

石油地质资源勘探技术的创新与发展

王慧卿 李雪娣 范云峰 韩崇 刘晶晶

中国石化河南油田分公司勘探开发研究院唐河地质研究所 河南 南阳 473132

摘要: 石油地质资源勘探技术正通过多维创新实现突破。物探领域形成三维地震、四维动态监测及非均匀地质建模(SSP)技术体系,分辨率较传统方法提升超30%;测井技术实现成像测井集成化与随钻测井实时化,储层识别准确率突破92%;钻井技术突破超深井耐温耐压瓶颈,配合旋转导向与无限级压裂技术,单井产量提升超50%。智能化与绿色低碳技术成为新增长点,为深层、复杂油气藏开发提供关键支撑。

关键词: 石油地质资源勘探技术;创新;发展

引言:随着全球能源需求的持续增长与能源结构的转型,石油地质资源勘探技术的重要性愈发凸显。传统勘探技术在深层、超深层资源开发及复杂地质构造解析中面临诸多挑战,精度不足、成本高昂且环保压力增大。在此背景下,技术创新成为突破瓶颈、提升勘探效率的关键。本文旨在系统探讨石油地质资源勘探技术的创新方向与发展趋势,分析技术革新如何推动勘探向高效、精准、绿色方向迈进,为保障能源安全与可持续发展提供技术支撑。

1 石油地质资源勘探技术发展现状与挑战

1.1 传统技术体系

(1)物探技术:作为油气勘探核心手段,地震勘探已从基础反射法发展至数字地震与三维地震阶段,通过多道次数据采集反演地下构造,结合逆时偏移等处理技术提升解释精度。电磁法利用电磁场传播特性探测地层,大地电磁法在复杂地质区应用广泛;重力勘探则通过测量重力场变化识别密度异常,为区域地质调查提供基础数据,三者常组合应用以弥补单一方法局限。(2)测井技术:数控测井实现数据自动化采集与处理,成为常规测井基础;成像测井通过多探测器组合呈现井壁地质特征,助力裂缝识别;核磁共振测井可精准获取孔隙度等参数,提供深层岩石物理特性信息。三类技术形成互补体系,为地层评价与储层识别提供多角度数据支撑。(3)钻井技术:定向钻井通过轨迹调控实现特定层段靶向钻进,提高储层钻遇率;欠平衡钻井降低对储层的伤害,适用于低渗透地层;多级压裂通过分段改造储层,增强油气渗流能力,是非常规油气开发的关键技术,三者共同构成传统钻井的核心技术框架^[1]。

1.2 现存问题

(1)深层/超深层勘探精度不足:9000米以深地层温度超200°C、压力达105MPa,常规设备易失效,如钻头

在高温下磨损加剧,万米深处日进尺不足30米。地震波在深层传播衰减严重,数据信噪比降低,测井传感器信号易受干扰,导致储层定位与参数解释精度下降,难以满足深地勘探需求。(2)复杂地质构造解析能力有限:断层、盐丘等构造导致地层连续性中断,地震波传播路径紊乱,传统物探技术难以精准刻画构造形态。如柴达木盆地“双复杂”区,复杂构造使地震资料分辨率低,圈闭精细刻画困难,易造成油气藏漏判或误判。(3)环保与成本约束:传统稠油热采依赖天然气燃烧加热,能耗高且碳排放量大;深层钻井需频繁更换设备与调整工艺,万米井钻探周期长达数百天,成本激增。同时,勘探过程中的废液、废气排放对生态环境构成压力,环保合规成本进一步推高开发投入。

2 石油地质资源勘探关键技术创新方向

2.1 物探技术革新

(1)三维/四维地震勘探:传统二维地震勘探仅能呈现平面地质信息,难以满足复杂油气藏勘探需求。三维地震勘探通过多方位、多道次数据采集,结合高分辨率成像算法,可清晰刻画地下构造细节,分辨率较传统技术提升30%以上,有效识别小尺度断层与岩性圈闭。而四维地震勘探在三维基础上引入时间维度,实现对油气藏开发动态的实时监测,例如在注水开发油田中,能精准追踪水驱前缘推进速度,为调整开发方案提供数据支撑,助力提高采收率5%-8%。(2)虚拟勘探技术:依托数字孪生技术,构建与实际油田1:1的虚拟地质模型,将地质数据、钻井参数等实时接入模型。在钻井作业前,通过模型模拟不同钻井轨迹下的地质风险,如避开高压水层、易坍塌地层,优化后的轨迹可使钻井事故率降低25%以上。同时,作业过程中模型能实时预警扭矩异常、井眼缩径等问题,实现钻井过程的动态管控^[2]。(3)非均匀地质模型(SSP):针对采空区、溶洞等非

均匀地质体勘探难题, SSP模型通过波场分离算法, 将地震波中的有效信号与干扰波精准分离。相较于传统均匀模型, 其对采空区边界的识别精度提升40%, 可准确判断采空区分布范围与填充状态, 为油田开发中规避采空区风险、合理部署井位提供关键依据。

2.2 测井技术智能化

(1) 成像测井集成化: 整合超声成像、电阻率成像、中子成像等多类型探测器, 形成全方位探测系统, 实现井眼360°无死角覆盖。传统测井技术存在探测盲区, 易遗漏井壁附近的薄储层, 而集成化成像测井可清晰显示厚度仅0.5米的薄油层, 储层识别准确率提高至92%以上, 同时能精准判断裂缝发育方向与密度, 为储层评价提供更全面数据。(2) 随钻测井(LWD): 通过钻杆内置传感器, 在钻井过程中实时采集地层电阻率、孔隙度、地层压力等数据, 借助高速数据传输系统将数据同步传输至地面控制中心, 延迟时间控制在10秒以内。基于实时数据, 地质工程师可快速预测前方地层压力变化, 提前调整钻井液密度, 有效避免井喷、井漏等事故, 同时及时发现优质储层, 减少无效钻井段, 单井钻井周期缩短10%-15%。(3) 智能分层注采: 在注采井中部署分布式传感器网络, 实时监测各层段的流量、压力、含油饱和度等参数。结合智能算法, 自动调控各层段的注采阀门开度, 实现对不同渗透率层段的精准注采。例如在非均质油藏中, 可避免高渗透层过度开采、低渗透层开采不足的问题, 使油藏纵向开发均衡性提升30%, 单井日产油量稳定增长8%-12%。

2.3 钻井技术突破

(1) 超深井钻井: 针对超深井(井深超过6000米)高温、高压的复杂环境, 研发耐高温钻头采用新型碳化钨合金材料, 可在200°C以上高温环境下保持硬度与耐磨性, 使用寿命较传统钻头延长2倍; 高强度钻杆采用特种合金钢管, 14厘米直径钻杆的承重能力达700吨, 可承受超深井钻井过程中的巨大扭矩与拉伸力, 突破超深井钻井的装备瓶颈, 为深层油气资源勘探提供技术支撑。(2) 旋转导向钻井: 相较于传统滑动导向钻井, 旋转导向系统通过井下闭环控制, 可在钻柱旋转过程中动态调整钻进方向, 调整响应时间缩短至0.5秒。该技术减少了钻柱与井壁的摩擦, 降低了卡钻风险, 同时大幅减少非生产时间, 在定向井作业中, 钻井效率提升20%以上, 且井眼轨迹控制精度更高, 靶心半径误差可控制在0.3米以内。(3) 无限级压裂: 采用连续管拖动封隔器技术, 无需起下管柱即可实现多段压裂作业。通过连续管将封隔器输送至目标层段, 坐封后进行压裂, 压裂完成后解封

并拖动至下一层段, 单井可实现百级以上压裂段数。该技术打破了传统分段压裂段数限制, 大幅增加储层改造体积, 在页岩油开发中, 可使单井产量提升50%以上, 且作业周期缩短30%^[3]。

2.4 绿色低碳技术

(1) 太阳能稠油热采: 传统稠油热采依赖天然气燃烧加热, 能耗高且碳排放量大。太阳能稠油热采技术采用槽式集热系统, 通过抛物面反射镜将太阳光聚焦至集热管, 加热传热介质, 再通过换热系统将热量传递至井筒, 实现稠油降黏开采。该技术可替代80%的天然气消耗, 单井年减少碳排放约1200吨, 同时降低热采成本30%-40%, 符合低碳开发要求。(2) 残油区二氧化碳驱油: 针对油田开发后期残油区(采收率低于25%), 将收集的二氧化碳注入油藏。二氧化碳与原油混合后可降低原油黏度、膨胀原油体积, 同时二氧化碳可溶解于水形成碳酸, 改善油藏渗透率, 实现残油高效开采。该技术不仅能使残油区采收率提升8%-12%, 还可将二氧化碳封存于地下, 单井年封存二氧化碳约5000吨, 实现经济效益与环保效益双赢。(3) 数码岩心技术: 通过CT扫描、聚焦离子束扫描等技术获取岩心微观结构图像, 构建三维数码岩心模型。利用数值模拟方法, 在模型中模拟流体(油、水、气)的流动规律, 研究不同开发条件下的流体驱替效率。基于模拟结果, 可优化注采压力、注采速度等开发参数, 减少现场试验成本。例如在低渗透油藏开发中, 通过数码岩心模拟优化的开发方案, 可使原油开采效率提升15%以上, 同时降低开发方案调整的风险与成本。

3 石油地质资源勘探技术发展面临的挑战与对策

3.1 技术瓶颈

(1) 深层资源勘探设备耐温耐压极限: 随着石油勘探不断向深层迈进, 地下环境的高温高压特性对勘探设备提出了严苛要求。当前, 用于深层资源勘探的钻井、测井等核心设备, 在极端环境下易出现性能衰减甚至故障。比如钻井过程中, 钻头和钻杆长期处于高温高压环境中, 材料的物理性能会逐渐下降, 导致设备使用寿命缩短, 难以稳定完成深层勘探作业; 测井设备的传感器在高温高压条件下, 信号传输易受干扰, 无法精准获取地下地质数据, 制约了深层资源的有效勘探。(2) 复杂储层非均质性表征困难: 复杂储层的地质结构极为多样, 不同区域的岩性、孔隙度、渗透率等参数差异显著, 这种非均质性给储层表征带来巨大挑战。传统的勘探技术难以全面捕捉储层的细微变化, 无法清晰描绘储层的空间分布特征。例如在裂缝性储层中, 裂缝的发育

程度、分布规律难以准确识别,导致对储层的储量评估和开发方案制定缺乏可靠依据,进而影响石油资源的开采效率。

3.2 政策与市场障碍

(1) 技术研发投入不足与成果转化机制缺失:石油地质资源勘探技术研发周期长、投入大、风险高,部分企业因短期收益考量,对技术研发的投入意愿较低,导致关键技术研发缺乏充足资金支持。同时,当前技术成果转化机制不完善,科研机构的研发成果与市场实际需求脱节,大量先进技术停留在实验室阶段,无法及时应用到实际勘探作业中,难以形成技术研发与产业应用的良性循环。(2) 国际技术封锁与标准壁垒:在全球石油勘探技术领域,部分发达国家掌握着核心技术,并通过技术封锁限制其他国家获取先进技术和设备。此外,国际上相关的技术标准多由少数国家主导制定,我国在参与国际标准制定过程中话语权不足,面临着较高的标准壁垒。这不仅增加了我国引进先进技术的难度,也使我国自主研发的技术在走向国际市场时面临诸多限制,制约了我国石油地质资源勘探技术的国际化发展。

3.3 应对策略

(1) 加强多学科交叉融合(地质、物理、AI):石油地质资源勘探涉及多个学科领域,加强地质、物理、人工智能等多学科的交叉融合,能够打破学科界限,整合各领域的技术优势。通过地质学科提供的地下地质理论基础,结合物理学学科的探测技术原理,再借助人工智能的数据分析和建模能力,可开发出更高效、精准的勘探技术,突破现有技术瓶颈,提升对深层资源和复杂储层的勘探能力。(2) 推动产学研用协同创新,建立国家级深地实验室:推动企业、高校、科研机构和应用单位的产学研用协同创新,能够整合各方资源,形成技术研

发、成果转化和产业应用的完整链条。建立国家级深地实验室,可为勘探技术研发提供先进的实验平台,集中优势力量攻克深层资源勘探设备耐温耐压、复杂储层表征等关键技术难题,同时促进科研成果快速转化为实际生产力,推动石油勘探技术的整体进步^[4]。(3) 完善知识产权保护与人才激励机制:完善的知识产权保护机制能够保障科研人员的创新成果,激发科研人员的研发积极性,避免技术创新成果被侵权。同时,建立科学合理的人才激励机制,通过薪资待遇提升、职业发展通道拓展、荣誉表彰等方式,吸引和留住石油勘探领域的高端人才,鼓励人才投身技术研发工作,为石油地质资源勘探技术的持续发展提供人才支撑。

结束语

石油地质资源勘探技术的创新与发展,是应对能源需求增长、破解复杂地质难题与实现绿色开发的关键。从物探、测井到钻井技术的全方位突破,不仅提升了深层与复杂构造的勘探精度,更推动了高效开发与低碳转型。未来,随着多学科交叉融合与产学研用协同创新的深化,勘探技术将持续升级,为保障国家能源安全、推动石油工业高质量发展注入更强动力,引领行业迈向智能、精准、可持续的新阶段。

参考文献

- [1]周建明.石油地质新方法在勘探开发中的应用[J].当代化工研究,2020,(06):74-75.
- [2]李晓红.地震勘探技术在石油地质勘探中的应用及发展[J].中国石油和化工标准与质量,2022,(15):162-164.
- [3]张庭姣.三维数据场可视化技术在石油地质勘探中的应用研究[J].粘接,2022,(13):182-183.
- [4]姜宇飞.石油天然气地质勘探工作过程中存在的问题[J].化学工程与装备,2021,(08):88-89.