

准噶尔盆地金龙油田佳木河组火山岩储层 孔隙类型及特征

王小军¹, 赵飞¹, 张琴², 王东学¹, 夏近杰¹, 吴行舟¹, 李晨溪², 梅啸寒², 吕德红³

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油长城钻探工程有限公司录井国际业务项目部, 北京 100101)

摘要:准噶尔盆地金龙油田佳木河组发育良好的火山岩储层, 明确火山岩储层特征及有利储集相带分布是进行火山岩储层勘探和开发的关键。本文通过岩心、薄片观察和高压压汞分析, 结合物性资料, 分析火山岩储层岩石学及物性特征, 并预测了有利储层的分布。结果表明, 佳木河组火山岩类储层包括火山熔岩类、火山碎屑熔岩类、火山碎屑岩类和沉火山碎屑岩类 4 种。火山岩储层物性总体上具有中-低孔和低-特低渗的特征。储集空间类型根据形态分为孔隙和裂缝两大类, 根据成因都包括原生和次生两类, 其中收缩孔、缝为主要的储集空间类型。不同的火山岩性和岩相表现出不同的压汞曲线类型, 包括双峰正偏态细孔喉型、单峰正偏态细-微孔喉型和单峰负偏态微孔-极细微孔喉型 3 类, 总体以微细-细孔喉为主, 分选差-中等。岩性上火山角砾岩、玄武岩和安山岩是工区内最好的储层, 岩相上火山爆发相和喷溢相上部储层物性最好, 平面上最好储集相带位于研究区中部呈北西-南东的条带状分布。

关键词:储层物性; 孔隙类型; 孔喉分布; 火山岩类储层; 佳木河组; 金龙油田; 准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pore types and characteristics of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield, Junggar Basin

Wang Xiaojun¹, Zhao Fei¹, Zhang Qin², Wang Dongxue¹, Xia Jinjie¹, Wu Xingzhou¹, Li Chenxi², Mei Xiaohan², Lyu Dehong³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Mudlogging International Department, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China)

Abstract: Volcanic rocks in the Jiamuhe Formation are favorable reservoirs in Jinlong oilfield. It is a key step for exploration and development of volcanic reservoirs to analyze the characteristics of volcanic reservoir and define the distribution of favorable reservoir facies belts. Based on core, thin section, high pressure mercury injection and reservoir property data, this paper defined the characteristics of lithology and property of the volcanic rocks, and predicted the distribution of favorable volcanic reservoirs. The results show that the volcanic reservoirs consist of volcanic lavas, volcanoclastic lavas, volcanoclastic rocks and depositional volcanoclastic rocks. The volcanic reservoirs in Jinlong Oilfield are characterized by medium to low porosity and low to extra low permeability. The reservoir spaces are divided into pore vs. fracture classes according to their shapes in the rock, and primary vs. secondary categories on the basis of genesis, of which the contraction pores and fractures are the main reservoir spaces of the volcanic reservoirs in Jiamuhe Formation. Volcanic rocks with different lithologies and petrofacies have different types of mercury-injection curves. There are 3 curve types featuring respectively in fine pore throat with bimodal positive skew distribution, fine-micro pore throat with unimodal positive skew distribution, and micro pore throat with unimodal negative skew distribution. Overall, the micro-fine pore throats are predominant and the sorting is poor to moderate. Lithologically, the volcanic breccias, basalt and andesite are the most favorable reservoirs in the study area, while as to petrofacies, the best reservoirs occur in the explosive facies and the upper part

收稿日期: 2016-06-29; 修订日期: 2016-12-20。

第一作者简介: 王小军(1972—), 男, 高级工程师, 石油地质学。E-mail: wxiaojun@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 张琴(1973—), 女, 博士、副教授, 沉积学、储层地质学。E-mail: zhangqin@cup.edu.cn。

of the effusive eruption facies. The best favorable reservoir facies belt is located at the middle part of the study area and is in NW-SE-trending banded distribution.

Key words: reservoir property, pore type, distribution of pore throat, volcanic reservoir, Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

随着油气勘探、开发领域的不断扩展和勘探技术的不断提高,火山岩油气藏作为油气勘探的新领域,已引起了石油工作者的广泛关注^[1-7]。我国火山岩油气藏分布面积广,目前已在准噶尔盆地、渤海湾盆地、松辽盆地等诸多盆地发现了火山岩油气藏,剩余资源丰富,勘探潜力大,是未来油气勘探开发的重要领域^[2,8-12]。

松辽、二连、渤海湾等盆地的勘探实践证实,火山岩储层非均质性极强,储集空间的质量和分布决定着油气藏的规模和开发效益^[13-14]。金龙油田位于准噶尔盆地西北缘东南部^[15],2012年在佳木河组火山岩获得高产油气流,已提交了部分控制储量,但是由于本区火山岩储层复杂,储集空间类型和定量表征难度大,规模性的勘探和效益开发受阻。本文通过对金龙油田及其外围的19口取心井的岩心观察和200余块薄片、铸体薄片及高压压汞等资料进行综合分析,对火山岩类储层岩石类型、储集空间类型、孔吼特征进行系统研究,明确有利火山岩类储层的分布,以期完善火山岩类储层储集空间分类体系,并为该区下一步火山岩类储层的勘探和开发提供科学依据。

1 区域概况

金龙油田位于准噶尔盆地西部隆起克-百断裂带的东南部,为中拐凸起东斜坡的一部分,其北部与已探明的克75井区二叠系上乌尔禾组油藏相邻,其南部、东南部紧邻生烃凹陷沙湾凹陷和盆1井西凹陷,东北部紧邻玛湖凹陷,西南部紧邻红山嘴断块区(图1)^[15-16]。研究区构造格局整体上呈一东南倾的单斜,是一个石炭纪—二叠纪的古隆起,形态北翼平缓,处于向玛湖凹陷过渡的斜坡部位,南翼受红3井东断裂的影响,区域构造位置十分有利,是准噶尔盆地富油气区带之一^[17-18]。

金龙油田自下而上发育有前石炭纪的变质岩基底、石炭系至白垩系以及新近系,缺失古近系^[18-20]。二叠系自下而上分为佳木河组(P_{1j})、风城组(P_{1f})、夏子街组(P_{2x})、下乌尔禾组(P_{2w})和上乌尔禾组(P_{3w})。佳木河组岩性复杂,储层以火山岩类为主,夹少量碎屑岩,其中火山岩类储层是绿灰色安山岩、玄武岩、流纹岩、火山碎屑熔岩及火山碎屑岩的组合^[15-20]。该区二叠系上乌尔禾组油气藏于1992年申报探明储

量超过 $2\,000 \times 10^4$ t。1999年发现了金龙油田佳木河组火山岩油气藏,为本区的增储上产作出了巨大贡献^[15]。

2 储层物性特征

通过对研究区岩心、普通薄片和扫描电镜观察,将佳木河组火山岩类储层划分为火山熔岩类、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩类和沉火山碎屑岩4大类^[17-18,20]。根据金龙油田岩心物性资料分析,二叠系佳木河组火山岩储层孔隙度主要分布在5.0%~22.31%,平均为10.22%(图2a),渗透率分布范围为 $0.11 \times 10^{-3} \sim 468.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2b),总体属于中-低孔和低渗-特低渗型储层。

研究区不同火山岩类型的储层物性存在差异。火山熔岩类中少见未充填或半充填气孔,而冷凝收缩缝和斑晶、基质溶孔相对发育,孔隙度分布于0.1%~20.4%,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 72.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是

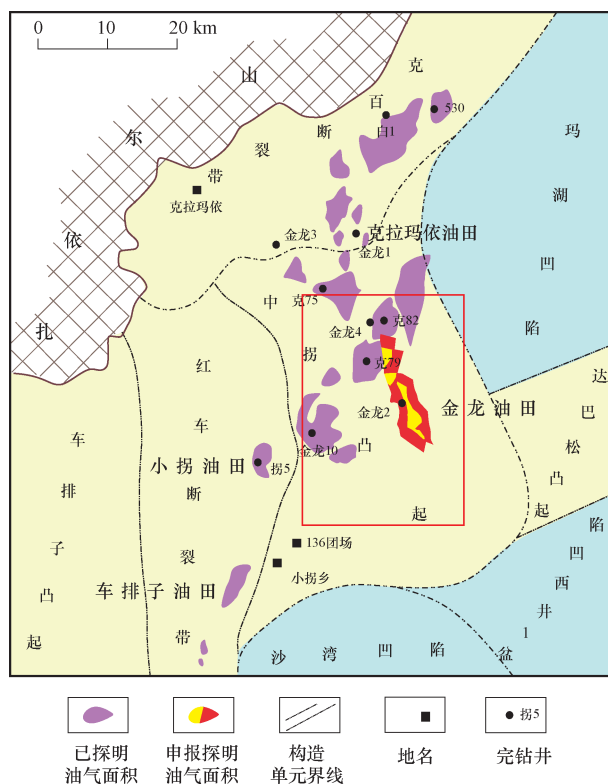


图1 金龙油田及研究区构造位置图(据新疆油田,2015)

Fig.1 Structure locations of Jinlong oilfield and the study area (from Xinjiang oilfield,2015)

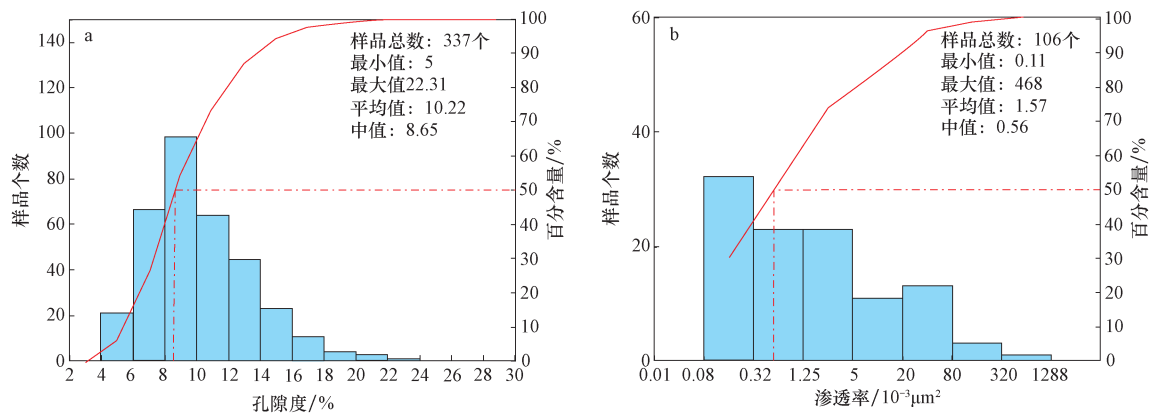


图 2 金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙度和渗透率分布直方图

Fig. 2 Pore and permeability histograms of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong Oilfield

a. 储层孔隙度分布;b. 储层渗透率关系

本区储集物性较好的储层;火山碎屑熔岩为熔浆胶结,渗流能力较差,但研究区火山碎屑熔岩经常见有颗粒及基质的溶蚀,大大提高了储层的储集性能,孔隙度为 4.4%~15.2%,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 4.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;火山碎屑岩包括火山角砾岩和凝灰岩,孔隙度为 0.3%~24.99%,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 85.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,火山角砾岩是工区内最好的储层;沉火山碎屑岩中火山碎屑颗粒见有不同程度的磨圆,因此研究区沉火山碎屑岩常见有一定的原生粒间孔隙,但后期火山灰常发生蚀变导致岩石更加致密,整体岩石储集性能和渗流能力变差,孔隙度为 0.78%~18.58%,渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 48.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 孔隙类型及特征

通过对金龙油田佳木河组岩心的观察以及岩石薄片镜下鉴定,火山岩的储集空间根据形态主要分为孔隙和裂缝两大类,根据成因孔隙类型分为原生孔隙和次生孔隙,裂缝类型分为原生裂缝(隙)(岩浆冷凝固结过程形成)及次生裂缝(隙)(构造作用和表生作用形成)(表 1)。进一步根据其赋存位置和特征分其亚类。各种孔隙和裂缝特征见图 3。

3.1 孔隙类型

3.1.1 原生孔隙

原生孔隙主要形成于岩浆结晶凝固固结成岩阶段,而对于火山碎屑岩而言,除了形成于火山岩屑的冷凝作用外,原生孔隙还形成于火山碎屑的堆积压固阶段^[11-12,21]。主要孔隙类型有原生气孔、斑晶、微晶或玻晶晶内孔、杏仁体内孔、粒间孔^[13-14,17]。其中晶内孔、杏仁体内孔、收缩孔是本区火山岩储层主要的原生孔隙。

1) 气孔:指岩浆内的挥发组分在冷凝、固结之后再逸散出去而留下的孔隙空间(图 3a—c)。研究区内熔岩类火山岩皆有发育,占到样品总孔隙的 37%(图 4)。此类气孔大多被浊沸石、绿泥石等充填或半充填(图 3f)。

2) 杏仁体内孔:为次生矿物充填气孔后留下的剩余气孔或充填物晶间孔隙(图 3e)。充填物为绿泥石矿物、各类沸石如浊沸石和片沸石等矿物,少量的硅质、方解石和沥青充填物。熔岩类多见此类孔隙,占到统计样品总孔隙的 42%(图 4)。

3) 晶内孔、晶间孔:包括斑晶、基质和杏仁内沸石类充填物晶内孔(图 3c)及在岩浆冷凝过程中或冷凝期后由于矿物结晶、析出,在晶体间产生的晶间孔,在熔岩类火山岩和火山碎屑熔岩中较常见。斑晶、基质晶体间的孔隙一般呈微孔形式存在,对储层性质的贡献较小(图 4),常见的是杏仁体内沸石晶内孔。

4) 收缩孔:斑晶、火山玻璃质、杏仁体内的充填物

表 1 金龙油田佳木河组火山岩储集空间类型与成因
Table1 Reservoir space types and genesis of volcanic rocks of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield

储集空间类型		成因
孔隙	原生孔隙	气体逸散、岩浆冷凝、收缩
	气孔、晶间孔、半充填杏仁孔、收缩孔	
	粒间孔	火山爆发、沉积
	斑晶溶孔	溶解、交代作用
	基质溶孔	溶解、交代作用
裂缝	杏仁溶孔	溶解、交代作用
	原生裂缝	岩浆冷凝收缩及充填物收缩
	收缩缝	
	构造直劈缝	构造应力作用
次生裂缝	斜交缝、微裂缝	构造应力作用
	风化裂缝	风化壳

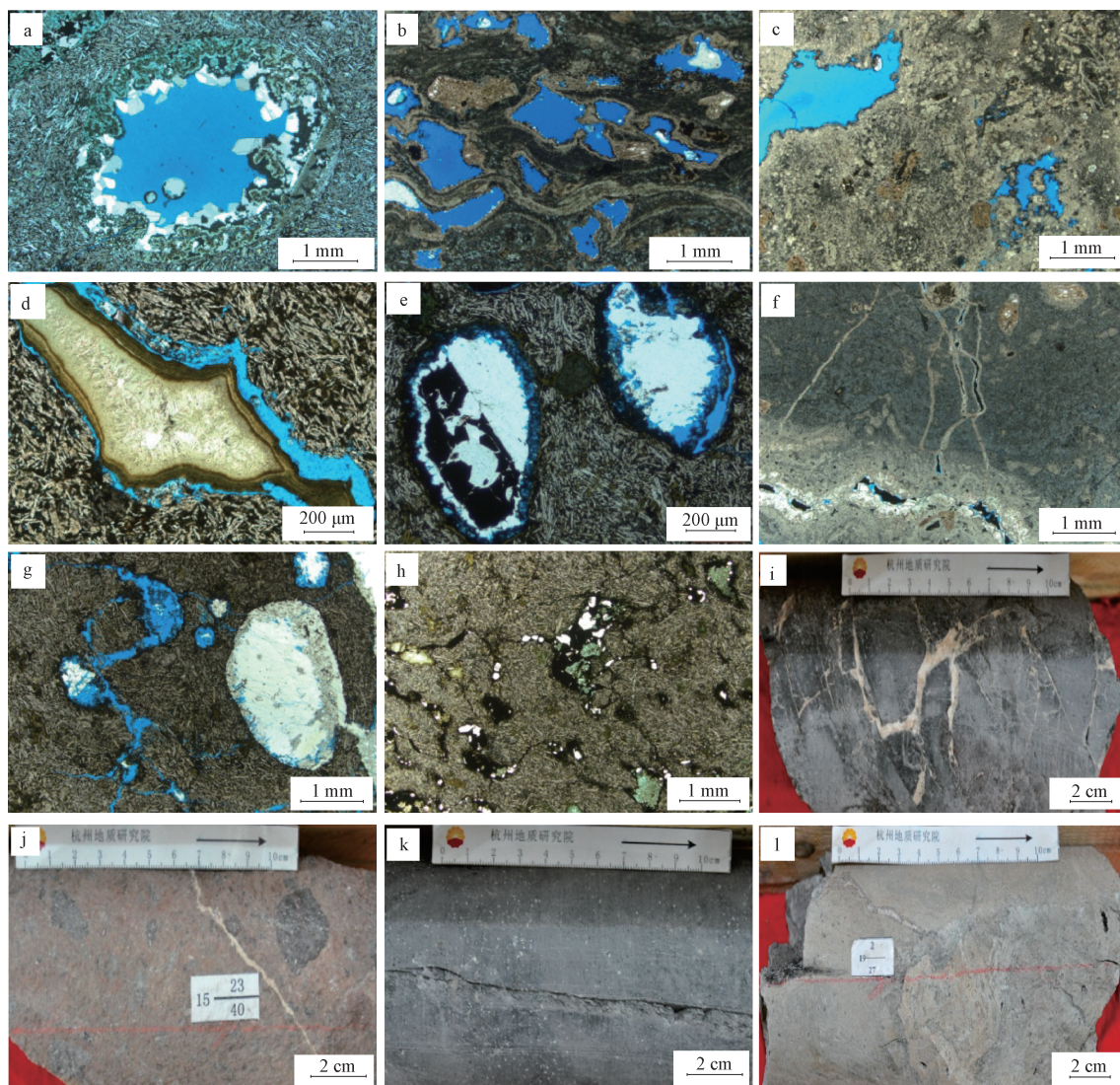


图3 金龙油田佳木河组火山岩典型孔、缝特征

Fig. 3 Characteristics of pores and cracks of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield

a. 安山岩,绿泥石、硅质半充填气孔,J201井,埋深4 166.22 m;b. 凝灰玻基安山岩,气孔发育,J204井,埋深4 329.8 m;c. 蚀变玻基安山岩,长石斑晶和玻基蚀变强烈,见气孔和基质溶孔,J208井,埋深4 240.06 m;d. 杏仁状安山岩,见绿泥石杏仁体边缘收缩孔,J201井,埋深4 133.05 m;e. 杏仁状安山岩,见绿泥石收缩孔、浊沸石杏仁体溶蚀孔,部分充填沥青,J201井,埋深4 165.52 m;f. 熔结凝灰岩,局部见拉长状硅质半充填气孔,气孔和微缝内见沥青,J204井,埋深4 287.29 m;g. 杏仁状安山岩,冷凝收缩缝发育且连通气孔,见方解石沿浊沸石杏仁体边缘交代,J201井,埋深4 165.52 m;h. 安山岩,收缩微裂缝发育,充填沥青、绿泥石、硅质,J201井,埋深4 168.55 m;i. 灰色火山角砾岩,钙质充填裂缝,J214井,埋深4 102.64 m;j. 棕色火山角砾岩,钙质充填裂缝,J214井,埋深4 113.61 m;k. 深灰色火山角砾岩,半充填直劈缝,J214井,埋深4 110.41 m;l. 灰白色流纹岩,发育斜裂缝、气孔,J213井,埋深4 284.55 m

(主要为绿泥石或绿泥石/蒙皂石混层)及熔浆在冷凝、结晶过程中收缩产生的孔隙^[13,22](图3d,e)。此类孔隙在本区熔岩类火山岩中比较发育,但平均面孔率整体不高,一般在0.01%~0.2%。

3.1.2 次生孔隙

研究区次生孔隙主要为杏仁体内溶孔(图3e),其次是斑晶和基质(微晶或玻璃质)溶孔(图3c),而火山碎屑岩的粒间溶孔少见。

溶蚀孔隙往往与各类裂隙伴生,即沿裂隙带发育,而远离裂隙逐渐减弱甚至消失^[17-18];溶蚀孔隙往往发

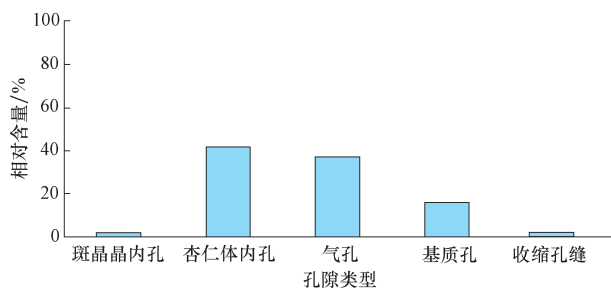


图4 金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙类型组成
Fig. 4 Pore types of volcanic reservoir of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield

育于沉火山碎屑岩之下的杏仁状熔岩,远离沉火山碎屑岩溶蚀孔隙发育减弱。

3.2 裂缝类型

1) 原生裂缝

研究区原生裂缝主要为岩浆凝固过程中收缩形成的裂缝^[14](图3g),以及斑晶、火山玻璃质、杏仁体内的充填物(主要为绿泥石或绿泥石/蒙皂石混层)收缩产生的微裂缝^[15,19](图3h),另外,在火山碎屑岩中由于粒间大量充填的火山尘或其他杂基收缩也可形成收缩缝,收缩缝构成火山碎屑岩的主要储集空间^[23]。

2) 次生裂缝

次生裂缝主要为构造与风化裂缝,可以是未充填、半充填或完全充填的裂缝^[15]。裂缝的发育与构造应力大小和离断裂的远近有关。岩心观察高角度构造裂缝往往被绿泥石、沸石类、硅质及方解石充填,少量半充填;低角度构造缝或网状构造缝及风化裂缝以半充填为主,有时伴随有溶蚀作用,成为油气运移的通道或有效的裂缝型储集空间^[15,21]。研究区裂缝主要发育在流纹岩、安山岩等熔岩中,常以高角度、网状缝出现,半充填—充填(图3i—l)。

4 孔喉分布特征

4.1 孔喉大小与分布

压汞实验参数表明(表2),金龙油田佳木河组火

山岩储层孔喉以微细、细喉为主。最大孔喉半径平均为0.3~4.1 μm,最大可达4.7 μm,孔喉中值半径多数小于0.4 μm,平均毛管半径为0.1~3 μm,排驱压力以小于1 MPa为主,少数可达2 MPa,中值压力介于4~19 MPa。总体上,二叠系佳木河组储层以微细—细孔喉为主,分选差—中等,压汞曲线无明显平台。

4.2 压汞曲线与孔喉分布类型

研究区二叠系佳木河组火山岩储层压汞曲线与孔喉大小分布可分为3种类型,各类典型孔喉分布特征见图5。

I类为双峰正偏态细孔喉型(图5a)。孔喉分布呈双峰,且孔喉以细喉为主,优势孔喉半径一般为20~0.5 μm,排驱压力一般小于0.03 MPa。此类型主要分布于气孔—杏仁状安山岩、火山碎屑岩中,以火山爆发岩相、喷溢相上部岩性为主,储层表现为中低孔和中低渗的特征。

II类为单峰正偏态或微负偏态细—微孔喉型(图5b)。孔喉分布呈单峰且偏向微孔喉的一边,优势孔喉半径一般在5~0.28 μm,排驱压力一般小于0.2 MPa。此类储层主要分布于角砾熔岩、熔结凝灰岩中,以火山爆发相和喷溢相为主,表现为低孔和低渗—特低渗储层的特征。

III类为单峰负偏态微孔—极细微孔喉型(图5c)。孔喉半径一般小于0.2 μm,渗透性极差。火山岩岩性

表2 金龙油田佳木河组火山岩压汞参数统计

Table 2 Mercury injection parameters of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield

井名	岩性	样品个数	有效孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	中值压力/MPa	中值半径/μm	排驱压力/MPa	最大孔喉半径/μm	退汞效率/%	孔喉体积比/%	平均毛管半径/μm	非饱和孔隙体积/%
J201	熔岩/火山角砾岩	8	13.1	5.0	7.3	0.1	0.3	3.0	34.2	2.4	0.8	32.7
J204	安山岩	4	8.8	1.7	9.9	0	0.4	2.0	28.3	2.6	0.5	45.0
	流纹岩	5	12.1	0.1	4.1	0.1	0.3	4.0	24.5	3.4	1.1	31.8
J208	熔岩/火山角砾岩	3	10.2	0.7	15.0	0.1	1.4	0.7	12.6	7.3	0.2	37.6
J213	熔岩/火山角砾岩	23	7.4	0.4	6.0	0.2	0.3	4.7	33.9	3.2	1.3	35.9
J214	熔岩/火山角砾岩	34	8.5	0.3	7.2	0	2.4	0.3	17.3	5.5	0.1	52.5
JL2001	角砾熔岩	5	7.1	0.5			1.8	0.4	12.7	7.0	0.1	71.2
JL2004	角砾熔岩	3	10.2	8.4	17.9	0	0.6	1.3	18.7	4.5	0.3	49.3
K301	角砾熔岩	4	13.3	0.1	17.3	4.4	2.8	0.3	17.7	5.7	2.9	45.9
K303	火山角砾岩	1	8.8	1.0	2.0	0.4	0.2	3.0	16.3	5.1	1.0	10.1
	英安岩	2	2.1	0.0			1.2	0.2	33.5	2.1	0.1	71.6
JL7	凝灰岩	2	4.0	<0.01			0.6	0.3	17.9	4.8	0.1	61.4
	火山角砾岩	3	5.6	3.8			0.2	0.4	37.9	1.7	0.1	62.2
JL041	安山岩	1	7.0	4.7					10.0	9.0		80.0
K017	安山岩	1	12.1	0.9	20.3	0			19.6	4.1		49.9
K302	凝灰岩	2	9.7	<0.01			6.1	3.9	25.1	3.0	4.0	55.3

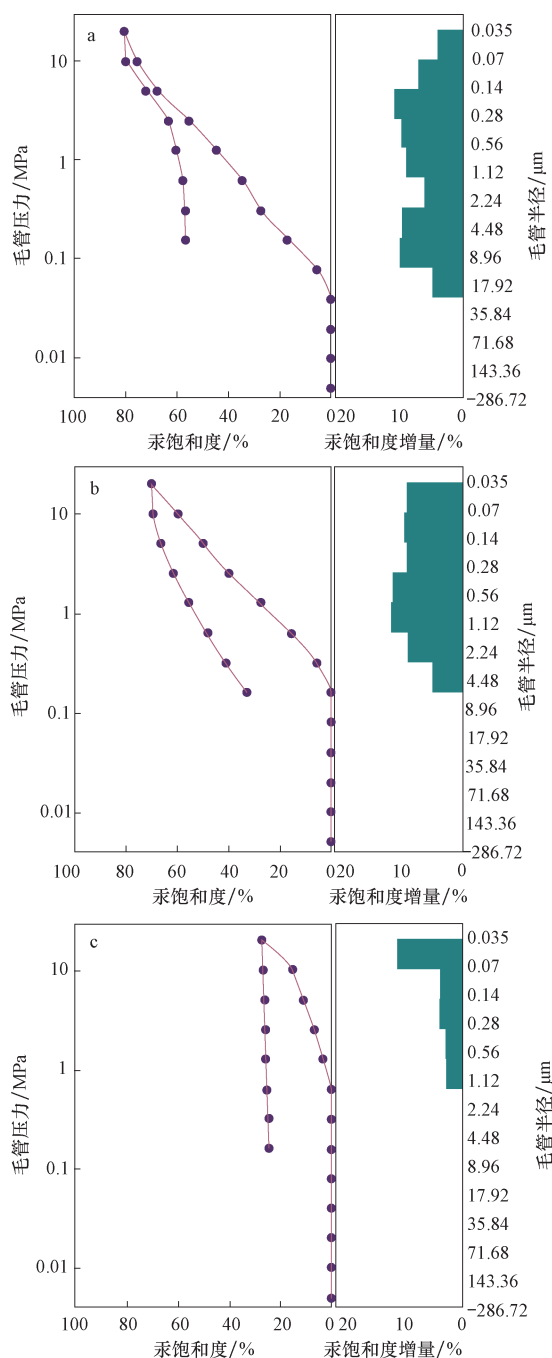


图5 金龙油田佳木河组火山岩储层压汞分析

Fig. 5 Mercury-injection curves of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield

- a. I类, J213井, 埋深4 268.59 m; b. II类, J201井, 埋深4 168.55 m;
c. III类, J2001井, 埋深4 131.74 m

主要为块状玄武岩、块状安山岩和沉凝灰岩, 火山岩相主要为喷溢相中下部及火山沉积相, 表现为特低孔和特低渗储层的特征。

5 有利火山岩储层相带预测

岩性是影响佳木河组火山岩储层质量的直接因

素, 尤其对原生孔隙发育程度具有决定性的作用^[11, 24-25]。研究区火山角砾岩中常见颗粒间孔、炸裂缝、粒内溶孔^[12-13, 18], 是研究区佳木河组最好的储层类型。火山熔岩类中少见未充填或半充填气孔, 而冷凝收缩缝和斑晶、基质溶孔相对发育, 并由于中基性火山岩中铁镁矿物及中基性斜长石含量高, 更容易遭受后期地表淋滤、溶蚀等作用的改善, 因此, 玄武岩和安山岩较流纹岩储层物性相对好^[26], 成为该区佳木河组较好的储层类型。

研究区发育火山爆发相、喷溢相、火山沉积相及火山通道相, 火山岩相对火山岩有利储集层的分布具有明显控制作用^[27-28]。目前试油获高产井的火山岩相基本为火山爆发相, 而喷溢相杏仁状、气孔状熔岩类次之, 而角砾凝灰岩、沉凝灰岩类储层最差, 该类岩性多以火山沉积相为主。据25口取心井788个孔渗数据点及试油资料可知, 研究区火山爆发相空落亚相、喷溢相储层物性相对较好。爆发相空落亚相固结速度快, 热熔程度相对较低, 炸裂作用强烈, 原生的粒间孔、炸裂缝以及次生溶蚀孔隙发育, 储层物性非常好, 尤其是空落亚相火山角砾岩是研究区最重要的储层。熔浆流在地表冷凝流动过程中, 挥发分从顶部和底部溢出, 在喷溢相上部亚相和下部亚相会发育一定的气孔及冷凝收缩缝, 当这些原生储集空间被后期溶蚀作用改造后成为研究区内重要的储集层^[29]。

综合储层物性分布和火山岩岩相分布特征, 研究区火山岩类储层可分为3类: I类为好储层, 属于储集能力一般的储层, 孔隙度在16%~12%, 渗透率介于 $1.0 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为低孔和低渗型储层, 岩性主要为集块岩、火山碎屑岩及气孔、杏仁状熔岩, 火山岩相为爆发岩相及喷溢岩相上部; II类为属于储集能力中等的储层, 孔隙度在7.5%~12%, 渗透率介于 $10 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为低孔和特低渗型储层, 岩性主要为角砾熔岩、熔结凝灰岩类, 其火山岩相为喷溢相; III类为差储层, 其孔隙度以小于7.5%为主, 为特低孔和特低渗储层, 岩性主要为致密的块状熔岩、沉凝灰岩, 其相带主要为喷溢相的底部及火山沉积相。在平面上, 有利的储集相带和岩相带主要位于克82井—金218井—金214井—金209井—金201井—金204井一带, 即位于研究区中部即断凸带周围呈北西—南东的条带状分布, 与有利火山岩相分布基本一致(图6)。

6 结论

- 1) 佳木河组火山岩类储层划分为火山熔岩类、火

- [14] 马乾,鄂俊杰,李文华,等. 黄骅坳陷北堡地区深层火成岩储层评价[J]. 石油与天然气地质,2000,21(4):337-340.
Ma Qian, E Junjie, Li Wenhua, et al. Reservoirs evaluation of deep-seated igneous rocks in Beipu Region, Huanghua Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4):337-340.
- [15] 何辉,孔垂显,蒋庆平,等. 准噶尔盆地西北缘二叠系火山岩储层裂缝发育特征及分布预测——以金龙2井区佳木河组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(5):1278-1288.
He Hui, Kong Chuixian, Jiang Qiping, et al. Fracture Characterization and prediction of Permian volcanic reservoir in Northwestern Margin of Junggar Basin: A Case from Jiamuhe Formation of Jinlong 2 Oil Field[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5):1278-1288.
- [16] 匡立春. 克拉玛依油田5—8区二叠系佳木河组火成岩岩性识别[J]. 石油与天然气地质,1990,11(2):195-201.
Kuang Lichun. Distinguishing of volcanics lithology in Jiamuhe Formation of Permian System, 5-8 Districts, Karamay Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(2):195-201.
- [17] 范存辉,支东明,秦启荣,等. 准噶尔盆地小拐地区佳木河组储层特征及主控因素[J]. 大庆石油学院学报,2012,36(2):48-52.
Fan Cunhui, Zhi dongming, Qin Qidong, et al. Characteristics and main controlling factors of reservoirs of Jiamuhe Formation in Xiaoguai Area, Junggar Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2012, 36(2):48-52.
- [18] 吴晓智,蒋宜勤,李佰华,等. 准噶尔盆地西北缘中拐—五八区佳木河组储层主控因素及发育区预测[J]. 新疆地质,2010,28(2):174-179.
Wu Xiaozhi, Jiang Yiqin, Li Baihua, et al. Predominant factor and forecasting of reservoir of Zhongguai-5-8 Zone's Permian Jiamuhe Formation in northwest margin, Zhungger Basin[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(2):174-179.
- [19] 范存辉,李虎,支东明,等. 新疆小拐地区二叠系佳木河组裂缝分布规律探讨[J]. 矿物岩石,2012,32(3):85-93.
Fan Cunhui, Li Hu, Zhi Dongming, et al. Study of the fractures distribution and numerical simulation of Jiamuhe Formation of Permian in Xiaoguai Oilfield[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(3):85-93.
- [20] 朱世发,朱筱敏,吴冬,等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):77-85.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):77-85.
- [21] 刘俊田,刘媛萍,郭沫贞,等. 三塘湖盆地牛东地区石炭系火山岩相储层特征及其成因机理[J]. 岩性油气藏,2009,21(2):64-69.
Liu Juntian, Liu Yuanping, Guo Mozhen, et al. Volcanic reservoir characteristics and genetic mechanism of Carboniferous in Niudong area of Santanghu Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2):64-69.
- [22] 赵海玲,黄微,王成,等. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):47-52.
Zhao Hailing, Huang Wei, Wang Cheng, et al. Micropores from devitification in volcanic rocks and their contribution to reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1):47-52.
- [23] La Felice S, Montanari D, Battaglia S, et al. Fracture permeability and water-rock interaction in a shallow volcanic groundwater reservoir and the concern of its interaction with the deep geothermal reservoir of Mt. Amiata, Italy[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2014, 284:95-105.
- [24] 孟元林,胡越,李新宁,等. 致密火山岩物性影响因素分析与储层质量预测——以马朗—条湖凹陷条湖组为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):244-252.
Meng Yuanlin, Hu Yue, Li Xinning, et al. Controlling factors on physical property of tight volcanic rocks and reservoir quality prediction: a case study of the Tiaohu Formation in Marlang-Tiaohu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):244-252.
- [25] Mao Z G, Zhu R K, Luo J L, et al. Reservoir characteristics, formation mechanisms and petroleum exploration potential of volcanic rocks in China[J]. Petroleum Science, 2015, 12(1):54-66.
- [26] 顿铁军. 克拉玛依油田五区佳木河组储层研究[J]. 石油与天然气地质,1989,10(1):59-74.
Dun Tiejun. Study on reservoirs of the Jiamuhe Formation in 5th District, Karamay Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1989, 10(1):59-74.
- [27] 王璞瑛,陈树民,刘万洙,等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):18-23.
Wang Pujun, Chen Shumin, Liu Wanzhu, et al. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1):18-23.
- [28] 罗静兰,林潼,杨知胜,等. 松辽盆地升平气田营城组火山岩岩相及其储集性能控制因素分析[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):748-757.
Luo Jinglan, Lin Tong, Yang Zhisheng, et al. Lithofacies and reservoir quality control factors of volcanics in the Yingcheng Formation in the Shengping gas field in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6):748-757.
- [29] Wang P, Chen S. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3):499-523.

(编辑 张亚雄)