

重油、油砂原位燃烧技术进展及发展思考

思 娜¹, 安 雷², 赵 阳¹, 吴 非¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100029)

摘 要:重油、油砂原位燃烧技术具有成本低、热能利用率高和采收率高等优点,是目前重油和油砂开发的研究热点。在技术调研的基础上,对常规原位燃烧技术的燃烧机理、燃烧类型和技术特点进行了总结分析,并详细介绍了水驱正向燃烧法、水平井火烧油层法、顶部燃烧重力驱油法、燃烧辅助重力驱油法和氧添加蒸汽辅助重力驱油法等最新原位燃烧技术的驱油原理、井网几何结构、适用性、优缺点和工程难点。研究认为,目前原位燃烧技术的创新研究主要集中于井网几何结构创新和与其他工程及增产措施融合,一方面避开了传统原位燃烧技术的难点,有利于该技术的快速发展和现场应用;另一方面可以融合注蒸汽法和原位燃烧法的技术特点,改善驱油效果,提高重油、油砂油藏采收率,早日实现效益产出。原位燃烧技术的创新发展对我国正在起步的重油、油砂资源开采具有一定的指导作用,为我国原位燃烧后续技术储备及创新提供了借鉴。

关键词:重油 油砂 原位燃烧

中图分类号:TE349 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)05-0106-06

Advance and Future Development of ISC for Heavy Oil and Oil Sand Development

Si Na¹, An Lei², Zhao Yang¹, Wu Fei¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec International Petroleum Exploration and Development Corporation, Beijing, 100029, China)

Abstract: In situ combustion (ISC) technology of heavy oil and oil sand reservoirs presents low cost, high utilization rate of thermal energy and high recovery rate. currently, it is deemed a technical research hotspot in heavy oil and oil sands development. Based on technical investigations, combustion principles and types, technical characteristics of conventional ISC were summarized and analyzed in this paper. The latest research on ISC, oil displacement principles of ISC, well patterns, applicability, advantages and disadvantages of the technology, and engineering difficulties were introduced in detail. These technologies include COFCAW, THAI, COGD, CAGD, and SAGDOX. The studies suggested that the innovation research of ISC technology mainly focused on well pattern and integration with other projects and well stimulation measures. As a result, it had no such technical difficulties as in traditional ISC, which promoted its rapid development and field application. On the other hand, it could integrate the technical characteristics of steam injection method and in-situ combustion method to improve oil displacement effects and heavy oil and oil sands reservoir recovery efficiency. The innovation and development of ISC technology would provide guidance in the exploitation of heavy oil in oil sands in China and also provide technical references for the subsequent technology reserve and innovation of ISC.

Key words: heavy oil; oil sand; in situ combustion

随着全球经济的日益发展,对石油的需求量迅猛增长,常规油气资源大规模开发之后,重油、油砂等非常规资源及其开发技术也随之受到关注。在众多的开采技术中,蒸汽驱技术和原位燃烧技术(in situ combustion, ISC, 也叫火烧油层)是研究最多的 2 种技术。

收稿日期:2015-01-21;改回日期:2015-06-28。

作者简介:思娜(1983—),女,陕西榆林人,2007年毕业于西安石油大学石油工程专业,2010年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,主要从事石油工程技术前瞻研究及战略规划研究。

联系方式:(010)84988101, sina_sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“非常规油气工程新技术调研”(YK51403)资助。

美国于 1942 年在伯特勒斯维尔油田进行了第一次 ISC 现场试验,目前已累计开展了 70 多个火烧油层项目。前苏联、荷兰、罗马尼亚、匈牙利、德国和印度等 40 多个国家也先后开展了火烧油层采油的相关研究工作。尽管经历了数十年的现场试验,但 ISC 的发展和应用还是受诸多限制。据美国能源部统计,北美油田大约一半以上的 ISC 试验都是失败的^[1]。我国油砂稠油地质储量为 59.70×10^8 t,可开采资源量为 22.58×10^8 t,从 1958 年起,先后在新疆、玉门、胜利、吉林和辽河等油田开展了 ISC 试验^[2-4],但受当时试验和生产条件的限制,ISC 技术的发展明显滞后于注蒸汽驱技术,截至目前现场应用很少^[5]。

笔者在技术调研的基础上,介绍了常规 ISC 技术的原理及特点,总结分析了几种 ISC 新技术的作用原理、特点、适用条件及创新等,以期为我国重油、油砂开发技术的发展提供借鉴。

1 ISC 技术原理

ISC 技术是指将空气注入到油层中,使油层在地下部分燃烧而产生驱替剩余原油动力的驱油技术,具有成本低和驱油效果明显的特点。

ISC 技术的主要作用机理是高温裂解、加热降黏和气体驱动,通常把在热裂解反应过程中沉淀在矿物基质上的类焦炭作为燃料。通过注气井点燃油层后,向油层连续注入空气或富氧气体助燃,形成移动燃烧带;燃烧带前方原油受热降黏、蒸馏,蒸馏后的轻质油、蒸汽及燃烧所产生的 CO_2 等气体在热力作用下向生产井运动,未被蒸馏的重质成分在高温条件下裂化、分解生成焦炭,成为维持油层燃烧的燃料;高温下,油层束缚水、蒸汽吞吐冷凝水及燃烧生成的水汽化形成水蒸气,携带大量热量向前运动,再次驱替原油,形成将原油驱向生产井的多种驱动作用并存的复杂过程(见图 1)^[5]。

1.1 燃烧类型

原位燃烧过程中,有正向/反向燃烧、干式/湿式燃烧和低温/高温氧化等 3 种类型。

1.1.1 正向/反向燃烧

按照空气注入方向和燃烧前缘的移动方向,可以将 ISC 分为正向燃烧和反向燃烧。

当空气的注入方向与燃烧前缘的移动方向相

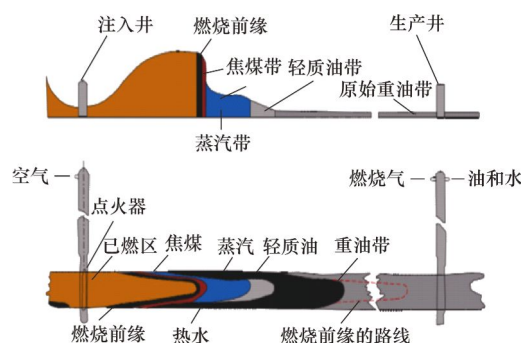


图 1 火烧油层机理

Fig. 1 The mechanism of ISC

同时,称为正向燃烧^[6]。其优点是作为燃料的是原油中无价值的焦油(焦炭);缺点是被加热原油必须通过油藏的低温区流向生产井,对于超稠原油,可能形成流体阻塞,高黏原油尤其明显,且热能利用率低。

当空气的注入方向与燃烧前缘的移动方向相反时,称为逆向燃烧或反向燃烧。反向燃烧初期与正向燃烧相同,但在点火井向外燃烧一段距离之后,便转为向邻近井注空气,驱动原油向原来的点火井流动,而燃烧前缘却从点火井向邻近井移动,与原油流动方向正好相反。反向燃烧主要用于开采特稠油,但需要大量的氧气,耗气量约为正向燃烧的 2 倍,且燃烧的不是正向燃烧中的重质组分,而是相对较轻的原油馏分。

1.1.2 干式/湿式燃烧

按照燃烧过程中是否有水/水蒸气注入,可以将 ISC 分为干式燃烧和湿式燃烧。

干式燃烧是指在燃烧过程中仅注入压缩空气或富氧气体混合物。其缺点是具有强腐蚀性,会生成大量有害的燃烧产物。

湿式燃烧是指在有水存在的情况下进行高温高压氧化。在干式燃烧一段时间后,伴随着压缩空气交替注入液态水,产生蒸汽。湿式燃烧耗氧量约为干式燃烧法的三分之二^[7]。

与正向/反向燃烧相结合,燃烧方式可分为干式/湿式正向燃烧和反向燃烧。湿式正向燃烧比反向燃烧耗气量少,且采收率高。反向燃烧由于空气消耗量约为正向燃烧的 2 倍,且容易转变为正向燃烧,因此实际生产中一般不采用反向燃烧。

1.1.3 高温/低温氧化

按照燃烧发生温度的不同,可将 ISC 分为低温

氧化和高温氧化2种方式。

低温氧化大约发生在 $150\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,是不完全氧化过程,部分氧气可能会进入生产井,产生酸液造成腐蚀,注入单位体积氧气燃烧所释放的热量很低。

高温氧化发生在 $400\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,燃烧充分,且大量氧气助燃产生了大量的气体,如 CO_2 、 CO 和水蒸气等,注入单位体积氧气燃烧所释放的热量得以最大化,所以高温氧化技术更有利于稠油热采。

1.2 技术特点

从ISC技术室内试验及现场实际应用效果来看,该技术具有以下优点:1)注气保持地层压力,有助于建立生产压差和驱动压差;2)燃烧产生的 CO_2 形成 CO_2 驱,增强了热驱效果,节省了 CO_2 的制造和作业费用;3)燃烧过程中10%的燃料为原油中的重质组分,大大提高了剩余油的品质;4)在现场条件和地质条件上,ISC采油比注蒸汽采油有更广泛的适应性,尤其对于埋藏较深的油层;5)ISC兼有火驱、蒸汽驱和热水驱的特点,热能利用率更高^[8]。此外,高温蒸馏和裂解作用还可提高产出原油的轻质组分含量。

但是,ISC技术也存在一些缺点:1)井下燃烧产生的热量不仅用于加热原油,而且有部分热量用来加热基岩和盖层,降低了加热效率,还可能引起其他油藏问题;2)产出液中的酸性气体会加速生产井管柱及地面设施的腐蚀;3)生产井出砂和井壁坍塌,引起油井破坏;4)热裂解和原油蒸发导致生产井井筒附近区域中的蜡、沥青沉淀,堵塞地层和井筒;5)高温易导致生产管柱破坏^[9]。

ISC技术在现场应用中存在以下难点:1)燃烧前缘推进方向难以控制,易引起单方向火窜、火线超覆,造成平面及纵向波及系数低,导致采收率低;2)难以注入维持持续高温氧化所需的空气;3)对于开发后期的稠油油藏,由于剩余油零散分布和储层具有非均质性,ISC技术的工程设计更加复杂^[9]。

2 ISC新技术

针对室内及现场试验过程中ISC技术面临的缺点和难点,将传统ISC技术与其他工程或增产措施相结合,形成了许多ISC新技术。例如,在正向燃烧的基础上,为了提高热效率和采收率,提出了结合正向燃烧与湿式燃烧特点的水驱正向燃烧技术;在直井网火驱的基础上,将水平井技术应用于ISC采油,将重力泄油理论与传统的火驱技术相结合,开

发出了“趾端到跟端”的火驱技术(THAI)和顶部燃烧重力驱技术;通过优化井网几何结构提高采收率,提出由均匀分布的注入直井和生产水平井组成的燃烧辅助重力驱技术;或者将几种不同原理的技术结合使用,如在SAGD注蒸汽过程中混合注入氧气的氧添加蒸汽辅助重力驱油技术。

2.1 水驱正向燃烧

在正向燃烧过程中,压缩空气需求量大、成本高,且约 $1/5$ 的生成热量被注入的空气吸收,造成热量利用率不高。1969年,泛美石油公司提出了水驱正向燃烧法(combination of forward combustion and water flooding, COFCAW),就是在正向燃烧生成一个小的燃烧腔后,在注气过程中向地层间歇或连续注水,降低油藏内部的峰值温度,扩大高温区波及范围,提高热效率,降低过高的温度对地层及井筒的伤害,以提高驱油效率和降低空气油比。COFCAW最显著的特点是至少减少了 $1/3$ 的空气注入量。

与常规干式燃烧相比,其控制过程相对复杂;与常规湿式燃烧不同,只要有足够热量来补偿热量损失,COFCAW就不会“熄火”,注入水会提高燃烧效率。然而,在空气水比很低的情况下,会造成部分“淬火”,这样高温氧化燃烧区域就会消失,无法达到形成水蒸汽或者是裂解原油的温度条件^[7]。

2.2 水平井火烧油层

水平井火烧油层(toe to heel air injection, THAI)技术由一口水平井和一口或者多口距离水平井趾端一定距离的空气注入直井组成,可以大幅提高重油、油砂的采收率^[10]。目前THAI技术主要应用于重油开发。

生产水平井部署在油层下部,注气直井(或者注气水平井)部署在靠近生产水平井趾端部位,向直井内注入空气或者氧气,燃烧带由水平井趾端向跟端推进,燃烧前缘加热的原油在重力作用下泄流到底部生产水平井中产出(见图2)。

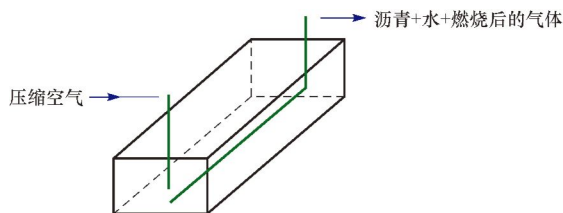


图2 THAI的井网几何结构

Fig. 2 The well pattern geometry of THAI

该技术充分利用原油改质及重力作用,使注入的空气沿着指定的通道燃烧,原油加热后黏度降低,直接流入生产水平井段采出。此外,水平井完井时,可以在水平段加入裂解催化物质,强化就地改质过程,进一步改善采出原油的性质。

THAI 具有以下优点:1)燃烧前缘稳定,易控制,受油层非均质性影响小;2)燃烧效率较高,三维物理模拟结果表明产出气中氧气含量低;3)采收率高,物理模拟试验中采收率达到 80% 以上;4)由于高温裂解作用,改善了采出原油的性质,API 重度一般可提高 50% 左右;5)可以控制气体超覆,并能有效提高储量动用程度^[1,10-11]。

2.3 顶部燃烧重力驱

顶部燃烧重力驱(combustion overhead gravity drainage, COGD)技术是由 K. E. Kisman 和 E. C. Lau 于 20 世纪 90 年代初首先提出的,也叫 COSH^[12](combustion override split production horizontal well),是重力泄油与火驱技术结合的另一种形式,井网结构一般采用直井-水平井的组合形式,注入直井在生产水平井的正上方(见图 3)。

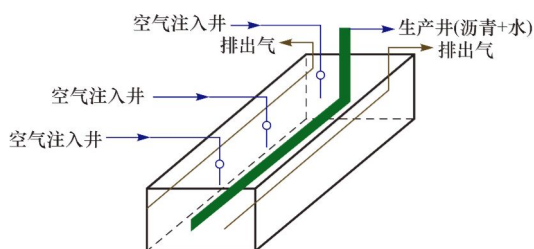


图 3 COGD/COSH 井网几何结构

Fig. 3 The well pattern of COGD/COSH

燃烧过程中,一般将气体注入到油层上部,首先在各注入井的周围形成分散的燃烧腔,随着燃烧的进行,各个小燃烧腔向外扩展形成连续的燃烧腔,加热的原油在重力作用下泄流到靠近油层底部的生产水平井中,其泄油机理与常规的蒸汽辅助重力驱油机理相近。

与 THAI 技术不同的是,该技术是从油藏上部到下部的燃烧,其井网结构包括一口或多口注入压缩空气的顶部注入直井和分离的一口或多口排气直井或水平井(用来去除燃烧气体,位于井网结构的侧面)。气体和液体在油藏中分别通过不同的井排出,生产水平井只生产液体。目前,COGD(或 COSH)还仅停留在室内试验阶段,无现场试验数据^[1,5,11]。

2.4 燃烧辅助重力驱

2008 年,William C. Pfefferle 提出了燃烧辅助重力驱(combustion assistant gravity drainage, CAGD)的概念,并申请了专利^[13]。该技术利用具有特定方位的双水平井系统进行开采,有助于燃烧腔的形成和燃烧前端的稳定增长(见图 4)。

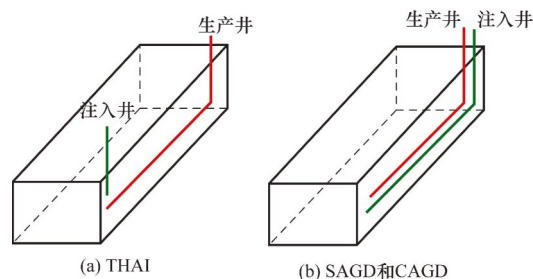


图 4 THAI、SAGD 和 CAGD 井网几何结构

Fig. 4 The well pattern of THAI, SAGD and CAGD

传统的原位燃烧是通过 2 口直井来提供燃烧所需的大量空气,尽管可以通过增加注入压力来增加气体注入量,但会引起气体指进和高气油比等一系列问题;另外,可流动的原油流入生产井之前必须流经低温区域,降低了原油采收率。CAGD 技术促进了 ISC 技术的发展,能让空气在地层中的分布区域更宽,形成更大的燃烧腔。

目前,研究人员已分别对 SAGD、THAI 和 CAGD 进行了油田级别的实验室数值模拟。结果表明,在原油产量相同的前提下,CAGD 的累计气油比最低;THAI 的燃烧前缘影响的油藏区域较小,且开发水平井只有很小一段水平段被用于开发,因此,尽管在气体腔室中可以产生高温,但是原油生产率要低于 SAGD 和 CAGD,且随着燃烧前缘逐渐远离注入井,气体腔室的平均温度下降,会进一步减弱 THAI 的开采效果^[1,13]。

2.5 氧添加蒸汽辅助重力驱

传统的注氧气 ISC 技术已经在一些油田进行了现场试验。它的优点是注入能量更高,燃烧产物接近纯 CO_2 ,且部分 CO_2 可以溶入原油降低原油黏度;缺点是安全性较差,腐蚀性较高,开发成本和低温氧化风险较高。

针对不适于采用 SAGD 的油藏,如薄沥青油藏、低油品沥青和深部沥青区域,Nexen 公司提出了氧添加蒸汽辅助重力驱(steam assisted gravity drainage with the addition of oxygen injection, SAGDOX)技术。

它结合了 SAGD 和 ISC 的特点,目前还处在实验室探索和物理模型试验的发展初期。该技术通过优化蒸汽与氧气的比例,在保持燃烧效率和生产率的同时,降低了注入成本。它采用与 SAGD 类似的井网几何结构(见图 5),不同的是 SAGDOX 技术通过封隔器隔离环空分别注入蒸汽和氧气,并分别排出沥青+水和气体。

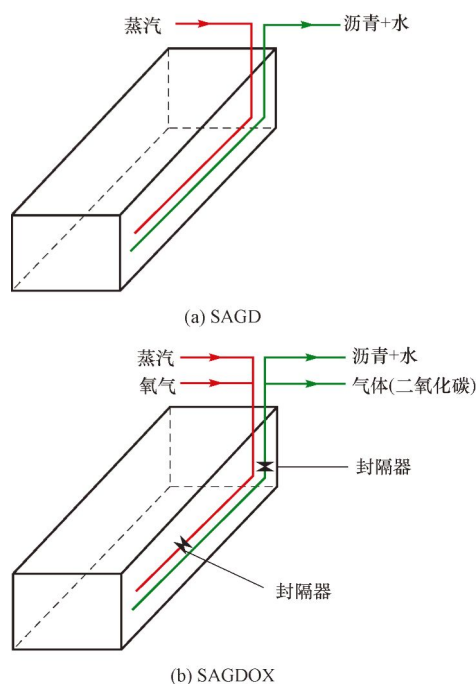


图 5 SAGD 和 SAGDOX 井网几何结构

Fig. 5 The well pattern of SAGD and SAGDOX

对于薄油藏,因为 SAGDOX 操作成本较低、井身结构适用性更强,比 SAGD 更具有优势。厚度小于 15 m 的较薄沥青油藏没有足够的空间容纳 2 口水平井,所以适合采用“趾端到根端”SAGDOX(toe to heel SAGDOX, THSAGDOX)和“单井”SAGDOX(single well SAGDOX, SWSAGDOX)的井网几何结构(见图 6)。

对于埋藏较深或者高压油藏,如果井筒与油藏流体的接触和地层能量都很充足,燃烧生成的 CO_2 可以溶解于生产流体中或者保留在油藏中,因此,优化的 SAGDOX 井网结构中无需单独的废气处理系统。

SAGDOX 是一种新的提高采收率的热采方法,既保留了注蒸汽的优点,又达到了降低开发成本的目的。在达到经济上限之前,停止注入蒸汽,进行原位燃烧,产生的蒸汽和汽化的原生水,可以大大降低蒸汽注入量,因此具有开采成本低和采收率高的双重优点。在同等条件下,SAGDOX 的 CO_2 排放量

比 SAGD 约高 20%,但是 SAGDOX 能通过单独的排出气并分离出纯 CO_2 ,因此释放量要比 SAGD 少很多^[1,14-15]。

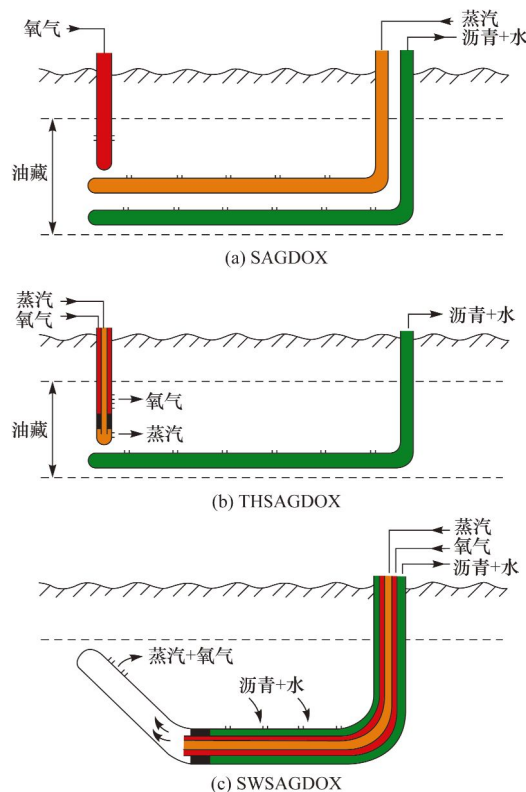


图 6 SAGDOX、THSAGDOX 和 SWSAGDOX 井网几何结构

Fig. 6 The well pattern of SAGDOX, THSAGDOX, SWSAGDOX

3 发展思考及建议

1) 当前,ISC 技术的创新主要是优化井网几何结构,扩大燃烧腔,提高能量利用率,进而提高采收率。研究过程中通过融合注蒸汽和 ISC 技术的优点,实现技术创新,达到经济有效开发重油、油砂的目的。

2) 根据我国的 ISC 技术现状,结合我国老油田开发及增产技术的优势,建议重点加强传统 ISC 技术与适用于我国重油、油砂油藏特征的工程及增产措施相结合方面的研究,同时针对 ISC 技术的难点,加大科研力度。

3) 在当前实际油田生产过程中,鉴于 ISC 技术燃烧控制难度较大,建议在蒸汽辅助重力驱达到经济极限后,以 ISC 技术为增产措施,提高原油采收率。

4) 将来需重视 ISC 燃烧过程发展及控制、地层

各向异性对 ISC 过程影响等方面的研究。

5) 在深入研究燃烧驱油机理基础上,针对目前现场试验总结的技术缺点,追本溯源,各个击破,对技术难点开展专项技术攻关,努力实现技术突破。

6) 我国致密油、页岩油等非常规资源具有岩性致密、油质较轻、含蜡量低等特点,可将 ISC 技术在重油、油砂油藏开采过程中的应用经验和做法用于致密油和页岩油的开发,如借鉴 ISC 新技术的井网几何结构,扩大油藏接触面积,改善原油的流动性,提高致密油、页岩油的采收率。

参 考 文 献

References

- [1] Janasson H P, Kerr R K. SAGDOX—steam assisted gravity drainage with the addition of oxygen injection [R]. SPE 165509, 2013.
- [2] 张宗源,谢志勤. 胜利油田火烧油层先导性试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(3): 88-92.
Zhang Zongyuan, Xie Zhiqin. Pilot test study on in-situ combustion in Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(3): 88-92.
- [3] 蔡文斌,李友平,李淑兰. 火烧油层技术在胜利油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 53-55.
Cai Wenbin, Li Youping, Li Shulan. Applications of combustion drive in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 53-55.
- [4] 袁士宝,孙希勇,蒋海岩,等. 火烧油层点火室内实验分析及现场应用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 53-55.
Yuan Shibao, Sun Xiyong, Jiang Haiyan, et al. Ignition experimental analysis of in-situ combustion under condition of pre-heating[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4): 53-55.
- [5] 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.
- [6] 王庆,刘慧卿,东晓虎,等. 考虑热损失的火烧油层注气井试井分析理论模型[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 334-337.
Wang Qing, Liu Huiqing, Dong Xiaohu, et al. Theoretical model of well test analysis for gas injection wells of in-situ combustion with heat loss consideration [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(3): 334-337.
- [7] Parrish D R, Craig F F Jr. Laboratory study of a combination of forward combustion and waterflooding: the COFCAW process [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(6): 753-761.
- [8] Belgrave John David Michael, Nzekwu Ben Ifeanyi, Chhina Harbir S. SAGD optimization with air injection [R]. SPE 106901, 2007.
- [9] Oskouei Seyed Javad Paitakhti, Moore R Gordon, Maini Brij B, et al. Feasibility of in-situ combustion in the SAGD chamber [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2011, 50(4): 31-44.
- [10] Greaves M, El-Sakr A, Xia T X. THAI: a new air injection technology for heavy oil recovery and in situ upgrading[C]. Petroleum Annual Technical Meeting, 1999.
- [11] 孙永杰. 火驱辅助重力泄油合理燃烧方式研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2011.
Sun Yongjie. Study on proper combustion type of combustion assisted gravity drainage [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), School of Petroleum Engineering, 2011.
- [12] 凌建军,黄鹍. 国外水平井稠油热力开采技术[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(4): 44-47.
Ling Jianjun, Huang Li. Foreign heavy oil thermal recovery technology of horizontal well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(4): 44-47.
- [13] Pfefferte William C. Method for GACD recovery of heavy oil: WO, 2008/060311 A2[P]. 2007-02-09.
- [14] Rahnema H, Mamora D. Combustion assisted gravity drainage (CAGD) appears promising[R]. SPE 135821, 2010.
- [15] Farrukh Akram. Reservoir simulation optimizes SAGD[J]. The American Oil & Gas Reporter, 2010, 53(9): 63-67.

[编辑 滕春鸣]