

碳酸盐岩储集层 测井解释译文集

杜奉屏等编译

10950

碳酸盐岩储集层 测井解释译文集

杜奉屏等编译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书编译了近年来美苏有关碳酸盐岩储集层测井解释方面的部分文章和专著,包括碳酸盐岩储集层的地质地球物理特征、测井解释基础以及测井解释方法等方面的论述。特别着重收集了关于裂缝性碳酸盐岩的研究文章。这些内容基本上反映了美国和苏联对碳酸盐岩和复杂岩性储集层测井解释的现状和方向。

本书可供石油测井工作者、地球物理专业的院校师生和有关石油地质人员参考。

碳酸盐岩储集层 测井解释译文集 杜奉屏等编译

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
人民交通出版社印刷厂排版
河北大厂回族自治县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 15印张 327千字 印 1—4,200
1983年1月北京第1版 1983年1月北京第1次印刷
书号: 15037·2380 定价: 1.35元

前 言

碳酸盐岩是分布很广的一种沉积岩,也是石油与天然气的主要储集层之一。据统计,世界原油可采储量的一半或油气总储量的40%储藏在碳酸盐岩当中,而且很多高产稳产的油气田都是碳酸盐岩储油。这情况也足以说明研究碳酸盐岩具有何等重要的意义。

碳酸盐地层中的孔隙结构主要是原生孔隙(粒间孔隙)和次生孔隙(裂缝-溶孔),但往往这两种孔隙结构在同一岩块上共存。由于孔隙结构复杂,因而泥浆侵入形态特殊,岩石物性不均匀,这就使得在碳酸盐地层中划分储集层、估计饱和特征、计算储集参数等都较碎屑岩地层困难。

看来碳酸盐地层中测井解释的关键在于研究复杂孔隙结构对泥浆侵入特征和岩石物性的影响。几年来、国外相继发表了许多有关识别地层裂缝、研究泥浆侵入特征、碳酸盐储集层的解释模型等方面的文章和专著,这些文章和专著均有助于我们对碳酸盐地层的认识和研究。

根据近几年来苏联、美国有关碳酸盐岩测井解释和物性研究方面的一些文章和专著,我们编辑了这本《碳酸盐岩储集层测井解释译文集》。译文集共分两大部分。第一部分是根据苏联Б.Л.阿力克山德洛夫所著《利用地球物理方法研究碳酸盐储集层》一书(1979年出版)的内容编译的。其中包括碳酸盐岩及其储集层的岩性和分类,用各种测井方法确定岩性、划分储集层、判断油、气、水层的理论和方法,确定孔隙度及油气饱和度的可能性的探讨。第二部分收集了美国和苏联一些专业刊物发表的关于裂缝性碳酸盐岩研究的文章。这些内容基本上反映了美国和苏联对碳酸盐岩和复杂岩性研究的现状和方向。

译文集由成都地质学院测井教研室编译,参加编译的同志有杜奉屏、肖慈珣、肖崇礼、陶淑娴。华东石油学院测井教研室的尚作源同志为译文集提供了部分译稿。在编译过程中丁绪荣副教授、史保连副教授、王愈吉讲师、朱光明讲师、陈仲侯讲师等为部分译稿做了校对,在此谨向他们表示感谢。

成都地质学院测井教研室

1981.5

目 录

第一部分 碳酸盐岩储集层测井解释基础

碳酸盐岩及其储集类型.....	1
碳酸盐岩和硫酸-卤素岩的岩性(1); 碳酸盐岩储集层的主要性质(3);	
碳酸盐岩储集层的形成(8); 碳酸盐岩储集层的分类(9)	
划分储集层、确定孔隙度和饱和特征方法的理论和实验根据.....	11
电阻率法(11); 自然电位法(22); 自然放射性法(24); 中子-伽马法(25);	
伽马-伽马法(28); 核磁测井(32); 声波测井(32)	
划分储集层和定量估价储集性质.....	37
岩性划分(37); 储集层的划分(41); 有效孔隙度的确定(45)	
定性评价储集层的饱和特性.....	55
根据电测井资料划分储集层、评价饱和特性(55); 利用电测井和某种孔隙度测井	
(中子伽马、声波测井)资料进行综合解释(63); 根据井温测量划分生产层(70)	
附: 俄文符号注释.....	72

第二部分 碳酸盐岩储集层测井解释方法

用测井资料确定裂缝.....	74
利用地层倾角测井确定地下裂缝.....	84
根据声波界面波及声波干涉图形确定裂缝的方法.....	98
如何利用测井资料描绘裂缝发育情况.....	109
弹性波传播速度与次生孔隙度的关系.....	115
裂缝和溶洞对纵波速度、横波速度及其比值的影响.....	118
计算北高加索裂缝碳酸盐岩储层油气储量时岩石物性资料的应用.....	122
研究泥浆侵入碳酸盐岩储集层的实验结果.....	125
复杂岩性地层的测井解释.....	130
消除石膏影响的若干孔隙度计算方法.....	150
低孔隙度碳酸盐岩的评价.....	158
对复杂岩性储集层的简化测井评价.....	173
研究碳酸盐岩的一种新途径.....	178
确定胶结系数及其辅助参数的实用方法.....	183
岩石骨架识别图(MID图).....	195

第一部分 碳酸盐岩

储集层测井解释基础

碳酸盐岩及其储集类型

通常把含有50%以上碳酸盐矿物的沉积岩叫做碳酸盐岩。它们是碳酸 H_2CO_3 的盐类；在自然界中已知的有方解石 $CaCO_3$ 、菱铁矿 $FeCO_3$ 、菱镁矿 $MgCO_3$ 、白云石 $Ca, Mg(CO_3)_2$ 、铁白云石 $(Ca, Mg, Fe)CO_3$ 、碳酸锶矿 $SrCO_3$ 、文石 $CaCO_3$ 、菱锰矿 $MnCO_3$ 、菱锌矿 $ZnCO_3$ 、菱镁铁矿 $(Mg, Fe)CO_3$ 、毒重石 $BaCO_3$ 等。组成碳酸盐岩的主要矿物是方解石和白云岩。有些白云岩含有大量的石膏和硬石膏杂质，这样的岩石通常叫硫酸-白云岩。碳酸盐地层经常有硫酸-卤素岩石伴生。

碳酸盐岩和硫酸-卤素岩的岩性

碳酸盐岩石中分布最普遍的是石灰岩、白云岩和它们的过渡性岩石。

石灰岩是通常由方解石组成的沉积岩。在化学成分上方解石与文石相同，但结晶不是斜方而是三方晶系。

白云岩(整个或主要)是由白云石组成的沉积岩。

在碳酸盐岩中，当 $CaCO_3$ 含量分别为5~25%和25~50%时，可划成含灰质白云岩和灰质白云岩； $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 含量分别为5~25%和25~50%时分成白云质灰岩和含白云质灰岩。如果石灰岩或白云岩中的石灰石或白云石含量超过50%时，就是纯碳酸盐。当石灰岩存在砂-粉砂质或粘土、二氧化硅、沥青杂质时，就叫砂质(泥质、硅质、沥青质)石灰岩等。

根据碳酸盐岩中泥质颗粒的含量，可以划分如下的一些亚种：少于5%——纯碳酸盐岩；5~15%——泥质碳酸盐岩；15~50%——泥灰岩；50~70%——泥质泥灰岩；大于70%——石灰质或白云质泥岩。

根据成因划分有：①生物的或有机石灰岩(即有机成因的石灰岩)；②化学石灰岩(或从溶液中沉淀产生的化学的石灰岩)；③碎屑石灰岩。

生物石灰岩是由动物和植物机体残骸，即：底栖的最低级的腕足类各种软体动物的贝壳、海百合类、石灰质海藻、珊瑚和其他海底生物的残骸。生物灰岩分布最广(图1)。生物灰岩的最有意义的代表是生物礁灰岩，它由群体的或增长的生物残骸组成。

生物礁灰岩具有块状结构、生物礁构造和孔洞极多的特征；在它们中间没有碎屑颗粒混合物。礁灰岩一般为很厚的、形状不规则的块体，常常突出地矗立在与它们同时产生的沉积岩之上，厚度达1000米以上。

白垩——石灰岩的极特殊的代表——是由微观单细胞石灰岩海藻，即薄的(0.002~0.005毫米)薄层、薄片、微管和微粒方解石的微粒状灰质藻组成。白垩常含有微孔虫残骸。白

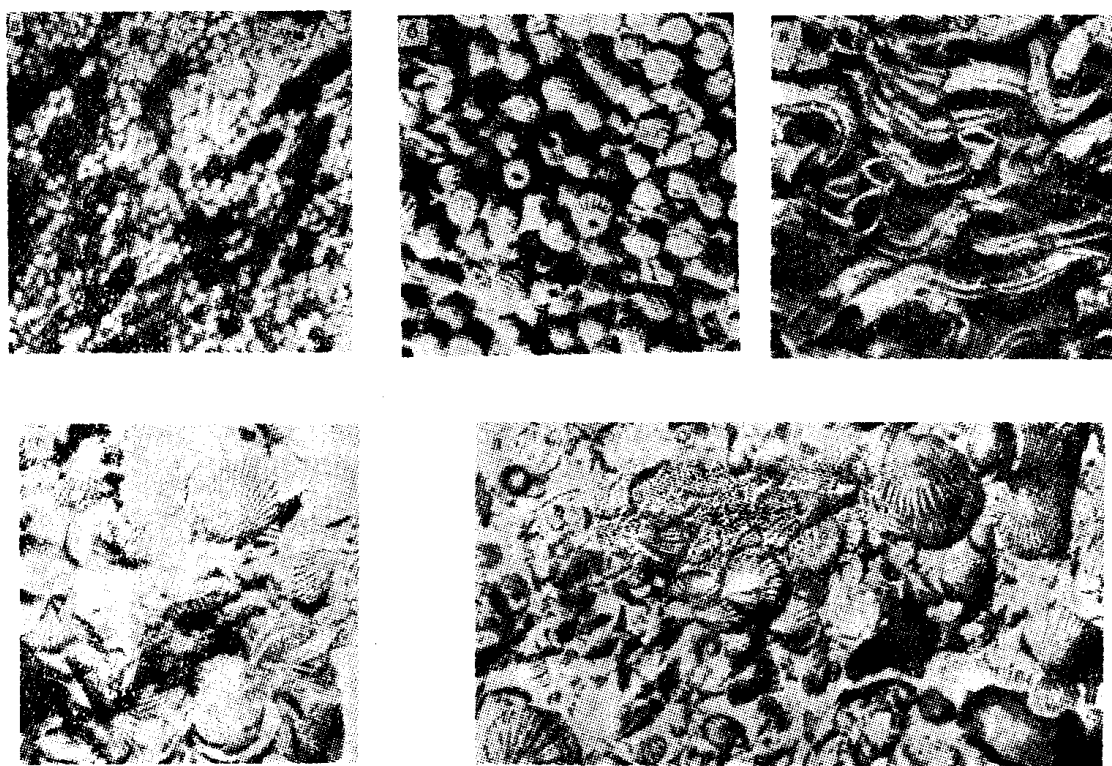


图1 生物灰岩

a-由微杆藻堆积组成的藻灰岩（上泥盆，诺夫哥罗德州，姆斯塔河(Мста)⁽¹³⁾）；b-由很好保存的轮藻目卵原细胞堆积组成的藻灰岩（上泥盆，弗兰阶，列宁格勒州，相西河(Сясь)⁽¹³⁾）；в-斧足类灰岩（介壳石灰岩），岩石结构显示介壳(*Pecten meridionalis*)丰富（上白垩，克里木，巴赫奇萨尔城附近⁽¹³⁾）；г-谢尔朴洛夫灰岩，结构显示管状介壳丰富（下白垩，戈特里夫阶，乌里亚洛夫城，沿沃尔加河⁽¹³⁾）；д-生物-碎屑灰岩，由方解石胶结的细的腕足类、海百合节片、三叶虫碎片组成（志留纪，兰多维列统，雅库特自治共和国，俄列里克河(Оленек)⁽¹³⁾）

要常据其外形而与其他生物灰岩区别，具白色均质结构和细颗粒的特征。

化学成因的碳酸盐岩有：石灰岩、白云岩、灰质凝灰岩和其他由于水的蒸发或其他原因，溶解质含量超过溶解极限而在天然贮积地沉积下来的碳酸盐岩。有机物（藻类和其他）的生命活动对碳酸盐化学沉积经常间接地创造有利条件。典型的化学成因石灰岩是粉粒的成层状沉积，没有生物残骸。

碎屑石灰岩——整个或主要是由较老的石灰岩机械破碎产物和有机物的再冲洗骨架残骸组成——由各种大小的碳酸盐颗粒组成，颗粒的横截面积常常是十分之几毫米，间或几毫米。也可遇到由巨大砾石组成的灰质砾岩。碎屑灰岩常含有大量的石英颗粒混合物。

化学和碎屑石灰岩的中间岩类是鲕状灰岩，它是由同心排列的小鲕粒组成。鲕粒是在水的相当活动带中碳酸钙化学沉积形成的。

根据形成条件，石灰岩有生物结构、结晶粒状结构、碎屑结构和鲕状结构之分。这些结构反映了晶体的各个微粒（颗粒）与胶结物的排列及相互关系的特点。

生物结构分成三个最主要的亚类：①纯生物的——岩石是由附着在微粒碳酸盐物质中的石灰质生物残骸组成（见图1a~г）；②生物-碎屑的——岩石中有破碎且部分磨圆的生物残骸，这些残骸位于微粒碳酸盐物质之中（见图1д）；③生物碎屑的——岩石仅由破碎的生物残骸组成而无明显的微粒碳酸盐颗粒。

在结晶粒状结构中, 根据颗粒大小又分成几种亚类: 粗粒(>0.5毫米), 中粒(0.5~0.1毫米), 细粒(0.1~0.05毫米), 粉粒(0.05~0.01毫米)和微粒(<0.01毫米)。

最后一种构造也可叫泥晶或隐晶结构。

碎屑结构在较老碳酸盐岩被破坏而产生的碎块堆积成的石灰岩中见到。鲕状结构的特征是具有同心结构的鲕粒, 其横截面一般小于1毫米。

白云石在沉积岩整个造岩时期都可能产生, 根据成因可分为原生的、共生的、成岩的和后生沉积的白云岩。前三种成因的白云岩常统一叫原生白云岩, 后生的白云岩叫次生白云岩。白云岩化的时期基本上与石灰岩强烈沉积时期吻合, 但是随地球的发展产生白云岩的频率一般要减小。

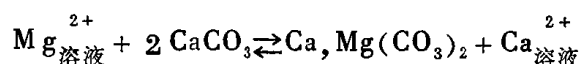
原生沉积白云岩是在含盐度较高的海湾和泻湖中由于白云岩从水中直接沉积而产生的, 这种岩石成很稳定的岩层。常见到白云岩与石膏互层; 有时出现石膏和硬石膏包裹体。原生白云岩的结构成均匀微粒结构, 大多数颗粒<0.01毫米。

共生和成岩白云岩, 是在成岩作用时期与由沉积物形成岩石的同时改造新沉积的石灰岩(灰质淤泥)而产生的。

共生和成岩作用白云岩成岩状和透镜体, 具有不光滑的断面和不清晰的层理。与其他成因类型的白云岩比较, 它们分布最为广泛。

后生的(次生的)白云岩是由于溶液循环时镁代替钙而把已经完全形成岩石的坚硬石灰岩改造而产生的。

产生白云石化作用时, 溶液中Mg/Ca比值应超过无论对方解石还是白云石都是平衡的溶液浓度值。Mg/Ca比值较高常使方解石或文石变成白云岩, 其反应式如下:



残留在溶液中的 Ca^{2+} 成石膏的形式。

后生白云岩本身包含部分残留的石灰岩, 常常呈块状或不清晰的层理, 有粒度不均匀和非均质结构的特征; 它们可能成透镜体分布在未变化的石灰岩中。

在与碳酸盐岩层相伴生的硫酸-卤素岩石中, 最普遍的是石膏、硬石膏、岩盐和钾-镁沉积。

纯石膏的化学方程为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。其中含32.50%的CaO, 46.51%的 SO_3 和20.99%的 H_2O 。硬石膏是无水硫酸钙—— CaSO_4 。石膏和硬石膏沉积可以是原生的, 也可以是次生的。这些岩类的原生岩石是在泻湖和盐湖中, 在炎热干燥气候条件下水蒸发而产生的。根据被蒸发水的成分和温度, 沉积可能是石膏也可能是硬石膏。石膏的次生沉积是在硬石膏的后生改造过程中产生的。

岩盐主要是带有各种氯和硫酸化合物杂质的石盐(NaCl)。岩盐层常与石膏和硬石膏层伴生。此外, 岩盐矿藏是钾-镁盐岩层的必须的成分。这种岩层主要由钾盐 KCl 、光卤石 $\text{KCl} \cdot \text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、杂卤石 $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和其他盐的矿物异类组成。

碳酸盐岩储集层的主要性质

储集有石油和天然气, 并在开发时能把它们排出的岩石就叫石油和天然气的储集层。储集层的主要性质是它们的孔隙度、渗透率、油水饱和度。

岩石的孔隙度 K_n 由岩石的孔隙空间与它的总体积之比决定，常用百分比或小数表示。碳酸盐岩石的孔隙度对其他的物理性质有很重要的影响。研究作为油气潜在储集层的碳酸盐岩石，就在于研究它们的物理性质——孔隙度和渗透率。

根据产生的时间，碳酸盐岩石的孔隙度有沉积的、成岩和后成成因的，研究人员都把第一个看成原生孔隙度，而最后一个（后生的）看成次生孔隙度。成岩成因的孔隙度可能是原生的也可能是次生的。

原生孔隙度就是与原生-沉积构造有关的孔隙所表征的孔隙度，这种孔隙度几乎不因成岩作用和其他过程的作用而变化。

原生孔隙度可以划分成几种类型：①粒间孔隙，它包括鲕粒和生物碎屑之间的孔隙空间；②微孔隙度，它由无数原生微型孔隙构成并为在沉积胶结时几乎不会消失的淤泥水充填；③溶洞，即在原生沉积中（例如生物沉积）存在被水充填的溶洞。

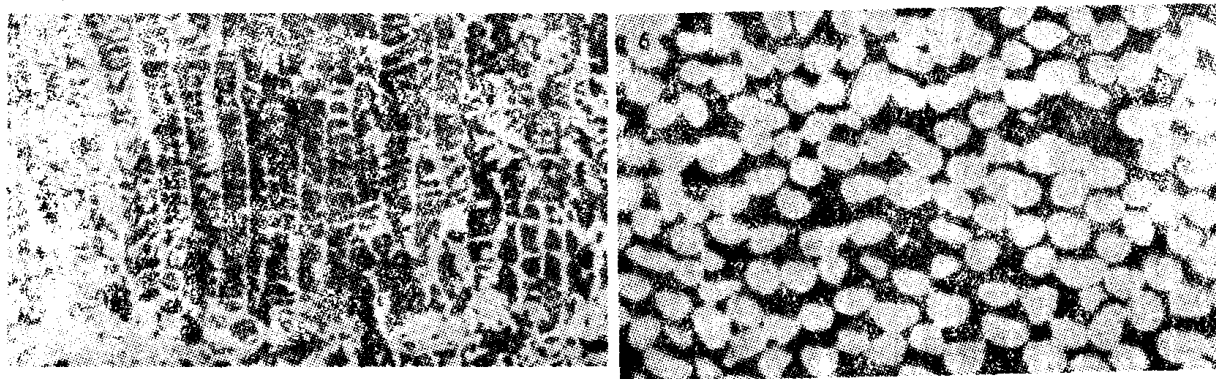


图2 岩石原生孔隙实例

a-由珊瑚 *Favosites* 构成的岩石原生孔隙。虽然珊瑚的骨架部分已完全白云石化，但孔隙仍保持完好⁽⁵⁶⁾；b-鲕状砂岩（巴加姆海滩⁽⁵⁶⁾）

坚硬的生物结构是由珊瑚、海绵、灰质藻、牡蛎和其他生物物质组成的。在许多情况下，生物结构的石灰岩储集层具有可观的石油贮量（图2a）。

经分选的砂质或砾岩颗粒组成的碳酸盐沉积也可能具有很高的原生孔隙度。鲕粒和经分选的生物碎屑的碳酸盐砂就是这方面极好的证明（图2b）。

次生（后生的）孔隙度是由岩石形成后发生改变而产生的。次生孔隙有：①由于岩石体积收缩产生的裂缝和孔洞；②与结晶作用有关的裂缝；③地壳中应力造成的裂缝；④由于岩石表面风化造成的裂缝和孔洞；⑤由于在岩石中循环的水溶液的溶解作用而使前已形成的孔隙体积扩大而造成的溶解孔隙。这些较早的孔隙可能是原生孔隙，也可能是岩石出现裂纹造成的孔洞。

次生孔隙可分成粒间和溶解孔隙。次生粒间孔隙在碳酸盐岩石中很少遇到。次生粒间孔隙的大小（0.10~0.50毫米）不超过周围碳酸盐粒的大小。它们的形成与后生重结晶过程有关。结晶颗粒联结起来就组成了粒间通道。

在碳酸盐岩石中次生溶解孔隙分布广泛，它们是由于完全或局部溶解（溶蚀）已形成的岩石、胶结或被胶结物质的单个颗粒或颗粒集合体而造成的。溶解孔隙的大小为0.05到2毫米。次生溶解孔隙还可能成溶洞（图3b、B）、微观岩溶及宏观岩溶空洞（图3a）和缝合线腔（图4）的形状。溶蚀孔隙的形状有不规则的、棱角的、拉长形的、缝隙形的，具有弯曲不平的管壁。它们通常由狭小的孔隙管道或宽5~25微米，呈微弯曲和直线形状的微裂缝彼此相通。珊瑚内的洞穴；水藻间的洞穴；由于贝壳的选择性溶解，主要由白云岩组成的岩石

中方解石颗粒选择性排走而形成的孔隙；叶状石灰岩藻内的孔隙；沿着裂缝的巨大空洞和溶蚀空洞就是由于强烈溶解而产生的次生孔隙的例子。

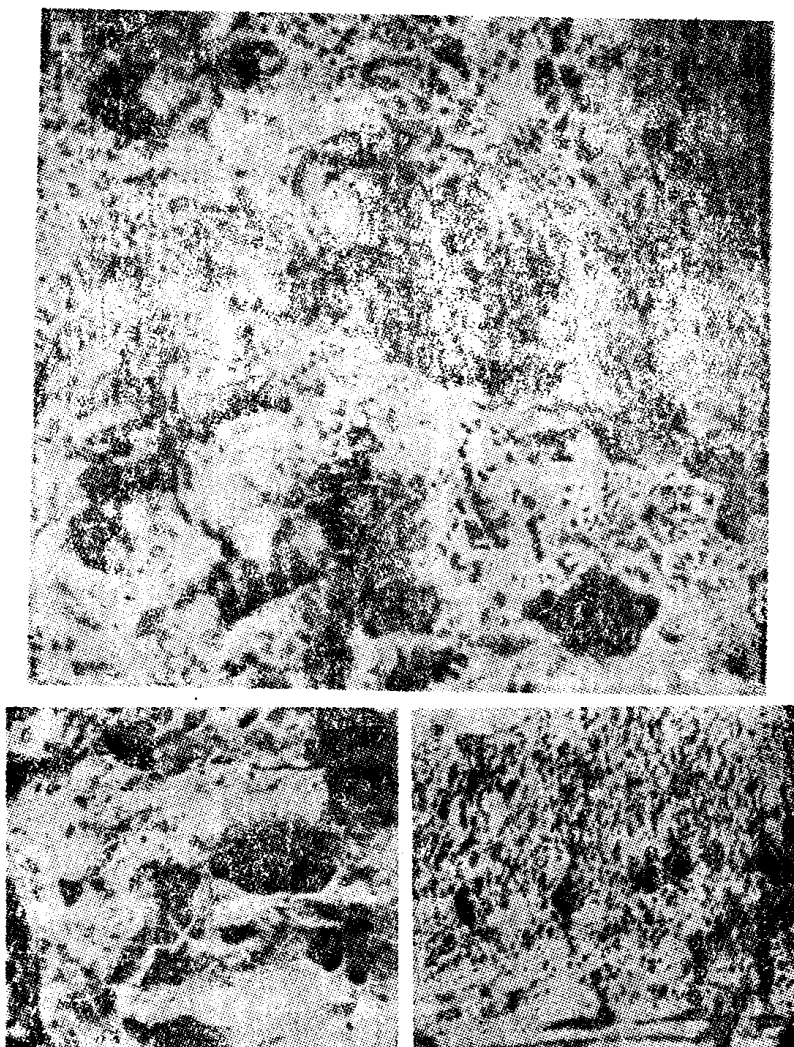


图3 岩石洞穴和岩溶孔隙度

a-含无数大小洞穴的岩溶碳酸盐角砾岩（上二叠，北沃尔加河区，萨马尔河曲（Самарская Лука）⁽¹³¹⁾），b-“孔洞”角砾型石灰岩；大洞穴的尺寸为12厘米（二叠纪，乌拉尔，阿依河⁽¹³¹⁾）；c-溶洞型“蜂窝状”白云岩；在细粒白云岩层中组成鸡窝状地区（上泥盆图尔格涅夫组，乌克兰加盟共和国，克里沃伊罗格，祖希河右岸⁽¹³¹⁾）



图4 石灰岩中缝合线裂缝的类型

a-下白垩，戈特里夫阶；中科佩特-达格（Центральный Копет-Даг），非柳津峡谷（Фирюзинское ущелье）⁽¹³²⁾；b-元古代；东西伯利亚，尤多莫-马伊区⁽¹³⁾

根据充填的程度,次生溶蚀孔隙可分成张开的,被沥青、矿物质(方解石、白云石、石膏、硬石膏、萤石、岩盐)、泥质-有机质局部和完全充填的孔隙或同时被矿物和沥青局部和完全充填的孔隙。

很难明确划分原生孔隙和次生孔隙。许多碳酸盐岩石在自身存在的时间内经受过复杂的变化,这种变化表现为孔隙发育时期与孔隙充填时期的多次重复交替。因此,碳酸盐岩石有极为多样的孔隙度和孔隙空间结构。

可区分几种类型的孔隙度:

1)总孔隙度(绝对孔隙度,物理孔隙度)。它是全部孔隙体积 V_n 与岩石体积 V_0 之比,即

$$K_n = \frac{V_n}{V_0} = \frac{V_{n\phi} + V_r + V_r}{V_0} \quad (1)$$

式中 $V_{n\phi}$, V_r , V_r 分别为粒间孔隙或岩石基质孔隙、溶洞、裂缝孔隙的体积。

总孔隙度取决于全部孔隙(包括开启的孔隙和封闭的孔隙)的数量而与孔隙的形状、大小和相互排列位置无关。

2)开放孔隙度或饱和孔隙度 $K_{n\phi}$ 。它们是彼此联通的孔隙,在一定的压力之下液体和气体可以穿过这些孔隙。

3)粒间孔隙度或基质孔隙度 $K_{n\phi}$, 等于粒间孔隙体积 $V_{n\phi}$ 与岩石总体积 V_0 之比:

$$K_{n\phi} = V_{n\phi}/V_0 \quad (2)$$

4)次生孔隙度($K_{n\phi}$)是次生孔隙体积($V_{n\phi}$)与岩石总体积之比:

$$K_{n\phi} = V_{n\phi}/V_0 \quad (3)$$

次生孔隙度包括溶洞和裂缝孔隙度。

5)溶洞孔隙度 $K_{n\phi}$ 是溶洞体积(V_r)与岩石总体积之比:

$$K_{n\phi} = V_r/V_0 \quad (4)$$

溶洞孔隙度可以分成联通的孔隙度 $K_{n\phi}$ 和不连通孔隙度 $K_{n\phi}$, 它们分别是相通的孔洞体积 $V_{r\phi}$ 和不相通的孔洞体积 $V_{r\phi}$ 与岩石总体积之比:

$$K_{n\phi} = V_{r\phi}/V_0; \quad (5)$$

$$K_{n\phi} = K_{r\phi}/V_0 \quad (6)$$

6)裂缝孔隙度($K_{n\phi}$)是裂缝体积与岩石总体积之比:

$$K_{n\phi} = V_r/V_0 \quad (7)$$

此时把裂隙度看成是特殊的孔隙度,这时基质(没有裂隙的岩石块体相对起颗粒的作用,而裂缝起着孔隙的作用)。E.M.斯苗霍夫把裂缝状孔隙分成张度为0.01~0.1毫米的微裂缝和张度>0.1毫米的大裂缝。

7)有效或动力孔隙度(K_{ϕ})。在压力梯度作用下液体可以在其中运动的岩石孔隙有效体积 V_{ϕ} 与岩石总体积之比,即为有效孔隙度:

$$K_{\phi} = V_{\phi}/V_0 \quad (8)$$

8)有效的油气饱和孔隙度 $K_{n\phi}$, 等于饱和油气的孔隙体积(V_{ϕ})与岩石总体积之比:

$$K_{n\phi} = V_{\phi}/V_0 \quad (9)$$

“有效孔隙度”概念的提出,是假设岩石中存在有液体或气体在其中实际上不发生运动的孔隙。

岩石孔隙度相同,但在评价储集性能时结论却很可能不相同。因为不仅孔隙的相对数量,

而且决定地层渗透率的孔隙绝对值也对岩石中储集或排出油气有意义。孔隙介质的渗透率系指介质中存在压力差时液体或气体通过介质的能力。渗透率是孔隙介质性质和它对油、气传导能力的量度。流体的流动速度与孔隙空间的几何特点（横截面大小、孔隙管道形状及其在孔隙体积中的分布）有关，这些特点决定了孔隙介质的渗透能力。例如，形状相对狭长（长比宽大10倍以上）、孔隙彼此联通的叫做管道，较短一些的叫狭通道或管喉（图5）。

在研究含油岩石的渗透率时，不仅要确定岩石的渗透率，而且还要确定液体和气体的物理-化学性质和它们的运动特性。为了描述含油岩石的渗透率，引出绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率的概念。

把浸取并进行烘干到恒定质量以后的岩石的气体渗透率叫做岩石的绝对渗透率 K_{np} 。

岩石中多相系统运动时的渗透率，或岩石中存在不运动液体时的气体渗透率，或岩石的液体渗透率叫做有效渗透率 $K_{np\phi}$ 。在天然条件下含油岩石的渗透率也是有效渗透率。

用百分比表示的孔隙介质的有效渗透率与其绝对渗透率之比，叫该介质的相对渗透率。

地层的含水饱和度系数 K_w 表示岩层中水的含量与孔隙总体积之比，或者单位孔隙体积中水的含量。

地层的含油饱和度系数表示地层中含油的体积与孔隙总体积之比，或单位孔隙体积中的含油量。含油层的含水饱和度系数取决于结合水、残留水或封存水的数量。它们留在滞流区内和颗粒的表面上并与油-岩石-水系统的物理化学性质、与地层孔隙空间的结构有关。石油在地层中仅贮存在油藏形成时期产生液体运动的那部分孔隙中。在排挤压力超过油水弯月面毛细压力的孔隙中，在形成油藏时水就被油挤出。当排挤压力超过毛细-结合状态的地层含水饱和度时，水亦可成自由水形态而存在。

在含油气岩石的孔隙系统中，残留水占据了部分孔隙的体积。联通孔隙和残留水所占体积之差表示储集层对油气的有效容积，用百分数表示的有效容积与岩石体积之比实际上反映有效孔隙度，而与联通孔隙空间体积之比则反映油、气饱和度。含油层的有效孔隙度等于联通孔隙度与油气饱和度系数的乘积：

$$K_{np\phi} = K_{np} K_w \quad (10)$$

有效孔隙度不仅表征产油层，而且能表征含水层、在普查石油和天然气时勘探出来的远景储集层的特征，因为有效孔隙度使得可以估计这些地层的有效容积。

根据渗透率性质和岩石特征，Г.И.捷奥多罗维奇把储集层分成三组：第一组是均匀渗透的；第二组是不均匀渗透的；第三组是裂缝的。

根据渗透率把第一、二组储集层分成五级：I级是渗透性极好的储集层（1达西以上）；II级是渗透性好的储集层（0.1~1达西）；III级是中等渗透性储集层（0.01~0.1达西）；IV级是弱渗透性储集层（0.001~0.01达西）；V级是难于渗透的储集层（小于0.001达西即1毫达西）。

前三级储集层（有时还包括第四级储集层）有工业价值。

绝对渗透率小于1毫达西的岩石通常在天然条件下含90%以上的残留水，这样岩层中没

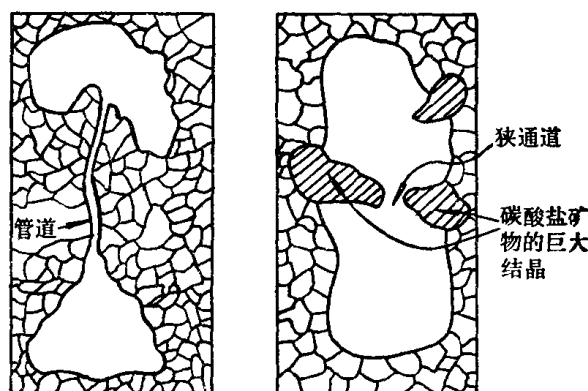


图5 孔隙之间的不同联通形态

有效孔隙度。因此，渗透率小于1毫达西的储集层(第五级)不具有工业价值。此外，孔隙度小于5%(有时6~7%)的没有裂缝、断裂和溶洞的岩石通常认为是非工业性的。

充填在岩石巨大颗粒和碎块之间，并使它们胶结在一起的矿物物质叫胶结物。根据物质成分，胶结物分成两种主要类型：单矿物和多矿物的。最普遍的是各种泥质胶结物，其次是化学成因胶结物。在化学成因胶结物中，从溶液中沉淀产生的各种成分的硫酸盐、氧化物和氢氧化物起主要作用。在估价储集层的容积、渗透性质以及它们的残留水饱和度方面，胶结物的结构(即岩石中胶结物和碎屑物质的相互位置和定量关系)有很大意义。

根据这一标志划分出下列几种主要胶结物类型：①接触型(或接触胶结物)——仅在碎屑颗粒的接触地点发育胶结物；②凝结型(或星点状胶结)——胶结物物质在岩石中成单个局部小块的形式不均匀分布；③薄膜型——胶结物以附着于碎屑颗粒的薄层形式存在；④孔隙型——胶结物在岩石相接触的碎屑颗粒之间分布；⑤基底型——颗粒淹没在胶结物基质中，彼此不接触。

通常岩石都是两种以上胶结类型的综合。

在其他条件相同的情况下，接触型胶结引起岩石储集性质有不太大的降低，因为在这种情况下孔隙管道的最大可能横截面对渗透是畅通的；残余水饱和度的值较低并在最小程度上表现了胶结物质的吸附性质。孔隙和基底类型胶结在这方面最为不利。

碳酸盐岩储集层的形成

在形成碳酸盐岩石的孔隙过程中，岩性因素(沉积作用和沉积后作用)起重要作用，这些因素与构造和水文地质因素相互作用时就增强或减弱了岩石孔隙度的发展。沉积作用因素与沉积的物理-化学条件有关，沉积后作用因素与分别在沉积岩(沉积作用)和岩石中(外变质)发生的沉积后成和后成改造有关。

属于沉积后的改造作用有：压实、重结晶、白云石化、方解石化、硫酸盐化、硅化、裂隙、溶蚀、缝合线化。下面研究它们的实质。

压实就是在上覆岩石重力作用下，岩石孔隙度减小。压实伴生有脱水和孔隙水的排出。

重结晶是相互有联系的、由压力所造成的物质溶解和再沉积的统一过程，结果在溶液中产生新的结晶中心，在这种作用下岩石的结构和构造有所改变，但化学成分不变。正如许多研究人员指出的，碳酸盐岩石的重结晶在很大程度上与岩石中含有其他物质的杂质(泥质、硅质、有机质、砂-粉砂质物质等)有关。这些杂质不仅使重结晶过程减慢，而且在成岩早期把岩石中已有的空洞和裂缝封住。在成岩的晚期，杂质使岩石具有脆性和硬度。后来在构造形变时，岩石出现许多裂隙，并沿裂隙产生次生溶蚀孔洞，岩石就变成多孔的和可渗透的。当重结晶，即由小的晶体产生更大结晶的时候，碳酸盐的密度增加，从而体积减小并出现次生孔隙度。因此重结晶的结果有可能使碳酸盐岩变成多孔的。

白云石化是白云石代替方解石的过程，它导致石灰岩变成白云质石灰岩和白云岩。相对于石灰岩讲白云岩的密度更大，因此白云石化就伴生岩石体积的改变和孔隙度的增加，而与成岩期无关。完全白云石化时岩石体积缩小12.3%。但是有些研究人员认为，白云石化不总都导致岩石体积的改变和孔隙的增加。

方解石化是方解石代替白云石(去白云石化作用)和在碳酸盐岩石孔隙和裂缝中沉积方解石的过程。方解石化过程是在白云石重结晶和石灰岩白云石化之后在外变质时期发生的。

硫酸盐化就是在成岩的各种阶段,在碳酸盐岩石中发生硫酸盐(硫酸的盐类)替代碳酸盐(碳酸盐类)的过程。在成岩阶段发生硫酸盐-碳酸盐物质的重新分布会在白云岩和石灰岩中产生细粒的硬石膏;在硫酸盐化的外力变质阶段则出现巨型石膏和硬石膏结晶替代石灰岩和白云岩,以及石膏和硬石膏充填孔洞和裂缝的现象。

硅化就是由于沉积物中的硅质-碳酸盐物质重新分配,发生氧化硅代替碳酸盐或氧化硅充填孔隙、溶洞和裂缝的过程。岩石硅化、硫酸盐化和重结晶将降低碳酸盐岩石的孔隙度和渗透率,但却使岩石硬度和脆性增加,这对产生构造裂缝和产生溶蚀孔洞系统,即提高它们的储集性是有利的。

碳酸盐岩储集层的分类

在有关陆源和碳酸盐岩的文献中提出了储集层的各种分类,这些分类考虑了研究的特征和采用的方法,但是它们不可能是包罗万象的。

石油和天然气储集层根据如下主要标志来分类:①岩性;②粒度成分;③胶结类型及其分布特征;④孔隙空间结构;⑤骨架和孔隙空间的结构;⑥容积特征;⑦渗透特征和储油性;⑧联通孔隙的空间分布特征等。

根据岩性特征,储集层可划分成陆源的(砂-粉砂质)和碳酸盐的。

根据粒度成分分类,主要依据各个尺寸级别的变化界限。对于碳酸盐岩,根据粒度成分分类的最合理方法是U.B.赫沃洛娃⁽¹²⁶⁾提出的。她建议把碳酸盐岩分成七组——从颗粒大于1毫米的巨粒(或巨晶的)到颗粒小于0.005毫米的极细粒(泥晶的,隐晶的)。

根据胶结类型,储集层可划分成具泥质、硅质或混合物混合胶结的储集层。

A.A.哈因⁽¹²⁶⁾提出一种考虑了岩性特征、孔隙空间特征和岩石胶结物成分的储集层分类图。这种分类法可以相当详细地划分陆源储集层;但是它没有完全考虑碳酸盐储集层孔隙类型的多样性(仅把孔隙度分成粒间的、裂缝的和混合的)。

大家都知道根据碳酸盐岩石孔隙空间结构的分类方法。Г.И.捷奥多罗维奇⁽¹¹⁷⁾认为,碳酸盐岩中有六种孔隙空间结构类型:①借助直径为0.01~0.005毫米的极细管道彼此联通的孤立孔隙;②在较宽阔的地方联通管道本身组成相应的孔隙;③借助极细孔隙的宽管道彼此联通的孤立孔隙。有时通道可能包含有更大的孔隙,这些孔隙造成渗透率剧烈增加(这种类型的孔隙空间常常在白云岩中遇到,偶尔也在白云质石灰岩中遇到);④孔隙处于白云岩或它们的胶结物基质的颗粒之间,并重复这些颗粒的主要部分的特点,即“粒间孔隙度”;⑤孔隙空间由裂缝组成;⑥包括两种或更多主要类型的混合或复杂的孔隙空间结构。

在E.M.斯苗霍夫领导下,全苏石油地质勘探科学研究所的研究人员提出的储集层分类是大家所熟知的。岩石的孔隙特征和渗透性质是这种分类的基础。所有的油气储集层分成两大类——简单的和复杂的(混合的)。具有单一、连续的渗透管道系统(孔隙、裂缝、结构与孔隙相似的溶洞)特征的孔隙和纯裂缝型储集层就属于简单的储集类型。具有各种物理性质的不同渗透管道系统,并且这些系统之间存在强烈的液体串流的裂缝-孔隙和孔隙-裂缝型储集层属于复杂的(混合的)储集类型。此外,油气储集层分成由储积条件以及稳定和不稳定的液体渗透条件所决定的各种类型。

纯裂缝储集层具有明显的各向异性;存在于裂缝中的溶蚀空洞可视为裂缝中的补充容积。因此很难同意这样的意见,即纯裂缝储集层可以属于简单的储集层。

对照岩芯资料与地球物理测井资料, Г.Е. 阿尔奇⁽²⁷⁾根据两种主要标志(即岩石骨架结构和孔隙空间结构)对碳酸盐进行了分类。他根据骨架结构把碳酸盐岩石分成三类: I——致密的; II——似白垩的; III——粒状的。根据孔隙空间他把碳酸盐岩石分成 A、B、C 和 D 级: A 级——孔隙小于 0.01 毫米; B 级——孔隙为 0.01~0.1 毫米; C 级——可见孔隙大于 0.1 毫米, 同时又不超过岩屑颗粒; D 级——孔隙大于岩屑块; 能看见由于次生重结晶而产生的孔隙、地层水循环的裂缝和管道。

根据 Г.Е. 阿尔奇的分类, 实际上任何类型和等级的组合, 即碳酸盐岩石的骨架和孔隙空间的各种组合都有可能。Г.Е. 阿尔奇的碳酸盐分类相当完全地反映了广泛利用岩芯和岩屑物质时全部可能组合的多样性。但是研究碳酸盐岩石的实践中几乎没(只是在全部取芯的参数井钻进时)有条件把岩芯资料与地球物理结果综合地详细逐层分析。因此阿尔奇分类法虽优点很多, 但在研究碳酸盐储集层对地球物理资料解释的实际工作中难以应用。

A.C. 彼斯特里科夫⁽⁹⁸⁾建议根据地球物理资料对储集层作如下划分。

- 1) 粒间型: a) 微孔隙(似白垩石灰岩); б) 大孔隙。
- 2) 裂缝型: a) 微裂缝; б) 大裂缝。
- 3) 溶洞型: a) 微溶洞; б) 大型溶洞。
- 4) 混合型(孔隙-裂缝)。

A.C. 彼斯特里科夫的分类是相当精练的, 但是有许多缺点: ①把裂缝储集层划分成弱裂缝和强裂缝没有明确的定量标志; ②根据地球物理测井资料把溶洞储集层划分成微溶洞和大型溶洞十分复杂; ③把粒间孔隙、裂缝和溶洞划分成亚型是根据不同的特点, 即粒间或溶洞孔隙的张度和总裂缝孔隙度值进行的; ④把混合储集层的全部多样性合并成了一种——孔隙-裂缝型。

B.H. 达哈诺夫提出的碳酸盐储集层分类与彼斯特里科夫的分类不同, 不仅根据孔隙空间结构更详细地把储集层划分成亚类, 而且还根据渗透率补充划分了四级。但是从综合利用地球物理测井资料的观点上看, 划分表示岩石储集性质或岩石在孔隙度、渗透率上差异的储集层亚类(弱裂缝, 粗粒等等)以及缺少把储集层划分为亚类的明晰等级(例如弱裂缝、强穴孔等)都使分类变得复杂了。因此, 在考虑了地球物理参数与碳酸盐岩物理性质的关系、矿场地球物理方法的可能性和在全国各地区应用地球物理划分储集层的实际经验后, 认为最好采用彼斯特里科夫的储集层分类方法, 但把划分的方案简化成下列类型。I、孔隙型(粒间孔隙): ①似白垩型; ②粒状或砂糖状。II、洞穴型。III、裂缝型。IV、混合型。根据不同孔隙类型所占优势又可将其划分成裂缝-孔隙、裂缝-空洞、孔隙-裂缝-空洞等等。凡混合型储集层前缀有“孔隙”两字者则表示在基质中存在有效孔隙度, 这种孔隙度可能为油气所饱和。

划分储集层、确定孔隙度和饱和 和特征方法的理论和实验根据

电 阻 率 法

碳酸盐岩的电阻率与孔隙度、泥质体积含量、饱和特征、原生和次生孔隙中的溶液矿化度以及地层埋藏的热力学条件有关。下面来研究这些因素对岩石电阻率的影响。

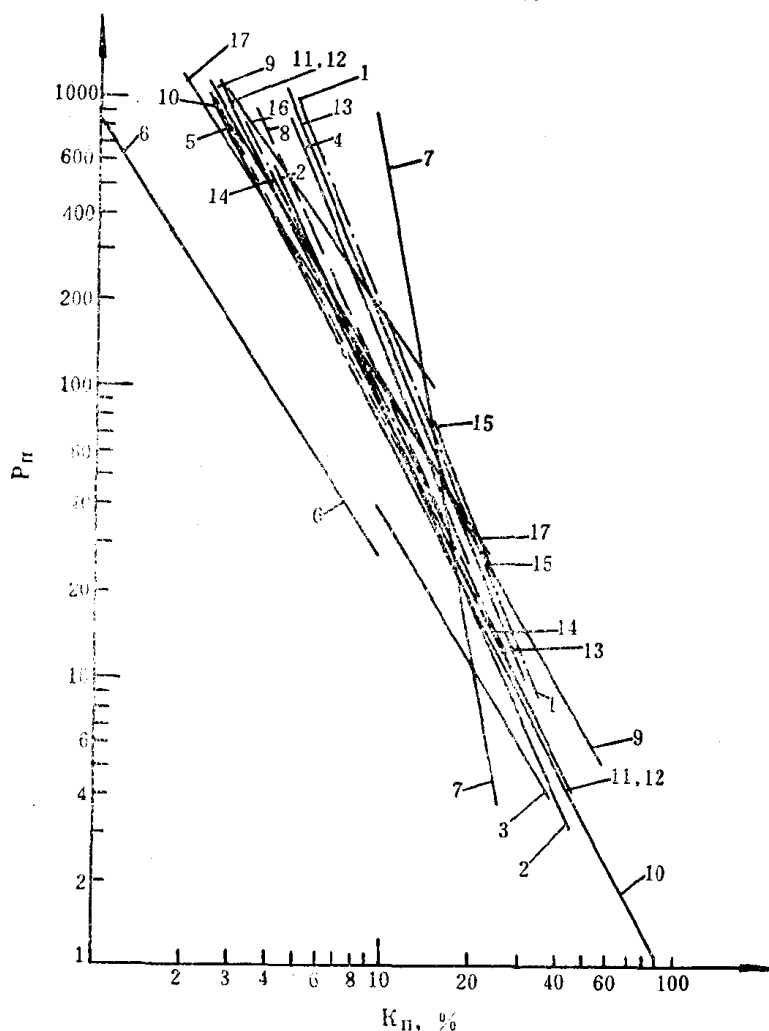


图6 岩石相对电阻 P_n 与孔隙度 K_n 的关系曲线

1-介壳灰岩和泥质灰岩；2-中等压实的粗晶石灰岩和白云岩；3-细晶和致密的石灰岩和白云岩（根据B.H. 达哈诺夫资料）；4-碳酸盐（根据阿尔奇资料）；5-巴什基里石炭纪和泥盆纪的碳酸盐岩（根据A.И. 奥尔洛夫，H.Г. 库里科娃）；6-克拉斯洛达尔边区上侏罗世石灰岩（根据T.C. 伊佐托娃资料）；7-达赖共和国石炭纪多内普建造的溶洞型和裂缝型石灰岩（根据B.A. 全集克耶夫资料）；8-白俄罗斯具粒间孔隙的碳酸盐岩（根据B.A. 库德雅夫采夫等资料）；9-切禅印古什苏维埃自治共和国油田和阿左夫（Азовского）高地上白垩世石灰岩；（根据Л.В. 耶夫列莫娃资料）；东外高加索上白垩世石灰岩；10-根据A.M. 涅恰依资料；11-根据Г.А. 施努尔曼资料；12-根据B.H. 库尔干斯基资料；13-萨拉托夫伏尔加河区石炭纪石灰岩（根据И.Е. 艾德曼资料）；14-古比雪夫区巴什基里建造石灰岩（根据H.Я. 卡楚利娜）；15-哈萨克斯坦石灰岩（根据Л.А. 锡加尔资料）；16-哥尔诺耶伊克里木基岩石灰岩的实验关系（根据H.A. 科波索夫资料）；17-克里米亚上白垩世碳酸盐岩（根据B.Ю. 温杰尔什登资料）

一般情况下，孔隙中100%含电阻率为 ρ_n 的水的岩石电阻率 ρ_{nn} 由下式决定：

$$\zeta_{nn} = P_n \rho_n \quad (11)$$

式中， P_n ——相对电阻或孔隙度参数，它与孔隙度 K_n 有如下关系式：

$$P_n = \alpha / K_n^m \quad (12)$$

式中， α ——常数，一般等于1； m ——与岩石结构特点有关的孔隙度指数。

原则上石灰岩的关系式 $P_n = f(K_n)$ (图6)与砂岩的类似关系式没有区别，只发现参数 P_n 变化范围很大。这是由于石灰岩孔隙空间结构有很大的非均质性造成的。

饱含油气岩石的电阻率

$$\rho_{nn} = \frac{\alpha \rho_n}{K_n^m K_n^n} \quad (13)$$

式中， K_n ——储集层的含水饱和度系数； n ——含水饱和度指数。它与岩石的润湿有关，从1.73变到4.33(在大多数情况下，亲水性储集层的 n 等于2)。电阻增大系数(或饱和参数)

$$Q = \frac{\rho_{nn}}{\rho_n} = \frac{1}{K_n^n} \quad (14)$$

它表示：储集层部分孔隙体积饱含油或气时，含水储集层的电阻率增大多少倍。如 Q 超过临界值(Q_{ko})，地层就认为是饱含油气的。

与陆源储集层一样，孔隙性泥质碳酸盐含油气储集层的导电率可用下式表示。

对泥质在其中成夹层状分布的储集层(薄层泥质储集层)：

$$\frac{1}{\rho_{nn}} = \frac{C_{r,n}}{\rho_{r,n}} + \frac{1 - C_{r,n}}{P_n \rho_n} K_n^n \quad (15)$$

对具有分散泥质的岩石(分散泥质储集层)：

$$\frac{1}{\rho_{nn}} = \frac{C_{i,n}}{\rho_{i,n}} + \frac{1 - C_{i,n}}{P_{cn} \rho_n} K_n^n \quad (16)$$

式中， $C_{r,n}$ 、 $C_{i,n}$ ——泥质的体积含量，即泥质体积或泥质颗粒与岩石体积之比(以后将一概用 $C_{r,n}$ 来表示)； $\rho_{r,n}$ 、 $\rho_{i,n}$ ——分别为泥岩夹层和分散泥质的电阻率，即便 $C_{r,n}$ 相同电阻率也可能有差别(实际上取它等于周围泥岩的电阻率，因此以后 $\rho_{r,n}$ 、 $\rho_{i,n}$ 一概用 $\rho_{r,n}$ 表示，而不管泥质分布特征如何)； P_n ——纯岩石夹层的相对电阻； P_{cn} ——对应岩石骨架孔隙度(K_{nc})的相对电阻； ρ_{nn} ——具有层状泥质的饱含油气的孔隙储集层电阻率； ρ_{nn} ——具有分散泥质的饱含油气的孔隙储集层的电阻率； K_n ——纯岩层含水饱和度系数。

泥质孔隙储集层的电阻增大系数是较复杂的数值，分散泥质储集层的电阻增大系数

$$Q_{r,n} = \frac{\rho_{nn}}{\rho_n} = \frac{C_{r,n}^2 P_{cn} \rho_n + (1 - C_{r,n}) \rho_{r,n}}{C_{r,n}^2 P_{cn} \rho_n + (1 - C_{r,n}) \rho_{r,n} K_n^n} \quad (17)$$

对(17)式的分析表明，当地层油气饱和度值相等时，储集层泥质含量的增大将导致饱和参数下降。

缝裂或孔隙-裂缝型储集层

在这种情况下，岩石的电阻率不仅与基质孔隙度和裂缝孔隙之间的比值、而且与裂缝的