

世界油页岩原位开采技术进展

刘德勋^{1,2} 王红岩² 郑德温² 方朝合² 葛稚新²

1. 中国石油大学化工学院 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院

刘德勋等. 世界油页岩原位开采技术进展, 2009, 29(5): 128-132.

摘 要 油页岩原位开采技术不需要进行采矿和建设大型的尾气处理设施, 可开发深层、高厚度的油页岩资源, 具有产品质量好、采油率高、占地面积少和环保等优点, 目前尚处于工业试验阶段。按照油页岩层受热方式的不同, 可将油页岩原位开采技术分为传导加热、对流加热、辐射加热 3 类技术。在此, 详细介绍了壳牌石油公司地下转化工艺技术、埃克森美孚公司 ElectrofracTM 技术、IEP 公司 GFC 技术等 3 种传导加热技术, 还介绍了太原理工大学的对流加热技术、雪弗龙 CRUSH 技术等 5 种对流加热技术, 以及 2 种辐射加热技术, 并分析了各类工艺的优缺点。根据我国油页岩资源埋藏深、品位低的特点, 应大力开展原位开采技术方面的研究工作, 为将来大规模开发油页岩资源提供技术储备。

关键词 原位开采 蒸汽加热 电加热 辐射加热

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.05.032

0 前言

油页岩干馏分为地上干馏和地下干馏两种。虽然地上干馏技术成熟, 但是由于工艺本身缺陷的问题, 具有很多难以避免的缺点, 例如: 利用率低、高污染、规模小、成本高、干馏炉产生的废渣数量极大, 占用大量土地面积, 不易回收利用等^[1-2]。

地下干馏指埋藏于地下的油页岩不经开采, 直接在地下设法加热干馏, 产出的油气被导出到地面上来, 冷凝获得页岩油及不凝气。地下干馏也称为原位开采。原位开采不但不需要进行采矿和建设大型的尾气处理设施, 而且可开发深层、高厚度的油页岩资源, 具有产品质量好、采油率高、占地面积少和环保等优点。国内外许多大公司及研究机构在这方面做了大量的研究, 已初见成效。我国 300 m 以深的油页岩资源占有相当大的比例, 根据传统油页岩干馏技术, 尚不能进行开发^[3]。在能源日趋紧张的今天, 我国有必要在完善传统的地面干馏工艺的基础上, 着力发展原位开采技术, 为未来油页岩资源开发提供理论和技术储备^[4-5]。

1 原位开采技术种类及各自优缺点

地下开采油页岩主要存在 3 个问题: ①干酪根

必须转化为可流动的石油和天然气。需要在相当大的区域内供给足够的热量, 以使高温分解在合理的时间内发生, 从而完成该转化过程; ②在包含干酪根、可能具有极低渗透性的油页岩中, 必须增加渗透性; ③干馏后的油页岩必须不会造成不适当的环境或经济的负担。由于向地层引入热量的方式有很多种, 原位开采技术达数十种, 笔者只对一些具有代表性的技术进行阐述。原位开采技术按照油页岩层受热方式的不同, 可分为传导加热、对流加热、辐射加热 3 类技术。

1.1 传导加热技术

目前主要利用传导加热方式加热页岩层的技术主要有壳牌石油公司的地下转化工艺技术(ICP)、美孚石油公司的 ElectrofracTM 技术和 IEP 公司的 GFC 技术。

1.1.1 壳牌公司的地下转化工艺技术(ICP)

从 1980 年, 壳牌石油公司 Houston R&D 研究中心开始研究 ICP 技术, 截至 2007 年, 共申请了 150 多项专利, 并且进行了中试试验(图 1)。

ICP 技术开采的基本原理是通过电加热器将热量传递给地下油页岩矿层进行加热和裂解, 促使油页岩中的干酪根转化为高品质的油气, 再通过生产井将油、气采出到地面。

作者简介: 刘德勋, 1985 年生, 硕士研究生; 2006 年毕业于中国石油大学(华东) 化学工程与工艺专业; 现从事油页岩开发技术研究工作。地址: (065007) 河北省廊坊市万庄 44 号信箱新能源所。电话: (010) 69213015。E-mail: ldhappyxun2006@163.com

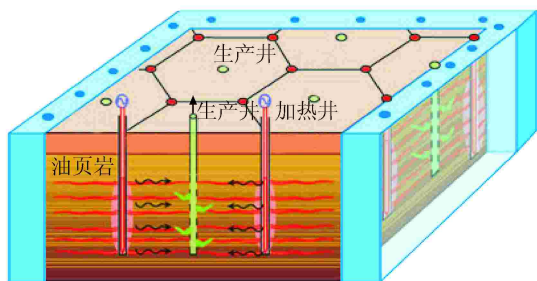


图 1 壳牌公司 ICP 技术图

ICP 技术中主要有 5 类井:冷冻井、疏干井、监测井、热源井、生产井^[3,6]。

冷冻井:向其中注入冷冻液,建立冷冻墙。

疏干井:用来抽出冷冻墙内部的地下水,防止地下水浸入页岩层,减少干馏过程中的能量能耗。

监测井:用于监测地层温度和压力、地下水的 pH 值、Eh 值、微生物的变化、裂缝尺寸等参数。

热源井:用于给地下的油页岩提供连续热量。

生产井:即采油井,将地层孔隙中流动的油气采集并输送到地面。

ICP 工艺主要包括以下部分:

1)建立冷冻墙。为了阻止地下水流入油页岩开采区,该工艺利用了冷冻墙技术,即先在开采区周边钻一系列井,建立环形封闭管道系统,注入 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷冻液,使周围的地下水冷冻,形成外围冷冻墙,保护周围地下水不受污染。建立冷冻墙之后,将开采区的地下水全部抽走,以减少加热过程中能量的消耗。

2)加热页岩层。钻加热井,安装加热棒进行传导加热和裂解油页岩,促使其内部的干酪根转化为高品质的油或气。

3)采出干馏油气。按照常规油气开采的方法,将地下干馏的高品质的油气采集到地面进行加工,生产石脑油、煤油等成品油。

4)钻探监测井。用来监测水文、地质、温度、压力和水质等参数^[7-8]。

该工艺的突出优点是:提高了资源开发利用效率;减少了开采过程中对生态环境的破坏,即少占地、无尾渣废料、无空气污染、少地下水污染及最大限度地减少有害副产品的产生。尽管该项技术还没有商业化推广,但关键的工艺、设备等技术问题已经解决,并在美国科罗拉多州进行了中试试验。

但该工艺也存在一些缺点:①电加热工艺复杂,故障多,难排除;②加热元件及功率小,耗电多,波及

面积小,成本高;③温度场呈球状分布,损失大;④油气迁移动力小,难以采出,导致回收率较低。据有关专家称,由于电加热能耗太大,在工业应用阶段,拟改用气体加热^[1]。

1.1.2 埃克森美孚公司的 Electrofrac™ 技术

埃克森美孚公司自从 1960 年就参与油页岩开发,现在集中精力主要研究原位开采技术。1990 年埃克森美孚公司通过对 30 多种工艺的调研,提出了 Electrofrac™ 工艺,并进行了实验室和小规模的试验及数值模拟,试验结果令人满意。目前正在计划进行现场试验,准备进行商业化应用。

如图 2 所示,Electrofrac™ 工艺先利用平行水平井对页岩层进行水力压裂,向油页岩矿层的裂缝中填充导电介质,形成加热单元。导电介质通过传导把热量传递给页岩层,使页岩层内的干酪根热解,产生的油气通过采油井采到地面上来。同时,伴生矿——碳酸氢钠也遇热发生反应生成碳酸钠,用水抽提出来,作为副产品^[9]。

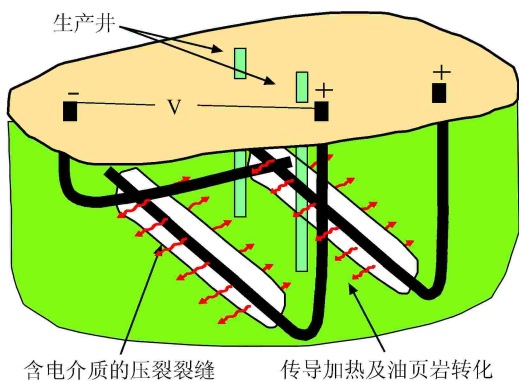


图 2 美孚公司 Electrofrac™ 技术图

该工艺的特点:①采用了压裂技术增加了页岩层的渗透性,可开采致密性油页岩资源;②生产副产品碳酸钠,提高了经济效益;③没有保护地下水,容易造成水污染;④采用平面热源的线性导热方式,有效地提高了热效率。

1.1.3 IEP 的 GFC 技术

该工艺流程(图 3)为:利用高温燃料电池堆的反应热直接加热油页岩层,使其中的有机质热解产生烃气,然后导入到采油井,被抽到地面上来。除了部分气体作为燃料被通入燃料电池堆外,其余大部分烃气经冷凝后获得石油和天然气。另外,在启动工艺装置预热油页岩时期,需要向燃料电池中通入天然气作为启动燃料。工艺正常运转后,能量自给自足^[9]。

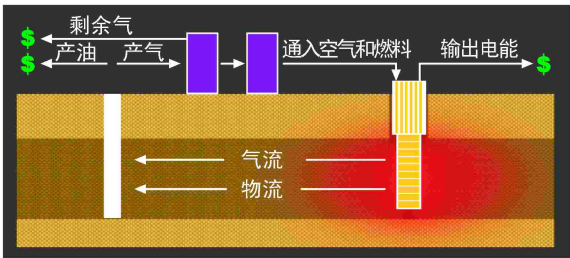


图 3 IEP 的 GFC 技术工艺流程图

工艺特点：①传导加热温度分布均匀。采用固体间热传导传递热量，大大提高了热量分布均匀性和利用效率。②利用流体压裂制造裂缝。通过增加温度使流体压力达到 710~1 420 kPa 来压裂油页岩，提高油页岩层孔隙度和渗透率。③能量自给自足。该工艺不仅能量自给自足，还可向外部提供电能。每生产 1 桶油，发电 174 Kw·h。④操作成本低。操作成本大约为 30 美元/桶。若将副产品电能和天然气计算在内，成本可降为 14 美元/桶。⑤环保。由于该工艺不是通过燃烧反应来发电，而是通过电反应来发电，几乎不产生 NO_x、SO₂ 等有害物质。

1.2 对流加热技术

目前主要利用对流加热方式加热页岩层的技术主要有太原理工大学对流加热技术、雪弗龙的 Crush 技术和 EGL 技术等。

1.2.1 太原理工大学对流加热技术

利用高温烃类气体对流加热油页岩开采油气技术是太原理工大学发明的一种原位开采技术(图 4)。

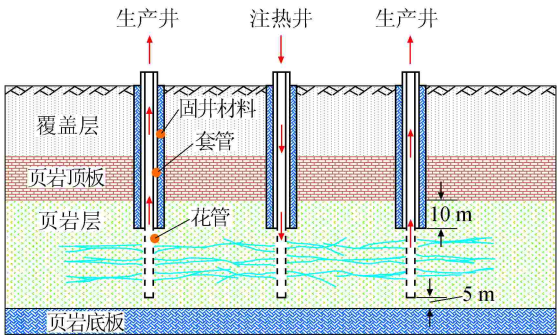


图 4 太原理工大学对流加热技术图

注：1. 注热井；2. 生产井；3. 页岩层；4. 页岩顶板；5. 覆盖层；6. 固井材料；7. 套管；8. 花管；9. 页岩底板

通过在地面布置群井，采用压裂方式使群井连通，然后间隔轮换注热井与生产井，将 400~700 ℃ 高温烃类气体沿注热井注入油页岩矿层，加热矿层使干酪根热解形成油气，并经低温气体或水携带沿生产井排到地面，油气水分离后，再进行单独的气体分离形成油气产品，并将烃类气体通入储罐，经加压

和升温到设定压力、温度后注入油页岩矿层，循环实施油页岩油气的开采^[10]。此外，赵阳升等^[11]还对油页岩岩石热损伤及导热过程进行了数值模拟，取得较好的数据结果，但目前还没有工业试验。

该技术的特点是：①利用群井压裂制造裂缝采用群井压裂方式，产生巨型的沿矿层方向的裂缝，使群井内所有钻井沿油页岩层连通，增加了油页岩层的渗透性，提高了采油效率；②利用高比热系数流体，提高了加热油页岩矿层的速度，利用热容系数高的烃类气体代替热容系数低的水蒸气，提高了加热速度，缓解了对水的需求；③间隔轮换注热井和生产井采用注热井与生产井间隔轮换的方法，保证了油页岩矿层均匀升温 and 油气的均匀开采。

1.2.2 雪弗龙 CRUSH 技术

2006 年，雪弗龙公司和 Los Alamos 国家实验室联合开发了 CRUSH 技术，并将根据设计的含有 2~5 个四点井网单元的工业试验模型，进行实验室室内实验和小规模的现场试验。目前主要研究注入高温 CO₂ 加热油页岩层技术(图 5)。该技术首先对页岩层进行爆破压裂，提高 CO₂ 与干酪根接触的表面积，将 CO₂ 以对流的方式从竖直井导入，通过一系列水平裂缝加热页岩层。生成的烃气经垂直井采出。该技术是基于 1950 年代 Sinclair 油气公司利用垂直井间自然和引导的裂缝开采地下干酪根的试验开发的^[12]。康菲石油公司和阿克伦大学的研究表明：CO₂ 是一种能使页岩油很好回收的载体，并申请了专利^[12]。该技术需要大量水，并进行现场生产，对环境破坏较大^[13]。

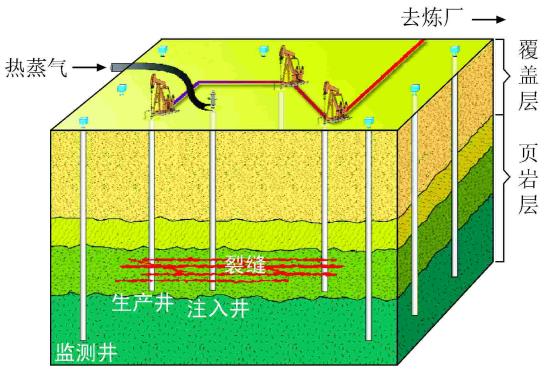


图 5 雪弗龙公司 CRUSH 技术图

1.2.3 EGL 技术

EGL 技术由 EGL 公司提出开发并申请了专利，目前处于小型试验阶段，未进行大规模的商业化开采。该技术主要利用对流和回流传热原理来加热

油页岩层,主要由加热系统和采油系统两部分组成。加热系统是一个封闭的环形系统,主要由几个平行的水平井组成。向环形系统中通入高温天然气或丙烷、干馏气带入热量来加热油页岩层^[12]。竖直井主要用于收集热解生成的油气,并输送到地面上来。

该技术的特点为:①采用了闭路循环。未向地层注入流体,提高了能量利用率,减少了对环境的影响。②能量自给自足。除了启动装置时需要天然气等燃料外,一旦该工艺正常运转后就可利用自身产生的干馏气来作为加热井的燃料。但关于地下水的测试与分析,干馏前和干馏过程中脱水的问题尚未研究。

1.2.4 Prttoprobe 公司的空气加热技术

该工艺流程先将压缩空气与干馏气通入燃烧器进行燃烧,加热到一定温度,消耗掉部分氧气,然后通入到油页岩地层中加热油页岩使其中的有机质生成烃气,最后把生成的烃气带到地面上来。采出的烃气冷凝后得到轻质油品^[12]。

工艺特点:①通入的高温压缩空气在地层中可压裂油页岩,增加油页岩的孔隙度,使生成的烃气很容易地从油页岩地层中导出来;②该工艺有 4 种产品:氢气、甲烷、轻油、水;③产生的部分轻质烃气通入燃烧器进行燃烧,加热即将通入地层的空气,能量自给自足;④产生的 CO_2 等气体又被打回油页岩矿层中,污染小,环保;⑤可开发深层(深可达 900 m)的油页岩矿;⑥开采后的油页岩仍能保持 94%~99% 的原始结构完整性,避免了地面塌方。

1.2.5 MWE 的 IGE 技术

工艺流程:先将高温蒸汽注入油页岩地层中,对流加热油页岩,与油页岩换热后,把热解生成的油气载到地面上来,冷凝、回收。分离后的不凝气被加热到一定温度后通入到地层与油页岩换热,循环利用(图 6)。MWE 公司称,该工艺中 1 口井的覆盖面积可达 $3\,000\text{ m}^2$,产油超过 $8\,100\text{ t/a}$ ^[12]。

工艺特点:①工艺只涉及气态流动,避免了液态石油的黏滞;②利用单一垂直中心井,减少了操作成本,提高了经济效益,降低了环境影响;③高压蒸汽只在油页岩层内循环,减少了向采油区渗透的地下水;④该工艺还可用作提高石油的采收率;⑤该工艺在超过 150 m 深和 8 m 厚的绿河油页岩地层中开发才具有经济效益。

1.3 辐射加热技术

目前主要利用辐射加热方式加热页岩层的技术主要有 LLNL 的射频技术和 Raytheon 公司的 RF/CF 技术等。

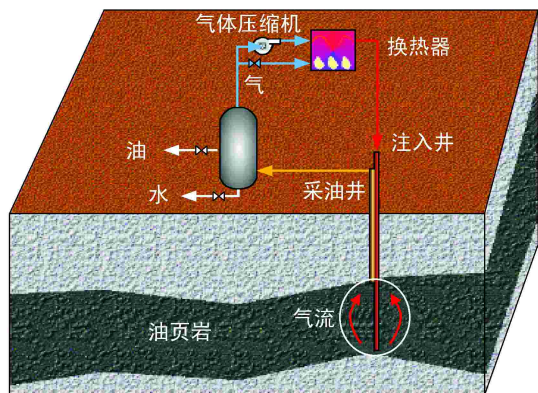


图 6 MWE 的 IGE 技术图

1970 年代后期美国伊利诺理工大学提出利用射频加热油页岩。该技术利用垂直组合电极缓慢加热大规模深层的页岩层。后来由 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)进行开发。LLNL 提出利用无线射频的方式加热页岩,克服了传导加热需要大量的热扩散时间的缺点。具有穿透力强,容易控制等优点(图 7)^[12-14]。

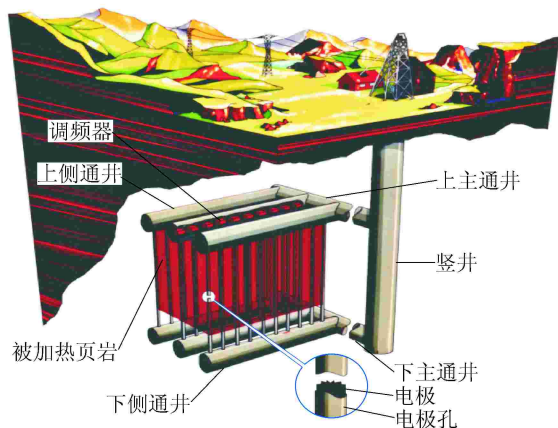


图 7 LLNL 的射频工艺图

Raytheon 公司的 RF/CF 技术是将一项利用射频加热和超临界流体做载体的专利转化技术。其工艺流程为:先将射频发射装置置于地下油页岩层中,进行加热,然后把向页岩层中通入超临界 CO_2 把热解生成的烃气载到采油井,被抽到地面上冷凝,回收。冷凝后的 CO_2 又打回地层中循环利用。

由于辐射加热具有传热快、体积加热、选择性加热、无环境污染和容易自动控制等优点,使得辐射加热油页岩具有较大得发展空间,主要具有以下特点:①采油率高。每消耗一个单位的能量有 4~5 个单位的能量被生产出来,相对于 ICP 技术的 3.5 个单位,更具有经济效益;②传热快,加热周期短,只有几

个月;③用于油页岩开采时,生产的石油含硫低,还可通过调节装置来生产不同的产品;④可用于开采油页岩、油砂、重油等资源,环保,无残留物质渗透地下水层;⑥选择性加热,可使指定加热目标区域快速达到目标温度。

总之,将热量传递油页岩的方式有3种:传导、对流和辐射。传导加热速度较慢,容易造成大量热量损失,成本较高,且由于油页岩的热膨胀,致使部分裂缝闭合,降低了油页岩的渗透性,而产生的油气压力较低,导致油气回收率较低。相比之下,对流加热油页岩速度较快,但不容易控制,由于流体压力的作用,裂缝一般不会闭合,油气的导出速度较快,但容易形成流体的短路即流体流速过快,不与油页岩换热就流出地层。射频加热穿透力强,加热速度较快,但成本较高,技术难度较大。由于油页岩地层的低渗透,为了干馏气体顺利导出,应对油页岩地层进行压裂,增加其孔隙度和渗透率。

2 结束语

未来原位开采技术的特点主要体现在以下几个方面:

1)工艺简单、有效,适应性强,将是今后技术发展的主要方向。

2)大规模、低成本、高效益为原位开采技术的重要发展方向。

3)研发有利于环保的技术方法和控制手段,避免或减轻对环境的影响,重视监测空气、地下水、土壤及生物质量等方面工作。

4)各种技术相互渗透、综合、集成和应用是当今原位开采技术发展的主要方向之一,如信息技术大量应用在工艺监测和控制、工艺过程建模和模拟研究上,这些经验技术大大加快了原位开采技术的开发与应用。

多年来的理论、技术的研究推动了原位开采技术的不断发展。随着技术逐步的成熟,油页岩的地下干馏,必将进行大规模商业化生产,但是我国在这方面的研究还处于空白状态。根据我国油页岩资源埋藏深、品位低的特点,我国应该开展原位开采技术

方面的研究工作,为将来全国大规模开发油页岩资源提供技术储备。

参 考 文 献

- [1] 钱家麟,王剑秋,李术元.世界油页岩开发利用动态[J].中外能源,2008,13(1):11-15.
- [2] 郑德温,王红岩,刘德勋,等.大庆柳树河油页岩特点及干馏工艺选择[J].天然气工业,2008,28(12):130-132.
- [3] 高书香,曹可广,孟庆萍.油页岩生产技术研究[J].吉林地质,2007,26(1):45-48.
- [4] 翟光明.关于非常规油气资源勘探开发的几点思考[J].天然气工业,2008,28(12):1-3.
- [5] 雷群,王红岩,赵群,等.国内外非常规油气资源勘探开发现状及建议[J].天然气工业,2008,28(12):7-10.
- [6] 国际壳牌研究有限公司.传导加热地下油页岩以赋予其渗透性并随后采油:荷兰,E21B43/28,87100890[P].1988-08-31.
- [7] 牛继辉,陈殿义.国外油页岩的地下转化开采方法[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(6):1027-1030.
- [8] 陈殿义.国外油页岩的地下开采及环境保护[J].吉林地质,2005,24(3):58-60.
- [9] 美国能源部.Secure fuels from domestic resources; the continuing evolution of America's oil shale and tar sands industries[R].[S.l.]:[s.n.],2007.
- [10] 太原理工大学.高温烃类气体对流加热油页岩开采油气的方法:中国,E21B43/24,200710139353.X.[P].2006-09-06.
- [11] 孙可明,赵阳升,杨栋.非均质热弹塑性损伤模型及其在油页岩地下开发热破裂分析中的应用.岩石力学与工程学报[J].2008,27(1):42-52.
- [12] 钱家麟,王剑秋.世界油页岩发展近况[J].中外能源,2007,12(1):7-11.
- [13] WIKIPEDIA.Oil Shale Extration[EB/OL].http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_shale_extraction,2008-01-10/2008-04-20.
- [14] BURNHAM A K, MCCONAGHY JR.Comparison of the acceptability of various oil shale processes[R].26th Oil Shale Symposium.Colorado:Colorado School of Mines,2006.

(修改回稿日期 2009-03-10 编辑 罗冬梅)