

稠油热采不同开发技术潜力评价

顾浩¹,孙建芳¹,秦学杰¹,董翠¹,李洪毅²,郑昕²

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:为评价中国石化不同稠油热采开发技术的潜力,针对蒸汽吞吐加密和蒸汽驱2种提高采收率技术,利用财务净现值、油藏数值模拟和成本分析法,绘制蒸汽吞吐单井经济极限产油量和蒸汽驱经济极限油汽比图版,建立了2种油藏埋深、2种井型蒸汽吞吐加密潜力评价标准,修订了蒸汽驱潜力评价标准,并以中国石化W油田为例开展实例应用。研究表明:当油藏埋深一定时,随着油价下降,无论是直井还是水平井,蒸汽吞吐单井经济极限产油量均呈指数增加;在油价为60美元/bbl时,中国石化稠油油藏蒸汽驱经济极限油汽比为0.096 t/t,W油田蒸汽吞吐加密和蒸汽吞吐直接转蒸汽驱新增可采储量分别为 32.4×10^4 和 71.1×10^4 t,总潜力为 103.5×10^4 t,当油价为80美元/bbl时,W油田总潜力为 426.5×10^4 t。同时,建议将水平井蒸汽驱潜力作为技术攻关潜力进行评价。

关键词:潜力评价 稠油热采 蒸汽吞吐加密 蒸汽驱 评价标准

中图分类号:TE345

文献标识码:A

Potential evaluation of different thermal-recovery technologies for heavy oil

GU Hao¹, SUN Jianfang¹, QIN Xuejie¹, DONG Cui¹, LI Hongyi², ZHENG Xin²

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China*; 2. *Exploration and Production Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China*)

Abstract: In order to evaluate the potential of different thermal-recovery technologies for heavy oil in SINOPEC, two EOR technologies, cyclic steam stimulation with infill wells and steam flooding, were studied. The methods of financial net present value, reservoir numerical simulation and cost analysis were used to draw the charts of single-well oil economic limit production of the cyclic steam stimulation and economic limit of oil-steam ratio for the steam flooding. And then the evaluation standards of the potential of cyclic steam stimulation with infill wells aimed at two kinds of buried depths and two kinds of well types were set up and the evaluation standards of the potential of steam flooding was revised. Finally, the potential was evaluated by taking W Oilfield of SINOPEC as an example. The results show that at a certain burial depth, single-well oil economic limit production of the cyclic steam stimulation increases exponentially as the oil price decreases for the vertical and the horizontal well. At the oil price of US \$ 60/bbl, the economic limit of oil-steam ratio for the steam flooding in the heavy oil reservoirs of SINOPEC is 0.096 t/t. The cyclic steam stimulation with infill wells and the steam flooding directly after cyclic steam stimulation can increase 32.4×10^4 and 71.1×10^4 tons of recoverable reserves respectively, and the total potential of W Oilfield is 103.5×10^4 t. At the oil price of US \$ 80/bbl, the total potential is 426.5×10^4 t for the W Oilfield. At the same time, it is suggested that the potential of steam flooding for the horizontal well should be evaluated as the potential of technological breakthrough.

Key words: potential evaluation; thermal recovery of heavy oil; cyclic steam stimulation with infill wells; steam flooding; evaluation standard

近十年来,稠油热采受技术进步、开发成本变化和 International 油价波动等因素影响,其不同开发技术的

收稿日期:2018-01-11。

作者简介:顾浩(1989—),男,湖北黄冈人,工程师,博士,从事稠油开发研究工作。联系电话:(010)82311835, E-mail:guhao.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“稠油、碳酸盐岩和致密油藏开发主体技术与应用潜力”(2016ZX05016-006)。

经济指标、潜力评价标准和潜力大小^[1-5]均发生变化。以前在评价稠油热采潜力时主要采用多因素回归法建立可采储量(或采出程度)与不同因素之间的多元关系式^[6],该关系式能较好地考虑多个因素对潜力的影响,但各因素对潜力影响的权重系数不能准确地把握。在目前低油价下,要想摸清稠油热采潜力,必须基于成熟的开发技术,并与油价挂钩,由此得到的潜力才能更好地指导油田开发部署。

目前,中国石化稠油热采主要采用蒸汽吞吐和蒸汽驱2种开发方式,截至2016年底,蒸汽吞吐年产量占热采总产量的96.72%,对于井距较大或单井控制储量较高的区块,可以采用蒸汽吞吐加密技术来提高采收率。中国石化稠油油藏蒸汽吞吐加密是一项成熟技术,可以广泛应用到不同埋深的稠油油藏,且采用不同井型进行加密^[7-8],另外,在蒸汽吞吐后期,中国石化稠油热采单元部分井组转蒸汽驱以进一步提高采收率,其提高采收率幅度平均达到15%。为此,针对中国石化蒸汽吞吐加密和蒸汽驱这2种成熟技术开展稠油热采潜力评价,主要包括不同油价下蒸汽吞吐和蒸汽驱经济指标计算、蒸汽吞吐加密和蒸汽驱潜力评价标准的建立和完善,并开展实例应用,最终形成稠油热采不同开发技术潜力评价方法。

1 稠油热采不同开发技术经济指标计算

1.1 蒸汽吞吐单井经济极限产油量

蒸汽吞吐属于单井作业,评价其是否具有经济效益需要与单井产油量结合。因此,用单井经济极限产油量作为评价蒸汽吞吐的经济指标,利用财务净现值法进行计算。当生产期内财务净现值刚好为0时对应的产油量即为经济极限产油量,其财务净现值的计算公式^[9-10]为

$$FNPV = \sum_{i=1}^t (C_m - C_{out})(1+i_c)^{-i} + V_r \quad (1)$$

式(1)中的单井年现金流出主要包括钻井成本、地面建设投资、经营成本、燃料费和税费等;相关参数详细计算方法可以参考文献^[9],最终可以得到蒸汽吞吐单井经济极限产油量表达式为

$$Q_{oc} = \frac{DP_d + I_s + \sum_{i=1}^t C_m (1+i_c)^{-i} - 0.8I_s \left(1 - \frac{t}{6}\right) (1+i_c)^{-t}}{\sum_{i=1}^t \left[\alpha P_o (1-R) r_o - \frac{r_s P_o}{16OSR} \right] (1+i_c)^{-i}} \quad (2)$$

式(2)中除了蒸汽吞吐成本数据外, t , r_o , r_s 和 OSR 等参数可以通过油藏数值模拟方法获得。

1.2 蒸汽驱经济极限油汽比

蒸汽驱属于多井作业,且通常是在蒸汽吞吐开发后期效果变差后转蒸汽驱,一般用经济极限油汽比来衡量蒸汽驱是否具有经济效益,其计算公式为

$$OSR_{min} = \frac{P_o}{(1-R)P_o \alpha - C} \quad (3)$$

式(3)主要考虑税费和操作费用,扣除税费和操作费用后商品油销售收入为注入蒸汽所消耗的费用,此时对应的油汽比即为蒸汽驱经济极限油汽比,其中,1 t油的费用按16 t蒸汽费用折算。

2 稠油热采不同开发技术潜力评价标准

2.1 蒸汽吞吐加密

针对浅层和中深层2种不同油藏埋深、直井和水平井2种不同井型,浅层稠油直井蒸汽吞吐加密、浅层稠油水平井蒸汽吞吐加密、中深层稠油直井蒸汽吞吐加密和中深层稠油水平井蒸汽吞吐加密4种蒸汽吞吐加密情况,首先分别建立相应的油藏数值模型,获取 t , r_o , r_s 和 OSR 等参数,然后基于式(2)绘制不同油价下蒸汽吞吐单井经济极限产油量图版,最后通过插值方法获取油层有效厚度下限值,建立不同油价下以油层有效厚度(对应单井控制储量)为主要指标的蒸汽吞吐加密潜力评价标准。

2.1.1 油藏数值模型参数

利用CMG对浅层和中深层稠油油藏分别建立油藏数值模型。浅层以春风油田为代表,模型主要参数包括:平面渗透率为2 000 mD,孔隙度为32%,原始含油饱和度为65%,岩石孔隙体积压缩系数为 $4.5 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$,原始地层温度为27.7 °C,直井井距从141 m×200 m加密到100 m×141 m(4口角井正中间加密1口直井),水平井井距从150 m加密到75 m(2口边井正中间加密1口水平井)。中深层以陈家庄油田为代表,模型主要参数包括:平面渗透率为1 800 mD,孔隙度为32%,原始含油饱和度为65%,岩石孔隙体积压缩系数为 $7.5 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$,原始地层温度为66 °C,对于普通稠油和特稠油油藏,直井井距从200 m×283 m加密到141 m×200 m,对于超稠油油藏,直井井距从141 m×200 m加密到100 m×141 m,水平井井距均从200 m加密到100 m。

另外,水平段长度统一取值为200 m,普通稠

油、特稠油和超稠油油藏地层温度下地面脱气原油粘度分别取值为1,3和 8×10^4 mPa·s。直井和水平井蒸汽吞吐注汽强度分别取值为240和480 m³/m,井底蒸汽干度为0.5,蒸汽吞吐结束标准均为周期油气比低于0.13 m³/m³。

2.1.2 蒸汽吞吐单井经济极限产油量图版

蒸汽吞吐成本取值包括:直井每米进尺成本、单井地面投资和单井经营成本分别取2 200元/m、 150×10^4 元/井和 75×10^4 元/(井·a⁻¹);水平井每米进尺成本、单井地面投资和单井经营成本分别取值为4 000元/m、 191×10^4 元/井和 115×10^4 元/(井·a⁻¹);基准收益率为8%;原油商品率为96%;综合税率包括资

源税为4.56%、城市建设税及教育附加税为1.4%、平均所得税为3%和特别收益金(特别收益金与油价有关,按中国石化标准征收)。

将上述油藏数值模拟结果和蒸汽吞吐成本取值代入式(2)可以分别得到直井和水平井蒸汽吞吐单井经济极限产油量图版,即蒸汽吞吐单井经济极限产油量与油价、油藏埋深三者之间的关系(图1)。从图1中可以看出:当油藏埋深一定时,随着油价下降,无论是直井还是水平井,蒸汽吞吐单井经济极限产油量均呈指数增加,并非线性递增,这表明在目前低油价下蒸汽吞吐的经济指标越高,对应蒸汽吞吐加密的潜力越小。

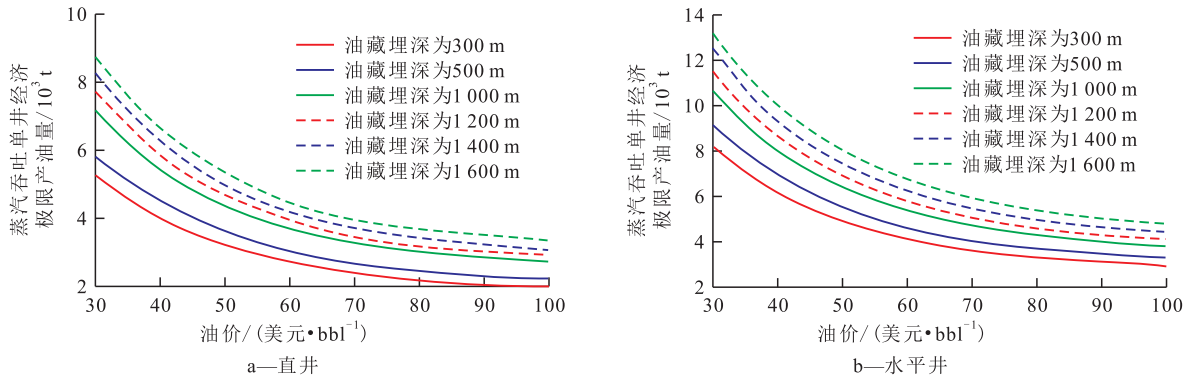


图1 蒸汽吞吐单井经济极限产油量与油价、油藏埋深的关系

Fig.1 Relation of single-well oil economic limit production with oil price and well depth in cyclic steam stimulation

2.1.3 蒸汽吞吐加密潜力评价标准

针对每种蒸汽吞吐加密情况,可以利用油藏数值模拟方法获得不同油层有效厚度时的累积产油量,再结合蒸汽吞吐单井经济极限产油量图版,通过插值方法可以得到不同油价下油层有效厚度下

限值,从而建立不同油价下以油层有效厚度为主要指标的蒸汽吞吐加密潜力评价标准。分别以油价为60和80美元/bbl为例,制定浅层和中深层稠油油藏蒸汽吞吐加密潜力评价标准(表1,表2)。该油层有效厚度标准是基于上述油藏物性参数得到的,通

表1 浅层稠油油藏蒸汽吞吐加密潜力评价标准

Table1 Evaluation standards of potential of cyclic steam stimulation with infill wells for shallow heavy oil reservoirs

油藏类型	原油粘度/(mPa·s)	油藏埋深/m	油层有效厚度 / m				提高采收率 / %	
			60 美元/bbl		80 美元/bbl		直井	水平井
			直井	水平井	直井	水平井		
普通稠油	50 ~ 10 000	>6	>4.5	>4.5	>3.5	12	12	
特稠油	<50 000	<600	>7.5	>6	>6	>5	9	9.5
超稠油	<100 000	>11	>8	>9	>6.5	7	8	

表2 中深层稠油油藏蒸汽吞吐加密潜力评价标准

Table2 Evaluation standards of potential of cyclic steam stimulation with infill wells for mid-deep heavy oil reservoirs

油藏类型	原油粘度/(mPa·s)	油藏埋深/m	油层有效厚度 / m				提高采收率 / %	
			60 美元/bbl		80 美元/bbl		直井	水平井
			直井	水平井	直井	水平井		
普通稠油	50 ~ 10 000	<1 600	>8	>5	>6.5	>4	9	10
特稠油	<50 000	<1 400	>10.5	>6.5	>8.5	>5	7	8.5
超稠油	<100 000	<1 400	>15	>8	>13.5	>6.5	6	7.5

过体积法可以计算该极限油层有效厚度所对应的最低单井控制储量,当孔隙度和含油饱和度等油藏物性与上述油藏参数差别较大时,既可以基于最低单井控制储量进行潜力区块筛选,也可以基于最低单井控制储量先反算各种油藏条件下的极限油层有效厚度,然后再进行潜力区块筛选。

2.2 蒸汽驱

在刘文章提出的蒸汽驱标准^[1]基础上进行修订,修订方法为:①根据式(3)计算在2016年底税费和操作成本等条件下的中国石化蒸汽驱经济极限油汽比。②利用新的蒸汽驱经济极限油汽比重新对油层有效厚度进行插值。③结合目前中国石化蒸汽驱现场应用情况,添加目前地层压力不宜超过7 MPa和提高采收率幅度按15%取值等技术参数。

2.2.1 经济极限油汽比图版

改变不同油价和操作成本等数据,并基于式(3)绘制蒸汽驱经济极限油汽比图版(图2)。目前中国石化稠油热采平均操作成本约为638元/t,对应油价为60美元/bbl时,中国石化稠油油藏蒸汽驱经济极限油汽比为0.096 t/t。

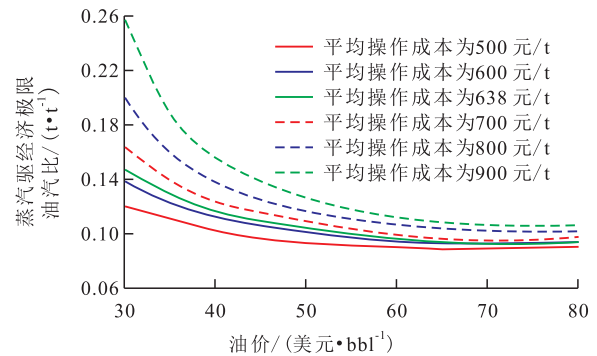


图2 蒸汽驱经济极限油汽比与油价、平均操作成本的关系
Fig.2 Relationship among economic limit of oil-steam ratio, oil price and average operating cost in steam flooding

2.2.2 潜力评价标准

刘文章利用油藏数值模拟方法得到了不同粘度的稠油油藏蒸汽驱经济极限油汽比与油层有效厚度之间的关系^[1],再结合蒸汽驱经济极限油汽比图版,通过插值方法可以获得不同粘度的稠油油藏在不同油价下的油层有效厚度下限值。以油价等于60和80美元/bbl为例分别制定稠油油藏蒸汽驱潜力评价标准(表3)。

表3 稠油油藏蒸汽驱潜力评价标准

Table3 Evaluation standards of potential of steam flooding for heavy oil reservoirs

油藏类型	原油粘度/(mPa·s)	油藏埋深/m	油层有效厚度/m		目前地层压力/MPa	净总厚度比	有效孔隙度/%	蒸汽驱前含油饱和度/%	渗透率/mD	水油体积比	提高采收率/%
			60美元/bbl	80美元/bbl							
普通稠油	50~10 000		>6	>5.5		≥0.4		>45			
特稠油	<50 000	≤1 400	>11.5	>10	≤7	≥0.5	≥20	>45	≥200	<5	15
超稠油	<100 000		>15	>13		≥0.5		>40			

3 应用实例

建立了蒸汽吞吐加密和蒸汽驱潜力评价标准后,就可以评价具体稠油热采开发单元在不同油价下的开发潜力。以中国石化W油田为例,W油田稠油热采开发单元共有22个,均属于中深层稠油油藏。根据潜力评价标准,筛选出有潜力的开发单元为17个(其中,在油价为60美元/bbl时保守评价蒸汽驱潜力,即只考虑蒸汽吞吐直接转蒸汽驱的潜力),最终评价结果如表4所示,油价为60美元/bbl时,W油田蒸汽吞吐加密可以新增可采储量为32.4×10⁴ t,需要新钻井为31口,蒸汽吞吐直接转蒸汽驱可以新增可采储量为71.1×10⁴ t,总潜力为103.5×10⁴ t;当油价为80美元/bbl时,蒸汽吞吐加密新增可采储量为39.4×10⁴ t,需要新钻井为45口,蒸汽吞吐转蒸汽驱新增可采储量为387.1×10⁴ t,总潜力为

426.5×10⁴ t。

表4 W油田潜力评价结果汇总

Table4 Potential evaluation results of W Oilfield

油价/(美元·bbl ⁻¹)	潜力方向	开发单元数	覆盖动用储量/10 ⁴ t	蒸汽吞吐加密数/口	目前采出程度/%	新增可采储量/10 ⁴ t
60	蒸汽吞吐加密	4	1 314	31	14.84	32.4
	直接转蒸汽驱	1	474		20.40	71.1
	总潜力	5	1 788	31	16.31	103.5
80	蒸汽吞吐加密	4	1 314	45	14.84	39.4
	直接转	1	474		20.40	71.1
	转蒸汽驱	5	1 935		15.94	290.3
	加密后转	1	71		9.40	10.7
	蒸汽吞吐降压转	1	100		10.38	15.0
	蒸汽驱总潜力	8	2 580		16.34	387.1
	总潜力	12	3 894	45	15.85	426.5

4 结论

在目前低油价下,为明确稠油热采潜力,须基于成熟的开发技术,并与油价挂钩,由此得到的潜力评价结果才能更好地指导油田开发部署。与传统稠油热采潜力评价方法不同的是,此次提出的稠油热采不同开发技术潜力评价方法是基于建立和完善后的潜力评价标准,该标准结合了稠油热采现场实际,且与油价有关,更具有理论和实用上的意义。当油藏埋深一定时,随着油价下降,无论是直井还是水平井,蒸汽吞吐单井经济极限产油量均呈指数增加,并非线性递增,这表明在目前低油价下蒸汽吞吐的经济指标越高,对应蒸汽吞吐加密的潜力越小。油价为60美元/bbl时,中国石化稠油油藏蒸汽驱经济极限油汽比为0.096 t/t, W油田蒸汽吞吐加密新增可采储量为 32.4×10^4 t,需要新钻井31口,蒸汽吞吐直接转蒸汽驱新增可采储量为 71.1×10^4 t,总潜力为 103.5×10^4 t;当油价为80美元/bbl时,蒸汽吞吐加密新增可采储量为 39.4×10^4 t,需要新钻井为45口,蒸汽吞吐转蒸汽驱新增可采储量为 387.1×10^4 t,总潜力为 426.5×10^4 t。蒸汽驱主要是针对直井,而水平井蒸汽驱目前现场成功应用较少,还处于攻关阶段,因此,建议将水平井蒸汽驱潜力作为技术攻关潜力进行评价。

符号解释:

$FNPV$ ——财务净现值,元; t ——时间, a ; i ——序数; C_{in} ——单井年现金流入,元; C_{out} ——单井年现金流出,元; i_c ——基准收益率,%; V_r ——开采期末地面设备残值折现,元; Q_{oc} ——蒸汽吞吐单井经济极限产油量,t; D ——完钻井深,m; P_d ——单位进尺成本,元/m; I_s ——地面建设投资,元; C_m ——单井年经营成本,元; α ——原油商品率,%; P_o ——油价,元; R ——综合税率,%; r_o ——蒸汽吞吐年产量占总产量比例,%; r_s ——蒸汽吞吐年注汽量占总注汽量比例,%; OSR ——蒸汽吞吐年累积油汽比,t/t; OSR_{min} ——经济极限油汽比,t/t; C ——操作成本,元/t。

参考文献:

- [1] 刘文章.稠油注蒸汽热采工程[M].北京:石油工业出版社,1997.
LIU Wenzhang. Thermal engineering of steam injection for heavy oil recovery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [2] 赵燕,吴光焕,孙业恒.泡沫辅助蒸汽驱矿场试验及效果[J].油气地质与采收率,2017,24(5):106-110.
ZHAO Yan, WU Guanghuan, SUN Yeheng. Field test and effect

analysis of foam-assisted steam flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 106-110.

- [3] 王传飞,吴光焕,韦涛,等.薄层特超稠油油藏氮气与降粘剂联合蒸汽辅助重力泄油物理模拟实验[J].油气地质与采收率,2017,24(1):80-85.
WANG Chuanfei, WU Guanghuan, WEI Tao, et al. Physical simulation experiment of nitrogen gas and dissolve solvent aided SAGD for thin formation and extra-super heavy oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 80-85.
- [4] 明玉坤.烟道气强化蒸汽驱提高稠油油藏采收率实验[J].大庆石油地质与开发,2017,36(3):100-105.
MING Yukun. EOR experiment of the heavy oil reservoir by the tunnel gas enhanced steam flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(3): 100-105.
- [5] 吴正彬,刘慧卿,庞占喜,等.稠油氮气泡沫辅助蒸汽驱可视化实验研究[J].特种油气藏,2016,23(5):126-129.
WU Zhengbin, LIU Huiqing, PANG Zhanxi, et al. Visualization experiment of nitrogen foam assisted steam-flooding in heavy-oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(5): 126-129.
- [6] 孙建芳,邱国清,吴光焕.胜利油区稠油蒸汽吞吐开采井网加密技术经济界限评价方法[J].特种油气藏,2002,9(2):47-49.
SUN Jianfang, QIU Guoqing, WU Guanghuan. Economic limit evaluation of infill technology for cyclic steam stimulation in Shengli oil province[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(2): 47-49.
- [7] 侯春华.胜利油区不同类型油藏调整挖潜技术措施与实施效果[J].油气地质与采收率,2006,13(4):74-76.
HOU Chunhua. Technology and measure for adjustment and tapping the potential and their effect in various types of oil reservoir in Shengli petroliferous province[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(4): 74-76.
- [8] 束青林,王宏,孙建芳.孤岛油田稠油油藏高轮次吞吐后提高采收率技术研究与实践[J].油气地质与采收率,2010,17(6):61-64.
SHU Qinglin, WANG Hong, SUN Jianfang. Study and practice of EOR after multiple steam stimulation in Gudao heavy oil field[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(6): 61-64.
- [9] 马玉霞,崔连训,刘新福.稠油热采老区蒸汽吞吐井经济极限累积产量关系式研究[J].河南石油,2002,16(5):16-18.
MA Yuxia, CUI Lianxun, LIU Xinfu. A study on formula of economic limit cumulative production of huff and puff heavy oil wells in old thermal recovery blocks[J]. Henan Petroleum, 2002, 16(5): 16-18.
- [10] 侯健,高达,孙建芳,等.稠油油藏不同热采开发方式经济技术界限[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(6):66-70.
HOU Jian, GAO Da, SUN Jianfang, et al. Economic and technical boundary values of different thermal recovery methods in heavy oil reservoir development[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2009, 33(6): 66-70.

编辑 王星