

含蜡原油管道蜡沉积影响因素与预测方法研究

刘玉幸¹ 陈亮宇²

1. 陕西博天节能环保科技有限公司东营分公司；2. 山东金岛勘察设计有限公司

摘要：本文研究了蜡沉积的主要影响因素及其预测方法，分析了油壁温差、蜡含量、添加剂及导热特性对蜡沉积过程的影响。通过冷指试验和环道试验，研究了不同油品组分和流动工况下的蜡沉积规律，并利用 BP 神经网络及动平衡蜡沉积速率模型预测蜡沉积速率。试验结果表明，油壁温差越大，蜡沉积量越多，蜡含量较高的油品更易形成蜡层，而降凝剂的加入可有效减少沉积量。研究表明，结合试验测量、数值模拟与神经网络预测，可有效提升蜡沉积预测精度，为油品管输的防蜡策略制定提供理论依据。

关键词：含蜡原油；沉积规律；沉积速率

原油管道输送过程中，蜡沉积是影响输送效率和管道安全的关键问题。由于温降导致蜡分子析出并沉积在管壁上，可能引发管道堵塞、流动阻力增大等问题，影响油田生产及经济效益。为此，本研究基于试验分析、数值计算和神经网络预测方法，探讨油品性质、温度场分布及流动工况对蜡沉积的影响。通过建立蜡沉积速率模型和优化防蜡措施，可以提高输送效率，为管道输送技术提供理论支持和工程指导。

1 蜡沉积规律的影响因素研究

1.1 冷指试验装置与方法

1.1.1 试验装置

冷指试验装置是一种常用于研究蜡沉积规律的试验设备，其原理基于油品与冷却介质之间的温差诱导蜡分子的析出与沉积。该装置通过在恒温原油中插入低温金属管（即冷指），使得蜡分子在油壁温差的作用下迁移至冷指表面并形成沉积层。通过测量不同试验条件下的沉积物质量，可获得蜡沉积规律。

冷指试验装置主要由可控温热浴、

可控温冷浴、冷指以及盛有试验油样的烧杯组成，如图 1 所示。可控温热浴通过循环水调节油样温度，使其稳定在设定值，以模拟管输原油的实际工况。冷指由金属管或金属板构成，表面温度低于原油析蜡点，冷浴循环系统可维持冷指恒温，从而形成油壁温差，为蜡的沉积提供表面。冷浴与冷指的进出口通过软管相连，形成冷却液循环回路，确保试验过程中冷指温度稳定。

1.1.2 试验方法

试验前，首先将原油样品加热至 70℃ 并恒温足够长时间，以确保其中蜡完全溶解。随后，将烧杯置于可控温热

浴中，使油温稳定在设定值，并通过搅拌和水浴保持均匀温度。试验开始前，对油样和烧杯进行称重，记录初始质量： M_1 。

试验过程中，将冷指水浴温度调节至设定温度，并浸入油样中。在温度场稳定后，测量原油中心的温度，并保持试验时间 16 h。试验结束后，将冷指取出，称量烧杯和原油的总质量 M_2 ，再将冷指置于干燥烧杯中，使凝油滴落后测定烧杯质量 M_3 和最终质量 M_4 。蜡沉积质量通过公式计算： $M_1 - M_2 + M_3 - M_4$ 。

1.2 油壁温差对蜡沉积的影响

1.2.1 温差对沉积量的影响

为了研究油壁温差对蜡沉积量的影响，本试验选择华北油田含蜡原油作为研究对象，该油样的凝点为 20℃，含蜡量为 20.1%。在试验过程中，设定两种不同的油壁温差（5℃ 和 8℃），并在不同温度区间（如 33/28℃、30/25℃、27/22℃ 等）下进行蜡沉积试验。

由图 2 可看出，油壁温差的增大会导致蜡沉积量的增加。在相同的温差

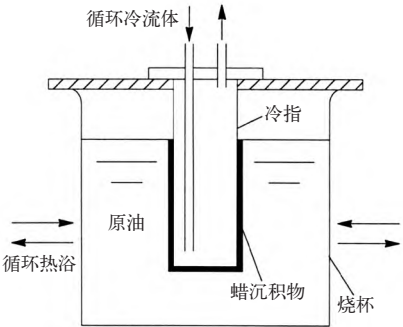


图 1 冷指试验装置示意图

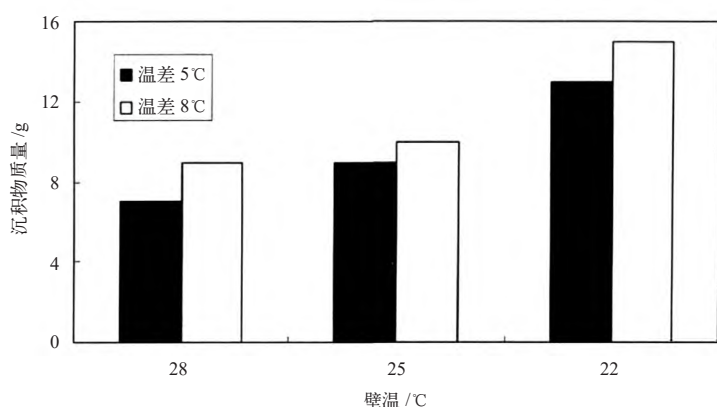


图2 不同油壁温差下沉积物质量对比

下，随着油壁温度的降低，沉积量增加。例如，在5℃的温差下，油壁温度区间从33/28℃降低至24/19℃时，沉积物质量从7g增加至23g；而在8℃的温差下，油壁温度区间从36/28℃降低至27/19℃时，沉积物质量从9g增加至31g。试验结果表明，较大的油壁温差会导致更显著的蜡沉积现象。这是由于油温的升高使油壁温差增大，增加了温度梯度，进而强化了分子扩散作用，使更多的蜡分子迁移至冷指表面，形成沉积层。

当冷指壁温降低至油样凝点以下时，沉积量显著增加，这是因为原油在低温下更容易黏附于冷指表面，形成较厚的凝油层，最终导致沉积物质量上升。因此，在原油管输过程中，合理控制油壁温差可有效调控蜡沉积量，减少蜡堵风险。

1.2.2 温差对沉积物组成的影响

除了影响蜡的沉积量，油壁温差还会显著影响沉积物的组成，包括蜡含量。试验采用BSY-338原油中蜡、胶质、沥青质含量测定仪，对不同温差下的沉积物蜡含量进行了测试，如图3所示。结果表明，在相同的温差下，随着油壁温度区间的降低，沉积物中的蜡含量总体呈增加趋势。例如，在5℃温差下，沉积物的蜡含量从21.8%增加至24.1%；而在8℃温差下，沉积物蜡含量从23.8%增加到24.7%。然而，当壁温降至油样凝点以下（如19℃）时，

沉积物中的蜡含量反而略有下降，这是因为此时沉积物中凝油所占的体积较大，导致相对蜡含量降低。

1.3 蜡含量对蜡沉积的影响

为研究蜡含量变化对蜡沉积的影响，本试验配制了不同蜡含量的模拟油，包括W62C10A0.5（蜡含量10%）、W62C12A0.5（蜡含量12%）、W62C15A0.5（蜡含量15%）和W62C20A0.5（蜡含量20%）。在油壁温度40/35℃，沉积时间10h的条件下，测定不同蜡含量下的蜡沉积量。

如图4所示，试验结果表明，随着模拟油中蜡含量的增加，沉积物的质量也随之增大。例如，10%蜡含量的

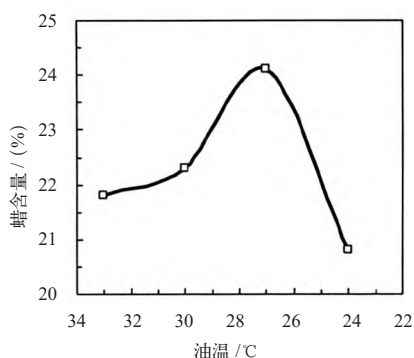


图3 沉积物中蜡含量变化

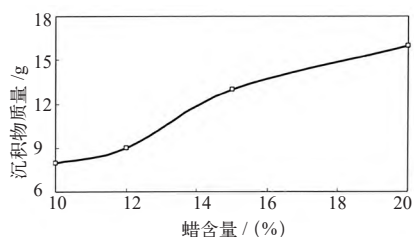


图4 沉积物质量随蜡含量的变化

模拟油沉积量最少，而20%蜡含量的模拟油沉积量最高。这是因为蜡含量增加时，原油或模拟油中蜡分子的浓度提高，使其在油壁温差作用下析出的蜡分子数量增加。此外，高蜡含量油品的析蜡点通常较高，意味着在输送过程中蜡更容易析出并沉积于管壁上。因此，在实际原油管输过程中，蜡含量较高的原油更容易发生蜡沉积问题，需要采取适当的控温或加剂措施，以减少蜡沉积的影响。

1.4 加剂对蜡沉积的影响

1.4.1 加剂对油品性质的影响

降凝剂是一种通过改变蜡晶结构来降低油品凝点、改善低温流动性的化学添加剂。其作用机理主要包括与蜡晶发生共晶作用、抑制蜡晶长大以及改变蜡晶形态。本试验以华北油田含蜡原油为研究对象，选用EVA降凝剂（加剂量100 mg/kg），测定其加剂前后的凝点、黏度以及蜡晶晶格参数的变化。

研究表明，加剂后原油的凝点显著降低，如6[#]原油的凝点由25℃降至6℃，降凝率达到76%。此外，加剂后原油的黏度也明显下降，如2[#]原油的黏度由980.5 mPa·s降至67.4 mPa·s，降黏率高达93.1%。XRD测试显示，加剂后蜡晶的晶面间距增大，蜡晶的结晶度提高，这意味着蜡晶的结构发生了变化，使其更难形成三维网络结构，从而降低了油品的凝点并改善了低温流动性。试验验证了降凝剂的作用机理，即通过与蜡晶共晶作用改变蜡晶的结构，使蜡晶不易聚集，从而提高油品的流动性，减少低温输送阻力。

1.4.2 加剂对蜡沉积的影响

除了改善油品的低温流动性，降凝剂还能够减少蜡沉积量，从而降低管道蜡堵的风险。本试验以模拟油W62C15A0.8为研究对象，在油壁温度区间36/30℃和33/27℃的条件下，分别测定加剂前后蜡沉积量的变化。

加剂后蜡沉积量显著减少。在

36/30℃油壁温度区间,加剂后的蜡沉积量减少14.3%;在33/27℃油壁温度区间,蜡沉积量减少37.5%。XRD测试显示,加剂后的沉积物蜡晶晶面间距增大,使蜡晶的聚集程度降低,减少了蜡晶形成三维网络结构的能力。因此,降凝剂不仅降低了原油的凝点和黏度,还减少了蜡的沉积量,提高了原油在低温下的输送效率。

2 蜡沉积试验环道测试段温度计算方法研究

2.1 环道试验装置及测试段温度变化特点

环道试验装置是一种用于模拟实际管道内蜡沉积过程的试验设备。该装置的测试段和参比段均设有控制壁温的水套,参比段油温与壁温一致,因此无蜡沉积,而测试段通过调控壁温低于油温,以模拟管道蜡沉积的实际情况。在测试段,热流体进入后受冷却水影响,温度沿管道轴向逐渐降低,形成温度梯度。由于油流与管壁温差的存在,蜡分子析出并沉积在管壁表面。因此,测试段的温度分布直接影响蜡沉积速率,是建立蜡沉积模型的重要基础。

2.2 测试段温度求解方法

F-K方法(分离变量转化为Kummer方程法)是一种用于求解管道流体温度分布的解析方法。该方法基于Graetz问题的研究特点,通过对能量平衡方程进行无量纲化处理,并结合恒壁温边界条件,将流体温度分布问题转化为偏微分方程的求解。由于温度分布涉及轴向和径向两个独立变量,F-K方法采用分离变量法,将温度函数表示为径向和轴向部分的乘积。该方法的优势在于其解析解较为直观,便于应用和分析,但在入口区域可能存在计算误差。

Svendsen方法是一种基于数值积分的温度分布求解方法,适用于Graetz数较大的情况,即热对流效应远大于热传导效应。该方法的核心思想是基于能

量平衡方程,并通过数值积分计算试验环道内油流的温度分布。

2.3 F-K方法与Svendsen方法计算结果对比

2.3.1 常壁温条件下两种方法对比

在常壁温边界条件下,测试管段的壁温恒定,而流体进入测试段后,其温度沿径向和轴向逐渐变化。利用F-K方法和Svendsen方法计算该工况下的温度分布,并在不同轴向距离(如1.16 m、2.31 m、3.47 m和4.63 m)处进行对比分析。

计算结果表明,两种方法得到的温度分布趋势一致,即在管中心区域温度变化较小,而靠近管壁处温度下降较快。然而,Svendsen方法的计算结果普遍高于F-K方法,且两者的差值在远离测试段入口处时逐渐增大。例如,在1.16 m处,两种方法的最大温差约为0.19℃,而在4.63 m处,该温差增大至0.33℃。此外,径向位置对两种方法计算结果的影响也较明显,尤其是在管壁附近(r^* 接近1)的温度梯度较大区域,F-K方法计算的温度值较低。

2.3.2 变壁温条件下两种方法对比

在实际环道试验中,测试管段的壁温并非恒定,而是受冷却水温度变化影响,沿轴向呈现一定的温度梯度。因此,计算变壁温边界条件下的温度分布对试验分析更具实际意义。本试验假设冷却水的温度沿轴向线性变化,即测试段进口壁温为40.5℃,出口壁温为40.0℃,

并分别采用F-K方法和Svendsen方法计算该情况下的温度分布。

如图5所示,两种方法在变壁温条件下的温度分布规律仍然一致,即管壁附近温度较低,随着轴向距离的增加,油流温度沿径向方向逐渐降低。然而,与常壁温情况类似,Svendsen方法的计算温度仍略高于F-K方法,且温差在远离测试段入口时更为明显。例如,在1.16 m处,两种方法的最大温差为0.18℃,而在4.63 m处增大至0.33℃。在变壁温情况下,流体的径向温度分布呈现出更加明显的“等温段”现象,即在管中心区域温度保持较长距离不变,而靠近管壁处温度骤降,这一趋势在F-K方法计算结果中尤为明显。

3 基于蜡沉积主要影响因素的预测方法研究

3.1 BP神经网络法预测蜡沉积速率

BP(Back Propagation)神经网络是一种典型的前馈神经网络,广泛应用于非线性预测问题。在蜡沉积速率预测中,BP神经网络以管道流动工况、温度场分布、剪切应力等参数作为输入,蜡沉积速率为输出,建立非线性映射关系。模型训练采用误差反向传播算法,通过不断调整权重和阈值,优化预测精度。

该模型能够较好地拟合蜡沉积过程,预测趋势与实际测量值基本一致,但在某些极端工况下存在一定误差。误

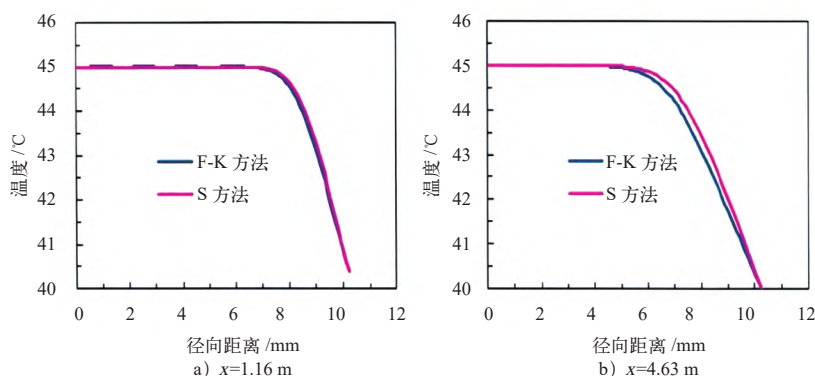


图5 不同轴距下两种方法对比结果(变壁温边界)

差分析表明,影响预测精度的主要因素包括样本数据的分布、网络结构的优化及学习率的设定。通过引入改进算法,如遗传算法优化权重或增加训练样本覆盖范围,可进一步提高预测精度,使BP神经网络在蜡沉积预测中具备更强的适用性。

3.2 关键参数计算

蜡沉积厚度的计算依赖于流体温度分布、剪切应力等关键参数。油温分布直接影响蜡沉积的形成与发展。计算时需考虑管道长度、流体流速、管壁热损失以及外界环境温度。根据传热平衡方程,油温沿管道轴向变化可由对流换热方程描述:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{q}{mC_p}$$

其中, T 为油温; x 为管道轴向位置; q 为单位长度管壁散热量; m 为流体质量流量; C_p 为比热容。通过数值方法可求得管道沿程温度分布,并结合蜡沉积温度阈值判断蜡沉积区域。

剪切应力决定了蜡沉积的脱落程度,主要由流体流动特性决定。管内流动可分为层流与湍流两种情况,其壁面剪切应力可分别表示为:

$$\text{层流流动: } \tau_w = \frac{4\mu U}{D}$$

湍流流动(由阻力系数 f 计算):

$$\tau_w = \frac{f\rho U^2}{8}$$

其中, μ 为流体黏度; U 为流速; D 为管道直径; ρ 为流体密度; f 由经验公式或Moody图求得。剪切应力过小会导致蜡沉积积累,过大会促使沉积层剥落。

3.3 动平衡蜡沉积速率模型

3.3.1 沉积与移除机制

蜡沉积的形成与去除受多种因素影响,主要包括扩散沉积、剪切剥离和溶解再吸收三个主要机制。扩散沉积是主导机制,溶解在油中的蜡分子因温度降低逐渐析出,并通过分子扩散和湍流

扩散沉积在管壁上。沉积层的厚度随时间增加,但同时也受到剪切应力的影响,当壁面剪切应力超过某一临界值时,部分沉积层被流体剥离。

3.3.2 计算结果对比与误差分析

基于动平衡蜡沉积速率模型计算的结果,与试验数据及现场监测数据进行对比,可验证模型的准确性。计算结果表明,蜡沉积速率随管道温降、流速及含蜡量的变化而不同,尤其在低温高黏度条件下沉积速率显著提高。对比试验数据,发现模型计算的蜡沉积厚度与实测数据偏差在10%以内,表明该模型能较好预测蜡沉积趋势。误差的主要来源包括油品组分变化、流场复杂性及试验测量误差。进一步优化模型时,可引入更精细的参数修正,如改进剪切剥离临界应力计算或考虑油品中表面活性剂的影响,以提高预测精度并更准确指导管道防蜡措施的制定。

3.4 沉积层蜡含量变化的影响

3.4.1 有效导热系数计算

蜡沉积层的导热特性对管道内流体的温度分布和蜡沉积速率影响较大。有效导热系数受蜡沉积层的密实度、油含量及温度梯度变化的影响,通常采用复合材料的有效导热系数模型进行计算。沉积层由固态蜡晶和残余油相组成,其导热性能可通过体积分数法或经验关联式求得。通常,蜡晶含量越高,导热系数越接近纯蜡的导热性能;反之,残余油相较多时,沉积层的导热能力降低。通过试验测定不同温度和含油比例下的蜡沉积导热系数,并结合理论计算,可获得适用于工程应用的导热系数预测模型,提高管道保温和防蜡措施的精确性。

3.4.2 导热系数对蜡沉积的影响

导热系数影响蜡沉积层的热传递能力,进而决定了沉积层的生长速率和最终厚度。当沉积层的导热系数较高时,管壁附近的温降较小,使蜡的沉积速率降低;反之,若沉积层导热性能较差,则管壁温度降低更快,促进更多蜡沉积。

沉积层导热系数的变化还会影响剪切应力和流体动力学特性,间接影响蜡层的剥离和再沉积过程。现场研究表明,在高蜡含量油品输送过程中,通过调整管道材料的导热特性或采用内涂层技术可有效改善蜡沉积情况。优化导热系数的计算方法和预测模型,对于制定合理的防蜡策略,提高管道输送效率具有重要的工程意义。

4 总结

本研究围绕原油管道蜡沉积问题,综合试验分析、数值计算及BP神经网络预测方法,系统探讨了油壁温差、油品性质、剪切应力及沉积层导热系数对蜡沉积速率及厚度的影响。通过冷指试验和环道测试,验证了不同温度场与流动工况下的蜡沉积规律,并建立了动平衡蜡沉积速率模型,较准确地预测了蜡沉积趋势。研究结果表明,优化管道温控策略、调整流速及采用降凝剂可有效降低蜡沉积量,提高输送效率。

参考文献:

- [1] 张雨,黄启玉,曾宪伟,等.原油管道高厚度蜡层冬季首次清管方案研究[J].石油科学通报,2024,9(06):1044-1057.
- [2] 樊成洋.某含蜡原油管道结蜡规律及防蜡剂作用效果评价[D].西安:西安石油大学,2023.
- [3] 李达,魏立新,刘桂芬,等.基于冷指试验的高含蜡原油蜡沉积规律研究[J].化学工程师,2022,36(04):79-82+60.
- [4] 李荣彬.PE管道蜡沉积机理及老化过程研究[D].北京:中国石油大学(北京),2021.
- [5] 杨晓鹏.高含蜡原油含水含稀油流变与沉积特性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2021.