

鄯善油田地应力、裂缝系统与油田开发

张 莉, 岳乐平, 杨亚娟

(西北大学地质系, 陕西西安 710069)

摘要:以吐哈鄯善油田为例, 分析地应力对低渗透砂岩油田裂缝(包括天然裂缝和人工压裂裂缝)的控制作用, 研究地应力对低渗透砂岩油田井网部署和注水开发的影响。认为, 古构造应力场与天然裂缝的形成、分布及发育程度有关, 现今应力场则不仅影响天然裂缝在地下的赋存状态及有效性, 而且控制了人工压裂裂缝的形态和延伸方向。低渗透油田的合理开发, 应考虑现今地应力状态下的天然裂缝和人工压裂裂缝的综合影响, 开发时, 注水压力应低于地层破裂压力, 不应沿天然裂缝方向和最大水平主应力方向部署注采井。

关键词:构造应力场; 低渗透油田; 天然裂缝; 人工压裂裂缝

第一作者简介:张莉, 女, 26 岁, 博士生, 油气勘探与开发

中图分类号: P553 **文献标识码:** A

目前, 我国新发现投入开发的油田中, 中、高渗透性中、大型油田愈来愈少, 低渗透油田所占比例却逐步增加; 在未动用的储量中更是大部分集中在低渗透储层中。因此, 低渗透油田的开发成功与否, 关系到我国石油工业的发展^[1]。低渗透砂岩油田普遍发育天然裂缝, 且经过压裂方具产能。地应力是控制储集层天然裂缝分布及水力压裂裂缝形态的重要因素。应力场是地应力的空间分布, 古构造应力场控制天然裂缝的形成、分布及发育程度; 现代应力场则不仅影响天然裂缝目前在地下的赋存状态及有效性, 而且控制了人工压裂裂缝的形态和延伸方向。国内外研究资料表明, 搞清地应力特征, 对合理部署井网, 科学开发油田至关重要^[2,3]。因此, 低渗透油田地应力及裂缝系统研究应当受到重视。本文以吐哈鄯善油田为例, 分析地应力对低渗透砂岩油田裂缝的控制作用, 研究地应力对低渗透砂岩油田井网部署和注水开发的影响。

1 古构造应力场与天然裂缝

含油气盆地储层天然裂缝发育特征、分布规律, 受控于古应力场。通过古应力场作用留下的形迹可以恢复、反演过去的地应力状态。

地震剖面解释、地层倾角测井解释与岩芯裂缝定向是分析油田断层或裂缝发育、分布特征的有效

手段。但由于经济成本原因, 直接获得的资料有限, 大部分井组或井间地段, 仍须根据古应力场分布状况, 推测该区域裂缝分布、发育情况。

鄯善油田地震剖面解释, 三间房组中的 7 条断层全部为近 NS 向正断层。11 口井的地层倾角测井裂缝解释, 裂缝方向为 $42.5^\circ \pm 10^\circ$ 和 $337.5^\circ \pm 10^\circ$, 为一对共轭裂隙。7 口井共 54 块含裂缝岩芯, 应用古地磁学方法进行了定向测量, 裂缝优势方向为 $30^\circ \sim 60^\circ$, $300^\circ \pm 10^\circ$, 反映出侏罗系三间房组形成后, 在近 NS 向主压应力作用下, 产生近 NS 向正断层以及与主压应力呈近 45° 角的 X 形断裂或裂缝。

野外露头亦是研究古构造应力场最理想的场所^[4]。鄯善油田连木沁野外剖面的侏罗系三间房组测量到 $30^\circ \sim 40^\circ$, $310^\circ \sim 320^\circ$ 一组共轭剪切节理裂缝, 反映出该区燕山末期古应力场最大水平主应力为近 NS 向。

通过已知断裂裂缝系统恢复, 反演得到燕山构造运动期古应力场的最大水平主应力为近 NS 向, 认为鄯善油田三间房组裂缝主要方位应该是 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $300^\circ \sim 330^\circ$, 与地层倾角测井解释、古地磁测量的裂缝方向大体一致。

2 现今应力场控制天然裂缝的有效性

储层天然裂缝的分布和发育受古构造应力场的控制, 而现今地应力会影响天然裂缝的保存状态

及渗流特征,控制天然裂缝在地下的有效性^[5](裂缝的开启情况和连通情况)。裂缝的开启状况可由裂缝开度来表示,其变化与缝面法线方向受力大小有关,而缝面法线方向受力取决于天然裂缝方向与现代应力场应力状态的关系。当天然裂缝方向与现代应力场最大水平主应力方向平行时,天然裂缝在地下的开度最大,连通性最好,裂缝对流体的导流能力也最强。当天然裂缝方向与最大水平主应力方向垂直时,裂缝开度最小,连通性最差,对流体的导流能力也最弱。当天然裂缝方向与最大水平主应力方向有一定夹角时,裂缝开度、连通性及对流体的导流能力居中,且夹角越大,对流体的导流能力也越弱。现代应力场应力测试结果表明,鄯善油田最大水平主应力方向为 NWW 向,因此 NWW 向的天然裂缝组系应该是最有效的裂缝组系。但鄯善油田天然裂缝的优势走向为 NE 向,与最大水平主应力方向以大角度相交,因此天然裂缝在地下的开启程度、连通性较差。此外,由于鄯善油田 80% 以上的天然裂缝被碳酸钙充填,故天然裂缝的有效性低,这就是鄯善油田开发已 6 年,但平均含水依然较低的原因。鄯善油田 NW 向、NS 向天然裂缝不发育,但由于它们与现今最大水平主应力方向平行或夹角较小,其开启性、连通性好,如果某些区块具有上述方向的裂缝,将成为畅通的油水通道。若油、水井恰好位于该裂缝方向上时,将容易造成水淹。

3 人工压裂裂缝的走势

油层压裂是开发低渗透油田的主要手段之一。可以根据油井压裂施工参数及液压-时间关系曲线,利用下述公式计算应力场数值^[6]

$$\sigma_v = rH - P_s$$

$$\sigma_h = P_1 - P_H - P_s$$

$$\sigma_H = 2P_{ev} - P_f + \sigma_h - P_s = 3P_1 + 3P_H - P_f - 2P_s$$

式中 σ_v 为有效垂直主应力,MPa; σ_h 为最小水平主应力,MPa; σ_H 为最大水平主应力,MPa; P_1 为瞬时关井压力,MPa; P_{ev} 为井底延伸压力,MPa; P_f 为破裂压力,MPa; P_s 为孔隙流体压力,MPa; P_H 为井筒液柱压力,MPa; r 为上覆岩层平均厚度,m; H 为油层中部深度,m。

由上述计算式得出,鄯善油田现代地应力状态为 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 。若储集层中不存在天然裂缝时,人工压裂将产生沿最大水平主应力方向即 σ_x 方向延

伸的垂直裂缝;但储集层中不可能没有天然裂缝,人工压裂裂缝的延伸方向将会复杂化。岩石的三轴力学实验结果表明,人工压裂时沿早期破裂面破裂的机率比其它方向更大。对鄯善油田有天然裂缝的岩芯所做的三轴力学实验结果也同样表明,压力增加到一定数值时,岩芯首先沿原破裂面方向产生破裂。天然裂缝与最大水平主应力方向夹角越小,人工压裂时,天然裂缝越容易压开,即人工压裂缝沿天然裂缝产生而不会产生新缝;当天然裂缝与最大水平主应力方向夹角很大时,人工压裂缝将沿最大水平主应力方向延伸。鄯善油田天然裂缝优势走向为 NEE 向,而最大水平主应力方向为 NWW 向,其夹角较大,因此人工压裂时,人工压裂缝主要沿最大水平主应力方向延伸。但对于发育 NWW 向天然裂缝的区域或现今应力场出现异常的区域(现今最大水平主应力方向为 NEE 向时),压裂缝沿原天然裂缝方向开裂。

4 地应力对低渗透油田开发的指导作用

4.1 油田注水

低渗透油田天然裂缝发育,当注水压力超过地层破裂压力时,容易将储集层中的天然裂缝压开,导致沿天然裂缝排列的油井的暴性水淹^[7]。地层破裂压力可根据下式求出

$$P_f = 3\sigma_3 - \sigma_1 - P_c + S_t$$

式中 P_f 为地层破裂压力,MPa; P_c 为地层孔隙压力,MPa; σ_3, σ_1 为现代应力场的最大和最小主应力,MPa; S_t 为含裂缝岩石的抗张强度,MPa。

鄯善油田一些注水井指示曲线出现拐点,超过拐点压力(即地层破裂压力),吸水量急剧增大,如 11-13 井拐点压力为 20 MPa,拐点之前吸水指数为 26.49 m³/(dMPa),拐点之后吸水指数升至 76.48 m³/(dMPa)。为防止裂缝水窜现象,含有裂缝的低渗透油田注水开发时,应使注水压力低于地层破裂压力。

4.2 油田井网部署

低渗透油田井网部署时,应综合考虑天然裂缝和最大水平主应力方向对注水开发的影响。鄯善油田利用该原则,在井网部署或重新调整时应注意:(1)天然裂缝发育区域,尤其是天然裂缝与最大水平主应力方向一致或夹角较小时,不沿天然裂缝方向布置注采井,避免注入水沿裂缝方向水窜。

(2)避免沿天然裂缝方向和现今最大水平主应力方向布置注采井,应使注水井与采油井与裂缝方向或现今最大水平主应力方向具有一定的夹角,以防止油井暴性水淹。

5 结论

(1)古构造应力场控制天然裂缝的形成、分布及发育程度,现代应力场则不仅影响天然裂缝目前在地下赋存状态及有效性,而且控制了人工压裂裂缝的形态和延伸方向。

(2)当天然裂缝方向与现代应力场最大水平主应力方向平行时,天然裂缝在地下的开度最大,连通性最好,裂缝对流体的导流能力也最强,且人工压裂沿天然裂缝方向延伸。

(3)地应力研究对低渗透油田注水开发具指导意义。注水开发时,注水压力应低于地层破裂压力;井网部署时,不应沿天然裂缝方向和最大水平主应力方向部署注采井。

工作中得到西北大学曲志浩、孙卫教授的指导,西安石油学院王觉民教授、吐哈油田指挥部朱永贤、吴诗平、陈杨艾等同志给予的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.217~224
- 2 李志明,张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.347~355
- 3 王忠茂. 地壳应力在低渗透裂缝砂岩油田开发中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(4):91~96
- 4 纳尔逊 R A. 天然裂缝性储集层地质分析[M]. 柳广第,朱筱敏,译. 北京:石油工业出版社, 1988
- 5 Howard J H, Nolen-Hoeksema R C. Description of natural fracture systems for quantitative used in petroleum geology[J]. AAPG Bull, 1990, 74 (2):151~162
- 6 王觉民. 陕北安塞地区地应力的初步研究[J]. 西安石油学院学报, 1994, 9(3):39~41
- 7 王平. 有天然裂缝的砂岩油藏的开发[J]. 石油勘探与开发, 1993, 14(4):69~74

IN-SITU STRESS, FRACTURE SYSTEM AND OIL-FIELD DEVELOPMENT IN SHANSHAN OILFIELD

Zhang Li Yue Leping Yang Yajuan

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi)

Abstract: Taking Shanshan Oilfields in Turpan-Hami Basin as an example, the control of earth stress over fractures was analyzed, and the effect of earth stress on well-net arrangement and waterflooding was studied in low-permeability sandstone oilfield. It is considered that paleo-tectonic stress field was related to the origin, distribution and development of natural fractures; present stress field affects not only the occurrence and validity of natural fractures, but also controls the configuration and extensional direction of artificial fractures. For the reasonable development of low-permeability sandstone oilfield, the effect of both natural and artificial fractures of present stress field should be considered. In waterflooding, injection pressure should be lower than the formation fracture pressure. The production and injection wells should not be arranged along the directions of natural fractures and the maximum horizontal principal stress.

Key words: tectonic stress field; low-permeability oilfield; natural fracture; artificial fracture.

