

济阳坳陷碎屑岩断裂带结构特征及演化模式

刘 鹏

中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月23日; 发布日期: 2022年12月31日

摘 要

通过野外断裂带露头解剖、岩心精细观察描述等手段, 结合测井资料、地震资料对济阳坳陷断裂带结构类型与特征、断裂带结构演化规律开展了研究。结果表明, 研究区断裂带结构包括滑动破碎带和诱导裂缝带两个结构单元。滑动破碎带位于断裂带核部, 主要由断层角砾岩组成, 也发育断层泥, 角砾棱角明显, 大小混杂, 呈松散破碎或固结状态; 诱导裂缝带位于滑动破碎带两侧, 主要发育裂缝或者变形带等微构造, 保留母岩的基本特征, 一般上盘诱导裂缝带裂缝发育明显好于下盘诱导裂缝带; 断裂带结构演化受断距控制, 随着断距的增大, 断裂带结构由一元型“诱导裂缝带”向三元型“上盘诱导裂缝带 + 滑动破碎带 + 下盘诱导裂缝带”演化。

关键词

济阳坳陷, 断裂带结构, 滑动破碎带, 诱导裂缝带

Structural Characteristics and Evolution Mode of Debris Rock Fault Zone in Jiyang Depression

Peng Liu

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 23rd, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

According to field and core observation of fault zones, combined with logging data and seismic data, the structural types and characteristics, structural evolution of fault zone in Jiyang Depression are studied. Brittle faults are mainly classified into two structural domains; a central core and

its enveloping damage zones, which can be distinguished from the surrounding wall rock containing background deformation. The fault core generally consists of a number of recurring slip surfaces and fault rocks such as gouges, cataclasites, and breccias. Damage zones are characterized by relatively low strain and less intense deformation compared to the fault core, and these zones generally exhibit several second-order structures such as subsidiary faults and fractures. Generally, the fracture development of hanging wall is better than that of foot wall. The evolution of the fracture zone structure is controlled by displacement. With the increase of displacement, the fracture zone structure evolves from single “induced fracture zone” to ternary “upper disc induced fracture zone + sliding fracture zone + lower disc induced fracture zone”.

Keywords

Jiyang Depression, Fault Zone Structure, Fault Core, Damage Zone

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

断裂构造是地壳中广泛发育的基本构造类型之一，既可呈破裂面(或滑动面)的形式出现，也可呈宽度不一的断裂带形式存在[1]-[8]。我国目前已知的多数含油气盆地内的含油气构造都伴生发育大量断层，且多数以断裂带的形式出现。大量的研究以及勘探实践表明断裂带是一个具有复杂内部结构的三维地质体[9] [10] [11]，控制着盆地内油气的运移与输导[2]-[7]。目前，针对断裂带的研究主要集中在对断裂带不同结构单元的识别、断裂变形机制、断裂带结构特征以及断裂带输导性等方面[9] [10] [11]，对不同成岩程度的断裂带的微观特征及其演化规律的研究有待深化和加强。以往对济阳拗陷的断层研究多是把复杂的三维断裂带作为简单的二维“面”来分析，忽略了断裂带内部结构的非均质性及其对油气运聚的影响，对不同地质条件下断裂带各结构单元的发育及其物性特征、影响因素等仍缺乏系统的、规律性的认识，这就制约了正确认识断裂带内部结构的变化及其在油气运聚成藏过程中所起的作用。本文以济阳拗陷断裂带为研究对象，在野外断裂带结构刻画基础上，利用地震资料、岩心资料以及测井资料等识别断裂带结构，建立研究区断裂带结构与物性差异演化模式，为下一步有效地勘探开发、提高油气勘探成功率提供了科学依据。

2. 断裂带结构特征

野外露头剖面解剖表明，断裂并非一个简单的面，其内部具有复杂的结构，依据变形程度，将断裂带内部划分为滑动破碎带和诱导裂缝带等2个不同类型的结构单元。

2.1. 滑动破碎带特征

研究区碎屑岩滑动破碎带主要发育固结的断层角砾岩(图1)、松散的断层角砾岩、断层滑动面等微构造类型。其中，固结的断层角砾岩主要发育在中生界砂岩断裂带内，松散的断层角砾岩主要发育在上部的古近系砂岩地层中，断层滑动面主要发育在古近系的泥岩地层中。

固结的角砾岩是由多组裂缝相互切割形成的，由仍保持原岩特点的岩石碎块组成，角砾岩形状不规则，大小不一，杂乱无定向。角砾多为棱角状、次棱角状。



Figure 1. Fault breccia characteristic in JiYang Depression
图 1. 王 100 井 2423.8 m、2425 m 发育断层角砾岩

研究区东营凹陷王 100 井中生界砂岩地层中发育碎裂带(图 2)，颗粒破碎、形成碎屑和基质，粒度变细，分选变差。宏观上，砂岩发育两组共轭裂缝；微观上，“裂缝”是具有一定厚度的碎裂带，是由颗粒破碎、滑动以及旋转形成的带状构造。

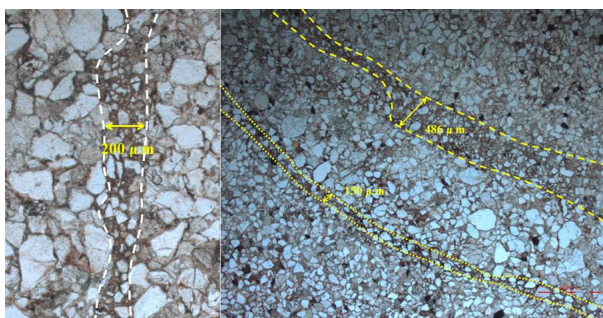


Figure 2. Cataclastic zone characteristic in JiYang Depression
图 2. 济阳拗陷单条碎裂带微观特征(王 100 井，2367.2 m，2425.5 m)

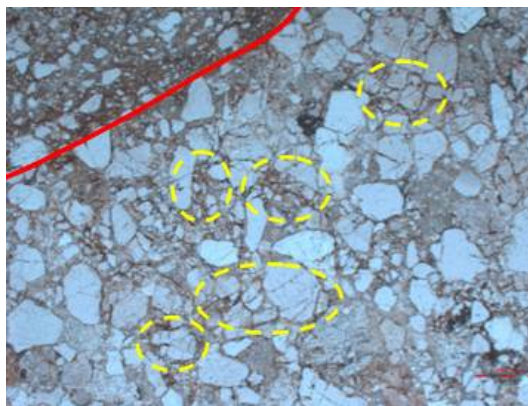


Figure 3. Particle fragmentation in cataclastic zone characteristic in JiYang Depression
图 3. 济阳拗陷碎裂带颗粒破碎(王 100 井，2425.2 m)

从薄片分析可以看出，研究区单个碎裂带厚度为微米级，而簇状碎裂带为毫米级(图 2)。碎裂带孔隙度

和渗透率同母岩相比明显降低,孔隙度普遍降低 10%~25%,渗透率降低 1~6 个数量级。同单条碎裂带相比,簇状碎裂带渗透率降低程度更大。此外,靠近碎裂带,围岩粒内微裂缝发育,发生明显的颗粒破碎(图 3)。

对碎裂带与两侧围岩的颗粒方位、粒度进行统计分析,研究表明,与两侧的围岩颗粒相比,碎裂带内颗粒粒度明显的变小,由 80~200 μm 下降至 40~80 μm ,且颗粒发生了一定程度的重排,定向性变好(图 4、图 5)。

2.2. 诱导裂缝带特征

碎屑岩诱导裂缝带内部发育大量微构造,根据母岩孔隙度的差异分为变形带和裂缝两种。裂缝是岩石受力发生破裂时,两侧的岩石沿破裂面没有发生明显位移的一种断裂构造。变形带是在高孔渗性砂岩中由于简单剪切变形导致碎裂作用而形成的致密带,又称粒化缝或破裂滑动带。变形带存在多种类型,济阳拗陷断裂诱导裂缝带主要发育层状硅酸盐带。

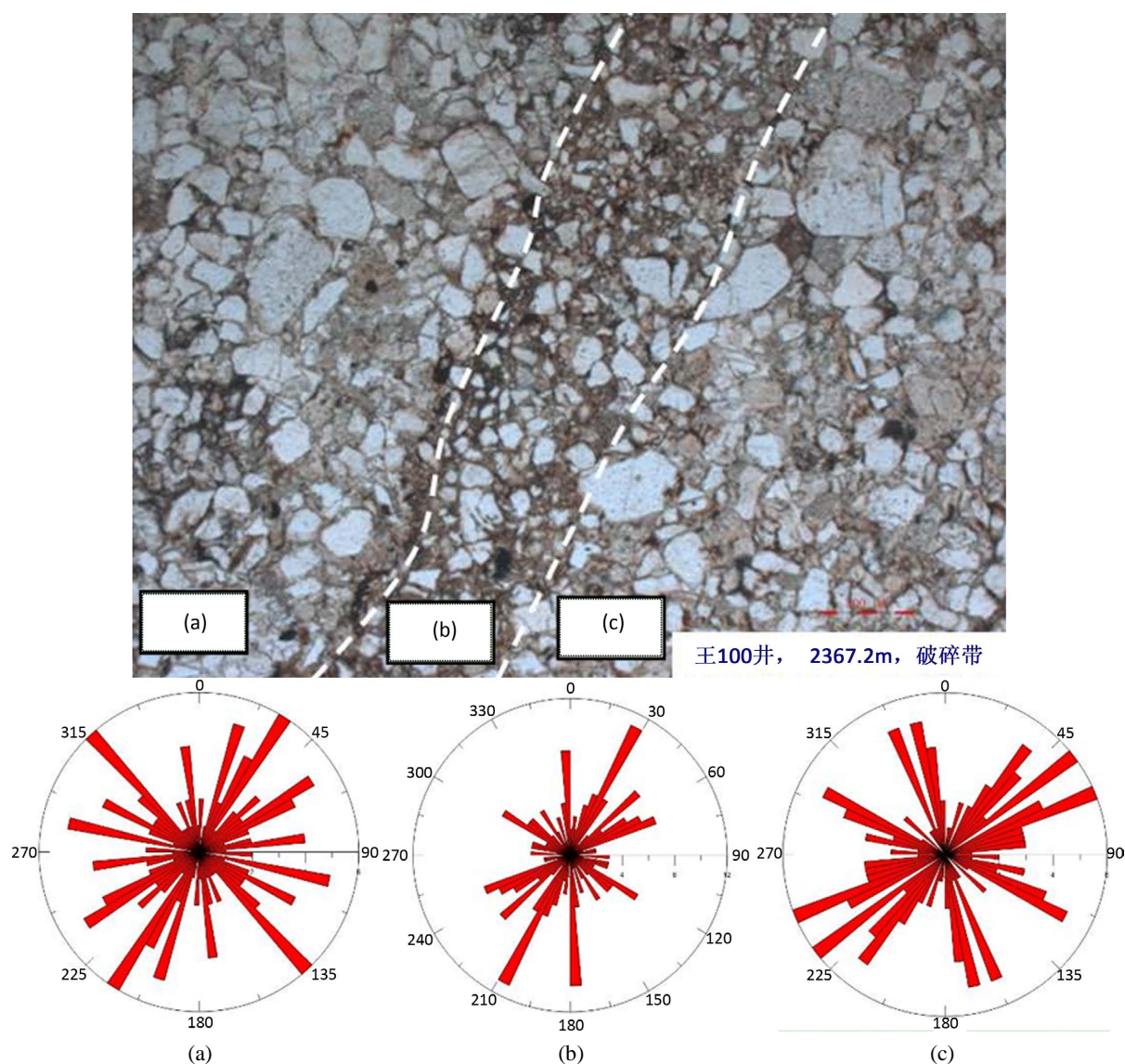


Figure 4. Rose diagrams of particle orientation of cataclastic zone (b) and intact rock (a) (c) in JiYang Depression
图 4. 济阳拗陷碎裂带(b)与两侧围岩(a) (c)颗粒方位玫瑰花图(王 100 井, 2367.2 m)

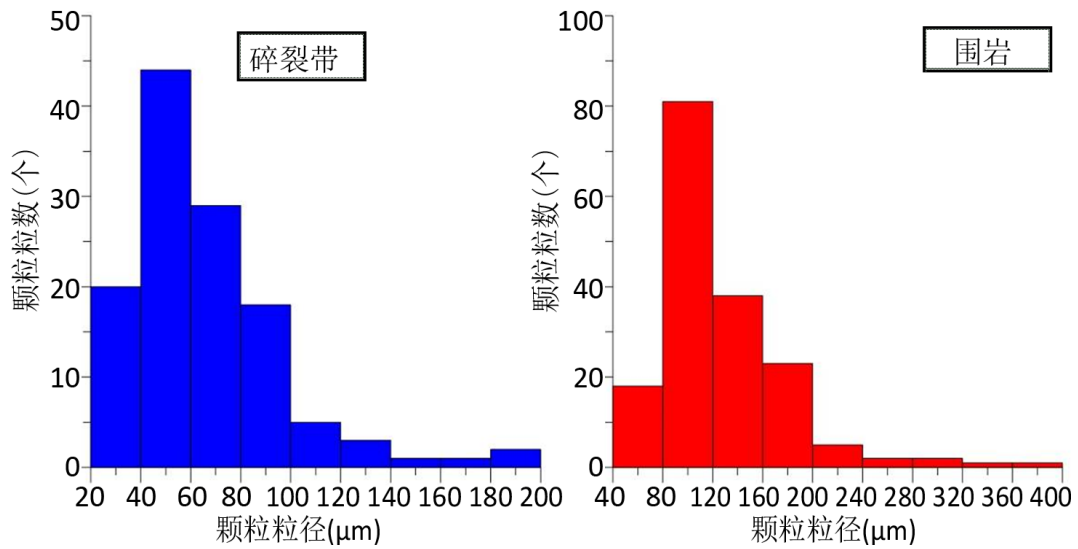


Figure 5. Particle size distribution diagram of cataclastic zone and intact rock in JiYang Depression
 图 5. 济阳拗陷碎裂带与两侧围岩颗粒粒度分布图(王 100 井, 2367.2 m)

1) 裂缝发育特征

宏观上, 诱导裂缝带裂缝走向与断层滑动面基本平行, 而且随着与断层滑动面距离的变化, 裂缝发育具有一定的规律性。野外观察表明, 无论断裂带规模如何, 在同一岩层中, 断层上下盘的裂缝发育特征不同, 上盘相比于下盘破碎程度较大, 但两盘破碎程度随着距断层核距离增加而逐渐降低, 如秦皇岛鸡冠山 1 号断层裂缝发育特征。岩心上, 砂泥岩裂缝多为剪切缝, 开度较小, 多为未充填、半充填, 充



砂岩裂缝特征



泥岩裂缝特征

Figure 6. Fracture characteristic of clastic rocks in JiYang Depression
 图 6. 研究区砂泥岩裂缝岩心特征

填物以泥质和石英为主(图 6)。

2) 变形带发育特征

在碎屑岩中, 变形带是一种普遍的结构, 指带内的区域应力积累。应力局部化的微观力学机制包括孔隙坍塌、颗粒的裂缝作用、颗粒与颗粒接触处的溶解作用。

不纯净高孔隙性砂岩无论处于哪个成岩阶段, 因黏土矿物含量较高, 其在变形过程中促使颗粒边界发生滑动, 而不发生颗粒破碎, 导致黏土矿物与碎屑颗粒发生混合, 称之为混合和涂抹作用, 形成的亚地震构造类型为硅酸盐带, 单条厚度 1~2 mm, 位移为毫米-厘米级, 组合模式多种多样, 颜色较母岩浅、呈灰白色; 单条、平行簇状、簇状被单条错断、单条被单条错断。微观上, 层状硅酸盐带内发生颗粒重排, 定向性变好, 粒度和分选性无变化(图 7)。

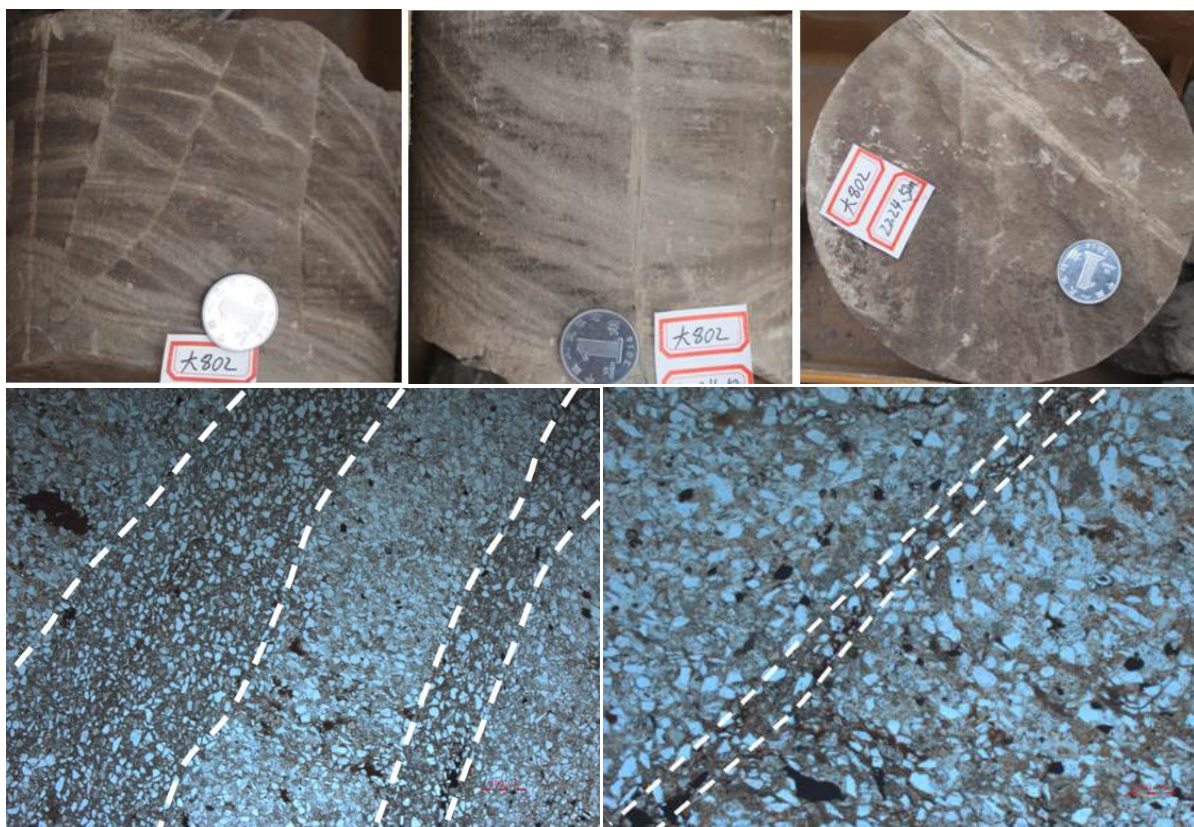


Figure 7. Phyllosilicates characteristic in JiYang Depression
图 7. 济阳拗陷大 802 井(2224.5 m)层状硅酸盐带岩心及微观特征

3. 断裂带结构演化模式

3.1. 断裂带变形机制

断层岩变形机制受多种因素影响, 如岩性、矿物成分、孔隙度、流体与压力等, 控制着断层岩的类型与结构。低孔隙度碳酸盐岩在断裂过程中发生脆性变形, 变形机制主要包括破裂作用、碎裂作用、碎裂流作用和剪切作用等[12] [13] [14] [15] [16]。

固结高孔隙性砂岩处于中等围压条件(埋深介于 1000~3000 m), 当应变速率较低时, 岩石受力后颗粒接触点应力增加, 导致颗粒破碎、颗粒尺寸减小和孔隙坍塌, 称之为碎裂作用(图 4)。

低孔隙性砂一泥互层地层岩石受力后, 一般发生脆性变形, 变形机制为破裂作用。形成的微构造类型

为裂缝。断裂带内裂缝大量发育，伴随剪切作用发生，在带内磨碎形成断层角砾岩，进一步滑动导致断层角砾岩转化为破碎程度更加严重的断层泥。通过岩心观察与断层岩微观结构分析，济阳拗陷碎屑岩正断层的变形机制主要为破碎作用和碎裂作用。破碎作用主要形成了裂缝，碎裂作用主要形成了碎裂带[17]。

3.2. 断裂带结构演化模式

断裂的生长演化源于裂缝的递进变形或小断层的生长联接，基于小规模断裂代表大规模断裂发育早期阶段，因此研究不同规模断裂可以分析断裂带内部结构形成演化过程。

根据物理模拟实验和野外断裂带结构精细解剖，结合前期岩心观察研究结果，将碎屑岩地层断裂带结构演化划分为四个阶段(图 8)，所以从发育到成熟、再到消亡，断裂带内部结构及其规模存在较大差异：

- ① 断裂发育初期，断裂发育规模小，断距小，仅形成一系列错综复杂的微裂隙，这些裂缝的连通性较好，但尚未形成上下贯通的主断面，且受局部应力场的影响具有一定的方向性，通常平行于断裂面发育的方向，可使得断裂带的垂向输导性优于侧向输导性；
- ② 断裂继续发育，这些微裂隙逐渐增多且局部可形成一个或多个大裂缝，此时断裂两盘地层主要沿着此破裂面错开，但仍未形成较大位移，此时断裂带对油气的输导能力取决于破裂面的开启程度和裂缝发育程度；
- ③ 断裂进一步发育，断层两盘发生较大滑距，在半脆性—脆性地层中，断层两盘易在已形成的破裂面处产生滑距，最终形成主滑动面及主动盘诱导裂缝带。在脆性地层中断裂带则主要由发育大量棱角状断层角砾岩的滑动破碎带及发育大量裂隙的诱导裂缝带组成；
- ④ 随着断距进一步增大，在断裂带核部发育断层泥，两侧的断层角砾岩带和诱导裂缝带进一步变宽。

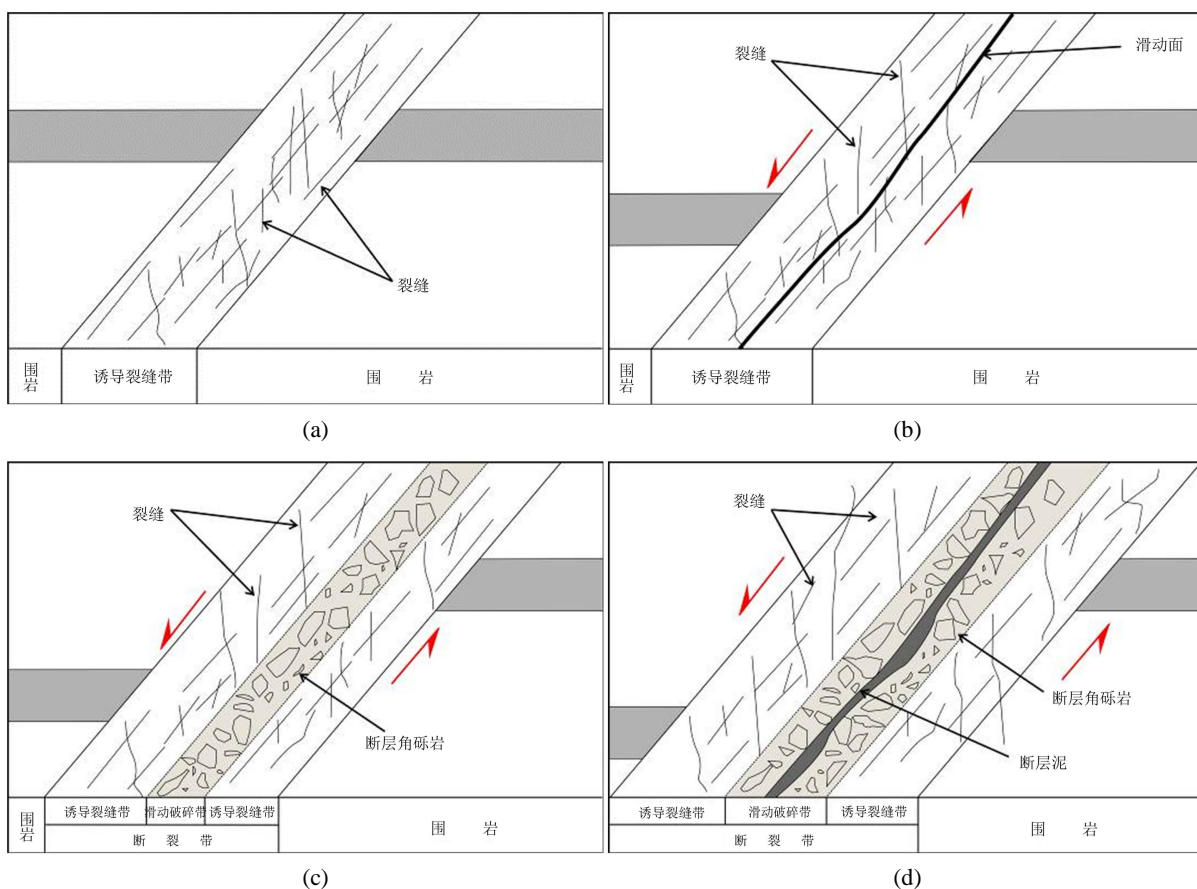


Figure 8. Fault zone evolution of clastic rocks in JiYang Depression

图 8. 碎屑岩断裂带演化模式图

平面上, 断裂带结构在走向上具有分段性; 通常断层走向上中段断距较大, 断裂带结构发育完整, 由滑动破碎带和两盘诱导裂缝带组成; 由中段向两侧, 由于所受应力逐渐减小, 断距减小, 结构发育不完整, 缺失滑动破碎带或下盘诱导裂缝带; 断层尾端, 断裂带结构以一元型为主, 由诱导裂缝带构成; 垂向上, 断裂带结构变化不规律, 三元型多发育在深部, 一元型由深到浅均有发育。

通过统计不同岩性断裂带厚度与断距的关系发现, 泥岩地层断距小于 200 m 时, 断裂带主要发育一元型, 当大于 200 m 时, 主要发育三元型; 砂泥岩互层地层断距小于 500 m 时发育一元型结构, 500~600 m 多发育二元型结构, 大于 600 m 发育三元型结构。

4. 结论

1) 断裂带是具有复杂内部结构的三维地质体, 根据断裂结构特征、物质组成可将其划分为滑动破碎带(面)、诱导裂缝带等结构单元。中生界砂岩滑动破碎带发育固结的断层角砾岩和碎裂带, 诱导裂缝带由裂缝组成。新生界碎屑岩滑动破碎带主要发育松散破碎的断层角砾岩, 诱导裂缝带发育层状硅酸盐带和裂缝两种微观结构类型。

2) 济阳拗陷碎屑岩断裂变形机制主要为破碎作用和碎裂作用。碎屑岩断裂带结构演化受断距控制, 随着断距的增大, 断裂带结构由一元型“诱导裂缝带”向三元型“上盘诱导裂缝带 + 滑动破碎带 + 下盘诱导裂缝带”演化。

参考文献

- [1] 樊计昌, 刘明军. 确定断裂带内部结构和物性参数的一种方法[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(2): 164-169.
- [2] 付金华. 惠民凹陷夏口断裂带油气成藏机制[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 136-140.
- [3] 韩忠义. 断层成为油气有效运移通道的主控因素分析——以东营凹陷南斜坡为例[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2008, 5(3): 52-55.
- [4] 罗群, 姜振学, 庞雄奇. 断裂控藏机理与模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [5] 孙永河, 漆家福, 吕延防, 等. 渤中凹陷断裂构造特征及其对油气的控制[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 669-675.
- [6] 王永诗, 郝雪峰. 济阳断陷湖盆输导体系研究与实践[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(4): 394-400.
- [7] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 付广, 孙永河. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. 地球科学, 2005, 30(3): 328-336.
- [8] Kim, Y.S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J. (2004) Fault Damage Zones. *Journal of Structural Geology*, **26**, 503-517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- [9] Berg, S.S. and Skar, T. (2005) Controls on Damage Zone Asymmetry of a Normal Fault Zone: Outcrop Analyses of a Segment of the Moab Fault, SE Utah. *Journal of Structural Geology*, **27**, 1803-1822. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.04.012>
- [10] Brogi, A. (2008) Fault Zone Architecture and Permeability Features in Siliceous Sedimentary Rocks: Insights from the Rapolano Geothermal Area (Northern Apennines, Italy). *Journal of Structural Geology*, **30**, 237-256. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.10.004>
- [11] Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B. (1996) Fault Zone Architecture and Permeability Structure. *Journal of Structural Geology*, **24**, 1025-1028. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2)
- [12] Engelder, J.T. (1974) Cataclasis and the Generation of Fault Gouge. *Geological Society of America Bulletin*, **85**, 1515-1522. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<1515:CATGOF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<1515:CATGOF>2.0.CO;2)
- [13] Holland, M., Urai, J.L. and Zee, W.V.D. (2006) Fault Gouge Evolution in Highly Overconsolidated Claystones. *Journal of Structural Geology*, **28**, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.10.005>
- [14] Hung, J.H., Ma, K.F., Wang, C.Y., et al. (2007) Subsurface Structure, Physical Properties, Fault-Zone Characteristics and Stress State in Scientific Drill Holes of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project. *Tectonophysics*, **466**, 307-321. <https://doi.org/10.5194/sd-SpecialIssue-55-2007>
- [15] Sibson, R.H. (1977) Fault Rocks and Fault Mechanisms. *Journal of the Geological Society of London*, **133**, 191-213. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.3.0191>

- [16] 高君, 吕延防, 田庆丰. 断裂带内部结构与油气运移及封闭[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(2): 4-7.
- [17] 刘鹏, 王永诗, 宋明水, 等. 碳酸盐岩断裂带断层岩特征及演化——以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷下古生界为例[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 588-597.