

川气东送工程节能环保技术的创新与应用

曹耀峰

(中国石油化工集团公司,北京 100728)

[摘要] 针对川东北地区敏感脆弱的生态环境及含剧毒高酸天然气的资源禀赋,始终坚持并严格落实“环保优先”的工程建设指导思想,大力推行以“节能环保、绿色低碳”为主要特征的生态工程建设模式,将系统优化思想与节能环保技术创新相结合、清洁生产措施与严格监管相结合,在优化设计、清洁生产、环境监测全过程推进节能环保技术的创新与应用,杜绝了重特大环境污染和生态破坏事故的发生,最大限度减少了工程建设对原始生态环境和人文历史环境的影响,实现了污染物排放浓度、总量和环境质量达标,履行了将川气东送工程建设成“生态工程”、把普光气田建设成“绿色气田”、把川气东送管道建设成“绿色能源大走廊”的社会承诺。

[关键词] 川气东送;工程建设;节能环保;技术创新

[中图分类号] TE9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)12-0015-04

1 川气东送工程概况及其生态环境^[1,2]

川气东送工程是由中国石油化工集团公司(简称中国石化)负责建设并运行的集天然气勘探开发、集输净化、管道输送以及天然气利用、市场销售于一体的特大型系统工程,总投资 626.76 亿元,是与三峡工程、南水北调、西气东输、青藏铁路工程具有同等重要地位的国家“十一五”重大工程。工程自 2007 年 8 月 31 日正式开工建设,2010 年 3 月 29 日全面竣工,建成了我国第一个超百亿立方米的酸性大气田、世界第二大高酸性天然气脱硫净化厂和我国又一条横贯东西的长距离、大管径、高压输气管道,并于同年 8 月 31 日正式投入商业运营。截至目前已累计探明天然气地质储量 $4.122 \times 10^{11} \text{ m}^3$,生产天然气 $1.735 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、生产硫磺 $3.4254 \times 10^6 \text{ t}$ 。

川气东送工程的顺利建成投产,标志着我国已成功跻身掌握高含硫气田规模开发核心技术的世界极少数国家的行列,对我国同类高含硫复杂气藏开发具有重大示范作用,对确保国家能源安全、调整能源结构和建设资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。

普光气田作为川气东送工程的主供气源,地处川东北地区,核心区域处于四川省达州市宣汉县普光镇,属于典型的川东民居环境,周边群山起伏,水系发达,植被丰富,自然风光秀美,历史文化积淀深厚,被誉为“川东明珠”。在川东北地区进行大规模的气田开发建设,必须面对和解决以下生态环保难题。

1) 土地资源的约束。川东北地区平均海拔 360~1 130 m,耕地和可供建设用地十分贫乏,坚持并积极落实保护耕地的基本国策在该地区尤为重要和紧迫。

2) 生态环境敏感脆弱。前河、中河、后河等长江支流流经普光气田腹地,分布多处国家级饮用水水源地、自然保护区和国家级文物保护单位,长输管道跨越巴山蜀水、鄂西武陵、江南水网等复杂地形地貌,穿越长江 7 次,工区内处处青山绿水,对外界因素干扰反应敏感,生态自我修复能力低,必须坚持环保先行,坚决不能走“先污染后治理”的老路。

3) 工程施工组织难度大。工程建设场面大、人员设备多、生产工艺复杂,产生的各类废弃物多,特别是钻井工程、高酸天然气集输及净化工程废弃物具有“剧毒、高酸”特性,净化处理工艺复杂。

[收稿日期] 2012-09-05

[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

4)可供借鉴的技术经验少。对于复杂山地、人口密集条件下的高含硫气田,国内外尚无成功开发先例,可资借鉴的技术和经验匮乏,必须走创新之路。

2 建设生态工程目标的提出及其主要思路

面对川东北地区特殊的生态环境及资源禀赋,工程建设指挥部在工程建设开工动员大会上明确提出:把川气东送工程建设成“生态工程”,把普光气田建设成“绿色气田”,把川气东送管道建设成“绿色能源大走廊”。

建设生态工程的主要内涵是:大力推行以“节能环保、绿色低碳”为主要特征的生态工程建设模式,积极创新应用节能环保技术和施工工艺,全面落实清洁生产措施,坚决杜绝重特大环境污染和生态破坏事故的发生,最大限度减少工程建设对原始生态环境和人文历史环境的影响,实现污染物排放浓度、总量和环境质量达标,力争实现“零污染”。

推行生态工程建设模式的主要思路是:将“环保优先”作为工程规划设计、工程实施、工程监理的重要前提和否决条件,将系统优化思想与节能环保技术创新相结合、将清洁生产措施与严格监管相结合,努力实现经济效益与生态环保效果整体最优的目标。

3 节能环保工程技术的创新与应用

为实现建设生态工程的目标,在优化设计、清洁生产、环境监测全过程推进节能环保技术的创新与应用,取得了预期效果。

3.1 积极运用最新技术成果,通过优化设计从源头上实现生态环保效果整体最优

1)在规划普光气田产能建设方案过程中,创新应用超深高含硫气田高产高效开发技术以及空气钻、水平井等石油工程技术,实现了“少井高产”。

通过对超深礁滩相碳酸盐岩储层开发精细描述技术、高含硫气藏渗流理论及开发指标优化技术、高含硫长井段气井一次性射孔技术、高含硫非均质储层大型酸压增产技术的创新应用,取得了优质气层识别和特殊酸压工艺的突破,开发井成功率与国际同类气田相比由85%提高到100%;创新应用丛式井组、大位移超深水平井等技术工艺,优化了气田整体开发方案,少建钻井平台36个,减少土地占用429亩(1亩 \approx 666.67 m²),实现了土地资源的集约化利用,从源头上减少了污染源和有毒有害废弃物。

其中,“普光气田产能建设关键技术”获得省部

级科技进步一等奖;“超深高含硫气田高产高效开发技术”取得发明专利4项(受理3项,授权1项)、实用新型专利12项。

2)在普光气田集输管线设计中,通过抗硫管材的腐蚀评价与优选技术、高含硫天然气集输管道焊接技术、高含硫气田集输系统综合防腐技术的突破与应用,优选确定了“全湿气加热保温混输”工艺路线,实现了高酸湿气的直接输送。

高含硫酸性气田地面集输工程有干气输送和湿气输送两种工艺路线。干气输送,是指将井口来气进行深度脱水处理,优点是对管线腐蚀程度低,安全系数大;缺点是必须根据井的布局建若干脱水站,占地多、投资大,而且每个脱水站都是一个污染源,不利于环保。湿气输送,是指将井口来气不单独脱水处理,经集气干线输送至净化厂后进行集中处理。优点是不必建若干小型脱水站,投资少、节约耕地,有利于环保;缺点是湿气对管道腐蚀程度高,易发生泄漏、堵塞等风险,必须破解管材抗腐蚀等技术难题。

创新了高温单质硫、氯离子共存腐蚀评价方法,突破了抗硫管材国际标准的范围,制定了高温、高压、多介质条件下选材标准,选定了普光气田气井井筒、集输管道、净化厂的抗硫管材;首次建立了高抗硫焊材及焊接接头耐蚀性评定方法,研发了消氢控制等焊接工艺技术,保证了管道接口的抗腐蚀性能;创新形成了“缓蚀剂、腐蚀监测、智能检测、阴极保护”4要素综合防腐技术。

首次实现了年产百亿立方米高含硫湿气的直接输送,与常规的干气输送相比,少建脱水站和减少污染源16个。

3)在净化厂总图布置和设备安装过程中,通过对功能区域的综合研究与创新应用大直径配管技术,顺利建成了世界第二大规模的天然气净化厂。

针对净化厂需要不停工轮番检修及安全生产的特殊要求,首次将功能划分与安全生产、紧急事故处理等进行综合研究,并形成了适宜高含硫天然气生产的工厂布置。通过对大口径高温管道布置方案进行研究,创新应用大直径配管技术,解决了设备管嘴初始热位移较大、管嘴受力校核困难的技术难题。同比减少占地26.2%,管材节省15%。

4)在普光气田——上海长输管道工程设计中,通过创新应用先进的设计理念、施工工艺与优化路由相结合,实现了建设绿色能源大走廊的工程建设目标。

本着有利于生态环境保护的设计理念,确定了“能打洞不爬山、能穿越的不跨越、能沉管的不穿越、能山下敷设的不上山”的设计原则,绕过青山绿水、少惊飞鸟游鱼,减少了管线在翻山越岭中对植被的破坏。大型跨越由原来的7处减少到1处;普光至宜昌段山区线路由原来的683 km减少到620 km。

创新隧道掘进与二次衬砌同步实施、小断面大口径管道布管和侧吊组对等隧道施工工艺,开凿山体隧道72条,总长92.7 km。

通过优化设计与新工艺的运用,少砍伐树木 3×10^6 株,规避了武汉梁子湖湿地自然保护区、重庆梁平东山国家森林公园、宜昌长阳丹水风景区等8处环境敏感区域,减少了对植被和农田的破坏,最大限度地保护了自然生态环境。

3.2 积极破解影响工程施工与生态环保兼顾技术难题,实现全过程清洁生产

1) 创新形成海相钻井废液、残渣处理及回收利用技术。创新形成了“高含硫气田钻井废液混凝/絮凝/吸附/氧化处理技术工艺”和“深井聚磺废渣复合固化处理技术”,获得2项国家发明专利;通过创新应用“废渣固化物调整/焚烧集成技术”,实现了固体废弃物的资源化利用。

处理后的钻井废液,COD(化学需氧量)从 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ mg/L降至100 mg/L以下,色度、SS(废水中悬浮物)、石油类、挥发酚等指标都达到GB 8918—1996《污水综合排放标准》一级排放标准,固化物浸出液指标均达到GB 8978—1996的一级标准。

2) 创新制订川东北地区钻井工程设计施工标准,下大力气保护水资源。为防止 H_2S 、钻井液体溢漏造成大气环境和河流的污染,钻井工程创新性制订了以下标准:表层套管下深不少于700 m;井口与河流、沟谷水平距离小于1 000 m的井,表层套管的下深必须低于河床、沟谷底部300 m;水平距离大于1 000 m的井,表层套管的下深必须低于河床、沟谷底部100 m。普光气田探井表套平均下深421 m,开发井比探井多下套管279 m,仅此一项,单井多增加投入54.61万元,总共38口井多增套管投入2 075.18万元。

为避免雨水进入污水池,造成污水外溢,对井场泥浆池一律采用钢筋混凝土结构,经抗压防渗实验合格后方可投用。与东部老油田挖土坑铺防渗布的措施相比,单井泥浆池的建设多投入费用100余万元。

普光气田开发建设期间,未发生一起钻井工程

污染水资源事件。

3) 创新形成产能测试高温焚烧技术。普光气田天然气 H_2S 含量15%、 CO_2 含量8%,具有剧毒强腐蚀性。必须解决试气求产技术难题,为气田整体开发确定科学合理的技术参数。

由于普通气田测试采用的传统火炬燃烧放空技术燃烧效率低、扩散慢,不适用于高含硫气田。

成功研制了国内首台高 H_2S 天然气焚烧炉,首创了“低抗硫级+高抗硫级组合放喷测试流程”,并取得两项国家专利。与传统常规技术相比,高 H_2S 天然气焚烧炉温度达到1 300℃以上,技术燃烧效率达到99.99%,测试时间由48 h延长到240 h,焚烧炉有效源冲高达200 m以上,促进了 SO_2 在大气中的扩散,降低了污染物的地面浓度,保证了排放在大气中的空气质量达到国家二级标准。与使用进口同类产品相比,每台焚烧炉可节约资金520万元。

4) 创新运用高含硫天然气深度脱硫技术。普光气田天然气 H_2S 含量15%、有机硫含量 340.6 mg/m^3 ,必须经过深度净化处理才能外输使用。首创两级吸收、级间冷却深度净化技术,自主研发固定床低温催化水解有机硫技术,应用在线加氢尾气处理及酸水汽提技术,实现了总硫回收率达99.9%以上,天然气净化率达到99.99%以上。

与常规脱硫技术相比,溶剂总循环量降低10%,再生能耗降低15%,净化天然气中 H_2S 含量 4 mg/m^3 、总硫含量 20 mg/m^3 、 CO_2 含量1%,均优于国标《天然气》一类气标准,而且优于欧洲气体能量交换合理化协会标准(EASEE-gas)和美国标准,主要技术指标达到了国际先进水平。

5) 创新运用含硫污水处理和高硫化物碱渣处理技术。国内首创了气提—溶氧气浮—复合氧化—沉淀除硫工艺,解决了单一除硫工艺很难将 H_2S 脱除至5 mg/L以内的问题;研发应用含硫污水净化、稳定处理技术工艺,研制出了空间除硫装置,建成了 $800 \text{ m}^3/\text{d}$ 的含硫污水处理站,满足了高含硫污水安全处理、达标回注、零污染排放的环保要求。

累计处理污水约 $2.8 \times 10^5 \text{ m}^3$,含硫污水处理后,硫 $\leq 5.0 \text{ mg/L}$ 、油 $\leq 6.0 \text{ mg/L}$ 、悬浮物 $\leq 3.0 \text{ mg/L}$ 、总铁 $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ 、SRB(硫酸盐还原菌) ≤ 25 个/mL、TGB(腐生菌) ≤ 100 个/mL、腐蚀速率 $\leq 0.076 \text{ mm/a}$,水质全部达到A3标准以上。

采用系统内部研发的“石油炼制工业油品精制废碱渣处理方法”专利技术,实现了高硫化物碱渣

处理技术首次在国内大型高含硫天然气净化厂成功应用,解决了净化厂废碱液的后续治理和恶臭污染问题,环保效益和社会效益明显。

6) 创新运用散装硫磺密闭仓储输送技术。硫磺露天堆放存在较大安全环保危险。通过成功研发散装硫磺密闭仓储技术,建成了两座四周有挡墙设计的半封闭式硫磺料仓及转运、消防安全等配套设施,实现了巨量硫磺的密闭储存,消除了安全和环保的隐患;并发明了皮带输送圆形料仓储存散装硫磺的方法,将皮带输送和圆形料场有机结合,实现了散装硫磺的堆料和取料自动化和机械化,做到无人值守全天候运行,达到了现场用工少、占地少、环保效果好等目的。

7) 积极开展 CO₂ 捕集及利用技术的创新与推广。针对普光气田天然气高含 CO₂ 的特点,积极开展了 CO₂ 捕捉、利用和封存 (CCUS) 技术的研发和推广使用,并取得了积极进展。

联合南化集团研究院进行了 CO₂ 回收技术研发。通过应用复合胺溶剂完成了低分压 CO₂ 回收侧线试验,与常规 MEA 吸收法性能对比,达到了 CO₂ 回收率 >80%, 产品 CO₂ 含量 >99% 的目标。

与四川大学及瓮福集团联合研究开发了“普光气田尾气 CO₂ 矿化磷石膏固废联产硫基复肥”项目。该技术利用酸性天然气尾气 CO₂ 矿化固废磷石膏联产硫基复肥,可大幅度降低 CO₂ 矿化成本并提高磷石膏循环利用经济性,具有 CO₂ 减排、固废利用和联产硫基化肥三重效益。该项目已经上报科学技术部的 2013 年国家支撑计划,并已获得批准。为加大科技攻关力度,中国石化与四川大学共建了 CO₂ 矿化利用研究院。目前试验研究进展顺利,取得和掌握了工艺参数与基础数据,完成了中试装置工程研究及设计,组织开展了示范工程的工艺包编制和可行性研究。预计首期建设单个联合 1.7×10^5 t CO₂ 矿化利用固废磷石膏 6.5×10^5 t/a 项目,生产硫基复合肥 5×10^5 t/a、轻质碳酸钙 3.5×10^5 t/a,同时实现余热利用,降低能耗,减少投资,经济效益预计超过 5 000 万元/年。项目推广前景良好,以 5×10^7 t/a 磷石膏固废为例,可矿化利用 CO₂ 1.2×10^7 t。

3.3 严格环境监测,全面落实还原、复耕措施,做到了“青山依旧、碧水长流”

1) 运用全自动化的远程控制、数据采集与传输技术,实现气田生产的全过程监测。本着对社会高度负责、对子孙后代高度负责的态度,坚持例行监测、

监督性监测、应急监测和远程布控连续监测相结合,在普光气田净化厂、集输站场、管线、隧道等部位,共安装 H₂S 检测仪 1 466 个、可燃气体检测仪 509 个、火焰探测器 107 个、感温感烟探测器 1 153 个;在气田周边共设置空气质量、地表水、地下水、植物和土壤等环境质量监测 296 点次/年,生活及工业类监督性监测 368 点次/年,构建了环境监测体系和多元立体监测网络,实现了工程运行与生态环境的和谐共处。

2) 加大环保、水保工程建设资金投入力度,全面落实还原、复耕措施。仅普光—上海川气东送管道工程就投入资金 8 亿元,完成水土保持工程施工点位 38 472 处,植树种草 591.9 m², 植被恢复面积 591.9 hm²。

在川气东送工程建设和投产运行期间,中国石化联合国家资质单位和专业机构,分别开展了工程中期环境影响评价、竣工环保验收监测,分阶段对工程建设和试生产期间的环保管理情况及当地环境质量进行了监测和评估,复核并验证了高含硫气田环保管理和环保外排指标的有效性,其中普光气田周边空气质量与开发前基本一致,符合《国家环境空气质量》二级标准;普光气田地表水水质与开发前基本一致,符合国家《地表水环境质量标准》的二类水质标准;普光气田地下水水质与开发前基本一致,符合国家《地下水质量标准》的三级质量准标;普光气田周边的植物、土壤等生态环境保持稳定,与开发前基本一致。经过对气田周围空气、地表水、地下水、植物和土壤等生态要素进行 5 年长期连续监测,监测数据说明:普光气田开发建设没有对周围的空气质量、地表水、地下水、植物和土壤等生态环境造成污染,区域环境质量满足相应功能区要求。

今后,中国石化将坚定不移地实施绿色低碳战略,在工程建设领域进一步总结完善和推行生态工程建设模式,大力推进节能环保技术的创新与推广使用,积极落实碳减排行动,与社会各界共同致力于资源节约型、环境友好型社会建设,并为此做出持之以恒的努力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 曹耀峰. 超深高酸性气田钻井工程技术与实践[M]. 北京:中国石化出版社,2011.

(下转 57 页)