

# 油页岩开采模式

陈晨, 孙友宏

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**随着世界石油市场高油价时代来临,原来高成本的油页岩生产变得经济,油页岩已成为非常重要的替代能源。由于受诸多因素限制,常规油页岩开采方法成本较高。基于我国油页岩埋藏条件及其物理力学性质,分析国内外非常规油页岩开采以及相关的试验,提出了2种开采模式——油页岩原位开采与钻孔水力开采。

**关键词:**油页岩;原位开采;钻孔水力开采

**中图分类号:**TD83;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0026-04

**Mining Mode for Oil Shale/CHEN Chen, SUN You-hong** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** With the era of high oil prices in world oil market, the high cost of oil shale production has become economical. Oil shale has become a very important alternative energy source. Due to many constraints, the cost of conventional mining methods for oil shale are higher. Based on the burial conditions as well as physical and mechanical properties of oil shale, at the same time, analyzed the unconventional mining methods and related tests for oil shale mining at home and abroad, two mining models are proposed, which are in situ mining and bore-hole hydraulic mining technology.

**Key words:** oil shale; in situ mining; bore-hole hydraulic mining technology

## 0 引言

随着全球经济的发展,对能源的需求日益增加,世界石油市场高油价时代已经来临。近年来,国际油价一直在60美元/桶以上震荡,最高曾达100美元/桶以上,在这种经济背景下世界各国不得不开始积极寻找新的替代能源。

随着技术的进步,油页岩地表干馏页岩油的成本约为1500元/t左右(30美元/桶),因此过去看来很高的油页岩生产成本在今天变得经济。全世界油页岩蕴藏的页岩油资源量大体有4110亿t,相当于目前世界已探明的原油和凝析油剩余可采储量的3倍。我国油页岩资源丰富,分布在20个省(市、区)的47个盆地,页岩油资源476亿t,相当于传统石油资源量的1.5倍,居世界第4位。

油页岩的主要开采方法为露天或地下巷道开采,前者要占用大量的耕地,对环境破坏大;后者遇薄矿层时,开采成本高。虽然国际上油页岩开发利用历史已有100多年,油页岩地面干馏和发电尽管技术已比较成熟,但由于其产生的废气、废水和废渣,给环境带来极大的污染,导致这些技术推广受到一定限制。美国以及国际上一些大的石油公司一直在致力于油页岩地下原位转化技术的研发,已进行

了野外生产性试验,取得了一些成果。但由于其技术的难度和使用条件的限制,至今一直未能商业化生产。就目前的技术条件,油页岩资源大都未能探明和开发利用,仍具有储量巨大、潜力巨大、开发利用技术难度大的“三大”特点。

我国现已启动的16个国家重大专项《大型油气田及煤层气开发》中课题18为“页岩油有效开采关键技术”、吉林大学主持的“国家潜在油气资源产学研用合作创新项目——油页岩勘探开发利用”等各部门分别从不同角度立项,其研究目标主要都是立足当前油页岩资源开采的技术难题,开展相关的开采关键技术研究,注重技术创新的研究。

针对我国各地区、地层油页岩油收率的不同,可采用不同的开采思路。

## 1 油页岩地下原位开采技术

油页岩地下原位开采技术一方面可以避免页岩开采后在干馏装置内热工生成的废水、废气和废渣所导致的环境污染,另一方面可以开采中深部(>500m以上)的油页岩,实现资源的最大化利用。该方法适于高品位油页岩。地下原位转化技术的原理:通过直接给地下油页岩层加热,使其在地下进行

收稿日期:2010-09-10

基金项目:教育部“国家潜在油气资源产学研用合作创新项目(油页岩勘探开发利用)”

作者简介:陈晨(1965-),男(汉族),四川资中人,吉林大学建设工程学院勘察工程系副主任、教授、博士生导师,地质工程专业,博士,从事岩土工程钻凿技术与计算机模拟、基础工程设计、施工与数值模拟研究及教学工作,吉林省长春市西民主大街6号,chenchen@jlu.edu.cn。

裂解,生成油气,最后通过生产井把油气开采出来。目前,油页岩原位开采技术达十几种,油页岩层加热方式可分为电加热、流体加热、辐射加热 3 类工艺。当今研究相对比较成熟的有壳牌 ICP 技术、埃克森美孚 Electrofrac TM 技术和 EGL 公司原位开采技术。

### 1.1 壳牌原位转化(ICP)工艺

在将近 30 年的时间里,壳牌公司的 Mahogany 研究工程一直致力于革新壳牌原位转化工艺。其工作原理如图 1 所示,在加热井中插入电加热器,一般加热距地表 300 ~ 600 m 深度的目的层的油页岩。岩层被缓慢地加热到 343 ~ 398 °C,油页岩中的干酪根转变为原油和天然气,运用传统的采油方法将生成物(原油和天然气)抽汲到地面。

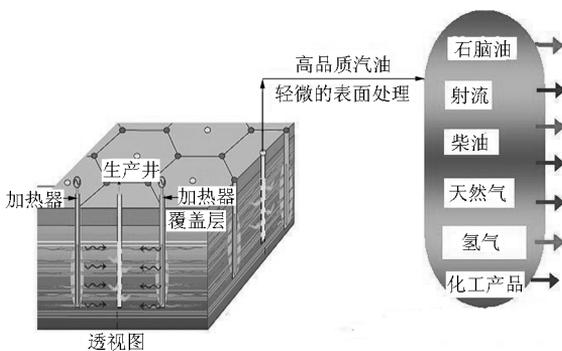


图 1 壳牌 ICP 技术原理图

为了防止地层水流入开采区、防止油气散失到附近地层,壳牌利用了冷冻墙技术,如图 2 所示。冷冻墙由冷冻井、连接冷冻井的密闭管网及冻结的围岩介质组成。在开采区周围钻一系列井,间距为 3 m 左右,在冷冻井内装入一密闭的循环系统,向循环系统内注入 -45 °C 的冷冻液,使之在密闭系统内循环,使系统周围的地下水及围岩介质一起冷冻,形成冷冻墙。2008 年开始试验,其地表庞大的装置如图 3 所示。

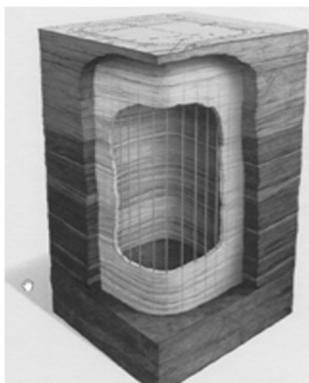


图 2 壳牌冷冻墙技术原理图



图 3 壳牌冷冻墙地表系统

### 1.2 埃克森美孚电压裂工艺

该技术通过水力压裂油页岩及向裂缝中注入一种导电材料,形成一种加热部分,这样将原位油页岩转换为加热原位油页岩,原理如图 4 所示。运用水平井中生成的垂直裂缝使得埃克森可以得到一个导流区,在该导流区将页岩油加热到分解温度,生成可以用传统采油技术采出的原油和天然气。根据埃克森美孚公司的经验,平面加热器较井眼加热器需要的井更少,并且地面占地更少。和壳牌技术一样,埃克森的原位技术也需要采取有效技术措施以阻止地层水侵入及保护地层水免受生成的碳水化合物和其他组分的污染。两种技术都需要大量的电以提供加热处理。

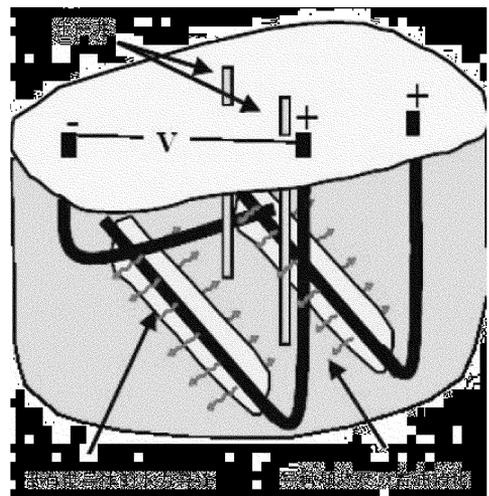


图 4 埃克森美孚电压裂工艺

### 1.3 斯伦贝谢/Raytheon2CF 的临界流射频技术

这种原位技术使用射频来加热油页岩到裂解温度及注入超临界二氧化碳,从而将液体和气体驱扫到生产井中,如图 5 所示。在地面,二氧化碳流体被分离并重新回注到注入井中,与此同时油和气被炼制成汽油、燃料油及其他产品。相比其他原位方法

需要加热好多年才能生产出油气,这种提取技术可以在仅仅几个月内就生产出油气。该技术可调节直接加到目的层的热能,可以生成各种各样的产品。

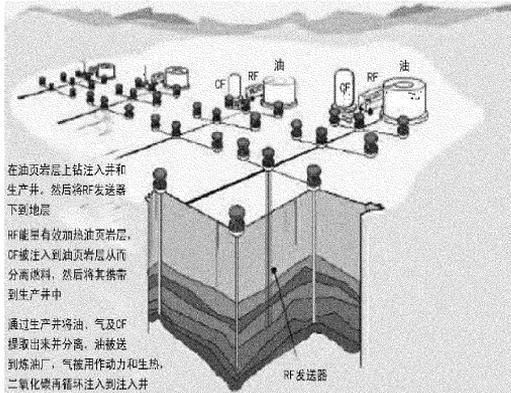


图5 斯伦贝谢临界流射频技术原理图

#### 1.4 存在的主要技术难题

上述各种油页岩地下原位开采技术以及拟进行研究的关键技术有以下几点:

- (1) 油页岩中的页岩油地下原位浸提技术,涉及到油页岩原位加热方法、有无油气输送载体等。
- (2) 油页岩原位破碎技术,涉及到如何将大尺寸的矿体采取各种技术措施原位破碎。
- (3) 深部地层密封技术。

## 2 钻孔水力开采技术

鉴于目前油页岩开发利用成本较高的特点,如何降低成本的研究思路集中在2个方面:一是利用大型干馏炉提炼页岩油,以规模化来降低成本;二是提高油页岩综合利用水平,如可以直接用于发电,生产新型建材,如吉林省农安和桦甸的油页岩中富集Na、P、Ca、Mn、Zn、Sr、Ba和Th等8种元素,还可以进行稀有、稀土、稀散金属的提取<sup>[1]</sup>,所以将油页岩矿石从地下提取上来在地表加工进行综合利用的前景还是十分广阔的。对油页岩埋藏较深,矿层不是很厚,含水量较大等特点,可以采用钻孔水力开采的方法将油页岩从地下提上来,该方法适于低品位油页岩。

### 2.1 对油页岩进行水力破碎的可行性

高压水射流技术能否破碎油页岩,要考虑油页岩的抗射流水力冲蚀特性。研究与应用表明<sup>[2]</sup>,射流水力冲蚀破岩的冲蚀压力值必须超过岩石内部胶结强度,并能够在岩石的某些部位产生微裂纹和有效地扩展微裂纹,把岩石颗粒及时有效地冲离基岩,形成水力冲蚀破碎体积。岩石颗粒间的孔隙首先从自由面开始破裂,在水力渗流压力的冲击及流体的

进一步扩张下,裂纹不断地扩展,增大了岩石上颗粒的暴露面从而大大地降低了岩石的强度。因抗拉强度仅为抗压强度的2%~10%<sup>[3]</sup>,所以,在较低的水射流压力下,岩石颗粒团可以相继被剥落。岩石自身的抗压强度与对其破碎的水力冲蚀破岩临界压力值之间的临界关系见表1。考虑到油页岩的抗压强度只有25~30 MPa,所以就目前的技术装备来说,完全可以对油页岩进行水力破碎。

表1 抗压强度与水力冲蚀破岩临界压力值

岩石分类	抗压强度/MPa	临界压力值/MPa
泥岩	34.96	8
中砂岩	47.74	12
软砂岩	97.28	21

此外,埋藏在地层深处岩石中含有溶解物质的水,它对岩石强度影响很大,尤其对孔隙度较大的岩石更是如此。水侵入岩石后,顺着孔隙与裂纹侵入岩石的深处,润湿所能达到的全部自由面上的每个矿物颗粒,使水分子沿颗粒间的接触面而侵入,从而减弱了晶粒间的联结力,降低了岩石的强度,如果空间足够,甚至可能发生“崩解”。图6为采用了吉林省农安某孔中的油页岩岩样在水中浸泡20~30 min的结果,油页岩岩样确实“崩解”了。



图6 油页岩在水中浸泡的结果

(a)—浸泡20 min; (b)—浸泡30 min

### 2.2 钻孔采矿技术

钻孔水力采矿是在穿过矿层的钻孔内,用高压水射流破碎矿层,并在孔底形成水-矿混合物,然后由下入孔内的液(气)力提升设备将矿浆输送到地面。该方法只要在地表操作,无需开凿提升井和地下巷道,可有效减少投资,减少环境污染,避免生产事故,尤其在地下水丰富以及危险(瓦斯富集)的矿区具有广阔的应用前景。据俄罗斯专家测算,建设一个相同生产能力的矿山,其建设费用只有传统矿山的30%~50%,开采成本为传统矿山的50%~60%<sup>[4,5]</sup>。

截止到目前为止,美国、俄罗斯、前南斯拉夫、塞黑、乌克兰、哈萨克斯坦、津巴布韦等国采用钻孔采矿技术分别开采了铁矿、金伯利岩、粘土矿、页岩、石

英砂、砂岩等矿产,这些工程实践中所采用的相关参数为:矿产的埋深从15 m到1000 m,工具管的直径是89~305 mm,工作的水压是7~20 MPa,流量是150~300 m<sup>3</sup>/h,矿浆的浓度(岩石:水)是1/6~1/1,切割工具半径能达到10 m,矿层厚度0.3~400 m。

图7为在塞黑开采石英砂矿的钻孔开采系统(BHM)。钻井开采工具置于钻孔的下部,高压水从地表通过内外管环状间隙送入孔内。在钻具的底部,一部分高压水通过喷嘴喷射出来切割矿石,同时产生矿浆;另一部分高压水进入下部的水力喷射器中产生真空。因此矿浆要向钻具集中流动,喷射器抽吸矿浆并将其输送到地表。到地表后矿石和水在水箱或水池中分离,净化后的水被水泵重新抽到孔内,完成新一轮循环。如有必要,压缩空气也可以参与到上升的矿浆中形成气举<sup>[4]</sup>。

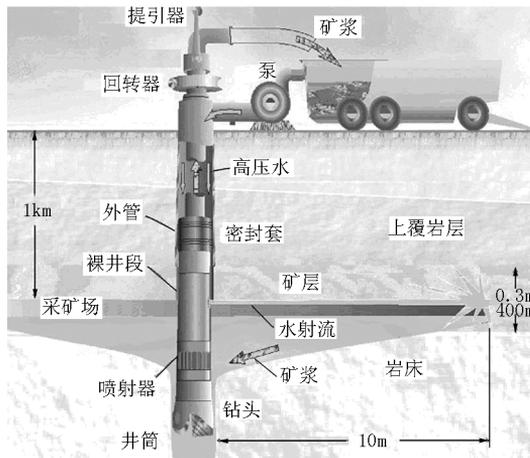


图7 钻孔开采系统(BHM)示意图

基于油页岩的埋藏条件及其自身的物理力学性质,可以认为钻孔水力开采是解决低品位油页岩开采问题的一种有效方法。从技术原理上,我国的水

射流技术、井底流场净化、反循环中心取样等已经非常成熟,并且一直在不断的实践中;从技术装备上,我国已经能够生产高压的水泵、耐磨性非常好的喷嘴。从基本理论到物质装备,以及国内还有一些采用BHM法开采滨海石英砂的成功案例,所以进行钻孔水力开采技术研发的各项条件已经非常成熟。完全可以利用油页岩开采的契机,提高我国钻孔水力开采的技术水平,降低开采成本,赶超发达国家。

### 3 结语

为充分合理开发利用我国油页岩资源,促进资源节约型、环境友好型社会的发展,利用新技术探讨各种有效的开采方法是十分有益的。基于我国油页岩的埋藏条件及其物理力学性质,我们提出了2种开采模式——油页岩原位开采与钻孔水力开采。对国外成功案例的分析表明,该方法可以有效地减少投资,减少环境污染,避免生产事故。从油页岩工业整个长远考虑,地下原位转化技术、钻孔水力开采应是最佳的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 陈晨,张祖培,王森. 吉林省油页岩的开采新模式[J]. 中国矿业,2007,16(5):55-57.
- [2] Bunker James, Dammer Anton, Guthrie Hugh, et al. Comparative Analysis of Athabasca Oil Sands and Green River Oil Shale Resources-Implications for Production [A]. In: AAPG 2005 Annual Convention Abstract Volume [C]. 2004:21.
- [3] 熊继有,廖荣庆,孙文涛,等. 石油工程岩石水力破碎特性研究[J]. 西南石油学院学报. 1999. (5):48-51.
- [4] Bojan Dimitrijevic, Ján Pinka and Vladimir Mitrovic. Selection of Technological Parameters in Borehole Mining Production by Technical Deep Drilling and Hydroexploitation [J]. Acta Montanistica Slovaca,2004(9):160-167.
- [5] 陈晨,张祖培. 钻孔水力开采技术[J]. 中国矿业,1998,7(6):40-43.

## 江西敲定3个重点勘查区找矿计划

**国土资源网消息** 近日,江西省找矿行动计划整装勘查实施方案通过省级初审。

据了解,在全国地质找矿行动计划46个重点勘查区中,有3个位于江西省。江西省国土资源厅对整装勘查实施方案进行了精心组织,并由省地矿局统一协调,省地调院具体负责编制。根据实施方案,江西赣中地区铁矿整装勘查将在2011~2015年对江西省中西部铁矿成矿远景区开展较为系统的地质、物探调查和综合研究,优选重点勘查区。在此基础上布施探矿工程,预期探求铁矿石资源量6亿t,可供进一步勘查的矿产地2处,形成新的资源接替基地。

江西东乡—德兴地区铜金多金属矿整装勘查将对江西省钦杭结合带东北部铜金成矿远景区开展地质、物探调查和

综合研究,优选出重点勘查区,预期探求铜资源量480万t、金资源量135t、钼1.7万t、铅锌40万t;可供进一步勘查的大型铜矿产地2处,中—大型铜、铅锌矿产地1~2处。

江西九瑞铜多金属矿整装勘查以铜矿为主要评价矿种,兼顾铅锌、钼、金、银等矿种,对九瑞—彭山地区铜(铅锌)矿成矿远景区开展较为系统的地质、物化探调查,优选勘查区,并结合点上的大比例尺地质、物探及探矿工程等普查工作,查明矽卡岩型、喷流—沉积热液型、岩浆热液交代充填型铜(铅锌银钼)矿地质特征及其成矿规律,对区内铜(铅锌银钼)矿资源潜力作出总体评价,探求(333+3341)铜资源量520万t,铅锌资源量200万t,伴生银1000t,提交大—中型以上铜矿产地2~3处。