

天然气勘探

# 塔中地区岩溶风化壳裂缝型储层预测技术

王振卿,王宏斌,张虎权,李 闯,张继娟

(中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃 兰州 730020)

**摘要:**断裂是塔中地区岩溶风化壳裂缝型储层的主要控制因素。且裂缝对于改善碳酸盐岩储层的储集性能、提高储层的连通性作用明显,裂缝预测技术的优选尤为重要。通过探讨地震裂缝预测技术在塔中岩溶风化壳裂缝型储层中的适用性,对比分析其预测效果,得出地震裂缝预测技术的预测结果与该区的钻井资料吻合。曲率分析法预测的无效裂缝较多,相干预测的裂缝方位与断裂走向具有较好的一致性,古应力场分析法主要用于预测断裂、裂缝的发育趋势,叠前 AVO 梯度法对于大断裂周围的裂缝发育带或者岩溶缝洞体的边缘地带预测效果较好。

**关键词:**碳酸盐岩;裂缝;曲率;相干;应变恢复;AVO 梯度

**中图分类号:**TE132.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1926(2011)05-0889-05

**引用格式:**王振卿,王宏斌,张虎权,等.塔中地区岩溶风化壳裂缝型储层预测技术[J].天然气地球科学,2011,22(5):889-893.

## 0 引言

塔中地区奥陶系碳酸盐岩岩溶风化壳埋深大于 5 000 m,岩性主要以泥质灰岩、生屑灰岩为主。其储层的平均速度大于 5 800 m/s,基质孔隙度小于 2.5 %,基质渗透率小于  $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,具有较强的非均质性。储集空间类型可分为孔洞型、裂缝孔洞型和裂缝型 3 种。裂缝对改善储层性能、提高储层的连通性起到重要的作用<sup>[1]</sup>,因此,预测裂缝发育带就显得非常重要。同时,碳酸盐岩中的裂缝具有形式复杂多变、多期成因、多期改造以及多期充填的特点,给储层预测和评价研究带来极大的困难。

裂缝预测技术的研究从 20 世纪 60 年代开始,Murray G H<sup>[2]</sup>对构造主曲率和裂缝发育的关系进行了研究,Gong Dilland P L 应用分形理论进行碳酸盐岩地区裂缝预测的尝试<sup>[3]</sup>,Andrey Bakulin 等<sup>[4-6]</sup>应用地震反射资料分别对单一裂缝的 HTI 模型、对称正交裂缝模型和单斜裂缝模型的裂缝参数进行定量估算研究尝试,曾锦光从断层古应力场入手预测裂缝<sup>[7-8]</sup>,随着相干和 AVO 梯度法等技术的广泛应用为岩溶风化壳裂缝型储层预测奠定了基础。总

之,前人主要应用曲率描述法、古应力场分析法和裂缝数值模拟法等技术预测裂缝发育带,且预测的精度有待提高。现有的地震裂缝性储层预测方法呈多样化特点,且各种方法的适用条件不同,因此有必要探讨这些技术在岩溶风化壳裂缝型储层预测中的优势和局限性,从而更客观、更精细地刻画该区碳酸盐岩裂缝型储集体,达到寻找裂缝性油气藏的目的。

## 1 地震裂缝预测技术的适用性分析

地震裂缝预测技术可分为叠后和叠前 2 个范畴:叠后地震裂缝预测技术可分为地震层位描述法、地震波形相似性分析法和古构造恢复法三大类;叠前裂缝预测技术有叠前 AVO 梯度分析法。

(1) 地震层位曲率描述法。地震层位曲率描述法预测裂缝的核心是通过描述地震层位的弯曲起伏程度从而达到预测裂缝的目的。主要有曲率法。曲率是描述曲线上任一点的弯曲程度,是一条曲线的二维属性,它是一个圆半径的倒数,可以反映一个弧形的弯曲程度,曲率越大越弯曲。对于脆性岩石,曲率的大小与岩石裂缝发育程度成正比。因此,用曲率法评价裂缝是合理的<sup>[9]</sup>。当岩石受构造应力挤压

时,会沿某一方向发生弯曲,中性面以上部位承受拉张应力而形成张裂缝。一般情况下曲率越大,张应力越大,张裂缝也越发育,曲率值可以间接反映张裂缝的多少。

曲率描述法从层状岩石的弯曲程度出发预测裂缝的发育程度,其理论基础是垂直作用下的弯曲薄板理论,须满足以下前提条件:①岩石是脆性的,裂缝主要由岩石破裂形成,不考虑岩层的塑性变形作用;②必须满足岩层受力变形而弯曲的条件;③只能预测弯曲岩层面上由于弯曲派生的抗张应力而形成的张性缝<sup>[10]</sup>。应当注意的是弯曲薄板理论只适用垂直成因褶皱,不适用水平力作用下的褶皱。

塔中岩溶风化壳裂缝型储层对应的岩石没有经历韧性变形,岩层的变形只能发生破裂作用。因此,该区储层的变形适合于应用曲率描述法来评价。

(2) 地震波形相似性分析法。地震波形相似性分析法主要有相干法。由于断裂、裂缝对碳酸盐岩储层改善作用明显,因此可以通过预测裂缝的手段来预测裂缝型储层。相干技术主要用于描述地震数据的空间连续性。根据地震理论,连续性好的同相轴对应于连续性较好的地质体,如水平地层或倾斜地层等;连续性差的同相轴对应于连续性较差的地质体,如断层等<sup>[11]</sup>。

目前地震相干算法已经发展到第三代,该算法的基本原理是将数学中的矩阵特征结果引入到了相干计算中,利用矩阵的特征结构来计算相似性,其最大优点是抗噪能力和分辨率高,但需要消除地层倾角的影响。首先计算各道之间的倾角和方位角值,拟合一个光滑的曲面,构建地震子体矩阵  $D$ ,从而提高该算法的精度。作为一种辅助手段,相干技术在断裂解释时已经得到普遍应用,在考虑地层倾角的前提下,时间孔径和空间孔径是决定相干运算成果的 2 个主要参数,时间孔径越小,空间孔径越小,相干能够预测的裂缝级别越小。调整时间孔径和空间孔径这 2 个参数,可以提高相干预测的敏感性,可以作为预测裂缝的必要补充手段<sup>[12]</sup>。

(3) 古构造恢复技术。古构造恢复技术主要指地层应变恢复技术。通过还原地层的构造发育史来计算每期构造运动对地层产生的应变,并将应变作为反应地层形变程度的一个主控参数,同时考虑地层厚度、岩性、裂缝发育方向,预测各个构造运动时期的裂缝分布,最后得到多期构造运动产生的裂缝叠加在目的层的结果<sup>[13]</sup>。

一般而言,地层应变量大表明地层变形剧烈,同

时也导致了裂缝的发育。塔中地区经历多期构造运动叠加改造,晚加里东和早海西 2 期构造破裂作用是塔中地区构造裂缝发育的主要时期,而早海西期是该区构造定型期,通过恢复上述多期构造运动在海西期对奥陶系顶面产生的应变进行裂缝预测。

由于构造运动,地层沉积时会受到填充作用和剥蚀作用的影响,造成古构造恢复的不准确。最终导致利用应变恢复技术预测的裂缝发育带不准确。

(4) AVO 梯度分析法。AVO 梯度分析法<sup>[14-16]</sup>从叠前地震道集出发预测研究区内的裂缝系统分布。实验研究表明<sup>[7]</sup>,地震波的动力学特征(振幅、主频、衰减等)比运动学特征(速度)对裂缝特征的变化更敏感,裂缝的存在可以表现为地震属性的异常,通过测量地震属性的变化可以检测裂缝。由于 AVO 随方位角的变化关系(即 AVO 梯度)反映岩石硬度的变化,通过计算  $360^\circ$  范围内的每一组方位角的梯度值,得出正交的方位角范围内的 AVO 梯度的最大差值,由此可以判定裂缝的走向;AVO 梯度较小的方向是裂缝走向,梯度最大的方向是裂缝法线方向,二者之差与裂缝的密度成正比,可以计算裂缝的相对密度(图 1)。

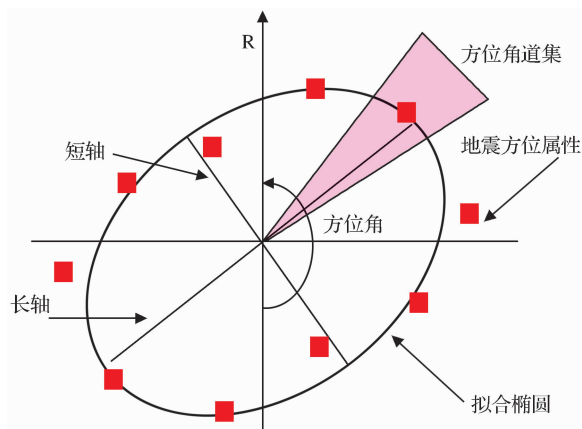


图 1 AVO 梯度法

由于 AVO 梯度分析法在 CMP 道集抽取方位角道集,必然受到地震采集面元的影响,会造成抽取的同一方位角道集信息并非来源于同一个反射点。AVO 梯度分析计算的分辨率小于面元级别,必然导致叠前 AVO 梯度分析法较叠后相干或曲率预测精度高。

## 2 地震裂缝预测技术预测效果分析

从灰岩储层的裂缝成因和裂缝发育程度的影响因素看,影响塔中地区裂缝发育的最关键因素还是构造变形程度。由 ZG17 井的成像测井资料(图 2)得出研究区普遍发育受区域构造作用控制的“X”型

剪切裂缝和早期的高角度张裂缝,可以推断构造变形是该区岩层形成裂缝的主要成因,储层构造裂缝的相对发育是形成灰岩储层有利条件。因此可以根

据构造的最终变形结果,应用曲率分析方法预测裂缝分布规律,计算结果主要反映现今构造裂缝的展布状况(图 3a)。

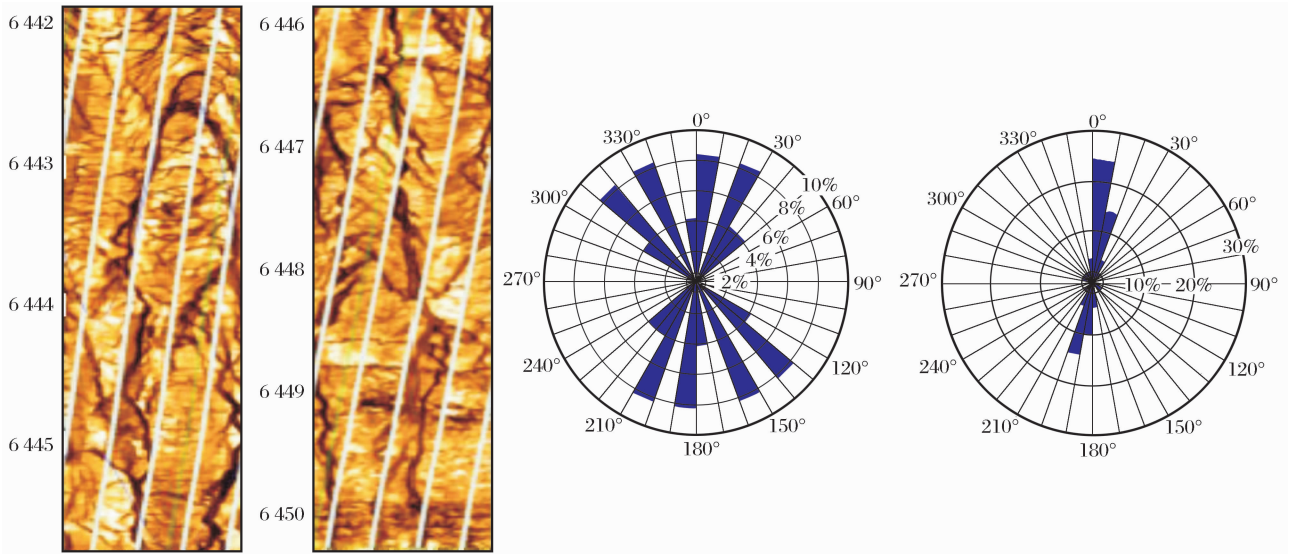


图 2 ZG17 井成像测井

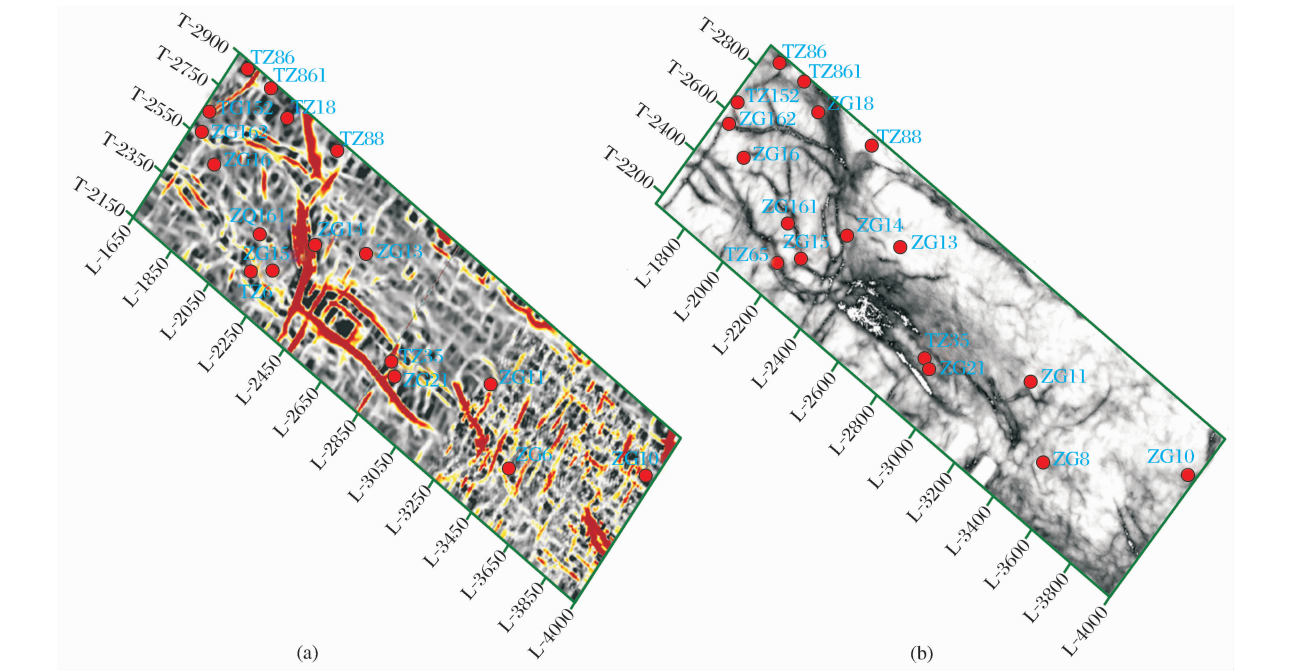


图 3 ZG162—ZG10 井区曲率和相干预测结果

从塔中地区 ZG162—ZG10 井区的曲率和相干预测裂缝结果(图 3b)可得,图中东北部靠近地震工区边界为一级断裂,即塔中一号断裂,走向北东向,控制塔中北北西向和北西向断裂构造带;图中西南部为二级构造断裂,该区在奥陶纪末受区域应力作用发生右旋扭扭活动形成沿寒武系膏盐层滑脱的逆冲断裂系统;图中北东向和正北向分布的断裂为海西期构造运动形成的一系列走滑断裂,同时裂缝系统也受其控

制,对该区的碳酸盐岩储层改造作用明显。  
可见,应用曲率描述法和相干算法这 2 种技术在预测大级别的断裂时有很好的 consistency,在预测小级别的裂缝时,相干预测的裂缝方位与断裂走向一致性较好,曲率技术预测的裂缝系统更为丰富,但可能放大一些无效的裂缝。  
TZ85 井区东北部为北西向断裂,是中加里东运动时期形成的塔中一号断裂发育带,控制了该区的构



造格局;西南部走向与塔中一号断裂带平行的是晚加里东运动时期形成的二级构造断裂发育带;ZG21 井附近的北东向走滑断裂带和北北西向左旋走滑断裂带是海西运动时期形成的。东部椭圆标记内海西期发育的北东东向走滑断裂带预测效果不明显(图 4)。

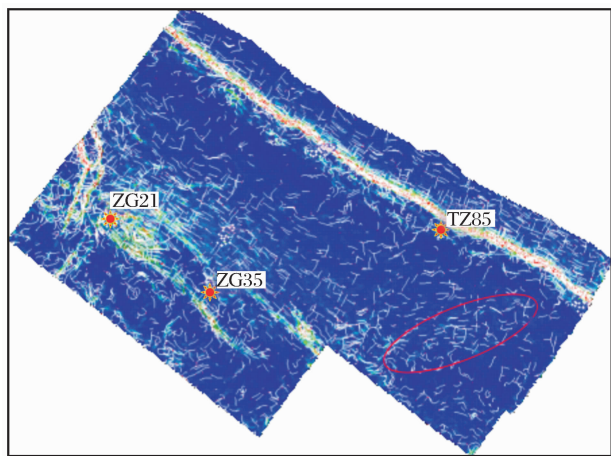


图 4 TZ85 井区奥陶系顶面裂缝预测

可见,地层应力场恢复技术能够较好地预测一级和二级构造断裂控制的裂缝发育带。对于断距较小的走滑断裂控制的裂缝发育带预测效果较差。在 seismic 勘探程度较低的地区应用该技术可以较好地把握研究区的断裂发育规律。

ZG19 井区主要发育东北部北西向的塔中一号断裂,中部近东西向的二级断裂和近南北向和北北东向的走滑断裂;成像测井资料(图 5a)得出,ZG19 井下奥陶统风化壳位置主要发育层状分布的小型溶蚀孔洞和裂隙,裂缝发育规模较差。对比该区的断裂纲要和叠前 AVO 梯度法的裂缝预测结果可得:叠前 AVO 梯度分析法对于大断裂周围的裂缝发育带或者岩溶缝洞体的边缘地带预测效果较好,主要反映小级别的裂缝带或者是岩溶缝洞集合体的边缘。断裂系统对下奥陶统风化壳裂缝型储层的控制作用明显,符合该区地质构造运动的规律(图 5b)。

### 3 结论

叠后裂缝预测技术在预测塔中岩溶风化壳裂缝型储层时有一定的效果,又有其各自的技术特色:构造层位曲率分析法具有操作简便等特点,但预测的结果可能反映一些无效信息,还须测井或钻探资料证实;地震波形相似性分析法(相干)在预测断裂的展布方面具有独到的优势,预测的裂缝方位与断裂走向具有较好的一致性;古构造恢复技术通过还原构造发育过程来预测裂缝为研究构造裂缝的发育开

辟了新的思路,但由于地层剥蚀作用的影响,必然降低其预测精度。

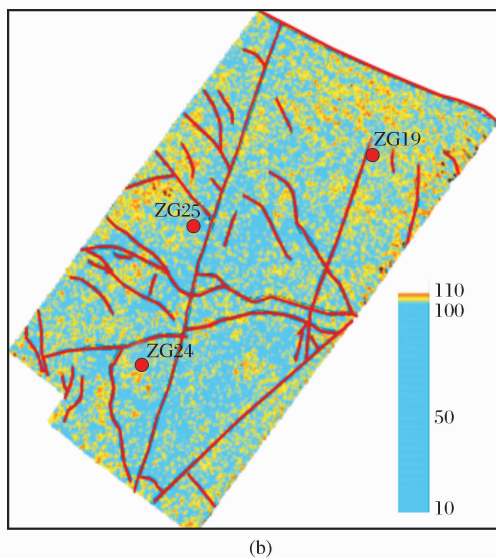
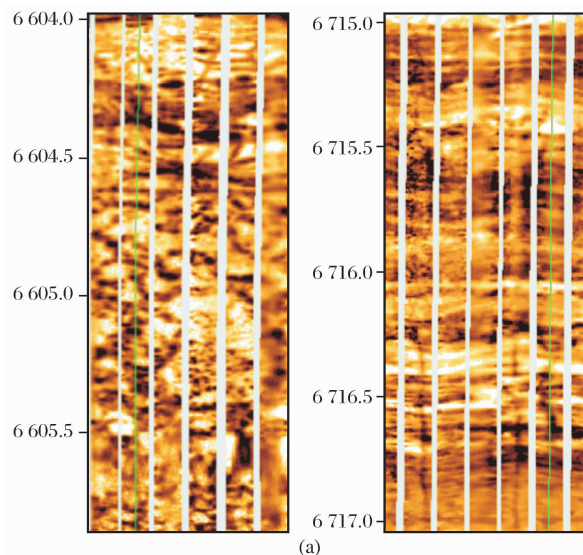


图 5 ZG19 井成像测井及

ZG19 井区下奥陶统岩溶风化壳叠前裂缝预测

叠前裂缝预测技术(AVO 梯度分析法)可以充分利用地震资料的方位角信息,直接反映地下裂缝介质的非均质性的各向异性特征。对于大断裂周围的裂缝发育带或者岩溶缝洞体的边缘地带预测效果较好,主要反映小级别的裂缝带或者是岩溶缝洞集合体的边缘,而对孔洞型储层不敏感。

上述各种裂缝预测技术的预测精度从高到低的顺序分别为叠前 AVO 梯度分析法、地震层位曲率分析法及地震波形相似性分析法,预测精度最低为古构造恢复法,在进行塔中岩溶风化壳裂缝型储层预测时,必须根据预测精度的要求选取适当的预测技术,勘探初期选取古构造恢复技术,为研究区的构造断裂

分级和组合提供依据,开发阶段应充分应用三维地震资料的叠前道集信息进行叠前裂缝预测;并结合钻井和岩心等资料,对裂缝的发育区进行准确定位。

#### 参考文献(References):

- [1] Gong Honglin. Geophysical characteristics of Ordovician Carbonate rock, central Tarim basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1):138-142. [龚洪林. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩岩石地球物理特征研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1):138-142.]
- [2] Murray G H. Quantitative fracture study, Sanish pool, Mckenzie county, north Dakota[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(1):57-65.
- [3] Su Peidong, Qin Qirong, Huang Runqiu. Prospects and status for the study on reservoir fractures[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(5):14-17. [苏培东, 秦启荣, 黄润秋. 储层裂缝预测研究现状与展望[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(5):14-17.]
- [4] Andrey Bakulin, Vladimir Grechka, Llya Tsvankin. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part I: HTI model due to a single fracture set[J]. *Geophysics*, 2002, 65(6):1788-1802.
- [5] Andrey Bakulin, Vladimir Grechka, Llya Tsvankin. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part II: Fractured models with orthorhombic symmetry[J]. *Geophysics*, 2002, 65(6):1803-1817.
- [6] Andrey Bakulin, Vladimir Grechka, Llya Tsvankin. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part III: Fractured models with monoclinic symmetry[J]. *Geophysics*, 2002, 65(6):1818-1830.
- [7] He Yudan, Wei Chunguang. The present situation and research direction of evaluation methods in fracture type reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2):537-543. [何雨丹, 魏春光. 裂缝型油气藏勘探评价面临的挑战及发展方向[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2):537-543.]
- [8] Gao Xia, Xie Qingbin. Advances in identification and evaluation of fracture[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5):1460-1465. [高霞, 谢庆宾. 储层裂缝识别与评价方法新进展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5):1460-1465.]
- [9] Xu Jianliang, Cheng Xubin, Pan Xiaohua, *et al.* Fracture and cavity prediction method In carbonate reservoirs and its application[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(11):40-42. [徐剑良, 程绪彬, 潘校华, 等. 碳酸盐岩储层缝洞的预测方法与应用[J]. *天然气工业*, 2007, 27(11):40-42.]
- [10] Sun Shangru. Application comparison of two curvature methods for predicating reservoir fractures[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(4):71-74. [孙尚如. 预测储层裂缝的两种曲率方法应用比较[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(4):71-74.]
- [11] Liu Chuanhu. Application of seismic coherent analysis technology to prediction of fractured reservoir[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, 36(2):238-244. [刘传虎. 地震相干分析技术在裂缝油气藏预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(2):238-244.]
- [12] Wang Zhenqing, Wang Hongbin, Gong Honglin. Improvement of the coherency technique and its application in carbonate fracture reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6):977-981. [王振卿, 王宏斌, 龚洪林. 地震相干技术的发展及在碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6):977-981.]
- [13] Xiao Li. Application of 3D Move fracture prediction technique in predicting Chengbei 30 buried hill fracture[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 26(3):55-60. [肖丽. 3D Move 裂缝预测技术在埕北 30 潜山裂缝预测中的应用[J]. *海岸工程*, 2007, 26(3):55-60.]
- [14] Mallick S, Craft K L, Meister L J, *et al.* Determination of deep tight gas sands using azimuthal velocity and AVO seismic data in Saudi Arabia[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(3):469-475.
- [15] Zhang Zhongjie. A review of the seismic anisotropy and its applications[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(2):281-292. [张中杰. 地震各向异性研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2):281-292.]
- [16] Bi Yanbin, Long Shengxiang, Guo Tonglou. Application of seismic azimuth anisotropic technique in fractural detection of lower Triassic Jia-2 reservoir in TNB area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(2):190-195. [毕研斌, 龙胜祥, 郭彤楼. 地震方位各向异性技术在 TNB 地区嘉二段储层裂缝检测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(2):190-195.]

## Prediction Technologies of Weathering Crust and Fracture Reservoirs in Tazhong Area

WANG Zhen-qing, WANG Hong-bin, ZHANG Hu-quan, LI Chuang, ZHANG Ji-juan

(Northwest Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Fracture is a key factor to improve the property and connectivity of carbonate reservoir, how to optimize the prediction technologies of fractures is an important work. We used the integrated seismic fracture detection technology to predict the weathering crust and fracture reservoir in the Tazhong area and contrasted with the predictive results. The results predicted by the technologies are provably identical with the drilling data. More ineffective fractures may be identified by curvature analysis. The fracture directions predicted by coherence technology are consistent with the fault strikes. The paleo-stress field analytical method is mainly suitable for the prediction of developing trend of faults and fractures. The prestack AVO gradient method has a good effect in the prediction of fracture belts around large faults and brim of karst fracture-cave body.

**Key words:** Carbonate; Fracture; Curvature; Coherent; Strain recovery; AVO gradient.