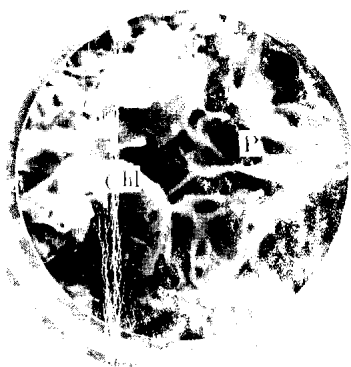




《造山带与盆地》之五

碎屑岩储集层的孔隙结构及其成因与对油气运移的控制作用

邸世祥 祝总祺 等著

西北大学出版社

51953

碎屑岩储集层的孔隙结构 及其成因与对油气运移 的控制作用

THE PORE STRUCTURE OF RESERVOIR IN CLASTIC
ROCKS, ITS ORIGIN AND CONTROL OVER
THE OIL AND GAS MIGRATION

邸世祥 祝总祺 等著

(国家自然科学基金资助项目)

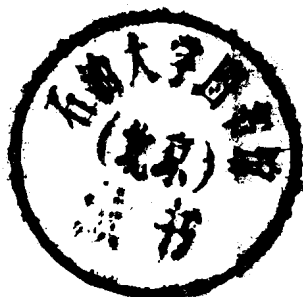
P 618.1302
022



51953



200289222



西北大学出版社

内 容 简 介

本书是对中国各主要含油气盆地碎屑岩储集层孔隙结构研究的部分成果,也是对“中国碎屑岩储集层孔隙结构”专著论点的进一步阐述,内容包括孔隙结构及其成因与对油气运移的控制作用三个方面。在孔隙结构方面,作者们提出了“有用孔隙度”、“最小含油喉道半径”及“储集层的孔隙结构应与储集条件有所不同”等新概念。在成因方面,对本书所涉及盆地储集层的成岩过程归纳为三类,并指出,它们在油气资源评价上有着不同的意义,这部分还提出了“成岩强度”新概念。在对油气运移的控制作用方面,不仅介绍了进行运移研究的光刻模型制作技术,而且从卡断现象出发,提出油气的二次运移是以小油滴或气泡方式进行的观点。全书的三方面紧密结合构成一个整体。本书对从事石油地质及油田开发的教学、科研与生产人员均有重要参考价值。

碎屑岩储集层的孔隙结构 及其成因与对油气运移的控制作用 邸世祥 祝总祺 等著

*

责任编辑 雷援朝
西北大学出版社出版发行
(西安市太白路)

新华书店经销 西安地图出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 1/16开本 11.5印张 字数:281千

1991年1月第1版 1991年1月第1次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-5604-0227-5/P·11 定价:6.00元

目 录

前 言	5458/29	邸世祥 (1)
本书论文综述		邸世祥 (2)
太白地区长二油层组的孔隙结构特征及其对含油气性的控制		
作用		祝总祺 邸世祥 罗铸金 (7)
略论摆宴井断裂构造带延安组油层孔隙结构对高产富集的控		
制作用		祝总祺 (23)
苏北溱潼凹陷下第三系储集层的毛管特性及其对油气聚集的		
控制		祝总祺 (40)
柴达木盆地北缘块断带中生界储集层研究		祝总祺 (51)
前梨园凹陷濮深 4 井下第三系沙河街组沙三段储集层孔隙结构		
特征及其成因		邸世祥 陈景维 卢焕勇 张金功 (66)
柯克亚油气田中新统砂岩储集层孔隙结构及成岩作用特征		邸世祥 (115)
内蒙乌兰格尔地区上古生界砂岩储层的成岩		
作用		卢焕勇 陈景维 邸世祥 (126)
谭庄—沈丘凹陷下白垩统储层的成岩作用		柳益群 卢焕勇 (138)
光刻显微孔隙模型在水驱油及油气二次运移模拟实验中		
的应用		孙 卫 (163)
卡断现象与油气二次运移形式		曲志浩 孙卫 王菁 孔令荣 (169)

CONTENTS

Preface	Di Shixiang	(1)
Summary of the papers in this work	Di Shixiang	(6)
Pore structure characters of Yanchang second oil-bearing group		
Taibai region		
and their control over oil and gasbearing		
formation	Zhu Zongqi Di Shixiang Luo Zhujin	(21)
On the control over high production and rich accumulation of pore structure in the oil		
reservoir of Yanan group Ba Yanjing fault-structure zone	Zu Zhongqi	(39)
Capillary characters of Lower Tertiary reservoirs in Qintong Depression north		
of the province Jiangsu and their control over accumulation of oil		
and gas	Zhu Zongqi	(50)
Reserch of Mesozoic reservoirs in the northern marginal fault—folded		
zone of Chai Damu Basin	Zhu Zongqi	(62)
Structure and its origin of the third member of Shahejie		
formation in Pushem №4 Well of Qian Liyuan		
Depression ...	Di Shixiang Chen Jingwei Lu Huanyong Zhang Jingong	(107)
The characteristics of the pore structure and diagenesis of the		
Miocene sandstone reservoir in Kekeya		
Oil-Gasfield	Di Shixiang	(123)
Diagenesis of the Upper Palaeozoic sandstones in Wulanger region Inner		
Mongolia	Lu Huanyong Chen Jingwei Di Shixiang	(134)
Diagenesis of the Lower Cretaceous in the Tanzhuang-Shenqiu		
region	Liu Yiqun Lu Huanyong	(159)
Application of Photoetched Micromode in study of displacing process		
of oil by water and secondary hydrocarbon migration		
in pores media	Sun Wei	(168)
Snap-off phenomena and the mechanism of secondary migration of		
hydrocarbons	Qu Zhihao Sun Wei Wang Jing Kong Lingrong	(179)

前 言

本书是我们承担的国家自然科学基金资助项目“中国碎屑岩储集层的孔隙结构、成岩作用与油气运移”的成果之二。由于经费有限，在完成任务中，不得不采取围绕该课题方向，大家分头与生产单位进行协作去完成有关任务的办法。本书所收论文及曾经发表过的一些论文，都是在这种方式下完成的。因此，这些成果实际都是国家基金委员会与各有关生产单位共同对我们资助的结果。

本书的内容包括三个方面：孔隙结构本身，沉积与成岩作用，即孔隙结构成因，以及孔隙结构对油气运移的控制作用。

本书得以出版，首先是由于得到了国家自然科学基金的资助及原石油部有关油田及地矿部第三石油普查大队与江苏石油地质大队的协作和多方面的帮助。在工作过程中，西北大学科研处、实验中心及地质系有关同志也协助我们解决了许多具体困难，为我们完成了部分测试任务及其它有关工作，图件全由刘仰枢、骆正乾及郭旗同志清绘。在此特向上述单位和所有帮助过我们的同志们表示衷心的感谢。

本书是所有作者与参加研究工作的同志们的共同成果，由邸世祥主编。我们期待它的出版能对教学、科研和生产工作有所帮助，也恳切希望读者能对书中不足，甚至错误之处提出批评指正。

邸世祥 一九九〇年六月十七日

PREFACE

This book is the other one achievement of the scientific research item "The Pore Structure, Diagenesis and Oil-Gas Migration of Reservoir in Clastic Rocks of China" supported financially by The National Natural Scientific Fund. It consists of three parts: the pore structure of reservoir in clastic rocks, its origin and control over the oil-gas migration.

It is a joint fruit of all the authors and the persons included in this item. This book is edited by Di Shixiang.

We would like to give our best thank firstly to the Committee of the National Natural Scientific Fund for the supporting financially. The heartfelt thanks are due to the 3rd Petroleum Prospecting and exploration Brigade of Ministry of Geology and Mineral Resources, the Petroleum Geology Brigade of Jiangsu Province and many oil fields of China for their helping and cooperating. We would give our warm appreciation to some departments and colleagues in Northwest University, especially Liu Yangshu, Luo Zhengqian and Guo Qi for their drawing all the figures and other helpings.

Di Shixiang 1990. 6. 17

本书论文综述

邸世祥

储集层的孔隙结构不仅影响着油气的运移和聚集，而且也决定着对聚集起来的油气如何合理的进行开发。因此，它历来都是油气勘探与开发工作者们都非常关心的问题，也是有关教学和研究人員十分感兴趣的研究课题。

围绕着这一问题，本书收入了三方面内容的部分成果，即专门论述储集层孔隙结构本身的4篇，兼论这方面内容的2篇；专门论述孔隙结构成因的2篇，兼论的2篇；另外2篇都是论述孔隙结构对油气运移的控制作用的。

在论述储集层孔隙结构的文章中，普遍涉及到的第一个问题就是孔隙类型的划分问题。正如我们在“中国碎屑岩储集层的孔隙结构”一书中指出的，不同学者对孔隙类型有不同的划分方法，概括起来有三种观点，即一种是以成因作为分类的原则，如 V. Schmidt 等就是依据这个原则划分的。以此，他们把孔隙分为原生、次生和混合成因三大类，进一步又分为若干小类；另一种是以孔隙大小为分类原则的，如一般石油地质学教科书上分出的超毛管孔隙（孔隙直径 $> 500\mu\text{m}$ ）、毛管孔隙（孔隙直径 $500-0.2\mu\text{m}$ ）与微毛管孔隙（孔隙直径 $< 0.2\mu\text{m}$ ）等；第三种是既考虑成因，又考虑大小的分类，E. D. 皮特曼把孔隙分为粒间孔、溶蚀孔、微孔及裂缝孔等4类就出于这一原则。本书中的孔隙分类，由于作者们的观点不同，完成论文的早晚有别，在具体划分上各文章并不完全相同，但最后趋向一致的意见是，在“东濮拗陷前梨园凹陷濮深4井下第三系沙河街组沙三段储集层孔隙结构特征及其成因”一文中由邸世祥提出的划分方案。此方案也已在“中国碎屑岩储集层的孔隙结构”一书中引用。它的划分原则是以孔隙产状为主，并考虑溶蚀作用的方案。根据孔隙产状把孔隙分成粒间、粒内、填隙物内及裂缝四种基本类型孔隙，考虑溶蚀作用，又相应地分出溶蚀粒间、溶蚀粒内、溶蚀填隙物内及溶蚀裂缝四种溶蚀类型孔隙。实践证明，这种方案不仅在划分原则上有很大突破，而且在生产、科研工作中对识别孔隙类型及进行储集层评价都有重要作用。

孔隙结构是指孔隙与喉道的组合，即储集层孔隙发育的总貌。实践证明，碎屑岩储集层孔隙结构的好坏，一般在岩性、孔渗性、铸体与电镜所观察的孔隙状况，以及压汞实验资料等许多方面都不同程度有所反映，而其本身状况又决定着流体由其中产出的情况。因此，在对储集层孔隙结构好坏级别进行划分时，应该考虑上述诸方面因素。本书“新疆柯克亚油气田中新统砂岩储集层孔隙结构及成岩作用特征”一文中由邸世祥提出的划分意见及主要标志就遵从了这一原则。在“中国碎屑岩储集层的孔隙结构”专著中，我们曾以上述划分意见将我国各含油气盆地主要碎屑岩储集层的孔隙结构进行了归属，并在此基础上总结出了不同级别不同类型储集层孔隙结构的一般规律和特殊之处。无疑，这些对教学、科研和生产工作都将会有一定指导意义。

在孔隙结构本身这部分中，本书还提出了一些新概念，它们不仅在理论上有所创新，而且证实对生产有比较明显地促进作用。

第一个新概念是“有用孔隙体积”、“有用孔隙度”。它是“陕北太白油田延长统第四段长2油层组的孔隙结构特征及其含油性的控制作用”一文的作者首次提出的。这一概念是建立在吸附水膜厚度为 $0.1\mu\text{m}$ 的前人研究成果基础之上的。由此得出：只有被半径 $>0.1\mu\text{m}$ 喉道所连通的孔隙体积，对聚集石油才是有效的。而所谓的煤油法有效孔隙体积，不仅包含这部分，而且也包含被半径 $<0.1\mu\text{m}$ 喉道所连通的孔隙体积，而后者油是无法进入的。因此，煤油法测出的孔隙体积实际并非全有效。为了使二者有所区分，故提出把真正有效的那部分孔隙体积称为“有用孔隙体积”。这部分体积占岩石总体积的百分数称“有用孔隙度” ($m_{1070}\%$)。显然，它比煤油法孔隙度要小。“有用孔隙度”的具体求法是先从压汞曲线上找到增加至 7.0 MPa 压力时的累积汞饱和度 ($S_{1070}\%$)，即相当于与半径 $>0.1070\mu\text{m}$ 喉道相连接的孔隙体积占总孔隙体积的百分数，再乘以煤油法孔隙度，就可近似地求得。根据大量实际资料，作者还绘制了 $m_{1070}\%$ 与 $K_{\text{空}}$ 及 $S_{1070}\%$ 与 $K_{\text{空}}$ 的关系曲线。据此，在无压汞资料的情况下，也可以根据常规孔、渗资料求得“有用孔隙度” ($m_{1070}\%$) 和 $S_{1070}\%$ 。

实践证明：用“有用孔隙度”的大小进行储集层评价更符合客观规律，对生产具有更大的指导作用。如本书四篇专论孔隙结构本身的文章都涉及到了这个概念，以其所进行的评价或所探讨的对油气的控制作用都基本符合实际。

“太白”一文在介绍“有效孔隙度” ($m_{1070}\%$) 时，还提到在评价中若能同时考虑“含油饱和度” ($S_{\text{油}}\%$ —油占总孔隙体积的百分数或 $S_{1070}^{\text{油}}\%$ —油占有用孔隙体积的百分数)，则将会使评价更有把握些。作者对太白油田有利地区的预测，主要就是根据 $m_{1070}\%$ 及 $S_{1070}^{\text{油}}\%$ 所得出的。该论文在论述“含油饱和度”这一问题时，还介绍了他们根据推导的 $H(m) = .2617P_c$ (MPa) 及 $P_c = f(s)$ 二式，首次绘制的 $H-f(s)$ 关系曲线。很显然，在无实测含油饱和度资料时，亦可根据该关系曲线近似地求出自由水面之上任一高度 (H) 样品的 $S_{\text{油}}\%$ 或 $S_{1070}^{\text{油}}\%$ 。无疑，这个数值的求得，对生产工作有重要参考价值。

第二个新概念是“最小含油喉道半径”，这一概念是本书作者之一曲志浩最早提出的，祝总祺在探讨“苏北溱潼凹陷下第三系储集层的毛管特征及其对油气聚集的控制”时，进一步阐明了它的广泛用途。首先他把它用于判断油气运移时期。这方面祝主要是根据计算的最大封存油柱高度与实际构造闭合度相比，在得知前者远远大于后者的情况下，按理构造应装满油，即油藏高度应等于构造闭合度，但实际油藏中的油柱高度反而大大小于构造闭合度，这就不得不使人们从油源的丰富程度及运移时间长短去考虑。经过认真分析有关资料后，发现主要是下伏生油层阜宁组四段进入成油深度的时期较晚，运移时间短，只有25000年所致。其次，祝还将它用于油气最富集区的评价。这方面他是根据工作区各地现有油藏高度，计算了它们各自的最小含油喉道半径，进而以此又计算了它们的有效孔隙体积占总孔隙体积的百分数与含油孔隙度（有效孔隙体积占总孔隙体积的百分数×煤油法孔隙度）。评价工作就是把各处所求得的含油孔隙度进行仔细的对比研究。在研究区经过这样对比后发现，草舍—储家楼一线，向北延伸到史家堡是高有效孔隙体积区和高含油孔隙

度区，因而，也是本区油气最富集的地区，这与事实完全相符。

第三个新概念是储集层孔隙结构的好坏，与储集条件的好坏应有所不同。在“前梨园凹陷濮深4井下第三系沙河街组沙三段储集层孔隙结构及其成因”一文中，邸世祥对此种观点进行了比较清楚地论述。他认为，前者是就储集层孔隙结构本身的好坏而言，而后者除考虑孔隙结构外，还必须考虑其中通过流体的性质、该储集层在整个盆地中所处的位置，以及其与生油层之间相互配合的关系等。孔隙结构好，又有其他条件的有利配合，储集条件肯定很好。孔隙结构条件比较差，而其他条件配合得很好时，也仍会有比较好的储集条件。也就是说储集层孔隙结构只是评价储集条件的一个很重要的方面，但并不是唯一的方面。因此，从储集条件出发，若其他条件配合的都很好，则对储集层孔隙结构的要求，可以降低一些。以此衡量濮深4井及其周围的沙三段储集层，虽然其孔隙结构比较差，但它处在生油生气的凹陷之中，生、储油层间互存在，孔隙结构状况对储油不利，但对储气还是可以的，本区深部气源充足，地层又普遍具有异常高压，故认为对储气来说其储集条件还是可以的，完全有找到气藏的可能性。

在孔隙结构本身这一部分中，还有不少与生产直接挂钩的论述，如在“略论摆宴井断裂构造带延安组油层孔隙结构对高产富集的控制作用”一文中，作者祝总祺从压裂效果角度把孔隙结构分成三类：第一类为孔隙大，喉道偏粗—偏细，歪度稍粗—偏细，但可用孔隙体积百分含量($S_{1070}\%$)比较高($70\% \pm$)类型。此类一般初产量不高，但压裂后产量成倍增长。第二类为大孔隙，粗喉道， $S_{1070}\%$ 高的类型，或孔隙小，喉道细， $S_{1070}\%$ 具一定数量但并不太高的类型。这两种都属压裂后有一定效果，但产量增长幅度不大。第三类为孔隙小、喉道细、 $S_{1070}\%$ 低的类型。特点是不仅初产量很低，而且压裂效果也很差。显然，对油田开发来说第一类孔隙结构的储集层最好，第三类的最差。

实践证明，储集层孔隙结构的好坏，与沉积和成岩作用均有关系。本书所收有关沉积作用方面的论文比较少，从仅有的论述中，已清楚地看出，它主要影响着储集层原生孔隙的发育程度及之后成岩作用的速度与方向。文章所揭示的规律是，在砂岩发育的相带，特别是当其沉积物的成分成熟度与结构成熟度都比较高时，一般原生孔隙都比较发育。此种储集层的成岩方向大都是演化速度较慢，所经受的成岩现象比较单一，其中溶蚀作用相对比较发育。目前储集层的孔隙结构也要好一些。本书所提到的柯克亚油气田中新统储集层及摆宴井侏罗系延安组储集层就属此类。如果一个地区受沉积环境影响而沉积了一套成分与结构成熟度均低的储集层，则其不仅不发育原生孔隙，而且成岩演化速度快，经历的成岩作用复杂，特别是各种各样的充填交代都可能发生，而溶蚀作用一般却比较弱，致使其成岩后所具有的孔隙结构一般都比较差。本书柳益群等所论述的谭庄—沈丘凹陷下白垩统储集层就属此类。由此可以看出，沉积环境与沉积相（包括岩石成分与结构）的研究，对寻找孔隙结构较好的储集层段和地区仍是十分必要的。在有利的沉积环境找到了好的储集相带，在其中才有可能找到孔隙结构好的储集层。沉积环境不好，又无好的砂岩相带发育，一般是很难找到孔隙结构好的储集层的。

本书关于成岩作用的论文相对稍多，这些论文的共同特点是，都用大量详实的材料论证了各种成岩现象，在此基础上，得出了有关成岩演化的规律，其中也包括有机质的成熟

史与孔隙的演化史。把这些与研究区的地质构造发育史等相结合，无疑会更有利于油气资源的评价工作。

从收入文章的论述来看，所涉及盆地的成岩演化史大致有以下三类：

第一类，其储集层岩石的成分成熟度比较高，杂基含量比较少，属快速沉积，早期被钙质充填，压实不厉害，颗粒成支架状，溶蚀作用明显，后期自生矿物的充填也不厉害，孔隙结构比较好，柯克亚油气田中新统储集层就属此类。

第二类，其储集层岩石成分与结构成熟度都低，岩屑含量高，且主要为火山岩屑，粘土质杂基含量也比较高，成岩速度快，成岩现象十分复杂，在成岩过程中不断发生的主要是使孔隙不断减小的作用，特别是早期的机械压实使原生孔隙减小的十分明显，这就导致在中成岩早期流体在其中的渗流就比较困难，加之后来的不断充填，流体在其中的渗流就越来越困难，直到处于停滞状况，在这种条件下，当然不可能有产生大量溶蚀的机会，只是偶而或局部地段才产生少量溶蚀孔隙，但它们也大都后期自生矿物再次充填，因此这类储集层的孔隙结构是非常差的，甚至连细小的填隙物内孔隙也不多，谭庄-沈丘凹陷下白垩统储集层即属此类。

第三类，其储集层岩性介于上述二者之间，主要为长石砂岩类，成岩速度一般，压实与各种充填胶结也比较厉害，但填隙物内孔隙，特别是高岭石填隙物内孔隙还比较发育，也有一定数量的溶蚀类型孔隙。这类储集层的典型例子如本书祝总祺等与卢焕勇等所论述的陕甘宁的上三迭系延长统及上古生界储集层。

上述三类中，显然第一类成岩演化储集层的孔隙结构比较好，其次是第三类的，而第二类的是最差的。

值得注意的是，在“前梨园凹陷濮深4井下第三系沙河街组沙三段储集层孔隙结构及其成因”一文中，作者首次提出了“成岩强度”的概念。它是建立在孔隙的保存主要应与埋深（H，反映受压的大小和时间的长短）和填隙物含量（V，反映溶蚀和充填共同作用的最终结果）两者有关的认识基础之上。由此得出了成岩强度 $S = V \cdot H$ 这一方程。按理S越大，目前保留的孔隙应该越少。在具体判断成岩强度时，作者指出，应先求出剖面上所有样品填隙物含量的平均值，以此乘每个样品所处的深度，便求出每个样品的趋势成岩强度。接着用每个样品的趋势成岩强度值与对应样品的实际填隙物含量 $\times$ 埋深所求的实际成岩强度逐一进行对比，若二者之差越大，则反映成岩强度越强，反之越弱。用上述概念对濮深4井所取样品进行计算后发现，孔隙结构相对好一些的沙三¹中下部与沙三²中部的成岩强度相对就要弱一些。说明这一概念在理论和实践上都是行得通的，因而是有重要意义的。

储集层的孔隙结构对油气的控制作用表现在好多方面，正如曲志浩在“石油地质学进展”教材中所写的，对油气运移、对油水分布、对残余水饱和度等都有明显的控制作用。本书第三部分曲志浩等与孙卫所写的两篇论文仅介绍了用模拟实验方法研究孔隙结构对油气运移控制的部分内容。第一篇讲述一种研究油气运移的新型显微孔隙结构模型的制作技术与实验方法。该模型是采用先进的光刻技术制作的。它可以将不同油田储集岩镜下观察到的孔隙结构真实的复制下来。这一模型为直接观察不同孔隙结构储集层中油气运移等过

程提供了方便,且使实验数据更接近真实。从目前获得的国内外资料来看,该模型所复制出的喉道半径已可以 $<10\mu\text{m}$,接近我国碎屑岩储集层的平均喉道半径($5\mu\text{m}\pm$),国外的一般才达到 $100\sim400\mu\text{m}$ 。因此,此模型的质量已达到和超过目前国内外的先进水平。

在另一篇论文中,作者使用此种模型,研究了油气在二次运移中的卡断现象。大量实验数据说明,卡断现象不仅是在采油过程中发生,而且也是在运移中普遍发生的现象,快速流动中可以发生,在慢速渗流中,特别是在小喉道处更容易发生。这与国外一些学者的研究是不一致的。从这一点出发,同时考虑到目前输导层中无任何残余油的事实,作者认为油气在二次运移中的相态,很大可能主要是以微小油滴或气泡的形式进行,而不是目前多数学者所主张的,以连续油相进行运移。而圈闭中油气的聚集,很可能像 R. J. Cordell (1977) 所主张的是通过毛细管过滤或半渗透膜效应逐步聚集起来的。

由上述两篇论著的论述看出:储集层孔隙结构对油气运移确有控制作用。但此问题的最终解决尚需进行大量研究工作。我们的成果在一些方面虽然突破了国内外现有水平,但研究工作并未终止,并将继续更深入地进行下去。

SUMMARY OF THE PAPERS IN THIS WORK

Di Shixiang

ABSTRACT

The present paper summarizes the main achievements of ten academic theses which have been collected in this book. There are three parts of the content: the pore structure of the clastic reservoir; the origin of the pore structure and the control of pore structure over the oil-gas migration.

In the first part, the authors have established the new styles of pore, the grade of pore structure and its subdivision Schedule; proposed the new conception of "useful porosity" and the method of its calculation; discussed the significant of "the smallest radius of the oil-bearing throat" and pointed out that "the pore structure of reservoir" and "the reserve condition of reservoir" should be distinguished.

In the second part, the authors have described with the example that the pore structure was controlled by the sedimentary facies and diagenesis; concluded that there are three kinds of diagenetic process: the pore structure of reservoir in the 1st one kind is the best; the medium, in the 2nd one; the worse, in the 3rd style.

In the third part, the authors have introduced the producing technics of making a new type of photoetched micromodel. Then, they also pointed out that the main form of the secondary oil-gas migration is by the movement of the oil droplets or gas bubbles. And the oil collection were accured by capollary percolation or semipermeable partition effect.

太白地区长二油层组的孔隙结构特征及其对含油气性的控制作用

祝总祺 邸世祥 罗铸金

太白地区直罗油田位于陕北葫芦河上游直罗镇以西。大地构造位置处于盆地东部斜坡带上。地表中生代地层向西区域性的缓缓倾斜。占井揭露的浅部地层表明：这里有一个东北-西南向的大型鼻状隆起通过，其上发育着一些次一级的局部高点和鼻褶。隆起在东北方向上展布很长（可达30km以上），在直罗油田的西南方很快倾没。研究区恰好在鼻状隆起的最高点。

本区已证实具有七个油层组，其中以延长统第四段的长二油层组最为稳定，含油情况也最好，为目前直罗油田的主力油层。

长二油层组为一套以细粒为主的硬砂质长石砂岩、长石砂岩及含钙质的硬砂质长石砂岩所组成的块状砂岩，分布广，厚度相对稳定。在本区内，砂层厚度一般变动在11.3—32.3m。油层物性也较延长统其它油层为好，孔隙度一般18—20%；渗透率几个— $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。区域勘探资料表明：长二油层组在本区为一东西向的略向南突出的新月形砂岩体。油藏内流体有一定的分异作用，油水界面在海拔425m—437m，呈一东高西低的斜面。但钻探的结果表明，本区绝大部分的生产井，无论它处于什么部位，一般均为油水同出，无水油井几乎没有，而且初产量很低，压裂以后，产量明显增加。为了弄清控制长二油层组内流体分布的主要因素，预测本区的勘探远景，1974年曾在红6井周围占井7口作为试验区（太₁、太₂、太₃、太₆、太₇、太₈、太₉）（见图1），本文就是在对该七口井364块样品作了铸体薄片和压汞试验的基础上提出来的。

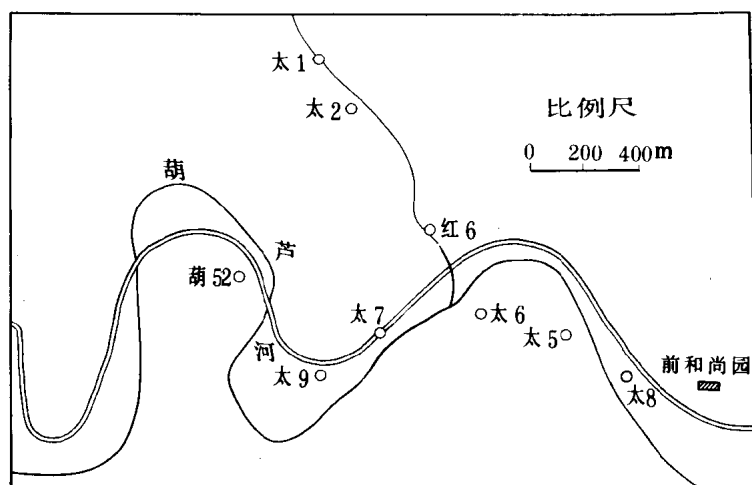


图1 太白地区压裂试验井组井位图

一. 长二油层组孔隙结构的一般特征

从试验所得的资料可以清楚地看出, 本区长二油层组的孔隙结构具有以下特征:

(1) 它们是由三种孔隙类型结合而成的复杂孔隙系统。

长二油层组具有三种孔隙类型: 粒间孔隙、胶结物孔隙和层间孔隙。

粒间孔隙是指岩石颗粒之间未被胶结物充填的孔隙。它们是孔隙系统中的主体, 其大小及数量直接控制着油层的储集性能。

胶结物孔隙指胶结物内所拥有的孔隙。从铸体薄片中所见, 它们主要与高岭石或方解石胶结物相伴随。这类孔隙个体细小, 常成团块状包含在粒间孔隙之中, 对粒间孔隙起着分割、堵塞的不良作用。

层间孔隙是指片状矿物解理之间或它们与颗粒接触面上的孔隙。常为线状及片状, 孔隙宽度不大, 但延伸较长。它们在孔隙系统中主要起连接作用, 可视为连通孔隙的一个组成部分。

(2) 长二油层组内的孔隙以分散的小孔隙为主。这可以从我们作的孔隙截距频率直方图上清楚地看出 (图 2); 峰位均在 $< 5.5\mu\text{m}$ 的位置上, 峰值普遍较高, 一般均在 60% 以上, 只有个别样品低于 50%, 平均截距 ($\bar{l}$) 一般小于 $10\mu\text{m}$, 最大的 $\bar{l}$ 为 $16.42\mu\text{m}$ (太, -112), 最小的仅 $2.25\mu\text{m}$ (太, -51) 最大孔隙截距 (l_{max}) 很少超过 $150\mu\text{m}$ 的; 大于 $55\mu\text{m}$ 的频率百分数不高 (一般小于 3%), 但是孔隙截距密度却很高, 通常在 100 个 / cm 以上。由此可见, 孔隙的分散性是相当严重的。这种孔隙的分散性无疑地对油气在内部的分布产生严重的影响。

(3) 长二油层组内的喉道一般偏粗, 但分选不好。从压汞曲线上可以看出: 它们的驱压力 (P_g) 是不高的, 但是没有很大的平台, 毛细管压力曲线为接近 45° 的直线。从喉道频率直方图上, 一般都包含有 $7.5-0.03\mu\text{m}$ 之间的各级喉道, 而且峰位一般靠近左侧亦证明了这一点。

(4) 对比铸体薄片资料与压汞试验数据发现: 一般孔隙大者, 喉道相应亦粗, 反之, 喉道相对也小。但是也有少数样品喉道较粗, 而孔隙却较细, 如太, -173 样所代表的就属于这种类型。

(5) 根据对本区 210 多块样品岩矿资料的统计表明, 总的趋势是随着粒度的增大, 孔隙结构变好, 但这一趋势往往受到成岩后生作用的影响, 当胶结物含量增多, 特别是钙质出现或颗粒次生加大时, 任何类型砂岩的孔隙结构都变的很坏。

总之, 太白地区的长二油层组乃是一套由三种不同类型的孔隙交织而成的复杂孔隙系统, 其特征以分散的小孔隙为主, 喉道偏粗但分选不好。孔隙结构的好坏受岩石结构构造及后生作用的不同而有差异。

二. “有用孔隙体积”及含油饱和度的确定

在常规情况下, 评定储集层的储集能力时都是用煤油法孔隙度。但是, 大家知道, 储

层中的孔隙是一粗细不等、大小不一的复杂的网状系统，当油层中有油和水两相共存时，毛细管现象是不可忽视的。根据毛细现象的拉普拉斯公式，石油通过的孔隙愈小，毛细阻力愈大。因此，石油总是占据较大孔隙或孔隙中央部位，而水则占据较小孔隙或孔隙的狭窄部分，即使在大孔隙中，石油也不能占有所有的空间，因为在矿物颗粒表面上总保留着

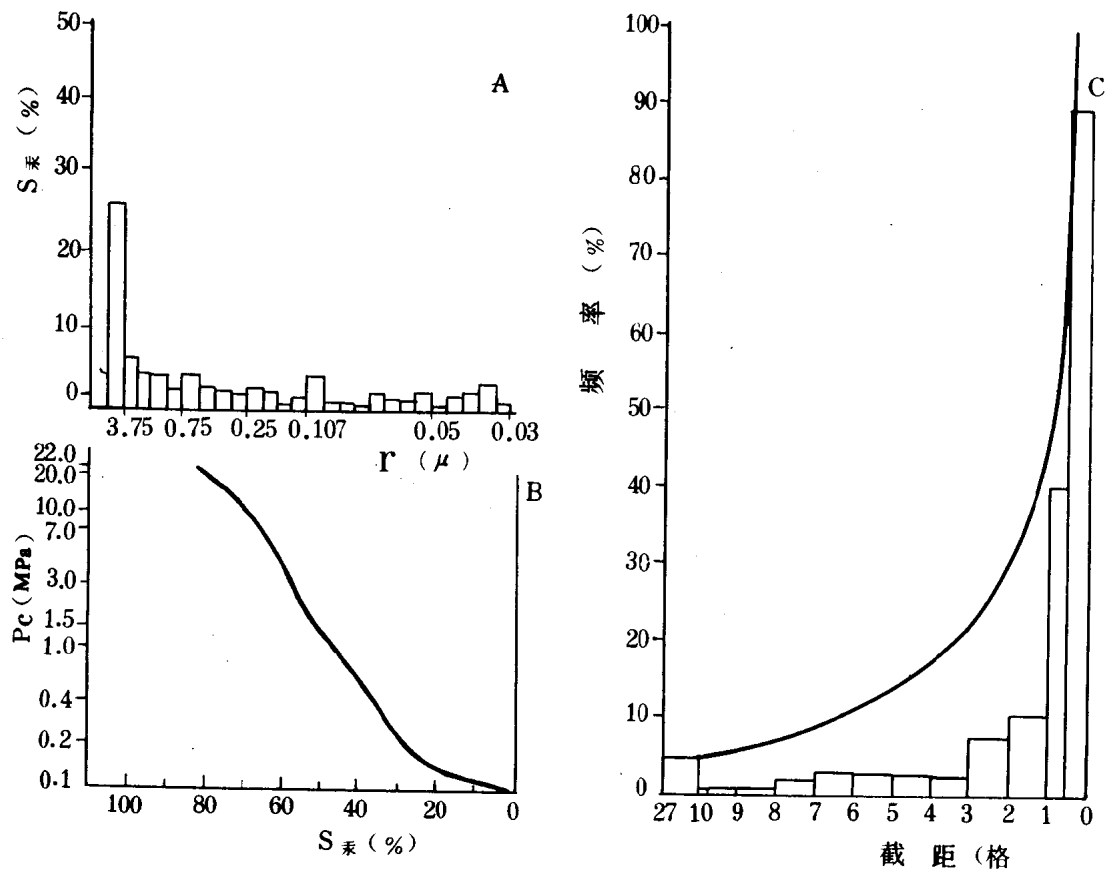


图2 太2-40孔隙结构图

A. 喉道半径频率直方图; B. 毛管压力曲线; C. 孔隙截距频率直方图和累积曲线;

$$K_{\text{空}} = 8.86 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \quad m_{\text{煤}} = 18.65\% \quad P_d = 0.102 \text{MPa}$$

$$m_{1070} = 12.13\% \quad \bar{l} = 11.03 \mu\text{m} \quad m_{\text{水}} = 11.71\% \quad M = 106.15 \text{个/cm}$$

一部分吸附水，这种吸附水就是在极大的压差下也是难以流动的。然而，煤油法孔隙度对上述特点是未加考虑的，它将岩样烘干后，在真空下饱和煤油测定的，经过这样处理，煤油能够润湿矿物表面，能渗入比其分子略大的孔隙。据前人研究，这种孔隙的最小孔径，要比吸附水的薄膜厚度约小一个数量级。显然，用煤油法测得的孔隙度不能代表原油可能占有的真正的空间。这种情况在孔隙细小的储集岩中尤为严重。因此，在评价储层的储集能力时必须把不能为油所占据的那部分孔隙从总孔隙中扣除，这里的关键问题是如何合理的确定这个界限。

根据 E. S. 米赛尔和 W.V. 安琪哈尔特的研究, 吸附水膜的厚度一般可达 $0.1\mu\text{m}$ (有时可以变厚)。这就意味着, 在自然条件下, 水膜可以把半径 $\leq 0.1\mu\text{m}$ 的管道全部堵死, 致使石油无法进入。马丁·雷克曼也曾明确宣称: 应当把半径 $< 0.1\mu\text{m}$ 的孔隙当成岩石固体部分看待。因此, 我们建议用扬弃了半径 $< 0.1\mu\text{m}$ 的孔隙之后, 其余的半径大于 $0.1\mu\text{m}$ 之孔隙空间代表石油能够进入的孔隙空间, 并把这部分空间体积称为“有用孔隙体积”, 相应的孔隙度称为“有用孔隙度”。

有用孔隙度的测定, 可以依靠压汞资料直接求得。当压力增加到 7 MPa 时的累积汞饱和度是相当于与喉道半径为 $\geq 0.1070\mu\text{m}$ 相连接的孔隙体积占总孔隙体积的百分数 ($s_{1070}\%$), 而它占岩样体积的百分数就可以近似地等于有用孔隙度 ($m_{1070}\%$)。问题在于没有压汞资料的样品如何能求得这个参数。

工作表明, 空气渗透率与有用孔隙度 ($m_{1070}\%$) 之间有一定的相关性 (图 3)。因此, 只要我们有常规的孔、渗数据, 就可以通过查图找出 $m_{1070}\%$ 。图 4 是分别对不同级别煤油法孔隙度样品所作的空气渗透率 ($k_{\text{空}}$) 与 $s_{1070}\%$ 的一组关系曲线。同理, 可以在此图上查到 $s_{1070}\%$, 以此再乘以煤油法孔隙度, 也可求得 $m_{1070}\%$ 。

下表列举了煤油法孔隙度近似的三个样品, 来进一步说明有用孔隙度的实用意义。

样 号	$M_{\text{煤}}\%$	$K_{\text{空}} \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	$s_{1070}\%$	$m_{1070}\%$
7-102	19.42	22.1	72.5	14.08
8-76	19.42	4.24	66.69	12.95
7-95	19.40	1.13	53.71	10.42

由此可见, 这三个样品的煤油法孔隙度均为 19.4% 左右, 依据这个参数评价储集能力似乎应当是一样的。但是, 当我们考虑了孔隙结构, 扬弃了那些对储存石油意义不大, 甚至根本没有作用的小孔隙, 此时它们的有用孔隙度就有较大的差别了。从这三个样品的渗透率来看, 它们的储集能力应当是有差别的, 然而这种差别在煤油法孔隙度中却没有得到应有的反映。由此可见, 有用孔隙度要比煤油法孔隙度在反映储层性能方面更有效。

但是在进行油层评价时, 仅仅依据有用孔隙度还是不够的, 还必须确切地掌握油层的含油饱和度。为了要获得真实的含油饱和度资料, 占井工艺需采取一些措施, 这样就会导致占井费用的增加, 经过占井液的浸泡和冲刷后求得的含油饱和度, 乃是残余油饱和度, 不足以代表油层的本来面目, 而本区这方面的资料正是这样的一批数据。

国外在应用毛管压力曲线资料计算储层中流体的方面取得一定的进展。马丁-雷克曼也指出“应用毛管压力资料来确定饱和度对低渗透性油藏具有特殊的意义”, 特别是在油水界面已经查明的情况下, 而后一个条件, 在本区通过战斗在生产第一线的同志们的多年工作已初步得到解决。因此, 我们试图用压汞资料对本区的含油饱和度作一番探讨。

毛管压力曲线告诉我们, 样品的毛管压力与水银饱和度成函数关系

$$P_c = f(s) \quad (1)$$

当在自由水面以上 H 高度的一个单元体积处于平衡状态时, 该处的毛管压力可表述

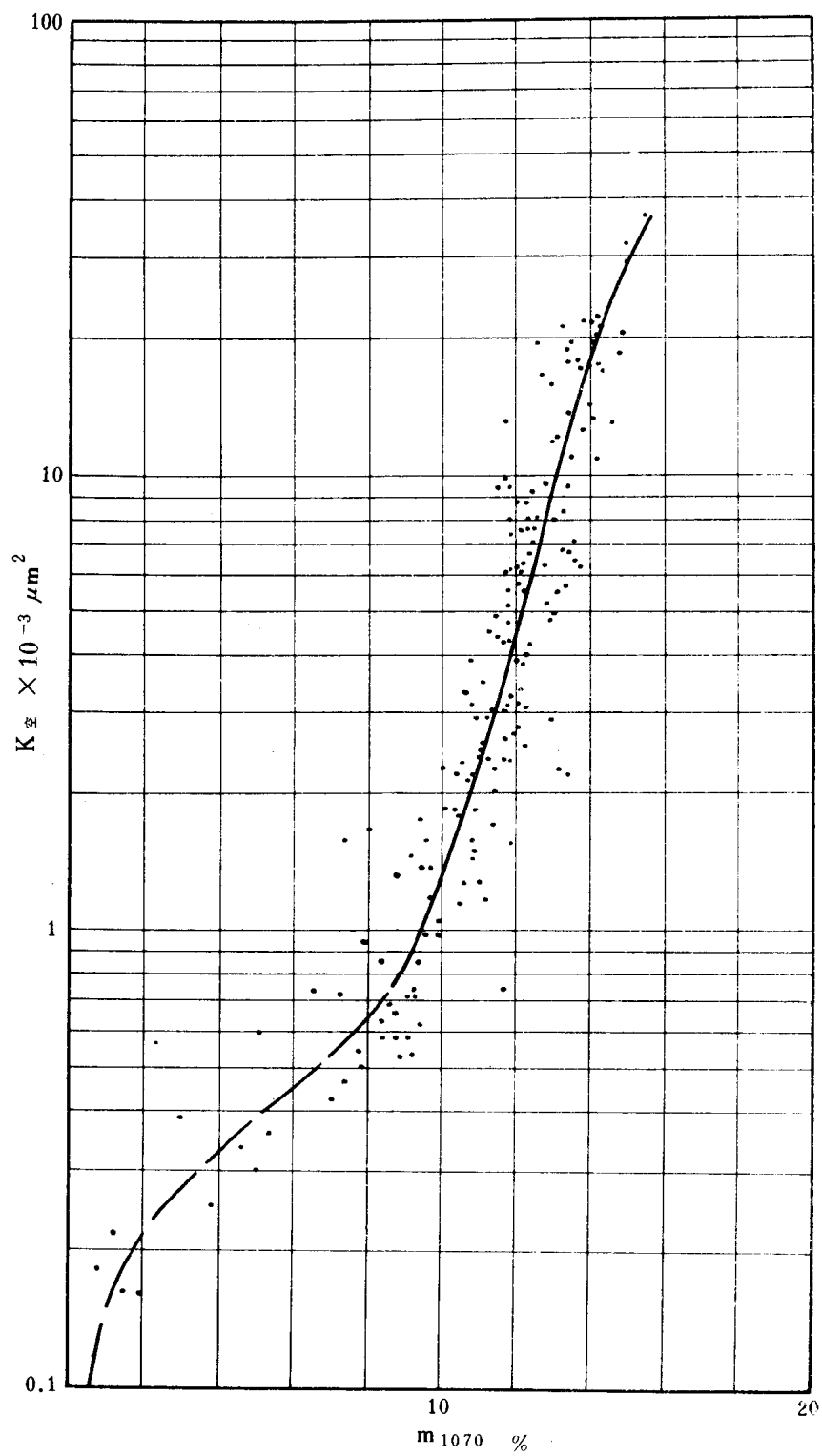


图 3 K 、 m_{1070} 关系曲线

为:

$$Pc(\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{油}})gH \tag{2}$$

所以，流体饱和度是自由水面以上高度 (H) 的函数:

$$H = f(s) / (\rho_{\text{水}} - \rho_0)g \tag{3}$$

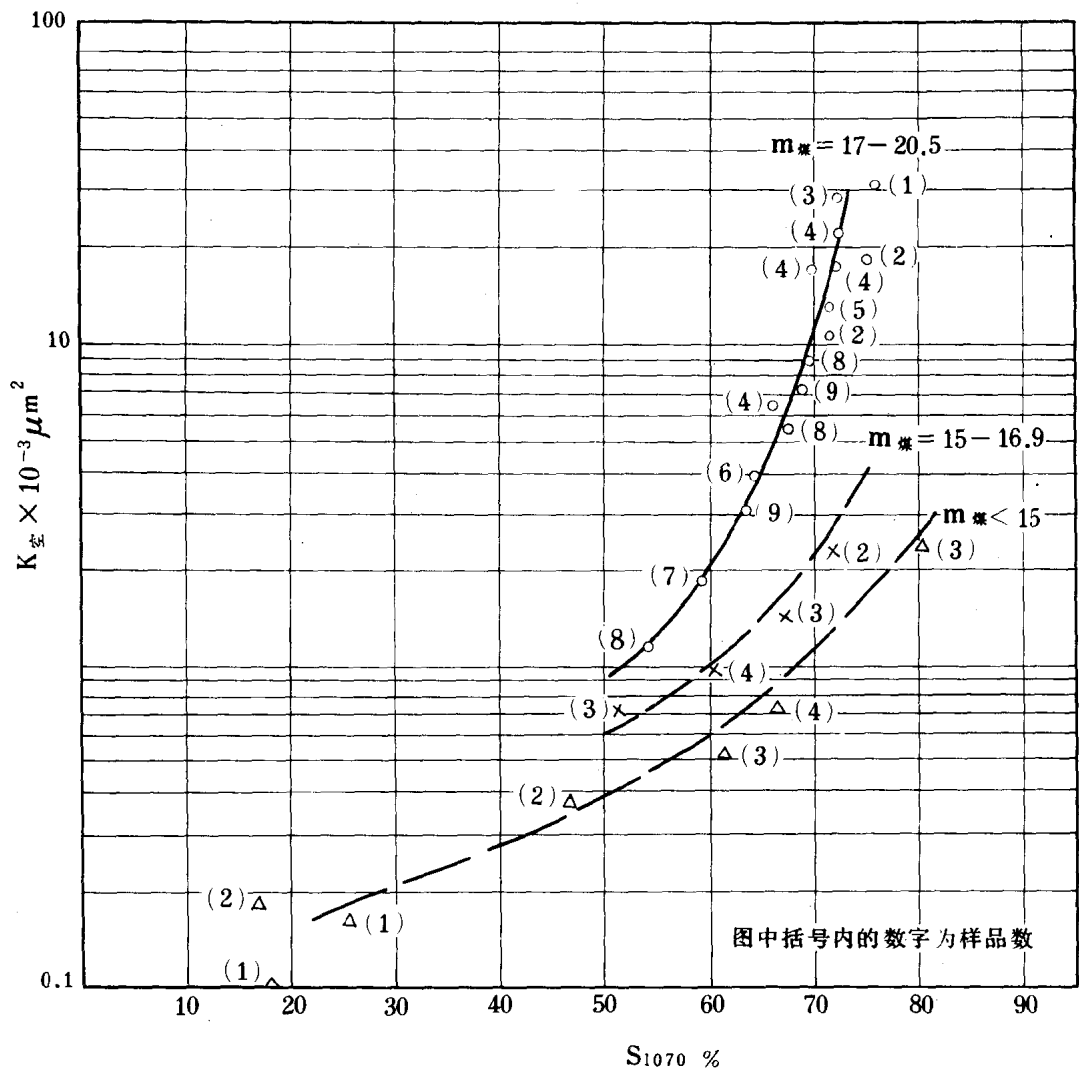


图 4 不同 $m_{\text{煤}}$ 的 $K_{\text{空}}-s_{1070}\%$ 关系曲线

在应用这个方法研究饱和度时，必须先把压汞法的毛管压力 P_c 换算成油藏情况下的毛管压力，当汞的表面张力为 $480 \times 10^{-5} \text{N/cm}$ ，接触角为 140° ，油的表面张力为 $30 \times 10^{-5} \text{N/cm}$ ，接触角为 30° 时，油藏内的毛管压力 ($P_{c_{\text{油}}}$) 就等于 $0.007605 P_c (\text{MPa})$ ，所以

$$H = 0.007605 P_c / (\rho_{\text{水}} - \rho_0)g \tag{4}$$