

页岩气分簇式射孔复杂故障控制方法研究

何庆钰^{1,2}

¹中石化经纬有限公司西南测控公司，四川 成都

²中国石化测录井重点实验室，山东 青岛

收稿日期：2025年2月13日；录用日期：2025年3月10日；发布日期：2025年3月21日

摘要

本文主要研究了页岩气分簇式射孔技术及其复杂故障控制方法。首先概述了页岩气开发现状与分簇式射孔技术应用现状。接着详细分析了页岩气分簇式射孔复杂故障类型及成因，探讨了技术、操作、设备与维护等方面导致故障的因素。根据复杂故障原因探讨了故障预防策略、故障诊断技术以及故障处理与应对措施，提出设备优化射孔方案设计、实时监测与预警系统等预防策略，以及针对不同故障的处理方法。之后阐述了复杂故障控制方法的实施流程、实施过程中的关键问题与解决方案。最后总结了研究成果，并对未来研究方向进行了展望。

关键词

页岩气，分簇射孔，复杂故障，多级点火

Research on Complex Fault Control Methods for Shale Gas Cluster Perforation

Qingyu He^{1,2}

¹Xi'nan Geosteering & Logging Company, SINOPEC Matrix Corporation, Chengdu Sichuan

²SINOPEC Key Laboratory of Well Logging, Qingdao Shandong

Received: Feb. 13th, 2025; accepted: Mar. 10th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

Abstract

This paper mainly studies the shale gas cluster perforation technology and its complex fault control methods. Firstly, it outlines the current status of shale gas development and the application status of cluster perforation technology. Then, it analyzes in detail the types and causes of complex faults in shale gas cluster perforation, and discusses the factors leading to faults in terms of technology, operation, equipment, and maintenance. Based on the causes of complex faults, strategies for fault

prevention, fault diagnosis technology, and fault handling and response measures are discussed. Proposals include equipment optimization perforation scheme design, real-time monitoring and early warning systems, as well as handling methods for different faults. Subsequently, the implementation process of the complex fault control method, key issues in the implementation process, and solutions are described. Finally, the research results are summarized, and the future research directions are prospected.

Keywords

Shale Gas, Clustered Perforating, Complex Faults, Multi-Stage Ignition

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 页岩气分簇式射孔技术概述

1.1. 页岩气开发现状

页岩气，因其清洁、高效的特性，在全球能源领域占据重要地位。美国在页岩气开发方面处于领先地位，主要得益于其先进的钻井和压裂技术。中国虽然起步较晚，但凭借丰富的资源和政府的支持政策，已在四川盆地和涪陵气田等地实现商业化生产，技术进步显著，对能源结构优化和环境保护产生了积极影响。

1.2. 分簇式射孔技术应用现状

分簇式射孔技术对提升页岩气产能和作业效率至关重要。该技术通过电缆将管串输送至油气井目的层，完成桥塞坐封和多簇射孔，为后续的压裂作业奠定基础。它以作业周期短、效率高、成本低等优势，在页岩气和致密油开采中得到广泛应用。国内技术的发展，如连续油管射孔、复合桥塞与射孔联作、多级点火控制等，进一步提高了作业的安全性和适用性。特别是在长水平段非均质性页岩储层的开发中，通过优化布储方式，实现了储层的立体改造。随着智能化技术的进步，分簇射孔技术正向智能化可控起爆方向发展，如国外的压力编程起爆系统，能够根据井况编译起爆程序，实现智能多级分簇起爆，为页岩气的高效开发提供了技术支持。

2. 页岩气分簇式射孔复杂故障类型及成因分析

2.1. 复杂故障类型概述

页岩气分簇式射孔作业中，复杂故障会导致施工效率低下甚至失败，主要故障类型包括：连续油管输送射孔中途起爆，因油管下放操作不当或套管防压闸门未开启导致憋压起爆；泵送工具串泵脱，因压力波动或工具串设计缺陷造成；桥塞不能坐封或坐封不丢手，受井筒条件或桥塞设计影响；射孔枪射孔不完全，由射孔枪性能不稳定或井筒条件恶劣引起。这些故障增加施工难度，还可能造成资源浪费和环境污染，深入研究其成因并制定控制措施对提高开发效率意义重大。

2.2. 射孔过程中的常见故障

在页岩气分簇式射孔作业中，常见故障有：射孔枪遇阻，因井底泥浆杂物、井壁结蜡、油管内壁死

油蜡质或井段变形；电缆及工具清洁问题，杂质影响正常运作，如电缆油污导电不良；卡枪问题，因井壁不规则、工具损坏或操作不当；点火失败，点火系统故障致射孔枪无法起爆；桥塞问题，桥塞未正确座封或失效影响压裂效果。这些故障与作业环境、工具质量、操作规范等因素有关，需严格控制各环节保障作业安全高效。

3. 页岩气分簇式射孔复杂故障控制方法

3.1. 故障预防策略

在页岩气分簇式射孔作业中，故障预防至关重要。设备定期检查与维护，详细检查射孔枪、桥塞、电缆等关键设备，清理灰尘残留物；优化射孔方案设计，根据地质条件和井眼轨迹设计射孔方案，选择合适桥塞和坐封工具；实时监测与预警系统，监控射孔作业参数，异常时预警；培训与意识提升，对作业人员培训，加强安全意识教育。这些策略可降低复杂故障风险，提高作业安全性和效率。

确保射孔枪性能稳定是页岩气分簇式射孔作业中极为关键的一环，以下是具体措施：

1) 射孔各项设备及参数的适应性调整

- 针对泥岩、页岩地层的适应性调整

射孔枪类型选择：在软地层中，应选择穿透力适中的射孔枪。这类地层较易穿透，但需要确保射孔孔道的清洁和完整性，避免孔道被地层碎屑堵塞。例如，可以使用带有较大孔径的射孔枪，以便在穿透地层后形成较大的孔道，减少堵塞风险。

射孔弹调整：选择改进射孔弹药型罩的高精度的射孔弹。改进射孔弹药型罩的射孔弹能够确保孔道的规则性，提高射孔效果，避免大量地层杂质返出，避免工具串被埋[1]。

射孔参数优化：适当降低射孔压力和射孔速度。在软地层中，过高的射孔压力可能导致地层碎屑飞溅，堵塞孔道。通过调整射孔压力和速度，可以减少这种风险，同时确保射孔孔道的清洁。

- 针对高压地层压力的适应性调整

射孔枪类型选择：选择耐高压的射孔枪。高压地层对射孔枪的耐压性要求较高，需要确保枪体能够在高压环境下正常工作。例如，可以使用高强度合金材料制造的射孔枪，其耐压能力可以达到 100 MPa 以上。

射孔参数优化：在高压地层中，需要严格控制射孔参数。例如，适当降低射孔速度，避免因过高的速度导致射孔枪与地层之间的摩擦力过大，从而影响射孔枪的耐压性。同时，需要确保点火系统的可靠性，避免因高压环境导致点火失败。

- 针对高温地层温度的适应性调整

射孔弹调整：选择耐高温的射孔弹。高温地层中，射孔弹需要能够承受高温环境下的点火和爆炸过程。一般建议 150°C 以下可以选择 RDX 火药射孔弹，150°C 以上应考虑使用 HMX 火药等高温射孔弹。

射孔参数优化：在高温地层中，需要严格控制射孔参数。例如，严格控制泵送速度，避免因为长时间泵送导致射孔枪暴露在高温中，从而影响射孔器材的性能。同时，需要确保点火系统的可靠性，避免因高温环境导致点火失败。

- 可溶桥塞选择考虑

- 1) 地层温度响应匹配

镁基合金桥塞：适用于温度 < 80°C 地层，溶解周期可控(24~72 小时适合多段压裂)

铝基复合桥塞：适配温度窗口为 80°C~120°C，需通过表面包覆技术调节溶解速率

增强型合金桥塞：针对 120°C~150°C 高温层，采用 Fe-Mn-Cu 合金体系，配比调整为 Mn (20~45 wt%)

2) 地层流体兼容性

矿化度 < 50,000 ppm 选用常规型(PH 值自适应)

矿化度 > 50,000 ppm 采用表面修饰桥塞:

添加 ZnO 涂层的酸性缓蚀型(适用于 $\text{Cl}^- > 80 \text{ g/L}$)

阳极氧化处理的碱性抗垢型($\text{HCO}_3^- > 5000 \text{ mg/L}$ 时选用)

3.2. 射孔过程中的操作规范

1) 下井操作控制

在将射孔枪下入井中的过程中，要严格控制下放速度。避免过快下放导致射孔枪与井壁碰撞，造成损坏。同时，要保持操作的平稳性，避免急起急停，防止因惯性力导致射孔枪内部结构受损或射孔弹移位。在下井过程中，要实时监测电缆的张力。如果电缆张力异常升高，可能意味着射孔枪遇到了阻碍，此时应立即停止下放，分析原因并采取相应措施，如缓慢活动管柱，尝试解除遇阻情况，而不是强行下压。

2) 泵送压力的选择与控制

一般在工程实践中，泵送压力的选择是水平井分簇射孔的一个关键点，现场泵送实践表明，泵送排量过大，易引起造斜点附件电缆扭曲变形，造成电缆上提遇卡工程复杂。此外，泵送速度过快，易导致管串在套变点“卡死”，造成管串遇卡工程复杂[2]。但泵送压力过低，又会导致工具串电缆冗余打扭遇卡，选择适当的泵送压力，是提高泵送分簇式射孔成功率的关键一环。

- 泵送压力的经验公式

以下提供一个适用于常规水平井的简化经验公式(需结合实际情况验证调整):

$$P_{\text{泵送}} \approx (f \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2) + \Delta P_{\text{工具}} + \Delta P_{\text{安全}}$$

$P_{\text{泵送}}$ —— 泵送压力 (MPa 或 psi)

f ：摩阻系数(与流体类型、雷诺数相关)

牛顿流体层流: $f = 16 \text{ Re}$; 湍流: $f \approx 0.02 \sim 0.05$

L : 水平段射孔段总长(米)

ρ : 流体密度(kg/m^3)

Q : 排量(m^3/min)

2) $\Delta P_{\text{工具}}$ —— 工具动态压降(MPa 或 psi)

简化为: $\Delta P_{\text{工具}} \approx (0.3 - 0.6) \cdot Q$ $\Delta P_{\text{工具}} \approx (0.3 - 0.6) \cdot Q$

(经验系数，工具摩擦与局部阻力总和)

3) $\Delta P_{\text{安全}}$ —— 安全余量(MPa 或 psi)

建议预留 10%~15% 的总压降

- 不同水平井条件下的泵送压力选择

• 长水平段页岩气井特点: 水平段较长，通常超过 1000 米，射孔枪输送距离远，摩擦阻力大。

泵送压力选择: 初始泵送压力: 在射孔枪进入水平段之前，需要较高的初始泵送压力来克服较大的摩擦阻力。输送过程中的泵送压力: 随着射孔枪逐渐进入水平段，摩擦阻力会逐渐增大。为了确保射孔枪顺利输送，泵送压力需要逐步增加。

注意事项: 在长水平段输送过程中，需要实时监测电缆张力和泵送压力，避免因压力过高导致井壁坍塌或设备损坏。同时，要根据井眼轨迹的变化及时调整泵送压力。

- 高倾角水平井特点：井眼倾角较大，通常在 60°以上，射孔枪在输送过程中受到的重力分量较大，摩擦阻力也相对较大。

泵送压力选择：初始泵送压力：由于高倾角井眼的重力分量较大，初始泵送压力需要较高，一般可在正常泵送压力基础上上浮 10%左右。输送过程中的泵送压力：在输送过程中，泵送压力需要根据井眼倾角和摩擦阻力的变化进行调整。

注意事项：在高倾角水平井中，射孔枪的输送稳定性较差，容易出现卡阻现象。因此，在输送过程中需要特别注意泵送压力的变化，避免因压力波动导致射孔枪卡阻。同时，要确保电缆的张力控制在合理范围内，避免电缆打扭或断裂。

泵送压力的实时监测与调整

实时监测：在射孔作业过程中，应配备高精度的压力传感器和电缆张力传感器，实时监测泵送压力和电缆张力的变化。通过监测数据，可以及时发现异常情况，如泵送压力过高或电缆张力异常增大。利用实时监测系统，可以绘制泵送压力和电缆张力随时间的变化曲线，为泵送压力的调整提供直观依据。

通过上述措施，能够有效确保射孔枪在页岩气分簇式射孔作业中的性能稳定，从而提高作业的成功率和效率，降低复杂故障的发生概率。

3) 防砂卡措施

在水平井分簇式射孔作业中，压裂常用覆膜砂容易返出进入井筒，导致阻流管砂卡，影响施工效率和安全性。

施工前维护设备：定期检查和维护电缆、阻流管、注脂头等设备，确保其处于良好状态，减少因设备故障导致的砂卡风险。

设计过程中应控制返排参数：在压裂施工后，合理控制返排参数，避免因返排过快导致砂粒回流，增加砂卡风险。

优化阻流管设计：适当增加阻流管内径，增加阻流管的过滤能力；降低密封脂的粘度，减小电缆粘附细砂的能力。适当增加注脂控制头注脂压力，保证电缆清洁[3]。

3.3. 故障诊断技术

故障诊断技术在页岩气分簇式射孔作业中很关键，包括实时监测和数据分析。实时监测技术通过传感器收集射孔过程参数，异常时报警；数据分析技术分析监测数据，建立故障预警模型，确定故障原因和位置。常见诊断方法有压力监测法、电缆张力监测法、声波检测法等。随着人工智能和大数据技术发展，引入智能算法和机器学习模型，实现智能化监测诊断，提高准确性可靠性。

3.4. 故障处理与应对措施

处理页岩气分簇式射孔复杂故障需多种措施。针对电缆打扭和管串遇阻，控制电缆下放速度和泵送排量；针对井筒内砂问题，施工前洗井通井，选用合适工具；针对复杂井眼轨迹，优化泵送工艺，选用可靠工具；在设计操作层面，考虑参数变化，制定合理施工方案并实时调整。这些措施可有效控制复杂故障，提高成功率和效率。

4. 复杂故障控制方法的实施与效果评价

4.1. 控制方法的实施流程

实施页岩气分簇式射孔复杂故障控制方法需遵循流程。先故障监测与识别，用监测技术找异常信号；再故障分析与定位，用专家评审和机器学习等手段分类定位；接着制定与实施应急控制策略，调整参数、

换部件、优工艺等；最后效果评估与反馈，全面评估处理效果，反馈优化后续方法。此流程可有效控制复杂故障，保障生产安全稳定。

4.2. 实施过程中的关键问题与解决方案

实施中遇关键问题及解决方案：连续油管输送射孔意外起爆，因油管下放操作不当或防压闸门未开，解决方案是控制下放速度、确保闸门开启；泵送工具串泵脱，因井斜变化、排量不当、摩擦力大等，优化泵送参数匹配；桥塞不能坐封或坐封不丢手，因桥塞质量或工具性能，采用高质量桥塞和工具并严格测试。这些措施可解决关键问题，提高施工效率质量。

4.3. 效果评价指标体系构建

构建效果评价指标体系很重要，包括：故障控制成功率，衡量方法有效性可靠性；生产效率提升率，对比实施前后生产效率；成本节约率，分析减少故障后的成本节约；安全性指标，评估作业安全性提升程度；环境友好性，考察对环境的影响；技术适应性，评价在不同条件下的适应性。此体系可全面系统评估实施效果，为优化改进提供依据，提升开采效益和可持续发展能力。

5. 结论与展望

通过对页岩气分簇式射孔复杂故障控制方法的研究得出结论：分簇射孔技术在页岩气水平井多段、分段压裂完井工艺中很重要，能有效提升产能，尤其在非常规油气资源开发中凸显重要性，多级点火分簇射孔技术提高了下井一次成功率，减少故障。针对复杂故障，本文提出控制方法，深入研究关键部件，揭示故障原因，提供解决方案，如电子选发开关技术提高射孔效率。研究成果具有理论实践意义，为未来研究提供参考。但页岩气开采复杂性不确定性对射孔作业要求更高，故障控制策略需进一步完善细化，以适应不同地质条件和开采需求。

参考文献

- [1] 颜湘庆, 赵昆, 黄晶, 等. 页岩油气水平井射孔枪串遇卡原因分析及处理措施[J]. 江汉石油职工大学学报, 2024, 37(4): 27-29.
- [2] 肖勇军, 宋毅, 陆应辉, 等. 川南页岩气套管变形井分簇射孔管串泵送工艺分析[J]. 石油矿场机械, 2021, 50(5): 66-72.
- [3] 张波, 刘云刚, 蔡锐, 等. 泵送桥塞射孔常见问题分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(17): 136-137.