

碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞连通体识别及刻画研究

李小波, 李新华, 荣元帅, 何新明, 巫波

(中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏具有极其复杂的缝洞空间结构, 识别和刻画储层内的缝洞连通体一直是油藏描述的技术难题, 目前尚缺乏较有效的处理方法。基于现代岩溶发育模式, 选取溶洞体和微断裂-裂缝体系进行地震属性特征识别; 运用岩溶地震相分析方法对溶洞和裂缝进行多属性融合的地震相分析, 再采用三维地质网格量化并形成几何格架地质模型, 实现对缝洞连通体的刻画。结果表明: 振幅梯度属性可有效识别“串珠状”强反射与地层反射的边界, 从而检测和成像出“串珠状”反射的溶洞体的空间分布; 最大曲率属性能有效地描述断裂和裂缝在平面上的线型特征和几何边界特征, 从而反映裂缝通道展布。岩溶地震相分析刻画的缝洞连通体呈现了缝洞储层的几何形态和空间的延展趋势, 实现了对缝洞体内部结构和连通通道的精细描述。通过预测和表征缝洞连通体的分布位置和形态特征, 为缝洞型油藏储集空间的精细描述提供重要技术支撑。

关键词:地震属性; 地震相分析; 缝洞连通体; 缝洞型油藏; 塔河油田

中图分类号: TE349

文献标识码: A

Identification and characterization of fracture-connecting components in carbonate fractured-vuggy reservoirs

Li Xiaobo, Li Xinhua, Rong Yuanshuai, He Xinming, Wu Bo

(Research Institute of Exploration and Productions, SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The spatial structure of fractures in the carbonate fractured-vuggy reservoirs in the Tahe Oilfield was very complicated; hence the identification and characterization of fracture-connecting components were difficult. Based on modern karst mode, we selected isolated caves, karst rivers and micro-fractures to identify seismic properties. Seismic facies analysis was used to study caves and fractures. 3D geologic network was applied to establish a geometric geologic model quantitatively, which could describe the fracture-connecting components. Amplitude gradient properties could effectively determine the boundaries between “beaded” strong reflectance and formation reflectance, which could detect and image the spatial distribution of caves with beaded reflectance. Maximum curvature attributes could effectively describe the plane linear features and geometric boundary characteristics of faults and fractures, which showed the distribution of fractures. The fracture-connecting components described by karst seismic facies described the geometric states and spatial extensions of fractured-vuggy reservoirs; hence realized the precise description of internal structure and communicating channel, and provided important technical supports or the development of fractured reservoirs.

Key words: seismic attributes; seismic facies analysis; fracture-connecting component; fractured-vuggy reservoir; Tahe Oilfield

碳酸盐岩喀斯特体系是近地表溶洞和裂缝发育的产物, 这一过程包括地下通道(喀斯特河道)的溶蚀作用, 溶洞的形成以及洞壁和洞顶的破裂, 通道内和洞中的沉积作用, 以及后期溶洞的塌陷、压实和愈合作用^[1-2]。塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏是多期表生条件下形成的岩溶体系经埋藏演化而形成的复杂古岩溶油藏, 缝洞空间结构极其复杂^[3]。在以断裂控制的断控岩溶、古水系控制的

暗河岩溶和古地貌控制的表层风化壳岩溶为主的3大地质背景下, 形成了以溶洞、裂缝为主要储集空间, 裂缝为导流通道, 基质基本无储渗能力的强非均质性油藏^[3-4]。

塔河油田缝洞型油藏在开发特征上具有产能差异大、单井开发动态悬殊、井与井之间可类比性差等特点, 尤其在注水开发中由于对缝洞空间展布及连通关系认识不清, 导致注入水易窜进、注水效

果不理想,注水开发后期调整难度大等问题。笔者运用岩溶地震相分析方法对溶洞和裂缝进行多属性融合的地震相分析,刻画缝洞连通体的空间结构,以期实现对缝洞体内部结构和连通关系的表征,为塔河油田缝洞型油藏储集体精细刻画和高效开发奠定基础。

1 地质体识别

根据现代岩溶发育模式可以将岩溶作用分为 4 个作用带:表层岩溶带、垂向渗滤带、潜流溶蚀带和径流溶蚀带^[5]。表层岩溶带主要发育裂缝和溶蚀孔洞,垂向渗滤带主要发育高角度的裂缝和岩溶通道,潜流和径流溶蚀带发育丰富的岩溶暗河管道。因此选取孤立溶洞、岩溶暗河、微断裂—裂缝体系 3 类岩溶地质体进行地震属性特征识别。

在地震剖面上“串珠”状反射特征是塔河缝洞型油藏最典型的特征,这些串珠反射被解释为塌陷的古溶洞;同时串珠反射被微断裂所分割,在平面上表现为下陷构造,未受溶洞塌陷影响的区域属于溶洞不发育区。为了成像和识别与古岩溶塌陷成因相关的“串珠状”反射及与其伴生的微断裂和裂缝,用地震反射倾角、最大曲率属性、相干属性和振幅梯度属性,提取“串珠状”反射特征和微断裂—裂缝的线状构造特征,从而达到检测和识别缝洞系统的目的。

1.1 溶洞体识别

1.1.1 孤立溶洞体识别

振幅梯度属性描述了振幅变化率。其可在体时窗内计算三维的振幅梯度,构建梯度张量并计算其特征值和特征向量。振幅水平方向最大分量可以更好地刻画“串珠状”反射的空间形态,相应的特征值代表了沿着水平方向最大分量方向上的强度。根据这一特征,利用振幅梯度属性可有效地确定“串珠状”强反射与地层反射的边界,从而检测和成像“串珠状”反射的空间分布。

1.1.2 岩溶暗河识别

岩溶暗河的形成和分布主要以断裂的分布为导向。在潜流溶蚀带和径流溶蚀带,水动力具有垂向渗入和水平运动,使径流区水平的洞穴层相当发育,容易形成岩溶暗河,同时受多条裂缝的引导易形成包含多条分支暗河的岩溶暗河系统。从振幅梯度属性沿层切片中($T_7^4 + 50$ ms)可看出(图 1),包含孤立溶洞的“串珠”状反射呈圆形或椭圆形,体现岩溶暗河的强振幅条带呈连续的带状分布。

油井在钻遇过程中泥浆漏失往往反映钻遇较

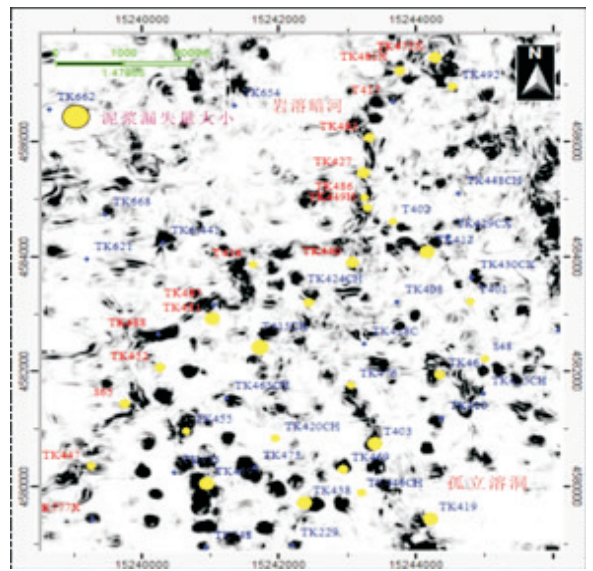


图 1 泥浆漏失井与振幅梯度的沿层切片叠合
切片位置为 $T_7^4 + 50$ ms。

Fig.1 Layer laminated slices of mud losing well and amplitude gradient

大规模的溶洞的信息。将泥浆漏失量和振幅梯度属性沿层切片叠加可以看出(图 1),岩溶暗河上漏失井沿暗河展布分布,反映岩溶暗河溶洞型储集体发育程度极高;表层岩溶发育区的漏失井的分布与“串珠”状反射特征相匹配。分析认为泥浆漏失井的分布与振幅梯度属性强的特征值相对应,振幅梯度属性可较好地反映包含溶洞的地震异常体。

1.2 微断裂—裂缝体系识别

微断裂—裂缝体系是伴生在溶洞附近且连通溶洞的主要通道,利用地震曲率属性可较好地描述断裂和裂缝通道在平面上的线型特征。Roberts (2001)定义了用于测定地层曲率的几种曲率属性,其中最大曲率属性的最大特点是包含了形状的信息,可以区别断层和表面的线型特征(褶曲)^[6-7]。在描述断裂和裂缝几何边界特征时最大曲率属性也是非常有效的,最大曲率属性的优点是包含了形状的信息,可区别断裂和褶曲的线型特征,反映出微断裂和裂缝的发育程度;可识别出小型的挠曲、褶皱和凸起等,更好地描述垂向上岩性的非连续性;可展现裂缝的线型特征,进而反映缝洞体的空间分布、配置关系及其连通性。

将表征裂缝通道的最大曲率属性与反映溶洞特征的振幅梯度属性叠加可以看出(图 2),在溶洞的四周均有微断裂—裂缝相伴生,且主要分布于溶洞的边界及上部,这是由于溶洞是沿着断裂或裂缝溶蚀扩大而形成的。最大曲率属性可以较好地表征微断裂—裂缝体系的空间分布,识别出的缝洞体

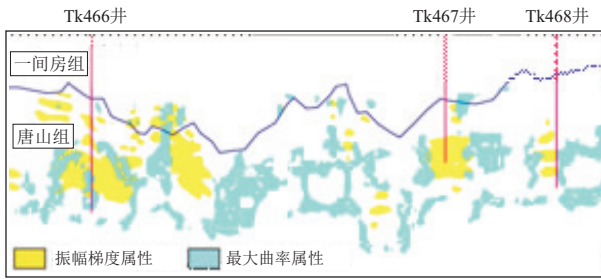


图 2 塔河油田 TK466-Tk468 井组
最大曲率属性与振幅梯度属性叠合剖面

Fig.2 Maximum curvature attributes and amplitude gradient of wells TK466-Tk468 in Tahe Oilfield

分布特征符合缝洞型油藏的地质特征。

2 地震相分析

由于塔河油田碳酸盐岩储层的非均质性极强,单一地震属性对地质体的识别存在一定的多解性,运用单一地震属性很难准确地描述地下复杂缝洞结构。因此,笔者采用多属性融合的岩溶地震相分析方法避免单一地震属性预测的不全面性。该方法可针对不同地质目标,选用不同的地震属性用于地震相分析,提取出共同特征,通过多种属性进行聚类对地质体进行解释,以降低特征解释的不确定性,提高半定量解释的可行性。

2.1 地震溶洞相分析

地震相分析的可行性研究表明,振幅梯度能识别出储层溶洞的地质特征,但不能完全描述微断裂和裂缝与溶洞的地质成因和空间分布特征。利用地震的倾角、最大曲率和振幅梯度属性进行溶洞地震相分析,可以提取出与溶洞发育相关的“串珠状”反射,从而达到检测和识别储层溶洞系统的目的。

2.2 地震裂缝相分析

用地震反射倾角、相干属性非连续性和最大曲

率属性进行裂缝地震相分析,可有效地从这些地震几何属性中提取出与微断裂和裂缝相关的共同特征,并对其进行几何尺度意义上的分级,提取出与裂缝发育相关的信息。微断裂—裂缝体系在地震几何属性中会表现为大的地震倾角值、大的曲率值和小的地震相干性。依据几何属性的物理和地质意义对地震裂缝相分析结果进行分类,同时利用地震几何属性在地震相空间的分布作为微断裂—裂缝分级的依据。各个代表微断裂—裂缝体系不同级别的地震分相用不同的颜色表示,通过颜色区分出不同尺度的裂缝。

从地震剖面上可以看出(图 3),通过岩溶地震相分析后,对包含在地震剖面中串珠状反射、杂乱反射和弱反射特征中的大尺度缝洞、小尺度溶蚀—孔洞以及裂缝在地震溶洞相和地震裂缝相中分别得到精细识别和刻画。

2.3 缝洞连通体刻画

要实现缝洞型油藏储层内部空间结构的表征,关键是要确定地震溶洞分相和裂缝分相在横向上的连通关系。多属性融合的地震相分析方法可以将提取的地震分相根据同一网格、溶洞优先,裂缝其次的原则,将缝、洞地震分相合并,且在三维地质网格量化;根据设定网格的搜索条件形成几何格架地质模型,实现缝洞体的刻画;最后通过地震波阻抗过滤围岩,得到缝洞连通体空间结构,实现缝洞连通关系的表征。地震相分析刻画的缝洞连通体反映了缝洞储层空间的几何形态和空间的延展趋势,实现了对缝洞体内部结构和连通通道的精细描述。

3 应用实例

塔河 4 区 S48 单元属于典型的喀斯特岩溶缝

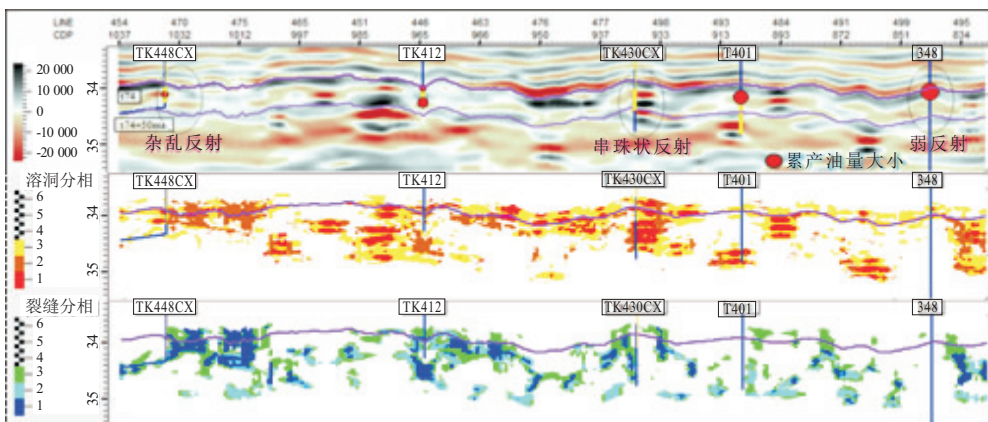


图 3 地震溶洞分相与地震裂缝分相剖面对比

Fig.3 Profiles of seismic caves and seismic fractures



图 4 S48 单元内部缝洞连通体平面展布
不同的颜色代表不同的连通体。

Fig.4 Plane distribution of fracture-connecting components in unit S48

洞系统,单元表层发育以裂缝—孔洞为主的风化壳岩溶、单元西部发育一条以溶洞为主的岩溶暗河。利用高精度三维地震资料提取相关地震几何属性,采用多属性融合的岩溶地震相分析方法,识别和刻画出了 S48 单元内部缝洞结构的几何形态。从单元内部刻画结果看出,TK440-TK427 井区暗河与表层岩溶的缝洞连通体;TK428CH-TK408 刻画出了井间微断裂—裂缝通道;TK473-TK469 井间发育的岩溶暗河得到较为清晰的识别和刻画(图 4)。

同时 S48 单元动态连通的 22 对井组中,有 20 对在单元连通体中完全匹配,动静态吻合率达到 91%,进一步表明识别和刻画的缝洞连通体能有效地反映单元内部连通特征。

4 结论

(1) 振幅梯度属性可有效地识别“串珠状”强反射与地层反射的边界,从而能检测和成像出反映“串珠状”反射的溶洞体的空间分布;最大曲率属性能有效地描述断裂和裂缝平面上的线型特征和几何边界特征,从而反映裂缝通道展布。

(2) 根据不同地质目标,选用不同的地震属性开展多属性融合的岩溶地震相分析,可有效地识别和精细地刻画缝洞储层空间的几何形态,实现对缝洞连通体的表征,提高储集体预测半定量解释的精度。

(3) 识别和刻画出的缝洞连通体对现场生产具有重要的指导作用,但其以静态信息确定连通为主,缺少现场动态连通的进一步修正。静态方法刻画的缝洞连通体并不全是有效的动态连通,要更好地运用于现场生产,必须将缝洞结构刻画和连通关系表征结合起来。

参考文献:

- [1] 鲁新便. 缝洞型碳酸盐岩油藏古岩溶系统与油气开发[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
- [2] 丁勇, 彭守涛, 李会军. 塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 488-494.
- [3] 彭守涛, 何治亮, 丁勇, 等. 塔河油田托甫台地区奥陶系一间房组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 108-114.
- [4] 韩华华, 漆立新. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 860-865.
- [5] 夏日元, 邹胜章, 梁彬, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011, 43-58.
- [6] Al-Dossary S, Marfurt K J. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation[J]. Geophysics, 2006, 71(5): 41-51.
- [7] Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. First Break, 2001, 19(2): 85-100.
- [8] 李小波, 李新华, 荣元帅等. 地震属性在塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏连通性分析及其注水开发中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 65-71.