

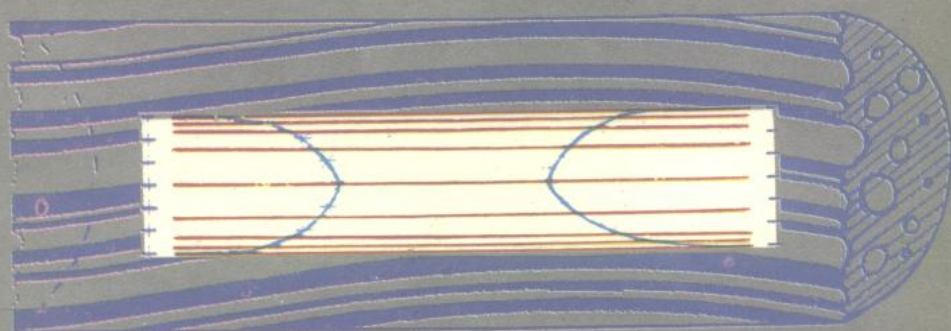
毛管理论

在

测井解释中的应用

——毛管电动力学与多孔性岩石

原海涵 著



油学(北京)

TE15

144

石油工业出版社

登录号	102040
分类号	TE15
种次号	044

毛管理论在测井解释中的应用

——毛管电动力学与多孔性岩石

原海涵著



574/31



石油工业出版社

(京)新登字 082 号

声 明

为尊重著作权,依据“知识产权法”,凡引用本书结论,请注明出处。凡应用本书方法者,请与著作者直接联系。

图书在版编目(CIP)数据

毛管理论在测井解释中的应用:毛管电动力学与
多孔性岩石/原海涵著. —北京:石油工业出版社,1995. 6
ISBN 7-5021-1370-3

I. 毛…

Ⅱ. 原…

Ⅲ. 多孔介质—毛细压力—应用—测井

N. TE15

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

计量出版社印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开 $7\frac{1}{4}$ 印张 166 千字 印 1-1500

1995 年 6 月北京第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

定价: 8.00 元

序

毛管理论是多孔介质孔隙结构研究中最广泛的一种理论。石油测井所研究的岩石是多孔介质。要研究多孔介质的结构,还要研究多孔介质与流体之间的相互作用。测井工作者对多孔介质特性的研究,尤其是与流体流动有关的研究还是不够的。

原海涵同志撰写的《毛管理论在测井解释中的应用》一书,从孔隙结构与毛管理论的基本概念,讲到如何应用毛管理论进行测井解释。

原海涵同志开展毛管理论在测井解释中的研究,是一种新的探索和尝试。它的出版对今后进一步开展多孔介质的测井解释研究及应用具有一定的参考价值。

王曰才

1994年10月26日

序

原海涵同志从事毛管理论用于测井解释的研究,是一个创举。他撰写的《毛管理论在测井解释中的应用》一书,内容新颖,颇有特色,建立了一套以毛管理论为基础的测井解释新方法,对阿尔奇公式中的系数(a, b)和指数(m, n)以及储层岩石导电机理提出了许多新认识,突破了一些传统的测井解释概念,因而发展了现代测井解释技术。

石油与天然气都是贮藏在储层多孔介质中,毛管理论是研究多孔介质的核心。本书以毛管理论为基础建立的各种测井解释模型和数学公式,找出了储层岩石多孔介质孔隙度、饱和度、渗透率与测井物理响应的理论关系;同时还涉及到测井响应与流体运移的关系,体现了学科的相互渗透和结合,从而产生了新的测井解释理论和方法,推动了现代测井解释技术的进步。书中建立了测井解释新方法,列举了油田应用实例作验证。与传统的测井解释和比较,可以提高油气储层测井解释的分辨率与准确性。

本书理论基础扎实,公式推导严谨。到目前为止,审者尚未见到国内外出版过相似内容的专著。本书具有较高的学术水平和实用价值。值此专著出版之际,审者作序,以表祝贺之忱。

毛管理论用于测井解释,正在发展中,希望本书能起抛砖引玉的作用,广大读者能从本书中得到启迪,提出宝贵意见,使毛管理论测井解释新方法更加完善,为我国石油工业的发展做出新奉献。

谭廷栋

1995 年元月 9 日



題

高級講師原海涵先生繼《石油地球

物理測井》出版之後又一部新作問世

愛子處，泛著精奇理之

兼得奧秘勇于探索之外

事如樹一收人勝昔

甲子春于天不奇運創進者大

編委會編室我室公刊



书 前 致 言

不断提高测井解释的精确度和理论水平,是测井工作者长期奋斗和努力的方向;从多方面、微观地深入研究岩石的电学性质,是提高测井解释水平的必由之路。毛管理论是多孔介质孔隙结构研究中最应用最广泛的一种理论,用其研究测井解释中的岩石导电机理,不仅在模型上与以往简单的体积叠加有所不同;而且研究了其中的流体电阻率的不均匀性,因而在理论上也是由线性理论向非线性理论过渡的一种探索和尝试,对测井界的学术争鸣可以起到抛砖引玉之用。

国内第一篇毛管理论文章发表至今已有 10 年了,在测井界老前辈和同行的关怀和支持下,经过不断地完善和发展,目前虽然仍有不足之处,但在阿尔奇公式系、指数 a 、 m 与渗透率的关系、流体电阻率抛物线规律、低电阻率油层导电机理、 n 指数理论极限范围、流动电位理论公式等方面都取得了较为满意的结论。现汇集出版,一方面供专家们参考,另一方面亦可更广泛地收集意见,以便不断提高和完善。

西北大学刘芬霞副教授对毛管理论的验证和应用作了大量工作,发表了多篇论文,本书收录了她的有关论文以飨读者。

本书由中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院教授级高级工程师谭廷栋审阅。

10 年来,测井界老前辈王曰才教授、张庚骧教授多次阅读了有关论文,并提出了许多宝贵意见;谭廷栋、廖明书、刘凤惠等专家给予了多方面的支持和鼓励;长庆油田张有书、甄庭江等同志在实验验证方面密切地给予了配合。

长庆油田总地质师李银德、副总地质师王声远、长庆勘探开发研究院院长闵琪、长庆石油学校唐烈、梅秀华同志在研究经费和人员组织上给予了大力支持,在此书即将出版之际,著者对他们的支持、鼓励与关怀表示衷心的感谢。同时对本书编辑出版给予支持和帮助的同志也表示谢意。

由于水平有限,书中不妥之处乃至错误在所难免,请批评指正。

原海涵 1994 年 5 月

于泾河之滨

引言

石油地球物理测井研究的对象——地下含油气储集岩是一种多孔介质,但多孔介质所涉及的范围十分广泛。身上穿的棉花,餐桌上的面包,建筑上的砖块,人体组织的肺和骨骼、毛发等等都属多孔介质。因而对其所开展的研究是多方面的,只不过由于目的不同,侧重面有所差异而已。建筑材料的砖块等物质偏重于强度,对多孔介质与流体相互之间的关系不予考虑;如是渗滤材料,除了研究其多孔介质结构外,还要考虑多孔介质与流体之间的相互作用。石油地质工作者对多孔介质的研究就属于后一类。

一、石油工业与多孔介质

在石油工业中,围绕着如何找到石油及如何最快最大限度地采出它们,地质家最关心的是岩石的储集层参数,如孔隙度、渗透率和饱和度及其流动性能等资料。因而测井工作者多年来亦是围绕着如何求准这几个参数进行工作的。寻找地下有无原油是石油工业的核心任务,因而对于储层孔隙流体性质的判断,即含油饱和度或含水饱和度的确定就成了测井解释专家工作的中心。而孔隙度和渗透率的研究程度就远不如含水饱和度充分。例如,对测井最有影响的公式——阿尔奇(Archie)公式的产生和久用不衰就证明了这一点。

目前,测井工作者对这一公式在多孔介质条件下的研究,尤其是对于与流动有关的研究还不够。这表现在目前解释中的基本模型大多数都是以孔隙的相对体积为基础的。虽然解释模型或公式多种多样,但其理论都是简单变化的线性理论。解释结果中也只有与孔隙有关的两个参数——孔隙度和饱和度的解释结果是较为理想的,理论上研究得较为充分。至于与流体有关的非线性参数,如渗透率、孔隙弯曲度等,其解释结果就不十分理想,而有关多孔介质流体运动的其他研究则进行得更不充分。

但是,地质专家并没有满足于孔、渗、饱等几个参数的研究,他们认识到对于石油这种流体矿物来说,渗滤或流动仍然是其研究的核心。水力学、渗流物理学科的相继建立和研究应用即说明了这一点。与其相关的是流体的通道截面,即孔隙结构和固液两相的表面性质等物理化学范畴的研究。在这些理论中,毛管理论是研究的核心。这不仅涉及到固液两相物质的界面性质,也涉及到包含固相物质的表面体系,即比面和孔隙的形态或性质。这就是说,多孔介质中的流体运移不仅涉及到动态的流体相,也涉及到静态的固体相,是一个宏大的研究课题。

在学科体系上,石油地质发展为地质勘探和油田开发两大门类,在研究方法上也分为静态和动态两类课题。其中动态学科外延到了电化学领域,例如,所谓“表观渗透率”即研究不同含盐度的地层水对渗透率所产生的影响,就已涉及到了电化学的学科领域。只是由于这一参数对石油生产的影响不如其他参数显著,因而在人们心目中还没有占据重要的地位,同时由于研究得不够深入,致使油田开发后期采收率不理想等许多问题还没有得到彻底的解决。

二、测井解释与多孔介质

对测井专家而言,他们要用电、声、核、磁、热等物理参数去解释各种地质参数。尽管测井专家所测的各种物理参数多种多样,但其中都包括了多孔介质中流体运动时的所有信息。而且这些参数中固液两相的反差是十分明显的。例如,岩石骨架的电阻率、声波速度、介质密度和核物

理性质和油水等流体介质相应的差别就是这样。但测井专家只研究了其体积效应,孔隙结构和表面性质研究得十分不够,特别是电学参数。由于没有认识到这种研究的重要性,没有深入研究这些物理参数和多孔介质及其与固液两相二者之间的许多问题,例如,毛管现象和固液两相的界面性质等,以致解释理论和实际工作中都有很多矛盾。

在当前的各种测井方法中,电法是主要的测井方法。这是由于岩石的电学参数,特别是电阻率是判别油水层性质的核心参数,生产实践决定了其实用价值。从理论上考虑,根本原因是岩石骨架和其中流体的导电性能差别很大,二者的关系易于研究,因而电法测井的解释理论就比其他测井丰富得多。此外,因为电法测井探测的范围最深,不仅能很好地反映未受侵入影响的地层原始状态;而且能在深、中、浅三个部位分别地得到信息,从立体方位反映侵入状态,从而能对流动状态进行估计。加上电法测井的历史悠久、技术完善,这就形成了当前测井解释中以电法测井为主的局面。而且在不久的将来,这种状态也不会有大的改变。

但是,几十年来,电法测井的理论解释中的许多问题,还没有得到解决,其中以油水层性质判断上的问题最多。在油水层的判断中,电阻率是主要参数。但是,无论是早期的电阻率大小还是稍后的阿尔奇公式,都是高电阻率是油层;低电阻率是水层。当含泥的低孔、低渗油层出现后,泥质也被认为是降低电阻率因素。几十年来,这一认识根深蒂固,出现了各种各样的解释模型。但是,当低电阻率油层出现后,油层电阻率可以低到 $1\Omega\cdot m$,泥质会降低电阻率这一认识受到了挑战,各种模型都对其无法作出合理地解释,其原因亟待探索。

此外,最有影响的阿尔奇公式中的系数 a 、 b 和指数 m 、 n 。虽然有过多理论,但都对 m 为什么与渗透率和矿化度有关?为什么叫作胶结指数但不与多孔介质参数有关? n 为什么大于 1 而近于 2?为什么电化学家所应用的亥姆霍兹经典理论,如流动电位等用于岩石动电学时,也是矛盾突出?特别是低阻率油层还无法从理论上予以解释。这就是说,当前测井解释的体积模型线性理论有许多问题需要探讨,最重要的是要研究多孔介质的非线性孔隙结构理论与测井物理参数的关系。就相邻学科发展的状态而言,首先应从电学研究开始。

三、测井解释与电化学理论

在测井解释理论中,测井专家也引入了电化学的研究理论。例如,“双水法”所依据的双电层理论,其核心是固液两相之间滑动层的 ζ 电位理论。但是在检验这一理论的四个理论实验中,流动电位和沉降电位就是电测井中自然电位的组成成分;电渗和电泳即是电阻率的导电过程。需要指出的是,前苏联专家 B. H. 达哈诺夫作流动电位实验证明了亥姆霍兹等的双电层、 ζ 电位等理论在岩石这种多孔介质的毛管条件下存在着显著的矛盾。依 ζ 电位、双电层理论建立的双水法也不能解释低电阻率油层的现象,有关固液界面的电化学理论,特别是毛管条件下的电化学理论,与测井解释关系极密切。显然,需要从理论上重新讨论。

在电化学理论、毛管电现象和胶体化学中,流体力学和电动力学的关系十分紧密,二者的差别仅在于液体运动的源动力是机械力还是是电动力,运动阻力,即流体的粘滞力和固液两相的表面力是完全一样的。因而二者的运动力学过程完全可以类比。考虑到当前电法测井理论解释的缺陷是仅从体积线性理论出发,现在研究就应从静态和动态多方面考虑引入多孔介质理论,应用流体力学、电动力学、界面效应和多孔介质等多种理论,综合地去研究岩石的导电机理。对电化学和物理化学家所研究的电渗和流动电位等理论问题也很可能给出一些合理的解释。这本小册子中介绍了这方面的有关知识,并对许多理论问题作了探索,现在提供出来以便引起争鸣。笔者希望读者能从其中得到启迪和帮助,为测井解释理论的发展作出贡献。

目 录

绪论	(1)
第一章 孔隙结构与毛管理论	(4)
第一节 孔隙结构的基本概念	(5)
第二节 孔隙结构的基本方法	(5)
第三节 孔隙结构的测量方法与成果性质	(6)
第四节 孔隙结构的表示方法	(7)
第五节 毛管曲线的定性应用	(9)
第六节 压汞曲线的定量参数	(10)
第七节 毛管参数的函数表示法	(11)
第八节 各种应用参数的函数积分计算方法	(13)
第九节 孔隙结构的理论研究概况	(14)
第十节 孔隙结构与测井解释	(15)
第十一节 小结	(16)
第二章 毛管模型的岩石电阻与 a 、 m 系指数	(20)
第一节 毛管解释模型的选择依据	(21)
第二节 岩石电阻与毛管的力电类比	(23)
第三节 岩石电阻率及其它	(24)
第四节 阿尔奇公式系、指数与渗透率的关系	(26)
第五节 毛管理论存在的缺陷	(29)
第六节 小结	(30)
第三章 毛管内荷电粒子的移动规律与流体电阻率	(32)
第一节 毛管内荷电粒子的移动规律	(33)
第二节 毛管内的流体电阻率	(38)
第三节 小结	(40)
第四章 低电阻率油层的导电机理与 n 指数	(41)
第一节 含水岩石电阻率	(42)
第二节 含油岩石电阻率	(44)
第三节 b 系数与 n 指数	(47)
第四节 其它	(49)
第五节 小结	(50)
第五章 流动电位与双电层理论	(53)
第一节 毛管电场条件下的流动电流	(54)
第二节 毛管条件下的流动电位理论公式	(56)
第三节 流动电位和渗透率之间的关系	(58)
第四节 流动电位与流体矿化度之间的关系	(59)
第五节 关于双电层理论	(62)
第六节 小结	(62)

第六章 裂缝内的流体电阻率及含裂缝的岩石电阻率与阿尔奇系数指数	(64)
第一节 裂缝中荷电粒子的移动速度规律	(64)
第二节 裂缝中的流体电阻率	(66)
第三节 裂缝流体电阻率与毛管流体电阻率的差别	(67)
第四节 包含裂缝的岩石电阻率	(69)
第五节 含裂缝岩石的阿尔奇公式中的系数与指数	(71)
第六节 小结	(74)
第七章 毛管孔径的测井方法确定及应用	(76)
第一节 平均毛管半径的计算公式	(76)
第二节 比面确定的依据	(78)
第三节 比面的测井确定方法	(79)
第四节 渗透率的确定	(81)
第五节 含水岩石电阻率的确定	(85)
第六节 小结	(86)
第八章 毛管理论的应用实例	(90)
第一节 在长庆油田安塞地区的应用	(90)
第二节 吐哈油田大墩一井解释	(92)
第三节 含水比的确定和油水层判断	(94)
附录 岩石电阻率毛管理论的验证	(98)

绪 论

岩石的多孔介质性质仅用孔隙度和渗透率来表征是不够的,需要研究孔隙结构。孔隙结构是研究微形孔洞大小分布的一门学科。常用的方法是铸体薄片测定法和压汞曲线法。铸体薄片是用有机玻璃注入岩石孔隙,待其凝固后制成薄片,在显微镜下测量与孔隙大小和其数量多少有关的各种参数;压汞曲线法是在对岩石注入水银的同时,直接测量与孔隙大小及与其多少有关的参数。现场上最常用的是压汞曲线法。

压汞曲线的定性参数是歪度、排驱压力、最大进汞饱和度、饱和度中值和曲线形态等,由这些参数可以定性判断岩石的基本性质。定量参数是平均毛管压力、分选系数、偏态和峰态等。获得这些参数所用的数学工具是离散级数法。这一方法的缺点是选样密度因人而异,计算结果误差较大,也难以进一步作理论研究。

函数积分法可以免除离散级数法的各种缺点,理论基础是毛管压力和毛管孔径是注汞饱和度和含水饱和度的函数。由理论可以证明,毛管压力曲线的理论表达式是双曲函数;毛管孔径曲线的理论公式是幂指数函数。

当前孔隙结构的理论研究主要为模拟实验和理论假设两大类。前者无法进一步从理论上提高;后者不能概括多孔介质中多变的微小孔洞分布状态。模拟实验表明,平行毛管模型具有良好的代表性,这种模型概念明确、方法简单,具有良好的实用价值。

测井解释中对孔隙结构研究得不够深入,对低电阻率油层的导电机理和阿尔奇公式中的系指数的物理意义,也无法从理论上予以解释,应加强这一方面的研究。

阿尔奇公式中的 a 系数与 m 指数是两个变化的参数,当前解释中把其当作不变参数看待是欠妥的。以往的体积模型研究中没有考虑岩石的多孔性特征,仅简单地把泥质等因素堆积在一起,没有考虑它们之间的相互影响和综合影响,因而无法证明 a 和 m 与渗透率有函数关系。当岩石这种多孔介质由无限多的平行毛管组成的理论用于岩石电阻模型时,毛管内的力电性质有很好地类比。岩石电阻是由无限多的毛管电阻并联组成的。岩石电阻率是毛管孔径分布特征参数的函数, a 和 m 都是毛管孔径或渗透率的函数,但仅用毛管概念还不能证明饱和度指数 n 大于 1 而近于 2。应进一步从微观角度研究毛管内液体的导电机理和流体阻率。

当前的流体导电理论用于多孔介质时矛盾较多,重要的原因在于,微孔隙的毛管内的荷电粒子的移动规律与大容器中的荷电粒子的移动理论有一定的差别,已经观察到毛管内荷电粒子的移动规律为弯月形的抛物线。当前用于描述这一规律的公式是电渗速度和内泊肃叶公式的简单叠加,不能用于研究流体电阻率和多孔介质的其他电学问题。

本文认为,毛管内的荷电粒子的移动过程服从水力学原则,为一层流运动。并假设毛管内液相中荷电粒子的体密度是均匀的,由力电平衡可以导出毛管内荷电粒子移动速度的抛物线分布规律,毛管内荷电粒子的平均速度是其最大速度的一半。毛管内的电流强度与毛管孔径的四次方成反比。毛管内的流体电阻率是按抛物线的倒数分布的,其平均电阻率是最小电阻率的二倍。毛管内的流体电阻率是毛管孔径、离子迁移率和普通流体电阻率的综合函数,比普通流

体电阻率复杂得多。

实验证明, n 指数是一个变量, 但理论上讨论得并不充分, 实用中多用其值为 2.0, 这是由于岩石导电机理认识得不深刻的结果。毛管理论认为岩石电阻率是地层水粘度、盐类离子迁移率和地层水电阻率的综合函数, 同时又是含水毛管孔径四次方平均值的函数。另外平均值愈小, 岩石电阻率愈大; 反之亦然。含油岩石电阻率除受上述诸多参数影响外, 还受束缚水薄膜厚度的影响, 其电阻率所以增大是由于油驱水后岩石中导电毛管个数的减少的结果。而且所剩导电毛管都是些较小的毛管, 因而其电阻率增大较为显著。低电阻率油层是由于其反比于毛管孔径四次方, 是 R_w^2 的函数的结果。由毛管理论导出的 $b=1.0$; n 是含水毛管个数的函数, 为一变量, 随渗透率的增大而增大, 极值范围为 1.0~2.0。常见有意义地层岩石的 n 指数近于 2.0。 F 为一与地层水电阻率有关的综合函数。本文的结论与实际资料符合较好, 但毛管理论不适用于非均质状态, 例如有裂缝时的岩石电阻率。

流动电位公式是按亥姆霍兹双电层或 ζ 电位理论建立的, 但和实际资料之间存在着如下几个矛盾: 第一, 不能从理论上解释微毛管的泥质砂岩层的流动电位的成因。第二, 不能从理论上解释流动电位为什么与渗透率有关。第三, 不能解释流动电位在渗透率大于几十毫微米平方后反而降低的原因。第四, 不能反映流动电位与流体矿化度之间的复杂变化规律。其原因是在毛管中应用普通地层水电阻率是不合适的。本文按物理学基本定义, 应用水力学原理、毛管内流体电阻率理论和与毛管有关的电化学知识, 由毛管内的电荷数量和流体电阻率重建了理论公式。新公式不受毛管孔径的限制; 流动电位与毛管孔径或渗透率有关; 能够解释渗透率由小变大过程中和流体矿化度变化时, 流动电位的复杂变化规律, 免除了原公式所存在的各项缺陷, 与实验结果十分吻合。双电层理论要进一步研究。

裂缝中荷电粒子的移动速度是按抛物线规律分布的, 最大速度在裂缝中心, 是其平均速度的 1.50 倍。相同固相轮廓时, 所包含孔隙截面形状为裂缝的, 荷电粒子移动的速度要比形状为毛管的速度大一倍还多。主要是荷电粒子在裂缝中的移动要比在毛管中移动少受一倍的侧向剪切阻力。裂缝中的流体电阻率是按抛物线倒数规律分布的。最小电阻率在裂缝中心, 平均值是最小值的 1.50 倍。裂缝中的流体电阻率除与流体导电性质有关外, 还是裂缝厚度平方倒数的函数。相同固相轮廓体积时, 孔隙截面形状为裂缝时的流体电阻率仅是形状为毛管时的流体电阻率的一半, 平均值才为其 $3/8$ 。当多孔介质型岩石包含裂缝时, 其电阻率是裂缝宽度和厚度三次方乘积的函数, 随裂缝的增大而减小。裂缝灰岩的电阻率基本上是由裂缝电阻控制的, 阿尔奇公式中的系指数都和毛管与裂缝参数有关, 饱和度 n 则随裂缝厚度的增大有所增大。高渗透层中的毛管变形极易接近裂缝状态, 因而易于出现 $n>2$; 无裂缝时, 便恒有 $n<2$ 。

理论推导可知, 平均毛管半径正比于岩石孔隙度, 反比于其内表面。其物理意义为岩石颗粒表面不变时, 其孔隙孔道截面, 即等效毛管半径正比于其孔隙体积大小。岩石的内表面与其颗粒表面有关, 碎屑岩颗粒的比面与其中值成反比。实际资料反映含泥量的自然伽马可以用来反映颗粒中值和岩石比面。岩石颗粒比面与自然伽马相对幅度的关系为一线性关系, 式中的系数与地区性的岩石颗粒和含泥性质有关。现场应用自然伽马所求得平均毛管半径能够反映铸体薄片的平均截距宽度和毛管压力的排驱压力。

在普赛尔提出的毛管法计算渗透率的公式中, 为了弥补毛管截面变形、通道交连等非理想圆管效应, 在实用时引入了一个岩性系数。实用中该参数是一个不变的常数。当把毛管假设为弯曲的状态时, 可以证明岩性系数是迂曲度平方的函数, 二者互为倒数关系, 是复杂的综合函数; 其流体力学意义在于它表现了流道的通畅程度或其运动阻力。

岩性系数的影响因素为孔隙度、毛管半径和渗透率。三者之中变化范围最大的是渗透率。在常见的渗透率范围内,该岩性系数和渗透率的相关系数高达 0.88,变化范围高达几十倍。普赛尔应把其当作常数的方法是不妥的。当用均值替代法找出该系数与毛管压力资料有关后,同一资料计算结果的精度大为提高,其中极限误差约降低了 2 倍,平均误差降低了 50%。

在测井解释时,依据理论把公式中的毛管压力参数转换为毛管半径参数;依据各地的实际资料确定出计算毛管半径的实用参数公式,进而进行渗透率解释。

含水岩石电阻率中的视平均毛管截面等参数可以用毛管孔径的可变方次来等效。该参数除了直接用毛管资料确定外,还可直接由孔隙度和渗透率进行确定,省去了 a 、 m 的实验室测量工作。

西北大学刘芬霞副教授对毛管理论进行了实验证明,书后收入了她的论文。

第一章 孔隙结构与毛管理论

对于岩石的多孔介质性质只研究孔隙度和渗透率是不够的,还需要研究孔隙结构。孔隙结构是研究微形孔洞大小分布的一门学科。常用的方法是铸体薄片和压汞曲线。铸体薄片是用有机玻璃注入岩石孔隙,待其凝固后制成薄片,在显微镜下测量与孔隙大小和其数量多少有关的各种参数;压汞曲线是在对岩石注入水银的同时,直接测量与孔隙大小及与其多少有关的参数。现场上最常用的是压汞曲线。

压汞曲线的定性参数是歪度、排驱压力、最大进汞饱和度、饱和度中值等典型参数和曲线形态等。由其可定性判断岩石的基本性质。定量参数是平均毛管压力、分选系数、偏态和峰态等。获得这些参数所用的数学工具是离散级数法。这一方法的缺点是选样密度因人而异,计算结果误差较大。

函数积分法可以免除离散级数法的各种缺点。理论基础是毛管压力和毛管孔径是注汞饱和度和含水饱和度的函数。毛管压力曲线的理论表达式是双曲函数;毛管孔径曲线的理论公式是幂指数函数。

当前孔隙结构的理论研究主要为模拟实验和理论假设两大类。前者无法进一步从理论上提高;后者不能概括多孔介质中多变的微小孔洞分布状态。模拟实验表明,平行毛管模型具有良好的代表性有较好地实用价值。

测井解释中对孔隙结构研究得不够深入,对低电阻率油层的导电机理和阿尔奇公式中的系指数的物理意义也无法从理论上予以解释,应加强这一方面的研究。

人们为了更有效地利用多孔介质,广泛地进行了各种各样的研究。以石油工作者为例,为了从地下采出更多的石油、天然气等流体矿物,大量地研究了储存这些矿物的各种岩石属性。通常包括如下几个方面。第一,作为骨架的碎屑颗粒成分、几何形状和相互之间的接触关系等。第二,胶结物的数量、成分和成形状态。第三,各种流体特性和岩石之间的相互关系,等等。但总的来看,这些影响最终都归结为它们的综合影响——多孔介质和其与流体之间的相互关系。

衡量多孔介质主要特性的常用参数是孔隙度和渗透率。这两个参数从宏观上把多孔介质的流体和数量与运动联系了起来。既形象,又方便,是石油地质工作者最常用的两个参数。

但是,孔隙度和渗透率只能宏观地研究多孔介质的流动性质,面对受多种因素影响的地下复杂流动,仅靠这两个参数是远远不够的,还不能完善地解决石油地质研究中所出现的各种流体流动问题的。这就出现了流体力学、渗流物理等基础科学,与其相关的是从微观角度研究岩石这一类多孔介质的孔隙结构的学科理论。石油测井解释中所涉及的问题要比简单的流体运动复杂得多,还要考虑流体运动时的电化效应。因而这些年来,测井工作者也涉猎了这一课题,如孔隙弯曲度理论、鸽子窝理论、葱皮理论等。但是这些研究相对于地质科学中的孔隙结构研究来说,还有一定的距离。为了深入地应用孔隙结构这一理论,我们首先讨论与孔隙结构有关的课题。

第一节 孔隙结构的基本概念

1. 多孔介质

石油在地下的主要的储存空间是岩石中的孔隙体积,这种体积多是以多孔介质形式出现的。所谓多孔介质通常具有如下两种特征:一是其中的孔隙空间是以众孔微小的孔洞,即所谓微孔出现的,这些微孔中不包含固体,并被固体或半固体的基质所包围;其中常含有诸如水、空气或烃类等流体物质。其二是这些微孔相互之间是连通的,可以使流体从这一侧渗入,而从另一侧泄出。这一类物质我们称之为非多孔介质。

2. 孔隙结构

岩石中除作为骨架的固体以外的部分统称为孔隙空间。由于这些空间可以是颗粒堆积的粒间空隙,也可以是胶结物作用后的剩余空隙,更可以是各种后生作用的最终结果。因而其形状千奇百怪,没有一定的格式。但其总的特征可以用大的孔隙和小的喉道两个几何形体来概括。岩石这种多孔介质的孔隙空间,就是由它们以各自的形式和状态相互联结所组成的。各种流体就是通过这些孔隙和喉道在多孔介质中进行流动的。

3. 多孔介质中的流体运动与孔隙结构

流体力学理论证明,在管道状态下,流体移动的速度和数量与管道半径之间是二次方或四次方的函数关系。由于孔隙和喉道的几何尺寸可以相差很大,因而孔隙和喉道相互之间的流体力学效应差别极大。这就是说,要研究多孔介质与流体之间的关系,就应首先研究孔隙和喉道之间的各种关系,然后才可能研究它们和流体之间的各种力学关系。这种孔隙和喉道之间的相互关系习惯上就称作“孔隙结构”,属于静态研究;研究其与流动之间的关系则称作动态研究。

就孔隙结构而言,已不再是片面的、孤立的、局部的考虑颗粒或胶结物某一单一因素的简单作用,而是全面地、有机地、整体地研究它们相互作用后的综合结果与流体之间的相互关系。因而在思想方法上是一较大的进步。

第二节 孔隙结构的研究方法

1. 基本概念

孔隙结构的研究源于国外,英文原文为 Pore Configuration。其中的 Pore 直译为孔隙;而 Configuration 则有构形,组态,外形,轮廓和排列方式等多种涵义。因而孔隙结构可为上述两词中文词组的多种组合。但从研究的内容和用途来说,一般认为孔隙结构是多孔介质中孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互联接之间的综合关系。

其所以如此,主要是因为多孔介质涉及的范围极为广泛,各种学科对其要求也不尽相同,研究的重点和内容也就多种多样。但总的来说偏重于其强度的学科,关心的是其孔隙的缩小程度;关心其储存和渗滤性能的学科,则偏重于其孔隙的增大程度和组成状态。石油地质专家关心的就是后者。因为,无论是油气运移中的油驱水,还是开采过程中的水驱油,除了岩石的储存能力外,关键仍在于其能否流动。因而喉道和孔隙应受到同样的重视,显然也包括相互之间的组合状态。这就构成了孔隙结构研究的基本内容。与其相关的则是与流体运动有关的各种学科,如水力学、渗流物理等。

2. 基本研究的方法原理

当前对孔隙结构测量和描述的方法很多,但基本上分为两大类。一类为二维的平面几何图象法;另一类则为三维的立体空间法。前者以铸体薄片和电子显微镜为主;后者则以压汞曲线为代表,包括离心法,吸附法,色谱法,定量体视法(光学法),压汞光学综合法,X 照象法等。二维的平面图象法,对孔隙和喉道的几何图形有较好的了解,但无法具体描述,其测量结果的代表性受到一定的限制,没有包括第三维坐标系统的孔隙结构信息。三维的立体空间法虽然对孔隙和喉道的几何图形难于观察和描述,但却包含了三维方向的全部信息。当然,如果岩石是各向均匀的,二维和三维的观测结果几乎是不相差的。但这种情况极少,各向之间总有些差异,因而三维的研究方法和结果在石油地质学中应用得远比二维广泛。

此外,石油地质学偏重于流体运动,三维的研究方法都是以流体运动为基础的。因而其观测结果有更多的实用性品格。这是三维研究方法,尤其是压汞曲线法在石油地质学中应用得广泛的又一原因。

第三节 孔隙结构的测量方法与成果性质

1. 铸体薄片

铸体薄片技术是指向岩石孔隙中注入冷凝型流体物质,如彩色有机玻璃等,待其凝固之后,制成薄片在显微镜下观察。具体方法是使薄片与镜中的等间隔方格网重叠,然后沿任一方向的一族平行测线,一般是横向测线,逐个测线统计孔隙或喉道在与其相交时交会出的线段长度与其出现的次数;或是统计测线上孔隙或喉道与其相交的点数。通常多用前者作为最后的测量结果。

由于孔隙和喉道的出现完全是随机的,它们与测线相交时,不可能是以曲线的曲率中心与测线重合,因而这些线段不一定与孔径有关,所以叫做“截距”。显然,截距是不能区分那些是孔隙形成的,那些是喉道形成的。同理,它们和测线的相交点数就更无法区别孔隙或喉道了。

2. 流动压力法

这一类测量是以毛管压力理论为基础的。根据是确定的固体毛管中,毛管压力和毛管半径是成反比的。多孔介质中的毛管种类和数量各不相同,不同压力下进入或流出多孔介质的流体数量是互不相同的。该值代表着不同孔径的毛管体积。测量不同压力时的这一体积值,即所谓孔隙饱和度,由其就可以表示不同孔径毛管在多孔介质中所占的百分数,即孔隙结构状态。

这一类测量的代表方法是压汞曲线,它们记录的是不同压力状态下的进汞量,与其类似的是吸附法,测量的是流体的排出量。这一种方法测量的虽不是毛管的孔隙体积,但测量的是与孔隙体积关系极其密切的毛管内表面面积,其测量结果也可以很好地代表不同的毛管体积数量。

3. 测量方法的性质

显然,无论是铸体薄片的截距,还是压汞曲线的压力大小,都不能区分何为孔隙,何为喉道。事实上,孔隙和喉道只是一个相对概念。如图 1-1 所示,其中的单号为孔隙,双号为喉道。当以绝对尺寸来衡量时,喉道 4 显然仍比孔隙 9 等要大一些。但是要区分孔隙和喉道,就必须描述一个孔隙和与其两端相接孔隙的相对关系。这实际上有很大困难,在当前技术条件下,无论二维还是三维的测量,其结果都是一些与孔径大小有关的几何尺寸的统计结果,是一系列单调的表格数字。显然,要用其来区分哪些是孔隙,哪些是喉道完全是不可能的。

此外,这种结果只与孔径尺寸大小有关,不能反映孔隙的几何形状。