

粒度资料计算碎屑岩油藏束缚水饱和度新方法

康志勇¹ 尚 策¹ 丁 群² 唐海龙¹

1. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;
2. 中国石油冀东油田公司勘探开发部, 河北 唐山 063004

摘 要:岩心实验分析法、经验公式法和测井解释法是目前确定碎屑岩油藏束缚水饱和度的主要方法。由于成本等因素,多数评价单元都无条件用岩心实验分析法获取束缚水饱和度,只能采用精度相对较低的经验公式法或测井解释法求取。针对这一问题,在分析碎屑岩油藏束缚水饱和度形成机理的基础上,采用碎屑岩粒度、碎屑岩体积密度、黏土矿物含量、全岩 X 衍射等分析项目,确定碎屑岩比表面积和碎屑颗粒表面水膜厚度等参数求取碎屑岩束缚水饱和度。由此建立了以碎屑岩颗粒直径、碎屑颗粒质量分数、岩石体积密度及黏土矿物质量分数等参数为基础的束缚水饱和度方程。采用该方程解释评价单元束缚水饱和度的精度高于测井解释法得出的精度,与岩心实验分析法中岩心间接分析法确定结果精度相当。该方程揭示了碎屑岩束缚水饱和度与水膜厚度和比表面积的乘积成正比,与岩石总孔隙度成反比,这一认识奠定了碎屑岩束缚水饱和度评价的理论基础,对低成本、高精度确定碎屑岩束缚水饱和度具有现实意义。

关键词:碎屑岩粒度分析;束缚水饱和度方程;比表面积;水膜厚度;质量分数;岩石体积密度;全岩 X 衍射;黏土矿物

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.05.012

A new method for calculating irreducible water saturation of clastic rocks reservoir from granularity data

KANG Zhiyong¹, SHANG Ce¹, DING Qun², TANG Hailong¹

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010, China;
2. Exploration and Development Department, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei, 063004, China

Abstract: Core experimental analysis method, logging interpretation method and empirical formula method are the main methods to determine the irreducible water saturation of clastic rock reservoir. Due to cost and other factors, most evaluation units are unable to obtain irreducible water saturation with core analysis method, which can only be obtained by logging interpretation method or empirical formula method with relatively low accuracy. To solve this problem, based on the analysis of the formation mechanism of irreducible water saturation in clastic rock reservoir, the specific surface area of clastic rock and the surface water film thickness of clastic particles are determined using the analysis items such as clastic rock particle size, clastic rock bulk density, clay minerals and whole rock X-ray diffraction. The irreducible water saturation equation based on the parameters of clastic rock particle diameter, clastic particle mass fraction, rock bulk density and clay mineral mass fraction is established. The accuracy of using this equation to

收稿日期:2021-11-10

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科技重大专项“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”(2017E-16)

作者简介:康志勇(1964-),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,硕士,从事油气藏综合评价研究工作。E-mail:1377211037@

qq.com

explain the irreducible water saturation of the evaluation unit is higher than that by logging interpretation method, and is equivalent to that determined by core indirect analysis method in core experimental analysis. The equation reveals that the irreducible water saturation of elastic rocks is directly proportional to the product of water film thickness and specific surface area, and inversely proportional to the total porosity of rocks, which lays a theoretical foundation for the evaluation of irreducible water saturation of elastic rocks. The study has practical implications for the determination of irreducible water saturation of elastic rock with lower costs and high precision.

Keywords: Grain size analysis of elastic rocks; Irreducible water saturation equation; Specific surface area; Water film thickness; Mass fraction; Rock bulk density; Whole rock X-ray diffraction; Clay minerals

0 前言

目前,确定碎屑岩油藏束缚水饱和度的方法很多,归纳起来主要有岩心实验分析法^[1-14]、经验公式法^[14-17]和测井解释法^[14-23]。其中经验公式法和测井解释法确定碎屑岩束缚水饱和度的精度较低,特别是测井解释法,由于测井资料覆盖面广,虽然解释精度有限,但在油气藏勘探开发研究中应用十分普遍。测井解释法主要包括电阻率测井解释法和核磁共振测井解释法等,其中核磁共振测井解释法主要用于特殊岩性油气藏的评价研究,由于其成本高,在常规碎屑岩地区录取较少,应用也十分有限。岩心实验分析法包括岩心直接分析法和岩心间接分析法,岩心直接分析法精度最高,但密闭取心分析束缚水饱和度的成本高,而采用常规取心的岩心间接分析法确定束缚水饱和度应用广泛,精度仅低于岩心直接分析法的精度。岩心间接分析法包括压汞曲线法、相渗曲线法和核磁共振 T_2 谱法等。在实际应用中,由于多数有取心井的评价单元并无饱和度方面的分析数据,如何将有限的常规岩心分析数据应用到饱和度评价之中,即利用物性、粒度、黏土矿物含量、全岩 X 衍射等分析项目解决碎屑岩束缚水饱和度的评价问题,既能充分利用宝贵的取心资料,又能提供一种经济实用、便捷高效、精度较高的束缚水饱和度评价方法。通过对国内外求取碎屑岩束缚水饱和度的现状调研^[1-23],目前还没有检索到采用粒度等常规岩心分析资料求取束缚水饱和度方面的参考文献,因此利用粒度等常规岩心分析资料求取束缚水饱和度还是一个全新的命题。文章试图从碎屑岩束缚水饱和度的形成机理分析入手,利用常规岩心分析数据解决碎屑岩束缚水饱和度定量评价问题,既降低了成本,又提高了束缚水饱和度的解释精度,为油气藏资源评价及油气藏开发奠定了可靠的资料基础。

1 碎屑岩束缚水饱和度形成机理

从碎屑岩束缚水的赋存状态分析^[24-25],碎屑岩束缚水饱和度受控于碎屑颗粒的比表面积、表面能和碎屑矿

物的亲水性。一方面,碎屑颗粒越细,特别是黏土矿物含量越高,则比表面积越大^[26-27],并具有较高的表面能,表面能越大的碎屑颗粒意味着能吸附更多的水,这些水就是束缚水;另一方面,碎屑矿物的亲水性是矿物表面引力形成结合水的能力,碎屑矿物的亲水性越强,吸附能力就越强,束缚水含量也越多。当碎屑岩比表面积一定时,表面能越强、亲水性越强,则束缚水水膜就越厚,束缚水饱和度也越大;同时碎屑颗粒表面越不规则(凹凸不平),束缚水水膜就越厚。水膜厚度还与油藏高度等因素密切相关。因此,如果能准确求取碎屑岩比表面积、碎屑颗粒表面束缚水水膜厚度、碎屑岩总孔隙度及碎屑岩体积密度等相关参数,就能利用常规岩心分析数据相对客观地确定碎屑岩束缚水饱和度。

2 碎屑岩比表面积

碎屑岩比表面积是指单位体积岩石中碎屑颗粒的总表面积与岩石总体积之比。单位碎屑岩的碎屑颗粒表面积大小与碎屑颗粒数量、质量分数、分选、磨圆、粒级^[28]等因素密切相关,见表 1。一般而言,粒径越小,单位体积碎屑岩的比表面积越大^[16];当粒径接近时,分选差的单位体积碎屑岩比表面积较大。

单位体积碎屑岩比表面积数学表达式:

$$S_R = \frac{A}{V_{ma} + \phi_t} = A \quad (1)$$

$$S_m = \frac{S_R}{\rho_b} \quad (2)$$

$$\rho_b = \rho_{ma}(1 - \phi_t) + \rho_{wt}\phi_t \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=1}^N A_i = \pi \sum_{i=1}^N (N_i d_i^2) \quad (4)$$

式中: A 为单位体积碎屑岩中碎屑颗粒总表面积, μm^2 ; A_i 为碎屑岩粒度分析第 i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 级碎屑颗粒表面积, μm^2 ; d_i 为碎屑岩粒度分析第 i 级碎屑颗粒直径(碎屑颗粒用十进制分级时, d_1 代表泥质、 d_2 代表细粉砂、 d_3 代表粗粉砂、 d_4 代表细砂、 d_5 代表中砂、 d_6 代表粗砂、 d_7 代表细砾,实验室做粒度分析时无法对中砾级及以上粒级颗粒取样分析;碎屑颗粒用 2 的几何级数制分

级时, d_1 代表黏土、 d_2 代表细粉砂、 d_3 代表中粉砂、 d_4 代表粗粉砂、 d_5 代表极细砂、 d_6 代表细砂、 d_7 代表中砂、 d_8 代表粗砂、 d_9 代表极粗砂、 d_{10} 代表卵石), μm ; N 为碎屑岩粒度分析中的粒级数, 级; N_i 为碎屑岩粒度分析第 i 级碎屑颗粒数量, 个; S_R 为单位体积碎屑岩比表面积, $\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$; S_m 为单位质量碎屑岩比表面积, m^2/g ; V_{ma} 为

单位体积碎屑岩骨架总体积, μm^3 ; ϕ_t 为碎屑岩总孔隙度; ρ_b 为碎屑岩体积密度, g/cm^3 ; ρ_{ma} 为碎屑岩骨架密度, g/cm^3 ; ρ_{wf} 为地层水密度, g/cm^3 。

碎屑岩骨架密度的计算是根据全岩 X 衍射分析值及黏土矿物分析数据和相应矿物骨架密度, 采用加权调和平均值通过式(5)~(7)求取。矿物骨架密度见表 2^[29-30]。

表 1 碎屑颗粒粒度分级表

Tab. 1 Clastolite grain size classification

十进制				2 的几何级数制				
粒级划分		d_i /mm	d_i /μm	粒级划分		d_i /mm	d_i /μm	ϕ 值 *
泥质		$d_i < 0.01$	$d_i < 10$	黏土		$2^{-10} \leq d_i < 2^{-8}$	$1.00 \leq d_i < 3.90$	$-10 \leq \phi < -8$
粉砂	细粉砂	$0.01 \leq d_i < 0.05$	$10 \leq d_i < 50$	粉砂	极细粉砂	$2^{-8} \leq d_i < 2^{-7}$	$3.90 \leq d_i < 7.80$	$-8 \leq \phi < -7$
					细粉砂	$2^{-7} \leq d_i < 2^{-6}$	$7.80 \leq d_i < 15.60$	$-7 \leq \phi < -6$
砂	粗粉砂	$0.05 \leq d_i < 0.10$	$50 \leq d_i < 100$		中粉砂	$2^{-6} \leq d_i < 2^{-5}$	$15.60 \leq d_i < 31.20$	$-6 \leq \phi < -5$
					粗粉砂	$2^{-5} \leq d_i < 2^{-4}$	$31.20 \leq d_i < 62.50$	$-5 \leq \phi < -4$
	细砂	$0.10 \leq d_i < 0.25$	$100 \leq d_i < 250$	砂	极细砂	$2^{-4} \leq d_i < 2^{-3}$	$62.50 \leq d_i < 125.00$	$-4 \leq \phi < -3$
					细砂	$2^{-3} \leq d_i < 2^{-2}$	$125.00 \leq d_i < 250.00$	$-3 \leq \phi < -2$
砾	中砂	$0.25 \leq d_i < 0.50$	$250 \leq d_i < 500$		中砂	$2^{-2} \leq d_i < 2^{-1}$	$250.00 \leq d_i < 500.00$	$-2 \leq \phi < -1$
					粗砂	$2^{-1} \leq d_i < 2^0$	$500.00 \leq d_i < 1\ 000.00$	$-1 \leq \phi < 0$
	粗砂	$0.50 \leq d_i < 1.00$	$500 \leq d_i < 1\ 000$		极粗砂	$2^0 \leq d_i < 2^1$	$1\ 000.00 \leq d_i < 2\ 000.00$	$0 \leq \phi < 1$
					砾	卵石	$2^1 \leq d_i < 2^2$	$2\ 000.00 \leq d_i < 4\ 000.00$
	中砾	$10 \leq d_i < 100$	$10^4 \leq d_i < 10^5$		砾石	$2^2 \leq d_i < 2^6$	$4.00 \times 10^3 \leq d_i < 6.40 \times 10^4$	$2 \leq \phi < 6$
	粗砾	$100 \leq d_i < 1\ 000$	$10^5 \leq d_i < 10^6$		中砾	$2^6 \leq d_i < 2^8$	$6.40 \times 10^4 \leq d_i < 2.56 \times 10^5$	$6 \leq \phi < 8$
	巨砾	$d_i \geq 1\ 000$	$d_i \geq 10^6$		巨砾	$d_i \geq 2^8$	$d_i \geq 2.56 \times 10^5$	$\phi \geq 8$

注: * 1934 年克鲁宾 (Krumbein) 将伍登—温特沃斯 (Udden-Wentworth) 的粒级划分转化为 ϕ 值, 即将几何级数标度转化为 ϕ 值标度。当粒径用毫米单位时 $\phi = -\log_2 d = -\log_2 2^n = -n, d = 2^{-n} = 2^{-\phi}$; 当粒径用微米单位时 $\phi = -\log_2 (d/1\,000) = -\log_2 2^n = -n, d = 10^3 \times 2^{-n} = 10^3 \times 2^{-\phi}$ 。

表 2 矿物骨架密度表

Tab. 2 Mineral density

矿物名称	结构式	骨架密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
石英	SiO_2	2.650
正长石(碱性长石亚族)	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2.570
钠长石(斜长石亚族)	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] \cdot \text{Ca}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2.620(2.610~2.760)
方解石	CaCO_3	2.715
白云石	$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$	2.860
方沸石	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_7\text{H}_2$	2.280(2.220~2.290)
黄铁矿	FeS_2	5.000
赤铁矿	Fe_2O_3	5.130(5.000~5.260)
菱铁矿	FeCO_3	3.960
硬石膏(硫酸钙)	CaSO_4	2.960
石膏(含水硫酸钙)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.320
岩盐、石盐(氯化钠)	NaCl	2.165
白云母	$\text{K}_2\text{Al}_4[\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	2.880(2.760~3.000)
黑云母	$\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_6[\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$	3.070(3.020~3.120)
海绿石	$\text{K}_{<2}(\text{Fe}, \text{Al})_4[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	2.500(2.200~2.800)
伊利石	$\text{K}_{0.75}(\text{Al}_{1.75}, \text{Mg}, \text{Fe})_4[\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	2.780(2.600~2.900)
蒙脱石	$(0.5\text{Ca}, \text{Na})_{0.66}\text{Al}_{3.34}\text{Mg}_{0.66}[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2.500(2.000~3.000)
高岭石	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	2.600
绿泥石	$\{\text{Mg}_6[\text{Al}_x\text{Si}_{8-x}\text{O}_{20}](\text{OH})_4\}^{x-} \cdot \{\text{Mg}_{6-x}\text{Al}_x\text{Si}_{8-x}(\text{OH})_{12}\}^{x+}$	2.940(2.600~3.300)

$$\bar{\rho}'_c = \frac{\sum_{k=1}^n w_{ck}}{\sum_{k=1}^n \frac{w_{ck}}{\rho_{ck}}} \quad (5)$$

$$\bar{\rho}'_{ma} = \frac{\sum_{l=1}^{M-1} w_{xl}}{\sum_{l=1}^{M-1} \frac{w_{xl}}{\rho_{xl}}} \quad (6)$$

$$\rho_{ma} = \frac{\bar{\rho}'_{ma} \sum_{l=1}^{M-1} w_{xl} + \bar{\rho}'_c w_{xl}}{\sum_{l=1}^M w_{xl}} \quad (7)$$

式中: k 为分析黏土矿物种类, 类; M 为全岩 X 衍射分析的矿物种类 (其中最大的 M 值代表黏土类), 类; w_{ck} 为第 k ($k=1, 2, 3, \dots, n$) 类黏土矿物质量分数; w_{xl} 为全岩 X 衍射分析的黏土矿物质量分数; w_{xl} 为全岩 X 衍射分析的第 l ($l=1, 2, 3, \dots, M$) 类矿物质量分数; $\bar{\rho}'_c$ 为碎屑岩中黏土矿物骨架密度平均值, g/cm^3 ; ρ_{ck} 为第 k 类黏土矿物骨架密度, g/cm^3 ; $\bar{\rho}'_{ma}$ 为碎屑岩中黏土矿物以外的矿物骨架密度平均值, g/cm^3 ; ρ_{xl} 为全岩 X 衍射分析第 l 类矿物骨架密度, g/cm^3 。

碎屑岩粒度分析的碎屑颗粒质量分数与碎屑颗粒数量、碎屑颗粒直径及碎屑颗粒骨架密度之间的关系式为:

$$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\pi N_i \rho_{mai} d_i^3}{6m} \quad (8)$$

式中: m 为单位体积碎屑岩质量, g ; m_i 为碎屑岩粒度分析中第 i 级碎屑颗粒质量, g ; w_i 为碎屑岩粒度分析中第 i 级碎屑颗粒质量分数; ρ_{mai} 为碎屑岩粒度分析中第 i 级碎屑颗粒骨架密度, g/cm^3 。

在实际应用中碎屑颗粒骨架密度一般分两部分: 一部分为泥质 (含黏土) 骨架密度, 采用 $\bar{\rho}'_c$ 值, 即 $\bar{\rho}'_{mai} = \bar{\rho}'_c$; 另一部分为砾砂级碎屑颗粒骨架密度, 采用 $\bar{\rho}'_{ma}$ 值, 即 $\rho_{mai} = \bar{\rho}'_{ma}$, 其中 $i \neq 1$ 。

对地层条件下单位体积碎屑岩, 碎屑颗粒质量等于碎屑岩体积密度:

$$m = \rho_b V = \rho_b \quad (9)$$

式中: V 为单位碎屑岩体积, μm^3 。

将式(9)代入式(8)得:

$$N_i = \frac{6\rho_b w_i}{\pi \rho_{mai} d_i^3} \quad (10)$$

将式(10)代入式(4)及式(1)得碎屑岩比表面积经典数学表达式:

$$S_R = 6\rho_b \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\rho_{mai} d_i} \quad (11)$$

3 束缚水水膜厚度

碎屑岩中的束缚水一般以毛管水和薄膜水的形式

存在。由于不能流动的毛管水和薄膜水厚度均属纳米级, 因此又称“纳米膜”或“束缚水膜”。在油气藏中束缚水膜是一个受诸多因素影响的变量, 且通过计算束缚水膜体积可计算碎屑岩束缚水饱和度。通过分析束缚水膜影响因素, 可进一步认识碎屑岩储层的含油喉道半径在不同油气藏中的变化规律。1953 年国外学者提出扩展的 Young-Laplace 公式^[31-32]:

$$p_{cR} = 2c\sigma_R + p_{dR} \quad (12)$$

式中: p_{cR} 为油藏条件下的毛管压力, MPa ; c 为水膜所在固体表面的平均曲率 (凹面曲率为正, 凸面曲率为负, 平面曲率为零); σ_R 为油藏条件下油水界面 (指孔隙中的油与水的接触面) 张力, N/m ; p_{dR} 为水膜在油水界面和固水界面之间的排斥力, 即水膜的分离压力, MPa 。

1948 年 Halsey G 根据实验结果给出水膜的分离压力与束缚水膜厚度之间的关系式^[33]:

$$p_{dR} = \frac{a}{h_{wf}^b} \quad (13)$$

式中: a 为常数; h_{wf} 为束缚水膜厚度, $h_{wf} > 0.0025 \mu\text{m}$; b 为束缚水膜指数, $b \geq 3$ 。

常数 a 是根据 Gee M L 的实验成果^[34], 在室温条件下测得空气—无离子水—强亲水石英表面体系的 a 值为 1.18×10^{-7} 。

束缚水膜所在固体表面的平均曲率与孔喉半径成反比^[35]:

$$c = \frac{f}{r_H} \quad (14)$$

式中: f 为常数, $f = 0.5$; r_H 为碎屑岩储层平均喉道半径, μm 。

油藏条件下毛管压力的经典表达式^[36]:

$$p_{cR} = \frac{2\sigma_R \cos\theta_R}{r_H} \quad (15)$$

式中: θ_R 为油藏条件下油水两相流体的润湿接触角, $\theta_R = 34^\circ$ 。

众所周知, 油藏的毛管压力是由油水的重力差来平衡的, 因此毛管压力可表示为^[35]:

$$p_{cR} = 10^{-3} g_0 H (\rho_{wf} - \rho_{of}) \quad (16)$$

式中: H 为自由水面以上油藏高度, m ; g_0 为标准重力加速度, $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$; ρ_{of} 为地层油密度, g/cm^3 。

式(12)~(16)联立得:

$$h_{wf}^b = \frac{10^3 a}{g_0 H (\rho_{wf} - \rho_{of}) \left(1 - \frac{f}{\cos\theta_R}\right)} \quad (17)$$

将相应参数代入式(17)得:

$$h_{wf}^b = \frac{3.03172673 \times 10^{-5}}{H (\rho_{wf} - \rho_{of})} \quad (18)$$

附着在碎屑颗粒表面的束缚水膜厚度不是一个固

定值,会随着温度压力等条件的变化而变化。在地层条件下,束缚水膜厚度是油藏高度、油水密度差、碎屑颗粒润湿性等参数的函数。在式(18)中,束缚水膜指数($b \geq 3.0$)随油藏高度增大而逐渐变小,一般在3.0~6.5之间变化。碎屑岩孔隙中的束缚水膜是由几十甚至几百个水分子“紧密”排列形成。根据已知单个水分子直径0.31~0.39 nm,当10个水分子“紧密”排列时,形成的束缚水膜厚度为3.5 nm。

在实际油气藏中,碎屑岩储层的束缚水膜主要分布在2.5~200.0 nm之间。油气藏高度越大,束缚水膜越薄,但最薄厚度一般不会小于2.5 nm。

4 束缚水饱和度

碎屑岩比表面积与束缚水膜厚度的乘积等于单位岩石束缚水体积,束缚水饱和度等于束缚水体积与碎屑岩总孔隙度的比值,因此有:

$$V_{wi} = \phi_t S_{wi} = S_R h_{wf} \tag{19}$$

$$h_{wf} = \frac{\phi_t S_{wi}}{S_R} = \frac{\phi_t S_{wi}}{S_m \rho_b} = \frac{\phi_t S_{wi}}{S_m [\rho_{ma} (1 - \phi_t) + \rho_{wf} \phi_t]} \tag{20}$$

$$S_{wi} = \frac{V_{wi}}{\phi_t} = \frac{S_R h_{wf}}{\phi_t} = \frac{6 \rho_b h_{wf}}{\phi_t} \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\rho_{mai} d_i} \tag{21}$$

$$S_{wi} = \frac{6 h_{wf}}{\phi_t} \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\rho_{mai} d_i} \left[\frac{\left(\sum_{l=1}^{M-1} w_{xl} \right)^2}{\sum_{l=1}^M w_{xl} \sum_{l=1}^{M-1} \frac{w_{xl}}{\rho_{xl}}} + \frac{w_{xl} \sum_{k=1}^n w_{ck}}{\sum_{l=1}^M w_{xl} \sum_{k=1}^n \frac{w_{ck}}{\rho_{ck}}} \right] \frac{1}{(1 - \phi_t) + \phi_t \rho_{wf}} \tag{22}$$

式中: V_{wi} 为单位体积碎屑岩束缚水总体积, μm^3 ; S_{wi} 为碎

屑岩束缚水饱和度。

式(21)和式(22)即粒度资料评价碎屑岩束缚水饱和度的通用方程。

5 应用实例

用粒度资料计算碎屑岩束缚水饱和度需要捋清几个问题:一是在泥质中黏土占比需由全岩X衍射分析资料确定,当有多个分析样品时,需采用厚度加权平均值计算评价单元的典型全岩X衍射分析数据;二是实际粒度资料划分几个粒级,每个粒级的粒径取值(上限值、下限值、中间值)需薄片鉴定或实际岩心观察后确定(一般取下限值的120%),当评价单元有多个粒度分析样品时,每个粒级均采用厚度加权平均值计算评价单元的典型粒度分析数据;三是评价单元总孔隙度采用与全岩X衍射分析及黏土分析样品对应的岩心分析孔隙度之厚度加权平均值;四是岩石骨架密度需用全岩X衍射定量分析和黏土矿物含量分析数据及相应矿物骨架的加权调和平均值计算,另外,碎屑岩的体积密度分析值可与全岩X衍射及黏土矿物分析值计算的体积密度相互验证。

茨602井粒度分析、黏土矿物含量分析、全岩X衍射分析数据见表3~5,根据表3~5和茨602块的基础参数,阐述茨602块束缚水饱和度的具体计算步骤。

茨602块于2006年度申报探明储量,茨602井位于茨602块的腰部,属构造岩性油藏,油水界面-2 239 m、油藏高度180 m、地层温度71.62℃、地层压力21.61 MPa、地层水矿化度4 845.7 mg/L、地面原油密度0.836 6 g/cm³;茨602井岩心分析样品深度2 168 m,岩心分析孔隙度18.8%;地层原油密度0.723 0 g/cm³、地层水密度0.990 0 g/cm³;束缚水膜指数取6.2。用粒度分析等资料计算该油藏平均束缚水饱和度的步骤如下。

表 3 茨 602 井粒度分析表

Tab.3 Grain size analysis of well Ci 602

样号	顶界深度 /m	粒级	d_i /mm	w_i	分析日期
2009L-15116	2 168.00	泥质	$d_i < 0.01$	11.47%	2005-08-26
		细粉砂	$0.01 \leq d_i < 0.05$	24.20%	
		粗粉砂	$0.05 \leq d_i < 0.10$	31.14%	
		细砂	$0.10 \leq d_i < 0.154$	16.40%	
			$0.154 \leq d_i < 0.25$	10.92%	
		中砂	$0.25 \leq d_i < 0.50$	5.89%	

表 4 茨 602 井黏土矿物分析表

Tab.4 Clay mineral analysis of well Ci 602

样号	分析日期	顶界深度 /m	矿物含量					伊蒙混层比
			蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	
2002L-94183	2005-08-26	2 168	0	67.5%	5.9%	17.4%	9.2%	73.0%

注:伊蒙混层比是指蒙脱石所占比例,余者为伊利石。

表 5 茨 602 井全岩 X 衍射分析表

Tab. 5 Whole rock X-ray diffraction analysis of well Ci 602

样号	分析日期	顶界深度 /m	矿物含量						
			黏土总量	石英	钾长石	斜长石	白云石	菱铁矿	黄铁矿
2002L-92902	2005-08-22	2 168	13.2%	52.2%	5.8%	9.3%	7.3%	1.3%	3.5%

第一步:根据黏土矿物分析和全岩 X 衍射分析以及矿物骨架密度,用加权调和平均值计算岩石骨架密度。

$$\bar{\rho}'_c = \frac{\sum_{k=1}^4 w_{ck}}{\sum_{k=1}^4 \frac{w_{ck}}{\rho_{ck}}} = \frac{0.492\ 75 + 0.241\ 25 + 0.174 + 0.092}{\frac{0.492\ 75}{2.50} + \frac{0.241\ 25}{2.78} + \frac{0.174}{2.60} + \frac{0.092}{2.94}}$$

$$= 2.617\ 14\ \text{g/cm}^3 \quad (23)$$

$$\bar{\rho}'_{ma} = \frac{\sum_{l=1}^6 w_{xl}}{\sum_{l=1}^6 \frac{w_{xl}}{\rho_{xl}}}$$

$$= \frac{0.522 + 0.058 + 0.093 + 0.073 + 0.013 + 0.035}{\frac{0.522}{2.65} + \frac{0.058}{2.57} + \frac{0.093}{2.62} + \frac{0.073}{2.87} + \frac{0.013}{3.96} + \frac{0.035}{5.00}}$$

$$= 2.730\ 74\ \text{g/cm}^3 \quad (24)$$

$$\rho_{ma} = \frac{\bar{\rho}'_{ma} \sum_{l=1}^6 w_{xl} + \bar{\rho}'_c w_{x7}}{\sum_{l=1}^7 w_{xl}}$$

$$= \frac{2.730\ 74 \times 0.794\ 0 + 2.617\ 14 \times 0.132\ 0}{0.926\ 0}$$

$$= 2.714\ 55\ \text{g/cm}^3 \quad (25)$$

第二步:根据岩心分析孔隙度和地层可动水密度计算岩石体积密度。

$$\rho_b = \rho_{ma}(1 - \phi_t) + \rho_{wf}\phi_t$$

$$= 2.714\ 55 \times (1 - 0.188) + 0.990\ 0 \times 0.188$$

$$= 2.390\ 335\ \text{g/cm}^3 \quad (26)$$

第三步:根据粒度分析资料计算碎屑岩比表面积。

$$S_R = 6\rho_b \sum_{i=1}^6 \frac{w_i}{\rho_{mai} d_i}$$

$$= 6 \times 2.390\ 335 \times \left(\frac{0.114\ 7}{2.617\ 14 \times 1.2} + \frac{0.242\ 0}{2.730\ 74 \times 12} + \frac{0.311\ 4}{2.730\ 74 \times 60} + \frac{0.164\ 0}{2.730\ 74 \times 120} + \frac{0.109\ 2}{2.730\ 74 \times 185} + \frac{0.058\ 9}{2.730\ 74 \times 300} \right) = 0.668\ 28\ \mu\text{m}^2 / \mu\text{m}^3 \quad (27)$$

第四步:根据油水密度差和油藏高度计算束缚水膜厚度。

采用油藏高度计算出的油藏顶部束缚水饱和度是油藏最小束缚水饱和度。对构造油藏而言,计算油藏平均束缚水饱和度时,平均油藏高度应取实际油藏高度的 1/2;对岩性(或以岩性为主)油藏而言,计算油藏平均束缚水饱和度时,平均油藏高度取实际油藏高度的 1/4,束缚水膜指数取 6.2。

$$h_{wf} = \left(\frac{3.031\ 726\ 73 \times 10^{-5}}{\bar{H}(\rho_{wf} - \rho_{of})} \right)^{1/6.2}$$

$$= \left(\frac{3.031\ 726\ 73 \times 10^{-5}}{45 \times (0.990\ 0 - 0.723\ 0)} \right)^{1/6.2} = 0.125\ 05\ \mu\text{m} \quad (28)$$

第五步:计算束缚水饱和度。

$$S_{wi} = \frac{S_R h_{wf}}{\phi_t} = 44.5\% \quad (29)$$

粒度资料计算茨 602 块束缚水饱和度见表 6。通过实例计算还可得知,黏土矿物含量每增加一个百分点,束缚水饱和度的增加量都大于 3%,可见黏土矿物含量是影响束缚水饱和度变化的主要原因之一。

表 6 粒度资料计算茨 602 块束缚水饱和度表

Tab. 6 Calculation of irreducible water saturation of block Ci 602 based on grain size data

粒级	$d_i / \mu\text{m}$	粒径计算 选值	w_i	ϕ_t	$\rho_{mai} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho_{of} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho_{wf} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	H / m	$h_{wf} / \mu\text{m}$	S_{wi}
泥质	$d_i < 10$	1.2	11.47%	18.8%	2.617 14	0.723 0	0.990 0	180	0.125 05	44.5%
细粉砂	$10 \leq d_i < 50$	12	24.20%		2.730 74					
粗粉砂	$50 \leq d_i < 100$	60	31.14%							
细砂	$100 \leq d_i < 154$	120	16.40%							
	$154 \leq d_i < 250$	185	10.92%							
中砂	$250 \leq d_i < 500$	300	5.89%							

用粒度分析等资料计算茨 602 块束缚水饱和度为 44.5% ,与岩心分析法的压汞资料确定油藏平均束缚水

饱和度 46.3% 相比精度相当,且明显优于测井解释法得出的束缚水饱和度 42.1% ,见表 7。

表 7 茨 602 块用粒度资料计算束缚水饱和度误差分析表

Tab.7 Error analysis of calculating irreducible water saturation with grain size data in block Ci 602

评价单元	束缚水饱和度			测井解释		粒度计算	
	岩心分析法	测井解释法	粒度资料计算	绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差
茨 602 块	46.3%	42.1%	44.5%	4.2%	9.1%	1.8%	3.9%

6 结论

1) 当束缚水膜厚度一定时,黏土含量是碎屑岩束缚水饱和度最大影响因素,黏土矿物质量分数每增加一个百分点,束缚水饱和度至少增加 3% 。

2) 碎屑岩束缚水饱和度与束缚水膜厚度和比表面积的乘积成正比,与岩石总孔隙度成反比。

3) 计算碎屑岩比表面积时,碎屑颗粒粒径取相应粒级粒径下限值的 120% 。

4) 评价单元有多个分析样品时,其质量分数采用厚度加权平均值得到一组评价单元的典型数据,对这组典型数据要重新计算每种矿物及每个粒级的质量分数。

5) 采用粒度分析等资料计算构造油藏平均束缚水饱和度时,平均油藏高度取实际油藏高度的 1/2;计算岩性油藏平均束缚水饱和度时,平均油藏高度取实际油藏高度的 1/4。

参考文献:

[1] 胡学军,杨胜来,蒋利平,等. 温度对亲水岩心束缚水饱和度的影响[J]. 油气地质与采收率,2004,11(5):46-48.
HU Xuejun, YANG Shenglai, JIANG Liping, et al. The effect of temperature on irreducible water saturation of water-wet core [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(5): 46-48.

[2] 桂婷婷,魏 东,王继平,等. 气藏束缚水饱和度实验测试与机理[J]. 大庆石油地质与开发,2017,36(1):81-84.
GUI Tingting, WEI Dong, WANG Jiping, et al. Experimental test and mechanism of the irreducible water saturation for gas reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 81-84.

[3] 吴 伟,李英杰,肖文华,等. 利用压汞实验确定岩心麻皮系数——以鸭儿峡油田白垩系为例[J]. 科学技术与工程,2020,20(11):4236-4242.
WU Wei, LI Yingjie, XIAO Wenhua, et al. Core uneven coefficient processing based on mercury injection experiment: A case of cretaceous glutenite reservoir in Yaerxia oilfield, Gansu, NW China[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4236-4242.

[4] 张全培,王海红,刘美荣,等. 超低渗透储层全孔径分布及其分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(6):1137-1149.
ZHANG Quanpei, WANG Haihong, LIU Meirong, et al. Study of the full pore size distribution and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1137-1149.

[5] 罗治形,蒋志斌,苏海斌,等. 压汞方法在不同类型储层研究中的应用[J]. 新疆石油天然气,2019,15(4):33-36.
LUO Zhixing, JIANG Zhibin, SU Haibin, et al. Application of mercury injection test in reseraching different types of reservoirs[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(4): 33-36.

[6] 王剑峰,毕研斌,李景发,等. 基于瞬时进汞饱和度的毛细管压力曲线储层评价方法[J]. 大庆石油学院学报,2010,34(2):54-59.
WANG Jianfeng, BI Yanbin, LI Jingfa, et al. A new method to evaluate reservoir with capillary pressure curve by means of instantaneous mercury injection saturation [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(2): 54-59.

[7] 张 磊,乔向阳,张 亮,等. 鄂尔多斯盆地旬邑探区延长组储层特征和开发效果[J]. 石油学报,2020,41(1):88-95.
ZHANG Lei, QIAO Xiangyang, ZHANG Liang, et al. Reservoir characteristics and development performance of yanchang formation in xunyi exploration area Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 88-95.

[8] 张 冲,张超谟,张占松,等. 黏土束缚水对压汞毛细管压力曲线的影响及校正[J]. 科技导报,2014,32(2):44-49.
ZHANG Chong, ZHANG Chaomo, ZHANG Zhansong, et al. Effect of clay bound water on the mercury injection capillary pressure curves and the correction [J]. Science and Technology Guide, 2014, 32(2): 44-49.

[9] 秦亚东,吴永彬,刘鹏程,等. 温度对稠油油藏油水相对渗透率影响规律的实验研究[J]. 油气地质与采收率,2018,25(4):121-126.
QIN Yadong, WU Yongbin, LIU Pengcheng, et al. Experimental study on effect of temperature on oil-water relative permeability in heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4): 121-126.

- [10] 吴一雄,胡向阳,杨冬,等.一种基于毛细管压力资料获取岩心束缚水饱和度的新方法[J].地质科技情报,2018,37(5):100-105.
WU Yixiong, HU Xiangyang, YANG Dong, et al. A new method of obtaining core irreducible water saturation based on capillary pressure curve [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5): 100-105.
- [11] 鲁瑞彬,王雯娟,胡琳,等.高温高压气藏衰竭开发气水相渗变化规律探讨[J].中国海上油气,2020,32(2):88-95.
LU Ruibin, WANG Wenjuan, HU Lin, et al. Discussion on the changes laws of gas-water relative permeability in the depletion development of HTHP gas reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 88-95.
- [12] 李威,李伟,闫正和,等.考虑相渗时变数值模拟历史拟合方法及应用[J].天然气与石油,2021,39(1):67-73.
LI Wei, LI Wei, YAN Zhenghe, et al. Numerical simulation historical matching method and its application considering the relative permeability time-dependent [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(1): 67-73.
- [13] 张言辉.基于物性预测相对渗透率的改进神经网络方法[J].天然气与石油,2020,38(3):44-49.
ZHANG Yanhui. Improved neural network method for predicting relation permeability based on physical properties [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(3): 44-49.
- [14] 李宁,周克明,张清秀,等.束缚水饱和度实验研究[J].天然气工业,2002,22(增刊):110-113.
LI Ning, ZHOU Keming, ZHANG Qingxiu, et al. Experimental research on irreducible water saturation [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(Suppl): 110-113.
- [15] 张冲,毛志强,金燕.基于实验室条件下的核磁共振测井束缚水饱和度计算方法研究[J].核电子学与探测技术,2010,30(4):514-518.
ZHANG Chong, MAO Zhiqiang, JIN Yan. Experimental studies of NMR logging irreducible water saturation [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(4): 514-518.
- [16] 高华,高楚桥,胡向阳.莺歌海盆地束缚水饱和度影响因素研究[J].石油物探,2005,44(2):158-159.
GAO Hua, GAO Chuqiao, HU Xiangyang. Influential factors of irreducible water saturation in Yinggehai [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(2): 158-159.
- [17] 陈嵘,李奎,胡向阳,等.莺琼盆地X-X气田束缚水饱和度评价[J].海洋石油,2018,38(4):67-71.
CHEN Rong, LI Kui, HU Xiangyang, et al. X-X gas field bound water saturation evaluation in Yingqiong Basin [J]. Offshore Oil, 2018, 38(4): 67-71.
- [18] 谢进庄,吴锡令.利用生产测井资料估算油水相对渗透率曲线[J].石油勘探与开发,2004,34(2):64-66.
XIE Jinzhuang, WU Xiling. Estimation of oil water relative permeability curves from production logging data [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 34(2): 64-66.
- [19] 李振林,李戈理,程道解,等.基于核磁共振T2谱储层产水率测井评价技术[J].测井技术,2020,44(1):67-72.
LI Zhenlin, LI Geli, CHENG Daojie, et al. Log evaluation technology for reservoir water production based on NMR T2 spectra [J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 67-72.
- [20] 吴见萌,张筠,葛祥,等.核磁测井解决致密碎屑岩束缚水饱和度计算难题[J].石油工业计算机应用,2017,25(1):56-59.
WU Jianmeng, ZHANG Jun, GE Xiang, et al. Nuclear magnetic logging solves the problem of calculating irreducible water saturation of tight elastic rocks [J]. Computer Applications of Petroleum, 2017, 25(1): 56-59.
- [21] 付晨东.用核磁共振测井资料确定束缚水饱和度的新方法[J].测井技术,2011,35(3):243-253.
FU Chendong. A new method to determine irreducible water saturation with NMR log data [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(3): 243-253.
- [22] 庞振宇,李艳,赵习森,等.特低渗储层可动流体饱和度研究——以甘谷驿油田长6储层为例[J].地球物理学进展,2017,32(2):702-708.
PANG Zhenyu, LI Yan, ZHAO Xisen, et al. Study on movable fluid saturation in ultra-low permeability reservoir: Taking chang 6 reservoir in Ganguyi oil field as an example [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 702-708.
- [23] 崔晗.大庆油田某区块核磁伪毛管压力曲线转换及应用[J].国外测井技术,2020,41(2):40-48.
CUI Han. Conversion and application of nuclear magnetic pseudo capillary pressure curve in a block of Daqing oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2020, 41(2): 40-48.
- [24] 张岩,王勇飞,高伟,等.川西拗陷致密气藏束缚水赋存状态与产出机理[J].石油地质与工程,2020,34(5):59-62.
ZHANG Yan, WANG Yongfei, GAO Wei, et al. Occurrence state and production mechanism of bound water in tight gas reservoirs in western sichuan depression [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(5): 59-62.
- [25] 周宗良,张凡磊,王怀忠,等.低渗砂岩储层毛管孔道应力与孔隙水膜赋存状态探讨[J].新疆地质,2017,35(3):320-324.
ZHOU Zongliang, ZHANG Fanlei, WANG Huaizhong, et al. Study of capillary channel pressure and pore water-film occurrence of low permeability sandstone reservoir [J]. Xinjiang Geology, 2017, 35(3): 320-324.
- [26] 邓帅,胡高伟,卜庆涛.粒径及孔径分布对天然气水合物形成影响的研究进展[J].地质科技情报,2019,38(4):41-52.
DENG Shuai, HU Gaowei, BU Qingtao. Research progress

- on the effects of particle size and pore size distribution on natural gas hydrate formation [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4): 41-52.
- [27] 童祐嵩. 颗粒粒度与比表面积测量原理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- TONG Husong. Measurement principle of particle size and specific surface area [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, 1989.
- [28] 华东石油学院教研室. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- Chief Editor of the Teaching and Research Office of East China Petroleum University. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982.
- [29] 刘显凡, 孙传敏. 矿物学简明教程[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 2010.
- LIU Xianfan, SUN Chuanmin. Concise course in mineralogy [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [30] 斯伦贝谢测井公司. 测井解释常用岩石矿物手册[M]. 吴庆岩, 张爱军, 译. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- Schlumberger Logging Company. Handbook of rocks and minerals commonly used in logging interpretation [M]. WU Qingyan, ZHANG Aijun, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [31] DERJAGUIN B V, CHURAEV N V, MULLER V M. Surface forces [M]. New York: Consultants Bureau, 1987.
- [32] 杨宇, 周文, 姜平, 等. 对致密气藏水膜厚度的再认识[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 94-102.
- YANG Yu, ZHOU Wen, JIANG Ping, et al. Re-recognition of water film thickness in tight gas reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 94-102.
- [33] HALSEY G. Physical adsorption of non-uniform surface [J]. Journal of Chemical Physics, 1948, 16(10): 931-935.
- [34] GEE M L, THOMAS W H, WHITE L R. Hydrophobicity effects in the condensation of water films on quartz [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1990, 140(2): 450-465.
- [35] 贺承祖, 华明琪. 油气藏中水膜的厚度[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 75-77.
- HE Chengzu, HUA Mingqi. The thickness of water film in oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(2): 75-77.
- [36] 杨通佑, 范尚炯, 陈元千, 等. 石油及天然气储量计算方法[M]. 第二版. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- YANG Tongyou, FANG Shangjiong, CHEN Yuanqian, et al. Calculation method of oil and gas reserves [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.

国产抗硫非金属复合连续管达到国际领先水平

2022年9月28日,工程材料研究院研发的抗硫非金属复合连续管,在中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定会上顺利通过了专家鉴定。鉴定表明,该产品达到国际领先水平,耐温、耐腐蚀性能出众,具备良好的经济、社会效益,能为油气田平稳运行和高效开发提供有力保障。

含硫化氢是我国西部油气资源的重要特征。在现有技术条件下,抗硫合金管线造价居高不下,而抗硫碳钢管线因为加注缓蚀剂导致加注成本高、管理难度大。基于腐蚀治理及降本增效的双重需求,耐腐蚀性优良的非金属管材成为含硫油气输送用管的一个重要发展方向。

工程材料研究院凭借多年在非金属和复合材料领域的深入研究,突破了管材结构设计、选材评价、质量评定、现场应用、运营维护和寿命评估等技术瓶颈,采用高阻隔、耐高温、抗溶胀的热塑性塑料作为内衬层,开发出国内首个抗硫非金属复合连续管,并于2020年获批成为集团公司自主创新重要产品。它可长期在110摄氏度的环境下服役,设计最高输气压力提升至16兆帕,最高硫化氢分压达2500千帕,性能指标超过国际标准。

抗硫非金属复合连续管比常用的825镍基合金双金属复合管成本降低约22%,与国外同类技术相比施工成本降低40%以上。同时,解决了合金产品腐蚀穿孔的问题,使用寿命预计可提升2到3倍,有效降低失效事故带来的环境污染。据悉,该产品拥有21件核心专利,其中发明专利13件、新型实用专利8件。研发的同时,工程材料研究院配套在国内首次建立了基于服役工况条件下的全尺寸实物管材性能评价技术体系,制修订国家及行业标准10余项,全面提升了我国油气田地面非金属管道的应用水平。

该产品在塔里木油田示范应用超过4.8千米。经后期多次取样评价证明,该产品具有良好的服役安全性和稳定性,满足酸性气体集输工艺使用要求,有望替代金属耐蚀管材,成为解决酸性气田集输管道腐蚀失效、降低管道建设投资的有力抓手。据悉,该产品进一步优化后还可应用于井下智能连续管和海洋非金属复合管,为国内油气开发提供有力支持。