文章编号:1673-2677(2026)01-0078-10 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.009
引用:王博,李欢,颜廷巍,等.体积压裂中射孔孔眼冲蚀的主控因素及冲蚀规律[J].新疆石油天然气,2026,22(1):78-87.
Cite:WANG Bo,LI Huan,YAN Tingwei,et al. Main control factors and laws of perforation erosion in volume fracturing[J]. Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):78-87.

体积压裂中射孔孔眼冲蚀的主控因素及冲蚀规律

王博[1],李欢[2],颜廷巍[1],周麟泰[1],盛少鹏[1],周福建[2]
(1.中国石油大学(北京)克拉玛依校区,新疆克拉玛依 834000;2.中国石油大学(北京),北京 102249)

摘 要:体积压裂是效益开发非常规油气资源的关键技术之一。目前体积压裂技术已进入以段内多簇、小簇间距、限流射孔、暂堵转向、大排量泵注以及高强度加砂等工艺为核心的阶段,但在高泵压、高排量、高砂比下射孔孔眼冲蚀严重,易造成暂堵失败和限流失效,致使段内射孔簇间流体竞争进液,导致裂缝难以同步起裂及均衡扩展,已成为制约非常规油气安全、高效开发的客观难题之一。通过对国内外射孔孔眼冲蚀相关文献的梳理,总结国内外射孔孔眼冲蚀理论模型,分析射孔孔眼冲蚀的研究现状,探讨了大规模加砂压裂过程中射孔孔眼冲蚀的原因,厘清射孔孔眼冲蚀的影响因素并提出冲蚀防护的方向。明确射孔孔眼冲蚀的主控因素及其影响规律,以及冲蚀防护的措施对高效开发非常规油气资源具有重要的工程意义。

关键词:非常规油气;体积压裂;射孔孔眼冲蚀;裂缝扩展;暂堵转向压裂
中图分类号:TE357 **文献标识码:**A

Main Control Factors and Laws of Perforation Erosion in Volume Fracturing

WANG Bo[1],LI Huan[2],YAN Tingwei[1],ZHOU Lintai[1],SHENG Shaopeng[1],ZHOU Fujian[2]
(1.Karamay Campus,China University of Petroleum (Beijing),Karamay 834000,Xinjiang,China;2.China University of Petroleum (Beijing),Beijing 102249,China)

Abstract: Volume fracturing is one of the key technologies for the efficient development of unconventional oil and gas resources. At present, volume fracturing has entered the stage with the core characteristics of multi-cluster, small cluster spacing, limited entry perforating, temporary plugging diversion, high injection rates and high-intensity proppant injection. Perforation erosion is serious in cases of high injection pressure, high injection rates and high sand concentrations. This leads to high likelihood of failure of temporary plugging and limited entry and consequently high difficulties in delivering spontaneous initiation and uniform propagation of fractures due to competitive fluid attraction among perforation clusters within one fracturing stage, which is practically restraining the safe and high-efficiency development of unconventional oil and gas. A global literature review of the studies on perforation erosion in both China and other countries is performed. The theoretical models of perforation erosion are summarized, and the research status of perforation erosion is analyzed. The causes of perforation erosion during large-scale propped fracturing are discussed, the factors affecting perforation erosion are identified, and the countermeasure strategies are proposed. Clarifying the main factors controlling perforation erosion and the corresponding laws and developing protective measures are of great engineering significance for the efficient development of

基金项目:国家自然科学基金"段内多簇压裂孔眼封堵控制机理研究"(52374057);"天山英才"青年科技创新人才项目"非常规油气集团压裂控制机理与智能优化研究"(2023TSYCCX0004)。
第一作者:王博(1990-),2019年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业,博士,副教授,主要从事储层改造相关教学与科研工作。(E-mail)wangbo@cupk.edu.cn
通讯作者:周福建(1966-),1990年毕业于中国石油大学(华东),博士,教授,主要从事储集层改造与储集层保护方面的研究工作。(E-mail)zhoufj@cup.edu.cn

unconventional hydrocarbon resources.

Key words: unconventional oil and gas; volume fracturing; perforation erosion; fracture propagation; temporary plugging diversion fracturing

以非常规油气为代表的低品位资源逐渐成为石油勘探开发的主体。在“十四五”期间，非常规油气资源持续作为我国油气储量增长的主力军，其中非常规原油与天然气分别占新增探明储量的75%和92%以上，成为支撑国家能源安全和保障油气增储上产的核心资源[1-2]。水平井段内多簇压裂是非常规油气效益开发的核心技术之一，通过缩小簇间距，增大段内射孔簇数目，在降低施工成本的同时对储层形成密切割效果，获得体积改造[3-4]。由于储层非均质性、射孔簇间流体竞争和缝间干扰的影响，多个射孔簇难以同步起裂及均衡扩展，制约了非常规油气工业化开发效果[5]。近年来，在体积压裂过程中，水平井分段压裂施工的规模和强度逐步增大，施工具有大排量、高砂比、高泵压、时间长和规模大等特点，如涪陵页岩气田焦页1HF井现场体积压裂施工用液量18 716 m^3，加砂量1 551 t，排量8~12 m^3/min，最高砂比27%[6]。根据玛湖MaHW1井井下鹰眼监测结果统计，约有75%以上的射孔孔眼具有明显的冲蚀特征，测量压裂冲蚀后孔眼直径8.72~47.00 mm(标准的初始孔径为8.00 mm)[7]。在高能压裂条件下，大量携砂压裂液以高速注入井筒，支撑剂颗粒在流体动力作用下反复冲击井筒内部管柱及工具组件，使套管壁厚减薄，强度下降[8]，特别是位于套管壁上的射孔孔眼更是冲蚀磨损的集中区域。冲蚀作用使得射孔孔眼持续扩径、形貌不规则化，致使孔眼摩阻显著降低，限流作用失效，进而导致段内裂缝分布极度不均，严重破坏压裂均衡性。与此同时，在暂堵转向压裂工艺中，孔眼冲蚀所引起的孔径扩大也大幅提升了暂堵剂的封堵难度，现场数据显示，暂堵球在严重冲蚀孔眼中的入孔效率下降超过40%[9]；另一方面，冲蚀后孔眼处局部流场扰动增强，暂堵剂在靠近孔眼时更易被流体剪切冲走，导致入孔效率下降、封堵效果变差，从而影响下一簇裂缝的均衡起裂与转向扩展。

综上所述，体积压裂过程中，高泵压、高排量、高砂比下射孔孔眼冲蚀问题突出，因此，厘清射孔孔眼冲蚀的主控因素及其影响规律，是提升压裂均衡性、保障工程安全与提高储层动用效率的关键技术环节。现场工况复杂多变，孔眼冲蚀受排量、砂比、压裂液性能及支撑剂性质等多因素共同影响，现有研究尚未形成系统完整的认识框架。本文围绕射孔孔眼冲蚀行为，系统论述相关的理论基础、数值模拟方法与物理模拟手段，重点探讨体积压裂过程中的孔眼冲蚀机理，梳理排量、砂比、砂粒尺寸等参数对冲蚀程度的影响规律，揭示其对压裂均衡性与暂堵封孔效率的制约机制，指明未来冲蚀磨损防护及研究方向，为构建高效、均衡、可控的体积压裂技术体系提供理论支持与实践参考。

1　射孔孔眼冲蚀理论

体积压裂过程中，射孔孔眼冲蚀问题已成为影响压裂效果的关键因素。如图1所示，射孔枪在套管上射孔后，压裂阶段注入高压流体在地层中形成裂缝，但压裂液携带的支撑剂颗粒会对孔眼产生显著的冲蚀作用[10]，图2为射孔孔眼冲蚀前后示意图[11]。Cramer等[12]通过现场实验发现冲蚀程度与通过孔眼的支撑剂量呈线性关系，并提出了水力射孔直径的概念。研究表明，射孔冲蚀包含圆度冲蚀和直径冲蚀两个阶段，其中圆度冲蚀阶段摩阻急剧降低，是导致限流失效的主要原因。Crump等[13]通过环路流动实验装置，对比分析了清水和携砂液对孔眼摩阻的影响，证实了冲蚀过程的阶段性特征。El-Rabba等[14]进一步研究

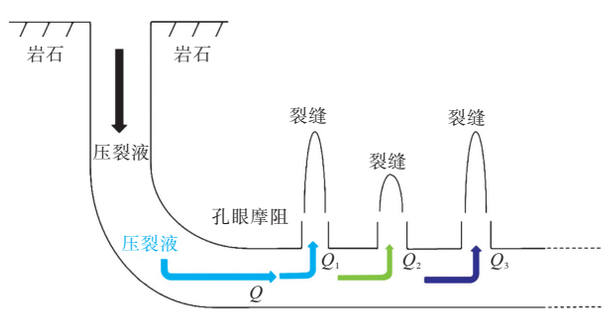


图1　水力压裂流体分布及射孔摩阻示意图

Fig. 1　Schematic diagram of pressure and fluid distribution during a hydraulic-fracturing treatment

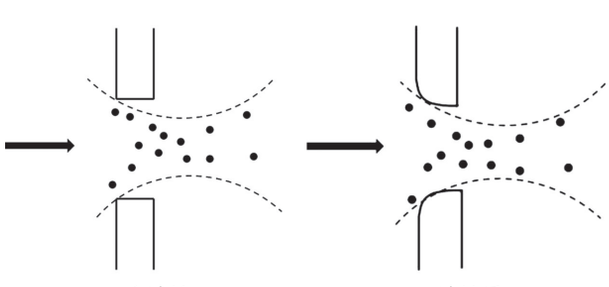


图2　射孔孔眼冲蚀前后示意图[11]

Fig. 2　Schematic diagram of perforation erosion[11]

发现，流量系数受砂粒径、含量、孔眼直径、流体黏度、注入流量和时间等多因素综合影响。基于这些实验数据，Long等[15]建立了半经验预测模型，将孔眼直径表示为支撑剂浓度和流速平方的函数，实现了对孔眼直径和流量系数动态变化的量化预测。这些研究不仅揭示了射孔冲蚀的机理特征，更为优化压裂工艺参数提供了重要理论依据，对提高非常规油气开发效率具有重要指导意义。

国内外学者基于实验数据建立了多种射孔孔眼冲蚀计算模型，用于预测摩阻系数和直径的动态变化以指导限流压裂设计，如表1所示。这些模型呈现出参数考虑逐步完善的趋势：早期Cramer模型[12]和Romero模型[16]仅考虑流经孔眼的支撑剂质量这一单一因素；El-Rabba模型[14]将影响因素扩展到流体黏度、孔眼直径、冲蚀时间和排量四个参数；而Long模型[15]则进一步聚焦于孔眼流速、支撑剂浓度和冲蚀时间三个关键变量。然而，射孔孔眼冲蚀本质上是一个复杂的固液两相作用问题，受限于现有实验技术难以完全模拟真实压裂环境，当前模型主要局限于预测流量系数和直径变化，尚无法准确表征实际工程中孔眼的三维冲蚀形态特征，这一局限性制约了模型在现场应用中的精确性，也凸显了未来研究需要突破的方向。

表1 射孔孔眼冲蚀模型总结表

Tab. 1 Summary of perforation erosion models

学者	考虑参数	模型
Cramer[12]	过射孔孔眼支撑剂质量	$D = d + 4.29 \times 10^{-6} m$
El-Rabba[14]	流体黏度、射孔孔眼直径、冲蚀时间、射孔孔眼排量	$K_d = \left[\left(1 - e^{-2.2d/\mu^{0.1}}\right)^{0.8} + N\right]^{0.5}$，$N = f(q,\mu,d,t)$
Romero[16]	过射孔孔眼支撑剂质量	$K_d = 0.56 + 1.65 \times 10^{-4} m$，$K_d \leqslant 0.89$，$D = d + 4.29 \times 10^{-6} m$
Long[15]	射孔孔眼流速、支撑剂浓度、冲蚀时间	$\mathrm{d}D/\mathrm{d}t = \alpha C v^2$，$\mathrm{d}K_d/\mathrm{d}t = \beta C v^2\left(1 - K_d/K\right)$

表中，D为冲蚀后射孔孔眼直径，mm；d为初始射孔孔眼直径，mm；m为过射孔孔眼支撑剂质量，kg；K_d为冲蚀过程中射孔孔眼流量系数；μ为流体黏度，mPa·s；N为无量纲参数，计算公式参考El-Rabba模型；q为射孔孔眼排量，m^3/min；t为冲蚀时间，min；v为射孔孔眼流速，m/s；C为支撑剂浓度，kg/m^3；K为最大射孔孔眼流量系数；α、β为射孔孔眼冲蚀系数，由实验确定。

1.1 射孔孔眼冲蚀数值模拟

现场实验通常需要在特定的实验室或实验场地进行，受条件和设备限制较大。相比之下，数值模拟较为灵活和方便，具有成本低、难度小、可控性强、参数调整灵活、预测准确等优势。刘雁蜀等[17]基于数值模拟方法分析不同排量和含砂量情况下射孔孔眼附近的流场、颗粒的运动轨迹及射孔孔眼的冲蚀规律，为现场限流法压裂射孔参数优化提供了理论依据。许国文[18]通过计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）仿真揭示了射孔孔眼在注入侧的显著冲蚀现象（图3），指出其受携砂液排量、砂比、支撑剂粒径及孔径等因素共同影响。曾德智等[19]结合

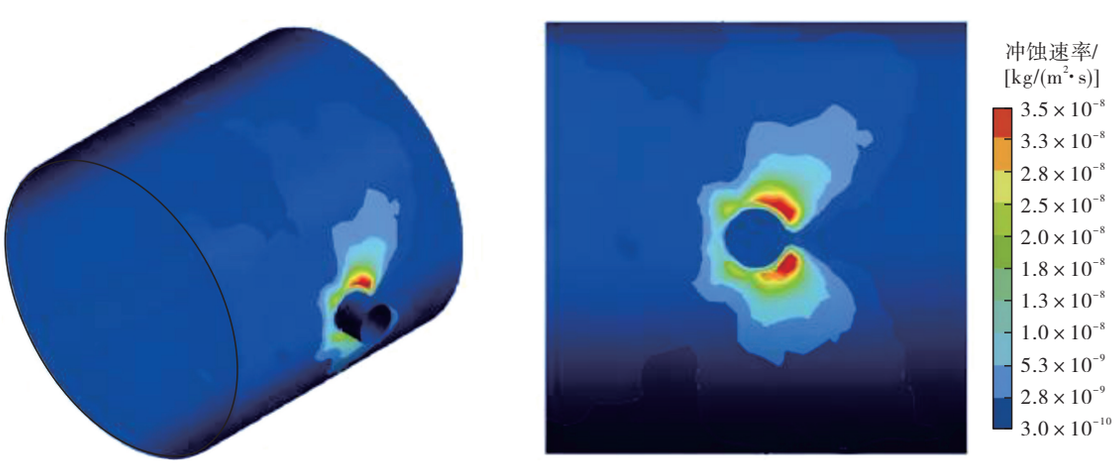


图3 基于CFD数值模拟方法模拟射孔孔眼冲蚀[18]

Fig. 3 Simulating perforation erosion based on Computational Fluid Dynamics[18]

E/CRC和Oka冲蚀模型分析了套管内流场特性,为限流压裂设计提供了重要依据。王文娟等[20]采用稠密离散模型(Discrete Displacement Partitioning Method,DDPM)进一步量化了流速、含砂量与粒径对单孔冲蚀的预测效果。李勇明等[21]研究发现,支撑剂浓度越高,初期冲蚀速度越快,但提高施工排量可优化限流作用,促进裂缝均衡扩展,这一结论为现场施工参数优化提供了理论支撑。Huang等[22]创新性地建立了考虑应力-渗流-裂缝-冲蚀的多场耦合模型,证实射孔冲蚀会不均匀扩大孔眼直径并重新分配流量,从而加剧裂缝扩展的不均匀性。Hu等[23]的三维CFD模型研究则进一步揭示了冲蚀位置、角度及注入速度对支撑剂分布的显著影响。射孔孔眼冲蚀具有明显的局部性特征,主要表现为入口侧的非对称扩径,且受施工参数和支撑剂特性的综合调控。虽然现有数值模型,如CFD、DDPM、CDEM(Combined Discrete Element Method)等已能较好预测冲蚀动态过程,但在支撑剂运移与冲蚀的长期耦合机制、多簇裂缝竞争进液与冲蚀反馈关系的定量表征等方面仍需深入研究,以进一步完善理论模型并指导现场实践。

1.2　射孔孔眼冲蚀物模实验

构建现场尺度射孔压裂冲蚀模拟平台,更能直观地观测真实射孔孔眼冲蚀现象,有助于建立射孔孔眼冲蚀理论模型。近年来,针对射孔孔眼冲蚀问题的实验研究取得了重要进展。臧传贞等[24]通过井下成像技术发现,采用180°相位角射孔可显著改善射孔孔眼磨蚀均匀性,提升各簇裂缝起裂均衡性。李臻等[25]采用高速液固两相流实验结合三维轮廓扫描,系统揭示了射孔孔眼扩孔规律。为更真实模拟现场条件,Wu等[26]搭建了地面冲蚀模拟系统,定量研究了不同工况下的冲蚀特征。张景臣等[27]则进一步构建了大型现场模拟装置,在流速191 m/s和压力35 MPa条件下,验证了施工参数对孔眼冲蚀的关键影响。在暂堵技术研究方面,王博等[28]通过5种孔眼模型实验,阐明了强冲蚀后暂堵参数与封堵效果的关联规律;滕卫卫等[29]通过极限冲蚀试验结合三维建模,优化了暂堵球直径并完成现场验证。Robinson等[30]综合运用CT扫描和声学成像技术(图4),建立了完善的现场冲蚀评估方法。这些研究不仅深化了对射孔孔眼冲蚀机理的认识,更为优化射孔设计、改进暂堵工艺提供了重要实验依据,对提升非常规油气储层改造效果具有重要指导价值。

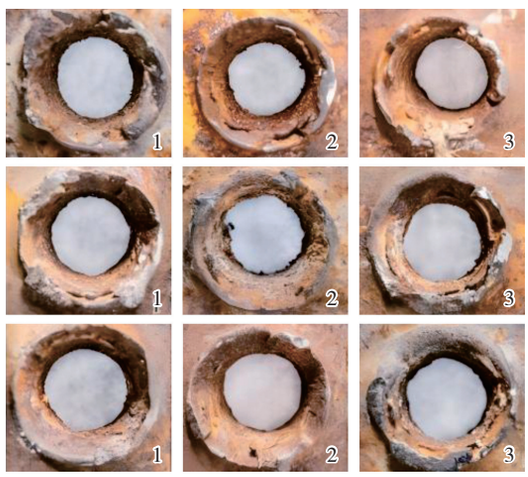


图4　现场真实冲蚀后孔眼形态(3簇9孔)[30]

Fig. 4　Photo of perforation shape after erosion[30]

2　射孔孔眼冲蚀原因

2019年至今,体积压裂技术在总结先前技术试验效果的基础上,以技术组合为途径,形成了一整套以段内多簇、小簇间距、限流射孔、暂堵转向、大排量泵注、高强度加砂、石英砂替代陶粒和滑溜水连续加砂为核心的体积压裂工艺[31-32]。与以往的体积压裂参数比较,这一阶段的关键参数指标均有更进一步提升,其中单段压裂簇数增加至6~12簇,簇间距减小至10~15 m,施工排量增大至12~15 m^3/min,加砂强度达到3 m^3/m,石英砂和滑溜水的使用比例大幅度提升。随着压裂工艺的发展,大规模施工和压裂成网的客观需求,加剧了射孔孔眼冲蚀问题的严峻程度,严重影响和制衡了段内多裂缝的均衡扩展和储层的整体改造效果。

2.1　大规模加砂

大规模加砂会造成射孔孔眼冲蚀。为更有效地开发非常规油气藏,现场施工规模已普遍达到“万方液、千方砂”水平。“万方液”指在体积压裂作业中注入的液体量达到上万方的规模,增加液量可以扩大裂缝的范围和长度,提高压裂液对地层的造缝能力和覆盖面积,从而形成更大规模的填砂裂缝;支撑剂注入规模达到“千方砂”的级别,可以使裂缝保持一定开度和长期导流能力。通过不断优化压裂工艺和增大施工规模,可以更好地应对复杂的地层条件,实现油气资源的有效开发和利用,但大规模加砂会增加压裂液中固体颗粒的含量(支撑剂),随流体携带对射孔孔眼造成冲蚀作用。随着支撑剂的冲刷磨蚀,射孔孔眼直径会逐渐增大,导致孔径不均匀,进而影响裂缝的扩展。

2.2　密切割压裂

密切割压裂的射孔布置会加剧射孔孔眼冲蚀。密切割压裂通过在水平井上设置更加紧密的压裂簇

来提高非常规油气储层的开采效率[33]，如图5所示，将多个压裂簇均匀分布在水平井段上，将储层“剁碎”，从而增加裂缝与储层的接触面积，以获得较好的体积改造效果[34]。近年来，体积压裂中井距与簇间距不断缩小，特别是针对多层或厚层油气藏，采用更密集的射孔簇，以提高油气层改造体积和最终采收率。尽管缩小簇间距可以增加裂缝的覆盖面积和密度，但也会带来裂缝扩展不均匀问题，更小的簇间距意味着更强的缝间应力干扰，导致裂缝形态和分布不理想，增加了缝内流体流动阻力。多个射孔簇会使局部区域的压力显著增加，导致流体流速加快，进而对射孔孔眼壁面的冲击力增强，加剧射孔孔眼冲蚀，致使限流失效和暂堵效果变差。

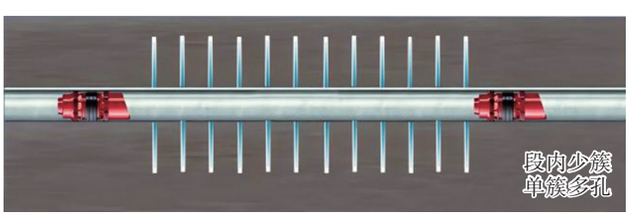


图5 密切割分段压裂示意图

Fig.5 Schematic diagram of closely spaced multi-stage fracturing

3 射孔孔眼冲蚀主控因素及其影响规律

影响射孔孔眼冲蚀的因素较多，主要因素包括流体性质、支撑剂特性、射孔参数、流体压力、施工排量以及岩石特性等。实际施工过程中，需要综合考虑这些因素，采取适当的措施，尽可能减少射孔孔眼冲蚀程度，确保压裂施工安全和压裂改造效果。

3.1 施工排量

施工排量对射孔孔眼冲蚀的影响是一个涉及流体动力学、冲蚀动力学和工程实践的多维度过程。研究表明，排量增加会显著提高孔眼流速，王文娟等[20]和张景臣等[27]发现这种流速提升不仅增强了对孔眼壁面的机械冲蚀作用，还形成了具有方向性特征的集中冲蚀带。Wu等[26]通过对比不同排量下的冲蚀演变过程，揭示了低排量(0.6 m^3/min)时冲蚀会在支撑剂达到一定量后趋于稳定，而高排量下冲蚀持续发展的关键差异。Zeng等[35]则从孔眼冲蚀后的形态详细描述了流速变化导致的冲蚀形态演变规律，如图6所示，从低流速时的规则圆形扩径，到中流速的长椭圆形冲蚀，直至高流速下形成非对称的喇叭状冲蚀区。



(a) 40 m/s (b) 55 m/s (c) 70 m/s (d) 85m/s (e) 100 m/s

图6 不同流速冲蚀后的射孔孔眼形态图[35]

Fig. 6 Perforation morphology after erosion at different flow rates[35]

随着排量升高，压裂液流速增大，孔眼边缘剪切应力增强，局部紊流与回流结构加剧，显著提升了对孔壁的冲刷能力。同时，高排量下单位时间进入井筒的支撑剂颗粒增多、动能提高，颗粒冲击频率和强度同步上升，加剧孔眼材料剥蚀和变形，导致孔径扩展、形貌失控，形成“喇叭口”结构，摩阻下降、限流失效。虽然高排量有利于改善裂缝扩展均匀性，但会显著加剧射孔孔眼的冲蚀程度并改变冲蚀形貌特征，在实际工程中需要根据具体工况优化排量参数。

3.2 支撑剂类型

在压裂过程中，支撑剂作为维持裂缝张开状态的关键材料，其类型和特性对射孔孔眼冲蚀具有重要影响。支撑剂类型主要包括石英砂、陶粒、酚醛树脂覆膜砂砾等，它们在大小、形状和材料特性上存在显著差异[36-37]，这些差异直接决定了支撑剂在压裂液中的悬浮性能以及在进入射孔孔眼和裂缝过程中的行为特征。研究表明，支撑剂的硬度是影响孔眼冲蚀的关键因素，较硬的支撑剂颗粒(如陶粒)会对孔壁造成更严重的磨损和扩大。张景臣等[27]通过实验发现陶粒的冲蚀速率明显高于石英砂，Wu等[26]的研究进一步证实了这一现象，指出陶粒因其较高的强度和硬度特性，在通过射孔孔眼时会产生更强的冲蚀作用。相比之下，石英砂虽然冲蚀作用较弱，但由于其强度不足，在与套管接触时容易发生破碎。此外，支撑剂的形状和大小也会显著影响冲蚀效果，尖锐或角锥形状的颗粒在高速流体中会产生更强烈的冲击作用，从而加剧对孔壁的冲蚀。

3.3 支撑剂粒径

在压裂作业中，支撑剂粒径作为关键参数直接影

响射孔孔眼的冲蚀程度和施工效果。较大粒径的支撑剂颗粒由于具有更大的质量和惯性,在进入射孔孔眼时会产生更强的冲击力,显著加剧孔壁的冲蚀磨损,同时可能引发局部堆积形成砂堵,严重影响施工安全和裂缝扩展形态。为降低砂堵风险,现场常采用段塞式加砂工艺,并控制支撑剂粒径分布,但粒径不均仍可能导致颗粒滞留或过度冲蚀。

王文娟等[20]的研究揭示了粒径变化与冲蚀速率的非线性关系,发现随着粒径增大,来流位置冲蚀减弱而其他部位呈现先减后增的趋势。Wu等[26]和张景臣等[27]的研究结果看似矛盾,前者认为小粒径冲蚀速率更高,后者则指出大粒径(20/40目)在早期冲蚀阶段更为显著,这种差异可能与实验条件和观察时段有关。Zeng等[35]通过系统研究发现,随着支撑剂粒径增大,冲蚀形成的漏斗状孔眼直径明显扩大,如图7所示,其中20/40目和30/50目粒径造成的形貌差异尤为显著,而较小粒径(70/140目和40/70目)的冲蚀效果相近。值得注意的是,小粒径颗粒虽单个冲击力弱,但数量大、分布广,易在孔眼边缘产生持续磨蚀,长期累积也会诱发冲蚀破坏。总之,支撑剂粒径的选择需要综合考虑瞬时冲击与长期磨蚀的平衡,以及施工安全与裂缝导流能力的双重需求,通过优化粒径分布来实现最佳的压裂效果。支撑剂粒径的选择是压裂工程中的重要研究课题。



(a) 20/40 目　(b) 30/50 目　(c) 40/70 目　(d) 70/140 目

图7　不同支撑剂粒径冲蚀后的射孔孔眼形态图[35]

Fig. 7 Perforation morphology after erosion with different proppant sizes[35]

3.4　支撑剂浓度

在加砂压裂过程中,支撑剂浓度(含砂比,含砂体积分数)作为关键施工参数直接影响射孔孔眼的冲蚀行为和程度。随着支撑剂浓度升高,单位体积携带的颗粒数量增多,颗粒间及颗粒与孔壁的碰撞频率显著提高,增强了对孔壁的冲刷作用。高浓度体系中,颗粒间的遮挡和串扰效应也导致局部流场紊乱,加剧孔眼边缘的不规则磨损,易形成扩径与缺口。此外,浓度升高还会提升流体的剪切应力与颗粒冲击能,导致孔壁材料出现塑性变形、微裂纹扩展等累积破坏效应,最终加速孔眼冲蚀演化过程。因此,支撑剂浓度对冲蚀的影响不仅体现在“量”的增加上,更体现在冲蚀机制的复合与强化。刘雁蜀等[17]通过分析发现,当含砂体积分数达到15%时射孔孔眼冲蚀最为严重,并确定了8 m^3/min为该工况下的安全施工排量。曾德智等[19]的研究进一步指出,含砂比的增大会显著提升射孔孔眼及其附近管壁的冲蚀速率,建议在高排量作业时采用低含砂比以减轻冲蚀损害。不同学者对冲蚀速率与支撑剂浓度的关系进行了深入探讨:王文娟等[20]观察到冲蚀速率随质量分数增加呈现先升后降的趋势;张景臣等[27]则发现冲蚀速率在砂比7%~16%范围内相对稳定,超过该阈值后急剧上升,建议限流压裂时将砂比控制在16%以内;Zeng等[35]通过实验揭示了不同砂浓度下的典型冲蚀形貌特征,如图8所示,发现高含砂条件下射孔孔眼呈现不对称漏斗状,入口侧冲蚀程度显著大于孔眼内部,且随着砂浓度增加,颗粒间相互作用增强导致射孔两侧冲蚀加剧,左侧冲蚀面积明显扩大。



(a) 砂浓度5%　(b) 砂浓度8%　(c) 砂浓度11%　(d) 砂浓度14%　(e) 砂浓度17%

图8　不同砂浓度冲蚀后的射孔孔眼形态图[35]

Fig. 8 Perforation morphology after erosion with different proppant concentrations[35]

支撑剂浓度与施工排量存在交互作用，在高排量条件下应采用“高排量-低含砂比”的优化组合方案，以平衡裂缝支撑效果与井筒完整性保护的双重需求。这些研究结果为现场施工提供了重要指导，建议将含砂比控制在5%~15%的安全范围内，以有效降低射孔孔眼冲蚀风险。

3.5 射孔角度

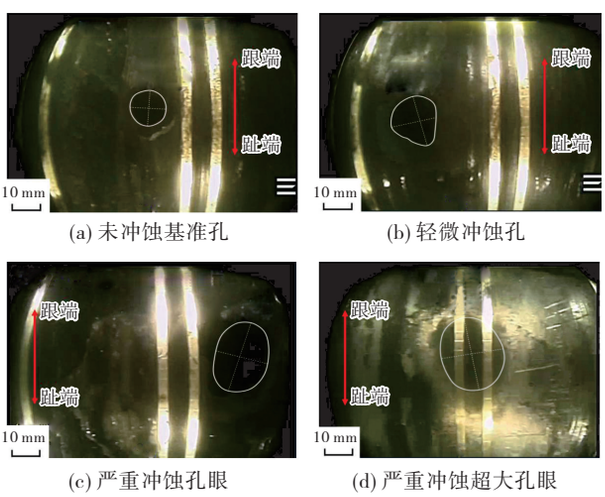
射孔角度是指在进行射孔操作时，射孔工具与井壁之间的夹角或入射角度，这一角度决定了射孔在地层中形成的裂缝方向和裂缝的迂曲形态。由于重力作用，低边射孔角度会使支撑剂以更直接、更强烈的冲击力作用于孔眼壁面，显著增加磨损和扩径程度，而过大或过小的射孔角度则会导致流体分配不均，加剧冲蚀风险。郭晓东等[38]通过对比30°、60°、90°、120°和150°这5种射孔角度发现，射孔角度90°时冲蚀速率最低，加密射孔后80°角度能使各簇间冲蚀速率差异最小，有效改善液量分配不均问题。Snyder等[39]的研究进一步证实重力对射孔冲蚀的影响，发现低边射孔孔眼冲蚀程度明显强于高边，建议采用定向射孔技术实现支撑剂均匀分布。Eckdahl等[40]的研究则表明，当大部分射孔孔眼位于井筒上部时，簇间冲蚀面积变化较小，0°~180°定向射孔虽然呈现对称分布，但冲蚀后面积差异仍可达10%左右。

优化射孔角度设计对控制冲蚀程度和改善流体均匀分布至关重要，其中近垂直角度（80°~90°）的射孔方式既能降低冲蚀速率，又能保证各射孔簇间的均衡进液，是实现高效压裂的关键技术参数。

4 射孔孔眼冲蚀防护

在加砂压裂过程中，高流速、高泵压和高砂比的客观条件导致射孔孔眼冲蚀现象不可避免。孔眼冲蚀防护需从结构优化、参数控制与材料干预三方面协同实施。首先，在结构层面可通过优化射孔方式（如改变孔径、孔距或采用非对称布孔）分散流体冲击集中区域，降低局部冲蚀强度[41]；其次，在参数控制上，合理匹配排量与砂比，避免极端工况诱发高能冲蚀，同时通过阶段调节砂浓度和流速，平衡改造强度与器械耐久性[42]；再次，材料干预方面，选用高强耐蚀套管材料或在孔壁涂覆耐磨涂层可有效延缓磨损进程[43]。针对暂堵阶段冲蚀导致的孔眼扩径问题，采用绳结式暂堵剂，因其具备球结稳封与双翼导向结构，可显著提升入孔稳定性与封堵效率，适应异形孔眼，降低冲蚀影响[44]。因此，多维度协同防护是保障孔眼结构完整性、提升压裂均衡性与作业安全性的关键路径。

目前，井下相机鹰眼监测技术[45]（图9）、分布式声波传感（DAS）技术[46-47]和分布式温度传感（DTS）技术[40]被广泛应用于评估射孔孔眼冲蚀程度，通过实时监测和调整压裂参数来最小化冲蚀影响。Cramer等[48]结合DAS、DTS、施工压力分析及射孔成像技术，发现支撑剂加入后井底压力下降，跟部射孔孔眼冲蚀更明显；Roberts等[49]基于鹰眼监测技术分析大量射孔数据，指出跟端射孔孔眼比趾端冲蚀更严重，支撑剂分布不均匀。这些研究为优化射孔设计和压裂施工提供了重要依据，有助于减少射孔孔眼冲蚀的不利影响。



(a) 未冲蚀基准孔　(b) 轻微冲蚀孔

(c) 严重冲蚀孔眼　(d) 严重冲蚀超大孔眼

图9 鹰眼监测的井下视频成像技术[45]

Fig. 9 The downhole video imaging technology[45]

国内外学者针对水平井段内多簇压裂的均衡改造问题，提出了限流和暂堵相结合的解决方案。限流压裂技术是水平井分段压裂实现多裂缝同步起裂常用方法，通过减少段内射孔数目来提高射孔孔眼摩阻[50-51]，然而，由于严重的射孔孔眼冲蚀效应，射孔孔眼孔径增大，导致限流失效，无法有效保持较高的射孔摩阻。射孔孔眼冲蚀影响限流压裂的扩展效果，降低压裂的均匀性和效率，这与限流技术的设计初衷背道而驰。为解决限流失效问题，孔眼暂堵技术应运而生，该技术通过泵入可降解暂堵材料，选择性封堵已冲蚀扩径的优势进液射孔簇，迫使压裂液转向未充分改造的射孔簇，从而提高段内改造的均匀性。“限流+暂堵”的组合方案，既利用了限流技术的初始分流优势，又通过暂堵技术弥补了因孔眼冲蚀导致的限流失效，为非常规油气储层的均衡改造提供了有效的技术路径。

5 结论与认识

近年来，伴随着国内外油气开发由常规进入非常规领域，压裂施工规模和作业强度逐步增大，使得射

孔孔眼冲蚀问题更为突出。聚焦射孔孔眼冲蚀的数值模拟和室内实验研究,阐述射孔孔眼冲蚀的主控因素及冲蚀规律,主要结论与认识如下。

1)非常规油气开采多采用段内多簇、小簇间距、限流射孔、暂堵转向、大排量泵注、高强度加砂为核心的体积压裂技术,由于密切割工艺和大规模加砂,射孔孔眼冲蚀问题更加突出。为提升孔眼抗冲蚀能力、保障压裂均衡性,在结构方面应优化孔径、孔距与布孔方式以分散冲击;参数上匹配排量与砂比;材料上可采用高强耐蚀套管或耐磨涂层延缓磨损;暂堵阶段优选绳结式暂堵剂,可适应异形孔眼,提升封堵稳定性与抗冲蚀能力。

2)施工排量、支撑剂类型、支撑剂粒径、支撑剂浓度和射孔角度对射孔孔眼冲蚀程度均有一定影响,冲蚀后射孔孔眼由圆形变为喇叭形。增大施工排量、支撑剂浓度,采用陶粒支撑剂和常规螺旋射孔,均会引起射孔孔眼冲蚀程度增强。为降低射孔孔眼冲蚀程度,建议现场压裂施工过程中使用高目数的石英砂支撑剂和定向射孔技术。

3)目前常用限流和暂堵的方法来提高非常规油气水平井段内均衡改造效果,但大排量、高砂比、高泵压等因素造成的射孔孔眼冲蚀,使得限流失效或暂堵失败,进一步导致各射孔簇间流体竞争,增大了各射孔簇同步起裂及均衡扩展的难度。“限流+暂堵”的协同方案,将限流技术的初始分流优势与暂堵技术的持续封控能力有机结合,实现了裂缝动态调控与均衡改造,不仅突破了孔眼冲蚀导致的限流失效瓶颈,也为非常规储层高效开发提供了科学指导与工程指引。

参考文献

[1]李国欣,雷征东,董伟宏,等.中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):1-11.
LI Guoxin, LEI Zhengdong, DONG Weihong, et al. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1):1-11.

[2]何希鹏,张培先,高玉巧,等.中国非常规油气资源效益开发面临的挑战与对策[J].中国石油勘探,2025,30(1):28-43.
HE Xipeng, ZHANG Peixian, GAO Yuqiao, et al. Challenges and countermeasures for beneficial development of unconventional oil and gas resources in China[J].China Petroleum Exploration,2025,30(1):28-43.

[3]吴奇,胥云,张守良,等.非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J].石油学报,2014,35(4):706-714.
WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4):706-714.

[4]邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J].地质学报,2015,89(6):979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J].Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6):979-1007.

[5]蒲春生,郑恒,杨兆平,等.水平井分段体积压裂复杂裂缝形成机制研究现状与发展趋势[J].石油学报,2020,41(12):1734-1743.
PU Chunsheng, ZHENG Heng, YANG Zhaoping, et al. Research status and development trend of the formation mechanisms of complex fractures by staged volume fracturing in horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1734-1743.

[6]贾长贵.页岩气功勋井焦页1HF增强型体积压裂突破十三年回顾与启示[J].天然气工业,2025,45(5):87-101.
JIA Changgui.Thirteen-year review and insights of ESRV fracturing in shale gas reservoirs: breakthroughs from the pioneer well JY1HF[J].Natural Gas Industry,2025,45(5):87-101.

[7]张士诚,李建民,许江文,等.准噶尔盆地非常规储层水力压裂监测技术进展[J].天然气工业,2025,45(4):70-84.
ZHANG Shicheng, LI Jianmin, XU Jiangwen, et al. Progress in monitoring technologies for unconventional reservoir hydraulic fracturing in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2025,45(4):70-84.

[8]王飞文,李军之,相志鹏,等. 压裂过程中脱接喷砂器处套管冲蚀模拟与对策[J]. 新疆石油天然气,2023,19(3):57-65.
WANG Feiwen, LI Junzhi, XIANG Zhipeng, et al. Simulation and countermeasures of casing erosion at downhole decoupled sandblaster during fracturing[J].Xinjiang Oil & Gas,2023,19(3):57-65.

[9]李永明,马健,栗铁峰,等.页岩水平井分段多簇缝口暂堵参数优化以川南下寒武统筇竹寺组页岩为例[J].西南石油大学学报(自然科学版),2024,46(6):137-145.
LI Yongming, MA Jian, LI Tiefeng, et al. Optimization of dynamic fracture plugging parameters in Lower Cambrian Qiongzhusi shale, southern Sichuan basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(6):137-145.

[10]PARSI M, VIEIRA R E, KESANA N, et al. Ultrasonic measurements of sand particle erosion in gas dominant multiphase churn flow in vertical pipes[J]. Wear, 2015, 328:401-413.

[11]KLIAFAS Y, HOLT M.LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90 bend[J].Experiments in Fluids, 1987,5(2):73-85.

[12]CRAMER D D.The application of limited-entry techniques in massive hydraulic fracturing treatments[C]//SPE Okla-

homa City Oil and Gas Symposium/Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, 1987: SPE-16189-MS.

[13] CRUMP J B, CONWAY M W. Effects of perforation-entry friction on bottomhole treating analysis[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(8): 1041-1048.

[14] EL-RABBA A M, SHAH S N, LORD D L. New perforation pressure-loss correlations for limited-entry fracturing treatments[J]. SPE Production & Facilities, 1999, 14(1): 63-71.

[15] LONG G, XU G. The effects of perforation erosion on practical hydraulic-fracturing applications[J]. SPE Journal, 2017, 22(2): 645-659.

[16] ROMERO J, MACK M G, ELBEL J L. Theoretical model and numerical investigation of near-wellbore effects in hydraulic fracturing[J]. SPE Production & Facilities, 2000, 15(2): 76-82.

[17] 刘雁蜀, 秦龙, 王治国, 等. 套管压裂过程中射孔孔眼冲蚀数值模拟[J]. 石油机械, 2015, 43(9): 66-69.
LIU Yanshu, QIN Long, WANG Zhiguo, et al. Numerical simulation of perforation hole erosion during cased hole fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(9): 66-69.

[18] 许国文. 连续油管水力喷射冲蚀数值模拟研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(6): 12-15.
XU Guowen. Numerical simulation research of coiled tubing hydraulic jet erosion[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(6): 12-15.

[19] 曾德智, 张思松, 田刚, 等. 加砂压裂过程中套管射孔孔眼抗冲蚀性能分析[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 204-213.
ZENG Dezhi, ZHANG Sisong, TIAN Gang, et al. Analysis of erosion resistance of casing perforation in the process of sand fracturing[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 204-213.

[20] 王文娟, 王治国, 仝少凯, 等. 基于DDPM的水力压裂套管射孔孔眼冲蚀预测[J]. 当代化工, 2023, 52(2): 398-402.
WANG Wenjuan, WANG Zhiguo, TONG Shaokai, et al. Prediction of perforation erosion of hydraulic fracturing casing based on DDPM[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(2): 398-402.

[21] 李勇明, 陈曦宇, 赵金洲, 等. 射孔孔眼磨蚀对分段压裂裂缝扩展的影响[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 52-59.
LI Yongming, CHEN Xiyu, ZHAO Jinzhou, et al. Influence of perforation erosion on multiple growing hydraulic fractures in multistage fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 52-59.

[22] HUANG G, HU X, ZHOU F, et al. A new multi-cluster fracturing simulation model coupled with perforation erosion: based on the continuous-discontinuous method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(6): 3887-3901.

[23] HU X, LI X, ZHOU F, et al. Simulation study on proppant transport in a horizontal wellbore considering perforation erosion[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 231: 212282.

[24] 臧传贞, 姜汉桥, 石善志, 等. 基于射孔成像监测的多簇裂缝均匀起裂程度分析——以准噶尔盆地玛湖凹陷致密砾岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 394-402.
ZANG Chuanzhen, JIANG Hanqiao, SHI Shanzhi, et al. An analysis of the uniformity of multi-fracture initiation based on downhole video imaging technology: a case study of Mahu tight conglomerate in Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 394-402.

[25] 李臻, 李真, 程嘉瑞, 等. 高速射流射孔孔眼冲刷腐蚀扩孔规律实验研究[J]. 山东化工, 2022, 51(20): 1-4.
LI Zhen, LI Zhen, CHENG Jiarui, et al. Experimental study on erosion of perforation tunnel in high speed jet flow[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(20): 1-4.

[26] WU B, ZHOU F, WANG M, et al. Field-Scale experimental study on the perforation erosion in horizontal wellbore under real fracturing conditions[J]. Processes, 2022, 10(6): 1058.

[27] 张景臣, 吕振虎, 石善志, 等. 套管孔眼压裂冲蚀大型现场实验研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(3): 85-91.
ZHANG Jingchen, LV Zhenhu, SHI Shanzhi, et al. Large-scale field experimental study on casing perforation erosion during fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(3): 85-91.

[28] 王博, 古小龙, 李文霞, 等. 强冲蚀不规则射孔孔眼封堵规律实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(6): 46-53.
WANG Bo , GU Xiaolong, LI Wenxia, et al. Experimental study on plugging of severely eroded irregular perforated hole [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2023, 38(6): 46-53.

[29] 滕卫卫, 古小龙, 王博, 等. 段内多簇暂堵压裂中暂堵球直径优化研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(5): 61-67.
TENG Weiwei, GU Xiaolong, WANG Bo, et al. Research on optimization of plugging ball diameter for multi-cluster temporary plugging fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(5): 61-67.

[30] ROBINSON S, LITTLEFORD T, LUU T, et al. Acoustic imaging of perforation erosion in hydraulically fractured wells for optimizing cluster efficiency[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2020: SPE-199718-MS.

[31] 赵金洲, 任岚, 蒋廷学, 等. 中国页岩气压裂十年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 121-142.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, JIANG Tingxue, et al. Ten years of gas shale fracturing in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 121-142.

[32] 金智荣, 黄越, 杜浩然, 等. 页岩储层水平井密切割压裂射孔参数优化方法[J]. 石油机械, 2023, 51(6): 89-96.
JIN Zhirong, HUANG Yue, DU Haoran, et al. A perforating parameter optimization method for horizontal well multi-cluster fracturing in shale reservoirs [J]. China Petroleum

Machinery,2023,51(6):89-96.

[33]韩济,蔺文浩,宗亭良,等.水平井密切割压裂射孔参数优化方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(22):142-144.
HAN Ji, LIN Wenhao, ZONG Tingliang, et al. Research on optimization method of perforating parameters for small cluster-spacing fracturing in horizontal wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(22): 142-144.

[34]钟林,冯桂弘,朱和明,等.压裂球座结构优化分析及耐冲蚀研究[J].表面技术,2021,50(6):213-219.
ZHONG Lin, FENG Guihong, ZHU Heming, et al. Structural optimization analysis and erosion resistance study of frac ball seat[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 213-219.

[35]ZENG D, ZHANG S, LI J, et al. An experimental study on casing perforation erosion during sand fracturing[J]. Wear, 2023, 528: 204980.

[36]陈思源,刘浩,金衍,等.压裂支撑剂发展综述与展望[J].石油科学通报,2023,8(3):330-346.
CHEN Siyuan, LIU Hao, JIN Yan, et al. Review and prospect of fracturing proppant development[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(3): 330-346.

[37]朱亚军,孟令韬,赵健,等.功能性压裂支撑剂研究进展与应用现状[J].石油化工应用,2023,42(11):1-4.
ZHU Yajun, MENG Lingtao, ZHAO Jian, et al. Research progress and application status of functional fracturing proppants[J]. Petrochemical Industry Application, 2023, 42(11): 1-4.

[38]郭晓东,程垒明,张景臣,等.定向射孔条件下孔眼冲蚀数值模拟研究[J].新疆石油天然气,2022,18(4):56-61.
GUO Xiaodong, CHENG Leiming, ZHANG Jingchen, et al. Numerical simulation study of hole erosion under directional perforating conditions[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(4): 56-61.

[39]SNYDER J, CRAMER D, WHITE M. Improved treatment distribution through oriented perforating[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, Virtual, 2021: SPE-204203-MS.

[40]ECKDAHL R, VIGRASS A, SINGH A, et al. Assessment of limited entry cluster distribution effectiveness and impactful variables using perforation erosion measurements[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2022: SPE-209122-MS.

[41]FAN Q, MA Y, WANG J, et al. Investigation into the perforation optimization in conglomerate reservoir based on a field test[J]. Processes, 2023, 11(8): 2446.

[42]王波,金成洪,刘江,等.深层煤系气水平井多簇射孔分段压裂参数优化——以准噶尔盆地侏罗系白家海地区为例[J].煤田地质与勘探,2025,53(4):86-93.
WANG Bo, JIN Chenghong, LIU Jiang, et al. Parameter optimization for multistage horizontal well fracturing based on multicluster perforation for deep coal measure gas: a case study of the Jurassic Baijiahai area in the Junggar Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(4): 86-93.

[43]张思松,曾德智,潘玉婷,等.大规模加砂压裂管柱冲蚀研究进展[J].新疆石油天然气,2022,18(3):65-72.
ZHANG Sisong, ZENG Dezhi, PAN Yuting, et al. Research progress on string erosion during massive sand fracturing[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(3): 65-72.

[44]吴宝成,周福建,王明星,等.绳结式暂堵剂运移及封堵规律实验研究[J].钻采工艺,2022,45(4):61-66.
WU Baocheng, ZHOU Fujian, WANG Mingxing, et al. Experimental study on migration and plugging pattern of knot temporary plugging agent[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(4): 61-66.

[45]ROBERTS G, LILLY T B, TYMONS T R. Improved well stimulation through the application of downhole video analytics[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2018: SPE-189851-MS.

[46]MOLENAAR M M, HILL D, WEBSTER P, et al. First downhole application of distributed acoustic sensing (DAS) for hydraulic fracturing monitoring and diagnostics[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2011: SPE-140561-MS.

[47]TRUMBLE M, SINKEY M, MEEHLEIB J. Got diversion? Real time analysis to identify success or failure[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2019: SPE-194336-MS.

[48]CRAMER D, FRIEHAUF K, ROBERTS G, et al. Integrating DAS, treatment pressure analysis and video-based perforation imaging to evaluate limited entry treatment effectiveness[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2019: SPE-194334-MS.

[49]ROBERTS G, WHITTAKER J, MCDONALD J, et al. Proppant distribution observations from 20 000+ perforation erosion measurements[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 2020: SPE-199693-MS.

[50]ZHOU H, WU X, SONG Z, et al. A review on mechanism and adaptive materials of temporary plugging agent for chemical diverting fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 212: 110256.

[51]WANG B, ZHOU F, YANG C, et al. Experimental study on injection pressure response and fracture geometry during temporary plugging and diverting fracturing[J]. SPE Journal, 2020, 25(2): 573-586.

(修改回稿日期:2025-11-27　编辑:丁艳艳)