

# A 构造低渗砂砾岩微观孔喉结构及对物性和产能的影响

孙藏军, 黄建廷, 别旭伟, 姜 永, 常 涛

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

**摘要:** 为了认识 A 构造孔店组砂砾岩储层的微观孔喉结构特征, 定量表征其对储层物性和产能的影响, 利用恒速压汞资料, 结合铸体薄片、扫描电镜、物性等分析化验和 DST 测试资料, 对其微观孔喉分布特征、进汞曲线特征以及不同尺度孔喉对储层物性的贡献等进行分析, 探讨孔喉结构对产能的影响。结果表明, 研究区发育低孔低渗粗—中喉型、特低孔低渗中喉型和特低孔特低渗细—微细喉型三类孔喉结构。与常规致密砂岩不同, 研究区孔店组砂砾岩储层孔隙和喉道分布形态和集中程度均差异大。渗透率越好, 喉道分布越均匀且偏粗—中喉分布频率越大, 孔喉半径比越小, 分布范围越集中且峰值频率越高, 越有利于渗流。喉道大小和分布是控制特低渗—低渗砂砾岩储层物性的关键参数, 尤其体现在对渗透率的影响。渗透率受控于占喉道体积分数 33.3% 左右的相对大喉道。孔喉结构越好, 储层品质指数  $RQI$  值越大, 测试日产气量越高。

**关键词:** 恒速压汞; 特低渗—低渗; 砂砾岩; 孔店组; A 构造

**中图分类号:** TE348      **文献标志码:** A

## Micropore throat structure of low-permeability glutenite reservoir in structure A and its influence on physical properties and productivity

SUN Cangjun, HUANG Jianting, BIE Xuwei, JIANG Yong, CHANG Tao

(Bohai Petroleum Institute of Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of the microscopic pore-throat structure of Kongdian Formation glutenite reservoir in structure A, and quantitatively characterize its impact on the physical properties and productivity of the reservoir, using the constant velocity mercury injection data, combined with cast thin sections, scanning electron microscope, physical properties and DST test data, it was analyzed the distribution characteristics of micropore pore-throat, the characteristics of mercury inflow curve and the contribution of different scale pore throats to the reservoir physical properties, and discussed the influence of pore throat structure on productivity. The results show that the study area developed three types of pore-throat structures: low-porosity and low-permeability coarse-medium throat, ultra-low-porosity and low-permeability middle throat, and ultra-low-porosity and ultra-low permeability fine-subtle throat. Different from conventional tight sandstones, the pores and throats of the Kongdian Formation glutenite reservoirs in the study area are very different in distribution and concentration. The better the permeability, the more uniform the throat distribution, and the larger the coarse-medium throat distribution frequency, the smaller the pore-throat radius ratio, the more concentrated the distribution range and the higher the peak frequency, the more favorable to the seepage. The throat size and distribution are key parameters for controlling the physical properties of ultra-low and low permeability glutenite reservoirs, especially in their influence on permeability. The permeability is controlled by the relatively large throat which accounts for about 33.3% of the throat volume fraction. The better the pore throat structure is, the greater the  $RQI$  value of reservoir quality index, and the higher the daily gas production in the test.

**Key words:** constant velocity mercury injection; ultra-low permeability; glutenite; Kongdian Formation; structure A

相比铸体薄片、扫描电镜及高压压汞等常规方法, 恒速压汞能够定量精细表征孔隙和喉道大小、体积及空间配置关系<sup>[1-6]</sup>, 是获取储层微观孔喉结构特征参数的重要手段, 对指导油气田高效开发起到关键作用。利用恒速压汞评价储层微观孔喉结构的

收稿日期: 2020-04-07; 改回日期: 2020-05-24。

第一作者简介: 孙藏军(1988—), 硕士, 工程师, 现主要从事海上油气田开发地质研究工作。E-mail: suncj2@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)。

研究,前人在鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地等地区,针对微观孔喉结构分类、分形特征、控制因素等<sup>[7-13]</sup>做了大量工作,但大多以常规致密砂岩为研究对象。而针对特低渗—低渗砂砾岩储层的微观孔喉结构研究相对较少<sup>[14]</sup>,尤其在渤海海域。与常规致密砂岩相比,组成砂砾岩的碎屑成分、结构更为复杂,进而影响该类储层的微观孔喉结构。渤海海域古近系广泛发育湖底扇、扇三角洲等近源砂砾岩沉积体,具有埋藏深、物性差、近油源易充注等特殊地质特征<sup>[15]</sup>,是储量接替和持续稳产的热点领域。

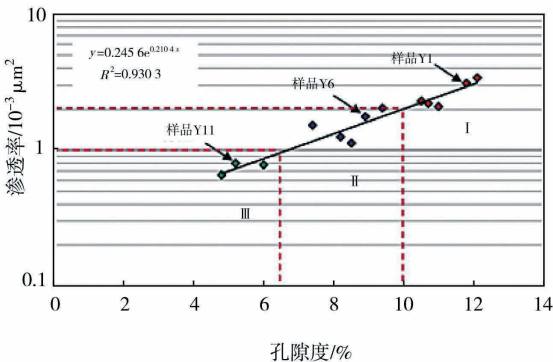
A构造位于渤海海域西南部的沙东南构造带,东靠渤中凹陷,西邻沙南凹陷,发育孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层和太古界裂缝性储层两套主力含气层段<sup>[16]</sup>。本文利用A构造古近系孔店组特低渗—低渗砂砾岩样品的恒速压汞测试资料,结合铸体薄片、扫描电镜、物性等分析,开展微观孔喉结构特征及其与物性的关系研究,重点探讨其对渗流能力的影响,以期为相似地质条件的储层评价提供借鉴。

1 实验方法及样品

本次实验利用ASPE-730型恒速孔隙分析仪,对13块特低渗—低渗砂砾岩样品进行孔喉结构检测。将直径2.5 cm、长度约1 cm的柱塞岩样抽真空后浸泡在汞液中,以0.000 05 mL/min的恒定速度进汞,并利用高分辨的压力感应及采集设备(可以分辨 $6.895\times10^{-6}$  MPa),通过检测进汞压力的涨落变化,分开记录孔隙与喉道实验数据点。在25 ℃下,最高进汞压力为6.205 5 MPa对应的喉道半径约为0.12 μm。由于在最大进汞压力下,小于0.12 μm的喉道未被测出且该部分喉道体积对渗流过程贡献极小,将

小于0.12 μm的喉道视为无效喉道<sup>[1]</sup>。

铸体薄片及扫描电镜鉴定结果表明,研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层具有颗粒分选中等,次棱角—次圆状,颗粒间呈线状—凹凸状接触,填隙物主要见泥质、高岭石和少量碳酸盐胶结物,以溶蚀颗粒孔、粒内溶蚀孔为主,主要发育片状—弯片状和管束状喉道。结合物性资料,将研究区孔店组13块特低渗—低渗砂砾岩样品分为三类(见图1),孔隙度介于4.80%~12.10%,平均8.8%,渗透率介于 $(0.65\sim3.40)\times10^{-3}$  μm<sup>2</sup>,平均 $1.77\times10^{-3}$  μm<sup>2</sup>。在铸体薄片、扫描电镜及物性分析基础上,选取3块代表样品(Y1、Y6、Y11),分别对应低孔低渗(Ⅰ)、特低孔低渗(Ⅱ)和特低孔特低渗储层(Ⅲ),进行微观孔喉特征对渗流的影响分析。



(Ⅰ—低孔低渗;Ⅱ—特低孔低渗、Ⅲ—特低孔特低渗)

图1 孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层孔—渗关系

2 微观孔喉结构特征

2.1 孔隙、喉道半径特征

关于孔隙和喉道大小的类型划分,前人因研究对象和地区不同,所建立的划分标准也不尽统一<sup>[17-18]</sup>。在参考前人划分方案基础上,建立研究区孔店组储层孔隙、喉道划分标准(见表1)。

表1 研究区孔隙和喉道大小划分标准

孔隙分类标准/μm					喉道分类标准/μm			
类型	邸世祥	长庆油田	李道品	本文方案	类型	长庆油田	李道品	本文方案
大孔	50~100	>100	>40	>130	粗喉道	>3	>4	>4
中孔	10~50	50~100	20~40	80~130	中喉道	1~3	2~4	2~4
小孔	—	10~50	—	<80	细喉道	0.5~1.0	1~2	1~2
细孔	5~10	0.5~10	4~20	—	微细喉道	0.2~0.5	0.5~1.0	0.5~1.0
微孔	1~5	<0.5	0.05~4.00	—	微喉道	<0.2	0.025~0.500	<0.5

与常规致密砂岩不同,研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩三类储层孔隙分布各不相同,主要体现在孔隙分布形态和集中程度(见图2)。样品Y1孔隙半径分布近似正态分布,呈单峰型,孔隙集中分布段为130.0~200.0  $\mu\text{m}$ ,平均孔隙半径为186.4  $\mu\text{m}$ ,以大孔为主;样品Y6孔隙半径分布呈半峰型,孔隙集中分布于115.0~125.0  $\mu\text{m}$ ,平均孔隙半径为123.4  $\mu\text{m}$ ,全为中孔;样品Y11孔隙半径分布近似正态分布,呈单峰型,孔隙集中分布于110.0~130.0  $\mu\text{m}$ ,平

均孔隙半径为147.8  $\mu\text{m}$ ,以中孔为主。

三类样品喉道半径分布曲线差异明显(见图2),渗透率越好,喉道分布越均匀且偏粗—中喉分布频率越高。样品Y1喉道半径分布主要呈粗—中喉单峰型,喉道半径集中分布段为2.0~5.0  $\mu\text{m}$ ,平均3.8  $\mu\text{m}$ ;样品Y6喉道半径分布主要呈细—中喉多峰型,集中分布段为1.0~4.0  $\mu\text{m}$ ,平均2.8  $\mu\text{m}$ ;样品Y11喉道半径分布主要呈细—微细单峰型,集中分布段为0.5~1.5  $\mu\text{m}$ ,平均1.1  $\mu\text{m}$ 。

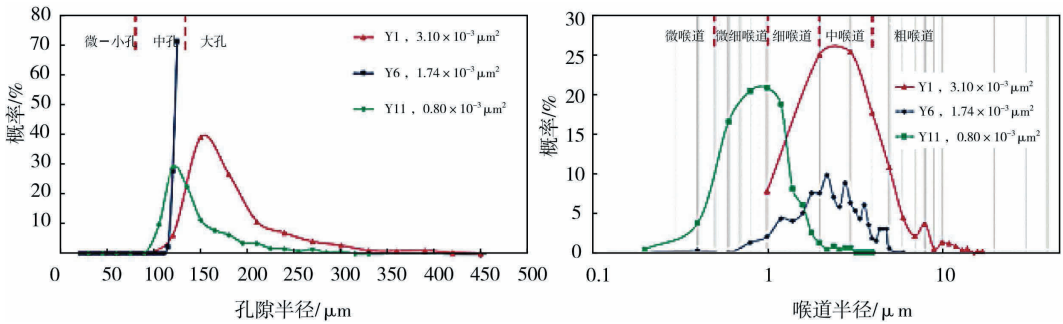


图2 研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩样品孔隙、喉道半径特征

2.2 孔喉半径比特征

孔喉半径比是微观孔喉半径发育程度的度量,其值大小反映孔喉间的差异程度<sup>[7]</sup>,孔喉半径比越小,流体流动时渗流阻力越小,越有利于开发<sup>[2-3]</sup>。常规致密砂岩孔隙分布通常相差不大<sup>[3-13]</sup>,因此,喉道大小和分布直接影响其孔喉半径比分布形态,喉道越大,孔喉比越小,物性越好<sup>[2]</sup>。与常规致密砂岩不同,研究区三类特低渗—低渗砂砾岩储层孔喉半径比分布受孔隙和喉道分布的综合影响,且以喉道为主。

研究区三类典型样品孔喉半径比分布(见图3)表明,渗透率越大,粗—中喉道越多,孔喉半径比越小,分布范围越集中且峰值频率越高,孔喉分布越均匀,越有利于渗流,如渗透率较高的Ⅰ、Ⅱ类特低渗样品Y1、Y6;反之,渗透率越小,细—微细喉道越多,孔喉半径比越大,分布范围越广,如渗透率较低的Ⅲ类超低渗样品Y11。

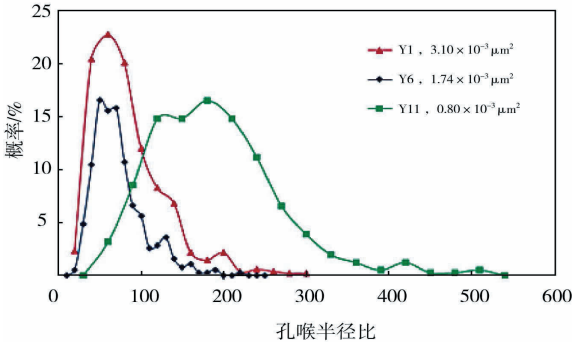


图3 孔店组特低渗—低渗砂砾岩样品孔喉半径比特征

2.3 进汞曲线特征

结合物性及恒速压汞资料,将研究区孔店组砂砾岩储层划分为三类典型进汞曲线(见图4),即Ⅰ类低孔低渗粗—中喉型(Y1)、Ⅱ类特低孔低渗中喉型(Y6)和Ⅲ类特低孔特低渗细—微细喉型(Y11)。

Y1号样品(Ⅰ类)排驱压力最低,孔隙进汞量最大。进汞早期受偏粗—中喉道控制,总进汞与喉道进汞量保持一致,随着进汞压力增大,总进汞受偏粗—中喉道及其所沟通的孔隙共同控制,进汞压力进一步增大,总进汞量受控于偏细喉道。可以看出,喉道进汞量始终随进汞压力增大而增大,说明有效孔隙体积相对较大,但进汞量受控于喉道。此类样品孔隙与喉道的发育程度和匹配关系最好,储集和渗流能力最强,是研究区好的储集层。

Y6号样品(Ⅱ类)有效孔隙体积和喉道半径相对较小,表现为进汞量相对较少。随着进汞压力增大,孔隙总进汞量较少,总进汞逐渐受喉道变化控制。此类样品的孔隙、喉道发育程度相对降低,储集和渗流能力较Ⅰ类储集层变低,是研究区较好的储集层。

Y11号样品(Ⅲ类)有效孔隙体积最少,孔隙进汞段极短,排驱压力最大,总进汞曲线与喉道进汞趋势基本一致,说明此类样品的孔隙发育极少,喉道大小、数量及其分布控制其渗流能力,是研究区较差的储集层。

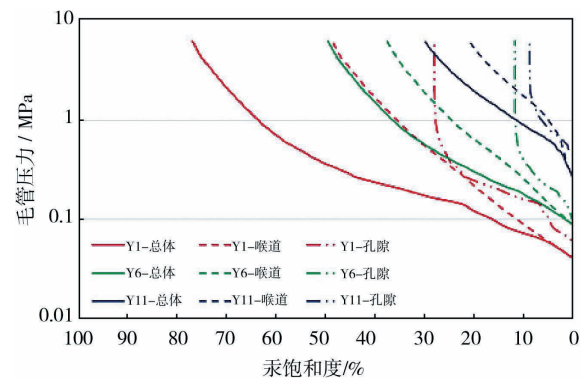


图4 研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩三类典型样品恒速压汞进汞曲线特征

3 不同尺度孔喉与物性的关系

根据恒速压汞资料(见表2),分别统计不同物性砂砾岩样品的进汞量参数( $S_f$ 、 $S_b$ 、 $S_t$ 、 $\varepsilon$ )和喉道对渗透率贡献累计达90%时对应的孔喉体积百分数( $\gamma_{t90}$ 、 $S_{b90}$ 、 $S_{t90}$ ),可以看出:① $\varepsilon$ 值均小于0.6,说明特

低渗—低渗砂砾岩储层样品中喉道体积明显大于孔隙体积,喉道数量多,体积大,对储集性影响较大;②物性越好, $\gamma_{t90}$ 和 $S_{t90}$ 值越大,说明物性好的特低渗—低渗砂砾岩储层粗—中喉道体积占比越大;③物性越好, $S_b$ 、 $S_{b90}$ 值越大, $S_{b90}/S_b$ 值越小,且各类型样品数值相差较大,说明物性越好的特低渗—低渗砂砾岩储层中,孔隙体积占比大,当喉道对渗透率贡献率累计达90%时,物性好的储层孔隙进汞量占比越小,反之,物性越差,孔隙越趋向进汞饱和;④ $S_{t90}/S_t$ 值相差不大,介于27.3%~40.7%,平均为33.3%,即特低渗—低渗砂砾岩储层中,占喉道体积分数33.3%左右的相对大喉道贡献了90%的渗透率,占喉道体积分数66.6%左右的相对小喉道对渗透率贡献极小,但小喉道数量多、体积占比大,对储集性影响较大;⑤喉道大小和分布是控制特低渗—低渗砂砾岩储层物性的关键参数,尤其是对渗透率的影响。

表2 研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层物性及恒速压汞进汞量参数

样品类型 及编号	物性参数		进汞量参数				喉道对渗透率贡献累计达 90%时 对应孔喉体积百分数				
	$\Phi$	$k$	$S_f$	$S_b$	$S_t$	$\varepsilon$	$\gamma_{t90}$	$S_{b90}$	$S_{t90}$	$S_{b90}/S_b$	$S_{t90}/S_t$
I-Y1	11.8	3.10	77.2	28.3	48.9	0.58	4.0	12.9	19.9	45.6	40.7
I-Y2	11.0	2.10	54.4	19.7	34.7	0.57	2.8	10.8	11.5	54.8	33.1
I-Y3	10.7	2.21	79.9	24.2	55.7	0.43	3.5	9.8	18.2	40.5	32.7
I-Y4	12.1	3.40	54.9	15.5	39.4	0.39	2.6	9.1	15.1	58.7	38.3
I-Y5	10.5	2.30	68.6	18.2	50.4	0.36	2.8	8.4	18.0	45.9	35.7
II-Y6	8.9	1.74	49.8	12.0	37.8	0.32	2.1	8.2	11.4	68.2	30.2
II-Y7	8.2	1.25	45.3	13.1	32.2	0.41	1.6	11.2	10.2	85.5	31.6
II-Y8	9.4	2.02	38.0	10.1	27.9	0.36	2.2	6.8	11.0	67.3	39.4
II-Y9	8.5	1.12	52.5	14.6	37.9	0.39	1.8	11.0	11.4	75.7	30.1
II-Y10	7.4	1.51	49.5	15.7	33.8	0.46	1.7	13.0	9.8	83.0	29.0
III-Y11	5.2	0.80	30.1	9.0	21.1	0.42	0.7	7.4	6.2	82.7	29.3
III-Y12	6.0	0.78	30.4	7.9	22.5	0.35	0.9	5.8	8.0	73.4	35.6
III-Y13	4.8	0.65	26.0	8.0	18.0	0.44	0.6	6.8	4.9	85.0	27.3
平均值	8.8	1.77	50.5	15.1	35.4	0.42	2.1	9.3	12.0	66.6	33.3
最大值	12.1	3.40	79.9	28.3	55.7	0.58	4.0	13.0	19.9	85.5	40.7
最小值	4.8	0.65	26.0	7.90	18.0	0.32	0.6	5.8	4.9	40.5	27.3

注: $\Phi$ 为孔隙度,%; $k$ 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $S_f$ 为总进汞量,%; $S_b$ 为孔隙总进汞量,%; $S_t$ 为喉道总进汞量,%; $\varepsilon$ 为总孔/喉体积比; $\gamma_{t90}$ 为喉道对渗透率贡献累计达90%时对应的喉道半径; $S_{b90}$ 为孔隙对渗透率贡献累计达90%时对应的累计孔隙进汞量,%; $S_{t90}$ 为喉道对渗透率贡献累计达90%时对应的累计喉道进汞量,%; $S_{b90}/S_b$ 为孔隙对渗透率贡献累计达90%时对应的累计孔隙进汞量/孔隙总进汞量,%; $S_{t90}/S_t$ 为喉道对渗透率贡献累计达90%时对应的累计喉道进汞量/喉道总进汞量。



4 孔喉结构对产能的影响

受恒速压汞离散取样资料及测试成本的限制,难以实现单井孔喉结构纵向的连续评价及建立孔喉结构与测试产能间的相关关系。前人根据平均水力流动半径概念,推导出储集空间孔渗关系,并定义储层品质指数( $RQI$ )<sup>[19]</sup>,见公式(1)。从公式(1)可以看出,储层品质指数( $RQI$ )综合反映了微观孔喉结构与岩石孔隙、矿物地质特征<sup>[19-20]</sup>,可作为评价孔喉结构与测试产能之间的纽带。

$$RQI=\sqrt{\frac{K}{\Phi}}=\frac{r}{2\tau\sqrt{F_s}} \tag{1}$$

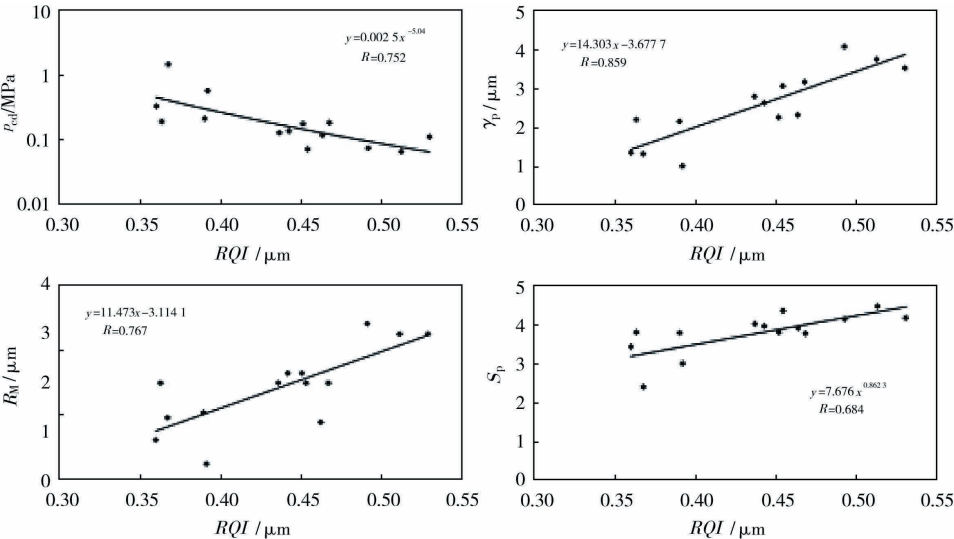


图5 研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层品质指数与微观孔喉结构参数相关关系

通过公式(1)~(5),结合单井孔隙度、渗透率测井解释结果及DST测试资料,可以建立孔喉结构与测试产能间的相关关系(见表3)。

具体步骤如下:①根据单井孔隙度、渗透率测井解释结果,代入公式(1)求取 $RQI$ 值;②将求取的 $RQI$ 值分别代入公式(2)~(5),求取孔喉结构参数( $p_{cd}$ 、 $\gamma_p$ 、 $S_p$ 、 $R_M$ );③根据恒速压汞测试样本资料,构建研究区不同储层类别的孔喉结构参数划分标准,

式中, $K$ 为渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $\Phi$ 为孔隙度,%; $\tau$ 为孔喉迂曲度,无量纲; $F_s$ 为形状因子,无量纲。

通过恒速压汞测试的孔喉结构参数与储层品质指数( $RQI$ )的相关性分析(见图5),可以看出, $RQI$ 与排驱压力( $p_{cd}$ )呈负相关,与平均喉道半径( $\gamma_p$ )、主流喉道半径( $R_M$ )及分选系数( $S_p$ )呈正相关,且相关性均较好,拟合其相关关系见公式(2)~(5)。

$$p_{cd}=0.002\ 5\ RQI^{-5.04} \tag{2}$$

$$\gamma_p=14.303RQI-3.677\ 7 \tag{3}$$

$$S_p=7.676\ RQI^{0.862\ 3} \tag{4}$$

$$R_M=11.473\ RQI-3.114\ 1 \tag{5}$$

结合DST测试资料,构建研究区不同孔喉结构与测试产能间的关系。

从表3可以看出,研究区特低渗—低渗砂砾岩储层孔喉结构不同,直接影响产能大小。孔喉结构越好,储层品质指数 $RQI$ 值越大,相应的孔喉结构参数排驱压力越小,平均喉道半径和主流喉道半径越大,分选系数越大,表现在测试产能即相同工作制度下的测试日产气量越高。

表 3 研究区孔店组不同类型储层孔喉结构参数标准及相应测试产能

储层类别		$RQI/\mu\text{m}$	$p_{cd}/\text{MPa}$	$\gamma_p/\mu\text{m}$	$R_M/\mu\text{m}$	$S_p$	$Q/(10^4\text{ m}^3)$
I	低孔低渗	0.44~0.53	0.06~0.17	2.84~4.11	2.00~3.20	3.77~4.45	10.50~16.81
	粗—中喉型	0.48	0.10	3.43	2.53	4.15	
II	特低孔低渗	0.36~0.46	0.11~0.20	2.20~2.67	1.20~2.21	3.78~3.96	6.31~8.10
	中喉型	0.42	0.16	2.35	1.80	3.85	
III	特低孔特低渗	0.36~0.39	0.31~1.39	1.05~1.40	0.36~1.30	2.40~3.44	3.85~5.82
	细—微细喉型	0.37	0.75	1.27	0.83	2.95	

注: $RQI$ 为储层品质指数, $\mu\text{m}$ ; $p_{cd}$ 为排驱压力,MPa; $\gamma_p$ 为平均喉道半径, $\mu\text{m}$ ; $R_M$ 为主流喉道半径, $\mu\text{m}$ ; $S_p$ 为分选系数; $Q$ 为相同工作制度下的日产气量, $10^4\text{ m}^3$ 。

## 5 结论

(1)与常规致密砂岩不同,研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层发育低孔低渗粗—中喉型、特低孔低渗中喉型和特低孔特低渗细—微细喉型三类孔喉结构类型。孔隙和喉道分布形态和集中程度差异大。渗透率越好,喉道分布越均匀化且偏粗—中喉分布频率越大,孔喉半径比越小,分布范围越集中且峰值频率越高,越有利于渗流。

(2)研究区孔店组特低渗—低渗砂砾岩储层喉道体积大于孔隙体积,喉道数量多,体积大,对储集性影响较大。储层物性越好,孔隙体积和相对大喉道体积占比越大。渗透率受控于占喉道体积分数33.3%左右的相对大喉道,占喉道体积分数66.6%左右的相对小喉道对储集性影响较大。喉道大小和分布是控制特低渗—低渗砂砾岩储层物性的关键参数,尤其体现在对渗透率的影响。

(3)研究区特低渗—低渗砂砾岩储层孔喉结构不同,直接影响产能大小。孔喉结构越好,储层品质指数 $RQI$ 值越大,相应的孔喉结构参数排驱压力越小,平均喉道半径和主流喉道半径越大,分选系数越大,表现在测试产能即相同工作制度下的测试日产气量越高。

### 参考文献:

- [1] 何顺利,焦春艳,王建国,等.恒速压汞与常规压汞的异同[J].断块油气田,2011,18(2):235-237.
- [2] 朱永贤,孙卫,于锋.应用常规压汞和恒速压汞实验方法研究储层微观孔隙结构——以三塘湖油田牛圈湖区头屯河组为例[J].天然气地球科学,2008,19(4):553-556.
- [3] 彭梦玲,张金亮,杨川.特低—超低渗透储层的微观孔喉结构研究[J].中国科技论文,2018,13(15):1783-1789.
- [4] RANGEL-GERMAN E, AKIN S, CASTANIER L M. Mult-phase flow properties of fractured porous media [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 51(3/4): 197-213.
- [5] AGUILERA R. Incorporating capillary pressure, pore throat aperture radii, height above free-water table, and winland r35 values on pickett plots [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(4): 606-624.
- [6] TEIGE G M G, HERMANRUD C, THOMAS W H, et al. Capillary resistance and trapping of hydrocarbons: a laboratory experiment [J]. Petroleum Geoscience, 2005, 11(2): 125-129.
- [7] 庞振宇,李艳,段伟,等.低渗、特低渗储集层微观孔喉结构分类表征——以延长油田延长组长2段和长6段储集层为例[J].新疆石油地质,2017,38(2):193-197.
- [8] 杨县超,张林,李江,等.鄂尔多斯盆地苏里格气田储层微观孔隙结构特[J].地质科技情报,2009,28(3):73-76.
- [9] 窦文超,刘洛夫,吴康军,等.基于压汞实验研究低渗储层孔喉结构及其对渗透率的影响——以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7储层为例[J].地质论评,2016,62(2):502-512.
- [10] 喻建,马捷,路俊刚,等.压汞—恒速压汞在致密储层微观孔喉结构定量表征中的应用——以鄂尔多斯盆地华池—合水地区长7储层为例[J].石油实验地质,2015,37(6):789-795.
- [11] 庞河清,曾炎,刘成川,等.川西坳陷须五段储层微观孔隙结构特征及其控制因素[J].中国石油勘探,2017,22(4):48-60.
- [12] 赖锦,王贵文,王书南,等.川中蓬莱地区须二段和须四段储层孔隙结构特征及影响因素[J].中国地质,2013,40(3):927-938.
- [13] 黄亮.松辽盆地龙西地区扶余油层特低渗透储层孔隙结构[J].大庆石油地质与开发,2019,38(4):15-21.
- [14] 徐守余,王淑萍.砂岩储层微观结构分形特征研究——以胜坨油田古近系沙河街组储层为例[J].天然气地球科学,2013,24(5):886-893.
- [15] 李建平,周心怀,吕丁友.渤海海域古近系三角洲沉积体系分布与演化规律[J].中国海上油气,2011,23(5):293-298.
- [16] 施和生,王清斌,王军,等.渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J].中国石油勘探,2019,24(1):36-45.
- [17] 邸世祥.碎屑岩储集层的孔隙结构及其成因与对油气运移的控制作用[M].西安:西北大学出版社,1991.
- [18] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [19] 宋子齐,成志刚,孙迪,等.利用岩石物理相流动单元“甜点”筛选致密储层含气有利区——以苏里格气田东区为例[J].天然气工业,2013,33(1):41-48.
- [20] 王瑞飞,沈平平,宋子齐,等.特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J].石油学报,2009,30(4):560-563, 569.

(编辑 谢葵)