

高粘度原油输送管道温度分布及热控制研究

王 涛 (国家管网集团华中公司襄阳作业区, 湖北 襄阳 441002)

摘要: 本文探讨了高粘度原油输送管道的温度分布特性, 分析了影响温度变化的多种因素, 并构建了温度分布的数学模型。针对传统热控制方法的局限性, 介绍了先进的热控制技术, 包括智能温控系统和节能保温技术。通过典型工程案例的分析, 提出了优化的热控制系统设计方案, 并展望了未来技术的发展趋势, 为高粘度原油的高效输送提供了理论支持与实践指导。

关键词: 高粘度原油; 输送管道; 温度分布; 热控制

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 024-0094-03

Research on Temperature Distribution and Thermal Control of High-Viscosity Crude Oil Conveying Pipelines

Wang Tao (Central China Branch of National Pipeline Network Group Xiangyang Operation Area, Xiangyang Hubei 441002, China)

Abstract: This paper discusses the temperature distribution characteristics of high-viscosity crude oil transportation pipelines, analyzes various factors influencing temperature changes, and constructs a mathematical model of temperature distribution. In view of the limitations of traditional thermal control methods, advanced thermal control technologies are introduced, including intelligent temperature control systems and energy-saving insulation technologies. Through the analysis of typical engineering cases, an optimized design scheme for the thermal control system was proposed, and the future development trend of technology was prospected, providing theoretical support and practical guidance for the efficient transportation of high-viscosity crude oil.

Key words: High-viscosity crude oil; Conveying pipeline; Temperature distribution; Thermal control

高粘度原油因流动性差, 输送过程中面临诸多挑战。随着高粘度原油的开采和运输需求增加, 管道温度控制变得至关重要, 直接影响原油流动性、输送效率和能源消耗。

1 高粘度原油输送管道温度分布特性

1.1 输送过程中温度变化的影响因素

在输送高粘度原油的过程当中, 温度的波动会受到多个不同因素的综合影响。首先, 原油的起始温度与管道的外部环境温度均是影响管道内部温度的核心要素。当环境温度偏低时, 可能会引起管道的热量损失, 进而对流体的温度产生影响。再者, 流体在管道中的流速对温度的分布起到了关键作用, 较慢的流速常常会引起热交换的不均衡和较大的温度差异。管道的热传导特性会对温度的波动产生显著的影响, 使用高导热性的管道材料可以更有效地传输热量, 从而降低温度差异。另外, 热控制系统的工作效率和操作模式, 例如加热电缆或热油循环等, 也将直接影响到管道内温度的稳定性和均匀性。

1.2 管道温度分布规律及数学模型

高粘度原油输送管道的温度分布规律可通过热传导方程来描述。管道内部的温度分布主要依赖于热量的传输机制, 这包括热量的传递、对流和辐射等多种方式。考虑到管道内部的热传递以及流体的能量传递,

可以采用以下的热传导公式来构建温度分布的模型:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c}$$

其中, T 代表温度, α 代表热扩散系数, 而 $\nabla^2 T$ 代表温度梯度; Q 是热源功率, ρ 表示流体密度, 而 c 则代表比热容。这一方程阐述了热量在管道中的传递特性, 并考虑了温度随时间和空间的变化模式, 从而能够揭示热源、管道的外部环境以及流体流动等多重因素对温度变化的作用。通过对该方程进行数值解析, 我们能够观察到在各种工作条件下的温度分布情况, 并进一步探讨各种影响因子对温度分布产生的作用。例如, 流速较高和热扩散系数较低往往会引发管道内部温度分布的不均匀性。然而, 一个高效的热控制系统能够通过精准地调整热源的功率来减缓温度的波动, 从而提升传输效率。

1.3 温度变化对输送效率的影响

对于高粘度原油的输送效率, 温度的波动产生了明显的效果。高粘度原油的流动特性与其温度有着紧密的联系, 当温度偏低时, 原油的粘度会上升, 这会增加流动的阻力, 从而导致输送效率的下降。更具体地说, 原油在低温环境下流动性较差, 泵送压力上升, 能量消耗增加, 并有可能引发管道阻塞或输送中断的情况; 然而, 在温度过高的情况下, 尽管原油的流动

性得到了提升，但过高的温度反而会增加管道的热损失和能源消耗，从而对经济效益产生不良影响。因此，确保管道的温度维持在一个可接受的范围内，不仅可以保障原油的流动特性，降低流动的阻力，还能有效减少能源的消耗，进而增强整体的输送效能。

2 高粘度原油管道的热控制技术

2.1 传统热控制方法及其局限性

传统上，高粘度原油的热控制主要是依靠加热电缆、热油循环系统以及蒸汽加热等多种手段来实现。这些策略旨在通过引入外部热源来提升管道内部温度，从而确保原油的流动性。在加热电缆系统设计中，电缆是沿着管道的外侧进行铺设的，并通过电流生成热量以加热管道，这一技术特别适合于短距离的传输。尽管如此，加热电缆在热效率和能耗方面表现不佳，特别是在长距离传输过程中，电缆的安装和维护复杂性以及对高能源的需求成为其主要的不足。热油循环系统的工作原理是，通过在管道内外循环流动加热油，利用热交换的方式来维持管道的温度。虽然这个系统在处理长距离传输问题上表现得相当出色，但它的安装过程较为繁琐，对设备的需求也相对较高，同时其维护费用也偏高，另外，热油的加热效果还会受到环境温度波动的较大影响。

蒸汽加热系统代表了一种传统的热控制技术，它是通过向管道或其周边注入蒸汽来利用蒸汽的热量来加热原油的（如图1）。这一技术能在较短的时间段内提供相对较高的热量，但同时也会导致较大的能量损耗，尤其是在长时间使用的情况下，蒸汽的持续供应可能会增加额外的能源消耗。另外，蒸汽加热可能会引起管道温度的大幅波动，这使得维持稳定的输送环境变得困难。总体而言，尽管传统的热控制技术能显著提升原油的流动特性，但它也存在如热效率不高、能量消耗大、设备繁琐和维护难度大等问题，因此迫切需要采用先进的技术方法进行改进。

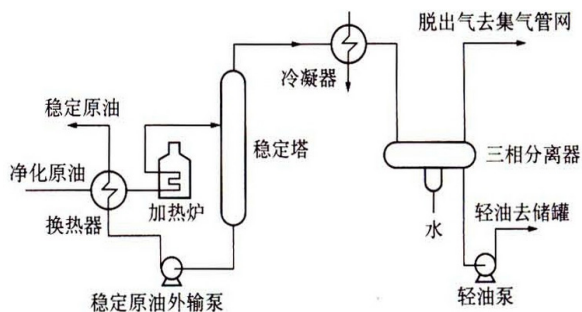


图1 原油蒸汽加热流程图

2.2 先进热控制技术的应用与优化

随着科技的不断发展，先进的热控制技术已经开始在高粘度原油传输过程中得到应用，目的是提升热

效率并减少能源的消耗。智能温度控制系统被认为是当前最尖端的技术之一，通过对管道温度的实时监控和数据分析来优化加热方案，从而实现了对温度的精确管理。智能温控系统与传统的加热电缆不同，它可以根据流体的真实需求来调整热源的功率，从而避免因过度加热导致的能源损失。与此同时，使用相变材料（PCM）作为隔热材料已逐步被认为是一种高效的热能管理策略。PCM 具有在特定的温度区间内吸纳或释放热能的能力，这有助于维持管道内部温度稳定，并减缓温度的波动和热量损失。

此外，采用低能耗热泵技术进一步增强了热控制系统的工作效率。热泵技术是通过回收环境中的低品质热能并提高其温度来加热管道内的流体，与传统的加热方法相比，它能显著降低能源的消耗并减少运营成本。在某些极度寒冷的地区，热泵技术不仅显著提升了热量控制的效率，还大幅度降低了对外界能源的依赖，从而使得高粘度原油的传输过程变得更为经济和环保。

例如，某西北地区的高粘度原油输送项目采用了智能温控系统和热泵技术的联合应用，在保证原油流动性的同时，有效减少了能源消耗。项目中通过实时监测管道内外温度数据，智能温控系统自动调节加热功率，确保温度维持在最佳区间。同时，热泵系统回收外部环境的低温热能进行加热，成功降低了对传统能源的需求。此项目的成功实施，不仅提高了输送效率，还降低了40%的能源费用，具有较强的示范作用和推广价值。

2.3 热控制系统的设计与运行策略

对于高粘度原油的有效传输，热控制系统的设计和运行策略显得尤为关键。首先，在设计过程中，必须全面考虑管道的地理位置、原油的物理属性、外界的气候状况以及传输所需的流量。考虑到各种工作环境和原油的特性，我们可以选择分段加热和局部温度控制的策略来设计方案。例如，在长途输送管道系统中，管道可以被划分为多个不同的加热段，每个加热段都会根据实际的温度需求来调整其加热功率，这样可以有效地避免由于全线加热而产生的过度能源消耗。另外，管道的热保温层的设计也是至关重要的，需要选择高效的保温材料，以最大程度地减少热量损失，提高系统的热效率。在设计过程中，我们还需要考虑到管道的可扩展性和系统的可维护性，以确保在未来的运营中可以根据实际需求进行灵活的调整。

从运行策略的角度看，热控制系统应当采用智能调节策略，利用传感器和数据收集工具来实时监测管道的温度和原油的流动状况。通过融合大数据分析与

人工智能的先进技术，该系统可以依据实时的数据动态地调节加热功率，从而实现精确的控制，并减少能源的不必要消耗。举例来说，在原油流动速度较慢或温度偏低的地方，系统会自动提高加热功率，但在流速更快的地方，能量输出会相应地减少。此外，该系统还应该拥有自我调整的功能，能够根据外界环境的变化（例如季节性的变化或天气的不稳定）进行自我调整。通过调整和优化管理策略，我们不仅可以确保温度的稳定性，还可以降低能源的过度使用，从而达到节能和减少排放的目的。

3 高粘度原油输送的优化与工程实践

3.1 典型工程案例分析

魏荆线作为连接河南油田至荆门炼厂的高粘度原油输送管道，面临着管径较小（219mm）以及所输送原油具有典型的“三高”特性（高粘度、高密度、高含蜡）的问题。这些特点使得原油在低温环境下容易凝固，从而影响流动性，增加输送阻力，导致摩擦损失和能源消耗的增加。为了应对这些挑战，魏荆线的热控制系统设计的主要目的是防止原油在管道内凝固，以及降低输送过程中的摩阻。通过有效加热管道，系统确保原油保持在适当的流动温度范围内，避免了凝固现象的发生，进而减少了因原油流动性差而产生的摩擦阻力，显著降低了能源消耗。

此外，魏荆线还结合了热油循环和站内工艺管网电伴热系统的双重加热方式，以应对高粘度原油在低温条件下的流动性问题。热油循环系统通过将加热油在管道内外循环流动，利用热油与管道的热交换作用，持续为管道提供均匀的热量，确保管道内原油的温度稳定在流动范围内，防止凝固和结蜡现象。而站内工艺管网电伴热系统则通过在管道外部安装电加热带，提供精确、局部的加热，以应对管道不同段落温度需求。电伴热系统能够快速响应温度变化，在管道温度低于设定值时自动启动，确保管道的温度保持在最佳水平。

在实际运行过程中，魏荆线的智能温控系统展现了其显著的节能效果。系统通过安装在管道不同位置的温度传感器，实时监测管道内的温度变化，并通过中央控制系统对加热设备进行精确调节。该智能化控制策略能够根据流体的实时状态，自动调整加热功率，确保原油温度维持在最优范围内，既避免了过度加热带来的能量浪费，也确保了管道的运行效率。在项目实施后，魏荆线成功降低了约30%的能源消耗，同时提高了输送效率。

3.2 输送系统的优化设计方案

在对高粘度原油输送系统进行优化设计的过程中，首先需要集中精力于热控制系统的整体优化。考

虑到各种输送环境和原油的特性，我们选择了结合分段加热和智能温度控制系统的方法，以进一步完善管道的热管理策略。在设计过程中，我们可以将管道划分为多个温度控制部分，并根据实时的数据来调整每一部分的加热功率，这样可以避免由于整体加热造成的能源损耗。例如，在气温较低或波动较大的区域，可以设置更高的加热功率，而在气温较高的区域，加热需求会自动降低。除此之外，使用高效的保温材料 and 降低热量损失的技术手段也构成了优化设计的关键环节。通过增强管道的保温功能，不仅可以确保其热效率，还可以降低外界环境对管道温度的不良影响，从而进一步优化系统的总体能效。

其次，在优化输送系统时，还需考虑到能源的供给和系统的持续性。基于传统的热油循环和电加热技术，并融合热泵技术与太阳能等可再生能源，我们可以进一步减少能源的使用并增强系统的持续性。热泵技术能够通过回收环境中的低品质热能并对原油进行加热，这被视为一种相对经济的节能策略。在设计过程中，可以考虑结合热泵和传统的加热方法，在能源效率达到最佳的时候采用热泵，从而降低对电加热系统的依赖。此外，利用太阳能加热技术，在阳光照射充足的地方为管道提供更多的热量，从而进一步减少运营的费用。通过综合运用这些多层次的优化策略，不仅可以确保原油在运输途中具有良好的流动性，还能显著提升整个系统的能源使用效率，降低对外来能源的依赖，从而实现节能和环境保护的双重目标。

4 结束语

高粘度原油的输送技术在提高输送效率和减少能源消耗方面具有重要意义。通过优化管道温度分布和应用先进的热控制技术，可以显著提升系统的能源利用效率和稳定性。随着智能化和绿色能源技术的不断发展，未来高粘度原油输送系统将更加高效、智能和环保，为行业的可持续发展提供有力支持。

参考文献：

- [1] 吴晓东, 万宇飞, 陈正文, 等. 高粘原油输送技术对比性研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(17): 189-190, 192.
- [2] 何磊, 田正印, 王建. 原油长输管道顺序输送动态传热特性研究 [J]. 石化技术, 2020, 27(2): 34-35.
- [3] 万军. 热输原油管道总传热系数的研究及应用 [J]. 管道技术与设备, 2022(5): 15-18.

作者简介：

王涛（1977.03—），男，汉族，湖北荆门人，本科，工程师，研究方向：电气及自动化控制、节能及减排、机械设备故障诊断与处置、天然气及液体管道工艺运行。