



# “火山口”上的天然气战役

——中石化“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”项目背后

■本报记者 计红梅

川气东送工程是国家“十一五”重大工程,与三峡工程、青藏铁路、南水北调等特大型工程具有同等重要的地位。作为川气东送工程气源的普光气田,是世界第二个百亿立方米级的特大型高含硫气田,具有超深、高酸、高压等特点,其勘探开发被称为“世界级难题”。有人形象地比喻:“在普光气田施工,就像天天坐在火山口上。”

然而,经过7年的不懈攻关,中石化硬是打赢了这场“火山口”上的天然气战役,每年将105亿立方米天然气输送到“川气东送”沿线六省二市的70多个城市,为其提供了优质清洁的能源。同时,其研发的高含硫天然气特大规模深度净化技术,可年处理高含硫天然气120亿立方米,生产硫磺210万吨,让我国的硫磺生产能力翻了一番。

1月18日,国家科学技术奖励大会在北京举行。中石化在普光气田项目上的努力获得了国家的认可,其“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”项目荣获了2012年度国家科学技术进步一等奖。这是中石化迄今为止获得的国家级科技进步最高奖项。当天,该项目第一完成人、中石化集团公司党组成员、副总经理曹耀峰作为特等奖项目代表,接受了党和国家领导人颁奖。

在接受《中国科学报》记者采访时,曹耀峰等项目核心成员向记者解读了这场惊心动魄的战役背后的挑战。

## 地下的“毒蛇猛兽”

硫化氢是普光气田令人望而生畏的最关键理由。

人们常形容硫化氢是地下的“毒蛇猛兽”,一旦控制不了,就会喷出伤人。而普光气田实现了气井超深、山地复杂、人口密集条件下高含硫气田的成功开发。这在全世界属于首例。

曹耀峰告诉《中国科学报》记者,硫化氢浓度达1000ppm就会致命,而普光气田的天然气中硫化氢浓度高达15万ppm。如果钻井、作业及生产过程中出现高含硫天然气泄漏,复杂山地救援将十分困难,很容易发生人员伤亡等特重大事故。

2003年12月23日22时,中石油的川东北气矿罗家16H井发生井喷,喷出的硫化氢气体使243人中毒身亡。有这样的教训在前,中石化开采普光气田时可谓如履薄冰。

“我们的口号是,时刻准备着漏漏。”中石化中原油田分公司总经理、普光分公司经理孔凡群告诉《中国科学报》记者。

要想防范硫化氢所带来的威胁,中石化发现,其中有几个关键的环节。一是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,必须攻克防腐防护技术难题;二是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技术和硫磺安全储运的难题;三是必须攻克高含硫气田安全控制难题。

为了解决上述难题,中石化经过近7年的技术攻关与工业化应用,实现了普光气田的安全高效开发,创新形成了“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”。

据介绍,该项目主要包括五个创新点:一是自主创新了特大型超深高含硫气田高产高效开发技术,建成了105亿方/年的普光气田。二是自主创新了特大型超深高含硫气田防腐防护技术,国内首次实现了年产百亿方高含硫湿气的直接输送,节约了土地,减少了污染源,并降低了投资20%。三是自主创新了高含硫天然气特大规模深度净化技术,高含硫天然气处理能力达到120亿立方米/年,生产硫磺210万吨/年。四是自主创新了特大型高含硫气田安全控制技术,建立了国内首座复杂山地油气田应急救援基地,确保了生产安全。五是自主研发了三种高含硫气田关键管材,打破了国外技术垄断实现了国产化,产品性能达到了国外同类产品先进水平,价格降低了35%-50%。

中国科学院院士和中国工程院院士对普光气田的安全高效开发给予了高度评价。戴金星、郭尚平、刘光鼎、罗平亚、李鹤林、徐承恩、范维澄等7位院士一致评价认为:普光高含硫气田开发处于国际一流水平。埃克森美孚、挪威斯堪伯奥、加拿大IMV、法国国际检验局等4家国际知名公司对普光气田也进行了评价,认为技术达到国际一流水平。

据悉,这一项目研究成果共获得国家专利41项,中石化专有技术23项,登记软件著作权2项,出版专著3部、发表论文85篇,制定了63项企业标准、3项行业标准,获省部级科技进步奖一等奖5项。

## 作战前夜的遗书

高含硫气田的开发是世界天然气开发行业的一大难题,目前世界上只有俄罗斯、加拿大等少数国家掌握这一技术。与同类型的法国拉克气田、俄罗斯阿斯特拉罕气田相比,普光气田的特点在于不仅规模大,而且钻井超深。



▲作为普光气田开发的大型配套工程,普光天然气净化厂综合处理能力居亚洲第一、世界第二。  
▶位于四川宣汉县的普光镇,因发现中国最大海相整装气田而举世闻名。  
▼普光气田高含硫化氢,勘探开发风险大。



业内将钻井深度达4500米以上的气田定位为超深气田,而与拉克气田3500米、阿斯特拉罕气田3700米的井深形成鲜明对比的是,普光气田的井深达到了5974米。

普光气田的气藏中硫化氢和二氧化碳平均含量分别高达15.16%和8.64%。而井深越大,则意味着硫化氢的腐蚀性越强,开采难度更大。“正因如此,安全成了主要问题。”曹耀峰说。

此前,高含硫气田工程建设在我国没有先例,潜在安全风险很大。以管材标准为例,国际上并没有如此高含硫、井深的标准可以借鉴。为了保障安全,中石化通过一次次实验,建立了高H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>分压的腐蚀预测模型和高含硫气田选材标准,硫化氢分压拓展到10兆帕。同时,根据实际情况,研发了抗硫管材焊接工艺,集输管道一次焊接合格率达95.5%;创新了高含硫气田湿气输送“四要素”综合防腐方法,形成了特大型高含硫气田防腐防护技术,腐蚀速度降低到0.059毫米/年以下。这些创新努力形成了酸气技术设计施工技术标准和工艺规范,为同类气田的集输工程建设提供了借鉴。

“除了技术上的创新,管理的严谨与科学也非常重要。”曹耀峰说,“在普光气田项目中,科技和管理是相辅相成的。”

据了解,在项目进行过程中,把硫化氢控制在地下,控制在管中,防止硫化氢泄漏,一直是贯穿该工程安全工作的主线。而这其中的关键环节是对天然气开发井的管理。

2006年9月,川气东送指挥部正式成立。曹耀峰担任了总指挥。他回忆说,当时他们一边制定项目的规划、战略,一边请国家安监总局的专家为指挥部的十几个核心成员作硫化氢防护等方面的培训。“做领导的,以其昏昏使人昭昭是不行的。我们的五大核心技术创新无一不是围绕安全问题而来的。”曹耀峰说。

在实际工作中,中石化团队树立了“零缺陷、零容忍”的理念,首次开展了复杂山地气体扩散风洞实验,建立了气体泄漏扩散理论和安全防范标准,研发了泄漏监测、气田连锁关断、特种救援装备,形成了复杂山地高含硫气田安全控制技术。鉴于高含硫天然气会令人“一吸致命”的危险,全气田共设置硫化氢检测点1466个、可燃气体检测点509个,实现了站场、管道、净化厂实时泄漏监测与报警,硫化氢浓度在2ppm即发出报警信号,报警时间小于1秒钟,泄漏监测准确率100%,成为“世界上报警仪最密集的地方”。

即便如此,当2008年7月30日普光气田第一口井普光气田普302-2开始试气作业之前,现场的领导、技术和管理人员还是事先写下了个人

的遗书,做好了“壮士一去兮不复还”的准备。此情此景,当时身处现场的中石化中原油田分公司副总经理、普光分公司副经理王寿平至今想起,仍旧不免心潮澎湃。

## 要安全,也要效益

对于普光气田项目来说,安全是头等大事。然而,没有效益,安全开发也会成为无源之水、无本之木。

“我们钻一口井的平均成本是2亿元人民币,如果加上地面集输设备的成本,一共是3亿元人民币。如果单井产量不高,油田的效益就没有了保障,这对气田的精细描述提出了要求。”曹耀峰说。

从原计划的52口井优化到了最终的40口井,基础研究贡献功不可没。据介绍,在该项目中,中石化首次建立了高含硫气田渗流理论模型,创新了超深超难相储层精细描述技术,并在此基础上研发了气井射孔和酸压增产技术,形成了特大型超深高含硫气田高产高效开发技术,开发井成功率达100%,采收率由67.3%提高到70%。

此外,为了最大限度地动用气田储量,普光气田开发方案还要求一次射开所有气层。对于高含硫化氢的井来说,射孔技术难度和安全风险极大,射孔井段长,井身安全受到的威胁更大。此前,某国际知名的射孔技术服务公司在分析情况后,知难而退,无功而返。中石化川气东送指挥部

工程技术部门与内部专业技术队伍一道,通过自主攻关,成功解决了普光地区安全射孔的技术难题,创造了射孔1215米的世界纪录,形成了超深高酸性气井井段分段延时起爆射孔技术。这项技术填补了国内石油行业多项空白,形成4项专利技术,整体技术居国际领先水平。

气田建设初期,由于国内缺乏相关的自主产品,关键抗硫管材和装备主要依赖进口,不仅设备价格昂贵,供货周期长,而且部分设备故障频发。“当时,国外的‘双抗’(抗硫化氢,抗二氧化碳)镍基合金管每吨44万~48万元人民币。”曹耀峰说。

为此,中石化大力实施国产化战略,依托普光气田这个最苛刻的“试验场”,以“普光气田开发技术重大专项”、“普光气田开发示范工程”等为平台,携手西南石油大学、中国安全生产科学研究院、宝山东铁股份有限公司、天津钢管集团股份有限公司等全国知名科研院所和制造企业投入关键装备国产化攻关中,研发了一系列具有自主知识产权的新产品和新技术,不仅使大湾区块60%以上的关键装备实现了国产化,而且在部分关键装备上打破了国外垄断,打上了“中国制造”的烙印。

立竿见影的效果是,国产化的管材生产出来后,还没拉到现场,国外镍基合金管每吨的价格就已从44万~48万元人民币降到了24万元人民币。之后国内同类的气田开发已完全可以使用国产化的管材,摆脱了受外企制约的局面。

## 看不见的战争

在普光气田干了五年后,负责普光天然气净化厂工作的中石化工程建设公司副总经理孙丽丽最感欣慰的一点是:“普光气田的山还是那么绿,水还是那么清”。

川气东送工程有三大标志性工程,分别是普光气田、集输管道工程和普光天然气净化厂。其中,普光天然气净化厂被称为整个川气东送工程的“咽喉”。就是它,把硫化氢含量高达15万ppm、一吸足以致命的天然气,变成了安全、清洁、高效的绿色能源。

与普光气田的惊心动魄不同,净化厂每天上演的是看不见的战争。孙丽丽将其特点作了如此的总结:“净化厂的特点是本质环保,本质安全。”

据介绍,为了节约土地,减少污染源,普光气田在国内首次实现了年产百亿方高含硫湿气的直接输送。普光气田产出的天然气因为高含硫化氢,有剧毒,不经净化处理,绝对不能进入长输管线,普光天然气净化厂就承担着净化处理天然气的重要使命。

普光天然气净化厂建成之前,国内天然气净化厂规模小于30亿立方米/年,天然气含硫量低于10%。而普光气田产出的天然气,硫化氢含量高达15.16%,二氧化碳含量高达8.64%,集剧毒与强腐蚀性于一体。这种大型系列脱硫装置建设,在我国没有先例。

普光天然气净化厂主要引进美国B&V公司成熟可靠的工艺技术,确立合理的工艺路线,总硫回收率在99.8%以上。针对普光天然气高含硫化氢和二氧化碳的“脾性”,中石化组织系统的南京化学工业公司、北京化工研究院与华东理工大学合作,研究新型脱硫剂、控制二氧化碳吸收技术、新颖的脱硫技术,完成了我国第一套大型天然气净化装置的设计,使我国大型高酸脱硫净化工艺设计水平达到世界先进水平。

经过净化厂的脱硫环节,天然气中剧毒的硫化氢变废为宝。普光天然气净化厂年产硫磺210万吨,占到我国硫磺产量的45%,使我国硫磺产量翻番,并由此减少了进口,降低了价格,缓解了我国化肥原料紧张局面,支持了我国的农业生产。

## 记者手记

### 辉煌背后是低调的坚持

随着中石化“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”项目荣获2012年度国家科学技术进步一等奖的消息传出后,这两天项目各主要完成人都忙碌了起来,不得不面对各大媒体的“围追堵截”。

此前,这样一个投资规模达627亿元、相当于一个千万吨级大油田的项目为何一直默默无闻,鲜少宣传?该项目第一完成人、中石化集团公司党组成员、副总经理曹耀峰的一句话可谓一语中的:“这是一个时刻处于危险之中的项目。”

实际上,即使是已经获得了很高荣誉的现在,曹耀峰和他的团队仍旧保持着谨慎、谨慎,再谨慎的心态。他告诉记者,对于这个项目而言,安全问题是重中之重。“之前我们是担心大家麻木,现在我们是担心麻痹。”

如果说技术上的创新是解决问题的钥匙,而长久的成功则需要持之以恒的耐心。对于这样一个“七年磨一剑”的项目,记者更加佩服与尊重的是,整个团队低调的坚持,以及在日常工作中没有磨灭的激情。这也将成为他们未来迎接一个又一个胜利的“秘密法宝”。



## 海相天然气是中国油气增长主要领域

■本报记者 计红梅

1月18日,在京举行的国家科学技术奖励大会上,中石化“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”项目荣获了2012年度国家科学技术进步一等奖。该项目第一完成人、中石化集团公司党组成员、副总经理曹耀峰作为特等奖项目代表,接受了党和国家领导人颁奖。

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。2011年世界一次能源消费结构中天然气占23.7%,而我国仅占4.5%。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。

如何利用科技的力量增加我国天然气的产量,降低天然气的对外依存度,在接受《中国科学报》记者采访时,曹耀峰谈了自己的看法。

《中国科学报》:您能否谈谈自己的获奖感受?

曹耀峰:普光气田是我国截至目前发现的最大规模海相整装高含硫气田,其重要性可与三峡工程、青藏铁路、南水北调等特大型工程媲美,对我国的油气发展有重要影响。有幸参与这一工程我感觉十分荣幸,是我职业生涯里的荣耀篇章。

《中国科学报》:“特大型超深高含硫气田安全高效开发技术及工业化应用”项目的成果未来对于我国天然气开发将产生怎样的影响?

曹耀峰:我国海相领域天然气资源十分丰富,国内外勘探表明此类资源普遍含硫。随着国内高含硫天然气资源的不断发现,大规模开发利用高含硫天然气资源是我国能源领域面临的重大课题。如果不解决高含硫天然气安全高效开发问题,将制约未来我国天然气的发展。因此,这一技术意义重大。

《中国科学报》:您认为海相天然气资源的开发利用对降低我国天然气对外依存度有何重要意义?

曹耀峰:从世界范围来看,世界上90%以上的油气储量是在海相地层中发现的。但是,我国目前已经发现的油气储量以陆相地层为主,海相地层中发现的储量不足10%。中国的地质专家们一致认为,中国的海相天然气资源还有相当大的潜力。未来海相天然气将是中国油气产量增长的主要领域。

2003年,中石化在四川东北地区发现了迄今为止我国规模最大、程度最高的特大型整装海相高含硫气田——普光气田。该气田已探明储量达4122亿立方米。该勘探成果于2006年获国家科技进步一等奖。中国油气资源“二次创业”由此取得重要进展。然而,只有将海相勘探找到的资源,转化成切实的产能,才能真正具有现实意义。

普光高含硫气田安全高效开发技术的应用前景广阔。截至目前,我国海相高含硫天然气资源探明储量已超过1万亿立方米。该项目形成的理论、技术和标准极大推动了我国高含硫天然气的开发步伐,为“盘活”国内更多的高含硫天然气资源开辟出了一条成功的路径,更多的高含硫天然气储量将陆续建成产能,可有效缓解国内天然气供应紧张的局面。

《中国科学报》:下一步海相天然气资源开发有哪些规划?

曹耀峰:目前,普光高含硫气田安全高效开发技术在国内已全面应用到中石化大庆、元坝、兴隆等高含硫气田开发建设中,预计2015年可为我国新增天然气产能100亿立方米/年。

此外,鉴于我们在该项目中所展现出的实力,哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等中亚地区国家已与我们商谈高含硫气田开发技术引进及合作开发其国内高含硫天然气事宜。这标志着我国已成为世界上少数几个掌握特大型超深高含硫气田开发核心技术的国家,并跻身世界一流。该地区高含硫气田的开发利用将增加全球天然气供应量,对优化全球能源消费结构具有重要意义。