

·专家论坛·

# 考虑孔隙波及特征的水驱理论采收率计算方法

王端平

(中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257001)

**摘要:**特高含水期矿场开发实践证明,在水驱开发方式不变、平面和垂向波及系数极高的情况下,继续水驱仍可以较大幅度提高油藏采收率;而传统的理论采收率计算方法不能解释上述现象,也不能从理论上指导特高含水期进一步提高采收率的工作方向。从压汞、核磁共振检测和可视化微观驱油实验3个方面对岩石孔隙波及特征进行了分析,结果表明,驱替过程实际是孔隙波及程度不断增大的过程,在较小的驱替动力和注水倍数条件下无法波及的一些孔隙,随着驱替动力和注水倍数的增加,将进一步被波及进而参与渗流;随着驱替剂(水)的继续注入,已波及孔隙的波及范围不断增大。在此基础上提出孔隙波及系数的概念,即为波及区域内的被驱替剂(水)占据的体积与波及区域内的可动油体积之比,建立了引入孔隙波及系数的水驱理论采收率计算方法;其采收率为平面波及系数、垂向波及系数、孔隙波及系数和驱油效率的乘积,增大孔隙波及系数是特高含水期提高水驱采收率的主要方向。

**关键词:**水驱采收率 平面波及系数 垂向波及系数 孔隙波及系数 体积波及系数 驱油效率

**中图分类号:** TE341

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)05-0001-03

水驱是目前应用最广泛的油藏开发方式,油藏水驱采收率一直是油田开发研究最注重的技术指标之一<sup>[1-6]</sup>。传统的理论采收率定义为驱油效率、平面波及系数和垂向波及系数的乘积<sup>[7-8]</sup>。在油藏特征和开发方式确定的情况下,由于原始含油饱和度和残余油饱和度为定值,因此驱油效率也是确定的<sup>[9-10]</sup>。根据传统理论采收率的定义,当平面波及系数和垂向波及系数极高时,继续水驱将难以进一步提高油藏采收率。然而,特高含水期矿场实践发现,即使在水驱方式不变且平面波及系数和垂向波及系数极高的情况下,继续水驱,仍然可以大幅度提高油藏的采出程度。室内实验驱替结果表明<sup>[11]</sup>,除了平面波及系数和垂向波及系数不断增大,孔隙波及程度也不断增大;一方面被波及的孔隙数目增多,另一方面已波及孔隙中的波及范围增大。传统理论采收率的体积波及系数的定义仅能反映平面波及系数和垂向波及系数对采收率的影响,却难以体现油藏水驱过程中岩石孔隙的波及特征,即反映了油层体积波及状况对采收率的影响,却未体现含油孔隙体积波及状况与采收率之间的关系。为此,笔者提出孔隙波及系数的概念,并推导出一种新的考虑含油孔隙体积波及状况的理论采收率计算方法,以期特高含水期油藏的开发提供参考。

## 1 岩石孔隙波及特征

### 1.1 压汞实验中的岩石孔隙波及特征

压汞实验表明,随着注入压力的不断增大,汞不断进入较小的孔隙。从典型压汞曲线(图1)可以看出,当驱替压力较小时,汞只能进入较大的孔隙;随着驱替压力的增大,则会进入更小的孔隙<sup>[12]</sup>。

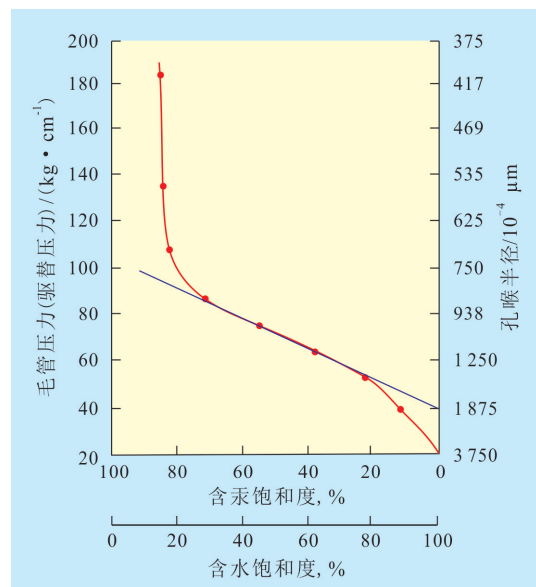


图1 典型压汞曲线

收稿日期:2013-07-18。

作者简介:王端平,男,首席高级专家,教授级高级工程师,博士,从事油气开发研究。联系电话:(0546)8501116, E-mail: wangduanping.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“整装油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2011ZX05011-002)。

### 1.2 核磁共振检测资料显示的岩石孔隙波及特征

核磁共振检测资料显示(图2),随着注入水的孔隙体积倍数(简称注水倍数)的增加,孔隙波及范围不断增大,剩余油分布范围则随之减小。当注水倍数为50时,剩余油主要分布于孔隙半径小于41  $\mu\text{m}$ 的孔隙中;当注水倍数达到100时,剩余油主要分布于孔隙半径小于32  $\mu\text{m}$ 的孔隙中。因此,注水倍数越大,被波及的孔隙数目越多。

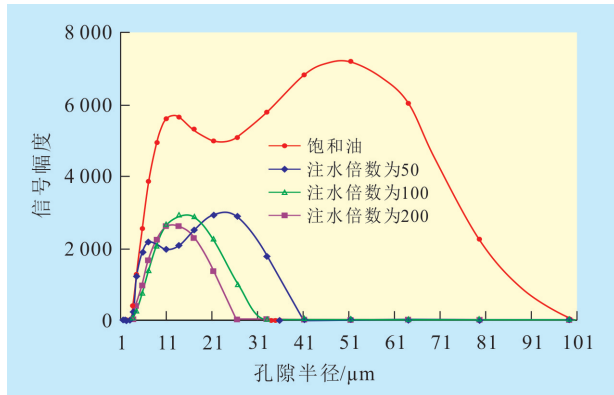


图2 核磁共振检测资料显示的岩石孔隙波及特征

### 1.3 微观驱油条件下的岩石孔隙波及特征

可视化微观驱油实验<sup>[11]</sup>(图3)显示,在水驱油



图3 微观驱油条件下的岩石孔隙波及特征

的过程中,驱替早期、中期和后期已波及的孔隙范围不断增大,含油饱和度不断减小,直至达到残余油饱和度为止。

综上所述,驱替过程实际上是孔隙波及程度不断增大的过程。一方面,在较小的驱替动力和注水倍数条件下无法波及的一些孔隙,随着驱替动力和注水倍数的增加,将进一步被波及进而参与渗流;另一方面,随着驱替剂(水)的继续注入,已波及孔隙的波及范围不断增大。传统的理论采收率的体积波及系数定义为平面波及系数与垂向波及系数的乘积,未反映驱替过程中的孔隙波及变化特征,因此应建立考虑孔隙波及特征的水驱理论采收率计算公式。

## 2 考虑孔隙波及特征的水驱理论采收率计算公式

### 2.1 孔隙波及系数的定义

假设油藏为均质油藏并且刚性水驱,则油藏的原始含油体积为

$$V_{oi} = Ah\phi S_{oi} \quad (1)$$

式中:  $V_{oi}$  为油藏的原始含油体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为含油面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$  为有效厚度,  $\text{m}$ ;  $\phi$  为有效孔隙度;  $S_{oi}$  为原始含油饱和度。

油藏水驱波及区域内的可动油体积和采出的原油体积(地下)分别为

$$V_{om} = A_s h_s \phi (S_{oi} - S_{or}) \quad (2)$$

$$V_{op} = A_s h_s \phi (S_{oi} - S_o) \quad (3)$$

式中:  $V_{om}$  为油藏水驱波及区域内的可动油体积,  $\text{m}^3$ ;  $A_s$  为波及面积,  $\text{m}^2$ ;  $h_s$  为波及厚度,  $\text{m}$ ;  $S_{or}$  为残余油饱和度;  $V_{op}$  为采出的原油体积(地下),  $\text{m}^3$ ;  $S_o$  为剩余油饱和度。

波及区域内驱替剂(水)所占据的体积应等于因驱替剂进入油藏而被采出的原油体积,即

$$V_w = V_{op} \quad (4)$$

式中:  $V_w$  为波及区域内驱替剂(水)占据的体积,  $\text{m}^3$ 。

将波及区域内驱替剂(水)占据的体积与波及区域内的可动油体积之比定义为孔隙波及系数,其表达式为

$$E_\phi = \frac{V_w}{V_{om}} = \frac{S_{oi} - S_o}{S_{oi} - S_{or}} \quad (5)$$

式中:  $E_\phi$  为孔隙波及系数。

由式(5)可以看出,孔隙波及系数越大,则剩余油饱和度越低;当孔隙波及系数趋近于1时,剩余油

饱和度趋近于残余油饱和度。因此,孔隙波及系数体现了含油孔隙体积的波及状况,在水驱过程中应尽量扩大孔隙波及系数,进而降低剩余油饱和度,以达到提高采收率的目的。

## 2.2 理论采收率表达式的推导

根据采收率的定义<sup>[13]</sup>以及式(1)、式(3)可得

$$E_R = \frac{V_{op}}{V_{oi}} = \frac{A_s h_s \phi (S_{oi} - S_{or})}{Ah\phi S_{oi}} \quad (6)$$

式中:  $E_R$  为油藏采收率。

将油藏水驱波及区域内的波及面积与含油面积之比定义为平面波及系数,波及厚度与有效厚度之比定义为垂向波及系数,其表达式分别为

$$E_A = \frac{A_s}{A} \quad (7)$$

$$E_z = \frac{h_s}{h} \quad (8)$$

式中:  $E_A$  为平面波及系数;  $E_z$  为垂向波及系数。

根据驱油效率的定义<sup>[10]</sup>可得

$$E_D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \quad (9)$$

式中:  $E_D$  为驱油效率。

将式(5)、式(7)一式(9)代入式(6),可得到新推导的理论采收率的计算式为

$$E_R = E_A E_z E_\phi E_D \quad (10)$$

传统理论采收率的体积波及系数为平面波及系数与垂向波及系数的乘积,其体现了油层体积波及状况与采收率之间的关系;而式(10)引入了孔隙波及系数,体积波及系数等于平面波及系数、垂向波及系数和孔隙波及系数三者的乘积,因此可以反映出油藏水驱过程中含油孔隙体积波及状况对采收率的影响。在油藏水驱开发过程中,采用井网优化、注采调整、层系细分以及层系重组等调整措施,当平面波及系数和垂向波及系数均达到较高水平甚至接近于1时,即在平面上处处见水、纵向上层层见水的特高含水期,还可以通过改变液流方向、不稳定注水、增大注水压差以及注水倍数等方式,使未波及的孔隙被波及,已波及孔隙的波及范围增大,进而增大孔隙波及系数,以达到提高采收率的目的。

## 3 结束语

提出了孔隙波及系数的概念,并在此基础上建

立了新的理论采收率计算方法。该方法不但能体现油层体积波及状况与采收率之间的关系,还能反映油藏水驱过程中含油孔隙体积波及状况对采收率的影响。该成果可以合理解释在平面波及系数和垂向波及系数不再增大的情况下,继续水驱还能进一步提高油藏采收率的现象,为特高含水期进一步水驱提高采收率提供了理论依据。即使在平面上处处见水、纵向上层层见水的特高含水期,平面波及系数和垂向波及系数已接近于1,难以再提高,也可通过改变液流方向、不稳定注水、增大注水压差和注水倍数等方式,使未波及到的孔隙被波及,已波及孔隙的波及范围增大,进而增大孔隙波及系数,以达到提高油藏采收率的目的。因此,增大孔隙波及系数是特高含水期提高水驱采收率的主要方向,这是一个漫长的开发阶段,更是在技术上和经济上具有挑战性的阶段。

## 参考文献:

- [1] 王建.注采耦合技术提高复杂断块油藏水驱采收率——以临盘油田小断块油藏为例[J].油气地质与采收率,2013,20(3):89-91.
- [2] 李阳.陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J].石油学报,2009,30(3):396-399.
- [3] 徐庆岩,杨正明,何英,等.特低渗透多层油藏水驱前缘研究[J].油气地质与采收率,2013,20(2):74-76.
- [4] 王光付,许坚,王端平.中国石化不同类型断块油藏水驱采收率分析[J].石油勘探与开发,2004,31(4):96-98.
- [5] 方宏长,冯明生.中国东部几个主要油田高含水期提高水驱采收率的方向[J].石油勘探与开发,1999,26(1):40-42.
- [6] 方伟,张居和,冯子辉,等.水驱不同注采位置油藏特征——以萨尔特油田北二西区块油藏为例[J].油气地质与采收率,2012,19(5):100-103.
- [7] 塔雷克·艾哈迈德.油藏工程手册[M].3版(原书影印版).北京:石油工业出版社,2009:932.
- [8] 伍友佳.油藏地质学[M].北京:石油工业出版社,2004:275.
- [9] 何更生.油层物理[M].北京:石油工业出版社,2002:255.
- [10] 才汝成,李阳,孙焕泉.油气藏工程方法与应用[M].东营:石油大学出版社,2002:150.
- [11] G 鲍尔威尔海特.注水[M].刘中民,译.北京:石油工业出版社,1992:45.
- [12] 陈碧珏.油矿地质学[M].北京:石油工业出版社,1987:185-186.
- [13] 郎兆新.油藏工程基础[M].东营:石油大学出版社,1991:28.