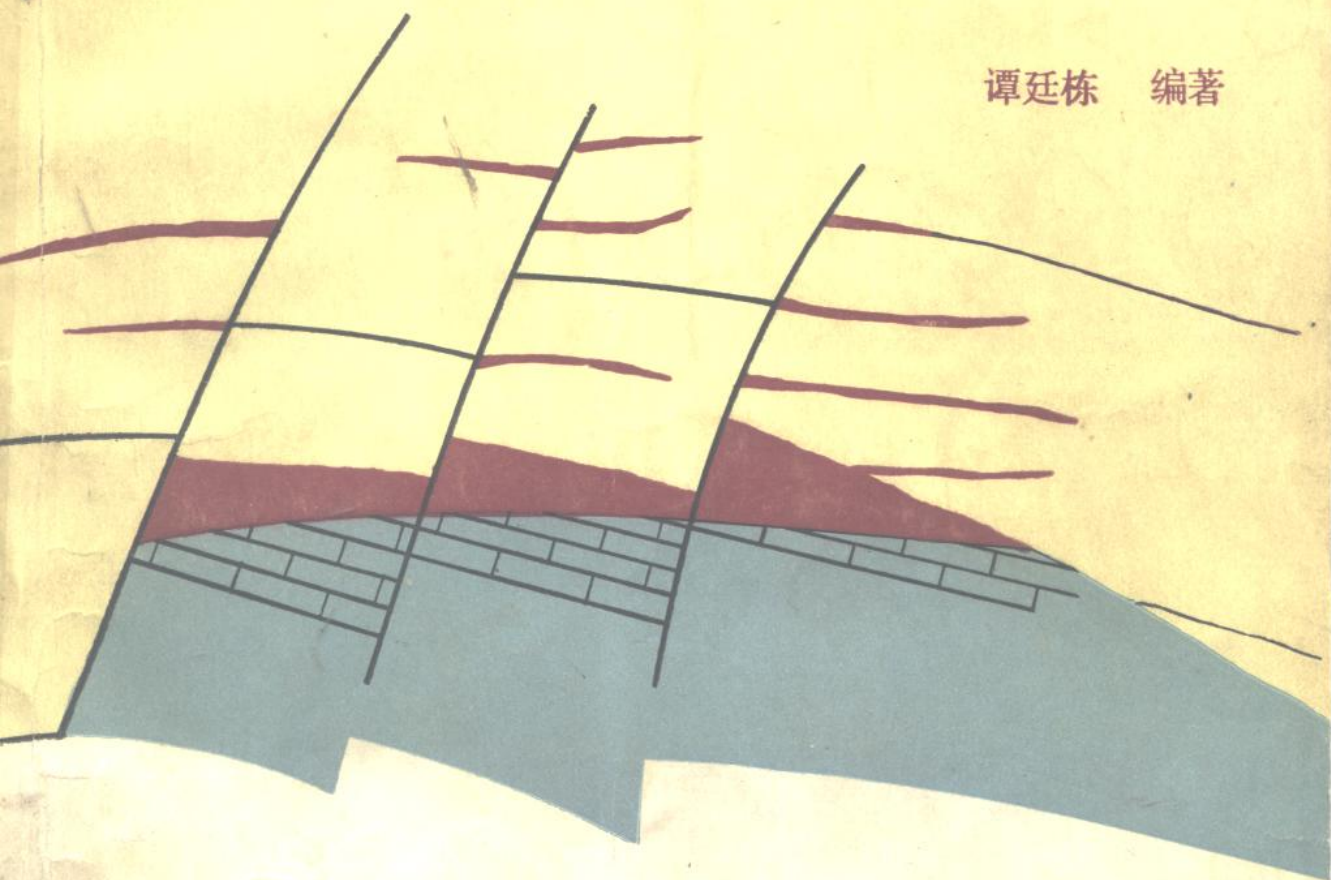


裂缝性油气藏 测井解释模型与评价方法

谭廷栋 编著



石油工业出版社

30832

裂缝性油气藏 测井解释模型与评价方法

谭 廷 栋 编 著

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书系统地论述了裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法。全书共分九章，主要包括：裂缝性油气层岩石的孔隙度、含水饱和度、渗透率和矿物含量解释模型，裂缝性油层与常规油层性质的比较，对水平裂缝、垂直裂缝和网状裂缝岩石电阻率的研究，泥浆侵入深度与双侧向测井探测深度估算，几种用于裂缝性油（气）、水层评价的新方法，裂缝性油气藏石油与天然气储量的计算。同时本书还对裂缝及裂缝方向的识别以及裂缝性油气层产能的预测也做了详细的介绍。书中还附有大量实例。

本书可供测井、地质、钻井、油藏工程技术人员使用，也可供高等院校测井、地质、钻井及油藏工程专业的师生、研究生参考。

裂缝性油气藏 测井解释模型与评价方法

谭廷栋 编著

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
妙峰山印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行



787×1092毫米 16开本 13¹/₄印张 313千字 2插图 印1—1,800

1987年5月北京第1版 1987年5月北京第1次印刷

书号：15037·2773 定价：3.20元

前 言

世界上许多高产油气藏都是裂缝性油气藏,我国一些高产油气藏也都是裂缝性油气藏。近年来,我着重研究了裂缝性油气藏的测井解释模型与评价方法,并将其运用于我国一些裂缝性油气藏的评价,取得了一定进展。裂缝性油气藏与粒间孔隙油气藏的测井解释模型不同,它们之间的测井评价方法也不一样,于是产生撰写本书的想法。

测井解释模型是建立测井解释方法的基础,应用根据裂缝性油气藏测井解释模型建立起来的测井方法评价裂缝性油气层,将有助于提高测井解释的精度。

由于裂缝性油气藏孔隙结构的非均质性,给测井与解释带来难题。目前国内外测井分析家正致力于研究,他们指出:裂缝性油气藏测井评价技术正在取得突破性的进展。

本书系统地论述了裂缝性油气藏测井解释模型,应用这些解释模型建立的测井解释方法,不仅能够识别裂缝和评价油气层,而且还能够估算石油与天然气控制储量和预测油气井产能,这是本书的突出特点。

在本书撰写过程中,参阅了王曰才、尚作源、楚泽涵、李厚义、曹嘉猷、曾文冲、欧阳健、文华川、赵良孝、吴继余、廖明书、廖觉生、刘宗诚等同志的有关文章,司徒丽丽、陈世新、徐辉同志参加了本书的文字修改和图幅编制工作,在此一并表示感谢。

本书由欧阳健同志审校。

编著者

目 录

第一章 裂缝性油气层岩石的孔隙度、含水饱和度、渗透率与矿物含量解释模型	(1)
第一节 裂缝孔隙度、基块(又称基质)孔隙度与总孔隙度	(1)
第二节 孔隙度分布指数与油气藏类型	(6)
第三节 裂缝含水饱和度、基块含水饱和度与总含水饱和度	(8)
第四节 裂缝渗透率、基块渗透率与总渗透率	(13)
第五节 岩石的矿物含量与岩石骨架的矿物含量	(21)
第二章 裂缝性油层与常规油层性质的比较	(23)
第一节 生产指数与生产压差	(23)
第二节 生产气油比与油层压力递减	(26)
第三节 流体界面与含水率	(27)
第四节 裂缝性油层采收率	(29)
第五节 油层裂缝渗透率、裂缝孔隙度、张开裂缝宽度与基块尺寸	(32)
第三章 水平裂缝、垂直裂缝与网状裂缝岩石电阻率	(36)
第一节 水平裂缝岩石电阻率	(36)
第二节 垂直裂缝岩石电阻率	(43)
第三节 网状裂缝岩石电阻率	(46)
第四节 裂缝岩石孔隙度指数与裂缝性岩石孔隙度指数	(49)
第五节 裂缝、裂缝性和裂缝-溶洞性岩石电阻率	(55)
第四章 泥浆侵入深度与双侧向测井探测深度及其侵入校正	(59)
第一节 裂缝性油气层的泥浆侵入深度	(59)
第二节 双侧向测井探测深度	(64)
第三节 双侧向测井侵入校正	(69)
第五章 裂缝性油(气)、水层测井评价方法	(73)
第一节 双侧向测井视电阻率差异与岩石荧光照片的对比	(73)
第二节 双侧向测井视电阻率与经过泥浆侵入校正后的岩石电阻率覆盖法	(74)
第三节 电导率差值法	(79)
第四节 电阻率差比法	(84)
第五节 侵入带饱和度法	(92)
第六节 纵波等效弹性模量差比法	(95)
第七节 横波与纵波时差比值法	(101)
第八节 双源距纵波时差重叠法	(105)
第九节 声波-电磁波法	(108)

第十节 温度法.....	(113)
第十一节 压力法.....	(116)
第十二节 三孔隙度法.....	(120)
第十三节 饱和度法.....	(126)
第十四节 裂缝性油气层的验证.....	(130)
第六章 估算裂缝性油藏石油储量.....	(137)
第一节 裂缝孔隙石油储量.....	(137)
第二节 原生的岩石基块孔隙石油储量.....	(143)
第三节 总孔隙石油储量.....	(149)
第七章 估算裂缝性气藏天然气储量.....	(152)
第一节 裂缝孔隙天然气储量.....	(152)
第二节 原生的岩石基块孔隙天然气储量.....	(155)
第三节 总孔隙天然气储量.....	(161)
第八章 识别裂缝与裂缝方向.....	(164)
第一节 裂缝识别测井.....	(164)
第二节 双侧向-微球形聚焦测井.....	(172)
第三节 双感应-八侧向(或球形聚焦)测井.....	(180)
第四节 中子、密度、声波与电磁波传播测井.....	(184)
第五节 自然伽马能谱测井.....	(196)
第九章 裂缝性油气层产能预测.....	(198)
第一节 裂缝性油层产能预测.....	(198)
第二节 裂缝性气层产能预测.....	(200)
附表 书中使用的许用单位与非许用单位换算表.....	(203)
参考文献.....	(205)

第一章 裂缝性油气层岩石的孔隙度、含水饱和度、渗透率与矿物含量解释模型

本章论述裂缝性油气层岩石的孔隙度、含水饱和度、渗透率与矿物含量。测井信息是这些参数的直接响应，它们是建立裂缝性油气层测井解释模型与评价方法的基础。

第一节 裂缝孔隙度、基块(又称基质)孔隙度与总孔隙度

裂缝性油气层岩石存在着两种孔隙度系统(图1-1)：一种是由粒间孔隙构成的基块孔隙度系统；另一种是由裂缝与溶洞孔隙构成的裂缝孔隙度系统。基块孔隙分布比较均匀，而裂缝与溶洞孔隙分布是非均匀的，这就构成了裂缝性油气层岩石孔隙分布的非均匀性特征。

在石油地质学中，裂缝孔隙度称为次生孔隙度，基块孔隙度称为原生孔隙度。

一、裂缝孔隙度

岩石裂缝孔隙度定义为裂缝孔隙体积与岩石体积之比，用下述公式表示：

$$\phi_f = \frac{V_{f_r}}{V} \quad (1-1)$$

式中： ϕ_f ——裂缝孔隙度，小数；

V_{f_r} ——裂缝孔隙体积，米³；

V ——岩石体积，米³。

图1-2是一个理想化的网格状裂缝系统把岩石切割为若干立方体的裂缝孔隙度模型。根据该模型可以建立计算裂缝孔隙度的公式。

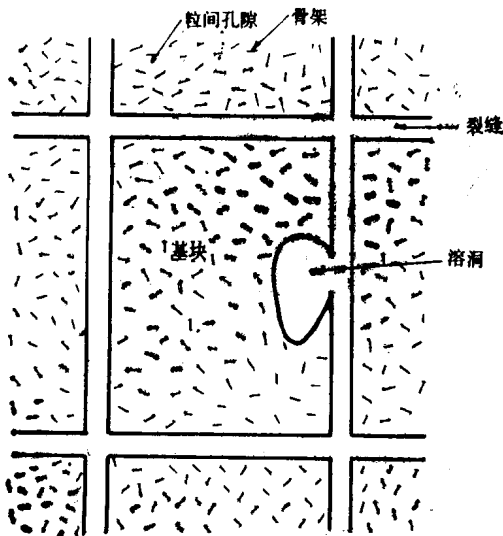


图 1-1 裂缝性岩石孔隙度系统

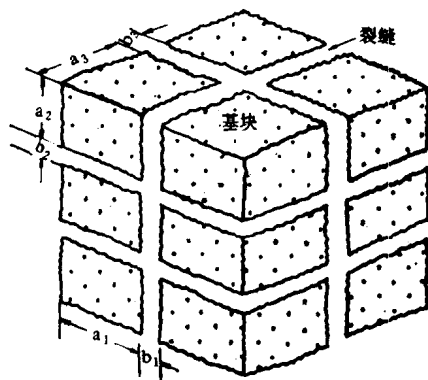


图 1-2 理想化的网格状裂缝系统岩石裂缝孔隙度模型

裂缝孔隙度

$$\phi_f = \frac{V_{\phi_f}}{V} = \frac{(a_1 + b_1)(a_2 + b_2)(a_3 + b_3) - a_1 a_2 a_3}{(a_1 + b_1)(a_2 + b_2)(a_3 + b_3)} \quad (1-2)$$

式中: a_1, a_2, a_3 ——岩石基块尺寸, 米

b_1, b_2, b_3 ——裂缝宽度, 米。

设立方体岩石基块尺寸 $a_1 = a_2 = a_3 = a$ 和裂缝宽度 $b_1 = b_2 = b_3 = b$, 代入 (1-2) 式

$$\phi_f = \frac{(a+b)^3 - a^3}{(a+b)^3} = \frac{3a^2b + 3ab^2 + b^3}{a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3} \quad (1-3)$$

因为裂缝宽度远小于岩石基块尺寸 ($b \ll a$), 所以裂缝宽度的立方和平方可以忽略不计, 则 (1-3) 式可近似地表示如下:

$$\phi_f \approx \frac{3b}{a + 3b} \approx \frac{3b}{a} \quad (1-4)$$

由此可见, 裂缝孔隙度的大小与裂缝宽度成正比, 而与岩石基块尺寸成反比。

在油气藏条件下, 张开裂缝的宽度取决于地层埋藏深度、孔隙流体压力和岩石类型。裂缝宽度变化范围在 10~200 微米之间。统计指出, 裂缝宽度在 10~40 微米之间出现的频数最高 (图 1-3)。

例 1-1

已知立方体岩石 (参看图 1-2) 基块尺寸 $a = 0.1$ 米, 裂缝宽度 $b = 40$ 微米, 应用 (1-4) 式计算裂缝孔隙度。

$$\phi_f = \frac{3 \times 40 \times 10^{-6}}{0.1} = 0.0012 = 0.12\%$$

如果取最大裂缝宽度 $b = 200$ 微米, 可计算出裂缝孔隙度 $\phi_f = 0.6\%$ 。由此可见, 岩石裂缝孔隙度通常都很小。

当裂缝性油气层埋藏深度超过 609.5 米时, 由于上覆盖层负荷的作用, 立方体岩石中的水平裂缝闭合, 垂直裂缝仍然张开 (图 1-4)。在这种情况下, 可以根据图 1-4 建立计算

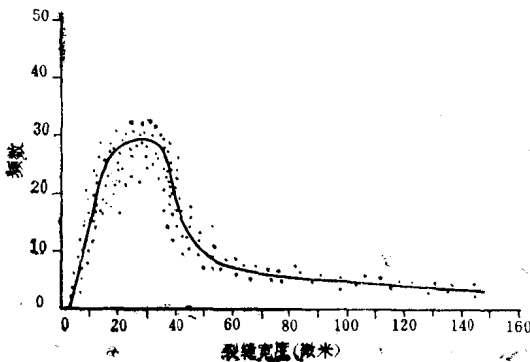


图 1-3 裂缝宽度统计频数曲线

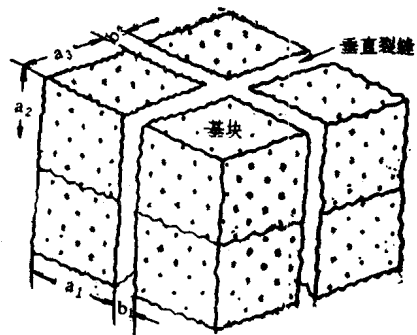


图 1-4 立方体岩石垂直裂缝孔隙度模型

垂直裂缝孔隙度的数学公式。

垂直裂缝孔隙度

$$\phi_{fv} = \frac{V_{\phi_{fv}}}{V} = \frac{(a_1 + b_1)a_2(a_3 + b_3) - a_1 a_2 a_3}{(a_1 + b_1)a_2(a_3 + b_3)} \quad (1-5)$$

式中: ϕ_{iv} ——垂直裂缝孔隙度, 小数。

同样地, 设立方体岩石基块尺寸 $a_1 = a_2 = a_3 = a$ 和垂直裂缝宽度 $b_1 = b_2 = b_3 = b$, 代入(1-5)式, 可得如下近似表达式

$$\phi_{iv} = \frac{(a+b)^2 a - a^3}{(a+b)^2 a} \approx \frac{2b}{a} \quad (1-6)$$

例1-2

已知立方体岩石基块尺寸 $a = 0.1$ 米, 垂直裂缝宽度 $b = 40$ 微米, 应用(1-6)式计算垂直裂缝孔隙度。

$$\phi_{iv} = \frac{2 \times 40 \times 10^{-6}}{0.1} = 0.0008 = 0.08\%$$

计算结果指出, 垂直裂缝孔隙度比裂缝孔隙度更小。

根据T.D.Van Golf-Racht的裂缝孔隙度经验估计值, 大裂缝孔隙度、微裂缝孔隙度和溶洞孔隙度变化范围, 示于表1-1中。

表 1-1 裂缝孔隙度经验估计值

裂缝孔隙度名称	裂缝孔隙度变化范围	备 注
网状大裂缝孔隙度	0.01~0.5%	孤立的微裂缝是指这种微裂缝互不连通
孤立的微裂缝孔隙度	0.001~0.01%	
网状微裂缝孔隙度	0.01~2%	
溶洞(在喀斯特岩石中)孔隙度	0.1~3%	

裂缝孔隙度经验估计值也很小, 但是, 裂缝孔隙度贮藏油气的经济价值特别高, 1个裂缝孔隙度单位贮藏的石油可采储量相当于5至8个基块孔隙度单位贮藏的石油可采储量。

二、基块孔隙度

岩石基块孔隙度定义为基块孔隙体积与岩石基块体积之比, 即

$$\phi_m = \frac{V_{\phi_m}}{V_m} \quad (1-7)$$

式中: ϕ_m ——岩石基块孔隙度, 小数;

V_{ϕ_m} ——基块孔隙体积, 米³;

V_m ——岩石基块体积, 米³

实际上, 岩石基块孔隙度是裂缝性岩石中的粒间孔隙度。在碳酸盐岩地层中, 这种孔隙度分布均匀, 而且变化不大。

岩石基块孔隙度又称原生孔隙度, 它不包括次生孔隙度。岩石基块孔隙度与裂缝孔隙度解释模型如图1-5所示。

例1-3

已知岩石基块孔隙体积 $V_{\phi_m} = 0.02$ 米³, 岩石基块体积 $V_m = 0.5$ 米³, 使用(1-7)式计算岩

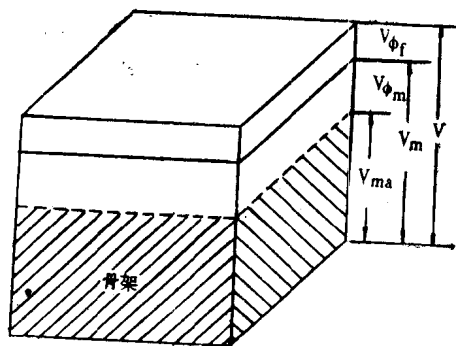


图 1-5 岩石基块孔隙度与裂缝孔隙度解释模型

石基块孔隙度。

$$\phi_m = \frac{0.02}{0.5} = 0.04 = 4\%$$

基块孔隙体积与岩石总体积(包括全部孔隙体积)之比, 定义为原生的岩石基块孔隙度

$$\phi_b = \frac{V_{\phi_m}}{V} \quad (1-8)$$

式中: ϕ_b ——原生的岩石基块孔隙度, 小数。

原生的岩石的基块孔隙度与岩石基块孔隙度之间的关系是

$$\phi_b = \phi_m (1 - \phi_f) \quad (1-9)$$

例1-4

由例1-3计算出岩石基块孔隙度 $\phi_m = 0.04$, 裂缝孔隙度 $\phi_f = 0.01$, 应用(1-9)式计算原生的岩石基块孔隙度。

$$\phi_b = 0.04 (1 - 0.01) = 0.0396 = 3.96\%$$

一般认为, 岩石基块孔隙度大于原生的岩石基块孔隙度。在裂缝孔隙度很低的情况下, 原生的岩石基块孔隙度近似地等于岩石基块孔隙度($\phi_b \approx \phi_m$)。

表1-2给出了伊朗油田岩心分析的岩石基块孔隙度以及基块渗透率和基块孔隙含水饱和度的经验估计值。

表 1-2 伊朗油田岩石基块孔隙度估计值

岩 性	基块孔隙度(ϕ_m) %	基块渗透率(K_m) (毫达西)	基块孔隙含水饱和度 (S_{wi}), %	岩 石 类 型
碳 酸 盐 岩	>8	>1	25	好
	5~8	0.1~1	25~50	差
	<5	<0.1	>50	致密

岩石基块孔隙度也是评价裂缝性油气层岩石类型的一个重要指标。基块孔隙度越大, 岩石贮藏油气的能力越高。表1-3是伊朗加奇萨兰 (Gachsaran) 油田岩心分析基块孔隙度与生产描述的实际例子, 该表对于评价裂缝性油气层岩石基块孔隙度的生产作用, 具有重要的参考价值。

该表指出, 岩石基块孔隙度越高, 基块孔隙含水饱和度越低, 岩石生产越好。

表1-4给出了伊朗弗列顿(Fullerton) 油田裂缝性石灰岩和无裂缝白云岩油气层岩石基块孔隙度的例子, 其中包括低孔隙度裂缝性石灰岩地层的基块孔隙度。

表1-4中低孔隙度裂缝性地层岩石基块孔隙度 $\phi_m = 2.38\%$, 它与我国任丘油田裂缝性白云岩油藏岩心分析孔隙度相接近, 任丘油田岩心分析的基块孔隙度平均值 $\phi_m = 2.15\%$ 。

三、总孔隙度

裂缝性油气层岩石的总孔隙度定义为总孔隙体积与岩石体积之比, 即

$$\phi = \frac{V_{\phi}}{V} \quad (1-10)$$

式中: ϕ ——岩石总孔隙度, 小数;

V_{ϕ} ——总孔隙体积, 米³。

表 1-3 加奇萨兰油田岩石基块孔隙度与生产描述

岩 性	岩石基块孔隙度 (ϕ_m), %	基块渗透率(K_m) 毫达西	基块孔隙含水饱和度 (S_{wi}), %	生 产 描 述
碳 酸 盐 岩	12~18	4~100	10~15	岩石生产好, 渗透率好, 含水饱和度低
	8~17	0.5~10	10~30	
	8~15	0.5~5	15~30	
	8~10	0.5~2	20~30	
	8~12	0.1~0.5	30~40	岩石生产好, 渗透率很低, 含水饱和度较高
	13~16	0.1	25~30	
	8~12	0.05	40~60	
	6~8	0.2	30~50	
	5~8	0.3	30~50	
	4~8	1.0	25~50	
	5~8	—	60~80	致密, 非生产岩石, 没有渗透率, 含水饱和度高
	3~8	—	70~100	
	0~4	—	100	

表 1-4 弗列顿油田基块孔隙度数值

地 层	岩石基块孔隙度 (ϕ_m), %	最大基块渗透率 (K_m), 毫达西	基块孔隙含水饱和度 (S_{wi}), %	备 注
低孔隙度裂缝性地层	2.38	96	60	根据300至500块裂缝石灰岩和无裂缝白云岩样品统计
裂缝性石灰岩	9.05	106	46	
无裂缝白云岩	8.72	42	42	

裂缝性油气层岩石总孔隙体积等于裂缝孔隙体积与基块孔隙体积相加。

$$V_{\phi} = V_{\phi_f} + V_{\phi_m} \quad (1-11)$$

因此, 总孔隙度等于裂缝孔隙度和原生的岩石基块孔隙度之和, 即

$$\phi = \frac{V_{\phi_f} + V_{\phi_m}}{V} = \phi_f + \phi_m \quad (1-12)$$

或

$$\phi = \phi_f + \phi_m (1 - \phi_f) \quad (1-13)$$

裂缝性油气层岩石总孔隙度、基块孔隙度和裂缝孔隙度如图1-6所示。在大多数情况下, 岩石基块孔隙度大于裂缝孔隙度($\phi_m > \phi_f$), 但在图1-6中给出的是岩石基块孔隙度小于裂缝孔隙度($\phi_m < \phi_f$), 这是因为裂缝孔隙中包括与裂缝连通的溶洞孔隙度。

从井段2637.3~2650.1米(厚度12.8米), 总孔隙度平均值 $\phi = 3.3\%$, 基块孔隙度平均值 $\phi_m = 1.51\%$, 裂缝孔隙度平均值 $\phi_f = 1.79\%$ 。

例1-5

根据图1-6, 在井深2645.5, 已知岩石基块孔隙度 $\phi_m = 2.2\%$, 裂缝孔隙度 $\phi_f = 1\%$, 应用(1-13)式计算总孔隙度。

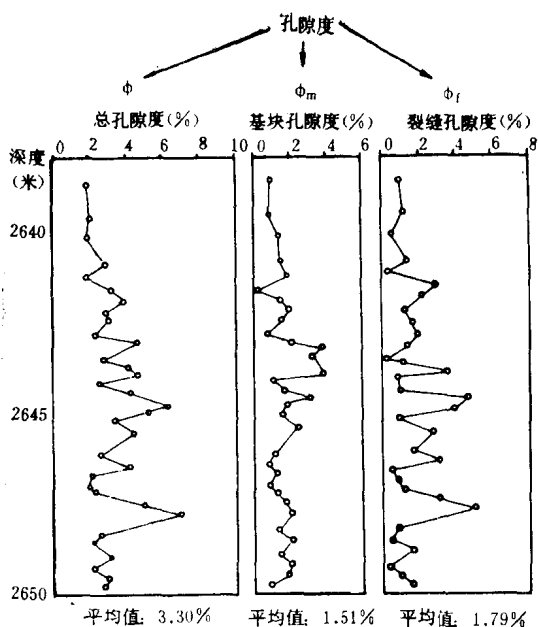


图 1-6 用岩心分析的岩石总孔隙度、基块孔隙度与裂缝孔隙度曲线

$$v_f = \frac{\phi_f}{\phi}$$

(1-14)

式中, v_f ——裂缝孔隙度分布指数, 小数。

原生的岩石基块孔隙度分布指数定义为原生的岩石基块孔隙度与岩石总孔隙度之比, 即

$$v_b = \frac{\phi_b}{\phi}$$

(1-15)

式中, v_b 为原生的岩石基块孔隙度分布指数, 小数。

因此, 裂缝孔隙度分布指数与原生的岩石基块孔隙度分布指数之间的关系是

$$v_f = 1 - v_b$$

(1-16)

应用 (1-16) 式作图, 如图 1-7 所示。

纵座标表示裂缝孔隙度分布指数, 横座标表示原生的岩石基块孔隙度分布指数。根据该图, 孔隙度分布可以分为以下三种类型。

(1) A型孔隙度分布。裂缝孔隙度分布指数 $v_f = 10 \sim 15\%$, 原生的岩石基块孔隙度分布指数 $v_b = 85 \sim 90\%$, 裂缝孔隙贮藏能力低, 而原生的岩石基块孔隙度贮藏油气能力高。这种类型的裂缝性油气藏贮藏能力大, 产量高, 而且产量下降慢, 稳产时间长, 但采收率比较低。

(2) B型孔隙度分布。孔隙度分布指数 $v_f = 40 \sim 50\%$, 原生的岩石基块孔隙度分布指

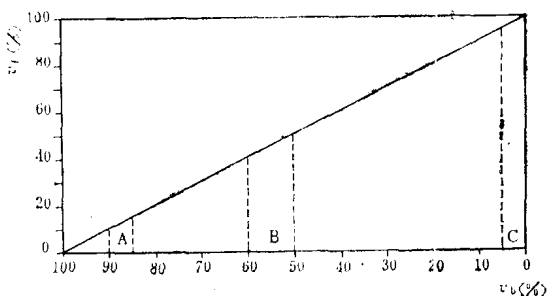


图 1-7 孔隙度分布指数与油气藏储集类型

$$\begin{aligned}\phi &= 0.01 + 0.022(1 - 0.01) = 0.03178 \\ &= 3.178\%\end{aligned}$$

图1-6指出, 总孔隙度随深度变化的趋势与裂缝孔隙度随深度变化的趋势相同, 而岩石基块孔隙度随深度变化的趋势与总孔隙度和裂缝孔隙度随深度变化的趋势不一样。岩石基块孔隙度变化小, 而裂缝孔隙度变化大, 因而相应地引起总孔隙度也有较大的变化。

第二节 孔隙度分布 指数与油气藏类型

岩石孔隙度分布指数用于评价油气藏类型和贮藏能力。

裂缝孔隙度分布指数定义为裂缝孔隙度与岩石总孔隙度之比, 即

数 $v_b = 50 \sim 60\%$ ，裂缝孔隙度贮藏油气的能力几乎与原生的岩石基块孔隙度相同。这种类型的裂缝性油气藏储量大，产量特别高，产量下降比较慢，稳产时间较长，采收率高。

(3) C型孔隙度分布。裂缝孔隙度分布指数 $v_f = 95 \sim 100\%$ ，而原生的岩石基块孔隙度分布指数 $v_b = 0 \sim 5\%$ ，油气全部贮藏在裂缝孔隙之中，原生的岩石基块孔隙不贮藏油气。这种类型的裂缝油气藏贮藏能力小，在短时间里油气产量特别高，采收率最高，但油气产量下降快，稳产时间短。

我国存在着这三种孔隙度分布类型的裂缝性油气藏。任丘古潜山白云岩油藏裂缝孔隙度分布指数平均值 $v_f = 33\%$ ，油藏类型处于A型和B型之间。四川石灰岩裂缝性气藏孔隙度分布类型在B与C型之间变化。

例1-6

已知某裂缝性白云岩油藏原生的岩石基块孔隙度 $\phi_b = 0.02$ ，总孔隙度 $\phi = 0.03$ ，应用(1-15)式与(1-16)式分别计算原生的岩石基块孔隙度分布指数和裂缝孔隙度分布指数。

$$v_b = \frac{0.02}{0.03} = 0.6667 = 66.67\%$$

$$v_f = 1 - 0.6667 = 0.3333 = 33.33\%$$

在裂缝性油气藏中，裂缝孔隙度虽然很小，但它的经济价值特别高。因此，对于裂缝性油气藏类型，应当使用孔隙度分布指数评价它的储量与产量。

表1-5给出了伊朗弗列顿油田碳酸盐岩裂缝孔隙度分布指数，表中还给出了岩石基块孔隙度、裂缝孔隙度、总孔隙度、基块渗透率以及总孔隙含气、油、水饱和度。

表 1-5 弗列顿油田裂缝孔隙度分布指数

分 组	1	2	3	4
裂缝孔隙度分布指数(v_f), %	10.40	39.69	19.24	5.71
岩石基块孔隙度(ϕ_m), %	1.98	1.58	2.56	7.92
裂缝孔隙度(ϕ_f), %	0.23	1.04	0.61	0.48
岩石总孔隙度(ϕ), %	2.21	2.62	3.17	8.40
基块渗透率(K_m), 毫达西	0.30	0.20	0.30	3.70
总孔隙含气饱和度, %	3.61	34.73	19.87	44.28
总孔隙含油饱和度, %	2.71	2.29	27.76	21.90
总孔隙含水饱和度, %	93.66	62.97	52.36	38.92

表中除第4组外，第1、2、3组是低孔隙度裂缝性油气藏。

鲁克(Locke)和毕律什(Bliss)提出了一个直接测定裂缝孔隙度分布指数的方法，该测定方法的具体步骤是：先用胶带罩住岩心上的裂缝或溶洞，再把岩心浸入水压室，水在控制下通过胶带渗入岩心，并记录压力，结果如图1-8所示。在从0至 V_{f_1} 之间，流体压力增加不显著，当裂缝孔隙体积饱和水以后，水开始侵入岩石基块体积(V_{f_m})，流体压力显著地增加，岩心总孔隙体积就是侵入水的总体积。由图1-8上的折点，可以确定裂缝孔隙度的分布指数。

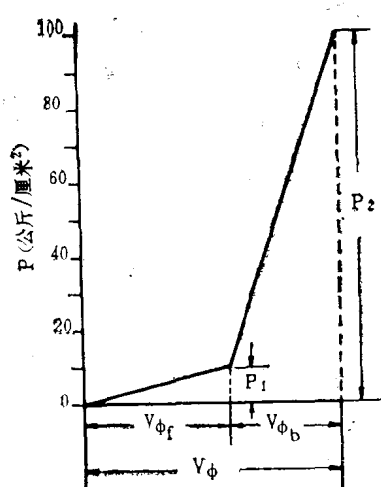


图 1-8 用压力法确定裂缝孔隙度分布指数

$$v_f = \frac{V_{\phi f}}{V_{\phi f} + V_{\phi b}} = \frac{V_{\phi f}}{V_{\phi}} \quad (1-17)$$

例1-7

在压力 P_1 时水侵入岩石裂缝孔隙体积 $V_{\phi f} = 0.1$ 厘米³，在压力 P_2 时水侵入岩石孔隙总体积 $V_{\phi} = 0.35$ 厘米³，应用(1-17)式计算裂缝孔隙度分布指数。

$$v_f = \frac{0.1}{0.35} = 0.2857$$

计算结果指出，岩石裂缝孔隙度分布指数为0.2857。这种裂缝性油气藏岩石，基块孔隙贮藏油气的能力要高于裂缝孔隙贮藏油气的能力。

第三节 裂缝含水饱和度、基块含水饱和度与总含水饱和度

在裂缝性油气层中，岩石孔隙空间存在两种孔隙含水饱和度，即裂缝孔隙含水饱和度与基块孔隙含水饱和度。总孔隙含水饱和度等于裂缝孔隙含水饱和度和基块孔隙含水饱和度的加权平均值。

裂缝孔隙束缚水饱和度极低，一般不超过5%，而基块孔隙束缚水饱和度较高，一般大于30%。基块孔隙含水饱和度大小与岩石基块尺寸有关，基块尺寸越小，含水饱和度越高，有时候甚至高达100%。此外，基块孔隙度越小，含束缚水饱和度越高。所以，在裂缝性油气层中，岩石基块孔隙含束缚水饱和度变化范围极大。

一、裂缝孔隙含水饱和度

图1-9表示裂缝宽度与基块尺寸平面图，图中 b 代表裂缝宽度， a 代表基块尺寸。

岩石裂缝孔隙含水饱和度定义为裂缝孔隙含水体积与裂缝孔隙体积之比，即

$$S_{wf} = \frac{V_{w,f}}{V_{\phi f}} \quad (1-18)$$

式中： S_{wf} ——裂缝孔隙含水饱和度，小数；

$V_{w,f}$ ——裂缝孔隙含水体积，米³。

法国石油研究院测定过岩石裂缝壁水膜的厚度。根据图1-10，裂缝宽度 $b = 100$ 微米，当水和油在裂缝中分布达到平衡时，测定束缚在裂缝壁一边的水膜厚度为0.16微米，裂缝壁两边的水膜厚度为0.32微米。因此，一般认为，在裂缝孔隙中的原生束缚水饱和度极小，甚至

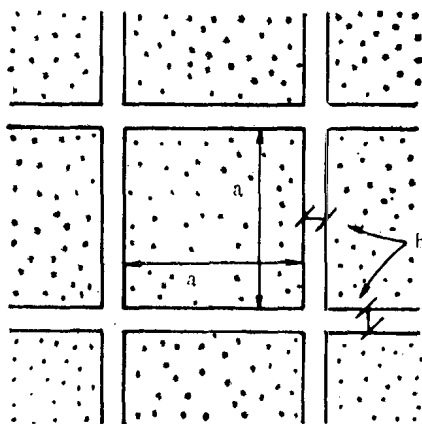


图 1-9 岩石裂缝宽度与基块尺寸平面图

可以忽略不计。

为了研究方便，把测定束缚在裂缝壁上水膜的厚度转换成裂缝孔隙含水饱和度。根据图1-10裂缝宽度和水膜厚度平面图绘制成垂直裂缝立体图（图1-11）。

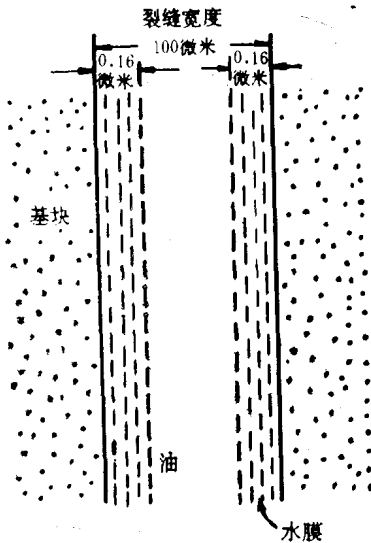


图 1-10 束缚在裂缝壁上水膜的厚度(μ 表示微米)

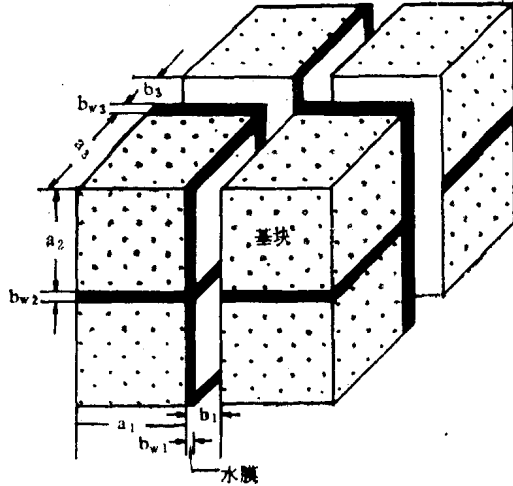


图 1-11 裂缝宽度与水膜厚度立体图

由于上部覆盖地层压力的作用，水平裂缝闭合，只保留束缚水膜的厚度，而垂直裂缝是敞开的。在裂缝壁上的水膜厚度用 b_v 表示。

按照图1-11，计算岩石裂缝孔隙体积与裂缝孔隙含水体积的公式分别表示如下：

裂缝孔隙体积

$$V_{\text{裂缝}} = (a_1 + b_1) (a_2 + b_{v2}) (a_3 + b_3) - a_1 a_2 a_3 \quad (1-19)$$

式中， b_v 为裂缝壁水膜的厚度，单位米。

裂缝束缚水体积

$$V_{\text{束缚水}} = (a_1 + b_{v1}) (a_2 + b_{v2}) (a_3 + b_{v3}) - a_1 a_2 a_3 \quad (1-20)$$

设 $a_1 = a_2 = a_3 = a$ 与 $b_1 = b_3 = b$ 以及 $b_{v1} = b_{v2} = b_{v3} = b_v$ ，计算裂缝孔隙含水饱和度的公式可写为

$$S_{vf} = \frac{(a + b_v)^3 - a^3}{(a + b)^2 (a + b_v) - a^3} \approx \frac{3b_v}{2b} \quad (1-21)$$

裂缝孔隙含束缚水饱和度的大小是与裂缝壁束缚水膜的厚度成正比，而与敞开裂缝的宽度成反比。当裂缝壁束缚水膜厚度不变时，裂缝宽度越大，裂缝孔隙含水饱和度越小。反之，裂缝宽度越小，裂缝孔隙含水饱和度越大。

例1-8

根据图1-10，已知裂缝宽度 $b = 100$ 微米，束缚在裂缝壁上水膜的宽度 $b_v = 0.32$ 微米，应用(1-21)式计算裂缝孔隙束缚水饱和度。

$$S_{vf} = \frac{3 \times 0.32 \times 10^{-6}}{2 \times 100 \times 10^{-6}} = 0.0048 = 0.48\%$$

当裂缝宽度减小到 $b = 10$ 微米时，计算裂缝孔隙度束缚水饱和度。

$$S_{wr} = \frac{3 \times 0.32 \times 10^{-6}}{2 \times 10 \times 10^{-6}} = 0.048 = 4.8\%$$

二、基块孔隙含水饱和度

裂缝性油气层岩石基块孔隙含水饱和度定义为基块孔隙含水体积与基块孔隙体积之比,

$$S_{wb} = \frac{V_{s_{wb}}}{V_{\phi_m}} \quad (1-22)$$

式中: S_{wb} ——基块孔隙含水饱和度;

$V_{s_{wb}}$ ——基块孔隙含水体积。

基块孔隙含水饱和度的大小不仅与基块孔隙度、渗透率、毛细管压力有关,而且还与基块尺寸有关。

图1-12是一个理想的裂缝性油气层岩石基块孔隙含水饱和度模型。假设基块A,B,C高度(h_b)相等,但基块孔隙度、渗透率不相同,且有基块孔隙度 $\phi_A > \phi_B > \phi_C$ 与基块渗透率 $K_A > K_B > K_C$ 。A基块的孔隙度高,渗透率大,基块孔隙含水饱和度低,含油气饱和度高。B基块孔隙度比A基块低,其渗透率也比A基块低,因此,B基块孔隙含水饱和度高,含油气饱和度低。C基块孔隙度和渗透率都比B基块低,在C基块孔隙内完全充满着束缚水饱和度,无油气存在。

如果岩石基块孔隙度和渗透率相同,但基块高度不相同,则小基块中不饱含油气,而大基块中饱含油气,如图1-13所示。

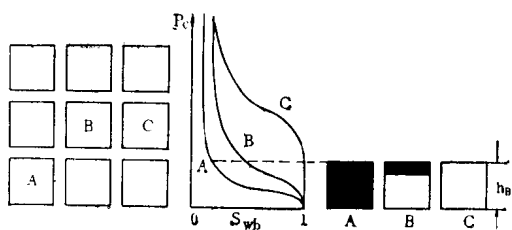


图 1-12 岩石基块孔隙含水饱和度模型

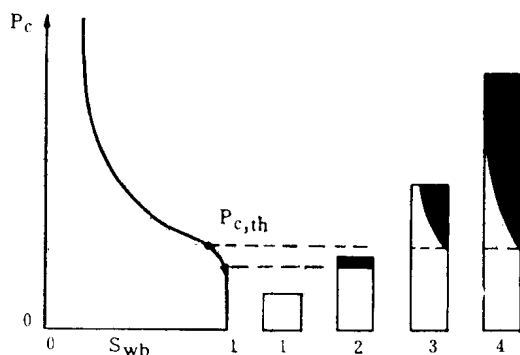


图 1-13 基块高度不同时含水饱和度模型

在图1-13中, $P_{c,th}$ 表示岩石基块毛细管压力门槛值。当岩石基块毛细管压力 P_c 小于毛细管压力门槛值 ($P_c < P_{c,th}$) 时,岩石基块孔隙不含油气。反之,当岩石基块毛细管压力 P_c 大于毛细管压力门槛值 ($P_c > P_{c,th}$) 时,岩石基块孔隙含有油气。

图1-13中的第1个基块只饱和束缚水,不饱和油气,第2,3,4个基块饱和油气及地层束缚水。

当基块孔隙度和基块高度同时发生变化时,基块孔隙含水饱和度的变化如图1-14所示。图中指出,①处的基块高度 $h_b = 0.912$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 13\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 60\%$;②处的基块高度 $h_b = 0.85$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 17\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 50\%$;③处的基块高度 $h_b = 0.4$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 17\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 95\%$;④处基块高度 $h_b = 0.3$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 17\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 95\%$;

⑤处基块高度 $h_b = 0.15$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 11\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 95\%$;⑥处基块高度 $h_b = 0.9$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 18\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 50\%$;⑦处基块高度 $h_b = 0.65$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 15\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 60\%$;⑧处基块高度 $h_b = 0.8$ 米,基块孔隙度 $\phi_m = 10\%$,基块孔隙含水饱和度 $S_{wb} = 98\%$ 。

裂缝性油气层岩石基块孔隙体积及其含水体积可以用常规的实验室方法进行测定。

例1-9

已知由实验室测定的某岩石基块孔隙含水体积 $V_{s_{wb}} = 0.035$ 米³,岩石基块孔隙体积 $V_{\phi_b} = 0.1$ 米³,应用(1-22)式计算岩石基块孔隙含水饱和度。

$$S_{wb} = \frac{0.035}{0.1} = 0.35 = 35\%$$

由此可见,岩石基块孔隙中饱含油气的多少,取决于岩石基块的高度和岩石孔隙度的大小。

三、总孔隙含水饱和度

裂缝性油气层岩石总孔隙含水饱和度等于总孔隙含水体积除以总孔隙体积。

$$S_v = \frac{V_{s_v}}{V_{\phi}} \quad (1-23)$$

式中: S_v ——裂缝性岩石总孔隙含水饱和度;

V_{s_v} ——总孔隙含水体积。

裂缝性油气层总孔隙含水体积等于裂缝孔隙含水体积加基块孔隙含水体积,即

$$V_{s_v} = V_{s_{vf}} + V_{s_{wb}} \quad (1-24)$$

其中,裂缝孔隙含水体积等于裂缝孔隙含水饱和度乘以裂缝孔隙体积,而基块孔隙含水体积等于基块孔隙含水饱和度乘以基块孔隙体积:

$$S_v = \frac{V_{\phi_f}}{V_{\phi}} S_{vf} + \frac{V_{\phi_m}}{V_{\phi}} S_{wb} \quad (1-25)$$

在等式右端分子和分母同除以岩石总体积 V ,获得裂缝性油气层岩石的总孔隙含水饱和度,即

$$S_v = \frac{\phi_f}{\phi} S_{vf} + \frac{\phi_b}{\phi} S_{wb} \quad (1-26)$$

由于原生的岩石基块孔隙度等于总孔隙度减裂缝孔隙度,同时裂缝孔隙度与总孔隙度之比用裂缝孔隙度分布指数表示,则有

$$S_v = v_f S_{vf} + (1 - v_f) S_{wb} \quad (1-27)$$

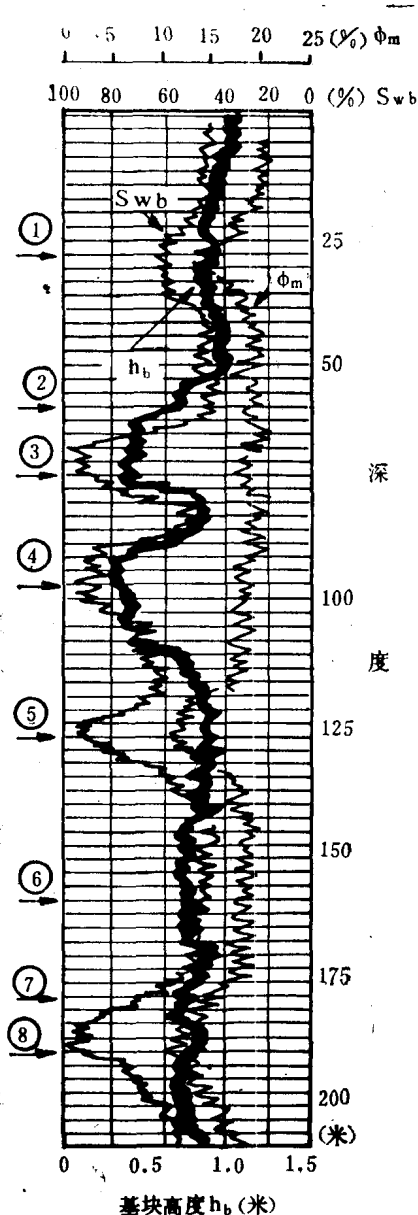


图 1-14 孔隙度与基块高度及含水饱和度的变化