

文章编号: 1009-3850(2008)03-0096-05

龙门山中段前缘须家河组裂缝特征与油气的关系

罗啸泉, 唐贵宾

(中石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 龙门山前深层须家河组气藏主要受裂缝控制, 裂缝的发育与构造、断裂密切相关。应用声发射试验、包裹体测温和碳、氧同位素等方法, 对龙门山中段前缘深层上三叠统须家河组裂缝特征进行了研究, 把须家河组裂缝分为构造裂缝和成岩裂缝两类。龙门山前须家河组中存在印支期、燕山期和喜马拉雅期的多期构造作用, 其中印支期和燕山期破裂作用相对较弱, 形成的裂缝较少, 而喜马拉雅期破裂作用较强, 形成了大量的断层和构造裂缝。对须家河组致密砂岩储层来说, 发育的构造裂缝是油气藏高产的必要条件。

关键词: 龙门山; 须家河组; 裂缝特征; 油气

中图分类号: TE122.2⁺3

文献标识码: A

龙门山位于四川盆地西北缘, 它北自广元, 南抵宝兴, 呈北东-南西走向, 长约 400 km, 北西界为茂汶断裂, 南东界为江油-关口-都江堰断裂, 宽约 30 ~ 50 km, 其中绵竹-大邑为龙门山中段^[1]。川西坳陷深层上三叠统须家河组砂岩储层十分致密, 据 1000 件样品统计, 孔隙度为 0.23% ~ 16.76%, 平均为 4.29%, 储层基质渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均渗透率为 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。天然气呈“冻结”形式赋存于致密的岩体中, 没有裂缝系统的叠加, 气井难以获得高产^[2-4]。龙门山前缘部分构造因隆起早、隆升幅度高, 经历的最大古埋深相对较小, 储层物性稍好于川西坳陷内部, 但储层总体仍很致密, 勘探实践证明要获得高产工业油气流仍然需要配以发育的裂缝^[5]。因此, 研究裂缝发育特征与油气的关系, 具有现实意义。

1 须家河组裂缝发育特征

通过岩心和野外剖面的观察和成像测井资料, 结合龙门山前构造发展历史, 龙门山中段前缘内主要发育下列两类裂缝:

1.1 构造裂缝

1.1.1 剪切裂缝

龙门山前区域共轭节理为剪切性质, 呈等间距分布, 延伸远, 节理面见方解石、石英充填或半充填, 产状一般为斜交, 缝面可见擦痕和阶步, 以 NE 向、NW 向为主, 与 TM 卫星图像解释的结果相吻合。

1.1.2 张性裂缝

张性构造裂缝分布受构造变形强度、变形中性面及岩石力学性质等因素制约, 与构造轴走向一致, 对流体的产出有重要作用, 多发育于形变较强的构造中, 在背斜的轴部发育纵张裂缝。

1.1.3 与断层相关的构造缝

在断裂带中常伴生有多组裂缝, 称为与断层相关的构造缝。包括受断层侧效应和末端效应的作用, 断层附近的剪切裂缝和张性裂缝, 其产状一般较乱, 常为网状, 剪切裂缝面常见擦痕和阶步等构造现象。

1.2 非构造裂缝

龙门山前须家河组储层中非构造裂缝主要包括沉积层理缝和成岩裂缝。沉积层理缝为储层沉积过

收稿日期: 2007-08-30 改回日期: 2008-04-06

作者简介: 罗啸泉 (1963—), 男, 教授级高工, 硕士, 主要从事油气地质勘探开发研究。Tel: (028) 83355029 E-mail: 2004kts@21cn.com

资助项目: 中石化龙门山前构造带油气勘探潜力及目标评价科研项目 (06-kk-0548) 资助

程中受环境影响形成的各种层理,须家河组沉积环境多样,形成了如斜层理缝、水平层理缝、沙纹层理缝和槽状层理缝,以及沿砾石边缘的不规则缝等多种类型的层理缝,缝面可见云母、泥质等充填或半充填。成岩裂缝是储层在成岩作用过程中形成的裂缝,如压溶缝、成岩收缩缝等。

1.3 储集岩声发射特征

声发射简称 AE,也称为应力波发射,其定义为材料或结构受力作用时发生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象。1950年,原联邦德国科学家 Kaiser发现了声发射对材料载荷历史的最大载荷具有记忆能力,即凯塞(Kaiser)效应;1963年,Goodman在岩石压缩试验中也证实了凯塞效应的存在。近年来,凯塞效应在测定地应力方面得到了广泛应用,笔者应用岩石声发射技术来研究遂宁组储层的破裂历史,并计算其地应力的,以解决裂缝的发育期次和规律。

格里菲斯(1920)认为,即使像玻璃那样的脆性材料,其内部都会有微小的裂纹,破坏是从微小裂纹处开始发生的。声发射实验是根据地下岩层中存在多期古构造应力场所产生的微观格里菲斯裂纹,只有当施加的力达到古应力强度时,裂纹才会扩展,形成不同的多个凯塞(Kaiser)效应点的原理,利用声发射实验 AE曲线上出现的凯塞效应点个数,来判断岩层在地史时期所受到应力强度及期次。

笔者选送了龙深1井、马深1井、金深1井和大邑1井须家河组二段、四段1块砂岩岩心样品,经成都理工大学工程地质研究所对岩石声发射试验。测试设备采用美国产 MTS815 Teststar程控伺服岩石力学试验系统及 AE-21(声发射检测系统,在加载过程中,采用加荷速率控制,进速率为 20KN/min。最后,由计算机绘出声发射特征参数图,图1中横坐标为时间(秒),左纵坐标为声发射特征参数,右纵坐标为载荷(KN)。

测试结果表明,样品的声发射曲线均显示龙门山前须家河组经历了多期构造应力作用,曲线都有4级 Kaiser效应点,显示该区须家河组沉积后,至少经历了四期构造运动。从龙门山前地质构造发展史来看,须家河组从沉积后经历了印支晚幕、燕山早幕、燕山晚幕和喜马拉雅期等多期构造运动,所以声发射试验反映出多期 Kaiser效应现象。

根据声发射的地应力记忆能力,越晚的凯塞效应点,对应的应力越新,因此,须家河组沉积以后经历的应力场作用为:第一期对应于印支晚期,测得应

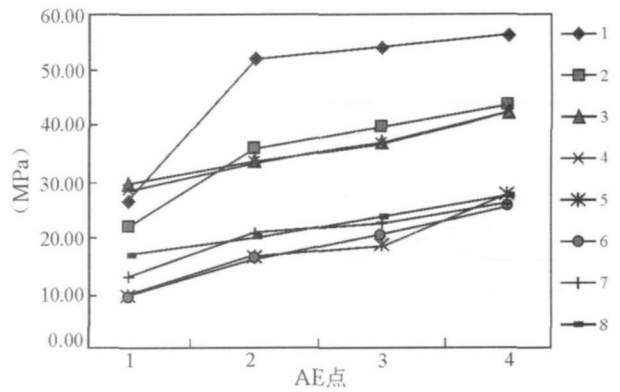


图1 须家河组岩心声发射试验结果

1. 龙深1井须二; 2. 大邑1井须四; 3-5. 马深1井须四; 6. 马深1井须二; 7, 8. 金深1井须二

Fig.1 Experimental results of acoustic emission for the reservoir samples from the Xujiahe Formation

1= deep Long1 well in the second member of the Xujiahe Formation; 2= DaYi1 well in the fourth member of the Xujiahe Formation; 3-5= deep Ma1 well in the fourth member of the Xujiahe Formation; 6= deepMa1 well in the second member of the Xujiahe Formation; 7 and 8= deep Jin1 well in the second member of the Xujiahe Formation

力分量为 9.53~26.43MPa;第二期对应于燕山中期,应力分量为 16.3~51.7MPa;第三期对应燕山晚期,应力分量为 18.68~53.68MPa;第四期对应喜马拉雅期,构造运动最强,应力分量最大为 25.46~56.04MPa。

龙门山推覆带从印支晚幕以来,自西向东推覆。声发射试验还表明位于龙门山推覆构造带大园包构造上的龙深1井(图2),自印支期以来形变强,四级 AE点应力分量居测试样品首位。其次是位于山前冲断带内大邑构造上的大邑1井, AE点应力分量也较高,须二段岩心构造斜交缝发育,与分析结果吻合。位于前陆盆地褶皱带内的马井构造,马深1井须四砂岩样品 AE点应力分量大于须二样品应力分

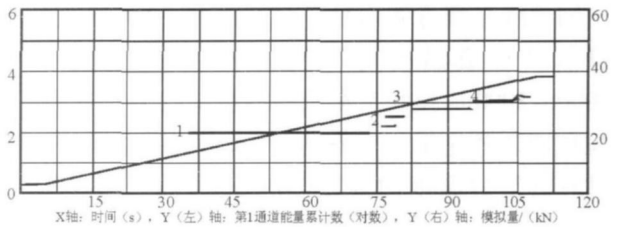


图2 龙深1井须二砂岩声发射曲线图

Fig.2 Acoustic emission curves for the sandstone from the deep Long1 well in the second member of the Xujiahe Formation

量的 2~3 倍,反映须四段受应力作用较强,裂缝相对须二段发育(图 3)。

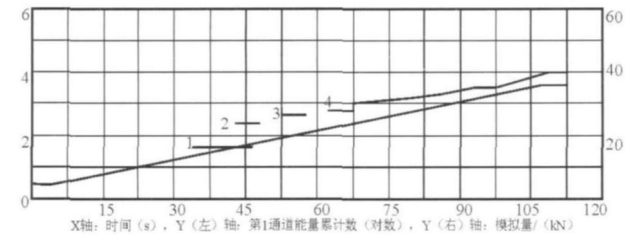


图 3 马深 1 井须四砂岩声发射曲线图
Fig 3 Acoustic emission curves for the sandstone from the deep Ma₁ well in the fourth member of the Xujihe Formation

从上述分析可以知道,龙门山前须家河组中存在印支期、燕山期和喜马拉雅期的多期构造作用,其中印支期、燕山期破裂作用相对较弱,形成的裂缝较少,喜马拉雅期破裂作用较强,形成了大量的断层和构造裂缝。

1.4 裂缝充填物同位素特征

为了确定龙门山前缘须家河组的破裂期次,利用 Epstein (1974)提出的氧同位素测温方程,计算了裂缝充填物形成时的古温度,可以求出裂缝形成的大致埋深和时期。

$$t = 31.9 - 5.55(\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w) + 0.7(\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)^2$$

式中: t —介质形成时温度/℃;
 $\delta^{18}O_c$ —方解石的氧同位素值/PDB‰;
 $\delta^{18}O_w$ —水介质的氧同位素值,陆相湖河
流体系,取 -10‰(PDB)。

据实测裂缝充填的方解石同位素资料,研究区须家河组中的裂缝可以分为 3 期:印支期裂缝充填方解石的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值在约 -13‰ 左右,其形成温度为 40.8~67℃,按古地温梯度 3.17℃/100m 计算,埋藏深度为 1000~1500m,为印支期构造运动的产物;燕山期裂缝充填方解石的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值约 -15‰ 左右,估算出其形成温度为 73.9~86.7℃,埋藏深度为 2000~3000m,反映为燕山期构造运动的产物;喜马拉雅期裂缝充填方解石的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值约 -18‰ 左右,估算其形成温度约为 121.8℃,埋藏深度为 3500~4000m,反映为喜马拉雅期构造运动的产物(表 1)。

1.5 裂缝充填物包体温度特征

储层中的流体包裹体是储层在成岩过程中被自生矿物晶格所捕获而形成的油气水包裹体,它们记录了油气水充注储层时的组成性质及物理化学条件。均一温度测试对象是与烃类包裹体共生的盐水

包裹体。根据包裹体的均一温度,结合盆地的古地温和储集层埋藏历史,来确定包裹体形成时的地层埋深及对应的地质时代,可以确定油气藏形成时期^[6]。在龙门山前缘关口断裂带上下盘采集了 5 个储层样品,进行了流体包裹体测试(表 2)。

表 1 裂缝充填物的碳、氧同位素值
Table 1 Carbon and oxygen isotope values for fissure fillings

样号	取样地点	层位	井深/m	$\delta^{13}C_{PDB}$ ‰	$\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	形成温度 /℃
R-5	92井	T ₃ Ⅹ	3225 00	-0.18	-15.35	81.6
K1	92井	T ₃ Ⅹ	1920 43	-4.14	-18.04	121.8
K2	92井	T ₃ Ⅹ	2657 50	-2.12	-11.37	40.8
K3	92井	T ₃ Ⅹ	4824 00	-1.93	-14.74	73.9
K4	171井	T ₃ Ⅹ	3704 00	-2.59	-14.15	67.0
K5	171井	T ₃ Ⅹ	3727 50	-3.05	-15.73	86.7

表 2 龙门山前储层流体包裹体特征
Table 2 Determinations of the fluid inclusions from the reservoir rocks in the frontal areas of the Longmen Mountains

采样地点	井深/m	层位	宿主矿物	大小/μm	气液比/%
火井		I ₂ S	方解石	(3~4)×9	5~8
大邑		I ₂ S	方解石	(2~5)×11	3~5
川鸭 92井	3225	T ₃ Ⅹ	方解石	(5~12)×30	3~8
	3225	T ₃ Ⅹ	石英	(2~10)×20	2~10
彭州白水河		T ₃ Ⅹ中	石英	6~12	5~8
彭州白水河		T ₃ Ⅹ下	石英	(2~4)×4	5

须二段包裹体的宿主矿物为石英晶体;须四段包裹体的宿主矿物有方解石晶体,也有石英晶体,以方解石包裹体最大,呈群体分布。须家河组流体包裹体的均一温度主要分布在 90~160℃ 之间,具有两个峰值(图 4),说明油气具有两期充注的特征。第一期为印支末期,对应的流体包裹体均一温度为 90~110℃;第二期为燕山期,对应的流体包裹体均一温度为 115~160℃。龙门山前缘上三叠统烃源岩的生烃高峰期为燕山期,因此,第二期油气充注是本区油气成藏的主要时期。另外,须家河组包裹体的气液比为 5%~8%,说明烃类中包含了一定数量的液态烃。中侏罗统沙溪庙组储层包裹体均一温度的峰值是 130~140℃(图 5),反映油气主要充注时期是在燕山晚期。

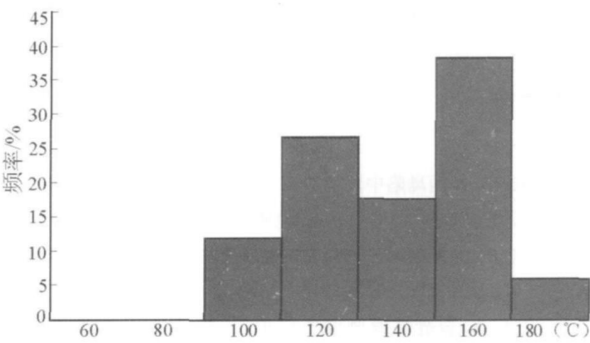


图 4 须家河组储层层体包裹体均一温度分布图

Fig 4 Distribution of the homogenization temperatures of the fluid inclusions from the reservoir rocks in the Xujiahe Formation

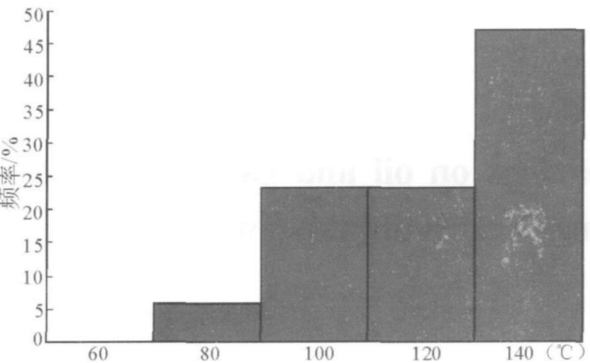


图 5 沙溪庙组储层流体包裹体均一温度分布图

Fig 5 Distribution of the homogenization temperatures of the fluid inclusions from the reservoir rocks in the Shaxinjiao Formation

2 裂缝与油气富集的关系

龙门山前缘部分构造因隆起早、隆升幅度高,经历的最大古埋深相对较小,储层物性稍好于川西坳陷内部,但储层总体仍很致密,勘探实践证明要获得高产工业油气流仍然需要配以发育的裂缝。

詹廷选等 (1995)对中坝 14 口井研究,裂缝增加的孔隙度是有限的,仅增加了岩石孔隙度的 0.87%,但增加的渗透率是突出的,其平均值可达不含裂缝砂岩的两个数量级(表 3)。因此,气藏的高产气井无不与裂缝发育有关。如中 19 井,须二上亚段平均孔隙度为 7.42%,渗透率为 $0.5464 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,当钻进须二段 1~20m,岩屑中见石英晶簇和方解石晶簇,并漏失泥浆 169.4m³,测试日产天然气为 $34.42 \times 10^4 \text{ m}^3$,凝析油为 14.24t,中 35 井也类似此情况,当钻入须二段 2.5~6.5m 时,漏失泥浆为 61m³,测试日产天然气为 $20.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,凝析油为 3.97t。位于背斜西北翼上的中 2 井,I、II 类储层厚度大(须二段厚 55.7m 的储层平均孔隙度为 10.53%),裂缝也较发育,当钻入须二段 21m 时,发生强烈井喷,测试日产天然气为 $69.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,凝析油为 53.46t,截至 1995 年累计产天然气为 $5.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。位于中坝背斜北部南东翼上的中 19 井和中 35 井,孔渗性较低,但裂缝较发育,获得了中等产量气井。而裂缝不发育的中 18 井,未获得工业气流。

钻探结果表明须家河组储层中裂缝发育程度与天然气产能成正相关(表 4)。因此,对须家河组致密砂岩储层来说,发育的裂缝是高产的必要条件。

表 3 中坝气田须二段砂岩有裂缝和无裂缝样品物性对比 (据詹廷选等, 1995)

Table 3 Comparison of the physical properties of sandstone samples with fissures and without fissures from the second member of the Xujiahe Formation in the Zhongba Gas Field (after Zhan Tingxuan et al., 1995)

物性 样品类型	孔隙度 %		渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
	样品数 / 件	平均值	样品数	平均值
有裂缝样品	53	4.8	53	16.671
无裂缝样品	1030	3.93	1652	0.152
裂缝样品增加值	—	0.87	—	16.519

表 4 川西部分典型井岩心裂缝线密度与产能关系 (据张贵生等, 2001)

Table 4 Relationship between fissure density and productivity in representative wells in western Sichuan (after Zhang Guisheng et al., 2001)

构造部位	井号	层位	统计岩心长 /m	裂缝条数 /条	裂缝密度 (条 /m)	产能 ($10^4 \text{ m}^3 / \text{d}$)	备注
大兴西	5	香二	89.47	189	2.11	2.46	产水 63.35m ³ / d
中坝	3	须二	18.68	54	2.9	16.37	产油 7.3 t / d
九龙山	9	须二	13.50	8	0.593	4.03	产水 9m ³ / d
	13	须二	34.47	72	1.922	15.94	
平落坝	1	香二	97.84	377	3.85	35.03	
	2	香二	176.94	1089	6.15	60.77	
	3	香二	220.56	686	3.11	13.03	
	5	香二	199.31	64	0.32	1.73	
	2	香四	22.75	83	3.65	22.60	
合兴场	127	须二	66.97	294	4.39	7.823	

另一方面,大断层对油气起破坏作用。在龙门山地区因区域性大断裂十分发育,北起广元,南至都江堰地表油气苗、沥青普遍分布。因构造形变强烈,断层通天,会造成保存条件变差,使天然气散失。

3 结 论

应用声发射试验、包裹体测温 and 碳、氧同位素等方法,对龙门山中段前缘深层须家河组裂缝特征进行了研究,须家河组裂缝分为构造裂缝和成岩裂缝两类。龙门山前须家河组中存在印支期、燕山期和喜马拉雅期多期构造作用,其中印支期、燕山期破裂作用相对较弱,形成的裂缝较少,喜马拉雅期破裂作用较强,形成了大量的断层和构造裂缝。对须家河组致密砂岩储层来说,发育的构造裂缝是高产的必要条件。因大断层通天,使保存条件变差,天然气散

失,对油气起破坏作用。

参考文献:

[1] 邓康龄. 川西坳陷中段构造与演化 [A]. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术 [C]. 北京: 地质出版社, 2004

[2] 王金琪. 早聚晚藏——川西坳陷天然气基本特征 [J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 5—12

[3] 王允成. 裂缝性致密油气储集层 [M]. 北京: 地质出版社, 1992

[4] 李宗银, 李耀华, 等. 川中川西地区上三叠统天然气成藏主控因素 [J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(1): 5—7.

[5] 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(7): 784—793.

[6] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 241—394.

Characteristics of fissures and their bearings on oil and gas accumulation in the Xujiache Formation in central Longmen Mountains, western Sichuan

LUO Xiao quan, TANG Gui bin
(Southern Branch, SINOPEC, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The oil and gas accumulation in the deep-seated strata of the Xujiache Formation in the frontal areas of the Longmen Mountains tends to be controlled by the fissures that in turn are associated with geological structures and faults. The characteristics of fissures are explored with the aid of acoustic emission, homogenization temperature of inclusions, and carbon and oxygen isotope data. The fissures in the Formation include structural fissures and diagenetic fissures. There once occurred multiple phases of tectonic movements in the Formation, including the Indosinian, Yanshanian and Himalayan orogenies, of which the former two were relatively weak and only minor amount of fissures are observed whereas the latter were highly severe and accounted for the formation of numerous faults and structural fissures which may be essential conditions for the enrichment of oil and gas in the dense sandstone reservoirs of the Xujiache Formation.

Key words: Longmen Mountains; Xujiache Formation; fissure; oil and gas