

# 自主创新为我国页岩气开发提供支撑

## ——记中国石化石油工程技术研究院攻关页岩油气关键技术

页岩气是蕴藏于页岩层可供开采的天然气资源,其形成和富集有自身独特的特点,往往分布在盆地内厚度较大、分布广的页岩层中。较常规天然气相比,页岩气开发具有开采寿命长和生产周期长的优点,大部分产气页岩分布范围广、厚度大,且普遍含气,这使得页岩气并能够长期以稳定的速率产气。

当前,页岩气经济有效开发很大程度上依赖于水平井钻完井及分段压裂为主体的工程技术。与北美相比,我国页岩气地表特征、储层埋深和储层复杂程度有很大的区别,勘探开发难度更大,美国页岩气工程技术不能简单复制,急需形成适合我国页岩气特点的工程技术体系。

从2011年起,按照中国石化集团公司“在页岩气开发上,中国石化要成为中国的代表,技术和评价走在最前面”战略要求,中国石化石油工程技术研究院(下称工程院)作出重大决策,将页岩气工程技术列入核心技术,依靠相关技术领域的多年积淀,投入优势研究力量,承担起中国石化大量页岩气关键工程技术的攻关任务。在多项核心技术上取得突破,申请专利150余项,基本形成了具有水平井段长2000米的钻完井及20段压裂能力的页岩气工程配套技术,为中国石化页岩气开发走在国内最前列作出重要贡献。

### 我国页岩气可采储量居世界前列

研究显示,新常态下的中国经济反映在能源消费和能源结构上,天然气将成为近中期调整能源结构的主力。到2030年,中国天然气需求量将超过5500亿方,由于国内常规天然气开发潜力有限,这就为煤层气、页岩气等非常规天然气的发展带来了契机。根据国家十二五规划的要求,中国天然气开采量在2015年将达到65亿立方米。中石化预计2015年将开采天然气达100亿立方米,中石油预计2015年将开采天然气达26亿立方米。加上其他天然气开采公司的开采量,我国将会在2015年100%超额完成“十二五”规划的要求。

以中国石化为代表,目前我国页岩气开采已进入自主技术阶段,初步形成了长水平井优快钻井技术及压裂试气工程技术等一系列自主技术和规范。技术的逐步成熟,将为我国页岩气的商用开采打开广阔蓝图,也意味着中国成为继美国和加拿大后,第三个能够使用自主技术装备进行页岩气商用开采的国家。

### 重点突破,为页岩气开发提供扎实的技术储备

2009年10月,国土资源部在重庆市綦江县启动了我国首个页岩气资源勘查项目。这标志着继美国

和加拿大之后,中国正式开始这一新型能源页岩气资源的勘探开发,对中国新型能源建设起到了积极的示范作用,在中国油气领域具有里程碑意义。

在页岩气开发系列工程技术攻关过程中,中国石化工程院以中国石化涪陵地区页岩气开发工程技术突破为重点,把技术研发和现场服务紧密结合,为涪陵页岩气规模开发开辟了道路,并与其他地区页岩气开发提供了扎实可靠的技术储备。

工程院认真贯彻创新驱动发展战略,围绕页岩气勘探开发技术需求,承担了中石化约70%的页岩气关键技术攻关任务。通过强化自主创新,突出协同攻关,形成了以一体化工程设计、水平井优快钻井、油基钻井液、弹性水泥浆、滑溜水压裂液、压裂工具、网络压裂及产能评价等为主要内容的、具有自主知识产权的配套技术链,已经具备了2000m水平井钻完井及20段以上的分段压裂技术支持与服务能力,打造了具有自主知识产权的页岩气工程技术链,为中国石化页岩气勘探开发做出了积极贡献,闯出了一条成功之路。

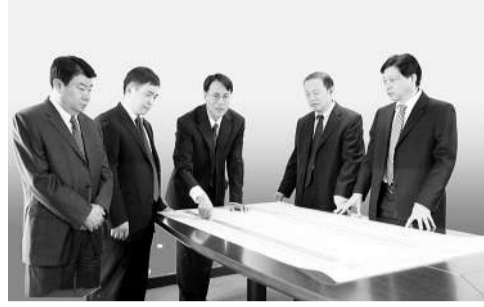
### 协同攻关,使页岩气勘探开发始终领先成为可能

在研发过程中,工程院通过深入分析需求,明确目标任务;成立专门组织,强化统筹管理;优化科技资源,组建强有力的研发团队;加大科研投入,保证研发需要;加强国际合作,提高研发起点;强化技术验证,加速成果转化;构建特殊机制,推进技术发展等多项举措,在页岩气工程技术上取得系列突破,使中国石化的页岩气勘探开发走在中国企业前面成为可能。

据介绍,工程院在中国石化集团公司党组的统一领导和各油田企业的大力支持与帮助下,充分利用集团公司勘探开发与工程服务一体化优势,攻坚克难,一步一个脚印,实现了页岩气工程技术的快速发展。工程院把非常规油气工程技术作为“十二五”期间着力培育的5项核心技术的中中之重,经过刻苦攻关,打破了国外的技术垄断。

应该说,中国石化充足的投资保证和下属各油田企业的大力支持是页岩气工程技术发展的保障。持续加大科研经费、设备配套和人才引进等扶持力度,为科技攻关提供了保障。油田企业、石油工程地区分公司等兄弟单位积极配合,加快了技术成果的验证和转化。

敢于担当、组织得力、高效运行的科技创新管理是页岩气工程技术创新发展的关键。工程院以服务勘探开发、推进石油工程技术进步为己任,承担了集团公司75%以上的页岩气工程技术攻关任务。他们构建了上下联动的科技攻关机制,激发了创新热情,



石油工程技术研究院领导团队

推进了科技创新,提升了创新质量。

自主创新、优化资源、协同攻关是实现页岩气工程技术快速发展的强劲推动力。在充分发挥自身优势的同时,他们及时跟踪世界技术前沿,充分利用社会科技资源,与国内外知名院校、研发机构建立协同创新联盟,加快了自主创新步伐,保证了创新成果的先进性和理论方法的提升。

近四年来,工程院累计承担各类页岩气工程技术科研项目36项,通过持续攻关,突破了一批关键技术难题,申请了国家专利151件,登记软件著作权5套,发表论文150余篇,编制集团公司标准9项、规范6项。形成了全井筒技术链的技术系列,具备了2000m水平段水平井钻完井及20段以上分段压裂技术支持能力,整体达到国际先进水平,为中国石化页岩气勘探开发提供了支撑。

### 突破难题,为页岩油气勘探开发提供支撑

(一)关键工具与助剂实现了工业化

一是自主研发的多级滑套、泵送桥塞、水力喷射、裸眼封隔器等分段压裂配套工具,实现了工业化、系列化,应用成功率100%,成本较国外同类产品降低三分之一以上。二是研制的油基钻井液体系性能优于国外同类产品先进水平。三是开发的弹性水泥浆体系,水泥浆弹性提高1倍以上。四是研发的滑溜水压裂液体系,降阻率达到了70%以上,成本较国外同类产品降低40%以上。

(二)打造完整的页岩气工程技术链

工程院持续开展了页岩气工程技术系列攻关,形成了从页岩工程地质评价、优快钻井、井工厂、油基钻井液、弹性水泥浆、压裂工具、压裂液、网络压裂设计、裂缝监测及压后评估和产能评价等配套技术链。

2014年以来,为进一步满足深层页岩气的勘探开发需求,工程院又开展了深层(垂深≥3500m)页岩

气勘探开发工程探索,开展了“甜点”评价、优快钻井与“井工厂”技术、低油水比油基钻井液、泡沫水泥浆固井、新型滑套工具、低成本高效滑溜水体系、精细化网络压裂工艺、产能评价与测试等关键技术研究攻关,完善了泡沫定向、长水平段一趟钻钻井、低油水比油基钻井液、弹性水泥浆和分段压裂等技术,攻克了随钻地层评价与地质导向、井工厂优快钻井、页岩气基钻井液、页岩气液面测试和压裂液返排利用等关键技术难题,研制成功了第二代滑溜水压裂液和固井滑套,进一步完善了3500米以浅页岩气工程技术链。

(三)工程技术实现了规范化标准化

形成了以页岩气水平井钻完井和分段压裂为主体的页岩气工程技术系列。一是研发的页岩气工程一体化设计技术,现场钻完井成功率100%、压裂符合率90%以上。二是形成的复杂地形“井工厂”优快钻井技术,有效降低了钻井成本。三是开发的网络压裂技术应用28口井,作业成功率100%。四是建立了页岩气水平井产能评价方法,试验井应用误差在10%以内。五是牵头制定了中国石化页岩气工程技术标准9项,编制作业规范6项推进了中国石化页岩气工程技术的发展。

(四)建成了国内一流的页岩气工程技术实验室

高水平的实验室是技术研发的基础和保障,工程院一直重视页岩气钻井及压裂实验室方面的建设。经过近年的建设,已基本建成了“设施先进,人才完备,重点突出,特色鲜明”,在国内具有领先水平的页岩气钻井及压裂实验室。2015年1月30日,工程院作为核心成员单位之一参与了“国家能源页岩油研发中心”申报工作并获得批准,具体负责页岩气研发工作。2015年5月底,工程院参与申报的“页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室”,目前已经通过答辩。

(五)支撑了中国石化页岩气勘探开发和产能建设

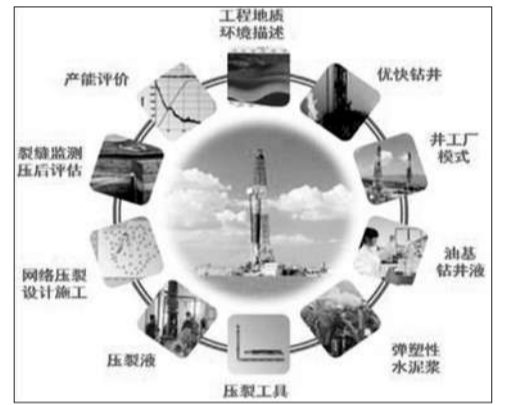
在集团总部的统一组织下,工程院与中国石化勘探分公司、江汉油田、华东分公司等油田企业及地区石油工程公司通力合作,通过应用自主页岩气工程技术,成立技术支持小组,开展了井工厂、低油水比油基钻井液、随钻地层评价、体积压裂、产能评价以及日常技术支持等一体化技术支持与服务。全面支撑了涪陵、丁山、彭水、南川等地区页岩气勘探开发和涪陵焦石坝1期50亿方天然气产能建设,为集团公司页岩气的勘探突破、产能建设及业务发展提供了全面的工程技术支撑。

截至2014年底,涪陵页岩气田累计开钻页岩气水平井170余口井,平均钻井周期逐年大幅度降低,由2012年的151天降到2014年的58.1天,降低了61.52%。单井投产费用由2012年的9500万元降为2014年7600万元,降低20%左右。其中焦页1HF井

初产20万方,实现了页岩气勘探的重大突破,被评为“中国页岩气功勋井”。焦页30号平台试验应用“井工厂”技术效果显著,平均钻井周期缩短30.5%,正在6个平台20口井进行推广。

随着深层页岩气的开发进程不断推进,工程院集中优势兵力,开展了技术攻关,为多口深层页岩气并提供全面技术支持,实现了深层页岩气工程技术突破。丁页2HF井创2013年当年页岩气井压裂单段规模最大,完钻井深最大(垂深4416m;井深5667m)纪录,压后初期产气量达10.5万方/天,首次实现了我国深层页岩气重大勘探突破。南页1HF井钻完井和压裂,完钻井深5820m(垂深4627m),压裂15段,为当时最深页岩气井,创造了国内深层页岩气分段压裂施工多项记录,金页HF1井在寒武系筇竹寺组也喜获工业气流。

页岩气工程技术系列成果得到了国内业界的充分肯定。中国石化集团领导曾这样评价工程院:“你们在页岩气工程技术上的系列突破,使得中国石化勘探发现的页岩气储量得以经济有效开发,使中国石化大规模开发成为可能,使中国石化在页岩气勘探开发走在国内企业前面成为可能……”国内油气领域的院士和专家评价说:“中国石化工程院在页岩气水平井钻完井与分段压裂关键技术上有重大创新,成果形成了完整的技术链并实现产业化,在焦石坝等区块推广应用,为实现该地区页岩气重大突破及涪陵1期50亿方天然气产能建设提供了主导工艺技术,对推动页岩气勘探开发有重要借鉴意义,使得中国石化的页岩气工程技术走在中国的前列。”美国能源领域院士和专家也评价说:“中国石化在页岩气工程技术研究方面做了大量的开创性的工作,在川东南海相页岩气勘探开发技术是一流的,无论是页岩气综合评价技术,还是水平井钻井,以及分段压裂试气技术,都已经走在世界前列。”(丁士东 马广军)



页岩气开发产业链

## 我国首个软组织及腹膜后肿瘤中心成立

科技日报讯(刘晨 记者吴红月)在6月27日于北京国际会议中心举办的第十届全国胃癌学术会议暨第三届阳光长城肿瘤学大会上,100多位来自全国各地的专家一同参与了北京大学肿瘤医院软组织及腹膜后肿瘤中心的第一次学术研讨会,也宣告了我国首个肉瘤中心(SarcomaCenter)的正式成立。

软组织及腹膜后肿瘤为来源于间叶组织肿瘤的统称。它包括50种以上的不同组织学亚型,如多形性细胞肉瘤、胃肠道间质瘤(GISTs)、脂肪肉瘤、硬纤维瘤、平滑肌瘤、外周神经鞘瘤等。软组织肿瘤并不少见,每年仅软组织肉瘤的发病率约为5/10万。长期以来,由于软组织肿瘤和腹膜后肿瘤发病率较低,病理类型繁杂,临床表现各异等特点,该类肿瘤早期诊断及规范化治疗一直是医学界的难题。特别是腹膜后肿瘤,在发病早期,患者往往无特异性的表现,待出现症状之时,肿瘤往往已经极其巨大,压迫如十二指肠、肝、脾、肾、胰腺等腹腔重要脏器或大血管,给外科手术切除带来极大的困难,手术难度大、风险高,术后复发率高,给患者家庭及社会都带来了沉重的负担。

据统计,软组织及腹膜后肿瘤患者最容易反复局部复发,如果接受规范的手术治疗,切除后的5年复发率可以从50%降低到20%,5年生存率可以达到70%以上。放疗、化疗及靶向治疗目前取得了显著进展,包括基因检测的精准医疗也日益得到重视。在多学科专家团队共同参与下,根据患者情况进行个性化的综合治疗,将使患者的治疗效果进一步提高。

北京大学肿瘤医院每年收治此类患者400余例,为国内及国际领先。在积累一定的诊治经验后特成立此中心,旨在充分利用现有优质资源的基础上,对软组织及腹膜后肿瘤进行系统、规范化的诊治,集中、深入的进行科学研究,提高此类疾病的诊疗水平,最终使广大患者受益。

北京大学肿瘤医院软组织及腹膜后肿瘤中心依托该院国内一流肿瘤专业医院的学科优势,集中了我国软组织肿瘤与腹膜后肿瘤领域相关的肿瘤外科、肿瘤内科、放疗科、病理科和影像科等各专业顶级专家,可为软组织肿瘤和腹膜后肿瘤患者提供国际化、规范化的优质诊疗服务。据悉,该中心接诊的患者,将采用多学科协作会诊(MDT)体系,由多个学科的专家共同讨论制定患者的具体治疗方案。据北京大学肿瘤医院的专家介绍,由于肿瘤自身的复杂性,多数情况下单一治疗手段仅对早期患者及部分肿瘤有效,即便有效也难以获得满意疗效,而大多数肿瘤患者则需要将外科手术、化疗、放疗等多种方法有机结合起来,针对患者的具体病情,提出最适合的个体化诊疗方案。

此次会议上,该中心还推出了亚洲第一个腹膜后肿瘤的指南性文件《北京大学肿瘤医院腹膜后软组织肿瘤诊疗共识》。

## “适应大规模风电并网的无功电压协调控制系统研发项目”获电力建设科技进步一等奖

主要完成单位:中国电力科学研究院电力自动化研究所

主要完成人员:蒲天骄 于汀 王伟 毕天禄 董雷 韩巍 杨占勇 王衡 李时光 王宇安

### 成果简介

风力发电是当今全球规模最大、快速发展的非水电可再生能源,是以清洁能源为主的新一轮能源变革的重要推动力。我国规划了8个千万千瓦级风电基地,各基地并网发电已逾6500万千瓦,形成了我国独有的“规模化开发、集中式接入”的风电并网模式。由于风电功率具有强波动性和不确定性,大规模风电集中接入对电网的运行和控制带来严峻挑战,风电汇集区电网电压问题日益突出,已成为制约风电可靠消纳的重要瓶颈。

“适应大规模风电并网的无功电压协调控制系统研发与工程应用”项目属于电力系统自动化领域,获得国家电网公司系列项目支撑,历时4年,投资逾2000万元,针对大规模风电并网的无功电压优化控制开展了深入的理论研究,实现了关键技术突破和工程应用,并取得了一系列科技成果:提出了基于风功率和负荷变化趋势辨识及多无功源协调的无功电压主动控制策略,适用于在线准确评估电压稳定薄弱区域的电压稳定指标,基

于非线性互补的松弛化原对偶内点法,无功优化与电压稳定的联合优化模型,电压水平与电压稳定的协调校正模型等原创性技术,在国内外均属首创。

运用上述研究成果,研发了支撑大规模风电并网运行的计及电压稳定约束的无功电压协调控制系统,有效解决了风电集中接入的无功电压控制问题,支撑了大规模风电功率的可靠送出,改善了电网的电压质量,促进了风电无功电压控制技术的发展。

该项目通过了电力工业电力系统自动化设备质量检测测试中心进行了第三方权威测试项目通过了中国电力建设企业协会组织的成果评审,认为整体成果处于国际先进水平,在基于风功率变化趋势的在线多无功源电压协调优化控制应用方面达到了国际领先水平。

### 关键技术及创新点

创新点一:首次提出基于风功率和负荷变化趋势辨识的无功电压主动控制策略,提高了电网电压质量和稳定性。

创新点二:首次提出基于支路电压相量的电压稳定在线评估指标,能够基于状态估计结果或PMU量测数据,在线准确识别风电汇集区域和负荷中心区域的电压稳定薄弱环节。

创新点三:首次提出基于非线性互补的松弛化原

对偶内点算法,适用于快速求解连续变量和离散变量共存的大规模非线性无功电压控制模型,有效保证了在线化计算的收敛性和求解的全局最优性。

创新点四:首次基于风功率预测结果和负荷预测结果,建立了电压稳定与无功优化的联合优化模型,并结合风电汇集站输送功率和电网负荷的变化趋势,实现含大规模风电的电网无功电压实时协调优化。

创新点五:首次基于电压与无功的灵敏度关系,建立了电压稳定裕度与电压水平的协调校正模型,实现了在电网状态估计失效而无法进行全网联合优化控制时,以最小的无功调整对电压稳定裕度薄弱环节或越限节点电压的实时校正。

### 应用前景

基于该项目成果研发的无功电压控制系统已在多个调度控制中心实际应用,在减轻人员工作强度的同时,保证了风电基地功率的可靠送出,提升了大规模风电并网的消纳水平,降低了电网损耗,提高了电压合格率,抑制了电压大幅波动,改善了系统薄弱区域的电压稳定裕度。项目成果的实际应用还推动了电网无功电压控制技术的发展,在降低风机大规模脱网风险等方面发挥了积极作用,对减少燃煤消耗起到了一定的辅助作用,在保障电网安全、稳定、

优质和经济运行的同时,实现了资源节约和环境保护,极大地促进了经济和社会的和谐发展。

项目先后应用于黑龙江、辽宁、新疆、甘肃、青海、福建,以及福州、包头等多个省网和地区电网调度控制中心,实现新增合同额712万元,项目应用后各地电网降低网损收益约9200万元,增加风电功率送出收益约5100万元,取得了显著的经济和社会效益。

该项目成果还可推广至全国其他千万千瓦级风电基地接入的电网,乃至国际上所有具有大规模风电接入运行特性的电网,应用前景十分广阔。

项目申请发明专利9项(授权1项)、发表论文17篇、申请软件著作权3项、出版专著1部、制定国家电网公司企业标准1项。(高飞)

### 相关链接

蒲天骄,教授级高级工程师,中国电力科学研究院电力自动化研究所副所长。负责承担了国网公司科技项目“大规模风电并网调度运行支撑关键技术研究与应用”“大规模风电/光伏发电接入电网无功电压优化控制与综合评价技术研究”,国家863科技项目“主动配电网运行关键技术研究”、“交直流混合配电网关键技术”等重大项目。多次获得省部级、国网公司科技进步奖。发表EI、SCI论文20余篇,合作出版专著1部。

## 特高压变压器及套管特殊试验技术达到国际领先水平



1000kV特高压交流变压器套管世界首次进行型式试验

主要研究单位:中国电力科学研究院武汉分院  
主要研究人员:陈江波 伍志荣 尹晶 蔡胜伟 邵茂峰 郭德浩 李辉 许晶 周翠娟 吴士晋 何妍  
1000kV特高压交流输电工程是我国乃至世界最高电压等级的输电工程,具有远距离、大容量、低损耗的优点,在优化我国能源配置方面发挥着重要作用,对我国乃至世界今后电网技术发展和电网建设也将产生重大而深远的影响。特高压交流变

压器及套管是工程的核心设备,其出厂试验和现场交接试验已达到世界试验能力的极限,国外尚无法严格按照标准进行试验考核,其试验成功与否直接关系到工程的成败。

为了解决这一世界性技术难题,国家电网公司组织高压领域精兵强将开展专项科研攻关。中国电力科学研究院武汉分院陈江波带领科研团队迎难而上,攻克特高压交流变压器低电位高场强局部放电监测以及套管电晕消除等技术难题,顺利完成了特高压交流变压器及套管特殊试验,该科技成果被湖北省科技厅鉴定为整体达到国际领先水平。

该成果的关键技术和创新点:研制出特高压交流套管关键试验装置并开发了满足特高压交流套管型式试验要求的试验系统。研制了世界首套1600kV标准电容器,开发了满足特高压交流变压器管型式试验要求的试验系统,在世界上首次完成了全电压(1100kV)下特高压交流套管的介电损耗角测量试验与局部放电试验。实现了特高压交流变压器套管局部放电试验方法的创新。提出套管局部放电测量

试验的“部分平衡测量法”,可使特高压交流变压器套管局部放电背景控制在2~3pC内,显著提高了测试精度。实现了特高压交流变压器局部放电试验方法和试验设备的创新。建立了特高压交流变压器局部放电模型,提出多测点监测声电结合试验方案以及抗干扰特殊试验措施,解决了特高压交流变压器低电位高场强局部放电监测、定位以及套管电晕消除等技术难题。研制出具备多个测量端同时监测、记录、回放信号功能的局部放电测量设备。

项目研发团队采用该技术成果,在世界上首次完成了特高压交流变压器套管全型式试验。国家电网公司采用该技术成果圆满的完成了世界首台1000kV交流特高压变压器和±800kV直流特高压换流变压器的现场局部放电试验。此外,该技术成果被广泛应用于特高压交流变压器和电抗器的出厂试验。

该技术在晋东南—南阳—荆门1000kV特高压交流输电示范工程及其扩建工程、皖电东送1000kV特高压交流示范工程、浙江—福建1000kV特高压交流输电工程中得到应用,取得了良好的效果,确保了特高压交流变压器这一特高压工程中的核心设备一次投运成功。

该技术成果获得专利5项,形成国际标准1项,

国家标准1项,国家电网公司企业标准1项;获得了包括国家能源奖、中国电力技术奖、电力建设奖、国家电网公司科技进步奖等奖项;直接经济效益达5200万元,随着后续特高压交流工程的陆续建设,该技术将创造更大的经济效益。

该技术填补了国内空白,使我国高压试验能力达到世界领先水平。对我国掌握特高压变压器技术发挥了关键作用,提升了我国电工装备制造整体水平。该技术指导了特高压交流变压器及套管出厂试验和现场交接试验等特高压工程建设重要环节,对确保工程投运、电网长期安全稳定运行具有重要意义。(高飞)

### 相关链接

陈江波,工学博士,教授级高级工程师,中国电力科学研究院高压研究所研究室主任,全国高压电气安全标委会副秘书长,全国绝缘材料与绝缘系统评定标委会委员。长期从事高压电与绝缘技术研究工作,研究领域包括输电设备检测试验、故障诊断等。参加并完成了国家支撑项目1项,负责或参与国家电网公司科技项目十余项。编写国际、国内标准7项,发表论文20余篇,参编著作3部,获得专利、软件著作权11项。