

设置不同地下水位与渗流梯度边界条件,模拟桩基在动态渗流环境下的应力与位移响应。模型结果与现场实测负摩阻力分布曲线进行对比,误差控制在8%以内,表明模型在反映孔压变化及桩土相互作用方面具有良好的精度与可靠性,可用于复杂地质条件下负摩阻力的预测与评估。

4.2 渗透系数与渗流方向的影响规律

渗透系数与渗流方向是影响桩基负摩阻力分布特征的关键因素。模拟结果显示,当渗透系数增大时,孔隙水压力变化速率显著加快,导致土体有效应力减小,桩周摩阻力峰值增大并向上移动,桩顶附加沉降也相应增加。当地下水渗流方向由上向下时,孔压消散引起地基固结沉降加剧,桩土相对位移增大,负摩阻力增强,桩顶附加荷载提升约20%—30%。相反,若渗流方向由下向上,孔压增高使土体浮托效应显现,有效应力降低,桩侧摩阻显著减弱,甚至出现局部正摩阻力区。该规律表明,渗流方向变化可直接引起桩周应力场的反转与摩阻力峰值迁移,是负摩阻力控制计算中不可忽略的影响参数,需在桩基设计与渗流评估中予以重点考虑。

4.3 土层压缩性与桩长比的影响

土体压缩性直接决定地基固结沉降量与桩土相对位移程度,从而影响负摩阻力的发展。分析结果表明,当土层压缩模量较低时,地基沉降加剧,负摩阻力增幅显著,桩侧剪切应力集中效应明显。通过参数化分析发现,桩长比(L/D)在15—25范围内时,负摩阻力与桩总承载力的比值趋于稳定,桩土协同变形关系合理;当L/D超过30后,桩身刚度主导作用增强,负摩阻力增长速率趋缓,摩阻分布趋于均匀。若桩长过短,则桩周沉降集中,易形成高峰摩阻区,导致桩顶荷载异常集中。研究结果说明,合理控制桩长比与地基刚度匹配关系,是减轻负摩阻力不利影响、优化桩基受力性能的重要途径^[3]。通过在设计中引入桩长优化与土体改良措施,可实现桩土变形协调与承载效应的平衡,提升结构的整体安全与稳定性。

5 工程应用与实践验证

5.1 工程背景与地质条件

研究选取的川西某河谷大桥位于典型高原湿润区,地势起伏显著,地下水位埋深较浅且受季节影响显著波动。桥位区地层主要由粉质黏土与粉细砂交互分布,局部夹杂卵石层,渗透系数介于 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s之间,属于中等渗透性地基。监测资料显示,春季融雪期地下水位上升幅度约2.5 m,雨季地表径流与渗流活动显著增强,地下水水力条件复杂。由于地层压缩性较大、桩长较深且桩间距密集,桩周土体在周期性渗流作用下发生固结沉降与应力重分布,负摩阻力问题尤为突出。现场勘测结果表明,部分桩基桩顶沉降量超过设计预期值的15%,桩身受力不均,桩侧摩阻分布呈明显非对称特征,为验证渗流耦合模型提供了典型的工程背景。

5.2 计算方法应用与结果分析

基于上述地质条件,本文采用渗流—固结耦合模型对桥梁桩基进行数值分析。模型输入参数包括渗透系数、孔隙比、桩土摩擦系数及地下水位变化幅度等,通过模拟不同季节渗流状态下的孔压变化与桩土相对位移过程,计算桩侧摩阻力的分布规律。结果表明,负摩阻力峰值出现在地下水位上升阶段桩中部区域,其最大值约为桩周有效应力的0.35倍,桩顶附加沉降占总沉降的18%。与实测静载试验数据对比,计算结果误差控制在10%以内,验证了模型在预测桩基沉降与摩阻演化方面的精度与可靠性。分析还显示,随渗透系数增大或地下水位波动频率上升,负摩阻力的增长幅度明显加剧,说明水动力作用是引发桩基应力重分布的关键因素。

5.3 防治措施与设计建议

针对川西地区地下水渗流强度大、桩周土体压缩性高的特点,工程设计与施工中应注重防渗与排水体系的协调优化。可在桩周设置透水性良好的砂垫层与竖向排水孔,降低孔隙水压力积聚速度,减弱固结沉降引起的相对位移;同时通过调整桩端持力层刚度与桩长比,提高桩土共同变形能力。对于粉细砂与粉质黏土交互地层,可采用分层固结修正计算,考虑季节性水位变化对长期负摩阻力的影响。施工阶段应控制灌注桩底浆体密实度及桩顶填充质量,减少初始偏差。运营期内建议布设多点孔压计与桩身应变计,实现渗流状态与桩基变形的长期监测,必要时根据监测数据进行模型修正与安全评估。通过设计优化与动态监控相结合,可有效减轻渗流诱发负摩阻力对桩基安全的不利影响,确保结构长期稳定服役。

6 结语

地下水渗流对桩基负摩阻力的形成与发展具有显著影响,其本质是渗流诱发的土体有效应力变化与桩土相对位移的综合效应。本文基于渗流—固结耦合理论,建立了修正计算模型,系统分析了渗透系数、渗流方向及土层特性等因素的影响规律,并通过有限元模拟与工程实例验证了模型的适用性。结果表明,渗流条件下的负摩阻力分布具有明显的分层与集中效应,合理的桩长设计、排水结构布置与地基改良措施可有效减弱不利影响。未来研究可进一步引入时间效应与非线性界面模型,实现对长期服役行为的动态预测,为复杂水文地质条件下的桩基设计与运维提供更具精度的理论支撑。

参考文献

- [1] 强雨晗.渗流作用下能源桩群桩传热性能及热-力耦合特性研究[D].扬州大学,2024.
- [2] 张东海.分层和渗流条件下竖直地埋管换热器传热特性研究[D].中国矿业大学,2020.
- [3] 杨涛.深厚承压含水地层降水开挖对周边环境耦合影响及水位控制研究[D].东南大学,2023.

Study on the Migration Characteristics of Hydrocarbons Based on Nitrogen Compound Analysis

Wan Chen

China National Offshore Oil Corporation (China), Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This study explores the application of nitrogen compounds in the migration research of oil and gas based on the geochemical analysis of crude oil. The results show that with the increase of migration distance, the total amount of nitrogen compounds decreases, and the ratio of shielding type/exposure type increases, reflecting the adsorption effect of the formation. Based on this, the migration characteristics of each region are clarified: the oil and gas in Dongzhuang area are controlled by faults and migrate from faults to anticlines; the migration trend between fault blocks in Weigang Oilfield is obvious; the migration path in Zhangdian area shows a trend from deep to shallow. The study also confirmed the significant control effect of faults on the migration of oil and gas within fault blocks. This achievement not only provides key geochemical evidence for revealing the mechanism of oil and gas accumulation in complex fault blocks, but also provides theoretical support and practical guidance for the selection of exploration targets and reservoir prediction in similar depressions, and has important geological significance and application value.

Keywords

Nitrogen compounds; Geochemical analysis; Hydrocarbon migration; Faults

基于含氮化合物分析的油气运移特征研究

陈婉

中海石油（中国）有限公司深圳分公司，中国·广东 深圳 518000

摘要

本研究基于原油地球化学分析，探讨含氮化合物在南阳凹陷油气运移研究中的应用。结果表明，随运移距离增加，含氮化合物总量降低，屏蔽型/暴露型比值升高，反映了地层吸附效应。据此明确了各地区运移特征：东庄地区油气受断裂控制，由断裂向背斜运移；魏岗油田断块间运移趋势明显；张店地区则显示由深部向浅部的运移路径。研究同时证实了断层对断块内油气运移的显著控制作用。该成果不仅为揭示复杂断块区油气运聚机制提供了关键地球化学证据，也为同类凹陷的勘探目标优选与成藏预测提供了理论支持与实践指导，具有重要的地质意义与应用价值。

关键词

含氮化合物；地球化学分析；油气运移；断层

1 引言

油气运移研究是贯穿油气勘探与开发全过程的核心问题，不仅关乎油气藏成因机制的深入解析，更对指导油气资源的高效勘探与合理开发具有重要的实践意义。准确揭示油气在地下的运移路径、方向与距离，是实现“精准找油”的关键前提。目前，油气运移研究的方法主要包括流体包裹体分析、生物标志化合物检测以及地球化学示踪等技术手段，其中含氮化合物作为一种指示效果较好的示踪剂备受关注。研究表明，原油中的吡咯类含氮化合物（如吡啶及其衍生物）在运移过程中表现出显著的地质层效应——由于极性差异，这些化合物在通过储层介质时发生选择性吸附与滞留，

丰度及结构参数的变化沿运移方向呈现规律性变化，因此，其分布特征与变化趋势可有效反映油气运移的方向和距离。

2 研究区域概况

南阳凹陷是南襄盆地内一个相对独立的断陷构造单元，面积 3600km²。其南部为新野凸起，西北部是师岗凸起，东北部是伏牛山，东部以唐河低凸起与泌阳凹陷相隔，是一个中新生代的小型断陷。牛三门次凹和东庄次凹是主要的生烃中心，因此周边的构造带（如魏岗鼻状构造、张店构造）油气最为富集。油气主要富集在古近系核桃园组，其中核三段是其主力烃源岩及重要的储层^[2]。

东庄构造带是位于东庄次凹内部的东庄背斜带，是在断裂的作用下形成的构造带，该区原油属于自生自储型，即东庄次凹生成的原油在该构造带聚集成藏。魏岗构造带是一北端抬升，向南倾没的鼻状构造，位于东庄次凹以东，牛三

【作者简介】陈婉（1989-），女，中国湖北松滋人，硕士，工程师，从事石油地质研究。

门次凹西北部，是一个典型的断块油田，油气藏的分布受断层控制明显，不同断块之间的油气性质存在一定差异。该区油气主要分布层位在核二段，核三段少，断层多且复杂，油气分布受断层影响较大。张店构造带位于南阳凹陷中部，紧邻牛三门生油次凹，总体上为南倾北抬的宽缓鼻状构造，构造轴向近南北向，断裂将该构造带分割成许多断块，其构造特征以背斜和断裂相结合为主，形成了多个背斜-断块复合型油气藏。这些区域的地质背景和油气藏特征为本次研究提供了良好的基础。

3 含氮化合物参数与油气运移关系

含氮化合物作为油气运移地球化学示踪的重要指标，其丰度及结构特征在原油运移研究中具有显著的应用价值。原油中的含氮化合物主要有中性吡咯类(包括咔唑、苯并咔唑等)和碱性吡啶类两种类型。这里研究的含氮化合物主要指中性的含氮化合物。吡咯类含氮化合物，尤其是咔唑类化合物，因其分子结构的特殊性，能够反映油气运移过程中的地质色层效应^[7]。例如，1,8-二甲基咔唑与2,7-二甲基咔唑的比值被广泛用于评估油气运移的距离和方向。这类参数的应用原理在于，不同位置的甲基取代基影响了分子的空间构型，从而决定了其对地层吸附作用的敏感性差异。屏蔽型咔唑(如1-咔唑)由于甲基取代基的存在，使其更不易受到地层矿物的吸附作用，而暴露型咔唑(如4-咔唑)则因缺乏屏蔽效应而更容易被吸附。

随着油气运移距离的增加，含氮化合物的总含量呈现出逐渐降低的趋势，这一现象主要归因于地层介质对含氮化合物的吸附作用。具体而言，原油在运移过程中会与储层岩石发生相互作用，其中极性较强的含氮化合物更容易被岩石

表面的活性位点所吸附，从而导致其浓度下降。由于屏蔽型咔唑的吸附能力较弱，其在运移过程中能够更好地保留，而暴露型咔唑则因较强的吸附作用而逐渐减少，最终导致屏蔽型/暴露型参数值的升高，形成屏蔽型咔唑相对于暴露型咔唑更富集的现象。

此外，含氮化合物的分布规律还受到运移路径中地质条件的影响。例如，断裂带的存在可能会加速油气的运移速度，同时也增强了含氮化合物的色层效应。这种效应不仅体现在平面上的运移趋势中，也在垂向上的层位变化中有所呈现。因此，通过分析含氮化合物参数的变化，可以有效地推断油气运移的方向和距离，为油气藏的勘探与开发提供重要的地球化学依据。

4 不同地区原油运移特征分析

4.1 东庄地区

东庄地区原油中含氮化合物总量及屏蔽型/暴露型参数的变化特征表明，其运移规律受多种地质因素的综合影响。研究表明，该地区原油主要来源于东庄次凹，由于油藏与源岩之间的距离较近，导致含氮化合物总量和屏蔽型/暴露型参数的变化表现不明显。这一现象可能归因于较短的运移路径削弱了地层吸附作用对含氮化合物分布的影响。此外，Z1大断裂在该地区的油气运移中起到了关键作用，位于Z1大断裂北侧的D1井原油含氮化合物总量明显低于南侧其他井，说明断裂可能充当了油气运移的通道或屏障，从而影响了含氮化合物的空间分布。结合区域地质背景分析，油气总体呈现从Z1大断裂向背斜方向运移的趋势，这一结论为进一步探讨该地区的油气成藏机制提供了重要依据。

表 1 东庄地区原油含氮化合物含量及咔唑类分参数表

序号	井号	总含量 (μg/g)	1-/4- 咔唑	1,8-/2,7- 咔唑	苯并咔唑 [a]/[c]	位置
1	D1	2.68	2.43	0.69	0.97	断层北
2	D2	3.23	2.98	0.91	0.95	断层南
3	D3	2.96	1.81	0.95	1.13	断层南
4	D4	3.15	2.33	0.37	1	断层南
5	D5	3.45	0.99	0.4	1.03	断层南
6	D6	3.14	1.31	0.5	0.86	断层南

4.2 魏岗油田

魏岗油田不同断块间含氮化合物参数的变化揭示了油气运移的复杂路径。油气从F I号断块向F VII断块运移的过程中，含氮化合物总量呈现出随运移距离增加而逐渐减小的趋势，这种变化规律与地层吸附作用密切相关。具体而言，在F I号断块内部，从M9井到M11井，含氮化合物总量的减少与屏蔽型/暴露型参数(如1-/4-咔唑、苯并咔唑[a]/[c])的增加进一步验证了油气沿特定方向运移的趋势。类似地，在F V号断块中，从两翼(M4井和M3井)到M5井，含氮化合物参数的变化同样显示出明显的规律性。这些结果表

明，魏岗油田内部的小断块结构对油气运移路径具有显著的控制作用，同时也反映了含氮化合物参数在刻画油气运移细节方面的有效性。

4.3 张店地区

油气运移的地质色层效应同样在垂向上也有反映，即从距离油源较近的层位到浅部原油，含氮化合物绝对含量随着运移距离的增加而减小。张店地区取样点间含氮化合物指标的差异为研究油气运移规律提供了重要线索。根据化验数据可以看出，N79断块内从P9井至P6井，含氮化合物总量显著降低。此外，张店地区剖面的分析进一步揭示了油气