

水平压裂辅助蒸汽驱开采有夹层稠油薄互层油藏数值模拟研究

凌建军, 李菊花, 黄海波, 胡其权 (江汉石油学院石油工程系, 湖北 荆州 434102)
范铁军, 席 锐, 李发科, 汪德文 (中原油田分公司, 河南 濮阳 457001)

[摘要] 利用数值模拟技术, 分别研究了具有物性和岩性夹层(包括单个和多个夹层)的稠油油藏对水平压裂辅助蒸汽驱开采效果的影响。模拟结果表明: 油藏中夹层的存在对开采不一定是不利因素; 注汽井打开程度不同对开采有夹层的稠油油藏有一定的影响; 开采过程中, 注汽井打开程度的确定依夹层的类型及分布范围而定。

[关键词] 稠油油藏; 水平压裂; 蒸汽驱; 岩性夹层; 汽油比; 数值模拟

[中图分类号] TE345 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9752(2001)02-0029-03

水平压裂辅助蒸汽驱(Horizontal Fracture-Assisted Steamflooding Technology, 简称HFAST)可以克服蒸汽超覆现象, 实现高速注汽, 大大降低蒸汽驱全系统的热损失, 提高蒸汽驱全系统的热效率。该项技术早已通过数模、物模、先导试验^{①[1~5]}, 证实了它是开采超稠油油藏最有效的方法之一。但有关HFAST数模、物模的研究往往将油层考虑为均质模型。在此, 笔者利用数值模拟技术研究稠油油藏中存在物性或岩性夹层及存在单个或多个夹层时对HFAST的影响。

1 模型基本参数及网格划分

1.1 模型基本参数

模型所使用的基本参数取自某稠油区块, 它们是: 油层深度 300 m; 油层温度 40 ℃; 油层厚度 10 m; 地层孔隙度 0.30; 原油饱和度 0.65; 原油相对密度 0.972; 40 ℃下的脱气原油粘度 60 000 mPa·s; 原油热膨胀系数 $6.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; 地层压缩系数 $9.3 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$; 水平方向渗透率 $1\,000 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$; 垂直方向渗透率 $300 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$; 油层岩石热容 2 540 kJ/(m³·℃); 油层导热系数 146.9 kJ/(d·m·℃); 上、下覆岩石热容 2 347 kJ/(m³·℃)。

1.2 网格划分

注采井距为 100 m, 井网为反 5 点井网, 取 1/8 对称单元作为模拟单元, 网格取对角网格, X, Y 方向网格数均为 5, 网格步长均为 17.75 m。

2 水平压裂辅助蒸汽驱开采有夹层稠油油藏的研究

2.1 物性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响

2.1.1 单个物性夹层的影响

为了研究单个物性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响, 在模型油层上部设计了一个水平延伸夹层。该模型向上分 7 层, 从上至下各层厚度依次为 3.0, 0.3, 1.7, 1.0, 0.5, 0.5, 3.0 m, 夹层为第 2 层

[收稿日期] 1999-06-06

[作者简介] 凌建军 (1963-), 男, 1987 年北京石油勘探开发科学研究院毕业, 硕士, 副教授, 现主要从事油气田开发工程的教学及科研工作。

① 凌建军, 刘文章, 胡建平. 超稠油油藏水平压裂辅助蒸汽驱相似物理模拟研究. 第二届中国-加拿大国际稠油技术讨论会论文集. 涿州, 1990.

(其渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 厚度为 0.3 m); 裂缝层为第 6 层。生产井全部打开, 并对比分析了注汽井全部射开和只打开下部(打开夹层下部全部层段)时的 2 种情况。模拟结果见表 1 (夹层延伸半径分别为注采井距的 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1)。

从表 1 可以看出: ①在一定范围内(夹层延伸半径小于 3/5), 随着物性夹层半径增大, 水平压裂辅助蒸汽驱开采效果逐渐变好; 超过该范围, 则随着夹层半径的增大, 开采效果稍有变差。但总体来说, 单个物性夹层的油藏进行水平压裂辅助蒸汽驱开采效果优于无夹层的油藏; ②随着物性夹层半径增大, 蒸汽突破时间推后; ③当夹层延伸半径较小时, 注汽井部分打开(打开夹层下部全部层段)的开采效果优于全部打开时的开采效果。当夹层半径延伸较大时, 注汽井全部打开的开采效果优于部分打开时的开采效果, 但差别很小。据此, 对于单个物性夹层的油藏, 可以采用部分打开注汽井的方式。

2.1.2 多个物性夹层的影响

为了研究多个物性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响, 在模型中增加了 3 个水平延伸夹层。该模型向上分 9 层, 从上至下各层厚度依次为 3.0, 0.1, 1.7, 0.1, 1.0, 0.1, 0.5, 0.5, 3.0 m, 夹层为第 2, 4, 6 层(其渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 厚度为 0.1 m); 裂缝层为第 8 层。生产井全部打开, 并对比分析了注汽井全部打开和部分打开(打开第一个夹层以下的全部层段)的情况。模拟结果见表 2 (夹层延伸半径分别为注采井距的 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1)。

从表 2 可以看出: ①随着物性夹层半径增大, 蒸汽突破时间推后; ②当注汽井全部打开时, 在一定范围内(夹层延伸半径小于 3/5), 随着物性夹层半径增大, 水平压裂辅助蒸汽驱开采效果逐渐变好; 超过该范围, 则随着物性夹层半径的增大, 开采效果稍有变差; ③当只打开注汽井下部, 物性夹层延伸不大时(小于 2/5), 夹层的存在使开采效果有所提高, 但夹层半径延伸过大时, 开采效果变差; ④当夹层延伸半径较小时, 注汽井部分打开的开采效果优于全部打开时的开采效果。当夹层半径延伸较大时, 注汽井全部打开的开采效果优于部分打开时的开采效果。

2.2 岩性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响

2.2.1 单个岩性夹层的影响

同样, 可以模拟一个渗透率为 0、厚度为 0.3 m 的岩性夹层, 模拟结果见表 3 (夹层延伸半径分别为注采井距的 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1)。

从表 3 可以看出: ①在一定范围内(夹层延伸半径为注采井距的 3/5), 随着夹层半径增大, 水平压裂辅助蒸汽驱开采效果逐渐变好; 超过该范围, 随着夹层延伸半径的增大, 开采效果逐渐变差; ②在一定范围内(夹层延伸半径为注采井距的 3/5), 随着夹层半径增大, 蒸汽突破时间推后; 但超过一定范围, 随着夹层半径的增大, 蒸汽突破时间提前; ③当夹层半径延伸较小时, 注汽井部分打开(打开夹层下部全部层段)的开采效果优于全部打开时的开采效果; 当夹层半径延伸较大时, 注汽井全部打开的开采效果优于部

表 1 单个水平夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响 (夹层渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

序号	夹层延伸半径	注汽井全部打开时 蒸汽突破时刻		注汽井部分打开时 蒸汽突破时刻	
		注入孔隙 体积倍数	累计 油汽比	注入孔隙 体积倍数	累计 油汽比
1	0	1.735	0.207	1.744	0.211
2	1/5	1.781	0.210	1.782	0.217
3	2/5	1.784	0.215	1.787	0.220
4	3/5	1.825	0.223	1.898	0.224
5	4/5	1.920	0.218	1.910	0.216
6	1	1.952	0.214	1.943	0.213

表 2 多个物性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响 (夹层渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

序号	夹层延伸半径	注汽井全部打开时 蒸汽突破时刻		注汽井部分打开时 蒸汽突破时刻	
		注入孔隙 体积倍数	累计 油汽比	注入孔隙 体积倍数	累计 油汽比
1	0	1.744	0.207	1.820	0.217
2	1/5	1.805	0.214	1.855	0.217
3	2/5	1.850	0.219	1.860	0.224
4	3/5	1.860	0.226	2.010	0.221
5	4/5	1.922	0.225	2.045	0.212
6	1	1.967	0.223	2.254	0.204

表 3 单个岩性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响 (夹层渗透率为 $0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

序号	夹层延伸半径	注汽井全部打开时 蒸汽突破时刻		注汽井部分打开时 蒸汽突破时刻	
		注入孔隙 体积倍数	累计 油汽比	累计 油汽比	注入孔隙 体积倍数
1	0	1.735	0.207	1.744	0.211
2	1/5	1.785	0.211	1.820	0.217
3	2/5	1.780	0.217	1.761	0.218
4	3/5	1.850	0.220	1.767	0.215
5	4/5	1.805	0.196	1.573	0.198
6	1	1.745	0.177	1.454	0.187

分打开时的开采效果。

2.2.2 多个岩性夹层的影响

如前所述，可以模拟渗透率为 0、厚度为 0.1 m 的多个岩性夹层，模拟结果见表 4（夹层延伸半径分别为注采井距的 1/5，2/5，3/5，4/5，1）。

从表 4 可以看出：①在一定范围内（延伸半径为注采井距的 2/5），随着岩性夹层半径增大，水平压裂辅助蒸汽驱开采效果逐渐变好；超过该范围，随着夹层半径的增大，开采效果逐渐变差；②在一定范围内（延伸半径为注采井距的 2/5），随着岩性夹层半径增大，蒸汽突破时间推后；但超过一定范围，随着夹层半径的增大，蒸汽突破时间提前；③当岩性夹层半径延伸较小时，注汽井部分打开（打开第一个夹层以下的全部层段）的开采效果优于全部打开时的开采效果；当夹层半径延伸较大时，注汽井全部打开的开采效果优于部分打开时的开采效果。

表 4 多个岩性夹层对水平压裂辅助蒸汽驱的影响（夹层渗透率为 $0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ）

序号	夹层延伸半径	注汽井全部打开时 蒸汽突破时刻		注汽井部分打开时 蒸汽突破时刻	
		注入孔隙 体积倍数	累计 油气比	注入孔隙 体积倍数	累计 油气比
1	0	1.744	0.207	1.820	0.217
2	1/5	1.800	0.215	1.875	0.216
3	2/5	1.827	0.221	1.857	0.217
4	3/5	2.000	0.220	1.895	0.203
5	4/5	1.840	0.195	1.525	0.189
6	1	1.760	0.174	1.500	0.146

3 结 论

对有物性夹层和岩性夹层的稠油油藏模型进行数值模拟可知，单个和多个夹层对 HFAST 的影响为：在水平压裂辅助蒸汽驱开采稠油油藏的过程中，夹层的存在并非一定是不利因素；注汽井打开程度不同，对开采有夹层的稠油油藏有一定的影响；对具有单个物性夹层的稠油油藏，注汽井打开下部油层的开采效果较好；对具有多个物性夹层、单个和多个岩性夹层的稠油油藏，当夹层延伸半径不大时，注汽井打开下部油层的开采效果较好；当夹层延伸半径过大时，注汽井全部打开效果较好。

[参考文献]

[1] 凌建军, 程绍志. 水平压裂辅助蒸汽驱开采稠油油藏数值模拟研究 [J]. 石油学报, 1995, 16 (专刊): 123~128.
[2] 凌建军, 王远明, 王书林等. 水平压裂辅助蒸汽驱开采稠油油藏的研究 [J]. 河南石油, 1996, 10 (3): 30~34.
[3] Britton M W. The street ranch pilot test of fracture-assisted steamflooding technology [J]. SPE 10707, 1982.
[4] Chu C. State of the art review of steamflood field projects [J]. SPE 11733, 1983.
[5] Stang H R, Soni Y. The saner ranch pilot test of fracture-assisted steamflooding technology [J]. SPE 13036, 1984.

[编辑] 真 辛