

文章编号:0253-9985(2007)06-0841-06

塔中地区碳酸盐岩裂缝综合预测技术及其应用

龚洪林^{1,2}, 潘建国², 王宏斌², 王振卿², 李 闯², 李录明¹(1. 成都理工大学, 四川 成都 610051; 2. 中国石油天然气股份有限公司
石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:塔中地区碳酸盐岩裂缝复杂多变,对储层的储渗性能、烃类运聚、产能起着至关重要的作用。针对塔中奥陶系裂缝发育的特点,形成了相干处理、应变分析、数值模拟3种裂缝预测技术。高相干相表示较致密地层的反映;低相干相表示可能是岩溶或裂缝发育反映;极低值相干相表示各级断层的反映。应变分析则是通过钻井标定,同时考虑地层厚度、岩性、裂缝发育方向等参数,对多期构造运动产生的裂缝的密度进行预测。数值模拟是利用应变、曲率或其他地震属性做约束,应用随机模拟方法,确定裂缝的平面展布与发育程度。根据岩心观察裂缝的切割关系、充填成分以及充填序次,结合测井资料和以上3种技术的裂缝预测结果及区域构造应力场的分析,对塔里木盆地塔中16—塔中30井区奥陶系碳酸盐岩裂缝发育带进行了预测,这三项技术预测的结果与井区内实际钻井奥陶系碳酸盐岩岩心裂缝参数统计值基本吻合,证实了利用相干体、应变分析和数值模拟技术综合预测塔中地区碳酸盐岩裂缝发育带是实用的,也是有效的。

关键词:相干处理;应变分析;数值模拟;裂缝;碳酸盐岩预测;塔中地区

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Comprehensive fracture prediction technologies and their application to carbonate rocks in Tazhong area

Gong Honglin^{1,2}, Pan Jianguo², Wang Hongbin², Wang Zhenqing², Li Chuang², Li Luming¹(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Northwest Branch,
Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730046, China)

Abstract: Fractures of carbonate reservoirs are complex in Tazhong area and are critical to the poroperm characteristics of the reservoirs, hydrocarbon migration and accumulation, and productivity of wells. Taking into consideration the characteristics of fractures in the Ordovician carbonates in the Tazhong area, this paper presents three fracture prediction technologies, including coherence processing, strain analysis, and numerical simulation. High coherence facies indicates dense formation and low coherence facies may mean the existence of karst cavities or fractures, while extreme low coherence facies reflects faults of different grades. Strain analysis predicts the density of fractures caused by multi-phase tectonic movements, through drilling calibration and taking into consideration the parameters such as strata thickness, lithology, and fracture orientation. Constrained by strain magnitude, curvature, and other seismic attributes, the numerical simulation determines plane distribution and development of fractures through probabilistic simulation. According to the cutting relationship, filling components and filling orders of fractures observed in core samples, this paper predicted the fractured zones in the Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong 16 – Tazhong 30 wellblock by combining logging data, fracture prediction results of the foregoing three technologies, and analysis of regional tectonic stress field. The prediction results are consistent with the statistics of fracture parameters of the cores taken from the Ordovician carbonate reservoirs in the field, showing that these technologies are practical and effective in predicting fractured zones in carbonates.

收稿日期:2007-08-22。

第一作者简介:龚洪林(1963—),男,高级工程师,石油物探。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(KTQQ-2005-010)。

Key words: coherent processing; strain capacity analysis; numerical simulation; fracture; carbonate rock prediction; Tazhong area

塔里木盆地塔中地区经过多年油气勘探,发现了塔中 I 号断裂带奥陶系碳酸盐岩油气富集带,但这套碳酸盐岩储层的基质孔隙度多小于 2%,基质渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碳酸盐岩中的裂缝具有形式复杂多变、多期成因、多期改造、多期充填的特点,裂缝的发育程度与开启性对油气藏储渗性能^[1]、烃类运聚^[2-5]、产能建设起着至关重要的作用,因此预测裂缝发育带就显得非常重要。在大量岩心观察的基础上,本文应用相干体、应变量分析和数值模拟新技术综合预测裂缝发育带。

1 地质背景

塔里木盆地塔中地区为台地相碳酸盐岩与其上覆碎屑岩组成的一个大型的继承性古隆起,碳酸盐岩顶面海拔在 $-3\ 000 \sim -6\ 000\ \text{m}$ 。塔中 I

号断裂带是塔中北斜坡,中-上奥陶统台地边缘礁滩相沉积的主控断层,近北西西走向,在隆起带发育一系列北西向高角度逆冲断层,平面上向东收敛,向西撒开呈帚状(图 1)。

塔中 I 号断裂带成型早、埋藏深,碳酸盐岩储层物性总体而言较差,但在经历多期构造变形作用与远程应力场的作用下,促进了裂缝系统的形成与埋藏溶蚀作用的发育,可在局部地区形成良好的孔-洞-缝复合型储集体,并有利于早期油气的成藏与保存,同时塔中 I 号断裂带复杂的地质特征造成了裂缝系统的复杂性与多样性。

2 裂缝预测技术

2.1 相干体数据处理技术

相干体数据处理技术就是利用地震波形相干

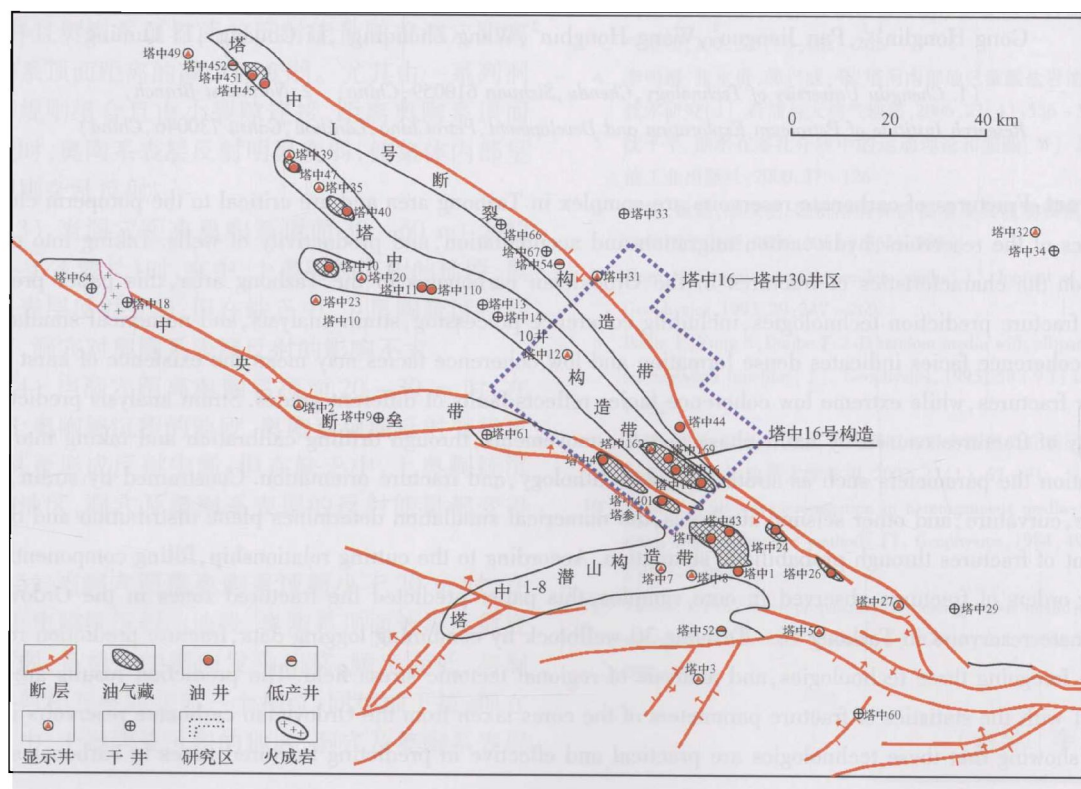


图 1 塔中 16—塔中 30 井区构造位置

Fig. 1 Sketch map showing the structural location of Tazhong 16 - Tazhong 30 wellblock

原理,计算中心地震道和指定相邻道的相关系数,将普通地震资料数据体转换成相干系数数据体,以突出地震资料中的异常现象。用“相干相”的概念,结合具体的地质条件对相干数据体进行解释,不同的相干相代表不同的地质含义。通常利用相干体资料能识别细微的岩层横向非均一性和断裂特征。塔中16—塔中30井区三维地震资料品质虽然相对较差,但由于奥陶系地层岩性横向变化较小,故影响相似性的主要地质因素为岩溶裂缝和断裂。为排除因断裂错位而在横向上引发的非相似性,采用相干体沿层切片即可预测岩溶、裂缝发育程度。如图2所示,可将奥陶系灰岩沿层相干相分类为:白色高相干相表示较致密地层的反映;黑色斑点状低相干相表示可能是岩溶或裂缝发育反映;灰色—黑色线状或条带状极低值相干相表示各级断层的反映。黑色斑点状低相干相表示可能的岩溶或裂缝发育区。在塔中16号构造

和塔中I号断裂之间的区域,塔中50和塔中12井区,构造解释表明该区域也是断裂集中发育的区域。

塔中16,塔中161,塔中162,塔中44井岩心裂缝统计显示(表1),裂缝密度分别为0.54%,0.75%,1.05%,1.79%,其中裂缝密度较低的塔中16井对应的是白色高相干相,而其他裂缝密度相对较高的3口井,则对应的是相干度较低的灰—黑色相干相,这与相干裂缝分析的结果基本吻合。

2.2 应变分析技术

应变分析技术是从地质成因的角度对裂缝进行预测的。通过对现今的地质模型从新到老进行反演,再从老到新进行正演,分别计算每期构造运动对所研究目的层产生的应变。应变是反应地层形变程度的一个属性参数。一般而言,地层应变量大表明地层形变强烈,也就可导致裂缝的发

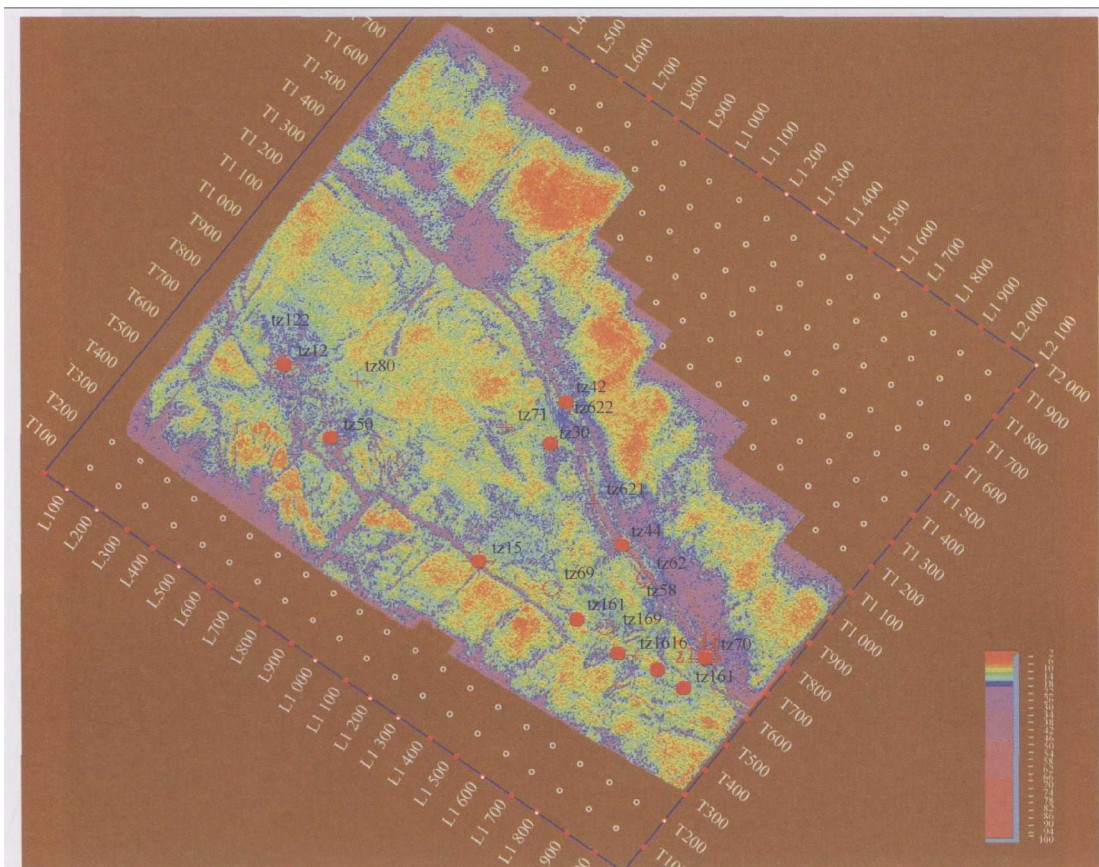


图2 塔中16—塔中30井区 $T_g 5'$ 0~40 ms 奥陶系灰岩顶面沿层相干图

Fig. 2 0~40 ms coherent image flowing $T_g 5'$ bedding plane on the top of the Ordovician limestone in Tazhong 16 - Tazhong 30 wellblock

表1 塔中16—塔中30井区奥陶系碳酸盐岩岩心裂缝参数统计

Table 1 Statistics of fracture parameters of the Ordovician carbonate rock cores in Tazhong 16 – Tazhong 30 wellblock

井号	岩心长/m	平均收获率, % 最小收获率, %	总缝数/ 条	平均裂缝密度/ (条·m ⁻¹)	占总裂缝比例, %				
					按大小分		按产状分		
					大-中缝	微小缝	垂直缝	斜交缝	水平缝
塔中161	227.33	$\frac{100}{100}$	168	0.74	11	89	74	12	14
塔中16	51.57	$\frac{94.0}{66.7}$	28	0.54	46	54	93	7	
塔中162	116.23	$\frac{100}{99}$	120	1.03	50	50	48	35	17
塔中44	40.88	$\frac{97.0}{73.8}$	73	1.79	11	89	65	32	3

育,因此用应变变量控制裂缝发育的密度,同时考虑地层厚度、岩性、裂缝发育方向等参数,分别对多期构造运动产生的裂缝的发育密度进行预测(图3),其中红色对应构造应变变量大的位置,即裂缝发育的部位,蓝色对应构造应变变量小的位置,裂缝相对欠

发育部位。可明显看出:1)裂缝发育区的分布与相干体技术预测的结果基本一致;2)裂缝主要沿断裂和构造转折端的高应变区分布。裂缝走向以北西-南东和北东-南西向为主,并发育近南北向和近东西向的裂缝,裂缝以高角度和直立缝为主。

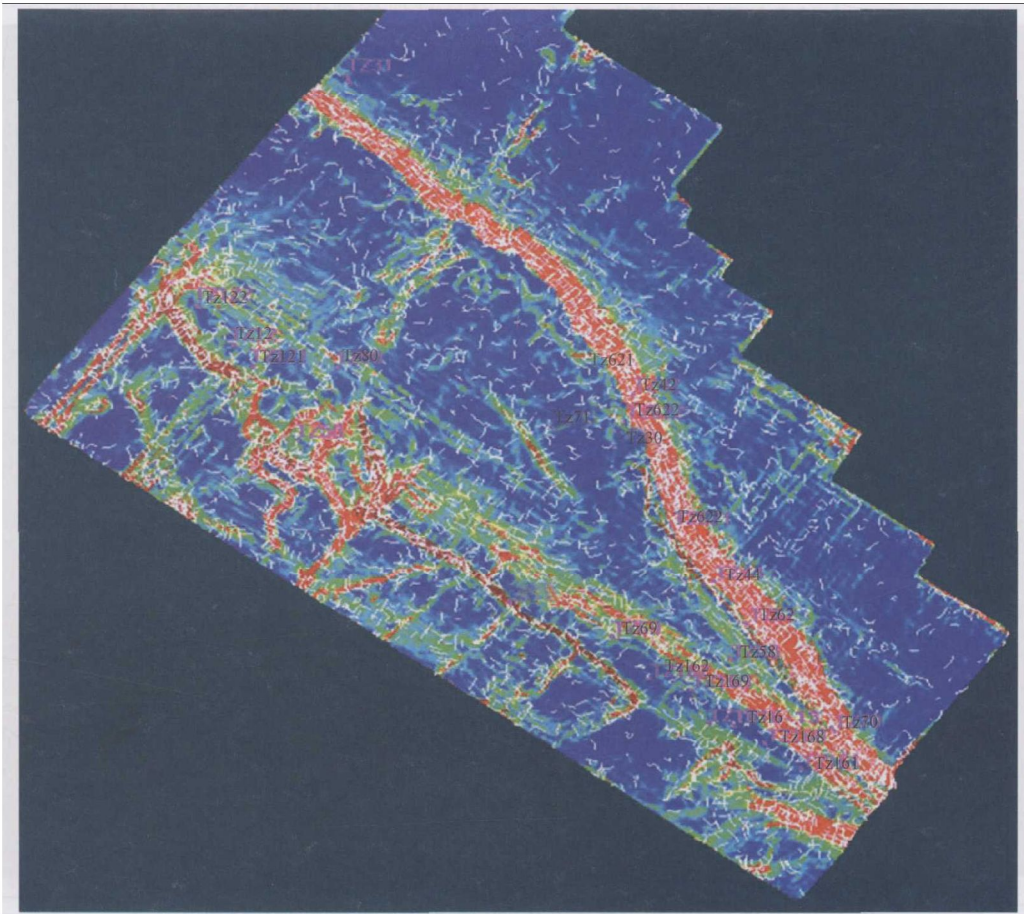


图3 奥陶系灰岩顶面应变变量分析及裂缝预测结果

Fig. 3 Results of strain capacity analysis and fracture prediction for the top of the Ordovician limestone

2.3 数值模拟裂缝预测技术

数值模拟裂缝预测技术是以随机目标建模为核心,综合应用露头、岩心、成像测井、地震属性等,建立裂缝分布的几何模型。工区内断裂发育主要有两组方向:北东-南西向和北西-南东向,根据工区内裂缝的主要发育方向和断层展布方位特征,把断裂按这两个方向分成不同组,分别进行断裂的落差、长度和走向等分析,选取裂缝数值模拟所需的基本参数,分析断裂的空间展布规律。确定裂缝发育的分形分维数,控制裂缝与断裂的离合率,进行断裂长度和走向分析,确定裂缝的最小、最大、平均长度和裂缝的倾向、走向。

通过这些分析得到断裂在空间上的展布规

律,可以用应变变量、曲率或其它地震属性做约束,应用随机模拟方法,计算出裂缝的平面展布,如图4为应变变量做约束的裂缝的平面展布图,不同颜色代表不同方向的裂缝,紫色表示北西-南东向裂缝,绿色表示北东-南西向裂缝。可以看到裂缝预测结果与应变变量分析预测结果基本一致,各个方向裂缝成网状交错出现。

3 认识

根据岩心观察裂缝的切割关系、充填成分以及充填序次^[4],并结合测井资料和以上几种方法的裂缝预测结果以及区域构造应力场的分析,大体可将裂缝分为3期(表2)。

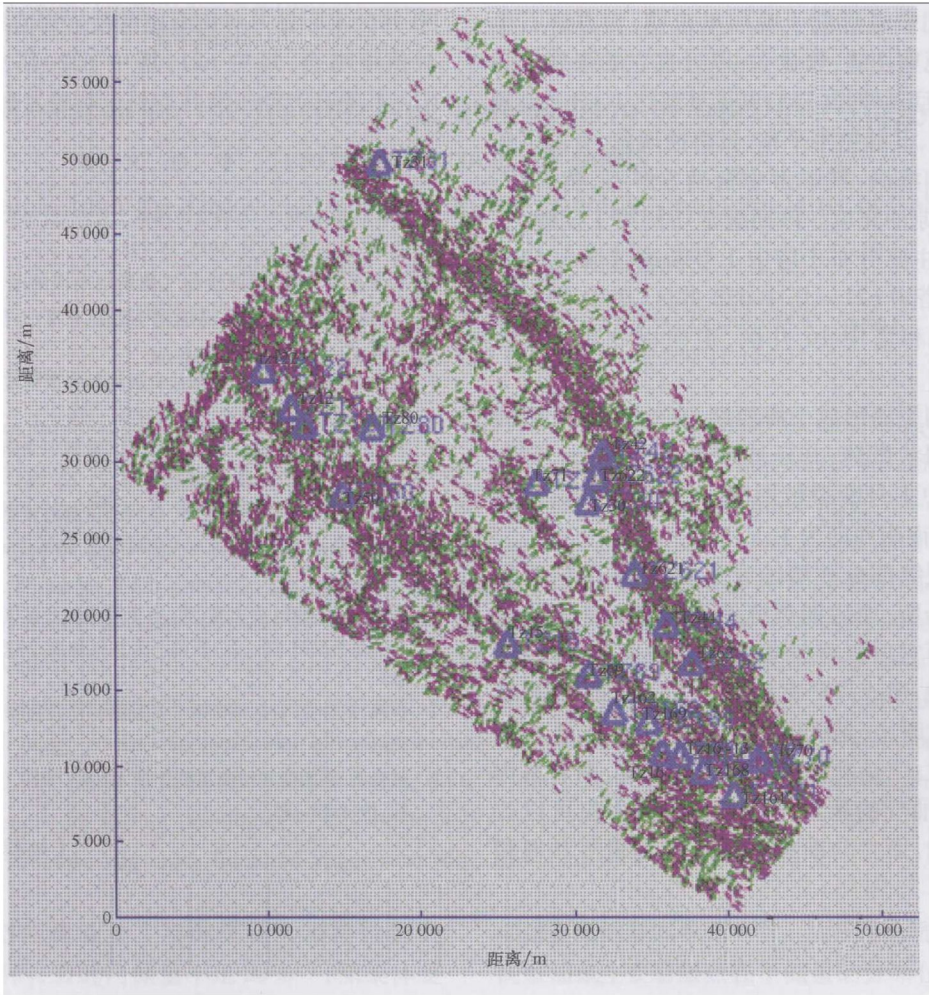


图4 塔中16—塔中30井区奥陶系灰岩顶面裂缝数值模拟预测平面分布

Fig. 4 Plane distribution of fractures predicted through numerical simulation for the top of the Ordovician limestone in Tazhong 16 - Tazhong 30 wellblock

表2 塔中16—塔中30井区奥陶系灰岩不同期次裂缝特征

Table 2 Characteristics of fractures in different periods for the Ordovician limestone in Tazhong 16 – Tazhong 30 wellblock

期次	充填物	宽度/mm	延伸长度/mm	裂缝形态	产状	有效性	性质	形成期
I期	方解石	1~50	5~100	平直、规模较大	垂直	多无效	张剪性	早加里东期
II期	方解石	1~20	1~50	规模较大	共轭剪切	多有效	剪性	晚加里东期
III期	方解石或张开	0.1~10	1~20	细小、规模小	网状微缝	多有效	剪性	海西期

第I期裂缝形成于早加里东期,为方解石充填或半充填的高角度缝,多具张剪性的特点,缝面细而平直,规模大、延伸长度长,主要分布于塔中I号断裂带塔中62—塔中44—塔中621—塔中622井区及塔中50—塔中12井区、塔中16井区,走向以北西—南东为主。

第II期裂缝形成于晚加里东期,为方解石半充填的共轭剪切缝,数量大,以近直立的张裂缝为特征,缝宽且延伸长,岩心可见其宽达1~3 cm,延伸长达1 m,其缝壁不平整,具溶蚀现象,有的可扩溶成溶缝和溶洞,其中为中粗晶方解石、萤石、石膏、沥青或原油充填。该期缝常切割第I期缝,有效缝较多,主要分布于塔中I号断裂带塔中62—塔中44—塔中621—塔中622井区、塔中50—塔中12井区和塔中16井区,走向以北东—南西为主。

第III期裂缝形成于海西期,有效缝较多,多为张剪性的网状微缝,其延伸距离短、规模小,主要分布于塔中I号断裂带周围,塔中16井区,主要以北北东—南南西向为主。

早期裂缝部分被溶蚀或充填,是深部岩溶发育的主要场所;而后期裂缝的影响则是显而易见的。一方面它可以将储集体相互沟通,明显改善其储集性能,形成高产富集区。另一方面,当裂缝的规模较大时,一是纵向上易与底水沟通,不利于油藏的开发;二是发育在大断裂附近时,两者易沟通,不利于油气的聚集和保存。裂缝不仅可以改善储集性能,而且与断裂共同为表生岩溶和埋藏

岩溶发挥了易溶通道的作用^[5]。

以上研究表明,裂缝发育带主要沿断裂和构造转折端的高应变区分布,应用相干体、应变场分析和新数值模拟这3项技术,能有效预测塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩裂缝发育带,且预测的结果基本一致。该预测结果与塔中16—塔中30井区实际钻井奥陶系碳酸盐岩岩心裂缝参数统计值相吻合,塔中621,塔中622,塔中82,塔中62—1等高产油气流井均处于裂缝发育区。

参 考 文 献

- 1 Van Golf-Racht T D. 裂缝性油藏工程基础[M]. 陈钟祥,译. 北京:石油工业出版社,1985. 15~28
- 2 斯麦霍夫 E M. 裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法[M]. 陈定宝,刘明新,刘慈群,等译. 北京:石油工业出版社,1985. 75~90
- 3 姜子昂,熊鹰. 川东南碳酸盐岩裂缝系统微型差异聚集[J]. 石油与天然气地质,1997,18(3):171~176
- 4 何治亮,陈强路,钱一雄,等. 塔里木盆地中央隆起区油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):768~778
- 5 韩革华,漆立新,李宗杰,等. 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):860~870,878
- 6 张达景,王英氏,尚志高,等. 塔里木盆地台盆区古生界油气输导体系与勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2006,27(5):604~613
- 7 包强,刘仲宣. 资阳地区震旦系裂缝特征及控制因素初探[J]. 天然气工业,1996,16(5):28~31
- 8 赵良孝. 碳酸盐岩储集层测井技术[M]. 北京:石油工业出版社,1994. 76~85

(编辑 武新民)