

岩层非均质性对裂缝发育的影响研究^{*}

曾联波^{1,2,*} 赵继勇³ 朱圣举³ 熊维亮³ 何永宏³

1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249;
3. 长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710021

摘要 为了探讨在平面上的岩层非均质性对不同方位裂缝发育的影响, 以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层为例, 进行了岩石单轴和三轴岩石力学试验及岩石声发射试验. 结果证实平面上不同方向岩石力学性质各向异性的存在, 它们是影响该区不同时期不同组系裂缝发育差异的主要原因. 岩层非均质性往往抑制了共轭剪切破裂中的一组裂缝的发育. 鄂尔多斯盆地延长组主要为在 2 期构造作用下形成的剪切裂缝, 在理论上应该发育 4 组剪切裂缝, 但由于受岩层强烈非均质性的影响, 每期主要发育 1 组裂缝, 因而目前在每个部位通常见到 2 组裂缝.

关键词 裂缝 岩层非均质性 岩石力学试验 声发射试验

低渗透储层是我国陆相沉积盆地的重要油气储层类型, 其储量占我国目前探明油气资源总量的 1/3 以上, 占“九五”以来探明储量的 70% 左右; 其产能约占我国年油气总产能的 1/5, 预计到 2010 年将达到 1/3 以上, 低渗透储层的勘探和开发对我国石油工业发展具有长远的战略意义. 由于沉积、成岩和构造作用影响, 使得低渗透储层非均质性严重, 裂缝发育, 影响油田开发效果^[1-3]. 裂缝的形成与分布除了受岩性、岩层厚度、构造、应力等因素影响外^[3-12], 由于沉积、成岩作用造成的岩层力学性质非均质性也是重要因素^[12-14]. 尤其是在构造差应力值较小的地区, 岩层非均质性甚至可能成为控制裂缝发育的主导因素^[15].

近年来, 岩层非均质性对裂缝发育的影响开始被人们所重视, 它甚至可能是引起不同方向裂缝间距分布存在明显群聚现象的主要原因^[16, 17]. 但目前的研究主要侧重于纵向上由于岩性差异导致的岩层非均质性对裂缝形成的影响^[18], 而对平面上的岩层非均质性对裂缝发育的控制作用尚不清楚. 本文从鄂尔多斯

盆地延长组特低渗透砂岩储层岩石力学实验入手, 并结合研究区不同组系裂缝发育差异的实际情况, 分析岩层非均质性对不同方位裂缝发育程度的影响.

1 地质背景

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组是我国典型的特低渗透砂岩储层分布区域, 目前在盆地中部的安塞—靖安地区和盆地西南部的陇东地区发现了一批大中型油田. 延长组地层厚度 1000—1500 m, 为平缓西倾的单斜构造, 地层倾角小于 1°. 其储集层主要为河控三角洲高建设期沉积的厚层状细—中粒岩屑长石砂岩, 其次为细—中粒长石岩屑砂岩和细—中粒长石砂岩. 储层碎屑的平均粒度中值为 0.174 mm, 碎屑矿物成分中, 石英占 37.4%, 长石占 25.4%, 岩屑占 18.4%. 储层中胶结物占 13.6%, 主要为绿泥石和浊沸石, 其次为水云母、方解石、硅质等, 以薄膜—孔隙型胶结为主, 其次为孔隙、再生型胶结. 储层的储集空间主要为原生粒间孔和次生溶蚀孔, 包括长石溶孔、岩屑溶孔、沸石溶孔、杂基溶孔、晶间孔和微裂隙等.

2007-07-24 收稿; 2007-09-13 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40572080)、CNPC 石油科技中青年创新基金(批准号: 05E7026)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

** E-mail: lbzeng@sina.com

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

储层岩石致密, 非均质性强, 物性较差. 储层孔隙度主要在 10% 左右, 而渗透率一般为 $(0.1-2.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于典型的致密特低渗透储层. 储层裂缝发育, 裂缝是特低渗透砂岩储层的有效储集空间和主要渗流通道, 影响着该区特低渗透砂岩油田开发方案部署和注水开发效果.

2 实验条件

为了研究某一部位在平面上岩石力学性质的差异性及其与裂缝发育的关系, 对平面上不同方向的岩样进行了单轴和三轴岩石力学试验及岩石声发射试验. 岩石样品取自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组陇东地区延长组特低渗透砂岩储层. 为了保证样品的数量, 选在厚度超过 20 cm 的细砂岩段钻样. 首先建立岩心的相对坐标系, 从某一标志线方向开始, 平行于层理面顺时针方向按 30° 间隔取样, 每个部位自下而上取 6 个方向的样品. 在同一平面上钻取 3 个平行的样品, 并加工成 25 mm × (45-60) mm 的标准圆柱形试样, 加工以后每个部位的试样数量为 18 个. 样品在现今地理坐标系中的实际方向按相邻段岩心的地磁定向以后确定. 根据过去大量的岩心地磁定向研究, 其误差为 ±10°. 岩石力学实验在北京科技大学岩石力学实验室由 WGE-600 型万能试验机、100 吨压力传感器、7V14 程序控制记录仪及 E4800 计算机等设备组成的单轴岩石力学实验平台以及由 TYS-500 型岩石三轴试验机、100 吨压力传感器、7V14 程序控制记录仪及 E4800 计算机等设备组成的三轴岩石力学实验平台上完成, 并按照《水利水电岩石试验规程 (SL264-2001)》行业标准实施. 根据该区延长组的埋藏深度和实际的样品数量, 三轴岩石力学实验的围压取 0, 10 和 20 MPa, 没有考虑地温的影响. 岩石声发射测试在国土资源部地壳变形地表过程开放实验室由 4010 系列声发射仪、300 kN 万能压力机、应变传感器和计算机等组成的声发射实验装置上完成, 重点测试不同方向岩样的声发射信号数量和岩石的抗压强度, 以反映在平面上岩石力学性质的非均质性变化规律.

3 结果分析

3.1 岩石力学试验

单轴岩石力学试验内容主要包括岩石的密度、

单轴抗压强度、弹性模量、Poisson 比及拉张强度等参数; 三轴岩石力学试验在不同围压轴向破坏应力、弹性模量和 Poisson 比测试的基础上, 对内聚力和摩擦角等抗剪强度参数进行了计算. 从 X18-01 井不同围压条件下的试验结果表明, 在平面上不同方向的岩石力学参数存在明显的差异, 反映了在平面上的不同方向的岩石力学性质非均质性明显. 其中, 在北东-南西方向(45°)和北北西-南南东方向(345°)的岩石抗剪强度、内聚力或单轴抗压强度明显降低, 而北北东-南南西方向(15°)和北西-南东方向(315°)的岩石抗剪强度、内聚力或单轴抗压强度明显增大(图 1). 不同方向岩样在 10 MPa 围压时的抗剪强度、在 20 MPa 围压时的抗剪强度、内聚力和单轴抗压强度的各向异性程度 $(H = (K_{\max} - K_{\min}) / K)$, 其中, H 表示各向异性程度, K_{\max} , K_{\min} 和 K 分别表示参数的最大值、最小值和平均值) 分别为 52.1%, 34.5%, 137% 和 56.3%, 反映岩石的抗剪强度、内聚力和抗压强度等参数在平面不同方向的各向异性特征十分明显.

3.2 岩石声发射试验

岩样试验显示的声发射类型属于 I 型, 它包含裂纹闭合阶段、线弹性阶段、裂纹稳定扩张阶段、裂纹非稳定扩张阶段和破裂阶段^[19]. 一般说来, 中生代砂岩裂纹闭合阶段的最高应力不超过其单轴抗压强度 σ_c 的 6.7%, 裂纹稳定扩张阶段起始点的应力为单轴抗压强度 σ_c 的 77%, 因而各岩样皆取外加初压应力至 σ_c 的 77% AE 信号量进行比较(表 1). 其中, 外加压应力至 6.7% σ_c (13 MPa) 作为裂纹闭合阶段的 AE 振铃总量, 外加压应力从 6.7% σ_c 至 77% (150 MPa) σ_c 作为线弹性阶段的 AE 振铃总量.

表 1 Z40 井测点 1 各岩样不同阶段 AE 振铃计数总量比较

样品 编号	外加压应力至 77% σ_c (150 MPa) 的 AE 振铃 计数总量	外加压应力至 6.7% σ_c (13 MPa) 的 AE 振铃 计数总量	从 6.7% σ_c 至 77% σ_c 的 AE 振铃 计数总量
ZF4-1c	350	243	107
ZF4-2c	450	140	310
ZF4-3c	1588	1194	394
ZF4-4c	550	331	219
ZF4-5c	731	315	415
ZF4-6c	744	208	536

陇东地区 Z40 井 6 个不同方向岩样的测试结果明显地反映了 60° (或 240°) 和 150° (或 330°) 方向在不同阶段的 AE 振铃计数总数最大 (图 2), 说明这两个方向的裂纹数量最多, 因而其岩石强度也相对

较低 (图 3). 岩石的破裂一般最容易沿阻力最小或应力集中的软弱面发生, 因此, 岩石强度最小、裂纹最多的方向也是最容易形成裂缝的方向.

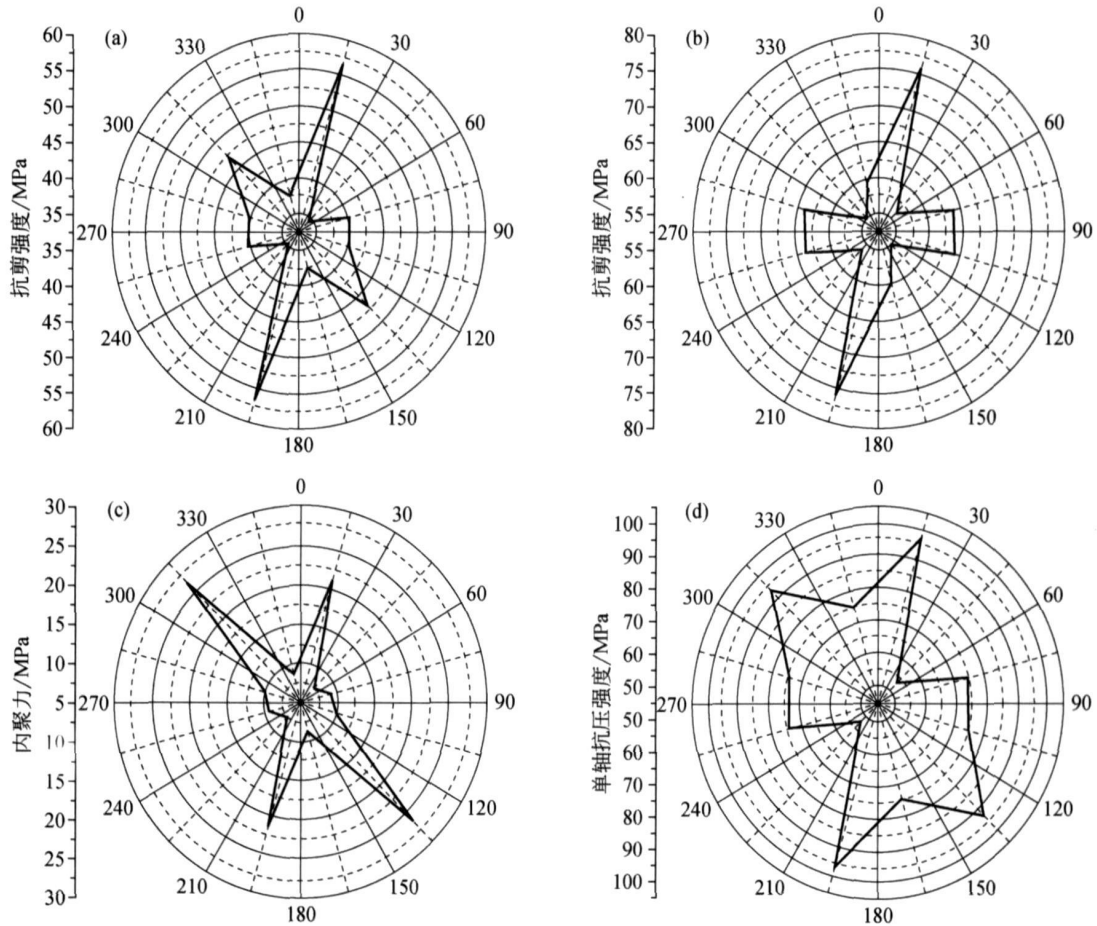


图 1 X18-01 井不同方向岩石的内聚力和不同围压下的抗剪强度与抗压强度 (取样深度为 1520.2—1520.5 m). (a) 在 10 MPa 围压时的岩石抗剪强度; (b) 在 20 MPa 围压时的岩石抗剪强度; (c) 岩石的内聚力; (d) 岩石的单轴抗压强度

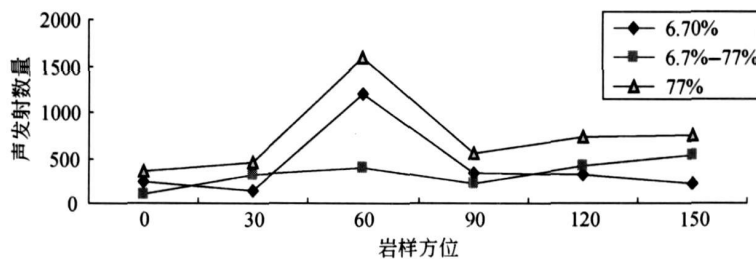


图 2 Z40 井不同方向岩石在不同阶段的声发射振铃数量分布图
取样深度为 1626.0—1626.4 m

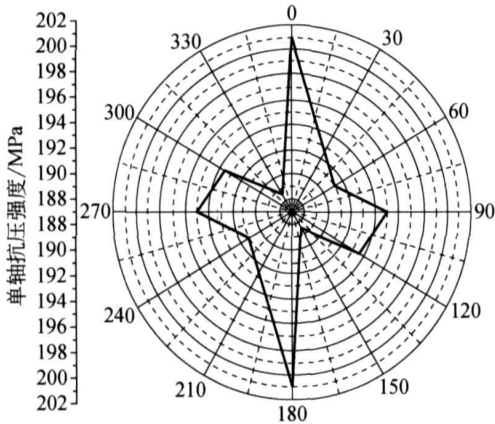


图3 Z40 井不同方向岩石的抗压强度分布图
样品与图2一致

4 讨论

4.1 岩石力学性质各向异性及其影响因素

为了反映岩石力学性质在平面上的各向异性,严格地讲,在取样时,6个方向的所有样品都应该是在同一平面上.但受岩心的限制,在取样时,保证了相同方向的3—4个样品是在同一平面上,但不同方向的样品不是在同一平面上.虽然它们是在相同的层位,但其垂向上有20—30cm的跨度.因此,不同方向的样品实际上存在有一定的差异.但在目前条件下,其差异降到了最低,因而该实验结果应该具有较好的代表性.

在传统的岩石力学分析中,大都将地层简化为纵向上各向异性,而横向上视为各向同性性质.李军等通过平面上不同方向弹性模量、Poisson比和单轴抗压强度的岩石力学实验,证实了岩石力学性质在平面上存在各向异性,认为在某些地质条件下这种各向异性程度很强烈,因而不能简化为平面各向同性处理^[20].本次单轴和三轴岩石力学实验同样证明了在特低渗透砂岩储层平面上岩石力学性质的明显各向异性特征.

影响岩石力学性质的因素很多,包括岩石的成分、结构、构造、孔隙度、渗透率、孔隙流体等^[21—23].其中,沉积和强烈成岩作用造成致密砂岩在不同方向上的结构、构造差异,包括矿物颗粒的定向性排列、地应力作用下的孔隙连通性、渗透性差异以及岩石中微裂隙分布等因素,是造成岩石力

学性质在平面上各向异性的主要原因.在沉积过程中,受水流方向的控制,使得矿物颗粒的排列具有取向性差异;由于形成该区特低渗透砂岩储层的强烈成岩作用,产生的次生孔隙和粘土矿物,使岩石的孔隙结构及其流体分布复杂且不均一,进一步造成不同方向岩石结构和构造的差异性;在强烈的机械压实和侧向构造挤压作用下,矿物颗粒由点接触变为由线接触,产生的粒内缝和粒缘缝等微裂隙更加加剧了岩石内部的这种不均一性,从而造成岩石力学性质在平面上的各向异性.

4.2 岩石力学性质各向异性对不同方向裂缝发育的影响

该区特低渗透砂岩储层的岩石力学性质各向异性,为合理地解释研究区内不同方向裂缝发育程度的差异性提供了岩石力学方面的证据.岩石力学性质各向异性主要控制了不同方向裂缝的发育程度,它通常抑制了共轭剪切裂缝中一组裂缝的发育程度,而留下另一组裂缝,从而使两组共轭剪切裂缝的发育程度不一致.由于不同方向岩石微观结构和构造的差异性,造成岩石内部应力状态的不均匀性,在相同的构造应力作用下,岩石最容易沿其强度最小的方向产生破裂形成裂缝.

根据地表露头、岩心和薄片裂缝研究,鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组裂缝主要为在燕山期和喜马拉雅期构造应力场作用下形成的与岩层近垂直的高角度剪切裂缝^[15].燕山期在NW—SE向水平挤压应力作用下,在理论上可以形成近东西向和北西向两组剪切裂缝.但岩层强烈非均质性抑制了近东西向裂缝的发育程度,而使北西向裂缝发育.喜马拉雅期在NNE—SSW向水平挤压应力作用下,在理论上可以形成近南北向和北东向两组剪切裂缝,但岩层强烈非均质性抑制了近南北向裂缝的发育程度,而使北东向裂缝发育.因此,陇东地区目前主要发育有北东向(优选方位为 50° — 60°)和北西向(优选方位为 320° — 330°)两组裂缝,而近东西向和近南北向裂缝发育程度较差^[15].

5 结论

由于沉积和成岩作用造成的岩石结构与构造的差异,使得特低渗透砂岩储层在不同方向的岩石力

学性质存在明显的各向异性特征, 从而造成在平面上的岩层非均质性, 它是影响不同方向裂缝发育程度的重要因素. 尤其是当一个地区的构造差应力值较小时, 岩层非均质性甚至可以成为控制裂缝扩展方向和路径的主导因素. 鄂尔多斯盆地陇东地区北东向(60°)和北西向(330°)岩石强度明显比其他方向要弱, 因而在燕山期和喜马拉雅期水平构造挤压应力作用下北东向和北西向两组裂缝发育, 而近东西向和近南北向裂缝发育程度较差.

致谢 十分感谢北京科技大学岩石力学综合实验室和国土资源部地壳变形地表过程开放实验室提供的实验条件, 感谢 原辰研究员的帮助和有益的讨论, 感谢评审专家提出的宝贵意见.

参 考 文 献

- 1 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理. 沉积学报, 2004, 22(1): 13—17
- 2 Shedid AS. Influences of fracture orientation on oil recovery by water and polymer flooding processes; An experimental approach. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50: 285—292
- 3 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征. 地质科学, 2004, 39(1): 11—17
- 4 Bai T, Pollard David D. Fracture spacing in layered rocks; A new explanation based on the stress transition. Journal of Structural Geology, 2000, 22(1): 43—57
- 5 Catherine LH, Lorenz J, Lawrence TL, et al. Lithological and structural controls on natural fracture distribution and behavior with in the Lisburne group, northeastern Brooks Range and north slope subsurface, Alaska. AAPG Bulletin, 1997, 81(10): 1700—1720
- 6 Chad A, Underwood ML, Cooke JA, et al. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin. AAPG Bulletin, 2003, 87(1): 121—142
- 7 Ji S, Zhu Z, Wang Z. Relationship between joint spacing and bed thickness in sedimentary rocks; Effect of interbed slip. Geol Mag, 1998, 135(5): 637—655
- 8 Sanders C, Bonora M, Richards D. Kinematic structural restorations and discrete fracture modeling of a thrust trap; A case study from the Tarija Basin, Argentina. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(7): 845—855
- 9 Turcotte DL, Newman WI, Shcherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture. Geophysical Journal International, 2003, 152(3): 718—728
- 10 William RJ. Quantitative evaluation of fractures on Monksbood anticline, a detachment fold in the foothills of western Canada. AAPG Bulletin, 1997, 81(7): 1110—1132
- 11 Wong PM. A novel technique for modeling fracture intensity; A case study from the Pinedale Anticline in Wyoming. AAPG Bulletin, 2003, 87(11): 1717—1727
- 12 Nelson RA. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Houston: Gulf Publishing Company, 1985
- 13 Guiton Martin LE, Sassi W, Leroy YM, et al. Mechanical constraints on the chronology of fracture activation in folded Devonian sandstone of the western Moroccan Anti-Atlas. Journal of Structural Geology, 2003, 25(8): 1317—1330
- 14 Memarian H, Fergusson CL. Multiple fracture sets in the southeastern Permian—Triassic Sydney Basin, New South Wales. Australian Journal of Earth Sciences, 2003, 50(1): 49—61
- 15 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因. 地质学报, 2007, 81(2): 174—180
- 16 Bai T, Pollard David D. Closely spaced fractures in layered rocks; Initiation mechanism and propagation kinematics. Journal of Structural Geology, 2000, 22(10): 1409—1425
- 17 John CL, Jenny LS, David SS, et al. Natural fractures in the spraberry formation, midland basin, Texas; The effects of mechanical stratigraphy on fracture variability and reservoir behavior. AAPG Bulletin, 2002, 86(3): 505—524
- 18 Rijken P, Cooke ML. Role of shale thickness on vertical connectivity of fractures; Application of crack-bridging theory to the Austin Chalk, Texas. Tectonophysics, 2001, 337(1—2): 117—133
- 19 丁原辰, 邵兆刚. 测定岩石经历的最高古应力状态实验研究. 地球科学-中国地质大学学报, 2001, 26(1): 99—104
- 20 李 军, 陈 勉, 柳贡慧. 岩石力学性质正交各向异性实验研究. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 50—56
- 21 黄思静, 单钰铭, 刘维国, 等. 储层砂岩岩石力学性质与地层条件的关系研究. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 454—459
- 22 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102—106
- 23 杨米加, 贺永年. 破裂岩石的力学性质分析. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 9—13