



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

渤中凹陷中生界火山岩储层裂隙发育程度实验研究：以安山岩为例

陈 欣，郭玲莉，陶 坊，吕春晓，张家轩，李三忠

Experiment on microfractures of Mesozoic volcanic rock reservoirs in the Bohai Sag: A case of andesite reservoir

CHEN Xin, GUO Lingli, TAO Wei, LV Chunxiao, ZHANG Jiaxuan, and LI Sanzhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022123102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东马努斯盆地热液蚀变火山岩元素迁移特征及影响因素

CHARACTERISTICS AND INFLUENCE FACTORS OF ELEMENT MIGRATION OF HYDROTHERMAL ALTERED ROCK IN EASTERN MANUS BASIN

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 86–101

西太平洋弧后盆地火山岩中熔体包裹体研究进展

Advances in melt inclusion studies in back-arc basin volcanic rocks in Western Pacific

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 166–179

渤中19-6凝析气田太古宇潜山储层发育主控因素及地质模式

Archaeozoic buried-hill reservoir of Bohai 19-6 condensate field: Main controlling factors and development model

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 170–178

复杂储层凝析气藏储量评价

RESERVE CALCULATION FOR COMPLEX RESERVOIR OF A CONDENSATE GAS FIELD

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 131–140

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151–162

珠江口盆地靖海凹陷火成岩发育特征及其地质意义

Igneous rocks in Jinghai Sag, Pearl River Mouth Basin and their geological significance

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 96–105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈欣, 郭玲莉, 陶圩, 等. 渤中凹陷中生界火山岩储层裂隙发育程度实验研究: 以安山岩为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 130-142.
CHEN Xin, GUO Lingli, TAO Wei, et al. Experiment on microfractures of Mesozoic volcanic rock reservoirs in the Bohai Sag: A case of andesite reservoir[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 130-142.

渤中凹陷中生界火山岩储层裂隙发育程度实验研究: 以安山岩为例

陈欣^{1,2}, 郭玲莉^{1,2}, 陶圩^{1,2}, 吕春晓^{1,2}, 张家轩^{1,2}, 李三忠^{1,2}

1. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 渤海湾盆地中生界火山岩发育广泛, 但含油气性横向变化较大, 失利井较多, 勘探风险大, 了解火山岩潜山储层内部裂隙发育程度及规律可为中生界火山岩潜山勘探提供理论依据。本文选取中生界安山岩, 开展不同构造环境下岩石微裂隙发育程度实验, 分析安山岩在不同应力状态下微裂隙发育规模、频率以及微裂隙空间分布, 探讨张性和压性构造应力环境下中生界火山岩微裂隙发育能力及空间展布规律。实验结果表明: 安山岩在压性和张性环境下均有微裂隙发育; 安山岩在较低的压应力作用下产生大量微裂隙, 微裂隙发育规模不随应力增大而升高, 其原因可能是安山岩本身含有大量先存构造缝、溶蚀缝和溶蚀孔, 受较小的应力后“再活化”产生微裂隙; 结合渤中凹陷的构造演化过程, 安山岩经历了燕山早期北东向压扭、中期伸展, 燕山晚期右旋压扭及喜山期伸展, 导致其内部裂隙较为发育, 其运储能力提升, 具备成为优质储层的基本条件。

关键词: 火山岩; 安山岩; 微裂隙发育; 构造缝; 中生界; 渤中凹陷

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022123102

Experiment on microfractures of Mesozoic volcanic rock reservoirs in the Bohai Sag: A case of andesite reservoir

CHEN Xin^{1,2}, GUO Lingli^{1,2}, TAO Wei^{1,2}, LV Chunxiao^{1,2}, ZHANG Jiaxuan^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}

1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

Abstract: The Mesozoic volcanic rocks are widely developed in the Bohai Bay Basin, North China. However, the regional oil-gas reserves vary greatly in lateral direction, and many wells frequently failed and exploration is facing high risk. Understanding the development of internal fractures of volcanic rocks can provide a theoretical basis for the exploration of Mesozoic volcanic buried-hill. We selected the Mesozoic andesite to carry out microfractures experiments under the action of tensile stress and compressive stress, in which the development ability and spatial distribution of microfractures in andesite rocks were analyzed. Results show that andesite generated microfractures in both compressive and tensile stress. Many microfractures occur under low compressive stress, and the size of microfractures does not increase with the increase of compressive stress. The reason may be that andesite contains many pre-existing structural fracture, dissolution-assisted fractures, and/or dissolution pores, which are “reactivated” to generate microfractures after small stress. Considering the tectonic evolution of the Bohai Sag, we believed that andesite had experienced NE compression-shearing in early Yanshanian, extension in middle Yanshanian, dextral compression-shearing in late Yanshanian, and extension in the Himalayan, resulting in relatively well-developed internal fractures and improved the transportation and storage capacity, which have met the basic conditions of forming a high-quality reservoir.

Key words: volcanic rock; andesite; microfracture; structural fracture; Mesozoic; Bohai Sag

资助项目: 崂山实验室科技创新项目“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测”(LSKJ202204400); 国家自然科学基金重大计划重点项目支持项目(92058211); 国家自然科学基金创新研究群体项目(42121005); 国家自然科学基金面上项目“走滑派生构造差异演化主控因素的砂箱实验研究: 以郯庐断裂渤海-山东段张扭派生的构造为例”(42072235); 李三忠教授泰山学者攀登计划项目(tspd20210305); 邢会林教授泰山学者特聘专家计划项目(tstp20221112)

作者简介: 陈欣(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事构造地质学研究, E-mail: cx1678442178@163.com

通讯作者: 郭玲莉(1985—), 女, 副教授, 硕士生导师, 从事构造地质学及海洋地质学研究, E-mail: guolingli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-12-31; **改回日期:** 2023-03-22. 周立君编辑

近年来, 随着油气勘探程度的提高, 火山岩油气藏的勘探也不断取得突破。目前, 在全球 20 多个国家的 336 个盆地或区块内发现了火山岩油气藏或油气显示^[1]。渤海湾盆地火山岩广泛分布, 中生界火山岩以中基性-酸性岩为主, 主要发育在渤海海域、辽河坳陷、黄骅坳陷(图 1a)等, 岩性主要为玄武岩、安山岩、粗面岩^[2-3]。除渤海湾盆地外, 我国在准噶尔、三塘湖、四川、松辽、海拉尔、二连等盆地的多个构造区相继发现火山岩油气藏, 并获得显著的油气勘探成果, 火山岩油气藏已经成为我国重要的勘探研究方向^[4-9]。

油气成藏需要充足的油源供给, 渤中凹陷是渤海湾盆地东部重要的富烃中心, 中生界火山岩层系与沉积层系交互形成的火山-沉积层序成藏组合, 利于形成油气藏, 中生界火山岩分布区是渤海海域油气勘探的有利区带^[10-11]。渤中凹陷自 20 世纪 70 年代开始勘探至今, 24 口钻遇中生界火山岩探井和评价井中, 有 10 口井在火山岩测试中获得油气流, 渤中地区火山岩具有良好的勘探前景^[12]。但研究区深层潜山地质情况复杂、针对火山岩潜山储层的相关研究还局限于宏观尺度, 缺少孔隙微观表征方面的研究, 以至于对火山岩储层的形成及改造作用认识不清, 优质储层分布规律尚不清楚, 制约了研究区火山岩油气藏勘探的深入开展。

潜山储层裂缝发育程度的实验研究可用于评价储层优劣。庞彦明等^[13] 和孙先达等^[14] 利用扫描电镜、X-CT 扫描和激光共聚焦扫描技术对松辽盆地北部营城组酸性火山岩储层微观结构进行了定量化描述, 发现酸性火山岩微观孔隙结构具有孔喉

比超大的特征; 姜振学等^[15] 利用二氧化碳吸附、甲烷吸附、氮气吸附和高压压汞对川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构进行了研究, 证实了孔隙结构对页岩含气性具有控制作用; 刘翰林^[16] 使用恒速压汞、扫描电镜、铸体薄片等方法对比分析了陇东地区不同构造段砂岩储层微观结构差异, 建立了不同储层类型的成因模式及孔隙演化。陶圩等^[17] 使用声发射检测技术研究了渤中凹陷深层多种潜山储层岩性在压性环境及张性环境下微裂隙发育特征。声发射技术能够实时、不间断地反馈岩石样品在受力状况下其内部微裂缝的产生以及扩展过程, 并且能够对微裂隙位置进行准确定位^[18-20]。作为一种便捷且经济的实验技术, 在储层裂隙发育特征研究中拥有良好的应用前景。

本文以中生界安山岩为例, 研究渤中凹陷中生界火山岩潜山储层的裂隙发育特征, 结合渤中区域安山岩潜山经历的挤压和拉张构造应力场, 开展了压性构造环境和张性构造环境下裂隙发育程度实验。使用声发射技术记录实验过程中出现的微裂隙, 分析不同应力条件下微裂隙发育特征和空间分布规律, 结合岩石光薄片鉴定, 识别微裂隙发育形态和规模; 结合渤中地区构造演化历史, 探讨张性和压性构造应力环境下中生界火山岩微裂隙发育能力及储集能力优劣。

1 区域地质背景

渤海湾盆地是华北克拉通东部地块上的一个中、新生代盆地^[21], 位于华北地区中北部, 是我国重

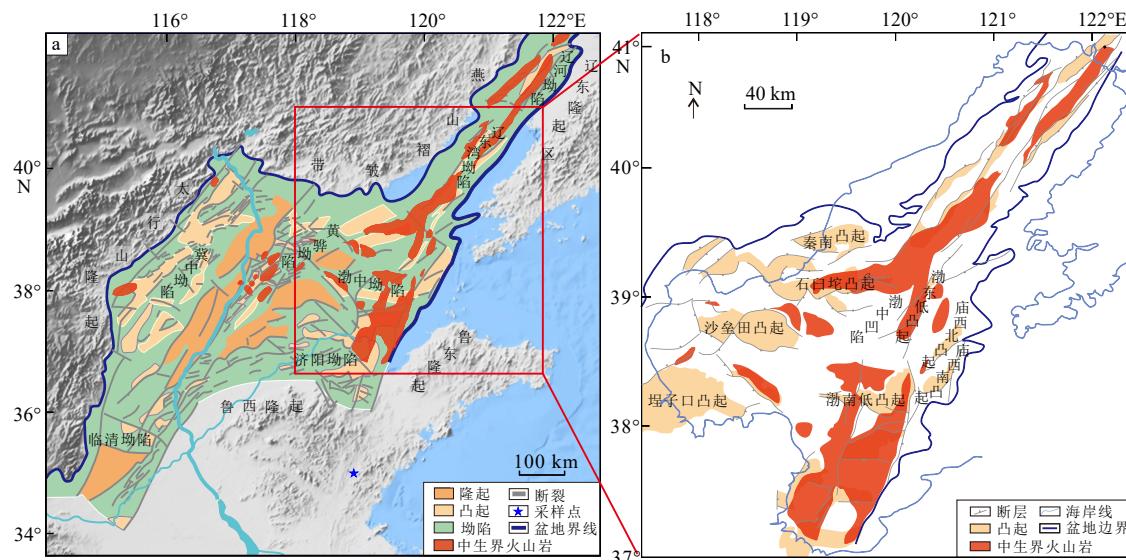


图 1 渤海湾盆地与渤海海域中生界火山岩分布^[18, 31]

Fig.1 Distribution of the Mesozoic volcanic rocks in Bohai Bay Basin and Bohai Sea area^[18, 31]

要的含油气盆地。渤海湾盆地在印支期受到华北板块在南部与华南板块碰撞、北部与东北地块群碰撞的控制,燕山期主要被古太平洋板块向欧亚大陆东缘俯冲作用所约束,喜山期受到太平洋板块俯冲和印度-欧亚大陆碰撞远程效应的叠加影响^[22-23]。燕山中一晚期,尤其是晚侏罗世以后,渤海湾盆地地质构造最为活跃,受古太平洋板块俯冲作用影响,渤海湾盆地东部形成了 NNE 向的走滑断裂带^[24],盆地表现为东部拉张和西部挤压,同时深部软流圈岩浆上涌,火山活动在中生代十分强烈,渤海湾盆地也是中国东部岩石圈最薄的地区^[2]。

渤中凹陷位于渤海湾盆地东部海域,其四周主要与凸起相邻,东、南、西、北依次是渤东低凸起、渤南低凸起、沙田凸起和石臼坨凸起(图 1b),凹陷面积 8634 km²。凹陷呈 NE 走向,东北部较窄,向西南部逐渐变宽,是渤海湾盆地的沉积中心,沉积厚度大,生烃物质基础雄厚,是重要的富烃凹陷^[25-26]。中生代以来,华南板块和华北板块挤压碰撞,使渤中凹陷局部抬升遭受剥蚀,三叠系几乎被剥蚀殆尽,仅局部留有余存。侏罗纪以后,太平洋板块对华北板块的高角度俯冲,郯庐断裂带相应发生大规模的左旋走滑,同时深部软流圈大规模上涌活动,幔源岩浆增生到地壳底部发生侵入作用,在这两种机制的联合作用下,渤海湾盆地发生了大规模的裂陷作用,并伴有大规模的火山活动,在研究区形成了巨厚的中生界火山岩地层^[27]。

研究区中生界火山岩的空间展布具有差异性,平面上东部主要呈 NE 向展布,沿郯庐断裂带发育,其发育重点区为渤东低凸起、渤南低凸起以及石臼坨凸起等,而在渤海中、西部海域分布范围相对零星(图 1b)。据渤中凹陷钻井资料,中生界发育侏罗系和白垩系火山岩,而缺失下三叠统。侏罗系自下而上发育兴隆沟组、北票组、海房沟组、髫髻山组和土城子组,海房沟组主要为粗碎屑砂砾岩,局部夹杂煤层,髫髻山组火山岩范围较小,局部地区存在中酸性侵入岩体。白垩系自下而上发育义县组、九佛堂组、沙海祖、阜新组以及孙家湾组,其中,九佛堂组至孙家湾组以河湖相沉积为主,主要为泥岩,局部夹杂薄层砂岩,火山岩不发育;义县组火山岩最为发育,且发育基性-中性-酸性的岩浆演化序列,可划分 3 个喷发旋回(图 2)^[28]。旋回一发育基性-中基性火山岩,岩性以玄武岩、玄武质安山岩为主;旋回二发育安山岩、玄武安山岩和凝灰岩,其中下部为中性肉红色安山岩和凝灰岩,中部为灰绿色安山岩、安山质角砾岩和凝灰岩,上部为灰色英安

岩和灰绿色的英安质角砾岩;旋回三发育酸性火山岩,下部以英安岩为主,中部为英安岩和英安质角砾岩互层,上部岩性复杂,岩相呈多样化,以流纹岩、流纹质角砾岩、粗面岩、粗面质角砾岩及凝灰岩夹层为主^[29-31]。

2 实验方法和数据分析

2.1 样品制备

根据钻井资料,安山岩为渤中地区火山岩油气藏重要储层之一,其中石臼坨凸起、渤东低凸起等构造的安山岩储层都有明显裂缝发育^[2,32]。本文样品采自于渤中地区深部中生界安山岩地层延伸至山东鲁西地区的中生界安山岩野外露头(采样点坐标: 35°42'26.9"N, 118°58'47.5"E),鲁西地区与渤中凹陷具有相同的大地构造环境和演化历史,且两地安山岩岩石学特征相似^[33-34],是类比的好材料,采样位置如图 1a 所示。结合渤中凹陷构造演化过程,安山岩裂隙发育实验按加载条件可分为压性和张性两类。样品尺寸及实验参数如表 1 所示,压性环境的安山岩样品为高 80 mm、直径 40 mm 的圆柱样;张性环境的安山岩样品为高 30 mm、直径 60 mm 的圆盘样(表 1)。

2.2 实验加载和数据分析

本实验加载在 CTM 微机伺服控制液压试验机上开展,使用 16 通道声发射全波形采集与分析系统记录实验过程的声发射信号,声发射探头分布位置如图 3 所示。压性环境下的裂隙发育实验分两组进行(Exp.1 和 Exp.2),以 0.1 kN/s 的速度进行载荷加载,Exp.1 对安山岩柱样进行连续加载,直至样品发生脆性破裂;Exp.2 对安山岩样品进行分段加载,以 Exp.1 安山岩样品的破坏时峰值应力基准,分段加载至峰值应力的 20%、40%、60%、70%,对比分析不同应力阶段的裂隙发育规模。本文定义 0~20% 峰值应力为低应力阶段,20%~70% 峰值应力为中等应力阶段,大于 70% 峰值应力为高应力阶段。张性环境下的裂隙发育实验为 Exp.3,保持 0.02 kN/s 的速度进行载荷加载,直至样品发生脆性破裂(表 1)。

实验加载完成,将安山岩样品沿横截面每隔 5 mm 制作一个岩石光薄片,分析岩石受力变形后微裂隙的发育类型、充填情况以及各应力阶段内微裂隙发育特征。本文使用的声发射定位分析软件

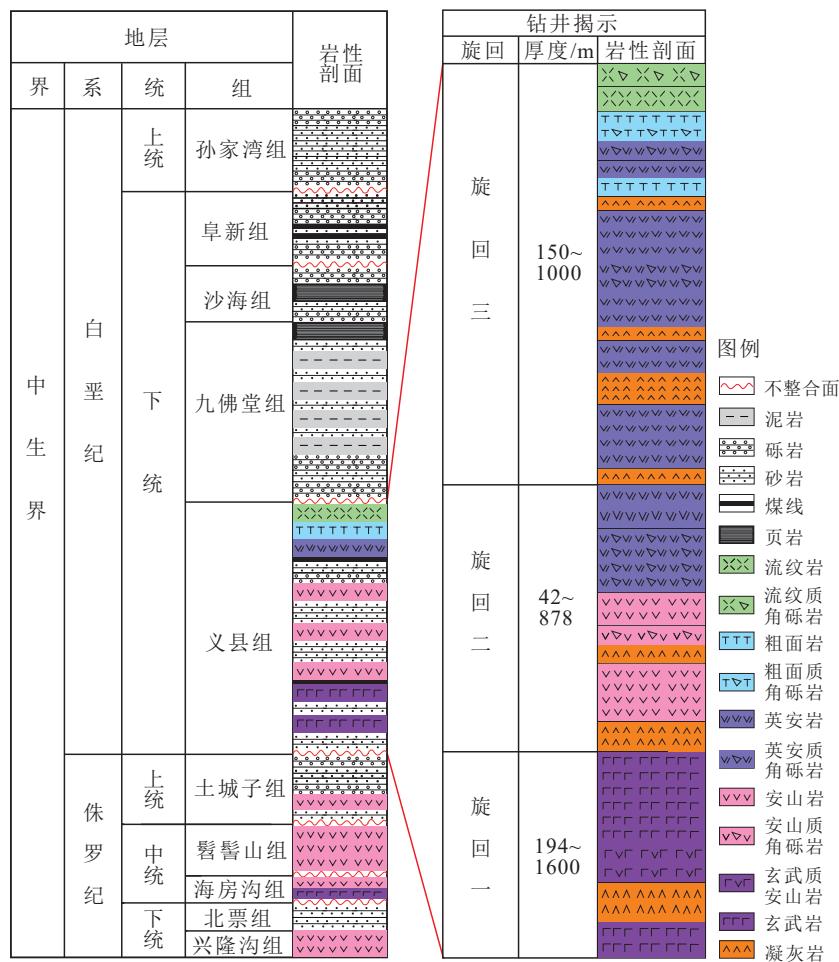
图 2 渤海海域中生界地层综合柱状图^[11, 29]Fig.2 Comprehensive histogram of the Mesozoic strata in Bohai Sea area^[11, 29]

表 1 样品尺寸及实验参数

Table 1 Sample size and experimental parameters

实验编号	加载条件	样品尺寸	声发射探头数量	加载速度	峰值应力
Exp.1	压性	Φ40 mm×80 mm	13	0.1 kN/s	100%
Exp.2	压性	Φ40 mm×80 mm	13	0.1 kN/s	70%
Exp.3	张性	Φ60 mm×30 mm	14	0.02 kN/s	100%

为中国地震局地质研究所研发的“AE007”，声发射定位原理基于时差定位法，并通过提高传感器下限及控制波速范围实现了平抑波速场不均对定位结果的误差^[35-36]。定位结果可直观反映岩石内部声发射源位置、裂纹初始位置、岩石损伤状况和不同加载阶段裂隙的发展程度。

3 微裂隙发育实验结果

3.1 压性环境下安山岩微裂隙发育特征

Exp.1 为安山岩样品连续加载至破裂，整个加

载过程中均有微裂隙产生，但不同应力状态下微裂隙发育的规模和空间分布差异较大（图 4a），在低应力状态阶段（0~20% 峰值应力）和高应力状态阶段（>70% 峰值应力），样品所产生的微裂隙比中等应力状态阶段（20%~70% 峰值应力）更多（表 2）。低应力状态阶段，样品的声发射数量维持在较高水平，较短时间内样品产生了大量微裂隙。微裂隙定位结果显示，此阶段产生的微裂隙主要集中在样品中心的局部区域，另有一些微裂隙零星分布于样品两端。在中应力状态阶段，随着应力增加，声发射数量较少，微裂隙规模很小，主要分布在样品两端，说明样品中部先存裂隙被逐步压实，没有形成新的微裂隙。期间出现了一次较为明显的声发射事件丛集，定位结果显示微裂隙位于样品中下部，说明早期形成于样品中部的微裂隙在中等压应力阶段向下扩展。高应力状态阶段，样品进入塑性变形并最终破裂，声发射事件率快速上升，峰值应力前声发射事件率出现回落几乎消失，随后突增至最高，表明样品内部微裂隙贯通形成宏观裂缝（图 4b）。

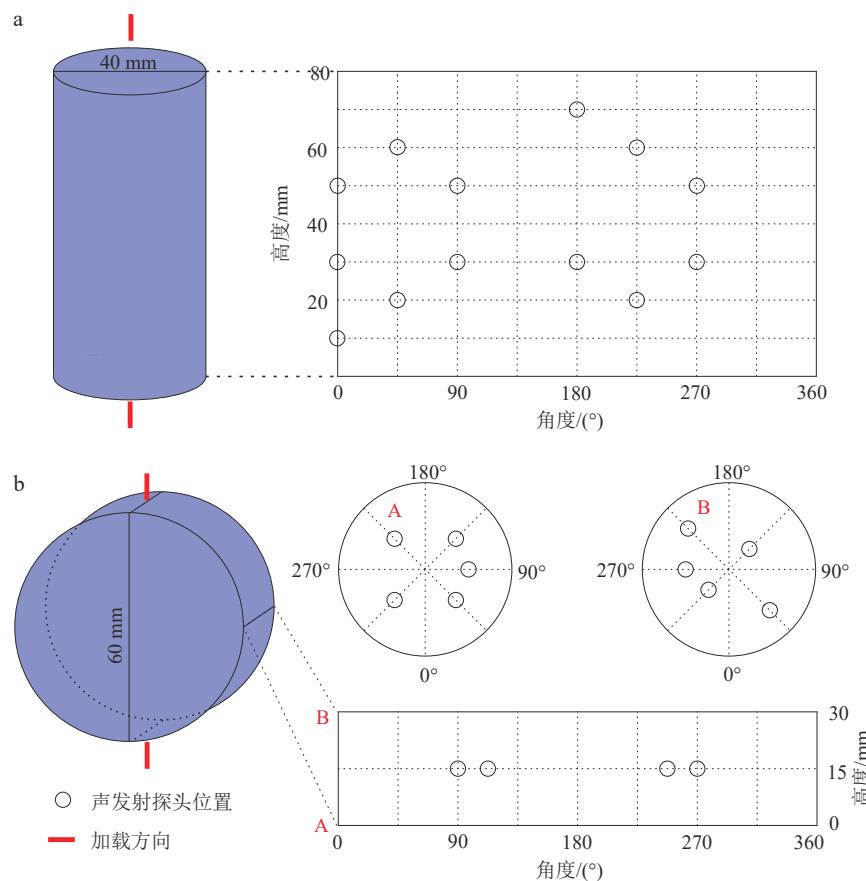


图 3 实验样品尺寸及声发射探头分布

a: 压性条件样品布局, b: 张性条件样品布局。

Fig.3 Test sample size and layout of acoustic emission probe

a: Layout of compressive condition samples, b: layout of tensile condition samples.

表 2 实验结果统计

Table 2 Statistics of experimental results

实验编号	最大应力/MPa	声发射数量			累计数量
		低应力阶段0~20%	中应力阶段20%~70%	高应力阶段70%~100%	
Exp.1	166.4	444	154	734	1332
Exp.2	116.4	630	75		705
Exp.3	6.3	114	462	644	1220

Exp.2 为安山岩样品分段加载实验, 安山岩样品在各加载阶段产生的微裂隙如图 4c 和图 4d, 微裂隙主要产生于低应力状态阶段, 其微裂隙数量占比为 90%。低应力状态阶段, 样品内部形成了一定规模的微裂隙, 声发射事件率较高。该阶段微裂隙主要分布在两端, 中部为微裂隙空白区域。说明样品上下部的先存裂隙相对发育, 先存裂隙在较低应力状态下再活化并扩展。随着应力加载, 安山岩样品在中等应力状态阶段仅产生了少量微裂隙, 声发射事件率较低。根据微裂隙定位结果, 该阶段产生的微裂隙主要出现在样品的上部和下部(图 4d)。

3.2 张性环境下安山岩微裂隙发育特征

Exp.3 为安山岩样品的张性环境微裂隙发育实验, 在低应力状态阶段持续有微裂隙形成, 但整体声发射事件率不高(图 5a), 该阶段产生的微裂隙规模除了小规模出现在样品下部外, 绝大多数集中于临近加载端的样品上部。随着应力的增加, 在中应力状态阶段样品内部微裂隙持续产生, 并形成明显的声发射集中区(图 5b)。说明样品上半部分微裂隙开始稳定地扩展汇聚。在高应力状态阶段, 声发射事件率水平随应力增大而逐渐上升, 这个阶段样品产生了大量微裂隙。该阶段样品产生的微裂隙

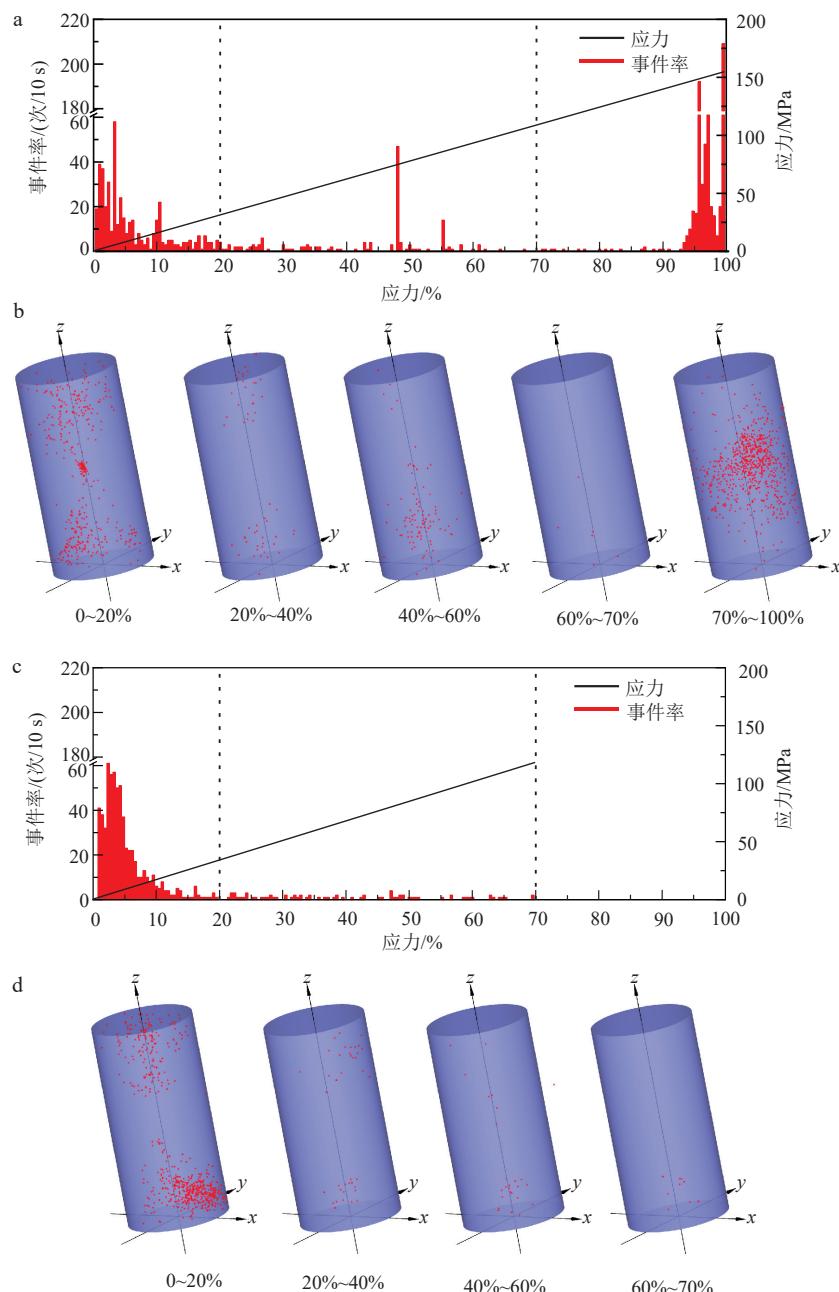


图 4 压性环境下声发射事件率及空间分布演化

a: Exp.1 声发射事件率, b: Exp.1 微裂隙空间分布及演化, c: Exp.2 声发射事件率, d: Exp.2 微裂隙空间分布及演化。

Fig.4 The acoustic emission event rate and the evolution of spatial distribution in compressive environment

a: Exp.1 acoustic emission event rate, b: Exp.1 spatial distribution and evolution of microcracks, c: Exp.2 acoustic emission event rate, d: Exp.2 spatial distribution and evolution of microcracks.

主要位于中上部, 此时样品上部的裂隙进入非稳定扩展阶段, 开始向下延伸, 最终与样品下部裂隙贯通形成主破裂面。

不同的应力环境下, 安山岩微裂隙发育特征有所不同。压性环境中, 安山岩在低应力状态下就有较大规模微裂隙产生, 而随着应力升高, 微裂隙发育规模扩大的幅度很小; 而张性环境下, 安山岩在高应力状态阶段微裂隙最为发育, 在其余阶段也有

多次的声发射脉冲, 规模不大。

3.3 微裂隙发育形态

通过实验后岩石光薄片显微分析, 安山岩样品内部多具有斑状、交织结构, 偶见玻晶交织结构, 其中斑晶为中性斜长石、角闪石, 偶见辉石, 与渤中凹陷深层安山岩对比, 其矿物组合、结构、构造等特征相似^[33-34]。此外, 构造缝、溶蚀孔和溶蚀缝非常发

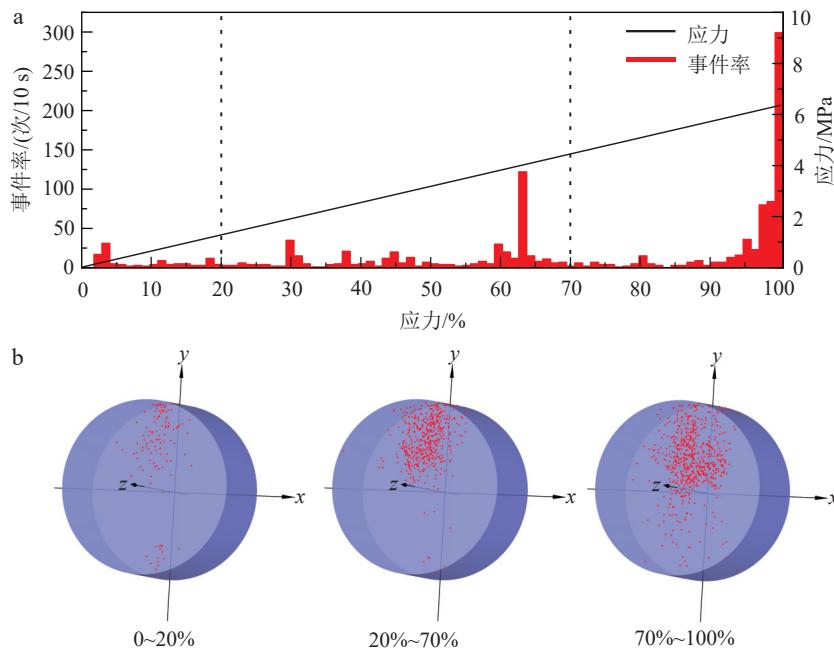


图 5 张性环境下声发射事件率及空间分布演化

a: Exp.3 声发射事件率, b: Exp.3 微裂隙空间分布及演化。

Fig.5 Acoustic emission event rate and evolution of spatial distribution in tensional environment

a: Exp.3 acoustic emission event rate, b: Exp.3 spatial distribution and evolution of microcracks.

育(图 6-8)。图 6 和图 7 分别为分段加载实验 Exp.2 中 $z=15$ mm 处和 $z=10$ mm 处的岩石光薄片的显微分析, 声发射定位处的微裂隙较多, 如图 6b 和 7b 中圆点所示。图 8 为 Exp.1 中 $z=70$ mm 处的岩石光薄片的显微分析。从发育形态看, 构造缝较为平直, 延伸较长(图 6f), 可见切穿长石、切割溶蚀缝(图 6d, 图 7e), 先存构造缝存在被溶蚀填充的现象(图 7f); 溶蚀缝多呈不规则脉状, 缝宽不一致, 内边缘较平滑, 部分也被填充物填充不能作为有效储层空间(图 7c); 长石中发育了大量溶蚀孔(图 7d); 一部分原生气孔被充填为杏仁(图 6d, 图 8f)。

压性环境下, 声发射定位的微裂隙分布位置与安山岩先存裂隙比较吻合, 表明实验中安山岩产生的微裂隙主要来源于先存构造缝、溶蚀缝和溶蚀孔的“再活化”。这些“再活化”的裂缝分为“边缘型裂缝”(图 8c)和“缝内型裂缝”(图 8d), 新产生的构造缝形成于先存裂隙周围或内部。在一定的构造应力下, 裂缝优先发育在“较弱”的低强度区域, 如先存的裂缝。叠加不同应力阶段的声发射定位(图 6-7), 在中、高应力阶段所产生的微裂隙分布于在低应力阶段产生的微裂隙区域内, 且位置更加集中, 表明安山岩在高应力状态产生的微裂隙是对低应力状态下产生的微裂隙的进一步加宽和扩展。张性环境下声发射定位和安山岩裂缝的相对位置

一致, 主断裂与声发射定位比较吻合; 在主断裂两侧还产生了多条次断裂(图 9)。

4 讨论

4.1 渤海湾盆地火山岩裂缝特征

山东省鲁西地区北部紧邻渤海湾盆地, 位于郯庐断裂带以西, 与渤中凹陷具有相同的大地构造环境和演化历史^[37-38], 可用于野外对比, 来分析渤海湾盆地深部潜山构造储层的发育情况。据鲁西地区 30 多个野外露头观察研究, 主要发育火山熔岩和火山碎屑岩两大类。火山熔岩含有安山岩, 普遍发育气孔构造; 火山碎屑岩主要为安山质碎屑岩和凝灰质碎屑岩, 表层构造缝和内部裂缝均比较发育。该区火山岩地层不仅受到多期强烈构造作用的叠加改造, 更经历长时间的风化作用影响, 大尺度上发育断层, 甚至多期断层(图 10a、b), 小尺度上发育构造裂缝、风化裂缝(图 10c、d)。

渤中凹陷火山岩储层成因类型多, 物性差异大, 有效储层形成机理与分布规律制约着深层勘探的进一步发展。为此, 众多学者针对渤中部地区中生界火山岩储层特征及主控因素进行了大量研究。研究者通过岩芯和岩石薄片分析, 将火山岩储

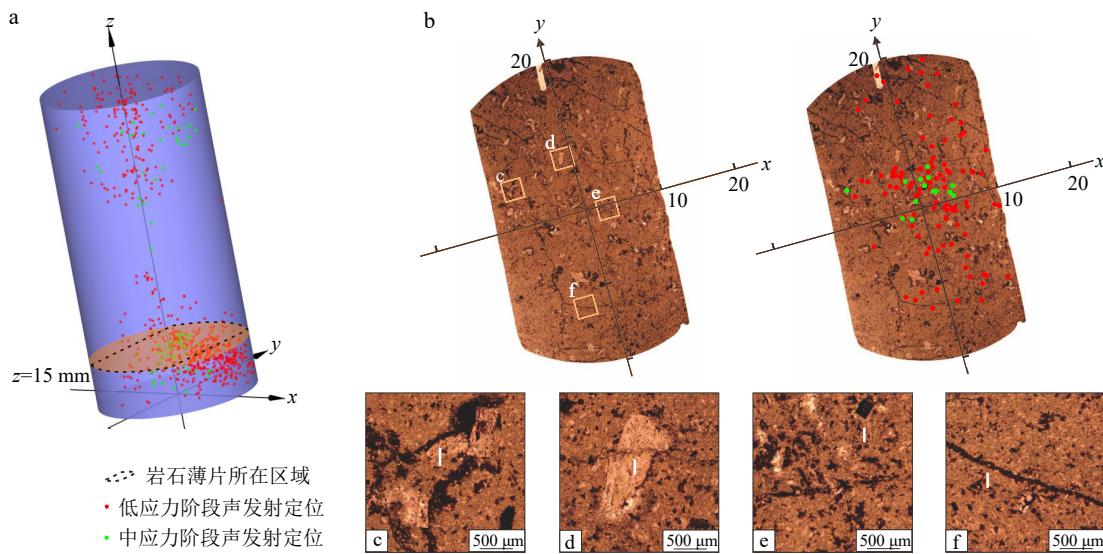


图 6 Exp.2 样品高度为 15 mm 微裂隙分布及发育特征

a: Exp.2 样品微裂隙空间分布, b: $z=15\text{ mm}$ 岩石薄片及微裂隙投影分布, c: 溶蚀缝, d: 构造缝切穿长石, e: 杏仁体, f: 构造缝。

Fig.6 Exp.2 distribution and development of microcracks in sample height of 15mm

a: Spatial distribution of microcracks in Exp.2 sample, b: $z=15\text{ mm}$ rock slice and microcracks projection distribution, c: corrosion joint, d: structural joints cut through feldspar, e: amygdala, f: structural joint.

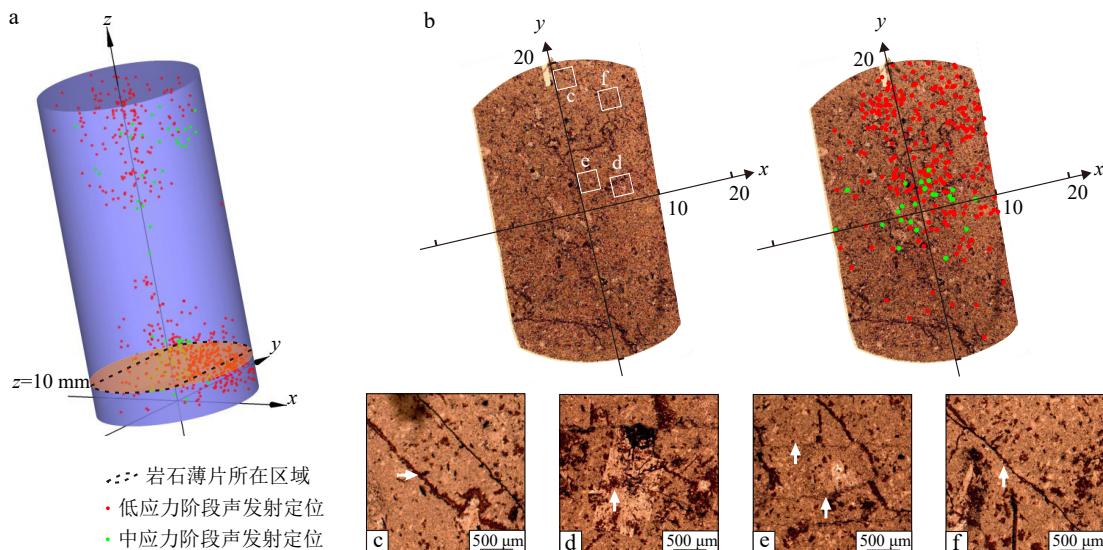


图 7 Exp.2 样品高度为 10 mm 微裂隙分布及发育特征

a: Exp.2 样品微裂隙空间分布, b: $z=10\text{ mm}$ 岩石薄片微裂隙投影分布, c: 溶蚀缝, d: 溶蚀孔, e: 构造缝(切割溶蚀缝), f: 构造缝(部分被溶蚀填充)。

Fig.7 Exp.2 distribution and development characteristics of microcracks with a sample height of 10mm

a: Spatial distribution of microcracks in Exp.2 sample, b: projection distribution of microcracks in $z=10\text{ mm}$ rock slice, c: corrosion joint, d: corrosion hole, e: structural fracture (cutting corrosion fracture), f: structural fracture (partially filled by corrosion).

层储集空间类型按成因划分为裂缝、原生孔隙和次生孔隙三大类, 其中主要的储集空间以次生孔隙与裂缝为主^[2, 39]。渤中地区中生界火山岩地层遭受了多期旋回的构造作用, 长期暴露于地表, 受到强烈的风化淋滤作用, 形成了规模大且复杂的裂缝系

统。构造缝主要为高角度裂缝、直立缝和斜交缝, 切割形态平直且延伸较远, 充填程度一般为半充填或全充填(图 11b); 溶蚀缝常与溶蚀孔和构造缝交错相连, 缝面呈不规则长条状, 多为未充填或半充填状(图 11a)。从野外勘查结果和钻井岩石光薄片

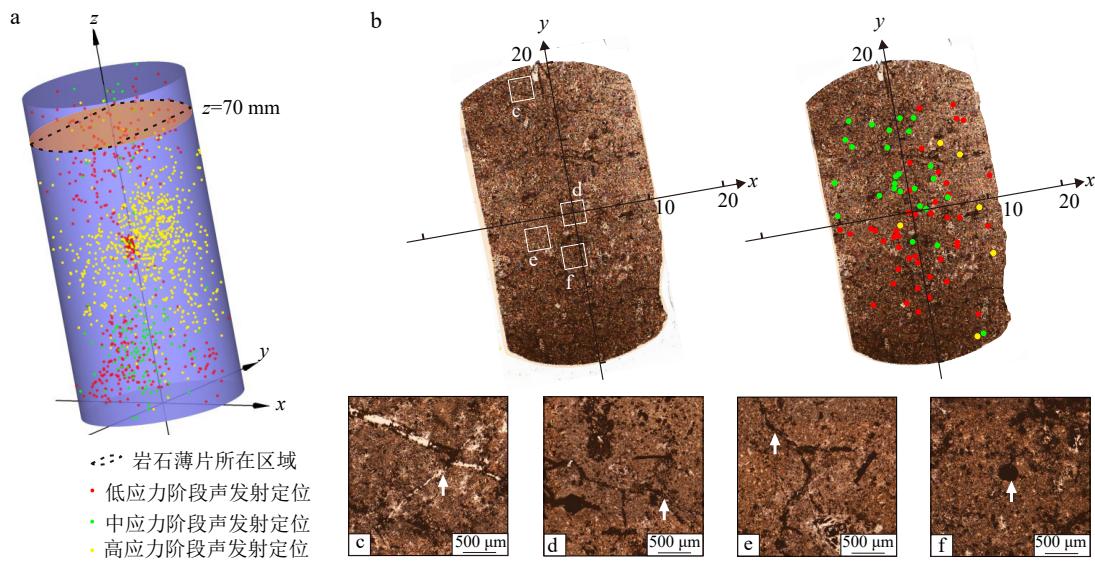


图 8 Exp.1 样品高度为 70 mm 微裂隙分布及发育特征

a: Exp.1 样品微裂隙空间分布, b: $z=70\text{ mm}$ 岩石薄片及微裂隙投影分布, c: 构造缝(裂缝边缘裂缝), d: 构造缝(裂缝内裂缝), e: 溶蚀缝, f: 杏仁体。

Fig.8 Exp.1 distribution and development of microcracks with a sample height of 70 mm

a: Spatial distribution of acoustic emission of Exp.1 sample, b: projection distribution of rock slice and acoustic emission at $z=70\text{ mm}$, c: structural crack (crack edge crack), d: structural fractures (fractures within fractures), e: corrosion joint, f: amygdala.

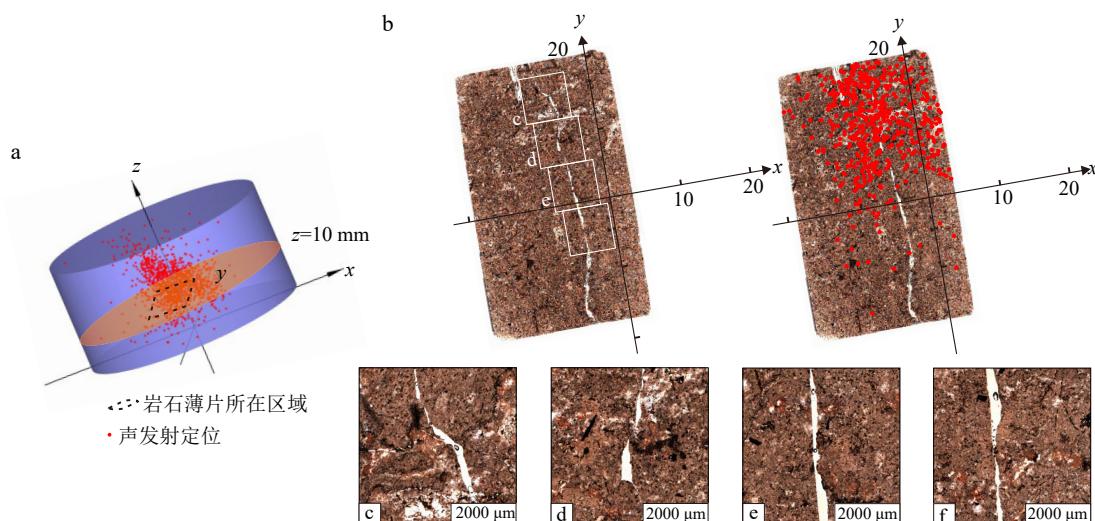


图 9 Exp.3 样品高度为 10 mm 微裂隙分布及微裂隙发育特征

a: Exp.3 样品微裂隙空间分布, b: $z=10\text{ mm}$ 岩石薄片及微裂隙投影分布, c-f: 主破裂带。

Fig.9 Exp.3 distribution and development of microcracks with a sample height of 10 mm

a: Spatial distribution of microcracks in Exp.3 sample, b: $z=10\text{ mm}$ rock slice and microcracks projection distribution, c-f: main fracture zone.

分析, 渤海湾盆地发育的中生界火山岩裂隙较为发育, 与实验结果一致, 具备形成优质储层的能力。

4.2 构造运动对火山岩储层的影响

渤中凹陷构造演化过程及构造格局对于研究火山岩储层优劣有着关键作用。渤中凹陷中生界火山岩潜山经历了中生代燕山期及新生代喜山期

构造运动。燕山期, 华北板块受到太平洋板块俯冲作用, 郊庐断裂经历了左旋走滑断裂作用, 渤中凹陷处于左旋压扭的构造应力场中^[40-41](图 12)。太平洋板块的俯冲作用为火山岩潜山储层形成初始断裂提供了必要的动力条件。通过实验分析, 火山岩在低应力时期即可在先存的裂缝周围形成大量微裂隙, 随着压应力的不断增大, 大量挤压裂隙产

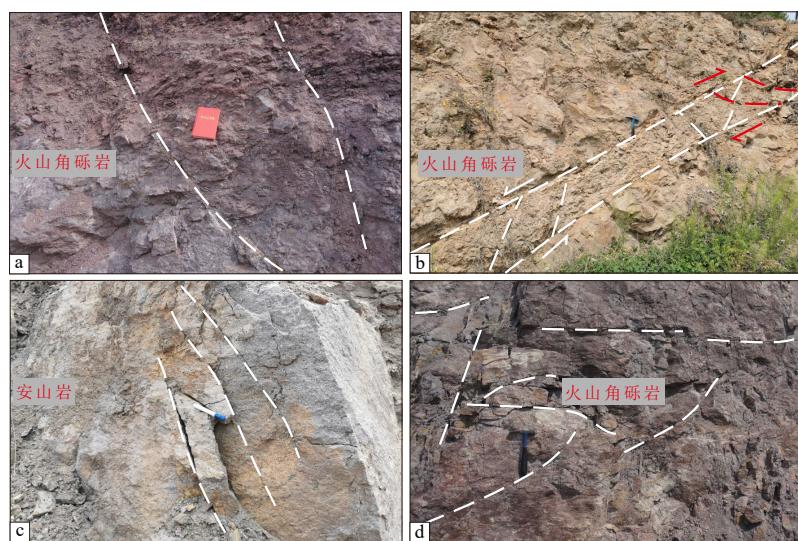


图 10 鲁西地区火山岩裂缝发育特征

a: 断层; b: 两期断层(左行为早期, 右行为晚期); c: 构造裂缝; d: 风化裂缝。

Fig.10 Development of typical fractures in volcanic rocks in western Shandong Province

a: Fault; b: two-stage fault (early left behavior and late right behavior); c: structural cracks; d: weathering cracks.

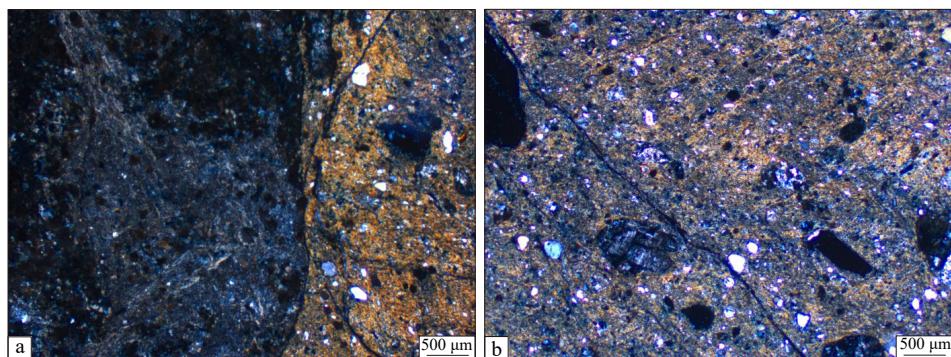


图 11 渤中凹陷中生界火山岩裂缝发育特征

火山角砾岩, 渤中凹陷西南部, 4218 m, 正交光, ×25。

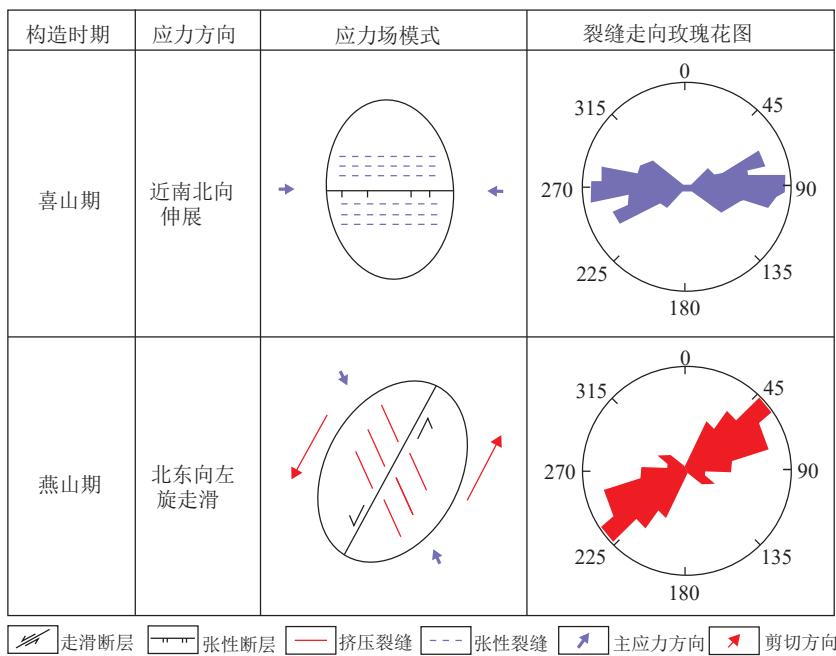
Fig.11 Fracture development of the Mesozoic volcanic rocks in Bozhong Sag

Volcanic breccia in 4218m in the southwest of Bozhong Sag, orthogonal light, ×25.

生并形成大规模断裂系统, 断裂带贯穿始终。然而, 薄片和岩芯资料表明, 先存裂隙部分已被溶蚀充填, 不能作为有效的储集空间。即使部分先存裂隙被充填, 也有利于在后期构造作用下裂缝的重新活化。

由于印度板块与华北板块的碰撞, 新生代渤海凹陷处于喜山期南北向伸展构造应力场^[42-43]。在南北向伸展作用下, 断层重新活动为伸展断层, 形成一系列北东向正断层^[44]。喜山期构造作用不足以形成新的大尺度裂缝。然而, 该构造作用阶段对先存裂隙的“再活化”至关重要, 这一时期是有效裂缝形成的关键时期。前期挤压形成了大规模的断裂系统, 在喜山期构造作用下重新被激活^[45-46]。

综上, 渤中凹陷中生界火山岩自中生代以来遭受了强烈压扭作用, 同时经历了多期深部岩浆-热液作用和火山活动, 在火山岩地层内部广泛发育构造缝、溶蚀孔和溶蚀缝。后期又受喜山期伸展改造作用, 内部溶蚀孔、缝及构造缝也得到了进一步的改造扩展, 渤中凹陷烃源层产生油气物质随大型断裂及不整合面进入火山岩岩层, 储油气潜山逐渐形成, 运储能力得以提升, 具备成为优质储层的基本条件。此外, 构造作用和风化作用对火山岩潜山储层的影响是相互关联的。构造应力不仅影响裂缝类型和密度, 还控制着风化程度。裂缝越发育内部裂缝更容易受到强烈溶蚀扩展, 导致形成更厚的风化壳和裂缝周围更宽的风化带, 这对油气储运空间

图 12 渤中凹陷深层潜山储层各时期构造应力与裂缝发育关系^[47]Fig.12 Relationship between tectonic stress and fracture development of deep buried hill reservoir in Bozhong Sag at different stages^[47]

的形成至关重要。

5 结论

(1) 根据野外观察和实验对比分析, 渤中凹陷安山岩储层内部广泛发育裂隙, 其主要类型为构造缝、溶蚀孔和溶蚀缝。

(2) 安山岩在张性和压性环境下均具备微裂隙发育能力, 但不同的应力环境下微裂隙发育特征有所不同。在压性环境下, 安山岩在低应力状态阶段就有较大规模微裂隙产生, 而张性环境下安山岩在高应力状态阶段微裂隙最为发育, 其原因可能是安山岩本身含有大量先存构造缝、溶蚀缝和溶蚀孔, 受较小的应力后“再活化”产生微裂隙。

(3) 渤中凹陷中生界安山岩储层经历了多期构造运动的叠加改造, 尤其是喜山期对先存裂隙的“再活化”至关重要, 前期挤压形成了大规模的断裂系统, 在喜山期构造作用下重新被激活, 是有效裂隙形成的关键时期。

致谢: 在实验和数据处理过程中受到了中国地震局地质研究所刘培洵副研究员、郭彦双副研究员和齐文博副研究员的指导和帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- [1] 王洛, 李江海, 师永民, 等. 全球火山岩油气藏研究的历程与展望 [J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1610-1620. [WANG Luo, LI Jianghai, SHI Yongmin, et al. Review and prospect of global volcanic reservoirs [J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1610-1620.]
- [2] 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.]
- [3] 王宇, 徐春强, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地石臼坨东428潜山构造成因解析: 华北克拉通破坏的深度揭示 [J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 219-228. [WANG Yu, XU Chunqiang, GUO Lingli, et al. Structural analysis of Shijiutuo East 428 buried hill in Bohai Bay basin: implications on destruction of the North China Craton [J]. Geotectonica et Metallogenica, 2021, 45(1): 219-228.]
- [4] Chen Z H, Liu W, Zhang Y, et al. Characterization of the paleocrusts of weathered Carboniferous volcanoes from the Junggar Basin, western China: Significance as gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 216-234.
- [5] Li H, Tang H M, Qin Q R, et al. Characteristics, formation periods and genetic mechanisms of tectonic fractures in the tight gas sandstones reservoir: A case study of Xujiahe Formation in YB area, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 723-735.
- [6] Zou C N, Zhu R K, Zhao W Z, et al. Geologic characteristics of volcanic hydrocarbon reservoirs and exploration directions in China [J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2010, 84(1): 194-205.

- [7] Du S, Shan X L, Yi J, et al. Controlling factors of high-quality volcanic reservoirs of Yingcheng Formation in the Songnan gas field [J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(4): 892-902.
- [8] Tang H F, Kong T, Liu X, et al. Formation mechanism of high-quality reservoirs of Lower Cretaceous volcanoclastic sedimentary rocks in Songliao Basin [J]. *Petroleum Research*, 2017, 2(2): 186-198.
- [9] Feng Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(4-5): 416-432.
- [10] 黄胜兵, 刘丽芳, 陈少平, 等. 渤东低凸起南段中生界火山岩潜山优质储层形成控制因素及综合预测[J]. 中国海上油气, 2021, 33(2): 26-35. [HUANG Shengbing, LIU Lifang, CHEN Shaoping, et al. Controlling factors and comprehensive prediction for the formation of Mesozoic high quality volcanic buried hill reservoirs in the southern part of Bodong low uplift [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(2): 26-35.]
- [11] 徐春强, 张新涛, 王晨杰, 等. 渤中凹陷中生界火山岩特征及优质储层控制因素[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2022, 52(4): 1027-1036. [XU Chunqiang, ZHANG Xintao, WANG Chenjie, et al. Characteristics of mesozoic volcanic rocks and controlling factors of high quality reservoirs in Bozhong depression [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2022, 52(4): 1027-1036.]
- [12] 张新涛, 张藜, 刘晓健. 渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩优质储层发育规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2023, 53(1): 1-16. [ZHANG Xintao, ZHANG Li, LIU Xiaojian. Development regularity of the mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay basin, China [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2023, 53(1): 1-16.]
- [13] 庞彦明, 章凤奇, 邱红枫, 等. 酸性火山岩储层微观孔隙结构及物性参数特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 72-77. [PANG Yanming, ZHANG Fengqi, QIU Hongfeng, et al. Characteristics of microscopic pore structure and physical property parameter in acidic volcanic reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 72-77.]
- [14] 孙先达, 索丽敏, 张民志, 等. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1479-1488. [SUN Xianda, SUO Limin, ZHANG Minzhi, et al. New progress of reservoir research by the technology of laser confocal scanning microscope analysis in the Daqing exploration area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(5): 1479-1488.]
- [15] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 126-134. [JIANG Zhenxue, TANG Xianglu, LI Zhuo, et al. The whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 126-134.]
- [16] 刘翰林, 杨友运, 王凤琴, 等. 致密砂岩储集层微观结构特征及成因分析: 以鄂尔多斯盆地陇东地区长6段和长8段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 223-234. [LIU Hanlin, YANG Youyun, WANG Fengqin, et al. Micro pore and throat characteristics and origin of tight sandstone reservoirs: A case study of the Triassic Chang 6 and Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 223-234.]
- [17] 陶圩, 郭玲莉, 刘永江, 等. 渤中凹陷深层储层裂隙发育程度实验研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 229-241. [TAO Wei, GUO Lingli, LIU Yongjiang, et al. Experiment study on microfracturing of deep reservoirs in the Bozhong Sag, Bohai Bay basin [J]. *Geotectonica et Metallogenica*, 2021, 45(1): 229-241.]
- [18] 沈功田, 戴光, 刘时风. 中国声发射检测技术进展: 学会成立25周年纪念[J]. *无损检测*, 2003, 25(6): 302-307. [SHEN Gongtian, DAI Guang, LIU Shifeng. Acoustic emission testing progress in China: celebration for the 25th anniversary of Chinese society for NDT [J]. *Nondestructive Testing*, 2003, 25(6): 302-307.]
- [19] 杨瑞峰, 马铁华. 声发射技术研究及应用进展[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(5): 456-461. [YANG Ruifeng, MA Tiehua. A study on the applications of acoustic emission technique [J]. *Journal of North University of China:Natural Science Edition*, 2006, 27(5): 456-461.]
- [20] 李善春. 管道气体泄漏的声源与声发射信号特性研究[D]. 大庆石油学院博士学位论文, 2007. [LI Shanchun. Study of acoustic resources from leakage of gas in pipe and acoustic emission signals characteristics [D]. Doctor Dissertation of Northeast Petroleum University, 2007.]
- [21] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64-89. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64-89.]
- [22] 吴智平, 侯旭波, 李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(4): 385-399. [WU Zhiping, HOU Xubo, LI Wei. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the Eastern North China block [J]. *Geotectonica et Metallogenica*, 2007, 31(4): 385-399.]
- [23] 牛成民, 薛永安, 黄江波, 等. 渤海海域隐性走滑断层形成机理、识别方法与控藏作用[J]. 中国海上油气, 2019, 31(6): 1-12. [NIU Chengmin, XUE Yong'an, HUANG Jiangbo, et al. Formation mechanisms, identification methods and control effects of recessive strike-slip faults in the Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(6): 1-12.]
- [24] 赵利, 李理. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制[J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 470-485. [ZHAO Li, LI Li. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic-Cenozoic [J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 470-485.]
- [25] 肖胜东. 渤海湾盆地渤中凹陷凝析气藏相态识别及其成因机制[D]. 西北大学硕士学位论文, 2019. [XIAO Shengdong. Phase identification and genetic mechanism of condensate gas reservoirs in the Bozhong depression, Bohai Bay Basin [D]. Master Dissertation of Northwest University, 2019.]
- [26] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1998, 34(4): 503-509. [HOU Guiting, QIAN Xianglin, SONG Xinmin. The origin of the Bohai Bay basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(4): 503-509.]
- [27] 王保全, 王志萍, 汤国民, 等. 渤海海域中部地区中生界火山岩储层特征及主控因素[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(8): 36-42. [WANG

- Baoquan, WANG Zhiping, TANG Guomin, et al. Characteristics of mesozoic volcanic reservoir rocks and their main controlling factors in the central Bohai sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(8): 36-42.]
- [28] 叶涛, 韦阿娟, 彭靖淞, 等. 渤海海域白垩系义县组火山岩岩相特征及成储差异[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 1081-1091. [YE Tao, WEI Ajuan, PENG Jingsong, et al. Characteristics and reservoir-forming differences of volcanic lithofacies in Yixian formation of Cretaceous in Bohai Bay area [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 1081-1091.]
- [29] 岳庆友. 渤中凹陷中生界火山岩成储机理及分布规律研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2021. [YUE Qingyou. Formation mechanism and distribution of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag[D]. Doctor Dissertation of Jilin University, 2021.]
- [30] 潘玉啟, 黄志安, 吴子杰, 等. 辽宁阜新地区义县组火山岩特征及喷发旋回划分[J]. 地质与资源, 2014, 23(S1): 21-26. [PAN Yuqi, HUANG Zhi'an, WU Zijie, et al. Characteristics of volcanic rocks and division of eruption cycles of the Yixian formation in Fuxin, Liaoning province [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23 (S1): 21-26.]
- [31] Tian J Q, Hao F, Zhou X H, et al. Distribution, controlling factors, and oil-source correlation of biodegraded oils in the Bohai offshore area, Bohai Bay basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2017, 101(3): 361-386.
- [32] 杨一珉. 渤中坳陷石臼坨凸起倾末端427/428构造潜山成藏特征研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2018. [YANG Yimin. The research of hydrocarbon accumulation conditions of buried hills in Shijiutuo uplift tilting end: 427/428 of Bozhong depression[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2018.]
- [33] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及主控因素[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(3): 48-57. [WANG Chenjie, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Development characteristics and main controlling factors of Mesozoic volcanic reservoirs in northern Bozhong sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(3): 48-57.]
- [34] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷428构造中生界火山岩优质储层主控因素[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(2): 69-75. [WANG Chenjie, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Main controlling factors of high-quality Mesozoic volcanic rock reservoirs in the Structure 428 of Bozhong Sag [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(2): 69-75.]
- [35] 刘培洵, 刘力强, 黄元敏, 等. 声发射定位的稳健算法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S1): 2760-2764. [LIU Peixun, LIU Liqiang, HUANG Yuanmin, et al. Robust arithmetic for acoustic emission location [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1): 2760-2764.]
- [36] 刘培洵, 陈顺云, 郭彦双, 等. 声发射矩张量反演[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 858-866. [LIU Peixun, CHEN Shunyun, GUO Yanshuang, et al. Moment tensor inversion of acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 858-866.]
- [37] 徐聪, 李理, 符武才. 鲁西地块中、新生界裂隙发育特征及构造应力场分析[J]. *地质科学*, 2021, 56(3): 829-844. [XU Cong, LI Li, FU Wucai. Development characteristics of fractures in the Mesozoic and Cenozoic and structure stress field analysis of the Luxi block [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(3): 829-844.]
- [38] 李三忠, 王金铎, 刘建忠, 等. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景[J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 487-497. [LI Sanzhong, WANG Jinduo, LIU Jianzhong, et al. Mesozoic structure and its tectonic setting in the Western Shandong block [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 487-497.]
- [39] 纪友亮, 胡光明, 黄建军, 等. 渤海湾地区中生代地层剥蚀量及中、新生代构造演化研究[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 351-358. [JI Youliang, HU Guangming, HUANG Jianjun, et al. Eroded strata thickness of mesozoic and evolution of Mesozoic and Cenozoic basins in the Bohai bay basin area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 351-358.]
- [40] 赵重远. 渤海湾盆地的构造格局及其演化[J]. *石油学报*, 1984, 5(1): 1-8. [ZHAO Chongyuan. Structural pattern and evolution of Bohaiwan BASIN, China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1984, 5(1): 1-8.]
- [41] Yi J, Li H Y, Shan X L, et al. Division and identification of vertical reservoir units in Archaeozoic metamorphic buried hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49 (6): 1282-1294.
- [42] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 147-160. [ZHOU Qijie, LIU Yongjiang, WANG Deying, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 147-160.]
- [43] 蒋有录, 刘培, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 525-533. [JIANG Youlu, LIU Pei, SONG Guoqi, et al. Late Cenozoic faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 525-533.]
- [44] 周维维. 渤海湾盆地断裂趋势带特征及控油作用[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2015. [ZHOU Weiwei. Characteristics of fault trend zone and oil control in Bohai Bay basin[D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2015.]
- [45] Liu X J, Hou M C, Niu C M, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic controls on the formation of large - scale metamorphic rock buried - hill reservoirs in Bozhong Sag, Eastern China [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(10): 5109-5124.
- [46] Wang W, Yi J, Shan X L, et al. Characteristics of fractures development and its controlling factors within the buried hill reservoirs from the Archaean metamorphic basement in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 935508.
- [47] 赵子龙. 渤中凹陷深层油气运聚成藏机制[D]. 西北大学博士学位论文, 2020. [ZHAO Zilong. Mechanism of deep hydrocarbon migration and accumulation in the Bozhong Depression[D]. Doctor Dissertation of Northwest University, 2020.]