

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

赫俊民¹,王小焱²,孙建芳³,孙小童³,史今雄²,曹东升²,曾联波²

[1. 中国石化 胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:利用野外露头、岩心、测井和铸体薄片资料,对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其影响因素进行研究。塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝主要分为构造裂缝、成岩裂缝和复合成因裂缝3种类型。其中,构造裂缝以剪切裂缝为主,其次为张裂缝;成岩裂缝主要为水平层理缝,其次是成岩缝合线;复合成因裂缝主要包括构造-成岩裂缝、构造-表生裂缝和岩溶裂缝。构造剪切裂缝是该区的主要裂缝类型,发育有北东-南西向、北西-南东向、近东-西向和近南-北向4组,它们在不同层位的发育程度存在明显的差异性;其中,北东-南西向裂缝为层位的优势裂缝发育方向。裂缝的倾角主要在70°以上,以高角度裂缝为主。裂缝的纵向延伸长度受岩石力学层控制,裂缝在岩石力学层内发育,并终止于力学层界面上。裂缝密度在纵向上和平面上存在明显的非均质性,主要受沉积作用、构造作用和岩溶作用等地质因素控制。随着塑性矿物含量与岩石层厚的增加,裂缝密度呈逐渐降低的变化规律。断层与褶皱构造对裂缝的发育程度有重要影响,使得不同构造部位的裂缝密度存在明显的差异;距断层面与褶皱轴面的距离越远,裂缝密度也逐渐降低。岩溶作用影响溶洞上部岩层中的裂缝发育程度;在溶洞上部岩层中,主要发育近直立裂缝、斜交裂缝和近水平裂缝3种产状类型的裂缝系统。

关键词:非均质性;裂缝密度;裂缝类型;裂缝走向;天然裂缝;中-下奥陶统;碳酸盐岩储层;塔河地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, Northern Tarim Basin

Hao Junmin¹, Wang Xiaoyao², Sun Jianfang³, Sun Xiaotong³, Shi Jinxiong², Cao Dongsheng², Zeng Lianbo²

[1. Geophysical Prospecting Institute of Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257022, China;

2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China]

Abstract: The characteristics of and major factors controlling the natural fracture development in the Middle-to-Lower Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area are studied through observations of outcrops, cores and casting thin sections, as well as logging data analysis. The natural fractures in the study area come in three types: tectonic fractures, diagenetic fractures and composite fractures. Specifically, the tectonic fractures are mainly shearing fractures, followed by tensional fractures; the diagenetic fractures are mainly bedding-parallel fractures, followed by diagenetic stylolites; the composite fractures mainly include structural-diagenetic fractures, structural-epigenetic fractures and karst fractures. The tectonic shearing fractures are dominant in the study area, developed in four groups trending NE-SW, NW-SE, nearly EW and nearly NS, respectively. However, they differ remarkably in different horizons in terms of development degree, and occur preferentially along the NE-SW direction in these horizons. High-angle fractures are dominant with a dip angle of over 70°. The longitudinal propagation length of the fractures is controlled by the rock mechanical stratigraphy, within which the fractures are developed, and on the interface of which the fractures terminate. Fracture density shows obvious hetero-

收稿日期:2018-07-11;修订日期:2019-06-27。

第一作者简介:赫俊民(1968—),男,高级工程师,勘探数据资源管理及勘探信息化建设相关技术研究。E-mail:slcchejm@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX0514-002)。

geneity both vertically and horizontally, mainly controlled by geological factors including sedimentation, tectonics and karstification. Along with the increase of plastic mineral contents and rock layer thickness, the fracture density gradually decreases. Faults and folds play a vital role in fracture development, leading to evident variation in fracture density at various structural locations. The fracture density tends to gradually decrease along with the increasing of distance to fault plane and fold axial plane. Besides, karstification affects the degree of fracture development in the upper strata of karst cavens, where there are mainly three types of fracture systems, i. e. nearly vertical fractures, obliquely-crossing fractures and nearly horizontal fractures.

Key words: heterogeneity, fracture density, fracture type, fracture strike, natural fracture, Middle-to-Lower Ordovician, carbonate reservoir, Tahe area

天然裂缝主要指储层在成岩作用及后期构造作用中形成的面状构造^[1]。随着裂缝性油气藏的不断发现,关于裂缝的研究国内外主要集中在裂缝的定量表征和分布预测两个方面。近年来,碳酸盐岩裂缝的研究也成为了研究的热点。但由于碳酸盐岩岩性的特殊性,裂缝的研究成为研究的重难点。通过对岩心与成像测井等资料的分析,发现塔里木盆地塔河地区奥陶系碳酸盐岩中裂缝既是储集空间,又是流动的通道。不同学者对此已经做了大量的工作,基于地震高分辨率多方位方法建立裂缝的地震识别方法^[2]。利用微电阻率成像测井资料建立塔河地区裂缝的定量关系^[3]。结合测井资料和地应力分析也可以分析裂缝发育分布规律^[4]。构造运动对裂缝的影响也受到普遍的关注,并作为裂缝发育的主控因素^[5]。但是,对于整个塔河地区天然裂缝的定量表征只是限于测井与地震等方法的应用,没有形成以岩心数据为主的直观表征系统与多学科的综合应用,也未系统揭示影响中-下奥陶统天然裂缝发育特征的主控因素。

本文以塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层为研究对象,通过对岩心、野外露头 and 铸体薄片分析,以裂缝发育规律与主控因素为目标,表征塔河地区中-下奥陶统裂缝发育特征和影响裂缝发育特征的地质因素。基于对塔河地区裂缝系统的精细描述,再结合天然裂缝的几何学特征,在此基础上探讨天然裂缝形成的地质因素,分析不同地质因素对裂缝发育的影响,为解决研究区缝洞型油藏勘探开发提供指导建议。

1 地质概况

塔里木盆地塔河地区构造位置属沙雅隆起中段,北邻阿克库勒凸起,南与满加尔凹陷及顺托果勒隆起接壤,在草湖凹陷西部,哈拉哈塘凹陷东部(图1)^[6-7]。研究区奥陶系自下而上分为蓬莱坝组、鹰山组、一间房组、恰尔巴克组、良里塔格组和桑塔木组6个岩石地层单元^[8],研究的目层位主要是中-下奥陶统的蓬莱坝组、鹰山组和一间房组。

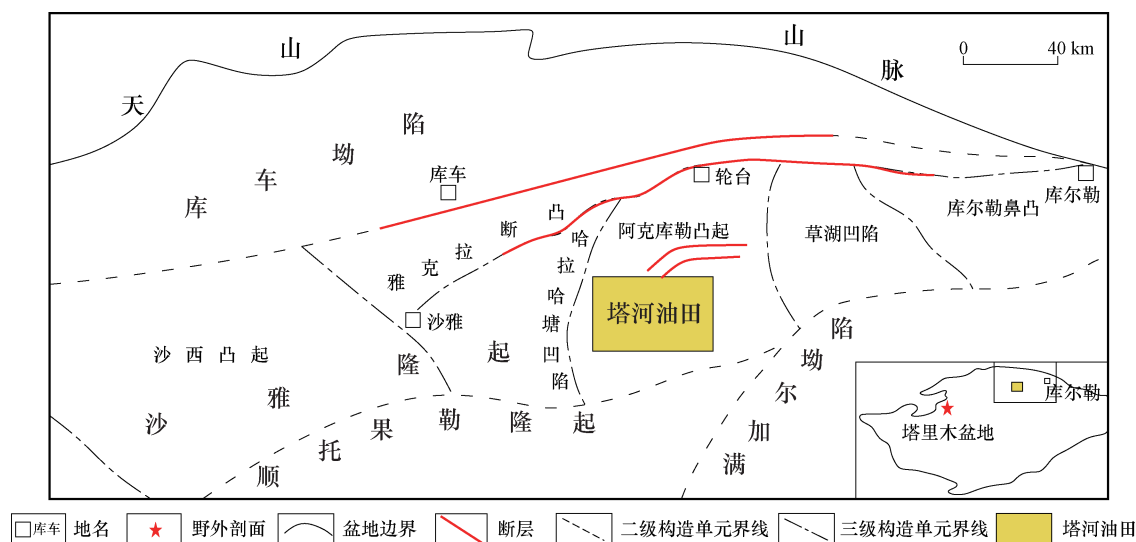


图1 塔里木盆地塔河地区奥陶系油藏构造位置^[6]

Fig. 1 The structural location of the Ordovician reservoir in Tahe area, Tarim Basin^[6]

塔河地区在地质历史时期经历了加里东、海西、印支—燕山和喜马拉雅四大构造旋回^[9-10]。加里东时期,塔里木盆地构造应力场方向以近南北向挤压为主;海西时期,构造应力场方向为北东—南西向挤压;印支—燕山时期为前陆盆地和陆内坳陷形成期,经历了三叠纪挤压和挠曲背景;喜马拉雅时期是陆内坳陷和前陆盆地形成的重要时期,构造演化以中等强烈挤压挠曲与隆升为主要构造背景。

2 天然裂缝发育规律

2.1 天然裂缝成因类型

本文基于野外露头、岩心和薄片等不同尺度的观察,将塔河地区裂缝按照成因分为构造裂缝、成岩裂缝和复合成因裂缝3种类型。其中,构造裂缝以剪切裂缝和张性裂缝为主;水平层理缝和成岩缝合线是两类主要的成岩裂缝;复合成因裂缝主要包括构造—成岩裂缝、构造—表生裂缝和岩溶裂缝。

构造剪切裂缝是塔河地区最为发育的构造缝之一,在野外与岩心均发育;裂缝面光滑平直,与岩层面高角度相交($>75^\circ$),延伸较长;存在未充填、砂泥质局部充填和方解石全充填3种不同充填程度;在局部剪切裂缝中沿缝面发育有溶蚀孔,在溶孔内以方解石和砂泥质局部充填或全充填为主(图2a—c)。构造张性裂缝是塔河地区另一类发育的构造裂缝,在野外与岩心均可见;裂缝面断续,较为粗糙,常与岩层面低角度相交,延伸较短;多被有机质或砂泥质局部充填,在部分裂缝中也可见方解石全充填(图2d—f)。

水平层理缝在野外较少,在岩心上较为发育;缝面平直,缝宽较小但发育均匀,延伸长度中等;未充填或泥质与方解石充填,也可见部分有机质全充填;在部分水平层理缝中有局部溶蚀现象并伴有晶形完整的黄铁矿充填;裂缝密度较小,岩层面发育(图2g)。成岩缝合线在野外与岩心上均可见,一般绕岩心一周;缝面呈现锯齿状,缝宽较小且变化较大,延伸较长,多与层面平行或低角度相交(或终止于岩层变化界面);充填物类型多样,主要以泥质与方解石全充填或局部充填;裂缝的密度变化较大,只在局部发育,受控于岩性变化(图2h,i)。

塔河地区碳酸盐岩储层还普遍发育与构造作用、成岩作用、表生作用或岩溶作用有关的复合成因裂缝,主要包括构造—成岩裂缝、构造—表生裂缝和岩溶裂缝3种类型。构造缝合线是一种由构造作用和成岩作用复合成因的构造—成岩裂缝,它是在早期构造裂缝的基础上,再经过成岩压溶作用形成的;与顺层分布的

成岩缝合线不同,构造缝合线与层面呈大角度相交,规模较大,裂缝面呈明显的锯齿状(图2j)。构造—表生裂缝是在表生成岩作用阶段,由于成岩作用和构造作用共同控制形成的裂缝类型;这类裂缝的规律性差,延伸较短,具有局部呈网状发育的特点(图2k)。岩溶裂缝是指与岩溶发育有关的裂缝,是在溶洞发育过程中或溶洞形成以后,由于上覆地层的自身重力作用,通常在溶洞顶部发生坍塌的同时形成的裂缝;岩溶裂缝一般分布在溶洞的顶部,呈环状发育,其裂缝形态表现为与溶洞顶面垂直、斜交和平行3种关系(图2l);由于在溶洞顶部的岩石中通常存在早期构造裂缝,因而岩溶裂缝可以在早期构造裂缝的基础上进一步发育和扩展。

2.2 天然裂缝发育特征

通过对塔河地区6口岩心井、14口成像测井和4个主要野外剖面(蓬莱坝剖面、一间房剖面、永安坝剖面和西克尔剖面)的观察分析,发现塔河地区奥陶系发育多组裂缝,裂缝之间交错切割,主要以构造剪切裂缝为主,大部分充填方解石或砂泥质。据裂缝发育特征研究,裂缝的组系、方位、倾角、密度和高度等常作为描述裂缝发育特征的参数。这些裂缝特征参数是定量描述裂缝发育特征的理论指标^[1,11-12]。

裂缝的方位和组系在确定裂缝的发育机制与发育期次方面具有一定的指导意义^[6,13]。根据塔河地区14口成像测井资料以及野外露头区观察资料统计分析,塔河地区主要发育有北东—南西向、北西—南东向、近东西向和近南北向4组构造裂缝。通过统计分析不同层位和不同组系的裂缝,发现研究区中—下奥陶统不同层位、不同组的裂缝发育程度存在一定的差异。其中,蓬莱坝组和鹰山组北东—南西向裂缝明显发育,其他方向裂缝的发育程度明显较差;而一间房组除了发育北东—南西向裂缝以外,北西—南东向裂缝和近东西向裂缝也较发育(图3)。该结果反映塔河地区以北东—南西向裂缝最为发育,其次是北西—南东向裂缝,而近东西向裂缝和近南北向裂缝的发育程度相对较差,这与该区断层的发育程度有相似之处。

裂缝的倾角即裂缝面在水平面上的投影与水平线的夹角。裂缝倾角的大小在一定程度上可以反映出裂缝的发育规律和构造作用的强度大小。根据塔河地区岩心与成像测井等资料观察统计,将研究区奥陶系碳酸盐岩地层构造裂缝的倾角分为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 、 $70^\circ \sim 80^\circ$ 和大于 80° 三个区间范围。根据统计结果,构造裂缝的倾角主要在 50° 以上,以中、高角度剪切裂缝为主(图4a,b)。

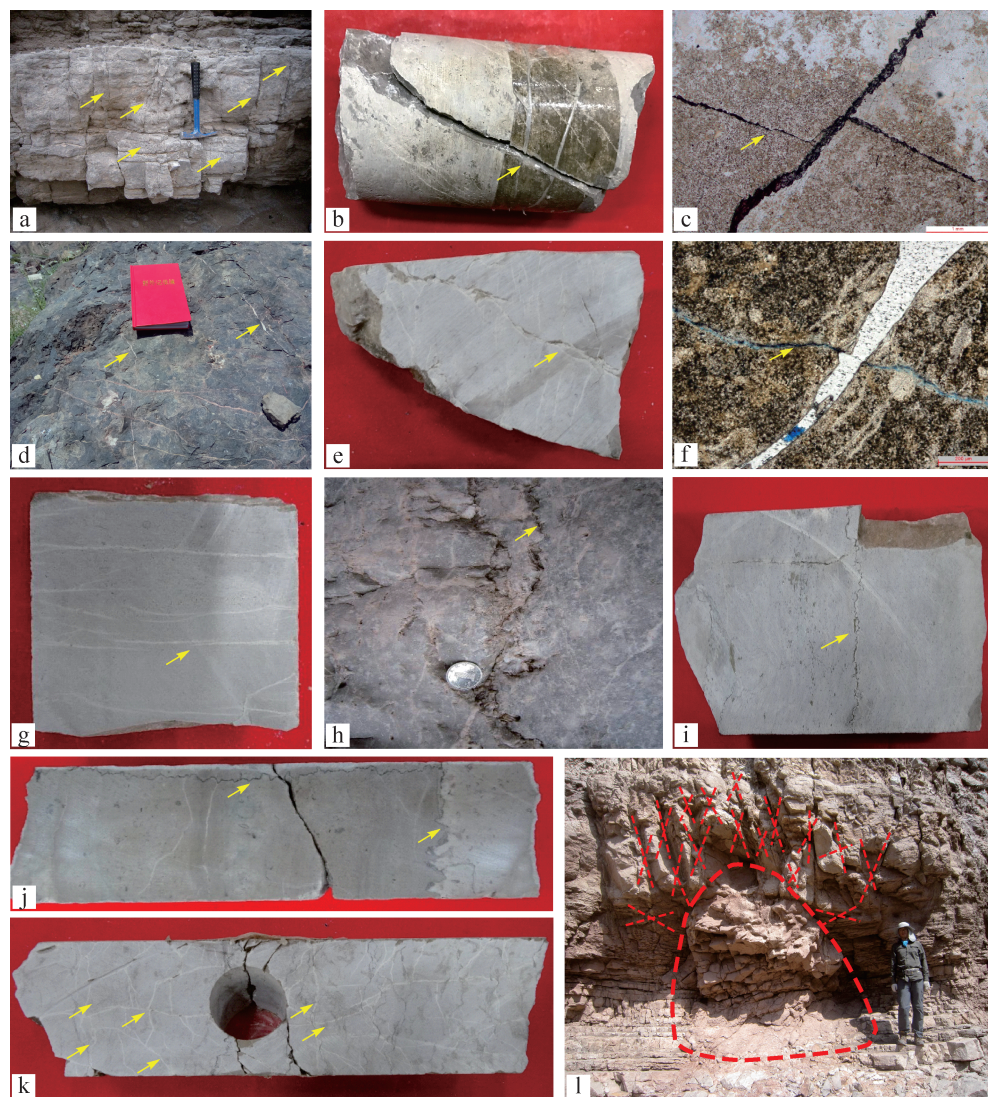


图2 塔河地区中-下奥陶统裂缝成因类型

Fig. 2 Genetic types of fractures in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 剪切裂缝,一间房剖面,一间房组(O_{2y}); b. 剪切裂缝,T403井,埋深5 454.32 m; c. 剪切裂缝,单偏光; d. 张性裂缝,蓬莱坝剖面,蓬莱坝组(O_{1p}); e. 张性裂缝,S71井,埋深5 508.70 m; f. 张性裂缝,单偏光; g. 水平层理缝,T416井,埋深5 594.52 m; h. 成岩缝合线,西克尔剖面,一间房组(O_{2y}); i. 成岩缝合线,T706井,埋深5 728.61 m; j. 构造成岩裂缝,T705井,埋深5 771.45 m; k. 构造表生裂缝,S71井,埋深5 711.35 m; l. 岩溶裂缝,西克尔剖面,一间房组(O_{2y})

裂缝的高度也称作裂缝的纵向延伸长度,可以反映裂缝的发育规模。裂缝的纵向延伸长度受岩石力学层控制,裂缝在岩石力学层内发育,并终止于力学层界面上。由于岩心直径的局限性,在利用岩心资料进行裂缝纵向延伸长度统计时需要根据测井资料进行校正。根据岩心与成像测井资料统计,将裂缝的纵向延伸长度划分为10~30,30~60,60~100 cm和大于100 cm四个区间,其中以10~30 cm与30~60 cm区间的中、小裂缝为主(图4 c,d)。

裂缝的密度包括裂缝的线密度、面密度和体积密度。本次主要讨论裂缝的线密度,即垂直于构造走向裂缝发育的条数。裂缝的线密度由裂缝的高度、裂缝

的条数和倾角共同决定。由于本次研究统计的裂缝以高角度的构造缝为主,所以裂缝的高度和裂缝的条数成为最主要的因素。从裂缝线密度的统计结果可得,裂缝的密度随着层位的不同也呈现了不同范围的变化,其中在中-下奥陶统的主要层位裂缝密度普遍小于6条/m;在不同的井位上,裂缝的纵向发育密度也存在较大的差别,变化范围较大,总体上裂缝的密度小于3条/m(图5)。

基于前述裂缝基本参数的统计,裂缝的方位、倾角、高度以及密度存在明显的差异性,不同特征参数表征的地质意义也各不相同。根据塔河地区单井纵向上裂缝发育规律统计结果可得,在不同的深度段裂缝的

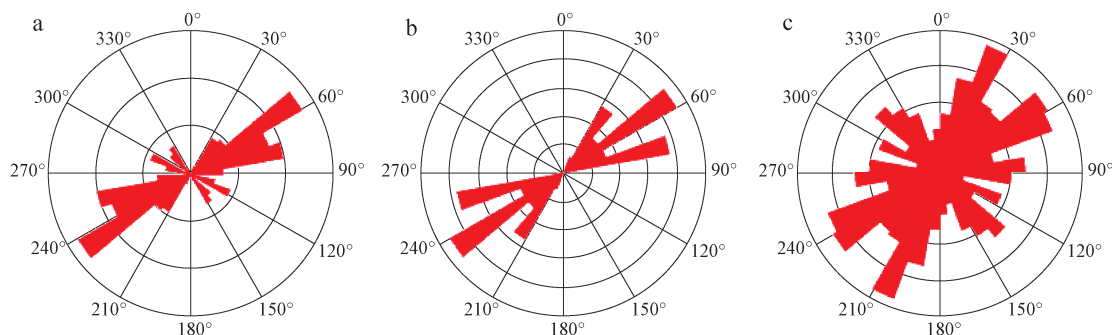


图3 塔河地区中-下奥陶统裂缝方位统计

Fig. 3 Statistics of fracture orientation of the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 蓬莱坝组; b. 鹰山组; c. 一间房组

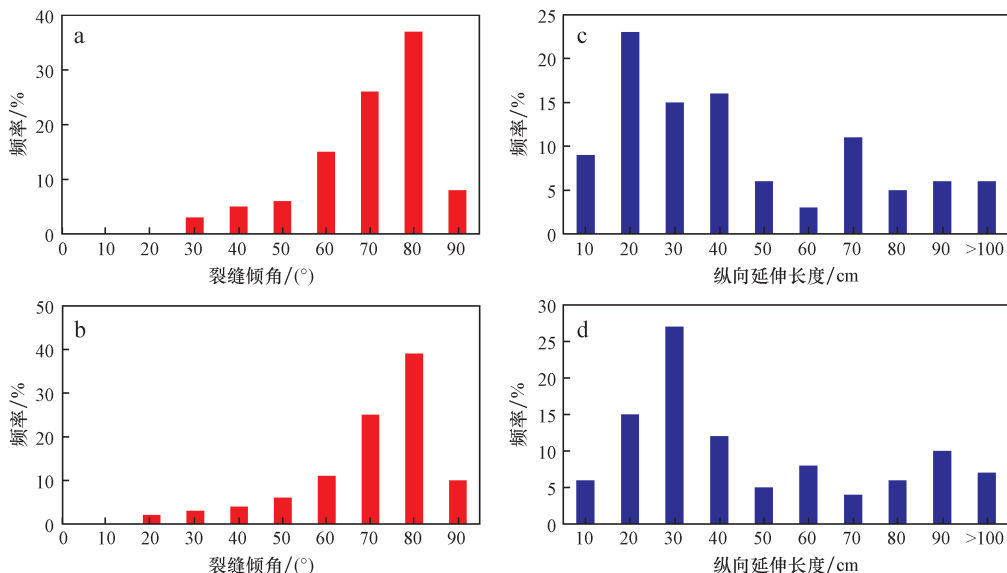


图4 塔河地区中-下奥陶统裂缝高度与倾角统计结果

Fig. 4 Statistical results of fracture height and dip angle in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 岩心裂缝倾角统计; b. 成像测井裂缝倾角统计; c. 岩心裂缝高度统计; d. 成像测井裂缝高度统计

密度存在较大差异;随着深度的变化,裂缝的密度变化并没有呈现明显的规律性,裂缝发育呈现出“短而密”的特征。结合塔河地区纵向上岩性的变化,单井上裂缝的发育规律不仅仅与深度的变化相关,还受其他因素的控制。在塔河地区纵向上不同组系中裂缝密度的变化规律也不同,蓬莱坝组和鹰山组裂缝的密度基本一致,但在蓬莱坝组和鹰山组中裂缝密度明显大于一间房组裂缝密度。

考虑到塔河地区碳酸盐岩储层经历了岩溶地质过程,因此在纵向上裂缝的发育特征也存在明显的分带性。塔河地区中-下奥陶统岩溶带在纵向上可以分为表层带、渗流带和径流带^[14]。在表层带,水流基本顺地表坡度流动,形成了河道和顺坡溶蚀缝洞,主体裂缝以中、高角度构造裂缝为主,低角度构造裂缝不发育。渗流带主要是地表水沿着断层或高角度裂缝垂向运动形成的,因此在渗流带中易形成与断层伴生的中、高角

度的构造裂缝。在径流带中,连续不断汇聚的流体容易形成地下河,地下河体系以近似水平的低角度为主,因此与其相关的裂缝也以低角度构造裂缝为主。

3 裂缝发育主控因素

裂缝形成与发育的控制因素较多,包括岩性、岩层厚度、构造作用及岩溶作用等多种因素^[15-17]。通过野外露头、岩心和薄片等观察分析,结合前述裂缝发育特征以及不同类型裂缝发育情况,本文将裂缝控制因素总结为沉积作用、构造作用和岩溶作用3方面的影响。

3.1 沉积作用

沉积作用对裂缝的控制主要表现在岩性和层厚等对裂缝的影响^[18]。结合塔河地区裂缝发育特征与沉积作用的特点,本次主要考虑岩性的差异与层厚的变

化对裂缝发育的影响。

岩性对裂缝密度发育的影响主要体现在岩石的矿物组分、构造及力学参数的差异。据理论研究,在相同的应力条件下,岩石脆性矿物组分含量越高,裂缝的发育程度更高^[19-20]。在相同组分的岩石中,随着岩石颗粒变细,在较小应变时即表现出破裂变形,裂缝越容易发育^[21]。基于对塔河地区野外露头、岩性和薄片的观察统计可得,在塔河地区白云岩比灰岩裂缝更发育,且随着白云石含量的增加,裂缝越发育。在灰岩中,生屑灰岩比泥质灰岩裂缝更为发育,这也表明随着泥质等塑性成分增加,裂缝的发育程度降低(图6)。

据研究,在一定厚度范围内,裂缝间距与层厚呈正线性关系^[22]。在研究区内,裂缝间距随着层厚的增加而增加,且在不同的岩性中裂缝间距与层厚的比值存在差异。部分裂缝可以切穿相邻能干性不同的地层,并发生一定的产状变化^[23]。根据塔河地区主体区岩心裂缝数据统计获得的不同岩性层厚与裂缝密度之间的关系可见,随着层厚的增加裂缝的密度呈现减小的趋势,并且白云岩的层厚对裂缝发育程度的影响范围

大于灰岩。但是,不同类型的灰岩对裂缝密度的影响也存在差异。当灰岩厚度在一定范围内时($<4\text{m}$),单层灰岩的厚度相同,泥质灰岩的裂缝密度最小,其次是生屑灰岩;且随着灰岩厚度的减小,泥质灰岩的密度减小趋势大于生屑灰岩(图7)。

3.2 构造作用

构造是控制储层裂缝发育的重要因素,构造应力是裂缝形成的主要动力^[24]。构造挤压作用的增强导致岩石状态变化。其中,裂缝的走向取决于裂缝形成时期的主应力产状,裂缝的发育程度受控于构造应力的大小^[25]。本次主要从构造类型和不同构造部位来阐明构造作用对裂缝的影响,主要讨论断层和褶皱对裂缝的影响。

由于断层活动的影响,在断层附近构造应力的分布具有明显的分带性^[26],从而影响断层附近裂缝的分布规律。据前人研究可知,断层上盘的裂缝较下盘发育,且由断面向两侧裂缝发育程度逐渐降低;在断层端部和交叉等应力集中区,裂缝相对发育。通过研究类

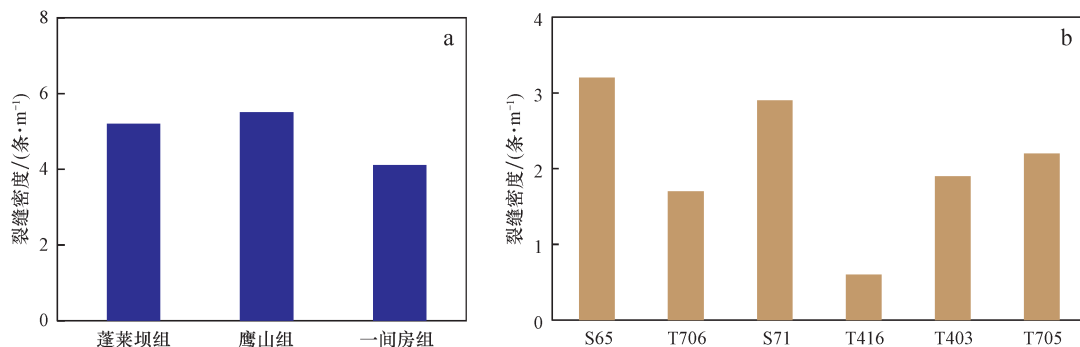


图5 塔河地区中-下奥陶统裂缝密度统计结果

Fig. 5 Statistical results of fracture density in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 不同组系裂缝密度;b. 不同井位裂缝密度

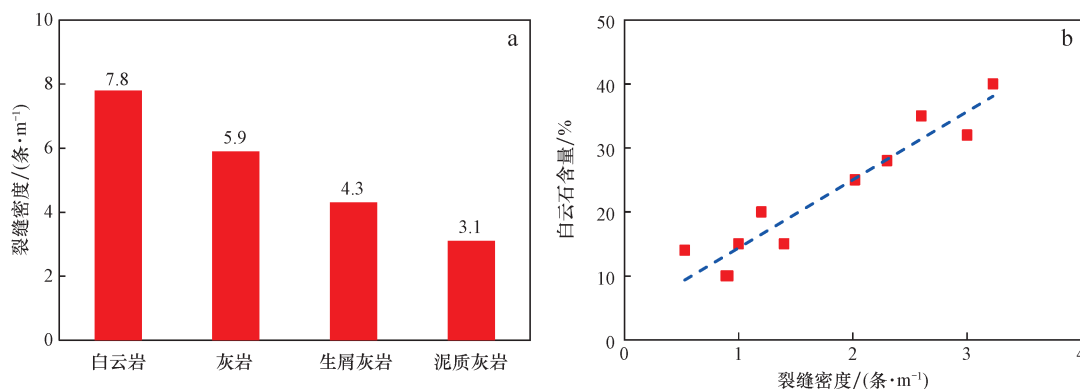


图6 塔河地区中-下奥陶统岩性对裂缝发育的影响

Fig. 6 The impact of lithology on fracture development in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 不同岩性裂缝密度发育情况;b. 白云石含量对裂缝密度发育的影响

比塔河地区碳酸盐岩储层与塔里木盆地西北缘野外露头,发现二者的构造运动具有同期性。基于野外露头的实测分析可知,在塔河地区主要以走滑断层为主,局部发育逆断层,很少看到正断层。针对野外典型剖面测量分析,在走滑断层中,裂缝主要在走滑断层的活动盘和断层的端部最发育。断层的端部为应力释放区,裂缝较为发育。在逆断层中,断层的上盘比断层的下盘裂缝发育,且断层的上、下盘裂缝密度的变化范围较大。总体上,裂缝的密度在 7.52 ~ 1.57 条/m 范围内变化,在断层的上盘裂缝密度的变化范围是 7.52 ~ 2.09 条/m,在断层的下盘裂缝的密度变化范围是 5.82 ~ 1.57 条/m。综合分析,在逆断层发育区带范围内主要存在 3 点规律:1) 在断层面附近裂缝发育,裂缝的发育密度是正常地层的 2 ~ 4 倍;2) 在断层影响的范围内,远离断层面,裂缝密度呈现减小的趋势,且在正常地层中趋于不变;3) 断层的上盘比下盘裂缝发育,断层面上盘的裂缝平均密度为 5.54 条/m,断层下盘的裂缝平均密度为 4.63 条/m(图 8)。

对于褶皱构造与裂缝的关系,许多学者都进行过研究,认为褶皱的轴部和转折端等构造曲率较大的部

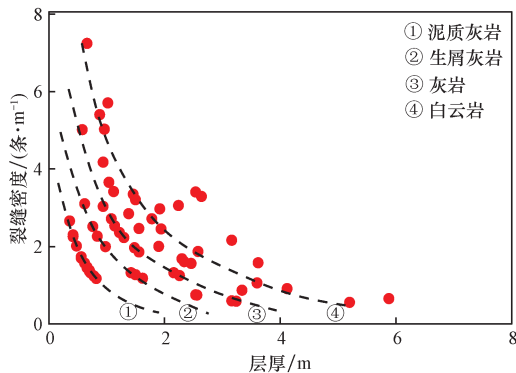


图7 塔河地区中-下奥陶统层厚对裂缝发育的影响

Fig. 7 The impact of layer thickness on fracture development in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

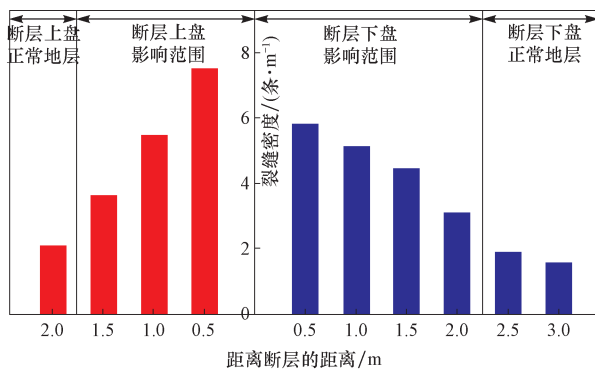


图8 塔河地区中-下奥陶统断层对裂缝发育的影响

Fig. 8 The impact of faults on fracture development in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

位裂缝最为发育,而褶皱翼部的裂缝发育程度相对较差;其中,陡翼的裂缝相对于缓翼发育,褶皱变形越强烈,裂缝越发育,裂缝密度越大^[27]。在塔河地区结合塔西北野外露头的观测发现,褶皱的转折端和核部裂缝最为发育;由褶皱轴面向两翼方向裂缝逐渐不发育,裂缝的密度逐渐减小。由图 9 分析可见,在褶皱的核部部位,裂缝密度接近 8 条/m;在褶皱的翼部,裂缝的密度分布在 4 ~ 6 条/m;在正常的岩石地层中,裂缝的平均密度在 2 条/m 左右。综合分析,在塔河地区褶皱构造对裂缝发育的影响主要体现在不同的褶皱构造部位裂缝的发育密度存在明显的差异。在褶皱的核部,裂缝密度是常规地层的 4 倍左右;在褶皱翼部,裂缝密度是常规地层的 2 ~ 3 倍。由此可见,褶皱的不同构造部位裂缝的发育程度存在明显的差异(图 9)。

3.3 岩溶作用

岩溶裂缝即与岩溶相关的裂缝。岩溶作用受沉积环境、流体性质和古地貌等多种因素的影响,岩溶的规模和岩溶的充填程度也影响着裂缝的发育。本文主要讨论发生的岩溶作用对裂缝发育的影响。前述中提到岩溶裂缝主要存在于岩溶作用形成溶洞的上部,形成的裂缝与溶洞顶面成不同的夹角(图 10a)。

岩溶裂缝的形成与岩溶作用形成的溶洞密切相关。一方面,由于溶洞的形成导致岩石受力发生改变,在上覆岩层的压力下溶洞的顶面产生滑塌,在溶洞的顶面形成破碎带,伴随着岩石破碎带的形成便很容易产生裂缝;另一方面,随着洞顶力学机制的变化,上覆岩层滑塌导致先期形成的溶洞被充填,由于上覆滑塌破碎程度的变化溶洞的充填也存在不同程度的差异,使得上覆滑塌过程中形成的裂缝规模也存在较大差异。岩溶裂缝形成的受力机制分为 3 个阶段:最开始,

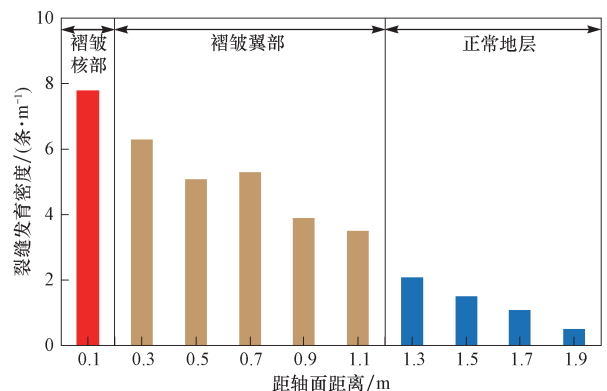


图9 塔河地区中-下奥陶统褶皱对裂缝发育的影响

Fig. 9 The impact of folds on fracture development in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

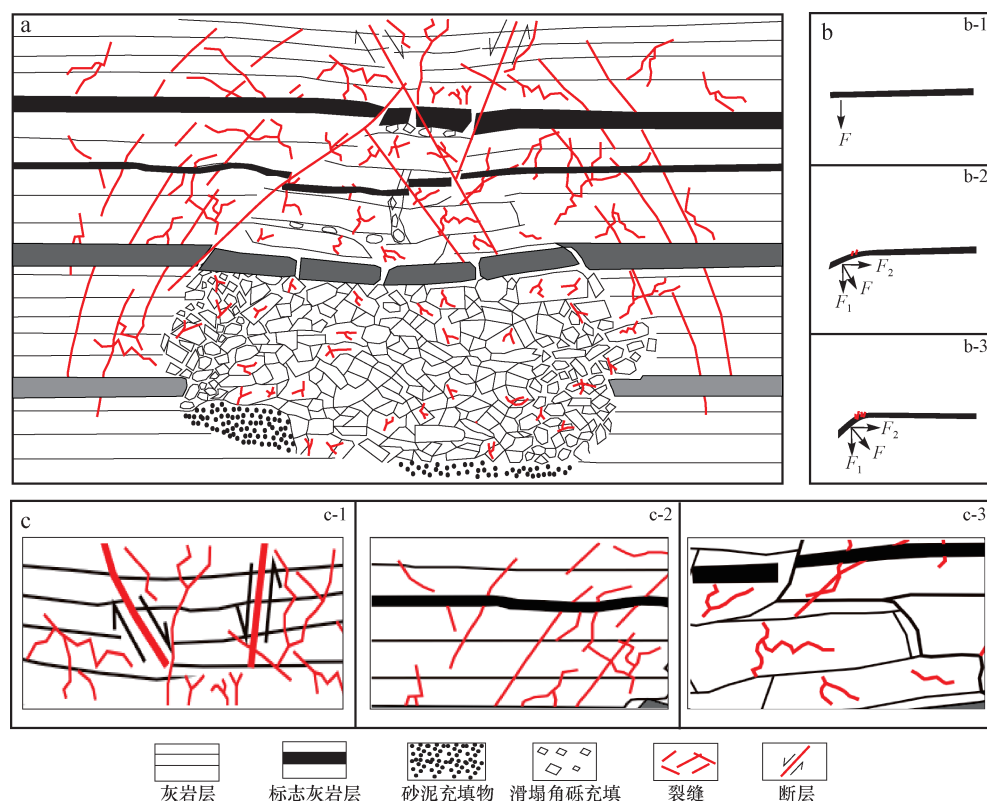


图10 塔河地区中-下奥陶统岩溶裂缝发育模式

Fig. 10 The development mode of karst fractures in the Middle-to-Lower Ordovician in Tahe area

a. 岩溶发育模式; b. 岩溶裂缝受力机制; c. 岩溶裂缝类型

岩层只受到上覆重力的影响;当下伏地层发生溶蚀时,在重力作用下岩层发生弯曲;在曲率较大地方,岩层破裂就会形成裂缝(图10b)。

根据塔河地区的统计分析,岩溶裂缝是较为常见的复合成因裂缝,其受岩溶作用的影响主要存在以下规律:1)岩溶裂缝主要分布在溶洞的顶部,在溶洞周围分布规模不大,岩溶裂缝具有向溶洞形成方向的收敛性;2)岩溶裂缝与溶洞顶面存在不同的夹角,远离溶洞顶面,主要发育垂直于洞顶的裂缝,并伴随着小断层的产生,靠近洞顶则主要以斜交缝和水平缝为主;3)以局部张性拉应力为主,形成的裂缝缝面断续,延伸不远(图10c)。整体上,岩溶裂缝的发育程度与溶洞的规模和充填程度密切相关,根据二者的具体定量关系便可以从岩溶裂缝的发育程度来预测溶洞的发育规模。

4 结论

1)塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝可分为构造裂缝、成岩裂缝和复合成因裂缝3种类型。构造裂缝以剪切裂缝为主,其次为张裂缝;成岩裂缝主要为水平层理缝,其次是成岩缝合线;复合成因裂缝主要包括构造-成岩裂缝、构造-表生裂缝和岩溶

裂缝。其中,高角度构造剪切裂缝是该区的主要裂缝类型,发育有北东-南西向、北西-东南向、近东-西向和近南-北向4组,它们在不同层位的发育程度存在明显的差异。

2)塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝的发育程度受沉积作用、构造作用和岩溶作用的控制。随着塑性矿物含量与岩石层厚的增加,裂缝的密度逐渐降低。距断层面与褶皱轴面的距离越远,裂缝发育程度也逐渐变差。岩溶作用使得在溶洞上部岩层中主要发育近直立裂缝、斜交裂缝和近水平裂缝3种产状类型的裂缝系统。

参 考 文 献

- [1] 曾联波. 雷家油田下第三系低渗透储层裂缝特征[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 167-169.
Zeng Lianbo. Fracture characteristics of Eocene low permeable reservoirs in Leijia oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 167-169.
- [2] 何发岐, 刘清林. 高分辨率多方位 VSP 方法在塔河油田奥陶系裂缝性储层研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 386-389.
He Faqi, Li Qinglin. Application of high resolution multiazimuthal walkawayvsp data to fractured reservoir prediction in Tahe oilfield [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32

- (4):386-389.
- [3] 赵舒. 微电阻率成像测井资料在塔河油田缝洞型储层综合评价中的应用[J]. 石油物探, 2005, 44(5): 509-516.
Zhao Shu. The application of microresistivity imaging log in the evaluation of carbonate fracture-vug reservoir in Tahe oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(5): 509-516.
- [4] 吴春, 孔祥荣. 塔河油田奥陶系储层地应力分布及裂缝发育规律研究[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 314-315.
Wu Chun, Kong Xiangrong. Research about the distribution of stress and the development of fractures in the Ordovician reservoir, Tahe oilfield[J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(3): 314-315.
- [5] 俞仁连, 傅恒. 构造运动对塔河油田奥陶系碳酸盐岩的影响[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(2): 1-6.
Yu Renlian, Fu Heng. Influence of tectonic movement on Ordovician carbonates of Tahe oilfield[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(2): 1-6.
- [6] 高玉飞. 塔河油田四区奥陶系裂缝精细描述及分布预测[D]. 中国石油大学(华东), 2009.
Gao Yufei. Detailed description and distribution predicting of Ordovician fractures in block 4 of Tahe oilfield[D]. China University of Petroleum (East China), 2009.
- [7] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 23-26.
Lin Zhongmin. Carbonate rock reservoir features and oil-gas accumulating conditions in the Ordovician of Tahe Oilfield in northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 23-26.
- [8] 吴萌. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层流体包裹体研究[D]. 成都理工大学, 2009.
Wu Meng. Research on fluid inclusions of Ordovician carbonate rocks reservoir, in Tahe Oilfield[D]. Chengdu University of Technology, 2009.
- [9] 康玉柱. 中国塔里木盆地油气地质特征及资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
Kang Yuzhu. Petroleum geological characteristics and resource evaluation of Tarim Basin, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [10] 丁文龙, 漆立新, 吕海涛, 等. 利用 FMI 资料分析塔河油田南部中-下奥陶统储层构造应力场[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 852-859.
Ding Wenlong, Qi Lixin, Lv Haitao, et al. Analysis of the Lower-Middle Ordovician reservoir tectonic stress field using FMI data in the southern of Tahe Oilfield[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 852-859.
- [11] 周文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
Zhou Wen. Evaluation method for fractured reservoirs[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998.
- [12] 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.
Zeng Lianbo. Formation and distribution of fractures in low-permeability sandstone reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [13] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Cheng'en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Geology, 2007, 81(2): 174-180.
- [14] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289-298.
Li Yang, Jin Qiang, Zhong Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289-298.
- [15] 郭光辉, 李建军, 卢玉红. 塔中 I 号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 27-31.
Wu Guanghui, Li Jianjun, Lu Yuhong. The fracture characteristics of Ordovician limestone in Tazhong No. 1 fault belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 27-31.
- [16] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoir: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [17] Stowell J F W. Characterization of opening mode fracture systems in the Austin Chalk[J]. GCAGS Transactions, 2001, 51: 313-319.
- [18] 吕文雅, 曾联波, 刘静, 等. 致密低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 74-83.
Lv Wenya, Zeng Lianbo, Liu Jing, et al. Fracture research progress in low permeability tight reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 74-83.
- [19] Narr W. Fracture density in the deep subsurface: Techniques with application to Point Arguello oil field[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(8): 1300-1323.
- [20] La C L H L. Lithological and structural controls on natural fracture distribution and behavior within the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and north slope subsurface, Alaska[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(10): 1700-1720.
- [21] 周灿灿, 杨春顶. 砂岩裂缝的成因及其常规测井资料综合识别技术研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 425-430.
Zhou Cancan, Yang Chunding. Contributing factor of sandstone fracture and its integrated identifying technology for regular logging data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(4): 425-430.
- [22] Narr W S J. Joint spacing in sedimentary rocks[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13(9): 1037-1048.
- [23] 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.
- [24] Narr W, Currie J B. Origin of fracture porosity—Example from Altamont Field, Utah (USA)[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(9): 1231-1247.
- [25] Finkbeiner T, Barton C A, Zoback M D. Relationships among in-situ stress, fractures and faults, and fluid flow: Monterey formation, Santa Maria Basin, California[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(12): 1975-1999.
- [26] Rawnsley K D, Rives T, Petti J P, et al. Joint development in perturbed stress fields near faults[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(8-9): 939-951.
- [27] Murray G H. Quantitative fracture study: Sanish Pool, McKenzie County, North Dakota[J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(1): 57-65.