



## 新疆米东高陡煤系天然裂缝与地应力特征及工程影响

吴嘉伟 张健 吕玉民 祝彦贺 王存武 张月 陈思路 訾敬玉

### 引用本文:

吴嘉伟, 张健, 吕玉民, 等. 新疆米东高陡煤系天然裂缝与地应力特征及工程影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 226–237.  
WU Jiawei, ZHANG Jian, LYU Yumin. Characterization of natural fractures and in-situ stress in high-steep coal-bearing strata in the Midong area in Xinjiang and influence on engineering[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 226–237.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1796>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制

In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 140–150 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/89ccb35a-401e-4189-a310-94470bd0dd0d>

##### 滇东-黔西地区现今地应力场与二叠系煤储层渗透率特征

Characteristics of present-day in-situ stress field and the Permian coal reservoir permeability in the eastern Yunnan and western Guizhou regions

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 179–186 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/14d3544d-27c1-42eb-b9df-7a448e16e410>

##### 滇东老厂矿区煤层气储层地应力特征研究

Study on in-situ stress characteristics of coalbed methane reservoir in Laochang Mining Area, eastern Yunnan

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f5888826-2f96-4e58-b2fc-a1607478f653>

##### 天然裂缝对水力压裂煤的起裂及扩展试验研究

Study on influence of natural fractures on initiation and propagation of hydraulic fracturing coal

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 92–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0813>

##### 新疆伊犁矿区侏罗系含水介质特征与地下水赋存运移规律

Characteristics of water-bearing media in Jurassic strata and groundwater occurrence and migration law in Yili Mining Area, Xinjiang

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 140–151 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0335>

##### 多煤层开采条件下高陡山体变形控制

Deformation control of high and steep mountain under condition of multi-coal mining

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 180–190 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c1815706-7909-4cc3-84e6-d9d734a0bf53>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

吴嘉伟, 张 健, 吕玉民, 等. 新疆米东高陡煤系天然裂缝与地应力特征及工程影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 226–237.

WU Jiawei, ZHANG Jian, LYU Yumin, *et al.* Characterization of natural fractures and in-situ stress in high-steep coal-bearing strata in the Midong area in Xinjiang and influence on engineering[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 226–237.

## 新疆米东高陡煤系天然裂缝与地应力特征及工程影响

吴嘉伟, 张 健, 吕玉民, 祝彦贺, 王存武, 张 月, 陈思路, 訾敬玉

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘 要:** 新疆米东区块位于准噶尔盆地南缘博格达山山前冲断带, 地层高陡, 构造复杂。当前, 天然裂缝、现今地应力特征及其对工程的影响认识不清, 制约煤层气高效开发。为阐明米东区块高陡煤系天然裂缝、现今地应力特征及其对工程的影响, 研究通过 4 口取心井岩心观察天然裂缝特征和明确裂缝类型, 进一步应用 Stereonet 软件统计了 M2 井成像测井裂缝产状分布规律; 对褶皱轴迹的构造分析和统计 M2 井诱导缝走向分别揭示了北单斜、八道湾向斜局部现今最大水平主应力方向, 运用 4 口井注入-压降试井参数计算现今地应力大小。通过微地震监测、微破裂向量扫描揭示位于八道湾向斜的 M8、M9 井和位于北单斜的 M10、M11 井煤层压裂缝延伸方位。结果表明: 层理缝/弱面、煤岩割理、剪切滑移缝是高陡煤系中最主要的 3 种天然裂缝类型。其中层理缝/弱面在 NNW 向挤压的地层抬升过程中极易活化, M2 井成像测井揭示八道湾组向斜核部层理缝/弱面广泛发育, 其产状与地层产状具有一致性; 八道湾向斜-七道湾背斜、北单斜现今地应力场具有明显的分区特征, 靠近北单斜的七道湾背斜轴迹的垂直方向指示北单斜现今最大水平主应力方向沿 NNW 向; M2 井 NEE 诱导缝走向表明八道湾向斜核部现今最大水平主应力方向沿 NEE 向, 反映向斜局部受控于中性面以下拉张应力场。北单斜由浅至深 (492~1 135 m) 水平地应力始终大于垂向地应力, 表现为以挤压作用为主的走滑断层地应力状态; 八道湾向斜-七道湾背斜由浅至深 (524~784 m) 从走滑断层地应力状态过渡为正断层地应力状态。微地震监测和微破裂向量扫描揭示 M8、M9、M10、M11 井压裂缝沿 NEE 走向煤层延伸。在现今应力场背景下, 高陡煤层的层理缝/弱面的普遍存在使压裂中易诱发套管变形、影响井壁稳定性, 特别对煤层压裂缝延伸具有显著诱导作用, 使压裂缝的主延伸方向与煤层产状一致, 导致煤层沿非层理方向的改造程度不足。考虑压裂液黏度-排量对传递应力的影响, 提高压裂液不同黏度和排量, 对比压裂改造效果和产量值得进一步实践。

**关键词:** 新疆米东区块; 高陡煤系; 天然裂缝; 现今地应力; 地质工程一体化

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)03-0226-12

### Characterization of natural fractures and in-situ stress in high-steep coal-bearing strata in the Midong area in Xinjiang and influence on engineering

WU Jiawei, ZHANG Jian, LYU Yumin, ZHU Yanhe, WANG Cunwu, ZHANG Yue, CHEN Silu, ZI Jingyu

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The Midong area in Xinjiang is located in the foreland thrust belt of Bogda Mountain on the southern margin of Junggar Basin, with high and steep strata and complex structures. At present, the characteristics of natural fractures and the current in-situ stress and their influence on engineering are unclear, which restricts the efficient development of coalbed methane. To clarify the characteristics of natural fractures and the current in-situ stress in high-steep coal-bearing strata and their influence on engineering, fracture characteristics and types were first observed in cores from four wells. Fracture occurrences are further counted from imaging logging of well M2 by Stereonet software. Analyzing the fold axis and counting strikes of induced fractures in well M2 from image logging, we describe the current maximum

收稿日期: 2024-12-04

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2024-1796

基金项目: 中国海洋石油有限公司重大项目课题资助项目 (KJGG2022-1001)

作者简介: 吴嘉伟 (1996—), 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 博士。E-mail: wujw13@cnooc.com.cn

horizontal principal stress direction of the north monocline and the Badaowan syncline, respectively. Parameters measured from injection/falloff tests of four wells are used to calculate magnitudes of the current in-situ stress. Through micro-seismic monitoring and vector scanning for microseismic, the extension direction of coal seam fractures in M8 and M9 wells located in the Badaowan syncline and M10 and M11 wells located in the northern monocline is reflected. The results show that bedding fractures/weak planes, cleats in coal, and shear fractures are the three main types of natural fractures in high-steep coal-bearing strata. Among them, bedding fractures/weak planes are easily activated during strata uplifts under NNW compression. Imaging logging reveals that bedding fractures/weak planes are widely developed in the syncline core of the Badaowan Formation, and their occurrences are consistent with those of strata. Current in-situ stress fields of the Badaowan syncline-Qidaowan anticline and the north monocline are obviously different. Near the north monocline, vertical directions to the Qidaowan anticline axis indicate that the current maximum horizontal principal stress direction of the north monocline is nearly along the NNW direction. NEE-trending induced fractures suggest that the direction of the maximum horizontal principal stress in the core of the Badaowan syncline is along the NEE direction, reflecting that the syncline is locally controlled by the tensile stress field below the neutral surface. In the northern monocline, from shallow to deep (492–1 135 m), horizontal principal stresses are always greater than vertical principal stresses, showing a strike faulting stress state dominated by compression. In the Badaowan syncline-Qidaowan anticline, from shallow to deep (524–784 m), the strike faulting stress state transits into the normal faulting stress state. Microseismic monitoring and vector scanning for microseismic reveal that the hydraulic fractures of M8, M9, M10, and M11 wells extend along the NEE-trending coal seam. Under the background of the current stress field, steep bedding fractures/weak planes tend to induce casing deformation during hydraulic fracturing, and they affect wellbore stability. In particular, bedding fractures/weak planes have a significant induction effect on the extension of hydraulic fractures in coal seams. Consequently, the main extension direction of hydraulic fractures is consistent with the occurrence of coal seams, which means limited stimulation of coal seams. Considering the influence of fracturing fluid viscosity and displacement on stress transfer, it is worth further practice to improve different viscosities and displacements of fracturing fluids and compare the fracturing effect and production.

**Key words:** Midong area in Xinjiang; high-steep coal-bearing strata; natural fracture; current in-situ stress; geology-engineering integration

## 0 引 言

准噶尔盆地煤层气预估资源量 3.83 万亿  $\text{m}^3$ , 是继沁水盆地和鄂尔多斯盆地之后的中国第三大煤层气盆地, 并在阜康、白家海等地的煤层气开发已取得突破性进展<sup>[1-2]</sup>。然而, 准噶尔盆地地质构造复杂, 尤其在盆地南部边缘, 中新世以来的持续强烈挤压形成一系列山前褶皱冲断带<sup>[3]</sup>, 使地层显著抬升变形, 导致煤系倾角高陡, 强烈构造挤压作用背景下天然裂缝发育、地应力变化大, 对钻完井、压裂等工程产生重要影响。米东区块位准噶尔盆地南缘博格达山西北侧, 是当前新疆煤层气勘探开发的主战场之一, 阐明米东区块复杂构造背景下天然裂缝和现今地应力的特征及其对压裂等工程影响对高陡煤系煤层气高效开发具有重要意义。

研究通过岩心观察揭示米东区块高陡煤系中发育的主要天然裂缝类型; 运用成像测井统计煤系天然裂缝产状分布规律。结合地质构造要素分析、成像测井诱导缝走向, 表征米东区块主力煤系现今最大水平主应力方向; 运用注入-压降试井方法测量不同构造部位现今地应力大小和确定地应力状态; 结合煤层水力压裂中微地震监测和微破裂向量扫描结果分析天然裂缝和现今地应力对高陡煤层压裂等工

程的影响和提出对米东高陡煤系煤层气压裂增产的合理化建议。

## 1 地质背景

米东区块位于准噶尔盆地南缘博格达山北麓山前冲断带, 面积 109  $\text{km}^2$ (图 1a—图 1b)。自燕山期晚白垩世, 印度板块不断向北推进, 并最终与欧亚板块碰撞, 受碰撞远程效应的影响, 博格达山逐步隆起。中晚侏罗世, 博格达山北缘逆断层强烈冲断, 导致博格达山整体抬升, 处于楔顶位置, 此时博格达山北缘构造带属于前渊凹陷, 沉积了厚度较大的侏罗系含煤湖相-三角洲相沉积体系, 中-下侏罗统八道湾组和西山窑组是区域内的主要含煤层系<sup>[4-5]</sup>(图 1c—图 1d)。上新世以来, 受印藏碰撞远程效应影响加剧, 博格达山持续性强烈挤压隆升, 形成博格达山北缘强烈冲断构造, 地层挠曲下沉, 高陡近直立<sup>[6-7]</sup>(图 1d, 图 2)。米东区块可进一步划分为北单斜、八道湾向斜-七道湾背斜构造单元(图 1b—图 1d, 图 2)。北单斜地层最为高陡, 地层倾角近  $90^\circ$ ; 八道湾向斜地层南陡(倾角  $60^\circ \sim 80^\circ$ )北缓(倾角  $40^\circ \sim 50^\circ$ ), 表现为一不对称向斜。向北西方向发育白杨北沟逆断层(F1)、碗窑沟逆断层(F2)和碱泉沟-魏家泉逆断层(F3)3 条主要的逆冲断层系统(图 1b, 图 1d, 图 2)。



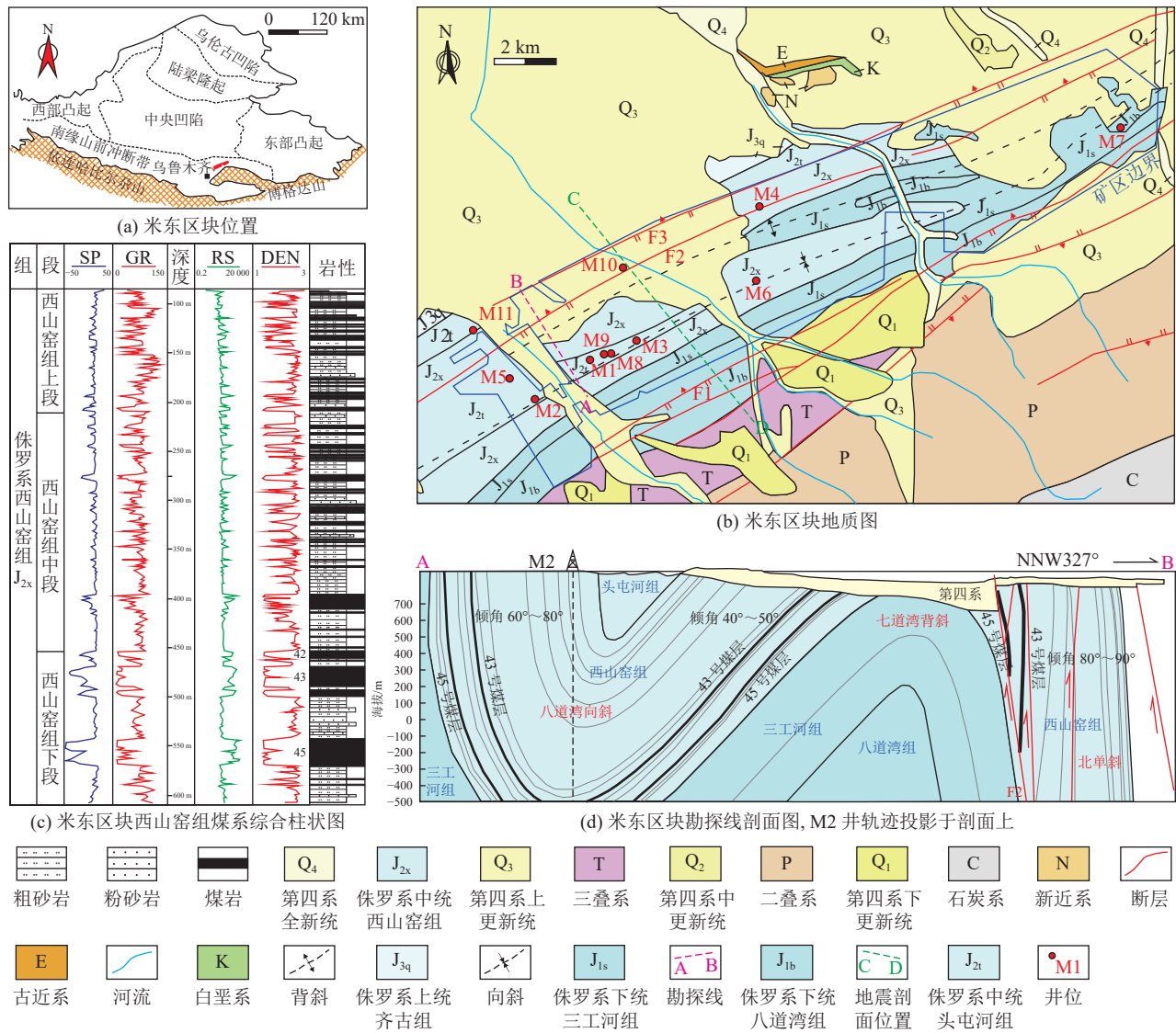


Fig.1 Location, regional geological map, comprehensive stratigraphic column of the coal-bearing strata in the Xishanyao Formation, and prospecting line profile map of Midong area

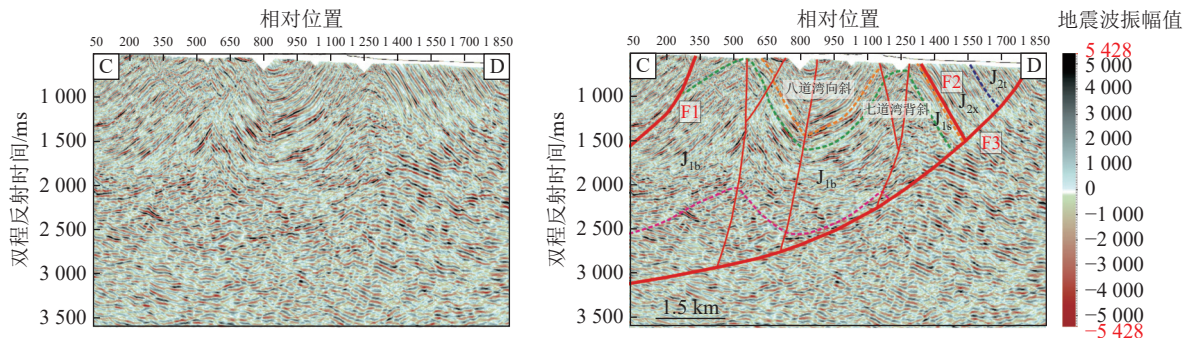


图 2 米东区块 NWW 向未解释(左)和解释(右)的地震剖面图  
Fig.2 Uninterpreted (left) and interpreted (right) seismic section trending in the NWW direction

米东区块煤层气地质储量  $100.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中 42+43 号、45 号煤层为主力煤层,分布在八道湾向斜和北单斜,七道湾背斜煤层由于地层抬升而被

剥蚀(图 1d, 图 2),42 号+43 号煤厚度范围 10~55 m,平均 31.4 m;45 号煤厚度范围 20~55 m,平均 37.1 m。煤层顶底板岩性以泥岩、粉砂质泥岩为主,局部发育

泥质粉砂岩、粉砂岩。主力煤层属中低渗储层，42 号+43 号煤渗透率为  $0.03 \times 10^{-15} \sim 4.87 \times 10^{-15}$  mD，平均  $0.73 \times 10^{-15}$  mD；45 号煤渗透率  $0.008 \times 10^{-15} \sim 2.86 \times 10^{-15}$  mD，平均渗透率  $0.13 \times 10^{-15}$  mD。2 套煤储层均为常温欠压储层，平均压力系数 0.81。煤体结构具有分带性，八道湾向斜整体以原生结构为主，局部发育碎裂-碎粒结构；北单斜以碎裂-碎粒结构为主。煤层含气量变化较大，42 号+43 号煤介于  $0.17 \sim 12.35$  m<sup>3</sup>/t，平均为 6.08 m<sup>3</sup>/t；45 号煤介于  $0.19 \sim 14.22$  m<sup>3</sup>/t，平均为 5.6 m<sup>3</sup>/t。宏观煤岩类型以半亮煤为主，半暗煤次之，有机质含量 83.62% ~ 91.34%，灰分含量 11.65% ~ 21.84%。

## 2 天然裂缝特征和产状分布规律

### 2.1 岩心天然裂缝特征

岩心观察中，层理缝、煤岩割理、剪切滑移缝是米东区块西山窑组高陡煤系最主要的 3 种天然裂缝类型。煤岩层理作为沉积弱面在地层挤压抬升过程中极易活化张开，形成层理缝组系，层理缝角度与地层倾角一致。岩心中可见产状一致的高陡或中低角度层理缝组系，缝间距 < 4 cm (图 3a—图 3b)。煤岩中部分层理缝未完全张开，沿层理缝方向由张开向闭合过渡 (图 3c)。沿陡倾泥岩层理缝平面保留植物叶片化石 (图 3d)。顶底板含砂泥岩与薄煤层共同抬升形成高陡煤系组合，与煤层和顶底板泥岩内部相



图 3 米东区块西山窑组煤系岩心天然裂缝特征

Fig.3 Characteristics of natural fractures in cores of coal-bearing strata of the Xishanyao Formation in the Midong area



比,二者间岩性变化的层理界面易张开形成层理缝(图 3e)。此外,一些岩心位置,煤层层理缝与其他产状的构造缝相交,形成复杂缝网组系(图 3f)。观察到的煤层层理缝大部分未充填,少数层理缝部分充填,充填矿物为方解石,滴酸剧烈起泡(图 3a—图 3f)。在煤系中,割理只存在于煤岩中,与暗淡煤、半暗煤相比,亮煤和半亮煤中割理更加发育,半亮煤岩心中等间距(约 1 cm)面割理平行排列,割理密度 78 条/m(图 3g)。强烈构造挤压背景下形成的剪切滑移缝是主要的裂缝类型之一。岩心中地层揉皱变形是强烈构造挤压作用的结果,顺层面发生剪切滑移形成顺层滑脱缝,弯曲的顺层滑脱面光亮,表面部分充填方解石(图 3h—图 3i)。剪切滑移缝面的擦痕和定向的方解石矿物纤维延伸方向指示微逆断层剪切滑

移运动方向(图 3j—图 3l),沿层理面发生剪切滑移的缝面相对平直(图 3j—图 3k);部分不沿缝面的微逆断层表面凹凸不平(图 3l)。

## 2.2 成像测井裂缝特征和产状分布规律

成像测井是表征井周裂缝发育特征和产状(倾向—倾角)分布规律最有效的方法。位于米东区块八道湾向斜近核部位置的 M2 井采集了成像测井数据(图 1b, 图 1d)。识别的裂缝分为人工裂缝和天然裂缝两种类型。主要人工裂缝类型为诱导缝,表现为倾角近竖直的未充填裂缝(图 4a);天然裂缝包括层理缝/弱面(图 4b)、未充填方解石等矿物的高电导率裂缝(高导缝)(图 4c)和主要充填方解石矿物的高电阻率裂缝(高阻缝)(图 4d),高导缝和高阻缝属于构造成因裂缝。

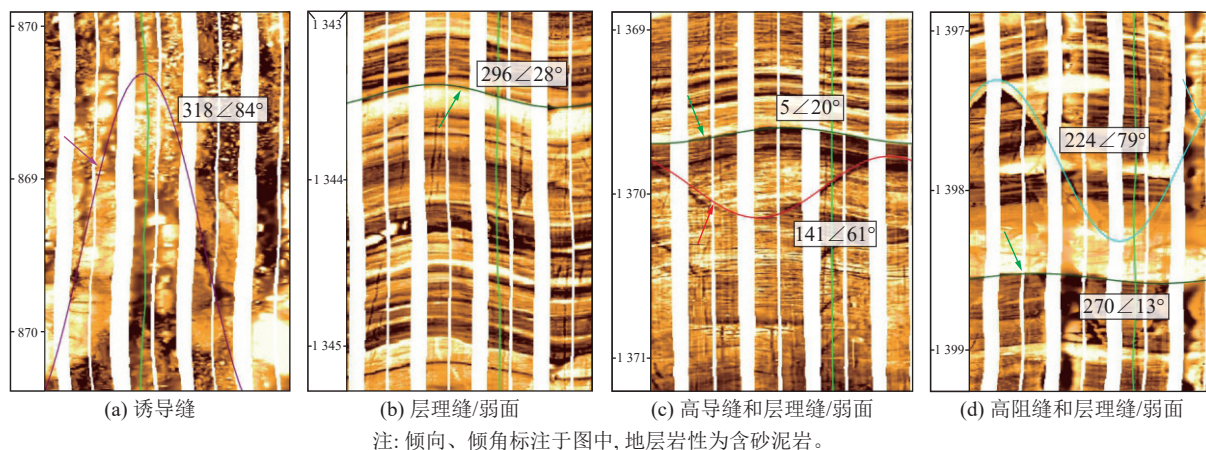


图 4 米东区块 M2 井煤系成像测井裂缝特征

Fig.4 Fracture characteristics of imaging logging in coal-bearing strata of well M2 in the Midong area

M2 井成像测井揭示了 42~44 号煤系(垂深 1 600~1 690 m)与 45 号煤系(垂深 1 740~1 820 m)天然裂缝产状分布规律。煤岩段测井曲线具有高声波时差和低密度特征(图 5a—图 5d)。低声波时差、高密度的顶底板及夹矸岩石类型主要为含砂泥岩(图 5a—图 5d)。在成像测井分辨率尺度,层理缝/弱面是位于八道湾向斜核部的 M2 井 2 段煤系中识别的裂缝类型,未识别高导缝和高阻缝,蝌蚪图表明了层理缝/弱面的分布的深度、倾向和倾角。42~44 号煤系层理缝/弱面线密度 1.16 条/m;45 号煤系层理缝/弱面线密度 1.08 条/m(图 5a—图 5d)。应用 Stereonet 软件统计层理缝/弱面产状,显示 2 组煤系的层理缝/弱面整体倾向 NW,倾角以中低角度为主(图 5b—图 5c, 图 5e—图 5f)。部分层段层理缝倾向分散、倾角变大(图 5a—图 5d)。

## 3 现今地应力特征

### 3.1 现今地应力方向

米东区块属受一系列 NEE 向断裂向 NNW 逆冲控制的再生前陆盆地系统,区内整体最大水平主应力方向为 NNW 向<sup>[4,8]</sup>。垂直于背斜轴迹方向间接指示现今最大水平主应力方向(图 1b, 图 1d, 图 2)。对于北单斜煤系,以垂直于邻近七道湾背斜轴迹的延伸方向指示现今最大水平主应力方向,其沿 NNW 向小幅度摆动(图 6)。成像测井井壁诱导缝沿现今最大水平主应力方向产生,其走向指示现今最大水平主应力方向<sup>[9-10]</sup>(图 4a)。位于八道湾向斜的 M2 井 28 组垂深范围在 280~1 316 m 的诱导缝整体走向沿 NEE 向(平均 55.1°),与 NNW 向区域挤压应力方向近垂直,表现出褶皱应力场在向斜局部的控制作用(图 6)。褶皱应力场存在以中性面为界的应力分

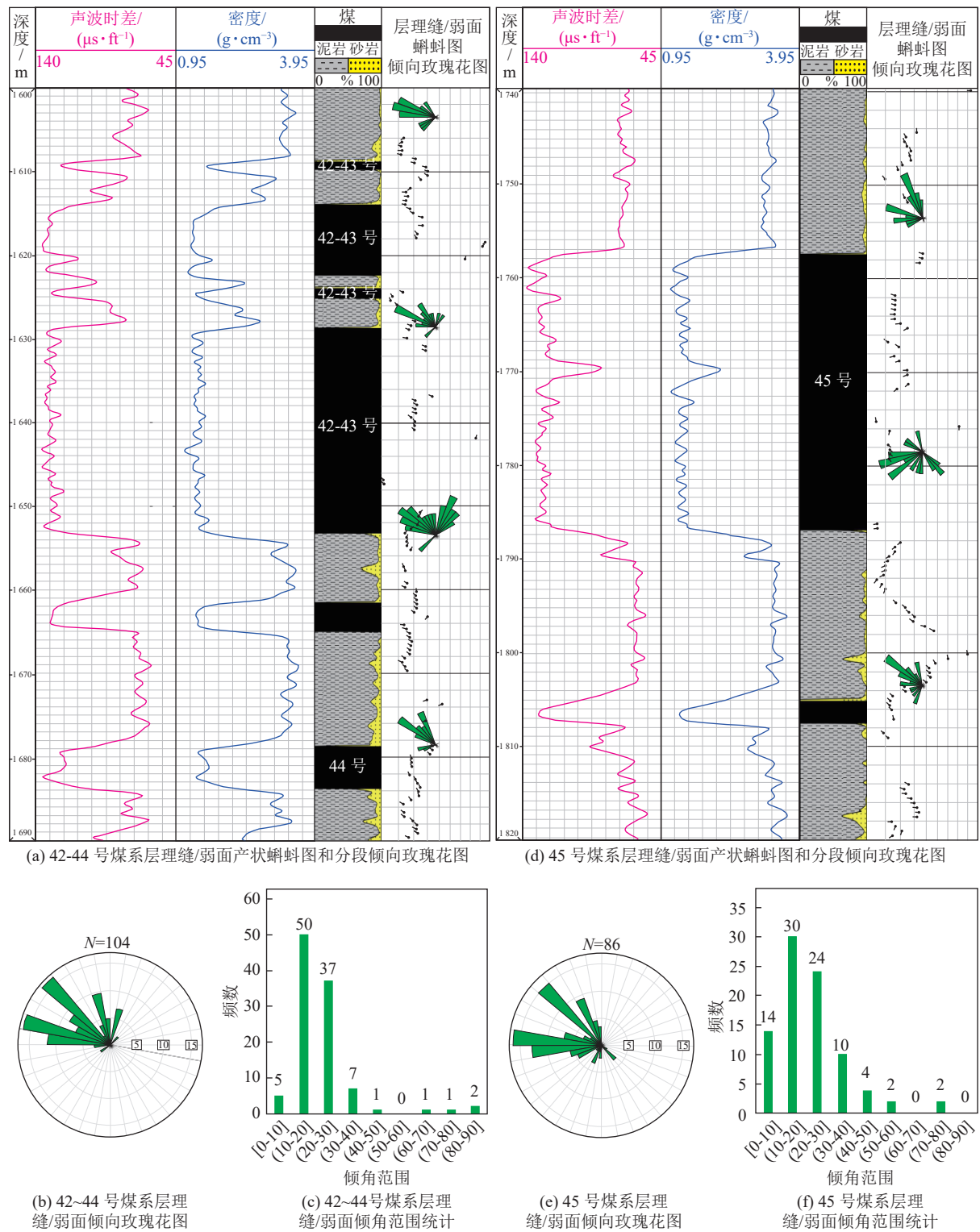


图 5 米东区块西山密组煤系成像测井层理缝/弱面产状分布规律

Fig.5 Occurrence regularities of bedding fractures/weak planes shown by image logging in the coal-bearing strata of the Xishanyao Formation in the Midong area.

区。对于背斜,在中性面以上为拉张应力场,中性面以下为挤压应力场;对于向斜,在中性面以上为挤压应力场,中性面以下为拉张应力场<sup>[11-12]</sup>。八道湾向斜为逆断层控制的相关褶皱,在NNW向区域挤压应力背景下形成NEE向向斜,中性面以下拉张应力场

最小水平主应力方向与NNW向区域最大挤压方向一致,最大水平主应力方向垂直于NNW向区域最大水平主应力方向,沿NEE向。因此,区别于北单斜,M2井成像测井NEE诱导缝走向揭示八道湾向斜核部局部可能受控于向斜中性面以下应力场控制,现

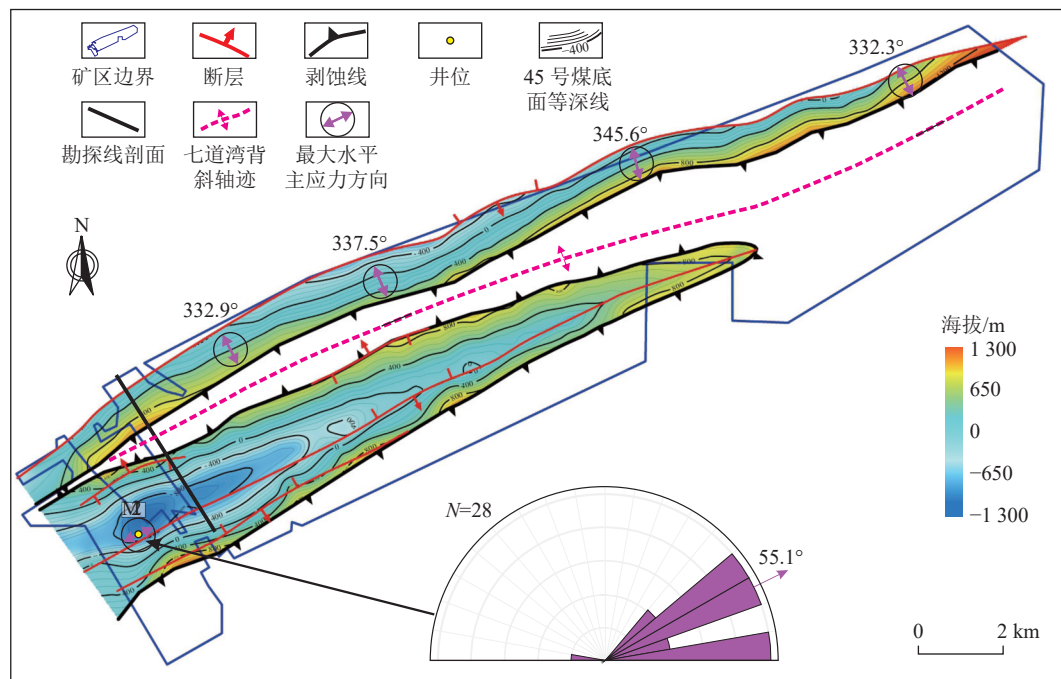


图 6 米东区块西山窑组 45 号煤系最大水平主应力方向

Fig.6 Characteristics of the maximum horizontal principal stress directions in coal-bearing strata of the Xishanyao Formation in the Midong area.

今最大水平主应力方向沿 NEE 向 (图 6)。

### 3.2 现今地应力大小

地应力主要由重力、构造应力、孔隙压力组成,可用垂向主应力 ( $\sigma_v$ )、最大水平主应力 ( $\sigma_H$ ) 和最小水平主应力 ( $\sigma_h$ ) 表征,并根据三向主应力的大小关系分为正断层地应力状态 (NF,  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ )、走滑断层地应力状态 (SF,  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ ) 和逆断层地应力状态 (RF,  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ )<sup>[10]</sup>。垂向主应力主要由上覆岩层的重力产生<sup>[13-14]</sup>,可表示为

$$\sigma_v = 0.027 h \quad (1)$$

式中:  $\sigma_v$  为垂向主应力, MPa;  $h$  为垂深, m。

最大和最小水平主应力可通过注入-压降试井测试结果计算求取<sup>[15]</sup>。在注入-压降试井测量中,闭合应力大小一般等于最小水平主应力<sup>[16]</sup>,即:

$$\sigma_h = P_c \quad (2)$$

式中:  $\sigma_h$  为最小水平主应力, MPa;  $P_c$  为闭合应力, MPa。

应用注入-压降试井数据的最大水平主应力<sup>[16]</sup>可表示为

$$\sigma_H = 3P_c - P_f - P_0 + T \quad (3)$$

其中,  $\sigma_H$  为最大水平主应力, MPa;  $P_f$  为破裂压力, MPa;  $P_0$  为储层孔隙压力, MPa;  $T$  为煤岩抗张强度, MPa。注入-压降试井可测量破裂压力和储层孔隙压力,前人测量淮南煤田乌东煤矿八道湾向斜煤

岩抗张强度为 1.08 MPa<sup>[17]</sup>。注入-压降试井中测量闭合应力 (时间平方根法)、储层孔隙压力、破裂压力,将上述参数和抗张强度带入式 (1)、式 (2)、式 (3) 中,求得米东区块 4 口井 (M5、M6、M7、M10) 共 11 个测量深度点的三向主应力大小 (表 1)。

将位于八道湾向斜-七道湾背斜的 M5、M6、M7 井点共 8 个测点和位于北单斜 M10 井点共 3 个测点地应力大小进行投图,得到 3 个方向地应力大小与深度的关系 (图 7)。在八道湾向斜-七道湾背斜 506.89 ~ 784.62 m 测深范围内,垂向主应力范围 13.69 ~ 21.18 MPa,最小水平主应力范围 8.21 ~ 12.97 MPa,最大水平主应力范围 12.63 ~ 20.5 MPa,两向水平应力差范围 4.42 ~ 7.62 MPa。在北单斜 491.96 ~ 1 135.42 m 测深范围内,垂向主应力范围 13.28 ~ 30.66 MPa,最小水平主应力范围 12.54 ~ 22.08 MPa,最大水平主应力范围 20.67 ~ 36.18 MPa,水平应力差范围 7.72 ~ 14.10 MPa。不同构造位置地应力特征具有明显的差异性。在八道湾向斜-七道湾背斜,郝育喜等 (2016) 应用应力解除法测量明确八道湾向斜两翼 375 ~ 400 m 为最大水平主应力主导的逆断层地应力状态<sup>[17]</sup>,本文中 524 ~ 785 m 由浅至深垂向主应力逐渐大于最大水平主应力表现为从走滑断层地应力状态到正断层地应力状态的变化;在北单斜,由浅至深最大水平主应力始终最大,垂向主应力居中,表明在北单斜不同深度构造挤压作用



表 1 米东区块西山窑组煤层注入-压降实验参数及现今地应力大小  
Table 1 Parameters of injection/falloff test and magnitudes of in-situ stress

井号	深度/m	$P_0$ /MPa	$P_b$ /MPa	$P_c$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa	$\sigma_{H1}$ /MPa	$\sigma_{H2}$ /MPa	$(\sigma_{H1}-\sigma_{H2})$ /MPa	地应力状态	构造位置
M5	715.16	6.47	11.74	11.62	19.31	17.73	11.62	6.11	NF	八道湾 向斜
	729.67	6.71	11.98	11.84	19.7	17.91	11.84	6.07	NF	
	693.43	3.43	10.33	10.15	18.72	17.77	10.15	7.62	NF	
	735.91	6.18	12.96	12.53	19.87	19.53	12.53	7.00	NF-SF	
	761.78	6.17	13.32	12.97	20.57	20.50	12.97	7.53	NF-SF	
	784.62	6.38	12.98	12.87	21.18	20.33	12.87	7.46	NF-SF	
M7	524.26	4.25	10.54	9.91	14.16	16.02	9.91	6.11	NF-SF	七道湾 背斜
	697.94	6.56	12.74	12.42	18.84	19.04	12.42	6.62	NF-SF	
M10	491.96	4.10	13.72	12.54	13.28	20.88	12.54	8.34	SF	北单斜
	648.42	4.71	14.55	12.95	17.51	20.67	12.95	7.72	SF	
	1 135.42	7.72	23.42	22.08	30.66	36.18	22.08	14.10	SF	

注： $P_0$ 为储层压力； $P_b$ 为破裂压力； $P_c$ 为闭合压力； $\sigma_v$ 为垂向主应力； $\sigma_{H1}$ 为最大水平主应力； $\sigma_{H2}$ 为最小水平主应力； $\sigma_{H1}-\sigma_{H2}$ 为水平应力差；NF 为正断层地应力状态；SF 为走滑断层地应力状态；RF 为逆断层地应力状态。

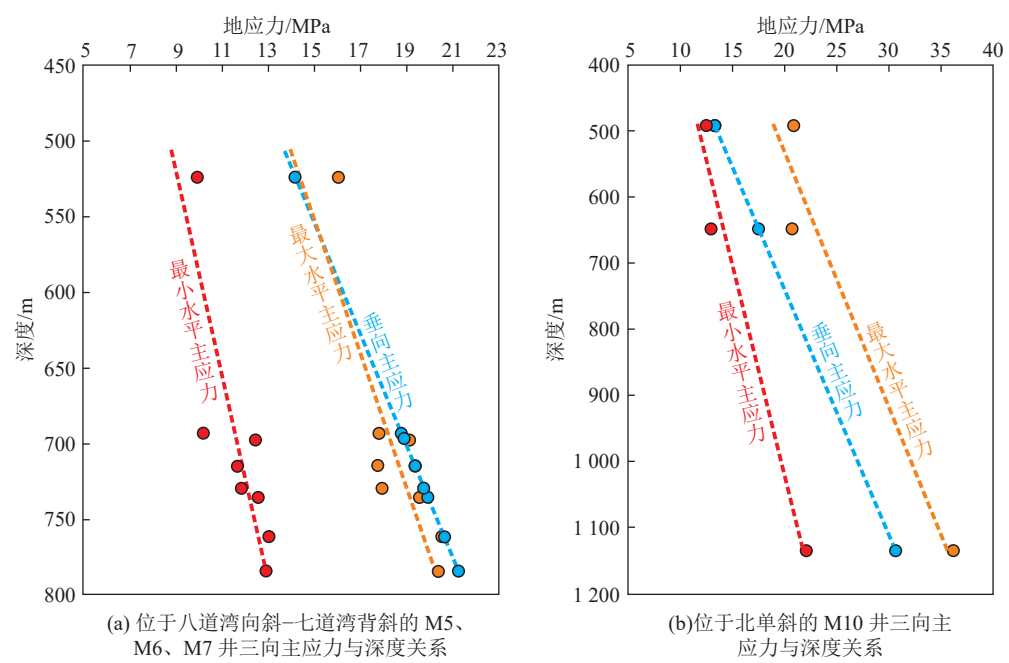


图 7 M5、M6、M7、M10 注入-压降井煤层三向地应力大小与深度的关系(井位见图 1b)  
Fig.7 Relations between magnitudes of three principal stresses and depths from wells with injection/falloff test data  
(See Fig. 1b for detailed well locations)

明显(图 7)。因此,无论是现今地应力方向、大小,还是地应力状态,八道湾向斜-七道湾背斜的地应力特征与北单斜具有明显差异性。

4 压裂监测与压裂缝延伸方位

微地震监测通过采集由于压裂引起的地应力变化产生的微弱地震信号,获得岩石破裂的空间位置<sup>[18]</sup>。微破裂向量扫描通过计算各监测台对准各扫描点的向量间的相关性程度,反映了破裂释放能量

的分布<sup>[19]</sup>。为揭示高陡煤层在压裂过程中压裂缝的延伸方位,研究分别应用微地震监测和微破裂向量扫描技术对 M8、M9、M10、M11 井 4 口井不同煤层压裂缝展布特征进行了刻画(表 2)。M8、M9 井位于八道湾向斜核部(图 1b),监测压裂煤层为垂深范围在 1 408~1 633 m 的 42 号+43 号与 45 号煤层,微地震事件点分布显示煤层压裂缝走向分布在 NEE 向 69°~73°,平均 NEE 向 70.5°,与煤层方位一致;主延伸缝面倾角高陡,表明八道湾向斜的煤层压裂缝沿

表 2 压裂监测煤层压裂缝延伸方位统计  
Table 2 Statistics of hydraulic fractures in coal seams by monitoring

井号	位置	方法	煤层段	垂深/m	主延伸方位		
					走向	倾角	性质
M8	八道湾向斜	微地震监测	42号+43号	1 408	NEE69°	—	沿煤层方位延伸
			45号	1 620	NEE73°	—	
M9	八道湾向斜	微地震监测	42号+43号	1 415	NEE70°	—	沿煤层方位延伸
			45号	1 633	NEE70°	—	
M10	北单斜	微破裂向量扫描	8号	665	NEE65°	近90°	沿煤层延伸
			8号	654	NEE65°	近90°	
			9号	787	NEE60°	70°	
M11	北单斜	微破裂向量扫描	5号	668	NEE70°	60°	沿煤层延伸
			4号	655	NEE45°	65°	

煤层走向方位延伸 (图 8a—图 8b, 表 2)。M10、M11 井位于北单斜西南部 (图 1b), 监测压裂煤层为垂深范围在 654 ~ 787 m 的 4、5、8、9 号煤层, 微破裂向量扫描结果显示煤层压裂缝走向分布在 NEE 向

45° ~ 70°, 平均 NEE 向 60°, 延伸缝面倾角高陡, 分布在 60° ~ 90°, 与压裂段煤层倾角具有一致性, 表明北单斜的煤层压裂缝沿煤层延伸 (图 8c—图 8d, 表 2)。

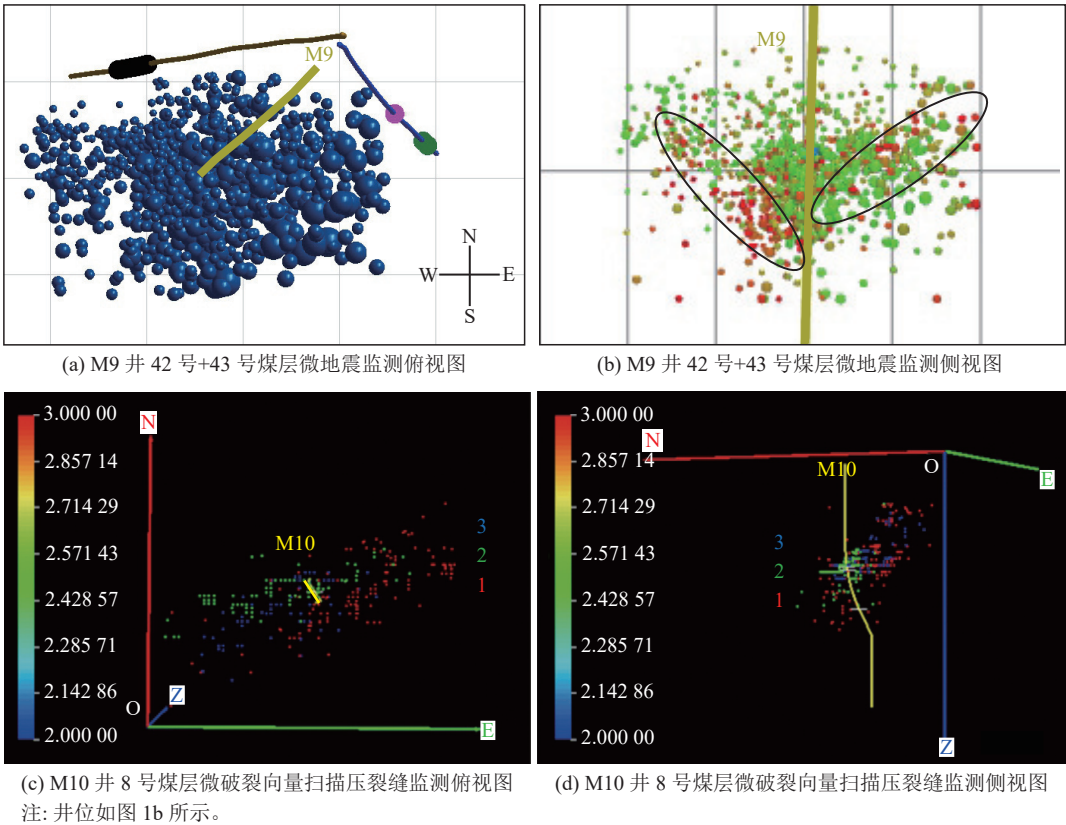


图 8 米东区块煤层压裂缝延伸方位监测

Fig.8 Monitoring of directions of hydraulic fractures in coal seams in Midong area

5 天然裂缝与现今地应力对工程的影响

5.1 对压裂缝延伸的影响

压裂时的现今地应力场和天然裂缝共同决定压

裂缝的延伸。当煤层层理、层理缝等天然裂缝不发育时,水力压裂缝的发育受控于现今地应力,沿最大水平主应力方向延伸,在逆断层地应力状态下,压裂

缝水平；在正断层和走滑断层地应力状态下，压裂缝竖直<sup>[20]</sup>。在米东区块八道湾向斜和北单斜现今地应力场条件下，高陡煤层层理缝/弱面对压裂缝的延伸具有明显的控制作用，表现为延伸缝面方位与煤层走向一致，延伸缝面倾角高陡（图 8，表 2）。然而，在米东区块煤层气运移、富集过程中，在 NNW 向构造挤压活化的高陡层理缝提供了天然的逸散优势通道，通至地表的高陡煤层可使煤层气直接逸散，地层倾角越高，煤层气越容易逸散。由于高陡层理缝的逸散作用，八道湾向斜陡倾的南翼含气量明显高于地层倾角相对更低的北翼<sup>[6,8]</sup>。因此，更大程度动用受控于最大水平主应力方向的人工压裂缝，降低层理缝/弱面对压裂缝延伸的诱导影响是米东区块高陡煤系煤层气压裂增产的关键。在非常规储层压裂中，与低黏度、低排量压裂液相比，高黏度、高排量压裂液能够降低滤失、携砂能力更强，能够有效传递应力，保持足够的液体压力推动裂缝的起裂和扩展，压裂缝易受控于地应力穿透层理，降低层理对压裂缝延伸的诱导影响<sup>[2,21-23]</sup>。当前米东区块煤层压裂的活

性水黏度  $6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$  左右，施工排量约  $12 \text{ m}^3/\text{min}$ ，压裂液的黏度和排量均较低，建议尝试不同高黏度-高排量压裂液施工，对比压裂缝延伸和改造效果，提高地应力和天然裂缝综合控制下的高陡煤层压裂改造后的煤层气产量。

## 5.2 对套管变形、井壁稳定的影响

在压裂过程中，高陡煤层天然裂缝对套管损坏具有重要影响，表现为在全井段施工压力稳定、生产套管钢级一致（P110）、固井质量优良/合格条件下，在八道湾向斜 42 号+43 号、45 号煤岩射孔压裂段附近发生压裂后的套管变形，表现为笔尖破损、井下电视鼓包、油管扣丝卷曲、铅模月牙印痕等套变特征（图 9）。目的层煤岩压裂套变位置以层理缝为代表的天然裂缝/弱面发育，在压裂时，压裂液注入导致裂缝表面孔隙压力增高、摩擦强度降低，当摩擦强度低于裂缝面上剪切应力时，天然裂缝被激活发生滑移，使套管遭受剪切变形<sup>[24-27]</sup>。因此，在压裂时，在煤岩段以层理缝为代表的天然裂缝滑移是产生套变的最主要因素。

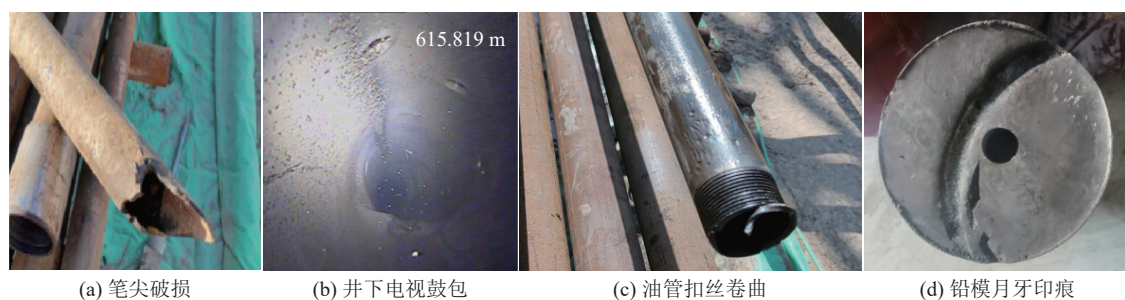


图 9 米东区块套管变形现象

Fig.9 Phenomena of casing deformation in Midong area.

此外，在高陡煤层钻井过程中，层理缝/弱面对煤层井壁稳定性具有不利影响<sup>[28-30]</sup>。层理缝/弱面使煤岩强度具有各向异性，层理缝/弱面作为天然不连续界面或胶结强度显著小于本体强度，在钻井扰动中易沿层理缝/弱面剥落，产生井壁崩落。因此，在高陡煤层钻井过程中，在现今地应力-层理缝/弱面综合影响下，选择合理的井斜-方位轨迹和为保持井壁稳定而设置合适的钻井液密度窗口亦尤为重要。

## 6 结 论

笔者通过岩心裂缝描述、成像测井表征人工和天然裂缝产状分布规律、构造要素分析、注入压降试井测量计算地应力，对米东区块西山窑组高陡煤系天然裂缝、现今地应力特征进行了阐明，并进一步分

析了其对压裂等煤层气开发过程中的影响。得到主要结论如下：

1) 岩心观察揭示层理缝/弱面、煤岩割理、剪切滑移缝是米东区块高陡煤系中最主要的 3 种天然裂缝类型。成像测井揭示位于八道湾向斜核部附近煤系中，层理缝/弱面是最主要的裂缝类型，其产状与宏观地层产状具有一致性。

2) 垂直于七道湾背斜轴迹的方向、M2 井成像测井诱导缝走向分别指示北单斜、八道湾向斜核部局部构造部位现今最大水平主应力方向。北单斜最大水平主应力方向整体沿 NNW 向小角度摆动；八道湾向斜核部局部可能受向斜地层中性面之下应力场控制，在 NNW 挤压背景下拉张，最大水平主应力方向沿 NEE 向。注入-压降试井揭示八道湾向斜-七道湾背斜由浅至深表现为从走滑断层地应力状态变为



正断层地应力状态。北单斜由浅至深最大水平主应力始终大于垂向主应力,表现为走滑断层地应力状态。现今地应力方向、大小和状态的差异性表明八道湾向斜和北单斜现今地应力场具有差异性,属于 2 种独立的应力分区。

3)在现今地应力场条件下,高陡煤层中以层理缝为代表的天然裂缝和层理弱面影响压裂缝延伸、套管变形和井壁稳定性。层理缝/弱面对压裂缝延伸具有显著的诱导作用,主压裂缝走向与煤层产状一致,使压裂对煤层的改造程度有限,建议进一步对比高黏度-高排量改造效果,提高高陡煤层的煤层气产量。

## 致谢

感谢中联煤层气有限责任公司吴洛菲、曹明亮、杨琦等在研究中提供的帮助。

## 参考文献(References):

- [1] LI M, LI M J, PAN J N, et al. Coalbed methane accumulation, *in situ* stress, and permeability of coal reservoirs in a complex structural region (Fukang area) of the southern Junggar Basin, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1076076.
- [2] 李雪彬,金力新,陈超峰,等. 深层煤岩气水平井压裂关键技术:以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 629–637.  
LI Xuebin, JIN Lixin, CHEN Chaofeng, et al. Key technologies of horizontal well fracturing for deep coal-rock gas: A case study of Jurassic in Baijiahai area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 629–637.
- [3] 郭召杰,吴朝东,张志诚,等. 准噶尔盆地南缘构造控藏作用及大型油气藏勘探方向浅析[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2): 185–195.  
GUO Zhaojie, WU Chaodong, ZHANG Zhicheng, et al. Tectonic control on hydrocarbon accumulation and prospect for large oil-gas field exploration in the southern Junggar basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 185–195.
- [4] 周俊. 乌东煤矿瓦斯赋存主控构造特征分析[J]. *矿业安全与环保*, 2018, 45(3): 108–111.  
ZHOU Jun. Analysis of the main structural features of gas occurrence in Wudong coal mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2018, 45(3): 108–111.
- [5] 杨曙光,李瑞明,汤达祯,等. 准噶尔盆地南缘中低煤阶煤层气成藏地质及有利区评价[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2020.
- [6] 马利军. 新疆乌东矿区八道湾向斜两翼瓦斯地质规律研究[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(7): 33–35, 68.  
MA Lijun. A geological study on both limbs of badaowan syncline, Urumqi eastern mining area, Xinjiang[J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(7): 33–35, 68.
- [7] 朱晨涛. 准噶尔盆地东南缘—新生代盆山关系及构造演化过程[D]. 杭州:浙江大学, 2017: 62–70.
- [8] 贾宝珊. 新疆乌东矿区瓦斯地质规律与瓦斯预测[D]. 焦作:河南理工大学, 2011: 18–32.  
JIA Baoshan. Gas geological law and gas prediction in Wudong mining area, Xinjiang[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011: 18–32.
- [9] WU J W, WANG Q Q, CHENG X, et al. Formation of multi-stage and clustered fractures at 3.6–4.9 km in the Shizigou structure, SW Qaidam basin[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 169: 104845.
- [10] 吴嘉伟,张长好,司丹,等. 柴达木盆地狮子沟构造下干柴沟组上段有效裂缝与地应力关系及其意义[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2557–2571.  
WU Jiawei, ZHANG Changhao, SI Dan, et al. Relation between effective fractures and *in situ* stress as well as its significance in upper Xiaganchaigou formation in shizigou structure, Qaidam basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2557–2571.
- [11] SMART K J, FERRILL D A, MORRIS A P, et al. Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding[J]. *Tectonophysics*, 2012, 576: 171–196.
- [12] 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.
- [13] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured *in situ* stresses and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 211–215.
- [14] JU W, SHEN J, QIN Y, et al. *In-situ* stress distribution and coalbed methane reservoir permeability in the Linxing area, eastern Ordos Basin, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(3): 545–554.
- [15] 魏永恒,葛燕燕,王刚,等. 新疆库拜煤田铁列克矿区地应力分布及其对煤层气开发的影响[J]. *现代地质*, 2022, 36(5): 1324–1332.  
WEI Yongheng, GE Yanyan, WANG Gang, et al. *In-situ* stress distribution and its influence on coalbed methane development in tielieke mining area, kubai coalfield, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 2022, 36(5): 1324–1332.
- [16] HOPKINS C W, FRANTZ J H, FLUMERFELT R W, et al. Pitfalls of injection/falloff testing in coalbed methane reservoirs[C]//Proceedings of SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Society of Petroleum Engineers, 1998: 9–24.
- [17] 郝育常,常博,王炯,等. 近直立煤层地应力测试及围岩应力分布特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(S1): 5–9.  
HAO Yuxi, CHANG Bo, WANG Jiong, et al. Study on *in situ* stress measurement and stress distribution characteristics of surrounding rock in near-vertical coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(S1): 5–9.
- [18] 易良平,杨长鑫,杨兆中,等. 天然裂缝带对深层页岩压裂缝

- 扩展的影响规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 84-97.
- YI Liangping, YANG Changxin, YANG Zhaozhong, et al. Influence of natural fracture zones on the propagation of hydraulic fractures in deep shale[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 84-97.
- [19] 梁北援, 徐力, 冷传波, 等. 微破裂向量扫描技术的数据采集[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2333-2339.
- LIANG Beiyuan, XU Li, LENG Chuanbo, et al. Data acquisition of vector scanning for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2333-2339.
- [20] 张金才, 尹尚先. 页岩油气与煤层气开发的岩石力学与压裂关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1691-1699.
- ZHANG Jincai, YIN Shangxian. Some technologies of rock mechanics applications and hydraulic fracturing in shale oil, shale gas and coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1691-1699.
- [21] 张士诚, 郭天魁, 周彤, 等. 天然页岩压裂裂缝扩展机理试验[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 496-503, 518.
- ZHANG Shicheng, GUO Tiankui, ZHOU Tong, et al. Fracture propagation mechanism experiment of hydraulic fracturing in natural shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 496-503, 518.
- [22] 周彤, 张士诚, 邹雨时, 等. 四川盆地东北缘强应力大倾角页岩储层水力压裂裂缝形态[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(3): 336-341.
- ZHOU Tong, ZHANG Shicheng, ZOU Yushi, et al. Hydraulic fracture geometry of shale gas reservoirs with strong tectonic stress and large dip angle in northeastern margin of Sichuan basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(3): 336-341.
- [23] 李宁. 渝东北大倾角页岩储层压裂改造研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 3-5.
- LI Ning. Study on fracturing reconstruction of large dip shale reservoir in northeast Chongqing[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 3-5.
- [24] 代清, 林颢屿, 陈春宇, 等. 页岩气井水力压裂对水平井套管变形影响分析[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(3): 118-121, 126.
- DAI Qing, LIN Haoyu, CHEN Chunyu, et al. Influence of hydraulic fracturing on casing deformation of horizontal wells in shale gas wells[J]. Machine Design & Research, 2022, 38(3): 118-121, 126.
- [25] 孙东玲, 梁运培, 黄旭超, 等. 新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 162-172.
- SUN Dongling, LIANG Yunpei, HUANG Xuchao, et al. Progress and prospects of coalbed methane development and utilization in coal mining areas with large dip angle and multiple coal groups in Xinjiang[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 162-172.
- [26] 袁光杰, 王向阳, 乔磊, 等. 页岩气井压裂套管变形机理及物理模拟分析[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 137-145.
- YUAN Guangjie, WANG Xiangyang, QIAO Lei, et al. Mechanism of casing deformation induced by shale gas well fracturing and its physical simulation analysis[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 137-145.
- [27] 何歆如, 朱海燕, 王向阳, 等. 深层页岩水力压裂对套管变形的影响[J]. 断块油气田, 2024, 31(4): 726-733.
- HE Xinru, ZHU Haiyan, WANG Xiangyang, et al. Influence of hydraulic fracturing on casing deformation of deep shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(4): 726-733.
- [28] 光新军, 王敏生. 高陡层理性地层井壁坍塌规律研究[A]. 第十七届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集[C]. 北京: 地质出版社, 2013: 180-183.
- GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Study on the law of wellbore collapse in high and steep layered rational strata[A]. Proceedings of the 17th National Annual Symposium on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering) [C]//Beijing: Geology Press, 2013: 180-183.
- [29] 东振, 鲍清英, 张继东, 等. 高陡倾斜煤层沿煤层钻井研究: 以准南昌吉地区为例[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1041-1051.
- DONG Zhen, BAO Qingying, ZHANG Jidong, et al. Research on drilling along steep coal seam: A case study of Changji area in southern margin of the Junggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1041-1051.
- [30] 蔚宝华, 闫伟, 李斌, 等. 高陡层理性地层井壁稳定性模拟试验研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 48-50.
- YU Baohua, YAN Wei, LI Bin, et al. Mechanical borehole stability test study in highly-dipped laminated formation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2): 48-50.