予考虑的时间有重大影响。关于这一点在图22中已有说明。图22为 q_2/q 与 t_{D1} 的函数关系曲线,其中 t_{D1} 是以分层1的性质(高kh分层)为基础的无量纲时间。这些结果是对 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) = 100$, $h_1/h_2 \leq 10^{-2}$ ($\lambda' = 7.5 \times 10^{-7}$)求得的,并且只要 $\lambda' = 7.5 \times 10^{-7}$ 和 $h_1/h_2 \leq 1$,这些结果都是可靠的。应当指出,这里所示出的某些曲线的形状,类似于开采多层不连通油藏的油井的产量曲线。图22说明,较小的 V_{pr} 值(较大的 ω' 值)在早期得出较大的 q_2/q 值,并从而对于较小的 V_{pr} 值(较大的 ω' 值), q_2/q 降至极限值 $[(k_2 h_2)/(\bar{k}h)]$ 的时间也较长。在这两个解之间有不可忽视的差别,并且对于较小的 V_{pr} 值存在的时间比较长,其原因可解释如下。我们已经表明,如果 V_{pr} 是固定不变的,则层间连通流动的解不取决于 ϕ_1/ϕ_2 、 c_{11}/c_{12} 和 h_1/h_2 值。如果 $(\phi_2 c_{12})/(\phi_1 c_{11} h_1)$ 固定不变, ω' 增长(或 V_{pr} 减小)相当于 h_2 增加(低kh分层的厚度)。 h_2 增加就是增加低kh分层与井眼相通的表面积,但是并不能改变分层间连通的表面积,并且这就是 q_2/q 为 ω' 的增函数的原因。

Chang^[49]所进行的大量计算表明,除在早期以外,只要 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) \geq 100$ 并且 $h_1/h_2 \leq 1$,裂缝油藏的解和层间连通系统的解将是一致的。他还表明,如果 $t_{D1} \geq 380/(\lambda' \omega')$,那么对于 $10^{-3} \leq V_{pr} \leq 10^{-2}$ ($10^{-9} \leq \lambda' < 10^{-5}$)来讲,只要 $(k_1 h_1)/(k_2 h_2) \geq 100$, $h_1/h_2 \leq 1$, Serra等^[48]推荐的方法就可用于分析层间连通系统。对于 $V_{pr} = 10^{-4}$ 来讲,只要 t_{D1} 的限值增加320倍,就能使用Serra等人的分析方法。对于 $V_{pr} = 10^{-2}$ 来讲,在上面列举的范围内, Serra等人的结果在 $t_{D1} \geq 10^{-2}$ 的所有时间内都是可用的。

三、结 束 语

这篇文章是应石油工程师学会的邀请而写的。关于分层油藏的动态是个很大的题目,我们把本文限制在一个比较小的范围。虽然分层是人们想象的非均质性最一般的形式,但当研究非均质性这个题目时,很有趣,却发现关于分层油藏动态的资料很少。例如,仅在最近才研究了用对数正态分布描述层状非均质的问题^[51],而这种想法在35年以前就已经提出来了。同时,很遗憾,表示渗透率随深度变化特征的统计学研究,常常与有关问题的地质观点混杂在一起,并且作为交换,使用“分层油藏”这一术语。另外,各种类型的非均质性同时予以考虑,因而也就不能识别分层作用或其后果的真正实质。

本文从研究关于分层油藏动态的早期著作开始,想着重研究分层油藏和单层系统中油井之间的重要差别。探讨了近井眼条件对油井动态的影响,并且探讨了与我们通过动力学试井