

引用格式:王林生,梁利喜,覃建华,等.玛湖砾岩油藏水平井压裂井间窜扰特征与机制分析[J].油气地质与采收率,2023,30(6):129-137.

WANG Linsheng, LIANG Lixi, QIN Jianhua, et al. Characteristics and mechanism of inter-well interference in horizontal well fracturing in Mahu conglomerate reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 129-137.

玛湖砾岩油藏水平井压裂井间窜扰特征与机制分析

王林生¹,梁利喜²,覃建华¹,张景¹,魏晓琛²,丁乙²

(1.中国石油新疆油田分公司,新疆克拉玛依 834000;

2.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都 610500)

摘要:玛湖砾岩油藏油气资源丰富,以地质工程一体化思想为指导形成的“大井丛、多层系、小井距、长井段、交错式、密切割、拉链式、工厂化”系列开发技术,已实现了百万吨级以上的年生产能力。但在实施小井距水平井、水平井体积压裂立体开发的过程中出现了不同程度的压裂井间窜扰现象,较大程度影响了钻/完井工程作业及稳定生产。为此,以理论研究与数值模拟相结合,开展了压裂窜扰机制研究及主控因素分析。研究结果表明:①根据水平井压裂井间窜扰的连通方式及窜扰特征,将玛湖砾岩油藏水平井压裂井间窜扰分为天然软弱结构发育导致的压裂窜扰、压裂缝沟通导致的窜扰和压裂扰动压力/应力扰动区连通诱发的邻井干扰3种类型。②水平井井距是影响水平井压裂井间窜扰以及井间窜扰程度的关键因素。当水平井井距小于300 m时,研究区井间压裂窜扰发生几率大幅增大。综合考虑压裂窜扰对油藏开采的积极作用以及压裂窜扰对钻/完井工程作业、采油作业的不利影响,合理优化设计水平井井距,对砾岩油藏的安全、高效开发具有积极且重要的意义。

关键词:砾岩;井间窜扰;水平井;压裂;井距

文章编号:1009-9603(2023)06-00129-09

DOI:10.13673/j.pgre.202301016

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Characteristics and mechanism of inter-well interference in horizontal well fracturing in Mahu conglomerate reservoirs

WANG Linsheng¹, LIANG Lixi², QIN Jianhua¹, ZHANG Jing¹, WEI Xiaochen², DING Yi²

(1.Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2.State Key Laboratory of Oil & Gas Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China)

Abstract: The annual production capacity of more than one million tons has been realized because Mahu conglomerate reservoirs are rich in oil and gas resources and a series of development technologies featuring “large well cluster, multi-layer system, small well spacing, long well section, staggered type, dense cutting, zippered type, and industrialization” have been formed under the guidance of the idea of geological engineering integration. However, the drilling and completion engineering and stable production are significantly affected due to the different degrees of inter-well interference in the process of three-dimensional development of horizontal wells with small well spacing and volume fracturing of horizontal wells. Therefore, theoretical research and numerical simulation are combined to study the fracturing interference mechanism and analyze the main control factors. The results show that ①according to the connection modes and characteristics of inter-well interference in horizontal well fracturing, the inter-well interference in horizontal well fracturing in Mahu conglomerate reservoirs can be divided into three types: fracturing interference caused by the development of natural weak structure, interference caused by fracture communication, and adjacent well interference induced by the connectivity of the pressure/stress interference zones due to the fracturing interference; ②the horizontal well spacing is the key factor affecting the inter-well interference and the inter-well interference degree in horizontal well fracturing, the the prob-

收稿日期:2023-01-14。

作者简介:王林生(1978—),男,云南师宗人,教授级高级工程师,从事油田开发地质研究。E-mail: bkqws@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“准噶尔盆地致密油开发示范工程”(2017ZX05070-001),中国石油股份专项“准噶尔南缘和玛湖等重点地区优快钻井技术集成与试验”(2019F-33)。

ability of inter-well interference in the study area increases greatly when the spacing between horizontal wells is less than 300 m. Therefore, it is necessary to comprehensively consider the positive effect of fracturing interference on reservoir production and the adverse impact of fracturing interference on the drilling and completion engineering / the oil production and reasonably optimize the design of horizontal well spacing, which are of positive significance to the safe and efficient development of conglomerate reservoirs.

Key words: conglomerate; inter-well interference; horizontal well; fracturing; well spacing

准噶尔盆地玛湖凹陷油气资源富集,规模建产能力巨大。其中,玛湖凹陷10亿吨特大型砾岩油藏的主力开发层系百口泉组、乌尔禾组均属于低孔、低-特低渗透储层,并且表现为非均质性强、孔隙结构复杂、渗透性差、脆性低、两向应力差大,复杂压裂缝网形成难度大等特点^[1-3]。为此,通过理论研究、认识深化和针对性系列技术的攻关,创新形成了以地质工程一体化思想为指导的“大井丛、多层系、小井距、长井段、交错式、密切割、拉链式、工厂化”系列开发技术,推动了水平井产能、储量动用程度、采收率的大幅度提升,实现了百万吨级以上的年生产能力^[4-6]。

与其他非常规油气开发实施“小井距水平井+体积压裂”技术相同,玛湖砾岩油藏在小井距立体开发过程中,随着井距减小、压裂规模增大,水平井间压裂窜扰现象频发^[7-9]。压裂过程中井间互扰的时间效应具有不确定性,可能是瞬态,也可能是长期存在,这种影响一方面可能是积极的,如强化井间应力扰动、利于复杂裂缝网络形成,或者有利于增大邻近井周地层能量,提升驱油效果,提高采收率;另一方面,也会导致邻近钻井过程中井下地层情况复杂加剧、套损风险增大、生产井开采早期见水、预期压裂效果实现难等负面影响^[10]。因此,研究压裂窜扰特征及其主控因素,从而对压裂窜扰进行因势诱导,主动利用或科学有效地防治,对保障玛湖砾岩油藏的安全高效开发具有积极且重要的意义。

近年来,在非常规油气开发过程中压裂窜扰问题频发,围绕油气井压裂窜扰特征、诱发机制以及防治措施等方面,国内外学者开展了积极研究。滕小兰等对调整井压裂窜扰进行研究,提出通过优化压裂目标缝长、加砂规模、前置液比、砂比以及排量等实现压裂规模与井距的匹配,预防压裂干扰^[11]。林彦兵等研究了天然裂缝发育是导致红河油田压裂窜扰的原因,指出储层渗透率、注入压差、井距是水平井井间沟通的主要影响因素,并提出了预防措施及建议^[12]。邓刚针对大庆油田压裂驱油过程中的窜扰问题,研究了压裂驱油时邻井压力实时监测配

套工艺及压力预警方法。综合压裂驱油的井距、连通特征,监测压力上升速率、上升幅度等参数,建立了压力预警机制,实现压力预警^[13]。鲁文婷等结合数值模拟方法,基于玛湖砾岩油藏典型压裂窜扰井,从地应力特征、地层岩石力学特性、压裂井及邻井生产特征等方面研究了压裂窜扰的原因,并提出通过非均匀射孔、优化压裂设计降低压裂窜扰风险^[8]。郭旭洋等通过对国内外页岩油藏井间干扰进行分析,指出对原地应力、地层岩石力学特性以及天然裂缝、断层等因素地准确分析是井间干扰科学评价的前提,通过关井、老井注液、重复压裂、优化井距和压裂优化可减小井间干扰^[14]。雍锐等针对页岩气开发,将压裂窜扰的客观因素归结为储层非均质性、天然裂缝发育以及地应力特征,主观原因则归结为压裂规模、投产顺序等^[15]。何乐等基于灰色关联分析得到在威远页岩气示范区压裂窜扰程度与井距、母井生产时间、平均单簇用液规模、天然裂缝等因素关系密切,通过优化用液规模、分簇参数,实施暂堵转向压裂工艺,能够有效降低井间压裂窜扰的影响程度,提高相邻压裂窜扰生产井的产量恢复速度和恢复程度^[16]。李国欣等分析井间干扰对邻井(老井)生产效果的影响,认为该影响并没有特定的规律,并将致密砾岩体积压裂引起的井间干扰划分为应力应变效应型、压裂液到达沟通型、压裂液与支撑剂均到达沟通型3种机理^[17]。为了平衡生产效果与井间干扰,北美地区典型页岩气田的井距也经历了不断地优化和调整。

可见,近年来压裂井间窜扰主要集中于页岩气储层,对于强非均质砾岩储层的压裂窜扰特征、发生机制及其影响,还有待系统、深入地认识^[18-20]。同时,目前关于压裂窜扰的分析均是基于邻井液压、产液量为衡量评价指标,尽管利于精确评价压裂窜扰程度,但均不能较好地指导压裂窜扰预测及压裂窜扰风险评价。为此,笔者针对玛湖砾岩油藏开发过程中的压裂窜扰问题,将工程特征、理论分析以及数值模拟相结合,研究水平井压裂井间窜扰特征及形成机制,以期对玛湖砾岩的开发井网部署、压裂优化提供指导与借鉴。

1 窜扰特征及机制分析

1.1 典型窜扰特征

1.1.1 压裂扰动距离大

较典型的,如MaHW6004水平井,延伸方向靠近水平最小主应力方向,在该井压裂第11级后,使MaHW6002井(为正钻水平井,与典型井的井距为400 m)井口压力不仅上升,还有油花冒出,表现出显著的压裂窜扰现象;同时,沿水平井最大主应力方向距该处1 385 m的MaD5925井日产液量由5.9 t/d升至44.7 t/d,井口压力由9 MPa升至28 MPa,且取样见压裂液。另外,在MaHW1324水平井压裂过程中,首日使与其相距588 m的玛132_H井出现压力降低、产液量降低异常;次日又呈现产液量明显增高、压力增高的压裂窜扰现象;并且与MaHW1324井相距2 km的MaHW1320井也出现了显著异常,呈明显窜扰特征。

1.1.2 对钻/完井工程作业及稳定生产均影响显著

一旦发生窜扰对邻井的干扰时间不确定,既有瞬间、短期影响,也有长期影响,对钻/完井工程作业及油井稳定生产均产生了较大影响。如MaHW6104井和MaHW6105井实施体积压裂,导致距其1.2 km的正钻井(MaHW6132井)发生溢流,钻井液的pH值由9.5降至6.5,三开裸眼段出现了大面积的井壁剥落垮塌现象,无法恢复正常作业,被迫停钻封井^[21]。

MaHW6002井、MaHW6004井、MaHW6009井、MaHW6010井以及MaHW6011井、MaHW6012井3个井组,在压裂或生产过程中,均呈现出不同程度的窜扰特征。MaHW6004井与MaHW6002井相距约为400 m, MaHW6004井目的层为百口泉组二段($T_1b_1^2$), MaHW6002井目的层为百口泉组一段($T_1b_1^1$),压裂后投产2口井生产规律趋于一致,反映生产过程中存在干扰(图1,图2)。同样MaHW6009井与MaHW6010井相距约为250 m, MaHW6009井目的层为 $T_1b_1^2$, MaHW6010井目的层为 $T_1b_1^1$, 2口井生产规律亦趋于一致,反映生产过程中存在干扰。

1.2 窜扰机制分析

根据水平井压裂井间窜扰的连通方式及窜扰特征,可将玛湖砾岩油藏水平井压裂井间窜扰分为天然软弱结构发育导致的压裂窜扰、压裂缝沟通导致的窜扰和压裂扰动压力/应力扰动区连通诱发的邻井干扰。

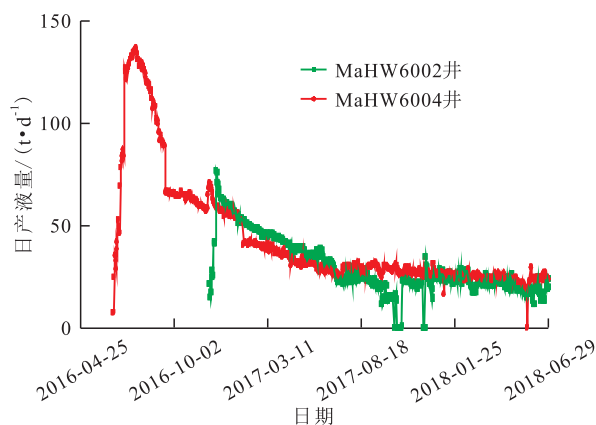


图1 干扰井日产液量动态曲线

Fig.1 Dynamic curves of daily fluid production in interfering wells

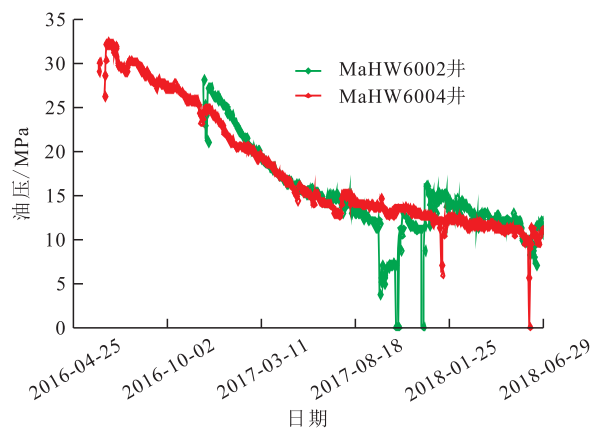


图2 干扰井油压动态曲线

Fig.2 Dynamic curves of oil pressure in interfering wells

1.2.1 天然软弱结构发育导致的压裂窜扰

天然软弱结构发育导致的压裂窜扰主要由于储层中发育断层、天然裂缝、不整合面等软弱结构面,这些结构面在原地条件下既可能处于开启状态,也可能处于闭合状态。但在压裂施工时,由于大规模高压流体注入,地层压力骤然升高,初始处于闭合状态的裂缝等天然软弱结构张开,甚至在高压流体下进一步扩展延伸,使压裂施工井与邻井沟通,导致井间窜扰。

该类窜扰主要受控于储层中软弱结构面的发育特征、软弱结构面的力学特性以及原地应力状态。在天然结构面沿水平最大主应力方向发育、原地应力水平低的条件下,实施储层压裂过程中,结构面相对更易开启,从而诱发井间窜扰。且窜扰的距离取决于结构面的规模及压裂施工泵注压力,泵注压力越大、结构面延伸越长,窜扰的潜在距离越远。

该类窜扰通常呈现即时发生的特征,在压裂施工期间或在压裂施工后短时间内邻井易出现窜扰

异常现象。因此,针对该类窜扰,须科学评价、精细描述储层中天然裂缝等软弱结构面的发育特征,进而通过水平井合理部署有效避开结构面,通过暂堵措施与优化压裂规模防止结构面开启、延伸,这是避免、减少压裂窜扰的关键。

1.2.2 压裂缝沟通导致的窜扰

由于大规模水力压裂产生延伸距离较长的人工裂缝,压裂缝与邻井地层沟通,对邻井地层的压力、流体性质产生显著的干扰,影响邻井正常的生产作业,产生压裂窜扰的现象。

该类窜扰取决于人工压裂缝的规模,主要受控于储层力学特性、地应力水平等地质力学因素以及水平井井距、段簇间距、相邻井及井组的压裂次序、压裂方式、压裂规模等工程因素。在地质力学特征相同的条件下,水平井井距越小,压裂规模越大,压裂施工诱发邻井窜扰的风险越大。

根据压裂缝延伸区域的不同,压裂缝沟通导致的窜扰可进一步划分为人工压裂缝延伸至邻井井筒、人工压裂缝延伸至与邻井人工压裂缝相交或搭接、人工压裂缝延伸至邻井的采油波及区3种情形。其中,第1种情形窜扰程度最强,对邻井生产作业的影响也最大;第3种情形产生的窜扰程度最弱,对邻井的影响也相对较小。当该类窜扰属于前2种情形时,即压裂缝延伸至邻近井筒或与邻近井压裂缝相交时,邻井窜扰现象同样具有即时性的特征;当属于第3种情形时,通常邻井窜扰出现的时间相对较晚,可能在压裂施工中后期,也可能在压裂后生产过程中。针对该类窜扰,在储层地质力学特征认识、表征的基础上,科学优化水平井井距、水平井压裂段簇间距以及压裂规模,可预防或有效降低水平井间发生压裂窜扰的风险。

1.2.3 压裂扰动压力/应力扰动区连通诱发的邻井干扰

与压裂缝沟通导致的窜扰相比,压裂施工井的压裂缝未延伸至邻近井井筒、裂缝网络、采油波及区,但压裂导致的地层压力或应力扰动区与邻井工程作业诱发压力扰动区或生产导致的压力降落区相交,从而对邻井产生干扰、影响。

该类邻井干扰取决于压裂缝规模、工程作业及生产诱发的压力扰动范围。其控制因素除了井间地层地应力、岩石力学特性等地质力学因素与压裂方式、压裂规模等工程因素外,还与井间地层的渗透性以及邻井工程作业或生产对井周地层压力的影响程度密切相关。井间地层的渗透性越好、邻井工程作业或生产诱发压力波动幅度越大,压力波动

距离越远,压裂井工程施工对邻井的干扰作用越强。

2 水平井部署参数对窜扰影响的数值模拟

对于待开发储层而言,地层物性、天然裂缝等结构面发育状况、地应力、岩石力学等地质力学特征是确定的;对于水平井压裂段簇间距、压裂规模、压裂方式等工程因素则需以实现压裂缝网复杂度、缝网体积规模最大化为首要目标进行优化设计。在此条件下,水平井井距优化设计成为改善压裂过程中窜扰的有效手段^[22]。水平井井距是地质工程一体化开发井网部署的重要参数,也是影响水平井压裂井间窜扰程度的关键因素。通过数值模拟,分析不同水平井井距条件下压裂缝规模与井间应力特征,研究水平井井距对压裂窜扰的影响。

2.1 数值模拟方法

水力压裂缝扩展是孔隙、裂缝渗流、岩石变形破裂、裂缝形态相互耦合的结果,受储层力学特性、储层应力状态、压裂液流变性等多种因素的影响与控制。

数值模拟是进行压裂缝扩展延伸分析的有效手段。本次采用非常规裂缝模型描述非均匀应力场中各向异性介质条件下裂缝形态及演化特征。该模型基于位移不连续法,可以计算储层存在天然裂缝的情况下,压裂缝扩展形态及压裂产生的扰动应力场。模型依托裂缝扩展准则和压裂缝与天然裂缝相交准则共同确定裂缝扩展的方向,同时还可以利用支撑剂沉降方程模拟支撑剂在裂缝中的密度分布。因此,与常规裂缝模型相比优势明显,可以解决裂缝网络中流体流动与裂缝弹性变形的完全耦合问题,同时还考虑了压裂缝分支之间的相互作用,能够计算分析相邻裂缝之间的应力阴影效应。研究表明,该方法可以较好地预测裂缝分布、几何形态以及支撑剂分布。

为验证基于水力压裂缝形态计算方法的可靠性及适用性,采用MaHW6002井的实际压裂施工参数进行裂缝数值模拟,获取各段的裂缝形态,通过将模拟得到的缝长、缝高与微地震的进行对比。结果(图3)显示,MaHW6002井模拟缝长与微地震监测结果符合率平均为89.8%,模拟缝高符合率平均达92.1%,论证了数值模拟的准确性。以MaHW6004井与MaHW6002井地质参数为基础,系统分析不同工程因素对井间窜扰特征的影响。

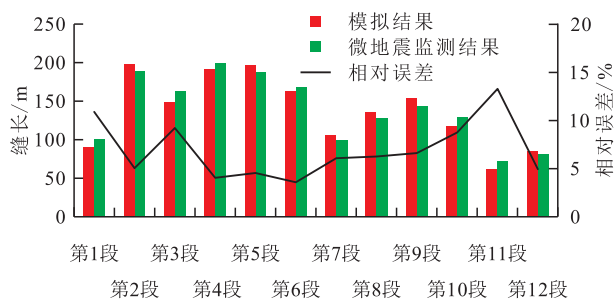


图3 模拟得到的缝长与微地震监测结果对比

Fig.3 Fracture length and height from simulation and microseismic detection

2.2 方位的影响

当MaHW6004井与MaHW6002井的井方位角分别取 0° 、 30° 、 60° 和 90° 时,2口井总裂缝体积分别为35 090,34 781,26 698和23 548 m^3 ,由不同井方位角条件下的缝网形态(图4)可知:在方位角更低

时(0° ,接近最小水平主应力方向),射孔后压裂缝延伸更明显。随着方位角增大,压裂缝延伸受地应力的抑制作用。统计不同井方位角条件下的平均缝长,并绘制柱状图(图5),由图5可以看出,井方位角与平均缝长呈负相关。

2.3 井距的影响

为了获取理想的裂缝形态,以利于裂缝规模的最大化,水平井延伸通常靠近最小水平主应力方位。

采用MaHW6004井与MaHW6002井的实际地质力学参数与实际压裂施工参数,基于UFM数值模拟分析2口水平井井距分别为500,400,300,200和100 m时,压裂形成压裂缝长度及压裂井间地应力扰动特征,以确定可有效改善压裂窜扰的水平井井距。

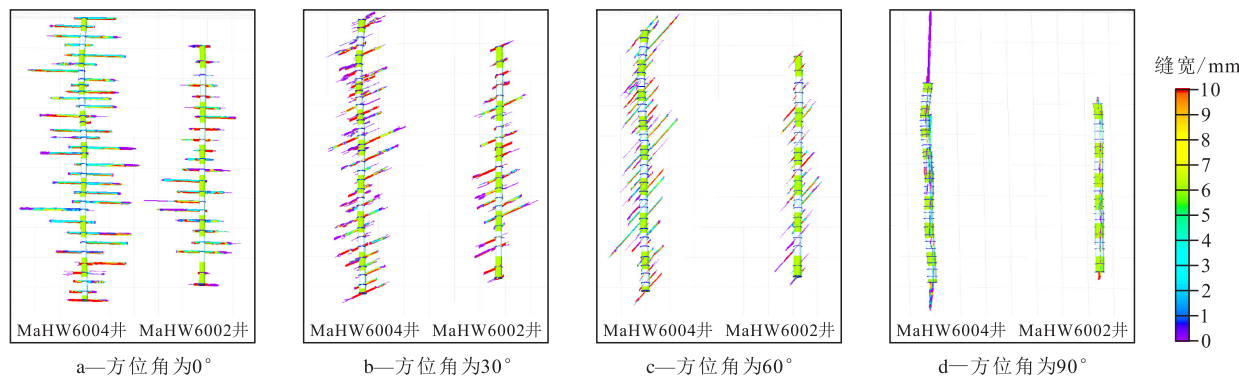


图4 不同井方位角条件下的缝网形态

Fig.4 Fracture network morphology under different well orientations

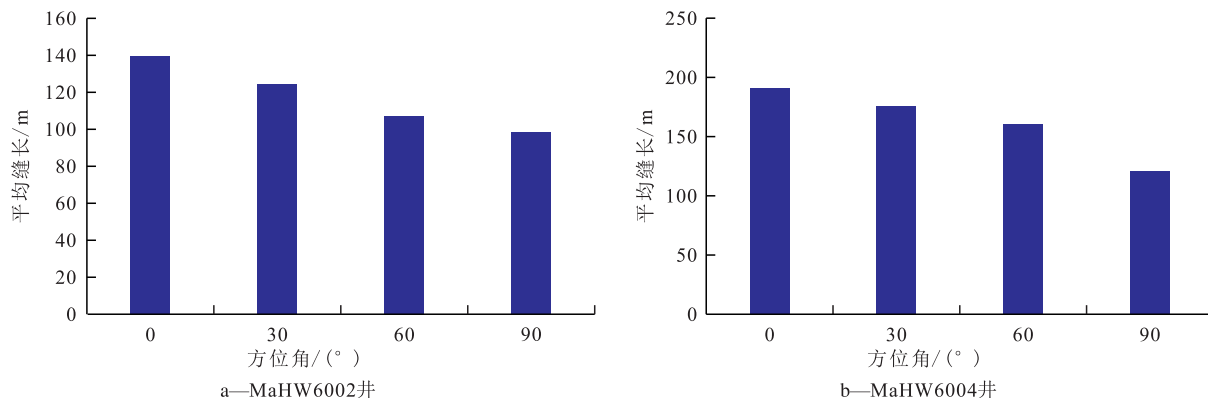


图5 不同井方位角条件下的平均缝长

Fig.5 Average fracture length under different well orientations

模拟结果(图6,图7)显示,针对MaHW6004井与MaHW6002井,由于压裂次序的影响,压裂过程中,受高压流体注入、压裂缝形成产生的应力阴影效应的控制,相同压裂规模下,不同井距的水平井人工压裂缝的长度不同,总体表现为在一定井距范围内,水平井人工压裂缝的平均缝长随井距增大呈增大趋势,但缝长的增大幅度小于井距的变化量。

因此,随着井距从500 m减小至100 m,2口井压裂缝的距离逐渐减小直至相互交错,综合分析认为,2口井裂缝相互交错将发生压裂缝沟通导致的窜扰,且窜扰程度较高。由数值模拟分析结果可知,2口井距离减小至200 m时,2口井之间已有多条相交。

基于MaHW6004井与MaHW6002井地质特征与压力施工参数,模拟不同井距条件下最小水平主

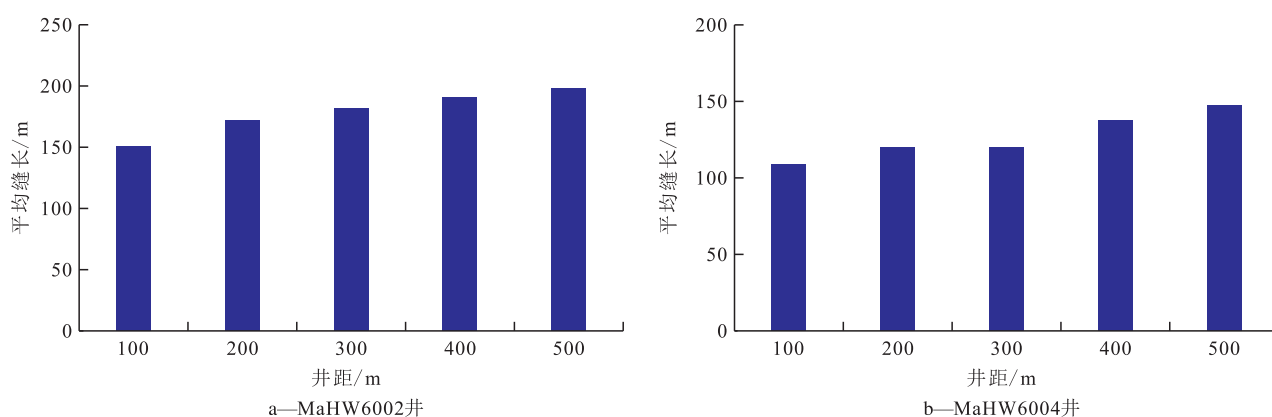


图6 不同井距条件下的平均缝长

Fig.6 Average fracture length under different well spacing conditions

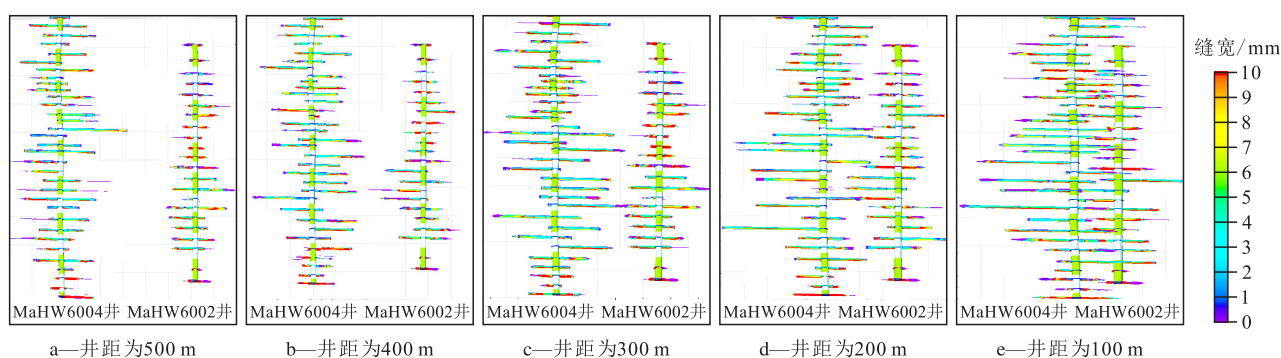


图7 不同井距条件下的压裂缝形态

Fig.7 Fracture morphology under different well spacing conditions

应力分布可知(图8),当井距为400,500 m时,最小水平主应力的井间应力扰动区未出现连通或重叠。当井距为300 m时,井间最小水平主应力在部分井段出现了扰动区连通。当井距为200,100 m时,2口井的最小水平主应力扰动区在井间呈大面积连通或叠加,井间干扰严重。综合分析不同井距条件下的裂缝规模与井间应力分布特征可知,在模拟分析工区工程地质特征条件下,当水平井井距小于300 m时,压裂窜扰风险增大。保持井距不小于300 m,有助于避免大幅降低压裂窜扰诱发对钻/完井工程

作业和采油作业的不利影响。因此,通过数值模拟分析水平井井间人工压裂缝规模、位置关系以及压裂扰动,为避免大规模窜扰的井距调整优化提供可靠依据。

值得关注的是,井间窜扰在对邻井钻/完井、开采工程作业产生不利影响的同时,也会对提高水平井最终采收率具有积极作用。因此,在水平井压裂井间扰动的井距优化过程中,考虑预防、避免压裂窜扰对工程作业不利影响的同时,还应主动强化利用其积极作用。

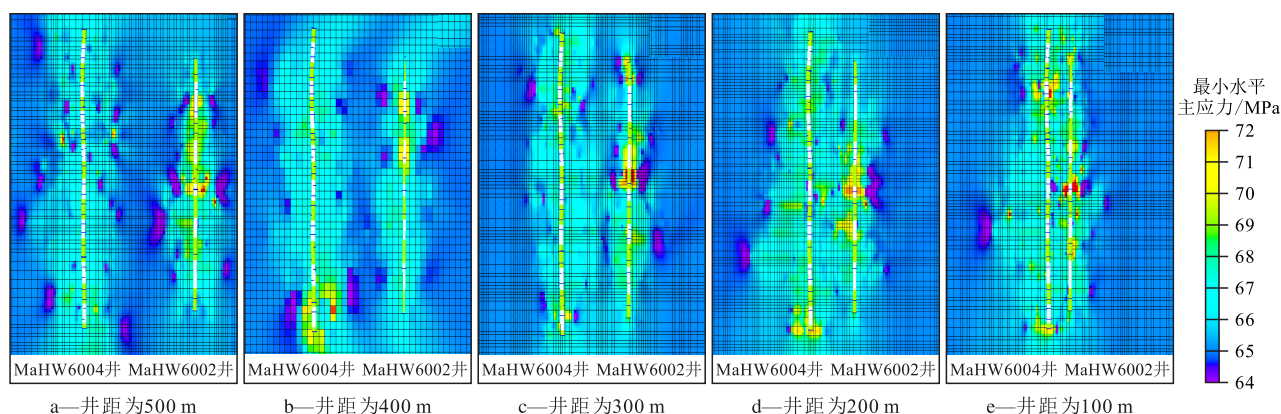


图8 不同井距条件下的井间应力分布

Fig.8 Stress distribution between wells under different well spacing conditions

2.4 簇间距的影响

统计Ma18井区多口井单段簇数和单段产液量之间的关系(图9),发现其拟合关系为:

$$Q = 300.25N + 526.17$$

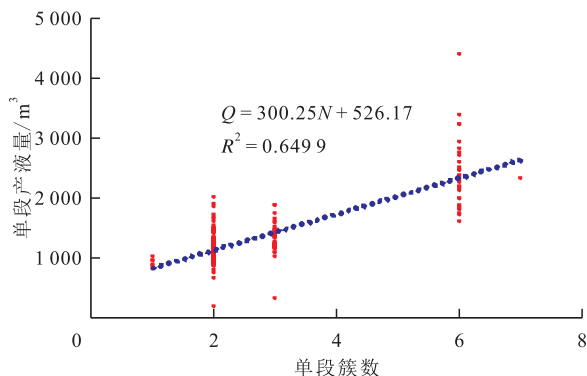


图9 单段簇数和单段产液量之间的关系

Fig.9 Relationship between cluster quantity per segment and liquid production per segment

当MaHW6004井与MaHW6002井簇间距分别取60,30,20,15和12 m时,分别对应单段1簇、单段2簇、单段3簇、单段4簇和单段5簇的工况,为避免单段产液量差异对总裂缝体积的影响,结合单段簇数和单段产液量之间的拟合关系分别设置各段产液量。不同簇间距条件下,压裂缝模拟(图10)与平均缝长(图11)结果显示,受簇间应力阴影效应影

响,导致平均缝长变小,簇间距与平均缝长呈正相关。

3 结论

玛湖砾岩油藏在实施小井距水平井、水平井体积压裂的立体开发过程中出现了不同程度的压裂窜扰现象,且呈现窜扰距离大、对钻/完井工程作业及稳定生产影响显著等特征。根据导致水平井压裂井间窜扰的连通方式差异,玛湖砾岩油藏压裂窜扰可分为天然软弱结构发育导致的压裂窜扰、压裂缝井间沟通导致的窜扰以及井间压裂扰动压力、扰动应力扰动区连通诱发的井间干扰3种类型。

井方位角与平均缝长呈负相关。受簇间应力阴影效应影响,缝长变小,簇间距与平均缝长呈正相关。水平井井距是水平井压裂发生井间窜扰以及影响井间窜扰程度的关键因素,且存在临界井距。针对MaHW6004井与MaHW6002井,临界井距为300 m。当水平井井距小于300 m时,压裂井间窜扰发生几率大幅增大。鉴于井间窜扰与地质力学特征、构造特征及压裂施工参数密切相关,不同井组下的临界井距具有差异性,需要开展针对性分析。综合考虑压裂窜扰对油藏开采的积极作用以

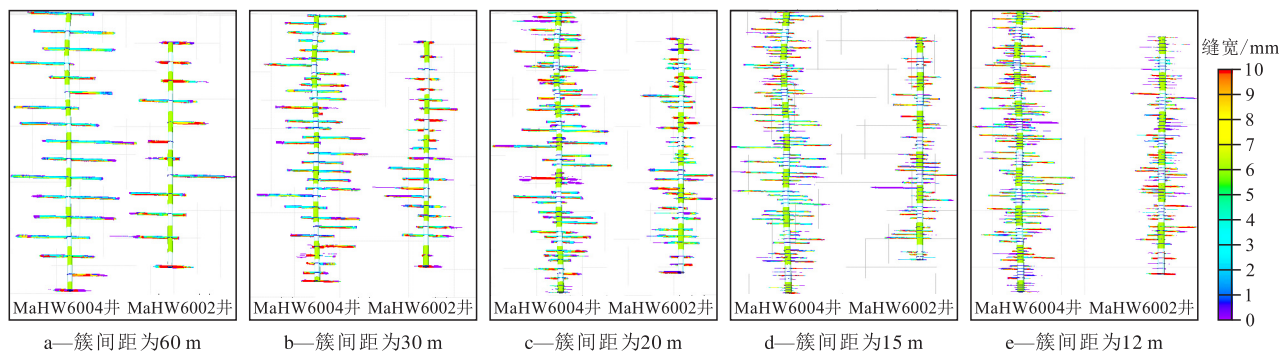


图10 不同簇间距条件下的压裂缝模拟

Fig.10 Fracture simulation under different cluster spacing conditions

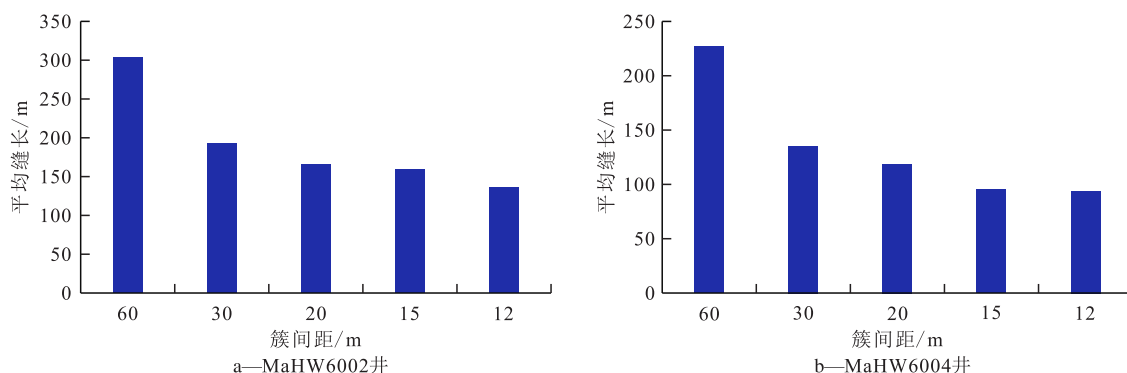


图11 不同簇间距条件下的平均缝长

Fig.11 Average fracture length under different cluster spacing conditions

及压裂窜扰对钻/完井工程作业、采油作业的不利影响,合理优化设计水平井井距,对砾岩油藏的安全、高效开发具有积极且重要的意义。

符号解释

Q ——单段产液量, m^3 ;

N ——单段簇数。

参考文献

- [1] 黄立良,王然,邹阳,等.准噶尔盆地玛南斜坡区上二叠统上乌尔禾组连续型砂砾岩油藏群成藏特征[J].石油实验地质,2022,44(1):51-59.
HUANG Liliang, WANG Ran, ZOU Yang, et al. Accumulation characteristics of continuous sand conglomerate reservoirs of upper Permian upper Wuerhe formation in Manan slope area, Junggar basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44 (1): 51-59.
- [2] 王林生,艾建华,伍顺伟,等.基于扩展弹性阻抗反演的致密砂砾岩储层定量预测技术——以玛湖凹陷达13井区为例[J].油气地质与采收率,2022,29(3):36-44.
WANG Linsheng, AI Jianhua, WU Shunwei, et al. Quantitative prediction technology for tight glutenite reservoirs based on EEI inversion: A case of Well Da13 Area in Mahu Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 36-44.
- [3] 毛锐,申子明,常秋生,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组核磁共振测井含油性评价方法[J].中国石油勘探,2021,26(4):162-172.
MAO Rui, SHEN Ziming, CHANG Qiusheng, et al. Evaluation method of reservoir oil-bearing property by NMR logging of Permian Lower Wuerhe Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 162-172.
- [4] 许江文,李建民,邹元月,等.玛湖致密砾岩油藏水平井体积压裂技术探索与实践[J].中国石油勘探,2019,24(2):241-249.
XU Jiangwen, LI Jianmin, WU Yuanyue, et al. Exploration and practice of volume fracturing technology in horizontal well of Mahu tight conglomerate reservoirs [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 241-249.
- [5] 李建民,吴宝成,赵海燕,等.玛湖致密砾岩油藏水平井体积压裂技术适应性分析[J].中国石油勘探,2019,24(2):250-259.
LI Jianmin, WU Baocheng, ZHAO Haiyan, et al. Adaptability of horizontal well volume fracturing to tight conglomerate reservoirs in Mahu [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 250-259.
- [6] 李晓梅,李洲,邓振龙,等.基于反演多参数体约束地质建模的水平井预警技术——以玛湖地区致密砂砾岩油藏为例[J].油气地质与采收率,2021,28(5):57-63.
LI Xiaomei, LI Zhou, DENG Zhenlong, et al. Early warning technology by geological modeling based on multiparameter constrained inversion for horizontal wells: A case of tight conglomerate reservoirs in Mahu area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 57-63.
- [7] 焦方正.页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践[J].天然气工业,2019,39(5):1-14.
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning “volume development” of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [8] 鲁文婷,王亮,杨升峰,等.玛湖油田致密砾岩油藏压裂数值模拟研究[J].特种油气藏,2021,28(3):94-98.
LU Wenting, WANG Liang, YANG Shengfeng, et al. Numerical simulation of fracturing in tight conglomerate reservoir of Mahu oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(3): 94-98.
- [9] 何小东,马俊修,刘刚,等.玛湖油田砾岩储集层岩石力学分析及缝网评价[J].新疆石油地质,2019,40(6):701-707.
HE Xiaodong, MA Junxiu, LIU Gang, et al. Analysis of rock mechanics and assessments of hydraulic fracture network in conglomerate reservoirs of Mahu oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 701-707.
- [10] 刘向君,熊健,梁利喜,等.玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储集层岩石力学特征与裂缝扩展机理[J].新疆石油地质,2018,39(1):83-90.
LIU Xiangjun, XIONG Jian, LIANG Lixi, et al. Rock mechanical characteristics and fracture propagation mechanism of sandy conglomerate reservoirs in Baikouquan formation of Mahu sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 83-90.
- [11] 滕小兰,邱玲.调整井压裂井间干扰实例分析及技术对策[J].石油钻采工艺,2011,33(2):88-90.
TENG Xiaolan, QIU Ling. Example analysis and technical measures for wells interference in adjustment well fracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 88-90.
- [12] 林彦兵,胡艾国,陈付虎,等.红河油田水平井压窜原因分析及防窜对策建议[J].油气藏评价与开发,2013,3(4):56-61.
LIN Yanbing, HU Aiguo, CHEN Fuhu, et al. Horizontal well fracturing channeling cause analysis and channeling prevention countermeasures in Honghe oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(4): 56-61.
- [13] 邓刚.压裂驱油试验邻井压裂窜扰风险预警方案及其应用[J].大庆石油地质与开发,2021,40(2):1-6.
DENG Gang. Early warning scheme and its application for the pressure channeling risk in adjacent wells of the fracturing-flooding test [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(2): 1-6.
- [14] 郭旭洋,金衍,黄雷.页岩油气藏水平井井间干扰研究现状和讨论[J].石油钻采工艺,2021,43(3):348-367.
GUO Xuyang, JIN Yan, HUANG Lei. Review and discussion of the study of interwell interference in shale oil and shale gas reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43 (3): 348-367.
- [15] 雍锐,常程,张德良,等.地质—工程—经济一体化页岩气水平井井距优化——以国家级页岩气开发示范区宁209井区为例[J].天然气工业,2020,40(7):42-48.
YONG Rui, CHANG Cheng, ZHANG Deliang, et al. Optimization of shale-gas horizontal well spacing based on geology-en-

- gineering-economy integration: A case study of Well block Ning 209 in the National Shale Gas Development Demonstration Area [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7): 42-48.
- [16] 何乐,袁灿明,龚蔚.页岩气井间压裂窜扰影响因素分析和防窜对策[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):63-69.
HE Le, YUAN Canming, GONG Wei. Influencing factors and preventing measures of intra-well frac hit in shale gas [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 63-69.
- [17] 李国欣,覃建华,鲜成钢,等.致密砾岩油田高效开发理论认识、关键技术与实践——以准噶尔盆地玛湖油田为例[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1 185-1 197.
LI Guoxin, QIN Jianhua, XIAN Chenggang, et al. Theoretical understandings, key technologies and practices of tight conglomerate oilfield efficient development: A case study of the Mahu oilfield, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1 185-1 197.
- [18] 曾凌翔.威远页岩气水平井控缝防窜技术优化与应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):81-85.
ZENG Lingxiang. Optimization and application of fracture control and channeling prevention technology in Weiyuan shale gas horizontal well [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 81-85.
- [19] 陈京元,位云生,王军磊,等.页岩气井间干扰分析及井距优化[J].天然气地球科学,2021,32(7):931-940.
CHEN Jingyuan, WEI Yunsheng, WANG Junlei, et al. Interwell-production interference and well spacing optimization in shale gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 931-940.
- [20] 赵勇,李南颖,杨建,等.深层页岩气地质工程一体化井距优化——以威荣页岩气田为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):340-347.
ZHAO Yong, LI Nanying, YANG Jian, et al. Optimization of deep shale gas well spacing based on geology-engineering integration: A case study of Weirong Shale Gas Field [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 340-347.
- [21] 田林海,屈刚,雷鸣,等.玛湖油田玛18井区体积压裂对钻井作业干扰问题的探讨[J].石油钻探技术,2019,47(1):20-24.
TIAN Linhai, QU Gang, LEI Ming, et al. Discussion of frac Interferences during volumetric fracturing in drilling operation of Ma 18 well area in Mahu oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 20-24.
- [22] 王军磊,贾爱林,位云生,等.基于多井模型的压裂参数-开发井距系统优化[J].石油勘探与开发,2019,46(5):981-992.
WANG Junlei, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Optimization workflow for stimulation-well spacing design in a multiwell pad [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 981-992.

编辑 单体珍