

文章编号: 1000 0747(2006) 04 0479 05

胜利油区水驱普通稠油油藏注蒸汽 提高采收率研究与实践

周英杰

(中国石化胜利油田地质科学研究所)

基金项目: 中国石油天然气总公司基金项目“孤岛油田水驱后注蒸汽开采可行性研究及先导试验”(960503 2)

摘要: 胜利油区地层条件下原油黏度大于 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的普通稠油油藏水驱采收率一般低于 18% , 普通稠油油藏采收率低于 25% 的储量达到 3.75 亿 t 。稠油为非牛顿流体, 渗流所需剪切应力大; 压力梯度相同, 油越稠渗流速度越低; 常温驱油效率低, 水驱波及系数小, 且水驱后原油黏度增加。稠油加热后渗流速度大幅度增加, 启动压力梯度减小, 油水相对渗透率得到改善, 驱油效率大幅增长。因此, 注蒸汽热采可以改善稠油渗流特性, 降低残余油饱和度, 提高驱油效率、波及系数及采收率。为进一步提高水驱后普通稠油油藏的采收率, 在优化注蒸汽开发技术政策的基础上, 在孤岛油田开展了先导试验, 明显提高了采收率。图 10 表 3 参 23

关键词: 胜利油区; 水驱; 普通稠油; 注蒸汽; 提高采收率

中图分类号: TE345

文献标识码: A

Studies and practices on the steam injection EOR of water driven heavy oil reservoirs in Shengli petroliferous province

ZHOU Ying jie

(Geological Scientific Research Institute, SLOF, Sinopec Shandong 257015, China)

Abstract: The water drive recovery efficiency of the ordinary heavy oil reservoirs with crude viscosity of more than $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ is generally lower than 18% in Shengli petroliferous province. The reserves with recovery factors of less than 25% are up to 375 million tons. Under the same pressure gradient, the higher the oil viscosity is, the lower the percolation flow velocity. At normal temperatures, the oil driving efficiency and the sweep efficiency of water driving are low, and the crude viscosity increases after water drive. When heavy oil is heated, its percolation flow velocity increases considerably, the starting pressure gradient decreases, the oil water relative permeability improves, and the oil displacement efficiency increases. The steam flood can improve heavy oil seepage flow characteristics, remain oil saturation, and enhance oil displacement efficiency, conformance factor as well as EOR. For further improving the ordinary heavy oil reservoirs recovery, a pilot test was carried out based on optimizing the development technique policy of steam injection and obtained an obvious EOR result.

Key words: Shengli Oilfield; water driving; ordinary heavy oil; steam injection; enhancing oil recovery

普通稠油的黏度为 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ (油藏温度) 至 $10\ 000\text{mPa}\cdot\text{s}$ (油藏温度下脱气原油)^[1,2]。胜利油区普通稠油油藏的水驱开发储量为 9.13 亿 t , 其中采收率低于 25% 的储量达到 3.75 亿 t , 主要原因是原油黏度的影响。由此引出了普通稠油油藏 (特别是采收率低于 25% 的油藏) 水驱后如何进一步提高采收率的问题。从资料调研情况看, 采用注蒸汽热采开发方式接替水驱开采稠油油藏是行之有效的提高采收率方法。本文分析胜利油区普通稠油油藏水驱开发的主要矛盾, 研究转注蒸汽开发的可行性、技术政策界限, 介绍现场试验效果。

1 普通稠油油藏水驱开发的主要矛盾

油层温度下脱气原油黏度小于 $4000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油

藏多采用水驱开发。受原油黏度的影响, 其开发效果差别很大。典型单元分析 (见表 1) 表明, 地下原油黏度小于 $87\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时的采收率高于 30% ; 地下原油黏度为 $89\sim 92\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时采收率为 $20\%\sim 30\%$; 地下原油黏度大于 $96\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时的采收率低于 18% 。为了进一步提高采收率, 对上述现象进行了深入分析。

1.1 稠油为非牛顿流体, 所需剪切应力大

常温水驱时, 稠油在多孔介质中渗流表现为拟塑性非牛顿流体的特征^[3,9]。以孤岛油田为例, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 中二南块的中 22 x612 井原油黏度为 $1024.3\text{mPa}\cdot\text{s}$, 渤 21 块的渤 21 4 12 井为 $1451.2\text{mPa}\cdot\text{s}$, 中二中块的中 34 x513 井为 $1623.6\text{mPa}\cdot\text{s}$, 中二北块的中 23 更斜 535 井为 $5792.9\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。由图 1 可见, 油越稠, 达到相

同剪切速率所需的剪切应力越大。

表 1 部分稠油油藏水驱开发指标统计表

油田、区块	层位	地下原油黏度 (mPa·s)	水驱采收率 (%)
孤岛中一区	N _{g3} -N _{g4}	50	38.4
东辛营八	E _{s2} 下	63.5	34.9
孤岛南区	N _{g3} -N _{g5}	66	33.3
孤岛中二北	N _{g3} -N _{g5}	92	26.4
孤岛西区	N _{g3} -N _{g5}	87	30.0
孤岛中二区	N _{g3} -N _{g5}	89	27.2
埕东西区	N _g	98	17.9
孤岛东区	N _{g3} -N _{g4}	112	15.6
孤岛渤 21	N _{g3} -N _{g4}	96	16.8
义东	N _g , E _d	(354)	5.6

注: 括号中的数值为经验公式计算值

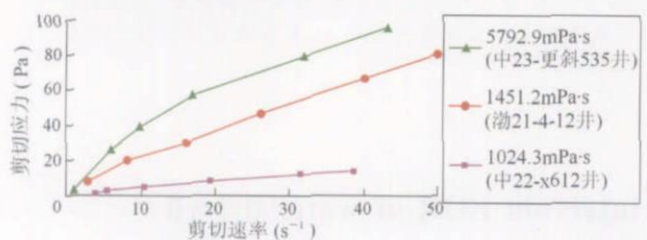


图 1 不同黏度(50°C)原油剪切应力与剪切速率的关系

1.2 压力梯度相同, 油越稠渗流速度越低

稠油通过岩心时渗流速度与压力梯度的关系曲线(见图 2)显示, 随压力梯度的增加, 渗流速度增加, 呈凹向渗流速度轴的曲线关系, 压力梯度相同, 油越稠渗流速度越低。当压力梯度达到某一数值以后, 渗流速度与压力梯度逐渐呈不过坐标原点的线性关系。

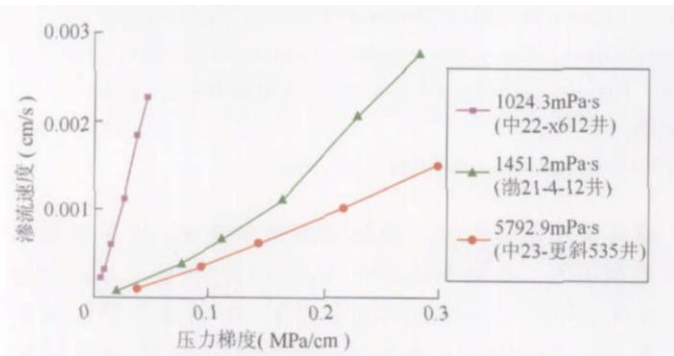


图 2 不同黏度原油(50°C)压力梯度与渗流速度的关系

1.3 常温条件下稠油渗流具有启动压力梯度

根据渗流速度与启动压力关系曲线, 可求取启动压力梯度。实验表明, 原油在多孔介质中的流度越小, 启动压力梯度越大(见图 3)。

1.4 稠油水驱驱油效率低

根据孤岛油田 4 口稠油井 50°C 条件下的驱油效率试验资料, 注入孔隙体积倍数不超过 7 便达到了水驱油试验的终结条件, 除原油流度较大的渤 21 块驱油效

率达到 45% 外, 孤岛中二北区、中二中区原油驱油效率低于 35% (见图 4)。

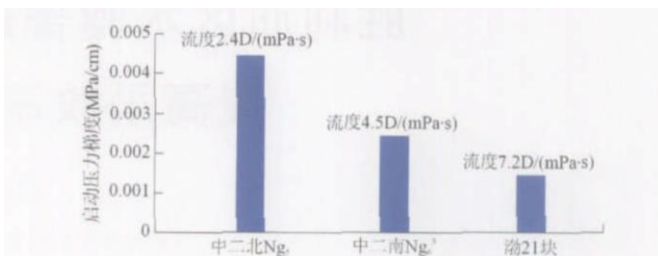


图 3 不同流度原油的启动压力梯度柱状图

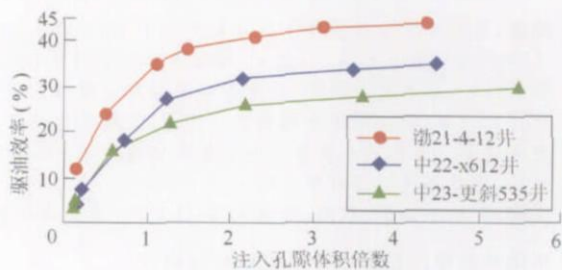


图 4 水驱油效率与注入孔隙体积倍数关系图

1.5 水驱波及系数小

试验表明, 油水流量比 (M) 越大, 指进越严重(见图 5), 波及系数也越低^[9]。胜利油区稠油在地层条件下的油水流量比为 100~500, 远大于试验时的油水流量比 71.5。故孤岛油田河道砂稠油常规水驱开发效果较差, 其水驱波及系数小于 50%, 水驱采收率一般低于 30%。

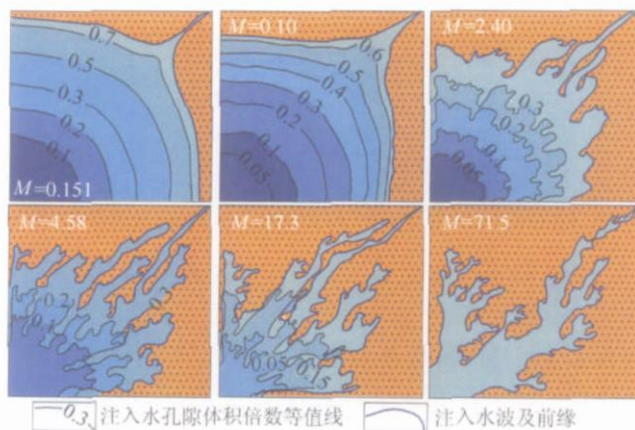


图 5 不同油水流量比条件下水驱油试验驱替前缘分布示意图

1.6 水驱后原油黏度增加

随着水驱采出油量的增加, 地下剩余油的黏度也不断增大。对俄罗斯阿尔兰油田和罗马什金油田^[11]的分析表明, 采出油轻组分含量高于剩余油, 而剩余油中胶质、沥青质含量比采出油高。

在低温时, 稠油中的沥青、胶质等极性物质吸附在油水界面及岩石颗粒表面上, 以液膜、固态膜形式存

在,对油水界面张力及水驱油效率有显著影响。

2 水驱后普通稠油油藏转注蒸汽热采的可行性

稠油黏度对温度的敏感性较强,温度低于 90°C 时,温度每升高 10°C ,黏度平均下降一半以上^[12]。从资料调研情况来看,采用注蒸汽热采开发方式接替水驱开采稠油油藏,采收率一般可达到50%以上^[11]。

2.1 稠油加热后渗流速度大幅增加

图6显示,随着温度升高,渗流速度与压力梯度的关系曲线倾角增大。这表明在同一岩心中,不同温度时破坏原油结构所需的压力梯度不同,高温时所需的压力梯度比低温时要小得多,说明高温时原油的结构易于破坏,因此高温时增加较小的压力梯度,就能获得较大的渗流速度。温度越高,渗流速度与压力梯度的关系曲线越接近于直线,表明其越接近于牛顿流体。

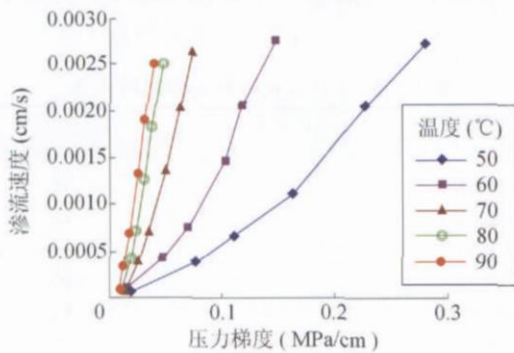


图6 中23更斜535井原油渗流速度与压力梯度关系曲线

2.2 稠油加热后启动压力梯度减小

据岩心实验结果,较低温度时稠油为非牛顿流体,渗流时存在一定的启动压力梯度。启动压力梯度与温度密切相关,随着温度的升高而降低(见图7)。

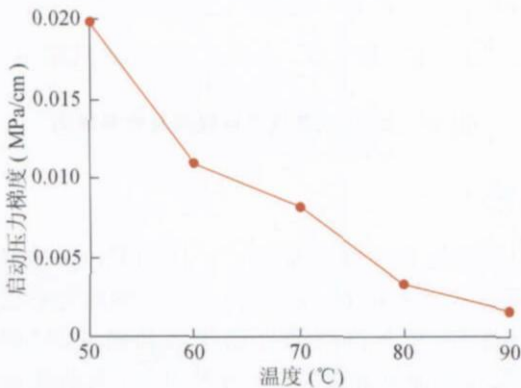


图7 中23更斜535井原油启动压力梯度随温度变化曲线

2.3 加热有利于改善稠油的油水相对渗透率

从渤106井岩心(N_{g6})在不同温度条件下的油水

相对渗透率曲线(见图8)可以看出:①含水饱和度相同时,油相相对渗透率(K_{ro})随温度的升高而增加,水相相对渗透率(K_{rw})随温度的升高而降低,油水相对渗透率比值(K_{ro}/K_{rw})随温度升高而增大;②随着温度升高,束缚水饱和度升高,岩心表面更趋向于亲水,整个曲线向右移动,束缚水饱和度由18%上升到38%;③随着温度升高,由于岩石颗粒的热膨胀及束缚水饱和度的增加,残余油饱和度降低,由42%下降到10%。

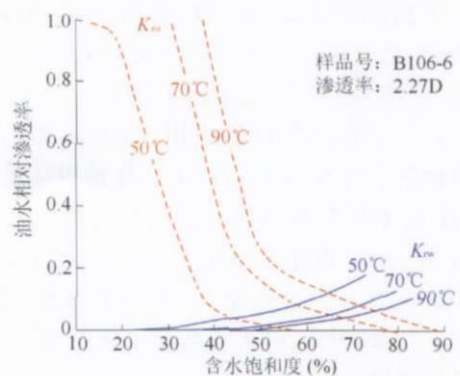


图8 孤岛油田渤106井油水相对渗透率变化曲线

2.4 高温驱油效率大幅增长

热采可大幅度提高驱油效率、降低油水黏度比,提高波及系数,从而大幅度提高采收率。孤岛油田中二北中23更535井热水驱和蒸汽驱的驱油效率试验表明,温度对驱油效率有明显影响,驱油效率随着温度升高而提高,蒸汽驱的驱油效率远高于热水驱(见图9)。

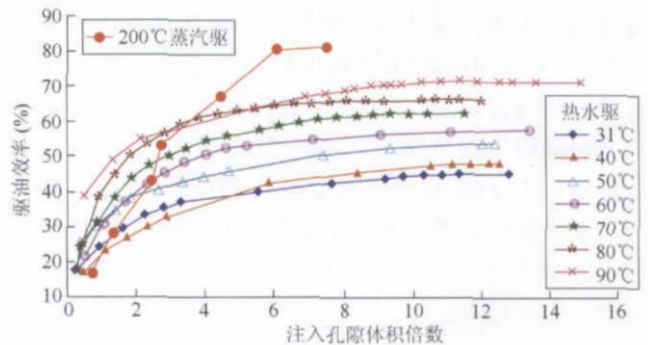


图9 中23更斜535井原油驱油效率试验曲线

2.5 水驱不同含水率时机转蒸汽驱对采收率的影响

水驱不同含水率时机转蒸汽驱各阶段采收率和总采收率模拟预测结果表明:转蒸汽驱时油井含水率越高,蒸汽驱后采收率提高的幅度越低。但即使水驱油藏含水率高达96%~98%时转蒸汽驱也还是有效的,热采总采收率比常规水驱可提高18%以上^[13]。

3 水驱后普通稠油油藏注蒸汽技术界限

为使水驱后普通稠油油藏注蒸汽开发技术在胜利油田取得突破,首先选择了孤岛油田渤21块开展先导

试验。渤 21 块位于孤岛披覆背斜的西翼边部,是被南北两条断层控制的地堑式含油断块。该块的含油层系为馆陶组 3 砂层组、4 砂层组,其中 Ng_3^3 、 Ng_3^4 、 Ng_3^5 、 Ng_4^2 为主力小层,储集层有效厚度 12.7m,孔隙度为 31%~33%,渗透率为 200~950mD,其油藏类型为层状普通稠油低饱和构造油藏,埋深 1230~1300m,油层温度 72℃,油藏压力为 12.4MPa,具有面积小(含油面积 3.0km²)、边水近、原油稠(密度为 0.97~0.98 g/cm³,50℃时黏度为 500~3000mPa·s)、构造简单、储量集中(地质储量 817 万 t)等主要地质特点。

渤 21 块馆陶组 3 砂层组、4 砂层组于 1975 年投入常规开发;1978 年 2 月开始,采用 300m 井距的正方形反九点井网转入注水开发;1989 年改面积注水为行列式注水,注采井距仍为 300m,但采油井距为 150m;到 1996 年 7 月,该块共有采油井 29 口,注水井 21 口,累计产油 106.8 万 t,采出程度 12.3%,采油速度 0.62%,综合含水率达 89.9%,进入特高含水开发期,但采出程度和采液速度低。

3.1 注蒸汽井网调整

经研究和论证,渤 21 块适合于注蒸汽开发以进一步提高采收率,但井网、井况不满足要求,为此,对原井网进行了加密调整^[13]。部署的 44 口加密井均按注蒸汽要求完井,加密后井距为 150~170m。

3.2 注蒸汽开发方式

由水驱开发转为注蒸汽开发,初期油层压力较高,残留的注入水较多,因此,初期可采用蒸汽吞吐开发方式^[14-16],一方面利用油层高压提高注蒸汽开发的采油速度和油汽比,另一方面可达到降低油层压力、尽量多地采出油层中的残留注入水的目的,同时起对油层起进行预热的作用,以更有利于蒸汽驱开发^[17-22]。

根据数值模拟结果,对比了井网加密后 4 种开发方式的效果(见表 2),可见吞吐加汽驱开发方式提高采出程度幅度最大。

表 2 井网加密后开发方式优化结果表

项目	开发方式			
	继续水驱	吞吐到底	吞吐加汽驱	直接汽驱
水驱	时间(a)	5		
	采出程度(%)	4.44		
蒸汽吞吐	时间(a)		4	4
	采出程度(%)		12.18	12.18
蒸汽驱	时间(a)			10
	采出程度(%)			21.82
合计	时间(a)	5	4	14
	采出程度(%)	4.44	12.18	26.33

3.3 注蒸汽强度

通过数值模拟,优化计算了不同周期注汽强度下的生产效果,以获得较高的采出程度和合理的油汽比为目标,吞吐井单井合理的周期注汽强度为 140~160 t/m。现场在实施过程中,视单井油层厚度的大小,在此范围内选取不同的注汽强度,并使周期注汽总量控制在 1500~2500t。

3.4 排液速度

数值模拟计算,吞吐周期的初期单井最大液量 60t/d 左右,为了在合理注汽条件下达到有效回采的目的,方案要求理论排量不小于 80t/d。

4 水驱后普通稠油油藏注蒸汽开发效果

1996 年 8 月,渤 21 块实施蒸汽吞吐试验,取得了较好的开发效果(见表 3、图 10),预测蒸汽吞吐可提高采收率 12.8%。继而推广到孤岛油田的中二南 $Ng_6^{[23]}$,注蒸汽吞吐平均单井产油能力比常规水驱生产井高 8~10 t/d,预测注蒸汽吞吐采收率比水驱可提高 15%。

表 3 渤 21 块水驱和热采效果对比表

开发方式	注水开发		蒸汽吞吐
	1975 年 4 月—1996 年 7 月	1996 年 8 月—2004 年 6 月	
总井数(口)	50		94
开井数(口)	28		43
日产液(t)	1502		1181.9
日产油(t)	159		220.2
综合含水率(%)	89.9		81.4
累计产油(万 t)	106.8		69.1
采出程度(%)	12.3		8

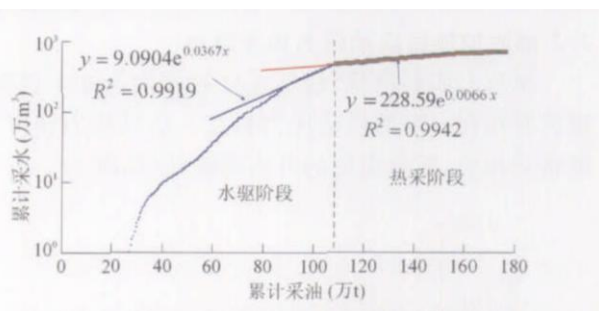


图 10 渤 21 块蒸汽吞吐提高采收率预测

5 结论

胜利油区地层原油黏度大于 100mPa·s 的普通稠油油藏的水驱采收率一般低于 18%。稠油的黏度对温度敏感性强,注蒸汽热采可以降低其黏度、改善流度比、降低残余油饱和度、扩大波及系数、提高驱油效率和采收率。

注蒸汽热采是较为理想的稠油油藏水驱后进一步提高采收率的方法,国外有许多成功的先例。胜利油

区孤岛油田渤 21 块注蒸汽先导试验, 仅蒸汽吞吐就可提高采收率 12.8%, 继而再进行蒸汽驱, 将会更大幅度地提高采收率。先导试验结果表明, 水驱后普通稠油油藏注蒸汽开发具有非常广阔的前景。

本文研究和撰写过程中得到中国石化胜利油田分公司地质科学研究所赵红雨高级工程师的帮助, 在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 刘文章. 热采稠油油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. (LIU Wen zhang. The development models of heavy oil reservoirs by thermal recovery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.)
- [2] 霍广荣, 李献民, 张广卿, 等. 胜利油田稠油油藏热力开采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. (HUO Guang rong, LI Xian min, ZHANG Guang qing, et al. Thermal recovery technique of heavy oil in Shengli oil field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.)
- [3] 蒋明, 许震芳. 齐 40 块稠油流变特性实验研究[J]. 断块油气田, 1997, 4(6): 19-22. (JIANG Ming, XU Zhen fang. Experiments on rheological property of heavy oil of block Qi 40[J]. Fault block Oil & Gas Field, 1997, 4(6): 19-22.)
- [4] 邢义良, 郎兆新, 张丽华. 稠油流变性的测量和研究[J]. 西安石油学院学报, 1998, 13(2): 25-27. (XING Yi liang, LANG Zhao xin, ZHANG Li hua. Measuring and study of heavy oil rheological property[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1998, 13(2): 25-27.)
- [5] 罗哲鸣, 李传宪. 原油流变性及测量[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994. (LUO Zhe ming, LI Chuan xian. Crude oil rheological property and measuring[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1994.)
- [6] 马世煜, 赵平起. 枣园油田原油的流变性及渗流特征研究[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(1): 61-63. (MA Shi yu, ZHAO Ping qi. Crude rheological property and flow characteristics of Zaoyuan Oil Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(1): 61-63.)
- [7] WU Y S, Karsten Pruess, Witherspoon P A. Flow and displacement of Bingham non Newtonian fluids in porous media[J]. Society of Petroleum Engineering Journal, 1992, Aug.: 369-374.
- [8] About Kasseem J H, Farouq S M. Flow of non Newtonian fluid in porous media[J]. Society of Petroleum Engineering Journal, 1986, Feb.: 289-296.
- [9] McDonald, Alvis E. Approximate solutions for flow on non Newtonian power laws fluids through porous media[J]. Society of Petroleum Engineering Journal, 1979, Feb.: 312-317.
- [10] 段昌旭, 于京秋. 孤岛常规稠油油藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. (DUAN Chang xu, YU Jing qiu. Gudao ordinary heavy oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.)
- [11] 刘文章. 稠油注蒸汽热采工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. (LIU Wen zhang. Thermal recovery engineering of heavy oil reservoirs injection steam[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.)
- [12] 凌建军. 实用稠油热采工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. (LING Jian jun. Practical engineering of thermal recovery of heavy oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.)
- [13] 王远明. 注水开发稠油油藏转蒸汽驱提高采收率[J]. 河南石油, 2000, 14(5): 25-31. (WANG Yuan ming. Conversion injection water to steam drive for EOR in a heavy oil reservoir[J]. Henan Petroleum, 2000, 14(5): 25-31.)
- [14] 王卫红, 王经荣, 李曼, 等. 稠油油藏蒸汽吞吐井注采参数系统优化[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 104-106, 118. (WANG Wei hong, WANG Jing rong, LI Dang, et al. Optimization of steam stimulation injection production parameter system in heavy oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 104-106, 118.)
- [15] 束青林, 毛卫荣. 孤岛稠油油藏蒸汽吞吐中后期配套开发技术[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(3): 26-31. (SHU Qing lin, MAO Wei rong. A study of development technique set of Gudao heavy oil reservoir in middle later phase of steam huff and puff[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(3): 26-31.)
- [16] 毛卫荣, 高丽. 具边底水的薄层疏松砂岩油藏蒸汽吞吐开采[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(7): 36-41. (MAO Wei rong, GAO Li. Steam huff and puff in thin layer loose sand reservoir with action edge bottom water drive[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(7): 36-41.)
- [17] 张本华, 束青林. 孤岛油田稠油环热采中后期剩余油分布规律[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 42-45. (ZHANG Ben hua, SHU Qing lin. Remaining oil distribution in the heavy oil ring of Gudao oilfield in middle later phase steam stimulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1): 42-45.)
- [18] 邵先杰, 孙冲, 王国鹏, 等. 浅薄层特、超稠油注蒸汽吞吐后剩余油分布研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 131-133. (SHAO Xian jie, SUN Chong, WANG Guo peng, et al. Remaining oil distribution in shallow, thin and super heavy oil reservoir of Henan Oilfield after steam stimulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 131-133.)
- [19] 周英杰. 边底水稠油油藏蒸汽吞吐转驱的研究[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 61-68. (ZHOU Ying jie. A study of the time for a conversion of steam huff puff to steam drive in a heavy oil reservoir with active edge bottom water drive[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 61-68.)
- [20] 周英杰, 李献民. 边底水稠油油藏蒸汽驱的开采特点及改善措施研究[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(1): 43-46. (ZHOU Ying jie, LI Xian min. Production of active edge bottom water drive viscous reservoir by steam flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(1): 43-46.)
- [21] ZHOU Ying jie, Li Xian min. Study and practice on recovery by steamflood in heavy oil reservoir with edge and bottom water[J]. SPE 30290, 1995.
- [22] 马秀峰, 杨兆中, 李哲, 等. 胜利油田边际稠油油藏提高采收率方法研究[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(4): 40-44. (MA Xiu feng, YANG Zhao zhong, LI Zhe, et al. Study of EOR method about marginal heavy oil reservoir in Shengli oil field[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(4): 40-44.)
- [23] 薛文河, 陈辉. 疏松砂岩稠油油藏水驱后期转蒸汽吞吐及其防砂措施研究[J]. 特种油气藏, 2000, 7(2): 27-32. (XUE Wen he, CHEN Hui. Study on conversion water drive to steam stimulation and sand control measure[J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2000, 7(2): 27-32.)

作者简介: 周英杰(1961), 男, 吉林德惠人, 博士, 中国石化胜利油田分公司地质科学研究所高级工程师, 主要从事石油地质与开发研究工作。地址: 山东省东营市聊城路 3 号, 胜利油田地质科学研究所, 邮政编码: 257015; 电话: (0546) 8715934. E mail: zybj1@163.com

收稿日期: 2006 03 15 修回日期: 2006 05 10

(编辑: 绘图 王孝陵)