

引用格式:赵乐强,冯建伟.岩石力学层与构造裂缝发育关系研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):35-46.
ZHAO Leqiang, FENG Jianwei. Interrelationship study between rock mechanical stratigraphy and structural fracture development[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 35-46.

岩石力学层与构造裂缝发育关系研究

赵乐强¹, 冯建伟²

(1. 中石化胜利油田勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 裂缝性储层的层间力学性质差异是控制裂缝发育的主要因素, 准确识别岩石力学层结构并建立与裂缝分布的关系, 对于提高裂缝预测和建模精度至关重要。以库车拗陷 D 气田深层致密砂岩为例, 综合野外露头、岩心、测井、地震资料, 基于力学实验、古孔隙度恢复和数值模拟方法, 识别泥岩隔夹层和裂缝特征, 恢复古孔隙度、古弹性模量、古泊松比及古应力场, 探讨岩石力学层与裂缝发育之间的关系, 建立力学层-裂缝层综合发育模式。结果表明: 岩石力学层常以岩相、隔夹层、力学参数的垂向差异为主控因素, 单一岩性条件下, 层厚与裂缝密度负相关, 与裂缝间距正相关, 复合砂岩条件下, 层厚与裂缝密度正相关, 与裂缝间距负相关; 裂缝密度、长度与泥岩隔夹层频率负相关, 裂缝平均间距与泥质含量负相关, 在互层条件下, 砂泥岩厚度比约为 6.7 时, 裂缝密度呈现高值, 中尺度缝以层间穿透缝为主, 小尺度缝以层内缝为主; 弹性模量与基质孔隙度幂指数正相关, 泊松比则与孔隙度“躺椅式”负相关; 岩石力学层和裂缝发育对应模式可划分为水平型和褶皱型两大类, 进一步划分为厚层砂岩低密度裂缝型、中层砂岩+薄层泥岩高密度裂缝型、厚层泥岩+薄层砂岩中密度裂缝型和等厚泥岩+砂岩低密度裂缝型。

关键词: 岩石力学层; 裂缝层; 古力学参数; 深层致密砂岩

中图分类号: P548

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2018)01-0035-12

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.01.004

Interrelationship Study Between Rock Mechanical Stratigraphy and Structural Fracture Development

ZHAO Leqiang¹, FENG Jianwei²

(1. Exploration and Development Research Institute, Petro China Shengli

Oilfield Branch, Dongying, Shandong 257015, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Because of mechanical difference between layers controlling fracture development, how to identify rock mechanical stratigraphy and establish relationship with fracture distribution is important for accurate fracture prediction and modeling. Using examples from studies of field outcrops, drilling cores, logging data and seismic data, this article shows that separate identification of mechanical stratigraphy and fracture stratigraphy leads to a clearer understanding of fracture patterns and more accurate prediction of fracture attributes away from the wellbore. Mechanical stratigraphy subdivides stratified rock into discrete mechanical units defined by properties such as elastic stiff-

收稿日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572124); 国家科技重大专项(2016ZX05047-003, 2016ZX05014002-006, 2017ZX05013006-003, 2016ZX05006-007-006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(17CX05010)

作者简介: 赵乐强(1972—), 男, 山东聊城人, 高级工程师, 主要从事石油地质研究。

冯建伟(1979—), 男, 山东临朐人, 副教授, 博士后, 主要从事构造地质学与岩石学研究, 本文通信作者。

E-mail: linqu-@126.com

ness, poisson's ratio and fracture mechanics properties. The results show that lithological combination, interlayer and unconformity are basic components for fracture stratigraphy. Under single lithology condition, layer thickness has negative correlation with fracture density and has positive correlation with fracture density, in contrast, under single lithology condition, layer thickness has positive correlation with fracture density and has negative correlation with fracture density. The fracture density, length have negative relationship with interlayer frequency, and the average spacing decrease along with shale content, under alternating lithology condition, when sandstone-mudstone ratio reaches 6.7 the fracture density shows high value. Most of middle-scale fractures are developed between layers and, but most of little-scale fractures are only developed in layers. Within certain limits, positive power relationship lies between matrix porosity and elastic modulus, however negative seat-like relationship lies between matrix porosity and poisson's ratio. Finally, the mechanical and fracture stratigraphy can be divided into two main categories and subdivided into six types.

Key words: rock mechanical stratigraphy; fracture stratigraphy; paleo-mechanical parameters; deep tight sandstone

大量野外露头、岩心及地震资料分析表明,岩石物性、地层厚度以及岩性界面对断层和裂缝构造的发育至关重要,造成了层状地层间裂缝样式及密度的显著差异和不均一性。由于目前地下裂缝的分布预测存在很大难度,建立已知层状地层的属性与裂缝分布之间的关系并进行未知区域的裂缝预测和建模,对于裂缝性油气藏的勘探开发具有重要的实际意义^[1-3]。早期,主要通过观察褶皱内部层间形态的差异来评价分析各种类型岩石的变形过程以及地层界面对构造发育的影响^[4-5],基于这些层状结构的变形现象以及岩石力学测试,可以对褶皱构造样式、断层相关褶皱作用、断层形态、冲断系统几何学、断层尺度划分等的形成机制较为合理的解释。同时,Donath^[6]和 Fruth^[7]等通过室内模拟实验研究了埋藏史和成岩演化史对构造样式和岩层力学性质的控制和影响作用。后来,地层结构控制裂缝产状和力学性质这一观念逐渐地被应用到地下开启缝网的形成机制及主控因素评价当中^[8-10]。不仅地层结构影响着裂缝的产状、规模(裂缝长度、高度和开度)、级别、样式和空间展布形态,不同成岩阶段的岩石力学性质、层状结构的频率以及沉淀胶结作用也不同程度的影响着裂缝的规模和孔隙度,而且,层状地层的力学性质是控制裂缝形成和发育模式的主要因素^[11-14]。再者,层状地层的力学性质对于地下开启状态裂缝的形成也具有一定的影响,主要包括抗张强度、弹性模量、脆性指数、裂缝力学性质、单层厚度及岩性界面性质,这些参数可以直接通过室内岩石力学实验、测井解释和地震资料反演获得^[15]。

近年来研究表明,岩石力学性质之间的差异可以将地层垂向上分割为连续分布的层状结构单元^[3],这些有力学性质差异的结构层就叫做力学层,可进一步理解为岩石受力后的力学响应层。相比较来看,裂缝层这一概念在地质学界鲜有提及,通常指基于裂缝发育范围、强度及观测的裂缝参数划分出的次级构造单元,也就是说力学层和裂缝层之间可以相互替代。Stephen^[3]认为力学层概念和裂缝层概念不能混淆使用,在2008年召开的 AAPG、SPE 和 SEG 裂缝研究会议上,对于如何建立一个最直接有效的办法来区别观测到的裂缝类型及分布特征与岩石力学性质变化之间的关系,最终没有达成一致意见,而是要强调和重视岩石力学性质具有时效特性这一观点。

对于完整岩石来说,力学参数会随着成岩作用的演化而变化,成岩作用可能从沉积之后开始持续到现在,也可能发生在几十万年到几百万年之间的一段时期内。因此,在室内所测试得到的岩石力学性质不能很好地解释当时岩石破裂时的机制。为了搞清楚裂缝层和力学层之间的关系,需要开展从造缝时间到现今的地层力学性质演化研究。Stephen 等^[3]在岩心观察和野外统计的基础上,对裂缝层和力学层进行了对比分析,认识到力学结构对裂缝样式的分布具有明显的控制作用,认为岩性界面导致了软硬岩层间的应力状态转变,以及弹性模量、泊松比等强度参数的差异,最终影响着纵向上裂缝的延伸可扩展,但未实现地层力学性质的演化研究。戴俊生等^[16-18]陆续通过有限元数值模拟的方法,对砂泥岩互层低渗透砂岩储层的裂缝发育规律及垂向穿透性进行了定量评价,认为泥岩层大于 3 m 或 5 m 时,不管砂岩层多厚、裂缝都恰好不能穿透。本次研究拟以库车坳陷深层致密砂岩互层为例,从地震、测井、岩心、镜下、露头、测试相结合的古岩石力学参数的恢复出发,通过对不同级次裂缝参数的大量统计,分析砂岩、泥岩厚度、组合、成分及力学性质对裂缝发

育和分布的控制作用,建立地质参数与裂缝参数之间的相关性^[19-20],对井间裂缝分布进行有效预测。

1 地质概况

库车拗陷位于天山冲断褶皱带与塔里木板块北缘的接合部位,依其褶皱形式及隆凹成带的展布格局,由山前向盆内可进一步细分为北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、拜城凹陷、秋里塔格背斜带和阳霞凹陷五个二级构造单元^[21]。D 气田位于天山南缘秋里塔格背斜带东段(图 1),北界控边断裂为迪北断裂,南界控边断裂为东秋里塔格断裂,断裂走向均为 NEE 或近 EW 向,从下至上断穿了三叠系、侏罗系、白垩系以及新近系,并向上消失于吉迪克组内,在两条主断裂的控制下地层褶皱呈现为近 EW 走向的长轴背斜。研究目的层段古近系由下至上依次发育了库姆格列木群(EII)和苏维依组(EI),两套地层均可进一步细分为三个岩性段,每个岩性段厚度总体在 79.4~135.5 m 之间,顶部与新近系吉迪克组(N1)呈整合接触。总体上,苏维依组(EI)岩性以褐色粉砂岩、粉细砂岩为主,中部过渡部位岩性以砾岩、砂砾岩为主,夹层大量分布,多为薄层泥岩、粉砂质泥岩,库姆格列木群(EII)靠上部位发育一套泥岩、粉砂质泥岩隔层,厚度分布稳定,大约为 12~14 m,上覆吉迪克组岩性以棕红色泥岩、灰绿色泥岩条带及厚层膏盐为主,具有较强塑性变形特征,是下部储层的有效盖层。D 气田位于天山南缘的斜坡地带,古近系沉积时位于一大型扇三角洲的前缘位置,水下分流河道沉积微相发育,分流间湾和席状砂微相次之^[22]。目前古近系储层埋藏深度普遍大于 4 500 m,压实程度高,矿物之间以线接触和面接触为主,局部钙质胶结使得储层脆性变强,由于原生孔隙所剩无几,裂缝不仅是重要的储集空间,也是主要的渗流通道,对于气藏的开发和生产至关重要。

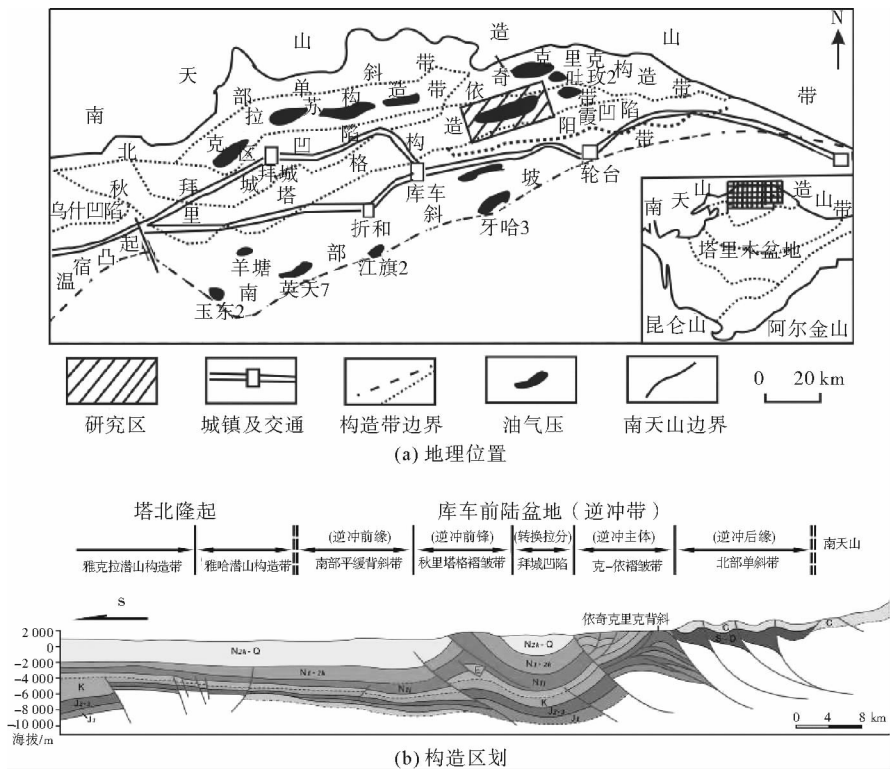


图 1 塔里木盆地 D 气田地理位置及构造区划
Fig. 1 Geological location and element division of D gas field in Tarim basin

2 野外露头裂缝的层状特征

2.1 裂缝密度测量

目前裂缝研究中,线密度、面密度、体密度是描述裂缝发育程度及总体规律的最直接参数^[23],但钻井岩

心和野外露头测量过程中,体密度和面密度测量工作繁琐且实际操作难度大,更容易受到人工认识程度的干扰,线密度测量简便易行,尤其在增加测线密度后能很好地表征裂缝整体发育强度。在库车坳陷索罕村地区设计了 2 条剖面的 4 条测线,对每条测线测量并分别统计裂缝开度、线密度、充填度、产状及力学,剔除方向性不明显的后期应力诱导缝后,共剩余 178 条裂缝,同时对露头岩性组合、岩性界面、厚度、夹层等也进行了详细统计。

2.2 裂缝分布的成层性

一般认为,强硬的岩层通常表现为脆性,裂缝一般比软弱的岩石更发育;在相同组分的岩石中,随着颗粒变细,裂缝越发育^[14]。但野外露头统计发现,从粗粒级的砾岩到砂质泥岩中裂缝均较发育,其中含砾砂岩和粉细砂岩级别的岩石中最为发育,达到 0.8 条/m 以上,与层状岩石相比,如不同级别的砂岩互层或砂岩夹薄层泥岩时,裂缝密度表现为高值(图 2、图 3)。根据镜下铸体薄片观察结果,古近纪地层内主要发育构造裂缝,其次为溶蚀缝、收缩缝和粒内粒缘缝。尽管粒内粒缘缝仅占总裂缝数量的 2.6% 左右,且主要发育在粒度较粗的砾岩、砾岩中,粒间常充填一定量的塑性泥质胶结物,但埋藏深度均大于 4 000 m 以下,压实成岩作用强烈,较常规砾岩层的脆性更强,在受力过程中较大的刚性颗粒容易发生应力集中,产生局部破裂,且绕过颗粒边缘或切穿颗粒延伸,此类裂缝在形态上表现为构造缝-粒缘粒内缝-构造缝的交替组合,具有很好的连通性和渗透性。相比较下,粗砂岩、中砂岩内裂缝密度较低,线密度都小于 0.4 条/m,而细砂岩、粉细砂岩裂缝密度较高,达到 0.7~0.8 条/m。D 气田古近系沉积时,区域构造环境相对平静,地形地貌相对平整,天山南缘作为主要的物源区,逐渐向北退缩,南部前缘隆起开始成为主要物源区,在 D 气田地区发育大量的水下分流河道微相、河口坝微相,平面上展布广,常连片分布,加上水流搬运距离较远,碎屑岩成分成熟度和结构成熟度都较山前地区和隆起周围要高,石英含量可达到 50%~80%。沉积后的储层在后期受到地层水矿物胶结作用,脆性矿物如石英、方解石和白云石等大量发育,增强了岩石的整体刚性特征,更容易形成构造裂缝。

一般情况下,随着砂体单层厚度的变小,裂缝会越发育,单层厚度越大,裂缝平均间距越大,而且两者呈反比例关系^[24]。本次野外统计表明,不管单砂体或者单泥岩层内都表现为薄层裂缝密度大于厚层裂缝密度,曲线呈座椅式负相关,即单层厚在 1~4 m 区间内裂缝密度降低较快,单层厚在 4~8 m 区间内裂缝密度几无变化,单层厚在 8~12 m 区间内裂缝密度急速降低,泥岩和粉砂质泥岩层裂缝稀疏,不同厚度岩层中裂缝密度差别不大(图 4(a)、4(b)),当大套泥岩中夹厚约 1~3 m 的砂岩裂缝分布比较集中。而对于复合砂体

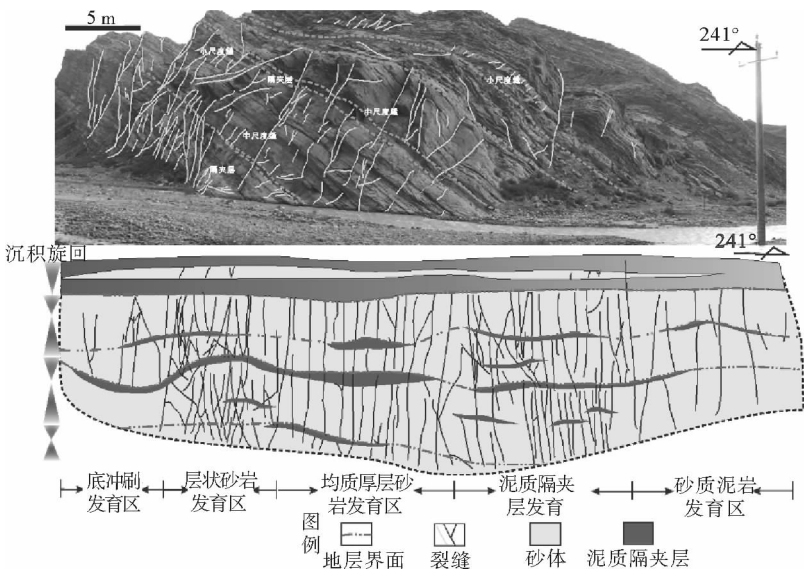


图 2 天山南缘库车河野外剖面裂缝发育模式

Fig. 2 Fracture development mode of Kuqa field outcrops at the South Tianshan piedmont

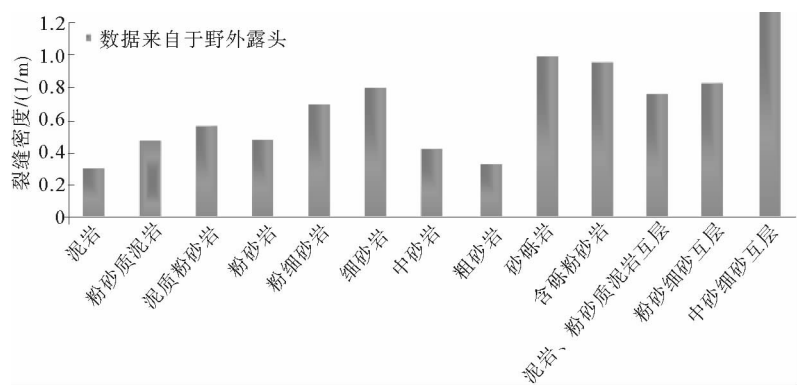


图 3 库车坳陷野外露头不同岩性中的裂缝发育程度对比

Fig. 3 Relationship between fracture density and lithology of the field profile

来说,其裂缝发育情况以及与单岩性层或单层砂体的裂缝发育情况有所不同,甚至完全不相同。由图 4(c)、4(d)可以看出,露头区裂缝密度与复合砂体厚度呈正相关关系,即厚度在小于 7.5 m 时,裂缝密度迅速增大,超过 7.5 m 后基本呈水平趋势,且裂缝平均间距与复合砂体厚度呈负相关关系,与之相比单砂体厚度与裂缝间距呈正相关关系。从砂体厚度与裂缝平均长度的拟合关系来看,单砂体曲线具正相关性,在砂体厚度大于 7.5 m 后基本呈水平趋势,而复合砂体曲线则在 4.5 m 处出现拐点,即在 4.5 m 以下裂缝长度逐渐减小,在 4.5 m 时达到最低值,然后迅速增加直到 7.5 m 趋于水平。可见,裂缝发育的影响因素不仅仅是单层厚度,还受岩性、隔夹层、岩性韵律组合的影响。在露头区陆相扇三角洲前缘砂体发育,但在水进期常夹杂大量泥质隔夹层,不仅改变了储层的整体结构,也影响着力学性质的连续性,造成了局部应力场的变化和集中,影响着裂缝的发育。以上分析说明厚层均质砂岩内裂缝并不发育,层状砂岩或含泥质夹层砂岩裂缝相对发育。

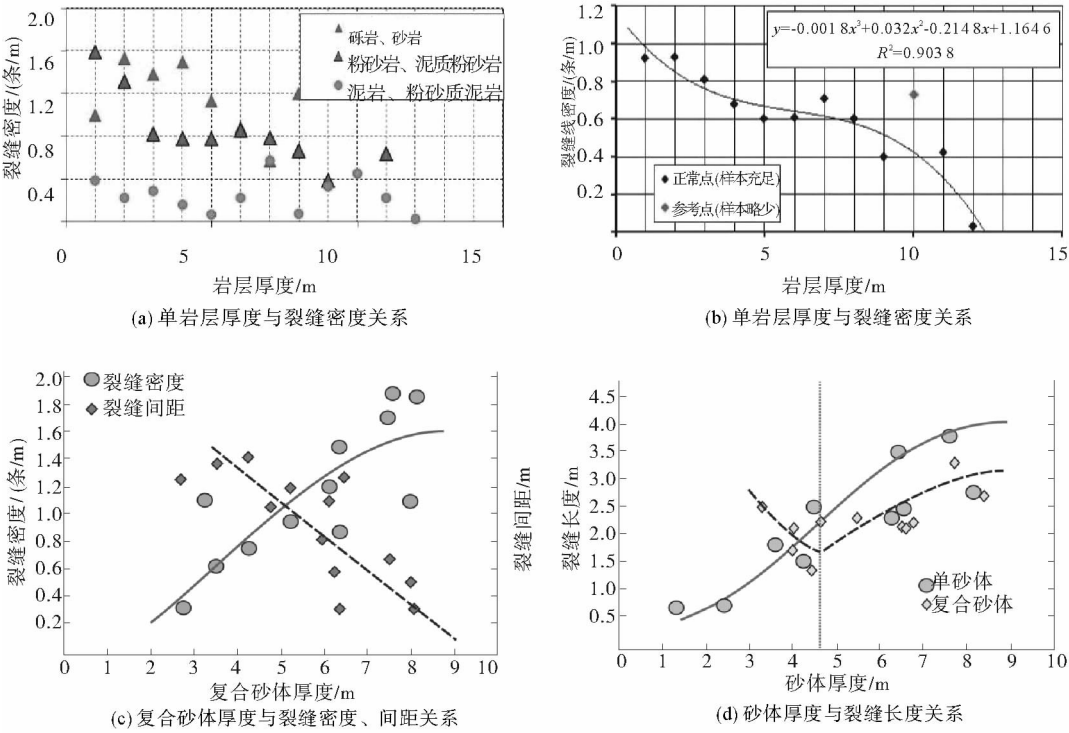


图 4 库车坳陷 D 气田裂缝发育与地层厚度关系

Fig. 4 Relationship between fracture development and layer thickness in D gas field, Kuqa depression

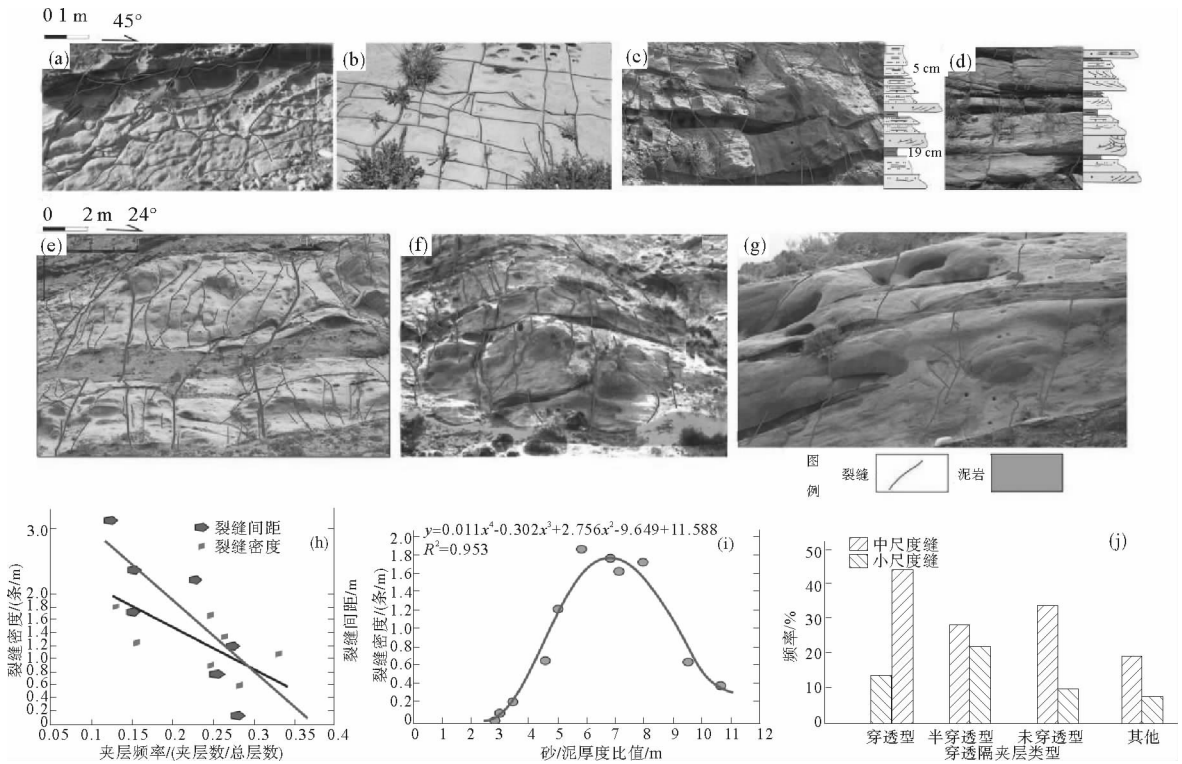


图5 天山南缘库车河野外露头裂缝发育模式

Fig. 5 Fracture development mode of tight sandstone in Kuqu field outcrops at the South Tianshan piedmont

为了研究泥岩隔夹层对裂缝发育的控制影响作用,可首先将裂缝进行分级归类。参考现行裂缝分类划分标准,同时考虑几何形态、成因机制,划分出三种尺度类型:大尺度缝、中尺度缝和小尺度缝^[25]。大尺度缝与微断层尺度相当,但断距不明显,空间上分布相对稳定,延伸距离一般超过 1 km,开度大于 1 mm,纵向上可同时切穿几套岩层,主要形成于区域应力环境中;中尺度缝一般指纵向上可切穿几个单砂层的裂缝,受泥岩隔层限制,延伸距离一般位于 10 m 至几百米,主要形成于区域应力环境中,局部受到次级应力场影响而发生走向变化;小尺度缝是指受局部应力场控制产生或较大尺度缝被隔夹层分割成的层内裂缝,受塑性夹层和物性变化影响明显,空间尺度一般小于 10 m,与较大规模缝呈斜交关系。这些夹杂在致密砂岩中的一系列泥岩隔夹层,在深层高温高压条件下具有强烈的塑性特征,一方面积累了部分塑性势能,同时降低了砂岩中的弹性应变能,使脆性砂岩更难于产生破裂,另一方面却造成了地层结构的强烈非均质性,容易在岩性界面附近发生应力集中,使周围脆性砂岩更容易产生裂缝。两者看似矛盾,但由前面分析可知,厚层砂岩产生的裂缝间距大、延伸长,层状复合砂岩或含夹层厚砂岩却在一定范围内随着厚度增加裂缝密度迅速增大,只是裂缝规模相对变小,且通常在岩层内发育,要么终止于岩性界面上,要么极少穿越岩层界面或岩性界面后发生产状改变。因此泥岩隔夹层的发育,对岩石力学机制起到减缓作用,降低了裂缝的穿透程度(图 5(a)~5(g)、5(h)~5(i))。通过对 77 条中尺度缝的统计发现,直接切穿一到几个夹层的占 46.5%,被夹层限制且消失于砂体内部的占 12%。对 89 条小尺度缝的统计发现,能够穿透一个夹层的占 15.5%,首尾延伸被夹层限制的占 37%左右。统计结果显示两者之间存在一定的反比例关系,即裂缝的规模越大越容易切穿夹层,以层间缝为主,小尺度缝以层内缝为主(图 5(j))。进一步统计发现,裂缝的线密度、长度与泥岩夹层频率也呈反比例关系(图 5(h)~5(i)),即泥岩夹层频率越高,裂缝密度越低,延伸距离越近。另外,裂缝间距与泥质含量呈反比例的关系,说明随着岩石矿物颗粒越小,岩层厚度一般越薄,应力分布越集中,同时泥质含量的增加,更增强了岩层微观结构的非均质性,进一步造成了应力的集中,容易产生小规模裂缝。重点选取几个典型的砂泥岩互层段进行统计发现,当砂/泥厚度比值为 6.7 左右时,裂缝密度达到最高值,即裂缝最发育,

小于或超过此范围时裂缝密度又开始降低。造成这种现象的原因很可能是由于砂/泥厚度比位于此范围时,地层整体结构非均质性强,砂岩中应力迅速集中并产生大量裂缝,然后逐渐扩展到泥岩内或切穿泥岩。

3 岩石力学层与裂缝发育关系建立

3.1 岩石力学参数分布与裂缝发育关系

岩石力学层的本质差异体现在岩石物理性质的差异上,从而制约着裂缝的发育及分布规律。为了获得连续的岩石力学参数剖面,在单轴压缩试验、三轴压缩试验及测井资料计算的基础上,先将单轴测试结果进行围压虚拟设定,逐步校正到三轴测试条件下,再将测试点深度校正到测井曲线深度上,并与测井计算结果进行对比分析,获得静态力学参数和动态力学参数之间的关系公式,最后以静态测试结果为准,对连续的测井计算结果校正为静态力学参数曲线。从D气田沿背斜长轴的近东西向连井剖面来看,岩石力学参数如弹性模量(E)和泊松比(U)的纵向分布规律与裂缝密度具有较好的一致性,总体上弹性模量高、泊松比低的部位裂缝相对发育(图6)。如D2-14井泥岩发育,砂岩往往以夹杂于厚层泥岩中的形式出现,经力学实验约束下的测井力学解释及动静态校正后,弹性模量相对其它井要低的多,裂缝发育密度呈现低值。并不是弹性模量高裂缝就一定发育,综合前期研究发现,厚层致密砂岩具有高的弹性模量和低的泊松比,但裂缝密度低、间距大、规模大,含泥质夹层的层状复合砂岩则密度变大,且随着夹层频率的增大呈现高值,如 EI_1-EI_2 之间的厚层砂岩裂缝发育程度明显低于 EI_3-EI_4 之间的层状含夹层复合砂岩。对比裂缝密度和力学参数纵向分布趋势,裂缝密度由 EII_3 至 EI_1 具有明显的旋回特征,与力学参数的旋回特征基本吻合,同时又可以反映在岩性及其组合变化方面。由于库姆格列木群(EII)和苏维依组(EI)共发育四套区域性泥岩隔层, EII_1 隔层厚度最大,在13.2~41.5 m之间,偶夹薄砂层,由西向东减薄, EI_4 底部泥岩厚度变化大,位于3.84至20.1 m之间,在局部井变薄, EII_2 底部隔层的厚度较均一,在11 m左右,西部连续性好,东部偶有薄砂层, EI_3 隔层厚度最薄,横向连续性差,局部含较厚砂体。垂向上,泥岩隔层附近的裂缝密度迅速降低,甚至改变产状及规模延伸到泥岩内或消失;平面上,隔层控制着裂缝的分布趋势,即从西向东裂缝密度逐渐升高。可见,致密砂岩储层中的稳定隔层起着控制低级序断层及大尺度裂缝发育的作用,不连续夹层则控制着小尺度裂缝发育和延伸,形成大量层内缝,而且以 EI 和 EII 之间的局部不整合为界限,上部裂缝相对下部更为发育,上部裂缝倾向以SSE和NNW为主,SSW向和NNE次之,下部则以NNW和NW为主,SSE次之,在界限附近裂缝密度出现大范围低值区。可见,岩石力学层是以泥岩隔层、不整合面为界限,以岩性组合方式为主导,局部以砂层组界面和泥质夹层为界限的横向上连续分布的力学结构单元,在受力过程中控制着裂缝的空间发育特征和垂向旋回性。

3.2 岩石力学-裂缝层发育地质模式及主控因素

野外露头、岩心观察及数值模拟结果同样证明了岩石力学层和裂缝层存在的合理性及可靠性,两者基于岩石力学性质及应力分布紧密联系在一起。作为一种复合地层,多套岩石力学层在受力过程中不再是单纯的有规律的各向均质变形和破坏,而是可以简化为横向均质破坏和纵向复杂变形破坏两种基本类型,此时弹性模量、泊松比、密度、抗剪强度和抗张强度属于复合力学强度范畴。由于研究区埋藏深,构造解析认为裂缝形成时期岩层埋深约3 500~4 000 m,上覆岩层密度按 2.517 g/cm^3 计算,该深度产生约85~105 MPa的下压力(即垂向应力)再减去孔隙流体所承受的压力得到岩层顶面所受垂向有效应力范围为40~55 MPa,地应力状态属于III类。因此根据拉-剪复合破裂准则,均质厚层砂岩的破裂方式以剖面高角度共轭剪切缝为主,兼具走滑性特征,当泥质夹层大量出现时,岩性界面处派生出局部张应力造成张性缝的产生,由于从山前向盆内最大有效古应力值总体呈降低趋势,即越向山前,应力值越高,地应力状态开始向II类转换,以发育水平共轭剪切缝和高角度缝为主,在背斜变形隆升过程中局部应力场改变派生张应力环境,这时应力场分布对裂缝分布起主导作用,岩石力学层则在垂向上起封隔作用,如稳定隔层常成为力学中和面,中和面之上以张性缝为主,之下以剪切缝和滑脱缝为主,当厚度(EII_1)达到一定值时,会阻断次级断层的发育,相应地,背斜前翼应力强度明显高于后翼,裂缝密度也明显高于后者,但总体上由于两者都处在应力状态的过渡带,因此网状缝十分发育。综合考虑岩相、厚度、夹层、地应力及褶皱程度,可将岩石力学层-裂缝层划分为两大类:水

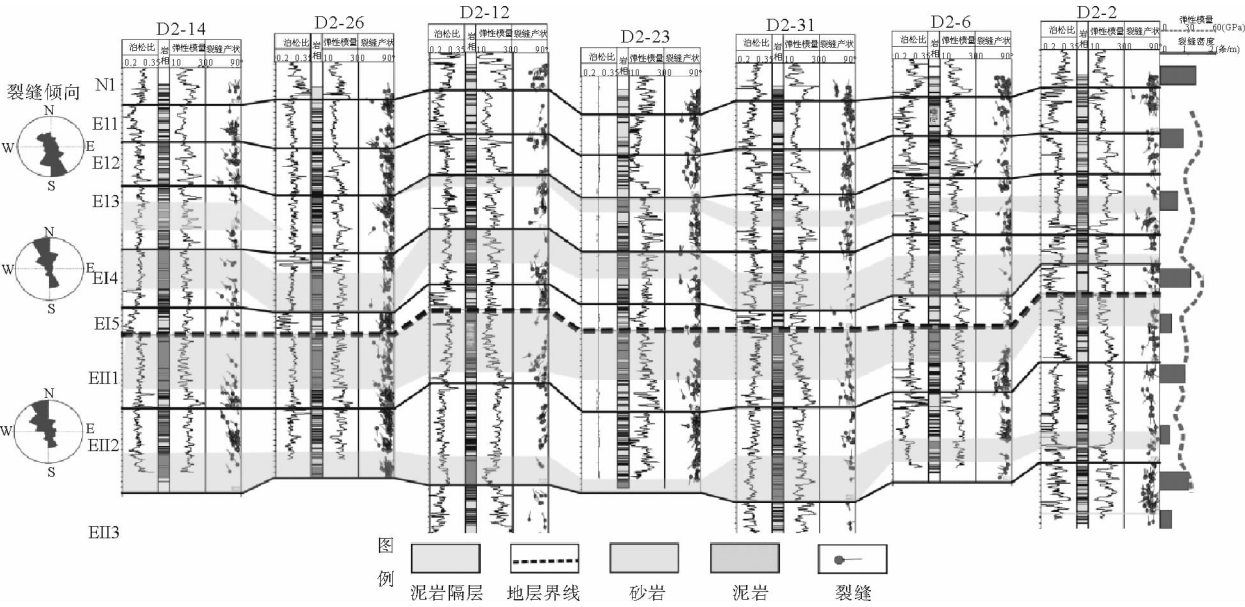


图 6 连井力学参数与裂缝关系剖面

Fig. 6 Relational graph between fractures and mechanical parameters in connecting-well section

平型和褶皱型,水平型以层间力学参数的差异为裂缝发育的主控因素。水平型进一步细分为厚层砂岩低密度裂缝型、中层砂岩+薄层泥岩高密度裂缝型、厚层泥岩+薄层砂岩中密度裂缝型和等厚泥岩+砂岩低密度裂缝型,褶皱型以层间力学参数差异为主,同时受控于褶皱形态及地应力状态,进一步细分为顶部冲起层状背斜型和顶部地堑层状背斜型(图 7)。

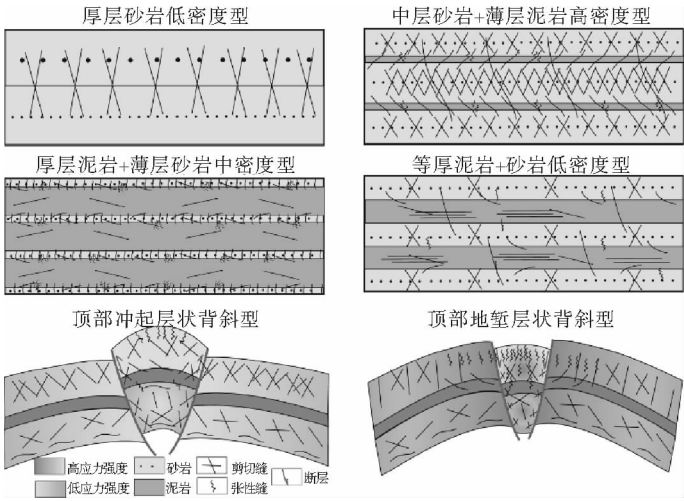


图 7 岩石力学层-裂缝层对应发育模式分类

Fig. 7 Division for corresponding development modes between rock mechanical stratigraphy and fracture stratigraphy

厚层砂岩低密度裂缝型力学层-裂缝层以厚层砂岩为主,有时为中层砂岩的垂向叠加体,常发现于在水下分流通河道微相中,岩性多以含砾砂岩、中砂岩、细砂岩等为主,受力后应力分布均匀,积聚的应变能密度低,通常产生规模较大的低密度、大间距大尺度缝,延伸远,共轭缝发育,如图 5(a)、5(b)中所示,位于库车河野外的厚层均质细砂岩中共轭剪切缝异常发育,平面连通性好、单条延伸长,但间距相对小,这种模式在图 6 中 D2-12 井、D2-3 井 D2-6 井、D2-3 井 EI₁ 层也有明显特征;中层砂岩+薄层泥岩高密度裂缝型力学层-裂缝层

以中厚层砂岩夹大量薄层泥岩或一定厚度的隔层为主,砂岩厚度远远大于泥岩厚度,这种地层仍具有较高的弹性模量和脆性特征,只是软弱夹层的存在加剧了应力和能量在砂岩内迅速聚积,并产生较高密度的层间共轭缝及部分穿层大尺度缝,也有少量泥岩界面的转换缝,常常先在泥岩内产生后低角度延伸入泥岩内,如图2、图6所示,一旦泥岩夹层出现,裂缝密度迅速增加,产状也变得杂乱,部分小尺度缝会被夹层限制,同样图6中D2-23井EII₂层也显示了厚层砂岩中夹杂薄层泥岩时,裂缝密度为高值;厚层泥岩+薄层砂岩中密度裂缝型力学层-裂缝层以厚层的韧性泥岩为主,夹薄层砂岩,砂岩多以河道侧缘、前缘席状砂微相的粉细砂岩、粉砂岩为主,通常这种地层内极少发育裂缝,但当广泛分布或应力作用强、持续时间长时,应力会逐渐转移到薄层砂岩内,从而产生一定数量的层内缝,常表现为中等密度的高角度缝,另有一些在岩性界面处的低角度缝延伸入泥岩后很快消失或终止,有的则顺层或岩性界面滑脱,因为露头泥岩难以保存,这种现象主要出现在研究区南部的钻井岩心中,如图6中的三套稳定隔层附近裂缝密度呈明显低值,隔层内裂缝零星分布,常由断层的强烈活动诱导发育;等厚泥岩+砂岩低密度裂缝型力学层-裂缝层是一种常见的互层型地层组合方式,通过有限元裂缝发育数值模拟结果,不论在多大的应力条件下此类型中的砂岩和泥岩内裂缝密度都表现为低值,与厚层泥岩内的砂岩裂缝分布密度相近,这在图6中的D2-B1井EII内部表现较好,即砂岩、泥岩稳定互层发育时,裂缝密度低且呈中低角度发育。顶部冲起层状背斜型力学层-裂缝层同时考虑了横向应力分布和纵向力学参数分布,这种背斜往往属于中低幅度背斜,发育在前陆冲断带的前缘位置,埋藏深度大,受力后受高围压影响,隆升幅度受限制,整体仍以挤压应力为主,广泛发育大量高角度剪切缝和共轭缝,仅在背斜的最顶部发育少量张性缝和扩张缝(图7),如库车坳陷内的大北、克深气田属于典型的深层、超深层致密储层,背斜幅度相对D气田低200 m以上,顶部以大规模次级逆冲断层为主,裂缝不甚发育且以剪切缝为主,张性缝仅出现在背斜枢纽部位;顶部地堑层状背斜型力学层-裂缝层则正好相反,埋藏深度浅,隆升幅度大,随着背斜的进一步变形及挤压能量的消耗,顶部应力状态发生改变,最大主应力转移到垂向上,控制产生了核部的大量张性缝和小型地堑发育,向两翼逐渐过渡为剪切缝和共轭缝,但这两种类型的总体裂缝发育特征仍然以层间的力学性质差异为主控因素,如不论泥岩隔层位于背斜的何种位置都不会产生可观的裂缝系统,这在D气田表现的非常明显,背斜顶部发育大量张性缝,尽管延伸短,但开度大、渗透性好,与密集正断层连接后组成垂向渗流通道,同时也会引起水锥破坏气藏生产。

4 岩石力学层约束下的裂缝分布预测

为了准确预测裂缝的空间分布,基于多因素约束的综合地质建模平台,首先对深度域的三维地震资料进行测井约束下的反演,计算获得地层弹性模量、泊松比、密度,根据力学参数的空间变化划分岩石力学层,建立气藏构造地质模型和三维力学模型(图8);其次,采用有限元法进行三维岩石力学参数约束下的古应力场、现今应力场模拟,建立应力-应变与裂缝参数之间的定量关系式,计算裂缝密度空间分布^[16];再次,基于岩石力学层及应力场计算得到的裂缝密度或强度体,同时考虑岩相、夹层频率、断层距离及褶皱曲率等多重地质因素对裂缝发育的控制影响程度,对裂缝强度体进行权重约束雕刻,获得最可靠的裂缝密度分布范围,最终建立离散裂缝网络地质模型(图9),模型结果与实际成像测井解释和岩心观察统计吻合率达到85%以上。

模拟结果表明:具不同弹性模量、泊松比参数的岩石力学层在空间上对裂缝的分布约束差异明显。总体上,如EI₅层细砂岩、中砂岩岩相约束下的裂缝强度总体高于粉砂岩、泥质粉砂岩的裂缝强度,且以细砂岩裂缝强度最高,粉砂岩和中砂岩其次,泥质粉砂岩最低,根据前面统计结果显示细砂岩的弹性模量相对为高值,泥质粉砂岩则呈现低值。但在背斜顶部地区弹性模量分布中等,含有一定数量的夹层,裂缝密度却较为发育,但在背斜的鞍部D2-27、D2-28井附近弹性模量整体为高值,但裂缝密度一般或较低,参考喜马拉雅期最大有效古应力场分布,应力强度(最大主应力与最小主应力之差)较背斜顶部和翼部都要低的多,通常应力强度越大岩石越容易破裂。由于研究区物源方向以NNE向为主,三角洲砂体厚度具有明显从北向南、从东向西减薄的趋势,全区稳定分布的4套隔层阻碍了裂缝的发育,有效性好,泥岩夹层则在EI₁、EI₅、EI₂层内零星分布,西部较东部多且厚度大、连续性好。垂向上,EII₁、EI₄、EII₂、EI₃层内以发育厚层泥岩+薄层砂岩中

密度型裂缝层为主,以等厚泥岩+砂岩低密度型裂缝层为次, EI₁、EI₅、EI₂ 以发育中层砂岩+薄层泥岩高密度型裂缝层为主,以厚层砂岩低密度型裂缝层为次, EI₃ 以发育厚层砂岩低密度型裂缝层为主, D 气田总体上符合顶部地堇层状背斜型裂缝发育模式。平面上,背斜翼部以发育水平型裂缝层为主,背斜顶部以发育褶皱型裂缝层为主,其中,北翼的东部以中层砂岩+薄层泥岩高密度型裂缝层发育为主,以厚层砂岩低密度型裂缝层为次,北翼的西部则以发育等厚泥岩+砂岩低密度型裂缝层为主,南翼的东部以等厚泥岩+砂岩低密度型裂缝层为主,以厚层泥岩+薄层砂岩中密度型裂缝层为次,南翼的西部整体以发育厚层泥岩为主,裂缝密度相对最低,局部有厚层泥岩+薄层砂岩中密度型裂缝层发育,背斜核部以发育厚层砂岩低密度型裂缝层为主,偶见中层砂岩+薄层泥岩高密度型裂缝层发育(图 9)。因此,深层围压条件下裂缝层分布特征不仅受控于岩石力学层,同时也受控于构造应力场,毕竟构造应力是产生裂缝的直接驱动力,或者说裂缝层是现今裂缝分布的结果,岩石力学层则是岩石力学参数和应力场的耦合。

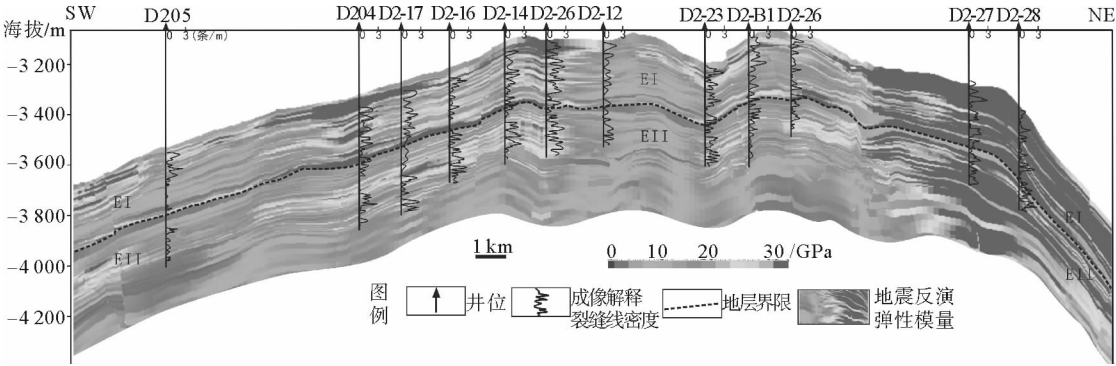
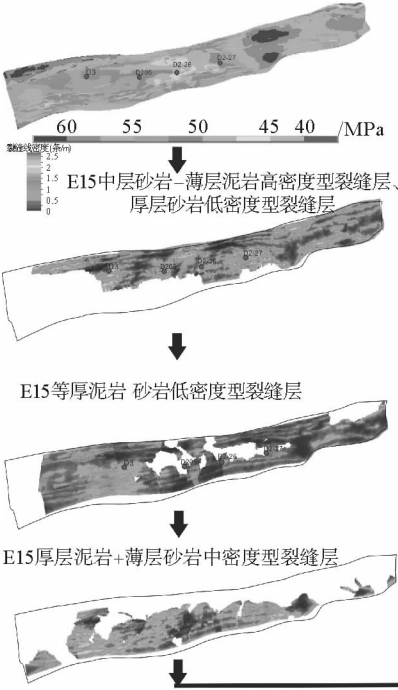


图 8 D 气藏古近系弹性模量与单井裂缝密度关系图

Fig. 8 Elastic modulus and single-well fracture density in Paleogene formation of D gas reservoir

E15喜马拉雅期最大有效主应力分布



E15裂缝离散网络地质模型

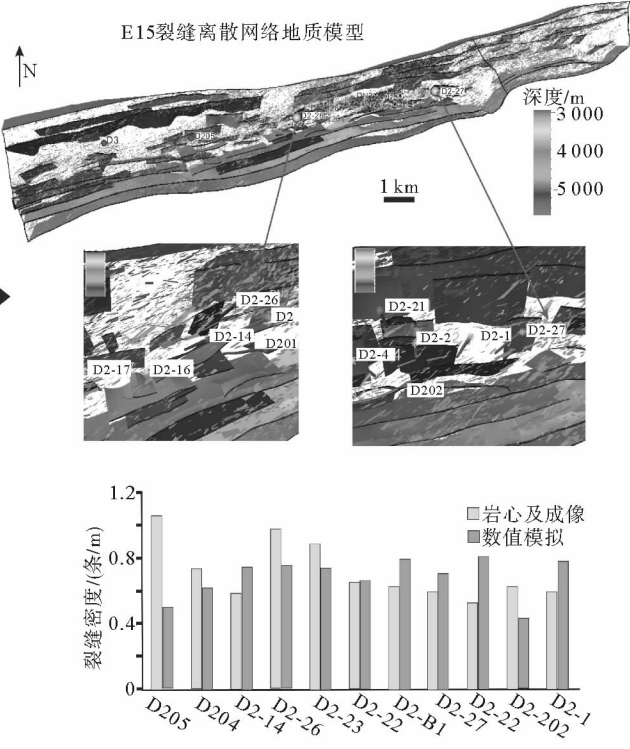


图 9 D 气藏古近系力学参数约束下的离散裂缝地质模型

Fig. 9 Geological model of discrete fracture network restricted by paleo-mechanical parameters in Paleogene formation of D gas reservoir

由此可见,岩石力学层的识别和划分对于裂缝预测和建模研究至关重要,只有划分岩相组合,恢复古力学参数及古应力场分布,确定岩石力学层界面及应力状态,才能从根本上解决裂缝的形成机制和演化规律,最终获得可靠的裂缝地质模型,服务于裂缝性储层尤其是深层致密气藏的勘探开发,最终有效指导储层压裂及开发方案的调整。

5 结论

1) 单一岩性条件下,裂缝密度与层厚负相关,即薄层单砂岩或泥岩层裂缝密度要大于厚层裂缝密度,单层厚在1~4 m时裂缝密度降低较快,在4~8 m时密度几乎无变化,在8~12 m时裂缝密度急速降低,当厚层泥岩中夹厚约1~3 m砂岩时裂缝发育集中;复合砂岩条件下,裂缝密度与厚度正相关,即厚度小于7.5 m时,裂缝密度迅速增大,超过7.5 m后基本无变化,裂缝间距与复合砂岩厚度负相关,则与单一岩性厚度正相关。

2) 裂缝密度、长度与泥岩隔夹层频率负相关,裂缝平均间距与泥质含量负相关,容易产生小尺度缝,在互层条件下,砂泥岩厚度比约为6.7时,裂缝密度最大并向两端逐渐减小,中尺度缝中穿透比例大,以层间缝为主,小尺度缝中穿透比例小,以层内缝为主。

3) 岩石的力学参数分布差异是岩石力学层的根本体现,恢复地层的古孔隙度并建立与力学参数之间的演化关系是恢复古力学参数及预测裂缝的有效途径,弹性模量与基质孔隙度幂指数正相关,泊松比则与孔隙度“躺椅式”负相关,孔隙度大于15%后,弹性模量渐水平,泊松比则迅速减小,孔隙度和砂质百分含量与裂缝密度正相关,孔隙度大于11%后,裂缝密度渐水平,砂质百分含量大于70%后,裂缝密度迅速增大。

4) 岩石力学层受控于岩相、隔夹层、不整合及力学强度参数分布,裂缝层则是岩石力学层受构造应力作用后的结果,同时受褶皱和断层的影响,可将岩石力学层-裂缝层对应模式划分为水平型和褶皱型。水平型进一步划分为厚层砂岩低密度裂缝型、中层砂岩+薄层泥岩高密度裂缝型、厚层泥岩+薄层砂岩中密度裂缝型和等厚泥岩+砂岩低密度裂缝型,对于指导深层致密气勘探开发具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1]NARR W. Fracture density in the deep subsurface: Techniques with application to Point Arguello oil field[J]. AAPG Bulletin,1991,75:1300-1323.
- [2]MORETTINI E. Combining high-resolution sequence stratigraphy and mechanical stratigraphy for improved reservoir characterization in the Fahud field of Oman[J]. Georabia,2005,10(3):17-44.
- [3]LAUBACH S E,OLSON J E,Gross M R. Mechanical and fracture stratigraphy[J]. AAPG Bulletin,2009, 93(11):1413-1426.
- [4]WILLIS B. Mechanics of Appalachian structure: U. S. geological survey[R]. 13th Annual Report,1894,211-281.
- [5]CURRIE J B,PATNODE H W,TRUMP R P. Development of folds in sedimentary strata[J]. Geological Society of America Bulletin,1962,73:655-673.
- [6]DONATH F A. Strength variation and deformational behavior of anisotropic rock[J]. Elsevier,1964,281-298.
- [7]FRUTH L S,ORME G R,DONATH F A. Experimental compaction effects in carbonate sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1966,36(3):747-754.
- [8]LARSEN B,GUDMUNDSSON A,GRUNNALEITE I,et al. Effects of sedimentary interfaces on fracture pattern, linkage, and cluster formation in peritidal carbonate rocks[J]. Marine and Petroleum Geology,2010,27:1531-1550.
- [9]WENBERG O P,SVÄNÅ T A,AZIZADEH M. Fracture intensity vs. mechanical stratigraphy in platform top carbonates: The Aquitanian of the Asmari formation, Khaviz anticline, Zagros, SW Iran[J]. Petroleum Geoscience,2006,12(3): 235-246.
- [10]LEZIN C,ODONNE F,MASSONNAT G J,et al. Dependence of joint spacing on rock properties in carbonate strata[J]. AAPG Bulletin,2009,93(2):271-290.
- [11]BAI T,POLLARD D D,GAO H. Explanation for fracture spacing in layered materials[J]. Nature,2000,403(6771):753-756.
- [12]OLSON J E. Predicting fracture swarms the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint

- spacing in rock[J]. Geological Society (London) Special Publication, 2004, 231: 73-87.
- [13] NOTENA K V, CLAES H, SOETE J, et al. Fracture networks and strike-slip deformation along reactivated normal faults in Quaternary travertine deposits, Denizli Basin, Western Turkey[J]. Tectonophysics, 2013, 588: 154-170.
- [14] JU W, HOU G T, ZHANG B, et al. Insights into the damage zones in fault-bend folds from geomechanical models and field data[J]. Tectonophysics, 2014, 610: 182-194.
- [15] AMEEN M S, SMART B G D, SOMERVILLE J M, et al. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 430-444.
- [16] 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.
- [17] 徐素国, 梁卫国, 莫江, 等. 软弱泥岩夹层对层状盐岩体力学特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 878-882.
XU Suguo, LIANG Weiguo, MO Jiang, et al. Influence of weak mudstone intercalated layer on mechanical properties of laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 878-882.
- [18] 商琳, 戴俊生, 冯建伟, 等. 砂泥岩互层裂缝发育的地层厚度效应[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 35-41.
SHANG Lin, DAI Junsheng, FENG Jianwei, et al. Effect of strata of thickness effects on fracture development in sand-mud interbed[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 35-41.
- [19] 侯贵廷. 裂缝的分形分析方法[J]. 应用基础与工程学报, 1994, 2(4): 299-305.
HOU Guiting. Fractal analysis of fractures[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1994, 2(4): 299-305.
- [20] 屈海洲, 张福祥, 王振宇, 等. 基于岩心-电成像测井的裂缝定量表征方法-以库车坳陷 ks2 区块白垩系巴什基奇克组砂岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 425-432.
QU Haizhou, ZHANG Fuxiang, WANG Zhenyu, et al. Quantitative fracture evaluation method based on core-image logging: A case study of Cretaceous Bashijiqike formation in ks2 well area, Kuqa depression, Tarim basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 425-432.
- [21] 曾联波, 王贵文. 塔里木盆地库车山前构造带地应力分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 59-60.
ZENG Lianbo, WANG Guiwen. Distribution of earth stress in Kuche thrust belt, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 59-60.
- [22] 杨帆, 孙玉善, 谭秀成, 等. 迪那 2 气田古近系低渗透储集层形成机制分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 39-42.
YANG Fan, SUN Yushan, TAN Xiucheng, et al. Formation mechanism of Paleogene low permeability reservoir in Dina 2 gas field, Tarim basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 39-42.
- [23] 赵文韬, 侯贵廷, 孙雄伟, 等. 库车东部碎屑岩层厚和岩性对裂缝发育的影响[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 603-610.
ZHAO Wentao, HOU Guiting, SUN Xiongwei, et al. Influence of layer thickness and lithology on the fracture growth of clastic rock in East Kuqa[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 603-610.
- [24] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 101-125.
- [25] NAGAMAN B, JAYARAM V. Fracture testing at small-length scales: From plasticity in Si to brittleness in Pt[J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2016, 68(1): 94-107.

(责任编辑: 李 磊)