

趋肤效应电伴热在长距离加氢尾油管线的应用

趋肤效应电伴热系统具有适用性强、安全可靠、安装维护简单、加热效率高和易于控制等特点，成为伴热系统的发展方向。目前的趋肤效应电伴热系统大多采用的是工频电源，伴热系统恒功率输出，不因外界环境温度的变化而改变，负载温度的控制是通过开关控制来实现的。分析了趋肤效应电伴热系统的原理和组成结构，分析了电磁场的趋肤效应和邻近效应现象，给出了趋肤效应电伴热系统中的工程计算实例规则，并提出一些应该注意的问题。

黄 旭/中国石化工程建设公司

问题的提出

电伴热是指用电能使输送管道内流体的温度维持在期望的工艺温度范围内。在工业生产领域，电伴热的应用越来越广泛，为各个行业管道输送系统的正常运行提供了保障。我国油田的原油其蜡含量较高，当含蜡原油的温度高于蜡的析出温度时，原油黏度较低，其流动阻力不大；但原油在油管内流动过程中不断向周围环境散热，当其温度低于蜡的结晶温度时，蜡晶微粒便开始在油流中析出，原油黏度急剧增加，最终可能失去流动能力而凝结，给原油的生产带来巨大的损失。应用电伴热对该输送管道进行保温，就能很好地解决含蜡原油的输送问题。

总的来说，电伴热主要适用于下列输送管道中：

1) 用于防冻型管道的伴热，输气管线含有饱和蒸汽，要求维持温度不低于6℃。

2) 用于常温时为凝固状态，输送时管道维持温度不低于50℃的流质中。这类流质只有加热到一定温度时才能变成

液态可以输送。如运输巧克力、牛奶等。

3) 要求管道维持温度为50~100℃，在常温下为固态或黏度很高，难以流动，但加热到一定温度后又易于流动物质的管道输送，如：稠油、高凝油、燃料重油、煤焦油和蜡等的输送。

4) 要求维持高温，温度高于100℃而低于150℃的输液管道，如硫磺必须加热到130~140℃时，才能变成液态，易于输送。

5) 间歇输送的高凝点介质或黏稠介质，如码头燃料油，管线不用扫线，可直接再起动等。

目前常用的管道电伴热方式有以下3种类型：

1) 电缆伴热。电缆伴热是用金属合金制成芯线，芯线外面用具有良好的热稳定性和导热性的材料做成绝缘层，最外层用铜或不锈钢制成封闭的铠装。该电缆伴热靠导体通电时产生的焦耳热来加热管道。

2) 电热带伴热。电热带伴热传热效果优于电缆伴热。电热带外形扁平便于与管道接触，分为恒功率和变功率两大类。恒功率电热带单位长度的发热功率基本恒定，不受温度的影响。变功率电热带又称自限式伴热带，是指电热带的输出功率随介质温度的升高而下降；反之则增加。系统核心部分的发热元件是具有正温度系数（简称PTC）特性的电阻。

3) 趋肤效应伴热（Skin Effect Power Tracing system, SECT）。当交流电通过铁磁性材料时，导体横截面上



黄 旭/高级工程师

关键词/Keywords

电伴热 ·
趋肤效应 ·
邻近效应 ·

的电流分布是不相同的,在接近导体表面部分电流比较集中,这种现象被称为趋肤效应。管道趋肤效应伴热是利用趋肤效应,使电能集中在碳钢管的内表面处转换为热能,并把热量传给管道。给钢管内壁施加交流电(趋肤效应伴热系统的热管),因电流集中在钢管的内表面,且仅在管道内壁表面流动,外表面几乎没有电流,故管道外壁不会检测到电流,所以自身能形成很好的绝缘结构。

趋肤效应电伴热系统

1. 各种伴热方式的比较

在众多伴热方式中,趋肤效应电伴热系统适用性强、安全可靠、安装维护简单、加热效率高及易于实现自动控制,成为研究的热门与重点。下表是趋肤效应电伴热系统与其他伴热方式的比较^[1-2]。

表 各种伴热方式的比较

序号	各比较项	趋肤效应伴热	电热带伴热	电缆伴热	蒸汽伴热
1	伴热距离	长	短	短	短(末点温度低)
2	电源供电点	少(20 km)	多(200 m)	多	
3	伴热功率	大	小	小	
4	伴热温度	≤150℃	≤150℃	高	高
5	传热效果	好	一般	一般	一般
6	伴热管敷设	直接焊接	捆扎	捆扎	捆扎
7	自动化控制	方便	控制点多	控制点多	无法实现
8	维修	方便	难度大	难度大	较方便
9	局部伴热	一般	好	好	好
10	安全性	好	一般	一般	好
11	施工费用	较高	较高	较高	低
12	运行费用	低	低	低	高
13	维修费用	低	高	高	低
14	管理	方便	方便	方便	不方便

2. 趋肤效应电伴热系统的基本构成及基本原理

一个完整的趋肤效应电伴热系统(含伴热与被伴热部分)基本上由加热电源、输液管、伴热管、伴热电缆、保温层和保护外壳等部分组成^[2]。伴热管焊接在输液管上,包裹一层保温层后,由保护外壳封装起来。其中,伴热管部分的基本结构如下图所示。接线盒把耐热电缆和伴热管连接起来,使交流电源、耐热电缆和伴热管形成闭合

回路。

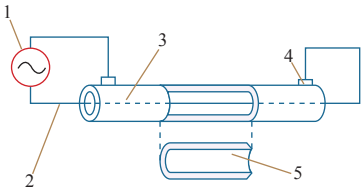


图 伴热电路结构图

1—交流电源 2—耐热电缆 3—伴热管 4—接线盒 5—趋肤电流层

趋肤效应电伴热系统实际上利用了电磁场里的两种现象:趋肤效应和邻近效应,下面对这两种效应作简要的介绍。

1) 电磁场的趋肤效应现象。所谓趋肤效应,简单的讲,就是当交流电通过铁磁性材料时,导体中电场强度、磁场强度和电流密度的分布不是均匀的,它们有一个共同的规律,就是导体表面的场量最大,越是深入导体内部,场量越小。导体中交流电的频率对于趋肤效应现象发生的显著程度影响很大。频率越高,电流就越集中于导体的表面流过,也就是透入深度越小。这就相当于有效流通面积越小,交流阻抗越大,相应的发热量也就更大,趋肤效应越明显。

2) 电磁场的邻近效应现象。空间中一根导体仅处于自身的时变电磁场中,如果空间中同时存在若干个通有交流电且彼此靠得很近的导体,它们除了处于本身的时变电磁场外,还处于其他各导体的时变电磁场中,这使得导体中的场量分布发生变化,不再维持单独存在时的分布,这种现象就是邻近效应。

趋肤效应电伴热技术的计算

对于趋肤效应电伴热系统来说,其电磁场计算推导比较复杂,其中有一些比较重要的计算法则,直接利用这些计算法则可以较为方便地获取需要的电路参数,为设计、分析提供很大的便利。

1. 电流的透入深度

工程上通常把电流密度衰减到极值的1/e时,离电流集中的表面的深度称为电流的透入深度,用s表示。

$$s = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \quad (1)$$

式中, s 为电流透入深度, cm; ρ 为媒质电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; f 为电源频率, Hz; μ 为媒质相对磁导率。

在透入深度内, 趋肤效应现象非常明显。从发热的角度来度量, 此发热量约占钢管总发热量的85%以上。透入深度是反映趋肤效应强弱的一个重要参量, 由上述公式可见, 透入深度与媒质的电阻率 ρ 、相对磁导率 μ 以及电源的频率 f 都有关系。一般来讲, μ 为1 000的钢管, ρ 为 $17.8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 当取 $f = 50 \text{ Hz}$, 则 $s = 0.095 \text{ cm}$, 表现出较强的趋肤效应现象。而如果 f 上升到500 Hz时, $s = 0.03 \text{ cm}$, 趋肤效应现象更加强烈, 基本保证管件外表面电压电流为零。

2. 散热功率计算

散热功率对于趋肤效应电伴热系统来说也是一个重要的指标, 一般情况下, 总是希望散热功率尽量小, 这样可以把更多的能量用于伴热本身, 而不是耗散浪费掉。以 Q_s 表示管线每米散热功率的大小, 计算公式为

$$Q_s = \frac{t - t_0}{R_r} \pi D_b \quad (2)$$

式中, Q_s 为管线每米散热功率, W/m; t 为管线伴热温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为管线周围环境温度, $^{\circ}\text{C}$; D_b 为保温层外径, m; R_r 为总热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

$$R_r = \frac{D}{2\lambda b} \ln \frac{D_b}{D} + R_{rd} \quad (3)$$

式中, b 为保温材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; D 为管线外径, m; R_{rd} 为地层土壤热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

$$R_{rd} = \frac{D_b}{2\lambda d} \ln \frac{4h}{D_b} \quad (4)$$

式中, d 为土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; h 为管线中心埋设深度, m。

由上式可见, 管线的散热功率与伴热温度、管线周围环境温度、保温材料的导热系数、尺寸大小、土壤导热系数、管线埋设深度及其自身尺寸等参数有关。

3. 工作电流与电压

用 I 表示趋肤效应电伴热系统的工作电流, 则

$$I = \sqrt{\frac{Q_j}{R_g}} \quad (5)$$

式中, I 为伴热装置的工作电流, A; R_g 为钢管的交流阻抗, Ω/m ; Q_j 为伴热功率, W/m。

$$Q_j = f_j Q_s \quad (6)$$

式中, f_j 为伴热功率系数。

$$R_g = \frac{\sqrt{\rho \mu_r f}}{5033 \pi d} \quad (7)$$

式中, ρ 为伴热管的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; f 为电源频率, Hz; μ_r 为伴热管的相对磁导率; d 为伴热管的内径, m。

对于伴热装置工作电压的计算, 要考虑两方面的内容: 一是伴热钢管的电压降; 二是穿管电缆的压降, 即

$$V = |V_g + V_L| \quad (8)$$

式中, V_g 为伴热管的电压降, V; V_L 为电缆的电压降, V。

$$V = I \sqrt{(R_g + R_L)^2 + (X_g + X_L)^2} \quad (9)$$

式中, R_g 为伴热管的电阻, Ω ; R_L 为电缆的电阻, Ω ; X_g 为伴热管的电抗, Ω ; X_L 为电缆的电抗, Ω 。

4. 功率计算

(1) 伴热所用功率计算

$$P = IV \cos \varphi \quad (10)$$

式中, P 为伴热装置功率, W/m; $\cos \varphi$ 为功率因数。

(2) 输入功率

$$P_1 = P(1 + K_1 + K_2) \quad (11)$$

式中, P_1 为伴热装置输入功率, W/m; K_1 为变压器功耗系数; K_2 为海拔高度功耗系数。

(3) 变压器容量计算

$$S = \frac{P_1}{\cos \varphi} K \quad (12)$$

式中, S 为变压器功率, W; K 为变压器安全系数。

趋肤效应电伴热技术在实际应用中应该注意的问题

使用趋肤效应伴热最主要的设备是大功率的变压器, 次级要求有调节范围, 必须保证伴热管有大电流流过。耐热电缆一方面要满足耐热温度的要求; 另一方面还要满足线芯横截面积的要

求,以电流密度在 $4\sim 5\text{ A/mm}^2$ 的铜芯电缆为宜。在伴热管材料的选择方面,要求管材必须是不需特殊抛光、厚壁磁性材料,普通碳钢即可。伴热管与耐热穿管电缆的连接必不可少地要用到连接件,要注意减小连接件与伴热管和电缆的接触电阻,防止局部过热。最后就是电压降的选择问题,按照经验,当伴热管使用在升温环境时,设计电压降为 $0.5\sim 0.7\text{ V/m}$;而当伴热管使用在恒温稳定环境时设计电压为 $0.3\sim 0.5\text{ V/m}$ 。

另外,在实际应用中,趋肤效应电伴热系统多用于长距离管道的伴热,这就无可避免地存在各管段间外部环境温度的差异问题,这就对温度探测设备的安装位置提出较高的要求。例如,如果温度探测设备检测到该处温度低于预定值而起动,那么整个伴热管都处于发热状态,而实际上,或许管道的大部分位置都未低至需要加热的温度值,这就造成了较大的能源浪费;反过来,也可能是温度探测设备检测到该处的温度未低至需要加热的温度而不起动伴热管,而实际上,管道的大部分位置都已低于预定值,这样就很有可能造成流质的凝结,使管道堵塞而给生产带来极大的损失。所以,实际施工的时候应该充分考虑,对环境温度以及被伴热流质的特性做仔细的分析,把温度探测设备布置在最合理的地方,且要应用热力分析模型技术,包括有限元分析和计算机流体力学分析方法,对每个伴热应用的设计参数进行评估。

趋肤效应电伴热技术的应用实例

以2012年新建的厂际管线为例,介绍趋肤效应电伴热技术的应用情况。

1. 设计条件

(1) 介质

介质名称:加氢尾油;介质特性:操作温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,比重 $0.833\ 7$,比热 $1.8\text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 管道

管道材质:无缝20号钢管;直径:DN200;管线长度:地下长度 $1\ 614\text{ m}$,地上长度 $9\ 081\text{ m}$;敷设状况:地上支架架空,地下顶管和管沟敷设。

(3) 保温层

保温材料:地上部分岩棉,地下部分聚胺酯硬质泡沫塑料;导热系数:在 $80\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,岩棉按 0.044 计算,聚胺酯按 0.029 计算;保温层厚度:地上按 80 mm 设计,地下按 $40\sim 50\text{ mm}$ 设计;设计热损失安全系数和附加安全系数不低于 25% 。

(4) 温度条件

在伴热状态下地下热管温度控制在 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,乙烯边界处物料温度控制在 $80\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 环境温度

最高环境温度: $39.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低环境平均温度: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;极端最低环境温度: $-18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;地下环境温度: $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 供电状况

供电电压:AC $6\ 000\text{ V}$ 50 Hz 3相,AC 220 V 50 Hz ,单相;供电点数量:2点供电;其他所需控制电压自行转换。

(7) 防护等级要求

防爆区域划分:乙烯区、石化厂区为防爆区,按I类2区考虑,温度组别按T3考虑,厂区外按非防爆区考虑。室内设备及相关附件防护等级为IP42。室外设备及相关附件防护等级为IP56。地下电缆接线盒及相关附件防护等级为IP66。

(8) 系统加热时间要求

系统从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$,空管预热时间不大于 17 h ,满管预热时间不大于 70 h 。

(9) 伴热方式

电伴热系统分两段,两端供电,其中一段采用混合伴热,每段电压不得超过 $3\ 000\text{ V}$,频率为 50 Hz ,不采用混合伴热的地上部分的长度为 $6\ 300\text{ m}$ 。

2. 散热量计算

(1) 趋肤效应电伴热回路具体分配

1) 地上、地下管道混合伴热回路包括地下管道 $1\ 614\text{ m}$ 和地上管道 $2\ 781\text{ m}$,共计 $4\ 395\text{ m}$ 。

2) 地上管道伴热回路包括地上管道 $6\ 300\text{ m}$ 。

(2) 散热量计算(计算过程略)

根据管径、输送温度、环境温度、输送介质和保温状况等,按照环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (地上) $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (地下)时工作温度保持在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算管线的热

损失和系统负荷等散热量,即要补充的热量。设计伴热功率时考虑解凝所需功率,即油在融化时的溶解热。选择伴热功率如下:

1) 管线1。地下回路包括地下管道1 614 m,保温厚度50 mm,热损失42.7 W/m,设计伴热功率53.4 W/m;地上管道2 781 m,保温厚度80 mm,热损失46.8 W/m,设计伴热功率58.5 W/m,回路伴热比为1,即只需要一根趋肤效应伴热管,运行功率286 kV·A,变压器容量为400 kV·A。地上管道满足从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$,空管预热时间不大于17 h,满管预热时间不大于70 h。热管的最高温度不高于 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 管线2。地上回路包括地上管道6 300 m,保温厚度80 mm,热损失49.4 W/m,设计伴热功率61.8 W/m,回路伴热比为1,即需要1根趋肤效应伴热管,1台变压器运行功率为452 kV·A,变压器容量为630 kV·A。地上管道满足系统从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$,空管预热时间不大于17 h,满管预热时间不大于70 h。伴热过程中,管道出口温度不高于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3. 配电系统设计

若伴热电压过高,一方面造价过高,因为随着耐压等级的提高伴热电缆的价格也相应提高;另一方面,电压过高也不利于安全运行,而且该公司厂内的电气系统中压基本上是6 kV的系统。因此根据现场的实际情况,主要是考虑现场的电源情况,决定在管线的两端设置电源,并将该管线电伴热分2段分别供电。

根据伴热功率计算所需的管线1的伴热电流为: $I=146\text{ A}$,进而根据伴热电流,计算出每1 000 m管线伴热所需电压 $U=443\text{ V}$ 。由于整个管线长约4 395 m,那么如果采用单电源供电的趋肤效应电伴热方式,则需要的伴热电压约为 $U=1\text{ }950\text{ V}$;

管线2的伴热电流为: $I=153\text{ A}$,进而根据伴热电流,计算出每1 000 m管线伴热所需电压 $U=468\text{ V}$ 。由于整个管线长约6.3 km,那么如果采用单电源供电的趋肤效应电伴热方式,则需要的伴热电压约为 $U=2\text{ }950\text{ V}$ 。

结束语

根据本文的论述能够得出以下结论:

1) 燃料重油、蜡油等稠油管线的输送,被输送介质在常温下(低于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$)为固态或黏度很高,难以流动,加热到一定温度后又易于流动,要求管道维持温度为 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用趋肤效应伴热,防止管线降温和管道停输再启动,效果特别好。

2) 趋肤效应电伴热的过程是等温伴热过程,沿途伴热量均匀。

3) 趋肤效应电伴热能够解决管线停输再启动的问题。

4) 通过趋肤效应电伴热技术能够实现智能化的全自动管线伴热控制。

5) 趋肤效应伴热与其他伴热方法相比,其经济性、安全性和便于维护性等优点是其他伴热方式无法比拟的。

6) 趋肤效应电伴热的不足之处就是其安装工艺相对复杂,工程安装费用较高。

参考文献

- [1] 陈维刚. 趋肤效应电伴热技术的应用[J]. 当代化工, 2004(3): 179-182.
- [2] IEEE Std 844—2000 IEEE recommended practice for electrical impedance, induction and skin effect heating of pipelines and vessels[S].

(收稿日期: 2014-09-15) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告