

稠油油藏直井侧钻重力火驱 开发效果的数值模拟研究

袁士宝^{1,2},李乐泓^{1,2,3},蒋海岩^{1,2},孙新革⁴

(1.西安石油大学石油工程学院,陕西西安710065; 2.陕西省油气田特种增产技术重点实验室,陕西西安710065;
3.中国石化江钻石油机械有限公司,湖北武汉430000; 4.中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依834000)

摘要:火烧油层作为接替蒸汽吞吐后的稠油开发方式,在厚层稠油油藏中常面临纵向波及效率低、易发生窜槽型燃烧等诸多问题。针对该类油藏的特点及开发历程,提出一种利用已有的蒸汽吞吐开发井网,对采油直井开窗侧钻水平段,变平面火驱为重力火驱的方法。从油藏地质因素和开发工程因素2方面考虑,分析了不同因素对直井侧钻重力火驱开采效果的影响,进一步研究了该方法的内在增产机理,并采用多元线性回归方程建立了采收率与主控因素之间的评价模型。结果表明,直井侧钻重力火驱对于厚层稠油油藏的采收率提高幅度达42%;直井侧钻长度约为井距的1/2时可获得较好的开采效果;建立的采收率评价模型与数值模拟得到的结果吻合度达到85%以上,能够为矿场转换开采方式时机及中长远规划提供一定的指导。

关键词:稠油;蒸汽吞吐;直井侧钻;重力火驱;数值模拟;线性回归

中图分类号:TE357.44

文献标识码:A

Numerical simulation study on development effect of gravity fire flooding with vertical well sidetracking in heavy oil reservoirs

YUAN Shibao^{1,2}, LI Lehong^{1,2,3}, JIANG Haiyan^{1,2}, SUN Xinge⁴

(1.College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil and Gas Reservoirs (SLAST), Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 3.SINOPEC Jiangzuan Petroleum Machinery Co., Ltd., Wuhan City, Hubei Province, 430000, China; 4.Exploration and Development Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: As an alternative for steam stimulation in heavy oil reservoirs, in-situ combustion often faces many problems in thick heavy oil reservoirs, such as low vertical sweep efficiency and channeling combustion. In view of the characteristics and development history of this type of reservoirs, the existing development well pattern based on steam stimulation was used to sidetrack the horizontal section of the vertical oil production wells, and the plane fire flooding was changed to gravity fire flooding. Considering the geological and engineering conditions in the reservoirs, the influence of different factors on the development effect of gravity fire flooding with vertical well sidetracking was analyzed. In addition, the internal stimulation mechanism of this method was studied, and the evaluation model between the recovery factor and the main controlling factors was built with the multiple linear regression equation. The results show that the gravity fire flooding with vertical well sidetracking improves the recovery factor of thick heavy oil reservoirs by 42%. When the sidetracking length of the vertical well is about 1/2 of the well spacing, efficient production can be obtained. Moreover, the evaluation model of recovery factors agrees with the numerical simulation result by more than 85%, guiding the timing of converting production modes and medium-and long-term planning for the field.

Key words: heavy oil; steam stimulation; sidetracking of vertical wells; gravity fire flooding; numerical simulation; linear regression

收稿日期:2021-04-17。

作者简介:袁士宝(1977—),男,黑龙江宾县人,教授,博士,从事热采及油藏管理研究工作。E-mail:upcysb@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“基于燃料沉积演化机制的火烧油层启动与控制”(51674198),西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(YCS20213138)。

稠油油藏是一种难动用的石油储备区^[1-2],在蒸汽吞吐开发后期,油藏吞吐效益和经济效益明显变差^[3-5],能够使用蒸汽驱^[6-7]或蒸汽辅助重力泄油驱^[8-9]作为接替方式的区块极其有限。火烧油层技术具有适应范围广及驱油效率高等特点^[10-11],常作为注蒸汽热采后的接替方式^[12]。油层较厚时,普通火驱常面临火线过早突破^[13],发生窜槽型燃烧等问题^[14]。为了改善厚层火驱开发效果,提出将水平井应用到火烧油层中,利用重力辅助泄油以提高火驱波及体积^[15],也就是所谓的重力火驱。主要有自上而下(Top-Down)火驱和“趾端到跟端”(THAI)火驱^[16]。Top-Down火驱需在油层上部新钻注气井排,只适用于未开发油藏,井网复杂,对施工工艺要求高^[17]。THAI火驱仅需一注一采,井网简单,新、老油藏均可采用^[18-19]。综合考虑,THAI火驱更适合作为蒸汽吞吐后的接替方式。在矿场实际生产中,蒸汽吞吐多为反九点井网,初始井距一般为150~200 m,后期经过多次加密大多在70~100 m^[20-21]。采用火驱作为接替蒸汽吞吐后的开发方式时,应尽量利用现有井网,以获得较高的采收率和较低的开发成本。

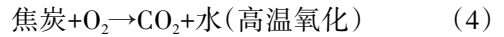
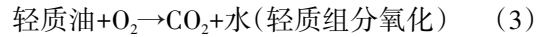
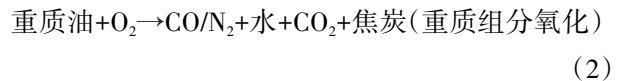
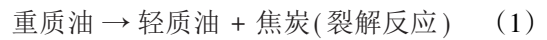
在结合蒸汽吞吐井网特点和各火驱技术特点的基础上,提出了一种利用直井侧钻形成重力火驱的开采方法,使用数值模拟软件全方位多角度地分析了普通火驱与侧钻火驱的开采效果,明确了侧钻火驱的主控油藏地质因素和开发工程因素,揭示了内在增产机理。在理论研究的基础上,开展主控因素与采收率之间的研究,建立了综合预测采收率评价模型。

1 火驱模型建立及效果对比

1.1 火驱模型的建立

利用CMG数值模拟软件中的STARS模块,以辽河油田某稠油油藏区块参数为基础,建立网格为29×29×12的稠油油藏重力火驱模型,油藏长度为140 m,宽度为140 m,厚度为60 m,顶部深度为500 m,孔隙度为0.2,渗透率为500 mD,含油饱和度为0.6,油层条件下原油黏度为536 mPa·s。岩石的热传导率为3.00×10⁵ J/(m·d·℃),油、气、水的热传导率分别为1.20×10⁴,3.2×10³和5.35×10⁴ J/(m·d·℃)。模型中考虑7种组分:水、重质油、轻质油、焦炭、O₂、CO₂、CO/N₂。

稠油油藏中发生的化学反应包括:



在火驱模型中使用反九点井网生产,井距为70 m,中间为注气直井,生产井关井条件设为井筒温度达200℃高温或井筒内氧气含量高于0.05,设定模型最长生产年限为10 a。注气直井在油层上部射孔,射孔层位设在第1,2,3,4小层,注入50℃的纯空气,最大注入压力为20 MPa,采用人工点火,加热温度为450℃,持续加热60 d。采用恒速率注气方案,油层成功点火后,保持注气速率为10 000 m³/d进行生产。在普通火驱中,生产井在直井段全井段射开。在重力火驱中,生产井在直井段不射孔,全部在油层底部(第12小层)侧钻水平段,长度为30 m,利用射孔完井全部射开。

1.2 火驱效果对比

由普通火驱与直井侧钻重力火驱采油速度对比(图1)可以看出,从第570 d开始,2种开采方式的采油速度逐渐升高,分析认为,原油点火成功后,重质油裂解为焦炭燃烧,释放出大量的热,油层温度快速上升,原油受热后黏度显著下降,可流动性大幅提高。普通火驱在2 700 d达到采油速度峰值,而直井侧钻重力火驱在1 000 d的采油速度就已经与之持平,从生产初期至3 500 d,直井侧钻重力火驱的采油速度始终高于普通火驱。相较于普通火驱,利用直井侧钻重力火驱可以获得较高的采油速度,在较短的时间内获得较高的原油产量,开采周期较短,能快速获得经济效益,减少开采风险。

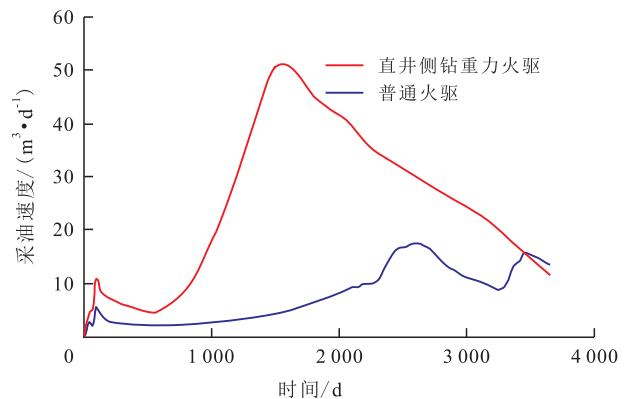


图1 普通火驱与直井侧钻重力火驱采油速度对比

Fig.1 Comparison of oil production rates between conventional fire flooding and gravity fire flooding with vertical well sidetracking

由普通火驱与直井侧钻重力火驱的空气油比

对比(图2)可见,普通火驱的空气油比峰值达4 000 m^3/m^3 ,直井侧钻重力火驱的峰值低于2 000 m^3/m^3 ,且在3 500 d之前普通火驱的空气油比始终高于直井侧钻重力火驱。在火驱采油工艺中,日常操作成本主要集中在空气压缩上^[22]。因此,直井侧钻重力火驱相较于普通火驱,更具成本优势。3 500 d之后直井侧钻重力火驱空气油比高于普通火驱,分析认为,在直井侧钻重力火驱开采后期,油藏内的大部分含油区域均被波及,储层内含油较少,且侧钻水平段的存在使得储层内的气体更容易进入生产井。因此,建议在直井侧钻重力火驱开采后期,可适当减少注气井的空气注入量。

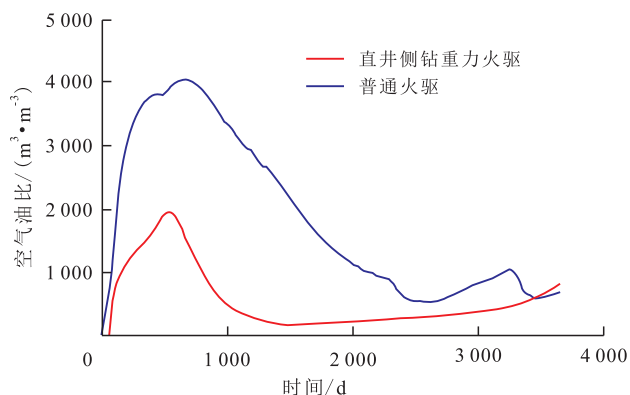


图2 普通火驱与直井侧钻重力火驱空气油比对比

Fig.2 Comparison of air-oil ratio between conventional fire flooding and gravity fire flooding with vertical well sidetracking

由普通火驱与直井侧钻重力火驱的温度场对比(图3)可见,在同一时刻,普通火驱的垂向波及

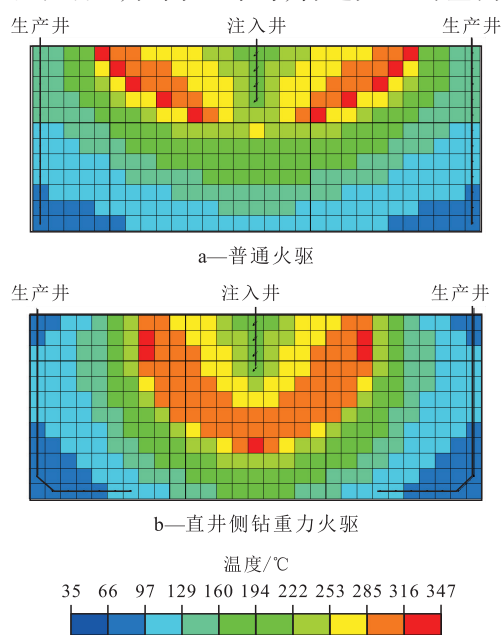


图3 普通火驱与直井侧钻重力火驱温度场对比

Fig.3 Comparison of temperature fields between conventional fire flooding and gravity fire flooding with vertical well sidetracking

差,燃烧只发生在油层上部,且水平超覆严重;而直井侧钻重力火驱由于水平段的牵引作用,火线垂向波及好,平面动用相对均匀,可减缓火线超覆。分析认为,侧钻水平段的存在减少了主井段与注气直井之间的距离,可以充分利用重力辅助泄油,向下牵引火线,调整火线波及方向,能缓解普通火驱水平超覆严重及垂向波及面积小的问题,从而取得较好的开采效果。

由普通火驱与直井侧钻重力火驱的采出程度对比(图4)可以看出,模型运行10 a后,2种开采方式的采出程度都达到最大,普通火驱的采出程度为19%,直井侧钻重力火驱的采出程度为61%,提高的采出程度达42%,效果显著。

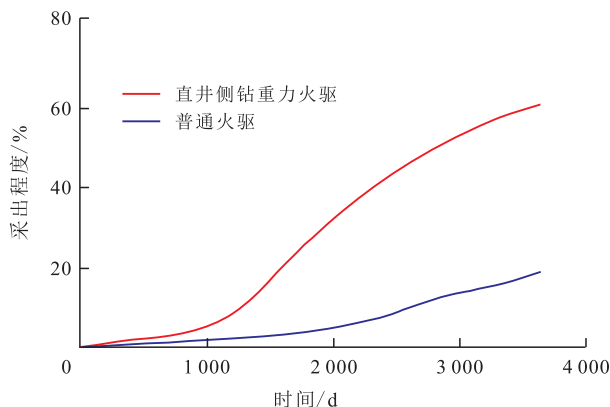


图4 普通火驱与直井侧钻重力火驱采出程度对比

Fig.4 Comparison of recovery degree between conventional fire flooding and gravity fire flooding with vertical well sidetracking

上述分析可知,利用直井侧钻水平段后平面火驱转为重力火驱,可有效抑制气体超覆,提高空气利用效率,扩大火驱波及面积,从而获得更高的采油速度、更低的空气油比和更高的采出程度。

2 直井侧钻重力火驱影响因素分析

在重力火驱过程中,燃烧前缘通常是先在油层底部水平段突破,而一旦氧气从水平段突破,发生燃烧烧毁井筒则难以避免,此时地层中仍有大面积区域未被燃烧带所波及,从而形成死油区^[23]。为了进一步研究在直井侧钻重力火驱过程中各因素对采收率的影响,从油藏地质因素和开发工程因素2方面考虑,进行参数敏感性分析。

2.1 油藏地质因素

通过现场数据及矿场经验得到火烧油层开发方式的筛选标准^[24],分别对原油黏度、原油密度、油层厚度、含油饱和度、渗透率等流体参数和地质参

数进行了界限确定。其中,CHU采用统计学上的可靠性限度法得到筛选标准,并且认为黏度并不是区别火烧油层成功与否的一个参数^[25]。宁奎等基于火驱现场项目参数统计,利用差值置信界限方法对火驱影响因素进行分析,发现油层深度和原油黏度并不是火烧项目成功的关键因素^[26]。原油密度与黏度密切相关,因此,综合考虑火烧油层筛选标准,仅对油藏孔隙度、渗透率、储层厚度和含油饱和度等地质参数进行敏感性分析,不考虑原油密度和黏度等流体参数。

对火烧油层筛选标准主要参数的研究是假定火驱项目成功与否只取决于油藏和原油特性,不考虑现场的施工和操作条件等外界因素影响。显然,在实际的矿场项目中,除了考虑油藏地质因素,开发工程因素对于火驱项目的影响也至关重要。

2.2 开发工程因素

影响直井侧钻重力火驱开采效果的开发工程因素主要有:注气速率、注气井射孔位置、直井侧钻长度和井距。

注气速率 在火烧油层过程中,空气注入量直接反映火烧油层油藏中增加的热量。增加注气速率可以扩大火线波及范围,提高采收率;但过高的注气速率又容易形成气窜通道,导致油层内燃烧不稳定。在一定范围内,增加注气速率可以提高采收率,但是超过最佳注气速率后,生产时间急剧缩短,采收率不升反降。因此注气速率并不是越大越好。

注气井射孔位置 注气井射孔位置位于油层上部时,可以增加射开位置与水平段的距离,延缓火线到达水平井的时间,还可以利用原油的重力作用。位于油层下部时,可以减缓气体超覆导致的纵向动用程度低,防止在开发过程中空气超覆严重影响开发效果。因此,注气井射孔位置对于不同油藏也会发生改变。

直井侧钻长度 在常规火驱中,当注气井与生产井均为直井时,很难保证燃烧前缘有充足的氧气供给,尽管可以通过增大注气量实现,但是增大注气量会导致气窜、空气油比过高等问题。生产直井侧钻水平段过短时,对于气窜或空气油比过高等问题的改善并不明显。而水平段过长时,由于注气直井与水平生产井之间距离很短,空气容易进入水平生产井,造成火窜,引起井筒内原油再次燃烧,烧毁水平井筒,具有严重的安全隐患。需确定一个合适的直井侧钻长度,能够在确保生产安全的同时,获得较好的开发效益。

井距 井距直接限制了直井侧钻长度,不同井距对应不同的直井侧钻长度,井距越大,直井侧钻长度越长。利用归一化处理方法,用直井侧钻长度与井距之比来综合考虑直井侧钻长度与井距,将有量纲的表达式化为无量纲的表达式,打破了只能在单一井距下研究合适直井侧钻长度的局限性,得到合适的两者之比后,可以在已知井距的情况下,反向求得合适的直井侧钻长度,凸显出直井侧钻长度的本质含义。

结合文献调研^[27-28]和矿场实际经验,可以确定影响直井侧钻重力火驱开发效果的主控开发工程因素为:注气速率、注气井射孔位置和直井侧钻长度与井距之比。

2.3 敏感性分析

结合火烧油层筛选标准和矿场经验,油藏地质因素的取值可设定为如表1所示的3种水平。开发工程因素的取值通常取决于油藏地质因素,综合考虑不同油藏地质因素的取值水平,选取油藏地质因素包括孔隙度为0.2,渗透率为500 mD,储层厚度为42 m,含油饱和度为0.6,作为火驱模型中的参数值,注气井均采用上部射孔,分别改变注气速率和直井侧钻长度,得到其与采收率之间的变化规律(图5,图6)。

从图5可以看出,当注气速率从5 000 m³/d变化至15 000 m³/d时,采收率先增大后减小,最小采收率为56.5%,在注气速率为10 000 m³/d时采收率最

表1 油藏地质因素取值水平
Table1 Values of geological factors in reservoirs

因素	孔隙度	渗透率/mD	储层厚度/m	含油饱和度
1	0.2	500	24	0.4
2	0.3	1 000	42	0.5
3	0.4	1 500	60	0.6

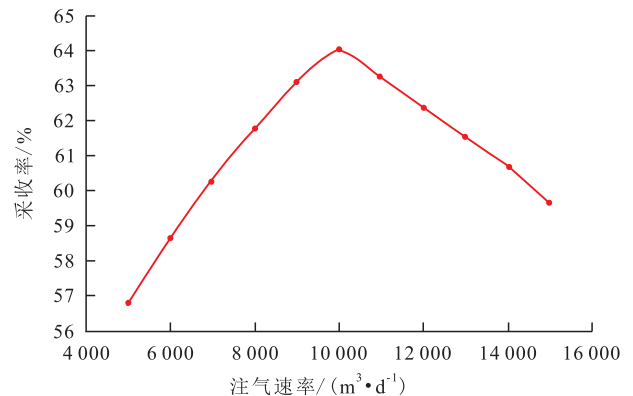


图5 注气速率与采收率的关系
Fig.5 Relationship between gas injection rate and recovery factor

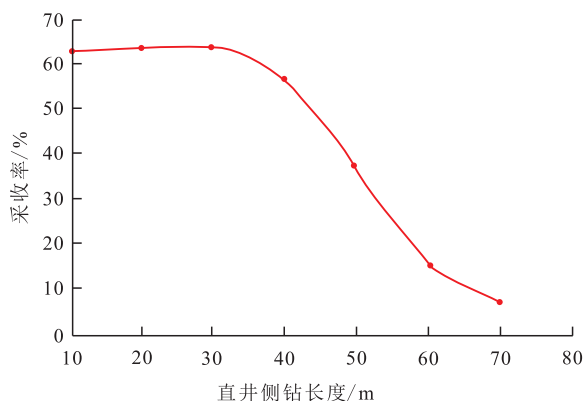


图6 直井侧钻长度与采收率的关系

Fig.6 Relationship between sidetracking length of vertical wells and recovery factor

大为64%。在注气速率变化范围内,采收率的整体波动较小,为了全面研究注气速率对采收率的影响,在火驱模型中对注气速率分别赋值为5 000, 10 000和15 000 m³/d。由图6可见,当直井侧钻长度较短时(10, 20, 30 m),采收率基本保持在64%;当直井侧钻长度较长时(40, 50, 60, 70 m),采收率急剧下滑,在60和70 m时采收率甚至低于15%,已经不具备开发效益和经济效益。

根据采收率变化规律,分别剔除注气速率和直井侧钻长度取值中的异常高值和异常低值,确定注气速率和直井侧钻长度的取值范围;注气井射孔位置可以分为上部射孔、中部射孔和下部射孔,为了将注气井射孔位置引入数据分析,同时考虑便于数据处理,分别使用1/3, 2/3和1来表示上部射孔、中部射孔和下部射孔;得到开发工程因素的取值水平(表2)。

表2 开发工程因素取值水平
Table2 Values of engineering factors

因素	注气速率/(m ³ ·d ⁻¹)	注气井射孔位置	直井侧钻长度/m
1	5 000	1/3	30
2	10 000	2/3	40
3	15 000	1	50

在火驱模型中,直井的侧钻通过地层射孔来实现,侧钻长度对应着不同的射孔个数,而在每一个

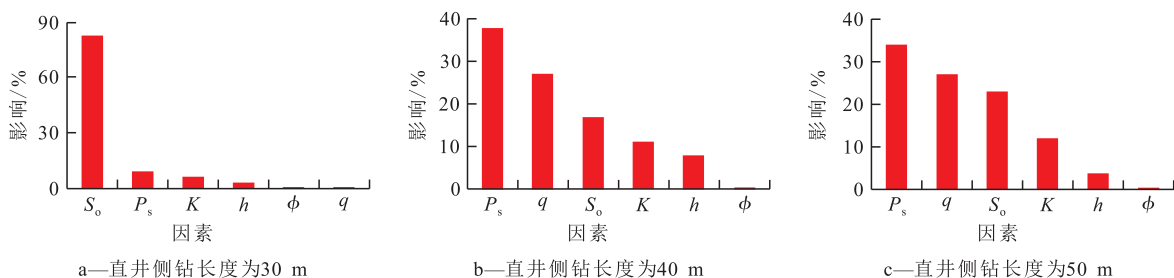


图7 采收率敏感性分析结果

Fig.7 Sensitivity analysis results of the recovery factor

火驱模型中,每口井的射孔个数是一个固定值,不能体现直井侧钻长度的改变。因此,分别在直井侧钻长度为30, 40和50 m的情况下,基于CMOST模块中的代理模型,分析其他因素对采收率的敏感性,由分析结果(图7)可见,直井侧钻长度较短(30 m)时,含油饱和度对采收率的影响最大,其值为82%,占据了绝对的主导地位,此时其他的油藏地质因素和开发工程因素对于采收率的影响甚微;随着直井侧钻长度的增加,对采收率影响最大的因素由含油饱和度变成了注气井射孔位置,但其他的影响因素如注气速率、含油饱和度等对采收率仍有较大影响。分析认为,当直井侧钻长度较短,表现为直井侧钻长度与井距之比为3/7时,水平井离注气井之间的距离较远,开发工程因素对采收率影响较小,此时仍是油藏地质因素对采收率的影响占据主导地位;当直井侧钻长度较长,表现为直井侧钻长度与井距之比为4/7和5/7时,水平井离注气井之间的距离较近,开发工程因素对于采收率的影响迅速增加,与油藏地质因素同等重要。分析认为当直井侧钻长度约为生产井与注气井之间井距的1/2时,可以获得较好的开采效果。在进行直井侧钻重力火驱时,若储层含油饱和度较高,可适当减小直井侧钻长度,减少其他地质因素和开发工程因素对采收率的影响;若含油饱和度较低,可适当增大直井侧钻长度,降低含油饱和度的重要程度,扩大注气井射孔位置和注气速率等开发工程因素的影响,通过调整开发政策来克服地质条件较差的情况,以期获得较好的开采效果。

3 多元线性回归方程求解

3.1 模拟结果预处理

由于所研究的油藏地质因素和开发工程因素较多,涉及的因素取值数量更多,如果采用数值模拟计算,需要人为调整大量的模型参数进行排列组合,工作量巨大。而采用CMOST多项式模型进行运

算时,只需把研究因素的取值范围输入,软件会将主控因素在不同取值下的情况自由排列组合运算,得到每一种组合方式下的采收率。

确定好主控因素及其取值范围后,在火驱模型中给对应的参数赋值,利用CMOST模块的代理模型进行运算。由于所研究的参数较多,得到的不同组合方式下的采收率结果众多,且有些采收率结果过低,不符合油藏实际情况。基于图6得到的直井侧钻长度与采收率关系对模拟结果进行筛选,直井侧钻长度为30 m时以采收率为64%作为基准,直井侧钻长度为40 m时以采收率为50%作为基准,直井侧钻长度为50 m时以采收率为30%作为基准,上下浮动10%为界,得到29组模拟结果。综合考虑各因素对采收率的影响,同时简化最终得到的多元线性回归方程的复杂程度,根据实际情况,建立各因素之间的联系。其中,含油饱和度和孔隙度用二者之乘积即储量系数($S_o\phi$)表示,渗透率和储层厚度用二者之乘积即地层系数(Kh)表示,注气速率和储层厚度用二者之比即注气强度(q/h)表示。由于组数过多,在此仅列出其中9组的相关数据。

表3 不同主控因素组合下的采收率
Table3 Recovery factors under different combinations of main controlling factors

直井侧钻长度	射孔位置	$S_o\phi$	Kh	q/h	采收率/%
3/7	1/3	0.18	60 000	250.00	55.87
3/7	2/3	0.1	63 000	357.14	53.74
3/7	1	0.24	36 000	416.67	54.78
4/7	1/3	0.2	90 000	250.00	46.36
4/7	2/3	0.18	90 000	83.33	45.45
4/7	1	0.2	24 000	625.00	42.25
5/7	1/3	0.12	42 000	357.14	33.62
5/7	2/3	0.18	21 000	238.09	25.73
5/7	1/3	0.2	9 000	83.33	37.32

表4 数值模拟结果和计算结果对比
Table4 Comparison between results from numerical simulation and calculation

序号	直井侧钻长度	射孔位置	$S_o\phi$	Kh	q/h	采收率 /%		
						模拟值	预测值	误差
1	3/7	1/3	0.18	60 000	250	55.87	63.30	13.29
2	3/7	1	0.24	36 000	416.67	54.78	56.48	3.10
3	4/7	2/3	0.18	90 000	83.33	45.45	43.76	3.72
4	4/7	1	0.2	24 000	625	42.25	44.04	4.24
5	5/7	1/3	0.12	42 000	357.14	33.62	32.41	3.60
6	5/7	2/3	0.18	21 000	238.09	25.73	23.29	9.48

3.2 回归方程的建立

设因变量 y 与自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 共有 n 组实际观测数据,假定因变量与自变量之间存在线性关系,则其数学模型为:

$$y_j = a_0 + a_1x_{1j} + a_2x_{2j} + \dots + a_mx_{mj} + e_j \quad (1)$$

将模拟结果导入 Excel 表格中,根据已有的主控因素之间的关系以及归一化方法,对参数数据进一步处理,通过 Excel 外挂的数据分析工具进行线性回归分析,得到采收率与主控因素之间的多元线性回归方程。

Excel 中的数据分析功能是利用最小二乘法,获得非常精确的多元线性回归方程。在数据分析窗口中选择“回归”,调出多元回归模型。将样本数据所在的区域选取到相应的子窗口,系统会立即计算该模型,并给出相应的计算结果报告。利用数据分析功能对主控因素和采收率进行线性回归,得到多元线性回归方程为:

$$y = 108.998\ 88 - 114.507\ 04 \frac{l}{L} - 9.034\ 21P_s - 26.452\ 59S_o\phi + 1.037\ 84 \times 10^{-4}Kh - 1.969\ 02 \times 10^{-2} \frac{q}{h} \quad (2)$$

由相关的回归分析报告可知,模型的复相关系数为0.942,表明采收率 y 与 $l/L, P_s, S_o\phi, Kh, q/h$ 之间相关程度高; F 显著性统计量的 P 值为 5.64×10^{-12} ,远小于显著水平 0.05,表明所建立模型的回归效果显著。

另外对几组主控因素取值,利用数值模拟软件得到采收率的准确值,并与回归方程((2)式)计算得到的采收率预测值进行对比。由预测结果(表4)可以看出,数值模拟软件得到的采收率和回归方程预测的采收率吻合度很高,误差均在15%以内,说明该多元线性回归方程能有效预测直井侧钻重力火驱的开发效果,指导矿场实际生产。

4 结论

在蒸汽吞吐开发后期,尤其是对于厚层稠油油藏,转换开发方式为火驱时可着重考虑利用已有井网,对直井开窗侧钻水平段,由平面火驱转变为重力火驱,有效避免平面火驱的问题,明显改善火驱效果。

从油藏地质因素和开发工程因素2方面对采收率进行敏感性分析,其中主控油藏地质因素为孔隙度、渗透率、储层厚度和含油饱和度,主控开发工程因素为注气速率、注气井射孔位置和直井侧钻长度与井距之比。认为当直井侧钻长度约为生产井与注气井之间井距的1/2时,可以获得较好的开采效果,当油藏条件较差时可以适当增加直井侧钻长度。

由主控因素和采收率之间的关系得到多元线性回归模型,其预测的采收率与数值模拟软件得到的采收率拟合度高,能有效预测直井侧钻重力火驱的开发效果,对于指导矿场实际生产具有一定的实用性。

符号解释

- a_0, a_m ——回归系数;
 e_j ——相互独立且都服从标准的正态分布, $j=1, 2, \dots, n$;
 F ——回归方程显著性检验方法;
 h ——储层厚度, m;
 K ——渗透率, mD;
 Kh ——地层系数, mD·m;
 l ——直井侧钻长度, m;
 L ——井距, m;
 m ——自变量的个数;
 n ——不同主控因素取值组合下得到的模拟结果组数;
 P —— F 检验的衡量指标;
 P_s ——注气井射孔位置;
 q ——注气速率, m^3/d ;
 q/h ——注气强度, $m^3/(d \cdot m)$;
 S_o ——含油饱和度;
 $S_o \phi$ ——储量系数;
 x_1, x_2, \dots, x_m ——可以观察的1组变量, 此处表示影响采收率的主控因素;
 y ——观测的随机变量, 其值随 x_1, x_2, \dots, x_m 的改变而改变, 且受试验误差影响, 此处表示采收率;
 ϕ ——孔隙度。

参考文献

[1] 万绪新, 谢广龙, 丁余刚. 胜利油田难动用石油储量地质工程

一体化探索[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 43-50.

WAN Xuxin, XIE Guanglong, DING Yugang. Exploration on geology-engineering integration of hard-to-recover reserves in Shengli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 43-50.

[2] 张抗, 张立勤. 21世纪初中国原油储量、产量构成变化分析及启示[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(3): 280-296.

ZHANG Kang, ZHANG Liqin. The analysis on the composition changes of China's crude oil reserves and production in early 21th century and its enlightenment[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 280-296.

[3] 张方礼. 火烧油层技术综述[J]. 特种油气藏, 2011, 18(6): 1-5, 65.

ZHANG Fangli. An overview of in situ combustion technology[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 1-5, 65.

[4] 蒋琪, 游红娟, 潘竞军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.

JIANG Qi, YOU Hongjuan, PAN Jingjun, et al. Preliminary discussion on current status and development direction of heavy oil recovery technologies[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 30-39.

[5] 王诗灏. 特深层稠油油藏火驱可行性[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 83-89.

WANG Shihao. Feasibility of the fire flooding in the extra-deep heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 83-89.

[6] 张义堂, 李秀峦, 张霞. 稠油蒸汽驱方案设计及其跟踪调整四项基本准则[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 715-719.

ZHANG Yitang, LI Xiuluan, ZHANG Xia. Four fundamental principles for design and follow-up of steam flooding in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 715-719.

[7] 张洪宝, 刘永建, 塔耀晶, 等. 稠油油藏氮气辅助蒸汽驱室内实验[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 624-627.

ZHANG Hongbao, LIU Yongjian, TA Yaojing, et al. Laboratory experiment of nitrogen assisted steam flooding in heavy oil reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(5): 624-627.

[8] 刘尚奇, 王晓春, 高永荣, 等. 超稠油油藏直井与水平井组合SAGD技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 234-238.

LIU Shangqi, WANG Xiaochun, GAO Yongrong, et al. SAGD process with the combination of vertical and horizontal wells in super-heavy oil reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 234-238.

[9] 刘志波, 程林松, 纪佑军, 等. 蒸汽与天然气(SAGP)开采特征——与蒸汽辅助重力泄油(SAGD)对比分析[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 79-83.

LIU Zhibo, CHENG Linsong, JI Youjun, et al. Production features of steam and gas push: Comparative analysis with steam assisted gravity drainage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 79-83.

[10] 赵睿智, 陈明贵, 高飞, 等. 厚层稠油油藏直井组合火驱优化[J]. 断块油气田, 2020, 27(2): 233-237.

ZHAO Ruizhi, CHEN Minggui, GAO Fei, et al. In-situ combustion optimization of vertical and horizontal wells combination for

- heavy oil reservoirs with thick layer[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(2): 233-237.
- [11] 才业. 水淹稠油油藏火驱开发受效特征研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(5): 125-131.
CAI Ye. Study on the response characteristics of fire flooding in water-flooded heavy oil reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(5): 125-131.
- [12] 张锐, 朴晶明, 邓明. 火烧油层段塞+蒸汽驱组合式开采技术研究[J]. *特种油气藏*, 2007, 14(5): 65-69.
ZHANG Rui, PU Jingming, DENG Ming. Compound recovery by in situ combustion slug+steam flooding[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2007, 14(5): 65-69.
- [13] 王泰超, 朱国金, 王凯, 等. 海上稠油油藏多元热流体吞吐后转火驱开发研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(5): 100-105.
WANG Taichao, ZHU Guojin, WANG Kai, et al. Conversion from multi-component thermal fluid flooding to fire-flooding in offshore heavy oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 100-105.
- [14] 高飞. 深层厚层块状稠油油藏直平组合火驱技术研究[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(3): 93-96.
GAO Fei. Study on fire flood with combination of vertical and horizontal wells for deep massive heavy oil reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(3): 93-96.
- [15] GREAVES M, SAGHR A M, XIA T X. Thai-new air injection technology for heavy oil recovery and in situ upgrading [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2001, 40(3): 38-47.
- [16] 薛宗占. 深层块状稠油油藏转重力火驱研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
XUE Zongzhan. Study on deep and massive heavy oil reservoir converted to fireflooding with assisted gravity drainage [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [17] COATES R, LORMIER S, IVORY J. Experimental and numerical simulations of a novel top down in-situ combustion process [R]. SPE 97728, 1995.
- [18] XIA T X. Injector-/producer-well combinations in toe-to-heel air injection [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2002, 54(6): 53-54.
- [19] 关文龙, 田利, 郑南方. 水平裂缝蒸汽辅助重力泄油物理模拟试验研究[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(3): 50-54.
GUAN Wenlong, TIAN Li, ZHENG Nanfang. Stimulation experiment on horizontal fracture-steam assisted gravity drainage [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2003, 27(3): 50-54.
- [20] 关文龙, 席长丰, 陈亚平, 等. 稠油油藏注蒸汽开发后期转火驱技术[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 452-462.
GUAN Wenlong, XI Changfeng, CHEN Yaping, et al. Fire-flooding technologies in post-steam-injected heavy oil reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 452-462.
- [21] 窦宏恩, 常毓文, 于军, 等. 稠油蒸汽吞吐过程中加热半径与井网关系的新理论[J]. *特种油气藏*, 2006, 13(4): 58-61.
DOU Hongen, CHANG Yuwen, YU Jun, et al. A new theory of the relationship between heating radius and well pattern during CSS process [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2006, 13(4): 58-61.
- [22] 王元基, 何江川, 廖广志, 等. 国内火驱技术发展历程与应用前景[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 909-914.
WANG Yuanji, HE Jiangchuan, LIAO Guangzhi, et al. Overview on the development history of combustion drive and its application prospect in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 909-914.
- [23] 关文龙, 吴淑红, 梁金中, 等. 从室内实验看火驱辅助重力泄油技术风险[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(4): 67-72.
GUAN Wenlong, WU Shuhong, LIANG Jinzhong, et al. The research on engineering risk in combustion assisted gravity drainage based on indoor experiment [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(4): 67-72.
- [24] 王弥康. 火烧油层热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.
WANG Mikang. Thermal recovery of in-situ combustion reservoir [M]. Dongying: Press of University of Petroleum, China, 1998.
- [25] CHU C. A study of fireflood field projects [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1977, 29(2): 111-120.
- [26] 宁奎, 袁士宝, 蒋海岩. 火烧油层理论与实践[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.
NING Kui, YUAN Shibao, JIANG Haiyan. In-situ combustion theory & practice [M]. Dongying: Press of China University of Petroleum, 2010.
- [27] 曲占庆, 李杨, 林珊珊, 等. THAI技术开发厚层稠油油藏井网参数优选[J]. *断块油气田*, 2014, 21(5): 627-631.
QU Zhanqing, LI Yang, LIN Shanshan, et al. Parameter optimization of well pattern for heavy oil reservoir with thick layer exploited by THAI technology [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21(5): 627-631.
- [28] 苏磊. 薄互层稠油油藏直平组合火驱技术[J]. *断块油气田*, 2016, 23(1): 129-132, 136.
SU Lei. Fire flooding with the combination of vertical and horizontal wells in heavy oil reservoir of thin interbeds [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2016, 23(1): 129-132, 136.

编辑 刘北羿