

文章编号:0253-9985(2012)05-0778-07

南襄盆地安棚浅、中层系特低渗储层裂缝特征 及其与深层系裂缝对比

巩磊¹,曾联波^{1,2},李娟¹,姜建伟³,唐小梅¹,王兆生^{1,4}

(1. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
3. 中国石化 河南油田分公司 研究院,河南 南阳 473132; 4. 河北联合大学 矿业工程学院,河北 唐山 063009)

摘要:利用野外露头、岩心、成像测井和薄片等资料,分析了南襄盆地安棚浅、中层系储层裂缝的发育特征,并与深层系裂缝特征进行了对比,最后分析了控制裂缝发育的主要因素。研究区发育有构造裂缝和成岩裂缝两种类型,以高角度构造裂缝为主,裂缝平均线密度为0.42条/m,裂缝高度通常小于0.40 m,平均为0.25 m,反映裂缝主要在层内发育。微观裂缝是沟通基质粒间孔和粒内溶孔的重要通道,它使储层孔隙的连通性变好。受喜马拉雅早期和晚期水平构造挤压应力作用,该区主要发育3组裂缝。其中,近东西向裂缝最为发育,其次为北东向和北西向裂缝。安棚油田裂缝的形成与分布受构造应力场、岩性、孔隙度、渗透率、层厚以及构造等因素的影响。在相同因素的作用下,安棚油田浅、中层系裂缝的成因类型、产状及发育特征和深层系具有相似性,但浅、中层系裂缝的发育程度略差于深层系裂缝。

关键词:裂缝;深层系;浅、中层系;安棚油田;泌阳凹陷;南襄盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Features of fractures in shallow- to mid-depth reservoirs with ultra-low permeability and their comparison with those in deep reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

Gong Lei¹, Zeng Lianbo^{1,2}, Li Juan¹, Jiang Jianwei³, Tang Xiaomei¹ and Wang Zhaosheng^{1,4}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key State Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473132, China;

4. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract: Based on data of outcrops, cores, image logs and thin sections, we analyzed the features of fractures in the shallow- to mid-depth reservoirs in Anpeng oilfield of Nanxiang Basin, compared them with that of the deep reservoirs, and determined the main factors controlling the development of these fractures. The study suggests that there are two types of fractures in the shallow-to mid-depth reservoirs in the Anpeng oilfield: the tectonic fractures and the diagenetic fractures. The former of high dip-angle dominates the study area with an average linear density of 0.42/m and a height of generally less than 0.40m (averaging at 0.25m), which indicates that fractures are confined within the layers. Micro-fractures are very important channels for connecting the intergranular pores and intragranular dissolved pores, and enhance reservoir pore connectivity. Affected by horizontal tectonic compressions during the Early and Late Himalayan movements, three sets of tectonic fractures were formed in the study area, i. e. E-W, NE-SW and NW-SE striking fractures. The E-W fractures were developed better than the other two sets. The formation and distribution of these fractures in the oilfield were controlled by such factors as the tectonic stress field, lithology, porosity, permeability, layer thickness and structures. Under the same control-

收稿日期:2012-01-10;修订日期:2012-08-18。

第一作者简介:巩磊(1985—),男,博士研究生,应力场分析和储层裂缝形成、分布及预测。

ling factors, the fractures in the shallow- to mid-depth reservoirs of the field are thought to have the similar genetic types, occurrences and development characteristics to that of the deep reservoirs, but slightly lower degree of development than that of the deep reservoirs.

Key words: fracture, deep reservoir, shallow- to mid-depth reservoir, Anpeng oilfield, Miyang Sag, Nanxiang Basin

裂缝是低渗透储层油气的有效储集空间和流体流动的主要通道,影响低渗透油气田的勘探和开发效果^[1-7]。因此,开展低渗透储层裂缝的发育特征及其渗流规律研究,对提高低渗透油气藏的勘探和开发水平具有十分重要的理论和实际意义。

安棚油田是南襄盆地典型的低孔特低渗透砂砾岩油气藏,其主要目的层段为古近系核桃园组三段。核桃园组三段可细分为9个油组,其中I—VI油组为浅、中层系,Ⅶ—Ⅸ油组为深层系。前人对该区深层系储层裂缝做过大量研究^[8-16],认为深层系储层裂缝发育,裂缝控制了储层流体的渗流,对油井产能、注水效果以及开发井网的部署有重要影响。而对于安棚浅、中层系的裂缝研究,过去仅根据一口的岩心资料进行过简单的描述。根据35.10 m岩心裂缝观察,认为浅、中层系裂缝不发育,以低角度裂缝为主,裂缝对浅、中层系油藏开发的影响较小,因而一直未对浅、中层系的裂缝开展系统研究。但近年来的注水开发实践表明,浅、中层系油藏具有与深层系油藏相似的开发特征,同样表明裂缝对安棚浅、中层系油藏的开发有重要的影响。因此,开展浅、中层系储层裂缝分布规律研究,对指导该油田浅、中层系下一步开发方案调整具有重要意义。并通过对安棚浅、中层系与深层系裂缝的系统对比,可以更好地认识安棚油田裂缝的分布规律,从而指导安棚浅、中层系和深层系油藏的开发方案调整。

1 地质概况

安棚油田浅、中层系位于南襄盆地东北部泌阳凹陷的南部,为受沉积作用控制的北西—南东向鼻状构造,地层倾角 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$,构造隆起幅度为250 m,断层不发育^[9]。安棚油田浅、中层系埋藏深度大于2 300 m,厚度700 m,沉积环境为扇三角洲前缘相的水下分流河道和前缘沉积,物源方向主要来自于南东方向的栗园砂体和南西方向的平氏砂体。储层岩性为长石岩屑砂砾岩、岩屑砂砾岩、岩屑长石砂砾岩及长石砂砾岩。岩屑含量较

多,成分主要为石英岩、花岗岩及混合岩,岩石的成分成熟度和结构成熟度较低,碎屑磨圆度较差,分选较差。填隙物以碳酸盐为主,泥质含量普遍较低。储层孔隙类型以次生粒间溶孔为主,其次为粒内溶孔和填隙物内微孔及裂缝^[8,10,15,17]。储层物性具有低孔隙度(平均6.75%)和特低渗透率(平均 $4.66 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)特征,物性纵向变化明显,随埋深增加,储层物性变差。安棚油田深层系埋藏深度大于3 000 m,厚度500 m,与浅、中层系具有相似的构造特征和储层特征,其差别主要体现在:①安棚深层系地层倾角为 $7^{\circ} \sim 12^{\circ}$,略陡于浅、中层系;②受埋藏深度较深等因素的影响,安棚深层系储层物性差,平均孔隙度和渗透率分别为5.37%和 $1.29 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层物性略差于浅、中层系。

2 浅、中层系裂缝发育特征

根据野外相似露头、岩心及薄片资料,安棚油田浅、中层系特低渗透储层裂缝可分为构造裂缝和成岩裂缝两种成因类型。构造裂缝是该区的主要类型(图1a,图2a),它们广泛分布于浅、中层系储层各种岩性中,分布受岩层控制,裂缝与层面垂直,并终止于层面上,具有方向性明显、分布规则及相应裂缝面特征。

根据定向取心资料以及成像测井资料分析,安棚油田浅、中层系发育有3组裂缝,其中以近东西向裂缝最发育,其次是北东向和北西向裂缝(图3a)。该区裂缝以高角度裂缝为主,裂缝倾角大于 70° 者占78.0%以上(图4),此外,在一些局部井段还发育近水平裂缝和倾斜裂缝。近水平裂缝主要由两种类型,一类是主要发育在泥质岩类中的成岩裂缝,它们通常顺微层面发育,具有顺微层面弯曲、断续、分叉、尖灭、合并等特征。另外一类是在构造翼部发育的近水平剪切裂缝,它们的产状近水平,但与层面具有一定的交角,具有较好的等间距性,其形成主要与构造挤压作用下断层的逆冲作用或层间滑动造成的剪切作用有关^[18]。



图1 南襄盆地安棚油田储层岩心上的构造剪切裂缝

Fig. 1 Tectonic shear fractures in cores from reservoir rocks in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

a. 浅、中层系, B99 井, 2 713. 50 m;

b. 深层系, A2020 井, 3 059. 50 m

通过岩心裂缝统计, 安棚地区浅、中层系岩心高角度构造裂缝的平均线密度 0.42 条/m。裂缝在不同构造部位、不同小层和不同井段的发育程度相对较大。从岩心裂缝结果看, 安棚浅、中层系裂缝的高度通常小于 0.40 m, 平均 0.25 m, 最大可达 0.80 m, 反映裂缝主要在层内发育。根据裂缝延伸长度和高度的统计关系, 推测裂缝在平面上的延伸长度为 2.8~4.5 m, 平均为 3.4 m。

根据 756 块铸体薄片资料分析和计算, 浅、中层系储层微观裂缝面密度主要分布在 0.50 cm/cm^2 以内, 平均为 0.39 cm/cm^2 ; 孔隙度主要分布在 0.30% 以内, 平均为 0.17%; 渗透率多小于 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $3.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。微观裂缝是沟通基质粒间孔和粒内溶孔的重要通道, 使储层孔隙的连通性变好, 有利于特低渗透油田的开发^[1,3,19]。

3 浅、中层系与深层系裂缝对比

杨永利^[10]、龚银忠^[8]等对安棚深层系的裂缝特征进行了较为详细的描述。在此基础上, 我们通过对南襄盆地安棚浅、中层系的裂缝发育特征与深层系裂缝进行了系统对比。通过对安棚浅、中层系的裂缝和深层系系统对比表明(表1), 安棚油田浅、中层系和深层系具有相同的裂缝类型, 都以与层面近垂直的构造剪切裂缝为主, 其次为顺层分布的成岩裂缝(图1, 图2)。裂缝的组系和方向也一致(图3), 均发育有 3 组裂缝, 且都以近东西向最为发育, 北东向和北西向次之。裂缝的倾角分布也具有较好的一致性(图4), 裂缝倾角大多数在 70° 以上, 反映浅、中层系和深层均以高角度裂缝为主的特点, 只是在深层系低角度缝出现的频率略高于浅、中层系, 主要与构造挤压作用下, 深层构造翼部地层的层间滑动作用较强, 从而产生了一些近水平的剪切裂缝, 而这类裂缝在浅、中层系不发育。

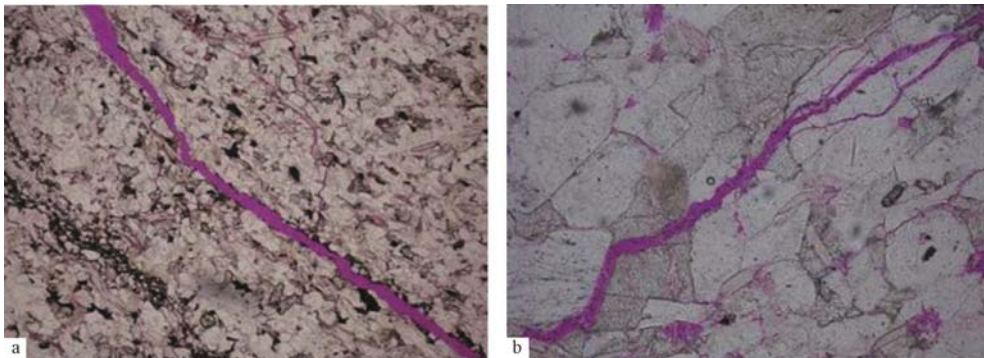


图2 南襄盆地安棚油田储层薄片上的微观构造裂缝

Fig. 2 Tectonic micro-fractures in thin sections from reservoir rocks in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

a. 浅、中层系, B246 井, 2 702. 80 m; b. 深层系, B195 井, 3 509. 70 m

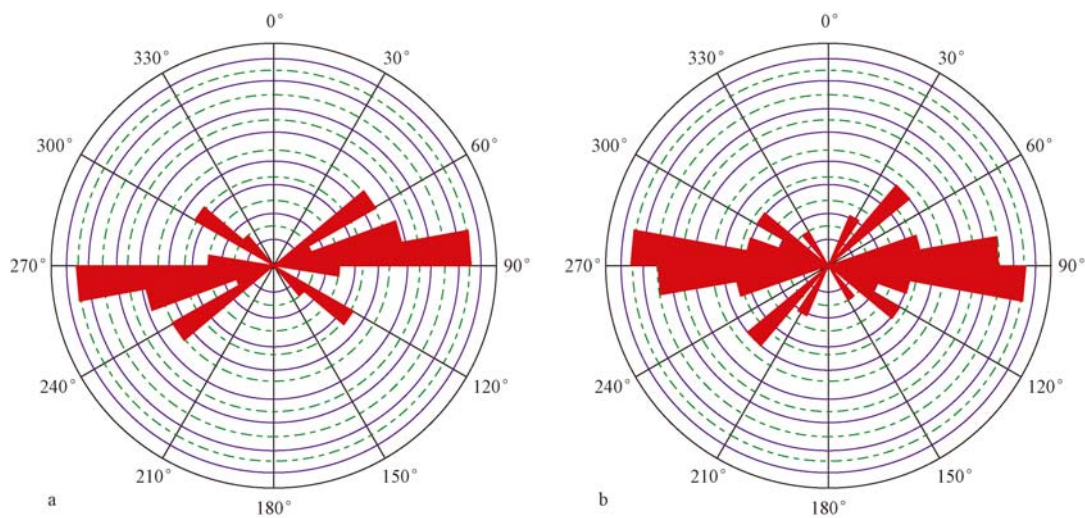


图3 南襄盆地安棚油田储层裂缝走向玫瑰花图

Fig.3 Rose diagrams of fracture strikes in reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

a. 浅、中层系(据定向取心,裂缝数量43条);b. 深层系(据定向取心和成像测井,裂缝数量63条)

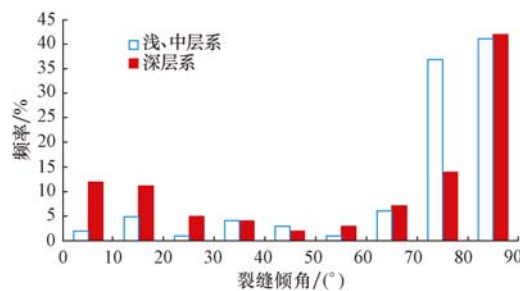


图4 南襄盆地安棚油田储层浅、中和深层系储层裂缝倾角分布对比

Fig.4 Comparison of fracture dip-angle distributions between shallow- to mid-depth reservoirs and deep reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang basin

表1 南襄盆地安棚油田储层浅、中层系与深层系裂缝特征对比

Tab.1 Comparisons of fractures between shallow- to mid-depth reservoirs and deep reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

裂缝特征	浅、中层系	深层系
裂缝成因类型	以构造裂缝为主,其次为成岩裂缝	以构造裂缝为主,其次为成岩裂缝
裂缝组系与方位	3组裂缝,以近东西向最发育,其次是北东东向和北西向	3组裂缝,以近东西向最发育,其次是北东向和北西向
裂缝倾角	以高角度裂缝为主,近水平裂缝和倾斜裂缝较少	以高角度裂缝为主,倾斜裂缝不发育,在构造边部局部井段发育近水平裂缝
裂缝密度	宏观裂缝平均线密度为0.42条/m;微观裂缝平均面密度为0.39 cm/cm ²	宏观裂缝平均线密度为0.53条/m;微观裂缝平均面密度为0.52 cm/cm ²
裂缝规模	高度一般小于0.40 m;估算延伸长度主要为2.8~4.5 m	高度一般小于0.60 m;估算延伸长度主要为3.0~5.0 m
微观裂缝的孔隙度和渗透率	孔隙度主要分布在0.30%以内,平均为0.17%;渗透率小于5.0×10 ⁻³ μm ² ,平均为3.0×10 ⁻³ μm ²	孔隙度主要分布0.50%以内,平均为0.28%;渗透率主要小于10.0×10 ⁻³ μm ² ,平均为6.1×10 ⁻³ μm ²

裂缝的发育程度可以用裂缝线密度、面密度以及裂缝的物性参数等特征参数来进行描述^[20-21]。通过对安棚浅、中层系和深层系储层裂

缝的上述参数进行对比研究发现,无论是从宏观裂缝还是从微观裂缝来讲,深层系的裂缝密度都比浅、中层系裂缝密度要大,深层系裂缝的规模也

较大,裂缝的孔隙度和渗透率也较高(表1)。

通过以上对比可以看出,由于安棚油田浅、中层系和深层系都属于古近系核三段,它们分布在同一构造层中,具有相似的沉积特征、构造特征及其形成演化历史^[8,15,17]。因此,安棚油田浅、中层系和深层系在裂缝成因类型、裂缝组系与方位以及裂缝的倾角等方面具有较好的一致,只是安棚深层系的裂缝密度、孔隙度和渗透率比浅、中层系更高,反映深层系裂缝比浅、中层系裂缝更发育的特征。

4 裂缝发育控制因素

由于安棚浅中层系和深层系储层的裂缝成因和分布特征具有较好的类似性,反映它们是在统一的构造应力场下形成的,具有相同的裂缝形成时期、成因机理及其主控因素。深入分析安棚油田控制裂缝发育的地质因素,对认识该区深层和浅、中层裂缝的发育规律具有重要的指导意义。

安棚地区特低渗透砂砾岩储层裂缝的形成除了与裂缝形成时期的古构造应力场有关外,还受储层岩性、物性、层厚和构造等储层内部因素影响。根据裂缝的相互切割关系,该区存在一组裂缝明显切割另一组裂缝的现象,反应该区构造裂缝主要分两期形成,这与裂缝充填物的包裹体测年数据一致,裂缝充填扩张脉包裹体均一温度主要分布在100~120℃,其次为170~180℃。此外,裂缝充填方解石的碳-氧同位素分析也证实了该区构造裂缝的两期形成^[9]。结合研究区构造演化特征^[22],该区的构造裂缝主要在喜马拉雅早期和喜马拉雅晚期形成。喜马拉雅早期和喜马拉雅晚期的古构造应力场控制了裂缝的成因类型、组系、产状及其力学性质,而储层内部因素影响了不同组系和不同层位裂缝的发育程度。

岩性是影响裂缝发育的基础,也是控制该区裂缝发育程度最为重要的因素之一。影响储层裂缝发育的岩性因素包括岩石成份、颗粒大小等^[5,23-25]。由于不同岩性的岩石成分及结构、构造不同,使岩石性质各异,因而在相同构造应力作用下,裂缝的发育程度不一致。脆性组份含量越高,岩石颗粒越细,裂缝的发育程度越高。根据不同岩性裂缝密度统计,该区砂岩中高角度构造裂缝的发育程度比泥岩中的好,而低角度裂缝在泥岩和含炭质砂岩中更为发育。在砂岩中,细砂岩

中的构造裂缝密度比中砂岩更大,例如,该区浅中层系细砂岩、中砂岩和泥质砂岩的平均岩心裂缝线密度分别为0.88,0.76和0.41条/m,反映了相同组分的岩石,颗粒越细,越有利于构造裂缝的发育。深层系裂缝也具有相同的分布规律(图5)。

储层物性是影响不同层位裂缝发育程度的重要因素^[23]。随着孔隙体积减小,岩石变得致密,强度增大,在经过弹性变形以后,在较小应变时就表现出破裂变形,使得具有低孔隙度、低渗透率的岩石裂缝更发育。受埋深以及沉积微相等因素的控制,该区浅、中层系的储层物性好于深层系,其平均孔隙度分别为6.75%和5.37%,渗透率分别为 $4.66 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $1.29 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,这是造成深层系储层裂缝比浅中层系裂缝更为发育的重要原因。

裂缝发育程度受岩层单层厚度控制^[23,26-27]。通过大量地表露头和岩心不同层厚裂缝间距统计,安棚地区特低渗透砂岩储层裂缝的间距服从对数正态函数分布。在一定层厚范围内,裂缝的平均间距与裂隙化的岩层厚度呈较好的线性相关关系,即随着裂隙化岩层厚度增大,裂缝间距相应增大,密度减小。

构造是控制该区构造裂缝形成与发育的重要因素,它通过控制不同构造部位的局部应力分布来控制其裂缝发育程度^[23,28]。该区断层不发育,安棚鼻状构造是控制裂缝发育的主要构造因素。鼻状构造的形成使储层发生弯曲变形或层间滑动而产生剪切作用,对裂缝的发育具有积极的作用,在鼻状构造的轴部和转折端等构造部位应力集中,裂缝最发育,而鼻状构造翼部的裂缝发育程度相对较差^[11,23]。由于深层系的地层倾角要大于浅中层系,地层弯曲变形程度大,所以其裂缝发育程度也较强。

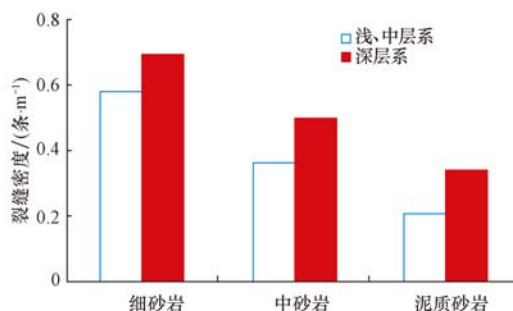


图5 南襄盆地安棚油田储层不同岩性裂缝密度分布

Fig. 5 Fracture densities of reservoirs with different lithologies in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin

5 结论

1) 安棚浅、中层系主要发育构造裂缝和成岩裂缝两种类型,其中以高角度构造裂缝为主。该区发育3组构造裂缝,以近东西向裂缝最发育,其次是北东向和北西向裂缝。裂缝平均线密度为0.42条/m,主要在层内发育。微观裂缝平均面密度为0.39 cm/cm²,是沟通基质粒间孔和粒内溶孔的重要通道。

2) 安棚浅、中层系和深层系储层裂缝具有相同的成因类型、分布特征及发育规律,但无论是从宏观裂缝还是从微观裂缝来讲,深层系裂缝的发育程度都比浅、中层系裂缝更为发育。

3) 安棚浅、中层系和深层系裂缝发育的控制因素相同。该区特低渗透砂砾岩储层裂缝的形成与分布除了与裂缝形成时期的古构造应力场有关外,还受储层岩性、物性、层厚和构造等储层内部因素影响。古构造应力场控制了裂缝的成因类型、组系、产状及其力学性质,而储层内部因素影响了不同组系和不同层位裂缝的发育程度。

参 考 文 献

- [1] 郭彤楼. 川东北地区碳酸盐岩层系孔隙型与裂缝型气藏成藏差异性[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 311-317, 326.
Guo Tonglou. Differences in reservoir forming between porous and fractured gas pools in carbonates, the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 311-317, 326.
- [2] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田 H3 层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 229-235.
Tu Bin, Ding Zupeng, Liu Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H-3 reservoir of Huo-shaoshan oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 229-235.
- [3] Zeng L B, Gao C Y, Qi J F, et al. The distribution rule and seepage effect of the fractures in the ultra-low permeability sandstone reservoir in east Gansu Province, Ordos Basin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 51(S2): 44-52.
- [4] 陈冬, 陈力群, 魏修成, 等. 火成岩裂缝性储层测井评价——以准噶尔盆地石炭系火成岩油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 83-90.
Chen Dong, Chen Liqun, Wei Xiucheng, et al. Log evaluation of fractured igneous reservoirs: a case study of the Carboniferous igneous reservoirs in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 83-90.
- [5] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11-17.
Zeng Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 11-17.
- [6] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714.
Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.
- [7] 张莉, 杨亚娟, 岳乐平, 等. 哈南阿尔善油藏微裂缝特征及其对开发的影响[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 158-161.
Zhang Li, Yang Yajuan, Yue Leping, et al. Characteristics of micro-fractures and their influence on water flooding in Aershan reservoir, Hanan oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 158-161.
- [8] 龚银忠, 胡书奎, 沈祖吉, 等. 安棚深层系储层裂缝对开发的影响及对策[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(5): 76-79.
Gong Yinzong, Hu Shukui, Shen Zuji, et al. The effect of Anpeng deep reservoir fracture to development and counter measure[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(5): 76-79.
- [9] 周文, 张银德, 闫长辉, 等. 泌阳凹陷安棚油田核三段储层裂缝成因、期次及分布研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 157-165.
Zhou Wen, Zhang Yinde, Yan Changhui, et al. Genesis, stages and distribution of the fractures in H3 reservoir in Anpeng oil field, Miyang Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 157-165.
- [10] 杨永利, 姜建伟, 卢小欧. 安棚油田深层系低渗透储层裂缝及其贡献[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 34-36.
Yang Yongli, Jiang Jianwei, Lu Xiaou. Deep low-permeability reservoir fractures and their contribution in Anpeng Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(5): 34-36.
- [11] 王国鹏, 郑浚茂, 樊中海, 等. 泌阳凹陷安棚鼻状构造的沉积成因及裂缝分布[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 38-41.
Wang Guopeng, Zheng Junmao, Fan Zhonghai, et al. Depositional genesis of Anpeng structural nose and fractures distributed in Anpeng deep zones[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 38-41.
- [12] 王国鹏, 胡铎波, 张延章, 等. 安棚油田储层裂缝特征及其形成期次分析[J]. 西北地质, 2005, 38(4): 72-77.
Wang Guopeng, Hu Xinbo, Zhang Yanzhang, et al. Reservoir fracture characteristics and generation analysis in Anpeng oil-field, Biyang depression[J]. Northwestern Geology, 2005, 38

- (4):72-77.
- [13] 周文,闫长辉,王洪辉,等. 泌阳凹陷安棚油田核三段储层天然裂缝特征研究[J]. 矿物岩石,2003,23(3):57-60.
Zhou Wen, Yan Changhui, Wang Honghui, et al. Study of characteristics of natural fracture in H3 reservoir of Miyang sag, Anpeng oil field [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(3):57-60.
- [14] 段心建,冯士平,陆建林,等. 泌阳凹陷安棚深层储集层裂缝特征及勘探潜力[J]. 新疆石油地质,2002,23(1):30-31.
Duan Xinjian, Feng Shiping, Lu Jianlin, et al. The fracture characteristics and exploration of Anpeng deep reservoir in Miyang sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(1):30-31.
- [15] 王振奇,侯国伟,张昌民,等. 赵凹油田安棚区深层系低渗透致密砂岩储层特征[J]. 石油与天然气地质,2001,22(4):372-377.
Wang Zhenqi, Hou Guowei, Zhang Changmin, et al. Reservoir characteristics of low permeable sandstone in deep level from Anpeng area, Zhaoao oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4):372-377.
- [16] 翁大丽,赵跃华,高孝田. 安棚深层系低渗透砂岩油藏裂缝研究[J]. 特种油气藏,1999,6(2):8-12.
Weng Dali, Zhao Yuehua, Gao Xiaotian. Study on fractures and fissures of low permeability sandstone reservoirs in Anpeng deep zone [J]. Special Oil & Gas reservoirs, 1999, 6(2):8-12.
- [17] 金振奎,陈祥,明海慧,等. 泌阳凹陷安棚油田深层系成岩作用研究及其在成岩圈闭预测中的应用[J]. 沉积学报,2002,20(4):614-620.
Jin Zhenkui, Chen Xiang, Ming Haihui, et al. Study on diagenesis of deeply-buried strata in Anpeng oilfield of Biyang sag and its application to prediction of diagenetic traps [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4):614-620.
- [18] 曾联波,王正国,肖淑容,等. 中国西部盆地挤压逆冲构造带低角度裂缝的成因及意义[J]. 石油学报,2009,30(1):56-60.
Zeng Lianbo, Wang Zhengguo, Xiao Shurong, et al. The origin and geological significance of low dip-angle fractures in the thrust zones of the western basins of China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 30(1):56-60.
- [19] Zeng L B. Microfracturing in the Upper Triassic Sichuan Basin tight gas sandstones: tectonic, overpressuring, and diagenetic origins [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(12):1811-1825.
- [20] Ortega O J, Marrett R A, Loubach S E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(2):193-208.
- [21] Narr W, Lerche I. Joint spacing in sedimentary rocks [J]. Journal Structural Geology 1991, 13(9):1037-1048.
- [22] 杨道庆,陆建林. 泌阳凹陷新生代构造演化及其形成机制[J]. 石油天然气学报,2005,27(4):416-419.
Yang Daoqing, Lu Jianlin. Tectonic evolution and formation mechanism of Biyang depression in Kainozoic [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(4):416-419.
- [23] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京:科学出版社,2008:1-4.
Zeng Lianbo. Formation and distribution of fractures in low-permeability sandstone reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2008:1-4.
- [24] Catherine L H, Lorenz J, Lawrence T I. Lithological and structural controls on natural fracture distribution and behavior in the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and north slope subsurface, Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(10):1700-1720.
- [25] 黄保钢,汪利兵,赵春明,等. JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质,2011,32(5):710-717.
Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, et al. Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5):710-717.
- [26] Rijken P, Cooke M L. Role of shale thickness on vertical connectivity of fractures: application of crack-bridging theory to the Austin Chalk, Texas [J]. Tectonophysics, 2001, 337(1/2):117-133.
- [27] Narr W, Suppe J. Joint spacing in sedimentary rocks [J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13(9):1037-1048.
- [28] 曾联波. 雷家油田下第三系低渗透储层裂缝特征[J]. 石油与天然气地质,1999,20(2):167-169.
Zeng Lianbo. Fracture characteristics of Eocene low-permeable reservoirs in Leijia oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2):167-169.

(编辑 高岩)