

文章编号: 1000-0550(2017)02-0343-15

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.012

潜山内幕火山岩储层特征及控制因素 ——以渤海海域秦皇岛 30A 地区白垩系为例

郭颖, 王粤川, 韦阿娟, 吴昊明, 叶涛, 高坤顺, 曾金昌

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

摘要 针对潜山内幕火山岩储层特征和控制因素复杂的难题,以渤海海域秦皇岛 30A 地区白垩系为例,通过岩芯观察、薄片鉴定和扫描电镜分析等,对潜山内幕火山岩储层储集空间类型、孔缝充填期次、成岩演化及控制因素进行研究。研究区火山岩储层以爆发相安山质火山角砾岩为主,储集空间分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 类。作为主要原生孔隙类型,储层中原生气孔先后经历早期充填和晚期充填两个充填阶段,导致原生孔隙大量减少。根据裂缝相互切割关系和充填矿物组合,将储层中裂缝分为四期,晚期裂缝充填程度低于早期裂缝。火山岩储层成岩演化经历同生成岩阶段、表生成岩阶段和埋藏成岩阶段 3 个阶段。同生成岩阶段火山热液作用对储层破坏作用最为明显,后期表生成岩阶段风化淋滤作用和埋藏成岩阶段溶蚀作用对储层物性进行了一定改善,但作用有限。未充填有效裂缝发育程度是控制潜山内幕火山岩储层物性和油气产能差异的关键因素。靠近大断裂和火山通道的构造高部位储层裂缝更为发育,但易受火山热液作用影响而被热液矿物充填,有效裂缝较少,储层渗透性和产能远低于距火山通道较远的斜坡带。构造部位、裂缝形成期次及宽度大小三个因素共同控制了有效裂缝发育。裂缝集中分布于靠近大断裂一定范围内,距火山通道较远、裂缝形成期次较晚且与油气成熟期和运聚期有效匹配、裂缝宽度较小的地区裂缝充填作用较弱,是有效裂缝和优质储层发育的有利地区,可作为下一步潜山内幕火山岩油气勘探的重点。

关键词 渤海;秦皇岛 30A 地区;潜山内幕;火山岩;储层特征;控制因素

第一作者简介 郭颖,男,1988 年出生,助理工程师,硕士,沉积储层及油气成藏研究,E-mail: guoying8832@163.com

通讯作者 王粤川,男,1980 年出生,高级工程师,E-mail: wangych@cnooc.com.cn

中图分类号 文献标识码 A

0 引言

随着国内外油气勘探开发程度的提高,火山岩油气藏勘探逐渐成为油气勘探的重要领域,引起国内外石油界学者的广泛关注。目前,在古巴、巴西、美国、澳大利亚、印度尼西亚、日本、阿塞拜疆、俄罗斯、墨西哥等国家均发现了火山岩油气藏^[1-5]。经过 50 余年的火山岩油气勘探,中国也相继在准噶尔盆地、塔里木盆地、松辽盆地、二连盆地、四川盆地、渤海湾盆地等 11 个盆地发现了火山岩油气藏^[6]。其中,辽河油田、胜利油田、大港油田等地区火山岩油气藏的不断发现证明渤海湾盆地火山岩油气勘探潜力巨大^[7-8]。但是,目前上述地区(尤其是渤海海域)火山岩油气勘探和研究重点多集中于风化壳型火山岩油气藏,而关于潜山内幕型火山岩油气藏的研究相对薄弱。潜山内幕火山岩油气藏成藏条件较风化壳型火山岩油气藏更为复杂,储层质量严重影响油气富集与分布。

同时,受储层多样性、成岩演化复杂性等因素影响,人们对潜山内幕火山岩储层特征及控制因素认识尚不明确,油气勘探开发难度和风险很大。

渤海海域秦皇岛 30A 地区于上世纪 70 年代首次在中生界白垩系潜山内幕火山岩地层中获得油气发现,显示该地区火山岩油气勘探具有良好前景。但随后的钻探结果表明,该地区火山岩储层质量横向变化快,不同井区油气产能差异巨大,储层问题严重制约该地区火山岩油气勘探,导致 40 年来始终无法取得实质性突破。因此,开展潜山内幕火山岩储层研究,进而指导研究区火山岩油气勘探势在必行。在前人研究基础上,通过岩芯观察、薄片鉴定、扫描电镜和物性分析等,对潜山内幕火山岩储层储集空间类型、孔缝充填期次、成岩演化、储层差异性及成因进行深入研究,并探讨了影响潜山内幕火山岩储层物性和产能差异的主控因素,对该区下一步火山岩油气勘探具有重要指导意义。

1 区域地质概况

渤海海域位于渤海湾盆地东部,是由下辽河拗陷、黄骅拗陷和济阳拗陷向海域延伸部分及渤中拗陷组成,面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,为发育在华北克拉通上的中、新生代叠合盆地。中生代时期,随着燕山运动的发展及郯庐断裂等大断裂的强烈活动,渤海湾盆地发生大规模的岩浆活动和火山喷发,形成大量火山岩含油气构造。尤其是在晚侏罗世—早白垩世时期,特别是早白垩世期间,渤海海域地壳活动十分强烈,火山活动频繁,强度大,持续时间长,火山岩分布范围广泛,厚度相对稳定,是目前渤海海域火山岩油气藏勘探的主力层系。

秦皇岛30A地区位于渤海海域下辽河拗陷辽西低凸起西南倾末端,南北分别被富生烃凹陷—渤中凹陷和秦南凹陷所夹持环抱(图1),油源丰富。目前,该区共钻探井4口,其中,B6井和QHD30A-1井先后钻遇中生界潜山内幕白垩系义县组火山岩地层并获得油气发现。经过油气测试,位于斜坡带的B6井获得高产油流,而随后钻探的位于构造高部位的QHD30A-1井却产能极低,为低渗差油层。两口井位于同一构造上,岩性岩相相似,且QHD30A-1井火山岩储层顶部较B6井高约100 m,具有更为优越的圈闭条件,但前者与后者相比油气产能低下,含油气性和油气产能差异巨大,说明该地区火山岩储层非均质极强,油气成藏十分复杂。亟需理清该区潜山内幕火山岩储层特征、储层差异性及其造成两口井储层和产能巨大差异的主控因素,以指导下一步油气勘探。

2 潜山内幕火山岩储层特征

2.1 火山岩岩性岩相特征

研究区含油气目的层为中生界潜山内幕白垩系义县组下段火山岩地层。义县组下段底部以基性深灰色、黑色玄武岩和灰色、褐色、褐红色凝灰岩为主,岩相为溢流相和溢流相与爆发相互层;中部以溢流相的中性灰绿色安山岩熔岩为主;顶部发育一套爆发相的安山质火山角砾岩,为该地区油气主要产出层段,上覆义县组上段含凝灰岩砂泥岩沉积段和砂泥岩互层段(图2)。通过岩芯和薄片观察,QHD30A-1井和B6井火山岩储层岩性岩相和火山喷发旋回类似,岩性岩相并非导致该区储层差异的主要原因。

2.2 火山岩储层储集空间类型

研究区火山岩储层具有孔隙和缝隙相互组合的“双孔介质”,属于裂缝—孔隙复合型储层。其储集空间类型按成因可划分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝3大类,按结构可进一步细分为9亚类:

2.2.1 原生孔隙

包括原生气孔、半充填气孔、砾间孔、砾内孔4类(图3)。

(1) 原生气孔:含有大量气液包裹体的火山物质喷出地表时,包裹体中的气体未能及时逸出,待岩浆冷凝后,由于气体溢出而在流动单元上部遗留下来后期未充填物质的气孔(图3a,c)。

(2) 半充填气孔:矿物沿气孔壁充填气孔,未完全充填形成杏仁体而留下来的孔隙,在研究区普遍发育(图3b)。

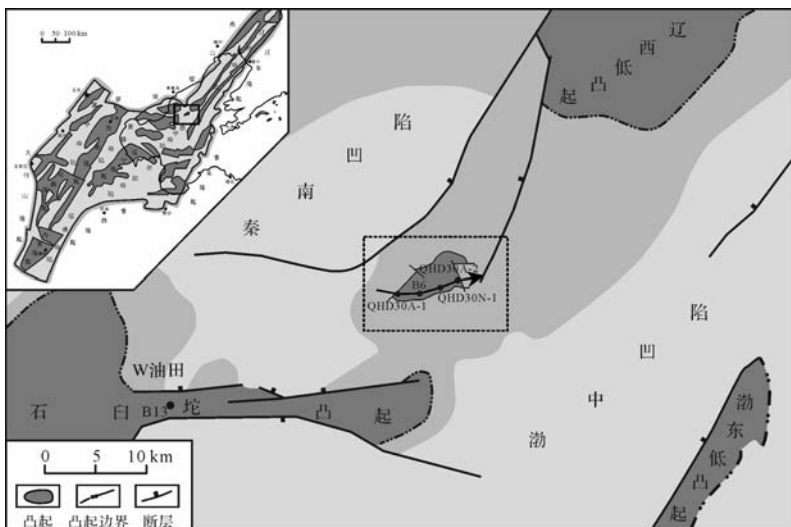


图1 研究区位置示意图

Fig.1 The location map of Qinhuangdao 30A

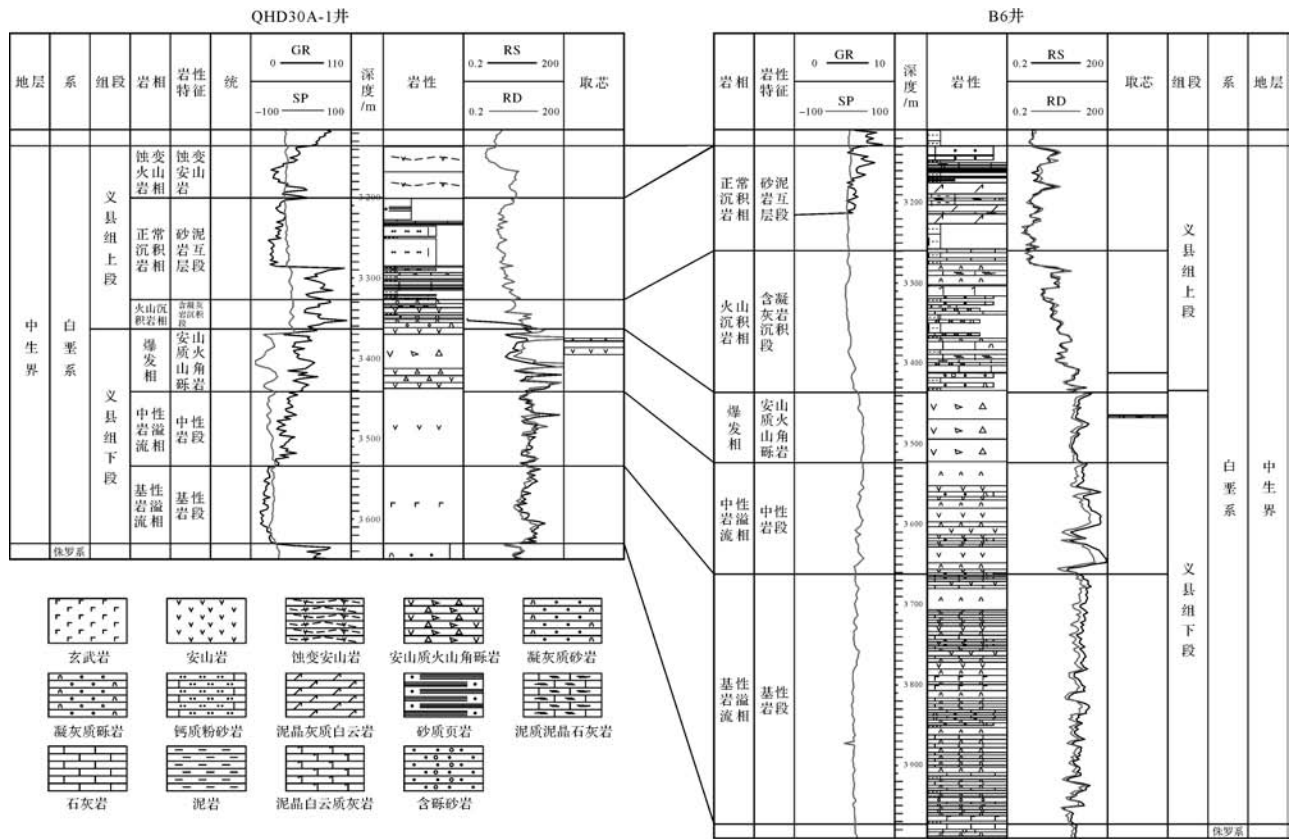


图2 秦皇岛30A地区白垩系火山岩储层岩性

Fig.2 Lithology of Cretaceous volcanic reservoir in Qinhuangdao 30A

(3) 砾间孔:较粗粒火山碎屑颗粒间未被充填,经成岩压实和重结晶作用后残余的孔隙(图3d)。

(4) 砾内孔:成岩过程中,粗粒火山碎屑内保留下来的未充填的气孔等原始孔隙(图3e)。

2.2.2 次生孔隙

包括各类型的基质内溶蚀孔和砾内溶孔。

(1) 基质内溶蚀孔:火山基质中微晶长石、细粒火山灰、火山尘等被不同程度溶解而形成的孔洞。包括凝灰基质溶蚀孔(图3g, h)、晶膜孔(图3f)和晶间溶蚀孔(图3i)。

(2) 砾内溶蚀孔:火山角砾岩中,砾内长石晶体(斑晶、晶屑)被溶蚀产生的孔隙(图3j)。

2.2.3 裂缝

包括未充填裂缝、半充填裂缝、充填残余裂缝、充填—溶蚀裂缝。

从成因角度,裂缝还可进一步分为构造缝、溶蚀缝和风化缝等类型,但由于研究区后期成岩作用改造强烈,根据现有资料已无法区分溶蚀缝、风化缝和构造缝,因此统称为裂缝。

(1) 未充填裂缝:火成岩成岩后受构造应力、溶

蚀等作用产生的未被矿物充填的裂缝(图3k, n, o)。

(2) 半充填和充填残余裂缝:裂缝被后期矿物不完全充填而留下的孔隙(图3l)。

(3) 充填—溶蚀裂缝:被充填裂缝,后期遭溶蚀重新开启成为有效储集空间(图3m)^[10-11]。

通过观察对比,研究区不同井区火山岩储层储集空间类型存在显著差异,主要表现为:QHD30A-1井火山岩储层原生气孔和裂缝的充填作用明显强于B6井,前者气孔类型以半充填气孔为主,裂缝型储集空间以半充填裂缝、充填残余裂缝和充填—溶蚀裂缝为主,而B6井气孔和裂缝后期充填作用较弱,气孔以未充填气孔为主,裂缝主要为未充填裂缝和半充填裂缝。另外,B6井火山岩储层除和前者一样发育大量气孔和基质内溶蚀孔外,还发育部分原生砾间孔、砾内孔和次生砾内溶蚀孔。储集空间类型的差异与火山岩储层复杂的成岩演化过程有关。

2.3 火山岩储层演化期次

2.3.1 原生气孔充填期次

秦皇岛30A地区潜山内幕火山岩储层早期发育大量原生气孔,后期被不同程度充填。根据气孔充填

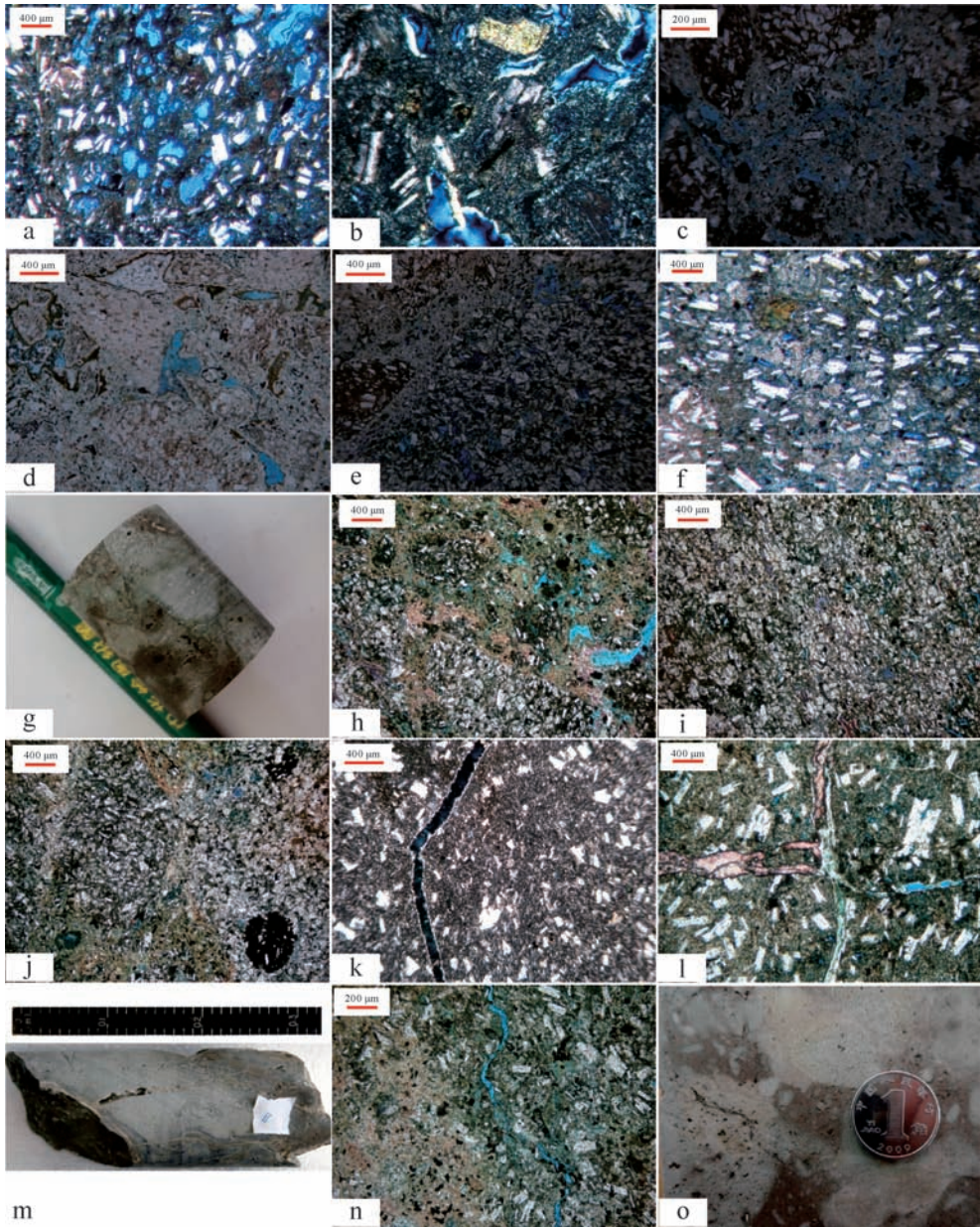


图3 潜山内幕火山岩储层储集空间类型

a. QHD30A-1井, 3 391.1 m, 原生气孔, 单偏; b. QHD30A-1井, 3 391.7 m, 气孔被绿泥石半充填, 正交, $\times 100$; c. B6井, 3 464.9 m, 原生气孔, 单偏; d. B6井, 3 465.0 m, 砾间孔, 单偏; e. B6井, 3 465.0 m, 砾内孔, 单偏; f. QHD30A-1井, 3 392.2 m, 晶膜孔, 单偏; g. QHD30A-1井, 岩芯, 3 392.2 m, 基质溶蚀孔; h. B6井, 3 464.68 m, 凝灰基质溶蚀孔, 单偏; i. B6井, 3 464.75 m, 晶间溶蚀孔, 单偏; j. B6井, 3 464.4 m, 砾内溶蚀孔, 单偏; k. QHD30A-1井, 3 376.2 m, 硅质半充填裂缝, 正交; l. QHD30A-1井, 3 376 m, 裂缝被绿泥石和方解石充填, 充填残余裂缝, 单偏; m. QHD30A-1井, 岩芯, 3 376.8 m, 充填裂缝后期被溶蚀, 充填—溶蚀裂缝; n. B6井, 3 464.4 m, 未充填裂缝, 单偏; o. B6井, 岩芯, 3 411.46 m, 未充填裂缝。

Fig.3 Core and photomicrographs of buried-hill inner volcanic reservoir spaces

矿物序列和成因, 将气孔充填过程分为两个阶段: 早期充填和晚期充填。

(1) 早期充填

早期充填发生于同生成岩阶段, 主要受岩浆期后热液作用影响, 表现为原生气孔被沸石、绿泥石等中低温热液矿物充填形成杏仁体或残余气孔^[12-14]。

该阶段, 岩浆喷出地表以后, 一方面, 各类矿物自岩浆及挥发份中结晶; 另一方面, 火山活动后期或者间歇期, 由火山活动提供的含有大量 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 等离子的碱性热液流体反复淋滤火山岩体并沿着地层中断裂破碎带或者裂缝运移, 进入原生气孔。随着温度、压力、矿物浓度等条件发生

变化,尤其是随着温度的降低,热液流体在火山岩储层的气孔中逐渐沉淀、结晶、充填,在气孔等原生孔隙中逐渐生成绿泥石、沸石等矿物集合体(图4)^[15-19]。

气孔的早期充填过程具有明显的多期次性。在岩浆后期热液的冷凝过程中,随着温度的降低,结晶温度高的富含铁、镁的绿泥石最先结晶出来,在气孔壁上形成衬边,随后结晶温度继续降低,结晶温度较低的沸石等矿物逐渐结晶析出,充填在气孔和裂缝中。研究区原生气孔完整的充填期次分为四期,由早到晚分别为绿泥石充填、沸石充填、白云石充填和晚期沸石充填(图4a)。但是,并非所有气孔都经历完

整的四期充填,大多数气孔只经历了其中一期或多期充填(图4b,c,d),部分气孔仅沿气孔边缘充填一层绿泥石衬边或皮壳状、针状绿泥石,形成半充填气孔,也有部分气孔被绿泥石多期完全充填形成杏仁体。

(2) 晚期充填

研究区火山岩储层中另一部分气孔充填物主要为方解石等碎屑矿物(图5),说明该类气孔属于后期充填,即本文所述的晚期充填。

晚期充填发生于早埋藏成岩阶段,充填物以钙质方解石为主,局部被硅质充填。该时期,研究区裂缝大量发育,这些裂缝沟通含有CO₂的地表水,CO₂溶

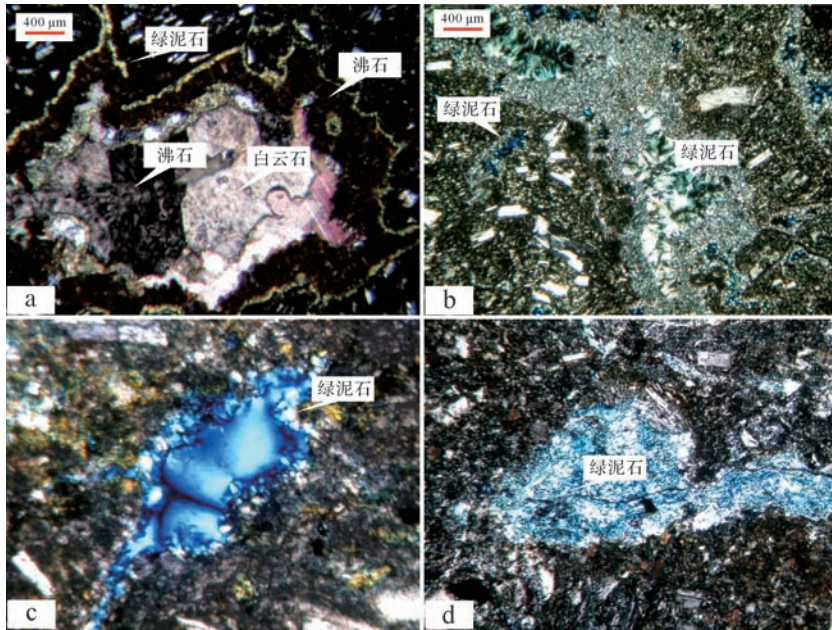


图4 气孔早期充填

a. QHD30A-1井,3 391.5 m,杏仁体,气孔被绿泥石、沸石、白云石和晚期沸石四期充填,正交,×25; b. QHD30A-1井,3 375.7 m,气孔被绿泥石充填一半充填,正交,×25; c. QHD30A-1井,3 389.5 m,气孔边缘被绿泥石充填形成衬边,正交,×100; d. QHD30A-1井,3389.5 m,气孔被绿泥石完全充填形成杏仁体,正交,×100。

Fig.4 Early filling stage of gas pores

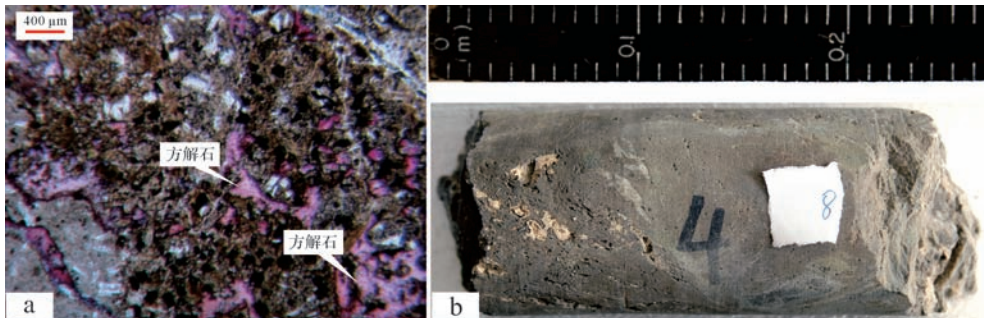
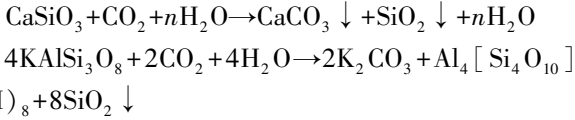


图5 气孔晚期充填

a. QHD30A-1井,3 376.8 m,杏仁体,由气孔被方解石充填形成,单偏,×25; b. QHD30A-1井,岩芯,3 377.5~3 377.8 m,杏仁体,由气孔被钙质充填形成。

Fig.5 Late filling stage of gas pores

于水中形成碳酸,促使地层中硅酸盐和铝硅酸盐矿物被溶蚀,并分解出碳酸钙、二氧化硅等矿物^[20]。其反应过程如下:



当孔隙流体中碳酸钙和二氧化硅含量达到饱和时,逐渐开始沉淀,使同生成岩阶段未被中低温热液矿物充填的气孔在该时期被钙质或硅质充填,形成杏仁体(图6),部分未完全充填的气孔发育残余孔隙。

在气孔充填的过程中,裂缝对促进气孔充填起到了至关重要的作用。构造运动导致研究区断裂和裂缝大量发育,裂缝沟通地表水并促进地表水在地层中循环、渗入气孔,促进了气孔充填。因此,整体上,在断裂发育地区火山岩储层中气孔更容易被充填,而在断裂不发育或远离断裂的地区,气孔充填程度较低^[20]。另外,储层中大量裂缝也在该阶段被硅质和钙质等矿物充填。

2.3.2 裂缝演化期次

秦皇岛30A地区火山岩储层自中生代以来经历多期构造运动,储层裂缝十分发育,不同时期形成的裂缝纵横交错切割,后期受到多期复杂充填。根据裂缝相互切割关系和充填矿物组合特征,将该区潜山内幕火山岩储层裂缝其分为四期,整体上晚期裂缝充填程度弱于早期裂缝(图7)。

2.3.3 成岩演化过程

通过对研究区潜山内幕火山岩储层孔隙(尤其是原生孔隙)和裂缝的发育和演化进行分析,建立了

秦皇岛30A地区潜山内幕火山岩储层成岩演化过程,并进一步明确了在不同的成岩演化阶段,火山岩储层所经历的成岩环境和成岩作用以及对孔隙度的影响(图8)。

秦皇岛30A地区潜山内幕火山岩储层演化过程主要分为3个大的成岩阶段:同生成岩阶段、表生成岩阶段、埋藏成岩阶段。同生成岩阶段火山岩储层主要受火山热液影响,表现为中低温热液矿物对原生气孔和早期裂缝的大量充填,使储层孔隙度降低;在表生成岩阶段,火山岩储层主要受构造作用、风化淋滤作用和溶蚀作用影响,发育各类次生溶孔和裂缝,使储层孔隙度升高,对储层物性具有改善作用;埋藏成岩阶段分为早埋藏成岩阶段和晚埋藏成岩阶段。早埋藏成岩阶段主要以构造作用和埋藏充填作用为主,使部分孔隙和裂缝被充填。晚埋藏成岩阶段主要发生有机酸和地层水等流体对储层的溶蚀,形成各类溶蚀孔缝,使孔隙度增大^[21-26]。三个成岩演化阶段中,同生成岩阶段的火山热液活动对潜山内幕火山岩储层影响最大,是导致储层物性变差的主要原因。大量气孔和裂缝在该时期被中低温热液矿物充填,储层物性变差,虽然后期风化淋滤作用和溶蚀作用对储层物性有所改善,但作用有限。

3 潜山内幕火山岩储层控制因素

3.1 火山岩储层影响因素及差异性

潜山内幕火山岩储层主要受成岩演化过程中各类成岩作用影响,且与一般的风化壳火山岩储层主要受风化淋滤作用控制,储层物性随距离风化壳顶面的

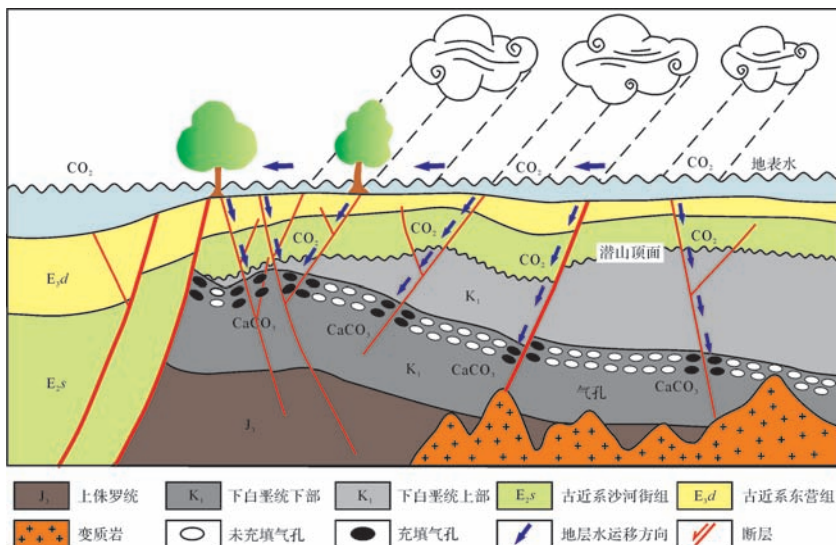


图6 气孔晚期充填模式

Fig.6 Late filling pattern of gas pores

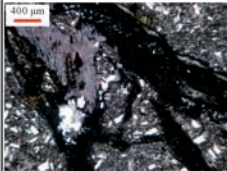
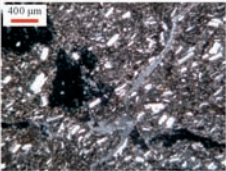
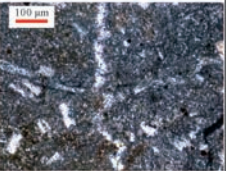
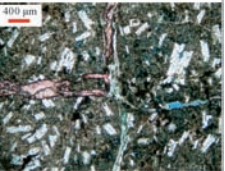
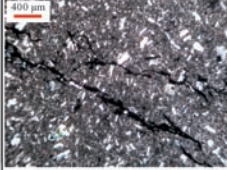
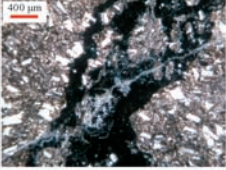

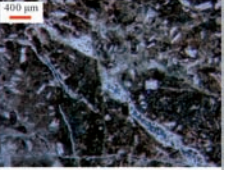
特征	第一期	第二期	第三期	第四期
主要充填物	绿泥石、沸石、黄铁矿、硅质、铁方解石	硅质石英	微晶石英和绿泥石	绿泥石、方解石、白云石
充填程度	完全充填, 充填作用强, 很少见到有效孔隙	大部分被充填, 部分微晶石英经历重结晶, 颗粒变大	充填作用较强, 仅见少量未完全充填的残余裂缝	充填、半充填裂缝
裂缝特征	裂缝有明显的溶蚀作用影响, 导致其边缘呈不规则状	充填物单一, 裂缝宽度较小, 切穿第一期裂缝明显	早期石英和晚期绿泥石复合充填, 切穿第二期裂缝	裂缝壁平直, 部分裂缝切穿第三期裂缝, 充填作用较弱, 少数裂缝充填物后期被溶蚀
薄片显微照片	 QHD30A-1:3 376.75 m, 裂缝被绿泥石、硅质、沸石、铁方解石充填, 正交光	 QHD30A-1:3 378.70 m, 早期裂缝被沸石充填, 晚期裂缝窄, 微晶石英充填, 切割早期裂缝, 正交光	 QHD30A-1:3 388.15 m, 早期裂缝被微晶石英充填, 晚期裂缝切割早期裂缝, 被微晶石英和绿泥石充填, 正交光	 QHD30A-1:3 376.00 m, 裂缝被绿泥石和方解石半充填, 见充填残余孔隙, 单偏光
	 QHD30A-1:3 375.00 m, 早期裂缝被黄铁矿充填, 正交光	 QHD30A-1:3 378.70 m, 晚期窄裂缝切割早期裂缝, 正交光	 QHD30A-1:3 387.80 m, 裂缝被早期微晶石英和晚期绿泥石充填, 正交光	 QHD30A-1:3 376.80 m, 裂缝被绿泥石半充填, 单偏光

图 7 秦皇岛 30A 地区火山岩储层裂缝期次

Fig.7 Fracture periods of volcanic reservoir in Qinhuangdao 30A

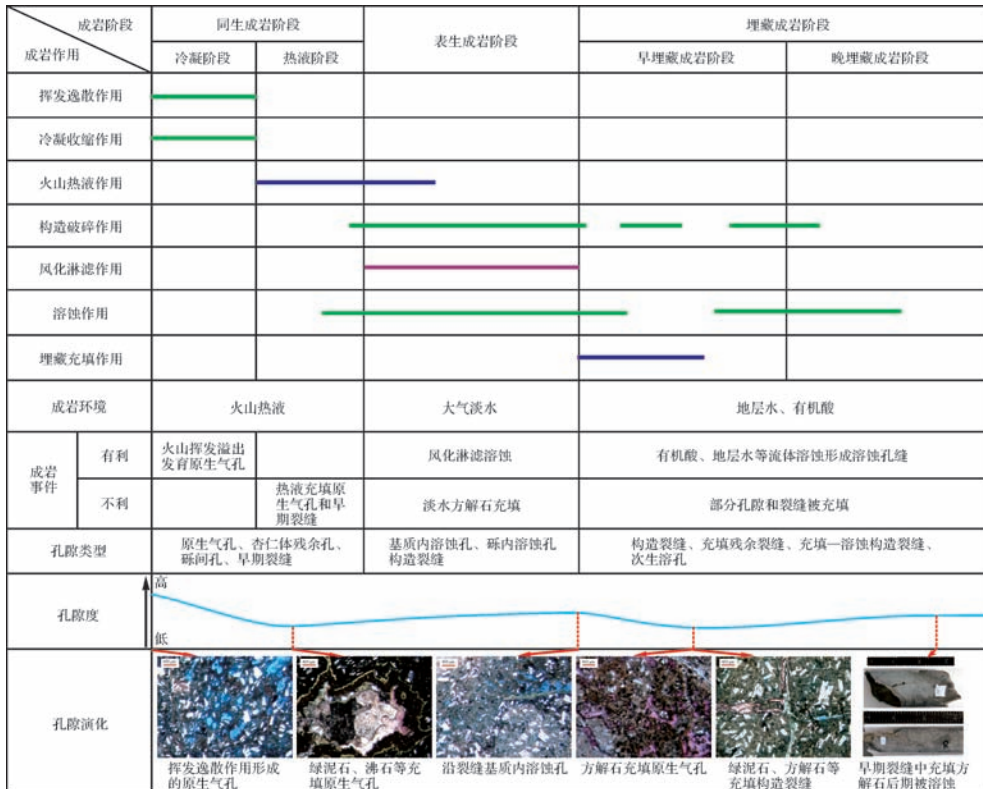


图 8 潜山内幕火山岩储层成岩演化

Fig.8 Diagenetic evolution of buried-hill inner volcanic reservoir

距离增大而逐渐变差不同, 研究区潜山内幕火山岩储层距离风化壳顶面较远(至少在 200~300 m 以上),

而且统计结果表明储层物性与距离风化壳顶面的距离并没有明显的相关性。因此潜山内幕火山岩储层

并不受风化淋滤作用控制,对研究区潜山内幕火山岩储层影响最为明显的成岩作用主要包括三类:溶蚀作用、充填作用和裂缝。

3.1.1 溶蚀作用

溶蚀作用是指岩石中易溶组分在一定的地质条件下被溶蚀或者部分溶蚀,从而产生新的孔隙,或者使原先被充填的孔隙重新开启或扩大,改善储层储集物性,是一种建设性的成岩作用^[27-30]。通过岩芯、薄片观察、扫描电镜分析,整体上 QHD30A-1 井火山岩储层溶蚀作用弱于 B6 井。扫描电镜下, QHD30A-1 井火山岩储层微观颗粒表面大多表现为黏土化,致密胶结,仅个别样品颗粒表面发育少量溶蚀孔隙(图 9a,b)。而 B6 井火山岩储层颗粒表面发育大量溶蚀孔隙,溶蚀作用强于 QHD30A-1 井(图 9c,d)。

3.1.2 充填作用

充填作用对潜山内幕火山岩储层储集空间具有破坏作用。一方面,原生孔隙和次生孔隙后期被矿物充填会使孔隙度降低;另一方面,裂缝的矿物充填对火山岩的储集性破坏性更大,它不仅占据一部分孔隙空间,使孔隙度降低,更重要的是大大降低了储层的渗透性,导致储层储集物性变差。岩芯、薄片观察结

果表明, QHD30A-1 井火山岩储层孔隙和裂缝充填作用都明显强于 B6 井,这是因为 QHD30A-1 井区距离大断裂更近,而该断裂带为研究区岩浆喷发和热液活动的火山通道,因此,在成岩演化过程中, QHD30A-1 井区更容易受到岩浆期后火山热液作用影响,促使气孔等原生孔隙和裂缝被绿泥石、沸石等中低温热液矿物充填。而 B6 井距离大断裂和火山通道较远,受火山热液作用影响较小,因此充填作用较弱(图 10);另外, QHD30A-1 井区由于靠近断裂而发育大量裂缝,也进一步促进了火山热液流体以及含 CO₂ 地表水在地层中流动循环,促使原生气孔和裂缝被热液矿物及淡水方解石等矿物充填。

3.1.3 裂缝

裂缝对潜山内幕火山岩储层改造和油气富集成藏具有建设性和破坏性双重作用。建设性作用表现为:①裂缝促进溶蚀孔隙发育。裂缝的存在构成了火山岩内部流体疏导体系,为早期岩浆热液和晚期酸性流体在储层中进行运移淋滤提供通道,促使淋滤带火山岩遭受早期热液蚀变及晚期酸性流体溶蚀作用,促进储层中易溶矿物溶解,形成溶蚀孔隙。通过对研究区和相邻的 W 油田 B13 井火山岩储层进行观察,发

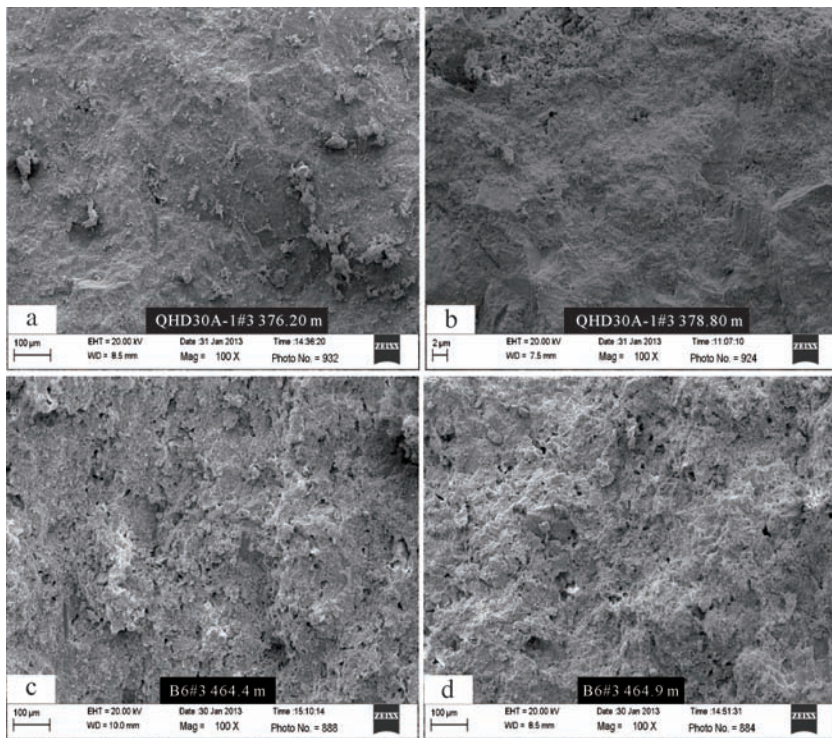


图9 QHD30A-1井和B6井火山岩储层扫描电镜照片

a. QHD30A-1井,3376.2m,安山质火山角砾岩,颗粒表面致密;b. QHD30A-1井,3377.7m,安山质火山角砾岩,颗粒表面较致密;c. B6井,3464.4m,安山质火山角砾岩,颗粒溶蚀产生微孔隙,表面黏土化;d. B6井,3464.9m,安山质火山角砾岩,颗粒表面黏土化,见溶蚀孔隙。

Fig.9 Scanning electron microscope photos of volcanic reservoir from Well QHD30A-1 and B6

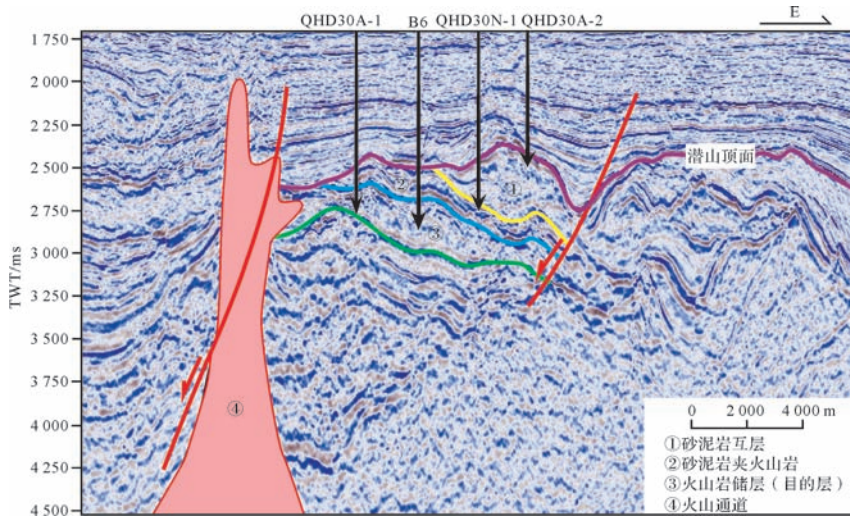


图10 秦皇岛30A地区过井地震剖面(剖面位置见图1)

Fig.10 Through-well seismic section in Qinhuangdao 30A

现其储层中溶蚀孔洞多与裂缝共存,溶蚀孔洞的发育程度受裂缝带所控制,沿裂缝带及其附近溶蚀孔洞及复合型的各种孔隙十分发育(图11)。②裂缝可作为油气储集空间和运移通道。裂缝的发育一方面为火山岩储层贡献了一定的储集空间;另一方面,裂缝通过连通原先孤立的原生孔隙和次生孔隙,为油气在储层中运移提供必要通道^[31]。研究区B6井3462.2~2467.52 m井段安山质火山角砾岩荧光下亮度高,沿裂缝及气孔为褐色沥青质充填,向基质侵染呈褐—黄—绿—兰色色晕,由裂缝向基质发光颜色由深到浅,油质由重到轻,证明研究区火山岩储层中的油气是沿裂缝贯入的,同时也说明裂缝可将原生孔隙串通使其成为有效的油气储集空间。

破坏性作用表现为:裂缝促进储集空间发生充填。在裂缝大量发育的地区,岩浆热液通过裂缝在储

层中运移并反复淋滤储层,促进了原生孔隙和早期裂缝被火山热液矿物充填。另外,在早埋藏成岩阶段,裂缝沟通地表水,促进了气孔和裂缝被淡水方解石、硅质等矿物充填,导致火山岩储层物性变差。

通过对QHD30A-1井和B6井岩石铸体薄片中心裂缝发育情况进行观察统计,两口井钻遇的火山岩储层裂缝发育情况存在明显差异:QHD30A-1井较B6井储层裂缝更为发育,裂缝密度更大,平均每块薄片发育裂缝密度为10.4条/片,而B6井裂缝密度仅为2.4条/片。但是,QHD30A-1井储层裂缝的充填程度却远远强于B6井,其钻遇的火山岩储层中大多数裂缝都被各类矿物充填,其中未充填裂缝密度仅为0.28条/片,占总裂缝数的2.37%,而完全充填的裂缝密度却高达9.29条/片,为B6井的13.9倍,完全充填率高达89.04%,为B6井的3.3倍。与之相比,B6井所

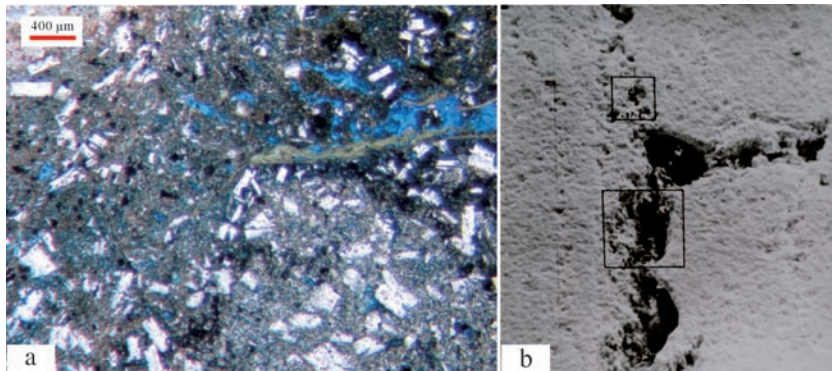


图11 沿裂缝发育的溶蚀孔隙

a. QHD30A-1井,3392.10 m,铸体薄片,安山质火山角砾岩,岩裂缝周围发育的溶蚀孔隙,单偏;b. B13井,2948.19 m,扫描电镜,安山质火山角砾岩,岩裂缝发育的溶蚀孔隙,×100。

Fig.11 Dissolution pores developed along fractures

表1 QHD30A-1井和B6井裂缝发育情况统计

Table1 Statistics of fractures in volcanic reservoir from Well QHD30A-1 and B6

裂缝发育情况	总裂缝密度	未充填裂缝密度	未充填率	半充填裂缝密度	半充填率	完全充填裂缝密度	完全充填率
	(条/片)	(条/片)	/%	(条/片)	/%	(条/片)	/%
QHD30A-1井	10.4	0.28	2.73	0.85	9.59	9.29	89.04
B6井	2.4	1.56	63.64	0.22	9.09	0.67	27.27

井所钻遇的火山岩储层虽然裂缝数量较少,规模较小,但是裂缝充填程度较低,储层中大多数裂缝都未被充填,其中未充填裂缝密度达1.56条/片,为QHD30A-1井的5.6倍,未充填率高达63.64%,为QHD30A-1井的23.3倍,而完全充填裂缝的密度仅为0.67条/片,仅占总裂缝数的27.27%,充填程度远低于QHD30A-1井(表1)。

3.2 潜山内幕火山岩储层主控因素分析

在以上研究基础上,进一步分析潜山内幕火山岩储层影响因素中对研究区火山储层物性和油气产能差异起决定性作用的因素,即影响潜山内幕火山岩储层质量的主控因素。

3.2.1 储层物性分析

通过岩芯取样,对研究区火山岩储层物性进行统计分析。QHD30A-1井火山岩储层平均孔隙度为20.38%,渗透率为 $2.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中,上部3375.7~3377.9m取芯段平均孔隙度为15.77%,渗透率为 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;下部取芯段3386.8~3392.8m,平均孔隙度为23.07%,渗透率 $3.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。B6井3464.2~3467.52m取芯段平均孔隙度为22.87%,渗透率为 $1.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,两口井储层物性差异明显(由于本次统计的是岩芯样品的总孔隙度,个别取自裂缝发育处的样品由于受到裂缝孔隙度的影响,导致该样品总孔隙度值偏高,并导致所有样品的平均孔隙度升高,且高于真实的基质孔隙度)。

整体上,QHD30A-1井区与B6井区储层孔隙度差别不大,虽然QHD30A-1井平均渗透率高于B6井,但是通过对前者岩芯样品的渗透率进行统计表明,QHD30A-1井所有测试样品中,渗透率低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占总样品数47.37%,且渗透率值变化范围极大,最小值为 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值为 $20.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,非均质性很强,测试结果也证明其为低渗差储层;而B6井的渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占样品总数的66.67%,且变化范围较小,均质性较好(图12)。根据赵澄林制定的辽河盆地火山岩储层分类标准(表2)^[10],QHD30A-1井和B6井火山岩储层分别属于高孔—低渗储层和高孔—中渗储层,即二者

孔隙度都较高,孔隙度并非影响该区火山岩储层油气产能差异主要因素,渗透率的巨大差异才是导致研究区火山岩储层物性和油气产能巨大差异的根本原因。而火山岩储层渗透性主要受作为油气运移主要通道的裂缝控制,即裂缝发育情况差异是导致研究区储层物性差异的根本原因。但需要注意的是,并非储层裂缝越发育储层质量就一定越好,因为所有裂缝中只有未充填的开启有效裂缝才能够为油气提供运移通道,是决定储层渗透性好坏的关键因素。并且只有裂缝发育期与该地区油气运移期相匹配,形成于油气大规模运移之前的未充填裂缝才对火山岩油气成藏起到促进作用,而形成于油气大规模运移结束之后的未充填裂缝往往作为油气溢散的主要通道,对油藏具有严重的破坏作用^[23]。

在研究区,虽然QHD30A-1井区火山岩储层裂缝更为发育,密度更大,但充填率较高(89.04%),绝大多数裂缝被后期充填,成为无效裂缝,储层渗透性较差;而B6井区火山岩储层虽然裂缝总数较少,密度较小,但裂缝充填率较低(27.27%),裂缝有效性和储层渗透性较好(表1),其岩芯裂缝中可以观察到明显的油气显示,而QHD30A-1井岩芯裂缝中却很少见到油气显示。因此,综合分析表明,未充填有效裂缝是

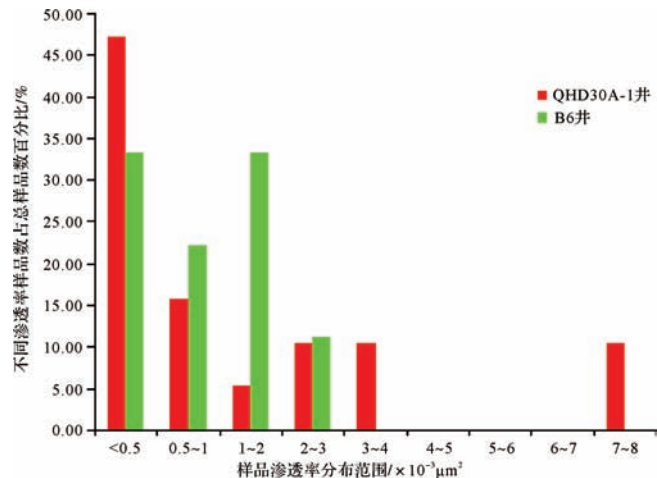


图12 秦皇岛30A地区火山岩储层岩芯渗透率统计分析

Fig.12 Core permeability statistics and analysis of volcanic reservoir in Qinhuangdao 30A

表2 辽河盆地火山岩储层分类评价标准(据赵澄林,1999)

Table 2 Classification and evaluation criterion of volcanic reservoir in Liaohe Basin

分类	孔隙度/%	评价	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	评价
1	>15	高孔隙度	>5	较高渗
2	10~15	较高孔隙度	1~5	中渗
3	5~10	中孔隙度	0.1~1	低渗
4	<5	低孔隙度	<0.1	特低渗

控制秦皇岛30A地区潜山内幕火山岩储层物性和油气产能的关键因素。

3.2.2 有效裂缝发育控制因素

研究表明,研究区潜山内幕火山岩储层中有效裂缝的发育主要受3个因素控制:

(1) 裂缝发育的部位

裂缝大量分布于靠近大断裂一定范围内^[6,32],但如果沿大断裂发育火山通道且裂缝带过于靠近火山通道,则裂缝带容易受火山热液作用影响,裂缝更容易被热液矿物充填,成为无效裂缝,如QHD30A-1井区;而距主断裂一定范围内,并距火山通道较远的部位是有效裂缝发育的主要地区,如B6井区。

(2) 裂缝形成的期次

通过观察发现,早期裂缝在漫长的成岩演化过程中多数被各类矿物充填,变成无效裂缝,而晚期形成

的裂缝则充填程度较低,未充填或半充填有效裂缝大量发育(图6)。尤其是形成期与研究区油气成熟期相近或者发育在油气成熟期之后的晚期裂缝,在其形成过程中或形成以后很快被油气占据,从而抑制了矿物对这些裂缝的充填,因此充填作用往往较弱。而形成于油气成熟期或者发育在油气成熟期之后且在油气大规模运移之前的晚期裂缝打通了烃源岩与储层之间的通道,极大的促进了火山岩油气的运聚和成藏。

(3) 裂缝宽度大小

火山岩储层裂缝的充填程度和有效性还与裂缝宽度大小密切相关。通过对岩石薄片中的裂缝宽度大小和充填程度进行测量和统计表明,宽度较小的裂缝充填程度远低于宽度较大的裂缝,有效性更好,对油气在火山岩储层中运移富集起到重要作用。B6井主要含油层段安山质火山角砾岩储层中,宽度大于0.05 mm的裂缝大多数被硅质、绿泥石等矿物充填(图13a,b),而裂缝宽度小于0.05 mm的微裂缝则未被充填或被矿物断续充填(图13c,d),且沿这些裂缝有少量原油外溢,基质普遍为油质侵染,说明这些未充填微裂缝为有效裂缝。

通过与其他油田火山岩油藏进行对比,发现在渤海海域以及我国西部地区火山岩油气藏储层存在相

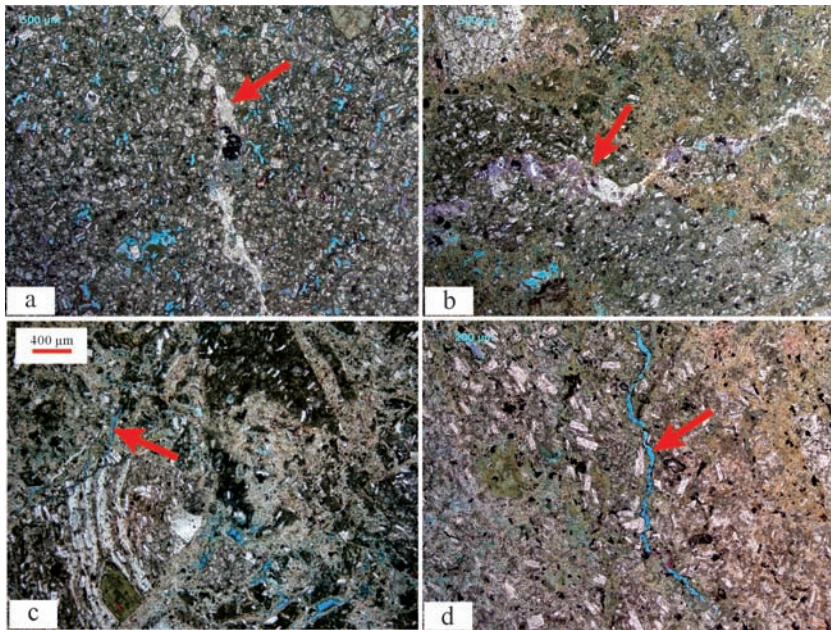


图13 B6井火山岩储层不同大小裂缝充填程度

a. B6井,3 464.63 m,铸体薄片,安山质火山角砾岩,裂缝宽度0.12~0.28 mm,硅质充填,单偏;B6井,b. 3 464.68 m,铸体薄片,安山质火山角砾岩,裂缝宽度0.2~0.28 mm,硅质和方解石充填,单偏;c. B6井,3 411.56 m,铸体薄片,安山质火山角砾岩,裂缝宽度0.04 mm,未充填微裂缝,单偏;d. B6井,3 464.40 m,铸体薄片,安山质火山角砾岩,裂缝宽度0.04 mm,未充填微裂缝,单偏。

Fig.13 Filling degree of different sized fractures in volcanic reservoir of Well B6

同规律。例如,渤海海域 W 油田 B13 井中生界安山质火山角砾岩储层中裂缝大量发育,且一般宽度大于 0.3 mm 者多被方解石、硅质充填或半充填,小于 0.3 mm 者一般无充填,岩芯表面见褐色原油,水洗后,沿未充填裂缝及孔洞见原油外溢,说明未充填裂缝为有效裂缝。另外,陈淦等^[33]通过对克拉玛依油田一区玄武岩油藏裂缝进行分析,发现 0.01~0.02 mm 未充填微裂缝对该地区火山岩储层油气渗滤具有重要作用^[33]。

为进一步证实未充填微裂缝可作为油气运移通道的可能性,根据毛管压力曲线对研究区 B6 井火山岩储层孔隙分布情况进行分析(图 14)。B6 井毛管压力曲线大体上可分为两部分,第一部分为陡斜率曲线段,第二部分为大曲率曲线段。第一部分陡斜率段,压力由 0.014 MPa 起约至 1.7~2.7 MPa,在此曲线段内,火山岩油层的孔隙体积只占总孔隙体积的 2%~15%,孔隙半径大于 0.4~0.25 μm 的是溶蚀—构造裂缝;第二部分约为 45 度曲线段,压力由 1.7~2.7 MPa 起至 25 MPa,火山岩油层孔隙体积占总孔隙体积的 50%~70%,孔喉半径小于 0.4~0.25 μm ,为孔隙喉道连通的微细孔缝。通过以上分析,研究区火山岩储层毛管压力曲线属于分选差、细歪度的类型,储层油气运移通道以微孔缝为主,证明未充填微裂缝可作为油气重要的渗滤通道。

3.3 潜山内幕火山岩储层发育模式

综合以上研究,未充填有效裂缝发育程度是影响研究区潜山内幕火山岩储层物性和油气产能差异的主控因素。火山岩储层所处的构造部位、储层裂缝的形成期次和裂缝宽度大小三个因素共同控制了有效裂缝的发育。裂缝大量分布于靠近大断裂一定范围内,距离火山通道较远、裂缝形成期次较晚(特别是形成期与烃源岩生油期相近或者在其之后,且在油气大规模运移之前的裂缝)、宽度较小的地区裂缝充填作用较弱,是有效裂缝和优质储层发育的有利地区。

QHD30A-1 井区位于距离边界大断裂和火山通道更近的构造高部位,B6 井区位于距离边界大断裂和火山通道较远的构造斜坡带。由于构造高部位较斜坡带更靠近边界大断裂,因此储层中裂缝更为发育,裂缝密度较斜坡带更大。但是由于构造高部位更靠近火山通道,因此裂缝和原生孔隙更容易受火山热液作用影响而被各类矿物充填,储层物性变差,不利于油气富集;而斜坡带虽然距离大断裂较远,裂缝密度和规模较小,但是由于远离火山通道,因此储层受

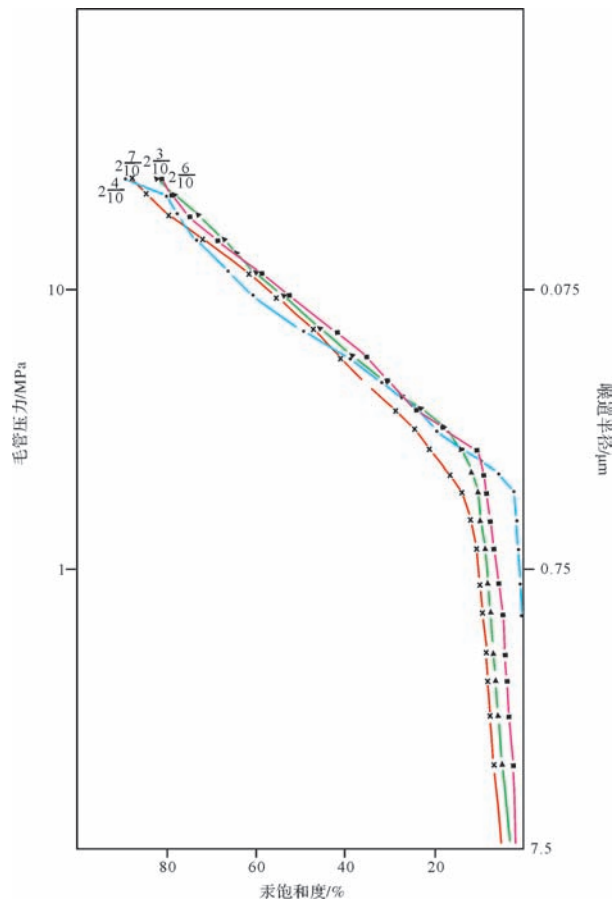


图 14 B6 井火山岩储层毛管压力曲线

Fig.14 Capillary pressure curve of volcanic reservoir of Well B6

火山热液作用影响较小,裂缝充填作用较弱,且可与油气成熟和运聚时间有效匹配,储层质量较好,较构造高部位更有利于油气富集成藏(图 15),可作为下一步潜山内幕火山岩油气勘探的重点。

4 结论

(1) 秦皇岛 30A 地区白垩系潜山内幕火山岩储层岩性以爆发相安山质火山岩角砾岩为主。储集空间类型按成因分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 大类和 9 亚类,整体属于裂缝—孔隙复合型储层。

(2) 火山岩储层中原生气孔经历早期和晚期两个阶段充填。早期充填发生于同生成岩阶段,受岩浆期后热液作用影响,气孔被沸石、绿泥石、白云石等中低温热液矿物四期充填。晚期充填发生于早埋藏成岩阶段,气孔被方解石等矿物单一充填。根据裂缝相互切割关系和充填矿物组合特征,将储层裂缝分为四期,晚期裂缝充填程度弱于早期裂缝。

(3) 潜山内幕火山岩储层成岩演化经历同生成

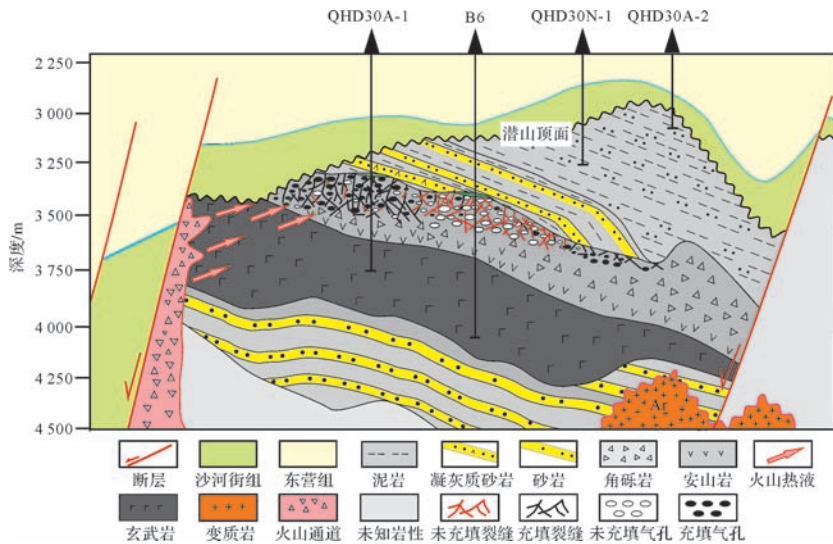


图15 秦皇岛30A地区潜山内幕火山岩储层发育模式

Fig.15 Reservoir development model of buried-hill inner volcanic rocks in Qinhuangdao 30A area

岩阶段、表生成岩阶段、埋藏成岩阶段3个阶段。其中,同生成岩阶段火山热液作用对储层影响最大,是导致大量孔缝被充填和储层物性变差的主要原因。后期表生成岩阶段风化淋滤作用和埋藏成岩阶段溶蚀作用对储层物性进行了一定改善,但作用有限。

(4) 未充填有效裂缝发育程度是影响潜山内幕火山岩储层物性和产能巨大差异的主控因素。构造部位、裂缝形成期次及宽度大小三个因素共同控制了有效裂缝发育。裂缝大量分布于靠近大断裂一定范围内,距离火山通道较远、裂缝形成期次较晚且形成期与油气成熟期和油气运聚期相匹配、裂缝宽度较小的地区裂缝充填作用较弱,是有效裂缝和优质储层发育的优势地区,更有利于油气大规模成藏,可作为下一步潜山内幕火山岩油气勘探的重点。

参考文献 (References)

[1] Hunter B E, Davies D K. Distribution of volcanic sediments in the Gulf coastal province-significance to petroleum geology [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1979, 29: 147-155.

[2] Hawlander H M. Diagenesis and reservoir potential of volcanogenic sandstones-Cretaceous of the Surat Basin, Australia [J]. Sedimentary Geology, 1990, 66(3/4): 181-195.

[3] Mark E M, John G M. Volcaniclastic deposits: implications for hydrocarbon exploration [M]//Richard V, Fisher, Smith G A. Sedimentation in Volcanic Settings. Society for Sedimentary Geology, Special Publication, 1991: 20-27.

[4] Petford N, McCaffrey K J W. Hydrocarbons in Crystalline Rocks [M]. London: The Geological Society of London, 2003.

[5] Seemann U, Scherer M. Volcaniclastics as potential hydrocarbon reservoir [J]. Clay Minerals, 1984, 19(3): 457-470.

[6] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.]

[7] 金春爽,乔德武,淡伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 19-29, 36. [Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Dan Weining. Meso-Cenozoic volcanic rock distribution and reservoir characteristics in the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 19-29, 36.]

[8] 刘中云,肖尚斌,姜在兴. 渤海湾盆地第三系火山岩及其成因 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(1): 22-26. [Liu Zhongyun, Xiao Shangbin, Jiang Zaixing. Volcanic rocks of Bohai Bay Basin in Tertiary and their Genesis [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(1): 22-26.]

[9] 朱伟林,米立军,龚再升. 渤海海域油气成藏与勘探 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng. The Hydrocarbon Accumulation and Exploration in Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 2009.]

[10] 赵澄林. 火山岩储层储集空间形成机理及含油气性 [J]. 地质论评, 1996, 42(增刊1): 37-43. [Zhao Chenglin. Formation mechanism of reservoir space and oil possibility of volcanic reservoirs [J]. Geological Review, 1996, 42(Suppl.1): 37-43.]

[11] 杨双玲,刘万洙,于世泉,等. 松辽盆地火山岩储层储集空间特征及其成因 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 506-512. [Yang Shuangling, Liu Wanzhu, Yu Shiquan, et al. Pore textures and its causes of volcanic reservoir in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 506-512.]

- [12] Augustithis S S. Atlas of the Textural Patterns of Basalts and Their Genetic Significance [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub, 1978.
- [13] Neuhoff P S, Fridriksson T, Arnorsson S, et al. Porosity evolution and mineral paragenesis during low-grade metamorphism of basaltic lavas at Teigarhorn, eastern Iceland [J]. American Journal of Science, 1999, 299(6): 467-501.
- [14] Neuhoff P S, Rogers K L, Stannius L S, et al. Regional very low-grade metamorphism of basaltic lavas, Disko-Muussuaq region, West Greenland [J]. Lithos, 2006, 92(1/2): 33-54.
- [15] 孙玉善, 曹自强. 克拉玛依油区沸石类矿物特征及分布规律 [J]. 新疆石油地质, 1991, 12(3): 253-261. [Sun Yushan, Cao Ziqiang. Characteristics and distribution of zeolite group minerals in Karamay oilfields [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1991, 12(3): 253-261.]
- [16] 朱世发, 朱筱敏, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系沸石矿物成岩作用及对油气的意义 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2011, 41(11): 1602-1612. [Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wang Xulong, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China [J]. Science China (Seir.D): Earth Sciences, 2011, 41(11): 1602-1612.]
- [17] 梁浩, 罗权生, 孔宏伟, 等. 三塘湖盆地火山岩中沸石的成因及其储层意义 [J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 537-543. [Liang Hao, Luo Quansheng, Kong Hongwei, et al. Formation and distribution of zeolite in volcanic rock and its effect on reservoirs in Santanhu Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 537-543.]
- [18] 熊益学, 郝爱华, 冉启全, 等. 火山岩原生储集空间成因及其四阶段演化——以准噶尔盆地滴西地区石炭系为例 [J]. 中国地质, 2012, 39(1): 146-155. [Xiong Yixue, Xi Aihua, Ran Qiquan, et al. The formation mechanism and four-stage evolution of volcanic primary reservoir spaces: A case study of Carboniferous volcanic rocks in Dixi area, Junggar Basin [J]. Geology in China, 2012, 39(1): 146-155.]
- [19] 刘万洙, 黄玉龙, 庞彦明, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用: 矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应 [J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 158-164. [Liu Wanzhu, Huang Yulong, Pang Yanming, et al. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation (K_1y) in the Songliao Basin: sequential crystallization, amygdule filling and reservoir effect [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 158-164.]
- [20] 许多年, 潘建国, 蒋春玲, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系火山岩储层气孔充填机理及定量化预测方法 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1746-1751. [Xu Duonian, Pan Jianguo, Jiang Chunling, et al. Pore filling mechanism and quantitative prediction methods of the Permian volcanic reservoir in Wuxia area, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1746-1751.]
- [21] 刘喜顺, 郭建华, 张晓萍. 准噶尔盆地西北缘火山岩岩石学与孔隙特征及演化模式研究 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 525-530. [Liu Xishun, Guo Jianhua, Zhang Xiaoping. Lithology, porosity characteristics and evolution model of volcanic rocks in northwest Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 525-530.]
- [22] 蔡东梅, 孙立东, 齐景顺, 等. 徐家围子断陷火山岩储层特征及演化规律 [J]. 石油学报, 2010, 31(3): 400-407. [Cai Dongmei, Sun Lidong, Qi Jingshun, et al. Reservoir characteristics and evolution of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 400-407.]
- [23] 李伟, 何生, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地西北缘火山岩储层特征及成岩演化特征 [J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 909-916. [Li Wei, He Sheng, Tan Kaijun, et al. Characteristics of reservoir and diagenetic evolution of volcanic rocks in northwestern Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 909-916.]
- [24] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2011, 41(11): 1613-1626. [Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China [J]. Science China (Seir.D): Earth Sciences, 2011, 41(11): 1613-1626.]
- [25] 董雪梅, 查明, 蒋宜勤, 等. 新疆北部石炭系火山岩储层特征、演化及成因模式 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2013, 28(4): 8-16. [Dong Xuemei, Zha Ming, Jiang Yiqin, et al. Characteristics, evolution and genetic modes of Carboniferous volcanic reservoir in northern Xinjiang, China [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2013, 28(4): 8-16.]
- [26] 曲江秀, 高长海, 查明, 等. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层特征及成岩演化 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 1-8. [Qu Jiangxiu, Gao Changhai, Zha Ming, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(5): 1-8.]
- [27] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115-129.
- [28] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1251-1258. [Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1251-1258.]
- [29] 雷海艳, 柳成志, 何仁忠, 等. 马朗凹陷火山岩成岩作用及其对储集层物性的影响 [J]. 新疆石油地质, 2011, 32(5): 480-483. [Lei Haiyan, Liu Chengzhi, He Renzhong, et al. Diagenesis of volcanic rocks and its effects on physical properties of reservoirs of Kalagang Formation in Malang sag of Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(5): 480-483.]
- [30] 刘成林, 杜蕴华, 高嘉玉, 等. 松辽盆地深层火山岩储层成岩作用与孔隙演化 [J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 33-37. [Liu Chenglin, Du Wenhua, Gao Jiayu, et al. Diagenesis and porosity evolution of deep volcanic reservoirs in Songliao Basin [J]. Litholog-

ic Reservoirs, 2008, 20(4): 33-37.]

- [31] 张生银,柳双权,张顺存,等. 准噶尔盆地东地区火山岩风化体储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学,2013,24(6): 1140-1150. [Zhang Shengyin, Liu Shuangquan, Zhang Shuncun, et al. The characteristics and controlling factors of volcanic weathering reservoir in Ludong region, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1140-1150.]
- [32] 侯连华,邹才能,匡立春,等. 准噶尔盆地西北缘克一百断裂带石炭系油气成藏控制因素新认识[J]. 石油学报,2009,30(4):

513-517. [Hou Lianhua, Zou Caineng, Kuang Lichun, et al. Discussion on controlling factors for Carboniferous hydrocarbon accumulation in the Ke-Bai fractured zone of the northwestern margin in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 513-517.]

- [33] 陈淦. 克拉玛依油田一区玄武岩油藏裂缝分析[J]. 新疆石油地质,1993,14(1):48-57. [Chen Gan. Analysis of the basalt reservoir fractures in district No. 1, Karamay oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1993, 14(1): 48-57.]

Characteristics and Controlling Factors of Buried-hill Inner Volcanic Reservoir: An example from the Cretaceous in Qinhuangdao 30A Area, Offshore Bohai Sea, China

GUO Ying, WANG YueChuan, WEI AJuan, WU HaoMing, YE Tao, GAO KunShun, ZENG JinChang
China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Limited Tianjin, Tianjin 300452, China

Abstract: Focusing on the complex characteristics and controlling factors of buried-hill inner volcanic reservoir, this paper takes the Cretaceous volcanic rocks in Qinhuangdao 30A area of Bohai Sea for example. The space type, filling stage, diagenetic evolution and controlling factors of buried-hill inner volcanic reservoirs were studied based on core observation, thin section identification and scanning electron microscope analysis. The lithology of volcanic reservoirs in the study area is mainly explosive facies andesitic volcanic breccia. The reservoir space can be classified as primary pore, secondary pore and fissure. As main primary pores, the gas pores experienced early filling stage and late filling stage, leading to primary pores being sharply reduced. According to the filling minerals and interaction cutting relation, the fractures are categorized as four periods while the late fractures were more weakly filled than early ones. The reservoirs experienced three diagenetic stages: syndiagenetic stage, epidiagenetic stage and burial diagenetic stage. The volcanic hydrothermal activity during syndiagenetic stage influenced the reservoirs most and is the primary cause for the reservoir physical properties becoming worse, while the weathering and leaching in epidiagenetic stage and the dissolution in burial diagenetic stage improved the reservoir physical properties to a limited extent. The development of unfilled effective fractures in reservoir is the main controlling factor, resulting in the differences of volcanic reservoir physical properties and oil-gas production capacity in the study area. The structurally high part close to volcanic conduit contains more fractures than slope zone, but the fractures were more affected by hydrothermal activity and filled by minerals, leading to less effective fractures, poorer reservoir permeability and much lower oil-gas production capacity than that in slope zone. Structure position, formation period and size of fractures controlled the development of effective fractures. The fractures are mostly distributed within a certain range nearby major faults and those developed in area far away from volcanic conduit and formed late with small width were less filled and are effective fractures. The area with those fractures developed is the favorable region of high-quality reservoirs and target for oil-gas exploration.

Key words: Bohai Sea; Qinhuangdao 30A area; buried-hill; volcanic rock; reservoir characteristics; controlling factors