文章编号:1009-3850(2016)04-0053-07

# 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区二叠系下石盒子组 盒1段致密砂岩气层测井评价方法

# 张渝悦<sup>1</sup>,张 $\mathbf{g}^2$

(1. 长江大学地球探测与信息技术学院,湖北 武汉 430100; 2. 中石化华北油气分公司,河

南 郑州 450006)

摘要:通过储层"四性"关系研究 分析了鄂尔多斯盆地北部杭锦旗探区致密砂岩储层岩性对物性的控制作用及测井 曲线对储层岩性、物性和含气性的响应特征。认为二叠系下石盒子组盒1段砂岩石英含量、粒度和孔隙结构是影响 物性和含气性的主要因素 ,储层"四性"关系具有砂岩粒度与石英含量控制物性、物性控制含气性的基本特点。利用 交汇图版法与双孔隙度曲线叠合法对研究区二叠系下石盒子组盒1段气层进行了综合识别。根据储层的岩性、物 性、孔隙结构等参数 ,结合单井测试产能特征 将杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒1段气层划分为3类进行综合评 价 ,气层以II类为主 ,其次为 I 类。

关键 词: 致密砂岩; 控制因素; 测井评价; 杭锦旗探区中图分类号: P534.46文献标识码: A

# 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地北部,北跨伊盟北部 隆起,南跨伊陕斜坡北部,西接天环坳陷北端。行 政区隶属内蒙古自治区鄂尔多斯市的杭锦旗、伊金 霍洛旗和东胜区境内(图1),区内有苏布尔噶、泊江 海、四十里梁、新召等乡镇,面积约2300km<sup>2</sup>。该区 为典型的丘陵-冲沟地形。大部分地区白垩系红砂 岩出露,部分地区被薄层黄土覆盖。区内表层为氧 化环境下形成的薄层红色粘土,有机成分少。可谓 土地贫瘠,植被稀少,主要是一些耐干旱的低杆植 物(如骆驼刺等)和稀疏的牧草,开阔处有少量农田 及绿化林。

杭锦旗探区构造简单,总体以向西南倾斜的单 斜构造为特征。近年来,在该区开展的天然气勘探 成果显著,气层多层叠合的特征进一步明确,储量 规模不断扩大。研究区上古生界具有煤系烃源岩 广覆式生烃、砂体多层叠合连片发育、区域盖层广 泛分布等诸多有利条件,奠定了杭锦旗探区具有形 成大型岩性气藏的基础。目前已在石炭系太原组 及二叠系山西组、下石盒子组发现6套气藏。其中 二叠系下石盒子组盒1段埋藏3000m左右,岩性为 辫状河相的岩屑石英砂岩,储层属于特低孔隙度和 低渗-特低渗透率。由于砂岩骨架对测井信息的影 响较大,故致密砂岩气层的测井响应不同于常规储



# 图 1 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗探区地理位置图 Fig. 1 Location of the Hangjinqi exploration area in northern Ordos Basin

收稿日期: 2015-11-30; 改回日期: 2016-03-06

基金项目:国家科技重大专项课题(示范任务编号:2011ZX05002-001)示范任务资助

作者简介: 张渝悦(1991-), 女 研究生。研究方向为油气地质与勘探方向

沉积与特提斯地质



图 2 杭锦旗探区 J32 井二叠系下石盒子组盒 1 段"四性"关系图

Fig. 2 Diagram illustrating the relationship between lithology, physical and electrical properties and gas potential of the He-1 member of the Permian Lower Shihezi Formation through the J-32 well in the Hangjingi exploration area

层 测井识别难点较大。通过对该区目的层储层 "四性"关系研究 利用几种不同的方法对气层进行 综合识别,并对该区致密砂岩气层进行分类评价。

# 2 致密砂岩储层的"四性"关系特征

针对低渗透砂岩储层,"四性"(岩性、物性、电 性、含气性)关系研究是建立储集层测井参数解释 模型和气层识别的基础<sup>[1-5]</sup>。研究储集层测井响应 特征及其与岩性、物性、含气性的对应关系,目的是 力求消除岩石矿物背景对油气信息的影响,以客观 评价砂岩储集性与含气性<sup>[6-8]</sup>。

综合地质、测井和分析化验资料对杭锦旗探区 二叠系下石盒子组盒1段分析表明,岩性、物性、电 性、含气性"四性"关系明显,具有很好的对应关系。 从图 2 中可以看出,盒 1 砂岩段可以划分出 4 个沉 积旋回,每个沉积旋回均为下粗上细的正旋回。随 着砂岩粒度由下到上逐渐变细,岩心分析孔隙度和 分析渗透率逐渐降低。同时,自然伽马曲线升高, 声波时差降低,密度曲线升高,电阻率增大,气层显 示逐渐变差,全烃净增值逐渐降低。

2.1 储层岩性特征及其对物性的控制作用

杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒1段砂岩类型 主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩。其中岩屑砂岩 所占比例最高,所占比例达76.4%,粒度主要为粗 粒、中粒;岩屑石英砂岩次之,所占比例达20.2%, 以粗粒为主;长石岩屑砂岩所占比例较小,粒度以 中、细粒为主,一般为非储层。

盒1段储层孔隙度主要分布区间为5%~ 15%,平均9.1%;渗透率主要分布区间为0.1~ 1.0mD,平均0.60mD。总体上属于特低孔隙度和低 渗-特低渗透率。孔渗关系性较好,表现出孔隙型储 层的特征。

盒1段储集岩孔隙类型主要以粒间溶孔和粒间 余孔为主,其次为粒内溶孔和晶间微孔,少量微裂 缝和晶内微孔,并以2种以上的孔隙同时存在为特 征,总面孔率为0.1%~5.5%。

岩心和薄片等分析实验资料表明,储层物性与砂岩粒度、碎屑组分密切相关。岩石颗粒越粗,孔 喉越大,孔隙结构也越好,物性就越好;反之,岩石 颗粒越细,粒间孔隙体积就越小,物性就越差(图 3)。另外,石英含量与孔隙度、渗透率之间存在着 较好的正相关关系,随着石英含量的增加,砂岩的 孔隙度和渗透率都呈逐渐变大的趋势(图4)。

2.2 储层岩性和物性的电性特征

在本区二叠系下石盒子组盒1段砂泥岩剖面 中,自然伽马和自然电位曲线能较好地反应储层泥 质含量和粒度的变化。粗砂岩储层的GR值一般为 30~60API,而中砂岩储层的GR值一般为60~ 80API。大套粗砂岩的自然电位负异常特征也比较 明显。另外,自然伽马曲线与测井曲线之间具有良 好的相关性,表明岩性是影响储层电性特征的最主 要因素。

盒1段岩屑石英砂岩和岩屑砂岩与自然伽马、补偿 密度、补偿中子、电阻率等测井参数有不同的对应 关系。当砂岩中岩屑组分高时,对应的自然伽马较 高(大于100API),补偿密度也较高(2.7g/cm<sup>3</sup>左 右),中子大于10%,声波时差小于210μs/m,电阻 率大于30Ω.m。

2.3 含气储层的测井响应

在渗透率较好的储层中,当含气饱和度较高时,三孔隙度曲线和电阻率曲线都有不同程度的异常响应。本区盒1段含气性较好的气层表现为电阻 率较高(20~80Ω.m),补偿中子6.0%~12.0%,声 波时差 230~260μs/m,密度小于 2.50g/cm<sup>3</sup>,自然 伽马小于 60API,自然电位负异常明显。

利用测井曲线的变化特征往往能够有效识别 储层的岩相特征、物性特征等。首先将地层剖面划 分为有限个测井相,然后用岩心分析等地质资料对 测井相进行刻度,进而确定各个测井相到地质相的



## 图 3 二叠系下石盒子组盒 1 段不同粒度砂岩孔隙度-渗透 率关系图

Fig. 3 Permeability vs. porosity of the sandstones from the He-1 member of the Permian Lower Shihezi Formation



图 4 碎屑组分石英含量与孔隙度、渗透率之间的关系

Fig. 4 Quartz contents vs. porosity and permeability of the sandstones from the He-I member of the Permian Lower Shihezi Formation

映射关系,最终达到利用测井资料来描述、研究储 层的目的。通过对杭锦旗探区二叠系下石盒子组 盒1段自然伽马曲线特征进行分类统计,按照砂体 对应的自然伽马测井曲线形态特征,识别出3种典 型有利储层测井相类型,不同测井相的储层砂岩岩 性、物性特征、产能特征都不同(表1)。

2.3.1 光滑箱形含砾粗粒、粗粒砂岩岩相

主要由含砾粗粒砂岩、粗粒砂岩组成,沉积物 粒度粗。对应的自然伽马曲线呈箱状,高幅度、顶 底突变。储层物性最好,孔隙度平均为10.2%,渗 透率平均为1.12mD,试气产能相对较高。

2.3.2 齿化箱型粗粒砂岩岩相

主要由粗粒砂岩组成 ,沉积物粒度粗。对应的

自然伽马曲线呈齿化箱状,锯齿状、高幅度、顶底突 变。储层物性较好,孔隙度平均为8.8%,渗透率平 均为0.85mD,试气产能相对较高。

2.3.3 齿化钟形粗粒、中粒砂岩岩相

主要由粗粒砂岩组成,沉积物粒度粗。对应的 自然伽马曲线呈齿化钟形,高幅度、底部突变,上部 渐变。储层物性较好,孔隙度平均为6.201%,渗透 率平均为0.680mD,试气产能相对较高。

综上所述 杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒 1 段砂岩碎屑含量、粒度和孔隙结构是影响物性和含 气性的主要因素 储层"四性"关系具有岩性控制物 性、物性控制含气性的基本特点。

#### 表1 杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒1段岩相-测井相与产能、孔渗统计表

Table 1Well logging facies , porosity and permeability of the sandstones from the He-1 member of the Permian LowerShihezi Formation

测井相		孔隙度(%)		渗透率(mD)			
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
光滑箱型	17. 739	7.944	10. 179	3.926	0. 38	1.014	
齿化箱型	14. 421	5.855	8. 87	3.406	0. 277	0.856	
齿化钟形	10. 579	4.664	6. 201	2. 855	0. 182	0. 680	

# 3 致密砂岩气层的综合识别方法

## 3.1 交汇图版法

交会图版法是利用单层试气资料的测井参数 进行交会来识别气层和非气层的一种经验方法。 结合本区上古生界储层及试气产量分布特征,具体 是以测试产气层、测井解释气层和测井解释干层的





Fig. 5 Cross plot of deep lateral resistivity vs. AC of the sandstones from the He-I member of the Permian Lower Shihezi Formation

层段为研究对象,作对应层段测井参数交会图,得 到气层的各种测井及测井解释参数限值。

采用二叠系下石盒子组盒1段砂岩的测井及解 释参数作了声波时差与深侧向电阻率、孔隙度与含 气饱和度、孔隙度与泥质含量等一系列交汇图(图5 ~图7),并确定了气层的物性和电性下限(表2), 图版符合率为95%。



# 图 6 盒 1 段砂岩储层孔隙度与含气饱和度交会图(图例见 图 5)

Fig. 6 Cross plot of gas saturation vs. porosity of the sandstones from the He-I member of the Permian Lower Shihezi Formation

#### 表 2 杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒 1 段气层的物性和电性下限标准

Table 2The threshold values of the physical and electrical properties of the sandstones from the He-1 member of thePermian Lower Shihezi Formation

	物性标准		电性 标 准						
层位	孔隙度	孔隙度 渗透率		深侧向电阻率	密度	含气饱和度 泥质含量			
	(%)	( mD)	(μs/m)	(Ω • m)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)		
盒1	≥5	≥0.10	≥200	≥60	≤2.6	≥50	≤15		



# 图 7 盒 1 段砂岩储层孔隙度与泥质含量交会图(图例见图 5)

Fig. 7 Cross plot of shale contents vs. porosity of the sandstones from the He-I member of the Permian Lower Shihezi Formation

## 3.2 双孔隙度叠合法

岩石电阻率的大小主要取决于连通孔隙中水 的含量 ,因此 ,对由阿尔奇公式和深侧向电阻率反 算出的底层孔隙度实际上是反映底层的含水孔隙 度<sup>[3]</sup> ,用 φ<sub>w</sub>表示:

$$\varphi_w = \sqrt[m]{\frac{aR_w}{R_i}}$$

式中 a、m 为岩电参数 ,与岩石结构有关 ,由岩 电实验测得。R<sub>1</sub>为实测地层电阻率 ,可以采用深感 应或深侧向电阻率。在气层识别过程中 ,可以用上 式计算的含水孔隙度  $\varphi_{e}$ 与利用三孔隙度曲线计算 的有效孔隙度  $\varphi_{e}$ 进行重叠。在纯水层 R<sub>1</sub> = R<sub>0</sub>、 $\varphi$  =  $\varphi_{w}$ ; 在油气层  $\varphi_{w} < < \varphi_{e}$ 。可见双孔隙度重叠的曲线 幅度差( $\varphi_{e}$ - $\varphi_{w}$ )可以反映地层含气孔隙度 ,如果  $\varphi_{e}$ >2 $\varphi_{w}$  ,通常可以判断为气层(图 8)。

# 4 致密砂岩气层的分类评价

由于在岩性气藏中储层物性是天然气成藏和 富集的主控因素,而致密砂岩储层非均质性较强, 同一岩性圈闭中不同位置的产能差别很大,因此, 在对气藏开发动用之前首先要对气层进行分类评 价 进而寻找高产富集区。

根据储层的岩性、物性、孔隙结构等参数,结合 单井测试产能,首先将杭锦旗探区二叠系下石盒子 组盒1段储层划分为3类,然后结合相应的测井响 应特征,将储层的测井参数进行对比刻度,得到对 应的3类气层的测井分类标准(表3)。

4.1 I 类气层

储层岩性主要为含砾粗粒岩屑石英砂岩。孔 隙类型以粒间溶孔、粒间余孔为主,孔隙度大于 10%;渗透率大于0.5mD,孔、渗关系较好;含气饱 和度大于50%。这类气层一般初产可达工业气流, 压裂后可获中高产气流。

# 4.2 II 类气层

储层岩性为中-粗粒岩屑石英砂岩,少量岩屑石 英砂岩。孔隙类型主要是粒间溶蚀孔、粒间余孔和 晶间孔,孔隙度5%~10%;渗透率0.1~0.5 mD;含 气饱和度为50%~60%。这类气层一般压裂后可 获工业气流。

#### 4.3 III 类致密层

岩性为细粒岩屑石英砂岩、岩屑砂岩。主要发 育粒间溶蚀孔、晶间孔和粒内溶孔,孔隙度小于 5.0%;渗透率小于0.1 mD,孔、渗关系差;含气饱和 度小于50%。这类气层在目前的工程工艺条件下 难以获得工业气流。

以上数据显示,本区气层以 II 类为主,II 类以 上气层占总砂体厚度的86%,表明杭锦旗探区二叠 系下石盒子组盒1段大部分砂岩段均为较好储层, 具有较大的开发潜力,是下一步开发评价和动用的 主力目标。

# 5 结论

(1) 杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒1段砂岩 石英含量、粒度和孔隙结构是影响物性和含气性的 主要因素,储层"四性"关系具有岩性控制物性、物 性控制含气性的基本特点。受岩性和孔隙结构的 影响,岩屑石英砂岩的含气性和电性好于岩屑砂岩。

(2)利用交汇图版法、双孔隙度曲线叠合法及

表3 杭锦旗探区二叠系下石盒子组盒1段气层评价标准表

## Table 3 Assessment of the gas reservoirs from the He-1 member of the Permian Lower Shihezi Formation

评价	느쌰	孔隙类型	物	性	电性参数				含气性	(注:)
类别	别		φ(%)	K(mD)	GR( API)	AC(µs/m)	LLD( $\Omega \cdot m$ )	DEN(g/cm <sup>3</sup> )	Sg( %)	给吃
Ι	含砾粗砂岩	粒间余孔	>10	>0.5	25 ~ 50	230 ~ 255	40 ~ 70	2. 10 ~ 2. 40	60 ~ 70	气层
II	粗-中砂岩	粒间溶孔、粒内溶孔	5~10	0.1~0.5	50 ~ 60	217 ~ 230	13 ~ 40	2.40~2.55	50 ~ 60	气层
III	中-细砂岩	粒内溶孔、晶间孔	< 5	< 0.1	70 ~ 80	200 ~ 217	8~13	2.55~2.60	< 50	致密层





Fig. 8 Descrimination of gas reservoirs based on the porosity overlay technique ( J-72 well)

气测全烃曲线分析法对研究区二叠系下石盒子组 盒1段气层进行了综合识别。其中利用交汇图版法 建立了气层的物性和电性下限标准,图版符合率为 95%;双孔隙度曲线叠合法是快速定性地识别气层 的较有效的方法。 结合单井测试产能特征,将杭锦旗探区二叠系下石 盒子组盒1段气层划分为3类,并建立了3类气层 的测井评价标准。分类评价结果表明,研究区二叠 系下石盒子组盒1段气层以II类为主,其次为I类。

(3) 根据储层的岩性、物性、孔隙结构等参数,

参考文献:

- [2] 章雄,潘和平,骆森,等. 致密砂岩气层测井解释方法综述 [J].工程地球物理学报 2005,12:431-436.
- [3] 雍世和.测井数据处理与综合解释[M].北京:中国石油大学 出版社 2002.121-139.
- [4] 李云省,曾渊奇,田建波,等. 致密砂岩气层识别方法研究[J].西南石油学院学报 2003 25(1):25-30.
- [5] 孙小平,石玉江,姜英昆.长庆低渗透砂岩气层测井评价方法[J].石油勘探与开发 2000 27(5):115-120.
- [6] 余敏 颜其彬. 致密砂岩气层的识别方法[J]. 天然气工业, 1996,15(6):244-249.
- [7] 李会军 涨文才 朱雷.苏里格气田优质储层控制因素[J].天 然气工业,2007,27(12):16-18.
- [8] 杨双定.鄂尔多斯盆地致密砂岩气层测井评价新技术[J].天 然气工业 2005 25(9):45-47.

- [9] 张威,贾会冲,孙晓.鄂尔多斯盆地定北区块太2段致密砂岩 气层识别[J].新疆石油地质 2015 36(1):48-54.
- [10] 张威 孙晓. 柳杨堡气田太 2 段致密砂岩气层测井评价方法 研究[J]. 石油地质与工程 2014 28(4):67-70.
- [11] 郝蜀民 應宽洋 李良.鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田 成藏特征及其勘探开发技术 [J].石油与天然气地质 ,2006 , 27(6):762-768.
- [12] 李良,袁志样,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天 然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268 -271.
- [13] 张威,马超,齐荣.柳杨堡气田太2段致密砂岩储层特征及 分类标准研究[J].石油地质与工程 2014 28(3):42-45.
- [14] 张海涛,时卓石玉江,等.低渗透致密砂岩储层成岩相类型 及测井识别方法-以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组8 段为例[J].石油与天然气地质,33(2):256-264.
- [15] 曾文冲.油气藏储集层测井评价技术[M].北京:石油大学 出版社,1991.10.

# Well logging assessment of tight sandstone gas reservoirs from the He-1 member of the Permian Lower Shihezi Formation in the Hangjinqi exploration area , Ordos Basin

ZHANG Yu-yue<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. North China Petroleum and Gas Company, SINOPEC, Zhengzhou 450006, Henan, China)

**Abstract**: The present paper gives a detailed description of the controls of lithology on physical properties and the responses of well logs to lithology , physical and electrical properties , and gas potential of the tight sandstone gas reservoirs from the He–I member of the Permian Lower Shihezi Formation in the Hangjinqi exploration area , northern Ordos Basin. The main factors influencing physical properties and gas potential include quartz contents , grain sizes and pore structures in the sandstones from the study area. The recognition of the tight sandstone gas reservoirs in the He–I member is based on the cross plot and porosity overlay tachniques , and the assessment of the tight sandstone gas reservoirs in the He–I member is carried out according to three types of the gas reservoirs , of which the type II gas reservoirs are interpreted to be the good gas reservoirs with exploration potential in the He–I member.

Key words: tight sandstone; controlling factor; well logging assessment; Hangjinqi exploration area