

缝洞型碳酸盐岩油藏的等效连续介质模型

徐 轩 杨正明 刘先贵 王学武 杜箫笙

(中国科学院 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘 要:等效连续介质模型是缝洞型碳酸盐岩渗流模型理论的主要研究方向之一,前人针对裂缝性储层建立了等效连续介质模型,但并不适用于孔洞发育的储层。采用毛管束模型、等值渗流阻力原理建立了孔洞型碳酸盐岩油藏渗流的等效连续介质模型。在此基础上,结合已有的裂缝发育区的等效渗透率模型,形成了较完善的缝洞型储层等效渗透率模型,并结合油藏实际情况进行了应用分析。应用结果表明,天然孔洞、裂缝提高了储层渗透率,但同时也加剧了储层的各向异性,所建立的等效连续介质模型是合理的。

关键词:碳酸盐岩;孔洞;储集层;连续介质;渗透率

中图分类号:TE344 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)01-0084-05

世界碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的 60%^[1],因此,碳酸盐岩储层在油气勘探开发中具有重要的地位。然而,碳酸盐岩油气藏的开发一直是一个世界性的难题。目前,虽然国内外针对碳酸盐岩油气藏的地质特征预测和描述已经取得了很大进步,但在开发方面,尤其是数值模拟方面,还存在着许多有待解决的问题。

等效连续介质模型的通用方法是用一个均质的岩块来代替非均质岩块,通过求解物质平衡方程,再加上适合的边界条件,来保证从非均质岩块和均质岩中流出的流体规模和方向都是相同的。Kasap、Lough 等^[2-3]专家和学者都对等效渗透率的计算进行了研究。对于等效连续介质模型^[4],其原则之一是将复杂的流动规律等效为简单的流动规律;二是将不连续的地质模型等效为连续的地质模型。而地质模型的等效可依据水电相似原理,通过串、并联电路的组合加以研究。这两方面的研究,最终可归结为缝洞系统渗透率的等效。为此,笔者建立了孔洞型碳酸盐岩油藏渗流的等效连续介质模型,并在此基础上结合冯金德、刘建军等人^[5-6]已有的裂缝发育区的等效渗透率模型,进一步建立了比较完善的缝洞型储层等效渗透率模型。

1 坐标变换原理

缝洞型碳酸盐岩油藏为各向异性介质,当等效渗透率张量为对角张量的形式时,根据几何关系和

渗透率方向之间的关系,可将各向异性介质中的流动变换为各向同性介质中的等价流动。设油藏坐标为 $x'-y'$,如果已知 x' 方向渗透率为 K_x , y' 方向渗透率为 K_y ,在这个二维剖面内,如果计算坐标 $x-y$ 与油藏坐标 $x'-y'$ 方向平行,则渗透率张量为:

$$K = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

反之,如果 $x-y$ 坐标方向与 $x'-y'$ 方向不一致,且二者夹角为 θ ,则有:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \cos^2 \theta + K_y \sin^2 \theta & (K_x - K_y) \sin \theta \cos \theta \\ (K_x - K_y) \sin \theta \cos \theta & K_x \sin^2 \theta + K_y \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 储层等效连续介质模型的建立

与陆源碎屑岩相比,碳酸盐岩储层的储集空间非常复杂,孔、洞、缝同时发育。按照储层储渗空间的几何形态、大小和成因,将储集空间分为孔隙、裂

收稿日期:2009-07-08;改回日期:2009-11-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973 计划”项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”(编号:2006CB202404)部分研究内容

作者简介:徐轩(1984—),男,湖北荆门人,2007 年毕业于中国地质大学(武汉)海洋地质与资源专业,在读博士研究生,主要从事低渗透油藏渗流理论及开发方面的研究工作。

联系方式:(010)69213294, cugxuxuan@163.com

缝、溶孔(洞)以及它们之间的相互耦合所形成的裂缝-孔隙、裂缝-溶孔(洞)、溶洞-裂缝等多种形式。

笔者先建立孔洞型碳酸盐岩渗流的等效连续介质模型,并在此基础上结合裂缝性储层等效连续介质模型,分析讨论孔洞、裂缝同时发育时储层的综合等效渗透率。

2.1 裂缝性储层渗流的等效连续介质模型

由冯金德、刘建军等人^[5-6]建立的裂缝发育区的等效渗透率模型简述如下。

假设裂缝发育区域的裂缝分布均匀,裂缝间相互平行,方向一致(均为 x 方向),且都为垂直裂缝,裂缝在平面上和纵向上完全贯通。裂缝开度为 b_f ,裂缝的线密度为 D_L ,单一裂缝渗透率 K_f 是 b_f 的函数; x 、 y 方向的基质渗透率分别为 K_{mx} 、 K_{my} 。根据等值渗流阻力原理及水电相似原理可计算得到:

$$1) \text{ 平行裂缝发育方向}(x \text{ 方向})\text{的等效渗透率}$$

$$K_{fx} = K_{mx} + (K_f - K_{mx}) D_L b_f \quad (3)$$

$$2) \text{ 垂直裂缝发育方向}(y \text{ 方向})\text{的等效渗透率}$$

$$K_{fy} = \frac{K_{my} K_f}{K_f - (K_f - K_{mx}) D_L b_f} \quad (4)$$

2.2 孔洞型储层渗流的等效连续介质模型

基于与文献[5]、[6]类似的思想,笔者同杨正明等共同研究建立了孔洞型碳酸盐岩油藏渗流的等效连续介质模型。该模型结合相关渗流理论、等值渗流阻力原理,以毛细管束模型为基础进行研究。

不同学者对孔洞大小的定义不同,有学者将大型洞穴和小孔洞统称为孔洞。笔者所讨论的孔洞采用张希明等^[7]对孔洞的定义,将孔洞与大型洞穴区别开来:孔洞的直径为 5~100 mm,大型洞穴指直径大于 100 mm 的溶洞。

模型简述如下:

实际岩石中的孔隙空间多是由不规则的孔道组成的,毛细管束模型将其简化为孔洞空间由等直径的平行毛细管束所组成的理想岩石,孔洞沿 x 方向发育,如图 1 所示。单个孔洞渗透率 K_h 是孔洞半径的函数,据毛细管束模型有 $K_h = \frac{r^2}{8}$ ^[8],考虑到该公式需满足的理想条件难以具备,应用中可由实验测量得到;岩块单元在 x 、 y 方向的长度分别为 a 、 b ; x 、 y 方向的基质渗透率分别为 K_{mx} 、 K_{my} ;孔洞平均半径为 r 。

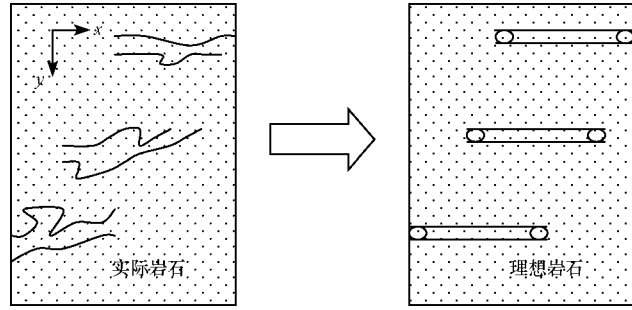


图 1 孔洞型碳酸盐岩毛管束模型示意

定义孔洞的面密度,即岩石中垂直于孔洞发育方向的单位面积内发育孔洞的个数,用 N_h 表示。其中 N 为垂直孔洞发育方向截面积 A 上孔洞的个数。

$$N_h = \frac{N}{A} \quad (5)$$

选择笛卡尔坐标系,等效渗透率以平行于 x 、 y 主轴方向的 K_{hx} 、 K_{hy} 表示。

2.2.1 平行孔洞发育方向(x 方向)的等效渗透率

垂直于孔洞方向切面的总面积为 A ($A = ab$)。则溶洞部分总的面积可表示为:

$$A_h = \pi N_h a b r^2 \quad (6)$$

基质部分的面积为:

$$A_m = ab - N_h a b \pi r^2 = (1 - N_h \pi r^2) ab \quad (7)$$

对于发生在水平方向的流动,总流量为基质和溶洞的流量之和,即:

$$Q_x = Q_h + Q_m = \frac{K_h A_h \Delta p}{\mu l} + \frac{K_{mx} A_m \Delta p}{\mu l}$$

$$= (K_h A_h + K_{mx} A_m) \frac{\Delta p}{\mu l} \quad (8)$$

假定存在一个等效的渗透率 K_{hx} ,使在同样的压力梯度下流量也为 Q_x ,则有:

$$Q_x = \frac{K_{hx} b \Delta p}{\mu l} \quad (9)$$

根据式(6)、(7)可得,水平方向的等效渗透率可表示为:

$$K_{hx} = \frac{K_h A_h + K_{mx} A_m}{A_h + A_m} = K_{mx} + (K_h - K_{mx}) \frac{A_h}{A}$$

$$= K_{mx} + (K_h - K_{mx}) N_h \pi r^2 \quad (10)$$

2.2.2 垂直孔洞发育方向(y 方向)的等效渗透率

同理可计算得到垂直孔洞发育方向(y 方向)的等效渗透率为:

$$K_{hy} = \frac{K_h K_{my}}{K_h - (K_h - K_{my}) N_h \pi r^2} \quad (11)$$

2.3 裂缝、孔洞同时发育时储层的综合等效渗透率

碳酸盐岩储层由于严重的非均质性,往往储集空间非常复杂,孔、洞、缝同时发育。笔者在上文已建立孔洞发育区等效渗流模型的基础上,结合前人建立的裂缝发育区的等效渗流模型基础上,进一步研究讨论了碳酸盐岩油藏中的孔洞发育区、裂缝发育区与基质区组合而成的储层综合等效渗透率。

实际地层中孔洞、裂缝的发育方向各异,其相互组合关系复杂。为研究问题方便,笔者仅讨论孔洞、裂缝发育方向一定,且均平行于水平方向(x 方向)发育的情形,如图2所示。假设沿 x 方向裂缝、孔洞和纯基质储层不连续发育,根据不同的储积空间类型将储层分为 m 个小的层段,各小层段内以一种孔隙空间为主且连续发育,储层总长度为 L 。其中沿 x 方向发育的孔洞型储层共有 m_1 段,每段孔洞的长度分别为 l_{hi} ,等效渗透率为 K_{hi} ;裂缝性储层共有 m_2 段,每段裂缝的长度分别为 l_{fi} ,等效渗透率为 K_{fi} ;基质储层共有 m_3 层段,每段基质的长度为 l_{mi} ,基质渗透率为 K_{mi} 。同样选择笛卡尔坐标系,等效渗透率张量以平行于 x 、 y 主轴方向的 K_x 、 K_y 表示。

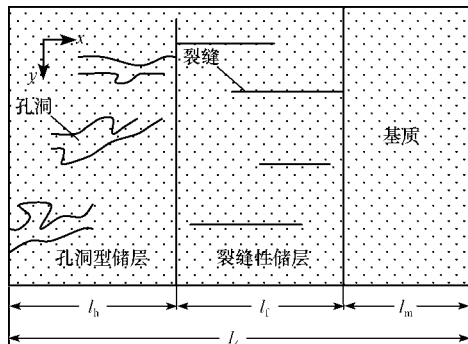


图2 裂缝孔洞同时发育时储层的等效连续介质模型示意

2.3.1 平行缝洞发育方向(x 方向)

由前面的假设可知,在水平上储层由三类区域构成:第一类是孔洞发育区;第二类是裂缝发育区;第三类是纯基质区域。

结合已建立的孔洞发育区等效渗流模型,先单独计算孔洞、裂缝区的等效渗透率,最后计算由孔洞等效区域、裂缝等效区域和基质区域共同构成的储层沿 x 方向的综合等效渗透率。

在给定压差下,沿 x 方向等效区域中的各孔洞发育区,裂缝发育区和基质区的流量相同,总的压降为孔洞、裂缝和基质储层压降之和,不难得出:

$$\frac{L}{K_x} = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{l_{hi}}{K_{hi}} + \sum_{i=1}^{m_2} \frac{l_{fi}}{K_{fi}} + \sum_{i=1}^{m_3} \frac{l_{mi}}{K_{mi}} \quad (12)$$

要计算 K_x 必须知道各段储层的等效渗透率,实际上这是很难实现的。为了简化计算,设孔洞区域总

长度为 l_1 ,即 $l_1 = \sum_{i=1}^{m_1} l_{hi}$,孔洞段平均渗透率为 K_{hx} ;

裂缝区域总长度为 l_2 ,即 $l_2 = \sum_{i=1}^{m_2} l_{fi}$,裂缝段平均渗

透率为 K_{fx} ;基质区域总长度为 l_3 ,即 $l_3 = \sum_{i=1}^{m_3} l_{mi}$,基质段平均渗透率为 K_{mx} 。因此,式(12)可简化为:

$$\frac{L}{K_x} = \frac{l_1}{K_{hx}} + \frac{l_2}{K_{fx}} + \frac{l_3}{K_{mx}} \quad (13)$$

解得总的等效渗透率为:

$$K_x = \frac{K_{hx}K_{fx}K_{mx}}{\frac{l_1}{L}K_{fx}K_{mx} + \frac{l_2}{L}K_{hx}K_{mx} + \frac{l_3}{L}K_{hx}K_{fx}} \quad (14)$$

2.3.2 垂直缝洞发育方向(y 方向)

同理可得 y 方向上的等效渗透率为:

$$K_y = \frac{K_{hy}l_1 + K_{fy}l_2 + K_{my}l_3}{L} \quad (15)$$

3 应用分析

选取国内某碳酸盐岩油藏为实例,采用以上等效渗透率模型进行分析。在不影响分析评价的基础上,为方便计算暂不考虑基质渗透率的各向异性,设基质各向渗透率相等。研究不同储层类型同时发育但发育程度不同时,各参数对储层渗透率的影响。该碳酸盐岩油藏孔洞发育区的储层特征为:孔洞孔隙度约为3%,孔洞半径从数十微米到数百微米不等,主要集中在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$,孔洞面密度从每平方厘米几个到数十个不等;裂缝发育区储层特征为:裂缝线密度为 $3 \sim 8$ 条/m,微观裂缝开度小于 $40 \mu\text{m}$,主要集中在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$;裂缝以垂直缝和高角度缝为主;基质区特征为:基质孔隙度为0.1%,渗透率为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据储层特征,利用所建立的等效连续介质模型,分析孔洞发育对储层渗透率的影响。

3.1 裂缝发育程度一定时,孔洞发育程度不同对储层的影响

通过调整储层段的长度来表征各类储层的发育程度,裂缝和孔洞段的等效渗透率 K_h 、 K_f 不变。取裂缝段发育长度一定,即 $l_2/L = 0.10$,考虑孔洞和基质发育程度不同对储层的影响。孔洞和基质的发

育程度见表 1。

表 1 孔洞和基质发育程度

算例	l_1/L	l_2/L	l_3/L
1	0.10	0.10	0.80
2	0.20	0.10	0.70
3	0.30	0.10	0.60
4	0.40	0.10	0.50
5	0.50	0.10	0.40
6	0.60	0.10	0.30
7	0.70	0.10	0.20
8	0.80	0.10	0.10
9	0.89	0.10	0.01

计算结果见图 3。由图 3 可知,孔洞显著提高了特低渗透储层水平方向的渗透率 K_x ,而对垂直孔洞方向渗透率 K_y 的改善作用较小。孔洞区发育程度越大,即 l_1/L 越大,储层等效渗透率越大;当孔洞发育区达到 $l_1/L=0.89$ 时, l_3/L 仅为 0.01,相当于储层段基本没有基质区,此时等效渗透率 K_x 达到最大 ($12.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$),等效于孔洞和裂缝区域的串联。

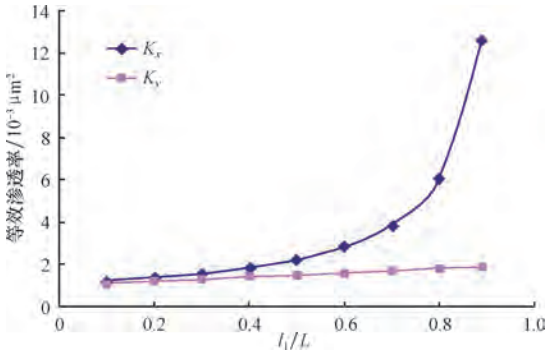


图 3 孔洞发育程度对储层的影响

3.2 孔洞发育程度一定时,裂缝发育程度不同对储层的影响

同理,裂缝和孔洞段的等效渗透率不变,取孔洞段发育长度一定,即 $l_1/L=0.10$,考虑裂缝和基质发育程度不同对储层的影响。裂缝和基质的发育程度见表 2。

表 2 裂缝和基质发育程度

算例	l_1/L	l_2/L	l_3/L
1	0.10	0.10	0.80
2	0.10	0.20	0.70
3	0.10	0.30	0.60
4	0.10	0.40	0.50
5	0.10	0.50	0.40
6	0.10	0.60	0.30
7	0.10	0.70	0.20
8	0.10	0.80	0.10
9	0.10	0.89	0.01

计算结果见图 4。由图 4 可知,裂缝对储层的改造作用基本与溶洞相似。通过分析可知:根据裂缝等效渗流理论和孔洞等效渗流理论,见式(3)、(4)、(10)和(11),裂缝、孔洞均仅对平行发育方向(x 方向)的改造作用显著,对垂直发育方向(y 方向)的改造作用不明显。对比图 3、4 还可以看出,基质基本不发育时(l_3/L 仅为 0.01), x 方向孔洞发育时的储层等效渗透率 ($12.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$) 要明显高于裂缝发育时的储层等效渗透率 ($4.2\times10^{-3}\mu\text{m}^2$),即孔洞比裂缝对储层的改善作用显著,这是因为针对笔者应用的油田储层条件通过等效模型计算的孔洞等效渗透率 K_{hr} 远大于裂缝等效渗透率 K_{fr} 。

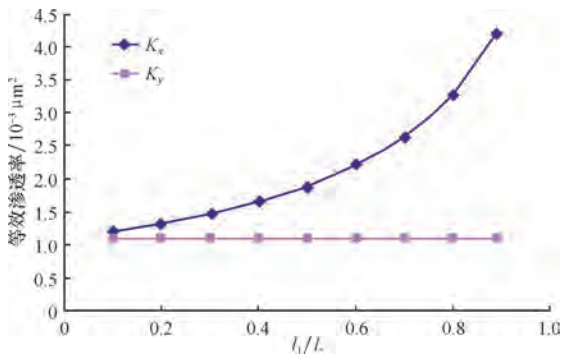


图 4 裂缝发育程度对储层的影响

3.3 孔洞和裂缝发育程度一定时,基质渗透率对储层的影响

裂缝和孔洞段的等效渗透率不变,取孔洞、裂缝以及基质段发育长度相同,即 $l_1:l_2:l_3=1:1:1$ 。通过改变基质层段的渗透率,即 K_m 的大小来分析基质渗透率对储层等效渗透率的影响。

计算结果见图 5。由图 5 可知,孔缝显著提高了特低渗透储层的渗透率;当基质区范围较大时(算例中 l_3/L 为 1/3),基质对整个储层最终的综合等

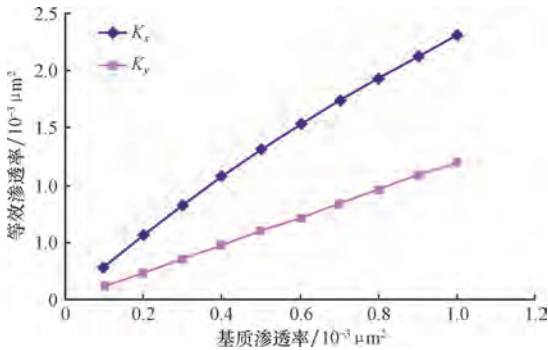


图 5 基质渗透率对储层的影响

效渗透率制约较大。分析认为对于平行发育方向(x 方向)的流动相当于三类储层串联,若基质区发育则流动中基质所引起的压降大,使综合等效渗透率接近基质;对于垂直发育方向(y 方向)的流动,裂缝、孔洞对储层的改造作用本身并不大,即等效的渗透率 K_{hy} 、 K_{fy} 接近基质,导致综合等效渗透率偏低。

4 结 论

1) 建立了孔洞型碳酸盐岩油藏的等效连续介质模型,并在此基础上初步建立了孔洞、裂缝、基质三类储层同时存在且定向发育时碳酸盐岩油藏的综合等效连续介质模型,从而将孔洞、裂缝发育参数与储层有机结合起来,为进一步研究碳酸盐岩油藏的渗流规律提供了新思路。

2) 为方便研究问题,笔者仅讨论了孔洞、裂缝的发育方向一定,且均平行于水平方向(x 方向)发育的情形下缝洞对储层综合等效渗透率的影响。结论为:缝洞定向发育时,显著提高了平行缝洞发育方向储层的渗透率 K_x ,对垂直于缝洞发育方向渗透率 K_y 的影响不大。

3) 实际油藏中孔洞、裂缝发育方向各异,其不

同的组合关系加剧了低渗透储层的各向异性,而最终储层的综合等效渗透率是孔洞、裂缝对储层各向渗透率影响的综合反映。

参 考 文 献

- [1] 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 23-30.
- [2] Kasap E, Lake L W. Calculating the effective permeability tensor of a gridblock[J]. SPE Formation Evaluation, 1990, 5(2): 192-200.
- [3] Lee S H, Durlafsky L J, Lough M F, et al. Finite difference simulation of geologically complex reservoirs with tensor permeabilities[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(6): 567-574.
- [4] 徐轩, 杨正明, 刘先贵, 等. 孔洞型碳酸盐岩油藏渗流的等效连续介质模型[J]. 武汉工业学院学报, 2009, 28(3): 51-54.
- [5] 冯金德, 程林松, 李春兰, 等. 裂缝性低渗透油藏等效连续介质模型[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 94-97.
- [6] 刘建军, 刘先贵, 胡雅初, 等. 裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续介质模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(增刊): 158-160.
- [7] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 17-22.
- [8] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.

[审稿 陈月明]

The Equivalent Continuum Media Model for Fractured Cavernous Carbonate Reservoir

Xu Xuan Yang Zhengming Liu Xiangui Wang Xuewu Du Xiaosheng

(Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei, 065007, China)

Abstract: The equivalent continuum media model is the main direction on the seepage model for carbonate reservoirs. Previous researchers have established an equivalent continuous medium model for fractured reservoir which is not fit for cavernous carbonate reservoir. An equivalent continuous medium model for cavernous carbonate reservoir was developed based on capillary model and the law of equivalent seepage resistance. The application results showed that natural fracture and cavity could improve the reservoir permeability and intensifies reservoir anisotropic, and the equivalent continuum media model is reasonable.

Key words: carbonate rock; cavern; reservoir; continuous media; permeability

吐哈油田研制出性能优良的 GFG-Ⅲ型固体缓蚀阻垢剂

针对油井腐蚀结垢问题,吐哈油田开展了阻垢剂配方及防腐防垢配套技术研发,于 2008 年底研制出了成本低、释放速度均匀的 GFG-Ⅲ型固体缓蚀阻垢剂,释放时间由 120 d 延长到 300 d 以上。

该阻垢剂 2009 年以来在吐哈油田应用 23 井次,平均单井防腐防垢作业成本由 3.72 万元降至 2.34 万元,下降了 37%;油井腐蚀结垢速度平均下降 1.09 mm/a,降低了 40%;油井检泵周期由 122 d 延长至 319 d,措施有效率达到 90%以上。