

文章编号: 1001 - 6112(2005)04 - 0404 - 05

断层不同输导通道封闭机理及其研究方法

付 广, 刘洪霞, 段海风

(大庆石油学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:在断层内输导通道类型及其特征研究的基础上,将断层垂向封闭性分为 2 种类型:一种是针对倾斜裂缝或以泥质为主的断裂带连通孔隙的紧闭愈合封闭机理;另一种是针对垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙的成岩胶结封闭机理。利用断层压力和泥岩塑性变形极限之间的关系建立了断层紧闭愈合封闭机理的研究方法;利用 SiO_2 和 CaCO_3 的沉淀建立了断层成岩胶结封闭机理的研究方法。并以乌尔逊凹陷北部主要断层为例,利用上述方法对其在大一段内的垂向封闭性进行了研究。研究结果符合实际地质情况,表明该方法用于研究断层内不同输导通道的垂向封闭性是可行的。

关键词:断层;输导通道;裂缝;连通孔隙;紧闭愈合;成岩胶结

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

大量油气勘探的实践表明,断层在油气聚集成藏中具有双重作用,既可起通道作用,又可起遮挡作用。断层在地下究竟起何作用关键取决于其封闭性。关于断层垂向封闭机制及其研究方法,许多学者^[1~17]都进行了大量的研究和探讨,并较以往取得了明显进步。然而,由于钻井、取心、断裂带本身的复杂性以及人们认识的局限,对断层垂向封闭性的评价主要局限于断层面压力、断移地层岩性以及一些间接反映其垂向封闭特征的地质信息上,很少从断裂带本身内部结构、油气渗滤通道类型及其特征等方面直接入手研究其垂向封闭机制,这无疑使断层垂向封闭性评价的精度受到一定的影响。因此,建立一套针对不同输导通道的断层垂向封闭机制及其评价方法,对于正确认识断层在油气运移、聚集与保存中的作用具有重要意义。

1 断层输导油气通道及其特征

不论是正断层还是逆断层,就其本身内部结构特征而言,能使油气发生渗滤运移的输导通道的类型主要有 2 种:一种是与断层形成相伴生或派生的裂缝;另一种是填充在断裂带中两盘破碎岩石颗粒之间的连通孔隙。

1.1 裂缝及其特征

裂缝主要是由断层形成的统一应力场和断层错

动引起的诱导应力场的作用下,断层内及附近岩石沿破裂面没有发生明显的位移而形成的一种伴生或诱导构造。伴生裂缝主要发育在断层带中,在断层带中央部位密度最大,一般不超过数十条,其分布方向与断层分布方向一致。诱导裂缝主要发育在断层附近,与断层以一定的角度相交,其交角大小主要取决于岩石力学性质和断层位移规模,离断层越近,诱导裂缝密度越大;反之则越小。

裂缝在断层及其附近形成了一个错综复杂的油气渗滤运移的输导通道,它经常伴随着断层的形成而形成,随着断层活动的停止,裂缝紧闭及愈合而终止其输导作用。

1.2 连通孔隙及其特征

由于断层错动,在强大的构造应力的作用下,断层两盘岩石被破碎,落入断裂带中便形成了断裂岩。断裂岩内部孔隙发育,其渗透性主要受断层性质的影响。不同性质的断层所形成的断裂岩其颗粒的破碎程度、变形程度和胶结程度等均不同,因此其渗透性也不同。张性及张扭断层所形成的张性断裂岩,颗粒胶结疏松,渗透性发育;而压性和压扭性断层所形成的压性断裂岩,颗粒胶结紧密,渗透性不发育。此外,断裂岩渗透性还受断裂形成发育时期的影响,断裂岩在断裂静止期的渗透性明显较活动期降低,甚至低于围岩^[18]。

与裂缝相比,断层的输导通道时间要长,但主要

收稿日期:2004 - 05 - 31;修订日期:2005 - 06 - 13。

作者简介:付 广(1962—),男(满族),辽宁新宾人,教授、博士生导师,主要从事油气藏形成与保存条件研究。

基金项目:国家“973”重点基础研究项目(2001CB209104)和黑龙江省教育厅科研项目(0551001)。

是在裂缝停止输导作用以后起输导作用。

2 断层垂向封闭机理

由上述分析可知,断层在垂向上造成油气散失的根本原因是断裂带中存在着裂缝和连通孔隙,它们作为油气渗滤运移散失的通道,使油气散失。因此,断层在垂向上能否阻止油气的渗滤散失,关键取决于这些输导通道能否封闭。断层中裂缝产状及断裂带填充物成分特征的不同,造成了不同输导通道封闭机制的差异,因此将断层的垂向封闭机制分为2种。

2.1 紧闭愈合垂向封闭机理

这种封闭机理主要是针对断层中的倾斜裂缝(包括水平裂缝)或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙(主要是倾斜或水平的断裂带)而言的。倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙主要是在上覆沉积载荷压力或区域主压应力的作用下发生紧闭闭合,但由于裂缝面的凹凸不平及颗粒的支撑,倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙难以完成愈合,仍会遗留渗透空间,通常是在裂缝的陡角处或颗粒的支撑处开启而使油气渗漏散失。因此,仅仅依靠断层所受到的压力,还不能使倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙在垂向上完全封闭,必须借助于泥岩的塑性流动,来堵塞它们紧闭后留下来的渗透空间。由泥岩变形机制可知,当上覆沉积载荷或区域主压应力大于泥岩塑性变形极限时,泥岩便发生塑性流动,堵塞倾斜裂缝或以泥岩填充为主的断裂带连通孔隙紧闭后遗留下来的渗透空间,使其愈合,在垂向上形成对油气的封闭。否则倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙在垂向上是难以完全愈合的。

2.2 成岩胶结垂向封闭机理

这种封闭机理主要是针对断层中垂直裂缝(包括近于垂直的裂缝)或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙(断裂带可以直立,也可以倾斜)而言的。由于上覆沉积载荷压力或区域主压应力对垂直裂缝或垂直断裂带的紧闭不起作用,加之砂质填充为主的断裂带又无足够的泥岩塑性流动来堵塞紧闭后断裂带中的遗留渗透空间,所以垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙在垂向上的封闭,主要是通过流体在运移过程中温度和压力条件的改变,使流体中所携带的大量的成岩物质过饱和和发生沉淀,来堵塞垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙,从而在垂向上形成封闭。最典型的是 $\text{Si}(\text{OH})_4$

迁移到浅处过饱和沉淀,导致石英增生;碳酸盐迁移至深处过饱和沉淀,形成嵌晶状碳酸盐岩胶结^[19]。这些石英和碳酸盐岩沉淀堵塞了垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙,在垂向上形成了封闭,阻止了油气的渗滤散失。

3 断层垂向封闭性的研究方法

由于断层中不同输导通道的封闭机理不同,因此采用的研究方法也应不同。

3.1 紧闭愈合封闭的研究方法

由上可知,断层中倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙能否形成垂向封闭关键取决于断层压力是否能达到泥岩塑性变形强度。

不论何种性质的断层,都会受到上覆地层的重力(垂直断层除外)和区域主压应力的作用(图1)。断层上的压力大小可以由下式求得:

$$N = N_1 + N_2 = Z(\rho_1 - \rho_w) \cos \alpha + \rho_1 \sin \alpha \sin \beta$$

式中: N 为断层受到的总压力,MPa; N_1 为上覆地层重量对断层产生的静岩压力,MPa; N_2 为区域主压应力对断层产生的压力,MPa; Z 为断层埋深,m; ρ_1 为上覆地层的平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为上覆地层水的密度, g/cm^3 ; α 为断层倾角, $(^\circ)$; ρ_1 为区域主压应力,MPa; β 为断层主应力与断层走向之间的夹角, $(^\circ)$ 。

根据彭秀美(1993)对湘鄂西泥质岩的三轴抗压实验结果^[20],将其屈服极限与围压作图(图2)可看出,二者具有明显的线性关系。如图2中当不存在围压(因围压为0,符合地下实际情况)时,泥质岩的塑性极限约为5 MPa,即当泥质岩受到单方向5 MPa的压力时,便可发生塑性变形。

由此可知,如果断层压力大于5 MPa,表明泥岩已发生塑性变形,倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙不仅可以在压力的作用下封闭,而且

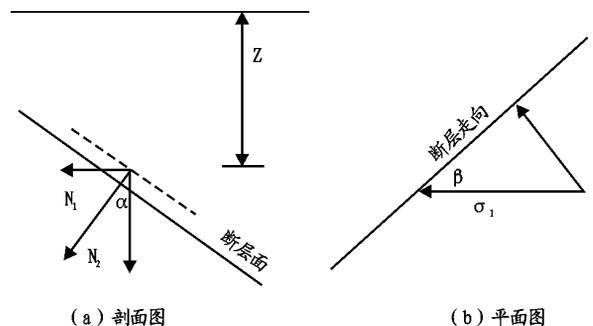


图1 断层受力示意图

Fig. 1 Sketch map of pressure applied on fault

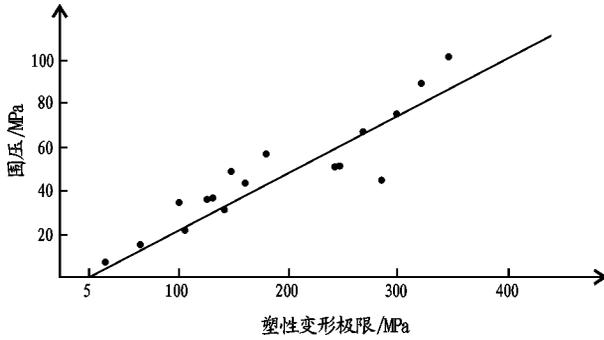


图 2 泥质岩塑性变形极限与围压之间的关系

Fig. 2 Relationship between the plastic deformation limit of mudstone and surround pressure

泥岩还可以塑性流动堵塞遗留下来的渗滤空间,形成垂向封闭,阻止油气渗滤散失;相反,如果断层压力小于 5 MPa,表明泥岩尚未发生塑性变形,倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙虽可在压力作用下紧闭,但其遗留下来的渗滤空间不能被泥岩塑性流动堵塞愈合,不能在垂向上形成封闭,造成油气渗滤散失。

3.2 成岩胶结封闭的研究方法

由上可知,弄清垂直断裂或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙是否被 CaCO₃ 或 SiO₂ 沉淀堵塞,是判断其垂向封闭与否的关键。根据张义纲(1991)的研究^[21],在持续埋藏的东濮凹陷地层剖面中,有机质的镜质体反射率分别为 0.30%~0.5%(Ⅰ、Ⅱ型干酪根)、0.6%~0.7%(Ⅲ、Ⅳ型干酪根)和 0.8%~1.0%(Ⅴ型干酪根)或 1.2%~1.4%(Ⅵ型干酪根)处 SiO₂ 和 CaCO₃ 发生沉淀,使砂岩发生胶结,形成封闭(表 1)。

根据断层的埋深与表 1 中 R₀ 相比对,来判断断层内垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙是否处于 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀带内。如果断层处于表 1 中 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀带内,断层内垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙便被 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀堵塞,在垂向上形成封闭;相反,如果断层处于多孔带内,断层就不能被 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀堵塞,从而在垂向上呈开启状态。

4 实例应用

本文以海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部几条主要断层为例,利用上述方法研究其在垂向上的封油性,阐明垂向封闭在该区油气运聚成藏中的作用。

乌尔逊凹陷北部主要发育南北—北东东向断层。断层分布条带性较强,主要可分为 2 个条带。第 1 个条带位于苏仁诺尔构造带,由 WU39、WU76、WU80 和 WU16 号等断层组成,其走向为由西南向东及由北东转向北东东,倾向为由东南转向东南南。该组断层由西向东断距为小—大—小、断层倾角逐渐变缓。第 2 条带为铜铂庙组断层带,由 WU21、WU13、WU14 号等断层组成,其走向为北东向,局部具反转性质。该组断层由北向南断距和断面倾角均有小—大—小的特征(图 3)。

乌尔逊凹陷北部油气主要分布在南屯组,油主要来源于南一段的暗色泥岩,气则主要通过断层来源于地壳深部,盖层则为大一段发育的大套泥岩。由表 2 可以看出,乌尔逊凹陷北部南屯组油气聚集绝大多数与断裂有关,主要是断块圈闭;其次是断层

表 1 盆地内区域性 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀带的分布^[21]

Table 1 Distribution of regional silica and carbonate precipitation zone in Basin

演化阶段	R ₀ , %	成岩孔隙带	特征	成因
未熟	<0.3 或 <0.4	第一个多孔带 (原生孔隙带)	微生物溶蚀为主	沉积压实作用, 有机质的大量菌解
	0.3~0.5	第一致密异常带	SiO ₂ 或碳酸盐沉淀	有机质的降解处于低谷
低熟	0.4~0.6	第二多孔带 (原次生孔隙带)	游离 SiO ₂ 和 自生高岭石形成	蒙脱石向伊利石 转化,有机酸的生成
	0.6~0.7	第二致密异常带	石英增生或碳酸盐沉淀	二羧酸的分解,CO ₂ 产率低
成熟	0.7~0.9(Ⅰ型) 0.7~1.2(Ⅱ型)	第三多孔带 (次原生孔隙带)	长石岩屑的溶蚀、高 岭石化、碳酸盐的溶解	有机质大量热降解, CO ₂ 产率高
	0.8~1.0(Ⅲ型) 1.2~1.4(Ⅳ型)	第三致密异常带	嵌晶状碳酸盐沉淀	有机质停止 大量生成 CO ₂
高熟	>1.4	深部成岩孔隙度 (间有局部性次生孔隙 发育层和致密异常层)	长石、高岭石、石英的 溶蚀、嵌晶状方解石的沉淀	高岭石的不稳定,成岩 物质的对流,热液溶蚀

封闭遮挡和断层—岩性圈闭。油气平面分布主要在苏仁诺尔断裂带上,也与断裂有着密切关系(图 3)。由此看出,断层在大一段盖层内垂向封闭性的好坏,对该区南屯组油气的聚集与保存至关重要。

根据乌尔逊凹陷北部各断层在大一段内的埋深和倾角,由前面的公式计算得到其在大一段地层内的压力大小(表 3)。由表 3 可以看出,乌尔逊凹陷北部除 WU21 号断层部分压力小于 5 MPa,不能使泥岩发生塑性变形而堵塞其内倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙紧闭后遗留下来的渗漏空间外,其余断层均可使其内倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙形成垂向封闭。

由乌尔逊凹陷有机质镜质体反射率资料可知,乌尔逊凹陷北部大一段泥岩有机质镜质体反射率值主要分布在 0.3% ~ 0.5%,局部 > 0.5%,达到 0.7%。由表 1 可以看出,乌尔逊凹陷北部主要断层在大一段内应处于 SiO₂ 和 CaCO₃ 的第一个沉淀带内,其内的 SiO₂ 和 CaCO₃ 沉淀可以使断层内垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙胶结,在垂向上形成封闭。

综合上述研究可知,乌尔逊凹陷北部主要断层在大一段内具较好的垂向封闭性,这可能是造成该区南屯组油气聚集的一个重要原因(表 2)。

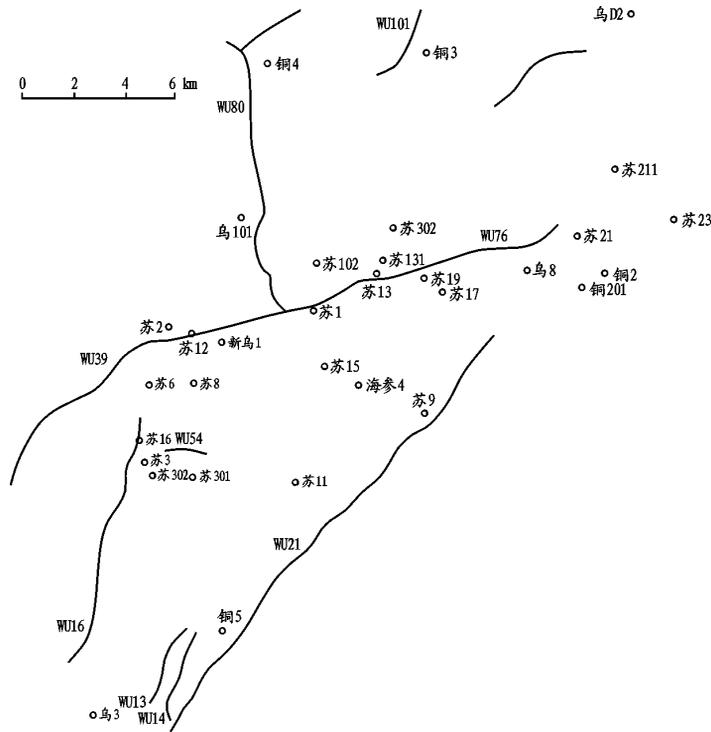


图 3 海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部主要断层分布图

Fig. 3 Distribution of main faults in the north of Wuerxun Depression, the Hailar Basin

表 2 乌尔逊凹陷北部南屯组油气藏类型

Table 2 Types of oil or gas reservoirs of the Nantun Formation in the north of Wuerxun Depression, the Hailar Basin

井号	油气藏类型	井号	油气藏类型	井号	油气藏类型
苏 11	岩性油藏	苏 1	断层—岩性油藏	苏 132	构造—岩性油藏
苏 16	断块油藏	海参 4	岩性油藏	苏 15	背斜油藏
苏 102	断层遮挡油藏	苏 31	断块油藏	苏 27	断块油藏
苏 131	断块油藏	乌 8	断块油藏	苏 12	断块油藏
苏 13	断块油藏	苏 2	断块气藏	苏 301	断鼻油藏
苏 17	背斜油藏	苏 21	构造—岩性油藏	苏 302	构造—岩性气藏
苏 8	断块气藏	苏 302	构造—岩性气藏		

表 3 乌尔逊凹陷北部主要断层倾斜裂缝或
以泥质填充为主的断裂带连通孔隙垂向封闭性评价

Table 3 Evaluation on vertical seal of tilt fractures or connected pores of fault zone
in main faults of the north of Wuerxun Depression, the Hailar Basin

断层号	断层埋深/m	倾角余弦值	断层面压力/MPa	垂直封闭性
WII4	1 429.5 ~ 1 575.0	0.865 9 ~ 0.911 9	13.4 ~ 14.7	封闭
WU13	1 550.0 ~ 1 595.0	0.909 5 ~ 0.995 0	14.7 ~ 16.5	封闭
WU21	940.0 ~ 1 620.0	0.650 8 ~ 0.993 5	3.1 ~ 10.9	不封闭—封闭
WU16	1 397.5 ~ 1 880.0	0.110 4 ~ 0.994 3	11.6 ~ 18.7	封闭
WU39	1 200.0 ~ 1 602.5	0.669 0 ~ 0.995 0	9.4 ~ 13.6	封闭
WU80	890 ~ 1 267.5	0.672 7 ~ 0.987 4	6.7 ~ 13.0	封闭
WU76	587.5 ~ 1 247.5	0.725 0 ~ 0.995 0	8.2 ~ 15.8	封闭

5 结论

1) 断层垂向封闭性按其输导通道类型不同可分为 2 种:一种是针对倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙的紧闭愈合封闭机理;另一种是针对垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙的成岩胶结封闭机理。

2) 利用断层压力和泥岩塑性变形极限建立了断层中倾斜裂缝或以泥质填充为主的断裂带连通孔隙的垂向封闭性研究方法;利用 SiO₂ 和 CaCO₃ 是否沉淀建立了断层中垂直裂缝或以砂质填充为主的断裂带连通孔隙的垂向封闭性研究方法。并以乌尔逊凹陷北部主要断层为例,利用上述 2 种方法对其在一大段的垂向封闭性进行了研究。研究表明,该方法用于研究断层不同输导层的垂向封闭性是可行的。

参考文献:

- 李德荣,杨书安. 试论不同力学性质的断裂构造的富水部位及富水性[J]. 地球科学,1975,1(3):200~229
- Gibson R G. Fault-zone seals in siliciclastic strata of the Columbus Basin, offshore Trinidad[J]. AAPG Bulletin,1994,78(9):1 372~1 385
- 吕延防,付广,高大岭等. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996. 64~108
- 付广,李玉喜,张云峰等. 断层垂向封闭性研究方法及其应用[J]. 天然气工业,1997,17(6):22~25
- 付广,杨勉. 断层垂向封闭性预测方法[J]. 复式油气田,2000,5(3):38~40
- 付广,王朋岩,孙洪斌. 断层垂向封闭模式及研究方法[J]. 新疆石油地质,1998,19(1):7~11
- 付广,薛永超,杨勉. 利用断裂充填物泥质含量研究断层封闭的方法[J]. 断块油气田,1999,6(1):9~12
- 刘泽容,信荃麟,邓俊国等. 断块群油气藏形成机理和构造模式[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 16~40
- 吕延防,付广. 断层封闭性研究[M]. 北京:石油工业出版社,2002. 66~131
- 董亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质,1998,19(3):215~220
- Berg R R, Avery A H. Sealing properties of Tertiary growth faults, Texas Gulf[J]. AAPG Bulletin,1995,79(3):375~393
- Koott S D. Fault seal analysis in the North sea[J]. AAPG Bulletin,1993,72(5):778~792
- Hooper E C D. Fluid migration along growth fault in compacting sediments[J]. Jour of Petrol Geol,1991,4(2):161~180
- 张云银,郝庐断裂带含油气性研究[J]. 石油实验地质,2003,25(1):28~32
- 于俊吉,罗群,张多军等. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质,2004,26(3):241~248
- 王洪辉. 川南三叠系新统大断裂封闭性研究[J]. 石油实验地质,2002,24(5):403~406
- 沈传波,梅廉夫,刘立林. 基于三维古构造应力场数值模拟的断层封闭性研究[J]. 石油实验地质,2004,26(1):103~107
- Matthai S K, Roberts S G. The influence of fault permeability on single-phase fluid flow near fault-sand intersections: results from steady-state high-resolution models of pressure-driven fluid flow[J]. AAPG Bulletin,1996,8(11):1 763~1 779
- 高宏斌,梁志刚. 断裂作用对孔隙性砂岩中流体运移的影响[A]. 见:焦大庆,梁志刚,王长青等. 含油气盆地流体演化研究[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 107~119
- 彭秀美. 用岩石力学实验研究区域盖层的埋深和厚度标值[A]. 见:石宝珩,周堃,关德范等. 扬子海相地质与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 262~269
- 张义纲. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京:河海大学出版社,1991. 138~148

(下转第 418 页)

nued and steady into the model , we simulated the process of the oil migration and accumulation in the faults and the reservoir. By observing the process of experiment and analysing the result and studying the character of tectonic stress field and the proof of fluid geochemistry for the controlling of faults to oil , this paper analyzed the character for the controlling of reverse faults to the oil in this area clearly.

Key words : physical simulation experiment ; fault transport system ; fault controlling oil mode ; the Hongche Faults ; Junggar Basin

(continued from page 408)

SEAL MECHANISMS OF DIFFERENT TRANSPORTING PASSWAYS OF FAULT AND THEIR RESEARCH METHODS

Fu Guang ,Liu Hongxia ,Duan Haifeng

(Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract :Based on the study of types and characteristics of transporting passways in faults , two types of vertical seal mechanisms of faults were divided. A vertical seal mechanism of fault is tight and heal seal mechanism for tip fractures or connected pores of fault zone filled mainly with mudstone. Another vertical seal mechanism of fault is diagenetic cementation seal mechanism for vertical fractures or connected pores of fault zone filled mainly with sandstone. A method studying the tight and heal seal mechanism of fault was established by using the relationship between surround pressure on fault and plastic deformation limit of mudstone. Another method studying the diagenetic cementation seal mechanism of fault was established by using whether deposition of silica and carbonate or not. These method were applied in studying the vertical seal mechanism of main fault in the first member of Damoguaihe Formation , the north of Wuerxun Depression in the Hailar Basin. The research results are accordant with actual geological conditions. It indicates that the methods are practical to study the seal of different transporting passways of fault.

Key words : fault ; transporting passways ; fractures ; connected pores ; tight and heal ; diagenetic cementation