

原油体积系数理论方程推导及应用

康志勇 陈 洋 刘曙光 韩明伟 闫鑫洋

中国石油 辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010

摘 要:原油体积系数是勘探开发过程中认识、评价油藏的重要参数,由于直接获取原油体积系数数据的原油高压物性(PVT)分析法受取样成本和取样条件等限制,造成绝大多数评价单元该资料缺失,目前最常用的类比法或经验公式法确定的原油体积系数精度明显偏低。为解决这一问题,以原油体积系数定义为理论基础推导并建立了原油体积系数理论方程。在实际应用方面,新建原油体积系数理论方程明显优于体积系数定义给出的理论方程,新方程涉及的参数均可以在地面条件下通过取样分析等方式获取。用新方程计算原油体积系数不仅大幅降低了原油 PVT 取样分析成本,计算精度也由经验公式的 89.4% 提升到新方程的 96.5%,应用范围可扩展到油藏勘探开发任何阶段,具有推广应用价值。

关键词:原油体积系数;气油比;地层油密度;地面原油密度;高压物性;理论方程

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.010

Derivation and Application of Crude Oil Volume Factor Theoretical Equation

Kang Zhiyong, Chen Yang, Liu Shuguang, Han Mingwei, Yan Xinyang

Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning, 124010, China

Abstract: The volume factor of crude oil is an important parameter for the understanding and evaluation of oil reservoirs in the process of exploration and development. Most of the evaluation unit information is missing due to the limitations of the high-pressure physical property(PVT) analysis of crude oil with direct access to crude oil volume factor data, such as sampling costs and conditions. The accuracy of the volume factor of crude oil determined by the currently most commonly used analogy or empirical formula method is significantly lowered. In order to solve this problem, the theoretical equation of crude oil volume factor is derived and established based on the definition of crude oil volume factor. In practical application, the newly established theoretical equation of crude oil volume factor is obviously superior to the one given in the definition of volume factor. The parameters involved in the new equation can be obtained by sampling analysis under ground conditions. The crude oil volume factor calculated by the new equation not only significantly reduces the cost of crude oil PVT sampling analysis, but also increases the calculation accuracy from 89.4% in the empirical formula to 96.5% in the new equation. The application range can

收稿日期:2020-09-17

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

作者简介:康志勇(1964-),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,硕士,主要从事油气藏参数评价等研究工作。E-mail:1377211037@qq.com

be widened to any stage of oil reservoir exploration and development, and embraces great value for promotion.

Keywords: Crude oil volume factor; Gas-oil ratio; Formation oil density; Surface crude oil density; PVT; Theoretical equations

0 前言

原油体积系数是指地层条件下单位体积原油与地面条件(20 ℃、0.101 325 MPa)下脱气原油体积的比值,原油体积系数是勘探开发过程中认识、评价油藏的重要参数。高压物性(PVT)取样分析是获取原油体积系数最直接有效的方法^[1-6]。由于原油高压物性分析及配套的高压物性取样操作要求高、取样及分析成本高,造成绝大多数评价单元缺乏原油高压物性分析获取的原油体积系数数据。目前获取原油体积系数应用的类比法和经验公式法都是采用相应构造带或油区、油田内的资料建立的^[7-16],跨构造带、跨油区,甚至跨油田应用时通常会产生较大误差,无法满足油田开发研究和生产的要求。建立精度高、适应范围广的原油体积系数评价新方法十分必要。

1 原油体积系数定义及特点

原油体积系数是指地层条件下单位体积原油与地面条件下脱气原油体积的比值:

$$B_{oi} = \frac{V_{of}}{V_o} \quad (1)$$

式中: B_{oi} 为原油体积系数; V_{of} 为地层油体积, m^3 ; V_o 为地面条件下脱气原油体积, m^3 。

石油从油层流动到井筒,再流动到储油罐,随着压力下降,溶解气中的绝大部分甲烷和乙烷会释放出来,还有相当大一部分丙烷、丁烷和戊烷也会从石油中释放出来。流体组分的变化不是一个简单过程,也不是一个确定过程,而是一系列闪蒸分离和差异分离的过程^[17]。闪蒸分离过程和差异分离过程的区别:在闪蒸分离过程中,所有气体与液体始终保持接触,使体系的体积随压力下降而增大,闪蒸分离过程是一个组分不变,体积变化的过程。在差异分离过程中,一些气体释放出来后,与液相不再接触,差异分离过程是一个体积不变,组分变化的过程^[18]。

当原油中溶解气量较少时,闪蒸分离和差异分离数据之间的差异很小。在这种情况下,差异分离后留下的残余物质与闪蒸分离的原油体积近乎相等,因此在原油地质储量评价时可直接应用差异分离获取的原油体积系数。

当原油具有高挥发性时,应充分考虑油藏内、井筒

内及地面分离设施内所发生的主要气体分离机理,此时,地层原油体积系数可能更接近闪蒸分离数据。对高挥发性原油而言差异分离和闪蒸分离获得的原油体积系数还是有较大差别^[19]。

通过上述分析不难看出,决定原油体积系数大小的主控因素是石油中的溶解气含量。实际高压物性分析资料也证实,原油体积系数与溶解气油比呈很高的正相关关系^[20]。

$$B_{oi} = 1 + \left(\frac{R_{si}}{321} \right)^{1/1.02}, (n = 307, r = 0.986 8) \quad (2)$$

式中: R_{si} 为原始溶解气油比或生产气油比, m^3/m^3 。

当然,原油体积系数还与原油密度等因素密切相关^[20],但原油体积系数和与之相关的诸因素之间存在怎样的函数关系,统计规律无法给出准确答案。

针对原油体积系数定义中的“地层油体积”及相应的“地面脱气原油体积”只有通过高压物性取样分析才能获取的实际情况,本研究以原油体积系数定义为基础,依据原油质量、密度和体积等参数之间的关系,通过严格的数学推导将原油体积系数定义中难以直接获取的“地层油体积”和“地面脱气原油体积”转换为井口极易取样分析的“地面脱气原油密度”“生产气油比”“溶解气密度”等参数,从而提出本研究的理论公式法,并为无高压物性分析资料的评价单元开展资源/储量评价提供了一种合理高效的原油体积系数确定方法。

2 体积系数理论方程推导

在原油体积系数定义中,地层油体积和地面条件下脱气原油体积可根据原油质量、原油密度和原油体积之间的函数关系求取。

$$V_{of} = \frac{10^{-3} m_{of}}{\rho_{of}} \quad (3)$$

$$V_o = \frac{10^{-3} m_o}{\rho_o} \quad (4)$$

式中: m_{of} 为地层油质量(含溶解气),kg; m_o 为20 ℃地面脱气原油质量,kg; ρ_o 为20 ℃地面脱气原油密度, g/cm^3 ; ρ_{of} 为地层油密度, g/cm^3 。

将式(3)、(4)代入式(1),则原油体积系数定义的公式形式可变为:

$$B_{oi} = \frac{\rho_o}{\rho_{of}} \times \frac{m_{of}}{m_o} \quad (5)$$

在式(5)中,脱气前后的原油质量差等于溶解气质量,而溶解气质量是溶解气体积与溶解气密度的乘积:

$$m_{\text{of}} - m_{\text{o}} = V_{\text{g}} \rho_{\text{g}} \quad (6)$$

式中: V_{g} 为地面条件下溶解气体积, m^3 ; ρ_{g} 为地面条件下溶解气密度, kg/m^3 。

将式(4)、(5)与式(6)联立,得原油体积系数另一种形式的数学表达式:

$$B_{\text{oi}} = \frac{\rho_{\text{o}}}{\rho_{\text{of}}} + \frac{10^{-3} V_{\text{g}} \rho_{\text{g}}}{V_{\text{o}} \rho_{\text{of}}} \quad (7)$$

由于地面条件下的单位体积原油在地层条件下所溶解的天然气体积称为溶解气油比,其数学表达式为:

$$R_{\text{si}} = \frac{V_{\text{g}}}{V_{\text{o}}} \quad (8)$$

将式(7)与式(8)联立得:

$$B_{\text{oi}} = \frac{\rho_{\text{o}} + 10^{-3} R_{\text{si}} \rho_{\text{g}}}{\rho_{\text{of}}} \quad (9)$$

式(9)即为计算原油体积系数之理论方程。当评价单元没有实际高压物性分析样品时,可通过生产井较易取得的原油和溶解气样品,分析后得到地面脱气原油密度、溶解气组分及溶解气密度;通过油气产量可获得评价单元生产气油比(地层压力高于饱和压力时的生产数据),再结合评价单元地层温度或气油比等参数获取地层油密度^[20],最后采用原油体积系数理论方程求取目标油藏的原油体积系数。

对溶解气含量极低或不含溶解气的稠油油藏,计算

原油体积系数的理论方程(9)可简化为:

$$B_{\text{oi}} = \frac{\rho_{\text{o}}}{\rho_{\text{of}}} \quad (10)$$

计算稠油油藏原油体积系数,特别是计算超稠油油藏原油体积系数时可采用简化的原油体积系数理论方程(10),并能满足稠油油藏储量评价时的精度要求。

3 实测数据对比分析

3.1 实例 1

稀油样品溶解气组分分析数据见表 1、稀油样品体积系数实验分析数据见表 2,依据表 1 和表 2 数据^[3-4],分别采用经验公式(2)和新建理论方程(9)计算原油体积系数,对比分析两个公式计算的误差情况。

由经验公式(2)计算原油体积系数平均相对误差为 10.59%,由新建理论方程(9)计算原油体积系数平均相对误差为 3.49%,稀油样品体积系数计算值及误差分析见表 3。

3.2 实例 2

典型稠油样品高压物性分析数据见表 4,依据表 4 数据^[5-6],分别采用经验公式(2)和新建原油体积系数理论方程的简化式(10)计算原油体积系数,对比分析两个公式计算的误差情况。

采用经验公式(2)及新建原油体积系数理论方程的简化式(10)计算稠油区块原油体积系数平均相对误差分别为 1.88% 和 0.84%,稠油样品体积系数计算值及误差分析见表 5。

表 1 稀油样品溶解气组分分析表

Tab. 1 Light oil solution gas composition analysis

井块	天然气摩尔组分/(%)									
	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆	CO ₂	N ₂
高深 1	74.57	13.43	5.51	1.43	1.42	0.45	0.38	0.11	—	—
S 48	82.80	6.86	6.10	0.81	0.81	0	0	0	2.31	3.30
G 942	79.07	5.43	5.74	1.30	1.01	0.30	0.25	0.23	3.43	3.24
F 154	62.70	6.64	8.63	2.46	2.00	1.03	0.50	0.40	4.39	11.25

表 2 稀油样品体积系数实验分析数据表

Tab. 2 Volume factor experimental analysis data of light oil samples

井块	基础参数			PVT 分析参数			
	$t/^\circ\text{C}$	p_{R}/MPa	$\rho_{\text{o}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	p_{b}/MPa	$\rho_{\text{of}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$R_{\text{si}}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	B_{oi}
高深 1	134.0	133.17	0.812 7	29.15	0.699 2	256.9	1.481 4
S 48	124.0	59.70	0.948 0	19.8	0.855 4	66.0	1.167 7
G 942	128.0	42.80	0.875 0	7.0	0.825 0	37.4	1.040 9
F 154	123.0	34.84	0.865 0	15.0	0.797 1	66.0	1.117 1

注: p_{R} 为地层压力, p_{b} 为饱和压力,下同。

表 3 稀油样品体积系数计算值及误差分析表

Tab.3 Light oil volume factor calculated value and the error analysis

井块	$\rho_g /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$B_{\text{oi分析}}$	$B_{\text{oi计算}}$		绝对误差		相对误差 /(%)	
			经验公式	理论方程	经验公式	理论方程	经验公式	理论方程
高深 1	0.927 2	1.481 4	1.803 8	1.503 1	0.322 4	0.021 7	21.76	1.46
S 48	0.933 3	1.167 7	1.212 1	1.180 3	0.044 4	0.012 6	3.80	1.08
G 942	0.946 0	1.040 9	1.121 5	1.103 5	0.080 6	0.062 6	7.74	6.01
F 154	1.114 7	1.117 1	1.212 1	1.177 5	0.101 1	0.060 4	9.05	5.41
平均	0.980 3	1.201 8	1.337 4	1.241 1	0.137 1	0.039 3	10.59	3.49

表 4 稠油样品体积系数实验分析数据表

Tab.4 Volume factor experimental data analysis of heavy oil samples

区块	基础参数			PVT 分析参数			
	$t / ^\circ\text{C}$	p_R / MPa	$\rho_o / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	p_b / MPa	$\rho_{\text{oi}} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$R_{\text{si}} / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	B_{oi}
嫩江	19.6	4.60	0.945 4	0.26	0.924 7	0.15	1.027 8
B 区	58.0	13.24	0.970 5	9.27	0.922 8	23.0	1.063 8

表 5 稠油样品体积系数计算值及误差分析表

Tab.5 Heavy oil volume factor calculated value and the error analysis

区块	$B_{\text{oi分析}}$	$B_{\text{oi计算}}$		绝对误差		相对误差 /(%)	
		经验公式	理论方程	经验公式	理论方程	经验公式	理论方程
嫩江	1.027 8	1.000 5	1.022 4	0.027 3	0.005 4	2.66	0.53
B 区	1.063 8	1.075 5	1.051 7	0.011 7	0.012 1	1.10	1.14
平均	1.045 8	1.038 0	1.037 0	0.019 5	0.008 8	1.88	0.84

通过实例分析,无论是稀油还是稠油,分别采用新建原油体积系数理论方程(9)和理论方程的简化方程(10)计算原油体积系数平均相对误差均小于 3.5%,说明该理论方程具有较高的计算精度;由于地面原油密度、溶解气组分等易取样品的分析成本远低于高压物性取样分析成本,因此采用新建理论方程(9)或(10)计算原油体积系数成本低、实用性强,有很高的推广应用价值。

4 结论

1) 根据原油体积系数定义建立的原油体积系数理论方程,经实验数据验证,计算精度由经验公式的 89.4% 提升到新建理论方程的 96.5%,满足了三级储量评价的精度要求,可在油藏勘探开发任何阶段广泛应用。

2) 在没有高压物性取样的评价单元,可对生产井地面原油和溶解气进行取样分析,用获取的地面原油密度和溶解气密度及生产气油比等参数计算原油体积系数,与 PVT 取样分析对比,可大幅降低评价单元原油体积系数分析成本。

参考文献:

- [1] 张 伟. 高压物性取样技术在雅达油田的成功应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 68-70.
Zhang Wei. Successful Application of PVT Technology in Yada Oilfield [J]. Well Testing, 2016, 25 (5): 68-70.
- [2] 郭沙沙, 梅海燕, 王怀龙, 等. 不同注入气对裂缝性油藏原油高压物性的影响[J]. 天然气与石油, 2014, 32(6): 61-64.
Guo Shasha, Mei Haiyan, Wang Huailong, et al. Effect of Different Injected Gases on High Pressure Physical Property of Crude Oil in Fractured Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (6): 61-64.
- [3] 梁宝兴, 周 伟, 刘 勇, 等. 四棵树凹陷高探 1 井流体特征及油藏类型分析[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 152-155.
Liang Baoxing, Zhou Wei, Liu Yong, et al. Fluid Features and Reservoir Types in Well Gaotan-1 in Sikesu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40 (2): 152-155.
- [4] 李爱芬, 王守龙, 吕 姣, 等. 地层原油组成差异对高压物性参数的影响[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 299-302.

- Li Aifen, Wang Shoulong, Lü Jiao, et al. Effect of the Composition of Formation Crude Oil on PVT Data [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35 (3): 299 - 302.
- [5] 于少君,郭庆军,王晓芳,等. 大庆油田稠油原油物性实验分析研究[J]. 当代化工,2007,36(4):458 - 460.
- Yu Shaojun, Guo Qingjun, Wang Xiaofang, et al. Experimental Analytic Study on Viscous Crude Oil Physical Properties in Daqing Oilfield [J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36 (4): 458 - 460.
- [6] 董长友,冀胜利,来建宾,等. 海上油田稠油原油物性实验分析研究[J]. 石化技术,2019,26(6):161 - 162.
- Dong Changyou, Gong Shengli, Lai Jianbin, et al. Experimental Study on the Physical Properties of Heavy Oil Crude Oil in Offshore Oil Field [J]. Petrochemical Technology, 2019, 26 (6): 161 - 162.
- [7] 郑俊德,张洪亮. 油气田开发与开采[M]. 北京:石油工业出版社,2004:4 - 6.
- Zheng Junde, Zhang Hongliang. Oil and Gas Field Development and Production [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 4 - 6.
- [8] 李玉蓉. 提高地层原油体积系数计算精度的方法[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(4):434 - 437.
- Li Yurong. Method of Enhancing Calculation Precision of Crude Oil Volume Factor [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39 (4): 434 - 437.
- [9] 张爱华. 原油原始气油比与体积系数的经验公式探究[J]. 断块油气田,2007,14(5):38 - 39.
- Zhang Aihua. Study on Empirical Equation of Initial Gas-Oil Ratio and Volume Factor [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14 (5): 38 - 39.
- [10] 柳锦云. 辽河盆地潜山油藏高压物性计算方法研究[J]. 石油地质与工程,2007,21(3):55 - 57.
- Liu Jinyun. Calculation Method and Research of Properties Under High Pressure in Buried Hill Reservoir of Liaohe Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21 (3): 55 - 57.
- [11] 李会会,李文杰,周生福. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏高压物性及最小混相驱压力实验研究[J]. 复杂油气藏,2018,11(1):57 - 61.
- Li Huihui, Li Wenjie, Zhou Shengfu. Experimental Study on PVT and the Minimum Miscible Pressure of Carbonate Fractured-Cavity Reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11 (1): 57 - 61.
- [12] 胡绍彬,徐庆龙,郭玲玲,等. 采出液含水对生产气油比的影响规律[J]. 石油学报,2018,39(1):116 - 121.
- Hu Shaobin Xu Qinglong, Guo Lingling, et al. Influence of Water Cut of Produced Liquid on Produced Gas-Oil Ratio [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39 (1): 116 - 121.
- [13] 吴春新,张言辉,周凤军,等. 黄河口凹陷流体 PVT 特征参数预测方法研究[J]. 中国石油大学胜利学院学报,2017,31(3):13 - 15.
- Wu Chunxin, Zhang Yanhui, Zhou Fengjun, et al. Study on Prediction Method of Fluid PVT Characteristic Parameters in Huanghekou Sag [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2017, 31 (3): 13 - 15.
- [14] 王静伟,计秉玉,张文彪. 基于多因素的油田可采储量不确定性分析[J]. 中国海上油气,2016,28(4):76 - 82.
- Wang Jingwei, Ji Bingyu, Zhang Wenbiao. Uncertainty Analysis of Oilfield Recoverable Reserves Based on Multi-Factors [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28 (4): 76 - 82.
- [15] 刘海涅,杨玉卿,刘海波,等. 一种定量判别储层流体性质的新方法[J]. 长江大学学报(自科版),2016,13(5):26 - 30.
- Liu Hainie, Yang Yuqing, Liu Haibou, et al. A New Method for Quantitative Identifying Fluid Property in Reservoirs [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13 (5): 26 - 30.
- [16] 李家燕. 改进的裂缝油藏注气物质平衡方程及储量计算[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(6):43 - 48.
- Li Jiayan. Modified Material Balance Equation for the Gas Injection in Fractured Oil Reservoirs and the Reserves Calculation [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37 (6): 43 - 48.
- [17] Kang Zhiyong, Zhao Zhigang, Li Huanbao, et al. Static Reserve Estimation Method Based on SEC Guidelines [J]. China Oil & Gas, 2013, 20 (3): 14 - 19.
- [18] 王永祥. 油气储量评估方法[M]. 张君峰,毕海滨,段晓文译. 2 版. 北京:石油工业出版社,2012:8 - 320.
- Wang Yongxiang. Determination of Oil and Gas Reserves [M]. Zhang Junfeng, Bi Haibin, Duan Xiaowen, trans. 2nd ed. Beijing:Petroleum Industry Press, 2012: 8 - 320.
- [19] Craft B C, Hawkins M F. Applied Petroleum Reservoir Engineering [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1956: 86 - 181.
- [20] 康志勇. 油气藏参数评价方法[M]. 北京:石油工业出版社,2013:73 - 76,143 - 144.
- Kang Zhiyong. Evaluation Method of Oil and Gas Reservoir Parameters [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 73 - 76,143 - 144.