



地学前缘
Earth Science Frontiers
ISSN 1005-2321, CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

题目： 页岩储层非构造裂缝研究进展与思考
作者： 丁文龙，王垚，王生晖，刘霆锋，张子游，勾通，张梦阳，贺湘
DOI： 10.13745/j.esf.sf.2023.12.5
网络首发日期： 2023-12-29
引用格式： 丁文龙，王垚，王生晖，刘霆锋，张子游，勾通，张梦阳，贺湘. 页岩储层非构造裂缝研究进展与思考[J/OL]. 地学前缘.
<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.12.5>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

页岩储层非构造裂缝研究进展与思考

丁文龙^{1,2,3}, 王 珪^{1,2,3,✉}, 王生晖^{1,2,3}, 刘霆锋^{1,2,3}, 张子游^{1,2,3}, 勾 通^{1,2,3}, 张梦阳^{1,2,3}, 贺 湘^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京) 自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室, 北京 100083)

*通信作者 简介: 王珪(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为石油构造分析、非常规油气储层裂缝形成机制与定量表征及工程甜点评价预测。E-mail: yaowang@cug.edu.cn

摘要 随着我国对非常规油气勘探理论的完善和技术的提高, 页岩油气勘探开发不断获得突破, 其战略地位也在不断上升。页岩储层的品质通常是制约其资源潜力的主要因素, 其中裂缝是页岩油气富集、高产、稳产的关键。因此裂缝作为富有机质页岩储层重要的储集空间和渗流通道, 其相关研究一直都是该领域内的重点。我国页岩储层内天然裂缝大量发育, 而非构造裂缝同样比较发育, 对页岩油气的富集和保存评价亦具有重要意义。目前对页岩储层构造裂缝的研究比较深入, 而对页岩非构造裂缝的研究则相对薄弱。为此本文在充分调研近年来国内外页岩非构造裂缝研究成果的基础上, 重点梳理了非构造裂缝的分类、识别与表征、主控因素、期次及演化序列等方面的研究进展。页岩储层非构造裂缝的成因和形态复杂、分布不规则、尺度较小, 依据成因机制差异将页岩非构造缝分为成岩缝、异常高压缝、层理缝和表生缝 4 个大类, 其识别与表征目前还主要停留在定性描述的阶段; 尽管不同类型的非构造缝主控因素存在差异, 但均在不同程度上受控于沉积作用、成岩作用、矿物组分及含量、岩石力学性质, 呈现出一定的共性。综合分析并指出了页岩储层非构造裂缝研究的关键问题及发展趋势: 一是基于页岩储层岩心、薄片、成像测井、常规测井的典型特征, 结合先进图像技术, 建立不同类型不同尺度非构造裂缝综合有效识别与定量表征新方法; 二是针对页岩储层非构造裂缝的形成发育具有“多成因类型、多控制因素、多期次演化”的特点, 并且页岩非构造裂缝的形成与演化与“古温压、古流体、古成岩”过程联系紧密。据此提出了利用页岩储层非构造裂缝中普遍存在的方解石等充填物的流体地球化学、同位素地球化学(C、O、Sr)及微区原位同位素年代学(U-Pb、Sm-Nd)等先进实验分析技术, 综合确定页岩储层非构造裂缝形成时间和活动期次及演化序列是未来研究的关键手段; 三是由页岩储层非构造裂缝发育程度与单因素主控因素之间的定性-半定量分析, 向多个主控因素耦合控制下的非构造裂缝发育程度的定量研究方向发展, 即采用数学方法确定不同主控因素对于裂缝发育程度影响的权重, 并构建适合我国页岩非构造裂缝发育程度的综合指数与多个主控因素之间的定量关系模型。

关键词 页岩油气; 非构造裂缝; 裂缝分类; 主控因素; 裂缝发育程度; 裂缝期次

中图分类号 TE132.2

文献标志码 A

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.12.5

The research progress and consideration of non-tectonic fractures in shale reservoirs

DING Wenlong^{1,2,3}, WANG Yao^{1,2,3,✉}, WANG Shenghui^{1,2,3}, LIU Tingfeng^{1,2,3}, ZHANG Ziyou^{1,2,3}, GOU Tong^{1,2,3}, ZHANG Mengyang^{1,2,3}, HE Xiang^{1,2,3}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42072173, 42372171)

作者简介: 丁文龙(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 石油地质学专业, 长期从事石油构造分析与控油气作用、非常规油气储层地应力分析及裂缝形成机制与定量表征及地质工程一体化研究方面的教学与科研工作。E-mail: dingwenlong2006@126.com

网络首发时间: 2023-12-29 08:57:44 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3370.p.20231228.1318.001>

2. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Strategy Evaluation for Shale Gas, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract With the improvement of unconventional oil and gas exploration theory and technology in China, shale oil and gas exploration and development continue to make breakthroughs, and its strategic position is also rising steadily. The quality of shale reservoir is usually the critical factor restricting its resource potential, and the fracture is the key to the enrichment, high yield and stable production of shale oil and gas. Therefore, as an important reservoir space and seepage channel of organic-rich shale reservoir, the research on fractures has always been the focus in this field. A large number of natural fractures are developed in shale reservoirs in China, and the non-structural fractures are also relatively developed, which is of great significance for the enrichment and preservation evaluation of shale oil and gas. At present, the study of tectonic fractures in shale reservoir is relatively in-depth, while that of non-structural fractures in shale is relatively poor. Therefore, based on the full investigation of recent domestic and foreign research achievements on non-tectonic fractures in shale, this paper focuses on the research progress of classification, identification and characterization, main control factors, stages and evolutionary sequences of non-tectonic fractures. The formation and shape of non-tectonic fractures in shale reservoir are complex, irregular distribution and small scale. According to the difference of genetic mechanism, non-tectonic fractures in shale reservoir can be divided into four categories: diagenetic fractures, abnormal high-pressure fractures, bedding fractures and supergene fractures. Although the main controlling factors of different types of non-tectonic fractures are different, they are all controlled by sedimentation, diagenesis, mineral composition and content, and rock mechanical properties to some degrees, showing certain commonalities. In this paper, the key problems and development trends of non-tectonic fractures in shale reservoirs are comprehensively analyzed and pointed out: (1) based on the typical characteristics of shale reservoir core, thin section, imaging logging and conventional logging, combined with advanced image technology, a new method of comprehensive and effective identification and quantitative characterization of non-tectonic fractures of different types and scales should be established; (2) the formation and development of non-tectonic fractures in shale reservoirs are characterized by "multi-genetic types, multi-control factors and multi-stage evolution", and the formation and evolution of non-tectonic fractures in shale reservoirs correspond to the processes of "paleotemperature and pressure, paleofluid and paleodiagenesis". Therefore, advanced experimental analysis techniques such as fluid geochemistry, isotope geochemistry (C, O, Sr) and micro-area in situ isotope chronology (U-Pb, Sm-Nd) of calcite and other fillings commonly found in non-tectonic fractures of shale reservoirs are proposed. It is a key method to determine the formation time, active stages and evolutionary sequence of non-tectonic fractures in shale reservoir comprehensively; (3) the qualitative and semi-quantitative analysis of the relationship between the development degree of non-tectonic fractures and the single controlling factors in shale reservoir will develop to the quantitative research direction of the development degree of non-tectonic fractures under the coupling control of multiple controlling factors. That is, the weight of the influence of different controlling factors on the development degree of fractures is determined by mathematical method. The quantitative relationship model between the comprehensive index of the development degree of shale non-tectonic fractures and many controlling factors can also be constructed.

Key words shale oil and gas; non-tectonic fracture; fracture classification; main control factor; fracture development degree; fracture formation period

0 引言

随着我国经济迅速发展,对油气资源的需求程度的不断增加,非常规资源迅速崛起,其战略地位不断上升。尤其页岩油气作为非常规资源中重要组成部分,一直是油气勘探与开发的热点^[1-4]。美国通过“页岩油气革命”成功实现了从能源进口国到出口国的改变。随着我国非常规油气地质理论的完善及压裂关键技术的攻关,目前也实现了页岩油气商业性开采^[5-13]。我国页岩油气资源可以分为为三大类:海相、陆相和海陆交互相页岩。平面上分布规律性明显,呈现两分性。南方多以下古生界海相页岩为主,而北方一般以中-新生界陆相页岩和上古生界海陆交互相页岩为主^[14]。相较于陆相页岩及海陆过渡相页岩,南方下古生界海相页岩具有分布广、厚度大、有机质类型好、总有机碳含量高、埋藏深、热演化程度高等 8 项优势^[15-23],因此,我国南方扬子地区下古生界海相黑色富有机质页岩一直是研究的热点。自 2013 年以来,我国在四川盆地南部和东部发现了以五峰组-龙马溪组为主要层段的大型页岩气富集区,随着页岩气高产、稳产井不断出现,涪陵、威远、长宁、昭通等地都已经进入页岩气大规模开采阶段,显示了页岩油气良好的资源潜力和开发前景^[4]。

随着非常规油气勘探与开发的兴起,细粒沉积的研究得到了广泛的关注,其相关研究主要聚焦在细粒沉积岩的矿物组成、形成环境、水动力条件与物源等方面^[24-25]。尽管目前已经取得一定成果认

识,但仍然存在细粒沉积岩相关概念模糊、术语应用混乱等问题^[26-27]。为避免页岩概念的争议,在此强调文中涉及的页岩主要采用邵龙义和张天畅^[28]提出的泥质岩及细粒沉积岩的定义,将泥质岩作为细粒陆源沉积物的总称,主要由粉砂(粒径4~63 μm)和黏土(粒径小于4 μm)组成。并可依据碎屑矿物、黏土矿物及内源矿物含量对其进行进一步划分为细粒陆源沉积岩和细粒内源沉积岩两个大类,若是细粒陆源沉积岩具有纹层和页理构造则称之为页岩。其储层致密,孔隙度一般低于10%,渗透率小于10 mD,其储层的物性条件对于评估其油气资源潜力至关重要。页岩储层中除了与基质有关的微米级-纳米级孔隙和有机质孔隙之外,还广泛发育有非构造裂缝和构造裂缝,这些裂缝的存在能够极大地改善页岩储层的储集性能和渗流能力。北美和我国海相页岩气的商业性开采表明,富有机质页岩储层中发育的不同尺度的天然裂缝是实现页岩气富集高产的关键因素^[29-33]。天然裂缝作为页岩油气储层的重要储集空间和渗流通道^[19-23, 29-36],不仅影响着页岩储层品质、页岩气富集和保存条件,还会对后期压裂效果和单井产能造成影响^[37-38]。从生产实践来看,页岩气单井产量与页岩层系岩石内部微裂缝发育程度密切相关,裂缝条数越多,走向越分散,产气量越高。页岩气可采储量最终取决于页岩储层内裂缝产状、组合特征和开度^[39-43];裂缝对页岩气储层渗透率改善的贡献率一般高达90%以上^[44-46]。因此,在良好的顶底板条件下,富有机质页岩储层的裂缝发育带(层段)就是页岩气勘探开采的甜点。

与北美地区的海相页岩相比,我国南方下古生界的下寒武统牛蹄塘组或筇竹寺组、上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组海相富有机质页岩具有“地层年代老、埋藏深度大、热演化程度高、多期次构造运动且改造强烈、应力各向异性和储层非均质性强、保存条件差异大”等特征^[47-50]。致使我国南海相页岩储层中不同尺度不同性质的构造裂缝广泛发育,并一直是国内外学者研究的重点。近年来随着我国页岩油气勘探开发的快速发展,对页岩气聚集机理和富集规律认识程度的不断深入,我国学者意识到了除了构造裂缝以外,页岩储层中的非构造裂缝同样比较发育,亦是页岩储层中常见的裂缝类型。其通常是与构造裂缝共同出现,形成复杂的裂缝网络系统,对页岩气成藏与保存评价亦具有重要意义^[51-55],为此国内外学者对于页岩裂缝的研究逐渐聚焦到了非构造裂缝上。起初关于非构造缝的研究主要集中在与构造裂缝的区分、发育特征、成因机制和分类等方面^[37-38, 51, 56-57],对于非构造裂缝的几何学特征^[58]、形成与演化机制^[59]及水下收缩裂缝的形成机制^[60]等方面仅有少量报道。随着我国在页岩油气领域不断突破,非构造缝的研究程度也在不断深入。目前已在页岩储层多尺度非构造裂缝成因类型与发育特征、裂缝形成机制与主控因素、裂缝发育模式、非构造裂缝对页岩油气富集、保存及产能的影响等方面取得了一些成果认识^[56-68],并有效地指导了页岩油气勘探开发。但相较于构造裂缝的研究程度,非构造裂缝的研究工作依旧相对滞后,严重制约了我国在页岩气勘探领域的发展。

笔者在调研了国内外页岩非构造裂缝研究理论和技术进展的基础上,系统梳理了国内外页岩储层非构造裂缝在分类、成因机制、识别与表征、主控因素、形成时间和活动期次及演化序列等方面研究的最新进展。在此基础上根据页岩油气勘探开发中的实际需求,重点分析了页岩非构造裂缝研究领域中存在的关键科学问题,指出了发展趋势和攻关方向,旨在深化我国页岩气富集理论和提升我国页岩气开采效果。

1 页岩非构造裂缝分类及成因机制

1.1 非构造裂缝分类

裂缝是岩石中没有明显位移的破裂,是指三维尺度比大于10的孔隙。页岩中天然裂缝可以分为构造裂缝和非构造裂缝两类^[62]。不同类型的页岩非构造裂缝在宏观和微观尺度上发育特征差异较为明显,不同学者基于裂缝成因、产状、集合形态、破裂性质等方面对于泥页岩非构造裂缝的成因分类已提出了诸多方案。但由于在裂缝具体研究中的出发点和侧重点的差异,且单一研究区不能涵盖所有类型的非构造缝,因此其分类目前尚存在一定的分歧。前人对于非构造裂缝分类方案具体见表1。

从表1分类方案看,目前在如何以准确的名称来命名非构造裂缝类别,如何以清晰的定义区分非构造裂缝类型及其地质意义等方面,仍存在一定争议。例如对层理缝、页理缝以及层间缝的概念,以及三者之间关系的认识尚存在着不同观点;微观尺度下粒间缝、粒内缝的分类方法并不能直观反映出

裂缝成因；层理缝的形成与多种作用联系紧密，对其如何进行分类还有待商榷。尽管非构造裂缝的分类命名略有差别，但是以裂缝成因的分类方案应用最为广泛。该分类方案不仅清晰地反应了非构造裂缝的形成机制，也有利于后期裂缝的识别与预测。因此本文在前人的研究基础上，以成因机制为划分依据将非构造裂缝分为4个大类：成岩缝、异常高压缝、层理缝、表生缝。

表1 页岩非构造缝分类方案
Table 1 Different classification for non-tectonic fractures

学者	页岩非构造缝分类
曾联波和肖淑蓉 ^[69]	干燥裂缝、矿物相变裂缝、卸载裂缝、脱水裂缝、热收缩裂缝、风化裂缝及成岩裂缝
郭璇等 ^[51]	表生裂缝、收缩裂缝、溶蚀裂缝、缝合线、差异压实裂缝、压裂缝、冰冻裂缝、重力滑塌有关的裂缝
龙鹏宇等 ^[43]	层间页理缝、成岩收缩微裂缝、有机质演化异常压力缝
丁文龙等 ^[62]	成岩收缩裂缝、成岩压溶缝合线、超压裂缝、热收缩裂缝、溶蚀裂缝和风化裂缝
袁玉松等 ^[55, 63]	干裂裂缝、水下收缩裂缝、成岩层理裂缝、欠压实超压裂缝、生烃超压裂缝和现代表生裂缝
徐翔 ^[70]	成岩收缩缝、成岩岩溶缝合线、超压裂缝、热收缩裂缝、溶蚀裂缝和风化裂缝
郭旭升等 ^[40]	有机质演化异常压力缝、成岩收缩缝、层间页理缝
田鹤等 ^[71] 、马诗杰等 ^[72]	成岩裂缝和异常高压裂缝 2 个大类 3 个亚类（页理缝、收缩裂缝、异常高压裂缝）
王幸蒙等 ^[73]	页理缝、成岩缝、异常超压缝
董大忠等 ^[74]	页理缝
马军 ^[75]	层理缝、解理缝、收缩缝、晶间缝
王濡岳等 ^[76-78]	宏观上以层理缝和层间缝产出，微观上为层间缝、粒间缝和粒内缝
曾维特等 ^[79]	成岩收缩缝、溶蚀缝和异常高压缝
曾联波等 ^[80]	成岩裂缝和异常高压裂缝 2 个大类 3 个亚类（层理缝、收缩裂缝和异常高压缝）

1.2 非构造裂缝成因机制

关于页岩储层非构造裂缝成因机制前人已做了较为详细的研究。成岩作用、异常高压作用、表生作用几乎包含了所有非构造裂缝类型的成因机制（表 2），其中成岩作用和异常高压作用是主要的成因机制。成岩作用以收缩作用为主，具体包括矿物脱水、热收缩和矿物相变收缩，由于收缩作用主要都在成岩过程中发生，因此将其归纳到成岩作用更为合适。异常高压作用主要涉及欠压实、生烃增压等。然而上述分类均是针对在单一机制的条件下形成的非构造缝，实际上页岩储层中很少发育单一类型非构造裂缝，多是由多种机制共同作用下的产物，其中以层理缝为主，采用上述分类方法显然并不适用。层理缝发育的基础是具备层理沉积构造，首先在沉积过程中需要形成的层理面，该层面为力学薄弱面^[37]。随后在成岩作用和异常高压等作用下沿着层理面破裂，从而形成层理缝。由于其成因较为复杂，并不是单一作用下的产物，因此可将层理缝单独作为一种分类方式^[81]。

表2 页岩非构造裂缝分类及成因机制
Table 2 Classification and genetic mechanism of non-tectonic fractures in shale

类型	亚类	主控作用	发育频率
成岩缝	成岩收缩缝	收缩作用	高
异常高压缝	欠压实超压裂缝	欠压实作用	高
	生烃超压裂缝	生烃作用	高
层理缝	压溶层理缝	压实压溶作用	中
	收缩型层理缝	收缩作用	高
	异常高压型层理缝	异常高压作用	高
	复合型层理缝	沉积、成岩、异常高压多种作用	高
表生缝	卸载裂缝	剥蚀作用	低
	风化裂缝	风化作用	低

1.2.1 成岩缝

成岩收缩裂缝：泥页岩在成岩早期或者成岩过程中，由黏土矿物脱水收缩作用使得沉积物体积减小的化学过程形成的脱水裂缝；泥页岩层受到岩浆侵入烘烤变质，由于温度梯度作用，受热岩石在冷却过程中发生收缩产生的裂缝；还可以由黏土矿物相变作用诱导泥页岩体积减小形成成岩收缩裂缝^[62]。

1.2.2 异常高压缝

海相页岩有机质含量普遍较高，且热演化程度较大，在生排烃过程中常会因大量排烃产生流体异常高压，因此异常高压作用是海相页岩非构造裂缝形成的最主要机制之一^[80]。超压形成的机制主要包含以下 4 种：欠压实作用^[64]、生烃作用^[65]、黏土矿物转化^[66]及水热增压。前三者较为常见，而水热增压形成超压的情况较少，只有在岩浆侵入、热流体上拱的特殊地质环境中才可能存在较为明显的超压作用^[67]。无论何种机制，只要形成的超压强度足够大，都可能导致泥页岩发生超压破裂，形成超压裂缝。其中欠压实作用和生烃作用，尤其是烃源岩生气是产生大规模超压的主要机制^[68]，因此泥页岩超压裂缝的主要类型为欠压实超压裂缝和生烃超压裂缝两种。

欠压实超压裂缝：在地层沉积过程中，由于经历快速沉降，泥页岩向外部流体排出速率快，渗透压迅速降低。而泥页岩内部流体受到致密带封隔未能及时有效排出，泥页岩进一步压实受阻，排水和压实平衡破坏导致欠压实，此时孔隙流体被迫承担部分上覆地层压力。当上覆地层载荷随着埋深增加不断加大，孔隙流体压力急剧增加，有效应力减少，最终形成异常高压^[82]。当超压值大于泥岩的破裂压力时，即可形成超压裂缝，通常优先沿着层理发育，若超压产生速度过快，层理裂缝不能及时泄压，便形成不规则的切层裂缝。

生烃超压裂缝：富有机质泥页岩（烃源岩）随着埋藏深度的增加，温度逐渐升高进入生烃门限。在生烃过程中，密度较大的干酪根转化为密度较小的石油和天然气，或者原油裂解生气而使孔隙流体体积膨胀。当 II 型干酪根 R_o 达到 2% 时，生气作用引起的体积膨胀可达 50% ~ 100%^[83-84]。在标准温度、压力条件下，单位体积的标准原油可裂解产生 534.3 体积的气体^[85]。因此，干酪根裂解生气或者原油裂解成气都可以造成孔隙流体压力的急剧增加，泥页岩在力学薄弱面发生破裂形成超压裂缝。由生烃作用引起的超压泥岩，可能已达到压实极限，因此会呈现出密度高、孔隙度低的特征，从而可以很好地与欠压实超压泥岩进行区分。泥页岩生烃作用对超压的贡献率与烃源岩热演化程度十分吻合^[86]，而生烃超压裂缝的形成往往是在生烃高峰期。

1.2.3 层理缝

层理缝的形成较为复杂，可以在单一机制形成，也可以为多种机制共同作用下的产物，目前对其研究更多地还是集中在讨论单一机制对其发育的影响^[81]。层理缝的形成与沉积层理关系密切，这些层理是由于沉积时期水动力条件发生改变，导致沉积物组分、颜色、结构在垂向上发生变化从而呈现

成层构造,其层理的形态及特征决定着层理缝的发育^[87-89]。层理面一般为力学薄弱面,因此层理缝往往沿着层理面分布^[37, 81]。

压溶层理缝:在沉积和成岩过程中,随着沉积物埋藏深度的增加,碎屑颗粒接触点上所承受的上覆地层压力持续增加,当颗粒接触部位的压力超过正常孔隙流体的压力时,颗粒接触部位的溶解度会增加,产生晶格变形和溶解作用,使得矿物在受压情况下在水溶液中发生溶解。随着压实作用的持续增强,颗粒所受到的压力不断增加,颗粒接触部位的压溶形态将依次由点到面扩展演化,从而形成顺层理面分布的压溶层理缝^[37, 90-91]。

收缩型层理缝:在沉积和成岩过程中,由于热收缩、脱水、黏土矿物转化等作用下会导致岩石体积减小,从而形成小尺度的裂缝。由于先存力学薄弱面,形成的裂缝沿着层理进一步延伸扩大,从而形成层理缝^[37, 81]。

异常高压型层理缝:页理发育程度较好的页岩储层发生欠压实作用、有机质生烃作用或黏土矿物转化时,储层内会造成局部流体压力异常,往往会沿着页理发育程度较好的层面发生破裂从而形成层理缝。有机质生烃成因下的层理缝在形成过程中会有酸性流体参与,排烃伴生的流体沿着层理流动,对早期生成的裂缝进一步扩展和延伸^[37]。

复合型层理缝:由多种机制共同作用下形成的层理缝,反映了多期次生长和发育过程。

1.2.4 表生缝

表生作用下产生的裂缝,包括卸载裂缝和风化裂缝^[62, 69]。

卸载裂缝:与表生作用有关的卸载,岩层负载减小、应力释放,岩层内部膨胀、隆起和破裂形成的。

风化裂缝:泥页岩顶面长期遭受风化剥蚀作用,岩石机械破裂而形成的裂缝。

2 页岩不同类型非构造裂缝识别与表征

不同尺度的页岩储层非构造裂缝成因类型的综合识别与表征是非构造裂缝研究的基础。前人常采用露头、岩心观察、成像测井解释、常规测井交会等多种方法,结合普通光学显微镜、荧光显微镜、扫描电镜(SEM)、阴极发光(CL)、电子背散射衍射(EBSD)、微米CT扫描等多种成像分析技术,对页岩储层宏观尺度、微观尺度非构造裂缝类型进行识别和发育特征研究^[92]。研究聚焦在宏观和微观非构造裂缝的几何形态(长度、宽度、间距)、裂缝产状(走向、倾角)、裂缝期次、裂缝力学性质、裂缝充填物成分、裂缝开启程度(开度、充填程度)、裂缝连通性等方面。由于非构造裂缝成因复杂、形态复杂、尺度小,这使得非构造裂缝识别、发育程度定量表征等方面的研究程度较为薄弱。因此前人对页岩非构造裂缝识别与表征的研究多局限在对不同成因类型非构造缝发育特征定性描述的层面上,缺少定量的分析。

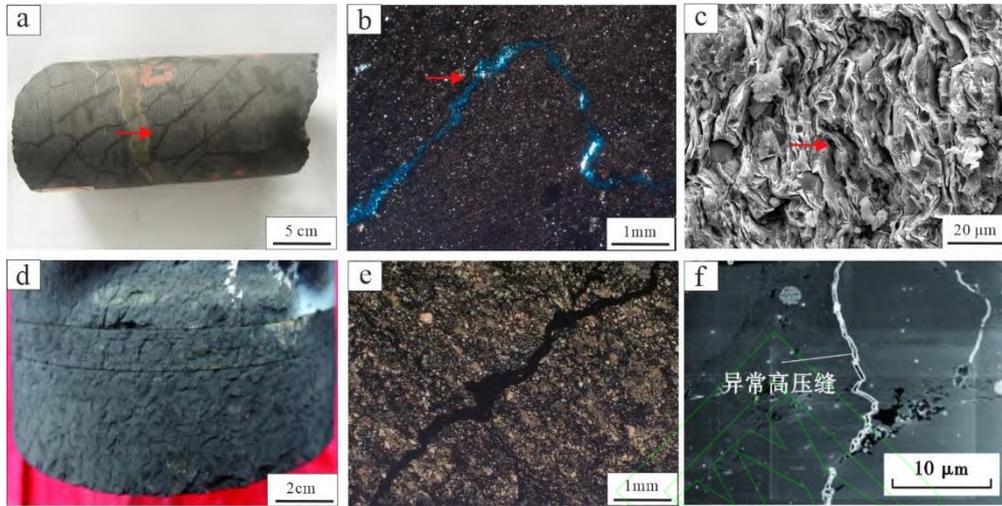
构造裂缝是在构造应力场作用下形成的天然裂缝,由于应力具有方向性致使构造缝的发育在某种程度上呈现出一定的规律性。相较于构造裂缝,非构造裂缝是在非构造因素作用下,由岩石体积力、重力或者成岩作用等因素诱发形成的一种与构造应力无关或间接有关的构造类型^[37-39, 51, 55-57, 62]。基于其成因复杂,形态上一般显示为不规则、弯曲、不连续,以微观裂缝居多^[62]。大多数非构造缝缝面粗糙、不平整^[51, 55, 63],纵向上切穿深度有限,规模不一,延伸性和连通性较好^[79]。

2.1 非构造缝识别与表征

2.1.1 成岩缝

与收缩作用有关的成岩裂缝,通常规模很小,延伸很短,方向性不明显(图 1a-c)。脱水裂缝是在成岩过程中由于黏土在水下或地下失水造成沉积物总体积的减少,在伴生的拉张或扩张作用下形成的。宏观上一般呈现三维龟裂型的“鸡笼状”储集空间或者多边形^[62, 79],裂缝网络均匀展布,间隔较小(图 1a)。微观尺度上成岩收缩缝以丝缕状、卷曲状在伊利石或伊蒙混层间发育^[79],或以晶间缝的形式产出^[40](图 1b-c)。收缩裂缝(泥裂):干燥裂缝是由暴露地表的沉积物失水形成,主要是张力裂缝,通常称为泥裂。泥裂由于地形差异发育两种组合形态,分别为发育在斜坡地带的矩阵裂缝

和平缓区域的网状裂缝。一般来说该类裂缝通常是由顶到底部逐渐裂开，上部裂开宽度大，向下逐渐变窄，呈现出“V”字型^[55, 57-58]。



a—成岩脱水收缩缝，呈“鸡笼状”，渝页1井，龙马溪组，118 m；b—黏土矿物收缩缝，岑页1井，牛蹄塘组，1 418 m；c—黏土矿物脱水收缩缝，呈丝缕状、卷曲片状，酉科1井，牛蹄塘组，1 360 m；d—异常高压缝，沿层理发育，松科1井，牛蹄塘组，288 m；e—异常高压缝，被有机质充填，岑页1井，牛蹄塘组，1 459 m；f—异常高压缝，N201井，龙马溪组。

图1 海相页岩储层成岩缝及异常高压缝宏观和微观特征（图a, b, c, d, e据文献[79], f据文献[95]）

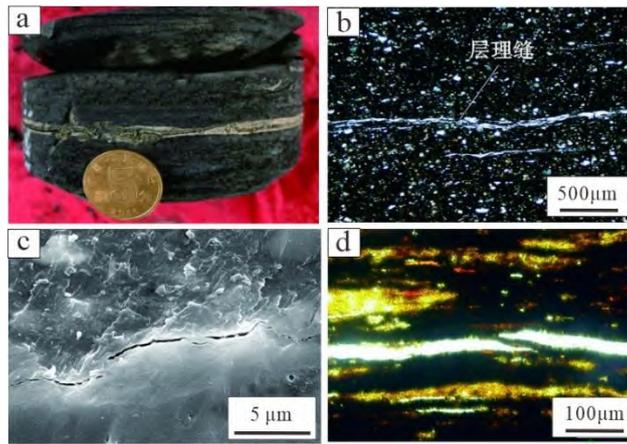
Fig. 1 The characteristics of diagenetic fractures and abnormal high-pressure fractures in marine shale reservoirs(a, b, c, d and e adapted from [79]; f adapted from [95])

2.1.2 异常高压缝

异常高压裂缝是由于异常流体作用下张开的裂缝，一般沿着层理面展布^[93]。通常情况下延伸较短，缝面形态不规则，开度不一，不成组系，且多被沥青、石英、方解石等充填^[79, 93-95]（图1d-f）。欠压实超压裂缝形状不规则，分布位置具有随机性，且被泥质或其他矿物充填^[55]。生烃超压裂缝在形态上与欠压实裂缝相似，形态不规则，裂缝不平整，常表现出中间宽、向两侧尖灭的透镜状形态和扩张裂缝的特征^[37, 55]（图1e）。微观尺度上超压作用成因的裂缝多发育在碎屑颗粒、黏土矿物和有机质之间，不成组系，形态不规则，多被有机质充填^[35]（图1e-f）。

2.1.3 层理缝

层理缝一般发育在纹层、页理界面，其展布方向与页理或纹层面接近一致^[74, 96]（图2a-d）。形态上具有断续、弯折、分叉等现象，其规模相对较小、横向连续性和连通性较差^[37, 67, 71, 97]。其分布形态和开度等特征受纹层发育程度影响明显。当纹层发育程度较差时，层理缝可能发生尖灭、分叉或穿层等现象。当纹层发育程度较好时，层理缝可以延伸很远。在野外露头观察到的层理缝一般未被充填，其长度可达数十米^[98-100]。层理缝的线密度变化较大，岩心尺度上线密度大小可以从几条/米到一百多条/米之间变化。层理缝充填物比较丰富，如方解石、石膏、石英、黄铁矿等^[81, 94]（图2a-b）。压溶层理缝常被石英、方解石等矿物充填，可与黏土矿物等矿物呈定向排列，开度变化大^[95]（图2b）；收缩层理缝一般延伸较短，裂缝开度变化大^[37]（图2c）；异常高压层理缝与异常高压缝相似，一般延伸较短，常表现为裂缝中部较宽，两端延伸依次变窄或尖灭，呈透镜状^[37]（图2d）。



a—水平层理缝，黄铁矿全充填，YS107井，龙马溪组，2 274.25~2 275.5 m；b—层理缝，N216井，龙马溪组；c—收缩成因层理缝，页岩，B1井，1 433.7 m；d—异常高压成因层理缝，B1井，1 438.9 m。

图2 海相页岩储层层理缝及溶蚀缝宏观和微观特征（图a, b据文献[95], c, d据文献[37]）

Fig. 2 The characteristics of bedding fractures and dissolution fractures in marine shale reservoirs(a and b adapted from [95]; c and d adapted from [37])

2.1.4 表生缝

表生缝：通常形状不规则、呈叠状或尖头状。它往往与新形成的自由表面破裂相平行、其发育与地形有关^[51]。

2.2 非构造缝发育程度表征

目前对于页岩非构造缝发育程度表征较为单一，一般通过统计裂缝密度（线密度、面密度），缺少更多的裂缝发育程度的定量评价指标。郭旭升等^[40]统计了焦石坝地区五峰组-龙马溪组不同亚段页理发育情况，以页理缝的线密度、宽度为参数，构建了页理缝综合指数（裂缝密度×裂缝宽度）定量表征页理缝的发育程度。赵圣贤等^[101]在对泸州地区五峰-龙马溪组页岩天然裂缝发育程度的研究中，创新建立了基于裂缝线密度、裂缝充填种类及裂缝倾角种类的天然裂缝发育指数评价方法，实现了裂缝发育程度的定量表征。由于非构造缝成因及特征的复杂性，尚未建立非构造裂缝发育程度统一的评价参数。因此，建立多参数表征页岩非构造裂缝发育程度的综合评价参数是未来的攻关方向。

3 页岩非构造裂缝发育主控因素分析及其与发育程度关系

3.1 页岩非构造裂缝发育主控因素分析

页岩储层非构造裂缝的成因机制决定了影响其发育程度与分布的主控因素。与构造裂缝发育分布的主控因素完全不同^[39]，构造裂缝发育主要受不同性质的构造应力影响，在构造活动频繁、活动程度较为强烈的地区内大量发育，呈现出明显的规律性，反映了局部构造应力信息与区域构造应力场的一致性^[102-103]。而非构造裂缝在空间上分布不规则且不连续，主要由成岩作用、异常超压作用、溶蚀作用等非构造因素引起。以往学者们对页岩储层中非构造缝的主控因素开展了一些研究，目前普遍认为影响非构造裂缝发育的主控因素有沉积环境、岩性、矿物组成、有机碳含量、岩石力学性质、成岩作用、异常高压、纹层发育程度、岩石非均质性等^[37, 39-40, 68-79, 94, 97]。在主控因素分析的基础上，不同学者还开展了页岩非构造缝发育程度与主控因素之间关系的研究^[37, 39, 72, 75-79, 94, 97]。由于在研究中对于非构造缝的主控因素分析都立足于各自实际区块，可能存在地区的局限性。因此本文综合了不同地区不同类型非构造裂缝主控因素方面的相关研究进展，并将已有的成果与认识进行了系统分析、归纳与总结。

3.1.1 岩性及矿物组成

页岩的岩性类型多，包括钙质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩等，这也导致页岩矿物成分较复杂，除了高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物外，还有石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等碎屑矿物

和自生矿物。页岩矿物组分和结构决定了页岩储层岩石力学性质和脆性，它是岩石产生裂缝的内因。而脆性矿物含量普遍被认为是影响非构造裂缝发育最关键因素之一^[37-40, 76, 95, 104]，页岩中脆性矿物含量越高（长石、石英、碳酸盐岩等），页岩在发生破裂之前承受的应变较小，越容易形成裂缝（图 3）。对于海相页岩储层，石英的含量是影响非构造裂缝的关键^[80, 104]。海相页岩中石英主要为生物成因，生物成因的硅质石英具有更复杂的成岩演化，有利于页岩保持较好的刚性结构^[40, 74]。此外石英含量较高时，也反映了其有机质含量丰度越高，而高的有机质含量有利于层理缝、异常高压缝的发育。因此在海相页岩储层中，高含量的生物成因石英往往有利于非构造裂缝的形成。长石和白云石也是页岩中脆性较大的矿物组分，硅质含量越高，页岩脆性越高，有利于页岩破裂形成裂缝^[104]。黄铁矿的存在同样控制着裂缝的发育。一方面黄铁矿的存在可以提高页岩储层的脆性，有利于裂缝的形成^[39, 100]；另一方面页岩页理缝的发育程度一般与黄铁矿的含量呈较好的正相关关系，黄铁矿的存在反映了其沉积时的还原环境。而黄铁矿含量的富集在某种程度上反映出页岩的有机质含量较高，有利于层理缝的形成^[38]。但是也有学者认为裂缝发育与黄铁矿含量呈负相关关系，局部的富集黄铁矿将限制天然裂缝的延伸，不利于裂缝发育^[101]。此外，黏土矿物作为页岩矿物组成的重要部分，其含量较高会造成页岩脆性降低，抗张剪强度变高，不利于构造缝的发育（图 3）。但高的黏土矿物含量却是成岩缝发育的基础，有利于在成岩过程中发生矿物转化及脱水收缩作用形成成岩收缩缝，页岩中黏土矿物含量越高，该类非构造裂缝越发育^[79, 105]。

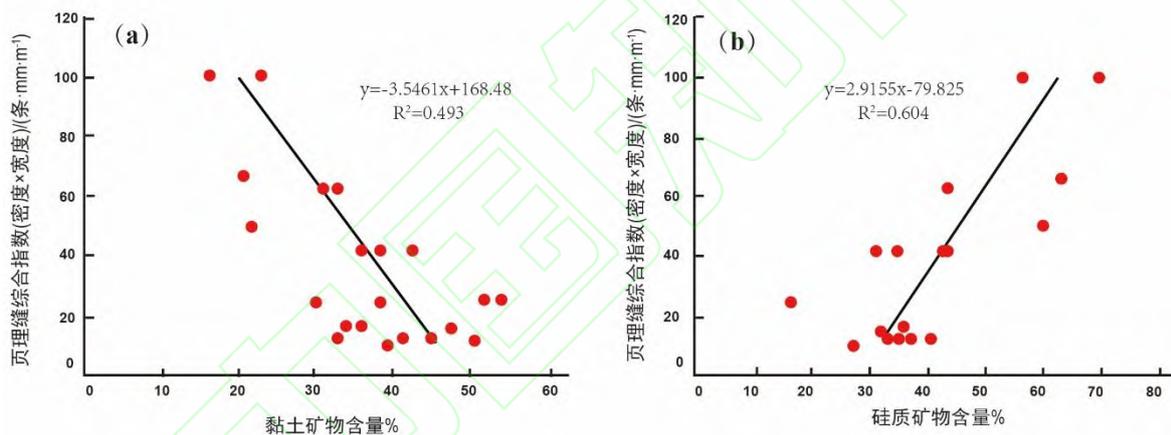


图 3 焦石坝地区 XX6 井页岩缝综合指数与黏土矿物、硅质矿物含量交汇图（据文献[40]）

Fig. 3 Foliation fracture index vs. contents of clay minerals and silica of well XX6 in Jiaoshiba area (Adapted from [40])

页岩的矿物组分颗粒的大小在某种程度上也控制着裂缝的发育。岩石颗粒越细，越有利于裂缝的发育，相反颗粒大反而不利于裂缝发育^[94]。但在通过野外露头观察发现随着颗粒尺寸的增加，岩石中发育的裂缝长度越长^[106]。因此颗粒粒度大小对于页岩裂缝的影响还需要进一步的深入研究。

3.1.2 岩石力学性质

页岩储层的岩性和岩石结构决定了地层岩石力学性质，而页岩破裂产生裂缝的程度与不同岩性岩石力学性质参数关系极为密切，如杨氏模量、泊松比等参数。一般来说低泊松比、高杨氏模量的页岩脆性大，容易形成裂缝。大量的岩石力学实验研究表明，随着埋深增加，相应的温度和围压增加，岩石的力学性质由脆性向延性发生转化^[107]。根据三轴抗压岩石力学实验结果，综合弹性模量和泊松比的测试证实了长宁地区龙马溪组页岩的脆性受泊松比的影响程度要高于弹性模量，埋深起关键作用。随着埋深的增加，页岩的 Rickman 脆性指数呈现明显的下降趋势^[108]。埋藏深度较浅的页岩具有较大的脆性，天然裂缝发育程度高，在岩石力学实验过程中容易产生脆性破坏形成复杂的张性裂缝。而对于埋藏深度较大的页岩，延性较高，在岩石力学实验过程中容易产生与轴向呈一定夹角的单一剪切

型, 形成有限的破坏^[100], 不利于形成裂缝。

3.1.3 有机质含量及热演化程度

有机质含量和热演化程度共同控制着页岩储层非构造裂缝的发育程度。一般来说, 在沉积环境相同的情况下, 有机质含量较高的页岩, 纹层较为发育, 有利于形成层理缝^[38, 71-74, 76-81, 109-111]。这是由于高有机质含量有利于页岩生烃, 生烃过程中孔隙流体体积发生倍数级膨胀, 页岩储层流体由单相流动转为混合多相流动^[79], 与此同时由于泥页岩低渗透层的封堵, 内部压力无法排出从而形成异常高压。当局部高压超过岩石破裂压力时, 在生烃增压作用的驱动下沿着层理的薄弱面产生层理缝^[71, 74]。

热演化程度也控制着页岩非构造缝的发育^[71-72]。随着热演化程度不断增加, 富有机质海相页岩生排烃强度不断增加, 异常流体压力增大, 层理缝或异常高压缝等越发育。在此基础上, 随着热演化程度的增加, 干酪根的杨氏模量也会增加, 从而增强页岩的弹性非均质性, 更容易在层间形成力学薄弱面, 促进非构造缝发育^[112]。此外有机质生烃会伴有大量的有机酸、CO₂ 和水生成, 对页岩储层中不稳定矿物成分进行溶蚀, 进一步促进裂缝发育^[79]。

3.1.4 异常高压

页岩储层中形成异常高压的因素有很多, 其中有机质生烃增压是形成流体异常高压的最主要原因, 在储层内部普遍发育^[109-115]。当上覆地层快速沉积时, 会造成下伏地层欠压实。随着埋深、热演化过程不断增大, 黏土矿物脱水、有机质生烃等作用会在低渗透层的封堵条件下造成局部异常流体高压, 从而形成超压裂缝。松辽盆地古龙凹陷青山口组泥岩大量发育的非构造缝, 是由于黏土矿物脱水和有机质生烃共同作用下产生了异常高压, 造成岩石破裂从而形成的产物^[56]。此外, 异常流体高压不仅可以降低岩石的剪切强度, 有利于剪切裂缝的形成和发育, 还可以在流体压力的驱使下使得应力莫尔圆向左移动^[115]。当异常流体压力大小到达某一临界值时, 岩石应力状态会被改变, 最小主应力的性质可以由最初的压应力转变为拉张应力, 从而造成岩石破裂形成异常高压缝。

3.1.5 沉积环境

水平层理普遍被认为是层理缝发育的基础^[81, 116]。层理是细粒物质在水动力较弱的低能环境下缓慢沉积, 之后定向排列形成纹层。一般来说页岩纹层与层面平行, 属于岩石力学薄弱面, 有利于裂缝的发育^[117]。页理缝多沿页岩纹层分布, 且页理缝的形态和开度也随着纹层的变化而发生改变, 证实了层理/纹层对于页岩储层中非构造缝的控制作用^[38]。曾维特等^[79]通过对比渝东南-黔北地区浅水陆棚相的牛蹄塘组上部、龙马溪组上部和深水陆棚相的牛蹄塘组下部、龙马溪组下部地层岩性特征, 明确了低能的水体环境有利于水平层理的发育, 为非构造裂缝的发育提供了基础。

沉积时期水体古盐度也控制着非构造缝的发育^[57, 79]。黏土矿物转化形成的收缩缝受水体古盐度和成岩作用两方面因素控制。当水体古盐度较低时, 对黏土矿物转化影响不大, 成岩作用起主导作用; 当古水体古盐度较高时, 黏土矿物的转化仅受古水体介质影响, 成岩作用影响减弱甚至消失。此外, 古水介质性质被认为是控制页岩成岩收缩裂缝形成程度的关键因素^[118]。

由以上分析可知页岩储层不同类型非构造裂缝发育控制因素存在差异。如收缩缝的发育主要受控于黏土矿物含量、古盐度、成岩作用等, 而超压缝的发育主要受控于有机质含量和热演化程度。尽管不同类型非构造缝主控因素略有差别, 但都在不同程度上受控于沉积环境、成岩作用、矿物组分及含量与岩石力学性质, 呈现出一定的共性。

3.2 页岩非构造裂缝发育程度与主控因素关系

学者们对页岩储层非构造裂缝主控因素开展研究主要集中在单因素对于非构造裂缝发育的影响, 如矿物组成、脆性矿物含量、纹层厚度、古盐度、有机质含量等, 然而对多主控因素与裂缝发育程度之间的定性-半定量关系研究较为薄弱。本文在梳理了页岩储层非构造裂缝发育程度与主控因素关系方面的研究进展的基础上, 分别阐述单个主控因素和多个主控因素耦合对于裂缝发育程度的影响, 系统分析并总结了非构造缝发育程度与主控因素之间的定性-半定量研究进展。

3.2.1 非构造裂缝发育程度与单一主控因素关系

目前非构造裂缝发育程度与主控因素的研究主要集中在两个参数: 有机碳含量 (TOC) 和脆性矿

物含量。大量研究表明,有机碳含量不仅控制着页岩的含气量,也在一定程度上控制着页岩裂缝的发育程度。丁文龙等^[39]通过统计全球各地区海相页岩气已投入开发的页岩有机碳含量与页岩裂缝发育程度关系分析发现,海相页岩有机碳含量与其裂缝发育程度之间关系总体呈现正相关性,并且初步建立了海相富有机质页岩裂缝发育程度与有机碳含量之间的半定量关系(表3)。高有机碳含量的页岩在生烃过程中不仅有利于增加页岩孔隙度,还有利于形成微裂缝^[119]。TOC含量与层理缝发育程度联系紧密,2%的TOC丰度被认为是层理缝能否大量发育的分界线^[120]。

表3 页岩非构造裂缝发育程度与有机碳含量关系(据文献[39])

Table 3 Relationship between the development degree of shale non-tectonic fractures and organic carbon content(Adapted from [39])

有机碳含量(TOC)	<2%	2%~4.5%	4.5%~7%	>7%
裂缝发育程度	差	中等	好	最好

此外,TOC的含量还控制着页岩页理缝的发育和裂缝密度的高低。一般认为页岩的TOC值与裂缝密度、页理缝的发育程度呈明显的正相关关系^[38, 70, 72]。当TOC值小于2%时,裂缝密度极低;当TOC值大于2%时,TOC值越高,裂缝密度越大;当TOC值达到9%时,裂缝密度最高可达到60条/mm^[74](图4a)。在TOC含量越高的层段,越容易形成局部异常高压流体,因此层理缝密度更大^[37, 111](图4b)。尽管普遍认为高有机质含量有利于裂缝发育,但是裂缝发育程度与所对应的有机质含量阈值还需要进一步研究。

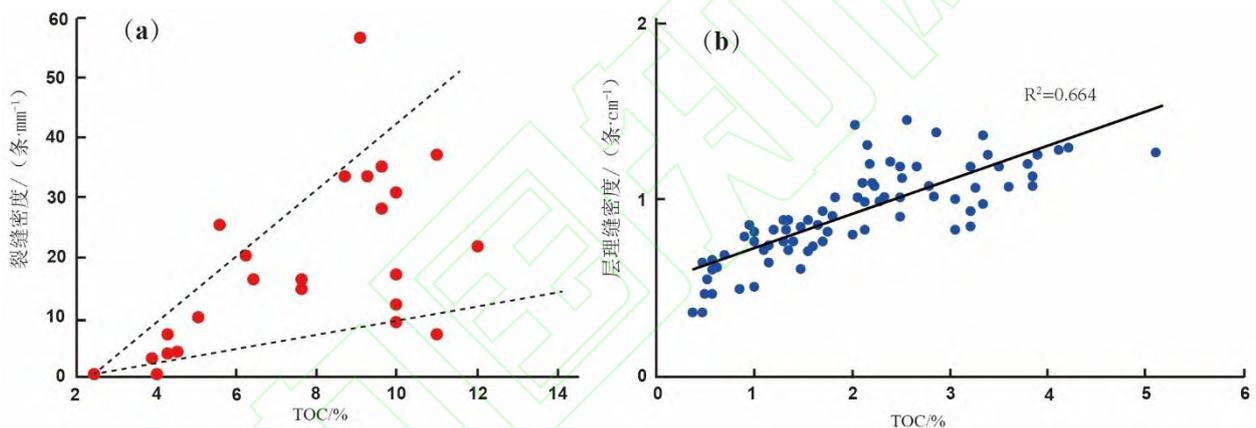


图4 裂缝密度与TOC关系图(a据文献[74],b据文献[111])

Fig. 4 Relationship between fracture density and TOC(a adapted from [74], b adapted from [111])

高的脆性矿物含量有助于提高页岩储层非构造裂缝发育程度几乎没有争议,主要通过改善页岩储层岩石力学性质,诱发岩石内在破裂从而加强裂缝发育程度,或是在成岩过程中页理面更容易破裂提高页理缝发育程度^[8, 39-40, 71, 74, 81]。黏土矿物是页岩的重要组成部分,亦是成岩收缩缝的基础物质,含量越高产生的成岩收缩缝越发育^[105]。但是普遍认为高的黏土矿物含量会降低页岩脆性,不利于裂缝发育。因此黏土矿物含量对于非构造缝的发育程度是否具有建设性还需要进一步研究。

3.2.2 多因素耦合对非构造裂缝发育程度的控制

页岩储层非构造缝的发育程度通常是由多个主控因素耦合作用下的结果,一般来说单一主控因素与非构造裂缝发育程度均呈较好的正相关关系。例如黔北地区变二段富有机质页岩的TOC含量、石英含量及非构造裂缝密度三者具有协同变化规律,石英与TOC、石英与裂缝密度均具有正相关关系^[77, 121]。此外,裂缝的发育还会受到地层厚度的影响。随着层厚增大,裂缝密度降低,裂缝尺度增加;而层厚越小,裂缝密度越大,但裂缝尺度会随之减小^[122]。高的TOC含量有利于在生排烃阶段形成异常高压从而形成层间超压缝,以方解石、石英和黄铁矿为主的裂缝充填物矿物组合佐证了页岩非构造缝的发育是在多因素的影响下耦合的结果^[98, 123]。四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩非构造缝的形成与分布除受构造应力与岩石力学层性质(脆性)控制以外,还受岩相与矿物组分、地层厚

度、TOC 和储层非均质性等因素影响^[75-79]。

然而，非构造缝的发育程度与各主控因素之间并不一定是单一的正相关关系，也有可能是区间分段式关系。王濡岳等^[76]研究认为渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩非构造主控因素主要有矿物组成与含量、TOC、岩性与岩石力学性质和储层非均质性等。TOC 与石英含量具有较好的正相关关系。通常认为生物成因的石英、长石、碳酸盐岩和黄铁矿等脆性矿物含量越高，TOC 越高，裂缝越发育^[39, 108, 121]。但是对研究区内 4 口井岩心裂缝参数统计对比发现，当 TOC 小于 6.5% 时，岩心裂缝密度与 TOC 正相关（图 5a）；当 TOC 大于 6.5% 时，裂缝密度与 TOC 则呈负相关关系，且石英与 TOC 的正相关使裂缝密度与石英含量也表现出分段性（图 5b, c）。黏土矿物含量与裂缝密度之间大体呈负相关关系，但当黏土矿物含量最低时（即石英与 TOC 最高），裂缝发育程度较低（图 5d）。这是由于在不同的 TOC 含量下石英和 TOC 对页岩脆性和塑性的贡献速率不同^[76]。

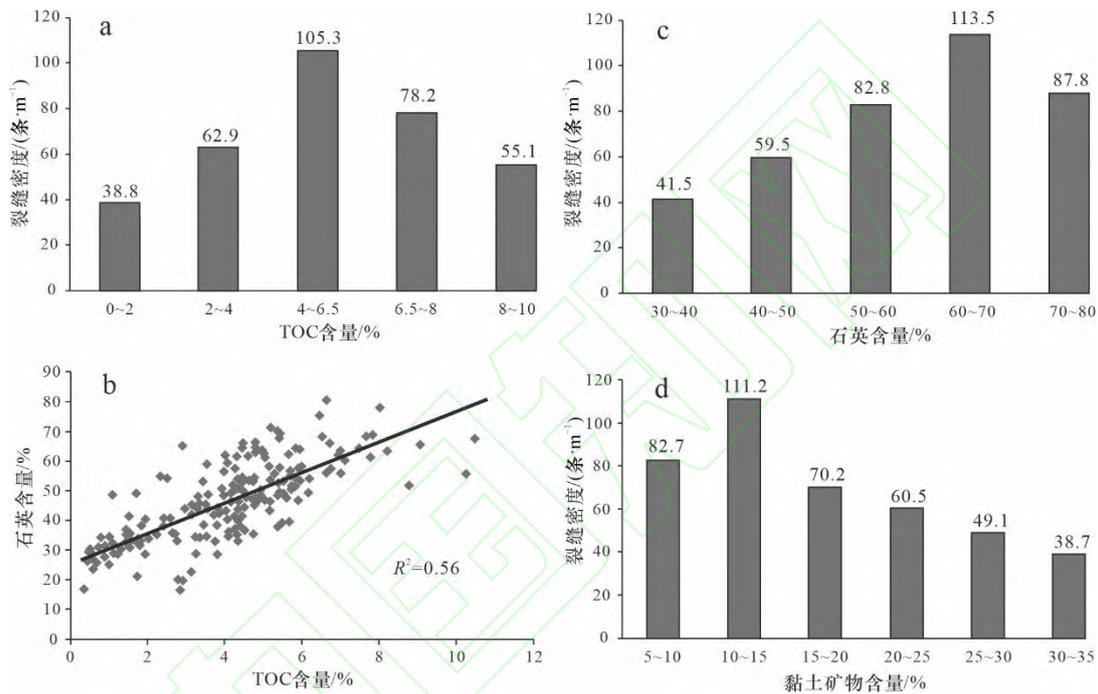


图 5 渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝密度与储层参数关系（据文献[76]）

Fig. 5 Relationships between shale fracture density and shale reservoir parameters in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area (Adapted from [76])

从上述研究成果来看，不论是单个主控因素或是多个主控因素与裂缝发育程度之间关系的研究均过于薄弱。在开展单因素对于裂缝发育程度的影响时，由于非构造缝成因机制复杂，很难保证是在单因素变量的前提下开展研究。而非构造缝的发育程度与多个主控因素之间并不一定是单一的正相关关系，很可能存在区间分段性。因此对于富有机质页岩非构造缝发育程度的研究中，需要在对单一主控因素分析的基础上，采用层次分析法、主成分分析法及粗糙集理论确定多个不同主控因素对于非构造缝发育程度影响的权重，并构建出页岩储层非构造缝发育的综合指数来较为准确地定量表征多因素耦合下的页岩非构造缝发育程度。

4 页岩非构造裂缝形成时间与活动期次及演化序列

现今页岩储层中裂缝的形成具有“多成因类型、多控制因素、多期次演化”的特点，因此裂缝形成的期次研究及演化模式对于页岩油气的勘探与开发具有重要意义^[124-131]。目前对于非构造裂缝期次确定研究较少，早期仅对非构造裂缝形成演化、古温压演化等方面有少量研究，缺少非构造裂缝形成时间（绝对年龄）的测定与发育期次的研究。随着我国对页岩气聚集机理、富集规律认识程度不断深入，页岩储层天然裂缝中的充填物引起了学者们广泛关注^[93, 120, 124, 126-130, 132]。裂缝作为盆地流体活动

和含气流体运移的重要通道, 各种流体在运移和流动过程中由于温度、压力等物理化学条件的改变使其在裂缝中以矿物的形式沉淀下来, 其记录的地球化学信息可以反映流体活动时期的温度、压力、流体性质和成岩环境。由于地质研究中需要强调时间的概念, 因此学者们多应用“古温压”、“古流体”、“古成岩”等术语来指代地质某一地质时期的温度压力、流体性质和成岩过程^[127, 130, 132]。非构造裂缝形成演化与“古温压”、“古流体”、“古成岩”联系紧密, 因此可以利用地球化学分析的手段对裂缝充填物进行分析, 从而获取非构造裂缝形成时间、活动期次及演化过程的相关信息。在裂缝期次研究中涉及的内容主要包括流体地球化学(流体包裹体)、同位素地球化学(C、O、Sr)及同位素年代学(U-Pb、Sm-Nd)分析等^[124, 126-130, 132]。基于碳酸盐岩矿物对介质环境变化比较敏感, 目前常被选取作为地球化学分析的测试对象^[134-136]。碳、氧、锶同位素主要用于反映成岩流体的性质及来源^[129, 132, 136-137]; 流体地球化学的实际应用主要是对脉体捕获的包裹体进行显微测温、激光拉曼光谱等测试, 从而获取成脉流体的古温压(均一温度、冰点温度、成分)信息^[126-130, 132]。在此基础上结合已有的构造埋藏史、热史认识, 还可以间接获取充填物形成时间, 目前广泛被应用到油气成藏研究中^[124, 127-130, 132]; 同位素年代学主要是通过获取矿物形成的时间来反映裂缝活动的时期, 是目前获取高精度绝对年龄的唯一途径。目前较为成熟的定年技术主要为碳酸盐岩 U-Pb 和 Sm-Nd 定年, 大多应用在对碳酸盐岩成岩序列和构造、埋藏史重建的研究中^[132, 135-143], 裂缝研究中涉及较少。

泥页岩非构造裂缝形成演化具有时序性和阶段性, 即从沉积开始到最大埋藏深度的不同阶段, 泥质沉积物或泥页岩形成不同类型的非构造裂缝^[63](表 4)。泥裂形成演化过程可以分为三个期次, 依次为同生成岩期、埋藏成岩期(早成岩期、中-晚成岩期)和表生成岩期^[57]。丁文龙等^[56]利用盆地模拟方法对松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组泥岩开展了流体形成等地质过程的数值模拟, 恢复了青山口组泥岩在埋藏过程中古流体压力演化。嫩江组沉积末期泥岩进入封闭状态, 之后由于内部生成的流体难以排出形成超压。在明水期末期流体压力达到峰值, 流体压力超压值于基质压力的 1/2 或 1/3 时即可产生裂缝^[131, 144]。从而明确青山口组泥岩非构造裂缝形成时期。Jochum 等^[145]对泥岩水平裂缝中的方解石脉开展了流体包裹体分析, 提出了水平非构造裂缝的形成与烃源岩初次排烃产生的超压有直接关联。

在页岩裂缝形成与演化过程的研究中, 需要强调时间的概念, 因此学者们普遍通过结合多种地球化学手段来厘定裂缝形成的绝对年龄。黔北岑巩区块下寒武统牛蹄塘组构造裂缝脉体成分复杂, 岩石学特征表明裂缝具有多期次开启与闭合的特点^[124]。结合碳氧稳定同位素及流体包裹体测试, 刻画了牛蹄塘组页岩裂缝发育期次与活动历史。涪陵地区上奥陶统五峰组、下志留统龙马溪组及宜昌地区下震旦统陡山沱组和下寒武统牛蹄塘组海相页岩裂缝脉体广泛存在, 裂缝矿物岩石学及地球化学特征反映了其形成时间、期次及成因^[127]。何建华等^[129]在对川东南永川地区龙马溪组页岩构造裂缝充填物的流体包裹体和碳氧同位素测试的基础上, 结合声发射测试、区域构造演化史和埋藏史建立了龙马溪组裂缝演化模式。不同裂缝演化期次充填物特征差异明显, 燕山期-喜山早期为水平纤状方解石和少量石英, 喜山中期为块状方解石脉体和石英, 喜山晚期至今充填矿物自形程度较高。高健^[132]利用 Sm-Nd 同位素定年精确厘定了焦石坝地区和彭水区龙马溪组裂缝脉体形成时间, 并结合流体包裹体测试分析了页岩气层古温压和古流体环境对于页岩气富集与保存条件的影响。

表4 埋藏阶段泥页岩非构造裂缝形成演化模式(据文献[63])

Table 4 Formation and evolutionary patterns of non-tectonic fractures of shale during burial(Adapted from [63])

埋藏阶段	裂缝类型	成岩阶段	深度区间/m
表层	干裂裂缝	未成岩阶段	地表-潜水面
浅层	水下收缩裂缝	未成岩阶段	10~100
中-深层	欠压实超压裂缝	早成岩阶段	~2 500
深层	生烃超压裂缝	中-晚成岩阶段	2 000~5 000
超深层	闭合裂缝	晚成岩阶段	>5 000

目前对于构造裂缝期次及演化模式的研究体系较为成熟,主要是综合利用露头、岩心观察、成像测井、包裹体分析、流体地球化学、声发射及定年技术可以准确地厘定裂缝形成时间、活动强度及演化过程。而上述研究手段并不完全适用于非构造裂缝的研究,例如可能存在裂缝尺度小不易观察、无明显交切关系、测井响应弱等问题,致使非构造裂缝的期次研究工作难以开展。笔者认为非构造裂缝的形成演化与“古温压、古流体、古成岩”过程联系紧密,故提出了基于页岩非构造裂缝中普遍存在方解石等充填物的流体地球化学、同位素地球化学(C、O、Sr)、同位素年代学(U-Pb、Sm-Nd)等方面的研究,同时结合区域构造演化和单井埋藏史恢复等信息综合确定页岩储层非构造裂缝形成时间与活动期次及演化序列。

5 结论

(1) 页岩储层天然裂缝发育是页岩油气富集、高产、稳产的关键,除了构造裂缝外,非构造裂缝对于页岩油气富集和保存同样重要。页岩储层非构造裂缝成因机制主要有成岩作用、异常高压作用和表生作用,据此将页岩储层非构造裂缝划分为成岩缝、异常高压缝、层理缝和表生缝4种类型。

(2) 页岩储层非构造裂缝的成因和形态复杂、分布不规则、尺度较小,目前对其识别与表征局限于对不同成因类型非构造裂缝发育特征的定性描述,尚未形成一套针对非构造裂缝有效识别与发育程度定量表征的方法。通过提取对非构造裂缝敏感的常规测井参数,结合成像测井、重标极差-变尺度分形概率-有限差分法(R/S-FD)等方法,综合识别宏观尺度的非构造裂缝将是非构造研究领域中的重点工作。在此基础上结合多种先进图像分析技术,形成不同类型不同尺度的非构造裂缝识别与表征及裂缝发育程度评价的新方法和新技术将是未来发展趋势。

(3) 页岩储层非构造裂缝发育的主控因素较多,不同类型非构造裂缝主控因素略有差别。层理缝发育主要受到沉积环境、成岩作用的影响,而异常超压缝的发育受控于有机质含量和热演化程度。尽管不同类型非构造裂缝主控因素存在差异,但均在不同程度上受控于成岩作用、矿物组分及含量和岩石力学性质,呈现出一定的共性。

(4) 页岩储层非构造裂缝的形成发育具有“多成因类型、多控制因素、多期次演化”的特点,并且非构造裂缝的形成与演化与“古温压、古流体、古成岩”过程关系紧密。据此指出了利用页岩非构造裂缝中方解石等充填物的流体地球化学、同位素地球化学及微区原位先进定年实验分析,是未来综合确定页岩非构造裂缝形成时间和活动期次及演化序列的关键手段。

(5) 目前页岩储层非构造缝发育程度与主控因素关系研究主要是单因素的定性-半定量分析,缺少多个主控因素耦合下的非构造裂缝发育程度的定量研究。因此未来不仅需要开展单一主控因素与裂缝发育程度定量关系研究,还需要确定不同主控因素对于裂缝发育程度影响的权重,建立多因素耦合下的非构造裂缝综合发育指数,从而量化表征非构造裂缝的发育程度。构建适用于我国页岩非构造裂缝发育程度量化的表征参数与多个主控因素之间的定量关系模型,对于未来页岩油气甜点优选、资源潜力评估等方面具有重要指导意义。

参考文献

- [1] 邹才能, 陶士振, 杨智, 等. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(4): 312-322.

- [2] 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 等. “进源找油”: 论四川盆地页岩油气[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(7): 903-920.
- [3] 赵文智, 贾爱林, 位云生, 等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 31-44.
- [4] 邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.
- [5] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004(7): 15-18, 131-132.
- [6] HAO F, ZOU H, LU Y. Mechanisms of shale gas storage: implications for shale gas exploration in China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1325-1346.
- [7] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
- [8] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 481-491.
- [9] 邹才能, 赵群, 董大忠, 等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [10] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
- [11] 杨威, 蔡剑锋, 王乾右, 等. 五峰—龙马溪组海相页岩生—储耦合演化及对页岩气富集的控制效应[J]. 石油科学通报, 2020, 5(2): 148-160.
- [12] GAO Z, XIONG S. Methane adsorption capacity reduction process of water-bearing shale samples and its influencing factors: one example of Silurian Longmaxi Formation shale from the Southern Sichuan Basin in China[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(4): 14.
- [13] QIU Z, TAO H, LU B, et al. Controlling factors on organic matter accumulation of marine shale across the Ordovician–Silurian transition in South China: constraints from trace-element geochemistry[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(4): 887-900.
- [14] 谢佳彤. 复杂构造区页岩裂缝及其对页岩气保存的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [15] 张金川, 陶佳, 李振, 等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 15-28.
- [16] ZHANG J, LI X, ZOU X, et al. Characterization of full-sized pore structure of coal-bearing shales and its effect on shale gas content[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(3): 1969-1982.
- [17] CAVELAN A, BOUSSAFIR M, MILBEAU L C, et al. Effect of organic matter composition on source rock porosity during confined anhydrous thermal maturation: example of Kimmeridge-clay mudstones[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 212: 103236.
- [18] 李恒超. 构造挤压对页岩孔隙特征及含气性的影响[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2017.
- [19] LOUCKS G, REED M, RUPPEL C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [20] 王飞腾, 郭少斌, 毛文静, 等. 基于热模拟实验的泥页岩黏土矿物演化及成岩阶段划分[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 174-179.
- [21] CURTIS E, CARDOTT J, SONDERGELD H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 26-31.
- [22] 曾祥亮, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 372-384.
- [23] 曾秋楠. 鄂尔多斯盆地东南部延长组陆相页岩储层特征与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [24] 蔡毅, 朱如凯, 吴松涛, 等. 泥岩与页岩特征辨析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 96-107.
- [25] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 6-15.
- [26] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [27] 彭军, 曾焱, 杨一茗, 等. 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 106-115.
- [28] 邵龙义, 张天畅. 泥质岩定义及分类问题的探讨[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 742-751.
- [29] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
- [30] 郭旭升. 四川盆地涪陵平桥页岩气田五峰组—龙马溪组页岩气富集主控因素[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(1): 1-10.
- [31] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- [32] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 8-17.
- [33] 郭彤楼. 涪陵页岩气田发现的启示与思考[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 29-43.
- [34] CLARKSON C, SOLANO N, BUSTIN R, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103: 606-616.
- [35] 久凯, 丁文龙, 李玉喜, 等. 黔北地区构造特征与下寒武统页岩气储层裂缝研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 797-803.
- [36] SLATT R, O'BRIEN N. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [37] 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 等. 典型致密砂岩与页岩层理缝的发育特征、形成机理及油气意义[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 180-191.
- [38] 李彦录, 陆诗磊, 夏东领, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长 7 油组页岩层系天然裂缝发育特征及主控因素[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 73-87.
- [39] 丁文龙, 李超, 李春燕, 等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 212-220.
- [40] 郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 799-808.
- [41] 余川, 聂海宽, 曾春林, 等. 四川盆地东部下古生界页岩储集空间特征及其对含气性的影响[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1311-1320.
- [42] CURTIS J. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [43] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 525-532.

- [44] 王玉满, 王宏坤, 张晨晨, 等. 四川盆地南部深层五峰组—龙马溪组裂缝孔隙评价[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 531-539.
- [45] 汪虎, 何治亮, 张永贵, 等. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 41-49.
- [46] 丁文龙, 姚佳利, 何建华. 非常规油气储层裂缝识别方法与表征[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [47] 聂海宽, 何发岐, 包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 111-116.
- [48] 郭彤楼, 刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示: 以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 643-651.
- [49] 刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏—强改造独特地质作用[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 11-28.
- [50] 丁文龙, 聂海宽, 樊春. 页岩气构造地质[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2017.
- [51] 郭璇, 钟建华, 徐小林, 等. 非构造裂缝的发育特征及成因机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 6-11.
- [52] 久凯, 丁文龙, 王哲, 等. 黔北凤冈地区龙马溪组海相页岩储层储集空间划分与演化过程分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 195-205.
- [53] ZHAO G, DING W, SUN Y, et al. Fracture characteristics and controlling factors for reservoirs in the Lower Silurian Longmaxi Formation marine shale of the Sangzhi block, Hunan Province, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106470, 2-14.
- [54] GU Y, DING W, MIN Y, et al. Nanoscale pore characteristics and fractal characteristics of organic-rich shale: an example from the lower Cambrian Niutitang Formation in the Fenggang block in northern Guizhou Province, South China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2019, 37: 273-295.
- [55] 袁玉松, 周雁, 邱登峰, 等. 泥页岩非构造裂缝形成机制及特征[J]. 现代地质, 2016, 30(1): 155-162.
- [56] 丁文龙, 张博闻, 李泰明. 古龙凹陷泥页岩非构造裂缝的形成[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 50-54.
- [57] 赵振宇, 郭彦如, 顾家裕, 等. 不同成岩期泥质岩非构造裂缝发育规律、形成机理及其地质意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 38-49.
- [58] ANDERSON J, EVERETT R. Mudcrack formation studied by timelapse photography[J]. Geological Society of America Specialist, 1964, 82: 4-5.
- [59] RAM W. Evolution of polygonal patterns in stratified mud during desiccation: the role of flaw distribution and layer boundaries[J]. GSA Bulletin, 2001, 113(1): 20-31.
- [60] JENKINS R, PLUMMER P, MORIARTY K. Late Precambrian pseudofossils from the Flinders Ranges, South Australia[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1981, 105(1/2): 67-81.
- [61] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1-6.
- [62] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135-144.
- [63] 袁玉松, 周雁, 邱登峰, 等. 埋藏过程中泥页岩非构造裂缝的形成演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 822-827.
- [64] DICKINSON G. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in the Gulf Coast region of Louisiana, USA[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37: 410-432.
- [65] PENCE R. Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressuring in Rocky Mountain region[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(4): 368-388.
- [66] REED R, PEACOR D. Geopressured shale and sealing effect of smectite to illite transition[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10): 1223-1232.
- [67] LUO X, VASSEUR G. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(10): 1550-1559.
- [68] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.
- [69] 曾联波, 肖淑蓉. 低渗透储集层中的泥岩裂缝储集体[J]. 石油实验地质, 1999(3): 266-269.
- [70] 徐翔. 四川盆地东南部海相页岩多尺度裂缝及对含气性影响研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [71] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 10.
- [72] 马诗杰, 曾联波, 石学文, 等. 四川盆地泸州地区海相页岩天然裂缝特征及主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2630-2642.
- [73] 王幸蒙, 姜振学, 王世骋, 等. 泥页岩天然裂缝特征及其对页岩气成藏、开发的控制作用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 34-42.
- [74] 董大忠, 施振生, 孙莎莎, 等. 黑色页岩微裂缝发育控制因素: 以长宁—威远剖面五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 763-774.
- [75] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响: 以渝东南地区阳春沟构造带五峰—龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 126-134.
- [76] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832-845.
- [77] 王濡岳, 胡宗全, 刘敬寿, 等. 中国南方海相与陆相页岩裂缝发育特征及主控因素对比: 以黔北岑巩地区下寒武统为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 631-640.
- [78] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [79] 曾维特, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南—黔北地区下古生界页岩非构造裂缝发育特征与主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2652-2664.
- [80] 曾联波, 马诗杰, 田鹤, 等. 富有机质页岩天然裂缝研究进展[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2427-2442.
- [81] 李子龙, 范昌育, 惠潇等. 非常规沉积储层层理缝研究进展及趋势[J/OL]. 沉积学报: 1-20[2023-10-10].
- [82] 吴娟, 陈学忠, 刘文平, 等. 川南五峰组—龙马溪组页岩流体活动及压力演化过程[J]. 地球科学, 2022, 47(2): 518-

531.

- [83] UNGERER P, BEHAR E, DISCAMPS D. Tentative calculation of the overall volume expansion of organic matter during hydrocarbon genesis from geochemistry data: implications for primary migration[J]. *Advances in Organic Geochemistry*, 1981, 10: 129-135.
- [84] MEISSNER F. Petroleum geology of the Bakken Formation, Williston basin, North Dakota and Montana[J]. *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation: AAPG Memoir*, 1984, 35:159-179.
- [85] BARKER C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(8): 1254-1261.
- [86] 孙波, 蒋有录, 石小虎, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷压力演化与超压形成机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 28-35.
- [87] 陈迎宾, 郑冰, 袁东山, 等. 大邑构造须家河组气藏裂缝发育特征及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 29-35.
- [88] 李鑫海, 崔耀科, 穆睿, 等. 致密砂岩中层理缝的赋存特征及其与油气分布的关系[J]. *地球科学前沿(汉斯)*, 2021, 11(3): 384-393.
- [89] 张君峰, 兰朝利. 鄂尔多斯盆地榆林-神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2006, (2): 172-177.
- [90] OLSON J, LAUBACH S, LANDER R. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: integrating mechanics and diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1535-1549.
- [91] JIU K, DING W, HUANG W, et al. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 48: 113-123.
- [92] 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢, 等. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2283-2300.
- [93] 王淼, 陈勇, 徐兴友, 等. 泥质岩中纤维状结构脉体成因机制及其与油气活动关系研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1107-1118.
- [94] 刘冬冬, 张晨, 罗群, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密储层裂缝发育特征及控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(4): 36-47.
- [95] 唐小梅, 曾联波, 岳峰, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩油储层裂缝特征及常规测井识别方法[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(6): 95-99.
- [96] ZENG L, LYU W, LI J, et al. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 30: 1-9.
- [97] COBBOLD P, ZANELLA A, RODRIGUES N, et al. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43(4): 1-20.
- [98] LI C, ZHAO L, LIU B, et al. Origin, distribution and implications on production of bedding-parallel fractures: a case from the Carboniferous KT- I Formation in the NT oilfield, Precaspian Basin, Kazakhstan[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107655.
- [99] UKAR E, LOPEZ R GALE J, et al. New type of kinematic indicator in bed-parallel veins, Late Jurassic-Early Cretaceous Vaca Muerta Formation, Argentina: E-W shortening during Late Cretaceous vein opening[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 104: 31-47.
- [100] 吴建发, 赵圣贤, 范存辉, 等. 川南长宁地区龙马溪组富有机质页岩裂缝发育特征及其与含气性的关系[J]. *石油学报*, 2021, 42(4): 428-446.
- [101] 赵圣贤, 夏自强, 李海, 等. 页岩储层天然裂缝定量评价及发育主控因素: 以泸州地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例[J/OL]. *沉积学报*: 1-17[2023-09-25]. DOI: 10. 14027/j. issn. 1000-0550. 2023. 015.
- [102] DING W, WAN H, ZHANG Y, et al. Characteristics of the Middle Jurassic marine source rocks and prediction of favorable source rock kitchens in the Qiangtang Basin of Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 63-72.
- [103] DING W, ZHU D, CAI J, et al. Analysis of the developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine-continental transitional shale-gas reservoirs: a case study of the Carboniferous-Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 121-133.
- [104] NELSON R. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: contributions in petroleum geology and engineering*[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [105] 赵杏媛, 何东博. 粘土矿物与页岩气[J]. *新疆石油地质*, 2012(6): 643-647.
- [106] PIREH A, ALAVI S, GHASSEMI M, et al. Analysis of natural fractures and effect of deformation intensity on fracture density in Garau formation for shale gas development within two anticlines of Zagros fold and thrust belt, Iran[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 125: 162-180.
- [107] RYBACKI E, REINICKE A, MEIER T, et al. What controls the mechanical properties of shale rocks? -Part I: strength and Young's modulus[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 135: 702-722.
- [108] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE J, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[R]. SPE 115258, 2008.
- [109] YUAN B, WANG Y, WEI N. The effects of fracturing fluid retention on permeability of shale reservoirs[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 5934-5939.
- [110] TEIXEIRA M, DONZ F, RENARD F, et al. Microfracturing during primary migration in shales[J]. *Tectonophysics*, 2017, 694: 268-279.
- [111] XU X, ZENG L, TIAN H, et al. Controlling factors of lamellation fractures in marine shales: a case study of the Fuling Area in Eastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021(12): 109091.
- [112] EMMANUEL S, ELIYAHU M, DAY-STIRRAT R, et al. Impact of thermal maturation on nano-scale elastic properties of organic matter in shales[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 70: 175-184.
- [113] GASPARRINI M, SASSI W, GALE J. Natural sealed fractures in mudrocks: a case study tied to burial history from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas, USA[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 55: 122-141.
- [114] OUGIER-SIMONIN A, RENARD F, BOEHM C, et al. Microfracturing and microporosity in shales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 162:198-226.
- [115] 曾联波, 赵继勇, 朱圣举, 等. 岩层非均质性对裂缝发育的影响研究[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(2): 216-220.
- [116] 贺振建, 刘宝军, 王朴. 准噶尔盆地永进地区侏罗系层理缝成因及其对储层的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18

- (1): 15-17.
- [117] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 181-196.
- [118] 赵杏媛, 陈洪起. 我国含油盆地粘土矿物分布特征及控制因素[J]. 石油学报, 1988, 9(3): 28-37.
- [119] JARVIE D, HILL R, RUBLE T, et al. Unconventional shale gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [120] ZHANG J, JIANG Z, WANG S, et al. Bedding-parallel calcite veins as a proxy for shale reservoir quality[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 127: 104975.
- [121] 曾维特, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 96-106.
- [122] LAUBACH S, OLSON J, GROSS M. Mechanical and fracture stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1413-1426.
- [123] 刘庆, 张林晔, 沈忠民, 等. 东营凹陷富有机质烃源岩顺层微裂隙的发育与油气运移[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 593-597.
- [124] 王兴华. 黔北岑巩区块下寒武统牛蹄塘组页岩储层裂缝表征与控气作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [125] 李雨桐, 杨西燕, 范存辉. 富有机质页岩天然裂缝表征研究进展[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(1): 32-38.
- [126] 范存辉, 李虎, 钟城, 等. 川东南丁山构造龙马溪组页岩构造裂缝期次及演化模式[J]. 石油学报, 2018, 39(4): 379-390.
- [127] 李文. 涪陵与宜昌地区海相页岩裂缝脉体成因及流体包裹体古温压特征[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- [128] 马军, 房大志, 张培先, 等. 渝东南地区阳春沟构造带五峰组—龙马溪组页岩构造裂缝特征及形成期次解析[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(7): 1117-1131.
- [129] 何建华, 李勇, 邓虎成, 等. 川东南永川地区龙马溪组页岩储层构造裂缝特征及期次演化研究[J/OL]. 地学前缘: 1-16[2023-09-19]. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.3.2.
- [130] 席斌斌, 腾格尔, 俞凌杰, 等. 川东南页岩气储层脉体中包裹体古压力特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 473-479.
- [131] FERTL W. 异常地层压力[M]. 宋秀珍译. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- [132] 高键. 渝东地区五峰—龙马溪组页岩裂缝脉体古温压及古流体成因[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- [133] 王大锐, 张映红. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 40-42.
- [134] 刘立, 孙晓明, 董福湘, 等. 大港滩海区沙一段下部方解石的地球化学与包裹体特征: 以港深67井为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(1): 49-54.
- [135] 蔡春芳, 李开开, 李斌, 等. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 91-96.
- [136] 曹剑, 胡文璋, 姚素辉, 等. 准噶尔盆地石炭系—二叠系方解石的碳、氧、锶同位素组成与含油气流体运移[J]. 沉积学报, 2007, (5): 722-729.
- [137] 石书缘, 胡素云, 刘伟, 等. 综合运用碳氧同位素和包裹体信息判别古岩溶形成期次[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 208-217.
- [138] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 12.
- [139] 胡安平, 沈安江, 潘立银, 等. 二元同位素在碳酸盐岩储层研究中的作用[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1): 11.
- [140] 胡安平, 沈安江, 陈亚娜, 等. 基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素($\Delta 47$)温度约束的四川盆地震旦系灯影组构造-埋藏史重建[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 896-905.
- [141] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 476-487.
- [142] CHERNIAK D, ZHANG X, WAYNE N, et al. Sr, Y, and REE diffusion in fluorite[J]. Chemical Geology, 2001, 181(1/2/3/4): 99-111.
- [143] TURNER W, HEAMAN L, CREASER R. Sm-Nd fluorite dating of Proterozoic low-sulfidation epithermal Au-Ag deposits and U-Pb zircon dating of host rocks at Mallery Lake, Nunavut, Canada[J]. Revue Canadienne Des Sciences De La Terre, 2003, 40(12): 1789-1804.
- [144] WAYNE N, JOHN B. Origin of fracture porosity: example from Altamont Field, Utah[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(9): 1231-1247.
- [145] JOCHUM J, FRIEDRICH G H, LEYTHAEUSER D, et al. Hydrocarbon-bearing fluid inclusions in calcite-filled horizontal fractures from mature Posidonia Shale (Hils Syncline, NW Germany) [J]. Ore Geology Reviews, 1995, 9(5): 363-370.