

第 1 章 储层孔隙结构及评价方法概述

§ 1.1 储层孔隙结构概述

储层孔隙结构是指岩石所具有的孔隙和喉道空间的几何形状、大小、分布以及不同形态孔隙和喉道之间的配置关系(罗蛰潭,1986)。对孔隙结构的研究评价,本质上是在将岩石内部的孔隙空间划分成孔隙和喉道的基础上,分别研究孔隙和喉道的大小、分布,以及孔隙和喉道之间的配置关系。孔隙和喉道分别控制储层的储集特性和渗流特性。所以,在国内外的石油天然气勘探开发面临的对象日趋复杂的形势下,储层孔隙结构的研究评价对于提高油气田的勘探开发效益具有越来越重要的意义。特别是在进入 21 世纪以后,随着岩性油气藏、页岩油气藏等非常规油气藏勘探开发的活动日趋活跃,储层孔隙结构的精细评价也日益受到重视。

含油气储层的形成经历了数千万年乃至上亿年的沉积埋藏过程。在这个形成过程中,储层岩石经历了多种地质作用和沉积成岩过程,如压实作用、胶结、溶解、溶蚀、淋滤、重结晶、白云化和生物作用等,而各个地区经历的地质过程和沉积环境不同,遭受的成岩作用和影响过程也不同,因而导致各地区、各个地层孔隙结构的非均质性极强,甚至同一块岩心不同部位的孔隙结构特征都会存在明显差别,这些因素给孔隙结构研究带来极大困难。

正是因为储层岩石的孔隙结构十分复杂,仅使用常规物性分析数据并不能完全反映岩石的特征,只有加强对岩石孔隙结构的研究,才能全面客观地了解岩石的储集性能和渗滤特征。在自然界的沉积岩体系中,部分岩石的常规物性与孔隙结构具有相对的一致性,但是,还有更多岩石的常规物性参数与其孔隙结构参数呈现了显著的不一致性,原因就是,常规物性参数不能全面客观反映岩石的渗滤特征。例如,实际研究中已经发现,孔隙度基本一致的岩石样品,渗透率的差异可以达到数量级的差别,其原因就是不同岩石样品在孔隙结构上的差异所致(图 1.1)。

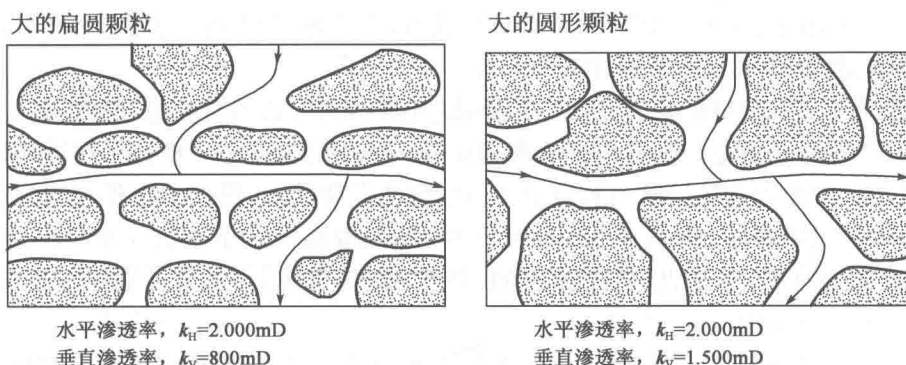


图 1.1 不同孔隙结构在不同方向上造成测量渗透率的差异(Tiab,2003)

§ 1.2 储层孔隙结构研究方法及现状

在常规油气储层孔隙结构的研究分析中,研究人员主要通过岩心观察描述岩心表壁的孔隙形状、大小及发育程度,孔隙内充填物等,然后取样进行实验室分析,岩样的扫描电镜 SEM 可以清楚地观察孔隙的内表面结构和微孔。定量确定孔隙结构主要通过如下 5 种方法(廖明光,2001):

(1)利用压汞毛管力曲线,包括进汞和退汞过程(Van Brakel,1981;Li 等,1986;Wardlaw 和 Tayler,1976);

(2)对岩石铸体薄片的镜下二进制图像进行计算机分析处理的岩石图像分析(Petrographic Image Analysis),简称 PIA 技术(Ehrlich 等,1984;Mc Creesh 等;Etris 等,1988);

(3)研究一种易混溶流体被另一流体驱替过程中的扩散现象(Bretz 等,1988;Perkins 和 Johnston,1963;Batycky 等,1982);

(4)油压力瞬变流动测试评估的惯性系数(Jones,1987);

(5)岩石样品的系列切片分析并用计算机重构孔隙系统的三维空间形体(Lin 和 Cohen,1982;Macdonald 等,1986)。

以上 5 种分析手段,被普遍使用,且方便、有效、可行的方法是压汞毛管力曲线分析和演示图像分析技术,尤其是压汞毛管力曲线,易被大多数现场工作者掌握使用。应用压汞毛管力数据,可以从中提取多个与孔隙结构相关的参数,且这些参数在油气勘探开发的多个领域得到应用。要预测在特定条件下流体的流动过程,以及一相流体被另一相流体驱替过程,最有效的方法则是将压汞毛管压力曲线研究和 PIA 技术完整地结合起来,获取孔隙结构的定量信息,建立油气储层孔隙结构的定量模型(Wardlaw,1990)。

储层孔隙结构不仅影响着油气的运移和聚集,而且对于制订合理高效开发油气藏的措施也至关重要。因此,它历来都是油气勘探与开发工作者们非常关心的问题,也是众多研究人员十分感兴趣的研究课题。

从 20 世纪 30 年代,国外就开展了孔隙结构研究,解决了许多现场提出的实际问题。50 年代曾掀起一个研究微观孔隙结构的高潮,涌现出许多新方法和资料解释新理论。60 年代以后,逐步在资料应用上扩大了范围,从单纯解释孔分布、渗滤特征,逐步扩大到油气田勘探、开发、储量计算及油气采收率的领域中来。

目前研究岩石孔隙结构的主要方法是用测定毛管力的方法确定孔隙和喉道的定量特征,并与孔隙铸体的镜下鉴定及扫描电镜观察相结合。核磁共振岩心分析技术和测井技术的出现,为无损岩心分析岩石孔隙结构和定量评价储层的孔隙结构,提供了一种新型的实用化技术。而且,核磁共振岩心分析技术和测井技术都不涉及废液处理的问题,这个特点也符合了环境保护日益增强的要求。因此,核磁岩心分析技术和测井技术,将在石油勘探与开发过程中,发挥越来越重要的作用。

岩心实验方法确定岩石孔隙结构参数的基础是毛管力与岩石孔隙尺寸之间的关系。Washborn(1921)首次提出用注汞实验确定孔隙性岩石的孔隙半径大小分布,并提出来著名的

Washborn 方程:

$$p_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (1.1)$$

式中, p_c 为毛管力, σ 为汞的表面张力, θ 为汞空气接触角, r 为柱形孔隙的孔半径。该方程是用压汞测试数据解释孔隙结构、孔喉大小分布的理论基础, 也是孔隙结构定量分析的前提。

对岩石孔隙毛管力数据进行实验分析的实验仪器是压汞分析仪器, 这种实验仪器把汞液作为非润湿性流体, 对汞液施加一定的压力, 把汞液注入岩石孔隙中。在汞液的驱替过程中, 测量驱替压力和汞液压入量之间的关系。这个时候, 驱替压力就是对应孔隙的毛管力, 汞液的压入量就是对应孔隙的体积。这种实验方法首先由 Purcell(1949) 提出, 并成功开发用于压汞分析的仪器装置。在 Purcell 推出实用的压汞分析仪器以后, 许多学者就开始从压汞资料中提取特征参数的研究。例如, 入口压力、排替压力和临界压力等术语用来描述压汞曲线的初始部分, 其中, 以 Robinson 等人的研究工作具有代表性。Robinson(1996) 用入口压力(Entry pressure)指示最大孔喉半径, 而 Schowalter(1979) 为了评价圈闭的封存性, 认为当非润湿相流体经过岩石中最大连通孔半径形成一条连续线路时的压力非常重要, 在压汞过程中, 他进行电导率测量后, 将汞饱和度为 10% 时的压力定义为排替压力(Displacement pressure)。Katz 和 Thompson(1986, 1987) 把汞穿过岩样形成连续通路时的压力称为临界压力(Threshold pressure), 并指出临界压力在压汞曲线图上对应于曲线的屈服点。

岩石的孔隙结构与毛管力有关, 而孔隙结构又与岩石的渗透率有关。据此推断, 岩石的毛管力参数与渗透率也应该存在某种关系。遵循这一思路, Swanson 尝试应用毛管力数据, 研究岩石的渗流特性和描述方法。他提出了压汞曲线上代表岩石孔隙系统内形成连续的、相互连接很好系统的特征位置(Swanson, 1977)。他发现在低压力时, 冷却结晶的伍德合金在岩石中呈斑点状分布, 随着注入压力不断增加, 非润湿相进入更小孔径, 伍德合金体积量增大。最后, 注入压力达到使伍德合金占据了一个有效相互连通的主孔隙系统, 该系统控制着流体流动(Dullien 和 Dhawan, 1975, 1982)。基于这些研究, Swanson 指出, 对于这个特征点, 总岩石体积下的汞饱和度就代表了对流体流动有效贡献的那部分孔隙空间, 而这一特征点在压汞曲线上就对应于双对数坐标下双曲线的顶点。

在后续的研究中, Swanson(1981) 在大量砂岩和碳酸盐岩样品分析的基础上建立了空气渗透率与双曲线顶点的经验关系, 以及盐水渗透率与双曲线顶点的相似关系及其诺模图。他还指出, 对于岩心塞和模拟钻井岩屑得到的顶点相同, 其他一些学者也表明压汞测试可选用钻井岩屑这样的操作意见(Purcell, 1949; Ghosh 等, 1987)。

恒速压汞分析技术(Rate Controlled Porosimetry)是压汞分析技术的一种改进方法。在恒速压汞实验中, 单位时间的汞液驱替速度恒定, 测量驱替压力的变化, 根据驱替压力的变化, 区分岩石中孔隙喉腔和孔隙喉道的尺寸和数量分布(Yuan 和 Swanson, 1989)。由于流动路径的限制程度不同, 压汞曲线就会出现新月形的波动起伏, 这使研究人员能够把孔隙空间分解成孔隙腔体和孔隙喉道两部分。该项技术可望实现对孔隙几何形态的定量评价, 后来 Yuan

(1991)又用该技术研究孔隙尺度的非均质性。

Thomeer(1960)首创了毛管力和汞饱和度的数学描述方法,并将压汞数据绘制在双对数坐标图上,形成一条近似双曲线。双曲线相对 X 、 Y 轴的位置由两条渐近线确定,而双曲线的形状与孔隙几何学特征有关,可用 Thomeer 孔隙几何因子 F_g 表征。有了这三个参数就可唯一确定一条双曲线,这就是最早期的双曲线拟合。但是,由于当时计算机速度过慢,内存太小,以及普及程度不高等因素,导致这种方法未被推广应用。当时, Thomeer 还建立了空气渗透率与 $(V_b)_{\text{poc}}/P_d$ 和 F_g 间的经验关系。后来 Thomeer(1983)又在大量实测样品拟合分析的基础上,对他在 1960 年建立的经验模型作了改进。

Chatzis(1985)研究了 r_{35} (累计频率为 35% 处对应的岩石颗粒半径, μm) 与孔隙度、渗透率之间的关系,用来评价封闭潜力和划定油气在地层圈闭聚集形成工业价值的下限。Hartmann 和 Coalson(1990)又把 r_{35} 值与孔隙类型和油藏质量关联起来, Pittman(1989)用 r_{35} 在现场评价有效产层的厚度大小。

PIA 技术是目前定量分析孔隙形态和孔隙类型及孔分布的最佳方法。自 1984 年 Ehrlich 发表第一篇论文,根据岩石图像研究复杂孔隙结构以来,应用 PIA 技术研究孔隙结构的方法引起各国同行的高度重视。很多研究人员认为它与压汞技术的结合是今后研究孔隙结构的重要方法(Wardlaw, 1990),随后一系列文章相继问世。Ehrlich 等人于 1991 年在 AAPG 上推出他们的系列研究成果,连续 3 期刊载,被称为岩石学与油层物理学新进展。Ehrlichde 系列研究成果详细论述了根据孔隙图像定量进行孔隙类型划分、孔隙类型与喉道大小的关系,以及一些储层物性参数的估算方法。PIA 技术从起初的半定量分析,简单参数输出发展到输出数据的再处理分析,相应的软件研究显得十分重要。Coskun 和 Wardlaw 先后研究了 PIA 技术估算渗透率及初始含水饱和度,目前,PIA 技术进一步扩展到剩余油分布研究。

我国在孔隙结构研究领域水平相对落后。开始时间比国外落后了近 20 年。1949 年 Purcell 提出水银注入法的装置,1964 年后我国才由玉门石油管理局和原北京石油学院将压汞技术引进,70 年代出现了研究和应用岩石孔隙结构的高潮。1986 年罗蛰潭和王允诚编著的《油气储层孔隙结构》成为国内第一部系统介绍孔隙结构理论及应用的专著。在理论方面,罗蛰潭(1986)等提出用地质混合经验分布参数描述喉道分布特征,陈立官(1980)指出用结构优度来反映孔隙结构好坏。王传禹(1981)等提出了 3 种度量大庆油田砂岩孔隙结构特征的特征参数:孔隙结构系数,相对分选系数和特征结构系数。罗蛰潭、王允诚(1986)研究了汞退出效率与岩石孔隙结构的关系,王传禹(1981)研究了孔隙结构特征参数 $\frac{1}{D_\phi}$ 与水驱油效率的关系,涂富华(1983)等研究了砂岩孔隙结构与水驱油效率的影响。曲志浩(1992)用光刻技术制作显微孔隙结构模型研究水驱油和油气二次运移。

石油钻井取心是有限的,压汞岩心分析对岩心又是破坏性的一次性实验,所以,在研究无规律孔隙结构特征上的数量要求与岩心有限之间存在矛盾。而且,压汞分析是一种重金属高污染的实验,实验岩心及实验废液都有难以处理的问题。目前,在对环境保护诉求日益高涨的背景下,大规模开展压汞岩心分析,也受到了环境保护方面的压力。所以,寻求一种环保、岩心无损,且能大规模展开的实验技术,是一种现实的需求。20 世纪 90 年代出现的核磁共振岩心分析和测井仪器,完全满足了这些要求。

§ 1.3 储层孔隙结构评价意义

石油天然气储层中的流体流动和开发动态受围岩的某些宏观和微观特性控制。其中,描述储层的典型宏观特性有厚度面积延伸,横向储层连通性(或流体流动阻挡)和非均质性等;描述储层的微观特征参数,包括孔隙性岩石的孔隙度、孔隙和喉道大小分布、渗透率、地层损害和毛管的驱替压力等参数。这些微观特性参数与上述宏观特性参数同样重要,因为这些微观特性参数也控制着储层的流体流动和开发动态。储层常规样品分析与储层孔隙结构评价相结合进行综合研究将能提高储层评价解释精度和约束储层地质模型,并因此减少石油天然气勘探开发的不确定性和风险。

当石油工业的勘探开发目标日益趋向复杂化的时候,如何提高石油天然气的勘探开发效率成了石油工业界的焦点。中国陆上油气田的沉积环境大部分属于陆相沉积,陆相沉积的本身就导致了储层物性的非均质性与空间分布的复杂性。当岩性油气藏、页岩油气藏成为新的勘探开发目标的时候,对精确认识和评价储层孔隙结构又提出了更高的要求。因此,就石油天然气勘探开发的需求对储层孔隙结构评价的要求而言,展开储层孔隙结构的评价和研究,至少有以下5个方面的意义。

第一,有助于认识和评价物性参数接近和物性相差甚远的储层,为制订合理的开发方案,特别是对于合理注水,提高注水的驱油效率提供依据。实际的勘探开发已经发现了渗透率高而注水驱油效果的实例,其原因,是复杂孔隙结构导致的非均匀水进现象(蔡忠,2000)。

第二,为正确认识和评价低电阻油层提供孔隙结构方面的依据。由于石油工业勘探开发的对象日益多元化和复杂化,低电阻油层也越来越多地出现在勘探开发的目标区域中。导致低电阻油层的因素很多,也很复杂,其中复杂孔隙结构就是导致低电阻油层的一个重要因素。

第三,为油藏精细描述与沉积相研究提供孔隙结构的参数依据。在物源和沉积环境基本一致的情况下,储层孔隙结构也可能呈现基本一致的形态。在沉积环境没有显著变化的情况下,如果储层的孔隙结构发生显著变化,说明成岩的后期作用对岩石形成了显著的改造作用。

第四,为解释地震波传播特征和衰减特征提供依据。一般来说,圆洞形式的孔隙对声波的衰减很小,而在孔隙度相同的情况下,裂缝形态的孔隙空间对声波将产生严重的衰减。

第五,油气储层孔隙结构定量研究是油藏描述的重要内容,是三次采油研究的地质基础,孔隙结构定量模型反映了储集性能好坏和渗透能力的大小,在特定条件下,还可对绝对渗透率、相对渗透率、扩散现象、毛管力—饱和度关系以及流体驱替效率等进行预测,无论对油气田勘探或开发都有重要指导意义,这方面的研究也是当今孔隙结构的前沿课题,其研究成果无疑将丰富和提高油藏微观研究理论水平。

第2章 储层孔隙结构的研究基础

§ 2.1 引言

中国油气层主要分布在陆相沉积中,陆相沉积的主要特点是岩石孔隙结构复杂,且具有非常明显的非均质性。中国已有的勘探实践表明,相对简单的油气藏勘探开发基本结束了。在今后的油气勘探开发中,石油技术人员面临的将是陆相沉积中岩石孔隙结构更为复杂的对象(刘光鼎,2002)。曾有研究人员运用分形方法研究岩石内部的孔隙结构(Prince,1990),但岩石孔隙结构实在太复杂而难以作图形描述。而且,分形方法实际上是一种统计方法。所以,用分形方法描述孔隙结构缺乏物理意义。

早在20世纪50年代,随着Purcell和Bloch因为发现核磁共振现象而获得1952年的诺贝尔奖,在全球范围内掀起一股核磁共振应用研究的热潮,核磁共振应用石油工业也是在这个时期开始的。应用核磁共振技术定量研究多孔介质孔隙结构的开创性工作,应该归功于Brownstein和Tarr两位先行者。为了便于使用正演模型研究特定空间内部的氢核弛豫规律,Brownstein和Tarr首先将细胞归结为球形、管形和板形(Brownstein,1979)。然后,在这种相对简单的细胞结构中,用扩散方程研究氢核的弛豫机制,这种方法简称为BT理论。后来的研究人员,基本沿用了这个研究方法,研究岩石孔隙中氢核的弛豫机制(Callaghan,2003,Nguyen,1995)。BT理论在研究细胞结构中是适用的,因为一个细胞可以看成孤立而且规则的结构,但BT用于岩石孔隙结构研究受到一定的局限。首先,岩石孔隙结构千差万别,如果简单归纳成球形、管形和板形结构,这种归纳方法过于近似;其次,也是更重要的一点,BT理论无法考虑岩石孔隙之间的连通性。

针对BT理论的这两个缺陷,作者提出球管模型方法评价岩石的孔隙结构,并应用球管模型(刘堂晏,2004)进行了孔隙环境下氢核弛豫机制的研究。目的是:实现对岩石孔隙结构更精确的描述,并考虑不同岩石孔隙结构之间的连通性。研究表明,球管孔隙模型实现了这两个目的。在实验室核磁岩心分析方法和核磁共振测井投入使用后,利用核磁共振测井资料研究岩石的孔隙结构又成为储层评价的热点之一,所以,利用核磁共振技术研究岩石的孔隙结构是该项技术在石油工业中的重要应用。

中国陆地油田基本为陆相生储盖背景的构造油藏和岩性油藏,储层的非均质性成为控制含油分布和开发中后期油水分布的主要因素。正是因为这个原因,复杂孔隙结构评价对于中国油气田,特别是中国陆地油气田具有很好的应用前景。2004年6月在北京召开的首届中国石油地质年会上,中国石油、中国石化和中国海油的知名专家均把岩性油气藏作为今后中国石油勘探开发的重点。非均质性是陆相沉积储层突出的特点,所以,非均质性也是陆相岩性油气

藏的显著特点。岩石孔隙结构是描述储层非均质性的主要方法,据此可以预测,岩石孔隙结构评价是今后中国陆地油气田勘探开发的常规研究内容。

§ 2.2 压汞数据刻度核磁数据的方法综述

前面已经介绍,压汞分析是分析岩石孔隙结构的经典高精度实验方法,但是,由于压汞实验的破坏性、岩心的有限性、实验成本高,以及面临的环境保护压力,压汞分析实验不可能大规模展开。核磁共振分析作为环保、无损、低成本的实验分析方法,正在日益广泛地应用于岩石孔隙结构评价。

压汞实验根据压力变化和汞液体积变化之间的关系,确定孔隙喉道大小和孔隙体积大小之间的关系,这是对孔隙结构的直接测量分析方法。与压汞数据评价岩石孔隙结构不同的是,核磁共振方法是根据氢核在孔隙空间中的弛豫过程评价岩石孔隙结构,属于间接的评价方法。正是因为这个原因,核磁共振岩心分析只有经过压汞数据的刻度以后,把核磁共振数据转换成伪毛管力数据。然后,在此基础上,借用压汞分析数据的评价方法,应用核磁共振数据研究岩石孔隙结构。

现有的伪毛管力转换方法,包括数值统计方法、图形对比方法、球管模型方法,以及幂函数非线性分段方法,这些转换方法在应用方法和计算精度上有一定的差别。在实际应用过程中,需要加以考察和选择。

2.2.1 最小饱和度误差分析方法

该方法由苏联学者 Yakov(2001)首先提出,Yakov 也是应用核磁共振数据评价岩石孔隙结构的先驱。该方法的主要原理是:首先将 T_2 谱的幅度进行归一化处理,将 T_2 谱从大孔隙部分向小孔隙部分进行反向累加,得到一条在物理意义上与压汞毛管力曲线相似的 T_2 谱积分曲线,其累积饱和度相当于压汞毛管力曲线的进汞饱和度。在同一块岩心中,压汞毛管力曲线与 T_2 饱和谱积分曲线反映近似相同的岩石孔隙结构特征。为了寻找一个最佳的转换系数,使转换得到的核磁伪毛管力曲线与实际压汞毛管力曲线最接近,引入一个平均饱和度误差函数 $(dS_w)_{(c)}$,用一定毛管力范围内所有采样点的 P_c 值,对误差进行平均处理。

$$dS_w = S_w(P_c) - S_w\left(\frac{k}{T_2}\right) \quad (2.1)$$

式中 P_c ——毛管力,MPa;

T_2 ——岩石的横向弛豫时间, μs 。

P_c 与 C/T_2 (具有压力的量纲)对孔隙尺寸具有相同的变化趋势,即都与孔隙半径成反比。

把压汞数据和 T_2 谱分布分别转换成毛管力和饱和度之间的关系,调整 P_c 与 C/T_2 之间的转换系数 C ,使式(2.1)的累计方差和达到最小。使式(2.1)方差和达到最小值对应的转换系数 C ,就是 T_2 谱分布到伪毛管力之间的转换系数(图 2.1)。

应用下面的计算方法,可以用最小饱和度误差法实现核磁共振数据到伪毛管力的转换。

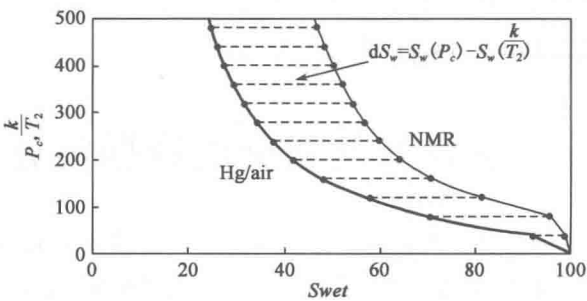


图 2.1 最小饱和度方法确定伪毛管力曲线的转换方法(Yakov,2001)

根据 T_2 谱分布,计算 T_2 谱分布的累计百分含量(图 2.2)。应该注意的是:由于最小毛管力与最大横向弛豫时间是对应关系,所以,计算 T_2 谱分布百分含量图时,最长弛豫时间 20000ms 与最小毛管力 0.1MPa 对应。

$$\begin{aligned} NCY_k &= \frac{1}{NACT} \sum_{i=1}^k NMR2_{(128-i+1)} \\ NCX_k &= \frac{C \times 1000}{NMR1_{(128-k+1)}} \\ NACT &= \sum_{i=1}^{128} NMR2_i \end{aligned} \tag{2.2}$$

式中 $NMR2$ ——核磁 T_2 谱分布的幅度,标准化以后无量纲;

$NMR1$ —— T_2 横向弛豫时间的布点值,ms。

同样,逐点计算压汞数据的压力与累计饱和度之间的关系,把他们重叠在一张图形上,调整 C ,使核磁分布的累计曲线与压汞的累计饱和度曲线之间的方差达到最小(图 2.2)。需要注意的是,压汞数据采集的压力值和汞饱和度之间的数据点通常为 23 个,而实验室核磁 T_2 谱分布的数据点可以达到 64 个以上,牛津核磁实验仪器常采用 128 个数据布点反演。所以,压汞数据点与核磁谱分布数据点的个数不会不相等。为了使核磁数据与压汞数据之间的数据个数具有一一对应的关系,需要以压汞数据为控制点,采用 3 次样条插值的方法,形成毛管力与累计饱和度之间的连续函数(图 2.2)。然后,以核磁谱分布的 T_2 布点为控制点,在压汞数据的连续函数上采集对应的汞饱和度,这样,核磁谱分布数据与压汞数据之间的数据点就具有了一一对应的关系。

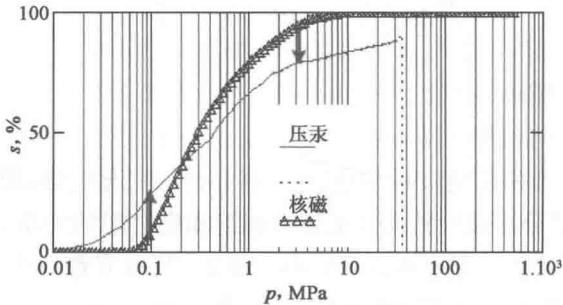


图 2.2 最小饱和度误差法的伪毛管力转换(样品:nd108-3)

2.2.2 相似对比法

相似对比法的基本做法是首先假定一个 C , 将 C/T_2 与 $Amp(T_2 \text{ 谱的幅度})$ 之间的关系, 以及 P_c 与 $DS \ Hg(i)$ (进汞饱和度增量, 也就是相邻压力的饱和度差值) 之间的关系, 重合绘制在一张图上(图 2.3)(刘堂晏, 2003)。计算结果表明, 假设 P_c 与 $DS \ Hg(i)$ 之间的关系在图 2.3 中保持不动, 当 C 增大时, C/T_2 与 Amp 之间的关系向图 2.3 的右方偏移; 当 C 减小时, C/T_2 与 Amp 之间的关系向图 2.3 的左方偏移。选择大小合适的两个 C 值, 使 C/T_2 与 Amp 之间的关系分别位于 P_c 与 $DS \ Hg(i)$ 关系的右边和左边。这样, 必存在唯一的 C , 使 C/T_2 到 Amp 之间的函数关系与 P_c 到 $DS \ Hg(i)$ 之间函数关系的相关系数达到最大值。使这两个函数关系相关性达到极大值的 C , 就是 T_2 与 P_c 之间的转换刻度系数。利用这个转换刻度系数可以将核磁共振实验数据的 T_2 谱分布, 转换为储层孔喉半径分布(图 2.3), 然后将孔喉半径分布进行累加, 即可得到连续分布的储层毛管力曲线。

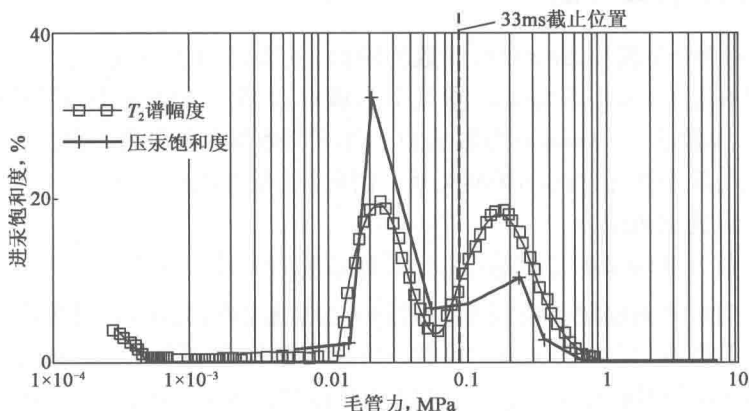


图 2.3 T_2 谱分布和毛管力分布

相似对比法与饱和度最小误差法的本质是一样的, 计算过程也基本类似。他们之间的主要差异是, 饱和度最小误差法使用饱和度的分布计算核磁数据与压汞数据之间的最小方差和, 相似对比法使用谱分布(或毛管半径分布)计算核磁数据与毛管数据之间的最小方差和(图 2.3, 图 2.4)。

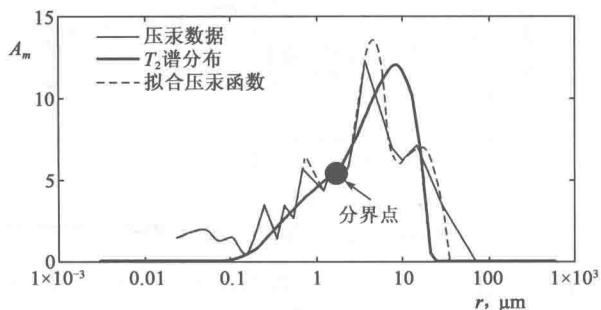


图 2.4 相似对比法确定毛管力方法(样品: nd108-3)

核磁 T_2 谱分布与压汞饱和度分布之间方差的计算结果表明,在改变转换刻度系数(C)的时候,核磁 T_2 谱分布与毛管力饱和度分布之间的方差可以达到极小值(图 2.5)。

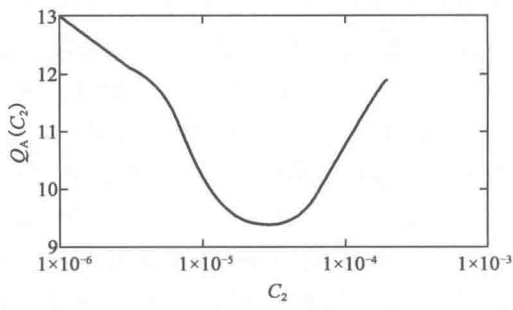


图 2.5 方差和在特定转换系数下达到极小值(样品:nd108-3)

2.2.3 Swanson 参数方法

Swanson 在 1986 年提出 Swanson 参数的时候,主要是为了研究毛管力与储层品质之间的关系。肖忠祥在 2008 年把 Swanson 参数引入核磁数据分析中,提出了核磁数据转换伪毛管力的 Swanson 参数法。Swanson 参数法的主要特点是利用多块岩心数据的单个特征点,建立核磁分析数据与压汞数据之间的转换关系。因此,这个方法对于区域上岩心孔隙结构的大尺度特征具有一定的刻画能力。

Swanson 参数方法的基本步骤是:首先,从压汞毛管力曲线中提取 Swanson 参数,并建立 Swanson 参数与对应岩石储层品质因子($\sqrt{K/\phi}$)之间的关系;其次,利用具备了压汞分析和核磁共振测量的样品数据,建立 Swanson 参数与核磁共振实验(或测井)横向弛豫时间几何平均值之间的相关关系;利用此相关关系,就可以从核磁共振实验(或测井)资料中提取 Swanson 参数,进而再根据 Swanson 参数与岩石储层品质因子($\sqrt{K/\phi}$)之间的相关模型,计算储层的储层品质因子($\sqrt{K/\phi}$)。结合核磁共振实验的总孔隙度,就可以在有核磁共振测量的井段连续地构造出核磁毛管力曲线(图 2.6)。

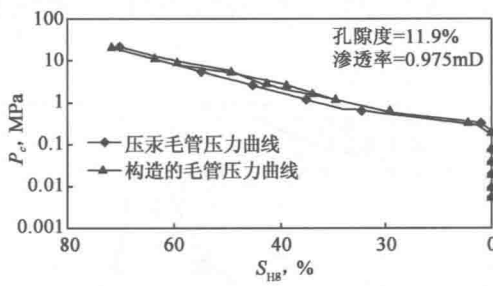


图 2.6 Swanson 参数计算伪毛管力(肖忠祥,2008)

Swanson 参数建立的拐点在双对数坐标(毛管力和进汞量)中是双曲线的顶点(图 2.7),在这个曲线上存在一点,其进汞饱和度 S_{Hg} 与毛管力 P_c 的比值(S_{Hg}/P_c)(Swanson 参数)最大,这个特征点表示在单位压力上进汞量达到最大。

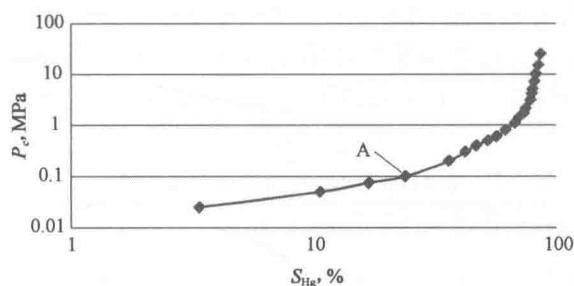


图 2.7 Swanson 参数计算方法示意图

Swanson 参数伪毛管力的转换方法是:首先,从实验岩样的压汞毛管力曲线中提取 Swanson 参数,并建立 Swanson 参数与对应的储层品质因子 $\sqrt{K/\phi}$ 之间的关系模型(图 2.8)。

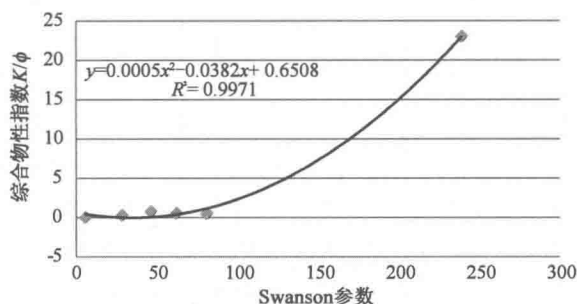


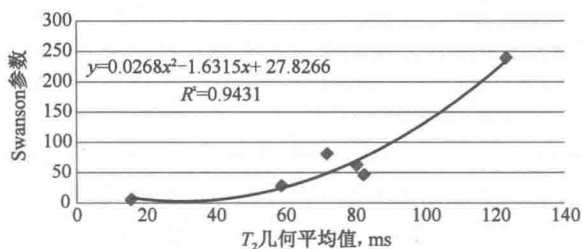
图 2.8 综合物性参数和 Swanson 参数之间的关系

其次,利用岩样压汞和核磁共振测量数据,提取 Swanson 参数与 T_2 几何平均值之间的关系模型(图 2.9)。通过这两个关系模型,就可以根据 T_2 几何平均值,计算岩石的储层品质因子。 T_2 几何平均值的计算公式由式(2.3)给出。

$$T_{2gm} = \prod_{i=1}^{128} T_{2i}^{\frac{Am_i}{AMT}} = T_{21}^{\frac{Am_1}{AMT}} \times T_{22}^{\frac{Am_2}{AMT}} \times \cdots \times T_{2128}^{\frac{Am_{128}}{AMT}} \quad (2.3)$$

$$AMT = \sum_{i=1}^{128} Am_i$$

式中, Am_i 是 T_2 谱在第 i 点的幅度。

图 2.9 Swanson 参数和 T_2 几何平均值之间的关系

最后,利用储层品质因子($\sqrt{K/\phi}$)构造毛管力曲线。岩石孔隙度和渗透率是反映岩石孔隙结构的宏观参数,不同孔隙度和渗透率的岩石在同样毛管力下,其进汞量是不同的。根据多

个岩样的压汞测试数据,可建立在不同压力下,进汞饱和度与岩样储层品质因子($\sqrt{K/\phi}$)之间的关系模型(表 2.1),当毛管力 P_c 中等时,岩样进汞饱和度与综合物性指数之间相关性良好,当 P_c 较大或较小时相关性较差。在毛管力很小时几乎没有汞液进入岩石,建立关系模型时舍去此部分数据。

表 2.1 Swanson 储层物性参数表

进汞 压力 MPa	N108-1	N108-2	N108-3	N108-4	N108-5	N108-6	截距	斜率	相关 系数
	$\sqrt{K/\phi}$ 0.0627	$\sqrt{K/\phi}$ 0.734	$\sqrt{K/\phi}$ 4.795	$\sqrt{K/\phi}$ 0.220	$\sqrt{K/\phi}$ 0.866	$\sqrt{K/\phi}$ 0.506			
0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.025	0	0	3.378	0	0	0	0	0	
0.05	0	0.079	10.63	1.679	0	0	3.074	2.2441	0.5375
0.075	0	0.079	16.89	4.642	0	0	5.215	3.5842	0.54
0.1	0	0.079	23.93	6.519	0	0	7.373	5.0765	0.5396
0.2	0	3.691	36.24	16.2	0	0	12.87	7.7993	0.5501
0.3	0	13.12	42.29	23.01	0	0	17.24	9.2677	0.5641
0.4	0	23.4	46.94	29.24	8.782	0	22.89	10.726	0.6416
0.5	0	31.1	52.5	34.08	21.6	6.821	29.88	12.29	0.79
0.6	0	36.83	57	38.22	27.76	13.42	34.9	13.392	0.8564
0.8	0	44.53	62.07	42.17	35.63	22.44	41.06	14.635	0.9136
1.1	0	52.54	67.84	48	43.4	31.25	47.73	16.05	0.924
1.4	0	57.73	70.3	53.34	49.06	37.85	52.24	16.711	0.9069
1.7	0	61.97	73.82	58.57	53.7	43.24	56.46	17.576	0.8926
2.1	0.156	65.89	75.09	62.52	57.23	46.98	59.38	17.919	0.8646
3.1	3.899	72.49	78.61	69.93	62.88	55.56	65.28	17.892	0.826
4.1	15.59	77.52	79.66	73.68	66.92	60.18	69.2	15.419	0.7973
5.1	26.51	79.8	80.08	75.95	70.66	63.7	71.95	12.964	0.7799
7.1	40.39	83.17	81.56	79.51	73.89	67.66	75.54	10.018	0.7496
10.1	50.99	86.16	82.83	82.67	76.51	71.62	78.64	7.7885	0.6996
15.1	59.88	89.22	84.8	85.83	80.25	75.47	82.02	6.1587	0.6474
25.1	66.9	92.28	86.49	88.89	82.87	78.78	84.91	4.8981	0.5637
32.1	69.24	93.62	88.04	91.36	83.68	80.65	86.54	4.6816	0.5393

综上所述,只需利用岩石核磁实验数据,结合由 Swanson 参数建立的 T_2 几何平均值和综合物性参数之间的关系,就可以求取不同毛管力下岩石的进汞饱和度,即通过核磁数据构造出岩石的伪毛管力曲线。对于 nd108-3 号岩样的构造毛管力曲线,如图 2.10 所示。

2.2.4 非线性关系的分段幂指数法

在这个方法中,首先假设 T_2 横向弛豫时间与毛管力之间具有非线性的幂指数关系,并按

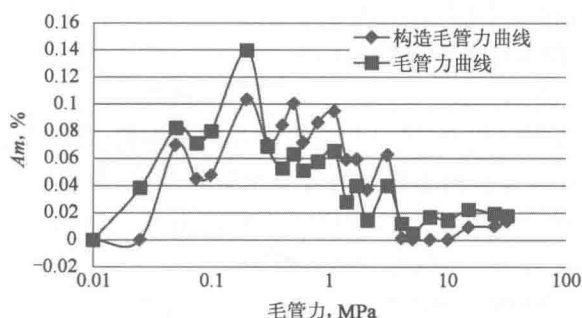


图 2.10 nd108-3 号岩石构造毛管力曲线与测量毛管力曲线对比图

照孔隙的大小分段建立压汞数据与核磁数据之间的幂指数关系(何雨丹, 2005)。在前面介绍的几种转换方法中, 包括最小饱和度误差方法、相似对比法的前提都是依据毛管力理论研究的结论, 即认为伪毛管力(P_c)与横向弛豫时间(T_2)之间存在线性转换关系。多位研究人员发现, 在较大孔隙中, 这个结论是成立的。但是, 如果存在大量小孔隙和微孔隙, 应用这两种方法转换的伪毛管力精度都有所降低。为了研究小孔隙、微孔隙岩心中伪毛管力的转换方法, 研究人员提出 T_2 分布与微细孔径分布之间可能不是线性关系, 而是分段的幂函数关系(图 2.11)。非线性幂指数转换方法, 首先需要将 T_2 分为两段, 然后, 在两段中, 分别建立 T_2 谱分布与压汞数据之间的关系。

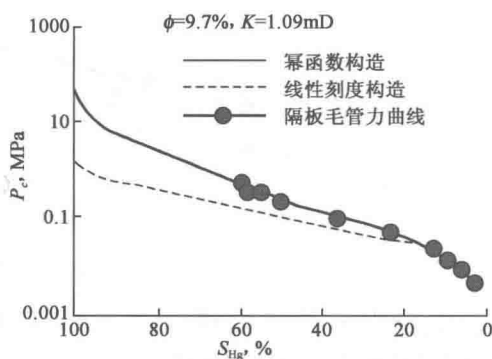


图 2.11 非线性分段幂级数转换方法(何雨丹, 2005)

分段非线性幂指数转换算法的实现步骤是:

第一步: T_2 谱分布分段。如果是双峰, 分界点就选在两个峰值之间的谷点。如果是单峰 T_2 分布, 其分界点选在其中的拐点(图 2.4)。

第二步: 按照与相似对比法相同的方法, 将 T_2 谱分布与压汞饱和度分布重叠带在一张图上。以分界点为界, 分别在两端建立 T_2 几何平均值与毛管力几何平均值之间的幂函数关系, T_2 几何平均值的计算公式见式(2.3), 毛管力几何平均值的计算公式与此类似。在双峰的 T_2 谱分布中, 分段建立 T_2 分布与相应的压汞毛管半径分布之间的相关方程, 这个方程在大孔中、小孔中的幂函数关系显然不同。因此, T_2 分布为双峰时需要使用不同幂函数分段构造毛管力曲线。

对于单峰、双峰 T_2 谱, P_c 到伪毛管力的转换公式分别为:

$$\begin{aligned}
 P_{cg} &= m \left(\frac{1}{T_{2g}} \right)^n, \text{ 单峰} \\
 P_{cg} &= m_1 \left(\frac{1}{T_{2g}} \right)^{n_1}, \text{ 大孔隙双峰} \\
 P_{cg} &= m_2 \left(\frac{1}{T_{2g}} \right)^{n_2}, \text{ 小孔隙双峰}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

式中 P_{cg} ——伪毛管力的几何平均值,MPa;
 T_{2g} ——横向弛豫时间的几何平均值,ms;
 $m_1、m_2、n_1、n_2$ ——待定参数。

根据横向弛豫时间几何平均值(T_{2g})与毛管力几何平均值(P_{cg})的相关性确定这些参数。对于双峰 T_2 分布,需要针对大孔和小孔处需要分别确定参数,分界点就是 T_2 谱分布的凹点。对于单峰 T_2 分布,当大孔和小孔之间有拐点时也归结为双峰,此时拐点为分界点(图 2.4)。最后对幂函数构造的毛管力曲线幅值做归一化处理。

选取宁东六块岩样,求出它们的进汞压力几何平均值(P_{cg})和横向弛豫时间几何平均值(T_{2g}),建立 P_{cg} 和 T_{2g} 倒数之间的转换关系为(图 2.12):

$$P_{cg} = 15.83 \times \left(\frac{1}{T_{2g}}\right)^{0.248} \tag{2.5}$$

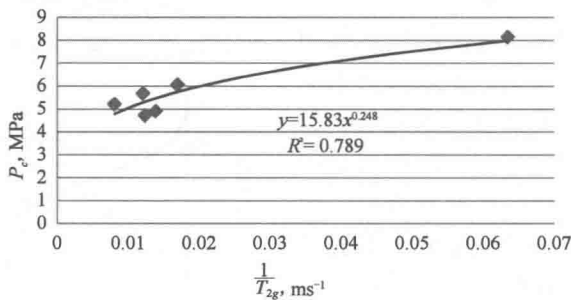


图 2.12 进汞压力与 T_2 几何平均值之间的关系

用此关系式把一块岩样的 T_2 分布转换为毛管力分布,如图 2.13 所示。

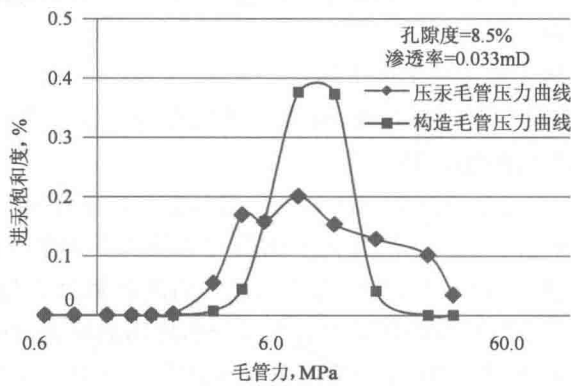


图 2.13 构造伪毛管力与测量毛管力对比(相关系数 0.76, nd108-1)

2.2.5 球管模型转换方法

基于球管模型方法建立压汞数据与核磁数据之间转换关系,实际上也是压汞数据对核磁数据的刻度方法(刘堂晏,2006)。逐次改变球管模型的参数,然后使用球管模型计算回波数据反演的布点位置,使用不同的布点方法得到不同的 T_2 反演谱,当 T_2 反演谱与压汞数据的方差达到最小时,这个 T_2 反演谱就是需要寻找的伪毛管力谱(图 2.14)。

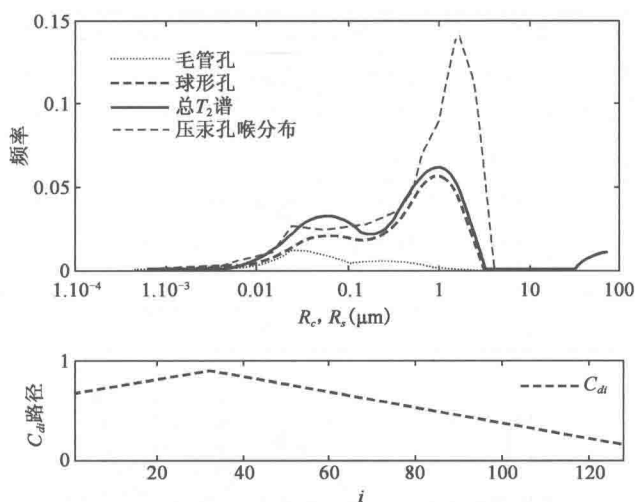


图 2.14 球管模型转换伪毛管力方法

球管模型方法可用于分析岩石中球孔隙和管形孔隙的分布特征,并实现对岩石孔隙结构参数的定量计算。

2.2.6 伪毛管力转换的误差分析及选用方法

目前主要压汞数据刻度核磁数据的方法有 4 种,即最小饱和度误差法、相似对比法、Swanson 参数法和分段幂函数法。第 5 种方法是球管模型转换方法,是应用球管模型评价岩石孔隙结构算法中的一个计算步骤,包含了孔隙结构寻优、迭代回波反演等计算过程,以及伪毛管力的转换方法。但是,在这个计算过程中,伪毛管力转换不是主要的目的,且具有较大的计算代价。所以,球管模型转换方法不是独立的伪毛管力转换方法。

将前面 4 种刻度方法应用到实际数据计算,相似对比法的伪毛管力刻度误差最小,其次是 Swanson 方法(表 2.2,图 2.15,图 2.16,图 2.17,图 2.18,图 2.19)。就刻度算法的本质而言,这是可以理解的。在相似对比方法中,压汞数据与刻度后的伪毛管力数据之间的刻度误差最小,因为这种方法就是按照两个数据之间的最小误差为寻优条件,搜索刻度系数。相似对比法的特点是:关注岩石孔隙结构细节特征和局部特征,仅限于单块岩心孔隙结构特征的刻画,且对孔隙结构分析具有较高的精度。但是这个方法的局限性在于:没有考虑单块岩心中大、小孔隙在数量分布上的差异,也很难考察多块岩心孔隙结构的一般特征,最小饱和度误差法与相似对比法类似。Swanson 参数方法的计算过程很复杂,而且,没有明确的物理意义,完全是一系列的统计规律,伪毛管力的转换精度也差强人意。但是,Swanson 参数法的优点是根据多块岩心的数据统计,寻找储层品质因子与毛管力之间的关系,Swanson 参数法抓住了储层评价核心参数与岩石物性一般规律之间的关系。分段幂指数方法的优点是考虑了孔隙结构尺寸上大小的差异,但是,计算结果表明,其伪毛管力的转换精度不是很理想。而且,将弛豫时间与伪毛管力之间的关系定义为非线性幂函数关系的假设,也缺乏理论支持。

表 2.2 不同方法拟合的压汞曲线与真实压汞曲线之间的误差和相关度对比

岩 样	Swanson 参数法		分段幂级数法		相似对比法		饱和度最小误差法	
	标准差	相关度	标准差	相关度	标准差	相关度	标准差	相关度
N108-1	6.6E-02	0.29	7.3E-02	0.29	3.8E-02	0.86	8.4E-02	0.86
N108-2	1.9E-02	0.84	1.0E-01	0.84	1.9E-02	0.84	4.0E-02	0.84
N108-3	2.4E-02	0.78	1.3E-01	0.78	2.5E-02	0.83	6.0E-02	0.60
N108-4	2.9E-02	0.38	9.9E-02	0.38	1.9E-02	0.78	3.1E-02	0.72
N108-5	2.8E-02	0.78	1.0E-01	0.78	2.4E-02	0.82	5.2E-02	0.78
N108-6	3.3E-02	0.60	1.0E-01	0.60	2.0E-02	0.86	4.7E-02	0.84

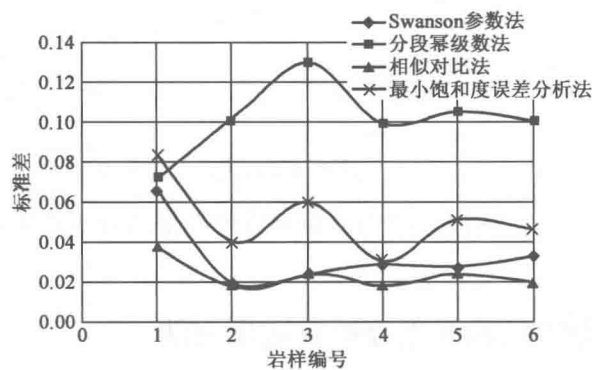


图 2.15 不同方法拟合压汞曲线的结果误差对比

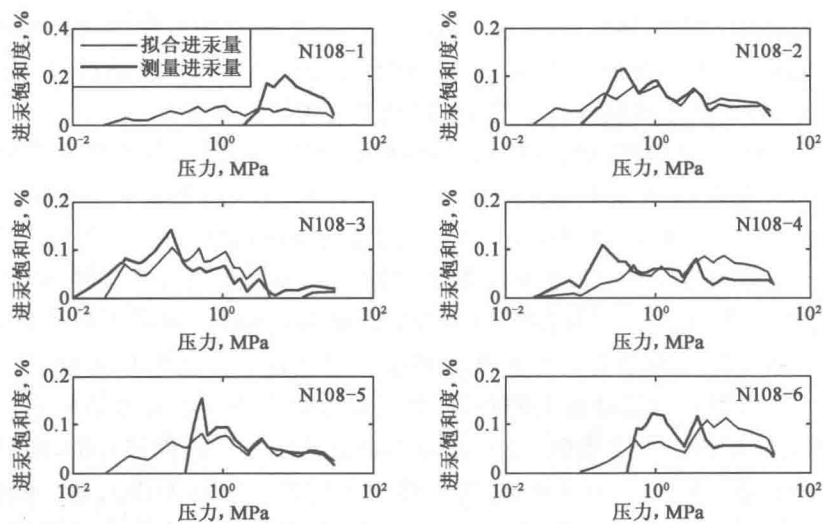


图 2.16 Swanson 参数法拟合压汞曲线与真实压汞曲线对比

在这 4 种伪毛管力的刻度算法中,就对数据的刻度方式而言,饱和度最小误差法和相似对比法,着重单块岩心特征的精细描述。所以,只要有一块岩心同时具备核磁数据和压汞分析数据,就能建立伪毛管力的转换关系。Swanson 参数法和分段幂指数法需要根据多块岩心的核

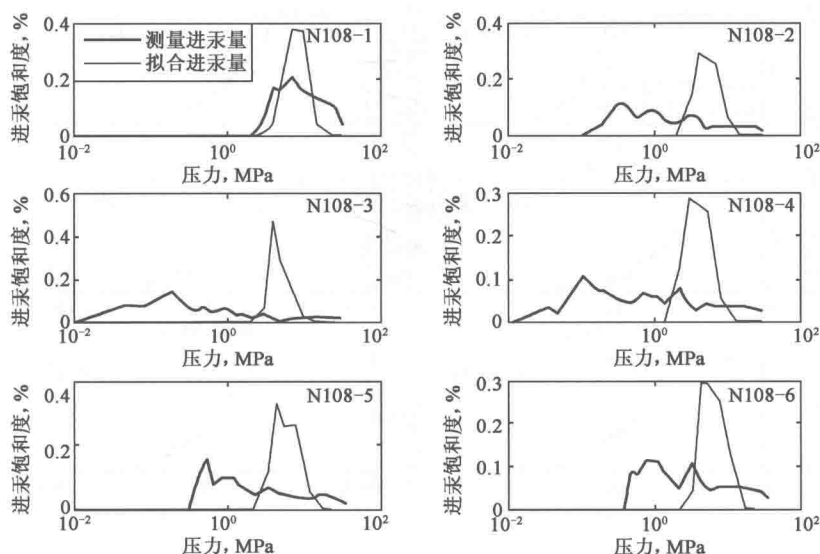


图 2.17 分段幂指数法拟合压汞曲线与真实压汞曲线对比

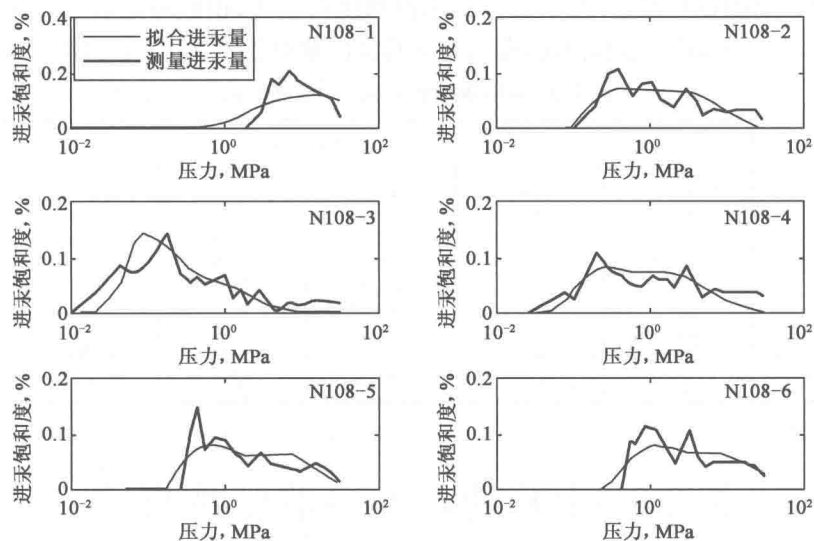


图 2.18 相似对比法拟合压汞曲线与真实压汞曲线对比

磁数据和压汞分析数据,建立各种参数之间的统计关系。所以,这两种方法着重从整体上把握区域孔隙结构的一般特征。

根据现有研究对以上 4 种伪毛管力刻度方法的计算分析,可以看出,这 4 种刻度方法各自具有优缺点。所以,在实际应用中,应该结合研究目标,根据这些方法的特点进行优先选用。例如,当研究目标关注局部岩石孔隙结构特征和细节特征的时候,建议选用相似对比法;当研究目标关注局部研究工区储层孔隙结构的区域特征和整体规律的时候,建议选用 Swanson 参数方法。最小饱和度误差法和分段非线性幂函数法,可以作为研究中的参考方法。