https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.066



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

巩 磊^{1,2},程宇琪²,高 帅^{1,2*},高志勇³,冯佳睿³,王洪涛⁴, 宿晓岑²,卢 崎²,王 杰²

1. 东北石油大学环渤海能源研究院,河北秦皇岛 066004

2. 东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆 163318

3. 中国石油勘探开发研究院实验中心,北京 100083

4. 大庆市信息技术研究中心,黑龙江大庆 163318

摘 要:库车前陆盆地东部下侏罗统为裂缝性致密砂岩储层,天然裂缝的分布控制了油气聚集和单井产能.裂缝连通性是影响致密储层孔渗性能、产能以及盖层完整性的关键因素,但是对于裂缝连通性定量表征方法及其影响因素缺少系统研究.以库车前陆盆地东部依奇克里克构造带下侏罗统致密砂岩储层为例,分析了其裂缝发育特征,利用基于裂缝节点类型及比例的方法对裂缝连通性进行定量表征,并利用数值模拟对裂缝连通性影响因素进行分析.研究区发育粒缘缝、粒内缝和穿粒缝3种微观裂缝类型.从西向东,裂缝连通性逐渐变差,与裂缝发育强度具有一致性.裂缝方位分散度、裂缝长度、裂缝密度以及组间夹角是影响裂缝连通性的主要因素.随着裂缝方位分散度、裂缝长度、裂缝密度以及组间夹角的增加,裂缝连通性变好.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2023)07-2475-14 **收稿日期:** 2021-09-08

Fracture Connectivity Characterization and Its Controlling Factors in Lower Jurassic Tight Sandstone Reservoirs of Eastern Kuqa Foreland Basin

Gong Lei^{1,2}, Cheng Yuqi², Gao Shuai^{1,2*}, Gao Zhiyong³, Feng Jiarui³, Wang Hongtao⁴, Su Xiaocen², Lu Qi², Wang Jie²

- 1. Bohai-Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China
- 2. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
- 3. Petroleum Geology Research and Laboratory Center, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
- 4. Daqing Information Technology Research Center, Daqing 163318, China

作者简介: 巩磊(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事裂缝表征与评价. ORCID: 0000-0002-4855-0429. E-mail: kcgonglei@foxmail.com * 通讯作者: 高帅, ORCID: 0000-0002-0316-8541. E-mail: 490389327@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.42072155, 41902150);黑龙江省优秀青年科学基金项目(No. YQ2021D006);黑龙江省普通本科高等 学校青年创新人才培养计划(No. UNPYSCT-2020147);黑龙江省博士后科研启动金(No.LBH-Q21001);中国石油"十四五"上游 领域前瞻性基础性课题(No. 2021DJ0302).

引用格式:巩磊,程宇琪,高帅,高志勇,冯佳睿,王洪涛,宿晓岑,卢崎,王杰,2023.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.地球科学,48(7):2475-2488.

Citation: Gong Lei, Cheng Yuqi, Gao Shuai, Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Wang Hongtao, Su Xiaocen, Lu Qi, Wang Jie, 2023. Fracture Connectivity Characterization and Its Controlling Factors in Lower Jurassic Tight Sandstone Reservoirs of Eastern Kuqa Foreland Basin. *Earth Science*, 48(7): 2475–2488.

Abstract: The Lower Jurassic in eastern Kuqa foreland basin is a fractured tight sandstone reservoir. The distribution of natural fractures controls hydrocarbon accumulation and single well productivity. Fracture connectivity is a key factor affecting porosity and permeability performance, productivity of tight reservoirs and cap integrity, but it lacks in systematic research on quantitative characterization methods of fracture connectivity and its influencing factors. Taking the Lower Jurassic tight sandstone reservoirs in eastern Kuqa foreland basin as an example, in this paper it analyzes the fracture development characteristics, quantitatively characterizes the fracture connectivity using a fracture node types and their proportions based method, and analyzes the controlling factors of fracture connectivity using numerical simulation. There are three types of microfractures in the study area: intragranular microfractures, grain-edge microfractures and integranular microfractures. From west to east, fracture connectivity deteriorates gradually, which is consistent with fracture development intensity. Fracture azimuth dispersion, fracture length, fracture density and angle between fracture sets are the main factors affecting fracture connectivity becomes better. **Key words:** eastern Kuqa foreland basin; fracture connectivity; quantitative characterization; controlling factor; tight sandstone;

Key words: eastern Kuqa foreland basin; fracture connectivity; quantitative characterization; controlling factor; tight sandstone, petroleum geology.

0 引言

学者们已经越来越认识到天然裂缝是影响非 常规油气勘探和开发的重要因素,尤其是在泥页岩 油气、致密油气以及深层油气等具有广阔勘探前景 的储集层中,有效裂缝分布规律成为制约油气勘探 成败的关键因素,世界上很多油气田也被确定为裂 缝性储层(Zeng et al., 2013; Laubach et al., 2018; Sanderson and Nixon, 2018; Lyu et al., 2019; Gong et al., 2021a; 王斌等, 2021). 天然裂缝的存在 明显提高了致密储层的孔隙度和渗透率,沟通了基 质孔隙,增加了油气田内部不同储集单元之间的连 通性,控制着优质储层分布和油气充注通道(Ghosh and Mitra, 2009; Gong et al., 2019a; Rashid et al., 2020;杨毅等,2021).与此同时,裂缝连通也可能导 致盖层完整性破坏、储集库(如CO2埋存、储气库、废 弃物处理等)泄露(金之钧, 2014; Petrie et al., 2014)、促进裂隙水与干热岩等资源开发利用(Magnusdottir and Horne, 2015)以及诱发地质灾害等问 题(Smith et al., 2011).因此,裂缝连通性定量表征 在诸多地质领域均是十分重要的,也是迫切需要的.

前人在天然裂缝的成因类型、发育特征、形成 机理、控制因素及分布规律预测方法等方面做了大 量的研究,比如提出了从破裂模式、力学性质及地 质成因等方面对致密砂岩储层裂缝进行分类,建立 了基于露头、岩心、薄片以及扫描电镜和CT的多尺 度天然裂缝定量表征方法,利用测井资料、钻井与 录井以及生产动态资料对天然裂缝进行识别和评 价,并且提出了一些天然裂缝预测方法,如曲率法、 地质力学模拟法以及地球物理方法等(曾联波等, 2007, 2020; 丁文龙等, 2015; Hooker et al., 2018; Peacock et al., 2018; 王 濡 岳 等, 2018; Gong et al., 2019b, 2021b; 冯建伟等, 2020; Ferrill et al., 2021).同时,也对裂缝有效性及影响因素进行了探 讨(曾联波等, 2012; 巩磊等, 2015; 王珂等, 2018; 鞠玮等, 2020; 鲍怡晨等, 2021). 但是由于地层通 常经历多期构造变形,并且不同地层结构的裂缝发 育模式不同,造成裂缝连通性影响因素复杂多变、 表征难度大,对于裂缝连通性方面的研究很少.王 中言和黄杰藩(1993)通过三轴压缩试验,探讨了微 裂缝演化的逐级连通模型.邬光辉等(2006)通过统 计裂缝的交点与端点的比值来表示裂缝连通性,对 塔中奥陶系碳酸盐岩裂缝连通性进行分析,探讨了 裂缝连通性对油气产能的作用.在国外,也有部分 裂缝连通性方面的理论研究,但主要集中在水文 地质和数学地质等领域(Xu et al., 2006; Alghalandis et al., 2015; Lei and Wang, 2016; 王伟 等,2021).实际上,只有裂缝之间发生相互连通, 形成内部连通的裂缝网络体系,才有可能成为有 效的渗流通道,有时看上去十分密集的裂缝网络 也不一定是水力连通的,它可能低于逾渗阈值. 因此,只有解决裂缝连通性表征及其动态演化过 程的问题,才能开展有效裂缝分布规律及其渗 透性评价,既能进一步明确优质储层分布和油 气充注过程,也能为盖层完整性演化过程评价 提供依据,进而指导勘探目标优选.为此,选择 库车前陆盆地东部下侏罗统致密砂岩储层为研 究对象,开展裂缝发育特征研究,建立裂缝连 通性定量表征方法,明确裂缝连通性主控因素.



图 1 库车前陆盆地位置及构造单元划分 Fig.1 Location and tectonic unit division of Kuqa foreland basin 据史超群等(2020)修改



图 2 库车前陆盆地东部吐格尔明剖面下侏罗统构造裂缝发育特征 Fig.2 Fracture development characteristics of Lower Jurassic at Tugeerming in eastern Kuqa foreland basin

1 地质背景

库车前陆盆地位于塔里木盆地北部南天山逆 冲断褶带的南缘,呈北东东-南西西向展布,整体上 可以划分为"四带三凹"的构造格局(图1)(巩磊等, 2017; 史超群等, 2020). 库车前陆盆地东部地区主 要包括依奇克里克构造带、阳霞凹陷以及秋里塔格 构造带东部,其下侏罗统油气资源丰富,是库车前 陆盆地天然气勘探的重要接替领域.本次研究主要 以库车前陆盆地东部依奇克里克构造带下侏罗统 为例,开展裂缝分布特征和连通性研究,其储层主 要为阿合组(J₁a)碎屑岩.阿合组沉积稳定,以辫状 河三角洲上平原-下平原水下分流河道砂沉积为 主,砂体厚度大(260~320 m),砂地比大(80%~ 90%),由多个从含砾粗砂岩、中砂岩到细砂岩的正 韵律组成(张荣虎等, 2019; 史超群等, 2020).岩石 类型主要为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,磨圆以次棱 角状为主,分选中等-好,成分成熟度和结构成熟度 较低.阿合组的储集空间主要为粒间溶蚀扩大孔、 粒内溶孔、微孔隙和微裂缝(史超群等,2020).储层 物性在横向上变化较大,孔隙度自西向东逐渐增大,从西部迪北102井的3.45%增加到东部吐东2井的10.72%.储层渗透率主要分布在0.5~3.0mD,整体上也表现出自西向东逐渐增加的趋势.

2 裂缝发育特征

根据露头区和岩心裂缝观察,依奇克里克构造 带下侏罗统阿合组发育构造裂缝和成岩裂缝(图2, 图3).根据构造裂缝的力学性质及其与层理面之间 的空间几何关系,研究区致密砂岩储层构造裂缝又 可划分为穿层剪切裂缝、顺层剪切裂缝以及层控张 性裂缝3种类型(Zeng et al., 2013; Gong et al., 2021a).层控张性裂缝以高角度(近直立)裂缝为主, 纵向延伸受岩石力学层控制,常垂直并终止于岩性 界面或岩石力学界面(图2a,图3a).穿层剪切裂缝 以中-高角度为主,裂缝面平直光滑,常有擦痕和阶 步,延伸长度大,一般切穿若干个岩石力学层(图 2b,图3b).顺层剪切裂缝是在构造挤压作用下发生 顺层剪切滑动形成的,与层理面大致平行或低角度



图 3 依奇克里克构造带下侏罗统岩心裂缝发育特征

Fig.3 Fracture development characteristics of Lower Jurassic core in the Yiqikelike structural belt

a. 近直立层控张性裂缝,YN3井,细砂岩,3183.23m;b. 高角度穿层剪切裂缝,YS4井,中砂岩,3436.30m;c. 顺层剪切裂缝,YN4井,细砂岩, 4126.13m;d. 层理缝,YN4井,细砂岩,4540.77m.图中红色箭头指示裂缝;蓝色箭头指示擦痕方向





相交,裂缝局部可见方解石充填,但整体充填程度 较弱(图 3c).成岩裂缝主要表现为层理缝(图 3d), 呈近水平或低角度,顺微层理面断续分布,裂缝开 度不大,裂缝面不平整,一般绕过矿物颗粒.

根据成像测井裂缝识别,研究区下侏罗统发育 NW-SE向、近S-N向和NE-SW向3组裂缝,局部还 发育近东西向裂缝,与野外相似露头观察的结果相 一致(图4).根据岩心裂缝密度统计,依奇克里克构 造带下侏罗统致密砂岩储层岩心裂缝的平均线密 度为1.26条/m,不同构造带和不同岩性,裂缝发育 程度有所差异(图5).在西部的克孜1井区裂缝最发 育,其次是依深、依南井区,宏观裂缝线密度均大于 0.8条/m,东部的吐孜、明南井区裂缝不发育,宏观



Fig.5 Fracture density distribution of Lower Jurassic core in the Yiqikelike structural belt



图6 依奇克里克构造带下侏罗统致密砂岩储层微观裂缝类型及发育特征

Fig.6 Microfracture types and development characteristics of Lower Jurassic tight sandstone reservoirs in the Yiqikelike structural belt

a. 粒内缝, MN1井, 粗砂岩, 2082.50 m; b. 粒缘缝, YS4井, 粗砂岩, 4004.45 m; c. 穿粒缝, YN5井, 中砂岩, 5010.30 m



Fig.7 Schematic diagram for quantitative characterization of fracture connectivity 据 Sanderson and Nixon (2015)修改. a. 裂缝节点类型示意图; b. 不同裂缝发育模式下的3种节点类型比例三角图; c. 裂缝连通性判别图版



图 8 依奇克里克构造带下侏罗统致密砂岩储层微观裂缝连通性定量表征

Fig.8 Quantitative characterization of microfracture connectivity of Lower Jurassic tight sandstone reservoirs in the Yiqikelike structural belt

a. 拼接的微观裂缝图片,TD1井,泥质细砂岩,2260.30m;b. 微观裂缝分布模式;c. 裂缝连通性表征

裂缝线密度约为 0.4 条 /m,即从西向东裂缝 发育程度变差.

在微观上,研究区发育粒内缝、粒缘缝和穿粒 缝3种类型的微观裂缝(图6).根据240块薄片分 析,研究区几乎所有的薄片都发育粒内缝和粒缘 缝,含穿粒缝的薄片数占总薄片数的75%,其平均 裂缝面密度为0.38 cm/cm²,反映依奇克里克构造 带下侏罗统储层遭受了强烈构造挤压和机械压实 的特点.在不同地区,微裂缝的密度差别较大,在 西部地区有效裂缝发育程度高,微观裂缝面密度 为0.3~0.8 cm/cm²;其次为中部地区,微观裂缝面 密度为0.2~0.4 cm/cm²;东部地区,裂缝发育程度 较低,微观裂缝面密度一般小于0.3 cm/cm².

3 裂缝连通性定量表征

在传统的裂缝连通性表征方面,主要是通过每 条裂缝所占有的平均交点的数量或裂缝的交点与 端点的比值来定量表征裂缝连通性,平均交点数量 越多或交点与端点比值越大,则裂缝连通性越好 (Berkowitz, 1995; 邬光辉等, 2006).然而,裂缝交 点可以划分成不同的类型,对裂缝连通所起的作用



Fig.9 The proportions of three kinds of nodes of microfractures in different areas of Yiqikelike structural belt

不同.为了能够定量表征裂缝的连通性,据裂缝的空间排列关系,将裂缝节点划分为孤立型节点(I型)、邻接型节点(Y型)以及交叉型节点(X型)(Sanderson and Nixon, 2018) 3类,分别可以实现1个、3个和4个方向连通,表示连通性依次变好(图7a).



Fig.10 Quantitative characterization of microfracture connectivity in different areas of the Yiqikelike structural belt



图 11 裂缝方位分散度对裂缝连通性影响模拟过程示意图

裂缝分布模式

Fig.11 Schematic diagrams for simulation process of influence of fracture azimuth dispersion on fracture connectivity

裂缝连通性表征

(c)裂缝方位分散度=30°

首先,获取裂缝分布照片(露头、岩心或薄片等,本 次研究主要针对薄片微观裂缝连通性进行定量表 征),经过图像倾斜和坐标校正后,统计不同类型节 点的数量 $(N_{\rm L}, N_{\rm Y} \, \pi \, N_{\rm X})$ 、裂缝数量 $(N_{\rm L})$ 等参数,计 算不同类型节点的比例并绘制三角图,计算每条裂 缝所占有的节点数量(C₁),分析裂缝连通概率. 大量的实例和数值模拟证实 (Berkowitz, 1995; Sanderson and Nixon, 2018),以I型节点为主的 裂缝网络是不连通的,即每条裂缝所占有的节点 数量 $C_1 < 2$ 时,该裂缝网络很难达到连通状态(图 7b). 随着每条裂缝所占有的Y型和/或X型节点 数的增加, CL会增加, 裂缝网络的连通性将会变 好;当C₁≥3.57时,裂缝网络达到渗流阈值,进入 连通状态(图7b).因此,可以将3种节点类型比 例三角图划分为3个区域来表征裂缝连通性,即 未连通区、临界连通区和连通区(图7c).

裂缝分布模式

利用上述方法,对研究区240块铸体薄片456 个视域不同类型节点的数量进行统计,并对裂缝连 通性进行判别.首先,获取微观裂缝分布照片,并尽 量拼接照片以获得尽可能完整的裂缝分布(图8a);



(d)裂缝方位分散度=40°

裂缝连通性表征

- 的影响
- Fig.12 Influence of fracture azimuth dispersion (a) and length (b) on X-node ratio

然后对微观裂缝分布进行清绘,获得微观裂缝分布 模式(图8b);最后统计不同类型节点的数量(N₁,N_y







 nN_x)、裂缝数量(N_i)等参数,计算不同类型节点的 比例并绘制三角图,计算每条裂缝所占有的节点数 量 (C_1) ,分析裂缝连通概率(图 8c).结果显示,在依 奇克里克构造带的不同地区,各种类型节点的比例 具有明显的差异(图9).其中,西部地区I型节点比 例主要分布在15%~50%,中部地区I型节点比例 主要分布在40%~70%,东部地区1型节点比例主 要分布在70%~85%,即从西向东,I型节点比例 呈增加的趋势.西部地区Y型节点比例主要分布 在 35%~70%, 中部地区 Y 型节点比例主要分布 在 20%~40%, 东部地区 Y 型节点比例主要分布 在10%~20%,即从西向东,Y型节点比例呈降低 的趋势.X型节点在各个地区的比例变化不明 显,主要分布在5%~15%之间,从西向东有降低 的趋势.将所有数据点投影到三角图上,可以判 断裂缝连通状况(图10):东部地区裂缝连通性整 体较差,主要分布在未连通区域;其次为中部地 区,裂缝连通性变好,部分裂缝处于临界连通状 态;西部地区裂缝连通性最好,大量裂缝处于连 通状态,整体表现为从东向西,裂缝连通性变好.

4 裂缝连通性主控因素分析及宏观 裂缝连通性预测

利用蒙特卡罗随机模拟方法,对影响裂缝连通性的因素进行模拟.模拟过程主要包括以下步骤: (1)基质模型的建立:设置模型为20m×20m,假设 模型基质致密,只能通过裂缝发生连通,当流体能 够从模型的底边通过裂缝系统渗流至模型的顶边 时,表示模型内裂缝发生连通;(2)裂缝模型的建 立:主要包括裂缝长度分布模型、裂缝方位模型、裂 缝密度模型等;(3)裂缝网络的生成:通过标识点过 程生成裂缝网络,根据设置的密度模型,在模拟区 域内随机生成一定密度的标识点,用这些标识点来 表示裂缝的中点,然后根据裂缝长度模型和方位模 型,赋予每一个标识点长度和方位,即完成裂缝网 络的生成;(4)连通性判断:通过统计不同类型节点 比例及裂缝连通性判别图版来进行(图7c)判断.在 本次研究过程中,分单组和两组裂缝系统分别进行 模拟:(1)具有不同长度、间距和方位分散度的单组 裂缝系统;(2)两组裂缝系统,第一组具有固定的长 度和方位角,第二组具有变化的长度和方位角,即 主要模拟裂缝长度、方位分散度、密度以及不同 裂缝组系间夹角等参数对裂缝连通性的影响.

单组裂缝条件下,主要分析了裂缝方位分散度 和裂缝长度(密度)对裂缝连通性的影响.其中,模 型1设置为:20m×20m模型,裂缝数量100条,裂 缝长度5m,裂缝方位均值为0°,改变裂缝方位分散 度(分别模拟了0°、5°、10°、20°、30°和40°),分析裂缝 方位分散度对裂缝连通性的影响.图11a~11d分别 为裂缝方位分散度是5°、10°、30°和40°时随机生成的 某一组裂缝模式、裂缝走向玫瑰花图和裂缝连通性 表征.模型2设置为:20m×20m模型,裂缝数量 100条,裂缝方位均值0°,裂缝方位分散度30°,改变 裂缝长度(分别模拟了2cm、4cm、6cm、8cm和 10cm),分析裂缝长度(密度)对裂缝连通性的影响.



Fig.14 Schematic diagrams for simulation process of influence of angle between fracture sets on fracture connectivity

模拟结果显示,裂缝方位分散度和长度(密度)是影 响单组裂缝连通性的重要因素.当裂缝方位分散度 为0°时,全部为I型节点,裂缝不可能达到连通状态 (图12a);随着裂缝方位分散度的增加,X型节点数 量呈明显增加的趋势,裂缝连通性变好(图13a);当 裂缝方位分散度达到40°时,裂缝网络仍处于临界连 通状态,说明在有限裂缝长度条件下,单组裂缝很 难达到连通状态.随着裂缝长度的增加,X型节点数 量呈明显增加的趋势(图12b),裂缝连通性逐渐由 未连通过渡为临界连通、直至连通状态(图13b).

两组裂缝条件下,主要分析了裂缝组间夹角、 裂缝长度(密度)对裂缝连通性的影响.其中,模型3 设置为:20m×20m模型,裂缝数量100条(两组, 每组50条),裂缝长度6m,一组裂缝方位角为0°,改 变另一组裂缝方位角(10°、20°、30°、40°、50°、60°、 70°、80°和90°),分析裂缝组间夹角对裂缝连通性的 影响.图14a~14d分别为组间夹角为10°、20°、40°和 50°时,随机生成的某一组裂缝模式、裂缝走向玫瑰 花图和裂缝连通性表征.模型4设置为:20m×20m 模型,裂缝数量100条(两组,每组50条),一组裂缝





方位角为0°,另一组裂缝方位角45°,分别改变其裂缝长度(密度)(分别模拟了2 cm、4 cm、6 cm、8 cm和10 cm),分析裂缝长度(密度)对裂缝连通性的影





Fig.16 Influence of angle between fracture sets (a) and fracture length (b) on fracture network connectivity



Fig.17 Simulation of macro fracture connectivity of Lower Jurassic in the Yiqikelike structural belt

响.模拟结果显示,裂缝组间夹角和长度(密度)是影响两组裂缝连通性的重要因素.随着裂缝组间夹角和长度(密度)的增加,X型节点数量呈明显增加的趋势(图15),裂缝连通性逐渐由未连通过渡为临界连通和连通(图16).

通过上述模拟可知裂缝组系、裂缝方位分散 度、裂缝长度、裂缝密度等因素是影响裂缝连通性 的主要因素.由于岩心或成像测井横向探测范围有 限,很难获取地下宏观裂缝系统的分布模式,因此 无法对其裂缝连通性进行直接定量表征,但是可以 第7期

以岩心和成像测井获取的影响裂缝连通性的上述 相关参数为约束条件,对其裂缝连通性进行模拟. 在本次模拟过程中,模拟了研究区3组裂缝情况,即 近S-N向、NE-SW向和NW-SE向,其平均方位角 分别为358°、41°和121°,方位分散度分别为25°、 28°和20°.根据露头区测量,裂缝平面延伸长度主要 分布在4~8m,然后模拟不同单井裂缝密度条件下 裂缝连通情况(图17).模拟结果显示,随着裂缝密 度增加,裂缝连通性逐渐变好.当裂缝密度小于 0.5条/m时(依奇克里克构造带东部),只有少量裂 缝连接在一起,整体上裂缝处于未连通状态;当 裂缝密度为0.5~1.1条/m时(依奇克里克构造带 中部),连通裂缝数量明显增多,整体处于临界 连通状态;当裂缝密度大于1.1条/m时(依奇克

5 结论

(1)库车前陆盆地东部依奇克里克构造带下侏 罗统致密砂岩储层发育构造裂缝和成岩裂缝,其 中,构造裂缝又可划分为层控张性裂缝、穿层剪切 裂缝和顺层剪切裂缝,主要发育 NW-SE 向、近 S-N 向和 NE-SW 向 3组.宏观裂缝线密度主要分 布在 0.4~1.2条/m. 在微观上,研究区发育粒内 缝、粒缘缝和穿粒缝 3种微观裂缝,平均裂缝面密 度为 0.38 cm/cm².宏观裂缝和微观裂缝具有相似 的分布规律,即从西向东,裂缝发育程度变差.

(2)根据裂缝的空间交切关系,将裂缝节点 划分为3类:孤立型节点(I型)、邻接型节点(Y 型)以及交叉型节点(X型).通过统计3种类型 节点的数量、比例,可以对裂缝连通性进行判 别.结果显示,东部地区裂缝连通性整体较差, 主要分布在未连通区域;其次为中部地区,裂 缝连通性变好,部分裂缝处于临界连通状态; 西部地区裂缝连通性最好,大量裂缝处于连通 状态,整体表现为从东向西,裂缝连通性变好.

(3)通过数值模拟证实,裂缝组系、裂缝方位分 散度、裂缝长度、裂缝密度等是影响裂缝连通性的 主要因素.在单组裂缝条件下,裂缝很难达到连通 状态,随着裂缝方位分散度和裂缝长度的增加,裂 缝连通性会变好.在多组裂缝条件下,随着裂缝 组间夹角和裂缝长度的增加,裂缝连通性变好.

(4)以岩心和成像测井获取的裂缝相关参数为 约束条件,对研究区宏观裂缝连通性进行模拟,结 果显示,在研究区3组裂缝的长度为4~8m情况 下,随着裂缝密度增加,裂缝连通性逐渐变好.当 裂缝密度小于0.5条/m时(依奇克里克构造带东 部),裂缝处于未连通状态;当裂缝密度为0.5~ 1.1条/m时(依奇克里克构造带中部),裂缝处于 临界连通状态;当裂缝密度大于1.1条/m时(依奇 克里克构造带西部),裂缝处于较好的连通状态.

致谢:感谢3位匿名评审专家、曾联波教授 和编辑提出的宝贵建议.在野外和岩心裂缝测 量过程中得到祖克威、周冬林和朱利锋的帮助,在此表示感谢!

References

- Alghalandis, Y. F., Dowd, P. A., Xu, C. S., 2015. Connectivity Field: A Measure for Characterising Fracture Networks. *Mathematical Geosciences*, 47(1): 63-83. https://doi.org/10.1007/s11004-014-9520-7
- Bao, Y.C., Liu, Q.H., Du, X.F., et al., 2021. Division of Glutenite Lithofacies Based on the Trielement of Gravel-Matrix - Fracture. *Earth Science*, 46(6): 2157-2171 (in Chinese with English abstract).
- Berkowitz, B., 1995. Analysis of Fracture Network Connectivity Using Percolation Theory. *Mathematical Geolo*gy, 27(4): 467-483. https://doi. org/10.1007/ BF02084422
- Ding, W.L., Wang, X.H., Hu, Q.J., et al., 2015. Progress in Tight Sandstone Reservoir Fractures Research. Advances in Earth Science, 30(7): 737-750 (in Chinese with English abstract).
- Feng, J.W., Zhao, L.B., Wang, Y.D., 2020. Controlling Factors for Productivity of Ultra-Deep Tight Reservoirs in Keshen Gas Field, Kuqa Depression. Acta Petrolei Sinica, 41(4): 478-488 (in Chinese with English abstract).
- Ferrill, D. A., Smart, K. J., Cawood, A. J., et al., 2021. The Fold - Thrust Belt Stress Cycle: Superposition of Normal, Strike-Slip, and Thrust Faulting Deformation Regimes. *Journal of Structural Geology*, 148: 104362. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104362
- Ghosh, K., Mitra, S., 2009. Two-Dimensional Simulation of Controls of Fracture Parameters on Fracture Connectivity. AAPG Bulletin, 93(11): 1517-1533. https://doi. org/10.1306/07270909041
- Gong, L., Fu, X. F., Wang, Z. S., et al., 2019a. A New Approach for Characterization and Prediction of Natural Fracture Occurrence in Tight Oil Sandstones with Intense Anisotropy. AAPG Bulletin, 103(6): 1383-1400.

https://doi.org/10.1306/12131818054

- Gong, L., Liu, B., Fu, X. F., et al., 2019b. Quantitative Prediction of Sub-Seismic Faults and Their Impact on Waterflood Performance: Bozhong 34 Oilfield Case Study. Journal of Petroleum Science and Engineering, 172: 60-69. https://doi. org/10.1016/j. petrol.2018.09.049
- Gong, L., Gao, M.Z., Zeng, L.B., et al., 2017. Controlling Factors on Fracture Development in the Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Jurassic-Neogene in the Kuqa Foreland Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28 (2): 199-208 (in Chinese with English abstract).
- Gong, L., Gao, S. A., Liu, B., et al., 2021a. Quantitative Prediction of Natural Fractures in Shale Oil Reservoirs. *Geofluids*, 2021: 5571855. https://doi. org/10.1155/ 2021/5571855
- Gong, L., Wang, J., Gao, S., et al., 2021b. Characterization, Controlling Factors and Evolution of Fracture Effectiveness in Shale Oil Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 108655. https:// doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108655
- Gong, L., Zeng, L.B., Du, Y.J., et al., 2015. Influences of Structural Diagenesis on Fracture Effectiveness: A Case Study of the Cretaceous Tight Sandstone Reservoirs of Kuqa Foreland Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 44(3): 514-519 (in Chinese with English abstract).
- Hooker, J. N., Laubach, S. E., Marrett, R., et al., 2018. Microfracture Spacing Distributions and the Evolution of Fracture Patterns in Sandstones. *Journal of Structural Geology*, 108: 66-79. https://doi. org/10.1016/j. jsg.2017.04.001
- Jin, Z. J., 2014. A Study on the Distribution of Oil and Gas Reservoirs Controlled by Source-Caprock Assemblage in Unmodified Foreland Region of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(06): 763-770 (in Chinese with English abstract).
- Ju, W., Niu, X. B., Feng, S. B., et al., 2020. The Present-Day In-Situ Stress State and Fracture Effectiveness Evaluation in Shale Oil Reservoir: A Case Study of the Yanchang Formation Chang 7 Oil-Bearing Layer in the Ordos Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(05): 931-940 (in Chinese with English abstract).
- Laubach, S. E., Lamarche, J., Gauthier, B. D. M., et al., 2018. Spatial Arrangement of Faults and Opening-Mode Fractures. *Journal of Structural Geology*, 108: 2–15. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.08.008

- Lei, Q. H., Wang, X. G., 2016. Tectonic Interpretation of the Connectivity of a Multiscale Fracture System in Limestone. *Geophysical Research Letters*, 43(4): 1551– 1558. https://doi.org/10.1002/2015GL067277
- Lyu, W. Y., Zeng, L. B., Zhou, S. B., et al., 2019. Natural Fractures in Tight-Oil Sandstones: A Case Study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Southwestern Ordos Basin, China. AAPG Bulletin, 103(10): 2343-2367. https://doi. org/10.1306/ 0130191608617115
- Magnusdottir, L., Horne, R. N., 2015. Inversion of Time-Lapse Electric Potential Data to Estimate Fracture Connectivity in Geothermal Reservoirs. *Mathematical Geo*sciences, 47(1): 85-104. https://doi. org/10.1007/ s11004-013-9515-9
- Peacock, D. C. P., Sanderson, D. J., Rotevatn, A., 2018. Relationships between Fractures. *Journal of Structural Geology*, 106: 41-53. https://doi. org/10.1016/j. jsg.2017.11.010
- Petrie, E. S., Evans, J. P., Bauer, S. J., 2014. Failure of Cap-Rock Seals as Determined from Mechanical Stratigraphy, Stress History, and Tensile-Failure Analysis of Exhumed Analogs. AAPG Bulletin, 98(11): 2365– 2389. https://doi.org/10.1306/06171413126
- Rashid, F., Hussein, D., Lawrence, J. A., et al., 2020. Characterization and Impact on Reservoir Quality of Fractures in the Cretaceous Qamchuqa Formation, Zagros Folded Belt. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104117. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2019.104117
- Sanderson, D. J., Nixon, C. W., 2015. The Use of Topology in Fracture Network Characterization. Journal of Structural Geology, 72: 55-66. https://doi. org/ 10.1016/j.jsg.2015.01.005
- Sanderson, D. J., Nixon, C. W., 2018. Topology, Connectivity and Percolation in Fracture Networks. *Journal of Structural Geology*, 115: 167-177. https://doi.org/ 10.1016/j.jsg.2018.07.011
- Shi, C.Q., Xu, A.M., Wei, H.X., et al., 2020. Quantitative Characterization on the Clastic Reservoir Destruction by Tectonic Compression: a Case Study of the Jurassic Ahe Formation in Yiqikelike Structural Belt, Kuqa Depression. Acta Petrolei Sinica, 41(2): 205-215 (in Chinese with English abstract).
- Smith, J., Durucan, S., Korre, A., et al., 2011. Carbon Dioxide Storage Risk Assessment: Analysis of Caprock Fracture Network Connectivity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(2): 226-240. https://doi.

org/10.1016/j.ijggc.2010.10.002

- Wang, B., Yang, Y., Cao, Z.C., et al., 2021. U-Pb Dating of Calcite Veins Developed in the Middle-Lower Ordovician Reservoirs in Tahe Oilfield and Its Petroleum Geologic Significance in Tahe Oilfield. *Earth Science*, 46(9): 3203-3216 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Yang, H.J., Zhang, H.L., et al., 2018. Characteristics and Effectiveness of Structural Fractures in Ultra-Deep Tight Sandstone Reservoir: A Case Study of Keshen-8 Gas Pool in Kuqa Depression, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 39(4): 719-729 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R.Y., Hu, Z.Q., Liu, J.S., et al., 2018. Comparative Analysis of Characteristics and Controlling Factors of Fractures in Marine and Continental Shales: A Case Study of the Lower Cambrian in Cengong Area, Northern Guizhou Province. *Oil & Gas Geology*, 39(4): 631– 640 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Fu, H., Xing, L.X., et al., 2021. Crack Propagation Behavior of Carbonatite Geothermal Reservoir Rock Mass Based on Extended Finite Element Method. *Earth Science*, 46(10): 3509-3519 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.Y., Huang, J.F., 1993. A Multisteps Coalescence Model for the Development of Stress-Induced Cracks in Reservoir Rocks. *Progress in Geophysics*, 8(4): 81-89 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Yue, G. L., Shi, J., et al., 2006. Analysis of Connectivity of Fractures of Ordovician Carbonates and Its Implication in Central Tarim Basin. West China Petroleum Geosciences, 2(2): 156-159 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dowd, P.A., Mardia, K.V., et al., 2006. A Connectivity Index for Discrete Fracture Networks. *Mathematical Geology*, 38(5): 611-634. https://doi. org/ 10.1007/s11004-006-9029-9
- Yang, Y., Wang, B., Cao, Z.C., et al., 2021. Genesis and Formation Time of Calcite Veins of Middle-Lower Ordovician Reservoirs in Northern Shuntuoguole Low -Uplift, Tarim Basin. *Earth Science*, 46(6): 2246-2257 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L.B., Gong, L., Zu, K.W., et al., 2012. Influence Factors on Fracture Validity of the Paleogene Reservoir, Western Qaidam Basin. Acta Geologica Sinica, 86 (11): 1809-1814 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L.B., Li, Y.G., Wang, Z.G., et al., 2007. Type and Sequence of Fractures in the Second Member of Xujiahe Formation at the South of Western Sichuan De-

pression. *Earth Science*, 32(2): 194-200 (in Chinese with English abstract).

- Zeng, L.B., Lü, P., Qu, X.F., et al., 2020. Multi-Scale Fractures in Tight Sandstone Reservoirs with Low Permeability and Geological Conditions of Their Development. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 449-454 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. B., Su, H., Tang, X. M., et al., 2013. Fractured Tight Sandstone Oil and Gas Reservoirs: A New Play Type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China. AAPG Bulletin, 97(3): 363-377. https://doi.org/ 10.1306/09121212057
- Zhang, R.H., Yang, H.J., Wei, H.X., et al., 2019. The Sandstone Characteristics and Hydrocarbon Exploration Signification of Lower Jurassic in Middle East Section of Northern Tectonic Belt in Kuqa Depression, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 30(9): 1243-1252 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍怡晨,刘强虎,杜晓峰,等,2021.基于砾石-基质-裂缝三元素的砂砾岩岩相划分.地球科学,46(6):2157-2171.
- 丁文龙, 王兴华, 胡秋嘉, 等, 2015. 致密砂岩储层裂缝研究 进展. 地球科学进展, 30(7): 737-750.
- 冯建伟,赵力彬,王焰东,2020. 库车坳陷克深气田超深层 致密储层产能控制因素.石油学报,41(4):478-488.
- 巩磊,高铭泽,曾联波,等,2017.影响致密砂岩储层裂缝分 布的主控因素分析——以库车前陆盆地侏罗系-新近 系为例.天然气地球科学,28(2):199-208.
- 巩磊,曾联波,杜宜静,等,2015.构造成岩作用对裂缝有效 性的影响:以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例. 中国矿业大学学报,44(3):514-519.
- 金之钧,2014.从源-盖控烃看塔里木台盆区油气分布规律. 石油与天然气地质,35(6):763-770.
- 鞠玮, 牛小兵, 冯胜斌, 等, 2020. 页岩油储层现今地应力场 与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长7油 层组为例.中国矿业大学学报, 49(5): 931-940.
- 史超群,许安明,魏红兴,等,2020.构造挤压对碎屑岩储层 破坏程度的定量表征——以库车坳陷依奇克里克构造 带侏罗系阿合组为例.石油学报,41(2):205-215.
- 王斌,杨毅,曹自成,等,2021.塔河油田中下奥陶统储层裂 缝方解石脉U-Pb同位素年龄及油气地质意义.地球科 学,46(9):3203-3216.
- 王珂,杨海军,张惠良,等,2018.超深层致密砂岩储层构造 裂缝特征与有效性——以塔里木盆地库车坳陷克深8 气藏为例.石油与天然气地质,39(4):719-729.
- 王濡岳,胡宗全,刘敬寿,等,2018.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.石油与天然气地质, 39(4): 631-640.

- 王伟, 付豪, 邢林啸, 等, 2021. 基于扩展有限元法的碳酸盐 岩地热储层岩体裂缝扩展行为.地球科学, 46(10): 3509-3519.
- 王中言, 黄杰藩, 1993. 储层岩石应力裂缝演化的逐级连通 模型及意义. 地球物理学进展, 8(4): 81-89.
- 邬光辉,岳国林,师骏,等,2006.塔中奥陶系碳酸盐岩裂缝
 连通性分析及其意义.中国西部油气地质,2(2):
 156-159.
- 杨毅, 王斌, 曹自成, 等, 2021. 塔里木盆地顺托果勒低隆起 北部中下奥陶统储层方解石脉成因及形成时间. 地球 科学, 46(6):2246-2257.

- 曾联波, 巩磊, 祖克威, 等, 2012. 柴达木盆地西部古近系储 层裂缝有效性的影响因素. 地质学报, 86(11): 1809-1814.
- 曾联波,李跃纲,王正国,等,2007.川西南部须二段低渗透 砂岩储层裂缝类型及其形成序列.地球科学,32(2): 194-200.
- 曾联波,吕鹏,屈雪峰,等,2020.致密低渗透储层多尺度裂
 缝及其形成地质条件.石油与天然气地质,41(3):
 449-454.
- 张荣虎,杨海军,魏红兴,等,2019.塔里木盆地库车坳陷北 部构造带中东段中下侏罗统砂体特征及油气勘探意 义.天然气地球科学,30(9):1243-1252.