

致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素分析 ——以新场须家河组为例

朱力力

中石化经纬有限公司西南测控公司

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8230

[摘要] 新场气田须二气藏是川西深层的重点勘探领域，勘探实践表明，须家河组气藏成藏机制复杂、气藏隐蔽性强、勘探难度大，而致密砂岩储层中裂缝对于油气勘探开发非常重要。通过野外露头、岩心观察、薄片鉴定、常规测井及成像测井等资料，对新场须二段气藏天然裂缝发育特征及主控因素开展研究，认为须二段储层裂缝可划分为垂直缝、高角度缝、斜交缝、低角度缝和平缝，以低角度缝和斜交缝为主。通过成像测井识别裂缝产状，结果表明新场地区裂缝主要有北东、北西和近南北、东西4个组系，其中东西向裂缝最为发育，其次为北东向裂缝和近东西向裂缝，而北西向裂缝相对发育程度最弱，而东西向裂缝也正好与现今水平最大主应力方向一致。区内有效裂缝的发育受断裂、构造变形、岩石粒度、岩石成分和岩层厚度等多方面因素控制。

[关键词] 天然裂缝；裂缝发育特征；致密砂岩储层；须家河组；川西坳陷

Analysis of fracture development characteristics and controlling factors in tight sandstone reservoirs ——Take Xujiahe Formation in Xin Chang as an example

Zhu Lili

Sichuan Southwest Measurement and Control Company, Sinopec Jingwei Co., LTD.

[Abstract] The Xinfang Gas Field's Xueri Gas Reservoir is a key exploration area in the deep western Sichuan region. Exploration practices have shown that the Xueri Formation gas reservoir has a complex accumulation mechanism, strong concealment, and high exploration difficulty. Fractures in tight sandstone reservoirs are crucial for oil and gas exploration and development. By analyzing field outcrops, core observations, thin section identification, conventional logging, and imaging logging data, research has been conducted on the natural fracture development characteristics and controlling factors of the Xueri Formation gas reservoir. It is concluded that the fractures in the Xueri Formation reservoir can be categorized into vertical fractures, high-angle fractures, oblique fractures, low-angle fractures, and horizontal fractures, with low-angle and oblique fractures being predominant. Imaging logging was used to identify the orientation of the fractures, and the results indicate that the main fracture groups in the Xinfang area are northeast, northwest, nearly north-south, and east-west, with east-west fractures being the most developed, followed by northeast fractures and nearly east-west fractures, while northwest fractures are the least developed. The east-west fractures also align with the direction of the current maximum horizontal stress. The development of effective fractures in the area is influenced by multiple factors, including faults, tectonic deformation, rock grain size, rock composition, and rock layer thickness.

[Key words] natural fractures, fracture development characteristics, tight sandstone reservoir, Xujiahe Formation, western Sichuan depression

川西坳陷新场地区须家河组储层为典型的低孔低渗致密储层,非均质性强、产能差异大,裂缝的发育程度直接影响其产能的大小,有效裂缝的存在可以显著提高低渗致密砂岩储层的基质渗透率,为流体运移提供渗流通道。通过地表露头、岩心、薄片及样品实验分析等直观手段,测井、地震、试井及生产动态资料等间接手段,对裂缝的充填特征、有效性及储层物性参数等进行解释。研究区经历了多期构造运动的影响和改造,导致须家河组储层断层、裂缝成因及分布复杂,寻找裂缝发育带,对提高致密储层天然气的储量、提高单井产量有着举足轻重的作用。因此,本文利用野外露头、岩心实验分析、成像及生产资料等,对该区须家河组裂缝发育特征及主控因素开展研究。

1 地质概况

川西新场构造位于四川盆地西部坳陷中段鸭子河~孝泉~新场~合兴场~丰谷北东东向隆起带上,东部与川中隆起相接,西与鸭子河构造以低相连,北邻梓潼凹陷、南临成都凹陷,是经历了多期构造运动的古今复合大型隆起带。须家河组发育逆断层,根据地震剖面分析,须家河组从下至上没有一条规模性大断裂,从深至浅断层活动呈逐步减弱特征,断层总体断距较小,横向延伸距离较短。

新场须家河组二段埋藏较深,一般在 4600~5200m,平均 4900m;平面上,须二段厚度变化不大,总体上向西减薄。从常规及铸体薄片鉴定结果看,新场须二储层砂岩岩石类型复杂,主要岩石类型为岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩及岩屑石英砂岩等。据岩心样品实验分析表明,须二段孔隙发育程度极差,储层基质渗透性也极差,而当裂缝发育时,才表现出较高渗透性,属于典型的致密砂岩储层。

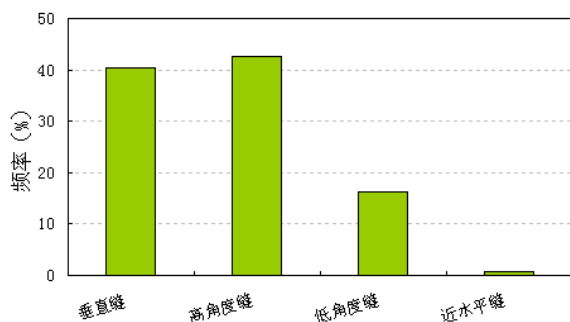


图1 岩芯裂缝产状分布统计图

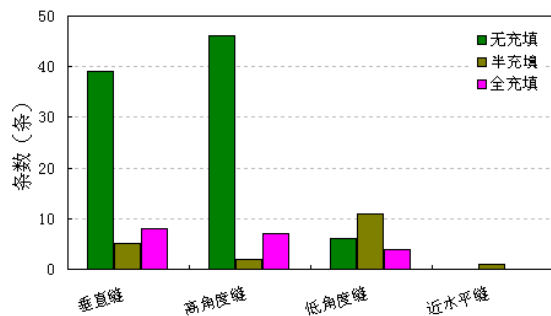


图2 裂缝充填程度统计图

2 裂缝发育特征

2.1 岩心裂缝特征

岩心观察主要用于识别宏观裂缝的展布规律和发育程度,通过开展岩心裂缝描述,首要进行天然裂缝和钻井所致的诱

导裂缝的区分和识别,剔除大量的诱导裂缝,对识别出的天然裂缝发育的特征进行归纳:

①须二岩芯发育的裂缝有低角度斜交缝、高角度缝和垂直缝,水平缝偶见。岩心裂缝产状统计结果反映研究区裂缝主要以高角度缝和垂直缝为主,低角度斜交缝和水平缝次之(图1)。

②裂缝的充填特征决定了后期裂缝的有效性,清楚裂缝充填特征对气藏的开发具有重要意义。通过对研究区须二段裂缝的充填特征进行描述和统计(图2),研究区须二段发育的垂直缝和高角度缝主要为未充填缝,占所有裂缝的比例为 70.5%,而半充填缝和全充填缝均占 14.7%。全充填缝在垂直缝、高角度缝、低角度缝中均有分布,表明全充填缝在低角度缝中占比稍大。

③分岩性统计取心段的裂缝发育特征,可以在宏观上明确不同岩性地层的裂缝发育情况。须二段裂缝主要发育在中-细砂岩及中砂岩中,其次为细砂岩、中粗砂岩和泥质粉砂岩,粗砂岩中发育相对较少。

④对岩心裂缝长度的统计表明,裂缝长度分布主要在 10~20cm 和 20~30cm 这两个长度范围内,少量裂缝长度大于 150cm。

⑤研究区须二段岩心裂缝宽度主要集中分布在 0.1~0.2mm、1.0~2.0mm 两个区间,少量宽度大于 5mm。此外,根据岩心裂缝充填情况分析,未充填缝宽度均小于 0.6mm,半充填缝宽度均大于 1.0mm,全充填缝宽度分布较广,但主要分布在 1.0~2.0mm 区间。从以上分析可以看出,岩心上观察到的有效裂缝(包括未充填缝和半充填缝)宽度虽分布较广,但主要分布还是小于 2.0mm。而且越宽的裂缝充填程度相对越高,表明其形成的时间相对较早。

⑥对单井裂缝密度进行统计须二取芯段裂缝线密度差异较大,平均线密度为 0.3929 条/米。单井取芯段之间线密度的差异,反映了研究区目的层裂缝发育的较强非均质性。

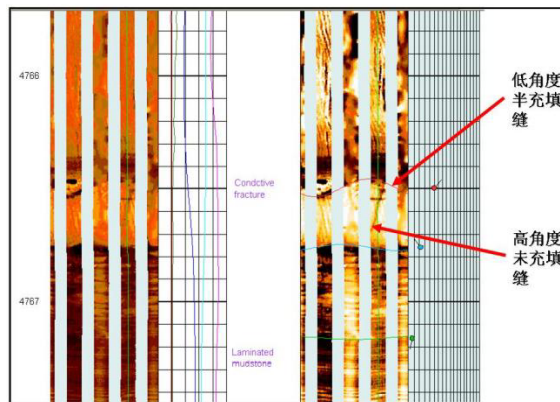


图3 CX560 井须二段成像裂缝识别图(未充填缝及半充填缝)

2.2 电成像裂缝特征

通过对研究区成像测井进行综合识别与解释,将电成像识别的天然裂缝分为三类,即未充填缝、半充填缝和充填缝。

未充填裂缝为连续传导缝,其有效程度高。CX560 井 4766.5~4766.71m(图3)其成像图上有一条明显的深色影像特征,影像连续性较好,图像清晰,颜色与其上下两侧有着明显的差别,为典型的未充填裂缝特征。

半充填裂缝为不连续传导缝,该类裂缝具有一定有效性。

CX560 井 4766.5m 处有一条较完整的正弦波形的曲线, 影像部分为暗色的低阻显示, 部分为亮色的高阻显示, 影像完整, 图像比未充填裂缝影像模糊, 低阻部分连续度相对高, 为半充填裂缝的典型影像特征。

充填裂缝为连续高阻缝, 其有效程度低。X3 井 5040.2m (图 4) 处的影像表现为亮色连续高阻特征, 曲线形态分别为近于直线和完整的低幅度正弦波形曲线影像, 说明裂缝被高阻矿物连续充填。

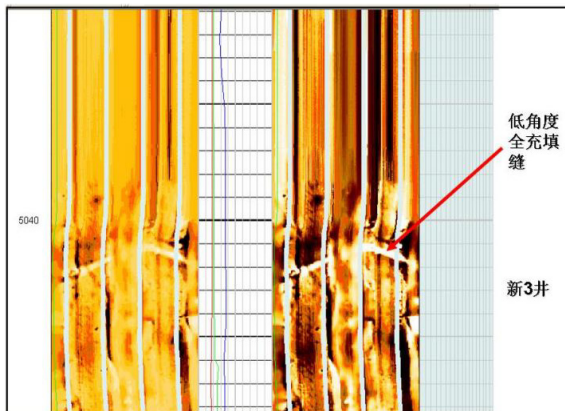


图 4 X3 井高阻充填缝成像特征

通过成像测井裂缝识别, 研究区天然裂缝的发育程度差异大, 其中以新 501 井区中亚段 TX₂⁴ 砂组裂缝最为发育, 而川孝 560、川孝 565 井区中上亚段, 新 3 上中亚段以及新 201 井区上亚段裂缝也较发育。

结合常规测井解释成果, 统计成像测井裂缝发育的产状差别。成像识别的裂缝主要发育低角度缝, 高角度缝次之, 垂直缝和近水平缝相对不发育, 而垂直缝及高角度缝有效程度相对较高, 低角度缝有效性相对较差。

此外, 分裂缝产状统计出充填率及半充填率表明, 垂直缝的充填率及半充填率最低, 随着裂缝倾角降低, 充填率及半充填率逐渐增高, 这表明低角度裂缝的形成时间相对较早, 而高角度裂缝形成时间相对较晚。

另外, 通过成像测井识别出的裂缝进行产状统计, 结果表明, 新场地区的井下裂缝主要有北东、北西和近南北、东西 4 个组系, 其中东西向裂缝最为发育, 其次为北东向裂缝和近东西向裂缝, 而北西向裂缝相对发育程度最弱, 而东西向裂缝也正好与现今水平最大主应力方位一致。

3 主控因素分析

3.1 断裂与裂缝的相关性

断裂作用带是一个天然裂缝发育带, 断裂带同生及伴生的破裂缝, 仅限于断裂带内。前人研究认为, 由断层伴生的裂缝系统常与断层之间的距离有一定的相关关系, 一般情况下, 裂缝的发育程度与到断层的距离呈负相关关系, 即裂缝距断层的距离越短, 裂缝越发育。新场须二段岩心观察同样可证实这一规律, 即断层对裂缝的影响非常明显, 在靠近断层的一些井, 其岩芯较为破碎, 饼裂现象普遍。

由于研究区断层走向主要为近 SN、EW 向, 结合本地区构造应力场演化也可以知道, 断层的形成时间有早晚, EW 向断层形成时间早, SN 向断层形成时间晚, 根据断层走向特征区分走向统计常规测井综合识别裂缝发育指数与断层距离间关系, 可以看出, 裂缝发育指数与 EW 向断层距离呈现较好的负相关关

系, 而与 SN 向断层距离亦呈现负相关趋势, 相关系数相对较差一些, 而且 XC8 井由于处在构造变形强度大的位置 (构造曲率值较大), 其裂缝发育不仅仅只是取决于断层, 还受到构造变形的强烈影响。

3.2 岩性对裂缝发育的控制

岩性不同其强度不同, 在同样的应力环境中破裂程度也不同。根据井下样品岩石抗张强度测试结果来看, 中-细砂岩、中-粗砂岩岩石抗张强度相对较低, 平均为 5.87MPa, 细砂岩岩石抗张强度平均为 10.14MPa, 泥岩岩石抗张强度为 9.50MPa; 抗压强度及弹性模量测试结果亦表明, 中砂岩的岩石抗压强度及弹性模量比细砂岩的岩石抗压强度及弹性模量相对要低, 而且泥岩的弹性模量在三种岩石中是相对最高的, 这表明在相同的地质力学环境下, 粒度粗的岩石相对于粒度细的岩石更容易产生破裂, 与岩心观察结果也是一致的。

3.3 岩石物性对破裂的影响

岩石物性 (孔隙度、密度等参数) 对岩石的力学性质有明显影响, 进而会影响到岩石的裂缝发育情况。

根据周文等对岩石力学参数与岩石体积密度之间关系实验研究证实, 随着岩石密度的增加, 岩石的抗张、抗压、弹性模量等参数均呈直线增加, 说明岩石密度的增加, 其需要的破裂应力高, 其更不易产生破裂, 反之, 其更易产生破裂。所以相对而言, 如果应力环境相同, 致密砂岩地层中相对低密度层 (即高孔隙度层) 比高密度层 (低孔隙度层) 应优先破裂。当然岩石物性好坏的影响不如纹层、层理等力学结构面的影响。

4 结论

(1) 川西坳陷新场须家河组天然裂缝普遍发育, 有效裂缝以垂直裂缝和高角度斜交裂缝为主, 主要发育于中-细砂岩及中砂岩中, 部分裂缝有不同程度的充填。

(2) 不同的岩石具有不同的成分、结构以及成岩强度, 导致力学性质存在较大的差异, 抗剪、抗拉能力也有一定的差异。在同样的应力条件下, 脆性成分高的岩石容易发生破裂而具有较高的裂缝密度。

(3) 研究区裂缝的发育受岩性、岩层厚度、岩石物性、力学结构面及断层等多方面地质力学因素的影响, 相对而言, 断层对裂缝的发育影响更为明显。

[参考文献]

- [1]刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42 (4): 973-980.
- [2]田飞, 章成广. 电成像测井资料裂缝识别技术及其应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7 (6): 723-727.
- [3]谢刚平, 叶素娟, 田苗. 川西坳陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J]. 天然气工业, 2014, 34 (1): 44-53.
- [4]虞兵, 冉晓军, 侯秋元, 等. 裂缝性致密砂岩储层品质评价[J]. 测井技术, 2019, 43 (4): 405-415.
- [5]郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42 (4): 765-783.