

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.498>



多尺度岩石力学层对断层和裂缝发育的控制作用

曹东升^{1,2}, 曾联波^{1,2*}, 黄诚³, 韩俊³, 巩磊⁴, 宋逸辰^{1,2}, 姚迎涛^{1,2}, 董少群^{1,5}

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)地球科学院, 北京 102249
3. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011
4. 东北石油大学环渤海能源研究院, 河北秦皇岛 066004
5. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

摘要: 岩石力学层是控制断层裂缝系统的重要因素, 岩石力学层级次和分布特征影响油气富集和高产。岩石力学层界面类型、特征及其对裂缝限制能力的差异决定了界面之间的岩石力学层存在多尺度特征, 并影响不同尺度裂缝的垂向延伸。多尺度岩石力学层划分方法包括裂缝层和构造层等构造变形方法、岩石学方法、层序地层学方法、测井数据反演力学参数法、实测岩石力学参数法、叠前地震数据反演等。岩性是岩石力学性质演化和裂缝发育的物质基础, 岩性组合控制了多尺度岩石力学层的纵向分布规律。岩石力学层面对裂缝的限制能力决定了对应岩石力学层的尺度。岩石力学层厚控制了层内裂缝密度, 主要有裂缝间距指数线性模型和幂函数模型两种定量关系。大尺度岩石力学层控制了大尺度断层裂缝的倾角、密度及构造样式等特征, 进一步控制了流体运移、富集和成藏, 决定了含油层系的垂向分布以及有利储层的发育。中小尺度力学层及微尺度力学层控制了断溶体储层垂向非均质性。研究深化了对多尺度断层裂缝主控因素的理解, 为油气渗流富集研究以及裂缝性储层建模提供了依据。

关键词: 多尺度岩石力学层; 岩石力学层划分; 断层裂缝发育特征; 流体渗流非均质性; 塔里木盆地台盆区; 石油地质学。

中图分类号: P55

文章编号: 1000-2383(2023)07-2535-22

收稿日期: 2022-01-19

Control of Multi-Scale Mechanical Stratigraphy on Development of Faults and Fractures

Cao Dongsheng^{1,2}, Zeng Lianbo^{1,2*}, Huang Cheng³, Han Jun³, Gong Lei⁴,
Song Yichen^{1,2}, Yao Yingtao^{1,2}, Dong Shaoqun^{1,5}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC Northwest Company, Urumqi 830011, China
4. Bohai-Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China
5. College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: Mechanical stratigraphy is an essential factor in controlling fault and fracture system. The scaling and distribution characteristics of mechanical stratigraphy are important geological factors affecting oil and gas enrichment and the yield of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.U21B2062)。

作者简介: 曹东升(1990—), 男, 博士研究生, 从事构造流体耦合作用、裂缝性储层评价预测及模拟研究。ORCID: 0000-0002-5076-395X。
E-mail: cds90@qq.com.

* 通讯作者: 曾联波, ORCID: 0000-0002-6470-8206. E-mail:lbzeng@sina.com

引用格式: 曹东升, 曾联波, 黄诚, 韩俊, 巩磊, 宋逸辰, 姚迎涛, 董少群, 2023. 多尺度岩石力学层对断层和裂缝发育的控制作用. 地球科学, 48(7):2535—2556.

Citation: Cao Dongsheng, Zeng Lianbo, Huang Cheng, Han Jun, Gong Lei, Song Yichen, Yao Yingtao, Dong Shaoqun, 2023. Control of Multi-Scale Mechanical Stratigraphy on Development of Faults and Fractures. *Earth Science*, 48(7):2535—2556.

tight reservoir. The multi-scale characteristics of mechanical stratigraphy are determined by types, characteristics, and the limiting capacity of mechanical stratigraphic interfaces, which affects the vertical extension of faults and fractures with different scales. The study and division methods of multi-scale mechanical stratigraphy include the structural deformation (such as the fracture layer and the structural layer) method, the petrology method, the sequence stratigraphy method, the logging data inversion mechanical parameter method, the measured rock mechanical parameter method, the prestack seismic data inversion, and so on. Lithology is the basis for the evolution of mechanical properties and the development of faults and fractures. Lithology combination controls the distribution of multi-scale mechanical stratigraphy. The mechanical interface limiting capacity to fractures determines the scale of the corresponding mechanical stratigraphy. The thickness of mechanical stratigraphy has a noticeable control effect on the fracture density and mainly includes two quantitative relationships: the linear model and the power function model of the fracture spacing index. Large-scale mechanical stratigraphy controls the characteristics of large-scale fractures and faults, such as dip angles, densities, and structural style, and controls reservoir development, fluid migration and enrichment, and determines the vertical distribution of oil-bearing formations and the development of favorable reservoirs. Medium to small-scale and micro-scale mechanical stratigraphy controls the vertical heterogeneity of fracture-cavity reservoirs. This study deepens the understanding of the main controlling factors of multi-scale fractures and provides a reference to the research of petroleum seepage and fractured reservoir modeling.

Key words: multi-scale mechanical stratigraphy; mechanical stratigraphy division; development characteristics of fault and fracture; fluid seepage heterogeneity; platform of Tarim Basin; petroleum geology.

0 引言

早在 19 世纪就有文献指出地层中节理发育受到岩石层面的控制和影响(Willis, 1894),一些地层界面将地层分割为若干个独立的裂缝发育单元。单元内部岩石力学性质相似,裂缝发育规律相同(Corbett *et al.*, 1987; Narr, 1991; Gross, 1993; Wu and Pollard, 1995; Becker and Gross, 1996),进而影响地下流体流动以及油气运移(Cooke *et al.*, 2006; Ferrill *et al.*, 2014).岩石力学层是指岩石力学行为相近或岩石力学性质一致的岩层,是由岩石力学界面所限定的具有相同或相近的强度、脆性和断裂力学性质的岩石力学单元,它包括岩石力学单元和岩石力学界面两部分(Gross *et al.*, 1995; Gudmundsson, 2011).Ferrill *et al.*(2017)把力学层定义为具有一定岩石力学性质、地层厚度及力学边界摩擦特征的地层层序.巩磊等(2018)指出岩石力学层是指一套岩石力学性质一致或岩石力学行为相近的岩层;也指出岩石力学层不一定是岩性均一层,与岩性层不完全对应.Laubach *et al.*(2009)强调了 Mechanical stratigraphy(译作岩石力学层或力学层)和 Fracture stratigraphy(裂缝层)的异同:力学层是依据抗拉强度、弹性模量、脆性、断裂力学性质等属性将层状岩石分成若干力学单元,裂缝层是根据裂缝的开度、密度或者其他观测参数将地层划分成裂缝发育单元,二者并不总是一致的(曾联波, 2008).

裂缝尖端的应力集中控制了裂缝扩展路径和速度:当裂缝遇到脆性较低的地层或力学性质变化较大的界面,原有应力大小不能支持裂缝继续扩展,裂缝端部拓展就会被限制;否则会在原来应力条件下沿着连续介质持续扩展(Gross *et al.*, 1995; Agosta *et al.*, 2015; Corradetti *et al.*, 2018).先存裂缝和层理面等低粘聚力面,会限制裂缝穿过并阻止其继续扩展(Pollard and Aydin, 1988; Gross *et al.*, 1995; Cooke *et al.*, 2006; 王伟等, 2021),由此控制地层中裂缝的发育(Becker and Gross, 1996; Bai and Pollard, 2000a, 2000b; Underwood *et al.*, 2003; Shackleton *et al.*, 2005; Laubach *et al.*, 2009; Zahm *et al.*, 2010).褶皱和断层发育演化过程也受力学层的控制,并影响断层内部结构(Zahm and Hennings, 2009; Ferrill *et al.*, 2014; Agosta *et al.*, 2015; Ferrill *et al.*, 2017).甚至有学者认为碳酸盐岩层序中岩石力学性质比其他构造活动(褶皱或断层等)对裂缝特征控制作用更加明显(Cooke *et al.*, 2006; Morris *et al.*, 2009; Burberry and Peppers, 2017).力学特征对裂缝样式具有明显的控制作用,力学层界面导致不同岩层之间应力状态的转变;弹性模量、泊松比等强度参数的差异,最终影响着裂缝垂向扩展(Nur, 1982; Gross, 1993; Gross *et al.*, 1995; Wu and Pollard, 1995; Bai and Pollard, 2000a, 2000b; 赵乐强和冯建伟, 2018).

在碳酸盐岩、致密砂岩、页岩等多种地层中发育的断层裂缝系统具有多尺度特征(表1);不同尺度天然裂缝对储层影响明显不同,其级次和分布特

表1 多尺度断层裂缝、裂缝层及力学层界面划分方案

Table 1 Multi-scale classification scheme of fractures, fracture layers, and mechanical stratigraphy interfaces

参考文献	分类依据及方案
Becker and Gross, 1996; Gross and Eyal, 2007	裂缝穿层性:穿层(Throughgoing)裂缝、层内(Bed-contained)裂缝
Bourbiaux <i>et al.</i> , 2002	裂缝尺度和发育特征综合分类:野外尺度疏导、大尺度稀疏分布、大-中规模连通、小尺度连通、小尺度不连通裂缝
Zahm and Hennings, 2009	不同级次岩石力学层界面与裂缝的关系:层控裂缝(Lamina-bound)、相控裂缝(Facies-bound)、层序限制裂缝(Sequence-bound)、穿层裂缝
Strijkers <i>et al.</i> , 2012	裂缝尺度:一级裂缝(Fracture swarms, 裂缝长度大于600 m)、二级裂缝(Non-stratabound fracture systems, 裂缝长度大于600 m)、三级裂缝(Stratabound small-scale fractures)
Rustichelli <i>et al.</i> , 2013	力学层界面类型及其对裂缝的限制能力:地层单元边界、微相组合(Facies associations)边界、沉积相(Facies)边界
Li <i>et al.</i> , 2018	页岩层系中裂缝的尺度:米级、分米级、厘米级和毫米级
董少群等, 2020	裂缝尺度:大尺度、中尺度、小尺度裂缝
曾联波等, 2020; 吕文雅等, 2021	油藏内天然裂缝规模及其控制界面:大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝和微尺度裂缝
Zeng <i>et al.</i> , 2021	断层和裂缝的发育特征和规模:I类断层、II类断层、大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝和微尺度裂缝

征是决定油气富集和高产的关键因素(Panza *et al.*, 2016; Rustichelli *et al.*, 2016; 董少群等, 2020; 李海英等, 2020; 曾联波等, 2020; 吕文雅等, 2021; Zeng *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021).天然裂缝的形成和分布受岩石力学层控制(Gross *et al.*, 1995; Strijkers *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2021),岩石力学层的力学性质、力学层界面两侧力学性质的差异、岩石力学层厚度和构造应力等因素决定裂缝的延伸与终止,使得天然裂缝具有多尺度特征:构造应力越大,越容易形成穿层的大尺度裂缝;较大的岩石力学性质差异和较强的岩石力学边界才能更有效限制裂缝扩展(Cooke *et al.*, 2006; Larsen *et al.*, 2010; 曾联波等, 2020; Zeng *et al.*, 2021).

岩石力学层的3个关键要素是地层岩石力学性质、力学层边界特征、力学层层厚.不同类型力学层界面两侧岩石力学单元性质不同,力学层界面对天然裂缝纵向扩展的限制作用也明显不同(曾联波等, 2020).例如在碳酸盐岩中,根据不同类型界面对裂缝的限制作用,可以分为地层单元边界、微相组合边界以及沉积相边界3个级次(Rustichelli *et al.*, 2013; Panza *et al.*, 2016),各级次界面对不同尺度裂缝限制能力有差异.Larsen *et al.*(2010)也发现,在潮缘(Peritidal deposits)碳酸盐岩中,层状泥岩、古土壤层以及瘤状灰岩层对裂缝的限制能力依次递减.显然,从宏观到微观,多尺度断层裂缝系统均会受到对应尺度岩石力学层的控制.前人发现岩石力学层对层状地层中的裂缝具有重要控制作用,

并进行了初步的定量研究(Bai and Pollard, 2000a; 巩磊等, 2018; Ji *et al.*, 2021);但是岩石力学层的类型与多尺度裂缝的关系尚不明确,岩石力学层定量研究方法及适用性需要进一步梳理.本文以塔里木盆地中部台盆区为例,结合盆地西北缘野外露头中的典型剖面,对岩石力学层多尺度特征及其对不同规模断层裂缝和流体活动的控制作用进行分析;旨在明确岩石力学层的内涵及多尺度发育特征,总结不同尺度力学层的划分方法,阐明多尺度裂缝发育特征、主控因素及对地质流体的影响,为裂缝性储层建模以及油气储渗富集研究提供新思路.

1 研究区地质概况

1.1 构造特征

塔里木盆地是一个构造活跃的叠合盆地,先后经历多期构造活动(漆立新, 2016),发育多个不整合界面(图1).盆地中部的地层较为平缓,主要经历了加里东中期的走滑破裂体系形成期、加里东晚期-海西早期的走滑断层主要活动期、海西晚期-印支期走滑断层再活动期和燕山期-喜马拉雅期的断层再活动期4个阶段,不同方向走滑断裂活动期次存在差异(焦方正, 2017; 杨毅等, 2021; 云露, 2021b).平缓的地层展布(南部顺托果勒构造坡度仅为 $0.1^{\circ}\sim0.5^{\circ}$,塔河南部为 $1^{\circ}\sim2.5^{\circ}$)以及以多期走滑为主的构造活动(图2),致使研究区没有复杂的逆冲褶皱,为不同尺度岩石力学层研究提供了良好的数据样本(Burberry and Peppers, 2017).

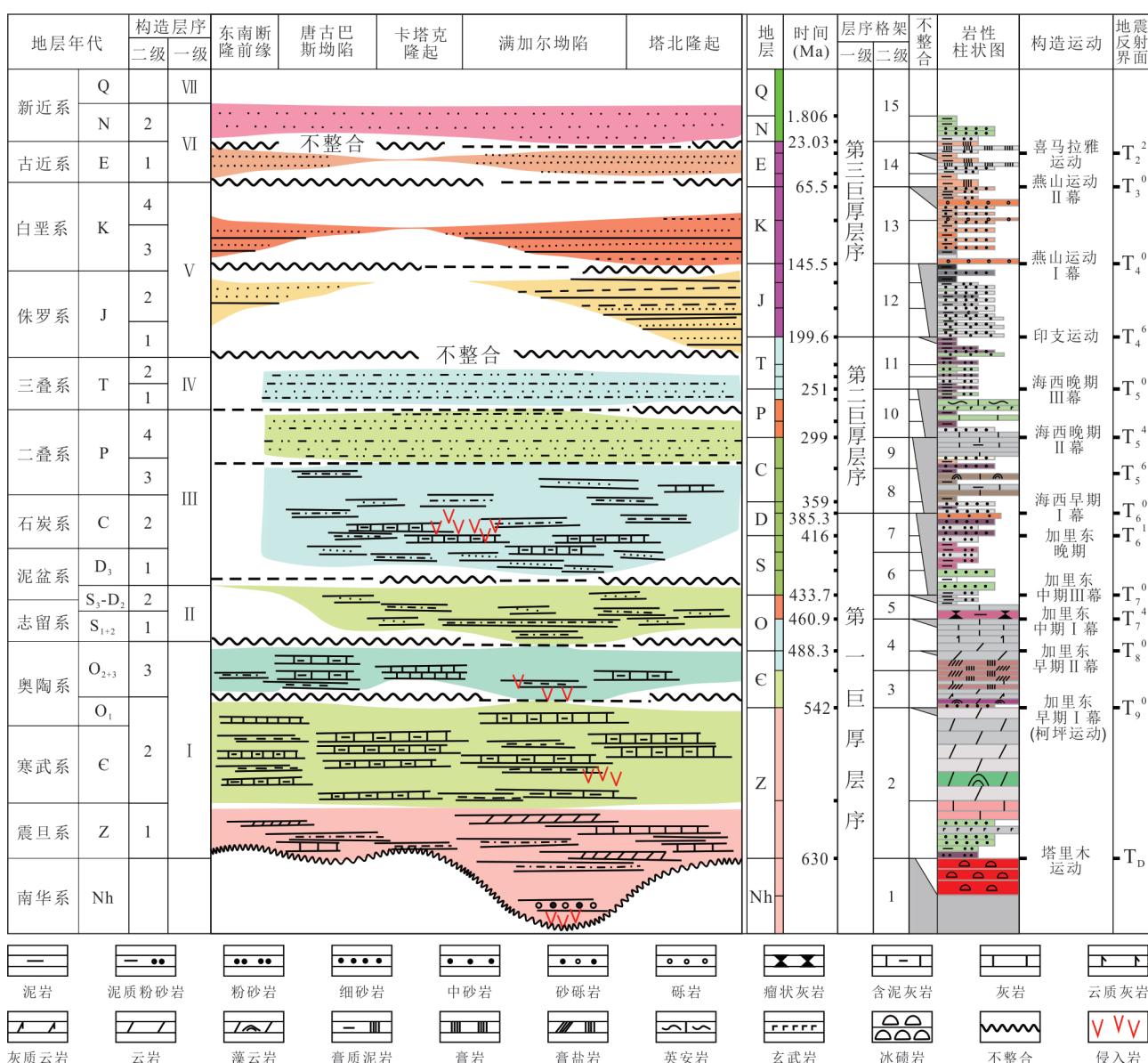


图1 塔里木盆地形成演化及盆地中部岩性柱状图(据李不龙, 2010; 黄诚, 2019)

Fig. 1 The formation and evolution of the Tarim Basin and the lithologic histogram of the central basin (according to Li, 2010; Huang, 2019)

1.2 沉积地层特征

盆地台盆区主要发育震旦系-中下奥陶统海相碳酸盐岩台地沉积、上奥陶统海相泥岩沉积、志留系-泥盆系海相碎屑岩沉积和石炭系-二叠系海陆交互沉积地层(林波等, 2021). 中下奥陶统一间房组和鹰山组上段主要为开阔台地沉积; 蓬莱坝组发育开阔台地, 局部为局限台地(高华华等, 2018; 王文博等, 2021). 蓬莱坝组以白云岩为主; 鹰山组由下段白云岩向灰岩过渡, 上段岩性则以灰岩为主; 一间房组以深灰色-浅灰色砂屑泥晶灰岩和泥晶砂屑灰岩为主(焦存礼等, 2018). 奥陶系上统泥

岩层系厚约800 m, 塔河地区主要在海西早期运动中抬升, 奥陶系中上统遭受了不同程度的剥蚀。

台盆区地层可以分为3个巨厚(一级)层序和15个二级层序(图1),奥陶系中下统碳酸盐岩为1个二级层序,8个三级层序。二级层序界面是由局部造陆隆升和全球海平面下降两种因素叠加而成的层序不整合面,代表的沉积间断在数十个百万年之间;三级层序界面是海平面下降至坡折带以下、低位期形成的层序不整合面,主要表现为垂向上岩性岩相的突变、暴露及喀斯特化,平均沉积时间跨度为2.63 Ma(王文博等,2021)。蓬莱坝

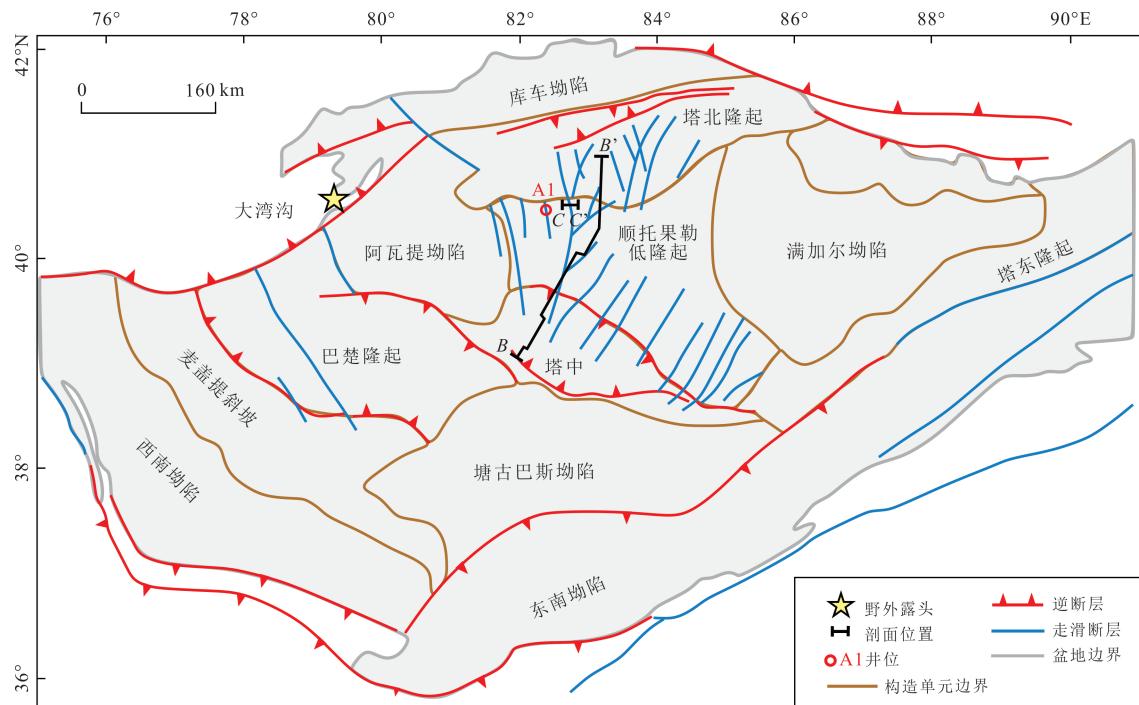


图2 塔里木盆地构造单元及台盆区塔河-顺北地区主要断层构造(据徐豪等, 2021)

Fig. 2 Structural units of the Tarim Basin and main faults in the carbonate platform of the Tahe-Shunbei area (according to Xu et al., 2021)

组包含3个三级层序, 鹰山组下段包含2个三级层序, 鹰山组上段包含2个三级层序, 一间房组为1个三级层序(王文博等, 2021)。三级层序可以分成两个体系: 下部半局限潮下沉积相和上部开阔潮下沉积相(赵锐等, 2019)。

1.3 构造层与裂缝层

随着塔里木盆地油气勘探领域由早期海相碳酸盐岩古隆起和古潜山向盆地深层的低隆起及斜坡转移, 在顺托果勒低隆区发现了一种新的“断控缝洞型”油气藏(漆立新, 2016; 焦方正, 2017)。高渗透性的断层裂缝成为主要的油气储集空间, 而不仅仅是流动通道(王玉伟等, 2019; 陈菁萍等, 2020)。同时在碎屑岩层系(志留系-古近系)也钻遇油气显示, 表明碳酸盐岩地层之外的碎屑岩领域具有良好的油气勘探潜力(杨培星等, 2019)。奥陶系碳酸盐岩地层中走滑断裂带获得重大油气突破, 揭示了克拉通内部小位移走滑断裂体系具有“控储、控圈、控运、控藏、控富”作用(林波等, 2021; 云露, 2021a), 断裂带具有“纵向分层变形、沿走向分段变形、多期多旋回走滑活动叠加、本地烃源垂向输导、走滑断裂控富”的特征(焦方正, 2017, 2018; 漆立新, 2020; 云露, 2021b; 王斌等, 2021)。前人的研究已表明宏观的断裂带受控于构造层(韩俊

等, 2021; 云露, 2021b), 野外观测尺度范围的裂缝系统受控于岩石力学层等因素(张鹏等, 2013; 赵乐强和冯建伟, 2018; 赫俊民等, 2019)。受多期构造和沉积演化影响, 台盆区形成多套能干性不同的地层, 导致走滑断裂活动过程中具有构造分层变形的特征(黄诚, 2019; 韩俊等, 2021)。表现为古生界底面-中奥陶统顶面发育走滑断裂体系, 中奥陶统顶面之上发育平面上呈雁列分布的正断层, 这些雁列正断层在不同层位分层发育。测井和岩心资料中的裂缝间距与层厚呈线性正相关, 随着层厚的增加, 裂缝密度呈现减小的趋势(赫俊民等, 2019)。生产资料也表明走滑断裂带纵向分层结构对油气藏垂向非均质分布的控制作用明显(刘宝增, 2020; 马庆佑等, 2020)。

塔里木盆地南华系-第四系沉积地层发育齐全, 前人划分构造层的依据包括走滑断裂垂向分层变形特征、断裂活动强度、关键构造变形期、区域性不整合面、岩性特征、地层能干性和岩石力学性质等(表2)。以往研究主要针对盆地中下部的含油气层系进行划分, 尽管划分范围和依据不同, 但结果有相似之处: 南华系顶界面、下寒武统顶面、中下寒武统顶面、奥陶系顶面、中泥盆统顶面、二叠系顶面是主要的分界面。

表 2 塔里木盆地中部构造层划分方案及其构造特征

Table 2 The division scheme and structural characteristics of structural layers in the central Tarim Basin

参考文献	分层	岩性	构造特征
韩俊等, 2021	下寒武统	南华系-震旦系裂谷-拗陷体系及下寒武统碳酸盐岩台地	正断层控制的半地堑、柯坪运动构造反转形成古隆起
	中寒武统	中寒武统膏盐岩层, 非能干地层, 具塑性流动特征	膏盐岩流动形成盐撇凹陷和盐拱背斜, 走滑花状构造和局部膏盐岩滑脱断层
	上寒武统-中奥陶统	上寒武统下秋里塔格组到中奥陶统一间房组的碳酸盐岩地层	直立主断裂与分支断裂形成的花状构造, 溶蚀改造形成“串珠”状地震反射
	上奥陶统-志留系	上奥陶统却尔却克组泥岩和志留系碎屑岩	雁列张扭式走滑断裂
林波等, 2021	中-下寒武统海相碳酸盐岩	海相碳酸盐岩沉积层, 顶部和中部均发育一套膏盐岩层	走滑断裂为直立线性断层(倾角大于80°), 在膏盐层垂向分段叠接, T_s^1 界面可见膏盐滑脱构造
	上寒武统-中奥陶统海相碳酸盐岩	海相碳酸盐岩沉积, 白云岩与灰岩的组合	走滑断裂在深部呈陡直状(倾角大于80°), 向上逐渐发散, 形成典型的花状构造变形
	上奥陶统泥岩	巨厚层状的海相泥岩沉积, 为明显的构造软弱层	在线性走滑断裂上方发育大量撕裂型雁列正断层, 雁列正断层的断层倾角变缓至40°~50°
	志留系-中泥盆统海相碎屑岩	砂岩与泥岩互层, 刚性地层	断裂构造样式与下伏构造层一致, 呈地堑向下收敛, 断层倾角多为40°~55°
邬光辉等, 2021	上泥盆统-石炭系海陆交互相地层	砂岩与泥岩互层夹少量灰岩段, 刚性地层	以正断层为主, 断层倾角多为40°~55°
	二叠系海陆交互相叠加火山岩	碎屑岩地层夹火山熔岩、火山碎屑岩为主, 刚性地层	顶部见少量正断层分布, 在地震剖面上与下伏的走滑断裂并未连接
	前南华系基岩		
	南华系-震旦系裂谷建造		
黄诚, 2019	寒武系-奥陶系克拉通海相碳酸盐岩		
	志留系-白垩系碎屑岩		
	新生界前陆盆地碎屑岩		
	寒武系-中奥陶统, 以加里东中期Ⅰ幕不整合面为顶界		
	上奥陶统, 以加里东中期Ⅲ幕不整合面为顶界		
	志留系-中泥盆统, 以海西早期不整合界面为顶界		
	东河塘组-二叠系, 以海西晚期不整合界面为顶界		
	中-新生界		

2 多尺度岩石力学层划分方法

岩石力学层是一套岩石力学性质相似的、顶底以岩石力学层界面为边界的相对连续岩石单元。岩石力学层界面可以是沉积中断形成的地层不连续、上下地层岩性变化或地层差异成岩改造等导致力学性质差异形成的。岩石力学层的直观特征是不同分层之间裂缝发育强度(裂缝密度、裂缝间距)、裂缝产状等参数存在差异, 根据裂缝开度、充填特征、裂缝面粗糙度等参数的差异也可以划分岩石力学层; 另一特征是力学层边界对裂缝垂向延伸的限制作用。岩石力学层的定量特征是

2.1 岩石学方法

岩石力学层多指在一定应力状态下, 岩石力学

力学参数(杨氏模量、泊松比、单轴抗压强度、脆性、Weibull 模量等)差异或是不连续(例如发育层理缝, 沿力学层界面张开)。以往研究中岩石力学层划分方法不仅包括地层的岩石力学性质(定量岩石力学参数)划分, 也可以通过裂缝层、构造层、岩性地层、层序地层等方法来间接表征岩石力学层。因此, 常用的多尺度力学层划分方法可以分为 4 类: 构造变形方法(裂缝层和构造层)、岩石学方法、层序地层学方法和岩石力学参数方法。岩石力学参数方法包括野外回弹仪测量及井下测井数据解释两种常用方法, 属于直接研究方法, 其他方法属于间接划分方法。性质相似的单元(曾联波, 2008; Laubach *et al.*, 2009; 巍磊等, 2018; 赵乐强和冯建伟, 2018; 曾联波

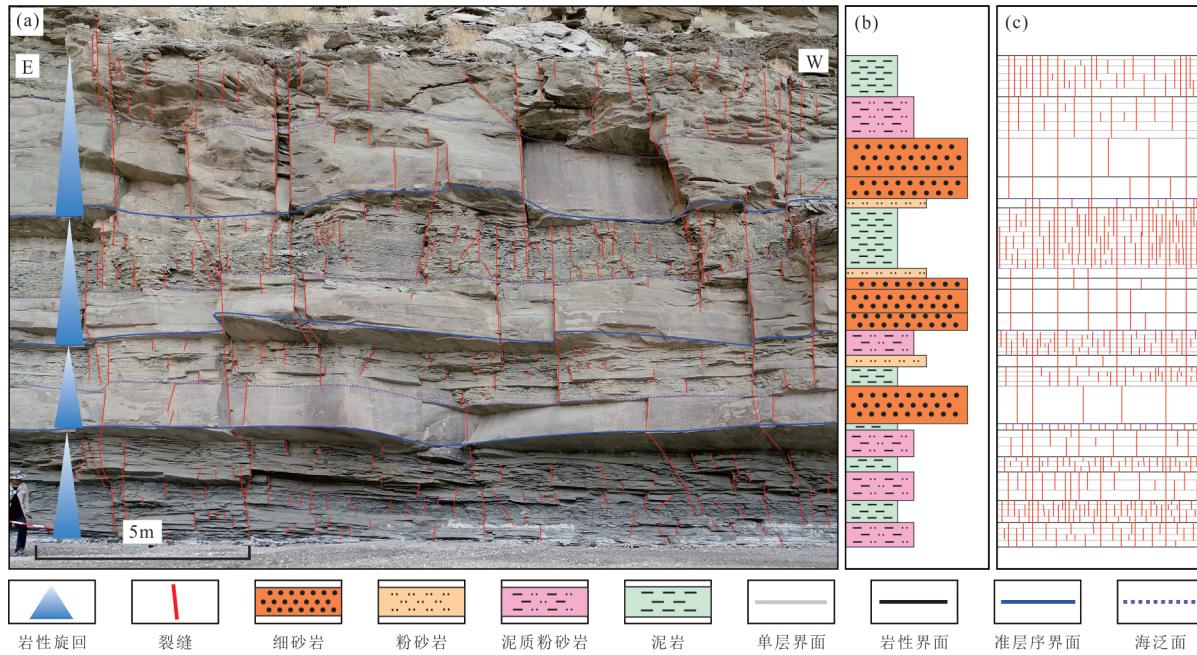


图3 大湾沟野外露头柯坪塔格组层序地层与岩石力学层划分及对比

Fig.3 The division and correlation of the sequence stratigraphy and the mechanical stratigraphy of the Kepingtage Formation in the Dawangou outcrop

a.野外剖面裂缝发育特征;b.岩性;c.岩石力学层与裂缝发育模式

等,2020),但是目前并没有被广泛认可的岩石力学参数来定量表征地层的这种相似性.大量研究表明同一地区岩性与裂缝密度具有一定相关性,岩性层影响裂缝的产状、规模(特别是高度,也包括长度和开度)、类型和空间排列组合(Laubach *et al.*, 2009).普遍认为碳酸盐岩地层中白云岩的裂缝密度大于云质灰岩,灰岩最小;粒度较细的碳酸盐岩地层裂缝密度大于粗粒的(Nelson, 2001; Moore and Wade, 2013).赫俊民等(2019)研究发现研究区碳酸盐岩地层中白云岩的裂缝密度最大;其次是灰岩、生屑灰岩、泥质灰岩,裂缝密度依次递减;裂缝发育程度随着白云石含量的增加而提高,随着泥质等塑性成分的增加而降低.现今的力学层是沉积地层经过成岩和构造作用改造的结果,同一地区的岩性和力学性质往往可以较好的对应(Corbett *et al.*, 1987; Lézin *et al.*, 2009; Rustichelli *et al.*, 2013; Burberry and Peppers, 2017),这说明岩石学中岩性分层也可以为岩石力学层划分提供依据.例如在砂泥互层的地质背景中,由于砂岩和泥岩岩石力学性质差异较大,岩性层厚度与裂缝间距有很好的对应关系(Ji *et al.*, 2021).因此,岩石学方法可以作为力学层的划分依据,特别是在力学性质差异较大的互层组合中.

2.2 层序地层学方法

层序是一套相对整一的、成因上有联系的、以不整合和可以与之对比的整合界面为界的地层(Jr Mitchum and Van Wagoner, 1991).不整合面是一个分开新老地层的界面,沿着界面有证据表明存在沉积间断或剥蚀.从大湾沟上奥陶统野外露头($40^{\circ}42'46.88''N, 79^{\circ}32'29.82''E$)可以清晰地看到层序界面及层序内部次级界面明显控制了裂缝的发育,是限制裂缝垂向延伸的重要界面(图3).剖面底部是印干组灰黑色碳质页岩层,剖面中上部的柯坪塔格组下段出露3个完整的滨浅海相旋回.每个岩性旋回底部为灰色中厚层细砂岩和粉砂岩,厚度为0.75~2.40 m,裂缝间距大;上部为薄层灰色-灰绿色泥质粉砂岩和泥岩,裂缝间距相对较小;每套地层组合相当于一个准层序的岩性旋回.垂向上,薄层内间距较小的裂缝向上终止于准层序底部的不整合界面,向下终止于厚层砂岩向薄层过渡的海泛面,多为层内裂缝.厚层中发育的大间距裂缝规模较大,往往不会被限制,成为贯穿多个层序的穿层裂缝.因此,单个正旋回准层序由上部的高裂缝密度薄层和下部的低裂缝密度厚层组合而成,下部厚层中主要发育穿层裂缝,薄层中发育大量层内裂缝和少量穿层裂缝.

也有学者将雷达扫描的野外露头天然裂缝分为层控(Lamina-bound)裂缝、相控(Facies-bound)裂缝、层序限制(Sequence-bound)裂缝、穿层(Throughgoing)裂缝 4 个尺度进行定量研究, 可以更加精确地研究构造和不同尺度力学层对裂缝密度的影响(Zahm and Hennings, 2009)。一个层序往往是由若干个岩性层有规律的垂向叠置构成的, 层序地层之所以能作为力学层的划分依据, 主要是因为层序中垂向上岩性不同, 其岩石力学性质存在差异; 加之单岩性层厚度差异也较大, 导致裂缝发育特征具有明显差别。在单个层序中, 作为层序底界面的不整合面和层序中部的海泛面往往是最明显的力学层界面, 成为划分力学层的主要依据。

2.3 实测岩石力学参数法

岩石力学参数是定量反映岩石力学层最直接的参数, 在野外经常使用回弹仪(Schmidt hammer 或 Rebound hammer)进行测量, 并需要结合岩石力学实验结果进行标定。回弹仪是 Ernst Schmidt 在 1948 年发明的, 开始主要用来做混凝土无损检测(Schmidt, 1951)。20 世纪 60 年代开始被引入到岩石力学的实践中, 分为多种型号, 可以估计单轴抗压强度、杨氏模量、地层能干性或者剪切模量(刚度)等力学参数(Katz *et al.*, 2000; Shackleton *et al.*, 2005; Ferrill *et al.*, 2011; Azarafza *et al.*, 2021)。与孔隙度测试、矿物成分分析、划痕实验、巴西劈裂、单轴或三轴压缩实验相比, 回弹仪为岩石力学数据的获取提供了快速廉价的替代方法(McGinnis *et al.*, 2017)。岩石力学性质可以用单轴抗压强度(UCS, Uniaxial Compressive Strength)来定量表征, UCS 对裂缝发育具有控制作用, 高 UCS 值力学层中裂缝密度相对更大(Corbett *et al.*, 1987; Bai and Pollard, 2000a; Lézin *et al.*, 2009; Rustichelli *et al.*, 2013)。由于回弹仪测量的是现今的力学性质, 是裂缝发育期的力学性质演化的结果, 但是仍然能表征力学层的相对差异(Underwood *et al.*, 2003; Shackleton *et al.*, 2005; Ferrill and Morris, 2003; Laubach *et al.*, 2009; Ferrill *et al.*, 2011; Rustichelli *et al.*, 2013; McGinnis *et al.*, 2017)。孔隙度、矿物成分以及颗粒大小等参数与力学参数(主要是单轴抗压强度和杨氏模量)有一定的相关性, 也可以用这些参数来表征或者计算岩石的力学性质(Corbett *et al.*, 1987; Lézin *et al.*, 2009; Rustichelli *et al.*, 2013)。平均裂缝间距与裂缝层厚度

的比值同回弹仪的回弹值存在正相关性, 特别在泥岩中二者的相关性较好(McGinnis *et al.*, 2017; Kadkhodaie, 2021); 但这一关系并不是普遍适用的, 甚至存在负相关性(Ogata *et al.*, 2017)。利用回弹仪测量计算得到的刚度比可以反演穿层裂缝的发育过程, 表明力学层是随着压实、成岩及构造裂缝的发育动态演化的(Shackleton *et al.*, 2005)。回弹仪还可以测量岩心力学性质, 有研究表明其测量的岩心单轴抗压强度与测井计算的单轴抗压强度具有较好相关性, 可以将测井计算的动态力学参数校正到静态力学参数(Kadkhodaie, 2021)。

2.4 测井解释力学参数法

测井解释是获得地下岩石物理性质和含油气性的主要手段, 通过地层岩石力学参数可以直接定性划分岩石力学层, 依据的岩石力学参数包括强度参数(抗压强度、抗拉强度及抗剪强度等)、弹性模量(杨氏模量、泊松比及体积模量等)、岩石脆性、Weibull 模量等(曾联波, 2008; Laubach *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2021)。作为一种重要的力学性质, 脆性是常用的综合岩石力学参数; 高脆性岩石中的脆性矿物含量高、杨氏模量大、内摩擦角大, 容易破裂并形成复杂的缝网系统(曹东升等, 2021)。在地下测井资料中, 横波测井结合常用纵波测井和密度测井就可以计算地层的岩石力学参数或者脆性指数, 也可以基于其他经验公式或回归函数计算力学参数。

以盆地中部的 A1 井为例, 将脆性指数(杨氏模量与泊松比的比值)作为综合岩石力学参数划分岩石力学层(图 4)。根据岩石力学层的定义, 类比测井解释地层岩性方法, 将岩石力学参数突变段的半幅点作为岩石力学层界面, 将岩石力学参数相近的连续地层划分为同一力学层。单个岩石力学层的脆性指数和层厚可以作为力学层的定量参数, 岩石力学指数较大且层厚较小或者岩石力学指数较大且层厚中等的单元划分为二类岩石力学层, 其他为三类力学层。研究发现预测的裂缝发育概率(Lyu *et al.*, 2016)与一类和二类岩石力学层具有很好的对应关系(图 4)。也有学者通过测井数据计算多种岩石力学参数, 并校正到对应的静态力学参数, 然后使用分类算法将地层划分成不同的力学单元; 可以有效指导钻井实践, 减少井壁稳定性分析中的不确定性, 并获得精度

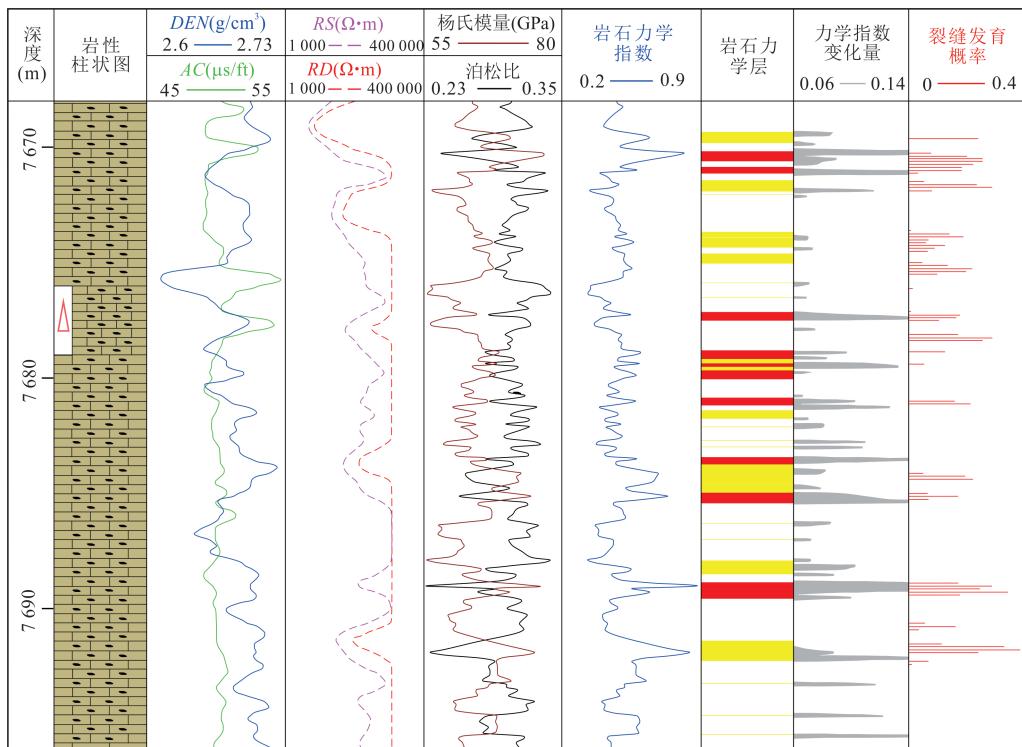


图4 塔里木盆地中部一间房组岩石力学参数方法划分岩石力学层结果

Fig. 4 The mechanical stratigraphic division by the rock mechanical parameter method of the Yijianfang Formation in the central Tarim Basin

岩石力学层道中,红色的是一类岩石力学层,黄色的是二类岩石力学层,白色是三类岩石力学层

更高的钻井泥浆设计参数(Kadkhodaie, 2021).

2.5 构造变形研究方法

构造变形主要指的是构造层和裂缝层两种不同尺度的研究方法. 裂缝层是根据裂缝发育程度、强度或其他裂缝属性将地层划分成的裂缝单元. 地层力学性质受成岩作用和构造作用影响不断演化, 现今的力学层和裂缝层在一些地质背景下是对应的, 也存在不一致的情况. 构造作用产生不同类型及特征的裂缝后, 会使裂缝层力学性质演化路径的差异加大, 对应的“古”力学层之间的差异会持续到现今. 裂缝层反映了特定构造应力条件下地层破裂时的岩石力学层特征(Laubach *et al.*, 2009); 因此, 可以将裂缝层视为“古”力学层, 裂缝层可作为力学层划分的依据. 裂缝的差异发育表现为裂缝在垂向上的终止分叉或产状变化(Fracture refraction)、裂缝开度以及裂缝密度等参数改变, 这些裂缝特征都可以作为裂缝层的划分依据, 进而划分岩石力学层(Teufel and Clark, 1984; Narr and Suppe, 1991; Rijken and Cooke, 2001; Underwood *et al.*, 2003; Bertotti *et al.*, 2007; Laubach *et al.*, 2009; Ferrill *et al.*, 2014; Agosta *et al.*, 2015; Ferrill *et al.*, 2017; Todaro *et al.*, 2022). 通过裂缝密度划分的岩石力学层表明岩性层与岩石力学层并不总是一致的(图5).

构造层是指地质演化过程中在一定构造单元及一定构造时期内形成的、具有一定构造变形特征的地层组合(周鼎武等, 2002). 它在时间上代表地质演化历史中一定的构造时期, 在空间上代表某一构造事件所影响的范围(杨旭和申文静, 2021). 构造层的划分主要依据地层的岩性组合特征、沉积充填序列、不整合和构造变形特征(周鼎武等, 2002). 因此, 构造层的内涵和裂缝层是相似的, 只是应用尺度有所不同, 构造层的划分同样可以指示现今的力学层.

值得注意的是, 测井数据也可以预测地层的裂缝发育程度(Lyu *et al.*, 2016), 并进行裂缝层的划分. 地震数据可以按照一定标准抽道集成为多个数据体联立反演, 获得纵横波速度、密度或者其他力学参数(曹东升等, 2021), 进而对地下岩层的岩石力学性质进行评价. 地震数据分辨率低, 但是覆盖范围广, 并且可以获得三维的参数分布, 适合对大尺度力学层的力学性质进行预测分析.

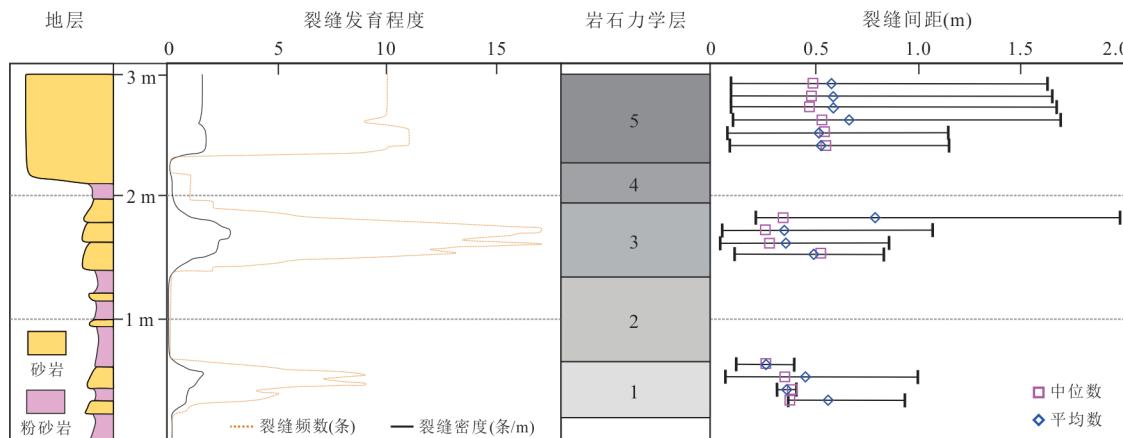


图 5 根据裂缝密度划分裂缝层和岩石力学层(据 Bertotti *et al.*, 2007 修改)

Fig. 5 Fracture layers and mechanical stratigraphic layers divided according to the fracture density (modified from Bertotti *et al.*, 2007)

上述研究方法的测量范围和精度不尽相同,适用于不同尺度。井资料中,裂缝层的观察和测量只能获得井周一定范围内的数据,获取的裂缝层定量参数存在取样误差。岩性层划分方法中,井下岩性界面与野外的岩性界面差异较大,相近尺度存在一定误差。层序地层学研究需要对岩石组合进行分析,适合研究相对大尺度地层单元。测井采样间隔多为 0.125 m, 精度为几十厘米到数米。目前地震数据主要可以反演米级的地层属性,难以识别更小尺度的地层。回弹仪的测量需要人工操作,测量目标受人的活动范围限制。

地层的力学性质是不断演化的,力学层是一个动态地质概念(Shackleton *et al.*, 2005),上述方法的划分结果代表不同时间和尺度的力学层格架。正如 Laubach *et al.*(2009)所言,想要在复杂的成岩和构造演化过程中更加精确地预测裂缝,需要将地层的应力场演化、地层力学性质演化以及现今的力学层特征相结合。多尺度力学层则需要综合以上的直接和间接测量方法进行划分研究,在获得力学层力学参数和裂缝层特征后,可以通过数值模拟来进一步研究力学层界面对裂缝限制能力的大小,从而实现不同尺度力学层界面的定量评价(曾联波等, 2020)。

3 塔里木盆地台盆区多尺度岩石力学层特征

在油藏范围内,前人往往将多尺度裂缝系统划

分为 4 个尺度(表 2)分别研究,从断层裂缝对流体控制的角度可以划分为更多的级次(Zeng *et al.*, 2021)。研究区具有明显位移的断层可以划分为走滑断裂带和走滑断层两个尺度,不能解释出断距的裂缝同样可以划分为多个尺度。其中,走滑断裂带是研究区最明显的构造类型,可以从盆地基底贯穿到浅层,是多尺度断层裂缝系统在三维空间的组合。研究区走滑断层垂向断距较小,走滑断层与大尺度裂缝难以有效区分,把地震资料中可以识别且具有单一不连续面的断层与大尺度裂缝在同一尺度进行研究。中小尺度裂缝往往通过测井和岩心来识别,也是野外剖面观测对应的尺度范围。本文将多尺度力学层分为大尺度岩石力学层(限制走滑断层和大尺度裂缝)、中小尺度岩石力学层和微尺度岩石力学层 3 个尺度(级次)范围进行研究。

3.1 大尺度岩石力学层特征

本文将限制断层和大尺度裂缝垂向延伸的地质界面称为大尺度岩石力学层界面,相邻界面之间的地层单元为大尺度岩石力学层,可以通过地震资料中的构造样式、断层裂缝密度以及地层厚度等参数识别划分。前人主要根据地层岩性和断层样式划分的构造层并不符合岩石力学层的划分原则。从力学层的角度研究,不仅要考虑构造期次和样式,同样需要考虑裂缝密度、地层厚度和分层界面等力学层的重要组成元素。基于相干属性、蚂蚁追踪属性和 AFE 属性体等多种叠后地震属性融合技术(李海英等, 2020)对地震资料中的裂缝解释(图 6 和图 7),结合岩性、层序以及地层厚度,对研究区大尺度岩石力学层厘定和划分,并对其控制的断层和大尺

表3 塔里木盆地中部大尺度岩石力学层划分结果及其特征

Table 3 The division and characteristics of the large-scale mechanical stratigraphy in the central Tarim Basin

地层和岩性	力学层 顶界面	构造特征
前寒武基底	T ₉ ⁰	正断层及其组合成的地堑,局部由于构造反转成为逆断层
中下寒武统,海相碳酸盐岩含塑性的膏岩和泥页岩	T ₈ ¹	高角度的走滑断裂,膏岩滑动相关的中低角度正、逆断层
上寒武统-中奥陶统碳酸盐岩	T ₇ ⁴	高角度走滑断裂带,以及断裂带之间独立的高角度断层和大尺度裂缝
上奥陶统厚层泥岩、泥晶灰岩	T ₇ ⁰	走滑断裂带上方雁列正断层,高角度断层和大尺度裂缝
志留系-石炭系砂泥岩互层,上部石炭系含灰岩地层	T ₅ ⁴	中低角度断层和大尺度裂缝,走滑断裂带上方更加发育
二叠系,砂泥岩和火山岩地层	T ₅ ⁰	中高角度断层裂缝,在平面上表现出多边形裂缝特征
三叠系,泥岩、粉砂岩为主	T ₄ ⁶	中高角度断层裂缝为主
侏罗系-古近系,砂岩和泥岩互层	T ₂ ²	下部为中低角度断层裂缝,上部以高角度为主
新近系-第四系,碎屑岩以砂岩和粉砂岩为主	地表	以中低角度断层裂缝为主

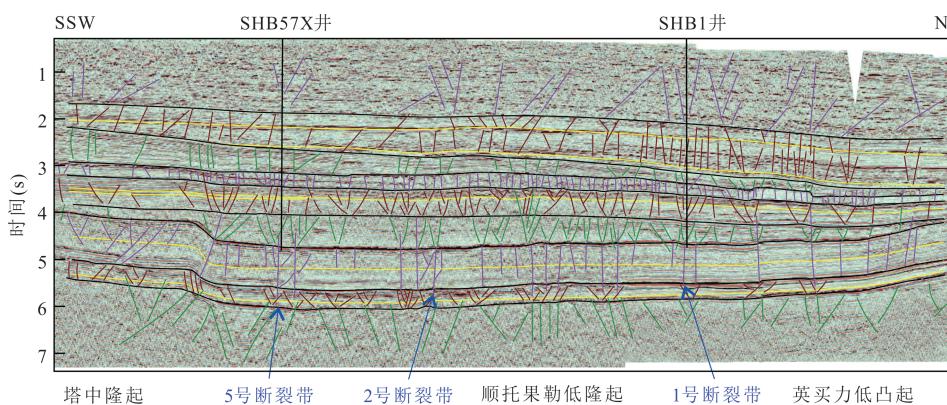


图6 塔里木盆地中部区域构造剖面

Fig. 6 The seismic section interpretation and the mechanical stratigraphic division in the central Tarim Basin

据韩俊等,2021;图中黑色的层位为大尺度岩石力学层界面,黄色是其他主要地震反射层;剖面位置为图2中的近南北向BB'

度裂缝特征进行分析(表3).研究区可以分为9个大尺度的力学层,其限制的断裂在垂向上明显受到力学层的影响.在图6东西向地震剖面中,上寒武统-中奥陶统($T_8^1-T_7^4$)碳酸盐岩大尺度力学层中, T_8^0 、 T_8^8 、 T_7^6 均对断层和大尺度裂缝具有一定的限制作用,特别是 T_8^0 反射层上下的裂缝产状发生了变化,表明三级层序的分界面是重要的力学层界面.

3.2 中小尺度力学层发育特征

中小尺度力学层主要指在大尺度力学层内部控制中小尺度裂缝特征的力学单元,主要依据高分辨率的地震数据、野外露头观察、钻录井(包括岩心观察)和测井资料进行研究.三级层序内部可以通过裂缝层的划分来表征力学层的发育特征.测井数据计算裂缝综合指数和综合维数可以很好地预测裂缝发育概率(Lyu *et al.*, 2016).笔者对目前油气勘探重点层位一间房组三级层序(王文博等,2021)内部的裂缝发育概率进行预测,并对层序内部不同分段(上部、中部及下部)的裂缝发育程

度进行计算(图8).结果表明一间房组上段和下段裂缝密度均大于中段的裂缝密度,一间房组裂缝密度从下段到上段表现出先减少后增加的趋势;3个分段的地层厚度并没有明显的差异,主要是由分段的岩性组合或者内部次级力学层的差异导致的.岩心中观察的岩性层厚度和裂缝发育程度数据表明,中小尺度裂缝线密度明显随着力学层厚度的增加而减小(图9).一间房组上部以含生屑藻粘结岩为主,生屑含量的增加更有利裂缝的发育.一间房组下部半局限潮下沉积环境以藻粘结岩为主,虽然生屑含量少,但是岩性层厚度更小,一定程度上也有利于裂缝的发育.

3.3 微尺度力学层发育特征

微尺度力学层不容易通过肉眼直接观察,可以被微尺度裂缝的限制关系所反映.微尺度裂缝规模小,一般采用铸体薄片、普通薄片、扫描电镜及三维CT扫描等微观分析方法进行研究表征(Anders *et al.*, 2014;吕文雅等,2021).微裂缝的垂向延伸同样

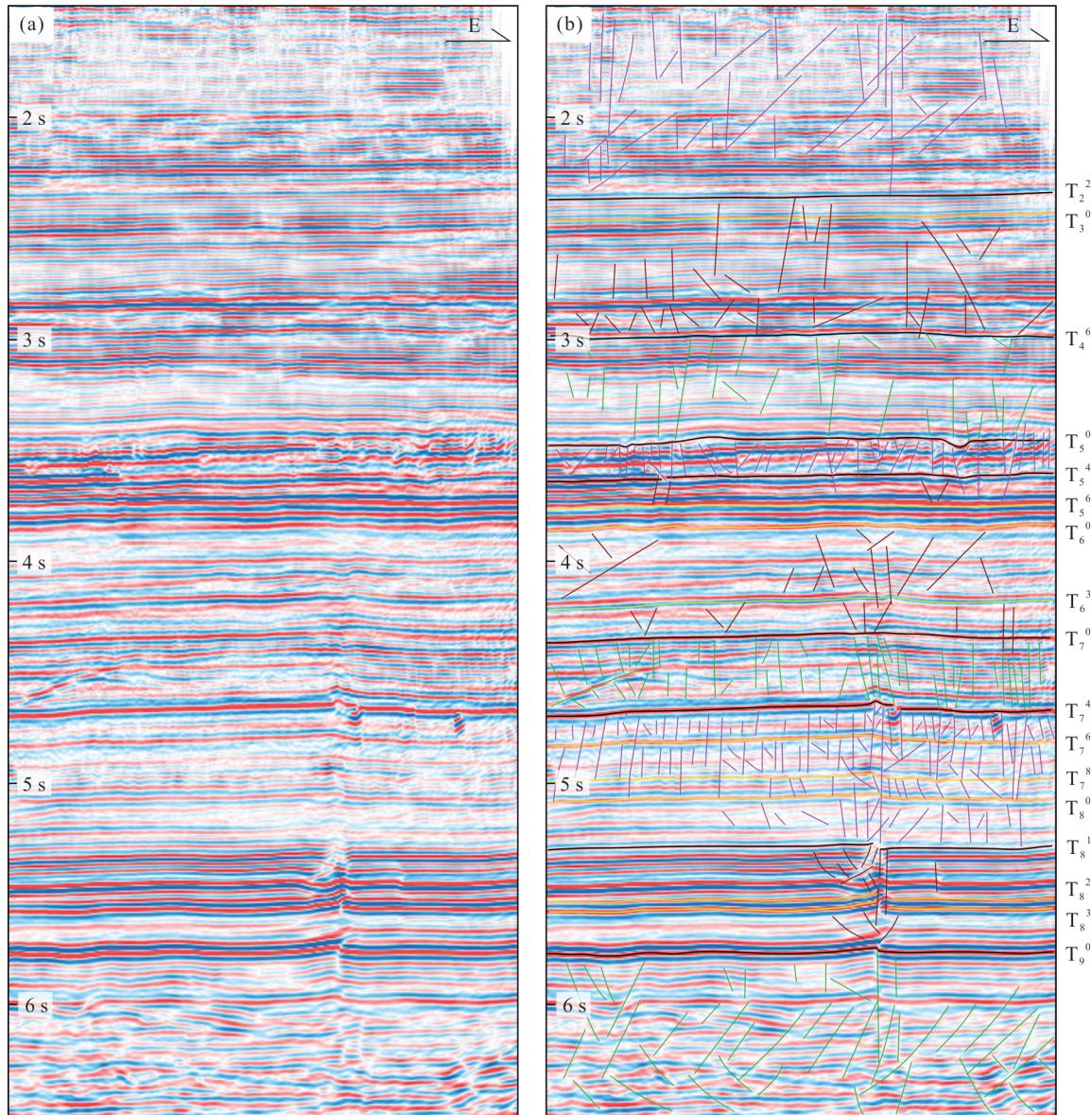


图 7 塔里木盆地中部大尺度岩石力学层划分结果及断裂解释

Fig. 7 The large-scale fault-fracture interpretation and the mechanical stratigraphic division of the seismic section in the central Tarim Basin

图 b 中黑色的层位为大尺度岩石力学层界面, 黄色是其他主要地震反射层; 近东西向剖面的位置为图 2 中的 AA'

会受到一些地质界面的限制, 这些相邻界面之间的岩层就是微尺度力学层。在图 10a 中开度较小的微裂缝不能穿过泥晶灰岩和颗粒灰岩的岩性界面, 垂向伸展被限制; 开度较大的微裂缝在两种岩性中产状也发生了变化。微裂缝往往在泥晶灰岩中更加发育, 在与亮晶胶结的颗粒灰岩界面处被限制(图 10b、10c)。缝合线是碳酸盐岩地层中一种常见的微观力学层界面, 对微裂缝具有明显的限制作用(图 10d)。在野外露头中, 这些微尺度的地质界面会把单个岩性层内部进一步分层, 形成次级的力学层。研究区微裂缝多被方解石充填, 表

明裂缝曾是有利的流体储集和渗流空间。

4 岩石力学层对多尺度断层裂缝的影响

岩石力学层是指岩石力学行为相近或岩石力学性质近一致的岩石力学单元, 同一岩石力学单元具有相近的岩石强度、脆性和断裂力学性质。研究表明岩石力学层的重要组成元素包括地层力学性质、力学层厚度、力学层界面特征及两侧力学性质的差异(Ferrill and Mor-

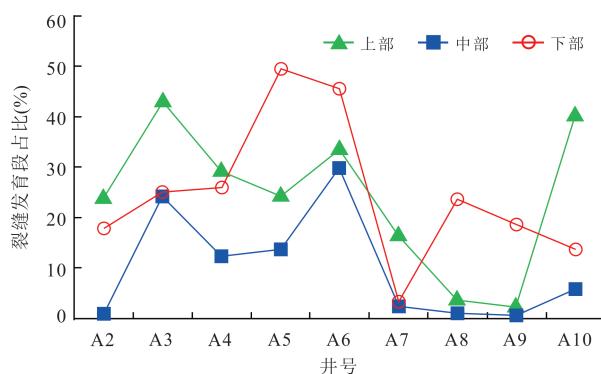


图8 台盆区一间房组测井数据预测裂缝发育段占比
Fig. 8 Proportions of fracture development sections predicted by logging data of the Yijianfang Formation in the platform area

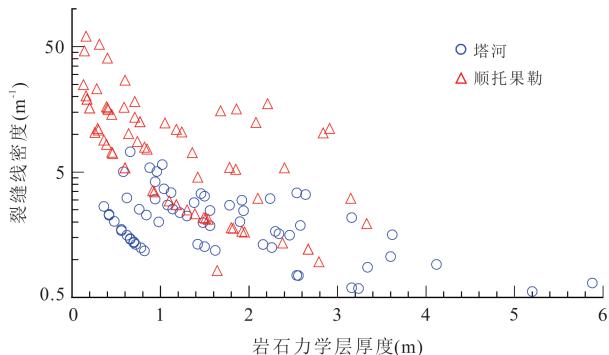


图9 裂缝密度与岩石力学层厚度关系
Fig. 9 Relationship between the fracture density and the mechanical stratigraphic thickness

ris, 2003; Laubach *et al.*, 2009; Ferrill *et al.*, 2014, 2017; McGinnis *et al.*, 2017).

裂缝发育规律的研究中,普遍认为地层厚度和岩石力学性质是控制裂缝发育的主要因素,此外还有岩性、沉积相、成岩相、孔隙度、粒度和分选等因素(巩磊等,2017),属于裂缝发育的内因.而且岩石力学性质与岩性和沉积相等地质参数有一定的相关性,岩石力学性质是上述地质参数在力学性能上的体现.从力学的角度来看,裂缝是一定力学性质岩石在受力后破裂的一种现象.因此,通过岩石力学性质(内因)和受力(外因)分析,就可以预测裂缝的发育特征,提供裂缝定量化预测思路.而岩石力学层成为包括层厚、岩性、沉积相、成岩相等裂缝发育控制内因的综合,对裂缝的预测具有重要作用.

前文的研究表明不同尺度裂缝会受到不同类型地质界面的限制,力学层界面和力学层也具有尺度特征.不同类型岩石力学层界面所限制的力学单元性质不同,它们对天然裂缝纵

向扩展的限制作用也明显不同(曾联波等,2020).岩性、力学层界面、力学层厚度是不同尺度力学层对断层裂缝尺度控制的重要因素.

4.1 岩性组合是多尺度断层裂缝发育的基础

研究表明力学层、裂缝层和岩性层是不同的概念,三者并不总是一致的(Laubach *et al.*, 2009; 曾联波等, 2020).一方面,在同一地区相同构造背景下,相同岩性的现今力学性质及定量力学参数是相近的(Lézin *et al.*, 2009; Gudmundsson, 2011; Moore and Wade, 2013; Rustichelli *et al.*, 2013; McGinnis *et al.*, 2017; Kadkhodaie, 2021);另一方面,裂缝层中裂缝密度与岩性较好的相关性(Nelson, 2001; 赫俊民等, 2019)表明,地质演化过程中相同岩性地层的力学性质也是相似的(Shackleton *et al.*, 2005).岩性层是特定沉积环境中的产物,一定的沉积环境中的地层的岩性、结构和厚度都是相似的;同岩性地层的后期成岩和构造改造过程也趋于相同,其力学性质也就相似.

根据裂缝的穿层性,可以将裂缝分为层内裂缝和穿层裂缝两种类型(Becker and Gross, 1996; Gross and Eyal, 2007; Rustichelli *et al.*, 2016),有研究指出相邻力学层剪切模量之比小于0.4就会限制裂缝的拓展(Renshaw and Pollard, 1995),这里的“层”往往指肉眼观察具有相同岩性的岩性层.但是,不同尺度力学层界面将地层分为了不同尺度的单元,穿层裂缝中的“层”广义上应该是不同尺度界面分割的相对应的地层单元.根据裂缝穿过不同尺度力学层的能力差异,裂缝的穿层性是相对的,会因力学层界面的限制能力而改变.

岩性的变化或者不连续是产生力学层的物质基础,控制着力学层内部岩石力学性质的空间分布.在特定构造环境中,岩性组合决定了裂缝的发育特征和纵向延伸距离,是多尺度断层裂缝发育的基础.

4.2 不同级次力学层界面是多尺度力学层重要组成部分

力学层界面是限制对应尺度断层或裂缝的一个分界面,相邻力学层界面之间的地层就是对应的力学层单元.曾联波等(2020)指出岩石力学层界面可以是一个面,也可以是具有一定厚度的塑性岩层.力学层界面可以是由地层沉积中断形成的地层不连续,上下地层岩性的变化、地层差异成岩改造等作用导致的力学性质差异也可以形成力学层界面.碎屑岩中限制天然裂缝纵向扩展延伸的岩石力学

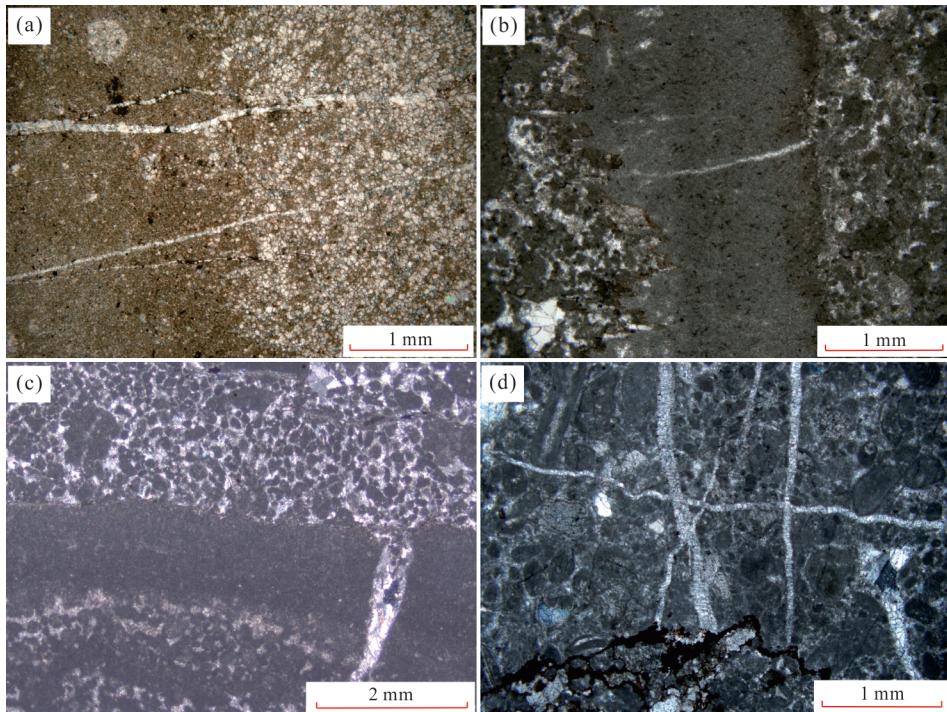


图 10 一间房组微裂缝被缝合线和岩性界面限制

Fig. 10 Microfractures of the Yijianfang Formation limited by stylolites and lithologic interfaces

层界面主要有层理面、沉积间断面、韵律岩性变化界面、泥岩隔层、泥岩夹层、钙质隔层、钙质夹层和沉积冲刷面等多种类型(曾联波等, 2020), 碳酸盐岩地层中的缝合线以及不同级别的层序界面也是重要的力学层界面类型。在较大的应力条件下, 对裂缝限制能力较弱的界面就不能有效限制裂缝的拓展, 需要更高级次力学层界面限制裂缝的拓展。裂缝拓展后对应的尺度范围随之改变, 也就是较大尺度裂缝被更高级次力学层界面所限制, 这种裂缝尺度与岩石力学层界面级别的动态对应关系也体现了岩石力学层的多尺度特征。多尺度力学层耦合的系统中, 力学层界面类型识别和级别划分尤为重要, 是正确划分多次度力学层的关键。

4.3 岩石力学层厚度及其组合控制了裂缝密度

岩石力学层厚度控制了裂缝密度(Pollard and Aydin, 1988; Bai and Pollard, 2000a, 2000b; Olson, 2004; 巩磊等, 2018), 这为裂缝密度的定量预测提供了约束条件。裂缝间距指数(FSI)是指岩石力学层厚度与受其限制裂缝的平均间距拟合得到的直线斜率(Hobbs, 1967; Narr and Suppe, 1991)。在含裂缝岩石力学层内部, 层控裂缝高度等于力学层的厚度, 层控裂缝间距多与层厚呈正比, 其比值主要分布在 0.1~10 之间(Bai and Pollard, 2000a; 巩

磊等, 2018), 可以称之为 FSI 线性模型。随着裂缝间距指数的不断变小, 似乎存在一个临界值, 大于这个临界值时就会发育穿层裂缝(Renshaw and Pollard, 1995; Gross and Eyal, 2007; 巩磊等, 2018), 临界值就是临界裂缝间距指数。有学者将其解释为压力阴影(Nur, 1982; Pollard and Segall, 1987; Gross *et al.*, 1995; Becker and Gross, 1996), 数值模拟研究表明大于临界裂缝间距指数时, 垂直于裂缝的应力分量就会从张应力变为压应力, 从而阻止进一步形成裂缝(Bai and Pollard, 2000b; 巩磊等, 2018)。临界裂缝间距指数与岩石力学层的平均应变无关, 它随着岩石力学层与相邻岩层杨氏模量比值的增加而降低, 随着力学层泊松比和上覆压力的增加而增加, 随着相邻岩层泊松比的增加而降低。也有研究指出裂缝间距(s)和层厚(t)之间的函数关系并不唯一, 也存在非线性的幂函数关系($s=mt^{1-k}$), 其中 m 为层状地层抗张强度与界面剪应力比值的一半, k 是 Weibull 模量(Ji *et al.*, 2021), 这种关系可以叫做 FSI 的幂函数模型。研究区裂缝的平均间距与力学层厚度在对数坐标中具有一定的线性关系(图 11), FSI 幂函数模型可以反映岩石力学层的定量特征: 塔河地区的 m 值介于 0.21~1.04, 在顺托果勒地区介于 0.08~0.30。

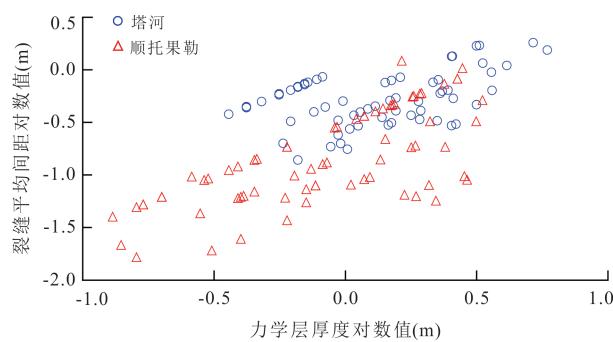


图 11 裂缝密度对数值与岩石力学层厚度对数值关系

Fig. 11 Relationship between fracture density and mechanical stratigraphy thickness in the logarithmic coordinate

综上,岩性及其组合是地层力学性质演化的物质基础,也是多尺度岩石力学层的基础;力学层界面对裂缝的限制能力决定了力学层的尺度;岩石力学层厚度控制了层控裂缝密度。在塔里木盆地中部塔河-顺北地区,地震资料中的大尺度裂缝受到大尺度岩石力学层的控制,其垂向延伸和裂缝产状在不同力学层中差异发育。中小尺度力学层控制了中小尺度裂缝的密度,有利于储层裂缝的定量预测。微尺度力学层控制的微裂缝增加了低孔渗地层的渗透性能。多尺度岩石力学层对断层裂缝系统具有明显的控制作用。小尺度岩石力学层控制同等级次裂缝发育的同时,影响了大尺度断层和大型板内走滑断裂带的内部结构和构造样式(Chen *et al.*, 2022)。

5 多尺度岩石力学层对流体活动的影响

不同尺度天然裂缝对致密低渗透储层的作用和对油气的影响明显不同(Panza *et al.*, 2016),大尺度裂缝通常影响油气的保存,中小尺度裂缝控制了致密储层的流体渗流,微尺度裂缝主要起储集作用(曾联波等, 2020; 吕文雅等, 2021)。多尺度裂缝是在不同尺度力学层的约束下发育的,多尺度力学层框架及其约束下的裂缝差异发育控制了地下流体活动规律。

5.1 大尺度力学层与油气的运聚成藏

顺托果勒地区走滑断裂带分层结构控制了油气的运聚成藏。在顺托果勒5号走滑断裂带垂向多层次结构控制下,寒武系油气沿走滑断裂穿过膏盐岩层,在中下奥陶统碳酸盐岩断裂带内部运移聚集,

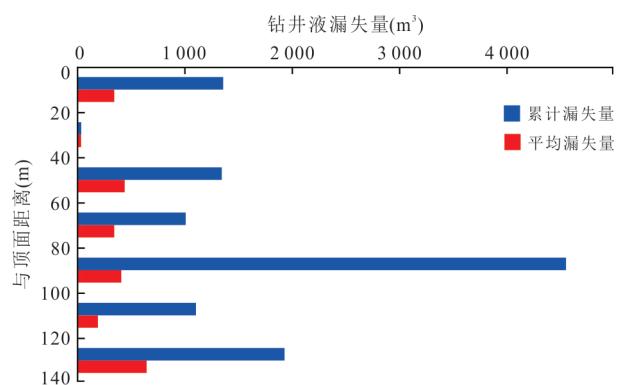


图 12 一间房组不同深度钻井液漏失量

Fig. 12 Drilling mud leakage at different depths of the Yijianfang Formation

作为区域盖层的上奥陶统厚层泥岩中断层和裂缝较少,形成了特有的“断溶体”油气藏(韩俊等, 2021)。走滑断裂的通源性、纵向输导性是油气差异聚集的主控因素,研究区主要储层类型是碳酸盐岩中断裂裂缝-洞穴型储层,其分布主要受断裂垂向分层控制,从而使得油气藏在垂向上非均质分布(刘宝增, 2020; 马庆佑等, 2020)。从多尺度力学层的角度分析,不同级次力学层界面对不同尺度裂缝发育的控制作用决定了地层是输导层、储层或者是盖层。如果断裂穿大尺度力学层,往往有利于油气的垂向运输,既可以是垂向通源的优势通道,也可以是导致油气藏破坏、油气散失的通道。中小尺度的力学层中裂缝发育且裂缝密度较大时,是有利的裂缝性储层发育基础。发育微尺度裂缝,有利于将基质孔隙连通,提高储层的储渗性质。无论常规的油气藏还是非常规的油气藏,都需要不同尺度力学层中发育一定规模和密度的有效裂缝,形成垂向上的输导层、储层或者盖层等有效组合。这些具有不同尺度和渗流作用的力学层垂向组合决定了有利储层的垂向分布,控制了含油层系的分布。

5.2 中小尺度力学层与油气藏垂向非均质性

大尺度力学层界面T₇⁴下伏碳酸盐岩地层中的钻井液漏失量分层统计结果表明,随着地层深度变深,钻井液漏失量有向深部增加的趋势(图12),表明一间房组的下部裂缝更加发育的同时,裂缝连通性更好。由于碳酸盐岩地层横向分布较为稳定,厚度变化不大,说明在油藏内部存在明显的垂向非均质性。顺北地区奥陶系获得高产的油气藏分布在T₇⁴界面以下45~530 m(刘宝增, 2020),油气藏范围内的中小尺度力学层会影响不同层位的储渗性能,控制着油藏的垂向非均质性。

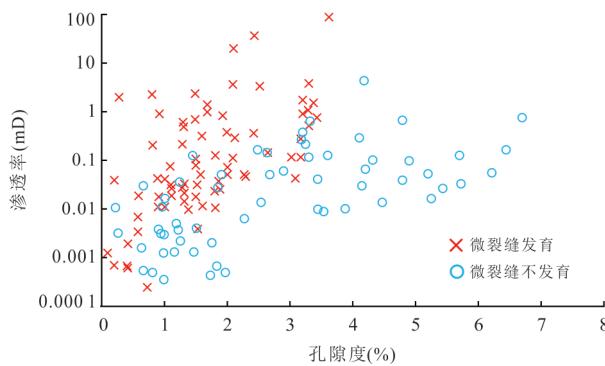


图 13 微裂缝发育特征对孔隙度和渗透率关系的影响
Fig. 13 The influence of microfracture development characteristics on the relationship between the porosity and the permeability

5.3 微尺度裂缝与储层物性

薄片可以反映微裂缝发育相对密度及其充填特征, 孔渗实验样品对应的薄片观察就可以评价微裂缝发育特征与岩石孔渗的相关性。微裂缝主要发育在低孔隙度样品

中, 可以提高地层的渗透率(图 13)。

多尺度岩石力学层控制了不同尺度的裂缝, 不同尺度裂缝对流体控制作用不同: 大尺度的岩石力学层控制了含油层系和油气藏垂向的分布, 中小尺度岩石力学层影响油气藏内部的非均质性, 微尺度裂缝可以明显提高地层的渗透率。

不同沉积相中同级次力学层的厚度存在差异, 其控制的穿层裂缝在规模和密度上也会存在系统差异, 例如斜坡相碳酸盐岩中的穿层裂缝垂向最高 20 m, 比台地相碳酸盐岩单元(普遍大于 100 m)的穿层裂缝短得多(Rustichelli *et al.*, 2016)。岩石力学层的抗张强度、弹性模量、脆性指数等力学性质对地下开启状态裂缝的形成也具有一定的影响(赵乐强和冯建伟, 2018)。力学层控制的多尺度裂缝直接影响地下流体的储集和渗流, 力学层与流体活动范围具有一定对应关系, 不同厚度岩石力学层(同时也是所限制裂缝的垂向高度)的力学层界面类型、划分方法及其对流体的控制作用可以总结为图 14。

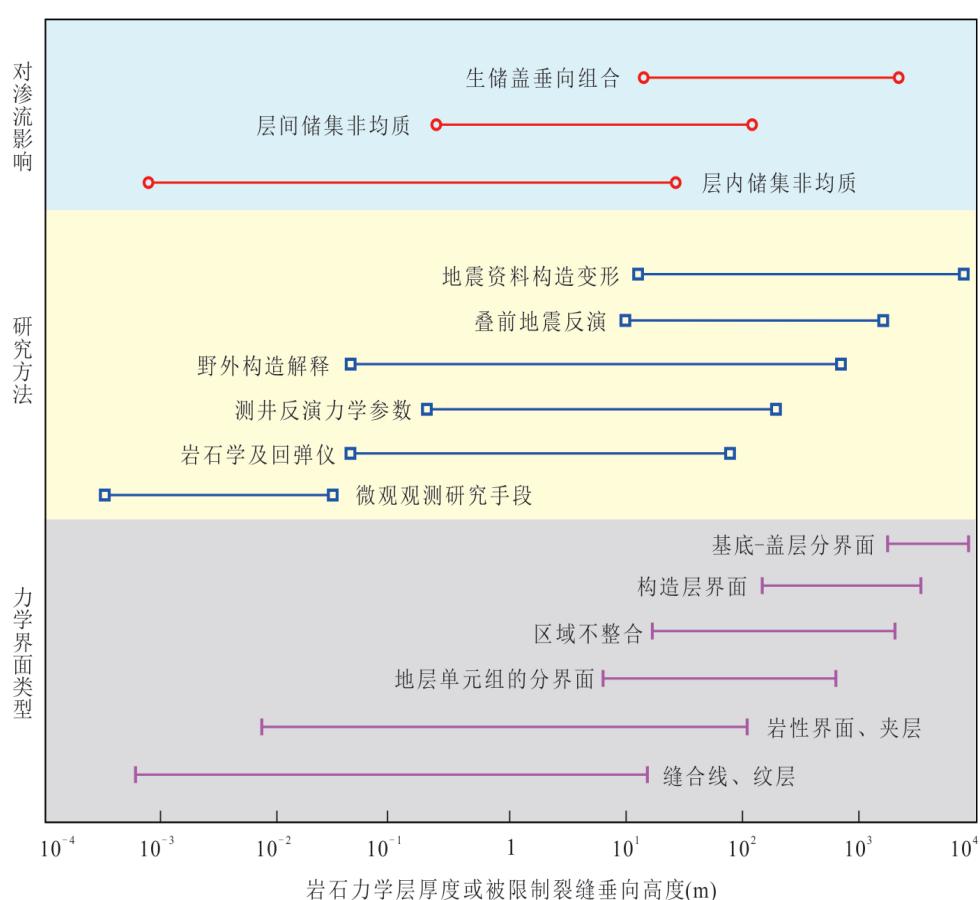


图 14 多尺度岩石力学层的岩石力学层界面类型、研究方法及其对流体的控制作用
Fig. 14 Interface types and study methods of multi-scale mechanical stratigraphy and their controls on geofluids

6 结论

(1) 多尺度岩石力学层的研究和划分方法包括裂缝层和构造层等构造变形方法、岩石学方法、层序地层学方法、测井数据反演力学参数法、实测岩石力学参数法、叠前地震数据反演等。不同尺度的岩石力学层需要采用相对应资料和划分方法进行研究,多尺度岩石力学层需要综合多种方法将地层的应力场演化、地层力学性质演化以及现今的力学层特征结合。

(2) 不同力学层界面对裂缝的限制能力存在差异,决定了力学层界面之间的岩石力学层也存在多尺度特征,影响不同尺度裂缝的垂向延伸。岩性是地层力学性质演化和裂缝发育的物质基础,岩性组合是多尺度力学层的基础。力学层界面对裂缝的限制能力决定了力学层的尺度。岩石力学层厚控制了层内裂缝密度,主要有裂缝间距指数(FSI)线性模型和幂函数模型两种定量关系。

(3) 塔里木盆地中部台盆区大尺度岩石力学层控制了大尺度断层裂缝的倾角、密度及样式等,控制了流体运移、富集和成藏,控制含油层系的分布,决定了有利储层的垂向分布。中小尺度力学层及微尺度力学层控制了断溶体储层的垂向非均质性。

References

- Agosta, F., Wilson, C., Aydin, A., 2015. The Role of Mechanical Stratigraphy on Normal Fault Growth across a Cretaceous Carbonate Multi - Layer, Central Texas (USA). *Italian Journal of Geosciences*, 134(3): 423–441. <https://doi.org/10.3301/IJG.2014.20>
- Anders, M. H., Laubach, S. E., Scholz, C. H., 2014. Microfractures: A Review. *Journal of Structural Geology*, 69: 377–394. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.011>
- Azarafza, M., Ghazifard, A., Asasi, F., et al., 2021. An Empirical Classification Method for South Pars Marls by Schmidt Hammer Rebound Index. *MethodsX*, 8: 101366. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101366>
- Bai, T. X., Pollard, D. D., 2000a. Fracture Spacing in Layered Rocks: A New Explanation Based on the Stress Transition. *Journal of Structural Geology*, 22(1): 43–57. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00137-6)
- Bai, T. X., Pollard, D. D., 2000b. Closely Spaced Fractures in Layered Rocks: Initiation Mechanism and Propagation Kinematics. *Journal of Structural Geology*, 22(10): 1409–1425. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00062-6)
- Becker, A., Gross, M. R., 1996. Mechanism for Joint Saturation in Mechanically Layered Rocks: An Example from Southern Israel. *Tectonophysics*, 257(2–4): 223–237. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00142-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00142-5)
- Bertotti, G., Hardebol, N., Taal-van Koppen, J. K., et al., 2007. Toward a Quantitative Definition of Mechanical Units: New Techniques and Results from an Outcropping Deep-Water Turbidite Succession (Tanqua-Karoo Basin, South Africa). *AAPG Bulletin*, 91(8): 1085–1098. <https://doi.org/10.1306/03060706074>
- Bourbiaux, B., Basquet, R., Cacas, M.C., et al., 2002. An Integrated Workflow to Account for Multi-Scale Fractures in Reservoir Simulation Models: Implementation and Benefits. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi. <https://doi.org/10.2118/78489-MS>
- Burberry, C. M., Peppers, M. H., 2017. Fracture Characterization in Tight Carbonates: An Example from the Ozark Plateau, Arkansas. *AAPG Bulletin*, 101(10): 1675–1696. <https://doi.org/10.1306/01251715242>
- Cao, D.S., Zeng, L.B., Lyu, W.Y., et al., 2021. Progress in Brittleness Evaluation and Prediction Methods in Unconventional Reservoirs. *Petroleum Science Bulletin*, 6(1): 31–45 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. J., He, D. F., Tian, F. L., et al., 2022. Control of Mechanical Stratigraphy on the Stratified Style of Strike-Slip Faults in the Central Tarim Craton, NW China. *Tectonophysics*, 830: 229307. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229307>
- Chen, J.P., Zhao, T., Xiao, C.Y., et al., 2020. Differential Diagenesis of Lower - Middle Ordovician Strike Slip Faults in Shunbei Area of Tarim Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 44(5): 23–34 (in Chinese with English abstract).
- Cooke, M. L., Simo, J. A., Underwood, C. A., et al., 2006. Mechanical Stratigraphic Controls on Fracture Patterns within Carbonates and Implications for Groundwater Flow. *Sedimentary Geology*, 184(3–4): 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.004>
- Corbett, K., Friedman, M., Spang, J., 1987. Fracture Development and Mechanical Stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *AAPG Bulletin*, 71(1): 17–28. <https://doi.org/10.1306/94886D35-1704-11D7-8645000102C1865D>
- Corradetti, A., Tavani, S., Parente, M., et al., 2018. Distribution and Arrest of Vertical Through-Going Joints in a Seismic-Scale Carbonate Platform Exposure (Sorrento Peninsula, Italy): Insights from Integrating Field

- Survey and Digital Outcrop Model. *Journal of Structural Geology*, 108: 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.09.009>
- Dong, S.Q., Lyu, W.Y., Xia, D.L., et al., 2020. An Approach to 3D Geological Modeling of Multi-Scaled Fractures in Tight Sandstone Reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 627–637 (in Chinese with English abstract).
- Ferrill, D.A., McGinnis, R.N., Morris, A.P., et al., 2014. Control of Mechanical Stratigraphy on Bed-Restricted Jointing and Normal Faulting: Eagle Ford Formation, South-Central Texas. *AAPG Bulletin*, 98(11): 2477–2506. <https://doi.org/10.1306/08191414053>
- Ferrill, D. A., Morris, A. P., 2003. Dilational Normal Faults. *Journal of Structural Geology*, 25(2): 183–196. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00029-9)
- Ferrill, D. A., Morris, A. P., McGinnis, R. N., et al., 2011. Fault Zone Deformation and Displacement Partitioning in Mechanically Layered Carbonates: The Hidden Valley Fault, Central Texas. *AAPG Bulletin*, 95(8): 1383–1397. <https://doi.org/10.1306/12031010065>
- Ferrill, D. A., Morris, A. P., McGinnis, R. N., et al., 2017. Mechanical Stratigraphy and Normal Faulting. *Journal of Structural Geology*, 94: 275–302. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>
- Gao, H.H., He, D.F., Tong, X.G., et al., 2018. Tectonic-Depositional Environment and Petroleum Exploration of Yingshan Formation in the Tarim Basin. *Earth Science*, 43(2): 551–565 (in Chinese with English abstract).
- 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., Yao, J.Q., Gao, S., et al., 2018. Controls of Rock Mechanical Stratigraphy on Tectonic Fracture Spacing. *Geotectonica et Metallogenica*, 42(6): 965–973 (in Chinese with English abstract).
- Gross, M. R., 1993. The Origin and Spacing of Cross Joints: Examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California. *Journal of Structural Geology*, 15(6): 737–751. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90059-J](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90059-J)
- Gross, M. R., Eyal, Y., 2007. Throughgoing Fractures in Layered Carbonate Rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11–12): 1387–1404. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2007\)119\[1387:TFILCR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2007)119[1387:TFILCR]2.0.CO;2)
- Gross, M.R., Fischer, M.P., Engelder, T., et al., 1995. Factors Controlling Joint Spacing in Interbedded Sedimentary Rocks: Integrating Numerical Models with Field Observations from the Monterey Formation, USA. *Geological Society, London, Special Publications*, 92(1): 215–233. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.092.01.12>
- Gudmundsson, A., 2011. Rock Fractures in Geological Processes. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511975684>
- Han, J., Kuang, A.P., Neng, Y., et al., 2021. Vertical Layered Structure of Shunbei No.5 Strike-Slip Fault Zone and Its Significance on Hydrocarbon Accumulation. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(2): 152–160 (in Chinese with English abstract).
- Hao, J.M., Wang, X.Y., Sun, J.F., et al., 2019. Characteristics and Main Controlling Factors of Natural Fractures in the Lower-to-Middle Ordovician Carbonate Reservoirs in Tahe Area, Northern Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(5): 1022–1030 (in Chinese with English abstract).
- Hobbs, D. W., 1967. The Formation of Tension Joints in Sedimentary Rocks: An Explanation. *Geological Magazine*, 104(6): 550–556. <https://doi.org/10.1017/s0016756800050226>
- Huang, C., 2019. Multi-Stage Activity Characteristics of Small-Scale Strike-Slip Faults in Superimposed Basin and Its Identification Method: A Case Study of Shunbei Area, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 41(3):379–389 (in Chinese with English abstract).
- Ji, S. C., Li, L., Marcotte, D., 2021. Power-Law Relationship between Joint Spacing and Bed Thickness in Sedimentary Rocks and Implications for Layered Rock Mechanics. *Journal of Structural Geology*, 150: 104413. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104413>
- Jiao, C.L., He, B.Z., Wang, T.Y., et al., 2018. Types and Quantitative Characterization of Reservoir Spaces of the Ultra-Deep Limestone Reservoirs in the Yijianfang Formation during the Middle Ordovician, Shuntuogoule Area, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6):1835–1846 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, F.Z., 2017. Significance of Oil and Gas Exploration in NE Strike-Slip Fault Belts in Shuntuogoule Area of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 831–839 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, F. Z., 2018. Significance and Prospect of Ultra-Deep Carbonate Fault-Karst Reservoirs in Shunbei Area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(2): 207–216 (in Chinese with English abstract).
- Jr Mitchum, R. M., Van Wagoner, J. C., 1991. High-

- Frequency Sequences and Their Stacking Patterns: Sequence-Stratigraphic Evidence of High-Frequency Eustatic Cycles. *Sedimentary Geology*, 70(2–4): 131–160. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(91\)90139-5](https://doi.org/10.1016/0037-0738(91)90139-5)
- Kadkhodaie, A., 2021. The Impact of Geomechanical Units (GMUs) Classification on Reducing the Uncertainty of Wellbore Stability Analysis and Safe Mud Window Design. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 91: 103964. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103964>
- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J. C., 2000. Evaluation of Mechanical Rock Properties Using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4): 723–728. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00004-6)
- Larsen, B., Gudmundsson, A., Grunnaleite, I., et al., 2010. Effects of Sedimentary Interfaces on Fracture Pattern, Linkage, and Cluster Formation in Peritidal Carbonate Rocks. *Marine and Petroleum Geology*, 27(7): 1531–1550. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.03.011>
- Laubach, S.E., Olson, J.E., Gross, M.R., 2009. Mechanical and Fracture Stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 93(11): 1413–1426. <https://doi.org/10.1306/07270909094>
- Lézin, C., Odonne, F., Massonnat, G.J., et al., 2009. Dependence of Joint Spacing on Rock Properties in Carbonate Strata. *AAPG Bulletin*, 93(2): 271–290. <https://doi.org/10.1306/09150808023>
- Li, H. Y., Liu, J., Gong, W., et al., 2020. Identification and Characterization of Strike-Slip Faults and Traps of Fault-Karst Reservoir in Shunbei Area. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 107–120 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. H., Huang, B. X., Li, Y. Y., et al., 2018. Multi-Scale Modeling of Shale Laminas and Fracture Networks in the Yanchang Formation, Southern Ordos Basin, China. *Engineering Geology*, 243: 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.010>
- Li, P. L., 2010. Tectonic Sedimentation and Reservoir Formation in Tarim Basin. Geological Publishing House, Beijing, 1–7 (in Chinese).
- Lin, B., Zhang, X., Kuang, A.P., et al., 2021. Structural Deformation Characteristics of Strike-Slip Faults in Tarim Basin and Their Hydrocarbon Significance: A Case Study of No.1 Fault and No.5 Fault in Shunbei Area. *Acta Petrolei Sinica*, 42(7): 906–923 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.Z., 2020. Analysis of Main Controlling Factors of Oil and Gas Differential Accumulation in Shunbei Area, Tarim Basin—Taking Shunbei No. 1 and No. 5 Strike Slip Fault Zones as Examples. *China Petroleum Exploration*, 25(3):83–95 (in Chinese with English abstract).
- Lü, W.Y., Zeng, L.B., Chen, S.Q., et al., 2021. Characterization Methods of Multi-Scale Natural Fractures in Tight and Low-Permeability Sandstone Reservoirs. *Geological Review*, 67(2): 543–556 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, W. Y., Zeng, L. B., Liu, Z. Q., et al., 2016. Fracture Responses of Conventional Logs in Tight-Oil Sandstones: A Case Study of the Upper Triassic Yanchang Formation in Southwest Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 100(9): 1399–1417. <https://doi.org/10.1306/04041615129>
- Ma, Q. Y., Cao, Z.C., Jiang, H.S., et al., 2020. Source-Connectivity of Strike Slip Fault Zone and Its Relationship with Oil and Gas Accumulation in Tahe-Shunbei Area, Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(4):327–334 (in Chinese with English abstract).
- McGinnis, R. N., Ferrill, D. A., Morris, A. P., et al., 2017. Mechanical Stratigraphic Controls on Natural Fracture Spacing and Penetration. *Journal of Structural Geology*, 95: 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.01.001>
- Moore, C.H., Wade, W.J., 2013. Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Elsevier, Amsterdam, 285–288.
- Morris, A. P., Ferrill, D. A., McGinnis, R. N., 2009. Mechanical Stratigraphy and Faulting in Cretaceous Carbonates. *AAPG Bulletin*, 93(11): 1459–1470. <https://doi.org/10.1306/04080909011>
- Narr, W., 1991. Fracture Density in the Deep Subsurface: Techniques with Application to Point Arguello Oil Field. *AAPG Bulletin*, 75(8): 1300–1323. <https://doi.org/10.1306/0C9B2939-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Narr, W., Suppe, J., 1991. Joint Spacing in Sedimentary Rocks. *Journal of Structural Geology*, 13(9): 1037–1048. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90055-N](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90055-N)
- Nelson, R., 2001. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Gulf Professional Company, Houston.
- Nur, A., 1982. The Origin of Tensile Fracture Lineaments. *Journal of Structural Geology*, 4(1): 31–40. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(82\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(82)90004-9)
- Ogata, K., Storti, F., Balsamo, F., et al., 2017. Sedimentary Facies Control on Mechanical and Fracture Stratigraphy in Turbidites. *Geological Society of America Bulletin*, 129(1–2): 76–92. <https://doi.org/10.1130/B31517.1>

- Olson, J. E., 2004. Predicting Fracture Swarms—The Influence of Subcritical Crack Growth and the Crack-Tip Process Zone on Joint Spacing in Rock. *Geological Society, London, Special Publications*, 231(1): 73–88. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.231.01.05>
- Panza, E., Agosta, F., Rustichelli, A., et al., 2016. Fracture Stratigraphy and Fluid Flow Properties of Shallow-Water, Tight Carbonates: The Case Study of the Murge Plateau (Southern Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 73: 350–370. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.03.022>
- Pollard, D.D., Aydin, A., 1988. Progress in Understanding Jointing over the Past Century. *Geological Society of America Bulletin*, 100(8): 1181–1204. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2)
- Pollard, D.D., Segall, P., 1987. Theoretical Displacements and Stresses near Fractures in Rock: With Applications to Faults, Joints, Veins, Dikes, and Solution Surfaces. *Fracture Mechanics of Rock*, 277–347. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-066266-1.50013-2>
- Qi, L.X., 2016. Oil and Gas Breakthrough in Ultra-Deep Ordovician Carbonate Formations in Shuntuogoule Uplift, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(3):38–51 (in Chinese with English abstract).
- Qi, L.X., 2020. Characteristics and Inspiration of Ultra-Deep Fault-Karst Reservoir in the Shunbei Area of the Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 102–111 (in Chinese with English abstract).
- Renshaw, C. E., Pollard, D. D., 1995. An Experimentally Verified Criterion for Propagation across Unbounded Frictional Interfaces in Brittle, Linear Elastic Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(3): 237–249. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)00037-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)00037-4)
- Rijken, P., Cooke, M. L., 2001. Role of Shale Thickness on Vertical Connectivity of Fractures: Application of Crack-Bridging Theory to the Austin Chalk, Texas. *Tectonophysics*, 337(1–2): 117–133. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00107-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00107-X)
- Rustichelli, A., Agosta, F., Tondi, E., et al., 2013. Spacing and Distribution of Bed-Perpendicular Joints throughout Layered, Shallow-Marine Carbonates (Granada Basin, Southern Spain). *Tectonophysics*, 582: 188–204. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.007>
- Rustichelli, A., Torrieri, S., Tondi, E., et al., 2016. Fracture Characteristics in Cretaceous Platform and Overlying Ramp Carbonates: An Outcrop Study from Maiella Mountain (Central Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 76: 68–87. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.020>
- Schmidt, E., 1951. A Non-Destructive Concrete Tester. *Concrete*, 59(8): 34–35.
- Shackleton, J.R., Cooke, M.L., Sussman, A.J., 2005. Evidence for Temporally Changing Mechanical Stratigraphy and Effects on Joint-Network Architecture. *Geology*, 33 (2): 101–104. <https://doi.org/10.1130/G20930.1>
- Strijker, G., Bertotti, G., Luthi, S. M., 2012. Multi-Scale Fracture Network Analysis from an Outcrop Analogue: A Case Study from the Cambro-Ordovician Clastic Succession in Petra, Jordan. *Marine and Petroleum Geology*, 38(1): 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.07.003>
- Teufel, L.W., Clark, J.A., 1984. Hydraulic Fracture Propagation in Layered Rock: Experimental Studies of Fracture Containment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24(01): 19–32. <https://doi.org/10.2118/9878-PA>
- Todaro, S., Agosta, F., Parrino, N., et al., 2022. Fracture Stratigraphy and Oil First Migration in Triassic Shales, Favignana Island, Western Sicily, Italy. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105400. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105400>
- Underwood, C.A., Cooke, M.L., Simo, J.A., et al., 2003. Stratigraphic Controls on Vertical Fracture Patterns in Silurian Dolomite, Northeastern Wisconsin. *AAPG Bulletin*, 87(1): 121–142. <https://doi.org/10.1306/072902870121>
- 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, 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, W.B., Fu, H., Lü, L.R., et al., 2021. Sequence Model of Ordovician Carbonate Strata in Shunbei Area, Tarim Basin, and Its Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1451–1465 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.W., Chen, H.H., Cao, Z.C., et al., 2019. Forming Mechanism of Ordovician Microbial Carbonate Reservoir in Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin. *Earth Science*, 44(2): 559–571 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Willis, B., 1894. The Mechanics of Appalachian Structure. US Government Printing Office, Washington, 222—224.
- Wu, G.H., Ma, B.S., Han, J.F., et al., 2021. Origin and Growth Mechanisms of Strike-Slip Faults in the Central Tarim Cratonic Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 510—520 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.Q., Pollard, D.D., 1995. An Experimental Study of the Relationship between Joint Spacing and Layer Thickness. *Journal of Structural Geology*, 17(6): 887—905. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00099-L](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00099-L)
- Xu, H., Guo, X.W., Cao, Z.C., et al., 2021. Application of Minimum Homogenization Temperatures of Aqueous Inclusions in Calcite Veins to Determine Time of Hydrocarbon Accumulation in Ordovician of Tahe Oilfield: Evidence from In-Situ Calcite U-Pb Dating by Laser Ablation. *Earth Science*, 46(10): 3535—3548 (in Chinese with English abstract).
- Yang, P.X., Tian, J.C., Zhang, X., 2019. Study of Characteristics of Triassic Sedimentary Facies and Depositional Model in the Northern Shunbei Region, Tarim Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 39(4): 86—96 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X., Shen, W.J., 2021. Characteristics and Evolution of the Structural Formations in Hongqi Sag, Hailar Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(6): 20—27 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Wang, B., Cao, Z.C., et al., 2021. Genesis and Formation Time of Calcite Veins of Middle-Lower Ordovician Reservoirs in Northern Shuntuogoule Low-Uplift, Tarim Basin. *Earth Science*, 46(6): 2246—2257 (in Chinese with English abstract).
- Yun, L., 2021a. Hydrocarbon Accumulation of Ultra-Deep Ordovician Fault-Karst Reservoirs in Shunbei Area. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(2): 136—142 (in Chinese with English abstract).
- Yun, L., 2021b. Controlling Effect of NE Strike-Slip Fault System on Reservoir Development and Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Shunbei Area and Its Geological Significance, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(3): 41—52 (in Chinese with English abstract).
- Zahm, C.K., Hennings, P.H., 2009. Complex Fracture Development Related to Stratigraphic Architecture: Challenges for Structural Deformation Prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova Anticline, Wyoming. *AAPG Bulletin*, 93(11): 1427—1446. <https://doi.org/10.1306/>08040909110
- Zahm, C.K., Zahm, L.C., Bellian, J.A., 2010. Integrated Fracture Prediction Using Sequence Stratigraphy within a Carbonate Fault Damage Zone, Texas, USA. *Journal of Structural Geology*, 32(9): 1363—1374. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.05.012>
- Zeng, L.B., 2008. Formation and Distribution of Fractures in Low Permeability Sandstone Reservoir. Science Press, Beijing, 101—105 (in Chinese).
- Zeng, L.B., Lyu, 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., Lyu, W.Y., Zhang, Y.Z., et al., 2021. 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. *Frontiers in Earth Science*, 9: 664629. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.664629>
- Zhang, P., Hou, G.T., Pan, W.Q., et al., 2013. Research on the Carbonate Rocks Fractures in the Northern Margin of Tarim Basin. *Geological Journal of China Universities*, 19(4): 580—587 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.X., Yu, J.J., Li, N.Y., et al., 2021. Multi-Scale Fracture Prediction and Characterization Method of a Fractured Carbonate Reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11(1): 191—202. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01033-w>
- Zhao, L.Q., Feng, J.W., 2018. Interrelationship Study between Rock Mechanical Stratigraphy and Structural Fracture Development. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 37(1): 35—46 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R., Zhao, T., Li, H.L., et al., 2019. Sedimentary Facies and Cyclic Stratigraphy of Yingshan and Yijiansfang Formations of Lower-Middle Ordovician in Shuntuogoule Area, Tarim Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 43(4): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D.W., Li, W.H., Zhang, Y.X., et al., 2002. Method and Practice of Comprehensive Study of Regional Geology: Guidance for Geological Field Practice in Qinling Orogenic Belt, Ordos Basin. Science Press, Beijing, 180—182 (in Chinese).

附中文参考文献

曹东升, 曾联波, 吕文雅, 等, 2021. 非常规油气储层脆性评

- 价与预测方法研究进展. 石油科学通报, 6(1): 31—45.
- 陈菁萍, 赵腾, 肖重阳, 等, 2020. 塔里木盆地顺北地区中下奥陶统走滑断裂差异成岩作用. 东北石油大学学报, 44(5): 23—34.
- 董少群, 吕文雅, 夏东领, 等, 2020. 致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法. 石油与天然气地质, 41(3): 627—637.
- 高华华, 何登发, 童晓光, 等, 2018. 塔里木盆地鹰山组沉积期构造-沉积环境与原型盆地特征. 地球科学, 43(2): 551—565.
- 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, 姚嘉琪, 高帅, 等, 2018. 岩石力学层对构造裂缝间距的控制作用. 大地构造与成矿学, 42(6): 965—973.
- 韩俊, 况安鹏, 能源, 等, 2021. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义. 新疆石油地质, 42(2): 152—160.
- 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 等, 2019. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素. 石油与天然气地质, 40(5): 1022—1030.
- 黄诚, 2019. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别: 以塔里木盆地顺北地区为例. 石油实验地质, 41(3): 379—389.
- 焦存礼, 何碧竹, 王天宇, 等, 2018. 顺托果勒奥陶系一间房组超深层灰岩储层类型及储集空间定量表征. 岩石学报, 34(6): 1835—1846.
- 焦方正, 2017. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义. 石油与天然气地质, 38(5): 831—839.
- 焦方正, 2018. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景. 石油与天然气地质, 39(2): 207—216.
- 李海英, 刘军, 龚伟, 等, 2020. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术. 中国石油勘探, 25(3): 107—120.
- 李丕龙, 2010. 塔里木盆地构造沉积与成藏. 北京: 地质出版社, 1—7.
- 林波, 况安鹏, 等, 2021. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义: 以顺北地区1号和5号断裂为例. 石油学报, 42(7): 906—923.
- 刘宝增, 2020. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例. 中国石油勘探, 25(3): 83—95.
- 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等, 2021. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法. 地质论评, 67(2): 543—556.
- 马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 等, 2020. 塔河-顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系. 海相油气地质, 25(4): 327—334.
- 漆立新, 2016. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义. 中国石油勘探, 21(3): 38—51.
- 漆立新, 2020. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示. 中国石油勘探, 25(1): 102—111.
- 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.
- 王文博, 傅恒, 闻廖然, 等, 2021. 塔里木盆地顺北地区奥陶系碳酸盐岩层序模式及其意义. 沉积学报, 39(6): 1451—1465.
- 王玉伟, 陈红汉, 曹自成, 等, 2019. 塔里木盆地塔中北坡奥陶系微生物碳酸盐岩储层形成机制与评价. 地球科学, 44(2): 559—571.
- 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等, 2021. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制. 石油勘探与开发, 48(3): 510—520.
- 徐豪, 郭小文, 曹自成, 等, 2021. 运用方解石中流体包裹体最小均一温度确定塔河油田奥陶系油气成藏时间: 来自激光原位方解石 U-Pb 年龄的证据. 地球科学, 46(10): 3535—3548.
- 杨培星, 田景春, 张翔, 2019. 塔里木盆地顺北地区三叠系沉积相及沉积模式研究. 矿物岩石, 39(4): 86—96.
- 杨旭, 申文静, 2021. 海拉尔盆地红旗凹陷构造层特征及构造演化. 大庆石油地质与开发, 40(6): 20—27.
- 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.
- 云露, 2021a. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件. 新疆石油地质, 42(2): 136—142.
- 云露, 2021b. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义. 中国石油勘探, 26(3): 41—52.
- 曾联波, 2008. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布. 北京: 科学出版社, 101—105.
- 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.
- 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等, 2013. 塔里木盆地北缘碳酸盐岩野外构造裂缝发育规律研究. 高校地质学报, 19(4): 580—587.
- 赵乐强, 冯建伟, 2018. 岩石力学层与构造裂缝发育关系研究. 山东科技大学学报(自然科学版), 37(1): 35—46.
- 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等, 2019. 塔里木盆地顺托果勒地区中下奥陶统鹰山组与一间房组沉积相与旋回地层. 东北石油大学学报, 43(4): 1—16.
- 周鼎武, 李文厚, 张云翔, 等, 2002. 区域地质综合研究的方法与实践: 鄂尔多斯盆地—秦岭造山带地质野外实习指导书. 北京: 科学出版社, 180—182.