

doi: 10.11720/wtyht.2022.1416

程仁杰, 孙建孟, 刘建新, 等. X 凹陷 A 构造低阻气层成因机理分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1369-1380. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1416>

Cheng R J, Sun J M, Liu J X, et al. Genetic mechanisms of low-resistivity gas zones in structure A of sag X[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1369-1380. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1416>

X 凹陷 A 构造低阻气层成因机理分析

程仁杰¹, 孙建孟¹, 刘建新², 迟蓬¹, 吕馨頔¹, 胡文亮², 付焱鑫², 赵文兵³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 3. 中国石油塔里木油田分公司勘探事业部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 经勘探开发证实, X 凹陷 A 构造 H 组地层 Q_{3c} 上部层段存在大量低阻气层。针对该层段地质沉积环境认识不清、储层微观认识不深入、气层低阻成因尚未明确等问题, 以研究区 3 口井的测井资料为基础, 结合钻井、录井资料和大量岩石物理实验资料开展相关研究。对研究区开展了基于薄片鉴定资料的岩石学、物性特征分析; 通过连井剖面、特殊测井资料并结合大量岩石物理实验对低阻气层成因机理开展研究; 基于数字岩心技术构建多组分导电模型, 从微观可视化尺度证实了低阻气层成因机理, 开展有限元电性模拟定量分析各低阻成因对电阻率降低的贡献。研究表明, 由于高阳离子交换容量粘土矿物的存在以及良好物性基础上发育复杂孔隙结构, 共同导致了研究区 Q_{3c} 上部气层的低阻响应。其中, 粘土附加导电性对低阻响应的贡献为 35.63%, 良好物性条件下的复杂孔隙结构对低阻响应的贡献达到 64.37%, 电性模拟结果与测井电性特征吻合, 证实了 Q_{3c} 上部低阻气层成因机理。

关键词: 低阻气层; 粘土附加导电; 孔隙结构; 数字岩心; 导电模拟

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)06-1369-12

0 引言

X 凹陷位于东海陆架盆地东北部, 是在前古近系基底上经历了断陷、拗陷与区域沉降 3 个大的演化阶段发育而来的具有东断西超特征的大型凹陷, 是中国近海油气资源丰富且具有较大勘探开发潜力的新近系含油气凹陷之一^[1-3]。X 凹陷整体呈 NNE 方向展布, 具有东西分带、南北分块的特点, 自西向东分为斜坡带、西次凹、中央反转带、东次凹及东部断阶带 5 个次级构造带。

A 构造位于中央反转构造带, H 组为该气田低渗致密砂岩天然气勘探开发的主要目的层, H 组沉积期同时存在 3 个方向的物源供给, 为一套中—大型辫状河三角洲前缘沉积^[4-5]。H 组碎屑沉积物受搬运距离的影响, 纵向上, 自下而上沉积碎屑成熟度逐渐降低。研究区主要产气层段埋深均大于 3 400

m, 地层受到了强烈的压实作用, 加上成岩过程中两次幕式抬升导致成岩环境的多次改变, 储层具有物性差、强非均质性、压力系统异常、孔隙结构复杂等特征。在勘探开发过程中发现了诸多测井复杂响应层段, 如低阻气层、层内或相邻层间相对低阻气层、高阻干层等。A 构造 3 口井的同一地质层系 Q_{3c} 上部均发现了低阻气层, 针对 A-2 井的低阻气层, 多位学者开展研究得到不同的结论^[6-7], 有学者认为导电矿物、粘土附加导电性和高矿化度泥浆侵入是气层低阻的成因, 另外有学者认为粘土附加导电性和高不动水饱和度导致了气层的低阻响应。针对相同沉积背景下研究区内同一地质层系出现的低阻气层存在沉积背景不清楚、成因机理尚未明确、低阻气层微观成因机理以及导电机理认识不足等问题, 本文以丰富的测井资料为基础, 结合大量的岩石物理实验资料, 对比分析研究区 Q_{3c} 上部低阻气层的成因机理, 基于矿物扫描、CT 扫描等可视化手段建立三

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2022-01-28

基金项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2021QNLM20001); 国家自然科学基金(42174143, 41874138)

第一作者: 程仁杰(1998-), 男, 重庆云阳人, 现为中国石油大学(华东)在读硕士生, 主要研究方向为测井数据处理与综合解释。Email: 582476598@qq.com

维数字岩心对低阻气层导电机理进行定量化研究。

1 储层特征

1.1 研究区岩石学特征

研究区 A 构造位于中央反转构造带中北部,其 H 组地层沉积期间来源于北部的母岩区碎屑物质顺着自北向南狭长河道长距离搬运,形成了 H 组砂岩成熟度由浅到深逐渐增大的空间展布^[8]。统计了 A

构造 3 口井共计 554 颗岩心薄片鉴定资料(表 1),研究区 H 组砂岩石英含量为 63%~65%、长石含量为 15%~18%、岩屑含量为 18%~20%,具有石英含量高、杂基和胶结物含量低的特征,按照传统命名规则,研究区砂岩以长石岩屑质石英砂岩为主。纵向上 Q6 到 Q3 稳定矿物组分含量逐渐降低,碎屑粒度呈现变粗的趋势,分选和磨圆程度逐渐变差,反映随着搬运距离变短,碎屑物质成分成熟度和结构成熟度逐渐降低。

表 1 A 构造 3 口井薄片鉴定分析统计

Table 1 Analysis and statistics of thin sections of 3 wells in structure A

层位	岩心数量	矿物含量均值/%				最大粒度 均值/mm	主要粒径 分布/mm	分选性	磨圆度
		石英	钾长石	斜长石	岩屑				
Q3	183	63.0	6.28	9.35	20.1	1.55	0.30~0.58	中—好	次棱—次圆
Q4	292	65.1	6.66	9.66	18.6	0.83	0.20~0.48	好—中	次棱—次圆
Q5	6	64.2	6.50	11.00	18.3	0.57	0.15~0.36	好	次棱—次圆
Q6	58	64.5	6.16	9.78	19.6	0.77	0.15~0.40	好	次棱—次圆

1.2 研究区物性特征

研究区 Q3、Q4 层段为凝析气勘探开发主要目的层段,对 A-2 井 Q3、Q4 层段的岩心物性分析资料进行统计(表 2),统计结果表明目的层段物性整体较差,属于低孔、低渗—特低渗储层。Q_{3c} 层间物性差异较大, Q_{3c} 上部地层孔隙度均值比下部大 3.5%、渗透率均值比下部大 0.9 mD。观察 Q3 层段岩心铸体薄片(图 1),发现 Q3 层段碎屑颗粒之间多呈线一点接触关系,反映成岩过程中较强的压实作用,地层原生粒间孔隙在上覆地层强压实作用下大大减少,孔隙类型以溶蚀粒间孔和粒内溶孔为主, Q_{3c} 上部 3 607 m 外的薄片仍观察到一定量的原生粒间孔隙。有学者统计发现, H 组储层次生溶孔对总孔隙度的贡献达到甚至超过 50%^[9]。长石及易溶岩屑等矿物组分在酸性成岩环境下易发生蚀变,溶蚀产生的溶蚀粒间孔、粒内溶孔和铸模孔对储层物性起到积极的改造作用。

图 1a、b 两块铸体薄片取自 Q_{3c} 上部低阻气层,对比图 1c 下部 3 634 m 高阻气层的铸体薄片,发现低阻气层薄片整体更“脏”,泥质填隙物更多,且以条带状和结核状富集于岩石颗粒之间,且通过图 1b 观察到低阻气层局部保留了一定量的原生粒间孔,说明 Q_{3c} 上部低阻气层的岩性和孔隙结构与下部高

阻气层存在较大差异。

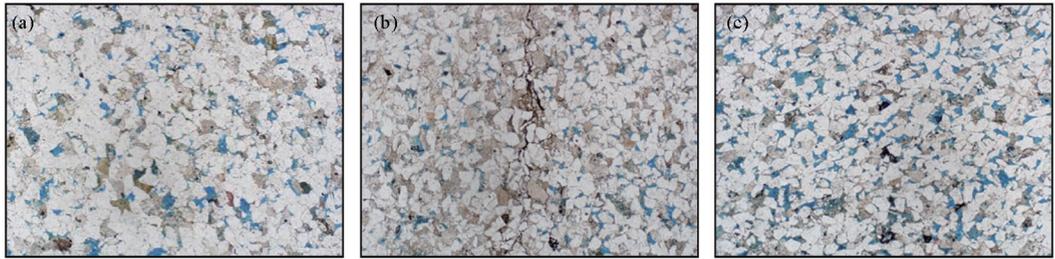
1.3 常规测井响应特征

研究区 A 构造 3 口井的连井剖面显示 Q_{3c} 层段为一大套连续砂体沉积, GR 曲线整体呈箱型、近似钟型,大套砂体内夹有多个泥质薄层,底部为一套厚泥岩沉积(图 2)。图中每口井第 1 道为岩性测井曲线道、第 2 道为孔隙度测井曲线道、第 3 道为深度道、第 4 道为地层层系道、第 5 道为气测录井道、第 6 道为电阻率测井曲线道, A-2 井第 7 道为随钻电阻率曲线道。3 口井的深、中、浅 3 条电阻率曲线在储层段均呈现明显的侵入特征,且在 Q_{3c} 上部储层段出现异常的低阻响应,深侧向电阻率仅为 6~8 Ω·m,而下部储层电阻率达到 30~70 Ω·m,上部储层段电阻率远低于下部储层电阻率,甚至低于泥岩段的电阻率(泥岩段电阻率为 20~25 Ω·m)。Q_{3c} 储层段三孔隙度曲线反映良好的物性特征,补偿中子曲线(CNCF)与补偿密度曲线(ZDEN)反向刻度显示明显的气层响应特征。气测录井显示全层段含气性好,部分深度段全烃含量达到 10%, C1 含量占全烃含量 90%以上。A-2 井 Q_{3c} 上部 3 606.5 m 深度点进行了 MDT 取样,取样流体中 C1 含量高达 93.2%,勘探及开发均证实研究区 A 构造 Q_{3c} 上部发育有大量具有潜在商业价值的低阻气层。

表 2 A-2 井岩心物性分析资料统计

Table 2 Analysis of core porosity and permeability of A-2 well

层段	埋深/m	样品数	孔隙度分布/%	孔隙度均值/%	渗透率均值/mD
Q _{3b}	3429~3550	294	8.1~9.0	8.4	1.50
Q _{3c} 上部	3592~3608	6	8.5~19.3	14.5	2.54
Q _{3c} 下部	3611~3659	14	8.3~12.0	11.0	1.63
Q _{4b}	3810~3868	233	8.6~12.1	9.729	0.911



a—A-2 井 Q_3c 上部 3 600 m; b—A-2 井 Q_3c 上部 3 607 m; c—A-2 井 Q_3c 下部 3 634 m

a—well A-2, the upper part of the Q_3c , 3 600 m; b—well A-2, the upper part of the Q_3c , 3 607 m; c—well A-2, the lower part of the Q_3c , 3 634 m

图 1 Q_3c 层段铸体薄片 (10 倍目镜×2 倍物镜, 单偏光)

Fig. 1 Casting thin sections of layer Q_3c (20 times eyepiece×2 times objective lens, single polarized light)

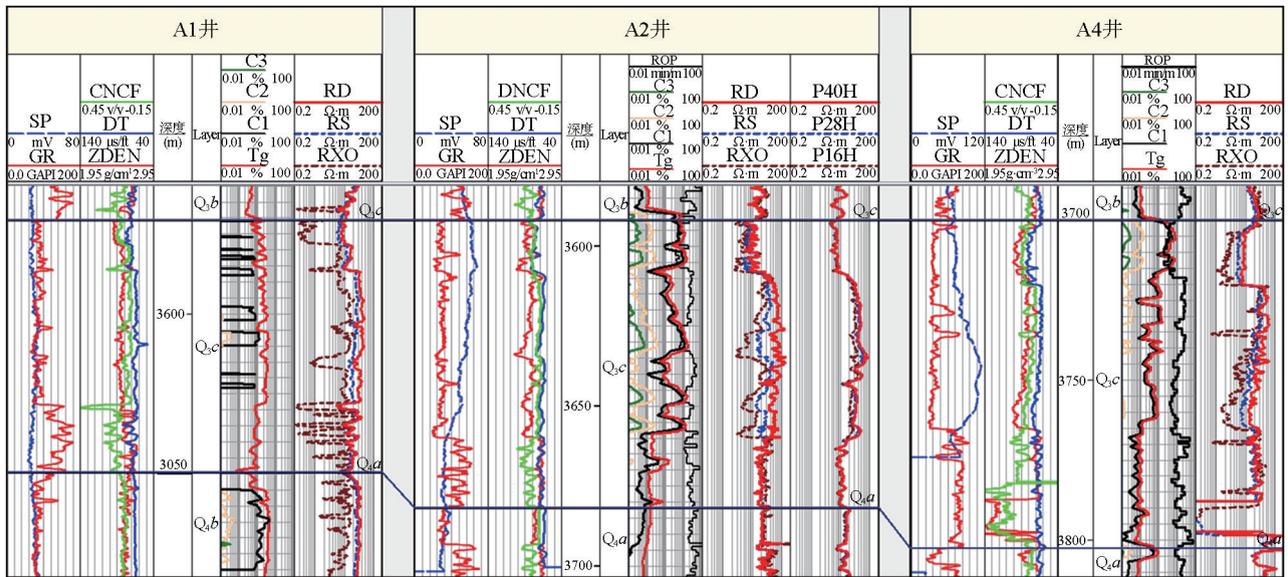


图 2 A 构造 3 口井连井剖面

Fig. 2 The inter-well profiles of 3 wells in the A structure

2 低阻成因机理分析

2.1 低阻成因概述

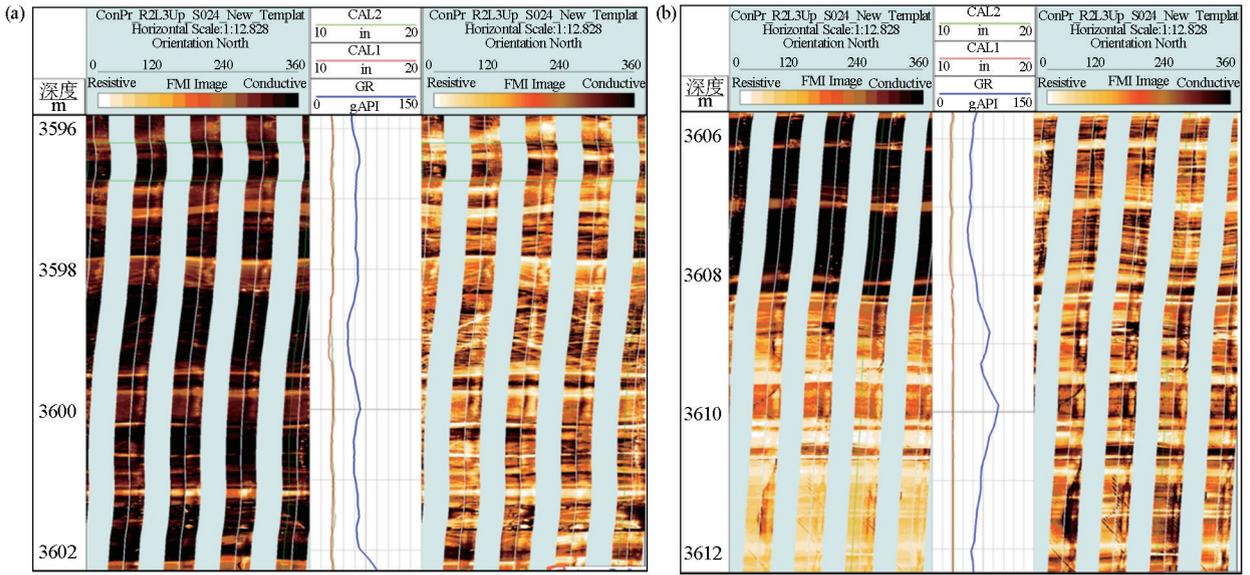
低阻油气层由于低电阻率特征,在测井解释流程中很容易将其与水层混淆,解释含水饱和度会远远大于地层真实含水饱和度,导致流体性质的判断错误。低阻油气层在全球各大油田均被大量发现,随着相关学者对低阻油气层难题的攻关,目前已经建立起完整的低阻油气层成因机理理论体系。国内有关学者将低阻油气层成因机理分为内因和外因两部分^[10]。内因包括:岩性细、泥质含量重、粘土附加导电性以及复杂孔隙结构等;外因则包括:泥浆侵入、砂泥岩薄互层、地层水矿化度差异、导电矿物等。经过调研发现大量低阻油气层成因并非单一因素,而是归结于多种成因的共同作用。基于已建立的低阻成因理论体系,结合测井资料和岩石物理实验数据,开展 A 构造 Q_3c 上部低阻气层成因机理的研究。

2.2 低阻气层成因机理研究

2.2.1 低阻外部因素排除

A-2 井采用随钻测井仪器测得 Q_3c 上部储层电阻率为 $6 \sim 8 \Omega \cdot m$,不同垂向探测深度的随钻测井电阻率曲线侵入特征不明显,且随钻测井电阻率测量值与电缆测井深侧向电阻率值一致,因此深探测电阻率测井曲线反映地层真实电阻率,排除泥浆侵入导致低阻这一外因。

图 3 为 A-2 井 Q_3c 层段高、低阻两个井段的 FMI 成像图像,其中左道为静态成像图,右道为动态成像图。FMI 成像图像显示 Q_3c 层段地层岩性以细砂岩为主,偶见砾石和泥质薄层发育,具有强非均质性特征。 Q_3c 上部 3 596~3 602 m 低阻气层的 FMI 动态图像显示存在多个泥质薄层,不存在明显的砂泥岩交互。由常规测井可知 Q_3c 纯泥岩段电阻率值高达 $20 \sim 25 \Omega \cdot m$,而 Q_3c 上部低阻层段电阻率甚至低于纯泥岩段电阻率,故排除砂泥岩薄互层导致低阻这一外因。



a—3 596~3 602 m 低阻气层段 FMI 成像; b—3 606~3 612 m 高阻气层段 FMI 成像

a—FMI image of 3 596~3 602 m low-resistance gas interval; b—FMI image of 3 606~3 612 m high resistance gas interval

图 3 A-2 井 Q_{3c} 层段 FMI 成像图像

Fig. 3 FMI dynamic image of Q_{3c} formation of Well A-2

连井剖面显示 3 口井 Q_{3c} 上部低阻气层和下部高阻气层之间不存在明显隔层, A-2 井 3 606~3 612 m 的 FMI 动态图像显示上部低阻气层和下部高阻气层之间偶见泥质薄层发育, Q_{3c} 层段纵向连通性整体较好, 上部低阻气层和下部高阻气层为同一套气水系统, 故排除由于层间地层水矿化度差异导致低阻这一外因。

统计研究区 Q3 层段共计 183 块薄片鉴定资料并未发现黄铁矿等导电矿物存在, 故排除导电矿物存在导致低阻这一外因。

2.2.2 高粘土含量及粘土附加导电性

研究区 H 组地层为一套中—大型辫状河三角洲前缘沉积, Q3 段主要发育水下分流河道和分流间湾两类沉积微相。FMI 动态图像观察到 Q_{3c} 砂体交错层理非常发育, 且在砂体底部可观察到明显的冲刷面, 反映 Q_{3c} 砂体为一套沉积水动力整体较强的水下分流河道沉积微相。在砂岩沉积间歇期, 由于水动力环境弱, 细粒沉积物及粘土物质大量沉积发育分流间湾沉积微相, 如 Q_{3c} 底部以及 Q_{3b} 底部均发育以灰色泥岩、粉砂质泥岩为主的分流间湾沉积微相。图 2 这 3 口井的连井剖面显示 Q_{3c} 砂岩段的 GR 曲线整体呈“箱型”或“钟型”特征, Q_{3c} 上部低阻气层的 GR 值有变大的趋势, 反映沉积水动力环境逐渐变弱, 沉积微相类型由水下分流河道向分流间湾逐渐过渡。由于沉积水动力环境较弱, Q_{3c} 上部低阻气层砂体相较于下部高阻气层段泥质薄层更

发育、粘土矿物含量更高。

通过图 1 薄片鉴定资料发现, Q_{3c} 上部低阻气层岩心铸体薄片相较于下部高阻气层岩心整体更“脏”, 部分泥质呈颗粒状富集在孔隙中。对比 Q_{3c} 上部低阻气层和下部高阻气层各 3 颗 X 衍射—全岩实验资料(表 3), 低阻气层的粘土含量高于高阻气层近 10%, 石英和钾长石含量低于高阻气层近 5%, 其他矿物含量无明显差异。X 衍射—粘土实验发现高、低阻岩心粘土矿物类型也存在明显差异(图 4)。低阻气层粘土矿物类型以伊蒙混层和绿泥石为主, 伊蒙混层含量占粘土矿物总量 43%, 绿泥石含量占粘土矿物总量 31.3%, 伊蒙混层中蒙脱石含量仅为 16.7%; 高阻气层粘土矿物以绿泥石和伊利石为主, 分别占粘土矿物总量 46% 和 27.7%。通过扫描电镜观察高、低阻气层岩心微观特征(图 5), 高阻气层岩心颗粒表面及粒间孔内分布大量叶片状绿泥石, 低阻气层岩心粒间孔之间中发育大量的絮状、搭桥状伊利石, 颗粒表面还分布一定量的叶片状绿泥石。

不同类型粘土矿物具有不同阳离子交换能力, 通常用阳离子交换容量 CEC 进行表征, 各类型粘土矿物的阳离子交换容量见表 4, 其中蒙脱石具有最大的阳离子交换容量, 绿泥石的 CEC 几乎接近于 0。Q_{3c} 上部低阻气层粘土矿物含量高, 且粘土矿物类型以伊蒙混层为主, 伊蒙混层阳离子交换容量大, 粘土矿物附加导电性大大降低地层电阻率。

表 3 X 衍射—全岩实验结果对比

Table 3 Comparison of X-ray diffraction-whole rock experiment results

井次	岩性	层位	深度/m	矿物种类和含量/%					
				石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	粘土总量
A-2		Q ₃ c 上部 低阻气层	3600	62.2	5.7	15.9	1.4	0.6	14.2
			3596	60.2	4.9	18.3	1.2	0.3	15.1
A-4	细砂岩	Q ₃ c 下部 高阻气层	3709	59.7	5.7	14.1	1.0	0.5	19.0
A-2			3645	65.6	9.6	15.4	1.8	1.2	6.4
A-2			3627	62.4	10.8	16.7	0.3	0.8	9.0
A-4			3732	69.0	10.6	13.6	2.0	1.0	3.8

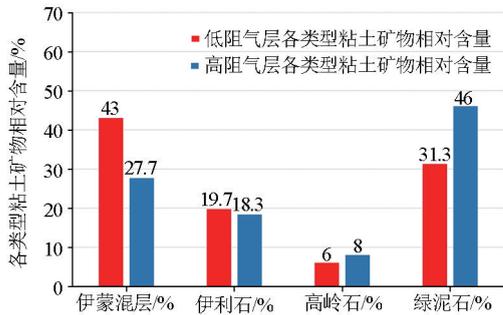
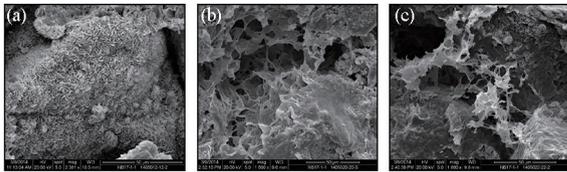


图 4 高、低阻气层各类型粘土矿物相对含量直方图

Fig. 4 Histogram of relative content of each clay mineral type



a—A-2 井高阻气层扫描电镜; b—A-2 井低阻气层扫描电镜; c—A-2 井低阻气层扫描电镜

a—SEM of high-resistance gas layer in well A-2; b—SEM of low-resistance gas layer in well A-2; c—SEM of low-resistance gas layer in well A-2

图 5 高、低阻气层扫描电镜微观特征对比

Fig. 5 Comparison of microscopic features of scanning electron microscope

表 4 各类型粘土矿物阳离子交换容量

Table 4 Cation exchange capacity of various types of clay minerals

粘土矿物类型	理论 CEC 范围/ (mmol · g ⁻¹)	CEC 均值/ (mmol · g ⁻¹)
蒙脱石	0.80~1.50	1.20
伊利石	0.10~0.40	0.25
高岭石	0.03~0.25	0.09
绿泥石	接近于 0	0

考虑在相同总孔隙度和骨架密度地层条件下,由粘土矿物总量以及粘土矿物类型导致的导电效率差异。根据 X 衍射实验得到的 Q₃c 上部低阻气层和下部高阻气层粘土矿物总量以及各类型粘土矿物相对含量,结合式(1)计算得到 Q₃c 上部低阻气层阳离子交换容量 Q_v 为 0.292 mmol/g,下部高阻气层 Q_v 为 0.082 mmol/g。考虑温度差异不大,地层水矿化度一致的情况下交换阳离子的当量电导率 B 为

定值,通过式(2)对比上部低阻气层和下部高阻气层粘土矿物的导电效率,结果表明低阻气层的粘土导电效率是高阻气层的 3.56 倍。因此,高粘土含量以及粘土附加导电性是形成 Q₃c 上部低阻气层的重要成因。

$$Q_v = \frac{CEC \cdot \rho_c \cdot (1 - \varphi_t)}{\varphi_t}, \quad (1)$$

$$R_{\text{clay}} = \frac{1}{B \cdot Q_v}, \quad (2)$$

式中: R_{clay} 为粘土矿物电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; B 为交换阳离子的当量电导率, $\text{S} \cdot \text{cm}^3 / (\text{mmol} \cdot \text{m})$; Q_v 为岩石的阳离子交换容量, $\text{mmol} / \text{cm}^3$; φ_t 为岩石总孔隙度,式中取值为 0.25; CEC 为阳离子交换容量, mmol / g ; ρ_c 为骨架密度, g / cm^3 , 式中取值为 2.65。

2.2.3 高压异常及复杂孔隙结构

统计 A-2 井共计 34 个深度点的 MDT 测压值, Q₃c 下部 3 633~3 634 m 高阻气层 3 个有效测试点的地层压力均值为 5 157 psi, 而 Q₃c 上部 3 606.5~3 607.5 m 低阻气层 5 个测试点的地层压力均值为 5 297 psi, 比下部高阻气层高 140 psi, 压力最高达到 5 460 psi, 压力系数达到 1.064 5。根据前人的分类标准^[11], 压力系数在 1.06~1.38 之间的地层归类为高压异常地层, 压力系数大于 1.38 为异常高压地层, 地层压力趋势图表明 Q₃c 上部低阻气层存在高压异常(图 6)。

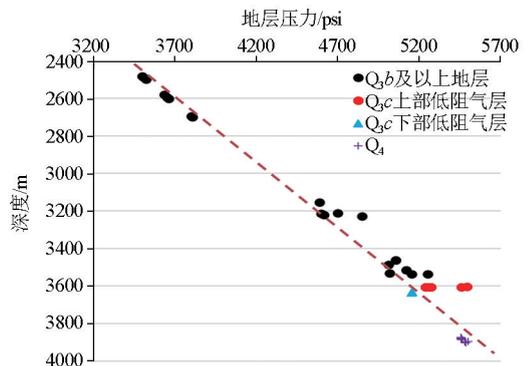


图 6 地层压力趋势

Fig. 6 Formation pressure trend diagram

近年来,针对不同岩性地层的超压成因研究取得了重要进展,国内有学者将超压成因分为 5 种成因类型^[12]: 不均衡压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压、压力传递。砂岩等渗透性岩层的超压成因在之前大多研究中仅归结于压力传递,认为其异常压力来源于邻近泥质岩层或者远距离超压源的压力传递^[13]。随着泥质岩层中生烃作用以及成岩作用等超压成因的重要性和普遍性逐渐被认知和证实,渗透性砂岩层中的超压成因应当被进一步认知。

鉴于 H 组泥岩总体为非烃源岩,且埋深大于 3 400 m,不存在机械压实不均衡的因素。通过上述沉积相带以及 X 衍射资料的分析证实 Q_{3c} 上部低阻气层相较于下部高阻气层具有更高的粘土矿物含量,因此本文重点研究成岩作用中蒙脱石—伊利石转化对 Q_{3c} 上部低阻气层高压异常现象的影响。

据相关学者研究^[14-16],成岩作用中蒙脱石—伊利石转化过程主要受随埋深和温度增加导致的矿物组分变化控制。粘土转化过程中的增压效应主要包括 4 个方面:转化过程使得粘土颗粒定向性得到增强,压实系数增大促进超压的形成;转化过程中蒙脱石层间吸附水和矿物转换产生的水大量脱出,致使地层产生附加的孔隙流体压力;转化过程中钾长石、云母等矿物遭到破坏和溶解,发生骨架弱化,上覆地

层应力转移到孔隙流体系统产生附加的孔隙流体压力;伊利石矿物以及自生矿物的沉淀增强体系封闭性,保证了地层压力系统的稳定。普遍认为,当温度略高于 60 ℃ 时,蒙脱石开始向伊利石转化。MDT 测试 Q_{3c} 地层温度在 132.1~135.2 ℃,且 Q_{3c} 上部地层中蒙脱石含量仅占粘土总量的 7%,伊利石含量占比则达到 56%,证实地层成岩作用处于蒙脱石向伊利石转化末期,粘土矿物转化过程中地层处于高压异常,在高压孔隙流体的保护下地层受到上覆地层的压实减轻,地层原生孔隙得到很好的保护。

通过图 1 铸体薄片对比,发现 Q_{3c} 下部 3 634 m 高阻气层孔隙类型以小孔径的溶蚀粒间孔为主;上部 3 607 m 低阻气层各尺寸孔隙均有发育,孔隙类型以原生粒间孔和溶蚀粒间孔为主。A-2 井核磁共振测井显示 3 618~3 636 m 高阻气层核磁 T2 谱主要分布在 200 ms 以内,谱峰相对较低,而 3 592~3 608 m 低阻气层 T2 谱谱峰则较饱满,T2 谱分布范围更广(图 7)。在高压异常地层条件下,铸体薄片、物性实验以及核磁共振测井均显示 Q_{3c} 上部低阻气层孔隙更加发育,相较于 Q_{3c} 下部高阻气层较差的物性,上部低阻气层较好的孔隙条件为优良导电路径的形成提供了很好的基础。

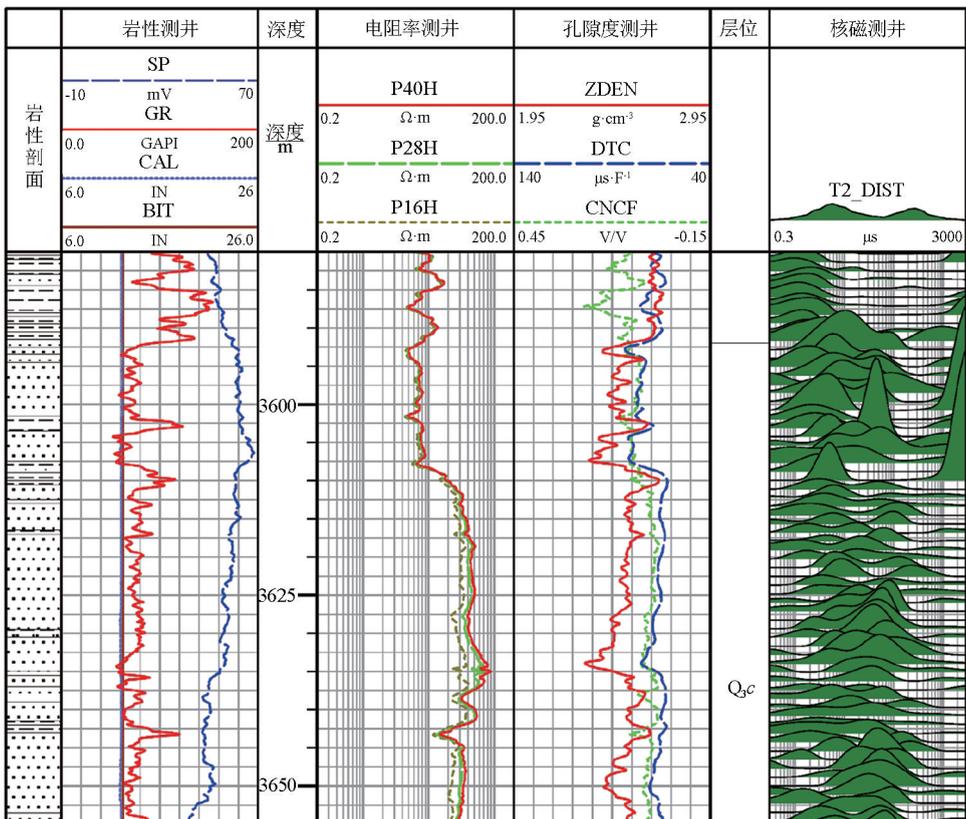
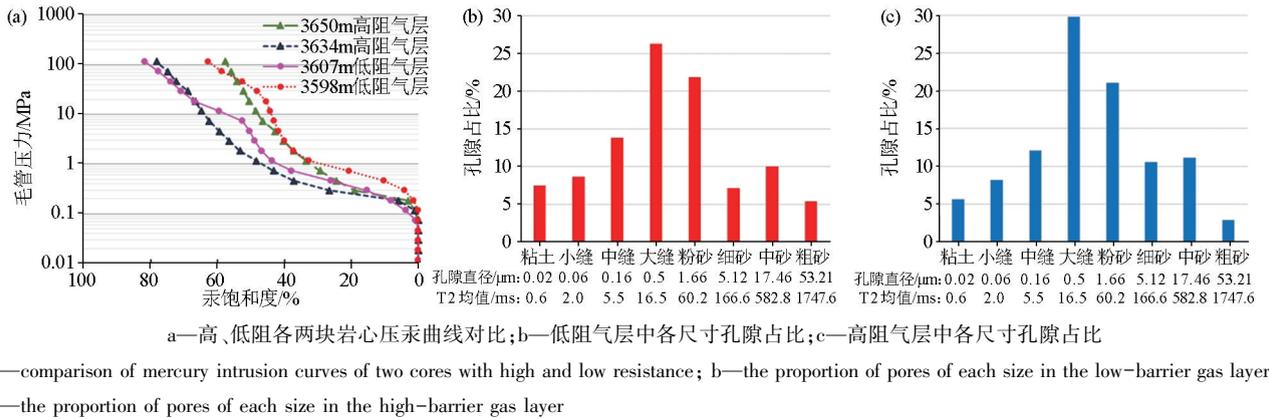


图 7 A-2 井 Q_{3c} 层段核磁共振测井响应
Fig. 7 NMR logging response in Q_{3c} section of Well A-2



a—高、低阻各两块岩心压汞曲线对比; b—低阻气层中各尺寸孔隙占比; c—高阻气层中各尺寸孔隙占比

a—comparison of mercury intrusion curves of two cores with high and low resistance; b—the proportion of pores of each size in the low-barrier gas layer; c—the proportion of pores of each size in the high-barrier gas layer

图 8 高、低阻气层压汞曲线及核磁测井各尺寸孔隙占比

Fig. 8 Mercury injection curve and the proportion of pores of various sizes in NMR logging

通过对比 Q_3c 上部低阻气层和下部高阻气层的岩心压汞实验数据以及核磁共振孔径分布,分析高、低阻地层孔隙结构差异(图 8)。高、低阻 4 颗岩心压汞实验对比发现:两块低阻岩心的比表面积均值达到 $3\ 500\ \text{m}^2/\text{g}$ 、体面积比均值达到 $7\ 871\ \text{m}^2/\text{cm}^3$,比两块高阻岩心的比表面积和体面积比均值分别大 $1\ 200\ \text{m}^2/\text{g}$ 、 $43\ 861\ \text{m}^2/\text{cm}^3$;低阻气层段两颗岩心压汞曲线呈现明显的双平台特征,说明低阻岩心内部至少存在两种不同尺寸的孔隙分布。通过对核磁 T_2 谱划定截止值区间分别得到低阻气层和高阻气层各尺寸孔喉分布,低阻气层各尺寸孔隙均有发育,孔隙类型以小孔隙为主,还存在一定量的中—大孔隙;高阻气层的各尺寸孔隙占比直方图近似呈正态分布,孔隙类型以小孔隙为主。通过核磁共振测井和压汞实验资料综合分析,相较于下部高阻气层,上部低阻气层更加复杂的孔隙结构,大量小孔隙与一定量的大孔隙组成复杂的双孔隙系统,这类地层具有更大的比表面积和体面积比。当气体充注入地层时,大尺寸孔隙内的地层水被优先驱替,随着气驱水过程的持续,充注动力不足导致微小孔隙内部、细小喉道内以及碎屑颗粒表面仍保留大量束缚水。

Q_3c 上部低阻气层在高压异常条件的保护下仍具有较好的物性条件,为上部低阻气层提供了很好的导电路径。相较于下部高阻气层单一的孔隙结构, Q_3c 上部低阻气层由于复杂的孔隙结构具有更大的比表面积和体面积比,从而导致更高的束缚水饱和度。在较好的物性基础上,复杂孔隙结构导致更高的束缚水饱和度为 Q_3c 上部低阻气层提供了更好的导电路径。因此,地层具有较好的物性基础上发育复杂孔隙结构是 Q_3c 上部低阻气层的又一重要成因。

3 基于数字岩心微观可视化的定量研究

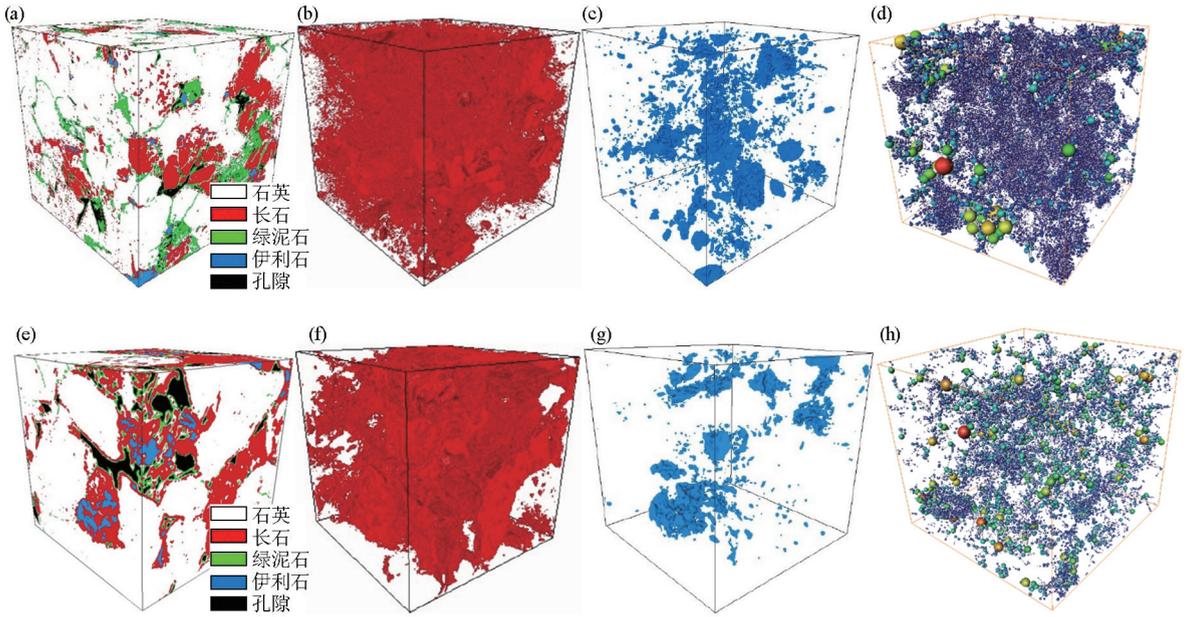
3.1 三维数字岩心模型建立

选取高、低阻气层两块岩心开展 X 射线 CT 扫描实验,扫描分辨率为 $1\ \mu\text{m}$,将 CT 扫描获取的灰度图像进行分割处理,构建了两块三维数字岩心模型。对高、低阻两块数字岩心进行组划分得到岩石各组分布形态以及相对含量,模型尺寸为 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$,其中白色为石英、红色为长石、蓝色为伊利石、绿色为绿泥石、黑色为孔隙(图 9)。通过数值模拟得到两块数字岩心的孔、渗参数与岩石物理实验结果具有较好的一致性(表 5)。

3.2 导电机理及电性模拟

通过高、低阻气层两块数字岩心模型,给定固定岩石矿物组分、孔隙内地层水和气体相应的电导率张量,采用有限元方法计算多组分三维数字岩心的电阻率^[17-18]。根据实际地层测试资料,设定地层水电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot \text{m}$ 进行电性模拟,各粘土矿物组分的电阻率取值参考表 4 中的阳离子交换容量 CEC 均值,结合式(1)、式(2)计算得到,其余岩石矿物和流体组分的电导率设为 $0\ \text{S}/\text{m}$ 。模拟得到高、低阻岩心在不同含水饱和度条件下的微观多组分分布和导电效率差异如图 10,图中灰色为石英、红色为长石、绿色为绿泥石、黄色为伊利石、蓝色为地层水、粉色为气体。

饱含水条件下高阻岩心的粒间溶孔和长石粒内溶孔被地层水占据,孔隙内的地层水为主要的导电路径,模拟电阻率为 $8.87\ \Omega \cdot \text{m}$;40% 含水饱和度条件下,气体占据了岩心内的中—小孔隙,微孔隙、角隅及吼道内仍保留束缚地层水,碎屑颗粒表面由于润湿性保留了一层水膜。高阻岩心电流密度分布显



a—低阻岩心全貌;b—低阻岩心长石组分;c—低阻岩心伊利石组分;d—低阻岩心孔隙网络模型;e—高阻岩心全貌;f—高阻岩心长石组分;g—高阻岩心伊利石组分;h—高阻岩心孔隙网络模型

a—overall picture of low resistivity core; b—feldspar composition in low resistivity cores; c—illite composition in low resistivity cores; d—pore network model for low resistivity cores; e—overall view of high resistivity core; f—feldspar composition in high resistivity core; g—illite components in high resistivity cores; h—pore network model for high resistivity cores

图 9 高、低阻两块数字岩心的矿物组分分布以及孔隙网络模型

Fig. 9 Mineral composition distribution and pore network model

示,低含水饱和度情况下水膜、角隅以及微孔隙内的地层水构成其主要的导电路径,导电路径连通性较差,电流密度低,模拟电阻率高达 $46.05 \Omega \cdot m$ 。

低阻岩心的伊利石含量明显高于高阻岩心,并且低阻岩心的长石组分相较于高阻岩心呈现更明显的分散状,孔隙网络模型显示低阻岩心内存在大量的微小孔隙,且发育一定量的中一大孔隙,表明低阻岩心孔隙结构复杂。在饱含水条件下,低阻岩心孔隙内的地层水和伊利石粘土矿物构成了良好的导电路径,模拟电阻率仅为 $2.67 \Omega \cdot m$;40%含水饱和度条件下,气体聚集在大尺寸孔隙内,连通性不好的中一小孔隙内仍保留大量的束缚水,加之高阳离子交换容量的伊利石矿物大量存在,在低含水饱和度时仍然构成了很好的导电路径。模拟 40%含水饱和度时低阻岩心的电阻率仅为 $10.46 \Omega \cdot m$ 。

高、低阻两块数字岩心电性模拟结果见图 11。两块岩心电阻率随含水饱和度变化差异明显,高阻岩心含水饱和度由 100%减小到 40%时,电阻率由

$8.87 \Omega \cdot m$ 增大到 $46.05 \Omega \cdot m$;低阻岩心含水饱和度由 100%减小到 40%时,电阻率由 $2.67 \Omega \cdot m$ 增大到 $10.46 \Omega \cdot m$ 。高、低阻两块岩心的饱和度指数分别为 1.818、1.505,低阻岩心的饱和度指数明显低于高阻岩心。在三维数字岩心可视化基础上进行多组分导电模拟研究高、低阻气层导电机理和导电效率,研究发现基于数字岩心的多组分导电模拟结果与测井电性特征一致,证实研究区 Q_3c 上部低阻气层由粘土附加导电性和复杂孔隙结构共同作用导致。

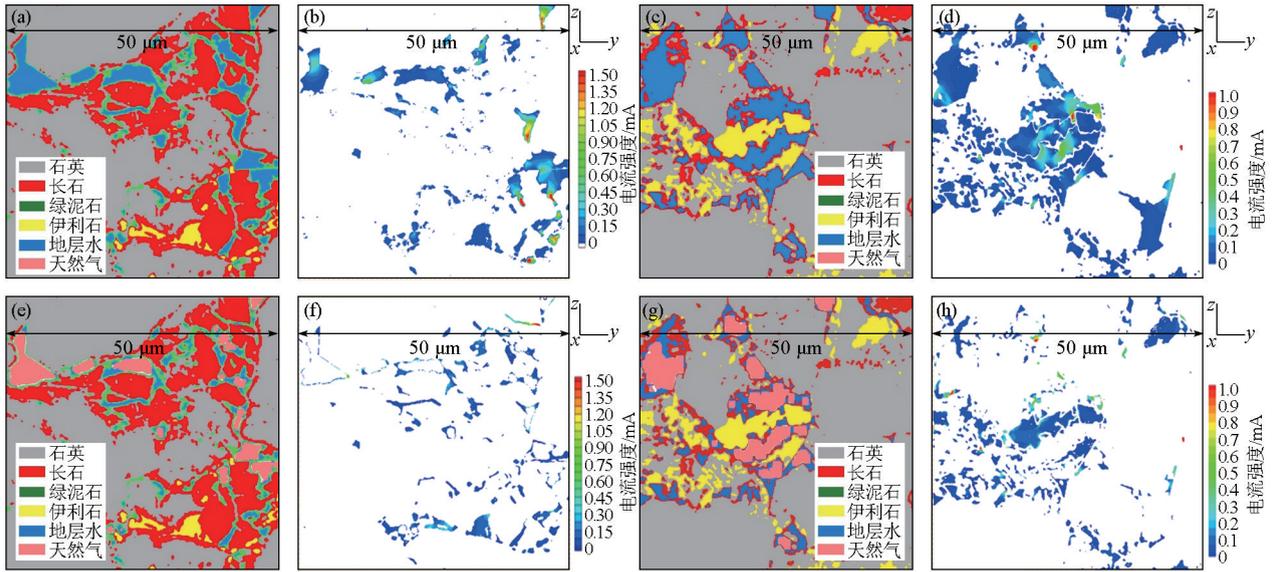
3.3 基于数字岩心的低阻各因素贡献定量分析

以上述 2 类数字岩心为基础,采用过程法分别建立相同物性条件下,阳离子交换容量不同的 2 块数字岩心,采用有限元算法计算 4 块数字岩心在不同含水饱和度条件下的电阻率。以实际地层条件下高阻气层岩心的电阻率为标准,研究不同孔隙度、阳离子交换容量和束缚水饱和度导致的电阻率变化。

表 5 高、低阻两块数字岩心各矿物组分含量及物性参数

Table 5 Contents of mineral components and porosity and permeability parameters

岩心类别	石英/%	长石/%	伊利石/%	绿泥石/%	孔隙度/%		渗透率/mD	
					数字岩心	物性实验	数字岩心	物性实验
低阻岩心	54.87	20.13	8.69	2.51	12.58	13.20	1.68	1.82
高阻岩心	57.65	21.29	2.51	5.23	8.42	8.54	0.97	1.03

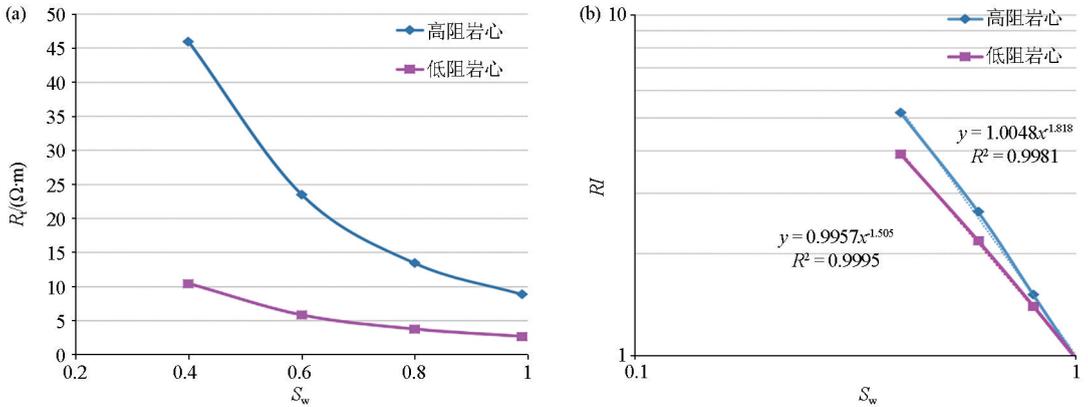


a—饱含水高阻岩心各组分分布; b—高阻岩心饱含水情况下的电流分布; c—饱含水低阻岩心的组分分布; d—低阻岩心饱含水情况下的电流分布; e—含水饱和度为 40% 时高阻岩心各组分分布; f—高阻岩心 40% 含水饱和度条件下的电流分布; g—含水饱和度为 40% 时低阻岩心各组分分布; h—低阻岩心 40% 含水饱和度条件下的电流分布

a—distribution of components in water-saturated high-resistance cores; b—current distribution in the case of high-resistance core saturated with water; c—component distribution of water-saturated low-resistance cores; d—current distribution in the case of water-saturated low-resistance cores; e—distribution of components of high resistivity core when water saturation is 40%; f—the current distribution of the high-resistance core under the condition of 40% water saturation; g—distribution of components in low-resistance cores when water saturation is 40%; h—the current distribution of the low-resistance core at 40% water saturation

图 10 高、低阻岩心电性模拟对比

Fig. 10 Simulation and comparison of electrical properties of high and low resistivity cores



a—高、低阻两块岩心不同含水饱和度下电阻率的变化; b—高、低阻两块岩心电阻增大率 RI 与含水饱和度的拟合

a—resistivity changes of two cores with high and low resistivity under different water saturation; b—fitting diagram of resistance increase rate RI and water saturation of two cores with high and low resistivity

图 11 高、低阻两块数字岩心电性模拟结果

Fig. 11 Electrical simulation results of two digital cores with high and low resistance

通过对比相同物性条件下, 阳离子交换容量变化导致的电阻率差异来定量分析粘土附加导电性对低阻的贡献; 通过对比相同阳离子交换容量条件下, 不同物性基础上由束缚水饱和度差异导致的电阻率变化来定量研究物性差异下复杂孔隙结构对低阻的贡献。根据测试及水分析资料, 模拟得到 4 块数字岩心在 130 °C 地层温度、0.1 Ω · m 地层水电阻率条

件下电阻率随含水饱和度的变化如图 12。图中 4 块岩心电阻率随含水饱和度的变化均呈幂函数关系。

以核磁共振测井计算得到的束缚水饱和度为参考, 认为高、低阻岩心束缚水饱和度分别为 0.4、0.6 时的电阻率为实际地层条件下的电阻率, 模拟得到实际高、低阻气层电阻率分别为 39.41 Ω · m、5.82

$\Omega \cdot m$,电阻率差异为 $33.59 \Omega \cdot m$ 。

模拟相同物性条件下由于阳离子交换容量差异导致的电阻率变化研究粘土附加导电性对低阻的贡献。由图 12 可知,孔隙度为 8.42%岩心的阳离子交换容量由 $0.082 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 增加到 $0.292 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 时,模拟得到不同含水饱和度情况的电阻率均大幅降低。当含水饱和度为 0.4 时,电阻率由 $39.41 \Omega \cdot m$ 降低为 $22.59 \Omega \cdot m$,电阻率下降 $16.82 \Omega \cdot m$ 。

由图 12 可知,当含水饱和度为 0.4 时,孔隙度为 8.42%的岩心阳离子交换容量由 $0.082 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 增加到 $0.292 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 时,电阻率由 $39.41 \Omega \cdot m$ 降低为 $22.59 \Omega \cdot m$,电阻率下降 $16.82 \Omega \cdot m$ 。

考虑相同阳离子交换容量条件下物性差异和孔隙结构差异对电阻率降低的贡献。由上文可知,孔隙结构差异导致束缚水饱和度存在明显差异,通过模拟相同物性条件下,不同束缚水饱和度条件下的电阻率变化研究孔隙结构差异对低阻的影响。模拟结果显示当孔隙度为 8.42%、阳离子交换容量为 $0.082 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 的岩心束缚水饱和度由 0.4 提高到 0.6 时,电阻率由 $46.05 \Omega \cdot m$ 降低到 $23.52 \Omega \cdot m$,电阻率下降 $22.53 \Omega \cdot m$;当孔隙度为 12.58%、阳离子交换容量为 $0.082 \text{ mmol}/\text{cm}^3$ 的岩心束缚水饱和度由 0.4 提高到 0.6 时,电阻率由 $18.24 \Omega \cdot m$ 降低到 $9.02 \Omega \cdot m$,电阻率下降 $9.22 \Omega \cdot m$ 。相较于 Q_3c 下部高阻气层,上部低阻气层发育更好的物性和复杂的孔隙结构,模拟孔隙度由 8.41%增加到 12.58%、束缚水饱和度由 0.4 提高到 0.6 时岩心电阻率的变化,研究在实际地层条件下物性和孔隙结构对电阻率的影响。模拟结果显示电阻率由 $39.41 \Omega \cdot m$ 下降为 $9.02 \Omega \cdot m$,电阻率下降 $30.40 \Omega \cdot m$ 。

对比前两组实验数据发现:对于物性越差的地层,孔隙结构差异对其电阻率的影响更大;对比第三组实验和前两组实验数据发现:在更好的物性条件下,复杂的孔隙结构对电阻率的影响远大于单一复杂孔隙结构对电阻率的影响。因此,在考虑复杂孔隙结构对低阻油气藏的影响时,需重点考虑地层物性条件是否存在差异这一前提,而非将低阻成因直接归因于单一复杂孔隙结构。

通过有限元方法计算得到高、低阻气层电阻率差异为 $33.59 \Omega \cdot m$,粘土附加导电性导致电阻率降低 $16.82 \Omega \cdot m$,物性差异条件下复杂孔隙结构导致电阻率下降 $30.40 \Omega \cdot m$,上述实验各参数取值及各低阻因素导致的电阻率下降量见表 6。将两个低阻成因导致电阻率下降的值进行归一化处理,得到各个成因对研究区 Q_3c 上部气层低阻响应的贡献。研究表明粘土附加导电性对低阻响应的贡献为 35.63%,良好物性条件下复杂孔隙结构对低阻响应的贡献高达 64.37%。

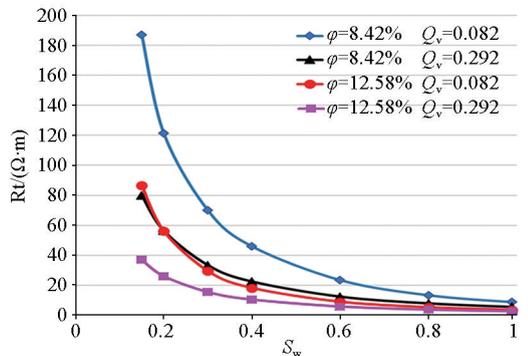


图 12 4 块岩心电阻率随含水饱和度的变化

Fig. 12 Variation of resistivity of 4 cores with water saturation

表 6 各低阻成因电阻率下降量分析及参数选取

Table 6 Analysis of the decrease in resistivity of each low resistance cause and parameter selection

因素	定量条件	$\varphi = 0.0842, S_w = 0.4$		
	$\Delta R_1(Q_v = 0.082 \rightarrow 0.292) / (\Omega \cdot m)$	16.82		
物性/孔隙结构差异	定量条件	$Q_v = 0.082$		
	孔隙度变量	$\varphi = 0.0842$	$\varphi = 0.1258$	$\varphi = 0.08 \rightarrow 0.12$
	$\Delta R_2(S_w = 0.4 \rightarrow 0.6) / \Omega \cdot m$	22.53	9.22	30.4

4 结论及认识

1) 通过测井资料、气测录井和生产测试资料证实 A 构造 3 口井同一地质层位 Q_3c 上部均出现低阻气层。以丰富的测井资料和大量岩石物理实验资料为研究依据,分别研究了外因和内因对地层电阻率的影响,进而确定低阻成因。研究发现低阻气层粘土含量高,粘土矿物类型以高阳离子交换容量的伊

蒙混层为主,定量分析发现低阻气层粘土矿物导电效率是高阻气层的 3.7 倍。高粘土含量以及粘土附加导电性是形成 Q_3c 上部低阻气层的重要成因。

2) 研究区 Q_3c 上部低阻气层中的粘土矿物处于成岩作用转化末期,蒙脱石向伊利石转化过程中地层保持高压异常,有利于地层原生粒间孔隙的保存,为上部低阻气层优良导电路径的形成提供了很好的物性基础。在此基础上,低阻气层内部发育的大量中—小孔隙与一定量的原生粒间大孔隙组成的双孔

隙系统大大提高了地层孔隙结构的复杂性,低阻地层具有更高的束缚水饱和度,这是形成 Q_3c 上部低阻气层的另一重要成因。

3)建立了高、低阻气层两块数字岩心,在三维数字岩心可视化基础上进行多组分导电模拟。对低阻气层的导电机理和导电效率开展研究发现:低阻岩心在高含气饱和度时,水膜、角隅和微孔隙内残余的束缚水构成其主要导电路径,导电效率低;低阻岩心内部存在大量的伊利石粘土矿物,且由于孔隙结构复杂,连通性较差的中—小孔隙内仍保留大量束缚水,在高含气饱和度情况下,中小孔内的束缚水和高阳离子交换容量的伊利石矿物构建了优良的导电路径,模拟结果与测井电性特征吻合,证实了粘土附加导电性和复杂孔隙结构是导致研究区 Q_3c 上部气层低阻的主要原因。

4)模拟物性、阳离子交换容量存在差异的 4 块数字岩心在不同含水饱和度条件下的电阻率变化,定量分析粘土附加导电性和物性差异下复杂孔隙结构对低阻的贡献。模拟发现,对于研究区这类低孔、低渗—特低渗地层,物性条件越差,单一孔隙结构差异对其电阻率的影响越明显;而对于物性基础更好的地层,复杂孔隙结构对其电阻率的影响远大于单一复杂孔隙结构对其电阻率的影响,因此,在考虑复杂孔隙结构对低阻油气藏的影响时,需重点考虑地层物性条件是否存在差异这一前提,而非将低阻成因直接归因于单一复杂孔隙结构。模拟结果显示粘土附加导电性对研究区 Q_3c 上部气层低阻响应的贡献为 35.63%,良好物性条件下复杂孔隙结构对低阻响应的贡献高达 64.37%。

参考文献 (References):

- [1] 陶士振, 邹才能. 东海盆地西湖凹陷天然气成藏及分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 103-110.
Tao S Z, Zou C N. Accumulation and distribution of natural gases in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(4): 103-110.
- [2] 何将启, 梁世友, 陈拥锋, 等. 东海盆地西湖凹陷新生代构造演化对油气的控制作用——以平湖组油气响应为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 221-226.
He J Q, Liang S Y, Chen Y F, et al. Control on petroleum by Cenozoic tectonic evolution in the Xihu Sag, the East China Sea Basin: Taking petroleum response of the Pinghu Formation as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 221-226.
- [3] 张银国. 东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 223-241.
Zhang Y G. Petroleum Geology and hydrocarbon distribution pattern of Huagang Formation in the Xihu sag of the East China Sea [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 223-241.
- [4] 董春梅, 赵仲祥, 张宪国, 等. 西湖凹陷中北部花港组物源及沉积相分析[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(5): 25-34.
Dong C M, Zhao Z X, Zhang X G, et al. Analysis of provenance and sedimentary facies of Huagang formation in the north central of Xihu Sag[J]. Journal of Noryeast Petroleum University, 2018, 42(5): 25-34.
- [5] 胡明毅, 柯岭, 梁建设, 等. 西湖凹陷花港组沉积相特征及相模式[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(5): 1-5.
Hu M Y, Ke L, Liang J S, et al. The characteristics and pattern of sedimentary facies of Huagang Formation in Xihu Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(5): 1-5.
- [6] 姜艳娇. A 地区低孔渗复杂储层导电机理及产能预测方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
Jiang Y J. The research of conductive mechanism and productivity prediction of low porosity and low permeability reservoir in A area [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [7] 王迪, 戚家振, 陈现, 等. 东海 N 气田低阻气层成因分析及饱和度定量评价[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(4): 7-13.
Wang D, Qi J Z, Chen X, et al. Forming reason analysis and saturation quantitative evaluation of low-resistivity gas layer in N Gas field of Donghai Sea[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(4): 7-13.
- [8] 徐昉昊, 徐国盛, 刘勇, 等. 东海西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组致密砂岩储集层控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 98-109.
Xu F H, Xu G S, Liu Y, et al. Factors controlling the development of tight sandstone reservoirs in the Huagang Formation of the central inverted structural belt in Xihu sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 98-109.
- [9] 刘金水, 曹冰, 徐志星, 等. 西湖凹陷某构造和花港组沉积相及致密砂岩储层特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 130-136.
Liu J S, Cao B, Xu Z X, et al. Sedimentary facies and the characteristics of tight sandstone reservoirs of Huagang Formation in Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 39(2): 130-136.
- [10] 程相志. 低阻油气层识别评价技术及分布规律研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008.
Cheng X Z. Study of recognition technology and distribution law on low-resistivity oil reservoir [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [11] 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 137-148.
Du X, Zheng H Y, Jiao X Q. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 137-148.
- [12] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.

- Zhao J Z, Li J, Xu Z Y. Advances in the origin of overpressure in sedimentary basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 973-998.
- [13] Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation; Reply[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(12): 2119-2119.
- [14] 李超, 罗晓容, 张立宽. 泥岩化学压实作用的超压响应与孔隙压力预测[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 951-973.
- Li C, Luo X R, Zhang L K. Overpressure responses for chemical compaction of mudstones and the pore pressure prediction. *Journal of China University of Mining and Technology*[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2020, 49(5): 951-973.
- [15] 褚庆忠. 异常压力形成机制研究综述[J]. *天然气勘探与开发*, 2001, 24(4): 38-46.
- Chu Q Z. Review of abnormal pressure formation mechanism[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2001, 24(4): 38-46.
- [16] 查明, 曲江秀, 张卫海. 异常高压与油气成藏机理[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 19-23.
- Zha M, Qu J X, Zhang W H. The relationship between overpressure and reservoir forming mechanism[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 19-23.
- [17] Yan W C, Sun J M, Zhang J Y, et al. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(1): 153-163.
- [18] 李霞, 李潮流, 李波. 致密砂岩电响应规律与饱和度评价方法[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 202-212.
- Li X, Li C L, Li B. Response laws of rock electrical property and saturation evaluation method of tight sandstone[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 202-212.

Genetic mechanisms of low-resistivity gas zones in structure A of sag X

CHENG Ren-Jie¹, SUN Jian-Meng¹, LIU Jian-Xin², CHI Peng¹, Lyu Xin-Di¹,
HU Wen-Liang², FU Yan-Xin², ZHAO Wen-BING³

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. CNOOC China Limited, Shanghai Branch, Shanghai 200335, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China)

Abstract: As confirmed by exploration and development, many low-resistivity gas zones exist in the upper portion of layer Q₃c of the H Formation in structure A of Sag X. Given the problems such as unclear understanding of the geological sedimentary environment, insufficient microcosmic knowledge about the reservoirs, and unclear causes of the low resistivity of the gas zones, this study conducted extensive research based on the log data of three wells in the study area, as well as the data on drilling and many petrophysical experiments. Specifically, the petrological and physical property characteristics of the study area were studied using the thin-section identification data; the genetic mechanisms of low-resistivity gas zones were studied using the well tie sections and the special log data, as well as the data of many petrophysical experiments; the formation mechanisms of low-resistivity gas zones were confirmed from the microscopic visualization scale by constructing a multi-component conductivity model using the digital core technique, and the contributions of various low-resistivity geneses to the decrease in resistivity were quantitatively analyzed through the finite element-based electrical simulations. As indicated by the study results, the low-resistivity response of the gas zones in the study area is caused by the presence of clay minerals with high clay content and high cation exchange capacity and also results from the complex pore structure formed under the favorable physical property conditions in the anomalous high-pressure depositional setting. The contributions of the clay additional conductivity and the complex pore structure to the low resistivity are 35.63% and up to 64.37%, respectively. The electrical simulation results are consistent with the log-derived electrical characteristics, verifying the genetic mechanisms of the low-resistivity gas zones in the upper portion of the Q₃c.

Key words: low-resistivity gas zone; clay additional conductivity; pore structure; digital core; electrical simulation

(本文编辑:王萌)