

文章编号:0253-9985(2011)05-0710-08

JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测

黄保纲,汪利兵,赵春明,杨庆红,曹树春,童凯军,宋洪亮

[中国海洋石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300452]

摘要:依据岩石化学指标和微观特征,JZS 潜山纵向上自上而下化学风化程度相应地可划分为风化、半风化和未风化3个级别。以岩心观察、岩石薄片鉴定和成像测井等资料为基础,结合生产测井资料,认为JZS 潜山由表及里也可分为风化壳、半风化壳和基岩3个带,与化学风化级别相对应;潜山储层储集空间主要为半风化壳的构造缝及风化壳的溶蚀缝;裂缝储层发育受岩性、构造运动及风化溶蚀作用等因素综合控制,主控因素是构造运动。按断裂期次及倾角大小,JZS 潜山构造缝可划分为4类,即早期半充填-充填水平缝、早期半充填-充填垂直缝、晚期半充填碎裂缝和晚期开启倾斜缝。应用原油包裹体检测技术确定JZS 潜山主要有效裂缝为晚期开启倾斜缝和半充填碎裂缝。通过岩心和成像测井资料标定,建立了JZS 潜山常规测井资料识别有效裂缝的标准并重构有效裂缝识别曲线。利用重构曲线,进行裂缝储层反演及分布预测。该方法预测结果与其他地球物理方法预测结果吻合较好,为开发井部署提供了地质依据。

关键词:裂缝储层;形成机制;储层预测;变质岩潜山;太古宇;辽西低凸起;渤海海域

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield

Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, Yang Qinghong, Cao Shuchun, Tong Kaijun and Song Hongliang

(CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China)

Abstract: According to litho-chemical index and microscopic features, the buried hill in JZS oilfield can be divided vertically from top to bottom into three zones with different levels of chemical weathering: weathered, semi-weathered and un-weathered zones. Similarly, based on core observation, thin section analysis and image logging and in combination with production logging data, it also can be divided into three zones from surface to core: weathered crust, semi-weathered crust and basement, corresponding to the three chemical weathering levels respectively. The reservoir space of buried hill is dominated by structural fractures in semi-weathered crust and the solution fractures in weathered crust. The development of fracture reservoir is controlled by multiple factors such as lithology, tectonic movement, weathering and dissolution, of which tectonic movement is the main controlling factor. According to the timing of faults and their dip angle, the structural fractures of buried hill in JZS can be grouped into four types: early semi-filled/filled horizontal fracture, early semi-filled/filled vertical fracture, late semi-filled cataclastic fracture and late open slant fracture. By using crude oil inclusion detection technique, we recognized that the main effective fracture types of the buried hill in JZS are late semi-filled cataclastic fracture and late open slant fracture. We also established criteria for identifying effective fractures with conventional logging data calibrated by core and image logging data and restructured a new effective structure identification curve for fractured reservoir inversion and distribution prediction. Application shows that the prediction results of this method correlate well with that of other geophysical methods. This method provides the necessary geological basis for development well emplacement.

收稿日期:2011-02-03。

第一作者简介:黄保纲(1972—),男,高级工程师,开发地质。

Key words: fractured reservoir, formation mechanism, reservoir prediction, metamorphic rock buried hill, Archean, Liaoxi low uplift, Bohai Sea

JZS 油田位于渤海辽东湾海域辽西低凸起中段,与辽西凹陷和辽中凹陷毗邻。油田发育新生界古近系沙河街组和太古宇两套含油气层系。油田西侧边界为辽西 1 号断层,东侧沙河街组向辽中凹陷下倾。辽西 2 号断层将油田分为东、西两个高带(图 1)。太古界变质岩潜山油藏已钻预探井及评价井 7 口,单井油层厚度大、测试产能高。

1 储层特征

1.1 岩性特征

依据岩心观察和薄片鉴定,JZS 油田太古界潜山基底岩性较单一,为一套混合岩化的花岗片麻岩。花岗片麻岩中石英和斜长石含量占 40% ~ 70%,暗色矿物含量多小于 30%^[1]。石英和斜长石属脆性粒状矿物,在构造应力下易产生裂缝。将岩石薄片镜下鉴定见碎裂结构者,定名为碎裂岩。按照所含长石的种类及其相对含量,片麻岩可再细分为钾长片麻岩、斜长片麻岩和二长片麻岩^[2]。JZS 潜山片麻岩以斜长片麻岩和二长片麻岩为主。

1.2 储集空间类型及特征

变质岩中几乎不存在任何原生孔隙,加上其本身不像灰岩那样易于溶蚀,次生孔洞也不发育。因此,变质岩潜山裂缝发育即代表储层发育,裂缝

发育是形成变质岩潜山油气藏的重要条件。变质岩基质孔、渗性差,变质岩潜山油藏储集性能依赖于断裂作用和风化淋漓溶蚀作用形成的微观裂缝系统,渗流则靠宏观裂缝起作用^[3-8]。通过岩心观察发现,JZS 潜山裂缝发育,包括构造缝和溶蚀缝;多数裂缝倾角较大,为开启缝,充填程度低,缝中含油;沿裂缝及节理发育少量溶孔,大洞穴不发育;宏观缝常切穿岩心,导致岩心破碎、取心收获率低,如 JZS-2 井的平均收获率仅为 23%。上述表明,JZS 潜山储集空间以裂缝为主(图 2)。岩心及成测井(FMI)观测到的裂缝线密度为 4.0 ~ 8.2 条/m。铸体薄片镜下鉴定可见树枝状、网状

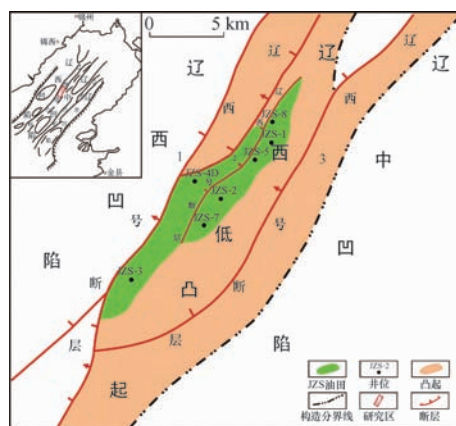


图 1 JZS 油田位置

Fig. 1 Location of JZS oilfield

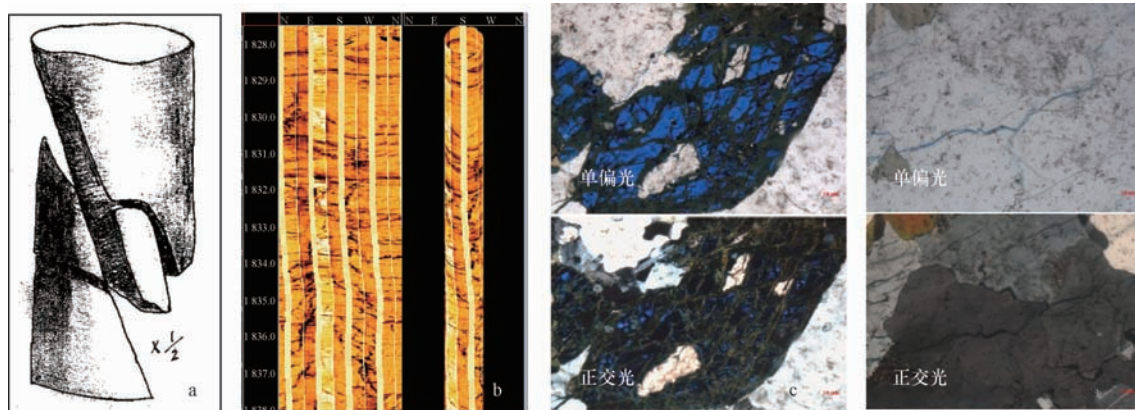


图 2 JZS 潜山储集空间类型及特征

Fig. 2 Reservoir space types and characteristics of the buried hill in JZS oilfield

a. 斜交缝,岩心素描,JZS-5 井,1 303.08 m;b. 裂缝发育,FMI 图片,JZS-1 井,1 830 ~ 1 338 m;

c. 风化壳熔蚀孔,铸体薄片照片,JZS-2 井,1 750.30 m;d. 半风化壳微缝,铸体薄片照片,JZS-2 井,1 865.37 m

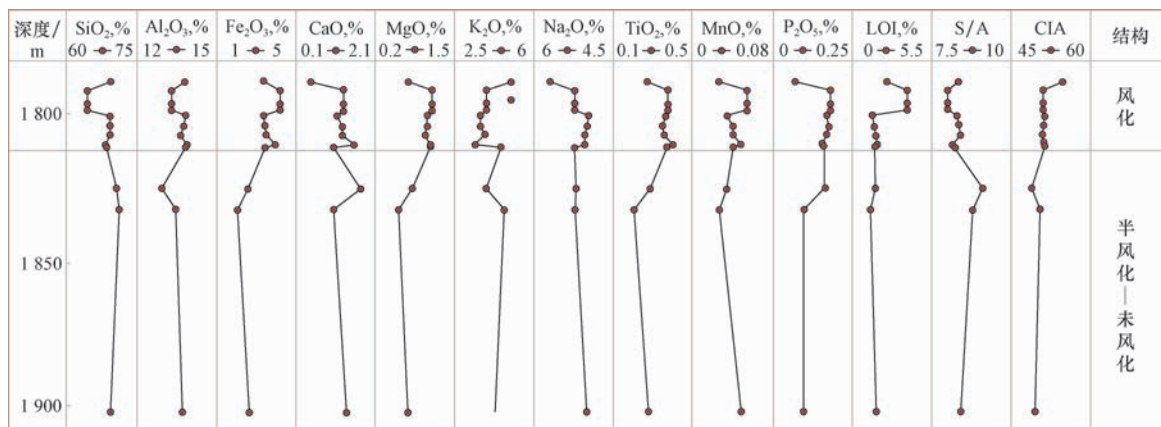


图3 JZS-5井岩石氧化物含量与风化指数剖面

Fig. 3 Oxide content and weathering index profile of well JZS-5

等细微裂缝。据 JZS-2 井 39 块岩心样品镜下统计发现,裂缝共计 129 条,其中全充填有 88 条,占 68.2%;半充填和开启缝有 41 条,占 31.8%,缝宽 0.01 ~ 0.15 mm,平均为 0.025 mm,而缝宽为 0.014 ~ 0.04 mm 的裂缝占 68%。

1.3 岩石化学指标及微观结构特征

与其他岩性潜山类似,变质岩潜山随风化程度不同,其基岩的化学、矿物及微观结构特征会出现相应变化^[9],使利用岩石化学指标及微观结构特征来研究变质岩潜山纵向上风化程度及特征成为可能。通过对 JZS 潜山 3 口井的岩样实验分析结果表明,JZS 潜山风化程度可划分为风化、半风化和未风化 3 个级别(图 3),各级别的化学指标和微观结构特征如下。

风化:石英和钾长石颗粒保持原结构,钾长石和黑云母部分分解,钠长石全部分解。岩石中 Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO 和 P₂O₅ 富集,CaO、Na₂O、K₂O 和 MgO 大量淋失,同时硅铝比值(Si/Al)和化学蚀变指数(CIA)^[10]高,反映化学风化程度较强。

半风化:石英和钾长石基本未变。高岭石沿钠长石周边大量出现,黑云母明显褪色。岩石中 Al₂O₃和 Fe₂O₃富集,CaO、Na₂O、K₂O 和 MgO 淋失,但数量比“风化”级别少。

未风化:基岩的矿物、化学成分和微观结构均未发生明显变化。

1.4 潜山分带性及储层特征

裂缝在垂向上分布具有分带性,因而潜山储层在纵向上也具有分带特征^[7-8]。根据岩石风化程度,

结合生产测井等资料,由表及里可将 JZS 潜山划分为 3 个带:风化壳、半风化壳和基岩,各带特征如下。

风化壳:风化程度高,裂缝发育。可见大量沿节理发育的溶蚀缝,同时充填现象也很明显。薄片镜下可见角闪石、黑云母绿泥石化、碳酸盐化;长石颗粒可见溶孔,呈孤立状;大部分裂缝和溶孔被方解石、绿泥石及铁质充填。储集空间为构造缝、溶蚀缝和少量溶孔。个别井风化壳较发育,如位于潜山山顶的 JZS-2 井,风化壳段储层厚 30 m,产能较高。

半风化壳:风化程度中等,裂缝发育。裂缝为构造缝,且多未被充填。溶蚀现象不明显,沿裂缝边缘仅见少量暗色矿物及长石溶蚀。储集空间以倾斜缝为主。多数井发育,产能高,是 JZS 潜山油藏的主要产层段。

基岩:岩石基本未风化,未见溶蚀现象,裂缝不发育,部分井段 FMI 见水平裂缝,但为无效裂缝,试油为干层。

综上,JZS 潜山裂缝主要发育在风化壳和半风化壳中。风化壳储集空间为构造缝和在构造缝或节理基础上经溶蚀作用形成的缝隙。半风化壳储集空间基本全为构造缝。JZS 潜山裂缝储层在连井剖面上呈“似层状”分布,储层厚度横向变化大、连续性较差。

2 裂缝储层发育的控制因素及裂缝有效性

2.1 裂缝分类

裂缝按成因性质、共轭关系可分为张裂缝和

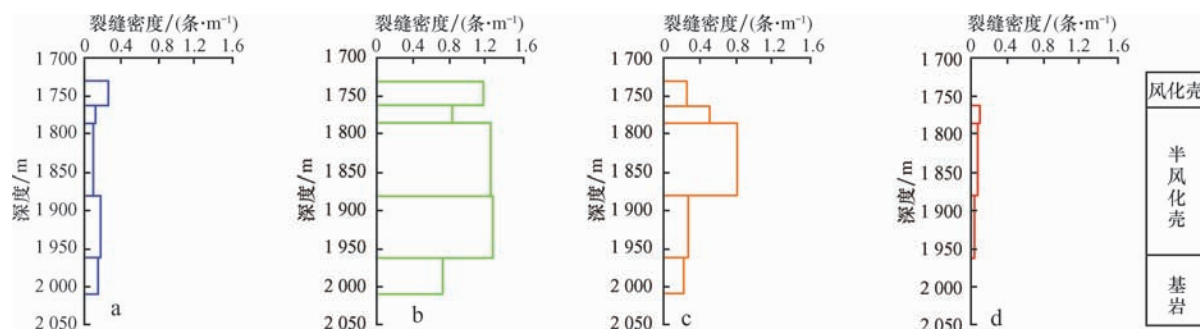


图4 JZS-2井裂缝发育特征

Fig. 4 Fracture development characteristics of well JZS-2

a. 裂缝倾角为 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$; b. 裂缝倾角为 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$; c. 裂缝倾角为 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$; d. 裂缝倾角为 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$

剪裂缝。裂缝分组常依据倾角大小或裂缝与岩心横截面的夹角,倾角小于 15° 为水平缝,大于 75° 为垂直缝, $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 称低角度倾斜缝, $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 为高角度倾斜缝。根据裂缝之间的切割关系、裂缝面平整度及缝内充填信息可判断裂缝形成时期的相对早晚。晚期裂缝多具张性或张扭性特征,常切割或穿过早期缝,充填程度轻,是油气主要储集场所^[11-13]。

通过对 JZS 潜山岩心观察结果表明,绝大部分裂缝切穿岩心,裂缝延伸长度较长、切层深度较深,断面光滑,因此主体应为剪裂缝。按裂缝相互切割关系、充填程度和倾角大小将其划分为 4 类即早期半充填-充填水平缝、早期半充填-充填垂直缝、晚期半充填碎裂缝和晚期开启倾斜缝。由于海上油田岩心少,因而无法描述整个井段的裂缝发育特征,但成像测井资料弥补了此项不足。JZS 潜山 7 口井的成像测井裂缝解释结果统计表明:半风化壳裂缝最发育,其次是风化壳;80% 以上的裂缝为倾斜缝(图 4)。

2.2 裂缝储层发育的控制因素

影响变质岩潜山裂缝储层形成和发育的因素有岩性、古地貌、埋深、风化作用、潜水和构造运动等,其中,岩性和构造活动特别是断裂作用是主要因素。在变质岩中,随着浅色矿物增加,岩石脆性增大,裂缝发育程度增强,储集性能变好。断裂与裂缝从成因上是不可分的,这已被大量野外露头研究所证实。裂缝系统主要是在构造运动和应力场作用下形成,受应力场控制。断裂性质控制裂缝的性质及发育方位,断裂分布密度控制裂缝的发育程度。太古宇变质岩潜山由于受印支、燕山和喜马拉雅等多期强烈构造运动和长期风化剥蚀

的影响,形成潜山顶面风化壳及内幕层中以裂缝发育为主、溶蚀为辅的良好储集空间。在断层附近因受断层两盘相对运动所产生的应力作用的影响,碎裂缝发育,储集性能好^[1,3-8,11-15]。

通过分析变质岩裂缝储层特征认为,JZS 潜山裂缝储层发育受岩性、构造运动及风化作用等因素综合控制,主控因素是构造运动。首先,花岗片麻岩易于形成裂缝,是 JZS 潜山裂缝形成的一个重要内在因素,但基岩岩性较单一,因此不是主控因素。其次,风化作用包括溶蚀和充填,仅能局部和部分地改造储层。区域上,JZS 潜山太古宇基底经历了裂陷、拉张和挤压等长期地质动力作用,构造运动频繁,断裂活动期次多。依据成像测井解释结果统计单井的裂缝产状,并将其与 JZS 构造断裂系统进行对比,可见裂缝发育方向与周边断层走向大体一致(图 5),因此认为构造运动特别是断裂作用是 JZS 潜山裂缝储层发育的主控因素。依据活动速率及时代,将 JZS 油田断层划分为四个级别,各级断层发育特征和对潜山裂缝储层发育的控制作用如下。

I 级:为边界断层,切割较深,切穿新生界古近系东营组至太古界,主要活动时期是沙河街组三段沉积时期,其次是沙河街组二段沉积时期。该级别断层控制了 JZS 构造及断裂系统格局。

II 级:主要为分割不同高点的断层,切穿新生界古近系沙河街组至太古宇,活动时期是沙河街组三段沉积时期至沙河街组一段沉积时期。该级断层对潜山裂缝形成起重要作用。

III 级:切穿新生界古近系沙河街组三段至太古宇,此级断层很少。

IV 级:多为 NE 向和 NNW 向正断层,仅切穿

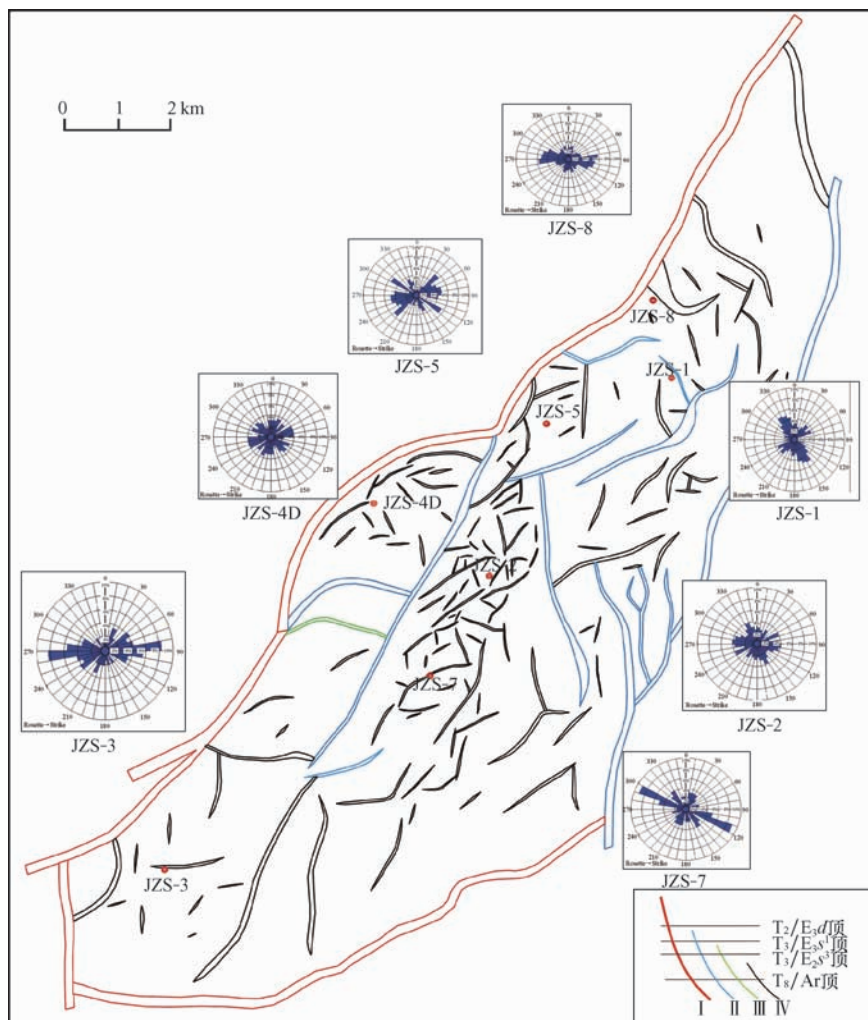


图 5 JZS 潜山裂缝产状与断裂系统对照

Fig. 5 Correlation of fracture occurrence with fault system of the buried hill in JZS oilfield

太古宇潜山顶面。形成于沙河街组三段沉积时期,之后即不再活动。断层延伸数百米,断距为 20 ~ 40 m,该级别断层近似反映了潜山裂缝的发育情况。

根据裂缝产状推断^[7], JZS 潜山裂缝具有与本区断层相同的形成时期,是多期构造运动叠加的结果,以古近纪喜马拉雅期拉张应力场(NW – SE 向伸展)和沿 NE 向右旋走滑应力场作用下形成的为主,燕山期及其之前的构造运动留下的构造变形信息微乎其微。

2.3 裂缝有效性分析

对开发而言,只有那些对渗流有贡献的裂缝即有效裂缝才有意义。原油包裹体检测技术可以检测裂缝的有效性。裂缝中原油包裹体发育程度与裂缝有效性呈正相关性。

共采集 JZS 潜山各类裂缝类型的岩心样品 14 个,对每个样品都进行 25 个视域的检测。检测结果表明(表 1):不同类型的裂缝其包裹体颗粒个数不同,垂直缝为 1.18 ~ 4.8 个/视域,水平缝为 1.88 ~ 2.7 个/视域,开启倾斜缝为 4.6 ~ 7.1 个/视域,碎裂缝为 5.8 ~ 7.1 个/视域。因而 JZS 潜山油藏有效裂缝以晚期形成的开启倾斜缝和半充填碎裂缝为主,其次是半充填垂直缝。

3 裂缝识别及裂缝储层分布预测

利用岩心和成像测井等资料结合地质实验分析对裂缝进行识别、描述和评价的研究方法已较成熟。但海上开发井井斜大,无法取得岩心和成像测井资料,因此尝试用常规测井资料对有效裂缝进行综合评价非常有必要。

表 1 JZS 潜山原油包裹体检测分析结果

Table 1 Analysis results of crude oil inclusion of the buried hill in JZS oilfield

类型	编号	井号	深度/m	岩性	有机包裹体密度/(个·视域 ⁻¹)
垂直缝	1	JZS-2	1 750.40	斜长片麻岩	4.50
	2	JZS-2	1 759.45	二长片麻岩	4.80
	9	JZS-5	1 799.80	斜长片麻岩	1.62
	10	JZS-5	1 803.73	斜长片麻岩	1.18
水平缝	6	JZS-2	1 750.60	斜长片麻岩	1.88
	7	JZS-2	2 020.30	二长片麻岩	2.00
	11	JZS-5	1 807.10	斜长片麻岩	2.68
倾斜缝	13	JZS-2	1 865.30	斜长片麻岩	6.98
	14	JZS-2	1 759.00	二长片麻岩	4.64
	15	JZS-2	1 866.46	斜长片麻岩	4.72
	18	JZS-5	1 799.80	斜长片麻岩	7.16
	12	JZS-5	1 807.10	斜长片麻岩	6.70
碎裂缝	13	JZS-8	1 850.00	黑云斜长碎裂片麻岩	7.10
	14	JZS-2	1 866.85	碎裂片麻岩	5.82

3.1 有效裂缝的常规测井识别

常规测井一般用电阻率、声波、密度或多个岩电参数综合识别和评价裂缝^[6,16-17]。本文将成像测井和岩心资料的裂缝解释结果标定到常规测井资料上,使裂缝信息、地质认识和常规测井响应建立起相关性。经聚类分析,形成 JZS 潜山常规测井资料识别有效裂缝的标准。进而通过重构一条综合考虑了电阻率、密度和声波等对裂缝敏感的拟声波曲线,并归纳出其对有效裂缝的响应标准(表 2),即可依据常规测井资料快速、准确地识别和评价有效裂缝。

3.2 裂缝储层分布预测

变质岩潜山裂缝储层非均质性强,成因复杂,储层预测较困难。基于单一参数的预测方法得到的结果往往存在多解性,因此常使用多种方法进行储层预测^[18-20],互相验证,以提高预测精度。

重构曲线在裂缝发育层段的响应有了明显增强,并且裂缝发育段与致密层段响应差异增大。重构裂缝曲线因综合了多条常规曲线对有效裂

缝的响应,能够准确反映原始曲线所表征的真实地质信息,其区分储层和非储层的敏感性得到加强,从而保证反演结果的可信度,并提高预测精度。基于重构曲线开展属性反演,而反演结果与已钻井吻合程度高。依据反演结果进行多井约束储层预测,预测结果表明:JZS 潜山纵向上风化壳-半风化壳有效裂缝储层发育,平面上主要集中于 JZS-2、JZS-7 井区和 JZS-1、JZS-8 井区(图 6)。

叠前弹性波阻抗反演利用不同偏移距的地震数据和声波及密度等测井资料,联合反演出与储层物性相关的多种参数,综合判别储层物性及含油气性。据 JZS 潜山纵横波速度及阻抗、Lamda 系数、泊松比和剪切模量交汇分析,横波阻抗能有效区分裂缝和非储层。由于裂缝方向和发育程度不同,地震反射在不同方位上会产生较强的各向异性、在不同偏移距上会产生不同的衰减异常。因此用 JZS 潜山钻井、测井和实际地震采集参数设计不同方位角及偏移距叠前地震模型,开展正演模拟,找出对裂缝储层敏感的属性参数。研究认为 JZS 潜山主要裂缝方向与地震采集方向在可检测方位内,地震信息可检测裂缝;当裂缝密度不同时,随偏移距增大,振幅和频率属性差异性越显著,在近偏和远偏表现出不同的异常值,所以可将远偏和近偏的差异值作为检测裂缝发育程度的另一种方法。最后利用叠前弹性参数反演、不同方位角各向异性分析及不同偏移距属性分析技术对 JZS 潜山裂缝储层平面分布进行了预测(图 7)。

表 2 JZS 潜山常规测井曲线识别有效裂缝的标准

Table 2 Criteria for identification of effective fractures with conventional logs of the buried hill in JZS oilfield

裂缝识别参数	有效裂缝	致密层(含垂直缝和水平缝)
lg(Rd)/(Ω·m)	<2.20	≥2.20
AC/(μs·m ⁻¹)	<60.00	≥60.00
DEN/(g·cm ⁻³)	<2.58	≥2.58
Fracture(重构)	<40.00	≥40.00

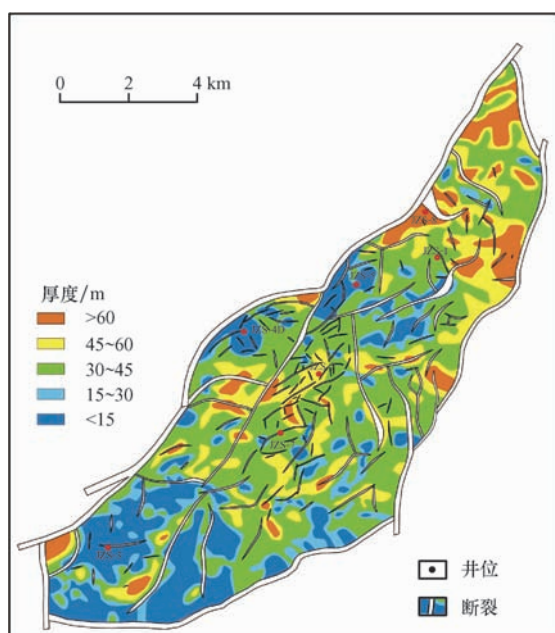


图6 JZS 潜山风化壳-半风化壳有效裂缝储层厚度

Fig. 6 Thickness of the effective fractured reservoir in weathered crust and semi-weathered crust of the buried hill in JZS oilfield

研究发现,重构曲线反演储层预测结果与叠前横波阻抗反演、方位各向异性及远近偏移距属性差异等多项裂缝预测技术预测结果在 JZS 潜山主体区吻合程度较高,已用于指导潜山油藏开发部署,并且开发井均取得较好开采效果。

4 结论

1) JZS 油田变质岩潜山储集空间以裂缝为主,潜山纵向上具有分带特征。根据风化程度,结合生产测井等资料,由表及里将潜山划分为风化壳、半风化壳和基岩 3 个带。裂缝主要发育于半风化壳及风化壳。

2) JZS 潜山储层发育受岩性、构造运动及风化作用等因素综合控制。其中岩性是重要的内在因素,构造运动是主控因素,风化作用是影响因素。

3) JZS 潜山有效裂缝以晚期半充填碎裂缝和晚期开启倾斜缝为主。

4) 基于岩心和成像测井,建立了 JZS 潜山常规测井资料识别有效裂缝的标准。通过重构曲线突出有效裂缝的测井响应,并运用重构曲线开展储层反演,对裂缝储层平面分布进行了预测,预测结果与其他地震方法综合预测的结果相符,有效指导了潜山油藏开发部署。

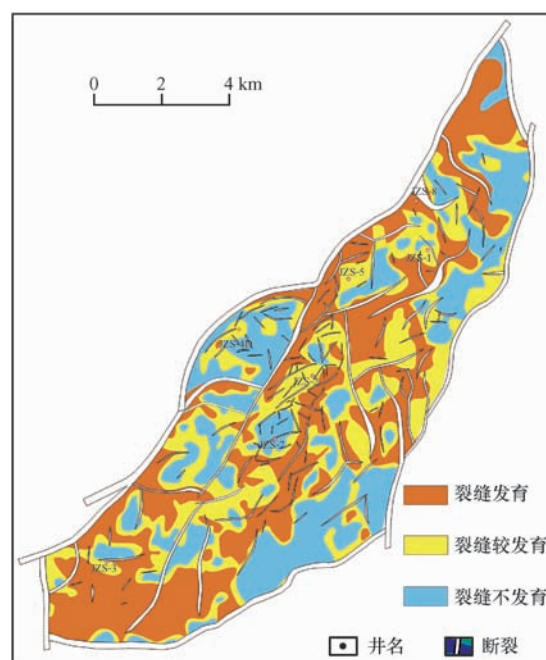


图7 地震方位各向异性预测 JZS 潜山裂缝储层平面分布

Fig. 7 Distribution of the fractured reservoirs predicted by seismic azimuthal anisotropy in JZS buried hill

参 考 文 献

- [1] 周心怀, 项华, 于水, 等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 17-20.
Zhou Xinhui, Xiang Hua, Yu Shui, et al. Reservoir characteristics and development controlling factors of JZS Neo-Archean metamorphic buried hill oil pool in Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 17-20.
- [2] 乐昌硕. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 152-186.
Le Changshuo. Petrology[M]. Beijing: Geological Publish House, 1984: 152-186.
- [3] 刘乐, 杨明慧, 李春霞, 等. 辽西低凸起变质岩潜山裂缝储层及成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 188-194, 222.
Liu Le, Yang Minghui, Li Chunxia, et al. Fractured reservoirs in metamorphic buried-hills in the Liaoxi low uplift and their hydrocarbon accumulation conditions[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 188-194, 222.
- [4] 杨明慧. 渤海湾盆地潜山多样性及其成藏要素比较分析[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 623-631, 638.
Yang Minghui. Diversity of buried-hills and comparison of their hydrocarbon-pooling factors in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 623-631, 638.
- [5] 吕丁友, 杨明慧, 周心怀, 等. 辽东湾坳陷辽西低凸起潜山构造特征与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30

- (4): 490–496.
- Lü Dingyou, Yang Minghui, Zhou Xinhui, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation in the buried hills of the Liaoxi low salient, the Liaodong Bay Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(4): 490–496.
- [6] 钱宝娟. 兴隆台古潜山储层特征及成藏条件研究[J]. 特种油气藏, 2007, 14(5): 35–37.
- Qian Baojuan. Xinglongtai buried hill reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation conditions[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2007, 14(5): 35–37.
- [7] 肖淑蓉, 张跃明. 辽河盆地基岩潜山油藏裂缝型储层特征[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 108–111.
- Xiao Shurong, Zhang Yueming. Fractured reservoirs of buried-hill basement in Liaohe Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2000, 14(2): 108–111.
- [8] 黄太明. 牛心坨地区太古界变质岩储层特征研究[J]. 特种油气藏, 2003, 10(5): 22–25.
- Huang Taiming. Study on characteristics of Archeozoic metamorphic reservoirs in Niuxintuo area[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2003, 10(5): 22–25.
- [9] 吴宏伟, 尚彦军, 曲永新, 等. 香港花岗岩风化级别化学指标体系及风化壳分带[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 125–134.
- Wu Hongwei, Shang Yanjun, Qu Yongxin, et al. Chemical weathering indices, classification, and zoning of weathered granitic rock in Hong Kong[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(2): 125–134.
- [10] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539–543.
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. Chemical index of alteration and its applications in the Neoproterozoic elastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539–543.
- [11] 张云峰, 王磊, 李晶. 海拉尔盆地苏德尔特古潜山裂缝发育特征[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(5): 4–6.
- Zhang Yunfeng, Wang Lei, Li Jing. Characteristics of fracture development in Sudeerte buried hill in Hailaer Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2006, 30(5): 4–6.
- [12] 牛文, 梁江平, 江涛, 等. 贝尔凹陷布达特群潜山裂缝发育特征及有利区预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 21–23.
- Niu Wen, Liang Jiangping, Jiang Tao, et al. Fracture development characteristic and favorable zone prediction for Budatequn Buried Hill in Beier Depression[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(4): 21–23.
- [13] 赵立旻. 大民屯凹陷古潜山裂缝特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2007, 26(4): 37–41.
- Zhao Limin. Characteristics and controlling factors of fracture in buried hill in Damintun Sag, Liaohe Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(4): 37–41.
- [14] 孙永河, 万军, 付晓飞, 等. 贝尔凹陷断裂演化特征及其对潜山裂缝的控制[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 316–322.
- Sun Yonghe, Wan Jun, Fu Xiaofei, et al. Evolutionary of faults and their control on fractures in buried hill in Beier Depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 316–322.
- [15] 孟卫工, 李晓光, 刘宝鸿. 辽河拗陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 584–589.
- Meng Weigong, Li Xiaoguang, Liu Baohong. Main factors controlling the formation of interior reservoirs in the metamorphic palaeo-buried hills of the Liaohe Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 584–589.
- [16] 卢颖忠, 黄智辉, 管志宁. 用常规测井资料识别裂缝发育程度的方法[J]. 测井技术, 2000, 24(6): 428–432.
- Lu Yinzong, Huang Zhihui, Guan Zhining. A new method for discrimination of the degree of fracture development using conventional log data[J]. *Well Logging Technology*, 2000, 24(6): 428–432.
- [17] 柴燕军, 韩小峰. 利用岩电资料研究变质岩古潜山裂缝发育分布规律[J]. 特种油气藏, 2002, 9(增刊): 490–496.
- Chai Yanjun, Han Xiaofeng. Study on distribution of fractures in metamorphic buried hill by litho-electro data[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2002, 9(suppl.): 490–496.
- [18] 牛彦良, 陈友福. 海拉尔盆地贝尔凹陷变质岩潜山裂缝的表征方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(5): 1–3.
- Niu Yanliang, Chen Youfu. Characterization method of fractures in metamorphic rock buried hill of Beier Sag in Hailaer Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(5): 1–3.
- [19] 杨凤丽, 周祖翼, 张善文, 等. 利用地震方法预测潜山裂缝性油气储层——以渤海湾南部为例[J]. 高校地质学报, 1999, 5(3): 322–327.
- Yang Fengli, Zhou Zuyi, Zhang Shanwen, et al. Predicting fractured reservoirs in burial hill pool with seismic methods: a case study in southern Bohai Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(3): 322–327.
- [20] 鹿洪友, 陈小宏, 张如伟. 桩海古潜山裂缝预测的方法研究——以胜利油田桩海地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 758–763.
- Lu Hongyou, Chen Xiaohong, Zhang Ruwei. Method study of fracture prediction in the Zhuanghai paleo-buried hill: an example from the Zhuanghai area of Shengli Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 758–763.

(编辑 张亚雄)