

## 真空隔热油管隔热性能失效机理分析

邓晶<sup>1</sup> 周成龙<sup>1,2</sup> 徐永香<sup>1</sup> 盛宏至<sup>1</sup>

1中国科学院力学研究所 北京 100190 2中国科学院研究分院 北京 100190

**【摘要】** 本文对真空隔热油管的隔热性能主要影响因素及失效机理进行了分析,并提出了改善隔热性能与延长使用寿命的解决思路。保证隔热层具有一定的真空度是维持隔热油管隔热性能的核心,氦气渗透、管材气体脱附、油管机械破坏等因素都会使得隔热层真空度下降,减弱隔热性能。氦气主要来源于钢材的析氢腐蚀和原油裂解等。本文根据对隔热性能主要影响因素的分析提出了一些解决思路,以期减缓其隔热性能下降速度,延长隔热油管使用寿命,提高稠油热采的热效率和经济性。

**【关键词】** 隔热油管 真空度 失效机理 氦气渗透

**【中图分类号】** TE934文献标志码: A

近年来,学者对于气体压力、隔热层层数、铝箔发射率和玻璃丝布孔隙比等对隔热油管隔热性能的影响开展了广泛的研究。本文将在以往研究的基础上,对主要因素对油管隔热性能的影响进行综合分析,以寻求改善其性能及寿命的方法。

### 1 真空隔热油管简介

#### 1.1 真空隔热油管结构

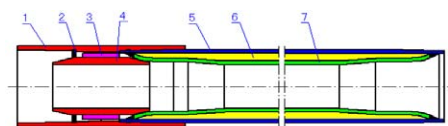


图1 真空隔热油管结构图

注: 1.接箍; 2.密封圈; 3.衬套; 4.衬管  
5.外管; 6.隔热系统; 7.内管

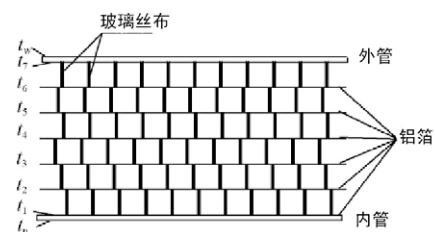


图2 隔热系统的一种形式

真空隔热油管结构如图1所示,主要由内管、外管、隔热系统等部分组成,内外管都使用合金材料,由于内管需要接触350℃左右的高温流体,其热应变使得内管伸长,因此在隔热油管生产过程中,需要事先在内管施加预应力伸长后与外管焊接,可补偿内外管温差影响,使产品在高温下可靠工作。

隔热系统的系统设计思路主要是阻止内外管之间以传导、对流、辐射三种传热方式进行传热。隔热系统通常是在进行真空处理或抽真空后回冲惰性气体,并使用氦气吸附剂。还有一些隔热油管在隔热系统中使用如图2的“超级隔热技术”结构,即采用多层隔热材料,利用高反射率的铝箔构成的反射屏层层反射,对辐射热流造成很高的热阻,以辐射透过率高、导热率低的玻璃丝布阻止屏面的直接接触<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 真空隔热油管隔热性能参数

预应力隔热油管的行业标准SY/T5324-94中定义了隔热油管最重要的性能参数,即视导热系数 $\lambda$ , W/(m·℃)。它反映了隔热油管隔热性能的高低。视导热系数 $\lambda$ 的原理公式和实验公式如下:

$$\text{原理公式 } \lambda = \frac{Q \ln \frac{D_1}{D_2}}{2\pi L(t_2 - t_1)} \quad (\text{式1})$$

$$\text{实验公式 } \lambda = \frac{\ln \frac{D_1}{D_2}}{\frac{2\pi L(t_2 - t_1)}{Q} - \frac{\ln(D_2 D_3 / D_1 D_4)}{\lambda_0}} \quad (\text{式2})$$

其中,  $Q$  为试验段有效稳态加热功率, W;  $\lambda_0$  为管材导热系数, W/(m·℃);  $L$  为试验段有效加热长度, m;  $t_1$  为内管内壁温度, ℃;  $t_2$  为内管外壁温度, ℃;  $t_3$  为外管内壁温度, ℃;  $t_4$  为外管外壁温度, ℃;  $D_1$  为内管内径, mm;  $D_2$  为内管外径, mm;  $D_3$  为外管内径, mm;  $D_4$  为外管外径, mm。

按照视导热系数 $\lambda$ 的高低,预应力隔热油管分为五个等级,其中隔热性能最低等级为A级,其视导热系数 $\lambda$ 范围为 $0.06 \leq \lambda < 0.08$  W/(m·℃),实际使用中的隔热油管视导热系数高于该范围上限时应该及时维修更换。

### 2 隔热性能主要影响因素及失效机理分析

真空隔热油管隔热性能受多种因素的影响,下面就几个主要的影响因素进行分析,并探讨隔热性能的失效机理。

#### 2.1 真空度和隔热层数

根据传热学知识,隔热系统中的气体与内外管之间的传热有传导、对流、辐射三种机理。传导和对流都是基于分子间的碰撞和能量传递来进行的,而辐射是通过电磁波的传播、吸收、反射来实现的。

从分子动理论的角度而言,气体压强和密度越低时,其分子碰撞(气体与气体、气体与固壁之间)的频率越低,因此降低气压对于减弱气体的导热和对流传热有重要作用。而当气压降低时,隔热层中的气体对内管外壁面热辐射的吸收能力也会降低,此时外管内壁面更容易接收到内管的辐射传热。因此,要提高隔热层的隔热性能,其中气体压力并不需要降到完全真空状态,而是有一个最优

范围<sup>[2]</sup>。

根据稀薄气体和传热学理论对不同压力下隔热油管视导热系数进行了计算。以 $\Phi 62 \times 114.3$  mm隔热层数为6层的隔热油管为例,如图3所示,其视导热系数随着压力升高存在一个突降区,当压力为37 Pa时视导热系数达极小值,此压力下的视导热系数与压力为3 Pa的视导热系数数值相等。从经济性角度考虑,如果可以在较低真空度条件下达到相同的隔热效果,则不需要进一步降低压力,以减少抽真空能耗。

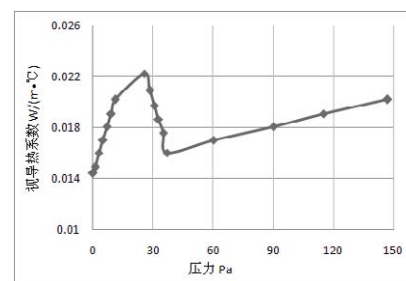


图3  $\Phi 62 \times 114.3$  mm隔热油管在不同隔热层压力下的视导热系数

通过实验研究揭示,在低压范围内( $P < 1$  Pa)隔热层数增加时,视导热系数 $\lambda$ 呈不断减少的趋势;在压力高于一定值( $P > 10$  Pa)后,层数的增加并非总是使 $\lambda$ 减少,而是有一峰值;层数的增加既会增加隔热层热阻,也会减小气体夹层的厚度和热阻,综合作用的结果是层数为6时隔热油管的

热阻最大<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 钢管腐蚀及氦气渗透

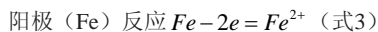
隔热层的真空度随着隔热油管使用时间的增长而下降,压力升高,根据上节的分析,这将使得隔热油管的视导热系数不断增长,隔热性能大幅下降,其主要原因有以下几点:

(1) 隔热管和隔热材料在加工过程中其表面不可避免地会污染许多机加工油泥和汗痕等,且金属材料受温度或腐蚀的影响,表面还会形成氧化层,由于氧化层结构疏松,比表面积大,吸附气体的能力较强。

(2) 根据电化学理论,在存在可导电的水时,钢铁材料组成的不均匀、内部应力的不均匀,可使得材料不同部位形成阴极和

本研究受到国家科技重大专项课题子课题2011ZX05024-005-005“海上稠油热采提高热效率关键技术研究”项目的资助。

阳极,发生电极反应,由于有氢气析出,又被称为析氢腐蚀,反应方程式如下:



阴极(杂质)反应



(3)在热介质注入油层并进行焖井作业时,原油会产生裂解反应。在稠油举升过程中,稠油裂解产生的氢气会大量进入油管,部分氢气渗透至隔热层中,导致隔热层真空度下降<sup>[4]</sup>。

### 2.3 机械破坏

机械破坏是比真空度下降更为直观,直接导致隔热油管的性能失效。隔热油管的工作条件比普通油管更加恶劣,其双层钢管的结构使得本身质量比普通油管重得多,在起下隔热油管的过程中所承受的拉力远大于普通油管;即使在生产工程中,隔热油管内管已经进行了热应力补偿,但这种补偿没有考虑管内热介质温度随下井深度和作业阶段的变化,因此加工时施加的预应力不能刚好抵消每根油管应用时内外管之间的热应力差距,引起钢材的强度下降;隔热油管要承受热介质的内压和外管油井液体的外压;上节中还提到了钢材的电化学腐蚀问题,严重的金属腐蚀同样会导致油管的机械破坏。

隔热油管的机械破坏具体表现为以下几种形式:油管联接螺纹破裂(如图4)、焊缝开裂、接箍破裂、管体破裂等。这些情况会导致流体泄漏至真空隔热层,甚至泄漏至套管内,从而使得隔热油管无法继续工作,只能进行更换或维修。



图4 隔热油管联接螺纹处的破裂照片

### 3 改善隔热性能与延长使用寿命的解决思路

(1)在兼顾隔热性能和经济性的基础上,选择最适合的隔热层真空度和隔热层层数。

(2)既然无法避免氢气出现在隔热油管内,则重点应该在防止氢气渗透进入隔热层方面。

(3)在减少隔热层其他气体方面,应对制作隔热油管的钢材进行预处理,严格去除表面气体吸附能力强的氧化层和油泥等,通过烘烤处理去除钢材本身吸附的气体后再抽真空。

(4)在防止隔热油管的机械破坏方面,油管的材质应该具有适宜的机械性能,以适应较为恶劣的使用条件;加工方法要兼顾油管预应力处理和焊接效果;使用抗拉、密封性好的联接螺纹结构;使用过程中避免油管撞击、过扭矩,并严格防锈处理<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

本文对真空隔热油管的隔热性能主要影

响因素及失效机理进行了分析,并提出了改善隔热性能与延长使用寿命的解决思路。保证隔热层具有一定的真空度是维持隔热油管隔热性能的核心,钢管腐蚀、原油裂解、氢气渗透、管材气体脱附、油管机械破坏等因素都会使得隔热层真空度下降,减弱隔热性能。在明确了真空隔热油管隔热性能的主要影响因素之后,生产厂家和用户就可以在相应的方面进行改善,从而减缓其隔热性能下降速度,延长其使用寿命,提高稠油热采的热效率和经济性。

### 参考文献

[1] E. B. Крейн, 黄鹂, 黄忠廉. 油田稠油热采技术综述[J]. 国外油田工程, 1997, 01:9-10  
 [2] 管虹翔, 李成见, 李萍等. 隔热油管技术应用于海上稠油常规生产井数值模拟分析[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4):257-260  
 [3] 王大为, 周耐强, 牟凯. 稠油热采技术现状及发展趋势[J]. 西部探矿工程, 2008, 12:129-131  
 [4] 薛瑞新. 国内外稠油开采技术研发趋势[J]. 科技创新导报, 2008, 27:25-25  
 [5] 王理学, 刘清良. 高真空隔热油管隔热机理及隔热结构的研究[J]. 山东理工大学学报, 2003, 17(4):93-96

### 作者简介

邓晶, 男, 1984年5月生, 2011年毕业于中国科学院研究生院, 获工学博士学位。

### (上接第252页)

粘度油包裹性较强,内外油层间温度传导较缓,UTI或数字温度计数值变化慢,应持续上下提放探头并耐心等待数值(15S内)不再变化为止;船舱油温和罐内油温出现较大差异时,应重新测量。

对于高挥发性油种,最重要的一点是保证过驳时二程船的舱盖以及一些大的舱孔处于关闭状态,防止油气大量逸出;同时,应根据船舱结构强度适当调整驳油流量,以防舱壁承压超限导致安全事故。

### 4 密度采信和底水测量对短重的影响

国内油品贸易习惯上都按重量交接和结算,因此二程发油中,船罐双方的密度差异自然成为一个敏感问题。立式岸罐容积较大

(一般为5~10万吨),而二程船普遍在五万吨载重吨以下,每次过驳罐里往往只发罐下部的一部分油;而罐内取样检测得到的密度则是整个罐的平均密度,对一些分层严重的重质油,并不能代表发出部分的真实密度。如果简单采信该密度作为发油密度,就会导致船罐密度出现较大差异。针对这类状况,经与货主、库区协商,对于特定几类不均匀油品,采信管线密度代替岸罐密度;在继续比对船罐密度的基础上,加取管线时间点样(即发油全程每隔一定时间从管线中取少量油样),以管线样密度作为岸罐实际发油密度,并以此进行交接。管线密度基本代表了发油部分的实际密度,可信度较高,实际当

中也和船舱样密度较为接近。这一计量方式已逐渐得到各方认可。

底水方面同样包含了相当大的短量风险。曾经发生过船测底水量比罐测多出数十吨的案例,此时须防范船方“狸猫换太子”的伎俩:把海水打入舱底并置换出同等体积的油到暗舱中,却声称明水来自岸罐。因此,不论罐检时是否存在明水,鉴定人员都应前、后船测进行严格的底水测量。若发现舱内有大量不明来历的底水,应坚决利用监管职权和执法手段,深入盘查并处理,严厉打击承运方违法欺诈行为,维护国内油品贸易秩序。

### (上接第255页)

根据脱水、脱烃单元设备、管道材质对操作温度的限定(不低于-35℃),采用油吸收+外冷复合工艺可实现最高42.97%的液化气收率和8995kg/h的总液烃产量增加。经济效益比较明显。

### 3 结论

通过以上分析和研究可知,油吸收+外冷复合工艺能有效提高迪那天然气处理厂液化气产量。但因轻油在流程中循环及吸收过程放热造成装置制冷和导热油热负荷增大,

研究结论可具体归纳为以下几点:

单纯采用油吸收工艺对于提高迪那液化气产量无效。

油吸收+外冷复合工艺是提高迪那液化气产量的有效措施。通过增加外冷设施,进一步降低了低温分离器温度,通过轻油回流,利用轻油对C<sub>3</sub>组分的吸收作用,增加轻烃冷凝率,提高液烃产量。

通过油吸收+外冷复合工艺改造,液化气收率理论上最高可提高至42%。

鉴于该工艺流程中,油吸收+外冷负荷

工艺能耗相对较高,且因吸收油的循环增加后续脱醇分馏等单元处理液量。建议与其它措施进行经济对比后,谨慎采用。

### 参考文献

[1] 王遇冬. 天然气处理原理与工艺[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2011  
 [2] 白俊生, 彭进. 提高C3收率的冷冻油吸收轻烃回收工艺[J]. 石油规划设计, 2006, 17(6)  
 [3] 李士富等. 冷油吸收工艺的改进[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(10)