

文章编号: 0253-2697(2025)11-- DOI:10. 7623/syxb202511001

储层裂缝测井评价技术

赖 锦^{1,2} 苏 洋² 党文乐² 琚颖淇² 信 毅³ 陈康军⁴
张有鹏⁵ 张荣虎⁶ 单 祥⁶ 赵仪迪⁷ 王贵文^{1,2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000; 4. 中国石油西南油气田公司开发事业部 四川成都 610051;
5. 中国石油集团测井有限公司国际公司 北京 100101; 6. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023;
7. 中国石油集团测井有限公司测井技术研究院 北京 102206)

摘要:“两深一非一老”(陆上深地、海域深水、非常规油气和老油田剩余油)储层均不同程度地发育裂缝,裂缝可以沟通基质孔隙,提升储层渗透率和油气井产能。系统归纳总结裂缝的测井识别与评价方法具有重要的理论与实践意义。基于国内外文献调研和自身工作实践,开展裂缝发育主控因素调研,梳理了裂缝识别与探测的主要地质与地球物理方法。研究表明:①构造应力场、构造样式和岩性组合等是裂缝发育的主控因素;②裂缝发育带导致井径发生变化、声波时差增大、密度降低以及电阻率显著降低;③裂缝发育带在阵列声波测井变密度图像上将呈现“V”字形干涉条纹,成像测井可直观地拾取裂缝面的形态和计算裂缝孔隙度等参数;④不同测井方法的融合,通过构建裂缝表征参数可实现裂缝发育带的半定量判别,人工智能融入可提升识别与探测裂缝的效率;⑤裂缝有效性评价主要侧重裂缝开启性和裂缝延伸性评价,与现今最大水平主应力方向平行且处于弱应力区的裂缝开启性较好;⑥裂缝延伸性可以依托不同探测深度测井资料,实现从井壁到井旁到远井的裂缝发育特征的判别。研究成果可为裂缝的测井识别与有效性评价提供理论指导与技术支持,助力“两深一非一老”油气增储上产。

关键词:裂缝;测井评价;裂缝有效性;成像测井;声波测井;人工智能中图分类号:P631 文献标识码:A

中图分类号:TE34

文献标识码: A

Well logging evaluation method of reservoir fractures

Lai Jin^{1,2} Su Yang² Dang Wenle² Ju Yingqi² Xin Yi³ Chen Kangjun⁴
Zhang Youpeng⁵ Zhang Ronghu⁶ Shan Xiang⁶ Zhao Yidi⁷ Wang Guiwen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China; 4. Development Division of PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Sichuan Chengdu 610051, China; 5. International Branch, China National Logging Corporation, Beijing, 100101; 6. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou, 310023, China;
7. Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Beijing 102206, China)

Abstract: Fractures are developed to varying degrees in the hydrocarbon reservoirs characterized with deep strata, deep water environment, unconventional resources, and remaining oil in mature oilfield. These fractures can connect matrix pores, thus enhancing reservoir permeability and improving well productivity. Therefore, a systematic summary of methods for fracture logging identification and evaluation is of vital theoretical and practical significances. Based on a review of domestic and international literatures combined with our work experiences, this paper investigates the primary controlling factors of fracture development, and summarizes the main geological and geophysical methods for fracture identification and detection. The research results show that: (1) Tectonic stress field, structural style, and lithological association are identified as key factors for fracture development. (2) Fracture develop zones are characterized by variations in bore hole diameter, an increase in interval transit time, a reduction in bulk density, and a reduction in significant resistivity. (3) On the array acoustic variable density logging image, the fracture development zones exhibit V-shape diffraction patterns, while formation imaging logs enable the direct extraction of fracture geometry and calculation of fracture parameters. (4) Construction of fracture characterization parameters through integration of multiple logging methods can enable semi-

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400307)和中国石油大学(北京)优秀青年学者基金(2462023QNXZ010)资助。

第一作者: 赖 锦,男,1988年2月生,2016年获中国石油大学(北京)博士学位,现为特任教授、博士生导师,主要从事沉积储层和测井地质学的教学与研究。Email: laijin@cup.edu.cn

通信作者: 王贵文,男,1966年1月生,2010年获中国石油大学(北京)博士学位,现为教授、博士生导师,主要从事沉积储层与测井地质学方面的教学与研究。Email: wanggw@cup.edu.cn

quantitative discrimination of fracture development zones, and artificial intelligence integration can enhance identification efficiency. (5)Fracture effectiveness evaluation mainly focuses on fracture openness and extendibility. Fractures that are aligned with the direction of the current maximum horizontal principal stress under stress relaxation conditions exhibit favorable openness. (6)Fracture extendibility can be assessed by integrating logging data obtained at various depths of investigation into formations, enabling the characterization of fractures in the bore hole wall, as well as near-well bore and far-field regions. These findings can provide theoretical guidance and technical support for fracture logging identification and its effectiveness evaluation, thereby increasing reserve and production in the abovesaid mature oilfield.

Key words:fracture; well logging evaluation; fracture effectiveness; imaging logs; sonic log; artificial intelligence

引用:赖锦,苏洋,党文乐,琚颖淇,信毅,陈康军,张有鹏,张荣虎,单祥,赵仪迪,王贵文. 储层裂缝测井评价技术 [J]. 石油学报, 2025,46(11):0000-0000.

Cite:LAI Jin,SU Yang,DANG Wenle,JU Yingqi,XIN Yi,CHEN Kangjun,ZHANG Youpeng,ZHANG Ronghu,SHAN Xiang,ZHAO Yidi,WANG Guiwen. Well logging evaluation method of reservoir fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(11): 0000-0000.

近年来,随着全球油气工业的发展,陆上深层超深层、海域深水、非常规油气以及老油田剩余油,即“两深一非一老”成为油气勘探开发主要目标^[1-5]。裂缝是岩石受力超过其屈服强度而产生的没有明显位移的破裂,泛指长宽比大于 10 的孔隙^[6-7]。作为油气增储上产的主要领域,“两深一非一老”油气储层均不同程度地发育不同类型的裂缝^[8-11]。裂缝是深层—超深层砂岩、碳酸盐岩油气储层重要的储集空间和渗流通道^[12-14]。深层—超深层储层往往岩性致密、物性差,其间发育的不同类型、成因的天然裂缝系统控制了有效储层的形成,是储层能否获得高产及稳产的关键因素^[15-17]。近年来,海域潜山储层等裂缝表征研究的重要性更为凸显,裂缝发育决定了有效储层发育与否^[18-20]。在致密油气、页岩油气和煤岩气等非常规油气储层中,裂缝是沟通基质微米—纳米孔喉以及压裂裂缝的重要通道,控制了非常规油气的富集、高产和稳产,同时也影响井网部署和压裂方案设计^[7,10,21-25]。对老油区油气注水开发而言,裂缝具有“双重”作用,一方面可以提升储层的渗透性,另外一方面在注水开发过程中,又可为水侵提供运移通道,使油井过早见水或被水淹,影响开发效果^[26]。明确裂缝的发育特征和分布规律,对油气藏开发过程中的水侵规律分析及防控水政策的制定具有重要意义,同时,裂缝的综合研究也有助于提升老油区剩余油的挖掘效率^[27-28]。

“两深一非一老”油气储层的裂缝研究不可忽视,无论是勘探还是开发阶段均需开展裂缝识别与探测研究,裂缝研究是沟通地质与工程之间的桥梁^[29]。为了助力深地、深海、非常规油气勘探进程并延缓老油气田开发寿命,亟需开展精细化裂缝识别与表征研究。目前,前人在裂缝形成主控因素、分类体系、识别标准以及分布规律预测等方面已开展了大量研究工作^[14,30-33]。裂缝发育带预测成为亟需解决的关键技术

难题,研究表明,地质、测井、地震和生产动态资料均可用于识别与探测裂缝^[8,34-35]。地球物理测井资料是深入漆黑地下、洞察油气藏的眼睛,蕴含了丰富的裂缝信息,同时以其分辨率高、连续性好等特征,在地下裂缝识别与探测以及裂缝有效性评价方面扮演着重要角色^[36-38]。然而,裂缝发育带与不同测井系列岩石物理响应机理的差异性,以及测井采集本身的不配套性,再加上裂缝发育规律的复杂性等均造就了裂缝测井识别与评价具有极大的难度^[36,38-40]。

笔者通过国内外文献调研,结合自身工作实践,系统归纳总结了储层裂缝测井评价技术研究进展。首先,开展裂缝形成与发育主控因素的调研,在此基础上实现裂缝分类;然后,梳理了识别与探测裂缝的主要地质与地球物理方法,分析了对裂缝发育响应较为灵敏的岩性、孔隙度和电阻率测井系列,阐明了地层倾角和成像测井对裂缝发育带的响应特征,同时揭示了声波测井系列对裂缝发育的响应规律,并分别指出了不同测井方法对裂缝响应的灵敏度、优势以及缺陷,指出了不同的测井方法融合,通过构建裂缝表征参数可以实现裂缝发育带半定量判别,且成像测井和双侧向测井通过岩心刻度后可以实现裂缝参数定量表征,总结了主要的人工智能和机器学习识别与探测裂缝的方法;最后,探讨了裂缝有效性评价中裂缝开启性(张开程度)和延伸性(径向延伸长度)的测井评价技术。研究成果以期为裂缝的测井识别、定量表征与有效性评价提供理论指导与技术支持,助力“两深一非一老”增储上产。

1 裂缝形成与发育主控因素

裂缝的形成与分布受外因与内因共同作用与影响^[36,41],其中,外因主要是构造因素,包括构造样式、构造应力场以及岩石力学特征等,而内因主要是指岩石本身的性质,如岩性组合,地层厚度等因素^[8,21,41-44]。

构造作用和生烃增压等作用为裂缝的形成提供外部动力;成岩作用通过改造岩石力学特征影响裂缝的发育程度;沉积作用决定了岩性、地层厚度等,是控制裂缝发育的内在因素^[45]。此外,碳酸盐岩储层裂缝的形成受到断裂和岩溶作用的叠加影响,容易发育岩溶裂缝^[13,46-49]。页岩储层由于独有的页理构造,控制了层理缝的形成与发育,而页岩层系内部的异常高压裂缝主要受有机质生烃伴生的异常高压影响^[10,21,24,50-51]。在宏观尺度上,裂缝的产生受控于构造作用形成的构造样式和应力场,以及受沉积作用约束的岩性组合、砂体展布、地层厚度等;在微观尺度下,粒度、矿物含量、岩石力学非均质性以及有机质热演化程度的差异对裂缝的发育控制明显^[52]。因此,无论宏观裂缝还是微裂缝,其形成均为构造作用、沉积作用、成岩改造和异常高压等单因素或多因素综合作用的结果,且不同类型和尺度裂缝形成的主控地质因素具有明显的差异^[9,17,45]。现今的天然裂缝是不同时期岩石经历构造应力场叠加作用下的结果,构造应力场的大小、方向控制了裂缝的形成与分布,而已经形成的天然裂缝进一步通过影响局部应力场分布来制约后期裂缝的形成^[53-54]。

1.1 构造应力场

构造应力场包括古构造应力场和现今构造应力场,其中,古构造应力场为地质历史时期的构造应力场,其结果表现为岩石当中形成的断层、褶皱与裂缝,而现今应力场泛指第四纪中新世—更新世以来的地应力,是古应力场的延伸和继承^[54-56]。古构造应力场控制了裂缝的形成与分布,而现今应力场则通过影响裂缝的开启性等特征来决定裂缝的有效性^[54,57-58]。

对天然裂缝尤其是构造裂缝而言,构造运动是形成构造裂缝的最主要原因^[49,59]。通过声发射实验可以获得岩石所经历的构造活动期次与古构造活动相对强度^[60]。岩石具有记忆效应,能够记住地质历史时期的古构造应力。在声发射实验过程中,随着应力的加载,当加载的应力值达到岩石所经历的最大古应力值时,岩石将会发出弹性波并被仪器接收到,即 Kaiser 效应。在实验过程中,岩石内部微裂缝的扩展是声发射的基本机制,当加载于岩石的应力大于上一期破裂所承受的应力时,裂缝才能扩展,从而发生声发射现象^[49]。

按照三轴应力场大小及其组合系,应力场可以分为:①正断层型地应力,即 $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ (对应的最大主应力 σ_1 垂直);②逆冲断层型地应力,即 $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$ (对应的最小主应力 σ_3 垂直);③走滑断层型地应力,即 $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$ 时 (对应的中间主应力 σ_2 垂直),中间主应力方向在垂直方向^[17,54,61-63]。在岩石埋藏过程中,受埋深以及区域构造挤压应力的影响,岩石的应

力状态也在不断变化,从而影响裂缝的形成与分布^[17,63]。

岩石在浅埋藏阶段,地应力主要由上覆岩层重力产生。若不受区域应力影响, S_v 为 σ_1 ,即为正断型应力机制,该应力状态主要形成高角度剪切裂缝和近直立张性裂缝^[17]。而随着埋藏深度的增大以及区域构造挤压应力增加, S_{Hmax} 将超过 S_v [$(\sigma_1 = S_{Hmax}) > (\sigma_2 = S_v) > (\sigma_3 = S_{Hmin})$],逐渐转化为走滑应力状态,在该应力状态下,主要形成近垂直的剪切裂缝和张性裂缝^[17]。而随着水平挤压应力的增强或构造抬升、地层剥蚀导致上覆应力降低, S_v 逐渐变为最小主应力 [$(\sigma_1 = S_{Hmax}) > (\sigma_2 = S_{Hmin}) > (\sigma_3 = S_v)$],应力状态为逆断型应力机制,此时主要形成低角度剪切裂缝 (倾角约为 30°) 和近水平张性裂缝^[17]。

在构造应力场研究中,地层压力,即流体压力也是影响裂缝形成的重要因素,异常高压是储层裂缝形成的重要驱动力^[17]。异常流体压力将引起岩石内部有效应力下降,使应力莫尔圆向左移动,与破裂包络线相交,从而有利于剪切裂缝形成^[17]。流体超压是引起泥页岩储层层理缝形成的重要原因,而引起流体超压的主要成因包括构造活动、有机质生烃、热液及黏土矿物转化等^[64]。因此,古构造应力场的期次和大小控制了裂缝形成的期次、尺度、规模和产状,较大的古构造应力容易形成大尺度裂缝,而构造应力越小越容易形成小尺度裂缝^[17]。应力状态控制了裂缝的产状,而构造应力的的大小决定了裂缝发育程度^[65]。早期形成的裂缝通过影响局部应力场制约了后期裂缝的形成,晚期裂缝可切割早期裂缝,但也被早期裂缝限制^[53]。

1.2 断层等相关构造样式

除了受区域构造应力场控制外,裂缝的形成还与褶皱、断层等局部构造样式有关^[53]。褶皱、断层等同样为古构造应力场所形成。在断层、褶皱的不同位置,局部应力场的变化将决定裂缝的发育密度、延伸长度等^[53]。不同构造样式以及同一构造内部不同构造位置的应力会形成差异性聚集,导致不同构造部位裂缝的发育程度存在差异^[8,43,59]。

断层附近构造应力分布的分带性决定了裂缝的分布规律,由于断层上盘是活动盘,应力扰动作用明显,因此断层上盘的裂缝通常较下盘发育,且由断层带向两侧裂缝发育程度逐渐降低^[17,65-66]。在断层核周围,尤其是断层端部,应力应变集中,裂缝密度大、间距小^[17]。事实上,当断层核形变较大时,即可形成断层泥、碎裂岩等断层破碎带,为典型裂缝发育区,且随着与断层破碎带距离的增加,裂缝密度呈幂律递减^[17]。由于断裂的边部效应,断层带附近的岩石裂缝明显发育^[67]。断裂及其伴生的裂缝是油气等流体的储集空

间和主要运移通道,控制着致密砂岩、碳酸盐岩优质储层的分布^[17],在碳酸盐岩中,走滑断裂及其伴生裂缝以及后期的岩溶改造将形成“孔-洞-缝”集中发育的断溶体储层^[47],而在致密砂岩储层中,断裂、褶皱等构造及其伴生的裂缝也将形成断缝体储集体^[66,68]。

褶皱的不同位置同样对裂缝发育具有明显影响。在褶皱的轴部和转折端等部位,构造曲率较大,裂缝最为发育,多为高角度张裂缝,裂缝宽度和长度均较大,而在褶皱翼部,裂缝的发育程度明显降低,裂缝类型主要为剪切缝,且两翼产状不同,形成的裂缝特征也不一样,陡翼裂缝明显比缓翼更发育^[46,69]。

1.3 岩性组合

构造应力场和构造样式是形成裂缝的外在驱动力,而岩性组合则是裂缝发育的内在因素和物质基础^[8,36,41]。裂缝的形成与分布受岩层控制,通常分布在岩层内,与岩层近于垂直,并终止于岩性界面上^[70-72]。在相同构造应力及构造样式条件下,岩性组合(矿物成分、岩石结构、岩层厚度、岩石力学参数等)的差异同样也是决定裂缝形成与分布的关键因素。不同岩性由于其矿物组分、粒度、结构及构造等特征的差异,会导致其岩石力学性质的差异,进而影响天然裂缝的发育程度^[59]。

在矿物组分和粒度方面,方解石、石英等脆性矿物组分的增加会导致岩石裂缝密度增大,而粒度变粗则导致裂缝发育程度降低,且随着泥质含量的增加,裂缝密度变小^[21,23,71-73]。泥岩等刚性程度低的岩层,在构造应力的作用下则可以通过自身的塑性形变释放应力,而刚性地层只能通过脆性破裂释放应力^[43,74]。通常情况下,细砂岩中的构造裂缝密度比中砂岩更大,而

砂岩相对砾岩也更容易发育裂缝^[75-76]。因此,沉积和后续成岩改造作用造成的岩石结构与构造的差异,将导致岩石力学性质(弹性模量、泊松比和脆性指数等)发生变化,从而造成裂缝扩展方向和路径不同^[41,71]。

岩层厚度同样控制其层内裂缝发育程度,岩层厚度越小则构造应力相对越集中,且薄层岩石产生裂缝所需应力差较小,因而越薄的砂岩越容易产生构造裂缝,裂缝密度越大^[43,53,73]。

1.4 岩石力学层

岩石力学层为具有相近岩石力学性质和断裂力学特性的岩层,由岩石力学界面和岩石力学单元构成^[14,77]。层理面、泥岩层、沉积间断面等层面均可以成为岩石力学界面^[78]。由于裂缝主要发育在岩石力学单元内,终止或受阻于力学界面,因此裂缝的发育程度与岩石力学层密切相关^[14]。不同岩性组合,同一岩性内部受后续成岩改造作用,也将导致其岩石力学性质差异较大,在构造挤压过程中控制了裂缝的形成^[59]。岩石弹性模量越大,泊松比越小,通常脆性越强,在发生破裂之前承受的应变更小,在应力作用下更容易破裂生成裂缝^[31,79]。岩石力学层界面类型、尺度及其对裂缝限制能力的差异决定了裂缝的发育存在多尺度特征^[80]。

2 裂缝分类体系

由以上裂缝发育的主控因素可知,裂缝的成因类型多样,不同岩性组合的裂缝其发育的主控因素差异较大,因此不同学者从裂缝成因、裂缝产状、裂缝尺度和充填情况等出发提出了诸多裂缝分类方案^[39,75,78,80-93](表1)。

表 1 基于成因、产状与尺度等的裂缝分类方案
Table 1 Classification scheme of fractures according to their origins, occurences and scales

分类依据	裂缝类型	来源
地质成因	构造裂缝、区域裂缝、卸载裂缝、风化裂缝、岩溶裂缝、层理缝、成岩裂缝、异常高压裂缝、收缩裂缝	文献[75,81-82,92-93]
裂缝形成力学性质	张裂缝、剪裂缝和张剪裂缝	文献[83-84]
裂缝面产状	近水平缝、低角度斜交缝、高角度斜交缝、垂直缝和网状缝	文献[85-86]
裂缝面充填情况	开启裂缝、半充填裂缝和充填裂缝	文献[39,87]
裂缝规模和尺度	微尺度裂缝、小尺度裂缝、中尺度裂缝和大尺度裂缝	文献[78,80,88]
成像测井解释	天然裂缝(充填、半充填和开启)、诱导缝(钻具振动缝、重泥浆压裂缝和应力释放缝)和井壁崩落	文献[89-91]

2.1 地质成因分类

天然裂缝按其地质成因可分为构造裂缝、区域裂缝、卸载裂缝、风化裂缝、岩溶裂缝等^[75,92](表1)。而裂缝按照其力学成因,又可进一步划分为构造裂缝和非构造裂缝,其中,构造裂缝按其力学性质可进一步划分出张裂缝、剪裂缝以及张剪裂缝,非构造裂缝分为成岩裂缝、异常高压裂缝、收缩裂缝等^[93]。构造裂缝是

在构造应力作用下由岩石发生脆性破裂而形成,而非构造裂缝则主要在成岩演化、流体超压、表生作用等非构造因素下由岩石产生破裂而发育^[7]。按照裂缝形成以后裂缝面的充填状况,裂缝可进一步分为开启裂缝、半充填裂缝和充填裂缝^[39,87](表1)。

2.2 测井解释评价分类

为了后续的裂缝测井识别与评价,有必要从测井

解释的角度对裂缝进行分类评价。在钻井之前,地下岩层应力处于均衡状态,而地层一旦被钻开,井周的地应力将重新分布^[54]。在上覆岩石压力、泥浆柱压力、孔隙流体压力以及构造挤压应力的综合作用下,在井壁最小水平主应力方向上的岩石将发生剪切破裂,形成井壁崩落,而在最大水平主应力方向上则发生张性破裂,形成诱导裂缝^[12,54,94]。诱导缝又可进一步分为钻具振动缝、重泥浆压裂缝和应力释放缝 3 类^[89-90](表 1)。诱导缝和井壁崩落为钻井后形成,因此切割层理和天然裂缝等在成像测井图像上表现为 180° 对称的暗线或者双轨,不发生任何充填、溶蚀现象^[6,89,91]。总体说来,从测井的角度,裂缝可以分为天然裂缝、诱导缝和井壁崩落^[54,89,91](表 1)。此外,由于测井资料尤其是成像测井资料可以拾取裂缝的形态并计算裂缝孔隙度等参数,因此又可以将裂缝进一步划分为近水平裂缝($0^{\circ}\leq\theta<15^{\circ}$)、低角度斜交缝($15^{\circ}\leq\theta<45^{\circ}$)、高角度裂缝($45^{\circ}\leq\theta<75^{\circ}$)、垂直裂缝($\theta\geq 75^{\circ}$)和网状裂缝^[85-86,95-97]。

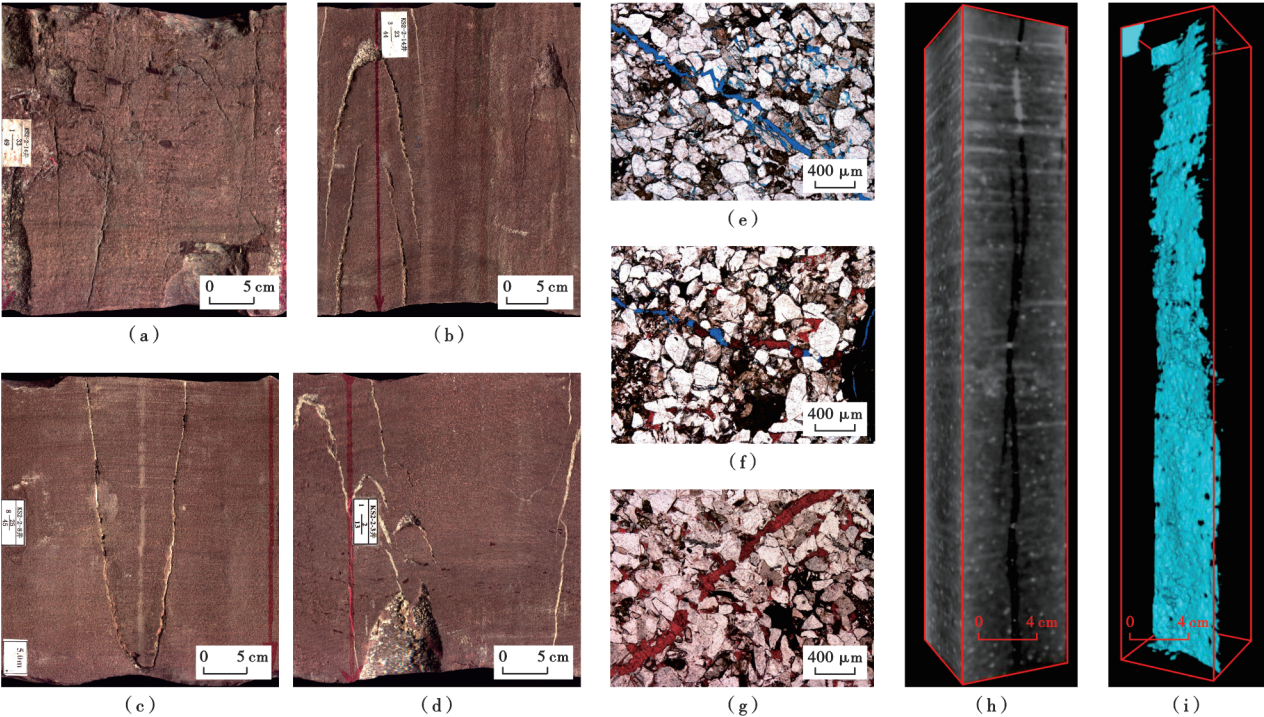
2.3 多尺度裂缝划分

根据裂缝发育的尺度以及观察手段的差异,裂缝可以划分出宏观裂缝与微裂缝,其中,宏观裂缝为野外露头、岩心上可以直接观察与描述的裂缝,而微裂缝的开展

通常小于 100 μm 甚至 50 μm ,靠肉眼无法直接观察,需依托显微镜和扫描电镜等设备来观察描述^[7,39,98-99]。裂缝发育的尺度往往从微观到宏观不断变化,且裂缝尺度越大,裂缝密度相对越低,而裂缝尺度越小,裂缝密度往往越高^[17,33,38]。因此,受岩石力学层控制,裂缝的发育具多尺度特征,根据观测手段的差异以及裂缝与岩石力学层的匹配关系,裂缝可以划分为微尺度(矿物颗粒和纹层尺度)、小尺度(岩心尺度)、中尺度(砂体—岩层尺度)和大尺度(地层尺度)裂缝 4 个级别^[78,80](表 1)。微尺度裂缝主要依靠显微镜和扫描电镜等来识别,中—小尺度裂缝需通过岩心观察与测井资料进行评价,而大尺度裂缝则一般通过地震资料拾取^[9,80,100]。

3 裂缝的识别评价方法

裂缝的测井识别与评价可依托不同的地质分析方法、地球物理方法(测井与物探)、钻井与录井以及生产动态资料等^[8,76,101]。野外露头、钻井取心可以为裂缝的识别与探测提供第一手资料,因而也成为裂缝观察与描述最直观可靠的方法^[53]。通过露头以及岩心的观察统计,可以获得裂缝面形态、裂缝面产状以及裂缝开启性等特征,同时可以统计获得裂缝密度、裂缝间距等信息^[83](图 1)。



(a)开启裂缝,克深 2-2-14 井 653.51 m;(b)半开启高角度裂缝,克深 2-2-14 井 6580 m;(c)半充填高角度裂缝,克深 2-1-5 井 6819.44 m;(d)方解石充填高角度和垂直裂缝,克深 2-2-3 井 6804.2 m;(e)微裂缝及其后期溶蚀,大北 9 井 4854.2 m;(f)方解石部分充填裂缝,大北 9 井 4853.75 m;(g)方解石完全充填裂缝,克深 242 井 6567.51 m;(h)直劈裂缝,克深 2-2-4 井 6682.38 m,CT 扫描三维重建;(i)裂缝面形态的三维渲染效果,克深 2-2-4 井 6682.38 m。

图 1 岩心、岩石薄片、扫描电镜与 CT 扫描结合的裂缝识别与表征(据文献[104]修改)

Fig. 1 Fracture identification and characterization using core, thin section, scanning electron microscope and CT scanning

此外,岩心配套分析化验,如岩石薄片、岩石 CT 扫描等可以在露头大尺度裂缝、岩心中一小尺度裂缝观察描述的基础上,探测微尺度裂缝的发育特征^[53,102-104](图 1)。当然,岩心资料受限于取心成本和取心技术,在深层、超深层、海上深水等领域,取心资料往往较少且岩心缺乏定向信息,因而与其他测井方法的结合势在必行^[46,91-92]。

除了利用露头 and 岩心直接观察裂缝之外,钻井工程中的动态信息也可以反映裂缝的发育情况,如泥浆漏失、气测录井异常高值等均可指示裂缝的存在^[103]。地震资料可以反映大尺度裂缝的发育特征,但难以拾取中一小尺度裂缝,而地球物理测井可以拾取中一小尺度裂缝。裂缝发育的层段通常在常规测井、成像测井、声波测井等有所响应,因而可以用来拾取裂缝的发育特征^[103]。与钻井取心相比,测井资料具有成本低、纵向连续和分辨率高等特点^[42,46,102-103]。

不同的地质、地球物理以及生产动态资料法的裂缝识别评价方法往往具有一定的局限性,因此需要采取多种方法综合分析,实现裂缝的综合识别与评价^[76,105]。需要注意的是,并非所有测井系列对裂缝发育响应敏感,常规测井曲线如自然伽马(GR)曲线和补偿中子测井(CNL)曲线相对不容易反映裂缝的发育情况,新技术测井系列中的岩性扫描测井(LithoScanner)难以有效地反映裂缝发育特征^[106]。

4 裂缝测井响应机理及特征

4.1 裂缝响应敏感的常规测井系列

裂缝为连续或不连续的面状非均质储集空间,在地层条件下,裂缝中充填了油气和地层水等原始流体,当地层被钻开后,由于井筒压力大于地层压力,钻井液会侵入到裂缝中,从而会对测井响应造成不同程度的影响,因此可以利用测井资料来识别与探测裂缝^[36,91,107]。不同的测井系列包含了储层中丰富的岩性、孔隙度和流体信息的变化,因而裂缝发育导致的岩石物理信息可从不同侧面(物理信息)反映出来,从而实现裂缝发育段的测井判别^[108-109]。

对裂缝响应较为敏感的测井曲线筛选是进行裂缝测井评价的前提^[42]。在常规 9 条测井曲线里面,“三岩性曲线”中的井径曲线和自然电位曲线对裂缝发育的响应较为灵敏,“三孔隙度曲线”中的声波时差曲线、密度曲线和中子曲线对裂缝发育带也均有响应,深、中、浅(深、浅侧向和微球聚焦)“三电阻率曲线”与岩性及孔隙度测井系列结合,可以较好地判断出裂缝发育带^[36,42,46,92]。地层倾角可以用井径曲线和微电阻率曲线探测,因而也可以用来拾取裂缝,成像测井资料则一直被认为是识别与探测裂缝最为有效的地球物理测井

技术之一^[90,110]。阵列声波测井可探测声波速度和幅度信息的变化,二者均对裂缝的发育有灵敏的响应,因而声波测井一直也被用于裂缝探测^[39,111]。此外,声波远探测测井资料可以探测井旁数十米范围内岩石物理信息的变化,使得裂缝的识别由“一孔之见”朝向“一孔远见”发展^[95,112]。

受限于仪器探测深度和纵向分辨率的不同,通过单一的测井方法难以实现对裂缝进行准确、系统的表征,因此不同测井方法的融合及其与地质、生产动态资料的结合可以弥补单种方法的劣势,从而提供更为全面的裂缝发育信息^[8,36]。首先,可利用 GR 曲线或 LithoScanner 等测井系列判别岩性特征^[106];进一步用电阻率的下降以及声波时差的增大判断可能的裂缝发育带,同时与岩心等资料结合,给出科学合理的判别结果。

4.1.1 岩性测井系列

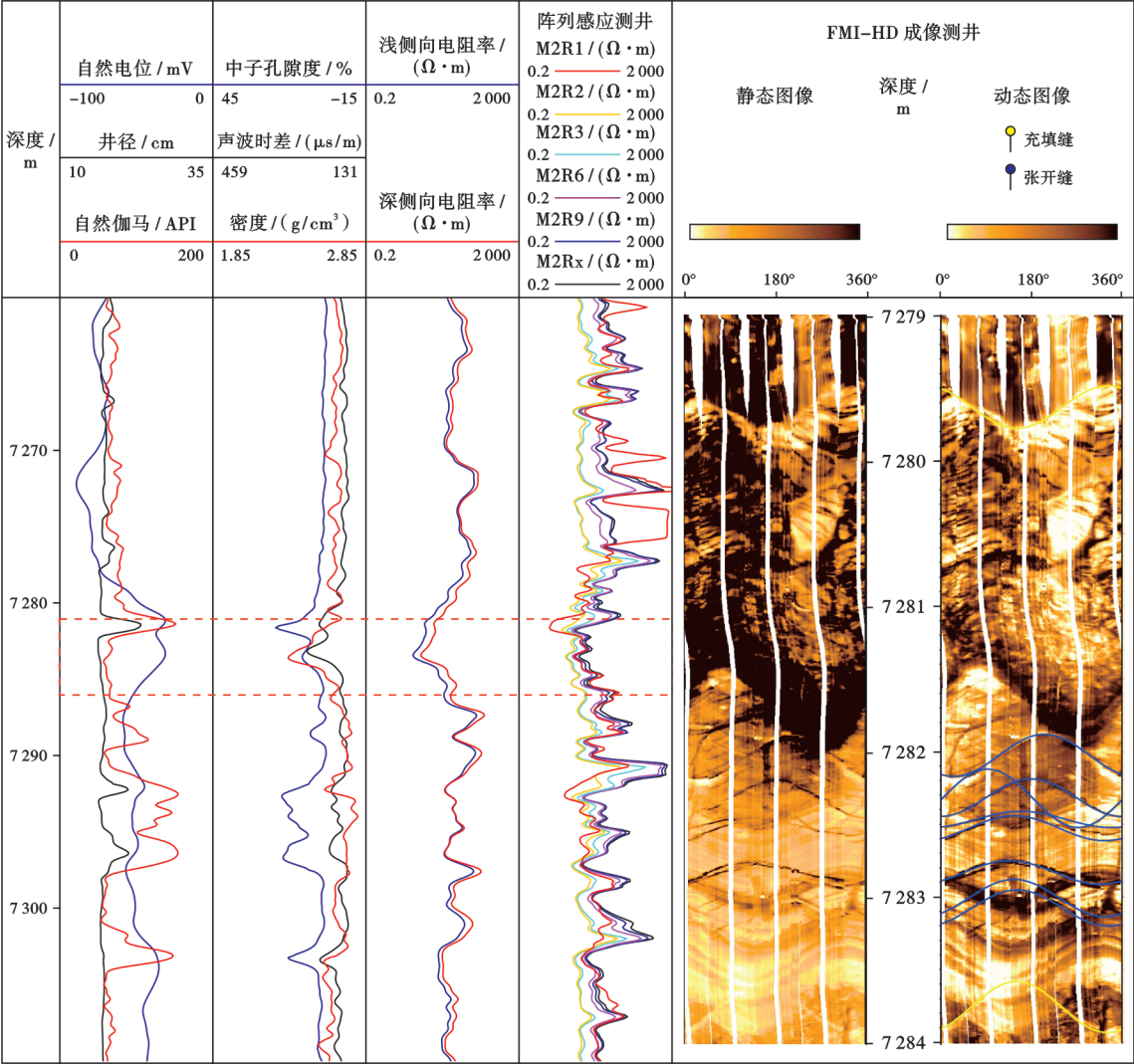
在钻井过程中,当钻遇裂缝发育带时,泥浆侵入会导致地层温度下降,造成井温负异常^[113]。井径曲线的变化可用于裂缝识别,但需要 2 条井径曲线结合进行判断,裂缝发育带将导致储层的渗透性变好,因而其自然电位(SP)曲线的幅度将增大,但 SP 曲线变化在油基泥浆环境无法适用。在裂缝发育井段,由于渗透率较好,泥浆在此处将侵入较深,因而在井壁容易形成泥饼,使得井径缩小^[41]。当裂缝发育程度较高时,裂缝带的岩石容易破碎,钻井过程中将形成井壁垮塌,从而使得井径扩大^[113]。因此,单条井径曲线的变化不易直接判断裂缝的发育程度,但当在双井径曲线中出现其中一个方向的井径大于钻头直径而另一个方向的井径接近钻头直径的现象时,即可判断该井段为裂缝发育带,而如果储层的基质渗透性变好,则双井径曲线的井径将均小于钻头直径^[36,41,91,113-114]。需要特别说明的是,当井壁受地应力影响发生严重井壁垮塌时,也会发现一条井径大而一条井径小的情况,此时应结合成像测井对二者进行区分^[91]。

4.1.2 电阻率测井系列

双侧向测井(聚焦能力强)、高分辨率阵列感应测井(纵向分辨率高且探测范围广)及其与微球聚焦测井、微侧向测井(探测深度浅但纵向分辨率高)结合,可以构成探测深度由浅及深的浅、中、深“三电阻率”,探测深度分别为泥饼环、冲洗带、过渡带和原状地层^[41,115-116]。在裂缝发育程度高的层段,深、浅侧向电阻率会出现高阻背景下的低阻异常,当裂缝发育程度较高时电阻率甚至呈尖刺状下降^[117]。根据深侧向电阻率(R_{LLD})、浅侧向电阻率(R_{LLS})的幅度差异可以评判裂缝的产状^[118]。通常情况下,高角度裂缝会导致

双侧向电阻率明显降低并呈现正差异($R_{LLD} > R_{LLS}$),而低角度裂缝则正好相反,深、浅侧向电阻率明显降低,但出现负差异($R_{LLD} < R_{LLS}$)^[41,118]。微侧向测井、微球聚焦测井贴井壁测量,在裂缝发育段,电阻率曲线出现明显的低阻异常,尖刺状下降的特征明显(图 2)^[107,114]。

高分辨率阵列感应测井由于可以提供 2 种不同纵向分辨率(0.304 8 m 和 0.609 6 m)、5 种不同探测深度(25.4 cm、50.8 cm、76.2 cm、152.4 cm、228.6 cm 和 304.8 cm)的多条电阻率曲线,可根据不同探测深度电阻率曲线的下降幅度差异拾取裂缝发育带^[39,95]。



注:M2R1、M2R2、M2R3、M2R6、M2R9 和 M2Rx 为根据软件聚焦算法输出的纵向分辨率为 2 ft(约为 0.61 m),径向探测深度分别为 10 in(约为 0.25 m)、20 in(约为 0.51 m)、30 in(约为 0.76 m)、60 in(约为 1.52 m)、90 in(约为 2.29 m)和 120 in(约为 3.05 m)的电阻率曲线。

图 2 水基泥浆钻井典型裂缝发育带的常规测井及成像测井响应特征(大北 302 井)

Fig. 2 Response characteristics of conventional and imaging logs of fracture development zones in water-based mud drilling at Well Dabai302

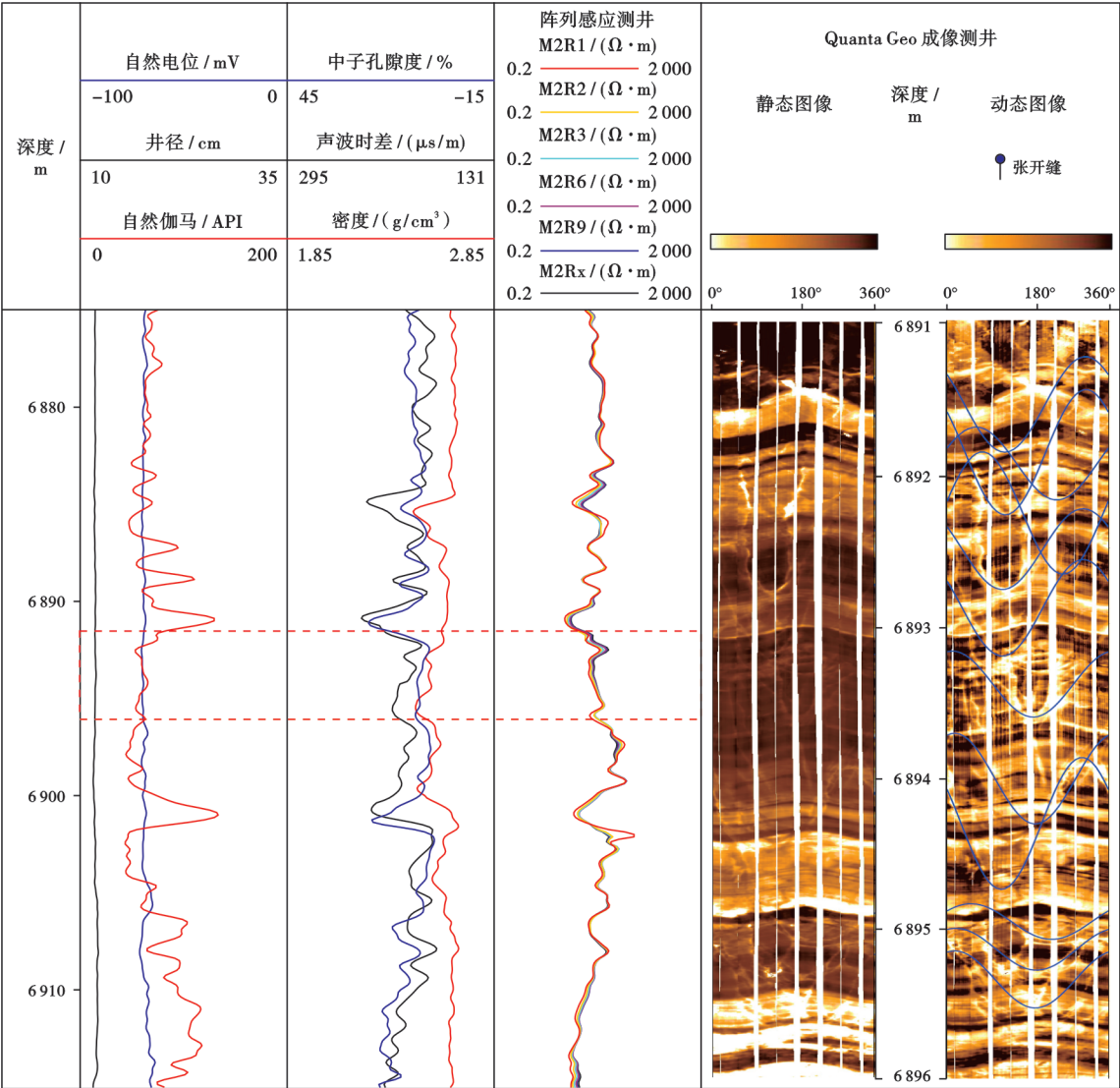
造成电阻率降低的并非只有裂缝,碳酸盐岩孔洞发育、泥质条带等也将造成电阻率降低,因此,识别裂缝时需要将泥质条带等剔除^[107]。此外,钻井形成的诱导缝也会造成电阻率下降,但由于诱导缝延伸不远,仅仅会造成微电阻率数值下降,而对探测深度较大的侧向测井则影响不大^[37,54,107]。

需要注意的是,在水基泥浆钻井条件下,侵入裂缝带的泥浆与地层并联导电,会造成裂缝发育段的电阻率突变降低,特别是在高阻背景条件下(碳酸盐岩储层

或致密砂岩),电阻率下降的趋势更为明显^[107]。然而,出于保护储层和提高钻井效率的目的,在深层、超深层以及海域,油基泥浆被大量使用^[119]。在油基泥浆背景下,由于钻井泥浆的电阻率较高,甚至比围岩还大,泥浆侵入到裂缝带里面并不会造成电阻率降低(图 3)。

4.1.3 孔隙度测井系列

声波测井对裂缝发育的响应最为灵敏,其次为密度测井,再次为中子测井,表现为“两高一低”,即中子高、声波时差高、密度低^[36,120]。



注：M2R1、M2R2、M2R3、M2R6、M2R9 和 M2Rx 为根据软件聚焦算法输出的纵向分辨率为 2 ft(约为 0.61 m)，径向探测深度分别为 10 in(约为 0.25 m)、20 in(约为 0.51 m)、30 in(约为 0.76 m)、60 in(约为 1.52 m)、90 in(约为 2.29 m)和 120 in(约为 3.05 m)的电阻率曲线。

图 3 油基泥浆钻井典型裂缝发育带的常规测井及成像测井响应特征(博孜 12 井)

Fig. 3 Response characteristics of conventional and imaging logs of fracture development zones in oil-based mud drilling at Well Bozi12

中子曲线探测的是地层的含氢指数，当遇到裂缝发育段时其读数往往会略微增大，代表孔隙度增加^[36]。尤其是在致密岩石发育段，中子测井基本无起伏，而裂缝的存在可使得中子测井的读数增大^[114,116]。但由于裂缝孔隙度(通常小于 0.5%，一般不超过 3.0%)比基质孔隙度要低得多^[104,121]，因此，中子测井的读数对裂缝发育程度较低的层段响应不灵敏。

在裂缝发育带，密度测井的读数会略微下降，其下降幅度视裂缝发育程度的差异而变化。此外，当裂缝发育规模较大引起井壁垮塌时，贴井壁测量的密度测井读数将极大降低^[41](图 2)。

声波时差测井随裂缝产状和裂缝发育程度的不

同，其响应特征也存在一定的差异。当裂缝的角度较低(近水平或低角度裂缝)时，声波的传播路径与其正交，滑行纵波在裂缝面上发生反射、折射，声波时差明显增大且声波能量衰减，幅值衰减可导致首波波至触发仪器响应后延，甚至可出现周波跳跃现象^[41,107,122](图 2)。声波时差的突然增大可指示水平或低角度裂缝存在，但由于声波时差测井探测的滑行纵波按最小时间选择声程，从而绕过高角度裂缝和直劈缝，因此高角度裂缝和直劈缝难以在声波时差测井上得到响应^[36,41,107,113]。高角度裂缝的判别需结合基于体积效应测量的密度测井和中子测井，以及电阻率测井系列^[36,123]。

孔隙度测井系列除了受裂缝发育影响外,还要注意孔隙发育带在曲线上造就的异常,碳酸盐岩孔洞发育带、致密砂岩高孔渗发育带均表现为声波时差增大、密度降低而中子读数增加。同样地,泥质条带的存在也将导致三孔隙度曲线“明显左偏”,因此,在实际应用中需结合自然伽马等曲线进行判别。与电阻率测井系列相比,孔隙度测井系列受泥浆的影响相对较弱,在油基泥浆钻井背景下仍可以较好地反映裂缝的存在,如在油基泥浆背景下裂缝发育带仍存在声波时差增大和密度降低的现象^[39](图 3)。

4.2 地层倾角与成像测井

4.2.1 地层倾角测井

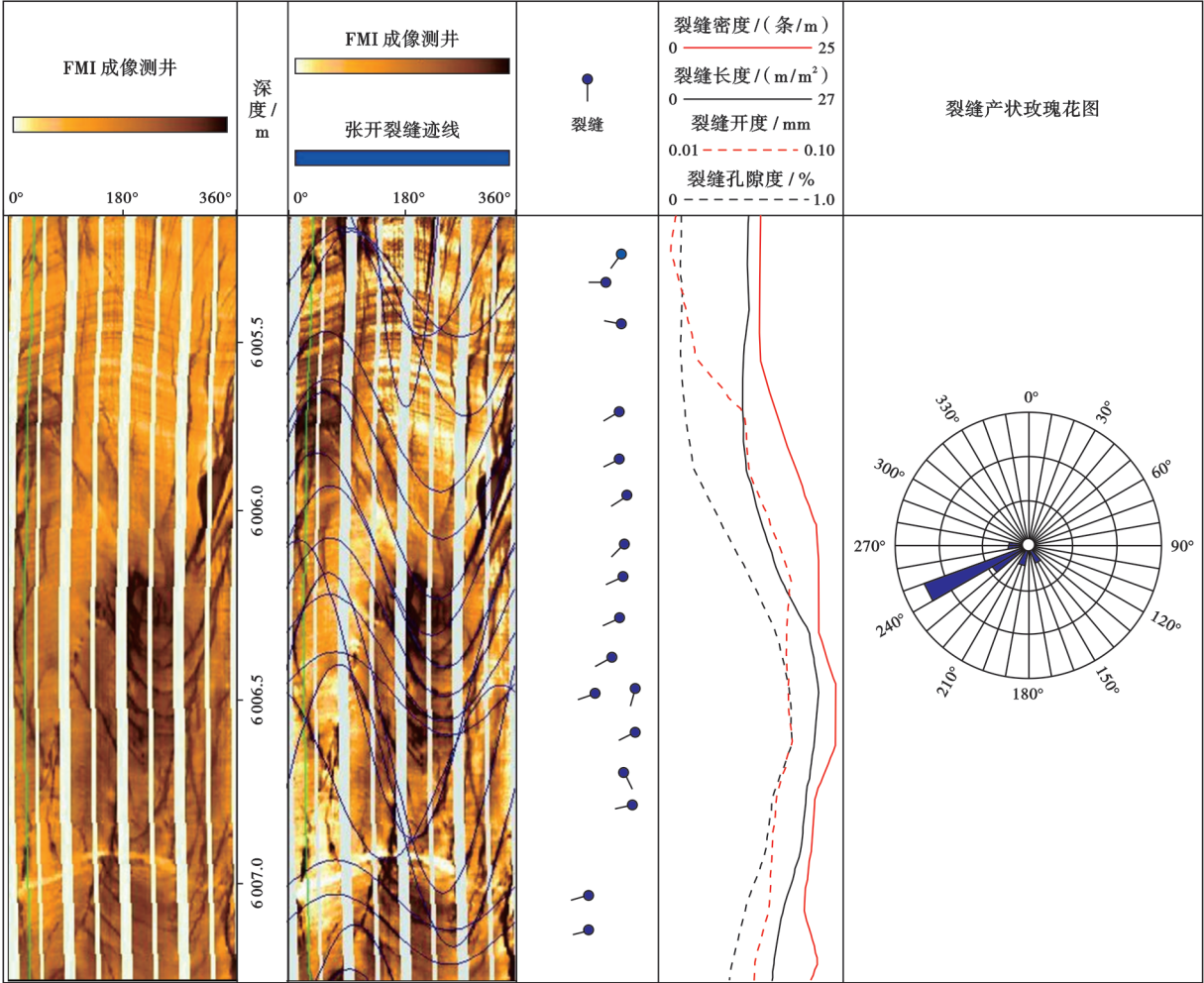
地层倾角测井可记录 4 条(四臂式)或 6 条(六臂式)微电阻率曲线,2 条或 3 条井径曲线,对裂缝发育位置极为敏感,钻遇裂缝时通常表现为电阻率降低和井径增大。利用地层倾角识别裂缝的主要方法包括裂缝识别测井(FIL)、电导率异常检测(DCA)等^[36,113,116,124]。当然,部分地质界面如泥质条带等也会导致电阻率异常,

因此,地层倾角测井资料的使用需结合其他资料进行综合判别^[124],总体上,地层倾角测井基本上已被成像测井所替代,因而利用地层倾角测井来识别探测裂缝的情况相对较少。

4.2.2 成像测井

成像测井在裂缝拾取方面与常规测井相比具备明显优势,不仅可以拾取井壁的裂缝发育带特征,刻画裂缝面的发育形态,还可以进一步计算裂缝孔隙度(FVPA)、裂缝开度(FVAH)、裂缝密度(FVDC)和裂缝长度(FVTL)4 个参数(图 4)^[36,87 91,125]。将井筒视为三维圆柱体,井壁裂缝大多围绕井眼周边分布,切割过井眼的裂缝在沿 0°~360°展开的成像测井图像上将显示为正弦曲线特征^[126-127]。根据成像测井图像特征可以区分裂缝的产状(倾角、倾向),同时还可以判断裂缝面的充填状况(开启、半充填、充填)^[91,110,128-129]。

由于成像测井的静态图像为全井段统一配色,而动态增强图像则是在一定窗长深度段内进行配色,因此,图像中的暗色正弦曲线对应开启裂缝(低阻泥浆侵



注:FMI—地层微电阻率扫描成像测井。

图 4 成像测井裂缝迹线拾取及成像测井裂缝参数计算(据文献[91]修改)

Fig. 4 Fracture trace picking and calculation of fracture parameters when applying imaging logs

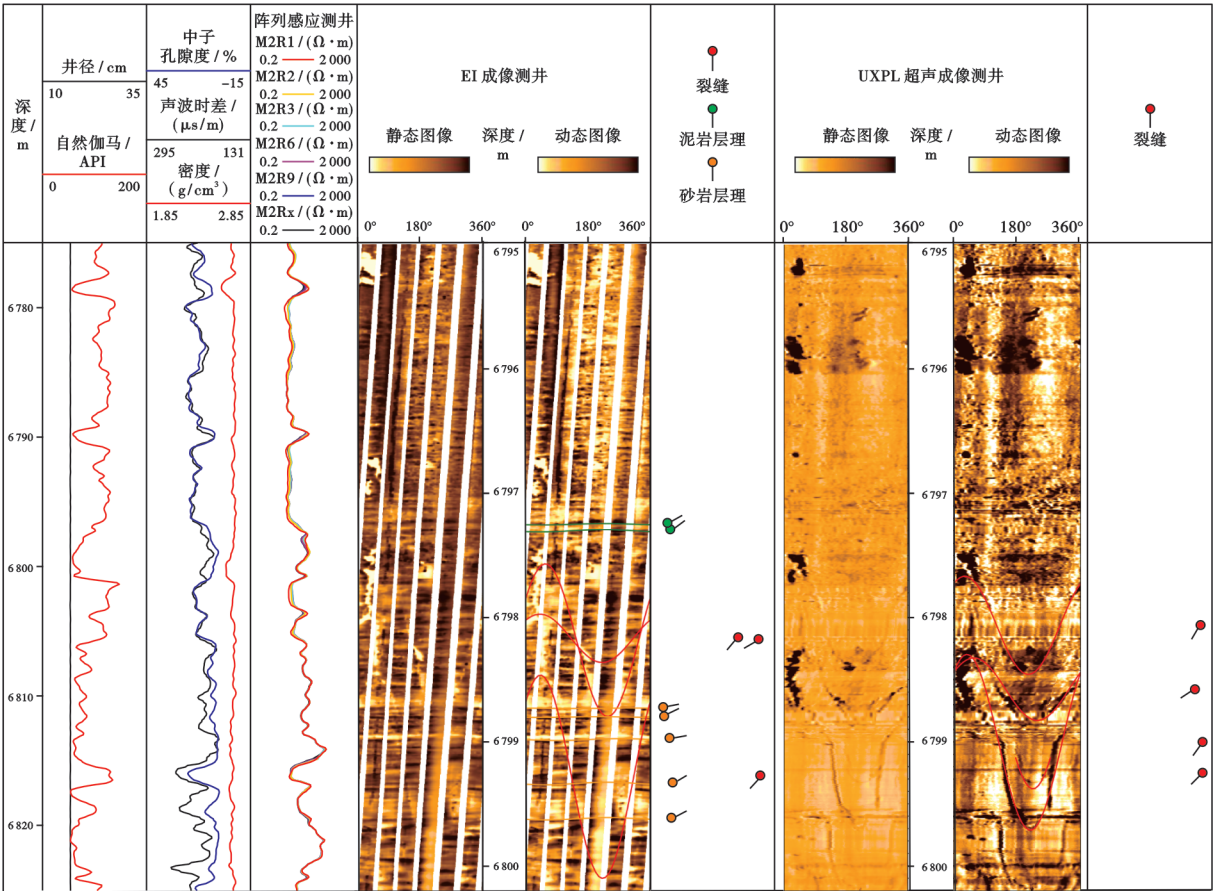
入裂缝面)或被低电阻物质(黄铁矿)充填的裂缝,亮色正弦曲线则指示高电阻填充物(如方解石)充填的裂缝^[109,130]。成像测井是目前识别裂缝最有效的测井方法。在沿 360°轴面展开的图像上,正弦曲线最低点的方位即为裂缝倾向,而正弦曲线振幅与井筒直径的反切值即为裂缝倾角,可用“蝌蚪图”来展示,其方格刻度表示裂缝倾角,蝌蚪尾部方向表示裂缝倾向^[63,69,79,91,114,131](图 4)。

图 2 中,常规测井的电阻率下降,声波时差增大以及密度降低均指示 7 279~7 284 m 深度段为裂缝发育带,但进一步通过成像测井发现,该深度段的岩石明显呈破碎特征,为典型的断-缝体发育层段,即断层破碎带较为发育的裂缝带(图 2)。

成像测井的纵向分辨率较高,可达 5 mm,但其探测深度约为 5 cm,仅仅处于冲洗带,虽可以直观拾取裂缝的存在,但在人机交互解释中存在人为误差,同时,泥质条带、缝合线等容易与天然裂缝混淆,对解释人员的经验要求较高,成像测井需要结合岩心等作出

的真假裂缝判别,区分泥质条带和沉积层理等^[36,91]。碳酸盐岩地层电阻率较高,有时甚至超出仪器分辨率范围,这导致其成像测井图像质量下降,有时呈麻点状,因此需要鉴别其中的裂缝和溶蚀孔洞等特征^[132]。裂缝通常切割层理面等界面,但在页岩层系中常见层理缝,因此需要结合常规测井等方法区分层理面和层理缝。此外,还需要区别成像测井上常见的钻井诱导裂缝和井壁崩落^[10,133]。

在油基泥浆环境下,井壁的电成像测井的图像质量明显下降,裂缝面往往表现为不连续亮色正弦曲线^[39,109,111](图 3)。超声成像测井虽然不受井内流体导电性影响,但容易受井眼不规则等因素影响而导致图像质量变差^[111]。总体上,在油基泥浆背景下,电成像测井对沉积层理响应灵敏,依然可以拾取纹层信息特征,但却失去了对裂缝的完全响应,而声成像测井资料虽然对裂缝响应灵敏,但对沉积层理却难以拾取^[134](图 5)。



注: M2R1、M2R2、M2R3、M2R6、M2R9 和 M2Rx 为根据软件聚焦算法输出的纵向分辨率为 2 ft(约为 0.61 m),径向探测深度分别为 10 in(约为 0.25 m)、20 in(约为 0.51 m)、30 in(约为 0.76 m)、60 in(约为 1.52 m)、90 in(约为 2.29 m)和 120 in(约为 3.05 m)的电阻率曲线;EI—油基泥浆电成像测井;UXPL—超声波成像测井。

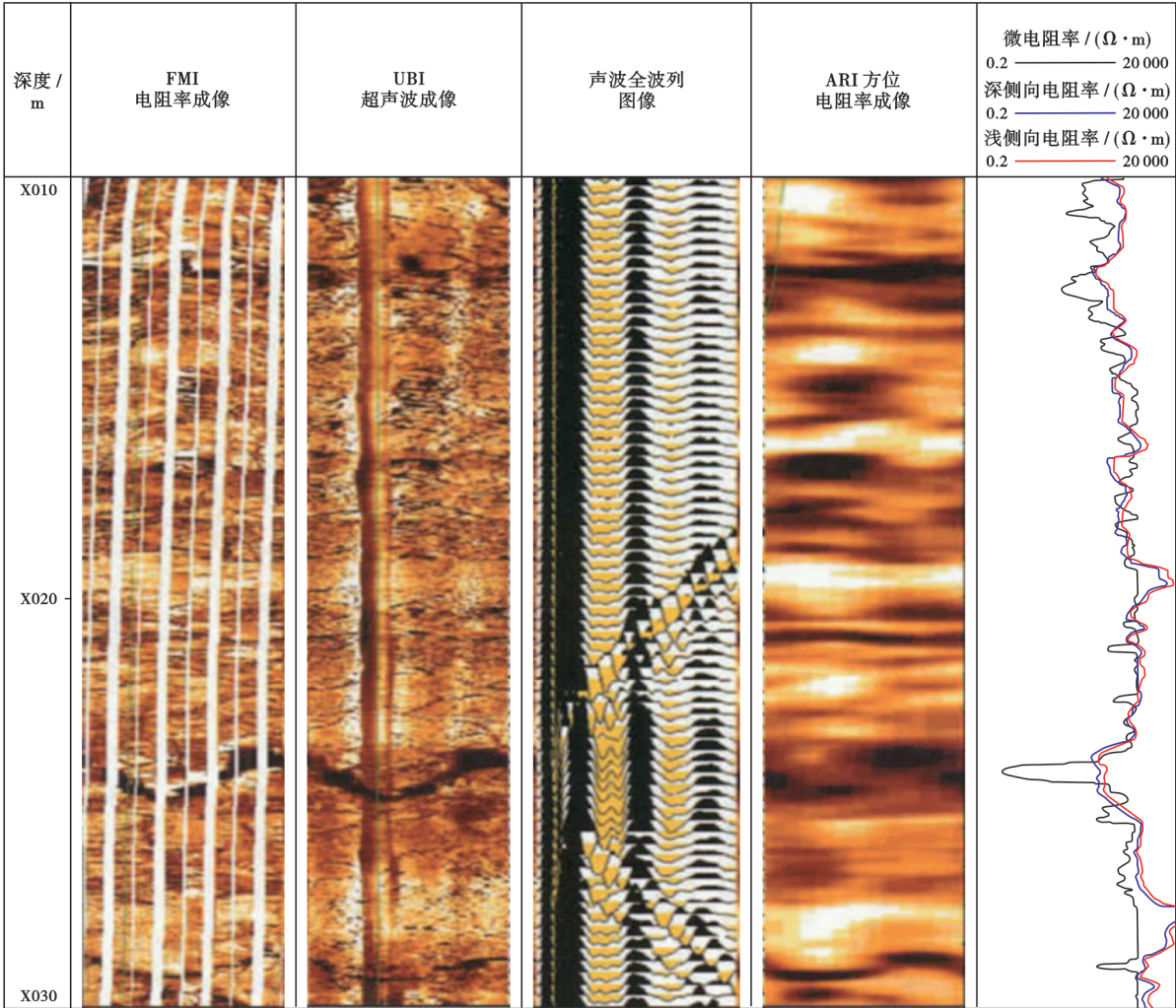
图 5 油基泥浆钻井声、电成像测井拾取裂缝与层理效果对比(博孜 1201 井,据文献[134]修改)

Fig. 5 Performance comparison of electrical and sonic imaging logs for identification of bedding and fractures in oil-based mud drilling at Well Bozi1201

4.3 声波能量衰减与斯通利波

当裂缝中充满地层流体或者侵入的泥浆时,其声阻抗与围岩相比具有显著区别。当声波通过裂缝时,除了声波时差增大外,必然引起声波的能量衰减^[102],因此在阵列声波测井中,全波波形和变密度显示图上的“V”字形干涉条纹是指示裂缝的良好标志^[102]。当然,在泥岩层以及扩径段,由于声波幅度衰减,声波波

形图上也容易出现“V”字形干涉条纹,因此在利用声波测井资料判别裂缝时,需要剔除泥岩、扩径段、岩性界面等影响,提取裂缝发育段有用信息^[42,102,135-136](图 6)。裂缝的存在同样会导致斯通利波(沿井壁表面传播)传播速度的变化和能量的衰减,同时产生斯通利波反射,因此,裂缝发育带通常还会出现斯通利波反射系数增大的现象^[36,42,122,125]。



注:FMI—地层微电阻率扫描成像测井;UBI—超声波钻孔成像测井;ARI—方位电阻率成像测井。

图 6 电成像、超声成像、阵列声波及电阻率裂缝响应特征(据文献[136]修改)

Fig. 6 Fracture response characteristics of electrical imaging, ultrasonic imaging, array sonic and resistivity logs

5 裂缝的定量表征

5.1 裂缝识别参数构建

在常规测井响应上,裂缝发育带表现为双井径曲线存在差异,密度略微下降,中子读数略微增大,声波时差增大,电阻率呈尖刺状降低,且深、浅电阻率往往存在分异,气测全烃值也随之增大^[28,39,68,137-138]。根据以上裂缝发育带的岩石物理响应特征,即可综合井径、三孔隙度、电阻率曲线,采用多元回归的方法构建裂缝

识别指数^[101,120]。通过提取电阻率降低因子和声波时差增大因子等裂缝指示的敏感因子,可以放大裂缝信号对测井曲线的影响,实现裂缝判别^[107]。此外,对常规测井曲线进行重极标差(R/S)分析,由于裂缝的发育导致岩石物理性质发生了明显变化,因此通过测井曲线上的突变点位置和突变点强弱可判断裂缝发育段的位置和裂缝发育强度^[92]。

5.2 裂缝参数的定量表征

裂缝参数的定量表征对储量计算和产能评估至关

重要^[8,36,103,139]。

裂缝孔隙度是油气储量计算的重要参数之一,通过成像测井可以计算裂缝的面孔率,即 1 m 井段之内的裂缝开口面积除以 1 m 井段中图像的覆盖面积^[36,91,140]。裂缝孔隙度通常小于 0.5%^[121]。在部分层段,由于沿裂缝发生溶蚀并处于相对松弛的应力背景,其裂缝孔隙度最高可达 2.67%^[104]。

除裂缝孔隙度外,裂缝开度的评价也是裂缝定量表征的核心问题,裂缝张开度通常决定了裂缝的渗透率^[125]。成像测井可以定量计算裂缝的平均张开度(1 m 井段裂缝轨迹宽度的平均值)和裂缝水动力开度(1 m 井段各裂缝轨迹宽度的立方之和再开立方,是对裂缝水动效应的一种拟合)^[36],但针对宽度小于 100 μm 的微裂缝,其拾取与评价较为困难^[125]。

裂缝延伸长度,包括井壁上裂缝的延伸长度和裂缝在地层中的延伸长度,是裂缝有效性评价的重点和难点^[125]。成像测井可以计算的裂缝长度(FVTL)为每平方米井壁所见到的裂缝长度之和,但对于裂缝径向延伸长度的评价,则需要综合不同探测深度的测井系列来实现^[37,141]。

裂缝密度为单位长度井壁上所见到的裂缝总条数。裂缝密度可人工直接统计。在部分裂缝密集发育的网状缝发育段,裂缝密度可大于 10 条/ m ^[36,46,69,91]。

除了成像测井外,双侧向测井也常用于裂缝开度和长度的计算。根据双侧向曲线的分异特征及其正负差异关系可以判断裂缝发育段的位置,并结合双侧向曲线分异的幅度,可以建立其与裂缝参数的对应关系,从而实现裂缝参数的定量计算。但双侧向测井容易受岩性、流体性质差异等因素影响,因而计算结果需要与岩心观察结果相互验证和刻度^[118,142]。

6 人工智能评价

人工智能(AI)、大数据与地球科学及固体地球物理学结合是大势所趋^[143-145]，“AI”赋能为裂缝测井识别与评价提供了新的思路^[37,95,109]。目前,裂缝的人工智能测井评价主要包括 2 大类:一大类为构建裂缝识别知识图谱,通过成像测井等实现裂缝自动拾取;另一大类为分类回归,通过输入充足的有标签数据(分类好的裂缝发育段与无缝段信息,及其对应的常规测井响应数据体特征),采用机器学习算法,将测井评价过程转化为机器学习过程,最终自动输出未知样本裂缝发育带信息^[109,146-147]。

6.1 成像测井图像智能分类

将成像测井图上人工拾取出来的裂缝形成图版,构成知识图库,同时利用图像分割方法与数学模型结

合,把人工识别出的裂缝分布形态、轮廓等细节转化成颜色、纹理、异常区域宽度等信息,这些信息通过计算机视角识别,以供机器学习^[109,127,148],最终通过计算机视觉技术和深度学习框架实现成像测井图中裂缝的智能识别与分割标注^[127]。借助图像处理技术进行裂缝自动提取与识别,可降低主观误判的风险。当然,机器学习的图像自动分割方法对图像质量有一定要求,适用于裂缝特征清晰、干扰信息较少的测井图像^[149]。

6.2 常规测井分类标签

机器学习算法,包括无监督学习、半监督和监督学习^[109,150]。无监督学习算法的识别精度低,有监督学习算法的精度高,但要有充足的含标签数据,半监督学习算法融合了无监督和有监督学习的优点,但其运行效率相对较低^[109]。

机器学习具有强大的数据处理和自适应学习能力,在进行裂缝的测井预测时,能建立测井曲线与裂缝之间的非线性识别模型,提高测井资料的处理质量和评价精度^[147,150]。已有的岩心观察、成像测井裂缝解释数据可以提供标签信息,标签可以为有裂缝和无裂缝,并根据裂缝发育程度和产状进一步将裂缝发育层段分为高角度、低角度裂缝等^[109]。然后,可以融入机器学习方法(贝叶斯、支持向量机、人工神经网络等),将大量有标签的测井数据进行训练,挖掘不同裂缝发育级别对应的敏感测井曲线响应特征,最终输出未知样本的裂缝发育信息^[109,150]。机器学习可深度挖掘裂缝发育与测井数据体之间的非线性关系,可弥补单条曲线识别或人工识别的不确定性问题,可提高裂缝的识别能力和效率^[28,147]。

当然,不同机器学习算法泛化能力的差别以及裂缝导致的测井响应差异性会影响裂缝的智能判别结果。此外,人工智能方法需要有大量输入样本学习才能保证输出结果的准确性。

7 裂缝有效性评价

裂缝有效性评价主要侧重 2 个方面:一是沿井轴方向的裂缝开启性评价,主要分析裂缝的张开度和孔隙度;二是水平方向的径向延伸性评价,主要研究连通状况和径向延伸情况^[36,101-111,139]。

7.1 裂缝开启性

裂缝自其形成后,其有效性受到后期构造应力、成岩作用等因素综合影响,因此,并不是所有的天然裂缝都是有效的,只有裂缝面开启,且裂缝之间发生相互连通形成裂缝网络体系的裂缝才能成为有效的储集空间和渗流通道,提高油气井的产能^[11,79,128]。

在构造应力方面,古构造应力场控制了裂缝的形

成与发育,而现今构造应力场则决定了裂缝的有效性。首先,现今构造应力场的方向对裂缝的开启性和渗流性有明显的控制作用,在通常情况下,与现今最大水平主应力方向平行的裂缝相对容易保持开启,而随着裂缝走向与水平最大主应力方向之间的夹角增大,作用到裂缝面上的法向应力将逐渐增加,裂缝面将逐渐闭

合,从而影响裂缝的有效性^[17,76,79,91,151-152](图 7)。在不同古构造应力场背景形成的多组系裂缝中,与现今应力场的最大主应力近平行分布的裂缝呈拉张状态,连通性好^[36]。地质历史时期的应力场方向转变会使得裂缝在不同历史时期呈现开启或闭合,影响裂缝的有效性^[44]。

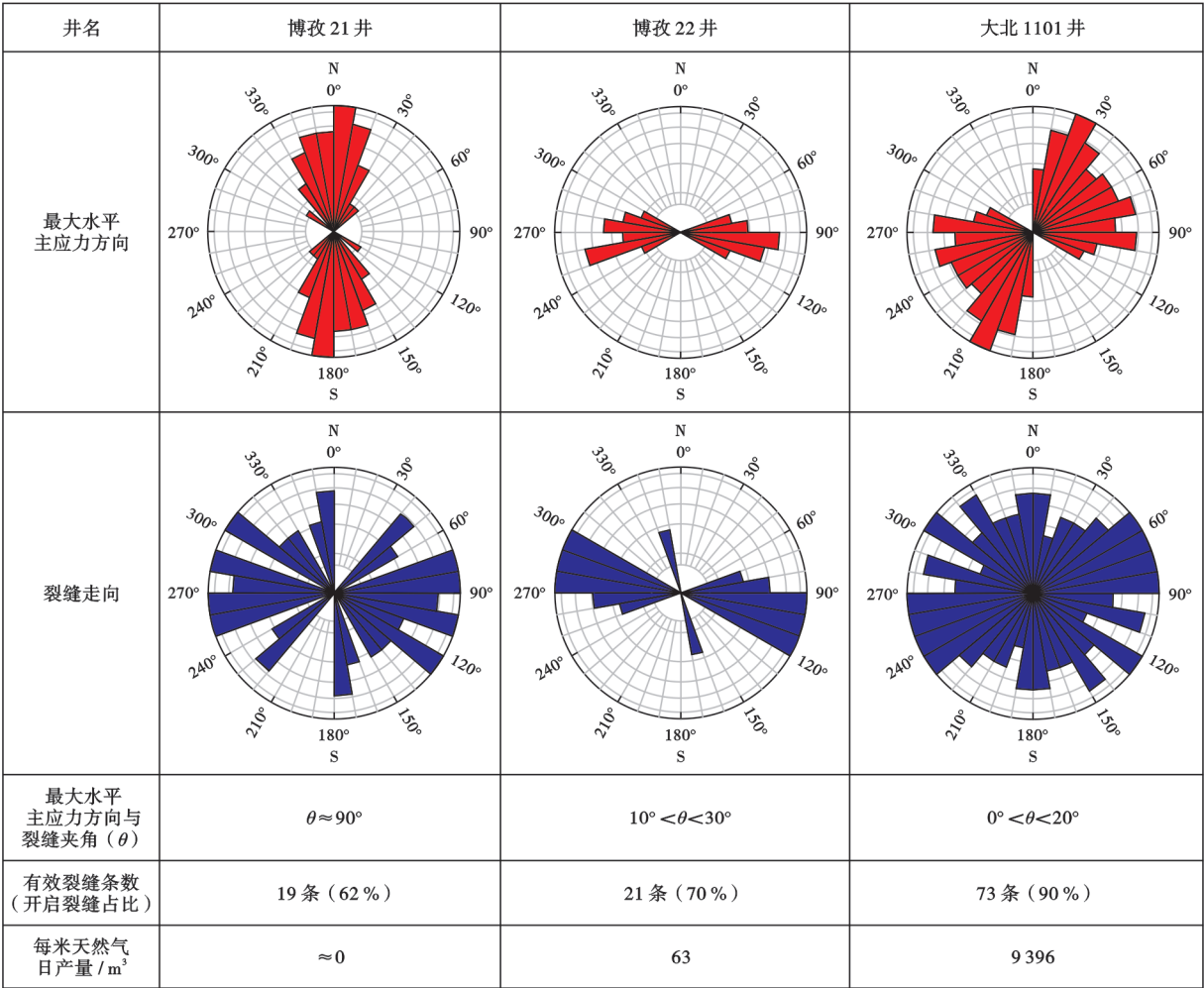


图 7 裂缝有效性与现今地应力及其与产能的关系

Fig. 7 Relationships between fracture effectiveness and in-situ stress as well as hydrocarbon productivity

在图 7 中,博孜 21 井的裂缝拾取较少,仅为 19 条,其中 12 条为开启裂缝,占总有效裂缝条数的比例为 62%,通过成像测井拾取的最大水平主应力方向为近 SN 向,而天然裂缝走向为近 EW 向,二者的夹角接近 90°,因而其裂缝有效性较差,最终该井的产能也较低。大北 1101 井的最大水平主应力方向为 NE—SW 向,拾取的天然裂缝走向也以 NE—SW 向为主,二者的夹角较小,裂缝的有效性较好,且该井拾取的裂缝总数达 73 条,其中有效裂缝较多,为 66 条,占总有效裂缝条数的比例达 90%,因此最终该井的产能也较高(图 7)。

构造应力的大小控制着裂缝的开启性。裂缝发育层段通常以形成裂缝的方式释放部分应力,因而,裂缝密度越大,现今水平的两向应力差也越小。进一步研究表明,随着现今水平两向应力差增大,裂缝孔隙度逐渐降低,说明随着现今应力值的增大,裂缝的有效性逐渐降低^[54](图 8)。因此,裂缝开度与裂缝倾角的大小具有一定的相关性,通常情况下,裂缝倾角越大,裂缝开度也相对较高,这主要由于高角度裂缝所受的应力相对较弱,裂缝容易保持开启^[48]。当然,异常流体压力的存在也会使得裂缝面容易保持开启,因而,流体超压往往对应的裂缝有效性也较好^[8,17]。

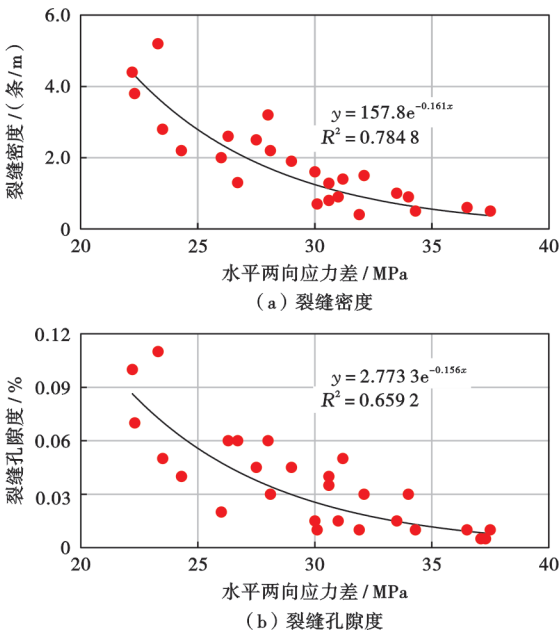


图 8 裂缝密度、裂缝孔隙度与水平两向应力差关系
Fig. 8 Relationships between fracture density, fracture porosity and horizontal in-situ stress differences

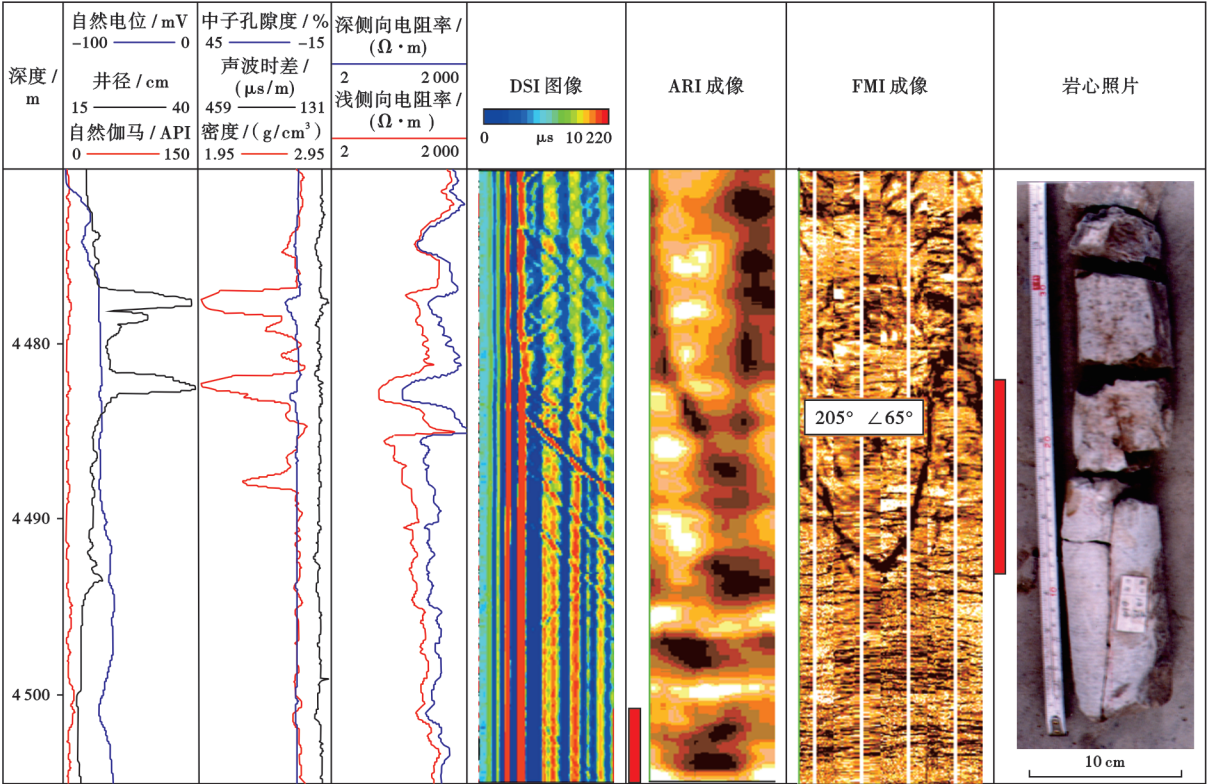
有效裂缝发育层段通常位于应力松弛区域,而应力松弛区域或层段的基质孔隙也普遍发育较好^[153-154]。在裂缝与孔喉匹配下,储层既可以高产,也可以获得稳产^[76,128,155-156]。

在成岩作用方面,破坏性成岩作用(胶结作用)会使得裂缝面闭合,裂缝在地下可能呈现完全被充填或闭合状态,降低了裂缝的有效性^[17],而溶蚀作用则可以进一步提升裂缝的有效性^[30,104,157]。部分学者认为,对裂缝的有效性起决定作用的因素主要为沿裂缝面的胶结作用和溶蚀作用,而不是现今的地应力方向^[158-160]。

7.2 裂缝径向延伸性评价

裂缝径向延伸长度是裂缝有效性评价的重点内容,裂缝径向延伸越长,沟通的油气储层的体积越大,油井的产量也越高,且能够保证持续稳产^[35,111]。从径向探测深度来看,地层微电阻率扫描成像测井(FMI)的探测深度较浅,约为 5 m,而方位电阻率成像测井(ARI)以及偶极声波成像测井(DSI)的探测深度较深,可沿井周 2~3 m 探测^[95,161]。因此,可以通过 FMI、ARI 和 DSI“3I”结合,实现裂缝的有效性分析。诱导缝通常较浅,仅能在探测深度较浅的 FMI 图像上见到,而有效的开启裂缝如果有一定的径向延伸范围,则可以在同时在 FMI、ARI 和 DSI 图像上识别^[37](图 9)。

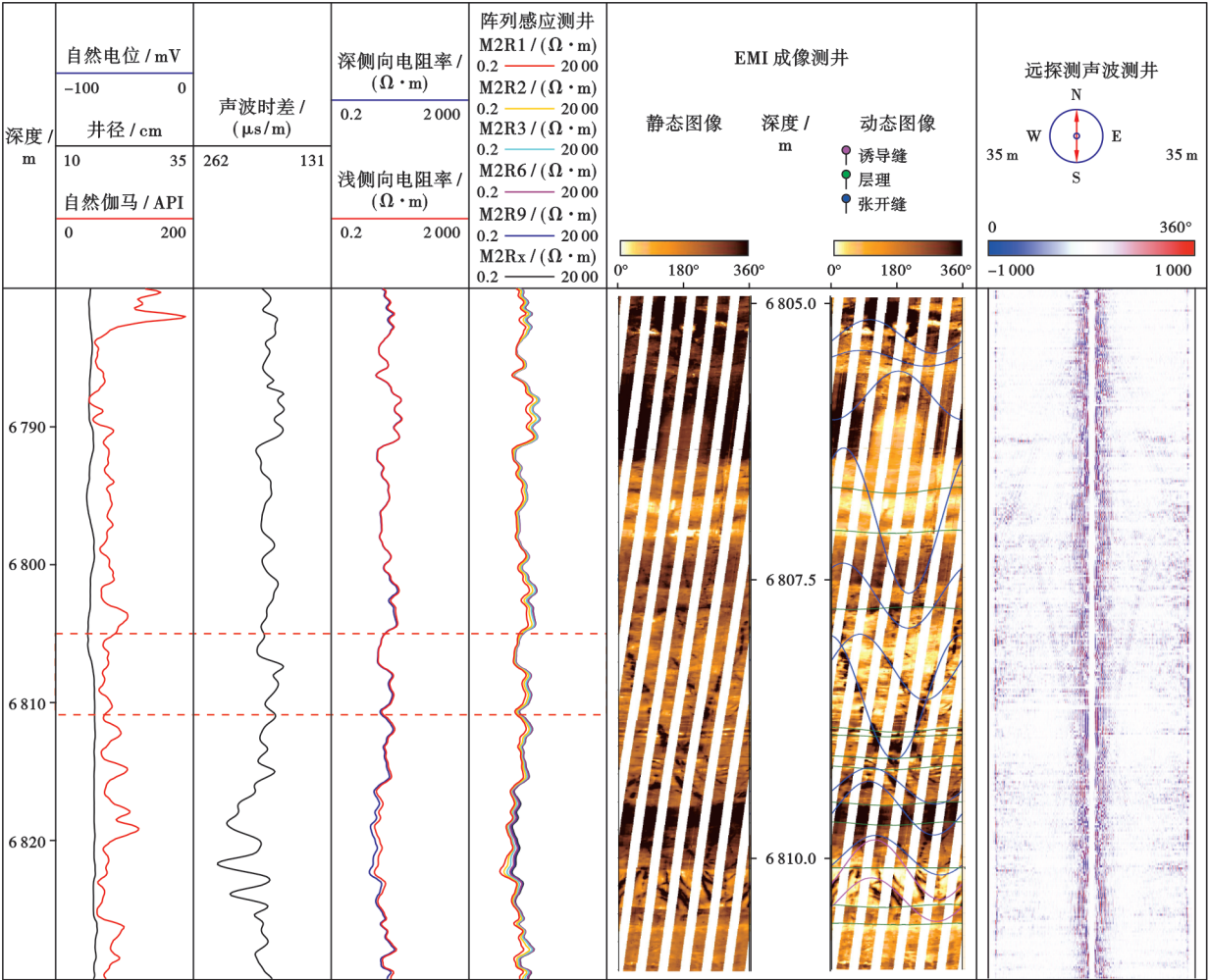
远探测声波测井技术的径向探测范围可覆盖 3~50 m,分辨率约为 1 m,对裂缝、洞穴和断层等地质异常反射体响应灵敏,与常规测井、成像测井等结合可以探测从井筒、井旁到远井数十米范围内的裂缝发育特征^[162-164]。在图 10 中 6 805.0~6 810.5 m 深度段,常



注:FMI—地层微电阻率扫描成像测井;ARI—方位电阻率成像测井;DSI—偶极声波成像测井。

图 9 FMI、ARI 和 DSI“3I”相结合的裂缝延伸长度评价(据文献[37]修改)

Fig. 9 Fracture extensibility evaluation using FMI,ARI and DSI (“3I” technology)



注:EMI—电磁干扰成像测井。

图 10 常规测井、成像测井与远探测声波测井相结合的裂缝延伸长度评价(博孜 106 井)
Fig. 10 Fracture extensibility evaluation using conventional and imaging logs in combined with acoustic remote-detection logging at Well Bozi106

规测井的电阻率下降、声波时差增大指示有裂缝发育,成像测井中的暗色正弦曲线指示裂缝井壁发育,而在其远探测声波测井图像上,也可以看到反射振幅强弱的变化,说明此井段裂缝的发育在井筒范围之内有一定延伸,指示裂缝的有效性较好。

8 结 论

- (1) 构造样式、构造应力场以及岩石力学层特征是裂缝形成与发育的内因,而岩石本身的性质,如岩性组合、地层厚度等因素是裂缝形成的外因。裂缝按地质成因可分为构造裂缝、区域裂缝、卸载裂缝、风化裂缝、岩溶裂缝等,而按照其力学成因可划分为构造裂缝和非构造裂缝,其中,构造裂缝按其力学性质可进一步划分出张裂缝、剪裂缝以及张剪裂缝,非构造裂缝可分为成岩裂缝、异常高压裂缝、收缩裂缝等。
- (2) 裂缝的测井识别与评价可依托不同的地质分

析方法、地球物理方法、钻井与录井以及生产动态资料等。对裂缝响应较为灵敏的测井曲线包括岩性测井曲线、孔隙度测井曲线和电阻率测井曲线系列。裂缝发育带通常导致井径变化,自然电位曲线的异常幅度增大,声波时差增大,密度降低,补偿中子略微增大,深、中、浅电阻率均明显下降,且高角度裂缝发育带的深、浅电阻率通常呈现正差异,而在低角度裂缝发育带则呈现负差异。

(3) 由于声波能量的衰减,裂缝发育带在阵列声波测井变密度图像上将呈现“V”字形干涉条纹,且导致斯通利波反射系数增大。成像测井可直观地拾取裂缝面形态和计算裂缝孔隙度等参数,成像测井可以区分诱导缝、井壁崩落和天然裂缝,同时可判别裂缝的开启性。不同常规测井曲线的融合,通过构建裂缝表征参数可对裂缝发育带进行半定量判别。不同的测井识别与探测裂缝的方法均有自己的优势与局限,精细化

和量化的裂缝识别与探测需要多学科、多方法联合攻关,人工智能与机器学习的融入可以提升裂缝识别的效率。可构建裂缝识别知识图谱,通过成像测井等实现裂缝自动拾取,也可以通过输入充足的有标签数据,采用机器学习算法,最终自动输出未知样本的裂缝发育带信息。

(4) 裂缝有效性评价主要侧重裂缝开启性和裂缝延伸性评价,现今应力场与成岩作用是影响裂缝开启性的重要因素,胶结作用会破坏裂缝的开启性,而溶蚀作用可以提升裂缝的开度。与现今最大水平主应力方向平行且处于应力松弛背景的裂缝开启性较好。随着水平两向应力差增大,裂缝逐渐闭合。裂缝延伸性则可以依托不同探测深度的测井资料,实现从井壁到井旁到远井的裂缝发育特征的判别。成像测井可以实现对井壁裂缝进行判别,常规测井和阵列声波测井可以实现对井筒裂缝的发育特征进行评价,而远探测声波则可以达到井旁数十米范围内的裂缝发育带进行预测。

(5) “两深一非一老”油气储层均不同程度地发育裂缝,裂缝的测井识别与探测在油气增储上产工作中将扮演越来越重要的角色。随着测井技术的发展进步,储层的裂缝识别和探测以及裂缝有效性评价有望取得新的突破。多学科(地质学、地球物理学、油藏工程)、多尺度(宏观、微观)、多参数(常规测井、成像、声波测井)和多方法(机器学习)融合是裂缝评价与预测的发展趋势。

符号注释: S_v —垂向应力,MPa; S_{Hmax} —水平最大主应力,MPa; S_{hmin} —水平最小主应力,MPa; σ_1 —最大主应力,MPa; σ_2 —中间主应力,MPa; σ_3 —最小主应力,MPa。

参 考 文 献

[1] 黄维和,韩景宽,王玉生,等. 我国能源安全战略与对策探讨[J]. 中国工程科学,2021,23(1):112-117.
HUANG Weihe, HAN Jingkuan, WANG Yusheng, et al. Strategies and countermeasures for ensuring energy security in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 112-117.

[2] 刘合,曹刚. 新时期采油采气工程科技创新发展的挑战与机遇[J]. 石油钻采工艺,2022,44(5):529-539.
LIU He, CAO Gang. Opportunities and challenges for scientific and technological innovation and development of oiland gas production engineering in the new era[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 529-539.

[3] 李阳,赵清民,薛兆杰. 新一代油气开发技术体系构建与创新实践[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2023,47(5):45-54.
LI Yang, ZHAO Qingmin, XUE Zhaojie. Construction and innovative practice of new generation oil and gas development technology system[J]. Journal of China University of Petroleum: E-

dition of Natural Science, 2023, 47(5): 45-54.

[4] 邹才能,马锋,潘松圻,等. 世界能源转型革命与绿色智慧能源体系内涵及路径[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 633-647.
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Global energy transition revolution and the connotation and pathway of the greenand intelligent energy system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 633-647.

[5] 孙龙德,贾承造,张君峰,等. 松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(12): 1699-1714.
SUN Longde, JIA Chengzao, ZHANG Junfeng, et al. Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(12): 1699-1714.

[6] 刘向君,段茜,梁利喜,等. 基于邻点融合方法的碳酸盐岩孔隙结构统计模型及其声学响应特性[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 43-50.
LIU Xiangjun, DUAN Xi, LIANG Lixi, et al. A statistical model of pore structure and acoustic response characteristics of carbonate rocks based on the adjacent interfusion method[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 43-50.

[7] 丁文龙,王垚,王生晖,等. 页岩储层非构造裂缝研究进展与思考[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 297-314.
DING Wenlong, WANG Yao, WANG Shenghui, et al. Research progress and insight on non-tectonic fractures in shale reservoirs[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1): 297-314.

[8] 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.
LIU Jingshou, DING Wenlong, XIAO Zikang, et al. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2283-2300.

[9] 李长海,赵伦,刘波,等. 微裂缝研究进展、意义及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(3): 402-416.
LI Changhai, ZHAO Lun, LIU Bo, et al. Research status, significance and development trend of microfractures[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(3): 402-416.

[10] LAI Jin, LIU Bingchang, LI Hongbin, et al. Bedding parallel fractures in fine-grained sedimentary rocks: recognition, formation mechanisms, and prediction using well log[J]. Petroleum Science, 2022, 19(2): 554-569.

[11] 巩磊,程宇琪,高帅,等. 库车前陆盆地东部下侏罗统致密砂岩储层裂缝连通性表征及其主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2475-2488.
GONG Lei, CHENG Yuqi, GAO Shuai, et al. Fracture connectivity characterization and its controlling factors in Lower Jurassic tight sandstone reservoirs of eastern Kuqa foreland basin [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2475-2488.

[12] LAI Jin, LIU Shichen, XIN Yi, et al. Geological-petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(11): 2263-2296.

[13] 沈安江,胡安平,乔占峰,等. 深-超深层碳酸盐岩储层发育与保持机理[J]. 中国科学:地球科学, 2024, 54(11): 3403-3420.
SHEN Anjiang, HU Anping, QIAO Zhanfeng, et al. Development and preservation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Science China Earth Sciences, 2024, 67(11): 3367-3385.

[14] 曾联波,宋逸辰,韩俊,等. 塔里木盆地构造流体作用对超深层断控碳酸盐岩缝洞型储层的控制[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 128-139.
ZENG Lianbo, SONG Yichen, HAN Jun, et al. Control of struc-

ture and fluid on ultra-deep fault-controlled carbonate fracture-vug reservoirs in Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 128-139.

[15] AMEENMS, MACPHERSON K, AL-MARHOON MI, et al. Diverse fracture properties and their impact on performance in conventional and tight-gas reservoirs, Saudi Arabia: the Unayzah, South Haradh case study[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(3): 459-492.

[16] LAUBACH S E, ZENG Lianbo, HOOKER J N, et al. Deep and ultra-deep basin brittle deformation with focus on China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 175: 104938.

[17] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层—超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 1-14. ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: distribution and development[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 1-14.

[18] 周心怀, 王清斌, 冯冲, 等. 渤海海域大型太古界潜山储层形成条件及地质意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1534-1548. ZHOU Xinhui, WANG Qingbin, FENG Chong, et al. Formation conditions and geological significance of large Archean buried hill reservoirs in Bohai Sea[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1534-1548.

[19] 谢玉洪, 袁全社. 中国近海深水深层油气地球物理勘探实践与展望[J]. *石油物探*, 2023, 62(2): 183-193. XIE Yuhong, YUAN Quanshe. Practice and prospects of deep-water and deep-formation geophysical exploration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(2): 183-193.

[20] 徐长贵, 杨海风, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地海域深层—超深层大型复合潜山油气藏形成条件[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1227-1239. XU Changgui, YANG Haifeng, WANG Feilong, et al. Formation conditions of deep to ultra-deep large composite buried-hill hydrocarbon reservoirs in offshore Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1227-1239.

[21] 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. GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEI Xiangfeng, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 799-808.

[22] 赖锦, 李红斌, 张梅, 等. 非常规油气时代测井地质学研究进展[J]. *古地理学报*, 2023, 25(5): 1118-1138. LAI Jin, LI Hongbin, ZHANG Mei, et al. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources[J]. *Journal of Palaeogeography: Chinese Edition*, 2023, 25(5): 1118-1138.

[23] 尹帅, 张子阳, 张星星, 等. 扇三角洲前缘非常规致密油储层裂缝发育模式: 以泌阳凹陷东南部古近系核三段为例[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 139-155. YIN Shuai, ZHANG Ziyang, ZHANG Xingxing, et al. Fracture development mode in fan delta front unconventional tightoil reservoirs: a case study of Paleogene He-3 in southeastern Biyang depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 139-155.

[24] HUANG Yuyue, WANG Guiwen, KUANG Lichun, et al. Recognition and impact on reservoir quality of fractures in fine-grained sedimentary rocks using image and array acoustic logs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2025, 173: 107284.

[25] 李国欣, 贾承造, 赵群, 等. 煤岩气成藏机理与煤系全油气系统[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 29-43. LI Guoxin, JIA Chengzao, ZHAO Qun, et al. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 29-43.

[26] 朱圣举, 赵向原, 张皎生, 等. 低渗透砂岩油藏天然裂缝开启压力及影响因素[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(4): 573-578. ZHU Shengju, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Jiaosheng, et al. Fracture opening pressure and its influence factors in low-permeability sandstone reservoirs[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2016, 46(4): 573-578.

[27] 徐小童, 曾联波, 董少群, 等. 塔里木盆地库车坳陷克深气藏超深层致密砂岩储层天然裂缝发育特征及对水侵的影响[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(4): 812-822. XU Xiaotong, ZENG Lianbo, DONG Shaoqun, et al. Fracture development characteristics and their influence on water invasion of ultra-deep tight sandstone reservoirs in Keshen gas reservoir of Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(4): 812-822.

[28] 董少群, 曾联波, 冀春秋, 等. 超深层致密砂岩裂缝测井识别深度核方法[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 166-176. DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, JI Chunqiu, et al. A deep kernel method for fracture identification in ultra-deep tight sandstones using well logs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 166-176.

[29] 张冠杰, 张滨鑫, 徐珂, 等. 塔里木盆地库车坳陷博孜区块超深层致密砂岩储层裂缝特征及其对油气产能的影响[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(2): 75-86. ZHANG Guanjie, ZHANG Binxin, XU Ke, et al. Fracture characteristics of ultra-deep tight sandstone reservoirs in the Bozi block, Kuqa depression of Tarim Basin, and effects on oil-gas production[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(2): 75-86.

[30] LAUBACHSE, LANDERRH, CRISCENTILJ, et al. The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 1065-1111.

[31] 孙帅, 侯贵廷. 岩石力学参数影响断背斜内张裂缝发育带的概念模型[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 455-462. SUN Shuai, HOU Guiting. Analysis of conceptual models for the influence of rock mechanics on tensile zone in faulted anticlines[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 455-462.

[32] 鞠玮, 杨慧, 侯贵廷, 等. 复杂构造变形区断控裂缝发育分布模式[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 130-138. JU Wei, YANG Hui, HOU Guiting, et al. Development and distribution pattern of fault-controlled fractures in complex structural deformation zones[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 130-138.

[33] 巩磊, 秦欣楠, 高帅, 等. 变质岩潜山多尺度裂缝发育特征及裂缝网络结构模式: 以渤中 Z 变质岩潜山为例[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 332-343. GONG Lei, QIN Xinnan, GAO Shuai, et al. Multi-scale fracture development characteristics and fracture network patterns of buried-hill in metamorphic rocks: a case study of the Bozhong Z metamorphic buried-hill[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 332-343.

- [34] 陈旋,贾雪丽,王波,等.吐哈盆地丘东洼陷深层致密砂岩油气富集主控因素[J].中国海上油气,2024,36(6):26-38.
CHENXuan,JIAXueli,WANGBo,etal. Main controlling factors for the enrichment of oil and gas in deep tight sandstone in the Qiudong sub-sag of the Turpan-Hami Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2024,36(6):26-38.
- [35] WANG Song,WANG Guiwen,ZENG Lianbo,et al. New method for logging identification of natural fractures in shale reservoirs;the Fengcheng Formation of the Mahu sag,China[J]. Marine and Petroleum Geology,2025,176:107346.
- [36] 赖锦,王贵文,孙思勉,等.致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J].地球物理学进展,2015,30(4):1712-1724.
LAI Jin,WANG Guiwen,SUN Simian,et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics,2015,30(4):1712-1724.
- [37] LAI Jin,SU Yang,XIAO Lu,et al. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: past, present and future prospect[J]. Geoscience Frontiers,2024,15(3):101779.
- [38] 张冲,叶青,周伟,等.基于力学层划分的火成岩潜山裂缝分形维变识别方法[J].地球科学,2025,50(2):521-534.
ZHANG Chong,YE Qing,ZHOU Wei,et al. Fractal dimension identification method of fractures in igneous buried hill based on mechanical layer division[J]. Earth Science,2025,50(2):521-534.
- [39] LAI Jin,WANG Guiwen,FAN Zhuoying,et al. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs[J]. Marine and Petroleum Geology,2017,84:195-214.
- [40] 秦瑞宝,曹景记,李雄炎,等.变质岩潜山储层裂缝声波测井评价方法及其在渤中 19-6 气田的应用[J].中国海上油气,2021,33(3):77-84.
QIN Ruibao,CAO Jingji,LI Xiongyan,et al. Acoustic logging evaluation method for fractures in metamorphic buried hill reservoir and its application in BZ19-6 gas field[J]. China Offshore Oil and Gas,2021,33(3):77-84.
- [41] 徐芳,张文旗,张兴阳,等.裂缝性碳酸盐岩气藏相控条件下测井裂缝解释——以土库曼斯坦阿姆河右岸为例[J].天然气地球科学,2016,27(8):1549-1556.
XU Fang,ZHANG Wenqi,ZHANG Xingyang,et al. Sedimentary facies controlled fracture quantitative interpretation of fractured carbonate gas reservoirs;a case study of the right bank of Amu Darya,Turkmenistan[J]. Natural Gas Geoscience,2016,27(8):1549-1556.
- [42] 董春梅,孙裔婷,马存飞,等.基于地质模式约束的天然裂缝测井识别方法研究[J].地球物理学进展,2020,35(4):1352-1363.
DONG Chunmei,SUN Yiting,MA Cunfei,et al. Research on natural fracture logging identification method based on geological model constraints[J]. Progress in Geophysics,2020,35(4):1352-1363.
- [43] 王珂,杨海军,李勇,等.库车坳陷克深气田致密砂岩储层构造裂缝形成序列与分布规律[J].大地构造与成矿学,2020,44(1):30-46.
WANG Ke,YANG Haijun,LI Yong,et al. Formation sequence and distribution of structural fractures in compact sandstone reservoir of Keshen gas field in Kuqa depression,Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia,2020,44(1):30-46.
- [44] 王志民,王翠丽,徐珂,等.超深层致密砂岩构造裂缝发育特征及控制因素——以塔里木盆地库车坳陷博孜一大北地区下白垩统储集层为例[J].天然气地球科学,2023,34(9):1535-1551.
WANG Zhimin,WANG Cuili,XU Ke,et al. Characteristics and controlling factors of tectonic fractures of ultra-deep tight sandstone;case study of the Lower Cretaceous reservoir in Bozi-Dabei area,Kuqa depression,Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2023,34(9):1535-1551.
- [45] 刘卫彬,张世奇,徐兴友,等.东濮凹陷沙三段致密砂岩储层裂缝形成机制及对储层物性的影响[J].大地构造与成矿学,2019,43(1):58-68.
LIU Weibin,ZHANG Shiqi,XU Xingyou,et al. Fracturing and its influence on the compact sandstone reservoir in the third Member of the Shahejie Formation in the northern Dongpu depression[J]. Geotectonica et Metallogenia,2019,43(1):58-68.
- [46] 李长海,赵伦,刘波,等.碳酸盐岩裂缝研究进展及发展趋势[J].地质科技通报,2021,40(4):31-48.
LI Changhai,ZHAO Lun,LIU Bo,et al. Research status and development trend of fractures in carbonate reservoir[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2021,40(4):31-48.
- [47] LI Hongbin,WANG Guiwen,LI Yuhang,et al. Fault-karst systems in the deep Ordovician carbonate reservoirs in the Yingshan Formation of Tahe oilfield Tarim Basin,China[J]. Geoenergy Science and Engineering,2023,231:212338.
- [48] 韩鹏远,丁文龙,杨德彬,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层裂缝表征与主控因素分析[J].地学前缘,2024,31(5):209-226.
HAN Pengyuan,DING Wenlong,YANG Debin,et al. Characteristics and main controlling factors of fracture development in the Ordovician carbonate reservoir,Tahe oilfield[J]. Earth Science Frontiers,2024,31(5):209-226.
- [49] 李云涛,丁文龙,韩俊,等.顺北地区走滑断裂带奥陶系碳酸盐岩裂缝分布预测与主控因素研究[J].地学前缘,2024,31(5):263-287.
LI Yuntao,DING Wenlong,HAN Jun,et al. Fractures in Ordovician carbonate rocks in strike-slip fault zone,Shunbei area; fracture distribution prediction and fracture controlling factors[J]. Earth Science Frontiers,2024,31(5):263-287.
- [50] 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.
WANG Ruyue,DING Wenlong,GONG Dajian,et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation,southeastern Chongqing-northern Guizhou area[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(7):832-845.
- [51] PANG Xiaojiao,WANG Guiwen,KUANG Lichun,et al. Lamellation fractures in shale oil reservoirs: recognition, prediction and their influence on oil enrichment[J]. Marine and Petroleum Geology,2023,148:106032.
- [52] 王勇飞,赵向原,刘成川.川东北元坝地区长兴组礁滩相储层裂缝特征及主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(7):973-981.
WANG Yongfei,ZHAO Xiangyuan,LIU Chengchuan. Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in reef-flat facies reservoirs of Changxing Formation in Yuanba area,northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2019,30(7):973-981.
- [53] 李理,桑晓彤,陈霞飞.低渗透储层裂缝研究现状及进展[J].地球物理学进展,2017,32(6):2472-2484.

LI Li, SANG Xiaotong, CHEN Xiafei. Research and progress on fracture of low-permeability reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2472-2484.

[54] 赖锦, 白天宇, 肖露, 等. 地应力测井评价方法及其地质与工程意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 1033-1043.

LAI Jin, BAI Tianyu, XIAO Lu, et al. Well-logging evaluation of in-situ stress fields and its geological and engineering significances[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 1033-1043.

[55] 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(3): 91-93.

ZENG Lianbo, TIAN Chonglu. Tectonic stress field and the development of low permeability oil fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(3): 91-93.

[56] YANG Chengwei, WANG Chenghu. Tensile fractures and in situ stress measurement data constraints on cretaceous - present tectonic stress field evolution of the Tanlu fault zone in Shandong Province, North China craton[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2023, 97(6): 1616-1624.

[57] 张荣虎, 魏国齐, 王珂, 等. 前陆冲断带构造逆冲推覆作用与岩石响应特征——以库车坳陷东部中一下侏罗统为例[J]. 岩石学报, 2021, 37(7): 2256-2270.

ZHANG Ronghu, WEI Guoqi, WANG Ke, et al. Tectonic thrust nappe activity and sandstone rock response characteristics in foreland thrust belt: a case study of Middle and Lower Jurassic, Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2256-2270.

[58] 何巧林, 王珂, 胡春雷, 等. 深层致密砂砾岩储层构造裂缝分布规律与有效性评价——以库车坳陷 KT1 气藏亚格列木组为例[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 437-447.

HE Qiaolin, WANG Ke, HU Chunlei, et al. Distribution regularity and effectiveness evaluation of structural fractures in deep tight glutenite reservoir: a case study of KT-1 gas reservoir in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2024, 29(4): 437-447.

[59] 毛哲, 曾联波, 刘国平, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1212-1221.

MAO Zhe, ZENG Lianbo, LIU Guoping, et al. Characterization and effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the south margin of the Junggar Basin, northwestern China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1212-1221.

[60] 孟庆修, 曹自成, 丁文龙, 等. 塔北隆起南斜坡带三道桥气田寒武系裂缝型白云岩储层裂缝期次差异与分布规律[J]. 地质学前沿, 2024, 31(5): 247-262.

MENG Qingxiu, CAO Zicheng, DING Wenlong, et al. Fracture stages and distribution patterns in Cambrian fractured dolomite reservoirs, Sandaoqiao gas field [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 247-262.

[61] ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1049-1076.

[62] LAI Jin, LI Dong, WANG Guiwen, et al. Earth stress and reservoir quality evaluation in high and steep structure: the Lower Cretaceous in the Kuqa depression, Tarim Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 43-54.

[63] 张辉, 张冠杰, 徐珂, 等. 库车坳陷应力状态转换特征及其地质与力学响应[J]. 地质学前沿, 2024, 31(5): 177-194.

ZHANG Hui, ZHANG Guanjie, XU Ke, et al. Characteristics of stress state transitions and its geological and mechanical response in the Kuqa depression [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 177-194.

[64] 何文渊, 孙宁亮, 张金友, 等. 陆相湖盆富有机质泥页岩中方解石脉成因及油气地质意义——以松辽盆地白垩系青山口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 937-950.

HE Wenyuan, SUN Ningliang, ZHANG Jinyou, et al. Genetic mechanism and petroleum geological significance of calcite veins in organic-rich shales of lacustrine basin: a case study of Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 937-950.

[65] 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 等. 塔里木盆地塔河地区中一下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1022-1030.

HAO Junmin, WANG Xiaoyao, SUN Jianfang, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1022-1030.

[66] 刘君龙, 刘忠群, 刘振峰, 等. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 530-540.

LIU Junlong, LIU Zhongqun, LIU Zhenfeng, et al. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the second Member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 530-540.

[67] 吴青鹏, 杨占龙, 郭精义, 等. 背斜型构造储层裂缝预测方法探讨——以 JLS 地区须二段储层为例[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 719-722.

WU Qingpeng, YANG Zhanlong, GUO Jingyi, et al. Approach of method of antiform reservoir fracture prediction: taking the reservoir of the 2nd Member of the Xujiahe Formation in JLS area as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 719-722.

[68] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 973-980.

LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, GUO Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: a case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, western Sichuan depression in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 973-980.

[69] 王振宇, 刘超, 张云峰, 等. 库车坳陷 K 区块冲断带深层白垩系致密砂岩裂缝发育规律、控制因素与属性建模研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 865-876.

WANG Zhenyu, LIU Chao, ZHANG Yunfeng, et al. A study of fracture development, controlling factor and property modeling of deep-lying tight sandstone in Cretaceous thrust belt K region of Kuqa depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(3): 865-876.

- [70] 曾联波,周天伟.塔里木盆地库车坳陷储层裂缝分布规律[J].天然气工业,2004,24(9):23-25.
ZENG Lianbo,ZHOU Tianwei. Reservoir fracture distribution law of Kuche depression in Talimu Basin[J]. Natural Gas Industry,2004,24(9):23-25.
- [71] 曾联波,漆家福,王成刚,等.构造应力对裂缝形成与流体流动的影响[J].地学前缘,2008,15(3):292-298.
ZENG Lianbo,QI Jiafu,WANG Chenggang,et al. The influence of tectonic stress on fracture formation and fluid flow[J]. Earth Science Frontiers,2008,15(3):292-298.
- [72] 张志强,郑军卫.低渗透油气资源勘探开发技术进展[J].地球科学进展,2009,24(8):854-864.
ZHANG Zhiqiang,ZHENG Junwei. Advances in exploration and exploitation technologies of low-permeability oil and gas [J]. Advances in Earth Science,2009,24(8):854-864.
- [73] 戴俊生,冯建伟,李明,等.砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J].地学前缘,2011,18(2):277-283.
DAI Junsheng,FENG Jianwei,LI Ming,et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation[J]. Earth Science Frontiers,2011,18(2):277-283.
- [74] 徐炳高,李阳兵,葛祥,等.川西须家河组致密碎屑岩裂缝分布规律与影响因素分析[J].测井技术,2010,34(5):437-441.
XU Binggao,LI Yangbing,GE Xiang,et al. Analysis of distributing law and influencing factors of compact clastic rock fracture in Xujiahe Formation in West Sichuan region[J]. Well Logging Technology,2010,34(5):437-441.
- [75] 曾联波,李忠兴,史成恩,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J].地质学报,2007,81(2):174-180.
ZENG Lianbo,LI Zhongxing,SHI Cheng'en,et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica,2007,81(2):174-180.
- [76] 王俊鹏,曾联波,周露,等.塔里木盆地克拉苏构造带超深层储层裂缝发育模式及开发意义[J].地球科学,2023,48(7):2520-2534.
WANG Junpeng,ZENG Lianbo,ZHOU Lu,et al. Development model of natural fractures in ultra-deep sandstone reservoirs with low porosity in Kelasu tectonic belt, Tarim Basin[J]. Earth Science,2023,48(7):2520-2534.
- [77] GROSS M R,FISCHER M P,ENGELDER T,et al. Factors controlling joint spacing in interbedded sedimentary rocks:integrating numerical models with field observations from the Monterey Formation,USA[J]. Geological Society, London, Special Publications,1995,92(1):215-233.
- [78] 曾联波,吕鹏,屈雪峰,等.致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J].石油与天然气地质,2020,41(3):449-454.
ZENG Lianbo,LÜ Peng,QU Xuefeng,et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development[J]. Oil & Gas Geology,2020,41(3):449-454.
- [79] 杜晓宇,金之钧,曾联波,等.基于成像测井的深层陆相页岩油储层天然裂缝有效性评价[J].石油与天然气地质,2024,45(3):852-865.
DU Xiaoyu,JIN Zhijun,ZENG Lianbo,et al. Evaluation of natural fracture effectiveness in deep lacustrine shale oil reservoirs based on formation microresistivity imaging logs[J]. Oil & Gas Geology,2024,45(3):852-865.
- [80] 吕文雅,曾联波,陈双全,等.致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法[J].地质论评,2021,67(2):543-556.
LÜ Wenyua,ZENG Lianbo,CHEN Shuangquan,et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Geological Review,2021,67(2):543-556.
- [81] 周文,张银德,闫长辉,等.泌阳凹陷安棚油田核三段储层裂缝成因、期次及分布研究[J].地学前缘,2009,16(4):157-165.
ZHOU Wen,ZHANG Yinde,YAN Changhui,et al. Genesis, stages and distribution of the fractures in H3 reservoir in Anpeng oil field, Miyang sag[J]. Earth Science Frontiers,2009,16(4):157-165.
- [82] 陈星岳,徐占杰,杜红权,等.川东北须家河组致密砂岩裂缝储集体识别与控藏作用[J].天然气地球科学,2025,36(1):114-126.
CHEN Xingyue,XU Zhanjie,DU Hongquan,et al. Identification of fractured reservoir and its effect on hydrocarbon accumulation of the Xujiahe Formation tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2025,36(1):114-126.
- [83] 范晓丽,苏培东,闫丰明.储层裂缝的研究内容及方法[J].断块油气田,2009,16(6):40-42.
FAN Xiaoli,SU Peidong,YAN Fengming. Study contents and methods of fracture in reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2009,16(6):40-42.
- [84] 曾联波,王正国,谢淑容,等.中国西部盆地挤压逆冲构造带低角度裂缝的成因及意义[J].石油学报,2009,30(1):56-60.
ZENG Lianbo,WANG Zhengguo,XIAO Shurong,et al. The origin and geological significance of low dip-angle fractures in the thrust zones of the western basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(1):56-60.
- [85] 申本科,胡永乐,田昌炳,等.陆相砂砾岩油藏裂缝发育特征分析——以克拉玛依油田八区乌尔禾组油藏为例[J].石油勘探与开发,2005,32(3):41-44.
SHEN Benke,HU Yongle,TIAN Changbing,et al. Fracture development in terrestrial glutinite reservoir: taking the Lower Wuerhe Formation reservoirs in 8th district of Karamay oilfield, NW China, as an example[J]. Petroleum Exploration and Development,2005,32(3):41-44.
- [86] 司马立强,姚军朋,黄丹,等.合川气田须家河组低孔隙度低渗透率砂岩储层有效性测井评价[J].测井技术,2011,35(3):254-258.
SIMA Liqiang,YAO Junpeng,HUANG Dan,et al. Effectiveness log evaluation of low porosity and low permeability sand reservoir in Xujiahe Group of Hechuan gas field[J]. Well Logging Technology,2011,35(3):254-258.
- [87] 赵俊峰,纪友亮,陈汉林,等.电成像测井在东濮凹陷裂缝性砂岩储层评价中的应用[J].石油与天然气地质,2008,29(3):383-390.
ZHAO Junfeng,JI Youliang,CHEN Hanlin,et al. Application of EMI in evaluation of fractured sandstone reservoirs in the Dongpu sag[J]. Oil & Gas Geology,2008,29(3):383-390.
- [88] ZENG Lianbo,LYU Wenyua,ZHANG Yunzhao,et al. The effect of multi-scale faults and fractures on oil enrichment and production in tight sandstone reservoirs: a case study in the southwestern Ordos Basin, China[J]. Frontiers in Earth Science,2021,9:664629.
- [89] 张筠,朱小红,李阳兵,等.川西深层致密碎屑岩储层测井评价[J].天然气工业,2010,30(1):31-35.
ZHANG Yun,ZHU Xiaohong,LI Yangbing,et al. Log evaluation of tight clastic reservoirs in the deep of western Sichuan

Basin[J]. Natural Gas Industry,2010,30(1):31-35.

[90] 马珊,林伟,王清晨,等.鄂尔多斯盆地南部延长组中段剪裂缝方向分析[J]. 科学通报,2016,61(27):3049-3063.
MA Shan,LIN Wei,WANG Qingchen,et al. Shear fracture direction and mechanical characteristics of the Middle Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China [J]. Chinese Science Bulletin,2016,61(27):3049-3063.

[91] LAI Jin,WANG Guiwen,WANG Song,et al. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization[J]. Marine and Petroleum Geology,2018,95:139-166.

[92] 廖海博,刘红岐,崔云江,等.基于常规测井的变质岩裂缝识别方法研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2023,43(4):189-198.
LIAO Haibo,LIU Hongqi,CUI Yunjiang,et al. Research on fractures identification method of metamorphic rock based on conventional logging[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2023,43(4):189-198.

[93] 王俊鹏,曾联波,徐振平,等.成岩流体对超深致密砂岩储层构造裂缝充填及溶蚀改造的影响:以塔里木盆地克拉苏油气田为例[J]. 地学前缘,2024,31(3):312-323.
WANG Junpeng,ZENG Lianbo,XU Zhenping,et al. The impact of diagenetic fluids on the structural fracture filling and dissolution alteration of ultra-deep tight sandstone reservoirs;a case study of the Kelasu oil and gas field in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers,2024,31(3):312-323.

[94] 印兴耀,马妮,马正乾,等.地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探,2018,57(4):488-504.
YIN Xingyao,MA Ni,MA Zhengqian,et al. Review of in-situ stress prediction technology [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(4):488-504.

[95] 赖锦,王贵文,庞小娇,等.测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时[J]. 地质论评,2021,67(6):1804-1828.
LAI Jin,WANG Guiwen,PANG Xiaojiao,et al. The past, present and future of well logging geology:to celebrate the publication of second edition of “Well Logging Geology”[J]. Geological Review,2021,67(6):1804-1828.

[96] 赖锦,王贵文,陈敏,等.基于岩石物理相的储集层孔隙结构分类评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):566-573.
LAI Jin,WANG Guiwen,CHEN Min,et al. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies;a case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region,Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(5):566-573.

[97] 王珂,张荣虎,王俊鹏,等.超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. 石油与天然气地质,2021,42(2):338-353.
WANG Ke,ZHANG Ronghu,WANG Junpeng,et al. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs;a case study of Keshen gas field,Kuqa foreland thrust belt,Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology,2021,42(2):338-353.

[98] ANDERSMH,LAUBACHSE,SCHOLZCH. Microfractures;a review [J]. Journal of Structural Geology,2014,69:377-394.

[99] 吕文雅,曾联波,周思宾,等.鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长 8 储层为例[J]. 天然气地球科学,2020,31(1):37-46.
LÜ Wenyua,ZENG Lianbo,ZHOU Sibin,et al. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin;case study of the eighth Member of the Yanchang Formation in Honghe oilfield[J]. Natural GasGeoscience,2020,31(1):37-46.

[100] 刘春,张荣虎,张惠良,等.库车前陆冲断带多尺度裂缝成因及其储集意义[J]. 石油勘探与开发,2017,44(3):463-472.
LIU Chun,ZHANG Ronghu,ZHANG Huiliang,et al. Genesis and reservoir significance of multi-scale natural fractures in Kuqa foreland thrust belt,Tarim Basin,NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2017,44(3):463-472.

[101] 赵涵彬,刘红岐,刘诗琼,等.基于随钻成像测井天然裂缝有效性表征方法研究[J]. 地球物理学进展,2023,38(6):2652-2662.
ZHAO Hanbin,LIU Hongqi,LIU Shiqiong,et al. Study on natural fracture effectiveness characterization method based on imaging while drilling logging[J]. Progress in Geophysics,2023,38(6):2652-2662.

[102] 韩刚,何峰,张孝珍,等.阵列声波测井在储层裂缝识别中的应用——以鄂尔多斯盆地 K 区为例[J]. 油气地质与采收率,2019,26(3):63-69.
HAN Gang,HE Feng,ZHANG Xiaozhen,et al. Application of array acoustic logging to fracture identification;a case study of Area K in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2019,26(3):63-69.

[103] 雷明,陈涛,韩乾凤,等.一种基于常规测井资料计算碳酸盐岩储层裂缝孔隙度新方法[J]. 地球科学,2023,48(7):2678-2689.
LEI Ming,CHEN Tao,HAN Qianfeng,et al. A new method for calculating fracture porosity based on conventional logging data [J]. Earth Science,2023,48(7):2678-2689.

[104] LAI Jin,ZHAO Fei,ZHANG Mei,et al. How high can fracture porosity become in the ultra-deep subsurface? [J]. Geoscience Frontiers,2023,14(5):101617.

[105] 赖锦,苏洋,肖承文,等.地球物理测井在地质领域应用经典案例解析[J]. 地质科技通报,2024,43(5):279-288.
LAI Jin,SU Yang,XIAO Chengwen,et al. Analysis of typical applications of geophysical well logs in geological fields[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2024,43(5):279-288.

[106] 苏洋,赖锦,赵飞,等.岩性扫描测井解释评价方法及其地质应用[J]. 地质论评,2024,70(5):1884-1898.
SU Yang,LAI Jin,ZHAO Fei,et al. Interpretation and evaluation methods of Litho-Scanner logging data and its geological application[J]. Geological Review,2024,70(5):1884-1898.

[107] 刘志远,李浩,武清钊,等.致密砂岩裂缝测井识别特色技术及其应用效果——以四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段为例[J]. 石油与天然气地质,2021,42(4):981-991.
LIU Zhiyuan,LI Hao,WU Qingzhao,et al. Characteristics and application effect of logging-based fracture identification in tight sandstones;a case study of the Upper Triassic Xu 2 Member in Western Sichuan depression,Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology,2021,42(4):981-991.

[108] 邓少贵,卢春利.裂缝-孔隙双孔介质的双侧向测井解释方法初探[J]. 测井技术,2010,34(6):537-541.
DENG Shaogui,LU Chunli. Investigation on interpreting dual laterolog responses in fractured-porous media[J]. Well logging

- Technology, 2010, 34(6): 537-541.
- [109] 董少群, 曾联波, 车小花, 等. 人工智能在致密储层裂缝测井识别中的应用[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2443-2461.
DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, CHE Xiaohua, et al. Application of artificial intelligence in fracture identification using well logs in tight reservoirs[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2443-2461.
- [110] 赖锦, 肖露, 白天宇, 等. 成像测井解释评价方法及其地质应用[J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 323-340.
LAI Jin, XIAO Lu, BAI Tianyu, et al. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological applications[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 323-340.
- [111] 唐军, 章成广, 信毅. 油基钻井液条件下裂缝声波测井评价方法——以塔里木盆地库车坳陷克深地区致密砂岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 389-397.
TANG Jun, ZHANG Chengguang, XIN Yi. A fracture evaluation by acoustic logging technology in oil-based mud: a case from tight sandstone reservoirs in Keshen area of Kuqa depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 389-397.
- [112] 唐晓明, 魏周拓, 苏远大, 等. 偶极横波远探测测井技术进展及其应用[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 333-340.
TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo, SU Yuanda, et al. A review on the progress and application of dipole acoustic reflection imaging technology[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 333-340.
- [113] 吴琼, 林冬萍, 于春燕, 等. 新立油田低渗透油层裂缝测井识别方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 112-115.
WU Qiong, LIN Dongping, YU Chunyan, et al. Fracture logging diagnosis method of low permeable reservoirs in Xinli oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(2): 112-115.
- [114] 何雨丹, 魏春光. 裂缝型油气藏勘探评价面临的挑战及发展方向[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 537-543.
HE Yudan, WEI Chunguang. The present situation and research direction of evaluation methods in fracture type reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 537-543.
- [115] 邓少贵, 全兆岐, 范宜仁, 等. 致密砂岩储集层裂缝的双侧向测井响应快速计算方法[J]. 石油大学学报, 2005, 29(3): 31-34.
DENG Shaogui, TONG Zhaoqi, FAN Yiren, et al. Fast computing methods for dual laterolog response of fracture of rigid sandstone reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(3): 31-34.
- [116] 许同海. 致密储层裂缝识别的测井方法及研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(3): 75-78.
XU Tonghai. Logging method and its research progress in identification of tight reservoirs fractures[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(3): 75-78.
- [117] 杨克明, 张虹. 地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用——以川西新场气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 683-689.
YANG Keming, ZHANG Hong. Application of 3D-3C seismic technique to the prediction of fractures in tight sandstone: an example from Xinchang gas field in the western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 683-689.
- [118] 邓少贵, 李智强. 裂缝性储层裂缝的阵列侧向测井响应数值模拟[J]. 地球科学, 2009, 34(5): 841-847.
DENG Shaogui, LI Zhiqiang. Simulation of array laterolog response of fracture in fractured reservoir[J]. Earth Science, 2009, 34(5): 841-847.
- [119] 朱金智, 游利军, 李家学, 等. 油基钻井液对超深裂缝性致密砂岩气藏的保护能力评价[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 62-68.
ZHU Jinzhi, YOU Lijun, LI Jiaxue, et al. Damage evaluation on oil-based drill-in fluids for ultra-deep fractured tight sandstone gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 62-68.
- [120] 潘保芝, 刘文斌, 张丽华, 等. 一种提高储层裂缝识别准确度的方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48(1): 298-306.
PAN Baozhi, LIU Wenbin, ZHANG Lihua, et al. A method for improving accuracy of reservoir fracture identification[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2018, 48(1): 298-306.
- [121] ZENG Lianbo, LI Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: a case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(4): 461-477.
- [122] 赖锦, 党文乐, 苏洋, 等. 声波测井地质与工程应用[J]. 地质论评, 2025, 71(3): 1046-1072.
LAI Jin, DANG Wenle, SU Yang, et al. Geological and engineering applications of sonic logs[J]. Geological Review, 2025, 71(3): 1046-1072.
- [123] 卢毓周, 魏斌, 李彬. 常规测井资料识别裂缝性储层流体类型方法研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 173-178.
LU Yuzhou, WEI Bin, LI Bin. A study on fluid type identification of fracture reservoir by using routine well logging data[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(1): 173-178.
- [124] 周文, 戴建文. 四川盆地西部坳陷须家河组储层裂缝特征及分布评价[J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 20-25.
ZHOU Wen, DAI Jianwen. The characteristics and evaluation of fractures distribution in Xujiache Formation in the western depression of the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(1): 20-25.
- [125] 李雄炎, 秦瑞宝, 魏丹, 等. 中国海上潜山裂缝性储层测井评价研究进展[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 69-82.
LI Xiongyan, QIN Ruibao, WEI Dan, et al. Research progress in logging evaluation of offshore buried-hill fractured reservoirs in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 69-82.
- [126] 陈翠雀, 罗菊兰, 韩焘, 等. 低渗透率储层裂缝发育程度与储层产能关系研究[J]. 测井技术, 2009, 33(5): 475-479.
CHEN Cuique, LUO Julan, HAN Tao, et al. Study on relationship between low-permeability reservoir fracture growth and reservoir productivity[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5): 475-479.
- [127] 夏文鹤, 朱喆昊, 韩玉娇, 等. 电阻率测井成像图并壁裂缝智能识别与分割方法[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(5): 1042-1052.
XIA Wenhe, ZHU Zhehao, HAN Yujiao, et al. Intelligent identification and segmentation method of well bore fractures in resistivity logging imaging map[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(5): 1042-1052.
- [128] SU Yang, LAI Jin, DANG Wenle, et al. Pore structure characterization and reservoir quality prediction in deep and ultra-deep tight sandstones by integrating image and NMR logs[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2024, 272: 106232.
- [129] 苏洋, 赖锦, 别康, 等. 深层超深层钻井地质信息测井拾取与评价[J]. 古地理学报, 2025, 27(1): 225-239.
SU Yang, LAI Jin, BIE Kang, et al. Well logging evaluation and

characterization of geological information for deep and ultra-deep drilling wells[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2025, 27(1): 225-239.

[130] 赖锦,韩能润,贾云武,等. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J]. 中国地质, 2028, 45(2): 304-318.
LAI Jin, HAN Nengrun, JIA Yunwu, et al. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. Geology in China, 2018, 45(2): 304-318.

[131] NIE Xin, ZOU Changchun, PAN Li, et al. Fracture analysis and determination of in-situ stress direction from resistivity and acoustic image logs and core data in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Borehole-2 (50-1370 m)[J]. Tectonophysics, 2013, 593: 161-171.

[132] 赖锦,刘秉昌,冯庆付,等. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1551-1567.
LAI Jin, LIU Bingchang, FENG Qingfu, et al. Well logging identification and evaluation of depositional microfacies in dolostones from the 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in the Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(5): 1551-1567.

[133] 赖锦,庞小娇,赵鑫,等. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 31-44.
LAI Jin, PANG Xiaojiao, ZHAO Xin, et al. Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 31-44.

[134] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Qixuan, et al. Toward the scientific interpretation of geophysical well logs: typical misunderstandings and countermeasures[J]. Surveys in Geophysics, 2023, 44(2): 463-494.

[135] 李佳阳,夏宁,秦启荣. 成像测井评价致密碎屑岩储层的裂缝与含气性[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 17-20.
LI Jiayang, XIA Ning, QIN Qirong. Fracture and gas-bearing evaluation of tight clastic reservoir with image logging[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1): 17-20.

[136] LUTHI S M. Geological well logs: their use in reservoir modeling[M]. Berlin: Springer, 2021: 1-373.

[137] 赖富强,夏炜旭,龚大建,等. 基于小波高频属性的泥页岩裂缝测井识别方法研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 124-131.
LAI Fuqiang, XIA Weixu, GONG Dajian, et al. Logging identification method of mud shale fractures based on wavelet high frequency attribute[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 124-131.

[138] 谭忠健,郭康良,吴立伟,等. 渤中 19-6 构造变质岩潜山优质储集层识别与产能预测[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(1): 57-63.
TAN Zhongjian, GUO Kangliang, WU Liwei, et al. Identification and productivity prediction of high-quality reservoirs in the metamorphic buried hills of the Bozhong 19-6 structure[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(1): 57-63.

[139] LAUBACHSE. Practical approaches to identifying sealed and open fractures[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(4): 561-579.

[140] ZENG Lianbo, SU Hui, TANG Xiaomei, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: a new play type in the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363-377.

[141] 赖锦,肖露,赵鑫,等. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 612-625.
LAI Jin, XIAO Lu, ZHAO Xin, et al. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 612-625.

[142] 陈必孝,张筠. 声波全波列测井资料分析处理技术及应用[J]. 测井技术, 2002, 26(5): 369-372.
CHEN Bixiao, ZHANG Yun. Full wave sonic logging data processing technique and its applications[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(5): 369-372.

[143] 李宁,徐彬森,武宏亮,等. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 508-522.
LI Ning, XU Binsen, WU Hongliang, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and Formation evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 508-522.

[144] LAI Jin, ZHAO Fei, XIA Zongli, et al. Well log prediction of total organic carbon: a comprehensive review[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 258: 104913.

[145] VANCE TC, HUANG T, BUTLER KA. Big data in Earth science: emerging practice and promise[J]. Science, 2024, 383(6688): eadh9607.

[146] TABASIS, SOLTANI TEHRANIP, RAJABIM, et al. Optimized machine learning models for natural fractures prediction using conventional well logs[J]. Fuel, 2022, 326: 124952.

[147] 陆国青,董少群,黄立良,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组相页岩油储层测井裂缝智能识别[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2690-2702.
LU Guoqing, DONG Shaoqun, HUANG Liliang, et al. Fracture intelligent identification using well logs of continental shale oil reservoir of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2690-2702.

[148] OLYA BAM, MOHEBIANR, BAGHERIH, et al. Toward real-time fracture detection on image logs using deep convolutional neural network YOLOv5[J]. Interpretation, 2024, 12(2): SB9-SB18.

[149] 陈珂瑜,王杨,蒋薇,等. 基于深度学习的 FMI 测井图像裂缝分割研究[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(1): 143-154.
CHEN Yufan, WANG Yang, JIANG Wei, et al. Research on fracture segmentation of FMI logging images based on deep learning[J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(1): 143-154.

[150] 程超,李培彦,陈雁,等. 基于机器学习的储层测井评价研究进展[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 164-177.
CHENG Chao, LI Peiyan, CHEN Yan, et al. Research progress of reservoir logging evaluation based on machine learning[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 164-177.

[151] LAI Jin, LI Dong, AI Yong, et al. Structural diagenesis in ultra-deep tight sandstones in the Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. Solid Earth, 2022, 13(6): 975-1002.

[152] 杨凤来,陈蓉,周庆,等. 油基泥浆下深层储层裂缝表征及有效性评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2024, 46(4): 51-64.
YANG Fenglai, CHEN Rong, ZHOU Qing, et al. Characterization and effectiveness evaluation of deep reservoir fractures under oil-based mud[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2024, 46(4): 51-64.

[153] 徐珂,田军,杨海军,等. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(1): 13-23.

XU Ke, TIAN Jun, YANG Haijun, et al. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra-deep layers of Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(1): 13-23.

[154] 吴永平, 肖露, 朱波, 等. 深层-超深层碎屑岩地应力测井评价及其控储效应[J]. 古地理学报, 2025, 27(3): 785-796.

WU Yongping, XIAO Lu, ZHU Bo, et al. Logging evaluation of in-situ stress and its effects on reservoir quality in deep and ultra-deep clastic rock[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2025, 27(3): 785-796.

[155] 赖锦, 宋翔羽, 杨薰, 等. 致密砂岩气储层测井综合评价技术研究进展[J]. 石油学报, 2025, 46(1): 220-235.

LAI Jin, SONG Xiangyu, YANG Xun, et al. Research progresses of comprehensive well logging evaluation methods of tight gas sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 220-235.

[156] 张荣虎, 金武弟, 曾庆鲁, 等. 塔里木盆地库车坳陷万米领域天然气成藏关键条件分析与接替领域优选[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(3): 51-64.

ZHANG Ronghu, JIN Wudi, ZENG Qinglu, et al. Analysis of key conditions for gas accumulation and favorable replacement fields in 10000-meter deep formations in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2025, 30(3): 51-64.

[157] 曾庆鲁, 张荣虎, 张立强, 等. 超深层储层构造裂缝促溶扩孔增渗效应——以塔里木盆地库车前陆冲断带白垩系砂岩为例[J]. 石油学报, 2025, 46(9): 1720-1737.

ZENG Qinglu, ZHANG Ronghu, ZHANG Liqiang, et al. Effect of structural fractures in ultra-deep reservoirs on promoting dissolution, enhancing porosity and increasing permeability: a case study of Cretaceous sandstone in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(9): 1720-1737.

[158] LAUBACH SE, OLSON JE, GALE JFW. Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222(1): 191-195.

[159] MATONTI C, GUGLIELMI Y, VISEUR S, et al. P-wave velocity anisotropy related to sealed fractures reactivation tracing the structural diagenesis in carbonates[J]. Tectonophysics, 2017, 705: 80-92.

[160] LAI Jin, CHEN Kangjun, XIN Yi, et al. Fracture characterization and detection in the deep Cambrian dolostones in the Tarim Basin, China: insights from borehole image and sonic logs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107659.

[161] 谢冰, 白利, 赵艾琳, 等. Sonic Scanner 声波扫描测井在碳酸盐岩储层裂缝有效性评价中的应用——以四川盆地震旦系为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 117-123.

XIE Bing, BAI Li, ZHAO Ailin, et al. Application of Sonic Scanner logging to fracture effectiveness evaluation of carbonate reservoir: a case from Sinian in Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 117-123.

[162] 罗利, 刘航, 刘海军, 等. XMAC-F1 反射横波远探测成像技术及其应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 28-33.

LUO Li, LIU Hang, LIU Haijun, et al. XMAC-F1 reflected-shear-wave remote detection imaging technology and its application[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 28-33.

[163] 林永茂, 雷炜, 缪尉杰. 深层致密气地质工程一体化实践——以川西须家河组为例[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 21-30.

LIN Yongmao, LEI Wei, MIAO Weijie. Practice of geology and engineering integration in deep tight gas development: a case study of Xujiahe Formation in western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 21-30.

[164] 李宁, 刘鹏, 武宏亮, 等. 远探测声波测井处理解释方法发展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 731-742.

LI Ning, LIU Peng, WU Hongliang, et al. Development and prospect of acoustic reflection imaging logging processing and interpretation method[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 731-742.

(收稿日期 2025-05-14 改回日期 2025-08-05 编辑 雷永良)