

油田经济极限井网密度计算新方法

黄金山

(中国石化集团油田勘探开发事业部,北京 100728)

摘要:经济合理的井网密度对提高油藏波及系数和最终采收率至关重要,是油田调整开发方案的依据。针对谢尔卡乔夫公式计算井网密度的结果与生产实际不符的问题,从理论及方法上对经济井网密度进行了系统阐述,明确了目前常用井网密度的内涵和外延,重新界定了经济极限井网密度的定义,在此基础上对谢尔卡乔夫公式进行了修正完善,建立了新的适合于中国石化不同油区和不同类型油藏计算经济极限井网密度的经验公式。根据各区不同类型油藏实际的储量丰度和油藏流度统计数据,结合修正的谢尔卡乔夫公式对中国石化5个主力油区及各油区的中高渗透、低渗透和稠油3种不同类型油藏的经济极限井网密度进行了计算。结果表明,东部5个主力油区和不同类型油藏在油价为80美元/bbl时可钻加密井分别为20 515和19 366口。

关键词:最终采收率 谢尔卡乔夫公式 经济极限井网密度 油藏类型 开发潜力

中图分类号: TE313.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)03-0053-03

2006年以来,国际油价逐渐走高,油田开发经济技术政策随之发生明显变化,原先采用的技术指标界限和经济指标界限已不能适应目前油田高效开发的需要。井网密度作为油田生产的重要参数,是油田调整制订开发方案的主要依据。稀井网、大压差对保持油井长期稳产不利,而密井网又会降低油田开发的经济效益。因此,选择合理的经济极限井网密度对油田生产和开发规划编制具有重要的意义。

谢尔卡乔夫公式是目前油田计算井网密度的主要手段^[1-2]。由于谢尔卡乔夫公式求取的油井早期单井可采储量与实际生产不吻合,笔者根据油区的实际情况对其进行了修改完善,建立了适合于中国石化不同油区和不同类型油藏的计算经济极限井网密度的经验公式。通过加强对经济极限井网密度的研究,以期在提高油田开发效益的同时,进一步提升开发方案的决策水平。

1 计算公式的建立

1.1 采收率与井网密度的关系

20世纪60年代,谢尔卡乔夫通过对油田开发末期采收率数据的整理、分析和研究,确定了采收率与井网密度之间的关系式^[1]为

$$E_R = E_D e^{-\frac{a}{f}} \quad (1)$$

式中: E_R 为油藏最终采收率; E_D 为油藏驱油效率; a 为井网指数; f 为井网密度,口/km²。

由式(1)可知,油藏最终采收率随井网密度增大呈指数形式增加。因此,单井增加可采储量为

$$\Delta N_R = V \frac{dE_R}{df} = VE_D a \frac{1}{f^2} e^{-\frac{a}{f}} \quad (2)$$

式中: ΔN_R 为单井增加可采储量,10⁴ t; V 为储量丰度,10⁴ t/km²。

由式(2)可得到单井增加可采储量随井网密度的变化趋势(图1)。由图1可以看出:在油田开发早期,随着井网密度的增加,单井增加可采储量是增大的,当井网密度达到一定规模时,单井增加可采

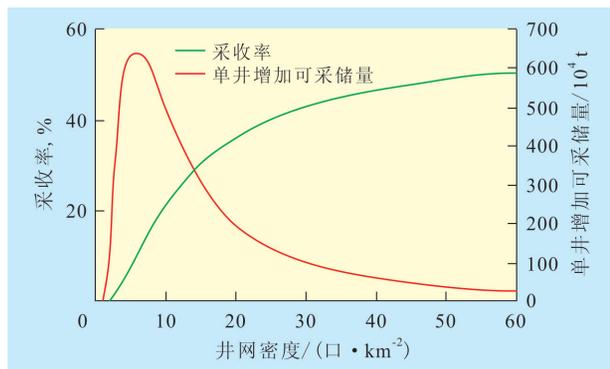


图1 采收率和单井增加可采储量与井网密度的关系

收稿日期:2013-03-07。

作者简介:黄金山,男,高级工程师,硕士,从事油田开发研究及管理工作。联系电话:(010)59968519,E-mail:huangjs@sinopec.com。
基金项目:中国石化油田开发先导项目“高油价下油田开发经济技术政策界限研究”(G5800-07-ZS-YTB022)。

储量开始呈指数形式下降;采收率随着井网密度的增加呈指数形式增加。但是该结果并不符合油田生产实际开发情况。

对于地质储量和含油面积相对规模较大的油气田来说,由于在开发早期的预探或试采阶段井与井之间不存在相互干扰,此时单井增加可采储量最大,且是定值,采收率随着井网密度的增加而增加,该阶段可看作是油田开发的第 I 阶段(图2)。当油田开发进入中后期,随着井数增多,井间发生干扰,此时,油藏采收率随井网密度的增大未呈线性增大,而是以指数形式增加,而单井增加可采储量开始呈指数形式下降,该阶段为油田开发的第 II 阶段(图2)。由此可见,谢尔卡乔夫公式仅适用于油田开发中后期,在油田开发早期应用时须对其进行修正完善。

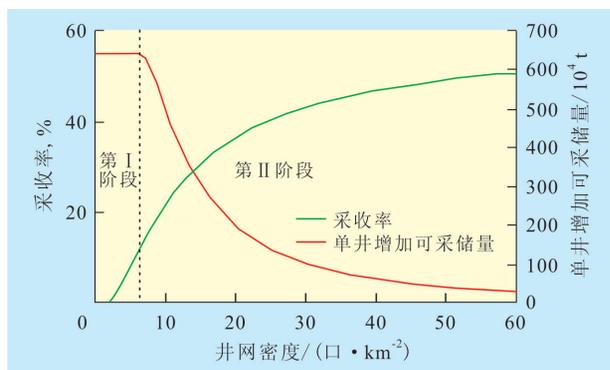


图2 修正后采收率和单井增加可采储量与井网密度的关系

1.2 经济极限井网密度的内涵和定义

计算经济极限井网密度的方法主要有净现值法、将来值法等^[3-9]。目前,对经济井网密度的定义主要有经济最优井网密度、经济极限井网密度和经济合理井网密度3种,但对其内涵的界定不统一^[10-11]。概括来说,这3种经济井网密度都是从项目评价的角度来定义的,即将油藏剩余可采储量作为一个经济单元来看待。依照该前提,以上3种经济井网密度可以分别定义为:①当项目的累积净现值达到最大时的钻井数量为经济最优井网密度,最后一口加密井刚好达到经济平衡;②当累积净现值为0时的井网密度即为经济极限井网密度,此时当井网密度达到最优后继续钻井,尽管该井净现值是亏损的,但对于整个区块或油田来说整体还是有效益的;③在经济最优井网密度附近根据油田开发实际情况所选择的井网密度为经济合理井网密度。因为目前在油田开发实际过程中对于评价无效益的井是不可能实施钻探的,即油井数量最多达到经

济最优井网密度范围,上述定义中的经济极限井网密度并不符合油田开发实际,因此,该定义在油田生产中并没有实际意义;而经济合理井网密度由于对最后一口加密井的盈亏无法准确界定其范围,因此在实际生产中不具备可操作性;根据油田实际开发情况,单位面积上最后一口加密井新增可采储量的价值等于这口井基本建设总投资和投资回收期内操作费用的总和,经济效益刚好平衡,此时的井网密度为经济最优井网密度,最后一口单井新增可采储量称为单井经济极限可采储量^[9]。由于经济极限井网密度是油田开发的常用术语,通过重新定义,可以确定此时的经济最优井网密度就是经济极限井网密度。

综上所述,经济极限井网密度需要结合单井效益来定义,应该摒弃原先的评价思路,根据经济极限井网密度的内涵以及油田开发的实际情况,依据单井的经济极限可采储量来确定经济极限井网密度。

1.3 计算公式

为了准确计算经济极限井网密度,首先要根据各地区不同类型油藏实际情况计算或估算出单井经济极限可采储量界限,然后通过修正后的谢尔卡乔夫公式,结合不同油区、不同油藏类型的储量丰度和油藏流度计算经济极限井网密度。

对于中国石化不同类型油藏最终采收率与井网密度的关系,管纪昂等利用谢尔卡乔夫公式分析了144个油藏开发单元的资料,按油藏流度求取了5种油藏类型的最终采收率与井网密度的关系式^[12-13](表1)。

表1 中国石化不同油藏最终采收率与井网密度的关系

油藏类型	开发单元数/个	油藏流度/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot (\text{mPa} \cdot \text{s})^{-1}$)	E_R 与 f 关系式
I	13	300 ~ 600	$E_R = 0.603 1e^{-0.020 12 \frac{1}{f}}$
II	27	100 ~ 300	$E_R = 0.550 8e^{-0.023 54 \frac{1}{f}}$
III	67	30 ~ 100	$E_R = 0.522 7e^{-0.026 35 \frac{1}{f}}$
IV	19	5 ~ 30	$E_R = 0.483 2e^{-0.054 23 \frac{1}{f}}$
V	18	<5	$E_R = 0.401 5e^{-0.101 48 \frac{1}{f}}$

利用中国石化各油田的开发资料,进一步研究并分析了驱油效率、油藏流度、井网密度和采收率之间的关系,建立了新的井网密度与采收率的关系式,即

$$E_R = 0.2715 \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{0.06971} \exp \left[-\frac{12.843}{f} \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.302815} \right] \quad (3)$$

式中： K_a 为空气渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ_o 为地层原油粘度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

式(3)是对井网密度与采收率关系的一种量化改进,用此关系可以对油藏的采收率进行研究。

将式(3)代入式(2)中,得到单井增加可采储量计算式为

$$\Delta N_R = V \frac{dE_R}{df} = 3.4913V \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.23311} \times \frac{1}{f^2} \exp \left[-\frac{12.843}{f} \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.302815} \right] \quad (4)$$

将各油区的实际单井极限可采储量界限值代入式(4),通过迭代方法即可求得相对应的经济极限井网密度。

2 应用实例

统计中国石化东部5个主力油区的储量丰度和油藏流度,针对不同油价之下5个主力油区以及各油区的中高渗透、低渗透和稠油3种类型油藏的经济极限井网密度进行了计算。

2.1 主力油区经济极限井网密度

依据中国石化东部5个主力油区的实际投资、成本、税费及油藏实际情况,计算了油价为50~100美元/bbl时的经济极限井网密度(表2)。通过计算可知,在油价为80美元/bbl时,胜利油区、中原油区、河南油区、江苏油区和江汉油区可钻加密井数量分别为14 801,1 791,1 032,845和2 046口,共计20 515口。

油区	油 价 / (美元·bbl ⁻¹)					
	50	60	70	80	90	100
胜利	13.81	14.39	15.01	15.65	16.32	17.03
中原	11.49	12.70	14.01	15.43	16.98	18.66
河南	17.83	19.69	21.80	24.17	26.85	29.89
江苏	12.45	13.66	14.96	16.36	17.88	19.52
江汉	10.91	12.22	13.64	15.18	16.86	18.70

2.2 不同类型油藏经济极限井网密度

根据中国石化各油区已投入开发的油藏单元基础资料,对不同类型油藏的采收率与油藏流度和井网密度的关系进行了拟合,分别得到了其经济极

限井网密度拟合公式,中高渗透、低渗透和稠油油藏的单元经济极限井网密度公式分别为

$$E_R = \left[0.359 + 0.065 \lg \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right) \right] \exp \left[-\frac{10.728}{f} \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.025} \right] \quad (5)$$

$$E_R = \left[0.3 + 0.025 \lg \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right) \right] \exp \left[-\frac{8.7283}{f} \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.01249} \right] \quad (6)$$

$$E_R = \left[0.33 + 0.058 \lg \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right) \right] \exp \left[-\frac{25.86}{f} \left(\frac{K_a}{\mu_o} \right)^{-0.285} \right] \quad (7)$$

依据2011年中国石化各油区不同类型油藏实际单井年操作费用、钻井投资、地面投资等经济参数,计算得到经济极限井网密度(表3),进而确定了油价为80美元/bbl时,各油区中高渗透、低渗透和稠油油藏可钻加密井数量分别为9 162,9 254和950口,共计19 366口。

表3 中国石化不同类型油藏经济极限井网密度 口/km²

油藏类型	油 价 / (美元·bbl ⁻¹)				
	50	60	70	80	100
中高渗透	13.63	14.49	15.39	13.63	17.03
低渗透	12.81	13.74	14.72	12.81	18.66
稠油	19.94	21.79	23.73	19.94	29.89

目前中国石化依照油田开发规划已在东部主力油区部署新钻开发井6 730口,按照目前的加密井潜力测算,老油区未来仍有较大开发潜力。

3 结束语

针对谢尔卡乔夫公式计算井网密度的结果与生产实际不符的问题,在前人研究成果的基础上从理论及方法上对经济极限井网密度进行了系统阐述,明确了目前常用极限井网密度的内涵和外延,重新界定了经济极限井网密度的定义,并对谢尔卡乔夫公式进行修正完善,建立了中国石化不同油区和不同类型油藏经济极限井网密度的经验公式。根据各油区的储量丰度和油藏流度,结合该经验公式对中国石化5个主力油区及各油区的中高渗透、低渗透和稠油3种不同类型油藏的经济极限井网密度进行了计算,中国石化东部主力油区和不同类型油藏在油价为80美元/bbl时可钻加密井数量分别为20 515和19 466口。

(下转第59页)