

致密气藏水平井整体压裂井网部署优化

卞晓冰^{1,2}, 张景臣³, 李双明¹, 郭天魁⁴, 张士诚²

1. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
3. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249
4. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580

摘要 致密气藏多采用衰竭式开发模式, 如何减少井间干扰是井网部署时必须考虑的问题。针对目标研究区域, 基于各压裂水平井的等效压力波及椭圆, 建立了致密气藏水平井整体压裂井网部署优化模型。从弹性势能的角度, 模拟目标区域和波及椭圆之间的运动, 将井网部署模型转化为求取弹性势能函数的最小值问题, 采用具有较高求解效率的拟物算法实现了该模型的求解。以M区块为例进行水平井整体压裂方案设计, 模拟结果显示: 气价较低时, M区块可采取稀井高产的开发模式; 随着气价的增加, M区块需要打更多井以获得最佳的经济效益。

关键词 致密气藏; 水平井; 整体压裂; 井网部署; 拟物算法

中图分类号 TE357.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.13.008

Optimization of integral fracturing design for horizontal well pattern arrangement in tight gas reservoir

BIAN Xiaobing^{1,2}, ZHANG Jingchen³, LI Shuangming¹, GUO Tiankui⁴, ZHANG Shicheng²

1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
3. Enhanced Oil Recovery Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
4. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract Depletion development is the main method to exploit tight gas reservoir, and well interference is the unavoidable factor in well network deployment. According to the target area, a new integral fracturing well pattern arrangement model for horizontal wells in tight gas reservoir was set up based on the non-overlapping pressure sweep ellipse areas of all fractured horizontal wells. Firstly, by solving the major semi-axis and minor semi-axis of the equivalent ellipses by commercial reservoir simulator, the move among the target area and equivalent ellipses was simulated from the view of elastic potential energy, and the well pattern arrangement model could be resolved as acquiring the minimum potential-energy function, which was solved by quasi-physical algorithm owing to the high solving efficiency. The method was applied in M block, which is a rectangle tight gas reservoir with an average porosity of 7.2% and an average permeability of $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Economic evaluation demonstrated that less fractured horizontal wells could achieve more net benefit when the gas price is low, while more fractured horizontal wells should be developed when the gas price is high.

Keywords tight gas reservoir; horizontal well; integral fracturing; well pattern arrangement; quasi-physical algorithm

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2015-05-22

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05048)

作者简介: 卞晓冰, 工程师, 研究方向为水力压裂优化设计及数值模拟, 电子信箱: xiaobingbian@126.com

引用格式: 卞晓冰, 张景臣, 李双明, 等. 致密气藏水平井整体压裂井网部署优化[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 52-55.

中国致密气藏资源丰富,在四川、鄂尔多斯、松辽等十几个盆地都有分布,远井资源量高达 $12 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1]。由于致密气藏储层物性差、含气丰度低,钻完井对储层伤害大,对其进行高效开发的关键是优化井网部署及实施水平井压裂技术^[2]。致密气藏井网部署往往是在对区块进行勘探评价的基础上有目的地选择气层储、渗好的部位投入开发第一批生产井,再对第一批生产井进行几次加密形成最终的井网^[3]。但这种开发模式加大了井网部署的难度,因为不同阶段投入生产的井会使整个区块的渗流场变得复杂,有可能加剧井间干扰,从而严重影响开发效果。通过建立数值模拟模型预测压裂水平井组的长期生产动态,进而优化缝长、缝间距、布缝方式等裂缝参数组合是水平井整体压裂井网优化的常用方法^[4];电模拟试验也可优化水平井/直井井网与压裂裂缝参数的匹配性^[5]。此外,针对整体压裂需优化多参数的特点,有学者引入了正交法及响应面分析法^[6]。总之,目前对致密气藏水平井整体压裂技术的研究多基于规则井网,现场施工仍需借鉴国内外压裂模式及经验^[4-7]。为此,本研究以井间干扰最小为目标,建立压裂水平井井网部署数学模型,应用拟物算法^[8]进行求解。以某致密气藏为例,进行水平井整体压裂井网部署研究。

1 压裂水平井等效波及椭圆

低渗透油气藏中多段压裂水平井每条裂缝的压力波及区域都可视为逐渐向外扩张的同心椭圆^[9]。若相邻裂缝发生缝间干扰,则压力波及区域形状变得更加复杂,当压裂水平井处于拟径向流阶段时,最外围的一系列压力等势线为近似椭圆族^[10]。但缝间干扰削弱了单条裂缝的增产优势,故以压裂水平井各条裂缝的压力波及椭圆相切作为缝间距的优化目标。采用等效方法,把具有多条压裂裂缝的水平井压力波及区域用一等效椭圆代替。

假设一口水平井压裂 N 条横切缝,单条裂缝形成的椭圆长、短半轴长分别为 a 和 b ,则对于 N 个椭圆所组成的体系,可用一长、短半轴长分别为 Nb 和 a 的大椭圆等效代替,此时二者具有相同的波及面积 $N\pi ab$ 。以裂缝条数 $N=3$ 为例,虚线椭圆代表单条裂缝波及区域,实线椭圆代表压裂水平井等效波及区域,如图1所示。

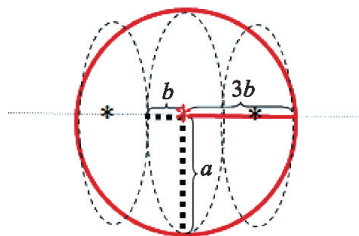


图1 压裂水平井等效波及区域示意

Fig. 1 Sketch map for equivalent sweep area of fractured horizontal well

2 整体压裂优化模型的建立和求解

2.1 井网优化部署流程

针对致密气藏建立水平井整体压裂井网优化流程如下:

- 1) 综合考虑压裂有效期及资金回笼时间,确定气藏数值模拟基准年限为 y 年;
- 2) 应用数值模拟软件分析裂缝条数、裂缝半长、导流能力等单因素变化对多段压裂水平井 y 年累积产量的影响,确定各单因素最优值;
- 3) 进行单井多段压裂正交方案设计,得到 y 年累积产量方案排序;
- 4) 对于排序靠前的方案,根据压裂水平井等势线分布确定其 y 年等效波及区域,本文选取90%地层压力的等势线作为其等效椭圆;
- 5) 针对目标区块,预先置入已投产井的等效椭圆,然后以井间干扰最小为目标,置入新井各等效椭圆,得到相应的水平井整体压裂井网部署方案;
- 6) 对各方案进行经济评价,确定最优压裂水平井井网部署方案。

2.2 数学模型

对水平井整体压裂井网部署模型的目标函数设置如下:在求出不同参数的压裂水平井波及椭圆后,把若干不同形状的等效椭圆互不叠加地置入气藏目标区域中,即可得到井间干扰最小、有效动用程度最大的井网部署方案,根据椭圆的中心点可确定井位。

至今没有找到多项式时间算法解的一类问题,称之为NP问题,不等椭圆置入问题的数学模型对应着NP问题中的Packing问题^[11]:对于一个已经存在的容器,能否将若干个不同大小和形状的物体互不重叠地放入容器中,并尽可能地使剩余的空间最小,以实现最优布局。如果能放下则给出各物体的方向及位置。Packing问题有如下两个限制条件:所有物体均位于容器内,物体之间不相重叠。

2.3 拟物思路

拟物算法是实现Packing问题求解最常用的算法,其优势在于该算法对所研究的问题提出了近似度非常高的物理体系,对于问题的求解往往具有较高的效率^[8,11]。拟物算法将容器等效为具有空腔的光滑弹性物体,空腔与容器的内部空间完全相同。放入容器的物体等效为光滑的弹性实体。随机把所有物体放入容器,则物体与容器、物体与物体之间会有弹性挤压现象,物体会在弹性力的作用下发生运移。最后会达到这样一种状态,即空腔和所有物体均恢复到没有弹性力作用的初始状态,此时也就得到了问题的解。

2.4 拟物算法

以圆形容器为例建立笛卡尔坐标系,其与 N 个椭圆组成的体系如图2所示,坐标系原点为容器的重心点。容器内放置 N 个物体,每个物体的位置用其几何重心的坐标来表示,方向用物体在绝对坐标系之下的欧拉角来表示,第 i ($i=1,2,\dots,N$)个物体的状态可以用参数组合 $(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \varphi_i, \psi_i)$ 表征,所有物体和容器构成的体系的状态可由式(1)^[11]表示

$$(x_1, y_1, z_1, \theta_1, \varphi_1, \psi_1, \dots, x_N, y_N, z_N, \theta_N, \varphi_N, \psi_N) \quad (1)$$

第 i 个椭圆的重心点坐标记为 (x_i, y_i) , $i=1,2,\dots,N$,长、

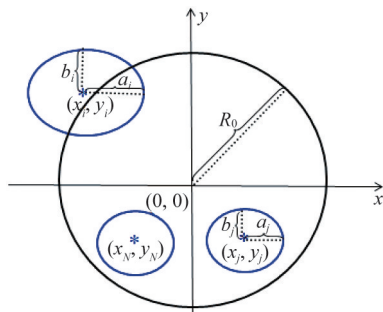


图2 容器和物体体系示意

Fig. 2 Sketch map of the container and object system

短半轴长分别为 a_i 和 b_i , 采用 R_i 表征其平均半轴长

$$R_i = (a_i + b_i) / 2 \quad (2)$$

设容器为第0个物体, L_{0i} 为容器和物体 i 之间的距离, 物体有一部分在容器外部时, 定义 $L_{0i} > 0$, 物体在容器内部时, 定义 $L_{0i} = 0$ 。则椭圆 i 与容器的距离^[11]为

$$L_{0i} = \begin{cases} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} + R_i - R_0 & \sqrt{x_i^2 + y_i^2} + R_i \geq R_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

令 L_{ij} 为物体 $i, j (i \neq j)$ 之间的距离, 两物体相交时, 定义 $L_{ij} > 0$; 两物体相离或相切时, 定义 $L_{ij} = 0$ 。则椭圆 i 与椭圆 j 的距离为

$$L_{ij} = \begin{cases} R_i + R_j - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} & \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq R_i + R_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

两个光滑弹性物体 $i, j (i \neq j)$ 之间的挤压弹性势能可根据式(5)计算

$$U_{ij} = \begin{cases} 0 & L_{ij} = 0 \\ L_{ij}^2 & L_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

因此, 容器和所有物体所组成体系的弹性势能^[12]为

$$U = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N U_{ij} = U(x_1, y_1, z_1, \theta_1, \varphi_1, \psi_1, \dots, x_N, y_N, z_N, \theta_N, \varphi_N, \psi_N) \quad (6)$$

由式(6)知, 弹性势能 U 与整个体系的状态有关, 且具有非负值, 当 $U=0$ 时, 表明物体的摆放方式是 Packing 问题的可行解。因此, Packing 问题即转化为对于势能函数 U 的最小值求取问题, 可以用梯度算法来求解此优化问题^[11, 12]。应用 Matlab 编程实现了上述求解不等椭圆 Packing 问题的拟物算法。若容器为其他形状, 则对椭圆与容器的距离即式(3)进行替换即可。

3 实例分析

M 区块为岩性圈闭致密气藏, 埋深 3624 m, 有效厚度 20 m, 平均孔隙度 7.2%, 平均渗透率 $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压力梯度 0.921 MPa/100 m。地应力方向 NE75°, 压裂裂缝延伸方位与砂体走向近似垂直。

参考勘探井压裂试气结果, 从 M 区块主力开发层系中选取相对物性最好的目标研究区域, 如图 3 中矩形圈闭区所示,

其中包含 M_1, M_5, M_9 和 M_{10} 共 4 口已开发直井, 开发直井的单井控制区域可由相应方案中水平井单条裂缝控制区域确定。

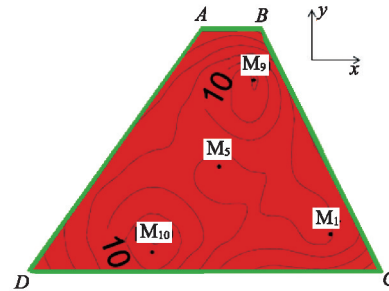


图3 目标研究区域

Fig. 3 Map of the target area

3.1 单井等效椭圆确定

应用商业软件 Eclipse 建立压裂水平井单井模型, 资金回笼期预定为 3 年, 水平井水平段长 800 m。由单因素变化对累积产量的影响结果知, 裂缝条数 n 、裂缝半长 L_f 、导流能力 F_{RCD} 和生产压差 ΔP 的最优值分别为 $n=7, L_f=250 \text{ m}, F_{RCD}=25 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}, \Delta P=15 \text{ MPa}$ 。据此设计 4 因素 4 水平的压裂水平井正交方案, 对 16 个方案进行为期 3 年的动态预测, 见表 1。由结果知方案 4、方案 12 和方案 3 依次为累积产量最优方案, 其等效波及椭圆参数见表 2。

表 1 压裂水平井正交方案设计

Table 1 Orthogonal design for fractured horizontal well

方案	$\Delta P/\text{MPa}$	L_f/m	$F_{RCD}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm})$	n	3 年累积产量/ 10^8 m^3
1	5	150	15	5	0.137
2	10	200	20	6	0.303
3	15	250	25	7	0.444
4	20	300	30	8	0.587
5	5	200	25	8	0.283
6	10	150	30	7	0.364
7	15	300	15	6	0.348
8	20	250	20	5	0.355
9	5	250	30	6	0.238
10	10	300	25	5	0.293
11	15	150	20	8	0.442
12	20	200	15	7	0.452
13	5	300	20	7	0.233
14	10	250	15	8	0.367
15	15	200	30	5	0.355
16	20	150	25	6	0.357

表 2 备选方案压裂单井等效椭圆参数

Table 2 Equivalent ellipse parameters for single well of design alternatives

方案号	时间/a	椭圆长轴/m	椭圆短轴/m
4	3	1110	905
12	3	790	610
3	3	915	700

3.2 井网方案部署

应用本文方法,对方案4、方案12和方案3分别进行水平井整体压裂井网部署。输出椭圆中心点坐标,即可求知每口井的井位。井网部署优化结果见图4。

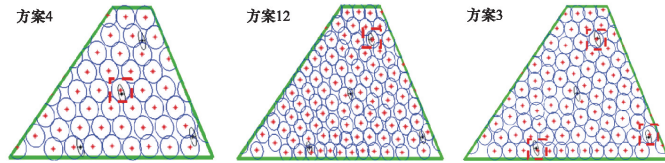


图4 备选方案最优井网部署

Fig. 4 Optimal well pattern arrangements of design alternatives

方案4、方案12和方案3分别打水平井42口、88口和79口,其中红色虚线所圈闭区由于与已打井控制区域重叠,故把该设计井位去除。

3.3 经济效益评价

M区块水平井钻井费用约 3.0×10^7 元/井,压裂费用约 1.5×10^7 元/井,天然气价格按 $1.0 \sim 2.5$ 元/ m^3 之间浮动考虑。根据以上经济参数对3个备选开发方案进行经济评价,结果见表3。气价较低时(1.0 元/ m^3)井数最少的方案4可达到稀井高产的目的;而随着气价的增加(1.5 元/ m^3 以上)井数最多的方案12为经济效益最佳的井网部署方案。因此,在考虑经济效益的基础上,采用水平井整体压裂井网部署方法可优化出最佳压裂开发方案,真正实现整个区块的经济高效开发。

表3 备选方案净收益数据

Table 3 Net benefit of design alternatives

方案号	水平井数	3年累产量/ $10^8 m^3$	净收益/ 10^8 元			
			1.0元/ m^3	1.5元/ m^3	2.0元/ m^3	2.5元/ m^3
4	42	24.654	5.754	18.081	30.408	42.735
12	88	39.776	0.176	20.064	39.952	59.84
3	79	35.076	-0.474	17.064	34.602	52.14

4 结论

1) 以研究区域井间干扰最小化为目标,提出了适合致密气藏的水平井整体压裂井网部署模型,结合正交试验及经济评价可优选出目标区域的最佳井网部署方案。

2) 将压裂水平井井网部署模型转化为近似度非常高的弹性势能求取问题,并采用高效的拟物算法实现了模型的求解。

3) M区块致密气藏水平井整体压裂优化结果表明,随着气价的增加,最优开发方案水平井数增加。

4) 水平井整体压裂技术充分考虑了井间干扰的影响,是提高致密气藏经济效益的有效措施。

参考文献(References)

- [1] 康毅力, 罗平亚. 中国致密砂岩气藏勘探开发关键技术现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 239-245.
Kang Yili, Luo Pingya. Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 239-245.
- [2] 雷群, 李熙喆, 万玉金, 等. 中国低渗透砂岩气藏开发现状及发展方向[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 1-3.
Lei Qun, Li Xizhe, Wan Yujin, et al. The status and development trend of exploiting low permeability gas sandstone reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(6): 1-3.
- [3] 吴英, 程林松, 张斌, 等. 低渗透气藏提高采收率方法研究现状及发展趋势[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 46-48.
Wu Ying, Cheng Linsong, Zhang Bin, et al. Present research situation and development trend of enhancing oil recovery method in low permeability gas reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6): 46-48.
- [4] 曲占庆, 赵英杰, 温庆志, 等. 水平井整体压裂裂缝参数优化设计[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 106-110.
Qu Zhanqing, Zhao Yingjie, Wen Qingzhi, et al. Fracture parameters optimization in integral fracturing of horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4): 106-110.

- [5] 温庆志, 于姣姣, 翟学宁, 等. 水平井整体压裂矩形联合井网电模拟试验研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 75-81.
Wen Qingzhi, Yu Jiaojiao, Zhai Xuening, et al. Electrical analog experiment of integral fracturing with rectangular combined well pattern [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 75-81.
- [6] 李威, 姜汉桥, 李杰, 等. 基于响应面的水平井-直井整体压裂参数优化方法[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(2): 88-91.
Li Wei, Jiang Hanqiao, Li Jie, et al. Optimization of integral fracturing parameters for horizontal-vertical wells based on response surface methodology[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(2): 88-91.
- [7] 李国锋, 秦玉英, 刘恋, 等. 丛式水平井组整体压裂工艺技术在致密低渗透气藏中的应用[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 49-53.
Li Guofeng, Qin Yuying, Liu Lian, et al. Application of overall fracturing technology for cluster horizontal wells to the development of low-permeability tight gas reservoirs in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 49-53.
- [8] 黄文奇, 叶涛. 求解等圆Packing问题的拟物型全局优化算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(6): 686-693.
Huang Wenqi, Ye Tao. Quasi-physical global optimization method for solving the equal circle packing problem[J]. Scientia Sinica Informationis, 2011, 41(6): 686-693.
- [9] Valko P P, Amini S. The method of distributed volumetric sources for calculating the transient and pseudosteady-state productivity of complex well-fracture configurations[C]. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, College Station, Texas, January 29-31, 2007.
- [10] Gupta A D, Xie J, Gupta N. Radius of investigation and its generalization to unconventional reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 2011, 63(7): 52-55.
- [11] 康雁, 黄文奇. 求解圆形Packing问题的一个快速拟物算法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 35: 30-32.
Kang Yan, Huang Wenqi. A fast quasi-physical algorithm for the disks packing problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 35: 30-32.
- [12] 何琨, 黄文奇, 金燕. 基于动作空间的求解二维矩形Packing问题的高效启发式算法[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1037-1044.
He Kun, Huang Wenqi, Jin Yan. Efficient algorithm based on action space for solving 2D rectangular packing problem[J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1037-1044.

(责任编辑 刘志远)