

# 孤岛油田底水稠油油藏注氮气辅助 蒸汽吞吐的选区新方法

杨 阳<sup>1</sup>, 刘慧卿<sup>1</sup>, 庞占喜<sup>1</sup>, 张兆祥<sup>1</sup>, 陈庆元<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大港油田分公司 勘探事业部, 天津 300000)

**摘要:**在注入相同蒸汽量的基础上分析注氮气辅助蒸汽吞吐效果时,许多学者忽略了注入总热量对蒸汽吞吐的影响。在注入总热量相同的条件下,通过分析孤岛油田底水稠油油藏特征,选取研究区3种典型地层参数,即油层厚度分别为2~5, 5~8和8 m以上,渗透率分别为 $500 \times 10^{-3}$ ,  $1\ 000 \times 10^{-3}$ ,  $2\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,对应的孔隙度分别为30%, 35%和40%,利用数值模拟技术从增油量、加热半径和底水锥进程度3个方面,对注氮气辅助蒸汽吞吐的效果进行了对比。建立了强底水和弱底水条件下普通稠油以及特稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐地层参数的筛选图版,利用该图版可有效分析底水稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐的可行性。研究表明:孤岛油田东区Ng3和中二北Ng5油层适合注氮气辅助蒸汽吞吐;孤北1区Ng3油层不适合注氮气辅助蒸汽吞吐。

**关键词:**稠油油藏 底水油藏 蒸汽吞吐 注氮气 数值模拟 孤岛油田

**中图分类号:** TE345

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)03-0058-04

孤岛油田构造上隶属于渤海湾盆地济阳拗陷沾化凹陷,为发育在孤岛凸起之上的以新近系馆陶组为主要储油层系的大型披覆背斜油田,其石油储量大,产量高,是中国著名油田之一<sup>[1]</sup>。根据孤岛油田的地质特征,分别对强、弱底水稠油油藏和特稠油油藏进行了数值模拟研究。油藏顶面深度为1 250 m,普通稠油和特稠油在50℃时粘度分别为5 000和12 000 mPa·s,原始含油饱和度为65%,初始地层温度为60℃。选取孤岛油田3种典型地层参数实施注氮气辅助蒸汽吞吐,即渗透率分别为 $500 \times 10^{-3}$ ,  $1\ 000 \times 10^{-3}$ 和 $2\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;对应的孔隙度分别为30%, 35%和40%;油层厚度分别为2~5, 5~8和8 m以上。

蒸汽吞吐主要是通过温度的升高改变稠油的流动性以达到高效采油的目的。许多学者在注入相同蒸汽量的基础上对比分析注氮气对蒸汽吞吐的改善,却忽略了注入总热量对蒸汽吞吐的影响,不能充分体现注氮气对蒸汽吞吐的改善程度<sup>[2-5]</sup>。因此,在注入总热量相同的条件下,对注氮气辅助蒸汽吞吐重新进行了对比分析。为使注氮气辅助蒸汽吞吐时波及体积达到最大,选取氮气和蒸汽的

混注比为20:1<sup>[6]</sup>。

## 1 注氮气辅助蒸汽吞吐效果对比

根据热力学中干度定义,在干度为0.55时,湿蒸汽焓值为

$$H_s = (1 - 0.55) H_w + 0.55 H_{s1} \quad (1)$$

式中: $H_s$ 为湿蒸汽焓值,kJ/m<sup>3</sup>;  $H_w$ 为饱和水焓值,kJ/m<sup>3</sup>;  $H_{s1}$ 为饱和蒸汽焓值,kJ/m<sup>3</sup>。

当注入蒸汽密度为46.19 kg/m<sup>3</sup>时,湿蒸汽焓值为96 362.802 kJ/m<sup>3</sup>;当氮气注入温度为300℃时,氮气焓值为395 kJ/m<sup>3</sup>。根据注入总热量相同得

$$\begin{cases} Q_{s1} H_s = Q_g H_g + Q_{s2} H_s \\ \frac{Q_{s2}}{Q_g} = \frac{1}{20} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{s1}$ 为只注蒸汽时的注汽强度,m<sup>3</sup>/m;  $Q_g$ 为注氮气强度,m<sup>3</sup>/m;  $H_g$ 为氮气焓值,kJ/m<sup>3</sup>;  $Q_{s2}$ 为注氮气辅助蒸汽吞吐时的注汽强度,m<sup>3</sup>/m。

以4个轮次作为研究对象,第1轮次注汽强度选用270 m<sup>3</sup>/m,周期递增率约为1.15,后3个轮次的

收稿日期:2014-03-24。

作者简介:杨阳,男,在读博士研究生,从事非常规油气田开发研究。联系电话:18810267464, E-mail: whitesheep00@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率基础研究”(2011CB201006),国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏提高开发效果技术研究”(2011ZX05014-003-008HZ),中国石油化工股份有限公司项目“塔河缝洞单元注水评价及优化技术”(P13142)。

注汽强度依次为310,360和410 m<sup>3</sup>/m。为了与实际生产情况相近,从第3轮次开始对比蒸汽吞吐与注氮气辅助蒸汽吞吐的效果。由式(2)的计算结果(表1)可以看出,注氮气辅助蒸汽吞吐一组的注汽量小于蒸汽吞吐的,这是注入总热量相同导致的必然结果。

轮次数	注入流体	注汽强度/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	注氮气强度/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )
第3轮次	蒸汽	360	0
	蒸汽+氮气	330	6 600
第4轮次	蒸汽	410	0
	蒸汽+氮气	380	7 600

### 1.1 增油量对比

对于不同地层参数条件下的稠油油藏而言,添加氮气后可有效改善吞吐的开发效果,其增油效果明显。随着油层厚度的增加或地层渗透率和孔隙度的增大,累积增油量和累积油汽比也不断增加。从增加幅度上可以看出,油层的渗透率和孔隙度比油层厚度对增油量的影响显著。这表明地层条件越好,氮气改善蒸汽吞吐的效果越好(表2)。

渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	孔隙 度, %	注入 流体	油层厚 度/m	累积产 油量/m <sup>3</sup>	累积增 油量/m <sup>3</sup>	累积油汽 比/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )
500	30	蒸汽	3	1 613.14		0.398
			6	3 754.79		0.464
			10	6 639.78		0.492
		蒸汽+ 氮气	3	1 781.36	168.22	0.476
			6	4 029.16	274.37	0.538
			10	7 104.73	464.95	0.569
1 000	35	蒸汽	3	2 011.52		0.497
			6	4 415.24		0.545
			10	7 699.28		0.570
		蒸汽+ 氮气	3	2 277.1	265.58	0.608
			6	4 925.09	509.85	0.658
			10	8 429.97	730.69	0.676
2 000	40	蒸汽	3	2 384.08		0.589
			6	5 193.09		0.641
			10	8 948.74		0.663
		蒸汽+ 氮气	3	2 703.24	319.16	0.722
			6	5 716.94	523.85	0.764
			10	10 006.9	1 058.16	0.802

### 1.2 加热半径增加量对比

由不同条件下加热半径增加量的对比(图1)可知:①在不同的油层厚度下,注入氮气辅助蒸汽吞

吐后,蒸汽吞吐的加热半径都明显增加,并且随着地层渗透率和孔隙度的增大,加热半径增加量逐渐增大。②当地层渗透率和孔隙度很小时,油层越厚,加热半径增加量越大;当地层渗透率和孔隙度很大时,油层越薄,加热半径增加量也越大。③油层越厚,随着渗透率和孔隙度的增大,加热半径增加幅度越小。总之,注氮气辅助蒸汽吞吐开发效果变好的主要原因在于增大了生产压差,扩大了蒸汽的波及范围,提高了蒸汽的洗油效率<sup>[7]</sup>。

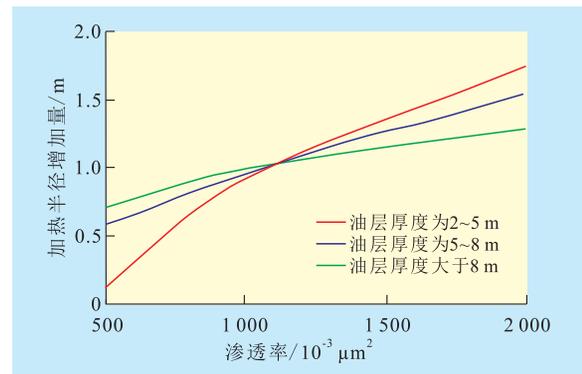


图1 加热半径增加量对比

### 1.3 底水锥进

通过对数值模拟过程中每个时间点各参数的监测,注氮气辅助蒸汽吞吐抑制底水锥进主要体现在3个方面:①氮气在地层条件下生成一定数量的气泡起到了封堵作用,对底水的向上锥进有一定的抑制作用;②注入氮气维持了地层压力,抑制了由于底水能量过大导致的水锥;③由于氮气的作用,水相相对渗透率降低,从而降低了油水界面张力,控制了水锥<sup>[8-10]</sup>。

## 2 注氮气辅助蒸汽吞吐适用条件

在注入总热量相同的条件下,注氮气辅助蒸汽吞吐能减少蒸汽注入量,增加累积产油量,但不一定能带来经济效益。以孤岛油田参数为基础,通过计算增收益,形成稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐的地质筛选条件,从而建立以油层厚度、渗透率为变量的筛选图版。

### 2.1 增收益平衡点

注汽费为236.76元/t,注氮气费为5元/m<sup>3</sup>(标准状况下),操作费为1 565元/t,管理费为48.52元/t,平均单井日费用为576元/t,销售费按销售收入的0.25%提取,约为每吨油1.86元;税金按每吨油15.5元提取。注氮气辅助蒸汽吞吐的增收益为:增油量×(油价-操作费-管理费-平均单井日费用-销售

费-税金)+减少的注汽量×注汽费-注氮气量×注氮  
气费。计算结果如图2和图3所示。

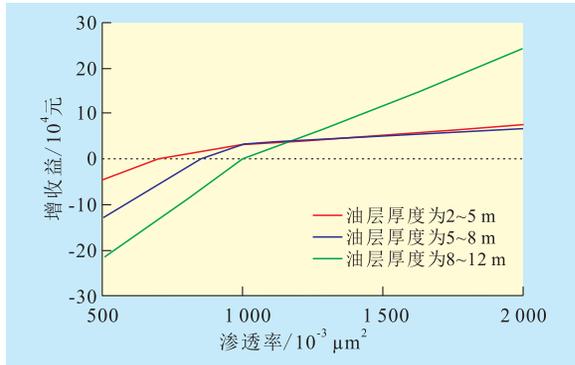


图2 弱底水普通稠油油藏增收益

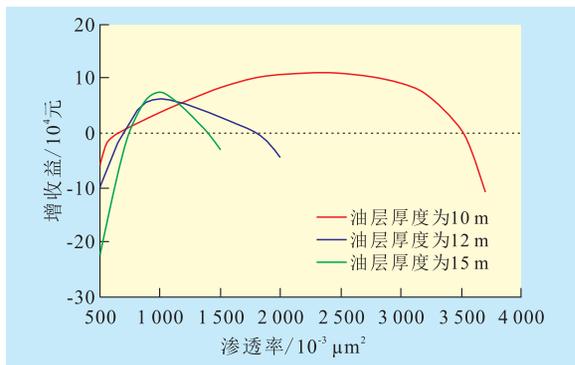


图3 强底水普通稠油油藏增收益

弱底水普通稠油油藏 对于油层厚度为2~5  
m的稠油油藏,渗透率小于 $700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时增收益  
为负值,应注蒸汽;大于该值时应注氮气辅助蒸汽  
吞吐,增收益平衡点为 $700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对于油层厚  
度为5~8 m的稠油油藏,渗透率小于 $850 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$   
时增收益为负值,应注蒸汽;大于该值时应注氮气  
辅助蒸汽吞吐,增收益平衡点为 $850 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对  
于油层厚度为8~12 m的稠油油藏,渗透率小于  
 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时增收益为负值,应注蒸汽;大于  
该值时应注氮气辅助蒸汽吞吐,增收益平衡点为  
 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

强底水普通稠油油藏 强底水普通稠油油藏  
油层厚度通常大于8 m。对于油层厚度为10 m的稠  
油油藏,渗透率小于 $650 \times 10^{-3}$ 和大于 $3500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$   
时增收益为负值,应注蒸汽;当渗透率为 $650 \times 10^{-3} \sim$   
 $3500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时应注氮气辅助蒸汽吞吐,初始增收  
益平衡点为 $650 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,闭合增收益平衡点为  
 $3500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对于油层厚度为12 m的稠油油藏,  
渗透率小于 $700 \times 10^{-3}$ 和大于 $1800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时增收  
益为负值,应注蒸汽;当渗透率为 $700 \times 10^{-3} \sim 1800 \times$   
 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时应注氮气辅助蒸汽吞吐,初始增收益平衡  
点为 $700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,闭合增收益平衡点为 $1800 \times 10^{-3}$

$\mu\text{m}^2$ 。对于油层厚度为15 m的稠油油藏,渗透率小  
于 $750 \times 10^{-3}$ 和大于 $1400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时增收益为负值,  
应注蒸汽;当渗透率为 $750 \times 10^{-3} \sim 1400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时  
应注氮气辅助蒸汽吞吐,初始增收益平衡点为 $750 \times$   
 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,闭合增收益平衡点为 $1400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

特稠油油藏 对于特稠油油藏而言,不论油层  
厚度和渗透率、孔隙度如何变化,注氮气辅助蒸汽  
吞吐增收益都为负值,所以不适合应用注氮气辅助  
蒸汽吞吐开发。

### 2.2 筛选图版的建立

利用不同油层厚度、渗透率和孔隙度下的增收  
益平衡点,绘制增收益平衡曲线。由弱底水普通稠  
油油藏地层参数筛选图版(图4)可见,当地层参  
数值是曲线上的某点时,注蒸汽与注氮气辅助蒸  
汽吞吐的收益相同,即增收益为零;当地层参数  
值落在曲线上方区域时,增收益为负值,应选用  
注蒸汽;当地层参数值落在曲线下方区域时,  
增收益为正值,应选用注氮气辅助蒸汽吞吐。  
增收益平衡曲线特征为两端平缓、中间陡峭。  
当渗透率很小时,油层厚度越大,应选用注  
蒸汽;当渗透率很大时,油层厚度越小,应  
选用注氮气辅助蒸汽吞吐。

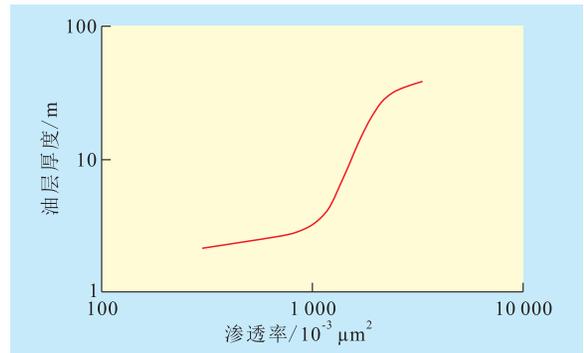


图4 弱底水普通稠油油藏地层参数筛选图版

利用初始增收益平衡点绘制初始增收益平衡  
曲线,闭合增收益平衡点绘制闭合增收益平衡  
曲线,建立强底水普通稠油油藏地层参数筛选  
图版(图5)。当地层参数值是曲线上的某点  
时,注蒸汽

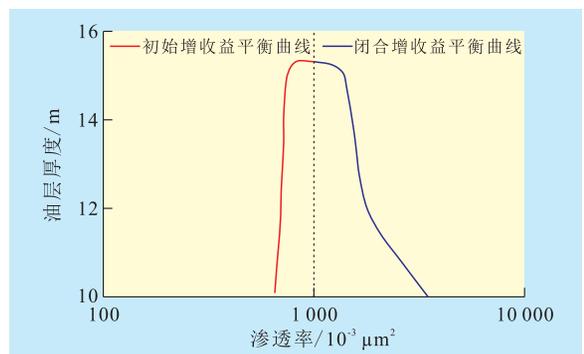


图5 强底水普通稠油油藏地层参数筛选图版

与注氮气辅助蒸汽吞吐的收益相同,即增收益为零;当地层参数值位于2条曲线所围区域之外时,增收益为负值,应选用注蒸汽;当地层参数位于2条曲线所围区域之内时,增收益为正值,应选用注氮气辅助蒸汽吞吐。

### 3 应用实例

孤岛油田东区 Ng3 油层的原油粘度为 3 000 ~ 5 500 mPa·s,属于弱底水普通稠油油藏。油层厚度为 6.3 m,平均渗透率为  $1\ 800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,对照图 4,其地层参数位于增收益平衡曲线的下方,因此适合注氮气辅助蒸汽吞吐。

孤岛油田中二北 Ng5 油层的原油粘度为 5 000 ~ 10 000 mPa·s,属于强底水普通稠油油藏<sup>[11]</sup>。油层厚度为 12 m,平均渗透率为  $1\ 700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,对照图 5,其地层参数位于初始增收益平衡曲线与闭合增收益平衡曲线所围区域内,因此适合注氮气辅助蒸汽吞吐。

孤北 1 区 Ng3 油层为过饱和重质稠油油藏,其原油具有高密度、高粘度、高含硫的“三高特点”,50 ℃时地面原油动力粘度为 13 769 mPa·s,属于特稠油油藏<sup>[12]</sup>。因此不适合注氮气辅助蒸汽吞吐。

### 4 结论

从新的角度研究了注氮气辅助蒸汽吞吐,即在注入总热量相同的条件下,经过数值模拟计算,对比分析注氮气改善蒸汽吞吐的效果,结果表明不仅增加了累积产油量,扩大了加热半径,而且能抑制底水锥进。这主要是因为氮气渗透性好且膨胀系数大,具有助排作用,可扩大蒸汽加热半径,降低残余油饱和度;加注氮气增加的压力起到了补充地层能量的作用,延长了吞吐周期;氮气的注入起到有

效的隔热作用,并且在地层条件下生成一定数量的气泡,起到了封堵作用。

建立了弱底水和强底水普通稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐的地层参数筛选图版,利用该图版可有效分析底水稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐的可行性;对于特稠油油藏而言,不适合注氮气辅助蒸汽吞吐。图版应用结果表明:孤东油田东区 Ng3、中二北 Ng5 油层适合注氮气辅助蒸汽吞吐;孤北 1 区 Ng3 油层不适合注氮气辅助蒸汽吞吐。

#### 参考文献:

- [1] 乐大发,陈清华,张福利.孤岛油田南区馆 1+2 砂层组细分对比标志特征[J].地球科学与环境学报,2011,3(1):84-88.
- [2] 刘慧卿,侯志杰,高本成,等.高 3 断块烟道气蒸汽混注驱替实验研究[J].石油勘探与开发,2001,28(5):79-81.
- [3] 李奋.永 8 断块稠油油藏渗流规律研究[J].油气地质与采收率,2006,13(2):62-65.
- [4] 张凯,李阳,王琳娜,等.稠油流变特性实验研究[J].油气地质与采收率,2007,14(5):91-94.
- [5] 李睿珊,何建华,唐银明,等.稠油油藏氮气辅助蒸汽增产机理试验研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(1):72-75.
- [6] 陈晓源.氮气辅助蒸汽吞吐工艺在面 120 区的应用研究[J].钻采工艺,2004,27(6):53-59.
- [7] 崔连训.河南稠油油藏氮气辅助蒸汽吞吐机理及氮气添加量优化研究[J].石油地质与工程,2012,26(2):64-70.
- [8] 杨元亮,沈国华,宋文芳,等.注氮气控制稠油油藏底水水锥技术[J].油气地质与采收率,2002,9(3):84-88.
- [9] 于会永,刘慧卿,张传新,等.超稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐数模研究[J].特种油气藏,2012,19(2):76-78.
- [10] 霍刚,范潇.混注烟道气辅助蒸汽吞吐驱替机理数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2012,19(4):59-61,65.
- [11] 陆先亮,束青林,曾祥平,等.孤岛油田精细地质研究[M].北京:石油工业出版社,2005.
- [12] 李琴.孤岛油田孤北 1 地区稠油油藏特征及储层敏感性分析[J].断块油气田,2005,12(4):28-30.

编辑 刘北羿

欢迎广大科技人员踊跃投稿