

超重油溶解气驱后转驱提高采收率实验

时 贤¹,李兆敏¹,张虎贲²,李松岩¹,张 波³

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580; 2.中国石化胜利油田分公司 东胜集团股份有限公司,山东 东营 257000; 3.中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257015)

摘要:采用溶解气驱开采超重油后,仍有大量残余油存在,为了进一步开发超重油潜力,开展了不同条件下超重油溶解气驱转驱方式对驱油效率影响实验。实验结果表明:在均质模型基础上,一般溶解气驱采收率约为10%,而溶解气驱后进行蒸汽驱或二氧化碳转驱都可在一定程度上提高最终采收率,其中实施溶解气驱后转蒸汽驱剩余油饱和度更低,平均采收率在70%以上,而转二氧化碳驱后平均采收率仅约为25%。另外,通过分析发现,压降速度、温度和渗透率等因素对溶解气驱开采效果都有一定影响,其中压降速度加快可适当增加驱替速度,在一定的时间条件下,压降速度越快,提高采收率效果越好。温度的影响则存在明显的时间效应,其值越低,溶解气驱提高超重油采收率的效果越明显;渗透率对提高采收率效果的敏感性较低,较高的渗透率有助于提高驱替速度。

关键词:超重油 溶解气驱 转驱 提高采收率 压降 温度

中图分类号:TE345

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0098-04

Experimental study of improving the recovery in super heavy oil reservoir after dissolved gas drive

Shi Xian¹, Li Zhaomin¹, Zhang Huben², Li Songyan¹, Zhang Bo³

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Dongsheng Group Company, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 3.Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Since amounts of residual oil still remains after dissolved gas drive in super heavy oil reservoir, effects of flooding conversion on oil displacement efficiency were studied through experiments under various conditions focusing on this problem. The lab experiment results illustrate that the oil recovery by the traditional dissolved gas drive for homogeneous lab core model is about 10%. Either steam stimulation or CO₂ stimulation after dissolved gas driving stimulation can enhance oil recovery to some extent. Steam stimulation is more applicable with a final oil recovery of more than 70%, whereas the oil recovery after CO₂ stimulation can only achieve about 25%. Additionally, the influences of the pressure drop speed, temperature and permeability on oil recovery are different. A faster pressure drop can lead to a faster recovery speed and enhance recovery efficiency for a certain time. The oil recovery is controlled by temperature with time effect. Lower temperature can enhance oil recovery. The effect of formation permeability on the oil recovery is limited, and a higher permeability can boost recovery speed.

Key words: super heavy oil; dissolved gas drive; flooding conversion; enhanced oil recovery; pressure drop; temperature

全球原始超重油地质储量丰富,特别是加拿大、委内瑞拉等国,拥有大规模的超重油富集带^[1]。

与普通原油相比,超重油具有密度高、重金属含量高、沥青质含量高、原油粘度相对低等特性,蒸汽驱

收稿日期:2014-11-15。

作者简介:时贤(1984—),男,山东冠县人,博士,从事采油理论与石油工程数值模拟研究。联系电话:(0532)86981717, E-mail:xiashi-upc@126.com。

基金项目:国家“863”计划“注气辅助SAGD技术研究与现场试验”(2009AA06Z205)。

等热力开采技术效果有限。溶解气驱技术因为完井方式简单,可在超重油油层出砂过程中形成“蚯蚓洞”似的网络,加之孔隙或盲端处气体对残余油的携带作用,所以取得了明显的驱油效果。数据统计结果表明,利用溶解气驱技术开采的超重油产量可占总产量的20%左右^[2-4]。

溶解气驱主要依靠气体释放能量,形成气泡连续相驱替原油,属于能量消耗的过程^[5-7]。不过,由于气体流动性有限及压力衰竭迅速,常规溶解气驱后提高采收率十分有限,仍有大量剩余油存在于地层之中,所以辅助应用其他提高采收率技术十分必要^[8-11]。蒸汽驱和二氧化碳驱在提高常规稠油采收率方面具有不同优势,蒸汽驱主要是利用注入热源使油层温度升高,降低原油粘度达到提高产油量的目的;二氧化碳驱油机理较为复杂,主要认为二氧化碳可降低原油粘度,使原油膨胀并改善油水流动度比等^[12-14]。结合上述常规稠油开采技术优势,研究了溶解气驱提高超重油采收率的机理和转驱实验,测试了超重油活油的泡点压力,并利用人工填砂岩心管进行了不同温度、压降速度和渗透率下溶解气驱后转驱提高采收率的模拟实验,并对2种不同溶解气驱后转驱方式的驱替效果进行分析,认为溶解气驱后转蒸汽驱对提高超重油采收率有较强优越性,可为下一步开发超重油提供技术支持。

1 实验准备及方法

1.1 实验材料与装置

实验采用委内瑞拉的超重油及高压纯氮气、高压纯二氧化碳气体、石英砂等原料。委内瑞拉超重油的死油和活油基本参数包括:地层温度为54℃,泡点压力为6 MPa,溶解气油比约为18 m³/m³,溶解气二氧化碳摩尔分数为13%,溶解气甲烷摩尔分数为87%,温度为40℃时的粘度为125 000 mPa·s,80℃时降至3 933 mPa·s。

实验装置由PVT系统、动力系统、岩心夹持系统和收集系统组成。PVT系统主要由提供纯甲烷气体和纯二氧化碳气体的高压气瓶、用于油气混合的高压釜、控制仪及提供压力的高压泵组成;动力系统主要包括平流泵和为二氧化碳驱提供动力的气源;岩心夹持系统由人工填砂岩心管和控制出口回压的回压控制装置组成,收集系统包括用以测量溶解气驱出气体积的量气瓶、锥形瓶和天平、量筒等。

1.2 实验步骤

实验步骤包括:①将人工填砂岩心管抽真空4 h

后,饱和水,称取湿重,计算孔隙度;②将饱和好的人工填砂岩心管放置到恒温箱内,恒温4 h;③水驱岩心,测定人工填砂岩心管的水测渗透率;④按照要求在配样器内配制活油;⑤首先检查实验仪器系统的密闭性,将一定量的委内瑞拉超重油倒入高压釜,再向高压釜中注入一定量纯甲烷,之后再注入一定量纯二氧化碳,设定高压釜至地层温度,搅拌2 h,使油气充分混合;⑥在回压大于原油饱和压力时,人工填砂岩心管饱和活油,计算含油饱和度;⑦进行超重油溶解气驱实验,模拟超重油溶解气驱衰竭式开采过程;⑧选取不同的人工填砂岩心管分别进行溶解气驱后转蒸汽驱及溶解气驱后转二氧化碳驱实验,观察2种转驱方式提高超重油采收率的效果。

选取岩心管长度为60 cm,直径为2.5 cm,实验的基本参数如表1所示。

表1 实验基本参数
Table 1 Basic parameters of experiments

岩心管 编号	孔隙 体积/ cm ³	孔隙 度,%	渗透率/ μm ²	含油 饱和 度,%	开采方式	实验 温度/ ℃
1	116.2	39.45	6.17	79.5	溶解气驱	54
2	113.9	38.67	7.72	81.3	溶解气驱	70
3	116.5	39.56	6.27	82.7	溶解气驱	90
4	121.3	41.19	7.02	79.04	溶解气驱转蒸汽驱	160
5	125	42.44	6.9	81.2	溶解气驱转蒸汽驱	200
6	131.4	44.6	8.15	77.9	溶解气驱转二氧化碳驱	54
7	127.6	43.3	7.83	76.6	溶解气驱转二氧化碳驱	54
8	116.5	41.2	5.2	78.5	溶解气驱	70
9	116.1	42.5	10.8	80.1	溶解气驱	70
10	115.8	43.1	14.4	79.8	溶解气驱	70

1.3 实验方法

超重油溶解气驱实验 超重油溶解气驱实验步骤为:①对1,2,3,8,9,10号人工填砂岩心管的岩心称取干重;②关闭岩心入口阀门,用氮气控制回压阀的压力,在压降速度为7.6 kPa/min的条件下,使回压逐渐降低至大气压力,记录岩心回压、岩心入口和中点检测点的压力、产油量、产气量随时间的变化。

溶解气驱后转蒸汽驱实验 溶解气驱后转蒸汽驱实验步骤为:①打开平流泵并设定流量,打开蒸汽发生器,加热蒸汽至实验温度;②将出口回压设置为2 MPa,对溶解气驱开采之后的4号和5号人工填砂岩心管进行蒸汽驱实验,蒸汽注入速度为2 mL/min,实验温度分别为160和200℃,模拟地层温

度为 120 ℃,记录实测压力,每注入 0.05 倍孔隙体积计量一次出液量,并对采出液进行一次破乳分析,得到产水量和产油量;③当含水率为 100%时停止实验。

溶解气驱后转二氧化碳驱实验 溶解气驱后转二氧化碳驱实验步骤为:①将出口回压设置为 2 MPa,打开平流泵,对溶解气驱开采后的 6 和 7 号人工填砂岩心管进行二氧化碳驱实验,其回压分别设定为 2 和 6 MPa,记录实测压力,每注入 0.05 倍孔隙体积计量一次出油量;②当不再出油时即停止实验。

2 实验结果分析

2.1 溶解气驱采收率影响因素

温度 由不同温度下采收率与驱替时间的关系(图 1)可以看出,当驱替时间为 0~600 min 时,温度越高,最终采收率越高,但采收率差异不大;在 600 min 左右,出现交汇点,被认为是原油启动阶段和跃变阶段的分界点;当驱替时间为 600~1 080 min 时,温度越高,最终采收率越低。早期温度对采收率影响不明显是因为加热生产时间较短,原油粘度仍然较大,但随着不断加热,补充了大量、连续的汽化潜热能,增加了受热面积,改善了开采效果;加热到一定时段以后,驱油效果明显变好,说明超重油对温度的敏感性很强。

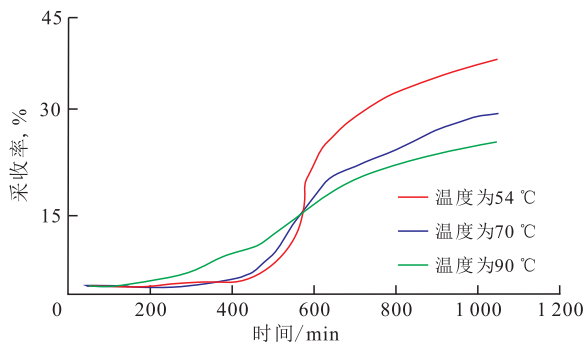


图 1 不同温度下溶解气驱的采收率

Fig.1 Oil recovery under dissolved gas drive at various temperatures

压降速度 原理上讲,较高的压力递减率可以形成较多的气泡,但只有当气体是非连续相的时候,其效果才会非常明显^[13]。由不同压降速度下的采收率(图 2)可见,在驱替时间一定时,压降速度大幅度升高后,提高采收率效果十分明显,主要是因为压降速度引起储层应力波动,对基质渗透率造成影响,从而提高了驱油效果。

渗透率 当温度设定为 70 ℃时,分别对不同渗透率下的人工填砂岩心管 2, 8, 9 和 10 号进行了驱

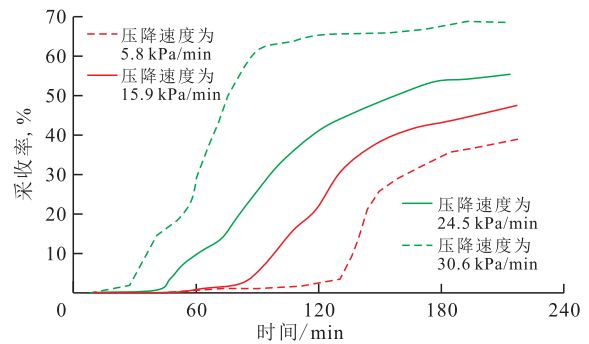


图 2 不同压降速度下的采收率

Fig.2 Oil recovery under dissolved gas drive at various pressure drop speeds

替实验,由实验结果(图 3)可以看出,渗透率对最终采收率影响较小,但渗透率越高,越容易在短时间内达到设定的采收率。

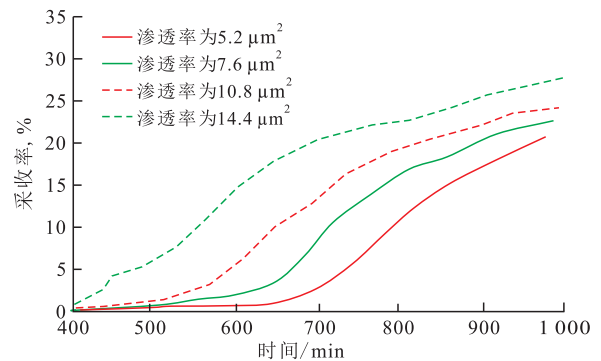


图 3 不同渗透率下的采收率

Fig.3 Oil recovery under various permeabilities

2.2 溶解气驱后转蒸汽驱实验结果

由转蒸汽驱前的溶解气驱驱油效果(图 4)可以看出,采收率随着驱替时间的增加而增加。从表 2 中可以看到,随着温度升高,溶解气驱后转蒸汽驱采收率提高十分明显,主要因为转蒸汽驱前压力较低,非常利于转驱,在蒸汽干度一定时,油层压力越低,在同样注入量条件下形成蒸汽的体积也越大,远远超过注入热水的体积^[14-16]。分别在温度为 160

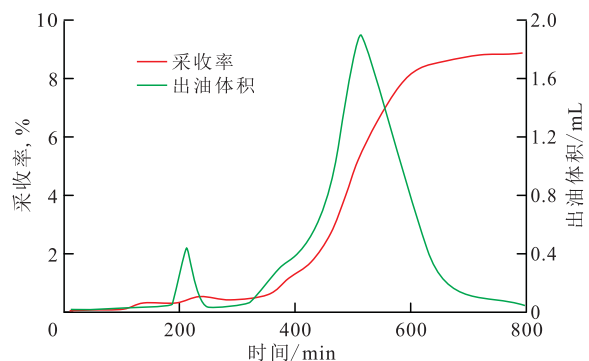


图 4 转蒸汽驱前溶解气驱不同时刻出油体积和采收率的关系

Fig.4 Relationship between oil volume and recovery efficiency under dissolved gas drive before steam flooding in different time

表2 溶解气驱后转蒸汽驱实验结果
Table 2 Experiment results of steam flooding
after dissolved gas drive %

岩心管编号	溶解气驱采收率	蒸汽驱采收率	最终采收率
3	8.10	63.19	71.29
4	8.87	68.77	77.64
5	9.15	73.62	82.77

和200℃条件下开展了溶解气驱后转蒸汽驱的采收率实验,由实验结果可见,温度对转驱后的采收率影响较小,两者最终采收率的差异仅约为3%。

2.3 溶解气驱后转二氧化碳驱实验结果

转二氧化碳驱前的溶解气驱6号与7号人工填砂岩心管的驱油效果与图4类似,随着驱替时间的增加,采收率也一直增加,而出油体积存在较为明显的峰值。由于泡点压力为6 MPa,而只有在泡点压力以下才能进行溶解气驱,所以并没有原油被驱替出来。由不同回压下溶解气驱后转二氧化碳驱的采收率(表3)可见,溶解气驱后转二氧化碳驱使采收率提高到30%左右,大幅度改善了开采效果,同时发现二氧化碳驱过程中压力对提高采收率效果并不十分敏感,而控制回压可以提高最终的采收率效果,保证溶解气驱中的油滴和气态“段塞”具有向前的驱动力。

表3 溶解气驱后转二氧化碳驱的采收率
Table 3 Recovery efficiencies of CO₂ flooding
after dissolved gas drive

岩心管 编号	饱和压力/ MPa	出口回 压/MPa	溶解气驱 采收率,%	最终采 收率,%
6	6	2	10.43	38.92
7	6	6	0	28.45

3 结束语

由于超重油的储层特性和特殊物性,需要采取溶解气驱实行降压开采以提高采收率,如果能在溶解气驱后结合不同的转驱方式,将会大幅度提高驱油效果,转驱方式、驱替条件和时机都对驱油效果有一定影响。其中,温度对超重油的初期开采驱油效果影响较小,温度升高反而影响超重油溶解气驱的效果,而渗透率对溶解气驱最终采收率影响差异较小。另外,溶解气驱具有明显的出油峰值,之后因为自身压力降低,采收率急剧下降。实验结果表明,溶解气驱后转驱可使采收率有明显提高,其中低压条件下,转二氧化碳气驱采收率不如转蒸汽驱的值高,其原因是二氧化碳本身对压力不敏感,另外低压环境下易于扩大蒸汽面积。所以对超重油

而言,溶解气驱后转蒸汽驱是有效提高开发潜力的开发方式之一。

参考文献:

- [1] 董本京,穆龙新.国内外稠油冷采技术现状及发展趋势[J].钻采工艺,2002,25(6):18-21.
Dong Benjing, Mu Longxin. Status and development trend of heavy oil cold production technology of the world [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(6): 18-21.
- [2] Mirabal M de, Rodriguez H, Gordillo R. Production improvement strategy for foamy hamaca crude oil: A field case [C]. SPE 37544, 1997.
- [3] Blanco M, Rodriguez T, Crespo J, et al. Optimal exploitation scheme in MFB-5 reservoir [C]. SPE 69851, 2001.
- [4] Wilhelms A, 等.稠油油藏溶解气驱机理[J].邸秀莲,高益桁,杨刚,等,译.特种油气藏,2002,9(4):85-88.
Wilhelms A, et al. Mechanism of solution gas drive in heavy oil reservoirs [J]. Di Xiulian, Gao Yiheng, Yang Gang, et al, trans. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(4): 85-88.
- [5] 刘尚奇,孙希梅,李松林.委内瑞拉MPE-3区块超重油冷采过程中泡沫油开采机理[J].特种油气藏,1998,5(2):24-27.
Liu Shangqi, Sun Ximei, Li Songlin. Production mechanism of foamy oil in cold recovery of super heavy oil in MPE-3 block of Venezuela [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1998, 5(2): 24-27.
- [6] 赵瑞东,吴晓东,熊春明,等.泡沫油国内外研究进展[J].特种油气藏,2012,19(1):17-22.
Zhao Ruidong, Wu Xiaodong, Xiong Chunming, et al. Research progress in foamy oil at home and abroad [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 17-22.
- [7] Andarcia L, Henry C, Rico A. Experimental study on production performance of two different heavy oils in Venezuela [C]. SPE 2000-043, 2000.
- [8] 许心伟,张锐,何中.稠油蒸汽驱开采特征及转驱程序研究[J].特种油气藏,1998,5(2):24-27.
Xu Xinwei, Zhang Rui, He Zhong. Study on recovery characteristics and conversion program of steam flooding for heavy oil [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1998, 5(2): 24-27.
- [9] 孙建芳.氮气及降粘剂辅助水平井热采开发浅薄层超稠油油藏[J].油气地质与采收率,2012,19(2):47-49.
Sun Jianfang. Study and application on HDNS technology to develop shallow and thin super heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 47-49.
- [10] 东晓虎,刘慧卿,张红玲,等.稠油油藏注蒸汽开发后转热水驱实验与数值模拟[J].油气地质与采收率,2012,19(2):50-53.
Dong Xiaohu, Liu Huiqing, Zhang Hongling, et al. Experimental and simulation study of hot-water flooding of heavy oil reservoirs after steam injection [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 50-53.
- [11] 王胜,曲岩涛,韩春萍.稠油油藏蒸汽吞吐后转蒸汽驱驱油效率影响因素——以孤岛油田中二北稠油油藏为例[J].油气地质与采收率,2011,18(1):48-50.

(下转第121页)