

The History of Constant-Rate Mercury Injection Technology and Its Application on the Development of Petroleum Fields*

Junchang Sun¹, Zhengming Yang^{1,2}, Qianhua Xiao¹

¹Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Science, Langfang

²Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang

Email: jjsun1983@yahoo.com.cn

Received: Sep. 4th, 2011; revised: Sep. 12th, 2011; accepted: Sep. 15th, 2011.

Abstract: Constant-rate mercury injection experimental technology is one of the advanced techniques which have been widely used to study the features of micro-pore structure on oil and gas reservoir in recent years. Comparing to the conventional constant-pressure mercury injection, this experimental technology can not only obtain the distributions of pore-body radius but also the pore-throat radius. This discussion reviews the invention history of the constant-rate mercury injection technology and its application on the development of oil and gas fields, and describes in detail C. Gaulie and H. H. Yuan's contributions to the invention of this technology and its basic principles. The emphasis is given on the application methods using this technology to get the micro-pore structure and dynamic flow parameters of oil and gas reservoirs. Some application examples obtained from low permeability sandstone and volcanic gas reservoirs are also discussed to prove that this technology is one of the most effective methods on the development of oil and gas reservoirs.

Keywords: Constant-Rate Mercury Injection; Development History; Petroleum Reservoir; Micro-Pore Structure; Flow in Porous Media

恒速压汞实验技术发展历史及其在油气田开发中的应用*

孙军昌¹, 杨正明^{1,2}, 肖前华¹

¹中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊

²中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊

Email: jjsun1983@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011年9月4日; 修回日期: 2011年9月12日; 录用日期: 2011年9月15日

摘要: 恒速压汞是近年来逐渐广泛使用的研究油气藏储集层微观孔隙结构特征的先进实验技术之一, 其克服了常规恒压压汞仅能反映喉道发育特征及测试数据反映孔隙结构非唯一性的缺点。本文综述了恒速压汞实验技术的发展历史及其在油气田开发中的应用, 详细介绍了 C. Gaulie、H. H. Yuan 等学者提出该项技术的思想、基本原理和合理性论证, 重点介绍了恒速压汞技术在求取储集层微观孔隙结构静态参数及油气开发中的渗流动态参数的应用方法, 并给出了低渗透砂岩及火成岩储集层应用实例。

关键词: 恒速压汞; 发展历史; 油气储层; 微孔隙结构; 多孔介质流动

1. 引言

恒速压汞实验技术是近年来在石油工业领域逐渐广泛使用的研究油气储集层微观孔隙结构特征及相关

渗流动态参数的新型实验技术, 由于该项实验技术测试信息的准确性和多样性越来越受到石油工业界的认可^[1]。中国科学院渗流流体力学研究所是全国最早引进恒速压汞实验仪器的科研单位, 目前, 大庆和长庆油田等均已引进美国 Coretest ASPE(Automatic Space

*基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-005)

Pore Examination)7300 恒速压汞仪进行油气田开发的科研工作。

历史上, Purcell 于 1949 年首次将常规高压压汞技术(以下简称常规压汞)引进到石油工业领域, 同时给出了结合 Laplace 方程计算多孔介质绝对和相对渗透率的数学模型^[2]。后来, Pickell. J. J. 等人还给出根据压汞实验测试结果计算油藏储层残余油饱和的方法, 使得压汞技术仅从获取孔喉大小、分布规律等静态参数发展到计算电阻率、残余油饱和度等渗流动态参数的阶段^[3]。但是由于常规压汞是在进汞过程中维持一系列恒定不变的压力, 通过不断提高仪器施加的进汞压力使得越来越小的孔隙被汞所充填。由于油气藏储集层孔隙空间一般是由孔径较小的喉道连通空间相对较大的孔道所组成, 细微的喉道是决定储集层渗流能力大小的主要因素, 而孔道则是决定储集性能好坏的关键。因此, 常规压汞测试结果仅能反映出多孔介质中喉道半径大小及其所控制的孔道体积, 无法给出孔、喉数目及其分布规律, 这就使得具有不同孔隙结构的多孔介质可能具有基本相同的测试结果。尤其对于低渗、致密油气藏及孔、洞较为发育的碳酸盐岩、火成岩储层更为严重。鉴于常规压汞的上述缺点, C. Gaulie, H. H. Yuan 等人先后提出以恒定速度进行压汞测试的实验技术^[4,5], 由于进汞速度很小可忽略渗流过程中的达西压降, 则仪器施加的进汞压力始终与毛管阻力相平衡, 那么由于多孔介质微观孔喉尺寸变化所引起的进汞压力波动就可以将其中所包含的细微的喉道和较大的孔道区分开来, 测试结果能够更为细致和精确反映多孔介质孔隙结构的复杂性和唯一性。

本文综述了恒速压汞实验技术发展历史, 重点介绍了 C. Gaulie, H. H. Yuan 等学者提出恒速压汞技术的思想、基本原理及在求取油气藏储集层静态孔隙结构和渗流动态参数的方法, 同时结合 ASPE7300 测试结果给出了该项技术在复杂油气藏储层评价方面的应用实例。

2. 恒速压汞技术发展历史及原理

2.1. 恒速压汞实验技术发展历史

恒速压汞实验技术的提出经历了长期的积累和发展过程。J. I. Gates 早在 1959 年使用汞孔隙度仪测定

孔洞型碳酸盐岩岩芯孔隙度时就观察到汞在进入岩芯孔隙过程中毛管压力波动现象。后来, Crawford 和 Hoover 等人在 1966 年也观察到了水驱油过程中注入压力的波动情况^[6]。Morrow 教授则在 1970 年有针对性地对非润湿相以极低速度驱替润湿相流体过程进行了研究, 更加清晰地观察到注入压力的波动现象, 并且还引入了一些术语来描述注入压力的动态变化过程^[7]。

1971 年, C. Gaulier 在 SPE 会刊上发表了第一篇关于恒速压汞(constant-rate mercury injection)技术设计思想、合理性分析及若干数据处理方法的研究论文, 该文可以认为是恒速压汞技术发展历史上第一次完整提出该项技术设计思想和实验仪器、数据处理和分析方法的研究论文^[4]。当时, C. Gaulier 的主要目的是通过恒速压汞技术根据进汞压力的波动区分出孔、洞型碳酸盐岩中较大的孔洞及较小的基质孔隙空间, 最终给出的是基质喉道(pore throat)半径大小、孔洞大小及其分布等微观孔隙特征数据^[4]。与后来 H. H. Yuan 等人提出和设计的仪器以及目前常用的 Coretest 公司的 ASPE7300 相比, C. Gaulie 设计的仪器测试精度较低, 最重要的是该仪器的设计思想是针对孔洞型油气藏储集层岩石, 还不能精确区分致密岩石基质中的喉道和孔道。但该仪器的优点是测试样品体积较大, 实验周期也相对较短。

1986 年, H. H. Yuan 和 B. F. Seanson 在前人研究的基础上提出了更加完整的恒速压汞实验思想, 设计出了包括压力放大器、A/D 转换器、计算机自动记录和处理实验数据等能够自动控制的恒速压汞实验仪器, 称为孔隙特征检测仪(APEX: Apparatus for Pore Examination), 为该项技术的商业化应用奠定了技术基础^[5]。H. H. Yuan 和 B. F. Swanson 根据岩石基质中喉道和孔道大小的不同则必然引起进汞压力的波动, 通过精密的仪器控制和检测就可以区分出孔径具有一定差别的喉道和孔道, 并自动记录各自的发育数量, 最终可以给出实验岩样喉道、孔道半径大小及其发育数量, 喉道、孔道及总的毛管压力曲线, 喉道、孔道孔隙体积大小及个数, 同时结合相关的孔隙结构假设和多孔介质渗流理论还可以计算得到绝对和相对渗透率、残余油饱和度、电阻率以及阿尔奇公式中的待定参数等渗流动态参数。通过细致的对比分析可以将孔隙结构特征参数、毛管压力曲线与沉积成岩演化特征、微观非均质

性等联系起来。

Pedro G. Toledo 等人对影响 H. H. Yuan 等人设计的仪器的因素诸如孔隙形状、连通性、润湿角滞后、岩样尺寸等进行对比分析, 结果认为样品尺寸是影响恒速压汞实验测试结果可靠性的最主要因素^[8]。对于相对较为均质的砂岩和粘土含量较高的碳酸盐岩, 较小的样品即可获得可信的实验结果。但是对于非均质性较强的含有孔、洞的复杂岩石应当选择尺寸较大的样品, 同时建议选用更低的进汞速度, 延长实验周期。

综合来看, 后期关于恒速压汞实验原理的研究均是建立在 C. Gaulier, H. H. Yuan 等人的研究基础之上的, 不同学者只是提出了若干种新的数据分析方法, 其应用领域主要还是集中在油气藏储集层岩石微观孔隙结构特征方面。

2.2. 恒速压汞技术基本原理

如前所述, C. Gaulier 于 1971 年首次提出了比较完整的恒速压汞实验思想并设计了相关的实验仪器, 其主要目的在于通过进汞压力的波动区分碳酸盐岩储集层中孔径较大的孔、洞以及孔径很小的基质孔隙, 这样就能够很好地反映出常规压汞所忽略的作为油、气主要储集空间的孔隙和溶洞, 因为这对于研究非润湿相驱替机理及预测水驱采收率非常重要。

C. Gaulier 对于恒速压汞技术最大的贡献是从理论上证明了该项技术的可靠性, 即能够通过进汞压力波动将喉道和孔道区分开来。假设压汞过程岩石样品润湿性保持不变, 则由于进汞速度很小就可以忽略由于渗流引起的达西压降。基于孔隙结构的毛管束假设, C. Gaulier 得到了达西压降与毛管力的关系^[4]:

$$\frac{P}{P_c} = \frac{4\mu L^2 Q \pi}{\sigma R V \phi \cos \theta} \quad (1)$$

式(1)中 P 为达西压降, P_c 为毛管力, μ 为流体粘度, L 为岩石样品长度, Q 为汞体积流量, σ 为表面张力, R 为岩样喉道半径, V 为实验岩样外观体积, ϕ 为孔隙度, θ 为润湿角。

式(1)中达西压降与毛管力比值是否足够小是判断恒速压汞技术是否能够准确反映实验岩样孔隙结构变化特征的唯一指标。流量 Q 取为 0.0017 mL/min。岩样尺度按最不理想情况选取选取, 长度 4 cm、直径 2.3 cm、孔隙度 10%, 而喉道半径假设为 1 μm 。将以

上数据及汞的粘度和润湿角代入(1)式可知 $P = 10^{-4} P_c$, 即按最不理想情况计算的达西压降仅为毛管力的万分之一。而对于外观尺寸较大的岩样, 则计算的达西压降仅为毛管力的百万分之一。这种误差是远远低于测试仪器的分辨率的, 因此认为设计的仪器能够准确反映油气储集层岩石微观孔隙结构的变化(C. Gaulier 研究中实验岩样尺寸为 3.75 cm \times 11 cm)。

从式(1)还可以看出, 达西压降和毛管力比值的大小与流量和岩样外观体积比值呈正比例关系。因此, 减小实验岩样外观体积就必然要求降低进汞速度, 这就是目前 ASPE7300 进汞速度较小(一般为 5×10^{-4} 或 1×10^{-5} mL/min)的原因之一。

H. H. Yuan 和 B. F. Swanson 在 1986 年发表的论文 “Resolving pore space characteristics by rate-controlled porosimetry” 中对恒速压汞原理进行了详细论述, 尤其是对孔道和喉道对毛管压力的不同响应特征进行了明确区分, 并且定义了一些专门术语来描述孔道和喉道中不同的进汞过程^[5]。如图 1、2 所示, 在进汞过程中, 汞要进入较大的孔隙空间就必须突破较小的喉道, 因为喉道对应的毛管阻力是最大的。一般而言, 一个独立的喉道总是存在一个半径最小的截面, 在汞到达这个最小截面之前毛管压力不断上升, 该过程被定义为 Rison, 特指在进汞过程中毛管压力不断上升, 并且该过程结束时进汞压力超过了之前的所有进汞压力。当汞突破最小的喉道后, 由于孔道半径的急剧增大必然导致毛管阻力快速降低, 进入岩样中的汞也会立刻重新分布。但孔隙中汞的总含量基本保持不变, 重新分布的仅是突破喉道的渗流前缘部分的汞。汞突破最小的喉道进入较大孔道中所引起毛管压力突降的现象称为 Rheon。实际上, Melrose 在 1965 年即提出使用 Rheon 来描述毛管压力突降这个现象, Heller 也曾在 1968 年观察到当非润湿相驱替饱和盐水岩石时驱替前缘突跳的现象(Rheon)。Rheon 也可以被解释为整体渗吸中的局部驱替过程。

当压力突降、岩样孔隙中的汞快速重新分布结束之后, 进汞压力会逐渐增加。在进汞压力未超过 Rheon 发生之前的压力时, 该过程被定义为 subison。在 subison 过程中, 随着进汞压力的增加, 孔隙中进汞饱和度不断增加, 此过程中进入岩样中的汞一是充填了由于 Rheon 发生时喉道中的亏缺空间, 二是进入

Rheon 发生时尚未被汞完全充满的孔道中。在 subison 过程中, 当进汞压力达到 Rheon 发生时的压力时, 就标志着由前一个喉道半径所控制的孔隙或孔隙系统进汞过程的结束。概括来说, 在恒速压汞原理中, 一个孔隙系统实质就是一个 Rheon 过程和紧随其后的一个 subison 过程或者 Rison 之后的多个 Rheon 过程和多个 subison 过程。

H. H. Yuan 和 B. F. Swanson 同时对图 1、2 中随进汞饱和度增加, rison 过程进汞压力上升较慢而 subison 过程进汞压力上升较快进行了解释。认为可能是在 rison 过程中汞要同时进入更多的大小相近的喉道中, 导致进汞压力增加较慢。而 subison 过程中汞仅充填较小的欠缺孔隙, 因此进汞压力上升较快。

根据对恒速压汞过程中孔道和喉道进汞压力响应特征的不同, H. H. Yuan 将 subison 过程中压力恢复到 rheon 发生前的压力水平之间所注入孔隙内的汞定义

为单个孔道进汞饱和度, 将所有的 subison 进汞饱和度累加即得岩样孔道进汞饱和度。而喉道进汞饱和度是将 subison 过程中压力恢复到 rheon 发生前的压力水平直至下一个 rheon 发生之间的进汞饱和度定义为单个孔隙系统对应的喉道进汞饱和度。实际数据处理时, 在获得总进汞饱和度之后, 减去孔道进汞饱和度即可得到喉道进汞饱和度。因为对于天然油气藏储集层岩石样品, 孔道空间一般远大于喉道空间, 因此上述处理可以减小系统误差, 这与 C. Gaulier 使用总进汞饱和度减去溶洞进汞饱和度求取基质进汞饱和度的方法是相同的。

3. 恒速压汞技术在油气开发中的应用

3.1. 求取储集层微观孔隙结构特征参数

在恒速压汞实验技术提出的初期, C. Gaulier 给出了若干种数据处理和分析方法。这些分析方法大致可分为两类, 一是研究毛管压力与基质进汞饱和度的关系, 二是研究毛管压力与较大的孔隙如气孔、溶洞进汞饱和度的关系。第一类包括毛管压力与基质进汞饱和度、喉道半径的关系、进汞饱和度与毛管压力比值与喉道半径的关系。C. Gaulier 给出的第二类数据处理方法包括溶洞和基质进汞饱和度与总进汞饱和度的关系、溶洞进汞饱和度与喉道半径的关系、溶洞大小分布规律。

H. H. Yuan 和 B. F. Swanson 在 1984 年提出完整的恒速压汞思想之后给出了三种数据处理分析方法, 均是针对研究储集层微观孔隙结构特征。一是对比研究孔道、喉道进汞饱和度与总进汞饱和度的关系, 这与 C. Gaulier 给出的方法基本相同; 二是研究不同进汞压力区间的孔道体积分布特征, 分别为初始进汞阶段、孔道进汞饱和度最大阶段、较高进汞压力阶段, 作为实例还对比了贝瑞岩芯和白云岩岩芯孔道分布特征的异同; 三是孔道与总进汞饱和度比值与进汞饱和度、毛管压力之间的关系, 因为这可以反映油气渗流过程中喉道与孔道相互匹配关系。

随着非常规低渗、特低渗及致密砂岩油气藏和孔、峰、洞均比较发育的碳酸盐岩和喷发成岩的火山岩油气藏的开发, 通过常规物理模拟方法获取的储集层宏观物性参数与微观孔隙之间的对应关系愈加复杂, 即不同岩性和孔隙类型的储集层可能具有基本相同的宏

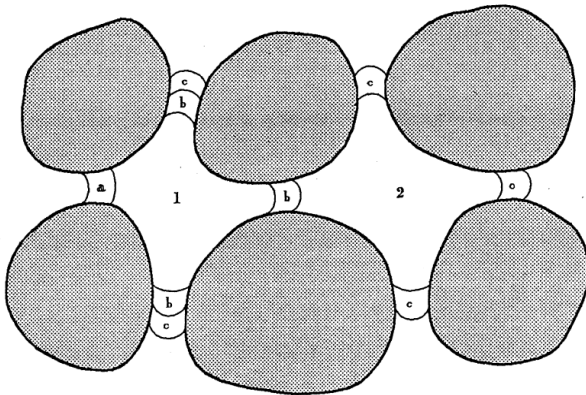


Figure 1. Schematic diagram of rock micro-structure
图 1. 岩石微观孔隙结构示意图

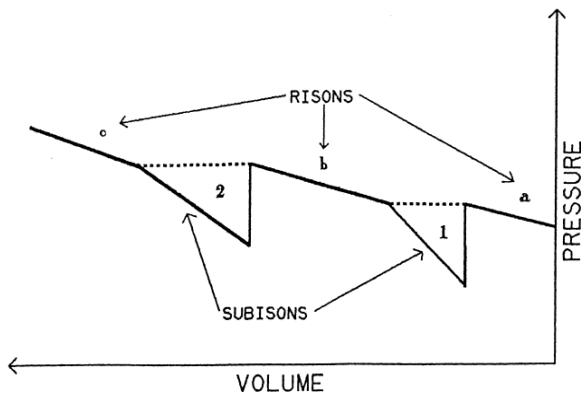


Figure 2. Schematic diagram of capillary pressure fluctuations
图 2. 恒速压汞实验毛管压力波动示意图

观物性参数,但对应的储集层储集和渗流能力及油气开发效果却有显著的差别。人们认识到,非常规油气储集层与常规储集层的主要和本质差别并不是在于宏观物性参数的差别上,更重要的是微观孔隙特征的差别,因为这才是决定油气开发效果的内在根本因素。因此,一些学者提出了根据恒速压汞测试结果进行储集层微观孔隙特征描述和评价的相关参数,这对储集层评价和指导油气田开发具有更直接的指导作用^[1,9]。

3.2. 不同物性储集层孔、喉半径发育特征

如前所述,油气藏储集层渗流能力是由其喉道大小所控制的,而储集能力则与孔道半径大小关系更为密切。因此,对比研究不同物性储集层喉道与孔道半径大小及其分布规律具有更加直接的认识作用。中国科学院渗流流体力学所首先提出了低渗砂岩储集层与中、高渗储集层的差别主要体现在喉道大小及其分布上,而其孔道大小却基本相同,自然孔喉半径比也具有明显的不同,如图3~图5所示。图3~图5中对应的纵坐标如果归一化后就可以得到孔、喉分布频率,可以明确反映出不同大小孔、喉的相对发育大小。

从图3~图5可以明显看出,不同渗透率级别的砂岩储集层孔道大小及其分布规律基本相同,孔道半径分布在50~250 μm之间,峰值孔道半径约为120 μm,呈较为明显的正态分布,大小孔道均比较发育。但不同渗透率级别的储集层喉道大小及其分布规律差别很大,渗透率越小,喉道半径越小且分布范围越窄,如渗透率为0.24 mD的岩样所有的喉道半径均小于1 μm。渗透率越大,喉道半径越大且分布范围越宽,如渗透率为9.92 mD的岩样最大喉道半径为4.4 μm,大

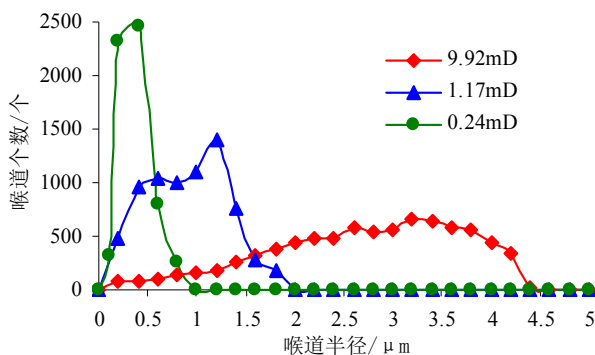


Figure 3. Pore throat radius distribution of reservoir rock
图3. 不同储层喉道半径分布图

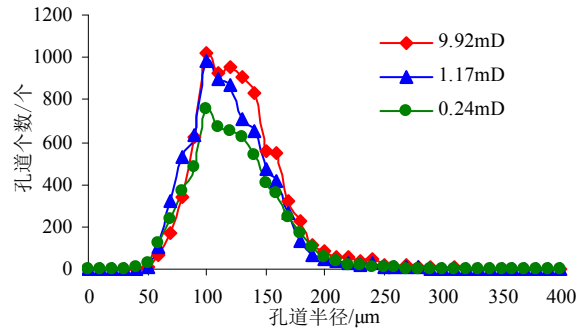


Figure 4. Pore throat distribution of reservoir rock
图4. 不同储层孔道半径分布图

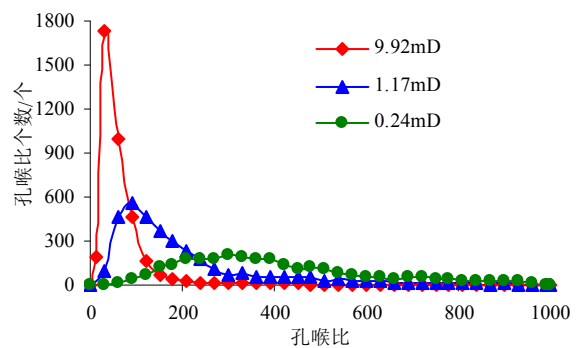


Figure 5. Aspect ratio distribution of reservoir rock
图5. 不同储层孔喉比分布图

于2 μm的喉道约占全部喉道个数的79%。由于孔喉半径比等于孔道与喉道半径的比值,因此,由于不同渗透率储集层孔道基本相同但喉道半径差别较大将导致孔喉比随渗透率变化而发生比较明显的变化。图5表明,随着渗透率减小,孔喉比呈增大趋势且分布范围变窄,渗透率与平均孔喉半径比之间也具有较好的函数关系。

3.3. 不同岩性储集层孔、喉体积发育特征

由于不同岩性油气藏储集层沉积成岩机理、特征及后期改造作用的差异,导致储集层地质特征具有明显的不同。常规中、高渗砂岩油气藏储集层一般埋藏较浅,压实和后期改造作用较弱,因此储集层以原生的粒间孔隙为主,次生溶孔及粘土充填导致的微孔隙较少,因此其孔道和喉道体积一般较大。低渗、致密砂岩油气藏埋藏较深,压实和后期溶蚀作用较为强烈,粘土充填严重,微孔隙所占比例增多,因此微观孔道和喉道体积一般小于中、高渗储集层。碳酸盐岩和喷

发成岩的火成岩储集层由于地质成岩作用更为复杂，孔隙类型种类多样，孔径往往具有跨尺度特征，较小的粒间孔、粒内孔及孔径较大的气孔、溶蚀孔、裂缝均有发育。

X-CT 及扫描电镜(SEM)虽然可以获得孔隙结构发育的详细特征，但是反映的仅是平面发育规律且难以准确定量孔隙大小。恒速压汞测试则可以更加接近油气渗流实际的反映孔隙大小及其连通性，图 6 即为沉积砂岩岩样 s1(渗透率 9.92 mD)与喷发成岩的火成岩岩样 v1(渗透率 8.26 mD)孔道与喉道进汞饱和度曲线。从图 6 可以看出，砂岩孔道与喉道进汞饱和度大小差距较大，当压力增加到一定程度后孔道进汞饱和度即基本保持不变，喉道进汞饱和度近似呈直线增长。火成岩孔道与喉道进汞饱和度大小差异小于砂岩岩样，孔道与喉道进汞饱和度呈现交替增加的特点，反映孔、喉匹配关系较为复杂，孔喉半径比分布特征的复杂性也证明了上述结论的正确性。从图 7 低渗砂岩孔道体积分布图可以看出，其中 90%以上的孔道体积都小于 50 nL，最大孔道体积仅为 250 nL。而 C. Gaulier 研究给出的溶洞型碳酸盐岩主体孔道体积为 2000~10,000 nL，是低渗砂岩的 40~200 倍^[4]。

3.4. 求取储集层渗流动态控制参数

油气藏储集层中总是发育有各种不同大小的孔隙和喉道，一般而言，不同大小的喉道对于储集层渗流能力的贡献是不同的，半径越大的喉道其对渗流能力的贡献越大，喉道半径越小，则其对渗流能力的贡献越小。使用孔道或喉道总体分布进行储集层微观孔隙描述在数学处理及实际应用中均是不方便的，因此人们提出

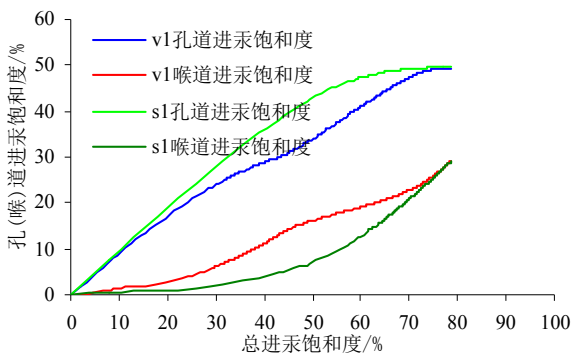


Figure 6. Pore and throat saturations of reservoir rock
图 6. 不同储层孔道与喉道进汞饱和度

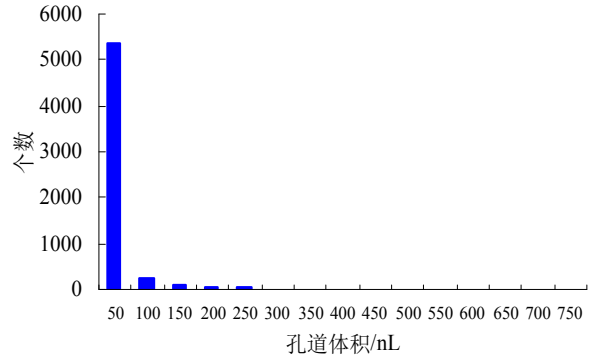


Figure 7. Pore volume distribution of low permeability reservoir rock
图 7. 低渗砂岩孔道大小分布图

了多种形式的平均参数或临界参数来表征微观孔隙半径大小，如平均孔隙半径、最大孔隙半径、临界孔隙半径等。恒速压汞技术对喉道发育个数的精确统计促使了主流喉道半径概念的提出和数值计算，在一系列不同大小的孔隙中总是存在少数几个孔隙对于渗透率的贡献是最大的。结合毛管束假设与多孔介质渗流力学理论，可以得到以恒速压汞实验结果计算的储集层主流喉道半径大小。大量的理论和实验研究表明，主流喉道半径能够更加准确地反映储集层渗流能力的大小，将储集层宏观渗流能力与微观孔隙结构特征参数联系起来，对于多孔介质渗流理论计算也具有极为方便的作用，图 8 即为低渗砂岩与火成岩储集层主流喉道半径与渗透率的关系，二者具有很好的对应关系。

3.5. 求取油气藏储层开发评价其他参数

除了基于毛管束假设和多孔介质渗流理论计算储

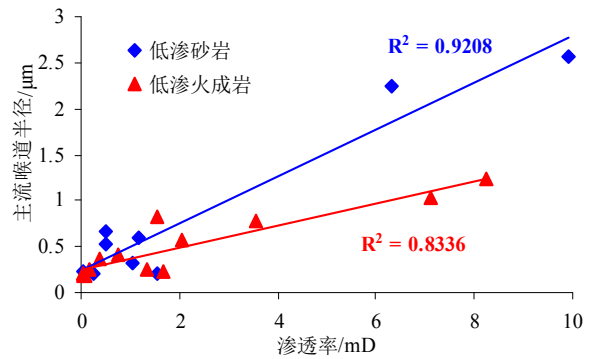


Figure 8. Relationship between permeability and main stream throat
图 8. 主流喉道半径与渗透率的关系

层渗透性能评价的重要参数主流喉道半径外, H. H. Yuan 等人还根据岩性指数的理论基础推导得到阿尔奇公式总的岩性指数 m 和地层电阻率指数 F 的计算公式^[10]:

$$m = 1 + \frac{\lg((1 - S_{mwr})/2)}{\lg(\phi)} \quad (2)$$

$$F = \frac{2}{(1 - S_{mwr})\phi} \quad (3)$$

式(2)、(3)中为 S_{mwr} 非润湿相流体饱和度, ϕ 为孔隙度。

在油气初次运移中, 较大的孔道空间是储集非润湿相(油、气)的最主要场所, 因为较大孔隙空间作为运移阻力的毛管压力较小, 而在水驱油开发过程中毛管压力较小的孔道则成为残余油分布的主要场所。如果结合恒速压汞测试的孔道与喉道体积空间, 则对应的孔道进汞饱和度将是储集层残余油饱和度的上限值, 这种思想与 Wardlaw 等人 1978 年水驱油成像研究结果相吻合。基于上述假设, H. H. Yuan 通过研究给出了 2 块贝瑞岩芯初始及残余油饱和度关系图, 并与末端岩芯的水驱油实验结果进行对比, 发现二者具有很好的一致性^[10]。因此, 恒速压汞实验结果与实际油气渗流过程相结合也可以获得开发动态中的相关评价参数, 针对不规则岩屑的恒速压汞测试结果就可以代替需要规则柱塞岩芯的水驱油实验结果, 为实际油气藏开发提供快速的指导参数。

4. 结论

1) 恒速压汞实验技术思想的提出是一个长期积累和发展的过程, C. Gaulie, H. H. Yuan 等人均先后对于该项技术的商业应用做出了重要的贡献, 目前使用的 ASPE7300 恒速压汞仪采用的即是 H. H. Yuan 等人的原理。

2) 与常规压汞不同, 恒速压汞实验过程中仪器维持很低的进汞速度保持不变, 这样由于微观孔隙半径大小的不同所引起的毛管压力波动就可以比较精确地

区分出细微的喉道和孔径较大的孔道。对应于喉道部分的 rison 特指进汞压力持续上升至前所未有的水平, 此部分对应喉道进汞饱和度; rheon 特指进汞前缘突破细微的喉道进入孔道时压力突降的瞬间, 此时进汞前缘的汞会在岩芯中快速重新分布; subison 对应进汞压力突降后汞充填孔隙但毛管压力还未超过 rheon 发生前的最高压力的过程。

3) 恒速压汞测试结果不仅可以更加准确地表征油气藏储集层微观孔隙结构特征, 而且与油气渗流理论相结合还可以获得更多的反映油气开发过程的动态参数, 如主流喉道半径、残余油饱和度、岩性指数、电阻率指数等参数, 石油工业界对该项技术的认可度逐年增加。

参考文献 (References)

- [1] 杨正明, 张英芝, 郝明强等. 低渗透油田储层综合评价方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.
- [2] W. R. Purcell. Capillary pressure-their measurement using mercury and the calculating therefore. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1949, 186: 39-48.
- [3] J. J. Pickell, B. F. Swanson, and W. B. Hickman. Application of air-mercury and oil-air capillary pressure data in the study of pore structure and fluid distribution. Society of Petroleum Engineers, 1996, 6(1): 55-61.
- [4] C. Gaulier. Studying vugular rocks by-constant-rate mercury injection. New Orleans: SPE3612, Presentation at the 46th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, October 3-6, 1971.
- [5] H. H. Yuan, B. F. Swanson. Resolving pore space characterization by rate-controlled porosimetry. Tulsa: SPE/DOE14892, Presentation at the SPE/DOE 5th Symposium on Enhanced Oil Recovery in Tulsa, April 20-23, 1986.
- [6] F. W. Crawford, G. M. Hoover. Flow of Fluids through Porous Medium. Journal of Geophysical Research, 1966, 71: 2911-2917.
- [7] Morrow, N. R. Physics and thermodynamics of capillary action in porous media. Industrial and Engineering Chemistry, 1970, 62(6): 32-56.
- [8] P. G. Toledo, L. E. Scriven, and H. Ted Davis. Pore-space statistics and capillary pressure curves from volume-controlled porosimetry. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(1): 46-54.
- [9] 孙军昌, 郭和坤, 刘卫等. 低渗致密火山岩气藏微观孔喉特征[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 548-552.
- [10] H. H. Yuan. Advances in APEX technology, SCA9004. Dallas: Presentation at the SCA 5th Annual Technical Conference, 15-16 August, 1990.