

长距离输油管道电伴热的应用

郑昆鹏（中石化石油工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：近几十年来，全世界经济的飞速发展，导致各国对石油的需求量日益增加，高凝、高蜡、高粘的“三高”原油以及寒冷地区成品油的输送问题等对长距离输油管线的运行提出了更高的要求。为切实保证石油长距离输送的连续性、高效性和安全性，我们需要在优化输送工艺的同时，加强对长距离输油管线电伴热应用的研究。本文将从电伴热的分类、原理、选用等方面入手，对目前长距离输油管道常用的电伴热形式进行分析研究。

关键词：电伴热；集肤效应；长线电伴热；选用

1 概述

传统伴热方式有蒸汽伴热、热水伴热等，通过伴热管将蒸汽、热水的能量传递到被伴热管道的外壁，补偿其散热损失。传统伴热方式有较大的局限，如伴热管的散热量不均匀、不易控制，伴热管前端及后端温差较大，且伴热效率较低，另外伴热源较难实现，且蒸汽、热水伴热管存在渗漏的隐患，不利于管道的施工、防腐及后期的维护。因此，发展至今，管道系统传统的伴热方式逐渐被电伴热所取代，特别是在长距离输油管道中的应用。

电伴热是利用电伴热装置将电能转化为热能，通过与被伴热管道直接或间接的热交换，补偿被伴热管道的散热损失的一种方式。电伴热方式能使被伴热管道内的介质温度保持在设计要求的工艺温度范围内，具有温度精准可控、伴热均匀、伴热效率高、施工简便、安全无泄漏、便于维护等优点。目前在国内外的长距离输油管道中广泛应用。

2 电伴热分类

2.1 感应电伴热

感应电伴热是通过在被伴热管道外缠绕电线或电缆，接通电源后，由电磁感应的热效应产生能量加热被伴热的管道，以补偿其散热损失。感应电伴热具有能量密度高的优点，但伴热线缆采用缠绕方式，长度相对过长，导致整体费用过高，在长距离输送管道中很少应用。

2.2 集肤效应电伴热

集肤效应电伴热的原理基于交流电通过导体时的“集肤效应”和“邻近效应”，集肤效应是当导体中通以交流电时，导体内部的电流分布不均匀，电流集中在导体“皮肤”部分的一种物理现象；而邻近效应是当高频电流在两导体中彼此反向流动或在一个往复

导体中流动时，电流会集中于导体邻近侧流动的一种物理现象，与集肤效应同时存在时，会使导体的电阻进一步增加，产生更多的热量，相当于对集肤效应的增强。

在集肤效应电伴热装置中，绝缘电缆穿过伴热钢管并与伴热钢管尾部连接，伴热钢管的首部与绝缘电缆分别接电源的零线和相线，形成回路，接通电源后，工频电流通过电缆和伴热钢管，电缆及伴热钢管的电阻产生热量。

由于集肤效应及邻近效应，交流电集中流过伴热钢管内表面起的某一深度内，而在伴热钢管外表面电压电流几乎为零，因此伴热钢管焊接在长输管道上很安全。根据上述原理，可以将集肤效应电伴热方式作为安全、高效的热源。伴热管产生的热量通过焊缝及导热材料传给长输管道，达到伴热的目的。

集肤效应电伴热具有安全、高效、加热均匀、投资省等优点，在工业管道及长输管道中广泛应用。

2.3 电阻伴热

电阻伴热方式是利用电流经过电阻时产生的热量，补偿被伴热管道的热量损失。目前，电阻伴热技术较成熟，各类伴热带发展已经较为完善，且伴热带安装应用较灵活，电阻伴热广泛应用于工业管道、设备、阀门、管件等部位，是应用很广泛的伴热方式。常规电阻伴热在长输管道中应用较少，长线电伴热是长输管道电伴热的主流形式。

电阻伴热的电伴热带或电伴热电缆基本分为两大类：恒功率电伴热带和自限温电伴热带。恒功率电伴热带的原理是通过给电伴热带施加电流，通过电伴热带电阻产生的热量对被伴热管道进行伴热。自限温电伴热带能够自动限制伴热时的温度，并随被伴热体的温度自动调整输出功率，无其他附加设备。自限温

伴热带具有其他伴热设备所没有的好处，它的工作温度是自动调节的，温度不会过高也不会过低。

2.4 长线电伴热

长线电伴热是在电阻伴热中逐渐发展出的一种形式，解决了电阻伴热距离较短的问题，目前被广泛的应用在长距离输油管道的电伴热中。长线电伴热的原理较简单，即对超长距离的伴热电缆施以高压电源，通过伴热电缆自身的电阻发热实现对伴热管道的热补偿。通过长线电伴热系统的运作，可实现单一供电点为几十公里的长距离管道提供伴热，同时伴热电缆在每个单位长度上提供的功率可以保持恒定，另外，通过长线电伴热电源的调节及长输管道上多个测温点的温度反馈，可实现伴热温度的调整及精确控制。

为提高长线电伴热的安全性，伴热电缆选择特殊结构的电缆，由高分子材料包敷两根平行导线，同方向另布 3-5 根带绝缘护套的金属导线，用于传输电能，同时外加金属铠装，确保伴热电缆的防外力损伤和抗拉性能。这种特殊结构的电缆最长连续使用长度可达 1km，减少了伴热电缆安装过程中的接头数量，提高了伴热电缆敷设的工作效率，同时减少了伴热电缆布置过程中外力损坏或拉拽过程中损坏的风险，大大提高了长线电伴热电缆安装过程及后期运行维护中的安全性。

3 电伴热方式的选用

选择电伴热的方式，需要依据工程的工艺条件、环境情况、伴热要求及应用业绩等多方面因素。以国外某原油管道项目实际为例：该项目管道输送加热后的高含蜡原油，析蜡点为 34℃，管道直径为 DN250，线路长度约 46km，首站出站输送温度为 68℃，出站压力为 9.46MPa，地温最低为 25℃，总传热系数为 0.42W/(m.K)，末站要求最低进站压力为 0.75MPa。该项目管道电伴热的主要作用为：①保证管道投产试运行的实现；②管道停输后，启用管道电伴热，保证管道内温度高于油品析蜡点 5℃以上，防止管道停输引起的凝管；③需要的情况下，启用电伴热提高输送油品的温度，降低油品的粘度，进而提高管道输量。综上所述，该工程电伴热的要求为，电伴热带的功率至少可实现将管道内原油由 25℃加热到 68℃。

3.1 当无热源时，径向一维热传导公式如下

$$q \cdot \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{A} \cdot dR = \int_{T_1}^{T_2} k \cdot dT$$

其中：

q：传热速度（W）；

R：半径（m）；

R₂：外径（m）；

R₁：内径（m）；

T：温度（℃）；

T₂：外表面温度（环境温度）（℃）；

T₁：内表面温度（流体温度）（℃）；

k：保温材料导热率（J/m·s·K）；

A：传热面积（m²）。

3.2 单位轴向长度（1m）内的热量损失如下

$$A=2 \cdot \pi \cdot R \cdot L$$

其中：

L：轴向长度（m）。

相对保温层热阻，其他如对流传热、管壁热阻等可忽略不计，积分可得：

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{avg} \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

将参数代入上式，得出：

单位长度管道的热量损失为 20.51W。

电伴热效率按 0.7 考虑，得出电伴热带的发热功率为：30W/m。

通过对各类电伴热形式的分析和比选，集肤效应电伴热和长线电伴热更加适用于该工程长输管道的伴热，通过与电伴热厂家调研，集肤效应的伴热功率可达 120W/m，长线伴热的功率可达 60W/m（单相）或 180W/m（三相），均可满足本工程的伴热要求。为了增加可靠性，一般另设一路作为备用。同时，该工程 46km 的线路中设置了 2 座截断阀室，截断阀的电伴热可以采用电阻伴热的形式。

4 集肤效应与长线电伴热的对比

由于集肤效应电伴热与长线电伴热是当今长输管道行业主流的电伴热方式，因此对两种电伴热方式进行进一步对比，主要从配套设施、安装及维护、应用领域、经济性等几个方面进行。

4.1 配套设施

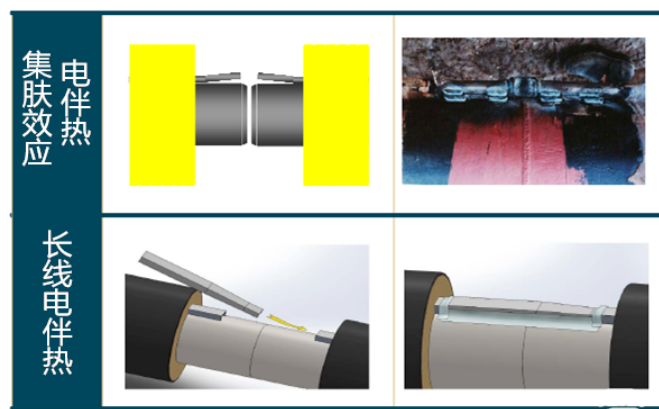
集肤效应电伴热的主要配套设施包括：①伴热管。伴热管一般为普通碳钢管，采用断续焊的方式焊接在长输管道上，是集肤效应电伴热的主要发热元件；②集肤效应伴热电缆。集肤效应伴热电缆长距离使用时，

绝缘层应满足耐高温、耐磨等要求,是集肤效应电伴热的另一个发热元件;③接线盒。分为首端接线盒、中间接线盒和尾端接线盒,用于电路中不同部分的连接;④电源。集肤效应电伴热的电源应根据伴热长度、伴热功率等实际情况确定,通常情况下采用工频交流电;⑤控制盘。为集肤效应电伴热系统提供电源和控制电路的通断;⑥温度监测系统。用于实时监测长输管道的运行温度,为控制盘提供信号以便调控长输管道的运行温度,使其保持在合适范围内。

长线电伴热的主要配套设施包括:①伴热电缆。长线电伴热的伴热电缆为专用的铠装电缆,具有绝缘、耐高温、耐磨、抗拉等特点,伴热电缆是长线电伴热的发热元件;②铝壳保护层。铝壳保护层先于伴热电缆安装到长输管道上,是伴热电缆安装的通道,隔离伴热电缆及聚氨酯保温材料,为前期的安装及后期的维护提供便利;③接线盒。长线电伴热系统所需的接线盒较少,用于伴热电缆电路的连接;④电源。长线电伴热的电源电压等级高,对电源的要求较高,应根据伴热长度、伴热功率等实际情况确定,一般采用工频交流电;⑤控制盘。与集肤效应电伴热类似;⑥温度监测系统。与集肤效应电伴热类似。

4.2 安装及维护

集肤效应电伴热及长线电伴热的安装方式对比如下图所示:



安装方式上,集肤效应电伴热和长线电伴热的主要区别在伴热部件与长输管道本体的连接上。

通过集肤效应电伴热的安装示意图可知:①伴热管与长输管道本体直接焊接连接,需破坏管道外防腐层,可能会破坏管道本体,因此对焊接质量要求极为严格;②伴热管间也需要进行焊接连接,增加了施工工程量,伴热管焊接的焊渣等也会对管道的外防腐层

产生破坏;③上述焊接的焊渣等难以清理干净,对后期的防腐层及防腐效果产生隐患;④伴热管的焊接质量直接影响后期伴热线缆的穿线工作,焊疤、焊瘤等可能会对线缆的保护层造成破坏。

通过长线电伴热的安装示意图可知:①伴热电缆的铝壳保护层直接捆扎在长输管道上,不对管道外防腐层造成任何破坏;②管段之间连接时,接口处的铝壳保护层直接捆扎,没有焊接工作,对管道没有影响;③伴热电缆在铝壳保护层内进行穿线施工,不会破坏伴热电缆的保护层。

4.3 应用领域

根据管道中液体的物性不同,要求管道内维持的温度也不同,集肤效应电伴热技术主要应用于管道的伴热和管道内液体或已凝固介质的加热、熔化或间歇输油的管线。

长线电伴热作为近年新兴的伴热技术,主要应用于石油、化工、电力、冶金等管道系统的工艺温度维持,也于长距离、大口径管道的伴热保温,或海底管道、埋地管道、架空管道、城市管廊内管道等。

4.4 经济性

通过对集肤效应电伴热及长线电伴热的对比,长线电伴热除在伴热电缆价格方面高于集肤效应电伴热外,其他在安装、运营及维护等方面均接近或低于集肤效应电伴热,整体经济性二者较为接近,需根据工程实际情况选择电伴热的方式。

5 结论

综上所述,电伴热具有热效率高、结构简单、安装维护方便、精准控温、自动控制等特点。近年来,电伴热在石油、天然气、石化、化工、电力、建筑、冶金、食品等多个领域得到越来越广泛的应用。在长距离输油管道的应用中,集肤效应电伴热和长线电伴热技术各自占据了市场较大的份额,保证了国内外众多长距离输油管道的平稳运行;通过安全可靠的技术、不断创新的发展,集肤效应电伴热和长线电伴热将进一步扩展各自的影响范围。

参考文献:

- [1] 孙广岭. 集肤效应电伴热在胜利埕岛海底输油管道上的应用研究 [J]. 石油工程建设, 2006(03):31-34.
- [2] 马丹旒, 高滨. 电伴热的选用及设计 [J]. 山东化工, 2014,43(10):113-117.
- [3] 赵晓刚, 周毅, 赵健宇. 输油管线集肤效应电伴热的优化 [J]. 化学工程, 2013(09):42-45.