

文章编号: 1001-6112(2008)01-0020-06

四川盆地西部坳陷 须家河组储层裂缝特征及分布评价

周文, 戴建文

(成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 成都 610059)

摘要:四川盆地西部坳陷须家河组砂岩储层是川西地区主要产气层段,该储层孔隙度、渗透率极低,裂缝是储层的主要渗滤通道,裂缝对储层含气性起重要作用,裂缝特征识别及分布在储层评价中较关键。通过岩心观察、测井资料分析,总结出该储层的裂缝主要为斜交裂缝,缝宽主要集中在 0.5~2.0 mm,缝长主要集中在 5~50 cm。研究认为该区主要有构造成因裂缝和区域性裂缝,并以丰谷构造为例,用变形应力场模拟法、构造主曲率法和构造滤波法评价了该区构造裂缝的分布,同时用厚度法和地质构造特征评价了区域裂缝的分布特征。

关键词:裂缝特征;裂缝分布;须家河组;下三叠统;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

THE CHARACTERISTICS AND EVALUATION OF FRACTURES DISTRIBUTION IN XUJIAHE FORMATION IN THE WESTERN DEPRESSION OF THE SICHUAN BASIN

Zhou Wen, Dai Jianwen

(Chengdu University of Technology, State Key Laboratory of Reservoir Geology
and Development Engineering, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The sandstone reservoir of Xujiahe Formation in the Western Depression of the Sichuan Basin, is the main gas producing zone of the West Sichuan district. The porosities and permeability of the reservoirs are very poor. The fractures are the major filtration passages in the reservoirs and play an important role in gas containing capability of reservoir. So the feature recognition and distribution of fractures is critical to evaluation of reservoirs. The author sums up the features of fractures through the analysis of rock core and well log information, and concludes that fractures in the reservoirs are mainly diagonal fractures. The width of fractures mainly is from 0.5 to 2.0 mm and the length of fractures mainly is from 5 to 50 cm. There are two main kinds of fractures in this areas: tectoclaste and regional fractures. Taking Fenggu Structure as an example, the author makes the distribution evaluation of tectoclaste by the means of distortional stress simulation, structure curvature and structure filtration and distribution evaluation of regional fractures, which has some guide contribution on exploration and exploitation in the areas.

Key words: fracture feature; fracture distribution evaluation; Xujiahe Formation; Lower Triassic; the Western Depression; the Sichuan Basin

四川盆地川西坳陷须家河组自上而下分为四段,即须五、须四、须三和须二段。其中须五段、须三段以泥页岩沉积为主,为区域盖层,同时具自生自储特性;须四段、须二段以砂岩、砾岩沉积为主,是储

层发育段^[1]。目前从川西坳陷须家河组已发现的 7 个气藏^[2~4](图 1)可知,须家河组储层基质物性较差,属于低孔致密—超致密储层。纵向上储层物性非均质性较强,须四段储层相对物性较好,须

收稿日期:2007-04-23;修订日期:2007-12-04。

作者简介:周文(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事油气储层评价及油气田开发地质等研究。E-mail:zhouw62@cdut.edu.cn。

基金项目:“十一五”国家重点攻关项目(2001BA605A-05-01-03)。

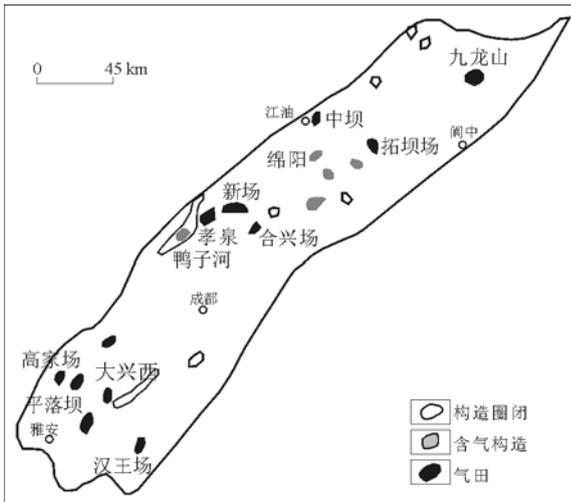


图 1 四川盆地西部坳陷须家河组气田分布^[2]
 Fig. 1 Distribution of Xujiache Fm gas fields in the Western Depression of the Sichuan Basin

二段较差。根据已开发地区的研究发现,某些局部地区由于裂缝的发育改造,其孔渗性得到了很大的改善^[5,6]。因此,裂缝特征及其分布的研究分析对该区致密储层的勘探开发具有重要指导意义。笔者从岩心、测井资料分析了川西须家河组储层的裂缝特征并进行了分类,以丰谷构造为例,用变形应力场模拟法、构造主曲率法和构造滤波发综合评价了该区构造裂缝的分布,同时评价区域裂缝的分布特征。

1 裂缝特征及成因分析

1.1 裂缝特征

1.1.1 岩心裂缝特征

根据川西已完钻的 40 余口井的岩心裂缝观察结果,该区裂缝按产状可分为垂直裂缝、斜交裂缝、网状裂缝和水平裂缝 4 类。

垂直裂缝较为常见,在统计的 6 697 条裂缝中,

垂直裂缝共 2 257 条,占总缝的 33.7%;主要发育于砂、砾岩地层当中,且常见有方解石、石英等次生矿物半充填,但在中坝、白马庙等构造上,该类裂缝的充填物较少(图 2A)。

斜交裂缝占总缝的 48%,在变形大的构造(如平落坝、大兴场、大西场、合兴场等)岩心上见有较多的斜交缝;在构造变形较小的构造(如白马庙、九龙山等)所见较少。该类缝也因构造应力作用形成,按与岩心轴水平线夹角分为高角度缝和低角度缝。这类裂缝多数常见有次生方解石全充填及半充填,缝面常见有擦痕,偶尔有阶步(图 2B)。

网状裂缝在部分井的岩心上可见,其主要发育于断层附近,即断裂裂缝带(如汉 5 井、大 15 井),或者构造变形大而存在多向变形带(图 2C)。

川西地区天然的水平裂缝相对较少,除在白马庙、汉王场、合兴场、平落坝等构造上见到少量的水平裂缝外,其他构造少见,特别是构造变形较小的构造。所见的水平裂缝见有岩纹层面(近水平产状)和层理面(近水平)破裂开的水平缝,并且见有次生石英及方解石充填,例如白马 8 井 7 ⁵²/₈₅ 号样(T₃x¹)见有一条硅质全充填水平缝。

通过 28 口井岩心裂缝统计,得到了岩心裂缝参数(表 1),其特征阐述如下。

根据统计结果,裂缝密度大的构造基本是构造形变大、断层发育的合兴场、平落坝等构造。如川合 127 井总裂缝条数达 1 204 条,平均线密度值为 15.12 条/m;平落 2 井总裂缝条数达 1 089 条,平均线密度值为 6.15 条/m。裂缝密度小的构造基本是构造变形小、断层不发育的白马庙、九龙山构造。如白马 8 井总裂缝数为 10 条,平均线密度值为 0.3 条/m;龙 5 井总裂缝数为 24 条,平均线密度值为 0.16 条/m。

根据 21 口井的岩心裂缝宽度及长度统计资料,

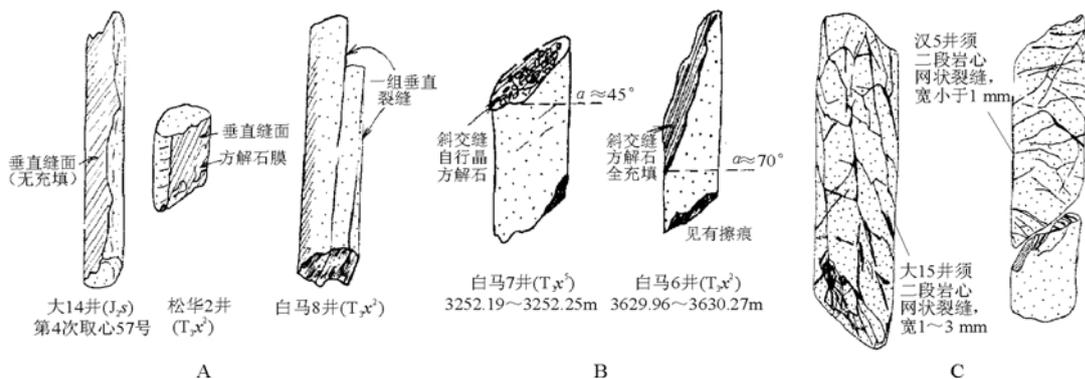


图 2 四川盆地西部须家河组地层岩心裂缝素描

Fig. 2 Description graph of core rock fractures in Xujiache Fm in the Western Depression of the Sichuan Basin

表1 四川盆地西部坳陷部分井岩心裂缝统计

Table 1 Statistic data of core rock fractures of partly well in the Western Depression of the Sichuan Basin

井号	岩心长/m	层位	总缝数/条	线密度/(条·m ⁻¹)	井号	岩心长/m	层位	总缝数/条	线密度/(条·m ⁻¹)
大14井	107.67	T ₃ x ²	20	0.190	平落6井	155.21	T ₃ x ²	778	5.01
松华2井	75.10	T ₃ x ²	5	0.070	平西1井	98.67	T ₃ x ²	608	6.16
白马2井	6.74	T ₃ x ²	10	1.480	平西2井	103.12	T ₃ x ²	45	0.44
白马6井	137.54	T ₃ x ²	4	0.030	汉5井	46.29	T ₃ x ²	427	9.23
白马8井	33.04	T ₃ x ²	10	0.300	汉4井	28.55	T ₃ x ²	30	1.05
白马7井	41.80	T ₃ x ²	1	0.020	汉2井	80.80	T ₃ x ²	22	0.27
川合127井	79.59	T ₃ x ¹⁻²	1 204	15.120	大6井	94.43	T ₃ x ²	162	1.71
川合137井	28.56	T ₃ x ^{2,4}	221	7.740	大5井	89.47	T ₃ x ²	184	2.11
川合139井	13.33	T ₃ x ^{2,4}	30	2.250	大8井	69.37	T ₃ x ²	129	1.46
川合140井	41.96	T ₃ x ^{2,4}	22	0.520	川丰125	62.72	T ₃ x ^{2,4}	53	0.85
川合148井	161.00	T ₃ x ²	18	0.112	川丰175	14.79	T ₃ x ⁴	19	1.29
平落1井	97.80	T ₃ x ²	377	3.850	龙5井	146.52	T ₃ x ²	24	0.16
平落2井	176.94	T ₃ x ²	1089	6.150	龙9井	1.70	T ₃ x ²	1	0.59
平落3井	220.56	T ₃ x ²	686	3.110	龙4井	31.39	T ₃ x ²	37	1.18

编制了岩心裂缝长度和宽度分布直方图(图3,4)。由图分析可知:1)岩心裂缝宽度主要集中在0.5~2.0 mm之间,约占49%;宽度在2.0~5.0 mm之间的缝约占26%;大于5 mm多为溶蚀缝,约占11%。由此可见,须家河组储层中以中小宽度缝为主。2)岩心垂直裂缝长度分布小于5 cm者约占

15%,5~10 cm者约占29%,10~20 cm者约占15%,20~50 cm者约占19%,50~100 cm者约占10%,100~200 cm者约占6%,200~500 cm者约占4%,500~800 cm者约占3%,而长度大于800 cm的裂缝仅占少数,个别垂直缝伸长达10 m。

1.1.2 测井裂缝特征

识别裂缝的测井方法,主要包括裂缝识别测井、长源距声波测井及微电阻率扫描成像测井(FMI)等^[7],利用这些资料可以对井下裂缝发育井段、裂缝产状及裂缝参数等进行确定。

裂缝识别测井:由于地层中裂缝(有效)中充满泥浆,因而在电导率曲线上可以出现高电导率异常(盐水泥浆)。根据异常在一组微电导率曲线上的不同反映,对井中裂缝识别及产状的判断。实际上,除裂缝外,地层中的许多地质界面可以造成电导率异常,判断中应注意结合其他资料进行区分。

长源距声波测井:按照目前的理论,纵波对水平缝及低角度斜交缝反映较为灵敏,而横波对垂直缝等高角度缝反映较为灵敏。因而从全波波形图中,可根据纵横波的衰减情况对裂缝发育井段及其可能的产状情况进行判断^[8]。从新851井须二段裂缝发育井段的全波波形特征(图5)看出,纵横波的波幅均出现严重的衰减;该井段垂直缝、斜交缝均发育,并伴有部分水平缝构成了网状裂缝结构。

FMI成像测井:从FMI测井成像图上,垂直裂缝显示垂直影像;斜交裂缝显示“三角函数”图像;水平裂缝显示水平图像^[9]。如白马8井FMI解释(图6):1)纵观全井段,FMI显示高角度缝和垂直

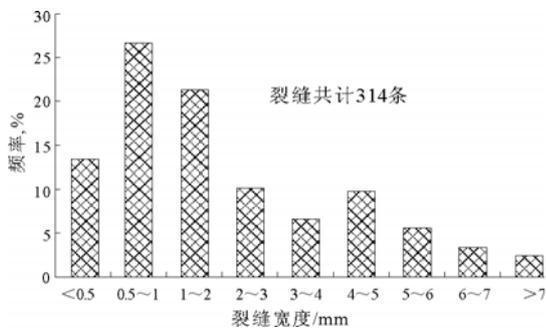


图3 四川盆地西部须家河组岩心裂缝宽度分布

Fig. 3 The width distribution of core rock fractures in Xujiahe Fm of the Western Depression, the Sichuan Basin

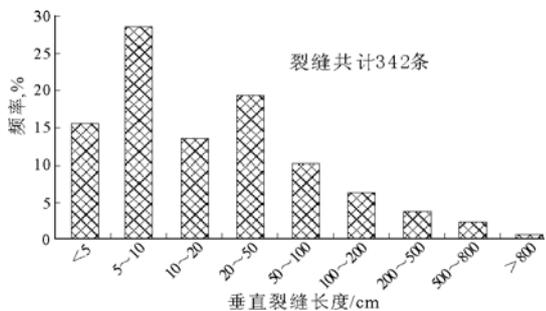


图4 四川盆地西部须家河组岩心裂缝长度分布

Fig. 4 The length distribution of core rock fractures in Xujiahe Fm of the Western Depression, the Sichuan Basin

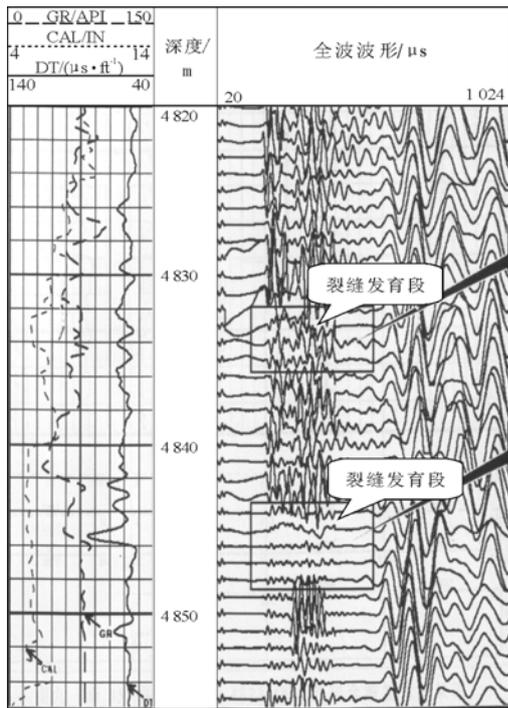


图 5 四川盆地西部坳陷新 851 井须二段全波测井
Fig. 5 Full waveform log of T_3x^2 in Well Xin851 of the Weatera Depression, the Sichuan Basin

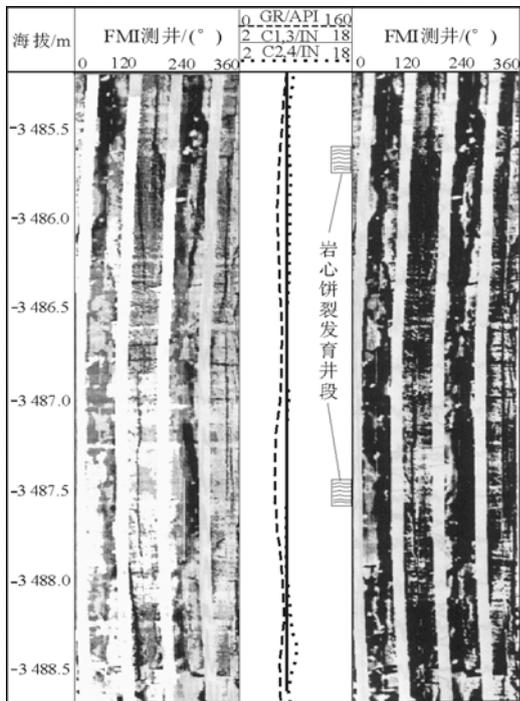


图 6 四川盆地西部坳陷白马 8 井须二段上段 FMI 测井
Fig. 6 FMI log of upper T_3x^2 in Well Baima 8 of the Western Depression, the Sichuan Basin

缝发育,斜交缝仅在局部井段(3 630~3 675 m)见到相对发育情况,水平缝较少,仅见于某些沿层面或层理的破裂;2)垂直裂缝成组,走向为 NW—SE

方向(图 7),垂直于白马庙鼻状构造的轴线方向。

1.2 裂缝成因分析

根据岩心观察和井剖面的裂缝分布特征分析,结合该区构造发展历史情况,认为该区主要存在下述主要的成因类型。

1.2.1 构造成因裂缝

构造缝广泛存在于须家河组地层中,这类裂缝与局部构造变形及断裂作用相关联。按力学成因及与断层和地层中结构面的关系可以划分为如下几亚类:1)与构造变形有关的构造张性垂直裂缝;2)晚期的剖面剪切裂缝;3)早期的平面剪切裂缝;4)断层附近的剪切裂缝、张性裂缝。

1.2.2 区域裂缝

所谓区域裂缝是指在区域构造应力场作用下形成的分布广泛、产状稳定而不受局部构造控制的裂缝系统^[10]。通过研究发现,在构造平缓地区,由于构造缝等其它裂缝所占比例较小,区域性裂缝的作用显得尤为突出。实际上无论构造变形区或是平缓地区地层中均存在这类裂缝,只是由于变形区的构造裂缝发育,其比例较高而掩盖了区域性裂缝组系的存在。因而构造平缓区更应重视区域性裂缝发育情况的研究,该区的天然气勘探应重视这种裂缝的作用。

2 裂缝的分布评价

通过岩心观察和测井裂缝特征分析,认为该区主要发育构造裂缝和区域性裂缝,并以丰谷构造为例,对这 2 种裂缝的发育程度和分布进行了评价。

2.1 构造裂缝分布评价

采用变形应力场模拟技术、主曲率法、构造滤波分析方法对研究区须四段的可能因局部变形形

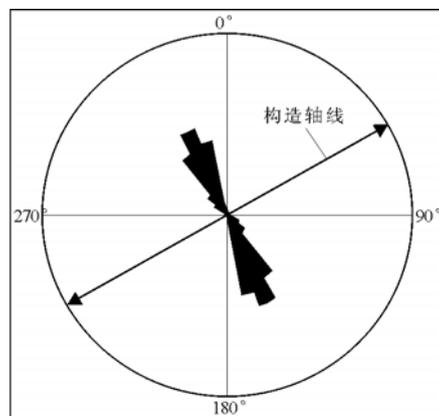


图 7 四川盆地西部坳陷白马 8 井须二段垂直裂缝走向
Fig. 7 Aligement of vertical fracture in T_3x^2 in Well Baima 8 of the Western Depression, the Sichuan Basin

成的构造缝的分布情况进行评价^[10,11]。

2.1.1 应力场模拟及结果分析

模拟了研究区构造变形时须四顶的最大水平主应力和最小水平主应力分布。主应力正值大于10.0 MPa区域主要沿构造轴线分布,这些地区是构造变形裂缝相对发育区^[12]。

2.1.2 构造主曲率分布特征

沿构造轴线,鼻凸等构造变形大,曲率值大。如按0.04 km⁻¹值为相对大小分界,可以圈定出构造裂缝发育区,其分布与构造变形应力场模拟结果得到的分布相近。

2.1.3 构造滤波分析成果

将4个方向上经构造滤波得到的拟构造图中的正向构造进行叠合,从研究区须四段构造滤波正向构造叠合图(图8)可以看出,该构造有3个方向的形变,即北东向(主要)、北西向(次要)、东西向。分析认为3个方向应为同期构造的多方向变形的产物。按照解释原理,由图8中可以看出各方面的正向构造在某些区块产生了叠合,这些地区可能是多组构造缝叠加的地区,主要分布在构造主要高点附近。

2.1.4 构造裂缝评价

根据上述3种方法对因构造变形而可能形成的裂缝分布情况的评价结果,将3种方法所得的裂缝可能发育带进行平面叠合,并根据下述原则对裂缝分布情况按级别进行评价。

裂缝相对发育区:主应力正值大于10.0 MPa、主曲率值大于0.04 km⁻¹、滤波的叠合区块。

裂缝发育一般区:上述3个界线中,只有两个界线吻合的区块。

裂缝发育较差区:上述3个界线中,只有1个界线吻合的区块。

裂缝不发育区:不位于上述任一个界线内的区块。

按上述原则,对与变形有关的构造缝分布进行评价:1)构造缝相对发育区主要分布于构造点;2)构造缝发育一般区主要分布于上述相对发育区的外围以及轴线、鼻凸部位(图9)。

2.2 区域裂缝分布评价

研究区另一种重要的裂缝类型为区域性裂缝,采用厚度法和地质构造特征分析该区区域性裂缝的分布间距和组系方向。

根据构造主体部位的受力情况,认为区域性裂缝走向为SE 130°~140°。

根据川丰125井、川丰175井的须四段岩心裂缝线密度(0.35条/m,0.2条/m)反算得到垂直裂缝的间距为3~5 m。按照川丰125井、川丰175井主要砂层厚度统计,其优势厚度值主要分布在10~15 m之间。根据Quillan^[13]提供的区域性裂缝密度与厚度关系,查得该厚度下,裂缝趋势平均密度为0.328条/m,这个值与岩心结果相近。因此,保守估计,须四段的区域性裂缝的间距在5 m左右。

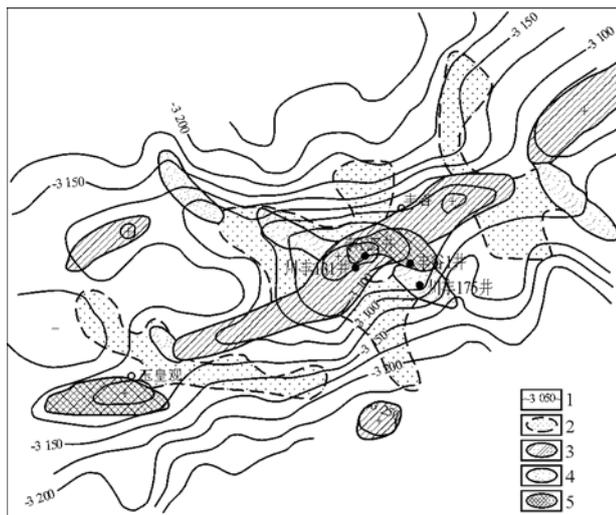


图8 四川盆地西部坳陷丰谷镇须四段顶面构造滤波正向构造叠合

- 1. 构造等高线;2. 砂岩分布区;3. 北东向滤波构造区;
- 4. 北西向滤波构造区;5. 东西向滤波构造区

Fig. 8 Filtering tectonic overprinting of the top of T₃x⁴ of Fenggu structure in the Western Depression of the Sichuan Basin

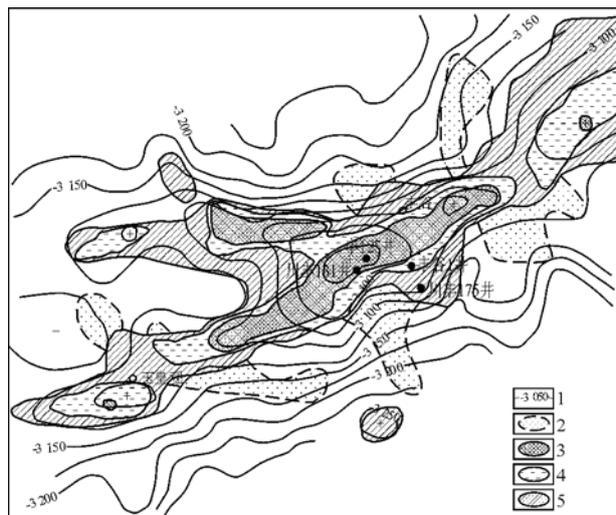


图9 四川盆地西部坳陷丰谷构造须四段顶面构造裂缝分布评价

- 1. 构造等高线;2. 砂岩分布区;3. 构造裂缝相对发育区;
- 4. 构造裂缝发育一般区;5. 构造裂缝发育较差区

Fig. 9 Evaluation of tectoclase distribution of the top of T₃x⁴ of Fenggu structure in the Western Depression of the Sichuan Basin

3 结论

1) 通过岩心观察, 垂直缝、斜交缝、水平缝在该区均有发育, 主要发育斜交缝和垂直缝, 只在变形大的构造上见有少量的水平缝。

2) 根据岩心和测井裂缝特征分析, 并结合其他资料分析, 认为川西须家河组地层裂缝主要有构造成因和与区域应力场有关的区域性裂缝。

3) 通过变形应力场模拟法、构造主曲率法和构造滤波综合评价了该区构造裂缝主要分布于构造点及轴线和鼻凸部位, 同时根据构造主体的受力情况得出区域裂缝的分布特征走向为 SE 130°~140°。

参考文献:

- 林良彪, 陈洪德, 翟常博等. 四川盆地西部须家河组砂岩组及其古地理探讨[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 511~517
- 曹 烈, 安凤山, 王 信. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 97~102
- 朱 彤, 叶 军. 川西坳陷致密碎屑岩气藏类型划分及特征[J]. 石油实验地质, 2004, 26(6): 537~541
- 任 春, 夏响华. 典型气藏上方地表化探特征分析: 以四川盆地

- 孝泉一新场气田为例[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 182~186
- 张贵生. 川西坳陷须家河组致密砂岩储层裂缝特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 41~43, 56
- 叶泰然, 黄 勇, 王 信等. 川西坳陷中段丰谷构造须家河组二段致密砂岩储层油气预测方法研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 85~89
- 许同海. 致密储层裂缝识别的测井方法及研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2005, (3): 79~82, 92
- 张 筠. 川西坳陷裂缝性储层的裂缝测井评价技术[J]. 天然气工业, 2004, 23(增刊): 43~45
- 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 58~61
- 周 文. 裂缝性油气储层评价方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998
- 于红枫, 王英民, 周 文. 川西坳陷松华镇—白马庙地区须二段储层裂缝特征及控制因素[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 25~29
- 黄泽光, 刘光祥, 潘文蕾等. 川西坳陷压扭应力场的形变特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 75~81
- Quillan H Mc. The role of basement fracturing in oil production from the oil fields of the Zagros fold belt in Southwest Iran [J]. Proceedings of the International Conference on Basement Tectonics, 1986, 5 : 305~306

(编辑 徐文明)

(上接第 19 页)

4 结论

1) 三角洲前缘浊积体的形成过程可概括为 4 个阶段, 即滑塌前的沉积物积累过程、触发机制作用过程、沉积物的二次搬运过程和浊积体的最终沉积过程。

2) 浊积体分布具有明显的区带性, 不同类型浊积体主要分布在三角洲前缘至盆地深水洼陷之间的 4 个不同区带内。其中三角洲前缘深水洼陷区沉积的与地震作用相关的二级滑塌浊积体是隐蔽油气藏勘探的最有利目标。

3) 触发机制、三角洲前缘沉积物组成及特征、前三角洲地区沉积底形形态、盆地水体深度以及水平面的升降、沉积物供应通量等因素都在不同方面直接或间接地影响到了浊积砂体的形成和分布。

参考文献:

- 严进荣, 陈 东, 郭勤涛等. 洼陷中浊积岩沉积特征及油气富集规律研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(3): 19~24
- 韦东晓, 田景春, 倪新峰. 湖相浊积砂体沉积特征及油气勘探意义[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 21~23
- 赵密福, 信荃麟, 刘泽容. 惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩的分布

- 规律及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 267~271
- 饶孟余, 钟建华, 王夕宾等. 东营凹陷东部沙三段滑塌浊积砂体沉积特征[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(3): 15~17
- 饶孟余, 钟建华, 王海侨等. 山东东营牛庄洼陷沙三中亚段浊积砂体储层特征及影响因素[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 256~262
- 高永进, 邱桂强, 陈冬霞等. 牛庄洼陷岩性油藏含油气性及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 284~287
- 李虎山, 吴云桐, 吕义军等. 牛庄地区沙三段远岸浊积扇发育与分布规律[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(2): 19~21
- 陈嘉树, 杨立明. 东辛地区沙河街组三段中部砂体沉积特征及控制因素[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 38~41
- 王金铎, 韩文功, 于建国等. 东营凹陷沙三段浊积岩沉积体系及其油气勘探意义[J]. 石油学报, 2003, 24(6): 24~29
- 赖志云, 周 维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 37~44
- 刘忠保, 赖志云, 汪崎生. 湖泊三角洲砂体形成及演化的水槽实验初步研究[J]. 石油实验地质, 1995, 17(1): 34~41
- 张关龙, 陈世悦, 鄢继华等. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 50~55
- 鄢继华, 陈世悦, 宋国奇等. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 573~578
- Einsele G, Chough S K, Shiki T. Depositional events and their records—an introduction [J]. Sedimentary Geology, 1996, 104: 1~9

(编辑 吴传芝)