

基于岩石类型的 碳酸盐岩油藏描述方法

CARBONATE RESERVOIR CHARACTERIZATION BASED ON ROCK TYPE

谭学群 廉培庆 张俊法 编著



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

基于岩石类型的 碳酸盐岩油藏描述方法

CARBONATE RESERVOIR CHARACTERIZATION BASED ON ROCK TYPE

谭学群 廉培庆 张俊法 编著

图书在版编目(CIP)数据

基于岩石类型的碳酸盐岩油藏描述方法/谭学群,
廉培庆,张俊法编著. —东营:中国石油大学出版社,
2016. 5

ISBN 978-7-5636-5211-2

I. ①基… II. ①谭… ②廉… ③张… III. ①碳酸盐
岩油气藏—油气勘探 IV. ① P618. 130. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 099736 号

书 名: 基于岩石类型的碳酸盐岩油藏描述方法
作 者: 谭学群 廉培庆 张俊法

责任编辑: 王金丽(电话 0532—86983567)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86983437)

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 9.25 字数: 204 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 85.00 元

Preface | 序 |

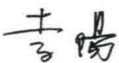
碳酸盐岩油气田在世界油气田的分布中占有重要地位。据统计,世界上在近 40 多个国家和地区的 57 个沉积盆地中发现了碳酸盐岩油气田,油、气储量分别占世界油、气总储量的 48% 和 28%,油、气产量约占世界油、气总储量的 60% 和 23%。碳酸盐岩油气田主要分布于中东、墨西哥等地。

我国碳酸盐岩油藏分布广泛,碳酸盐岩油气总资源量大于 300×10^8 t 油当量,石油资源量约 150×10^8 t。众所周知,碳酸盐岩油气藏的储集体形成机制和流体流动机理不同于砂岩油藏,在开发方法与开采技术方面存在特殊性。

近年来,随着中国石油化工集团公司不断实施“走出去”的海外石油资源开发战略,接触到的国外碳酸盐岩区块不断增加,油藏类型越来越多。为了开发好这些碳酸盐岩油气藏,做好油藏精细描述,正确划分碳酸盐岩油藏类型并搞清岩石类型的展布规律和属性变化是首要问题。借助于“十二五”国家科技重大专项 31 项目“中东中亚富油气区大型项目勘探开发关键技术”的支持,中国石化石油勘探开发研究院在总结实践的基础上,经过一年多的准备撰写本书。

本书重点介绍了国外碳酸盐岩研究中如何划分储层岩石类型,通过使用大量的岩心分析数据,研究岩石结构、成岩作用以及岩石与流体间相互作用的动态特征,评价现今油藏的岩石特征,并将岩石类型贯穿于油藏描述的每一个环节;立足于实用有效的原则,对重要概念进行了梳理,便于读者理解,在介绍方法时举实例、摆图表,逐步分析,易于掌握,便于应用。

本书的出版将对碳酸盐岩油藏的科研工作与开发生产起到启发和帮助作用,也会为我们开发好海外同类油藏提供借鉴。

中国工程院院士 

2015 年 1 月

Preface | 前言 |

碳酸盐岩油藏中的石油储量大约占全球石油储量的一半,且赋存极其丰富的天然气资源。因此,了解当前碳酸盐岩油藏研究热点,掌握国际上最新的针对碳酸盐岩油藏的描述方法,无疑是很重要的。

当前碳酸盐岩油藏研究的热点是岩石物理相岩石类型的研究与应用。岩石类型(Rock Type)的定义是:“沉积在相似地质条件下,经历了相似的成岩过程,形成了具有统一的孔喉结构和润湿性的一类岩石。同一种岩石类型应具有统一的孔隙度-渗透率关系、相似的毛管压力曲线特征和相对渗透率数据集。”

本书以岩石类型概念为切入点,详细介绍了岩石类型的划分与应用,并贯穿于三维地质建模的各个环节。这些技术和方法,强调了岩石物理和油藏工程方面的研究,强调了特殊岩心分析的应用,强调了动静结合,有别于单纯地质学的岩石类型划分,也有别于国内常用的相控建模理论,在方法上和手段上是一种必要的补充与完善。

本书中介绍的这些方法涉及多个学科,包括石油地质、油藏工程、测井解释、地球物理、应用数学等领域,并应用了多种资料进行综合分析 with 评价,力求从不同角度对结论进行印证,目的是使最终建立的三维地质模型能够尽量真实再现地下情况,减小储层预测的不确定性。

以建立碳酸盐岩油藏三维地质模型为主线,全书共分为八章,各章之间既相互联系,又自成体系,其主要内容如下:

第一章,介绍碳酸盐岩地质学经典的岩石类型划分方法,即邓哈姆分类方法和卢西亚分类方法,是从岩石结构角度或者说是从静态角度对碳酸盐岩油藏岩石类型进行划分。

第二章,介绍多种岩石物理相岩石类型划分方法,包括 Winland R_{35} 法、FZI 法、DRT 法、J 函数法、修正的 Lorenz 图示法等,是从动态角度进行划分。

第三章,对比 Z 公司提出的两种岩石类型划分方法,指出了仅仅使用地质学方法划分的局限性。

第四章,提供了碳酸盐岩岩石类型划分的工作流程,并分析了岩相、岩石物理相组合和岩石类型之间的关系。

第五章,介绍岩石类型预测方法,通过建立岩石类型和测井曲线的关系,把从取心井中划分的岩石类型合理地推广到未取心井中。

第六章,以阿布扎比一个碳酸盐岩油藏为例,介绍集各种信息建立碳酸盐岩油藏岩石类型模型和三维属性模型的方法,强调了稳定区和地质概念模型的作用,尤其强调了地震资料在井间的约束作用。

第七章,介绍一种岩石类型评价储量的方法,尝试使用动静结合的方法建立岩石物理截止值与岩石类型的关系,在C油田使用5种不同的方法定量评价储层有效厚度,进而计算相应的地质储量。

第八章,以中东地区孔隙型碳酸盐岩Y油田为例,提出了一套基于岩石类型的渗透率和饱和度计算方法,为碳酸盐岩油藏建模奠定基础。

总之,借助于“十二五”国家科技重大专项31项目“中东中亚富油气区大型项目勘探开发关键技术(二期)(2011ZX05031)”的支持,以及国际合作中的一些经验和体会,研究团队边学习、边实践、边探索、边总结,在中东Y碳酸盐岩油藏的研究中取得了多项成果,岩石类型的研究得到较好应用,所以撰写了本书,希望对国内同行有所启发和借鉴。

在本书编写过程中,得到了领导的关心和鼓励,中国工程院院士李阳为本书作序,中国科学院院士、中国石化石油勘探开发研究院院长金之钧给予了悉心指导,石勘院总工程师计秉玉、国家“千人计划”专家段太忠提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

李艳华参与编写了第五章,杜秀娟参与编写了第一章,高慧梅、高敏、董广为、张诗洋等协助完成了部分工作,在此一并表示感谢。

由于水平有限,书中难免存在问题和纰漏,敬请读者批评指正。

编著者

2015年1月

Contents | 目录 |

第一章 碳酸盐岩地质学岩石类型划分方法 1

 第一节 邓哈姆岩石类型划分方法 2

 第二节 卢西亚岩石类型划分方法 3

 本章小结 7

第二章 碳酸盐岩岩石物理相岩石类型划分方法 8

 第一节 利用特殊岩心分析划分岩石类型 9

 第二节 利用常规岩心资料划分岩石类型 14

 本章小结 18

第三章 两种岩石类型划分方法的比较 19

 第一节 前期岩石类型划分方法 19

 第二节 利用测井曲线预测岩石类型和渗透率 23

 第三节 建议的岩石类型划分方法 24

 本章小结 31

第四章 碳酸盐岩储层岩石类型划分——地质与特殊岩心分析的联系 33

 第一节 岩相及沉积学的作用 33

 第二节 岩石物理相组合及流动单元划分 36

 第三节 储层岩石类型划分 40

 第四节 特殊岩心分析在岩石类型划分中的作用 43

 本章小结 46

第五章 测井预测岩石类型方法 47

 第一节 多元回归分析 47

 第二节 人工神经网络方法 55

第三节	自组织映射方法	60
本章小结		69
第六章	碳酸盐岩油藏地质建模	70
第一节	储层岩石类型表征	71
第二节	稳定区确定	73
第三节	井网格平均化	74
第四节	未取心井点的预测	75
第五节	地质概念模型	78
第六节	三维岩石类型建模	79
第七节	基于地震资料的孔隙度分布	83
第八节	地震数据约束的三维属性建模	86
本章小结		89
第七章	岩石类型在储量计算中的应用	90
第一节	油藏特征	91
第二节	储量计算方法	91
第三节	结果及讨论	98
本章小结		105
第八章	基于岩石类型的属性建模方法	106
第一节	井点岩石类型划分与预测	106
第二节	基于岩石类型的孔渗建模方法	116
第三节	含水饱和度预测	123
本章小结		130
参考文献		132

碳酸盐岩地质学岩石类型划分方法

碳酸盐岩岩石类型划分对于油藏描述来说意义重大,它主导了 3D 模型中岩石物理参数的分布。尽管其重要性广为人知,但目前还没有一种能够被普遍接受的岩石类型定义及划分标准。如果碳酸盐岩岩石类型划分的目的是在 3D 模型中实现合理地分布储层属性,并产生主要岩石类型(控制着地质储量及流体流动)的空间分布,那么大部分现存岩石类型的定义都有问题。主要是因为这些方法是以沉积为导向的,它们假设沉积相能充分表征储层属性。但事实上,大多数碳酸盐岩储层受成岩改造影响严重,即便重视了成岩作用并在划分阶段加以考虑,但在空间插值阶段也常被忽略,因为这一阶段通常受控于沉积趋势。目前建模的实践仍然受困于地质和岩石物理结合方面知识和经验的缺乏。

目前,碳酸盐岩岩石类型的研究现状可以概括为三套体系:

第一套体系是严格基于地质相(沉积相)及相关属性的岩石类型,通常称为沉积岩石类型(depositional rock type, DRT),包括纯结构分类(Dunham, 1962; Embry 和 Klován, 1971)、孔隙成因分类(Choquette 和 Pray, 1970),以及前两者与颗粒或孔隙大小相结合的 Lucia 分类(Lucia, 1983, 1995)。这些分类方法是建立在地质观察基础上的,因为其能与沉积环境和空间相关性相联系而比较简单。但是,由于成岩作用的改造,这些方法不能反映流体流动,与岩相学中观察到的现今孔隙也无关。扫描电镜并不总能反映与孔喉有关的流动特征。另外,这些方法都是针对取心段的,在未取心井或取心井未取心段难以找到根据测井曲线进行预测的有效方法。如果在清楚的沉积相控制下,井间岩石类型比例是可以估计的,但如果经历了强烈的成岩作用,这一比例则很难确定。

第二套体系是指按孔喉分类的岩石类型。从压汞实验中得到的孔喉分布能较好地反映流动单元和基质渗透率,但在 3D 模型中缺少属性分布的空间指导和趋势。这类方法的代表是 Winland R_{35} 分类法(Kolodzie, 1980)、Ramakrishnan (1998, 2001)分类法,以及 Marzouk 等(1995, 1998)的孔喉分类法。Winland R_{35} 分类法是在压汞实验中把非润湿相汞饱和度为 35%时所对应的孔喉当作有效流动的指示。Marzouk 等(1995)按照压汞实验中得到的孔喉半径分布,将碳酸盐岩孔隙度分为微孔(micro pore)、中孔(meso pore)和巨孔

(macro pore)三类。Clerke(2008)利用渗透率和 Thomeer 参数之间的关系,证明了渗透率主要受对应于排驱压力的最大孔喉控制。由于缺乏空间指导,这些方法缺少与次生孔隙(如孔洞和裂缝)的联系,当与动态数据相结合时会遇到尺度问题。在井间分布趋势和规律不明的情况下,这种岩石类型的预测在未取心井中是一大挑战。

第三套体系是基于测井相的分类。Amaefule(1993)等用流动单元指数(flow zone index, FZI)建立了与岩石物理属性的联系,但仍缺乏与地质和空间规律的结合。Serra 和 Abbott(1980)首次使用了测井相(electrofacies)一词,是指能唯一描述某一岩石单元的一套测井响应,实际上是对测井曲线的分类,其在几个硅质碎屑岩储层中证明是有效的。Amaefule(1993)等使用储层质量指数(rock quality index, RQI)和流动单元指数划分了岩石类型,尽管这种方法更实际、更高效,但由于碳酸盐岩强烈的成岩作用导致的复杂孔隙体系,使得这种方法与测井响应和地质认识结合较弱,进而导致井间预测并不准确。

这三套体系的出发点和研究角度有所不同,每套体系也各有利弊。理想情况下,是针对资料特点和区块特点,多方法、多手段、多学科相互结合、相互验证,从而得到一种综合的岩石类型划分方法。

也有人将第一套体系称为地质学岩石类型划分方法,将第二套体系和第三套体系统称为岩石物理相岩石类型划分方法。本章介绍地质学岩石类型划分方法,重点介绍影响广泛的邓哈姆方法和卢西亚方法,这两种方法都是根据岩石结构对碳酸盐岩进行分类的,其他各章将分别介绍岩石物理相岩石类型划分方法及其应用。

第一节 邓哈姆岩石类型划分方法

碳酸盐岩地质学岩石类型划分是根据岩心或野外露头,把具有相似结构、颗粒大小和分选的储层岩石划分为同一类的过程,每一种岩石类型的沉积环境具有特定的分布趋势和范围。碳酸盐岩地质学最经典的分类方法之一是邓哈姆方法,在书中其他章节有所提及,因此有必要首先介绍一下邓哈姆碳酸盐岩分类方法。

图 1-1 是邓哈姆碳酸盐岩分类方法。邓哈姆(Dunham, 1962)的碳酸盐岩分类方法在国内外很流行,影响也很大。

邓哈姆的分类对于颗粒-灰泥石灰岩来说是两端元的分类,这两个端元是颗粒和泥。邓哈姆根据颗粒和泥的相对含量,把常见的颗粒-灰泥石灰岩分为四类,即颗粒灰岩(grainstone)、泥粒灰岩(packstone)、粒泥灰岩(wackstone)和泥灰岩(mudstone)。

颗粒灰岩是指颗粒支撑、不含泥或含泥很少的碳酸盐岩;泥粒灰岩主要由颗粒组成,颗粒与颗粒是相互接触的,粒间孔隙中充填着泥。这两种岩石都是颗粒支撑的,即颗粒是岩石的主体,构成岩石的基本格架。

粒泥灰岩主要由泥组成,含有少量颗粒,这些颗粒分散于泥中,互不接触;泥灰岩几乎全由泥组成。这两种岩石都是泥支撑的。



图 1-1 邓哈姆碳酸盐岩岩石类型划分方法

颗粒灰岩是高能环境的产物，泥灰岩是低能环境的产物，泥粒灰岩和粒泥灰岩介于两者之间。

此外，邓哈姆还划分了两类特殊的石灰岩类型，即黏结岩和结晶灰岩。

邓哈姆的分类简明扼要，有高度的概括性，同时又具有明显的三分性，把石灰岩乃至整个碳酸盐岩划分为颗粒-泥灰岩、黏结岩和结晶灰岩三类。这个三分性就是碳酸盐岩分类的“纲”，抓住了这个纲，次一级的岩石类型（即“目”）自然就清楚了。这是邓哈姆分类方法的最基本的优点，这一分类方法在沉积环境及岩相古地理研究中尤为适用。

第二节 卢西亚岩石类型划分方法

卢西亚分类的理论基础是岩石内孔隙大小的空间分布，它控制岩石的渗透率和饱和度，而且与岩石结构有关。所谓岩石结构，是指岩石中各组分的边界在空间上的排列方式。

卢西亚按岩石结构将碳酸盐岩划分为颗粒为主和灰泥为主两大类。颗粒为主结构的特点是存在开启或堵塞的粒间孔隙及颗粒支撑结构，灰泥为主结构的特点是颗粒之间充填了泥，即使在颗粒形成了支撑格架后颗粒之间依然被泥填充。邓哈姆分类中，颗粒灰岩的结构明显以颗粒为主，而泥粒灰岩结构的界限则比较模糊。换句话说，邓哈姆分类中的泥粒灰岩在卢西亚分类中既可以出现在以颗粒为主的碳酸盐岩中，也可以出现在灰泥为主的碳酸盐岩中。正像现今镜下可以观察到的那样，有些泥粒灰岩具有粒间孔隙空间，有些泥粒灰岩的粒间孔隙空间被灰泥充填。因此，按岩石结构必须将泥粒灰岩分为两类：① 颗粒为主的泥粒灰岩，具有粒间孔隙空间或空间内含少量胶结物及灰泥；② 灰泥为主的泥粒灰

岩,即颗粒间的孔隙空间全部被灰泥充填。

为了确定岩石结构与岩石物理参数之间的关系,有必要对现今存在于岩石中的孔隙空间进行岩石物理特性的定义和分类,最好将孔隙空间划分为粒间孔隙(即存在于颗粒或晶粒之间的孔隙空间)和孔洞孔隙(除粒间孔隙以外的所有其他孔隙空间)。根据孔洞的连通方式,孔洞孔隙可进一步细分为两类:① 分散孔洞(separate vug),即只有通过粒间孔隙网络才能连通的孔洞孔隙;② 接触孔洞(touching vug),即孔洞与孔洞之间是直接连通的。

粒间孔隙的岩石物理属性与颗粒大小、分选和粒间胶结物有关。对于颗粒大小和分选性一定的岩石,粒间孔隙随胶结物的增加而减小。Lucia(1983)指出,在渗透率大于0.1 mD($1\text{ mD} = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的非孔洞孔隙型碳酸盐岩中,颗粒大小与汞排驱压力有关,二者之间的关系曲线是双曲线型的(图 1-2)。图 1-3 说明,当颗粒大小(颗粒直径)为20~500 μm 时,20 μm 和 100 μm 是两个重要的分界点,由此可以划分出三个孔渗带。

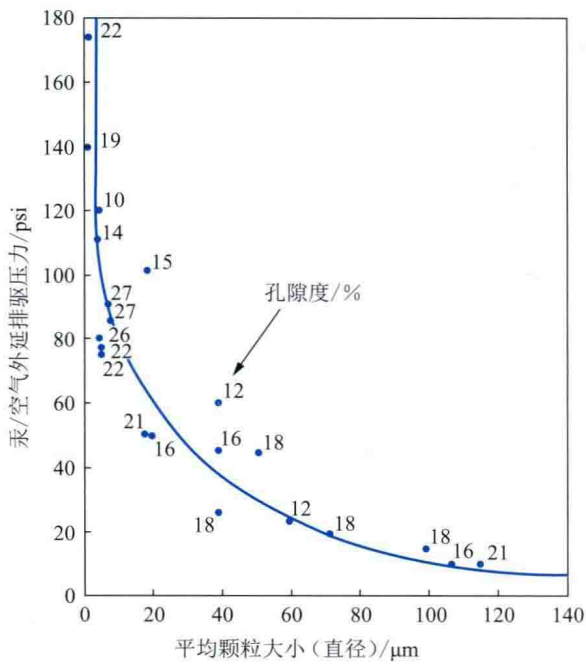


图 1-2 汞排驱压力与渗透率大于 0.1 mD 的非孔洞孔隙型碳酸盐岩储层平均颗粒大小之间的关系
(1 psi = 6.895 kPa)

Lucia 对非孔洞孔隙型石灰岩和白云岩进行了岩石物理分析,按照上述岩石物理标准将非孔洞孔隙型碳酸盐岩划分为 1 类、2 类和 3 类(图 1-4),并拟合了每一类岩石的孔渗关系和含水饱和度计算公式。

1 类由颗粒灰岩、白云质颗粒灰岩和粗晶白云岩等三种岩石组成,2 类由颗粒为主的泥粒灰岩、细一中晶为主的白云质泥粒灰岩和中晶—灰泥为主的白云岩三种岩石组成,3 类由泥质为主灰岩和细晶—灰泥为主的白云岩等两种岩石组成。

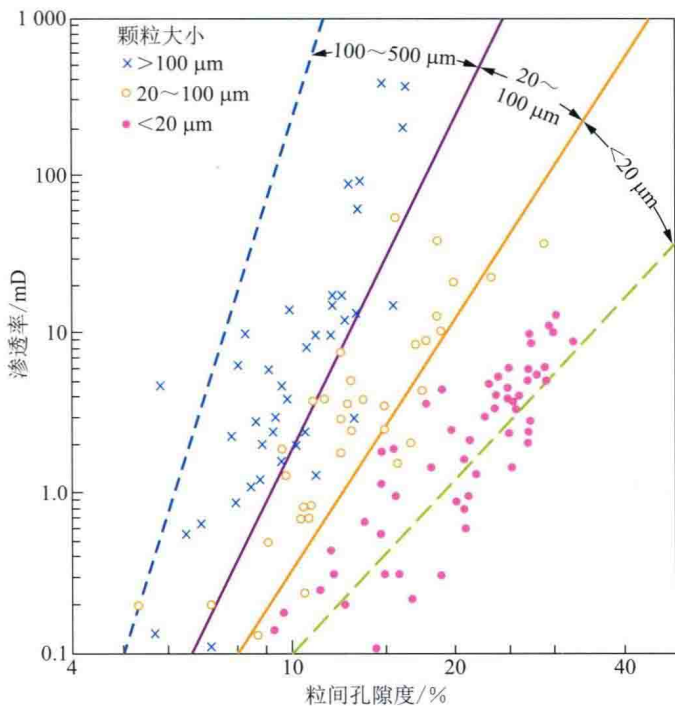


图 1-3 非孔洞型碳酸盐岩粒间孔隙度-空气渗透率结构分区图

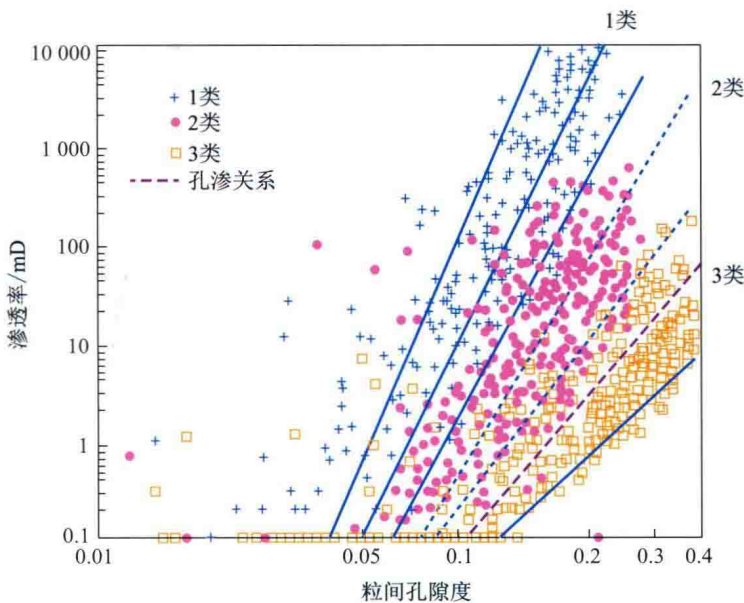


图 1-4 非孔洞型碳酸盐岩岩石物理分类及粒间孔隙度-空气渗透率关系图

对于非孔洞型碳酸盐岩, 各类岩石的岩石物理属性经验公式如下:

1 类: $K = (45.350 \times 10^8) \phi_{ip}^{8.537}, S_{wi} = 0.02219H^{-0.316} \phi_{ip}^{-1.745}$ (1-1)

2 类: $K = (2.040 \times 10^6) \phi_{ip}^{6.380}, S_{wi} = 0.14040H^{-0.407} \phi_{ip}^{-1.440}$ (1-2)

3 类: $K = (2.884 \times 10^3) \phi_{ip}^{4.275}, S_{wi} = 0.61100H^{-0.505} \phi_{ip}^{-1.210}$ (1-3)

式中 K ——渗透率, mD;
 ϕ_{ip} ——粒间孔隙度, %;
 S_{wi} ——原始含水饱和度, %;
 H ——油柱高度, m。

三种岩石类型的渗透率计算公式可以概括为如下孔渗转换公式:

$$\lg K = (A - B \lg rfn) + (C - D \lg rfn) \lg \phi_{ip} \tag{1-4}$$

其中, $A = 9.798\ 2$, $B = 12.083\ 8$, $C = 8.671\ 1$, $D = 8.296\ 5$, rfn 是连续的岩石结构数, 它代替了岩石类别数, 取值范围为 $0.5 \sim 4$ 。

上述三类岩石限定了三种岩石物理类别, 图 1-5 阐述了岩石结构分类与岩石物理分类之间的关系。颗粒灰岩、白云质颗粒灰岩以及粗晶白云岩具有相似的岩石物理性质, 都属于 1 类岩石物理结构的岩石; 颗粒为主的泥粒灰岩、细—中晶为主的白云质泥粒灰岩、中晶—灰泥为主的白云岩具有相似的岩石物理性质, 都属于 2 类岩石物理结构的岩石; 灰泥为主的灰岩(泥粒灰岩、粒泥灰岩和灰泥岩)、细晶—灰泥为主的白云岩具有相似的岩石物理性质, 都属于 3 类岩石物理结构的岩石。

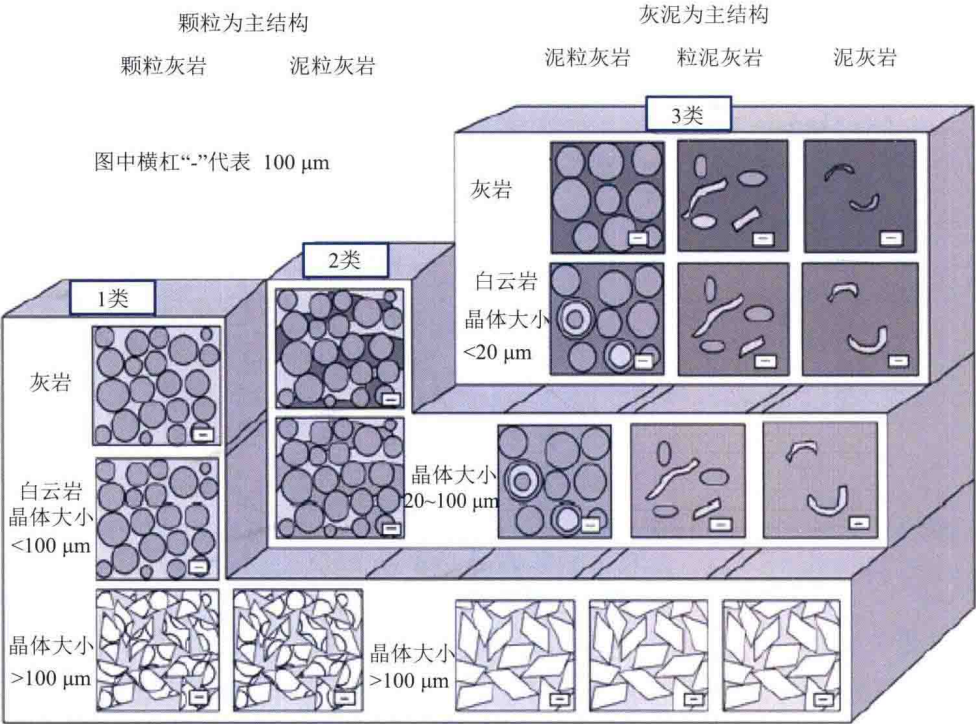


图 1-5 岩石结构分类与岩石物理分类的关系

分散孔洞的出现增大了总孔隙度, 但渗透率并没有明显增加。因此, 在估算渗透率时, 必须首先用总孔隙度减去分散孔洞孔隙度以求取粒间孔隙度, 然后使用非孔洞型孔渗转换公式。公式(1-1)~(1-3)中的含水饱和度公式不适合于分散孔洞碳酸盐岩。分散孔洞对

渗透率和初始含水饱和度的影响取决于粒内孔隙和粒间孔隙的连通程度。

在过渡带上方的大型分散孔洞中通常充满油气。过渡带中,粒内微孔隙中含有相当数量的毛细管束缚水,导致在原始含水饱和度很高的层段也能产纯油。含大量分散孔洞孔隙颗粒灰岩的过渡带宽度大于非孔洞型颗粒灰岩的过渡带。

接触孔洞的孔隙体系很难与孔隙度建立联系,而与裂缝孔隙空间的几何形状、大孔洞及坍塌的角砾岩有关。接触孔洞的尺寸大于井眼,仅使用取心井很难全面研究。取心井只能表征由微裂缝和铸模孔溶解形成的小的接触孔洞。这类体系能提高基质渗透率 5~10 倍。

使用岩石物理参数量化地质模型的关键是选择好相或单元,能够用唯一的岩石物理参数进行成图表征。在非孔洞储层(基质储层)中,要描述的最重要的结构元素是:① 使用改进的邓哈姆分类方法描述颗粒大小和分选;② 使用 20 和 100 μm 两个分界点描述颗粒大小;③ 粒间孔隙度;④ 分散孔洞;⑤ 分散孔洞孔隙度。

用以下三步预测岩石物理属性在空间上的分布:① 使用本节介绍的方法建立岩石结构与岩石物理属性之间的关系,并建立预测模型;② 通过岩心和测井数据描述岩石结构和岩石物理属性的一维分布;③ 使用地质演化和层序原则将这种信息推广到三维空间。

本章小结

(1) 邓哈姆根据颗粒和泥的相对含量将常见的颗粒-灰泥石灰岩分为四类,即颗粒灰岩、泥粒灰岩、粒泥灰岩和泥灰岩。

(2) 卢西亚根据岩石结构将碳酸盐岩划分为颗粒为主和灰泥为主两大类,按岩石物理参数将非孔洞型碳酸盐岩分为三类,并给出了响应的孔渗转换公式和原始含水饱和度计算公式,建立了岩石结构分类与岩石物理分类之间的关系。

第二章

碳酸盐岩岩石物理相岩石类型划分方法

第一章中介绍的邓哈姆碳酸盐岩分类方法,是从地质学角度或者说是从静态角度对碳酸盐岩岩石类型进行划分,这种分类方法在碳酸盐岩油藏研究中非常重要,在本书后面的章节中还会提到。而目前碳酸盐岩研究的热点是用综合的方法对岩石类型进行划分,尤其是应用岩石物理的方法或者说动态的方法划分碳酸盐岩的岩石类型。这类方法借助于岩心分析,在有条件的情况下还结合成岩作用分析,考虑碳酸盐岩从原地沉积,到成岩作用,再到现今储层属性(孔隙度、渗透率、含水饱和度等)的演化规律和结果,对于建立精确的三维地质模型和数值模拟模型有重要意义。从本章起,将从多个角度介绍这类方法在油田中的实际应用,以期对地质学家和油藏工程师有所帮助。

实际上,储层岩石类型划分就是将储集岩划分为独立单元的过程。如果对岩石类型定义和划分合理,那么储层的真实动态特征就能反映在数值模拟中。研究人员已经注意到传统分类方法的局限性,因此提出了拟合孔渗关系的新模型。

传统方法是在半对数坐标系统中对孔隙度和渗透率进行简单的线性回归,但由于碳酸盐岩强烈的非均质性,孔渗关系不是唯一的,简单的线性回归会人为地忽略实验数据的分散性,使预测的渗透率分布变得平滑,从而忽略储层的非均质性,导致预测结果存在较大误差。图 2-1 是根据中东某碳酸盐岩油田 A, B, D 三口取心井资料绘制的孔隙度-渗透率图,孔隙度范围为 5%~40%,渗透率范围为 0.01~150 mD。由图 2-1 可以看出,采用一条孔渗关系进行线性回归误差较大。

经常用到的岩石物理相岩石类型划分方法包括 Winland R_{35} 方法、FZI 方法、DRT 方法,此外还有 J 函数法、修正的 Lorenz 图示法等。

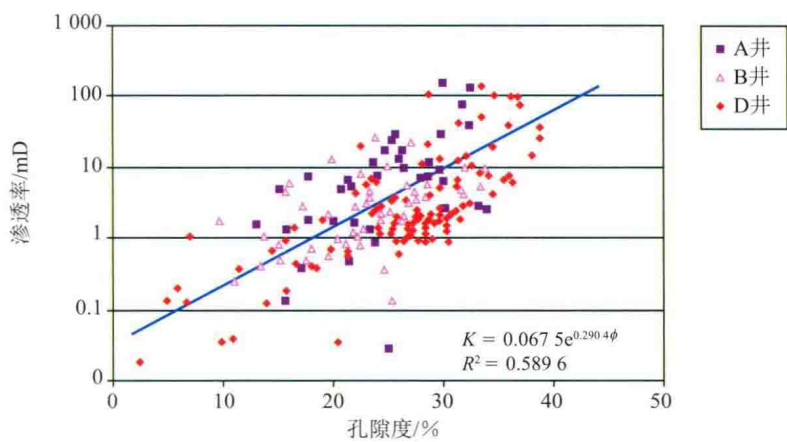


图 2-1 根据三口取心井绘制的孔隙度-渗透率图

第一节 利用特殊岩心分析划分岩石类型

1. Winland R_{35} 方法

20 世纪 70 年代, H. D. Winland 通过对科罗拉多 Spindle 油田的研究, 利用压汞毛细管压力曲线建立了孔隙度、渗透率与孔喉半径间的经验公式(2-1)。他通过对 321 块不同水湿岩心样品的研究, 得到了在不同进汞饱和度下孔参与孔喉半径间的关系, 并发现当进汞饱和度为 35% 时, 孔喉半径与孔隙度、渗透率之间的相关性最好。

$$\lg R_{35} = 0.732 + 0.588 \lg K_{\text{air}} - 0.864 \lg \phi \tag{2-1}$$

式中 R_{35} —— 进汞饱和度为 35% 时对应的孔喉半径, μm ;

K_{air} —— 未校正的空气渗透率, mD;

ϕ —— 孔隙度, %。

根据 Winland 理论, 当进汞饱和度为 35% 时, 被润湿相占据的孔隙空间对流体的流动起作用, 而被非润湿相占据的剩余孔隙空间只对储集起作用, 对流动不起作用。根据 R_{35} 值, 可以将储层划分为五种不同的岩石类型或流动单元:

- (1) 巨孔喉, R_{35} 值大于 $10 \mu\text{m}$;
- (2) 大孔喉, R_{35} 值在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$;
- (3) 中孔喉, R_{35} 值在 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$;
- (4) 微孔喉, R_{35} 值在 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$;
- (5) 纳米孔喉, R_{35} 值小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

图 2-2 是根据 A, B 和 D 三口取心井数据绘制的 Winland R_{35} 图。由图可以看出, D 井非均质性比其他两口井更强。三口井具有相同的流动单元, 可以划分为四种岩石类型, 见表 2-1。