

基于物理模拟实验研究地层组成对断层结构的影响

单亦先¹, 劳海港²

(1. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 河北联合大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 地层组成对断层结构具有重要的影响或制约作用, 基于物理模拟实验研究了不同砂岩含量地层的断层结构特征。结果表明, 纯砂岩即泥岩含量为0时, 断层结构为二元型; 泥岩含量为4%~16%时, 断层发育一元型结构; 泥岩含量为16%~20%时, 断层发育二元型结构; 泥岩含量为20%~35%时, 断层发育二元或三元型结构, 二元或三元型结构的界线并不很明显; 泥岩含量为35%~50%时, 断层又发育二元型结构; 泥岩含量为50%~100%时, 断层回归于一元型结构。泥岩含量与破碎带的宽度、诱导裂缝个数具有明显的正相关关系, 基本上呈近似正态分布。

关键词: 物理模拟 地层组成 泥岩含量 破碎带宽度 诱导裂缝 断层结构

中图分类号: TE111.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)02-0024-04

A research on the impact of stratigraphic composition on fault structure based on physical simulation experiment

Shan Yixian¹, Lao Haigang²

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City,

Shandong Province, 266580, China; 2. College of Mining Engineering, Hebei United University,

Tangshan City, Hebei Province, 063009, China)

Abstract: Stratigraphic composition has an important influence or restrict on fault structure. Fault structure characteristics with different sandstone contents of strata have been researched based on physical simulation experiments. The experiments show that the fault is a binary type when the sandstone content is 100%; the fault develops into a unary type while the shale content is 4%–16% and a binary type while the shale content is 16%–20%; and it develops into binary or ternary type with unclear boundaries while the shale content is 20%–35%; the fault is binary type again when the shale content is 35%–50% and becomes unary type when shale content is 50%–100%. There is an apparent positive correlation among the shale content, the width of damage zone and the number of induced joints, which is an approximately normal distribution.

Key words: physical simulation; stratigraphic composition; shale content; width of damage zone; induced joints; fault structure

陆相断陷盆地中, 断层对油气成藏的重要性不言而喻。由于断层样式的多样性、运动的周期性及动力机制的复杂性^[1-2], 导致了不同断层相关的油气成藏的差异性。随着油气勘探的深入与野外踏勘的加深, 断层研究由传统的面状构造向三维地质体扩展^[3], 两者对断层发育地质背景存在迥然不同的观点。面状构造以充分胶结的地层为断层形成的

先决条件; 三维地质体则是断层发育在尚未固结的沉积物或孔隙性颗粒物之中, 复杂形变带则是其典型的识别标志^[4]。中外学者将断层内部结构通常分为断层核和破裂带二元结构单位^[5-7], 其中断层核发育滑动面、断层岩及泥岩涂抹等, 发育于断层核外围的破裂带以节理密集发育为主要特征。发育于未成岩地层中的断层核可细分为内核带、外核带

收稿日期: 2015-01-14。

作者简介: 单亦先(1965—), 男, 山东潍坊人, 教授, 从事油气田生产过程的智能监控技术、石油专用试验设备研制、石油装备检测技术与故障诊断研究。联系电话: 18605460902, E-mail: 18605460902@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006-003)。

和混合带^[8],根据应力场的差异性又可分为内破碎带与外破碎带^[9-10]。对于断层内部结构演化, Miccarelli 等通过对野外不同活动强度的断层进行研究,提出断层二元型结构受断层位移的影响^[11]。随着断距的增加,断层由不连续破碎带向有断层核的二元型结构演化。Gray 等对凝灰岩中发育的断层分析认为,随着断距的增加,断层由单一的断层核向二元型结构演化^[12]。由此可以看出,断距影响着断层二元型结构的发育。

断层三维地质体的深入研究、盖层中的泥岩涂抹及破碎带的发育是今后断层相关油气成藏研究的重点,而断层结构则是解决这一问题的关键。其中,对于尚未固结的沉积物中断层结构单元发育的规律性目前尚未开展研究。笔者以尚未完全固结的砂、泥为实验材料,研究地层组成对断层二元型结构形成的影响程度。需要说明的是,本文实验以中国石油大学(华东)与中国石化胜利油田分公司共建的国家十二五实验室为平台,其中王学军等已经对实验设备中的构造变形做了详细介绍^[13],在此不再做进一步说明。

1 实验设计思路

近年来,中外学者对砂泥岩地层中的断层结构进行了详细分析^[4-9,11],结果表明,泥、页岩地层中多发育简单的一元型断层结构,而在砂、泥岩互层中多见复杂的二元型断层结构,在纯砂岩地层中则以一元型断层结构为主。这种现象是否与断层形成的物质载体即地层有明显的关系,为此设计了关于地层组成对断层结构特征的影响实验。实验是通过泥岩含量的增加探究断层结构的变化,泥岩含量从0到100%选取30个测试点分别进行实验,最终建立地层中泥岩含量变化与断层结构之间的关系。

2 地层组成对断层结构的影响

由于多数实验的结果有相同之处,故笔者选择不同泥岩含量中的典型实验进行分析,即纯砂岩,泥岩含量分别为4%~20%,20%~35%和35%~100%。其中砂、泥岩的粒度约为0.3~0.4 mm,泥岩采用钠土为实验材料。

2.1 纯砂岩地层

对于纯砂岩地层,在物理模拟变形完成后形成2条呈线型展布的断层面(图1),单条断层相对较窄,但2条断层组合宽度相对较大,并且纵向上基本

呈直线状延伸,表现为二元型结构。在安徽巢湖、山东新汶野外纯砂岩地层中,断层同样比较狭窄,上盘发育较少的诱导裂缝,下盘则基本不发育,也表现为二元型断层结构。由此可见,物理模拟实验的纯砂岩地层中的断层结构与实际野外露头发育的基本一致。



图1 纯砂岩地层中的断层特征

Fig.1 Faults feature in pure sandstone formation

2.2 泥岩含量为4%~20%地层

选取泥岩含量为16%的地层进行解剖。在剪切物理模拟作用下,泥岩含量为16%的地层中断层发育较为平直的断面(图2),仅有局部的泥岩进入断层中,断层不发育诱导裂缝带。进入断层中的泥岩由于含量较低,并没有形成连续的泥岩涂抹层,断层在后期的油气充注过程中成为沟通深部烃源岩和浅层圈闭的良好通道。这种地层组成发育的断层在山东新汶野外剖面上呈线状展布,断层上、下两盘均不发育诱导裂缝带,断层面处发育规则的破碎带,局部仅有少量的从泥岩中刚蹭下来的碎片和松散砂。模拟结果与野外观察的共同特征是发育明显的一元型断层结构。



图2 泥岩含量为16%地层中的断层特征

Fig.2 Fault features in a model with shale content 16%

2.3 泥岩含量为20%~35%地层

继续增加泥岩含量,断层结构发生了明显的变化(图3,图4)。当泥岩含量达到23%时,断层宽度明显增加;在破碎带边缘发育规模不等、大小不一

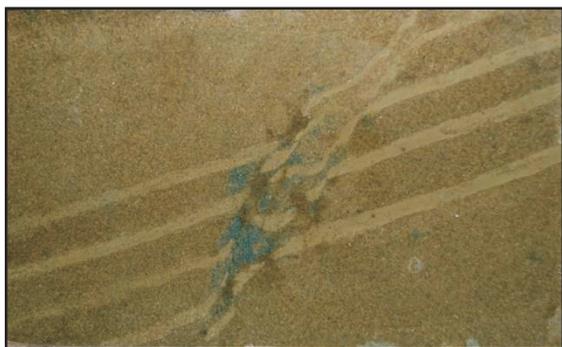


图3 泥岩含量为23%地层中的断层特征

Fig.3 Fault features in a model with shale content 23%



图4 泥岩含量为33%地层中的断层特征

Fig.4 Fault features in a model with shale content 33%

的裂缝。当泥岩含量为33%时,断层的宽度继续增大,发育的诱导裂缝带越加明显。断层上、下盘均发育数量不等的裂缝。当泥岩含量增至35%时,断层宽度逐渐减小,裂缝不规则地出现在断层的上、下盘。在安徽巢湖野外相同地质体中,断层同样发育明显的二元型结构;断层的宽度较大,而且其宽度在纵向上并不是一成不变的,断层的形态也有所变化,发育明显的诱导裂缝带,且上盘的裂缝数明显多于下盘。

2.4 泥岩含量为35%~100%地层

继续增加模型的泥岩含量,当泥岩含量为37%时,断层的宽度比泥岩含量为35%时的有所减小(图5),主要发育2条规模不等的断层;诱导裂缝带

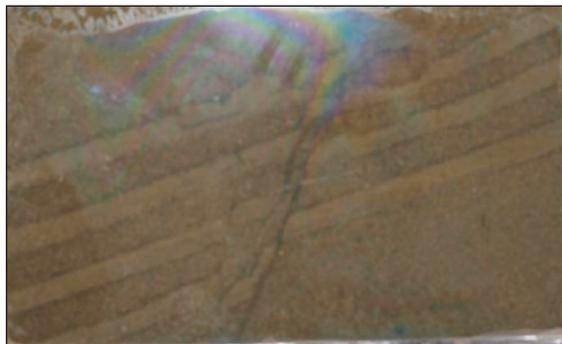


图5 泥岩含量为37%地层中的断层特征

Fig.5 Fault features in a model with shale content 37%

也逐渐减小。继续增加泥岩含量,在泥岩含量为60%的地质模型中,断层基本上呈线型面出现,泥岩的涂抹较为严重,泥岩厚度决定了涂抹长度;诱导裂缝带不发育。在纯泥岩(即泥岩含量为100%)地质模型中,仅有断层面存在,断层呈平直状,没有诱导裂缝带出现(图6)。李会军等对实际裂缝与泥岩厚度的统计表明^[14],诱导裂缝带随着泥岩厚度的增大而逐渐减小,实验中的结论也证实了这点。



图6 泥岩含量为100%地层中的断层特征

Fig.6 Fault features in a model with shale content 100%

3 泥岩含量、破碎带宽度对断层发育的约束

通过模拟不同泥岩含量地层中的断层发育情况,统计了泥岩含量与破碎带宽度及诱导裂缝个数的关系(图7)。结果表明,泥岩含量、破碎带宽度与断层结构有一定的关联性。在泥岩含量为0时,断层的结构为二元型,破碎带的宽度约为2 cm;当泥岩含量为4%~16%时,断层发育一元型结构,破碎带宽度为1 cm;当泥岩含量为16%~20%时,断层发育二元型结构,破碎带的宽度为1~2 cm;当泥岩含量为20%~35%时,断层发育二元或三元型结构,破碎带的宽度为2~4.4 cm,其宽度具有逐渐由小到大、然后变小的趋势;当泥岩含量为35%~50%时,断层发育二元型结构,破碎带的宽度由3.4 cm逐渐减小到1 cm;当泥岩含量为50%~100%时,断层发育一元型结构,破碎带宽度约为0.8 cm左右。断层中的诱导裂缝个数与破碎带宽度同样具有相似的变化特征。当泥岩含量为0时诱导裂缝个数为2个;当泥岩含量为4%~16%时诱导裂缝个数为0~1个;当泥岩含量为16%~20%时诱导裂缝个数约为1~2.5个;当泥岩含量为20%~35%时诱导裂缝个数为2.5~4个,个数变化也具有由小到大、然后变小的趋势;当泥岩含量为35%~50%时诱导裂缝个数逐渐变为1个;而泥岩含量为50%~100%时基本不发育诱导裂缝。

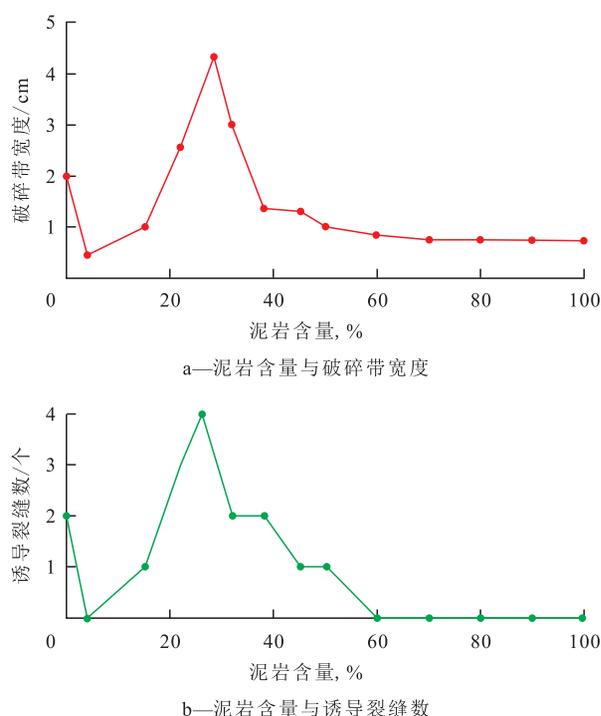


图7 泥岩含量与破碎带宽度、诱导裂缝数的关系

Fig.7 The relationship among shale content, width of damage zone and number of induced joints

4 结论

物理模拟结果表明,纯砂岩即泥岩含量为0时断层结构为二元型;泥岩含量为4%~16%时断层发育一元型结构;泥岩含量为16%~20%时断层发育二元型结构;泥岩含量为20%~35%时断层发育二元或三元型结构,2种结构的界线并不很明显;泥岩含量为35%~50%时断层发育二元型结构;泥岩含量为50%~100%时断层又归于一元型结构。泥岩含量与破碎带的宽度、诱导裂缝个数具有明显的正相关关系,基本上呈正态分布。

参考文献:

[1] 黄超.济阳拗陷断层聚集带划分及断块油藏分布规律[J].特种油气藏,2013,20(6):59-62.
Huang Chao.Faults in Jiyang depression accumulation zone division and fault block oil reservoir distribution laws[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2013,20(6):59-62.

[2] 杨贵丽.青东凹陷走滑构造对油气成藏的控制作用[J].油气地质与采收率,2014,21(5):18-21,26.
Yang Guili.The strike slip structure and its influences on the formation of petroleum reservoir in Qingdong sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(5):18-21,26.

[3] 邱贻博,王永诗,刘伟.断裂带内部结构及其输导作用[J].油气地质与采收率,2010,17(4):1-3.
Qiu Yibo, Wang Yongshi, Liu Wei.Study on internal structure and migration in fault zones[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2010,17(4):1-3.

[4] Mollema P N, Antonellini M A.Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in Aeolian sandstone[J].Tectonophysics,1996,267(1/4):209-228.

[5] Caine J S, Evans J P, Forster C B.Fault zone architecture and permeability structure[J].Geology,1996,24(11):1 025-1 028.

[6] 陈伟,吴智平,侯峰,等.断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J].石油学报,2010,31(5):774-780.
Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al.Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(5):774-780.

[7] Wouter van der Zee, Janos L Urai.Processes of normal fault evolution in a siliciclastic sequence: a case study from Miri, Sarawak, Malaysia[J].Journal of Structural Geology,2005,27(12):2 281-2 300.

[8] Clausen J A, Gabrielsen R H, Johnsen E, et al.Fault architecture and clay smear distribution.Examples from field studies and drained ring-shear experiments[J].Norwegian Journal of Geology,2003,83(2):131-146.

[9] Jones M A, Knipe R J.Seismic attribute maps: application to structural interpretation and fault seal analysis in the North Sea Basin [J].First Break,1996,14(12):449-461.

[10] Micarelli L, Moretti I, Daniel J M.Structural properties of rift-related normal faults: the case study of the Gulf of Corinth, Greece [J].Journal of Geodynamics,2003,36(1/2):275-303.

[11] Micarelli L, Benedicto A C, Wibberley A J.Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks [J].Journal of Structural Geology,2006,28(7):1 214-1 227.

[12] Graya M B, Stamatakos J A, Ferrillb D A, et al.Fault-zone deformation in welded tuffs at Yucca Mountain, Nevada, USA [J].Journal of Structural Geology,2005,27(10):1 873-1 891.

[13] 王学军,单亦先,劳海港,等.构造变形与烃类充注一体化物理模拟的难点及解决策略[J].石油实验地质,2013,35(4):453-456.
Wang Xuejun, Shan Yixian, Lao Haigang, et al.Difficulties and solving strategies for integrated physical simulation of tectonic deformation and hydrocarbon charging[J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(4):453-456.

[14] 李会军,吴泰然,郝银全,等.港深78井裂缝发育影响因素、成因及其在油气勘探中的意义[J].断块油气田,2004,11(3):27-29.
Li Huijun, Wu Tairan, Hao Yinquan, et al.Controlling factors and causes of fracture formation in GS78 area and its signification for oil and gas exploration[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2004,11(3):27-29.