

普光气田安全高效开发技术及工业化应用

曹耀峰

(中国石油化工集团公司,北京 100728)

[摘要] 针对普光超深高含硫气田安全高效开发面临的诸多世界性技术难题,按照“学习借鉴、攻关创新、集成应用”紧密衔接的科技创新路径,组建产学研一体化技术攻关团队,形成开放式创新体系,实现科技攻关与现场先导试验良性互动,成功推动了超深高含硫气田安全高效开发技术的研发与配套、关键装备国产化、标准体系建设及其工业化应用,使我国成为世界上少数几个掌握开发特大型超深高含硫气田核心技术的国家,为我国乃至世界复杂山地超深高含硫气田安全高效开发做出了贡献。

[关键词] 普光气田;超深高硫;技术创新;工业化应用

[中图分类号] TE37 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)11-0049-04

1 前言

21世纪人类将进入低碳经济时代,天然气作为清洁能源的地位日益突出。2010年世界一次能源消费结构中天然气占22.6%,而我国仅占4.8%,大力开发利用天然气是国家能源战略的重点发展方向之一。据统计,世界天然气资源约60%含硫、10%为高含硫。我国高含硫天然气资源十分丰富,资源量超过 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明储量近万亿立方米。安全高效开发该类资源对当前及今后的能源结构调整具有重大意义。

2 普光气田概况及其安全高效开发面临的世界性难题

普光气田是我国已发现的最大规模的海相整装高含硫气田,其主体区块探明储量 $2.783 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。主要具有以下特点:a. 埋藏超深,平均井深5 974 m;b. 压力高,气藏地层平均压力达56 MPa;c. 硫化氢和二氧化碳含量高,平均含量分别达到15.2%、8.6%,有机硫含量达 340 mg/m^3 ;d. 地处复杂山地,人口密集,平均海拔360~1 130 m,气田核心区域约 500 人/km^2 。由于高含硫天然气剧毒、腐蚀性强,安全风险高,开发难度大,尤其对于普光气田这样超

深、地处复杂山地、人口密集条件下的高含硫气田,国内外尚无成功开发先例,是公认的世界性难题。从工程技术角度看,主要有以下几个方面。

1)超深高含硫气田储层特征及渗流规律复杂,投资风险高,必须攻克少井、高产、高效开发的技术难题。

2)高含硫化氢天然气腐蚀性极强,普通钢材几小时就会发生应力腐蚀开裂,必须攻克腐蚀防护技术难题。

3)天然气高含硫化氢和有机硫,必须攻克高含硫天然气特大规模深度净化和硫磺安全储运的难题。

4)硫化氢浓度达0.1%会致人瞬间死亡,普光气田高达15%,钻井、作业及生产过程中高含硫天然气一旦泄漏,复杂山地救援十分困难,必须攻克高含硫气田安全控制难题。

5)国内不能生产高抗硫管材,国外公司实行垄断,价格昂贵且供货周期长,必须攻克抗硫管材国产化难题。

3 普光气田安全高效开发技术创新实践

为缓解我国能源紧张局面,有效利用高含硫天然气资源,国家实施了以普光气田为主供气源的

[收稿日期] 2013-09-02

[作者简介] 曹耀峰(1953—),男,陕西渭南市人,教授级高级工程师,主要研究方向为石油天然气工程技术开发与管理;E-mail:caoyf2011@126.com

“川气东送”工程,并将其列为“十一五”重大工程。中国石油化工集团公司针对普光超深高含硫气田安全高效开发面临的诸多世界性难题,按照“学习借鉴、攻关创新、集成应用”紧密衔接的科技创新路径,组建产学研一体化技术攻关团队,坚持面向工程建设一线、以解决工程建设现场实际难题为导向的工程科技管理模式,实现了科技攻关与现场先导试验的良性互动,有效提高了科技攻关和技术成果的转化应用效率。

3.1 尊重科学技术发展规律,按照“学习借鉴、攻关创新、集成应用”紧密衔接的科技创新路径进行自主创新

1)积极学习借鉴国内外高含硫气田安全高效开发的经验。在人类发展历史上,每一项技术创新取得的进步无不是建立在继承前人成功经验的基础之上。我们邀请法国、加拿大等具有开发高含硫气田经验的国际知名公司参与普光气田开发方案的设计审查、监督管理,组织一线技术人员远赴加拿大高含硫气田跟班培训,最大限度地吸收、学习和借鉴国外企业开发高含硫气田的经验。

2)组建产学研一体化攻关团队自主创新。针对普光气田与国外已开发高含硫气田的差异性,以及国外企业对核心技术的封锁,组织大型国有企业、科研院所和大专院校近3 000人的研发团队,创建了高含硫气田储层改造、腐蚀评价、泄漏模拟等实验室,依托“高含硫气藏安全高效开发技术”和“大型高含硫气田开发示范工程”两项国家科技重大专项,以普光气田开发面临的酸性气田安全高效开发、硫化氢防护、特大酸性气体净化、安全保障、抗硫装备管材国产化等世界性难题为攻关目标,坚持不懈地开展自主创新。

3)注重科技成果现场转化应用,构建技术研发与现场应用良性互动的技术创新体系。在工程建设一线组建了建设单位、施工单位、第三方服务商技术力量组成的技术集成应用团队,在工程建设现场组织实施了气体钻井、旋转尾管固井、储层改造等63个先导试验项目,同时聘请系统内部实践经验丰富的专家和科研人员进驻现场指导新技术应用,实现了科技成果“攻关一批、集成转化一批、现场应用一批”,极大地发挥了科技对工程建设的支撑和引领作用,促进了科技成果向现实生产力的转化。

3.2 创新形成的主要技术成果

经过七年的攻关和应用,创新形成了高含硫气

田安全高效开发的五项核心技术,在国际上首次成功开发了年产 $1.05 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的特大型超深复杂山地高含硫气田,自主设计建成了世界第二大超百亿立方米级的高含硫天然气净化厂。

3.2.1 创新形成了特大型超深高含硫气田高产高效开发技术

建立了高含硫气田气—液—固(硫)三相渗流理论模型,首次揭示了高含硫气藏单质硫析出、运移、沉积的特殊渗流规律,直接用于“少井高产”的开发设计。创新超深礁滩相气藏开发精细描述技术,气藏描述单元由三级提升到四级层序,建立的三维地质模型精确描述了超深储层的含气性和空间展布。创新高含硫长井段气井射孔和酸压增产工艺,实现了超深高含硫气藏一次性安全射孔和非均质巨厚气层的有效改造,大幅提高了气井的生产能力。应用上述创新技术,提高了单井产量和气田开发效益。设计的气井均钻遇优质气层,成功率达100%;创造了气井一次性射孔井段1 215 m的世界记录;气井酸压后日产气量由 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 提高到 $8 \times 10^5 \text{ m}^3$;气田开发内部收益率由12.9%提高到17.1%。

3.2.2 创新形成了特大型高含硫气田腐蚀防护技术

建立了高含硫化氢、二氧化碳、单质硫、氯离子共存环境的腐蚀评价方法和选材标准,创新了高含硫气田抗硫管材腐蚀评价与优选技术。建立了焊接接头耐蚀性评定及消氢控制方法,攻关突破了高含硫天然气集输管道焊接工艺难题,提升了管道接口的抗硫化氢腐蚀性能。创新高含硫气田湿气集输“缓蚀剂、腐蚀监测、智能检测、阴极保护”综合防腐工艺,提高了复杂山地集输系统的抗腐蚀能力。上述技术创新,突破了抗硫管材选择国际标准NACEMR-0175范围,硫化氢分压由3.5 MPa拓展到10 MPa;高含硫天然气集输管道一次焊接合格率达95.5%,超过国家优质工程标准(93%);普光气田腐蚀速度0.059 mm/a以下,实现了高含硫天然气湿气直接输送。

3.2.3 创新形成了高含硫天然气特大规模深度净化技术

1)高含硫化氢及有机硫天然气特大规模深度脱硫技术。研发了固定床低温催化水解有机硫和两级吸收、级间冷却净化工艺,实现了硫化氢和有机硫深度脱除。

2)特大规模硫磺高效回收技术。研发了特大

型克劳斯炉和低温加氢水解尾气处理工艺,大幅度提高了总硫的回收率。

3) 特大规模散装硫磺储运技术。研发了特大型散装硫磺仓储成套装置和硫磺粉尘监测、抑制与消防系统,实现了安全环保储运。

应用上述创新技术,高含硫天然气净化率99.99%,总硫回收率达99.9%;自主设计建成了年处理高含硫天然气 $1.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、生产硫磺 $2.1 \times 10^6 \text{ t}$ 的净化厂。

3.2.4 创新形成了复杂山地高含硫气田安全控制技术

首次开展了复杂山地气体扩散风洞实验,揭示了不同气象条件下高含硫天然气泄漏扩散规律,建立了人体动态毒性负荷理论模型,研发了泄漏监测、气田连锁关断、特种救援装备,建成了国家级油气田应急救援基地。建立了“技术设计无缺失、监测控制无缺位、培训演练无缺员、应急救援无缺憾”的安全控制链,实现了气田建设与生产全过程、全方位、全天候的安全监测与控制。首次建立了复杂山地高含硫气田搬迁、疏散、预警的安全防范标准;泄漏监测系统硫化氢浓度报警值0.000 2%,准确率达100%;全气田连锁关断系统响应时间2~20 s,成功率达100%,实现了安全生产零事故。

3.2.5 自主研发了关键抗硫管材,实现了国产化

创新了超高纯净度冶炼技术,研制了P110SS抗硫套管、BG2250高镍基合金油管和大口径L360抗硫集输管,打破了国外技术封锁,性能指标达到国外同类产品先进水平,价格降低了35%~50%。

根据国内外相关文献查新检索结果,普光气田安全高效开发五项核心创新技术中,特大型超深高含硫气田高产高效开发技术、高含硫天然气超大规模深度净化技术、复杂山地高含硫气田安全控制技术三项达到国际领先,特大型高含硫气田腐蚀防护技术、关键抗硫管材国产化两项达到国际先进。

普光气田从开发设计到投产运行,先后聘请三家国际知名公司跟踪评估,均给予高度评价。国际著名质量健康安全环保管理体系(QHSE)评估机构法国国际检验局评价,普光气田净化厂总体设计具有很高的国际水平;国际知名工程设计管理公司加拿大IMV公司评价,普光高含硫气田集输系统设计具有世界一流水平;国际能源领域知名安全风险评估咨询公司挪威斯堪伯奥评价,普光气田钻井、作业、集输整体技术设计在国际油气领域处于领先水平。

4 普光气田安全高效开发技术产生的学术影响

1) 首次揭示了高含硫气藏单质硫析出、运移、沉积的特殊渗流规律,建立了高含硫气田气—液—固(硫)三相渗流理论模型;揭示了不同气象条件下高含硫天然气泄漏扩散规律,建立了人体动态毒性负荷理论模型,为复杂山地超深高含硫气田安全高效开发奠定了理论基础。

2) 创建了高含硫气田储层改造、腐蚀评价、泄漏模拟等实验室,使我国高含硫气田开发研究水平迈入世界先进行列。

3) 创新形成了高含硫气田开发的五项核心技术,标志着我国已具备安全高效开发高含硫气田的能力。

4) 建立了高含硫气田安全开发的整套(四类66项)技术标准,促进了我国天然气开发领域技术的升级换代。

5 普光气田安全高效开发技术工业化应用取得的经济社会效益

1) 普光气田天然气为“川气东送”管道沿线六省两市70多个城市提供了优质清洁能源,极大推动了产业结构调整和区域经济社会发展,每年可减少二氧化碳排放量 $1.68 \times 10^7 \text{ t}$,减少二氧化硫、氮氧化物等有害物 $7 \times 10^5 \text{ t}$ 。

2) 我国是世界上最大的硫磺需求国和进口国,其中80%硫磺用作生产磷肥的原料。普光气田将天然气中剧毒的硫化氢变害为利,年产 $2.1 \times 10^6 \text{ t}$ 硫磺,占我国硫磺产量的45%,为降低我国硫磺对外依存度做出了贡献。

3) 创新形成的理论、技术和标准极大推动了我国高含硫天然气的开发步伐,预计“十二五”末和“十三五”末每年高含硫天然气产量分别达到 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $5 \times 10^{10} \text{ m}^3$,成为我国今后一个时期天然气产量的重要增长点。

4) 与我国毗邻的中亚地区高含硫天然气资源十分丰富,按照国家“走出去”的发展战略,已与哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦国家石油公司进行了高含硫气田合作开发的交流,将拓展我国开发利用海外油气资源的新领域。

5) 高抗硫套管、高镍基合金油管、大口径抗硫集输管等关键抗硫管材已全面国产化,广泛应用到

我国高含硫气田开发建设中,并出口美国、加拿大、中东、中亚等国家和地区,提升了大型国有企业高端管材制造的国际竞争力。

6)普光气田安全高效开发推动了当地经济社会发展。在普光气田周边建成了社会主义新农村示范区,1万多人搬入新居,援建了一批道路、学校、医院等基础设施;支持当地政府建成了天然气化工

园区,进驻企业30余家,增加近2万个就业岗位。

“普光气田安全高效开发及工业化应用”项目,攻克了建国以来几代石油人努力探索的高含硫气田安全高效开发技术,成功开发了普光特大型高含硫气田,对国家天然气发展战略产生了重要影响,使我国成为世界上少数几个掌握开发特大型超深高含硫气田核心技术的国家。

The secure and highly efficient development technology for Puguang Gas Field and its industrial application

Cao Yaofeng

(China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China)

[Abstract] To solve the multi-types of technical problem concerning with the development technology of Puguang Gas Field which is deeply reserved and abounds with hydrogen sulfide, we have organized a scientific innovation team of industry-teaching-research integration. So that, we have formed a technology innovation system, realized the general interaction of key science and technology program and site-testing, promoted the research and development of gas field with super-deep and high-sulfur, localization of key equipment, the construction of standard system and its industrial application, pushed China to be one of the few countries of holding the core technology for high-sulfur gas field development, and made important contribution to super-deep and high-sulfur gas field development of China and even the whole world.

[Key words] Puguang Gas Field; super-deep and high-sulfur; technology innovation; industrial application