

西湖凹陷花港组低渗透砂岩储层孔隙结构

鞠传学,董春梅,张宪国,董翼新

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛 266580)

摘要:为明确西湖凹陷花港组低渗透砂岩储层孔隙结构与产能之间的关系,利用 500 余块铸体薄片资料和 311 块常规压汞分析测试资料对该地区孔隙结构特征进行了分析和评价。通过对微观孔隙结构特征参数与储层宏观物性参数相关性分析,优选出最大连通孔隙半径和平均连通孔隙半径作为孔隙结构分级参数,并运用数据构型方法确定出孔隙结构分级界限,建立了适合工区低渗气藏的新的分级标准。利用该标准及孔隙与喉道大小的组合特征,将花港组 H3 段砂岩储层的孔隙结构划分为 6 种类型:大—中孔粗喉型、中—小孔中喉型、中—小孔中细喉型、小孔细喉型、细—小孔微细喉型和细孔微喉型。根据孔隙结构分类结果划分了 4 种储层类型,产能级别分别对应高产、中产、低产和特低产,其中一类储层主要对应大—中孔粗喉型和中—小孔中喉型孔隙结构类型,孔隙度和渗透率均较高,对应产能为高产,是该地区最有利的储层。

关键词:西湖凹陷;低渗透;储层特征;微观孔隙结构;分类评价

中图分类号:TE 122.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.09005

储集岩的孔隙结构是影响油气储集与油气田开发效果的重要因素。特别针对低渗透砂岩储层孔隙结构的研究,是深入剖析油气储层强非均质性的重要环节^[1-4]。关于孔隙结构的分类评价前人已经做了大量研究,谢武仁、郑艳荣等^[5-7]利用曲线形态和排替压力为基础对孔隙结构进行分类;王瑞飞等^[8]提出以退汞效率与退汞饱和度的乘积作为储层微观孔隙结构分类评价指标;Rodolfo 等^[9]应用改进的流动单元指数实现了孔隙类型的划分;张宪国等^[10]将分形算法应用于储层孔隙结构评价;葛新民^[11]应用信息熵—模糊谱聚类算法对储层孔隙结构进行了分类。前人主要

通过压汞资料的地质统计分析对低渗透砂岩孔隙结构进行定性和定量分类,而较少地考虑微观孔隙结构参数与宏观储层物性之间的相关关系,从而难于反映出不同孔隙结构类型储层的差异性及与产能的关系。本文以西湖凹陷花港组 H3 段低渗透砂岩气藏为例,通过对微观孔隙结构特征参数分析确定出孔隙结构分级界限,进而建立孔隙、喉道分级标准,对储层孔隙结构进行定量分类评价,并结合生产动态寻找与产能的关系,为后期寻找“甜点”奠定基础。

1 研究区地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地北部,呈 NNE 向展布。构造上西湖凹陷总体上为“两洼夹一隆”的构造格局,且具有“东西分带,南北分块”的构造特征(图 1)。西湖凹陷始新统至中新统发育海相

收稿日期:2016-02-16

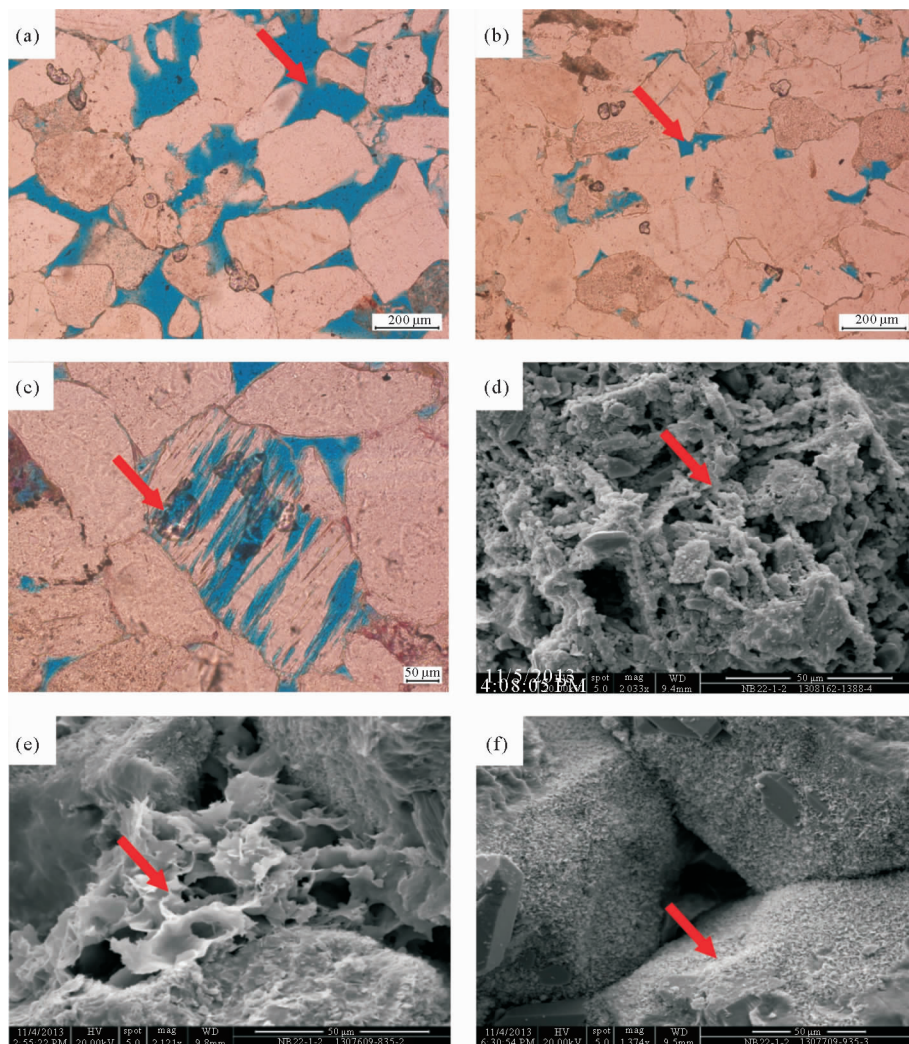
基金项目:国家科技重大专项课题“复杂油气藏精细表征及剩余油分布预测”(2011ZX05009-003)

作者简介:鞠传学(1991—),男,在读硕士,主要从事油气储层地质方面的研究工作。E-mail:juchuanxue@126.com

隙,孔径大小相差悬殊;岩屑溶孔次之(图 3d),溶孔孔径一般在 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间,孔径一般较小。

晶间孔主要有绿泥石和自生伊利石及伊蒙混

层晶间微孔隙(图 3e、f),这些黏土矿物晶体之间具有一定的微孔隙,具有一定的渗流能力,但孔隙孔径较小,且连通性差。



(a) X-2 井, 3 776.5 m, (-), 溶蚀扩张粒间孔; (b) X-2 井, 4 006.5 m, (-), 残余粒间孔; (c) X-2 井, 3 746.5 m, (-), 长石铸模孔; (d) X-2 井, 4 020.8 m, (SEM), 岩屑溶蚀; (e) X-2 井, 3 775.2 m, (SEM), 伊利石晶间孔; (f) X-2 井, 3 785.2 m, (SEM), 晶间孔

图 3 西湖凹陷花港组 H3 段孔隙类型图版

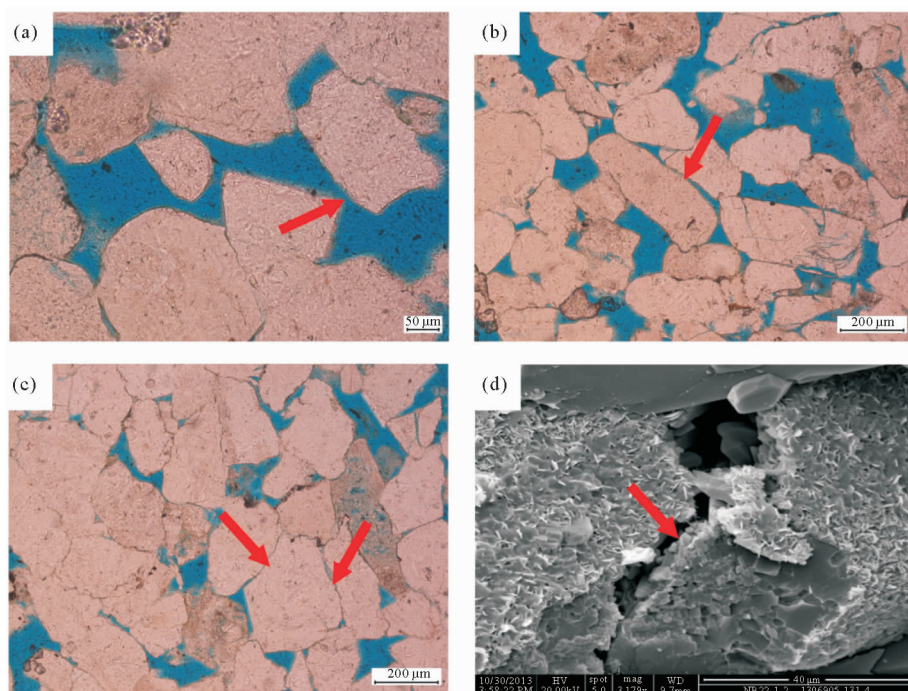
Fig. 3 Pore types of H3 of Huagang Formation in Xihu Depression

3.2 喉道类型及特征

在低渗透储层中,喉道是影响储层渗透率的关键因素。受颗粒本身的大小和形状、岩石颗粒间的接触关系、胶结物形态等因素影响,喉道的大小及形态差异较大。经统计分析,西湖凹陷花港组 H3 段储层喉道类型主要包括孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道、片状喉道和管束状喉道。西湖凹

陷花港喉道类型见图 4。

孔隙缩小型喉道是指使孔隙相连的通道为孔隙的缩小部分,主要发育于具有颗粒点接触为主、胶结物含量少且以溶蚀扩张粒间孔隙为主的砂岩中(图 4a)。缩颈型喉道主要由压实和胶结作用引起,胶结物的衬边式胶结及溶蚀作用似的孔喉难以区分,此时砂岩可能有较高的孔隙度,喉道短而粗或窄而长,其渗流能力低于孔隙缩小型喉道。



(a) X-2 井,3 740.5 m,(-),孔隙缩小型喉道;(b) X-1 井,3 789 m,(-),缩颈型喉道;
(c) X-1 井,3 870 m,(-),片状喉道;(d) X-2 井,3 704 m,(SEM),管束状喉道

图 4 西湖凹陷花港喉道类型图版

Fig. 4 Throat types of H3 section, Huagang Formation in Xihu Depression

(图 4b)。片状喉道常常表现为颗粒之间连通孔隙的长条状通道,其形态多呈弯片状,同时细长片状或不规则弯曲状的成岩缝也属于该类喉道(图 4c)。管束状喉道发育于颗粒间黏土矿物含量较高的砂岩中,在扫描电镜下可见这些微孔隙呈管束状分布于其中(图 4d)。

4 孔隙结构分类

由上可见,工区内孔隙、喉道类型种类较多,综合压汞资料、铸体薄片特征及扫描电镜特征,建立工区储层孔隙、喉道分级标准,并对工区储层孔隙结构分类总结。对于不同类型的低渗透储层,其孔隙大小及规模差异不大,但渗透率差异较大,而渗透率差异体现在喉道的差别^[15]。喉道是控制低渗透储层质量的关键因素^[16],因此,着重通过对喉道分级标准研究进行孔隙结构分类,其分级主要参考李道品^[17]给出的孔隙大小分类标准。

4.1 主控参数的优选

由压汞资料获得的孔喉结构定量特征参数很

多,包括最大连通孔喉半径、平均连通孔喉半径、孔喉半径中值、孔喉分选系数、排替压力、最大进汞饱和度、变异系数、退汞效率等^[18-20]。通过将上述各参数与储层孔隙度和渗透率分别进行相关性分析,选出能够反映储层物性的主控特征参数。分析显示,最大连通孔喉半径、平均连通孔喉半径与渗透率相关性最好(图 5),因此,选取最大连通孔喉半径和平均连通孔喉半径作为工区孔隙结构分级的指标参数。

4.2 喉道分级界限的确定

主要采用数据构形分析的方法^[21]。如果参数的分布服从正态分布,且该参数包含有若干个正态次总体,即性质不同的群体,则在概率累积曲线上表现为几个相交的直线段,这些直线段的交点值即为每个正态次总体的界限值。利用该方法对最大连通孔喉半径和平均连通孔喉半径进行分析(图 6),发现曲线上各有 5 个拐点,依次确定最大连通孔喉半径和平均连通孔喉半径的值,将孔隙结构划分为 6 类,最终确定了工区花港组 H3 段孔隙、喉道分级标准(表 1)。

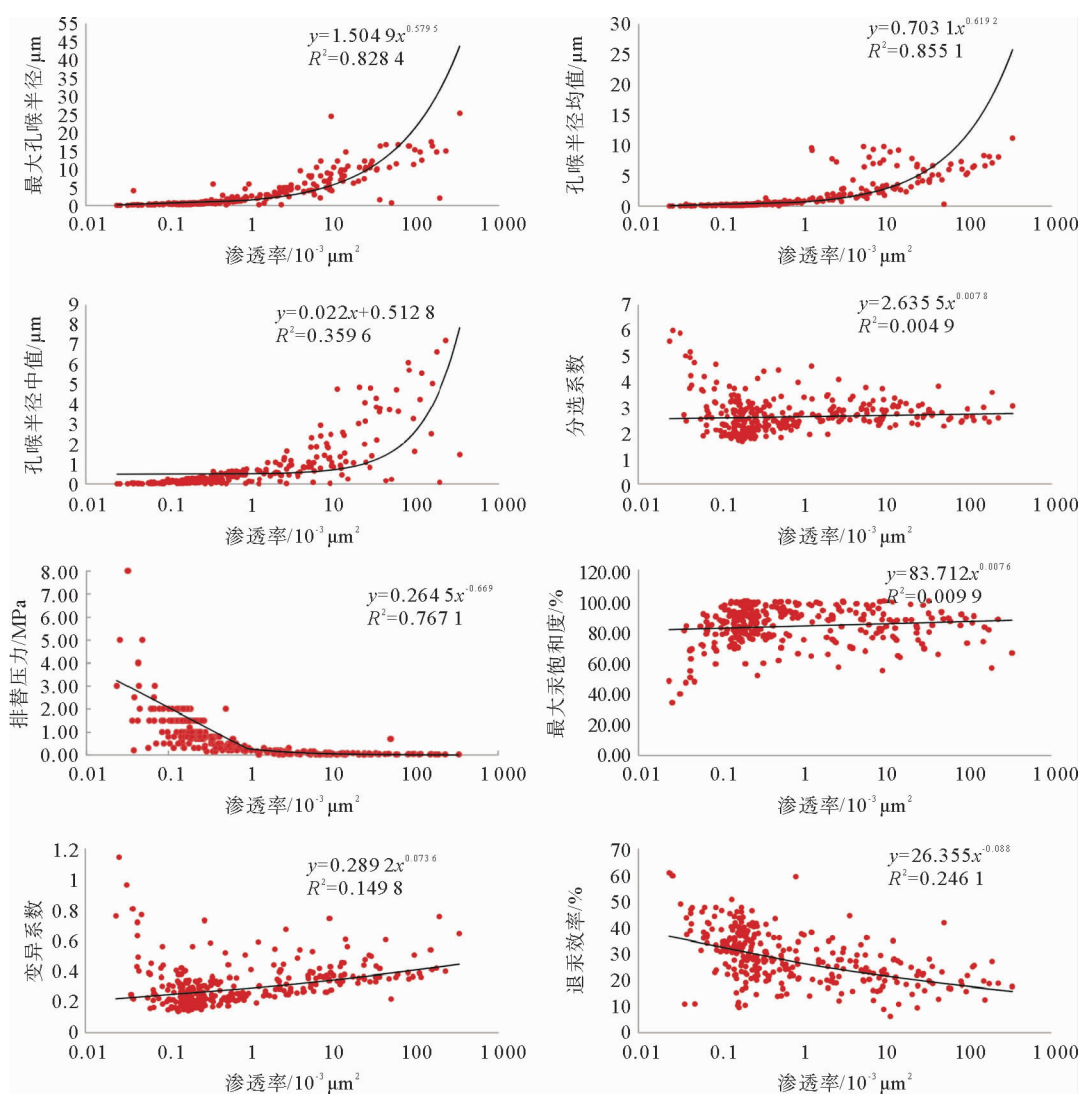


图5 西湖凹陷花港孔隙结构参数与渗透率相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis for characteristic parameters of pore structure and permeability of Huangang Formation in Xihu Depression

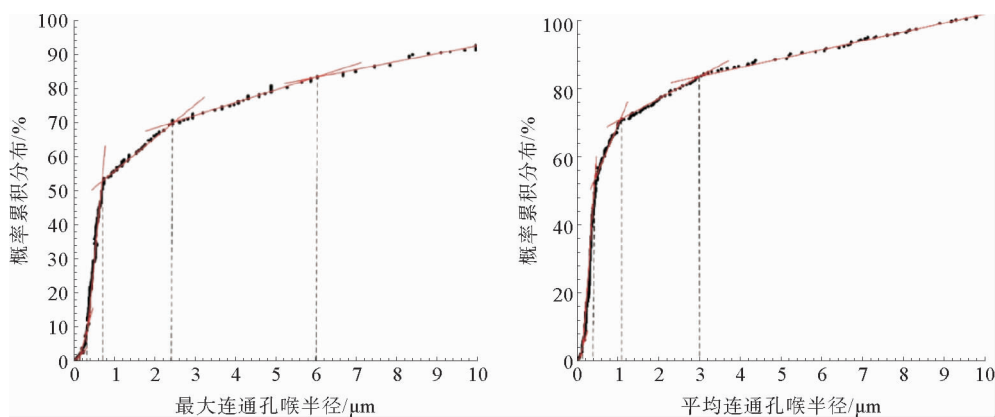


图6 最大连通孔喉半径、平均连通孔喉半径概率累积分布

Fig. 6 Accumulation curve of the largest connected pore-throat radius and the average connected pore-throat radius

表 1 西湖凹陷花港组孔隙、喉道分级标准

Table 1 Pore and throat grading standards of Huagang Formation in Xihu Depression

孔隙分级	平均孔隙直径/ μm	喉道分级	最大连通孔喉半径/ μm	平均连通孔喉半径/ μm
大孔隙	>100	粗喉道	>6	>3
中孔隙	$100\sim50$	中喉道	$2.4\sim6$	$1.1\sim3$
小孔隙	$50\sim10$	中细喉道	$0.7\sim2.4$	$0.4\sim1.1$
细孔隙	$10\sim0.5$	细喉道	$0.3\sim0.7$	$0.15\sim0.4$
微孔隙	<0.5	微细喉道	$0.1\sim0.3$	$0.05\sim0.15$
		微喉道	<0.1	<0.05

根据上述标准,结合铸体薄片镜下观察的孔隙喉道大小、分选及连通特征、岩心物性分析特征及压汞曲线特征,将工区花港组 H3 段储层砂岩的孔隙结构划分为 6 种类型;即 I 类大一中孔粗喉型、II 类中一小孔中喉型、III 类中一小孔较中细喉型、IV 类小孔细喉型、V 类细一小孔微细喉型和 VI 类细孔微喉型。

I 类大一中孔粗喉型孔隙结构(图 7a),孔隙类型以溶蚀扩张粒间孔为主,残余粒间孔次之,含较多溶蚀孔;喉道类型以孔隙缩小型喉道为主,其次为缩颈型喉道。镜下测量平均孔隙直径 $>70\mu\text{m}$,孔隙度一般 $>11.6\%$,平均为 14.6% ;渗透率一般 $>3.5\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $46.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。压汞曲线为具有一定斜率的平台型,平台相对较短,分选相对较差,排替压力 $<0.1\text{MPa}$,最大连通孔喉半径 $>6\mu\text{m}$,平均连通孔喉半径 $>3\mu\text{m}$ 。主要见于分选较好且杂基、塑性岩屑含量低的中砂岩、细砂岩中,主要发育在辫状河三角洲前缘远岸水下分流河道中,为工区花港组储层内孔渗性最好的一类孔隙结构。

II 类中一小孔中喉型孔隙结构(图 7b),孔隙类型主要为溶蚀扩张粒间孔和残余粒间孔,溶蚀孔较少;喉道类型主要为缩颈型喉道、片状喉道,镜下测量平均孔隙直径一般在 $40\sim85\mu\text{m}$ 。孔隙度一般为 $5.7\%\sim18.4\%$,平均为 10.5% ;渗透率一般为 $(0.76\sim3.5)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $1.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。压汞曲线为具有一定斜率的平台型,平台相对较长,分选相对较好,排替压力在 $0.1\sim0.2\text{MPa}$ 。最大连通孔喉半径为 $2.4\sim6\mu\text{m}$,平均连通孔喉半径为 $1.1\sim3\mu\text{m}$ 。主要见于分选一般且岩屑含量低的细砂岩中,主要发育在辫状河三角洲前缘远岸水下分流河道中,为工区花港组

内孔渗性较好一类孔隙结构。

III 类中一小孔中细喉型孔隙结构(图 7c),孔隙类型以原生孔保存的残余粒间孔为主;喉道以片状喉道为主,其次为缩颈型喉道。镜下测量平均孔隙直径一般在 $30\sim70\mu\text{m}$,孔隙度一般为 $6\%\sim14.4\%$,平均为 9% ;渗透率一般为 $(0.35\sim0.8)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.63\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。压汞曲线为具有长平台型,平台最长,分选较好,排替压力在 $0.2\sim0.8\text{MPa}$,最大连通孔喉半径为 $0.7\sim2.4\mu\text{m}$,平均连通孔喉半径为 $0.4\sim1.1\mu\text{m}$ 。主要见于分选中等一较差、塑性矿物含量较多的细砂岩中,主要发育在辫状河三角洲前缘近岸水下分流河道中,为工区内花港组内最常见的一类孔隙结构。

IV 类小孔细喉型孔隙结构(图 7d),孔隙以溶蚀孔为主,残余粒间孔较少;喉道以片状喉道为主,弯片状次之,缩颈型喉道较少,镜下测量平均孔隙直径一般在 $20\sim50\mu\text{m}$ 。孔隙度主要分布在 $5\%\sim11\%$,平均为 7.3% ;渗透率一般为 $(0.23\sim0.45)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.37\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。压汞曲线为具有一定斜率的平台型,平台较短,分选较差,排替压力在 $0.8\sim2\text{MPa}$ 。最大连通孔喉半径为 $0.3\sim0.7\mu\text{m}$,平均连通孔喉半径为 $0.15\sim0.4\mu\text{m}$ 。主要见于分选中等一较差、塑性矿物含量较多的细砂岩中,主要发育在辫状河三角洲前缘近岸水下分流河道中,为工区花港组内孔渗性较差的一类孔隙结构。

V 类细一小孔微细喉型孔隙结构(图 7e),孔隙以溶蚀孔为主,喉道为片状喉道、弯片状喉道,镜下测量平均孔隙直径为 $8\sim20\mu\text{m}$,孔隙度主要分布在 $2\%\sim8\%$,平均为 4.6% ;渗透率一般为 $(0.03\sim0.22)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.15\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

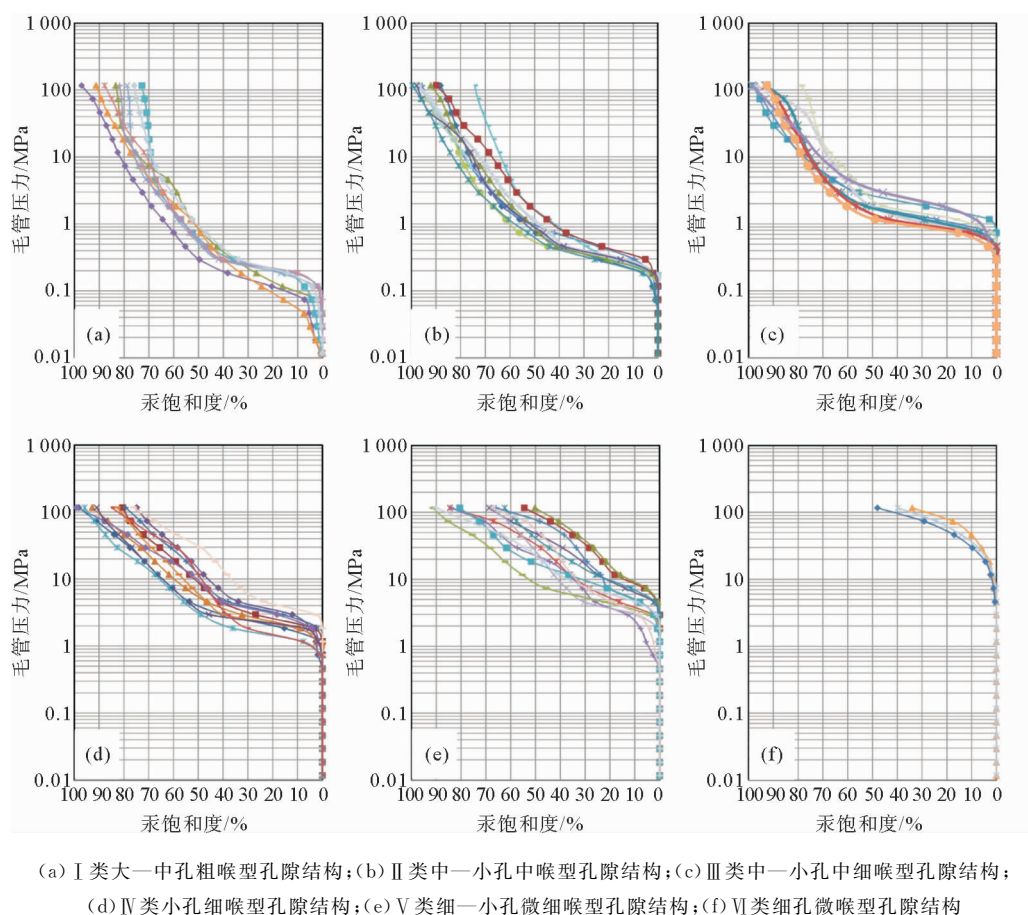


图7 西湖凹陷花港组储层孔隙结构分类图

Fig. 7 Pore structure classification of Huagang Formation in Xihu Depression

压汞曲线为缓坡形,平台较短,分选较差,排替压力在2~5 MPa。最大连通孔喉半径为0.12~0.3 μm ,平均连通孔喉半径为0.05~0.15 μm 。主要见于分选较差、塑性岩屑较高的细砂岩中,主要发育在辫状河三角洲前缘近岸水下分流河道中,为工区花港组内孔渗性较差的一类孔隙结构。

VI类细孔微喉型孔隙结构(图7f),仅见少量溶蚀孔,喉道基本不发育,镜下测量平均孔隙直径<10 μm ,孔隙度一般<2.2%;渗透率一般<0.06 mD。压汞曲线表现为陡坡形,排驱压力大,一般>6 MPa。最大连通孔喉半径<0.12 μm ,平均连通孔喉半径<0.05 μm 。主要发育在细、粉砂岩为主的席状砂中,由于较强的压实作用,颗粒被压碎、紧密的排列在一起,见少量溶蚀孔且连通性极差,为工区花港组内孔渗性最差但发育较多的一类孔隙结构。

5 孔隙结构分类研究的地质意义

将基于孔隙结构分类后的样品的孔隙度渗透率进行交会分析可以看出,微观孔隙结构类型与宏观的物性具有很好的对应关系,孔隙结构越好的储层其物性越好^[22-24](图8)。因此,利用孔隙结构分类结果可以对储层进行分类,划分储层的产能等级。根据《海上石油天然气储量计算规范》行业标准规范及孔隙结构差异,可以将工区的有效储层划分为4类(图9):一类储层主要对应I和II类孔隙结构类型,该类储层孔隙度和渗透率均较高,且对应产能为高产,是该地区最有利的储层;二类储层主要对应II和III类孔隙结构类型,该类储层孔隙度和渗透率均小于一类储层,产气能力也较一类储层低,对应产能为中产;三类储层主要对应III类孔隙结构类型,孔隙度、渗透率较差,

对应产能类型为低产;而四类储层对应Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ类孔隙结构类型,对应产能为特低产,是该地区最差的一类储层。

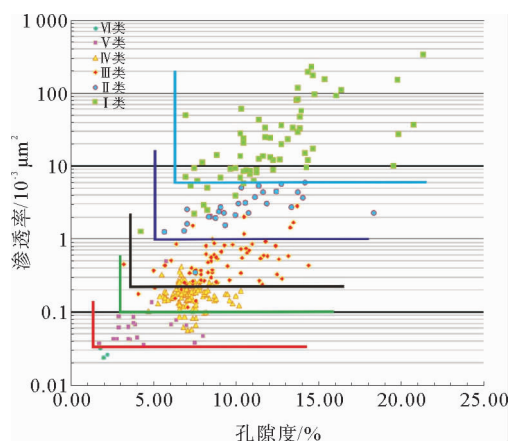


图 8 西湖凹陷花港组基于孔隙结构分类后孔隙度—渗透率交会图

Fig. 8 Relationship between porosity and permeability of different pore structure types of Huagang Formation in Xihu Depression

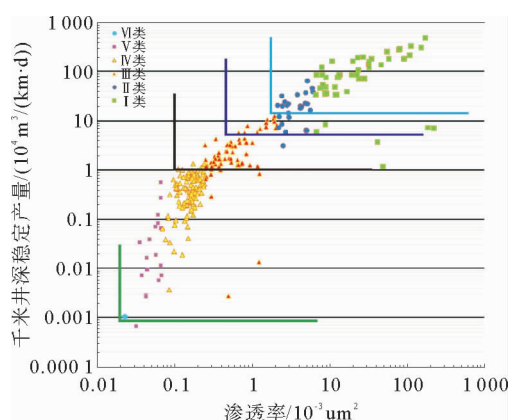


图 9 西湖凹陷花港组基于孔隙结构分类后渗透率—产能交会图

Fig. 9 Relationship between permeability and productivity of different pore structure types of Huagang Formation in Xihu Depression

6 结论

(1)西湖凹陷花港储集空间类型多样,可将孔隙类型分为粒间孔、溶蚀孔和晶间孔。粒间孔主要包括溶蚀扩张粒间孔、残余粒间孔、溶蚀粒间孔;溶蚀孔主要包括长石溶、岩屑等溶蚀孔;晶间孔主要存在于绿泥石、伊利石等黏土矿物中。喉

道类型主要分为孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道、片状喉道和管束状喉道。

(2)最大连通孔喉半径和平均连通孔喉半径为孔隙结构特征参数中与渗透率相关性最好的特征参数,选取其作为喉道分级的最优参数,运用数据构型的方法及工区内储层特征将西湖凹陷花港储层孔隙结构划分为大—中孔粗喉型、中—小孔中喉型、中—小孔较中细喉型类小孔细喉型、细—小孔微细喉型和细孔微喉型 6 种类型。

(3)基于孔隙结构分类结果,可以划分储层的类型和产能级别,Ⅰ和Ⅱ类孔隙结构类型为二类储层,对应产能为中产;Ⅲ类孔隙结构类型为三类储层,对应产能为低产;Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ类孔隙结构类型为四类储层,对应产能为特低产。

参考文献:

- [1] 刘媛,朱筱敏,张思梦,等.三肇凹陷扶余油层中一低渗透储层微观孔隙结构特征及其分类[J].天然气地球科学,2010,21(2):270-275.
- [2] 赵跃华,王敏.红河油田储层孔隙结构特征分类及影响因素[J].石油学报,1994,15(4):31-39.
- [3] 赵清平,赵国祥,万琳,等.渤海海域歧南断阶带侏罗系优质储层影响因素[J].海洋地质前沿,2015,31(7):28-35.
- [4] 于兴河,李顺利,杨志浩.致密砂岩气储层的沉积—成岩成因机理探讨与热点问题[J].岩性油气藏,2015,27(1):1-13.
- [5] 谢武仁,杨威,杨光,等.川中地区上三叠统须家河组砂岩储层孔隙结构特征[J].天然气地球科学,2010,21(3):435-440.
- [6] 郑艳荣,屈红军,冯杨伟,等.安塞油田H区长6油层组储层微观孔隙结构特征[J].岩性油气藏,2011,23(5):28-32.
- [7] 汪新光,李茂,覃利娟,等.利用压汞资料进行低渗储层孔隙结构特征分析——以W11-7油田流沙港组三段储层为例[J].海洋石油,2011,31(1):42-47.
- [8] 王瑞飞,吕新华,国殿斌.深层高压低渗砂岩储层微观孔喉特征参数研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(1):64-68.
- [9] Rodolfo S B, Duarray A, Cintia M, et al. How to propagate petrophysical properties in a fracture network for naturally fractured carbonate reservoirs—case study: cretaceous formation at Maracaibo Lake, Venezuela[C]// SPE Europec/Eage Annual Conference and Exhibition, Spain, Barcelona: SPE, 2010: 1-14.
- [10] 张宪国,张涛,林承焰.基于孔隙分形特征的低渗透储层孔隙结构评价[J].岩性油气藏,2013,25(6):40-45.
- [11] 葛新民,范宜仁,唐利民,等.基于信息熵-模糊谱聚类的非均质碎屑岩储层孔隙结构分类[J].中南大学学报:自然科学版,2015,34(6):2227-2235.

- [12] 张建培,徐发,钟韬,等.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组一花港组层序地层模式及沉积演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(1):35-41.
- [13] 刘金水,唐健程.西湖凹陷低渗储层微观孔隙结构与渗流特征及其地质意义—以HY构造花港组为例[J].中国海上油气,2013,25(2):18-23.
- [14] 徐国盛,赵莉莉,徐发,等.西湖凹陷某构造花港组致密砂岩储层的渗流特征[J].成都理工大学学报,2012,39(2):113-121.
- [15] 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.
- [16] 张创,孙卫,杨建鹏,等.低渗砂岩储层孔喉的分布特征及其差异性成因[J].地质学报,2012,86(2):335-348.
- [17] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997:14-30.
- [18] 杨玉卿,潘福熙,田洪,等.渤中25-1油田沙河街组低孔低渗储层特征及分类评价[J].现代地质,2010,24(4):685-693.
- [19] 明红霞,孙卫,周清波,等.马岭油田北三区延1012储层微观孔隙结构特征及其生产动态分析[J].西北大学学报:自然科学版,2014,44(6):970-978.
- [20] 吴浩,郭英海,张春林,等.致密油储层微观孔吼结构特征及分类——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠统延长组长7段为例[J].东北石油大学学报,2013,37(6):12-17.
- [21] 冉新权,吴胜和,付晶,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透储层孔隙结构分类研究[J].地学前缘,2013,20(2):77-85.
- [22] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].石油学报,2012,33(3):437-441.
- [23] 谢庆邦.陕北三叠系延长组低渗储集层孔隙结构特征及其评价[J].石油勘探与开发,1988,15(2):48-55.
- [24] 陈欢庆,蒋平,张丹锋,等.火山岩储层孔隙结构分类与分布评价:以松辽盆地徐东地区营城组一段火山岩储层为例[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(4):1453-1463.

STUDY ON THE PORE STRUCTURE OF LOW PERMEABILITY RESERVOIR OF THE HUAGANG FORMATION IN XIHU DEPRESSION AREA

JU Chuanxue, DONG Chunmei, ZHANG Xianguo, DONG Yixin

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to make clear the relationship between the porosity and the production capacity of the low permeability sandstone reservoir in Huagang Formation of the Xihu Depression, pore structures are studied. More than 500 cores data and 311 conventional mercury testing data are used. By the correlation analysis between the characteristic parameters of microscopic pore structure and macroscopic physical properties, choosing the maximum connected pore-throat radius and average connectivity of pore-throat radius as the favorable parameters for throat grading and using the method of data configuration, the paper determined the pore structure classification standards and established the new classification system that suitable for low permeability gas reservoir in this area. The pore structure of Huagang Formation H3 sandstone reservoir could be divided into six types including big-mid pore with coarse throat type, mid-small pore with mid throat type, mid-small pore with mid-fine throat type, small pore with fine throat type, small-fine pore with micro-fine throat type and fine pore with micro throat type. According to the classification of pore structure, the reservoir could be grouped into four types with the production capacity corresponding to high, middle, low, and ultra-low yield respectively. The first kind of reservoir corresponding to the big-mid pore with coarse throat type and the mid-small pore with mid throat type, of which porosity and permeability were higher as well as the capacity of yield, is the most favored reservoir.

Key words: Xihu Depression; low permeability; reservoir characteristics; microscopic pore structure; classified evaluation