

压力导数改善试井分析典型曲线的应用

Y. M. pirard, A. Bocoock
Floptrol Johnston/schlumberger

刘慰宁 译
张朝琛 校

摘 要

迄今已开发出许多的无因次压力对无因次时间的典型曲线。所有这些典型曲线的双对数表达方式在试井后期很难辨识，所以拟合的唯一性就减弱了。

半对数表达法可以强化压力响应的特征，但是，由于压力比例尺以直角坐标表示，典型曲线拟合法将无法使用。这一缺陷，可以采取在双对数坐标上绘制半对数曲线斜率的办法（即对时间对数值求导的压力）来加以克服。因此，以同样方式求导的压力典型曲线就能够与导数数据相拟合。这种拟合方法，通过把压力及导数数据合绘在同一张图版上而进一步得到改善。

所提供的一些现场实例可以说明如何使用导数使试井解释更为深入。还表明导数可以阐明压力响应的细节，而这些细节在单独使用压力数据时是无法发现的。

导数也可用来对压力恢复续流阶段的压力数据进行反褶积，补偿井筒储存效应。如果井筒储存系数是一个较合理的常数，在试井早期受到井筒储存掩蔽的真实的储层响应会被恢复其本来面目，对试井早期数据进行解释。这种办法在那些具有高渗透性的非均质地层的情况下尤其有用。

一、引 言

分析试井时所记录的压力数据习惯上是以确定画在各种特定比例尺图版上的直线段为依据的。最著名的是Horner图解法。利用Horner图可以获得很多受人欢迎的油藏参数⁽²⁾。可以用直角坐标图解释试井的早期数据（井筒储存常数的确定）或晚期数据（拟稳定状态的解释）。水力压裂井常用的是压力对时间的平方根或四次方根的关系。对于球形流等则用压力对时间平方根的倒数的关系图版。这种在特定图版上处理成直线的做法，如能在正确的流态下使用，也就是说，这一方法是按此流态设计时，那么处理效果是相当不错的。

已经研究成功的典型曲线拟合法可用来鉴别各种不同的流态。它是一种全球风行的方法。所有从早期到晚期的整套测试数据都要用来与所选择的井—油藏模型相应的某一种典型曲线进行拟合。一旦获得一条拟合曲线，就可以鉴别出流态，并可针对每一流态或其中任一流态进行具体分析，得出所描述系统的各种参数。

典型曲线要求将数据以双对数形式表达。当试井早期压力变化很快时，这种双对数图解法有良好的辨识能力，但是在试井晚期压力变化很小时，其辨识能力就很差了。

而且，典型曲线本身的表现也无助于获得一个单值的压力拟合^[5]。

所以，尽管这一方法在理论上是正确的，但由于工业应用中常得出不可靠及非单值的结果，仍经常遭到冷落。只有当明显地缺少合适的资料而使具体分析无法收效时，才会考虑到这种方法。

另一方面，通常都公认半对数图解法能显示出更多的特性。遗憾的是，因为对于压力采用直角坐标，所以这一图解方式不能运用各种典型曲线。

然而，如果在双对数坐标上将压力数据对时间的半对数图形的斜率对时间绘制，就可以看出最终所得的图形显现出很有意思的特点^[6]。尤其是无限作用径向流（即 Horner 领域或试井中期范围）的特点是很容易识别的。非均质性和晚期（边界）效应也能清晰地展现出来。将数据和压力典型曲线两者的导数都画在双对数坐标轴上。然后，典型曲线分析就是在双重图版上拟合压力和导数数据。拟合导数数据是轻而易举并且更为直接的，因为流态都各拥有其特殊的形状。

另外，当储层响应由于井筒储存效应而被掩盖时，压力导数可以用来对压力恢复的早期阶段的续流影响进行反褶积。反褶积数据的导数也可以与压力变化及其导数一同绘在双对数坐标上。这种三重曲线图在瞬态压力分析中已证明是一种强有力的方法。

本文考虑了不同类型油藏范围内的一系列井史实况，表明用压力及其导数进行典型曲线分析是有效的。

二、理 论

应用导数方法有很多好处。典型曲线拟合及已改进的（更敏感的）半对数分析法都可以在同一图上完成。在压力数据上很难觉察的非均质性都可在导数图版上得到放大。

压力恢复与多产率导数典型曲线的形状与压降典型曲线非常相似。这就意味着，对测压数据进行初步直观的检查是比较容易的。这是因为各种流态的形状很少受到各种迭加效应的歪曲。系统流态的诊断是简便的，并且可在压降典型曲线上直接进行有效的初始拟合。

因为在导数双对数图上流态很清楚，其形态具有特征，故而导数图是一种很有用的诊断工具。

就像在压力图版上一样，井筒储存使斜率为 1。以无因次项表示，

$$p_D = \frac{t_D}{C_D}$$

$$\frac{t_D}{C_D} p'_D = \frac{dp_D}{d(\ln(\frac{t_D}{C_D}))} = \frac{t_D}{C_D}$$

从纯系井筒储存作用变到无限作用径向流（IARF）的过渡区产生一个驼峰，驼峰的高度表示表皮因子的性质（图 1）。无限作用径向流是一条水平直线，因为半对数斜率为定值（图 1）。

$$p_D = 0.5 \left[\ln\left(\frac{t_D}{C_D}\right) + 0.80907 + \ln(C_D e^{(2S)}) \right]$$

$$\frac{t_D}{C_D} - p'_D = 0.5$$

非均质系统会呈现出一个过渡区，过渡区的形状是在无限作用径向流水平线下面形成一个倾角（图2）。这一凹陷的形状与位置则表示其非均质性的特点^[8,9,12]。

在导数图上各种双重孔隙性的动态类型相对说来比较易于鉴别。

具有孔隙间拟稳定流动的过渡区形成一个对称凹陷，然而凹陷的前半部却往往由于井筒储存效应受到歪曲（图2）。在过渡区终了处，导数的无因次纵坐标值等于0.5。这表示整个系统为无限作用径向流。

对于瞬态孔隙间流动系统来说，裂缝系统的流动在试井早期很快就过去了，故而在所有实例中一开始其数据就进入过渡区（图3）。在过渡阶段导数曲线图是一条比较平坦的曲线，并在典型曲线上纵坐标为0.25处趋于一条水平线。而后当全系统是径向流时，曲线才转而向上趋于纵坐标为0.5的水平直线。

在导数图上还可以区别开板状和球状基岩块不同几何形状流动的差异（图3）。这一图幅还展示了一个具有一条封闭断层的均质油藏的典型曲线的特征。这条典型曲线与球状基岩块的形状非常相似，若单靠压力数据时就不可能将这两者加以区分。

导数图也可以区别双重孔隙和双重渗透率动态之间的差异^[12]。双重渗透率的过渡区下倾情况与双重孔隙度（孔间拟稳态流）的形状类似，但是下倾深度不如后者。这一下倾的深浅程度可用参数 κ 来表示：

$$\kappa = \frac{k_1 h_1}{k_1 h_1 + k_2 h_2}$$

对双重孔隙系统 $\kappa = 1.0$ 。在很多情况下， κ 因子对压力曲线的影响是不易察觉的。双重渗透性动态可以这样来断定，即 κ 通常接近于1。如果 κ 小于0.6，这个系统的动态呈现出均质性的特征（图4）。在诊断系统的动态时，双重渗透性动态可能有一个长而浅的过渡期。它在导数曲线中的下倾在典型曲线上达到0.25以下。

在拟稳态压力消耗过程中，压降期在晚期是一条斜率为1的线段。

$$p_D = A \left(\frac{t_D}{C_D} \right) + B$$

$$\frac{t_D}{C_D} p'_D = A \left(\frac{t_D}{C_D} \right)$$

在那些封闭系统和具有恒压边界的油藏中，恢复期呈现出其导数值趋向于零（图5）。

三、应 用

根据对不同流态形状的认识，工程师可以应用压力和导数的双重曲线图来诊断系统的动态并选择一个井-油藏模型拟合他所掌握的数据。根据他对这种诊断的分析，可以确定哪一部分数据（如果有的话）适宜用来做专门的分析。这些专门的曲线图将被用来证实压力/导数典型曲线的拟合结果。

为了进行实例讨论，将提供涉及各种油藏类型的压力和导数拟合的双对数曲线图。这些数据全部取自压力恢复期。没有提供试井前的产率变化史；但在所有情况下，均使用多产率的典型曲线，以便将所有以往的流动阶段都考虑进去。

实例1的数据来自机械式压力记录仪，可以与均质型压力典型曲线十分满意地进行拟合

(图6)；但导数曲线表明，后期的少数数据点有上升趋势。所以，与双重孔隙的典型曲线进行拟合是可能的(图7)。在数据密度如此低的情况下，导数曲线提供了更多的信息；但这些数据的质量尚不允许作出结论性的典型曲线拟合。

如果将试井时间延长，则将得出完整的系统动态，压力分析将能提供更肯定的结果。

碰到象这一类情况时，必须多加小心，以确保导数资料的末尾不会由于微分算法的末端效应而产生任何偏差。

这里介绍的实例2和3，如只做压力分析，可能判断为一个均质系统。而导数曲线却揭示出有较小的非均质性，这就加深了我们对油藏动态的认识。

实例2如图8所示。在第六个数据点处就很快达到了无限作用径向流(IARF)。随后的数据点沿着这条水平线分布，直到出现一个简单的下倾，它表明一个短暂的双重孔隙过渡期。在此以后，数据点又沿着水平线分布，并保持无限作用径向流直到试井结束。

像这样一个短暂的过渡期，常常意味着其储能比 ω 是很大的(接近于1)。

$$\omega = \frac{(\phi V c_t)_t}{(\phi V c_t)_t + (\phi V c_t)_m}$$

因此，用传统的双重孔隙模型进行解释，得出了一个大得不合理的裂缝体积，它在物理上显然是不可能的(30%)。或许需要另外一种模型：导数方法揭示了压力响应的许多细节，而这些细节在以前是从来没有观察到的。

实例3如图9所示。在这里我们从压力曲线上看到的是“教科书”中的均质动态，然而，其导数曲线却表明，它在早期与典型曲线有一些小的偏差。这可能是属于井筒储存效应变化的结果。导数曲线表明，在最后半个对数周期其数据点处于无限作用径向流的范畴内。

应该注意，不管数据质量如何好，在导数图上是很离散的。在微分算法中采用匀整化，能减少这种“干扰”。几乎对于全部数据都需要做一定量的匀整化。但是必须小心从事，以保证不致于使数据的形状受到损害。根据本文作者的的经验，在导数图上有一些分散点是常事，可以通过点晕的中心来与典型曲线进行拟合。在任何情况下，都不可能拟合导数数据上出现的所有的微小偏差。

如果需要，可对数据施加过度的匀整工作。就拟合的目的来说，微分算法是有用的，它也可以用来对典型曲线进行同样的匀整。

实例4在图10中呈现的是一个长而平坦的过渡期(这段曲线的底部可能被误认为是无限作用径向流)。像这样长的过渡期表明，其储能比 ω 值较小。在一个双重孔隙系统中，其过渡区也将非常深。压力与导数值与双重渗透率模型拟合得很好。其 κ 等于0.993，这意味着，高渗透层占总渗透率-厚度乘积的93%。绝大部分的油是从这一高渗透层流入油井的，虽然仍有大量的油储集在低渗透层中。高低渗透率两层之间的窜流可用 λ 来表示。

在导数曲线上位置较高的水平线的纵坐标值，比导数数据最低部位的要大5.2倍。这可能与该井是处于两条斜交断层之间的情况相拟合，但是，地质资料却排除了这一可能性。所以，宁愿取其与双重渗透率系统拟合为好。

四、井筒储存的反褶积理论

续流对压力恢复响应有着严重的影响，特别是当在地面关井时更是如此。在若干小时内

砂层面流量（在试井分析中是要考虑的）可能仍保持在某种较高的水平上。这意味着，井底测出的压力更多地是代表井内的状态而不是油藏内的状态。如果已知井底砂层面的流量，有关油藏的信息当然也可获得。

如果测出了砂层面的流量，在进行多流率分析^[7]时，可以把额外的流率数据包括在内来加以分析。

导数方法提供了一种根据井筒储存常数的认识而计算井底流量的简单方法。

在压力恢复时续流量可表示为

$$Q_{wb} = 24C \frac{dp}{dt}$$

这个表达式用来补偿续流对压力恢复资料的影响。使用Van Everdingen^[1,3]所定义的褶积乘积，可以证明^[11]，正则化压力

$$\Delta p(t_n) / \left[1 - \frac{24C}{qB} p'(t_n) \right]$$

对

$$\frac{\log \frac{t_p t_n}{t_p + t_n} - \frac{24C}{qB} \left[\sum_{i=1}^n p'(t_i) \log \frac{t_n - t_{i-1}}{t_n - t_i} + p'(t_n) \log(t_n - t_{n-1}) \right]}{1 - \frac{24C}{qB} p'(t_n)}$$

的关系曲线可用来补偿续流效应，并且对均质系统从试井极早期阶段开始就呈现出半对数直线段。

这些补偿数据的导数可在双对数坐标上绘成曲线，其坐标轴与绘制压力变化和导数值曲线的相同。如果这种反褶积数据表明是无限作用径向流，则曲线将是水平的，并且具有与径向流的常规导数资料相同的纵坐标。

五、反褶积的应用

为了将两个可能的模型间的差异区别开来，对实例1施行反褶积是很有用的。这些反褶积数据表明，选择均质模型要稍为好一些（图11）。然而，这些资料的质量尚不足以做出最后的选择。

应当注意的是实例3，由于井筒储存改变了，反褶积无法使用。因为在试井时已观察到呈现无限作用径向流，反褶积实际上是不必要的。

在试井数据未达到径向流态时，反褶积是极其有用的。

实例5如图12所示。图12是最后的数据点没有达到水平线的均质系统的动态。数据的质量是最佳的，反褶积清晰地表明试井一小时后在油藏中就已达到无限作用径向流（尽管由于井筒储存的妨碍使这一时间拖长到22小时）。这种反褶积做法证实，用正规的典型曲线拟合法可以使压力值得以拟合。在非均质系统中导数法和反褶积技术特别有用。

实例6如图13所示。图13为双重孔隙系统的实例。其数据点在靠近过渡区终点时即已中止。但已有足够的数据可在压力典型曲线上进行良好的拟合。

不必重视过渡区是不完全的这一事实，这种导数型曲线的拟合已经足以精确地估量出 ω

及 λ 参数的大小。

反褶积表明，在井筒储存期裂缝系统就已达到无限作用径向流，证实了压力的拟合。

在反褶积数据上的水平线正好位于预计在试井结束时呈现径向流动的地方。应注意的是，在过渡期间反褶积数据有一个对称的下倾。这种下倾的形状在未加工的数据中受到了井筒储存效应的歪曲。

实例7的资料取自一非均质油藏，但只进行时间压力分析是不可能给出唯一解的。有两种模型能势均力敌地与该井的资料相吻合。第一个模型（图14）用的是带有不稳定孔隙间流动的双重孔隙模型。其导数数据趋向于0.25线，而后，当全系统为径向流时，又上升到0.5线。反褶积却清晰地表明，在双对数拟合图上反褶积数据点与刚好在0.25线以上的一条直线相吻合。

这些数据的另一种可能是一个带有封闭断层的均质油藏（图15）。反褶积曲线当然也一样（因为井筒储存系数与油藏模型无关），但是，由于封闭断层的影响（半对数斜率的加倍），可以解释为油藏中呈现无限作用径向流的时间将与导数曲线上上升点相一致。

试井分析与地质信息相结合，将能选择出正确的油藏模型。

对井的压力响应进行有效的分析，应能提供一切可能的拟合情况，这相当于一切可能的井/油藏的配置图像。

六、对极早期试井数据采用导数分析

使用精密的井底关井工具的好处是可以提供无井筒储存效应影响的某些资料。此类资料可以提供非常靠近井筒地区的最佳信息。

可以证明的一种情况是径向复合油藏^[4]。当传导率（ kh/μ ）在径向上有变化时，就可以认为是一个复合油藏。这种径向传导率变化，既可以是由于油藏岩石渗透率的变化而引起，也可以是由于流体有变化（例如在注入井中）而引起。

里圈地层区中见到径向流时，在导数图上形成一条水平线。如果外圈地层区的传导率比里圈地层区的低，那么导数数据点将偏离向上（如果外圈地层区的传导率大于里圈，导数数据点则将偏离向下）。随后在全系统内将发生无限作用径向流。

油井酸化就可能形成这种状况。井筒周围形成一个高渗透率区。如果在这个地区达到了无限作用径向流状况，则导数曲线将是一条水平线。

这一流态的时间很短，除非井筒体积非常小，否则由于续流影响将被完全掩盖。

经历一个过渡期以后，整个系统呈现出径向流。外圈地层区的分析将表明，由于里圈地层区酸化的激励效应将产生一个负值的表皮效应。

用导数图不难鉴别流态何时开始与结束。数据水平部分的纵坐标比值可给出里外两个层区传导率的比值。由于在这种复合油藏的实例中，在里外两个层区中的粘度是一样的，所以这个比值事实上就是渗透率的比值。

半对数分析当然显示两条直线，但若没有压力和导数的双对数图，那就很难确切地识别系统的动态。

实例8如图16所示。该井已经过酸化，而后用井下关井法进行试井。其导数资料从水平线处开始，表明在里圈地层区内是径向流（并且是高渗透性的）。这一流态很快结束，而导

数数据随着全系统发展成无限作用径向流而逐步向上翘。较高的导数线表明外圈地层区的渗透率较低。

七、结 论

工业界曾经因为应用典型曲线需要试井时间长，分辨率差，结果不正确而感到厌烦。在压降型曲线上是无法精确地进行压力恢复分析的，从而造成靠人工进行典型曲线的拟合是不现实的。功能强大的计算机的出现改变了这一尴尬“局面”：压力恢复及多产率典型曲线都很容易形成，而更重要的是能计算压力导数。

导数方法确有很多优点，主要一点是在一个双重典型曲线拟合图上可以同时进行整个系统的分析和改进的“半对数”分析。

所举的一些例子表明，应用压力导数是如何提高了对压力资料的解释能力。流态的诊断简化为鉴别易于识别的各种特征形状。这种求导数的方法使得能对早期压力资料进行反褶积，对续流进行补偿，并且可以研究油藏而不仅是井筒附近的性质。

从大部分实例中显然可以看出，导数所显示的各种特征在压力资料上是见不到的，而且，用各种常规模型也是不能解释的。只有真正的均质状态，才算是一种例外。现在用于非均质油藏的流动模型都是过分简化的，例如，双重孔隙油藏的裂缝系统就决不会是规则的。在一个油藏中可能存在着各种形式的非均质性。

需要一些更通用的模型来描述复杂的油藏。事先了解油藏的大致构造（根据地质、岩心、测井）就变得重要了。试井分析的作用现在就是从所有可能的典型曲线的解中找出一种更适合压力和导数资料的解。而后再输入其他信息，工程师就能对他的油藏确定一个最好的模型。

符 号 说 明

- B—地层体积系数；
- c_t —油藏总压缩率；
- C—井筒储存常数；
- h—油层厚度；
- k—渗透率；
- p—压力；
- q—产率；
- Q_{wb} —续流量；
- S—井筒表皮因子；
- t—时间；
- κ —渗透率比；
- λ —孔隙间流动参数
- μ —粘度；
- ϕ —孔隙度；
- ω —储存比。

足码

D—无因次;

f—裂缝介质;

i—初期;

m—基质;

wb—井筒。

参 考 文 献

1. Van Everdingen A.F. and Hurst W. : "The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs." Trans. AIME, 1949.
2. Horner D.R. : "Pressure build up in wells." Proc. 3rd World Pet. Cong. E.J. Brill, Leiden, II (1951).
3. Van Everdingen A.F. : "The skin effect and its influence on the productive capacity of a well." Trans. AIME, 1953.
4. Hurst W. : "Interference between oil fields." Trans. AIME, 1960.
5. Gringarten A.C., Bourdet D., Landel P.A., and Kniazeff V. : "A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early time transient analysis." paper SPE 8205, September 1979.
6. Bourdet D., Whittle T.M., Douglas A.A., and Pirard Y.M. : "A new set of type-curves simplifies well test analysis". World Oil, May 1983.
7. Meunier D., Wittmann M.J., and Stewart G. : "Interpretation of pressure build up tests using in-situ measurement of afterflow." paper SPE 11463, March 1983.
8. Bourdet D., Ayoub J.A., Whittle T.M., Pirard Y.M. and Kniazeff V. : "Interpreting well tests in fractured reservoirs." World Oil, October 1983.
9. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. : "Use of pressure derivative in well test interpretation." paper SPE 12777, April 1984.
10. Bourdet D., Alagoa A., Ayoub J.A., and Pirard Y.M. : "New type-curves aid analysis of fissured zone well tests." World Oil, April 1984.
11. Bourdet D., and Alagoa A. : "A new method to compensate afterflow on pressure build ups." World Oil, September 1984.
12. Bourdet D. : "Pressure behaviour of layered reservoirs with crossflow." paper SPE 13628, Spring 1985.

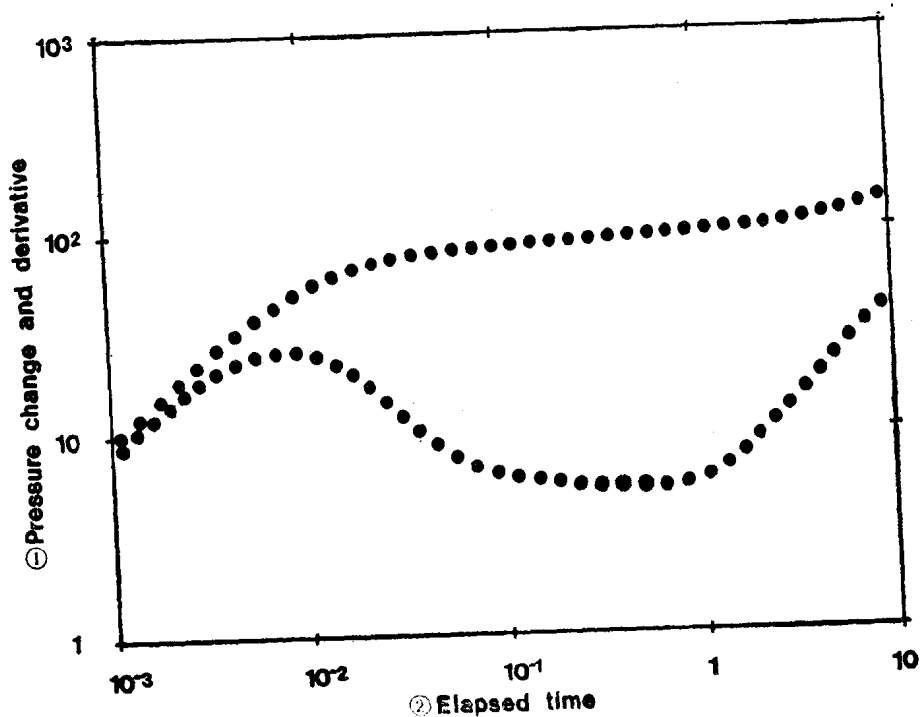


图 1 均质有限油藏中油井的典型资料 (压降动态)

①压力变化和导数; ②经过时间

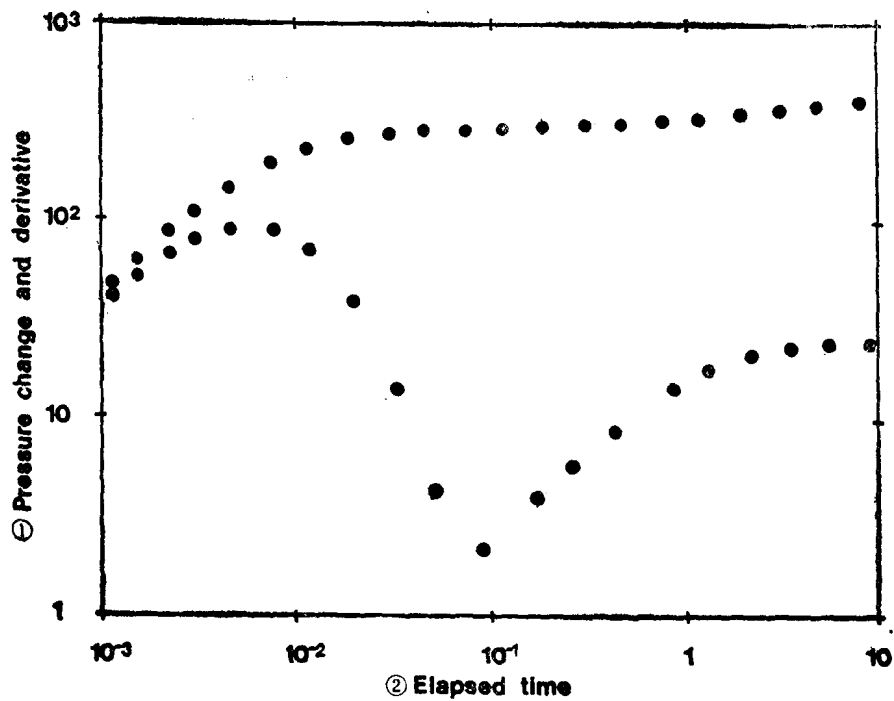


图 2 非均质无限作用油藏中油井的典型资料
①压力变化和导数；②经过时间

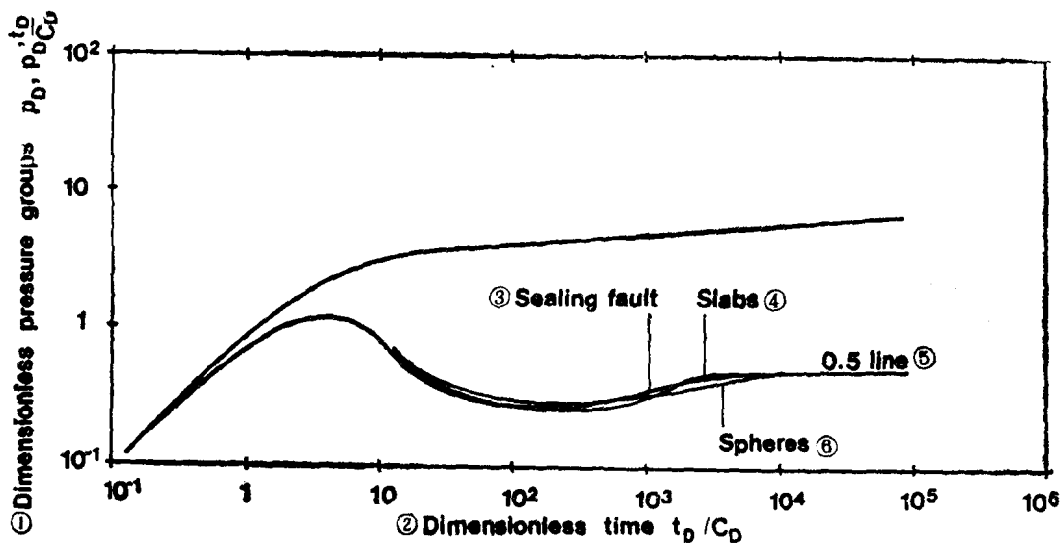


图 3 双重孔隙系统，不稳定孔隙间流动，板状和球形基质块
以及带封闭断层的均质油藏的典型曲线
①无因次压力数群；②无因次时间；③封闭断层；④板状；⑤球状；⑥0.5线

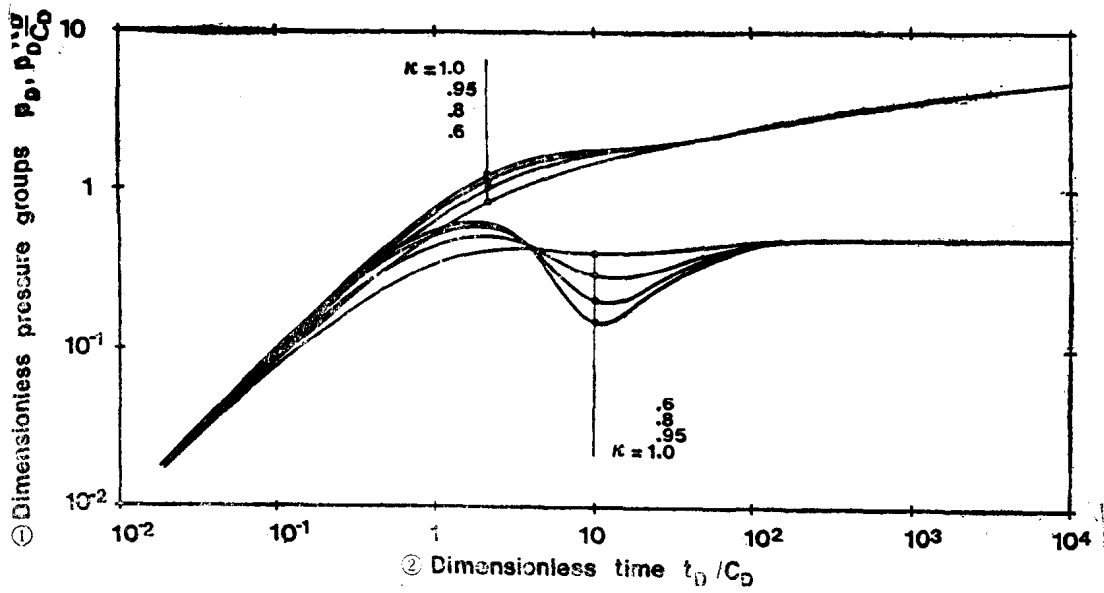


图 4 双重渗透率系统的典型曲线, κ 的效应
 ①无因次压力数群; ②无因次时间

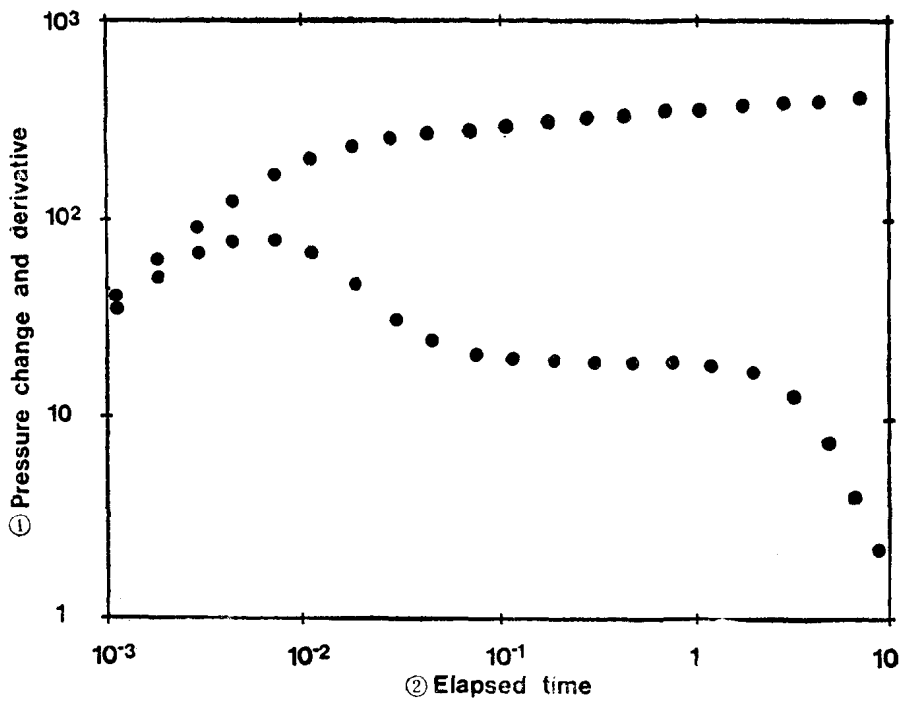


图 5 具有恒压边界的均质有限油藏或系统中的油井的典型资料
 ①压力变化与导数; ②经过时间

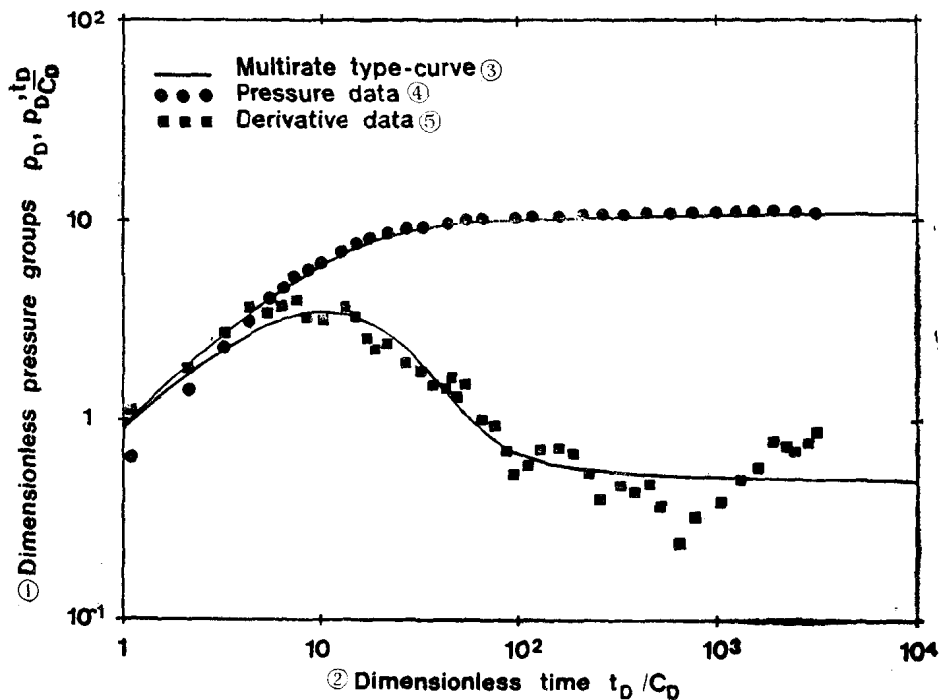


图 6 实例1——在均质典型曲线上的拟合

①无因次压力数群; ②无因次压力; ③多产率典型曲线; ④压力资料; ⑤导数资料

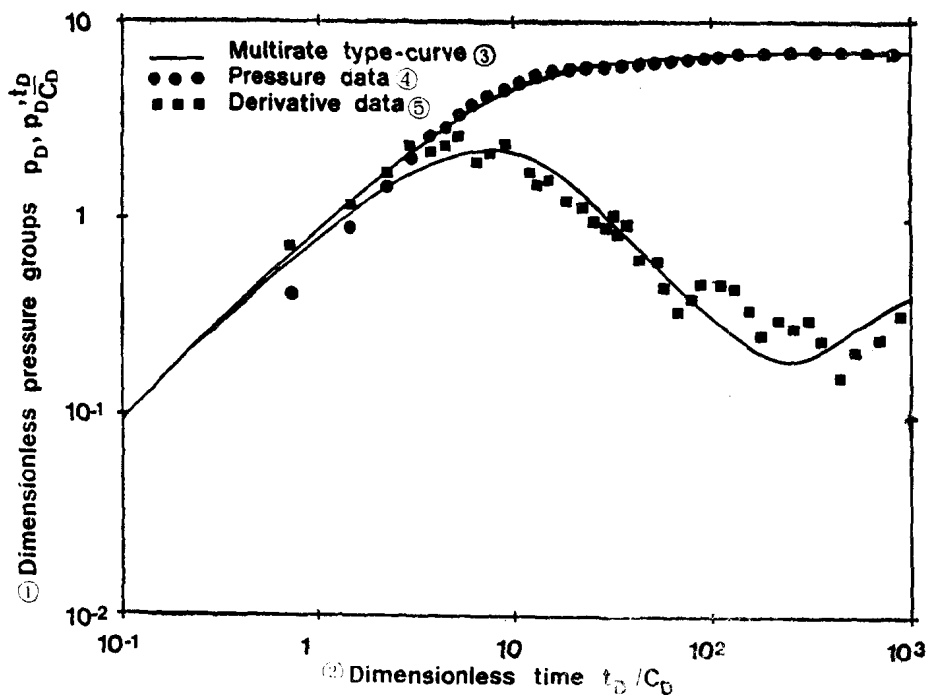


图 7 实例1——在非均质(双重孔隙性)典型曲线上的拟合

①无因次压力数群; ②无因次时间; ③多产率典型曲线; ④压力资料; ⑤导数资料

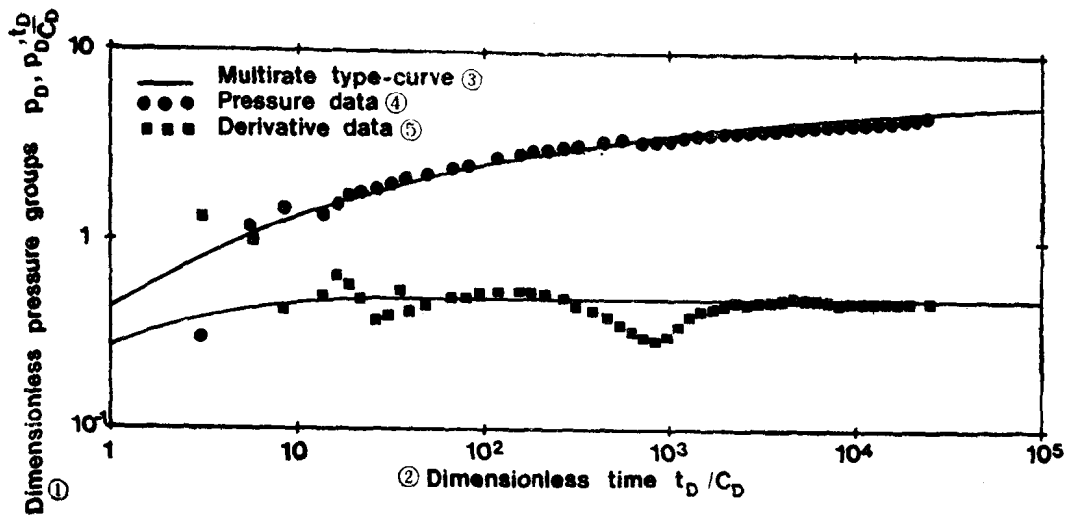


图 8 实例2——在均质典型曲线上的拟合，显示非均质动态迹象
 ①无因次压力数群；②无因次时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料

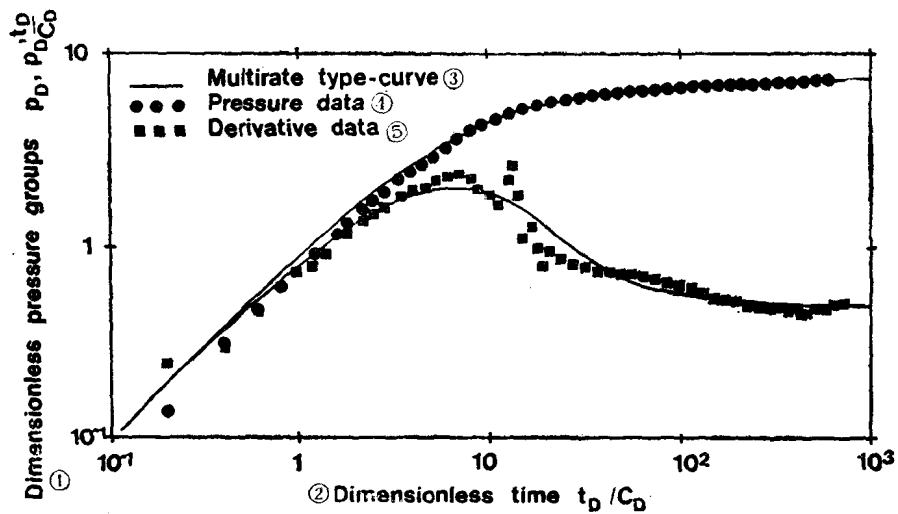


图 9 实例3——在均质典型曲线上的拟合，显示非均质动态迹象
 ①无因次压力数群；②无因次时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料

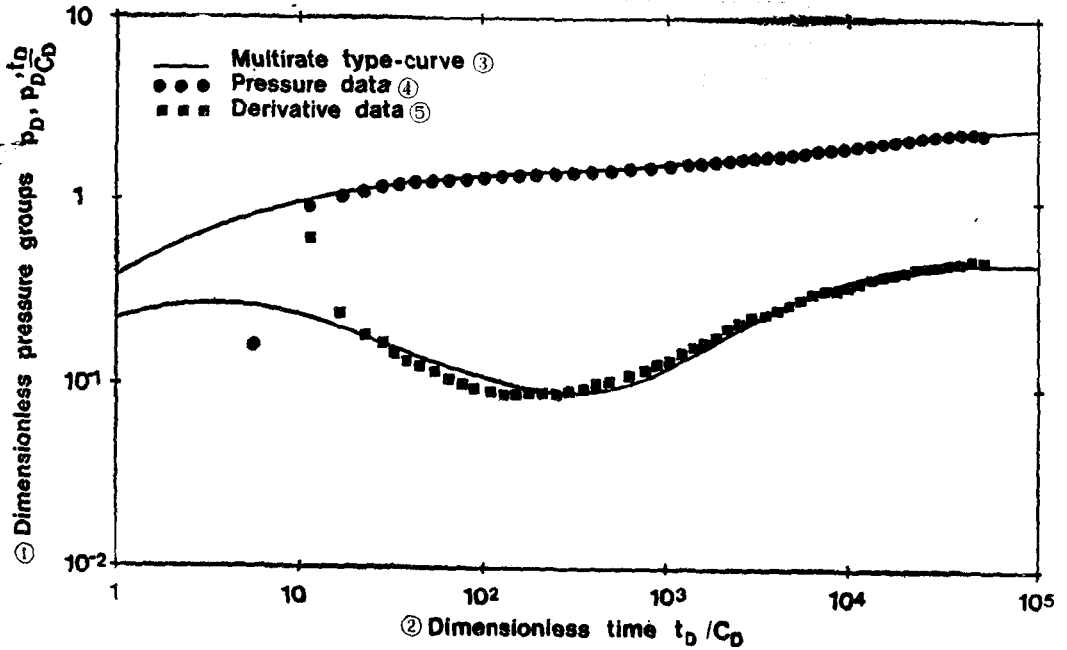


图 10 实例4——在非均质典型曲线上的拟合，双重渗透率动态
 ①无因次压力数群；②无因次时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料

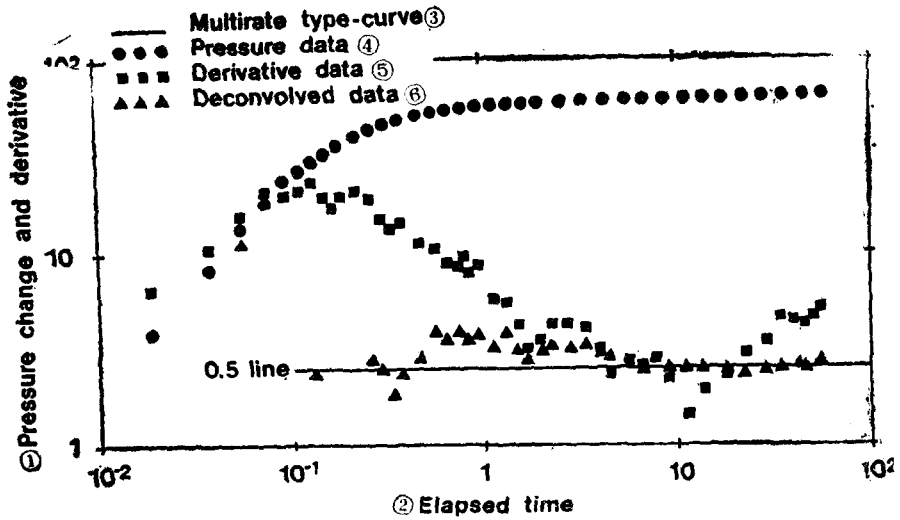


图 11 实例1——压力、导数和反褶积资料的三重曲线
 ①压力变化和导数；②经过时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料；⑥反褶积资料

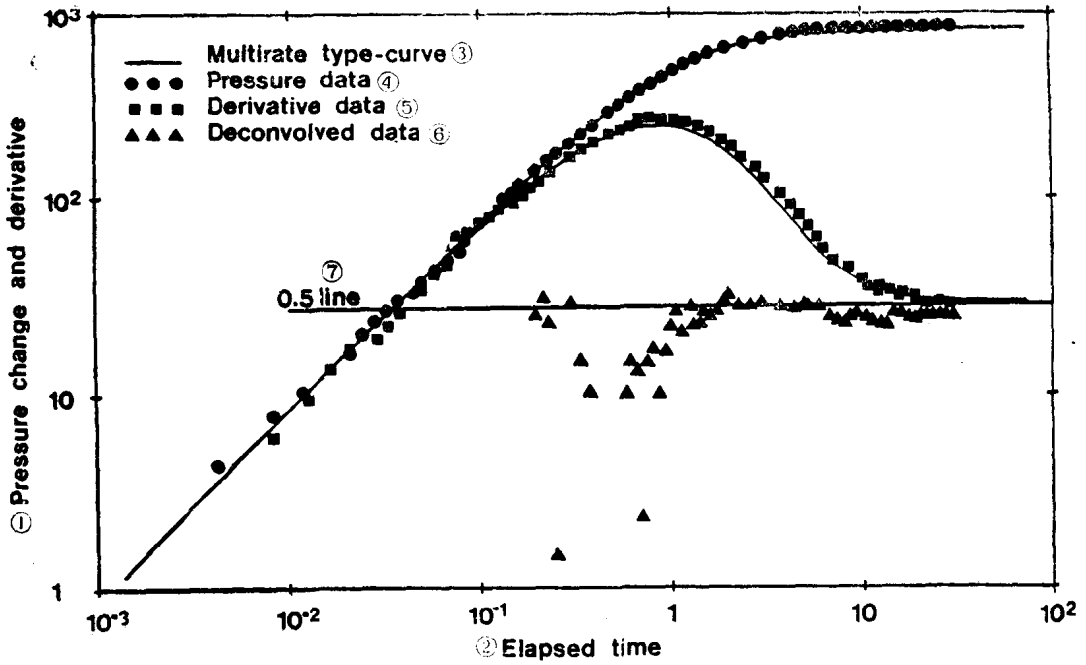


图 12 实例5——在均质典型曲线上的拟合，包括反褶积数据
 ①压力变化和导数；②经过时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料；⑥反褶积资料
 ⑦0.5线

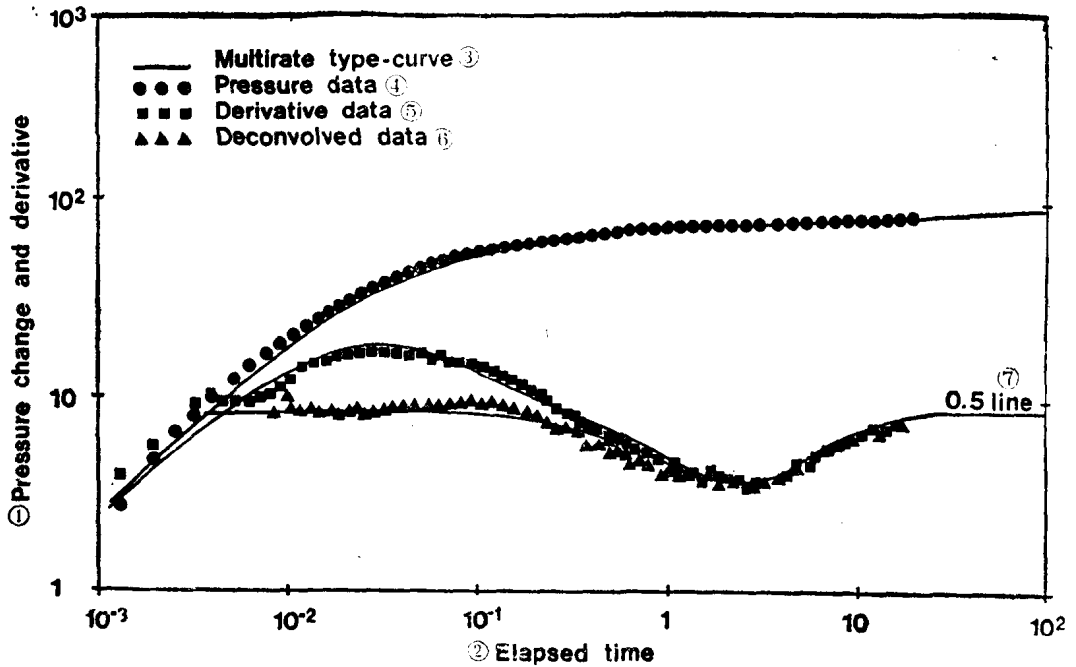


图 13 实例6——在非均质典型曲线上的拟合，包括反褶积数据
 ①压力变化与导数；②经过时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料；⑥反褶积资料

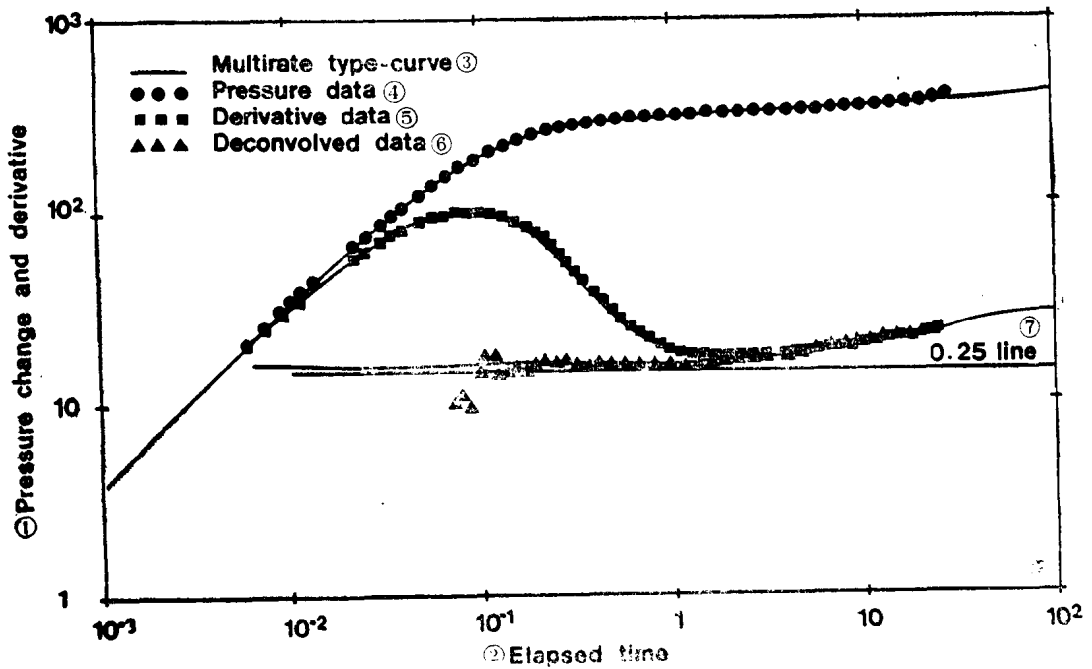


图 14 实例7——在非均质典型曲线上的拟合，不稳定孔隙间流动，球形基质岩
 ①压力变化与导数；②经过时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料；⑥反褶积资料；
 ⑦0.25线

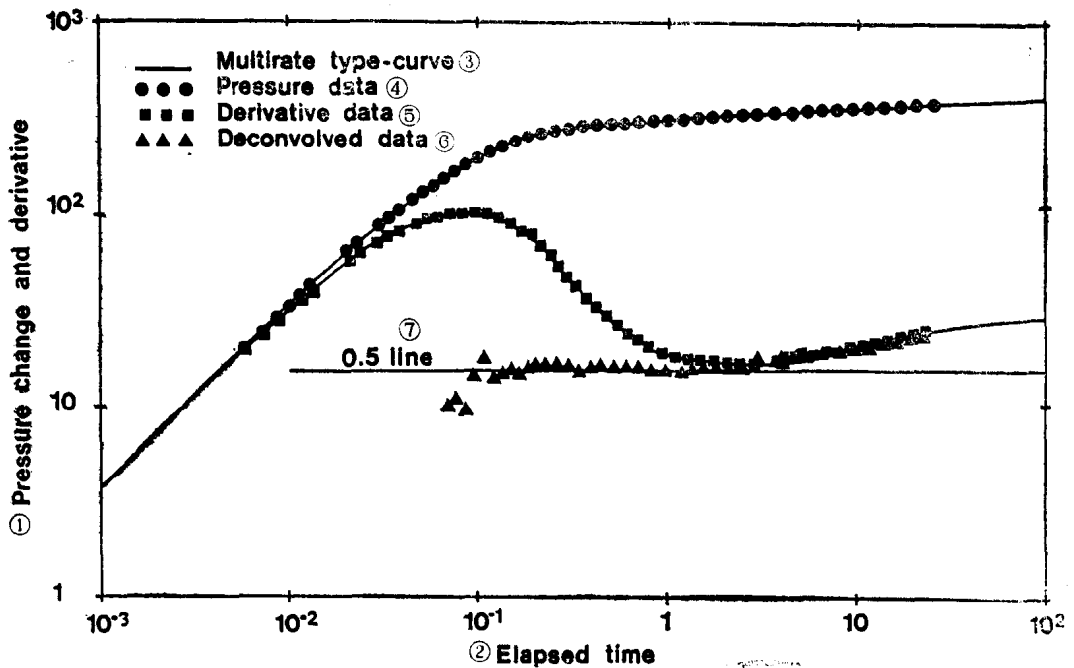


图 15 实例7——在均质典型曲线上的拟合，经改进包括封闭断层效应
 ①压力变化与导数；②经过时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料；⑥反褶积资料；
 ⑦0.5线

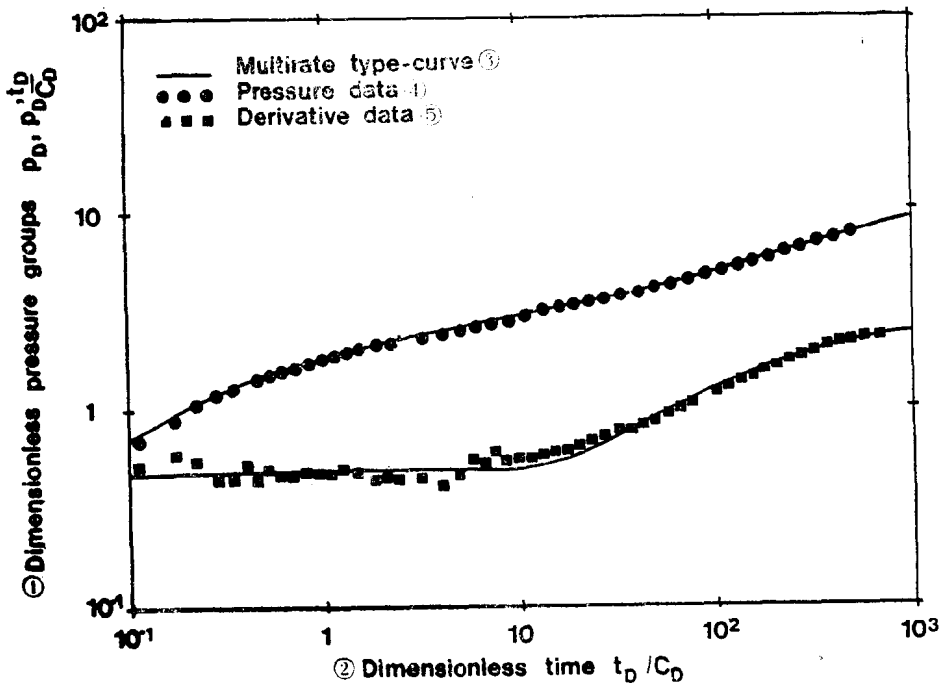


图 16 实例8——在复合油藏典型曲线上的拟合
 ①无因次压力数群；②无因次时间；③多产率典型曲线；④压力资料；⑤导数资料