

# 燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集驱油封存技术及应用

吕广忠, 李振泉, 李向良, 张建, 王世杰

中国石化胜利油田分公司, 东营 257015

**摘要** 燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集驱油封存技术是提高特低渗透油藏采收率和减少温室气体排放的有效方法。针对燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集和大幅度提高低渗透油藏采收率的技术瓶颈开展研究,形成了燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集纯化处理技术、CO<sub>2</sub>驱提高采收率油藏适应性评价体系、室内实验技术和油藏工程优化设计技术系列,配套了CO<sub>2</sub>驱注采工艺和地面工程技术系列,并建成国内外首个燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集与驱油示范工程。实践表明,技术应用效果良好,开发的高效CO<sub>2</sub>捕集溶剂及工艺比传统单乙醇胺(MEA)工艺捕集成本降低35%,CO<sub>2</sub>驱油与封存示范区累计注入CO<sub>2</sub> 12.8万 t,累计增油2.9万 t,封存CO<sub>2</sub> 11万 t。

**关键词** 燃煤电厂;CO<sub>2</sub>捕集;驱油封存技术;油藏采收率

**中图分类号** TE357.4

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.005

## Technology and Application of CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage for Coal-fired Power Plant

LÜ Guangzhong, LI Zhenquan, LI Xiangliang, ZHANG Jian, WANG Shijie

Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257015, China

**Abstract** The carbon dioxide capture, the flooding and the storage technologies in a coal-fired power plant are effective for enhancing the oil recovery in an ultra-low permeability reservoir and reducing the greenhouse gas emissions. The studies in these directions provide insight on the dynamic microscopic mechanism of the carbon dioxide mixed with oil, the capture of the carbon dioxide to reduce the high cost of coal-fired power plants, the serious corrosion of oil storage and production systems and other key technologies, to form the technology series, including the carbon capture coal-fired power plant flue gas purification technology, the carbon dioxide EOR reservoir adaptability evaluation system, the indoor experimental techniques and the reservoir engineering optimization design technology, supported with the carbon dioxide flooding processes and the ground engineering. The first demonstration project of the coal-fired power plant carbon capture, flooding and storage is established, with good results. Compared with the conventional MEA capture process, the efficient carbon capture solvents and the process make a cost reduction of 35%, over 128000 t of CO<sub>2</sub> being successfully injected into the reservoir, with the cumulative oil increment of 2.9×10<sup>4</sup> t, and 110000 t of CO<sub>2</sub> being stored in the CO<sub>2</sub> flooding and sequestration demonstration zone.

**Keywords** coal-fired power plant; CCUS; oil recovery

中国能源消费结构以煤为主,CO<sub>2</sub>排放量大且持续增长,面临严峻的减排压力。燃煤电厂是CO<sub>2</sub>主要的排放源,排放量约占总排放量的50%,是碳减排的主要对象;另一方面,作为今后中国油气勘探开发主战场的低渗透油藏,受油藏条件的限制,开发效果较差,而CO<sub>2</sub>作为一种优越的驱油剂,可大幅度提高该类油藏的采收率。因此,燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集、驱油与地下封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术作为一项有望实现化石能源大规模低碳利用的

新技术,不仅具有良好的生态效益,而且能够增加原油产量,保障国家能源供给,将可能成为未来中国较少CO<sub>2</sub>排放和保证能源安全的重要战略技术选择。

燃煤电厂烟气具有CO<sub>2</sub>分压低(常压)、含量低(8%~15%)、强氧化(含有4%~7%的O<sub>2</sub>)和组分复杂等特征,国外已对燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集开展了相关研究,并建有小规模燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集装置,但存在能耗大、成本高等缺点<sup>[1-5]</sup>,难以进行大规模推广应用,国内研究尚处起步阶段,与国外

收稿日期: 2013-07-11;修回日期: 2013-11-27

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC24B03)

作者简介: 吕广忠,研究员,研究方向为油气田开发工程,电子信箱:dkylgz@163.com

引用格式: 吕广忠,李振泉,李向良,等.燃煤电厂二氧化碳捕集驱油封存技术及应用[J].科技导报,2014,32(1):40-45.

有较大差距。

CO<sub>2</sub>驱提高石油采收率,国外技术相对成熟,已成为主要的提高采收率方法<sup>[6-10]</sup>。与国外相比,中国油藏条件差、埋藏深、原油黏度高,国外已有技术并不完全适用,驱油过程中CO<sub>2</sub>地下封存的条件、能力及安全性等方面尚待深入研究。

针对燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集成本、CO<sub>2</sub>驱油机制、封存率和采收率之间的最优匹配及高压CO<sub>2</sub>的安全注采等问题,介绍燃煤电厂烟道气CO<sub>2</sub>捕集、CO<sub>2</sub>驱油与封存的关键技术及应用效果,提出适合中国资源特点、能够推广应用的燃煤电厂烟道气CO<sub>2</sub>捕集、CO<sub>2</sub>驱油与封存及产出气CO<sub>2</sub>回收的关键技术,打造国内外首个燃煤电厂烟气CCUS全流程示范工程,以实现环境与经济效益的互利双赢。

## 1 燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集及输送技术

### 1.1 捕集纯化处理技术

胜利油田燃煤电厂烟气具有CO<sub>2</sub>质量分数低(8%~12%)、分压低(常压)、烟气组分复杂(除CO<sub>2</sub>外,O<sub>2</sub>质量分数4%~7%,N<sub>2</sub>质量分数75%,CO<sub>2</sub>质量分数8%~12%,SO<sub>2</sub>质量浓度400 mg/m<sup>3</sup>,NO<sub>x</sub>质量浓度700 mg/m<sup>3</sup>等)和氧化性强等特点,造成CO<sub>2</sub>捕集再生蒸汽消耗量大、溶液腐蚀性强、溶液易降解、吸收能力低,从而使捕集成本增高。针对燃煤电厂烟气特点,从捕集溶剂、捕集工艺、能量回收利用等方面开展研究工作,建立了燃煤电厂烟道气CO<sub>2</sub>捕集纯化成套技术,建成了工业化生产成套装置,实现了低能耗、低成本CO<sub>2</sub>捕集。

1) 回收低分压CO<sub>2</sub>的复合胺溶剂。采用分子结构设计与实验研究相结合的方法,发明了回收低分压CO<sub>2</sub>的复合胺溶剂(MSA),该溶剂以单乙醇胺(monoethanolamine, MEA)为主吸收剂,同时添加活性胺、缓蚀剂、抗氧化剂等辅助成分。MSA与常规MEA吸收剂相比,吸收能力提高30%,再生能耗降低10.0%,氧化降解率下降98%,对碳钢类设备的腐蚀速率小于0.1 mm/a。

2) 热泵式低能耗CO<sub>2</sub>捕集工艺。以自主开发的高效复合胺溶剂为基础,通过室内小试评价、模试试验测试、工艺模拟优化等手段,获得了捕集工艺放大规律,形成了工业规模下主要捕集工艺参数及关键捕集设备的优化方法;针对常规CO<sub>2</sub>捕集工艺能量利用率低、捕集能耗较大的问题,开发了热泵式低能耗CO<sub>2</sub>捕集工艺,采用蒸汽型吸收式热泵技术,回收贫胺液的余热用于富胺液加热和CO<sub>2</sub>解吸,有效降低了再生能耗和循环水用量,捕集能耗降低18.7%。

3) 燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集纯化工业化生产成套装置。应用自主开发的新型高效CO<sub>2</sub>捕集溶剂、高效反应设备及热泵式低能耗CO<sub>2</sub>捕集工艺,在胜利油田胜利发电厂建成了年产量4万t的烟气CO<sub>2</sub>捕集装置。现场生产运行数据表明,该装置CO<sub>2</sub>捕集率大于80%,CO<sub>2</sub>纯度大于99.5%,捕集运行成本为197元/t,与国内外工业化装置相比捕集成本降低33.2%。

### 1.2 CO<sub>2</sub>管道输送技术

CO<sub>2</sub>管道输送有3种方式:气相输送,优点是运行压力较低,操作安全性高,管道不需要保温,对不同输量适应性强,缺点是输送过程首站采用压缩机加压,操作及管理复杂,同时管径大,投资高;液相输送,优点是运行压力较低,缺点是管道需要保冷,且输送过程中容易发生相变,对不同输量的适应性较差,投资费用较高;超临界输送,优点是投资较低,管道不需要保温,对不同输量适应性强,缺点是首站需要采用压缩机加压,压缩机操作及管理较复杂,且能耗较高,此外,运行压力较高。针对CO<sub>2</sub>的相态特性,通过经济性、安全性和工艺可行性等综合评估,选择气相或超临界管线输送。

## 2 CO<sub>2</sub>驱油与封存油藏工程配套技术

### 2.1 CO<sub>2</sub>驱提高采收率油藏适应性评价体系和评价方法

油气田CO<sub>2</sub>驱开发方面,美国不仅在实验室进行了系统实验研究,而且进行了大量矿场实验。本文统计了国外81个资料完整且已实施的注CO<sub>2</sub>项目,对影响注气效果的因素和CO<sub>2</sub>的油藏参数分布情况进行分析,取项目数累计比例>95%时的参数值作为筛选界限,确定了CO<sub>2</sub>驱的原油黏度<6 mPa·s、原油密度<0.8762×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>、剩余油饱和度>0.2 s和深度>1000 m的筛选界限。

利用物理模拟、数值模拟和数理统计方法,综合分析了注气效果影响因素,明确了混相能力(地层压力/最小混相压力比值)与驱油效率的关系,确定了实施CO<sub>2</sub>驱的油藏渗透率下限为0.5×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。结合国内外CO<sub>2</sub>驱应用实例<sup>[10-12]</sup>,建立了适合胜利油田的CO<sub>2</sub>驱提高采收率(CO<sub>2</sub> flooding for enhance oil recovery, CO<sub>2</sub>-EOR)油藏评价标准:混相能力≥1(混相驱),0.8~1(近混相驱);渗透率>0.5×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;油藏条件下原油黏度<12 mPa·s;油藏条件下原油密度<0.8762×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>;剩余油饱和度>25%;单储系数>39000 m<sup>3</sup>/(km<sup>2</sup>·m);油层深度>2000 m;地层温度<145℃。实现了油藏适应性的多因素定量评价。

### 2.2 CO<sub>2</sub>与原油及与储层相互作用机制

#### 2.2.1 CO<sub>2</sub>与原油的作用机制

1) CO<sub>2</sub>与地层油的特异性。CO<sub>2</sub>在油藏条件下处于超临界状态,具有较高的密度和较低的黏度,易于注入地层。同时,CO<sub>2</sub>与地层油相特性实验表明<sup>[13-16]</sup>,CO<sub>2</sub>与原油互溶性强,溶于原油后可引起原油膨胀,使原油的体积增大,从而促使充满油的孔隙体积也增大,有利于油在孔隙介质中的流动;降低原油黏度,促使原油流动性提高,减少溶剂用量,提高驱油经济效益;降低界面张力,提高洗油效率;改善流度比,扩大波及体积。

2) CO<sub>2</sub>对原油的抽提作用。利用高温高压PVT分析仪,研究了CO<sub>2</sub>的溶解和强烈的抽提作用对平衡油、气组分变化的影响(图1),认识了由于CO<sub>2</sub>对轻烃的强烈抽提作用,地层油中C<sub>7</sub>以下组分90%以上被抽提到气相中,有效富化了气相,气相组分越来越接近地层油,以致达到动态混相。

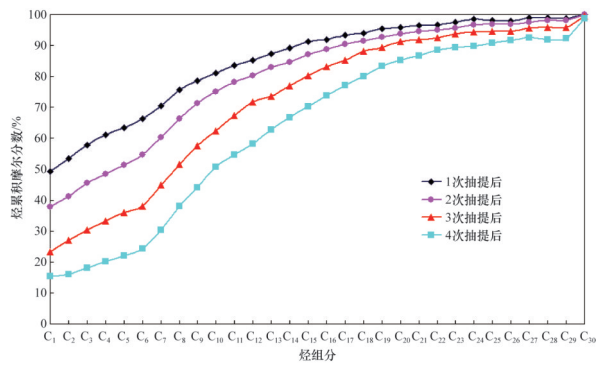


图1 平衡气相中纯烃组分的变化

Fig. 1 Components change curve of pure hydrocarbon in the gas phase equilibrium

3) CO<sub>2</sub>驱过程中沥青质伤害。CO<sub>2</sub>驱过程中,由于CO<sub>2</sub>的不断抽提作用,难溶的沥青、石蜡最终沉淀出来,这是与CO<sub>2</sub>高效驱替效率相伴的主要副作用。当注入的CO<sub>2</sub>与原油接触时,流体特性和平衡条件发生改变,利于有机固体的沉淀,可引起地层损害和井眼堵塞,处理和净化费用很高。混相与非混相两种条件下的沥青质沉淀室内实验研究表明,两种CO<sub>2</sub>驱方式下均有一定的沥青质沉积生成,但其绝对含量很小(表1)。同时,长岩心驱替实验也表明,在驱替过程中压力变化比较平缓,说明在CO<sub>2</sub>驱的过程中,有微量沥青质沉积析出,但不会对储层造成伤害。

表1 沥青质沉淀测试结果

Table 1 Test results of fluid solid contents

实验条件	压力/MPa	样品体积/mL	样品密度/(mg·m <sup>-3</sup> )	沥青质质量/g
注CO <sub>2</sub> 前	17.5	48.8212	0.7386	0.0158
		51.1947	0.7386	0.0325
		53.0143	0.7386	0.0200
		52.7374	0.7386	0.0241
		54.8745	0.7386	0.0297
注CO <sub>2</sub> 后	35	38.50205	0.7386	0.02442
		5.075	0.7386	0.0107
		3.05	0.7386	0.0086

4) 产出气回注对CO<sub>2</sub>驱油效率的影响。CO<sub>2</sub>驱过程会伴随着CO<sub>2</sub>的产出,不同处理方式的经济性存在较大的差异,CO<sub>2</sub>驱直接回注是经济性较好的方式,为此,通过室内实验研究了产出气回注对驱油效果的影响。对不同阶段油井产出气进行组分割析和驱油效果实验评价(图2),表明当产出气中CO<sub>2</sub>质量分数大于72%时,直接回注对驱油效率影响较小,原因是由于CO<sub>2</sub>的抽提作用,产出气中轻烃组分随CO<sub>2</sub>质量分数增加而逐渐增加,有利于降低混相压力,提高驱油效率,抵消CO<sub>2</sub>不纯的不利影响。因此,油井产出气中CO<sub>2</sub>质量分数较低时可与纯CO<sub>2</sub>混注,CO<sub>2</sub>质量分数较高时可直接回注。

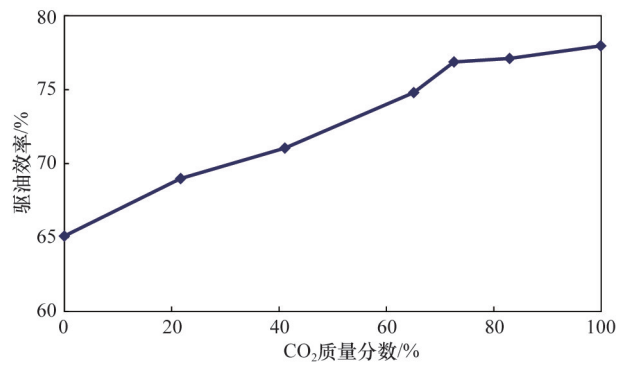


图2 产出气回注时CO<sub>2</sub>质量分数对驱油效率的影响

Fig. 2 Displacement efficiency vs. CO<sub>2</sub> concentration of produced gas reinjection

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>与储层相互作用机制

CO<sub>2</sub>溶于水形成碳酸水,溶解储层的灰质,改善储层渗透率。另一方面,储层颗粒的脱落运移堵塞地层,降低储层渗透率(图3)。

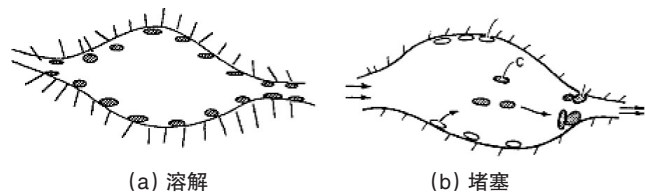


图3 CO<sub>2</sub>与储层相互作用示意

Fig. 3 Interaction between CO<sub>2</sub> and rock

CO<sub>2</sub>到达储层后,要与地层原油、地层水以及储层岩石相互接触,在这三相接触过程中,会发生一些物理化学性质的变化,从而使储层的渗透能力也发生变化。对特定的储层而言,渗透能力的变化与地层水和储层岩石的物理性质有关。

室内实验表明,注入CO<sub>2</sub>后,岩石的分选变差,喉道半径变小,孔隙度、渗透率降低,但降低幅度小于5%。同时,从毛管压力曲线变化可看出(图4),CO<sub>2</sub>驱后,曲线中间平缓段略有变短,平缓段位置升高,说明岩石的分选性变差,喉道半径变小,但门限压力基本不变,平均喉道半径变化小于15%。

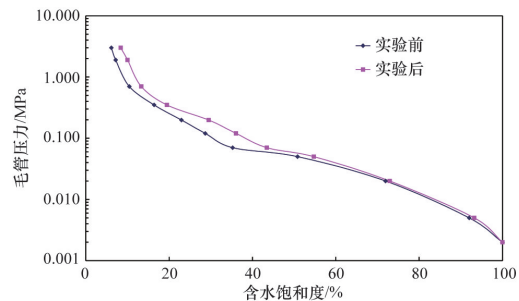


图4 注CO<sub>2</sub>前后毛管压力曲线

Fig. 4 Comparison of capillary pressure curves before and after CO<sub>2</sub> flooding

### 2.3 CO<sub>2</sub>驱油与封存油藏工程优化设计技术

针对低渗透油藏储层识别及预测难度大、非均质性强,故应用岩石物理相分析、频谱成像及拓频处理等新技术实现低渗透油藏有效储层识别和预测,可预测叠合厚度6 m以上的储层,符合率达85%;建立考虑CO<sub>2</sub>混相驱渗流特征的数值

模拟方法,优化井网井距、压力保持水平、注入方式、注气速度和注入量等参数,形成CO<sub>2</sub>驱油与封存油藏工程优化设计技术,制定CO<sub>2</sub>驱技术政策界限(图5),实验区最佳CO<sub>2</sub>驱油与封存政策界限为五点法井网,350 m注采井距,连续注入,压力保持水平30 MPa,注入速度20 t/d,最大注气量为0.33PV(孔隙体积)。

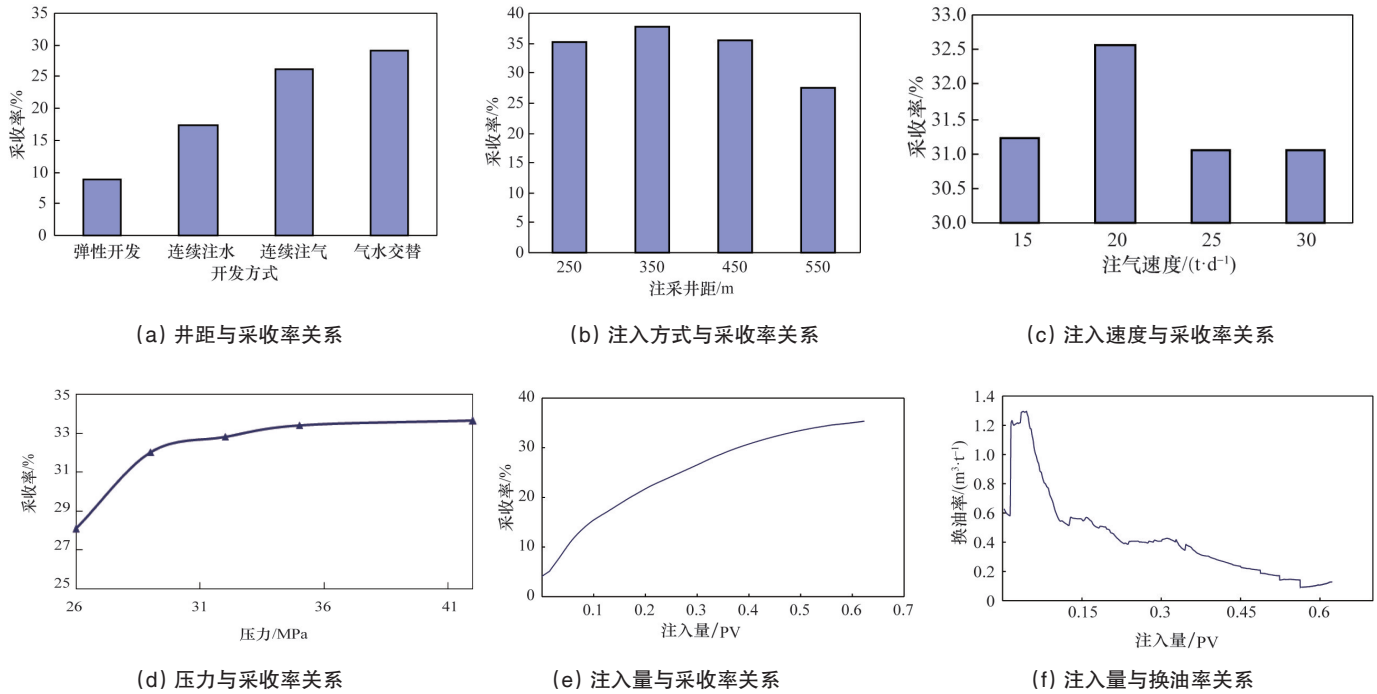


图5 示范区CO<sub>2</sub>驱技术政策界限  
Fig. 5 Technology policy of CO<sub>2</sub> flooding in demonstration zone

## 3 CO<sub>2</sub>驱注采工艺

### 3.1 CO<sub>2</sub>驱免压井安全注气管柱

由于调整方案注气井转为生产井,或其他原因需要更换管柱时,CO<sub>2</sub>的高膨胀性使得施工过程存在较大风险,为此设计了免压井安全注气管柱(图6)。免压井安全注气管柱中反洗阀的作用是在正常注气时油管连通,环空关闭,反洗井时与环空连通可替换保护液。水力锚的作用是锚定管柱。密封插头主要由插头及O型圈组成,主要是与回接筒配套,起到连接丢手管柱与密插管柱并且密封的作用。蝶阀的原理是当蝶阀受到上部外力作用时,可翻转一定角度,从而实现内部的连通,当蝶阀受到的外力消失时,蝶阀在弹簧力的作用下可恢复原状,从而密封井内气体。

免压井安全注气管柱具有4个特点:1)采用锚定式管柱结构,可防止管柱蠕动,以确保注气作业正常进行,同时可保护丢手管柱上部套管;2)可实现反洗井更换环空保护液的功能,当油套环空注入含有缓蚀剂的环空保护液时,液体经反洗阀直接进入油管,后经油管返出井筒,从而达到保护油层

的目的;3)采用分体式丢手结构,在更换上部注气管柱时,不需起出下部丢手管柱;4)多功能注气阀及蝶阀单向阀的应用可以实现上部管柱不压井作业。

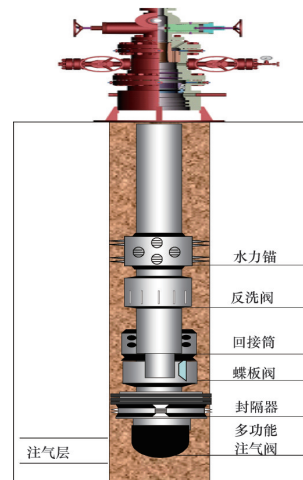


图6 Structure of gas injection string

### 3.2 CO<sub>2</sub>驱多功能采油管柱

采用CO<sub>2</sub>的生产井,随着开采时间的延长会出现气窜、结垢和腐蚀等问题,同时,考虑后期换泵换管方便,设计了具有丢手、关闭等功能的采油管柱,如图7所示。该工艺管柱具有4个特点:1) 设计有防腐泵及各种自身具有防腐性能的井下配套工具;2) 利用挂片器监测不同材料在井下环境的腐蚀状况;3) 固定式测压装置可以实时监测气驱效果;4) 气锚降低泵吸入口油气比,提高泵效。

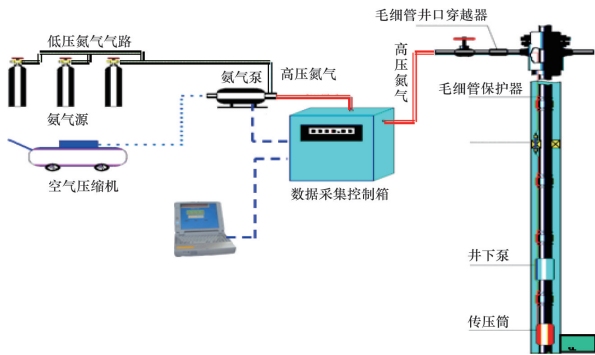


图7 多功能采油管柱

Fig. 7 Structure of versatile production string

### 4 应用效果

通过创新技术的集成和应用,建成了国内外首个燃煤电厂烟气CCUS全流程示范工程,即在胜利燃煤电厂建成烟气CO<sub>2</sub>捕集装置,捕集的CO<sub>2</sub>用于高89-1特低渗透油藏驱油与封存。该捕集装置的年产能力为4万t,烟气捕集率>80% (1.01×10<sup>5</sup> Pa、0℃的标准条件下流量为20000 m<sup>3</sup>/h, CO<sub>2</sub>质量分数14%),液态CO<sub>2</sub>产品纯度为99.5%,MSA碳捕集工艺比传统MEA工艺再生能耗降低20%,同时吸收剂损耗大幅下降,捕集成本降低25%。

在纯梁采油厂高89-1块进行低渗透油藏驱油与封存示范工程,2008年开始实施,注气后,见效井产量较注气前上升2~3倍,中心井高89-S1井第一年日产油稳定在8.5 t/d,第二年递减率为13.2%;外围井89-13井第一年递减率42.1%,第二年递减率25.5%(图8)。截至目前,已累计注入CO<sub>2</sub> 12.8万t,增产2.9万t,封存CO<sub>2</sub> 11万t,预计可提高采收率17.2%。

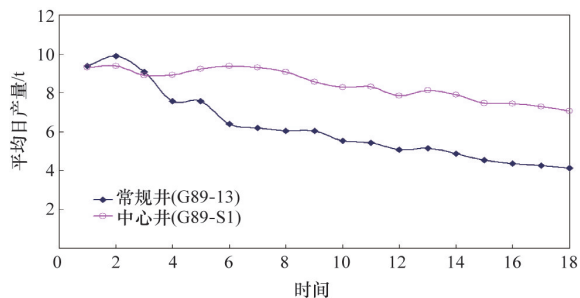


图8 中心井高89-S1井与常规井每月平均日产量

Fig. 8 Monthly average daily production of center well and conventional well

### 5 结论

1) 提出了适合中国资源特点、能够推广应用的燃煤电厂烟道气CO<sub>2</sub>捕集、CO<sub>2</sub>驱油与封存及产出气CO<sub>2</sub>回收的关键技术,建成了国内外首个燃煤电厂烟气CCUS全流程示范工程,应用效果良好,开发的高效CO<sub>2</sub>捕集溶剂及工艺比传统MEA工艺捕集成本降低35%,CO<sub>2</sub>驱油与封存示范区累计注入CO<sub>2</sub> 12.8万t,累计增油2.9万t,封存CO<sub>2</sub> 11万t。

2) 形成了燃煤电厂烟道气CO<sub>2</sub>捕集纯化成套技术,建成了工业化生产成套装置,实现了低能耗、低成本CO<sub>2</sub>捕集。

3) 建立了CO<sub>2</sub>提高采收率油藏评价标准,实现了CO<sub>2</sub>油藏适应性的多因素定量评价。

4) 发现了CO<sub>2</sub>驱油藏产出气回注对驱油效果的影响机制,提出油井产出气中CO<sub>2</sub>浓度较低时可与CO<sub>2</sub>混注,CO<sub>2</sub>浓度较高时可直接回注。

5) 发明了免压井安全作业的CO<sub>2</sub>注入管柱,可实现40 MPa高压注入;研制了高气油比深抽、腐蚀监测、实时测压的多功能采油管柱。

### 参考文献 (References)

- [1] 赵雪, 芮久后, 王宇, 等. 探讨适合中国的CO<sub>2</sub>捕集技术[J]. 科技导报, 2010, 28(4): 97-100.  
Zhao Xue, Rui Jiuhou, Wang Yu, et al. A study on CO<sub>2</sub> capture technology in China[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(4): 97-100.
- [2] 赵毅, 沈艳梅, 倪世清, 等. 燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集分离技术研究现状及其展望[J]. 热力发电, 2001, 40(6): 9-12.  
Zhao Yi, Shen Yanmei, Ni Shiqing, et al. Status quo of research in CO<sub>2</sub> capture and separation technology for coal-fired power plants and prospects thereof[J]. Thermal Power Generation, 2001, 40(6): 9-12.
- [3] 黄斌, 许世森, 邵时旺, 等. 华能北京热电厂CO<sub>2</sub>捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-19.  
Huang Bin, Xu Shisen, Gao Shiwang, et al. Industrial test of CO<sub>2</sub> capture in Huaneng Beijing coal-fired power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 14-19.
- [4] 黄斌, 刘练波, 许世森, 等. 燃煤电站CO<sub>2</sub>捕集与处理技术的现状与发展[J]. 电力设备, 2008, 9(5): 4-6.  
Huang Bin, Liu Lianbo, Xu Shisen, et al. The current situation and development of CO<sub>2</sub> trapping and treatment technique in coal-fired power station[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(5): 4-6.
- [5] 要建军. 火电厂CO<sub>2</sub>捕集与封存技术探讨[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(3): 25-26.  
Yao Jianjun. Discussion on carbon capture and storage technologies in thermal power plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2011, 27(3): 25-26.
- [6] 高慧梅, 何应付, 周锡生. 注二氧化碳提高原油采收率技术研究进展[J]. 特种油气藏, 1997, 19(2): 55-61.  
Gao Huimei, He Yingfu, Zhou Xisheng. Research progress on CO<sub>2</sub> EOR technology[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 19(2): 55-61.
- [7] 李士伦, 周守信, 杜建芬, 等. 国内外注气率技术回顾与展望[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 1-5.  
Li Shilun, Zhou Shouxin, Du Jianfen, et al. Review and prospects for the development of EOR by gas injection at home and abroad[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(2): 1-5.

- [8] Taber, Seright R S. EOR screening criteria revisited-Part1: Introduction, to screening criteria and enhanced recovery field projects, SPE[J]. Reservoir Engineering, 2001, 12(3): 189-198.
- [9] Jarrell P M, Fox C, Stein M, et al. Practical aspects of CO<sub>2</sub> flooding[J/OL]. Society of Petroleum Engineers, 2002, 22: 214.
- [10] 李孟涛, 张英芝, 杨志宏, 等. 低渗透油藏 CO<sub>2</sub>混相驱提高采收率试验[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 43-47.  
Li Mengtao, Zhang Yingzhi, Yang Zhihong, et al. Research on CO<sub>2</sub> miscible flooding to enhance oil recovery in low permeability reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(6): 43-47.
- [11] 李孟涛, 单文文, 刘先贵, 等. 超临界二氧化碳混相驱油机理实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 80-83.  
Li Mengtao, Shan Wenwen, Liu Xiangui, et al. Laboratory study on miscible oil displacement mechanism of supercritical carbon dioxide[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 80-83.
- [12] 李孟涛, 杨广清, 李洪涛. CO<sub>2</sub>混相驱油方式对榆树林油田采收率影响研究[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(4): 52-54.  
Li Mengtao, Yang Guangqing, Li Hongtao. Study of the influence of CO<sub>2</sub> miscible displacement on enhanced oil recovery in Yushulin oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(4): 52-54.
- [13] 郝永卯, 薄启炜, 陈月明. CO<sub>2</sub>驱油实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 110-112.  
Hao Yongmao, Bo Qiwei, Chen Yueming. Laboratory investigation of CO<sub>2</sub> flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 110-112.
- [14] 姜洪福, 雷友忠, 熊霄, 等. 大庆长垣外围特低渗透扶杨油层 CO<sub>2</sub>非混相驱油试验研究[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 659-663.  
Jiang Hongfu, Lei Youzhong, Xiong Xiao, et al. CO<sub>2</sub> immiscible displacement experimental study aiming at Fuyang extra-low permeability layer at peripheral of Daqing placanticline[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 659-663.
- [15] 李相远, 李向良. 低渗透稀油油藏二氧化碳选井标准研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(5): 66-68.  
Li Xiangyuan, Li Xiangliang. Study on well selection criterion of CO<sub>2</sub> stimulation in thin oil reservoirs with low permeability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(5): 66-68.
- [16] 李振泉, 李相远, 袁明琦, 等. 商13-22单元 CO<sub>2</sub>驱室内实验研究[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(3): 9-11.  
Li Zhenquan, Li Xiangyuan, Yuan Mingqi, et al. Study on laboratory experiments of CO<sub>2</sub> drive in Shang 13-22 unit[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(3): 9-11.

(责任编辑 王媛媛)

## ·学术动态·



## 中国科普专家李象益获得“卡林加奖”

2013年11月24日,在巴西里约热内卢举行的世界科学大会开幕式上,联合国教科文组织向李象益颁发“卡林加奖”。这是“卡林加奖”设立61年来第一次颁给中国的科普工作者,反映了国际社会对中国科普工作的充分肯定和赞誉。

李象益现为中国自然科学博物馆协会名誉理事长、北京市科委特聘科普专家。他是中国科技馆的创办人之一,曾任中国科技馆馆长;曾任中国科学技术协会科普部门的负责人,在农村、工厂和矿山开展科普工作;发起了中国第一次全国科学普及调查;一直从事科普和科学教育工作。联合国教科文组织在声明中称赞李象益是一位学术和科普专家。

“卡林加奖”(UNESCO Kalinga Prize),也称“卡林加科普奖”,是联合国教科文组织于1952年设立的一项世界性科普大奖,每2年颁发1次,主要奖励在职业生涯中致力于向大众介绍科学、研究和技术,同时致力于在国际上宣传科学技术的重要性的科学家、新闻工作者、教育家和作家。“卡林加奖”是科普领域的国际最高奖项,候选人由联合国教科文组织成员国委员会提名,由联合国教科文组织负责评审与颁奖,截至2011年,共奖励了22个国家的66个人。联合国教科文组织总干事伊琳娜·博科娃向李象益颁发了获奖证书和艾伯特·爱因斯坦奖章。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15316542.html>。