

引用格式:李睿琦,吕文雅,王浩南,等.塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带克深地区典型断背斜天然裂缝分布特征[J].天然气地球科学,2023,34(2):271-284.

LI Ruiqi, LÜ Wenya, WANG Haonan, et al. Distribution characteristics of natural fractures of the typical fault anticlines in Keshen area of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(2): 271-284.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2022.08.008

塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带克深地区 典型断背斜天然裂缝分布特征

李睿琦^{1,2},吕文雅^{1,2},王浩南^{1,2,3},李杰⁴,刘雨林⁵,袁瑞⁶

(1.油气资源与探测国家重点实验室,中国石油大学(北京),北京 102249;

2.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;

3.中国石油大庆油田有限责任公司成都勘探开发研究院,四川 成都 610000;

4.中国石油长庆油田陇东油气开发分公司,甘肃 庆阳 745000;

5.中国石油塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000;

6.长江大学,湖北 武汉 430100)

摘要:为明确超深层储层断背斜内天然裂缝的分布特征,以库车坳陷克拉苏构造带克深地区白垩系巴什基奇组为例,结合地质、地震、FMI成像测井、地应力以及岩石力学参数等资料,通过储层地质力学法明确了克深地区典型断背斜构造样式内天然裂缝的分布特征,为该区致密气的有利勘探提供了地质依据。结果表明:不同断背斜垂向上具有从顶部、中部到底部天然裂缝密度“高—低—高”的普遍特征;断背斜的翼间角越大,顶部和中部的裂缝分布越局限,底部裂缝分布越广泛;距断背斜轴部越远的部位,顶部和底部的裂缝分布越局限,中部的裂缝分布越广泛。断背斜顶部转折端相对中部与底部储层天然裂缝较发育,改善了储层的物性,为致密气提供储集空间和渗流通道。

关键词:断背斜;天然裂缝;分布特征;有利区带;克拉苏构造带;库车坳陷

中图分类号:TE121.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2023)02-0271-14

0 引言

21世纪以来,深层、超深层储层逐步成为油气资源发展的重点领域,塔里木盆地已在库车坳陷大北、克深、迪那、克拉等气田的白垩系和古近系内实现了勘探突破^[1-3]。与常规储层相比,致密砂岩储层具有成岩作用强烈、低孔低渗、天然裂缝发育等地质特征,天然裂缝是超深层致密储层油气重要的储集空间和主要的渗流通道,对超深层致密油气的勘探开发具有重要作用^[4-6]。国内外诸多学者通过岩心、野外露头、成像测井、地震数据和试井数据等多

种资料和曲率法、构造应力场数值模拟法、分形分维法等多种方法对超深层储层构造裂缝的成因演化、分布特征和影响因素进行了大量研究,有效指导了裂缝性油气藏的勘探工作^[1-7]。

在克深地区,由于强烈的构造挤压广泛发育各式各样的断背斜构造,断背斜控制着天然裂缝的形成和分布,影响了超深层致密储层的油气储量和开发效果,断背斜天然裂缝分布特征研究对指导研究区超深层致密油气藏勘探开发具有重要的现实意义^[7-9]。在对断背斜的研究中发现背斜内部的应变存在明显的分层特征,其内部的裂缝分布也具有一

收稿日期:2022-07-18;修回日期:2022-08-18;网络首发日期:2022-09-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:42002135);中国石油战略合作科技专项(编号:ZLZX2020-02);中国石油大学(北京)青年拔尖人才科研启动基金项目(编号:2462017YJRC057)联合资助。

作者简介:李睿琦(1997-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事储层裂缝形成、分布及预测研究。E-mail:lrq1997cup@163.com.

通信作者:吕文雅(1990-),女,湖南邵阳人,博士,副教授,主要从事储层裂缝形成、分布及预测与非常规油气田开发地质研究与教学工作。

E-mail:wylwenwen@163.com.

定的分层性,另外断背斜构造的翼间角对裂缝分布的影响十分密切,断背斜顶部裂缝发育区的厚度随着翼间角的减小而逐渐增加^[10-12]。但针对不同断背斜内部天然裂缝分布特征的差异以及同一断背斜的不同部位天然裂缝分布特征差异的研究较少,仍需进一步研究。为明确该区致密气的富集情况,需要揭示不同断背斜内部天然裂缝分布特征的差异、以及同一断背斜的不同部位天然裂缝分布特征差异,为致密气勘探提供合理的地质依据。

此外,前人对克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组不同断背斜各部位的储层物性、应力分布、溶蚀强度等方面开展了研究,同时针对克深地区裂缝的发育特征进行了定量描述和预测,讨论了裂缝对区域应力场转换的指示作用,探讨了裂缝的形成机理,分析了有效裂缝的控制因素,探讨了裂缝对致密储层物性的影响^[10-11, 13-22]。前人认为克深气田巴什基奇克组产气储层普遍发育网状缝—垂向缝,克深地区巴什基奇克组的构造裂缝包括近东西向充填缝以及以南北向高角度为主的张性裂缝,它们的形成主要受喜马拉雅中晚期的挤压构造应力控制^[2-9]。但针对克深地区不同断背斜内天然裂缝分布特征缺少系统的研究,在一定程度上制约了该区超深层致密储层油气的勘探开发。

本文以克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组克深地区的两断式平缓褶皱(代表性气藏为克深2、克深6、克深8气藏)、二级反冲构造(代表性气藏为克拉2气藏)和凸型三角带(代表性气藏为克深9气藏)3种典型断背斜构造样式为研究对象(表1),在明确研究区地层分布、构造样式特征以及古构造应力场演化的基础上,结合地质、地震、FMI成像测井、地应力以及岩石力学参数等资料,通过储层地质力学法分析了3种典型断背斜构造样式的裂缝分布特征、含典型断背斜构造样式的过KS902井剖面的天然裂缝分布特征。研究结果一方面丰富了断背斜理论成果,另一方面可为研究区超深层致密气的勘探开发提供地质依据。

1 区域地质概况

库车坳陷位于我国塔里木盆地北部,北与南天山断裂褶皱带以逆冲断层相接,南为塔北隆起,是一个以中、新生代沉积为主的叠加型前陆盆地^[22]。研究区位于库车坳陷内部北东东—南西西向展布的克拉苏—依奇克里克构造带上(图1),该构造带

表1 研究区3种典型断背斜构造样式的代表性气藏及不同部位岩石力学参数

Table 1 Typical gas reservoirs and mechanical parameters of the different parts of the three typical fault anticlines in the study area

构造样式	单元类型	代表气藏	杨氏模量/GPa	泊松比
两断式平缓褶皱	断层部位	克深2、克深6、克深8气藏	15	0.22
	背斜部位	克深8气藏	10	0.24
二级反冲构造	断层部位	克拉2气藏	18	0.22
	背斜部位		14	0.25
凸型三角带	断层部位	克深9气藏	18	0.24
	背斜部位		14	0.26

是南天山山前第一排冲断带,东西长约为248 km,南北宽约为15~30 km,勘探面积为5 500 km²,成藏地质条件优越,厚度大、分布广、成熟度高,主力储层为白垩系巴什基奇克组,具备优越的油气地质条件及良好的致密气勘探前景^[23-26]。

库车坳陷的演化过程主要分为2个阶段:古近纪的弱伸展构造和新近纪—第四纪的喜马拉雅造山运动^[26-28]。南天山隆起诱发的挤压应力促使库车坳陷进入再生前陆盆地演化阶段,受其影响,克拉苏构造带的构造应力场经历了从弱伸展向挤压的逐步转变,期间发生了强烈挤压变形,特别是在喜马拉雅运动中晚期的挤压作用下发育成排成带的逆冲叠瓦式背斜群,在断背斜构造内部形成了大量发育程度以及分布范围不一的裂缝^[1, 23, 29-34]。库车坳陷克拉苏构造带表现出盐上层、盐岩层及盐下层分层收缩的变形特征,其中盐下层发育冲断构造,逆冲断层由北部基底卷入式逆冲断层向南过渡为盖层滑脱逆冲断层^[9, 25]。克拉苏构造带盐下断背斜构造样式按照翼间角划分出平缓褶皱以及开阔褶皱两大类,以开阔褶皱为主,并依据两大类构造样式内的次级断层发育及组合特征进行细分,平缓褶皱中发育反冲构造、二级反冲构造、凹型构造三角带以及凸型构造三角带,开阔褶皱中发育次断同倾三断式断背斜和次断同倾反冲构造(图2)。

库车坳陷出露完整的中生界白垩系,自上而下分为巴什基奇克组、巴西盖组、舒善河组和亚格列木组4个层组^[15]。巴什基奇克组沉积时期,受来自南天山3个沉积物源控制,包括北部的天山物源供给区、东部的库鲁克塔格物源供给区以及西南部的温宿凸起物源供给区,以辫状河三角洲前缘水下分流河道和扇三角洲前缘水下分流河道沉积为

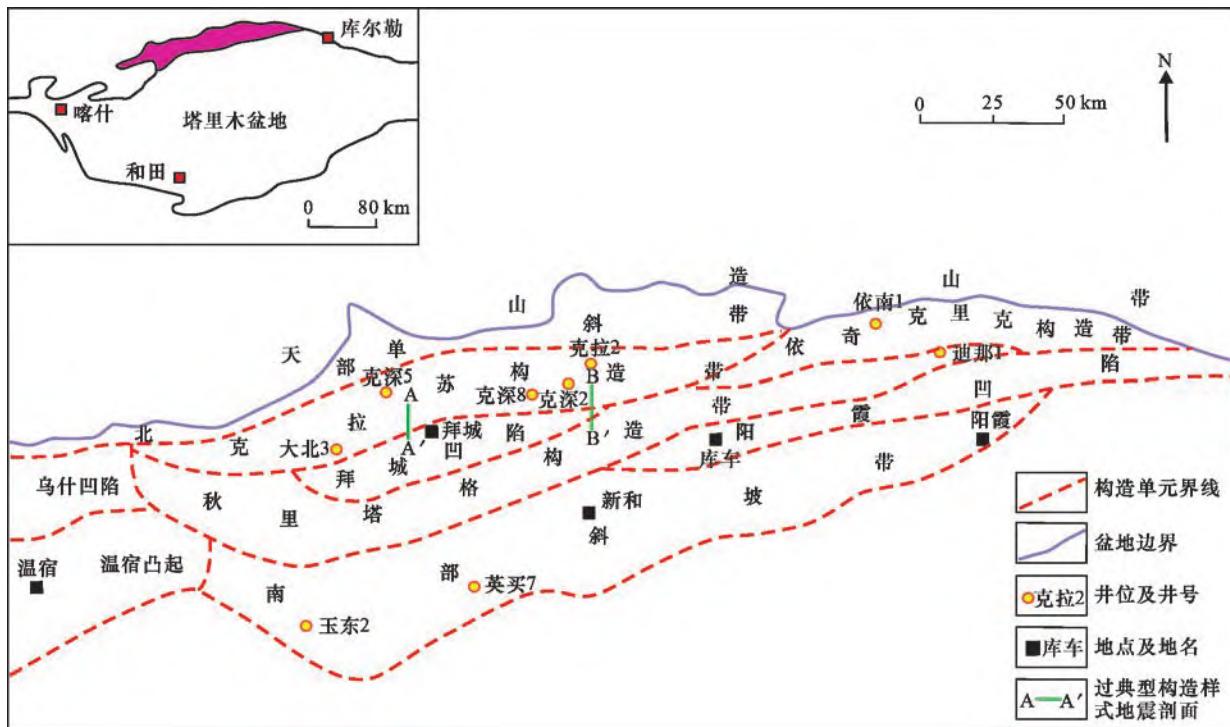


图 1 库车坳陷构造单元划分(据文献[24-26]修改)

Fig.1 Division of structural units in the Kuqa Depression (modified from Refs.[24-26])

主^[35-36]。克深地区白垩系巴什基奇克组地层厚度约为200~300 m,平均埋深在6 000 m以深,储层岩性以红褐色岩屑长石砂岩为主,并含有少量长石岩屑砂岩,分选中等,局部区域由于水动力环境的改变分选较差,基质孔隙度为2%~8%,基质渗透率为 $(0.05\sim 0.5)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[37]。由于喜马拉雅中晚期的构造运动对库车坳陷的构造变形和最终定型起着至关重要的作用,克深地区巴什基奇克组在喜马拉雅中晚期形成了大量构造裂缝,以高角度剪切裂缝和中角度剪切裂缝为主,裂缝开度较大、延伸距离较短,主要发育北北西—南南东向和北北东—南南西向2组裂缝,裂缝孔隙度为0.011%~0.13%,裂缝渗透率为 $(1.00\sim 10.00)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,形成了典型的超深层裂缝性致密砂岩储层^[32,37-44]。

2 天然裂缝预测研究方法

目前,储层天然裂缝预测方法主要有岩层曲率法、断裂分形法、地震法、储层地质力学法等^[45-52]。储层地质力学法是通过应力场数值模拟方法预测裂缝形成时期的古应力分布,在此基础上预测天然裂缝的分布。应力场数值模拟方法主要分为有限元和离散元2种,其中有限元法适应性较强,对于地质演化过程、演化阶段及复杂受力情况、加载特殊

模拟问题都可以实现,应用广泛^[53-59]。

有限元数值模拟方法的基本原理是将一个连续的地质体离散成有限个单元,用节点连接这些单元,在每个单元内赋予特定的岩石力学参数,根据研究区实际边界条件和载荷,建立并求解以节点位移或单元内应力为未知量,以总体刚度矩阵为系数的联合方程组,用构造插值函数求得每个节点上的位移,进而计算每个单元内的应力和应变的近似值^[55]。

应力场数值模拟能够准确顺利进行的基础是建立一个合理的地质模型，在建立地质模型的时候，本文综合考虑了研究区构造演化、沉积相分布、砂体厚度等地质背景资料，建立了符合研究区实际的地质模型。利用地震、测井和钻井资料恢复古构造发育史剖面，构建应力场数值模拟的地质隔离体^[56]。

建立力学模型包括了地质体不同部位的岩石力学参数以及力学性质的确定等^[60]。可以将地质体看作是弹性体、弹塑性体或者黏弹性体，在此基础上确定地质体的岩石力学特征。为将地质模型转换为可用于有限元数值模拟的力学模型，需确定研究区不同地质单元的材料属性和受力环境^[57-58]，包括杨氏模量和泊松比等岩石力学参数的范围，再

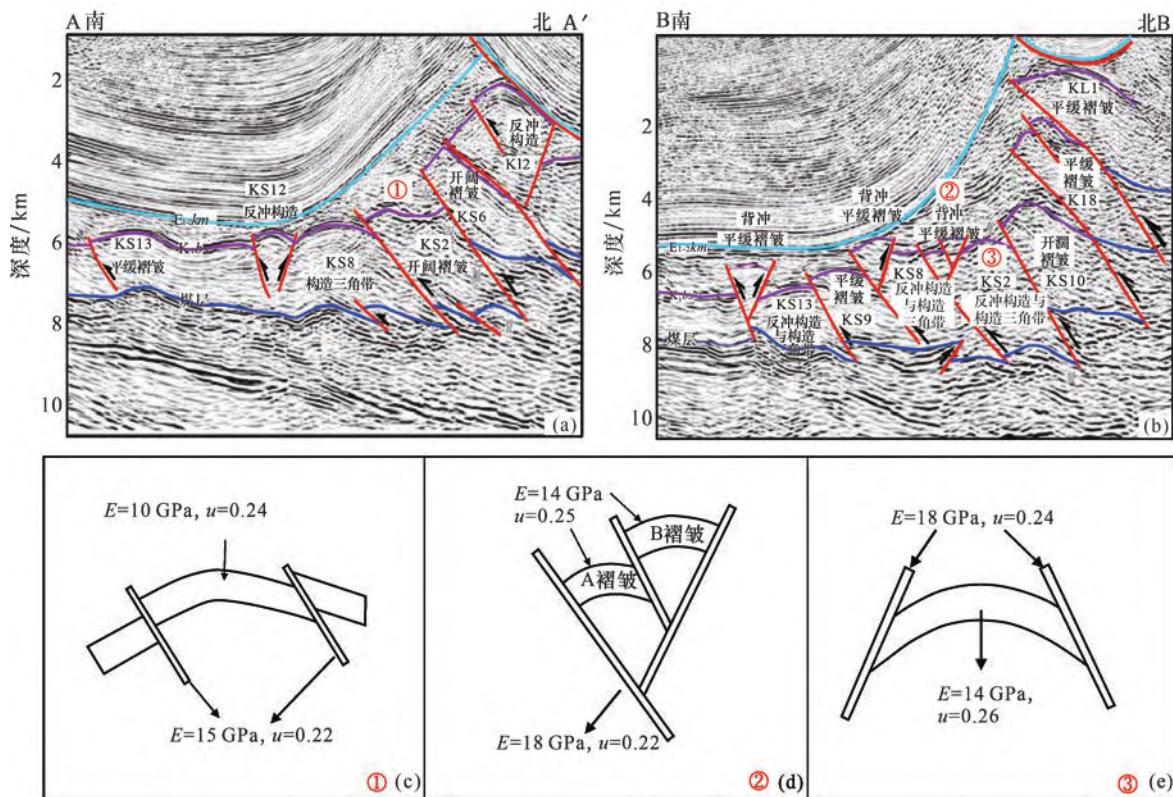


图2 克拉苏构造带克深地区典型构造样式地震剖面及对应3种典型断背斜构造样式力学模型

[图2(a)和图2(b)据侯贵廷等^[28]修改]

Fig.2 Seismic sections of subsalt structural styles of Keshen section in Kelasu tectonic belt and mechanical models of the three typical fault anticlines (Fig.2(a) and Fig.2(b) are modified from HOU et al.^[28])

(a)过克深201井地震剖面;(b)过克深902井地震剖面;(c)两断式平缓褶皱力学模型图;

(d)二级反冲构造力学模型图;(e)凸型三角带力学模型图(E 为杨氏模量, u 为泊松比)

结合岩相分布反复模拟调整,最终确定不同区域的岩石力学参数。研究区是典型超深层裂缝性致密砂岩储层,属于弹性材料,因此对各构造样式的断层部位和背斜部位赋予不同的岩石力学参数。采用三角形自由网格的划分法,既能反映地质体非均质性,又能保证复杂处的网格不过于粗糙。通过对KS902井、KS201井为代表的长石砂岩样品进行高温高压三轴岩石力学实验,岩石的杨氏模量(E)集中分布在2~25 GPa之间,泊松比(u)集中分布在0.13~0.28之间,排除特高、特低异常值后,取样品实验岩石力学参数中位数,对地质模型进行参数赋值得到力学模型(表1)。两断式平缓褶皱的背斜部位杨氏模量(E)为10 GPa,泊松比(u)为0.24,断层部位杨氏模量(E)为15 GPa,泊松比(u)为0.22;二级反冲构造的背斜部位杨氏模量(E)为14 GPa,泊松比(u)为0.25,断层部位杨氏模量(E)为18 GPa,泊松比(u)为0.22;凸型三角带的背斜部位杨氏模量(E)为14 GPa,泊松比(u)为0.26,断层部位杨氏模

量(E)为18 GPa,泊松比(u)为0.24[图2(c)—图2(e)]。

数学模型主要包括根据力学模型所确定的数值计算方法,基于地质模型和力学模型来确定。对于3种不同的断背斜构造样式,在地质模型和力学模型的基础上,运用ANSYS软件进行网格剖分,得到数学模型,进而施加边界条件。边界条件是影响构造应力场数值模拟结果准确度的重要环节,而确定边界条件主要根据区域构造应力背景^[57]。根据对库车坳陷内发育的褶皱、断裂、共轭节理、各时代地层岩石磁组构分析,构造变形解析的最大主压应力方位为358°,磁组构分析的最大主压应力方位为2°。因此认为库车坳陷白垩系在喜马拉雅中晚期最大主应力方位为近南北向,在近南北向的挤压应力作用下形成了北北西—南南东向和北北东—南南西向2组主要裂缝^[44, 60-62]。运用岩石声发射实验对古构造应力的大小进行恢复,模拟结果表明,克拉苏构造带克深地区的喜马拉雅中晚期最大主压应

力大小一般为 170 MPa^[22]。另外由于研究区目的层属于超深层储层,所以上覆岩层重力对其构造变形也有一定的影响,按照上覆岩层平均厚度 6 900 m、重力加速度 9.8 m/s²计算得到上覆岩层压力约为 160 MPa^[26]。利用应力场有限元数值模拟方法计算研究区喜马拉雅中晚期的古应力,结合实际的岩石破裂准则,获得岩石破裂率,通过从成像测井资料获得的裂缝统计数据进行标定,并以此验证模拟结果,反复调整模型,得到较为真实的天然裂缝展布规律,从而实现天然裂缝定量预测。

3 3 种典型断背斜天然裂缝分布特征

3.1 不同断背斜天然裂缝分布特征

两断式平缓褶皱两侧逆冲断层的倾向相同,表现为同冲平缓褶皱,储层地质力学法裂缝预测结果显示断层部位的裂缝密度约为 3.6 条/m,断背斜内部的裂缝密度集中在 3.0~3.4 条/m 范围内[图 3(a)];二级反冲构造相较于两断式平缓褶皱和凸型三角带距离造山带更近,构造变形更强,逆冲断层的倾向相反,次级断层更发育^[12],包含 A、B 2 个褶皱,其

中断层部位的裂缝密度约为 4.8 条/m,断背斜内部的裂缝密度集中在 3.0~4.5 条/m 范围内[图 3(b)];凸型三角带两侧逆冲断层的倾向相反,表现为对冲平缓褶皱^[12],断层部位的裂缝密度约为 4.8 条/m,断背斜内部的凸型三角带的裂缝密度集中在 3.0~4.5 条/m 范围内[图 3(c)]。根据上述对裂缝分布的预测和统计结果可知,3 种典型断背斜构造样式均表现出断层部位的天然裂缝更为发育,其次是背斜内部。

垂向上,背斜顶部的裂缝密度值最大,底部次之,中部相对较低,这与地表露头观察到的背斜顶部裂缝最发育,其次为底部,中部裂缝发育程度相对较差的特征一致(图 4)。在相同边界应力作用下,由于断层和背斜内部的岩石力学性质存在差异,造成断层和背斜处应力集中;应力差异化进而导致不同部位构造变形程度不同,变形程度越高的部位应力释放集中,裂缝密度越大,因此 3 种典型断背斜中不同部位裂缝分布存在差异^[63]。其中断背斜转折端裂缝密度大、分布范围广、裂缝更发育,改善了储层质量,是研究区致密气潜在的勘探开发有利区。

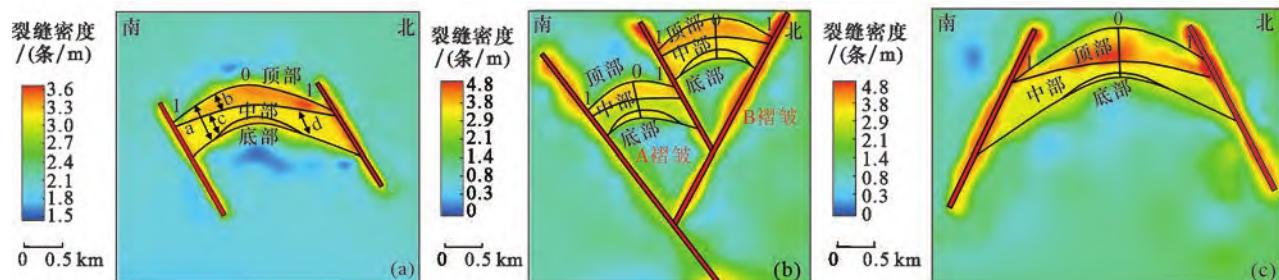


图 3 3 种典型断背斜裂缝密度模式

Fig.3 Fracture intensity pattern diagrams of the three typical faulted anticlines

(a) 两断式平缓褶皱;(b)二级反冲构造;(c)凸型三角带

图中 0 代表距离轴部最近,1 代表距离轴部最远,a 代表背斜整体厚度,b、c、d 分别代表顶部、中部和底部的厚度

3.2 断背斜不同部位天然裂缝分布特征

针对两断式平缓褶皱[图 3(a)]、二级反冲构造[图 3(b)]和凸型三角带[图 3(c)]3 种典型断背斜,对其背斜的顶部、中部和底部裂缝发育区的厚度与背斜总厚度之比(简称“厚度占比”)进行统计,结合与轴部的位置关系,得到厚度占比与距轴部的相对距离关系图(图 5),两者拟合关系呈二次多项式分布。3 种典型断背斜构造样式各部位的天然裂缝分布特征变化趋势具有一致性:①从背斜的轴部到翼部,顶部裂缝发育区分布范围始终大于底部,且两者范围均逐渐减小,中部裂缝发育区分布范围逐渐

增大,越靠近翼部的顶部裂缝发育区分布范围越小、中部裂缝发育区分布范围越大[图 5(a)—图 5(e)];②背斜内部横向裂缝集中发育在轴部,裂缝密度沿两翼方向逐渐减小,顶部裂缝密度大于底部裂缝密度大于中部裂缝密度,这与地表露头观察结果一致(图 4);③二级反冲构造和凸型三角带的裂缝发育程度略高于两断式平缓褶皱。在相同边界应力作用下,同一背斜内各部位岩石力学性质一致,但由于背斜各部位形态不同,导致背斜各部位受到的应力不同,其中背斜顶部应力相对集中,进而造成背斜各部位变形程度不同,因此背斜各部位天然裂

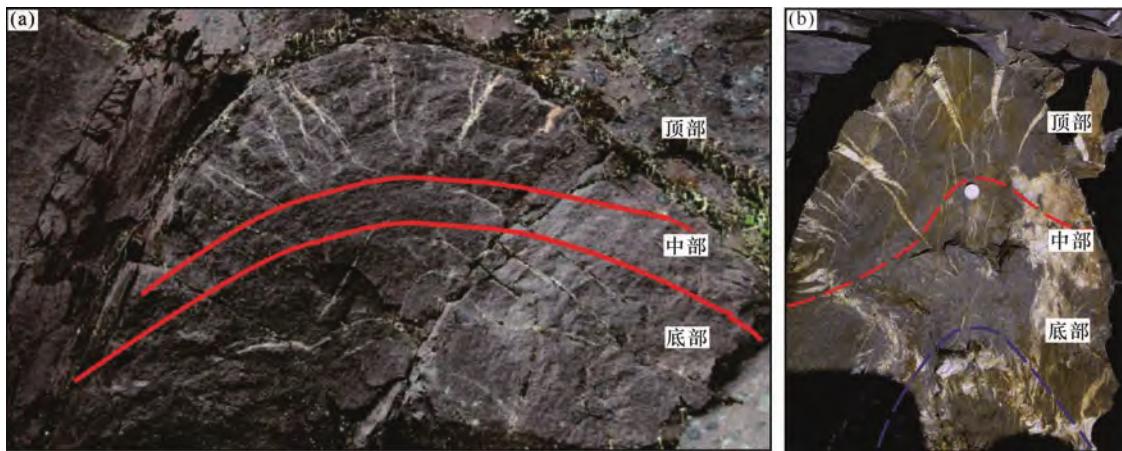


图4 地表露头中断背斜顶部、中部及底部裂缝分布特征(据文献[26, 63]修改)

Fig.4 Fracture distribution characteristics of the top, middle and bottom of the anticlines in the outcrops
(modified from Refs.[26, 63])

(a) 大翼间角形态断背斜;(b) 小翼间角形态断背斜

缝的发育程度和分布也存在明显差异。

3.3 不同翼间角对断背斜天然裂缝分布的影响

断背斜内的裂缝分布与翼间角的大小密切相关^[12]。本文针对3种典型断背斜构造样式,将其翼间角从130°以10°为间隔逐渐递增到160°分别进行应力场数值模拟,并根据储层地质力学法预测3种典型断背斜构造样式在不同翼间角形态下的裂缝密度分布(图6)。结果表明:翼间角从130°以10°为间隔逐渐递增到160°,两断式平缓褶皱的裂缝密度在3.0~3.6条/m范围内[图6(a)—图6(d)],其中顶部和底部的裂缝密度在3.3~3.5条/m范围内,中部的裂缝密度在3.0~3.2条/m范围内;二级反冲构造和凸型三角带的裂缝密度在2.5~4.8条/m范围内[图6(e)—图6(l)],其中顶部和底部的裂缝密度在3.0~4.5条/m范围内,中部的裂缝密度在2.5~2.9条/m范围内;同一断背斜随着背斜翼间角大小的改变,各部位的裂缝密度也会发生变化,翼间角增大时,缩短率减小,曲率变小,变形程度减弱,导致相同部位处的裂缝密度会有所降低。

利用缩短率和翼间角可以推算出背斜各部位距离顶界面的距离^[61],以背斜顶部、中部和底部的厚度(b 、 c 、 d 值)为基础,推算不同翼间角形态下背斜各部位厚度占背斜整体厚度的比值(b/a 、 c/a 、 d/a 值),统计获得厚度占比与到轴部的相对距离(0代表距离轴部最近,1代表距离轴部最远)关系图(图7)。3种断背斜构造样式的不同翼间角形态下背斜各部位天然裂缝分布特征表现为:①各部位厚度占比与到轴部的相对距离呈二次多项式分布,顶

部[图7(a)—图7(c)]和底部[图7(g)—图7(i)]裂缝主要集中在背斜轴部,距离轴部越远,顶部和底部裂缝发育区厚度越小,而中部裂缝发育区厚度随着与轴部距离增大而增大[图7(d)—图7(f)];②当背斜翼间角从130°以10°为间隔逐渐递增到160°时,背斜顶部、中部裂缝发育区的厚度减小,底部裂缝发育区的厚度增大[图7(a)—图7(i)]。地表露头中断背斜顶部、中部及底部裂缝分布特征(图4)中不同翼间角形态下裂缝分布情况以及数值模拟结果说明,在应力作用下,随着翼间角的增大,背斜弯曲程度和缩短率也随之减小,断背斜形态发生变化,造成了变形强度的改变,导致其顶部裂缝发育区范围变小、底部裂缝发育区范围增大。

4 含典型断背斜剖面裂缝分布特征

利用储层地质力学法预测含典型断背斜构造样式的过KS902井剖面(简称“剖面”)的裂缝分布特征。首先通过有限元数值模拟方法对剖面进行应力场数值模拟,得到喜马拉雅中晚期古应力分布特征,再根据岩石样品实验获得岩石破裂准则,结合KS902井目标井段成像测井资料裂缝统计数据,预测剖面其他区域裂缝分布特征。结果表明剖面中的断背斜裂缝分布遵循了以下规律:在剖面中断层端部、交叉部位的裂缝密度值相较于背斜内部更大,断背斜转折端顶部裂缝较发育且分布范围广(图8)。断背斜内的背斜部位顶部、中部至底部裂缝密度呈现“高—低—高”的分布特征,背斜的顶部、底部的裂缝密度普遍高于中部。根据成像测井

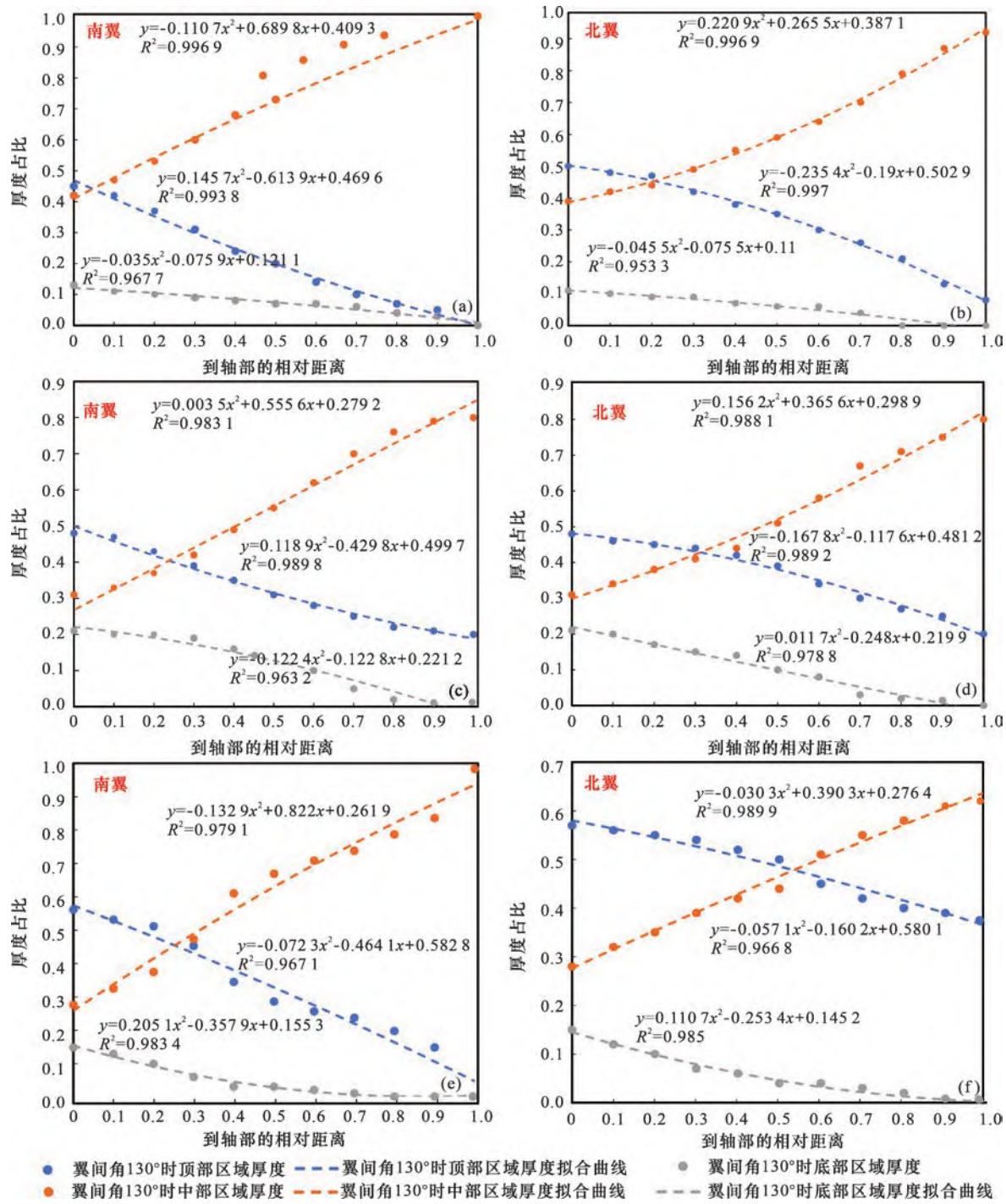


图5 3种典型断背斜南北翼各部位厚度占比与距轴部的相对距离关系

Fig.5 The relationship between thickness ratio of each part of the south and north wing of the three typical fault anticlines and the relative distance to the axis

(a)两断式平缓褶皱南翼;(b)两断式平缓褶皱北翼;(c)二级反冲构造南翼(A褶皱);

(d)二级反冲构造北翼(A褶皱);(e)凸型三角带南翼;(f)凸型三角带北翼

资料显示,背斜的顶部裂缝近等间距规律性排列;底部裂缝发育具有分带性,紧密发育段与无裂缝段交替出现;中部裂缝分布稀疏且部分裂缝发育程度不高(图8)。通过成像测井资料的裂缝解释成果统计发现,背斜顶部裂缝密度在1.8~2.3条/m范围内,

中部裂缝密度在1.2~1.7条/m范围内,底部裂缝密度在1.7~2.2条/m范围内,与储层地质力学法预测的裂缝规律一致,说明过KS902井剖面裂缝密度分布图较准确地反映剖面天然裂缝分布情况(图8)。

剖面包含有多个典型断背斜,不同断背斜天然

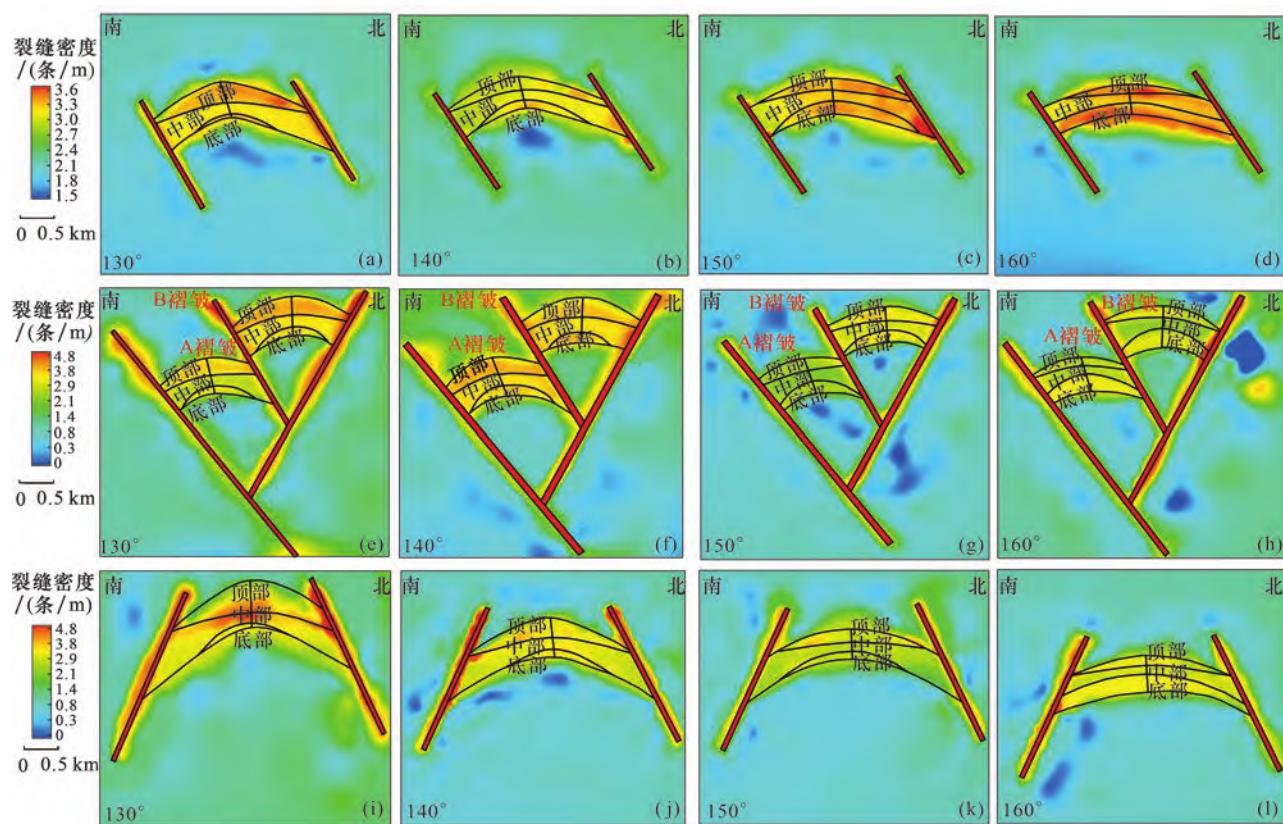


图6 3种典型断背斜不同翼间角裂缝密度分布

Fig.6 Fracture intensity distributions of the three typical faulted anticlines with different interlimb angles

(a)两断式平缓褶皱130°翼间角;(b)两断式平缓褶皱140°翼间角;(c)两断式平缓褶皱150°翼间角;(d)两断式平缓褶皱160°翼间角;(e)二级反冲构造130°翼间角;(f)二级反冲构造140°翼间角;(g)二级反冲构造150°翼间角;(h)二级反冲构造160°翼间角;(i)凸型三角带130°翼间角;(j)凸型三角带140°翼间角;(k)凸型三角带150°翼间角;(l)凸型三角带160°翼间角

裂缝分布存在差异性。由于二级反冲构造、两断式平缓褶皱相较于凸型三角带其内部断层发育的规模更大、背斜变形强度更大,因此二级反冲构造和两断式平缓褶皱内发育的裂缝密度更高。剖面中同一断背斜中,断背斜内部不同部位天然裂缝分布存在差异性。成像测井解释结果表明,白垩系巴什基奇克组中的断背斜内构造裂缝走向主要为近EW方向以及少量近NS方向。其中断背斜中部区域,裂缝不太发育,裂缝规模相对较小;而断背斜顶部与底部裂缝发育程度明显增强,裂缝规模相对较大(图8)。

克深地区白垩系巴什基奇克组由南至北裂缝密度与发育强度逐渐增大,KS13反冲构造与构造三角带区域裂缝密度整体小于KS8反冲构造与构造三角带,且两者均小于KS10开阔褶皱断背斜叠置区域裂缝密度。

剖面中裂缝分布特征及成像测井等地质资料显示,由于典型断背斜内不同部位应力存在差异,

导致其内部断层、背斜不同部位构造变形程度不同,而变形程度越高的部位裂缝密度越大,因此断背斜内背斜自顶部、中部至底部的应力呈现“高—低—高”变化,而其发育的裂缝密度同样呈现“高—低—高”的变化。同理,断背斜内断层端部、交叉部及断层两侧局部应力集中,变形程度高,伴生着断层破碎带,发育大量裂缝^[64-67]。此外,当翼间角改变时,同一断背斜内部不同部位天然裂缝分布存在差异性。同一断背斜随着断背斜翼间角变大,变形程度减弱,裂缝密度会不断降低,从而造成不同翼间角的断背斜裂缝发育程度存在差异。

克拉苏构造带克深地区白垩系巴什基奇克组属于超深层致密砂岩储层,其基质孔隙度为2%~8%,基质渗透率为 $(0.05\sim 0.5)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝发育储层孔隙度为0.011%~0.13%,裂缝发育储层渗透率为 $(1.00\sim 10.00)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[40,42,45]。基质孔隙度高出裂缝发育储层孔隙度1~2个数量级,表明裂缝具有一定的储集空间,是超深层致密储层油气的

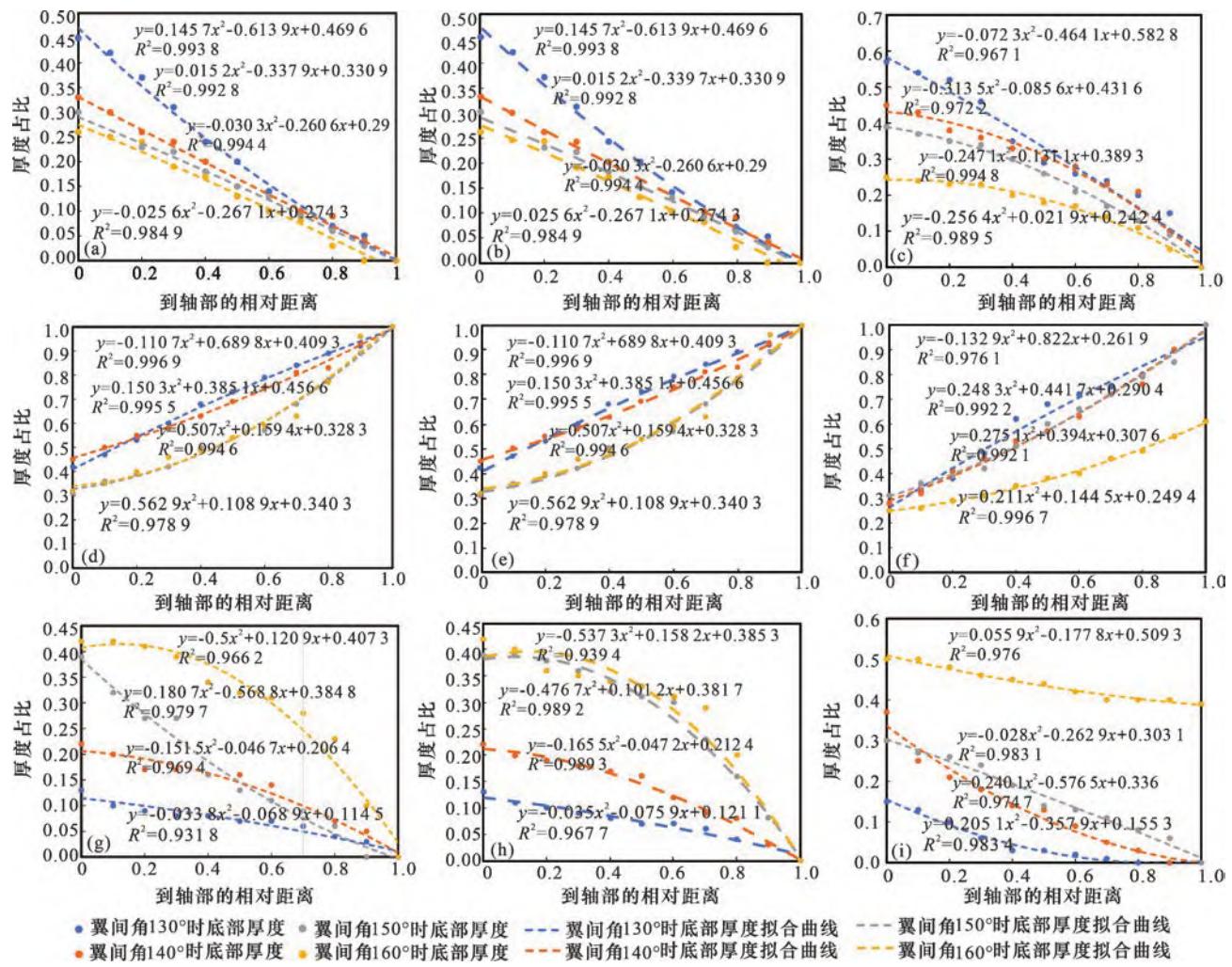


图 7 3 种典型断背斜不同部位厚度占比与距轴部的相对距离的关系

Fig.7 The relationship between thickness ratio of different parts of the three typical fault anticlines and relative distance to the axis

(a)两断式平缓褶皱顶部区域;(b)二级反冲构造顶部区域;(c)凸型三角带顶部区域;(d)两断式平缓褶皱中部区域;(e)二级反冲构造中部区域;(f)凸型三角带中部区域;(g)两断式平缓褶皱底部区域;(h)二级反冲构造底部区域;(i)凸型三角带底部区域

有效储集空间;裂缝发育储层渗透率比基质储层的渗透率高出 1~3 个数量级,表明裂缝可以显著提高储层渗透率,是超深层致密储层油气的重要渗流通道,改善了研究区致密储层质量^[5]。图 8 揭示了研究区过 KS902 井剖面宏观的天然裂缝分布特征,可为探明研究区优质储层及致密气有利勘探开发区提供地质依据。结果表明断背斜转折端顶部储层的裂缝密度大,裂缝的存在可以有效地改善断背斜转折端顶部超深层致密储层质量,因此断背斜转折端顶部是研究区致密气潜在的有利勘探开发区。

5 结论

(1)两断式平缓褶皱、二级反冲构造、凸型三角带的天然裂缝密度在垂向上呈现“高—低—高”特

征,断背斜的顶部和底部裂缝密度较大,裂缝密度范围为 3.2~4.5 条/m;中部裂缝密度较小,裂缝密度范围为 2.5~3.2 条/m。根据天然裂缝发育及分布特征可将断背斜分为顶部高发育区、中部一般发育区、底部高发育区。

(2)从背斜轴部到翼部,断背斜顶部裂缝分布范围始终大于底部,越靠近翼部,顶部裂缝分布范围越小、中部裂缝分布范围越大,且顶部与底部的裂缝密度值均在转折端高点处达到最大,向两翼逐渐减小。

(3)翼间角大小影响顶部、中部和底部裂缝分布范围,断背斜两翼夹角越小,顶部和中部裂缝分布越广泛,而底部裂缝分布越局限;当翼间角固定不变时,越靠近翼部,顶部和底部裂缝分布范围越小,而中部裂缝分布范围与距轴距离成正相关关系。

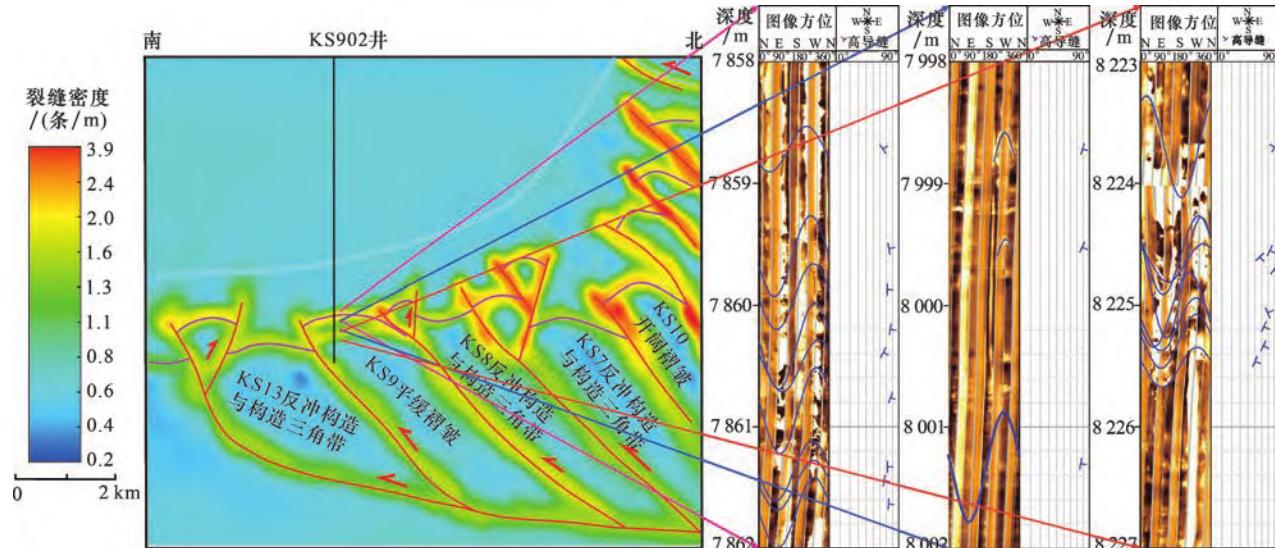


图8 过KS902井剖面裂缝密度分布

Fig.8 Fracture intensity distribution in the profile crossing Well KS902

(4)过KS902井剖面中的典型断背斜裂缝分布特征与断背斜部位、构造样式类型、翼间角大小等因素控制。剖面中各断层端部、交叉部位裂缝密度最大,断背斜顶部次之。断背斜顶部裂缝密度范围为1.8~2.3条/m,中部裂缝密度范围为1.2~1.7条/m,底部裂缝密度范围为1.7~2.2条/m,呈现“高—低—高”的特征。裂缝发育储层渗透率比基质储层渗透率高出1~3个数量级,极大改善了超深层致密储层的渗透性。断背斜转折端顶部裂缝较中部与底部更发育,是研究区致密气潜在的有利勘探开发区。

参考文献(References)

- [1] 杨海军, 张荣虎, 杨宪彰, 等. 超深层致密砂岩构造裂缝特征及其对储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田白垩系为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(7):942-950.
YANG H J, ZHANG R H, YANG X Z, et al. Characteristics and reservoir improvement effect of structural fracture in ultra-deep tight sandstone reservoir: A case study of Keshen Gas-field, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(7):942-950.
- [2] 韩秀玲, 杨贤友, 熊春明, 等. 超深裂缝性厚层改造效果影响因素分析与高效改造对策[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8):1280-1286.
HAN X L, YANG X Y, XIONG C M, et al. Influencing factors and efficient reservoir stimulation countermeasures in thick and ultra-deep naturally fractured reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8):1280-1286.
- [3] 曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 等. 7 000 m以深优质砂岩储层的特征、成因机制及油气勘探意义——以库车坳陷下白垩统巴什基奇组为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(1):38-47.

ZENG Q L, MO T, ZHAO J L, et al. Characteristics, genetic mechanism and oil & gas exploration significance of high-quality sandstone reservoirs deeper than 7 000 m: A case study of the Bashiqike Formation of Lower Cretaceous in the Kuqa Depression[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1):38-47.

- [4] 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 等. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 667-678.

ZHANG R H, WANG J P, MA Y J, et al. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried Cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 667-678.

- [5] 史超群, 张慧芳, 周思宇, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带—秋里塔格构造带白垩系巴什基奇组深层、高产储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(8):1126-1138.

SHI C Q, ZHANG H F, ZHOU S Y, et al. Comparative study on deep and high yielding reservoir characteristics and controlling factors of Cretaceous Bashiqike Formation in Kelasu structural belt and Qiultage structural belt of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(8): 1126-1138.

- [6] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1):19-32.
HE D F, ZHOU X Y, YANG H J, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression Tarim Basin: A clue from new shot seismic data[J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2009, 33(1):19-32.

[7] NENG Y, XIE H, YIN H, et al. Effect of basement structure and salt tectonics on deformation styles along strike: An example from the Kuqa fold-thrust belt, West China[J]. Tectonophysics, 2018(730):114-131.

- [8] ZENG Q, LU W, ZHANG R, et al. Lidar-based fracture

- characterization and controlling factors analysis: An outcrop case from Kuqa Depression, NW China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018(161):445-457.
- [9] NELSON R A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs[M]. 2nd Edition. Houston: Gulf Professional Publishing, 198:51-81.
- [10] 曾联波,吕鹏,屈雪峰,等.致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J].石油与天然气地质,2020,41(3):449-454.
- ZENG L B, LÜ P, QU X F, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3):449-454.
- [11] 丁文龙,尹帅,王兴华,等.致密砂岩气储层裂缝评价方法与表征[J].地学前缘,2015,22(4):173-187.
- DING W L, YIN S, WANG X H, et al. Assessment method and characterization of tight sandstone gas reservoir fractures [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4):173-187.
- [12] 高帅,曾联波,马世忠,等.致密砂岩储层不同方向构造裂缝定量预测[J].天然气地球科学,2015,26(3):427-434.
- GAO S, ZENG L B, MA S Z, et al. Quantitative prediction of fractures with different directions in tight sandstone reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3):427-434.
- [13] 能源,李勇,徐丽丽,等.克拉苏构造带盐下超深层断背斜裂缝带发育模式及预测方法[J].大地构造与成矿学,2017,41(1):61-68.
- NENG Y, LI Y, XU L L, et al. Patterns of fracture zone in the deep subsalt layer of Kelasu structural belt and prospecting method[J]. Geotectonica et Metallogenica, 2017, 41(1):61-68.
- [14] 余和中,韩守华,赵庆军,等.向斜下中和面构造油气藏——中国南方海相中—古生界油气勘探新方向[J].海相油气地质,2008,13(4):49-52.
- YU H Z, HAN S H, ZHAO Q J, et al. Hydrocarbon accumulation below the syncline neutral surface: A new prospecting target of petroleum exploration in Mesozoic-Paleozoic marine formations in southern China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(4):49-52.
- [15] 鞠玮,侯贵廷,黄少英,等.断层相关褶皱对砂岩构造裂缝发育的控制约束[J].高校地质学报,2014,20(1):105-113.
- JU W, HOU G T, HUANG S Y, et al. Constraints and controls of fault related folds on the development of tectonic fractures in sandstones[J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(1):105-113.
- [16] 杨学君.大北气田低孔低渗砂岩储层裂缝特征及形成机理研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.
- YANG X J. Characteristics and Origin of Fractures in Tight Sandstone Reservoirs with Low Permeability, Dabei Gas Field [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011.
- [17] 曾联波,周天伟.塔里木盆地库车坳陷储层裂缝分布规律[J].天然气工业,2004, 24(9): 23-25.
- ZENG L B, ZHOU T W. Reservoir fracture distribution law of Kuche Depression in Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 23-25.
- [18] 张仲培,王清晨.库车坳陷节理和剪切破裂发育特征及其对区域应力场转换的指示[J].中国科学(D辑:地球科学),2004,34(S1):63-73.
- ZHANG Z P, WANG Q C, Development of joints and shear fractures in the Kuqa Depression and its implication to regional stress field switching[J]. Science in China(Series D:Earth Sciences), 2004, 34(S1):63-73.
- [19] 韩登林,李忠,寿建峰.背斜构造不同部位储集层物性差异——以库车坳陷克拉2气田为例[J].石油勘探与开发,2011, 38(3):282-286.
- HAN D L, LI Z, SHOU J F, Reservoir property difference between structural positions in the anticline: A case study from Kela-2 gas field in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38 (3): 282-286.
- [20] 赵力彬,石石,肖香姣,等.库车坳陷克深2气藏裂缝—孔隙型砂岩储层地质建模方法[J].天然气工业,2012, 32(10): 10-13.
- ZHAO L B, SHI S, XIAO X J, et al. Geologic modeling of fractured and porous sandstone reservoirs in the Keshen-2 gas pool of the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 10-13.
- [21] 王振宇,陶夏妍,范鹏,等.库车坳陷大北气田砂岩气层裂缝分布规律及其对产能的影响[J].油气地质与采收率,2014, 21(2):51-56,114-115.
- WANG Z Y, TAO X Y, FAN P, et al. Distribution rule of fractures and their effect on deliverability in sandstone reservoirs, Dabei Gas Field, Kuqa foreland basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (2) : 51-56, 114-115.
- [22] 詹彦,侯贵廷,孙雄伟,等.库车坳陷东部侏罗系砂岩构造裂缝定量预测[J].高校地质学报,2014, 20(2):294-302.
- ZHAN Y, HOU G T, SUN X W, et al. Quantitative prediction of tectonic fractures of Jurassic sandstones in the eastern Kuche Depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(2):294-302 .
- [23] 王珂,戴俊生,商琳,等.曲率法在库车坳陷克深气田储层裂缝预测中的应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014, 29(1):34-39.
- WANG K, DAI J S, SHANG L, et al. Reservoir fracture prediction of Keshen gas field in Kuqa Depression using principal curvature method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(1):34-39.
- [24] 张荣虎,王珂,王俊鹏,等.塔里木盆地库车坳陷克深构造带克深8区块裂缝性低孔砂岩储层地质模型[J].天然气地球科学,2018, 29(9): 1264-1273.
- ZHANG R H, WANG K, WANG J P, et al. Reservoir geological model of fracture low porosity sandstone of Keshen 8 wellblock in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1264-1273.
- [25] 侯贵廷,孙帅,郑淳方,等.克拉苏构造带克深区段盐下构造样式[J].新疆石油地质,2019, 40(1): 21-26.
- HOU G T, SUN S, ZHENG C F, et al. Subsalt structural styles of Keshen section in Kelasu tectonic belt [J]. Xinjiang

- Petroleum Geology, 2019, 40(1): 21-26.
- [26] 周鹏, 尹宏伟, 周露, 等. 断背斜应变中和面张性段储层主控因素及预测方法——以克拉苏冲断带为例[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(1): 50-59.
- ZHOU P, YIN H W, ZHOU L, et al. Reservoir controlling factor and forecast of tensional zone in geostrain neutral plane of faulted anticline: Example from Kelasu fold-thrust belt [J]. Geotectonica et Metallogenica, 2018, 42(1): 50-59.
- [27] 雷刚林, 谢会文, 张敬洲, 等. 库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 816-820.
- LEI G L, XIE H W, ZHANG J Z, et al. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 816-820.
- [28] 徐振平, 谢会文, 李勇, 等. 库车坳陷克拉苏构造带盐下差异构造变形特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1034-1038.
- XU Z P, XIE H W, LI Y, et al. Characteristics and controlling factors of the subsalt differential structure in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6): 1034-1038.
- [29] 能源, 谢会文, 孙太荣, 等. 克拉苏构造带克深段构造特征及其石油地质意义[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(2): 1-6.
- NENG Y, XIE H W, SUN T R, et al. Structural characteristics of Keshen segmentation in Kelasu structural belt and its petroleum geological significance[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(2): 1-6.
- [30] SOBEL E R, DUMITRU T A. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5043-5063.
- [31] YIN A, NIE S, CRAIG P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan[J]. Tectonics, 1998, 17(1): 1-27.
- [32] SOBEL E R, CHEN J, HEERMANCE R V. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the southwestern Chinese Tianshan: Implications for Neogene shortening rate variations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 247(1-2): 70-81.
- [33] ZHANG M L, TAN C X, TANG L J, et al. An analysis of the Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(6): 615-619.
- [34] 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 库车坳陷克拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 49-56.
- QI J F, LEI G L, LI M G, et al. Analysis of structure model and formation mechanism of Kelasu structure zone Kuqa Depression[J]. Geotectonica et Metallogenica, 2009, 33(1): 49-56.
- [35] 谢会文, 尹宏伟, 唐雁刚, 等. 基于面积深度法对克拉苏构造带中部盐下构造的研究[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 1033-1040.
- XIE H W, YIN H W, TANG Y G, et al. Research on subsalt structure in the central Kelasu structure belt based on the area-depth technique [J]. Geotectonica et Metallogenica, 2015, 39(6): 1033-1040.
- [36] 杨克基, 漆家福, 马宝军, 等. 库车坳陷克拉苏构造带盐上和盐下构造变形差异及其控制因素分析[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 211-224.
- YANG K J, QI J F, MA B J, et al. Differential tectonic deformation of subsalt and suprasalt strata in Kuqa Depression and their controlling factors[J]. Geotectonica et Metallogenica, 2018, 42(2): 211-224.
- [37] 付小涛, 王益民, 邵剑波, 等. 超深层裂缝致密砂岩储层砂体、裂缝发育特征及对产能的影响:以塔里木盆地库车坳陷KS2气田为例[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 326-337.
- FU X T, WANG Y M, SHAO J B, et al. Characteristics and effect on productivity of the sandstone and fractures in ultra-deep and fractured tight sandstone gas reservoirs: A case study of KS2 Gas Field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2021, 35(2): 326-337.
- [38] 袁龙, 信毅, 吴思仪, 等. 深层白垩系致密砂岩裂缝定性识别、参数建模与控制因素分析——以塔里木盆地库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇组储层为例[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(1): 20-31, 72, 6-7.
- YUAN L, XIN Y, WU S Y, et al. Research on qualitative identification, parameter modeling and control factors of cracks in deep Cretaceous tight sandstone: Taking the Cretaceous Bashiqiqike Formation reservoir in Kehan area, Kuqa Depression, Tarim Basin as an example[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(1): 20-31, 72, 6-7.
- [39] LI Z, SONG W J, PENG S T, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic relationships between the Kuqa subbasin and Tian shan, Northwest China: Constraints from depositional records [J]. Se-dimentary Geology, 2004, 172(3-4): 223-249.
- [40] 于志超, 刘可禹, 赵孟军, 等. 库车凹陷克拉2气田储层成岩作用和油气充注特征[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 533-545.
- YU Z C, LIU K Y, ZHAO M J, et al. Characterization of diagenesis and the petroleum charge in Kela 2 Gas Field, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Earth Science, 2016, 41(3): 533-545.
- [41] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价——以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇组为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 158-167.
- ZHANG H L, ZHANG R H, YANG H J, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: A case study of Cretaceous Bashiqiqike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 158-167.
- [42] 王珂, 杨海军, 张惠良, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征与有效性——以塔里木盆地库车坳陷克深8气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 719-729.
- WANG K, YANG H J, ZHANG H L, et al. Characteristics and effectiveness of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir: A case study of Keshen-8 gas pool in Kuqa De-

- pression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 719-729.
- [43] 冯建伟, 孙建芳, 张亚军, 等. 塔里木盆地库车坳陷断层相关褶皱对裂缝发育的控制[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3):543-557.
- FENG J W, SUN J F, ZHANG Y J, et al. Control of fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3):543-557.
- [44] 罗威, 倪玲梅. 致密砂岩有效储层形成演化的主控因素——以库车坳陷巴什基奇克组砂岩储层为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(1):7-12.
- LUO W, NI L M. Main controlling factors of formation and evolution of effective reservoir in tight sandstone: Taking Bashiqiqike Formation sandstone reservoir in Kuqa Depression as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1):7-12.
- [45] 史超群, 王佐涛, 朱文慧, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带大北地区超深储层裂缝特征及其对储层控制作用[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(12):1687-1699.
- SHI C Q, WANG Z T, ZHU W H, et al. Fracture characteristic and its impact on reservoir quality of ultra-deep reservoir in Dabei region, Kelasutectonic belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(12):1687-1699.
- [46] LIU G P, ZENG L B, ZHU R K, et al. Effective fractures and their contribution to the reservoirs in deep tight sandstone in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021(124): 104824.
- [47] 丁中一, 钱祥麟, 霍红, 等. 构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1):3-9, 16.
- DING Z Y, QIAN X L, HOU H, et al. A new method for quantitative prediction of tectonic fractures: Two-factor method[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1):3-9, 16.
- [48] 刘松, 孙向阳. 利用偏移距衰减属性裂缝储层检测方法[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3):282-286.
- LIU S, SUN X Y. A method for forecasting fractured reservoirs using attenuation attributes in different offsets[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2009, 36(3):282-286.
- [49] 曾联波, 柯式镇, 刘洋. 低渗透油气储层裂缝研究方法[M]. 北京:石油工业出版社, 2010.
- ZENG L B, KE S Z, LIU Y. Fractures Research Method for Low Permeability Oil and Gas Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [50] 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法[J]. 地质论评, 2021, 67(2):543-556.
- LÜ W Y, ZENG L B, CHEN S Q, et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Geological Review, 2021, 67(2):543-556.
- [51] 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.
- LÜ W Y, ZENG L B, LIU J, et al. Fracture research progress in low permeability tight reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4):74-83.
- [52] 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6):2283-2300.
- LIU J S, DING W L, XIAO Z K. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2283-2300.
- [53] 戴俊生, 王霞田, 季宗镇, 等. 高邮凹陷南断阶东部阜宁期构造应力场及其对断层的控制作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2):1-5, 19.
- DAI J S, WANG X T, JI Z Z, et al. Structural stress field of Funing sedimentary period and its control on faults in the east of south fault terrace in Gaoyou Sag[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(2):1-5, 19.
- [54] 王红才, 王薇, 王连捷, 等. 油田三维构造应力场数值模拟与油气运移[J]. 地球学报, 2002, 23(2):175-178.
- WANG H C, WANG W, WANG L J, et al. Three-dimensional tectonic stress field and migration of oil and gas in Tanhai [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(2): 175-178.
- [55] 曾联波, 肖淑蓉, 罗安湘. 陕甘宁盆地中部靖安地区现今应力场三维有限元数值模拟及其在油田开发中的意义[J]. 地质力学学报, 1998, 4(3):60-65.
- ZENG L B, XIAO S R, LUO A X. The three-dimensional finite element numerical simulation of modern stress field and its significance in the oil development of the Jingan area in the central Shaanxi-Gansu Ningxia Basin[J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4(3): 60-65.
- [56] 曾联波, 文世鹏, 肖淑蓉. 低渗透油气储集层裂缝空间分布的定量预测[J]. 勘探家, 1998, 3(2):24-26, 6.
- ZENG L B, WEN S P, XIAO S R. Quantitative prediction of fracture space distribution in low-permeability reservoir[J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(2): 24-26, 6.
- [57] 胡秋媛, 李理. 鲁西地区晚中生代—古近纪伸展构造的应力场数值模拟[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2):259-266.
- HU Q Y, LI L. Numerical simulations of tectonic stress fields for Late Mesozoic-Paleogene extensional tectonics in western Shandong[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 259-266.
- [58] 刘爱华, 杨清, 吴均平. ANSYS三维地应力场数值模拟方法应用研究[J]. 地质力学学报, 2013, 19(2):133-142.
- LIU A H, YANG Q, WU J P. A practical ANSYS 3-D numerical simulation method for in-situ stress field[J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19(2): 133-142.
- [59] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 塔里木盆地大北气田构造应力场解析与数值模拟[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2557-2572.
- WANG K, ZHANG H L, ZHANG R H, et al. Analysis and numerical simulation of tectonic stress field in the Dabei Gas Field, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(11): 2557-2572.
- [60] 韩志锐, 曾联波, 高志勇. 库车前陆盆地秋里塔格构造带东、西段构造变形与储层物性的差异性[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 508-515.
- HAN Z R, ZENG L B, GAO Z Y. Difference of structure deformation and reservoirs physical property in Qiulitage structural belt of Kuqa Foreland Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014,

- 25(4): 508-515.
- [61] LIU G P, ZENG L B, LI H N, et al. Natural fractures in metamorphic basement reservoirs in the Liaohe Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011(119): 104479.
- [62] YU X, HOU G T, NENG Y, et al. Development and distribution characteristics of tectonic fractures in Kuqa Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(4): 644-656.
- [63] SUN S, HOU G T, ZHENG C F. Fracture zones constrained by neutral surfaces in a fault-related fold: Insights from the Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression [J]. *Journal of Structural Geology*, 2017(104): 112-124.
- [64] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodology [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 152(1): 70-87.
- [65] KIM Y S, PEACOCK D C P, SANDERSON D J, et al. Fault damage zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(3): 503-517.
- [66] LYU W Y, ZENG L B, ZHOU S B, et al. Natural fractures in tight-oil sandstones: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(10): 2343-2367.
- [67] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等.页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J].地学前缘, 2016, 23(2): 63-74. DING W L, ZENG W T, WANG R Y, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 63-74.

Distribution characteristics of natural fractures of the typical fault anticlines in Keshen area of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression, Tarim Basin

LI Ruiqi^{1,2}, LÜ Wenya^{1,2}, WANG Haonan^{1,2,3}, LI Jie⁴, LIU Yulin⁵, YUAN Rui⁶

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

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

3. Chengdu Exploration and Development Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Company Ltd., Chengdu 610000, China;

4. Longdong Oil and Gas Development Company of Changqing Oil field, PetroChina, Qingyang 745000, China;

5. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China;

6. Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: In order to clarify the natural fracture distribution of fault anticlines in the ultra-deep reservoirs, this paper takes the Cretaceous Bashijiqike Formation in the Keshen area of the Kelasu tectonic belt in the Kuqa Depression of Tarim Basin as an example. Combined with geological data, seismic data, FMI image logs, in-situ stress and rock mechanics parameters, the distribution characteristics of natural fractures in the typical faulted anticlines in the Keshen area are clarified by reservoir geomechanics, and the results provide a geological basis for the favorable zone exploration of tight gas in the study area. Different fault anticlines have the general characteristics of natural fracture intensity of “high-low-high” from the top, middle to bottom of the faulted anticlines. The larger the angle between wings, the more limited the distribution of fractures at the top and in the middle of the faulted anticlines, and the wider the distribution of fractures at the bottom of the faulted anticlines. The farther away from the fracture anticline axis, the more limited the fracture distribution at the top and bottom of the faulted anticlines, and the more extensive the fracture distribution in the middle of the faulted anticlines. The natural fractures at the hinge zone at the top of the fault anticlines are more developed than those in the middle and at the bottom of the fault anticlines, which improves the physical properties of the reservoirs and provides reservoir space and seepage channels for tight gas.

Keywords: Faulted anticline; Natural fracture; Distribution characteristics; Favorable zone; Kelasu structural belt; Kuqa Depression

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42002135); the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (Grant No. ZLZX2020-02); the Young Top Talents Research Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (Grant No. 2462017YJRC057).