

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.04

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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.04

Lin Z Z, Liu D M, Pan H P, et al. Response characteristics of gas hydrate well-logging in Muli area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1012-1018. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.04

木里地区天然气水合物测井响应特征

林振洲^{1,2}, 刘东明², 潘和平¹, 李洋², 高文利², 邱礼泉², 张小未³

(1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 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; 3. 北京中医药大学东方学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 木里地区天然气水合物附存状态和储层岩性与海域或极地冻土区的水合物存在明显差异,为分析研究区水合物储层的测井响应特征,形成基于该特征的水合物储层识别方法,对本地区水合物勘探具有重要意义。文中利用常规测井和超声成像测井资料,分岩性、分附存状态,讨论了多种情况下水合物测井响应特征及产生的原因,统计出储层测井参数值的范围,并对研究区钻孔进行了水合物识别。研究表明:①视电阻率和自然伽马对孔隙型水合物反映灵敏,视电阻率和纵波速度对裂隙型水合物反映灵敏;②地质编录的厚层水合物均能识别,且识别出一些疑似水合物储层,但少量钻遇的薄层水合物未能识别,分析原因为水合物含量偏低,导致测井响应特征不明显;③研究区 10 口井识别出水合物和疑似水合物异常,其中孔隙型储层累计厚度 89 m,裂隙型储层累计厚度 151.6 m,故研究区以裂隙型水合物储层为主。综上所述,地球物理测井方法对水合物储层有很好的响应,可有效运用于研究区所有钻孔的水合物储层识别工作。

关键词: 祁连山木里地区;天然气水合物;测井响应特征

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1012-07

0 引言

天然气水合物广泛分布在永久冻土带和海底沉积物中,近年来我国陆续开展了永久冻土带和海上天然气水合物的勘探调查工作。2008 年开始,中国地质调查局组织在青海省祁连山南缘多年冻土区实施天然气水合物科学钻探试验,成功钻获天然气水合物实物样品,实现我国陆域冻土区天然气水合物勘查找矿工作的重大突破。同时,开展了一系列地质、地球物理、地球化学调查和实验分析测试,发现一系列天然气水合物的直接证据和异常标志^[1-6]。

当前国际上有多地区的冻土区天然气水合物勘探开发计划研究程度较高,如美国阿拉斯加北部斜坡的 Brudhoe-Kuparuk 地区,加拿大 Mackenzie 三角洲 Sverdrup 盆地,俄罗斯的西西伯利亚盆地、Le-

na-Tun-guska 地区、Timan-Pechora 盆地、东北西伯利亚及 Kamchatka 地区,挪威 Svalbard 半岛,格陵兰等^[7-10]。

地球物理测井技术是较早应用于天然气水合物勘探的方法之一,不同的测井方法对天然气水合物具有不同程度的反映^[11],能够有效地识别天然气水合物储层。在国内外其它地区天然气水合物测井响应特征是:自然伽马低、自然电位负异常、电阻率较高、声波时差小、中子孔隙度高、密度低,上述响应特征多出现在地层疏松或孔隙度较大的沉积性地层孔隙中^[12-16],而木里地区属岩性致密的硬岩地层,孔隙度小且裂隙十分发育,这些不同于其它地区的岩性、地质特征,是否会导致水合物测井响应特征发生变化。本文的目的是:根据祁连山木里地区钻孔的测井、岩心及录井等资料,对水合物储层(孔隙型和裂隙型)的测井响应特征进行分析研究,统计水合

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家 127 专项项目(GZHL20110324, GZH201400305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160224)

作者简介: 林振洲(1981-),男,在读博士,现主要从事测井数据处理方法的研究工作。Email: linzhenzhou@igge.cn

通讯作者: 潘和平(1953-),男,教授,博士生导师,长期从事测井与井中物探方面的教学和科研工作。Email: panpinge@163.com

物储层的测井响应值范围,提出一套适合本研究区的测井识别方法。

1 地质背景

天然气水合物钻探区位于青海省祁连山南缘,其构造单元属中祁连盆地的木里坳陷西端,地处木里煤田的聚乎更矿区一井田和三露天井田(图1)。

据前人研究^[17-18],由于构造作用及其演化结果,研究区所处的聚乎更矿区中部为三叠系组成的一个背斜,南北两侧为侏罗系含煤地层组成的两个

向斜(图1),其中北向斜分布有一露天、二井田和三井田3个井田,南向斜由一井田、四井田、二露天和三露天4个井田组成。所出露地层中木里组下段为辫状河冲积平原环境下,沉积的一套粗碎屑岩,底部底砾岩发育;上段以湖泊—沼泽环境为主,发育本区主要可采煤层下₁和下₂煤。江仓组下段主要为三角洲—湖泊沉积环境,含煤2~6层;上段以浅湖—半深湖环境为主,为一套细碎屑泥岩、粉砂岩,不含煤。文中所研究的钻孔都位于三露天和一井田,钻遇的水合物都产于中侏罗统的江仓组和木里组。

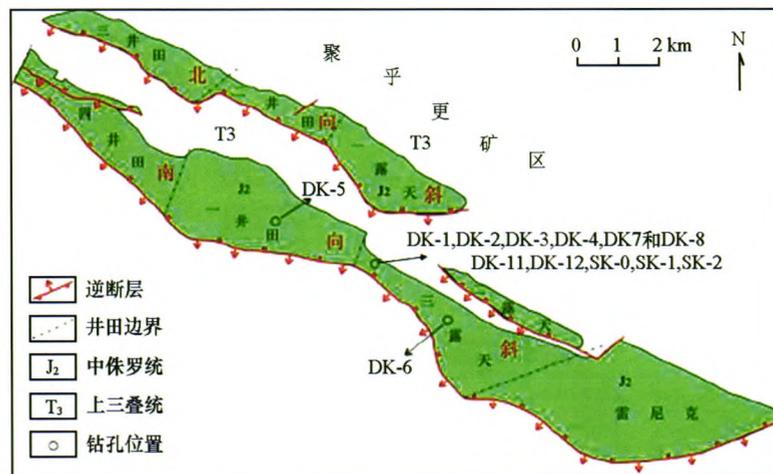


图1 研究区地质及钻孔位置示意(据庞守吉,2011)^[6]

2 测井响应特征

本研究区水合物储层类型复杂,主要岩性为泥岩、油页岩、粉砂岩、细砂岩等,水合物以片状产于岩层的裂隙中,或以浸染状产出在岩层的孔隙中^[19],这些都会导致测井响应特征的差异。因此,文中选取有代表性的钻遇水合物晶体且测井参数丰富DK8和DK9井,分砂岩、泥岩和页岩,研究含水合物层和同一口井中同种岩性不含水合物层的测井响应特征。

2.1 砂岩水合物储层

砂岩中的孔隙为天然气水合物提供了良好的储集空间。DK8井在147.8~155.93 m钻遇水合物,储层岩性为细砂岩,地质编录描述:该层呈灰色,有油迹渗出,局部见波状层理(152.5 m);裂隙较发育,裂隙面中多见油迹;整个层位,下半段岩性变粗。通过与上部不含水合物细砂岩测井曲线对比(图2),水合物层视电阻率增大约200 Ω·m,纵波速度增大约150 m/s,密度减小约0.05 g/cm³,自然伽马减小约

10 API,井径增大约5 mm。超声波成像测井通过测量井壁岩石对超声波的反射情况(回波幅度与传播时间)来获得井壁的图像,从而可以用于识别裂缝、断层等地质构造。本段地层超声成像背景色较亮,夹杂着3条颜色相对较暗的细小裂缝,说明整体上该段水合物储层岩石完整,属于典型的砂岩孔隙型水合物储层。

以上分析表明本层水合物储集层的测井响应特征为:视电阻率增大,自然伽马略微减小,密度、井径和纵波速度变化不明显。

2.2 泥岩水合物储层

DK8井在171.56~175 m钻遇水合物,储层岩性为粉砂质泥岩,地质编录描述:该层呈深灰色,含少量小团块状黄铁矿,发育少量裂隙。超声成像显示该段地层整体较为完整,发育2条较宽的裂缝,为水合物提供了良好的储集空间。通过与下部不含水合物泥岩测井曲线对比(图3),水合物层视电阻率增大约100 Ω·m,纵波速度增大约50 m/s,密度减小约0.2 g/cm³,自然伽马减小约15 API,井径增大约2 mm。因此,泥岩裂隙型水合物储层测井响应特征

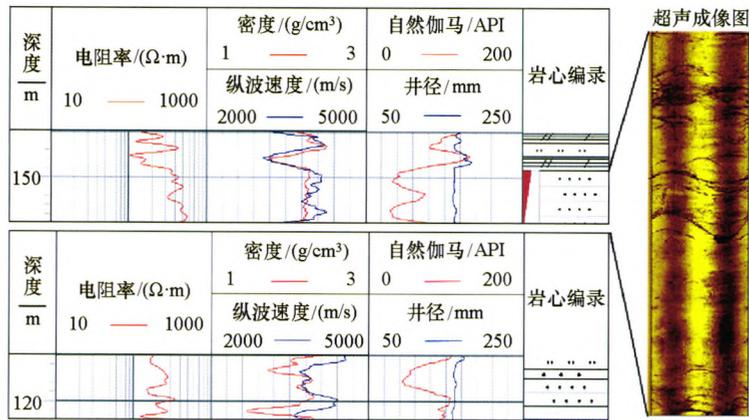


图2 DK8 井含水合物砂岩(上)与不含水合物砂岩(下)测井曲线对比(红色斜三角形指示含水合物层)

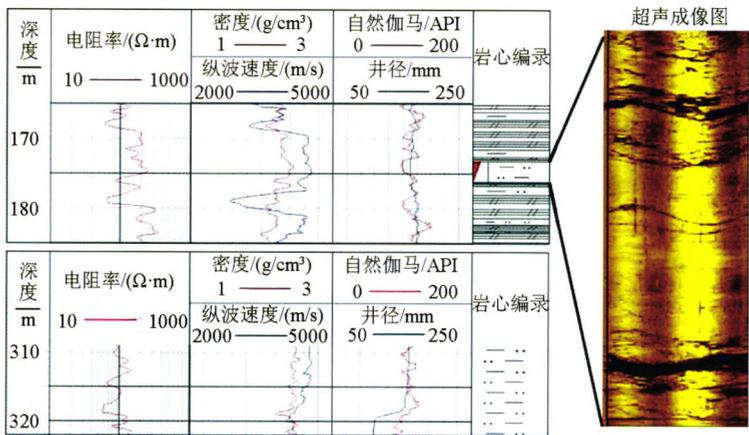


图3 DK8 井含水合物泥岩(上)与不含水合物泥岩(下)测井曲线对比(红色斜三角形指示含水合物层)

为:视电阻率增大,密度略有减小,纵波速度、自然伽马和井径变化不明显。

2.3 页岩水合物储层

DK9 井在 188.2~209.45 m 钻遇水合物,地质编录为油页岩、泥岩和细砂岩,通过测井曲线推断,本段泥岩无水合物异常响应特征(可参考图 3 的响应特征),故文中选取两段页岩储层与本井不含水合物的页岩层进行对比(图 4)。

页岩地层通常岩石破碎或裂隙发育,超声成像回波信号弱,故背景色较暗,其中发育的裂隙或破碎颜色较亮。从超声成像图形可以看出页岩地层裂隙极其发育,为裂隙型水合物提供了适宜的储集环境。上段页岩储层的响应特征比下段明显,上段水合物层视电阻率增大约 $120 \Omega \cdot m$,纵波速度增大约 $1800 m/s$,密度减小约 $0.2 g/cm^3$,自然伽马增大约 25 API,井径增大约 14 mm;下段水合物层视电阻率增大

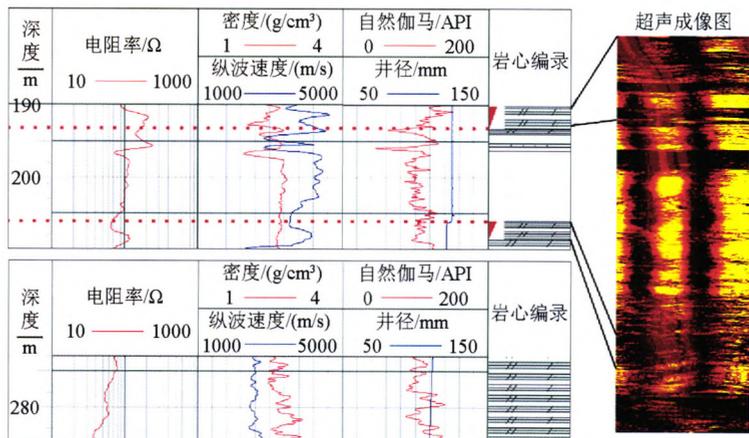


图4 DK9 井含水合物页岩(上)与不含水合物页岩(下)测井曲线对比(红色斜三角形指示含水合物层)

40 $\Omega \cdot m$, 纵波速度增大约 1 500 m/s, 密度减小约 0.01 g/cm^3 , 自然伽马减小约 10 API, 井径增大约 11 mm。

分析研究表明,页岩裂隙型水合物储层测井响应特征为:视电阻率增大,纵波速度增大明显,密度、自然伽马和井径变化不明显。

3 响应特征原因分析

地质编录资料显示,木里地区 13 口井钻遇到 47 层天然气水合物异常,其中 6 口井钻遇到 16 层水合物晶体。当水合物含量较高或储层较厚时,水合物测井响应特征明显,反之则不明显。文中选取

47 层水合物异常测井响应特征明显的井段,分砂岩、泥岩和页岩,分别统计了含水合物和不含水合物视电阻率、自然伽马、纵波速度和密度测井值,并用直方图将两者进行对比。

3.1 孔隙型水合物储层

超声成像图显示砂岩段岩石一般较完整,水合物以孔隙型赋存状态为主。含水合物砂岩层的视电阻率值主要分布于 370~490 $\Omega \cdot m$,纵波速度值主要分布于 3 800~4 100 m/s,密度值主要分布于 2.2~2.3 g/cm^3 ,自然伽马值主要分布于 30~50 API(图 5)。与不含水合物砂岩层对比发现,水合物可导致地层视电阻率值增大,自然伽马减小,密度和纵波速度无明显变化。

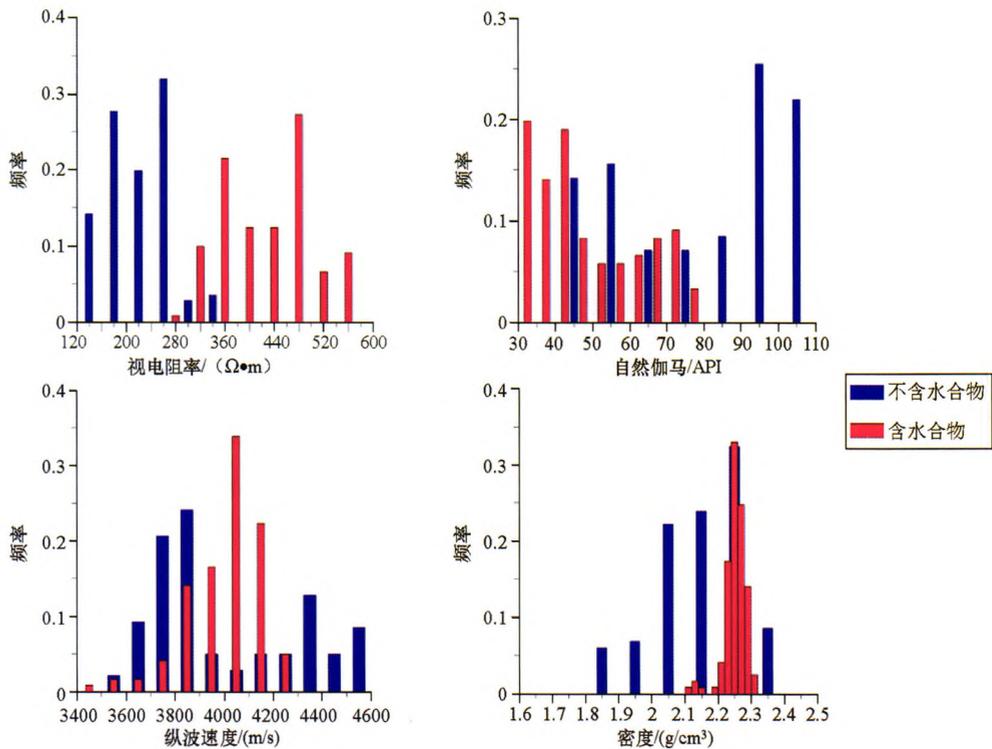


图 5 砂岩储层测井响应分布直方图

天然气水合物在形成过程中具有“排盐效应”,导致储层导电性变差,因此,造成木里地区砂岩水合物层比饱和水层的视电阻率高 2 倍左右,但这与海域或极地冻土区水合物层比饱和水层视电阻率高 50 倍以上的差异相比,木里地区的水合物层视电阻率响应特征就不是特别明显,推测差异较小的原因与水合物的含量偏低有关;水合物形成过程中还会吸收大量的纯水结晶,有效地将泥质滤除,故自然伽马表现出减小的测井响应特征;密度值在含水合物层略有降低,纵波速度略有增大,但与饱和水层差别不明显,而海域水合物储层密度、波速响应特征都比较明显,分析原因为,海域水合物储层主要在疏松未

固结地层,一旦形成水合物,将改变储层的物性,使岩石波速和密度都产生明显的变化,而木里地区孔隙型水合物附存在已成岩且岩性致密的砂岩中,对岩石物性的改造作用有限,因此,密度和纵波速度响应特征不明显。

3.2 裂隙型水合物储层

泥岩和页岩的裂隙或破碎带,为水合物提供了良好的储集空间,因此称之为裂隙型水合物储层。

本次统计的含水合物泥岩视电阻率值主要分布于 150~250 $\Omega \cdot m$,纵波速度值主要分布于 4 400~4 600 m/s,密度值主要分布于 2.3~2.5 g/cm^3 ,自然伽马值主要分布于 100~120 API(图 6)。与不含水

合物泥岩层对比,水合物层视电阻率增大明显,增大大幅度约2~3倍;密度值略有减小,说明水合物在裂隙中形成后对岩性致密的泥岩物性有一定的改造作用,导致其岩石密度变小;纵波速度和自然伽马对泥岩裂隙型水合物测井响应特征不明显。

本次统计的含水合物页岩视电阻率值主要分布于75~210 Ω·m,纵波速度值主要分布于3600~4600 m/s,密度值主要分布于2.4~2.7 g/cm³,自然

伽马值主要分布于101~139 API(图7)。与不含水合物页岩层对比,水合物储层视电阻率值明显大于非水合物层,最大能相差约5倍;纵波速度增大明显,增大幅度约1.5倍,说明水合物对裂隙发育地层固结作用明显,破碎地层的完整度有所提升;密度值差别不大,分析原因为虽然地层完整度得到提升,但固态水合物和液态水的密度值本身相差不大,故测井响应特征不明显;自然伽马值也无明显差别。

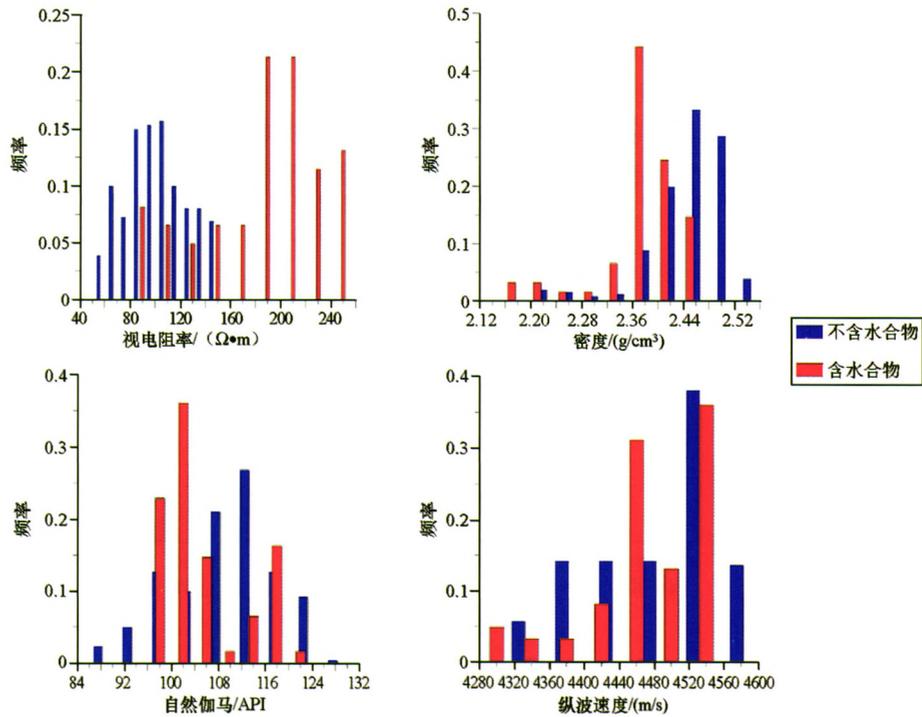


图6 泥岩储层测井响应分布直方图

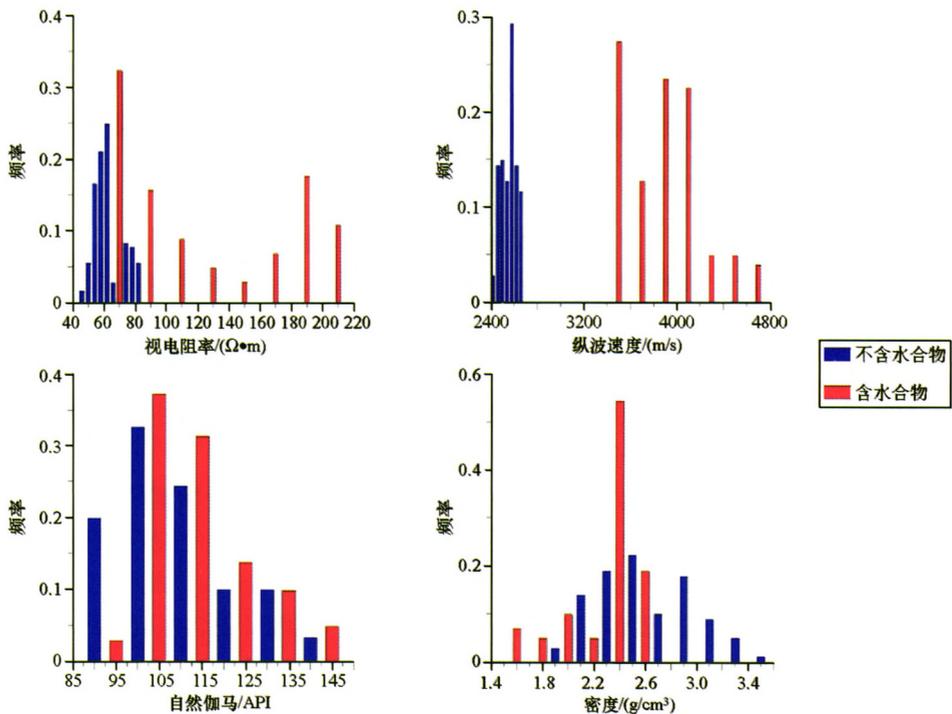


图7 页岩储层测井响应分布直方图

泥岩和页岩的水合物储层响应特征研究表明:裂隙型水合物储层视电阻率响应特征明显;裂隙越发育、地层越破碎的储层,纵波速度响应特性越明显,说明水合物的形成对地层的物性会造成一定的影响;裂隙型水合物储层的泥质含量往往较高,水合物形成时虽然对泥质有滤除作用,但由于木里地区水合物含量较低,滤除效果有限,故自然伽马响应特征不明显。

4 识别结果

通过上节的分析,笔者总结出木里地区水合物

储层的响应特征(表1)。

木里地区钻井14口,收集到12口井测井数据,按照上述测井响应特征,结合地质编录或录井等资料,识别出10口井共67层天然气水合物和疑似天然气水合物储层,累计厚度240.6 m。储层岩性种类较多,主要包括中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩和页岩(表2)。其中砂岩水合物储层累计厚度89 m,以孔隙型水合物为主;泥岩水合物储层累计厚度46.6 m,以裂隙型水合物为主;页岩水合物储层累计厚度105 m,也以裂隙型水合物为主。可见木里地区水合物主要赋存于泥岩和页岩的裂隙中,属裂隙型水合物储集区。

表1 木里地区天然气水合物储层测井响应特征

附存状态	岩性	视电阻率	纵波速度	自然伽马	密度
孔隙型	砂岩	增大	不明显	减小	不明显
裂隙型	泥岩	增大	不明显	不明显	略微减小
	页岩	增大	增大明显	不明显	不明显

表2 测井解释的水合物和疑似水合物储层统计表

井号	中砂岩		细砂岩		粉砂岩		泥岩		页岩		单井层厚
	层数	厚度	层数	厚度	层数	厚度	层数	厚度	层数	厚度	
DK-1			1.0	3.4	5.0	10.6					14.0
DK-2	2.0	4.6	2.0	2.8			1.0	2.7	7.0	61.2	71.2
DK-3	1.0	1.8					6.0	17.9	4.0	9.2	28.9
DK-6			1.0	4.5			1.0	2.5			7.0
DK-8	1.0	2.6	1.0	2.9	4.0	16.8	5.0	8.6	6.0	19.3	50.1
DK-9	2.0	6.9	1.0	2.0	3.0	15.6	1.0	6.8	3.0	9.0	40.3
DK-12							1.0	2.8			2.8
SK0	1.0	1.5					1.0	5.2			6.7
SK-1									2.0	6.7	6.7
SK-2	1.0	4.3			3.0	8.8					13.1
总计	8.0	21.7	6.0	15.6	15.0	51.8	16.0	46.4	22.0	105.4	240.8

5 结论

通过对木里地区天然气水合物测井响应特征研究,得出如下认识和结论。

1) 天然气水合物的测井响应特征极为复杂,整体表现为“高视电阻率、高纵波速度、低密度、低自然伽马”的特征,不同类型的水合物之间的测井响应特征存在一定差异。

2) 建立孔隙型和裂隙型天然气水合物储层的测井识别方法,其中孔隙型利用视电阻率与自然伽马相结合的方法进行识别,裂隙型利用视电阻率和纵波速度相结合的方法进行识别。

3) 孔隙型水合物储层主要测井参数值范围:视电阻率370~490 $\Omega \cdot m$,纵波速度3 800~4 100 m/s,

密度2.2~2.3 g/cm^3 ,自然伽马30~50 API;裂隙型水合物储层主要测井参数值范围:视电阻率75~250 $\Omega \cdot m$,纵波速度3 600~4 600 m/s,密度2.3~2.7 g/cm^3 ,自然伽马100~139 API。

4) 10口井识别出水合物和疑似水合物储层67层,累计厚度240.6 m,其中孔隙型储层累计厚度89m,裂隙型储层累计厚度151.6 m。

5) 天然气水合物主要赋存于中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩和页岩中,研究区以裂隙型水合物储层为主。

致谢:文章编写过程中得到陆域天然气水合物勘查技术研究与集成项目的资金支持,得到地球物理地球化学勘查研究所孔广胜、方慧等专家的指导,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 祝有海,张光学,卢振权,等.南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J].石油学报,2001,22(5):6-10.
- [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):1762-1771.
- [3] 祝有海,张永勤,文怀军,等.祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J].地球学报,2010,31(1):7-16.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Collett T S. Well log evaluation of natural gas hydrates [D]. USA. U.S. Geological Survey, 1992.
- [8] Collett T S, Lee M W. Downhole well log characterization of gas hydrates in nature—a review [C]//The 7th International Conference on Gas Hydrates, 2011.
- [9] Guerin G, Goldberg D, Meltser A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (B8): 17781-17795.
- [10] Davie M K, Buffett B A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (B1): 497-514.
- [11] 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):1110-1121.
- [12] Sha Z B, Liang J Q, Zhang G X, et al. A seepage gas hydrate system in northern South China Sea: Seismic and well log interpretations [J]. Marine Geology, 2015, 366: 69-78.
- [13] 梁劲,王明君,陆敬安,等.南海神狐海域含水合物地层测井响应特征[J].现代地质,2010,24(3):506-514.
- [14] 王秀娟,吴时国,王吉亮,等.南海北部神狐海域天然气水合物分解的测井异常[J].地球物理学报,2013,56(8):2799-2807.
- [15] Wang X J, Hutchinson D R, Wu S G, et al. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenhu area, South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116 (B05102): 1-18.
- [16] 赵军,武延亮,周灿灿,等.天然气水合物的测井评价方法综述[J].测井技术,2016,40(4):392-398.
- [17] 文怀军,鲁静,尚瀚君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究[J].中国煤田地质,2006,18(5):19-21.
- [18] 庞守吉.祁连山木里天然气水合物钻孔沉积构造特征及水合物分布关系研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [19] Fang H, Xu M C, Lin Z Z, et al. Geophysical characteristics of gas hydrate in the Muli area, Qinghai province [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 37: 539-550.
- [20] 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):834-838.

Response characteristics of gas hydrate well-logging in Muli area

LIN Zhen-Zhou^{1,2}, LIU Dong-Ming², PAN He-Ping¹, LI Yang², GAO Wen-Li²,
QIU Li-Quan², ZHANG Xiao-Wei³

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 3. Dongfang College, Beijing University of Chinese Medicine, Langfang 065000, China)

Abstract: The presence of gas hydrate and the lithology of reservoirs in Muli area are significantly different from those in the sea area or polar permafrost zone. For analyzing the logging response characteristics of the hydrate reservoir in the study area, the hydrate storage layer identification method is of great significance for hydrate exploration in this area. In this paper, the characteristics of well logging and the causes of hydrate logging were discussed by using conventional logging and ultrasonic imaging logging data, and the characteristics of reservoir logging parameters were calculated. The hydrate recognition was carried out in the study area. Some conclusions have been reached: (1) The apparent resistivity and natural gamma ray are sensitive to the pore hydrate, and the apparent resistivity and the longitudinal wave velocity are sensitive to the fissure hydrate. (2) The thick hydrate of the geological catalog could be identified, with the identification of some suspected hydrate reservoirs, but a small amount of drilling thin layer of hydrate failed to identify the analysis of the reasons for the low hydrate content, resulting in non-obvious logging response characteristics; (3) 10 wells in the study identified hydrate and suspected hydrate anomalies, in which the cumulative thickness of the pore-type reservoir was 89m, and the cumulative thickness of the fractured reservoir was 151.6m. Therefore, the fractured hydrate reservoir is the main research area. In summary, the geophysical logging method has a good response to the hydrate reservoir, and can be effectively applied to the reservoir identification of all the boreholes in the study area.

Key words: Qilian Mountain; gas hydrate; response characteristics of well-logging

(本文编辑:叶佩)