第 53 卷　第 3 期　　成都理工大学学报（自然科学版）　　Vol. 53　No. 3
2026 年 6 月　　JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY（Science & Technology Edition）　　Jun. 2026

DOI：10.12474/cdlgzrkx.2024112001　　期刊主页：https://xbzrkx.cdut.edu.cn/

复杂构造区天然裂缝差异分布及成因——以塔里木库车前陆冲断带为例

胡笑非[1]，邓虎成[1*]，高艳芳[1]，杜　宇[1]，王翠丽[2]，张昊天[3]，
杨宇勇[1]，雷湘湘[1]，郭尚荣[1]，吴永平[2]

1. 成都理工大学 能源学院（页岩气现代产业学院），成都 610059；
2. 中国石油塔里木油田公司 勘探开发研究院，新疆 库尔勒 841000；
3. 宜宾学院 计算机科学与技术学院，四川 宜宾 644000

[摘要] 南天山前陆冲断带构造复杂，深层–超深层致密砂岩储层中天然裂缝发育。以下白垩统为重要勘探开发目标的目的层经历了多期构造运动，所形成的复杂裂缝系统为储集层提供了必要的富集和渗流空间。然而，库车前陆冲断带不同气田、不同褶皱变形内、不同层位之间裂缝展布特征差异明显。以库车坳陷重点增储上产区为例，基于成像测井、岩心资料、常规测井、镜下薄片、野外地质剖面等资料对重点区块裂缝发育差异性及裂缝成因类型进行研究。通过对研究区应力环境演化特征分析发现自下白垩统沉积以来，应力场方向未发生明显改变，明确了重点区块构造样式及组合特征。厘清了重点区块复杂天然裂缝发育特征及展布规律。博孜大北地区裂缝走向以近南北向为主；克深 X 地区裂缝走向以近东西向为主，发育少量近南北向裂缝；迪那 Y 地区裂缝走向则以近东西向为主。研究区主要发育 3 种构造成因裂缝：区域构造裂缝、构造变形裂缝、断层共（派）生裂缝。结合地质构造背景和应力场环境，梳理了不同成因裂缝的典型发育特征，并开展了基于地质构造环境和应力场相耦合的天然裂缝发育主因分区评价，将库车前陆裂缝发育分布特征主要分为 2 类模式。可为该前陆冲断带裂缝分布预测提供参考。

[关键词] 前陆冲断带；裂缝展布；裂缝成因；库车坳陷；致密砂岩

[分类号] P618.13　　[文献标志码] A

The differential distribution characteristics and genesis of natural fractures in complex tectonic zones: a case study of the Kuqa foreland of Tarim Basin

HU Xiaofei[1]，DENG Hucheng[1*]，GAO Yanfang[1]，DU Yu[1]，WANG Cuili[2]，

收稿日期：2024-11-20；**改回日期：**2025-03-10。　　**责任编辑：**魏　崴。
基金项目：四川省自然科学基金青年基金项目（2024NSFSC0815）。
第一作者：胡笑非（1991—），男，研究员，研究方向：非常规储层地质力学评价，E-mail：huxiaofei@cdut.edu.cn。
***通信作者：**邓虎成（1980—），男，教授，研究方向：油气储层地质力学评价，E-mail：denghucheng@cdut.cn。
引用格式：胡笑非，邓虎成，高艳芳，等，2026. 复杂构造区天然裂缝差异分布及成因——以塔里木库车前陆冲断带为例［J］. 成都理工大学学报（自然科学版），53（3）：534—550.
Hu X F, Deng H C, Gao Y F, et al., 2026. The differential distribution characteristics and genesis of natural fractures in complex tectonic zones: a case study of the Kuqa foreland of Tarim Basin［J］. Journal of Chengdu University of Technology（Science & Technology Edition），53（3）：534—550.

ZHANG Haotian[3]，YANG Yuyong[1]，LEI Xiangxiang[1]，GUO Shangrong[1]，WU Yongping[2]

1. *College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*;

2. *PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China*;

3. *School of Computer Science and Technology, Yibin University, Yibin 644000, China*

Abstract: The tectonic structure of the southern Tianshan foreland thrust belt is complex, in which natural fractures have extensively developed in deep and ultra-deep tight sandstone reservoirs. The Lower Cretaceous strata, a significant target for exploration and development, have experienced multiple episodes of tectonic movement, forming a complex fracture system that provides essential storage and permeability space for reservoirs. However, there are clear differences in the fracture distribution characteristics among different gas fields, within various folds, and at different stratigraphic levels in the Kuqa foreland thrust belt. Taking the Kuqa Depression as an example, which is a key area for enhanced resource discovery and production, we investigated the differential development of fractures and their genetic types based on imaging logging data, core data, conventional logging data, microscopy, and field geological profiles. The analysis of stress evolution in the study area revealed that since the deposition of the Lower Cretaceous strata, there has been no significant change in the stress field direction, clarifying the structural patterns and combination features of key blocks. The investigation also delineated the characteristics and distribution laws of complex natural fractures in the key block: the fractures in the Bozi–Dabei area mainly trend nearly north-south (N-S), those in the Keshen X area primarily trend nearly east-west (E-W) with some N-S trending fractures, and the Dina Y area is characterized by E-W trending fractures. Three main types of tectonic origin fractures are identified: regional tectonic fractures, deformation-related fractures, and fault-related fractures. Combined with the geological structural background and stress field environment, typical development features of different genetic fractures are summarized, and the fracture distribution characteristics are classified into two primary modes in the Kuqa foreland thrust belt. This study provides a guide for predicting fracture distributions in this foreland thrust belt.

Key words: foreland thrust belt; fracture distribution; fracture genesis; Kuqa Depression; tight sandstone

前陆冲断带位于前陆盆地造山带前缘，常由一系列逆冲断裂和褶皱构造组合而形成复杂构造区带，是极为重要的一类油气聚合场所(邹才能等，2010)。中国中西部叠合盆地广泛发育前陆冲断带，如塔里木盆地库车前陆冲断带、四川盆地龙门山前陆冲断带和准噶尔西北缘前陆冲断带(刘和甫等，2000；何登发等，2004；汤良杰等，2004)。前陆冲断带往往经历了强烈的构造活动改造，呈现出多期次、多级次断裂组合断裂带。冲断带内可形成油气资源潜力巨大的构造圈闭，尤其是针对深层−超深层致密储层，断裂和裂缝的发育成为了油气输导富集和开发高产的关键因素(邓虎成等，2013；刘春等，2017；王志民等，2023；Hu et al., 2023)。

库车前陆盆地面积 2.8×10^4 km^2，天然气资源量 8.91×10^{12} m^3，石油资源量 5.77×10^8 t。其中，“博孜—大北”和“克拉—克深”2 个超万亿立方米气田目前均已成功勘探开发，评价显示致密砂岩储层具有埋藏深至超深、成岩作用强、低孔低渗和高温高压特征(王招明等，2016；田军等，2020；曾庆鲁等，2020)。开发实践显示，不同断块之间、不同井之间、甚至不同砂岩层段之间产能差异较大，常见数十倍产能差异(陈东等，2025)。在强烈构造挤压作用下所形成的天然裂缝尺度、规模、分布特征和有效性等为油气渗流富集的核心因素(孙爽等，2019；王东英，2021；吕文雅等，2021；尹帅等，2023；巩磊等，2023；Zeng et al., 2023；鞠玮等，2024)。

库车坳陷克拉苏冲断带致密储层内天然裂缝发育，成因机制和主控因素复杂。基于构造裂缝成因类型，构造裂缝可划分为区域构造裂缝、构造变形相关裂缝和断层共(派)生裂缝 3 类(周文，1998)。近年来，前人对该构造带开展了系统裂缝特征表征及成因分析，逐渐明确裂缝发育分布受到岩性、单层厚度、构造样式、断裂级次和距断裂距离等叠合控制(王珂等，2018；曾联波

等, 2020; 冯建伟等, 2020)。基于定性和定量-半定量分析提出裂缝发育主控模型和分布带: 如区域裂缝带、局部变形控制带、断裂控制带、断层-转折端共控裂缝带等(鞠玮等, 2014; 孙雄伟等, 2015; 邓虎成等, 2016)。由于冲断带内构造复杂, 多级别逆冲断层广泛分布发育, 前人认为其对该地区裂缝发育演化起重要作用, 并且部分地区走滑断层的发育及其调节作用, 是控制天然裂缝发育及分布的关键因素(赵光杰等, 2022; 王珂等, 2023; 郭宏辉等, 2023)。此外, 冲断带区域内经历了强烈的构造挤压作用, 山前构造变形强烈(王珂等, 2022; 李睿琦等, 2023), 发育一系列整体近东西向展布的褶皱变形。同一褶皱不同部位内的裂缝发育程度、特征均有差异(冯建伟等, 2020)。克拉苏冲断带局部构造变形复杂、多级次断裂发育, 不同断块间裂缝的分布规律及产状样式差异明显, 给深层-超深层致密砂岩储层勘探开发评价、治水对策研究等工作造成难题。针对该问题, 需通过全面的野外勘查、钻井岩心、测井资料等统计分析, 厘清不同区域复杂裂缝系统的发育特征和分布规律, 对比裂缝演化过程及分布模式, 为前陆冲断带致密砂岩油气勘探开发及后续地质问题提供理论依据和实践指导。

1 地质概况

库车坳陷位于南天山造山带与塔里木板块结合处, 受到多次复合隆升和挤压冲断作用的叠合影响, 发育多条由北向南逆冲的大型叠瓦状冲断层和近东西向展布的褶皱, 空间上呈现出“南北分带、东西分段、上下分层”的构造特征(田作基和宋建国, 1999; 徐珂等, 2022)。具体细分为北部单斜带、克拉苏—依奇克里克冲断带、拜城凹陷、秋里塔格背斜带和阳霞凹陷 5 个二级构造单元(Neng et al., 2018; 冯建伟等, 2020)(图 1)。

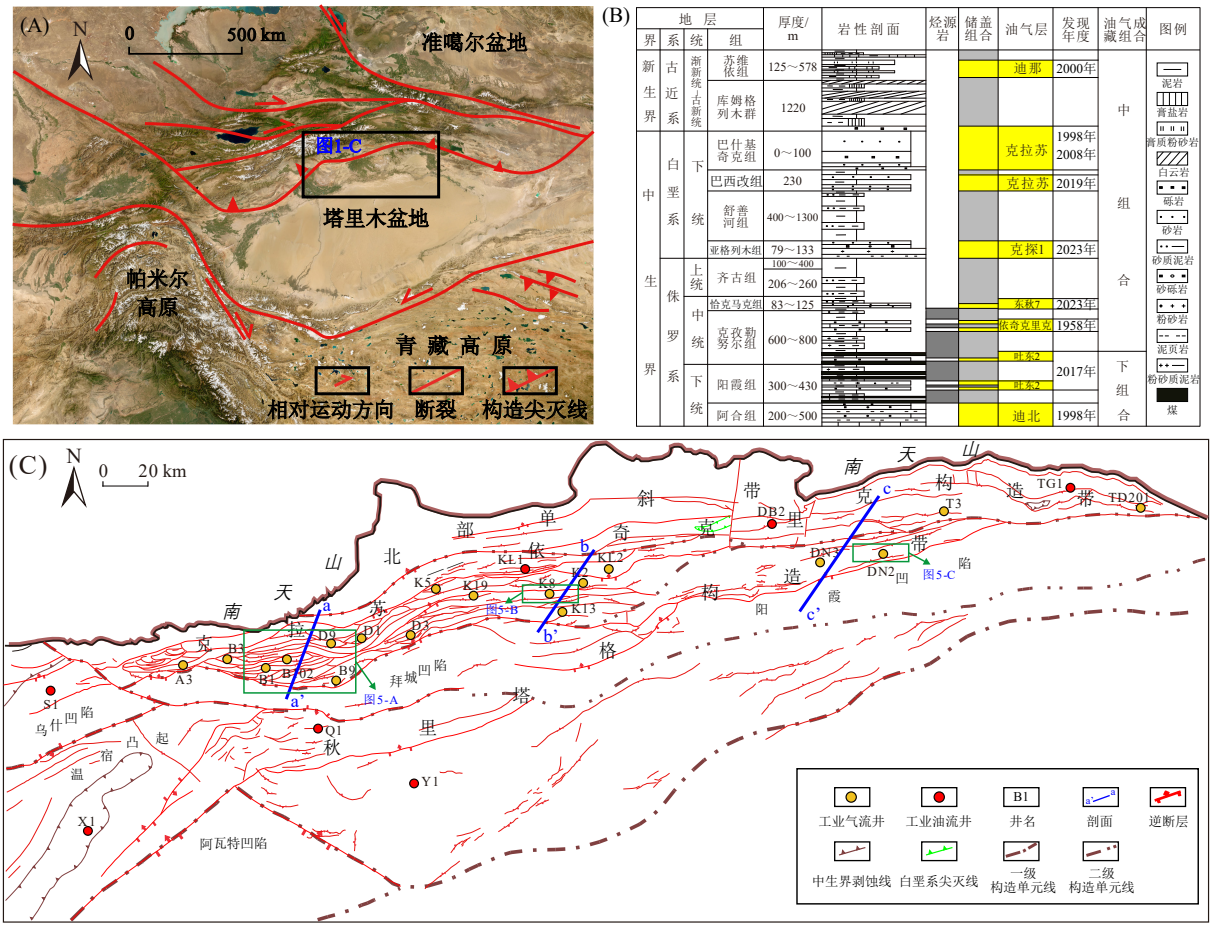

图 1 库车坳陷构造单元划分及中-新生界储盖组合综合柱状图

Fig. 1 Structural unit division of the Kuqa Depression, and a comprehensive stratigraphic column showing different Mesozoic–Cenozoic reservoir-cap rock combinations

(A)库车坳陷分布位置图; (B)库车坳陷中-新生界储盖组合综合柱状图; (C)库车坳陷构造单元划分图

2　构造演化特征及差异性

塔里木盆地位于南天山、阿尔金山和西昆仑山之间，是发育在元古宇结晶基底上的大型含油气叠合盆地（何登发等，2005），志留纪末期，昆仑岛弧与塔里木大陆板块发生碰撞，开始形成前陆盆地和古前陆冲断带（余海波等，2016）。库车坳陷自晚古生代以来经历了海西期—印支期、燕山晚期—喜马拉雅早期、喜马拉雅中期和喜马拉雅晚期共 4 期主要的构造活动，构造演化期间区域性隆升和构造变形明显，造成不同时期、不同区块的沉积、构造和抬升剥蚀特征差异显著，导致区域性的不整合接触。

中生代三叠纪开始，盆地表现为造山后相对短期的区域拉张应力场和板块边界作用力传递所造成的裂陷作用。到侏罗纪—白垩纪时期（燕山晚期），盆地则表现出均衡坳陷作用，于克拉苏构造带地层沉积厚度最大，应力场由弱伸展状态转变为挤压状态，古水平最大主应力方向为近 SN 向（图 2）。新近纪时期（喜马拉雅中期），盆地整体呈现出均衡沉降作用，在近 SN 向持续区域挤压背景下受隆坳格局的影响，于克拉苏和秋里塔格形成 2 个巨厚膏盐岩层（余海波等，2016）。上新世—第四纪时期（喜马拉雅晚期），盆地整体为压陷作用，该时期受强烈的近 SN 向区域挤压作用，多级次断裂和褶皱变形显著发育，形成多个近 EW 向线性褶皱带。整体上库车前陆盆地区域应力场的水平最大主应力方向自燕山晚期以来保持近 SN 向，在喜马拉雅中期出现小角度偏移，应力场方向在多个地质时期内保持相对稳定，在长期应力作用下逐渐演化，总体应力场具有一定的继承性，形成复杂的褶皱和逆冲断层系统。

受多套膏盐岩和煤系地层等滑脱层的影响，在挤压造山成盆过程中形成明显的分区、分层构造变形。库车前陆冲断带西段博孜—大北地区盐下层以逆断层、逆冲叠瓦构造以及突发构造为主，整体呈现出多排由南向北呈阶梯状的逆冲断裂系统。该地区构造剖面（图 3-A）显示盐下层构造复杂呈现出多级次断裂和多重推覆构造特征，由北向南断裂倾角逐渐变缓，构造样式由逆冲推覆逐渐变为逆冲叠瓦，中生代地层整体呈现出楔形逆冲，但整体背斜构造变形程度较小。此外，部分地区还存在花状、类花状构造，表示局部走滑断裂的存在。库车前陆冲断带中段克深—克拉地区（图 3-B）盐下层以前展开式逆冲推覆构造为主，构造样式主要为突起构造、叠瓦构造和逆冲构造。北部山前冲断变形强烈，构造抬升明显，断块规模相较于博孜—大北地区大，褶皱变形程度强。该地区库姆格列木群非能干层膏盐岩层厚度大，“软连接”作用明显，通过塑性变形吸收和缓解上覆地层重力、构造挤压应力等。类似的，库车前陆冲断带东段（图 3-C）位于秋里塔格构造带，盐下层见基底卷入逆冲断裂，见逆冲叠瓦构造，于 DN2 井区见大型断层转折褶皱，在褶皱后翼发育突起构造。构造应力对前陆冲断带内构造变形发育具重要控制作用，北部山前构造应力强，以高角度逆冲断裂为主，破碎程度较大；远离山前构造应力逐渐减弱。

3　天然裂缝特征及差异性

3.1　天然裂缝分布特征

下白垩统巴什基奇克组裂缝成像测井资料显示，库车前陆冲断带不同构造区带裂缝优势走向差异较为明显（图 4）。自西向东，冲断带西部地区（乌什凹陷东部、博孜地区及大北西部地区）构造裂缝走向以近 SN 和 NNE 向为主，少见 NE 向裂缝；中部地区（大北东部、克深地区）构造裂缝走向以 EW 向为主；东部迪北和吐格地区以近 SN 向为主，而迪那地区以近 EW 向为主。由西到东，整体库车前陆冲断带裂缝优势走向呈现出 SN-EW-SN 交替特征。为进一步明确库车前陆冲断带天然裂缝分布特征，开展分区分块分析。

基于成像测井和钻井岩心资料，对天然裂缝开展精细化识别，明确了 3 个典型气田天然裂缝发育及分布特征。库车前陆冲断带西部博孜—大北地区下白垩统巴什基奇克组和巴西改组裂缝优势走向主要为近 SN 向，博孜西部偏 NNW 向、博孜东部以 SN 向为主、大北地区以 NNE 向为主（图 5-A）。库车前陆冲断带中部克深 X 断块以近 EW 向为主，少部分井如西部地区 4 口井裂缝走向为 SN 向或 NNW 向（图 5-B）。库车前陆冲断带东部迪那 Y 断块古近系苏维依组和库姆格列木群裂缝优势走向主要为 NEE 向和近 EW 向，

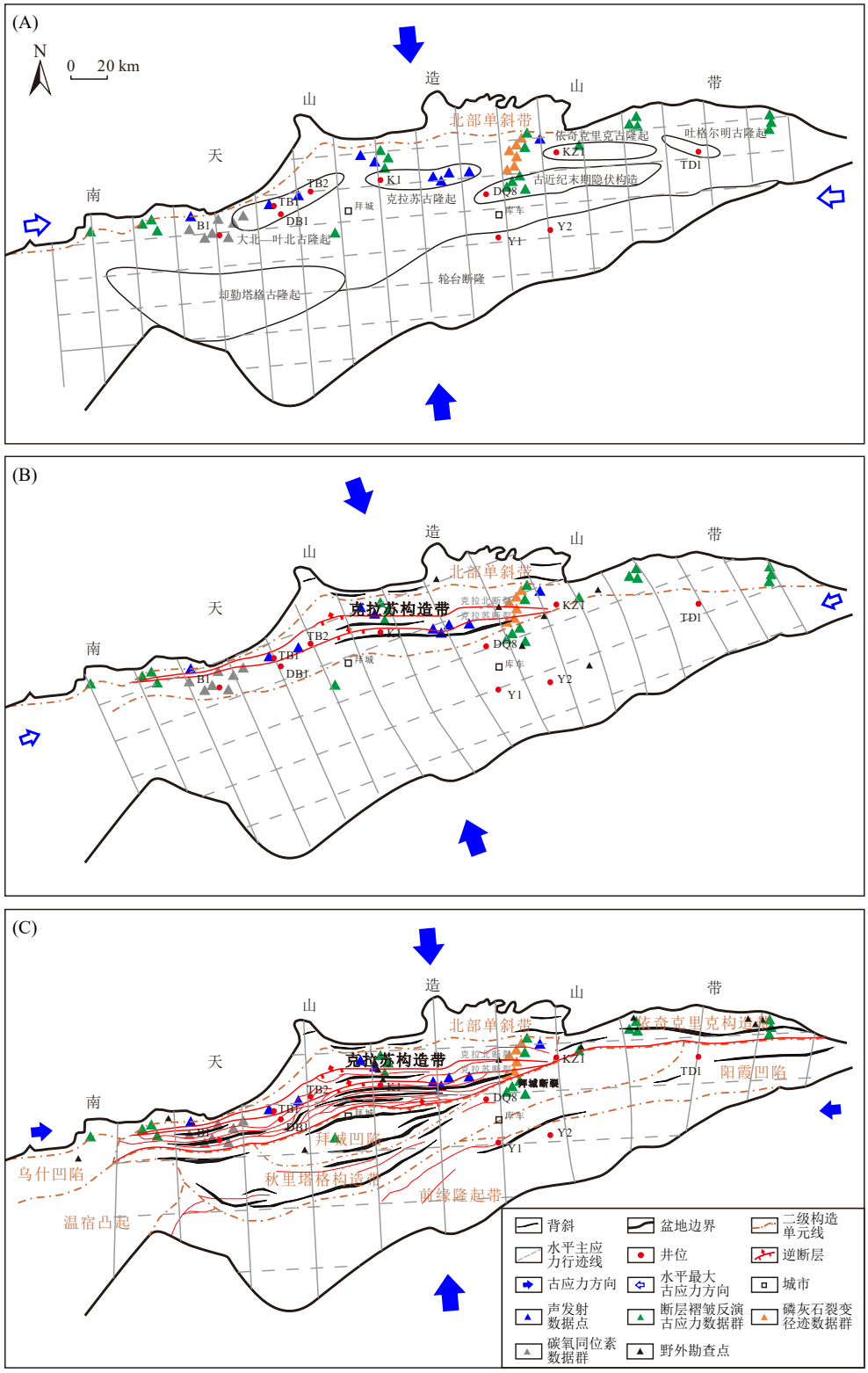

图 2 库车前陆冲断带古构造形迹图

Fig. 2 Paleotectonic view of the Kuqa foreland thrust belt

(A)燕山晚期—喜马拉雅早期构造形迹图;(B)喜马拉雅中期构造形迹图;(C)喜马拉雅晚期构造形迹图

(图中部分声发射数据点来源于曾联波等, 2004;部分断层褶皱反演古应力数据群来源于张仲培等, 2003;张琰, 2019;部分磷灰石裂变径迹数据群来源于王彦斌等, 2001)

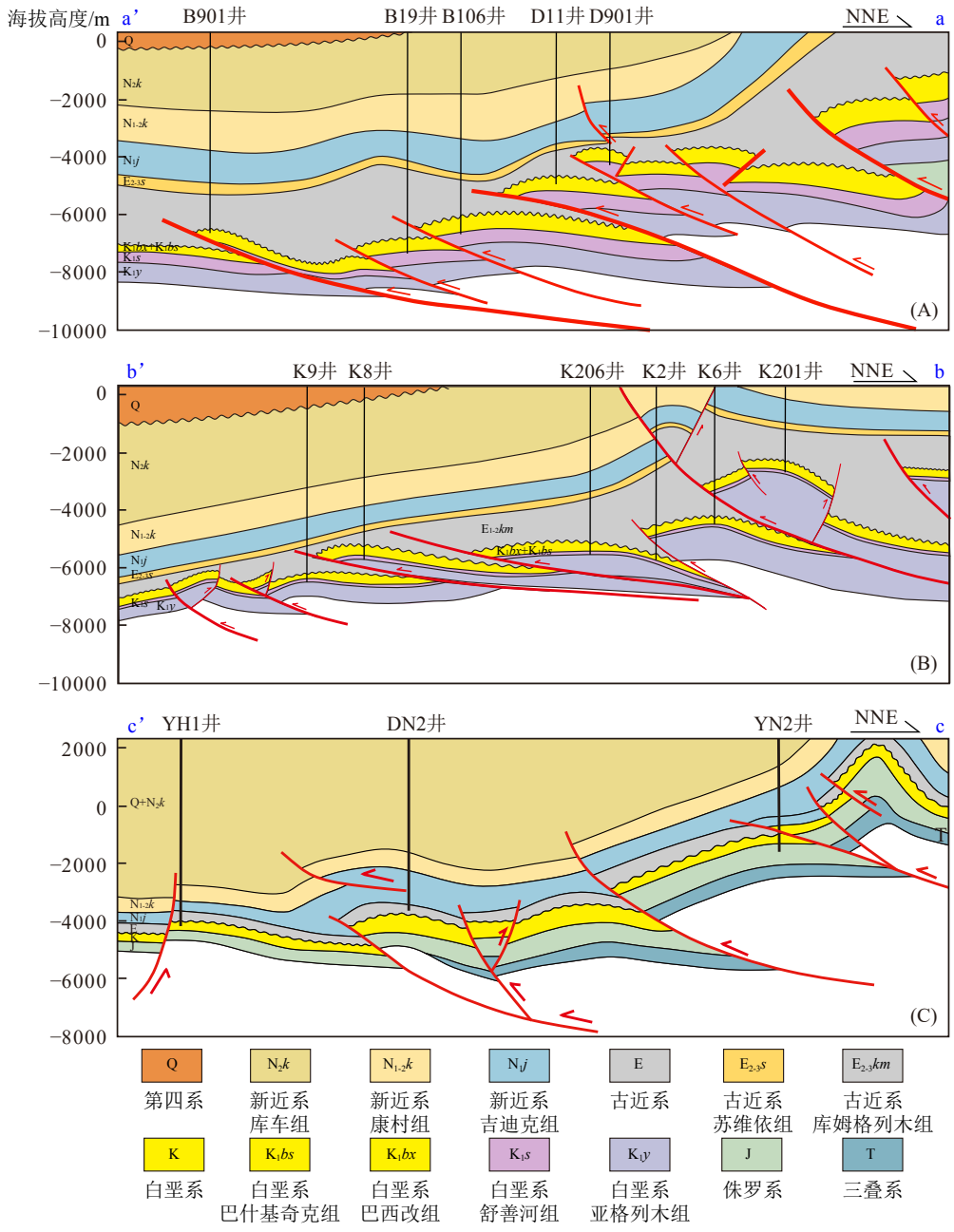

图 3　库车前陆冲断带构造剖面图（剖面位置见图 1-C）

Fig. 3　Tectonic cross section of the Kuqa foreland thrust belt

（A）剖面 a-a'：西部区块；（B）剖面 b-b'：中段区块；（C）剖面 c-c'：东部区块

整体上裂缝走向较为一致。此外，3 个地区整体有效裂缝（未充填和半充填裂缝）发育程度较高（图 6），为该区域内油气富集高产奠定了基础。

前人研究表明，博孜—大北地区下白垩统致密砂岩主要见 3 期构造活动相关裂缝（王志民等，2023；陈东等，2025），其中形成时期较早的裂缝充填程度较高，形成时期较晚的裂缝多为半充填或未充填，有效程度较高。钻井岩心观察显示，天然裂缝主要以高角度−垂直平行和共轭剪切裂缝为主，偶见垂直张性裂缝（图 7-A～C）。克深 X 断块以垂直−高角度张性裂缝为主，少见剪切裂缝（图 7-D～F），其中张性裂缝充填性以晚期半充填和未充填为主，裂缝发育较长，可贯穿垂直深度较大（主要>50 cm），同时以方解石为主的充填物能够为半充填裂缝提供有效的支撑，保证烃类物质在埋藏条件下的有效传输空间。迪那 Y 地区以高角度−垂直张性裂缝为主、高角度剪切裂缝次之（图 7-G～I）。

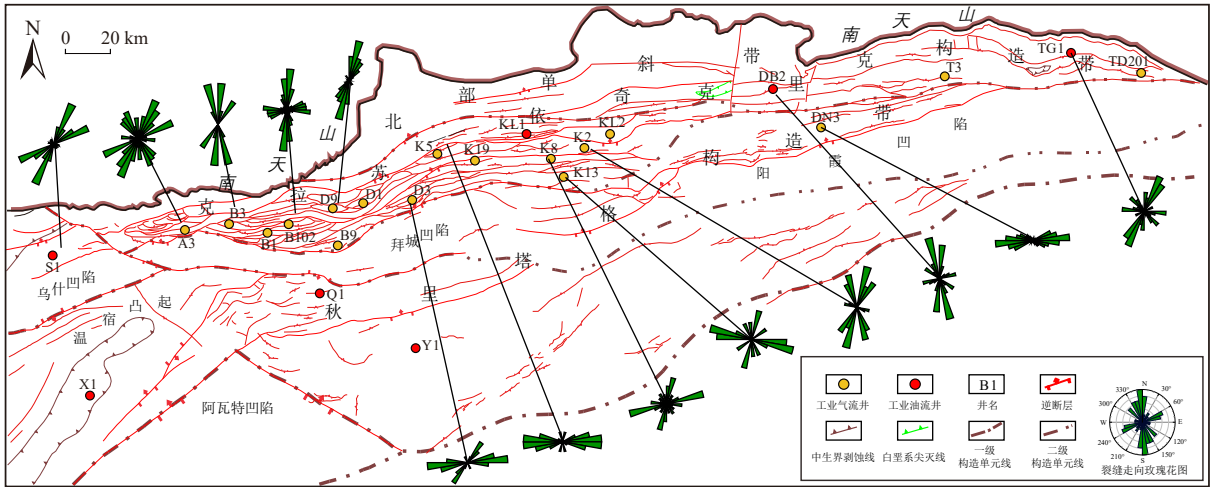

图 4 库车前陆冲断带天然裂缝走向玫瑰花分布图

Fig. 4 Rose diagram of natural fracture orientations in the Kuqa foreland thrust belt

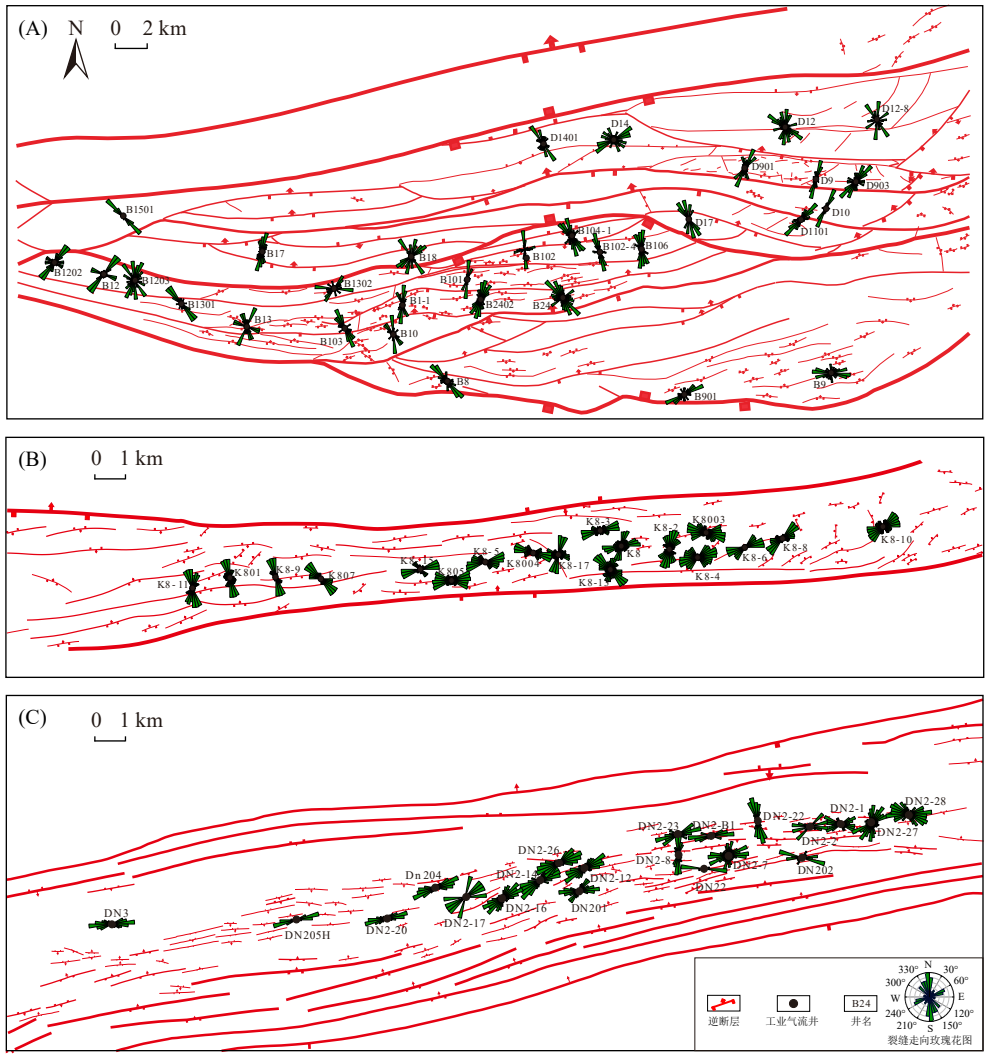

图 5 克拉苏构造带重点区块成像测井裂缝走向玫瑰花分布图(区块位置见图 1-C)

Fig. 5 Rose diagram of imaging logging fracture orientation and distribution of key blocks in the Kelasu structure belt

(A)博孜—大北地区下白垩统裂缝走向玫瑰花图分布;(B)克深 X 地区下白垩统裂缝走向玫瑰花图分布;(C)迪那 Y 地区古近系裂缝走向玫瑰花图分布

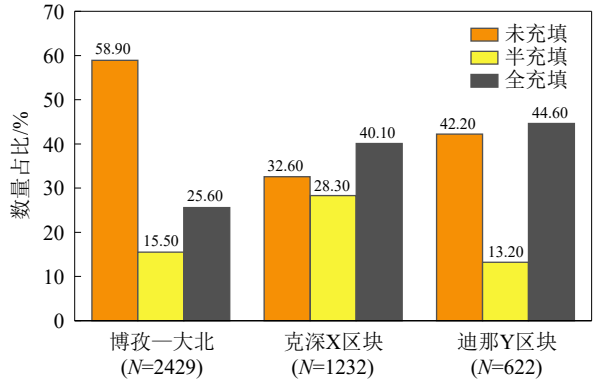

图 6　重点区块成像测井裂缝充填性柱状图

Fig. 6　Histogram of fracture fillings in imaging logging data of key blocks

3.2　天然裂缝成因分析

前人研究认为，天然构造成因裂缝主要有3类，包括区域构造裂缝、局部构造变形相关裂缝以及断层共(派)生裂缝(图 8)(周文，1998)。区域构造裂缝主要指由区域性应力场(地壳运动、板块间构造活动等因素所引起的应力场分布)作用下形成的分布广泛、产状基本稳定且不受局部构造变形所控制的裂缝系统，多发生在地层明显变形前；区域构造裂缝主要以 2 组成共轭“X”型发育的剪切裂缝出现，往往垂直于层面且缝面无明显错动，此外可见一组与古水平最大主应力方向平行的垂直张性裂缝。局部构造变形相关裂缝，指地层受构造应力作用产生褶皱变形及其过程中形成的各类特征、产状不同拉张缝和剪切裂缝等。能干层易发生纵弯褶皱变形，外侧张性带发生拉伸，内侧挤压带产生缩短，两

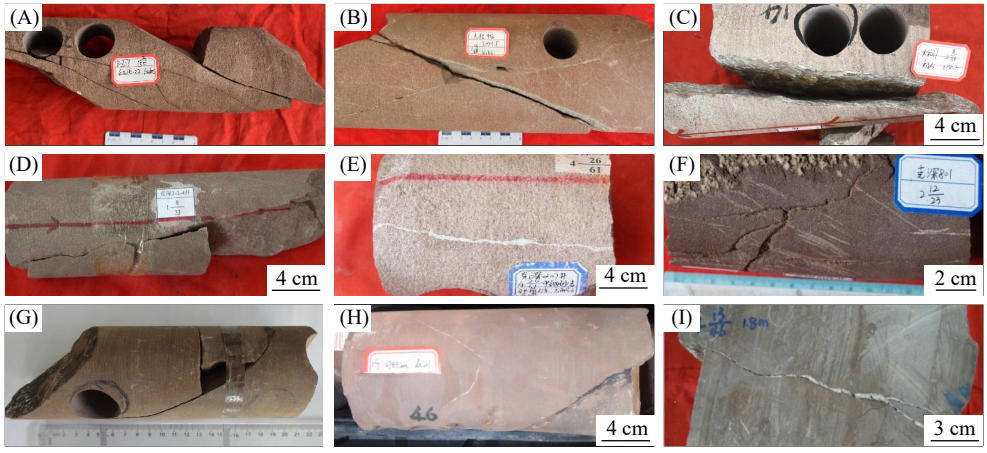

图 7　钻井岩心裂缝特征照片

Fig. 7　Photographs of example drilling core fractures

(A)B17 井，深度 6 056.22 m，高角度未充填剪切裂缝；(B)D902 井，深度 5 093.5 m，高角度半充填共轭剪切裂缝；(C)D17 井，深度 6 150.2 m，近垂直半充填张性裂缝；(D)K2-2-4 井，深度 6 675.5 m，近垂直未充填张性裂缝；(E)K207 井，深度 6 812.2 m，近垂直全充填张剪性缝；(F)K801 井，深度 6 812.2 m，全充填近垂直张性裂缝；(G)DN22 井，深度 4 922.1 m，2 条未充填高角度剪切裂缝；(H)DN201 井，深度 4783 m，一条高角度全充填张剪性缝，另一条未充填剪切裂缝；(I)DN204 井，深度 5 188.2 m，高角度半充填张性裂缝(袁静等，2017)

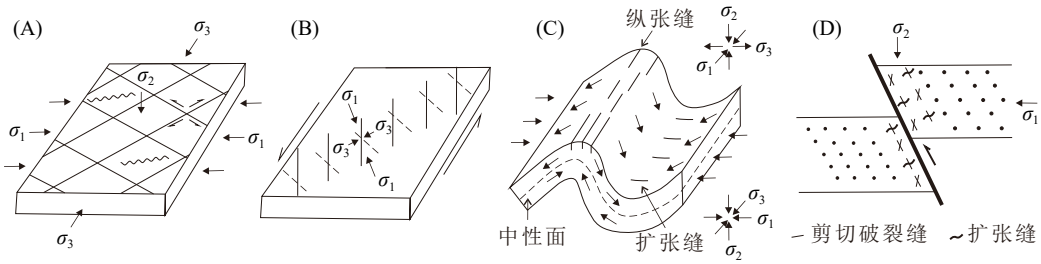

图 8　3 类主要构造裂缝类型模式图(据周文，1998 修改)

Fig. 8　Typical pattern of the three main types of tectonic fractures

(A)区域构造裂缝(挤压应力场)；(B)区域构造裂缝(剪切应力场)；(C)构造变形裂缝；(D)断层共(派)生裂缝

注：σ_1 为水平最大主应力；σ_2 为中间应力；σ_3 为水平最小主应力。

者之间形成中和带(过渡带)(Hudleston and Holst, 1984; Frehner, 2011);张性带内以发育与变形枢纽平行的纵张缝为典型特征,挤压带则发育与挤压应力方向相协调的剪切裂缝为主。与断裂相关的裂缝,主要可以分为共生和派生 2 类:共生裂缝指与断层活动时形成的裂缝系统,通常以 2 组共轭剪切裂缝的形式出现(一组与断层产状一致或呈小角度相交,另外一组与断层面斜交);派生裂缝主要指断层形成后,受断层扰动影响局部应力场方向和大小发生改变所形成的裂缝,常可见 1 组羽状张性裂缝和 2 组剪切裂缝。整体上断层相关裂缝分布较为复杂。若断层存在走滑特征,走滑扰动应力场的控制会使得裂缝的发育分布[包含 7 类应变破裂要素(邓辉等, 2019)]更加杂乱。本文以博孜—大北地区下白垩统致密砂岩天然裂缝为例,开展天然裂缝成因分析。

3.2.1 区域构造裂缝

远离断裂、构造相对平缓的位置裂缝发育受区域应力场控制。以 B1501 井为例(图 9),该井远离断裂、最大构造曲率较小(K_1bs 曲率 0.24 km^{-1}, K_1bx 曲率 0.21 km^{-1}),地层变形程度较低,单井岩心显示裂缝以 NW 和 NE 向剪切裂缝为主,缝面较为平直,无擦痕、阶步,偶见 SN 向张性裂缝。剪切裂缝走向与库车前陆冲断带整体上继承性的近 SN 向水平最大主应力呈小角度相交,张性裂缝与水平最大主应力方向接近平行,与图 8-A 中挤压应力场所形成的区域构造裂缝理论相一致。此外,野外剖面显示,区域构造裂缝同样以 NE 和 NW 向剪切裂缝为主,以垂直或高角度裂缝为主,呈现出棋盘格状(图 10),为区域构造裂缝典型分布特征。经该地区野外统计,区域构造裂缝缝长较大,长度大于 0.4 m,主要在 0.4~6.0 m,呈现出穿多层砂岩或贯穿薄层

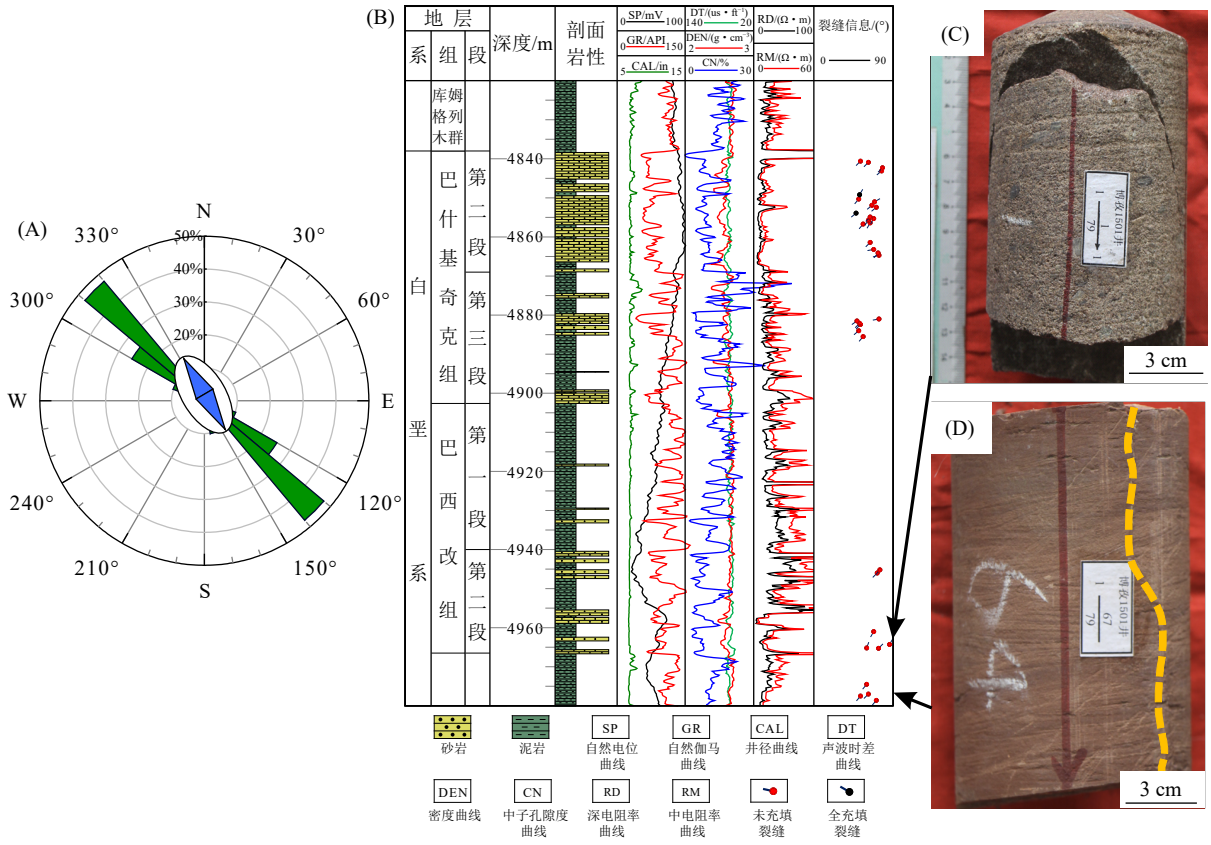

图 9 B1501 井裂缝特征柱状图及岩心照片

Fig. 9 Columnar diagram showing the characteristics of fractures in well B1501 and photographs of core samples

(A)成像测井识别裂缝走向玫瑰花图,绿色三角代表裂缝走向,蓝色箭头代表水平最大主应力方向;(B)常规测井曲线及裂缝信息综合图;(C)岩心发育 NW 向剪切裂缝,缝面平直;(D)岩心发育 SN 向张性裂缝,缝面弯曲粗糙(图中黄色虚线处)

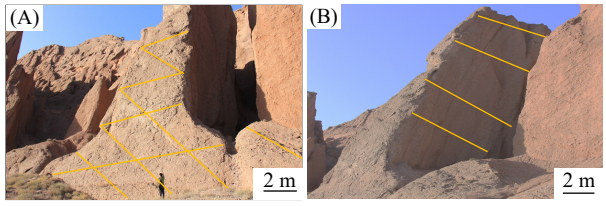

图 10　区域构造裂缝野外露头

Fig. 10　Outcrop of regional tectonic fractures in the field

（A）库车河剖面正视面；（B）库车河剖面侧视面，巴什基奇克组底砾岩，见 2 组共轭剪切裂缝穿层分布

泥岩特征，穿薄层砂、泥岩层数可达 7～15 层。区域构造裂缝形成时期较早，在燕山晚期—喜马拉雅早期近 SN 向水平最大主应力挤压作用下，地层无明显褶皱变形时开始形成。构造变形曲率和背斜翼间角显示，博孜—大北地区背斜褶皱高部位最大曲率主要分布在 0.1～0.42 km^{-1}，平均翼间角 152°，主要以褶皱变形程度较小的逆冲叠瓦构造以及突发构造为主（而克深—克拉地区整体构造变形程度较大，高部位最大曲率主要在 0.38～0.62 km^{-1}，平均翼间角 131°），区域构造裂缝发育较为明显。

3.2.2　构造变形裂缝

远离断裂、构造变形相对强烈的位置裂缝发育受地层局部应力场控制。博孜—大北地区 B9 井为特殊，与该地区其他井相比所在部位变形程度较大（图 11），该井远离断裂、最大构造曲率异常（0.66 km^{-1}），地层变形程度高，单井成像与岩心资料显示裂缝以近 EW 向垂直或高角度张性裂缝为主，薄片上可见张性裂缝绕开颗粒延伸发育。根据 B102 井（曲率 0.1 km^{-1}）、B102-1 井（曲率 0.35 km^{-1}）、B102-2 井（曲率 0.4 km^{-1}）与 B102-4 井（曲率 0.43 km^{-1}）测井资料绘制连井剖面图（图 12），B102 井岩心可见 EW 向张性裂缝发育，4 口井成像测井玫瑰花图显示 EW 向褶皱变形相关张性裂缝均主要发育在变形程度较大的构造高部位巴什基奇克组上段，而变形程度较小的巴什基奇克组下段与巴西改组则主要发育近

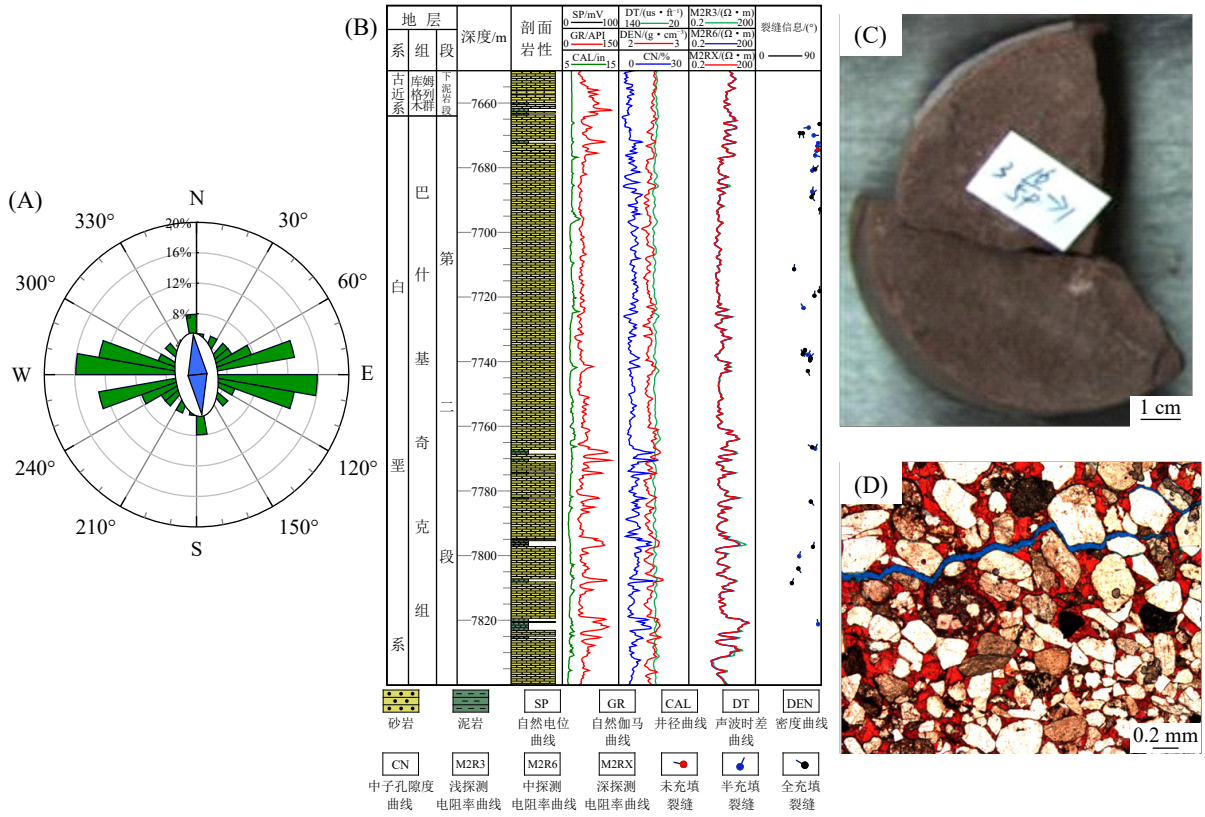

图 11　B9 井裂缝特征柱状图及岩心照片

Fig. 11　Columnar diagram showing the characteristics of fractures in Well B9 and photographs of core samples

（A）成像测井识别裂缝走向玫瑰花图，绿色三角代表裂缝走向，蓝色箭头代表水平最大主应力方向；（B）常规测井曲线及裂缝信息综合图；（C）EW 向未充填张性裂缝使岩心破碎；（D）未充填张性裂缝，颗粒以点-线接触为主无明显挤压剪切的粒内缝、粒间缝

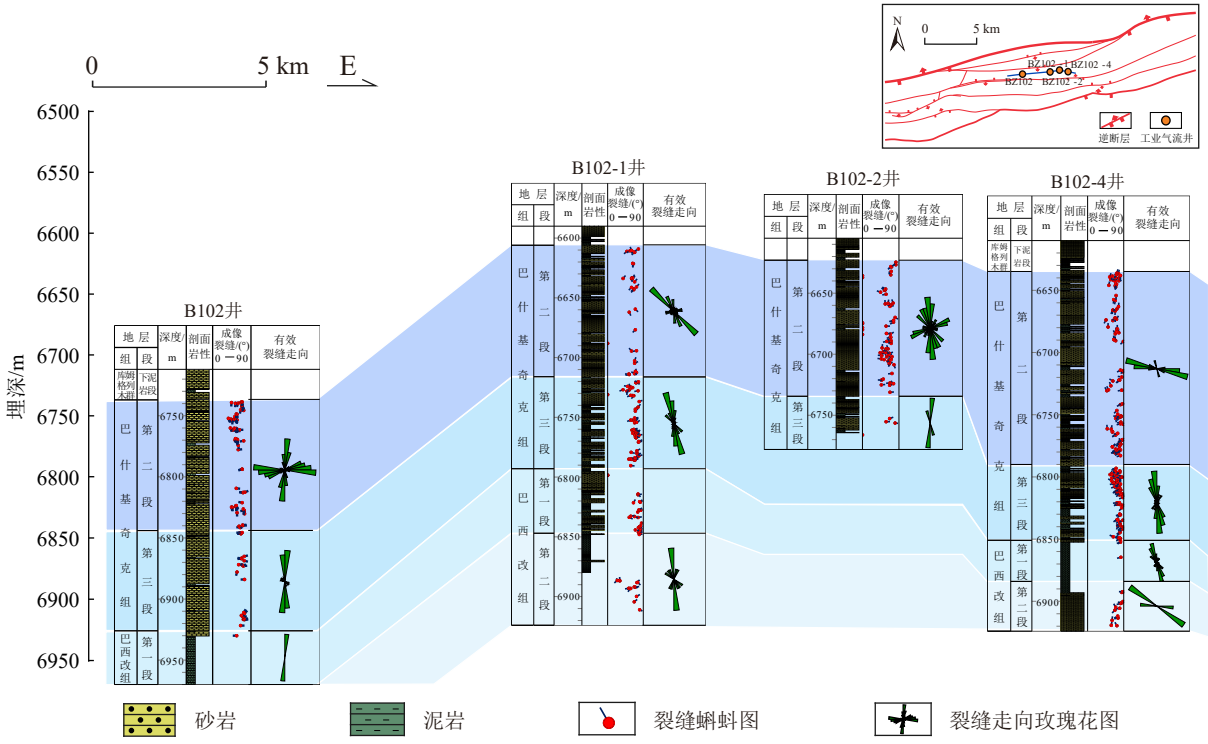

图 12 博孜地区裂缝特征连井剖面图

Fig. 12 Cross-well profile illustrating the characteristics of fractures in the Bozi area

SN 向剪切裂缝，少量发育 NW 向剪切裂缝，构造变形裂缝发育不明显。基于成像测井信息统计近 EW 向构造变形裂缝密度与曲率之间的关系，结果显示：当曲率大于 0.4 km^{-1} 时，该区近 EW 向构造变形裂缝相对发育，裂缝发育密度大于 0.05 条/米(图 13)。褶皱变形相关张性裂缝主要在发育褶皱变形程度较高的突起构造和逆冲构造高部位，发育时期相对较晚。

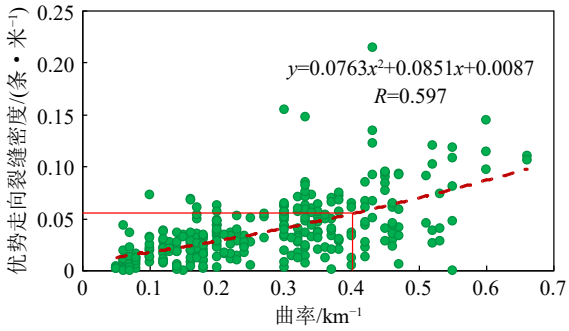

图 13 近 EW 向裂缝发育密度与曲率关系

Fig. 13 Relationship between the development density of fractures trending nearly east-west, albeit with some slight curvature

3.2.3 断层共(派)生裂缝

靠近断裂的位置受断裂扰动应力场影响，地应力方向发生偏转，断层共(派)生成因相关裂缝发育方位进而受控。以 B24 井为例(图 14)，该井穿过断层(井深 7 324 m 左右)，所穿断层产状为 315°∠80°，断层上盘的裂缝走向以 NW 向与 NEE 向为主，少量发育近 SN 向、EW 向裂缝，裂缝走向分布较为杂乱，裂缝发育密度较高(0.62 条/米)；相对于上盘，断层下盘裂缝走向较为集中，主要发育 NW 向裂缝，裂缝发育密度较上盘低(0.25 条/米)(图 14-A、B)。岩心破碎，可见剪切裂缝发育，缝面见斜向擦痕、阶步(图 14-C)；薄片颗粒以面接触为主紧密排列，见粒内缝、粒间缝(图 14-D、E)。库车前陆多发育走滑断裂(郭宏辉等，2023)，野外观测发现，克孜努尔沟剖面发育右旋走滑断裂，断面倾角大、切割多层地层、走向延伸远；核部多为杂乱网状组系剪切裂缝，倾角不一，裂缝呈现出分叉、分支情况，泥质充填程度高。其上盘发育 38 条共轭剪切裂缝，下盘发育 10 条垂直于层面的共轭剪切裂缝，缝长 1.5～2.0 m，发育 2 组共轭剪切裂缝，一组与断裂走向呈小角度相交，另一组与断裂走向呈大角度相交，产状分别为 63°∠66°和 342°∠56°，主动盘(上盘)共轭剪切裂缝发育情况优于被动盘(下盘)(图 15-A)。库车河剖面发育多个右旋走滑断裂，核部网状缝发育程度高，在巴什基奇克组右

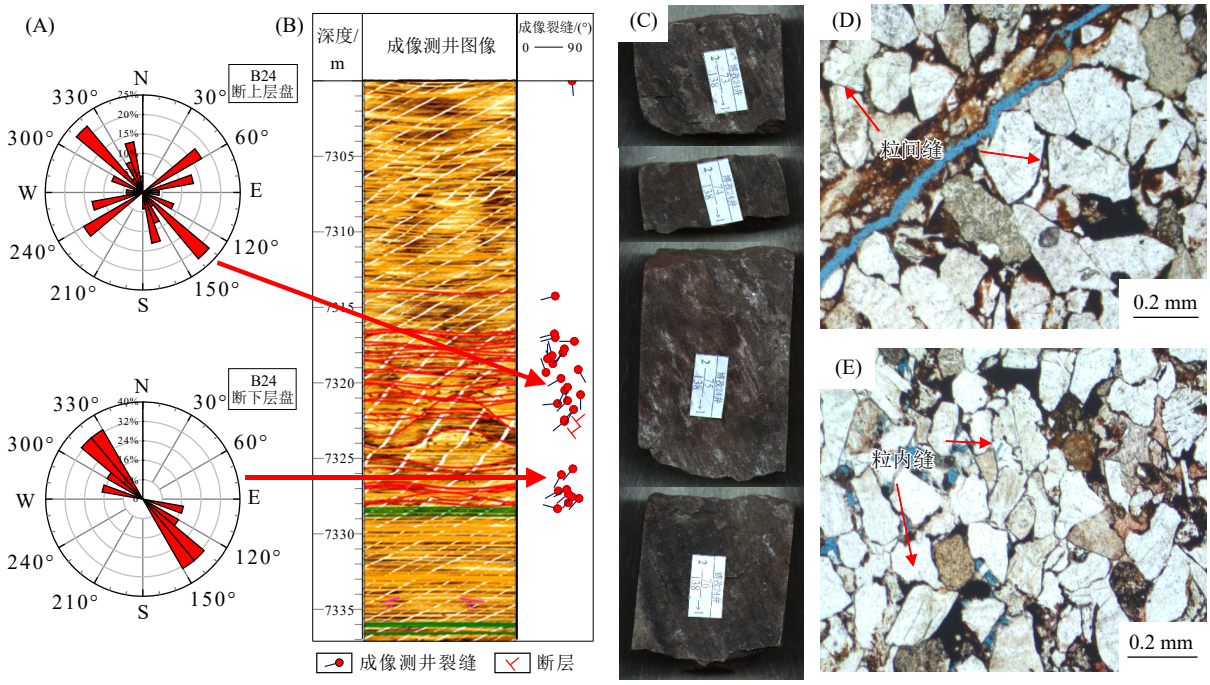

图 14　B24 井岩心、薄片资料

Fig. 14　Core and thin section data from Well B24

（A）B24 井裂缝走向玫瑰花图；（B）B24 井穿断层成像测井柱状图；（C）B24 井深度 7 225.2 m 处岩心发育剪切裂缝，见斜向擦痕阶步，擦痕方位 NW；（D）B24 井深度 7 221.17 m 处薄片见破碎带内铁泥质和碎粒状长英质充填，微裂缝沿破碎带分布，粒内缝发育；（E）B24 井深度 7 223.65 m 处薄片见一条由碎粒状方解石半充填的剪切裂缝，粒间缝发育

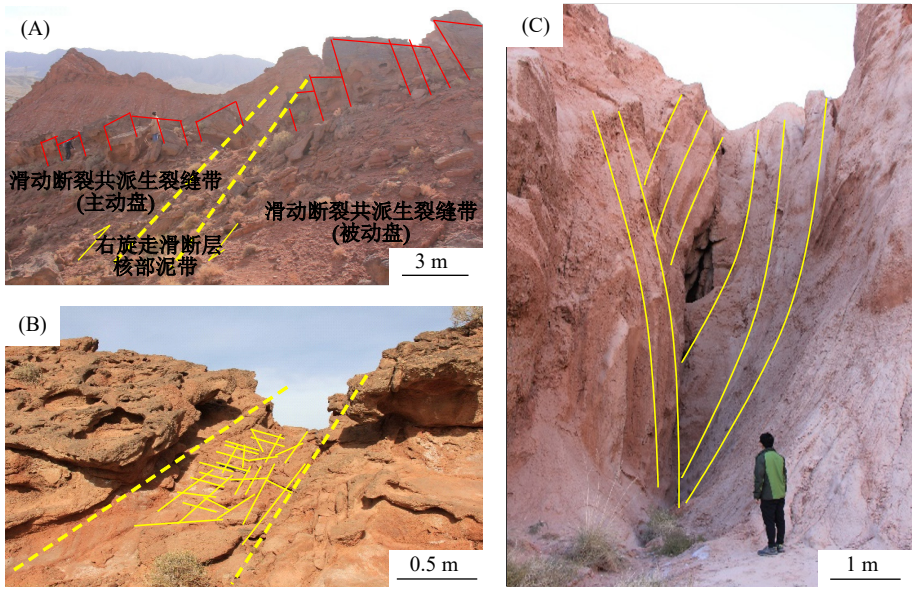

图 15　断层共（派）生裂缝野外露头

Fig. 15　Outcrop of co-derived fractures associated with faults in the field

（A）克孜努尔沟剖面右旋走滑断裂剖面图；（B）库车河剖面右旋走滑断裂核部网状裂缝发育；（C）库车河剖面巴什基奇克组，右旋断裂附近见多个滑动面，多期方解石充填

旋走滑断裂附近可见多个滑脱面被多期方解石充填（图 15-B、C）。基于成像测井信息统计裂缝发育密度与距断层距离之间的关系，结果显示：越靠近断层裂缝发育程度越高，在断层 600 m 范围内裂缝发育密度大于 0.15 条/米，断层发育对裂缝控制作用明显（图 16）。断层共（派）生裂缝

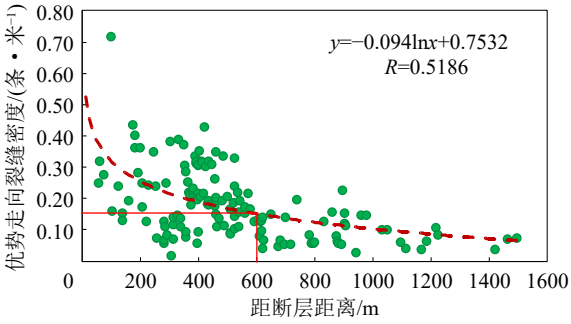

图 16 裂缝发育密度与距断层距离关系

Fig. 16 Relationship between the development density of fractures and distance from faults

与断裂形成时期相一致，主要在喜马拉雅晚期次级断裂发育时期。

4 多成因天然裂缝分区评价

基于各成因裂缝力学性质、裂缝走向、倾角、长度和穿层性、缝面特征、薄片上微观颗粒与微裂缝特征等多种因素，形成了该地区区域构造裂缝、构造变形裂缝与断层共(派)生裂缝 3 种成因裂缝的发育特征识别表(表 1)，根据裂缝特征的识别归类，可为该地区天然裂缝成因划分提供依据。

天然裂缝发育特征是判断构造成因的重要依据，与其所处的构造地质环境具有密切联系。基于研究区地层最大构造曲率和距断裂距离 2 个方面，综合多尺度裂缝发育特征，可划分为区域构造挤压区、断裂控制区和相对强变形褶皱区(图 17)：博孜—大北地区断裂控制区为距断裂距离≤600 m 范围内的区域，该区域内裂缝主要以断裂相关裂缝为主；相对强变形褶皱区为距断层距离>600 m 且曲率≥0.4 km^{-1} 的区域，该区域内裂缝主要以褶皱相关裂缝为主；区域构造挤压区为距断层距离>600 m 且曲率< 0.4 km^{-1} 的区域，该区域内裂缝主要以区域构造相关裂缝为主。

综上所述，结合天然裂缝成因机理模式与研究区构造演化特征，形成了 2 类主要裂缝发育分布模式(图 18)。库车前陆冲断带自下白垩统沉积以来，区域构造应力场方向未发生明显转动，主要以近 SN 向为主(图 2)。然而不同区块构造裂缝走向有较明显差异，通过对多成因、多产状天然裂缝发育特征进行梳理认为：远离断裂且构造变形相对较为平缓区域，地层主要受区域性构造应力作用，在该应力场环境影响下，裂缝主要为区域构造成因剪切裂缝，共轭剪切裂缝小角度夹角平分线方向与水平最大主应力方向相一致，匹配弱构造变形程度下多成因裂缝发育模式；在远离断裂且地层构造变形程度相对较大区域，构造高部位主要发育与构造应力方向相垂直的拉张应力裂缝，该组张性裂缝在研究区内主要呈现为近 EW 向，匹配强构造变形程度下多成因裂缝发育模式；靠近断裂的区域则发育断层共(派)生裂缝，断裂核部附近裂缝走向相对较为杂乱，靠近断裂附近裂缝则以剪切裂缝为主；此外，例如 B102 井、K13 井等单井上 SN 向、EW 向裂缝均有

表 1 库车前陆冲断带裂缝成因特征识别表

Table 1 Identification table for the genesis and characteristics of fractures

主要参数	区域构造裂缝		构造变形裂缝	断层共(派)生裂缝
力学性质	剪切裂缝	张性裂缝	张性裂缝	以剪切裂缝为主
走向	NE和NW向(30°～60°和300°～330°)	近SN向(345°～15°)	与构造背斜轴向呈小角度近似平行，整体近EW向(75°～105°)	NE、NW向(15°～45°和315°～345°)以及近EW向
倾角	单一组系或平行组系裂缝，倾角大于75°的垂直缝	裂缝倾角大于75°的垂直缝	裂缝倾角大于75°的垂直缝	裂缝倾角大于60°
长度和穿层性	裂缝长度大于50 cm，呈现出穿多层砂岩或贯穿薄层泥岩特征	裂缝长度大于50 cm，呈现出穿多层砂岩或贯穿薄层泥岩特征	长短不一、呈现出穿多层砂岩或贯穿薄层泥岩特征	长短不一，无明显穿层特征，泥岩里不发育
缝面特征	缝面平直、切割颗粒	缝面弯曲、缝面粗糙，未见切割颗粒、擦痕	缝面弯曲、缝面粗糙，未见切割颗粒、擦痕	缝面平直、切割颗粒，见明显擦痕、阶步
薄片下颗粒、微裂缝特征	颗粒整体以线接触为主，不发育粒内缝、粒间缝		颗粒整体以线接触为主，不发育粒内缝、粒间缝	颗粒整体以面接触为主

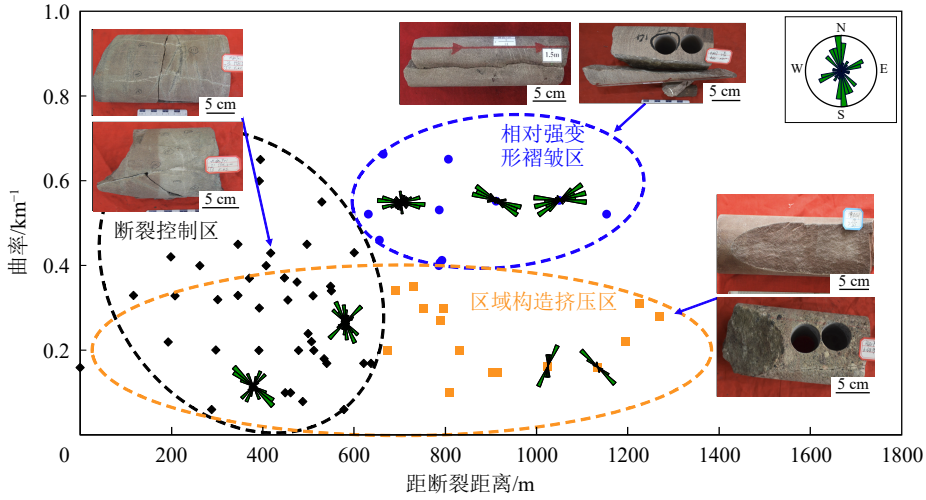

图 17　博孜—大北地区基于单井曲率与距断裂距离相耦合的裂缝成因分区图

Fig. 17　Fracture causation zoning map for the Bozi–Dabei region, based on the coupling of wellbore curvature and distance from fault

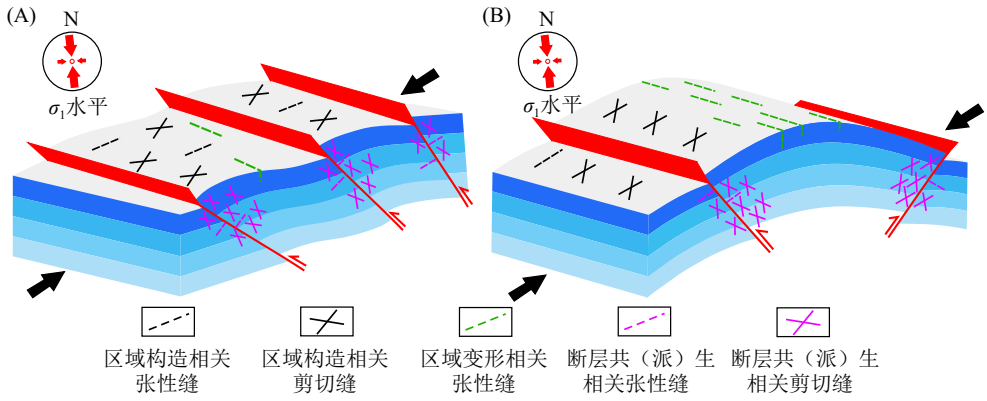

图 18　库车前陆裂缝发育模式分类图

Fig. 18　Classification of fracture development patterns in the Kuqa foreland

（A）逆冲叠瓦弱变形程度下多成因裂缝发育模式图；（B）以突发构造为例的强变形多成因裂缝发育模式图

发育（图 4），此类单井所处位置靠近断裂且构造变形强，其裂缝发育受断裂与地层构造变形应力共同作用。

致密砂岩裂缝发育与形成是外因受力与内因岩石力学相耦合的结果。在地应力场环境下，不同地区地应力场环境与构造变形展布空间不同，所对应区域构造的构造样式与变形程度有较大不同，对裂缝发育分布有较大影响；内因岩石力学受岩石层矿物组成与胶结物类型比例等共同影响。后续研究工作应综合考虑内因、外因影响，对裂缝发育特征与成因机制进行深入剖析。

5　结论

（1）库车前陆冲断带天然裂缝发育特征差异明显，博孜—大北地区裂缝走向以近 SN 向为主，克深 X 地区裂缝走向以近 EW 向为主，见部分近 SN 向裂缝，迪那 Y 地区裂缝走向则以近 EW 向为主，自西向东裂缝优势走向呈现出 SN-EW 交替特征，3 个地区整体有效裂缝（未充填和半充填裂缝）占比较高，为烃类物质在埋藏条件下提供了有效传输通道。

（2）库车前陆冲断带某区块主要发育区域构造裂缝、构造变形裂缝与断层共（派）生裂缝 3 种构造成因裂缝。以博孜—大北地区下白垩统致密砂岩为例，厘定出距断裂较远、构造平缓的区域主要发育区域构造裂缝；距断裂较远、构造变形程度较大的区域主要发育构造变形裂缝；而断裂附近主要发育断层共（派）生裂缝。

（3）在多成因天然裂缝识别及分析归类的基础上，明确了各类成因天然裂缝力学性质、产状特征以及特征参数等多尺度发育特征，分区分带对天然裂缝主要成因进行厘定，与裂缝所处位置

的地质构造环境相耦合,可为多成因裂缝研究与裂缝预测提供依据。

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献说明:本文章所有作者均参与了相关研究工作,并对文章的最终版本进行了审阅与确认。胡笑非负责研究设计与整体框架的构建,撰写文章;邓虎成优化研究思路和方法;高艳芳负责相关图件绘制与数据处理;杜宇负责数据分析与可视化;王翠丽负责测井数据处理及建议;张昊天参与岩心图像整理分析;杨宇勇处理地震数据;雷湘湘负责绘制裂缝特征图件;郭尚荣参与成像测井数据处理工作;吴永平对文章结论优化与审核。

[参 考 文 献]

陈东, 王翠丽, 邓虎成, 等, 2025. 超深层优势天然裂缝特征、分布及控产作用评价——以塔里木盆地博孜—大北地区下白垩统致密砂岩为例[J]. 天然气地球科学, 36(3): 479—492.

Chen D, Wang C L, Deng H C, et al., 2025. Evaluation of characteristics, distribution, and production control of advantageous natural fractures in ultra-deep layers: a case study of the Lower Cretaceous tight sandstone in the Bozi–Dabei area of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 36(3): 479—492. (in Chinese)

邓虎成, 周文, 刘岩, 等, 2016. 油气藏内多成因多期次天然裂缝系统评价技术[M]. 北京: 科学出版社.

邓虎成, 周文, 周秋媚, 等, 2013. 新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J]. 岩石学报, 29(3): 1087—1097.

Deng H C, Zhou W, Zhou Q M, et al., 2013. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2nd Xu member, Xinchang gas field[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 1087—1097. (in Chinese)

邓辉, 李果营, 杨海风, 等, 2019. 走滑应变椭圆模型的改进及应用举例[J]. 地球科学进展, 34(8): 868—878.

Deng H, Li G Y, Yang H F, et al., 2019. Improvement and application of riedel shear systerm[J]. Advances in Earth Science, 34(8): 868—878. (in Chinese)

冯建伟, 孙建芳, 张亚军, 等, 2020. 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, 41(3): 543—557.

Feng J W, Sun J F, Zhang Y J, et al., 2020. Control of fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 41(3): 543—557. (in Chinese)

巩磊, 程宇琪, 高帅, 等, 2023. 库车前陆盆地东部下侏罗统致密砂岩储层裂缝连通性表征及其主控因素[J]. 地球科学, 48(7): 2475—2488.

Gong L, Cheng Y Q, Gao S, et al., 2023. Fracture connectivity characterization and its controlling factors in Lower Jurassic tight sandstone reservoirs of eastern Kuqa foreland basin[J]. Earth Science, 48(7): 2475—2488. (in Chinese)

郭宏辉, 冯建伟, 赵力彬, 2023. 塔里木盆地博孜—大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 44(4): 962—975.

Guo H H, Feng J W, Zhao L B, 2023. Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in Bozi–Dabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 44(4): 962—975. (in Chinese)

何登发, 贾承造, 李德生, 等, 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 26(1): 64—77.

He D F, Jia C Z, Li D S, et al., 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 26(1): 64—77. (in Chinese)

何登发, 尹成, 杜社宽, 等, 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. 地学前缘, 11(3): 91—101.

He D F, Yin C, Du S K, et al., 2004. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts—a case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 11(3): 91—101. (in Chinese)

鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等, 2014. 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, 20(1): 105—113.

Ju W, Hou G T, Huang S Y, et al., 2014. Constraints and controls of fault related folds on the development of tectonic fractures in sandstones[J]. Geological Journal of China Universities, 20(1): 105—113. (in Chinese)

鞠玮, 杨慧, 侯贵廷, 等, 2024. 复杂构造变形区断控裂缝发育分布模式[J]. 地学前缘, 31(5): 130—138.

Ju W, Yang H, Hou G T, et al., 2024. Development and distribution pattern of fault-controlled fractures in complex structural deformation zones[J]. Earth Science Frontiers, 31(5): 130—138. (in Chinese)

李睿琦, 吕文雅, 王浩南, 等, 2023. 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, 34(2): 271—284.

Li R Q, Lü W Y, Wang H N, et al., 2023. 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, 34(2): 271—284. (in Chinese)

刘春, 张荣虎, 张惠良, 等, 2017. 库车前陆冲断带多尺度裂缝成

因及其储集意义[J]. 石油勘探与开发, 44(3): 463—472.

Liu C, Zhang R H, Zhang H L, et al., 2017. Genesis and reservoir significance of multi-scale natural fractures in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(3): 463—472. (in Chinese)

刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等, 2000. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J]. 地学前缘, 7(3): 55—72.

Liu H F, Wang Z C, Xiong B X, et al., 2000. Coupling analysis of Mesozoic–Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China[J]. Earth Science Frontiers, 7(3): 55—72. (in Chinese)

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[J]. 地质论评, 67(2): 543—556.

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[J]. Geological Review, 67(2): 543—556. (in Chinese)

孙爽, 赵淑霞, 侯加根, 等, 2019. 致密砂岩储层多尺度裂缝分级建模方法——以红河油田 92 井区长 8 储层为例[J]. 石油科学通报, 4(1): 11—26.

Sun S, Zhao S X, Hou J G, et al., 2019. Hierarchical modeling of multi-scale fractures in tight sandstones: a case study of the eighth member of the Yanchang Formation in wellblock 92 of the Honghe Oilfield[J]. Petroleum Science Bulletin, 4(1): 11—26. (in Chinese)

孙雄伟, 侯贵廷, 于璇, 等, 2015. 库车前陆冲断带低渗砂岩的裂缝发育模式[J]. 大地构造与成矿学, 39(5): 808—815.

Sun X W, Hou G T, Yu X, et al., 2015. Model for the fracture development of the sand with low-permeability in the foreland faulted fold belt[J]. Geotectonica et Metallogenia, 39(5): 808—815. (in Chinese)

汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等, 2004. 库车前陆褶皱–冲断带前缘大型盐推覆构造[J]. 地质学报, 78(1): 17—25.

Tang L J, Jin Z J, Jia C Z, et al., 2004. A large-scale salt nappe complex in the leading edge of the Kuqa foreland fold-thrust belt, Tarim Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 17—25. (in Chinese)

田军, 杨海军, 吴超, 等, 2020. 博孜 9 井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 40(1): 11—19.

Tian J, Yang H J, Wu C, et al., 2020. Discovery of well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 40(1): 11—19. (in Chinese)

田作基, 宋建国, 1999. 塔里木库车新生代前陆盆地构造特征及形成演化[J]. 石油学报, 20(4): 7—13.

Tian Z J, Song J G, 1999. Tertiary structure characteristics and evolution of Kuche foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 20(4): 7—13. (in Chinese)

王东英, 2021. 页岩气藏跨尺度气水两相流动模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).

Wang D Y, 2021. Cross-scale gas-water two-phase transport simulation in shale gas reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China). (in Chinese)

王珂, 杨海军, 李勇, 等, 2018. 塔里木盆地大北气田超深层致密砂岩储集层构造裂缝发育特征及其影响因素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(1): 111—120.

Wang K, Yang H J, Li Y, et al., 2018. Characteristics and controlling factors of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir, Dabei Gas Field, Tarim Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(1): 111—120. (in Chinese)

王珂, 张荣虎, 曾庆鲁, 等, 2022. 塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带箱形褶皱形成机制及油气勘探意义[J]. 天然气地球科学, 33(9): 1384—1396.

Wang K, Zhang R H, Zeng Q L, et al., 2022. Formation mechanism of the box fold and its significance in the Qiulitage structural belt of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(9): 1384—1396. (in Chinese)

王珂, 张荣虎, 赵继龙, 等, 2023. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带走滑作用对构造裂缝的影响[J]. 天然气地球科学, 34(8): 1316—1327.

Wang K, Zhang R H, Zhao J L, et al., 2023. Implication of strike-slipping to tectonic fractures in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 34(8): 1316—1327. (in Chinese)

王彦斌, 王永, 刘训, 等, 2001. 天山、西昆仑山中、新生代幕式活动的磷灰石裂变径迹记录[J]. 中国区域地质, 20(1): 94—99.

Wang Y B, Wang Y, Liu X, et al., 2001. Apatite fission-track records of Mesozoic and Cenozoic episodic reactivation of the Tianshan and West Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 20(1): 94—99. (in Chinese)

王招明, 李勇, 谢会文, 等, 2016. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识[J]. 中国石油勘探, 21(1): 37—43.

Wang Z M, Li Y, Xie H W, et al., 2016. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa foreland basin[J]. China Petroleum Exploration, 21(1): 37—43. (in Chinese)

王志民, 王翠丽, 徐珂, 等, 2023. 超深层致密砂岩构造裂缝发育特征及控制因素——以塔里木盆地库车坳陷博孜—大北地区下白垩统储集层为例[J]. 天然气地球科学, 34(9): 1535—1551.

Wang Z M, Wang C L, Xu K, et al., 2023. Characteristics and controlling factors of tectonic fractures of ultra-deep tight sandstone: case study of the Lower Cretaceous reservoir in Bozi–Dabei area, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural

Gas Geoscience, 34(9): 1535—1551. (in Chinese)

徐珂, 杨海军, 张辉, 等, 2022. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层致密砂岩气藏一体化增产关键技术与实践[J]. 中国石油勘探, 27(5): 106—115.

Xu K, Yang H J, Zhang H, et al., 2022. Key technology and practice of the integrated well stimulation of ultra-deep tight sandstone gas reservoir in Kelasu structural belt, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 27(5): 106—115. (in Chinese)

尹帅, 丁文龙, 林利飞, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地西部志丹—吴起地区延长组裂缝特征及其控藏作用[J]. 地球科学, 48(7): 2614—2629.

Yin S, Ding W L, Lin L F, et al., 2023. Characteristics and controlling effect on hydrocarbon accumulation of fractures in Yanchang Formation in Zhidan–Wuqi area, Western Ordos Basin[J]. Earth Science, 48(7): 2614—2629. (in Chinese)

余海波, 漆家福, 杨宪彰, 等, 2016. 塔里木盆地库车坳陷中生代原型盆地分析[J]. 新疆石油地质, 37(6): 644—653.

Yu H B, Qi J F, Yang X Z, et al., 2016. Analysis of Mesozoic prototype basin in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 37(6): 644—653. (in Chinese)

袁静, 李欣尧, 李际, 等, 2017. 库车坳陷迪那 2 气田古近系砂岩储层孔隙构造-成岩演化[J]. 地质学报, 91(9): 2065—2078.

Yuan J, Li X Y, Li J, et al., 2017. Tectonic-diagenetic evolution of Paleocene tight sandstone reservoir pores in the DN2 gas field of Kuqa Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 91(9): 2065—2078. (in Chinese)

曾联波, 刘国平, 朱如凯, 等, 2020. 库车前陆盆地深层致密砂岩储层构造成岩强度的定量评价方法[J]. 石油学报, 41(12): 1601—1609.

Zeng L B, Liu G P, Zhu R K, et al., 2020. A quantitative evaluation method of structural diagenetic strength of deep tight sandstone reservoirs in Kuqa foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 41(12): 1601—1609. (in Chinese)

曾联波, 谭成轩, 张明利, 2004. 塔里木盆地库车坳陷中新生代构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 34(增刊 1): 98—106.

曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 等, 2020. 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克组为例[J]. 天然气工业, 40(1): 38—47.

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

张琰, 2019. 库车坳陷大北区块深层白垩系储层发育的构造-流体模型[D]. 北京: 中国石油大学(北京).

Zhang Y, 2019. Tectonic-fluid model of deep reservoir of cretaceous in the Dabei block, Kuqa depression[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese)

张仲培, 林伟, 王清晨, 2003. 库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带的构造演化[J]. 大地构造与成矿学, 27(4): 327—336.

Zhang Z P, Lin W, Wang Q C, 2003. Progressive structural evolution of Kelasu–Yiqikelike structural belt in Kuqa depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 27(4): 327—336. (in Chinese)

赵光杰, 李贤庆, 刘满仓, 等, 2022. 库车坳陷北部构造带断裂活动及油气成藏意义[J]. 矿业科学学报, 7(1): 34—44.

Zhao G J, Li X Q, Liu M C, et al., 2022. Fault activity and hydrocarbon accumulation significance of structural belt in northern Kuqa Depression[J]. Journal of Mining Science and Technology, 7(1): 34—44. (in Chinese)

周文, 1998. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社.

Zhou W, 1998. Evaluation methods of fracture reservoir in oil and gas pool[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology. (in Chinese)

邹才能, 张光亚, 陶士振, 等, 2010. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 37(2): 129—145.

Zou C N, Zhang G Y, Tao S Z, et al., 2010. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(2): 129—145. (in Chinese)

Frehner M, 2011. The neutral lines in buckle folds[J]. Journal of Structural Geology, 33(10): 1501—1508.

Hu X F, Deng H C, He J H, et al., 2023. Complex genesis of multiperiod fractures in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Pengzhou gas field, western Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 20(1): 161—176.

Hudleston P J, Holst T B, 1984. Strain analysis and fold shape in a limestone layer and implications for layer rheology[J]. Tectonophysics, 106(3/4): 321—347.

Neng Y, Xie H W, Yin H W, et al., 2018. Effect of basement structure and salt tectonics on deformation styles along strike: an example from the Kuqa fold-thrust belt, West China[J]. Tectonophysics, 730: 114—131.

Zeng L B, Song Y C, Liu G P, et al., 2023. Natural fractures in ultra-deep reservoirs of China: a review[J]. Journal of Structural Geology, 175: 104954.