

高温高压致密油藏非常规射孔参数对裂缝扩展规律的影响机制

张 琛

中石化经纬有限公司胜利测井公司 山东 东营 257000

摘 要：水力压裂技术是解锁致密油藏的关键钥匙，而射孔作业则是压裂施工的“第一道工序”，其质量直接决定了后续裂缝能否按预期路径有效扩展。尤其是在地质条件更为严苛的高温高压（HPHT）致密油藏中，储层物性、地应力状态及流体行为均呈现出高度复杂性与非线性特征。传统的常规射孔理念与参数设计已难以满足此类特殊储层的开发需求。本文旨在系统探讨在高温高压致密油藏环境下，非常规射孔参数——包括射孔相位角、孔密、孔径、孔深、簇间距以及多级射孔时序等——如何通过改变井筒-储层界面的初始几何形态、应力集中分布及流体流动特性，进而深刻影响水力裂缝的起裂压力、起裂位置、扩展路径、缝网复杂度乃至最终的压裂改造体积（SRV）。通过厘清其中的作用机理与内在联系，本文旨在为优化HPHT致密油藏的射孔-压裂一体化设计提供理论支撑与实践指导，从而提升单井产能与最终采收率。

关键词：高温高压；致密油藏；非常规射孔；裂缝扩展；应力干扰；起裂机理

引言

射孔在传统认知里只是沟通井筒与储层的物理通道，但在非常规油气藏开发，尤其是低孔、低渗、强非均质性的致密油藏中，其角色已转变为主动“引导”和“塑造”水力裂缝网络的精密工程手段，在高温高压（HPHT）致密油藏中这一转变尤为关键。HPHT致密油藏地层温度超150°C、压力系数大于1.8，岩石力学性质改变，高温降低岩石强度，高围压抑制裂缝张开扩展，且天然裂缝系统等地质因素耦合，构成复杂力学场，水力压裂成功与否取决于能否精准起裂并形成复杂缝网。在此挑战下，“非常规射孔”出现，它突破固定模式，依地质力学模型精细化、个性化设计射孔参数，这些参数协同营造利于裂缝扩展的“微环境”。深入探究非常规射孔参数对裂缝扩展规律的影响机制，是理论前沿热点，更是HPHT致密油藏经济高效开发的迫切需求。本文将从裂缝起裂、转向与干扰、缝网复杂度构建三维度系统阐述该机制。

1 裂缝起裂阶段：非常规射孔参数对起裂门槛与位置的调控机制

水力裂缝的起裂是整个压裂过程的起点，其难易程度（起裂压力）和精确位置直接决定了后续施工的成败。在HPHT致密油藏中，由于地应力极高，起裂压力往往接近甚至超过套管的承压极限，这使得对起裂过程的精准控制变得至关重要。非常规射孔参数正是通过改变井筒附近的应力场和流体动力学条件，来调控这一关键

环节。

1.1 射孔孔深与孔径

射孔的本质是在坚硬的套管、水泥环和地层中制造一个应力集中点。根据弹性力学理论，孔眼尖端会产生显著的应力集中效应，其集中系数与孔眼的几何形状密切相关。孔深和孔径是决定这一效应强度的两个核心参数。

孔深的影响：更深的射孔孔道能够穿透近井地带可能存在的钻井污染带或应力屏蔽层，直达原始地层。更重要的是，孔深直接决定了应力集中区域向地层内部的延伸距离。较长的孔道意味着应力扰动范围更大，在相同注入压力下，更容易在孔道末端达到岩石的抗拉强度，从而实现更低的起裂压力^[1]。对于HPHT储层，深穿透射孔（如超深穿透射孔枪）能有效克服高围压带来的起裂阻力，是降低施工风险、保护井筒完整性的重要手段。

孔径的影响：较大的孔径一方面提供了更大的流体流通截面积，降低了流体在孔道内的摩擦损失，使得更多的泵注能量能有效传递至孔道末端用于起裂；另一方面，大孔径本身也会带来更高的应力集中系数。然而，孔径并非越大越好。过大的孔径会严重削弱套管的机械强度，在HPHT条件下，套管本身已承受巨大载荷，过度削弱可能导致其在压裂过程中发生变形或损坏。因此，需要在保证套管安全的前提下，寻求最优孔径。

1.2 射孔相位角与孔密

在水平井分段压裂中，我们期望裂缝沿着垂直于最小水平主应力（ Sh_{min} ）的方向扩展，以最大化裂缝

与储层的接触面积。然而，井筒周围的切向应力分布是不均匀的，其最大值出现在平行于最大水平主应力（SHmax）的方向上，最小值则出现在垂直于SHmax的方向上。理论上，裂缝应优先在切向应力最小处起裂，即垂直于SHmax的方向。

相位角：相位角定义了射孔簇内各孔眼在圆周方向上的分布角度。传统的90°相位（四簇）会在四个象限均匀布孔。但在存在较大水平主应力差（ $\Delta\sigma_h = SH_{max} - Sh_{min}$ ）的情况下，这种均匀布孔会导致多个潜在的起裂点。实际起裂往往发生在最薄弱或最容易起裂的位置，可能导致裂缝偏离理想方位。采用非对称相位角（如60°/120°）或定向射孔（所有孔眼集中在一个狭窄的扇区内，如30°），可以将所有射孔孔眼都布置在期望的起裂方位（即垂直于SHmax的方向）上。这样，所有的注入流体能量都集中于此，极大地提高了在目标方位起裂的成功率和确定性，避免了无效的、偏离主应力方向的裂缝起裂。

孔密：孔密指单位长度内的射孔数量。较高的孔密可以在目标方位上形成更密集的应力扰动区，相当于在井筒周围制造了一个连续的、弱化的“起裂带”。这不仅进一步降低了起裂压力，还使得起裂过程更加平稳，减少了压力波动^[2]。但对于HPHT储层，过高的孔密同样会过度削弱套管，且可能导致多个相邻孔眼同时起裂，引发复杂的多裂缝竞争问题。因此，孔密的设计需与相位角协同考虑，在保证起裂效果的同时兼顾井筒安全。

综上所述，在起裂阶段，非常规射孔通过“深穿透、大孔径”降低起裂门槛，通过“定向相位、优化孔密”精准导航起裂位置，共同确保了在HPHT致密油藏这一高难度舞台上，水力裂缝能够“顺利出生”并“走对方向”。

2 裂缝扩展阶段：非常规射孔参数对裂缝转向与应力干扰的塑造机制

一旦裂缝成功起裂，其后续的扩展路径便成为关注焦点。在理想的均质地层中，裂缝将沿直线扩展。然而，真实储层充满了非均质性，如天然裂缝、岩性夹层、应力阴影等。非常规射孔参数通过预先设定的孔眼空间布局，主动干预了多条裂缝之间的相互作用（应力干扰），从而引导裂缝走向更复杂的网络。

2.1 簇间距（Cluster Spacing）

簇间距是指同一压裂段内相邻射孔簇中心之间的距离。它是控制多裂缝间应力干扰强度的最关键参数。当一条裂缝开始扩展时，它会在周围地层中产生一个压缩性的应力场（应力阴影），这个应力场会阻碍邻近裂缝在同一平面上的扩展。（1）小簇间距：当簇间距过小时，

各簇间的应力阴影会强烈重叠。这会导致两种不利后果：一是部分簇可能因无法克服邻近裂缝产生的高应力而根本不起裂（簇效率低下）；二是即使起裂，裂缝也会被强烈挤压，导致缝宽窄、导流能力差。在HPHT储层，由于基质渗透率极低，窄缝极易被压裂液滤失或支撑剂嵌入而闭合，几乎丧失导流能力。（2）大簇间距：过大的簇间距虽然能有效避免应力干扰，确保每条主裂缝都能充分发育，但会留下大量的未改造“盲区”，降低了压裂改造体积（SRV），无法有效动用储层。（3）最优簇间距：非常规射孔设计的目标是找到一个“甜蜜点”——簇间距足够小，以利用适度的应力干扰迫使裂缝在扩展过程中发生偏转或分叉，从而增加缝网的复杂度；同时又足够大，以保证大部分射孔簇都能成功起裂并形成具有经济价值的主干裂缝。这个最优值高度依赖于储层的杨氏模量、泊松比、水平主应力差以及天然裂缝发育程度。在HPHT条件下，岩石通常更硬、更脆，对应力干扰更为敏感，因此需要更精细的簇间距优化。

2.2 孔眼内流体分配

在同一射孔簇内，通常包含多个孔眼。理想情况下，压裂液应均匀分配到每个孔眼，使它们同时起裂并共同承担流量，形成一条统一的主裂缝。然而，由于孔眼长度、摩阻以及地层局部非均质性的差异，流体往往会优先进入阻力最小的孔眼，导致“指进”现象——少数孔眼主导了整个簇的流量，其余孔眼则处于闲置状态。

限流法：这是一种典型的非常规射孔策略。通过刻意设计较小的孔径和/或较低的孔密，人为增大孔眼摩阻，使其远大于地层的起裂和延伸净压力。在这种情况下，为了维持总流量，井底压力必须升高，从而迫使流体克服阻力，分配到更多的孔眼中去^[3]。这种方法能有效提高单簇内的孔眼利用率，促进形成更宽、更强的单一主裂缝，特别适用于需要打造高导流主干缝的场景。

均衡布孔：另一种策略是通过精确控制每个孔眼的几何尺寸（如使用可变孔径射孔枪），结合储层精细描述，对不同位置的孔眼进行差异化设计，以实现流体的自然均衡分配。这需要更高精度的地质力学模型支持。孔眼内的流体分配直接影响了单簇裂缝的初始形态和强度，进而影响其在后续扩展中与其他簇裂缝的相互作用方式。

3 缝网构建阶段：非常规射孔参数对复杂缝网形成的驱动机制

最终目标是形成一个高密度、高连通性的复杂缝网系统，以最大限度地增加泄油面积。非常规射孔参数通过上述对起裂和扩展的调控，为复杂缝网的形成奠定了

基础。

3.1 诱导应力场的构建

传统压裂理念将缝网复杂度视为储层固有属性的被动结果，仅能“顺应天时”，易导致HPHT致密油藏改造体积不足、裂缝单一等问题。现代非常规射孔技术则提出“主动创造”诱导应力场的新范式：通过射孔参数的空间布局，在压裂前于井筒周围预设非均匀、非对称的初始应力扰动场，该设计基于精细地质力学模型量身定制^[4]。例如，采用60°/120°非对称相位角可集中起裂于目标方位，并在其他区域形成应力薄弱带；非均匀簇间距（如中密边疏）可强化局部应力干扰。当主裂缝扩展时，其尖端应力强度因子受此预设场调制，在特定方向（如垂直主缝或与天然弱面成夹角处）易超断裂韧度阈值，诱发分支缝。尤其在高应力差储层中，交错式（Staggered）射孔（相邻簇错开45°）使裂缝相互“推挤”，在簇间产生剪切应力，激活天然裂缝或页理，促使主缝偏转、分叉或连接，形成T形、工字形等复杂缝网，显著提升工程可控性与开发效益。

3.2 多级射孔时序

如果说空间布局的优化是对静态应力场的精妙设计，那么多级射孔时序控制则是对动态压裂过程的精准“编排”。近年来，随着智能完井技术和延时起爆装置的发展，射孔已不再局限于一次性同步开启，而是具备了精确的时间维度控制能力。

顺序开启策略：在同一压裂段内，可先引爆位于中部的射孔簇，待其形成具有一定长度和宽度的主裂缝，并在周围建立起稳定的应力阴影区后，再依次引爆两侧的簇。此时，后开启的裂缝在向远处扩展时，会受到先形成裂缝所产生的压缩性应力场的强烈排斥。这种排斥力会迫使新裂缝向应力较低的未改造区域偏转，甚至发生90°转向，从而有效填充簇间“盲区”，显著扩大压裂改造体积（SRV）。在HPHT条件下，由于岩石脆性

高、断裂能低，这种由时序控制诱导的裂缝转向更为容易实现。

交替开启与全局优化：在整口水平井的多级压裂中，还可实施跨段的交替开启策略。例如，对奇数段采用“由内向外”顺序开启，对偶数段则采用“由外向内”反向开启。这种全局性的时序编排，能够有效缓解段间应力干扰，避免因连续压裂导致的“应力锁闭”现象，确保各压裂段改造均匀，防止出现“强段更强、弱段更弱”的产能极化问题。

4 结语

高温高压致密油藏开发是与极端地质条件的博弈，非常规射孔已从辅助作业跃升为决定压裂成败的战略性前置工程。本文论证了射孔核心参数通过多重机制影响水力裂缝形态与效能，其本质是在井筒-储层界面进行精密“应力场与流场预编程”，将不可控裂缝行为引导至可预测、可优化轨道，对HPHT致密油藏的主动干预尤为必要。未来射孔-压裂一体化设计将向更高精度、更强智能化发展，需融合地质工程一体化理念，构建跨尺度地质力学模型，利用人工智能和大数据优化射孔参数，实现个性化、智能化射孔设计，如此才能释放油藏能源潜力，保障国家能源安全，重塑非常规油气开发未来。

参考文献

- [1]陈思维,芮振华,胡婷,等.致密油藏CO₂-EOR技术断层和裂缝再激活的四维地应力演化研究[J/OL].力学学报,1-18[2025-11-20].
- [2]陈贞万,郭愿刚,惠磊.南梁长3油藏裂缝发育特征及动用技术研究[J].石油化工应用,2025,44(06):34-38.
- [3]罗波波,刘峰刚,王瑞飞,等.挥发性致密油藏孔隙结构及高温高压三相相渗实验[J].石油地质与工程,2023,37(03):69-75+81.
- [4]卢宇.致密油藏水平井分簇射孔完井优化理论与应用[D].西南石油大学,2019.