

SULIGE

苏里格气田

开发论 (第二版)

Sulige Gas Field
Development Approach (2nd Edition)

冉新权 李安琪 ◎ 编著



石油工业出版社

苏里格气田开发论

(第二版)

冉新权 李安琪 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据对苏里格气田的开发评价及其开发实践,系统地总结了苏里格气田开发过程中的经验和教训,同时阐述了岩性圈闭的大型低渗透—特低渗透砂岩气田开发的新思路和新理论,并在实践中进行了验证。本书总结的理论和实践,对苏里格气田的全面开发和同类型气田的开发具有一定的指导意义。

本书适合从事油气田开发方面的技术人员使用,也可供相关院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

苏里格气田开发论/冉新权,李安琪编著. -2 版
北京:石油工业出版社,2013. 1
ISBN 978 - 7 - 5021 - 9332 - 4

I. 苏…

II. ①冉… ②李…

III. 砂岩油气田 - 气田开发 - 研究 - 内蒙古

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 256848 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 1 月第 2 版 2013 年 1 月第 3 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:19.25

字数:490 千字 印数:5001—7500 册

定价:68.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

——为冉新权、李安琪编著的《苏里格气田开发论》出版而作

苏里格,蒙语,意为“半生不熟的肉”,也释为大地的“心脏”或“肺”。但是,汉语直读,仅字面理解,是个相当“雅”的名字,着实令人羡慕。

苏里格,位于美丽的鄂尔多斯大草原,是一块神奇的土地,是一块有许许多多可歌可泣故事的地方。成吉思汗、卫青、霍去病、李广、岳飞以此为疆场,金戈铁马,驰骋四方,留下了神话般的千古传奇。焉脂、王昭君、蔡文姬留下了血泪般的千古美谈。

苏里格气田,就在鄂尔多斯大草原。1999年钻探了苏2井,2000年在苏里格地区中部钻探成功了苏6井,获日产120万立方米无阻流量,从此发现了苏里格大气田。接着以“悠悠万事,唯此唯大”的气魄,集中油田人力、物力、财力,迅速扩大勘探成果。

2001年1月20日,中国石油天然气股份有限公司在北京举行新闻发布会,宣告中国陆上第一大气田——苏里格气田在广袤的鄂尔多斯盆地诞生。2002年度获国家科技进步一等奖,国家科技部在北京召开新闻发布会,专题向海内外媒体介绍苏里格大气田勘探获重大突破。2003年探明地质储量5337亿立方米,是国内最大的整装天然气气田。

但是,开发初期遇到了前所未有的困难。被认为是“世界级的开发难题”,被看作是“烫手的山芋”。问题的关键就是“低渗、低压、低丰度”,一时成为负面议论的话题等,使苏里格开发难以为继,被搁置了三年。苏里格成了塞北的孤雁,沙漠中的骆驼。苏里格背负沉重,其“场面”可想而知,其心情也难以言表。但这是常有的事,不足为怪,这是传统文化的不光彩面。当时,志士仁人,都如履薄冰,诚惶诚恐,夜已深,会继续,感慨之余,我曾在靖边说过一段话,“苏里格啊,苏里格!你的‘名字’很‘雅’,苏里格草原也很漂亮,但你是带刺的玫瑰,是漂亮的女人不贤惠”,可见心情之沉重。

2005年,中国石油睿智果敢的决策者,以其敏锐的洞察力和判断力,决定以市场配置资源,走科技、低成本开发之路。尔后,经过几年不懈的努力,确立了“数字化、信息化、标准化、市场化”工作目标,形成了“5+1”、“六统一”、“三共享”管理体系、配套了十二项适用新技术,苏里格开发大见成效。

现在看来,苏里格气田开发大放异彩,“带刺的玫瑰是漂亮的,漂亮的女人是贤惠的”。虽然玫瑰有刺,漂亮女人也有歹毒之人,但苏里格如亭亭玉立的漂亮少女,正在展现她那婀娜多姿、风姿绰约的无穷魅力。

古往今来,大凡要干成一件事,并不易。苏里格的成就说明,一是关键要有明白人,会干事,能干成事。苏里格开发就有这么一批人,组织者是明白人,而且还是创造者。二是市场配置资源,按经济规律运作,不逆规律而为,一切事都会顺理成章。三是组织重点技术攻关,提高单井产量,推广适用新技术、新工艺、新材料、新装置。四是全过程低成本开发,不动摇、不后

退。这就是苏里格开发的成功之道。

2007年,苏里格气田累计探明1.1万亿立方米,是名副其实的中国第一个超万亿立方米特大型气田。当年苏里格气田年生产天然气18亿立方米,日产量突破1000万立方米。2008年天然气产量将达到45亿立方米。2010年将实现年产100亿立方米。苏里格气田是个宝,也难得,来之不易,要珍惜,要呵护!我预言在不远的将来,苏里格气田将实现年产200亿立方米宏伟目标,将令世人更为振奋!

但是,苏里格气田属于典型的“低渗、低压、低丰度”气田。必须坚持“依靠科技,创新机制,简化开采、走低成本开发路子”。实现整体、规模、效益开发,始终是苏里格大气田开发要坚持的方向,而且毫不动摇,坚持到底。

鄂尔多斯盆地是个大型沉积盆地,有37万平方千米,沉积层厚度达5000~6000米,肯定是个大油区、大气区。天然气资源特别丰富。据专家推算,鄂尔多斯盆地上古生界,煤系气源岩产气量就达484万亿立方米,排烃释放量达155万亿立方米。所以鄂尔多斯盆地天然气资源量,远远不是中国石油天然气股份有限公司第三次天然气资源评价的10.7万亿立方米,而应是像一些专家预言的那样:上古10万亿立方米,下古10万亿立方米,煤层吸附10万亿立方米。如果决策得当,技术对路,极有可能建成中国21世纪最大的天然气生产基地,而苏里格大气田可能只是其中之一,那时将会令国人更为惊喜!

我在鄂尔多斯盆地工作了34年,我有这个信心。冉新权、李安琪编著的《苏里格气田开发论》一书出版,是这一开发成果的初步结晶,我表示诚挚的祝贺!品读此作,情味难尽,感慨之余,用何志新教授近读汉史赋诗一首,作为“序”的结束语,“将军功业固难封,至今陇上杏留名。二师先生凭侥幸,毕竟李广是英雄。”

历史是公正的,时间是公平的,“只有付出才有可能成功”,这是真理。苏里格气田开发大会战的开拓者和开发者才是真正的英雄!作为石油人能为中华民族伟大复兴助一臂之力,不失作为中国人的骄傲!

胡文瑞

2008年5月16日于北京

(胡文瑞,中国工程院院士,中国石油天然气股份有限公司原副总裁)

第二版前言

《苏里格气田开发论》第一版出版以来,承蒙广大读者的厚爱,两次印刷很快销售一空。为了满足广大读者的需要,让更多的人了解和关心苏里格气田,关心经济边界气藏的开发,特修改再版。尤其是该书出版至今已经5年,5年来,无论是天然气地质理论,还是苏里格气田开发运用的技术,都有了较大的变化和进步,加之世界对开发致密气藏的日益重视,更有必要对本书进行修订。

近年来,“根缘气”这一新名词进入石油、天然气地质学家的视线。根缘气(Source-contacting Gas)是一种成藏机理上的非常规天然气聚集类型。它形成的地质条件是储层致密、气源丰富、源储相通、储盖一体。致密储层中天然气的运移依靠生烃膨胀力等所产生的剩余压力差;且天然气的聚集与其气源岩紧密相连,其间不存在地层水的发育,因此没有浮力作用的产生。根据这个论述,可以断定鄂尔多斯盆地上古生界的天然气藏为“根缘气”气藏,继而断定鄂尔多斯盆地上古生界具有丰富的天然气资源,并且有大面积不含水的纯含气区域。然而,根缘气都存在于致密的储层中,鄂尔多斯盆地上古生界的天然气藏应该属于致密气藏,其中榆林气田那样的高产气田,只能看作为致密气藏中的“甜点”,而苏里格气田就是典型的致密气田。

针对致密储层,近年来水平井开发成为苏里格气田开发的主体技术。几年前,苏里格气田只是试验性地钻了两三口水平井,而2011年所钻水平井占钻井总井数的13%左右,2012年部署水平井数300口左右,要占总钻井数的30%。还设计钻水平井的“丛式井组”。近年来丛式井和水平井钻井技术配套完善,钻井周期不断缩短,达到了降低开发成本、保护生态环境的目的。

水平井布井、钻井跟踪的主要依据是通过三维地震,结合钻井资料,精细描述储层,勾画出储层的形态。这几年,苏里格气田几乎所有的新开发区域,都广泛地应用三维地震资料进行精储层细描述及油气性预测,在布井时就基本掌握了地下的砂体形态、走向和含气情况,优选有利区块进行水平井开发,提高了钻井成功率。

天然气水平井的压裂技术是苏里格气田水平井开发的技术支撑。《苏里格气田开发论》第一版出版时,还没有天然气水平井压裂工艺。然而短短的5年,天然气水平井的压裂技术已经在长庆油田试验成功,广泛地运用在苏里格气田的开发中。一井多缝的水平段压裂技术已经成熟,在苏里格气田一般一井要压裂造缝10来次,有一口井,1000余米的水平段压裂造缝18次。

“三维地震,储层精细描述,水平井多段压裂”已经成为苏里格气田近年来形成的行之有效的新的集成技术。运用这一技术链,不仅越来越得心应手地开发苏里格致密气藏,而且还钻出了一批高产井、稳产井,如在以前不被人看好的苏20井区,2011年钻出了无阻流量达每天

300 多万立方米的高产井,单井配产每天 20 万立方米,可以稳产 3 年以上。

近年来,苏里格气田除了实现“从直井开发到水平井、丛式井开发并重”的转变外,还通过密井网试验和干扰试井,优化了井网,确定了 600 米×800 米的井网优化部署,估计采收率可以由初期井网的 20% 提高到 35% 左右。近几年来苏里格气田开发在地质研究、动态分析、工艺试验和数字化管理等方面出现了不少的新成果和新认识,无疑再版书中要一并撰述,以飨读者。

第二版中保留了中国工程院院士胡文瑞教授为《苏里格气田开发论》第一版撰写的“序”。苏里格气田的开发证明了胡文瑞教授总结的苏里格气田的“关键要有明白人,还是创造者”、“市场配置资源,按经济规律运作”、“组织重点技术攻关,推广适用新技术、新工艺、新材料、新装置”和“全过程低成本开发”这四条“成功之道”是完全正确的;其“在不远的将来,苏里格气田将实现年产 200 亿立方米宏伟目标,将令世人更为振奋”的“预言”已经实现。保留这“序”,也为了让胡文瑞教授“开发苏里格气田的石油人不失作为中国人的骄傲”这鼓舞人心的语言继续激励我们,努力把苏里格气田建成中国 21 世纪重要的天然气生产基地!

本书所引用的苏里格气田天然气开发资料截至 2011 年底。

作者

2012 年 2 月

目 录

绪论	(1)
第一章 苏里格气田主要地质特征	(15)
第一节 大面积、低丰度、低渗、低压、低产的致密砂岩岩性气藏	(15)
第二节 储层的沉积模型:辫状河与曲流河沉积	(16)
第三节 储集砂体纵向上多期叠置、横向上复合连片	(20)
第四节 有效砂体规模小,横向连续性差	(22)
第五节 储层微观结构	(28)
第六节 储集砂体地质模型	(33)
参考文献	(37)
第二章 储层富集区块的筛选	(39)
第一节 富集区块的基本地质特征	(39)
第二节 富集区块筛选的技术路线	(43)
第三节 富集区块筛选技术	(44)
第四节 富集区块筛选技术的应用	(56)
参考文献	(58)
第三章 有效储层预测及井位优选	(59)
第一节 有效储层含气地球物理特征及预测的可行性	(59)
第二节 技术路线	(63)
第三节 有效储层预测的技术方法	(64)
第四节 井位优选技术流程	(76)
第五节 井位优选技术应用	(77)
参考文献	(79)
第四章 快速产能评价技术	(80)
第一节 产能评价技术的应用	(80)
第二节 修正等时试井资料分析方法的改进	(82)
第三节 一点法测试评价	(85)
第四节 快速产能评价技术	(89)
第五节 压裂水平井产能评价技术	(96)
参考文献	(99)
第五章 稳产接替技术	(101)
第一节 低压气井生产的基本特征	(101)

第二节	开发过程中储层物性变化规律	(106)
第三节	低渗透带对气井生产的补给作用	(114)
第四节	合理配产分析及开发井网论证	(118)
参考文献		(135)
第六章	快速钻井技术	(136)
第一节	技术发展历程	(136)
第二节	快速钻井技术	(142)
第三节	应用效果分析	(148)
第四节	丛式井组钻井技术	(149)
第五节	水平井钻完井技术	(156)
参考文献		(168)
第七章	多层多段压裂技术	(169)
第一节	水平井多段压裂技术	(169)
第二节	直井多层连续分压技术	(181)
参考文献		(185)
第八章	井下节流技术	(187)
第一节	井下节流技术的应用	(187)
第二节	井下节流技术原理	(193)
第三节	井下节流技术攻关及配套完善	(196)
第四节	应用效果	(199)
参考文献		(202)
第九章	排水采气技术	(203)
第一节	排水采气技术的优选	(203)
第二节	低压低产气井排水采气工艺技术	(206)
第三节	应用效果	(215)
参考文献		(221)
第十章	地面工艺技术优化	(222)
第一节	技术背景	(222)
第二节	集输工艺形成	(224)
第三节	中低压集气工艺技术	(230)
第四节	多井单管串接集气工艺技术	(234)
第五节	增压开采技术	(239)
第六节	低温分离脱油脱水工艺技术	(243)
第七节	应用情况	(248)
参考文献		(248)

第十一章	气田数字化管理技术	(249)
第一节	技术背景	(249)
第二节	数字化生产管理与控制平台功能	(250)
第三节	数字化管理效果分析	(260)
	参考文献	(261)
第十二章	气田“标准化设计、模块化建设”	(262)
第一节	技术背景	(262)
第二节	标准化设计	(262)
第三节	模块化建设	(266)
第四节	标准化造价	(267)
第五节	规模化采购	(268)
第六节	建设标准化实施效果和重要意义	(270)
第十三章	关于大型致密砂岩岩性气藏的开发问题	(272)
第一节	致密气藏(储层)的定义、成因及特点	(272)
第二节	开发低渗透(和致密)储层天然气的意义	(274)
第三节	国外致密气藏开发实例	(276)
第四节	我国的低渗透(致密)砂岩天然气田	(282)
第五节	大型致密砂岩岩性天然气田的开发	(288)
	参考文献	(295)
	后记	(296)

绪 论

苏里格气田是迄今为止我国陆上发现的最大的天然气田,也是致密砂岩天然气气藏的典型代表。随着我国国民经济持续快速增长、工业化不断推进、城市化步伐的加快,天然气作为一种优质、高效的清洁能源和化工原料,市场需求迅猛增长,供需矛盾日益突出。估计在今后较长的一段时期内,动用类似苏里格气田致密储量的比例将越来越大。因此,苏里格气田的规模有效开发,必将对于致密气田开发技术的进步、致密储量的经济有效开发具有显著的意义。

苏里格气田的开发,经历了一个曲折发展的过程。这个过程,包含着辩证地、客观地认识苏里格气田的过程;包含着不断发展的、进步的开发先导性试验过程;包含着解放思想、实事求是的思想路线和实践过程;包含着科技进步、技术创新的艰辛探索过程。把这段不平凡历程,特别是苏里格气田特色开发技术、开发模式以及这些技术、模式形成的过程,汇编成《苏里格气田开发论》,目的是抛砖引玉,启发思路,推动致密气田开发技术的进步,推动致密气田开发水平的不断提高。

一、不懈的探索——苏里格大气田的发现

2001年1月20日,北京,中国石油天然气股份有限公司举行新闻发布会,宣告中国陆上第一大气田——苏里格气田在广袤的鄂尔多斯盆地诞生。2002年,国家科技部在北京召开新闻发布会,专题向海内外媒体介绍了中国石油长庆油田分公司天然气勘探获得重大突破的情况。

20世纪80年代,在对鄂尔多斯盆地地质认识不断深化的基础上,长庆油田打破单一构造指导找气的思路,实施了从盆地边缘勘探向盆地腹地勘探的转移。按照“主探下古,兼顾上古”的方针,1989年,在陕西靖边境内,以陕参1井为标志的下古生界奥陶系风化壳岩性气藏勘探取得重大突破,当时国内最大的整装天然气田——靖边气田在鄂尔多斯盆地诞生。

在下古生界气藏勘探的过程中,科研人员发现,鄂尔多斯盆地上古生界广覆式生烃,大面积含气。在此理论的指导下,长庆油田上下古并重,及时对上古生界气藏展开评价勘探。评价结果是上古生界沉积物源充足,砂岩储层厚度大、粒度粗,多期叠合,呈带状展布,延伸距离长,在整个盆地都有分布。1996年,以陕141井为代表的上古生界山西组山₂段气藏勘探取得突破,上古生界第一个储量上千万立方米的整装气田——榆林气田发现。从此揭开了上古生界天然气规模勘探的序幕。

2000年,长庆油田按照“区域展开,重点突破”的方针,加强对盆地上古生界天然气富集规律的研究,从大的沉积格局、区域构造发育背景及气藏富集因素入手,确定了大型河流三角洲复合砂体——盆地大面积展布的二叠系石盒子组砂体为勘探的重要目标。8月26日,在鄂尔多斯盆地中部苏里格庙地区,苏f井“仰天长啸”,喷出了 $120.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,标志着苏里格大气田的发现。

苏里格气田位于内蒙古鄂尔多斯市境内(图0-1),北起敖包加汗,南至安边,东到桃利庙,西达鄂托克前旗,勘探面积 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,天然气资源量 $3.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。主力产层为二叠系石

盒子组盒₈气层,岩性为三角洲平原分流河道沉积中粗粒石英砂岩,储层以粒间溶孔为主,发育少量原始粒间孔、晶间孔,平均孔隙度5%~12%,平均渗透率0.06~2mD,气藏压力系数0.87,埋深3300~3500m。天然气甲烷含量在90%以上,不含H₂S,CO₂含量在1%以下。盒₈气藏属岩性圈闭气藏,储层分布受砂体和物性双重控制。无边底水,属定容弹性驱动气藏。

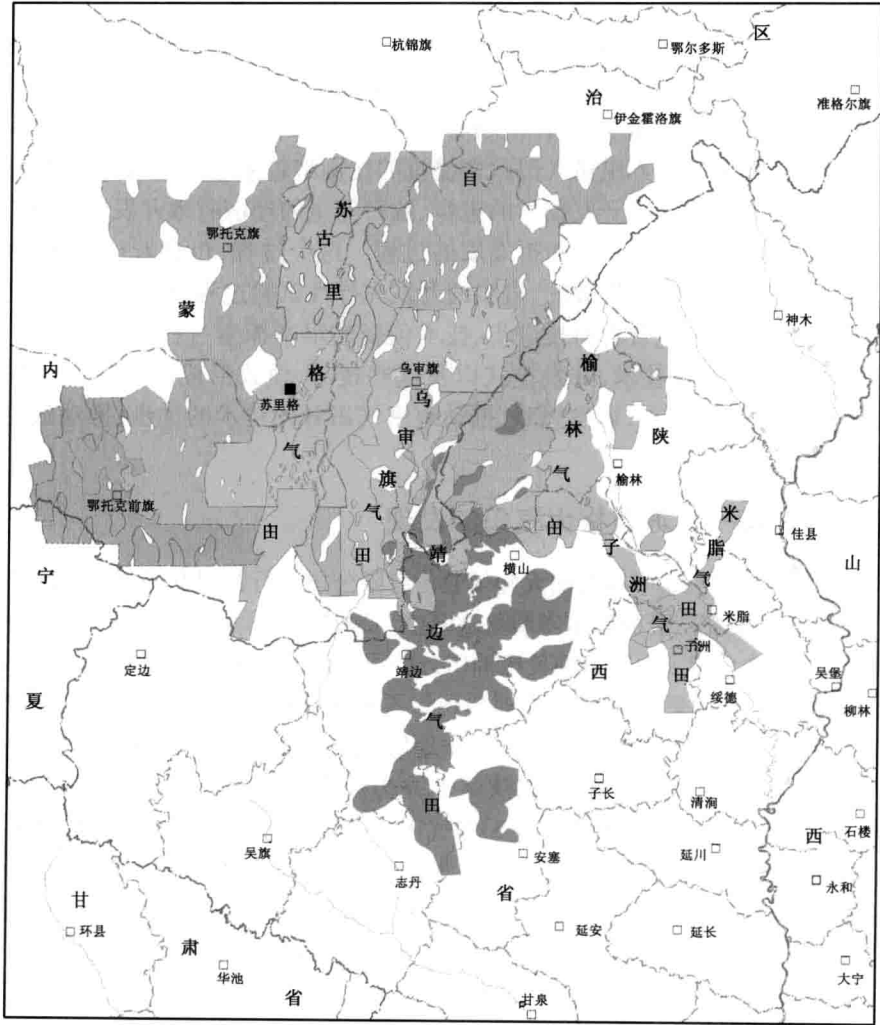


图0-1 苏里格气田地理位置图

继苏f井获得高产后,苏d井、苏e井、桃e井、苏a0井等探井一点法试气都相继获得中—高产工业气流,大气田轮廓基本清晰,主力含气砂体展布形态明确,天然气勘探形势喜人。2001年、2002年长庆油田集中评价苏里格,先后完钻探井39口,2001年、2003年两次提交储量,通过国家矿产资源储量委员会(简称国家储委)认定,苏里格气田探明天然气地质储量达 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。2007—2010年,每年新增基本探明储量超过 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至2010年底,累计探明储量、基本探明储量达 $3.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,并有更大的远景规模。

苏里格大气田的发现,标志着我国首个世界级大气田的诞生。它的发现,极大地鼓舞了我

国天然气下游市场的信心,也增强了长庆油田加快天然气勘探开发步伐的信心。

二、苏里格气田是一个什么样的气田

苏里格气田巨大的资源优势,如何转化为经济优势?在下游市场迫切需求天然气的情况下,认识苏里格气田、继而开发好苏里格气田迫在眉睫。

在苏里格气田勘探阶段,10口探井试气平均无阻流量达到 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,当时普遍认为苏里格气田是一个优质的高产气田。

2001年,在苏里格气田的动态评价过程中,长庆油田对苏d井、苏e井、苏f井等5口井作了修正等时试井,主要任务是评价储量和单井产能。试验设计了四个开关工作制度和一个延续流量工作制度。每一个工作制度开井时间和关井时间是12h,每个工作制度产量依次递增。当时的试井、试采都是基于高产的思路,单井试采配产都在 $(30 \sim 40) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $(20 \sim 30) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。试验结果发现,在开关工作制度阶段,气井油套压下降快,延续流量阶段压降也很快,关井一到两个月后,压力很难恢复到原始地层压力,这一结果让大家很吃惊。开发人员初步认识到苏里格气田单井控制储量小、非均质性强、连通性差,因此压力恢复缓慢。

2002年,为了进一步认识苏里格气田,长庆油田优选区块部署两口水平井进行试验。当时的思路是基于苏里格气田压力下降快、砂体连通性差的特点,希望通过水平井的水平段扩大渗流面积并沟通更多的含气砂体。苏平a井水平段869m,其中气层段120m,含气层段75m(图0-2)。实钻结果表明,单个气层在横向甩开几百米甚至几十米的情况下,储层物性就会发生很大的变化,含气砂体变薄,甚至尖灭。由于当时地震预测地下含气砂体技术不过关,依靠水平井连通多个含气砂体,提高单井产能的愿望没有实现。

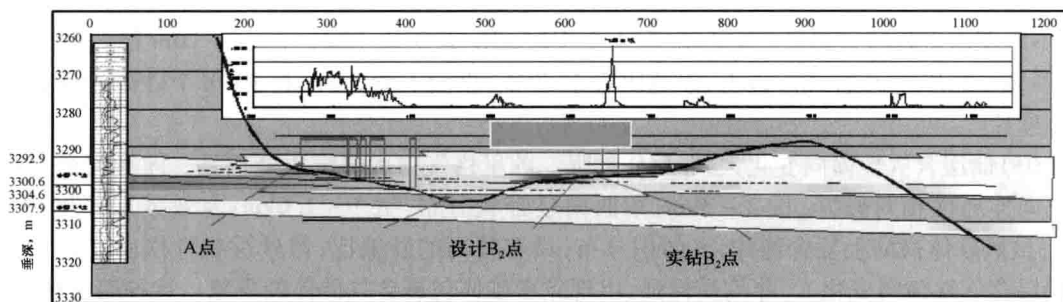


图0-2 苏平a井钻井效果综合图

在水平井试验的同时,长庆油田进行了14口井的大规模压裂试验。主要施工参数为:支撑剂(陶粒) $70 \sim 100 \text{ m}^3$,排量 $4 \sim 5 \text{ m}^3/\text{min}$,平均砂比 $28\% \sim 36\%$,采用 $3\frac{1}{2}\text{in}$ 油管注入。

当时的思路主要是基于苏里格气田开发评价前期试验过程中表现出来的低渗、低压、低产特性,希望通过大规模压裂改造局部储层,达到沟通含气砂体、增强连通性、提高单产的效果。试验结果表现出增产量与加砂规模不匹配的矛盾,利用大规模压裂沟通多个砂体的预期目标也没有实现。

2003年,为进一步认识储层空间分布特征,长庆油田开辟了苏f开发试验区,沿苏f井东西向(井距800m)部署了12口加密解剖井。同时开展了地震攻关、欠平衡、小井眼钻井、 CO_2

压裂等一系列新技术新工艺试验。这时的试验思路已经根据前一阶段的结果进行了调整,主要是在储层宏观认识和工艺技术效果的基础上,进一步深入认识储层,进一步检验工艺技术的适应性。钻井结果表明砂地比高,有效储层薄,储层横向变化大,单井可对比性差,气井稳产时间短、递减快,进一步说明储层的非均质性强,也反映了工艺技术和开发政策在一定程度上还不适应苏里格气田的实际,苏里格气田的复杂性和开发难度进一步显现。

在苏里格气田开发前期评价的三年内,长庆油田在苏里格气田累计钻开发评价井 25 口,开发试验井(加密解剖井)12 口,开发井 17 口;开展二维地震 614km,三维地震 200km²,三维多波地震 100km²,三维三分量 VSP 测井(井下地震测井)1 口;开展水平井开发试验 2 口,大型压裂 8 口,CO₂ 压裂 8 口,欠平衡钻井试验 4 口,小井眼 6 口,分层压裂 7 口;进行了产能试井,产气剖面测试 5 口,压力恢复试井 9 口,干扰试井一个井组;围绕寻找高产富集区,提高单井产量、降低开发成本进行了十多项专题研究,包括储层预测、二维、三维地震资料采集、处理解释等。同时还开展了采气工艺、地面流程等试验。

如何评价苏里格气田?社会各界和业内专家都高度关注,关于苏里格气田好坏的争论也喧嚣尘上。有些人认为苏里格气田可以实现效益开发,有些人认为苏里格气田是边际气田,有些人甚至认为苏里格气田根本就是无效气田。尽管人们对苏里格气田的认识还有些迷惑,但是前期试验和综合研究的效果表明,苏里格毫无疑问是大气田,是属于鄂尔多斯盆地特有的一种类型的大气田。

(1)气田储量落实。通过开发井及开发地震资料,经国家有关机构以及五家外国公司对苏里格气田的进一步评价,证实苏里格气田的储量是落实的,而且面积大、资源量大,在一定的技术条件下,可以进行有效开发。

(2)砂体多期叠置并复合连片。苏里格气田上古气藏地层具有典型的陆相河流沉积特点,不同期次沉积特点显著,其中盒₈有 4 个小层,山₁有 3 个小层。在 60~70m 厚的盒₈地层中,砂体平均厚度可达 30m 以上,砂地比近于 50%,纵向上盒₈、山₁有 10 多个砂体相互叠置、复合连片。

(3)储层含气性横向变化大,非均质性强。苏里格气田优势沉积微相是心滩和河道;砂体南北向连通性相对较好,长 2~3km;东西向呈带状分布,宽 1~1.6km;有效砂层厚度 10~15m;虽然砂体横向上复合连片,大面积分布,具有较高的砂地比,但砂层物性横向变化快,导致储层含气性横向变化大,非均质性强,出现致密砂体包裹含气砂体的现象。这种储层特征决定了苏里格气田特殊的非均质性。

(4)大面积含气、局部相对富集的岩性气藏。苏里格气田上古气藏区域构造平缓,砂体总体发育,主要的产气层山₁段一盒₈段在整个平面上连续分布,钻井结果显示井井有气,印证了苏里格气田大面积含气的认识。同时,苏里格气田以隐蔽岩性气藏为主,实钻过程中出现高产井说明在局部是可以形成相对富集区的。

(5)典型的“低渗透、低压、低产、低丰度”气田。大量数据表明,苏里格气田是典型的低渗透(0.06~2mD)、低压(压力系数 0.87)、低产[(1~2)×10⁴m³/d]、低丰度[(1.1~2)×10⁴m³/km²]气田。在生产动态中表现为气井初期递减快,中后期递减慢,在较低井底流压下,气井表现出一定的稳产能力。

“如何认识苏里格气田”这一环节是苏里格气田开发进程中的一个重要环节。苏里格气

田的认识过程,是一个循序渐进、由浅入深、由表及里的过程,这个过程对苏里格气田的有效开发起到了十分关键的作用。在围绕如何提高单井产量、如何经济有效开发苏里格气田的技术攻关中,广大科技人员始终坚持“实践—认识—再实践—再认识”的辩证唯物主义认识论,在苏里格气田储层分布规律、开发主体技术适应性等方面遇到困难的情况下,迎难而上、锲而不舍地开展试验评价,认识不断深入、不断提高、不断升华,逐步揭示了苏里格气田的真面貌。特别是寻求苏里格气田单井实际产能的过程,集中地体现了认识转变、思路转变的发展过程。在试验初期,人们认为苏里格气田高产,估计单井无阻流量在百万立方米以上,设计单井产量都在 $(40 \sim 50) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并围绕这一目标进行了多层次、多角度的攻关试验,结果发现压力迅速下降,产量迅速降低,关井一段时间后压力也难以恢复到原始水平,这一结果使大家认识到苏里格气田并不是想象般的高产,随后试验产量降低到 $(10 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,结果发现产量波动较大,压力依然下降很快。这时,有人认为苏里格气田开发技术难以突破,单井难以实现高产。当把单井产量进一步降低到 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右的时候,在保持稳产上仍然存在比较大的困难。这时有专家形容苏里格气田为“漂亮的媳妇不贤惠”。在这样的情况下,是继续加大试验力度,追求苏里格气田的单井“高产”,还是转变思路,直面苏里格气田“低产”的实际,寻求针对性的技术措施,直接关系到苏里格气田的命运。在认真反思、总结过去的基础上,2005年,科研人员转变思路,把苏里格气田的单井平均产量定位在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,把苏里格气田定位为一个储量巨大、储层非均质性极强、典型的“四低”气田。从单井“高产”到“低产”思路的重大转变,对于深化苏里格气田开发技术研究,促进苏里格气田开发成本降低,实现苏里格气田经济有效开发起到了重要的作用。

2006年时任中国石油天然气集团公司副总经理、股份公司总裁的蒋洁敏给予苏里格气田开发高度评价:“苏里格气田的开发是解放思想、勇于实践的结果;党的思想路线——解放思想,实事求是,一切从实际出发,在苏里格闪闪发光;大庆油田的勘探开发是实践“两论”的结果,苏里格气田的开发也是学习“两论”、实践“两论”的结果。”

三、苏里格气田开发为什么难

经过3年多的前期评价和大量开发试验,人们认识到苏里格气田不仅是一个世界级的气田,它的开发也是一个世界级的难题。

发现苏里格气田的长庆油田,在低渗透、特低渗透油气田勘探开发技术的研究与应用上创造了巨大成就,成功开发了以安塞油田、靖安油田、靖边气田、榆林气田为代表的一大批低渗透油气田。强大的低渗透研发能力、先进的低渗透研发技术,使鄂尔多斯盆地发展成为我国重要的石油天然气生产基地之一,同时形成了“安塞模式”、“靖边模式”等致密油气田高效开发的模式。苏里格气田发现后,长庆油田公司除了加强力量进行内部集中攻关外,还引进BP、Phillips、Total、Burlington、Schlumberger、BJ等国外石油公司,开展了气藏评价和针对性技术试验。试验结果表明,苏里格气田是迄今为止致密气田领域内开发难度最大的气田。

(1) 难点一:有效储层难以识别,井位优选困难。

传统的储层识别技术主要是根据地震和地质资料,通过数据处理和解析发现含油含气层位,一般砂岩是油气聚集的主要场所,储层的物性也是比较接近的。这样,找到含油含气层系中的砂体也就是意味着找到了有效储层。但是苏里格气田由于非均质性极强,导致有效储层

难以识别。从地震资料上看,苏里格气田主力产层盒。层内各种岩性以及有效储层与之间波阻抗没有固定的关系,尽管砂体是连续的,但有效砂体可能是孤立的、分散的,表现在常规地震反射没有特定的响应,预测存在多解性,不能从根本上解决苏里格气田有效储层的预测问题。从钻井资料上看,通过对全区各小层砂岩、有效砂岩的钻遇率统计,各小层砂岩钻遇率一般大于 50%,而有效砂岩钻遇率一般为 20%~40%,这就得到一个结论,找到砂体并不是找到了有效储层,有效储层难以识别直接导致井位优选困难(图 0-3)。

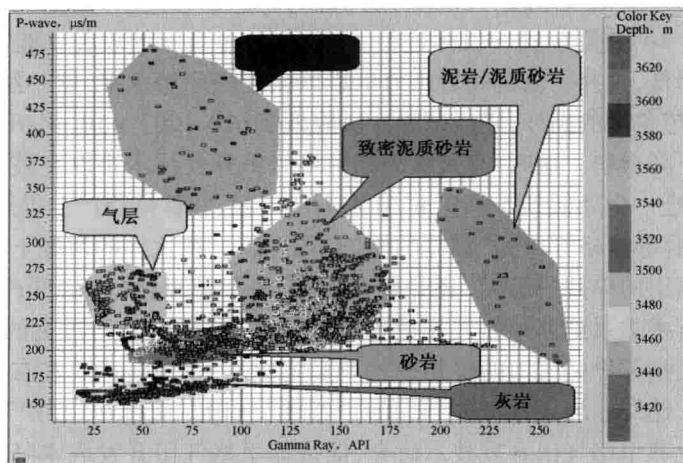


图 0-3 纵波与自然伽马交会图

(2) 难点二:单井控制储量少,经济有效开发难度大。

尽管苏里格气田含气面积大,但是由于储量丰度低,储层非均质性严重,导致单井控制储量小,气井产能差异大,压力下降快,而且通过水平井、大规模压裂改造等技术手段提高单井产量的效果都不理想。因此,科研人员根据开发评价阶段气井储层、试气和试采的特征,用储层最大单层有效厚度、累积有效厚度、压力恢复速率、无阻流量等指标,将苏里格气田的气井分为 I、II、III 类井, I 类井初期配产 $(2 \sim 3) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, II 类井初期配产 $(1.5 \sim 2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, III 类井初期配产 $(0.7 \sim 1) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在对试生产阶段生产数据的综合分析评价后认为,按照评价常规开发的投入和产出计算,即使苏里格气田气井全部是 I 类井,苏里格气田的开发都没有经济效益(图 0-4)。

(3) 难点三:新工艺、新技术试验未达到预期效果。

在苏里格气田前期评价及先导性试验中,应用了大量新工艺、新技术,包括三维多波、二维多波地震,水平井、欠平衡钻井、空气钻井, CO_2 压裂、大规模压裂等各种工艺技术,科研人员期望通过新工艺、新技术,进一步提高有效储层的预测成功率,进一步提高布井成功率;也期望通过各种不同类型的钻井技术、压裂技术,有效保护储层,改善储层的连通性。这些试验,吸引了斯伦贝谢、贝克休斯、BJ 等著名的国际油气工程技术服务商参与,但是都未达到预期效果。

(4) 难点四:非均质性强,缺乏类似气田开发经验。

苏里格气田非均质性强特点,既不同于国外的低渗透气田,比如美国圣胡安盆地的 Pictured Cliffs 气田,也不同于国内的其他气田,如川东北、塔里木克拉-2、青海涩北气田,甚至与

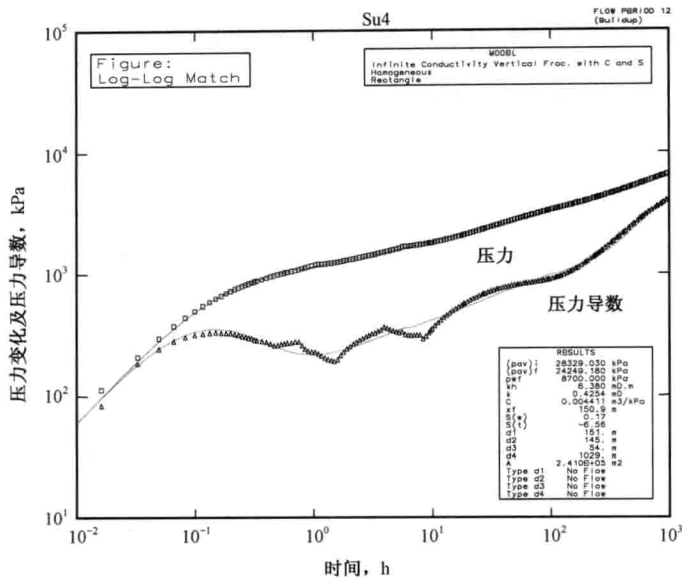


图 0-4 气井试井曲线图

“一母所生”的靖边气田、榆林气田、乌审气田的储层性质也完全不同。苏里格气田的非均质性,不仅表现在储层横向上展布变化大,纵向上层位多且层位之间有隔夹层,而且还表现在储层的物性变化也很大。对于这一类型的储层,开发人员没有现成的经验,也没有可以照搬的模式,只能在实践中摸索前进。

苏里格气田开发的难点,人们有不同的认识。有些人认为是技术不够先进,技术不适应,难以实现苏里格气田的有效开发;有些人认为气价低、成本高,人不敷出,难以实现有效开发;有些人认为苏里格气田从发现到前期评价只用了很短的时间,对于一个 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 面积的大气田,仅仅几十口井、几个试验就完全认识苏里格气田,还欠火候。这些认识,都是苏里格气田开发难的一些反映。

在苏里格气田发现初期,由于勘探高产井的发现、大气田“横空出世”的喜悦以及对苏里格气田高产的期望,在工作量很小的情况下,人们的认识先入为主,认为苏里格气田是一个常规气田,能够实现高产高效开发,这种观念在一段时间内成为一种思维定势,因为对困难估计不足,在试验结果不理想的情况下,一些人对苏里格气田产生失望悲观情绪,不能正视困难、转变观念,人为地制造了主观上的困难。

油气田勘探开发由于一次性投入大,因此也被人们认为是风险比较大的行业。苏里格气田的开发,由于在前期内没有取得突破,开发的整个业务流程,包括研究、布井、钻井都面临着很大的压力,这时的投资试验,人们在心理上难免有“冒险”和“风险”的想法,由于没有现成经验,前期开发试验也没有展示出良好的方向,因此,继续加大试验的力度,无论是人们的心理,还是投资和成本都面临着较大的压力。

到 2003 年底,苏里格气田的单井建井综合成本控制在 1200 万元内,地面建设投资控制在 350 万元内。根据对苏 f 井区试采生产井生产结果的初步评价结果,认为单井平均可采储量只有 $1600 \times 10^4 \text{ m}^3$, I 类井和 II 类井合计单井累积可采储量为 $1950 \times 10^4 \text{ m}^3$,还不到 $2000 \times$