

陕甘宁盆地延长统区域裂缝 的形成及其油气地质意义

曾联波¹, 郑聪斌²

(1. 石油大学, 北京 102200; 2. 长庆油田勘探局, 陕西 西安 710021)

提要:陕甘宁盆地三叠系延长统由于受到水平挤压和隆起等多期应力作用, 形成了 4 组区域裂缝, 其中东西向和北西向裂缝以及南北向和北东向裂缝分别属于共轭剪切裂缝, 它们分别在燕山期北西西向挤压和喜马拉雅期北北东向挤压运动中形成。由于受地层非均质性影响, 该区中北部主要发育东西向和南北向两组裂缝, 而南部主要发育北西向和北东向两组裂缝。区域裂缝系统控制了延长统储集层渗透性的差异, 对油气运移及开发方案的确定有重要作用。

关 键 词:区域裂缝; 油气地质; 延长统; 陕甘宁盆地

中图分类号: P 542.3

文献标识码: A

文章编号: 1000—3967(1999) 04—0391—06

随着对裂缝性储集层数量和储量发现的不断增加, 人们对储层裂缝成因、分布特征及其在勘探和开发地质中作用的认识日益深入。裂缝提高了储层的渗透性, 尤其在低渗透储层中, 裂缝是储层中油气运移和流体渗流的主要通道, 影响着油气分布及开发效果, 对油气田勘探和开发方案的布置以及提高采收率有重要意义。

岩层中的裂缝以构造成因为主, 从控制裂缝分布的地质因素来看, 主要分为两类: 一类为构造裂缝, 其分布与褶皱和断层具有特定的时空关系; 另一类为在相对未变形地层中广泛发育, 破裂面两侧无明显水平错动且垂直于岩层面的区域裂缝, 它的分布与区域应力场有关。虽然区域裂缝的重要性仅次于构造裂缝, 在一些油气田中区域裂缝性岩层可成为良好的储集层, 但人们对区域裂缝并没有给予足够的重视。区域裂缝可分布在多种构造和不同的岩层中, 尤其当区域裂缝系统与构造裂缝系统相叠加时, 可形成极好的裂缝性储集层。

陕甘宁盆地三叠系延长统是盆地形成后沉积的第一套含油层系, 主要埋深为 1 000~1 400 m, 由三角洲沉积体系的细砂岩、粉砂岩和砂质泥岩组成, 厚度在 1 000 m 以上。在构造上为燕山期—喜马拉雅期形成的平缓西倾的大单斜, 地层倾角小于 1°, 其上发育一系列由于沉积作用造成的鼻状构造。该区储层岩石致密, 物性差, 非均质性强, 岩石孔隙度为 10% 左右, 渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

收稿日期: 1998—03—30

基金项目: 中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目《陕甘宁盆地低渗透油田开发配套新技术》下属专题。

(作者简介: 曾联波(1967—) 男, 石油大学地球科学系讲师, 从事低渗透储层和构造地质教学工作。)
Copyright © 1999 China Academic Electronic Journal. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 区域裂缝的分布特征

根据靖安、安塞和固城川地区的古地磁定向岩心及露头区研究,该区三叠系延长统中分布有东西向、北西向、南北向和北东向 4 组区域性裂缝。由于受沉积作用造成的非均质性影响,各组裂缝的发育程度在不同区域有所差别。在盆地中北部的靖安地区和安塞地区,以与地层走向和倾向平行的东西向和南北向两组正向正交裂缝为主(图 1-A),而北东向和北西向裂缝仅局部发育。根据裂缝的饱和度计算,东西向和南北向裂缝的饱和度值分别为 0.365 和 0.369,北西向和北东向裂缝的饱和度值分别为 0.508 和 0.516,反映东西向和南北向裂缝型式发育完好,达到饱和状态,而北西向和北东向裂缝型式发育较差^[1]。在盆地南部的固城川地区,以与地层走向和倾向斜交分布的北西向和北东向两组斜向正交裂缝为主(图 1-B),而东西向和南北向裂缝发育较差。裂缝的延伸方向受构造应力场及储层的非均质性影响,各组裂缝的方位可发生 10~20° 的偏移。

区域裂缝的分布规则,规模大,间距宽,发育范围广,产状相对较稳定,延伸较远,并组成良好的裂缝网络系统。裂缝的分布受岩层控制,一般分布在岩层内,垂直并终止于层面上。同一岩层内裂缝的分布表现出较好的等距性。裂缝的间距呈正态函数分布,主要分布在 80~230 cm 之间,在部分裂缝密集发育段,其裂缝线密度可达到 10 条/米以上。

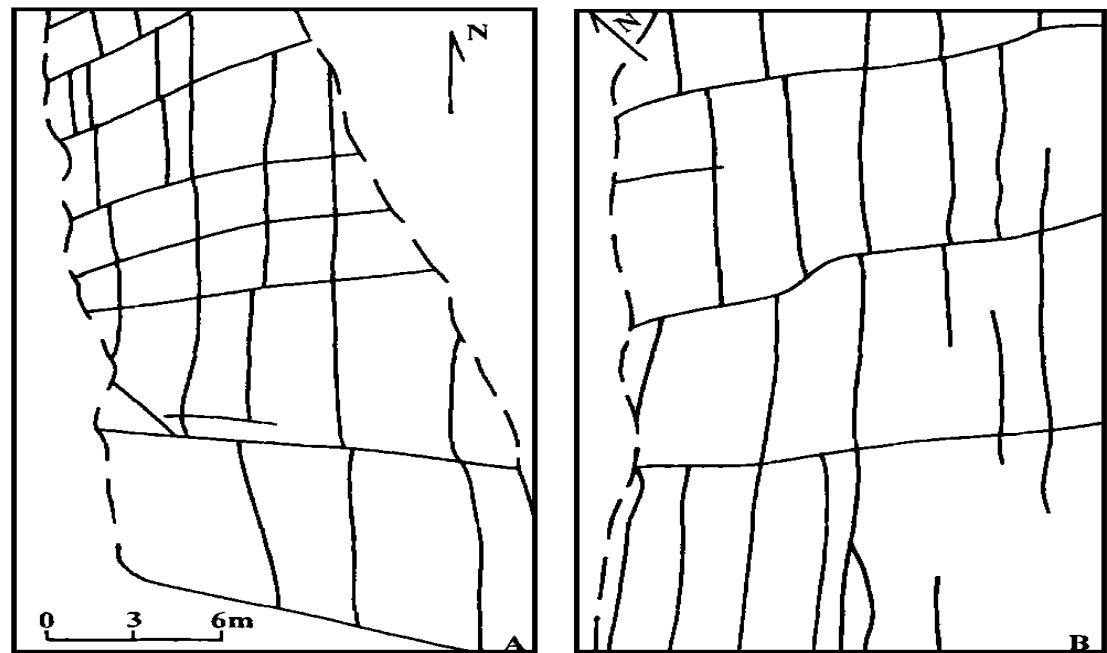


图 1 陕甘宁盆地延长统砂岩中主要区域裂缝平面分布图

Fig. 1 Plan showing the distribution of regional fractures in sandstone of the Yanchang epoch of the Shaanxi-Gansu-Ningxia basin
A—靖安地区,B—固城川地区

岩层中裂缝的发育程度明显地受其单层厚度控制,在一定的层厚范围内,裂缝的平均间距与裂缝化的岩层厚度之间呈较好的正线性关系(图 2),即表明在其他条件相同时,薄岩层中的裂缝比厚岩层更发育。当岩层的单层厚度大于 3 m 时,则裂缝一般不发育。根据裂缝间距与层厚的线性关系,可用裂缝间距指数 I 值来评价各组裂缝的发育程度^[3]。用上述方法对靖安地区东西向和北东向两组主要裂缝进行计算,在各层位中,东西向裂缝的平均裂缝间距指数 I 值比南北向裂缝要大,反映东西向裂缝比南北向裂缝更发育。计算结果还表明,该区以长 6 层裂缝最发育,而长 1 层及长 4+5 层裂缝发育程度相对较差(表 1)。

表 1 靖安地区各层位裂缝的平均裂缝间距指数 I 值
Tab. 1 Data of the average fracture spacing index I
in various horizons in the Jing'an area

裂缝组系	长 1 层	长 2 层	长 3 层	长 4+5 层	长 6 层	长 7 层
东西向裂缝	0.61	1.08	1.13	0.77	1.50	1.23
南北向裂缝	0.46	1.00	0.78	0.69	1.22	0.94

在该区部分层段的裂缝中见有方解石和石英充填现象,脉宽均匀,脉壁平直,矿物晶形不明显,属于细纤维状,与拉张裂缝中形成的自形一半自形粒状晶体明显不一致,反映了裂缝形成时的挤压应力体制,裂缝形成后在两期不同应力作用下有多次不同程度的开闭史。

2 区域裂缝的成因分析

区域裂缝的成因目前仍不清楚,提出的可能成因包括岩石圈板块平缓挠曲、地潮疲劳、结晶基底断裂重新活动等多种^[3~5],但都不能完全令人信服。根据裂缝分布特征及盆地地质背景分析,陕甘宁盆地区域裂缝的形成可能与水平构造挤压和隆起等造成的多期应力作用有关,其中以水平构造挤压应力为主。

从露头区裂缝的分布看,该区 4 组裂缝中以东西向和北西向裂缝的延伸性最好,其长度一般超过露头区所见范围。南北向和北东向裂缝分别受前面两组裂缝的限制,并终止裂缝面上。在局部地段,可见南北向和北东向裂缝分别切割东西向和北西向裂缝。在延河剖面上,还可见东西向裂缝呈右阶雁行排列,具折尾、菱形结环和菱形分叉现象,以及追踪东西向和北西向两组裂缝的追踪张裂缝呈北西西向分布的现象。反映东西向和北西向裂缝以及南北向和北东向裂缝分别为共轭剪切裂缝,它们在两期不同应力作用下形成,早期为北西西向水平挤压,晚期为北北东向水平挤压,早期应力作用强度大于晚期。上述两期应力作用的方向及强度分别与该区域燕山期和喜马拉雅期构造应力场一致^[9]。岩层非均质性较强,岩石力学性质各向异

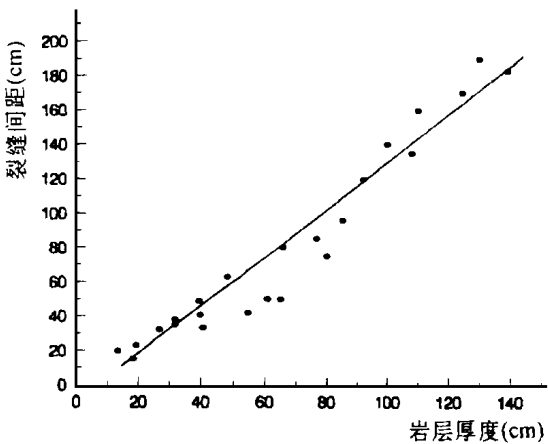


图 2 靖安地区区域裂缝间距与岩层厚度关系
Fig. 2 Relationship between the regional fracture spacing and the thickness of strata in Jing'an

性,使共轭剪切裂缝系中两支裂缝的发育程度不一致,通常抑制了正常共轭剪切裂缝系中一组裂缝的发育,而只留下另一组主要的裂缝走向^[3]。在盆地中北部的靖安地区和安塞地区,砂体呈北东向展布,与砂体沉积向呈一定夹角的東西方向和南北方向的岩石抗剪强度最弱,使该区东西向和南北方向裂缝发育,而两组共轭剪切裂缝系中的北西向和北东向右支裂缝的发育分别受到抑制。在盆地南部的固城川地区,砂体的走向呈东西向展布,岩石力学性质的各向异性分别抑制了两组共轭剪切裂缝系中的东西向和南北向左支裂缝的发育,而留下与砂体展布方向呈一定夹角的北西向和北东向裂缝。

根据低渗透非均质砂岩进行的高温高压三轴岩石力学实验,在一定深度范围内,当岩石受到水平应力挤压时,岩石中主要形成与最大主压应力(σ_1)方向呈一定夹角的单向剪切破裂,有时出现与主破裂面共轭的破裂[?]。岩石中裂缝的破裂角与岩石力学性质有关,受岩石原生沉积构造控制。根据区内 25 块岩样的力学实验[?],岩石的平均内摩擦角为 $39.8\sim 44.8^\circ$,则其共轭剪切裂缝的平均破裂角在 $45.2\sim 50.2^\circ$ 之间,这与该区共轭剪切裂缝的破裂角基本相同。

盆地中地下岩石的应力状态研究表明,盆地中裂缝的形成可以通过减少重力、增加构造作用、温度和流体压力等力源来实现^[7]。燕山中晚期,该区受到北西西向水平构造挤压和第二次构造热事件的影响^[6,8~9],延长统达到最大埋藏深度,具有较高的古地温(古地温梯度为 $3.5\sim 4.7^\circ\text{C}/100\text{m}$)和地层流体压力。在此构造挤压引起的较强应力作用和深埋藏作用下,形成了延长统中早期东西向和北西向两组共轭剪切裂缝。喜马拉雅期,该区在受到北北东向水平构造挤压和第三次构造热事件的作用下^[6,8~9],地层抬升剥蚀(剥蚀厚度 $600\sim 3\,200\text{m}$),并形成了延长统中晚期南北向和北东向两组共轭剪切裂缝。

3 区域裂缝的油气地质意义

低渗透储层中的裂缝主要起渗流通道作用。根据岩心显微薄片分析,延长统中的区域裂缝可使其渗透率比基质渗透率增高 1~2 个数量级,并使其水平渗透率各向异性高达 50:1 以上。从薄片上测得裂缝的平均张开度为 $31\mu\text{m}$,平均孔隙度为 0.03%,渗透率为 $32.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\sim 103.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $49.3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,反映裂缝的储集能力小,它的存在主要是增加储集岩的渗透性及非均质性。

影响不同组系裂缝渗透率的因素较多,其中现应力场通过控制不同组系裂缝目前的保存状态和张开度而影响其渗透性。该区现应力场的最大主应力方向为北东东向^[6,10],与其呈小角度分布的北东向和东西向裂缝呈张剪状态,它们的张开度大,裂缝的渗透性最好,而其他两组裂缝呈压剪状态,张开度和渗透性相对较差。从安塞油田注水动态、示踪剂实验及电子干扰试井监测结果看^[10],在王窑区和坪桥区明显存在北东向和近东西向两个方向反映,水线推进速度为 $1.1\sim 27.1\text{m}/\text{d}$,反映现应力场作用下这两个方向裂缝渗透性较好的特点。因此,东西向和北东向裂缝是油田开发井网布置时应重点考虑的对象,可加大该方向的井距。

裂缝是水平井布置的重要地质依据,根据延长统中裂缝分布以及现应力场对各组裂缝渗透性的影响,该区水平井可按北西—南东方向设计,它不仅可穿越渗透性较好的东西向和北东

? 曾联波,低渗透砂岩储层裂缝的实验研究,1997。

? 黄思静等,陕甘宁盆地固城川地区三叠系延长组 6~8 储层地应力、岩石力学测试及天然裂缝发育规律研究,1997。

向裂缝,提高单井产能,同时还对井孔的稳定和套管的保护都起一定的作用。

由于延长统基质的渗透率极低,裂缝间距大,开发井钻遇天然裂缝的概率小,因此在开发中需普遍进行压裂改造,以形成与开发井相沟通的有效渗流裂缝网络系统。在均质岩层中,压裂缝的分布主要是垂直于最小主应力方向延伸的。但当储层中天然裂缝发育时,天然裂缝的分布影响人工压裂缝的展布。大量三轴岩石力学试验表明^[1],当岩石中存在天然裂缝时,岩石的破裂强度下降43%~55%,则岩石首先最容易从这些部位破裂。天然裂缝分布对裂缝性储集层压裂改造设计有重要的指导作用。

结论:陕甘宁盆地三叠系延长统由于受到水平构造挤压和隆起等造成的多期应力作用,形成了东西向、北西向、南北向和北东向4组区域裂缝。裂缝的分布受岩层控制,与层面垂直,并随岩层厚度的增加,裂缝间距呈线性增大。根据构造史和应力史分析,该区裂缝主要在燕山期和喜马拉雅期古构造应力场作用下形成,但由于受北东东向现应力场的影响,造成了储集层中裂缝渗透性的各向异性,使北东向和东西向裂缝的渗透性比南北向和北西向裂缝的渗透性好,它们对合理开发井网的布置、水平井的设计、压裂改造方案设计有重要影响。

参考文献:

- [1] WU H & POLLARD D D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness[J]. *J. Struct. Geol.*, 1995, 17(6): 887—905.
- [2] NARR W. Fracture density in the deep subsurface: Techniques with application to point Arguello oil field[J]. *AAPG*, 1991, 75(8): 1300—1323.
- [3] NELSON R A. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs* [M]. Gulf Publishing Company, 1985.
- [4] LORENZ J C. Regional fractures I: A mechanism for the formation of regional fractures at depth in flat lying reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1714—1737.
- [5] LORENZ J C. Regional fractures II: Fracturing of Mesaverde reservoirs in Piceance Basin, Colorado[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1738—1757.
- [6] 张泓. 鄂尔多斯盆地中新生代构造应力场[J]. *华北地质矿产杂志*, 1996, 11(1): 87—92.
- [7] NARR W & CURRIE J B. Origin of fracture porosity example from Altament Field[J]. *AAPG Bull.* 1982, 66: 1231—1247.
- [8] 任战利, 赵重远, 张军等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. *沉积学报*, 1994, 12(1): 56—64.
- [9] 孙少华, 李小明, 龚革联等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(3): 306—309.
- [10] 吴志宇. 安塞油田裂缝特征及对开发效果的影响[J]. *低渗透油气田*, 1997, 2(3): 22—26.
- [11] 安欧. *构造应力场* [M]. 北京: 地震出版社, 1992.

Origin of the regional fracturing in Yanchang epoch , Shangannig basi n significance for geology of oil and gas

ZENG Lian bo¹, ZHENG Cong bin²

(1. University of Oil , Beijing 102200, China ;

2. Changqing Institute of Oil Field , Xi ' an , Shaanxi 710021, China)

Abstract :The Yanchang Epoch of Triassic in Shangannig basin under went multiple compressive and uplifting deformations , which led to four sets of regional fracturing .The E-W,NW striking and

NS, NE striking fractures constitute a conjugate shear system responding the Yanshanian NW compression and Himalayan NNE compression. Because of the heterogeneity of rocks, EW and NS striking fractures were developed in the mid north area, whereas NW and NE striking fractures were developed in the south. These fractures are major controls over the permeability of oil reservoirs, therefore significant for exploration and planning of oil and gas resources in the area.

Key words regional fracturing; geology of oil and gas; Yanchang Epoch; Shanganning basin

(上接第 382 页)

A discussion on the Proterozoic stratigraphic framework in the basement of eastern section of the Mid-Qilian Massif

GUO Jin jing, ZHANG Guo wei

(Department of geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

LU Song nian, ZHAO Feng ting, LI Huai kun

(Tianjin Institute of geology and mineral resources, CAGS, Tianjin 300170, China)

ZHENG Jian kang

(Qinghai Comprehensive Regional Geological Survey Party, Xining, Qinghai 810012, China)

Abstract It is generally considered that the basement of the eastern part of Mid-Qilian Massif consists of three stratigraphic sequences that are separated by parallel unconformable boundaries: the Paleoproterozoic Huangyuan Group, Mesoproterozoic Huangzhong Group and Huashishan Group. However recent study suggest that (1) The Huashishan Group unconformably overlies the Huangyuan Group at angle, and paleontological data suggests that the Huashishan Group represents a stable sedimentary cover of Sinian to Cambrian age, rather than basement. (2) The Huangyuan Group and Huangzhong Group were formed in the same tectonic cycle and should be combined as Huangyuan Group.

Key words eastern section of Mid-Qilian Massif; Proterozoic basement; stratigraphic framework; Huangyuan Group; Huashishan Group