

儲油岩毛細压力的研究

(美) H.W. 布朗

(一) 引言

毛細压力的意义及其重要性

在多孔介质诸如儲油层的空隙中, 二种以上不互相混合的流体的共存, 引起了毛细力。由于在孔隙空间中二种不互相混合的流体之间的界面上存在着界面张力, 因此界面是弯曲的, 在界面二边存在着压力差。这一压力差就叫做毛细压力。

共同充填一个多孔介质的二种不互相混合的流体之间的毛细压力的幅度取决于几个因素: 1)介质的结构特征, 2)介质的可湿润性, 3)流体之间的界面张力, 4)流体的相对饱和度, 5)饱和度的状态。对于一个特定的儲油岩样品中二个不互相混合的流体对来说, 毛细压力是流体饱和度的单一函数, 前提是这一润湿岩石的流体的饱和度早已从原始的完全饱和度单向地下降下来了。同样, 对于一个润湿的流体其饱和度已事先下降到一个特定饱和度的场合来说, 则毛细压力取决于结构特征和儲油岩的可湿润性。

虽然在大多数的儲油层中毛细压力的绝对幅度通常是不大的, 但毛细压力的作用是非常重要的。它与重力在一起控制了儲油层中流体饱和度的原始分布, 尤其是原生水的分布。凭借着在孔隙空间中它们对于流体界面形状的影响, 它们在很大程度上控制了儲油层中流体运动的相对自由度, 它们是在采油过程中影响流体习性及其分布的重要因素。

毛細压力研究的现有水平

Leverett^[1] 以及 Bruce 和 Welge^[2] 介绍了在小岩心中测量毛细压力的方法以及测定毛细压力和流体饱和度之间关系的方法。它们推荐

了恢复原始状态的方法, 其中被湿润性流体所饱和的岩心样品是放在一个允许湿润相渗滤的多孔隔板之上的。对置于隔板之上的非湿润相施加一个已知的压力, 一部分湿润相就被挤出到样品之外。采用逐级升高压力的方法, 就可以得到毛细压力和流体饱和度之间的关系。

Purcell 介绍了另一种测定毛细压力的方法, 其方法是在压力下将作为非湿润相的水银压到一个已抽真空的样品中去, 汞蒸汽和留在孔隙中的残余气体相当于湿润相。水银压入法的优点是操作快, 因为加压后很快就达到了平衡。而在恢复原始态的方法中平衡要在几天之后才能达到。

恢复原始态法和压汞法都是静态法。Hassler 把这些方法改变一下来测定动态毛细压力以求相对渗透率。其方法是允许这二个相都通过岩心样品, 而根据它们之间的压力差进行控制。在平衡状态下, 这二个相继续在流动但其相对饱和度不变。

Leverett^[6] 以及 Rose 和 Bruce^[6] 指出了儲油岩的异向性和毛细压力对于岩石结构特征的依赖性。这些作者也提出了对比毛细压力和饱和度以及岩石结构特征之间关系的方法, 以便扩大毛细压力测量的应用范围, 在对比的方法中包含了 J 曲线的运用。

(二) 本文研究的课题

本文研究了毛细压力测量和应用中的三个问题。

恢复原始态法和压汞法之間結果的对比

虽然恢复原始态法是最常用的方法而且一般认为最可靠, 但是压汞法具有操作快的优点。恢复原始态法由于可以应用类似于儲油层中的

流体，其成果通常可以更直接地去解决储油层问题。另一方面压汞法必须通过一个换算因子以求得储油层液体的毛细压力。为了将压汞法测得的毛细压力换算为恢复原始态法的测定数据，Purcell 提出了一个换算常数，它不取决于储油岩的性质。

鉴于大多数储油岩组成的复杂性并鉴于压汞法完成的工作还有限，似乎应该在可比较的基础上研究这二个方法，尤其是去研究不同建造的岩心其换算因子的不变性是合适的。

静态和动态毛细压力之间的对比

大多数毛细压力与饱和度之间关系的测定工作是在静态条件下进行的。

尽管推测当气或水在储油层中溢流的时候毛细压力导致流体的运动而对原油的回收起重要影响，但是还不知道在流体流动时的毛细压力是不是与静止时一样。近年有几篇文献提出了应用毛细压力的数据解决渗流力学方面的课题的方法。由于静力系统和动力系统本质上的差别，这样应用的可靠性还有些问题。

在研究毛细压力测定的许多课题中，尤其应该对比研究在静态平衡下测得的毛细压力与在动态平衡下测得的毛细压力。

岩石毛细压力与岩石结构的关系

Leverett 以及 Rose 和 Bruce 提出的将毛细压力——饱和度关系与岩石渗透率、孔隙率，可湿润性相对比的方法要求采用一个无量纲的“毛细压力函数”。从这一无量纲的函数与湿润相饱和度的关系图上得出的曲线叫做毛细压力函数曲线或叫做 J 曲线。曾设想对于一个特定的地质建造的许多岩心来说，这一曲线是单一的。如果确实是这样的话，那么对于一个特定建造来说，一旦导出了一根 J 曲线，就对于根据已知的渗透率孔隙率算出毛细压力——饱和度的关系或者根据已知的毛细压力和孔隙率算出渗透率具有重要意义。这一方面合适的报导还没有，这种需要推动了我们去试图肯定这一关系。

(三) 静态毛细压力的测量

用恢复原始态法和压汞法测定了岩样的毛细压力——饱和度关系。所用的样品是采自生产层的石灰岩和砂岩。

恢复原始态法

所用的取代室是习用的取代室，其主要的特点是一个带孔的瓷器隔板。当这一隔板为被取代的流体所饱和时，它只允许这一流体渗滤。当隔板和已饱和的岩心达到毛细接触时，在隔板二侧施加一个合适的不变的压力差时将导致流体从岩心中被取代出来，流到隔板之外，最后有一定的流体留下来补足毛细力。施加于隔板二侧的压力差就是毛细压力，因为根据定义，毛细压力是湿润相和非湿润相之间的压力差。残留在岩心中的流体的数量是用重量法测定的。

本文中的恢复原始态法的数据都是在降低湿润相饱和度的条件下测定的。

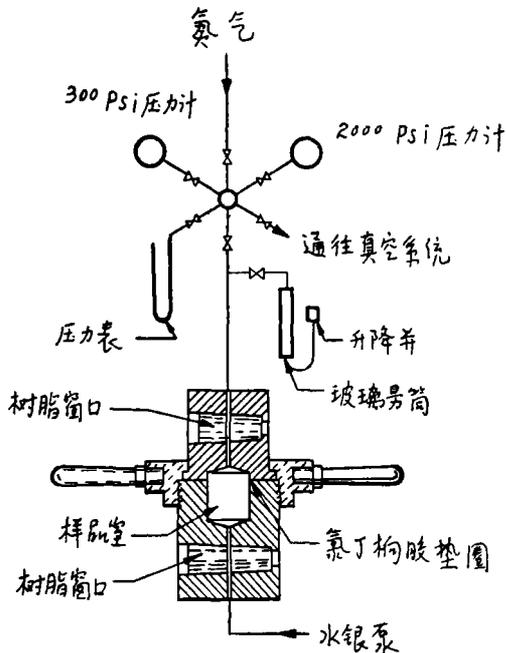


图1 压汞法毛细压力仪

压汞法

压汞法测定毛细压力的仪器是根据 Pur-

cell 设计的, 参见图 1。仪器的主要部分是一个水银排代泵, 一个气体量管, 一个样品夹持器和一个歧管系统, 后者允许气体压力以高真空变到氮气瓶中所具有的压力。

气体量管是按原先的仪器外加上去的, 以便同时还可以测定孔隙率。在此以前, 仪器仅能测出总容积, 需要另外一个仪器来测固体部分的容积。加进这个气体量管就可以按照习用的气体法测定样品固体部分的容积。用一个已知容积的钢坯来标定这一系统, 这简化了岩样固体部分的计算。

在操作时, 岩样放在压封的夹持器里, 系统的压力升至一预定的压力, 用习用的气体法测出岩样固体部分的容积。下一步是将系统抽真空, 用一水银泵把水银引进体系, 从夹持器上面和下面的 Lucite 窗口读出二个参考标记之间的容积。把已知的样品夹持器的容积减去这一容积就得到样品的总容积。于是拿掉真空泵, 让气体进入以增加样品周围水银的压力。水银压到岩样孔隙中去是通过上 Lucite 窗的参考标记上水银气体界面的退缩而反映出来的, 渗入的数量是根据水银泵的活塞推进到水银的新月状界面重新回到参考标记上而测量出来的。再提高压力, 推进水银泵活塞, 如此下去一直到所要求的最高压力达到为止。

(四) 动态毛细压力的测量

根据 Hassler 提出的原理设计了一个仪器以进行流体力学的研究来测定储油岩对油和气的相对渗透率, 这一仪器可以直接固定气和油之间的毛细压力, 并在流体流动下保持这一压力在一固定的已知的水平上。

用以测量动态毛细压力的 Hassler 型仪器的基本点参见图 2。二块端板都是由一块中央盘状隔板和一块外围环状隔板组成的。由一个金属筒把这二块瓷隔板分割开。每块端板的面都是凹形的, 便于气体通过它。油是经外围环流通的, 而中央盘是用以测量油相的压力的。

在操作中, 在二种不同的压力下让油和气

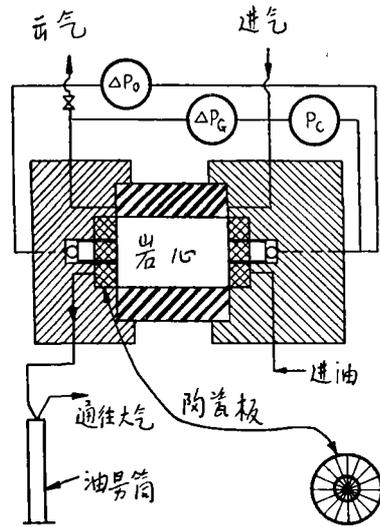


图 2 动力毛细压力仪

通过岩样, 它们之间的压力差就是毛细压力。因为从一个岩心面到另一个岩心面的油相的压力降是可以由中央瓷板测量的, 气相的压降可以在出口处加以调节, 直到其压降恰恰等于油相的压降为止。当这一条件达到时, 在岩样二端的毛细压力是相等的, 如果岩心是均匀的话, 整个岩心的饱和度基本上是一样的。由气体扩张所引起的任何饱和度的变化都是很小的, 因为所采用的压力差是不高的。当趋向这一平衡状态时, 气相的压降维持在比油相为高的数值上。从而在达到平衡前, 入口端的饱和度低于出口端, 因为沿着流动的方向毛细压力梯度是逐渐下降的。因此, 岩样每一部分中的流体被取代到较高的饱和度区域中去。在这些条件下获得的毛细压力数据应当相当于静态法中获得的排代曲线。

在上述状态下达到平衡之后, 拿掉岩样, 然后用重量法测定饱和度。

岩心样品的岩性测定

进行了岩石学的研究来决定岩心样品的岩石性质。这些样品都采自德克萨斯州西南部的白垩纪的爱德华建造。

这些样品都是碳酸岩, 包括石灰岩, 白云质石灰岩和白云岩。

在这些样品中, 主要是晶粒间的孔隙占优

势，虽然有些样品具有溶洞。

样品用目视法根据粒度划分为三种结构类型。

1) 微粒的：在 20 倍物镜反光下看不见晶粒，但在 50 倍物镜下可以看到晶粒。

2) 细粒的：在 20 倍物镜下可看到晶粒，但平均的粒度大约是 0.02mm。

3) 粗粒的：在 20 倍物镜下非常清楚，粒径超过 0.04mm。

(五) 研究成果

恢复原始态法和压汞法的对比

这二种方法所得的毛细压力——饱和度曲线几乎是一样的。结果的一致性表明这二种方法所得到的毛细压力——饱和度曲线在几何上是相似的，对于任何一个岩心来说，一条曲线的毛细压力乘上一个常数就可以得到另一条曲线。图 3 图 4 分别是砂岩和石灰岩由这二种方法所得到的毛细压力曲线。

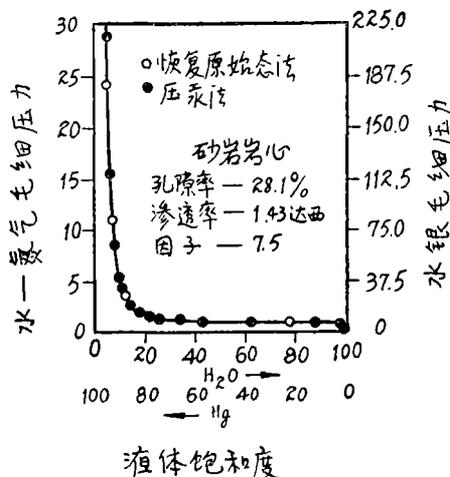


图 3 恢复原始态法和压汞法毛细压力

这些成果总的来说肯定了 Purcell 的结论，不同的地方是 Purcell 采用了一个恒定的换算因子，而这从图 3 图 4 的数据来看是有问题的。Purcell 的恒定的换算因子是从下列数据推导出来的：

水的表面张力：70 达因/厘米

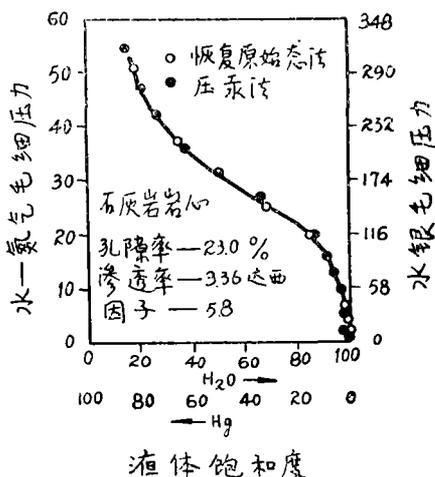


图 4 恢复原始态法和压汞法毛细压力

水银的表面张力：480 达因/厘米

水与固体的接触角：0°

水银与固体的接触角：140°

$$\text{换算因子} = \frac{\text{水银毛细压力}}{\text{水-空气毛细压力}} = \frac{-(480) (\cos 140^\circ)}{(70) (\cos 0^\circ)} = 5.25$$

Purcell 所列出的结果采用了换算因子的一级近似值 5.0，并发现这二种方法的成果是相当一致的。

相反，我们的研究发现如果采用不同的因子(5.4~8.3)，它们之间几乎是完全一致的。通过实验定出的因子值最低是 5.4 表明理论值 5.25 可能是一个极限值。这一推测为已知的水的表面张力对于沾染的灵敏性所证实，十分可能水的表面张力等于 70 达因/厘米是一个最高值。因此采用比 Purcell 更高一些换算因子是合理的，是为实验结果所支持的。已有的资料表明这一因子对于石灰岩可以假定为 6.4，对于砂岩是 7.2。希望进一步的工作能修正这一数字，但就目前来说，这些值一般可以导出较好的对比关系。

上面已经说过静态毛细压力测定的这二种方法几乎是一致的，假如所采用的换算因子是合适的话。用恢复原始态法测定一个毛细压力点就可以算出这一岩心的换算因子，只要这一

点的位置是适当的。图3中可以看出怎样的位子才算是适当的。图中沿着曲线的水平部分，湿润相的饱和度对于毛细压力的变化是最灵敏的。正是在这里，换算因子必须使二根曲线重合起来，才可以避免饱和度产生大的误差。因此已知点必须在这一区域内。这样就可以用快速的水银注入法得出一根完整的曲线，然后换算为恢复原始态的曲线。

静态和动态毛细压力测定的对比

图5图6分别列出了一个砂岩和一个石灰岩的静态和动态毛细压力数据的对比。二种方法几乎是完全一致的，它肯定了静态毛细压力同样可以运用于流动体系的假设是可靠的，从而可以用来解决流体流动的动力学问题。然而，必须指出这二种方法中只存在二个相，油相和气相，既没有研究过油和水的二相系，也未研究过水、油、气的三相系。

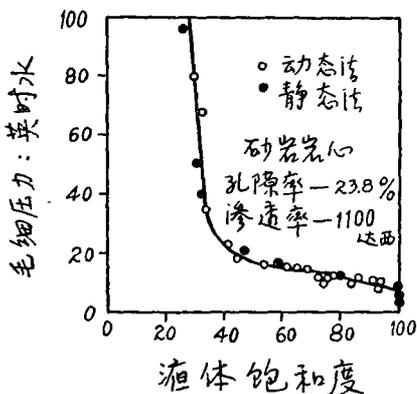


图5 静态法和动态法毛细压力

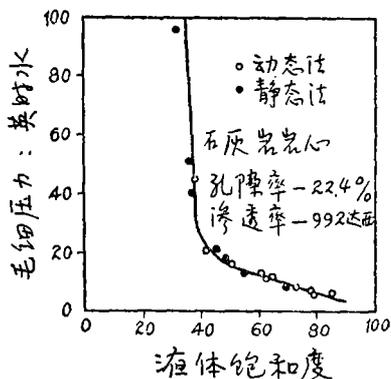


图6 静态法和动态法毛细压力

岩石的毛细特性和岩石结构的关系

Leverett 的毛细压力函数关系，经 Rose 和 Bruce 提出用来对比同一建造不同样品的毛细压力曲线。它是：

$$J(S_w) = (P_c / \gamma \cos \theta) (K / \phi)^{0.5}$$

其中 P_c = 毛细压力

K = 渗透率

ϕ = 孔隙率

γ = 二种流体之间的界面张力

θ = 二种流体之间的界面与岩石表面的接触角。

$(P_c / \gamma \cos \theta) (K / \phi)^{0.5}$ 是无量纲的，记之为 $J(S_w)$ 。 S_w 是指湿润相的饱和度。从毛细压力函数曲线可以得出 $J(S_w)$ 与湿润相饱和度的关系图。这一曲线通常叫做 J 曲线。

根据 J 曲线对比了 Jourdanton 矿场爱德华建造岩样的毛细压力——液体饱和度的资料。用恢复原始态法从七个井不同深度的岩心上得到了毛细压力——液体饱和度的资料。岩心孔隙率的范围是 9.5% 到 28.2%，渗透率的范围是 0.346md 到 186md。

在 $J(S_w)$ 函数与湿润相饱和度的关系图上发现所有的点子都是沿着同一趋向排列的。成果画在图7上，它支持了 Rose 和 Bruce 的说法。然而，感到曲线还应当有所改进。

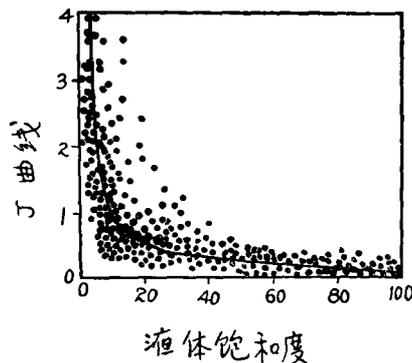


图7 爱德华建造全部岩心的 J 曲线

对这一资料作进一步的研究表明对于同一岩性的岩样来说这一曲线可以更好一些。因此，把样品分类，按照它是石灰岩还是白云岩而分

开画在图8图9上。

这样一分以后，白云岩样品有所改进。图9与图7相比，点子的分散度有所降低。

为了定量地去研究这一问题，用图7和图9的J曲线计算了40个白云岩的渗透率。算得的渗透率与实测的渗透率对比在表1中。根据实测数值分别计算了百分误差。用图7的J曲线，样品的平均误差是71.5%。用图9的J曲线，误差降低到48.0%。这些岩样的孔隙率

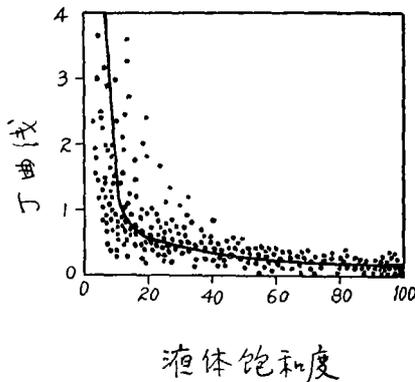


图8 爱德华建造石灰岩岩心的J曲线

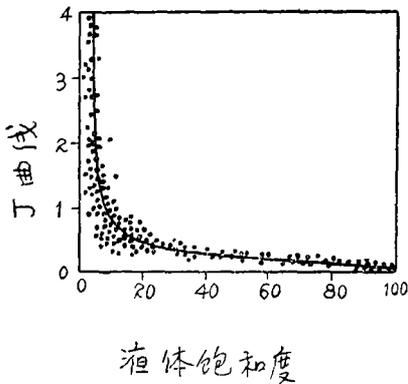


图9 爱德华建造白云岩岩心的J曲线

和渗透率的变化范围是很大的，孔隙率是3倍，渗透率是500倍，因此平均百分误差对于这一建造的岩心是有相当代表性的。在这种场合下，把白云岩与石灰岩分开就改进了白云岩的对比关系。

图8中的石灰岩又根据结构分为二类。一类是微粒的，一类是粗粒的，它们分别画在图10和图11上，这样又有了一些改进。

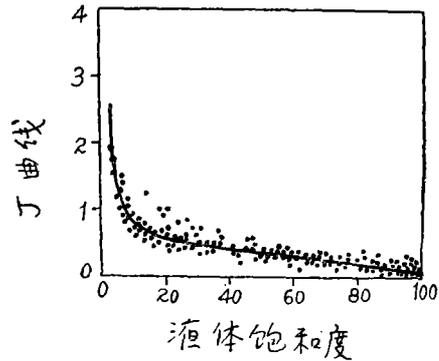


图10 爱德华建造微粒石灰岩的J曲线

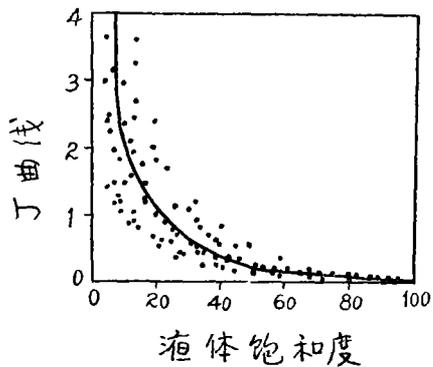


图11 爱德华建造粗粒石灰岩的J曲线

但将白云岩分为细粒和粗粒二类后，其改进程度是可以忽视的。

细粒石灰岩不够多，没有再去研究它。

这些资料表明对于一个建造的不同样品可以用J曲线来对比其毛细压力数据，但导出的成果的正确性是有一定限制的。按照岩性分类，情况要好一些。

(六) 结论

1. 压汞法与恢复原始态法的比较说明它们得到的结果是近乎一样的，只要换算因子用得恰当，但是换算因子对于所有样品来说并不是常数。这一因子对于石灰岩平均是6.4，对于砂岩平均是7.2。

2. 静态和动态毛细压力曲线的结果是近乎一样的，这肯定了在流体流动的动力学课题上运用静态毛细压力资料的可靠性。

3. 一些爱德华石灰岩的资料说明运用 J 就更好一些。

曲线是可以对比同一建造不同样品的毛细压力资料的、如果对比限于同类岩性的样品,其关系

(张义纲译自 (Petr. Trans. AIME

1951 Vol. 192 P. 67~74)

表 1 用 J 曲线计算的渗透率和实测渗透率之间在白云岩上的对比

	岩样号	孔隙率	实测渗透率 (K_m)	全部爱德华样品的 J 曲线		白云岩的 J 曲线	
				计算的渗透率 (K_c)	误差 (%)	计算的渗透率	误差
1 号井	58	.279	186.0	205.0	10.2	144.0	22.6
	65	.225	70.3	155.0	121.0	108.0	53.6
	66	.254	137.0	189.0	38.0	141.0	2.9
	69	.246	154.0	324.0	110.3	274.0	77.9
2 号井	1	.117	1.03	1.78	72.8	1.26	22.3
	4	.104	0.346	2.42	599.0	1.68	386.0
	5	.206	20.6	27.4	33.0	20.8	1.0
	6	.159	2.51	4.14	65.0	3.30	31.4
	7	.143	1.97	4.46	126.4	3.19	61.9
	8	.127	7.17	11.1	54.7	7.92	9.5
	10	.201	34.0	42.0	23.6	30.0	11.8
	11	.237	45.0	72.9	62.0	52.1	15.8
	14	.134	1.99	2.11	6.0	1.50	24.6
	18	.113	4.55	7.56	66.1	5.4	18.7
	30	.125	2.29	5.19	126.7	3.7	61.5
	3 号井	32	.224	160.0	111.0	30.6	78.9
33		.200	113.0	112.0	0.9	79.7	29.4
10		.214	15.9	10.0	37.1	7.18	54.7
12		.133	2.85	6.85	140.3	4.82	69.1
4 号井	16	.236	30.6	17.4	43.1	13.3	56.5
	18	.171	10.7	25.4	137.0	18.9	76.6
	19	.187	53.5	77.5	44.8	57.4	7.3
	1	.220	8.9	11.9	33.7	8.5	4.5
	3	.154	4.07	3.86	5.2	2.94	27.8
	4	.170	2.79	2.25	19.4	1.61	42.3
5 号井	7	.253	14.3	15.7	9.8	10.7	25.2
	16	.202	93.0	116.0	24.7	81.9	11.9
	24	.276	28.5	144.0	405.0	106.0	272.0
	3	.131	2.62	7.79	200.0	5.58	115.0
	4	.117	5.07	3.80	25.0	2.71	46.5
	5	.122	1.26	0.785	37.7	0.561	55.5
	6	.155	6.13	6.09	0.7	4.35	29.0
	7	.204	40.8	27.1	33.6	21.8	46.5
	8	.249	67.5	81.2	20.3	62.1	8.0
	9	.212	34.5	39.7	15.1	34.6	0.3
	11	.237	52.5	50.5	3.8	41.5	21.0
	12	.228	53.0	82.5	12.0	60.6	18.1
	14	.235	43.8	50.0	14.2	38.3	12.4
	17	.250	39.5	31.5	20.2	23.8	39.7
	18	.223	74.0	97.7	32.0	73.9	0.1
					71.5		48.0

$$\text{误差} = \left(\frac{K_c - K_m}{K_m} \right) 100$$