

# 普光气田高效井设计技术

何生厚<sup>1</sup>, 孔凡群<sup>2</sup>, 王寿平<sup>2</sup>, 曾大乾<sup>2</sup>

(1. 中国石化川气东送建设工程指挥部, 四川达州 635000; 2. 中石化中原油田普光分公司, 四川达州 635000)

**[摘要]** 普光气田是我国目前发现的最大海相气田, 具有高含硫化氢、超深层、储层非均质性强、气水关系复杂等特点。国内没有成功开发类似气田的先例。在普光气田开发建设过程中, 实时跟踪新井资料, 动态开展沉积微相、储层预测、含气性预测等研究, 及时优化井位设计, 培育高产气井, 逐步完善形成了一套高效井设计技术, 为实现普光气田高效开发提供了强有力的技术支撑。

**[关键词]** 碳酸盐岩; 沉积微相、储层预测; 含气性预测; 高效井; 设计

**[中图分类号]** TE1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)10-0024-05

## 1 前言

普光气田具有高含 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、埋藏深、储层巨厚、非均质性强、气水关系复杂等特点, 国内没有类似气田成功开发经验可供借鉴; 与国外类似的法国 Lacq、美国 Madden 等气田相比, 由于超深和 H<sub>2</sub>S 分压高, 单井投资达 2 亿元以上, 开发难度更大。如何安全、高效开发普光气田, 是摆在中国石化人面前的一大难题。在普光气田开发方案设计过程中, 为实现高效井设计, 针对普光气田特点, 重点开展了沉积微相细化技术、储层预测技术和含气性预测技术攻关研究, 动态跟踪开展沉积微相、储层预测和含气性预测研究, 不断提高储层预测精度。通过不同井型适应性研究和创新性工程技术的结合, 反复优化, 形成了高效井设计技术。在原开发方案设计的 52 口井的基础上, 优化为 40 口井的方案, 并保有相同的生产能力。

## 2 碳酸盐岩储层沉积微相细化技术

基本原理主要是不同沉积环境形成的岩石, 其储层孔隙结构和储层物性存在差别, 而这些因素形成的物理性质差异可在各种测井上出现差别响应。根据各种测井信息的集总, 可形成随井身岩相变化

而引起岩石物理变化的连续电相剖面。再通过聚类分析建立起测井岩相的数学模型, 通过误差判断将其他井电相剖面转化为测井岩相剖面, 从而达到利用测井信息定性识别岩相的目的<sup>[1,2]</sup>。

储层沉积微相细化研究技术流程为: a. 四级地层层序研究, 根据暴露标志并结合沉积相带的变化、沉积物的堆积样式及测井曲线特征等研究层序界面特征, 普光地区地层四级层序界面多是岩性的突变面、沉积相转换面, 或界面在 GR 曲线上具有 GR 值正向漂移的特征, 而界面上下成岩作用也常常不同。进一步将飞仙关组划分为 2 个三级层序 9 个四级层序, 长兴组划分为 2 个三级层序 5 个四级层序, 普光地区四级地层层序基本完整, 可对比性强<sup>[3]</sup>; b. 建立测井相与岩相对应关系模型, 对单井的测井资料进行环境校正与标准化处理后, 通过取心观察、薄片鉴定等确认岩相标准层的岩相与测井相的对应关系, 普光气田根据钻井取心、录井岩屑分析等资料共划分了 16 种岩相, 其中有效储层共有 7 种岩相, 包括泥晶云岩、结晶云岩、鲕粒云岩、砂屑云岩、砾屑云岩、礁前角砾云岩以及障积礁云岩; c. 应用模式聚类识别岩相。模式聚类从图形的角度来讲就是将需要判别岩相的测井数据套用在各模式岩相的特征图版上(见图 1), 判断其相似程度, 找出与其最相似的模

**[收稿日期]** 2010-07-28

**[作者简介]** 何生厚(1946-), 男, 江苏宜兴市人, 教授级高级工程师, 长期从事油气田开发研究; E-mail: hesh6312@126.com

式作为这个数据点的模式。普光地区微相与岩相具有较好的对应关系,根据标志井(普光2,6,302-1等井)建立的测井相与岩相对应关系模型,分别对每口井进行岩相识别,并结合地震相研究结果,建立沉积岩相纵横相骨干剖面(见图2),并开展沉积微相纵横向展布特点研究<sup>[2,4]</sup>。

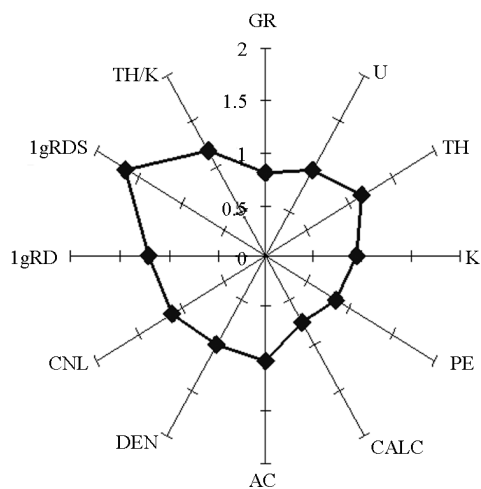


图1 鲕粒白云岩特征图版

Fig. 1 Characteristic pattern of oolite dolomite

注:GR - 自然伽马;U - 自然伽马能谱测井中铀的含量;TH - 自然伽马能谱测井中钍的含量;K - 自然伽马能谱测井中钾的含量;TH/K - 钍和钾含量的比值,就是上面两天曲线测量值的比值;PE - 岩性密度测井;CALC - 井径;AC - 声波时差测井;DEN - 补偿密度;CNL - 补偿中子;LgRD - 深侧向电阻率值的对数值;LgRDS - 浅侧向电阻率值的对数值

研究认为,普光地区发育开阔台地、局限台地、蒸发~局限台地、台地边缘、台缘斜坡~陆棚5个相,台坪、泻湖、台缘礁滩等8个亚相和相应的30余个微相,各种相带(或微相)交错分布。飞仙关组和长兴组储层发育受边缘滩亚相和边缘礁亚相控制明

显,I,II类储层主要发育于鲕粒浅滩、粒屑浅滩和生物礁滩。

### 3 礁滩相碳酸盐岩储层预测技术

高效井设计的目的是单井钻穿尽量多的储层,特别是优质储层,培育高产井。普光气田气藏埋深一般在6000m左右,同时受上部膏盐岩影响,造成飞仙关和长兴组地震响应特征小,II,III类储层与围岩难以有效区分;再加上逆断层、储层非均质性强的影响,给储层预测带来一系列技术难题,直接影响储层预测精度。基于此,普光气田储层预测技术研究的总体思路就是优选多种地震属性参数,集成有效预测方法,克服礁滩相储层埋藏深、地震响应特征小和地质复杂造成的困难,最终实现精确预测储层的目标。

1)利用多元线性回归和神经网络算法,提高多属性预测精度,宏观了解储层空间展布。属性分析技术在国内外储层预测应用中相当广泛,它主要是分析地震波的速度、振幅、相位、频率等参数的变化幅度范围与油气的对应关系。由于不同岩石之间的物性差别较小,单属性分析技术存在多解性问题,预测精度相对较低。为此,采用多属性分析技术,利用多元线性回归和神经网络计算法降低多解性带来的预测不确定因素,达到提高井旁的吻合精度。以孔隙度多属性分析为例,通过对普光主体井点处的储层孔隙度与28种地震属性中相关性分析,相关性最好的绝对振幅仅为0.25。通过采用多元线性回归算法,优选出一组与孔隙度最优属性进行拟合,使得相关性达到0.47<sup>[5,6]</sup>。多属性分析后,通过选取样本点,利用神经网络算法,最终相关性达到0.79。

2)采用岩石物理建模技术,实现储层厚度预测的量化。国内外没有成熟的针对碳酸盐岩的岩石

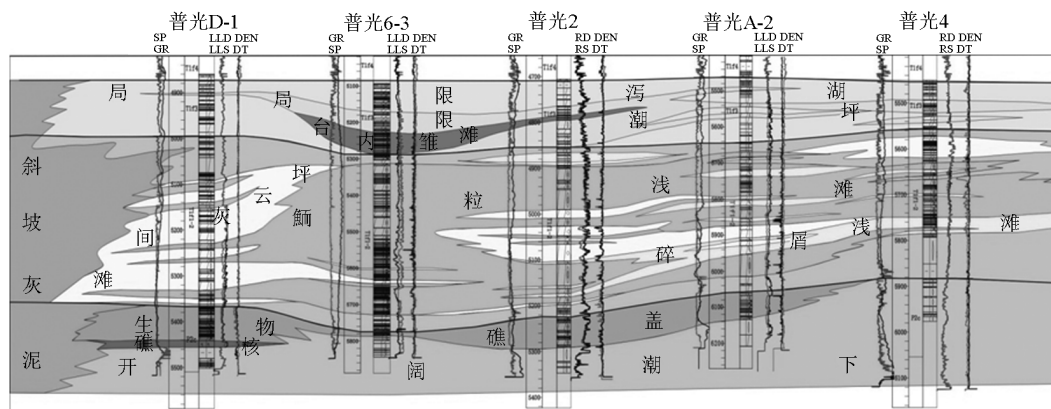


图2 沉积微相骨干剖面

Fig. 2 Main section of microfacies

物理建模技术可借鉴,导致量化标准不确定,预测精度低。针对普光气田礁滩相储层孔隙、裂缝并存的特点,参考碎屑岩岩石建模思路完善普光气田岩石模型。首先,引入碎屑岩 Xu-White 模型,在刚性孔隙的基础上增加微裂缝,扩展到岩石模型中;其次,利用速度和孔隙度数据估算孔隙类型,采用 Gassmann(加斯曼)方程进行流体置换;最后,将裂缝引起的非均质性都加入模型中,计算  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  等参数,寻找区分储层与非储层的波阻抗范围<sup>[5,7]</sup>。分析结果:纵波波阻抗能够将 I, II 类储层与非储层有效区分开来(见图 3),实现了储层厚度预测的量化。

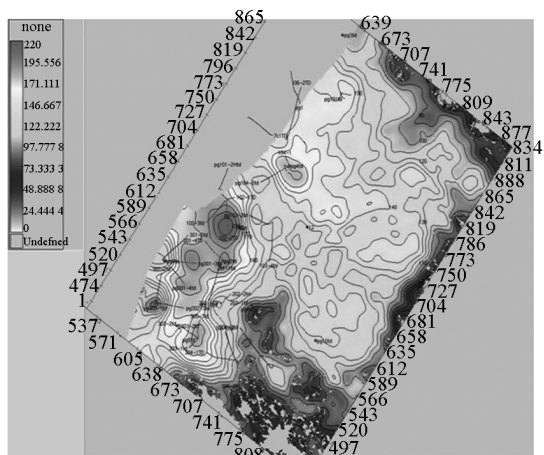


图 3 普光气田主体飞仙关组预测储层等厚图  
Fig. 3 Isopach map of reservoir prediction of Feixianguan Formation in mainbody, Puguang Gas Field

3) 储层预测参数优选等技术是大幅度地提高预测精度的关键技术。普光气田发育逆断层,储层非均质性强,已有的资料井以大斜度井和水平井为主,这些复杂因素给地质模型的构建带来了一定的难度,采用怎样的方法解决大斜度井的时深标定、逆断层建模、非均质低频模型建立问题,成为精细地质建模的关键。在时深标定方面,通过采用井控制下基于模型的子波相位—幅度谱估算方法,使大斜度井的时深标定由常规雷克子波标定的 0.3 提高到 0.8 以上。在逆断层建模上,采用三维建模技术构建精细的地质模型,消除断层附近储层扭曲的问题,同时利用高频滤波技术,消除碳酸盐岩储层非均质性的影响。地质模型的好坏,并非取决于某一项技术的优势,主要取决整体的应用<sup>[7]</sup>。准确的子波、合理的标定结果、精细的低频模型三者之间密不可分,通过不断迭代循环修正,最终得到一个精

准的地质模型。

在储层预测技术研究、应用过程中,针对普光气田超深层礁滩相碳酸盐岩储层特点,借鉴国内外先进思路和方法,优选多种属性参数和预测方法对飞仙关组和长兴组储层进行储层预测对比研究,并对预测成果进行实钻检验。通过反复优化,逐步集成基于岩石物理模型的多属性参数的神经网络联合反演方法,克服各种多解因素的困扰,有效解决储层预测精度不高的难题。为多打高产井提供了有利的技术保证。

#### 4 礁滩相碳酸盐岩储层含气性预测技术

在普光气田,笔者优选数据结构而不是传统的数值变量来研究储层含气性。地震数据体结构特征是指地震数据体中每一地震道离散数据点按时间顺序排列所显示的波形特征,它有两层涵义:一是纵向上的时间顺序排列;二是横向上的空间组合变化特征。应用地震数据体结构特征法预测储层含气性,就是研究地震数据的排列组合特征与含气性的关系,最终达到预测油气层的目的<sup>[8]</sup>。

首先,提取每一地震振幅数据道数据,同时对数据道数据进行累加生成处理;然后,对于每一个地震道数值建立 GM 模型并确定异常值范围,同时划分地震数据体结构特征的灰色异常系统;其次,对比井上的含油气情况与计算的灰色异常情况,进行有井和无井的关联分析;最后,根据关联分析结果进行排序,确定异常时段。建立地震数据体结构特征异常值分布分类剖面图,预测描述气层纵向展布特点及气层品质(见图 4);建立地震数据体结构特征异常值分布分类平面图,预测描述含气区范围和品质。飞仙关组—长兴组地震数据体结构异常值计算分析认为,普光地区地震数据体结构异常值分布范围在 200~680,其中,异常值小于 350 为非含气区,异常值大于 350 以上为含气区;平面上飞仙关组—长兴组最大含气面积 52.1 km<sup>2</sup>, I + II 类含气面积 35.7 km<sup>2</sup>。飞一、二段主力层系,气层厚度一般为 150~350 m,气层连通性较好;长兴组气层厚度一般为 20~150 m,气层连通性差。普光气田 I, II 类含气区是高效井井位部署的主要区域<sup>[9,10]</sup>。

根据储层含气性预测成果,结合实钻资料进一步落实气水界面。研究发现普光 2 块的飞仙关组、长兴组和普光 3 块均为独立气水系统。飞仙关组发育边水,长兴组各礁体具有独立的气水系统,发育底

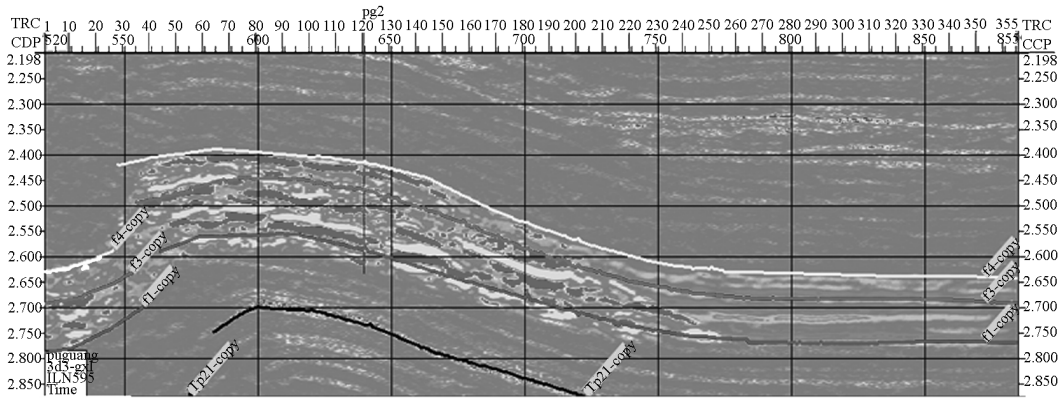


图 4 过 P2 井气层地震数据体结构特征异常剖面图

Fig. 4 Anomaly profile through P2 well gas-bearing in structural feature of seismic data cube

水。根据含气性预测成果,进一步优化了井位部署方案和井位设计,明显降低了方案、井位实施的风险,为“不打低效井”提供了技术保证。

### 5 高效井设计与跟踪优化

普光气田气藏埋深在 6 000 m 以上,单井开发成本 2 亿元左右。多打高产井是实现普光气田高效开发的基础,而开发井设计是培育高产井的关键。为此,在气藏地质精细研究基础上,确定了“井型优选,井轨迹优化设计,多级审查,跟踪优化”的技术思路。

1) 开发井井型优选。应用数值模拟技术,对直井、大斜度井和水平井进行控制储量、产能的模拟计算,结合现有开发技术和财税体制下,新井收回全部投资、采气操作费并获得标准收益率时所应达到的最低产量或储量值,评价各种开发井型的适应性。研究结果,在稳产 6~10 a,平均单井产气量达到  $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  条件下,普光气田直井要求单井控制储量  $32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,钻遇

有效储层厚度 134 m;水平井要求单井控制储量  $34 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,钻遇有效储层厚度 89 m。据此,在普光气田部署 6 口水平井。4 口水平井部署在构造低部位气水内边界线附近;2 口井部署在气层厚度发育较薄区域。而直井和定向井则主要部署在气田构造高部位气层厚度较大的区域。

2) 井轨迹优化设计。普光气田受山地地形条件限制,钻井平台在开发初期已经确定。为确保单井钻遇有利储层,以井台为中心多角度对比分析储层预测和含气性预测剖面,同时考虑构造走向、裂缝方向、井网井距、气水关系等因素,综合确定钻井方位。而靶点垂向位置确定,则针对气田气层厚度大但非均质性极强的特点,设计井轨迹靶点一般是从整个主力层段穿过, I, II 靶点一般分别距离气层顶、底 10 m 左右,以保证最大泄气范围(见图 5)。

3) 多级审查。为确保井位设计最优,由普光分公司牵头,组成涵盖中石化上游科研单位的科技队伍,实

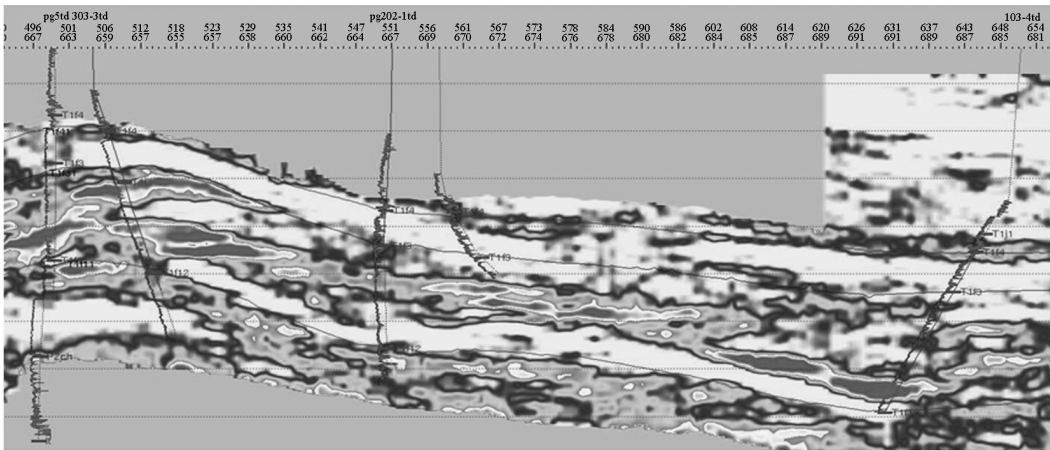


图 5 储层预测剖面图

Fig. 5 The profile of reservoir prediction

行“普光分公司、中原油田分公司和油田事业部(或川气东送指挥部)”三级论证审查机制。普光分公司负责设计的第一级审查,修改完善后报中原油田分公司审查,最后报油田事业部(川气东送建设工程指挥部)审定。通过逐级审查,逐步完善,不断优化。

4)跟踪优化。普光气田储层埋藏深,上覆嘉陵江组膏盐岩地层厚度在平面上变化较快,导致地层速度变化大,加上储层非均质性较强,一致储层深度的精确确定难度大。因此,除了及时利用新井资料滚动开展储层及含气性预测外,在气井钻至目的层段后,还要加强随钻跟踪分析,对比与邻井的关系和与设计的误差,及时优化调整靶点位置,确保气井钻遇较厚优质储层,水平井的井轨迹穿过优质储层。

## 6 结语

普光气田应用高效井设计技术设计完钻的38口开发井钻井成功率100%,平均钻遇气层厚度为337.9 m,全部达到设计指标,钻遇气层厚度符合率86.2%,为培育高产井奠定了坚实的气层基础。其中已完成投产试气作业井32口,实测无阻流量单井平均 $494 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,达到方案配产指标要求。

在普光气田开发过程中,逐步完善形成的高效井设计技术是实现高含硫化氢、超深层、礁滩相碳酸盐岩气藏高效开发的关键技术,为“川气东送”工程战略目标实现提供强有力的技术支撑。四川盆地目前发现的整装气田主要为高含硫化氢海相气藏,具有埋藏深、非

均质性强、气水关系复杂等特点,高效井设计技术具有广泛的推广应用前景。但各气田都有自身特点,所以必须以发展的眼光来推广应用这项技术,并在应用中不断发展、完善和提高。只有这样,高效井设计技术才更具有生命力,才能为超深层碳酸盐岩气藏高效开发提供有效的技术支持,也将有力推动我国高含硫化氢、礁滩相碳酸盐岩气藏开发技术的进步。

## 参考文献

- [1] 王敬农,鞠晓东,毛志强,等.石油地球物理测井技术进展[M].北京:石油工业出版社,2006
- [2] 裘亦楠,薛叔浩,应凤祥,等.油气储层评价技术[M].北京:石油工业出版社,2001
- [3] 马永生,刘波,梅冥相,等译.碳酸盐岩层序地层学—近期进展及应用[M].北京:海洋出版社,2002
- [4] 马永生,主译.碳酸盐岩微相—分析、解释及应用[M].北京:地质出版社,2006
- [5] 陆基孟,王永刚,任甲祥,等.地震勘探原理[M].东营:中国石油大学出版社,2009
- [6] 庞彦明,黄德利,刘云燕,等译.使用开发地震[M].北京:石油工业出版社,2001
- [7] 钱荣钧,王尚旭,詹世凡,等.石油地球物理勘探技术进展[M].北京:石油工业出版社,2006
- [8] 林昌荣,孙立春,崇仁杰.地震数据结构特征与油气预测[J].中国海上油气(地质),2000,14(6):417-421
- [9] 刘伟方,于兴河,黄兴文,等.利用地震属性进行无井条件下的储层及含油气预测[J].西南石油学院学报,2006,28(4):22-25
- [10] 林昌荣,王尚旭,马在田,等.地震数据体结构特征时空关系与油气预测[J].石油勘探与开发,2009,36(2):208-215

## Design techniques of high effective wells in Puguang Gas Field

He Shenghou<sup>1</sup>, Kong Fanqun<sup>2</sup>, Wang Shouping<sup>2</sup>, Zeng Daqian<sup>2</sup>

(1. The Headquarters of Sichuan-to-East Gas Transmission Project, SINOPEC, Dazhou, Sichuan, 635000, China; 2. Sinopec Zhongyuan Oilfield Puguang Company, Dazhou 635000, China)

[Abstract] So far Puguang Gas Field is the largest marine gas field in China, which is characterized by high  $\text{H}_2\text{S}$  content, ultra depth, strong heterogeneity of reservoir and complicated gas-water relations. There was no precedent for successfully exploiting analogous gas fields in China. During the development and construction of Puguang Gas Field, design of development wells were optimized and some wells with high productivity were bred via real-time tracking of data of new wells, continuous research on sedimentary microfacies, reservoir prediction and gas-bearing prediction. As a result, a series of design techniques of high effective wells are formed gradually, which provide strong technical supports for high efficient development of Puguang Gas Field.

[Key words] carbonate; sedimentary microfacies; reservoir prediction; gas-bearing prediction; high effective wells; design