

川气东送建设工程综述

曹耀峰^{1,2}

(1. 中国石油化工集团总公司, 北京 100728; 2. 中国石化川气东送建设工程指挥部, 四川达州 635000)

[摘要] 川气东送建设工程是我国首次对超深高酸性天然气进行大规模勘探开发、集中净化处理、长距离管道输送、综合市场开发及利用的系统工程,具有特大型、超复杂、高风险、高难度的特点。在简要介绍工程的开发背景、建设规模,分析其面临主要技术与管理难点的基础上,系统叙述了建设工程主要的管理与技术创新系列成果、建设理念及所取得的成就。建设工程所形成的超深高酸性气田勘探开发配套系列技术和特大型综合油气项目建设管理经验,必将为同类气田的建设提供有益的借鉴。

[关键词] 高酸性气田;技术集成与创新;管理创新与运行模式;大型天然气净化厂

[中图分类号] TE3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)10-0004-05

1 前言

川渝地区是我国主要的天然气勘探开发区,“十五”期间,在几十年探索积累的基础上,中国石化通过海相勘探理论、技术和管理的创新,在川东北地区发现和探明了储量大、丰度高的普光气田。国家高层管理者对普光气田的发现高度重视,2006年7月4日时任国务院副总理曾培炎听取汇报后指出,普光气田是川东北地区天然气勘探的重大发现,是海相油气勘探理论的重大突破,是我国能源领域的一件大事,对促进我国能源结构调整和经济发展有着十分重要的意义,要尽快实施、加快建设并命名为“川气东送工程”,列入国家“十一五”重大工程。2007年4月9日国务院正式核准川气东送工程建设,8月31日国家川气东送工程建设领导小组成立并在北京举行隆重开工仪式。

2 建设工程概述

2.1 工程简介

川气东送工程主要包括资源勘探、普光气田开发、天然气净化厂建设、长输管道施工及配套天然气利用等上中下游项目,总投资626.76亿元。其中资源勘探重点是普光气田及周边的通南巴、巴中、南江

等7个探区,面积 $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$;普光气田开发主要是 $105 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气产能建设,是我国首次规模开发超深高酸性气田的重大工程;普光气田净化厂建设设计规模 $160 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,先期建设6套联合12系列天然气处理装置及配套工程,年处理能力 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;川气东送管道设计总长度2170 km,其中管径 $\phi 1016 \text{ mm}$ 、设计压力10 MPa的干线长度1635 km,自西向东横跨四川、重庆、湖北、江西、安徽、江苏、浙江、上海等8省市,设计年输气能力 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$,是中国石化第一条长距离、大管径、高压天然气输送管道;天然气利用主要包括达州化肥厂 $30 \times 10^4 \text{ t/a}$ 合成氨、 $48 \times 10^4 \text{ t/a}$ 尿素项目和川维 $30 \times 10^4 \text{ t/a}$ 醋酸乙烯、 $20 \times 10^4 \text{ t/a}$ 合成氨项目。

2.2 技术难点分析

川气东送工程是我国首次对超深高酸性天然气进行大规模勘探开发、集中净化处理、长距离管道输送、综合市场开发及利用的系统工程,具有特大型、超复杂、高风险、高难度的特点。普光天然气高压、高产、高含硫,其规模开发在国内尚无先例,国外经验也十分匮乏,工程设计、施工工艺、安全质量等面临巨大挑战。

1) 安全风险大。气藏剧毒高压,井控安全风险大;复杂高陡山区,穿山过江,施工安全风险高。

[收稿日期] 2010-07-28; **[修回日期]** 2010-08-02

[作者简介] 曹耀峰(1953-),男,陕西渭南市人,教授级高级工程师,长期从事石油勘探开发技术与管理工作;E-mail:caoyf2011@126.com

2) 技术难题多。石油工程面临着诸多世界级难题, 钻井需攻克“深、毒、喷、漏、塌、卡、斜”等难题; 试气作业需攻克长井段射孔、高产长效耐蚀管柱等难题; 集输工程、大型净化厂需攻克特殊管材焊接、特殊工艺施工等难题; 长输管道工程需攻克大口径管道山区跨越等难题。

3) 质量要求高。钻井产层固井质量、酸气管道焊接质量、净化厂装置安装施工质量、大口径长输管道工程质量都必须达到优质工程标准。

4) 影响因素多。工区高山深谷、沟壑纵横、水网密布、道路崎岖, 环境敏感、自然灾害频发, 人口稠密, 施工环境差; 工程建设所需物资数量庞大、品种繁多, 材质特殊、制造周期长、供应商多、保供难度大。

建设工程面临的难题, 必须进行技术攻关和管理创新方能实现预期的工作目标。

3 强化管理创新, 确保工程建设目标实现

在工程建设中通过认真践行科学发展观, 深刻把握工程特点与建设难点, 准确把握工程建设的整体性、层次性和开放性特征, 将国内外先进的工程建设管理理论与我国石油石化工程建设实践相结合, 创造性地进行管理模式与工程安全管理创新, 建立具有国际领先水平的标准体系并强力实施, 探索建立起一体化领导下的特大型综合油气工程建设管理模式, 正确处理工程建设安全、质量与速度、效益的关系, 创新工程建设组织运行管理方式方法, 发挥集团化优势攻克超深高酸气田世界级难题, 战胜一系列困难和工区洪涝、汶川地震等特大自然灾害, 全力打造“安全工程、效益工程、优质工程和生态工程”, 实现了工程安全优质高效建设投运。

3.1 创新实行了指挥部一体化领导下的工程项目管理模式

川气东送工程是庞大的系统工程, 项目群之间具有高度的系统联动性, 同时因该工程系首次实施, 技术保障、资源配置、进度协同都存在不确定性, 整体同步投产的难度极大。为此工程建设运用系统论原理, 对工程建设实施整体布局和系统控制, 在坚持以项目管理为基本运作模式的基础上, 组建工程建设指挥部, 创新实行了工程建设指挥部一体化领导下的工程项目管理模式。指挥部进驻工程建设前线, 针对工程跨行业、跨区域、项目众多的复杂性, 统筹协调项目群之间的整体协同推进, 有效规避了项

目群之间进展失衡以及单体项目过于关注局部、容易忽视工程整体的倾向; 针对剧毒硫化氢意外泄漏可能带来的致命风险, 指挥部强势监管工程建设的安全环保和质量管理, 有效防范了因一线施工队伍不适应工区特殊安全环保形势和质量要求带来的巨大风险。这一管理模式创新性在于通过“指挥部”这一传统组织形式与“项目部”这一现代管理形式的优化组合, 实现了石油石化优良传统与现代管理手段的有机结合, 协同效应在项目内部和项目群之间得到充分发挥。其实施效果在于既充分发扬了石油石化行业快速调集精兵强将集中力量办大事的传统优势, 又充分保障了以项目部法人责任制为核心的项目化管理的独立运作, 实现了“整体大于局部之和”, 体现了高效能。

系统控制是将工程建设上中下游板块中的各项目作为一个有机统一的整体来统观运筹, 通过确立“四大工程”建设目标, 建立强有力的工程组织管控体系, 强化“组织、协调、监督和服务职能”作用的发挥和“系统运行与各专业板块运行、业主运行与施工单位运行和整体运行与阶段运行”的三个结合, 落实“组织、制定、程序、统筹和激励”管控手段, 以强力组织、强势管理、强大保障、强劲合力推动工程建设整体推进。

3.2 超深高酸性气田工程技术标准体系

针对超深高酸性气田勘探开发关键环节建立工程技术系列标准, 在宏观上充分把握标准的指导方向, 先框架、后标准, 分阶段、有层次的编制和修订完善了 51 项专业标准, 形成了一整套重点明确、内容互补、科学严谨并成功指导我国第一个超深高酸性气田大规模开发的工程技术标准体系, 其内容覆盖了地质勘探、钻井、测井、录井、试气采气、安全环保、集输工程等天然气勘探开发全过程。各标准以安全、优质、高效为基本指导思想, 严格界定工程参数和指标的质、量、度, 严细规范操作要求和施工流程, 使各专业工程的技术管理、施工监理、队伍标准化物资准备、装备配套、工程施工、试验检验、安全防护、应急措施等方面有章可循。

3.3 始终以“四大目标”引领工程建设

结合工程实际细化确定了“建设安全工程、效益工程、优质工程、生态工程, 打造中国石化新时期新品牌”的川气东送工程建设五大目标并坚持以此引领工程建设, 推动工程建设。

1) 普光气田气藏平均压力 55 MPa, 平均 H₂S 含

量 15 % ,平均 CO₂ 含量 8 % ,集剧毒强腐高压于一体。超深高酸性气田勘探开发、集输系统、净化厂工程建设等均属于高危施工。从坚持以人为本、安全发展的理念出发,必须依靠科学严谨的技术标准体系、严密的监管和防范体系、严格的管理制度和先进的技术装备、严细认真的作风和本领,将各种安全隐患消灭在萌芽状态,杜绝井喷失控和硫化氢中毒等各类重特大安全事故的发生,故建设“安全工程”是本工程建设的首要目标和关键任务。

2) 加强工程投资控制,提高投资质量,在川东北地区建成一个国内最大、现代化程度领先的天然气生产、净化和供应及现代化程度较高的大型石化深加工基地,建成一条横贯东西的能源大动脉,使工程成为国家调整能源经济结构的杠杆支点、集团公司新的经济增长点、促进和拉动地方经济社会民生发展的发力点,实现工程效益最大化的“效益工程”是工程建设的中心目标。

3) 牢固树立“为川气东送工程质量负责一辈子”的理念,建立健全质量管控体系,严格按设计施工标准和程序推进工程建设的科学规律办事,实现生产井固井、管道焊接、设备安装质量合格率 100 % ,产层固井优质率 83 % 、安装单位工程优良率 98 % 以上,焊接一次合格率 93 % 以上,将川气东送工程打造成国际一流的“优质工程”。

4) 坚决杜绝“重生产、轻环保”、“先污染后治理”等做法,把清洁生产、和谐发展贯穿于工程建设全过程,强化和落实环境风险评估与防范和削减措施,实现“一避免,三确保”,用先进的环保与技术及其设备把普光气田建设成绿色气田,把管道工程建成绿色能源走廊,为落实保护生态环境这一国家的基本国策,把川气东送工程建设成与自然和谐共存的“生态工程”。

4 技术集成创新,攻克工程建设技术难题

面对诸多世界级技术难题,实施“借鉴创新,先导推进,整体集成”的科技创新战略。通过考察、交流、合作,组织引进国外成熟技术和关键装备实施消化吸收再创新。组织国内相关领域的院所、院校、院士尖端科技资源和系统内部业务专家及一线科研人员,组成产学研三结合的优势团队,建立面向工程建设一线的创新机制,依托“高含硫气藏安全高效开发技术”等国家科技重大专项和“南方复杂深井钻井关键技术研究”等中石化“十条龙”项目实施自主

科技攻关。结合引进的技术装备和攻关课题,组织开展了相关领域的 63 项新技术先导性试验,形成专家攻关与现场试验良性互动和双向促进的创新态势,既提高了技术创新的针对性,又加速了技术创新步伐。在先导技术现场成功应用的基础上,实施集成配套和规模化应用,促进了先导技术向主导技术的快速跨越,形成了超深高酸性气田工程七大配套技术系列,最终依靠高科技战胜了高难度。

4.1 南方海相勘探技术

围绕海相碳酸盐岩勘探,建立了深层碳酸盐岩礁滩储层“多元生烃、三元控储、复合控藏”系列海相油气勘探的新理论,形成了以寻找构造—岩性复合圈闭中优质储层为主要勘探对象的全新勘探思路;以发现大中型气田和提交规模储量为目标,攻关发展针对性海相勘探技术,建立了以山地高精度地震技术为主导的、包括深层圈闭评价、碳酸盐岩储层测井综合评价、精细层序地层及沉积相描述、山前带构造建模及评价、礁滩复合油气藏成藏机理及评价等深层碳酸盐岩油气勘探配套技术系列,形成了“以沉积相研究为指导、以模型正演与地震相分析为基础、以相控多参数储层反演为核心”的深层碳酸盐岩礁滩储层“相控三步法”综合预测技术。实现了普光气田周边迅速扩展、元坝台缘礁滩及山前带勘探突破以及黑池梁—南江东部及川东南北部大型礁滩勘探目标。

4.2 超深高酸性气田开发技术

研究建立模式聚类数学方法进行岩相识别,进一步细化了沉积微相,识别结果与取芯剖面对比精度达到 87 % ;采用稀疏脉冲和神经网络的多属性联合反演方法预测储层展布特点,井控制下基于模型的子波相位—幅度谱估算方法优化子波和时深标定等参数,无井控制下地震叠代滤波技术替代井间数学插值,形成了一套适合于普光气田碳酸盐岩储层特点的储层预测技术方法,经普光气田主体开发井完钻验证,符合率达到 83.5 % ;应用边际贡献法,测算出在稳产 6 ~ 10 a 条件下,普光气田主体单井初期产量、单井累产气量、经济可采储量、单井控制地质储量、单井钻遇有效厚度等技术经济界限;采用合成地震记录标定结果得到单井的时深关系曲线,建立全区的平均速度场,沿层提取出相应层位的平均速度场,开展变速成图并及时跟踪分析完善,形成了一套碳酸盐岩构造解释的新思路,普光主体构造描述进一步清晰。在方案实施过程中,不断深化气藏

构造、沉积微相、储层预测、含气性预测和气水关系等认识并实时应用到开发井位设计中,确保设计井位最优、钻遇储层最厚。按照“少井、高产、降低投资”的井位部署原则优化普光气田主体开发方案,开发井由 52 口优化为 40 口,单井产量平均由 $70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 调整到 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采收率由 65.5 % 提高到 70 %。

4.3 超深高酸性气田钻井综合配套技术^[1]

突破井深及“斜、硬、漏、喷、塌、卡、毒”等技术难题,形成了适应超深高酸性气田的以井身结构优化、气体钻井、垂直钻井、复合钻井、控压钻井、超深水平井、钻头优选、事故预防与处理等综合配套钻井优快技术;具有抑制性强、防塌封堵效果优、剪切稀释性好、润滑防卡能力强的高温抗硫钻井液技术;以井控装备配套、硫化氢监测、井控压井工艺、应急投产工艺等技术为主的井控配套技术和以防气窜水泥浆体系、高抗挤空心玻璃微珠低密度水泥浆体系、防气窜分段压稳模型设计、尾管固井、双级固井、高温隔离液技术、正注反挤工艺等技术配套的复杂压力体系及高酸性环境固井技术组成四大钻井工程技术系列,大幅度提高了建井速度和质量。3 年累计完成勘探开发钻井 102 口,总进尺 $55 \times 10^4 \text{ m}$,平均机械钻速 1.92 m/h,井身质量合格率 100 %,取芯平均收获率 91.92 %,生产井固井合格率 100 %。

4.4 超深高酸性气田测试及生产完井技术^[2]

攻关形成了以“井下安全阀 + 循环滑套 + 永久封隔器”为主要完井工具,针对性的设计应用普光气田主体开发井酸压生产一体化管柱结构,管串在最恶劣环境中安全系数均在 1.8 以上;对常规 APR 测试管柱不断完善和改进,形成了满足川东北地区恶劣工况条件下快速优质评价地层的射孔—酸压—测试三联作、加重酸压测试联作、OMNI 阀 + HP 阀的裸眼替喷测试等系列管柱结构;攻关形成了长井段分段延时起爆射孔技术,成功解决了气井射孔层位深、射孔井段长、一次性全井段安全射孔的技术难题;开发了高温压裂液、胶凝酸体系;针对不同储层特征,形成了以“深度酸压”为核心配套闭合酸压、加重酸压、震荡酸压、多级交替注入工艺的川东北酸压储层改造技术体系。川东北高温高压高含硫深井安全高效的测试完井工艺及配套技术体系,有效加快了超深高酸性气田勘探开发步伐。其中普光 101-2H 井射孔井段长度达到了 838.8 m,创造了国内水平井射孔井段最长的记录。

4.5 高酸性气田集输工程技术^[2]

通过国际技术合作并引进加拿大 VECO 公司成熟的设计技术,指导集输工艺的选择、流程设计、腐蚀控制、安全防护,确定了普光气田酸气集输的整体设计路线:全湿气加热保温混输、抗硫管材 + 缓蚀剂 + 阴极保护 + 智能清管防腐、SCADA + ESD + 声波泄露监测控制、截断阀室 + ERP + 紧急疏散广播 + 应急火炬系统安全措施;即时开展抗硫材质评价优选、特种管道焊接、腐蚀控制监测、应急等技术研究,根据工艺流程选择合理的材质、腐蚀控制工艺等,配套形成了高酸性气田集输工艺技术,实现了复杂山区高酸气田安全建设和运行采用“管线隧道 + 桁架跨越 + 悬索跨越 + 地下穿越”的联合管网敷设方式,较好地满足了湿气混输、智能清管的生产需要;从焊材优选、焊接工艺评定及优化、复杂环境焊接施工技术三方面开展研究和攻关,开发的高硫气田地面集输系统抗硫管道异种钢焊接工艺技术填补了国内空白;在国内首次使用了将有线和无线技术组成的冗余环,首次创新性的把 5.8 G 无线宽带接入系统作为工业以太网冗余环网的备用链路,填补了国内空白。国内首次实现高酸性气田集输场站、酸性管道整体安全投入生产运行。

4.6 大型高酸脱硫净化处理厂技术^[2]

引进 Black & Veatch 成熟可靠的工艺包,采用 N-甲基二乙醇胺 (MDEA) 法脱硫、三甘醇 (TEG) 法脱水、常规 Claus 二级转化法硫磺回收、加氢还原吸收尾气处理的工艺路线,总硫回收率达到 99.8 % 以上;研究和筛选新型脱硫剂、控制二氧化碳吸收和新颖的脱硫技术,完成我国第一套大型净化装置的工艺设计,使我国大型高酸脱硫净化工艺设计水平提升到世界先进水平;进行腐蚀机理和选材研究,合理、正确地选择出高压部分接触硫化氢管道、高压设备、低压湿硫化氢环境的材料并在适当位置设置在线腐蚀监测仪,监测管道腐蚀情况;组织开展大型设备选型及结构尺寸确定、大型硫磺回收装置平面布置、高温、大口径管道和制硫炉等关键管道和设备应力分析计算模型和方法、大尺寸管道器材和大型化阀门选用、大型硫磺燃烧炉工程、大型液硫储罐技术、大型余热锅炉技术开发等大型装置设计、制造研究等工作,确保了大型装置的自主设计、制造和安装,提升了我国大型装置工程技术水平;首次在净化厂进行安全集成系统研究,将净化厂所有的安全减灾措施进行集成,工艺装置采取了安全可靠的紧急

连锁切断措施,净化厂设置了4级紧急关断。全气田上中下游设置了统一的紧急切断连锁,集输系统、净化厂及输气首站之间的一级关断和二级关断中自动产生动作的部分信号采用硬线连接,一旦触发这些关断动作,各部分的相关连锁动作自动发生,确保了气田的安全;开展大型硫磺成型系统和运输方案的工程研究,实现了硫磺产品储存和运输的自动化。

4.7 大口径长输管道工程技术

通过联合技术攻关,探索形成了大口径长输管道工程设计及高落差大口径输气管道施工、特殊地段长江穿越施工、隧道施工、焊接等技术系列,大口径长输管材首次实现国产化,实现了管道工程技术的整体水平的提升。川气东送管道工程从系统构成优化、站场布局、设备选型、通信方式、自动化控制以及技术经济指标等都达到了当今国内外天然气管道建设的先进水平。川气东送管道工程创造出多项国内外施工高记录,其中 $1\ 035\text{ m}\times 3.8\text{ m}\times 3.3\text{ m}$ 的大溪亮隧道进出洞口高差 397.51 m ,创长输管道建设中隧道坡度最大世界新纪录;管径 813 mm 穿越距离 $3\ 910.17\text{ m}$ 的南京长江定向钻穿越工程,创造了大口径管道施工世界新记录;野三河悬索桥工程主跨 240 m 、桥身长 332 m 安装了直径 $\phi 1\ 016\text{ mm}$ 的两条并行管道,创造了管道悬索桥跨度最大、桥身最长的世界新记录。

5 建设工程取得的主要成果

经过3年多艰苦努力,参与建设的技术、管理、施工人员攻克了超深高酸性气田勘探开发、大型高含硫天然气净化厂设计建设、复杂地貌大管径管道施工等众多技术、管理与施工难题,安全优质高效地建成投运了川气东送一系列工程项目,不仅为我国长江沿线经济发展和人民生活提供了清洁能源,也探索形成了具有世界领先先进的配套系列技术和超大型多项目工程建设管理经验,提高了我国整体核心竞争力。2010年8月川气东送工程全面建成并投入商业化运营,建设工程取得了一批标志性成果。

1)第一个超百亿方酸性大气田在我国的川东北地区拔地而起。动用储量 $1\ 811.06\times 10^8\text{ m}^3$,累计完钻38口开发井,测试求产平均单井产量 $80\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均无阻流量 $480\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$;资源基础更加巩固,接替阵地逐步清晰,截至2009年底川东

北地区天然气累计探明储量 $4\ 981\times 10^8\text{ m}^3$ 、控制储量 $4\ 032\times 10^8\text{ m}^3$ 、预测储量 $5\ 598\times 10^8\text{ m}^3$,三级储量合计 $14\ 611\times 10^8\text{ m}^3$;亚洲规模最大的高酸性天然气净化厂全面投用,年净化能力 $120\times 10^8\text{ m}^3$ 、年产净化天然气 $90\times 10^8\text{ m}^3$ 、硫磺 $240\times 10^4\text{ t}$,总硫回收率达到99.8%以上。

2)中国石化第一条长距离、大管径、高压输气管道跨然耀世。其跨越巴山蜀水、鄂西武陵、江南水网等复杂地形地貌,共穿越长江7次、山体隧道72条、大中小型河流501次、公路铁路1 238次,最大坡角 85° ,施工条件之恶劣为世界管道建设史所罕见;工程建成的投用进一步完善了我国天然气基干管网,对于保障国家能源安全,促进能源结构调整和节能减排,推动西部大开发、中部崛起、东部率先发展战略的实施,提高沿线各地人民生活质量,具有重要的战略意义和积极的现实作用。一条完整的天然气产业链初具规模,沿线中国石化的炼化和销售企业众多,有利于利用天然气替代和优化原料、燃料,发展CNG加气业务,可大大降低炼化化工生产成本,大幅提高天然气利用价值。

3)中国石化在海相碳酸盐岩地层勘探、超深高酸性气田规模开发和净化储运技术领域迈入世界先进行列。形成了一系列超深高酸气田生产建设配套技术和特大型综合油气工程建设组织管理经验,创立了一整套国际先进的超深高酸气田勘探开发建设及安全标准体系,创造出一系列工程建设先进指标,实现了大口径厚壁X70螺旋焊管、直缝焊管及卷板、钢板的100%国产化。

4)培育锤炼了精神与人才队伍。通过工程建设培育形成了以“创业、创新、求实、奉献”为主要内容的川气东送精神,锤炼了一支装备精良、技术精湛、作风过硬、能打硬仗的工程建设队伍,培养了一批特大型工程建设组织管理人才、高酸性气田开发建设专业技术人才和高危行业特种技能操作人才。

参考文献

- [1] 何生厚.高含硫化氢和二氧化碳天然气田开发工程技术[M].北京:中国石化出版社,2008
- [2] 何生厚,曹耀峰.普光高酸性气田开发[M].北京:中国石化出版社,2010

(下转23页)