

油气井射孔技术的现状与发展

刘卫民¹ 任庆阳²

1 陕西地矿物化探队有限公司 2 陕西地矿物化探队有限公司李新胜劳模创新工作室

DOI:10.12238/etd.v6i3.14408

[摘要] 本文聚焦于油气井射孔技术,深入探讨其现状与发展趋势。首先阐述了射孔技术在油气开采中的重要地位,接着分析了当前常用射孔技术的特点和应用范围,包括电缆输送射孔、油管输送射孔等。同时,探讨了射孔技术面临的挑战,如复杂地层适应性、射孔效率与质量等问题。通过对国内外研究动态的梳理,展望了射孔技术在智能化、高效化、环保化等方面的发展方向,旨在为油气井射孔技术的进一步研究和应用提供参考。

[关键词] 油气井; 射孔技术; 现状; 发展

中图分类号: TE934 **文献标识码:** A

The Current Status and Development of Perforation Technology in Oil and Gas Wells

Weimin Liu¹ Qingyang Ren²

1 Shaanxi Geological Mineral Exploration Team Co., Ltd

2 Li Xinsheng Model Worker Innovation Studio of Shaanxi Geological Exploration Team Co., Ltd

[Abstract] This article focuses on perforation technology in oil and gas wells, and explores its current status and development trends in depth. Firstly, the important position of perforation technology in oil and gas extraction was elaborated, followed by an analysis of the characteristics and application scope of commonly used perforation technologies, including cable transportation perforation, tubing transportation perforation, etc. At the same time, the challenges faced by perforation technology, such as adaptability to complex formations, perforation efficiency and quality, were discussed. By reviewing the research trends at home and abroad, the development direction of perforation technology in intelligent, efficient, and environmentally friendly aspects is discussed, aiming to provide reference for further research and application of perforation technology in oil and gas wells.

[Key words] oil and gas wells; Perforation technology; present situation; develop

引言

油气井射孔技术作为油气开采过程中的关键技术,直接影响着油气井的产能和经济效益。它是沟通井筒与储层的重要手段,通过射孔枪在套管和水泥环上形成孔道,使油气能够顺利流入井筒。随着油气资源的不断开发,开采环境日益复杂,对射孔技术的要求也越来越高。深入了解油气井射孔技术的现状和发展趋势,对于提高油气开采效率、降低成本具有重要意义。

1 油气井射孔技术概述

1.1 射孔技术的定义与作用

射孔技术是指利用特定的工具和方法,在油气井套管和周围的水泥环以及地层中形成孔道,建立油气从地层流入井筒的通道。其作用主要体现在以下几个方面:一是连通井筒与储层,使油气能够顺利流入井筒;二是提高油气井的产能,通过优化射孔参数和方式,可以增加油气的渗流面积,降低流动阻力;三是

为后续的增产措施提供基础,如压裂、酸化等,射孔质量直接影响这些措施的效果。

1.2 射孔技术的发展历程

射孔技术的发展经历了多个阶段。早期主要采用子弹射孔,这种方法射孔深度浅、孔径小,对地层的污染较大。随着技术的进步,发展出了聚能射孔技术,它利用炸药爆炸产生的聚能效应,在套管和地层中形成较深的孔道,大大提高了射孔效果。近年来,随着计算机技术和材料科学的发展,射孔技术不断创新,出现了智能化射孔、复合射孔等新型射孔技术^[1]。

2 油气井射孔技术的现状

2.1 常用射孔技术

2.1.1 电缆输送射孔

电缆输送射孔凭借操作便捷性与经济性,成为浅井及中深井作业的主流选择。该技术依托电缆作为传输载体,将射孔枪精

准下放至目标层位,通过地面控制系统远程触发射孔弹。这种方式无需复杂井下设备,施工周期短且成本可控。但面对大斜度井与水平井,电缆因柔性不足易发生遇阻,导致射孔枪难以到达预定深度,同时井眼轨迹复杂还会造成定位偏差,影响射孔准确性。

2.1.2 油管输送射孔

针对深井、大斜度井及水平井的特殊需求,油管输送射孔技术展现出显著优势。它将射孔枪串接于油管柱底部,利用油管刚性结构提供稳定支撑,确保射孔装置在复杂井眼中的可靠输送。此技术尤为突出的是可实现负压射孔工艺,通过精确控制井筒与地层间的压力差,在射孔瞬间形成抽汲效应,快速清除孔道内岩屑残渣,有效降低射孔污染,提升油气渗流通道的畅通性,从而大幅提高油气流产能。

2.1.3 过油管射孔

当油气井需要进行补孔作业或分层选择性射孔时,过油管射孔技术便成为理想方案。该技术无需起出原有油管,直接通过油管内径下入特制小直径射孔枪,显著缩短作业时间并降低施工成本。不过受限于油管尺寸,过油管射孔枪规格较小,致使射孔深度与孔径指标相对有限,在处理致密地层等需要深穿透作业时存在一定局限性,需要根据具体地质条件合理选用。

2.2 射孔技术面临的挑战

2.2.1 复杂地层适应性难题

全球油气勘探开发逐步向深层、非常规领域拓展,复杂地质条件已成为制约射孔技术效能的关键因素。低渗透储层在我国占比超60%,这类储层孔隙结构致密,渗透率普遍低于1毫达西,常规射孔方式难以形成有效渗流通道。以鄂尔多斯盆地为例,现场实践表明,通过将射孔密度从16孔/米提升至32孔/米,配合深穿透射孔弹,可使单井产量提高40%以上。而在高温高压环境中,塔里木盆地超深气井井底温度超180℃、压力达140MPa,对射孔器材的金属材料强度和密封性能提出严苛要求,传统碳钢材质射孔枪的爆裂失效风险显著增加。此外,碳酸盐岩地层发育的溶洞、裂缝系统,需要精准控制射孔方位以匹配天然渗流通道,传统射孔工艺难以满足这类精细化作业需求^[2]。

2.2.2 效率与质量提升瓶颈

射孔作业的工程质量直接影响油气井产能释放。当前行业普遍存在射孔弹穿孔成功率不稳定问题,在疏松砂岩地层中,因岩屑堵塞和压实带形成,实际有效孔眼数仅为设计值的70%~80%。渤海某油田统计显示,单次射孔作业平均耗时达12小时,其中射孔弹装填、校深定位等辅助工序占比超40%,导致作业成本居高不下。技术层面,现有聚能射孔技术受限于射流能量衰减,在1000米以上井深作业时,穿深精度偏差可达±15cm,严重影响压裂改造效果。开发集成化射孔装备、优化射孔参数设计,成为突破效率质量瓶颈的关键。

2.2.3 绿色作业转型需求

随着环保法规趋严,射孔作业的环境影响管控面临新挑战。据行业调研,单口井射孔作业产生的弹壳、射孔液等废弃物平均

达300~500公斤,若处理不当,重金属成分会渗入土壤和水体。在页岩气开发密集区,部分区域土壤铅含量超标1.5倍,与射孔弹壳锈蚀密切相关。同时,传统射孔液含有的聚合物添加剂降解周期长达数年,对生态系统造成持续压力。开发可降解射孔材料、构建废弃物循环利用体系,已成为行业实现绿色转型的必然选择^[3]。

3 油气井射孔技术的发展趋势

3.1 智能化射孔技术

智能化射孔技术依托先进的传感技术、数据处理技术和智能控制算法,为射孔作业带来了革命性的变化,成为未来射孔技术发展的核心方向。传统射孔作业往往依赖人工经验设定参数,难以精准适配复杂多变的地层条件,而智能化射孔技术则打破了这一局限。

通过在射孔设备中集成多种高精度传感器,能够实时采集地层的岩石力学特性、孔隙度、渗透率等关键参数。这些数据借助高速数据采集与处理系统,迅速传输至智能控制单元。基于预先设定的算法模型,智能控制单元可以根据地层实际情况,自动、动态地调整射孔参数。以智能射孔枪为例,它能够依据地层岩石的硬度和应力分布,自主优化射孔密度和方位。在面对硬度较高的岩层时,智能射孔枪可增加射孔密度,以确保形成足够数量的油气流通通道;而在应力集中区域,则精准调整射孔方位,避免射孔孔道因应力作用过早闭合,从而显著提高射孔效果。

此外,智能化射孔技术具备强大的实时监测能力。在射孔作业过程中,系统持续监测压力、温度、射孔弹发射状态等关键参数。一旦出现异常,如压力骤变、温度超限等情况,系统能够立即发出警报,并自动采取相应的应急措施,有效降低作业风险,保障作业安全。同时,通过对大量作业数据的分析和学习,智能化系统还能不断优化自身的控制策略,实现自我迭代和升级,进一步提升作业的精准性和可靠性。

3.2 高效射孔技术

高效射孔技术致力于在保证射孔质量的前提下,大幅提高作业效率,缩短施工周期,降低综合成本^[4]。这一目标的实现主要通过两个关键途径:新型射孔装备的研发和射孔工艺的优化。

在新型射孔装备研发方面,科研人员不断探索新材料、新工艺,以提升射孔弹和射孔枪的性能。高能射孔弹和复合射孔弹便是其中的典型代表。高能射孔弹采用特殊的高能炸药配方,在爆炸瞬间能够产生更高的能量,显著增加射孔深度,使油气井能够穿透更深层的油气储层,扩大开采范围。复合射孔弹则结合了多种功能,不仅能够实现高效穿孔,还能在射孔后对孔道周围地层进行适度压裂,改善地层渗透性,提高孔道质量,为油气流动创造更有利的条件。同时,新型射孔枪在结构设计和材料选择上也不断创新,采用高强度、耐高温、耐腐蚀的材料,提高射孔枪的可靠性和使用寿命,确保在复杂井下环境中能够稳定工作。

在射孔工艺优化方面,连续油管射孔技术展现出了巨大的优势。与传统的电缆射孔技术相比,连续油管射孔技术采用连续的油管作为输送射孔工具的载体,具有更强的输送能力和更高

的作业灵活性。它能够在不压井的情况下进行射孔作业,避免了因压井对地层造成的污染和伤害,同时减少了起下管柱的时间,实现快速射孔。在一些需要多层射孔的油气井中,连续油管射孔技术可以一次性完成多个层位的射孔作业,大幅提高作业效率,缩短施工周期,为油气井的快速投产提供了有力保障^[5]。

3.3 环保型射孔技术

随着全球环保意识的不断增强以及环保法规的日益严格,环保型射孔技术应运而生,成为油气开采行业实现可持续发展的重要支撑。环保型射孔技术围绕减少射孔作业对环境的影响,从射孔弹材料、射孔液使用以及废弃物处理等多个环节入手,构建起一套完整的环保解决方案。

在射孔弹材料方面,研发可降解材料是重要的发展方向。传统射孔弹通常采用金属材料制造,在射孔作业完成后,弹壳会残留在井下,难以回收,长期存在可能对地层环境造成污染。而可降解射孔弹材料的出现,有效解决了这一问题。这些材料在完成射孔任务后,能够在一定时间内通过与地层流体发生化学反应或在微生物的作用下自然分解,不会对地层和环境造成长期危害。目前,一些新型高分子材料和生物降解材料已在射孔弹制造中得到应用,并取得了良好的试验效果。

射孔液的选择和使用也是环保型射孔技术的关键环节。传统射孔液中可能含有有害物质,在射孔作业过程中,如果射孔液泄漏或返排不彻底,会对地层和周边环境造成污染。环保型射孔液采用无毒、无害、可生物降解的成分,在保证射孔作业顺利进行的同时,最大限度地减少对环境的影响。此外,通过优化射孔液配方和工艺,还可以提高射孔液的性能,如改善其携砂能力、降低滤失量等,进一步提升射孔作业效果。

在废弃物处理方面,加强对射孔废弃物的回收和利用是环保型射孔技术的重要内容。对于射孔作业产生的废弹壳、废射孔液等废弃物,通过建立完善的回收处理体系,进行分类收集、集中处理。部分废弃物经过处理后可以实现再利用,如废弹壳经过熔炼和加工后可制成其他金属制品,废射孔液经过净化处理后可重复使用或达标排放,从而降低废弃物对环境的影响,实现资源的循环利用。

3.4 与其他技术的融合

射孔技术与其他油气开采技术的融合是当前行业发展的一大趋势,通过技术协同创新,能够充分发挥各项技术的优势,实现油气开采效益的最大化。射孔技术与压裂技术的结合便是其中的典型案例。射孔压裂一体化作业将射孔和压裂两个工序合二为一,在完成射孔的同时,立即进行压裂作业。这种一体化作业模式减少了作业工序,缩短了施工周期,降低了作业成本。更

重要的是,通过射孔与压裂的协同设计,可以根据地层特点和油气储层分布,精准控制射孔位置和压裂参数,使压裂裂缝能够更好地与射孔孔道相连通,形成高效的油气流动通道,显著提高油气井的增产效果。

射孔技术与测井技术的融合同样具有重要意义。测井技术能够获取地层的详细信息,包括地层岩性、物性、流体性质等。将射孔技术与测井技术相结合,可以根据测井资料准确确定射孔位置和参数。通过对测井数据的深入分析,能够精准识别油气富集区域,选择最佳的射孔层位和射孔点,避免盲目射孔造成的资源浪费和作业成本增加。同时,测井技术还可以在射孔作业后对射孔效果进行评估,为后续的开采方案调整提供依据,进一步提高射孔作业的针对性和有效性。

4 结论与展望

油气井射孔技术作为油气开采的重要环节,经历了从传统子弹射孔到聚能射孔、智能化射孔的持续发展。当前,电缆输送射孔、油管输送射孔及过油管射孔已成为主要技术手段,在提高油气井产能、优化开采工艺中发挥了关键作用。然而,面对复杂地层条件、射孔效率及质量提升的瓶颈,以及日益严格的环保法规,现有技术仍面临诸多挑战。在深层、超深层及非常规储层中,如何确保射孔的深度、方位和效率,仍是亟待解决的难题。未来,射孔技术将沿着智能化、高效化、环保化和多技术融合的方向发展,需加强技术研发与装备创新,推动理论与现场应用的紧密结合,持续提升我国油气射孔技术的自主创新能力与核心竞争力。

[参考文献]

- [1]郭阳,高悦然,于泽玺.油田射孔弹射孔稳定性的影响因素及对策分析[J].石化技术,2025,32(01):85-87.
- [2]邹代武.裂缝性碳酸盐岩酸压物理模拟试验[D].中国石油大学(北京),2017.
- [3]郭鉴升.射孔技术在油气井增产中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(16):162-164.
- [4]赵亮,许峰,张贤华,等.低渗透油田开发的难点和对策[J].化工设计通讯,2018,44(08):46.
- [5]陈华彬,唐凯,陈锋,等.水平井定向分簇射孔技术及其应用[J].天然气工业,2016,36(07):33-39.

作者简介:

刘卫民(1982--),男,汉族,陕西西安周至人,本科,身份证号:610124198203134233,职称:工程师,研究方向:地球物理勘查与遥感。