

四川盆地涪陵地区页岩岩石相标定方法与应用

彭勇民^{1,2}, 龙胜祥^{1,2}, 胡宗全^{1,2}, 杜伟^{1,2}, 顾志翔^{1,2}, 方屿^{1,2}

(1. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:利用地质、测井特征标志及特色岩石相,开展四川盆地涪陵地区水平井的页岩岩石相标定。根据岩性组合、炭质含量及硅质含量3大关键标志,将涪陵地区典型导眼井下志留统龙马溪组89m厚的大套页岩段划分为9种不同类型的岩石相。根据标志层、炭质染手和粉砂质纹层等地质特征标志,以及测井响应的异常值、测井形态类型、挖掘效应、假挖掘现象等测井特征标志,明确了①、③和⑥号岩石相为特色岩石相。通过水平井“水平段垂直投影法”及垂直投影后的测井信息结果,并与典型导眼井的岩石相特征标志、特色岩石相进行对比,确定了水平井井轨迹穿行的岩石相顶、底边界,完成了不同类型的岩石相标定。依据岩石相与压裂试气产能的关系,寻找特高产、高产水平井的岩石相类型,发现①和③号富碳高硅岩石相具有高产潜力,明确①和③号岩石相为最佳岩石相。根据最佳岩石相原则,从地质角度建议水平井最佳井轨迹或靶窗着陆点宜在①号与③号最佳岩石相之间穿越。该方法已应用于四川盆地涪陵页岩气田,依据岩石相标定方法的产能预测与压裂试气结果的吻合率大于80%,它在反馈优化井轨迹和提高单井产能等方面具有很好的推广应用前景。

关键词:岩石相;水平井;页岩段;涪陵地区;四川盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Calibration method of shale petrological facies and its application in Fuling area, the Sichuan Basin

Peng Yongmin^{1,2}, Long Shengxiang^{1,2}, Hu Zongquan^{1,2}, Du Wei^{1,2}, Gu Zhixiang^{1,2}, Fang Yu^{1,2}

(1. SINOPEC Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Petrological facies calibrations were performed on shale of horizontal wells in Fuling, Sichuan Basin, based on geological and well-logging characteristic marks, and specialized petrological facies. In accordance with the three key marks (lithological combination, calcareous content and siliceous content), the whole set of 89-meter-thick shale interval in the typical pilot wells of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Fuling were divided into nine different types of petrological facies. The No 1, 3 and 6 petrological facies were identified as specialized petrological facies based on geological marks like marker beds, carbon dyes and silty laminae as well as logging marks such as logging response anomaly, the types of logging curve shape, excavation effect and pseudo excavation effect. We compared the results of projected well-logging information through horizontal section-based vertical projection with characteristic marks and specialized petrological facies in typical pilot wells to determine the top and bottom boundaries of the petrological facies and accomplished the calibrations. The relationship between petrological facies and the post-fracturing tested productivity was used to identify the petrological facies in prolific horizontal wells. It was found that the petrological facies with high calcareous and silica contents (No. 1 and 3 facies with) have the greatest productivity potential, thus were determined to be the best petrological facies. Based on the principle of the best petrological facies, we suggest the best trajectory of horizontal well or landing point of target window be between the No. 1 and 3 facies. Application of the calibration method to Fuling shale gas field were positive, with the coincidence rate between the predicted and tested productivities being more than 80%, proving it a potential method for optimizing well trajectory design and increasing single-well

收稿日期:2016-03-23;修订日期:2016-07-05。

第一作者简介:彭勇民(1965—),男,博士、教授级高级工程师,沉积层序、储层成岩作用与次生孔隙演化、常规与非常规油气勘探开发。E-mail: pengyongmin2005@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05061,2016ZX05060);中国石化重点项目(G5800-13-ZS-KJB005)。

production.

Key words: petrological facies, horizontal well, shale member, Fuling area, Sichuan Basin

近几年来,“页岩气革命”掀起了全球范围内页岩气勘探开发的高潮,页岩气勘探开发正在迅猛发展。然而,如何确定水平井穿行情况与高产关系是一个关键问题。岩石相标定方法为这一问题提供了一种实用的工具,它是明确水平井穿行的最佳岩石相或确定开发主力层的方法,但是国内外专利、非专利方面的文献却未见到有关岩石相标定的报道。

岩石相标定是在岩石相划分的基础上,通过地质与测井相结合的方法确定水平井的水平段穿越某种岩石相的过程。岩石相发展了相或岩相的内容。前人在传统的相或岩相方面作出了不少成果^[1-6]。随着页岩气的发展,看似简单的细粒沉积如页岩岩相也出现了一些新认识,即页岩的3大结构组分:粘土质的絮凝粒、较粗的单个石英颗粒以及分散的有机质^[7],这些结构组分的变化形成了多样性的沉积构造与不同的泥页岩岩相^[8-15]。尽管如此,上述相或岩相成果对页岩气勘探开发却没有发挥直接的指导作用。

在页岩气勘探开发中,水平井的钻、完井与压裂技术是非常普遍且至关重要的。然而,地下地质的复杂、地质标志的认识不清以及钻井过程中的井眼轨迹导向偏差^[16-18]等因素,却共同导致了井轨迹所穿越的页岩气目的层、小层或岩石相与钻前预测产生了较大差别,这给压裂选段与施工方案、页岩气产能带来了显著的影响。实践表明,不同的页岩小层或岩石相所贡献的产能大小是不一样的,不同的压裂选段^[19]与施工方案所引起的产能大小也不一样,有时产能差异很大。因此,明确水平井井轨迹所穿越的岩石相标定显得非常迫切。

针对上述问题与生产需要,在没有现有技术可借鉴的情况下,本文依据地质与测井相结合,提出一种水平井段的岩石相标定方法。该岩石相标定方法具有直观准确定相、反馈优化钻井导向等特点,为页岩气的勘探开发提供了一种新手段。

1 典型导眼井的岩石相特征标志

该方法主要是从涪陵页岩气开发实践中发展起来的。涪陵页岩气田位于四川盆地川东高陡褶皱带万县复向斜带,呈北东向展布。本区为大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层所夹持的断背斜构造,具有“东西分带、南北分块”的特征,总体平缓,断裂不发育。涪陵地区地表出露地层主要为中侏罗统沙溪庙组和下三叠统嘉陵江组,目的层为下志留统龙马

溪组至下奥陶统五峰组的89 m含气页岩段,以黑色含放射虫硅质页岩、碳质页岩和粉砂质页岩为特色。其中,五峰组主要为硅质页岩夹碳质页岩,厚度一般5~7 m;龙马溪组三分性特征明显(一般厚249 m):下部(一般厚89 m)为暗色碳质、硅质泥页岩段,中部(一般厚30 m)为浊积砂岩段,上部(厚130 m)为含粉砂质泥岩段。主力产层或页岩气甜点段集中于厚度38 m的龙马溪组一亚段(龙一亚段)至五峰组,包括了第1至第5小层。研究表明五峰组-龙马溪组属于深水陆棚微相沉积,页岩气富集条件优越。截至2016年9月21日,2016年产气 $35.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计产气达 $77.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.1 岩石相划分

针对涪陵地区下志留统龙马溪组下部,开展层序地层划分以约束岩石相顶底界面。从图1可以看出,涪陵地区的JY1井下志留统龙一段可以划分出一个三级层序(SQ2)。SQ2又可以细分为2个体系域及8个准层序。受准层序界面的约束,并根据岩性组合、碳质含量和硅质含量3大关键标志,将JY1井导眼井即垂直井段厚89 m的大套页岩段划分为9种不同类型的岩石相。为了方便、简洁,自上而下岩石相分别编号为⑨号至①号。

值得指出的是,岩石相由于受准层序界面的约束而具有成因与时间意义,这给岩石相的划分对比及工业应用奠定了理论基础。同时,因为准层序界面相当于小层或高级别沉积旋回的界面,这样,第①—⑨号岩石相分别对应着第1至第9小层(图1)。

在岩石相划分的基础上,根据表1进行命名:⑨号岩石相(相当于第9小层)命名为含碳低硅页岩相,厚度为12.97 m;⑧号岩石相为高碳低硅页岩相,厚度为12.63 m;⑦号岩石相为中碳中硅粉砂质页岩相,厚度为16.35 m;⑥号岩石相为中碳中硅含粉砂质页岩相,厚度为11.02 m;⑤号岩石相为高碳高硅页岩相,厚度为10.18 m;④号岩石相为高碳中硅页岩相,厚度为7.63 m;③号岩石相为富碳高硅页岩相1,厚度为10.15 m;①+②号岩石相为富碳高硅页岩相2,厚度为7.30 m(图1)。其中,①—⑤号岩石相构成了38 m优质页岩段,为涪陵地区现今的页岩气产层。优质页岩是指TOC(有机碳含量) $\geq 2\%$ 的富有机质页岩。在岩石相划分与命名的基础上,利用钻录井、测井和实验分析资料,依据炭质含量、硅质含量,结合录井显示、含气量等指标,开展岩石相描述。①—⑤号岩石相具有

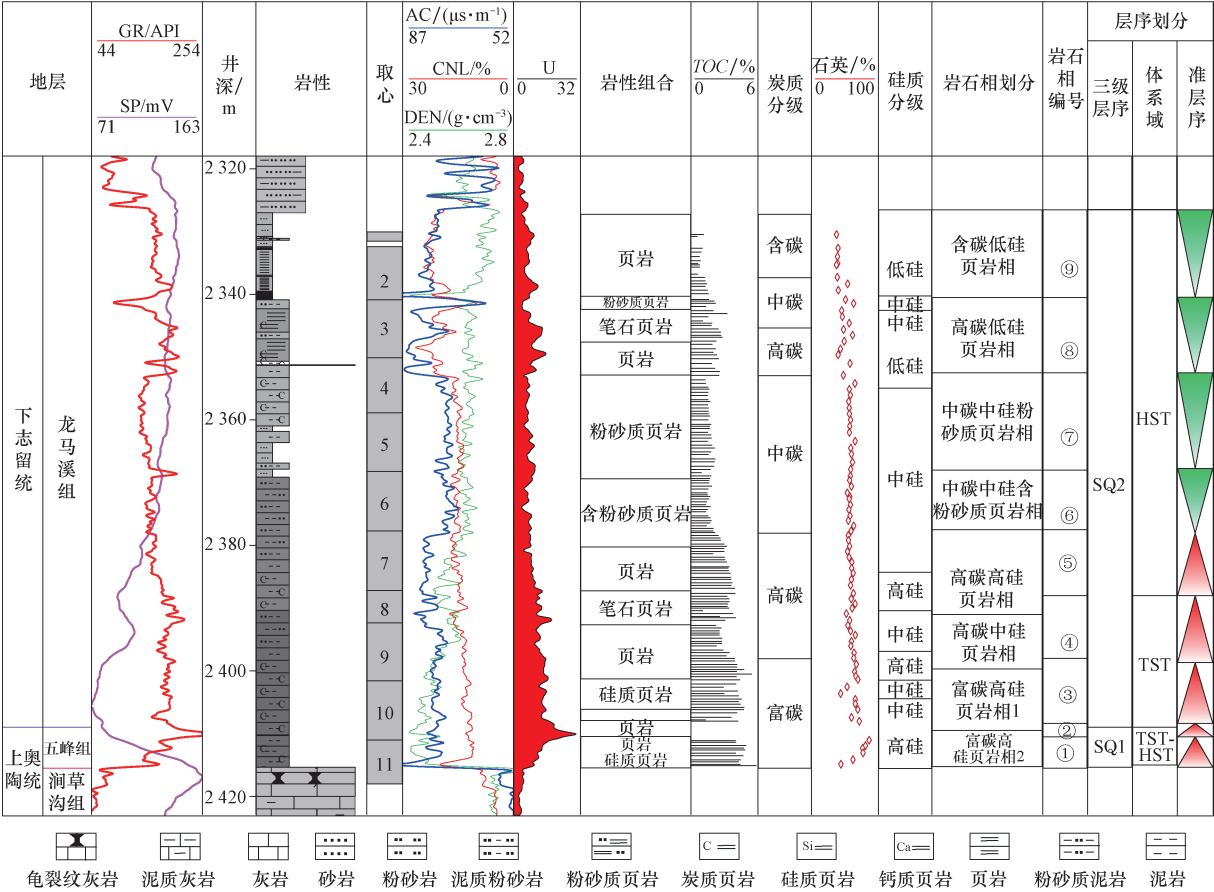


图 1 四川盆地涪陵地区典型导眼井岩石相划分柱状图
Fig. 1 Histogram showing the division of petrological facies in a typical pilot hole in Fuling area, the Sichuan Basin

表 1 岩石相命名方案
Table 1 Nomenclatures of petrological facies

炭质含量/%		≥4,富碳	4~2,高碳	2~1,中碳	<1,含碳
硅质含量/%	≥40,高硅	富碳高硅页岩相	高碳高硅页岩相	中碳高硅页岩相	含碳高硅页岩相
	40~30,中硅	富碳中硅页岩相	高碳中硅页岩相	中碳中硅页岩相	含碳中硅页岩相
	<30,低硅	富碳低硅页岩相	高碳低硅页岩相	中碳低硅页岩相	含碳低硅页岩相

注:该表以页岩岩性组合为例,其他类推。

富碳或高碳、高硅、高气测、高含气量的特征,进而确定①—⑤号岩石相为本区的有利岩石相类型。

1.2 岩石相特征标志提取

岩石相特征标志提取主要包括两个方面:岩石相的地质特征标志和测井特征标志提取。

1) 地质特征标志

岩石相的地质特征标志主要包括标志层、炭质染手和粉砂质纹层等。以标志层为关键,通过这些地质特征标志的提取,从不同类型岩石相中挑选出含地质特征标志的岩石相作为特色岩石相。例如,①和③号岩石相的炭质染手强烈(图 1)。同时,经岩心和录

井岩屑观察发现⑥号岩石相或 6 小层的粉砂质纹层密集发育。因此,①,③和⑥号岩石相可作为特色岩石相。岩心观察②号为灰色或深灰色含小型生物介壳的灰质页岩,厚 20 cm,成为可对比的标志层。经岩心、录井岩屑观察发现⑥号岩石相的粉砂质纹层密集发育(图 1)。因此,①,②和⑥号岩石相可作为特色岩石相。

2) 测井特征标志

岩石相的测井特征标志主要包括异常值(如伽马的最大值与最小值)、测井形态类型(如钟形与指形)、挖掘效应(低中子且低密度值)、假挖掘现象(如高中子且不同密度值)、双测井组合反向现象(高伽马值且低密度值)等。以异常值为关键,通过对这些测井特征标志的提取,从不同类型岩石相中挑选出含测井特征标志的岩石相作为特色岩石相。例如,①,③和④号岩石相具有双测井组合值反向现象(图 1,图 2a),①号具挖掘效应、伽马钟形,②号为异常高的伽马最大值与高尖指形,④号见假挖掘现象与伽马指形,伽马从④号至⑤号具有爬坡向左漂移的现象,⑥号顶界见到次异常高伽马值。因此,①,②,④和⑤号岩石相可作为特色岩石相。

至此,获得了典型导眼井的岩石相划分结果,并确

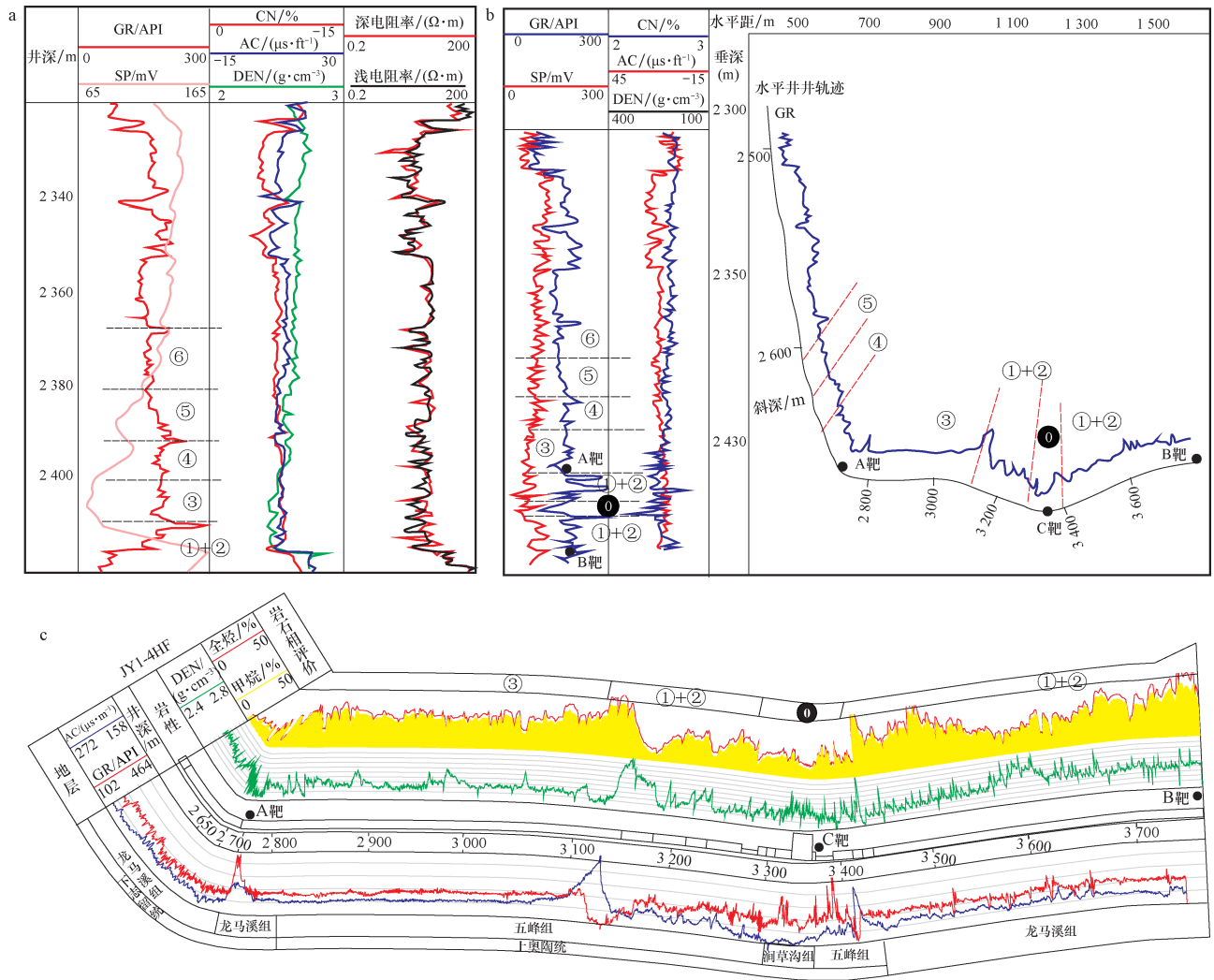


图2 四川盆地涪陵地区水平井井轨迹穿越的岩石相标定

Fig. 2 Calibration of petrological facies through which the trajectory of a horizontal well passing in Fuling area, the Sichuan Basin

a. JY1 井典型导眼井岩石相; b. JY1-4HF 井水平段垂直投影与岩石相标定; c. JY1-4HF 井水平段岩石相标定

定了可对比的特色岩石相及不同岩石相类型的可识别的特征标志。

2 水平井段垂直投影

2.1 垂直投影方法

从水平井的水平段或井轨迹中,不便直接观察特色岩石相的测井特征,难以与典型导眼井的岩石相划分结果进行对比,也难以确定不同类型岩石相的顶、底界限。为此,需要一种垂直投影方法,将水平井段的井轨迹与测井曲线一起垂直投影到垂直平面上,此方法可命名为水平段垂直投影法。

借助于但不限于北京吉奥特能源科技有限责任公司 2013 年研发的“HoriView 水平井测井分析软件 V2.0”,应用水平井段垂直投影法自动实现水平井段的井轨迹与测井曲线一起垂直投影到垂直平面,方便快捷地得到了水平井段垂直投影的结果

(图 2b 左侧)。

2.2 水平井靶点确定

依据水平井的垂直投影的结果,利用完、钻井的实钻 A、B、C 靶点深度数据(图 2c),在水平井的井轨迹(图 2b 右侧)与垂直投影后的测井曲线上(图 2b 左侧)予以确定各靶点位置,并在图上进行标注(图 2b)。例如,先在图 2b 的右侧依据实钻斜深标注 A、B、C 靶点,然后根据垂深在图 2b 的左侧标注 A'、B'、C' 靶点;或者按照图 2b 的水平虚线箭头将右侧的 A、C 靶点直接投影相交于左侧垂直投影后的测井曲线上,得到对应的 A'、C' 靶点;但 B 靶点是上翘的,只能用上翘 CB 井段的垂深位移量并以 C 为新起点向下进行标注 B 靶点。通过“水平井靶点确定”这一步,将水平井的井轨迹实际的测井信息转换成垂直投影后的测井信息,在垂直投影后的测井曲线上可以方便直观地观察由 A'、B' 靶点限定的水平井所穿行的地层测井信息。

3 井轨迹的岩石相标定

3.1 穿行的岩石相

根据水平井的垂直投影结果,考察 JY1-4HF 水平井垂直投影后的测井曲线与测井信息(图 2b 左侧),并与典型导眼井(JY1 井)的岩石相划分、测井特征标志、特色岩石相(图 2a)进行对比,结合岩屑录井资料即地质特征标志,进而确定 JY1-4HF 水平井的井轨迹在哪个岩石相中穿行。例如,首先依据伽马(GR)最大值异常与高尖指型、“高伽马、低密度”双测井组合、岩屑的强烈染手等地质与测井特征标志,并与典型导眼井对比(图 2a),可以准确直观地确定该异常是①+②号与③号岩石相的分界面(图 2b 左侧的点虚线);然后,将该界面自左向右引一条假想的水平线并相交于图 2b 右侧的水平井井轨迹上,得到①+②号、③号岩石相的实际分界点,从而以此点为界将较平坦的水平井井轨迹划分出①+②号、③号岩石相。按照同样的方法,将余下的水平井逐个逐段地进行岩石相标定,从而获得 JY1-4HF 水平井井轨迹穿行的不同类型岩石相标定结果(图 2b);最后,根据①+②号、③号、0 号层(上奥陶统涧草沟组灰岩分界点的深度数据),通过另外一种地质软件,如石文软件 Gxplorer,叠加上多种地层属性信息如岩性、录井显示、钻时等,得到 JY1-4HF 岩石相标定结果综合图(图 2c)。在图 2b 和图 2c 中,可以看出 JY1-4HF 主要穿行①、③号岩石相,少量穿行 0 号层,图 2c 表明录井气测的全烃或甲烷含量在①和③号岩石相最好,而 0 号层最差。

3.2 最佳岩石相

岩石相标定的目的就是在水平井的水平段中寻找最佳岩石相。按照压裂试气产能的特高($\geq 50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、高($\geq 30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、中、低和特低分级,最佳岩石相或开发主力层是指具特高产或高产潜力的岩石相类型。

根据岩石相标定,跟踪多口水平井的开发生产动态或勘探钻井动态,并利用开发生产动态资料尤其是产能数据,从典型导眼井的岩石相划分与有利岩石相类型中优选出最佳岩石相。通过建立不同类型岩石相与压裂试气产能的关系(表 2),揭示水平井井轨迹穿越的岩石相不同,则产能不同。依据此关系,寻找发现高产和特高产的岩石相类型。例如,水平井 A、B 全部穿行①和③号岩石相并且达到特高产,据此明确①、③号为最佳岩石相。相反,水平井 C、D、E 主要穿行④、⑤和⑥号岩石相,次要穿行①、③号岩石相(占比偏低,20%),且压裂试气产量低于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,据此明

表 2 岩石相标定与压裂试气对应关系
Table 2 Relationship between petrological facies calibration and post-fracturing production test results

水平井井名	压裂试气/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	水平段穿越的岩石相长度
A 井	37.5	水平段长 1 500 m,其中 438.6 m 在①号岩石相顶部,835.2 m 在③号岩石相
B 井	54.7	水平段长 1 500 m,其中 1 500 m 在①号岩石相
C 井	20.3	水平段长 1 000 m,其中 500.2 m 在④、⑤号岩石相,365.5 m 在⑥号岩石相
D 井	20.2	水平段长 1 000 m,其中 192.8 m 在③号岩石相,745.1 m 在④号岩石相
E 井	16.7	水平段长 1 500 m,其中 1 500 m 在④号岩石相

确④、⑤和⑥号不是最佳岩石相(表 2)。

根据最佳岩石相,从地质角度建议下一步钻井的水平井最佳井轨迹或靶窗着陆点宜在①号与③号岩石相界面的上、下几米之中穿越。

通过典型导眼井的岩石相特征标志、水平井段的垂直投影和井轨迹的岩石相标定,根据直井或导眼井岩石相识别特征标志确定水平井井轨迹穿行的不同类型岩石相,以及最佳岩石相占比(即最佳岩石相累计长度除以 A 和 B 靶点之间的长度),进而从地质角度分析已钻井的压裂试气产能高低的原因。这种岩石相标定方法不仅可应用于涪陵地区,也可推广至其他地区。例如,通过彭水地区 4 口水平井的岩石相标定,认为井轨迹穿行③号岩石相的占比偏低(0~25%)是产量偏低主因之一,该区压裂试气产量最高的一口井为 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。同样,通过丁山地区 DY1HF 井的岩石相标定,水平段穿越最佳岩石相仅为 150 m、占比 15.5%,不利于高产,该井经过 17 mm 油嘴连续油管膜制氮气助排方式得到的压裂试气产量为 $3.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。此外,通过威远地区 WY1HF 井的岩石相标定,水平段穿越最佳岩石相为 628 m、占比 61.5%,该井压裂试气产量为 $17.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 岩石相预测试气产能

根据焦石坝中北部开发区构造位置相近的 39 口水平井动态跟踪及数据,投点得到最佳岩石相、其他岩石相与试气无阻流量或试气产能的关系(图 3),发现产量大于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 井的水平井段在①、③号岩石相中穿越,产量小于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 井的水平井段在④和⑤号岩石相中穿行。以此从半定量角度建立了试气产能的预测标准或界限:①+③最佳岩石相占比大于 50%,预测试气产量大于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。利用此标准可以依据岩石相标定结果进行试气产能预测。截至

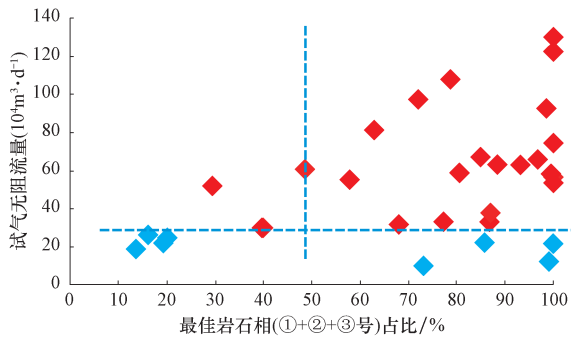


图3 最佳岩石相占比与试气无阻流量投点
Fig. 3 Plots for open-flow capacity and ratio of the best petrological facies

2015年5月,预测21口井,吻合17口,吻合率大于80%(表3)。实践表明,岩石相方法预测试气产能吻合率高,效果良好。同时,依据不同类型岩石相所具有的试气产能不同,为得到高产,钻井井轨迹在哪种岩石相类型中穿行是至关重要的,研究表明,①,③号岩石相即最佳岩石相,是井产量大于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的保障。这为高产井及水平井井轨迹提供了明确的方向,即井轨迹瞄准①和③号最佳岩石相(富碳高硅页岩相)。同样,最佳井轨迹这一发现可以推广到别的开发试验区、开发区或勘探有利区带中。

值得指出的是,从岩石相地质角度进行的试气产

能预测方法属于半定性半定量性质。针对不同地区,预测标准或界限是不同的,但可以借鉴该方法和步骤进行分析。

综上所述,利用“水平段垂直投影法”及岩石相标定方法,可以准确直观地确定水平井水平段井轨迹在哪个岩石相中穿越,这具有以往无法比拟的优越性。传统上通过地质、测井和地震资料相结合的方法,定性判断水平段所穿行的不同小层边界是具有不确定性且不直观的。同时,根据最佳岩石相原则及岩石相的试气产能预测功能,促进定向或二次压裂。如果前期的压裂试气产能不理想,经过岩石相标定后的井轨迹大多在④和⑤号岩石相中穿行,可以开展二次压裂增加砂量液量以定向且仅向下延伸人工裂缝至①和③号最佳岩石相,通过二次压裂帮助提高产能;如果既有最佳岩石相,又具有非最佳岩石相,可以优选最佳岩石相预先进行加密压裂以提高单井产能,放缓或稀疏压裂非最佳岩石相以减少低产能压裂段数达到降本增效。此外,根据岩石相标定工具和最佳岩石相原则,反馈优化钻井导向。按照水平井井轨迹宜在最佳岩石相内及其界面的上、下几米之中穿越的这个原则,通过前期水平井动态跟踪与岩石相标定结果,将非最佳岩石相占优势的井信息反馈给钻井设计与井轨迹导向。根据地质和测井特征标志,改善下一步井轨迹导向与现场调整

表3 水平井岩石相标定方法预测的试气产能吻合情况
Table 3 Coincidence rate between forecasted productivity through petrological facies calibration and post-fracturing production test results in a horizontal well

井名	水平段穿行的岩石相长度	预测产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	预测时间	压裂试气产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压裂试气 时间	吻合情况
1井	水平段长1 500 m,其中867.6 m,③号底部、119.1 m①+②号顶部	>30	2013-10-12	33.04	2013-10-23	吻合
2井	1 385 m,其中1 059.7 m在③号、318.6 m在①+②号岩石相	>30	2013-10-12	41.5	2013-11-3	吻合
3井	1 579 m,其中993.3在③号岩石相	>30	2013-10-12	41.1	2013-10-26	吻合
4井	1 453 m,其中1 046.7 m在③号岩石相	>30	2013-10-12	46.05	2013-12-8	吻合
5井	1 493 m,其中854.6 m在④+⑤号岩石相穿越	<30	2013-10-12	26.98	2013-12-23	吻合
6井	1 400 m,其中1 023.8 m在④号岩石相	<30	2013-10-12	11.5	2014-1-9	吻合
7井	1 200 m,其中862 m在④号岩石相	<30	2013-10-12	20.9	2013-12-28	吻合
8井	1 500 m,其中1 500 m在③号岩石相	<30	2013-10-12	37.66	2013-11-14	不吻合
9井	1 500 m,其中1 131.8 m在③号岩石相穿越	>30	2013-12-18	31.25	2014-1-4	吻合
10井	1 646 m,其中1 534 m在①+③号岩石相	>30	2013-12-18	18.34	2014-1-21	不吻合
11井	1 345 m,其中450.3 m在③号、608 m在①+②号岩石相	>30	2013-12-18	43.5	2013-12-24	吻合
12井	2 100 m,其中1 452.6 m在③号岩石相穿越	>30	2013-12-18	46.73	2014-2-19	吻合
13井	1 038 m,其中1 031.3 m①+②号岩石相	>30	2013-12-18	31.25	2014-1-4	吻合
14井	1 543 m,其中1 243 m在①+③号岩石相穿越	>30	2013-12-18	44.7	2014-1-23	吻合
15井	1 458 m,其中804.5 m在①+②号、682.1 m在③号岩石相	>30	2014-3-6	20.1	2014-3-10	吻合
16井	838 m,其中501 m在④、350.6 m在③号岩石相	<30	2014-8-21	14.7	2014-9-13	吻合
17井	1 557 m,其中471.7 m在③号、1 135 m①+②号岩石相	>30	2014-9-25	21.9	2014-9-19	不吻合
18井	1 764 m,其中1 312 m在①+②号、218.6 m③号岩石相	>30	2014-12-3	26.8	2014-9-22	不吻合
19井	1 500 m,其中1 010 m在③号、320 m在①号岩石相	>30	2015-4-8	34.5	2015-8-2	吻合
20井	1 500 m,其中400 m在①+③、640 m在④+⑤号	<30	2015-4-8	14.9	2015-4-30	吻合
21井	1 200 m,其中500 m在①+③号、555 m在④+⑤号岩石相	<30	2015-4-30	7.92	2015-5-19	吻合

优化,尽最大可能让井轨迹穿越最佳岩石相,从而提高单井产能。

5 结论

1) 岩石相标定方法技术适用于页岩气勘探开发。根据岩性组合、炭质含量和硅质含量3大关键标志,将大套页岩段细分为不同类型的岩石相;利用“水平段垂直投影法”及岩石相标定方法,可以准确、直观确定水平井水平段的井轨迹在哪个岩石相中穿越,具有以往无法比拟的优越性。

2) 根据岩石相标定的结果,并依据不同类型岩石相与压裂试气产能的关系,寻找最佳岩石相。研究发现,下志留统89 m含气页岩段的①号和③号富碳高硅岩石相具有高产潜力,为最佳岩石相。

3) 该方法已应用于中国石涪陵页岩气产能建设与开发方案之中,与实钻结果吻合较好。在寻找最佳岩石相或优选主力目的层以提高产能、减少低产能的压裂段数以达到降本增效方面具有广阔的应用前景。

致谢:本文得到了中国石化科技发展部、油田事业部、石油勘探开发研究院等的支持,中国石化江汉油田分公司、中国石化勘探分公司、中国石化西南油气分公司和长江大学提供了相关资料,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Reading H. G. 1986. Sedimentary environments and facies [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1-300.
- [2] 刘宝珺. 沉积岩石学 [M]. 北京:地质出版社, 1980.
Liu Baojun. Sedimentary Petrology [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1980.
- [3] 王新征, 王健伟, 蔡宏兴, 等. 采用岩性细分实现岩相精细描述的方法; 中国: CN103529474A [P]. 2014.
Wang xinzen, Wang Jianwei, Cai hongxin, et al. Method of facies Detailed-description with Lithologic subdivision. China: CN103529474A [P]. 2014.
- [4] 郑和荣, 胡宗全, 周小进, 等. 一种基于地理信息系统的岩相古地理资料处理方法. 中国: CN103377196A [P]. 2013.
Zheng Herong, Hu Zongquan, Zhou Xiaojing, et al. data processing method of facies and palaeogeography based on the geo-information system. China: CN103377196A [P]. 2013.
- [5] 刘建昌. 岩相内插. 中国: CN102057301A [P]. 2011.
Liu jianchang. Facies interpolating. China: CN102057301A [P]. 2011.
- [6] 郑和荣, 高波, 彭勇民, 等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向 [J]. 古地理学报, 2013-15(5): 645-656.
- Zheng Herong, Gao Bo, Peng Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas prospect direction in the Lower Silurian of Middle-Upper Yangtze area [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 645-656.
- [7] Aplin Andrew C, Macquaker Joe H. S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [8] Schieber. J. Distribution and deposition of mudstone facies in the Upper Devonian Sonyea group of New York [J]. Journal of Sedimentary Research. 1999, 69: 909-925.
- [9] Singh, P.; Slatt, R. M.; Coffey, W. Barnett shale—unfolded; Sedimentology, sequence stratigraphy, and regional mapping [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2008, 58: 777-795.
- [10] Heath Jason E.; Dewers Thomas A.; McPherson Brian J. O. L.; et al. 2011. Pore networks in continental and marine mudstones: Characteristics and controls on sealing behavior [J]. Geosphere, 7(2): 429-454.
- [11] Abouelresh Mohamed O.; Slatt Roger M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(11): 1-22.
- [12] Jiang Zaixin; Guo Ling; Liang Chao. Lithofacies and sedimentary characteristics of the Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(3): 238-251.
- [13] Almon, W. R.; Dawson, W. C.; Ethridge, F. G.; et al.; Castelblanco-Torres, B. Sedimentology and petrophysical character of Cretaceous marine shale sequences in foreland basins—Potential seismic response issues [C]. // In: Boulton, P., and Kaldi, J. eds. Evaluating fault and cap rock seals; AAPG Hedberg Series no. 2, 2005, 215-235.
- [14] Loucks Robert G; Ruppel Stephen C. Ruppel. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [15] Galloway, W. F.; Hobday, David K. Terrigenous clastic depositional systems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1996: 1-230.
- [16] Liu Xiushan, Shi Zaihong. Improved method makes a soft landing of well path [J]. Oil & Gas Journal, 2001, 22: 203-213.
- [17] Kundert Donald, Mullen Mike. Proper evaluation of shale gas reservoirs leads to a more effective hydraulic-fracture stimulation [C]. (SPE-123586). Pennsylvania, USA: SPE unconventional gas conference, 2009: 1-11.
- [18] Parker Mark, Buller Dan, Petre Erik, et al. Hanynessville shale-petrophysical evaluation [C]. (SPE-122937). Pennsylvania, USA: SPE unconventional gas conference, 2009: 1-11.
- [19] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical consideration in evaluating and producing shale gas resources [C]. (SPE 131768), Pennsylvania, USA: SPE unconventional gas conference, 2009: 1-33.

(编辑 张玉银)