

石油地质勘探技术的创新研究

王 睿

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300480

摘 要: 石油地质勘探技术,就是围着油气生成、运移、聚集和保存这些条件来展开的,现在已经形成了从宏观构造识别到微观储层评价的多层次技术体系。像高精度地球物理、精细化地质评价、深层非常规勘探,还有智能化数据解析这些创新技术,确实推动了勘探能力的提升,但难题也还不少:核心技术的自主研发还不够,多技术融合的成熟度不高,数据处理效率也有限,再加上装备适配性这块也有短板。下一步,得强化核心技术攻关,推进多领域融合创新,同时把智能化的处理体系搭起来。

关键词: 石油地质勘探;地球物理勘探;多技术融合;勘探装备适配性

引言: 石油地质勘探是找油找气的核心环节,技术水平直接决定了勘探效率和成功率。这篇文章把石油地质勘探的技术基础和传统核心技术体系捋了一遍,讲清楚了从宏观构造识别到微观储层评价的技术是怎么一步步迭代过来的,重点分析了高精度地球物理、精细化地质评价、深层非常规,还有智能化勘探这些创新技术。在此基础上,针对核心技术自主研发不够、多技术融合成熟度偏低这些现实问题,提出了强化专项攻关、推进多领域融合、搭建智能化处理体系这几个优化方向。

1 石油地质勘探技术基础概述

1.1 石油地质勘探核心原理

石油地质勘探的核心,在于找到地下油气藏的位置和范围。它的基础理论围绕油气生成、运移、聚集和保存这几个条件展开。勘探工作首先要识别出过去存在过有利于有机物沉积与转化的古地理环境,分析有机质向油气转化的热演化过程。在这个基础上,研究油气在地下层孔隙里运移的动力机制和通道条件,搞清楚油气是怎么在特定的构造或地层圈闭中聚集成藏的。还要评估圈闭的封闭性能,以及后期构造变动对油气保存造成了什么影响。有效的勘探,必须综合判断生油层、储集层、盖层、圈闭、运移路径和保存条件这六个要素在时空上的匹配关系。只有这些条件在同一个地质历史时期协调配置好了,才有可能形成具有工业价值的油气聚集。

1.2 传统石油地质勘探核心技术体系

传统石油地质勘探,主要靠地表地质调查、钻井岩心分析、测井和地震勘探这些技术手段,来建立对地下地质条件的认识。地表地质调查,通过观察出露地层的岩性、产状和构造形态,推断区域构造格架和地层展布

特征。钻井工程直接从地下取回岩心和岩屑,通过分析岩石的孔隙度、渗透率与含油气性,拿到最直接的地下信息。地球物理测井在钻井完成之后下入探测仪器,连续记录不同深度地层的电性、声学 and 放射性参数,用来识别储层和流体性质。地震勘探利用人工激发声波在地下不同岩层界面上的反射特征,经过数据处理形成地下构造图像^[1]。这些技术相互配合,形成了从宏观构造形态到微观储层参数的多层次认识体系,共同支撑起对勘探目标的基本判断和后续的部署决策。

1.3 石油地质勘探技术迭代核心逻辑

石油地质勘探技术的迭代,一直沿着从宏观到微观、从结构到属性、从定性到定量这条逻辑在走。早期技术主要解决地层的空间形态和构造格架问题,后来勘探目标慢慢转向深层、复杂构造和隐蔽圈闭,光靠结构成像就不够用了。技术升级的方向,就转到了岩石物理属性和流体性质的直接识别上,比如通过更精细的地震波属性分析,去反推储层的孔隙度和含流体饱和度这些信息。计算能力上来了,大规模数据处理和反演也变成了现实,技术就从凭经验判断,一步步走向了基于多参数约束的定量解释。每一次技术迭代,都能让地下地质体的描述维度更多、分辨精度更高,勘探决策的不确定性也就降下来了。

2 石油地质勘探核心创新技术体系

2.1 高精度地球物理勘探创新技术

高精度地球物理勘探创新技术的核心,就是提升对地下介质物理属性差异的分辨能力,同时把成像搞得更清楚。传统方法主要认得出大尺度的构造形态,创新技术就不一样了,通过增加空间采样密度和信号动

态范围,能抓到更微弱的地震反射信号,还能把各种干扰波压下去。在数据处理这块,已经发展出了能适应复杂速度场变化的偏移成像方法,能把倾斜地层和断裂地层产生的绕射波给归回原位,还原出地下真实的构造样子。拿压缩感知框架下的新一代高保真处理技术来说,它做到了信噪比和分辨率同步提高,地震图像的信噪比能提升5倍以上,分辨率也能提高2个倍频程,给极低信噪比区域的弱信号检测提供了可靠手段。还有多波多分量接收技术,用了它之后,就可以同时记录纵波和转换横波了。

2.2 精细化地质评价与识别创新技术

精细化地质评价与识别创新技术,主要是从微观尺度去挖储层的非均质性特征和含油气分布规律。这套技术体系以高分辨率层序地层分析为基础,先搭好等时地层格架,再去追踪单砂体级别的沉积单元。岩石物理分析负责把地震弹性参数和储层物性之间的转换关系量化出来,给后面的反演提供物理约束。在这个基础上,借助属性优化和多属性融合的方法,从地震数据里提取出能反映孔隙发育程度和流体敏感属性的特征参数。叠前反演技术补上了叠后数据信息量不够的短板,通过分析振幅随偏移距的变化特征,把流体识别的可信度提上来了。实际应用也证明,叠前反演能拿到纵横波阻抗、泊松比等多种弹性参数,跟常规的叠后波阻抗反演一比,对储层预测和含气性识别都更可靠^[2]。在储层参数估算这块,智能化方法比传统技术进步不小,孔隙度估算误差能降低15%到30%,低信噪比条件下的解释效果也明显改善。

2.3 深层、非常规油气勘探创新技术

深层与非常规油气勘探创新技术,致力于解决高温高压环境下以及特殊赋存状态里的勘探难题。深层条件下,岩层经历了复杂的成岩改造,孔隙空间大幅缩减,常规勘探方法对这类致密介质的探测敏感性明显下降。当前深层钻探已经突破万米深度,井下温度超过200摄氏度,地层压力超过130兆帕,这对采集装备和处理方法提出了很高的技术要求。针对深层致密储层,攻关形成的超深层压裂技术把压裂成功率从50%提升到了96%,有效改善了深层资源的开发效益。对于非常规油气,它的赋存形式从宏观圈闭转变成了连续分布的微纳米孔隙体系,纳米级孔喉系统占了储集空间总体积的70%到80%。页岩气储层的孔径主要是5到200纳米,致密砂岩油储层的孔径是50到900纳米。

2.4 智能化数据勘探与解析创新技术

智能化数据勘探与解析创新技术,以自动学习与模式识别方法为核心,重塑了地质信息挖掘和知识发现的基本流程。传统的解析过程依赖人工经验来逐步提取数据特征,面对海量高维度的地球物理数据时,效率跟不上,主观性也较强。智能化方法通过构建多层次的网路结构,能够从原始地震波形或测井曲线中自动学习出对岩性和流体敏感的特征表达。在数据处理阶段,深度域速度模型的全周期耗时可以缩短34%,地震成像精度得到大幅度提高。在断层识别方面,智能断层识别技术能够捕捉断距5到10米的走滑断层信息,识别准确度提高了40%。在属性解释环节,智能聚类 and 分类算法可以快速识别沉积相带与岩性边界,减少人机交互的迭代次数。

3 现阶段石油地质勘探技术创新存在的问题

3.1 核心技术自主研发深度不足

当前石油地质勘探领域在核心技术的自主研发方面,仍然存在明显深度不足的问题。部分基础性的采集方法和处理算法,长期依赖外部引进,自主构建的理论框架还没有形成完整的技术闭环。对于地震波场传播机理、复杂介质反演数学基础这类底层科学问题,原创性贡献比较有限,导致后续技术迭代被卡在既有知识体系里。在关键处理软件 and 解释平台上,底层代码与核心模块的自主开发能力比较薄弱,许多先进算法没法快速转化成能工程化应用的稳定工具。

3.2 多技术融合应用成熟度较低

各类勘探技术之间的融合应用,在实际工作中呈现出成熟度偏低的局面。地震、测井、地质分析这些不同的技术手段,各自积累了独立的数据格式 and 解释标准,跨技术的数据对齐与信息互通缺少统一规范的融合框架。在整合多物理场信息的时候,由于各技术对地下介质的响应机理不一样,分辨率尺度和敏感参数之间本来就存在差异,简单的叠加分析很难产生协同增益的效果。许多融合尝试停留在定性联合展示的层面,缺少基于物理约束的定量协同反演方法。不同技术团队之间的工作流程相对独立,融合所必需的交叉学科知识储备也不够,导致多技术综合解释结果的可靠性很难得到系统的验证。

3.3 勘探数据处理与转化效率有限

勘探数据处理与向地质认识转化的整体效率仍然有限,成了制约勘探周期和成果质量的一个重要瓶颈。原始采集获得的地震 and 测井数据量巨大,常规处理流程里很多环节依赖人工参数测试 and 质量监控,很难实现全流

程自动化。对于复杂构造区或者低信噪比区域的数据,多次迭代处理所需要的计算资源和处理时间明显增加,但没法保证最终成像质量一致可靠^[3]。在数据向地质信息转化这个环节,从处理成果中提取构造形态和储层属性,仍然需要大量的人工交互解释,解释结果的主观差异性很难消除。多源异构数据的整合分析与信息挖掘,缺少高效的协同平台,大量有用信息分散在不同专业软件里,没办法充分融合。

4 石油地质勘探技术创新的优化发展路径

4.1 强化核心技术专项研发攻坚

强化核心技术专项研发攻坚,需要聚焦底层算法和基础理论等长期薄弱的环节。2026年5月,中国石油基础研究院在北京揭牌成立,瞄准了深层地质理论、非常规资源赋存方式这些基础问题。应当组织跨学科力量,针对复杂介质地震波场传播机理、非线性反演数学基础等方向做系统性攻关,建立起自主的理论框架。在软件平台方面,集中突破核心代码模块。国产 GeoEast 软件是我国第一套拥有自主知识产权的地震数据处理解释一体化软件,有 3000 多万行代码、近 1000 个模块,整体性能达到国际先进水平,已经覆盖国内 8 个盆地超过 46 万平方千米,还走进了海外 40 多个国家和地区。对于深层高温高压环境下的采集方法,以及非常规储层的精细评价技术,要设立专项任务,解决信号弱、干扰强、分辨率不足这些难题。

4.2 推进多领域前沿技术融合创新

推进多领域前沿技术融合创新,需要打破技术体系之间的壁垒,建立起统一的物理信息融合框架。着力解决地震、测井、地质等多源数据在尺度、精度和响应机理上的不一致问题,发展基于共同物理约束的联合反演与协同解释方法。已经有学者依托国家自然科学基金项目,开展了钻井中地震资料高分辨率处理的多尺度智能融合与动态验证研究^[4]。在数据层面构建统一的空间参考和属性标准化体系,实现定量融合。推动采集、处理、解释一体化的工作模式,避免信息传递过程中的损失。

4.3 搭建智能化勘探数据处理体系

搭建智能化勘探数据处理体系,目的是通过自动学习来提升处理效率和成果质量。2025年,中国石油的研发支出达到了 272.5 亿元,在超深层和非常规油气勘探方面取得了标志性成果。应当建立覆盖预处理、信号增强、成像到属性解释的全流程智能化框架。针对低信噪比区域,发展基于深度网络的自适应噪声压制技术。有研究提出的融合残差注意力的深度卷积自编码网络,峰值信噪比比基准方法提升了 2.783 到 8.099 个分贝。利用智能分类与聚类算法快速识别构造形态和流体敏感区带^[5]。同时构建统一的数据管理与流通平台。中国石油昆仑大模型已经建成了超过 600TB 的高质量行业数据集,覆盖地震、测井、钻井全业务领域,落地了 125 个应用场景,地震处理综合效率提升了 10 倍以上,储层参数预测识别精度超过了 85%。

结束语:石油地质勘探技术,正处于从传统经验驱动向数据智能驱动转型的关键阶段。高精度物探、精细化评价、深层非常规,还有智能化解析这些创新技术,已经展现出了明显的优势,但核心技术自主研发不足、多技术融合成熟度偏低、装备适配性差这些问题,仍然在制约着行业的发展。未来需要聚焦底层理论攻关和多领域技术协同,加快智能化体系建设,切实提升我国油气勘探的自主创新能力和决策效率。

参考文献

- [1] 张旭东. 石油地质勘探技术的创新研究 [J]. 地质研究与环境保护,2025,4(6).
- [2] 陈军,孔令华,曾玉兰,等. 石油地质勘探技术的创新应用及发展前景探析 [J]. 中国设备工程,2025(1):239-241.
- [3] 唐康祺. 石油地质勘探技术的创新与发展 [J]. 地质研究与环境保护,2025,4(7).
- [4] 杨明辉,王海峰. 石油地质勘探技术的新进展与挑战 [J]. 建筑与施工,2025,4(5):181-183.
- [5] 赵洪达. 石油地质勘探技术的创新实践及发展前景分析 [J]. 石油石化物资采购,2025(18):106-108.