DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508150006

塔里木盆地克深气田构造裂缝主控因素及发育模式

宋雯丹[1,2]，徐朝晖[1,2,*]，徐怀民[1,2]，彭强强[1,2]

（1. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249；2. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室，北京 102249）

摘要：克深气田作为库车坳陷超深层致密砂岩储层的典型代表，其裂缝系统的发育特征与分布规律在天然气高效开发中具有重要控制作用。本文基于岩心与成像测井资料，系统刻画了克深气田构造裂缝的成因类型、产状、充填性与开度等基本特征，分析了构造裂缝发育规律，明确了构造裂缝发育主控因素，并建立了适用于超深层致密砂岩的构造裂缝发育模式。研究结果表明，克深气田不同区块裂缝发育程度受控机制显著不同：北部区块主要受控于构造应力强度减弱及早期裂缝充填改造，裂缝密度相对较低；中部区块位于背斜核部及应力叠加区，具备岩性脆性高、岩石力学层薄等裂缝形成与扩展的有利条件，裂缝最为发育；南部区块膏盐岩层较薄导致应力传递高效，配合走滑作用及硬石膏胶结支撑，形成了大开度、低充填的裂缝特征。研究构建的裂缝发育模式揭示了“构造-沉积”二元耦合控制机制，丰富了超深层致密砂岩裂缝形成机理的认识，为克深气田开发井网优化部署、压裂改造设计及类似构造背景区裂缝型储层的勘探开发提供了理论支撑。

关键词：库车坳陷；克深气田；超深层；构造裂缝；差异分布；主控因素；发育模式

中图分类号：P618. 13 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8527(2026)02-0356-17

Main Controlling Factors and Development Model of Tectonic Fractures in Keshen Gas Field, Tarim Basin

SONG Wendan[1,2], XU Zhaohui[1,2,*], XU Huaimin[1,2], PENG Qiangqiang[1,2]

(1. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*)

Abstract: The Keshen Gas Field, a typical representative of ultra-deep tight sandstone reservoirs in the Kuqa Depression, exhibits a fracture system whose development characteristics and distribution patterns exert a critical control on efficient natural gas development. Based on core and imaging log data, this study systematically characterizes the genetic types, orientation, filling properties, and aperture of structural fractures within the Keshen Gas Field. It analyzes the patterns of structural fracture development, identifies the main controlling factors, and establishes a developmental model applicable to ultra-deep tight sandstones. The results demonstrate significantly different controlling mechanisms for fracture development across various blocks: fractures in the northern block are primarily controlled by weakened tectonic stress intensity and the modification by early fracture fillings, resulting in a relatively lower fracture density. The central block,

收稿日期：2025-08-15；**修回日期**：2025-11-21；**编辑**：戚开静。

基金项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目（U24B2015）。

作者简介：宋雯丹，女，博士研究生，1999年出生，主要从事油气开发地质研究。Email：18810062920@163. com。

＊通信作者：徐朝晖，男，博士，副教授，1980年出生，主要从事油气地质大数据与人工智能、开发地质、测井地质学等领域教学与科研工作。Email：xuzhaohui@cup. edu. cn。

引用格式：宋雯丹，徐朝晖，徐怀民，等. 塔里木盆地克深气田构造裂缝主控因素及发育模式［J］. 现代地质，2026，40（2）：356-372. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508150006.

SONG Wendan, XU Zhaohui, XU Huaimin, et al. Main Controlling Factors and Development Model of Tectonic Fractures in Keshen Gas Field, Tarim Basin［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 356-372. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508150006.

located in the anticlinal core and a stress superposition zone, possesses favorable conditions for fracture initiation and propagation, including high rock brittleness and thin mechanical layers, making it the most intensely fractured area. In the southern block, efficient stress transmission due to thinner salt-gypsum layers, combined with strike-slip activity and anhydrite cementation support, gives rise to fractures characterized by large apertures and low filling degrees. The established fracture development model reveals a "tectonic-sedimentary" binary coupling control mechanism, enriches the understanding of fracture formation mechanisms in ultra-deep tight sandstones, and provides theoretical support for optimized well placement, hydraulic fracturing design in the Keshen gas field, as well as for the exploration and development of fractured reservoirs in similar structural settings.

Key words: Kuqa depression; Keshen gas field; ultra-deep reservior; tectonic fracture; differential distribution; main controlling factor; development pattern

0　引　言

随着传统浅层油气资源的枯竭，深层和超深层油气藏逐渐成为全球油气勘探开发的热点并取得重大突破[1-3]。在中国西部储层的研究中，一般将埋深超过 4500 m 定义为深层，埋深超过 6000 m 定义为超深层[4-5]。全球学者将渗透率小于 0.1 mD 的储层定义为致密砂岩储层[6]。深层-超深层致密砂岩储层具有高温高压、地质构造复杂和地层条件严峻等特征[7-8]，为油气勘探开发带来较大挑战。在深层和超深层气藏的开采过程中，裂缝的存在与分布对气藏的开发具有关键性影响。裂缝不仅可以作为天然气的运移通道，还能显著提高储层的渗透性，增加天然气的产出[9-10]。

克深气田自 2008 年获得重大突破以来，已发现多个千亿立方米级气藏，实现了中国近 8000 m 超深层天然气勘探的重大突破[11-12]。由于埋藏深度极大，原生孔隙在复杂的成岩演化过程中逐渐减少，储层的基质渗透率普遍较低，天然裂缝成为油气渗流的主要通道，对改善储层渗透性起着至关重要的作用[13]。明确裂缝的分布规律、主控因素和发育模式，对克深气田后续开发井网的部署、钻井和压裂等工程措施具有指导意义，最大限度地提高油气的采收率。

库车坳陷裂缝研究不断突破，王珂等通过岩心与成像测井分析，发现克深 5、6 区块裂缝受构造变形时序控制，早期缓挤压形成平行背斜长轴的高角度张裂缝[14]。张荣虎等利用实验分析与 FMI 资料，证实克深 8 区块裂缝开度受构造部位控制，背斜高部位及边界断裂带为高渗透段[15]。刘群明等基于生产动态数据，认识到克深 2、9、8 区块分别呈现“方向型”、“过渡型”和“缝网型”裂缝模式，其发育程度与连续性依次增高[16]。韩高松采用岩心-电成像联合表征，发现克深 2 区块裂缝密度随距断裂距离增大而幂函数减小，最发育区集中于距断裂 400 m 范围内[17]。

前人对库车坳陷克深气田构造裂缝的研究主要集中在克深气田局部区块，但对克深气田全区裂缝的发育特征差异性和分布规律缺乏系统性的研究，导致对整个克深气田裂缝系统空间分异规律及其控制机制的认识尚不充分，此外在推广至其他区域时适用性受限，一定程度上制约了气田整体开发战略的优化。受逆冲挤压构造作用，克深气田主要发育构造缝，非构造缝较为少见，因此论文主要讨论构造裂缝相关研究认识。作者基于岩心、成像测井等资料，从构造裂缝类型和产状、充填性和张开度、裂缝线密度等方面讨论了克深气田构造裂缝发育特征，对比分析了不同区块构造裂缝发育的差异性，明确了构造裂缝发育主控因素，最后建立了克深气田不同成因构造裂缝发育地质模式。该研究完善了前人关于克深气田不同区块构造裂缝发育差异性的认识，为克深气田开发井网部署、压裂方案优化提供了理论依据，对提高类似深层超深层致密砂岩储层的勘探开发水平具有重要的理论和借鉴意义。

1　地质概况

库车坳陷地处塔里木盆地北部，北与南天山断裂褶皱带毗邻，南边和东边分别与塔北隆起、阳霞凹陷相接，西至乌什凹陷，是一个主要发育中、新

生代沉积体系的叠加型前陆盆地[18-20]（图1a）。研究区克深气田位于塔里木盆地库车前陆冲断带克拉苏构造带中东部克深段，先后经历了燕山晚期、喜马拉雅早期、喜马拉雅中期和喜马拉雅晚期4次构造运动，分别对应着区域水平挤压、初始隆升、强烈隆升并最终定型的4个关键阶段[21-22]。受南天山造山带的挤压逆冲推覆作用，克拉苏冲断带发生了强烈的压缩变形，呈现一系列紧密排列的逆冲叠瓦状构造特征，形成了KS6、KS5、KS24、KS2、KS8、KS9和KS13等多个断背斜天然气藏，自北向南的推覆挤压导致应力逐渐降低，构造变形逐渐减弱[23-24]（图1b）。

克深气田垂向钻遇第四系、新近系、古近系、白垩系等多套层序[25]。晚白垩世的构造抬升剥蚀使下白垩统与上覆地层古近系库姆格列木群膏盐岩层呈角度不整合接触[18]。研究区目的层为主力含气层系下白垩统巴什基奇克组，埋深6000 ~ 7500 m[26]。依据地层发育的旋回特征及岩性组合特征，巴什基奇克组具体划分为巴一段、巴二段和巴三段。巴一段和巴二段为砂质辫状河三角洲沉积，岩性主要为红褐色砂岩及含砾砂岩，砂岩中发育丰富的强牵引流成因的冲刷面和楔状交错层理，指示了高能水动力环境。巴三段为扇三角洲前缘和前扇三角洲沉积，发育砂砾岩、含砾砂岩、砂岩、泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩[16, 27]（图1c）。

2 构造裂缝基本特征分布规律

目前克深气田投入开发裂缝型低孔砂岩气藏11个，作者系统搜集并整理了其中最具代表性的KS6、KS5、KS24、KS2、KS8、KS9、KS13等7个区块的资料（表1）。这些区块在空间上自北向南连续分布，涵盖了克深气田由强挤压断背斜到低幅构造的不同构造样式。其天然气储量与产能规模较大，占克深气田的绝大部分；因此针对它们开展深层超深层裂缝特征对比研究，对认识克深气田裂缝规律具有重要意义，每个区块裂缝特征参数见表2。本研究基于39口取心井与76口井的电成像测井资料，对巴什基奇克组主力产层段裂缝进行系统描述与解释。

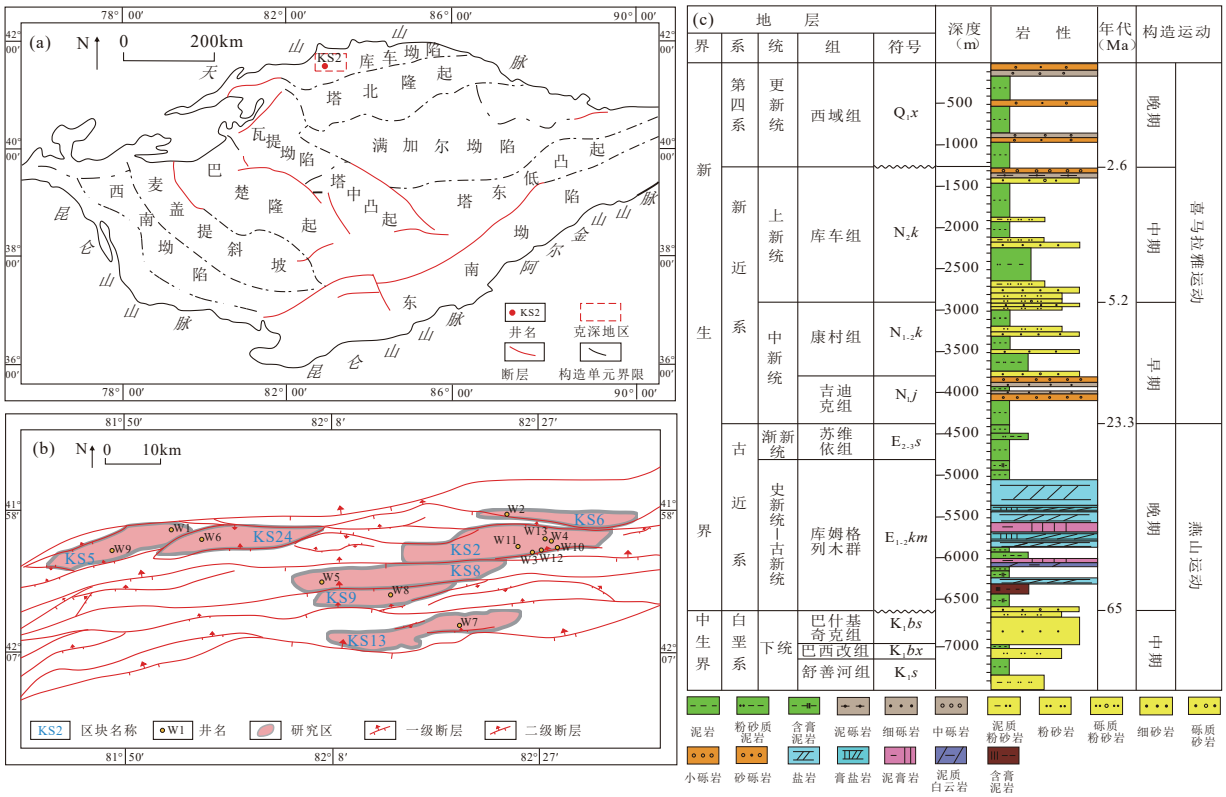


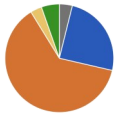
图1 塔里木盆地克深气田地质概况（（a）（b）修改自文献[20]，（c）修改自文献[27]）

Fig. 1 Geological overview of keshen gas field, Tarim Basin ((a) and (b) are modified from reference [20]; (c) is modified from reference [27])

(a) 塔里木盆地构造单元平面图;(b) 克深气田构造单元平面图;(c) 克深气田地层综合柱状图

表 1　克深气田取心、成像测井、目的层埋深及岩性资料数据统计

Table 1　Statistics of coring, imaging logging, target layer burial depth, and lithologic data in the Keshen gas field

区块	取心井数量	取心/进尺/m	取心层位	取心深度/m	成像测井数量	巴什基奇克组埋深/m	岩性特征
KS6	3	68.97/71.30	巴一段 巴二段	5617 ~ 6159	3	5603.5 ~ 6299.9	
KS5	5	151.17/154.30	巴一段 巴二段	6416.5 ~ 7048.0	6	6352.00 ~ 7090.75	
K24	3	49.62/50.65	巴一段 巴二段	6178.0 ~ 6585.5	14	6142 ~ 6775	
KS2	15	322.51/347.02	巴一段 巴二段 巴三段	6509.0 ~ 6514.2	30	6489.03 ~ 7485.00	
KS8	7	77.01/107.10	巴一段 巴二段 巴三段	6778.00 ~ 7361.43	14	6713.60 ~ 7389.44	
KS9	3	50.31/60.01	巴一段 巴二段	7479.7 ~ 7976.0	5	7404.00 ~ 8050.56	
KS13	3	54.70/58.00	巴一段 巴二段	7340.0 ~ 7642.5	4	7298 ~ 7777	
全区	39	871.28/950.21	巴一段 巴二段 巴三段	5617 ~ 7976	76	5603.50 ~ 8050.56	

注：含砾砂岩　含泥砾砂岩　中砂岩　细砂岩　粉砂岩　泥岩

2.1　构造裂缝成因类型及产状特征

基于研究区 39 口取心井的岩心观察，从力学成因角度识别出克深气田发育张性缝和剪切缝两类构造缝。张性缝表现为裂缝面粗糙，延伸范围有限，部分可切穿泥砾岩层（图 2a—d）。剪切缝缝面平直光滑，延伸较长，部分剪切裂缝具有微小断距（图 2e—h）。根据倾角可将克深气田裂缝划分为直立缝、高角度缝、低角度缝和水平缝，其中张性缝多为高角度斜交缝，剪切缝多为直立缝。

通过岩心–成像测井标定发现克深气田裂缝走向分为 4 组：东西向、南北向、北东向和北西向（图 3）。图 4 为克深气田 66 口电成像测井的裂缝走向及现今地应力方向解释结果，图 5 和图 6 为克深气田 39 口取心井的裂缝成因类型及裂缝倾角解释成果。可以看到，克深气田不同区块的裂缝成因类型及产状特征受控于多期构造应力作用，在平面上呈现显著的分区分带性。具体而言，克深气田由北向南，近 NS 向的直立剪切缝发育程度呈现增大的趋势（图 4—6）。北部的 KS5 和 KS6 区块形成时间早，在白垩纪—古近纪低强度近南北向挤压、晚期中新世以来背斜轴部受到强挤压形成的拉张作用以及异常流体高压的共同作用下，于核部形成大量的与背斜长轴平行的近 EW 向高角度张性裂缝，早期形成的张性缝在晚期核部的拱张应力作用下发生活化并产生新的近 EW 向裂缝，

表 2 克深气田裂缝参数差异对比

Table 2 Comparison of difference of fracture parameters in the Keshen gas field

区块	裂缝成因类型	裂缝产状		裂缝开度/mm	裂缝充填性		
		倾角	走向		充填物	充填度	充填率
KS6	张性缝 91.7% 剪切缝 8.3%	高角度缝 71.2% 直立缝 20.5% 低角度缝 4.8% 水平缝 3.5%	近 EW 向	0 ~ 2 主要分布 0 ~ 0.2	以方解石为主，其次是泥质	全充填 52.2% 半充填 18.4% 未充填 29.5%	70.5%
KS5	张性缝 94.2% 剪切缝 5.8%	高角度缝 47.7% 直立缝 29.7% 低角度缝 19.2% 水平缝 3.4%	近 EW、NW-SE 向； 近 NS 向	0 ~ 1 主要分布 0 ~ 0.2	以方解石为主，其次是泥质	全充填 53.6% 半充填 15.7% 未充填 30.6%	69.4%
K24	剪切缝 65.7% 张性缝 34.3%	直立缝 46.5% 高角度缝 33.3% 低角度缝 10.1% 水平缝 10.1%	近 NS 向	0 ~ 1.5 主要分布 0 ~ 0.2	以方解石为主，其次是白云石	全充填 50.5% 半充填 39.4% 未充填 10.1%	89.9%
KS2	剪切缝 80.2% 张性缝 19.8%	直立缝 54.7% 高角度缝 25.4% 水平缝 17.9% 低角度缝 2.0%	近 NS 向； 近 EW、NW-SE 向	大于 0.2 主要分布 0.5 ~ 1	以方解石为主，其次是硬石膏	全充填 35.1% 半充填 39.5% 未充填 25.4%	74.6%
KS8	剪切缝 86.5% 张性缝 13.5%	直立缝 78.5% 高角度缝 17.5% 水平缝 1.8% 低角度缝 2.2%	近 NS 向； 近 EW、NNW-SSE 向	大于 0.2 主要分布 0 ~ 0.5	以白云石为主，其次是泥质	全充填 11.3% 半充填 23.4% 未充填 65.3%	34.7%
KS9	剪切缝 88.7% 张性缝 11.3%	直立缝 62.9% 高角度缝 36.4% 低角度缝 0.7%	近 NS、NNW-SSE 向	0 ~ 1 主要分布 1 ~ 1.5	以白云石和泥质为主，其次是方解石	全充填 14.6% 半充填 23.8% 未充填 61.6%	38.4%
KS13	剪切缝 98.3% 张性缝 1.7%	直立缝 89.7% 高角度缝 8.6% 水平缝 1.7%	近 NS 向； 近 EW 向	大于 0.2 主要分布大于 2	以白云石为主，其次是硬石膏和泥质	全充填 8.6% 半充填 22.4% 未充填 70.0%	30.0%
全区	剪切缝 61.1% 张性缝 38.9%	直立缝 50.3% 高角度缝 33.7% 水平缝 10.2% 低角度缝 5.8%	近 NS 向； 近 EW、NW-SE 向	主要集中在小于 1.0	以方解石为主，其次是泥质、白云石	全充填 32.3% 半充填 26.1% 未充填 41.6%	58.4%

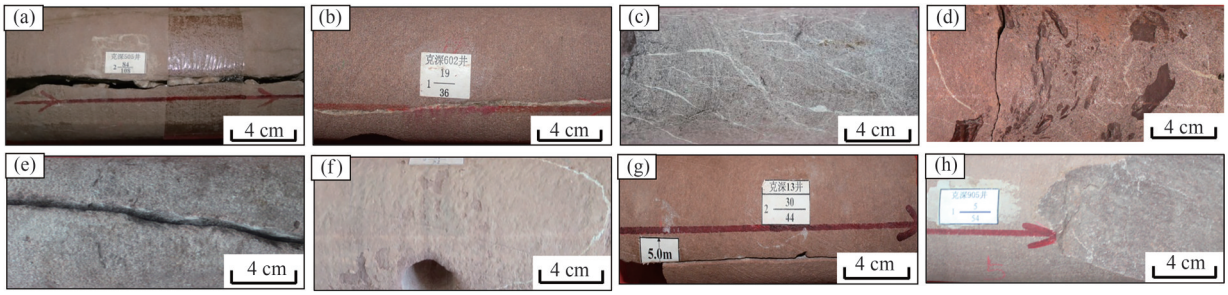


图 2 克深气田巴什基奇克组裂缝特征

Fig. 2 Fracture characteristics of the Bashijiqike Formation in the Keshen gas field

(a) W1 井，6009.8 m，直立张性缝，方解石全充填；(b) W2 井，6773.28 m，直立张性缝，方解石半充填；(c) W3 井，6990.53 m，网状缝，方解石全充填；(d) W4 井，6512.31 m，张性缝，方解石全充填，切割泥砾；(e) W5 井，6522.32 m，直立剪切缝，未充填；(f) W6 井，7368 m，高角度剪切缝，方解石全充填；(g) W7 井，7480.32 m，直立剪切缝，未充填；(h) W8 井，7353.46 m，直立剪切缝，未充填

分布于气藏翼部[28]。中部的 KS24、KS2 和 KS8 区块在喜马拉雅中期经历构造反转事件，区域挤压方向从近 SN 向转为 NNW—SSE 向，此期应力场的转变叠加了持续的背斜拱张作用，导致早期

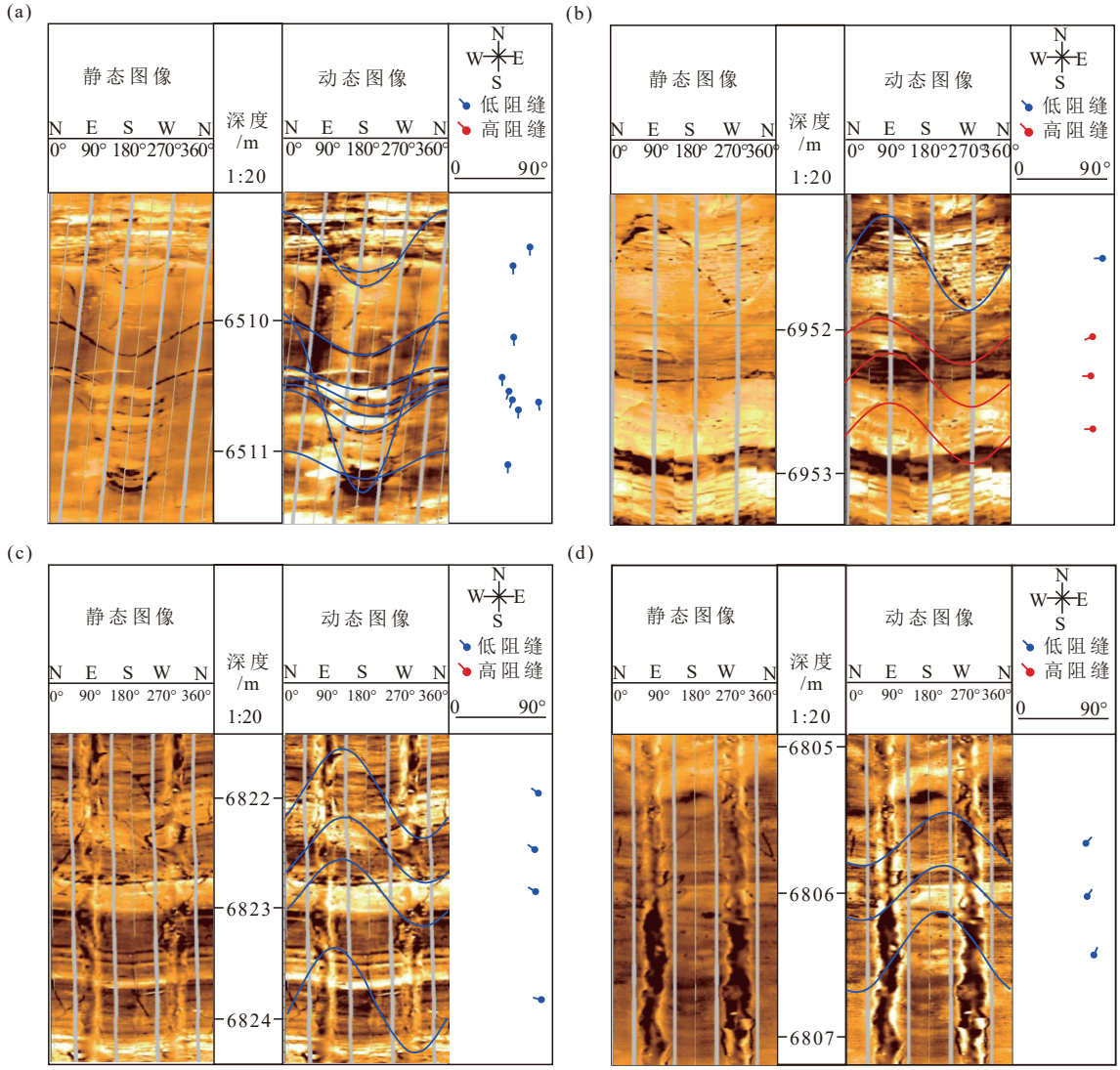


图 3　克深气田巴什基奇克组成像测井裂缝产状特征

Fig. 3　Characteristics of fracture occurrence in the Bashijiqike Formation imaging log of the Keshen gas field

(a) W4 井，近 NS 向裂缝；(b) W3 井，近 EW 向裂缝；(c) W3 井，近 NW—SE 向裂缝；(d) W3 井，近 NE—SW 向裂缝

形成的近 EW 向张性缝和新生的近 NS 向剪切缝共存，但以剪切缝为主[29]。南部的 KS9 和 KS13 区块受到喜马拉雅晚期近 NS 向挤压应力控制，此时的挤压应力达到峰值并稳定为 NS 向，最终形成大量的近 NS 向、NW—SE 向和少量的 NE—SW 向的直立剪切缝。空间分布上，直立剪切缝比例表现出自北向南递增的特征，且与南部边界大断裂的距离呈正相关关系。靠近南边大断裂的 KS13 区块剪切缝占比高达 98.3 %，印证了该区强挤压应力场的控制作用。

基于 Ramsay 的背斜弯曲变形理论，背斜型油气田发育过程中存在一个关键的“应变中和面”[30-32]，该界面在构造变形过程中剪切应力趋于零，其上下岩石变形机制呈现显著差异，对裂缝的发育特征具有重要控制作用[33-34]。借鉴此理论模型，本研究建立了适用于克深气田盐下冲断带断背斜应力中和面模式（图 7），并据此将克深气田自上而下划分为张性段、过渡段和压扭段三个构造力学段带[35-37]。以 W9 单井裂缝解释为例，可以看到张性段受拉张应力主导，地应力值相对较低，主要发育高角度张性缝，裂缝开度也较大，但裂缝密度较低。过渡段应力状态由拉张向挤压过渡，裂缝发育受局部构造应力调整影响，形成兼具张性和剪切性质的混合型裂缝体系，常表现为网状缝，该段地应力值、裂缝发育程度及裂缝开度中等，部分裂缝可见半充填现象。压扭段处

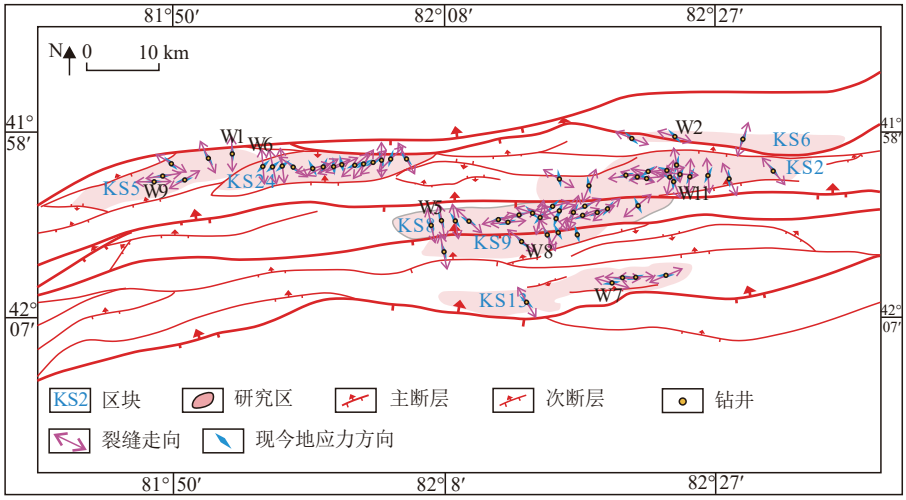


图4 克深气田裂缝走向及现今地应力方向平面图

Fig. 4 Planar map of fracture orientation and current geostress direction in the Keshen gas field

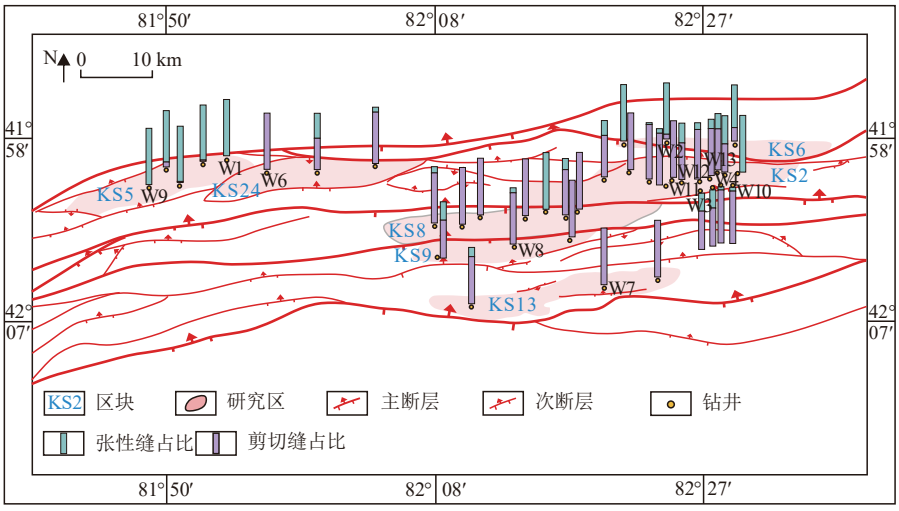


图5 克深气田裂缝成因类型平面图

Fig. 5 Planar map of genetic types of fractures in the Keshen gas field

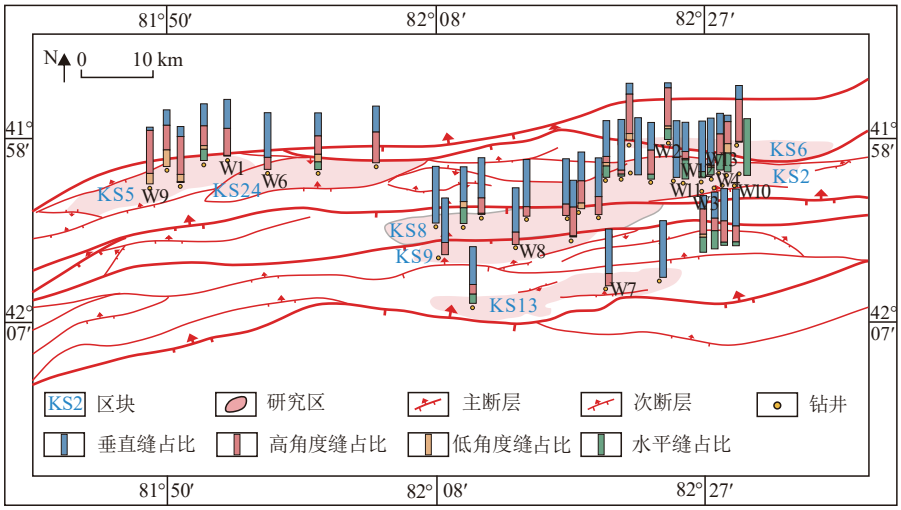


图6 克深气田裂缝倾角平面图

Fig. 6 Planar map of fracture dip angles in the Keshen gas field

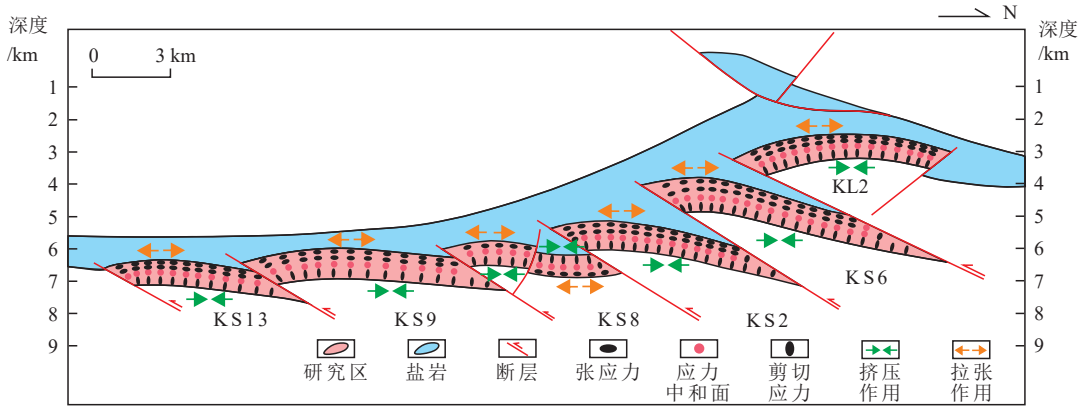


图 7　克深气田断背斜应力中和面模式图（修改自文献［38］）

Fig. 7　Model diagram of the neutral surface in faulted anticlines in the Keshen gas field （modified from reference［38］）

于挤压-剪切应力主导区，地应力值较高，主要发育剪切缝，裂缝开度较小但裂缝密度显著增高。此外，裂缝发育在垂向上表现出强烈的非均质性，总体上在巴什基奇克组第一段和第二段天然裂缝都很发育，但巴一段裂缝分布相对集中，巴二段裂缝分布则较为分散（图 8）。

2.2　构造裂缝充填特征及开度

裂缝的充填度受构造运动期次和裂缝形成时期的共同控制[14]。基于克深气田 39 口取心井共计 871.28 m 取心资料，统计裂缝充填特征，结果表明克深气田全充填比例呈现出由北向南逐渐降低的空间分布特征（图 9）。这一趋势主要归因于北部区块构造变形发生较早，构造裂缝形成时间相对较早，经历了较长时间的胶结作用，导致充填程度普遍较高。具体表现为 KS6、KS5、KS24 和 KS2 区块岩心裂缝的充填率高于 69.4%，最高可达 89.9 %；而南部 KS8、KS9 和 KS13 区块裂缝充填程度显著降低，仅有 30.0 % ~ 38.4 %（表 2）。此外，每个区块内部裂缝充填特征也存在明显的空间非均质性。KS6 区块的 3 口取心井数据显示，裂缝全充填比例自西向东递减。KS5 气藏东部裂缝充填程度低于西部。KS24 西部和东部区域全充填比例较高。KS2 区块高部位充填程度比翼部充填程度低。KS8 区块裂缝充填程度整体较低，背斜高部位裂缝充填率低，翼部充填率高。KS9 区块和 KS13 区块未充填比例自西向东逐渐增大。

裂缝充填物类型受控于成岩流体性质及成岩环境[39-41]。基于克深气田 39 口取心井共计 871.28 m 取心资料，分析克深气田裂缝充填物分布特征，发现不同区块裂缝充填物类型在空间上呈现显著的南北分带性。岩心观察与分析表明，克深气田构造裂缝充填物主要有方解石、白云石、泥质和硬石膏（图 10）。不同充填矿物在成像测井响应特征上存在一定的差异，当裂缝被泥质、黏土等矿物充填时，会显示为暗色，当裂缝被方解石、石英、白云石、硬石膏等高电阻率的矿物充填时，显示为亮色（图 3）。KS6、KS5、KS24、KS2 区块受白垩纪—古近纪早期成岩环境的影响，充填矿物成分主要为淡水-半咸水介质成岩环境下的方解石。KS8、KS9、KS13 区块受巴什基奇克组上部库姆格列木群底部盐岩层系的影响，白云石和硬石膏充填比例显著增高，主要与盐岩溶解形成的偏碱性卤水介质及盐湖成岩环境密切相关[42]。

克深气田构造裂缝的垂向充填程度呈现显著分异特征。基于 39 口取心井共计 871.28 m 取心资料，分析裂缝充填率在垂向上的变化规律，发现紧邻不整合面附近的裂缝充填程度普遍较高。这一现象主要归因于上覆地层富含石膏、白云岩等易溶矿物，在富钙质成岩流体作用下发生溶解，溶解物质随后在下方裂缝系统中迁移并沉淀充填。随着埋深的增加，成岩流体的控制作用减弱，因此巴三段相较于巴一段和巴二段，充填率整体呈现降低的趋势（图 11）。

裂缝开度是裂缝两壁之间的垂向距离，是表征裂缝发育规模的关键参数，直接制约着储层裂缝系统的储集能力与渗流能力[43]。基于克深气田 39 口取心井共计 871.28 m 取心资料，分析构造裂缝开度分布特征，发现克深气田裂缝开度在空间上呈现出分区分带的差异性。KS6、KS5 和 KS24 区块裂缝开度相对较低，主要分布在 0.2 mm 以

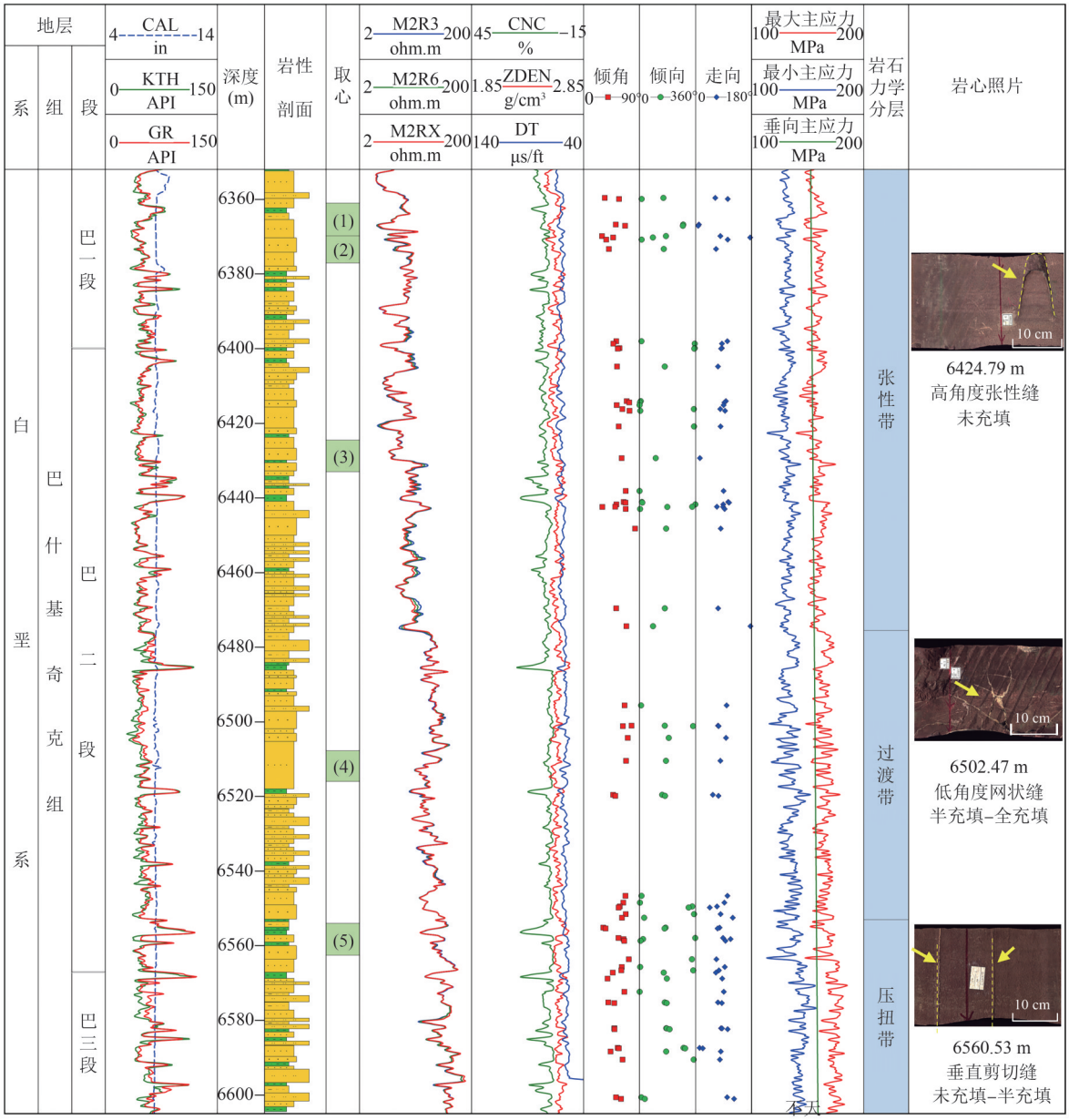


图8 克深气田W9井白垩系巴什基奇克组裂缝综合柱状图

Fig. 8 Comprehensive columnar chart of fractures in the Cretaceous Bashijiqike Formation of Well W9, Keshen gas field

下，KS2、KS8区块裂缝开度0.20 ~ 0.94 mm，KS9区块裂缝开度主要分布在1.0 ~ 1.5 mm，KS13区块的裂缝开度较大，开度大于2 mm的裂缝占比达到43%（图12）。

3 构造裂缝发育主控因素

3.1 构造作用的因素

3.1.1 褶皱对裂缝的控制作用

褶皱对裂缝分布的控制作用表现为不同构造部位裂缝发育程度呈现显著空间分异[44-45]。其根本原因在于褶皱形成过程中，不同构造部位所经历的力学行为，例如拉伸、压缩、剪切和弯曲等应力状态存在显著差异[46]。基于克深气田76口电成像测井资料，分析克深气藏各个区块不同构造部位成像测井裂缝线密度发育程度，发现背斜核部裂缝发育程度整体较低，但局部区域次级断层发育可使核部裂缝密度增大。相较之下，背斜南翼裂缝发育程度显著高于北翼。基于以上克深气田实际观测，结合前人研究成果，克深气田褶皱对裂缝控制机理主要体现在应力分异机制、岩层曲率与应变分布、构造非对称性以及多期构造叠加等方面。核部主要受张性应力控制，形成数量

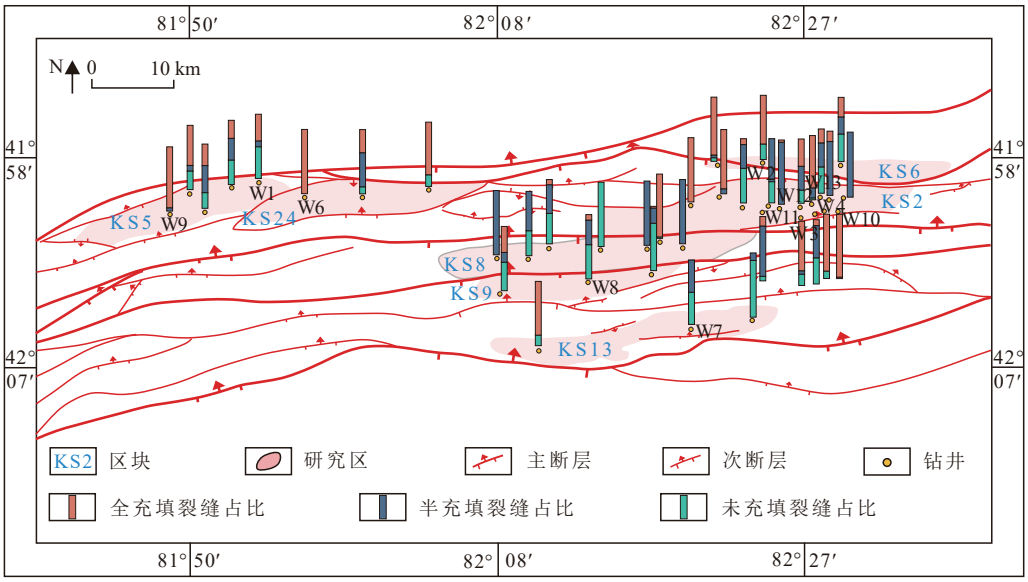


图 9　克深气田单井裂缝充填程度平面分布图

Fig. 9　Planar distribution map of single-well fracture filling degree in the Keshen gas field

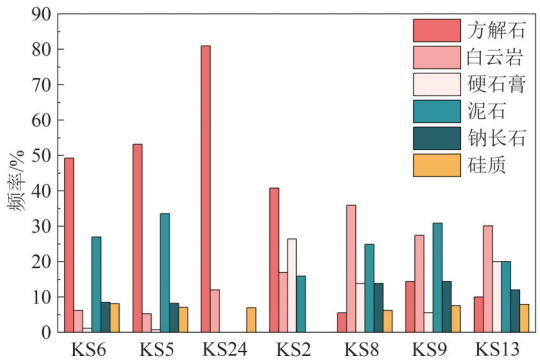


图 10　克深气田充填物频率直方图

Fig. 10　Histogram of filling material frequencies in the Keshen gas field

相对较少但有效性高的主干张性裂缝网络；而翼部尤其是陡翼主要受剪切应力控制，为调节强烈的剪切应变而发育密度大但有效性相对较低的网络状剪切裂缝。克深气田南翼因其更陡的岩层倾角和毗邻断裂带的特殊构造位置，强烈的挤压作用使其成为剪切应力集中区域，因此其裂缝密度显著高于北翼和核部（图 13-14）[47]。

值得注意的是，经典背斜褶皱裂缝发育模式中裂缝发育程度通常是核部高于翼部，而克深气田出现翼部裂缝发育程度高于核部，王珂等认为可能与构造部位的表述方式及研究区的实际地质情况有关[48]。经典模型中的核部可能包含了核部和翼部的上半部分，这样就导致核部裂缝密度高于翼部裂缝密度。克深气田处于强烈冲断背景下，背斜南翼紧邻边界断层，导致背斜核部与翼部的实际划分与经典模型不同。核部实际仅包含弯曲变形最强的顶部区域，而翼部则因靠近断层而保留了更多高密度裂缝区域，缺失了远端低密度区，从而导致翼部平均裂缝密度更高（图 15）。

3.1.2　断层对裂缝的控制作用

断层通过改变局部的应力场分布控制裂缝的发育程度[49-50]。不同级别的断层对裂缝发育的控制作用存在差异，相比次级断层，克深气田边界断层对构造裂缝的控制作用更强，这主要是因为大型断层能在更大范围内引起更显著的应力场变化[28, 48]。通过分析克深气田 39 口取心井的岩心线密度与边界断层的距离，发现距离边界断层越近，裂缝线密度越高，但距边界断层距离大于 2.3 km 时，裂缝线密度不再呈现逐渐减小的趋势，表明此时断层对裂缝发育的控制作用在此距离范围外开始减弱（图 16）。其原因可能是断层所引起的应力场扰动随距离增大而衰减，超出一定范围后不再起主导作用。在断层控制范围内，裂缝主要形成于断层端部、断层壁面及附近损伤带等应力集中区域；而在此范围之外，裂缝发育则更多受区域构造应力或其他局部因素控制。

3.2　沉积作用的因素

3.2.1　岩石力学层厚度

岩石力学层是指力学行为相近或一致的岩石单元，其对裂缝发育的控制作用主要表现在对应

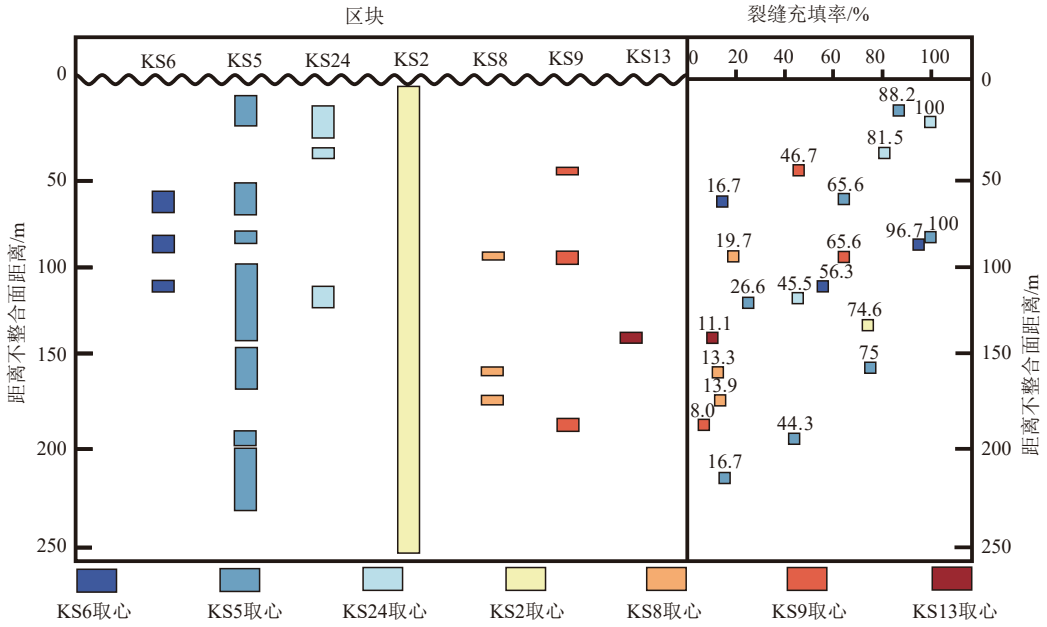


图 11 克深气田裂缝垂向充填率

Fig. 11 Vertical filling ratio of fractures in the Keshen gas field

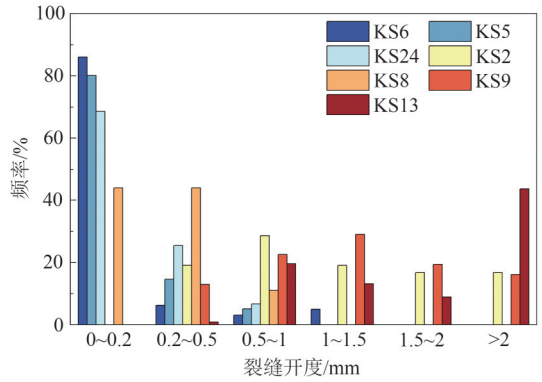


图 12 克深气田裂缝开度频率直方图

Fig. 12 Histogram of fracture aperture frequencies in the Keshen gas field

力分布、能量耗散和破裂行为的约束作用[51-52]。本研究基于39口取心井的871.28 m取心数据，以顶底泥岩、泥质砂岩或者泥砾为界划分岩石力学层，通过统计克深气田各个区块的岩石力学层厚度与岩心裂缝线密度关系，发现裂缝线密度与岩石力学层存在显著的负相关关系，这是由于岩层厚度越小则构造应力相对越集中，岩石发生破裂的概率也就越大，进而促进构造裂缝的发育[53]。当岩石力学层厚度小于5 m时，裂缝线密度随着厚度的增加急剧下降，尤其是中部的KS2区块裂缝线密度下降幅度最大，这是由于KS2区块岩石脆性更强、构造应变更大，对应力变化响应最为敏感，故下降幅度最大。然而当岩石力学层厚度大于5 m这一临界值后，应力在岩层内趋于均匀化，破裂难度趋于稳定，裂缝线密度则趋于稳定（图17）。

3.2.2 岩石类型

在区域地应力条件相对稳定的背景下，岩石组分和结构差异是导致岩石力学性质分异的关键因素[54]。基于39口取心井的871.28 m岩心岩性描述资料的统计结果表明，相较于泥岩，砂岩中裂缝发育程度显著更高，这是因为砂岩脆性矿物含量较高，在构造应力作用下更易发生脆性破裂并形成裂缝[55]。此外岩石粒度对裂缝发育也有一定的控制作用，KS6、KS8和KS13区块的粉砂岩中裂缝尤为发育，其中KS13区块粉砂岩裂缝线密度高达3条/m，这是由于细粒沉积物受上覆压力的压实作用更强，岩石致密化程度和强度增大，此类岩层在同样的构造应力作用下更易破裂形成裂缝。其他区块的裂缝主要发育在细砂岩和中砂岩中，说明可能是由于细砂岩和中砂岩中含有较多钙质、白云质和硅质等高脆性的矿物成分，降低了岩石破裂阈值（图18）。

在砂、泥岩厚度比值达到一定数值时，裂缝发育程度会明显增大[56]。以KS2区块为例，基于岩心资料统计不同砂泥厚度比值下的裂缝发育特征，发现砂泥岩厚度比为6～8时，裂缝发育程度最大，这是由于在该比值范围内，砂岩层作为构造应力积累与脆性破裂的主体单元，而薄层泥岩仅作为塑性隔挡层，一方面通过塑性形变吸收部

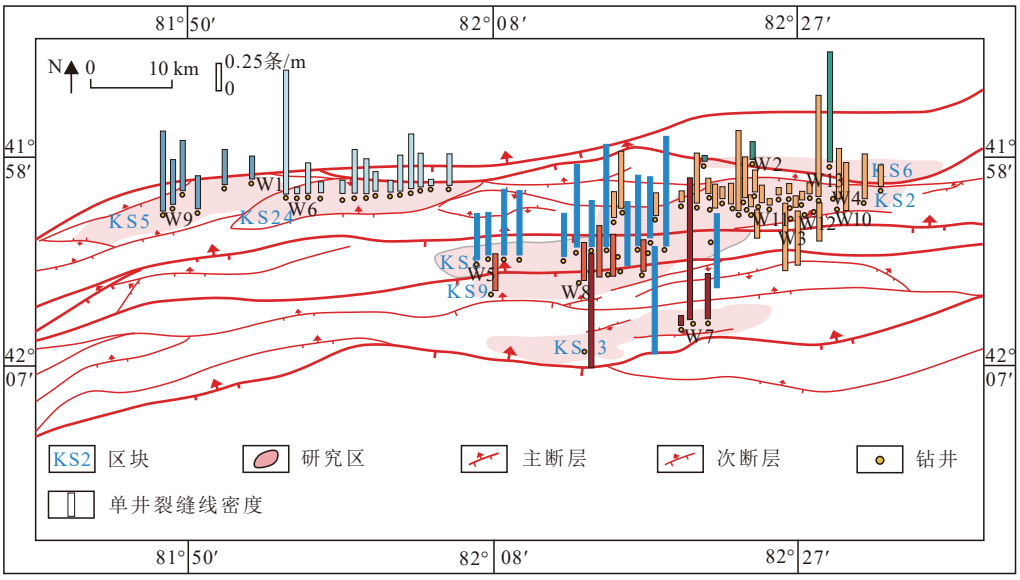


图 13　克深气田不同构造位置成像测井裂缝线密度分布平面图

Fig. 13　Planar distribution map of FMI fracture linear density at different structural positions in the Keshen gas field

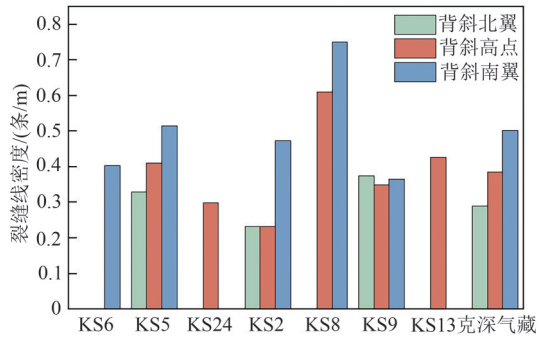


图 14　克深气田不同构造位置成像测井裂缝线密度分布直方图

Fig. 14　Histogram of FMI fracture linear density distribution at different structural positions in the Keshen gas field

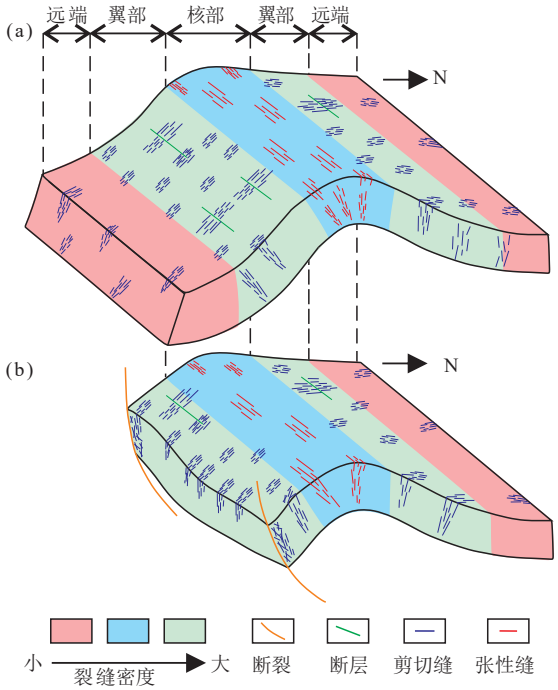


图 15　褶皱裂缝模式（修改自文献［48］）

Fig. 15　Fold-fracture model （modified from Ref.［48］）

(a)经典背斜;(b)克深气田背斜

分应变能，另一方面阻止裂缝垂向上向相邻砂岩层扩展，这种“砂岩主导破裂-泥岩约束能量耗散”的耦合效应，使应力更集中于当前砂岩层内，最终促进密集裂缝的形成（表 3）[57-58]。

3.2.3　上覆膏盐岩层

克深气田北部发育巨厚的膏盐岩层[59]，在喜马拉雅期强烈的逆冲挤压背景下，这套塑性层首先发生塑性流动，吸收和耗散了大量的区域构造应力，使得传递至下伏巴什基奇克组砂岩储层的有效构造应力相对减弱[42]。因此，尽管北部整体构造位移量和应变量大，但直接作用于裂缝的有效张应力却相对不足。南部区块膏盐岩层薄，应力屏蔽效应弱，构造应力传递更为高效。同时，邻近秋里塔格走滑断裂带的构造背景，导致局部派生出张性应力环境（图 4），该应力环境对于形成与维持大开度裂缝至关重要。

前面分析发现南部区块裂缝充填物中白云石和硬石膏比例增高（图 10）。一方面，脆性矿物白云石含量高增强了岩石的破裂能力，另一方面，硬石膏常形成斑点状胶结，这种胶结方式并未完全堵塞裂缝，反而在裂缝壁之间起到了支撑的作

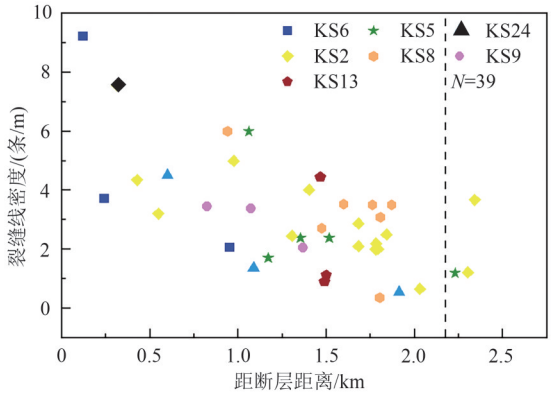


图 16 克深气田岩心裂缝线密度与断层距离交会图

Fig. 16 Cross-plot of core fracture linear density versus distance to faults in the Keshen gas field

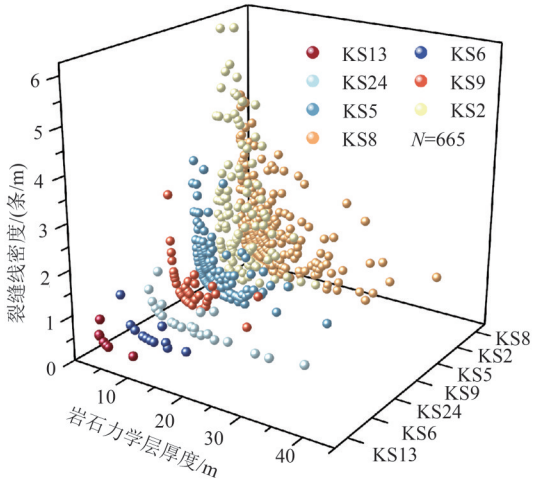


图 17 克深气田不同区块岩石力学层厚度与岩心裂缝线密度交会图

Fig. 17 Cross-plot of rock mechanical layer thickness versus core fracture linear density in the Keshen gas field different blocks

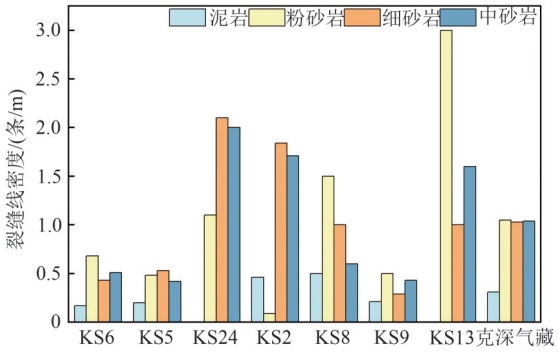


图 18 克深气田不同岩性岩心裂缝线密度分布特征

Fig. 18 Distribution characteristics of core fracture linear density in different lithologies of the Keshen gas field

用，有效抵抗了上覆地层的压实作用，有利于原生裂缝开度的长期保持[60-61]。结合南部极低的裂缝充填率（表 2），这种支撑性胶结与未被充填的空间共同保障了裂缝开度的长期保持。

4 构造裂缝发育地质模式

在系统分析克深气田巴什基奇克组构造裂缝基本特征、分布规律及主控因素的基础上，耦合构造应力大小与构造演化特征，建立了克深气田“构造-沉积”二元耦合构造裂缝发育地质模式，该模式全面揭示了研究区裂缝空间分布特征及成因机制（图 19）。

北部的 KS6 和 KS5 区块更靠近天山逆冲推覆体系的前端，其裂缝主要受早期构造活动控制。燕山晚期—喜马拉雅早期近 NS 向伸展作用导致近 EW 向张性缝大量产生，短暂的 NNW—SSE 向挤压作用产生了少量的近 SN 向和 NW—SE 向的剪切缝，同时该挤压作用在背斜轴部产生的拉张作用有利于近 EW 向张性缝的产生，此阶段的最大有效构造应力为 35.2 ~ 59.9 MPa[55]。构造活动发生较早，裂缝经历了长期的成岩胶结作用，导致充填程度高，且受淡水-半咸水介质成岩环境的影响，充填物以方解石为主。同时，北部发育的巨厚膏盐岩层在逆冲挤压背景下发生塑性流动，吸收和耗散了部分区域构造应力，使得作用于下伏砂岩储层的有效张应力相对减弱，因此裂缝开度也相对较低。

中部 KS24、KS2 和 KS8 区块位于构造应力叠加区，经历了多期应力场转换。喜马拉雅中期 NNW—SSE 向挤压叠加于早期构造之上，形成了以近南北向剪切缝为主、张剪复合的裂缝体系，最大有效构造应力达到 80.9 MPa[55]。该区位于背斜核部，岩性脆性高、岩石力学层薄，相较于北部和南部，裂缝更为发育。

南部 KS9、KS13 区块紧邻边界断裂，受喜马拉雅晚期强烈的近南北向挤压应力控制，主要发育以近南北向直立剪切缝。相较于构造应力叠加区的中部，南部区块应力减小，导致裂缝密度相较于中部有所降低。然而，走滑作用、高脆性矿物含量以及硬石膏等矿物的斑点状胶结支撑作用，使得该区裂缝开度表现为相对较高，且充填率最低。

构造、岩石力学层厚度、岩石类型和上覆膏盐岩层因素在空间上相互耦合，共同控制形成了该区“平面分带、垂向分层”的裂缝分布模

表 3　克深 2 气藏砂泥岩厚度比与裂缝线密度关系

Table 3　Relationship between sandstone-mudstone thickness ratio and fracture density in the Keshen 2 gas field

砂泥岩厚度比	裂缝线密度/(条/m)	岩性组合特征	岩心图片
< 4	4.0 ~ 4.8	泥岩层厚， 砂岩孤立薄层	 W10井，6803.87 m，褐色泥岩夹灰褐色砂质条带，1条微斜缝
4 ~ 6	3.8 ~ 6.2	砂泥岩互层， 砂岩占比提升	 W11井，6677.76 m，粉砂质泥岩，2条张性缝，白云岩全充填
6 ~ 8	4.1 ~ 6.7	砂岩主导， 泥岩薄隔层	 W12井，6939.5 m，棕褐色泥质细砂岩，张性网状缝
> 8	5.3 ~ 6.3	厚层砂岩， 泥岩夹稀少	 W13井，6804.94 m，棕褐色中砂岩少量泥砾，2条垂直小缝，白云石全充填

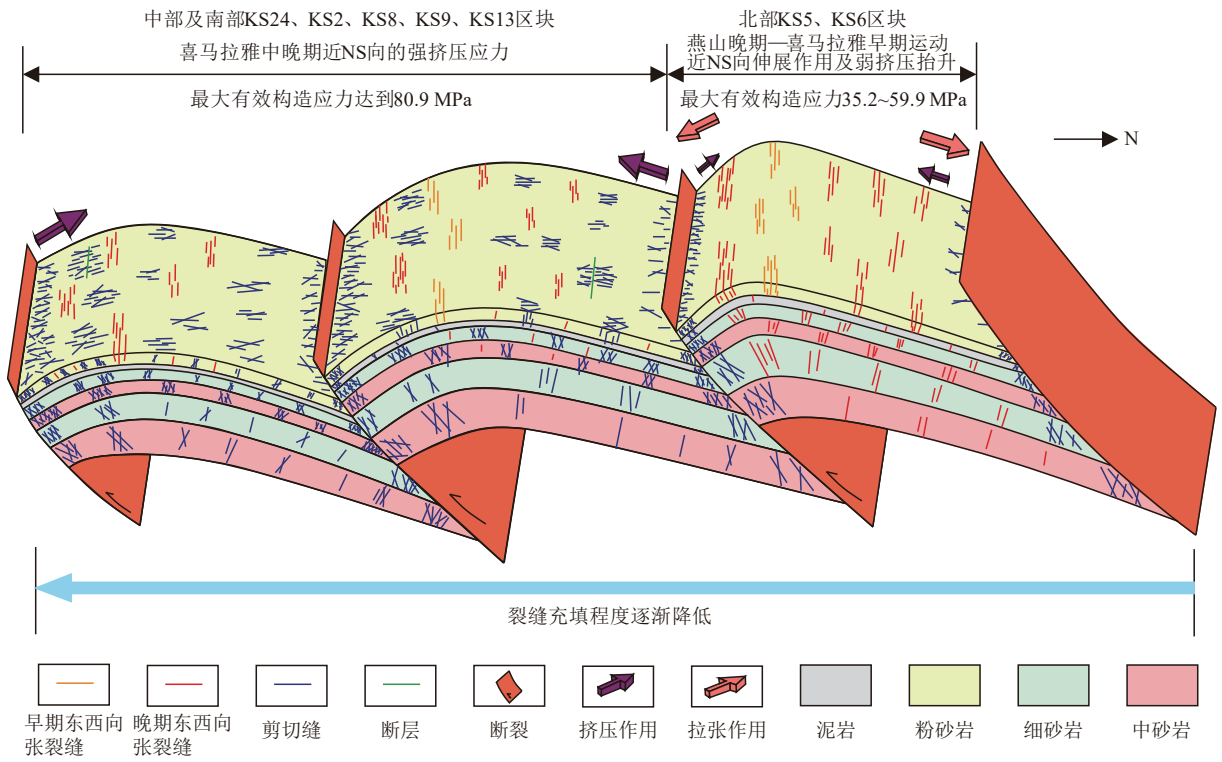


图 19　克深气田构造裂缝地质模式图

Fig. 19　Geological models of structural fractures of the Keshen gas field

式，为克深气田高效井位部署、压裂层段优选　层致密砂岩气藏裂缝预测及有效开发具有重要及开发方案调整提供了关键地质依据，对超深　指导意义。

5 结 论

（1）克深气田构造裂缝类型与产状的空间分异受多期构造应力场控制。平面上，北部KS5、KS6区块受早期弱挤压和背斜拱张作用，以近EW向张性缝为主；中部KS24、KS2、KS8区块应力场的转变叠加了持续的背斜拱张作用，形成以近NS向剪切缝为主的张剪复合裂缝；南部KS9、KS13区块紧邻边界断裂，近NS向直立剪切缝占主导。纵向上，受应变中和面的影响，浅部张性段主要发育高角度张性缝，中部过渡段主要发育网状缝，深部压扭段主要发育剪切缝。

（2）构造作用、岩石力学层厚度、岩性和上覆膏盐岩层均对克深气田深层超深层致密砂岩储层裂缝分布有显著的控制作用。褶皱与断层活动主导裂缝的空间分异性。背斜南翼及近边界断裂区应力集中，裂缝密度显著高于核部；次级断层通过局部应力调整促进裂缝密集发育。砂岩脆性层厚度＜5 m更易发育裂缝，砂泥岩互层界面易诱发剪切缝；上覆膏盐岩层通过其塑性流动吸收并屏蔽区域应力，影响下伏地层的有效应力分布，一定程度上影响了裂缝开度。

（3）本研究建立了克深气田“构造-沉积”二元耦合的裂缝发育模式。北部KS6、KS5区块受早期构造控制，发育近EW向张性缝，巨厚膏盐岩层的塑性流动吸收并屏蔽了部分区域构造应力，使得下伏储层有效张应力减弱，导致裂开度相对较小，且经历长期成岩胶结作用后充填程度高。中部KS24、KS2、KS8区块位于构造应力叠加区，经历多期应力场转换，在岩性脆性高、岩石力学层薄的有利条件下，形成以近NS向剪切缝为主的裂缝系统，裂缝密度相对较高。南部KS9、KS13区块紧邻边界断裂，受喜马拉雅晚期强挤压应力控制，发育近NS向直立剪切缝，走滑派生张应力环境与硬石膏等矿物的支撑性胶结，形成了裂缝开度大的特征。该模式系统揭示了不同区块裂缝发育的主控机制，为气田开发井网部署与压裂优化提供了地质依据。

参考文献：

[1] 王清华，杨海军，杨威. 塔里木盆地库车坳陷超深层碎屑岩油气地质研究新进展和下步勘探方向[J]. 石油勘探与开发，2025，52（1）：1-14.

[2] 朱光有，姜华，黄士鹏，等. 中国海相油气成藏理论新进展与万米深层超大型油气区预测[J]. 石油学报，2025，46（4）：816-842.

[3] PELLEGRINI B D S，PORTUGAL SEVERIANO RIBEIRO H J. Exploratory plays of Para-Maranhao and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters，Brazilian Equatorial Margin[J]. Brazilian Journal of Geology，2018，48（3）：485-502.

[4] 李剑，佘源琦，高阳，等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. 中国石油勘探，2019，24（4）：403-417.

[5] 郭旭升，胡东风，黄仁春，等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业，2020，40（5）：1-14.

[6] ELKINS L E. The Technology and Economics of Gas Recovery from Tight Sands[C]. Hobbs：SPE Production Technology Symposium，1978.

[7] 何登发，贾承造，赵文智，等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发，2023，50（6）：1162-1172.

[8] 马永生，蔡勋育，黎茂稳，等. 深层—超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展[J]. 石油勘探与开发，2024，51（4）：692-707.

[9] 李厂，何建华，蒋睿，等. 川西新场—丰谷地区须二段致密砂岩储层有效构造裂缝成因及发育规律[J/OL]. 成都理工大学学报（自然科学版）：1-20. https://link. cnki. net/urlid/51. 1634. N. 20250115. 1134. 003

[10] 王艳丽，朱松柏，吴伟民，等. 超深层裂缝性致密砂岩气藏断-缝发育特征及生产对策[J]. 新疆石油地质，2025，46（2）：217-223.

[11] 冯建伟，赵力彬，王焰东. 库车坳陷克深气田超深层致密储层产能控制因素[J]. 石油学报，2020，41（4）：478-488.

[12] 江同文，张辉，徐珂，等. 克深气田储层地质力学特征及其对开发的影响[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2020，42（4）：1-12.

[13] 杨海军，李勇，唐雁刚，等. 塔里木盆地克深气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报，2021，42（3）：399-414.

[14] 王珂，张荣虎，王俊鹏，等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. 石油与天然气地质，2021，42（2）：338-353.

[15] 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.

[16] 刘群明，唐海发，吕志凯，等. 超深层气藏裂缝发育模式及水侵规律——以塔里木盆地克深2、9、8气藏为例[J]. 天然气地球科学，2023，34（6）：963-972.

[17] 韩高松. 库车坳陷克深气田巴什基奇克组致密储层裂缝发育规律[D]. 北京：中国石油大学（北京），2023.

[18] 何巧林，王珂，胡春雷，等. 深层致密砂砾岩储层构造裂缝分布规律与有效性评价——以库车坳陷KT1气藏亚格列木组为例[J]. 海相油气地质，2024，29（4）：437-447.

[19] 王清华，程晓敢，谢会文，等. 库车坳陷克拉苏构造带盐下深层多滑脱构造模式及油气地质意义[J]. 地球科学，2025，50（1）：97-109.

[20] 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克组储层为例[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45 (1):20-31, 72.

[21] 张月, 韩登林, 杨铖晔, 等. 超深层碎屑岩储层裂缝充填流体迁移规律——以库车坳陷克深井区白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2020, 41 (3):292-300.

[22] 王俊鹏, 曾联波, 周露, 等. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层储层裂缝发育模式及开发意义[J]. 地球科学, 2023, 48 (7):2520-2534.

[23] 徐小童, 曾联波, 董少群, 等. 塔里木盆地库车坳陷克深气藏超深层致密砂岩储层天然裂缝发育特征及对水侵的影响[J]. 石油实验地质, 2024, 46 (4):812-822.

[24] 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克组深层、高产储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31 (8): 1126-1138.

[25] 冯佳睿, 高志勇, 张宇航, 等. 库车坳陷大北克深井区白垩系储层含盐特征与分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52 (1):38-54.

[26] 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.

[27] 刘志达, 罗晓容, 付晓飞, 等. 超深层致密砂岩输导层差异性成岩演化与成藏过程——以塔里木盆地库车坳陷克深气藏为例[J]. 地质学报, 2025, 99: 1-18.

[28] 付小涛, 王益民, 邵剑波, 等. 超深层裂缝性致密砂岩储层砂体、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.

[29] 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.

[30] 饶家健, 张文涛, 刘启蒙. 应力对背斜构造中地热的控制作用研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40 (3):46-52.

[31] SUN S, HOU G, ZHENG C. 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.

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

[33] 汪林波, 韩登林, 王晨晨, 等. 库车坳陷克深井区白垩系巴什基奇克组孔缝充填特征及流体来源[J]. 岩性油气藏, 2022, 34 (3):49-59.

[34] AJAMI M, ASGARI K, KADKHODAIE A. Analysis of the correlation between fracture topology and mechanical properties of rocks in fractured carbonate reservoirs: In Dehram group, Fars arc Zone (Southwest Iran) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 177 :1-25.

[35] MCCAFFREY K J W, HOLDSWORTH R E, PLESS J, et al. Basement reservoir plumbing: fracture aperture, length and topology analysis of the Lewisian Complex, NW Scotland [J]. Journal of the Geological Society, 2020, 177 (6):1281-1293.

[36] 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.

[37] 周鹏,唐雁刚,尹宏伟,等. 塔里木盆地克拉苏构造带克深2气藏储层裂缝带发育特征及与产量关系 [J]. 天然气地球科学, 2017, 28 (1): 135-145.

[38] RAMSAY J G. Folding and Fracturing of Rocks [M]. New York: McGraw-Hill,1967.

[39] 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 等. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现[J]. 天然气工业, 2020, 40 (1):20-30.

[40] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solid [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1920, A221 (4) : 163-198.

[41] SAEDI G, SOLEIMANI B, SAMANI B, et al. The interaction between faults and in-situ stress on the kinematic and subsurface natural fracture of Aghajari oilfield in southwest of Iran [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208 :1-17.

[42] 卓勤功,李勇,宋岩,等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性[J]. 石油实验地质, 2013, 35 (1): 42-47.

[43] ONO T, YOSHIDA H, METCALFE R. Use of fracture filling mineral assemblages for characterizing water-rock interactions during exhumation of an accretionary complex: An example from the Shimanto Belt, southern Kyushu Japan [J]. Journal of Structural Geology, 2016, 87:81-94.

[44] DOUMA L A N R, REGELINK J A, BERTOTTI G, et al. The mechanical contrast between layers controls fracture containment in layered rocks [J]. Journal of Structural Geology, 2019, 127:1-11.

[45] WANG Z, WANG C, XU K, et al. Characteristics and control factors of tectonic fractures of ultra-deep tight sandstone: Case study of the Lower Cretaceous reservoir in Bozi-Dabei area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2023, 8 (6):439-453.

[46] 祖克威,曾联波,巩磊. 断层相关褶皱概念模型中的裂缝域 [J]. 地质科学, 2013, 48 (4): 1140-1147.

[47] 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.

[48] 王珂,杨海军,李勇,等. 库车坳陷克深气田致密砂岩储层构造裂缝形成序列与分布规律 [J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44 (1): 30-46.

[49] 李凤磊, 林承焰, 任丽华, 张国印, 关宝珠. 塔里木盆地塔北地区多期断裂差异匹配控制下超深岩溶缝洞储层成藏特征[J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 219-236.

[50] 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.

[51] REZAEE H, NOORIAN-BIDGOLI M. Numerical and experimental investigation of the influence of temperature and grain size on the fracture behavior of rock [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17 (2): 1102-1119.

[52] 卫欢, 单长安, 朱松柏, 等. 库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组致密砂岩裂缝发育特征及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2025, 37 (1): 149-160.

[53] 赵文韬, 侯贵廷, 张居增, 等. 层厚与岩性控制裂缝发育的力学机理研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51 (6): 1047-1058.

[54] 李翔. 库车坳陷克深2区块白垩系巴什基奇克组裂缝分布及建模[D]. 成都:西南石油大学,2015.

[55] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 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, 2004, 9(S1): 98-106.

[56] 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.

[57] 李莉妃, 任启强, 杨田, 等. 多级构型界面下致密砂岩储层构造裂缝发育特征——以川西坳陷须家河组二段为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46 (4): 722-734.

[58] 张银涛,余一欣,谢舟,等. 塔里木盆地富满地区走滑断裂带精细刻画及勘探应用成效[J]. 现代地质,2024,38(6):1417-1430.

[59] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25 (2): 153-166.

[60] 王俊鹏,曾联波,徐振平,等. 成岩流体对超深致密砂岩储层构造裂缝充填及溶蚀改造的影响:以塔里木盆地克拉苏油气田为例 [J]. 地学前缘, 2024, 31 (3): 312-323.

[61] 巩磊, 姚嘉琪, 高帅, 等. 岩石力学层对构造裂缝间距的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42 (6): 965-973.