

doi: 10.11720/wtyht.2019.1349

李洋, 刘东明, 林振洲, 等. 木里地区水合物钻孔井壁构造裂缝特征[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 84–89. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1349>

Li Y, Liu D M, Lin Z Z, et al. Characteristics of fractures from borehole walls of gas-hydrate drilling holes in Muli region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 84–89. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1349>

# 木里地区水合物钻孔井壁构造裂缝特征

李洋<sup>1,2,3</sup>, 刘东明<sup>1,2,3</sup>, 林振洲<sup>1,2,3</sup>, 王宇航<sup>1,2,3</sup>, 贾定宇<sup>1,2,3</sup>, 欧洋<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 自然资源部 地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 3. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 木里地区三露天井田断层发育、岩性复杂, 且钻探结果揭示水合物主要赋存于地层裂缝中, 因此, 笔者专门利用声成像测井资料对三露天井田水合物钻孔井壁构造裂缝进行研究, 明确了研究区构造裂缝的成像测井响应特征, 并从裂缝线密度、倾角、倾向等方面对裂缝的分布特征进行了分析讨论。结果表明: ①研究区水合物钻孔井壁裂缝发育, 倾角以高角度为主, 低角度次之, 水平裂缝与高角度裂缝少见; 冻土层及以上裂缝较冻土层以下更为发育。②研究区裂缝主要走向与地层断裂走向基本一致或小角度斜交, 裂缝的发育受断层控制明显。③研究区裂缝倾角相对较大, 不利于烃类气体的大量聚集, 这可能是该区域钻孔少见水合物的原因之一。

**关键词:** 木里地区; 天然气水合物; 裂缝; 声成像测井

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2019)01-0084-06

## 0 引言

天然气水合物是主要由甲烷及其他几种烃类气体分子和水分子组成的类似冰的固态笼型晶体化合物, 主要分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中, 是目前地球上尚未开发的储量最大的潜在能源<sup>[1-2]</sup>。我国冻土面积辽阔, 具备良好的天然气水合物形成条件和勘探前景<sup>[3-5]</sup>, 其中, 2008 年在青藏高原祁连山木里煤田聚乎更矿区钻获的天然气水合物实物样品, 是世界首次在中低纬度高山冻土区发现水合物实物<sup>[6]</sup>。近年来, 众多学者在木里地区开展了系统的调查工作, 研究结果显示该区断层发育、地层缺失和重复、岩性种类复杂, 水合物主要赋存于地层裂缝中, 受裂缝控制比较明显<sup>[7-8]</sup>。

钻孔岩芯是研究地层裂缝的第一手资料, 但岩芯取出后, 裂缝的方位信息便无法准确获得, 对裂缝

的研究造成较大的局限性<sup>[9]</sup>。地球物理测井是天然气水合物资源勘查与储层评价的有效手段, 其中超声成像测井能够获得反映地层原位地质特征的井壁图像, 使测井资料的应用变得更加直观、精确, 可以有效地评价地层裂缝特征<sup>[10-11]</sup>。因此, 利用成像测井资料研究天然气水合物钻孔井壁构造裂缝特征具有重要意义。

## 1 地质概况

本次研究的目标区域位于祁连山冻土区木里煤田聚乎更矿区。祁连山冻土区位于青藏高原北部, 海拔 4 100~4 300 m, 面积约为 10 万 km<sup>2</sup>, 年平均气温-5.1℃。祁连山构造单元包括北祁连构造带、中祁连陆块和南祁连构造带 3 部分, 其中北祁连分为河西走廊和走廊南山, 中祁连陆块主要为托莱山。聚乎更矿区总体上由一个大背斜和两个小向斜组

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-12-14

**基金项目:** 中国地质调查局中国地质科学院基本科研业务费项目 (JYYWF20180102); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160046, DD20189133); 国家 127 专项项目“陆域天然气水合物勘查技术与集成” (GZHL20110324, GZH201400305)

**作者简介:** 李洋 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理测井仪器方面的研发工作。Email: liyang@igge.cn

**通讯作者:** 刘东明 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理测井数据解释方面的研究工作。Email: liudongming@igge.cn

成,大背斜包括大通山南缘和托莱山北缘;北部向斜包括三井田、二井田和一露天 3 个井田;南部向斜包括四井田、一井田、二露天和三露天 4 个井田(图 1)。其中,三露天井田是天然气水合物勘探的主要研究区。

到目前为止,中国地质调查局在研究区共施工了 12 口天然气水合物勘探井和 3 口试采井,即

DK1、DK2、DK3、DK4、DK5、DK6、DK7、DK8、DK9、DK10、DK11、DK12、SK0、SK1、SK2。研究区内钻获的所有实物样品及显著异常产出埋深范围为 110~500 m,全部赋存于永久冻土层(厚度一般为 60~80 m,局部 120 m)之下,主要产出于粉砂岩、暗色泥岩、油页岩等低孔渗岩层的裂缝中<sup>[13-14]</sup>。

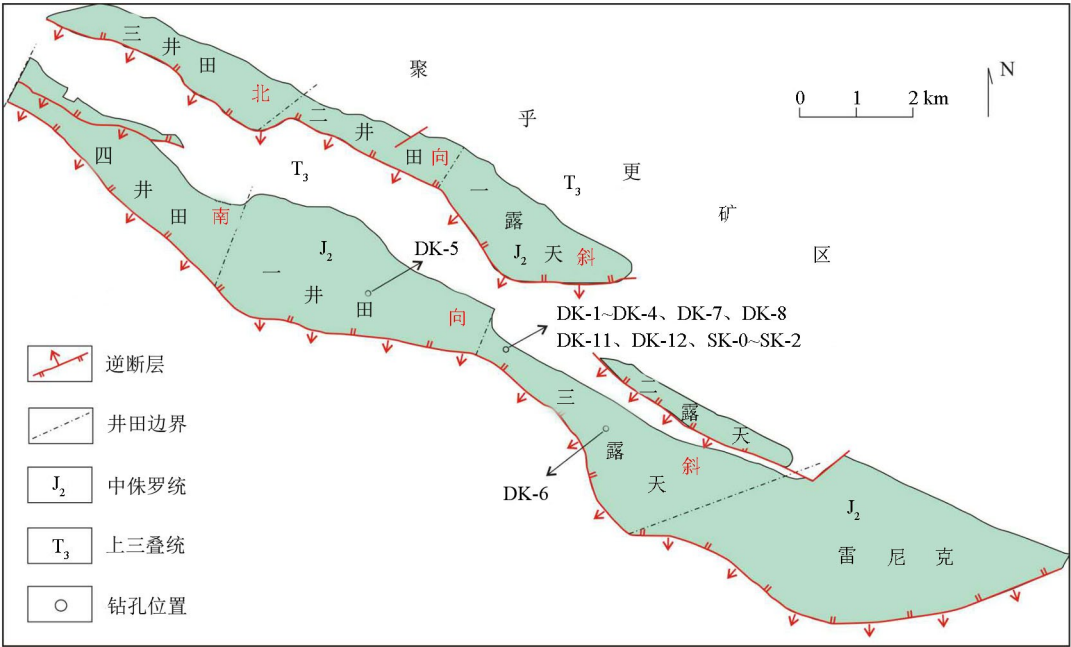


图 1 研究区地质及钻孔位置示意图<sup>[12]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of geology and drilling location in the research area

2 裂缝的测井响应特征

裂缝是岩石受力发生破裂,沿破裂面两侧的岩石没有发生明显位移的一种断裂构造现象。裂缝的分类方案有很多种,主要有<sup>[15-16]</sup>:①按产状可以分为水平裂缝、低角度裂缝、高角度裂缝、垂直裂缝;②按充填程度可以分为张开裂缝(未充填)、部分充填裂缝和全充填裂缝;③按成因可分为天然裂缝和钻井诱生裂缝。

1) 不同产状的裂缝

水平裂缝近水平切割整个井眼,图像上显示为近水平的连续性好的暗色条带(若被高声阻抗物质充填则为亮色条带),倾角小于 15°(图 2a)。低角度裂缝小角度切割整个井眼,图像上显示出明显的正弦曲线状暗色条带,起伏幅度较低,倾角在 15°~45°之间(图 2b)。高角度裂缝大角度切割整个井眼,图像上同样显示出明显的正弦曲线状暗色条带,起伏幅度较高,倾角在 45°~75°之间(图 2c)。垂直裂缝近 90°切割整个或部分井眼,图像上显示为尖

峰状暗色条带,起伏剧烈,倾角大于 75°(图 2d)。

2) 不同充填程度的裂缝

张开裂缝未被充填,在图像上显示为暗色条带(图 2a~d)。部分充填裂缝由于充填不完全,在图像上显示为断续的暗色条带。全充填裂缝根据其充填物质声阻抗的不同,在图像上的显示也不尽相同,若为泥质充填,则显示为浅色条带(图 2e),若为方解石充填,则显示为亮色条带(图 2f)。

3) 不同成因的裂缝

天然裂缝可分为构造裂缝和非构造裂缝。非构造裂缝是岩石失水和岩浆冷却而体积收缩以及压溶作用而形成的,主要有收缩裂缝和缝合线两种。构造裂缝是岩石在地壳运动过程中受构造作用力而形成的,主要有张开裂缝和充填裂缝,图 2a~f 皆为构造裂缝。钻井诱生裂缝是钻井过程中钻具震动、地层应力释放和钻井液压裂等因素诱导形成的,图像上显示为两组羽状排列或两条近于直立的暗色条带,呈 180°对称分布,图 2g 为一组地层原始应力释放、挤压井眼周围地层而形成的钻井诱生裂缝,又称作井壁崩落。

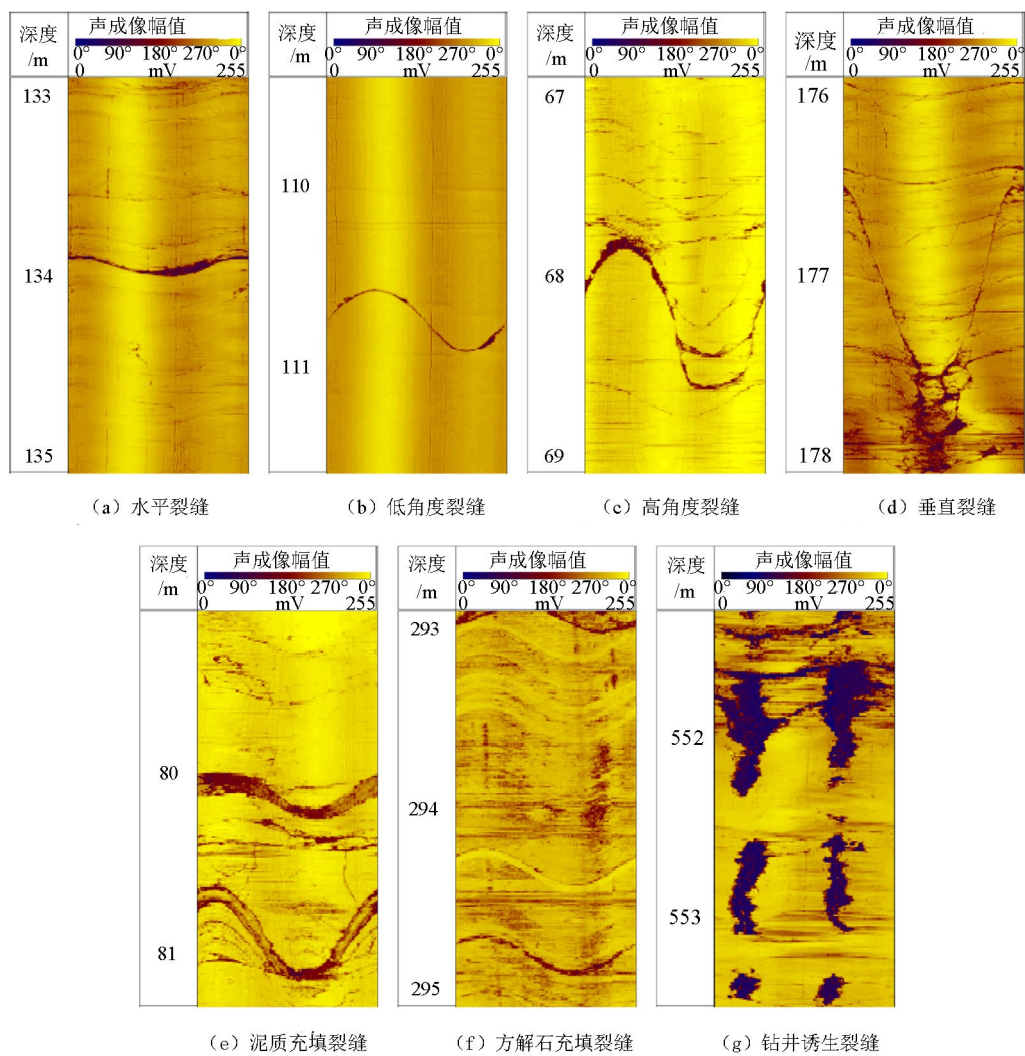


图 2 不同类型裂缝的声成像测井响应特征

Fig.2 The response characteristics of different types of fractures from ultrasonic image logging

3 裂缝分布特征

笔者利用 DK11、DK12、SK0、SK1、SK2 五个钻孔的声波成像测井资料,根据裂缝在声成像图像上的展布形态,对钻孔井壁构造裂缝进行了人机交互提取,计算了裂缝参数并分析了裂缝分布特征。

裂缝线密度是衡量裂缝发育程度的参数,一般用单位长度(10 m)内裂缝的条数来表示<sup>[16]</sup>。由各钻孔的裂缝线密度曲线图(图 3)可知,DK11、DK12、SK0、SK1 和 SK2 五个钻孔的裂缝线密度平均值分别为 16.7 条/10 m、25.4 条/10 m、16.7 条/10 m、21.4 条/10 m、17.8 条/10 m,最大裂缝线密度分别为 56 条/10 m、89 条/10 m、37 条/10 m、61 条/10 m、51 条/10 m,冻土层深度范围内裂缝线密度明显大于冻

土层以下。

利用成像测井资料,不仅能获得裂缝线密度信息,还能准确计算出每条裂缝的倾角、倾向。各钻孔裂缝倾角倾向分布图(图 4)显示:① DK11 孔裂缝倾角主要分布在 35°~75°范围内,倾向以近正 S 向为主;② DK12 孔裂缝倾角主要分布在 30°~65°范围内,倾向以近 WS 向为主;③ SK0 孔裂缝倾角主要分布在 30°~60°范围内,倾向以近 WS 向为主;④ SK1 孔裂缝倾角主要分布在 20°~55°范围内,倾向以近 WS 向为主;⑤ SK2 孔裂缝倾角主要分布在 35°~70°范围内,倾向以近 WS 向为主。由此可见,研究区裂缝以高角度为主,低角度次之,水平裂缝和垂直裂缝极少;裂缝走向仅 DK11 孔以近 EW 向为主,其余 4 个钻孔均以 NW-SE 向为主。

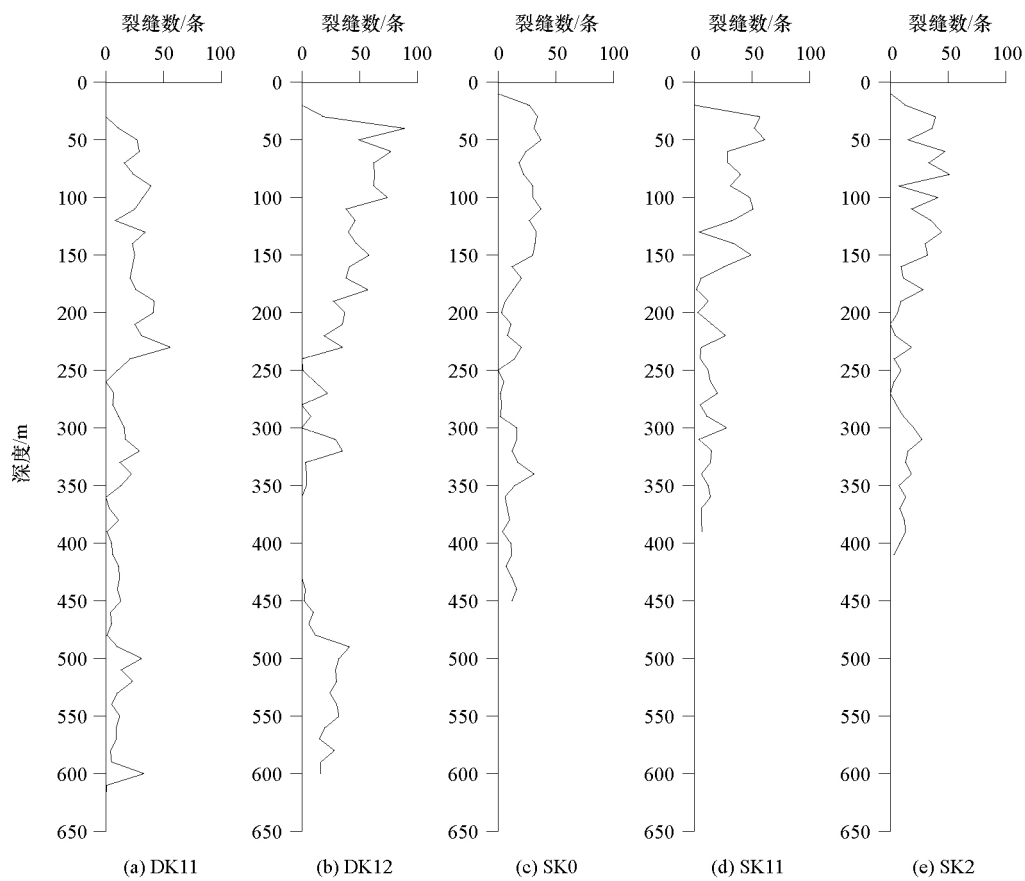


图 3 各钻孔裂缝线密度曲线

Fig.3 The line density curve of fractures for every hole

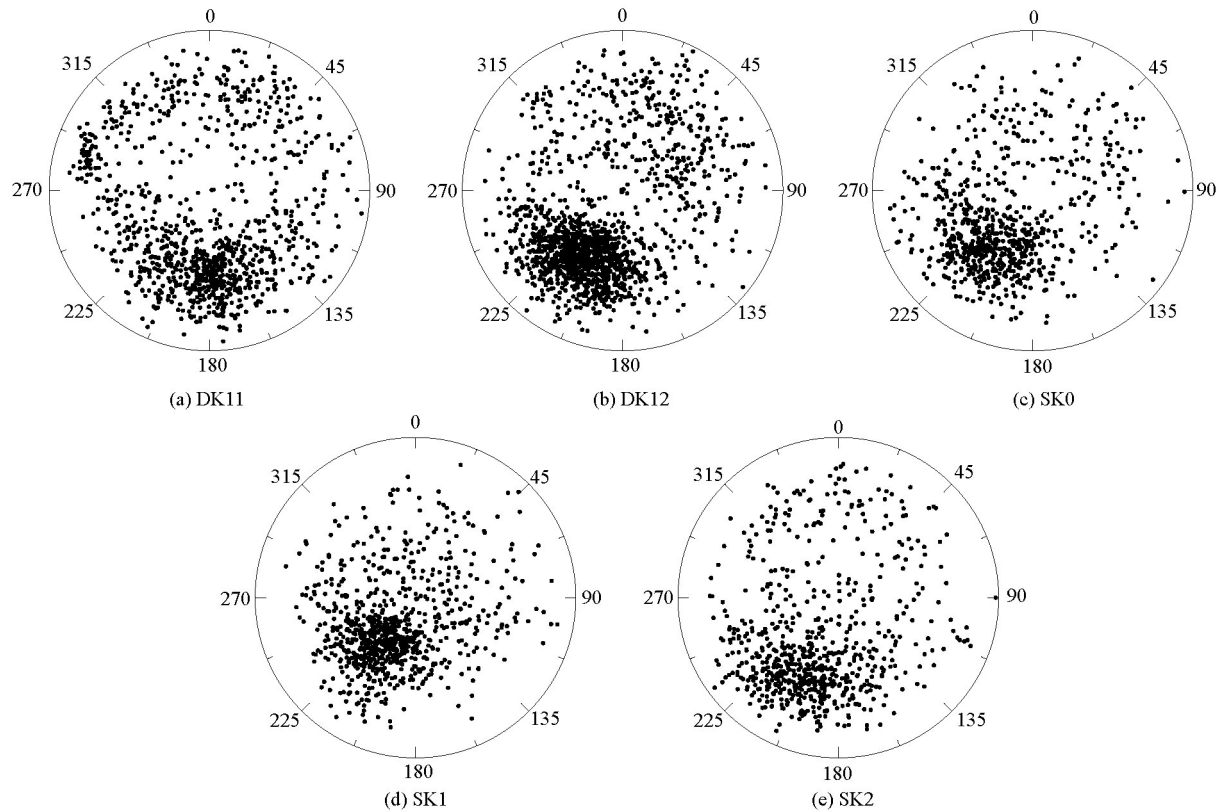


图 4 各钻孔裂缝倾角、倾向赤平投影

Fig.4 The stereographic projection of fracture dip and azimuth for every hole



## 4 讨论

研究区断层广泛发育,其中  $F_1$ 、 $F_2$ (或  $F_{27}$ )、 $F_{27'}$ (或  $F_{25}$ )3 条断层走向均为 NW-SE 向,在平面上以近乎平形状展布在工区内,控制了研究区的基本构造形态<sup>[17]</sup>。而通过成像测井获得的裂缝主要走向与地层断裂走向基本一致或小角度斜交,说明研究区内大多数裂缝的发育受到断层的控制。

地层中的裂缝既是油气运移的通道、又是油气储集的重要空间<sup>[7]</sup>。裂缝倾角的大小往往决定着裂缝是主要作为油气的运移通道还是作为油气的储集空间。研究区裂缝较为发育,为烃类气体的运移和聚集提供了空间,但裂缝的倾角相对较大,地层垂直方向上的连通性较好,使得烃类气体多数向上扩散,少数得以聚集。而冻土层及以上裂缝相对下部更为发育,导致冻土层内很难有烃类气体聚集,这也可能是研究区冻土层内未见天然气水合物、仅冻土层以下见少量天然气水合物的原因之一。

## 5 结论

笔者利用声成像测井资料对木里地区三露天井田的 DK11 等 5 个钻孔的井壁构造裂缝进行了提取与分析,取得以下认识:

1) 研究区水合物钻孔井壁裂缝整体较为发育,冻土层以上裂缝较冻土层以下更为发育;裂缝线密度最大为 25.4 条/10 m,倾角以高角度为主,倾向以 WS 向为主;

2) 研究区裂缝的发育受地层主控断层的显著控制,其走向以 NW-SE 向为主,与地层断裂的走向基本一致或小角度斜交;

3) 研究区裂缝倾角相对较大,地层纵向上的连通性较好,冻土层无法形成有效的水合物盖层,这可能是该区域钻孔少见水合物的原因之一。

## 参考文献 (References):

[1] 张洪涛,张海启,祝有海.中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J].中国地质,2007,34(6):953-961.  
Zhang H T, Zhang H Q, Zhu Y H. Gas hydrate investigation and research in China: present status and progress[J]. Geology in China, 2007,34(6):953-961.

[2] 祝有海,张永勤,文怀军,等.青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J].地质学报,2009,83(11):1762-1770.  
Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China[J]. Acta Geologi-

ca Sinica, 2009,83(11):1762-1770.

[3] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物存在的主要证据[J].现代地质,2010,24(2):329-336.  
Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Major evidence for gas hydrate existence in the Qilian permafrost, Qinghai[J]. Geoscience, 2010,24(2):329-336.

[4] 祝有海,赵省民,卢振权.中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J].天然气工业,2011,31(1):13-19.  
Zhu Y H, Zhao S M, Lu Z Q. Resource potential and reservoir distribution of natural gas hydrate in permafrost areas of China[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(1):13-19.

[5] 方慧,孙忠军,徐明才,等.冻土区天然气水合物勘查技术研究主要进展与成果[J].物探与化探,2017,41(6):991-997.  
Fang H, Sun Z J, Xu M C, et al. Achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017,41(6):991-997.

[6] 郭星旺,祝有海.祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价[J].地质通报,2011,30(12):1868-1873.  
Guo X W, Zhu Y H. Well logging characteristics and evaluation of hydrates in Qilian Mountain permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(12):1868-1873.

[7] 侯颖,邹长春,曲璐,等.青海木里三露天天然气水合物储层测井识别与划分[J].现代地质,2015,29(5):1111-1121.  
Hou J, Zou C C, Qu L, et al. Classification and Identification of gas hydrate reservoirs from well log data in sanlutian, Muli coalfield, Qinghai[J]. Geoscience, 2015,29(5):1111-1121.

[8] 林振洲,刘东明,潘和平,等.木里地区天然气水合物测井响应特征[J].物探与化探,2017,41(6):1012-1018.  
Lin Z Z, Liu D M, Pan H P, et al. The response characteristics of gas hydrate well logging in Muli area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6):1012-1018.

[9] 陈利敏,秦荣芳,蒋艾林,等.青海木里三露天天然气水合物钻孔岩心构造裂隙特征[J].现代地质,2015,29(5):1087-1095.  
Chen L M, Qin R F, Jiang A L, et al. Structural fracture characteristics of cores from gas-hydrate drillholes in sanlutian of Muli coalfield, Qinghai[J]. Geoscience, 2015,29(5):1087-1095.

[10] 林振洲,李洋,高文利,等.祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析[J].物探与化探,2013,37(5):834-837.  
Lin Z Z, Li Y, Gao W L, et al. Physical character analysis of logging data for natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013,37(5):834-837.

[11] 邹长春,刘东明,聂昕,等.利用成像测井资料分析汶川地震断裂带科学钻探 3 号孔 (WFSD-3) 裂缝特征[J].现代地质,2012,26(6):1146-1153.  
Zou C C, Liu D M, Nie X, et al. Fracture characterization using image logging in borehole 3 of Wenchuan earthquake fault zone scientific drilling (WFSD-3) [J]. Geoscience, 2012,26(6):1146-1153.

[12] 庞守吉,苏新,杨旭,等.祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验井中侏罗统的沉积学特征[J].地质通报,2011,30(12):1829-1838.

Pang S J, Su X, Yang X, et al. Sedimentological features of middle jurassic strata revealed by scientific drilling boreholes of natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(12):1829-1838.

[13] 庞守吉,苏新,何浩,等.祁连山冻土区天然气水合物地质控制因素分析[J].地学前缘,2013,20(1):223-238.

Pang S J, Su X, He H, et al. Geological controlling factors of gas hydrate occurrence in Qilian Mountain permafrost, China[J]. Earth Science Frontiers, 2013,20(1):223-238.

[14] 王平康,祝有海,卢振权,等.祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J].地质通报,2011,30(12):1839-1850.

Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and its distribution characteristics[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(12):1839-1850.

[15] 邓呈祥,潘和平,方思南.汶川科钻 WFSD-3 孔裂缝响应特征及识别方法[J].地质科技情报,2015,34(5):184-189.

Deng C X, Pan H P, Fang S N. Fracture identification and the response characteristics of fracture in the third drilling hole of WFSD project[J]. Geological Science and Technology Information, 2015,34(5):184-189.

[16] 刘东明,林振洲,高文利,等.藏南泽当科学钻探 ZDSD-1 孔超声成像测井解释[J].物探与化探,2017,41(4):672-677.

Liu D M, Lin Z Z, Gao W L, et al. The interpretation of ultrasonic imaging logging data obtained in drill hole ZDSD-1 of the zedang scientific drilling in Tibet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41 (4): 672-677.

[17] 于长青,李永红,卢振权,等.青海木里三露天井田构造特征及其与天然气水合物分布关系[J].现代地质,2015,29(5):1138-1143.

Yu C Q, Li Y H, Lu Z Q, et al. Structural features and the relation with gas hydrate distribution in sanlutian of Muli, Qinghai[J]. Geoscience, 2015,29(5):1138-1143.

Characteristics of fractures from borehole walls of gas-hydrate drilling holes in Muli region

LI Yang<sup>1,2,3</sup>, LIU Dong-Ming<sup>1,2,3</sup>, LIN Zhen-Zhou<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-Hang<sup>1,2,3</sup>, JIA Ding-Yu<sup>1,2,3</sup>, OU Yang<sup>1,2,3</sup>  
(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of Ministry of Natural and Resources, Langfang 065000, China; 3. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China)

**Abstract:** Well-developed faults and diversified lithology constitute the features of Sanlutian well field, and the drilling results reveal that gas hydrate mainly occurs in the fractures of reservoirs. Therefore, the acoustic image logging data are used specifically to study the structural fractures from borehole walls of gas-hydrate drilling holes in Sanlutian well field. In this paper, the response characteristics of fractures in acoustic image logging were confirmed and the linear density, dip angle and dip direction of fractures were discussed. Some conclusions have been reached: ① Fractures are developed in the borehole walls of gas-hydrate drilling holes. In these fractures, high-angle fractures are dominant, followed by low-angle fractures, and the vertical and horizontal fractures are rare. ② The main strike of fractures is basically consistent with the fault strike or oblique-crossing at small angles. The distribution of fractures is controlled distinctly by faults. ③ It is unfavorable for the assembly of hydrocarbon gases as the fractures of the study area are dominated by high-angle fractures, which is one of the possible reasons why gas-hydrate is rare.

**Key words:** Muli region; gas-hydrate; fractures; acoustic image logging

(本文编辑:王萌)