

东濮凹陷北部盐间泥岩裂缝储层预测技术研究

国殿斌^{1,2}, 徐怀民¹, 梁国胜², 苏惠²

(1.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2.中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院,河南 濮阳 457001)

摘要:东濮凹陷北部盐间泥岩裂缝储层预测目前尚无适用技术。在分析泥岩裂缝储层地质与地球物理特征的基础上,发现盐间泥岩裂缝发育段由于富含脆性矿物,易受构造形变作用形成构造裂缝,且具有低速、低波阻抗、低泊松比及高电阻率等地球物理特征。据此,形成了剩余构造分析和广义多属性聚类分析为核心的2项适用于盐间超压、构造成因泥岩裂缝预测技术。其中,剩余构造分析技术将常规地质构造分解为构造背景、局部构造形变和随机因素3部分,突出局部构造形变产生的微曲率变化,从而达到预测泥岩裂缝的目的;广义多属性聚类分析则是将地震反演法与地震属性法结合起来进行属性优选,进行神经网络聚类分析,定性预测出泥岩裂缝发育区。实际应用中2套方法预测结果吻合度较高,依据预测结果部署的濮深18-1井在沙三段上亚段10砂组3258 m处见到良好油气显示,产油量为215~420 m³/d。

关键词:泥岩裂缝 剩余构造分析 广义多属性聚类分析 储层预测 东濮凹陷

中图分类号: P631.445

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)05-0053-04

东濮凹陷北部发育5套盐岩,其中沙三段上亚段与中亚段之间的盐间泥岩在以往勘探过程中发现了受生烃及构造作用影响而产生的大量垂向、高角度裂缝,以脆性较强的富碳酸盐烃源岩中最为发育,其间见到了一些良好的油气显示,表明其可以作为储层形成泥岩裂缝油气藏。以往由于受传统观念束缚,对泥岩裂缝油气藏的重视和研究程度不够,对裂缝展布等成藏控制因素的认识程度较低,给泥岩油气藏勘探带来很大困难^[1-2]。中外泥岩裂缝油气藏的不断发现和近年来北美地区页岩气勘探获得的巨大成功^[3]均表明,东濮凹陷北部的泥岩裂缝油气藏具备较大的勘探潜力。

大量发育的微裂缝不但可以为泥页岩油气的赋存提供有效储集空间,还可为泥页岩油气的成功开采提供可压裂通道,是泥岩油气井高产的一个重要因素。东濮凹陷北部盐间泥岩裂缝性油气藏勘探开发的最大难点主要表现在对泥岩裂缝储层发育程度和分布范围的预测上。目前中外用于砂岩裂缝预测的技术主要有3种^[4-10]:第1种为定性分析与相干体分析相结合的裂缝预测方法;第2种主要通过构造应力、体曲率计算来分析预测裂缝^[11];第3种是利用地震纵波方位的各向异性来预测裂缝^[12]。其中,第1种方法精度较低,目前应用较少;第2种

方法适用于断层等曲率较大的地质体,而对于鼻状构造和背斜等低幅度、宽缓、微曲率的地质体效果不理想;第3种方法要求地震资料需具有高覆盖次数和高品质,技术较为复杂且研究周期长,对于薄层精度较低,其适用性受到很大局限。由于目前尚无成型的适用于泥岩裂缝预测的专用技术,因此,笔者针对东濮凹陷盐间泥岩裂缝具有的脆性矿物成分含量高、高压、构造形变成因以及层薄等特征,通过技术攻关与实践,形成了剩余构造分析和广义多属性聚类分析为核心的泥岩裂缝储层预测技术,以期非常规油气勘探开发提供指导。

1 地质与地球物理特征

1.1 地质特征

脆性矿物成分含量高 X衍射全岩物相分析结果表明,东濮凹陷盐间泥岩的矿物组成归为碎屑矿物、粘土和碳酸盐3类。泥岩全岩矿物组成中,粘土矿物含量为17%~52.1%,平均为27.6%,不到源岩总矿物组成的三分之一。粘土矿物中,伊利石占绝对优势,占粘土矿物含量的88%~100%,平均为97.8%;硅质矿物含量最高为26%,最低为2%,平均为17.3%;碳酸盐含量除少量薄层灰岩外,最高为

收稿日期:2014-07-10。

作者简介:国殿斌,男,教授级高级工程师,在读博士研究生,从事油气田勘探开发与管理工作。联系电话:13603833549, E-mail: lgs@zy-dzy.com。

46%,最低为6.1%,平均为33.42%。在碳酸盐矿物中,以方解石为主,白云石次之。泥岩全岩矿物硅质矿物和碳酸盐矿物之和平均为50.72%,普遍含有相对较高的脆性矿物,增加了岩石脆性,有利于裂缝的形成及后期压裂改造。

泥岩裂缝主要为构造裂缝 泥岩裂缝可以分为构造裂缝、成岩裂缝、异常压力裂缝和变质收缩裂缝。东濮凹陷烃源岩成岩作用规模一般较小,成岩裂缝不发育;且古近系埋藏较浅,泥岩发生变质作用,形成变质收缩裂缝的可能性较小。濮深18-1井的岩心观察与成像测井结果表明,泥岩裂缝主要为构造裂缝,以高角度张裂缝和剪切缝为主,见少量张剪裂缝和一定数量的水力破裂缝。这是由于富含脆性矿物的盐间泥岩层,延展性越小,易产生破裂,且泥岩有机质含量越高,岩石固结程度越差,有利于微裂缝的形成。由于在局部隆升(鼻状构造或背斜)与断裂活动等局部或区域构造应力作用下,夹于盐间的板状泥岩地层发生弯曲,在弯曲顶部产生纵张应力,形成垂直于最大主应力方向的张裂缝,纵张裂缝与横张裂缝的延伸方向垂直。由于东濮凹陷盐间泥岩在成岩过程中存在欠压实作用,且盐岩的塑性流动也易造成地层的差异压实,从而形成异常高压^[13]。同时,泥岩在封闭状态下,由粘土矿物转化脱水、生烃增压和水热增压等综合作用形成高异常流体压力,当流体压力超过泥岩破裂压力时,形成以垂直方向为主的微裂缝系统。以上异常高压层段都会产生张裂缝。因此,可以认为构造应力是东濮凹陷泥岩裂缝产生的主要控制因素,其次为异常高压导致的水力破裂作用。

1.2 地球物理特征

泥岩中由于裂缝的发育,速度特征常常表现为低速异常。如柳屯次洼沙三段上亚段10砂组盐间裂缝不发育的泥质白云岩层段地震速度一般为2 900~3 000 m/s,表现为较低的波阻抗。作为围岩的岩盐速度一般为4 000 m/s,波阻抗较高,横向变化不大,基本不随埋深而变化,二者接触界面的地震反射特征表现为横向连续性较好、振幅变化较小的中强反射。而裂缝发育的泥质白云岩层段降速特征明显,如濮深18井泥质白云岩裂缝发育段速度为2 200 m/s,降低幅度较大,波阻抗表现为异常低值,即裂缝发育导致反射系数增大。因此,在泥岩裂缝发育区,地震反射相对于裂缝不发育层段往往表现为振幅增强的强反射。此外,由于裂缝对地震发射波高频成分的吸收衰减作用,裂缝发育区的地震反射频率也会降低,泥岩弹性力学参数往往具有

低泊松比特征,与脆性矿物含量之间成明显的负相关关系;且具有较低的杨氏弹性模量,与泥岩中的脆性矿物含量之间成比较明显的正相关关系。由于脆性矿物(白云岩、灰岩)含量较高,泥岩裂缝发育段相对于普通泥岩段具有较高的电阻率。

2 泥岩裂缝储层预测技术

泥岩裂缝储层地质与地球物理特征分析结果表明,盐间泥岩裂缝形成的条件是在特定的沉积背景下,既要满足富含脆性矿物的内因又需要有局部构造形变的外因。因此,首先通过井震联合的沉积微相研究,划定存在富含有机质的盐间泥岩发育区,这是泥岩裂缝存在的基本石油地质条件;其次,根据脆性矿物与电阻率的关系,利用测井资料圈定脆性矿物发育区,这是泥岩裂缝易发育的岩性条件。鉴于盐间泥岩主要为构造裂缝,需要研究是否存在局部构造形变的外因条件,若具备这样的外因条件则基本可以判定存在裂缝发育区。剩余构造分析技术和广义多属性分析技术是甄别泥岩裂缝发育导致的地震属性异常的有效手段。

2.1 剩余构造分析技术

局部构造形变、地层高压是影响盐间泥岩裂缝发育必不可少的外部因素,其中局部构造形变是关键因素。构造形变程度通常可以用曲率来表示^[11]。由于常规的体曲率计算仅适用于研究断层等曲率较大的地质体的发育,为了突出局部低幅度构造的形变特征,笔者提出了剩余构造分析技术。首先,假定地质现象大体上由区域性因素、局部性因素和随机性因素3部分组合而成。剩余构造分析的目的就是将复杂的构造地质现象分解为这3个部分,以趋势面代替区域性因素,用统计方法消除随机性因素,最后达到突出局部性因素,即突出局部构造微曲率变化的目的,有助于更好地认识局部构造形变特征,从而预测由构造应力变化导致的裂缝发育区。研究的基本步骤为:①利用多项式函数拟合法或构造图多次平滑法,对目标层进行趋势面分析,得到反映区域构造背景的趋势面。多项式次数越高,趋势面对空间数据点的逼近程度越高,一般需要4次以上的趋势面分析。②用目标层常规构造图数据减去构造趋势面数据,即常规构造减去构造背景,得到反映局部形变或构造微曲率变化的剩余构造数据,对该数据进行适当平滑消除随机性因素,再进行绘图,即得到剩余构造图。③在对剩余构造图进行分析的过程中,将正值设定为正曲率范围,

表示构造向上局部隆起形变,该值越大表示形变幅度越大;负值为负曲率范围,表示构造向下局部形变,最终结合已钻井资料的常规测井序列识别的裂缝,分析曲率与裂缝发育关系。一般正曲率与负曲率构造形变均可产生裂缝,但正曲率范围裂缝发育程度优于负曲率范围。

2.2 广义多属性聚类分析技术

东濮凹陷盐间泥岩地球物理特征分析研究结果表明,地层中裂缝发育引起的层速度降低幅度可达15%~20%,从而导致地震属性发生显著变化,这为利用地震多属性聚类分析预测泥岩裂缝提供了依据。目前储层预测技术系列中常用的技术方法有2类,一是地震多属性分析技术,二是储层地震反演技术。由于东濮凹陷盐间泥岩裂缝的地震响应特征比较复杂,单一地震属性预测结果存在多解性^[14],预测效果较差,因此,在地震拓频、高精度地震反演的基础上,把波阻抗等作为普通的属性参与属性提取和优选,将地震反演法与地震属性法结合起来形成广义多属性聚类分析技术来预测泥岩裂缝发育区。

在进行储层预测过程中,为了充分利用各种有用的地震信息,共提取了涵盖振幅类、复数道统计类、频谱统计类、层序统计类和相关统计类的5大类26种地震属性。在分析泥岩裂缝产生的地震响应特征的基础上,采用聚类分析、神经网络相关分析与人工优选相结合的原则进行地震敏感属性优选(图1)。按照其与裂缝相关程度确定对泥岩裂缝较为敏感的地震属性由好到差依次排列为:波谷最小振幅(负半周积分)、波阻抗、吸收系数、地震波弧长和均方根振幅。在不同地区、不同层位,由于地质条件不同、岩性组合搭配不同,属性优化所得到的属性和次序也不同,将研究区内已钻井进行分析评价的结果作为学习样本,进行神经网络聚类分析,可定性地预测出泥岩裂缝发育区。

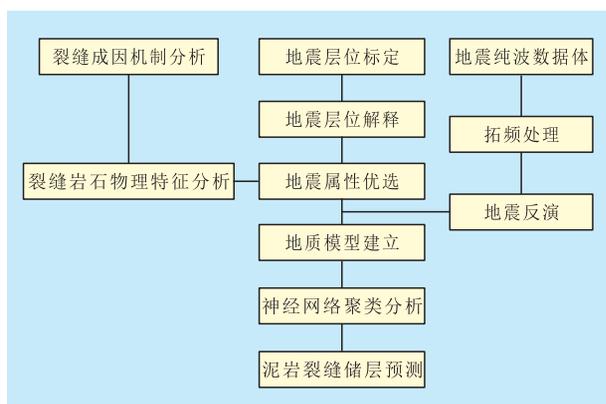
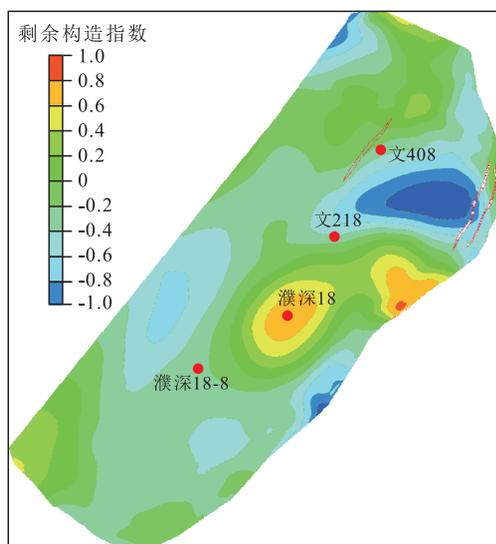


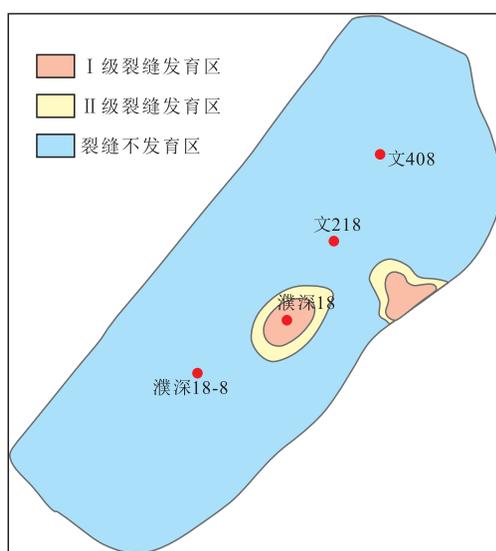
图1 广义多属性聚类分析技术预测泥岩裂缝储层流程

3 应用效果

应用剩余构造分析与广义多属性聚类分析技术,分别对柳屯次洼沙三段上亚段10砂组开展泥岩裂缝储层预测。剩余构造分析结果(图2a)显示,濮深18井区位于隆起形变较大的曲率正值区,属于泥岩裂缝较为发育的区域;濮深18-8井、文218井、文408井位于构造形变幅度较小的曲率负值区,泥岩裂缝储层不发育。利用广义多属性聚类方法预测柳屯次洼沙三段上亚段10砂组泥岩裂缝分布特征显示,濮深18井区为裂缝发育地震属性异常区,构造的叠合结果(图2b)与剩余构造分析结果吻合较好,说明2种方法预测泥岩裂缝的可信度较高。根据该项预测结果,部署濮深18-1井和濮深18-侧1



a—剩余构造分析



b—广义多属性聚类分析

图2 柳屯次洼沙三段上亚段10砂组剩余构造分析与广义多属性聚类分析泥岩裂缝储层预测结果

井均在沙三段上亚段10砂组盐间钻遇较为发育的泥岩裂缝,其中濮深18-1井钻至沙三段上亚段10砂组井深3 258 m处见到良好油气显示,产油量为215~420 m³/d。

4 结束语

东濮凹陷北部盐间泥岩裂缝主要由富含脆性矿物的高压泥岩地层在局部构造形变作用下形成的,为构造裂缝。裂缝发育段具有低速、低波阻抗、低泊松比、高电阻率等地球物理特征,具有强振幅、较连续的地震响应特征。应用剩余构造分析与广义多属性聚类分析2种不同机理的方法预测泥岩裂缝储层。其中,剩余构造分析是着眼于泥岩裂缝的构造成因,而广义多属性聚类分析则侧重于对泥岩裂缝发育所造成的地震属性异常的检测。实际应用结果表明,2种方法预测的泥岩裂缝发育区吻合度较高,与研究区已有钻井资料吻合较好,说明广义多属性聚类分析和剩余构造分析适用于东濮凹陷盐间超压、构造成因的泥岩裂缝储层预测,具有较好的可操作性、实用性以及较高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 郭瑾.东营凹陷利津洼陷泥岩裂缝气藏成藏条件[J].石油天然气学报,2009,31(5):222-225.
- [8] 方杰,刘宝泉,金凤鸣,等.华北北部中、上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J].石油学报,2002,23(4):18-23.
- [9] 张亚明,陈振东,周秀艳.辽西地区中上元古界生烃量评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2002,21(1):22-24.
- [10] 方杰,刘宝泉,郭树之,等.张家口下花园青白口系下马岭组灰质页岩热模拟实验[J].高校地质学报,2002,8(3):345-355.
- [11] 李春林,郭鹏,任德生.大民屯凹陷构造应力场及其与油气运聚关系[J].油气地质与采收率,2012,19(6):47-49.
- [12] 李军生,庞雄奇,宁金华,等.太古宇潜山油气成藏控制因素分析——以辽河断陷大民屯凹陷法哈牛—曹台地区为例[J].油气地质与采收率,2010,17(4):17-19,23.
- [13] 孟卫工.辽河断陷大民屯凹陷古近系盖层特征及对油气系统的影响[J].古地理学报,2005,7(1):25-36.
- [14] Herberg H D. Significance of high wax oils with respect to genesis of petroleum[J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(6): 736-750.

- [2] 宁方兴.现河庄地区泥岩裂缝主控因素分析与油气成藏[J].石油地质与工程,2008,22(5):37-39.
- [3] 葛忠伟,樊莉.页岩气研究中应注意的问题[J].油气地质与采收率,2013,20(6):19-22.
- [4] 宋梅远,张善文,王永诗,等.沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J].油气地质与采收率,2011,18(6):18-22.
- [5] 胡望水,雷志诚,许辰,等.白音查干凹陷锡林好来油田白云质泥岩储层研究[J].特种油气藏,2013,20(1):11-14.
- [6] 丁文龙,许长春,久凯,等.泥页岩裂缝研究进展[J].地球科学进展,2011,26(2):135-142.
- [7] 黄龙威.东濮凹陷文留中央地垒带泥岩裂缝性油气藏研究[J].石油天然气学报,2005,27(3):289-292.
- [8] 安丰全.利用测井资料进行裂缝的定量识别[J].石油物探,1998,37(3):119-123.
- [9] 张奎华.密度投影技术在页岩裂缝储层预测中的应用——以渤南洼陷罗家地区沙三段下亚段为例[J].油气地质与采收率,2013,20(3):46-48.
- [10] 王延光,杜启振.泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J].地球物理学进展,2006,21(2):494-501.
- [11] 李志勇,曾佐勋,罗文强.裂缝预测主曲率法的新探索[J].石油勘探与开发,2003,30(6):83-85.
- [12] 张吉昌,刘月田,丁燕飞,等.裂缝各向异性油藏孔隙度和渗透率计算方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):62-66.
- [13] 冷济高,刘晓峰,庞雄奇,等.盐间泥岩裂缝超压油气藏成藏作用[J].石油勘探与开发,2006,33(6):692-696.
- [14] 刘光蕊,陈发亮,韩福民,等.利用地震多属性技术进行储层预测与评价——以东濮凹陷濮城地区沙一段为例[J].油气地质与采收率,2011,18(4):47-49.

编辑 裴磊

(上接第52页)

- [8] 方杰,刘宝泉,金凤鸣,等.华北北部中、上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J].石油学报,2002,23(4):18-23.
- [9] 张亚明,陈振东,周秀艳.辽西地区中上元古界生烃量评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2002,21(1):22-24.
- [10] 方杰,刘宝泉,郭树之,等.张家口下花园青白口系下马岭组灰质页岩热模拟实验[J].高校地质学报,2002,8(3):345-355.
- [11] 李春林,郭鹏,任德生.大民屯凹陷构造应力场及其与油气运聚关系[J].油气地质与采收率,2012,19(6):47-49.
- [12] 李军生,庞雄奇,宁金华,等.太古宇潜山油气成藏控制因素分析——以辽河断陷大民屯凹陷法哈牛—曹台地区为例[J].油气地质与采收率,2010,17(4):17-19,23.
- [13] 孟卫工.辽河断陷大民屯凹陷古近系盖层特征及对油气系统的影响[J].古地理学报,2005,7(1):25-36.
- [14] Herberg H D. Significance of high wax oils with respect to genesis of petroleum[J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(6): 736-750.
- [15] Tegelaar E W, Mathezing R M, Jansen J B H, et al. Possible origin of n-Alkanes in high-wax crude oils[J]. Nature, 1989, (342): 529-531.
- [16] Del Rio J C, Philip R P. Nature and geochemistry of high weight hydrocarbons (above C40) in oils and solid bitumens [J]. Organic Geochemistry, 1999, 18(4): 541-553.
- [17] 欧光习,李林强.辽西-冀北拗陷中-上元古界油源及成藏期分析[J].矿物岩石地球化学通报,2006,25(1):87-91.
- [18] 黄第藩,赵孟君,张水昌.塔里木盆地满加尔油气系统下古生界油源油中蜡质烃来源的成因分析[J].沉积学报,1997,15(2):7-13.
- [19] 黄海平.大民屯凹陷烃源岩中高分子量烃的形成与分布特征[J].石油实验地质,2000,12(4):297-301.

编辑 经雅丽