

文章编号: 0253-9985(2001)01-0088-05

辽河油田曙光区兴隆台油层隔层特征 及其封隔能力评价

隗合明, 党 生, 顿铁军

(西安工程学院地球科学系, 陕西西安 710054)

摘要: 辽河油田曙光区兴隆台稠油油层中隔层按岩性可分为泥岩类、砂(粉砂)质泥岩类、泥质砂(粉砂、砾)岩类。不同类型隔层的特征明显不同, 渗透率以泥质砂(砾)岩类最高, 其次为砂质粉砂质泥岩类, 泥岩类最低; 突破压力以泥岩类最高, 泥质砂(粉砂、砾)岩类最低, 砂(粉砂)质泥岩类介于中间; 热导率、比热容和热膨胀系数以泥岩类最高, 其次为砂(粉砂)质泥岩类, 泥质砂(粉砂、砾)岩类最低。根据隔层的突破压力、中值半径、小孔隙含量、渗透率和厚度等将本区油层隔层分为 3 类、6 个亚类, 其中泥岩类为 I 类(封闭型)隔层, 对蒸汽的阻隔能力最强, 砂(粉砂)质泥岩为 II 类(限制封闭型)隔层, 阻隔能力介于 I 类与 III 类之间, 泥质砂(粉砂、砾)岩类为 III 类(限制型)隔层, 阻隔蒸汽能力最低。根据 I 类和 II 类隔层分布系数、 $< 1\text{ m}$ 厚隔层分布系数及隔层分布连续性, 综合评价认为, 兴隆台稠油层 7 套隔层中有 4 套为好隔层, 1 套为较好隔层, 2 套为差隔层。

关键词: 隔层; 特征; 分类; 综合评价; 辽河油田; 兴隆台油层

第一作者简介: 隗合明, 男, 53 岁, 教授, 能源地质与矿床地质

中图分类号: P618.130.2⁺1 文献标识码: A

辽河油田曙光区下第三系兴隆台油层及其大凌河等油层主要为稠油。随着稀油开采速度的加快和储量的大幅度减少, 目前辽河的稠油开采量已占 50% 以上。如何提高稠油的采收率, 已是该油田生产面临的一个重要课题, 其关键是采用先进有效的热采工艺, 改善隔层对蒸汽的阻隔效果。因此, 必须查明该区含油层系中隔层的分布、特征和性质及影响隔层阻隔能力的主要因素等, 并对隔层进行品质分类和综合评价, 从而为热采工艺方案的选择提供重要的地质依据。

1 基本特征

1.1 岩性及矿物组成

兴隆台油层的隔层由多种岩性组成, 按成分可归纳为 4 个主要类型: (1) 泥岩类; (2) 砂(粉砂)质泥岩类; (3) 泥质粉砂、砂(砾)岩类; (4) 灰泥质砂(砾)岩类。

隔层岩石的一个显著特征是泥岩多含有一定量的砂质或砾石, 以不纯泥岩和含泥质砂(砾)岩为主。此外, 岩石中所含砂粒分选差, 各种粒级的砂、砾都有, 泥、砂、砾混杂一起, 多呈基底式胶结, 反映

了近源、快速沉积的特点。

据岩矿鉴定和 X 衍射全岩定量分析结果, 本区隔层中泥岩、含砂(砂质)泥岩和部分含泥(泥质)砂岩、含泥(泥质)砂砾岩的矿物组成以粘土矿物和石英为主。粘土矿物含量为 23.9%~53.4%, 平均为 30.5%。石英含量平均为 40.8%。次为钾长石和斜长石, 分别为 10.5% 和 12.6%。此外还有少量方解石、白云石及菱铁矿和菱锰矿。粘土矿物以蒙脱石为主, 相对含量平均高达 82.4%, 次为分伊利石, 相对含量为 13.2%, 高岭石含量较少, 相对含量仅为 4.4%。

1.2 物性

(1) 不同岩性渗透率不同。由表 1 看出, 泥岩(包括微含粉砂泥岩)类和含泥钙质砂岩的渗透率最低, 泥质砂(砾)岩类的渗透率最高, 砂质粉砂质泥岩类(包括灰泥质砂岩)的渗透率介于上述二者之间。

(2) 垂直渗透率小于水平渗透率。隔层垂直渗透率与水平渗透率之比为 0.14~0.9, 平均为 0.44, 表明蒸汽沿垂向运移较沿水平方向差。此外, 不同岩类对比, 泥质岩类的比值为 0.36, 砂质岩类为 0.71, 这一特征表明泥质岩类比砂质岩类具更好的阻隔性能。

(3) 不同压力下岩石的渗透率不同。不同类型

岩石在不同压力下渗透率的变化幅度有所不同。砂质泥岩类变化幅度最大, 压力为 5 MPa 时渗透率剩余系数为 0.33, 当压力增到 10 MPa 时该系数则降至 0.09。泥质砂(砾)岩类, 由于有骨架颗粒支撑, 渗透率变化幅度较小, 压力为 5 MPa 时渗透率剩余系数为 0.53 左右, 压力增至 10 MPa 时仍剩 0.35 左右。

表 1 不同岩性隔层物性特征

Table 1 Physical properties of insulating layers in different rocks

岩 性	孔隙度/ $\%$	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
		垂直	水平
微含粉砂泥岩	5.37	0.87	2.17
含泥钙质砂岩	0.53	0.001 7	0.001 8
含粉砂泥岩	30.16	1.29	9.05
粉砂质泥岩	27.38	10.3	14.00
灰泥质粉细砂岩	30.29	4.23	15.20
泥质粉细砂岩、含泥粉砂岩、灰泥质砂砾岩	29.97	36.65	51.68

上述岩石渗透率随压力变化而变化的特征有利于稠油的热采, 因储层渗透率变化小, 有利于蒸汽扩散推进; 隔层的渗透率下降幅度大, 有助于增强隔层的阻隔能力。

表 2 不同岩性隔层微孔隙结构参数

Table 2 Parameters of micropores texture in different insulating layers

岩 性	比表面积 $/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	孔隙流体能 $/\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	突破压力 $/\text{MPa}$	突破半径 $/\text{nm}$	突破时间 $/\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	中值压力 $/\text{MPa}$	中值半径 $/\text{nm}$	< 6.3nm 小孔 隙含量/ $\%$	隔层类别
微含粉砂泥岩	97.83	6.85	3.91	35.81	2.66	61.13	2.29	72.6	I
含泥钙质砂岩	0.98	0.07	8.18	17.11	11.66	29.98	4.67	79.1	I
含粉砂泥岩	112.81	7.90	1.80	81.02	0.59	53.88	2.59	67.6	II
粉砂质泥岩	89.69	6.28	1.56	89.74	0.43	45.31	3.09	74.6	II
灰泥质砂岩	100.31	7.02	1.44	97.22	0.36	41.79	3.35	69.2	II
泥质细砂岩、含泥粉砂岩、灰泥质砂砾岩	81.21	5.68	0.26	624.8	0.014	23.12	6.99	54.9	III

表 3 杜 84- 65- 67 井不同岩性热导率

Table 3 Thermal conductivity of different lithologic characters in Du 84-65-67 Well

样号	井深/m	岩 性	热导率/ $\text{W}(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$					
			50 $^\circ\text{C}$	100 $^\circ\text{C}$	150 $^\circ\text{C}$	200 $^\circ\text{C}$	250 $^\circ\text{C}$	300 $^\circ\text{C}$
隔 10	705.0	含泥粉细砂岩	0.553 3	0.607 7	0.649 4	0.692 0	0.749 4	0.835 2
隔 11	705.4	含泥钙质砂岩	1.634 5	1.599 1	1.581 9	1.566 8	1.537 4	1.477 6
隔 112	724.6	灰泥质粉砂岩	0.616 2	0.639 9	0.651 6	0.671 0	0.717 9	0.811 8
隔 21	821.3	粉砂质泥岩	0.698 6	0.749 1	0.743 8	0.744 7	0.813 7	0.874 2

实验条件: ①温度 30~ 300 $^\circ\text{C}$ 、间隔 10 $^\circ\text{C}$, 压力 0.1MPa; ②含油饱和度、含水饱和度: 0.9

1.4.2 比热容

测试结果表明, 隔层岩石的比热容随温度的升高而升高, 但不同岩性的比热容大小有所不同, 泥岩类最高, 砂质泥岩类次之, 泥质砂(砾)岩最低(表 4)。

1.3 微观孔隙结构

通过对吸附法与压汞法综合测得毛细管压力曲线和微孔隙结构参数(表 2)的分析, 兴隆台油层的隔层具有 3 种不同的类型: (1) 泥岩、微含粉砂泥岩和含泥钙质砂岩类; (2) 含粉砂泥岩、粉砂质泥岩和灰泥质砂岩类; (3) 泥质细砂岩、含泥粉砂岩和灰泥质砂砾岩类。

1.4 热物理性质

1.4.1 导热

测试结果表明, 隔层中不同岩性的热导率有较明显的差异(表 3), 按其大小不可将隔层划分为 3 种类型。

(1) 钙质砂岩类。热导率最高, 在 50~ 300 $^\circ\text{C}$ 的不同温度下都在 1.4 W/(m $\cdot$ $^\circ\text{C}$) 以上。

(2) 砂质(粉砂质)泥岩类。热导率较低, 在 50~ 300 $^\circ\text{C}$ 的不同温度下为 0.698 6~ 0.874 2 W/(m $\cdot$ $^\circ\text{C}$)。

(3) 泥质(灰泥质)砂岩、粉砂岩、砂砾岩类。热导率最低, 在 50~ 300 $^\circ\text{C}$ 的不同温度下为 0.553 3~ 0.835 2 W/(m $\cdot$ $^\circ\text{C}$)。

1.4.3 热膨胀

测试结果(表 5)表明, 隔层泥质岩类的热膨胀系数较大, 且随温度变化而反复变化, 一般表现为低温(50 $^\circ\text{C}$)时膨胀系数最低, 由 50 $^\circ\text{C}$ 到 100 $^\circ\text{C}$ 或 150 $^\circ\text{C}$ 时增高, 到 200 $^\circ\text{C}$ 时降低, 尔后又升高。而砂

质岩类的热膨胀系数较小, 总体表现为随温度的升高而逐渐降低的趋势。

表 4 杜 84-65-67 井隔层岩石定压比热容

Table 4 Specific heat capacities of insulating layers in Du 84-65-67 Well

样号	井深/m	岩性	定压比热容/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$					
			50℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃
隔 1	654.6	微含粉砂泥岩	0.873 4	0.903 5	0.980 9	1.077 2	1.164 5	1.214 7
隔 6	685.6	含粉砂泥岩	0.867 7	0.878 0	0.965 8	1.080 5	1.171 0	1.186 4
隔 12	725.6	粉砂质泥岩	0.849 0	0.878 0	0.959 4	1.055 2	1.130 8	1.150 5
隔 112	724.6	灰泥质粉细砂岩	0.859 2	0.873 3	0.932 4	1.026 9	1.147 4	1.228 3
隔 81	703.6	粉砂质泥岩	0.858 6	0.934 1	0.997 7	1.057 0	1.120 5	1.196 4
隔 9	704.4	泥质粉细砂岩	0.835 5	0.850 5	0.904 1	0.974 5	1.040 2	1.079 3
隔 14	737.0	灰泥质砾状砂岩	0.833 6	0.854 5	0.878 7	0.921 6	0.998 4	1.124 2
隔 20	816.0	含泥油浸砾砂岩	0.818 8	0.851 1	0.928 3	1.031 6	1.142 0	1.240 9

实验条件: 温度: 22℃~ 295℃ 压力: 10.3~ 11.2MPa 含水饱和度、含油饱和度: 0.0%

表 5 杜 84-65-67 井隔层岩石热膨胀系数

Table 5 Thermal expansion coefficient of insulating layers in D 84-65-67 Well

样号	井深/m	岩性	热膨胀系数/ K^{-1}					
			50℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃
隔 5	683.8	微含粉砂泥岩	4.273 5	5.982 9	5.413 1	5.027 6	4.856 3	5.729 7
隔 21	821.3	粉砂质泥岩	2.827 8	5.011 7	5.816 6	4.276 5	4.411 4	4.764 9
隔 81	703.6	粉砂质泥岩	3.883 5	4.530 7	4.660 2	4.438 3	5.609 5	—
隔 2	655.0	泥质粉砂岩	3.367 0	3.189 8	2.612 3	1.748 1	2.164 5	2.503 8
隔 9	704.4	泥质细粉砂岩	2.851 1	2.025 6	1.683 5	1.612 2	1.460 3	1.507 1

实验压力: 0.1MPa, 测点间隔: 50℃

2 隔层品质

2.1 分类

笔者通过对兴隆台油层隔层的基本特征及其阻隔能力影响因素的研究, 参考国内外有关盖层和隔层分类的某些方案^[1~6], 确定出本区最能反映隔

层品质的 4 个参数是突破压力、中值半径、小孔隙含量和渗透率。这 4 个参数与隔层岩性和热物性等之间有很好的相关性, 可以反映出其品质的优劣。根据上述参数并考虑隔层的厚度(耗热情况)将本区油层隔层分为 3 类 6 个亚类(表 6)。

表 6 兴隆台油层隔层品质分类

Table 6 Classification of insulating layers in Xinglongtai oil horizon

隔层类别	岩性	微孔隙结构			渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	
		突破压力 /MPa	中值半径 /nm	0.8~ 6.3nm 小孔隙含量/ $\%$	垂直	水平
I	泥岩、微含粉砂泥岩	≥ 3.9	< 2.5	> 70	< 2.0	< 3.0
II	含砂泥岩、砂质泥岩、灰泥质砂岩	> 1	< 3.0	> 60	< 5	< 15
III	泥质砂岩、含泥砂岩、灰泥质砾状砂岩	< 1	> 3	< 60	2~ 5	3~ 15

(1) I 类(封闭型隔层): 该类隔层阻隔能力最强。主要由泥岩和微含粉砂泥岩等组成, 突破压力高($\geq 3.9\text{ MPa}$), 中值半径小, 渗透率最低。一般情况下它主要靠自身形成的压差屏障即能阻止蒸汽进入隔层, 故称之为封闭型隔层。其中, 厚度 $\geq 1\text{ m}$ $< 3\text{ m}$ 为封闭型的隔层(I-1 亚类), 厚度 $> 3\text{ m}$ 的为封闭型次隔层(I-2 亚类)。

(2) II类(限制-封闭型隔层): 该类隔层阻隔能力介于 I 类和 III类之间。主要由突破压力较高、渗

透率较低的砂质泥岩等组成。它是靠突破压力较高和厚度较大的作用, 由最初限制到最后阻止住蒸汽穿过隔层的, 因此称为限制-封闭型隔层, 封隔蒸汽对热采效果更好。

(3) III类(限制型隔层): 该类隔层的阻隔能力最低。主要由突破压力低($< 1\text{ MPa}$)、渗透率较高(垂直渗透率 $> 5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)的泥质砂岩、泥质砂(砾)岩、灰泥质砾状砂岩等岩石组成。一般情况下它不能阻止蒸汽进入并穿越隔层, 只能在一定程度

上限制或延缓蒸汽的垂向渗漏, 因此称为限制型隔层。III2 亚类较 III-1 亚类封隔能力更低。

本区热采试验结果证实, 厚度 $> 1\text{ m}$ 且 $< 3\text{ m}$ 的泥岩是最好的隔层, 既能阻止蒸汽运移, 又耗热较少, 在正常热采条件下即可满足稠油采收率要求。

2.2 综合评价

隔层品质分类是以岩石的测试分析结果为标准, 由于本区取芯井很少, 分析测试的有效数据更少, 因此, 我们在杜 84 块内选择了有代表性的 200 口井, 对隔层进行电性标准化处理, 并将测井解释结果与岩芯观察和测试结果进行拟合, 然后建立隔层渗透率与泥质含量关系图版。结果表明, 各类单一型隔层的泥质含量和渗透率大小都有较好的相关性。所划的 I 类隔层, 泥质含量一般在 90% 以上, 渗透率在 $3 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 以下; II 类隔层的泥质含量在 50%~90% 之间, 渗透率介于 $3 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 之间, III 类隔层的泥质含量小于 50%, 渗透率一般与根据化验资料确定的分类标准基本一致。

因此, 本次研究采用电测井解释的隔层泥质含量、渗透率和厚度作为隔层分类和分区评价参数。

经过研究, 将不同类型隔层的分布系数及其分布连续性(钻遇率)作为评价隔层好坏的指标。据上述各种参数所占比例将隔层分为好、较好和差 3 个类型(表 7)。

表 7 隔层评价标准

Table 7 Evaluation criterion of insulating layer

类型	I + II 类隔层分 $< 1\text{ m}$ 厚隔层分		钻遇率/%
	布系数/%	布系数/%	
好隔层	≥ 80	< 5	> 90
较好隔层	$\geq 70 \sim 80$	$5 \sim 10$	$80 \sim 90$
差隔层	$50 \sim < 70$	> 10	< 80

依据上述标准, 兴隆台油层 7 个隔层综合评价结果为 4 套为好隔层, 1 套为较好隔层, 2 套为差隔层(表 8)。

3 结论

(1) 辽河油田兴隆台油层的隔层由不纯泥岩和含泥质砂(砾)岩等多种岩性组成, 不同岩性的渗透率、微观孔隙结构、导热、比热容和热膨胀等特征均

不相同。

表 8 杜 84 块隔层综合评价表

Table 8 Complex evaluation of insulating layers in Du-84 Block

隔层层位	I + II 类隔层分布系数/%	$< 1\text{ m}$ 厚隔层分布系数/%	钻遇率/%	评价结果
馆陶组—兴隆台油层	80	3.6	100	好隔层
兴 I - II	85	5.6	95	好隔层
兴 II - III	80	4.8	98	好隔层
兴 III - IV	80	2.8	98	好隔层
兴 I - IV - VI	70	17.9	98	较好隔层
兴 VI ₁ - VI ₂	50	16.2	77	差隔层
兴 VI ₂ - VI ₃	60	10.9	77	差隔层

(2) 隔层对蒸汽阻隔的能力受多种因素影响, 包括岩石的岩性、成分、物性、热物性和厚度等, 而最能准确反映其阻隔能力或品质的参数是岩石的突破压力、中值半径、小孔隙含量和渗透率, 其次是厚度。依据上述参数, 兴隆台油层的隔层分为 3 类和 6 个亚类, 其中 I 类为封闭型隔层, 阻隔能力最强。II 类为限制型隔层, 阻隔能力最低。II 类为限制-封闭型隔层, 阻隔能力介于 I 类与 III 类之间。

(3) 同一地区的不同层位、乃至同一层位的隔层平面分布很不均匀, 即由不同类型的隔层组成。依据对兴隆台油层中 7 套隔层的品质分类及各套隔层中不同类型隔层的分布系数(比例)和分布连续性、厚度等, 确定出沙河街组—兴隆台油层、兴 I - 兴 II, 兴 II - 兴 III, 兴 III - IV 为好隔层, 兴 I - IV - 兴 VI 为较好隔层, 兴 VI₁ - VI₂, 兴 VI₂ - VI₃ 为差隔层。

参 考 文 献

- 肖无然, 陈伟钧. 天然气盖层的研究方法[A]. 见: 地质矿产部石油地质研究所编, 石油与天然气地质文集, 中国煤成气研究(第 1 集)[C]. 北京: 地质出版社, 1988. 148~158
- 张义纲. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京: 河海大学出版社, 1991. 138~148
- 傅广, 陈章明, 姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 46~50
- 戴贤忠, 李学田. 济阳坳陷第三系天然气盖层评价及形成机理[J]. 石油学报, 1991, 12(2): 1~9
- 郑朝阳, 张之达, 朱盘良. 盖层类型及其对油气运移聚集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 96~101
- 顿铁军, 唐青山, 魏桂萍. 中国稠油油藏[M]. 西安: 西北大学出版社, 1996. 63~78

CHARACTERISTICS OF INSULATING LAYERS AND EVALUATION OF SEALING ABILITY FROM XINGLONGTAI OIL HORIZON OF LIAOHE OILFIELD

Kui Heming Dang Ben Dun Tiejun

(*Department of Earth Sciences, Xian Engineering Institute, Xian, Shaanxi*)

Abstract: The insulating layers of Xinglongtai dense oil horizon in Shuguang District, Liaohe Oilfields could be divided into three types such as mudstone, sandy mudstone, argillaceous sandstone. Their properties differ differently with each other. The argillaceous sandstone possesses the highest permeability then the sandy mudstone; mudstone has the lowest permeability but possesses the highest breakpressure; the argillaceous sandstone has the lowest breakpressure. As for thermal conductivity, specific heat and thermal expansion coefficient, mudstone is the highest and argillaceous sandstone is the lowest. According to the breakpressure, midvalue radius, permeability and thickness, the insulating layers could be divided into three types and six subtypes. Among all the seven layers in the study area, four of them are fine, two of them are secondary, two of them are poor.

Key words: insulating layer; characteristics; classification; complex assessment; Liaohe Oilfield; Xinglongtai oil horizon

《石油与天然气地质》杂志封面照片征集启事

1. 照片要求反映既有学术价值又有欣赏价值的与本刊内容相关的典型的地质景观、地质地貌等。当然,能达到“地质奇观”那就更理想了。典型地质现象的微观照片也可以,例如镜下显微照片。请参照本刊封面照片。
2. 每幅照片附简短的文题或文字说明。
3. 照片规格为 5R(19.5 cm × 4 cm) 或 3R(12 cm × 8.5 cm), 竖幅为宜, 横幅照片能裁成竖幅也可以。
4. 照片要求主题突出, 反差好。
5. 请勿一稿多投。
6. 照片一经刊用, 酌致稿酬。

《石油与天然气地质》编辑部