

船舶管道多层隔热结构的传热机理分析和实验研究

申 亮

上海中远海运重工有限公司 上海 200231

摘要: 隔热材料内传热机理复杂,影响很大。它通常可分为气相、固相导热、对流换热和辐射传热。对流换热率通常相当低。因此,有效的导热可以是气相、固相导热和辐射传热系数之和。文章利用能量平衡方程和 $p-1$ 微分方程,构建了船舶管道系统多层隔热结构的稳态传热模型。研究了船舶管道采用多层隔热结构的可能性,并通过合适的实验进行了验证。结果,在硅酸铝纤维层之间添加金属铝箔纤维改善了材料的隔热性能,并随着工作温度的升高而提高。对于中低温管道,隔热层有限,不建议使用多层隔热层^[1]。

关键词: 船舶管道保温; 多层隔热; 稳态传热; 实验研究

总的来说,隔热材料的有效热系数随着温度的升高而迅速增加。这是因为介质中的传热系数基本上与三次方的温度成正比,而由于辐射产生的热量比例随着温度的升高而增加。辐射温度限值改善了温度下的隔热性能。传热限制通常通过向绝缘层添加红外遮光剂,向隔热纤维添加高反射碎金属箔,或将相互平行一定纤维隔热嵌入大金属箔作为反射屏实现。多层反射隔热系统广泛应用于航天飞行、冶金、低温等行业。这是因为它轻,隔热性能好。对于船舶,高温管道是机舱中最重要的散热源,精心设计的科学隔热结构降低了热量损失,提高了经济性。舱室降低温度,改善船员的生活条件,以节省空间和有效的船载能力。多层金属隔热层通过减少热辐射降低传热系数,热辐射可用许多行业。它作为多层隔热已被广泛研究,并获得了良好的应用。将多多层隔热结构应用于管道保温材料已经存在保温上,但传热分析的效果和使用却少。本文对船舶蒸汽管道传热机理进行了理论和实验研究。

一、船舶管路系统

使用动力装置在湖泊和河流的船舶不能替代管路系统的应用,如人体内的食道、呼吸器官、肠道和血管。对于万吨级船舶和危化船,管材数量巨大,布局复杂,且具有以下分类。

1. 根据管路使用特点和运输中的工作条件进行分类。首先是用于动力设备正常运行的推进装置,如燃油、滑油、压缩空气、冷却、进排气管路等。第二,是一整套措施,以确保船舶的生存能力、航行安全、船员和乘客的正常生活和工作,包括舱底、压载、消防、生活、机舱通风与空气调节、疏排、CO₂、测量、透气管路等。计算压力和计算温度根据管道进行分类。船舶管道多种多

样,工作环境不同,压力、温度、流量和腐蚀程度也不同。性能取决于无缝、焊接、双金、塑料和玻璃纤维增强管。根据管道应用、介质类型、活塞环与气缸之间的参数(压力、温度),选择要用于每根管道的管道材料。压缩空气管道是用压缩空气压缩机压缩空气的印刷品。它也主要存放在空气瓶中,如主机和辅机设备起动管和汽笛和务笛系统、压力水柜中的压力管道、清洗水管等。动力装置在柴油机运转时必须产生大量热量,以免热部件温度过高,影响正常工作,或者这些受热负荷加热必须及时有效地处理热量。通常,一定量的液流被用来与热组件冷却,将这些热量从冷却的机械设备中携带出去。冷却管路是足够冷却淡水、江水、海水或冷却油来散热设备,一些可靠性可以提供各种水冷却、空气冷却和油冷却。为了排放泄漏的水和石油,以确保不被水腐蚀船体的船只航行的可持续性和安全性。该系统舱底水管系设置,以有效确保排除舱底水。例如,为了防止船只航行或倾斜,任何水源或水源保护管道的海水都不允许海水通过该系统进入舱内;以确保船舶在航行、出入港口、货物、装卸货物等各种条件下具有一定的吃水深度。重心高度恒定,平衡稳定,减少了船体的过度弯曲力矩,避免了过大的剪切力,减少了船体因压载不正确而产生的振动;另一个重要系统是船只消防系统,该系统被认为非常危险,尤其是对运载客船和危险品的船只,大于500吨的船只。此外,为了在船舶发生失火时相互救援灭火,它必须按照要求设置一个国通岸接头,并使一艘或另一艘船舶的连接方便,以保证船员和乘客的日常供水,必须建造一个供水系统,包括饮用、洗涤、舷外及热水管路组成^[2]。

二、模型的建立

在多层隔热管道层的情况下,隔热层和反射屏通常

由超细玻璃构成，如图1所示。

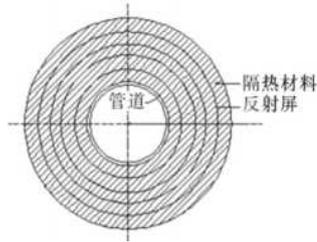


图1 管道多层隔热结构示意图

1.管道无限长，热量仅径向传播，热流是静态的。反射屏编号和管壁为0、1、2...，n层等。从最外层外壁是n+1层。层温度 $T_0, T_1...T_{n+1}$ ， $T_0 > T_{n+1}$ 。

2.漫反射是隔热系统反射屏，发射率 ϵ_0 ，外壁发射率 ϵ_{n+1} ，第i ($i = 1, 2, \dots, n$)层的两侧 ϵ_{i1} 和 ϵ_{i2} 发射率，热阻金属箔及厚度忽略。

3.超细玻璃纤维呈灰体。多层隔热系统是由隔热纤维和反射屏组成的堆栈，它们在每个单元中以相同的方式传热。因此，取出机组建立多层热力系统的热力模型。如果忽略流速，纤维内部的热交换由气体、固体热量和辐射组成。纯散射介质是辐射和热传导组合物传递的能量简单叠加。纤维系统的材料是高散射介质，散射出约为0.98分。因此，总传热可以在联热阻模式

$$q = q_c + q_r \quad (1)$$

q_c 径向单位长度的热流； q_c 是每单位传导长度的热流。 q_r 是单位辐射传导长度的流量。可以计算两个反射屏之间的热流(2)。

$$q_c = \frac{2\pi\lambda_c(T_i - T_{i+1})}{\ln(\frac{d_{i+1}}{d_i})} \quad (2)$$

式中，反射屏 d_i 为第i层直径；超细玻璃纤维 λ_c 导热系数为气固耦合

$$\lambda_c = 0.024 + 0.000078(T_m - 273) + 4.0 \times 10^{-5}\rho \quad (3)$$

公式中， T_m 玻璃纤维的平均绝对温度， $T_m = (T_i + T_{i+1}) / 2$ ；石油化工工厂和管道绝缘技术规范规定了 ρ 超细玻璃纤维的密度，其中玻璃纤维用作密度为60千克/立方米的管道绝缘材料。方程(1)中的辐射热通量 q_r 可以通过求解光纤绝缘材料中的辐射转移方程来实现。辐射转移方程是微分方程-积分，解主要包括光学薄膜近似、光学厚度近似和比特流近似。多层车辆隔离系统最常见的方法是利用一维平行平面逼近两个热流的方法。对于研究的无限长同心圆柱体，最好采用透射方程的微分逼近P1法。两个同心圆柱体之间介质吸收、发射、散射过程中的近似能量转移方程P1如下^[3]。

$$q_r = \frac{\pi d_i \sigma (T_i^4 - T_{i+1}^4)}{\frac{3}{8} K \rho d_i \ln(\frac{d_{i+1}}{d_i}) + (\frac{1}{\epsilon_{i2}} - \frac{1}{2}) + \frac{d_i}{d_{i+1}} (\frac{1}{\epsilon_{i+1}} - \frac{1}{2})} \quad (4)$$

三、实验研究

1.实验设备和材料的解释。空气由均匀分布的热管加热，金属管加热模拟船舶的蒸汽管。管子外表面温度由温度计和恒温器控制，可加热至900℃。管子的外径为168毫米。加热区有效长度：1，600毫米。实验样品位于管道中间，两端用隔离层保护。冷面测温热电偶沿轴向放置在样品外表面的中心，实验中使用的一层氧化铝石英纤维涂层样品的厚度为10ram，铝箔纤维织物的厚度为0.2毫米，铝箔纤维织物的厚度为0.2毫米，铝箔纤维热阻厚度不相关。

2.实验过程的解释。为了研究添加反光屏对硅酸铝纤维材料绝缘的影响，采用两种包裹进行了对比研究。热表面温度设定为160、300、450℃，并且当冷表面温度和环境温度变得稳定时记录下来。具体包裹方式为：(1)五层纤维毯，一层包裹铝箔纤维最外层，铝箔向内；(2)五层纤维毯包裹，纤维布五层铝箔，布置交替^[4]。

四、理论与实验结果分析

实验结果见表1实验数据。

表1 实验和理论分析结果

结构	环境 温度/℃	实验测得的外热 流表面平均温度/℃	根据实际温度计算列单 位长度热流/(W·m ⁻¹)	模型计算的绝热层 外表面平均温度/℃	模型计算得到的单位 长度热流/(W·m ⁻¹)	
内部	160.00	20.00	30.67	78.34	31.38	77.80
不加	300.00	18.00	42.00	181.69	41.78	179.57
反射屏	450.00	19.00	59.33	338.75	57.42	319.39
内部	160.00	23.00	31.33	70.92	33.88	75.17
初期	300.00	21.00	43.67	172.59	43.79	173.66
反射屏	450.00	21.00	60.00	328.43	57.81	306.33

1.通过将理论计算与实验计算进行比较，可以得到较好的热流。

2.当添加反射屏时，绝热层外表面温度增加。这是因为环境温度升高，测试时间长，达到稳定，环境温度不同。

3.添加反射屏时，单位长度的热流会减小，但减小范围有限。最大下降发生在热表面450的温度下0秒时，单位长度的热流从338.74增加到328.44瓦/米，这意味着：(1)由于工作温度低，由于辐射导致的热量低，因此通过在纤维涂层层之间添加反射屏，绝缘性能得到改善，但增益很小。绝缘层中辐射传热系数与介质中局部温度的立方值成正比。在低温下，辐射传热低，随着温度升高，通过材料传递的热量逐渐增加。当温度超过700℃时，辐射成为材料中的主要传热模式。室内温度

为 25°C ，每单位长度的热流取决于热表面的温度。当反射屏在低温下加入时，材料隔热性能的改善效果不清楚，并且可以看出，改善效果随着温度的升高而逐渐出现。

(2) 两反射屏之间材料的光学厚度大。两个反射屏之间的光学厚度被定义为 $\tau = K\rho L$ ，两个反射屏之间的距离 L 。室温设定为 20°C ，热表面温度设定为 450°C ，而硫属化合物材料气体的导热系数为铝和硅纤维的导热系数的固体结合系数。当内衬以两种方式密封时，可以看到，在这两种情况下，随着材料消光系数的增加，每单位长度的热流会减少。这是因为材料光损失系数的增加降低了发射热导率和传导热导率。还可以看出，材料的光漫射系数很小。反射屏的加入大大改善了系统的隔热性能，但在高光强下，反射屏的加入对隔热性能的影响有限。本实验中使用的密度为 120千克/立方米 的硅酸铝纤维在室温下具有 5158m^{-1} 的消光系数，在两个反射屏之间具有 51.58 的光厚度，并且处于光厚度状态。考虑到材料和结构成本，通过添加反光屏，建议不要在低于 400°C 的工

作温度下使用多层绝缘结构。

建立多层隔热结构传热理论模型，并进行了实验验证。理论结果与实验结果一致。根据实验数据和理论分析，铝箔纤维织物在铝箔纤维层之间铺设后，单位长度的热流随温度的升高而减小和增加。对于蒸汽管中的低温和低温，增加反光屏后保温性能有改善的限度，考虑到材料成本和施工成本，建议不要对船舶蒸汽管使用多层隔热结构。

参考文献：

- [1] 李海. 金属热防护系统隔热材料的隔热机理及隔热效率研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 周瑞. 高真空多层隔热中接触导热数值计算和实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [3] 金允久. 中间包复合反射隔热保温技术的研究[D]. 钢铁研究学报, 2019, 16(2): 23-26.
- [4] 马秦. TPS多层隔热结构数值分析方法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(6): 14-18.