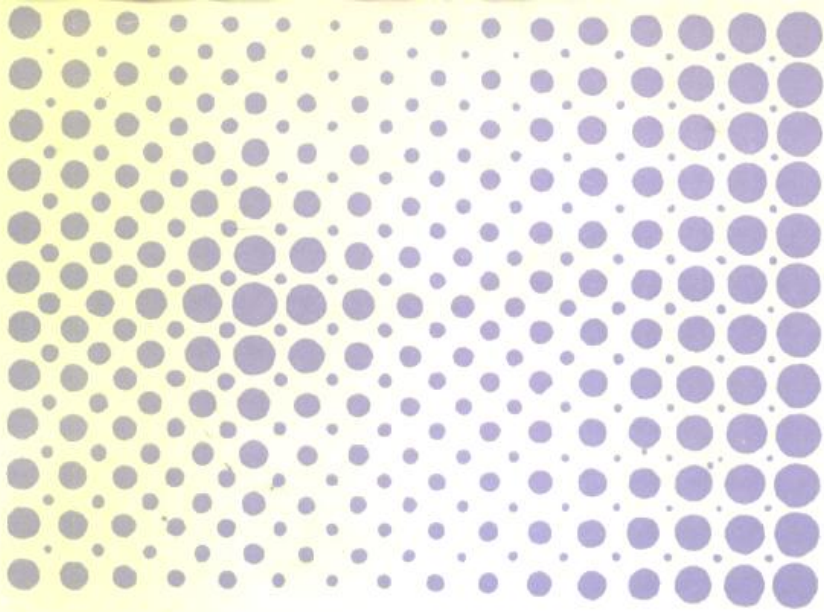
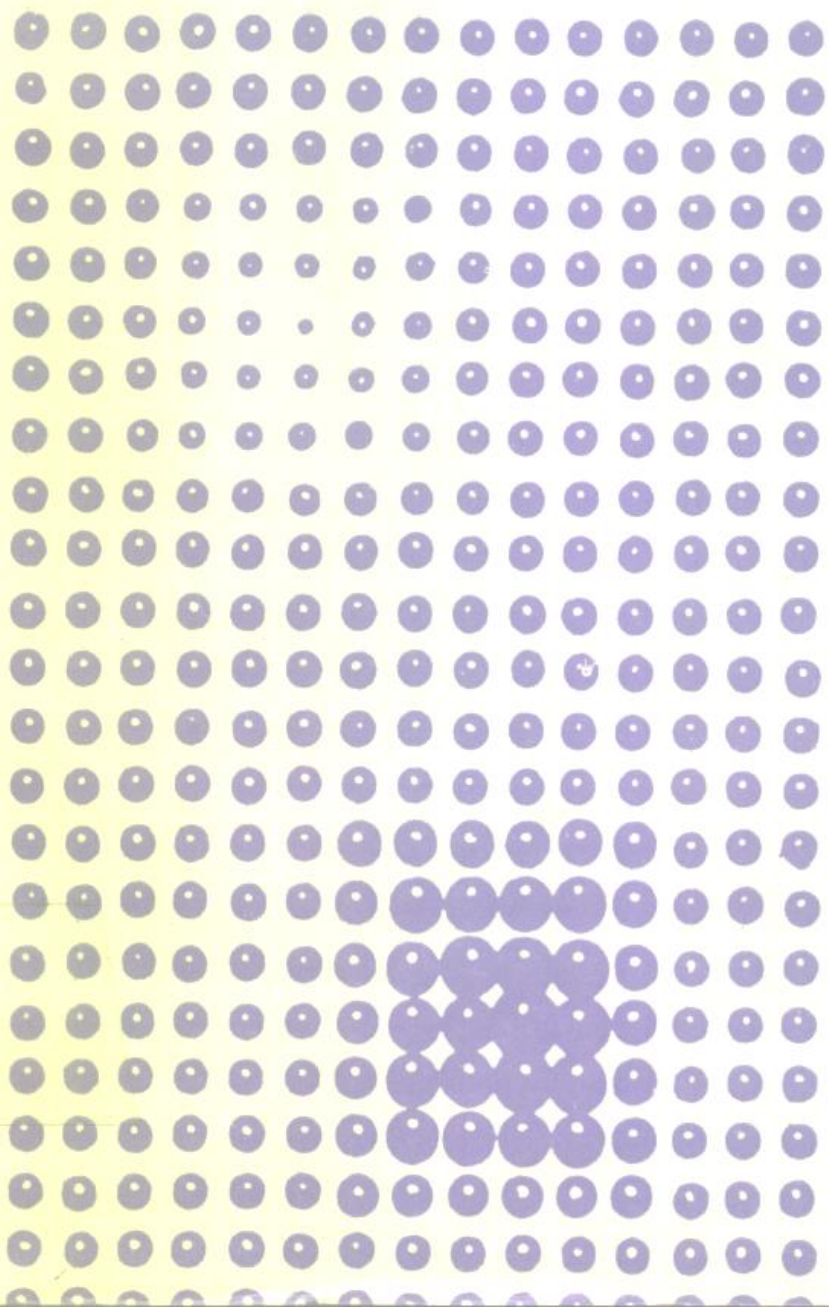




陈永生 著

油田非均质对策论



石油工业出版社

- 073798

油田非均质对策论

陈永生 著



200419467



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书主要包括油田非均质的地质特点、油田非均质在注水开发过程中的表现、油田非均质的开发调整及非均质油田注水开发的基本特点四部分。

本书可供矿场地质及油田开发专业工程技术人员使用。

油田非均质对策论

陈永生 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 19¹/₂印张 1 插页 488千字 印 1—2000

1993年11月北京第1版 1993年11月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0906-4/TE·846

定价: 15.30元

目 录

绪 论	(1)
第一章 油田非均质的地质特点	(4)
第一节 层间非均质的地质特点	(4)
第二节 单一油层平面和纵向非均质	(6)
第三节 孔间非均质	(11)
第四节 断层与裂缝	(23)
第五节 流体性质非均质	(31)
第六节 油层润湿性	(40)
第二章 油田非均质在注水开发过程的表现	(48)
第一节 层间干扰与单层突进	(48)
第二节 平面矛盾	(72)
第三节 厚层非均质所造成的层内矛盾	(82)
第四节 油层结构对水驱效果的影响	(96)
第五节 孔间和孔道非均质对油田开发效果的影响	(102)
第六节 油层润湿性对油田开发效果的影响及其注水后的变化	(123)
第七节 注水过程对原油性质的影响	(133)
第八节 几种矛盾间的关系	(137)
第三章 油田非均质的开发调整	(142)
第一节 井网与层系的部署与调整	(142)
第二节 注水	(157)
第三节 油井调整措施	(215)
第四节 厚油层扩大水淹厚度的措施	(255)
第四章 非均质油田注水开发的基本特点	(267)
第一节 开发试验	(267)
第二节 注采平衡与压力平衡	(287)
第三节 水驱油基本规律	(294)
第四节 剩余油分布的基本特点	(297)
第五节 提高采收率的基本思想	(303)

绪 论

砂岩油田开发的根本问题是用最少的投资,获得尽可能高的采油速度和尽可能高的采收率。注水开发的砂岩油田也不例外。本书的目的主要是想讨论注水开发砂岩油田非均质性及其对采收率的影响。如果这个问题讨论得比较清楚,结合合理的开发部署,高效率的经济管理,那么前两个问题就可能得到比较好的答案。

一、决定注水开发砂岩油田采收率高低的三要素

几乎所有搞油田开发的人都知道下面这个需要进一步完善的公式,

$$\eta_k = H_k \cdot S_k \cdot L_k$$

式中 η_k ——油田采收率;

H_k ——油田的水淹厚度系数;

S_k ——油田的水淹面积系数;

L_k ——油田驱油效率。

上式告诉我们,三个系数高了,注水开发的油田采收率就高,三个系数低,采收率也就低,这三个系数的高低取决于什么因素呢?概括起来是三要素:

- ① 油田的非均质情况;
- ② 人们认识油田非均质的程度;
- ③ 人们解决油田非均质的能力。

这三个要素对油田采收率的高低起着决定性的作用。第一要素是客观条件,是客体,而且这个客体具有一般客体不具备的一些特点,即深埋地下,高温高压。

第二要素是人们认识油田非均质的程度。由于油田深埋地下,人们不能直接接触,而只能通过各种间接手段认识油田,加上其地质的,力学的和物理化学的复杂特性,给人们认识油田带来很大困难。

第三要素是人们解决油田非均质的能力。这很容易理解,不多叙述了。

所以,有经验的油田开发工作者经常说:问题认识清楚了,也解决一多半了,在解决问题的同时,又加深了对油田的认识。

二、砂岩油田非均质的基本类型

油田非均质是绝对的,无条件的,无限的,而均质只是相对的,有条件的,有限的,也就是只有在一定的非均质层次内,一定的条件下,有限的范围内才可以把油田近似地看成是均质的,而且理论研究也必需这样做。油田的非均质从宏观到微观可以分为两大类:流场非均质和流体非均质。

1. 流场非均质

流场指的是在油田开发中,提供流体存储,并让流体在其中流动的場所或空间。这个场所是非均质的,极其复杂的,按其油气水在其中运动时所受的控制程度及相互关系,将流场非均质从宏观到微观分6个层次。

第一层次,也是最宏观的层次,即层间非均质。该层次研究层与层之间油层性质、油层

物性、原油性质等各方面的非均质。这种非均质在多油层笼统注水和采油的条件下,表现为严重的层间矛盾;

第二层次非均质是平面非均质,反映了同一油层不同位置的油层物理性质(如渗透率、厚度)不同,原油性质不同,地层倾角不同,以及由于油层的沉积特征、结构、构造、裂缝发育情况的不同所造成的非均质。这类非均质在同一井筒相同压差注水或采油的条件下,表现出严重的平面矛盾。

对于平面上同时存在裂缝驱油和孔隙驱油所造成的非均质,也可以列入这一层次;

第三层次非均质是层内非均质,它表示油层不同部位油层渗透率分布情况不同,垂直渗透率和水平渗透率不同,不同方向渗透率不同,造岩矿物颗粒排列不同等。

这一层次对厚油层,块状底水油藏、气顶油藏有特别重要的意义;

第四层次非均质是孔间非均质,表示砂岩油层孔隙大小不同,有的油层孔隙半径可相差几十倍。孔隙与其他孔隙通道多少不同,裂缝宽窄不同也是非均质,油层孔间的非均质形成孔间矛盾,是降低油层孔隙利用系数的主要因素;

第五层次是孔道非均质。由于孔道形状、长短、连通关系、孔径及弯曲程度都不同,会给孔隙驱油效率带来影响。

第六层次非均质是表面非均质,也即砂岩造岩矿物颗粒表面非均质。由于岩石颗粒表面活性、粘土矿物分布情况及束缚水分布状况不同,造成岩石不同颗粒,不同孔隙,以至同一孔隙不同位置润湿性不同。

2. 流体非均质

石油、天然气和作为驱替剂的水之间存在着明显的物理、化学和物理化学性质的差异,这些差异在水(气)和其他驱油剂驱油(气)的过程中,自始至终地影响着由流场不均质所造成的水驱油过程的不均匀特点的变化和发展,在多数情况下,这些差异使矛盾加剧。在水驱油过程中,这种原油、天然气和水之间各方面性质的差异称为流体非均质。

通过上面分析可以看出,用三个系数表达油田采收率公式是不够完善的了,驱油效率所包含的内容太庞杂,有必要将其分解为孔隙利用系数和孔隙驱油效率,这样式(0-1)就变成:

$$\eta_k = H_k \cdot S_k \cdot K_k \cdot Z_k$$

式中 K_k ——孔隙利用系数;

Z_k ——孔隙驱油效率。

流场中6个层次的非均质、流体非均质,加上原油中极性分子和非极性分子的差异,水分子,以及这些组分在孔隙中的分布状态,如束缚水的分布,油气水的差别、温度、压力的影响以及不同矿物的结晶点阵的不同,晶体缺陷的存在等造成了很复杂的非均质状况。

这些从宏观到微观的非均质性,当把它们笼统地当作均质的而不加区别地对待时,就会产生问题,出现矛盾,而且这些矛盾随着注水开发程度的加深,在不断地发展变化。从总的看来,流场6个非均质层次影响油田采收率4大系数的关系大致是:

- ① 水淹厚度系数主要受层间非均质和层内非均质(纵向上)的影响;
- ② 水淹面积系数主要受平面非均质和层内非均质(方向上)的影响;
- ③ 孔隙利用系数主要受孔间非均质和表面非均质的影响;
- ④ 孔隙驱油效率主要受孔道非均质和表面非均质的影响。

流场和流体的非均质在油田开发过程从来都是组合在一起的,而流场中非均质的6个层次

之间又是相互联系而又相互区别的，不同层次的非均质需要不同的办法去调整、解决。

三、人们认识注水开发砂岩油田非均质性的基本手段

人们认识注水开发砂岩油田非均质性的基本手段常有：

- ① 区域和现代沉积研究；
- ② 构造地质研究；
- ③ 开发地震；
- ④ 测井；
- ⑤ 试井；
- ⑥ 钻井取心；
- ⑦ 取样分析化验；
- ⑧ 数学模型；
- ⑨ 物理模型；
- ⑩ 现场试验等。

这些方法中，每一类都可以细分出许多种方法来，而且目前在飞快地发展着。在本书中不打算详细讨论这些方法，但是书中所谈到的看法、观点和大量的数据资料都是来之于这些方法的某一种或几种。

总的来说，对油田非均质的认识程度是：流场非均质中的层间非均质和平面非均质认识比较清楚；层内非均质有了一定的认识，对于孔间、孔道和表面非均质现在还知之不多，甚至很无知，目前还要解决手段问题；流体非均质中的密度差、粘度差，现在都有一定的认识，而物理化学性质差异的影响却认识很肤浅。

四、人们解决油田非均质的能力

现有解决不同类型、不同层次油田非均质问题的能力是很不相同的。解决或调整层间非均质和平面非均质，主要是层系、井网、采油工艺技术问题。目前，从技术上没有什么大的难点，只要在经济上可行就可以采取。

调整层内非均质，现在在一定地质条件下，还有些方法，如细分注水，改变注水方向等，但在一些条件下，措施的成功率是不够高的。

对于解决或调整孔间、孔道或表面非均质问题，现在大量的措施还处于试验探索阶段。如注胶束等。

本书围绕着油田非均质问题，从地质特点，动态表现，开发调整三方面按油田非均质的特点，油田非均质在注水开发过程的表现和油田非均质的开发调整的顺序，分章叙述，讨论。最后一章作为归纳小结。

第一章 油田非均质的地质特点

对于注水开发的油田（包括美国等国家采用二次注水采油方法的油田），影响油田高产稳产期的长短和最终采收率的高低的因素是油田非均质。只有研究清楚油田非均质的地质特点，才能谈得上调整由此而造成的矛盾。

油田非均质分成两大类，流体非均质和流场非均质，流场非均质又分为6个层次。下面将从油田开发的角度分别讨论它们的地质特点。

第一节 层间非均质的地质特点

一个油田一般有多个油层组，每个油层组又有多个单油层。这里所说的单油层是指在同一地质时间间隔内的沉积，上下有夹层和其他油层可以分开的含油地层。这些夹层在小范围内应该是稳定的。目前世界上见到的大的砂岩油田多属于这种情况。

层间非均质是油田中宏观的，层次最低的非均质，也是当前研究得比较清楚，人们有不少措施可以进行调整的非均质层次。在油田中，层间非均质可能表现为下述几方面的地质特点：

一、储油层性质之间的非均质

同一油田在纵向上可以有多个储油层，这些储油层之间油层性质可以大不相同，对于复合油气藏更是如此。

1. 储油层岩性之间的差异

从现在已经发现的油气藏来看，储油层岩性是多种多样的，几乎各类岩性的地层都可以成为储集层。

(1) 沉积岩 沉积岩储集层主要有：

砾岩储集层：如克拉玛依油田；

砂岩储集层：如大庆油田；

泥页岩储集层：如大庆油田外围的一些地区；

碳酸盐储集层：如四川的大部分气田。

(2) 变质岩和火成岩 在一定条件下，变质岩和火成岩也可以成为储集层。如老君庙油田志留系储集层就是古老的变质岩。

这些不同岩性的储集层如果在一个油田内纵向上同时出现时，一般能区别开来。这是因为不同岩性的储集层流场非均质的6个层次的非均质一般都很突出。

2. 储油空间和油气运移通道不同

不论什么岩性的储集层，储油空间和流体流动通道无非是孔隙、裂缝和孔洞以及这三种情况的组合。对于同一个油田的各个油层，它们的油气储集空间和流体通道可以是同类型的（如大庆油田的萨尔图油层和葡萄花油层），也可以是不同类型的。储集层储集空间和流通孔道不同，油水运动规律及孔隙内原始油水分分布状况也不相同。按油气储集空间和流体流动主要通道的不同可以将储集层划分为下面几种类型。

(1) 孔隙型 孔隙型即孔隙储油、孔隙渗流的储集层。

这类储集层多有原生孔隙,也可以是经过后生作用改造后孔隙。油气储集在油层孔隙中,而且这些孔隙又是流体运动的通道。砾岩储集层、砂岩储集层,以及生物碎屑岩储集层均可能属于这类。

(2) 裂缝-孔隙型 储油以孔隙为主,渗流以裂缝为主的一类储集层。

这类储集层油气主要储集在油层孔隙中,而流体在油层运动的主要通道却是裂缝,孔隙中的油流到裂缝中,而汇流到井底。这类储集层往往是裂缝连通很远,而孔隙渗透率却很低。如美国的斯普拉柏雷油田。

(3) 孔隙-裂缝型 这类油层孔隙度较低,裂缝发育而延伸不远,孔隙空间和裂缝空间都是储油空间,又都是油气水运动的通道。

(4) 裂缝型 这类油气田裂缝既是油气储集的主要空间又是流动通道。碳酸盐储集层、泥页岩储集层都可以形成这样的储集类型。这类储集层可能没有原生孔隙,或有孔隙而不连通、不渗透。裂缝均是成岩或后生作用形成的。

(5) 洞隙型 溶洞、孔洞、孔隙和裂缝既是储油空间,又是流动通道。这些储集层均属于可溶性的盐类沉积层,基本没有原生孔隙,只有后生孔隙。

这些具有不同类型的储油空间和渗流空间的储集层,如在同一油田剖面上不同位置钻遇时,要考虑划分不同的层系。

3. 层间渗透率的差别

对于同一种岩性的储集层,尤其对砂岩孔隙储油的油层来说,油层间渗透率的非均质是储油层物性非均质中最重要的一种。

这在砂岩油田中是常见的,图 1-1 所给的是大庆油田×区部分油层平均渗透率剖面。从图上可以明显地看出,层与层之间平均渗透率差异是很大的,最大可达5倍以上。

如果从一口井看各个层之间的渗透率差异将不是5倍、10倍,可以达到几十、上百倍。为了表示最高渗透率和平均渗透率的差异程度,引进单层突进系数(k)这一概念。

$$k = \frac{K_{\max}}{\bar{K}} \quad (1-1)$$

式中 $K_{\max}$ ——一口井或一个油田

渗透率最高的油层的渗透率;

$\bar{K}$ ——厚度权衡的平均渗透率。

现在有人采用变异系数来表示,笔者认为单层突进系数更方便些。各层间渗透率的差异是油田开发层系划分和组合的重要依据之一。

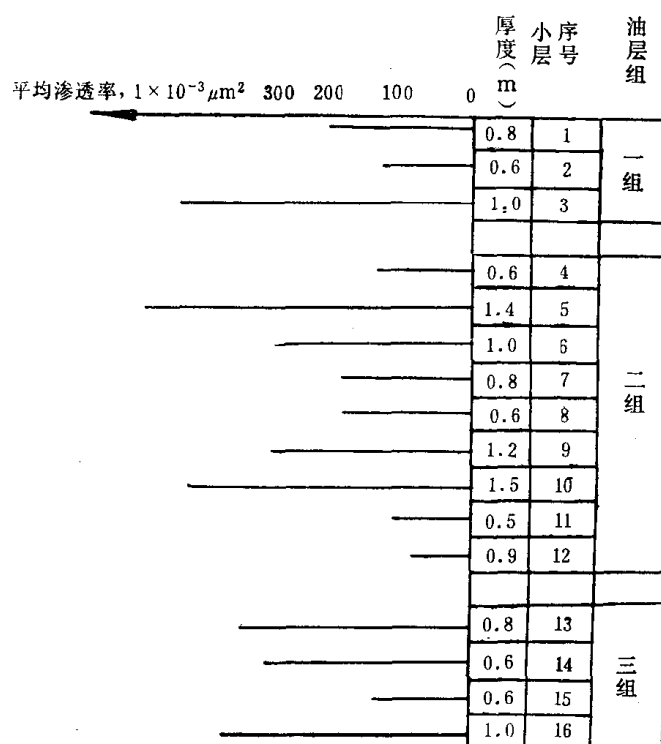


图1-1 萨尔图油田×区分小层渗透率和有效厚度数据剖面图

4. 油层厚度和沉积特征及后生作用的差别

同样是一个单层，有的可以厚达几十米，甚至更厚，而薄的却只有10cm，甚至更薄。在开发过程中，由于油水重力差异，厚层开发效果和薄层是大不相同的。

油层虽然厚度相差不多，但不同沉积相的油层也要从宏观上认真加以区别对待，它们的开发效果可能相差不少。

二、各层油气水关系是否相同

油田油气水的关系及油气水层的关系是很不相同的。有的简单，有的就很复杂。即使是油气和油水界面很整齐有规律的油田情况也不同。如底水油藏和边水油藏的差别；边水活跃和不活跃油藏的差别；具有很大气顶和只有不大气顶油藏的差别等。油水界面不平整的悬挂油藏又是另外一种情况。

在油气水层相互关系复杂的油藏，水夹层、气夹层等都是油田开发中需要认真考虑的问题。

三、各层间天然能量驱动方式和大小不同

油田天然能量常有水驱（包括边水和底水）、弹性驱、气顶驱、溶气驱和重力驱动。若一个油田不同层，不同区具有不同的天然能量，而且能量的大小差别很大，在这种情况下，对于不同的油层就要采取不同的开发方式，充分利用天然能量。

四、各油层油气水的性质、压力、温度，以至相态可能不同

若这种状况出现就要采取不同的措施。如凝析油气田的开发就与一般油气田有很大的不同。

五、各个层的压力系统可能不同

各个油层的压力系统往往是不同的。

以上谈到的是各油层5个方面的不同，这仅仅是指可能有这5个方面不同，并不排除出现其他方面的不同，况且各油田这些层与层之间差异程度也不一样。当然，并不是说每个油田各油层之间一定有这5个方面的不同。

第二节 单一油层平面和纵向非均质

油层都有一定的厚度和分布范围，对于没有经过剥蚀作用的储油层，其分布范围受当时沉积相的控制，而其厚度、孔隙结构不但受沉积相的控制，还受成岩作用、后生作用的影响，甚至控制。所以对于成岩作用、后生作用不强的砂岩油田，研究沉积相可以有助于掌握油层的非均质性；而对于后生作用强的油田，研究沉积相的同时必须认真研究成岩作用和后生作用，甚至要把后者放在首要地位。

一、油层平面非均质

油层平面非均质是研究油水运动单元内的非均质情况。油层平面非均质主要表现在：

1. 平面上油层渗透率分布的非均质

任何一个油层，那怕被认为是最均匀的油层，油层不同平面位置的渗透率也是不同的，对于非均质严重的油层，平面渗透率的变化可达几倍、十几倍，甚至几十倍。图1-2就是大庆油田×区×层的小层平面图的一部分。从图上可以看出该层有效渗透率和有效厚度的非均质是严重的。这种非均质在油田开发中成为产生平面矛盾的内在条件。

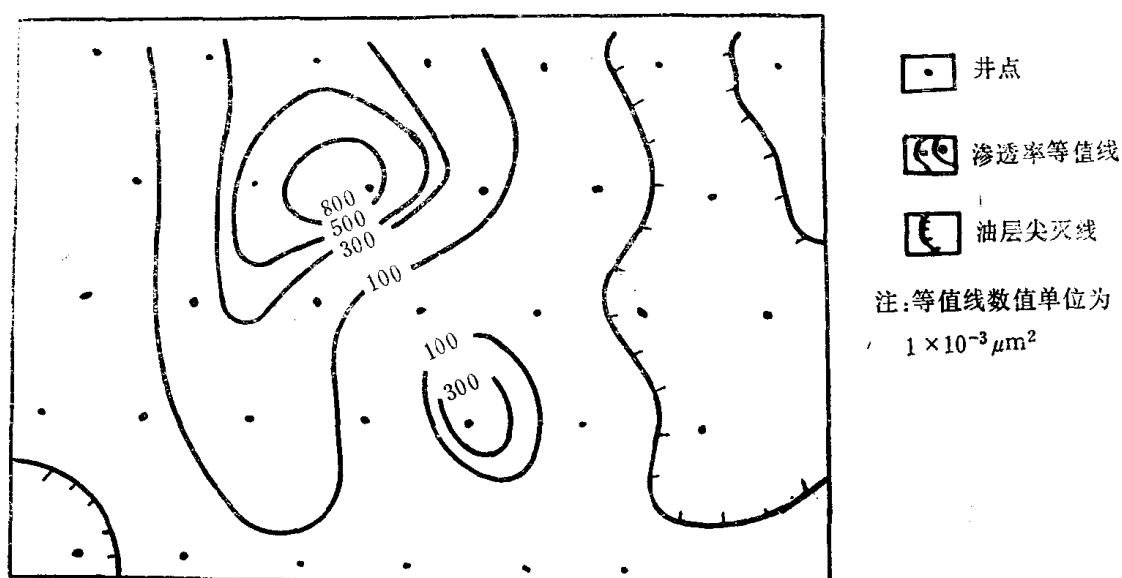


图1-2 ×区××小层渗透率等值线平面图

根据对大量油层的分析，可以把油层在平面上非均质（从渗透率和厚度角度看）分成下面5种类型。

① 大面积分布的厚油层。砂体在平面上分布较均匀，油层厚度大，渗透率高，只有个别地方出现油层缺失，渗透率变化梯度也不大；

② 条带状分布的砂体。油层厚度大的部分和高渗透部分基本吻合，而且成条带状分布，沿条带发育方向厚度渗透率均变化不大，延伸较远，而垂直于砂岩体延伸方向，向两侧油层明显变坏，甚至尖灭；

③ 高渗透区零星分布的油层。这类油层高渗透区呈零星分布，大面积范围内是低渗透率油层和尖灭区；

④ 大面积分布的低渗透薄油层。油层薄而且稳定，大面积分布，容易追索对比；

⑤ 零星分布的油层。大面积是尖灭区，砂体呈零星小面积分布。

这5种类型的砂体分布可以由不同的沉积相形成，而不同相的油层注水开发效果是大不相同的，需给予重视。

2. 地层倾角的影响

对于地层倾角小，油水密度差又小的油田，地层倾角的影响是不大的，但对于高角度的油田却是不可忽视的因素。

地层倾角大，重力分异作用就明显，在同一注水井点注水，沿倾向向构造高部位驱油和向构造低部位驱油的效果是不同的，重力所起的作用也是不同的，这样就增加了平面矛盾的影响因素。

3. 油层裂缝发育情况不均匀

油气水在油层中的流动通道除了孔隙之外，还有裂缝。大量的地质研究证明，裂缝在平面上不同方向的展布情况，连通情况是很不相同的。裂缝不同的展布情况在注水开发中所起的作用大不相同。

4. 油层厚度平面非均质

油层厚度变化是水驱油非活塞过程和油水密度差起作用的必要条件。厚度大，重力作用表现得明显，这对具有底水或气顶油田尤其显得重要。有人认为从油层厚的地方向薄的方向驱油，驱油效率高，有的则认为相反。不管怎么认识，均认为油层平面上的厚度非均质对驱油效果是有影响的。

5. 同一块岩心不同方向的渗透率不同

不论是海相砂岩、湖相砂岩，还是河流三角洲沉积的砂岩，由于都是在水流的条件下沉积的，而且砂粒总不是等径的小球，再加上成岩作用和后生作用的影响，就造成了同一岩样不同方向所测得的渗透率不同。最突出的是平行层理面方向渗透率和垂直层理面方向的渗透率不同，也就是垂直渗透率和水平渗透率的差异问题。

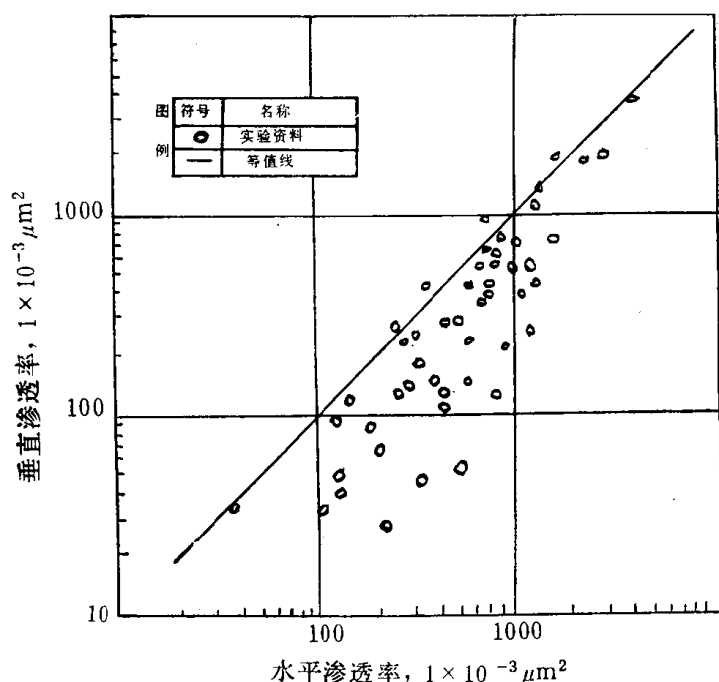


图1-3 水平渗透率与垂直渗透率关系曲线

有5种情况可以造成沉积岩构造和层理。图1-4就是这5种情况的示意图。当这5种情况的差异看得清楚时，层理由肉眼就看出来了，当差异不大时，虽然肉眼不易看出来，但在渗透率测量时，垂直的和水平的差别就表现出来了，可以将测水平渗透率时流体的流动简化成平行的不等径的，但每根管各自粗细均匀的毛管束（见图1-5A），而把测垂直渗透率时的流体简化成平行的，不等径的，多次重复出现细脖子的毛管束（见图1-5B）。

从图1-5可以很明显看出，水平渗透率测示时，所受的流动阻力就是摩擦阻力损失，应符合泊肃叶方程。而垂直渗透率测示时，由于管径粗细变化不均，除沿程摩擦阻外，还有局部阻力损失，很显然求出的渗透率就要比水平的低。

(1) 水平渗透率和垂直渗透率的差别 图1-3是用大庆油田的资料做的。从图可以看出，渗透率越低两者差别越大。如在垂直渗透率 $0.1 \mu\text{m}^2$ 左右处，两者相差3倍左右，但垂直渗透率达到 $3 \mu\text{m}^2$ 以上时，两数相差就很小了。从看到的国外资料，也多有这方面的情况。如美国某油层126块岩样中，垂直方向的平均渗透率是水平方向最小渗透率的70%。从沉积岩构造上可以很好的说明垂直渗透率小于水平渗透率。

沉积岩构造和层理之所以能观察到，主要是由于粒度的变化，其次是由矿物成分的变化造成的。如果把层理产生的原因抽象并突出出来，通常

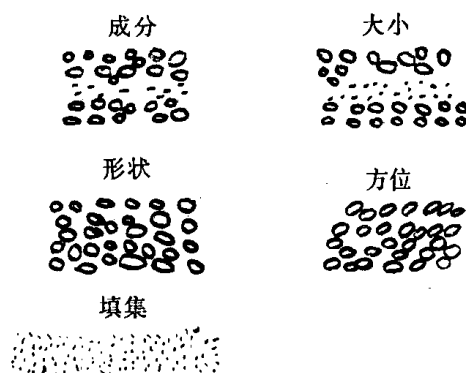


图1-4 产生层理的不同组合
(引自《砂与砂岩》，略有改动)

上述分析说明,垂直渗透率和水平渗透率的差异是油层沉积特征的一种表现,层理影响突出,只有当渗透率很高时,才近似相等。

(2) 方向渗透率 同是水平渗透率,不同的方向,渗透率也不同。下面是一个典型的例子美国伊利诺斯洲福雷油田罗宾逊砂层,为了确定砂层内岩石类型分布;确定孔隙度、渗透率与岩性的关系,以及油层非均质性的分布情况;确定油层的成因,以便可能预测油层的大小、形态、分布、延伸和连续性。在1.3公顷面积内打了10口取心井(全油田共14口),有3口井定向取心。经过综合研究,专家们认为罗宾逊层总厚15m,分A、B和C3层,分别厚2.1m、7.2m和5.7m,A层为波痕状砂岩,渗透率为 $0.05\mu\text{m}^2$,渗透率变化系数为0.79,最大渗透率方向平行于波痕层理波谷轴向,最小渗透率方向与波谷轴向成直角,其值为最大渗透率的85%~95%;B层为斜层理砂岩,渗透率 $0.3\mu\text{m}^2$,渗透率变化系数为0.60,斜层理的倾斜方向一般为最大渗透率的方向,最小渗透率为最大的90%~95%;C层为层状砂岩(占85%)和页岩(15%),渗透率为 $0.425\mu\text{m}^2$,渗透率变化系数为0.5,砂岩部分无明显的水平渗透率变化。总之,最大渗透率方向平行于沉积水流方向,三口定向取心井的岩心表明,这方向也就是砂岩延伸方向。

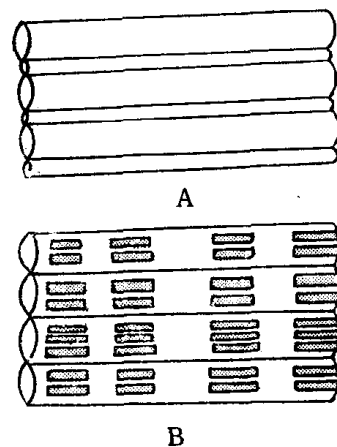


图1-5 毛管束示意图

砂岩不同方向渗透率不同的原因,主要是砂粒不圆,在流水的作用下,沉积物的长轴呈一定方向排列造成的。《砂和砂岩》(中译本,美国F.J.佩蒂庄等著)一书中写到:“在沉积时,骨架砂粒的堆集,其长轴平行于水流方向,并在逆流方向上与沉积界面成 $15^\circ\sim 18^\circ$ 的叠复状。因此异向性对孔隙系统是有影响的。”在H.E.Rineck等所著的“陆源碎屑的沉积环境”一书中大量引用了不同沉积岩研究者都认为不等轴砂粒沉积时的长轴的方向与水流方向有一定的关系的观点,书中还写到:“长条形砂粒与卵石一样,趋向于平行水流方向的选择性方位。达普拉斯和罗明格(1945年)进行的试验表明,石英砂粒的宽边与卵石一样指向上游。而且石英砂粒的纵向方位常常向上游倾斜(施瓦莎切1951年)”。在莎尔图油田莎尔图油层的岩心薄片上,有不少薄片可以看出砂岩颗粒呈定向排列。图1-6就是一张碎屑颗粒呈定向排列的照片。

当碎屑颗粒在流体定向流动中沉积下来后,水继续在可渗透的砂粒中流动,平行于水流方向的孔隙,流速较高,而孔道主流线两侧的孔隙成为滞流区,涡流区或流速较慢的孔隙空间就可能有较多的、较细的颗粒,包括粘土矿物沉积在此孔隙中。这样的结果就必然造成水流方向的渗透率要比其他方向的高。图1-7就是在理想的条件下,在长轴碎屑的骨架中,细粒沉积物可能的沉积位置的示意图。

其他如油田平面上油气水性质的不同,分布不均匀,都将影响油田开发部署。如油田过渡带的开发部署和纯油区的通常总是不同的,原因就是这一点。

二、油层纵向非均质

一个单层在纵向上的非均质也是需要认真注意的,它同样影响油田的开发效果。油层纵向非均质突出表现在:

① 大量的取心井资料表明,同一油层在纵向上渗透率的分布是很不均匀的。图1-8是大

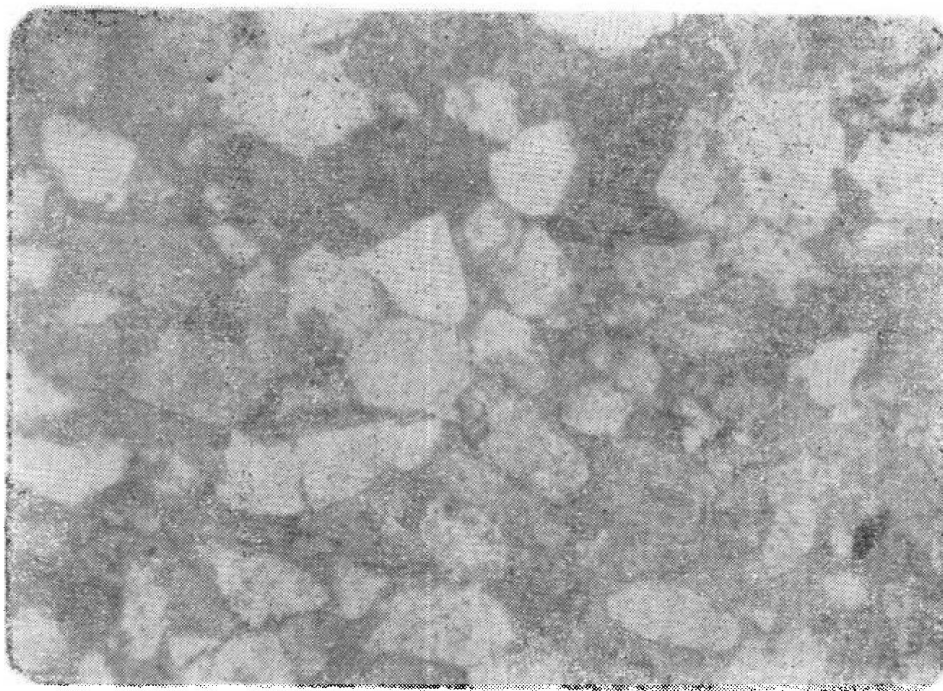


图1-6 砂岩颗粒显定向排列 (宋2井1083.2m处样品)

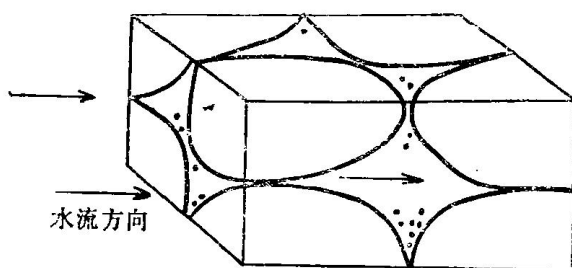


图1-7 理想条件下, 长轴碎屑沉积、水流方向及细粒碎屑沉积示意图

庆油田×井油层的岩心分析资料, 由此可看出同一个层的渗透率在纵向上的差异可以达几十倍。按油层渗透率纵向上的变化特点, 可以将油层分为下面几种类型:

- a. 均匀层: 油层在纵向上渗透率变化不大, 而且没有明显的规律性;
- b. 正韵律油层: 下部渗透率高, 向上逐渐变低的油层;
- c. 反韵律油层: 下部渗透率低, 向上逐步变高的油层;

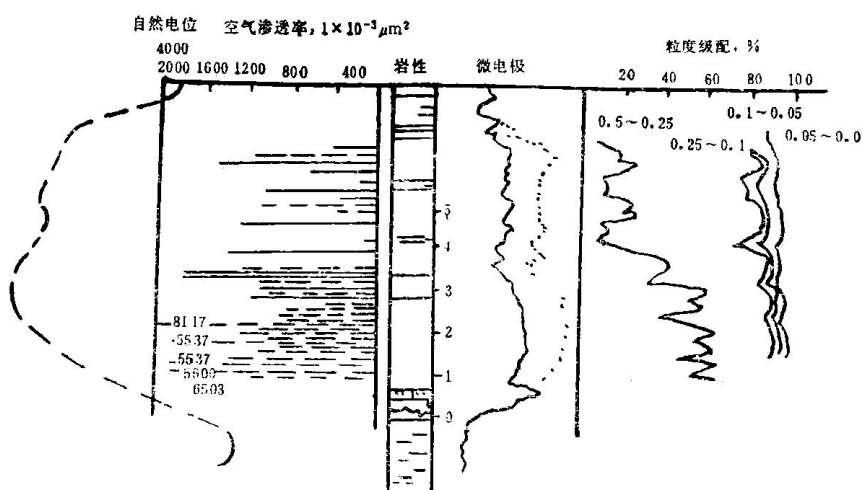


图1-8 ×井×油层纵向非均质图

d. 全韵律油层: 指从下部到上部, 油层渗透率由高变低, 再逐渐变高的油层, 或者由低变高后再逐渐变低的油层;

e. 复合韵律油层: 指渗透率从高到低或从低到高的变化, 在一个油层中交错迭合, 多次出现的油层;

f. 无韵律油层: 在油层纵向上, 渗透率变化无规律可循, 或呈阶梯形。

这种按渗透率划分油层类型, 对于原生孔隙为主或以次生孔隙为主的油层均适用。

② 一个单一的厚油层内由于有岩性和物性的夹层存在, 可以细分为几个段。这些夹层在开发厚油层时, 对油水运动规律和措施有效期保持时间的长短起很大的作用。隔层延伸的距离越长, 措施效果越好。所以从某种意义上来说, 隔层及其延伸情况比油层本身更重要。

从一口井来看, 这些隔层可以比较容易地区分出来, 但是是否延伸范围广, 从沉积岩石学可以进行分析和研究。但最终必需经过油田开发动态给予证明。

从大量的已被动态证实了的资料来看, 厚层内隔层可以有几种类型:

a. 厚层内有稳定隔层的, 这是指隔层的延伸距离可以达到一个注采井距以上, 如图1-9的A图中的隔层1就属于这类;

b. 厚层内有较稳定的隔层, 隔层的延伸距离可以达到注采井距之半, 或更远些, 但不到一个井距。如图1-9A图中的隔层2;

c. 厚层内没有稳定的隔层, 隔层的延伸距离都小于注采井距之半。这些泥岩层或低渗透层在砂岩中成透镜状分布, 当这些透镜体很多, 互相交错迭合时, 对油水运动也将产生明显的影响, 如图1-9的B图。

③ 当一个层的厚度很大, 或者构造很平缓时, 同一井内存在油气界面或油水界面, 甚至两种界面同时存在。这时同层内的油气水有非均质问题,

怎么防止气锥和水锥的形成, 就成为油田开发的主要问题。当注入水或边水沿着厚层底部高渗透带推进, 造成大面积水淹时, 这时厚油层就变成近似于带底水的油层。类似情况, 当注入气或气顶气沿着厚油层顶部大面积向油井突进, 造成油井气串, 这时的油层就近似于带气顶的油层, 这时油层纵向非均质的情况就更复杂了。但这些现象都是后生形成的。

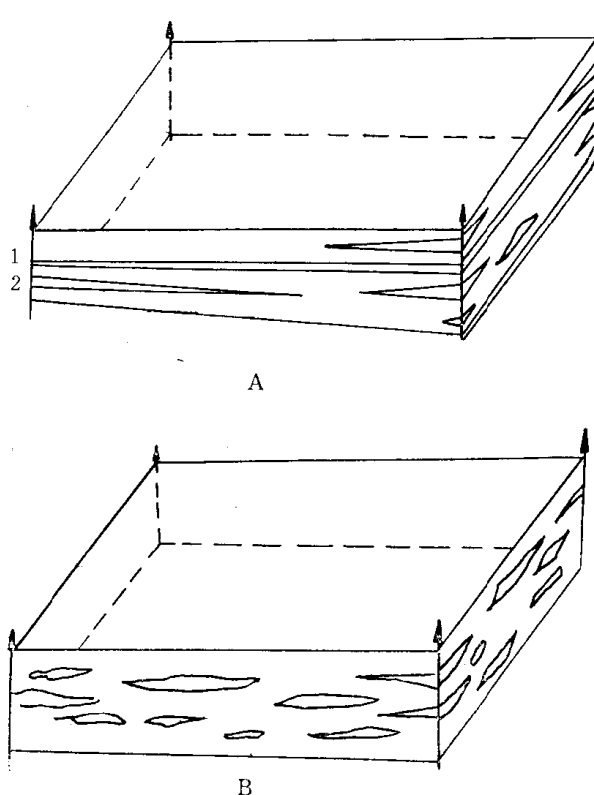


图1-9 厚油层内隔层类型示意图

第三节 孔间非均质

油田中的油气水是储藏在岩石的孔隙和裂缝中, 也是在孔隙和裂缝中流动的。油层中孔

隙有多少，其空间有多大，孔隙直径的大小，油水在这些孔隙中所处的状态，这是我们研究油水运动规律，以至提高油田采收率的基础。孔隙什么样呢？这在扫描电镜下可以看得较清楚，或者用伍德合金或环氧树脂注入岩心，做出的孔隙骨架也能看得清楚(见图1-10)。



图1-10 电镜扫描下的高岭石绿泥石照片(大庆油田岩心)

砂岩油层多有原生孔隙，经过成岩作用和后生作用多少发生了变化。总的说来，压实作用、压溶作用、胶结作用和沉淀作用是使岩石的孔隙变小，而溶解作用则使岩石的孔隙变大。对于碳酸盐岩石，重结晶作用的白岩化作用都有可能使孔隙变大。除此之外，风化侵蚀作用、构造的水平挤压作用、垂直升降作用，也对孔隙和裂缝的形成起了作用。但对于油田开发工作者来说，更关心的是这些变化的总结果，也就是现在油层的孔隙状况及其对油田开发效果的影响。

岩石中孔隙体积（包括裂缝）占总体积的多少，多用孔隙度来表示。可用下式求得：

$$\text{孔隙度} = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{岩石体积}} \times 100\% \quad (1-2)$$

总孔隙体积与总岩石体积之比称做绝对孔隙度或总孔隙度，它包括岩石中所有孔隙、缝隙，不管是连通的还是不连通的统统算在内。在研究油层时，强调的是连通孔隙度，也就是连通的孔隙体积与岩石总体积之比。

不管是总孔隙度还是连通孔隙度，都是一种孔隙大小的累计概念，是大孔隙、小孔隙、裂缝、微孔隙等等的总和，它丝毫不能反映孔隙的复杂情况。为了能较好地讨论孔隙的复杂

性，分下面几部分讨论。

一、孔隙结构的研究方法

当前研究孔隙的方法主要有4种：压汞法(或离心法)、岩石薄片测量、电子显微镜观察研究及注模法。这4种方法各有长短，从不同的侧面反映了孔隙的复杂面貌。

1. 压汞法

用压汞法取得的实验数据，可以绘制压汞曲线。根据这些资料，按公式 p_{Hg} （压汞时的压力） $= \frac{7.5}{r}$ 可以求出孔隙半径（ r ）及不同半径的孔隙所控制的孔隙体积占总连通孔隙体积的百分数。图1-11就是用太133井岩心做出的压汞曲线和孔隙体积关系图。用这方法求出的孔隙半径主要代表了孔隙的喉道半径，也就是孔隙间相互连通部分的最小半径，求出的体积代表不同喉道半径所控制的孔隙空间体积。所以这种方法求出的体积是可靠的。但是，这

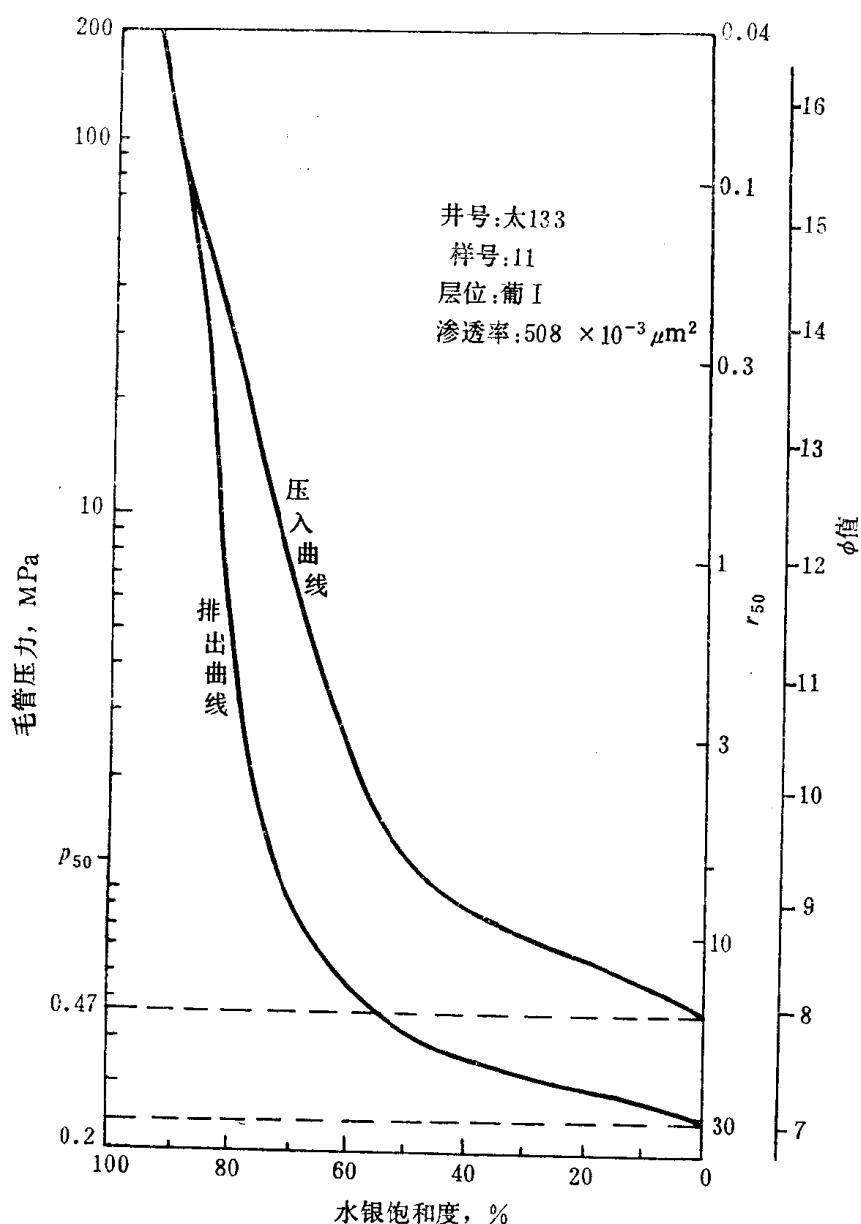


图1-11 毛管压力曲线