

文章编号: 0253- 9985(2004) 06- 0639- 05

柴达木盆地西部裂缝的成因机制和分布模式

童亨茂^{1,2}, 曹戴勇¹

(1. 中国矿业大学煤炭资源教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200)

摘要: 柴达木盆地西部不同构造带裂缝的发育特征既有区别又有联系, 可归纳为“南翼山型”、“咸水泉型”和“狮子沟型”。裂缝发育的组合型式与成因机制与变形方式、变形强度以及边界作用条件等相关。通过对裂缝成因类型与构造带变形强度(应变率)之间的定量分析, 认为挤压褶皱区裂缝的分布模式共有 3 种: 横张裂缝+ 纵张裂缝+ 顺层缝(Ⅰ型); 横张裂缝+ 纵张裂缝+ 平面共轭剪裂缝+ 顺层缝(Ⅱ型); 横张裂缝+ 纵张裂缝+ 顺层缝+ 平面共轭剪裂缝+ 剖面(共轭)剪裂缝(Ⅲ型)。可见, 变形强度越大, 裂缝的组合型式就越复杂。就总体而言, 柴达木盆地西部构造裂缝以横张和纵张裂缝为主。

关键词: 裂缝; 张裂缝; 成因机制; 分布模式; 露头

中图分类号: TE111.2

文献标识码: A

Genesis and distribution pattern of fractures in western Qaidam basin

Tong Hengmao^{1,2}, Cao Daiyong²

(1. Key Laboratory for Coal Resources, China University of Mining, Beijing;

2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing)

Abstract: Fractures in different structural zones in western Qaidam basin can be divided into 3 types, namely “Nanyishan type”, “Xianshuiquan type” and “Shizigou type”. The combination patterns and genesis of the fractures are correlated with the mode and strength of deformation and boundary conditions. Quantitative analysis of the relationship between the genetic types of fractures and the deformational strength (strain) of structural zones shows that there are 3 distribution patterns of fractures in compressed and folded region, including transverse tensile fractures+ longitudinal tensile fractures+ bedding fractures (type I), transverse tensile fractures+ longitudinal tensile fractures+ planar conjugate shear fractures+ bedding fractures (type II), and transverse tensile fractures+ longitudinal tensile fractures+ bedding fractures+ planar conjugate shear fractures+ profile (conjugate) shear fractures (type III). The larger the deformation strength is, the more complex the combination patterns of fractures would be. As a whole, the structural fractures in western Qaidam basin are mainly transverse and longitudinal tensile fractures.

Key words: fractures; tensile fracture; genesis; distribution pattern; outcrop

已有的勘探实践表明, 柴达木盆地西部(以下简称柴西)第三系以发育非常规储层——裂缝性储层为主^[1], 已发现狮子沟油田、南翼山油田、油泉子油田、咸水泉油田等一系列裂缝性油气田^[2~4]。裂缝是地壳中规模最小的构造, 却是最为复杂的构造^[5], 有关裂缝的成因机制和分布模

式方面的许多问题还未得到解决, 如针对裂缝的力学成因至今还存在“张性”和“剪性”的争议^[5~7], 而柴西的独特条件可能成为解决裂缝力学成因争议的理想之地。本文在对柴达木盆地西部露头裂缝详细的测量统计分析和构造解析的基础上, 结合岩心裂缝的观测分析和测井资料裂缝

的分析解释,研究了柴西裂缝的成因机制和分布规律,并建立了挤压褶皱区裂缝的分布模式,确定张性裂缝是挤压褶皱区裂缝的主要成因类型,为本区裂缝性储层的进一步勘探开发提供了科学依据。

1 概况

柴达木盆地位于青藏高原北部,西以阿尔金山为界,东至秦岭。南北夹于昆仑山和祁连山之间,面积 $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,为我国大型的内陆盆地之一,发育古生界、中生界和新生界^[8,9]。新生界是柴达木盆地最重要的沉积层序。根据已有的勘探成果,第三系和第四系分别是最主要的含油层系和含气层系^[10,11]。

柴达木盆地西部,北西西向构造(褶皱和断裂)占绝对优势(图1)。地表北西西向褶皱成排成带,形成了一系列的褶皱构造(图1),南翼山、咸水泉、狮子沟都是其中的背斜构造。柴达木盆地北西西向褶皱形成时间较晚,狮子沟组(N_2^3)已卷入褶皱,与七个泉组形成强烈的角度不整合,七个泉组以下地层没有明显的间断,呈整合接触关系。

柴达木盆地西部北西西向构造是由于印度板块向欧亚板块的强烈俯冲推挤,造成柴达木盆地南北边界对盆地南南西方向的挤压作用而形成的。其变形强度与基底性质及边界条件有关,变形集中在茫崖凹陷地区,西部比东部强烈。

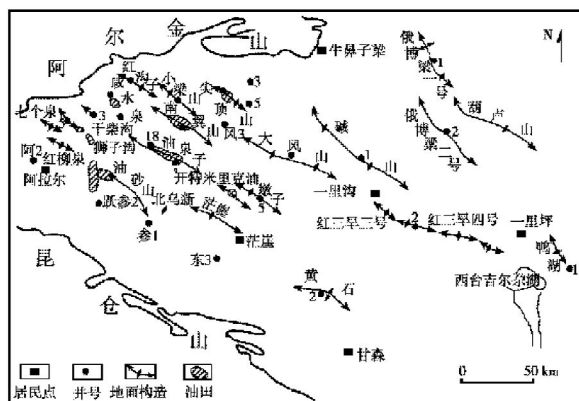


图1 柴达木盆地西部地面构造分布图

Fig. 1 Distribution of surface structures in western Qaidam basin

在没有基底先存构造的条件下,褶皱轴向和断裂方向都比较稳定,表现出稳定的方向性。柴

西十一号断裂带以北,褶皱成排成带,方向十分稳定。

2 裂缝类型与发育特征

柴西一系列北西西向的褶皱构造中,大大小小的背斜有 20 多个,均出露地表,形成很好的地面构造。这些背斜均是在新第三纪末期的构造运动中形成的,地层上下变形基本协调统一,如南翼山构造地面高点和地下高点在平面上的位置是一致的。

露头裂缝系统观测表明,柴西同一构造带上的裂缝分布十分相似,不同构造带之间裂缝的发育又存在一定的区别。根据裂缝发育特征的差别和联系,可以划分为 3 个类型,分别称其为“南翼山型”、“咸水泉型”和“狮子沟型”。其中“南翼山型”分布最广,油泉子、开特米里克、油敦子、尖顶山、大风山和小梁山等构造都属于这一类型;干柴沟和红沟子属于“咸水泉型”;油砂山和北乌斯则属于“狮子沟型”。同一类型构造裂缝的发育特征非常一致。下面分别以南翼山、咸水泉和狮子沟构造为代表来阐述露头裂缝的发育特征。

2.1 南翼山型

2.1.1 裂缝的组系、方位

以南翼山为代表的露头构造,以发育两组近于垂直的裂缝为特征(图2),其中一组裂缝和褶皱的长轴近于平行,夹角从 0° 到 15° 左右,走向为 $290^\circ \sim 320^\circ$;

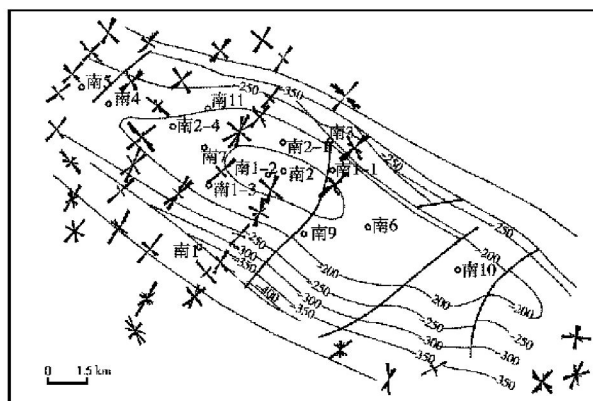


图2 南翼山地面构造露头裂缝方位分布

Fig. 2 Distribution of outcrop fracture orientations in Nanyishan structure

另一组和褶皱的短轴平行或近于平行,夹角同上,走向为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 。裂缝方位的一致性非常好(图

2)。裂缝面基本上和层面垂直。根据与褶皱的关系,可以确定它们分别是与褶皱相关的纵张裂缝和横张裂缝。在背斜核部,层面的倾斜程度比较小,倾角一般小于 12° ,露头裂缝以高角度和直立裂缝为主。本区不规则的非系统裂缝发育较少,往往在断层或断裂带附近出现。

由于这两组相互垂直裂缝的切割和风化作用的影响,南翼山构造出现了很规则的“豆腐块”残丘,形成了很壮观的南翼山“石林”地貌景观。

2.1.2 裂缝网络

本区存在两个级别的裂缝网络系统——大裂缝网络系统和层内裂缝网络系统。大裂缝网络系统裂缝的发育不受层的限制,裂缝穿层而过而非终止于层内,切穿深度一般超过3 m,延伸长度一般超过10 m,延伸超过20 m的约占1/3。大裂缝网络的间隔为1~3 m,平均间隔为2.3 m。本区“豆腐块”、“卧狮形”等地貌残丘的形成就是由于大裂缝网络切割风化而形成的。在能干层和非能干层互层的地层中,除了发育大裂缝网络以外,还发育层内裂缝网络系统。层内裂缝网络系统的特点是,裂缝大多数终止于层面,裂缝的间隔(裂缝密度)与层厚成正相关关系。对于岩性没有什么变化的厚泥岩层,裂缝间隔受大裂缝网络的控制,与层厚无直接关系。

2.1.3 裂缝的延伸性和贯穿性

南翼山背斜露头区裂缝的延伸性和贯穿性都比较好。裂缝在层内的延伸长度大多超过10 m,可见长度超过20 m者占一定的比例。有一定数量的裂缝延伸超过100 m。两组裂缝的延伸性有较大的差异,北西向裂缝延伸长度大部分小于3 m,而北东向裂缝一般都超过10 m,即北东向裂缝的延伸性远好于北西向的裂缝。裂缝的贯穿性也比较好。本区以发育大裂缝网络为主,切穿深度一般超过3 m,大部分超过5 m。总的来说,裂缝可以在平面上构成很好的连通网络。南2井和南7井长时间强烈的井喷也证实了南翼山构造裂缝良好的连通性能。

2.1.4 裂缝的充填性

本区露头裂缝的充填物以膏盐为主,充填宽度1~30 mm,膏盐晶体以纤维状形式生长,一般与裂缝壁垂直,有的发生弯曲,特别是充填物很厚的情况下。充填物弯曲生长的情况说明在充填过程中裂缝有活动,或者充填过程不是一次完成的。

充填物除了膏盐外,还有方解石和沥青。有完全充填、不完全充填和无充填等几种情况。直立缝和水平缝都有不同程度的充填。其中水平裂缝充填最完全,其次是与轴向平行的纵张裂缝,充填最少的是与短轴近于平行的横张裂缝。沥青充填仅在轴部附近可见。说明油气在轴部附近有沿裂缝运移到地表的痕迹。

2.2 咸水泉型

咸水泉构造位于阿尔金山前,为一北陡南缓的不对称箱状背斜,构造轴线为一反“S”形(图3),西北部分地形和狮子沟地区类似,沟壑纵横;向东南地形逐渐相对平坦,趋向于和南翼山类似。

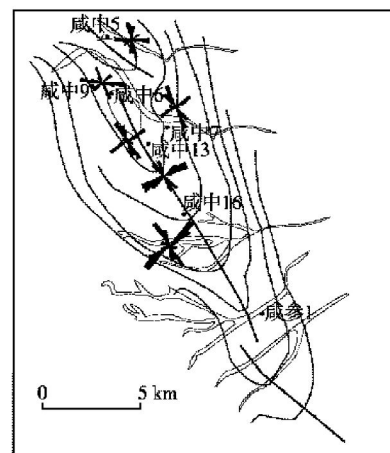


图3 咸水泉地面构造露头裂缝方位分布

Fig. 3 Distribution of outcrop fracture orientations in Xianshuiquan structure

华岩山高点以东,裂缝类型和南翼山的一致,也主要发育与褶皱轴垂直的横张裂缝和与褶皱轴平行的纵张裂缝,裂缝的方位主要为北东向和北西向(图3)。横张裂缝和纵张裂缝基本控制了这里的地貌特征,山沟基本上沿裂缝的走向发育。

在华岩山高点以西的阿尔金山前地带,尤其是在石油沟内,除了发育横张裂缝和纵张裂缝以外,还发育平面“X”共轭剪裂缝,把岩层切割成菱形块。值得注意的是,菱形块的锐角平分线所指示方向——主压应力方向为北西向。

和南翼山一样,咸水泉的顺层裂缝也比较发育。

2.3 狮子沟型

狮子沟地面构造形态为一向东北突出的弧形构造,为南翼陡、北翼缓的平顶状背斜,西部构造

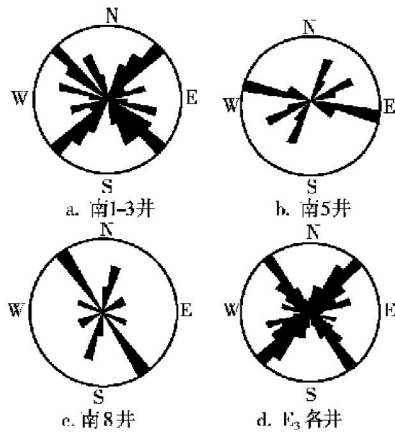


图6 岩心裂缝走向玫瑰花图(根据古地磁测量)
Fig. 6 Rose diagram showing fracture strikes observed in cores (from paleomagnetic observation)

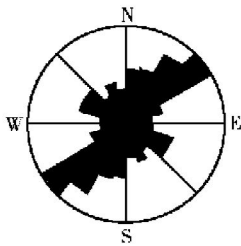


图7 南1-3井倾角测井裂缝方位玫瑰花图
(2900-3100 m井段)

Fig. 7 Rose diagram showing fracture strikes interpreted from diplog in Nan 1-3 well

面和地下地层变形协调一致,而且露头、岩心和测井等资料反映裂缝的发育特征完全一致,这几方面都充分说明裂缝的力学成因的确定是十分可靠的。为此可以得出结论:在挤压变形区张性裂缝占主导地位。

3.2 咸水泉型

以咸水泉背斜构造为代表,分布在柴达木盆地西部边缘阿尔金山前地带,包括咸水泉、干柴沟和红沟子3个背斜构造。这一类型的构造除了发育北北东到北东向的横张裂缝和北西西到北西向的纵张裂缝外,在背斜的西部靠近阿尔金山前的部分,发育沿褶皱轴向挤压而形成的平面“X”共轭剪裂缝。这套平面共轭剪裂缝把岩层切割成菱形块,其锐角平分线为北西-南东向,并切割纵张裂缝和横张裂缝,反映了阿尔金山由北西向南东方向对盆地的挤压作用,说明在第四纪开始以来,阿尔金山走滑过程中存在对盆地的挤压作用。

3.3 狮子沟型

以狮子沟构造为代表,分布在十一号断裂构造带,包括狮子沟构造和油砂山构造。该构造带是受十一号逆冲断层控制的断展背斜构造带。这一构造带的变形强度在柴西是最大的,总体为倾向南南东的不对称背斜构造,南翼地层向外围逐渐变陡,可呈倒转状态。

在狮子沟构造的3条剖面中,花土沟剖面变形强度最小,剖面剪裂缝不太发育,以发育纵张裂缝、横张裂缝和平面“X”共轭剪裂缝的裂缝组合;狮子沟剖面 and 游园沟剖面变形强度较大,尤其是后者,剖面剪裂缝十分发育。特别是,“狮子沟型”地区裂缝的发育与断层的关系最为密切,断层对裂缝的发育起重要的控制作用。

4 分布模式

通过柴西裂缝的成因类型与构造带变形强度(应变值)的定量分析,表明挤压褶皱区裂缝分布是有规律的,裂缝发育的组合型式主要取决于变形强度的大小,裂缝的发育存在3种类型的组合型式。

I型:横张裂缝+纵张裂缝+顺层缝。

这一类型的裂缝组合发育在弱→中等变形强度(褶皱变形的缩短量小于15%)的褶皱中。柴西地区以南翼山构造为代表的大部分褶皱的缩短量为8%~15%,均发育这一类型的裂缝组合型式。

II型:横张裂缝+纵张裂缝+平面共轭剪裂缝+顺层缝。

这一类型的裂缝组合发育在中等→较强变形强度(褶皱变形的缩短量为15%~20%)的褶皱中,柴西以咸水泉构造为代表的阿尔金山前地区发育这一类型的裂缝组合。

III型:横张裂缝+纵张裂缝+顺层缝+平面共轭剪裂缝+剖面(共轭)剪裂缝。

这一类型的裂缝组合发育在强变形(褶皱变形的缩短量大于20%)的褶皱中,柴西以狮子沟构造为代表的大部分地区发育这一类型的裂缝组合。

上述各组合型式都发育顺层裂缝,但顺层裂缝的发育程度依次增强。

根据挤压褶皱区裂缝的这一分布模式,可以对无井或少井的挤压背斜构造进行裂缝分布的初步预测。

(下转第649页)

- 5 李丕龙, 李学田, 宋明水, 等. 合肥盆地石油地质与地球物理特征研究及进展[M]. 北京: 地质出版社, 2003. 88~ 179
- 6 薛爱民, 金维浚. 合肥盆地油气地质及其与大别造山带构造耦合[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 36~ 103
- 7 陈刚, 李丕龙, 李学田. 合肥盆地原型恢复与油气评价的研究方法思考[J]. 石油实验地质, 2002, 24(3): 200~ 203
- 8 胡圣标, 汪集琦. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. 地质前缘, 1995, 2(3~ 4): 171~ 180
- 9 罗晓容. 沉积盆地数值模型的概念、设计及检验[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 196~ 204
- 10 周中毅, 潘长春. 沉积盆地古地温测定方法及其应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 1992. 1~ 103
- 11 Suggate R P. Relations between depth of burial, vitrinite reflectance and geothermal gradient[J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(1): 5~ 32
- 12 Barker C E. Temperature and time in the thermal maturation of sedimentary organic matter[A]. In: Naeser N D, McCulloch T H. Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories[C]. New York: Springer-Verlag, 1989. 73~ 98
- 13 Barker C E. Implications for organic maturation studies and evidence for a geologically rapid increase and stabilization of vitrinite reflectance at peak temperature: Cerro Prieto geothermal system, Mexico[J]. AAPG Bull, 1991, 75: 1 852~ 1 863
- 14 何生, 王青玲. 关于镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的问题讨论[J]. 地质论评, 1989, 35(2): 120~ 125
- 15 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33~ 37
- 16 肖贤明, 刘祖发, 申家贵, 等. 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法——镜质组反射率梯度法[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2 340~ 2 343
- 17 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等. R_o 反演的盆地热史恢复方法与相关问题[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 345~ 346
- 18 Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter[A]. In: Buntebarth G, Stegena L. Paleogeothermics[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 79~ 93
- 19 Marshall J E A. The Silurian of Saudi Arabia: thermal maturity, burial history and geotectonic environment[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1995, 89: 145~ 150
- 20 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 171~ 282
- 21 Jiang L L, Wu W P, Chu D R, et al. Post-collisional extensional and thrust-nappe structures in northern part of Dabie mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2 378~ 2 385
- 22 Zhu G, Song C Z, Wang D X, et al. Studies on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of strike-slip time of the Tarr-Lu fault zone and their tectonic implication[J]. Science in China (series D), 2001, 44(11): 1 002~ 1 008
- 23 林银山, 郭福生, 辜骏如, 等. 北淮阳燕山期岩浆岩地球化学特征及其构造环境[J]. 中国区域地质, 2001, 20(1): 100~ 106
- 24 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 等. 大别山腹地燕山期岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义[J]. 地质学报, 1991, 65(4): 329~ 336
- 25 简平, 马昌前, 杨坤光. 大别造山带东部燕山晚期区域变质-岩浆活动与区域构造抬升的同位素地质年代学证据[J]. 地球科学, 1996, 21(5): 519~ 523
- 26 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹年龄的测定[J]. 中国科学(D), 1995, 25(10): 1 086~ 1 091
- 27 吴玺虹, 刘顺生, Jonckheere R, 等. 东大别地区磷灰石裂变径迹年龄的构造意义初析[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 343~ 349
- 28 杨坤光, 马昌前, 许长海, 等. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(2): 97~ 103
- 29 Reiners P W, Zhou Z Y, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology[J]. American Journal of Science, 2003, 303: 489~ 518
- 30 Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous-Cenozoic history of the Southern Tan-Lu fault zone, apatite fission-track and structural constraints from the Dabieshan (eastern China) [J]. Tectonophysics, 2002, 359(3~ 4): 225~ 253

(上接第 643 页)

参 考 文 献

- 1 彭立才, 邵文斌, 张林, 等. 苏斯库勒油田跃灰 1 井区 E_2^3 灰层裂缝预测[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 391~ 395
- 2 刘人和, 周文, 刘文碧, 等. 青海柴达木盆地咸水泉油田第三系地层裂缝分布评价[J]. 矿物岩石, 1998, 72(2): 52~ 56
- 3 魏成章, 李忠春, 吴昌吉. 柴达木盆地南翼山凝析气藏裂缝性储层特征[J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 5~ 7
- 4 李元奎, 王铁成. 柴达木盆地狮子沟地区中深层裂缝性油藏[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 12~ 17
- 5 Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. GSA Bull, 1988, 100: 75~ 99
- 6 Bai T, Pollard D D, Gao H. Explanation for fracture spacing in layered materials[J]. Nature, 2000, 403: 753~ 756
- 7 Keller J V, Hall S H, McClay K R. Shear fracture pattern and microstructural evolution in transpression fault zones from field and laboratory studies[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(9): 1 173~ 1 187
- 8 马新华, 魏国齐. 我国中西部前陆盆地天然气勘探的几点认识[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 114~ 117
- 9 夏文臣, 张宁, 袁晓萍, 等. 柴达木侏罗系的构造层序及前陆盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 173~ 181
- 10 刘云田, 杨少勇. 柴达木盆地北缘侏罗系砂岩孔隙发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 267~ 269
- 11 王明明, 李本亮, 魏国齐, 等. 柴达木盆地东部第四纪水文地质条件与生物气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 341~ 345