

Determination of Fracture Development Characteristics of Granite Buried Hill Reservoir in PL Oilfield

Jing Tang, Laiming Song, Xu Liang, Tao Niu, Yan Nie

CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing
Email: tangjing3@cnooc.com.cn

Received: Nov. 6th, 2019; accepted: Nov. 22nd, 2019; published: Nov. 29th, 2019

Abstract

PL oilfield has been the first large-scale field found in weathering crust reservoirs of the Mesozoic buried granite hills in coast waters of China in recent years. In this brand new area of development, reservoir characterization is considered essential for efficient and successful development. The Mesozoic reservoirs in PL oilfield are mainly of fracture-porosity type. The reservoirs directly related to fractures accounts for 85% of the total reservoir. Aiming at the study of fracture characteristics of buried hill in PL oilfield, field outcrop investigation, core observation description, logging data description, casting thin section description and other methods are carried out to clarify the fracture development characteristics. Based on the fine slice identification, the fracture development law was studied, and the fracture types and main characteristics, the fracture development degree, influencing factors and spatial distribution law were studied. The relationship between the width of granite fracture and the characteristics of oil and gas seepage was determined by combining the statistical results of the fluorescence display grade of the thin section and the filling of the thin section casting. The study in this paper laid the foundation for further development.

Keywords

Buried Granite Hill, PL Oilfield, Fracture Characteristics, Influence Factor, Oil and Gas Limit

PL油田花岗岩潜山储层裂缝发育特征厘定

汤婧, 宋来明, 梁旭, 牛涛, 聂妍

中海油研究总院有限责任公司, 北京
Email: tangjing3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2019年11月6日; 录用日期: 2019年11月22日; 发布日期: 2019年11月29日

摘要

PL油田是近年来中国近海首次发现的一个以中生代花岗岩潜山风化壳为储层的大型油气田。在花岗岩潜山这个新的开发领域,储层特征的认知是制约高效开发的关键。PL油田中生界储层以裂缝孔隙型为主,与裂缝直接相关的储层占总储层的85%。针对PL油田潜山裂缝特征研究,开展野外露头调研,岩心观察描述,测井资料描述以及铸体薄片描述等多尺度的裂缝描述手段,明确裂缝的发育特征。基于精细薄片鉴定进行裂缝发育规律研究,开展裂缝类型及主要特征,裂缝发育程度、影响因素及空间分布规律研究等工作。结合荧光薄片荧光显示级别以及铸体薄片铸体充填情况统计结果确定了花岗岩裂缝宽度与油气渗流特征之间的关系。为后续开发奠定了基础。

关键词

花岗岩潜山, PL油田, 裂缝特征, 影响因素, 含油气界限

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1909年,美国在俄亥俄州中部辛辛那提隆起勘探新生界含油层系时偶然发现了摩罗县潜山油气藏,是世界上最早发现的潜山油气藏,我国最早发现的潜山油田是1959年酒西盆地的玉门鸭儿峡潜山油田。国外潜山主要为不整合型潜山油藏,储层主要受岩溶控制,储层主要为溶蚀孔洞和溶蚀裂缝,因此非均质性弱,并且分布较为稳定,主要集中在潜山风化壳。与国外潜山油气藏相比,国内潜山油气藏构造复杂、规模小。渤海海域燕山期侵入的花岗岩潜山有着极大的勘探潜力,其中PL油田是目前国内发现的最大花岗岩潜山油藏,该油田的勘探成功,打开了渤海地区的油气勘探新局面,目前世界上仅委内瑞拉的拉帕滋油田、越南的白虎油田等花岗岩潜山油藏可与之媲美[1][2][3][4][5]。但该花岗岩潜山岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩,储集空间类型属于裂缝-孔隙型的储集类型,具有双重介质的特点,与裂缝直接相关的储层占总储层的85%。对裂缝的认知程度曾一度困扰潜山开发决策。

2. 区域地质概况

PL油田位于渤海东部海域庙西北凸起上,潜山是长期遭受风化剥蚀的元古界花岗岩地层。构造主体整体埋深较浅,构造区内次生断层发育,且紧邻渤东凹陷与庙西凹陷,成藏条件非常有利。

在庙西北凸起区古近系整体缺失,新近系馆陶组的湖相泥岩直接披覆沉积于潜山之上,潜山局部高点甚至缺少馆陶组。潜山储层与馆陶组湖相泥岩在垂向上形成良好的储盖组合。油田内最重要的中生界花岗岩潜山圈闭发育于庙西北凸起南、北两个高点之间的鞍部,储层带发育厚度可达235 m [6][7]。

中生界潜山油藏的储层具有纵向具有分层性,平面上具有分区性的特点,纵向上由浅及深依次将风化带划分为极强风化带、强风化带、次风化带和弱风化带。同时内幕断层发育,储集空间具有孔隙型与裂缝型共存的特征,与裂缝直接相关的储层占总储层的85%。

3. 潜山裂缝特征

针对PL油田潜山裂缝发育特征的研究,开展野外露头考察,岩心观察描述,测井资料描述以及铸体

薄片描述等多尺度的裂缝描述手段，明确了裂缝的发育特征，并完成了多角度裂缝分类。

3.1. 野外地质调研

PL 油田是位于渤海湾的中生界花岗岩潜山油藏，工区位于海上，地质考察难以实现，同时花岗岩体为深层侵入岩，出露地表较少，通过区域调查发现，华北地区的胶东地区同样存在中生界的花岗岩地层，且出露地表，通过考察，发现位于黄岛的小珠山有现存比较典型的中生界花岗岩露头。

从黄岛小珠山花岗岩露头全貌来看，花岗岩层整体较为致密，顶部覆盖经长时间风化形成的坡积砂以及植被形成的腐殖层。向下岩石更加致密，可见发育黑云母等暗色矿物。构造裂缝较发育，而缺少溶蚀孔洞(图 1)。

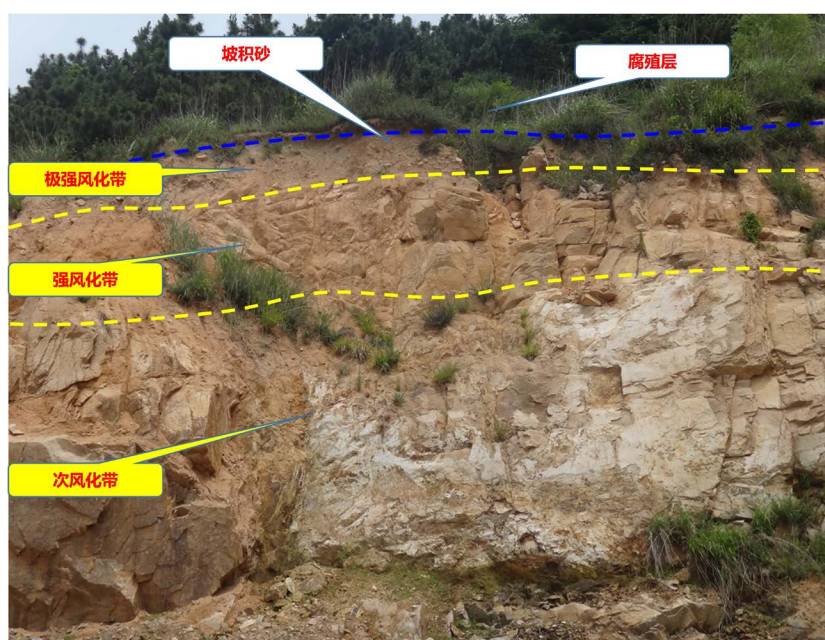


Figure 1. Outcrop formation map outside
图 1. 野外露头地层结构图

结合钻井地质分层，对中生界花岗岩的野外露头进行了地层的划分，顶部发育坡积砂，同时裂缝最为发育，裂缝被风化淋滤遭受破坏，整体特征表现为小而密，可见部分被泥质充填的溶孔存在；向下为极强风化带，花岗岩古隆起经历了长时间的暴露风化，产生大量的溶蚀孔隙及裂隙，改善了储层条件，被上覆沉积盖层覆盖形成风化壳圈闭；然后向下为强风化带，裂缝整体较为发育，但裂缝相对保存完整，风化破坏减弱，从裂缝的倾角来看，以中高角度裂缝为主，同时可见水平裂缝和垂直缝的存在；再向下过渡为次风化带，裂缝发育明显减弱，岩石保存完整。

3.2. 岩心观察描述

岩心资料观察对了解地下岩层的保存状态提供了最为直接的依据，对 PL 油田 4 口井岩心观察裂缝密度进行统计。从各风化带裂缝密度统计情况来看，极强风化带的岩心破碎，保存较差；强风化带的裂缝最发育，保存较完整；次风化带裂缝发育有所减少(图 2)。

从裂缝的角度统计结果来看，与野外露头调研具有相似的特征。极强风化带以低角度缝为主，强风化带和次风化带以中、高角度缝缝为主(图 3)。

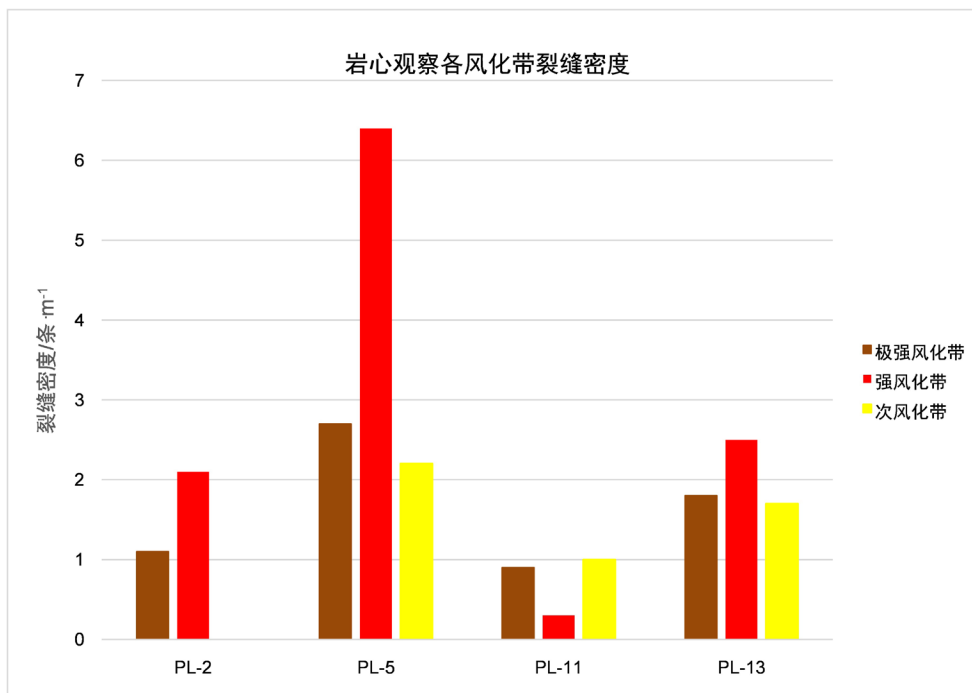


Figure 2. Statistical chart of fracture density in each weathering zone of PL oilfield
图 2. PL 油田各风化带岩心观察裂缝密度统计图

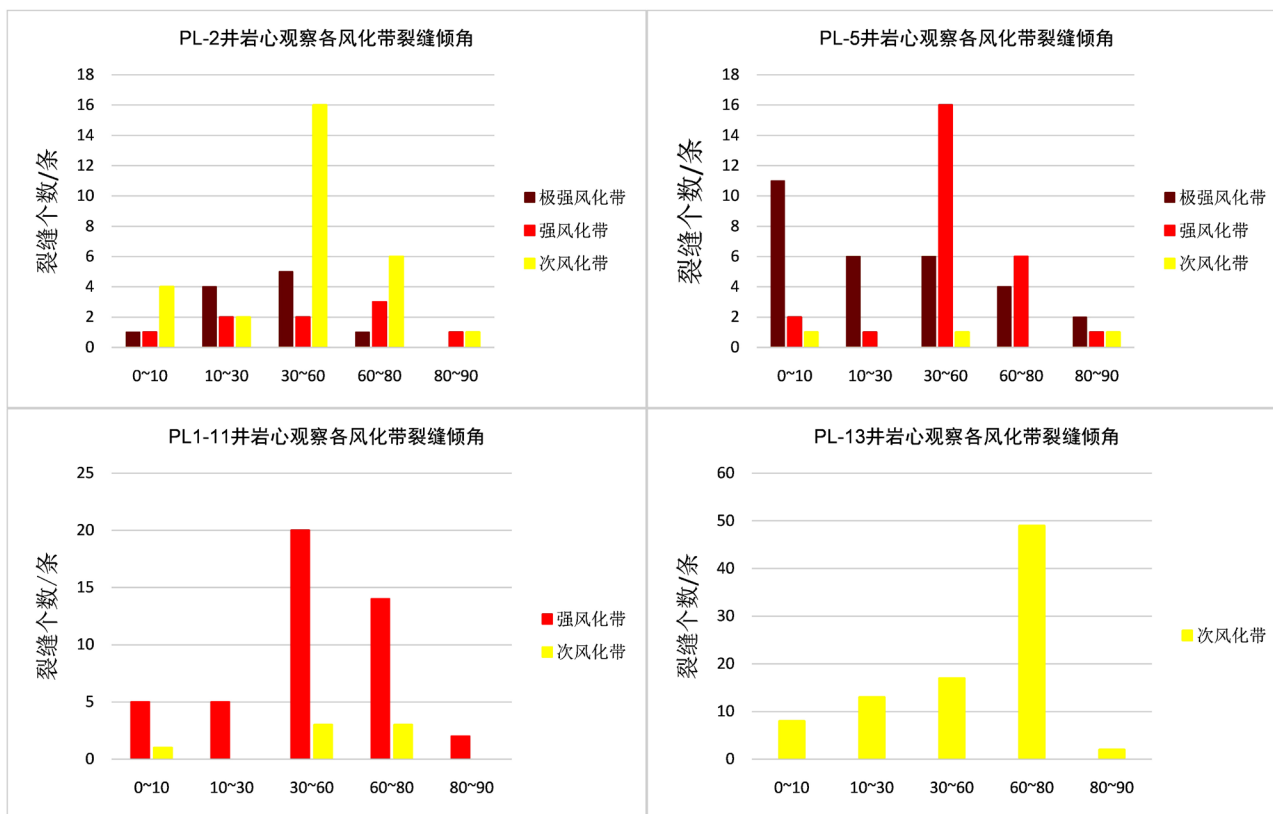


Figure 3. Statistical chart of fracture dip in each weathered zone
图 3. 各风化带裂缝倾角统计图

3.3. 测井资料描述

PL 油田研究区成像测井资料覆盖面广, 包含裂缝方位信息, 与取心资料尺度接近, 可与之相互验证, 共有 9 口井的成像测井倾角和方位资料。

裂缝的角度统计结果显示, 裂缝倾角亦以中高角度为主(图 4), 与岩心角度一致。成像测井资料识别裂缝密度略低于岩心观察描述结果, 但属于同一尺度, 范围为 5 条/米左右(图 5)。

统计不同风化带的裂缝密度, 发现成像测井资料的规律性也较明显, 整体上随着地层埋深增大, 裂缝的密度逐渐降低(图 5)。

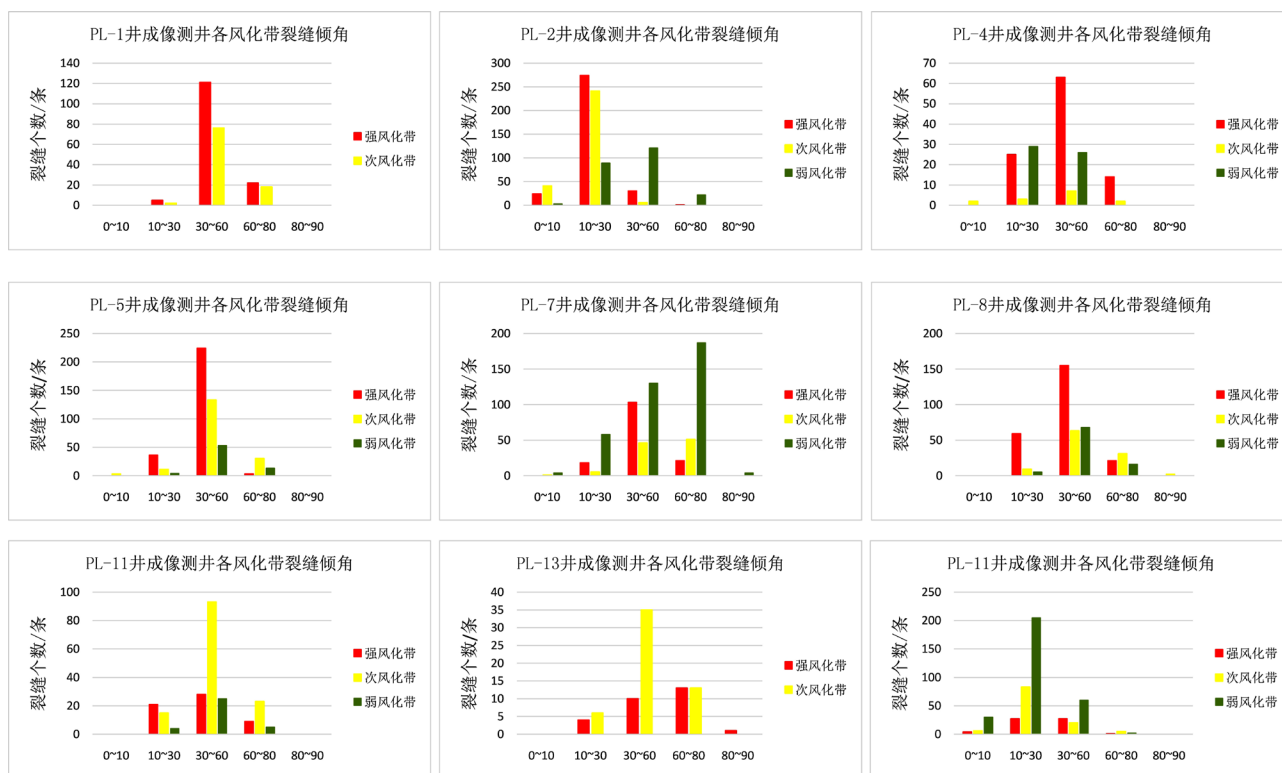


Figure 4. Fracture angle statistics of imaging logging data

图 4. 成像测井资料裂缝角度统计图

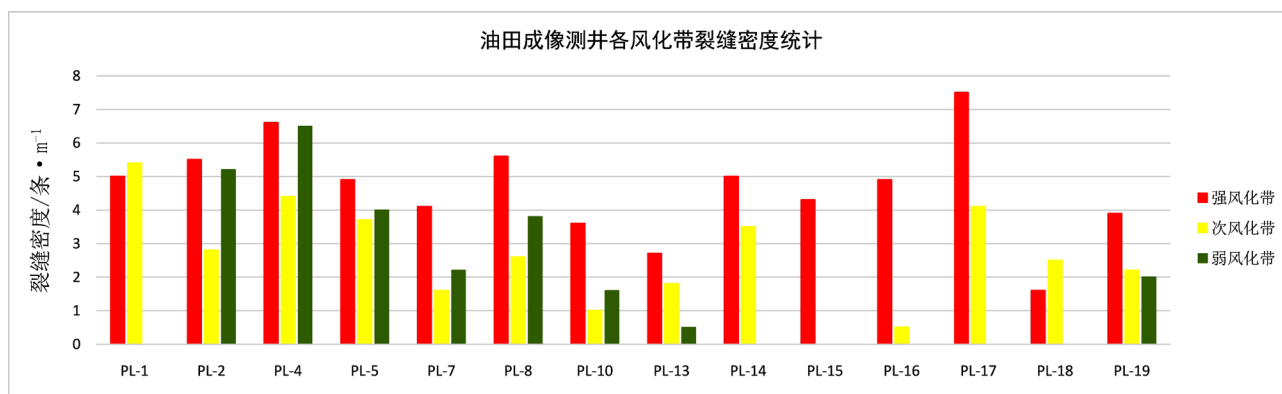


Figure 5. Statistical chart of fracture density in each phase of imaging logging data

图 5. 成像测井资料各相带裂缝密度统计图

统计不同风化带的裂缝走向,发现单井上下不同相带的裂缝走向宏观方向一致,说明构造缝的形成受控于构造运动,风化差异影响轻微(图 6)。

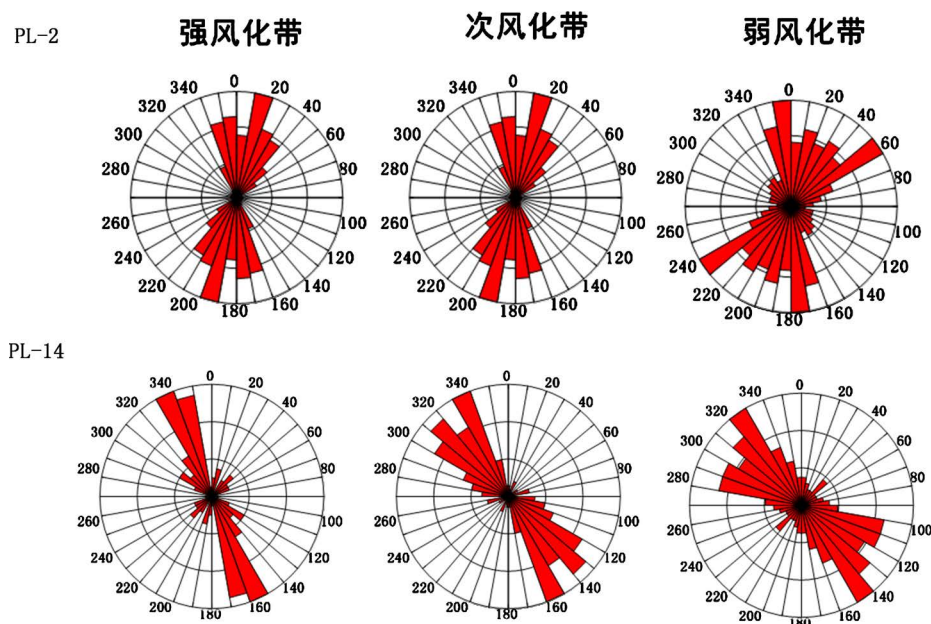


Figure 6. Statistical chart of fracture trend of different weathered zones in imaging data
图 6. 成像测井资料不同风化带裂缝走向统计图

3.4. 铸体薄片描述

PL 地区主要发育辉长岩、辉绿岩、闪长岩、二长岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗岩等。基性、中基性、中酸性、酸性岩系列都有发育,岩石类型多样。

除 PL-1 井发育中基性侵入岩之外,其余井中所见岩性均为中酸性,其中在 PL-2、PL-8 井中部分层位见碎裂花岗岩,推测为岩体侵位冷凝成岩之后构造活动所致。PL 油田岩石类型多样,且其中暗色矿物较多,推测岩浆起源较深(岩石圈地幔或软流圈)。

油田中生界花岗岩潜山属裂缝-孔隙型储层,储层具孔隙和裂缝双重介质特点,主要的储集空间类型:破碎粒间孔、粒内溶孔、构造裂缝、构造-溶解缝、收缩缝等(图 7)。储集空间组合类型以裂缝-孔隙型为主。

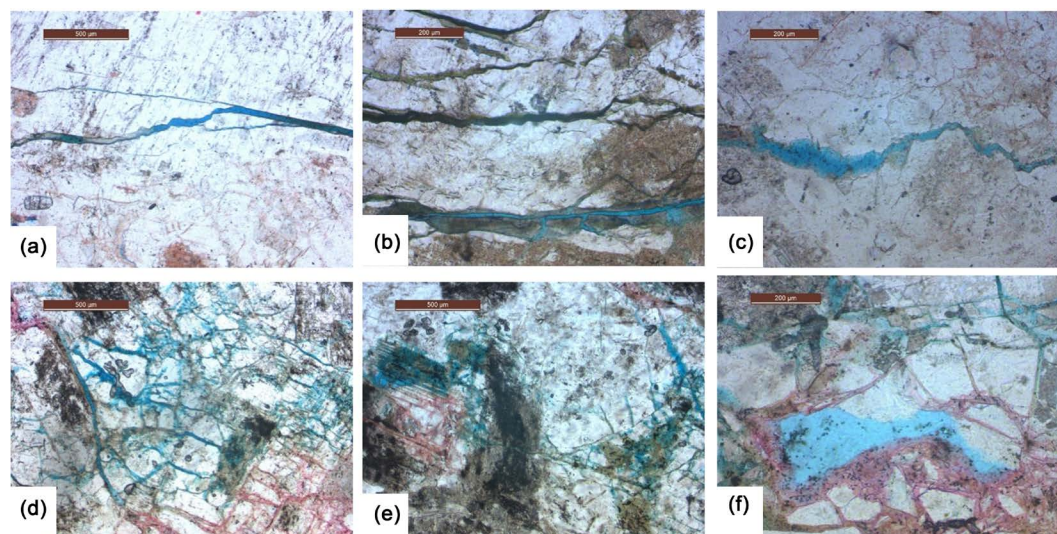
PL 油田基质发育微裂缝,沿微裂缝发育一些溶蚀孔及碎裂岩的粒间孔。微观裂缝仍以构造缝、溶蚀构造缝为主,镜下裂缝多呈不规则状,缝宽一般 10~100 μm ,部分可达 0.8 mm,扩溶现象比较普遍[8] [9]。

4. 裂缝分布规律研究

4.1. 裂缝类型及主要特征

通过对油田储层镜下薄片鉴定和分析,认为所观察裂缝按照成因总体可分为以下构造缝、溶蚀扩大缝、粒内压裂缝、网状缝和粒缘缝等[10] [11]。

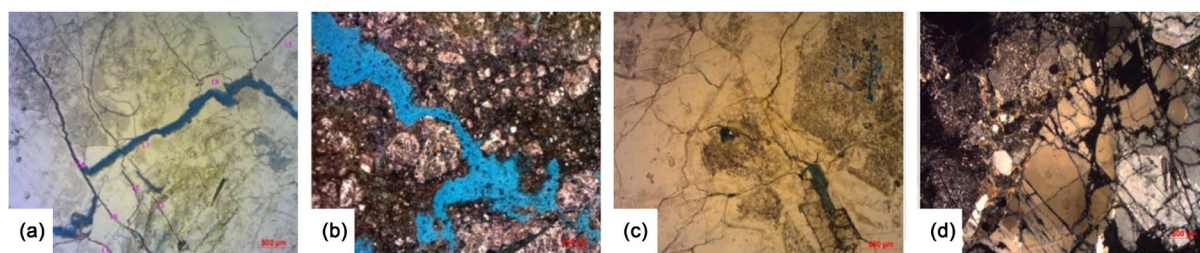
构造缝:岩石在构造应力作用下产生破裂而形成的裂缝,是最主要的类型。其最大特点是裂缝成组出现,沿一定方向有规律地分布,分布具不均匀性,裂缝边缘比较平直,延伸较远,常穿透多个颗粒(图 8(a))。



(a) PL-10 井, 1476.00 m, 构造缝, $\times 25(-)$; (b) PL-10 井, 1490.00 m, 构造缝, $\times 25(-)$; (c) PL-10 井, 1468.00 m, 溶蚀缝, $\times 25(-)$; (d) PL-2 井, 1470.00 m, 风化溶蚀缝, $\times 25(-)$; (e) PL-2 井, 1487.88 m, 长石溶孔, $\times 25(-)$; (f) PL-2 井, 1385.00 m, 长石溶孔、晶间溶孔, $\times 25(-)$ 。

Figure 7. Micrographs of fracture types in weathering crust of buried granite hills

图 7. 花岗岩潜山风化壳储层裂缝类型显微照片



(a) PL-15 井, 1285 m, 构造缝, $\times 25(-)$; (b) PL-18 井, 1387 m, 溶蚀扩大缝, $\times 25(-)$; (c) PL-17, 1675 m, 粒内压裂缝及粒缘缝, $\times 25(-)$; (d) PL-2, 1922 m, 网状缝, $\times 25(-)$ 。

Figure 8. Types and microscopic characteristics of fractures

图 8. 裂缝成因类型及微观特征

溶蚀扩大缝: 常发育在风化带顶部, 受表生淋滤作用影响而形成, 具备复合成因的属性。表生流体沿先存裂缝进入, 溶蚀或冲蚀周边矿物造成裂缝开度扩大和边缘凸凹不平(图 8(b))。

粒内压裂缝: 岩石颗粒在埋藏过程中受上覆岩层压实作用或侧向挤压等应力作用, 在颗粒内部形成的规模中等或中等偏下、延伸距离近、边缘弯曲不平直、开度较小的一些裂缝, 分布于颗粒内部的裂缝即为粒内压裂缝(图 8(c)), 此种裂缝在研究区中分布广泛, 数量众多, 但多数裂缝开度较小且多充填泥质。

粒缘缝: 常分布于颗粒边缘, 因颗粒与颗粒压实嵌合作用有限而保存的原始缝隙。岩石经后期采出和压力释放之后, 粒缘缝常开度增大而多形成“假缝”的状态。一般情况下, 如保持压实状态而不产生额外空隙, 粒缘缝中常充填少量泥质杂基而呈现中较为明显的粒缝轨迹。其中能够明显分出颗粒与颗粒接触关系的呈暗色部分即为粒缘缝(图 8(c))。此种裂缝在研究区多有分布, 但对储层研究意义不大。

网状缝: 指呈现密集网状式分布形态的裂缝群。多组不同开度不同延伸距离的裂缝密集分布(图 8(d))。从成因上看, 网状缝具有构造成因和压实成因的叠合属性。发育规模不均一, 可在几个颗粒的范围形成开度最高 $30\ \mu\text{m}$ 左右的网状缝, 也可在十几或几十个颗粒的范围内形成延伸距离达 $1000\ \mu\text{m}$ 和最高开度达 $100\ \mu\text{m}$ 的网状裂缝。网状缝在研究区的出现对于提高储层储集性能有重要意义。

4.2. 裂缝发育程度

针对裂缝的发育情况,依据铸体薄片的镜下鉴定和分级鉴定方法,针对油田薄片分别统计裂缝宽度、裂缝充填程度等裂缝发育特征。

裂缝宽度分布较广,但主体范围为 0~50 μm , 10~20 μm 范围的裂缝出现频率最高(图 9)。裂缝充填情况不均一,未充填裂缝约占 26%,充填裂缝占 53%,部分充填裂缝占 14%而半充填裂缝占 7%。由强风化带到次风化带再到弱风化带,可以推断裂缝发育规律呈现密度渐小、充填程度增强的趋势,裂缝充填物以泥质和方解石矿物为主。

4.3. 裂缝发育影响因素

风化壳型花岗岩潜山储集层在纵向上具有明显的分带性,不同风化壳分带由于风化作用的强度不同,构造变形的强度和方式的不同,可形成不同溶孔、不同裂缝类型的组合体,从而造成储层物性上的差异和分带。

图 10 为花岗岩储层纵向上按照强风化带、次风化带和弱风化带进行对应岩性、测井解释含油性、微观特征、面孔率、裂缝连通性和溶蚀程度等特征的统计和对比成果。可以看出,靠近风化带顶部的极强风化带和强风化带常表现为较高的面孔率、较优的裂缝连通性和溶蚀程度,因此储层物性表现较好。次风化带则相对较差,至弱风化带有所改善。

潜山花岗岩储层具孔缝双介质的特征,受表生风化淋滤作用影响形成孔隙型储层孔隙类型以粒内溶孔为主。受构造作用影响形成裂缝型储层,常见裂缝类型主要为微裂缝、构造缝和网状缝。不同风化壳分带由于风化作用的强度不同构造变形的强度和方式的不同可形成不同溶孔不同裂缝类型的组合体从而使风化壳储层表现出明显的分带性。

由顶部极强风化带→强风化带→次风化带→弱风化带,裂缝特征参数的变化趋势有:裂缝开度逐渐减小;裂缝密度逐渐减小;裂缝充填程度逐渐增大。其中开度大于 100 μm 的异常裂缝主要发育于顶部极强风化带和强风化带中(图 9)。

针对花岗岩储层的储集空间,裂缝和孔隙是主要的表现形式。统计裂缝测量数据如图 11 所示,不同风化带中花岗岩储层的裂缝与溶孔所占比例有所不同,由强风化带到次风化带再到弱风化带,裂缝与溶孔面孔率均逐渐降低。

整体宏观演化规律为由浅及深面孔率为减少的趋势,裂缝和溶蚀孔隙面孔率变化较为一致。但溶蚀孔隙仅在极强风化带和强风化带的顶部有较显著发育,而裂缝则除弱风化带以外均较为发育。由极强风化带→强风化带→次风化带→弱风化带面孔率整体呈降低趋势,裂缝面孔率整体高于溶蚀孔隙面孔率。不同风化带溶孔与裂缝所占比重不同。极强风化带溶蚀孔隙比例较大;强风化带两者相当;次风化带裂缝所占比例较大;弱风化带两者相当(图 11)。

风化壳型花岗岩潜山储集层的形成和发育,分析认为主要受表生风化淋滤作用、构造作用控制,其次还包括有机酸溶蚀作用、地貌及微古地貌特征、深部热液活动等影响因素[12][13]。

首先,表生风化淋滤作用促使出露地表的花岗岩体坚固性变差,易于形成裂缝。同时也使岩石中矿物发生溶解、氧化、碳酸盐化和高岭土化等。经过大气淡水的淋滤,将未风化而易于溶解的物质,以及风化后形成的黏土质细小物质冲走,从而使致密的花岗岩体发育了新的孔缝洞,增加了储集空间,提高了储层孔隙度与渗透性。表生风化淋滤作用强度决定储集空间类型及物性。风化越强烈,矿物蚀变程度越高,孔隙越发育。

其次,构造是裂缝型储层形成的主控因素,大断裂伴生次级断裂和微裂缝,组成裂缝系统,改善了储集层物性。由于断裂沟通使得表生大气淡水、深部热液和烃源岩演化生成的有机酸沿断裂对花岗岩进

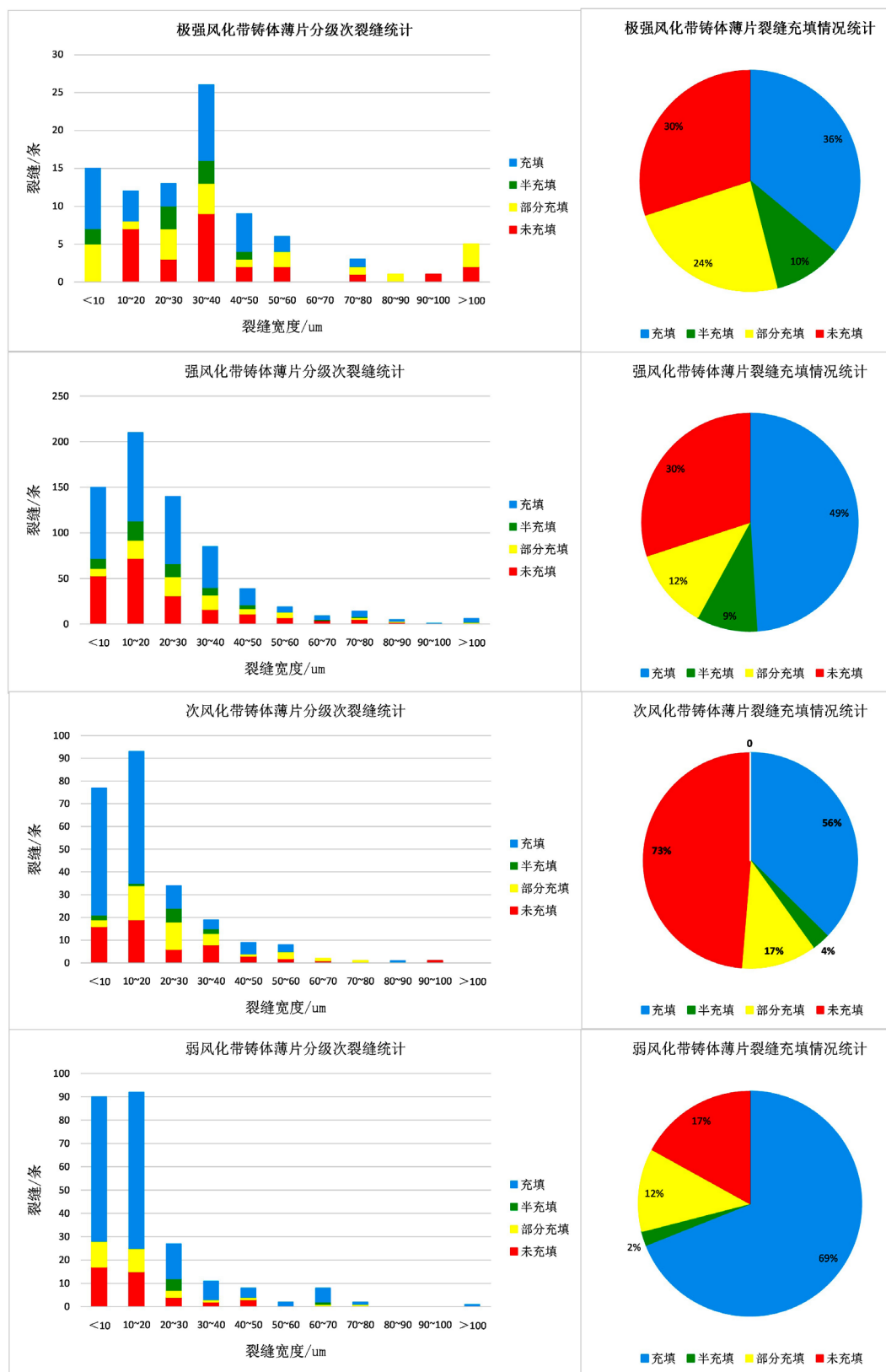


Figure 9. Comparison of fracture development characteristics in different weathering zones of PL oilfield
 图 9. PL 油田不同风化带的裂缝发育特征对比

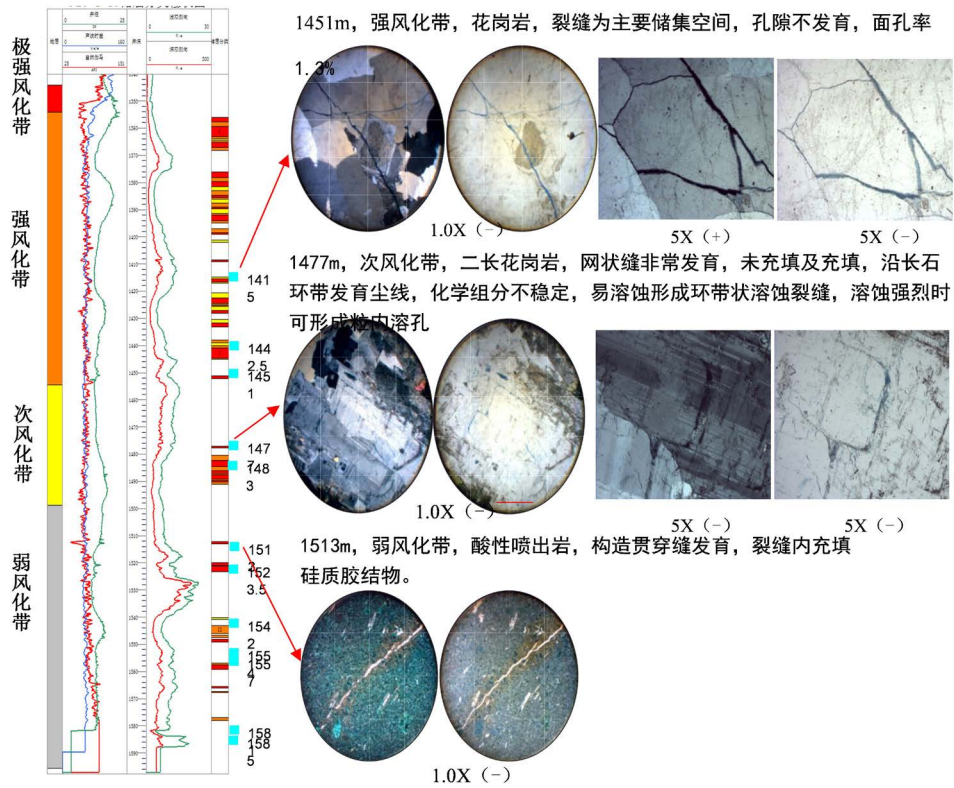


Figure 10. Statistics of face rate parameters in different weathered zones

图 10. 纵向不同风化带面孔率参数统计

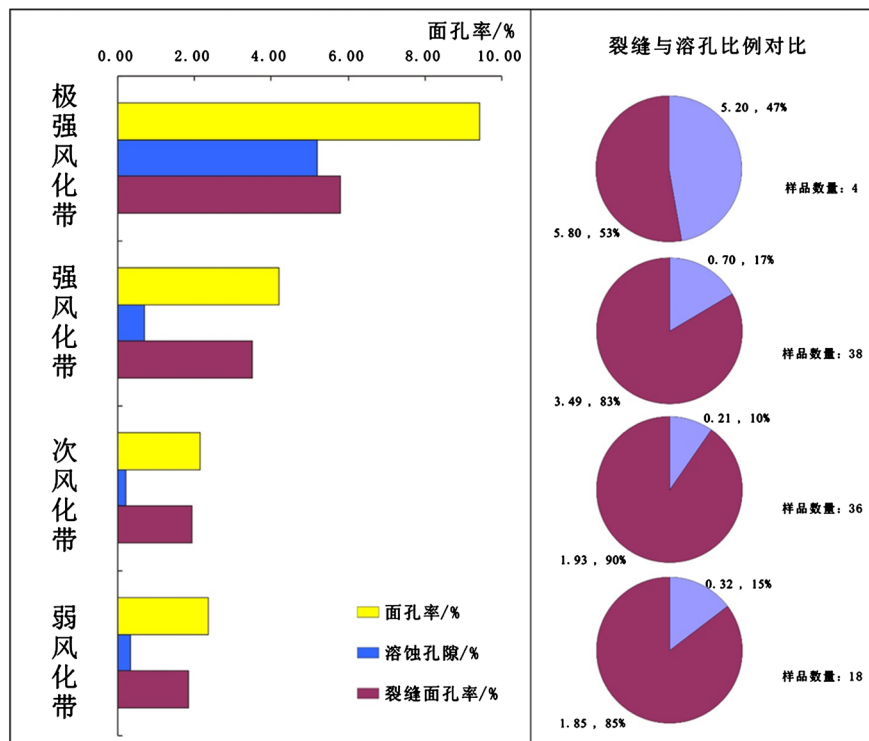


Figure 11. Comparison of dissolution porosity surface rate and fracture face rate in different weathering zones

图 11. 不同风化带溶蚀孔隙面孔率和裂缝面孔率对比

一步溶蚀改造，使花岗岩储集层具有更好的储集和渗透性。构造成因裂缝发育于断裂带附近，离主断裂越近裂缝越发育，在相同的后期成岩成缝环境下，构造是成缝的主要控制因素。

此外，原油稠化形成的有机酸及油气侵位带来的有机酸对储层具有改善作用；地貌及微古地貌影响大气水的汇集部位和风化砂砾石带的保留，进而控制储层厚度；储层埋藏较浅，热演化程度不高，也是风化壳储层物性保持较好的重要因素。

总的来说，垂向上裂缝风化程度存在明显的分带性。靠近风化带顶部，储层风化程度变高，同时裂缝发育程度(宽度、网状程度、延伸长度等)变高；由极强风化带→强风化带→次风化带面孔率整体呈降低趋势，裂缝面孔率整体高于溶蚀孔隙面孔率。

构造位置影响裂缝发育的发育程度，构造高部位裂缝网状程度高，构造中部网状程度变弱，裂缝发育程度随井深降低。构造低部位溶蚀段减小，多发育构造缝，裂缝开启程度高。

4.4. 裂缝空间分布规律

从纵向上来看，随着极强风化带→强风化带→次风化带→弱风化带的变化，裂缝的开度逐渐减小，充填程度逐渐增大，裂缝密度逐渐减小的特征(图 12)。

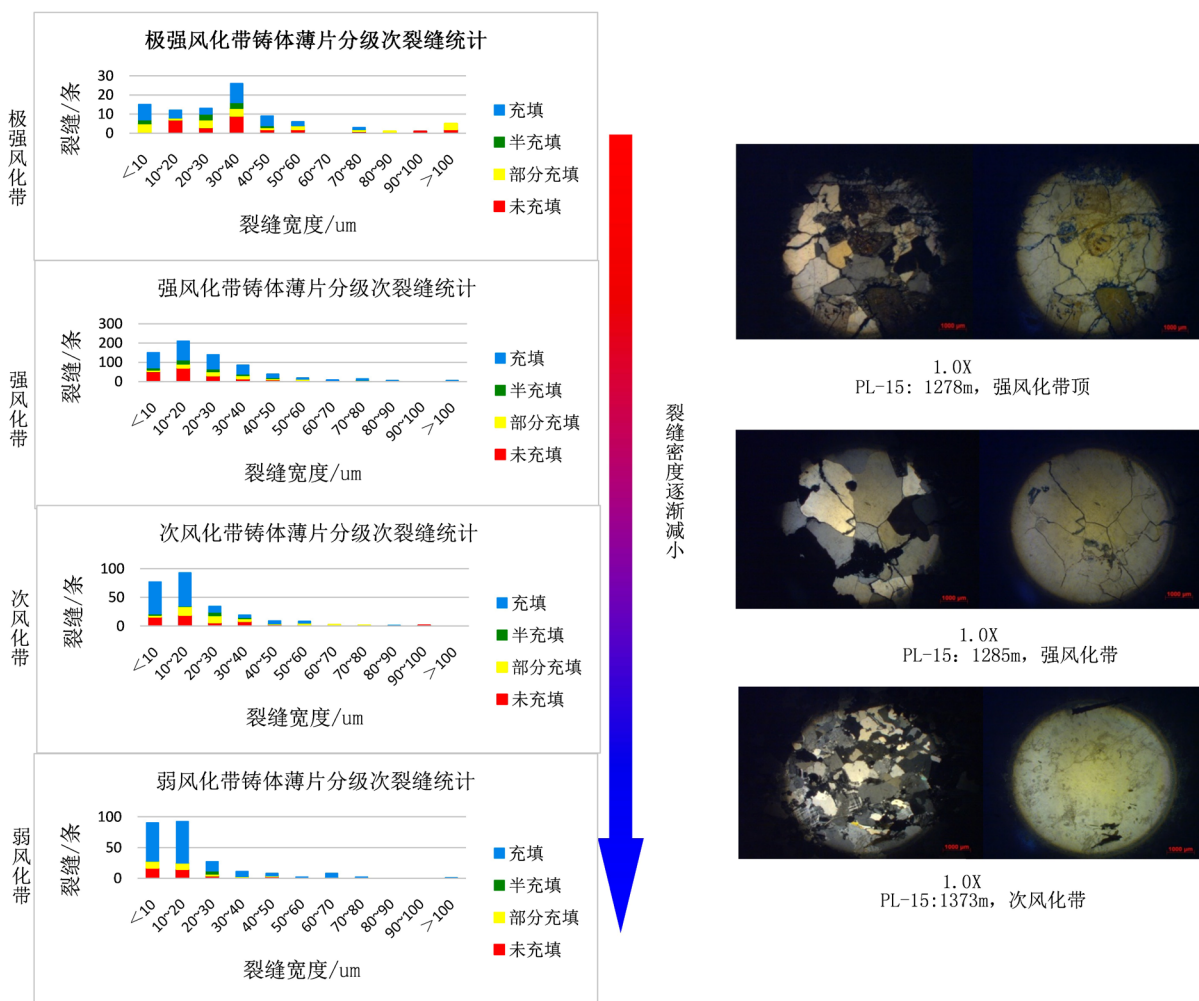


Figure 12. Comparison of fracture density in different weathered zones of PL oilfield
图 12. PL 油田不同风化带裂缝密度对比图

从平面上来看, 裂缝的发育程度与构造部位的高低以及与断层的远近具有重要关系, 构造部位越高裂缝越发育, 与断层越近, 裂缝发育程度越强。充填程度也与构造部位的高低直接相关, 构造部位越高, 裂缝充填程度越高, 构造部位越低, 充填程度与之降低。发育的裂缝多为开启裂缝[14] (图 13)。

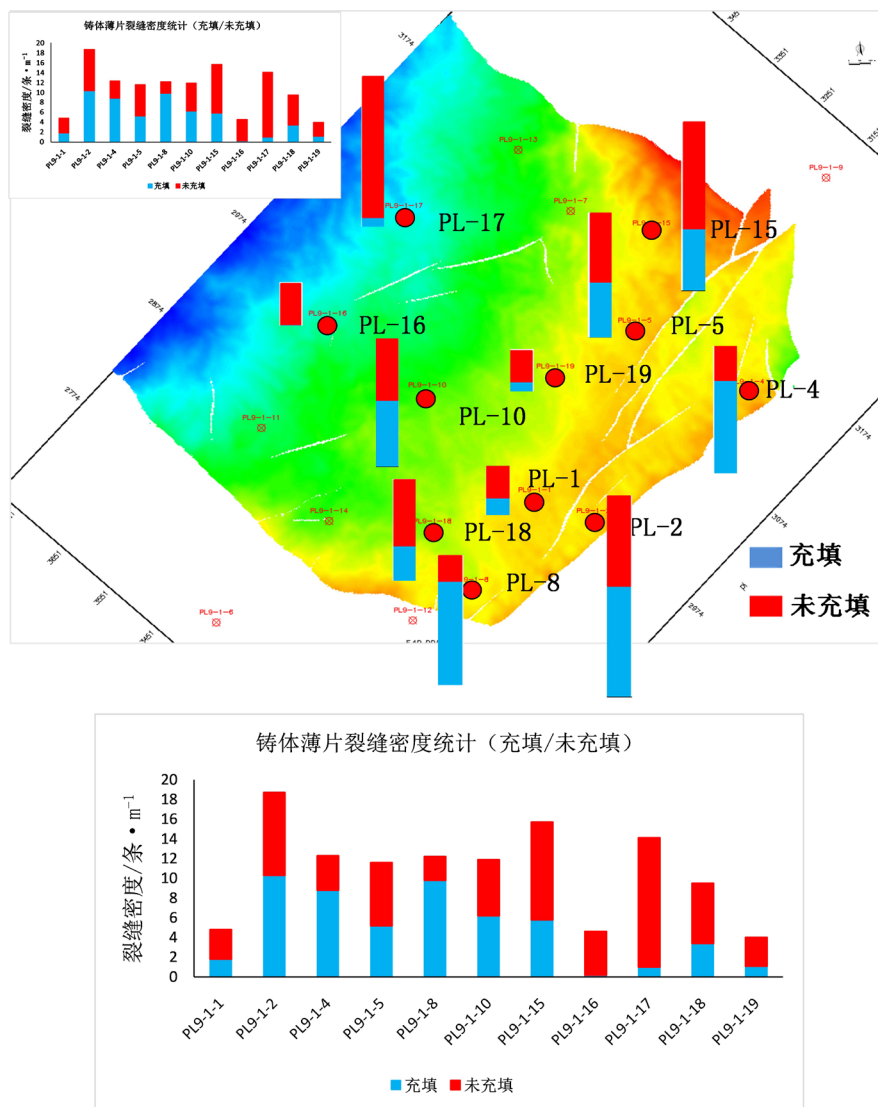


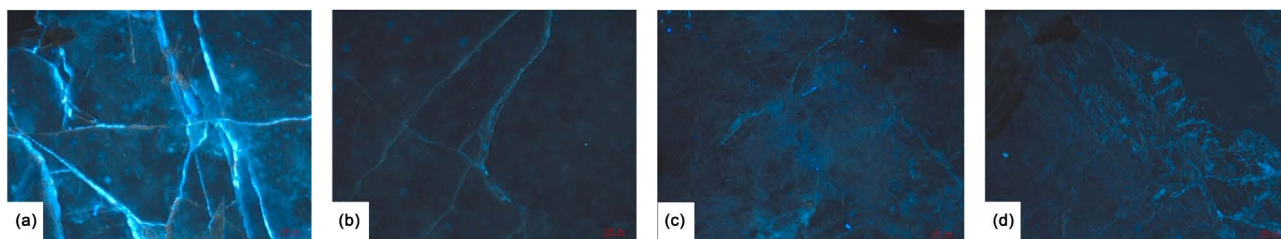
Figure 13. Plane distribution statistics of fracture density of casting thin section (filling/unfilling)

图 13. 铸体薄片裂缝密度平面分布统计(充填/未充填)

5. 裂缝含油气界限确定

风化带强度越高荧光显示相对较好(如图 14(a)、图 14(b)), 一般显中亮至亮蓝白色荧光, 尤其以裂缝充填油质沥青而显示的荧光为主, 油质沥青浸染矿物而产生的荧光显示较少。而风化带强度较弱如次风化带, 弱风化带中荧光显示中等, 一般显中暗至中亮蓝白荧光, 矿物被油质沥青浸染现象明显(图 14(c)、图 14(d))。

在国内, 周永胜, 张流《裂缝性储集层岩芯裂缝统计分析》一文中结合国内油田的实际资料, 统计界定了岩心裂缝的分级方案。其中划分了 4 级方案(表 1):



(a) PL-8 井, 1330.00 m, $\times 10$; (b) PL-8 井, 1385.00 m, $\times 10$; (c) PL-7 井, 1610.55 m, $\times 10$; (d) PL-8 井, 1572.00 m, $\times 10$ 。

Figure 14. Casting thin section of oilfield

图 14. 油田荧光薄片

Table 1. Divide scheme of drilling core fracture

表 1. 岩心裂缝分级方案

裂缝等级	长度/mm	宽度/mm
大裂缝	>1000	>10
中裂缝	500~1000	5~10
小裂缝	100~500	1~5
微裂缝	10~100	0.01~1
毛细管裂缝	<10	<0.01

① 大裂缝：它对油气运移是有利的，但在一定情况下很容易使油气散失。

② 中、小裂缝：这两级裂缝在油气渗流中所起作用基本相同，差别在于渗流速度上。

③ 微裂缝：此类裂缝仍然满足达西渗流规律，在压力驱使下油气在其中可以定向流动，因此它们是储集空间的主要部分。微裂缝发育极大地改善了储层的结构，有利于油井的生产，但由于微裂缝延伸较短，在空间上有时很难构成网络，必须与中、小裂缝和孔隙相结合，才能成为极好的储层，因此油气产量的高低、稳产时间的长短就取决于裂缝网络与微裂缝和其基质块孔隙的配置情况。

④ 毛细管裂缝：此类裂缝流体的流动已不符合达西定律，而是受毛细管力的控制，油气在其中是一种极缓慢的渗滤流动。如裂缝网络中裂缝孔隙度和基质块孔隙度都较低，在油气开发过程中，需要注水驱油，注水时因岩石亲水性不同，效果也不一样，亲水岩石利用毛细管力可以驱油；反之，毛细管力就成为油渗出的阻力。

但该方案就与荧光薄片鉴定的结果相比，仍是较粗的一种分类结果。通过对荧光薄片的统计结果显示：裂缝以及后被溶蚀的扩大缝宽度越大，可充填的有机质含量越高，荧光显示越强。一般为中亮 - 亮蓝光。而微裂缝的宽度较小，荧光一般显示为中暗 - 中亮蓝光或黄光。同时荧光显示的级别与储层的相带具有重要关系，随着地层的加深，裂缝尺度减小，荧光显示级别随着降低(图 15)。

荧光显示与裂缝的类型和数量有关，裂缝、溶蚀缝荧光显示相对较强，微裂缝荧光显示相对较暗。同时在一视域内可以发现：裂缝类型多样且相对较为集中的区域，荧光显示较好。

基于上述的分析，荧光薄片能够在一定程度上反映不同开度裂缝的含油气性规律，但无法量化界定裂缝开度有效性的阈值。

为进一步确定裂缝开度与油气渗流特征之间的关系，通过分析创新性的提出了依据铸体薄片铸体的充注程度界定裂缝的油气渗流界限的研究方法。

铸体薄片在制片过程中，铸体能否压入裂缝之中的过程，可以等效的认为是一种驱油实验的过程，

从图 16 可以看出, 典型铸体薄片铸体的充填程度与裂缝开度关联性强, 一定程度上反映了渗流特征的差异[14] [15]。

为了对裂缝有效开度进行分析, 对铸体薄片的充注特征进行分析, 以期指导裂缝有效开度界限的研究工作。为更为准确地铸体充填程度的变化, 依据铸体充填的颜色进行区分, 划分为强充注、弱充注以及未充注三类情况。如图 17 所示, 红色区域表示强充注铸体的侵染, 淡蓝色区域为弱充注裂缝, 其余为未充注铸体的裂缝。并且进行了数据的统计[16] [17] [18]。

除 PL-15 井之外, 还分别针对多口井的裂缝中铸体的充填程度进行了统计(图 18)。

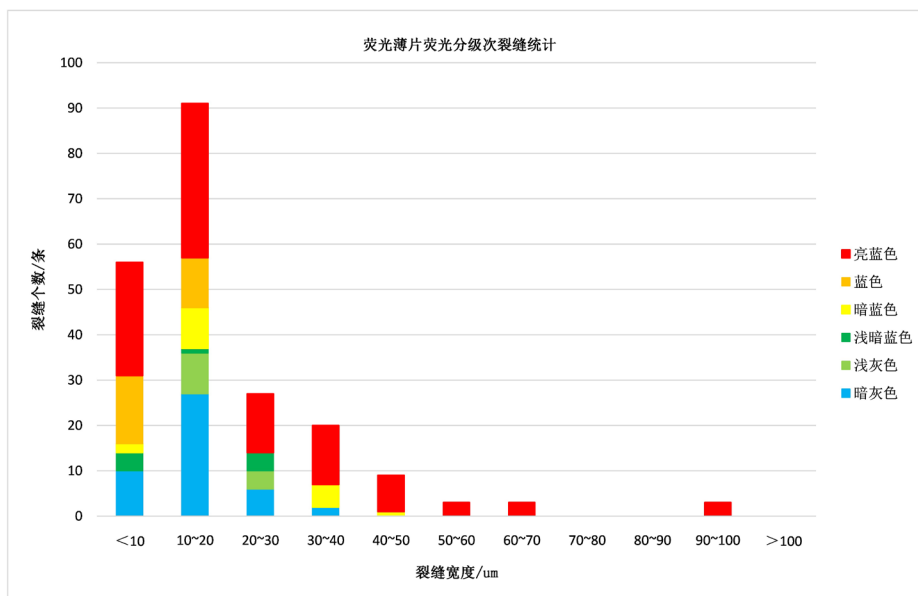
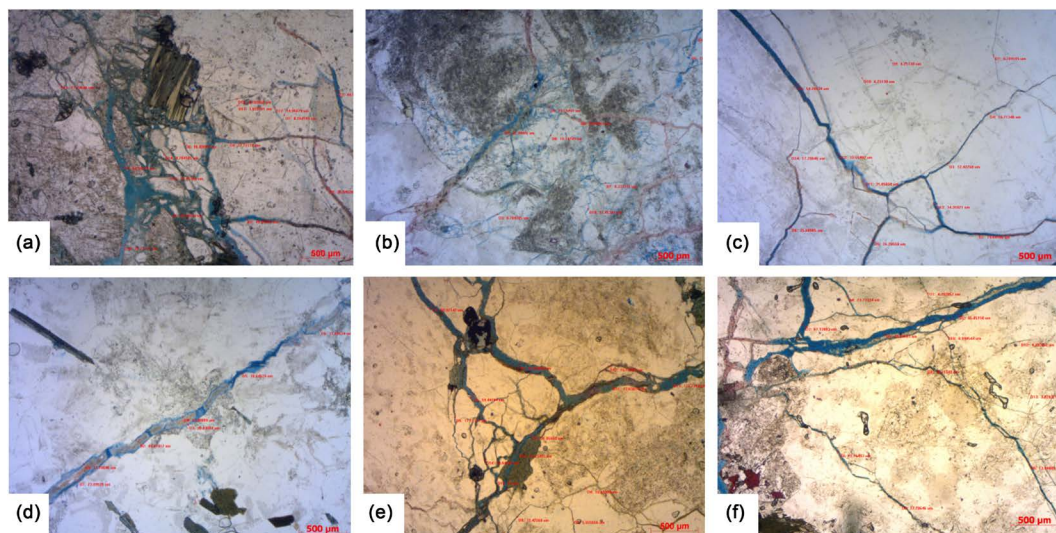


Figure 15. Relationship between fluorescence display level and crack width in oilfield
图 15. 油田荧光显示级别与裂缝宽度关系图



(a) PL-18 井, 1415.77 m, $\times 25(-)$; (b) PL-2 井, 1385.98 m, $\times 25(-)$; (c) PL-15, 1303.78 m, $\times 25(-)$; (d) PL-15, 1340.55 m, $\times 25(-)$; (e) PL-17 井, 1685.30 m, $\times 25(-)$; (f) PL-8 井, 1465.00 m, $\times 25(-)$ 。

Figure 16. Relationship between fracture opening and casting filling degree of some casting thin sections
图 16. 部分铸体薄片裂缝开度与铸体充填程度关系图

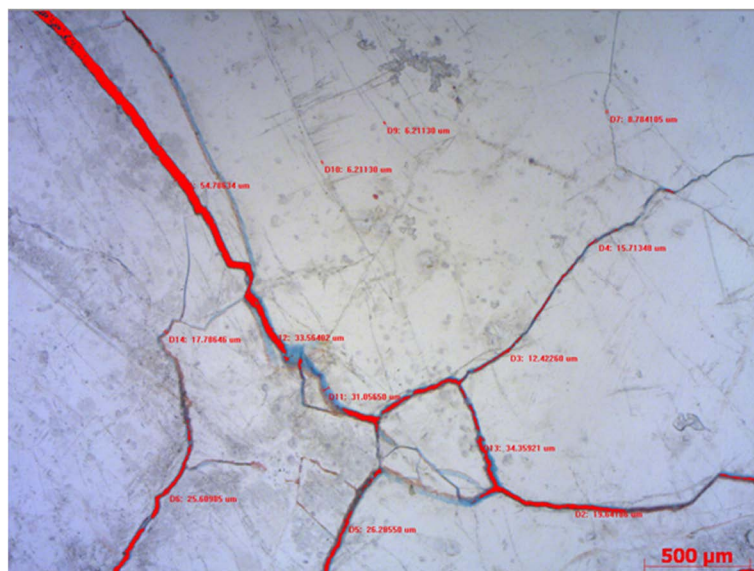


Figure 17. Relationship between crack width and casting filling degree of casting thin section (PL-15, 1503 m)
图 17. 铸体薄片裂缝宽度与铸体充注程度关系图(PL-15, 1503 m)

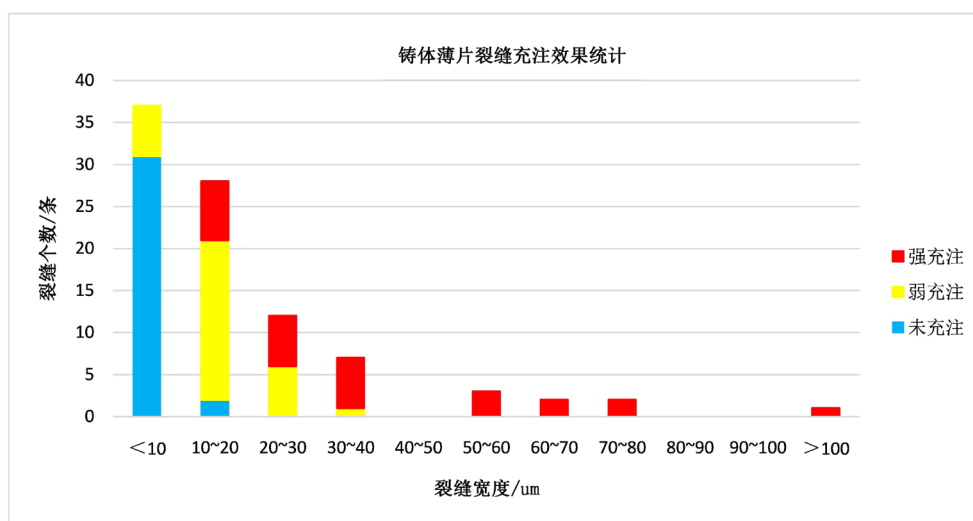


Figure 18. Statistical chart of filling effect of cast thin section in oilfield
图 18. 油田铸体薄片充注效果统计图

通过分析确定了以下的三分方案:

① (>20 μm): 铸体能够有效充注, 此类裂缝仍然满足达西渗流规律, 在压力驱使下油气在其中可以定向流动, 因此它们是储集空间的主要部分。

② 微裂缝(10 μm ~20 μm): 铸体充注程度取决于与小裂缝的连通情况, 与小裂缝和孔隙相结合, 才能成为极好的储层, 因此油气产量的高低、稳产时间的长短就取决于裂缝网络与小裂缝和其基质块孔隙的配置情况。

③ 毛细管裂缝(<10 μm): 铸体难以充注, 此类裂缝流体的流动已不符合达西定律, 而是受毛细管力的控制, 油气在其中是一种极缓慢的渗滤流动。

结合统计结果确定了 PL 油田中生界花岗岩裂缝宽度与油气渗流特征之间的关系: 20 μm 以上裂缝为

有效缝, 10 μm 以下裂缝为无效缝。

6. 结论

1) PL 油田潜山花岗岩地层所发育裂缝类型按照成因主要发育构造缝、溶蚀扩大缝、粒内压裂缝、网状缝和粒缘缝等。

2) 花岗岩潜山的储集层在纵向上表现出明显的分带性, 主要与花岗岩风化壳在垂向上具有分带性相关。不同风化带中储集层的裂缝发育情况、溶孔特征、岩性类型以及物性和含油级别有差异。越靠近风化带顶部, 储层风化程度越高和裂缝发育程度(宽度、网状程度、延伸长度等)越高。

3) 由极强风化带→强风化带→次风化带→弱风化带储层整体演化规律为面孔率减少、裂缝和溶孔发育强度有规律性减弱变化。

4) 纵向上来看, 随着极强风化带→强风化带→次风化带→弱风化带的变化, 裂缝的开度逐渐减小, 充填程度逐渐增大, 裂缝密度逐渐减小。从平面上来看, 构造部位越高裂缝越发育, 与断层越近, 裂缝发育程度越强。同时构造部位越高, 裂缝充填程度越高, 构造部位越低, 充填程度与之降低。发育的裂缝多为开启裂缝。

5) 结合荧光薄片荧光显示级别以及铸体薄片铸体充填情况统计结果确定了 PL 油田中生界花岗岩裂缝宽度与油气渗流特征之间的关系: 20 μm 以上裂缝为有效缝, 10 μm 以下裂缝为无效缝。

参考文献

- [1] Cuong, T.X. and Warren, J.K. (2009) Bach Ho Field, a Fractured Granitic Basement Reservoir, Cuu Long Basin, Offshore Se Vietnam: A "Buried-Hill" Play. *Journal of Petroleum Geology*, **32**, 129-156. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2009.00440.x>
- [2] Li, B.J. (2011) The Natural Fracture Evaluation in the Unconventional Tight Oligocene Reservoirs-Case Studies from CuuLong Basin, Southern Offshore Vietnam. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, 20-22 September 2011, 955-965. <https://doi.org/10.2118/145909-MS>
- [3] Borgohain, T. (2010) Reservoir Fairway Analysis of a Barail Interval of Deohal Area in Upper Assam Basin Using High Resolution Sequence Stratigraphy and Seismic Attributes. *AAPG Annual Convention and Exhibition*, New Orleans, 11-14 April 2010, 965-985.
- [4] Haskell, J.B., Toelsie, S. and Mohan, A. (2010) Optimization of Sand Control for Unconsolidated, Shallow, and Low-Pressure Sandstone Reservoirs: A Suriname Case Study. *Trinidad and Tobago Energy Resources Conference*, Port of Spain, 27-30 June 2010, 953-964.
- [5] Barion, C.C. (1995) Fractal Analysis of Sealing and Spatial Clustering of Fracture. In: Barion, C.C. and Lapointe, P.R., Eds., *Fractals in the Earth Science*, Plenum Press, New York, 141-178. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1397-5_8
- [6] Howard, J.H. and Nolen-Hoeksema, R.C. () Description of Natural Fracture Systems for Quantitative Use in Petroleum Geology. *AAPG Bulletin*, **74**, 151-162.
- [7] Allan, J. and Sun, S.Q. (2003) Recovery Factor in Fractured Reservoirs: Lessons Learned from 100 Fractured Fields. *Petroleum Exploration and Development*, **30**, 129-136. <https://doi.org/10.2118/84590-MS>
- [8] Ahmed, T. and McKinney, P.D. (2005) *Advanced Reservoir Engineering*. Gulf Professional Publishing, Houston, 322-381.
- [9] 马龙, 刘全新, 张景廉, 等. 论基岩油气藏的勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 8-11.
- [10] 李欣, 闫伟鹏, 崔周旗, 等. 滨海湾盆地潜山油气藏勘探潜力与方向[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 140-144.
- [11] 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地深层石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [12] 谭广辉, 邱华标, 余腾孝, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组油藏成藏特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 26-33.
- [13] 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): 77-86.
- [14] 张斌. 松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2012, 34(4): 508-516.

-
- [15] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 273-280.
- [16] 罗伟, 蔡俊杰, 万琼华. 惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析及石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019(4): 126-135.
- [17] 潘晓庆, 宋来明, 牛涛. 花岗岩潜山双重孔隙介质油藏地质建模方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 33-44.
- [18] 罗海炳, 胡英杰, 刘兴周. 辽河坳陷兴隆台潜山中生界地质新认识与油气新发现[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 439-448.